

博士論文

炭素繊維強化樹脂により補強した鋼トラス部材
の耐震補強効果に関する研究

(Seismic Strengthening of Steel Truss Members
with Carbon Fiber Reinforced Plastics)

2023年3月

立命館大学大学院理工学研究科
環境都市専攻博士課程後期課程

川村 弘昌

立命館大学審査博士論文

炭素繊維強化樹脂により補強した鋼トラス部材
の耐震補強効果に関する研究

(Seismic Strengthening of Steel Truss Members
with Carbon Fiber Reinforced Plastics)

2023年3月

March 2023

立命館大学大学院理工学研究科

環境都市専攻博士課程後期課程

Doctoral Program in Advanced Architectural,

Environmental and Civil Engineering

Graduate School of Science and Engineering

Ritsumeikan University

川村 弘昌

KAWAMURA Hiroaki

研究指導教員：伊津野 和行 教授

Supervisor : Professor IZUNO Kazuyuki

目次

第1章 序論	1
1.1 研究の背景	1
1.2 研究の課題	2
1.3 研究の目的	2
第2章 既往の研究	4
2.1 鋼トラス橋や高アーチ橋など長大橋の耐震補強に関する研究事例	4
2.2 炭素繊維強化樹脂の特性に関する事項	6
2.2.1 炭素繊維の定義	6
2.2.2 補強用炭素繊維の種類	6
2.2.3 炭素繊維の応力ひずみ曲線	9
2.2.4 炭素繊維の短所	10
2.2.5 炭素繊維の価格	11
2.2.6 接着剤の材料特性	11
2.3 炭素繊維強化樹脂を鋼材の補修・補強に使用した研究事例	14
2.4 炭素繊維強化樹脂で補強した鋼材の耐震性能に関する研究事例	15
2.5 建設当時の耐震設計基準と現行の耐震設計基準の違い	15
第3章 対象橋梁の耐震性能	18
3.1 対象とした橋梁の諸元	18
3.2 耐震補強設計の基本方針	18
3.2.1 目標とする耐震性能および部材に対する限界状態	18
3.2.2 耐震補強の検討フロー	19
3.2.3 適用した設計地震動	19
3.3 耐震性能照査における解析条件	20
3.3.1 解析方法	20
3.3.2 解析モデル	21
3.4 耐震補強の検討結果	26
3.4.1 固有値解析の結果	26
3.4.2 現況における耐震性能の照査結果	30
3.4.3 耐震デバイスの選定	32
3.5 まとめ	40
3.6 耐震補強方法の課題	40
第4章 炭素繊維強化樹脂により補強した鋼板の補強効果	42
4.1 概要	42
4.2 実験方法	42
4.2.1 試験体形状	42

4.2.2 CFRP 補強材料	45
4.2.3 CFRP 補強方法	45
4.2.4 各種荷重試験における荷重条件と使用した試験装置	46
4.2.5 試験体の計測項目と計測位置	49
4.3 実験結果と考察	50
4.3.1 引張荷重試験の結果	50
4.3.2 圧縮荷重試験の結果	54
4.3.3 曲げ荷重試験の結果	60
4.3.4 引張荷重試験および圧縮荷重試験における CFRP のヤング係数の推定	64
4.3.5 曲げ荷重試験における CFRP のヤング係数の推定	67
4.4 まとめ	69
第 5 章 炭素繊維強化樹脂により補強した鋼 H 形部材の全体座屈に対する補強効果	70
5.1 概要	70
5.2 実験方法	70
5.2.1 試験体形状	70
5.2.2 CFRP 補強材料	72
5.2.3 CFRP 補強方法	72
5.2.4 圧縮荷重試験における荷重方法と使用した試験装置	75
5.2.5 試験体の計測項目と計測位置	76
5.3 実験結果と考察	80
5.3.1 圧縮荷重試験における荷重値と破壊状態	80
5.3.2 圧縮荷重試験における CFRP のヤング係数の推定	92
5.3.3 降伏荷重算出に合成断面のヤング係数と断面積が座屈耐荷力に与える影響	95
5.4 まとめ	98
第 6 章 炭素繊維強化樹脂により補強した鋼材の交番荷重時の補強効果	99
6.1 概要	99
6.2 実験方法	99
6.2.1 試験体形状	99
6.2.2 CFRP 補強材料	100
6.2.3 CFRP 補強方法	101
6.2.4 各種荷重試験における荷重条件と使用した試験装置	103
6.2.5 試験体の計測項目と計測位置	106
6.3 実験結果と考察	108
6.3.1 引張荷重試験の結果	108
6.3.2 圧縮荷重試験の結果	114
6.3.3 交番荷重試験の結果	120
6.3.4 交番荷重試験における鋼材の塑性化が断面の剛性に与える影響	134
6.4 まとめ	142

第7章 結論と今後の課題	143
7.1 本研究の結論	143
7.2 今後の課題	147
参考文献	148
謝辞	151
卷末付録	153
【第4章の図表および写真】	153
【第5章の図表および写真】	207
【第6章の図表および写真】	260

要旨

本研究は、炭素繊維強化樹脂（以下、CFRP）を用いた鋼部材の断面補強の効果と鋼トラス橋の部材に対してCFRP補強することによる耐震補強への適用性を確認することを目的として、種々の解析および実験をおこなったものである。

数十年前に建設された鋼トラス橋に現行の耐震設計基準で定められた地震荷重が作用すると、トラスを構成する各部材の応答値が許容値を大きく上回る可能性がある。これらのトラス橋は上部構造に対する耐震補強の実施が進んでいないことが課題である。鋼トラス橋の新たな耐震補強方法としてCFRPでの補強の適用性を確認するためには、圧縮力が作用する場合の全体座屈の現象に対する補強効果、および圧縮力と引張力が交番して作用する状態での補強効果を明らかにすることが重要である。

まず、対象とした鋼3径間連続上路式トラス橋について、橋梁全体の動的解析とその解析結果による従来工法による耐震補強の有効性を検討した。その結果、鋼材による補強は、死荷重の増加に起因した応答値の増加と接合時の母材への悪影響が明らかとなった。そこで、死荷重への影響や接合による母材への影響が小さいCFRPによる補強の適用性を研究課題とした。

次に、鋼材をCFRPで補強した場合の補強効果を確認するために、CFRPで補強した試験体を用いた載荷試験を実施した。その結果、CFRPでの補強により全体座屈の発生を抑制する効果と全体座屈後の変形性能に対する効果を示した。CFRPで補強した鋼部材の座屈耐荷力を算出する際には、圧縮時のCFRPのヤング係数が低下する影響を適切に反映する必要があることを示した。また、引張載荷時におけるCFRPの剥離に対しては、高伸度弾性パテ材の施工が有効であることを示した。圧縮載荷時において高伸度弾性パテ材を使用する場合は、座屈耐荷力の低下に対する影響と全体座屈後の変形性能が向上する効果を配慮する必要があることを示した。

交番載荷時においては、座屈変形が進展することにより鋼材の断面剛性が低下した。しかし、この鋼材の断面剛性の低下は、CFRPで補強することで抑制する効果があることを示した。

最後に、CFRPによる鋼部材の補強は、鋼トラス橋の耐震補強に対して有効であることを明らかにし、耐震補強設計に適用性があることと適用する際に配慮すべき事項をまとめた。

第1章 序論

1.1 研究の背景

数十年前に建設された鋼トラス橋は、建設当時の設計基準（例えば、道路橋耐震設計基準・同解説¹⁾）で設定されていた地震時の設計荷重が、現行の基準である道路橋示方書^{2~4)}で示される地震荷重よりも小さかった。このため、現行の基準で定められた地震荷重がこのような古い橋梁に作用すると、トラスを構成する各部材の応答値が許容値を大きく上回る可能性がある。

鋼トラス橋の耐震補強について、下部構造の耐震補強は、コンクリート製の橋脚のような1次モードが卓越する構造に対してRC巻き立て工法、鋼板巻き立て工法、炭素繊維巻き立て工法などの補強方法が確立されていることから、概ね補強工事が完了している。しかし、上部構造である鋼トラス橋本体の耐震補強は、その骨組み構造が高次の複雑な挙動を示すことから、具体的にどのような補強方法が有効であるか一般的な手法が確立されておらず、橋梁毎にその検討をおこなって最適な手法を決定しているため、耐震設計および耐震補強工事が進捗していないのが現状である。

鋼トラス橋は、一般的に静定構造である場合が多い。また、トラス部材に作用する力は、その構造の特性により軸力が支配的となる。そのため、トラス構造を構成する一部の部材が塑性化、もしくは座屈や破断が生じることで、橋全体の耐荷性能に重大な悪影響を及ぼすことになる可能性がある。

鋼トラス橋は、立体骨組み構造であるため地震時の挙動は複雑な応答モードとなることが多い。そのため、各部材に作用する応答値についても簡易的に推定することは困難である。近年ではコンピュータによる解析の技術が進歩しているため、立体骨組み解析は比較的容易に実施することが可能である。このことより、地震時においては時刻歴応答解析により、作用する地震動の特性を考慮した解析が可能である。この解析手法であれば、トラス橋の特徴の一つである高次の複雑な挙動に対する解析的な検討が可能となっている。トラス橋やアーチ橋といった立体骨組み構造の橋梁は、様々な橋梁形式がある。これらの構造に最適な耐震補強を設計するためには、その橋梁毎で地震時の振動特性を把握して、耐震補強のデバイスや部材補強の範囲を決定する必要がある。しかし、これらの鋼部材に対する耐震設計の手法については、研究の蓄積と実績がまだまだ少ないのが現状である。このように、耐震補強方法の選択肢が少ないことが、上部構造に対する耐震補強の未実施につながっている。

本研究で検討の対象とした橋梁は、沖縄自動車道（西日本高速道路株式会社 九州支社 管理）において金武ダムを跨水するために架橋された億首川橋と呼ばれる橋梁群のうち、図-1.1の構造一般図に示す鋼3径間連続鋼上路式トラス橋である。この橋梁は、1974年に完成し、翌年の1975年に供用が開始された建設後40年以上経過した古い橋梁の一つである。この橋梁の状況は、本研究の背景で述べた状況と全く同じ状況であり、下部構造の耐震補強は完了していたが、上部構造の耐震補強は未実施の状態であった。そのため、鋼トラス橋に対する有効かつ効率的な耐震補強の方法を検討する必要があった。

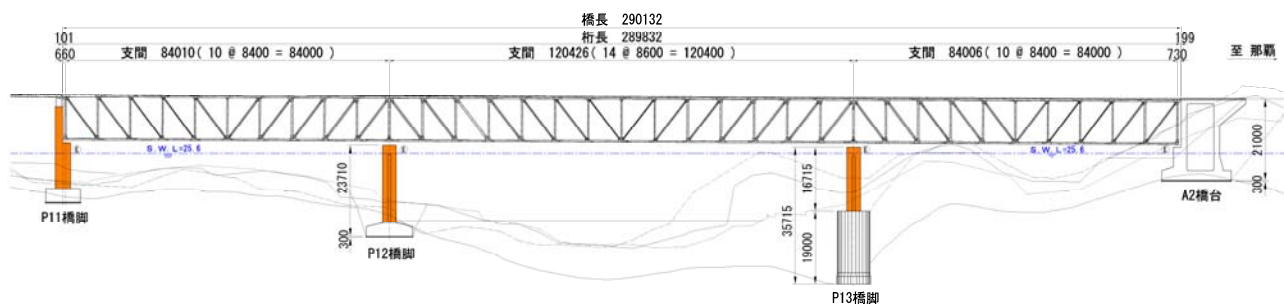


図-1.1 億首川橋（鋼トラス橋）の一般図（単位：mm）

本橋を対象として種々の検討をおこない、その検討から得られる知見をもとに、古い鋼トラス橋に対する耐震補強方法の適用性について考察をおこなうことにした。

1.2 研究の課題

鋼トラス橋は、鋼製の材料を溶接により組み合わせた部材をトラス形状に組み立てた骨組み構造で構成されている。鋼部材に対する断面補強方法は、鋼材を高力ボルトや溶接により接合することで断面補強する方法が一般的である。特に既設の鋼構造物を補強する場合は、すでに死荷重が作用した状態に対して補強を実施する必要がある。ボルトにより補強材料を接合する場合には、母材にボルト接合用の孔をあらかじめドリルなどで施工する必要があるが、母材を損傷させることになる。また、溶接により補強材を接合する場合には、母材に溶接により高熱を与えることで母材の機械的性質が変化することが懸念される。

鋼材と高力ボルトもしくは溶接による断面補強以外の鋼部材への断面補強の方法としては、炭素繊維材料に接着剤を含浸させることにより硬化させて対象構造物に接着して補強する方法、またはあらかじめ炭素繊維材料を硬化させたプレートを対象構造物に接着して補強する方法が近年注目されている。この炭素繊維材料を含浸接着樹脂により硬化した物体は、炭素繊維強化樹脂（以下、CFRP）と呼ばれるもので高い強度と耐久性を有する補強材料である。この補強材料は、鋼材を補強材料として使用した補強法と比較すると軽量であり施工作业におけるハンドリングが容易であることが特徴である。また、接着剤により既設構造物へ接合するため、母材に対して悪影響を与えずに接合することができる。

CFRPによる鋼部材の補強方法は、腐食に対する断面補強方法^{5,6)}として採用されている。これは、腐食により断面欠損した母材をCFRPにより補強する方法である。そのため、死荷重や活荷重のような比較的静的な挙動に対してのみの補強方法として採用されているのが現状である。CFRPの耐震補強に対する適用については、鋼製橋脚の補強工法としてガイドライン（案）⁷⁾が提案されているが、実用化には至っていない。CFRPによる補強については、地震のように大きな力が繰り返し作用する動的な挙動に対して耐震補強として利用することは未解明なことが多いためである。特に鋼部材に対する設計に対しては、部材に圧縮力が作用する場合には全体座屈と局部座屈が発生することを考慮する必要がある。しかし、CFRPにより補強された鋼部材における座屈現象は未解明な部分が多い。

また、引張力と圧縮力が交番して作用するような状態についても研究が少ない状況である。そのため、CFRPによる補強を鋼部材の耐震補強に対して実用化に至っていないことが課題として挙げられる。

1.3 研究の目的

本研究では、鋼トラス橋の部材に対してCFRPを用いた断面補強を実施し、その補強効果と耐震補強への適用性を確認することを目的とした種々の検討をおこなうこととした。

第3章では、対象とする橋梁の地震時の特性を把握することと既存の耐震補強方法を適用した場合における橋梁全体の応答値の低減効果を確認することを目的として、立体骨組みモデルによる時刻歴応答解析を実施した。この検討では、橋梁全体の耐震性能を高める方法として、既往の研究で提案されている①支承取替による免震化、②制震ダンパーの追加による応答値の抑制、③部材の当て板補強の3つの方法で耐震補強効果を確認した。特に③の部材の当て板補強については、CFRPによる補強の適用を課題として、以降の研究を実施した。

第4章では、CFRPによる鋼部材の補強効果を確認することを目的として種々の実験を実施した。実験の種類として、まずCFRPを鋼板に接着した合成断面が板要素としてどのような挙動を示すのかを把

握するための基礎的な検討として、矩形の鋼板に CFRP を補強した試験体を用いて引張荷重試験、圧縮荷重試験および曲げ荷重試験を実施した。この実験結果より、各荷重状態における鋼材の降伏、全体座屈、曲げ変形に対する補強効果を確認した。また、実験結果から得られた各荷重状態での荷重とひずみの関係から、CFRP のヤング係数を推定し、鋼材に対する補強効果に与える影響を確認した。

第 5 章では、鋼トラス橋の部材として多く用いられている鋼製 H 形断面の柱部材における全体座屈に対する補強効果を確認することを目的として、CFRP で補強した鋼 H 形断面の試験体を用いて圧縮荷重試験を実施した。この実験結果より、圧縮荷重における全体座屈の座屈荷重に対する補強効果と座屈変形後の荷重値と変位に対する補強効果を確認した。また、圧縮荷重状態における CFRP のヤング係数を実験値から推定し、鋼 H 形部材の座屈耐荷力に与える影響を確認した。

第 6 章では、地震による作用力は引張状態と圧縮状態が交番して繰り返し作用するため、その繰り返し交番荷重時における補強効果を確認することを目的として、CFRP で補強した鋼 H 形断面の試験体を用いて引張荷重試験、圧縮荷重試験および交番荷重試験を実施した。まず、引張荷重試験および圧縮荷重試験により、対象とした試験体での各荷重時の挙動と CFRP の補強効果を確認した。また、高伸度弾性パテ材の施工の有無による CFRP の剥離および破断に対する影響を確認した。引張荷重試験と圧縮荷重試験の結果を踏まえて、交番荷重試験を実施した。この実験結果より、交番荷重の繰り返し荷重で進展する座屈変形による鋼材の塑性化が試験体断面の剛性に与える影響を確認した。

第 7 章では、本論文全体のまとめ、前章までの検討結果を踏まえて、鋼トラス橋の部材に対する CFRP 補強について、耐震補強としての補強効果と適用性を検証した。

第2章 既往の研究

2.1 鋼トラス橋や鋼アーチ橋など長大橋の耐震補強に関する研究事例

鋼トラス橋を含む鋼アーチ橋などの骨組み構造を有する長大橋に対する耐震補強の研究は、1995年1月17日に発生した「兵庫県南部地震」以降、数多くの検討がなされている。骨組み構造を有する長大橋は、部材数が多く複雑なモードでの挙動となるため立体骨組みモデルによる時刻歴地震応答解析による耐震補強効果の検討がなされている。

上平、中出、井上、明神ら⁸⁾は、「長大橋の耐震性能向上」という論文で、挙動が複雑な橋梁および長大橋の多くは、耐震補強の実施可能な対策が見出せないために手つかずになっていることを課題として、その耐震工法として、耐震ブレースと床組免震が有効かつ現実的であることを提案している。その具体的な方法の一つとして、鋼材の弾塑性特性を利用したエネルギー吸収機構を有した「軸降伏型座屈拘束ブレース」をトラス構造の斜材部分に挿入することを提案している。その構造の特徴は、軸力が作用した場合、圧縮力に対しては、芯材が降伏後、局部座屈を生ずるが、拘束管が芯材の横たわみを拘束することで、引張降伏状態と同様の弾塑性挙動を示すものである。また、従来の免震工法は、下部構造上部に設置された支承（主構支承）を免震機構に置き換え上部構造から下部構造に対して作用する慣性力を低減させ、耐震性能を向上させる工法で、中小規模桁橋などには適用可能であるが、スパンが200mを超えるような長大橋に対しては、上部構造の重量が大きい慣性力に伴う応答変位が過大なり、上部構造を支持する支承構造が非現実的な寸法になる可能性がある。そこで、車両が通行する道路床組とそれを支持する上部構造（トラス桁）が分離され、別途道路床組を支持するための支承（床組支承）がトラス桁上に設置された構造とした床組免震工法を提案している。

後藤、川西ら⁹⁾は、「腐食と補修履歴を考慮した鋼構造物の耐震性能評価のための解析手法」という論文で、鋼構造部材の腐食欠損やその補修履歴は、鋼構造物の長期間における力学性能の変化に影響を与えることを報告している。現状の手法では鋼材の腐食課程や過去に受けた補修の履歴により構造物に内在し応力再分配により変化する死荷重下の応力分布や変形が無視されることを課題として、腐食欠損部分を補修した構造物の極大地震下の動的な終局挙動がその補修方法により初期状態の構造と比較してどのように変化するかについて検討している。この検討では、動的な極大地震などの大きな振幅を持つ地震波が入力した場合、引張り斜材であっても圧縮力が作用することにより、補修された斜材の曲げ剛性の復元が十分でないと、トラス橋の地震時の性能は建設当初と比較して低下する可能性があることを報告している。

野中、原田、岩村、王ら¹⁰⁾は、「観測地震波を用いたトラス橋の実挙動再現および大地震時挙動の予測」という論文で、まず、動的解析のモデル化手法について、地震応答解析では質量が設定されたすべての節点に地震力（1種類の地震加速度）が作用すると仮定すること、材料非線形性についてはファイバーモデルを用いることによって評価すること、局部座屈（幾何学的非線形性）については、ひとつの部材を座屈モードが表現できるように複数の梁要素で分割することを提案している。この条件のもと、固有値解析の結果は計測結果と解析結果が近い値であること、想定入力地震波では塑性化しない結果となったこと、標準波形において、橋軸方向地震時には固定支承側の下弦材が、橋軸直角方向地震時には固定支承側の斜材が降伏する結果となったことを報告している。

金治、鈴木、香川、渡邊ら¹¹⁾は、「長大トラス橋の対震性能向上化における設計地震力と損傷制御構造」という論文で、長大橋の場合、レベル2地震動に対する耐震性の向上化が、技術的難易度から一般高架橋に後れをとっていること、さらに、橋梁形態、橋長も一橋ごとに異なり、一般高架橋のように補

強方法が確立されている状況になく、また予備的検討では投資額が大きなものとなることが道路管理者の課題となっていることを挙げている。また、技術的難易度に関しては、その解析技術、新規の免震や制震技術、海上部、高所部における施工技術など長大橋独自の問題が山積している状況にあることを課題として挙げている。そこで、各部材の弾性限に格差を設けることにより、鉛直支持主部材はできるだけ損傷を許容せず、水平力対応部材に損傷、正確には安定した弾塑性挙動を許容し同時にエネルギー吸収を図る免震や制震技術の設計思想を提案している。固有周期と応答スペクトルの関係から応答制御特性についての報告をしている。具体的には、橋軸方向は、1次モードが支配的であり、長周期化の効果は大きいので免震構造が有効であることを報告している。橋軸直角方向は、2次モードに着目するとかなりの長周期化を実現しなければ応答の増大につながる危険性があるため、高減衰化を期待する設計が望ましいことを報告している。具体的な耐震工法として、橋軸方向の免震化には、床組免震システムの採用を提案しており、橋軸直角方向の制震技術には、座屈拘束ブレースを対傾構と横構に配置することで減衰効果を期待することを提案している。

太田、大塚、野原、新井ら¹²⁾は、「鋼上路式アーチ橋の耐震補強に対する検討」という論文で、アーチ橋の補強方法としては、アーチリブの耐力不足に対して、角補強やプレート補強、およびコンクリート充填といった部材の耐力増加が一般的であることと、鋼材の応答低減を目的として、橋梁トラス部材にダンパーを設置、あるいは対傾構などのトラス部材を省略することで、橋梁の長周期化や減衰効果の向上を図った事例があることを報告している。上路式アーチ橋における課題の一つとして、直角方向地震時に支承部に生じる大きな上揚力が発生することを挙げており、支承上揚力の低減に着目した補強対策を提案している。具体的には、振動単位の構造全体の応答値を改善・低減する方法として、免震・制震装置の付加、エネルギー減衰機構（ダンパー）の設置、支承条件の変更による構造特性の変更などがあることを報告している。また、部材耐力の増加、機能の向上の方法として、断面増厚、リブ補強、角補強、コンクリート充填、橋脚巻き立て補強などがあることを報告している。また、支承の橋軸直角方向ダンパー化、対傾構のダンパー化が応答値低減に効果があったことを報告している。

原、緒方、石塚、山戸ら¹³⁾は、「既設道路橋鋼3径間連続トラス橋の免震化による耐震補強設計」という論文で、鋼トラス橋のような骨組み構造を有する上部構造の耐震補強設計として、免震ゴム支承を用いた耐震性向上策を報告している。全支承を水平反力分散構造とした場合は、橋軸方向に対しては長周期化により応答が低減されるため上部構造の耐震性能に対して降伏はしないが桁遊間が不足するため制震ダンパーを併用する必要があることを報告している。また、下部構造に対しては橋脚が揺れやすくなることで橋脚の応答値が増加するため下部構造の耐震性能に対しては効果がないことを報告している。全支承を免震ゴム支承とした場合は、免震効果で上部構造・下部構造ともに応答値が低減されるため、耐震性能に対して有効であることを報告している。

杉岡、林、鈴木ら¹⁴⁾は、「長大鋼中路アーチ橋の耐震補強におけるせん断パネルダンパーの適用効果」という論文で、せん断パネルダンパーの配置および降伏耐力の最適化によって、支承や上部構造鋼部材、橋脚に対する地震応答の低減効果が変化することが明らかになったことにより、耐震性能向上対策におけるせん断パネルダンパーの適用効果とその有効性を報告している。

長大橋について、動的解析に部材の座屈変形を考慮する手法に関する研究も数多く検討がなされている。

野中、宇佐美、吉野、坂本、鳥越ら¹⁵⁾は、「上路式鋼アーチ橋の大地震時弾塑性挙動および耐震性向上に関する研究」という論文で、アーチ下横構の部材座屈は、部材に初期たわみを与えておいて面外方向に変形しやすくすることでモデル化している。座屈を考慮する部材は、圧縮方向に変形した時に発生

軸力が低下するようにモデル化している。また、初期たわみと幾何学的非線形を考慮することで部材座屈を考慮している。部材座屈の影響としては、橋梁全体の耐荷力が低下し、不安定になることはない。これは細長比が小さいため、細長比が大きい場合は注意が必要であることを報告している。

本荘，横山，前原，田崎，川神ら¹⁶⁾は、「鋼上路式アーチ橋の耐震補強設計に関する検討」という論文で、部材座屈を幾何学的非線形により評価している。具体的なモデル化の方法は、部材端を剛結結合としてモデル化し、1つの部材を多分割して中間節点に質量を設定している。これにより、面外方向に変形が生じることによる耐力低下が発生する。この現象を幾何学的非線形による部材座屈としている。この解析モデルで非線形動的解析を実施した結果、下横構については、部材座屈と耐力低下が発生し、構造安定性を満足しない解析結果となったことを報告している。部材座屈を発生させない対策として、部材剛性は増加させずに座屈耐荷力のみ増加する補強方法を提案している。既設部材とは接合せずに座屈変形のみを拘束する構造を提案している。断面補強すると塑性化しなくなり応答値が増大する。そのため、下横構や対傾構などの2次部材を降伏させることによって塑性変形でエネルギー吸収することで主要部材の応力値が低減できることを報告している。

これらの従来の研究では、アーチ橋やトラス橋などの大きな圧縮軸力を受ける部材については、塑性化を許容しないように構造の免震化や制震デバイスの設置を検討した報告事例が多い。また、部材の座屈変形に着目した解析や検討を実施している事例があるが、結論としては部材の座屈を発生させないように補強することや2次部材における鋼材の降伏による塑性変形でエネルギー吸収するという結論の検討事例が多い。従来の研究では、本研究で着目している座屈変形を積極的に発生させることで応答値の低減を図ることを目的とした研究事例がほとんどない。また、鋼部材における座屈耐荷力は、座屈変形が発生するまでの強度について多くの検討がなされているが、本研究で着目している座屈変形後の挙動については、検討事例がほとんどないのが現状である。

2.2 炭素繊維強化樹脂の特性に関する事項

2.2.1 炭素繊維の定義

「炭素繊維」の定義は、ISO（国際標準化機構）によると、「有機繊維を焼成して得られる炭素含有量が90%以上の繊維」である。有機繊維には、炭素原子の他に水素原子や窒素原子などが含まれるが、焼成（1000℃以上の高温加熱処理）することによって、それらを水素原子や窒素原子のガス化合物として繊維から放出して、炭素原子の組成を90%以上に変換した繊維が炭素繊維である¹⁷⁾。

図-2.1に示す通り、炭素繊維は直径5～15μmの単繊維を1,000～60,000本に束ねられた繊維束という形態をしている。

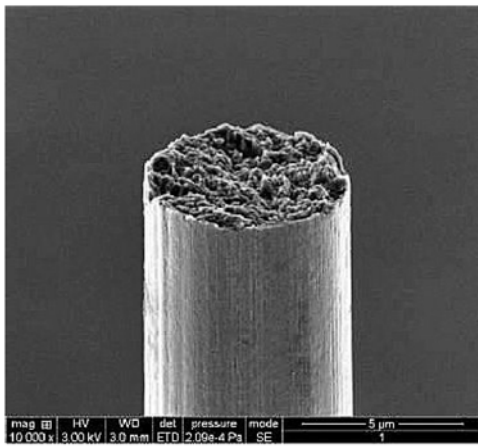
表-2.1に示す通り、炭素繊維の特徴は、力学的特性として、比重が小さい（軽い）・強度が高い（強い）・弾性率が高い（硬い）という特徴がある。また、機能的特性として、耐腐食性、耐薬品性、耐熱性、低熱膨張率、熱伝導性、電気伝導性、X線透過性という特徴がある。

2.2.2 補強用炭素繊維の種類

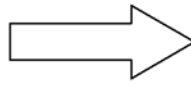
補強用炭素繊維の種類としては、以下のものがある。

(1) CFRP シート

炭素繊維を一方向もしくは二方向に配列したものであり、現場で液状の常温硬化型・含浸接着樹脂を含浸・硬化させることによって、既設鋼構造物と一体化を図るものである。



単繊維直径5μm
単繊維



単繊維24,000本からなる
繊維束を巻いたポビン

単繊維直径	5~15μm
繊維束	単繊維1,000~60,000本の集まり

図-2.1 炭素繊維の形態¹⁾

表-2.1 炭素繊維の特徴¹⁾

力学的特性	軽い : 比重は鉄の約 1/4、アルミ合金の約 2/3
	強い : 比強度 ¹⁾ は鉄、アルミ合金の 10 倍以上
	硬い : 比弾性率 ²⁾ は鉄、アルミ合金の 5 倍以上
機能的特性	耐腐食性 (錆びない)、耐薬品性、耐熱性
	低熱膨張率、熱伝導性、電気伝導性、X線透過性

1) 比強度 = 強度 ÷ 密度、 2) 比弾性率 = 弾性率 ÷ 密度



写真-2.1 CFRP シート

(提供 : 日鉄ケミカル&マテリアル(株)「トウシート」)

(2) CFRP スtrandシート

繊維束に工場では樹脂を含浸・硬化させた直径 1 mm程度の繊維ストランドを横糸で連結したものである。CFRP スtrandシートは施工現場では繊維への樹脂含浸工程が不要となり、不陸修正材兼用のペースト状の接着剤で鋼材表面に接着する。



写真-2.2 CFRP スtrandシート

(提供：日鉄ケミカル&マテリアル(株)「Strandシート」)

(3) CFRP プレート

引抜き成形法と呼ばれる製法にて、炭素繊維を熱硬化型樹脂で含浸させて硬化させた帯板状の成形板であり、この CFRP プレートもペースト状の接着剤で鋼材表面に接着するものである。



写真-2.3 CFRP プレート

(提供：三菱ケミカルインフラテック(株)「eプレート」)

2.2.3 炭素繊維の応力ひずみ曲線

炭素繊維の応力-ひずみ関係は、図-2.2 に示す通り、一般に線形に近く、設計上は線形としてよい。

炭素繊維の材料特性（引張強度、弾性係数、繊維目付量）は、表-2.2 に示す通り、グレード別で分類される。炭素繊維の引張強度は鋼材と比較して、5～8 倍程度の強度を有する。また、弾性係数は、鋼材と比較して 1.2～3.2 倍となっている。

図-2.3 および図-2.4 に示す通り、高強度型は、引張強度が高い材料であるが、弾性係数が比較的小さいため、ひずみも大きいことが特徴である。コンクリート橋脚の補強など高い引張耐力が要求される場合に用いることが多い。中弾性、高弾性型は、弾性係数は高いが脆性的な破壊を起こしやすい性質があるので引張強度も低く設定されている。応力度の低減やたわみの低減が要求される場合に用いることが多い。

補強材である炭素繊維と既設部材である鋼材は、後述するプライマー、不陸修正材、接着剤、含浸材などにより接合することになるが、炭素繊維と鋼材の弾性係数の違いを接着剤などによりいかに吸収するかが応力伝達において重要な課題となる。

また、補強用 FRP を鋼材面に使用する場合の剥離防止を目的として、高伸度弾性樹脂を用いることがある。

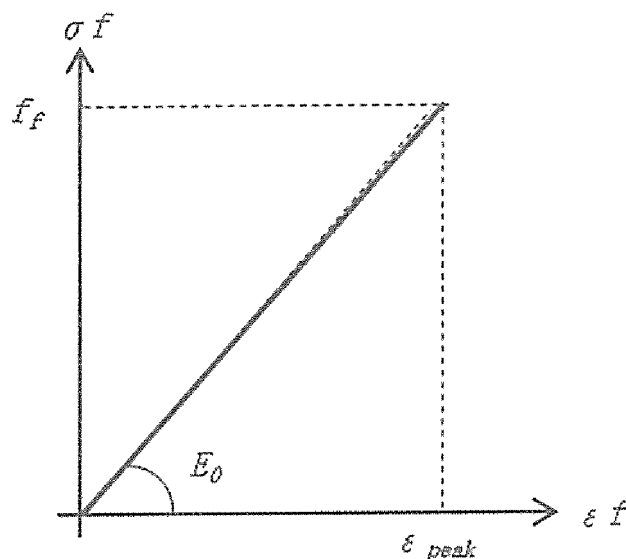


図-2.2 炭素繊維の応力-ひずみ曲線⁶⁾

表-2.2 CFRP シートの材料特性⁵⁾

	引張強度 (N/mm ²)	弾性係数 (kN/mm ²)	繊維目付量 (g/m ²)
高強度型	3400	245	200～600
中弾性型	2900	390	300
	2400	450	
高弾性型	1900	540	
	1900	640	
鋼	400～570	200	—

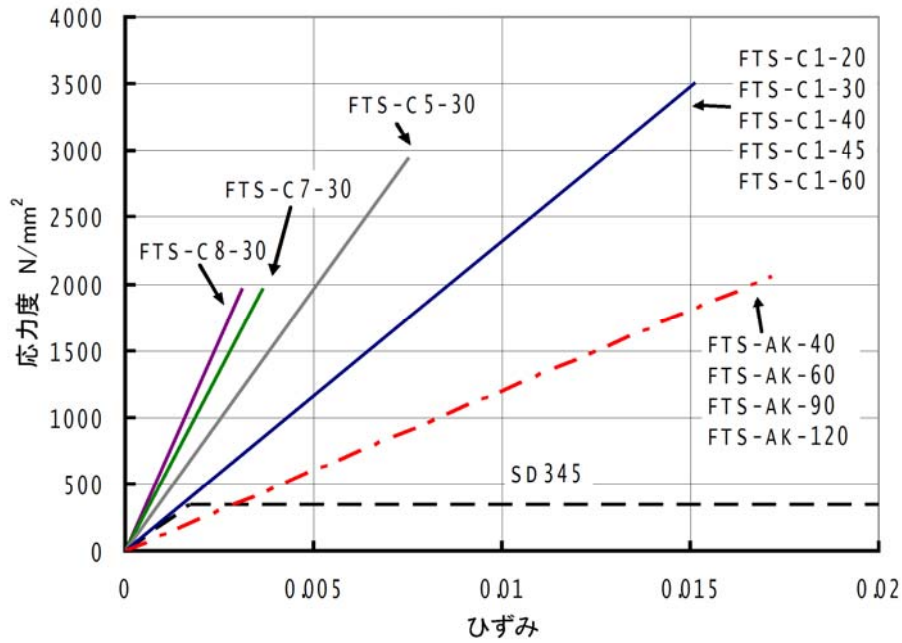


図-2.3 炭素繊維シートの応力-ひずみ曲線¹⁸⁾

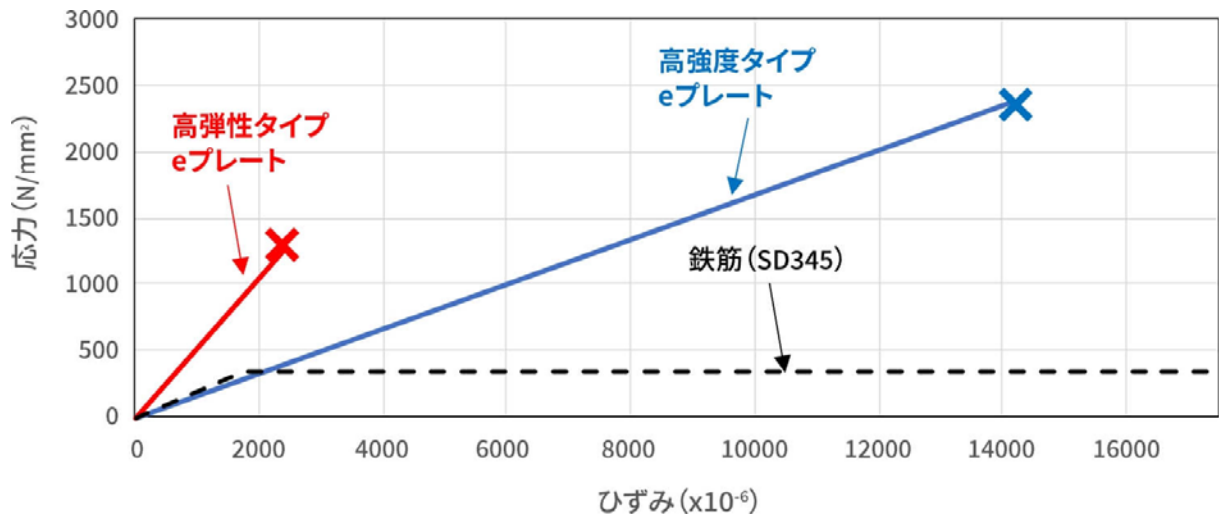


図-2.4 炭素繊維プレートの応力-ひずみ曲線
(提供：三菱ケミカルインフラテック(株)「eプレート」)

2.2.4 炭素繊維の短所^{17,19)}

炭素繊維は、脆性的な材料であるため、突然破断する性質がある。よって、破断荷重に対して十分な安全率を設定する必要がある。また、部分的に繊維が破断しても終局状態に至らないように繊維を束状にして使用することが必要である。

炭素繊維の強度は、繊維方向に対して十分な強度を有するが繊維と直交する方向に対しては強度が非常に弱い。そのため、せん断変形に対する抵抗が非常に弱いことが挙げられる。例えば、繊維を折れ曲げた状態で使用すると繊維が破断しやすい。

炭素繊維は、連続した状態で使用しないとその強度を十分に発揮できない。繊維の接合方法は、接着剤による含浸・硬化による方法が一般的であるが、接合部の強度は、接着剤の強度に依存する。

圧縮方向に作用する力に対しても十分な機能を発揮しない。面外方向の変形（座屈変形）に対して抵抗するように接着剤による含浸・硬化が必要になる。

接着樹脂で含浸させた状態では、炭素と鋼材は非伝導性のエポキシ樹脂で絶縁されている状態である。しかし、炭素と鋼材はどちらも導電性の高い材料であるため、炭素と鋼材の電位差による腐食が懸念される場合がある。

2.2.5 炭素繊維の価格

炭素繊維の設計価格（材料費）は、表-2.3 のとおりである。価格は、種類・タイプ・強度・繊維目付量により違いがある。この価格は、2022年現在の参考価格である。

表-2.3 炭素繊維の設計価格

種類	タイプ	価格 (円/㎡)
CFRP シート	高強度タイプ	6,000～14,000
	中弾性タイプ	12,000～13,000
	高弾性タイプ	16,000～22,000
CFRP スtrandシート	高強度タイプ	15,000
	中弾性タイプ	29,000～32,000
	高弾性タイプ	35,000～55,000
CFRP プレート	高強度タイプ	3,600～7,200 (円/m) 50mm 幅
		72,000～144,000

2.2.6 接着剤の材料特性

(1) 接着用樹脂材料の種類

補強用 CFRP の接着接合に用いる接着用樹脂材料の種類は、プライマー、不陸修正材、接着剤、含浸接着樹脂、高伸度弾性樹脂がある。これらの接着用樹脂材料は、使用する補強用 CFRP と既設部材との組み合わせや施工時の環境条件において、その性能が適切な試験方法で確認されたものを用いる必要がある。

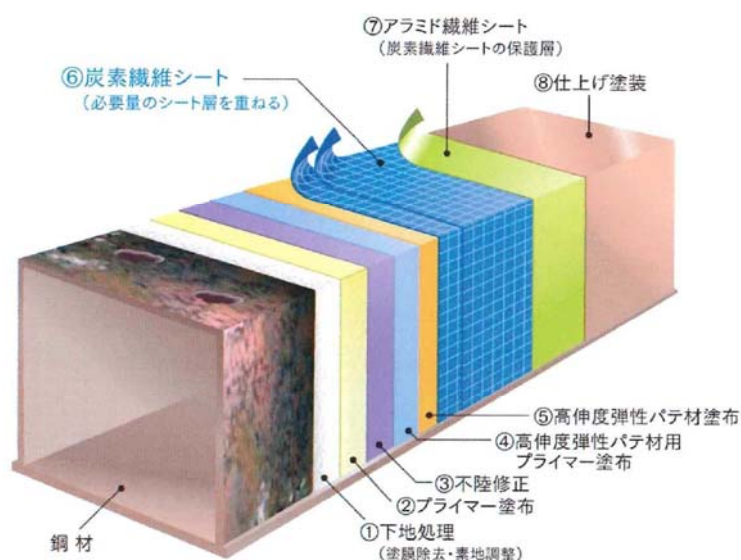


図-2.5 炭素繊維シート接着工法の各層の構成⁵⁾

(2) プライマー

プライマーは、既設部材と補強用 CFRP を一体化するために、補強用 CFRP を接着する前に既設部材面に塗布し、既設部材と補強用 CFRP との間の付着強度の発現を促す材料である。すなわち、既設部材と不陸修正材、接着剤もしくは含浸接着樹脂との組み合わせで十分な付着強度が確認されている必要がある。

既設部材が鋼材の場合には、鋼材の表面処理後の防錆、電氣的な絶縁などの目的でも使用される材料である。

(3) 不陸修正材

不陸修正材は、既設部材表面を平坦にすることを目的に塗布する材料である。既設部材に段差などの凹凸部が存在する場合に補強用 CFRP を接着すると、突起部が大きい場合には補強用 FRP が破断する恐れがある。したがって、大きな突起は、グラインダーなどで切削して平坦にする必要がある。また、不陸修正材は、プライマーや含浸接着樹脂と十分な付着強度が確認されている必要がある。

(4) 含浸接着樹脂

CFRP シートは、含浸接着樹脂が繊維の間に確実に含浸・硬化することにより、繊維間が強固に結びついて十分な応力伝達が実現され、所要の強度やヤング係数などの品質を有する複合体となる。したがって、含浸接着樹脂は、CFRP シートに確実に含浸することが前提であり、含浸に適した粘度であることが重要である。

CFRP シートに含浸・硬化した含浸接着樹脂の品質は、含浸・硬化した状態で評価する必要がある。ここで含浸接着剤の含浸状態が不十分であると、所要の強度やヤング係数が得られない可能性がある。したがって、CFRP シートと含浸接着剤の適切な組み合わせを選定する必要がある。材料試験の方法は、JSCE-E541「連続繊維シートの引張試験方法（案）」を参照して材料試験をおこない、適切な特性値を得るのが望ましい。

(5) 接着剤

接着剤は、既設部材表面もしくは既設部材に塗布されたプライマー面に CFRP プレートや CFRP ストランドシートを接着する材料である。その施工では、施工現場での CFRP シートへの樹脂含浸工程のような作業が不要となる。また、接着剤は FRP プレートもしくは FRP ストランドシートや既設部材もしくはプライマーと十分な付着強度が確認されている必要がある。なお、一般に CFRP プレートは CFRP シートや CFRP ストランドシートよりも厚く、単位幅当たりの引張耐力が大きい。そのため、継手長さを長くしても、CFRP プレートの引張耐力よりも低い荷重で継手部の剥離による破壊が生じる。

(6) 高伸度弾性樹脂

高伸度弾性樹脂は、低弾性・高伸度な特性を有しており、補強用 CFRP の剥離防止を目的として使用される。そのため、ヤング係数が $55\sim 75\text{N/mm}^2$ 、伸びが $300\%\sim 500\%$ の範囲であることが確認されている必要がある。下地との付着を確保するための専用プライマーが必要であり、鋼材と補強用 CFRP の間もしくは、不陸修正後の不陸修正材と補強用 FRP の間に塗布される。鋼材、不陸修正材、含浸接着樹脂との組み合わせで付着強度が確認されている必要がある。

高伸度弾性樹脂の引張弾性係数が大きいと、鋼板が局部座屈を生じて面外変形しようとするときに補

強用 CFRP が変形に十分追従できない。一方、引張弾性係数が小さいと補強用 CFRP を鋼板の変形に追従させることができるが、補強用 FRP の接着効果が十分に得られない。また、高伸度弾性樹脂の引張最大荷重時伸びが小さいと、局部座屈により鋼板が大きく変形した際に高伸度弾性樹脂が破断し、補強用 CFRP が剥離するようになる。一方、引張最大荷重時伸びが大きいと、その引張弾性係数との共存が困難である。よって、高伸度弾性樹脂の伸びと補強用 CFRP・既設鋼材の変形のバランスをとることで座屈や剥離を生じないようにする必要がある。

(7) エポキシ樹脂

一般的なエポキシ樹脂は、ビスフェノール A（主剤）とエピクロロヒドリン（硬化剤）を混合して重合体を作るタイプである。

エポキシ樹脂は、接着力が強く、酸素・水分の透過性が低い特徴があり、多くの化学物質に対しての耐性を持っているため、外面腐食を予防するためには理想に近い樹脂といえる。

エポキシ樹脂は紫外線により表面が劣化して白く変色する。屋外では年 10 μ m 程度の速度で劣化する。

エポキシ樹脂の可使用時間は、施工時の気温にもよるが、標準温度で約 60 分である。温度が高いと固まりにくく、温度が低いと固まりやすい性質がある。

(8) ポリウレア樹脂

高伸度弾性樹脂の一種であるポリウレア樹脂は、イソシアネートとポリアミンの化学反応によって形成された樹脂化合物である。ポリウレア樹脂は、約 400% という高い伸び率を持ち、基材の形状変化に追従する性質がある。ポリウレア樹脂は、硬化速度が速いため専用の塗布装置を使用するなどシビアな取り扱いが求められる。ポリウレア樹脂の可使用時間は、標準温度で約 30 分である。

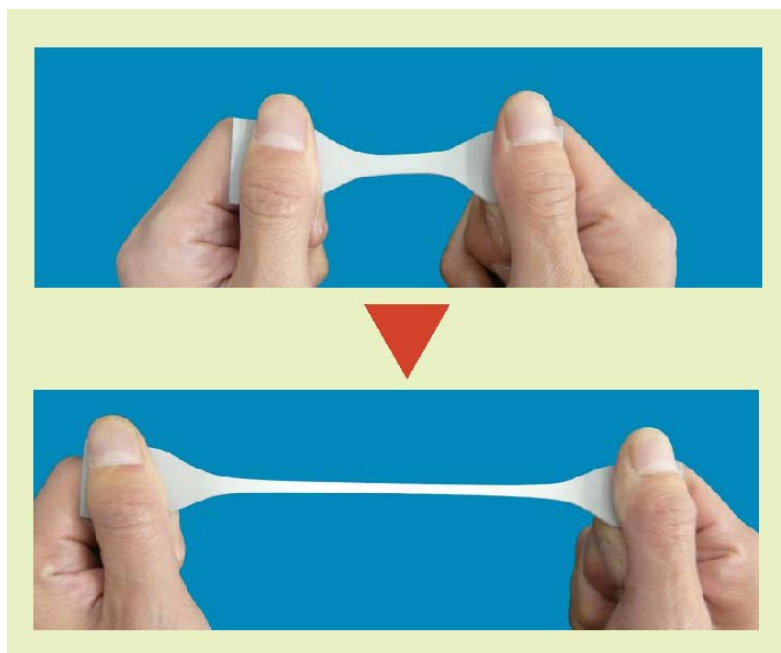


写真-2.4 ポリウレア樹脂

(提供：日鉄ケミカル&マテリアル(株)「PL-CF 工法」)

2.3 炭素繊維強化樹脂を鋼材の補修・補強に使用した研究事例

鋼材を CFRP で補強する工法は、従来では腐食により断面欠損した鋼材に対して断面補強する方法^{4,5)}として採用されてきた。また、腐食部の補強に対して CFRP 補強を適用するための検討が数多くなされている。しかし、これらの検討は、静的な荷重に対する検討である。本研究で着目している地震力が作用した時のような引張と圧縮が交番するような荷重状態や動的に荷重が変化する状況を想定した検討はおこなわれていない。

松村¹⁹⁾は、「CFRP 接着工法による土木構造物の補修・補強」という特集記事の中で、CFRP 接着工法に期待される効果として、高強度～高弾性な材料特性を活用した効率的な補修設計が可能であること、構造物本体への入熱や断面欠損を伴わずに母材への影響が少ないこと、薄く軽量であり補強後の外形の変化や重量増が少ないことなどを設計・施工上のメリットとして述べている。しかし、制約条件として、鋼材の変形や CFRP の破断に至るような荷重レベルまでの補強効果は期待せず、鋼材と接着剤の界面での剥離や接着剤自体のせん断破壊が生じない範囲で適用されていることを報告している。この制約条件で適用されている理由としては、CFRP 材料による補強効果は、鋼材が線形挙動を示す範囲内で平面保持の仮定が成り立つと仮定して、CFRP が鋼断面換算して算出される伸び剛性や曲げ剛性により評価されるためであり、この有効性は一連の実験によって確認できているためである。よって、引張・圧縮の両方の応力の作用下に対しても応力改善効果が期待できることを報告している。

杉江、小林、稲葉、本間、大垣、長井ら²⁰⁾は、「鋼部材腐食損傷部の炭素繊維シートによる補修技術に関する設計・施工法の提案」という論文で、腐食により損傷した鋼部材を合理的に補修することを目的として炭素繊維シートを用いた補修工法を開発し、既設の実橋梁を対象とした補修効果確認試験の結果を報告している。また、実橋梁の補強前後により発生ひずみの計測結果により所要の補強効果が得られたことを報告している。しかし、その適用範囲は弾性挙動をする範囲、すなわち炭素繊維シートの剥離が生じない範囲での適用を前提としており、塑性変形後の挙動や CFRP の剥離に対して課題としている。

秀熊、小林、立石、長井、宮下ら²¹⁾は、「CFRP スtrandシートによる鋼板の補強効果に関する研究」という論文で、炭素繊維シート、CFRP スtrandシート、CFRP プレートで補強した鋼材に対して、引張試験、圧縮試験および梁曲げ試験を実施し、鋼材応力低減効果および剥離特性について報告している。炭素繊維シートおよび CFRP スtrandシートで補強した場合は降伏荷重まで剥離は発生せず、CFRP 補強鋼板の断面は合成断面として計算値とほぼ一致していることを報告している。

宮下、長井ら²²⁾は、「一軸引張りを受ける多層の CFRP が積層された鋼板の応力解析」という論文で、多層の CFRP が積層された鋼板に対する新たな応力解析手法を提案している。提案手法の妥当性については、解析解、屋内実験ならびに有限要素解析により検討しており、提案手法は解析解と完全に一致する解を与えており、解析解が存在していない 3 層以上の多層の CFRP により補強された鋼板の応力解析が可能となることを確認している。

奥山、宮下、緒方、藤野、大垣、秀熊、堀本、長井ら²³⁾は、「鋼桁腹板の合理的な補修・補強方法の確立に向けた CFRP 接着鋼板の一軸圧縮試験」という論文で、鋼桁端部の腹板腐食に対する合理的な補修・補強工法を確立することを目的とした基礎的な研究として、CFRP 接着鋼板の一軸圧縮試験を実施し、座屈変形に対する CFRP の補強効果として、CFRP 接着することにより弾性座屈荷重が増加することを確認している。また、第変形を伴う座屈変形に追従させるためにまず鋼板と CFRP シートの間にポリウレタ樹脂パテ材を挿入し 1 層目に弾性率の低い CFRP シートを貼り付けることで補強量を大きくした場合でもパテ材の効果により剥離が発生しにくいことを報告している。CFRP 接着鋼板の弾性座屈荷重を予測する方法についても検討し、CFRP 接着長を考慮して評価する方法を提案している。

若林, 宮下, 奥山, 秀熊, 小林, 小出, 堀本, 長井ら²⁴⁾は, 「高伸度弾性パテ材を用いた炭素繊維シート接着による鋼桁補修設計法の提案」という論文で, CFRP 補強が鋼構造物への適用事例が少ない要因として, 高応力下や座屈による大変形時において, CFRP が剥離する場合があります, 鋼構造物の補修に適用できる条件が限定的であることを課題として挙げている. そこで, CFRP の剥離抑制対策として低弾性かつ高伸度のパテ材を接着層に塗布する仕様を用いて, 各種鋼部材の特性に応じた補修量の算定方法や構造細目を提案している. また, この提案による補強方法の効果を確認するために実験を実施しており, 高伸度パテ材の影響で鋼板への荷重伝達率が減少することを確認している. その荷重伝達率の低下は, 補強の着目点からの定着長を 200mm, CFRP の各層の端部ずらし量を 25mm 確保することで, 実用上問題ないレベルに抑えられることを確認している.

秀熊, 大垣, 菊池, 小林, 宮下, 奥山ら²⁵⁾は, 「炭素繊維シート接着により補強された鋼製柱の耐荷力評価法に関する実験研究」という論文で, 全体座屈のみに着目して炭素繊維シートによる補強設計方法を確立するために, 異なる細長比パラメータを有する鋼板を用いた 1 軸圧縮試験を実施し, その実験から得られた補強後の耐荷力基礎データによりオイラー座屈式および道路橋示方書¹⁹⁾ (以下, 道示) における座屈耐荷力の評価式に対する適用性と最適な評価方法の提案を報告している. 最適な評価方法として, 部材全長にわたって炭素繊維シート接着された鋼長柱は, 道示の耐荷力評価式において, 細長比パラメータの断面 2 次半径を計算する際に, 補強後の板厚を炭素繊維シートの引張剛性換算で鋼材の板厚に足し合わせた板厚として計算することで, 終局強度を安全側に評価できることを報告している. また, 補強仕様として, CFRP 補強の剥離を抑制する効果があるポリウレタ樹脂パテ材の使用と中弾性型の炭素繊維シートの使用を提案している.

国外における CFRP 補強の報告事例として, Garrett Brunell, Yail J. Kim ら²⁶⁾は, 「Functionality of Damaged Steel Truss Systems Strengthened with Posttensioned CFRP Tendon」という論文で鋼トラス橋の部材が腐食により局所的な損傷が発生した場合に橋梁全体のたわみ特性に影響を受けることを報告している. その影響を回復する手法として, CFRP により補強し, ポストテンションを導入することを提案している. この方法により, トラス構造の冗長性と機能が回復することを報告している.

2.4 炭素繊維強化樹脂で補強した鋼材の耐震性能に関する研究事例

鋼材を CFRP で補強した部材に対して耐震性能の効果を検討した研究については, 事例が少ない. 国内においては, 鋼製橋脚に対して CFRP 補強した文献²⁷⁾と補強工法に関するガイドライン (案)⁷⁾があるのみで上部構造の鋼部材に対する耐震補強を目的とした研究事例はない. また, 具体的な施工方法や使用に関する規定が存在しないため, 実構造物に対して CFRP 補強を実用化した事例はほとんどないのが現状である. 国外においても鋼材を CFRP で補強した部材に対して耐震性能の効果を検討した研究は, 筆者の知る限り事例がない.

渡辺, 石田, 林, 山口, 池田ら²⁷⁾は, 「炭素繊維シートを用いた鋼製橋脚の耐震補強」という論文で, 鋼製橋脚の断面変化位置における炭素繊維シートによる耐震補強で局部座屈に対する補強効果を報告している. 具体的には, 炭素繊維シートの補強が断面の板厚変化部で剛性を高め, 板厚変化部での座屈を防止し, 座屈位置が基部に移行させることができ, 安定した挙動を示したことを報告している.

鋼材を CFRP で補強した部材に対して耐震性能の効果を検討した海外における報告事例は,

炭素繊維シートによる鋼製橋脚の耐震補強工法研究会 (財団法人土木研究センター) が発行した「炭素繊維シートによる鋼製橋脚の補強工法ガイドライン (案)」⁷⁾では, 鋼製橋脚柱部の耐震補強工法として炭素繊維シートによる補強工法のガイドラインをまとめている. このガイドラインでは, 鋼製橋脚に

おける局部座屈の遅延もしくは抑制を補強効果として期待している。しかし、実構造物へ適用するための基礎的研究やデータの蓄積が不足しているため、最適な炭素繊維材料の種類、貼り付け方法、貼り付けに使用する接着剤の仕様などは明確に規定されていない。

2.5 建設当時の耐震設計基準と現行の耐震設計基準の違い

本研究で対象とした橋梁は、1974年に完成しているが、建設当時の設計で適用された耐震設計基準は、1972年に発行された「道路橋耐震設計基準・同解説」¹⁾である。当時の耐震設計は、震度法により地震力を静的に作用させた設計がおこなわれていた。この基準における設計水平震度は式(2.1)により算出していた。

$$k_h = v_1 \cdot v_2 \cdot v_3 \cdot k_0 \quad (2.1)$$

ここで、 k_h ：設計水平震度

k_0 ：標準設計水平震度（0.2とする）

v_1 ：地域別補正係数（道路橋耐震設計基準・同解説 4.3 の表-4.1 および表-4.2 に示す補正係数）

v_2 ：地盤別補正係数（道路橋耐震設計基準・同解説 4.3 の表-4.3 に示す補正係数）

v_3 ：重要度別補正係数（道路橋耐震設計基準・同解説 4.3 の表-4.4 に示す補正係数）

標準設計水平震度は、一律 $k_0=0.2$ であり、架橋地点の地域特性、地盤特性、橋梁の重要度により補正係数が定められており、それらの値を考慮した設計水平震度により耐震設計が実施されていた。対象とした橋梁は、沖縄県に架橋された自動車専用道路であるため、地域別補正係数は $v_1=0.7$ 、重要度別補正係数は $v_3=1.0$ である。また、地盤種別は当時のII種地盤であったため、地盤別補正係数は $v_2=1.0$ である。これらの係数より、設計に用いられた設計水平震度は $k_h=0.14$ であった。つまり、現行の耐震設計基準でのレベル1地震動相当の地震力のみで設計されていた。

現行の耐震設計基準である道路橋示方書・同解説V耐震設計編⁴⁾は、1995年1月の兵庫県南部地震による道路橋の甚大な被害経験を踏まえて、翌年の1996年での改定で、レベル2地震動に対する耐震設計をおこなうことが明確にされた。その後、2011年3月の東北地方太平洋沖地震や2016年4月の熊本地震の発生による被災経験を踏まえて見直しがおこなわれた基準である。現行の耐震設計基準では、従来の震度法レベルであるレベル1地震動に対する耐震設計に加えて大規模地震であるレベル2地震動に対する耐震設計を実施する必要がある。現行の耐震設計基準における標準加速度応答スペクトルは、表-2.4～表-2.6の通りである。対象とした橋梁の架橋地点の地盤種別は、第3章で後述する通り、全ての地盤種別が同一振動単位で混在した条件であった。そこで、動的解析の応答値が大きかったII種地盤において、建設当時の地震力相当のレベル1地震動と現行のレベル2地震動の標準加速度応答スペクトルを比較する。対象とする橋梁の固有周期によって異なる場合が、その最大値で比較すると、レベル1地震動は $S_0=2.50$ に対して、レベル2地震動（タイプI）は $S_{I0}=13.00$ 、レベル2地震動（タイプII）は $S_{II0}=17.50$ であるため、入力地震動の大きさとして5.2倍もしくは7倍の違いがある。このため、全ての部材を降伏させない、もしくは座屈させない断面で設計しようとする5.2倍もしくは7倍の強度に補強する必要がある。しかし、部分的に部材の塑性化を許容することで地震力により部材に発生する応答値を低減することが可能となり、補強量を少なくすることが可能となる。

そこで、本研究では、2.2、2.3および2.4の既往の研究成果とそれらの研究課題、2.5における建設当時と現行の耐震設計基準の違いを踏まえて、鋼部材の断面補強にCFRP補強を耐震補強として適用することで地震力による座屈変形に対する補強効果を検討することにした。

表-2.4 レベル1地震動の標準加速度応答スペクトル $S_0^{4)}$

地盤種別	固有周期 T (s) に対する S_0 (m/s^2)		
I種	$T < 0.10$ $S_0 = 4.31 T^{1/3}$ ただし, $S_0 \geq 1.60$	$0.10 \leq T \leq 1.10$ $S_0 = 2.00$	$1.10 < T$ $S_0 = 2.20/T$
II種	$T < 0.20$ $S_0 = 4.27 T^{1/3}$ ただし, $S_0 \geq 2.00$	$0.20 \leq T \leq 1.30$ $S_0 = 2.50$	$1.30 < T$ $S_0 = 3.25/T$
III種	$T < 0.34$ $S_0 = 4.30 T^{1/3}$ ただし, $S_0 \geq 2.40$	$0.34 \leq T \leq 1.50$ $S_0 = 3.00$	$1.50 < T$ $S_0 = 4.50/T$

表-2.5 レベル2地震動の標準加速度応答スペクトル $S_{10}^{4)}$

地盤種別	固有周期 T (s) に対する S_{10} (m/s^2)		
I種	$T < 0.16$ $S_{10} = 25.79 T^{1/3}$	$0.16 \leq T \leq 0.60$ $S_{10} = 14.00$	$0.60 < T$ $S_{10} = 8.40/T$
II種	$T < 0.22$ $S_{10} = 21.53 T^{1/3}$	$0.22 \leq T \leq 0.90$ $S_{10} = 13.00$	$0.90 < T$ $S_{10} = 11.70/T$
III種	$T < 0.34$ $S_{10} = 17.19 T^{1/3}$	$0.34 \leq T \leq 1.40$ $S_{10} = 12.00$	$1.40 < T$ $S_{10} = 16.80/T$

表-2.6 レベル2地震動の標準加速度応答スペクトル $S_{H0}^{4)}$

地盤種別	固有周期 T (s) に対する S_{H0} (m/s^2)		
I種	$T < 0.30$ $S_{H0} = 44.63 T^{2/3}$	$0.30 \leq T \leq 0.70$ $S_{H0} = 20.00$	$0.70 < T$ $S_{H0} = 11.04/T^{5/3}$
II種	$T < 0.40$ $S_{H0} = 32.24 T^{2/3}$	$0.40 \leq T \leq 1.20$ $S_{H0} = 17.50$	$1.20 < T$ $S_{H0} = 23.71/T^{5/3}$
III種	$T < 0.50$ $S_{H0} = 23.81 T^{2/3}$	$0.50 \leq T \leq 1.50$ $S_{H0} = 15.00$	$1.50 < T$ $S_{H0} = 29.48/T^{5/3}$

第3章 対象橋梁の耐震性能

3.1 対象とした橋梁の諸元

本研究において、対象とした橋梁は、沖縄自動車道の億首川橋という鋼トラス橋である。この橋梁は、鋼鈹桁橋、鋼トラス橋、RCホロー桁橋からなる橋梁群の中の一つであり、対象とした鋼トラス橋は、図-3.1に示す通り、支間長84m+120.4m+84m（橋長290m）、主構間隔6.8m、主構高さ11.0mの鋼3径間連続上路式トラス橋である。この橋梁は、沖縄海洋博覧会の開催を目指して建設された沖縄自動車道の一部であり、1974年に完成し、1975年に供用を開始した。このように供用を開始して50年近く経過していることで老朽化が進んでいることと、現行の道示²⁹⁾における耐震性能を満足していないことから早急な耐震補強工事が必要な橋梁である。下部構造については、2006年にRC巻き立て工法による耐震補強工事が施工済みであるが、支承部や上部構造である鋼トラス橋の部材に対しては、耐震補強の設計・施工がおこなわれていない状態であった。

そこで、本章では、対象とする鋼トラス橋において、各トラス部材に発生する応答値を低減するために上部構造に対する耐震補強方法の検討を以下の4つの手順で実施した。

- ① 支承取替による免震化および水平反力分散化することで地震応答を低減する効果に関する検討
- ② 制震ダンパーを適切な位置に配置することで地震時の支承移動量を低減する効果に関する検討
- ③ せん断パネル型制震ストッパーを配置することで支承に発生する上揚力を低減する効果に関する検討
- ④ トラス部材の降伏および座屈に対して鋼板当て板補強を実施することで塑性変形を解消する効果に関する検討

本章では、地震時における動的な挙動を精度よく予測するための手法として、立体骨組モデルによる非線形時刻歴応答解析（動的解析）を実施した。この解析結果により、支承の免震化と各種制震デバイスの配置による各部位の応答値の低減効果を考察する。また、本章では対象とした鋼トラス橋を一例として検討を実施したが、上路式鋼トラス橋や上路式アーチ橋など本検討で取り上げた橋梁と条件が類似する構造形式の橋梁に対する補強方法の有効性についても考察する。

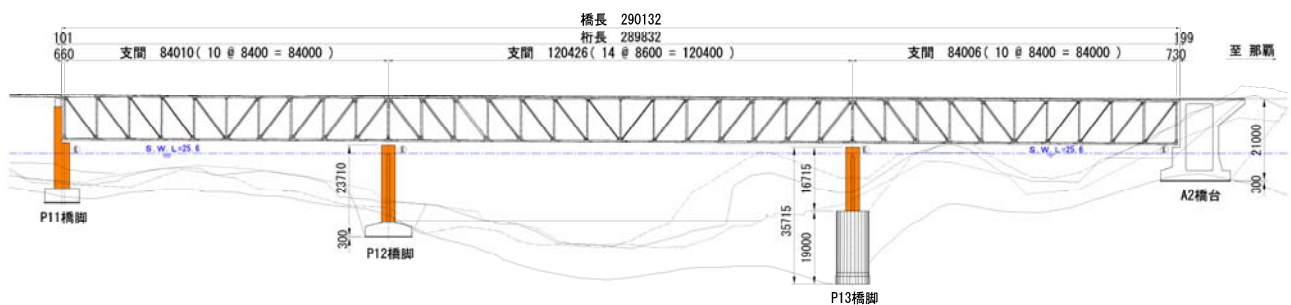


図-3.1 億首川橋（鋼トラス橋）の一般図（単位：mm）

3.2 耐震補強の基本方針

3.2.1 目標とする耐震性能および部材に対する限界状態

対象橋梁におけるレベル2地震動に対する目標性能は、平成24年版の道示V²⁹⁾に示される耐震性能2とした。上部構造における主要構造（上弦材、下弦材、斜材、鉛直材、対傾構）および2次部材（上横構、下横構）の応答値に対する制限値は、鋼材の降伏耐力もしくは座屈耐力以下となることを目標とし

た^{27~29)}。下部構造については、3.1 で述べた通り、RC 巻き立て工法による補強がすでに施工されていたので、国土交通省事務連絡（平成 27 年 6 月 25 日）³¹⁾に示されている「既設道路橋において求める耐震性能とその観点」における耐震性能 2 として照査した。つまり、下部構造の応答値に対する制限値は、補強後の断面における終局耐力（塑性ヒンジにおける終局回転角）以下となることを目標とした。

3.2.2 耐震補強の検討フロー

本章における耐震補強の検討は、次に示すフローで実施した。はじめに耐震補強前（以下、現況とする）の構造に対して、レベル 2 地震動による時刻歴応答解析を実施して、各部材の応答値を把握することにした。

この現況の構造に対する解析結果を踏まえて、橋梁各部の部材に対する補強量が最小限になるように各種の制震デバイス（免震支承、制振ダンパー、せん断パネル型制震ストッパー）の配置方法を検討することにした。

これらの制震デバイスを配置した後の構造に対して、レベル 2 地震動による時刻歴応答解析を実施して、その解析結果から得られる応答値が目標とする耐震性能を満足するように制震デバイスの諸元を検討することにした。

適切な諸元を設定した制震デバイスで補強した構造において、目標とした耐震性能を満足しないトラス部材を構成する鋼部材については、鋼板当て板工法での断面補強により、降伏もしくは座屈による塑性変形の発生を解消する検討をすることにした。

3.2.3 適用した設計地震動

本章の検討における動的解析で使用した入力地震動は、平成 24 年版の道示 V²⁹⁾の設計地震動（レベル 2、タイプ I および II）を対象橋梁の橋軸方向と橋軸直角方向に対して加震した。対象とする橋梁は、地盤種別が表-3.1 に示す通り、橋梁の振動単位における各橋脚位置で異なる地盤種別が混在する地盤条件であった。一つの振動単位に対して複数の地盤種別の入力地震動を作用させる解析手法として、地震動の速度や変位を下部構造から入力する手法があるが、標準的な手法とはなっていない。道示 V において、それぞれの地盤種別に対する地震動を下部構造の位置の地盤種別によらず共通に作用させて動的解析をおこない、慣性力を求めることとされている。この方針に従い、表-3.1 に示す全ての地盤種別の入力地震動ごとに時刻歴応答解析を実施した。本検討は、応答値が最も大きかった II 種地盤における解析結果を基に検討を実施した。地域区分は本橋の架橋地点が沖縄県であるため、表-3.2 に示す通り C 区分とした。

表-3.1 各橋脚位置における地盤種別

橋脚位置	地盤種別
P11 橋脚付近	I 種地盤
P12 橋脚付近	I 種地盤
P13 橋脚付近	II 種地盤, III 種地盤
A2 橋台付近	II 種地盤

表-3.2 道示Vにおける地域区分と地域別補正係数²⁹⁾

地域区分	地域別補正係数			対象地域
	c_z	c_{tz}	c_{tz}	
B2	0.85	1.0	0.85	鳥取県のうち米子市、倉吉市、境港市、東伯郡、西伯郡、日野郡 島根県、岡山県、広島県 徳島県のうち美馬市、三好市、美馬郡、三好郡 香川県のうち高松市、丸亀市、坂出市、善通寺市、観音寺市、三豊市、小豆郡、香川郡、綾歌郡、仲多度郡 愛媛県 (B1 地域に掲げる地域を除く。) 高知県のうち長岡郡、土佐郡、吾川郡 (いの町のうち旧伊野町の地区を除く。) 熊本県 (C 地域に掲げる地域を除く。) 大分県 (C 地域に掲げる地域を除く。) 宮崎県 (B1 地域に掲げる地域を除く。)
C	0.7	0.8	0.7	北海道のうち旭川市、留萌市、稚内市、紋別市、士別市、名寄市、上川郡 (上川総合振興局) のうち騰栖町、当麻町、比布町、愛別町、和寒町、剣淵町及び下川町、中川郡 (上川総合振興局)、増毛郡、留萌郡、苫前郡、天塩郡、宗谷郡、枝幸郡、礼文郡、利尻郡、紋別郡 山口県、福岡県、佐賀県、長崎県 熊本県のうち荒尾市、水俣市、玉名市、山鹿市、宇土市、上天草市、天草市、玉名郡、葦北郡、天草郡 大分県のうち中津市、豊後高田市、杵築市、宇佐市、国東市、東国東郡、速見郡 鹿児島県 (奄美市及び大島郡を除く。) 沖縄県

3.3 耐震性能を照査するための解析条件

3.3.1 解析方法

本章の検討における解析手法は、立体骨組モデルによる非線形動的応答解析とした。これは、地震時における横構や対傾構のような2次部材を含むトラス構造部材の動的な挙動を精度よく予測するためである。材料非線形特性は、ファイバーモデルにより応力-ひずみ関係を考慮した。鋼材およびコンクリートの応力-ひずみ関係は道示V²⁸⁾に示される通りとした。鋼材の応力-ひずみ関係は図-3.2に示し、鋼材の降伏応力度とヤング係数は表-3.3に示す。また、コンクリートの応力-ひずみ関係は図-3.3に示し、コンクリートの設計基準強度とヤング係数、鉄筋の降伏応力度は表-3.4に示す。時刻歴応答解析における時間積分にはNewmark β 法を用い、 $\beta=1/4$ とした。また、積分の時間間隔は、 $\Delta t=0.01$ 秒とした。

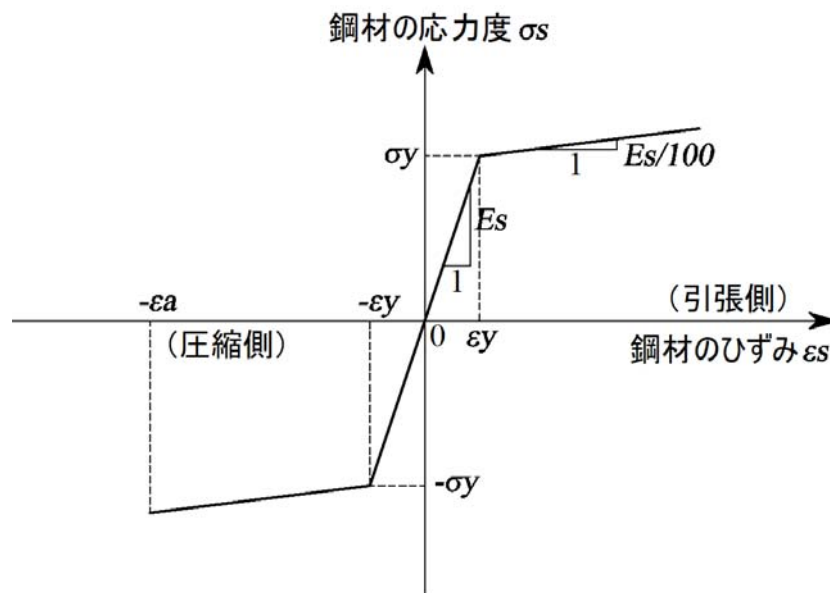
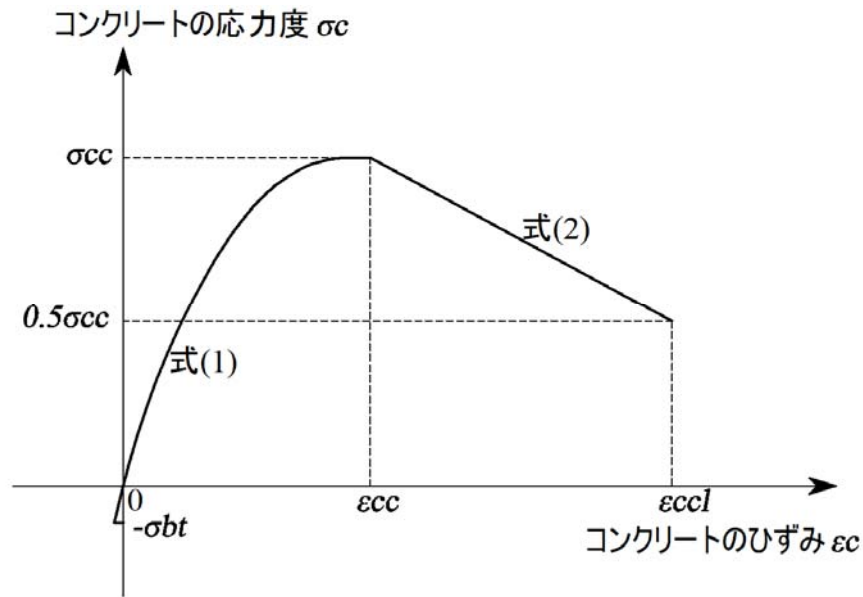


図-3.2 鋼材の応力-ひずみ関係

表-3.3 鋼材の降伏応力度とヤング係数

材質	ヤング係数 $E_s(\text{N/mm}^2)$	降伏応力度 $\sigma_y(\text{N/mm}^2)$	降伏ひずみ $\varepsilon_y(\mu)$
SS400(SS41),SM400	2.0×10 ⁵	235	1175
SM490Y(SM50Y)		355	1775
SM570(SM58)		450	2250



$$\sigma_c = E_c \varepsilon_c \left\{ 1 - \frac{1}{n} \left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{cc}} \right)^{n-1} \right\} \quad (0 \leq \varepsilon_c \leq \varepsilon_{cc}) \quad (3.1)$$

$$\sigma_c = \sigma_{cc} - E_{des} (\varepsilon_c - \varepsilon_{cc}) \quad (\varepsilon_{cc} \leq \varepsilon_c \leq \varepsilon_{ccl}) \quad (3.2)$$

図-3.3 コンクリートの応力-ひずみ関係

表-3.4 コンクリートの設計基準強度とヤング係数と鉄筋の降伏応力度

部位	設計基準強度 $\sigma_{ck}(\text{N/mm}^2)$	ヤング係数 $E_c(\text{N/mm}^2)$	使用鉄筋	鉄筋の降伏応力度 $\sigma_y(\text{N/mm}^2)$
下部構造躯体	24	2.50×10 ⁴	SD295A	295
巻立コンクリート	36	3.30×10 ⁴	SD345	345
床版	50	2.98×10 ⁴	SD345	345

3.3.2 解析モデル

本章の検討における解析モデルを図-3.4 に示す。各部材で設定した要素は、表-3.5 に示す通りである。以下に各部材のモデル化手法を詳述する。

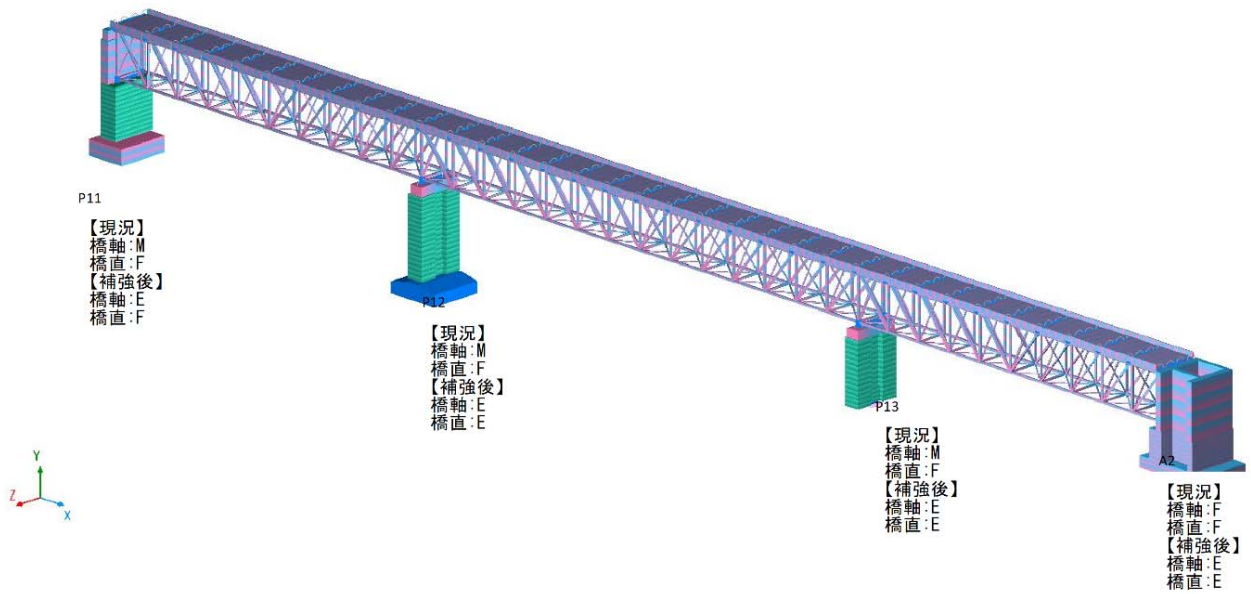


図-3.4 鋼トラス橋部分の解析モデル

表-3.5 各部材におけるモデル化の手法

部位		モデル化の手法
上部構造	上弦材	ファイバーモデル
	下弦材	ファイバーモデル
	斜材	ファイバーモデル
	鉛直材	ファイバーモデル
	対傾構	ファイバーモデル
	横構	ファイバーモデル
	コンクリート床版	ファイバーモデル
支承	現況：金属支承	固定支承：線形バネ要素 可動支承：バイリニアモデル
	補強後：免震支承	バイリニアモデル
制震ダンパー		速度依存型モデル
せん断パネル型制震ストッパー		トリリニアモデル
下部構造	橋台躯体	線形バネ要素
	橋台地盤－基礎	線形バネ要素
	橋脚柱躯体	ファイバーモデル
	橋脚地盤－基礎	線形バネ要素

(1) 橋脚のモデル化

鉄筋コンクリート断面である橋脚のモデル化は、躯体と地盤－基礎に対してそれぞれ次の通りとした。躯体については、既設柱断面によるファイバーモデルとしてモデル化した。基礎－地盤については、線形バネ要素を用いてモデル化した。

(2) 鋼トラス部材のモデル化

鋼断面のトラス部材のモデル化については、全部材をファイバーモデルとしてモデル化し、トラス格点は接合部における実構造の挙動を精度よく再現するために剛結合とした。ファイバーモデルの要素分割は、部材断面の大きさから幅方向を 10 分割程度、板厚方向を 4 分割程度とした。ファイバーモデルの要素分割の一例として、下横構における断面モデルを図-3.5 に示す。

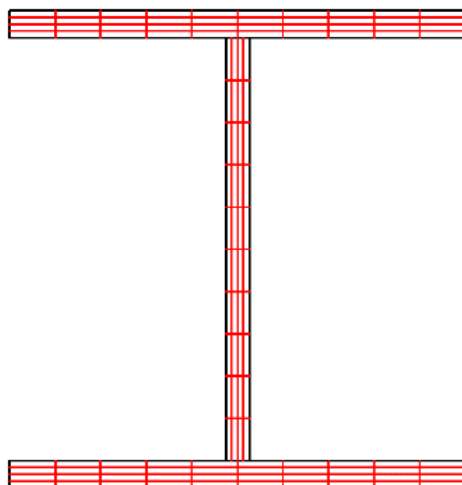


図-3.5 下横構におけるファイバーモデルの断面分割

(3) 支承および制震デバイスのモデル化

現況（支承取替前）の支承は、ピボット支承という鋼製支承であった。よって、固定支承は線形バネ要素によりモデル化した。また、可動支承はピボットローラー支承であった。よって、可動支承は摩擦による非線形履歴曲線を考慮した非線形バネ要素とした。可動支承の復元力モデルは、図-3.6 に示す通りで、摩擦係数 $\mu=0.05$ のバイリニアモデルとした。固定方向のバネ要素については、剛のバネ要素とし、初期剛性を $K_f=1.0 \times 10^6 \text{ kN/mm}$ とした。

補強後（支承取替後）の支承は、免震支承（高減衰型免震ゴム支承 HDR-S）を採用した。よって、免震支承は非線形バネ要素によりモデル化した。復元力モデルは、図-3.7 に示す通りでバイリニアモデルとし、各値は表-3.6 の通りとした。

制震ダンパーは、速度依存型の粘性ダンパーを橋軸方向の挙動に対して機能するように端支点部の下弦材と橋台を接続するように配置した。減衰力モデルは、速度依存性を考慮した減衰抵抗力として式(3.3)の通り設定した。採用した制震ダンパーは、動的解析による応答値より最大抵抗力が $F_{max}=2000 \text{ kN}$ 、ストローク $\pm 250 \text{ mm}$ の粘性ダンパーとした。減衰係数 C は、 $C=2413.5 \text{ kN} \cdot \text{s/m}$ とした。

$$F = CV^\alpha \quad (3.3)$$

ここで、 F ：減衰抵抗力 (kN)

C ：減衰係数 ($\text{kN} \cdot \text{s/m}$) ($=2413.5 \text{ kN} \cdot \text{s/m}$)

V ：相対速度 (mm/s)

α ：速度依存係数 ($=0.10$)

せん断パネル型制震ストッパーは、橋軸直角方向の挙動に対して機能するように端支点部における上弦材の横桁と橋台の間に配置した。復元力モデルは、図-3.8 に示す通りで移動硬化型のトリリニアモデルとし、各値は表-3.7 の通りとした。

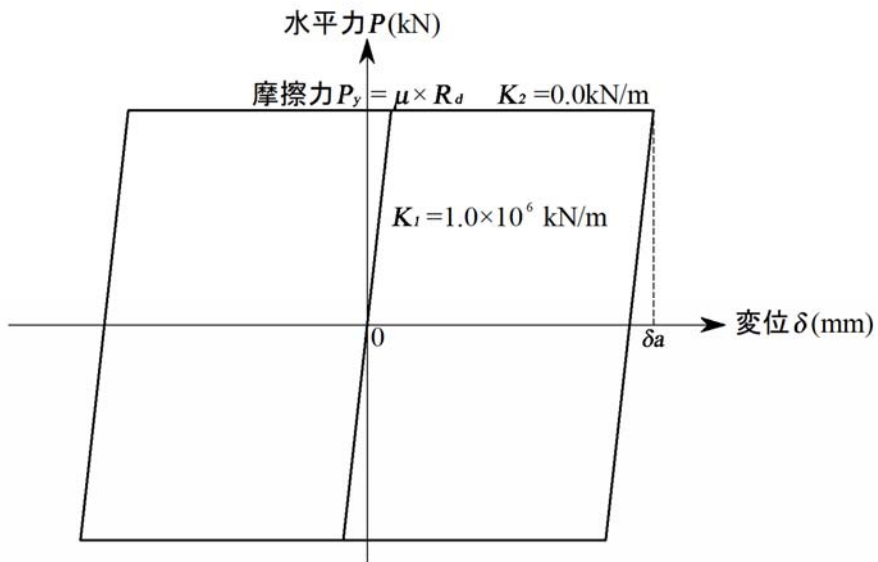


図-3.6 可動支承における非線形バネ要素の復元力モデル

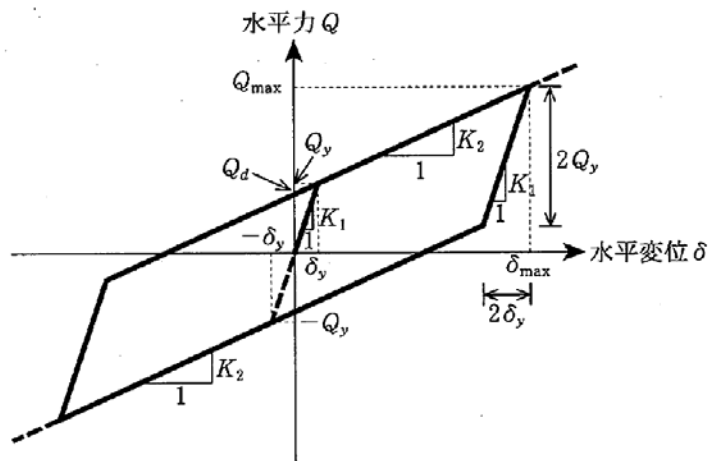


図-3.7 免震支承における非線形バネ要素の復元力モデル

表-3.6 免震支承の復元力モデルにおける水平力と水平変位の値

	降伏時の水平力 Q_y (kN)	降伏変位 δ_y (mm)	最大水平力 Q_{max} (kN)	最大変位 δ_{max} (mm)
P11 橋脚	490.8	8.3	1564.1	200
P12 橋脚	771.8	6.0	4388.4	300
P13 橋脚	810.8	6.2	1983.2	100
A2 橋脚	723.8	8.3	2306.6	199

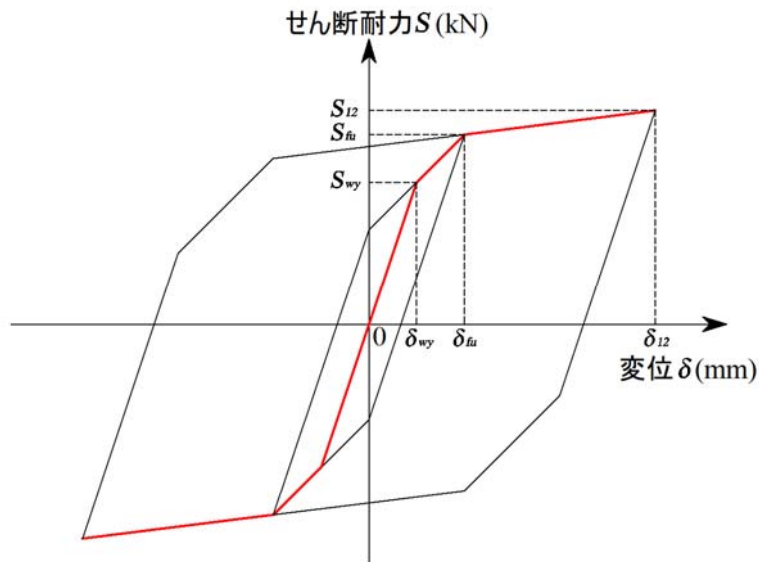


図-3.8 せん断パネル型制震ストッパーにおける非線形バネ要素の復元力モデル

表-3.7 せん断パネル型制震ストッパーの復元力モデルにおける水平耐力と水変位の値

	せん断降伏 耐力 S_{wy} (kN)	せん断降伏 変位 δ_y (mm)	全塑性耐力 S_{fu} (kN)	全塑性変位 δ_{fu} (mm)	限界耐力 S_{l2} (kN)	限界変位 δ_{pu} (mm)
P11 橋脚 A2 橋台	1818.7	0.844	2210.5	7.924	3132.1	60.0

(4) コンクリート床版のモデル化

コンクリート床版のモデル化は、質量を考慮するだけでなく、コンクリート床版を全断面有効とした剛性を考慮した線形梁要素としてモデル化した。コンクリート床版とトラス部材の縦桁との結合条件は、図-3.9 に示す通りとし、非合成設計であることからトラス橋の床組構造である縦桁とは合成断面として抵抗しないと仮定して、全ての回転方向が自由となるように接合条件を設定した。

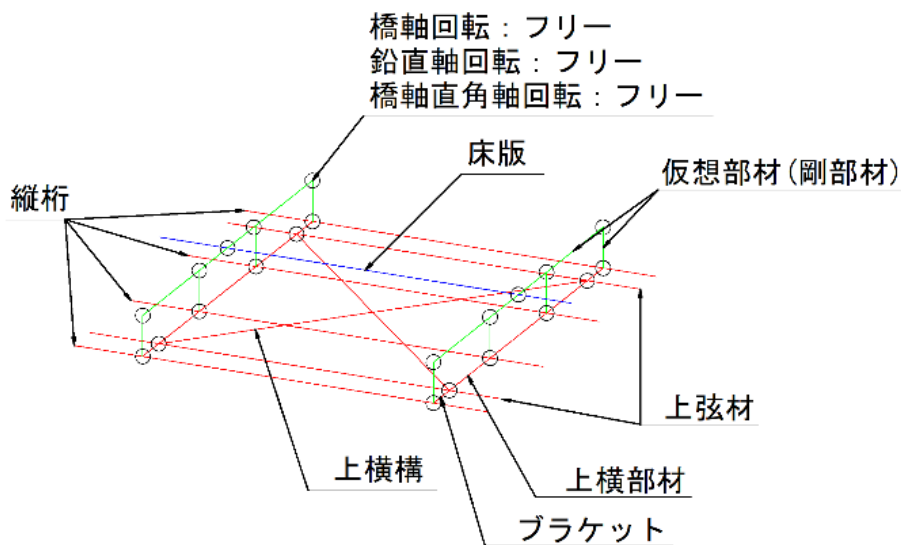


図-3.9 コンクリート床版とトラス部材の結合モデル

(5) 隣接橋梁の影響を考慮するためのモデル化

対象とする橋梁の P11 橋脚については、隣接橋梁である RC ホロー桁橋と掛け違い構造となっているため、P11 橋脚は RC ホロー桁の挙動が影響する構造となっていた。また、コンクリート床版は伸縮装置により接続されているため、伸縮装置による抵抗の影響や隣接橋梁との衝突による影響を確認することを目的として、対象橋梁に影響を与える隣接橋梁すべてを実際の橋梁形式を再現した骨組モデルとして考慮した。

3.4 耐震補強効果の検討結果

3.4.1 固有値解析の結果

まず、対象とする橋梁全体の固有振動特性を把握することを目的として、現況および補強後の橋梁モデルに対して固有値解析を実施した。固有値解析により得られた固有振動特性を表-3.8 と表-3.9 に示す。また、固有振動モードを図-3.10 と図-3.12 に示す。

現況のモデルにおける固有振動特性は、1 次モード（固有周期 $T=1.15$ 秒）で上部構造全体が橋軸方向に振動するモード形状を示しており、2 次モード（固有周期 $T=0.98$ 秒）で上部構造の中央径間の部分が橋軸直角方向に振動するモード形状を示していることがわかった。

次に、補強後のモデルにおける固有振動特性は、1 次モード（固有周期 $T=1.55$ 秒）で上部構造全体が橋軸直角方向に振動するモード形状を示しており、2 次モード（固有周期 $T=1.28$ 秒）で上部構造全体が橋軸方向に振動するモード形状を示していることがわかった。

現況のモデルと補強後のモデルの固有振動特性の変化を比較すると、橋軸方向および橋軸直角方向ともに支承の免震化の影響により、卓越する振動モードの固有周期が長周期化されていることがわかった。特に橋軸直角方向の振動モードについては、橋梁全体が 1 次モードで振動しているモード形状に変化しており、固有周期は 0.98 秒から 1.55 秒と 1.5 倍以上に長周期化されていることがわかる。

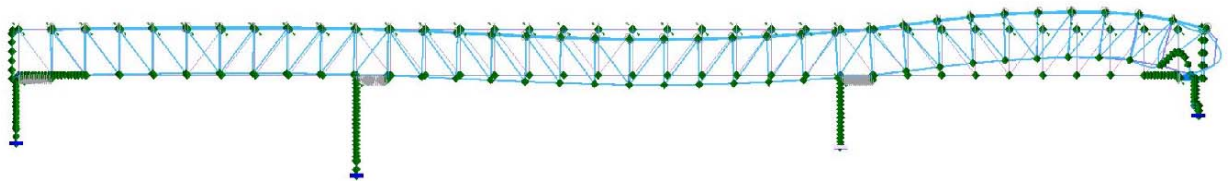
Rayleigh 減衰の設定は、図-3.11 と図-3.13 に示す通りで、1 つ目のモードは橋軸方向および橋軸直角方向でモード形状が 1 次モードとなる振動モード次数を選択し、2 つ目のモードは Rayleigh 減衰のグラフが過減衰にならない卓越モードを選択した。この理由として、過減衰になるモードを選択すると応答値が小さくなる傾向になるため、安全側の設計となるように減衰が小さくなるモードを選択した。

表-3.8 現況のモデルにおける固有振動特性

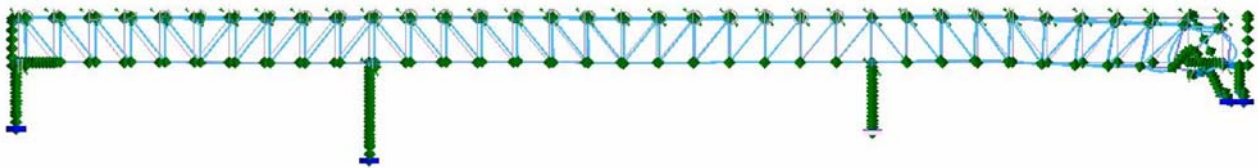
	振動モード次数	固有周期 T (秒)	固有振動数 f (Hz)	刺激係数			モード減衰 hi (%)	モード形状
				橋軸	鉛直	直角		
現況	1	1.15	0.87	-65.3	-2.3	0.0	2.5	橋軸方向 1 次
	2	0.98	1.03	0.0	0.0	44.9	3.2	橋軸直角方向 1 次
	3	0.89	1.12	11.0	22.0	0.0	2.0	
	4	0.73	1.37	0.0	0.0	-36.0	3.2	
	5	0.68	1.47	0.0	0.0	-44.4	3.2	橋軸直角方向 2 次
	17	0.28	3.64	57.1	1.5	0.7	9.4	橋軸方向 2 次

表-3.9 補強後のモデルにおける固有振動特性

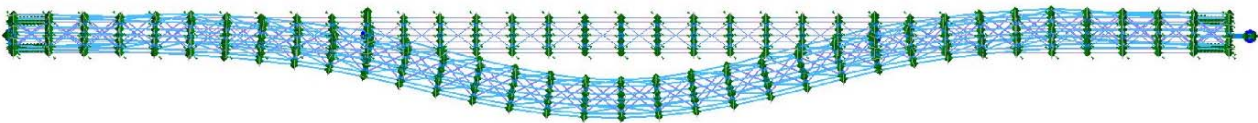
	振動モード次数	固有周期 T (秒)	固有振動数 f (Hz)	刺激係数			モード減衰 hi (%)	モード形状
				橋軸	鉛直	直角		
補強後	1	1.55	0.65	0.0	0.1	59.9	1.1	橋軸直角方向1次
	2	1.28	0.78	73.8	0.1	0.0	1.3	橋軸方向1次
	3	1.09	0.92	0.0	0.0	2.6	1.4	
	4	1.03	0.97	0.0	0.0	-49.2	2.7	
	5	0.89	1.12	0.0	20.9	0.0	2.0	
	8	0.82	1.22	0.2	0.2	34.7	2.0	橋軸直角方向2次
	39	0.24	4.12	36.8	-2.0	0.2	10.8	橋軸方向2次



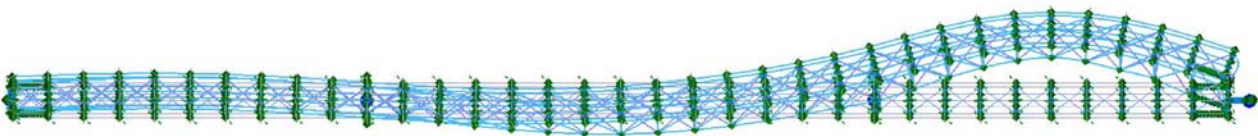
(a) 橋軸方向1次 (1次モード)



(b) 橋軸方向2次 (17次モード)

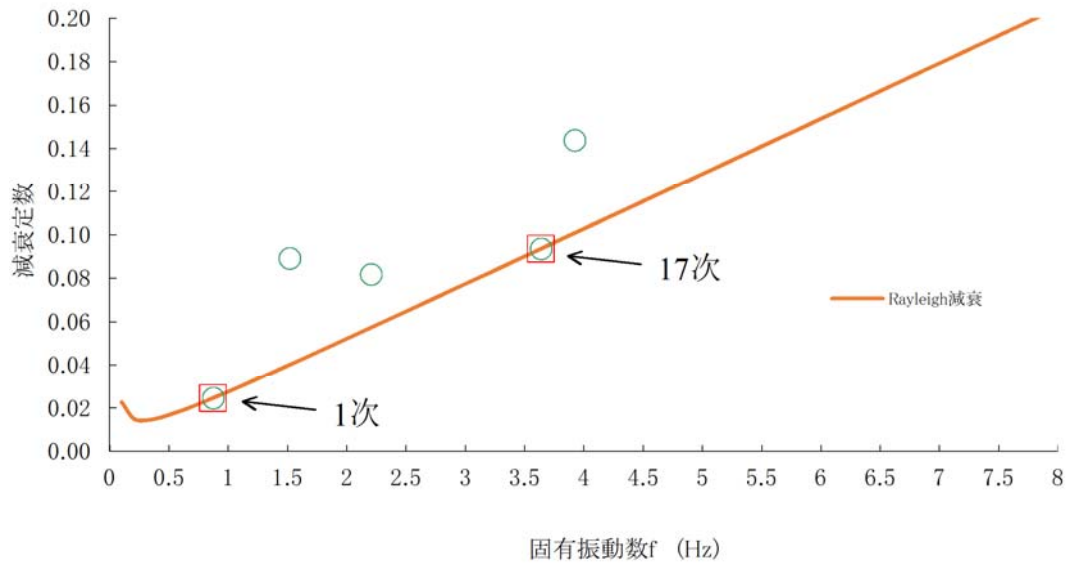


(c) 橋軸直角方向1次 (2次モード)

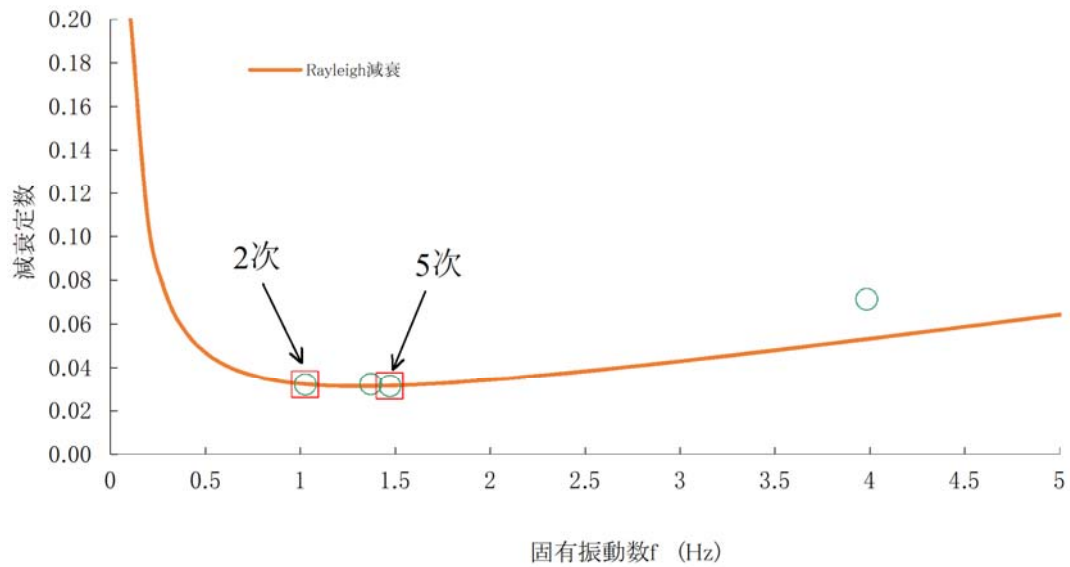


(d) 橋軸直角方向2次 (5次モード)

図-3.10 固有振動モード (現況モデル)

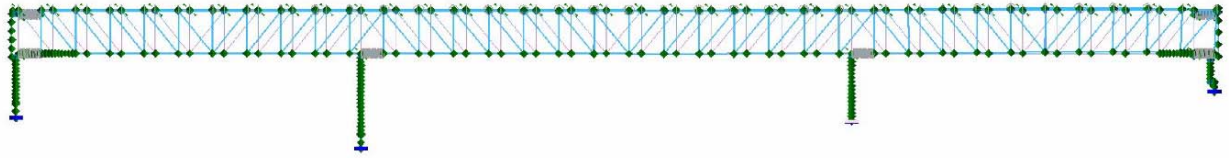


(a) 橋軸方向加震時

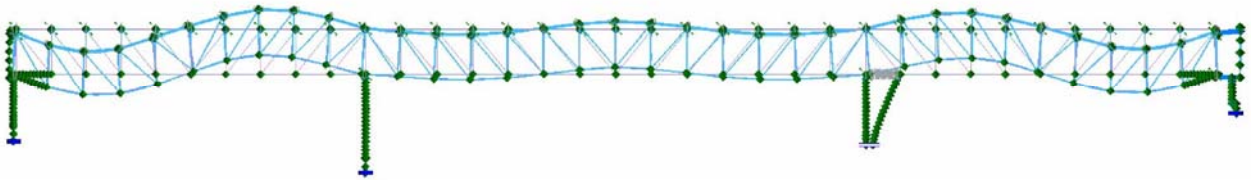


(b) 橋軸直角方向加震時

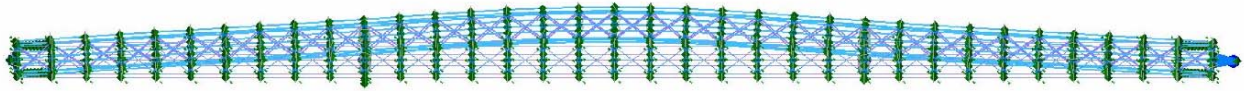
図-3.11 Rayleigh 減衰の設定 (現況モデル)



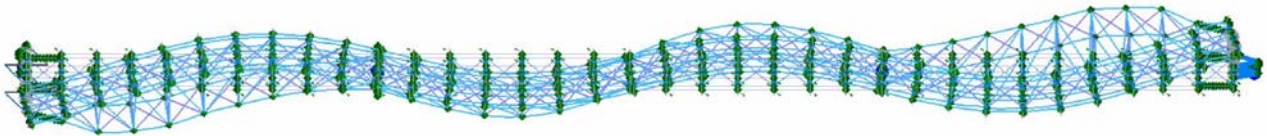
(a) 橋軸方向1次 (2次モード)



(b) 橋軸方向2次 (39次モード)

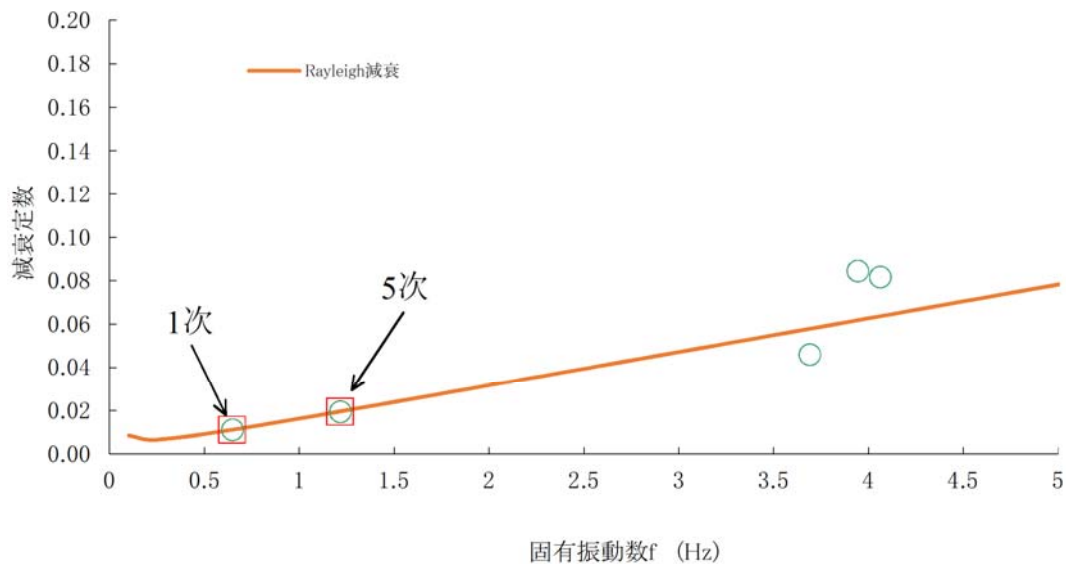


(c) 橋軸直角方向1次 (1次モード)

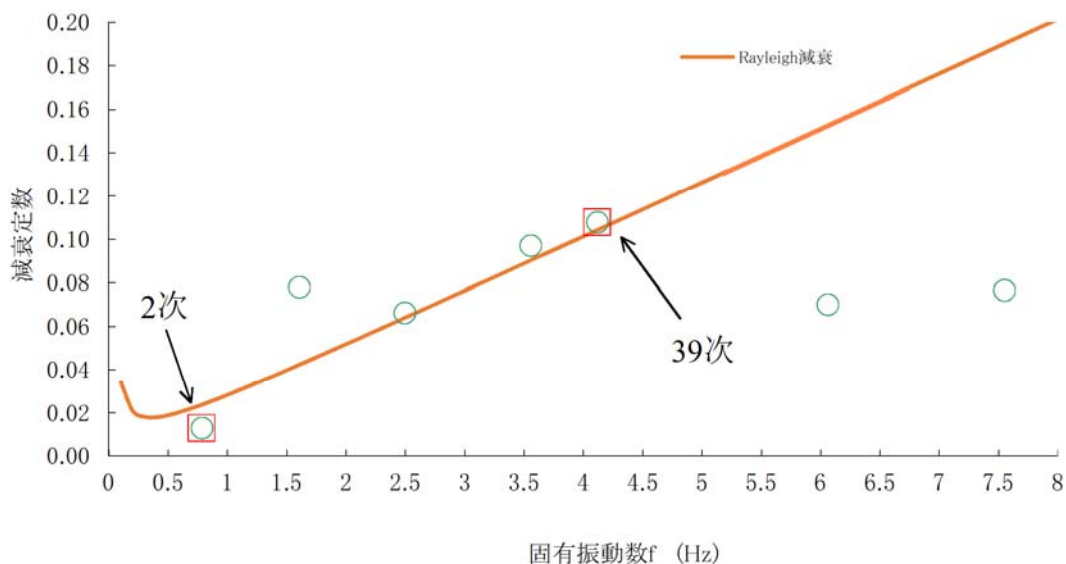


(d) 橋軸直角方向2次 (8次モード)

図-3.12 固有振動モード (補強後モデル)



(a) 橋軸方向加震時



(b) 橋軸直角方向加震時

図-3.13 Rayleigh 減衰の設定（補強後モデル）

3.4.2 現況における耐震性能の照査結果

まず、現況のモデルにおいて時刻歴応答解析を実施した。支承条件について、橋軸方向は A2 橋台の支承を固定支点とし、P11～P13 橋脚の支承を可動支点とした。また、橋軸直角方向は全ての支承を固定支点とした。

各部材の応答値に対する耐震性能の判定は表-3.10 に示す通りである。また、橋軸方向加震時および橋軸直角方向加震時において、許容値を超過している上部構造のトラス部材の分布は図-3.14 の通りである。橋軸方向加震時においては、下部構造（橋脚）、上部構造部材ともに発生応答値が許容値を超える結果となった。ここで、許容値とは、橋脚については橋脚基部に配置した塑性ヒンジにおける終局回転角、上部構造については、降伏耐力もしくは座屈耐力としている。トラス部材における上弦材、下弦材、斜材、鉛直材については、トラス格点部の結合条件を剛結構造としているため、断面力として、軸方向力と曲げモーメントが同時に発生していた。よって、これらの部材は軸方向力と曲げモーメントを受ける

部材として道示Ⅱ²⁸⁾の式(4.3.1)～(4.3.5)を用いて応力度の照査を実施した。また、支承の移動量についてもローラー可動部の移動可能量よりも大きな移動量が発生する結果となった。橋軸直角方向加震時には、上部構造部材の発生応答値が許容値を超える結果となった。橋脚については、RC 巻き立て工法による耐震補強がすでに実施されていたが、橋軸方向加震時において許容値を満足しない結果となった。本手法による照査では、これまでに実施された橋脚補強では現行基準の耐震性能を完全に満足する結果にはならなかった。

以上の結果より、現況の構造では現行の基準による耐震性能を満足していないことが判明した。よって、耐震補強により耐震性能を満足する構造物に改良する必要があることがわかった。

表-3.10 支承部の免震化および制震デバイスの追加による応答値の比較

検討ケース	現況		免震 (HDR-S)		免震 (HDR-S) +制震ダンパー +せん断パネル		免震 (HDR-S) +制震ダンパー +せん断パネル +当て板補強		
	橋軸方向	橋直方向	橋軸方向	橋直方向	橋軸方向	橋直方向	橋軸方向	橋直方向	
加震方向									
支承条件 ^{※1}	MMM	FFF	EEE	EEE	EEE	EEE	EEE	EEE	
固有周期(s)	1.15	0.98	1.30	1.54	1.28	1.54	1.32	1.55	
上部構造 の降伏 σ_n/σ_y	上弦材	0.84	0.79	0.81	0.80	0.80	0.80	0.79	0.79
	下弦材	1.28	0.86	0.56	0.80	0.79	0.87	0.79	0.88
	斜材	0.78	0.69	0.49	0.46	0.51	0.43	0.52	0.43
	鉛直材	0.52	1.11	0.39	1.04	0.40	0.52	0.40	0.51
	対傾構	1.88	4.31	1.41	4.19	0.61	1.67	0.50	0.95
	下横構	2.03	2.29	0.69	1.56	0.83	1.57	0.82	0.92
支承移動量 (橋軸) (mm)	142.1 > 132.5		238.2 > 200		190.1 < 200		199.0 < 200		
橋脚耐力 θ/θ_u	P11	1.23	0.03	0.27	0.01	0.39	0.01	0.42	0.03
	P12	2.17	0.86	0.78	0.05	0.77	0.05	0.79	0.03
	P13	1.14	0.38	0.60	0.03	0.59	0.03	0.62	0.01

※1：支承条件は、F：固定支点、M：可動支点、E：弾性支持支点を示す。

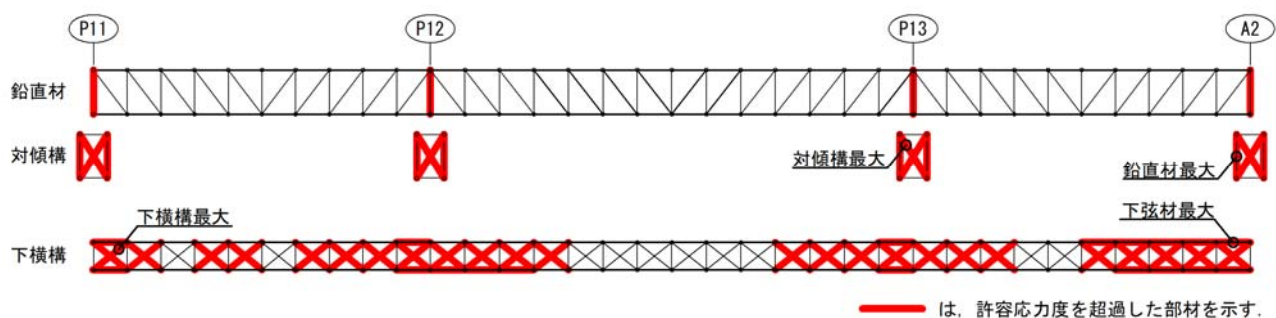


図-3.14 現況モデルにおける許容値を超過しているトラス部材の分布

3.4.3 耐震デバイスの選定

(1) 免震支承の設置効果および種類の選定

3.4.2における現況の耐震性能の照査結果より、まず、橋脚に発生する応答値を低減する必要があった。橋脚はすでに RC 巻き立て工法による耐震補強が施工されていたため、橋脚自体に更なる耐震補強を施工することはできなかった。そこで、支承の橋軸方向に対する免震化により橋梁全体の長周期化および各支点における水平反力分散化を図ることで橋脚に発生する応答値を低減することを試みた。免震支承の種類としては、鉛プラグ入り積層ゴム支承（以下、LRB）と超高減衰ゴム支承（以下、HDR-S）などがある。本章の検討では、これらの免震支承が対象橋梁に対して応答値（支承移動量および橋脚の塑性ヒンジにおける回転角）を低減する効果が高いかを確認するために比較検討を実施した。

表-3.11 に免震支承の履歴モデルにおけるバネ剛性と等価剛性の比較を示す。免震支承のパラメータは、ゴム支承の形状により決定される。新設橋梁であれば、ゴム支承の形状は自由に設定できるが、今回対象としているのは既設橋梁の支承から免震支承に取替えることを目的としている。そのため、既設支承よりも大きな支承は、設置することが不可能となるため採用できない。このように形状を制限された状態で最適な免震支承のパラメータを設定する必要があった。そこで、免震支承のパラメータを決定する条件として、橋脚の応答値が許容値を満足するように設定した。表-3.12 に橋軸方向加震時において各支点の支承移動量と各橋脚に発生する応答値（塑性ヒンジの回転角）の比較結果を示す。LRB は、支点の支承移動量を許容値（端支点部：桁遊間、中間支点部：ゴム支承の許容せん断ひずみに達した時の変形量）以下に低減する効果があることが確認できた。しかし、橋脚に発生する応答値は大きくなり許容値（塑性ヒンジの終局回転角）を上回る結果となった。HDR-S は、橋脚に発生する応答値を小さくすることができ、許容値以下に低減する効果があることが確認できた。しかし、端支点の支承移動量は大きくなり許容値である桁遊間を上回る結果となった。これらの結果の原因として、表-3.11 に示す通り LRB は、ゴム支承に内蔵されている鉛プラグによる減衰効果が高いため支承移動量を抑制する効果が高いが、バネ剛性が大きいと橋脚に発生する応答値は大きくなってしまったと推定することができる。HDR-S は、LRB より減衰効果は小さいがゴムの特性値と形状によりバネ剛性を小さくすることができたため、橋脚に発生する応答値を小さくすることが可能であったと推定することができる。また、固有周期を比較すると、LRB のケースが $T=1.15$ 秒に対して、HDR-S のケースが $T=1.30$ 秒となっており、HDR-S のケースの方が橋梁全体を長周期化できていることが確認できた。

以上の比較結果を踏まえて、支承を HDR-S とした場合における各部材に発生する応答値は表-3.10 の通りで、橋軸方向加震時において、支承による免震化と水平反力分散化の効果により、橋脚に発生する応答値を低減できることが確認できた。しかし、上部構造については、許容値を超過しているトラス部材の分布は図-3.15 の通りで、橋軸方向加震時においては応答値をある程度低減する効果が確認できたが、橋軸直角方向加震時においては支承の免震化をしていないため、上部構造の応答値を低減する効果がなかった。

以上の結果より、支承に HDR-S を採用することにより既に RC 巻き立て工法による補強が施工されている橋脚に対して更なる断面補強をする必要がなく許容値を満足することを確認できた。しかし、橋軸方向加震時における端支点部の支承移動量については、許容値を満足することができていない状態であるため、別途追加の対策により、応答値を抑制するための検討を実施することにした。また、橋軸直角方向加震時においては、支承の免震化をおこなわなかったため、上部構造の応答値を低減することができなかった。そのため、別途追加の対策により、橋軸直角方向加震時においてトラス部材に発生する応答値を抑制するための検討を実施することにした。

表-3.11 免震支承の履歴モデルにおけるバネ剛性および等価剛性の比較

免震支承 の種類	P11 橋脚			P12 橋脚,P13 橋脚			A2 橋台		
	1次剛性	2次剛性	等価剛性	1次剛性	2次剛性	等価剛性	1次剛性	2次剛性	等価剛性
	K_1 (kN/mm)	K_2 (kN/mm)	K_B (kN/mm)	K_1 (kN/mm)	K_2 (kN/mm)	K_B (kN/mm)	K_1 (kN/mm)	K_2 (kN/mm)	K_B (kN/mm)
LRB	128.7	19.8	46.342	211.7	32.6	74.380	133.8	20.6	48.015
HDR-S	94.1	9.0	7.129	131.7	12.6	17.372	94.1	9.0	11.516

※ K_1, K_2 は、図-3.7における剛性勾配を示す。

表-3.12 橋軸方向加震時における免震支承の固有周期と応答値の比較

免震支承 の種類	固有周期 T (秒)	P11		P12		P13		A2	
		支承 移動量 (mm)	橋脚耐力 θ/θ_u	支承 移動量 (mm)	橋脚耐力 θ/θ_u	支承 移動量 (mm)	橋脚耐力 θ/θ_u	支承 移動量 (mm)	橋脚耐力 θ/θ_u
LRB	1.15	105.6	0.32	58.6	1.51	112.5	1.53	108.9	—
HDR-S	1.30	230.9	0.27	164.2	0.78	191.1	0.60	238.2	—
判定	—	≤ 200	≤ 1.0	≤ 300	≤ 1.0	≤ 388	≤ 1.0	≤ 200	—

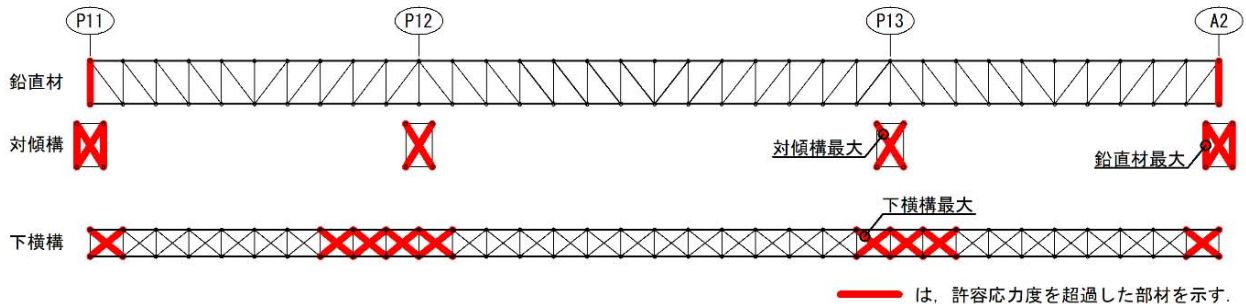


図-3.15 支承の免震化（HDR-S）したケースにおける許容値を超過しているトラス部材の分布

(2) 制震ダンパーの設置効果

橋軸方向加震時における端支点部は、支承を HDR-S に変更することにより支承の移動量が桁遊間を上回る結果となったため、支承の移動量を抑制する対策が必要となった。そこで図-3.16のように粘性型制震ダンパーを設置することによって、支承の移動量を抑制することができるかを検討した。制震ダンパーの設置位置については、橋脚の耐力に比較的余裕があり、なおかつ端支点部における支承の移動量の抑制効果が大きい配置を比較検討した。検討で採用した粘性型制震ダンパーの諸元は、3.3.2の(3)に示す通りである。表-3.13 に制震ダンパーの配置の違いによる橋脚の塑性ヒンジ部における応答値の比較を示す。CASE2 および CASE3 は比較的橋脚の耐力に余裕がある P13 橋脚に制震ダンパーを設置したケースであるが、制震ダンパーを設置することで P13 橋脚に慣性力が集中し、橋脚の応答値が増加し許容値を上回る結果となった。よって、CASE1 における P11 橋脚と A2 橋台に制震ダンパーを設置するケースが全ての橋脚において応答値が許容値を満足する結果となった。また、表-3.10 の橋軸方向加震時の結果が示す通り、制震ダンパーを設置することにより、支承の移動量が桁遊間以内の応答値となり、上部構造と下部構造が衝突することを回避できる構造にすることができた。

以上の結果により、制震ダンパーを P11 橋脚と A2 橋台に設置することにより支承の移動量を最も抑制する効果があることを確認できた。

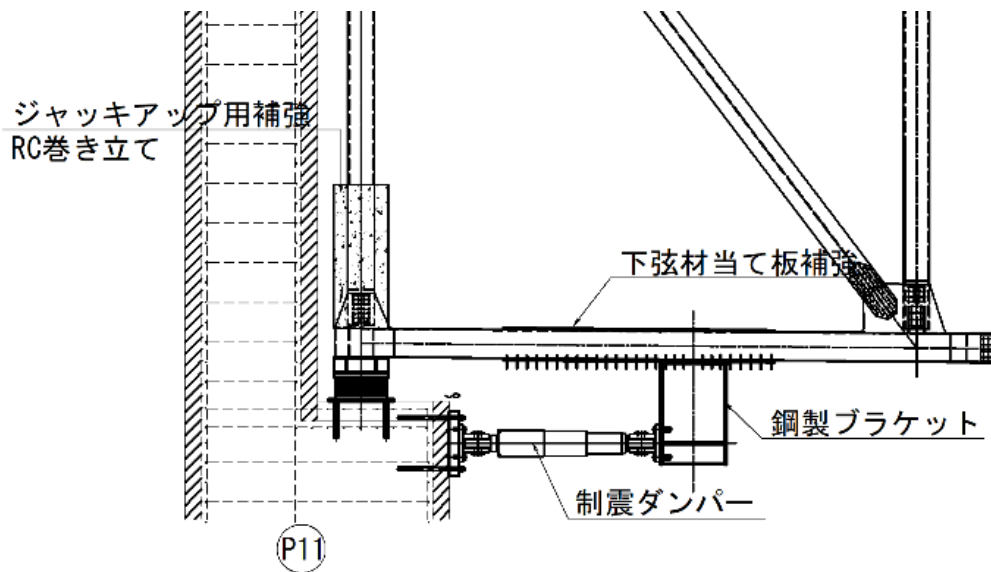


図-3.16 制震ダンパーの設置 (P11 橋脚)

表-3.13 制震ダンパーの配置の違いによる橋脚における応答値の比較

		CASE1	CASE2	CASE3
制震ダンパーの設置位置	P11	○	○	
	P12			
	P13		○	○
	A2	○		
橋脚の塑性ヒンジ部における 回転角の照査 θ/θ_u	P11	0.39	0.54	0.21
	P12	0.77	0.60	0.51
	P13	0.59	1.96	3.02
	A2	—	—	—

(3) せん断パネル型制震ストッパーの設置効果

橋軸直角方向加震時については、端支点部における鉛直材と対傾構に発生する応答値が許容値を上回る結果となっていた。また、支承に作用する反力についても大きな上揚力が発生している結果となっていた。端支点部においてこのような大きな応答値が発生していた原因は、トラス構造の形状的な要因が挙げられる。図-3.17 に示すようにトラス橋を断面方向に見た場合、コンクリート床版や橋面荷重による大きな慣性力が作用する位置（構造の重心位置）と支点位置の距離が大きいため、水平方向の慣性力が重心位置に作用すると支点である支承に大きな上揚力が発生することになる。

そこで、図-3.18 のように端支点部における上弦材側の横桁と下部構造のパラペットの間にせん断パネル型制震ストッパーを設置した。この構造にすることで、コンクリート床版や橋面荷重などの重量物により重心位置が近い上弦材側の挙動を抑制することができる。これにより、橋軸直角方向の地震力により発生する水平方向の慣性力をせん断パネル型制震ストッパーの変形性能により吸収する試みを実施した。検討に使用したせん断パネル型制震ストッパーの諸元は、表-3.7 に示す通りである。検討の結

果は、表-3.10 に示す通りである。端支点部における鉛直材および対傾構の応答値を低減する効果を確認できた。また、端支点部の支承において発生していた大きな上揚力についても、表-3.14 の橋軸直角方向加震時の結果が示す通り、せん断パネル型制震ストッパーの設置により、設計で最低限考慮すべき値である $0.3R_d$ (R_d : 死荷重反力)²⁹⁾を下回る値に低減する効果を確認できた。

しかし、中間支点の対傾構については、応答値の低減効果が認められたものの依然として許容値を上回る応答値が発生している状態であった。また、下横構については、せん断パネル型制震ストッパーの設置による応答値の低減効果は全くない結果であった。これらの原因として、端支点のように中間支点部付近では上弦材側の挙動を抑制できていないことが推測できる。

以上の結果より、せん断パネル型制震ストッパーの設置を設置することで端支点部における鉛直方向に作用する応答値に対して一定の低減効果が確認できた。

表-3.14 せん断パネル型制震ストッパーの設置による支点部に発生する上揚力の変化

	せん断パネル制震ストッパー設置前		せん断パネル制震ストッパー設置後	
	-0.3R _d	R _u	-0.3R _d	R _u
P11 橋脚	-1200	> -5654	-1200	≦ 842
P12 橋脚	-4935	≦ -1936	-4935	≦ -3033
P13 橋脚	-4935	≦ -4367	-4935	≦ -3236
A2 橋台	-1200	> -2493	-1200	≦ 876

※ (+) 方向は下向きを示す。(単位: kN)

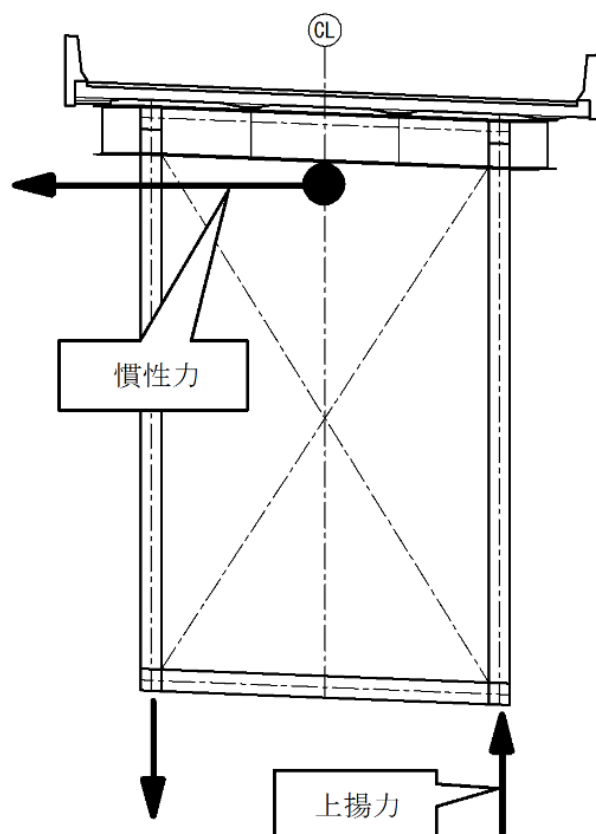


図-3.17 水平方向の慣性力作用位置と支点部における上揚力発生メカニズム

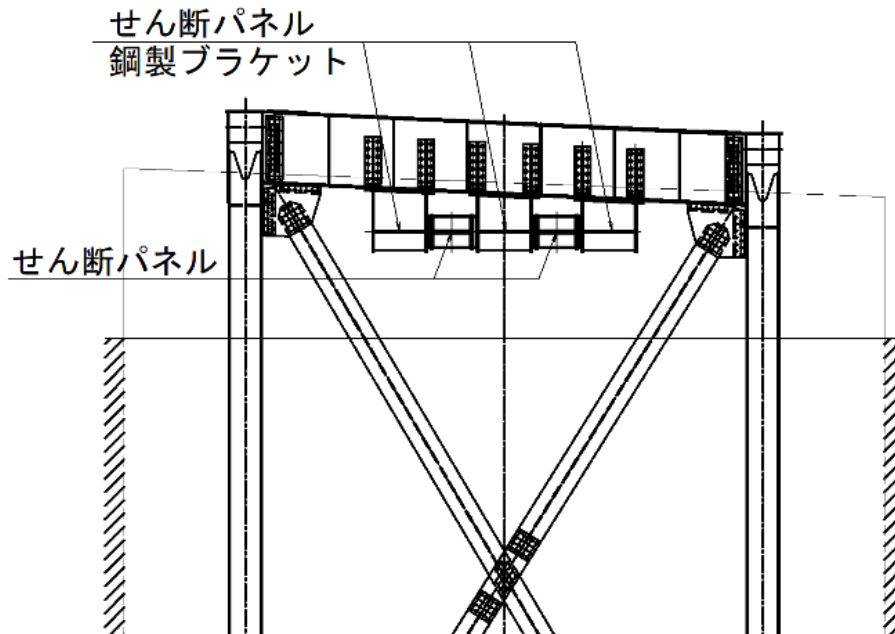


図-3.18 せん断パネル型制震ストッパーの設置

(4) 鋼板当て板工法による断面補強

上部構造における対傾構と下横構については、表-3.15 および表-3.16 で計算した発生応力度と図-3.19 部材の補強が必要な箇所が示す通り、これまでの耐震デバイスの設置による耐震補強でも許容値である降伏応力度および座屈により低減された応力度の制限値を上回る応力度が発生している部材が存在した。上部構造における鋼部材の断面については、塑性化を許容しない設計が原則となっているが、その理由として、道示V²⁹⁾の14.2.1解説と設計要領第二集【橋梁保全編】³⁰⁾の8章2-4-6で示されているように、上部構造の鋼断面部材を塑性化させた場合における研究の蓄積が少ないことにより未解明な部分が多くあることが挙げられる。そこで許容値を上回る応力度が発生している部材については、弾性挙動となるように鋼板当て板補強による断面補強を実施することにした。

鋼板当て板工法による断面補強量を決定するための方針は、次の通りとした。動的解析における部材の応答値は当該部材をファイバーモデルによりモデル化しているためそのモデルから算出された応力度で評価している。しかし、鋼板当て板補強の設計ではファイバーモデルから算出される応力度を使用せず、部材に発生する断面力から応力度を算出することにより補強量を決定した。その理由として、一般的にはファイバーモデルを使用しない動的解析や構造解析により断面力を算出してその断面力を使って断面計算する手法が簡単で効率的な方法になるからである。

以下に断面決定の手順を示す。

- ① 死荷重に対しては、鋼板当て板補強前の既設鋼断面のみが受け持つものとして、式(3.4)で応力度を算出する。

$$\sigma_d = \frac{N_d}{A_s} \quad (3.4)$$

ここで、 σ_d ：死荷重作用時における発生応力度(N/mm²)

N_d ：死荷重作用時における発生軸力(N)

A_s ：既設鋼断面における断面積(mm²)

- ② 地震による作用荷重については、既設鋼断面と鋼板当て板補強の合成断面で受け持つものとして、式(3.5)で応力度を算出する。

$$\sigma_{EQ} = \frac{N_{EQ}}{A_s + A_f} \quad (3.5)$$

ここで、 σ_{EQ} ：地震力作用時における発生応力度(N/mm²)

N_{EQ} ：地震力作用時における発生軸力(N)

A_f ：鋼板当て板補強分の断面積(mm²)

- ③ 補強後の合成断面に対する照査は、式(3.4)および式(3.5)から算出した発生応力度の合計値が許容応力度を満足することを式(3.6)により照査する。

$$\sigma_d + \sigma_{EQ} \leq 1.7 \times \sigma_a \quad (3.6)$$

ここで、 σ_a ：許容応力度(N/mm²)

- ④ 式(3.6)の照査における許容応力度は、今回対象とする部材が軸方向力のみが作用する部材のため、道示Ⅱ²⁸⁾の表-3.2.1 で示されている許容軸方向引張応力度と道示Ⅱの式(3.2.1)で示されている許容軸圧縮応力度とした。T形鋼の許容軸圧縮応力度については、フランジとガセットが高力ボルトにより連結された構造となっているため、道示Ⅱの式(4.5.1)により算出した。また、許容応力度の割増係数は、地震時として1.7を考慮した。
- ⑤ 鋼板当て板の補強部材と既設鋼部材の接合は、高力六角ボルト M22(F10T)を使用した摩擦接合とした。摩擦接合面の処理は、既設鋼部材側を1種ケレン相当とし、新設の当て板補強部材側をブラスト処理した鋼材面に無機ジンクリッチペイント 75 μ m を塗付する仕様とした。この組み合わせによる接合面の摩擦係数は、道示Ⅱ²⁸⁾では規定されていない。そこで既往の文献³²⁾における実験結果を参考にして摩擦係数を $\mu=0.4$ としてボルト1本あたりの許容力を算出し、必要ボルト本数を算出した。

以上の断面決定の手順を踏まえて、鋼板当て板工法の補強断面を決定した。鋼板当て板補強が必要な部材における補強後の断面を図-3.20に示す。補強後の断面諸元を表-3.17に、発生応力度を表-3.18に示す。鋼板当て板補強により、2つの補強効果が得られたことが確認できた。まず、部材の断面積が増加するため、発生応力度を低減する効果が確認できた。また、部材断面の断面2次半径が増加するため、全体座屈に対する耐荷力が向上して、許容軸圧縮応力度の制限値が増加することが確認できた。これら2つの補強効果により、対傾構と下横構における降伏もしくは全体座屈による塑性変形が発生しない構造に補強することができたと判断した。

また、鋼板当て板工法による断面補強を実施することで、対象部材における鋼材重量が増加することおよび部材の剛性が増加するため、それらの部材が接続される下弦材や鉛直材といった主要部材の応答値が増加することが懸念されたが、その増加量は表-3.10に示す通りわずかな増加であり、許容値を上回るような応答値の増加は発生しなかった。

表-3.15 対傾構および下横構における補強前の断面諸元

部材名称	断面タイプ	断面形状(mm)	材質	既設部材 断面積 $A_s(\text{mm}^2)$	有効座屈長 $L(\text{mm})$	断面2次半 径 $r(\text{mm})$	細長比 λ
下横構	①	H 252 × 244 × 11 × 11	SS400	7986	9727(9868)	60.6	160.4(162.7)
	②	CT 254 × 270 × 13 × 14	SS400	6900	9727	57.7	168.4
	③	H 270 × 302 × 16 × 14	SS400	12420	9868	65.0	151.7
	④	H 270 × 282 × 16 × 14	SS400	12140	9868	65.8	150.0
	⑤	H 255 × 250 × 14 × 14	SS400	10248	9868	61.5	160.5
対傾構	⑥	H 460 × 494 × 22 × 19	SM490Y	28790	5173	111.4	46.4

※()内の数値は、P12-P13間の部材を示す。

表-3.16 対傾構および下横構における補強前の発生応力度

部材名称	断面タイプ	補強前の断面力(kN)		補強前の発生応力度(N/mm ²)		
		死荷重時 N_d	地震時 N_{EQ}	死荷重時 σ_d	地震時 σ_{EQ}	合計 $\sigma_d + \sigma_{EQ} \leq 1.7 \times \sigma_a$
下横構	①	—	-624.1	—	-78.1	-78.1 > 62.9
	②	—	-363.1	—	-52.6	-52.6 > 38.9
	③	—	-896.7	—	-72.2	-72.2 > 68.7
	④	—	-882.3	—	-72.7	-72.7 > 69.9
	⑤	—	-648.1	—	-63.2	-63.2 > 62.9
対傾構	⑥	-2447.2	-6906.7	-85.0	-239.9	-324.9 > 276.8

※断面力および発生応力度において (+) は引張側, (-) は圧縮側を示す。

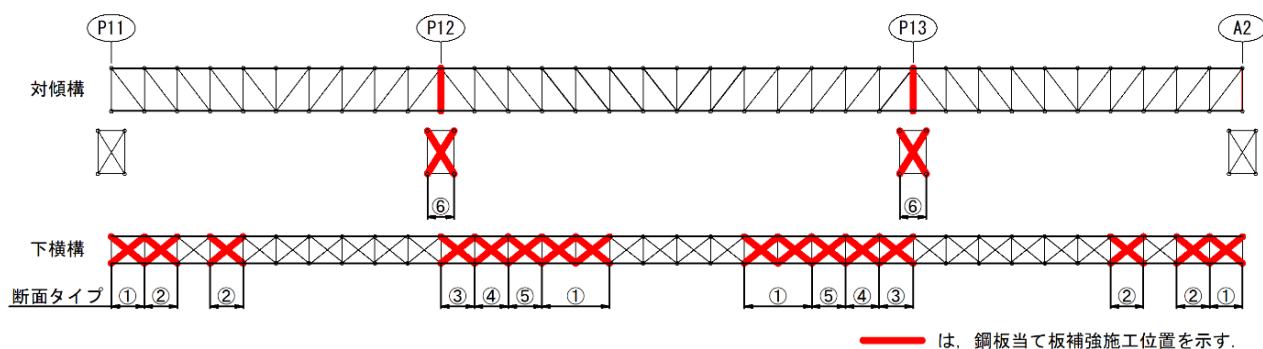


図-3.19 対傾構および下横構において鋼板当て板補強が必要な箇所

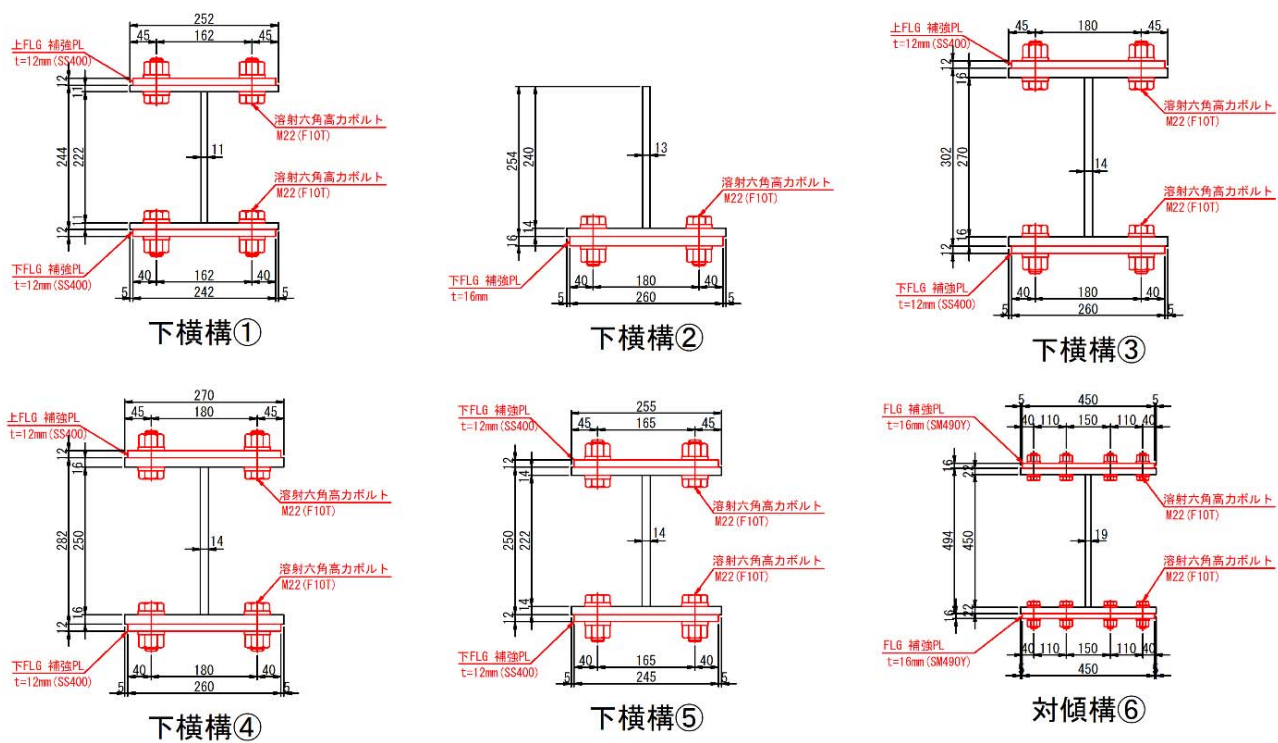


図-3.20 対傾構および下横構における鋼板当て板補強の断面形状（単位：mm）

表-3.17 対傾構および下横構における鋼板当て板補強の断面諸元

部材名称	断面タイプ	補強板の形状(mm)	材質	補強部材断面面積 $A_f(\text{mm}^2)$	有効座屈長 $L(\text{mm})$	断面 2 次半徑 $r(\text{mm})$	細長比 λ
下横構	①	2 - PL 242 × 12	SS400	5808	9727(9868)	63.5	153.2(155.4)
	②	1 - PL 260 × 16	SS400	4160	9727	63.9	168.4
	③	2 - PL 260 × 12	SS400	6240	9868	67.2	146.8
	④	2 - PL 260 × 12	SS400	6240	9868	67.8	145.5
	⑤	2 - PL 245 × 12	SS400	5880	9868	63.7	154.8
対傾構	⑥	2 - PL 450 × 16	SM490Y	14400	5173	114.9	45.0

※()内の数値は、P12-P13 間の部材を示す。

表-3.18 対傾構および下横構における補強後の発生応力度

部材名称	断面タイプ	補強後の断面力(kN)		補強後の発生応力度(N/mm ²)		
		死荷重時 N_d	地震時 N_{EQ}	死荷重時 σ_d	地震時 σ_{EQ}	合計 $\sigma_d + \sigma_{EQ} \leq 1.7 \times \sigma_a$
下横構	①	—	-676.9	—	-49.1	-49.1 ≤ 67.6
	②	—	-385.2	—	-34.8	-34.8 ≤ 44.5
	③	—	-832.2	—	-44.6	-44.6 ≤ 72.2
	④	—	-742.0	—	-40.4	-40.4 ≤ 73.2
	⑤	—	-598.8	—	-37.1	-37.1 ≤ 66.5
対傾構	⑥	-2447.2	-6688.9	-85.0	-154.9	-239.9 ≤ 280.4

※断面力および発生応力度において (+) は引張側, (-) は圧縮側を示す。

3.5 まとめ

対象橋梁である鋼3径間連続上路式トラス橋について、橋梁全体系の動的解析とその解析結果による耐震補強効果の検討として、支承取替による免震化および各種制震デバイスの設置検討および既設鋼部材の鋼板当て板補強の検討を実施した結果、以下の知見が得られた。

- 1) 支承取替により免震化と水平反力分散化による耐震補強として、取替後の支承に HDR-S を採用することで下部構造に発生する応答値を低減する効果を確認できた。しかし、端支点部における支承の移動量が大きくなり桁遊間を上回る移動量が発生する結果となった。上部構造の応答値に対しては、橋軸方向加震時においてはある程度の低減効果が得られたが、橋軸直角方向加震時においては免震化していないため低減効果がなかった。
- 2) 制震ダンパーを、端支点である P11 橋脚と A2 橋台に配置することにより、橋軸方向加震時における端支点部での支承の移動量を桁遊間より小さい移動量に抑制できることが確認できた。この移動量の抑制により、上部構造と下部構造の衝突を回避した構造にすることが可能となった。
- 3) せん断パネル型制震ストッパーを、端支点部である P11 橋脚および A2 橋台の上弦材側の横桁と下部構造の間に配置した。これにより、橋軸直角方向の地震力により発生する水平方向の慣性力をせん断パネル型制震ストッパーの変形性能により吸収することが可能となった。この結果により、端支点部における鉛直材と対傾構の応答値を低減する効果と支承に発生する上揚力を低減する効果が確認できた。
- 4) 上部構造において対傾構と下横構に発生していた降伏もしくは座屈による塑性変形に対する補強は、鋼板当て板により補強することにした。この補強により、部材の断面積が増加するため、発生応力度を低減することができた。また、部材の断面2次半径が増加することで許容軸圧縮応力度を増加（座屈耐荷力の向上効果）させることができた。この結果、部材の全体座屈による変形の発生を解消することが確認できた。
- 5) 鋼板当て板工法での断面補強により死荷重の増加および断面剛性が増加した。しかし、これらの増加による下弦材や鉛直材といった主要部材の応答値の増加はわずかであったことから、他の部材に対する応答値への影響はほとんどないことが確認できた。

今回得られた知見は、上路式トラス橋や上路式アーチ橋など本検討の対象橋梁に類似した構造形式の橋梁における耐震補強設計に対して、支承の免震化による耐震補強効果、粘性型制震ダンパーやせん断パネル制震ストッパーといった制震デバイスの最適な配置方法によって、同様の耐震補強効果が得られることを期待できる成果である。

3.6 耐震補強方法の課題

鋼板当て板工法による断面補強は、補強材の接合による死荷重の増加と断面剛性の増加に起因した応答値の増加が懸念される。今回対象とした橋梁については、応答値の増加はわずかであったが、橋梁の条件によっては、補強を実施することで他の部材の応答値が増加して、補強量が増加することが懸念される。

鋼板を既設鋼部材に接合する方法として、高力ボルトにより接合することになるが、ボルト孔を既設鋼部材にあらかじめ施工する必要があるが、一時的に既設部材に対して悪影響を与えることになる。また、高力ボルトによる接合以外の施工方法としては、溶接による接合が考えられるが、溶接は非常に大きな熱が施工時に発生するため、その熱影響による鋼材組成の脆化が課題となる。

鋼材以外の材料による鋼部材に対する断面補強方法として、炭素繊維材料に接着剤を含浸させて硬化

することで接着する方法，もしくはあらかじめ炭素繊維を含浸材で硬化させた材料を接着する方法が挙げられる．炭素繊維材料を用いた耐震補強は，コンクリート構造に対しては研究と実用化が進んでおり，施工実績も多くあるが，鋼部材に対する耐震補強として使用した研究事例は第2章でも述べた通り少なく，実績もほとんどないのが現状である．そこで，今回対象とした鋼トラス橋の耐震補強として，炭素繊維材料による断面補強が適用できないかが課題として挙げられる．

また，現行の基準では，鋼部材の座屈変形を耐震補強設計では原則許容していない．しかし，大規模地震時において，対傾構や横構といった2次部材に対して座屈変形が発生した場合はその変形性能による履歴エネルギー吸収効果が期待できることが予想される．これらの部材の座屈によるエネルギー吸収する手法を確立することが課題として挙げられる．

第4章 炭素繊維強化樹脂により補強した鋼板の補強効果

4.1 概要

鋼トラス橋は、鋼材を溶接で組み合わせた部材をトラス形状に組み立てた骨組み構造で構成されており、トラス部材に作用する力は部材軸方向に作用する軸力が支配的である。軸力の方向には、引張方向と圧縮方向がある。軸力が引張方向に作用する場合は、部材断面に一様に引張方向の応力度が発生するが、その応力度は降伏強度（以下、 σ_y ）に達すると剛性が低下し塑性変形が発生する。その後、引張強度（以下、 σ_u ）に達した後に鋼材断面は破断する。また、軸力が圧縮方向に作用する場合は、部材断面に一様に圧縮方向の応力度が発生する。断面が全体座屈が発生しない形状であれば、応力度は σ_y まで増加するため、降伏による塑性変形が発生する。しかし、断面が小さい場合もしくは部材長が大きい場合は応力度が σ_y に達する前に座屈変形が発生する。座屈変形は部材全体が座屈する全体座屈と部材を構成する板要素が部分的に座屈する局部座屈の2種類の座屈現象がある。特に全体座屈が発生して部材が面外方向に変形した後では、曲げ変形に類似した応力状態となることが推測される。つまり、部材を構成する鋼板が板要素として圧縮力が作用する部分および引張力が作用する部分が複合された状態になると推測される。

本章では、板要素としての鋼板を炭素繊維強化樹脂（以下、CFRP）で補強した場合の補強効果がどのようなになっているか確認することを目的として、矩形断面の鋼板をCFRPで補強した試験体を用いて、引張載荷試験、圧縮載荷試験、曲げ載荷試験を実施した。この実験は、トラス橋を構成する鋼製のH形部材にCFRPを用いて補強することで全体座屈に対する補強効果および座屈後の補強効果があることを確認するための基礎研究である。

本章の実験では、CFRPの破壊が発生する。ここでいうCFRPの破壊とは、炭素繊維の破断（以下、CFRPの破断）およびCFRP接着面の剥離（以下、CFRPの剥離）といった現象を総称している。

4.2 実験方法

4.2.1 試験体形状

引張載荷試験と圧縮載荷試験に使用した試験体の形状は図-4.1に、曲げ載荷試験に使用した試験体の形状は図-4.2に示す通りである。試験体の製作寸法は、幅50mm、厚さ9mm、長さ550mmの鋼板を使用した。使用した鋼板の材料諸元は、表-4.1に示す通りである。

表-4.1 鋼板の材料諸元

項目	単位	内容	備考
鋼種（材質）	—	SS400	JIS G 3101
ヤング係数 E_s	N/mm ²	2.0×10^5	設計値
ポアソン比 ν	—	0.3	設計値
板厚 t_s	mm	9	公称値
降伏強度 σ_y	N/mm ²	298 (235)	ミルシートの値（設計値）
引張強度 σ_u	N/mm ²	441 (400)	ミルシートの値（設計値）

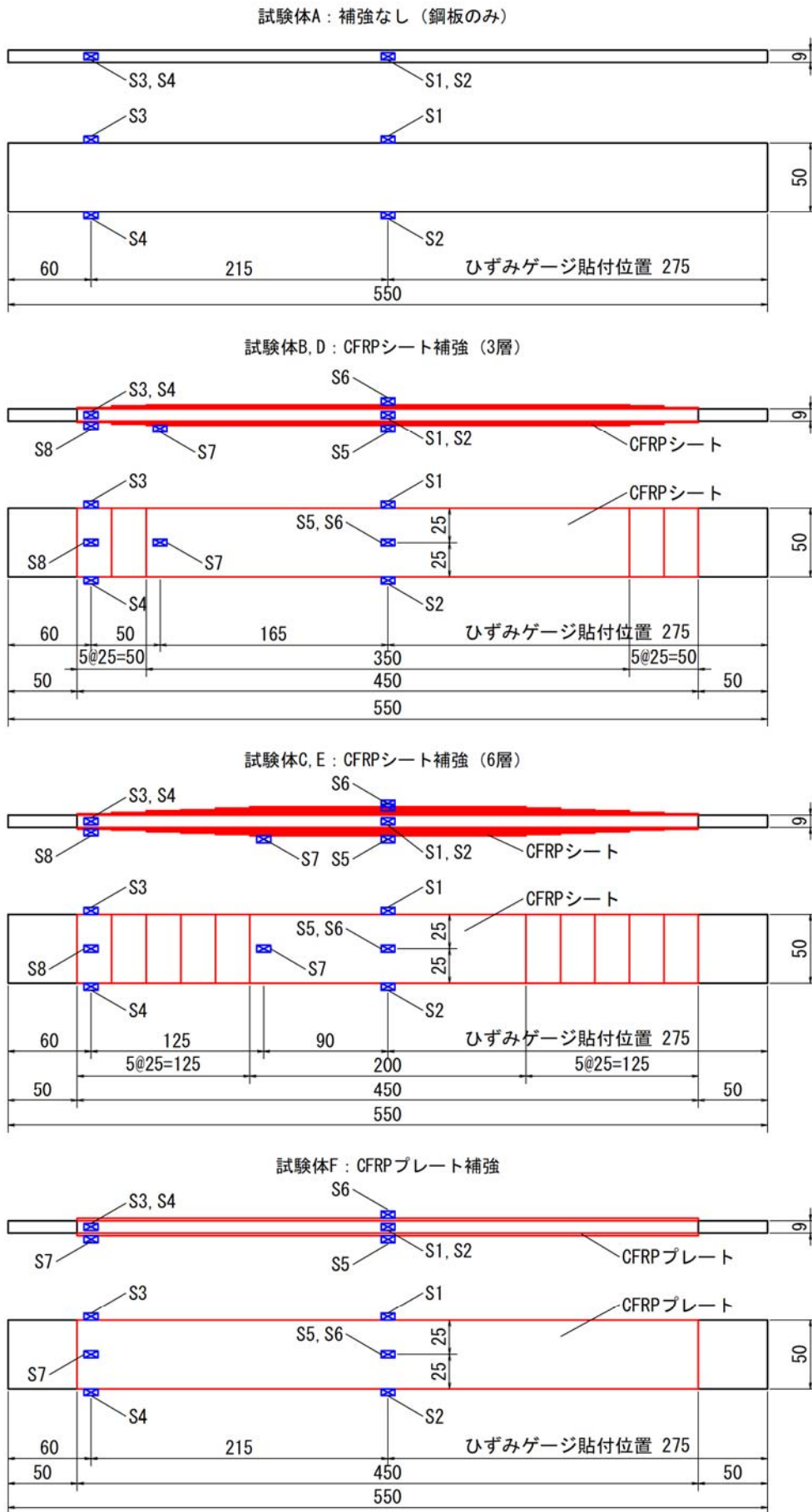


図-4.1 引張载荷試験および圧縮载荷試験における試験体形状とひずみゲージの貼付位置（単位：mm）

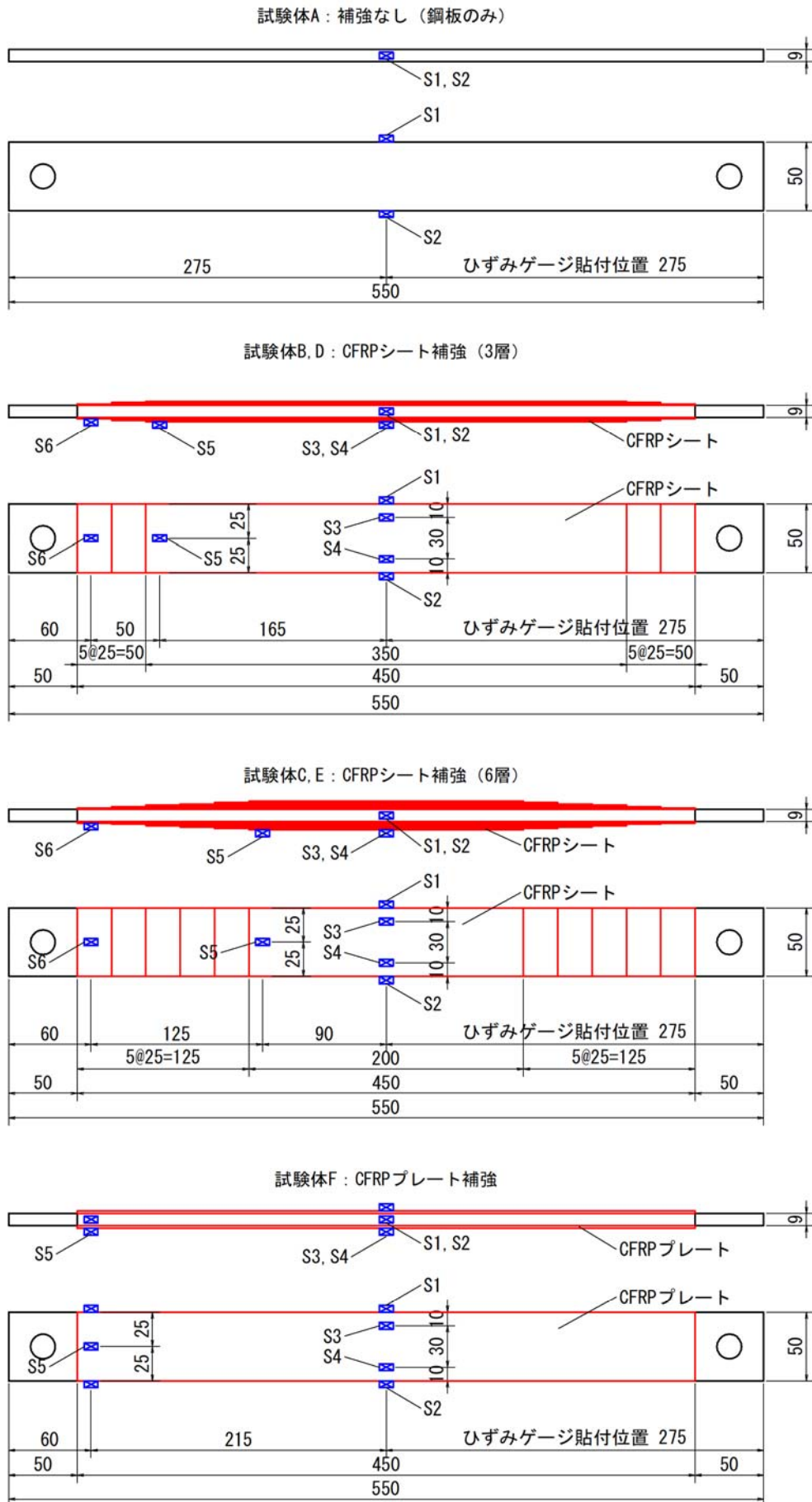


図-4.2 曲げ載荷試験における試験体形状とひずみゲージの貼付位置（単位：mm）

4.2.2 CFRP 補強材料

鋼板の補強に使用した炭素繊維材料の材料諸元は、表-4.2 に示す通りである。メーカー発行の試験成績書では引張方向の機械的性質のみが提供されており、圧縮方向の機械的性質についてはメーカーから提供された値はない。補強材料に使用した炭素繊維材料は、その機械的性質が補強効果に対してどのような影響があるかを確認するために繊維目付量が 300g/m^2 (設計値) の中弾性 CFRP シートと高弾性 CFRP シート、幅 50mm、板厚 2mm の高弾性 CFRP プレートの 3 種類とした。中弾性 CFRP シートと高弾性 CFRP シートは日鉄ケミカル&マテリアル株式会社の「トウシート」を、高弾性 CFRP プレートは三菱ケミカルインフラテック株式会社の「e プレート」を使用した。

炭素繊維材料を接着する樹脂の材料諸元は、表-4.3 に示す通りである。中弾性 CFRP シートと高弾性 CFRP シートの接着については、同じ種類の CFRP シート用含浸接着樹脂を使用した。また、高弾性 CFRP プレートの接着については、CFRP プレート用接着樹脂を使用した。

表-4.2 炭素繊維材料の材料諸元

項目	単位	中弾性 CFRP シート	高弾性 CFRP シート	高弾性 CFRP プレート	備考
製品名 (型番)	—	フォルカ トウシート (FTS-C5-30)	フォルカ トウシート (FTS-C8-30)	e プレート (HM520)	
繊維目付	g/m^2	306	325	—	メーカー発行の試験成績書
設計厚 t_{cf}	mm	0.165	0.143	2.0	設計値
引張ヤング係数 E_{cf}	N/mm^2	4.12×10^5	6.79×10^5	4.88×10^5	メーカー発行の試験成績書
引張強度 σ_{ucf}	N/mm^2	3502	2616	1504	メーカー発行の試験成績書
引張破断ひずみ ϵ_{ucf}	μ	8500	3853	3082	メーカー発行の試験成績書

※試験方法は、JIS A1191/JSCE-E541-2013 に準ずる

表-4.3 接着樹脂の材料諸元

項目	単位	CFRP シート用 含浸・含浸接着剤	CFRP プレート用 接着剤	備考
製品名 (型番)	—	含浸・接着樹脂 FR-E9P	エポサーム L-600 (鋼材用)	
引張強度	N/mm^2	73	28	試験方法は、JIS K7161 に準ずる
圧縮強度	N/mm^2	109	76	試験方法は、JIS K7181 に準ずる
引張せん断強度	N/mm^2	15.3	17.9	試験方法は、JIS K6850 に準ずる
鋼材接着強度	N/mm^2	12.6	31.4	試験方法は、JIS A6909 に準ずる
硬化物比重	—	1.18	1.80	試験方法は、JIS K7112 に準ずる

4.2.3 CFRP 補強方法

各種試験の実験ケースは、表-4.4 に示す通りである。各ケースにおける試験体数は 1 体ずつとし、補強の違いによる実験パラメータは CFRP の種類 (中弾性 CFRP シート、高弾性 CFRP シート、高弾性 CFRP プレート)、CFRP の積層数 (CFRP シート：片面当り 3 層と 6 層、CFRP プレート片面当り 1 枚)

とした。CFRP の種類と積層数については、後述する全体座屈挙動と座屈後の補強効果に関する実験で採用した条件に合わせている。

CFRP の補強範囲は、前掲の図-4.1 および図-4.2 に示す通りで幅方向は鋼板の幅と同じ 50mm とし、長さ方向については、試験体全長 550mm の端部 50mm ずつを残した 450mm の範囲とした。端部 50mm は試験機に試験体を固定するための部分である。また、CFRP 補強の積層に関しては、補強端部での応力集中を緩和するために 25mm のずらし範囲を積層ごとに設けた。CFRP の定着長は文献²³⁾の算出方法により 30~60mm 程度と仮定した。これらの補強範囲の方針により、CFRP の各積層における補強材の長さは表-4.5 の通りとし、CFRP の貼付面は、鋼板の両面とした。

表-4.4 各種試験における実験ケースおよび試験体一覧

ケース (種類, 積層数)		試験体番号			
		引張载荷試験	圧縮载荷試験	曲げ試験	
A	補強なし	A-t	A-c	A-b	
B	中弾性 CFRP シート	3 層	B-t	B-c	B-b
C		6 層	C-t	C-c	C-b
D	高弾性 CFRP シート	3 層	D-t	D-c	D-b
E		6 層	E-t	E-c	E-b
F	高弾性 CFRP プレート	F-t	F-c	F-b	

表-4.5 CFRP の積層における補強材の長さ

		1 層目	2 層目	3 層目	4 層目	5 層目	6 層目
中弾性 CFRP シート	3 層	450mm	400mm	350mm	—	—	—
	6 層	450mm	400mm	350mm	300mm	250mm	200mm
高弾性 CFRP シート	3 層	450mm	400mm	350mm	—	—	—
	6 層	450mm	400mm	350mm	300mm	250mm	200mm
高弾性 CFRP プレート		450mm	—	—	—	—	—

4.2.4 各種载荷試験における载荷条件と使用した試験装置

4.2.3 により CFRP 補強を施工した試験体に対して、万能試験機（定格荷重 300kN）を用いて 1 軸引張载荷試験、1 軸圧縮载荷試験、曲げ载荷試験を実施した。各载荷試験における試験状況は写真-4.1~写真-4.3 の通りである。試験体に対する载荷荷重の作用方法は、図-4.3 に示す通りである。引張载荷試験と圧縮载荷試験については、固定間距離が 450mm となるように両端を専用のつかみ具により固定してそれぞれ引張方向と圧縮方向に荷重を単調载荷した。曲げ载荷試験は、支間長が 500mm となるように専用の固定治具で単純梁として支持し、支間中央付近に対して専用の载荷治具で 100mm 間隔の位置に集中荷重を载荷した。

作用させた最大荷重については、引張载荷試験では試験体の鋼材部分が破断するまで変位制御により载荷した。圧縮载荷試験では試験体に全体座屈が発生し、その後 CFRP が破断もしくは剥離するまで変位制御により载荷した。曲げ载荷試験では試験体の鋼材部分が降伏し、その後 CFRP が破断もしくは剥離するまで変位制御により载荷した。

試験装置は、(株)島津製作所製の「オートグラフ AG-300kNX」を使用した。データの記録装置は、(株)東

京測器研究所製の「データロガーTDS-530」とノートパソコンを組み合わせで使用した。試験装置と記録装置の接続は、写真-4.4 に示す接続状況および図-4.4 に示すシステムブロック図の通りで、オートグラフからの入力である荷重・変位のデータを、試験体に貼り付けたひずみゲージからの入力であるひずみデータをデータロガーに内蔵されたスイッチボックスに接続し、データロガーと USB 接続したパソコンでデータの保存を実施した。



写真-4.1 引張载荷試験の実施状況



写真-4.2 圧縮载荷試験の実施状況



写真-4.3 曲げ荷重試験の実施状況

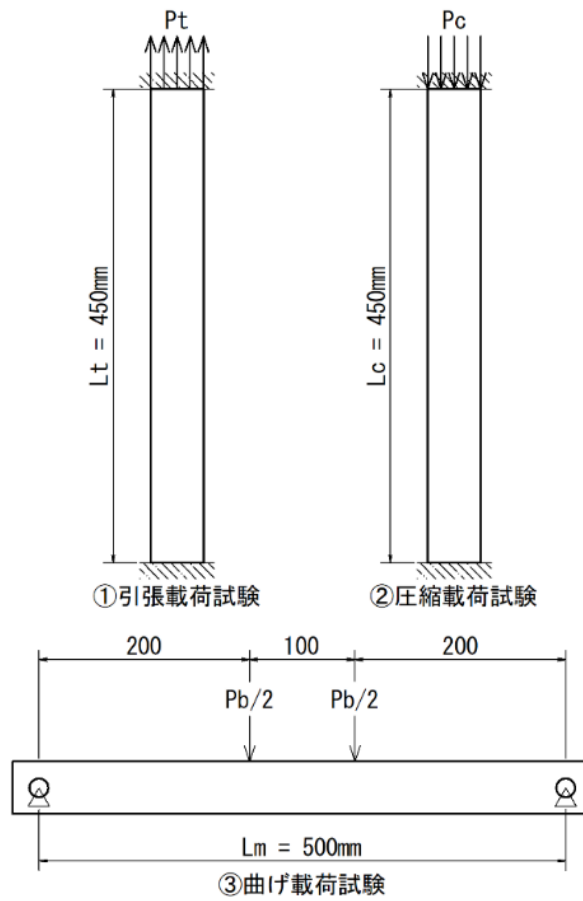


図-4.3 各荷重試験における荷重方法



写真-4.4 データロガー（TDS-530）およびパソコンの接続状況

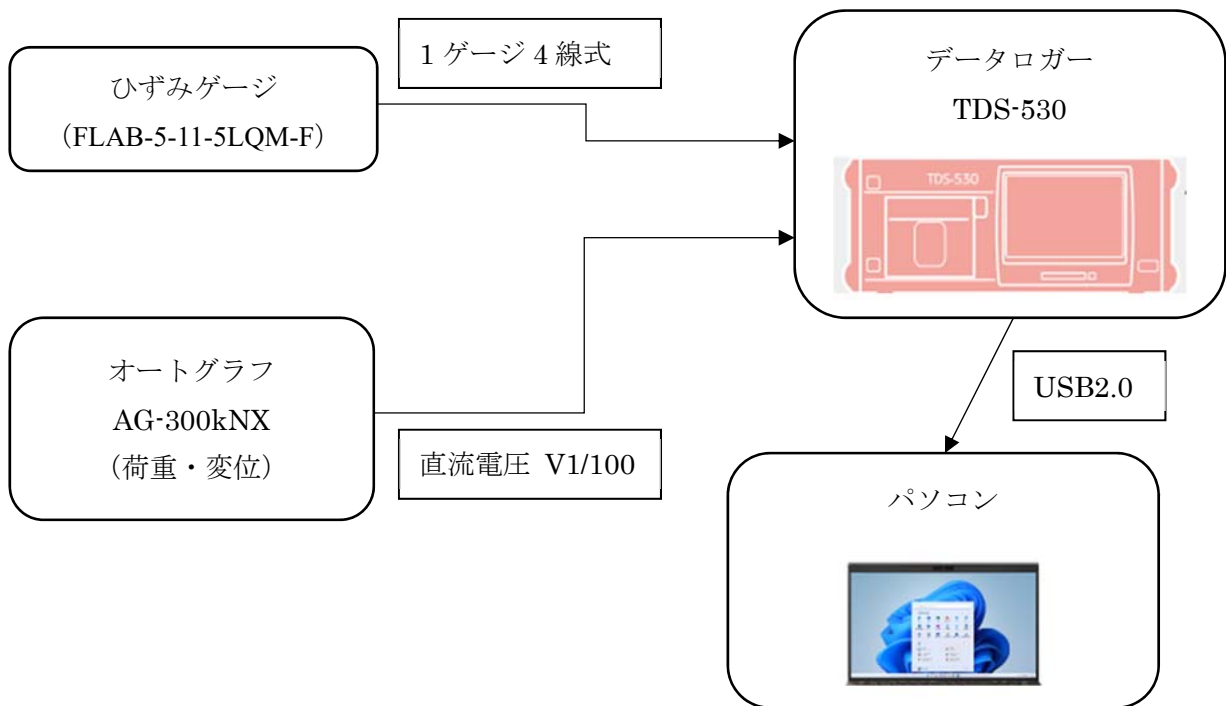


図-4.4 システムブロック図

4.2.5 試験体の計測項目と計測位置

各試験における計測項目は、表-4.6 の通りである。ひずみ測定に使用したひずみゲージは、(株)東京測器研究所の一般用ひずみゲージ「FLAB-5-11-5LQM-F」を使用した。ひずみゲージの貼付位置は、前掲の図-4.1 および図-4.2 の通りで、鋼材部分の計測位置は、板厚面で試験体の中央付近と端部付近とし、CFRP部の計測位置は、CFRP面の試験体中央付近、端部付近および最終層の端部付近とした。

表-4.6 各試験における計測項目

試験体 ケース	引張荷重試験			圧縮荷重試験			曲げ荷重試験		
	A	B~E	F	A	B~E	F	A	B~E	F
荷重	1項目	1項目	1項目	1項目	1項目	1項目	1項目	1項目	1項目
部材方向 の変位	1項目	1項目	1項目	1項目	1項目	1項目	1項目	1項目	1項目
鋼材部分 のひずみ	4箇所	4箇所	4箇所	4箇所	4箇所	4箇所	2箇所	2箇所	2箇所
CFRP 表面 のひずみ	—	4箇所	3箇所	—	4箇所	3箇所	—	4箇所	3箇所

4.3 実験結果と考察

4.3.1 引張荷重試験の結果

引張荷重試験で得られた降伏荷重 P_{ty} 、降伏応力度 σ_y および CFRP 補強による降伏荷重の変化率を表-4.7 に示す。また、鉛直荷重 P_t と鉛直変位の関係を図-4.5 に示す。いずれの試験体でも降伏荷重 $P_{ty}=133.2 \sim 135.3\text{kN}$ であり、CFRP の補強により降伏荷重が増加することはなかった。また、降伏応力度の平均値は $\sigma_y=297.8\text{N/mm}^2$ であった。表-4.1 におけるメーカー発行のミルシートに記載された降伏応力度とほぼ一致する値が得られている。このことより、鋼材の降伏は補強端部の未補強部分から降伏が始まったことが推定できる。

次に、降伏荷重に達した時の鋼材に発生しているひずみを表-4.8 に示す。試験体中央におけるひずみ S_1 , S_2 の値に着目すると、補強していない試験体 A についてはひずみ値が降伏ひずみの値を全体的に大きく超えていることがわかる。それに対して、CFRP 補強した試験体 B~F はいずれも降伏ひずみの値より小さいひずみ値であった。この傾向は、CFRP の補強層数が多い試験体の方がより小さくなっており、中弾性 CFRP シートによる補強では 9~14%、高弾性 CFRP シートによる補強では 11~12% 小さくなっていった。また、中弾性 CFRP シートにより補強した試験体より高弾性 CFRP シートにより補強した試験体の方が 4~10% 小さくなっていった。このことより、CFRP 補強によりひずみ値の増加を抑えられており、鋼材に発生するひずみに対する補強の効果を確認することができた。また、CFRP 補強したケース B~F において、試験体中央付近のひずみ S_1 , S_2 と試験体端部のひずみ S_3 , S_4 の値を比較すると端部の方は降伏ひずみに近い値もしくは降伏ひずみを大きく超えた値となっている。それに対して補強していない試験体 A については試験体の箇所に関係なく一様に近いひずみ値となっている。このことより、CFRP 補強した鋼材の降伏変形は未補強部分である端部において発生していたことがわかる。このことは、写真-4.5 と写真-4.6 に示す CFRP 補強の剥離状況からも、降伏変形が補強区間に進展するにつれて CFRP の剥離が発生していたことが確認できる。この CFRP 補強の剥離は、鋼材と CFRP の剛性の違いに起因する伸びの差で接着面の破壊が発生したことが原因である。この剥離現象は、CFRP の補強層数および種類に関係なく全ての補強ケースで発生している。CFRP 補強の剥離が発生した時の CFRP 表面に発生しているひずみを表-4.9 に示す。試験体の端部において、CFRP の剥離が発生するまでは鋼材の降伏ひずみに近いひずみかそれ以上のひずみが一時的に発生しているが、端部で CFRP の剥離が発生すると試験体中央に向かって剥離が進展し、試験体中央付近では 1000μ 程度のひずみ値で剥離が発生していた。このことから、鋼材端部の未補強部における降伏変形により CFRP 補強の剥離が発生しているこ

とが確認できる。

以上の結果より、引張荷重が作用する CFRP 補強した鋼材については降伏荷重が作用することで CFRP 補強が剥離するため、鋼材の塑性化（降伏）を許容しないことを補強設計の前提条件とするか、もしくは鋼材の塑性化が発生した後において CFRP 補強が剥離しないようにする対策が必要となる。CFRP の剥離を防止する対策の一つとして、高伸度弾性パテ材を鋼材と CFRP 補強の間に施工する方法が有効であることが既往の研究^{22~25)}で明らかになっている。

表-4.7 引張載荷試験の結果一覧

試験体	降伏荷重 P_{ty} (kN)	降伏応力 σ_y (N/mm ²)	補強による変化率 (%)	CFRP の剥離
A-t	133.7	297.1	—	
B-t	134.1	298.1	0.3	○
C-t	135.9	302.1	1.7	○
D-t	132.8	295.1	-0.7	○
E-t	132.2	293.8	-1.1	○
F-t	135.3	300.8	1.2	○

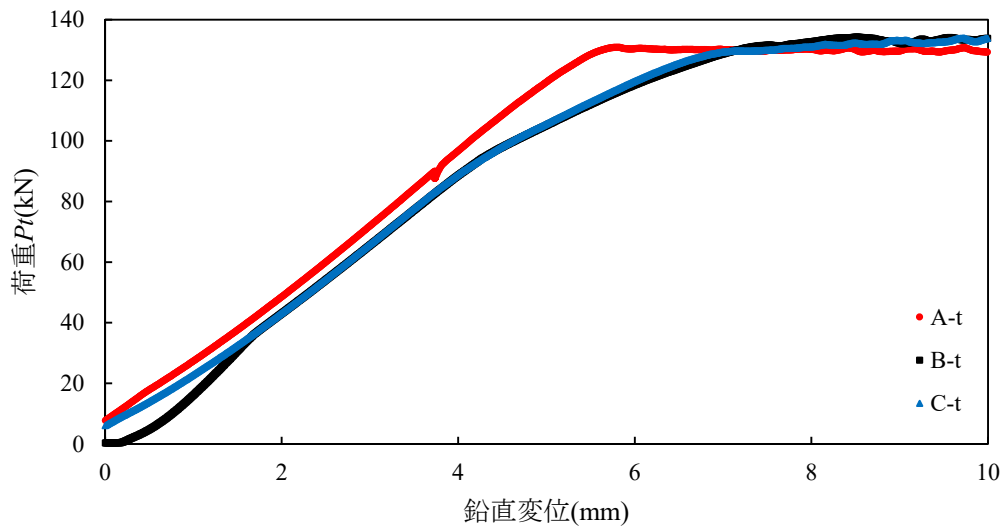
表-4.8 降伏荷重に達した時の鋼材に発生しているひずみ（単位： μ ）

試験体	試験体中央付近		試験体端部付近	
	S1	S2	S3	S4
A-t	4031(2.71)	3486(2.34)	3641(2.44)	2533(1.70)
B-t	1211(0.81)	1277(0.86)	2725(1.83)	1516(1.02)
C-t	1079(0.72)	1071(0.72)	21954(14.73)	20017(13.43)
D-t	1150(0.77)	1132(0.76)	1723(1.16)	3731(2.50)
E-t	978(0.66)	951(0.64)	1541(1.03)	13327(8.94)
F-t	730(0.49)	798(0.54)	1411(0.95)	6094(4.09)

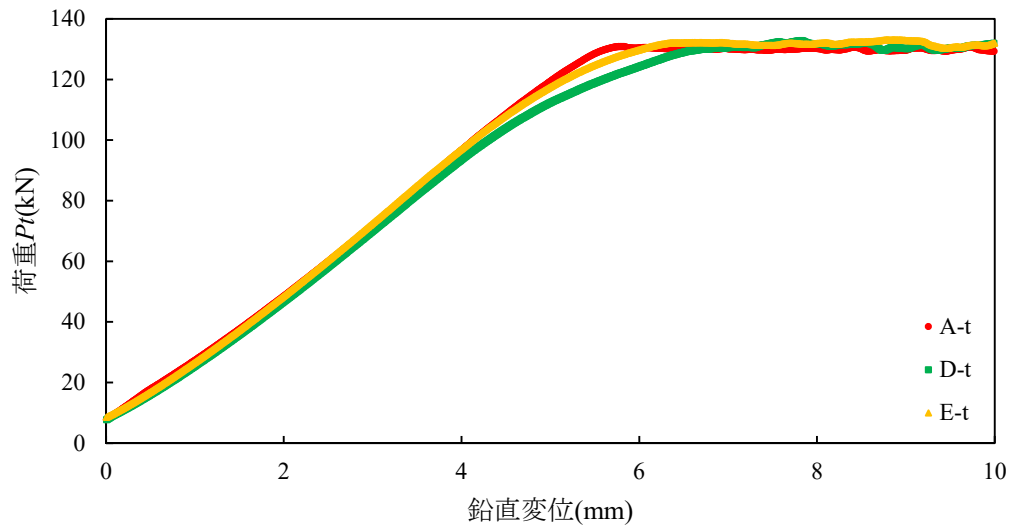
※()内の数値は、鋼材の降伏ひずみ $\epsilon_y=1490\mu$ に対する比率を示す。

表-4.9 CFRP の剥離が発生した時の CFRP 表面に発生しているひずみ（単位： μ ）

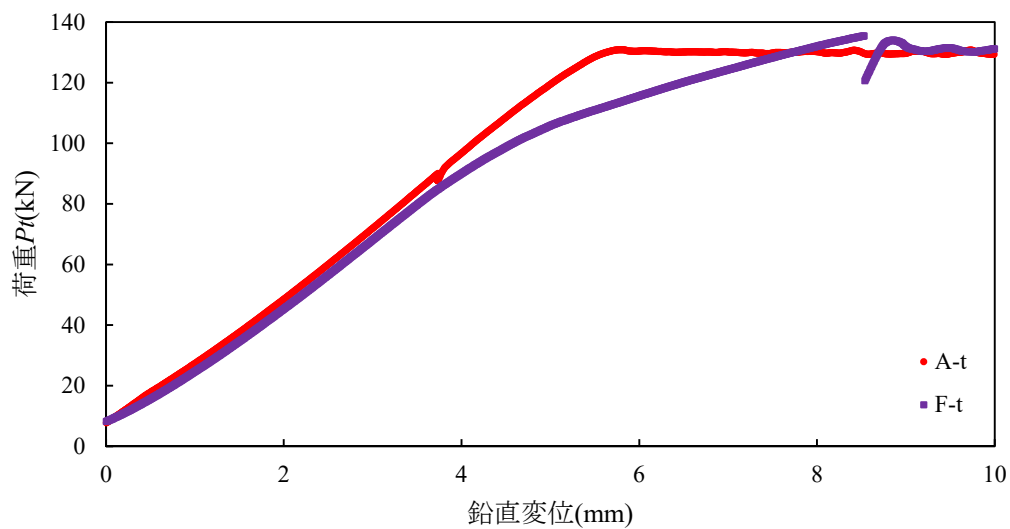
試験体	試験体中央付近		試験体端部付近	
	S5	S6	S7	S8
B-t	1179	1250	1013	1351
C-t	1087	1034	908	2610
D-t	1175	1119	951	1877
E-t	945	921	700	1301
F-t	842	724	230	—



(a)試験体 A-t, B-t, C-t



(b)試験体 A-t, D-t, E-t



(c)試験体 A-t, F-t

図-4.5 引張載荷試験における鉛直荷重—鉛直変位関係

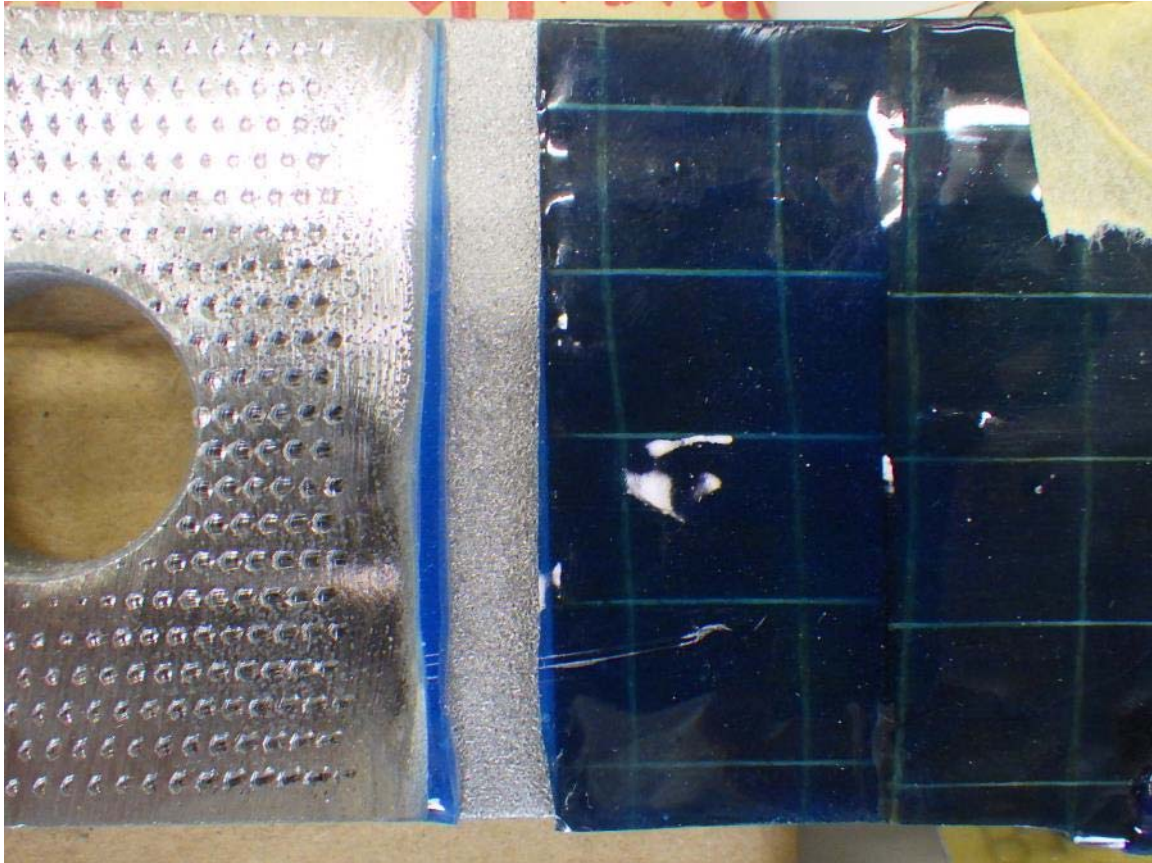


写真-4.5 引張荷重試験後における CFRP の破壊状況（幅方向）

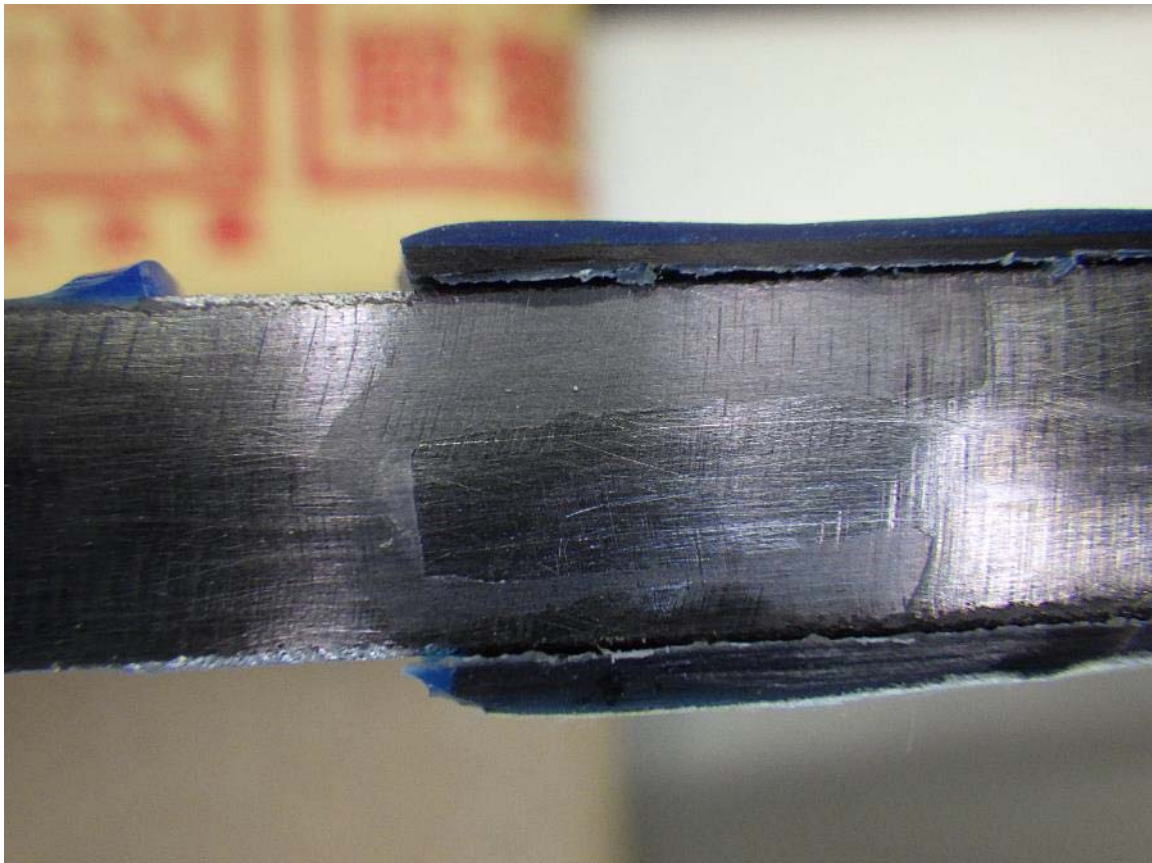


写真-4.6 引張荷重試験後における CFRP の破壊状況（板厚方向）

4.3.2 圧縮荷重試験の結果

圧縮荷重試験においては、弱軸方向に全体座屈が発生した。圧縮荷重試験で得られた座屈荷重 P_{cr} とオイラーの弾性座屈式である式(4.1)および道示³⁾の基準耐荷力の式(4.2)～(4.4)により算出した座屈荷重の比較を表-4.10 に示す。また、圧縮荷重試験で得られた鉛直荷重 P_c と鉛直変位の関係を図-4.7 に示す。圧縮荷重試験における試験体の固定点間距離は、前掲の図-4.3 に示す通り 450mm である。端部の固定条件は固定端としているため、有効座屈長は道示における柱の有効座屈長の決定方法である表-4.11 に基づき換算係数の推奨値を $\beta=0.65$ とし、有効座屈長 $l=0.65 \times 450=292.5\text{mm}$ とした。本章で採用した試験体形状および初期不整の状態は、道示の耐荷力曲線を算出する前提条件とは異なるが、道示の耐荷力曲線の値を参考値として本章における実験結果との比較をおこなった。

- ・オイラーの弾性座屈の式

$$\sigma_{cr} = \pi^2 \cdot E_s / \lambda^2 \quad (1.0 < \bar{\lambda}) \quad (4.1)$$

- ・道示の基準耐荷力の式

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{cr} / \sigma_y &= 1.0 \quad (\bar{\lambda} \leq 0.2) \\ \sigma_{cr} / \sigma_y &= 1.109 - 0.545 \bar{\lambda} \quad (0.2 < \bar{\lambda} \leq 1.0) \\ \sigma_{cr} / \sigma_y &= 1 / (0.733 + \bar{\lambda}^2) \quad (1.0 < \bar{\lambda}) \end{aligned} \right\} \quad (4.2)$$

- ・細長比パラメータ

$$\bar{\lambda} = \frac{1}{\pi} \cdot \sqrt{\frac{\sigma_y}{E_s}} \cdot \frac{l}{r_{s+cf}} \quad (4.3)$$

- ・断面 2 次半径

$$r_{s+cf} = \sqrt{I_{s+cf} / A_{s+cf}} \quad (4.4)$$

ここで、

- σ_{cr} : 座屈応力度(N/mm²)
- σ_y : 鋼材の降伏応力度(N/mm²)
- E_s : 鋼材のヤング係数 (N/mm²)
- λ : 細長比 ($\lambda=l/r$)
- $\bar{\lambda}$: 細長比パラメータ
- r_{s+cf} : 補強後の断面二次半径(mm)
- l : 部材の有効座屈長(mm)
- r_{s+cf} : 補強後の断面二次半径(mm)
- I_{s+cf} : 鋼材と CFRP の合成断面における断面二次モーメント(mm⁴)
- A_{s+cf} : 鋼材と CFRP の合成断面の断面積(mm²)

試験体 B-c～E-c においては、補強層数を増加することで補強なしの試験体 A-c と比較して座屈荷重の実験値が増加した。実験値の増加率は、試験体 A-c と比較して 3 層補強した場合である試験体 B-c、D-c が 51～53%の増加、6 層補強した場合である試験体 C-c、E-c が 112～118%の増加であった。CFRP の種類による増加率については、3 層補強した場合である試験体 B-c、D-c と 6 層補強した場合である試験体 C-c、E-c のいずれの実験値においても補強なしの試験体 A-c の座屈荷重の実験値に対する増加率は差がない結果であった。この結果は、4.3.3 で後述する高弾性 CFRP シートにおける圧縮ヤング係数の顕著な低下が影響していると推定することができる。

全体座屈による弱軸方向の変形が発生した後にさらに鉛直変位を増加させていくと CFRP の破壊が発

生した。試験体中央付近における CFRP の破壊状況を写真-4.7～写真-4.10 に示す。これらの写真からも全体座屈による変形が面外方向に発生した面は引張応力が作用するため CFRP の破断が発生し、その裏面は圧縮応力が作用するため CFRP の剥離が発生していたことがわかる。CFRP の破断および CFRP の剥離が発生した状態における試験体の CFRP 表面に貼り付けたひずみゲージの値を表-4.12 に示す。CFRP の破断が発生した時の発生ひずみは、表-4.2 に示すメーカー提供の試験成績書による CFRP の引張破断時のひずみ ε_{ucf} を超えるひずみが発生していたことを確認することができた。ここで、計測されたひずみの値が CFRP の破断ひずみを大きく超えた値となっている。しかし、ひずみゲージの貼付位置は CFRP の表面であるのに対して、炭素繊維は CFRP の内部に層状に配置されている。つまり、炭素繊維の位置よりひずみゲージの位置の方が全体座屈発生時における中立軸からの距離が大きいことになる。そのため、ひずみゲージの値が実際に炭素繊維に発生しているひずみより大きくなったと推測できる。また、図-4.6 において、全体座屈の変形が発生した後に荷重値が急激に減少している箇所があるが、この時に CFRP の破壊が発生していたことが確認できた。中弾性 CFRP シートで補強した試験体については、試験体 B-c、C-c とともに鉛直変位が約 6mm になったときに CFRP の破断が発生していたことがわかる。それに対して高弾性 CFRP シートで補強した試験体については、試験体 D-c は鉛直変位が約 4mm になったときに、試験体 E-c は鉛直変位が約 5mm になったときに CFRP の破断が発生していたことがわかる。このことより、中弾性 CFRP シートによる補強は全体座屈発生後の大きな変形に追従できる性能が期待できることを確認できた。

表-4.10 圧縮載荷試験の結果一覧

試験体	細長比パラメータ $\bar{\lambda}$	座屈荷重 P_{cr} (kN)			補強による増加率	比較		CFRPの破壊形態
		オイラー式①	道示式②	実験値③		③/①	③/②	
A-c	1.383	70.1	49.9	45.1	—	0.644	0.905	—
B-c	1.310	95.8	66.1	68.1	50.8%	0.710	1.030	破断
C-c	1.238	127.1	84.5	98.4	118.1%	0.775	1.166	剥離
D-c	1.388	92.1	65.7	69.3	53.4%	0.752	1.054	破断
E-c	1.367	118.2	83.6	95.6	111.8%	0.809	1.144	破断
F-c	1.155	209.7	132.7	100.0	121.5%	0.477	0.754	破断

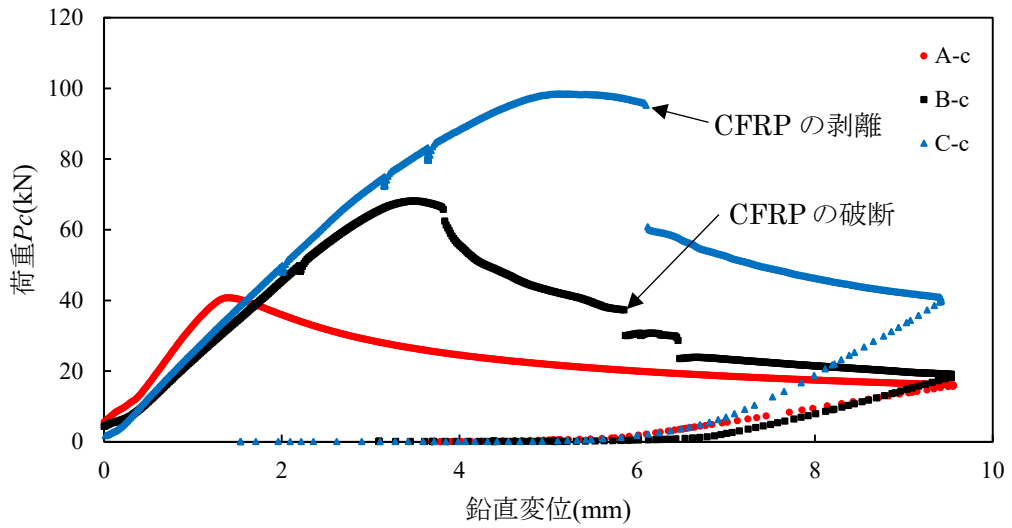
表-4.11 柱の有効座屈長 (L : 部材長(mm))³⁾

	1	2	3	4	5	6
座屈形が点線のような場合						
β の理論値	0.5	0.7	1.0	1.0	2.0	2.0
β の推奨値	0.65	0.8	1.2	1.0	2.1	2.0

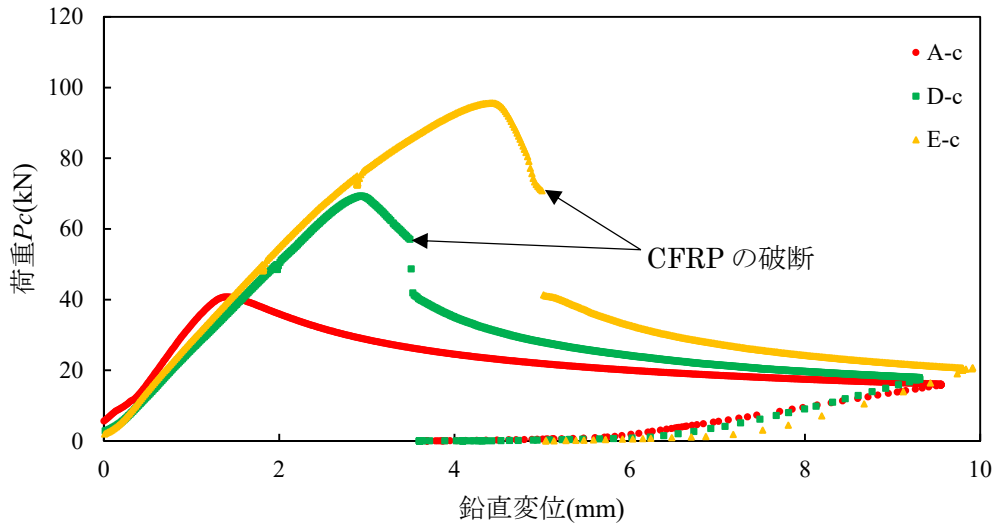
材端条件	回転に対して	水平変位に対して
	固定	固定
	自由	固定
	固定	自由
	自由	自由

表-4.12 圧縮載荷試験におけるCFRPの破壊が発生時したときの荷重とひずみ

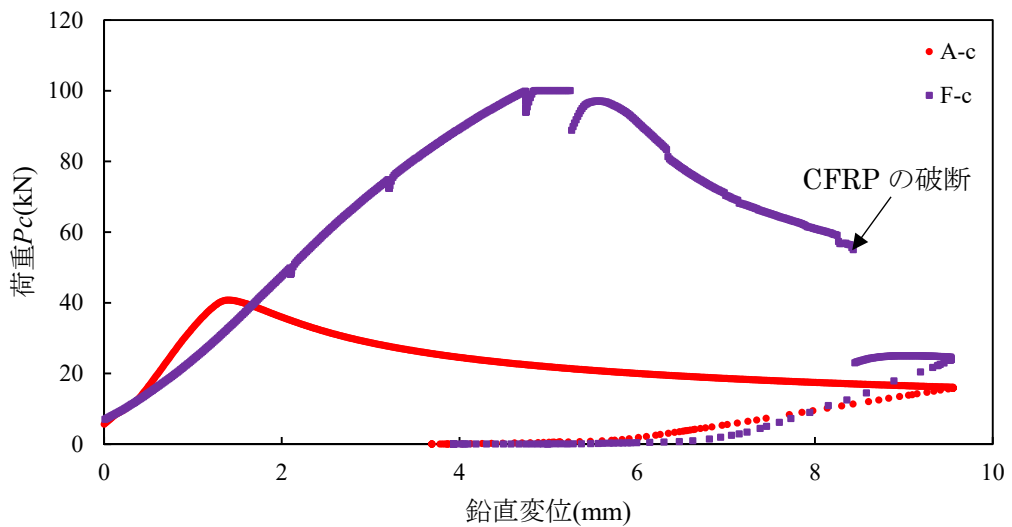
試験体	CFRPの破壊状態	発生荷重 P_c (kN)	発生ひずみ ϵ (μ)	
			圧縮側	引張側
B-c	CFRPの剥離	65.7	-5428	—
	CFRPの破断	37.3	—	10295
C-c	CFRPの剥離	95.8	-5260	—
	CFRPの破断	発生なし		
D-c	CFRPの剥離	59.4	-5044	—
	CFRPの破断	57.0	—	4444
E-c	CFRPの剥離	71.2	-19188	—
	CFRPの破断	71.2	—	5552
F-c	CFRPの剥離	97.2	-803	—
	CFRPの破断	55.6	—	5150



(a)試験体 A-c, B-c, C-c



(b)試験体 A-c, D-c, E-c



(c)試験体 A-c, F-c

図-4.6 圧縮載荷試験における鉛直荷重—鉛直変位関係

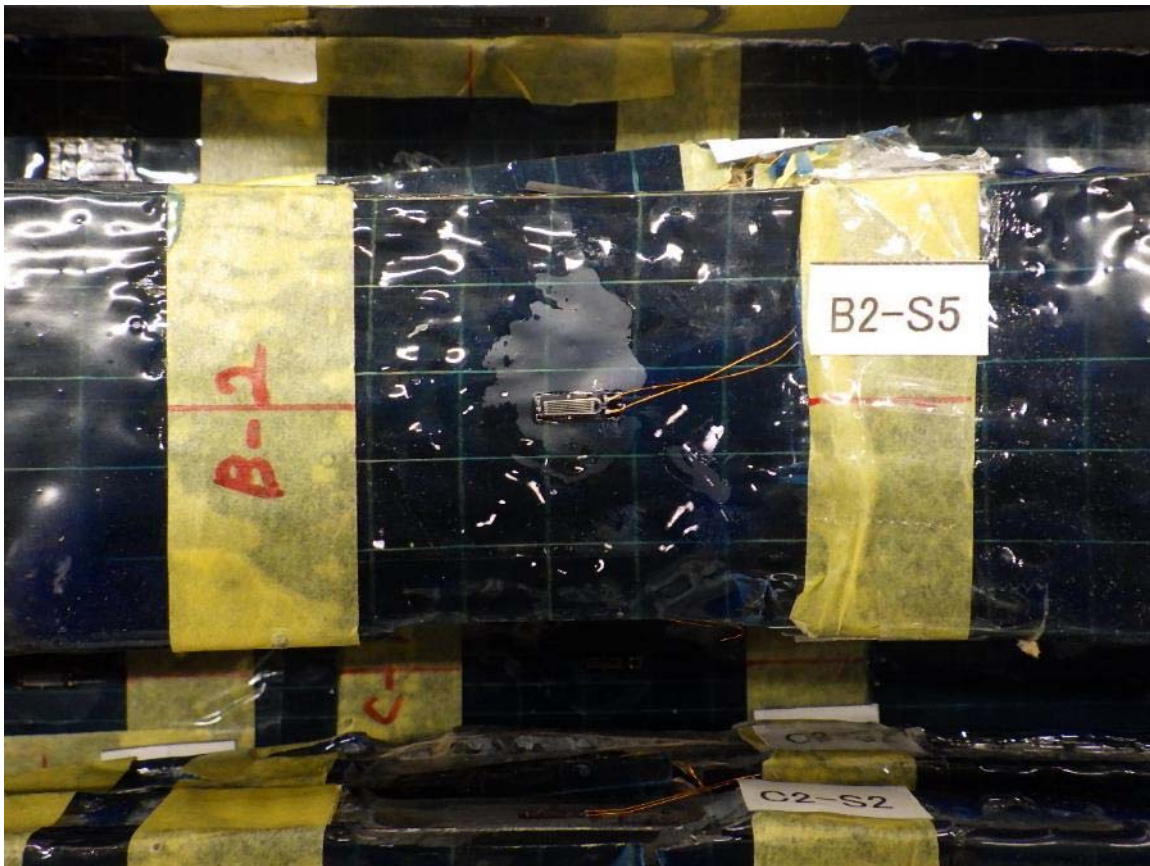


写真-4.7 圧縮載荷試験後における CFRP の破壊状況（試験体 B-c 幅方向 圧縮側）

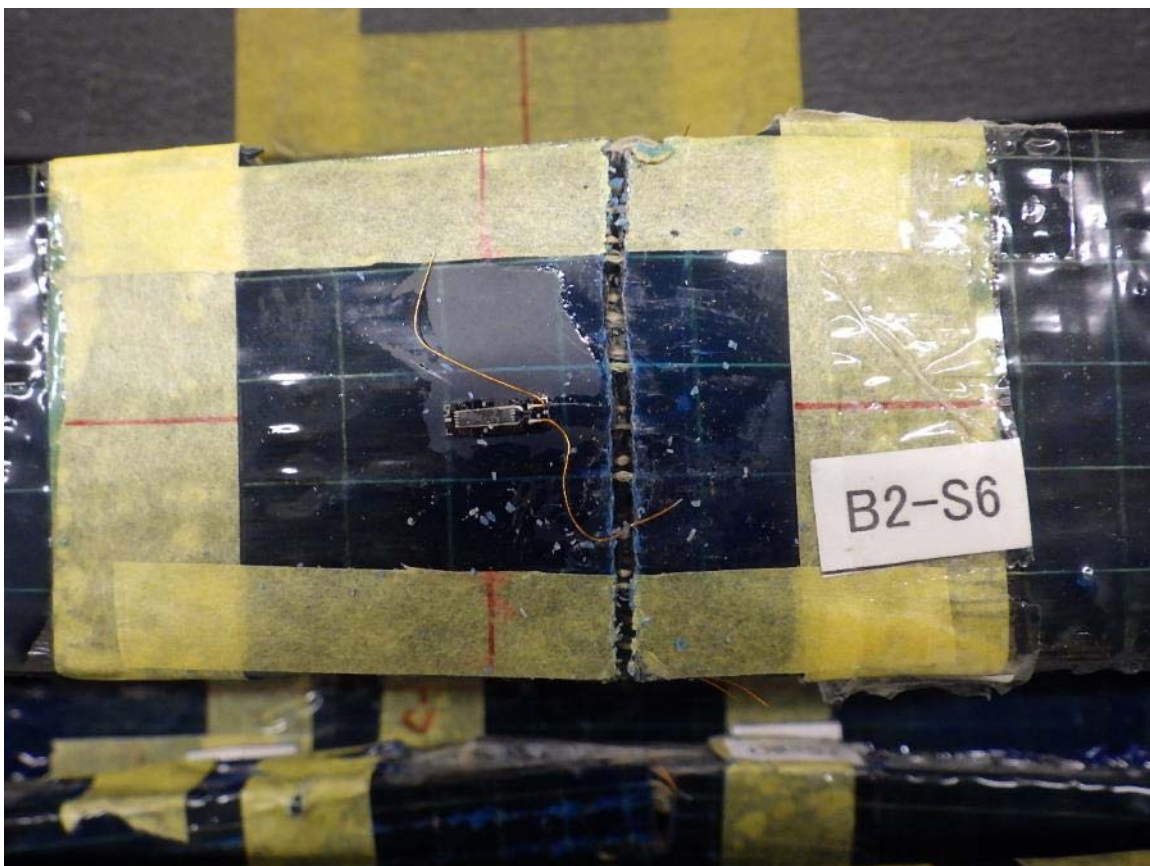


写真-4.8 圧縮載荷試験後における CFRP の破壊状況（試験体 B-c 幅方向 引張側）



写真-4.9 圧縮荷重試験後における CFRP の破壊状況 (試験体 B-c 板厚方向 圧縮→引張側)



写真-4.10 圧縮荷重試験後における CFRP の破壊状況 (試験体 B-c 板厚方向 引張→圧縮側)

4.3.3 曲げ載荷試験の結果

曲げ載荷試験で得られた鋼材の降伏荷重 Pb_y , CFRP が破壊するときの最大荷重 Pb_{max} と最大荷重発生時の鉛直変位を表-4.13 に示す。また、曲げ載荷試験における鉛直荷重 Pb と鉛直変位の関係を図-4.8 に示す。ここで、曲げ載荷試験における降伏荷重 Pb_y は、鋼材表面に貼り付けたひずみゲージ S1 もしくは S2 (貼り付け位置は図-4.2 を参照) の値が降伏ひずみ $\epsilon_y=1490\mu$ に達した時の荷重値を示し、最大荷重 Pb_{max} は、CFRP の破壊により荷重値が低下する直前の荷重値を示す。CFRP 補強をすることにより、いずれの試験体においても鋼材の降伏荷重および CFRP が破壊する直前の最大荷重の値が増加した。CFRP の補強層数を増やすことによる影響について、中弾性 CFRP シートにより補強した試験体 B-b と C-b の比較では、降伏荷重が 15.6% の増加、最大荷重が 23.2% の増加であった。高弾性 CFRP シートにより補強した試験体 D-b と E-b の比較では、降伏荷重 15.0% の増加、最大荷重が 8.2% の増加であった。また、CFRP の種類による影響について、鋼材の降伏荷重は中弾性 CFRP シートで補強した試験体よりも高弾性 CFRP シートで補強した試験体の方が 3.2~3.7% 増加したことが確認できた。また、高弾性 CFRP プレートにより補強した試験体 F-b において最も鋼材の降伏荷重が増加し、その増加率は 72.1% であった。しかし、CFRP が破壊する直前の最大荷重は、高弾性 CFRP シートで補強した試験体よりも中弾性 CFRP シートで補強した試験体の方が大きくなった。最大荷重時の鉛直変位も中弾性 CFRP シートで補強した試験体で最も大きくなり、高弾性 CFRP シートで補強した場合と比較して 3 層で補強した場合は 1.15 倍、6 層で補強した場合は 1.25 倍となっていた。

試験体中央付近における CFRP の破壊状況を写真-4.11, 写真-4.12 に示す。これらの写真からも、圧縮応力が作用している試験体の上側は CFRP の剥離が発生しており、引張応力が作用している試験体の下側は CFRP の破断が発生していたことがわかる。CFRP の破断時における発生ひずみと表-4.2 におけるメーカー提供の試験成績書による引張破断時のひずみ ϵ_{ucf} の比較を表-4.14 に示す。これらの CFRP の破壊状態を CFRP 表面に貼り付けたひずみゲージによるひずみ値で確認すると、試験体 B-b, C-b, D-b, F-b において、引張側において引張破断時のひずみ ϵ_{ucf} の補正值 (図-4.8 に示すひずみゲージ貼付位置により 0.6 の係数で補正した値) に近い値が発生していたことが確認できる。試験体 B-b, D-b, E-b のひずみ値は引張破断ひずみに達していないが、CFRP の破断が発生していた。これは、写真-4.11, 写真-4.12 (写真-付 4.21~写真-付 4.28) の CFRP の破断状況からもわかるように、ひずみを計測している位置より離れた位置で CFRP の破断が発生していたため、計測されたひずみは小さな値になっていたと推測できる。

以上の結果より、鋼材の降伏による塑性変形前の弾性曲げ挙動においては、弾性剛性が大きい CFRP で補強することで高い補強効果が得られることがわかった。しかし、降伏による塑性変形が始まり、CFRP が破壊するまでの曲げ挙動においては弾性剛性が大きい高弾性 CFRP シートや高弾性 CFRP プレートよりも引張強度が高い中弾性 CFRP シートの方が大きな変形に追従することができて、結果的に最大荷重の増加に寄与し、高い補強効果が得られることがわかった。

表-4.13 曲げ載荷試験の降伏荷重および最大荷重

試験体	降伏荷重		最大荷重		最大荷重時の鉛直変位 δ_{max} (mm)
	Pb_y (kN)	補強なしとの比較	Pb_{max} (kN)	補強なしの降伏荷重との比較	
A-b	11.1	—	—	—	—
B-b	13.5	1.22	25.9	2.33	8.15
C-b	15.6	1.41	31.9	2.87	8.99
D-b	14.0	1.26	22.0	1.98	3.80
E-b	16.1	1.45	23.8	2.14	2.96
F-b	19.1	1.72	27.0	2.43	4.31

表-4.14 曲げ載荷試験における CFRP の破断時における発生ひずみ

試験体	CFRP の破断時における発生ひずみ ϵ (μ)		CFRP の引張破断ひずみ(μ)	
	圧縮側	引張側	ϵ_{ucf}	$0.6\epsilon_{ucf}$ ^{※1}
B-b	-6068	4950	8500	5100
C-b	-2327	5209		
D-b	-2160	1956	3853	2312
E-b	-1281	1461		
F-b	-947	2300	3082	1849

※1：ひずみゲージ貼付位置による補正值（図-4.7）

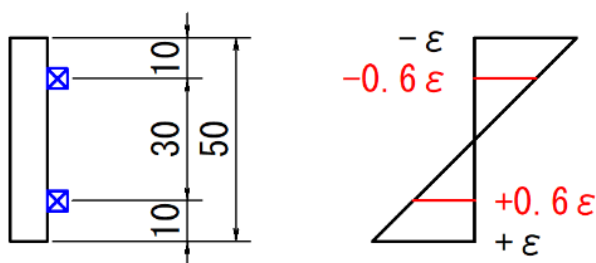
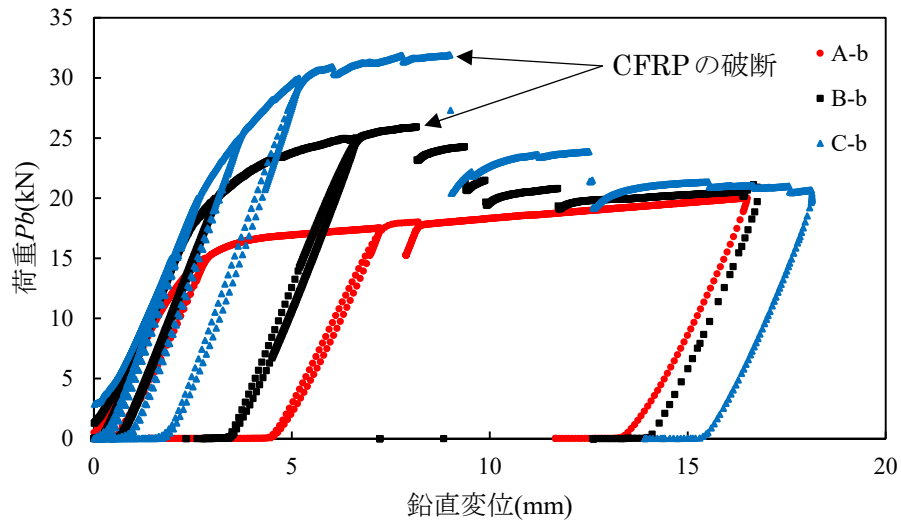
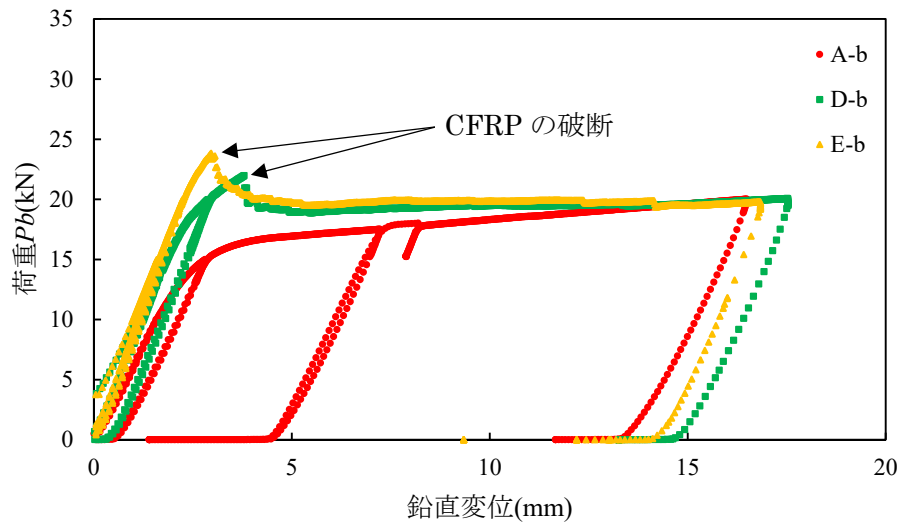


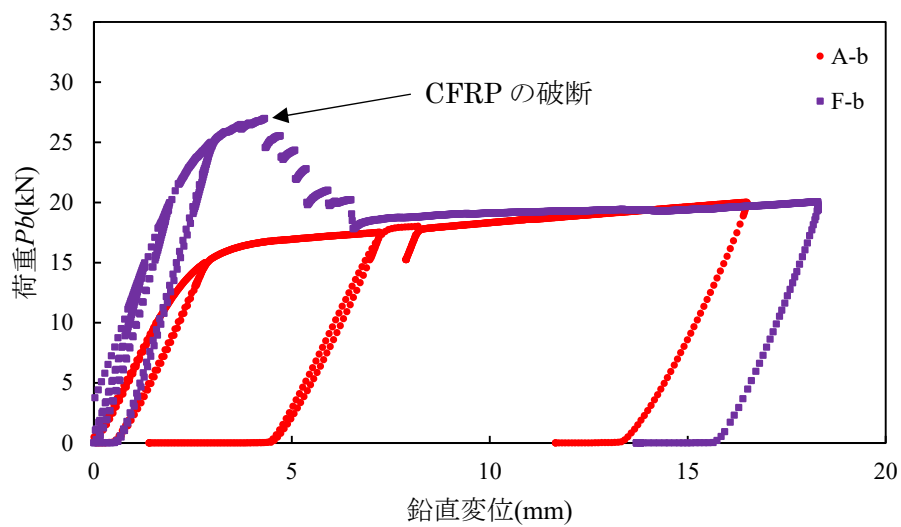
図-4.7 ひずみゲージ貼付位置によるひずみ値の補正（単位：mm）



(a)試験体 A-c, B-c, C-c



(b)試験体 A-c, D-c, E-c



(c)試験体 A-c, F-c

図-4.8 曲げ載荷試験における鉛直荷重—鉛直変位の関係

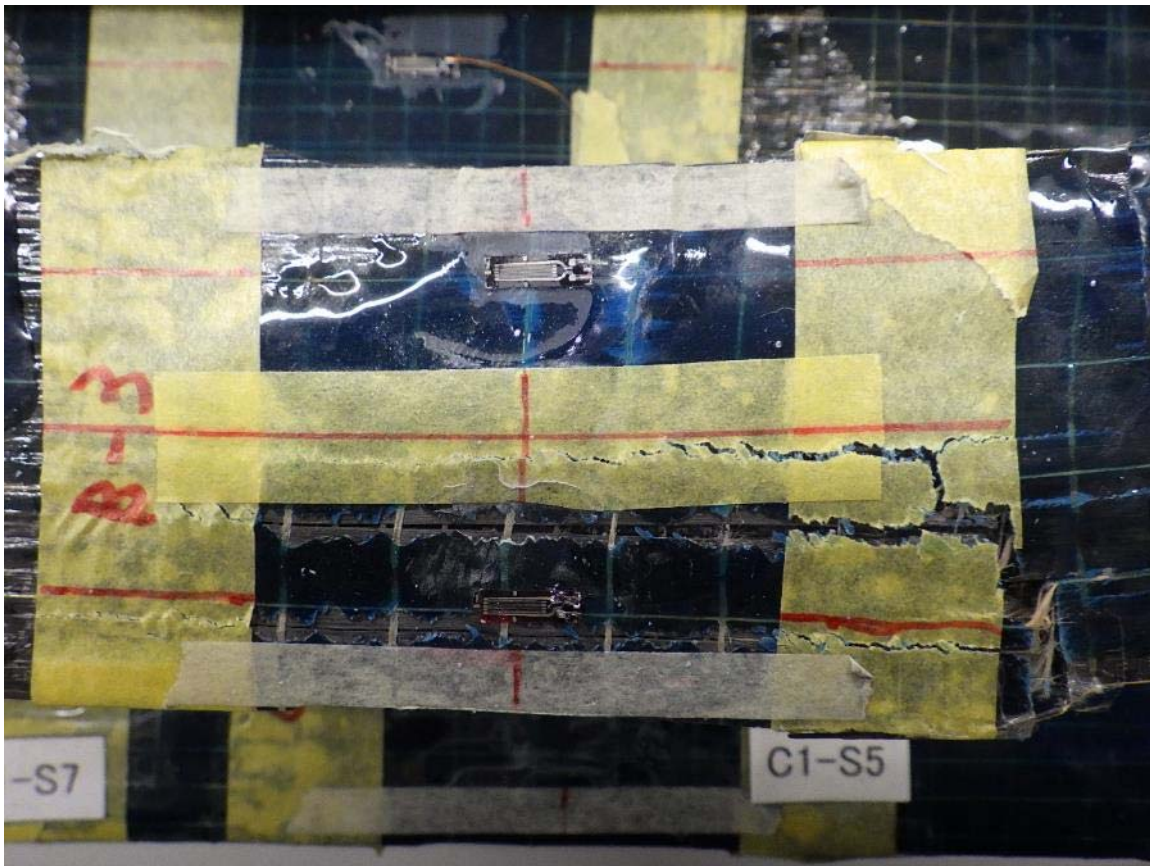


写真-4.11 曲げ荷重試験後における CFRP の破壊状況 (試験体 B-b 幅方向 表)



写真-4.12 曲げ荷重試験後における CFRP の破壊状況 (試験体 B-b 幅方向 裏)

4.3.4 引張載荷試験および圧縮載荷試験における CFRP のヤング係数の推定

本章における各種載荷試験の結果より、鋼材に対して CFRP 補強をした場合の補強効果は、CFRP 補強後におけるヤング係数が影響すると推測した。しかし、メーカーから提供されている炭素繊維材料のヤング係数は引張時におけるヤング係数のみで圧縮時におけるヤング係数は不明であった。そこで実験値での荷重とひずみの関係を使って引張載荷時と圧縮載荷時における CFRP の見かけのヤング係数の推定を試みた。推定方法は、実験結果における弾性変形領域の荷重とひずみの関係を直線近似し、その傾きが式(4.5)で示されるヤング係数と断面積の積と等しいことに着目して、CFRP のヤング係数 E_{cf} を式(4.6)～(4.9)により算出した。

$$P = E_{s+cf} \cdot A_{s+cf} \cdot \varepsilon \quad (4.5)$$

$$A_{s+cf} = A_s + A_{cf} \quad (4.6)$$

$$E_{s+cf} = \frac{E_s \cdot A_s + E_{cf} \cdot A_{cf}}{A_s + A_{cf}} \quad (4.7)$$

$$E_{s+cf} \cdot A_{s+cf} = E_s \cdot A_s + E_{cf} \cdot A_{cf} \quad (4.8)$$

$$E_{cf} = \frac{E_{s+cf} \cdot A_{s+cf} - E_s \cdot A_s}{A_{cf}} \quad (4.9)$$

ここで、

E_s : 鋼材のヤング係数(N/mm²)

E_{cf} : CFRP のヤング係数(N/mm²)

E_{s+cf} : 鋼材と CFRP の合成断面におけるヤング係数(N/mm²)

A_s : 鋼材の断面積(mm²)

A_{cf} : CFRP の断面積(mm²)

A_{s+cf} : 鋼材と CFRP の合成断面の断面積(mm²)

上記の式(4.5)～(4.9)により推定した CFRP の見かけのヤング係数を表-4.15 および表-4.16 に示す。また、引張載荷試験および圧縮載荷試験において、弾性域での荷重とひずみの関係(図-付 4.13～図-付 4.24)を直線近似した近似直線から算出した傾きを表-4.17 に示す。表-4.16 の計算で採用した傾きは試験体中央の計測値を直線近似して求めた傾きの値を採用した。まず、鋼材のヤング係数は、補強なしの試験体 A-t および A-c の結果から推定した。この結果、今回の実験で使用した鋼材のヤング係数の実験値は設計値である $E_s=2.0 \times 10^5 \text{N/mm}^2$ と比較して 2～3% 小さい値であることを確認することができた。この結果より、CFRP の見かけのヤング係数を算出するために使用する鋼材のヤング係数は、実験値より推定した値の平均値である $E_s=1.946 \times 10^5 \text{N/mm}^2$ を用いることにした。CFRP のヤング係数 E_{cf} について、実験値からの推定値とメーカーから提供された試験成績書(表-4.2 の引張時のヤング係数 E_{cf}) の値(以下、メーカー提供のヤング係数の値)を比較した結果、引張載荷時は 0.856～0.992 で試験体 E-t と F-t は実験値がメーカー提供のヤング係数の値より小さくなったが、それら以外の試験体については概ねメーカー提供のヤング係数の値と同等の値が発現していたことが確認できた。また、圧縮載荷時は 0.642～0.945 であり、中弾性 CFRP シートで補強した試験体についてはメーカー提供のヤング係数の値と同等の値が発現していたが、高弾性 CFRP シートおよび高弾性 CFRP プレートで補強した試験体については、メーカー提供のヤング係数の値よりも小さい値が発現していたことが確認できた。以上の結果より、CFRP の見かけのヤング係数は引張時よりも圧縮時の方が小さい値になる傾向であることが確認できた。

CFRP の引張時と圧縮時のヤング係数の相違については、圧縮時の見かけのヤング係数は引張時のヤ

ング係数と比較して 80%程度に低下する場合があることが既往の研究^{33),34)}で示されている。また、引張時のヤング係数が大きくなるにつれて圧縮時の見かけのヤング係数が低下する場合があることが既往の研究³⁵⁾において実験で確認されている。本章での実験では、採用した試験体の大きさおよび CFRP の補強条件により高弾性 CFRP シートと高弾性 CFRP プレーートの圧縮時における見かけのヤング係数の低下の度合いが顕著に表れたケースであったと推測することができる。よって、圧縮荷重時において全体座屈における座屈荷重を評価する際には、CFRP における圧縮側の見かけのヤング係数の低下の影響を適切に考慮することが必要である。

表-4.15 引張荷重時及び圧縮荷重時における CFRP の見かけのヤング係数の推定 (その 1)

試験体	鋼材の断面積 $A_s(\text{mm}^2)$ ※1	CFRP の断面 積 $A_{cf}(\text{mm}^2)$ ※1	鋼材のヤング係数 $E_s(\times 10^5 \text{N/mm}^2)$			補強後の断面 積 $A_{s+cf}(\text{mm}^2)$			
			実験値	設計値	比較				
A-t	450.0	-	1.959	2.000	0.979	450.0			
A-c			1.934		0.967				
B-t		49.5	1.946 (A-t,A-c の 平均値)		0.973	499.5			
B-c		99.0					549.0		
C-t								42.9	492.9
C-c									
D-t								200.0	650.0
D-c									
E-t									
E-c									
F-t									
F-c									

※1：鋼材および CFRP の断面積は幅に設計値を乗じた公称値

表-4.16 引張載荷時及び圧縮荷重時における CFRP の見かけのヤング係数の推定（その 2）

試験体	補強後のヤング係数 $E_{s+cf}(\times 10^5 \text{ N/mm}^2)$			CFRP のヤング係数 $E_{cf}(\times 10^5 \text{ N/mm}^2)$			$E_{s+cf} \cdot A_{s+cf}(\times 10^8 \text{ N})$			
	実験値 ^{※1}	計算値 ^{※2}	比較	実験値 ^{※3}	試験成績書 ※4	比較	実験値 ^{※5}	計算値 ^{※6}	比較	
A-t	1.959	1.959	1.000	-	-	-	0.881	0.881	1.000	
A-c	1.934	1.934	1.000	-	-	-	0.870	0.870	1.000	
B-t	2.158	2.162	0.998	4.080	4.120	0.990	1.078	1.080	0.998	
B-c	2.139		0.990	3.895		0.945	1.069		0.990	
C-t	2.294	2.338	0.981	3.874		0.940	1.259	1.284	0.981	
C-c	2.272		0.972	3.751		0.910	1.247		0.972	
D-t	2.363	2.368	0.998	6.734		6.790	0.992	1.165	1.167	0.998
D-c	2.157		0.911	4.362			0.642	1.063		0.911
E-t	2.565	2.722	0.942	5.809	0.856		1.374	1.458	0.942	
E-c	2.406		0.884	4.814	0.709		1.289		0.884	
F-t	2.727	3.437	0.793	4.482	4.880		0.918	1.772	2.234	0.793
F-c	2.613		0.760	4.112			0.843	1.698		0.760

※1：実験値から得られた $E_{s+cf} \cdot A_{s+cf}$ を補強後の断面積 A_{s+cf} で除した値

※2：計算に用いた鋼材のヤング係数 E_s は実験値，CFRP のヤング係数 E_{cf} はメーカー発行の試験成績書の値

※3：各実験値を用いて式(4.9)により算出した値

※4：メーカーが事前に JIS A1191/JSCE-E541 に準じて試験した成績であり，引張時の弾性率（ヤング係数）

※5：実験結果における荷重とひずみの関係を直線近似して式(4.5)より求めた傾き（表 4.17）

※6：補強後のヤング係数 E_{s+cf} の計算値に補強後の断面積 A_{s+cf} を乗じた値

表-4.17 荷重とひずみの関係を直線近似して式(4.5)より求めた傾き

試験体	直線近似により求めた傾き $E_{s+cf} \cdot A_{s+cf}(\times 10^8 \text{ N})$		
	S1,S2	S3,S4	平均値
A-t	0.08711	0.08916	0.08813
A-c	0.08704	0.12522	0.10613
B-t	0.10778	0.09383	0.10080
B-c	0.10687	0.10445	0.10566
C-t	0.12594	0.09901	0.11248
C-c	0.12472	0.08635	0.10553
D-t	0.11648	0.09540	0.10594
D-c	0.10630	0.10447	0.10538
E-t	0.13743	0.09004	0.11374
E-c	0.12889	0.03571	0.08230
F-t	0.17722	0.09124	0.13423
F-c	0.16982	0.03788	0.10385

4.3.5 曲げ載荷時における CFRP のヤング係数の推定

4.3.4 において、CFRP のヤング係数は引張応力が作用しているときと圧縮応力が作用しているときでは、圧縮時の見かけのヤング係数が引張時と比較して小さくなる傾向があることを示した。しかし、部材に曲げが作用する場合には、部材断面において引張応力が作用する部分と圧縮応力が作用する部分が同時に存在することになる。そこで、このように引張と圧縮が同時に作用する曲げ変形において見かけのヤング係数がどのような状態であるかを確認するために曲げ載荷時における CFRP の見かけのヤング係数の推定を試みた。曲げ載荷試験で得られた CFRP 補強断面の降伏ひずみについて、降伏荷重 Pb_y により算出した支間中央の降伏曲げモーメント M_y と合成断面の断面係数 Z_s+Z_{cf} より算出した降伏ひずみの計算値、FEM 解析により算出した降伏ひずみの解析値と実験値を比較した結果を表-4.18 に示す。①の計算値は、補強断面が部材全体で一様に分布している状態での計算式で算出しているため、実験における実際の補強範囲とは異なる条件で計算している。②の FEM 解析による解析値は、実験における補強範囲を再現し、材料の物性についてもメーカー提供値（表-4.1～表-4.3）を使用したモデルでの解析で得られたひずみ値である。②の解析値と①の計算値を比較すると差がない結果であるため、補強範囲の違いによる支間中央付近の発生ひずみに対する影響はないと判断できる。以上を踏まえて、①の計算値と③の実験値を比較してみると、中弾性 CFRP シートで補強した試験体 B-b, C-b においては若干計算値が小さくなっているがほぼ同程度の値であった。しかし、高弾性 CFRP シートおよび高弾性 CFRP プレートで補強した試験体 D-b, E-b, F-b においては、0.946, 0.873, 0.820 となり、計算値および解析値が実験値よりも 5～18%程度小さな値となっていた。この降伏ひずみの低下は、4.3.4 で確認した高弾性 FRP シートと高弾性 FRP プレートにおける圧縮時の見かけのヤング係数が引張時と比較して低下する傾向にあることが原因の一つとして推定できる。

次に、曲げ載荷試験における降伏ひずみの計算値と実験値の違いから CFRP の見かけのヤング係数の値がどの程度低下するかを試算した。4.3.4 の結果からは引張時と圧縮時で CFRP の見かけのヤング係数は異なる傾向にあることを示したが、本章における計算では計算方法を簡便にするために引張側と圧縮側のヤング係数は一定と仮定して計算した。曲げ載荷時における CFRP の見かけのヤング係数の計算結果を表-4.19 に示す。CFRP の見かけのヤング係数の低下率は、中弾性 FRP シートで補強した試験体 B-b, C-b では 0.857, 0.926 であり、高弾性 CFRP シートで補強した試験体 D-b, E-b では 0.776, 0.677 であり、高弾性 CFRP プレートで補強した試験体 F-b では 0.654 であることが推定できた。以上の結果により、曲げ変形が作用している状態においても CFRP の見かけのヤング係数は低下する傾向にあることが確認できた。本章の実験では、特に高弾性 CFRP シートおよび高弾性 CFRP プレートにおけるヤング係数の低下が顕著に表れていることが確認できた。よって、曲げ変形に対する CFRP の補強効果を評価する際には、CFRP における曲げ作用時の見かけのヤング係数の低下の影響を適切に考慮することが必要である。

表-4.18 曲げ載荷試験における降伏ひずみの計算値と実験値の比較

試験体	降伏曲げ モーメント $M_y(\text{kN}\cdot\text{mm})^{*1}$	断面係数(mm^3) ^{*2}			降伏ひずみ $\epsilon_y(\mu)$			
		鋼材 Z_s	CFRP $Z_{cf}\times$ (E_{cf}/E_s) ^{*3}	合計 Z_s+Z_{cf}	①計算値 ^{*4}	②解析値 ^{*5}	③実験値 ^{*6}	① / ③
A-b	1109.4	3750	-	3750	1479	1475	1490	0.993
B-b	1352.2	3750	850	4600	1470	1506	1490	0.986
C-b	1557.2	3750	1700	5450	1429	1485	1495	0.956
D-b	1404.6	3750	1214	4964	1415	1414	1497	0.945
E-b	1614.2	3750	2427	6177	1307	1301	1496	0.873
F-b	1914.0	3750	4067	7817	1224	1224	1493	0.820

※1：降伏曲げモーメントは、鋼材の引張側におけるひずみ値が降伏ひずみ $\epsilon_y=1490(\mu)$ に達した時の荷重が作用した時の支間中央での曲げモーメント

※2：鋼材および CFRP の断面係数は幅および板厚の設計値を公称値として算出した値

※3：CFRP の断面係数は、CFRP の設計板厚をヤング係数比 (E_{cf}/E_s) により鋼材換算して算出した値

ここで、計算に使用する CFRP のヤング係数はメーカーが事前に JIS A1191/JSCE-E541 に準じて試験した成績であり、引張時の弾性率 (ヤング係数)

※4：CFRP による補強断面を支間全体一様として M_y , Z_s+Z_{cf} および E_s , E_{cf} から算出したひずみの計算値

※5：実験を再現した FEM 解析 (図-付 4.25~図-付 4.30 の通り、ソリッド要素を用いた弾性解析) により得られたひずみ値

※6：※1 において降伏荷重とみなしたときにおける鋼材の引張側における発生ひずみの値

表-4.19 曲げ載荷試験における CFRP の見かけのヤング係数

試験体	鋼材のヤング係数 $E_s(\times 10^5 \text{N}/\text{mm}^2)^{*1}$	CFRP のヤング係数 $E_{cf}(\times 10^5 \text{N}/\text{mm}^2)$		
		試験成績書 ^{*2}	推定値 ^{*3}	比較
B-b	2.000	4.120	3.815	0.926
C-b			3.529	0.857
D-b		6.790	5.268	0.776
E-b			4.594	0.677
F-b		4.880	3.192	0.654

※1：鋼材のヤング係数は、設計値

※2：メーカーが事前に JIS A1191/JSCE-E541 に準じて試験した成績であり、引張時の弾性率 (ヤング係数)

※3：表-4.18 において、降伏ひずみの①計算値が実験値と等しくなる時の CFRP のヤング係数

4.4 まとめ

本章の実験および結果の検討により得られた知見は以下の通りである。

- 1) 圧縮載荷時における全体座屈による変形後の補強効果は、中弾性 CFRP シートにより補強した試験体が CFRP の破壊が発生することなく鋼材が座屈変形により塑性変形した後のひずみ増加および変形の増加に対して追従することを確認できた。
- 2) 曲げ載荷時において、降伏が発生するまでの弾性域では、ヤング係数が大きい高弾性 CFRP シートおよび高弾性 CFRP プレートによる補強が中弾性 CFRP シートによる補強よりも高い補強効果があった。
- 3) 曲げ載荷時において、鋼材が降伏変形した後の塑性域では、中弾性 CFRP シートによる補強のほうが高弾性 CFRP シートおよび高弾性 CFRP プレートによる補強よりも CFRP の破壊が発生することなく、鋼材が降伏変形した後のひずみ増加および変形の増加に対して追従することを確認できた。
- 4) 圧縮載荷時において、CFRP の見かけのヤング係数を推定した結果により、CFRP における圧縮載荷時のヤング係数は引張載荷時のヤング係数と比較して 64～84%低下することが確認できた。よって、圧縮載荷時において、座屈荷重に対する CFRP の補強効果を評価する際には、圧縮載荷時における CFRP の見かけのヤング係数の低下の影響を適切に反映することが必要である。
- 5) 曲げ載荷時において CFRP の見かけのヤング係数を推定した結果により、CFRP における曲げ載荷時のヤング係数が引張載荷時のヤング係数と比較して 65～78%低下することが確認できた。よって、曲げ変形に対する CFRP の補強効果を評価する際には、曲げ載荷時における CFRP の見かけのヤング係数の低下の影響を適切に反映することが必要である。

第5章 炭素繊維強化樹脂により補強した鋼 H 形部材の全体座屈に対する補強効果

5.1 概要

鋼トラス橋は、第4章でも述べた通り鋼材を溶接で組み合わせた部材をトラス形状に組み立てた骨組み構造で構成されており、トラス部材に作用する力は部材軸方向に作用する軸力が支配的である。そのため、トラス橋を構成する部材が部分的に塑性化、あるいは座屈や破断が発生すると、橋全体に対する耐荷力の性能に重大な影響を与える可能性がある。一般的にトラス橋は長スパンの橋梁で採用される橋梁形式であるため、部材断面や部材長が大きくなる傾向がある。本研究における耐震補強のように構造部材の全体に補強が必要となった場合は、補強範囲が大規模になる可能性が高い。一方、トラス橋の主構部材ではなく、横構や対傾構といった2次部材を補強することにより橋梁全体として耐荷力向上が期待できる場合がある。

本章では、鋼トラス橋の部材に対して炭素繊維強化樹脂（以下、CFRP）を用いた耐震補強設計手法を確立することを目的とした基礎的検討として、トラス橋を構成する2次部材に多く使用されている鋼製の H 形部材に対して CFRP による補強をすることで圧縮軸力が作用した場合に発生する全体座屈挙動と座屈後の補強効果を明らかにするために圧縮載荷試験を実施した。

本章の実験では、CFRP 補強部の破壊が発生する。ここでいう CFRP 補強部の破壊とは、炭素繊維の破断（以下、CFRP の破断）および CFRP 接着面の剥離（以下、CFRP の剥離）といった現象を総称している。

5.2 実験方法

5.2.1 試験体形状

圧縮載荷試験で使用した試験体の形状は、図-5.1 に示す鋼製 H 形断面とした。本章の実験では全体座屈の挙動に対してのみ着目するためにフランジと腹板が局部座屈しない断面形状を採用した。具体的なフランジと腹板の断面寸法は局部座屈しない断面となるように道示Ⅱ³⁾に示す式(5.1)を用いて幅厚比パラメータ R が 0.7 より小さくなるように決定した。フランジの断面寸法は、幅 100mm、板厚 9mm で、幅厚比パラメータは $R=0.286$ である。腹板の断面寸法は、幅 140mm、板厚 19mm で、幅厚比パラメータは $R=0.154$ である。

$$R = \frac{b}{t_s} \sqrt{\frac{\sigma_y}{E_s} \cdot \frac{12(1-\nu^2)}{\pi^2 k}} \quad (5.1)$$

ここで、

- R : 幅厚比パラメータ
- b : 鋼材の自由突出幅および固定縁端距離(mm)
- t_s : 鋼材の板厚(mm)
- ν : 鋼材のポアソン比 (=0.3)
- k : 座屈係数 (フランジ : 0.43, 腹板 : 4.0)
- σ_y : 鋼材の降伏応力度(N/mm²)
- E_s : 鋼材のヤング係数 (N/mm²)

また、試験体の部材長は、5.2.4 で後述する載荷試験装置に設置できる大きさで、なおかつ全体座屈が発生する長さとなるように式(5.2)を用いて弱軸回りの細長比パラメータ $\bar{\lambda}$ が 1.0 より大きくなるように設定した。載荷試験装置の形状より、部材長を 1,764mm とした場合、ヒンジ間の距離は 2,424mm とな

る。つまり，有効座屈長を $l=2,424\text{mm}$ とした場合，細長比パラメータは $\bar{\lambda}=1.624$ となるため，全体座屈が発生する形状を設定できた。

$$\bar{\lambda} = \frac{1}{\pi} \cdot \sqrt{\frac{\sigma_y}{E_s}} \cdot \frac{l}{r} \quad (5.2)$$

ここで，

- $\bar{\lambda}$: 細長比パラメータ
- l : 部材の有効座屈長 (mm)
- r : 部材の断面二次半径 (mm)

$$r = \sqrt{I_s/A_s} \quad (5.3)$$

- I_s : 鋼材の断面二次モーメント (mm^4)
- A_s : 鋼材の有効断面積 (mm^2)
- σ_y : 鋼材の降伏応力度 (N/mm^2)
- E_s : 鋼材のヤング係数 (N/mm^2)

試験体の弱軸方向の部材の曲がり（初期たわみ）は，許容値を部材中央で $L/1000=1.7\text{mm}$ （部材長 $L=1,700\text{mm}$ ）の目標値で製作した。その結果，試験体の初期たわみは，計測値で最大 1.5mm であった。

各鋼板の材料諸元は，表-5.1 に示す通りであり，降伏応力度はメーカー発行のミルシートの値を示し，ヤング係数，ポアソン比，板厚は，設計値および公称値を示す。

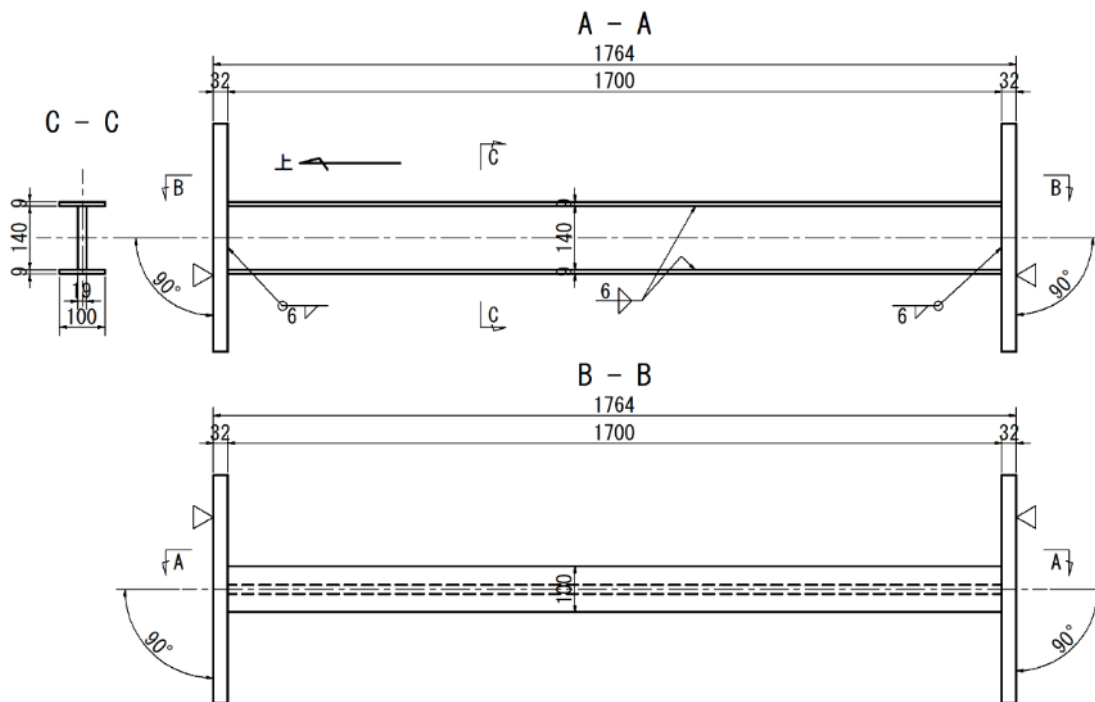


図-5.1 試験体形状（単位：mm）

表-5.1 鋼材の材料諸元

項目	単位	内容			備考
鋼種 (材質)	—	SM400A			JIS G 3101
ヤング係数 E_s	N/mm ²	2.0×10 ⁵			設計値
ポアソン比 ν	—	0.3			設計値
板厚 t_s	mm	9	19	32	公称値
降伏強度 σ_y	N/mm ²	298 (235)	307 (235)	309 (235)	ミルシートの値 (設計値)
引張強度 σ_u	N/mm ²	441 (400)	445 (400)	445 (400)	ミルシートの値 (設計値)

5.2.2 CFRP 補強材料

鋼部材の補強に使用した炭素繊維材料の材料諸元は、第4章で使用した炭素繊維材料と同じ仕様（表-4.2 参照）である。メーカー発行の試験成績書では引張方向の機械的性質のみが提供されており、圧縮方向の機械的性質についてはメーカーから提供された値はない。補強材料に使用した炭素繊維材料は、その機械的性質が補強効果に対してどのような影響があるかを確認するために繊維目付量が 300g/m²（設計値）の中弾性 CFRP シートと高弾性 CFRP シート、幅 50mm、板厚 2mm の高弾性 CFRP プレート の 3 種類とした。中弾性 CFRP シートと高弾性 CFRP シートは日鉄ケミカル&マテリアル株式会社の「トウシート」を、高弾性 CFRP プレートは三菱ケミカルインフラテック株式会社の「e プレート」を使用した。

炭素繊維材料を接着する樹脂の材料諸元は、第4章で使用した接着樹脂と同じ仕様（表-4.3 参照）である。中弾性 CFRP シートと高弾性 CFRP シートの接着については、同じ種類の CFRP シート用含浸接着樹脂を使用した。また、高弾性 CFRP プレートの接着については、CFRP プレート用接着樹脂を使用した。

5.2.3 CFRP 補強方法

圧縮載荷試験の実験ケースは、表-5.2 に示す通りである。各ケースにおける試験体数は2体ずつとし、補強の違いによる実験パラメータは CFRP の種類（中弾性 CFRP シート、高弾性 CFRP シート、高弾性 CFRP プレート）、CFRP の積層数（CFRP シート：片面当り 3 層と 6 層、CFRP プレート片面当り 1 枚）とした。CFRP の補強量については、後述するオイラーの弾性座屈式により求めた補強後の座屈荷重が降伏荷重を超えないように設定した。

CFRP の補強範囲は、図-5.2～図-5.4 に示す通りである。CFRP の貼付面は、フランジの両面とした。CFRP の幅方向の寸法は、フランジ外面は鋼板の幅と同じ 100mm とし、フランジ内面は 30mm とした。長さ方向については、試験体全長 1700mm の端部 10mm ずつを残した 1680mm の範囲とした。また、CFRP 補強の積層については、補強端部での応力集中を緩和するために 25mm のずらし範囲を積層ごとに設けた。CFRP の定着長は文献²³⁾の算出方法により 30～60mm 程度と仮定した。これらの補強範囲の方針により、CFRP の各積層における補強材の長さは表-5.3 の通りとした。

表-5.2 圧縮載荷試験における試験体一覧

ケース (種類, 積層数)		試験体番号	
A	補強なし	A-1	A-2
B	中弾性 CFRP シート	3 層	B-1
C		6 層	C-1
D	高弾性 CFRP シート	3 層	D-1
E		6 層	E-1
F	高弾性 CFRP プレート	F-1	F-2

表-5.3 CFRP の積層における補強材の長さ

		1 層目	2 層目	3 層目	4 層目	5 層目	6 層目
中弾性 CFRP シート	3 層	1680mm	1630mm	1580mm	—	—	—
	6 層	1680mm	1630mm	1580mm	1530mm	1480mm	1430mm
高弾性 CFRP シート	3 層	1680mm	1630mm	1580mm	—	—	—
	6 層	1680mm	1630mm	1580mm	1530mm	1480mm	1430mm
高弾性 CFRP プレート		1680mm	—	—	—	—	—

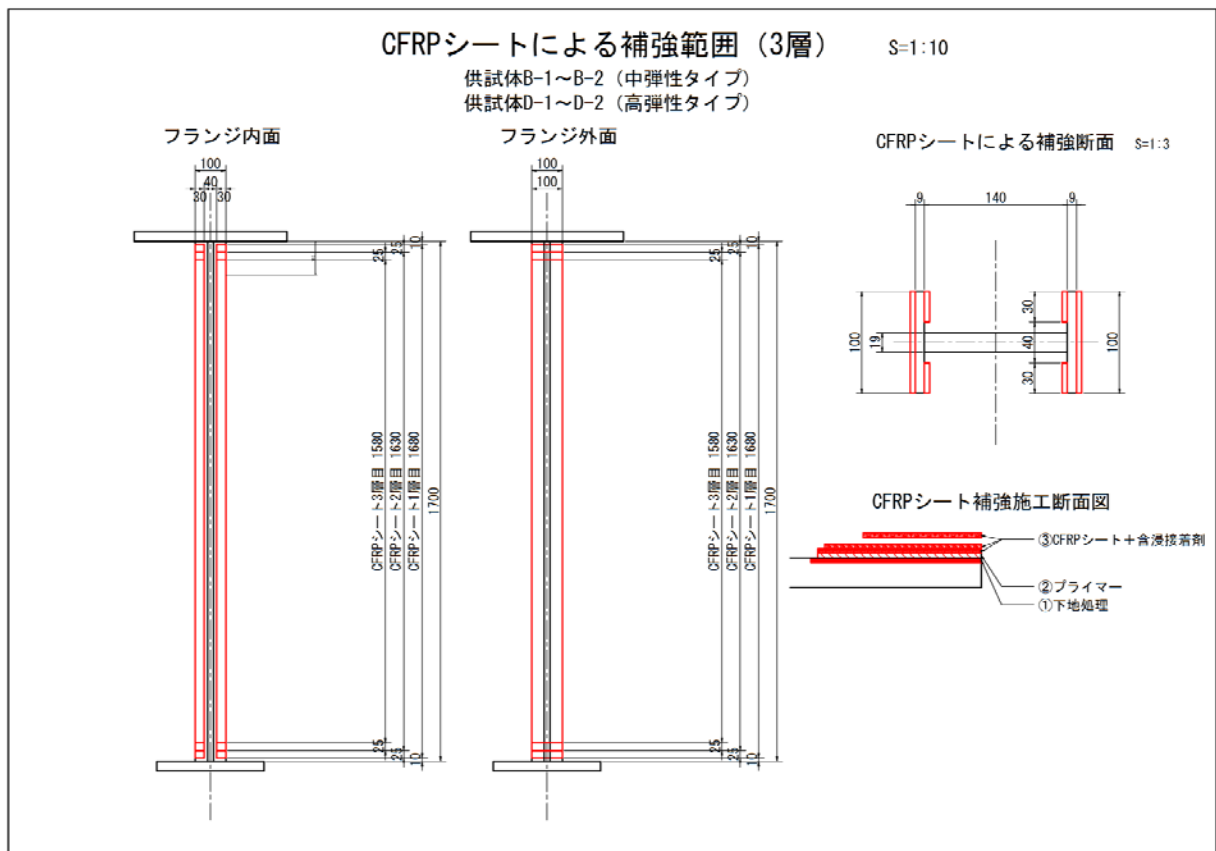


図-5.2 CFRP シート 3 層を補強する場合の補強範囲 (試験体 B-1,B-2,D-1,D-2)

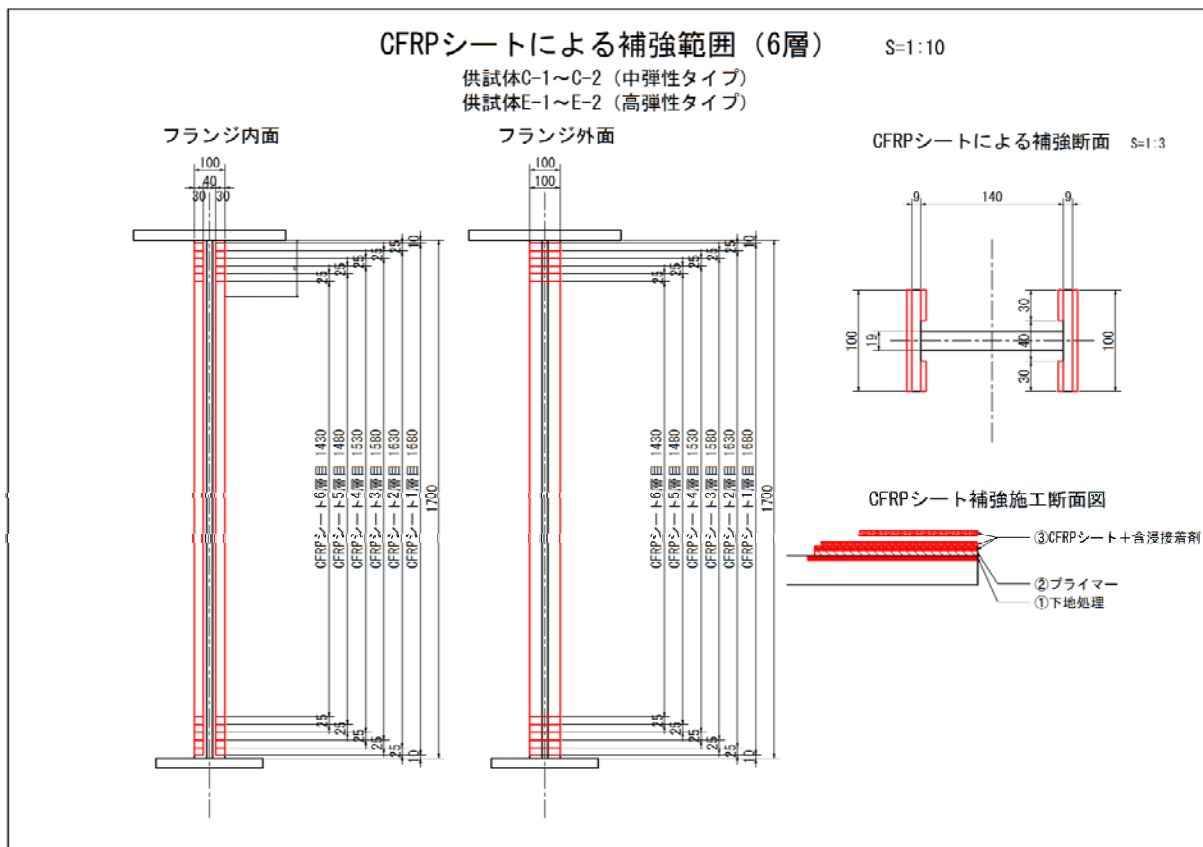


図-5.3 CFRP シート 6 層を補強する場合の補強範囲（試験体 C-1,C-2,E-1,E-2）

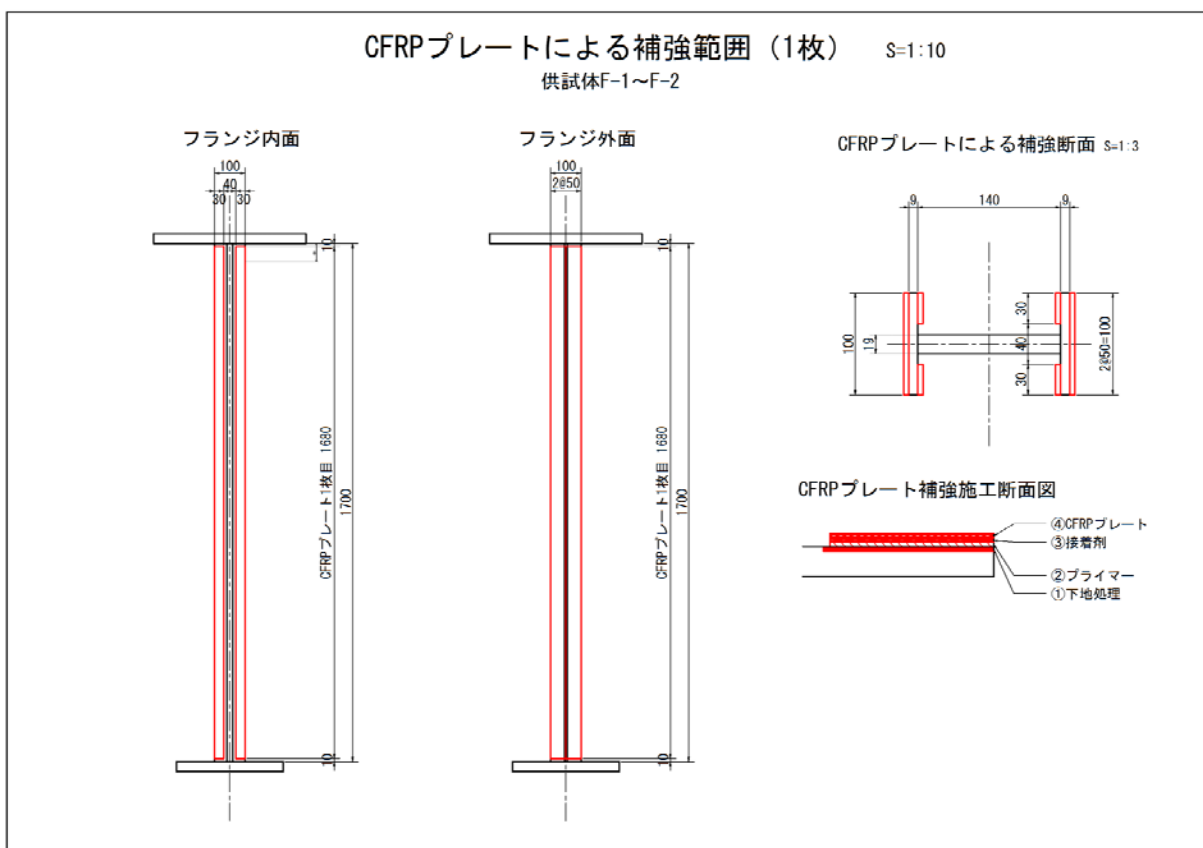


図-5.4 CFRP プレート 1 枚を補強する場合の補強範囲（試験体 F-1,F-2）

5.2.4 圧縮荷重試験における荷重方法と使用した試験装置

圧縮荷重試験をおこなう前に試験装置の改造を実施した。写真-5.1 に示す通り試験体の両端がピン構造となるようにヒンジ部材を配置した。5.2.3 により CFRP 補強を施工した試験体に対して、改造後の試験装置により圧縮荷重試験を実施した。圧縮荷重の荷重は、2000kN 油圧ジャッキにより部材方向に荷重した。圧縮荷重試験の試験状況は、写真-5.1 の通りで、ピン位置の間隔が有効座屈長となるように配置した。ヒンジ部材が有効座屈長の全長に占める割合は約 15%であり、H 形鋼部分よりも曲げ剛性が大きく、後述するオイラーの弾性座屈式における条件である一様な断面とは異なっているが、支間中央部での梁としてのたわみ剛性に対する評価への影響は 3%程度であると推定されるため、座屈荷重への影響は小さいと判断した。また、両端のそれぞれが 13%程度の範囲で補強されていない場合における試験体全長に対する補強範囲の影響については、既往の研究²³⁾で補強範囲を考慮した場合と無視した場合とでは差がないとの結果も示されているため、本研究では考慮していない。荷重は、変位制御により単調に荷重した。変位を増加させることで全体座屈の変形を発生させ、座屈発生後に荷重値が大きく低下した後にもさらに変位を増加させ、CFRP の剥離や繊維破断などの変状が発生し鉛直方向の変位が概ね 6mm になるまで変位を増加させた。その後、荷重値が 0kN になるまで除荷した。

データの記録装置は、(株)東京測器研究所製の「データロガー TDS-530」および「外部スイッチボックス IHW-50G」とノートパソコンを組み合わせ使用した。試験装置と記録装置の接続は図-5.5 に示すシステムブロック図の通りでありロードセルからの入力である荷重データ、変位計からの入力である変位データ、ひずみゲージからの入力であるひずみデータをデータロガーに内蔵されたスイッチボックスと外部スイッチボックスに接続し、データロガーと USB 接続したパソコンでデータの保存を実施した。

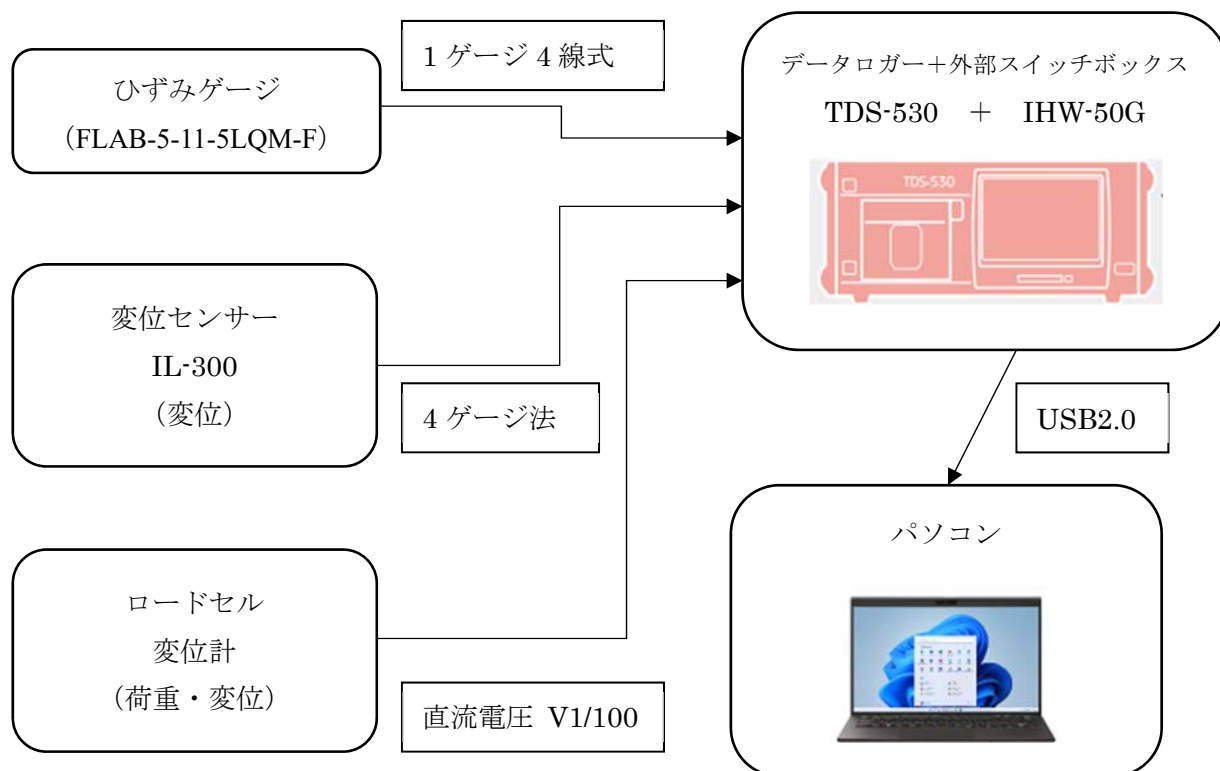


図-5.5 システムブロック図

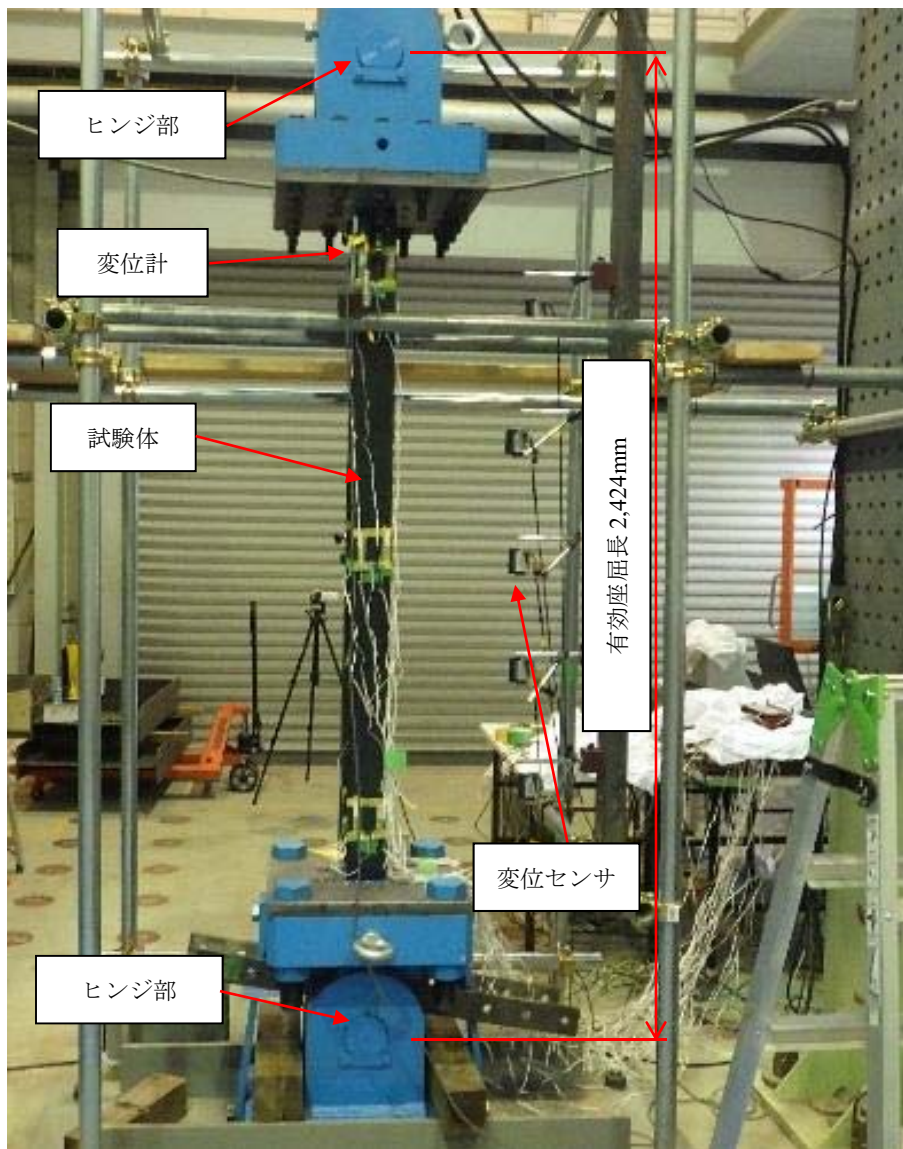


写真-5.1 圧縮載荷試験の試験状況

5.2.5 試験体の計測項目と計測位置

圧縮載荷試験における計測項目は、表-5.4 の通りである。ひずみ測定に使用したひずみゲージは、第4章で使用したのと同じで(株)東京測器研究所の一般用ひずみゲージ「FLAB-5-11-5LQM-F」を使用した。変位の測定に使用した変位計は、レーザー変位センサーは、(株)キーエンスのレーザーセンサー「IL-300」を使用し、接触式変位計は、(株)東京測器研究所の高感度変位計「CDP-50」を使用し、ワイヤー式変位計は、武藤工業(株)のワイヤー式リニアエンコーダ「DEX-01-V」を使用した。荷重値を計測するロードセルは、(株)東京測器研究所のロードセル「TCLP-2MNB」を使用した。

ひずみゲージの貼付位置と変位計による変位の計測位置は図-5.6～図-5.10の通りで、鋼材側面・ウェブ面およびCFRP表面のひずみ計測位置は試験体の中央付近と最終層の端部から部材中央側100mmの位置とした。鉛直方向の変位の計測位置は、試験体上側のベースプレート下面で計測した。水平方向の変位の計測位置は、ウェブ面の中央で300mmの間隔で5か所を、フランジ面の中央で1か所を計測した。

表-5.6 圧縮載荷試験における計測項目

試験体ケース	A	B~E	F	計測方法
荷重 (ロードセル)	1項目	1項目	1項目	ロードセル
ジャッキの ストローク	1項目	1項目	1項目	ワイヤー式 変位計
鋼材部分の ひずみ	フランジ：12箇所 ウェブ：3箇所	フランジ：12箇所 ウェブ：3箇所	フランジ：12箇所 ウェブ：3箇所	ひずみゲージ
CFRP表面の ひずみ	—	18箇所	24箇所	ひずみゲージ
鉛直方向の 変位	2箇所	2箇所	2箇所	接触式変位計
水平方向の変位 (面外方向)	5箇所	5箇所	5箇所	レーザー 変位センサー
水平方向の変位 (面内方向)	1箇所	1箇所	1箇所	接触式変位計

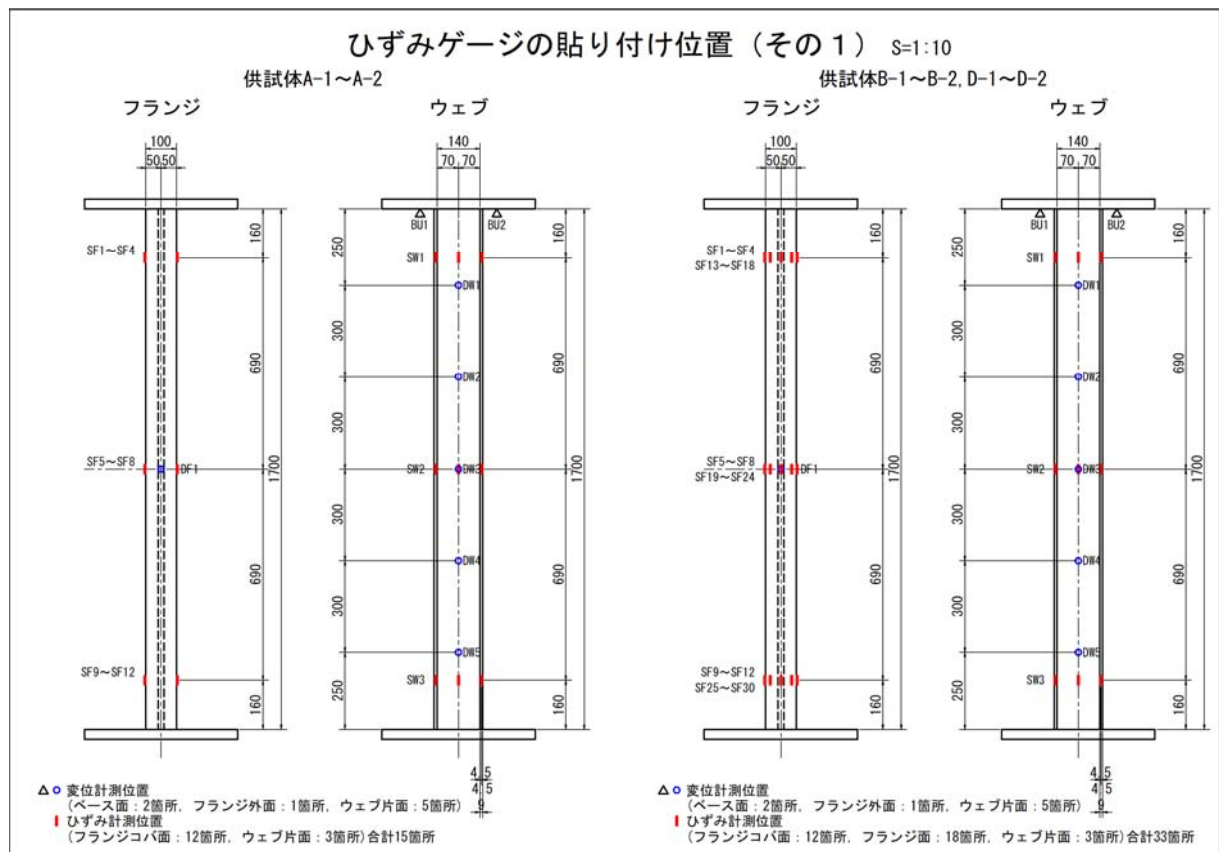


図-5.6 ひずみゲージの貼付位置と変位計測位置（その1）

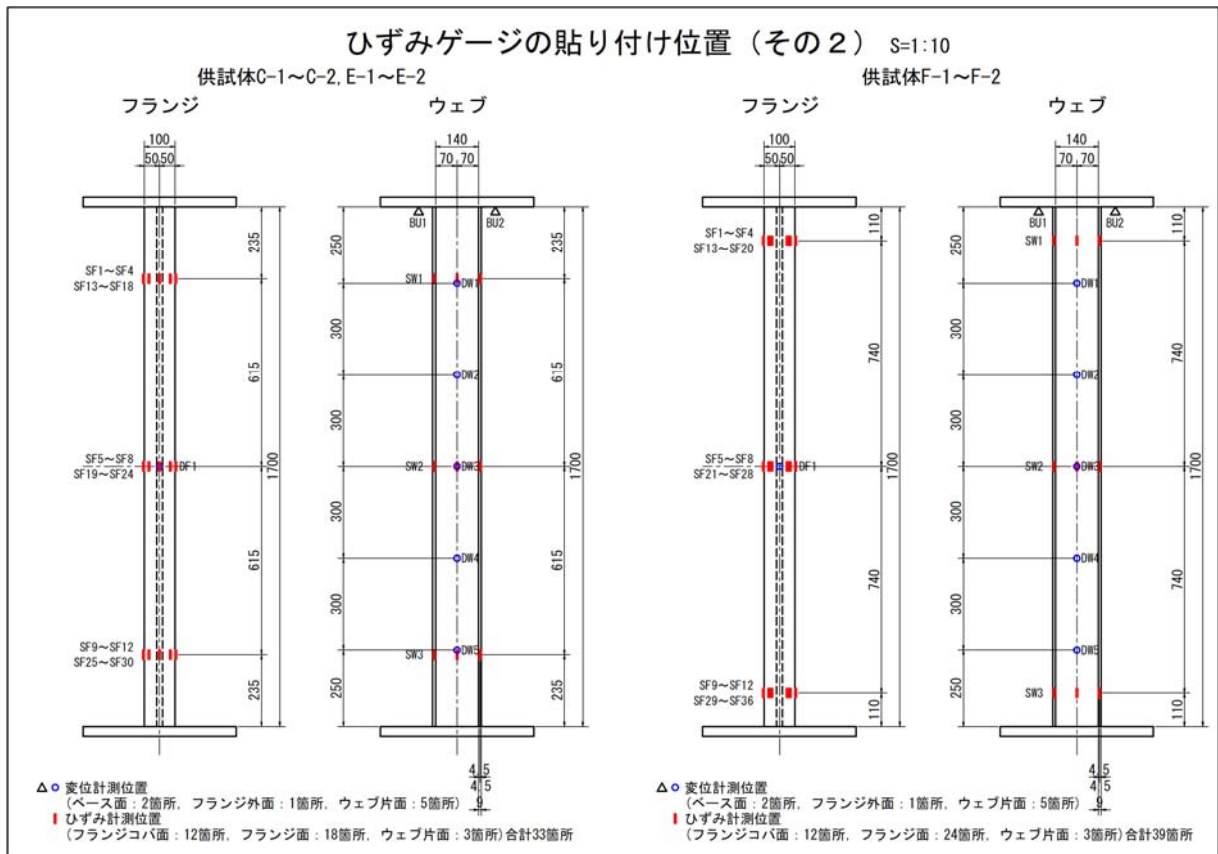


図-5.7 ひずみゲージの貼付位置と変位計測位置（その2）

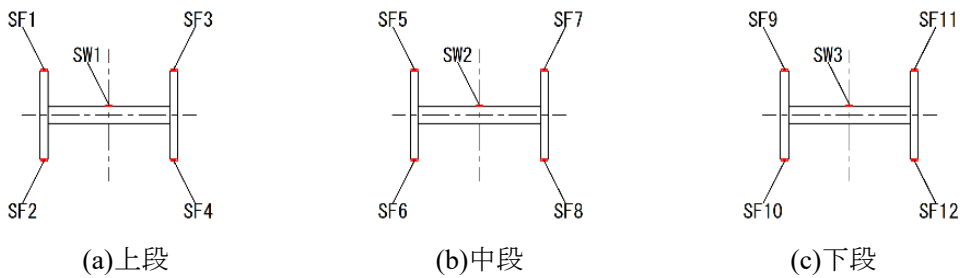


図-5.8 断面方向におけるひずみゲージの貼付位置（試験体 A-1,A-2）

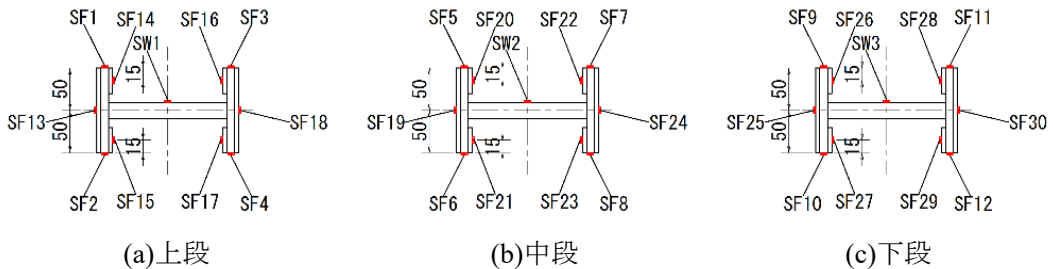


図-5.9 断面方向におけるひずみゲージの貼付位置（試験体 B-1,B-2,C-1,C-2,D-1,D-2,E-1,E-2）

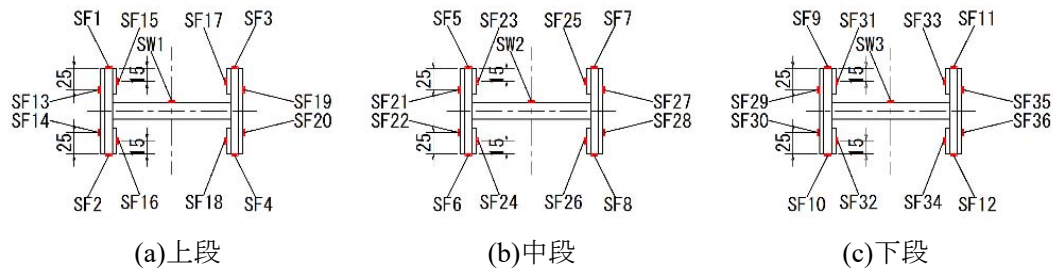


図-5.10 断面方向におけるひずみゲージの貼付位置 (試験体 F-1,F-2)

5.3 実験結果と考察

5.3.1 圧縮載荷試験における荷重値と破壊状態

圧縮載荷試験により得られた全体座屈が発生した時の荷重値と CFRP で補強することによる荷重増加率、および CFRP 補強部における破壊状態を表-5.5 に示す。この表において、全体座屈が発生するときの荷重値は、後程 5.3.3 で示す①オイラーの弾性座屈式から算出した値、②道示Ⅱの基準耐荷力の式から算出した値、③実験により得られた全体座屈荷重の推定値である。実験における座屈荷重の推定値は、座屈前の荷重値と座屈後の荷重値の分布を図-5.11～図-5.16 で示すように直線近似し、その 2 つの近似直線の交点を全体座屈が発生した時の荷重値とした。この方法を座屈荷重の推定法として採用した理由であるが、実験では初期たわみが小さかったことや試験体を設置した時の条件（偏心載荷、載荷方向の軸線のずれやヒンジ部におけるピンの傾きなど）により、オイラーの弾性座屈式から算出した荷重よりも大きな荷重で全体座屈の変形が発生したと認められたことが挙げられる。特に試験体 B-1 および D-2 のケースでは、全体座屈が発生した時および荷重が低下した時の鉛直変位の変化をとらえているが、これらのケースでは今回採用した 2 つの近似直線の交点により求められる座屈荷重は、実験での最大荷重に近い値を与えていると思われる。以上のことより、近似直線による座屈荷重の推定方法が妥当であると判断した。

鋼材のみの断面に対する降伏荷重は、 $P_y=1400\text{kN}$ ($=\sigma_y \times A_s=314\text{N/mm}^2 \times 4460\text{mm}^2$) であるが、全ての試験体において降伏荷重に達する前に全体座屈が発生していることがわかった。試験体 F-1 については、全体座屈による変形が発生せずに CFRP 補強部の破壊（繊維破断と剥離）が発生したため、座屈荷重の実験値を得ることができなかった。試験体 F-2 については、全体座屈による変形が発生したが、座屈変形が発生すると同時に CFRP 補強部の破壊（繊維破断および剥離）も同時に発生したため、補強状態における座屈後の荷重値と鉛直変位の分布データが得られなかった。このことより、試験体 F-1 と F-2 は、全体座屈が発生した時の荷重を推定することはできなかった。また、高弾性 CFRP プレートで補強したケースである試験体 F-2 は、座屈が発生するとともに急激に変形が増加し、CFRP の破断や CFRP の剥離も同時に発生したため、どの時点で CFRP の破断と CFRP の剥離が発生したのかをデータ値の変化で確認することができなかった。以上の結果より、高弾性 CFRP プレートによる補強は、降伏や座屈といった大きなひずみが発生するような状態での適用性が低いと判断することができる。これは、第 4 章で得られた知見の一つである、曲げ作用時における降伏が発生するまでの弾性域ではヤング係数が高い CFRP での補強の方が補強効果高いという結果と傾向が一致する。

CFRP で補強することによる座屈荷重の増加率は、補強なしの試験体 A-1 と A-2 の実験値の平均値に対する増分の割合を示している。CFRP 補強部における破壊の状態は、CFRP の剥離の有無、CFRP の破断の有無を示している。全体座屈が発生した場合は、写真-5.2 に示すように部材全体が曲がる変形となった。CFRP の剥離は、写真-5.3 に示すように、全体座屈の曲がりにおいて圧縮方向の変形が作用する部分で鋼材と接着剤の界面で剥離が発生し、CFRP 補強が盛り上がるような変形が発生した。CFRP の破断は、写真-5.4 に示すように CFRP 内にある炭素繊維が破断した。試験体 F-1 においては、写真-5.5 に示すように CFRP プレートが割れて、鋼材面からの剥離が発生した。試験体 F-2 においては、写真-5.6 に示すように CFRP プレートが粉々に割れる破壊が発生した。

CFRP の補強層数による影響については、中弾性 CFRP シートにより補強したケースおよび高弾性 CFRP シートにより補強したケースのいずれのケースについても補強層数を 3 層から 6 層に増やすことで座屈荷重が増加することが確認できた。その増加率は、補強なしのケースと比較して、3 層の場合が 28%の増加率、6 層の場合が 51～59%の増加率であったことが確認できた。

次に、CFRPの種類による影響については、補強による座屈荷重の増加率を比較すると、CFRPシート6層のケースにおいては増加率に差がない結果であった。このことは、5.3.2で後述する高弾性CFRPシート6層でみられた圧縮時のヤング係数の顕著な低下が影響していると推定することができる。

また、中弾性CFRPシートのケースにおいては、CFRPの破断が発生しなかったが、高弾性CFRPシートと高弾性CFRPプレートのケースでは、写真-5.4～写真-5.6に示す通りCFRPの破断とCFRPの剥離が発生した。このCFRPの破断の現象は、図-5.14および図-5.15における試験体D-1、D-2、E-1、E-2のケースでの座屈後の荷重値をみると、鉛直変位が概ね4mmになったときに荷重値の急激な低下が発生していたことから判断することができる。CFRPの破断が発生した場合は、いずれのケースにおいても補強なしのケースである試験体Aの結果に近づくように荷重値が低下していたことが確認できた。これは、CFRPの破断が発生することにより、CFRPによる補強効果が失われたことを示している。このことより、既往の研究^{23),25),36)}でも指摘されているように、高弾性CFRPシートでは全体座屈が発生した後の大きな変形に対しては追従できずにCFRPの破断が発生した。このCFRPの破断を抑制するためには、高伸度弾性パテ材の適用が有効とされているが、今回の実験では他の試験体と条件を揃えるために使用していない。中弾性CFRPシートで補強した試験体のケースにおいては、CFRPの破断が発生することなく4mm以上の変形に対して追従することができることが確認できた。このことは、中弾性CFRPシートによる補強をすることで全体座屈が発生した後も補強の剛性を維持しながら大きな変形に対しても追従することができることを示している。この特徴を生かして、軸力部材に地震力が作用した場合に座屈変形によりエネルギー吸収をすることが期待できることを示した結果である。

CFRPの破断が発生する前の鉛直変位3.5mmの時のにおける水平変位の分布を図-5.17に、最大鉛直変位6mmの時のにおける水平変位の分布を図-5.18に示す。水平方向の変位の計測位置は、図-5.6および図-5.7に示すウェブ面での5か所を計測している。CFRPの繊維破断が発生する前である鉛直変位3.5mmの時では、補強なしのケースである試験体Aの水平変位が最も大きくなり、中弾性CFRPシートによる補強のケースである試験体B,Cよりも高弾性CFRPシートによる補強のケースである試験体D,Eの方が水平変位を小さく抑えられていたことが確認できる。また、補強量の違いによる比較においても3層補強したケースの試験体よりも6層補強したケースの試験体の方が水平変位を小さく抑えられており、全体座屈が発生した後においてもCFRPによる補強効果が維持されていることが確認できた。しかし、鉛直変位が6mmの時では、水平変位の大きさは補強なしのケースである試験体Aの水平変位が最も大きいのは変わらないが、中弾性CFRPシートで補強したケースである試験体B,Cの水平変位は、補強なしの試験体Aの場合と比較して84～92%に水平変位が小さくなっていたことが確認できる。この結果は、CFRPで補強することにより曲げに対する剛性の増加が維持されていると推測できる。しかし、高弾性CFRPシートにより補強したケースである試験体D,Eの水平変位は、補強なしの試験体Aの場合と比較して94～96%しか水平変位が小さくなっていなかったことが確認できる。このように、鉛直変位3.5mmの時と6mmの時の水平変位の変化の割合を比較することでCFRPの繊維破断と剥離により補強効果が失われたことが影響していると推測できる。この曲げ変形に対するCFRPの補強効果の傾向は、第4章で確認した鋼板をCFRP補強したケースにおける補強効果と概ね一致する。

荷重を除荷した時の挙動についても、図-5.11～図-5.16に示す通り特徴的な挙動を確認することができた。座屈変形が発生せずに鋼材の降伏による塑性変形が発生した部材を除荷するときの荷重と変位の関係の傾きは初期剛性の傾きとなることが一般的である。しかし、今回の実験においては、明らかに異なる挙動となっていることが図からも確認できる。具体的には、座屈変形がある程度進展した部材に対して荷重を除荷していくと、除荷し始めた初期の段階では荷重値の減少が小さく変形が急激に戻る挙動

を示すことが確認できた。これは、座屈による塑性変形が部材中央付近の局所的な範囲で発生し、部材全体としては水平方向の曲げ変形による影響が支配的であると推測できる。この挙動は、直線的な挙動ではなく、曲線的な挙動となっているため、各試験体の実験値を直線近似、2次曲線近似、および3次曲線近似で表してみると、図-5.20 に示す通りである。実験値と直線近似を比較すると、実験値の分布は明らかに直線分布ではないことがわかる。実験値と2次曲線近似、3次曲線近似を比較すると、精度よく近似できていることがわかる。また、2次曲線近似と3次曲線近似に精度の差はほとんどないことがわかる。このことより、除荷時の荷重と変位の関係は、2次曲線で精度よく近似することができることが確認できた。図-5.19 に示す両端ピン支持の座屈による面外方向のたわみ量は、一般解として式(5.4)の通り、三角関数で表される。このとき、 C は任意の係数であり、 x は図-5.19 に示す通り端部からの距離を示す。面外方向のたわみ量が小さい場合、部材長 L の中間点におけるたわみ y は、テイラー展開で1次までの項で近似することができる。このとき $\sin kx \cong kx$ より、 $y = C \cdot k \cdot L/2$ となる。これを式(5.5)に代入すると式(5.6)になるため、荷重 P は面外変形 y の2次曲線で近似することができる。以上のことより、本研究で求めた近似式においても2次曲線により近似することが妥当であると判断できる。

$$y = C \sin kx \quad (5.4)$$

$$k^2 = \frac{P}{EI} \quad (5.5)$$

$$P = \frac{4EI \cdot y^2}{L^2} \quad (5.6)$$

ここで、

P : 両端に作用させる部材軸方向の力(N)

E : ヤング係数(N/mm²)

I : 断面2次モーメント(mm⁴)

表-5.5 圧縮载荷試験の結果一覧

試験体	細長比パラメータ	全体座屈発生時の荷重値 P_{cr} (kN)				補強による増加率 (%)	理論値との比較		CFRPの破壊状態	
		オイラー式①	道示式②	実験値③	③の平均値④		③/①	③/②	剥離	破断
A-1	1.624	530.8	410.5	398.3	397.6	—	0.750	0.970	—	—
A-2				396.9						
B-1	1.567	612.3	465.7	503.9	512.7	28.9	0.823	1.082	○	
B-2				521.4						
C-1	1.521	693.9	520.1	639.3	630.3	58.5	0.921	1.229	○	
C-2				621.2						
D-1	1.563	635.5	481.2	515.8	509.6	28.2	0.814	1.072	○	○
D-2				503.5						
E-1	1.516	736.3	551.0	610.0	599.9	50.9	0.828	1.107	○	○
E-2				589.7						
F-1	1.447	902.8	659.4	F-1は全体座屈が発生しなかったため実験値なし			○	○	○	○
F-2				F-2は急激に座屈したため実験値の推定不可						

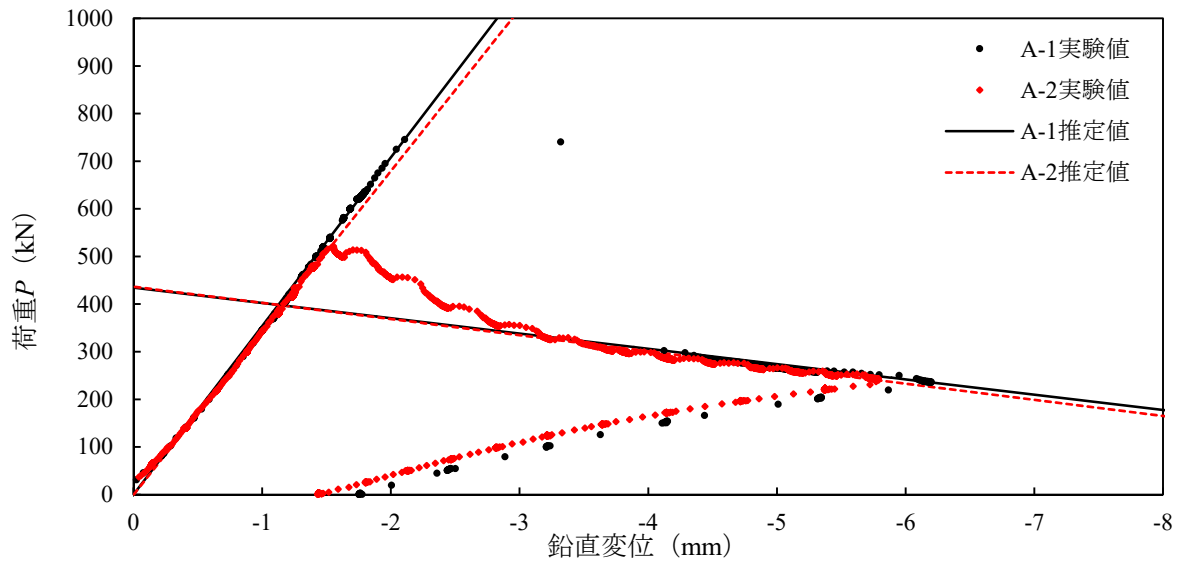


図-5.11 鉛直荷重－鉛直変位関係および座屈荷重の推定（試験体 A-1,A-2）

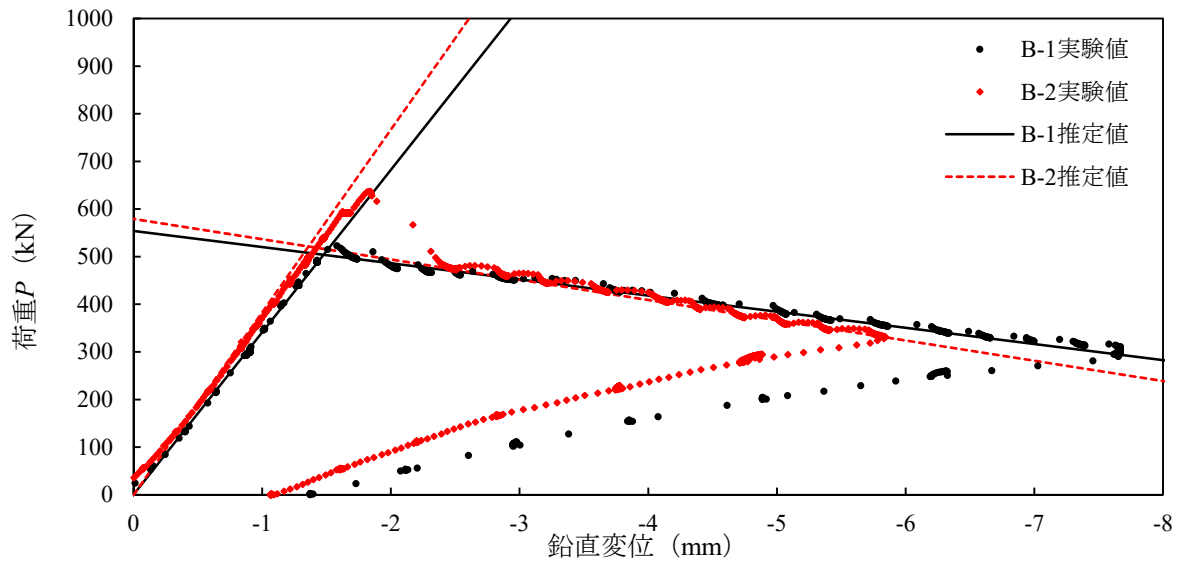


図-5.12 鉛直荷重－鉛直変位関係および座屈荷重の推定（試験体 B-1,B-2）

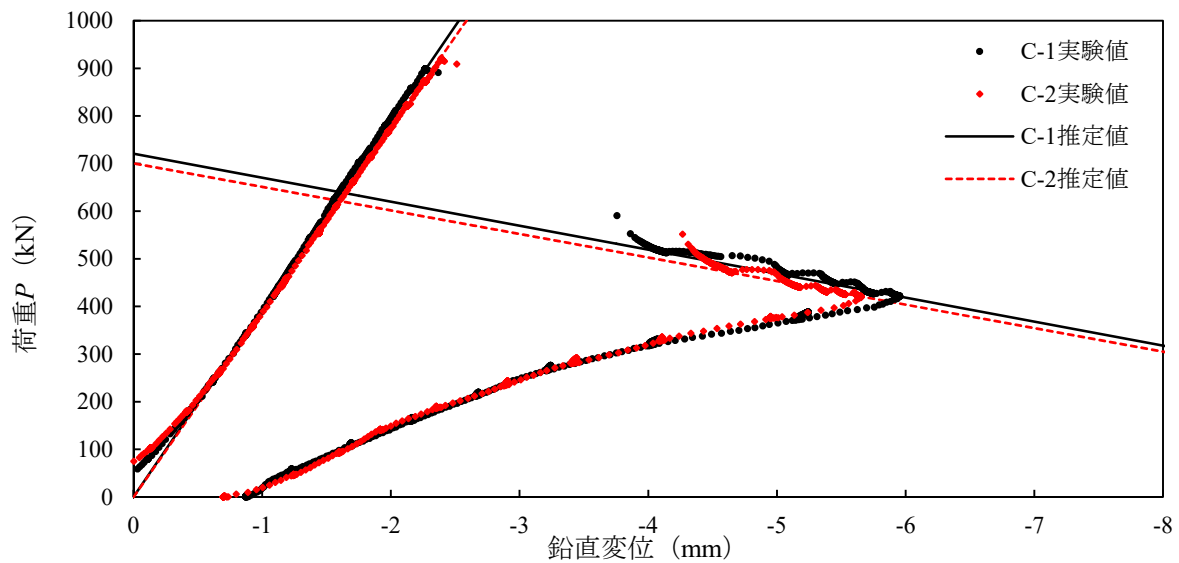


図-5.13 鉛直荷重－鉛直変位関係および座屈荷重の推定（試験体 C-1,C-2）

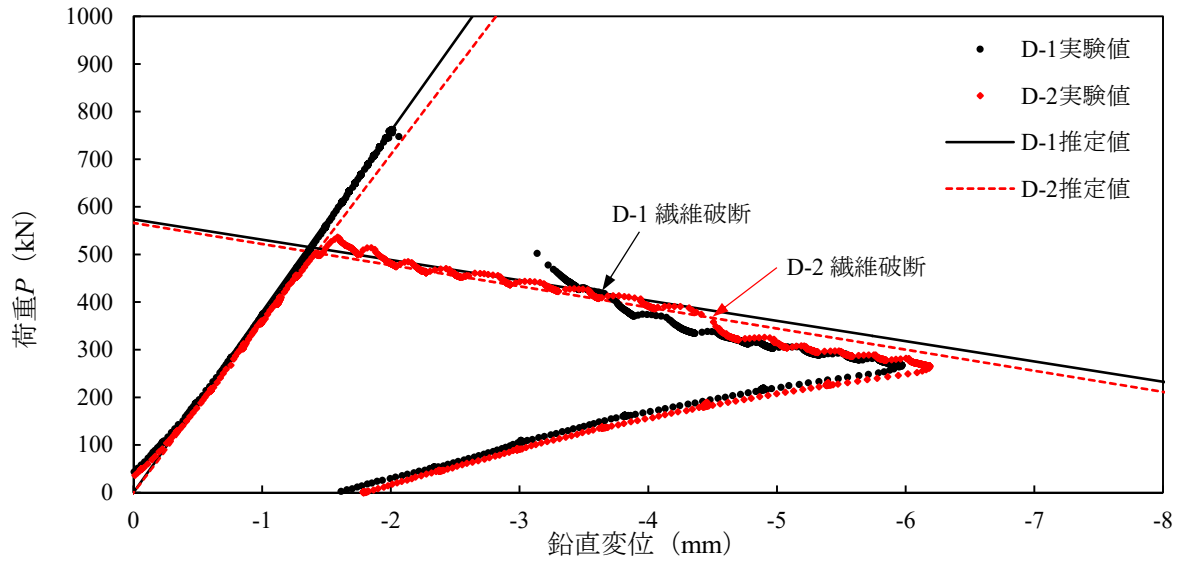


図-5.14 鉛直荷重—鉛直変位関係および座屈荷重の推定 (試験体 D-1,D-2)

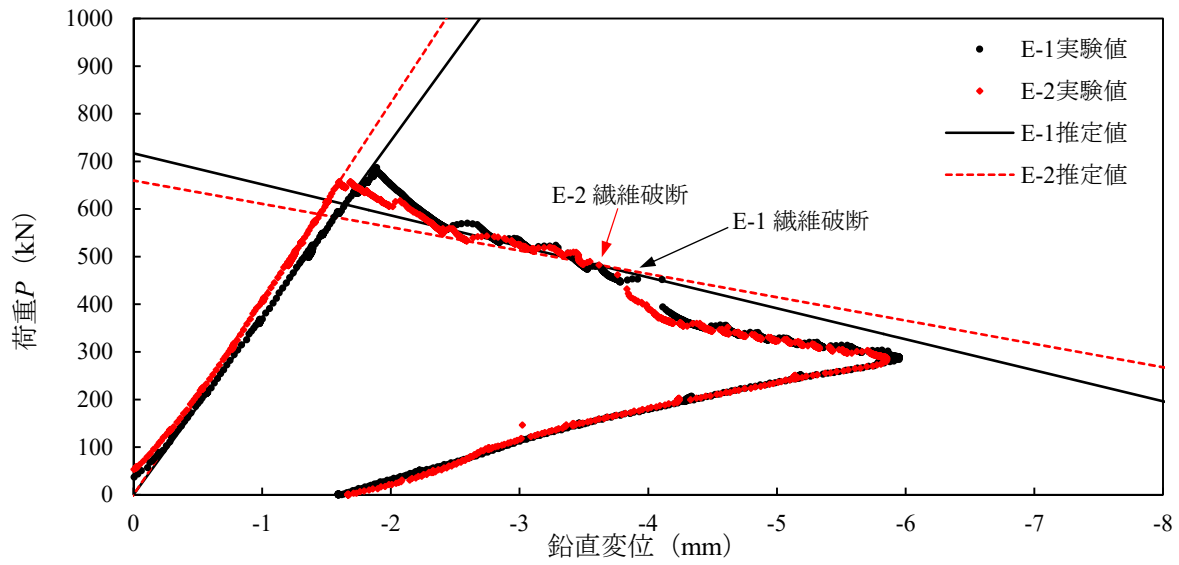


図-5.15 鉛直荷重—鉛直変位関係および座屈荷重の推定 (試験体 E-1,E-2)

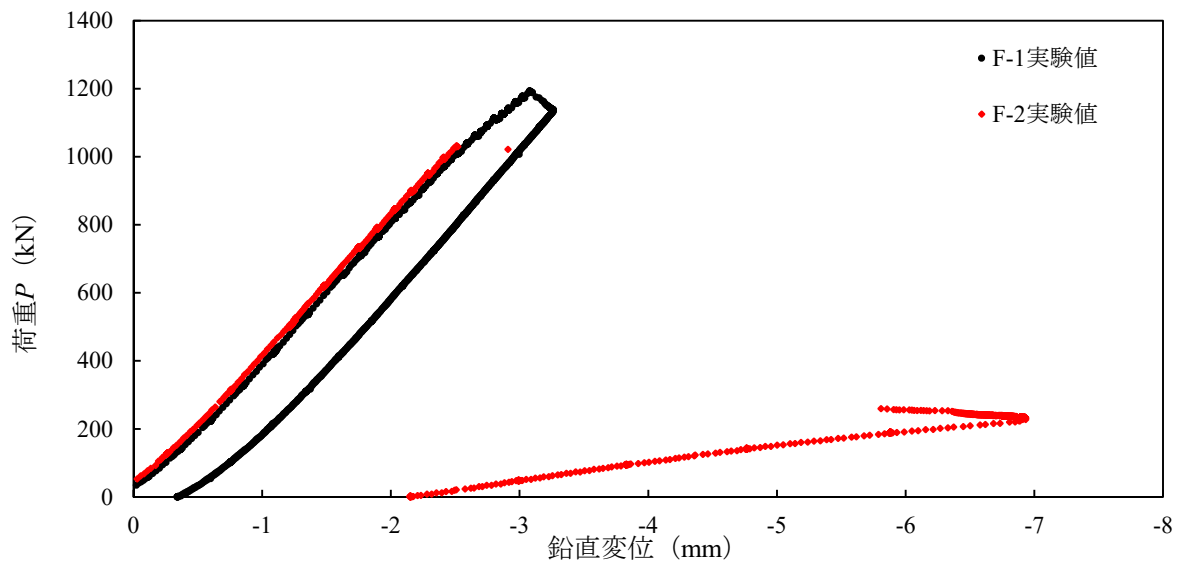


図-5.16 鉛直荷重—鉛直変位関係および座屈荷重の推定 (試験体 F-1,F-2)

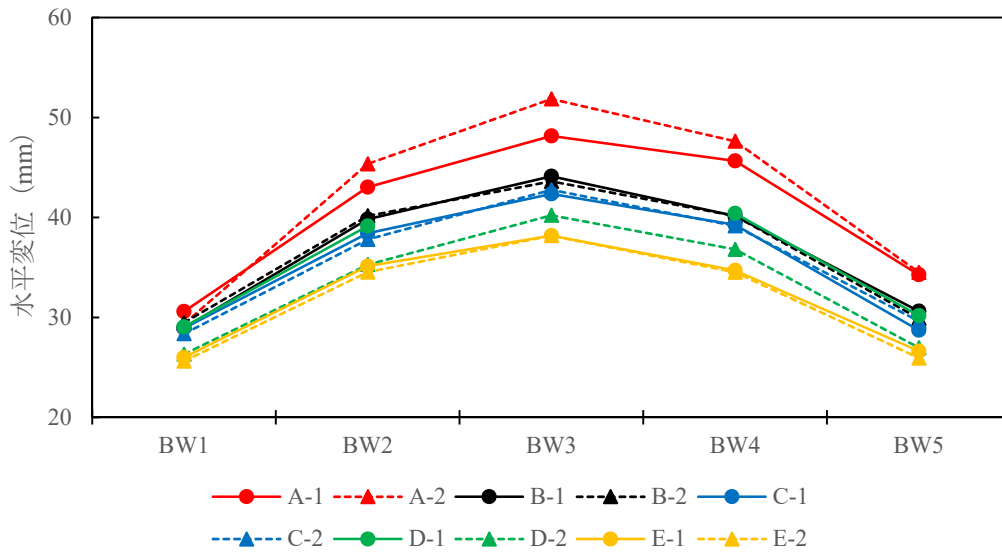


図-5.17 水平変位の分布 (鉛直変位 3.5mm 時)

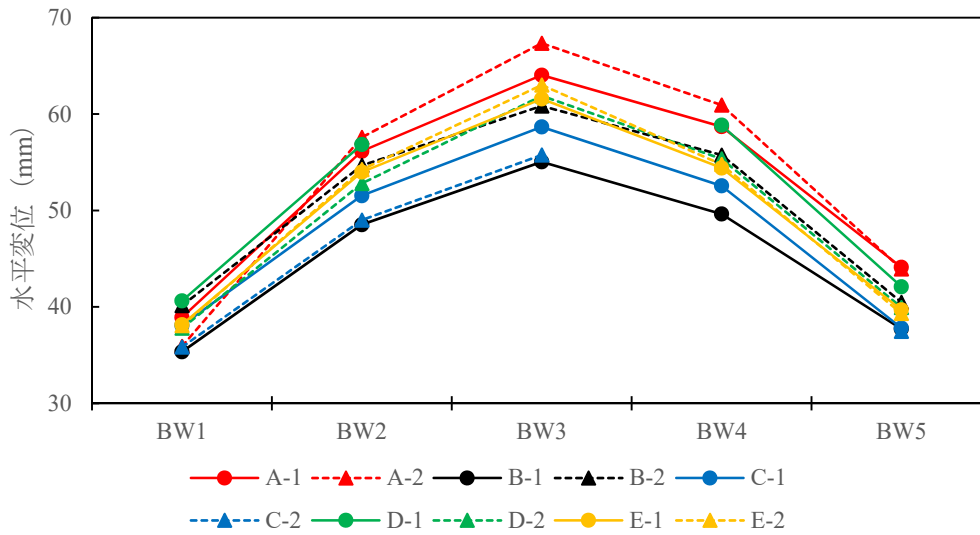


図-5.18 水平変位の分布 (鉛直変位 6mm 時)

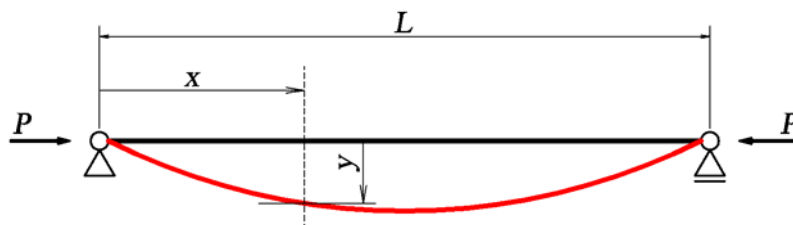
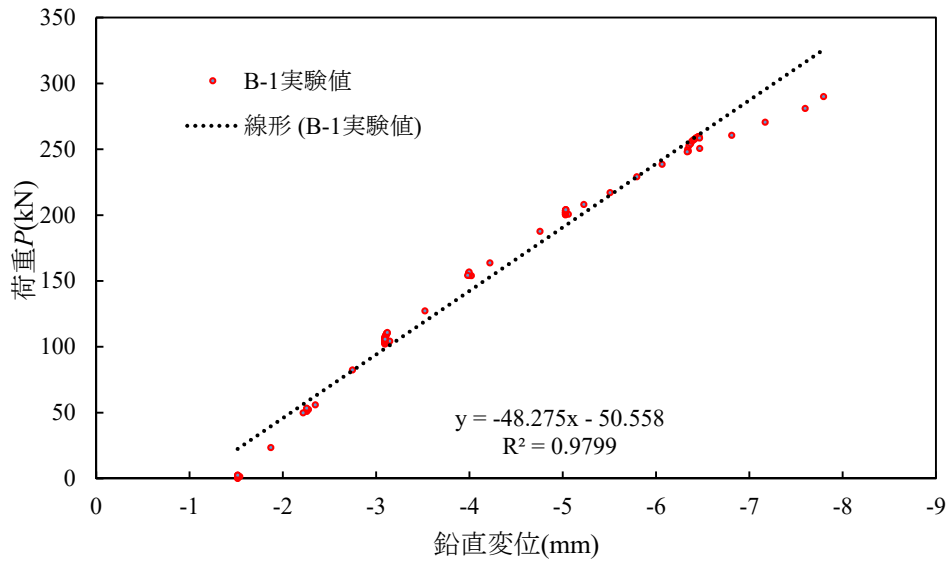
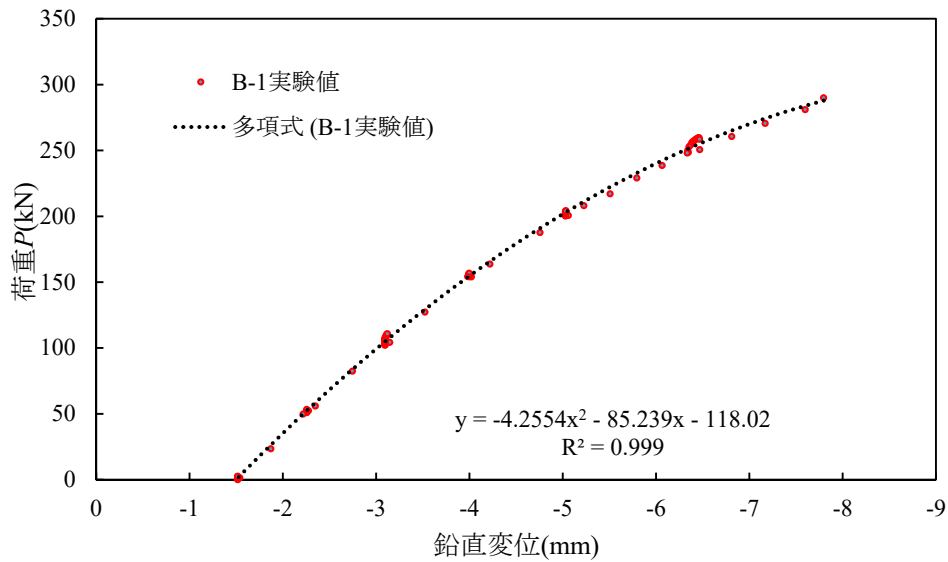


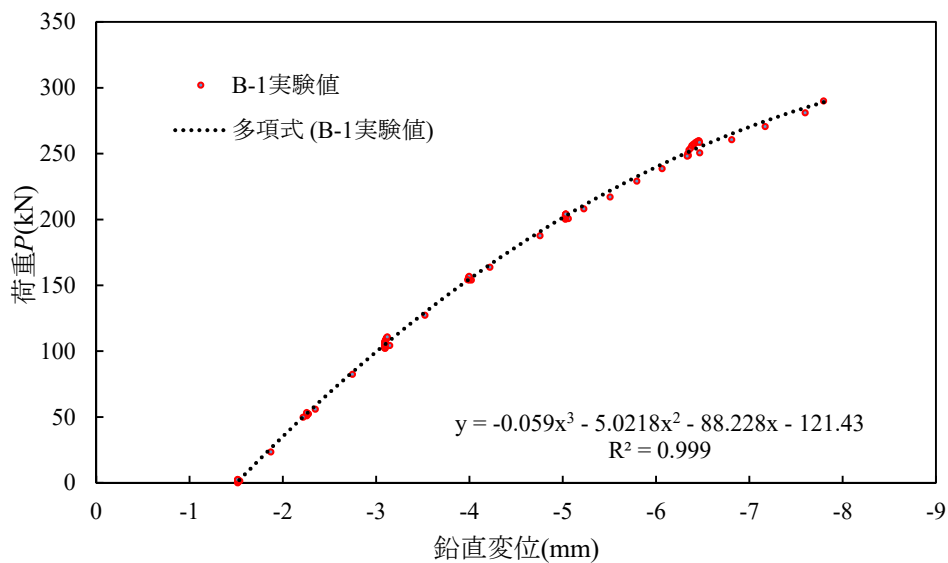
図-5.19 両端ピン支持の単純梁における座屈変形



(a)線形近似



(b)2次曲線近似

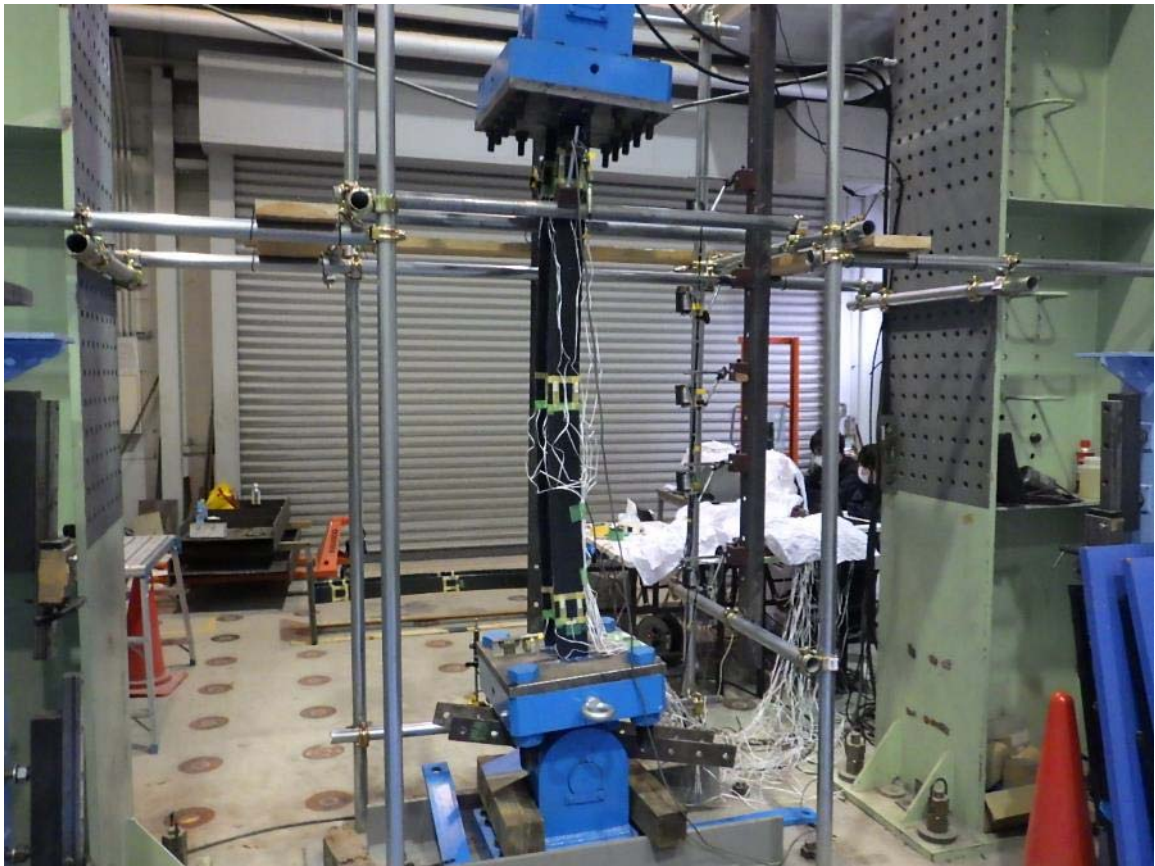


(c)3次曲線近似

図-5.20 除荷時における荷重と鉛直変位の関係に対する近似曲線 (試験体 B-1)



(a)試験体 B-1

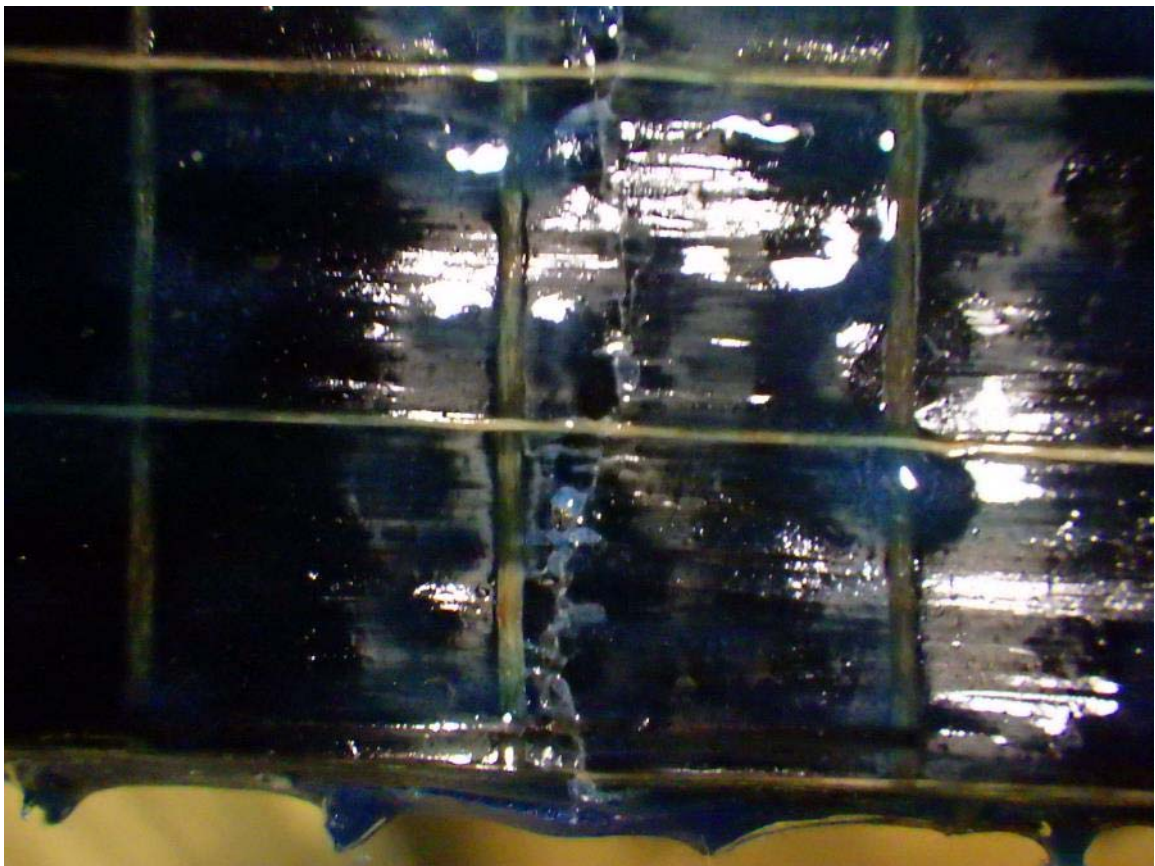


(b)試験体 B-2

写真-5.2 圧縮載荷試験終了後の試験体

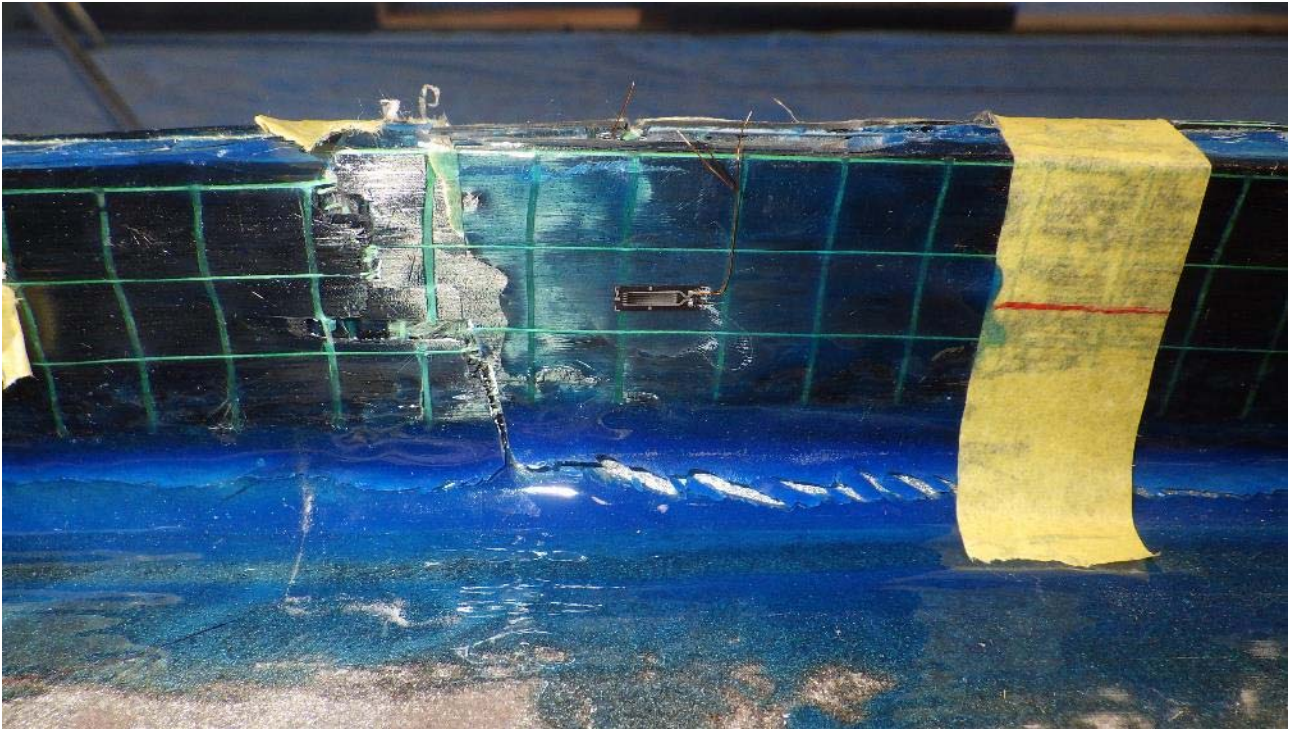


(a)幅方向

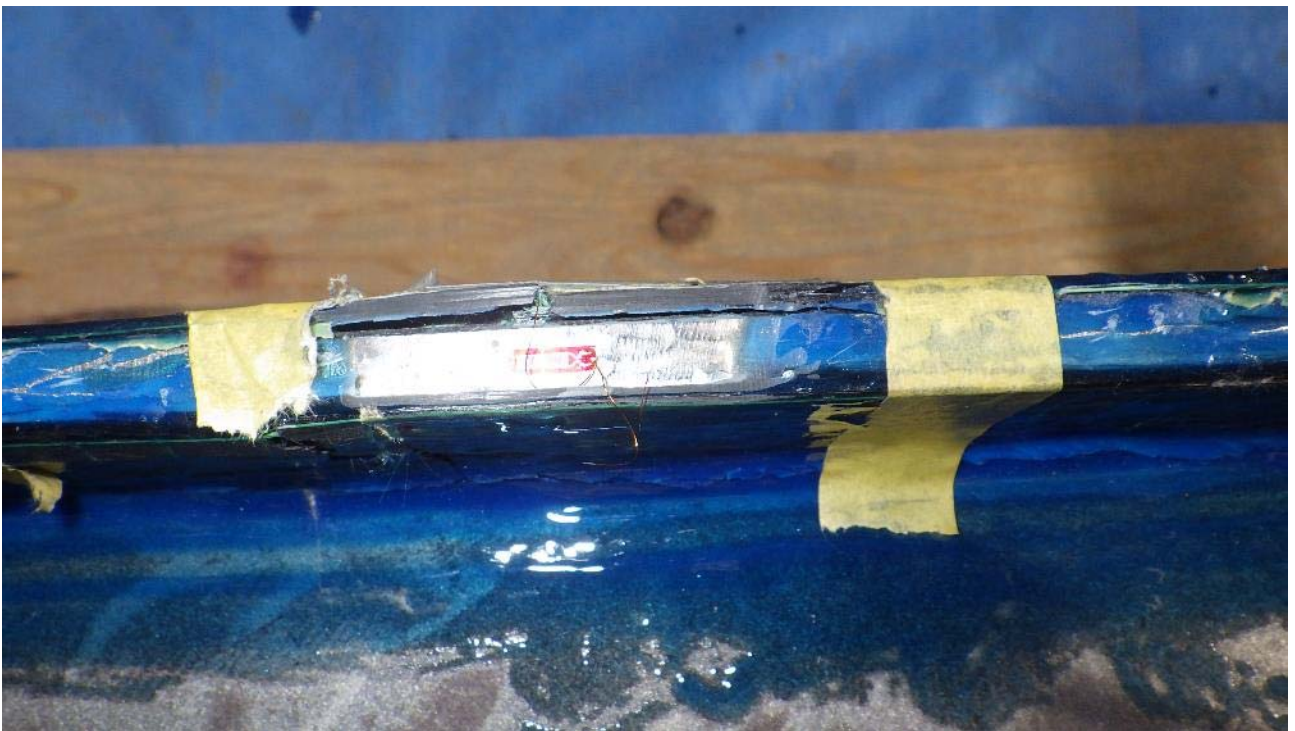


(b)幅方向 (接写)

写真-5.3 圧縮載荷試験終了後の CFRP 表面 (試験体 C-1)

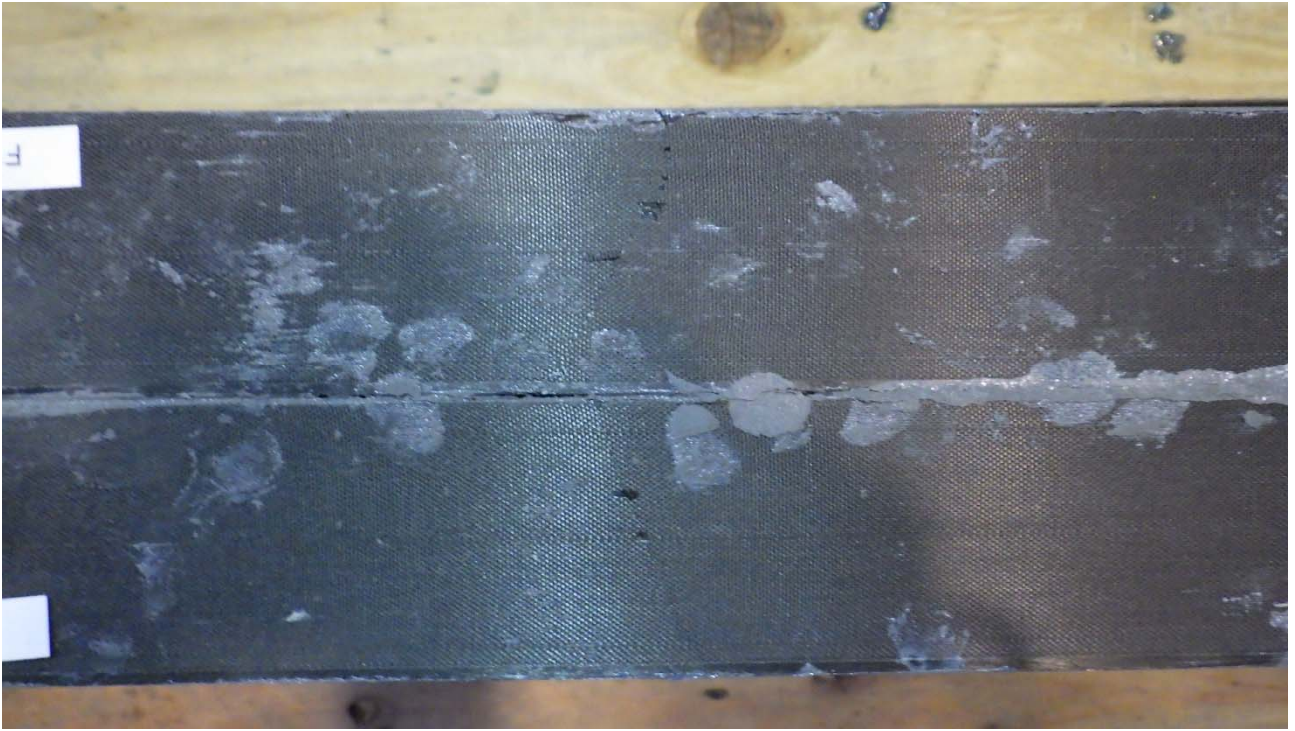


(a)幅方向 (接写)



(b)板厚方向 (接写)

写真-5.4 圧縮載荷試験終了後の CFRP 表面 (試験体 D-1)



(a)幅方向



(b)板厚方向

写真-5.5 圧縮載荷試験終了後の CFRP 表面 (試験体 F-1)



(a)幅方向



(b)板厚方向

写真-5.6 圧縮載荷試験終了後の CFRP 表面 (試験体 F-2)

5.3.2 圧縮荷重時における CFRP のヤング係数の推定

CFRP の引張時と圧縮時の見かけのヤング係数の違いについては、既往の文献^{33),34)}において 80%程度に低下することが検証されており、第 4 章においても板要素に対する CFRP 補強の場合で確認した。そこで、鋼製 H 形断面においても同様の傾向があるかどうかを確認するため、実験値における荷重とひずみの関係により、圧縮荷重時における CFRP の見かけのヤング係数の推定をおこなった。具体的には、実験結果において全体座屈が発生するまでの荷重とひずみの関係を直線近似し、その直線の傾きが式(5.7)に示される合成断面のヤング係数 E_{s+cf} と合成断面の断面積 A_{s+cf} の積であることに着目して、式(5.8)～(5.11)により CFRP のヤング係数 E_{cf} を算出した。

$$P = E_{s+cf} \cdot A_{s+cf} \cdot \varepsilon \quad (5.7)$$

$$A_{s+cf} = A_s + A_{cf} \quad (5.8)$$

$$E_{s+cf} = \frac{E_s \cdot A_s + E_{cf} \cdot A_{cf}}{A_s + A_{cf}} \quad (5.9)$$

$$E_{s+cf} \cdot A_{s+cf} = E_s \cdot A_s + E_{cf} \cdot A_{cf} \quad (5.10)$$

$$E_{cf} = \frac{E_{s+cf} \cdot A_{s+cf} - E_s \cdot A_s}{A_{cf}} \quad (5.11)$$

ここで、

P : 圧縮荷重時の荷重(N)

E_s : 鋼材のヤング係数(N/mm²)

E_{cf} : CFRP のヤング係数(N/mm²)

E_{s+cf} : 鋼材と CFRP の合成断面におけるヤング係数(N/mm²)

A_s : 鋼材の断面積(mm²)

A_{cf} : CFRP の断面積(mm²)

A_{s+cf} : 鋼材と CFRP の合成断面における断面積(mm²)

ε : ひずみゲージにより計測した座屈前に鋼材に発生するひずみ

式(5.7)～(5.11)により推定した圧縮時における CFRP の見かけのヤング係数の推定値は、表-5.6 および表-5.7 に示す通りである。また、圧縮荷重試験において弾性域での荷重とひずみの関係を直線近似した近似直線(図-付 5.15～図-付 5.38)から算出した傾きを表-5.8 に示す。まず、鋼材のヤング係数 E_s については、試験体 A-1 および A-2 の荷重とひずみの関係の傾きから算出した。その結果、実験値から算出した鋼材のヤング係数は、設計値である $E_s=2.0 \times 10^5 \text{N/mm}^2$ よりも 6～9%大きい値であることが確認できた。このことより、本章の検討で使用する鋼材のヤング係数は、実験値より算出した値の平均値である $E_s=2.143 \times 10^5 \text{N/mm}^2$ を用いることにした。CFRP の見かけのヤング係数 E_{cf} は、実験値より推定した値とメーカー発行の試験成績書に記載されている引張時のヤング係数の値を比較すると、中弾性 CFRP シートで補強したケースである試験体 B, C では 0.930～1.133 であり、いずれの試験体においてもメーカー発行の試験成績書の値である引張時のヤング係数と同程度の値が発現していることが確認できた。高弾性 CFRP シートで補強したケースである試験体 D, E では 0.778～1.072 であり、特に高弾性 CFRP シート 6 層で補強したケースである試験体 E では引張時のヤング係数より比較的小さい値が発現していることが確認できた。高弾性 CFRP プレートで補強したケースである試験体 F では 0.728～0.759 であり、このケースにおいても引張時のヤング係数より比較的小さい値が発現していることが確認できた。このこと

より、本章の実験結果においては、試験体のサイズおよび補強状態による条件で高弾性 CFRP シート 6 層と高弾性 CFRP プレートの試験体において、圧縮時の見かけのヤング係数の低下が顕著に表れたケースであったと推測できる。

同一条件の試験体において、実験値から算出した見かけの CFRP のヤング係数 E_{cf} の推定値では最大 20% 程度のばらつきがある。これは、CFRP を貼り付けしたときの貼付位置のずれや含浸樹脂の施工量が均一でないことに起因する鋼材との接着性能の低下など、CFRP 補強の施工に対する不確定要素が影響していると推定できる。しかし、合成後のヤング係数 E_{s+cf} の推定値では最大 2% 程度の小さなばらつきとなっている。このことより、CFRP の見かけのヤング係数 E_{cf} の推定値におけるばらつきが、CFRP 補強による補強効果に対して与える影響は小さいと判断できる。

表-5.6 圧縮荷重時における CFRP の見かけのヤング係数の推定 (その 1)

試験体	鋼材の断面積 $A_s(\text{mm}^2)$ ※1	CFRP の断面 積 $A_{cf}(\text{mm}^2)$ ※1	鋼材のヤング係数 $E_s(\times 10^5\text{N/mm}^2)$			補強後の断面 積 $A_{s+cf}(\text{mm}^2)$													
			実験値	設計値	比較														
A-1	4460.0	-	2.171	2.000	1.085	4460.0													
A-2			2.116		1.058														
B-1		158.4	2.143 (A-1,A-2 の 平均値)		1.072		4618.4												
B-2																			
C-1		316.8					2.143 (A-1,A-2 の 平均値)	1.072		4776.8									
C-2																			
D-1		137.3								2.143 (A-1,A-2 の 平均値)	1.072		4597.3						
D-2																			
E-1		274.6											2.143 (A-1,A-2 の 平均値)	1.072		4734.6			
E-2																			
F-1		640.0														2.143 (A-1,A-2 の 平均値)	1.072		5100.0
F-2																			

※1：鋼材および CFRP の断面積は幅に設計値を乗じた公称値とした。

表-5.7 圧縮荷重時における CFRP の見かけのヤング係数の推定 (その2)

試験体	補強後のヤング係数 $E_{s+cf}(\times 10^5 \text{ N/mm}^2)$			CFRP のヤング係数 $E_{cf}(\times 10^5 \text{ N/mm}^2)$			$E_{s+cf} \cdot A_{s+cf}(\times 10^8 \text{ N})$			
	実験値 ^{※1}	計算値 ^{※2}	比較	実験値 ^{※3}	試験成績書 ^{※4}	比較	実験値 ^{※5}	計算値 ^{※6}	比較	
A-1	2.171	2.171	1.000	-	-	-	9.681	9.681	1.000	
A-2	2.116	2.116	1.000	-	-	-	9.437	9.437	1.000	
B-1	2.230	2.211	1.008	4.666	4.120	1.133	10.298	10.212	1.008	
B-2	2.201		0.996	3.830		0.930	10.166		0.996	
C-1	2.256	2.274	0.992	3.847		0.934	10.778	10.864	0.992	
C-2	2.311		1.016	4.664		1.132	11.037		1.016	
D-1	2.297	2.282	1.006	7.280		6.790	1.072	10.559	10.491	1.006
D-2	2.285		1.001	6.890			1.015	10.505		1.001
E-1	2.348	2.413	0.973	5.668	0.835		11.115	11.424	0.973	
E-2	2.329		0.965	5.349	0.778		11.028		0.965	
F-1	2.320	2.726	0.851	3.554	4.880		0.728	11.834	13.905	0.851
F-2	2.339		0.858	3.705			0.759	11.931		0.858

※1: $E_{s+cf} \cdot A_{s+cf}$ の実験値を補強後の断面積 A_{s+cf} で除した値

※2: 鋼材のヤング係数 E_s は実験値とした. CFRP のヤング係数 E_{cf} はメーカー発行の試験成績書の値

※3: 各実験値を用いて式(5.11)により算出した値

※4: メーカーが事前に JIS A1191/JSCE-E541 に準じて試験した成績であり, 引張時の弾性率 (ヤング係数)

※5: 実験結果における荷重とひずみの関係を直線近似して式(5.7)より求めた傾き (表-5.8)

※6: 補強後のヤング係数 E_{s+cf} の計算値に補強後の断面積 A_{s+cf} を乗じた値

表-5.8 荷重とひずみの関係を直線近似して式(5.7)より求めた傾き

試験体	直線近似により求めた傾き $E_{s+cf} \cdot A_{s+cf}(\times 10^8 \text{ N})$						
	SF1,SF2	SF3,SF4	SF5,SF6	SF7,SF8	SF9,SF10	SF11,SF12	平均値
A-1	10.331	9.107	10.628	9.119	9.861	9.041	9.681
A-2	10.200	9.269	9.611	8.828	9.432	9.284	9.437
B-1	10.693	9.752	11.417	10.063	10.359	9.506	10.298
B-2	10.939	0.975	10.745	9.711	10.520	9.330	10.166
C-1	11.112	10.427	11.036	10.498	11.056	10.539	10.778
C-2	11.646	10.969	11.795	10.020	11.390	10.401	11.037
D-1	10.856	10.024	10.869	9.915	10.793	10.895	10.559
D-2	10.780	9.963	11.025	10.750	10.435	10.078	10.505
E-1	11.847	10.675	11.448	10.598	11.511	10.613	11.115
E-2	11.783	10.215	12.057	10.040	11.788	10.284	11.028
F-1	12.526	11.560	12.062	11.889	11.715	11.249	11.834
F-2	12.598	11.664	12.652	11.587	11.817	11.266	11.931

5.3.3 降伏荷重算出に合成断面のヤング係数と断面積が座屈耐荷力に与える影響

座屈耐荷力の理論値は、オイラーの弾性座屈式である式(5.12)と道示における軸方向圧縮力を受ける部材に対する基準耐荷力式である式(5.13)、式(5.14)において、断面二次半径を計算するとき合成断面の並列モデルに対する複合則⁷⁾に従い、補強後の板厚をCFRPと鋼材のヤング係数比(E_{cf}/E_s)で換算して鋼材の板厚に足し合わせた板厚を合成断面の板厚として計算した。ここでは、安全側の評価となるように合成後の降伏応力度は増加させずにCFRPによる補強を考慮しない鋼材のみの降伏応力度で耐荷力の計算を実施した。このことは、文献⁷⁾でも、合成断面における降伏応力度 $\sigma_{(s+cf)y}$ が鋼材のみの降伏応力度 σ_y より大きいことは確実であるが、現時点では具体的に推定することが困難であることが示されている。よって、文献⁷⁾では、 $\sigma_{(s+cf)y}=\sigma_y$ とすることにより安全側の評価としている。一様な断面補強において圧縮荷重が載荷された時の降伏応力度の増加による影響は、文献²⁵⁾の研究でも確認されている。

- ・オイラーの弾性座屈式

$$\sigma_{cr} = \pi^2 \cdot E_s / \lambda^2 \quad (1.0 < \bar{\lambda}) \quad (5.12)$$

- ・道示の基準耐荷力式

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{cr}/\sigma_y &= 1.0 \quad (\bar{\lambda} \leq 0.2) \\ \sigma_{cr}/\sigma_y &= 1.109 - 0.545\bar{\lambda} \quad (0.2 < \bar{\lambda} \leq 1.0) \\ \sigma_{cr}/\sigma_y &= 1/(0.733 + \bar{\lambda}^2) \quad (1.0 < \bar{\lambda}) \end{aligned} \right\} \quad (5.13)$$

- ・細長比パラメータ

$$\bar{\lambda} = \frac{1}{\pi} \cdot \sqrt{\frac{\sigma_y}{E_s}} \cdot \frac{l}{r_{s+cf}} \quad (5.14)$$

ここで、

σ_{cr} : 座屈応力度(N/mm²)

σ_y : 鋼材の降伏応力度(N/mm²)

E_s : 鋼材のヤング係数 (N/mm²)

λ : 細長比 ($\lambda = l/r$)

$\bar{\lambda}$: 細長比パラメータ

r_{s+cf} : ヤング係数比により鋼材換算した補強後の断面二次半径(mm)

l : 部材の有効座屈長(mm)

5.3.1 における表-5.5 では、オイラーの弾性座屈式である式(5.12)により算出した座屈荷重①と実験値③の比較では、CFRPにより補強した全ての試験体において実験値の方が理論値に対して80~92%と小さい値になっていた。これは、オイラーの弾性座屈式は部材の有効座屈長全体にわたり一様な断面と仮定して導出された式であることに対して、本研究における試験体は、CFRPを補強層ごとにずらして補強していること、試験体からヒンジ部までの治具の範囲において部材の剛性が大きく異なっていること、など一様な断面ではない条件となっているが、5.2.4でも述べた通り、補強範囲および端部の曲げ剛性の違いによる座屈荷重への影響は小さいと判断した。この前提条件により、理論値を求める式の一つとしてオイラーの弾性座屈式を採用して実験値との比較を簡便にしている。道示の基準耐荷力式である式(5.13)により算出した座屈荷重②と実験値③の比較では、CFRPにより補強した全ての試験体において実験値の方が理論値に対して105~123%と大きい値になっていた。いずれの比較においても実験値と理論値には差異がある結果であった。そこで、降伏荷重に対してもCFRPの補強による合成断面の影響を考慮することで道示式に対する適用性を向上させることができるかどうかを試みた。

柱部材の全体座屈に対して、CFRPによる補強断面を考慮して座屈耐荷力を評価する手法は、文献²⁵⁾

の研究において、秀熊らが座屈耐荷力の評価方法を提案している。本研究においてもこの方法を採用して検証を試みた。この方法では、式(5.15)に示すように座屈応力度を降伏応力度で無次元化した値である座屈耐荷力 σ_{cr}/σ_y の実験値を算出するために実験により得られた座屈時の荷重値（以下、座屈荷重）である P_{cr} を鋼材が降伏するときの荷重（以下、降伏荷重）である P_y で無次元化する計算方法で算出している。この時の降伏荷重は、CFRP による補強の断面積を考慮しない場合の式(5.16)と考慮する場合の式(5.17)を用いて算出している。

$$\sigma_{cr}/\sigma_y = P_{cr}/P_y(P_{ys}, P_{ys+cf}) \quad (5.15)$$

$$P_{ys} = \sigma_y \times A_s \quad (5.16)$$

$$P_{ys+cf} = \sigma_y \times A_{s+cf} \quad (5.17)$$

上記の計算方法により算出した座屈耐荷力と細長比パラメータの関係を耐荷力曲線と比較した結果を図-5.21(a)および図-5.21(b)に示す。また、式(5.15)～式(5.17)により算出した座屈耐荷力の一覧を巻末の表-付 5.9 および表-付 5.10 に示す。鋼材のみの断面を考慮して算出している図-5.21(a)の分布は、表-5.5の結果と同じである。補強なしの試験体である A については、道示の耐荷力曲線を下回る結果となっているが、CFRP により補強された試験体である B～E については、いずれのケースにおいても道示の値に対して 112～139%と大きく上回る値となった。CFRP による補強の断面積を考慮して算出している図-5.21(b)の分布は、CFRP により補強された試験体である B-E については、いずれのケースにおいても道示の値に対して 103～121%と 2 割程度の増加にとどまった。以上の結果より、座屈耐荷力を評価する場合は、細長比パラメータの断面二次半径の計算で CFRP による断面を引張剛性換算で考慮することと式(5.17)で算出した降伏荷重 P_y を用いて算出した座屈耐荷力が安全側の評価になることがわかった。CFRP による補強の影響を考慮した座屈耐荷力は、この評価方法でも適切に評価できている結果であった。しかし、CFRP による補強の影響をさらに精度よく評価できる方法を検討した。

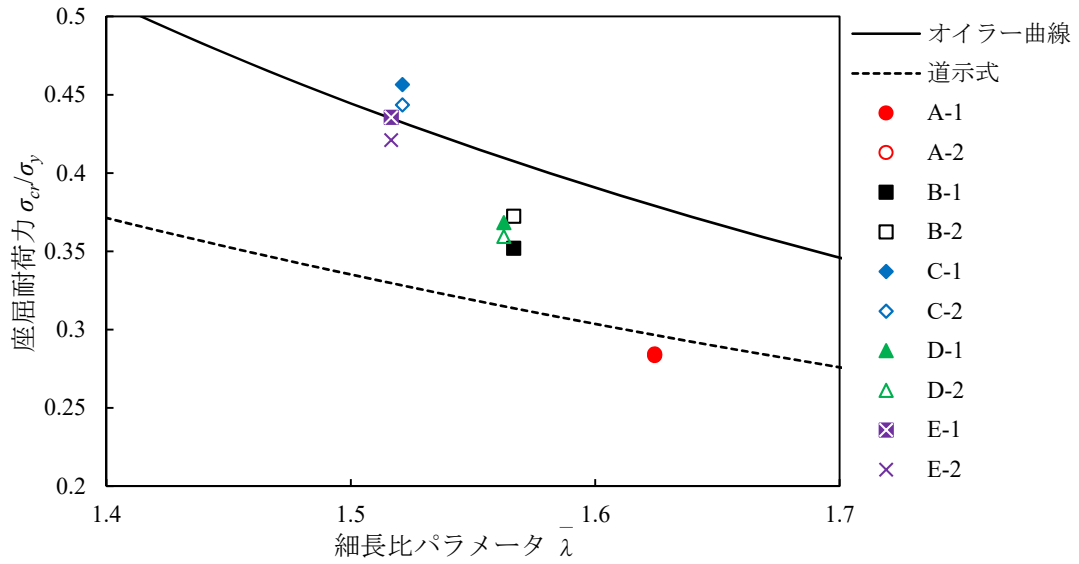
本研究では 5.3.2 で算出した圧縮時における合成断面のヤング係数 E_{s+cf} と断面積 A_{s+cf} および鋼材の降伏ひずみ ϵ_y を用いた座屈耐荷力の評価を試みた。具体的には、式(5.15)における降伏荷重 P_{ys+cf} を式(5.18)で算出することにした。

$$P_{ys+cf} = E_{s+cf} \cdot A_{s+cf} \cdot \epsilon_y \quad (5.18)$$

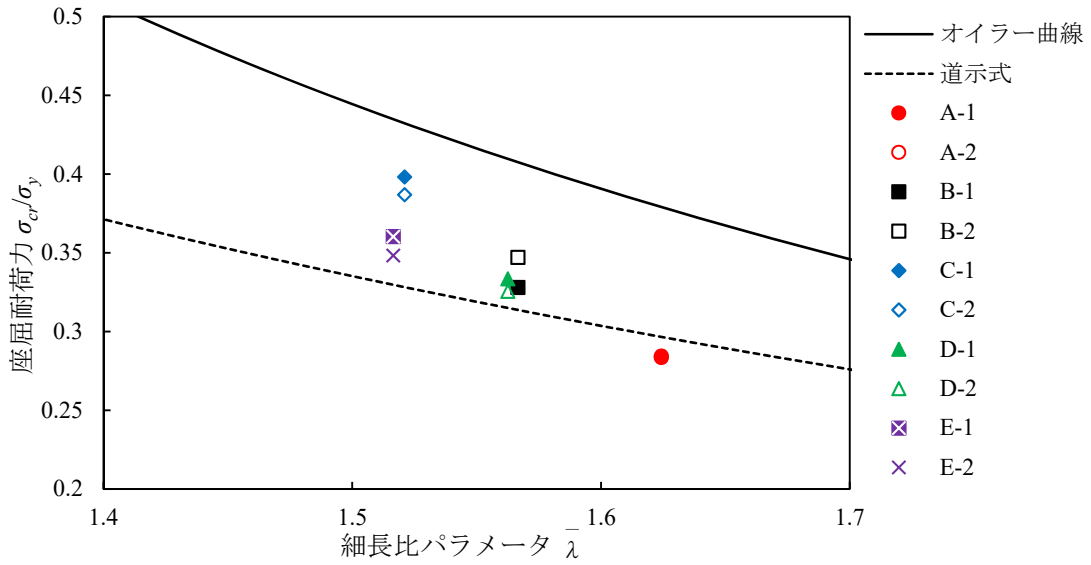
ここで、

ϵ_y : 降伏ひずみ ($\epsilon_y = \sigma_y/E_s$)

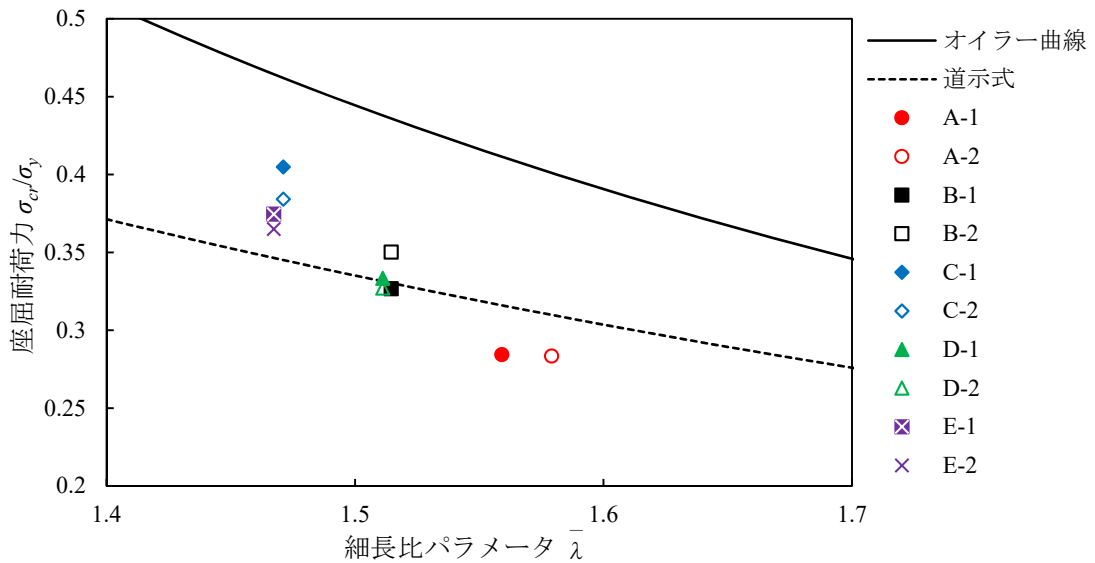
上記の計算方法により算出した座屈耐荷力と細長比パラメータの関係を耐荷力曲線と比較した結果を図-5.21(c)に示す。また、式(5.15)および式(5.18)により算出した座屈耐荷力の一覧を巻末の表-付 5.11 に示す。CFRP により補強された試験体である B～E については、いずれのケースにおいても道示の値に対して 99～117%と図-5.21(b)の結果よりも近い値となった。補強なしの試験体である A-1 および A-2 の結果については、道示の基準耐荷力の値よりも危険側の値を示している。これは、細長比パラメータを計算する際に鋼材のヤング係数に実験値から推定した値を採用しているためである。以上により、本研究の実験結果では、CFRP により補強した合成断面のヤング係数 E_{s+cf} および断面積 A_{s+cf} は、5.3.2 で前掲の式(5.7)～式(5.11)を用いて実験の結果から算出した CFRP の圧縮時における見かけのヤング係数の低下を考慮して補正することにより、座屈耐荷力の下限相当である道示の基準耐荷力の式が適用可能なことを示すことができた。



(a)降伏荷重に鋼材の断面のみを考慮した場合



(b)降伏荷重に鋼材+CFRPの断面を考慮した場合



(c)降伏荷重に合成断面と鋼材の降伏ひずみを考慮した場合

図-5.21 実験値より算出した座屈耐荷力と耐荷力曲線の比較

5.4 まとめ

本章の実験および結果の検討により得られた知見は以下の通りである。

- 1) 座屈荷重に対する CFRP 補強の効果について、いずれの補強ケースにおいても座屈荷重の増加、および全体座屈後の荷重低下の低減を確認することができた。
- 2) CFRP の補強層数について、補強層数が多いケースにおいて座屈荷重の増加率が大きくなることを確認できた。また、全体座屈後の荷重値に対しても大きくなることを確認できた。
- 3) CFRP の種類について、中弾性 CFRP シートと高弾性 CFRP シートのいずれの補強ケースにおいても座屈荷重および全体座屈後の荷重値の増加に差がない結果であった。この結果は、高弾性 CFRP シート 6 層の試験体で得られた圧縮弾性率の顕著な低下が影響していると推定できる。
- 4) 全体座屈発生後の変形性能について、中弾性 CFRP シートにより補強した試験体の方が、繊維破断の発生した高弾性 CFRP シートおよび高弾性 CFRP プレートで補強した試験体よりも大きな変形に対しても追従できることを確認することができた。
- 5) CFRP 補強部における破壊の影響について、CFRP の破断や CFRP の剥離の発生により、全体座屈後の荷重値が大きく低下することを確認することができた。すなわち、CFRP 補強部の破壊により、CFRP の補強効果が失われたことを確認することができた。このことより、CFRP により鋼材を補強する場合は、CFRP に発生するひずみが破断ひずみに達するまでを適用範囲とする必要がある。
- 6) 圧縮載荷時における CFRP の見かけのヤング係数を実験値から推定した結果について、中弾性 CFRP シートでは引張載荷時における CFRP のヤング係数と同程度の値が発現したことを確認できた。一方、高弾性 CFRP シートおよび高弾性 CFRP プレートでは、引張載荷時における CFRP のヤング係数より小さくなる傾向であることを確認できた。
- 7) 降伏荷重を算出する際に CFRP の換算断面積が座屈耐荷力に与える影響について、CFRP による補強の断面を考慮して算出した降伏荷重を用いて無次元化した座屈耐荷力の値が座屈耐荷力の下限相当である道示の基準耐荷力式の値に近い値となることを確認することができた。
- 8) CFRP で補強された部材の座屈耐荷力を評価する方法として、鋼と CFRP の合成断面におけるヤング係数と断面積および鋼材の降伏ひずみとの積で算出した降伏荷重を用いて無次元化した座屈耐荷力により評価することで、座屈耐荷力の下限相当である道示IIの基準耐荷力式を適用可能であることを示すことができた。このときの CFRP のヤング係数は、本研究の実験で得られた圧縮載荷時における CFRP の見かけのヤング係数の低下を適切に考慮することが必要である。

第6章 炭素繊維強化樹脂により補強した鋼材の交番載荷時の補強効果

6.1 概要

鋼トラス橋の部材に地震力が作用した場合、トラス部材に作用する力は動的な挙動で圧縮方向と引張方向の軸力が交互に作用することが想定される。特に圧縮力により全体座屈が発生した部材に対して、その後に引張力が作用する場合の挙動や、座屈変形がある程度進展した部材に再び圧縮力を作用させたときの挙動などを確認した実験や研究は、土木の分野では事例が少ないのが現状である。特に、炭素繊維強化樹脂（以下、CFRP）により補強した鋼部材に対して、座屈変形を考慮した繰り返し載荷に関する研究は前例がほとんどない。一方、建築の分野では、繰り返し載荷を受ける鋼製の圧縮材に対する履歴のモデル化を目的とした実験が多数報告されている。例を挙げると、若林ら³⁷⁾が座屈後の剛性低下を表現したモデルを提案している。加藤、秋山³⁸⁾は、塑性化の進行での圧縮側耐力の低下を表現したモデルを提案している。また、第3章、第4章、および第5章での検討でも動的な挙動に対する課題として挙げているように、2次部材について、座屈変形によるエネルギー吸収効果を期待できることは、トラス橋などの長大橋に対する橋梁全体の耐震補強効果として有効な手段となる可能性がある。

本章では、鋼トラス橋の部材に対して CFRP を用いた耐震補強設計手法を確立することを目的とした基礎的検討として、トラス橋を構成する2次部材に多く使用されている鋼製の H 形部材に対して CFRP による補強をすることで圧縮力と引張力が交互に作用した場合の挙動とその補強効果を明らかにするために交番載荷試験を実施した。また、交番載荷試験を実施する前に引張載荷試験および圧縮載荷試験により、対象とした試験体形状における引張載荷時の降伏状態、圧縮載荷時における全体座屈の状態を確認し、交番載荷試験を実施する上での基礎データを確認した。

本章の実験でも、CFRP 補強部の破壊が発生する。ここでいう CFRP 補強部の破壊とは、炭素繊維の破断（以下、CFRP の破断）および CFRP 接着面の剥離（以下、CFRP の剥離）といった現象を総称している。

6.2 実験方法

6.2.1 試験体形状

本章の実験で使用した試験体の形状は、図-6.1 に示す鋼製 H 形断面とした。本章の実験では圧縮力載荷時における全体座屈に対する挙動と引張力載荷時における降伏変形に対する挙動を同時に着目するため、圧縮載荷時には降伏変形する前に全体座屈が発生し、なおかつフランジおよび腹板が局部座屈しない断面を採用した。まず、具体的なフランジと腹板の断面寸法は、局部座屈しない断面となるように第5章の式(5.1)を用いて幅厚比パラメータ R が 0.7 より小さくなるように決定した。フランジの断面寸法は、幅 50mm、板厚 4.5mm で、幅厚比パラメータは $R=0.278$ である。腹板の断面寸法は、幅 90mm、板厚 4.5mm で、幅厚比パラメータは $R=0.361$ である。

また、試験体の部材長は、6.2.4 で後述する載荷試験装置に設置できる大きさで、なおかつ鋼材の降伏による変形が発生する前に全体座屈が発生する長さとなるように第5章の式(5.2)を用いて、弱軸回りの細長比パラメータ $\bar{\lambda}$ が 1.0 より大きくなるように設定した。載荷試験装置の形状より、部材長を 780mm とした場合、ヒンジ間の距離は 900mm となる。つまり、有効座屈長 $l=900\text{mm}$ とした場合、細長比パラメータは $\bar{\lambda}=1.059$ となるため、全体座屈が発生する形状を設定できた。

試験体の弱軸方向の部材の曲がり（初期たわみ）は、許容値を部材中央で $L/1000=0.8\text{mm}$ （部材長 $L=900\text{mm}$ ）の目標値で製作した。その結果、試験体の初期たわみは、最大 0.5mm であった。

試験体の製作に使用した鋼板の材料諸元は、表-6.1 に示す通りである。降伏応力は、メーカー発行のミルシートの値を示し、ヤング係数、ポアソン比、板厚は、設計値をよび公称値を示す。

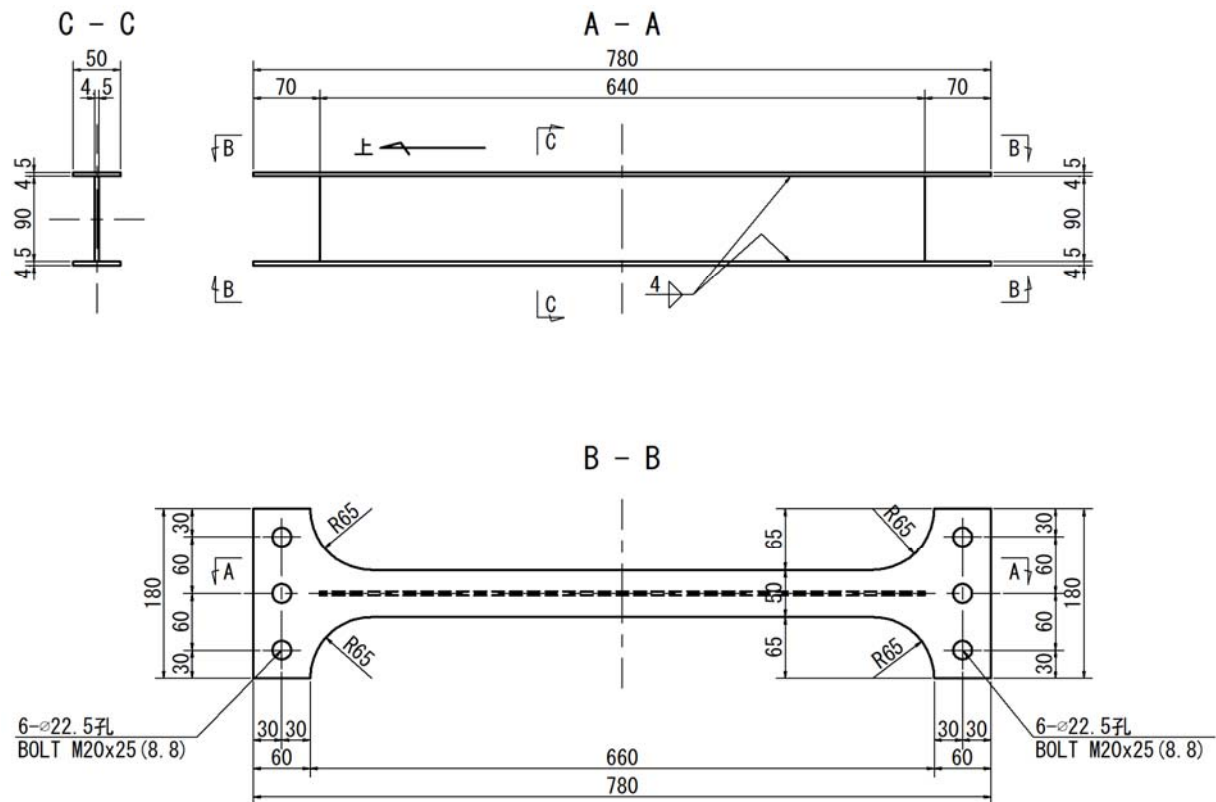


図-6.1 試験体形状 (単位 : mm)

表-6.1 鋼板の材料諸元

項目	単位	内容	備考
鋼種 (材質)	—	SS400	JIS G 3101
ヤング係数 E_s	N/mm ²	2.0×10^5	設計値
ポアソン比 ν	—	0.3	設計値
板厚 t_s	mm	4.5	公称値
降伏強度 σ_y	N/mm ²	302 (235)	ミルシートの値 (設計値)
引張強度 σ_u	N/mm ²	449 (400)	ミルシートの値 (設計値)

6.2.2 CFRP 補強材料

鋼部材の補強に使用した炭素繊維材料の材料諸元は、表-6.2 に示す通りである。第 4 章および第 5 章で使用した炭素繊維材料のうち、大きな変形に対して追従する性能があることが確認された繊維目付量が 300g/m² (設計値) の中弾性 CFRP シートと同じ材料を使用した。日鉄ケミカル&マテリアル株式会社の「トウシート」である。メーカー発行の試験成績書では引張方向の機械的性質のみが提供されており、圧縮方向の機械的性質についてはメーカーから提供された値はないが、第 4 章および第 5 章で推定した圧縮時のヤング係数が参考となる。

炭素繊維材料を含浸・接着する樹脂の材料諸元は、表-6.3 に示す通りで、CFRP シート用の含浸・接着

樹脂を使用した。含浸・接着樹脂は、本章の実験のために新たに手配したため、メーカー提供の試験成績書の内容が、第4章および第5章で使用した材料とは若干異なる値となっている。

本章においては、鋼材とCFRPの剛度の違いに起因するCFRPの剥離を防止する効果を確認するために、鋼材とCFRPの間に高伸度弾性パテ材を施工した。高伸度弾性パテ材の材料諸元は、表-6.4に示す通りである。

表-6.2 炭素繊維材料の材料諸元

項目	単位	中弾性CFRPシート	備考
製品名(型番)	—	フォルカトウシート(FTS-C5-30)	
繊維目付	g/m ²	306	メーカー発行の試験成績書
設計厚 t_{cf}	mm	0.165	設計値
引張ヤング係数 E_{cf}	N/mm ²	4.12×10^5	メーカー発行の試験成績書
引張強度 σ_{ucf}	N/mm ²	3502	メーカー発行の試験成績書
引張破断ひずみ ε_{ucf}	μ	8500	メーカー発行の試験成績書

※試験方法は、JIS A1191/JSCE-E541-2013 に準ずる

表-6.3 含浸・接着樹脂の材料諸元

項目	単位	CFRPシート用含浸・含浸接着剤	備考
製品名(型番)	—	含浸・接着樹脂(FR-E9P)	
引張強度	N/mm ²	71	試験方法は、JIS K7161 に準ずる
圧縮強度	N/mm ²	105	試験方法は、JIS K7181 に準ずる
引張せん断強度	N/mm ²	15.4	試験方法は、JIS K6850 に準ずる
鋼材接着強度	N/mm ²	9.9	試験方法は、JIS A6909 に準ずる
硬化物比重	—	1.22	試験方法は、JIS K7112 に準ずる

表-6.4 高伸度弾性パテ材の材料諸元

項目	単位	高伸度弾性パテ材	備考
製品名(型番)	—	高伸度弾性パテ(FU-Z)	
引張強度	N/mm ²	9	試験方法は、JIS K7161 に準ずる
引張弾性係数	N/mm ²	73	試験方法は、JIS K7161 に準ずる
伸び	%	423	試験方法は、JIS K7161 に準ずる
鋼材接着強度	N/mm ²	5.2	試験方法は、JIS A6909 に準ずる
硬化物比重	—	1.24	試験方法は、JIS K7112 に準ずる

6.2.3 CFRP 補強方法

各載荷試験の実験ケースは、表-6.5に示す通りである。補強の違いおよび高伸度弾性パテ材の有無による実験パラメータは、CFRPの積層数(CFRPシート:2層と4層)および高伸度弾性パテ材の施工範囲(施工なし、補強範囲全面、補強端部のみ)とした。CFRPの補強量については、表-6.6に示す通り第5章で述べたオイラーの弾性座屈式である式(5.12)により求めた補強後の座屈荷重が提案した式(5.18)に

より求めた降伏荷重を超えないように設定した。

CFRP の補強範囲は、図-6.2 に示す通りである。CFRP の貼付面は、フランジの片面（外側）のみとした。CFRP の幅方向の寸法はフランジ幅と同じ 50mm とした。長さ方向については、試験体全長 780mm の端部のボルト接合部 65mm ずつを残した 650mm の範囲とした。また、CFRP 補強の積層に関しては、補強端部で応力集中を緩和するために 25mm のずらし範囲を積層ごとに設けた。CFRP の定着長は文献²³⁾の算出方法により 30~60mm 程度と仮定した。これらの補強範囲の方針により、CFRP の各層における補強材の長さは、表-6.7 の通りとした。

高伸度弾性パテ材の施工範囲は、図-6.2 に示す通りである。高伸度弾性パテ材の有無およびその施工範囲の違いにより、CFRP の剥離に対してどのような影響があるかを確認するために、補強範囲全面に施工するケース、補強範囲の端部のみに施工するケース、施工しないケースとしている。補強範囲の端部のみに施工するケースにおける施工範囲は、ずらし範囲（(積層数-1) × 25mm）+ 定着長（75mm と仮定）を補強範囲としており、2 層の場合は 1 × 25mm + 75mm = 100mm とし、4 層の場合は 3 × 25mm + 75mm = 150mm とした。

表-6.5 各載荷試験における試験体一覧

ケース	CFRP 補強の有無	積層数	高伸度弾性パテの有無	試験体番号		
				引張載荷	圧縮載荷	交番載荷
A	補強なし	-	-	A-t-N	A-c-N	A-a-N
B	中弾性 CFRP シート	2 層	なし	B-t-N	B-c-N	B-a-N
			全面	B-t-P1	B-c-P1	B-a-P1
			端部のみ	B-t-P2	B-c-P2	B-a-P2
C		4 層	なし	C-t-N	C-c-N	C-a-N
			全面	C-t-P1	C-c-P1	C-a-P1
			端部のみ	C-t-P2	C-c-P2	C-a-P2

表-6.6 各ケースにおける座屈荷重と降伏荷重の比較

ケース	CFRP の補強量	降伏応力度 σ_y (N/mm ²)	降伏ひずみ ϵ_y (μ)	降伏荷重 P_y (kN) ^{*1}	座屈荷重 P_{cr} (kN)	
					オイラー式 ^{*2}	道示式 ^{*3}
A	なし	302	1510	258.2	230.1	135.9
B	2 層			278.7	264.6	152.6
C	4 層			299.3	299.2	168.8

※1：式(5.18)により算出した鋼+CFRP 補強の合成断面における降伏荷重

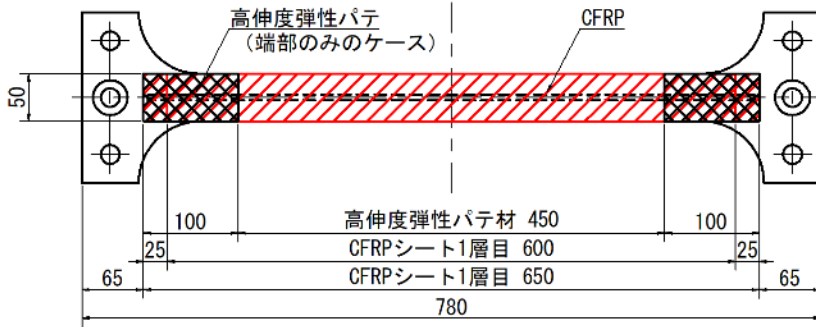
※2：式(5.12)により算出した鋼+CFRP 補強の合成断面における座屈荷重

※3：式(5.13)により算出した鋼+CFRP 補強の合成断面における座屈荷重

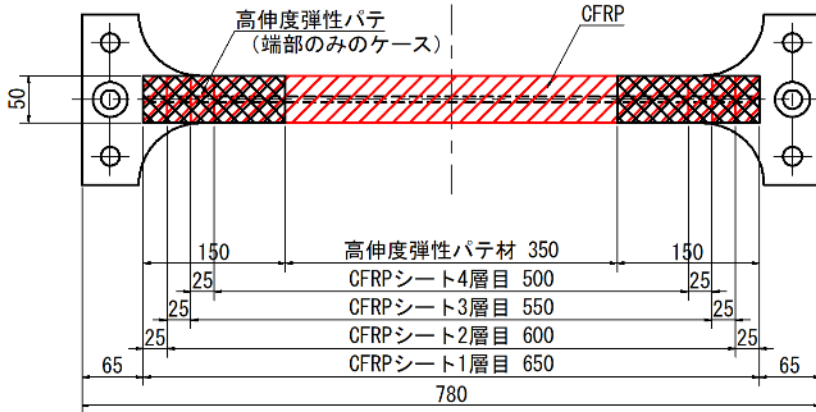
表-6.7 CFRP の積層における補強材の長さ

		1 層目	2 層目	3 層目	4 層目
中弾性 CFRP シート	2 層	1680mm	1630mm	1580mm	—
	4 層	1680mm	1630mm	1580mm	1530mm

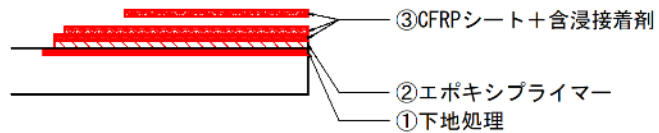
中弾性CFRPシート（2層）



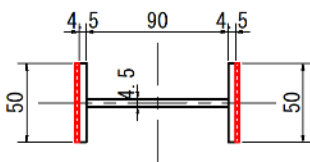
中弾性CFRPシート（4層）



CFRPシート補強施工断面図 （高伸度弾性パテなし）



CFRPシートによる補強断面



CFRPシート補強施工断面図 （高伸度弾性パテあり）

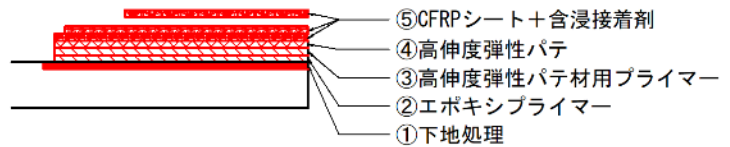


図-6.2 CFRP シートの補強範囲（単位：mm）

6.2.4 各種荷重試験における荷重条件と使用した試験装置

各荷重試験をおこなう前に圧縮荷重と引張荷重の交番荷重試験が同時に実施できるように専用の固定治具を作成した。実際の試験装置へ試験体と固定治具を設置した状況は、写真-6.1 に示す通りである。試験体と試験装置の配置概要は、図-6.3 に示す通りである。端部は回転自由となるようにヒンジとなる固定治具とした。この配置で上下の回転ヒンジの間隔が有効座屈長 $l=900\text{mm}$ となるように配置した。ヒンジ部分が有効座屈長の全長に占める割合は約 10% であり、H 形鋼部分よりも曲げ剛性が大きく、第 5

章で述べたオイラーの弾性座屈式における条件である一様な断面とは異なるが、支間中央部での梁としてのたわみ剛性に対する評価への影響は 2%程度であると推定されるため、座屈荷重への影響は小さいと判断した。また、両端のそれぞれが 16%程度の範囲で CFRP の補強がされていない場合における試験体全長に対する補強範囲の影響については、既往の研究²³⁾で補強範囲を考慮した場合と無視した場合とでは差がないとの結果も示されているため、本研究では考慮していない。この傾向は、本研究の第 4 章の曲げ荷重試験でも CFRP の補強範囲の違いが曲げ剛性に影響するかを FEM 解析により確認し、ほとんど影響がないことを確認している。

作用させた荷重荷重について、引張荷重試験では、試験体の鋼材部分が降伏し、CFRP の剥離が全面にわたって発生するまで変位制御により単調荷重した。圧縮荷重試験では、試験体に全体座屈による変形が発生し、CFRP の破断と CFRP の剥離が発生するまで変位制御により単調荷重した。

交番荷重試験では、引張荷重試験および圧縮荷重試験の結果を踏まえて、圧縮側の荷重と引張側の荷重を繰り返し作用させるように実施した。圧縮側の荷重は、全体座屈が徐々に進展するように 1 サイクルごとに荷重する変位量を 0.5mm ずつ増加させ、座屈変形により、CFRP の破断および CFRP の剥離が発生するまで荷重した。引張側の荷重については、後述する引張荷重試験の結果より、試験体中央部より先にボルト接続部の降伏変形が先行して発生したため、ボルト接続部の降伏変形が起きない荷重 $P_{tmax}=175kN$ を最大荷重とした。

試験装置は、(株)島津製作所製の「オートグラフ AG-300kNX」を使用した。データの記録装置は、(株)東京測器研究所製の「データロガー TDS-530」とノートパソコンを組み合わせ使用した。試験装置と記録装置の接続は、写真-6.2 に示す接続状況および図-6.4 に示すシステムブロック図の通りで、オートグラフからの入力である荷重・変位のデータ、変位計からの入力である変位データ、試験体に貼り付けたひずみゲージからの入力であるひずみデータをデータロガーに内蔵されたスイッチボックスに接続し、データロガーと USB 接続したパソコンでデータの保存を実施した。



写真-6.1 試験装置の設置状況

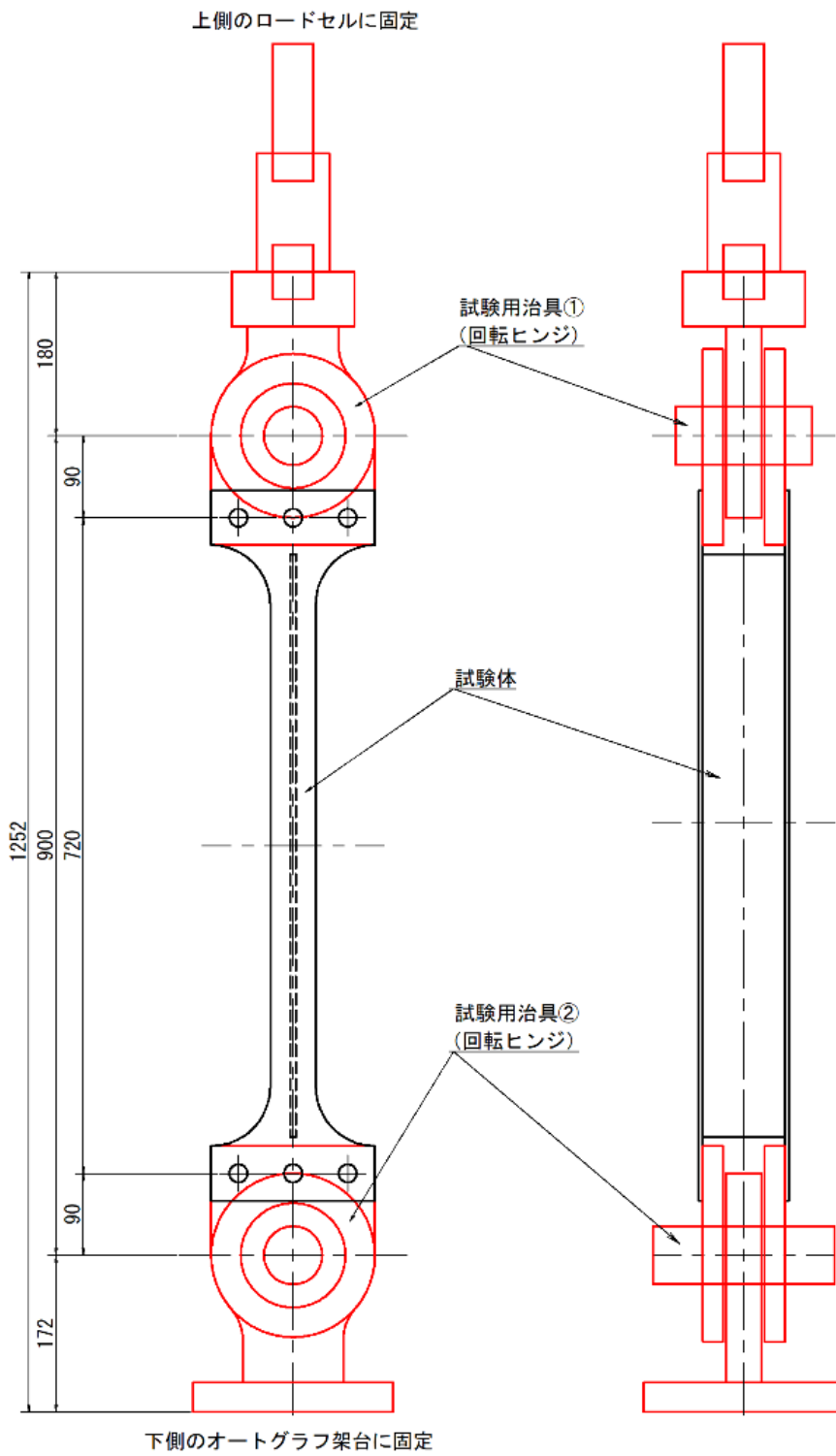


図-6.3 試験装置の概要図 (単位 : mm)



写真-6.2 データロガー（TDS-530）およびパソコンの接続状況

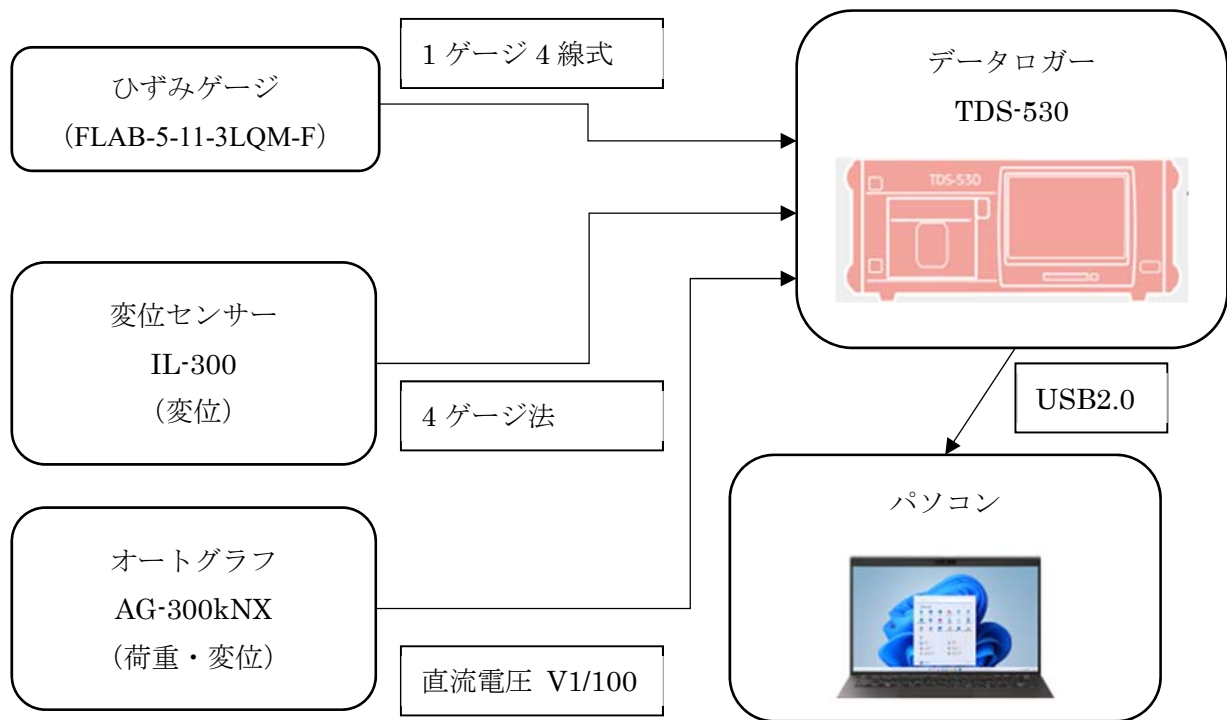


図-6.4 システムブロック図

6.2.5 試験体の計測項目と計測位置

各試験における計測項目は、表-6.8 の通りである。ひずみ測定に使用したひずみゲージは、(株)東京測器研究所の一般用ひずみゲージ「FLAB-5-11-3LQM-F」を使用した。変位の測定に使用したレーザー変位センサーは、(株)キーエンスのレーザーセンサー「IL-300」を使用した。

ひずみゲージの貼付位置と変位計による変位の計測位置は図-6.5～図-6.7 の通りで、鋼材部分の計測

位置は板厚面で試験体の中央付近と端部付近とし、CFRP 部の計測位置は CFRP 面の試験体中央付近、最終層の端部から部材中央側 50mm の位置とした。水平方向の変位の計測位置は、ウェブ面の部材中央で 1 か所を計測した。

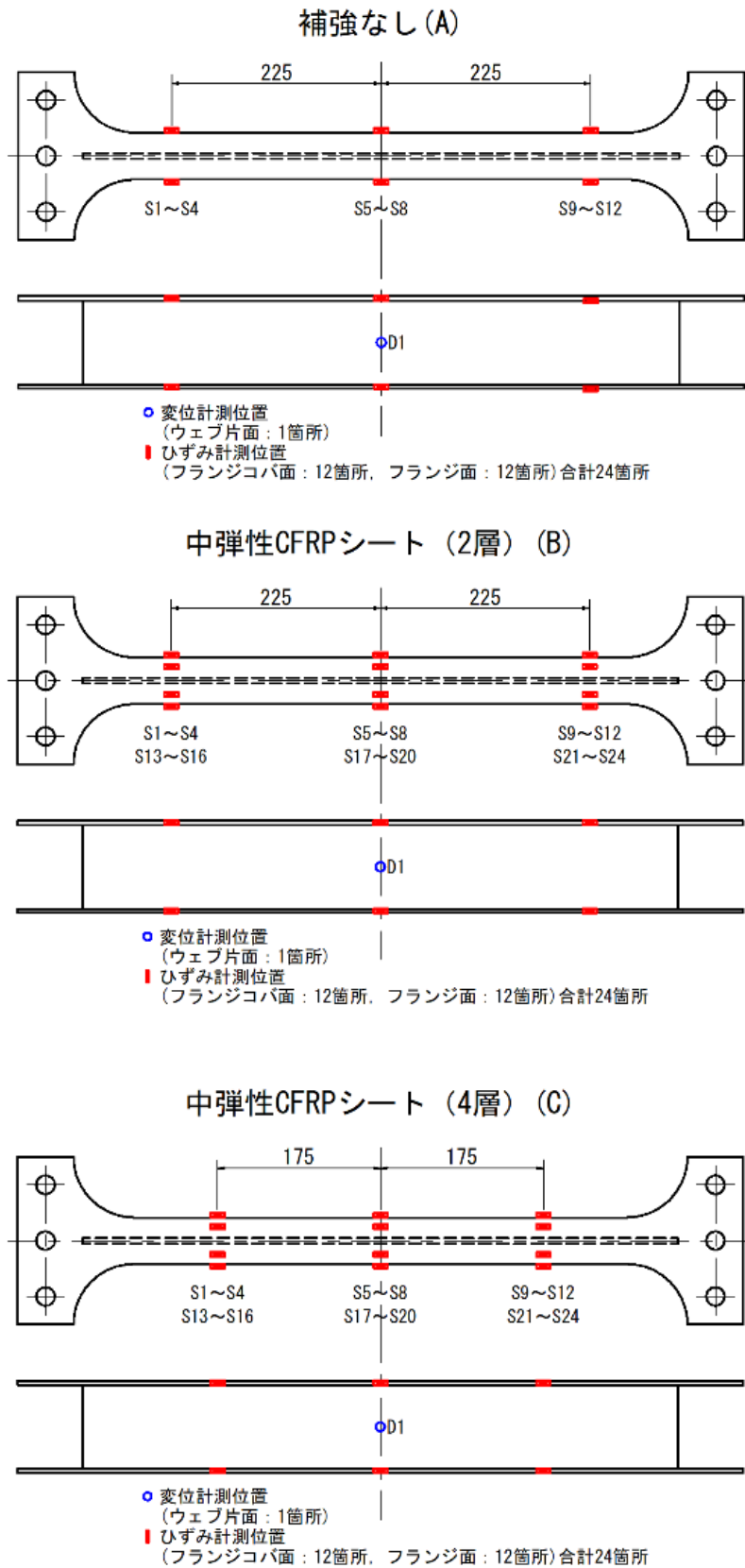


図-6.5 ひずみゲージの貼付位置と変位計測値 (単位: mm)

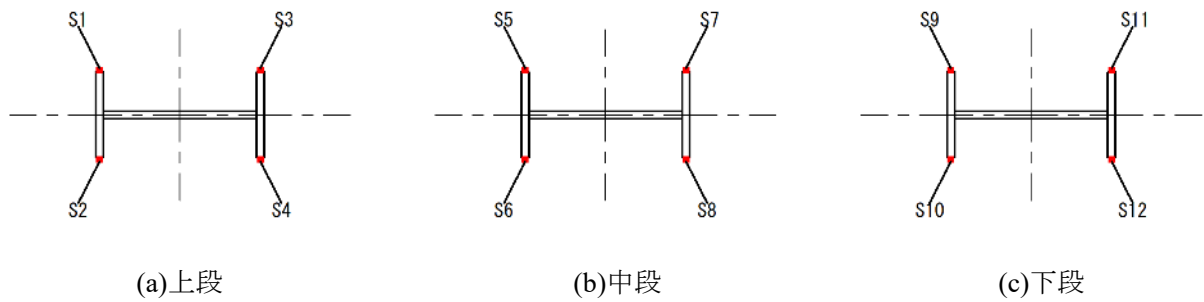


図-6.6 断面方向におけるひずみゲージの貼付位置と変位計測値（試験体 A）

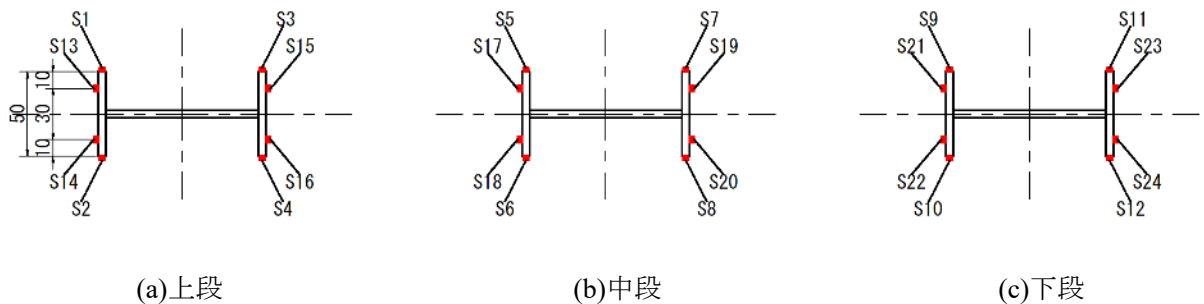


図-6.7 断面方向におけるひずみゲージの貼付位置と変位計測値（試験体 B, C）（単位：mm）

表-6.8 各試験における計測項目

試験体 ケース	引張荷重試験		圧縮荷重試験		交番荷重試験		計測方法
	A	B~C	A	B~C	A	B~C	
荷重	1 項目	1 項目	1 項目	1 項目	1 項目	1 項目	オートグラフ (ロードセル)
部材方向 の変位	1 項目	1 項目	1 項目	1 項目	1 項目	1 項目	オートグラフ
鋼材部分 のひずみ	12 箇所	12 箇所	12 箇所	12 箇所	12 箇所	12 箇所	ひずみゲージ
CFRP 表面 のひずみ	—	12 箇所	—	12 箇所	—	12 箇所	ひずみゲージ
部材の 水平変位	1 箇所	1 箇所	1 箇所	1 箇所	1 箇所	1 箇所	変位センサー

6.3 実験結果と考察

6.3.1 引張荷重試験の結果

引張荷重試験で得られた降伏荷重 P_t 、および CFRP 補強による降伏荷重の変化率を表-6.9 に示す。また、鉛直荷重 P_t と鉛直変位の関係を図-6.8 に示す。この図では、いずれの試験体においても鉛直荷重と変位の関係はほとんど変わらない結果であった。これは試験体を接合している部分の強度不足により、CFRP 補強をしている範囲より先に接合部の降伏による塑性変形が発生したためだと考えられる。接合部の降伏変形は、図-6.8 においても鉛直変位の増加の割合が大きくなっている挙動が荷重値 175kN のあ

たりから始まっていることを確認できる。この傾向は、図-6.9 の鋼材部における鉛直荷重とひずみの関係からも確認することができる。写真-6.3, 写真-6.4 は、引張試験後における試験体の状態である。この写真でも、試験体端部のボルト接合部で鋼材の降伏による塑性変形が発生していたことが確認できる。このことより、接合部の形状は、CFRP 補強部よりも断面を大きくすることで降伏しないようにすることが必要である。

表-6.9 において、試験体中央付近の CFRP 補強の範囲で補強効果を確認するために、試験体の中央部に貼り付けたひずみゲージの値が、降伏ひずみ ϵ_y に達した時の荷重値を比較した。この比較により、2 層補強したケース B では補強なしのケース A と比較して 8.1~11.2%の増加であった。4 層補強したケース C では、補強なしのケース A と比較して 5.5~18.7%の増加であった。これらの結果より、CFRP 補強により、鋼材に発生すひずみが小さく抑えられており、鋼材のひずみに対する補強の効果を確認することができた。この結果は、第 4 章の引張載荷試験結果と同様の傾向である。

次に、各試験体において CFRP の剥離が発生したときの荷重値と CFRP 表面のひずみ値を表-6.10 に示す。CFRP の剥離は、補強範囲の端部から発生し、徐々に部材中央へと進展していった。特に高伸度弾性パテ材を鋼材と CFRP 補強の間に施工しなかった B-t-N と C-t-N は、CFRP の剥離が発生した荷重が上段部、中段部、下段部の全ての位置でほぼ同じ値である。これは、端部における CFRP の剥離と同時に一気に全ての CFRP 補強部が剥離していることを示している。これに対して、高伸度弾性パテ材を施工した B-t-P1 および B-t-P2 は、部材中央部付近での CFRP の剥離が発生していなかった。C-t-P1 および C-t-P2 は、部材中央付近まで FRP の剥離が発生したが、B-t-N, C-t-N のケースとは異なり、端部において CFRP の剥離が発生した荷重値よりも大きな荷重値で CFRP の剥離が発生していた。これは、鋼材と CFRP の剛性の違いによる伸び差が高伸度弾性パテ材の層で吸収されることで CFRP の剥離を防止する効果があったことを示す結果であったと判断できる。しかし、端部における CFRP の剥離はどの試験体においても確認された。端部付近の CFRP は各層毎に 25mm のずらし範囲を設けているため、補強層数の影響はないと考えられる。端部の CFRP の条件は、補強層数に関係なく高伸度弾性パテ材の施工の有無とその施工範囲の違いである。高伸度弾性パテ材を施工しなかった試験体 B-t-N, C-t-N において、端部での CFRP の剥離が発生した時の荷重値は、214~234kN であった。高伸度弾性パテ材を CFRP 補強部の全面に施工した試験体 B-t-P1, C-t-P1 において、端部での CFRP の剥離が発生した時の荷重値は、242~250kN であった。これらの荷重値を比較しても高伸度弾性パテ材を全体に施工することにより、1 割程度高い荷重まで CFRP の剥離を抑制できていたことがわかる。それに対して、高伸度弾性パテ材を CFRP 補強部の一部に施工した試験体 B-t-P2, C-t-P2 において、端部での CFRP の剥離が発生した時の荷重値は、198~235kN であった。この結果は、高伸度弾性パテ材を施工しなかった試験体とほぼ同じ結果であり、高伸度弾性パテ材の効果がほとんどないことを示している。この理由として、高伸度弾性パテ材の施工範囲を CFRP 補強の最終層から部材中央側 75mm の範囲としている。この施工範囲が CFRP と鋼材を一体化させる定着長の区間として、不足していた可能性がある。今回の実験では、高伸度弾性パテ材の部分施工の範囲は 1 ケースしか実施していないので、その施工範囲が CFRP の剥離に対してどの程度影響があるのか検討の余地がある。

以上の結果より、交番載荷試験における引張載荷の最大荷重 P_{tmax} は、端部の降伏変形を発生させない $P_{tmax}=175kN$ とした。これは、今回採用した試験体の形状では、当初想定していた試験体の中央付近での降伏が発生せずにヒンジ部との接合部が先行して降伏することが実験の結果より判明したためである。この載荷範囲であれば、引張載荷時は弾性域の挙動となるため、ヒンジとの接合部における降伏変形の影響を受けない実験が可能である。

表-6.9 引張荷重試験における降伏荷重の推定値

試験体	降伏荷重 P_{ty} (kN)			補強による 変化率 (実験値)	CFRP の剥離 (中央部)
	①計算値※1	②実験値※2	② / ①		
A-t-N	258.2	249.5	0.97	—	
B-t-N	278.7	277.4	1.00	11.2%	○
B-t-P1		273.7	0.98	9.7%	
B-t-P2		269.6	0.97	8.1%	
C-t-N	299.3	263.2	0.88	5.5%	○
C-t-P1		282.2	0.94	13.1%	○
C-t-P2		296.1	0.99	18.7%	○

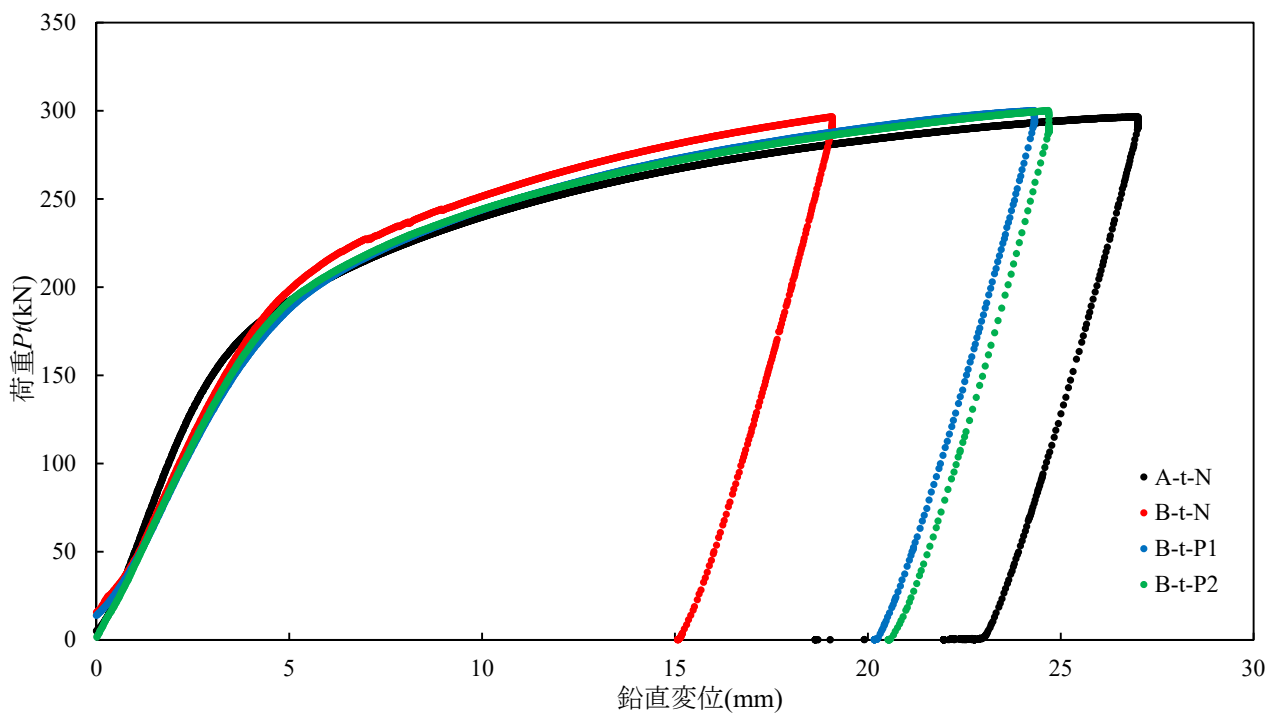
※1：表-6.6 に示す計算により求めた降伏荷重 P_y

※2：図-6.9 および図-付 6.3～図-付 6.8 に示す実験値において、中段部の鋼材のひずみが降伏ひずみ $\epsilon_y=1510\mu$ に達した時の荷重値

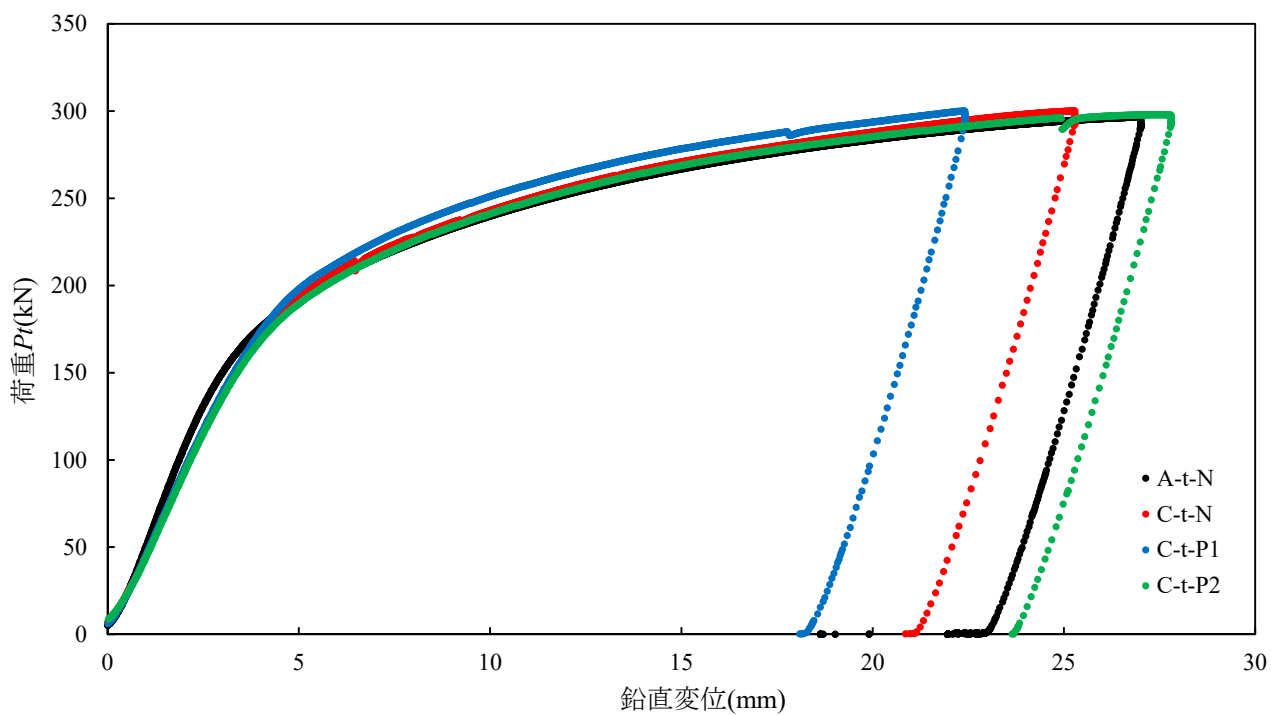
表-6.10 引張荷重試験における CFRP の剥離発生時の荷重値と CFRP 表面のひずみ値

試験体	箇所	荷重 P_t (kN)	発生ひずみ $\epsilon(\mu)$ ※1			
			S13	S14	S15	S16
			S17	S18	S19	S20
			S21	S22	S23	S24
B-t-N	上段部	227.3	1384	1532	1283	1255
	中段部	236.8	1228	1352	1327	1360
	下段部	234.6	1377	1265	1531	1482
B-t-P1	上段部	242.1	1212	1401	734	1053
	中段部	剥離なし	—	—	—	—
	下段部	250.1	1016	993	1583	1606
B-t-P2	上段部	235.0	1032	1188	1043	—
	中段部	剥離なし	—	—	—	—
	下段部	197.8	978	887	887	775
C-t-N	上段部	214.1	1162	1167	989	958
	中段部	214.1	1212	981	923	1015
	下段部	214.1	1221	1107	1050	1063
C-t-P1	上段部	247.3	884	744	1143	970
	中段部	288.1	1184	1216	1539	1805
	下段部	247.3	884	846	1099	1058
C-t-P2	上段部	209.2	864	814	470	734
	中段部	296.1	1605	1732	1854	1428
	下段部	229.3	1004	816	903	966

※1：図-付 6.9～図-付 6.14 に示す実験値において、ひずみ値が急激に低下する直前のひずみ値

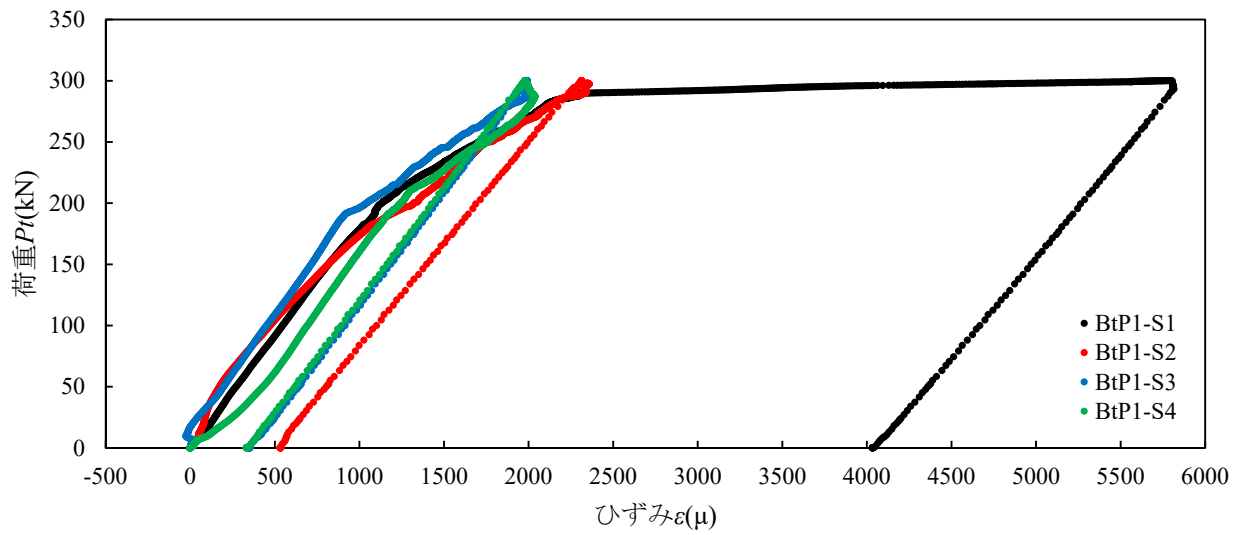


(a)試験体 A-t-N, B-t-N, B-t-P1, B-t-P2

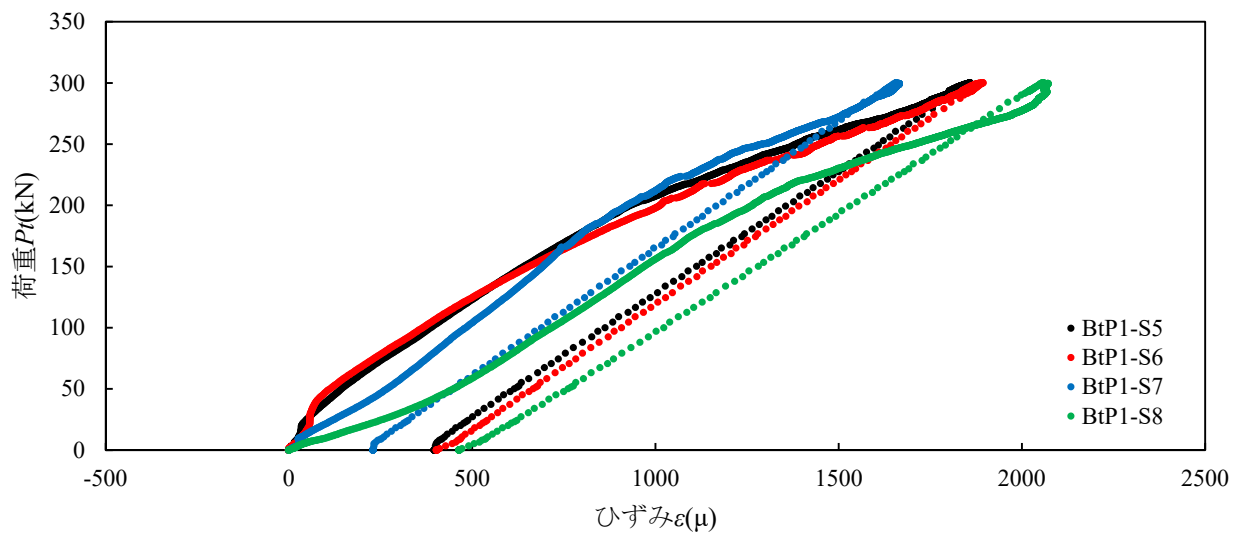


(b)試験体 A-t-N, C-t-N, C-t-P1, C-t-P2

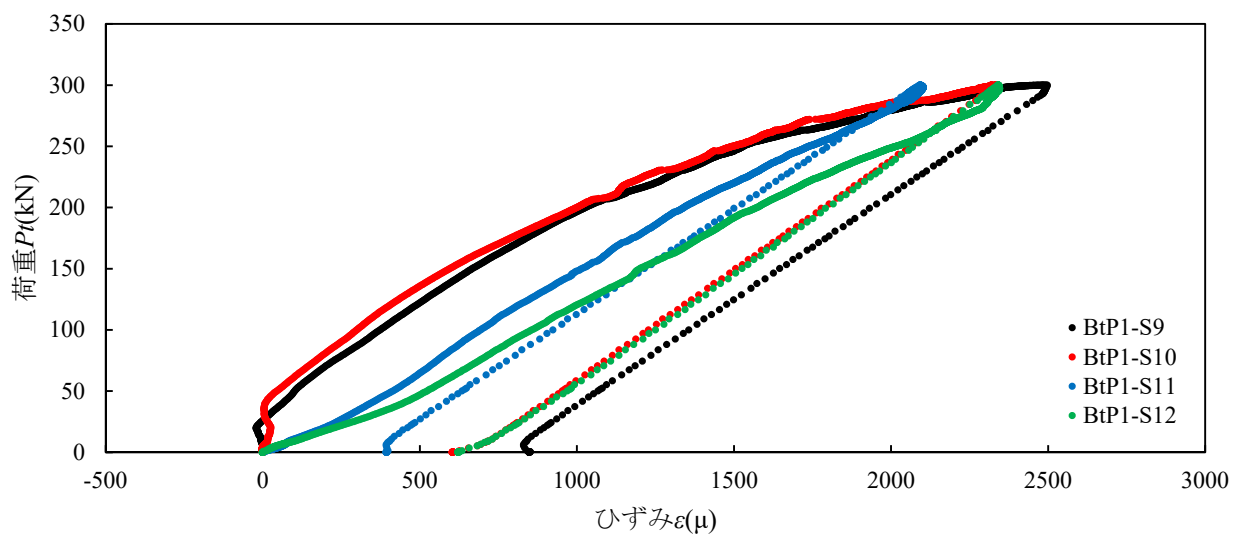
図-6.8 引張載荷試験における鉛直荷重—鉛直変位関係



(a)上段部



(b)中段部



(c)下段部

図-6.9 引張載荷試験における鉛直荷重-ひずみ関係（鋼材部）（試験体 B-t-P1）



写真-6.3 引張試験後の試験体（試験体 B-t-N）



写真-6.4 引張試験後の試験体（試験体 B-t-P1）

6.3.2 圧縮載荷試験の結果

圧縮載荷試験により得られた全体座屈が発生した時の荷重値と CFRP で補強することによる荷重の増加率、および CFRP 補強部における破壊状態を表-6.11 に示す。また、鉛直荷重 P_c と鉛直変位の関係を図-6.11 に示す。この表において、全体座屈が発生する時の荷重値は、第 5 章の 5.3.3 で示した①オイラー弾性座屈の式から算出した値、②道示Ⅱの基準耐荷力の式から算出した値、③実験により得られた全体座屈荷重の推定値である。実験における座屈荷重の推定値は、最大荷重を座屈荷重とした。計算値と実験値を比較すると、実験値は、オイラーの弾性座屈式から算出した座屈荷重の値に近い結果であった。オイラーの弾性座屈式は、座屈挙動の上限を示す。このような傾向を示した要因としては、実験における初期不整（部材の曲がりや荷重載荷時の偏芯など）が小さかったことより、座屈変形が発生しにくい条件であったことが推定できる。試験体の初期たわみは、最大で 0.5mm であった。道示式における初期たわみの値は $l/1000=900/1000=0.9\text{mm}$ (l は有効座屈長) であるため、試験体の初期たわみは比較的小さい値であった。

CFRP で補強することによる座屈荷重の増加率は、補強なしの試験体 A-c-N の実験値に対する増分の割合を示している。CFRP 補強部における破壊の状態は、CFRP の剥離の有無、CFRP の破断の有無を示している。全体座屈が発生した試験体について、CFRP 補強を 2 層とした試験体 B は、座屈荷重の増加率が小さく補強効果がみられなかった。CFRP 補強を 4 層とした試験体 C は、C-c-P1 で 11% の増加率であり、座屈荷重に対する補強効果があったことを確認できた。試験体 C-c-N と C-c-P2 については、全体座屈が発生せずに端部の接合部付近での局部座屈による変形が先行してしまった。これは、試験体を接合している部分の局部座屈に対する耐荷力が不足していたことにより、全体座屈が発生する前に該当部分の局部座屈が発生し、試験体の耐荷力が低下したためだと考えられる。しかし、これらの試験体で全体座屈が発生しなかったのは、CFRP 補強により全体座屈の耐荷力が増加したためで、定量的な評価はできないが補強効果はあったと判断することができる。

急激な面外変形が発生する前後の荷重と変位の値を表-6.12 に示す。補強なしの試験体 A-c-N は、全体座屈の変形により急激に変形が進展したときの荷重と変位を示す。また、鉛直荷重と水平変位の関係を図-6.12 に示す。CFRP 補強をした試験体 B および C で全体座屈が発生した試験体は、いずれの試験体においても全体座屈の変形により急激に変形が進展すると同時に CFRP の破断と剥離が発生した。この時の荷重値について、補強なしの試験体 A-c-N と補強ありの試験体 B、C を比較すると、試験体 B は補強なしの試験体 A とほぼ同じ値であった。試験体 C は補強なしの試験体 A より 9% 増加していた。この補強効果の傾向は、座屈荷重に対する補強効果の傾向と一致している。CFRP が破壊する直前の鉛直変位について、CFRP で補強することで補強なしの場合と比較して、1~2mm 程度増加している。このことより、CFRP 補強することで大きな鉛直変位が発生しても急激な座屈変形を抑えることができていたことを示している。また、CFRP が破壊する直前の水平変位について、補強なしの場合と比較して、1~3mm 程度減少している。このことより、CFRP 補強することで面外方向の変形を抑制できていたことを示している。これらの結果より、全体座屈後の変形に対しても補強効果があったことを確認できた。全体座屈が発生した場合は、写真-6.5 に示すように試験体の全体が面外方向に曲がる変形となった。CFRP の剥離と破断は、写真-6.6 に示す。全体座屈の曲がりにおいて、圧縮方向の変形が作用する部分は、鋼材と接着剤の界面で剥離が発生し、CFRP 補強に盛り上がるような変形が発生した。引張方向の変形が作用する部分は、CFRP 内にある炭素繊維が破断した。また、圧縮載荷試験における CFRP の剥離および破断は、試験体の中央付近で発生している。引張載荷試験で発生した CFRP 補強端部における CFRP の剥離は発生していなかった。これは、全体座屈の変形による部材の曲がり試験体の中央付近で大きく

なっており、端部に向かって曲げ変形が小さくなっていったためである。この結果は、第4章の曲げ載荷試験の結果および第5章の圧縮載荷試験における全体座屈時の結果と傾向が一致している。急激な面外変形が発生した後は、荷重値が減少し、水平変位が増加した。試験体 B, C における減少した後の荷重値は、 $P_c=87.7\sim 91.6\text{kN}$ であり、補強なしの試験体 A で示している荷重値 $P_c=100.8\text{kN}$ に近い値まで減少していたことがわかる。これは、急激な面外変形の発生により、CFRP の剥離と破断が発生し、CFRP の補強効果が失われたことを示している。

急激な面外変形が発生する直前の鋼材および CFRP 補強部に発生しているひずみ値を表-6.13 に示す。鋼材部に発生しているひずみ値について、CFRP 補強をしている試験体 B, C における引張側のひずみ値は、補強なしの試験体 A では最大で 20000μ 以上のひずみが発生していたのに対して、 8000μ 程度のひずみ値に抑えられていた。これは、CFRP による補強で鋼材に発生する引張方向のひずみ値が低下したためと推測できる。圧縮側のひずみは、補強なしの試験体 A の発生ひずみとあまり変わらない結果であった。これは、圧縮側については、急激な面外変形が発生する前に CFRP の剥離が発生していた可能性がある。次に、CFRP 補強部に発生しているひずみは、CFRP の引張破断ひずみ ϵ_{ucf} と比較しても小さな値であることがわかる。これは、急激な面外変形が発生するのは CFRP の破断が原因ではないことを示している。このことより、CFRP の破断は、先に急激な面外変形が発生し、その変形に起因する急激なひずみの増加によるものと推定できる。実験データは、1 秒ごとに記録していたため、CFRP が破断するときの正確なひずみ値を記録できていなかった。そのため、実験データからの定量的な推定はできなかった。

高伸度弾性パテ材の施工の有無が全体座屈の変形による CFRP の剥離や破断に与える影響について、CFRP の補強層数が 2 層と同じ条件である高伸度弾性パテ材を施工していない試験体 B-c-N と施工した B-c-P1, B-c-P2 で比較をおこなった。表-6.12 において、急激な面外変形が発生する直前の荷重値を比較すると、高伸度弾性パテ材を施工した試験体の方が施工していない試験体よりも荷重値が 4~5% 小さくなっていった。また、今回の実験では CFRP 補強なしのケースと比較しても 1~2% 小さくなっていった。水平変位については、高伸度弾性パテ材を施工した試験体の方が施工していない試験体より 2mm 程度大きな変位となった。このことより、高伸度弾性パテ材を施工した方が大きな変形に対して追従する効果があることを確認できた。しかし、荷重値に対する補強効果は、高伸度弾性パテ材を施工することで低下する傾向にあることを確認できた。この影響により、CFRP 補強が 2 層の場合は、荷重値に対する補強効果が小さいことと高伸度弾性パテにより補強効果が低下したことが複合的に作用して、補強なしのケースより荷重値が低下したと推測できる。CFRP 補強が 4 層の場合は、全てのケースで全体座屈をした結果が得られていないため、高伸度弾性パテ材による影響が確認できなかった。このことより、圧縮載荷時において、全体座屈が発生するまでの挙動に対しては、高伸度弾性パテ材を使用しない方が座屈荷重の増加に有効であるが、全体座屈後の面外変形の挙動に対しては、高伸度弾性パテ材を使用したほうが大きな変形に対して有効であると言える。

以上の結果より、交番載荷試験における圧縮載荷は、急激な面外変形が発生しない最大の鉛直変位まで変位制御で載荷し、除荷することにした。

表-6.11 圧縮載荷試験における座屈荷重の比較

試験 ケース	細長比パ ラメータ	全体座屈発生時の荷重値			補強に よる増 加率(%)	理論値との比較		CFRP の破壊状態	
		オイラー 式①	道示式②	実験値③		③/①	③/②	剥離	破断
A-c-N	1.059	230.1	136.3	259.7	—	1.129	1.906	—	—
B-c-N	1.026	264.6	152.6	267.5	3.0	1.011	1.753	○	○
B-c-P1				255.4	-1.7	0.965	1.674	○	○
B-c-P2				256.9	-1.1	0.971	1.683	○	○
C-c-N	1.000	299.2	168.8	全体座屈が発生しなかった（端部の局部座屈が先行した）					
C-c-P1				289.5	11.4	0.968	1.715	○	○
C-c-P2				全体座屈が発生しなかった（端部の局部座屈が先行した）					

表-6.12 圧縮載荷試験における急激な面外変形が発生する前後の荷重と変位

試験体	荷重値 P_c (kN)	鉛直変位 z (mm)	部材中央の水平変位 x (mm)	CFRP 破壊時の状況
A-c-N	236.8→100.8	9.0	14.1→28.1	—
B-c-N	245.1→87.2	10.2	-11.7→-29.3	全体座屈が発生したケースは、面 外変形が急激に進展すると同時に CFRP の剥離と破断が発生
B-c-P1	233.8→87.7	10.4	-13.5→-31.1	
B-c-P2	218.0→91.6	11.8	-13.5→-28.7	
C-c-N	—	—	—	
C-c-P1	257.3→89.1	11.1	-13.3→-33.3	
C-c-P2	—	—	—	

表 6.13 圧縮載荷時における急激な面外変形が発生する直前のひずみ値

試験体	鋼材における発生ひずみ ϵ_s (μ)		CFRP における発生ひずみ ϵ_{cf} (μ)		CFRP の引張破断ひずみ(μ)	
	S5	S6	S17	S18	ϵ_{ucf}	$0.6\epsilon_{ucf}^{*1}$
A-c-N	5672	-17115	—	—		
	21602	-29355	—	—		
B-c-N	-4585	3795	-1387	1412		
	-11229	4241	-3026	1920		
B-c-P1	-25915	5295	-2799	29		
	-15922	3778	-1050	689		
B-c-P2	-7393	3059	-1166	1263		
	-20638	4578	-3478	1168		
C-c-P1	-5466	2382	-1639	2254		
	-26751	8222	-4142	-401		

※1：ひずみゲージ貼付位置による補正值（図-6.10）

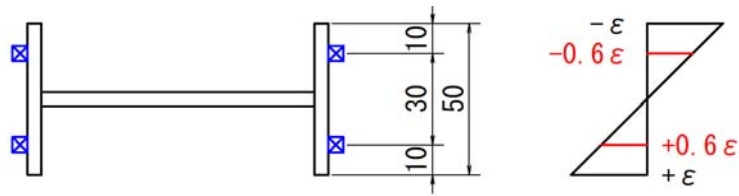
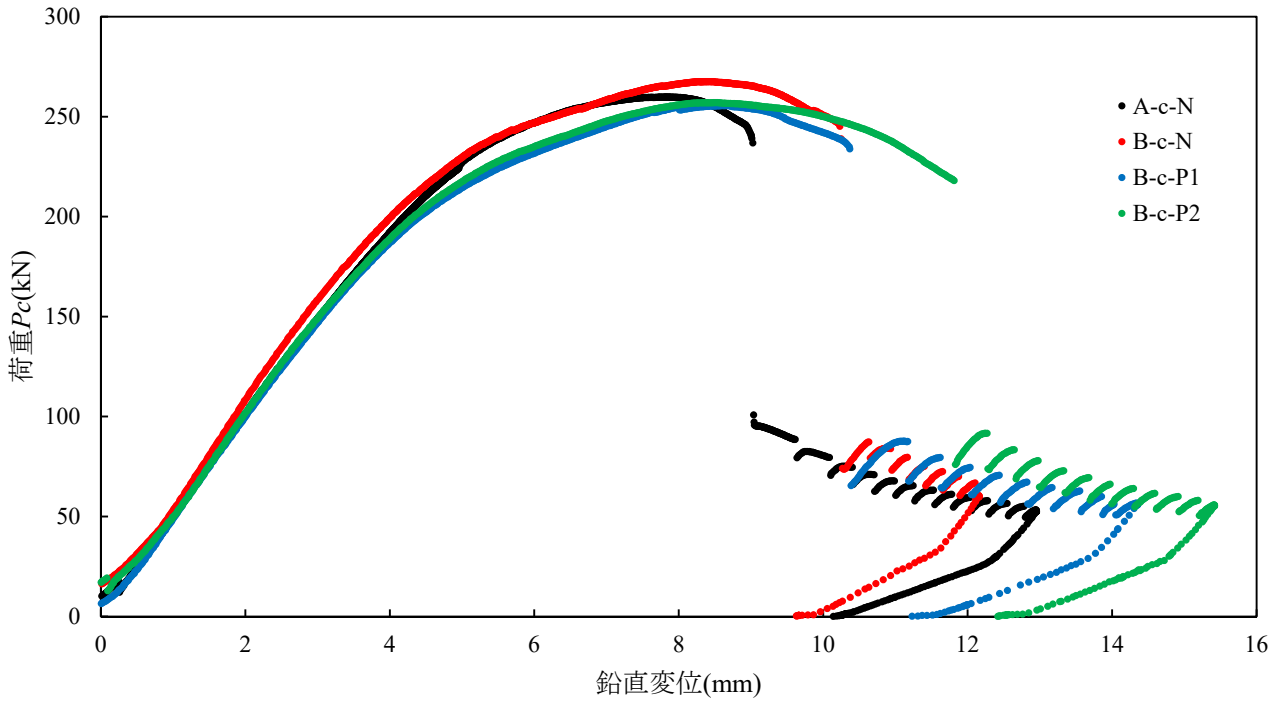
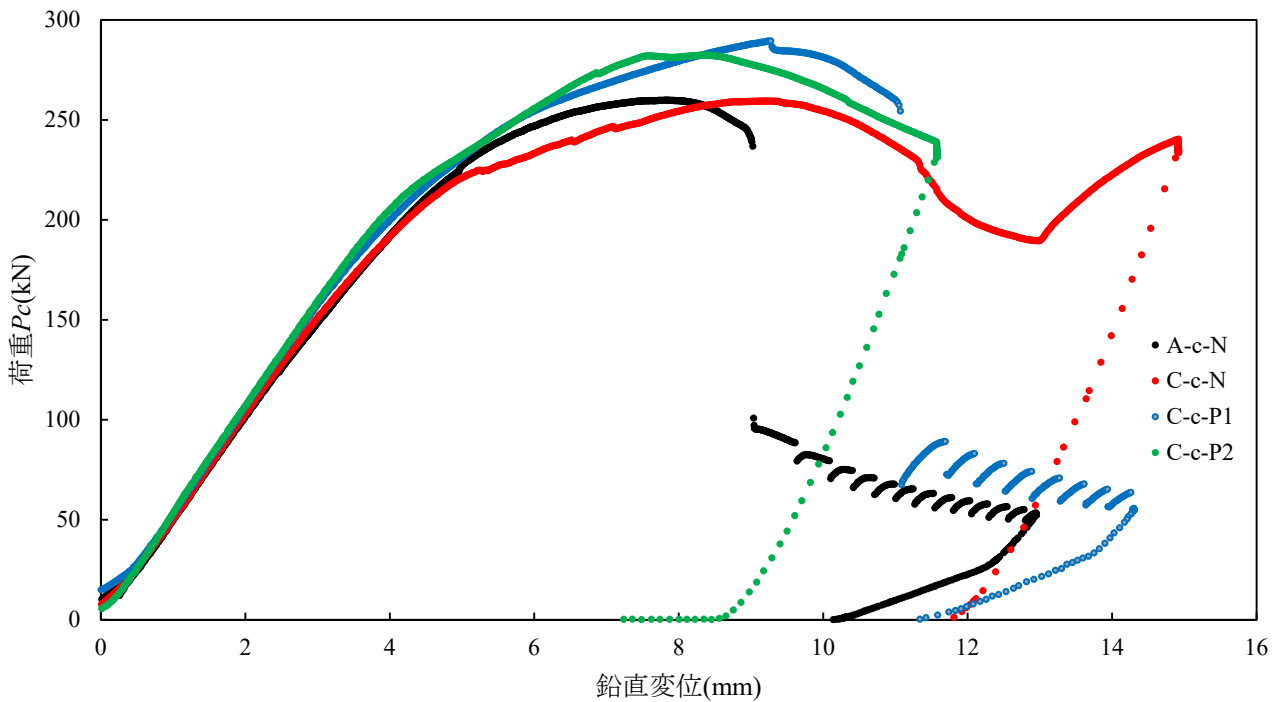


図-6.10 ひずみゲージ貼付位置によるひずみ値の補正

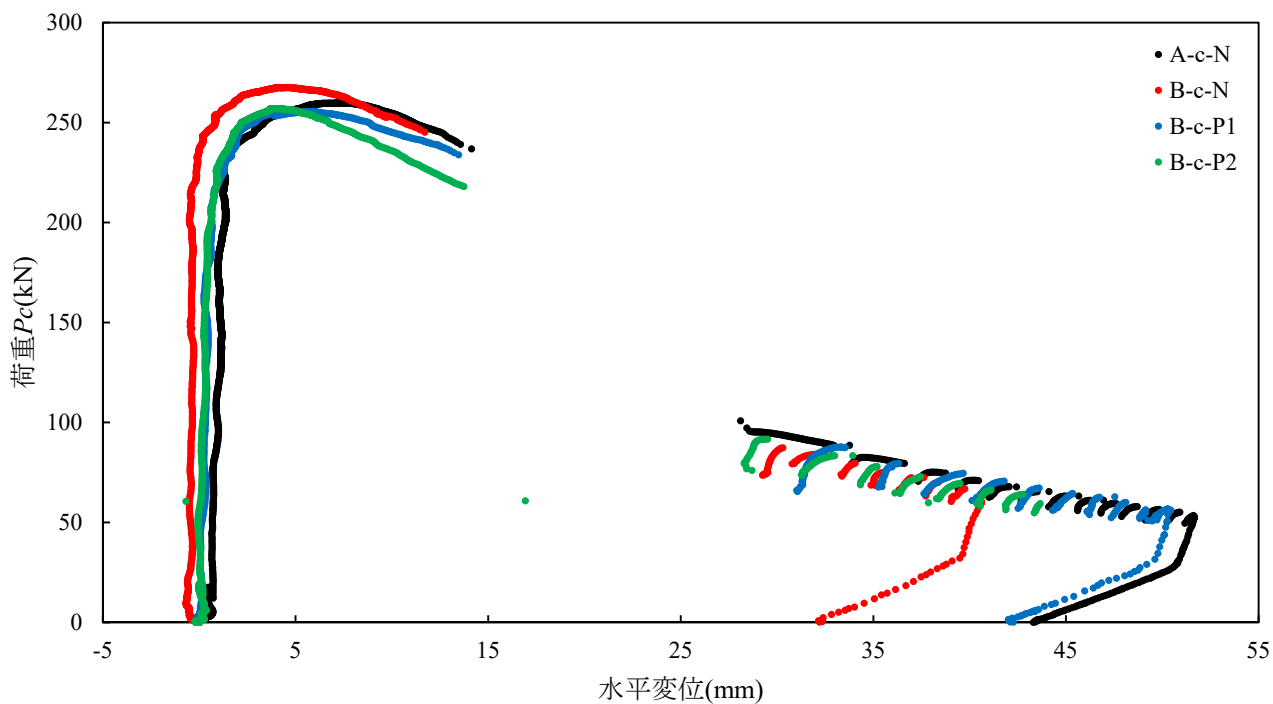


(a)試験体 A-c-N, B-c-N, B-c-P1, B-c-P2

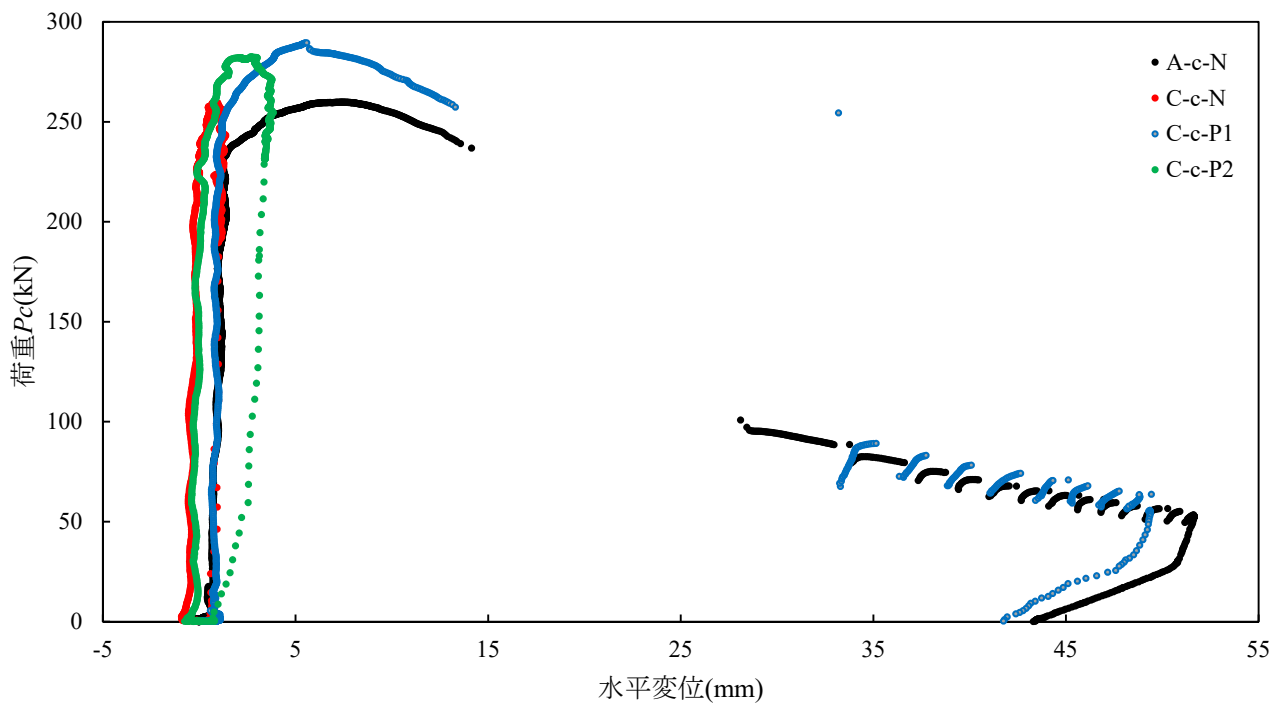


(b)試験体 A-c-N, C-c-N, C-c-P1, C-c-P2

図-6.11 圧縮載荷試験における鉛直荷重－鉛直変位関係



(a) 試験体 A-c-N, B-c-N, B-c-P1, B-c-P2



(b) 試験体 A-c-N, C-c-N, C-c-P1, C-c-P2

図-6.12 圧縮載荷試験における鉛直荷重－水平変位関係



写真-6.5 圧縮試験後の試験体（試験体 B-c-N）（その 1）



写真-6.6 圧縮試験後の試験体（試験体 B-c-N）（その 2）

6.3.3 交番載荷試験の結果

交番載荷試験における荷重の載荷方法は、前述の引張載荷試験および圧縮載荷試験の結果より、次の通りとした。引張側の載荷については、6.3.1における引張載荷試験の結果より、最大荷重を175kNとして、荷重制御により載荷した。そのため、いずれの試験体においても引張側の挙動において鋼材の降伏は発生しなかった。圧縮側の載荷については、6.3.2における圧縮載荷試験の結果より、急激な座屈変形による荷重値の低下が発生する直前の鉛直変位に対して2~3mm程度小さい値を1サイクル目の最大変位とした。その後、急激な座屈変形が発生するまで最大変位を0.5mmずつ増加させて変位制御により載荷した。1サイクル目の鉛直変位および最終的な鉛直変位（急激な座屈発生時の鉛直変位もしくは、載荷を中止した時の鉛直変位）と載荷サイクル数を表-6.14に示す。

交番載荷試験により得られた全体座屈が発生した時の荷重値とCFRPで補強することによる荷重の増加率、およびCFRP補強部における破壊状態を表-6.15に示す。また、鉛直荷重 P と鉛直変位の関係を図-6.13~図-6.16に示す。全体座屈が発生する時の荷重値について、オイラー弾性座屈の式から算出した値および道示Ⅱの基準耐荷力の式から算出した値と比較すると、6.3.2の結果と同様に、実験値はオイラーの弾性座屈式から算出した座屈荷重に近い値であった。

圧縮側の挙動について、1サイクル目の載荷時の勾配は、除荷時の勾配に比べて緩やかな勾配であった。このようになった原因の一つとして、鉛直変位が試験装置のストロークの値であり、試験体の変位とは異なる可能性があることが挙げられる。試験装置のストロークの値と試験体の変位が異なると考察した理由について、試験装置の固定間には、試験体のほかに上下の反力梁、ヒンジ部の治具、接続用のボルトがあり、それらの変形も含めた合計値がストロークの値になるからである。しかし、この影響が勾配の差となっているかどうかは工学的な根拠を見出せていないため、完全な解明には至っていない。また、もう一つの原因として、試験体と治具の接合部に作用する摩擦による影響も考えられる。この原因についても載荷時と除荷時で摩擦係数が異なることを定量的に確認することができなかったため、完全な解明には至っていない。2サイクル目以降の載荷時の勾配は、荷重が増加しない区間が前のサイクルより長くなった。その後、前のサイクルの載荷時の勾配に比べて急な勾配で前のサイクルでの最大荷重と最大変位の点を目指すような挙動となった。除荷時の勾配は、各サイクルで変化が見られなかった。

引張側の挙動について、交番載荷試験では降伏変形が発生するまで載荷していない。よって、どのサイクルにおいても載荷時と除荷時の勾配に変化はなかったが、載荷時の勾配は除荷時の勾配と比べて緩やかな勾配であった。また、圧縮載荷時の座屈変形が進んだ分だけ荷重と変位の関係が圧縮側へ移動していった。これは、圧縮載荷時の座屈変形により、残留変位が発生しているためだと考えられる。

圧縮方向の荷重と引張方向の荷重が入れ替わる区間に荷重が0kNのままの区間が鉛直変位の変化として3mm程度の区間がある。これは、試験体の端部で試験治具と固定しているボルトの軸径とボルト孔径の差が3mm程度あり、圧縮載荷と引張載荷が作用する荷重の方向が入れ替わる時に孔径の余裕分移動することで発生している。

表-6.15において、CFRPで補強することによる座屈荷重の増加率は、補強なしの試験体A-a-Nの実験値に対する増分の割合を示している。CFRP補強部における破壊の状態は、CFRPの剥離の有無、CFRPの破断の有無を示している。全体座屈が発生したかどうかは、試験体の中央付近における水平変位の増加が指標の一つとなる。図-6.17~図-6.19に示す通り、試験体B-a-P2、C-a-P1、C-a-P2は水平変位が大きく増加していることが確認できる。このことより、試験体B-a-P2、C-a-P1、C-a-P2は、全体座屈が発生したと判定した。全体座屈が発生した試験体について、CFRP補強を2層とした試験体B-a-P2は、座屈荷重が8%増加した。CFRP補強を4層とした試験体C-a-P1とC-a-P2は、座屈荷重が23~26%増加し

た。以上の結果より、CFRPにより補強することで、座屈荷重に対する補強効果があったことを確認できた。6.3.2の結果では、試験体Bは補強効果がみられなかったが、交番載荷試験では補強効果がみられた。6.3.2の結果との違いは、試験体Aの座屈荷重が6.3.2の時と比較して $P_{cr}=240.5\text{kN}$ と小さい値となっていることが影響している。

急激な面外変形が発生する前後の荷重と変位の値を表-6.16に示す。CFRP補強した試験体BおよびCで全体座屈が発生した試験体は、いずれの試験体においても全体座屈の変形により急激に変形が進展すると同時にCFRPの破断と剥離が発生した。この時の荷重値と鉛直変位について、補強なしの試験体A-a-Nと補強ありの試験体B、Cを比較すると、試験体Bは試験体Aと比較して9.5%小さい値であった。試験体Cは、試験体Aと比較して-2~11%であり、ほぼ同じ値のケースと大きい値のケースであった。この結果より、座屈変形後の荷重に対する補強効果について、試験体Bは補強効果があまりないが、試験体Cは補強効果があったと判断できる。CFRPの破壊が発生する直前の鉛直変位について、CFRPで補強することで補強なしの場合と比較して、2~5mm増加している。この結果は、CFRP補強をすることで大きな鉛直変位が発生しても急激な座屈変形の発生を抑制できていたことを示している。これらの結果は、6.3.2における圧縮載荷試験の傾向と一致している。CFRPの破断と剥離は、表-6.15および表-6.16に示す通り、試験体B-a-P2、C-a-P1、C-a-P2の3体において、圧縮載荷時の急激な面外変形が進展した際に試験体の中央付近で発生している。交番載荷試験後の試験体の状況は、写真-6.7、写真-6.8に示す通りである。全体座屈が発生した場合、写真-6.7に示すように試験体の全体が曲がる変形となり、試験終了後も残留変位として変形が残っている状態であった。CFRPの剥離と破断は、写真-6.8に示すように発生していた。全体座屈の曲がりにより、圧縮方向の変形が作用する部分は、鋼材接着剤の界面で剥離が発生し、CFRP補強が盛り上がるような変形となった。引張方向の変形が作用する部分は、CFRP内にある炭素繊維が破断した。引張載荷時においては、6.3.1の引張載荷試験で観察されたCFRPの剥離は発生しなかった。引張載荷時にCFRPの剥離が発生しなかったのは、鋼材の降伏変形が発生する荷重まで載荷せずに弾性域の載荷に留めたことが要因として挙げられる。圧縮載荷時においては、全体座屈による急激な面外変形が発生するまでCFRPの破断および剥離が発生していないため、CFRPによる補強効果を維持しながら、大きな変形に追従していたと判断できる。

高伸度弾性パテ材の施工の有無が、交番載荷試験における荷重値や変形、およびCFRPの破断や剥離に与える影響について、確認することができなかった。これは、今回の実験では高伸度弾性パテ材を施工しなかった試験体B-a-Nと試験体C-a-Nで全体座屈を発生させることができなかったためである。

交番載荷試験により得られた荷重値とひずみの関係を図-6.20~図-6.25の(a)計測データに示す。まず、試験体の端部付近の鋼材部に貼り付けたひずみゲージの値であるS1~S4、S9~S12については、圧縮載荷時および引張載荷時ともにほぼ線形の挙動を示していることがわかる。圧縮側において、部分的にひずみの大幅な増加がみられるが、これは、部分的に端部で局部座屈が発生した影響であると推定できる。試験体の端部付近のCFRP補強部に貼り付けたひずみゲージの値であるS13~S16、S21~S24については、圧縮載荷時および引張載荷時ともにほぼ線形の挙動を示しており、この部分におけるCFRPの剥離や破断は見られなかった。そのため、CFRPの剥離および破断時にみられるひずみ値の急激な変化も観察されなかった。試験体中央部の鋼材部に貼り付けたひずみゲージの値であるS5~S8については、圧縮側の最大荷重に達するとひずみが+側と-側に分かれて急激に増加していることがわかる。これは、全体座屈による面外変形により曲げ変形が発生して、鋼材が降伏していることを示している。また、荷重とひずみの履歴ループは、座屈変形が進展するにつれてひずみ値の履歴の中心が少しずつ一方にずれていくことを確認できた。これは、ひずみの増加により、鋼材において部分的に塑性化が発生し、残

留ひずみが蓄積されているためである。

表-6.14 交番载荷試験における圧縮方向の変位荷重

試験ケース	圧縮方向の鉛直変位(mm)		サイクル数 (全体座屈時)	全体座屈発生 の有無
	1 サイクル目	最終変位 (全体座屈時)		
A-a-N	-9.0	-9.4	2 回	○
B-a-N	-8.5	-11.1	6 回	
B-a-P1	-8.6	-12.1	5 回	
B-a-P2	-8.5	-13.2	6 回	○
C-a-N	-10.0	-10.5	2 回	
C-a-P1	-8.3	-13.7	6 回	○
C-a-P2	-8.2	-14.0	6 回	○

表-6.15 交番载荷試験における座屈荷重の比較

試験 ケース	細長比パ ラメータ	全体座屈発生時の荷重値 $P_{cr}(kN)$			補強に よる増 加率(%)	理論値との比較		CFRP の破壊状態	
		オイラー 式①	道示式②	実験値③		③/①	③/②	剥離	破断
A-a-N	1.059	-230.1	-136.3	-240.5	—	1.045	1.764	—	—
B-a-N	1.026	-264.6	-152.6	全体座屈が発生しなかった (端部の局部座屈が先行した)					
B-a-P1				全体座屈が発生しなかった (端部の局部座屈が先行した)					
B-a-P2				-259.5	7.9	0.981	1.701	○	○
C-a-N	1.000	-299.2	-168.8	全体座屈が発生しなかった (端部の局部座屈が先行した)					
C-a-P1				-303.4	26.2	1.014	1.780	○	○
C-a-P2				-295.4	22.8	0.987	1.750	○	○

表-6.16 交番载荷試験における急激な面外変形が発生する前後の荷重と変位

試験ケース	荷重値 P(kN)	鉛直変位 z(mm)	部材中央の水平変位 x(mm)	CFRP 破壊時の状況
A-a-N	-224.2 → -77.0	-9.4	計測できなかった	—
B-a-N	—	—	—	全体座屈が発生したケースは、面 外変形が急激に進展すると同時に 剥離と破断が発生
B-a-P1	—	—	—	
B-a-P2	-203.0 → -90.0	-13.2	14.5 → 25.8	
C-a-N	—	—	—	
C-a-P1	-249.2 → -72.6	-11.2	13.7 → 30.9	
C-a-P2	-220.0 → -80.7	-15.0	14.0 → 28.2	

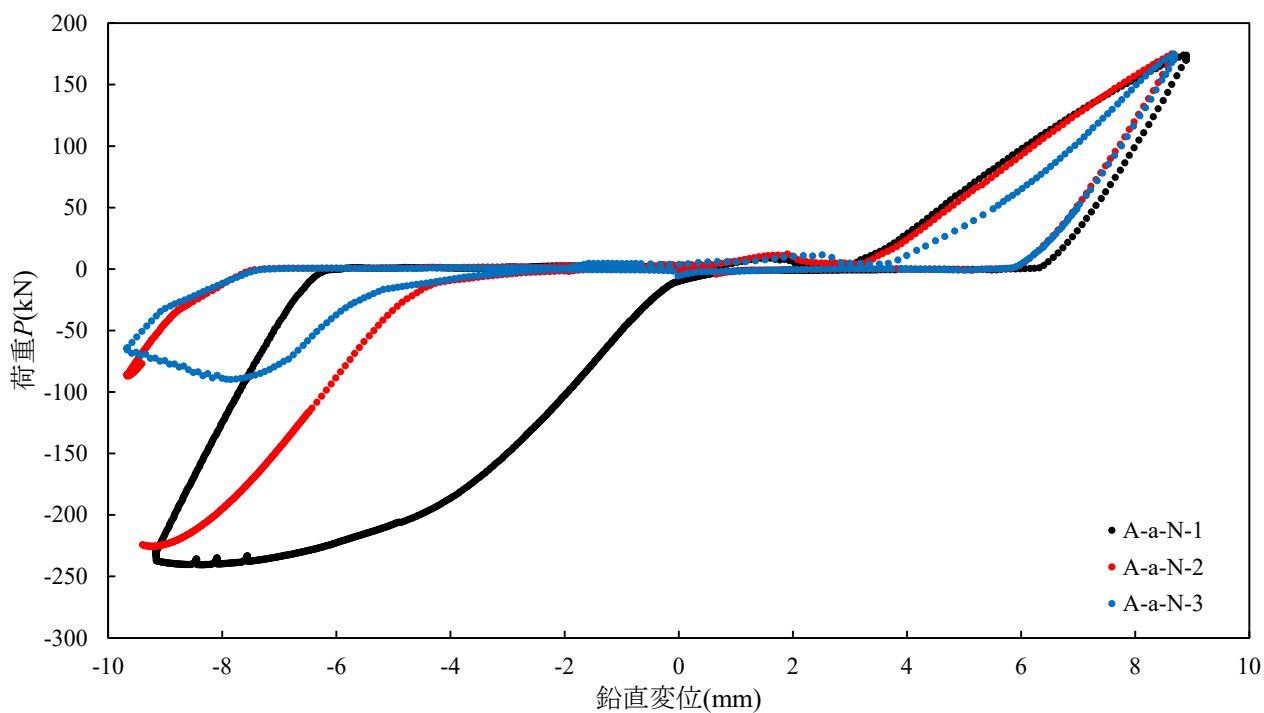


図-6.13 交番载荷試験における鉛直荷重－鉛直変位関係（試験体 A-a-N）

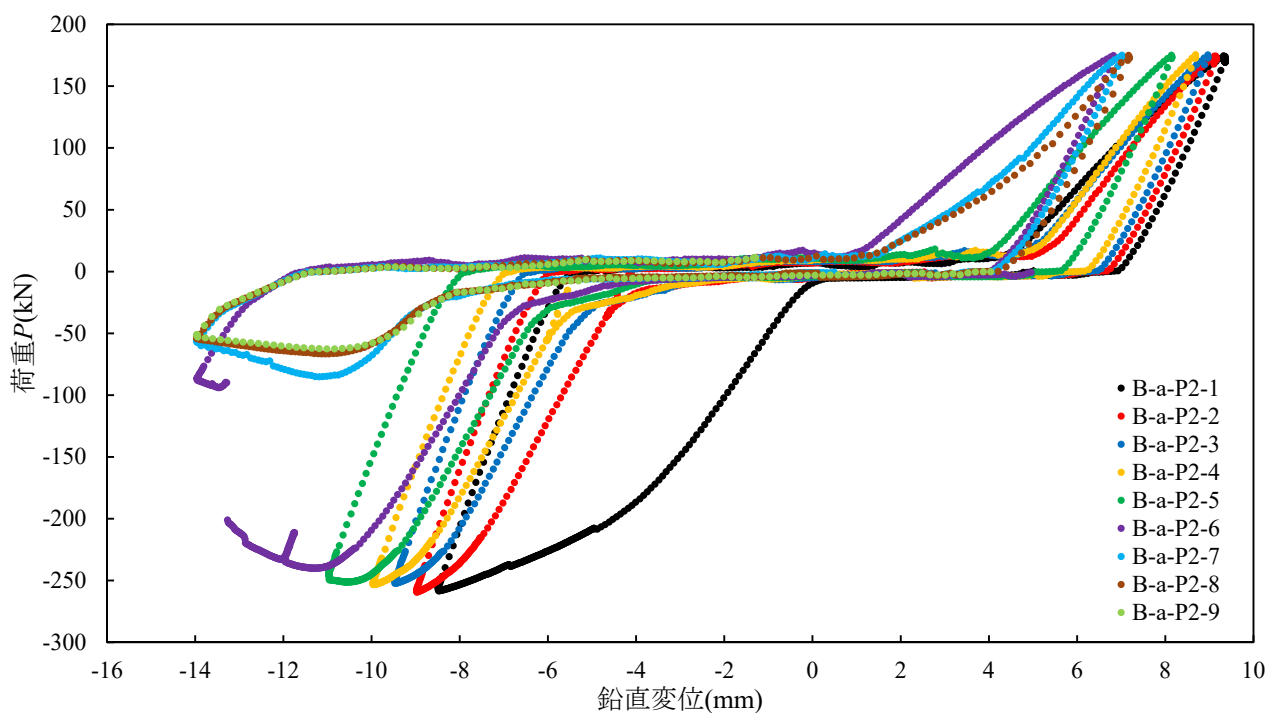


図-6.14 交番载荷試験における鉛直荷重－鉛直変位関係（試験体 B-a-P2）

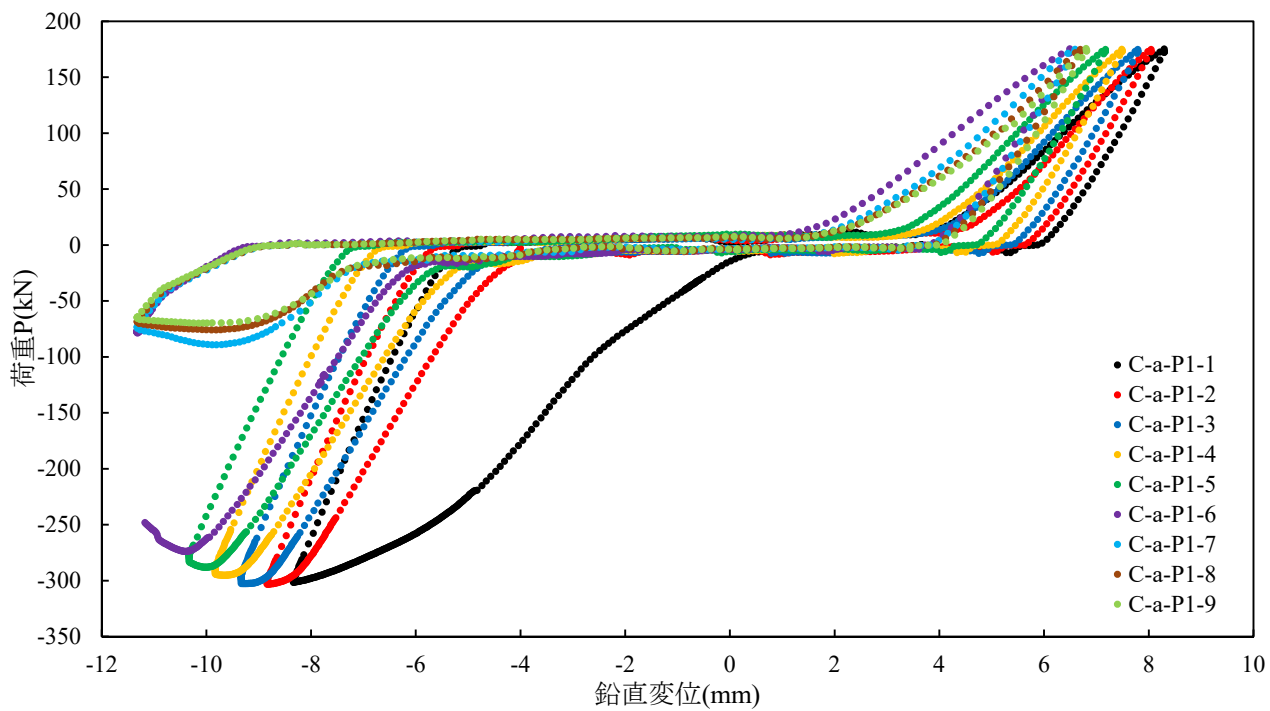


図-6.15 交番载荷試験における鉛直荷重—鉛直変位関係 (試験体 C-a-P1)

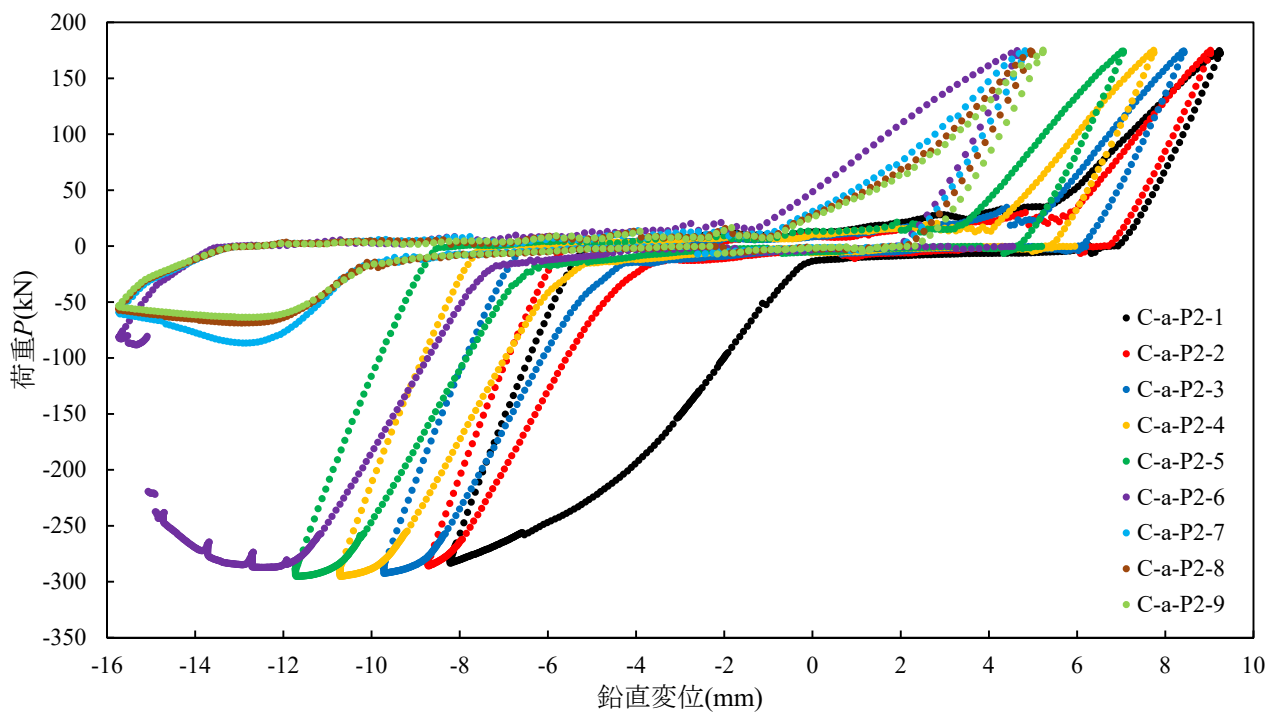


図-6.16 交番载荷試験における鉛直荷重—鉛直変位関係 (試験体 C-a-P2)

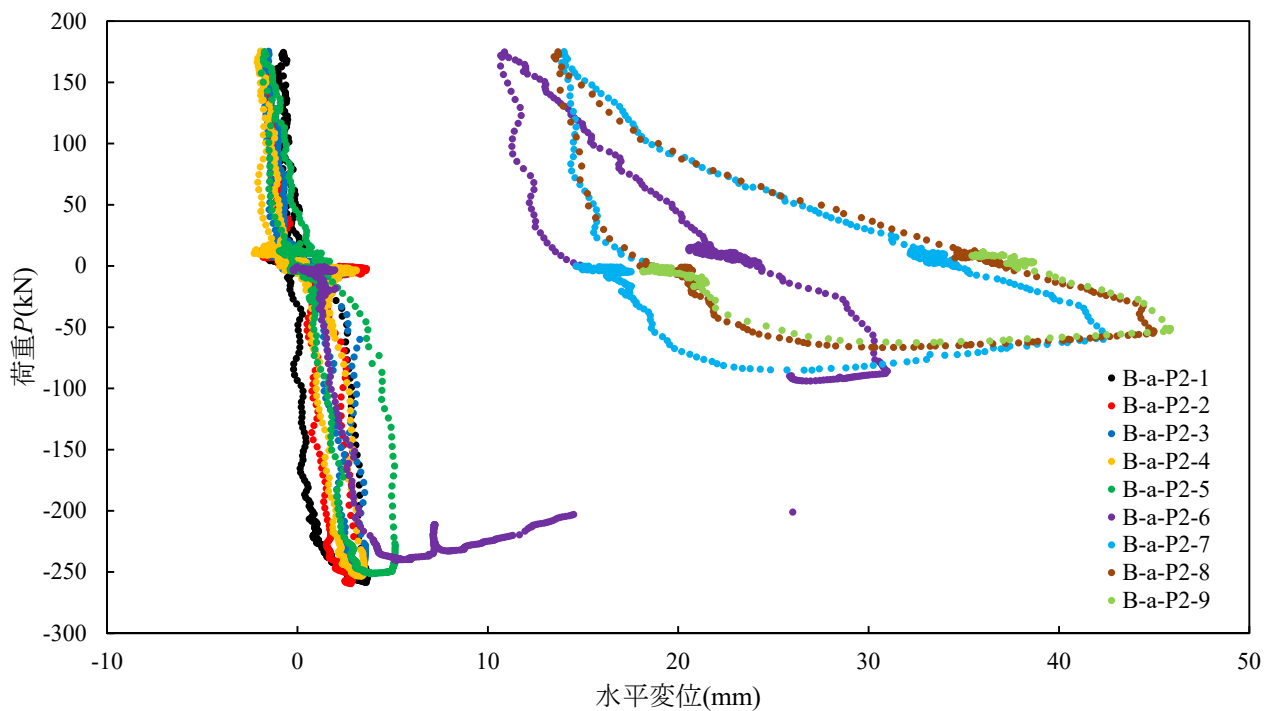


図-6.17 交番載荷試験における鉛直荷重－水平変位関係（試験体 B-a-P2）

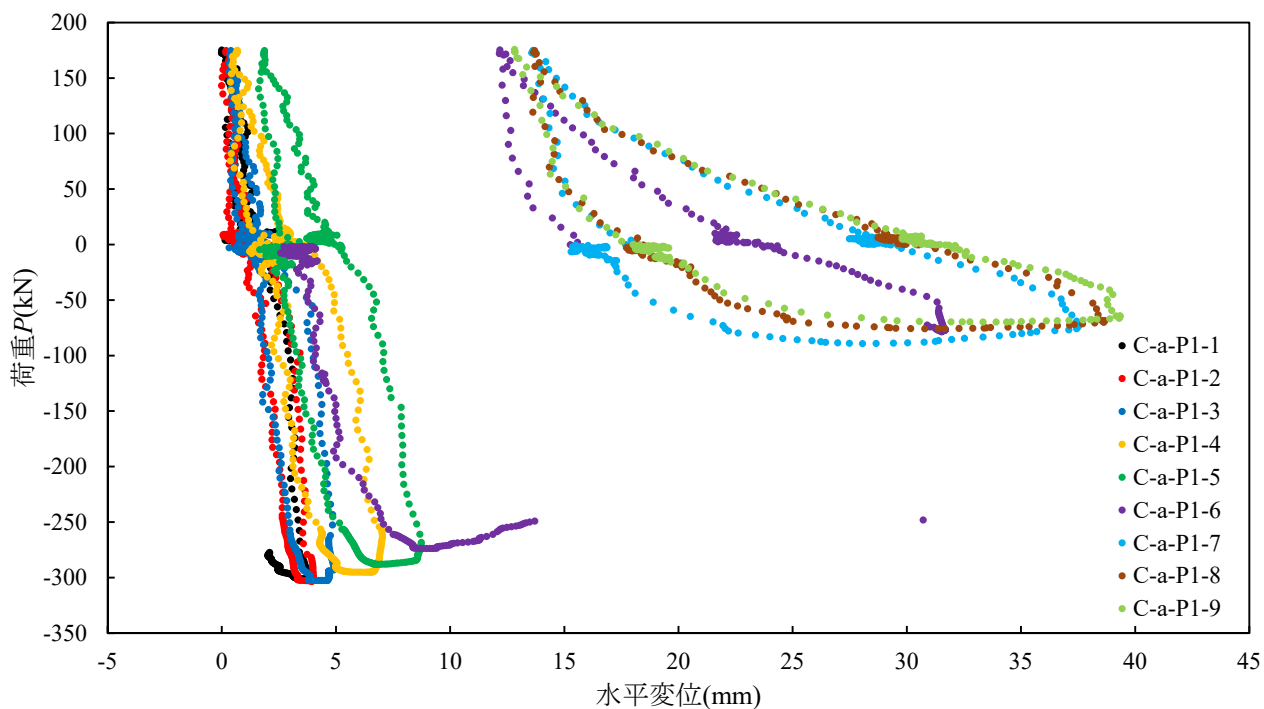


図-6.18 交番載荷試験における鉛直荷重－水平変位関係（試験体 C-a-P1）

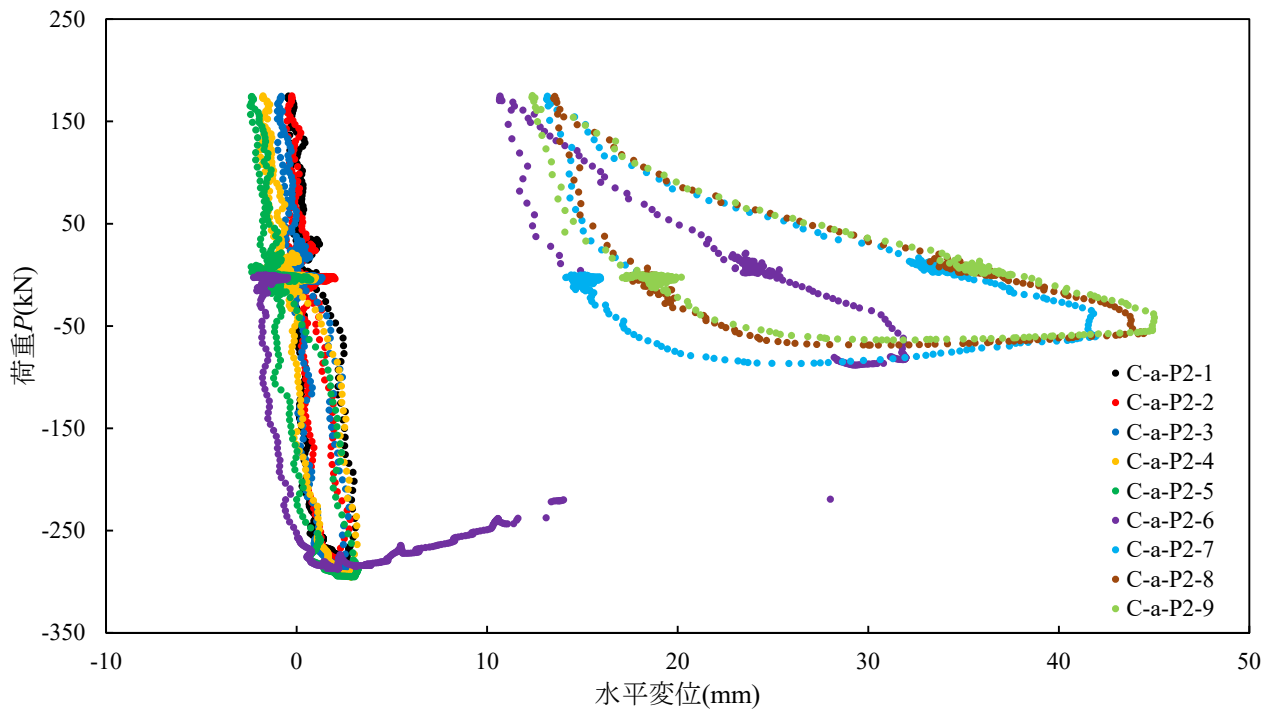


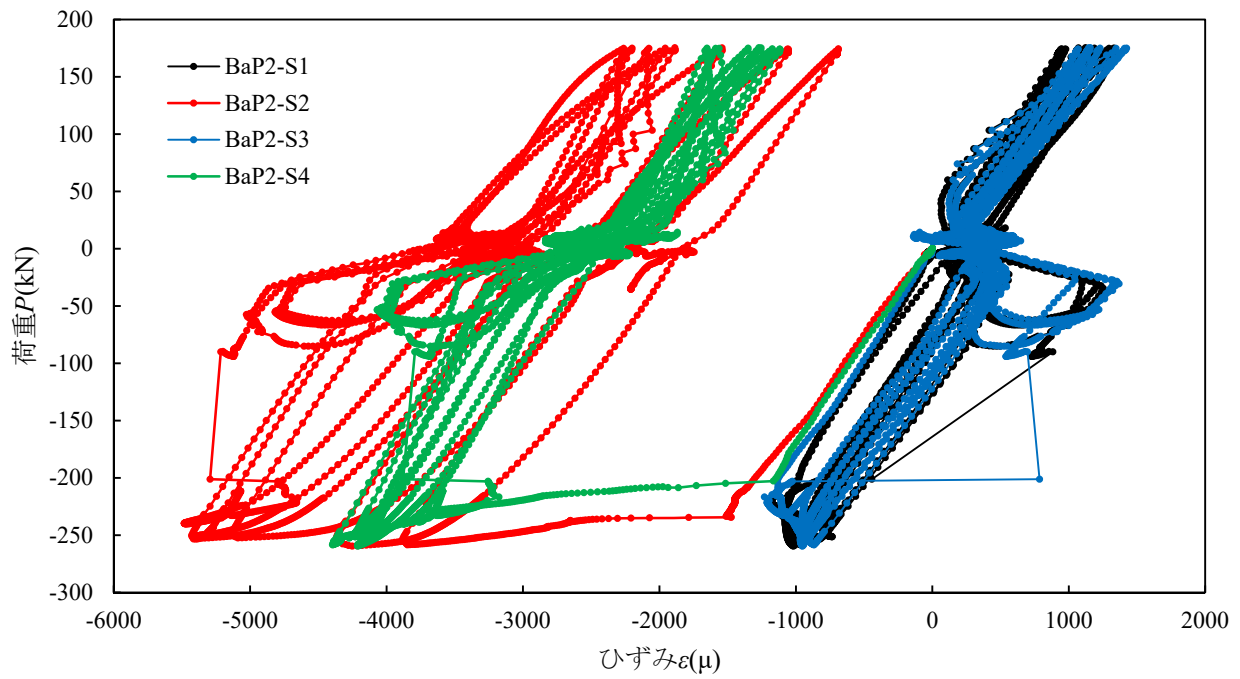
図-6.19 交番載荷試験における鉛直荷重－水平変位関係（試験体 C-a-P2）



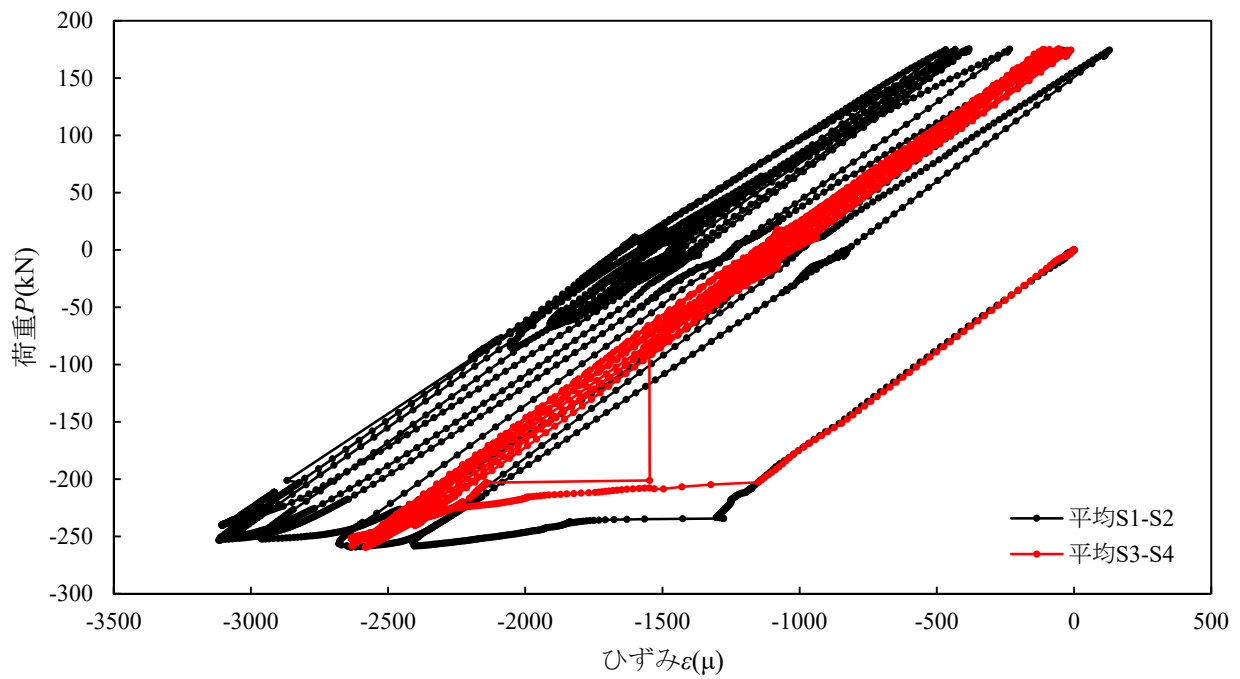
写真-6.7 交番载荷試験後の試験体（試験体 B-a-P2）（その 1）



写真-6.8 交番载荷試験後の試験体（試験体 B-a-P2）（その 2）

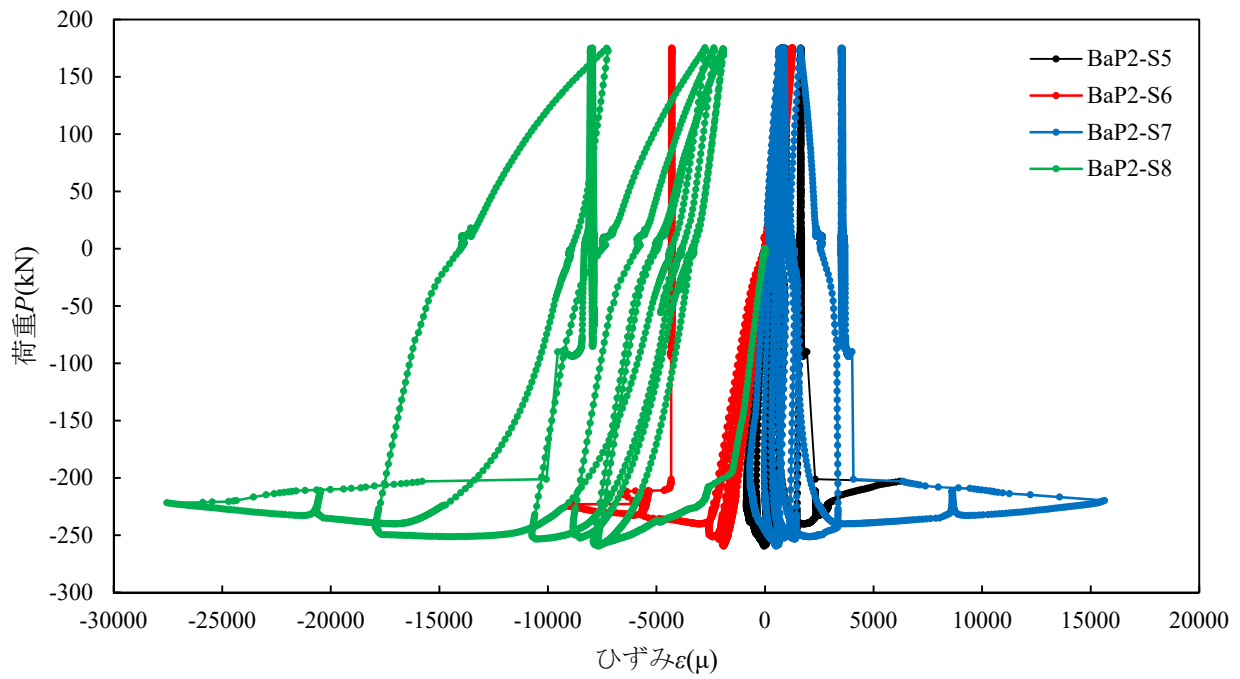


(a)計測データ (S1~S4)

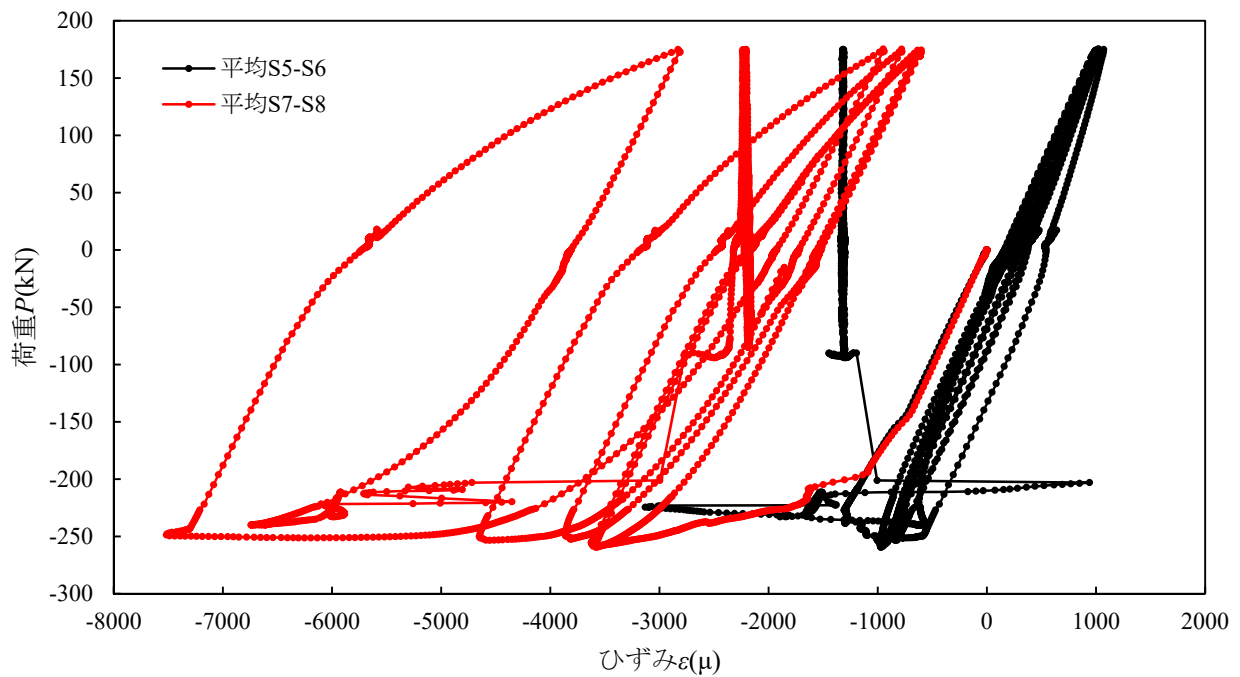


(b)平均データ (S1-S2, S3-S4)

図-6.20 交番载荷試験における鉛直荷重-ひずみ関係 (試験体 B-a-P2) (鋼材部ひずみ S1~S4)

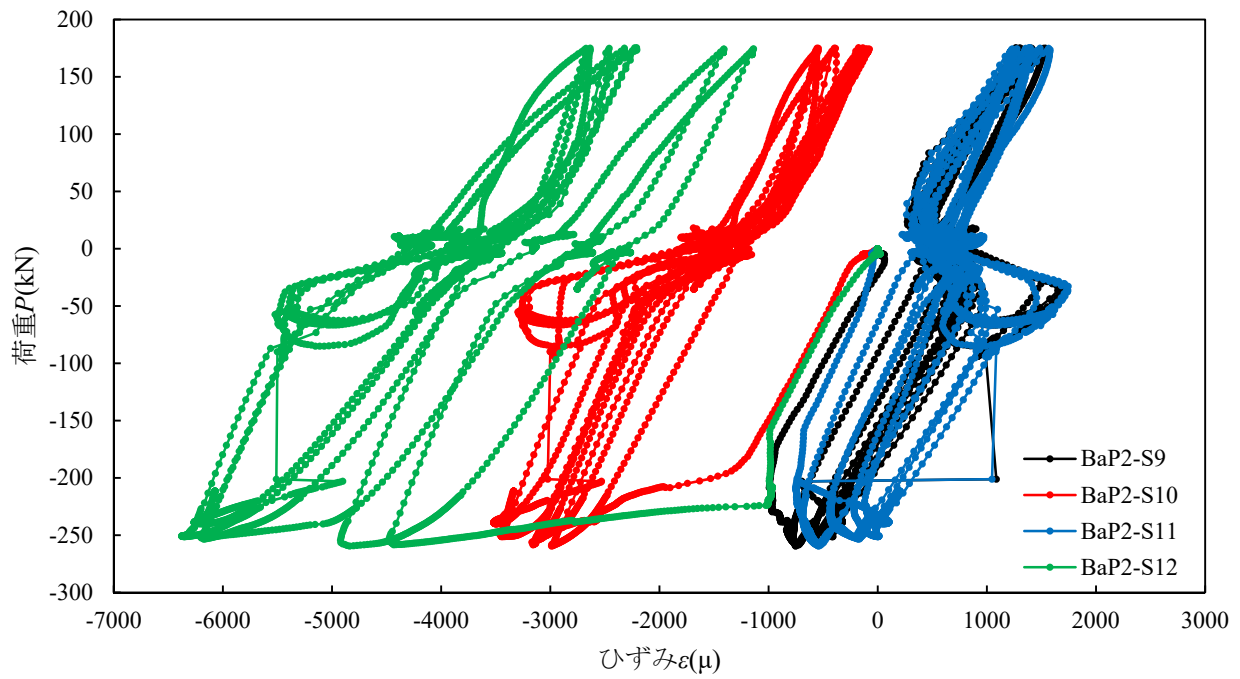


(a)計測データ (S5~S8)

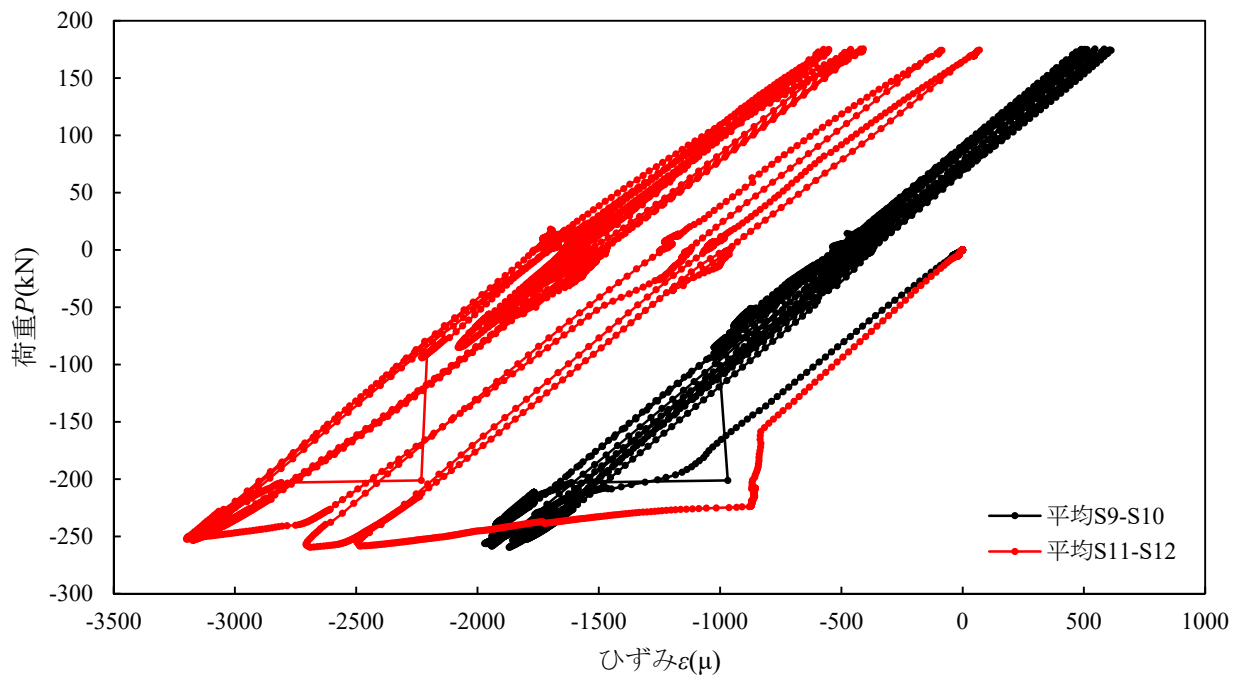


(b)平均データ (S5-S6, S7-S8)

図-6.21 交番载荷試験における鉛直荷重-ひずみ関係 (試験体 B-a-P2) (鋼材部ひずみ S5~S8)

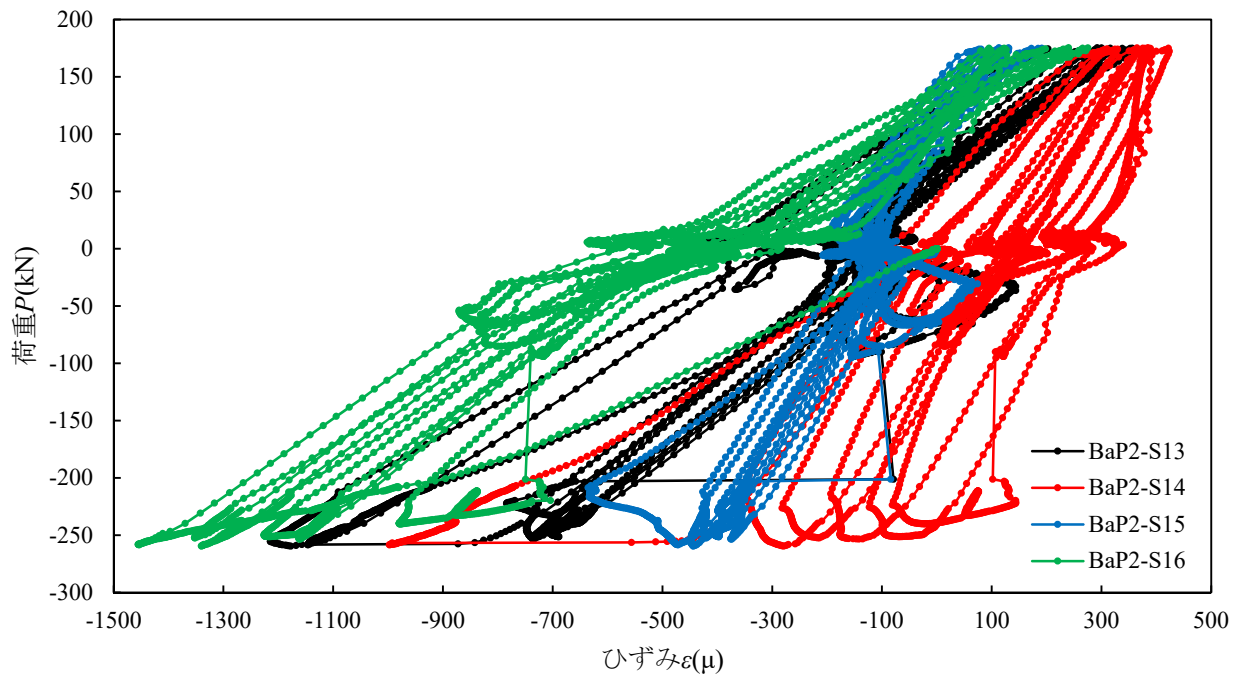


(a)計測データ (S9~S12)

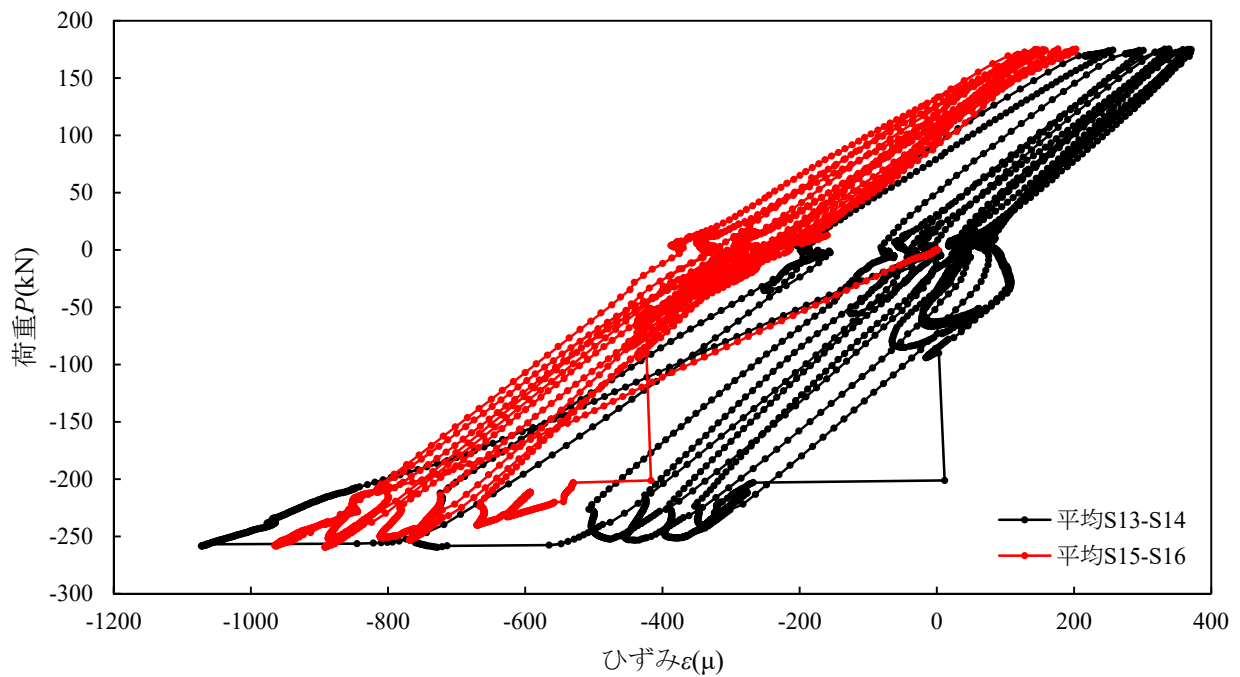


(b)平均データ (S9-S10, S11-S12)

図-6.22 交番载荷試験における鉛直荷重-ひずみ関係 (試験体 B-a-P2) (鋼材部ひずみ S9~S12)

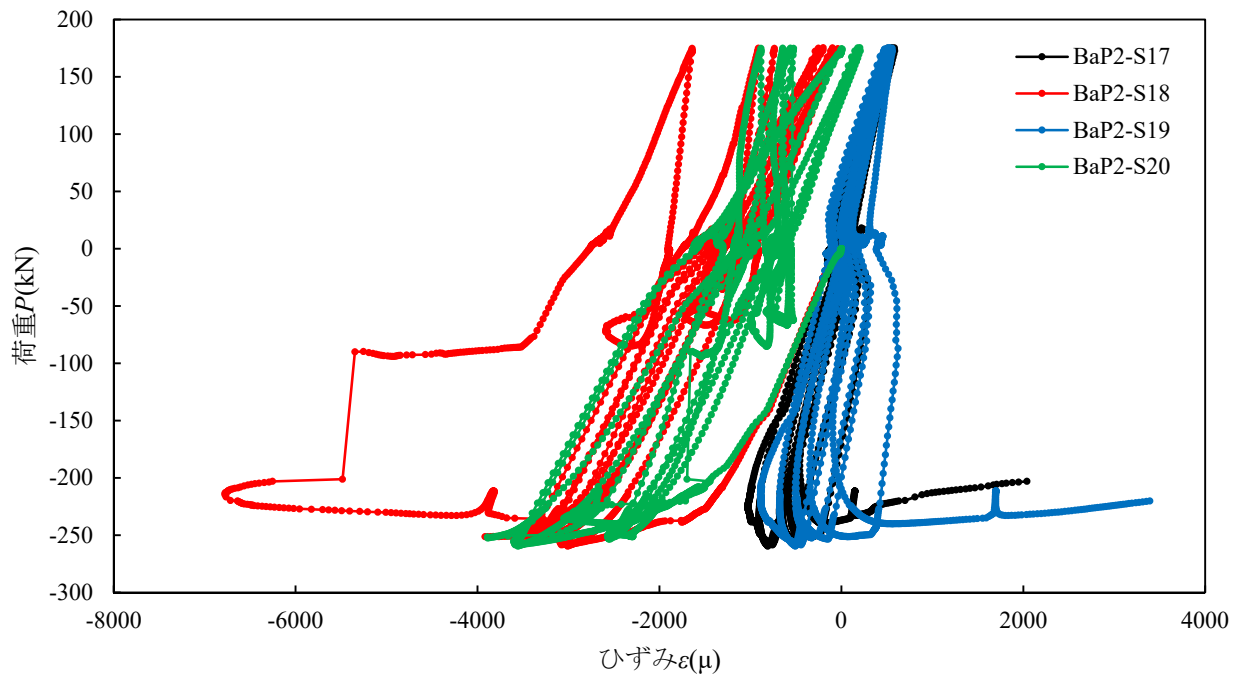


(a)計測データ (S13~S16)

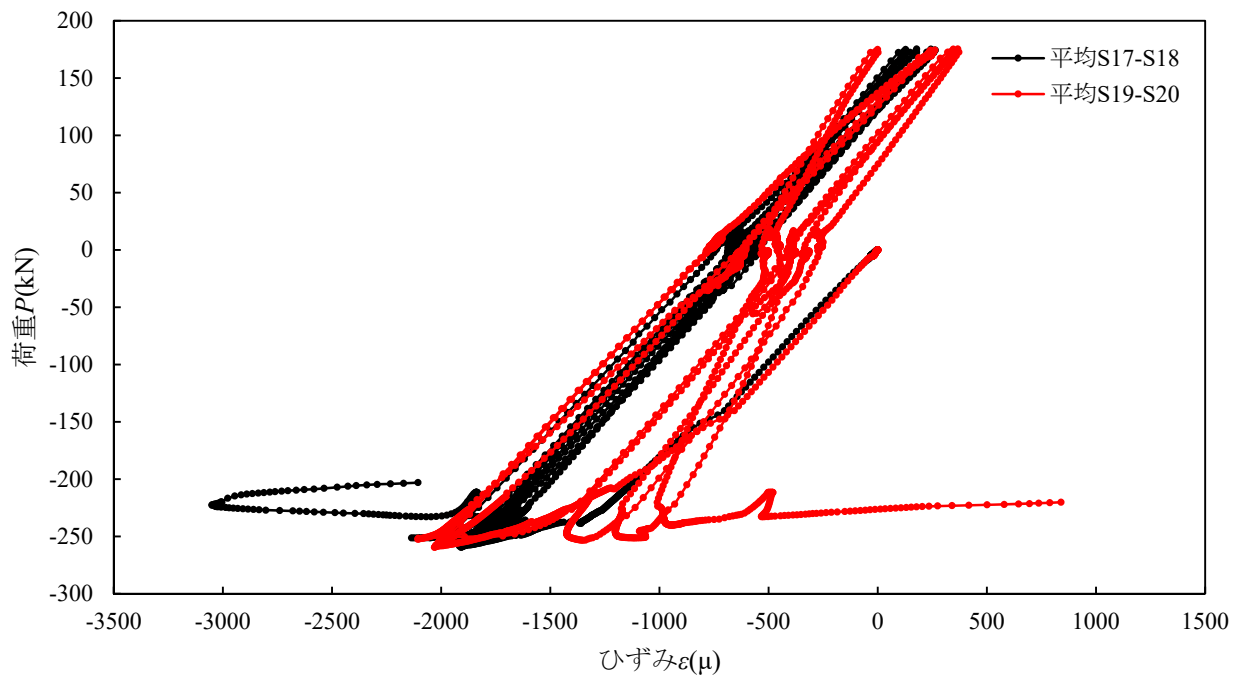


(b)平均データ (S13-S14, S15-S16)

図-6.23 交番載荷試験における鉛直荷重-ひずみ関係 (試験体 B-a-P2) (CFRP 部ひずみ S13~S16)

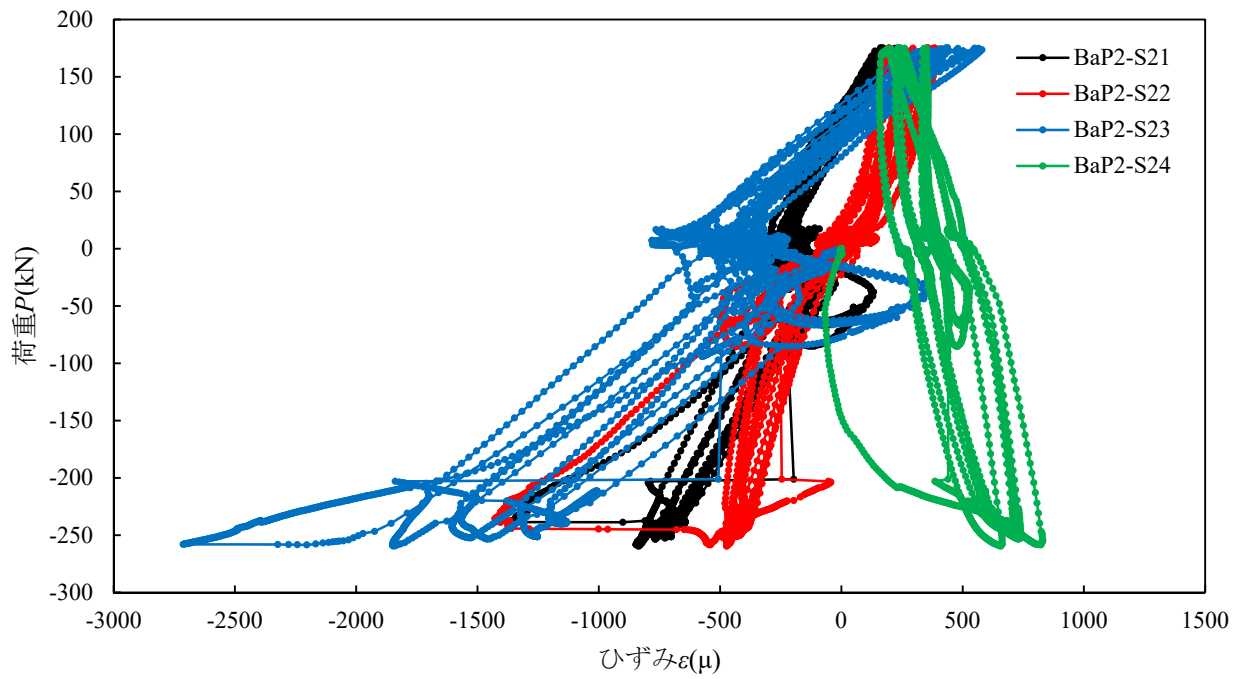


(a)計測データ (S17~S20)

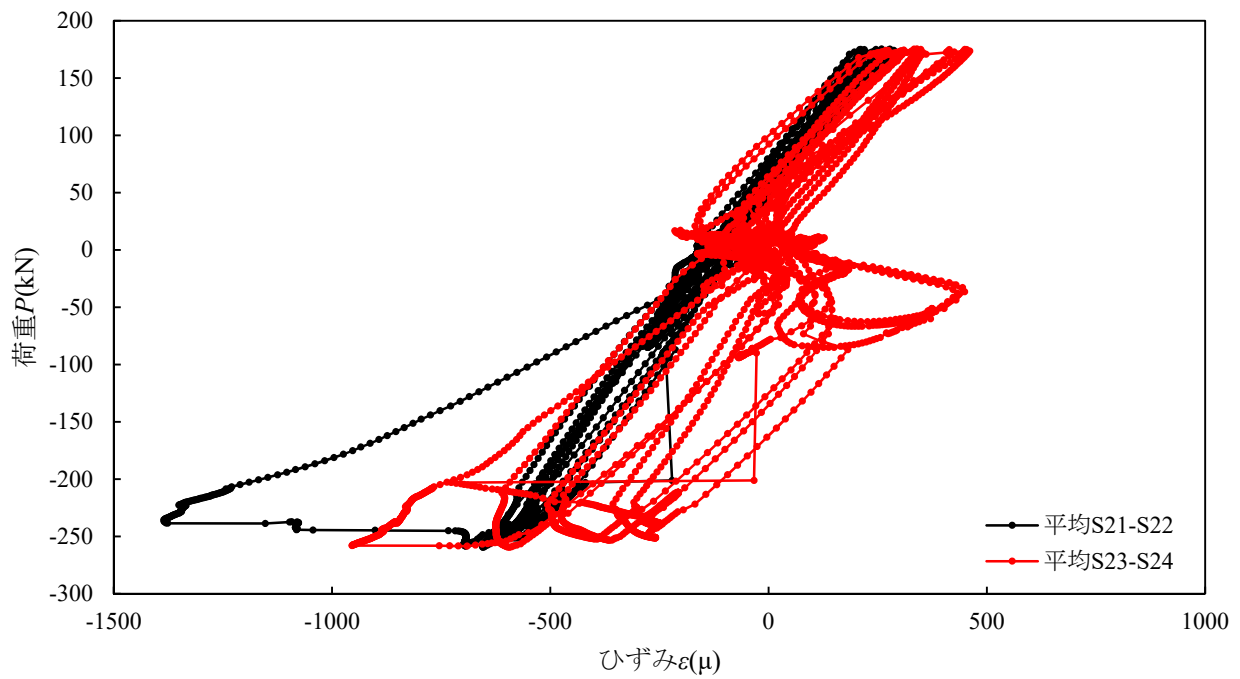


(b)平均データ (S17-S18, S19-S20)

図-6.24 交番載荷試験における鉛直荷重-ひずみ関係 (試験体 B-a-P2) (CFRP 部ひずみ S17~S20)



(a)計測データ (S21~S24)



(b)平均データ (S21-S22, S23-S24)

図-6.25 交番載荷試験における鉛直荷重-ひずみ関係 (試験体 B-a-P2) (CFRP 部ひずみ S21~S24)

6.3.4 交番载荷試験における鋼材の塑性化が断面の剛性に与える影響

交番载荷試験の結果より、座屈変形による鋼材の塑性化が試験体断面の剛性に与える影響を確認することにした。荷重とひずみの関係は、第5章において鋼材とCFRPの合成断面に対するヤング係数の推定をした手法より、式(5.7)~(5.11)で表すことができる。式(5.7)における $E_{s+cf} \cdot A_{s+cf}$ の値が荷重とひずみの関係での傾きの値となる。実験値から傾きを算出する際に用いたひずみ値は、試験体において同一断面のフランジ面に貼り付けた2つのひずみゲージ（例えば、S5とS6、S7とS8など）の値の平均値とした。鉛直荷重とひずみの平均値の関係は、図-6.20~図-6.25の(b)平均データに示す通りである。この方法により算出した各計測位置での傾きを表-6.17~表-6.23および図-26~図-29に示す。CFRP補強をした試験体における傾きの設計値は、表-6.1および表-6.2に示す材料諸元と式(5.8)~(5.11)により合成断面のヤング係数 E_{s+cf} と断面積 A_{s+cf} を算出した値である。補強なしの試験体A-a-Nにおける傾きの設計値は、鋼材のヤング係数 E_s と断面積 A_s により算出した値である。表-6.17、図-26で示す補強なしの試験体A-a-Nにおける試験体中央部（S5-S6、S7-S8）の傾きの値をみると、1サイクル目の圧縮の荷重時と除荷時および全サイクルの引張の除荷時の傾きは、設計値に対して96~108%であり、ほぼ同じ値であった。しかし、1サイクル目の引張の荷重時、2サイクル目の圧縮の荷重時の傾きは、設計値に対して18~66%であり、緩やかな傾きに変化していることが確認できた。表-6.18、表-6.19、図-27で示すCFRPを2層補強した試験体B-a-P2における試験体中央部（S5-S6、S7-S8）の傾きをみると、S5-S6の値において傾きの変化があまりなかったが、S7-S8の値において設計値と比較すると、1サイクル目の圧縮の荷重時および除荷時と全サイクルの引張の除荷時の傾きは92~98%であり、設計値とほぼ同じ値であった。しかし、1サイクル目以降の引張の荷重時は、31~60%となり繰り返し荷重が進むにつれてより緩やかな傾きに変化していることが確認できた。また、2サイクル目以降の圧縮の荷重時は、61~89%となり繰り返し荷重が進むにつれてより緩やかな傾きに変化していることが確認できた。表-6.20、表-6.21、図-28で示すCFRPを4層補強した試験体C-a-P1における試験体中央部（S5-S6、S7-S8）の傾きをみると、S7-S8の値において傾きの変化があまりなかったが、S5-S6の値において設計値と比較すると、1~3サイクル目の圧縮の荷重時および除荷時と全サイクルの引張の除荷時の傾きは、1サイクル目の引張の除荷時125%と2サイクル目の引張の除荷時137%を除いて93~110%であり、設計値とほぼ同じ値であった。しかし、3サイクル目以降の引張の荷重時は、34~68%となり繰り返し荷重が進むにつれてより緩やかな傾きに変化していることが確認できた。また、4サイクル目以降の圧縮の荷重時は、63~81%となり繰り返し荷重が進むにつれてより緩やかな傾きに変化していることが確認できた。表-6.22、表-6.23、図-29で示すCFRPを4層補強した試験体C-a-P2における試験体中央部（S5-S6、S7-S8）の傾きをみると、S7-S8の値において傾きの変化があまりなかったが、S5-S6の値において設計値の傾きと比較すると、1~4サイクル目の圧縮の荷重時および除荷時と全サイクルの引張の除荷時の傾きは87~111%であり、設計値とほぼ同じ値であった。しかし、3サイクル目以降の引張の荷重時は、42~80%となり繰り返し荷重が進むにつれてより緩やかな傾きに変化していることが確認できた。また、5サイクル目以降の圧縮の荷重時は、87~92%となり繰り返し荷重が進むにつれてより緩やかな傾きに変化していることが確認できた。また、CFRPの補強層数の違いにより、傾きの変化が始まるサイクルが異なる傾向であることも確認できた。CFRPを2層補強した試験体Bでは、2サイクル目以降の圧縮の荷重時および1サイクル目以降の引張の荷重時から徐々に傾きが緩やかになったが、CFRPを4層補強した試験体Cでは、4サイクル目以降の圧縮の荷重時および3サイクル目以降の引張の荷重時から徐々に傾きが緩やかになった。このことより、CFRP補強の層数が多い方が、傾きが緩やかになる現象を抑制する効果があると推定できる。この傾向は、鋼材にCFRP補強をすることが、繰り返し荷重で座屈変形が進展することによ

る鋼材の断面剛性を低下させることに対して抑制する補強効果があることを示した結果である。

以上の結果より、交番载荷の繰り返し载荷が進むにつれて、試験体中央付近における圧縮荷重の载荷時と引張荷重の载荷時の傾き $E_{s+cf} \cdot A_{s+cf}$ が徐々に緩やかな値に変化することが確認できた。この現象は、繰り返し载荷で座屈変形が進展することにより鋼材の断面剛性が低下することが原因であると推定できる。この鋼材における断面剛性の低下は、CFRP で補強することにより抑制することができることを確認できた。

表-6.17 交番载荷試験における荷重とひずみの関係から算出した傾き（試験体 A-a-N）（鋼材部）

		荷重とひずみ関係から算出した傾き（ $\times 10^6 \text{kN}$ ）					
計測位置（2点平均）		S1-S2	S3-S4	S5-S6	S7-S8	S9-S10	S11-S12
圧縮 1	(+)方向	0.145 (0.871)	0.189 (1.105)	0.166 (0.971)	0.172 (1.006)	0.168 (0.982)	0.161 (0.942)
	(-)方向	0.170 (0.994)	0.178 (1.041)	0.165 (0.965)	0.169 (0.988)	0.179 (1.047)	0.172 (1.006)
引張 1	(+)方向	0.191 (1.117)	0.155 (0.906)	0.031 (0.181)	0.076 (0.444)	0.155 (0.906)	0.176 (1.029)
	(-)方向	0.174 (1.018)	0.163 (0.953)	0.184 (1.076)	0.171 (1.000)	0.168 (0.982)	0.168 (0.982)
圧縮 2	(+)方向	0.175 (1.023)	0.174 (1.018)	0.112 (0.655)	0.109 (0.637)	0.174 (1.018)	0.172 (1.006)
	(-)方向	0.167 (0.977)	0.188 (1.099)	0.062 (0.363)	0.865 (5.058)	0.178 (1.041)	0.170 (0.994)
引張 2	(+)方向	0.185 (1.082)	0.174 (1.018)	0.064 (0.374)	1.578 (9.228)	0.165 (0.965)	0.183 (1.070)
	(-)方向	0.173 (1.012)	0.165 (0.965)	0.306 (1.789)	9.022 (52.760)	0.168 (0.982)	0.170 (0.994)

※1：()内の数値は、設計値から求めた傾き ($E_s \cdot A_s = 2.0 \times 10^5 \times 855 = 0.171 \times 10^6 \text{kN}$) との比を示す。

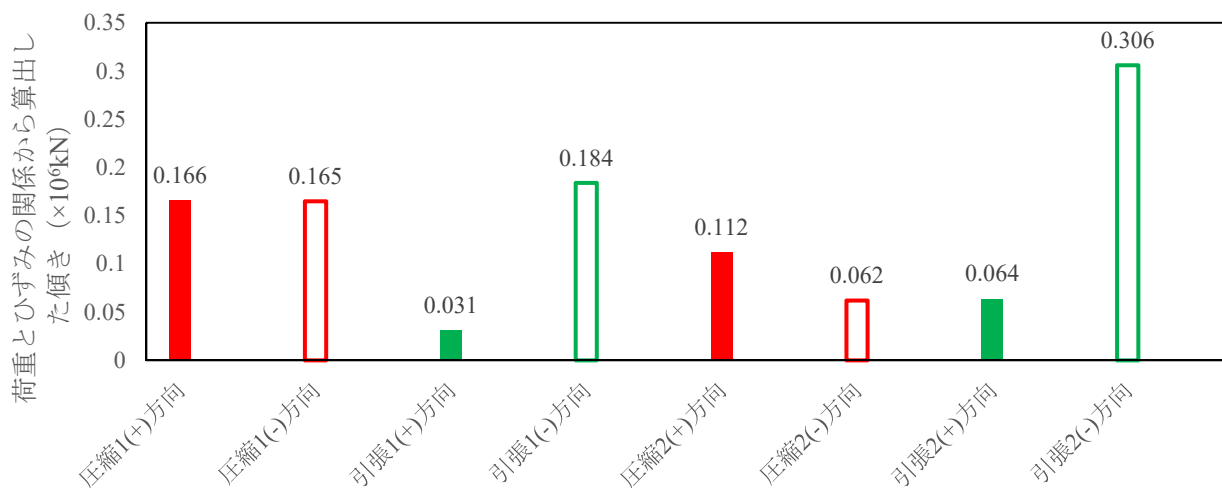


図-6.26 交番载荷試験における荷重とひずみの関係から算出した傾き（試験体 A-a-N）（鋼材部 S5-S6）

表-6.18 交番載荷試験における荷重とひずみの関係から算出した傾き
(試験体 B-a-P2) (鋼材部) (その 1)

計測位置 (2点平均)		荷重とひずみ関係から算出した傾き (×10 ⁶ kN)					
		S1-S2	S3-S4	S5-S6	S7-S8	S9-S10	S11-S12
圧縮 1	(+)方向	0.175 (0.912)	0.177 (0.926)	0.177 (0.926)	0.176 (0.922)	0.169 (0.885)	0.191 (0.997)
	(-)方向	0.178 (0.931)	0.177 (0.926)	0.207 (1.083)	0.188 (0.980)	0.176 (0.919)	0.179 (0.937)
引張 1	(+)方向	0.246 (1.287)	0.110 (0.574)	0.246 (1.287)	0.110 (0.574)	0.161 (0.841)	0.155 (0.812)
	(-)方向	0.212 (1.107)	0.187 (0.978)	0.212 (1.107)	0.187 (0.978)	0.180 (0.939)	0.169 (0.884)
圧縮 2	(+)方向	0.163 (0.854)	0.179 (0.935)	0.204 (1.065)	0.170 (0.889)	0.176 (0.919)	0.175 (0.914)
	(-)方向	-0.175 (0.913)	0.179 (0.934)	-0.208 (1.088)	-0.186 (0.971)	0.180 (0.939)	0.175 (0.914)
引張 2	(+)方向	0.146 (0.762)	0.158 (0.827)	0.237 (1.236)	0.115 (0.602)	0.164 (0.858)	0.151 (0.791)
	(-)方向	0.178 (0.929)	0.171 (0.895)	0.211 (1.102)	0.188 (0.981)	0.179 (0.935)	0.168 (0.879)
圧縮 3	(+)方向	0.166 (0.866)	0.162 (0.846)	0.236 (1.234)	0.138 (0.718)	0.178 (0.930)	0.159 (0.829)
	(-)方向	0.172 (0.901)	0.178 (0.932)	0.211 (1.100)	0.186 (0.971)	0.184 (0.962)	0.171 (0.892)
引張 3	(+)方向	0.134 (0.701)	0.160 (0.836)	0.253 (1.321)	0.104 (0.541)	0.168 (0.877)	0.136 (0.711)
	(-)方向	0.172 (0.897)	0.177 (0.926)	0.209 (1.090)	0.186 (0.969)	0.180 (0.940)	0.166 (0.867)
圧縮 4	(+)方向	0.162 (0.844)	0.176 (0.919)	0.219 (1.146)	0.145 (0.758)	0.185 (0.965)	0.162 (0.847)
	(-)方向	0.169 (0.884)	0.184 (0.963)	0.208 (1.087)	0.177 (0.923)	0.183 (0.954)	0.174 (0.908)
引張 4	(+)方向	0.140 (0.733)	0.161 (0.839)	0.269 (1.407)	0.080 (0.415)	0.173 (0.905)	0.184 (0.961)
	(-)方向	0.176 (0.922)	0.171 (0.895)	0.214 (1.115)	0.179 (0.935)	0.135 (0.704)	0.164 (0.855)

※1 : ()内の数値は, 設計値から求めた傾き ($E_{s+cf} \cdot A_{s+cf}=2.116 \times 10^5 \times 904.5=0.191 \times 10^6 \text{kN}$) との比を示す.

表-6.19 交番载荷試験における荷重とひずみの関係から算出した傾き
(試験体 B-a-P2) (鋼材部) (その 2)

		荷重とひずみ関係から算出した傾き (×10 ⁶ kN)					
計測位置 (2点平均)		S1-S2	S3-S4	S5-S6	S7-S8	S9-S10	S11-S12
圧縮 5	(+)方向	0.168 (0.875)	0.166 (0.869)	0.227 (1.188)	0.121 (0.631)	0.177 (0.923)	0.154 (0.807)
	(-)方向	0.174 (0.909)	0.179 (0.937)	0.214 (1.117)	0.163 (0.850)	0.178 (0.928)	0.178 (0.928)
引張 5	(+)方向	0.139 (0.724)	0.163 (0.854)	0.328 (1.712)	0.059 (0.310)	0.171 (0.893)	0.134 (0.700)
	(-)方向	0.171 (0.896)	0.173 (0.903)	0.209 (1.090)	0.178 (0.931)	0.180 (0.942)	0.167 (0.870)
圧縮 6	(+)方向	0.157 (0.819)	0.180 (0.938)	0.238 (1.241)	0.117 (0.610)	0.172 (0.898)	0.159 (0.832)
	(-)方向	0.174 (0.911)	0.182 (0.948)	-1.246 (-6.511)	2.138 (11.172)	0.183 (0.956)	0.185 (0.968)
引張 6	(+)方向	0.151 (0.788)	0.188 (0.983)	0.061 (0.320)	6.347 (33.164)	0.179 (0.937)	0.161 (0.840)
	(-)方向	0.171 (0.896)	0.176 (0.918)	-6.263 (-32.720)	-11.582 (-60.514)	0.179 (0.934)	0.172 (0.896)

※1 : ()内の数値は、設計値から求めた傾き ($E_{s+cf} \cdot A_{s+cf} = 2.116 \times 10^5 \times 904.5 = 0.191 \times 10^6 \text{kN}$) との比を示す。

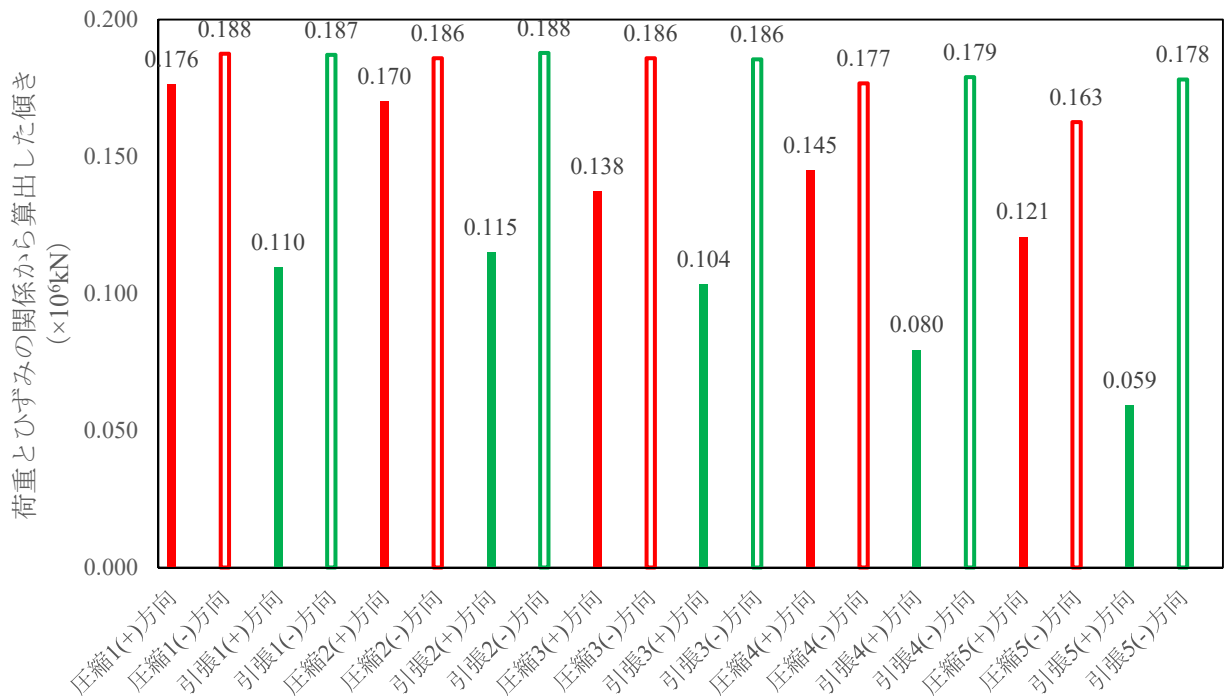


図-6.27 交番载荷試験における荷重とひずみの関係から算出した傾き (試験体 B-a-P2) (鋼材部 S7-S8)

表-6.20 交番載荷試験における荷重とひずみの関係から算出した傾き
(試験体 C-a-P1) (鋼材部) (その 1)

計測位置 (2点平均)		荷重とひずみ関係から算出した傾き (×10 ⁶ kN)					
		S1-S2	S3-S4	S5-S6	S7-S8	S9-S10	S11-S12
圧縮 1	(+)方向	0.203 (0.957)	0.255 (1.205)	0.208 (0.982)	0.211 (0.996)	0.203 (0.957)	0.201 (0.950)
	(-)方向	0.205 (0.969)	0.212 (1.001)	0.223 (1.054)	0.209 (0.988)	0.217 (1.024)	0.192 (0.907)
引張 1	(+)方向	0.229 (1.080)	0.203 (0.957)	0.264 (1.248)	0.202 (0.955)	0.219 (1.032)	0.162 (0.763)
	(-)方向	0.211 (0.997)	0.203 (0.960)	0.233 (1.098)	0.201 (0.949)	0.229 (1.082)	0.183 (0.866)
圧縮 2	(+)方向	0.194 (0.917)	0.225 (1.061)	0.212 (1.000)	0.221 (1.042)	0.203 (0.957)	0.194 (0.916)
	(-)方向	0.204 (0.963)	0.213 (1.008)	0.225 (1.062)	0.209 (0.988)	0.219 (1.033)	0.190 (0.895)
引張 2	(+)方向	0.240 (1.133)	0.197 (0.928)	0.287 (1.357)	0.193 (0.911)	0.234 (1.107)	0.149 (0.704)
	(-)方向	0.210 (0.990)	0.203 (0.958)	0.230 (1.086)	0.199 (0.940)	0.230 (1.085)	0.180 (0.851)
圧縮 3	(+)方向	0.194 (0.917)	0.224 (1.055)	0.211 (0.996)	0.222 (1.046)	0.199 (0.937)	0.192 (0.907)
	(-)方向	0.204 (0.963)	0.212 (1.001)	0.204 (0.961)	0.218 (1.029)	0.219 (1.032)	0.188 (0.887)
引張 3	(+)方向	0.226 (1.068)	0.201 (0.948)	0.144 (0.680)	0.197 (0.932)	0.233 (1.102)	0.146 (0.688)
	(-)方向	0.206 (0.973)	0.248 (1.171)	0.216 (1.021)	0.198 (0.936)	0.226 (1.066)	0.181 (0.853)
圧縮 4	(+)方向	0.193 (0.909)	0.222 (1.046)	0.172 (0.811)	0.224 (1.058)	0.193 (0.911)	0.195 (0.921)
	(-)方向	0.200 (0.942)	0.212 (1.002)	0.191 (0.902)	0.208 (0.983)	0.214 (1.011)	0.191 (0.900)
引張 4	(+)方向	0.220 (1.037)	0.205 (0.969)	0.078 (0.366)	0.194 (0.916)	0.225 (1.063)	0.151 (0.713)
	(-)方向	0.201 (0.947)	0.206 (0.971)	0.204 (0.965)	0.194 (0.916)	0.222 (1.047)	0.181 (0.855)

※1 : ()内の数値は, 設計値から求めた傾き ($E_{s+cf} \cdot A_{s+cf} = 2.220 \times 10^5 \times 954 = 0.212 \times 10^6 \text{kN}$) との比を示す.

表-6.21 交番载荷試験における荷重とひずみの関係から算出した傾き
(試験体 C-a-P1) (鋼材部) (その 2)

		荷重とひずみ関係から算出した傾き (×10 ⁶ kN)					
計測位置 (2点平均)		S1-S2	S3-S4	S5-S6	S7-S8	S9-S10	S11-S12
圧縮 5	(+)方向	0.189 (0.894)	0.221 (1.041)	0.139 (0.658)	0.217 (1.023)	0.195 (0.919)	0.190 (0.895)
	(-)方向	0.198 (0.937)	0.213 (1.005)	0.172 (0.811)	0.208 (0.982)	0.215 (1.015)	0.190 (0.896)
引張 5	(+)方向	0.215 (1.014)	0.209 (0.987)	0.073 (0.343)	0.185 (0.873)	0.223 (1.053)	0.151 (0.711)
	(-)方向	0.198 (0.934)	0.207 (0.979)	0.196 (0.927)	0.194 (0.916)	0.220 (1.039)	0.182 (0.857)
圧縮 6	(+)方向	0.192 (0.907)	0.218 (1.030)	0.133 (0.628)	0.212 (1.000)	0.201 (0.950)	0.185 (0.874)
	(-)方向	0.195 (0.921)	0.236 (1.116)	0.152 (0.719)	0.184 (0.867)	0.210 (0.993)	0.185 (0.872)
引張 6	(+)方向	0.233 (1.099)	0.212 (1.000)	0.186 (0.880)	0.219 (1.034)	0.231 (1.089)	0.140 (0.660)
	(-)方向	0.195 (0.920)	0.206 (0.974)	0.734 (3.465)	0.387 (1.827)	0.215 (1.015)	0.180 (0.850)

※1: ()内の数値は、設計値から求めた傾き ($E_{s+cf} \cdot A_{s+cf} = 2.220 \times 10^5 \times 954 = 0.212 \times 10^6 \text{kN}$) との比を示す。

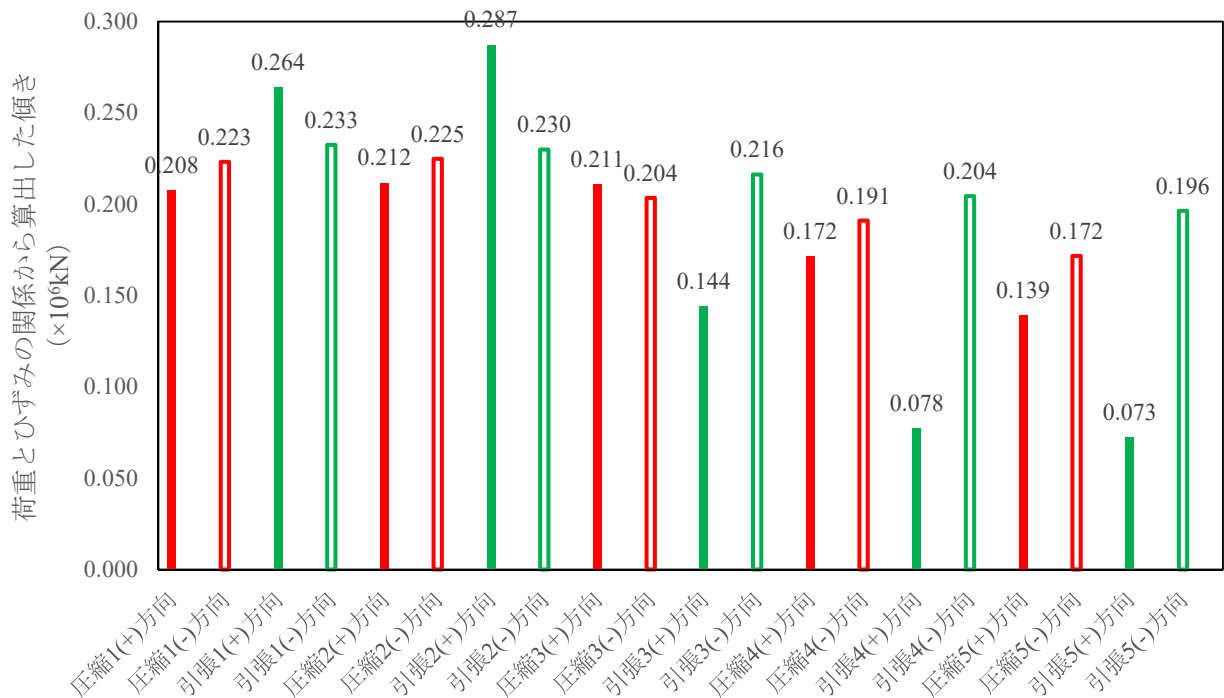


図-6.28 交番载荷試験における荷重とひずみの関係から算出した傾き (試験体 C-a-P1) (鋼材部 S5-S6)

表-6.22 交番載荷試験における荷重とひずみの関係から算出した傾き
(試験体 C-a-P2) (鋼材部) (その 1)

計測位置 (2点平均)		荷重とひずみ関係から算出した傾き (×10 ⁶ kN)					
		S1-S2	S3-S4	S5-S6	S7-S8	S9-S10	S11-S12
圧縮 1	(+)方向	0.223 (1.053)	0.191 (0.903)	0.235 (1.108)	0.199 (0.940)	0.224 (1.055)	0.188 (0.889)
	(-)方向	0.208 (0.983)	0.200 (0.943)	0.216 (1.021)	0.223 (1.054)	0.211 (0.997)	0.198 (0.934)
引張 1	(+)方向	0.221 (1.042)	0.221 (1.045)	0.187 (0.882)	0.267 (1.258)	0.197 (0.930)	0.214 (1.010)
	(-)方向	0.220 (1.040)	0.200 (0.944)	0.221 (1.042)	0.215 (1.016)	0.206 (0.973)	0.196 (0.925)
圧縮 2	(+)方向	0.202 (0.954)	0.207 (0.976)	0.217 (1.024)	0.219 (1.034)	0.211 (0.998)	0.194 (0.916)
	(-)方向	0.204 (0.965)	0.205 (0.966)	0.221 (1.041)	0.221 (1.043)	0.212 (1.001)	0.199 (0.940)
引張 2	(+)方向	0.212 (1.001)	0.226 (1.065)	0.184 (0.868)	0.268 (1.264)	0.196 (0.926)	0.216 (1.019)
	(-)方向	0.203 (0.956)	0.201 (0.950)	0.223 (1.053)	0.217 (1.025)	0.210 (0.993)	0.196 (0.927)
圧縮 3	(+)方向	0.200 (0.945)	0.208 (0.984)	0.212 (1.001)	0.223 (1.053)	0.204 (0.965)	0.199 (0.939)
	(-)方向	0.204 (0.961)	0.204 (0.963)	0.214 (1.009)	0.225 (1.064)	0.206 (0.971)	0.203 (0.957)
引張 3	(+)方向	0.217 (1.023)	0.230 (1.087)	0.169 (0.799)	0.293 (1.381)	0.194 (0.917)	0.218 (1.030)
	(-)方向	0.204 (0.961)	0.197 (0.932)	0.222 (1.050)	0.214 (1.011)	0.209 (0.987)	0.194 (0.915)
圧縮 4	(+)方向	0.201 (0.948)	0.206 (0.972)	0.210 (0.990)	0.223 (1.052)	0.203 (0.960)	0.197 (0.928)
	(-)方向	-0.204 (0.962)	-0.205 (0.969)	-0.196 (0.923)	-0.230 (1.087)	-0.201 (0.947)	-0.205 (0.967)
引張 4	(+)方向	0.232 (1.094)	0.227 (1.070)	0.118 (0.556)	0.301 (1.419)	0.194 (0.916)	0.212 (1.003)
	(-)方向	0.207 (0.976)	0.195 (0.921)	0.219 (1.036)	0.212 (1.001)	0.215 (1.015)	0.190 (0.896)

※1 : ()内の数値は, 設計値から求めた傾き ($E_{s+cf} \cdot A_{s+cf} = 2.220 \times 10^5 \times 954 = 0.212 \times 10^6 \text{kN}$) との比を示す.

表-6.23 交番载荷試験における荷重とひずみの関係から算出した傾き
(試験体 C-a-P2) (鋼材部) (その 2)

		荷重とひずみ関係から算出した傾き (×10 ⁶ kN)					
計測位置 (2点平均)		S1-S2	S3-S4	S5-S6	S7-S8	S9-S10	S11-S12
圧縮 5	(+)方向	0.202 (0.953)	0.206 (0.971)	0.194 (0.914)	0.224 (1.059)	0.203 (0.956)	0.196 (0.927)
	(-)方向	0.203 (0.958)	0.206 (0.971)	0.180 (0.850)	0.232 (1.097)	0.195 (0.920)	0.205 (0.967)
引張 5	(+)方向	0.229 (1.083)	0.229 (1.082)	0.093 (0.437)	0.332 (1.565)	0.180 (0.850)	0.213 (1.006)
	(-)方向	0.209 (0.989)	0.192 (0.907)	0.220 (1.040)	0.207 (0.978)	0.220 (1.036)	0.185 (0.872)
圧縮 6	(+)方向	0.201 (0.948)	0.207 (0.975)	0.184 (0.869)	0.227 (1.071)	0.201 (0.951)	0.197 (0.931)
	(-)方向	0.215 (1.013)	0.224 (1.059)	0.215 (1.013)	0.191 (0.903)	0.153 (0.720)	0.205 (0.970)
引張 6	(+)方向	0.249 (1.176)	0.250 (1.179)	0.088 (0.416)	0.042 (0.196)	0.137 (0.647)	0.273 (1.287)
	(-)方向	0.210 (0.993)	0.193 (0.910)	0.195 (0.923)	0.159 (0.751)	0.216 (1.018)	0.185 (0.875)

※1 : ()内の数値は、設計値から求めた傾き ($E_{s+cf} \cdot A_{s+cf} = 2.220 \times 10^5 \times 954 = 0.212 \times 10^6 \text{kN}$) との比を示す。

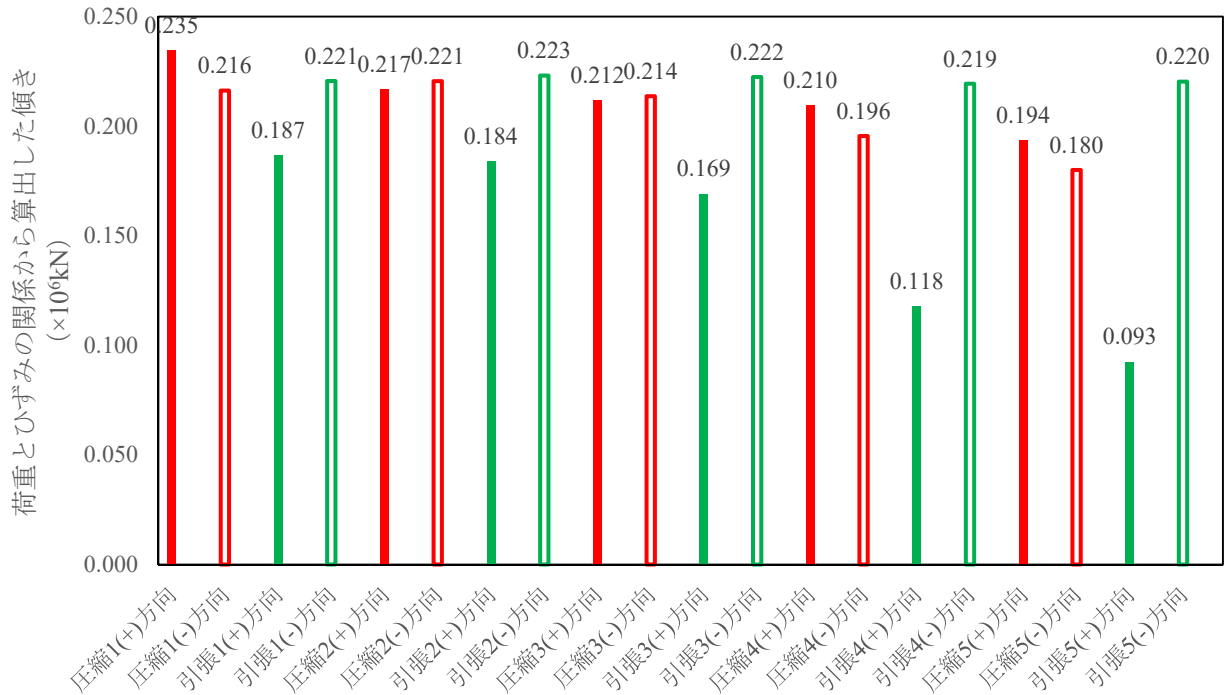


図-6.29 交番载荷試験における荷重とひずみの関係から算出した傾き (試験体 C-a-P2) (鋼材部 S5-S6)

6.4 まとめ

本章の実験および結果の検討により得られた知見は以下の通りである。

- 1) 引張載荷試験において、鋼材に発生するひずみが降伏ひずみに達した時の荷重値は補強なしのケースと比較して6~19%増加していたことが確認できた。これは、CFRP補強により鋼材に発生するひずみを小さく抑えられており、鋼材のひずみに対してCFRPの補強効果があることを確認できた。
- 2) 引張載荷試験において、高伸度弾性パテ材によりCFRPの剥離が抑制できる効果を確認できた。特に高伸度弾性パテ材をCFRP補強範囲の全体に施工することにより、1割程度高い荷重までCFRPの剥離を抑制できることが確認できた。しかし、高伸度弾性パテ材の施工範囲がCFRPの剥離に対してどの程度影響があるのか検討の余地がある。
- 3) 圧縮載荷試験において、CFRPで補強することにより補強なしと比較して、座屈荷重が最大で11%増加することが確認できた。このことより、CFRP補強により座屈荷重に対する補強効果があったことを確認できた。この傾向は、交番載荷試験における圧縮載荷状態においても確認することができた。
- 4) 圧縮載荷試験において、急激な面外変形が発生する前後の荷重と変位より、CFRP補強をすることで大きな鉛直変位が発生しても急激な座屈変形を抑えることができていたことが確認できた。この結果により、全体座屈後の変形に対しても補強効果があったことを確認できた。この傾向は、交番載荷試験における圧縮載荷状態においても確認することができた。
- 5) 圧縮載荷試験において、CFRPが破壊する直前の水平変位についても補強なしの場合と比較して小さく1~3mm程度減少していた。このことより、CFRP補強することで面外方向の変形を抑制できていたことを確認できた。この結果からも、全体座屈後の変形に対しても補強効果があったことを確認できた。この傾向は、交番載荷試験における圧縮載荷状態においても確認することができた。
- 6) 圧縮載荷試験において、全体座屈が発生するまでの挙動に対しては、高伸度弾性パテ材を使用しない方が座屈荷重の増加に有効であることが確認できた。しかし、全体座屈後の面外変形の挙動に対しては、高伸度弾性パテ材を使用したほうが大きな変形に対して有効であることが確認できた。
- 7) 交番載荷試験における荷重とひずみの履歴ループは、座屈変形が進展するにつれてひずみ値の履歴の中心が少しずつ一方向にずれていくことを確認できた。これは、ひずみの増加により、鋼材において部分的に塑性化が発生し、残留ひずみとして蓄積されているためである。
- 8) 交番載荷の繰り返し載荷が進むにつれて、試験体中央付近での圧縮荷重の載荷時と引張荷重の載荷時の荷重とひずみの関係における傾きが徐々に緩やかな値に変化することが確認できた。この現象は、繰り返し載荷で座屈変形が進展することにより鋼材の断面剛性が低下することが原因であると推定できる。この鋼材における断面剛性の低下は、CFRPで補強することにより抑制することができた。

第7章 結論と今後の課題

7.1 本研究の結論

本論文は、鋼トラス橋の2次部材に対して、CFRPを用いた断面補強を実施し、その補強効果と耐震補強への適用性を確認することを目的として、種々の解析および実験により検討をおこなった研究である。

以下に各章において得られた結論を示す。

第1章では、数十年前に建設された鋼トラス橋に現行の耐震設計基準で定められた地震荷重が作用すると、トラスを構成する各部材の応答値が許容値を大きく上回る可能性があることを示すとともに、これらの鋼トラス橋は、上部構造に対する耐震補強の実施が進んでいない現状を踏まえて、有効かつ効率的な耐震補強の方法を検討する必要があることを本研究の目的として示した。

鋼部材に対する具体的な補強方法として、CFRPによる補強を研究の対象とした。鋼部材の耐震補強に適用する上で、圧縮力が作用する場合の座屈現象に対する補強効果を明らかにする必要があることと、圧縮力と引張力が交番して作用するような状態に対する補強効果を明らかにする必要があることを本研究の目的として示した。

第2章では、まず、トラス橋やアーチ橋のような骨組み構造の橋梁に対する耐震補強を検討した既往の研究を調査した。その調査により、従来の研究では、座屈変形を積極的に部材に発生させることを考慮した耐震補強方法に関する研究事例がほとんどないこと、座屈変形後の挙動に対する検討事例がほとんどないことを確認し、それらが本研究において検討すべき課題であると位置付けた。

本研究の補強材料として着目したCFRPについて、その特性および長所・短所を調査した。また、CFRPを鋼材の補修・補強に使用した研究事例を調査した。その調査により、腐食の補強に対してCFRP補強を適用するための検討が多くされており、実用化されていることを確認した。しかし、耐震補強として適用することを目的とした研究事例はほとんどなく、実用化された事例もないことを確認した。よって、CFRPによる鋼材への補強することについて、耐震補強への適用性に関する検討が、本研究において検討すべき課題であると位置付けた。

第3章では、対象とした橋梁である鋼3径間連続上路式トラス橋について、橋梁全体の動的解析とその解析結果による耐震補強効果の検討として、支承取替による免震化と水平反力分散化および各種制震デバイスの設置検討および既設鋼部材の当て板補強の検討を実施した。

対象とする橋梁に対して、支承取替による免震化と水平反力分散化による耐震補強で、橋軸方向加震時において下部構造に発生する応答値を低減する効果を確認できた。しかし、上部構造の応答について、橋軸方向加震時においては支承の移動量が大きくなること、橋軸直角方向加震時においては免震化していないため、部材の応答値を低減する効果がなかったことを確認できた。

橋軸方向加震時における支承の移動量を小さく抑制する方法として、制震ダンパーを端支点到に配置することが有効であり、上部構造と下部構造の衝突を回避した構造にすることが可能になることを確認できた。

橋軸直角方向加震時における端支点到の応答値を低減する方法として、せん断パネル型制震ストッパーを配置することが有効であり、これにより、端支点到における鉛直材と対傾構の応答値を低減する効果と支承に発生する上揚力を低減する効果を確認できた。

支承の免震化と水平反力分散化および各種制震デバイスの配置だけでは、横構や対傾構といった上部

構造の応答値を完全に許容値以下に低減することはできなかった。これらの部材について、鋼板当て板の補強をおこなうことによる発生応力度の低減と座屈耐荷力を向上させることで、部材の降伏変形や座屈変形が発生しない構造になったことを確認できた。

これらの検討結果から、上路式トラス橋や上路式アーチ橋など、本検討の対象橋梁に類似した構造形式橋梁における耐震補強設計にも同様の耐震補強効果が得られることが期待できることを示した。

しかし、本検討で採用した鋼板当て板工法による断面補強は、橋梁の条件によって、補強材の接合による死荷重の増加と断面剛性の増加に起因した応答値の増加が懸念される。そこで、鋼材以外の材料による鋼部材に対する断面補強方法として、CFRP による断面補強が耐震補強方法として適用できないかを第4章以降における研究の課題として示した。

第4章では、板要素としての鋼板を CFRP で補強した場合の補強効果を確認するために、矩形断面の鋼板を CFRP で補強した試験体を用いて、引張载荷試験、圧縮载荷試験、曲げ载荷試験を実施し、その実験結果から CFRP による補強効果を確認した。また、この実験結果から CFRP の見かけのヤング係数を推定し、圧縮载荷時と曲げ载荷時における CFRP の見かけのヤング係数の低下の影響を検討した。この実験は、第5章で検討したトラス橋を構成する鋼製の H 形部材に CFRP を用いて補強することで全体座屈に対する補強効果および座屈変形後の補強効果を明らかにするための基礎研究とした。

圧縮载荷試験における全体座屈による変形後の補強効果は、中弾性 CFRP シートにより補強した試験体が CFRP の剥離と破断が発生することなく、鋼材の座屈変形により塑性変形した後のひずみの増加および変形の増加に対して追従することを確認できた。

曲げ载荷時における補強効果について、鋼材の降伏が発生するまでの弾性域では、ヤング係数が大きい高弾性 CFRP シートおよび高弾性 CFRP プレートによる補強が、中弾性 CFRP シートによる補強よりも高い補強効果があることが確認できた。しかし、鋼材が降伏変形した後の塑性域では、中弾性 CFRP シートによる補強の方が高弾性 CFRP シートおよび高弾性 CFRP プレートによる補強よりも CFRP の破断や剥離が発生することなく、鋼材が降伏変形した後のひずみの増加および変形の増加に対して追従することを確認できた。

圧縮载荷時および曲げ载荷時において、CFRP の見かけのヤング係数を推定した結果により、圧縮载荷時および曲げ载荷時の CFRP のヤング係数は、引張载荷時のヤング係数と比較して、圧縮载荷時は 64～84%に、曲げ载荷時は 65～78%に低下することが確認できた。よって、圧縮载荷時の座屈荷重に対する CFRP の補強効果を評価する際には、圧縮载荷時における CFRP の見かけのヤング係数の低下の影響を適切に反映することが必要であることを示した。また、曲げ载荷時の曲げ変形に対する CFRP の補強効果を評価する際には、曲げ载荷時における CFRP の見かけのヤング係数の低下の影響を適切に反映することが必要であることを示した。

第5章では、鋼トラス橋を構成する部材として2次部材に多く使用されている鋼材を溶接で組み合わせた部材の一つである鋼製 H 形部材に対して、CFRP による補強をすることで圧縮軸力が作用した場合に発生する全体座屈の挙動と座屈後の補強効果を明らかにするために圧縮载荷試験を実施し、その実験結果から CFRP による補強効果を確認した。また、この実験結果から CFRP の見かけのヤング係数を推定し、圧縮载荷時における CFRP の見かけのヤング係数の低下の影響を検討した。

座屈荷重に対する CFRP による補強効果について、いずれの補強ケースにおいても座屈荷重の増加、および全体座屈後の荷重低下の低減を確認できた。CFRP の補強層数を増やすことで、座屈荷重の増加率が大きくなること、および全体座屈後の荷重値が大きくなることを確認できた。CFRP の種類による補強効果の違いについて、中弾性 CFRP シートと高弾性 CFRP シートの結果を比較すると座屈荷重およ

び全体座屈後の補強効果に差がないことを確認できた。この結果は、圧縮弾性率の顕著な低下が影響していることを示した。

全体座屈後の変形性能について、中弾性 CFRP シートにより補強した試験体が高弾性 CFRP シートおよび高弾性 CFRP プレートで補強した試験体よりも座屈変形後の大きな変形に対しても追従できることを確認できた。また、CFRP の破壊の影響について、特に高弾性 CFRP シートで補強した試験体において発生した CFRP の破断では、全体座屈後の荷重値が大きく低下することを確認できた。中弾性 CFRP シートで補強した試験体では、CFRP の破断は発生せずに CFRP の剥離のみが発生している状態であった。この結果より、鋼材の塑性変形後に対して、中弾性 CFRP シートによる補強が CFRP の破断が発生することなく大きな変形に対して追従できることを示した。しかし、CFRP の破断が発生すると CFRP による補強効果が失われるため、CFRP により鋼材を補強する場合は、CFRP に発生するひずみが破断ひずみに達するまでを適用範囲とする必要がある。

圧縮載荷時における見かけの CFRP のヤング係数を実験値から推定した結果について、中弾性 CFRP シートでは引張載荷時における CFRP のヤング係数と同程度の値が発現したことを確認できた。しかし、高弾性 CFRP シートおよび高弾性 CFRP プレートでは引張載荷時における CFRP のヤング係数より小さくなる傾向であったことを確認できた。この推定結果は、第 4 章で確認した CFRP のヤング係数の推定結果と同じ傾向であった。

CFRP で補強された部材の座屈耐荷力を評価する方法として、鋼と CFRP の合成断面におけるヤング係数と断面積および鋼材の降伏ひずみとの積で算出した降伏荷重を用いて無次元化した座屈耐荷力により評価することで、座屈耐荷力の下限相当である道示Ⅱの基準耐荷力式を適用可能であることを示した。この時の CFRP のヤング係数は、本研究の実験で得られた圧縮載荷時における CFRP の見かけのヤング係数の低下の影響を適切に反映する必要があることを示した。

第 6 章では、鋼製 H 形部材に対して、CFRP による補強をすることで圧縮力と引張力が交互に作用した場合の挙動とその補強効果を明らかにするために引張載荷試験、圧縮載荷試験、交番載荷試験を実施し、その実験結果から CFRP による補強効果を確認した。また、座屈変形が進展するにつれて鋼材と CFRP の合成断面における断面剛性がどのように変化するかを確認し、この変化が CFRP による補強効果にどのような影響を及ぼすのかを示した。第 6 章の実験では、第 4 章および第 5 章の実験結果を踏まえて、座屈変形後の補強効果に対して大きな変形にも追従することを示した中弾性 CFRP シートによる補強を採用した。

引張載荷時における補強効果について、CFRP 補強により鋼材に発生するひずみを小さく抑えられており、鋼材のひずみに対して CFRP の補強効果があることを確認できた。また、引張載荷時において、高伸度弾性パテ材を鋼材と CFRP 補強の間に施工することで 1 割程度高い荷重まで CFRP の剥離を抑制できることを確認できた。この結果は、高伸度弾性パテ材を施工することで鋼材が降伏ひずみに達した後も CFRP の補強効果が持続していることを示した。

圧縮載荷時における補強効果について、CFRP で補強することにより、座屈荷重が増加し、補強効果があったことを確認できた。また、全体座屈後の挙動に対しても、CFRP で補強することにより、荷重値と鉛直変位の増加および鉛直・水平変位の抑制に対して補強効果があったことを確認できた。また、圧縮載荷時における高伸度弾性パテ材の影響について、座屈荷重に対しては高伸度弾性パテ材を使用しない方が有利であることを確認できた。しかし、全体座屈後の面外変形に対しては高伸度弾性パテ材を使用したほうが大きな変形に対して追従する効果があることを確認できた。これらの結果より、圧縮載荷時における座屈変形後において CFRP による補強効果と高伸度弾性パテ材の変形に対する有効性を示

した。

交番載荷時における補強効果について、試験体中央付近での圧縮荷重の載荷時と引張荷重の載荷時において、ヤング係数と断面積の積で表すことができる荷重とひずみの関係における傾きが、繰り返し載荷が進むにつれて徐々に緩やかな値に変化することが確認できた。この現象は、繰り返し載荷で座屈変形が進展することにより鋼材の断面剛性が低下することが原因であることを示した。この鋼材における断面剛性の低下に対して、CFRPで補強することがその低下を抑制する効果があることを示した。

最後に、以上の結論を踏まえて、CFRPによる補強効果が鋼トラス橋の耐震補強に対して有効であることと耐震補強設計に対して適用性があること、および適用する際に配慮すべき事項を以下に示す。

- 1) 大きな地震力が作用することで全体座屈が発生する可能性がある鋼トラス橋の鋼部材をCFRPで補強することにより、鋼材に発生する応力（ひずみ）を低減することが可能である。これにより、座屈耐荷力が増加し、座屈の発生を抑制することに対して有効である。この特性は、第4章～第6章で実施した圧縮載荷試験において共通した傾向を確認できた。
- 2) CFRPで補強した鋼部材の座屈耐荷力は、道示IIの座屈耐荷力の式を適用することが可能である。この座屈耐荷力を算出する際には、圧縮載荷時におけるCFRPの見かけのヤング係数の低下の影響を適切に反映することが必要である。本研究の成果では、圧縮載荷時におけるCFRPの見かけのヤング係数の低下は、引張載荷時におけるCFRPのヤング係数に対してCFRPの補強状態により64～84%になることが明らかとなった。これらの特性は、第4章～第5章で実施した圧縮載荷試験において共通した傾向を確認できた。
- 3) 大きな地震力が作用することで鋼トラス橋の鋼部材の一部に降伏による変形や全体座屈による変形が発生しても、CFRPで補強することにより、座屈変形後の挙動に対して、荷重値の低下を抑制することと変位の増加を抑制することに対して有効である。これらの特性は、第4章～第6章で実施した圧縮載荷試験において共通した傾向を確認できた。
- 4) 全体座屈後の変形性能については、CFRPの破断の有無により補強効果が変化する。降伏変形が発生した後の変形や全体座屈の変形が発生した後の挙動に対して鋼材を補強する場合には、引張破断ひずみの値が設計値で 7500μ 以上の大きな変形に追従する性能を有するCFRPにより補強することが有効である。本研究の実験で用いたCFRP材料は、中弾性CFRPシートがそれに該当する。ただし、降伏変形が発生するまでや座屈変形が発生するまでの弾性域の挙動に対して鋼材を補強する場合には、ヤング係数の値が設計値で $5.0 \times 10^5 \text{N/mm}^2$ 以上のCFRPにより補強することが有効である。本研究の実験で用いたCFRP材料は、高弾性CFRPシートおよび高弾性CFRPプレートがそれに該当する。これらの特性は、第4章～第5章で実施した圧縮載荷試験において共通した傾向を確認できた。CFRPにより鋼材を補強する場合は、CFRPに発生するひずみが引張破断ひずみに達するまでを適用範囲とする必要がある。
- 5) 引張載荷時において、試験体端部のCFRPで補強していない鋼材断面のみの部分から降伏変形が始まる。この特性は、第4章および第6章で実施した引張載荷試験において共通した傾向を確認できた。CFRPの剥離はCFRP補強の端部に応力集中が生じないようにする対策が必要である。その対策の一つとして、高伸度弾性パテ材を施工することが有効である。これにより、鋼材が降伏ひずみに達した後もCFRPの補強効果を持続させることが可能であり、CFRPの剥離を抑制することに対して有効である。

- 6) 圧縮載荷時における高伸度弾性パテ材の影響について、座屈荷重に対しては、高伸度弾性パテ材を使用することで座屈耐荷力を低下させてしまうことが本研究で明らかになった。しかし、座屈変形後の挙動に対しては、高伸度弾性パテ材を使用することで大きな変形に対して追従する効果がある。よって、高伸度弾性パテ材を使用する場合には、座屈耐荷力の低下に対する影響と座屈変形後の変形性能向上に対する影響を配慮する必要がある。
- 7) 大きな地震力の圧縮力と引張力が交番して作用することで鋼トラス橋の鋼部材の一部に全体座屈による変形が発生し、その繰り返し載荷で座屈変形が進展することにより鋼材の断面剛性が低下することが明らかになった。CFRP で補強することが、鋼材の断面剛性の低下を抑制することに対して有効である。

7.2 今後の課題

本研究では、実験により、鋼トラス橋の鋼部材に CFRP 補強をすることによる耐震補強効果について検討をおこなった。実験装置とその規模により、対象とした試験体の形状は実際の構造物よりも小さいモデルで実験をおこなっている。本研究の検討結果を踏まえて、今後は、様々な形状の鋼部材に対する適用性を FEM 解析により確認する必要がある。また、CFRP による補強効果を汎用的に反映するための設計手法を確立することが必要である。

交番載荷試験では、試験体と試験装置を接続する部分の強度不足により、CFRP 補強をしている範囲より先に接合部の降伏による塑性変形が発生することを事前の引張載荷試験で確認したが、接合部の塑性変形が発生しないように改善した試験体での実験は実施していない。そのため、本研究では、引張載荷時における降伏変形の影響が圧縮載荷時の全体座屈にどのような影響を与えるかを確認できていない。今後は、試験体の接合部が塑性変形しないように形状を改良して、その影響を確認する必要がある。

交番載荷試験では、高伸度弾性パテ材の施工について、CFRP の補強範囲に対して、①施工なし、②部分施工、③全面施工の3パターンで実験をおこなったが、圧縮載荷試験および交番載荷試験では全体座屈が発生しない試験体が多数あったため、高伸度弾性パテ材の施工が全体座屈の挙動に対してどのような影響を与えるのか比較することができなかった。今後は、CFRP により補強した鋼部材における全体座屈の挙動に対して、高伸度弾性パテ材の施工の有無とその施工範囲が与える影響を確認する必要がある。

引張載荷時においては、端部の未補強部分から降伏変形が発生する。端部に未補強区間ができてしまう主な原因は、部材の端部にはボルトなどの継手構造があるためである。CFRP で補強するためには平らな面で連続した定着長を確保する必要があるため、継手部のボルトや添接板があると連続した施工が困難となる。その改善方法としては、凹凸がある面においても連続した定着が有効となる施工方法を検討する必要がある。

本研究では、CFRP 補強による補強効果の確認を部材単位でしか検証していない。今後は、鋼トラス橋の鋼部材に CFRP 補強をすることにより、橋梁全体の耐震性能にどのような影響を与えるのかを時刻歴応答解析を実施して確認する必要がある。そのためには CFRP で補強した鋼部材を適切にモデル化する手法を確立する必要がある。特に、CFRP で補強した鋼材の降伏による塑性化や座屈変形による塑性化を適切にモデル化する手法を確立する必要がある。この検討を踏まえて、座屈変形によるエネルギー吸収で橋梁全体の耐震補強効果に期待した設計手法の確立を目指すことが重要であると考えられる。

参考文献

【第1章】

- 1) 日本道路協会：道路橋耐震設計指針・同解説，1972年4月
- 2) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説，Ⅰ共通編，2017年11月
- 3) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説，Ⅱ鋼橋編，2017年11月
- 4) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説，Ⅴ耐震設計編，2017年11月
- 5) 高速道路総合技術研究所：炭素繊維シートによる鋼構造物の補修・補強工法 設計・施工マニュアル，2013年10月
- 6) 土木学会：FRP接着による構造物の補修・補強指針（案），2018年7月
- 7) 炭素繊維シートによる鋼製橋脚の耐震補強工法研究会：炭素繊維シートによる鋼製橋脚の補強工法ガイドライン（案），財団法人土木研究センター，2002年7月

【第2章】

- 8) 上平悟，中出収，井上幸一，明神久也：長大橋の耐震性向上方法，三菱重工技報，Vol.39，No.6，pp.312-315，2002年11月
- 9) 後藤芳顕，川西直樹：腐食と補修履歴を考慮した鋼構造物の耐震性能評価のための解析手法，土木学会論文集，No.738/I-64，pp.233-244，土木学会，2003年7月
- 10) 野中哲也，原田隆典，岩村真樹，王宏沢：観測地震波を用いたトラス橋の実挙動再現および大地震時挙動の予測，応力力学論文集，Vol.6，pp.665-674，土木学会，2003年8月
- 11) 金治英貞，鈴木直人，香川敬生，渡邊英一：長大トラス橋の対震性能向上化における設計地震力と損傷制御構造，土木学会論文集，No.787/I-71，pp.1-19，土木学会，2005年4月
- 12) 太田あかね，大塚久哲，野原秀彰，新井雅之：鋼上路式アーチ橋の耐震補強に対する検討，構造工学論文集，Vol.53A，pp.1-10，土木学会，2007年3月
- 13) 原利弘，緒方秀行，石塚純，山戸隆秀：既設道路橋鋼3径間連続トラス橋の免震化による耐震補強設計，土木学会第63回年次学術講演会，I-617，土木学会，2008年9月
- 14) 杉岡弘一，林訓裕，鈴木直人：長大鋼中路アーチ橋の耐震補強におけるせん断パネルダンパーの適用効果，土木学会論文集 A1（構造・地震工学），Vol.70，No.4，pp.I-654-I-663，土木学会，2014年3月
- 15) 野中哲也，宇佐美勉，吉野広一，坂本佳子，鳥越卓志：上路式鋼アーチ橋の大地震時弾塑性挙動および耐震性向上に関する研究，土木学会論文集，No.731/I-63，pp.31-49，土木学会，2003年4月
- 16) 本莊清司，横山和昭，前原直樹，田崎賢治，川神雅秀：鋼上路式アーチ橋の耐震補強設計に関する検討，構造工学論文集，Vol.55A，pp.515-524，土木学会，2009年3月
- 17) 平松徹：よくわかる炭素繊維コンポジット入門，日刊工業新聞社，2015年12月
- 18) 日鉄ケミカル&マテリアル(株)コンポジット事業部：FORCA トウシート工法 関連技術資料 抜粋版，2021年4月
- 19) 松村政秀：CFRP接着工法による土木構造物の補修・補強，成形加工，第28巻，第3号，pp.88-91，プラスチック成形加工学会，2016年2月
- 20) 杉浦江，小林朗，稲葉尚文，本間淳史，大垣賀津雄，長井正嗣：鋼部材腐食損傷部の炭素繊維シートによる補修技術に関する設計・施工法の提案，土木学会論文集 F，Vol.65，No.1，pp.106-118，土木

学会，2009年3月

- 21) 秀熊佑哉，小林朗，立石晶洋，長井正嗣，宮下剛：CFRP スtrandシートによる鋼板の補強効果に関する研究，鋼構造年次論文報告集，第17巻，pp.643-650，日本鋼構造協会，2009年11月
- 22) 宮下剛，長井正嗣：一軸引張りを受ける多層のCFRPが積層された鋼板の応力解析，土木学会論文集A，Vol.66，No.2，pp.378-392，土木学会，2010年6月
- 23) 奥山雄介，宮下剛，緒方辰男，藤野和雄，大垣賀津雄，秀熊佑哉，堀本歴，長井正嗣：鋼桁腹板の合理的な補修・補強方法の確立に向けたFRP接着鋼板の一軸圧縮試験，構造工学論文集，Vol.57A，pp.735-746，土木学会，2011年3月
- 24) 若林大，宮下剛，奥山雄介，秀熊佑哉，小林朗，小出宜央，堀本歴，長井正嗣：高伸度弾性パテ材を用いた炭素繊維シート接着による鋼桁補修設計法の提案，土木学会論文集F4（建設マネジメント），Vol.71，No.1，pp.44-63，土木学会，2015年4月
- 25) 秀熊佑哉，大垣賀津雄，菊池新平，小林朗，宮下剛，奥山雄介：炭素繊維シート接着により補強された鋼製柱の耐力評価法に関する実験研究，構造工学論文集，Vol.65A，pp.769-778，土木学会，2019年3月
- 26) Garrett Brunell and Yail J. Kim：Functionality of Damaged Steel Truss Systems Strengthened with Posttensioned CFRP Tendon，JOURNAL OF COMPOSITES FOR CONSTRUCTION，pp.383-394，May 2013
- 27) 渡辺貴之，石田圭吾，林和彦，山口隆裕，池田尚治：炭素繊維シートを用いた鋼製橋脚の耐震補強，構造工学論文集，Vol.48A，pp.725-734，土木学会，2002年3月

【第3章】

- 28) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説，Ⅱ鋼橋編，2012年3月
- 29) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説，Ⅴ耐震設計編，2012年3月
- 30) 東・中・西日本高速道路株式会社：設計要領第二集【橋梁保全編】，2017年7月
- 31) 国土交通省 道路局 事務連絡：既設道路橋の耐震性能照査及び耐震設計について，2015年6月
- 32) 川村弘昌，竹内正一，鮫島力：摩擦接合面の違いによるすべり耐力確認試験について，土木学会第72回年次学術講演会，I-628，2018年8月

【第4章】

- 33) Agarwal B.D. and Broutman L.J.：Analysis and Performance of Fiber Composites，Second Edition，Wiley，1991.11
- 34) 北根安雄，鈴木森晶，寺口大輝，松井孝洋，舘石和雄：ハイブリッドFRP引抜成形山形材の圧縮耐力に関する研究，土木学会論文集A1，Vol.77，No.5，pp. II_25-II_36，2021.3
- 35) 北村浩巳，久保村健二：ピッチ系炭素繊維複合材料の特性と応用，新日鉄技報，第349号，pp.61-66，1993.7

【第5章】

- 36) 秀熊佑哉，大垣賀津雄，宮下剛：炭素繊維シート接着により補強された鋼製柱の局部座屈強度に関する基礎研究，第8回FRP複合構造・橋梁に関するシンポジウム，pp.42-51，2020.11

【第6章】

- 37) 柴田道生, 中村武, 若林寛: 鉄骨筋違の履歴特性の定式化 —その1 定式化関数の誘導—, 日本建築学会論文報告集, No.316, pp.18-24, 1982.6
- 38) 加藤勉, 秋山宏: 鋼構造筋違骨組の復元力特性, 日本建築学会論文報告集, No.260, pp.99-108, 1977.10

謝辞

本論文を作成するにあたって、立命館大学理工学部環境都市工学科 伊津野和行教授、立命館大学理工学部環境都市工学科 野阪克義教授、立命館大学理工学部環境都市工学科 野村泰稔教授、立命館大学理工学部環境都市工学科 四井早紀助教には、大変有益なご指導をいただきましたことを心より感謝申し上げます。

伊津野教授には、本論文の主査として、適切かつ丁寧な指導を賜りました。伊津野先生は、私が立命館大学大学院修士課程でも主査として大変お世話になり、修士課程が修了後、日本橋梁株式会社に就職してからも種々の委員会活動と一緒に活動させていただくことができました。また、日本橋梁での業務で行き詰ったときなども設計方法の方向性や技術上の問題点などに対して、適切なアドバイスをいただく機会に恵まれました。修士課程修了後 22 年の月日が流れ、博士後期課程の社会人学生として再びご指導を頂く機会に恵まれました。先生には、研究の意義や方向性、問題点、解決方法などを終始適切な指導をしていただきました。また、私の仕事の都合などで論文や報告を提出するのが深夜や休日になったときも、昼夜、休日を問わず連絡を頂くこともございました。このような先生の熱心なご指導に深く感謝申し上げます。

野阪教授には、本論文の副査として、鋼構造物の耐荷力と炭素繊維補強による複合構造物に関するご指導を頂きました。特に、実験を実施するにあたって、実験方法の検討、準備、実験装置のセッティング・操作方法、実験時のトラブル対応に至るまで適切なアドバイスおよびサポートをしていただきました。また、実験結果に対する考察や論文の執筆についても大変有益なアドバイスをしていただきました。野阪先生は、私が立命館大学大学院修士課程に在籍している頃から 1 学年上の先輩として非常にお世話になった先輩の一人でした。このような先生の熱心なご指導に深く感謝申し上げます。

野村教授には、本論文の副査として、耐震補強した構造物に対する時刻歴応答解析に関するご指導を頂きました。本研究は、時刻歴応答解析による耐震性能の把握もおこなっており、解析手法で行き詰った際に有益かつ適切なアドバイスをさせていただきました。改めて感謝申し上げます。

四井助教には、防災システム研究室のゼミにおいて、研究報告の際に適切なアドバイスをいただきました。改めて感謝申し上げます。

本研究にあたり、立命館大学防災システム研究室の豊田英夫氏、藤澤志織氏、山口佑佳氏、扇田隼輔氏、森川康平氏には、2021 年度および 2022 年度に実施した実験準備および実験時の補助でご協力いただきました。特に、2021 年度の秋に実施した実験は、大がかりな実験だったため、大変助かりました。心よりお礼を申し上げます。この実験では、橋梁研究室の皆様にもご協力いただきました。心よりお礼を申し上げます。また、2020 年度から 2022 年度の間、防災システム研究室に在籍していた院生ならびに学部生の皆様には、親ほど年齢の離れた私に対して暖かく接していただきました。学生時代を思い出し、大変楽しかったです。

西日本高速道路株式会社 九州支社 構造技術課と改築課の皆様および同社の沖縄高速道路事務所の皆様には、同社が管理されている沖縄自動車道の億首川橋を研究の対象橋梁として使わせていただきましたことを改めて感謝申し上げます。また、研究を進めるにあたって、多くの資料を提供していただきましたことを改めて感謝申し上げます。この研究の成果が高速道路の橋梁における維持管理に役立つことができれば幸いです。

日鉄ケミカル&マテリアル株式会社には、本研究の実験で使用した炭素繊維シートである「トウシート」と専用の含浸接着樹脂、プライマー材、高伸度弾性パテ材を提供していただきました。特に、同社

の秀熊佑哉氏には、実験を実施するにあたって、CFRP シートの貼り付け方法をご指導していただきました。また、CFRP シートに関する技術資料の提供や実験方法および実験結果に関する有益なアドバイスをしていただきました。改めて感謝申し上げます。

三菱ケミカルインフラテック株式会社には、本研究の実験で使用した炭素繊維プレートである「e プレート」と専用の接着剤「エポサーム L-600」を提供していただきました。特に、同社の三橋悠三氏には、実験を実施するにあたって、CFRP プレートの貼り付け方法をご指導していただきました。また、CFRP プレートの技術情報の提供や実験方法および実験結果に関する有益なアドバイスをしていただきました。改めて感謝申し上げます。

日本橋梁会社には、博士後期課程で研究する機会を与えていただいたことを深く感謝いたします。特に私が在籍する技術グループ技術チームのチーム員には、実験や研究で会社を不在にすることが多々あり、業務に対してご迷惑をおかけしたことをお詫びするとともに、私が不在の中でも業務を遂行してくれたことを深く感謝申し上げます。

最後に、博士後期課程で研究することを応援し、常に献身なサポートをしてくれた妻と娘、母、並びに妻の両親に深く感謝申し上げます。

巻末付録

【第4章の図表および写真】

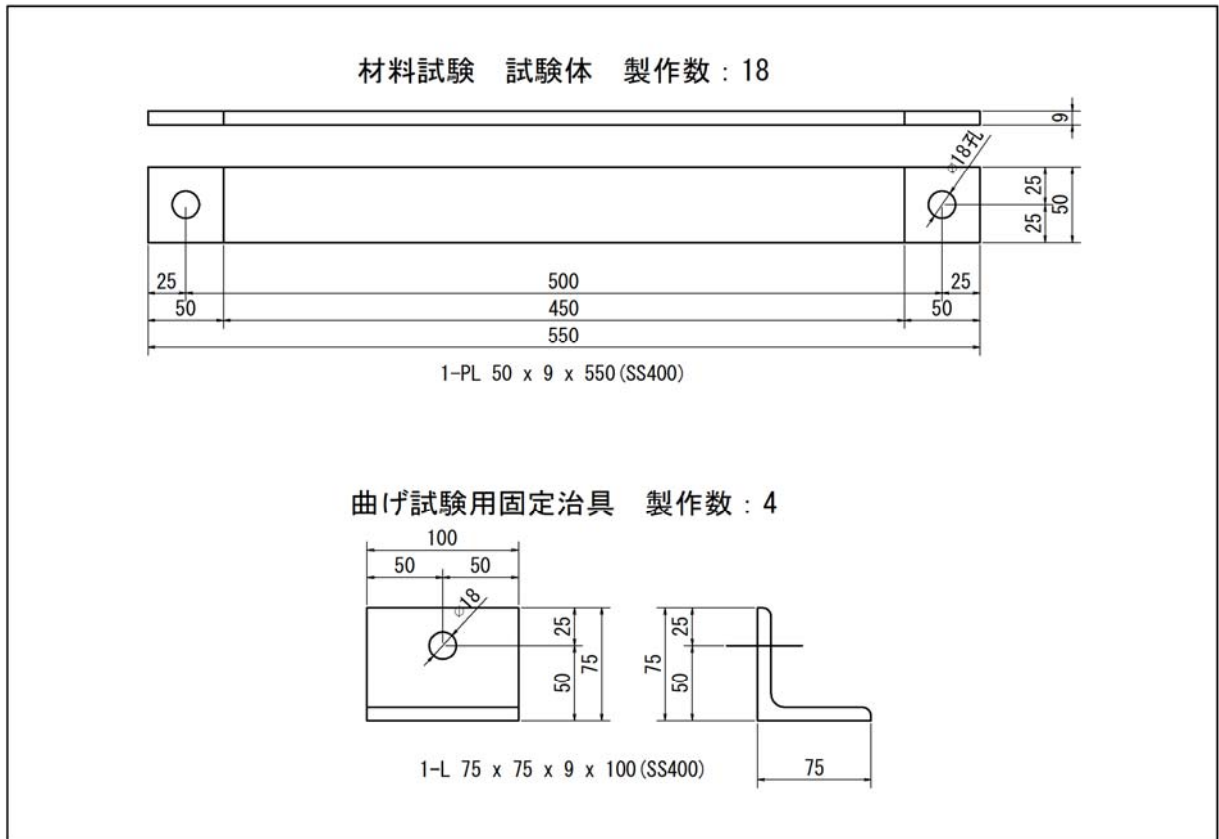


図-付 4.1 試験体および曲げ試験用試験治具の製作寸法

表-付 4.1 CFRP シートの貼り付け作業フロー

作業工程	作業内容	使用材料
下地処理	1.プラスト処理（鋼材表面の錆，塗膜の除去）	
エポキシプライマー塗布	1.プライマーの調合（主剤:硬化剤 4：1 重量比） 2.プライマーの塗布 3.指触乾燥確認	プライマー (FP-N9)
CFRP シート貼付け (各層繰り返し)	1.FRP シートの切断 2.含浸・接着樹脂の調合（主剤：硬化剤 3：1 重量比） 3.含浸・接着樹脂の下塗り（標準塗布量 0.4kg/m ² ） 4.FRP シートの貼り付け，含浸・脱泡 5.含浸・接着樹脂の上塗り（標準塗布量 0.2kg/m ² ）	CFRP シート (FTS-C5-30,FTS-C8-30) 含浸・接着樹脂 (FR-E9P)

表-付 4.2 CFRP プレートの貼り付け作業フロー

作業工程	作業内容	使用材料
下地処理	1.ディスクサンダー処理（鋼材表面の錆，塗膜の除去）	
CFRP プレート貼付け	1.CFRP プレートの切断 2.接着剤の調合（主剤：硬化剤 2：1 重量比） 3.接着剤の塗布 ①鋼材表面（標準塗布量 0.1kg/m/50mm 幅） ②CFRP プレート表面（標準塗布量 0.2kg/m/50mm 幅） 4.CFRP プレートの貼り付け 5.養生	CFRP プレート (HM520) 接着剤 (エポサーム L-600)

表-付 4.3 万能試験機の仕様

定格	型番	オートグラフ AG-300kNX (株島津製作所製)
	負荷重量	300kN
	クロスヘッド速度	0.0005～250mm/min
	クロスヘッド～テーブル間隔	最大 1440mm
	有効試験幅	595mm
	フレーム剛性	400kN/mm
付属品	ロードセル	300kN 用
	引張試験用つかみ具	手動式定位置くさび形つかみ具（300kN 用）
	曲げ試験用キッド	
所要条件	大きさ	試験機本体：W1186mm×D752mm×H2414mm 計測制御装置：本体内蔵 スマートコントローラ：W80mm×D50mm×H250
	質量	約 960kg
	電源	3 相 200～230V 50-60Hz 7.5kVA(2.5kW)

表-付 4.4 記録装置の仕様

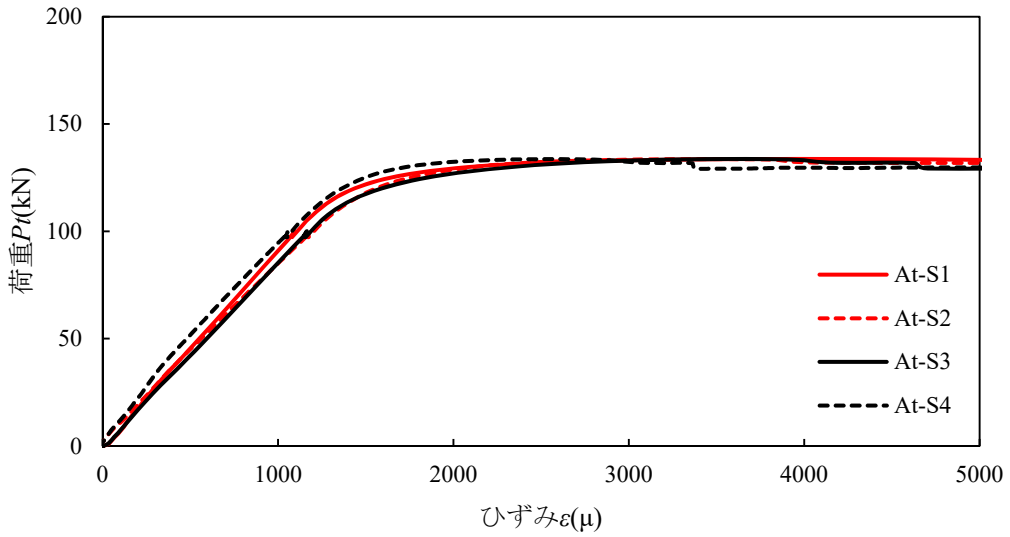
データロガー	型番	TDS-530 (株東京測器研究所製)
	センサーモード	直流電圧測定（荷重，変位）：電圧 1/100 ひずみゲージ：1 ゲージ 4 線式
	内部スイッチボックス	測定点数：30 点
	インターフェース	USB2.0 プロトコル互換
	大きさ	W320mm×D440mm×H130mm
	重量	約 8kg
	電源	定格電圧：AC100～240V 最大消費電力：104VA

表-付 4.5 ひずみゲージの仕様

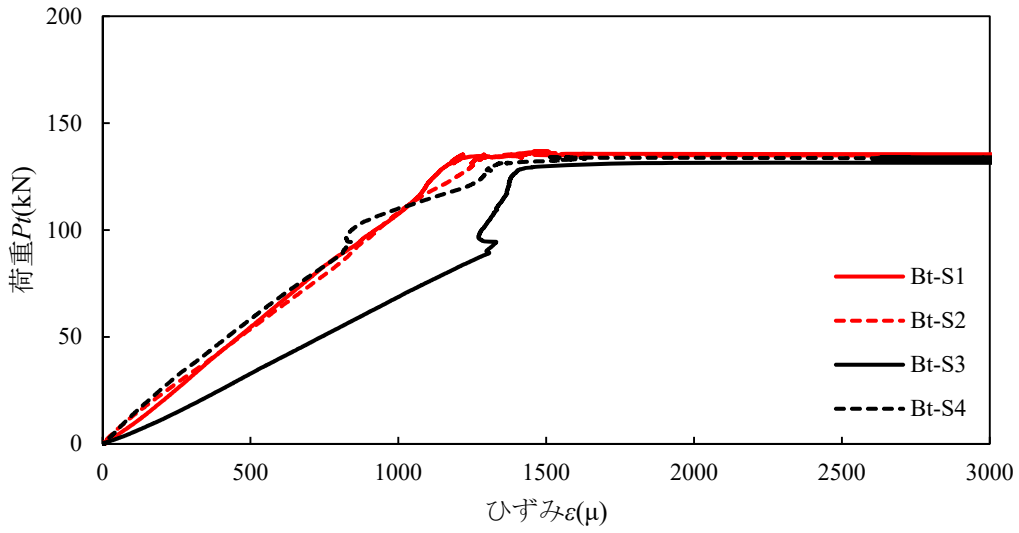
ひずみゲージ	型番	FLAB-5-11-5LQM-F (株東京測器研究所)
	ゲージ長	5mm
	ゲージ幅	1.5mm
	ベース長	10mm
	ベース幅	3mm
	抵抗値	120Ω
	リード線	ポリプロピレン4平行線 (モジュラ付)
	リード線長さ	5m



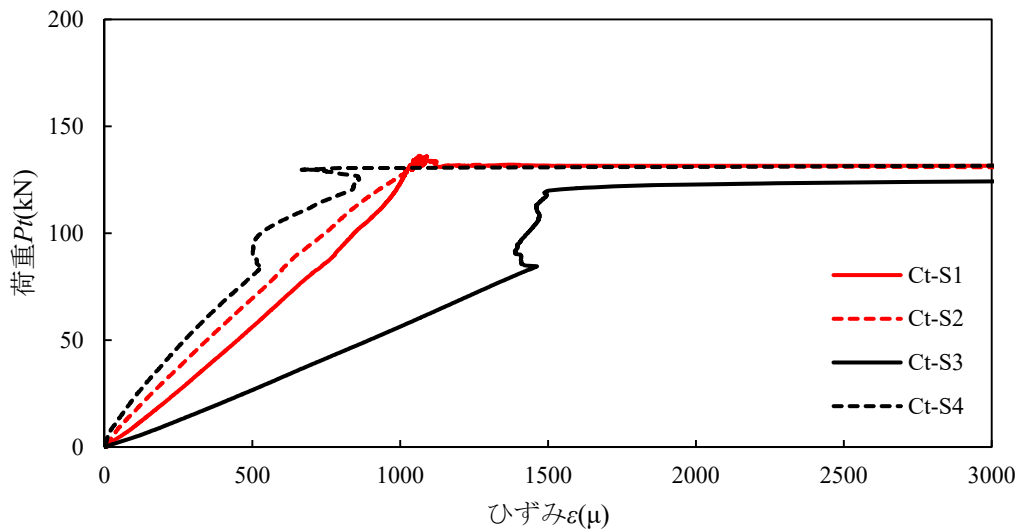
写真-付 4.1 ひずみゲージ (FLAB-5-11-5LQM-F)



(a)試験体 A-t

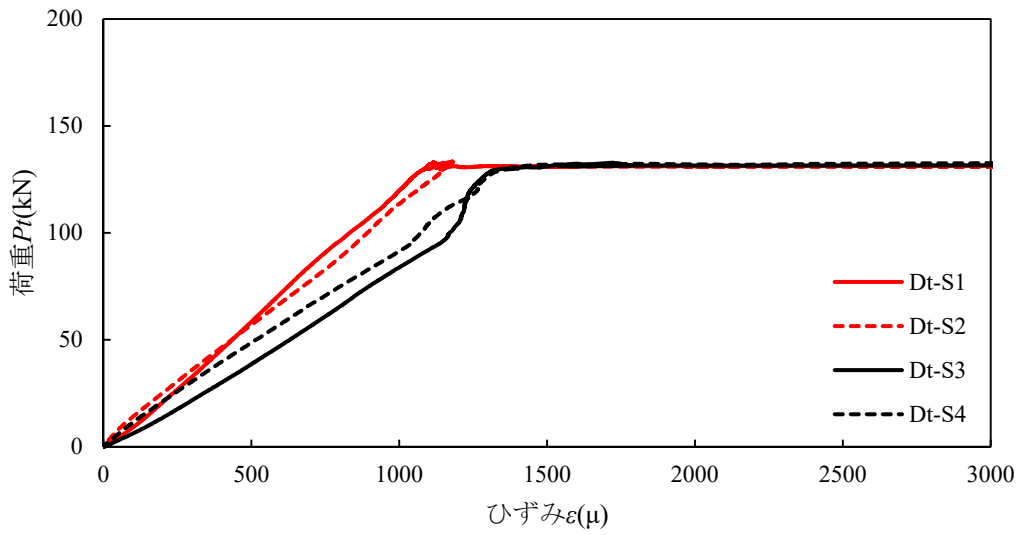


(b)試験体 B-t

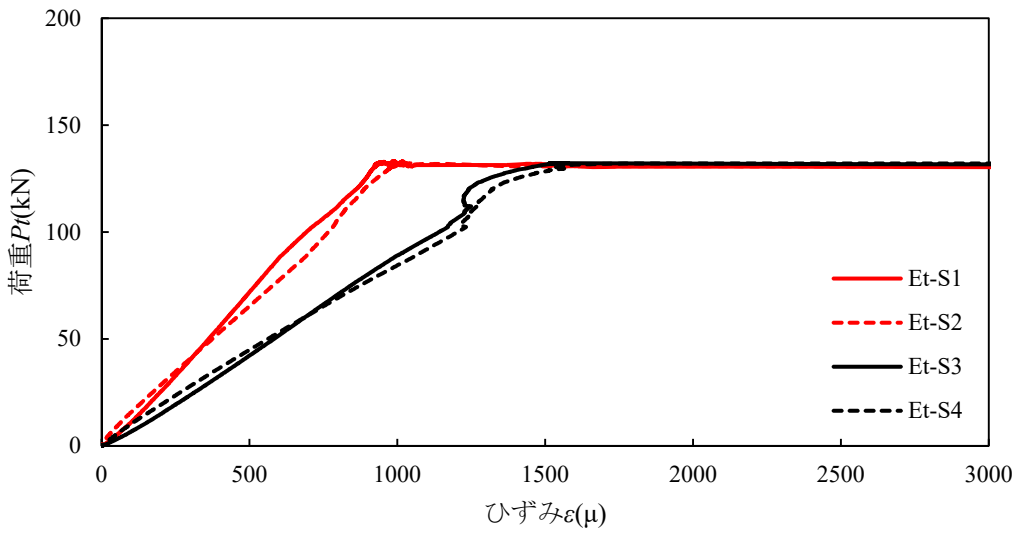


(c)試験体 C-t

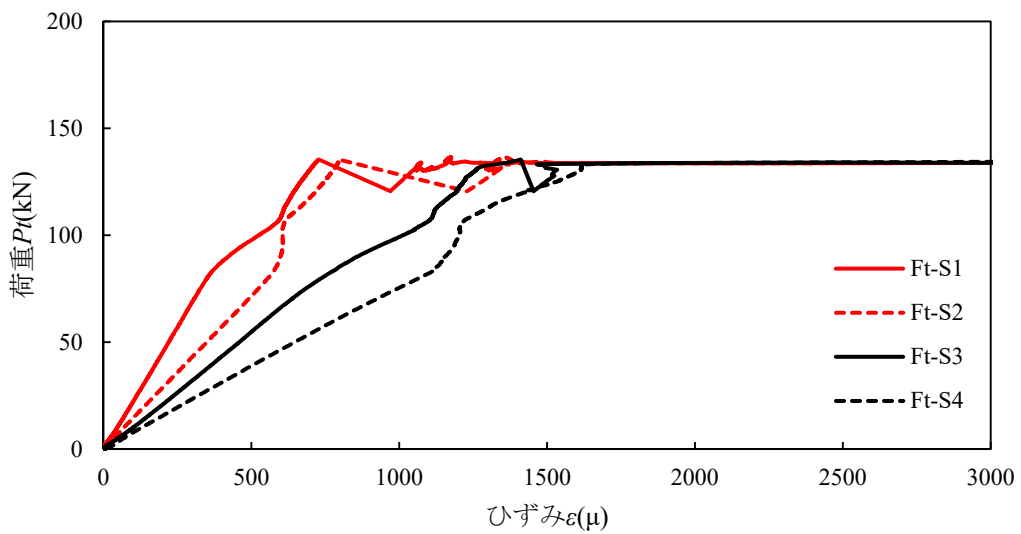
図-付 4.1 引張載荷試験における鉛直荷重－ひずみ関係（鋼材部）（その 1）



(a)試験体 D-t

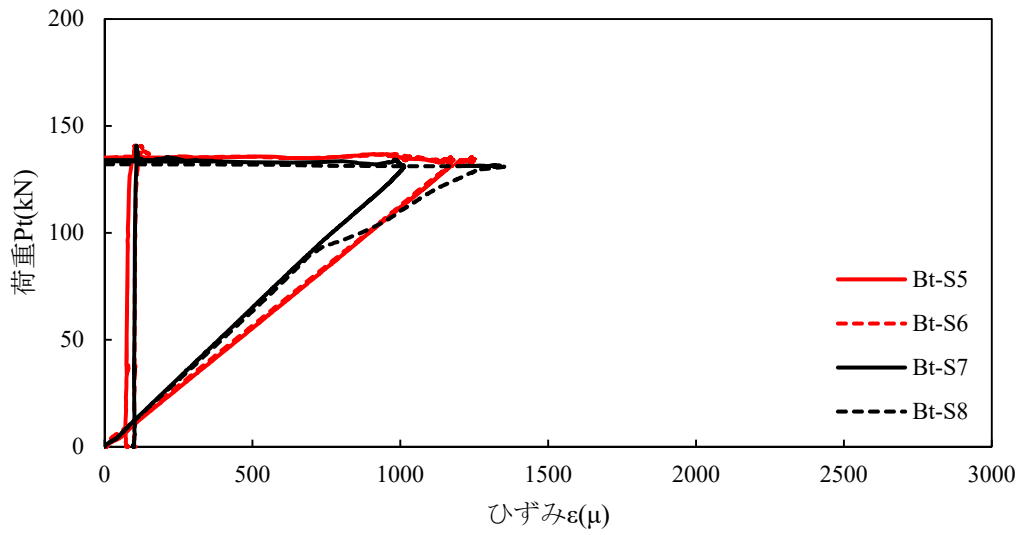


(b)試験体 E-t

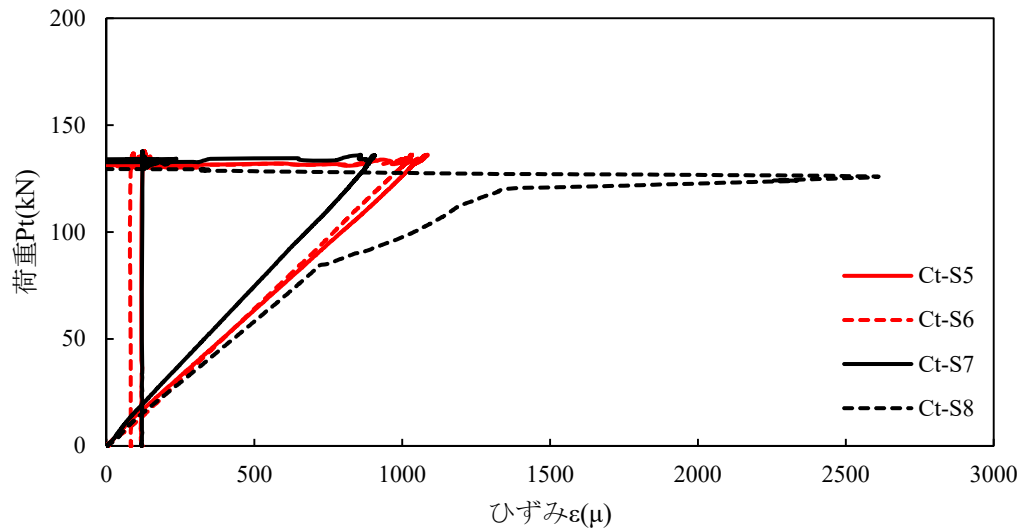


(c)試験体 F-t

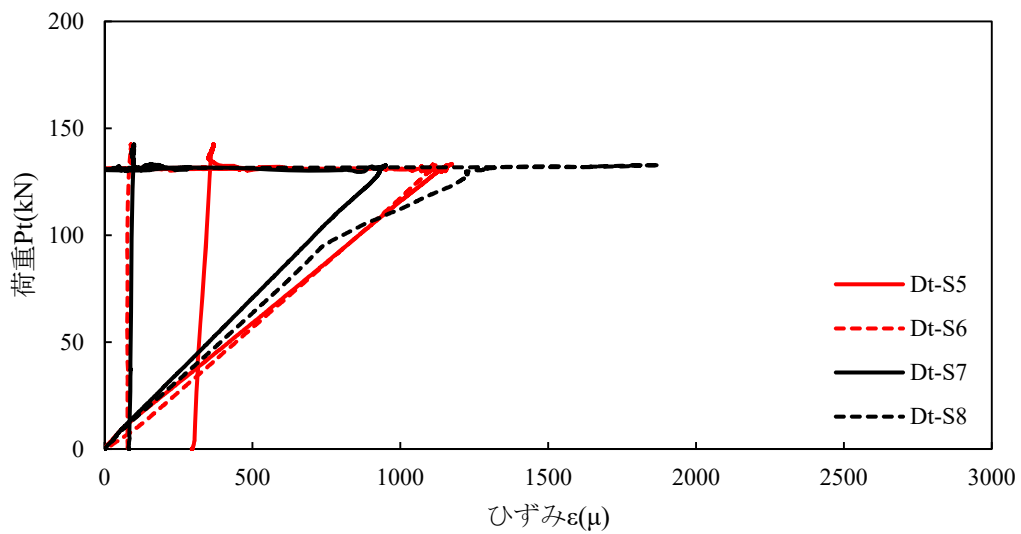
図-付 4.2 引張載荷試験における鉛直荷重－ひずみ関係（鋼材部）（その 2）



(a)試験体 B-t

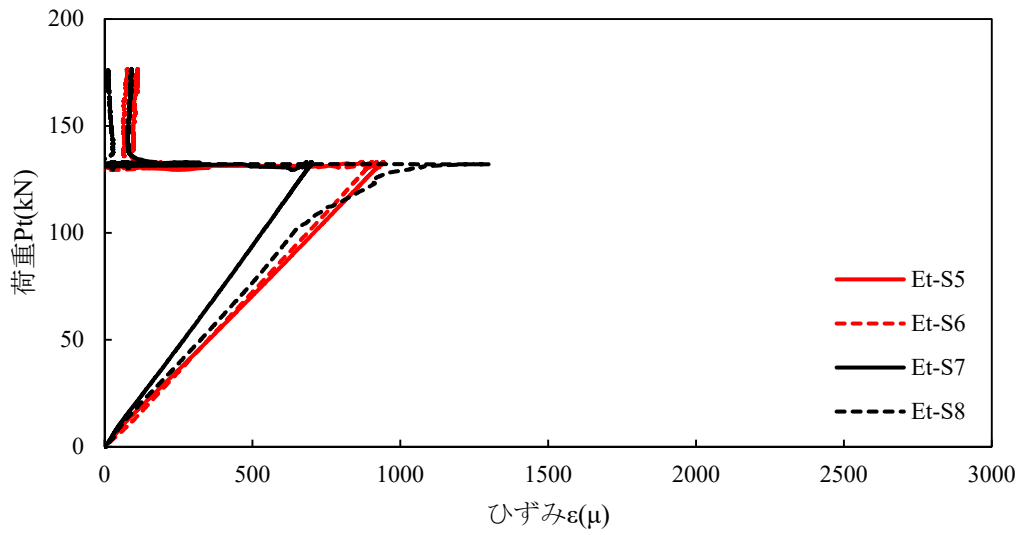


(b)試験体 C-t

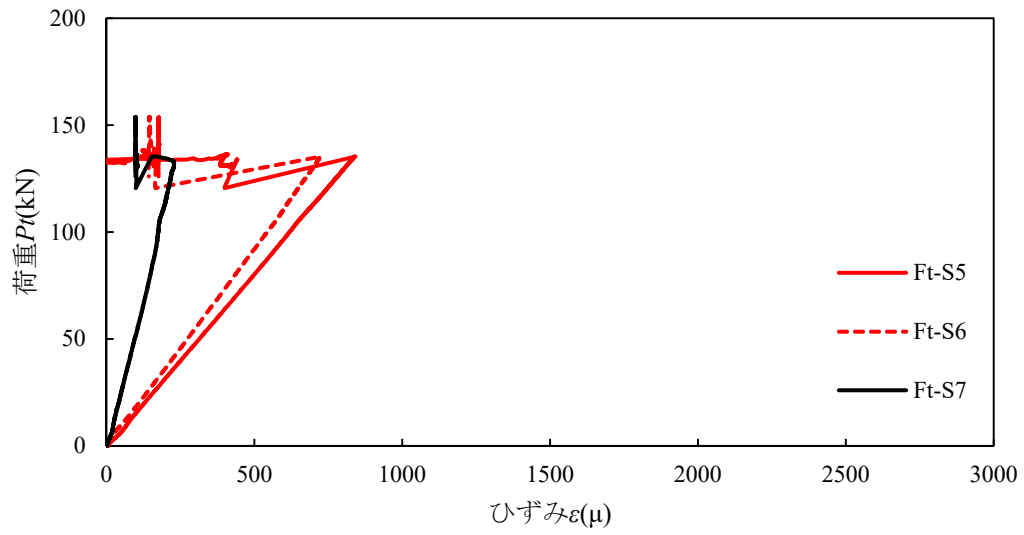


(c)試験体 D-t

図-付 4.3 引張載荷試験における鉛直荷重－ひずみ関係（CFRP 補強部）（その 1）



(a)試験体 E-t



(b)試験体 F-t

図-付 4.4 引張載荷試験における鉛直荷重－ひずみ関係（CFRP 補強部）（その 2）

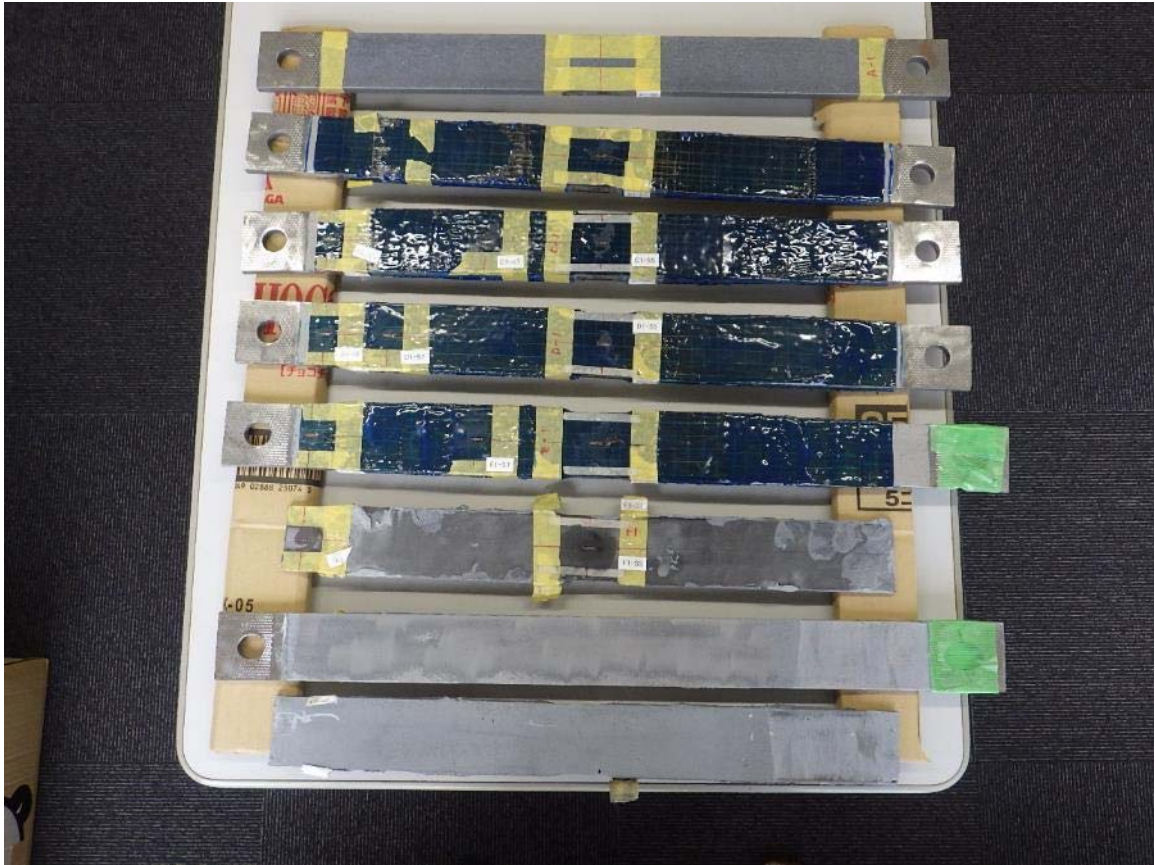
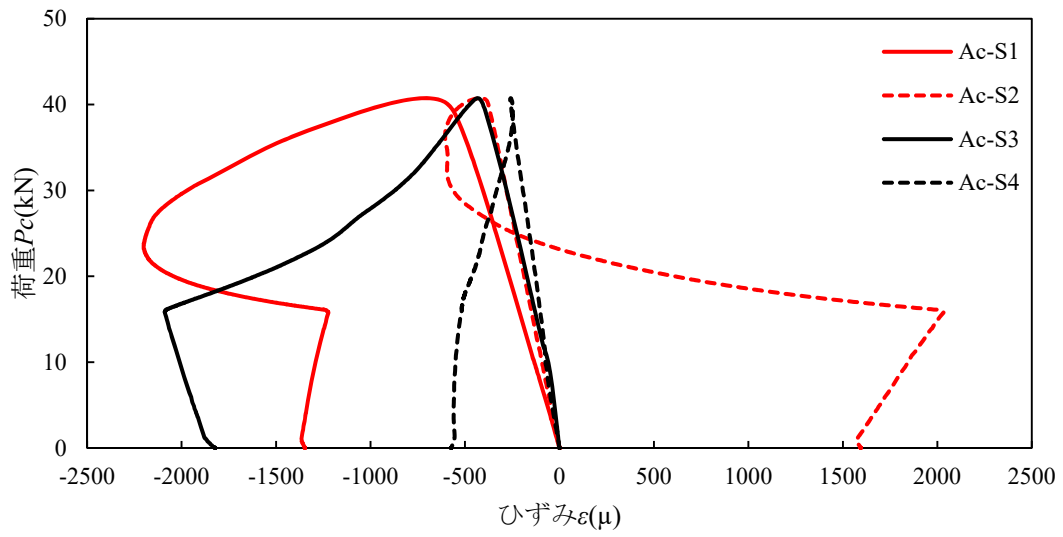
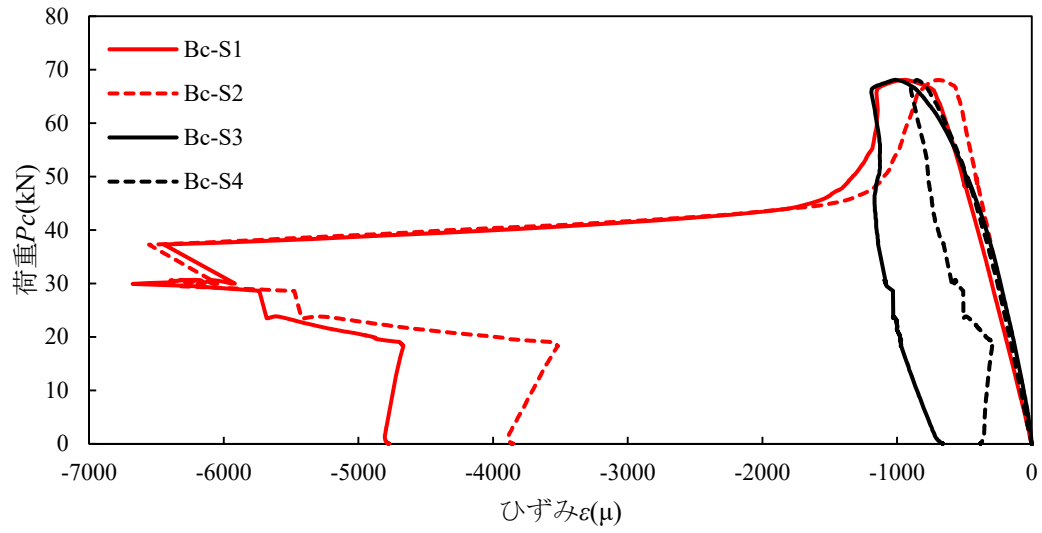


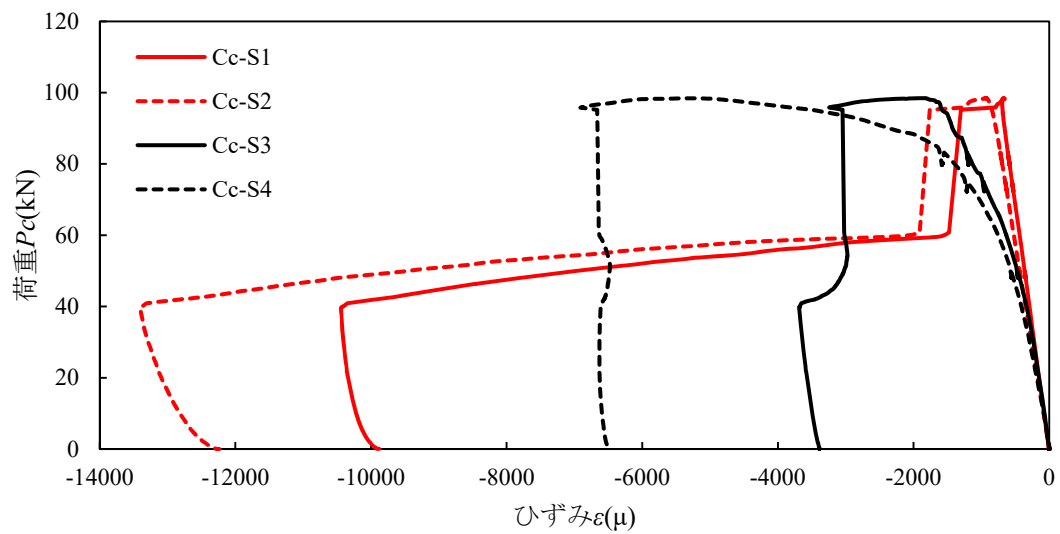
写真-付 4.2 引張載荷試験後の試験体



(a)試験体 A-c

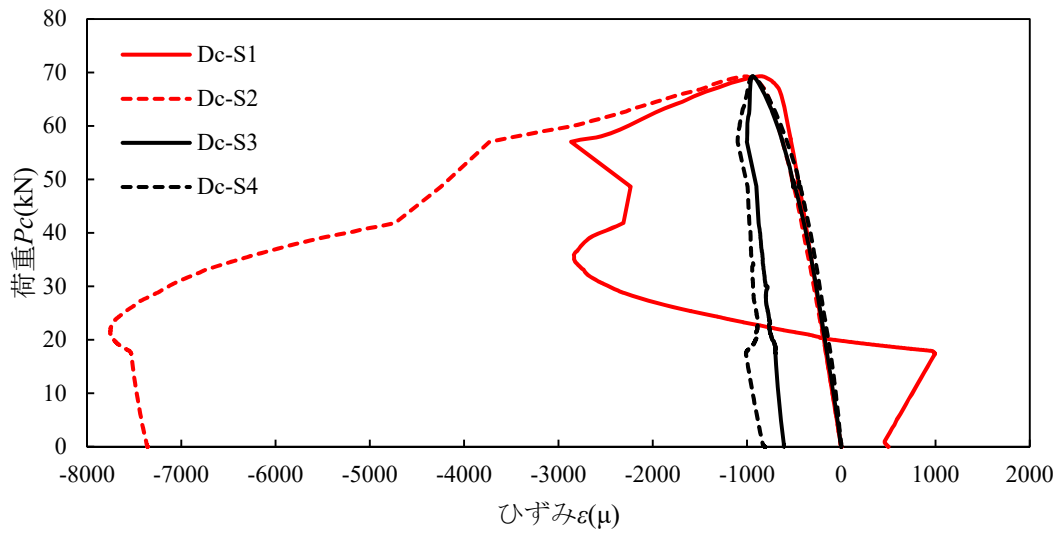


(b)試験体 B-c

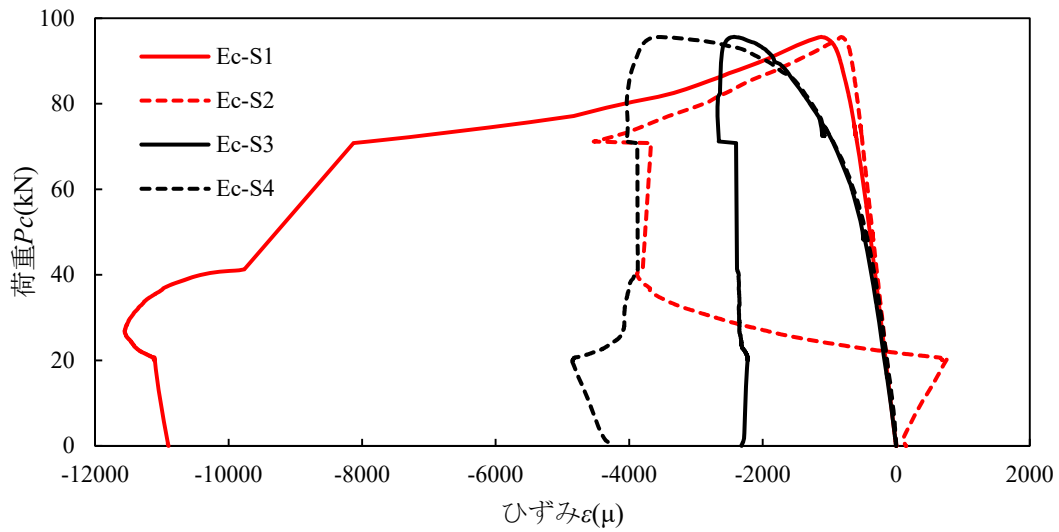


(c)試験体 C-c

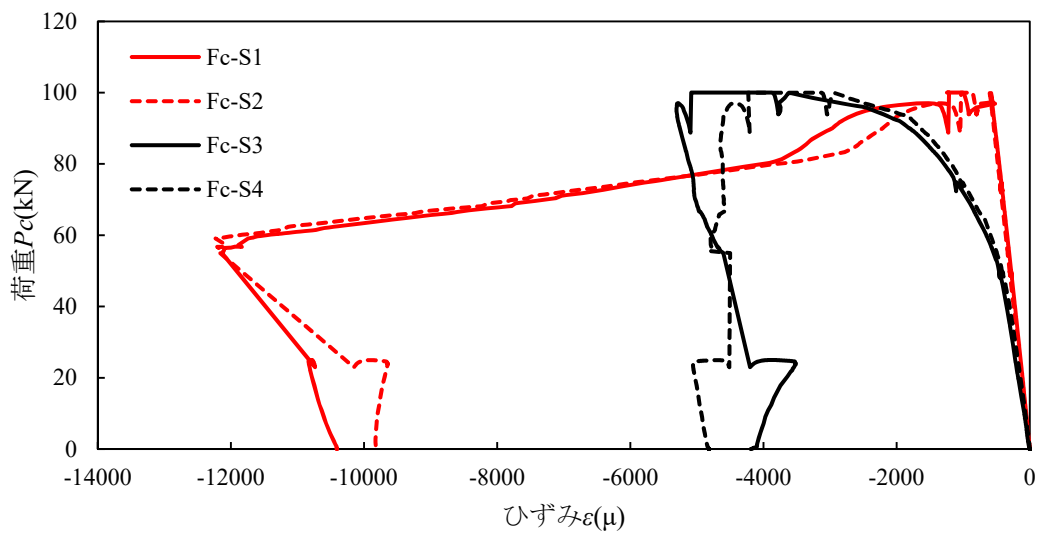
図-付 4.5 圧縮載荷試験における鉛直荷重－ひずみ関係（鋼材部）（その 1）



(a)試験体 D-c

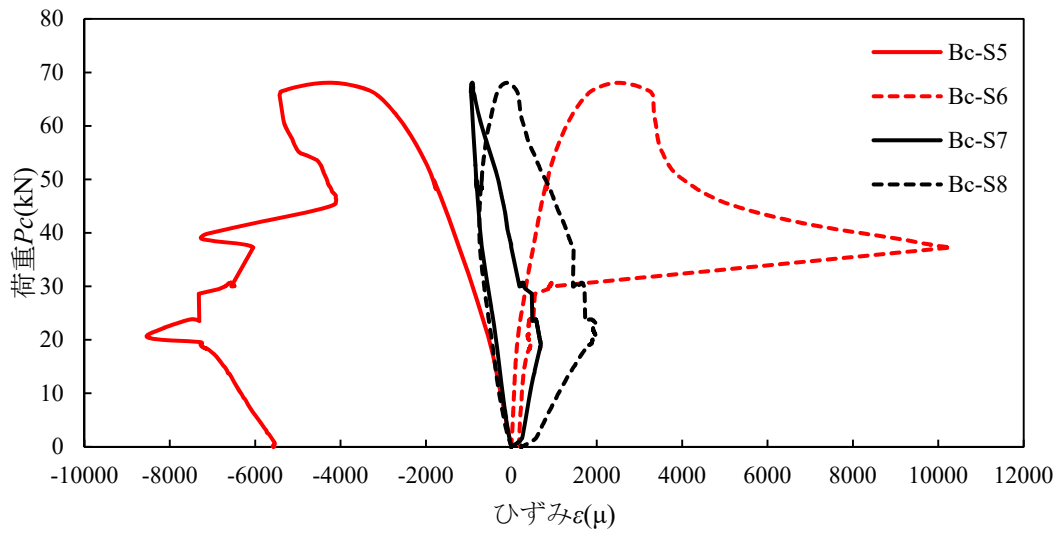


(b)試験体 E-c

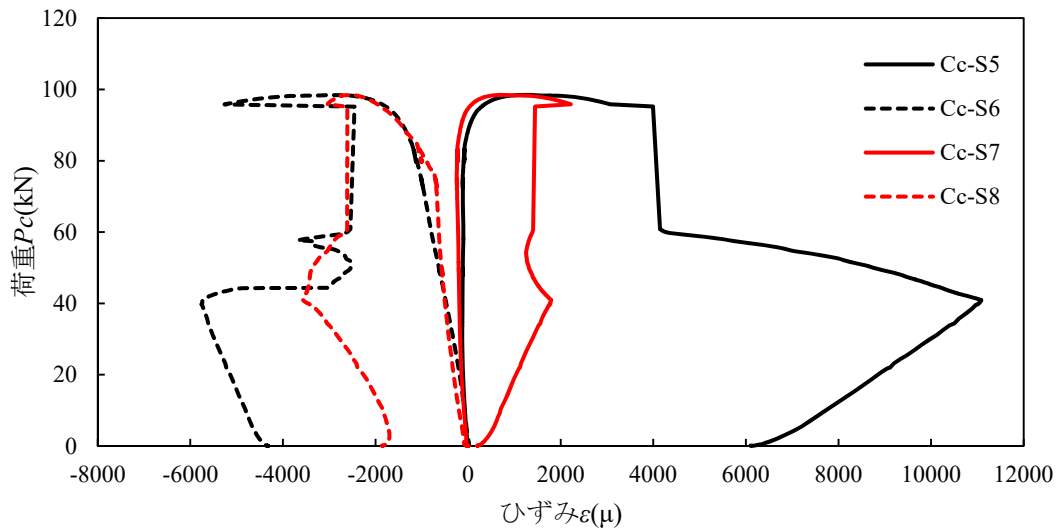


(c)試験体 F-c

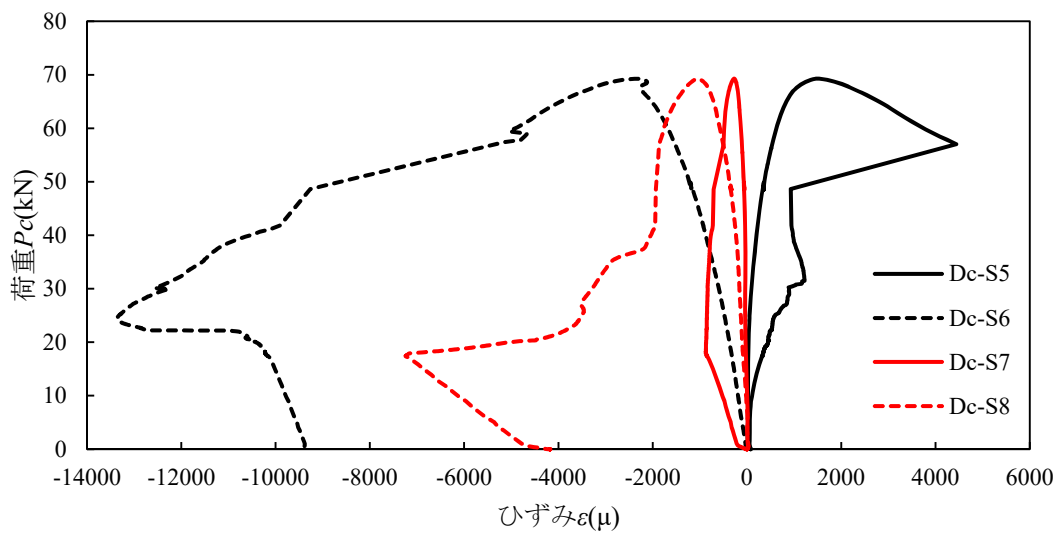
図-付 4.6 圧縮載荷試験における鉛直荷重-ひずみ関係 (鋼材部) (その 2)



(a)試験体 B-c

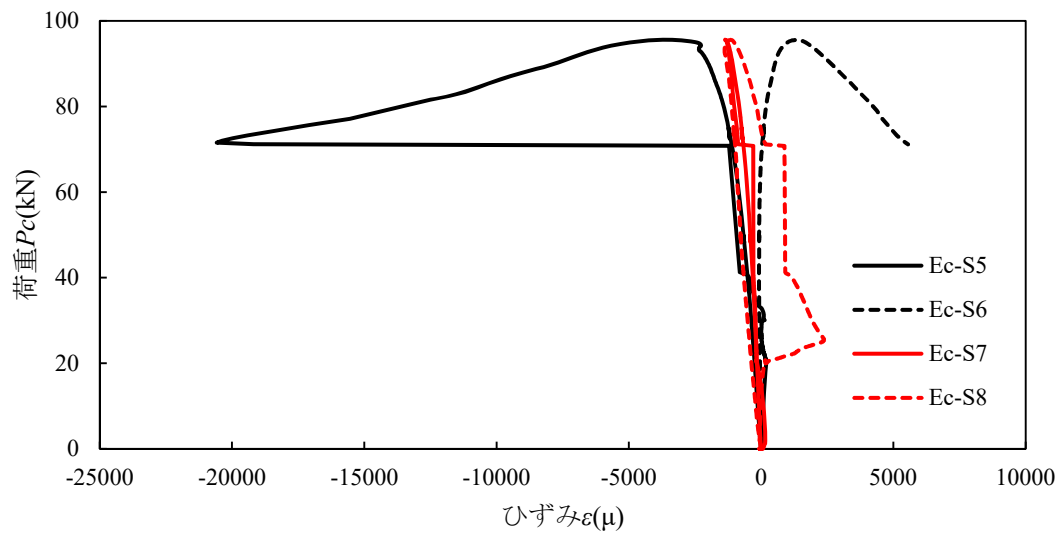


(b)試験体 C-c

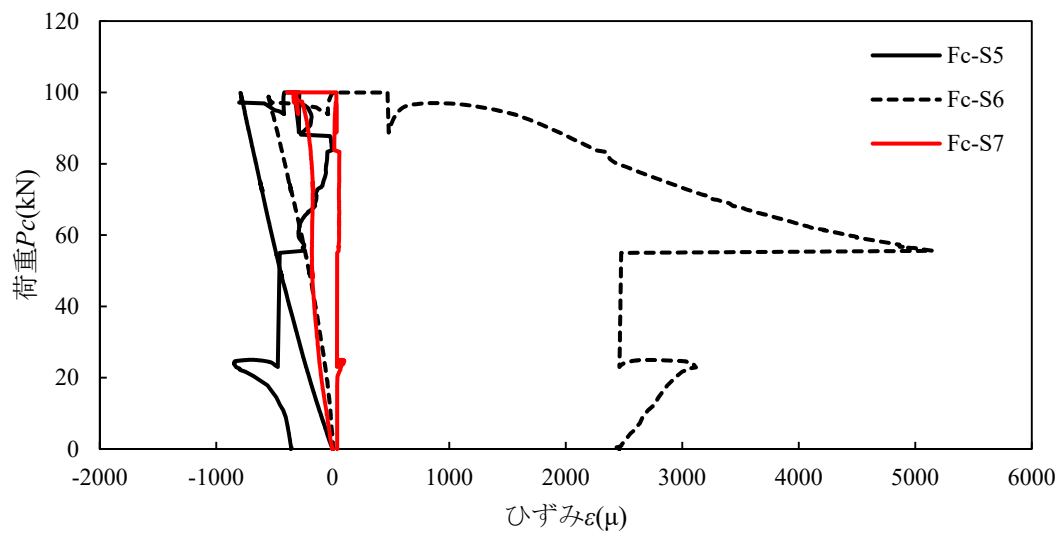


(c)試験体 D-c

図-付 4.7 圧縮載荷試験における鉛直荷重－ひずみ関係（CFRP 補強部）（その 1）



(a)試験体 E-c



(b)試験体 F-c

図-付 4.8 圧縮載荷試験における鉛直荷重－ひずみ関係（CFRP 補強部）（その 2）



写真-付 4.3 圧縮載荷試験後の試験体

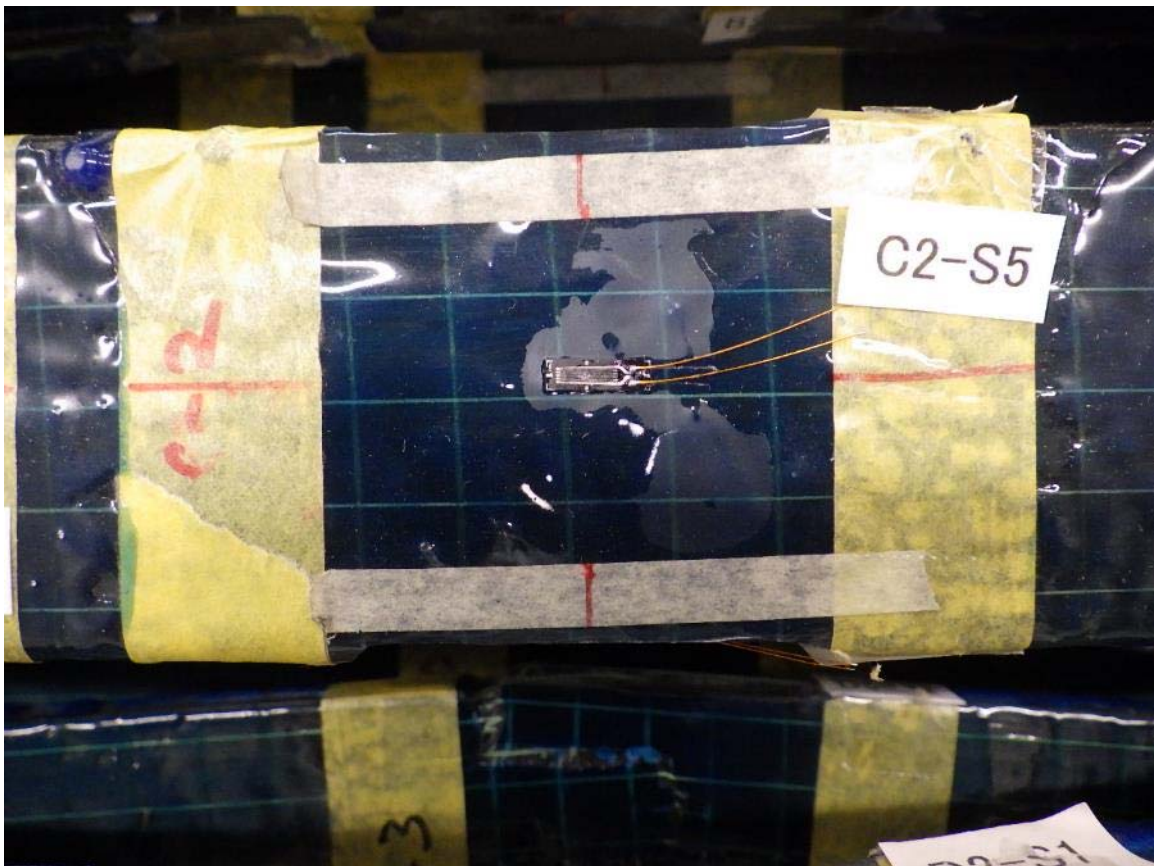


写真-付 4.4 圧縮載荷試験後における CFRP の破壊状況 (試験体 C-c 幅方向 圧縮側)

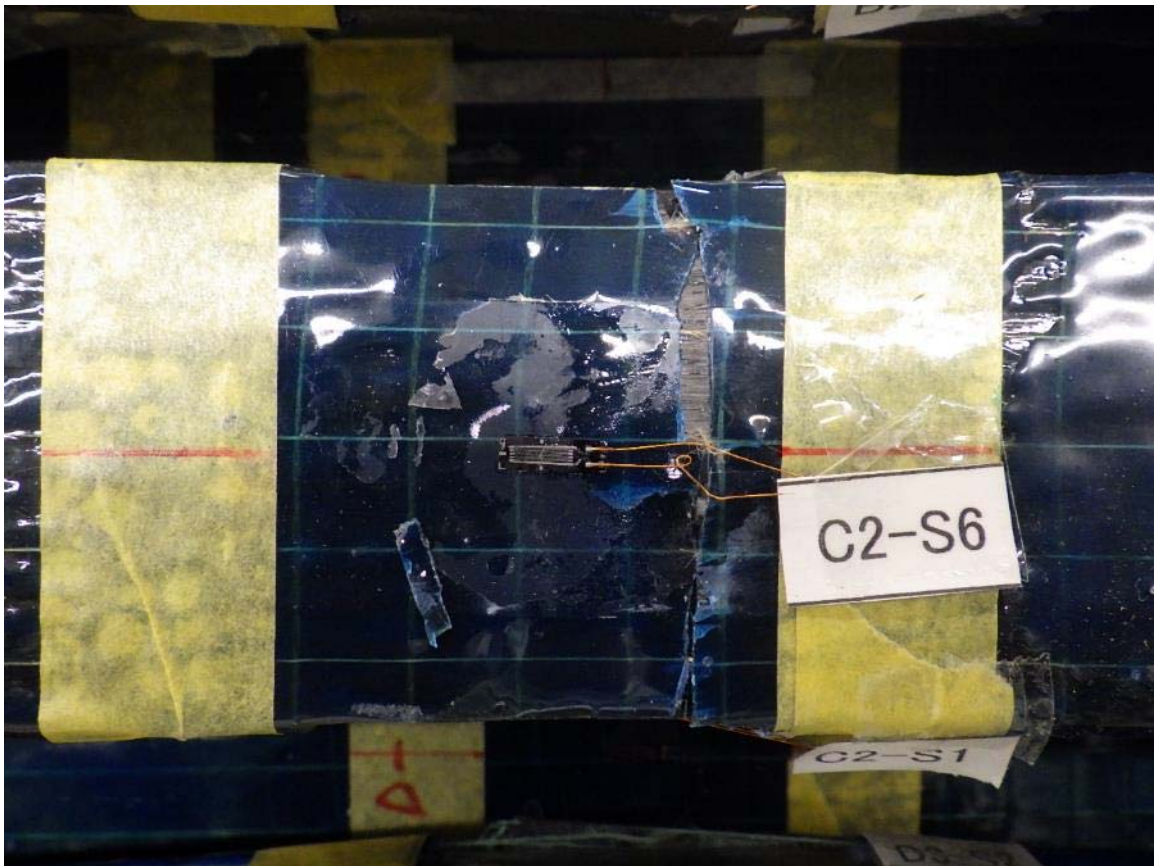


写真-付 4.5 圧縮荷重試験後における CFRP の破壊状況 (試験体 C-c 幅方向 引張側)



写真-付 4.6 圧縮荷重試験後における CFRP の破壊状況 (試験体 C-c 板厚方向 引張→圧縮側)



写真-付 4.7 圧縮載荷試験後における CFRP の破壊状況 (試験体 C-c 板厚方向 圧縮→引張側)

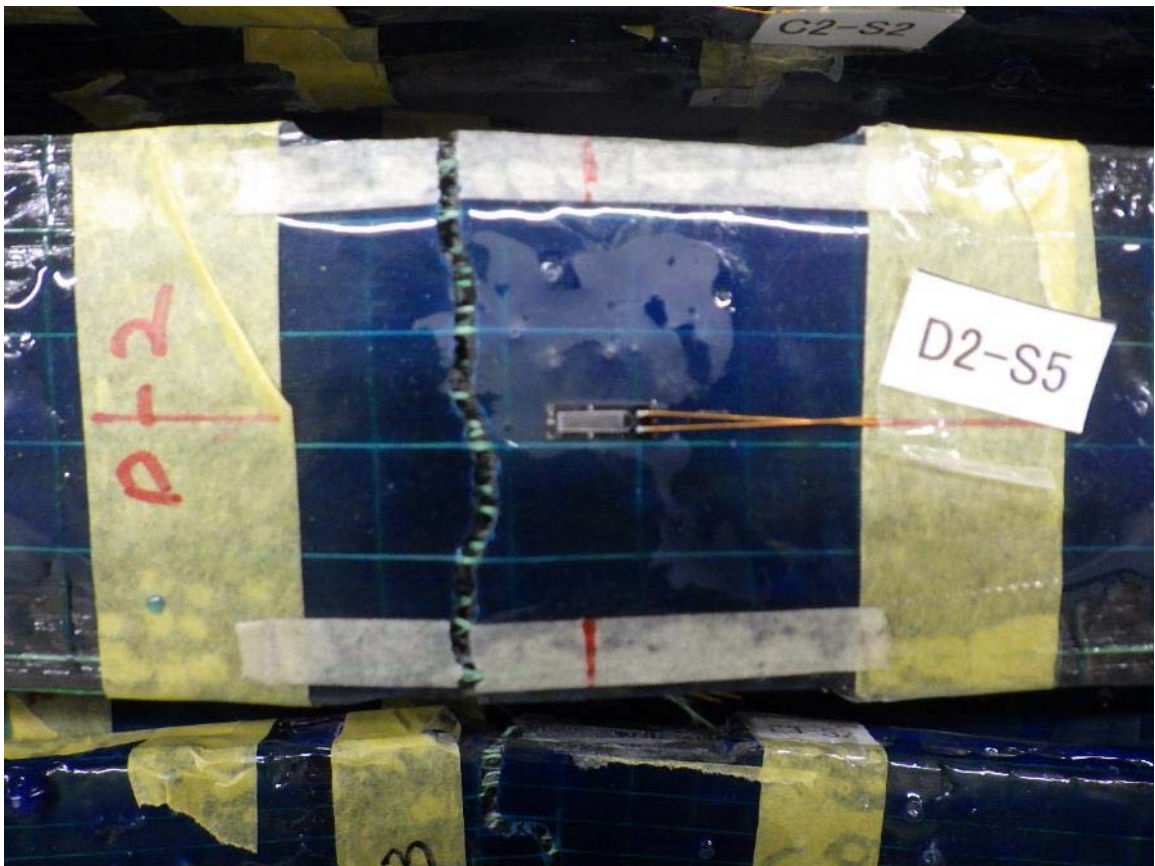


写真-付 4.8 圧縮載荷試験後における CFRP の破壊状況 (試験体 D-c 幅方向 引張側)



写真-付 4.9 圧縮荷重試験後における CFRP の破壊状況 (試験体 D-c 幅方向 圧縮側)



写真-付 4.10 圧縮荷重試験後における CFRP の破壊状況 (試験体 D-c 板厚方向 引張→圧縮側)

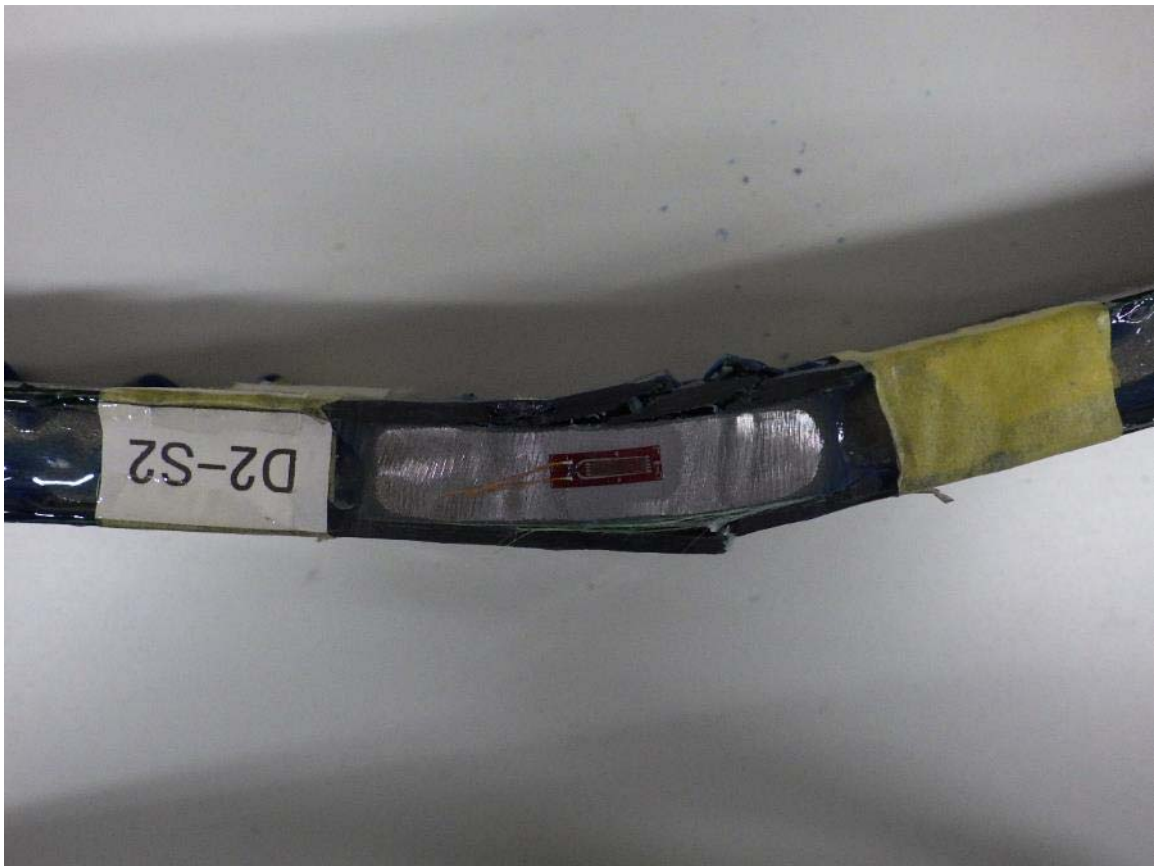


写真-付 4.11 圧縮載荷試験後における CFRP の破壊状況 (試験体 D-c 板厚方向 圧縮→引張側)

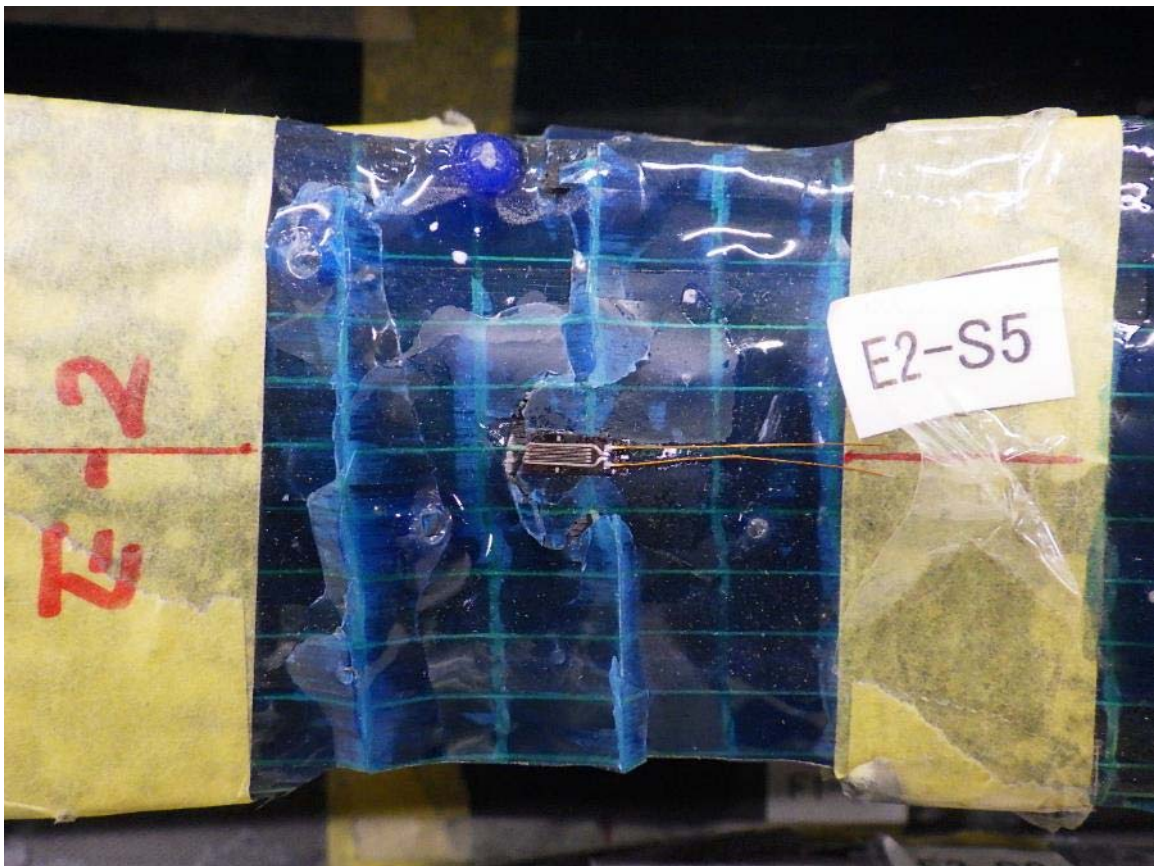


写真-付 4.12 圧縮載荷試験後における CFRP の破壊状況 (試験体 E-c 幅方向 圧縮側)

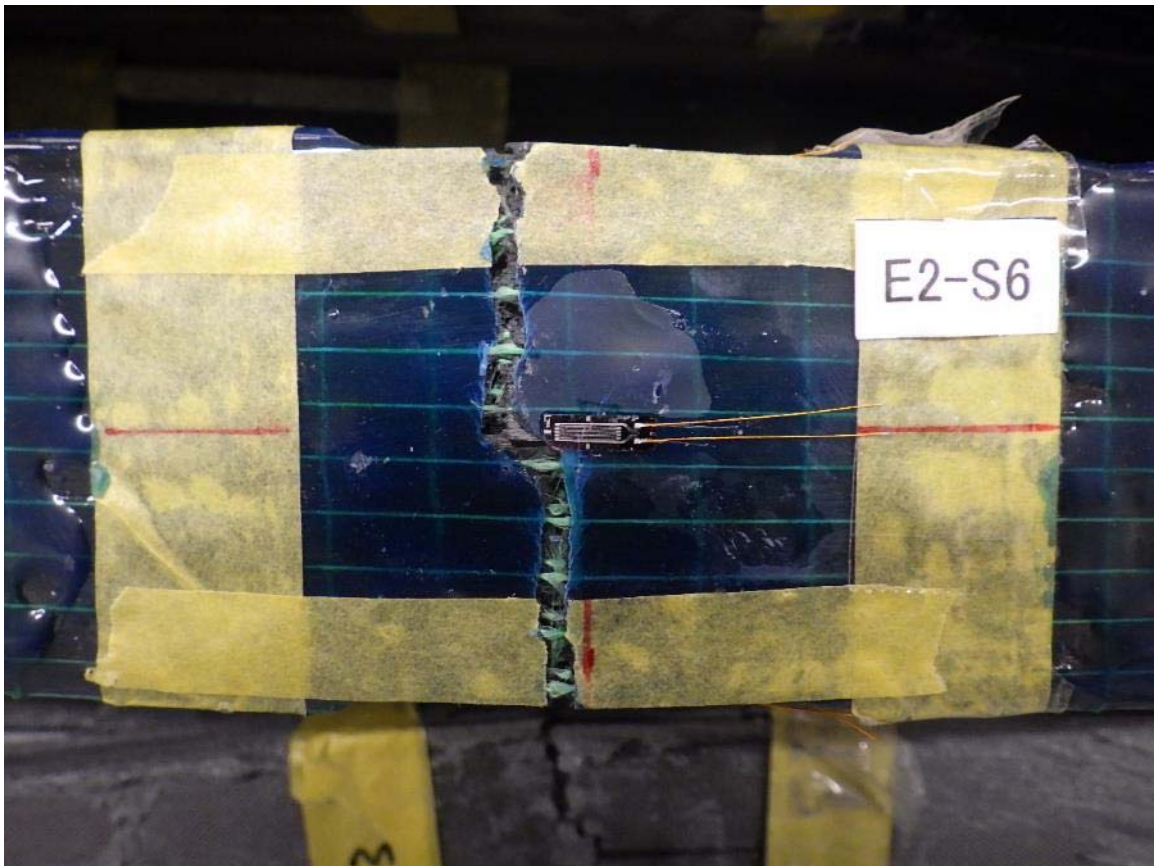


写真-付 4.13 圧縮載荷試験後における CFRP の破壊状況 (試験体 E-c 幅方向 引張側)



写真-付 4.14 圧縮載荷試験後における CFRP の破壊状況 (試験体 E-c 板厚方向 圧縮→引張側)



写真-付 4.15 圧縮載荷試験後における CFRP の破壊状況 (試験体 E-c 板厚方向 引張→圧縮側)



写真-付 4.16 圧縮載荷試験後における CFRP の破壊状況 (試験体 F-c 幅方向 圧縮側)



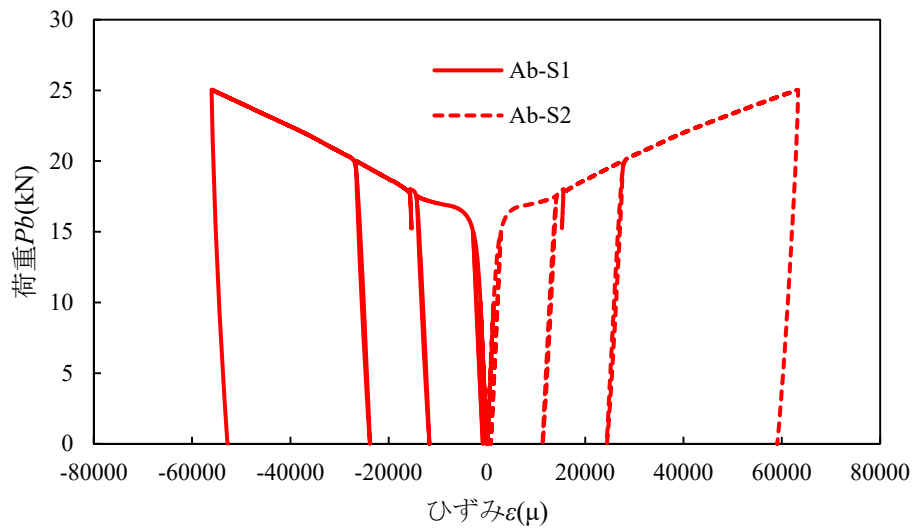
写真-付 4.17 圧縮載荷試験後における CFRP の破壊状況 (試験体 F-c 幅方向 引張側)



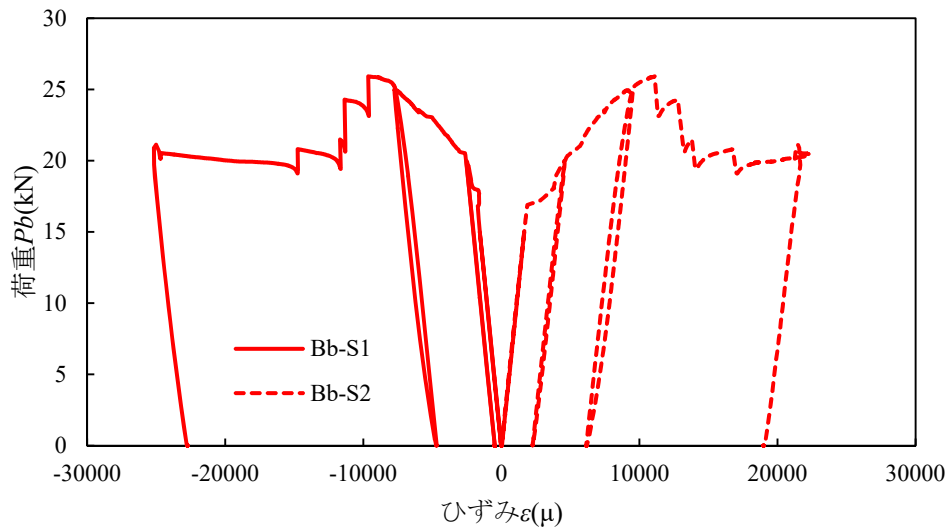
写真-付 4.18 圧縮載荷試験後における CFRP の破壊状況 (試験体 F-c 板厚方向 圧縮→引張側)



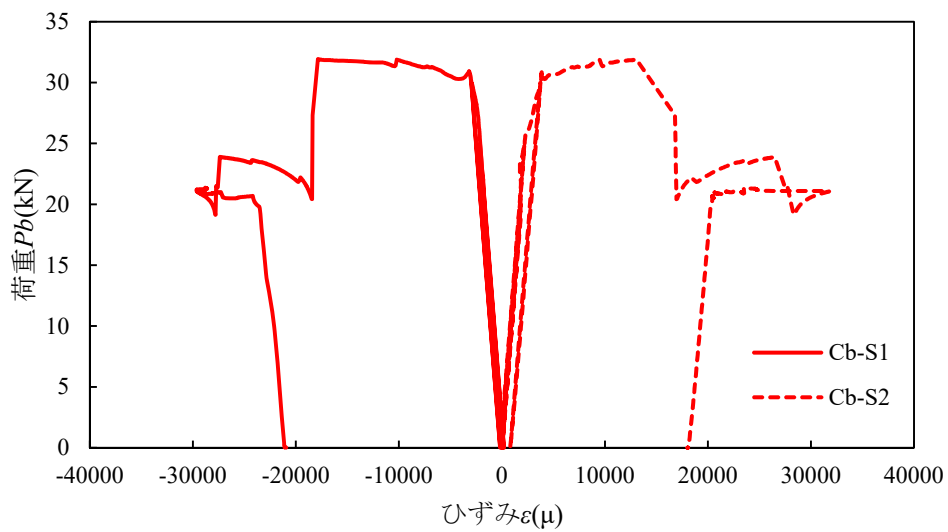
写真-付 4.19 圧縮載荷試験後における CFRP の破壊状況（試験体 F-c 板厚方向 引張→圧縮側）



(a)試験体 A-b

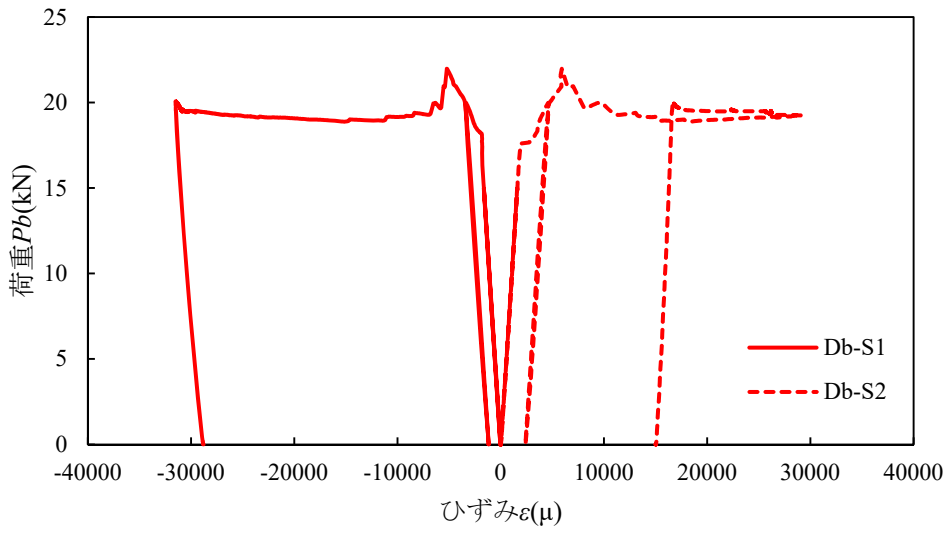


(b)試験体 B-b

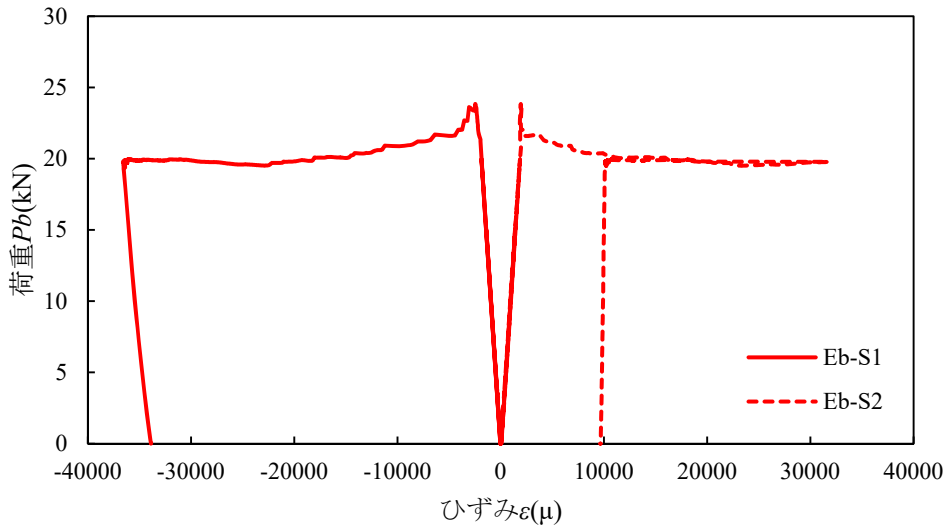


(c)試験体 C-b

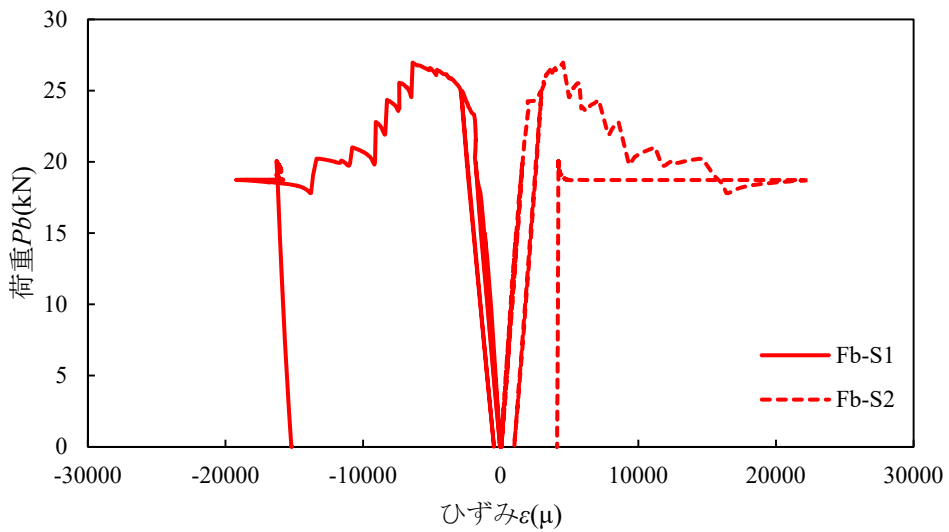
図-付 4.9 曲げ載荷試験における鉛直荷重—ひずみ関係（鋼材部）（その 1）



(a)試験体 D-b

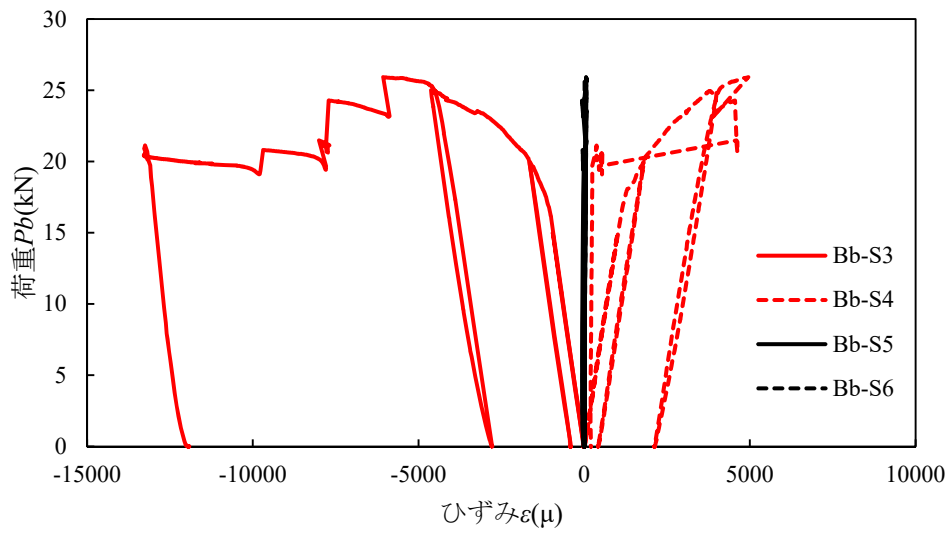


(b)試験体 E-b

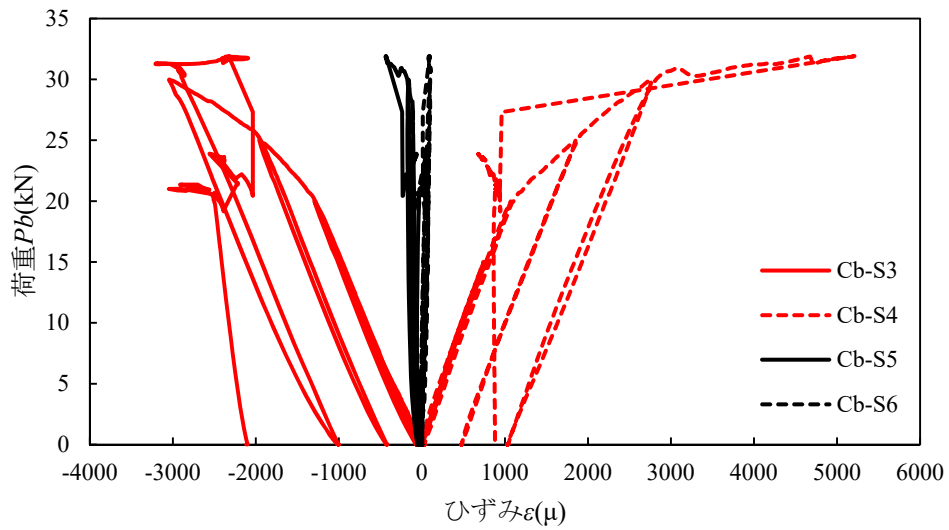


(c)試験体 F-b

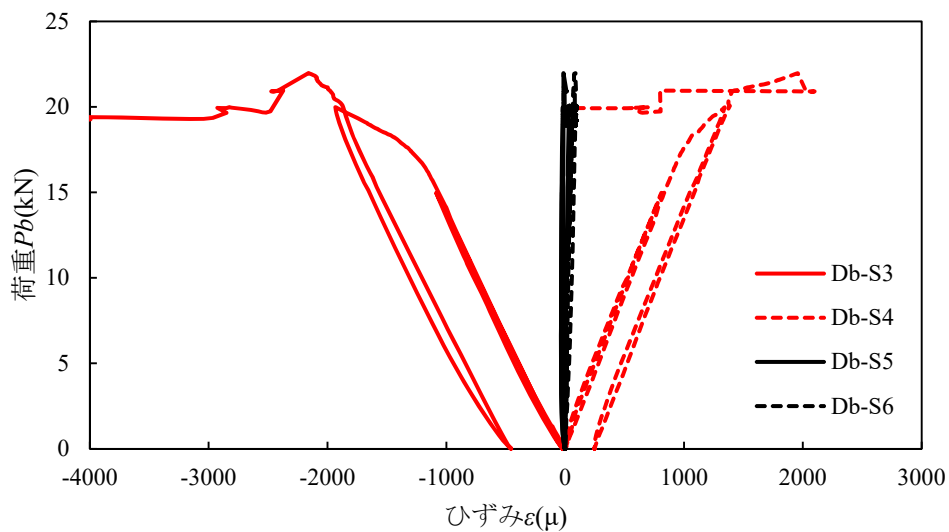
図-付 4.10 曲げ載荷試験における鉛直荷重－ひずみ関係（鋼材部）（その 2）



(a)試験体 B-b

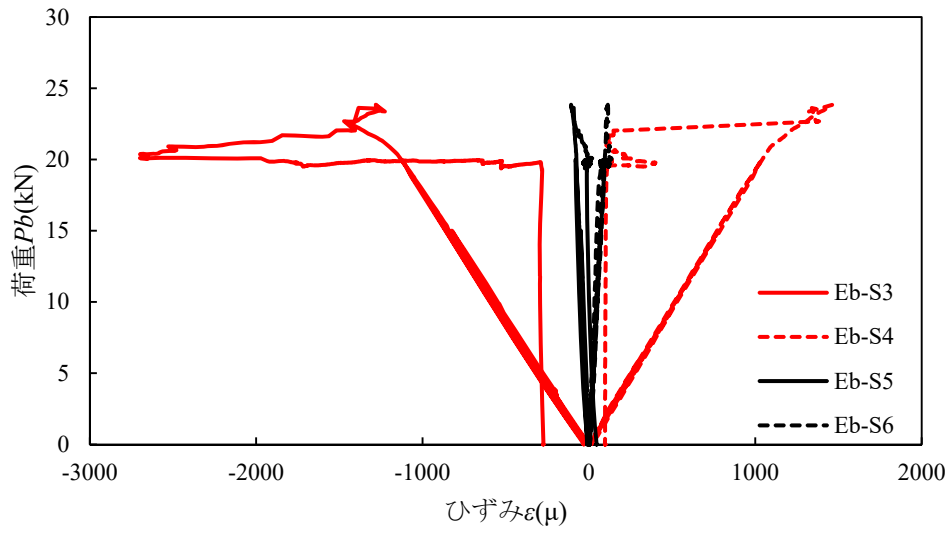


(b)試験体 C-b

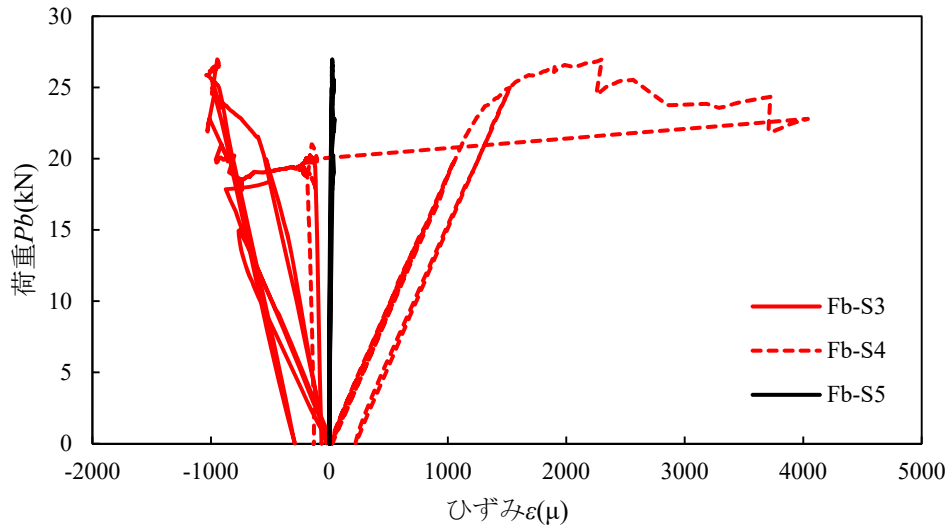


(c)試験体 D-b

図-付 4.11 曲げ載荷試験における鉛直荷重-ひずみ関係 (CFRP 補強部) (その 1)



(a)試験体 E-b



(b)試験体 F-b

図-付 4.12 曲げ載荷試験における鉛直荷重－ひずみ関係（CFRP 補強部）（その 2）



写真-付 4.20 曲げ载荷試験後の試験体

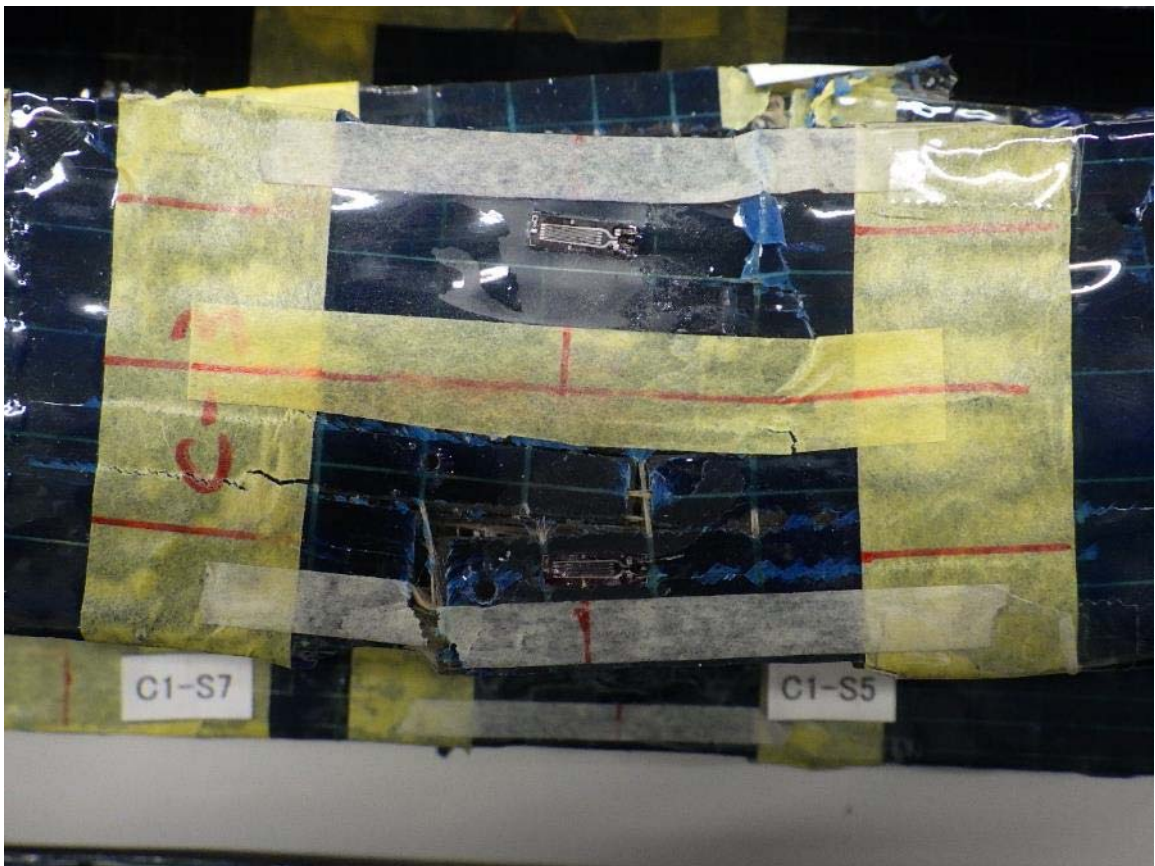


写真-付 4.21 曲げ载荷試験後における CFRP の破壊状況 (試験体 C-b 幅方向 表)

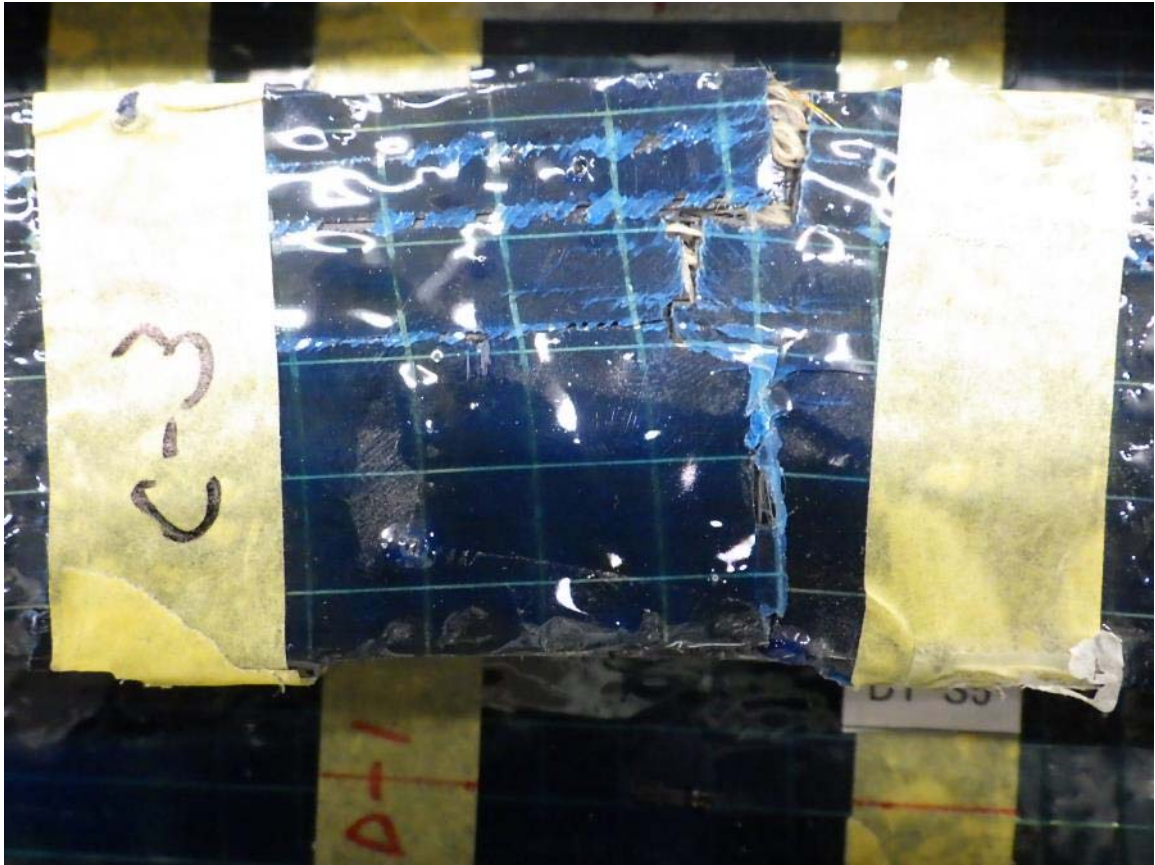


写真-付 4.22 曲げ載荷試験後における CFRP の破壊状況 (試験体 C-b 幅方向 裏)



写真-付 4.23 曲げ載荷試験後における CFRP の破壊状況 (試験体 D-b 幅方向 表)



写真-付 4.24 曲げ荷重試験後における CFRP の破壊状況 (試験体 D-b 幅方向 裏)

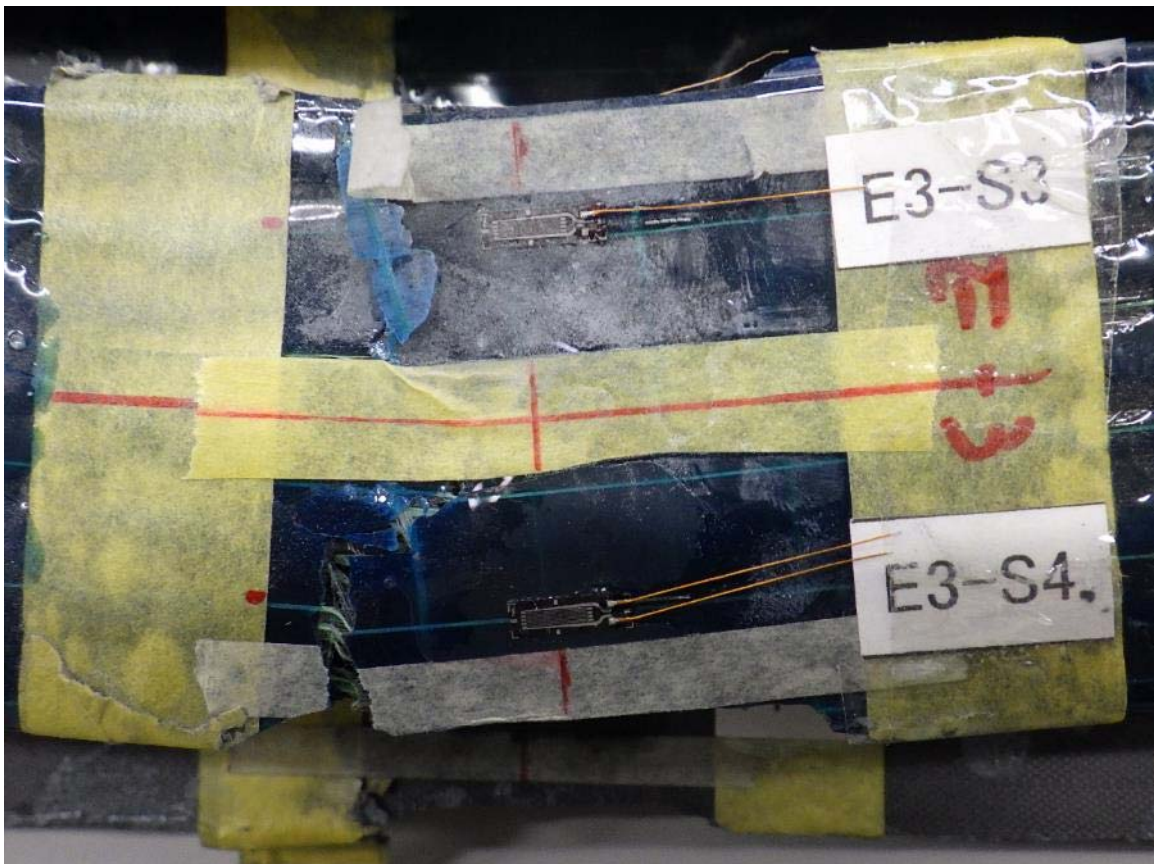


写真-付 4.25 曲げ荷重試験後における CFRP の破壊状況 (試験体 E-b 幅方向 表)



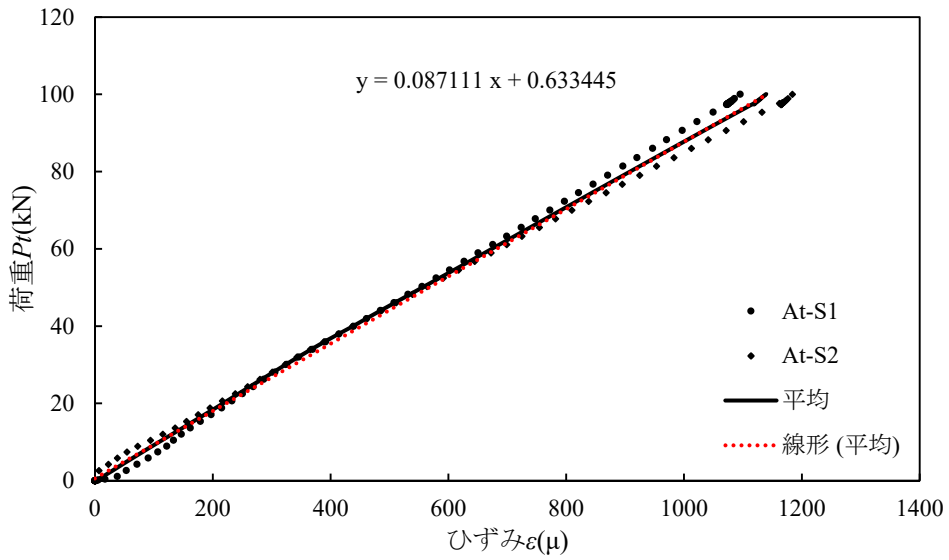
写真-付 4.26 曲げ載荷試験後における CFRP の破壊状況 (試験体 E-b 幅方向 裏)



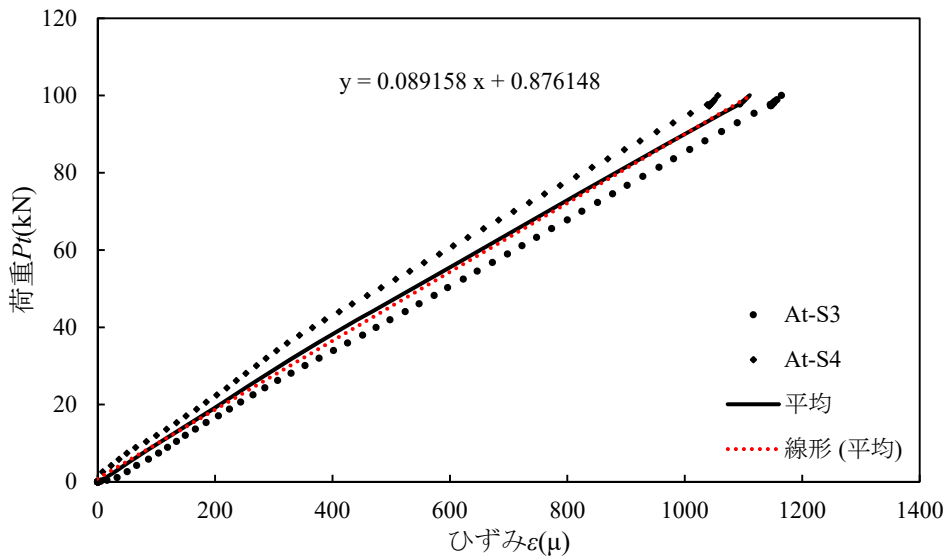
写真-付 4.27 曲げ載荷試験後における CFRP の破壊状況 (試験体 F-b 幅方向 表)



写真-付 4.28 曲げ載荷試験後における CFRP の破壊状況 (試験体 F-b 幅方向 裏)

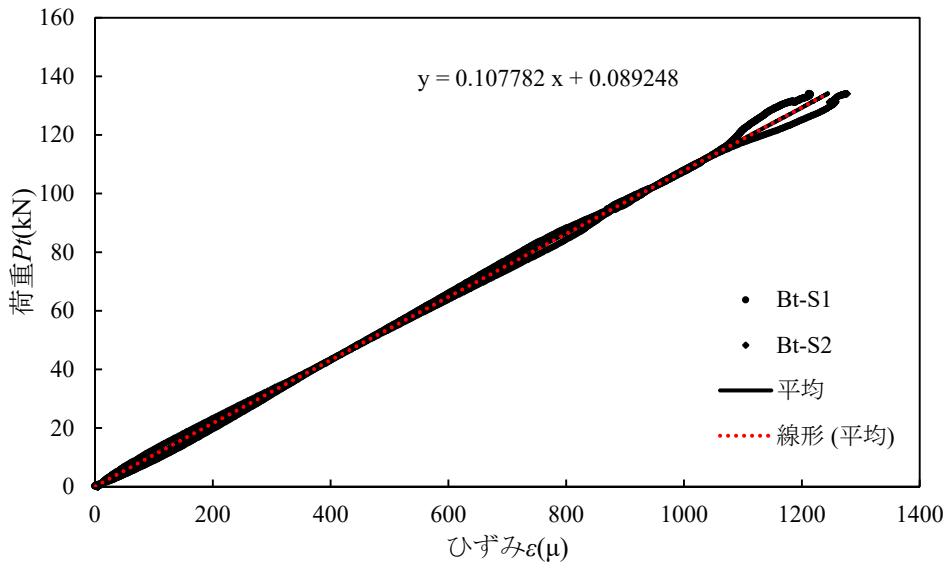


(a)計測位置 S1, S2

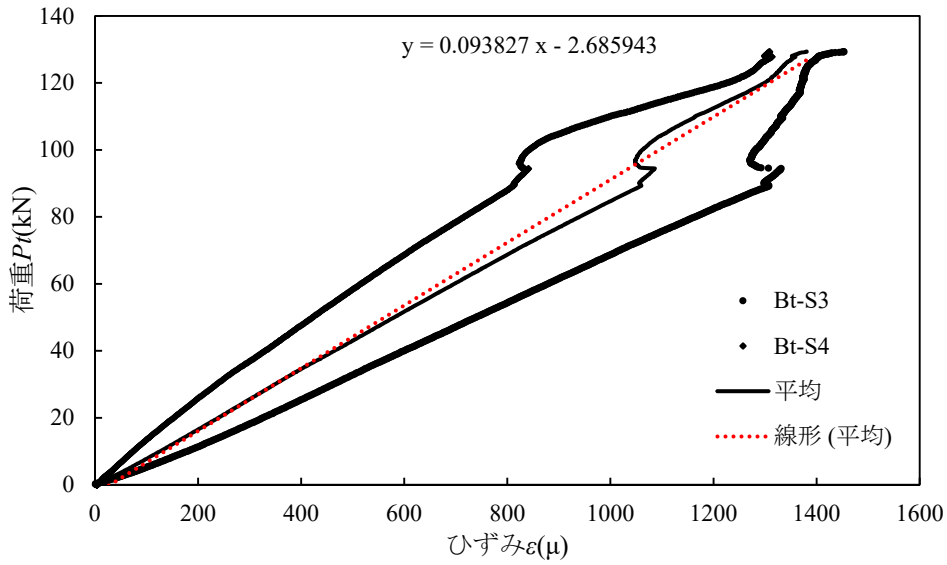


(b)計測位置 S3, S4

図-付 4.13 引張載荷試験における鉛直荷重－ひずみ関係と近似直線（鋼材部）（試験体 A-t）

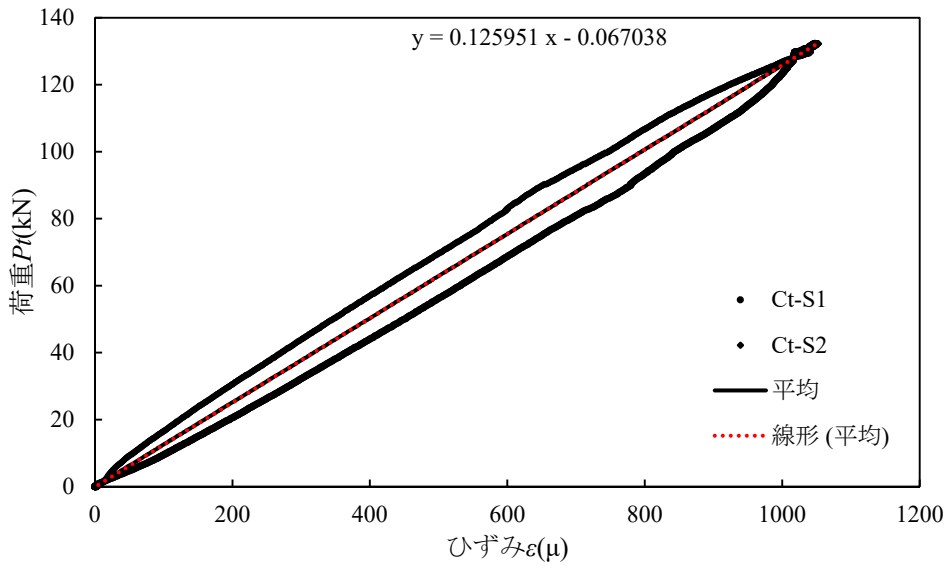


(a)計測位置 S1, S2

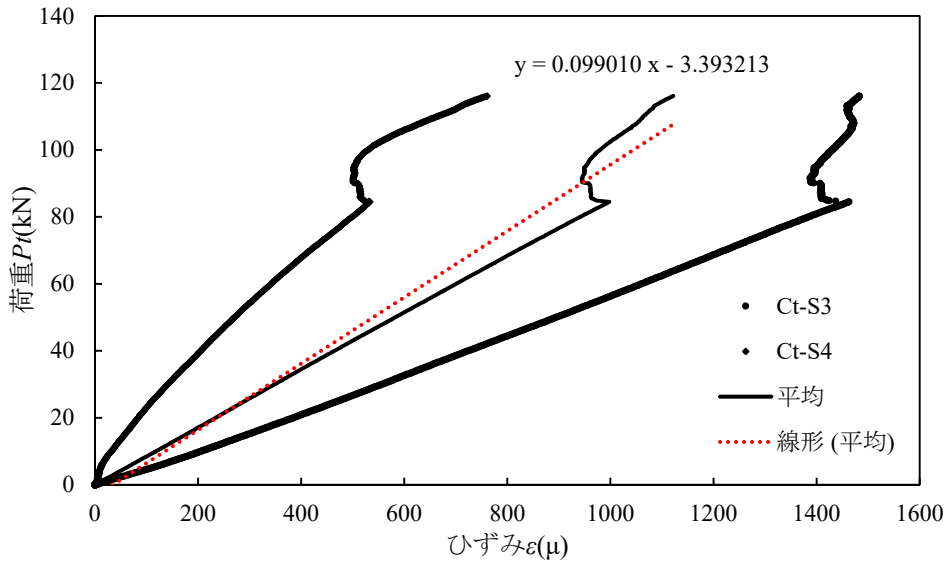


(b)計測位置 S3, S4

図-付 4.14 引張載荷試験における鉛直荷重－ひずみ関係と近似直線（鋼材部）（試験体 B-t）

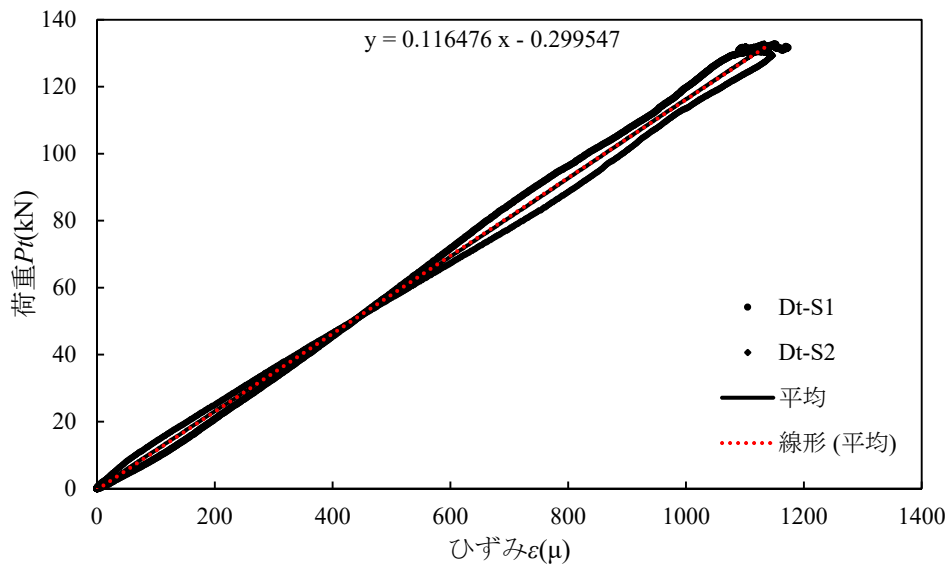


(a)計測位置 S1, S2

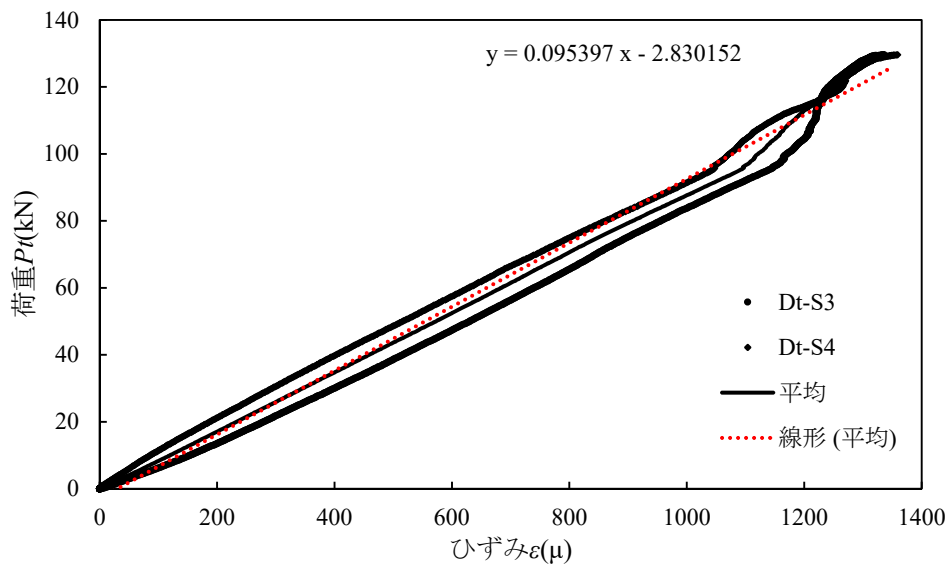


(b)計測位置 S3, S4

図-付 4.15 引張載荷試験における鉛直荷重－ひずみ関係と近似直線（鋼材部）（試験体 C-t）

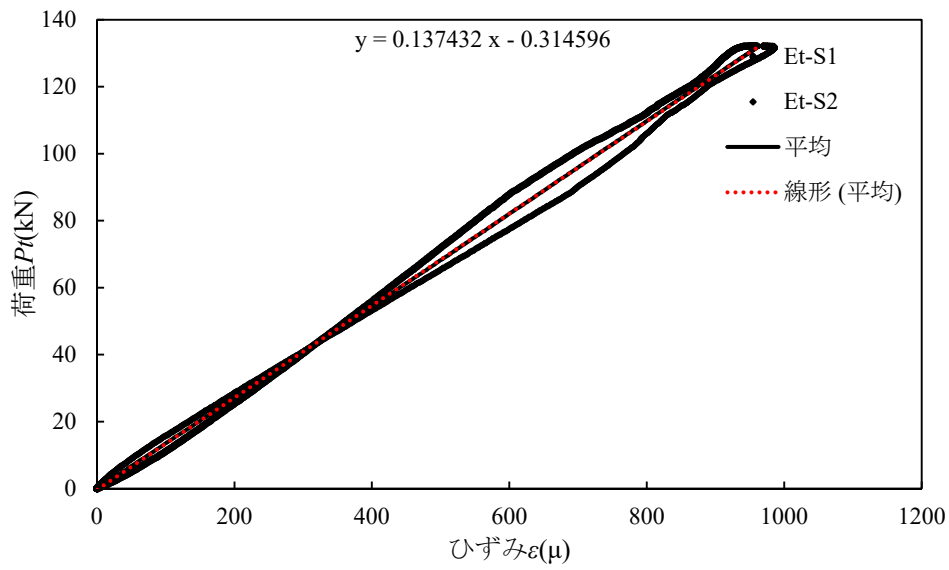


(a)計測位置 S1, S2

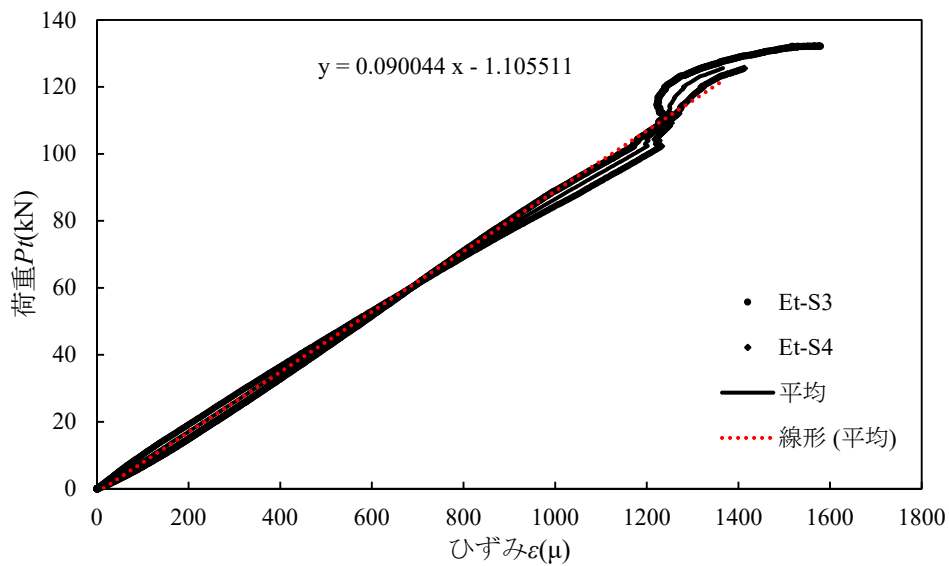


(b)計測位置 S3, S4

図-付 4.16 引張載荷試験における鉛直荷重－ひずみ関係と近似直線（鋼材部）（試験体 D-t）

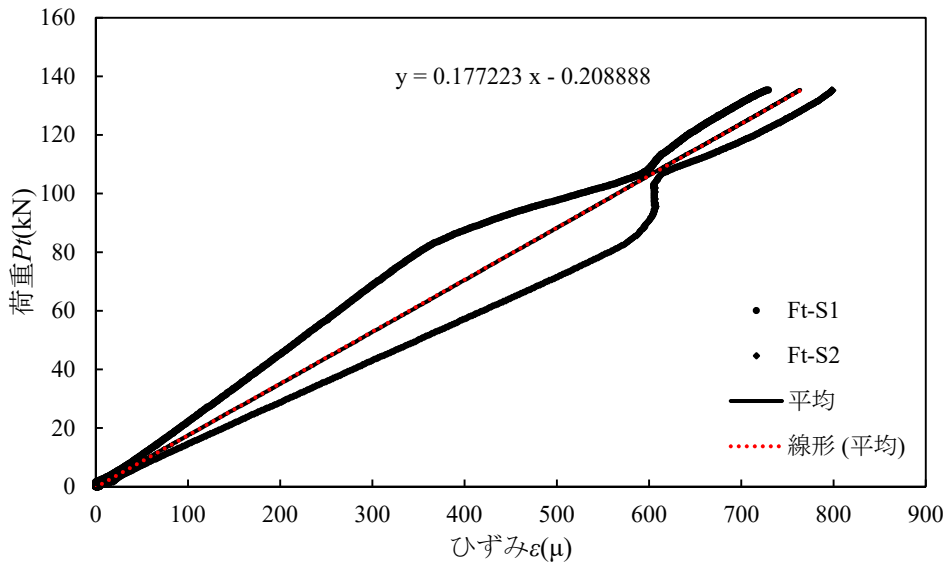


(a)計測位置 S1, S2

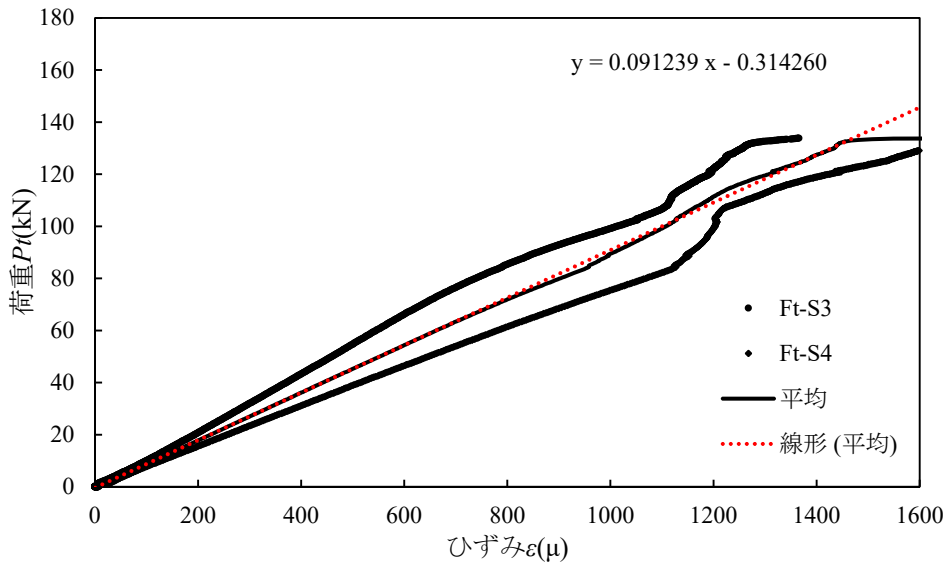


(b)計測位置 S3, S4

図-付 4.17 引張載荷試験における鉛直荷重－ひずみ関係と近似直線（鋼材部）（試験体 E-t）

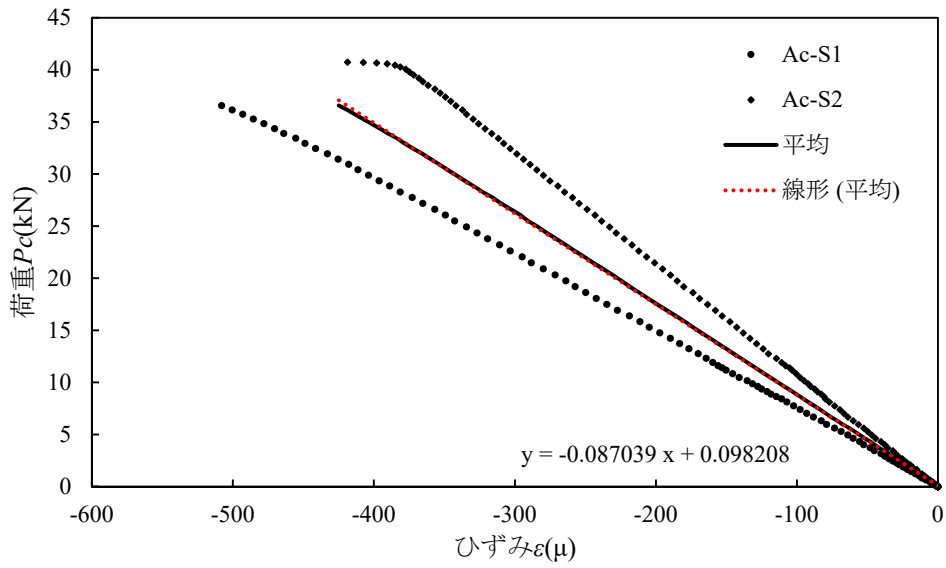


(a)計測位置 S1, S2

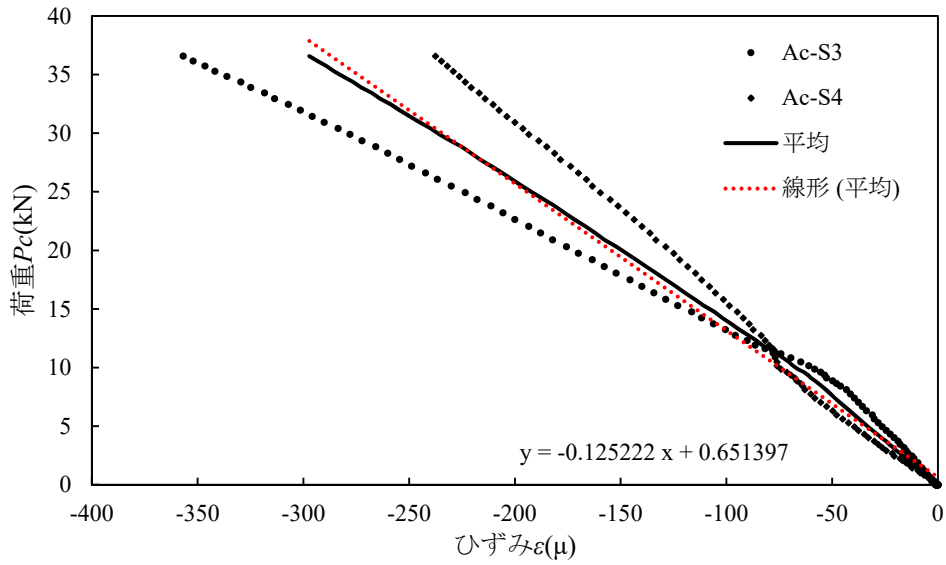


(b)計測位置 S3, S4

図-付 4.18 引張載荷試験における鉛直荷重－ひずみ関係と近似直線（鋼材部）（試験体 F-t）

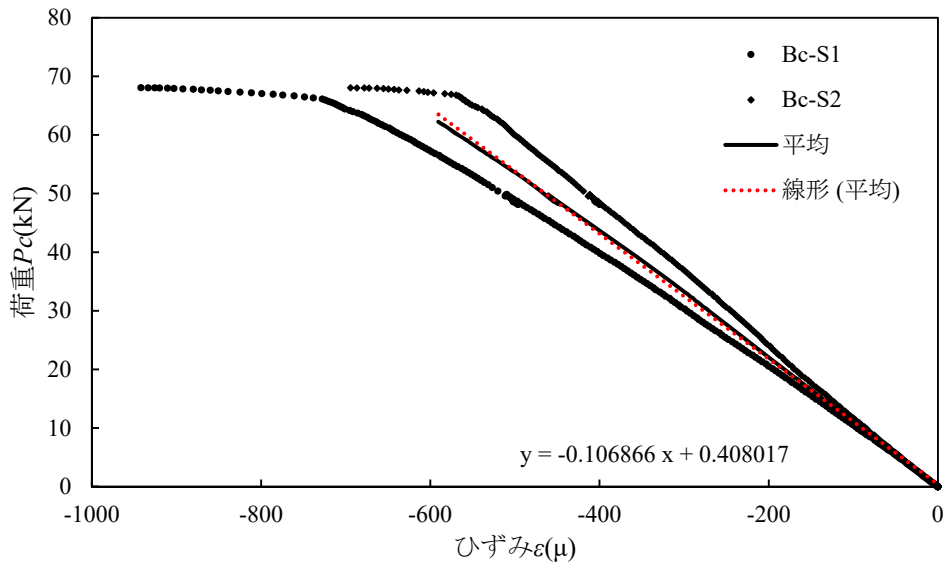


(a)計測位置 S1, S2

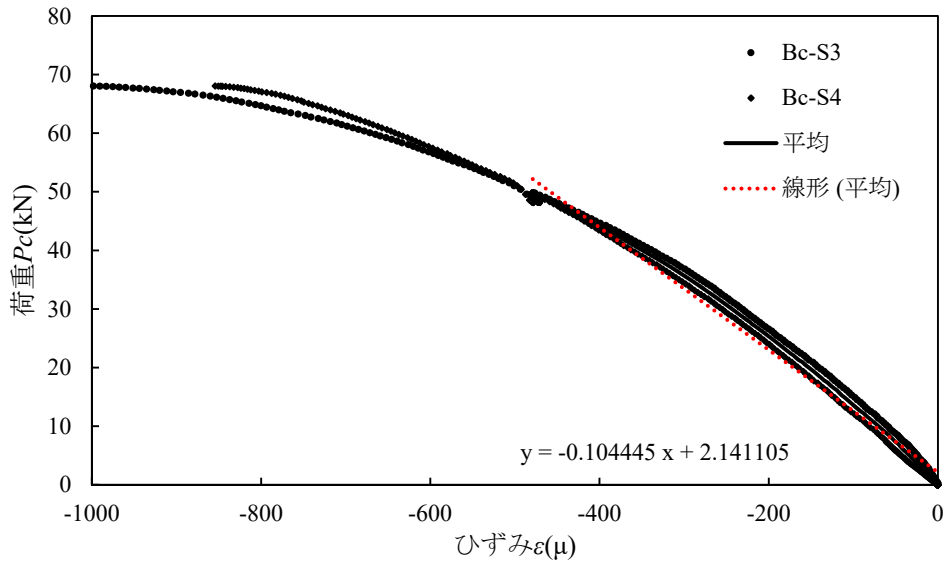


(b)計測位置 S3, S4

図-付 4.19 圧縮載荷試験における鉛直荷重－ひずみ関係と近似直線（鋼材部）（試験体 A-c）

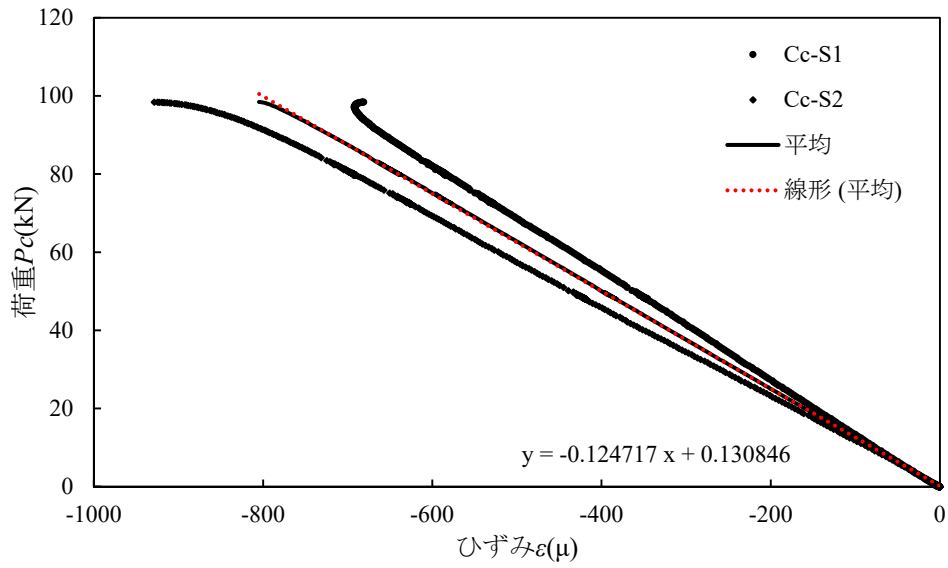


(a)計測位置 S1, S2

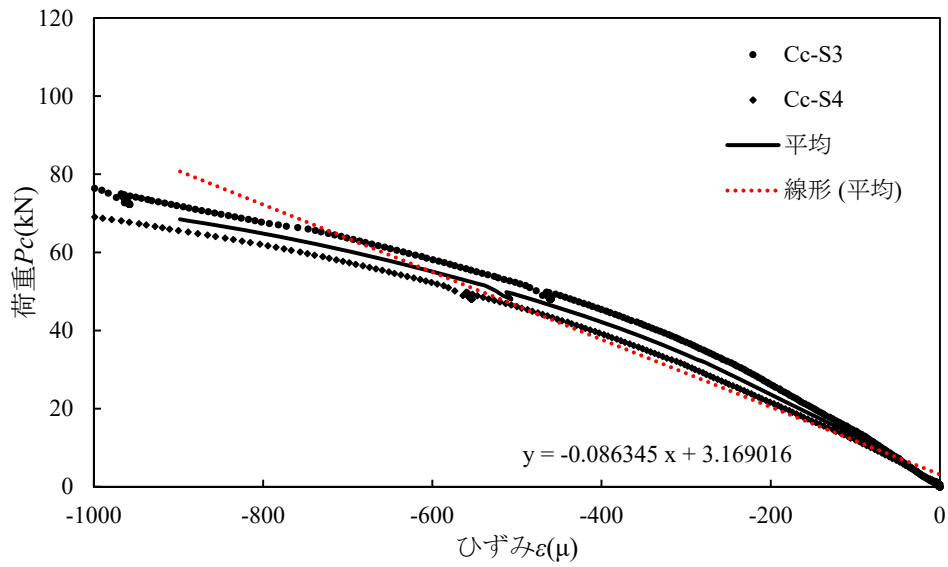


(b)計測位置 S3, S4

図-付 4.20 圧縮載荷試験における鉛直荷重－ひずみ関係と近似直線（鋼材部）（試験体 B-c）

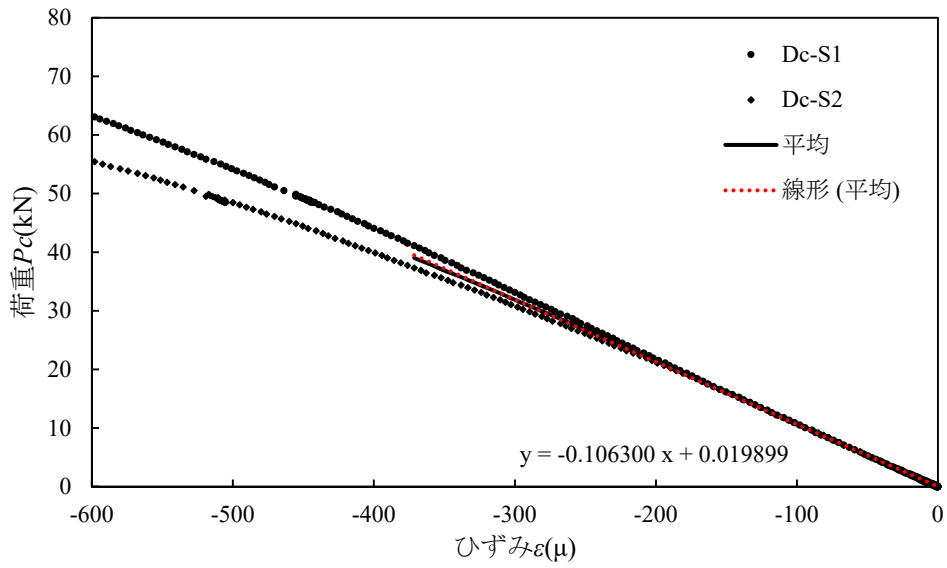


(a)計測位置 S1, S2

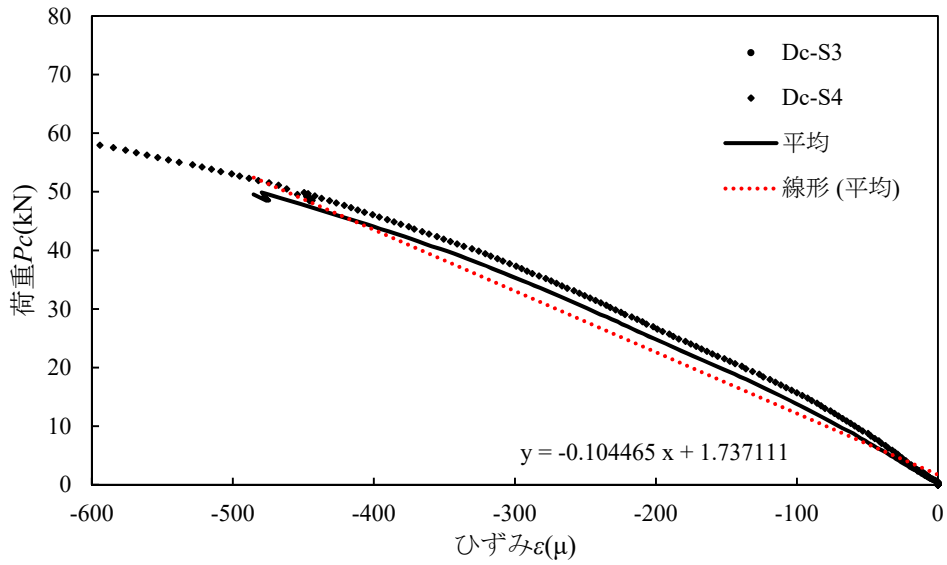


(b)計測位置 S3, S4

図-付 4.21 圧縮載荷試験における鉛直荷重－ひずみ関係と近似直線（鋼材部）（試験体 C-c）

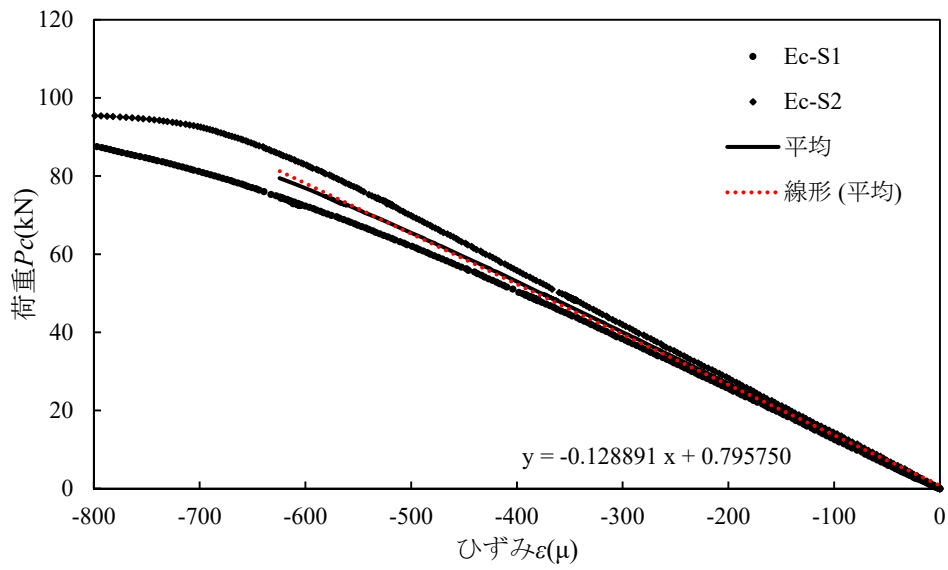


(a)計測位置 S1, S2

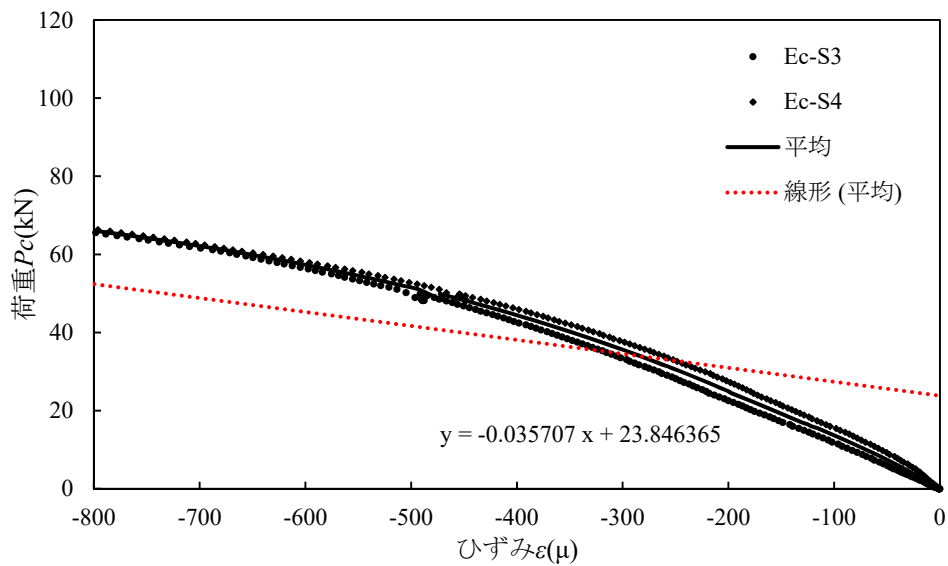


(b)計測位置 S3, S4

図-付 4.22 圧縮載荷試験における鉛直荷重－ひずみ関係と近似直線（鋼材部）（試験体 D-c）

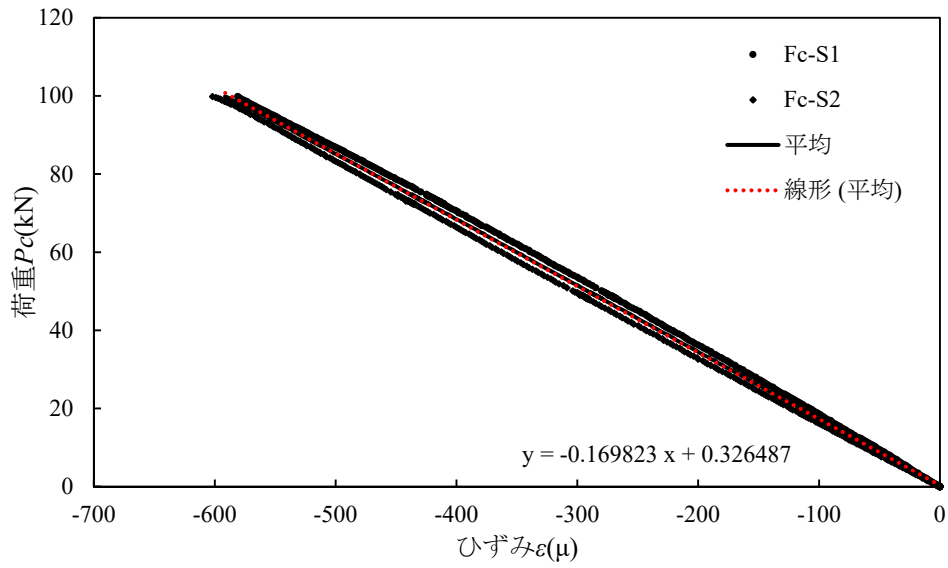


(a)計測位置 S1, S2

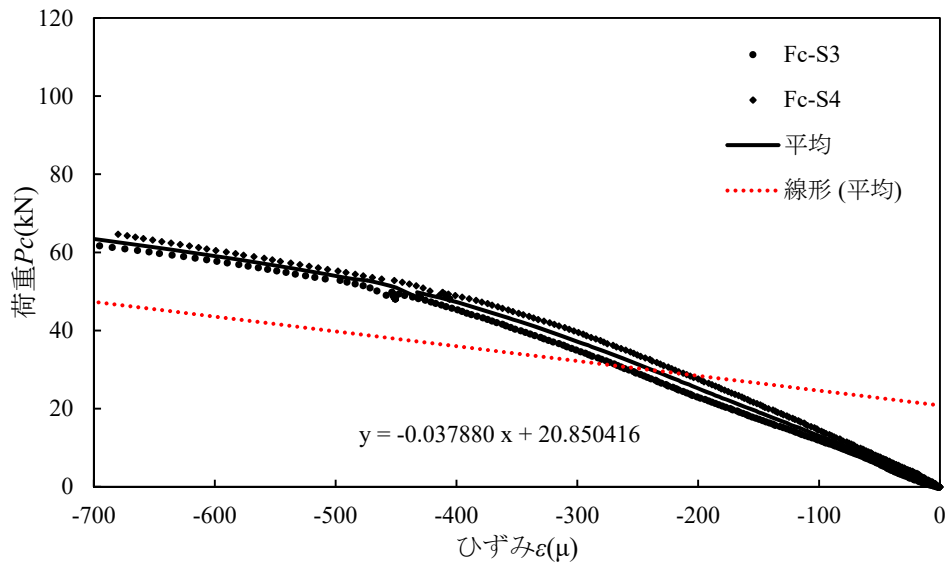


(b)計測位置 S3, S4

図-付 4.23 圧縮載荷試験における鉛直荷重－ひずみ関係と近似直線（鋼材部）（試験体 E-c）



(a)計測位置 S1, S2



(b)計測位置 S3, S4

図-付 4.24 圧縮載荷試験における鉛直荷重－ひずみ関係と近似直線（鋼材部）（試験体 F-c）

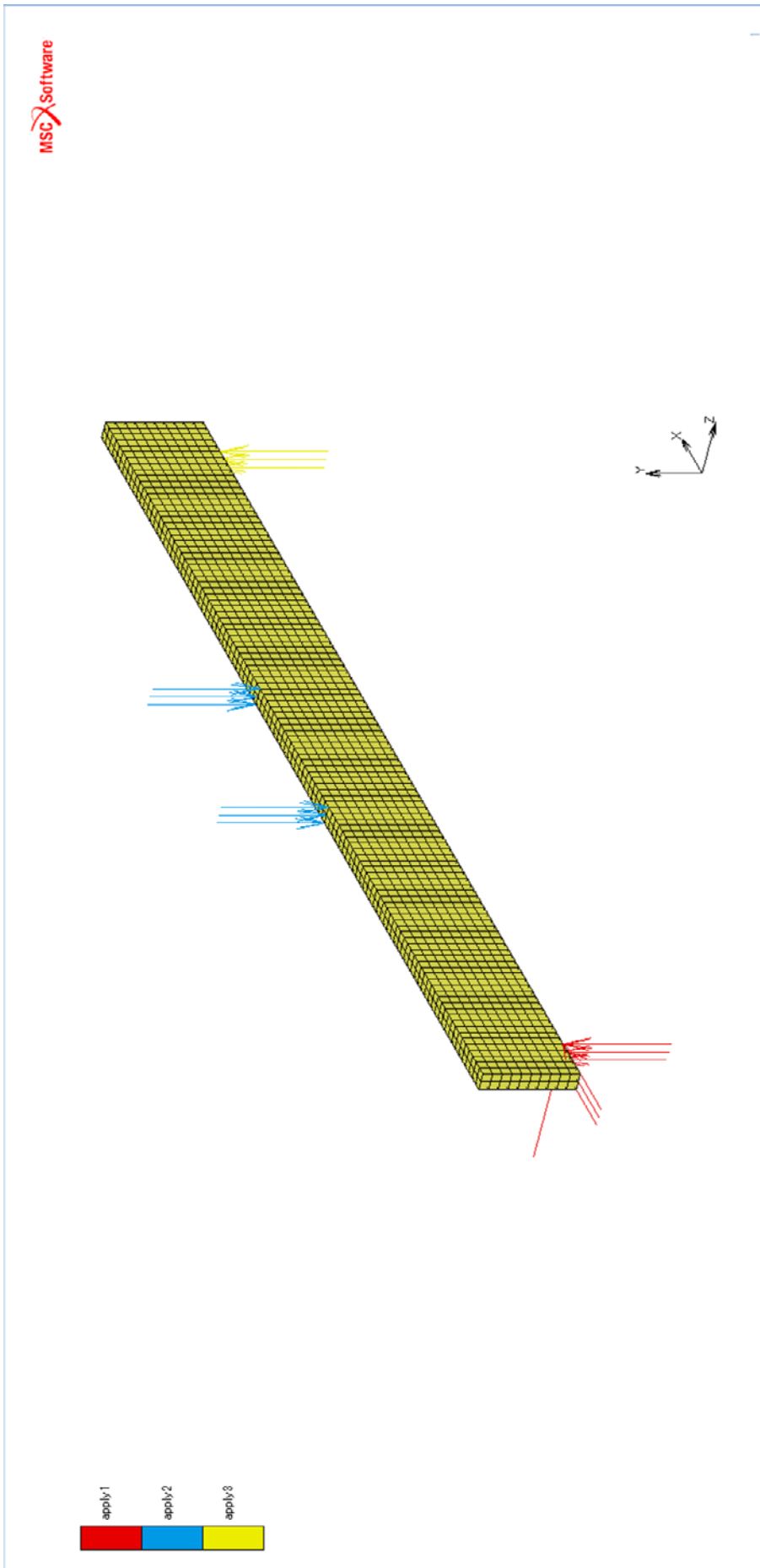


図-付 4.25 試験体 A-b の解析モデル

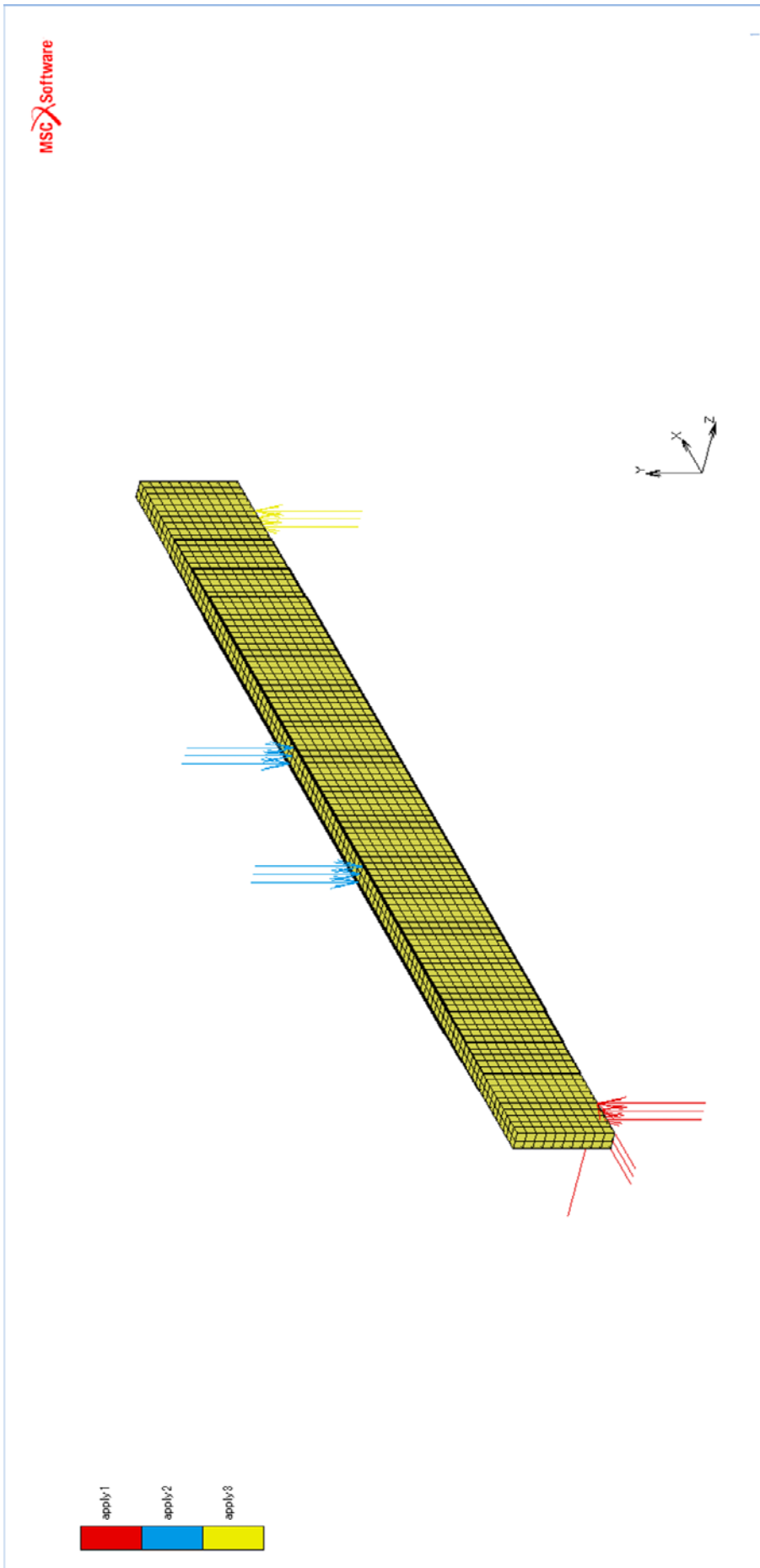


図-付 4.26 試験体 B-b の解析モデル

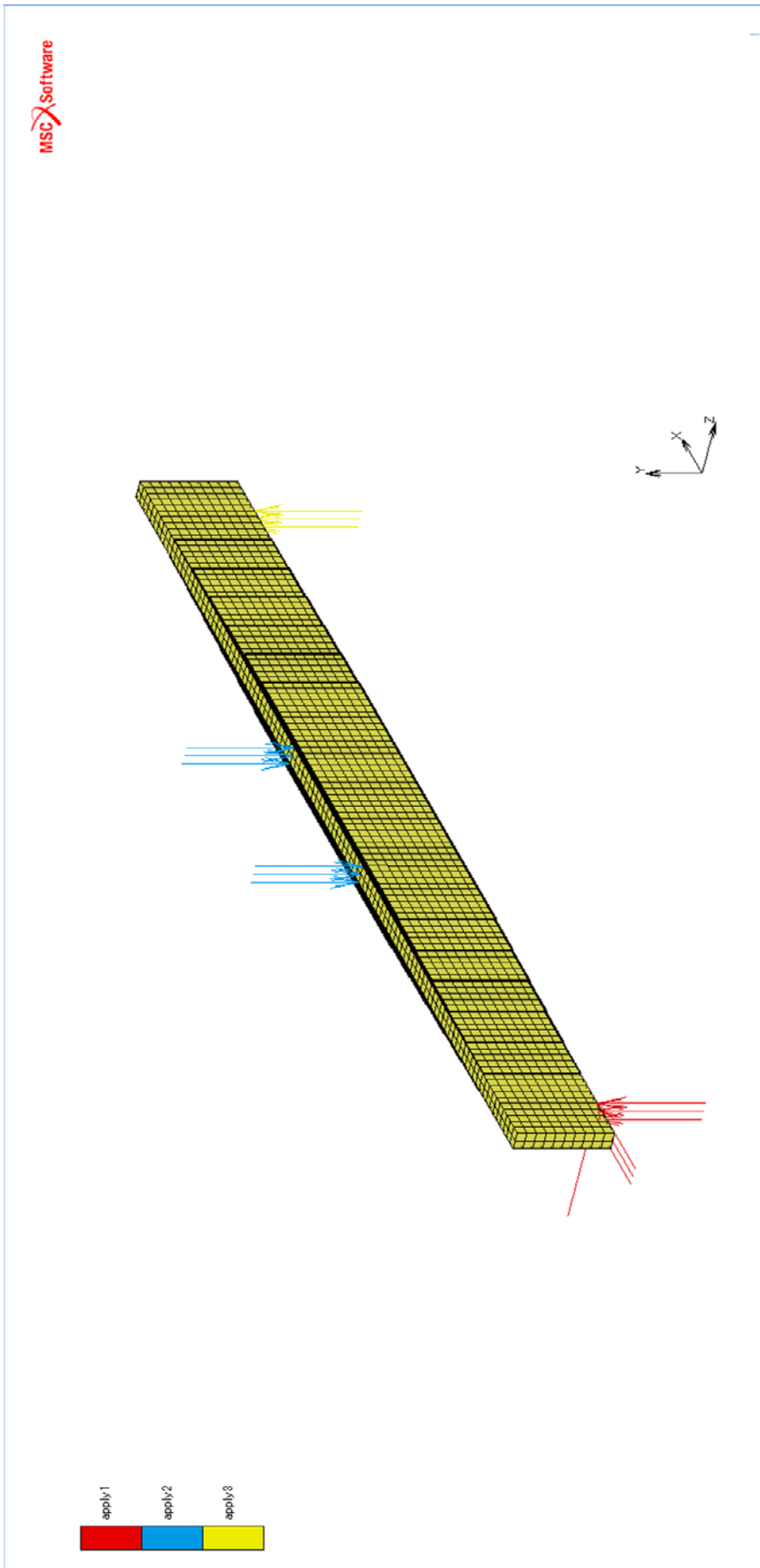


図-付 4.27 試験体 C-b の解析モデル

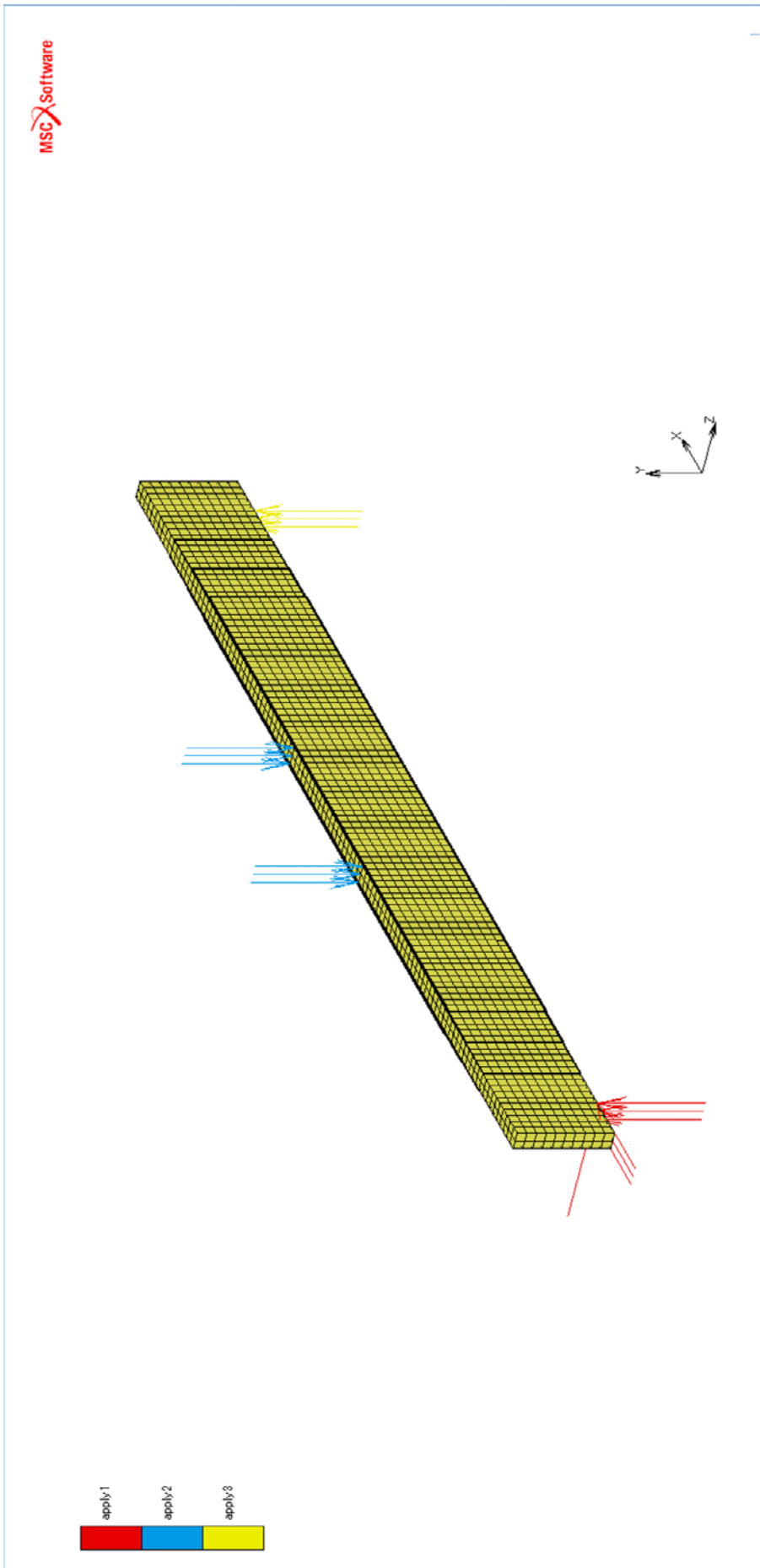


図-付 4.28 試験体 D-b の解析モデル

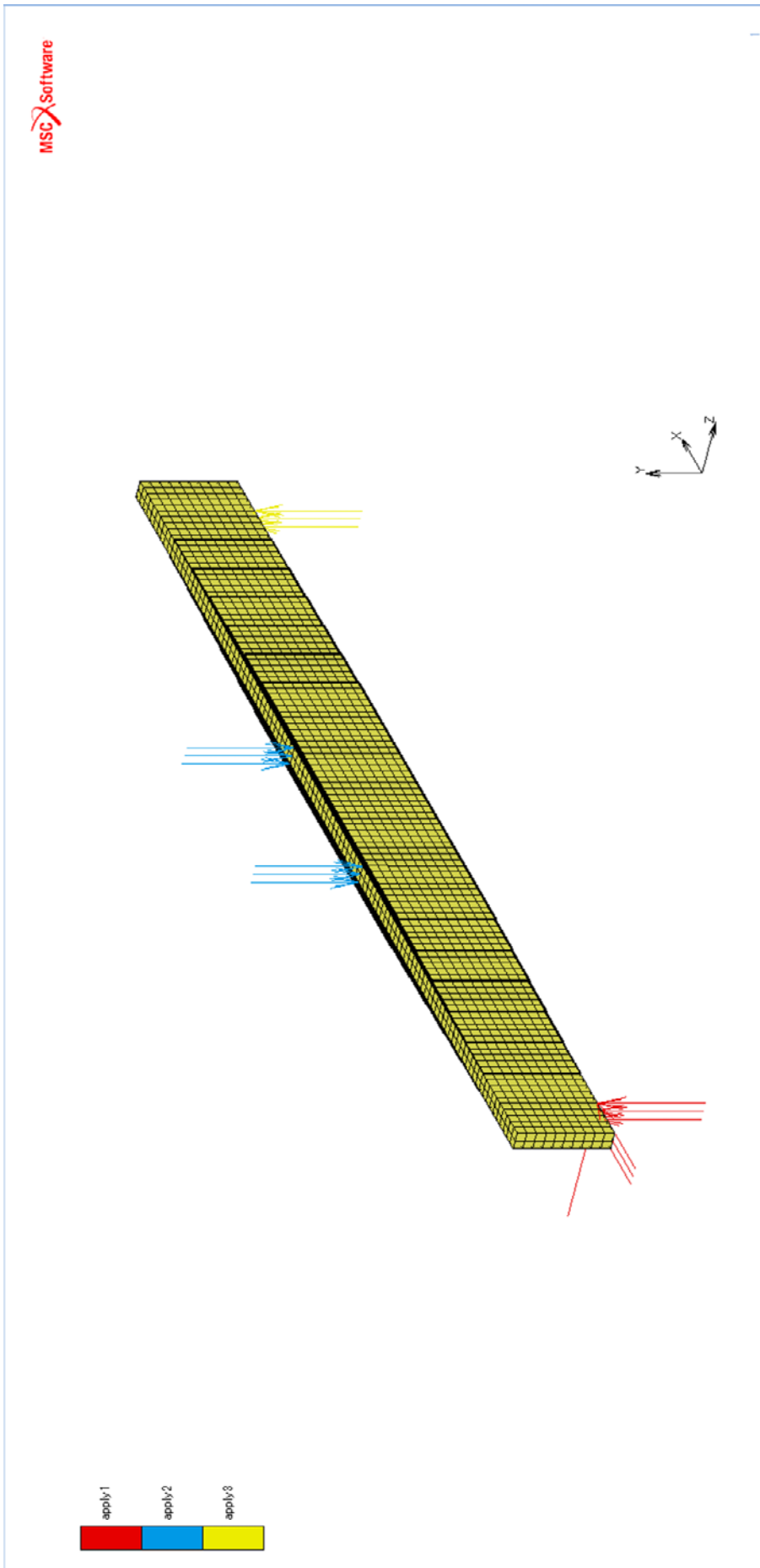


図-付 4.29 試験体 E-b の解析モデル

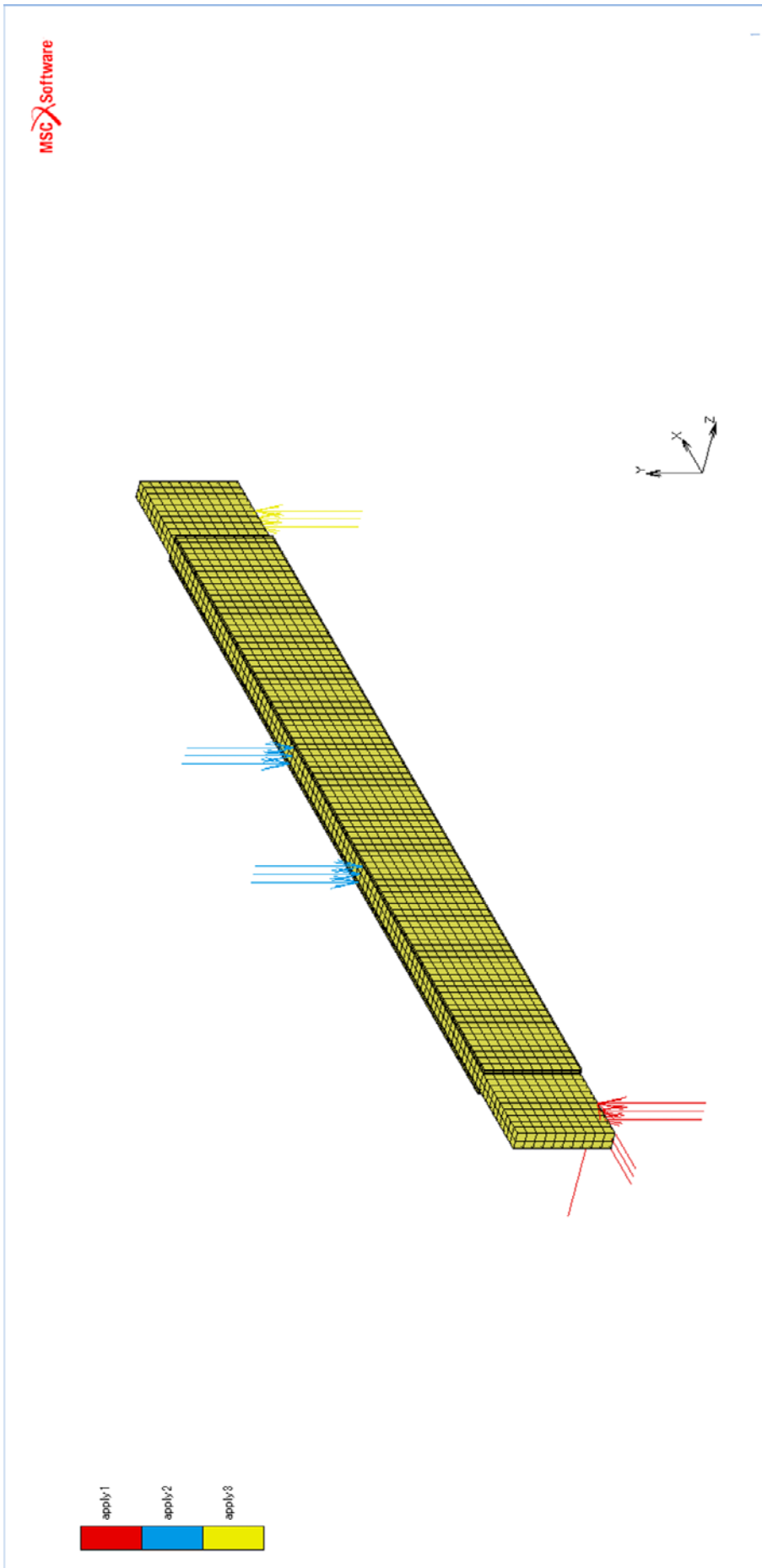


図-付 4.30 試験体 F-b の解析モデル

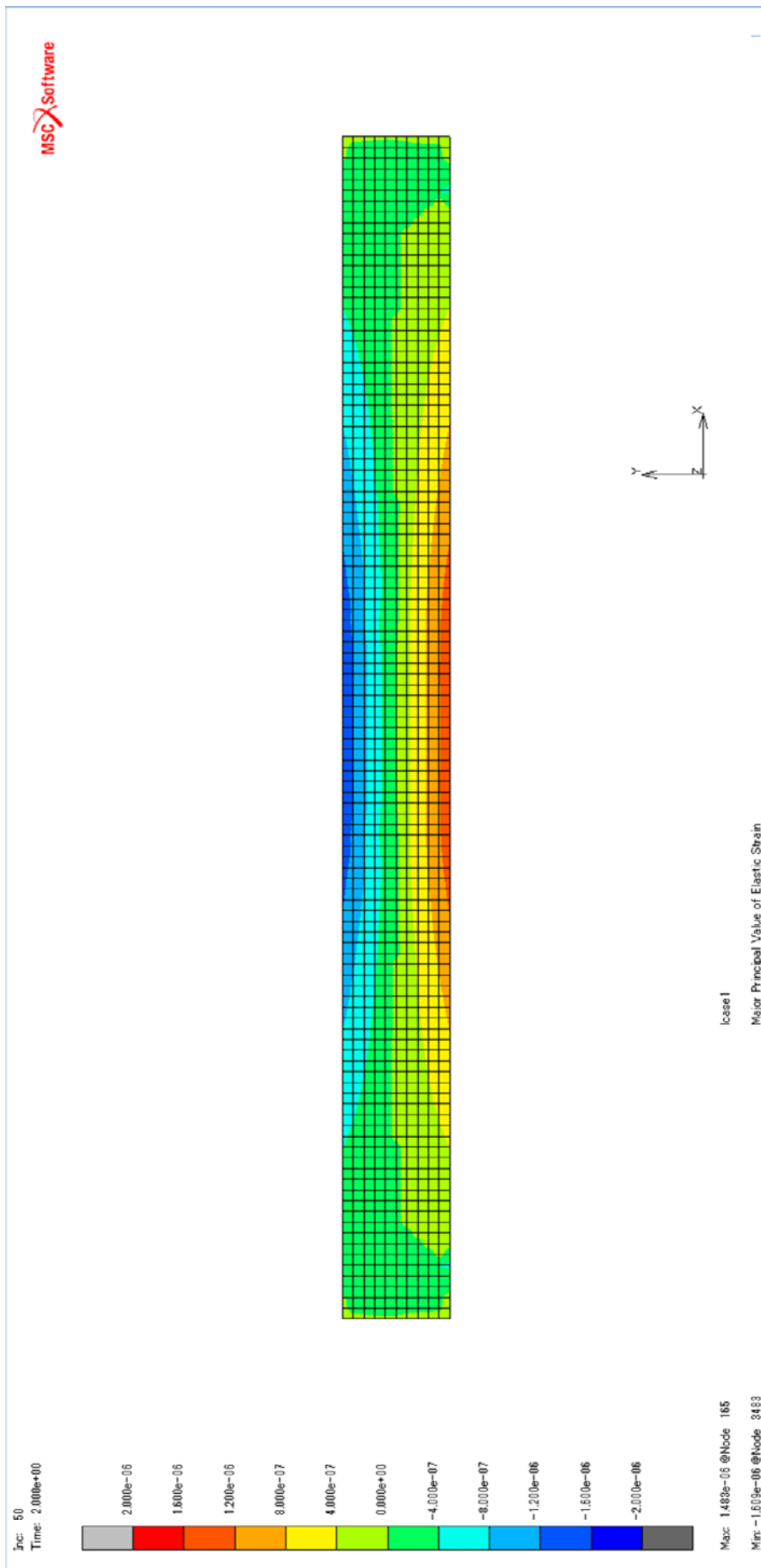


図-付 4.31 試験体 A-b の解析結果（鋼材におけるひずみのコンター図）

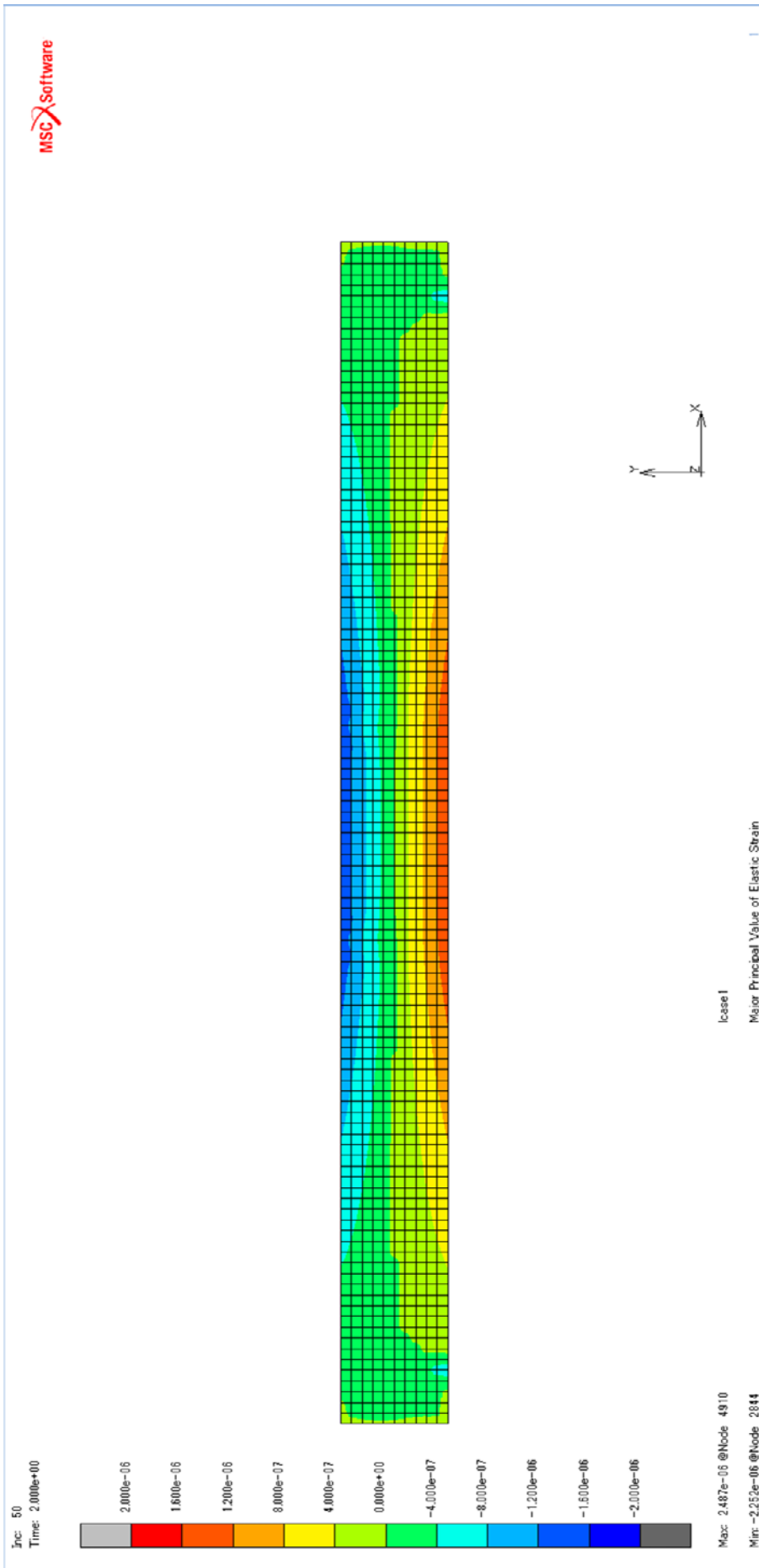


図-付 4.32 試験体 B-b の解析結果（鋼材におけるひずみのコンター図）

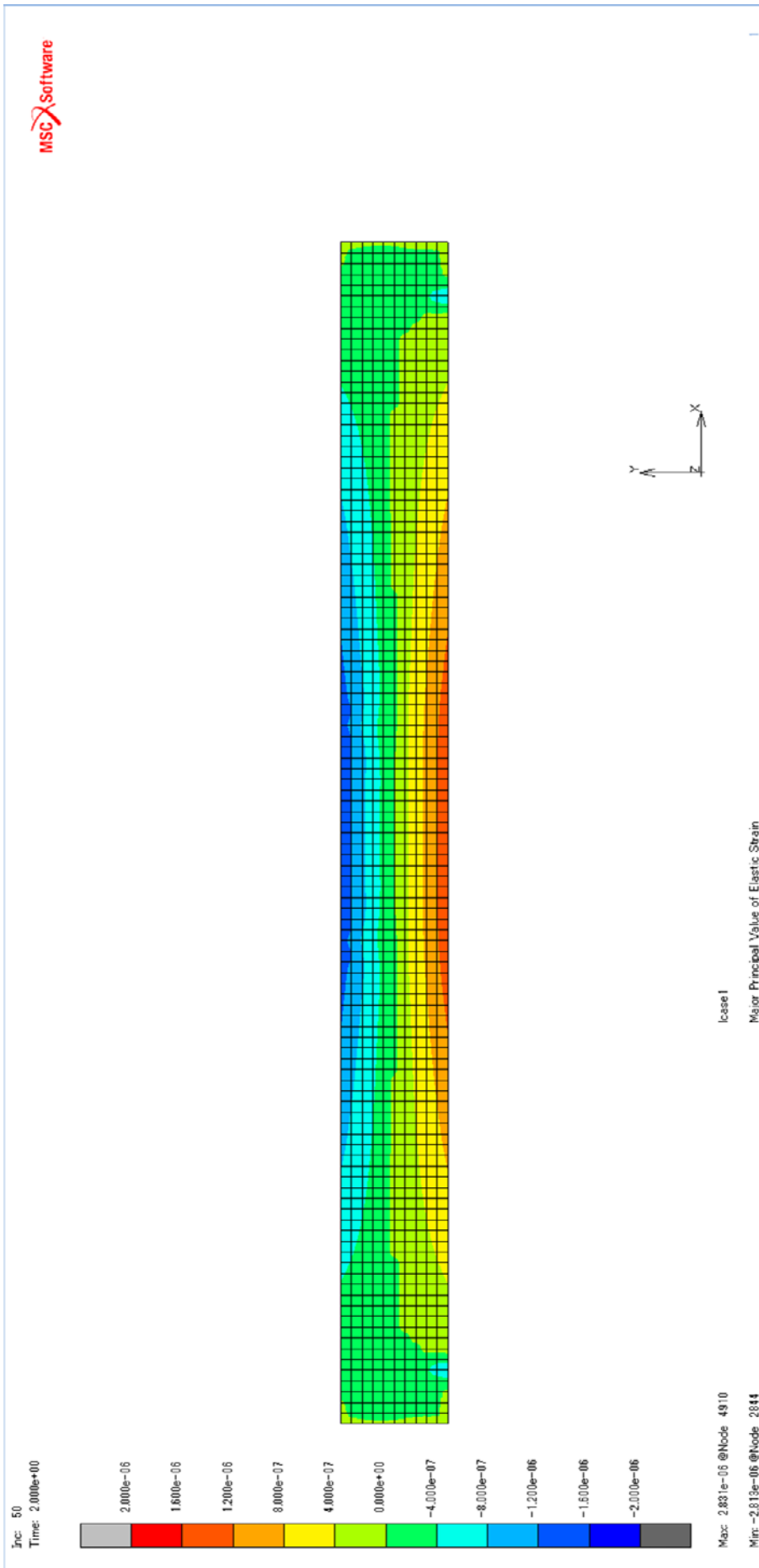


図-付 4.33 試験体 C-b の解析結果（鋼材におけるひずみのコンター図）

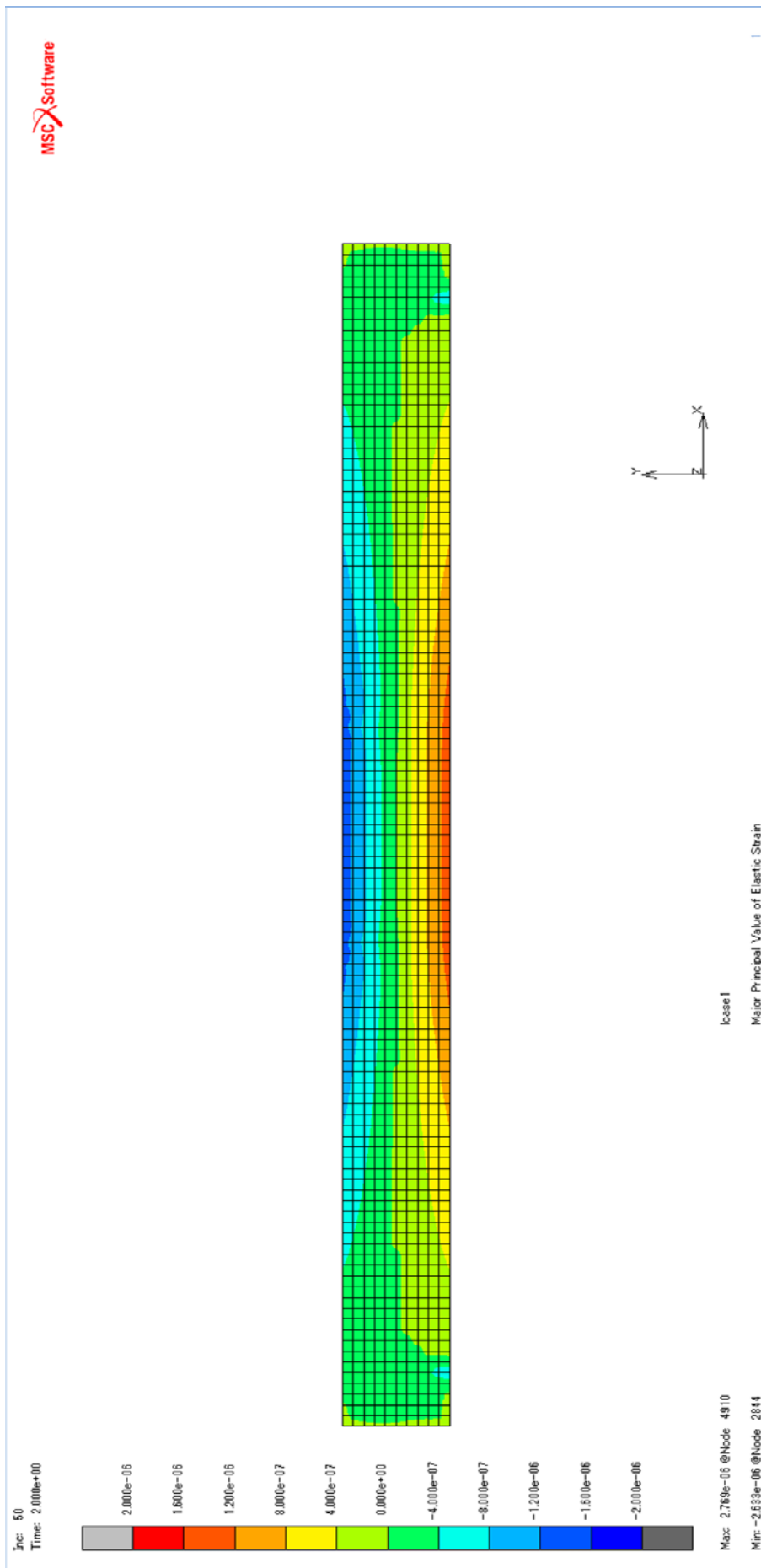


図-付 4.34 試験体 D-b の解析結果（鋼材におけるひずみのコンター図）

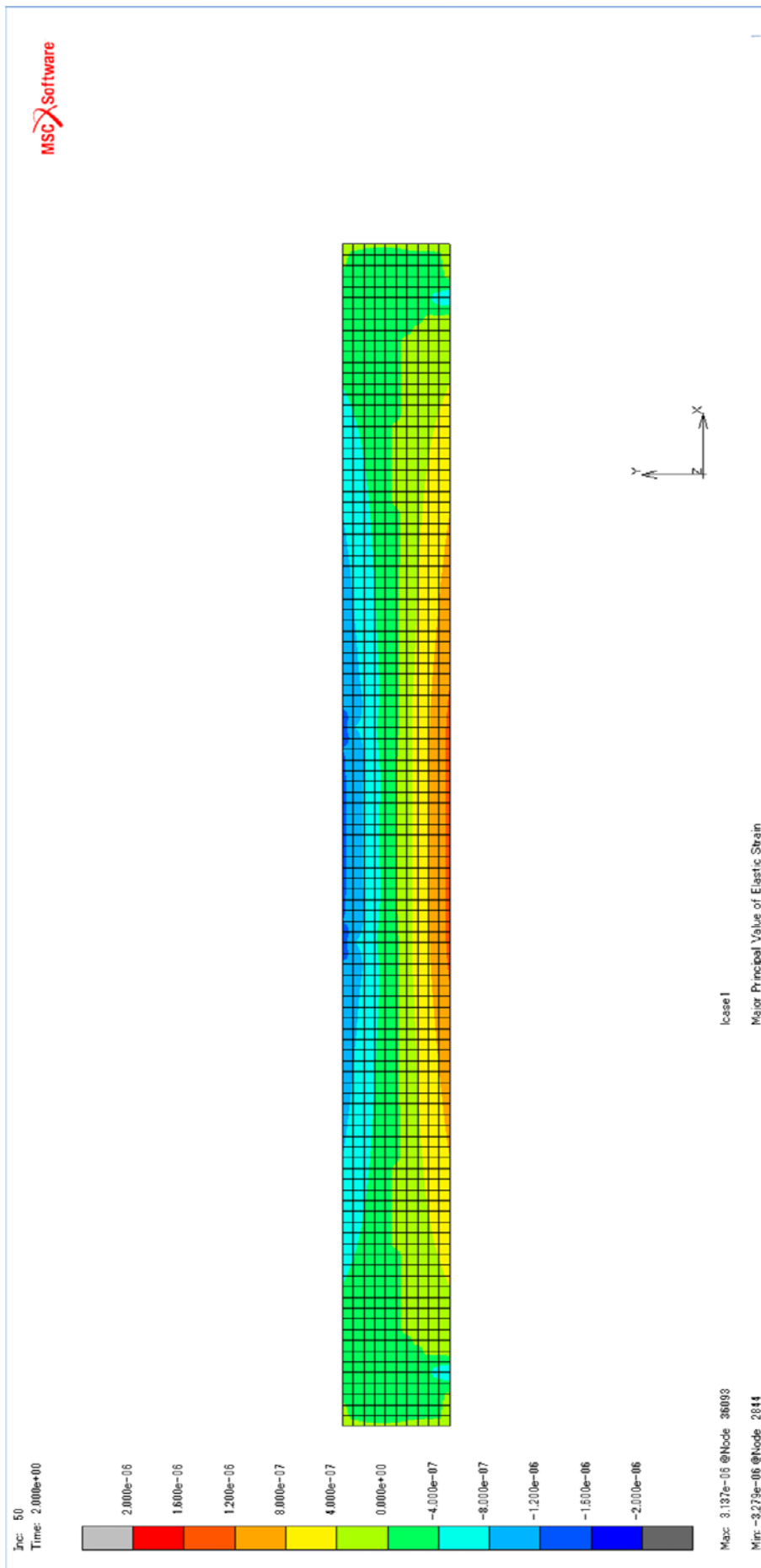


図-付 4.35 試験体 E-b の解析結果（鋼材におけるひずみのコンター図）

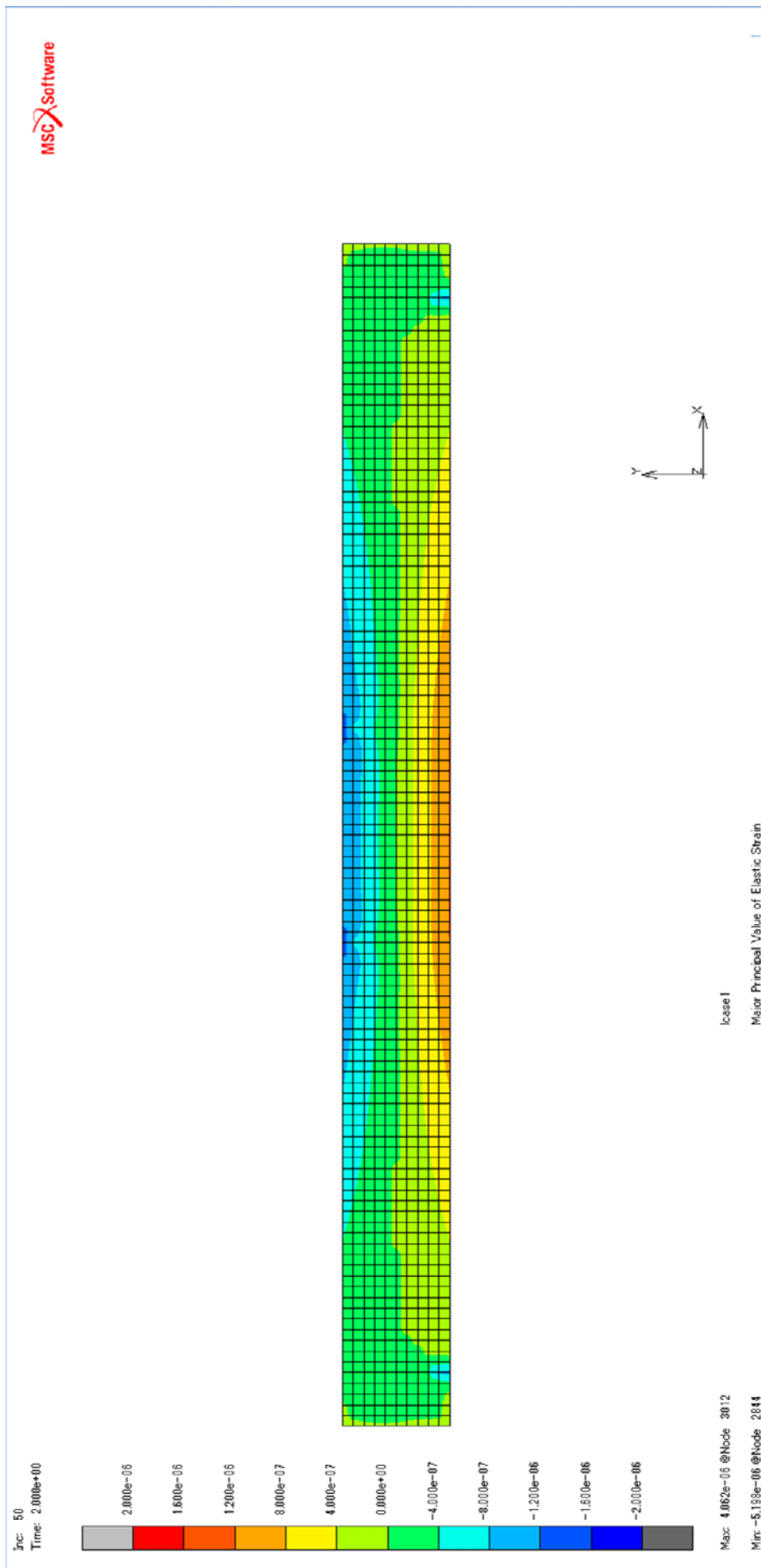


図-付 4.36 試験体 F-b の解析結果 (鋼材におけるひずみのコンター図)

【第5章の図表および写真】

表-付 5.1 試験体の製作寸法測定記録（その1）

寸法測定記録 計測日：令和3年9月1日 川村弘昌 No.1

L1~L4: ± 2
 B1, B2: ± 2.0
 H1, H2: ± 2.0
 t1, t2: ± 0.45
 δ1, δ2: ± 1.8
 ボルト孔位置:
 型板による確認
 単位: mm

		部材長さ				フランジ幅		桁高		フランジ板厚		圧縮材の曲がり	
		L1	L2	L3	L4	B1	B2	H1	H2	t1	t2	δ1	δ2
A-1	規定値	1764.0	1764.0	1764.0	1764.0	100.0	100.0	158.0	158.0	9.0	9.0	50.0	50.0
	計測値	1764.5	1764.5	1764.5	1764.5	99.7	99.6	159.0	160.9	9.1	9.1	48.5	48.5
	誤差	0.5	0.5	0.5	0.5	-0.3	-0.4	1.0	2.9	0.1	0.1	-1.5	-1.5
A-2	規定値	1764.0	1764.0	1764.0	1764.0	100.0	100.0	158.0	158.0	9.0	9.0	50.0	50.0
	計測値	1764.0	1764.5	1764.5	1765.0	99.8	99.8	160.2	158.4	9.2	9.2	50.0	50.0
	誤差	0.0	0.5	0.5	1.0	-0.2	-0.2	2.2	0.4	0.2	0.2	0.0	0.0
B-1	規定値	1764.0	1764.0	1764.0	1764.0	100.0	100.0	158.0	158.0	9.0	9.0	50.0	50.0
	計測値	1764.0	1764.5	1764.5	1764.0	99.7	99.8	160.0	157.8	9.2	9.2	50.0	52.0
	誤差	0.0	0.5	0.5	0.0	-0.3	-0.2	2.0	-0.2	0.2	0.2	0.0	2.0
B-2	規定値	1764.0	1764.0	1764.0	1764.0	100.0	100.0	158.0	158.0	9.0	9.0	50.0	50.0
	計測値	1764.0	1764.5	1764.5	1765.0	99.7	99.7	160.2	158.2	9.2	9.2	50.0	50.0
	誤差	0.0	0.5	0.5	1.0	-0.3	-0.3	2.2	0.2	0.2	0.2	0.0	0.0

日本橋梁株式会社

表-付 5.2 試験体の製作寸法測定記録 (その2)

寸法測定記録

計測日: 令和3年9月1日

川村弘昌

No. 2

L1~L4: ± 2
 B1, B2: ± 2.0
 H1, H2: ± 2.0
 t1, t2: ± 0.45
 δ1, δ2: ± 1.8
 ボルト孔位置:
 型板による確認
 単位: mm

		部材長さ				フランジ幅		桁高		フランジ板厚		圧縮材の曲がり	
		L1	L2	L3	L4	B1	B2	H1	H2	t1	t2	δ1	δ2
C-1	規定値	1764.0	1764.0	1764.0	1764.0	100.0	100.0	158.0	158.0	9.0	9.0	50.0	50.0
	計測値	1764.5	1764.5	1764.5	1764.5	99.6	99.8	160.5	157.7	9.2	9.2	50.0	49.0
	誤差	0.5	0.5	0.5	0.5	-0.4	-0.2	2.5	-0.3	0.2	0.2	0.0	-1.0
C-2	規定値	1764.0	1764.0	1764.0	1764.0	100.0	100.0	158.0	158.0	9.0	9.0	50.0	50.0
	計測値	1764.0	1764.5	1764.5	1765.0	99.7	99.8	158.1	159.9	9.2	9.2	49.0	50.5
	誤差	0.0	0.5	0.5	1.0	-0.3	-0.2	0.1	1.9	0.2	0.2	-1.0	0.5
D-1	規定値	1764.0	1764.0	1764.0	1764.0	100.0	100.0	158.0	158.0	9.0	9.0	50.0	50.0
	計測値	1765.0	1764.5	1764.5	1764.0	99.9	99.8	157.9	160.8	9.2	9.2	50.0	50.0
	誤差	1.0	0.5	0.5	0.0	-0.1	-0.2	-0.1	2.8	0.2	0.2	0.0	0.0
D-2	規定値	1764.0	1764.0	1764.0	1764.0	100.0	100.0	158.0	158.0	9.0	9.0	50.0	50.0
	計測値	1764.0	1764.5	1764.0	1764.5	99.9	99.9	160.6	158.2	9.2	9.2	49.0	50.0
	誤差	0.0	0.5	0.0	0.5	-0.1	-0.1	2.6	0.2	0.2	0.2	-1.0	0.0

日本橋梁株式会社

表-付 5.3 試験体の製作寸法測定記録 (その3)

寸法測定記録

計測日: 令和3年9月1日

川村弘昌

No. 3

L1~L4: ± 2
 B1, B2: ± 2.0
 H1, H2: ± 2.0
 t1, t2: ± 0.45
 δ1, δ2: ± 1.8
 ボルト孔位置:
 型板による確認
 単位: mm

		部材長さ				フランジ幅		桁高		フランジ板厚		圧縮材の曲がり	
		L1	L2	L3	L4	B1	B2	H1	H2	t1	t2	δ1	δ2
E-1	規定値	1764.0	1764.0	1764.0	1764.0	100.0	100.0	158.0	158.0	9.0	9.0	50.0	50.0
	計測値	1764.0	1764.0	1764.0	1764.5	99.2	99.7	160.0	158.1	9.2	9.2	50.0	49.0
	誤差	0.0	0.0	0.0	0.5	-0.8	-0.3	2.0	0.1	0.2	0.2	0.0	-1.0
E-2	規定値	1764.0	1764.0	1764.0	1764.0	100.0	100.0	158.0	158.0	9.0	9.0	50.0	50.0
	計測値	1764.5	1764.5	1764.5	1765.0	99.5	99.7	160.4	157.7	9.2	9.1	50.0	50.5
	誤差	0.5	0.5	0.5	1.0	-0.5	-0.3	2.4	-0.3	0.2	0.1	0.0	0.5
F-1	規定値	1764.0	1764.0	1764.0	1764.0	100.0	100.0	158.0	158.0	9.0	9.0	50.0	50.0
	計測値	1764.0	1764.0	1764.0	1764.5	99.7	99.9	159.7	158.0	9.3	9.2	50.0	50.0
	誤差	0.0	0.0	0.0	0.5	-0.3	-0.1	1.7	0.0	0.3	0.2	0.0	0.0
F-2	規定値	1764.0	1764.0	1764.0	1764.0	100.0	100.0	158.0	158.0	9.0	9.0	50.0	50.0
	計測値	1765.0	1764.5	1764.5	1764.0	99.6	99.9	158.9	159.9	9.2	9.3	50.0	50.0
	誤差	1.0	0.5	0.5	0.0	-0.4	-0.1	0.9	1.9	0.2	0.3	0.0	0.0

日本橋梁株式会社

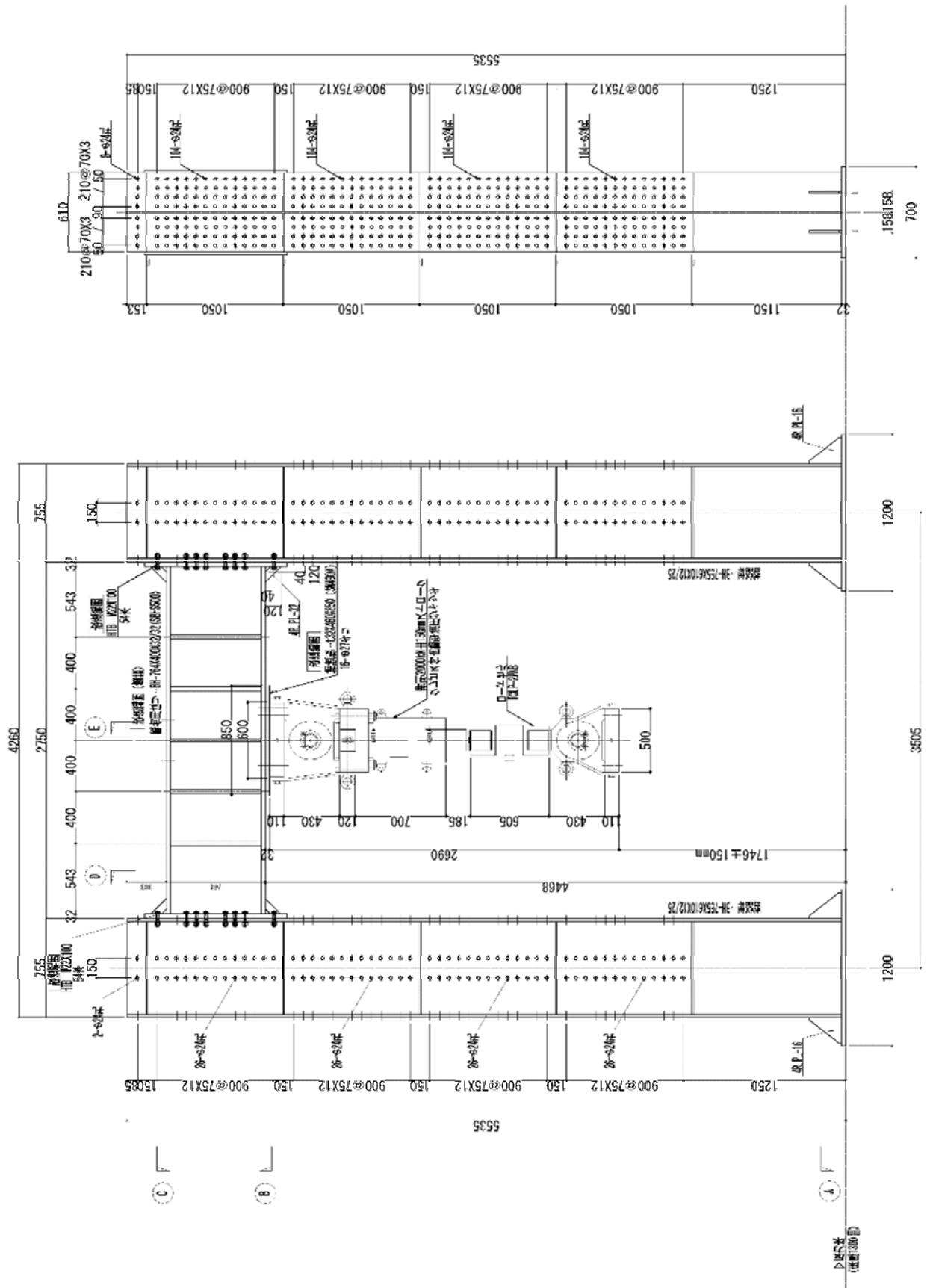


図-付 5.1 改造前の試験装置の概要図 (単位 : mm)

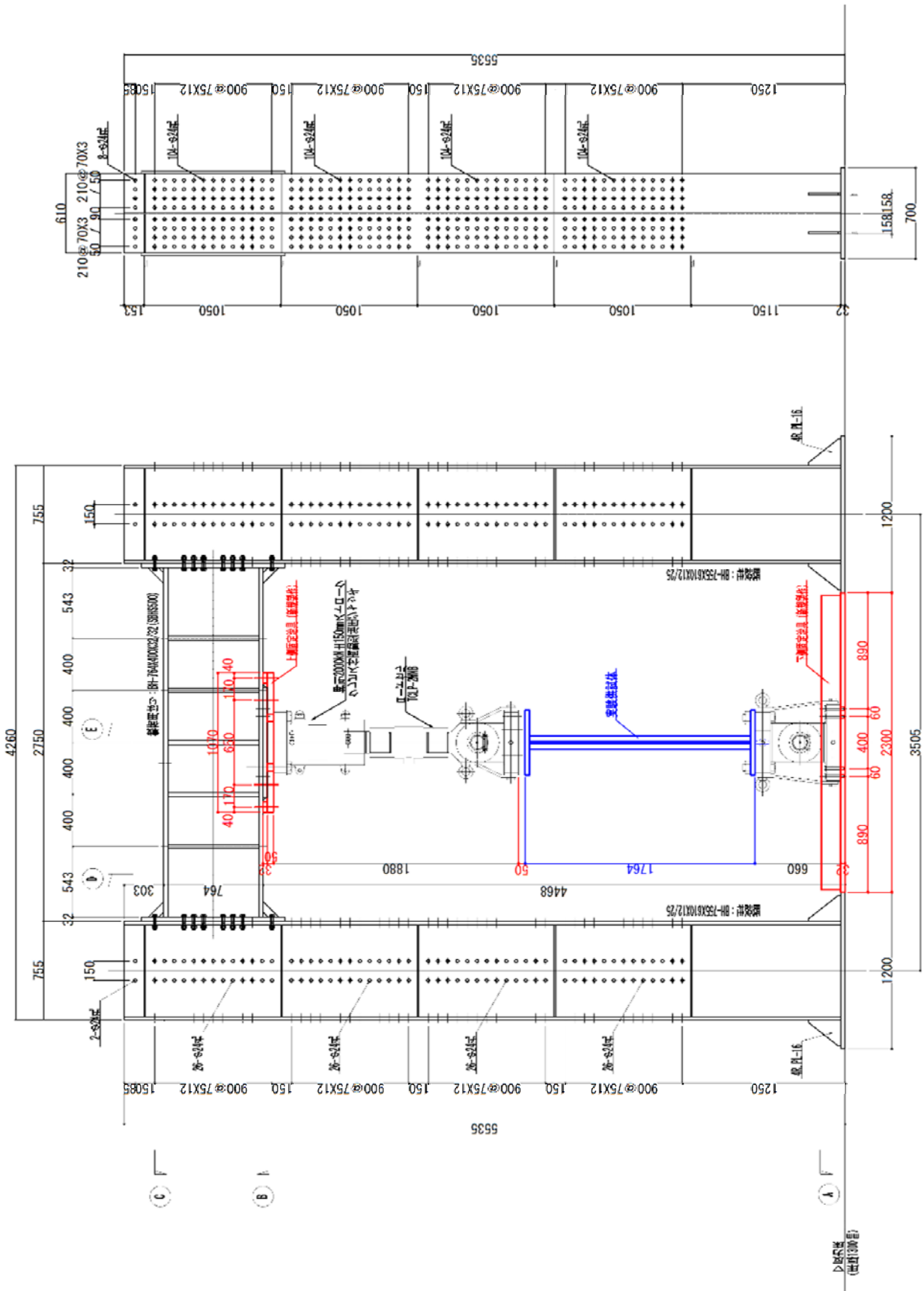


図-付 5.2 改造後の試験装置の概要図 (その 1) (単位 : mm)

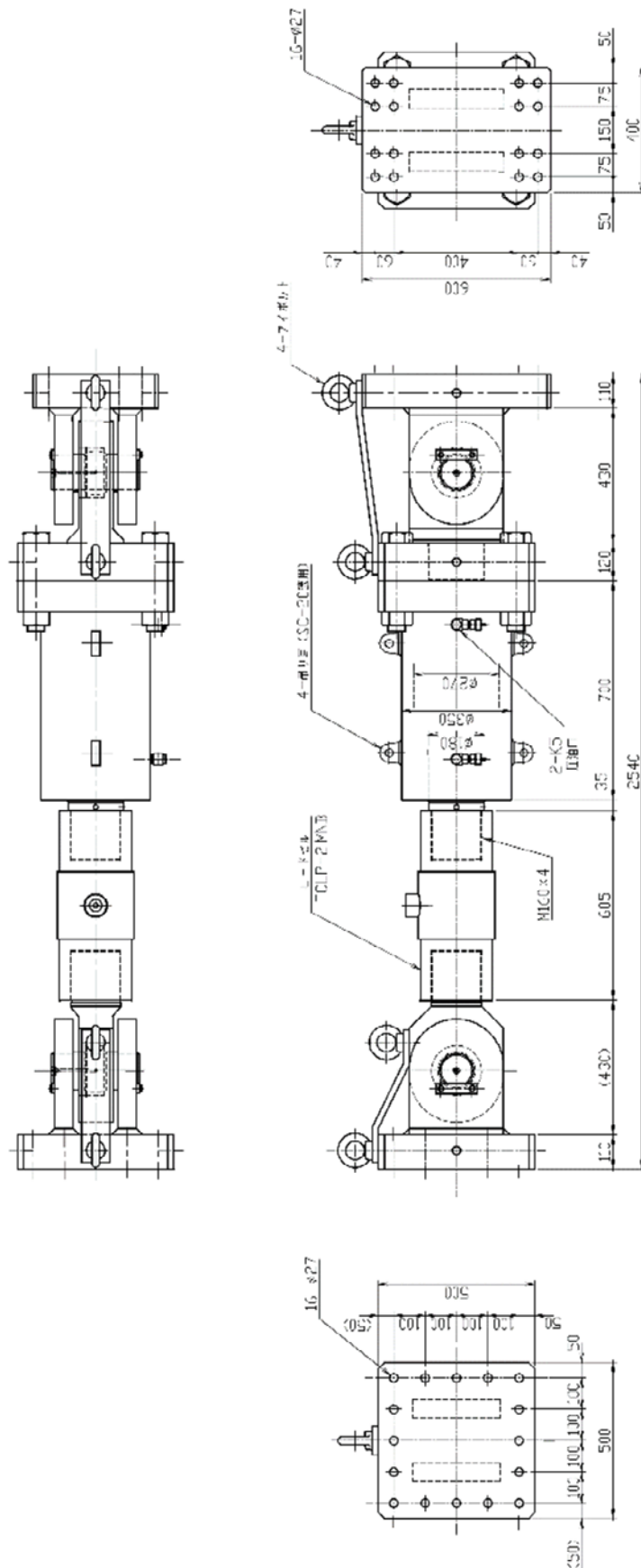


図-付 5.4 2000kN 油圧ジャッキの詳細図 (単位 : mm)

表-付 5.4 2000kN 油圧ジャッキの仕様

	仕様
製造メーカー	オックスジャッキ株式会社
負荷重量	2000 kN
ストローク	±150 mm
押圧力	34.93 MPa
引圧力	62.88 MPa
押受圧面積	572.56 cm ²
引受圧面積	318.09 cm ²
必要油量	約 17.2 ℓ
機械高	2540 mm
クレビス回転角	±5°
質量	約 1790 kg
ロードセル	TCLP-2MNB (株東京測器研究所)

表-付 5.5 記録装置の仕様

データロガー	型番	TDS-530 (株東京測器研究所製)
	センサーモード	直流電圧測定 (荷重, 変位) : 電圧 1/100 ひずみゲージ : 1 ゲージ 4 線式
	内部スイッチボックス	測定点数 : 30 点
	外部スイッチボックス IHW-50G	測定点数 : 50 点
	インターフェース	USB2.0 プロトコル互換
	大きさ	W320mm×D440mm×H130mm
	重量	約 8kg
	電源	定格電圧 : AC100~240V 最大消費電力 : 104VA

表-付 5.7 変位計の仕様

レーザー変位センサー	型番	IL-300 (株キーエンス)
	基準距離	300mm
	測定距離	160~450mm
	繰り返し精度	30 μ m
接触式変位計	型番	CDP-50 (株東京測器研究所)
	容量	50mm
	定格出力	5mV/V
	感度	200 $\times 10^{-6}$ ひずみ/mm
ワイヤー式変位計	型番	DEX-01-V (武藤工業株)
	ワイヤー有効長	1000mm
	分解能	0.01mm
	出力パルス数	25 パルス/mm

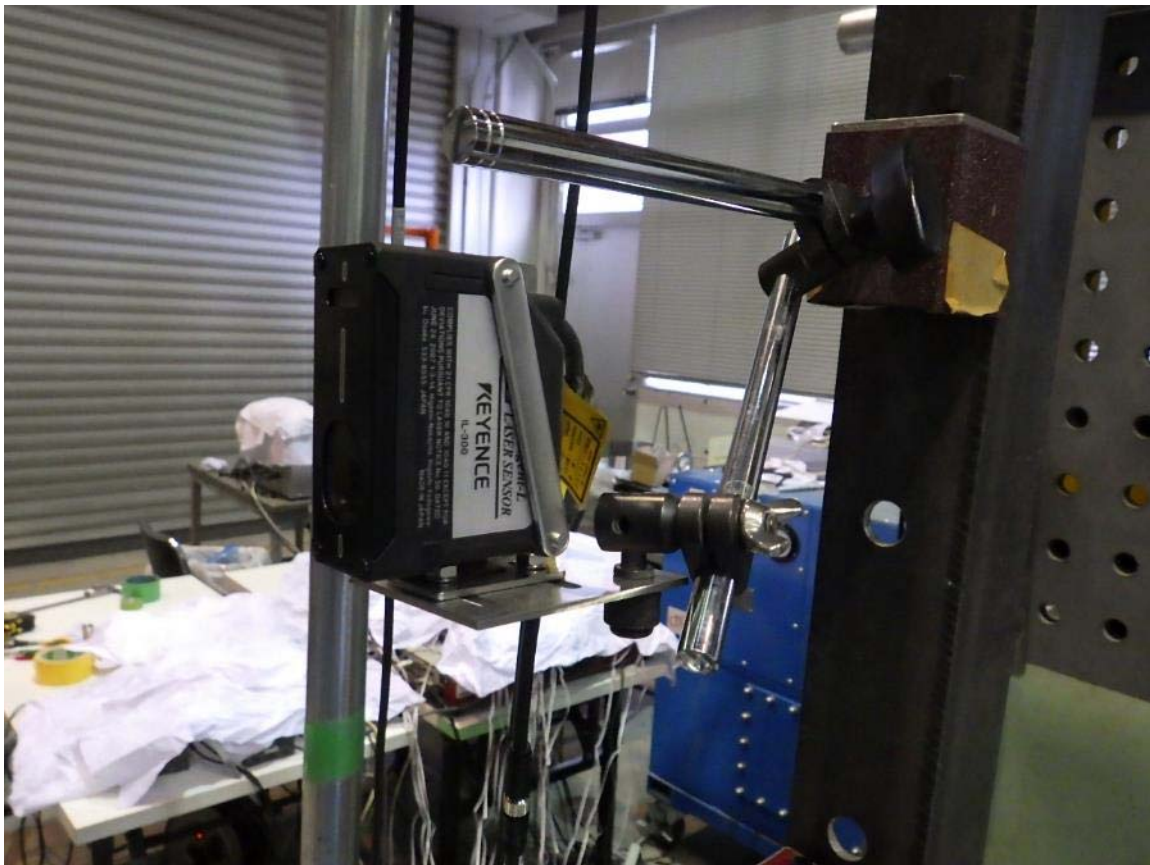


写真-付 5.1 レーザー変位センサー (IL-300)



写真-付 5.2 接触式変位計



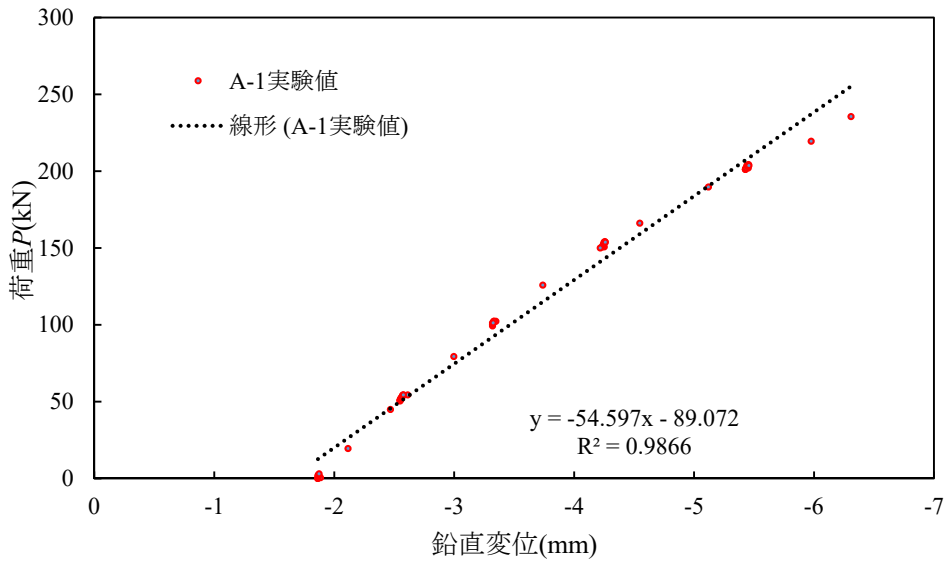
写真-付 5.3 ワイヤー式変位計

表-5.8 ロードセルの仕様

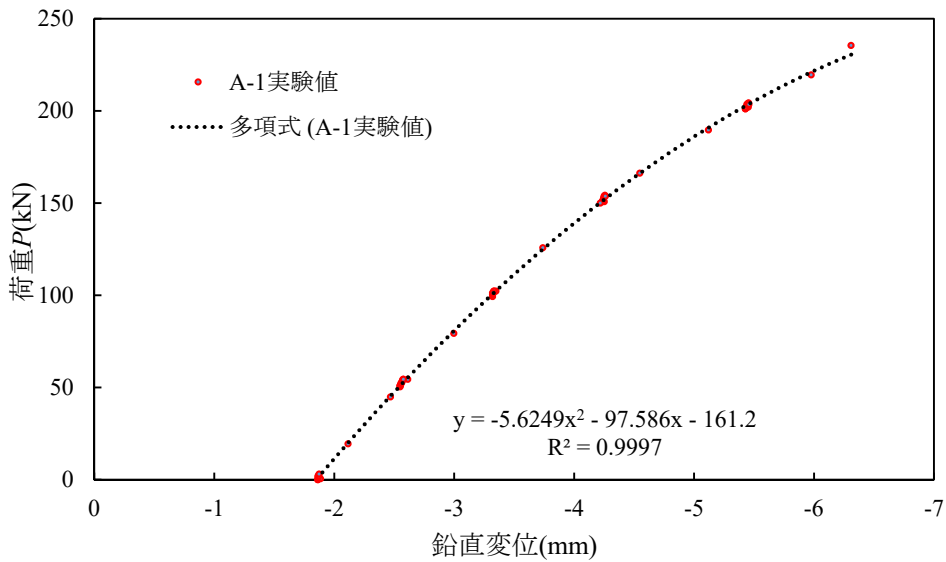
ロードセル	型番	TCLP-2MNB (株東京測器研究所)
	容量	2MN
	定格出力	1mV/V(2000×10 ⁻⁶ ひずみ)±0.5%
	外形	直径φ245mm×長さ605mm
	質量	110kg



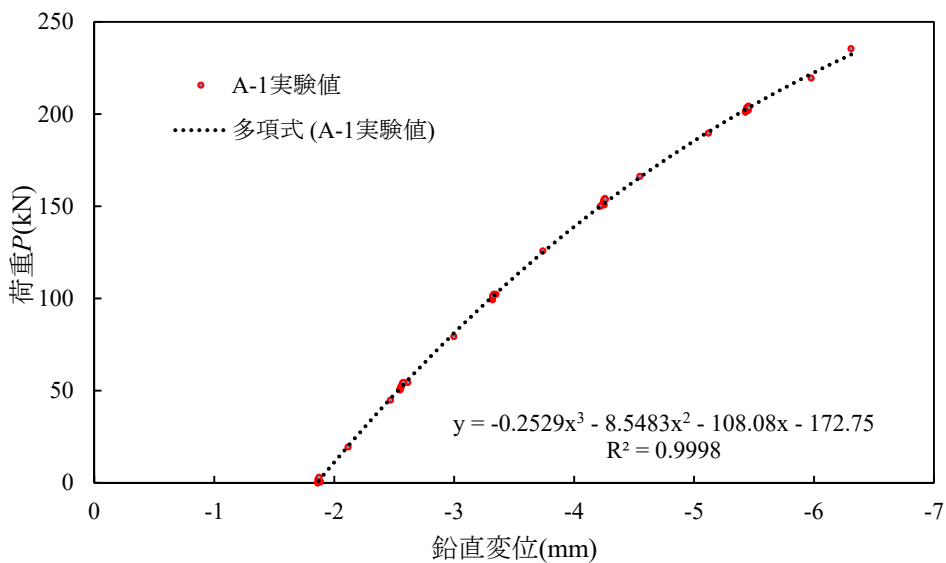
写真-付 5.4 ロードセル (TCLP-2MNB)



(a)線形近似

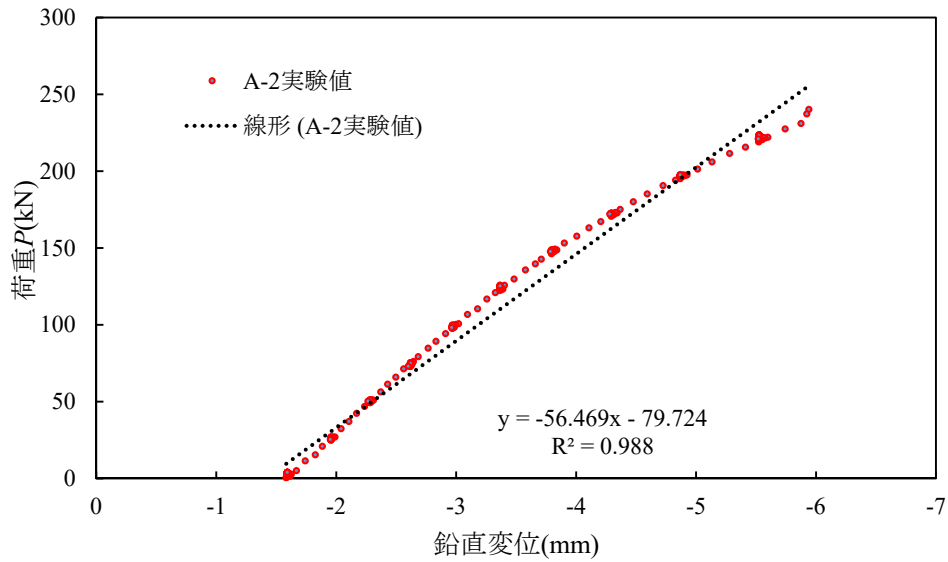


(b)2次曲線近似

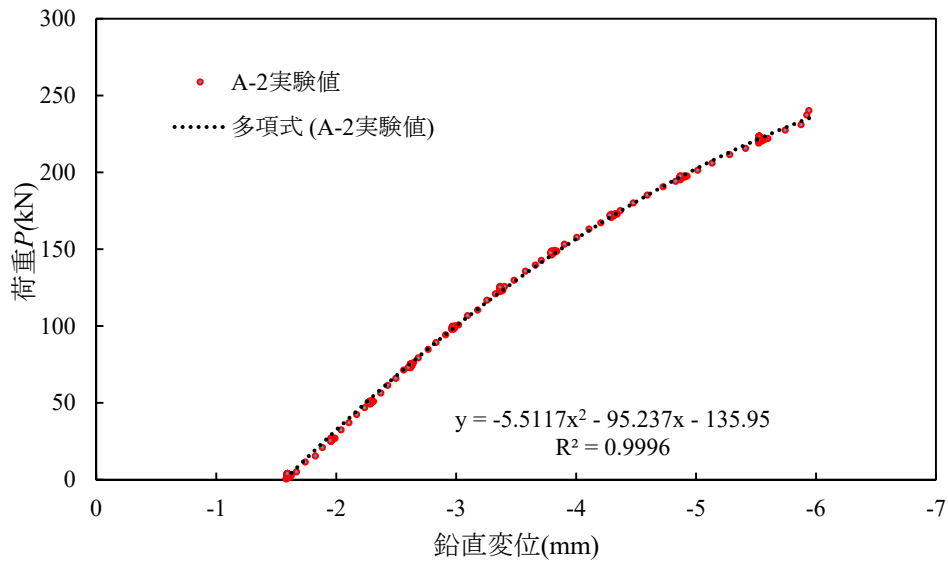


(c)3次曲線近似

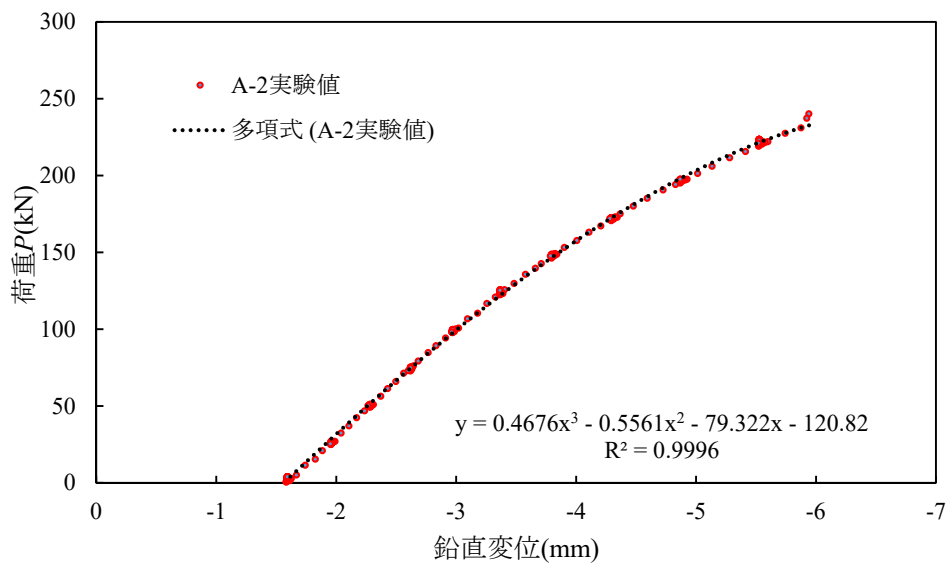
図-付 5.5 除荷時における荷重と鉛直変位の関係に対する近似曲線 (試験体 A-1)



(a)線形近似

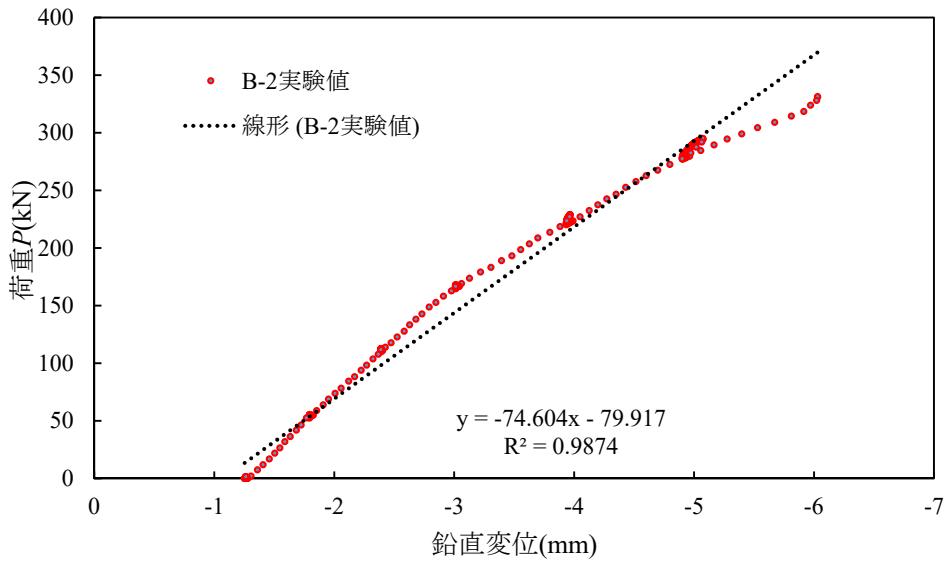


(b)2次曲線近似

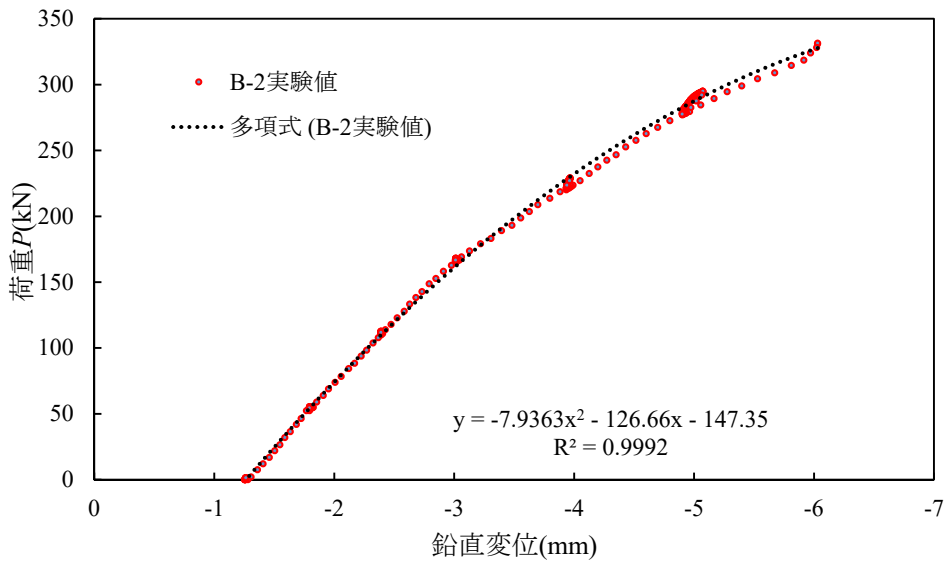


(c)3次曲線近似

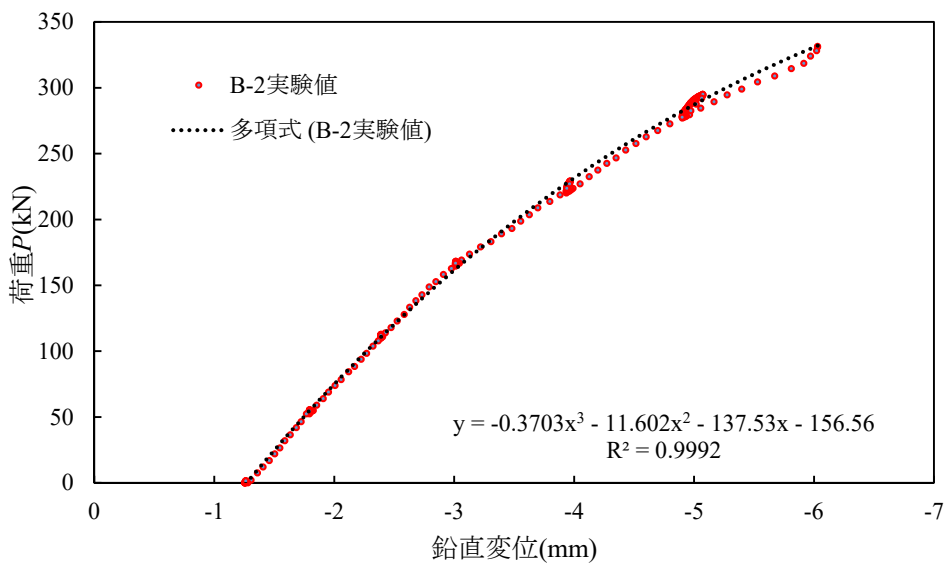
図-付 5.6 除荷時における荷重と鉛直変位の関係に対する近似曲線 (試験体 A-2)



(a)線形近似

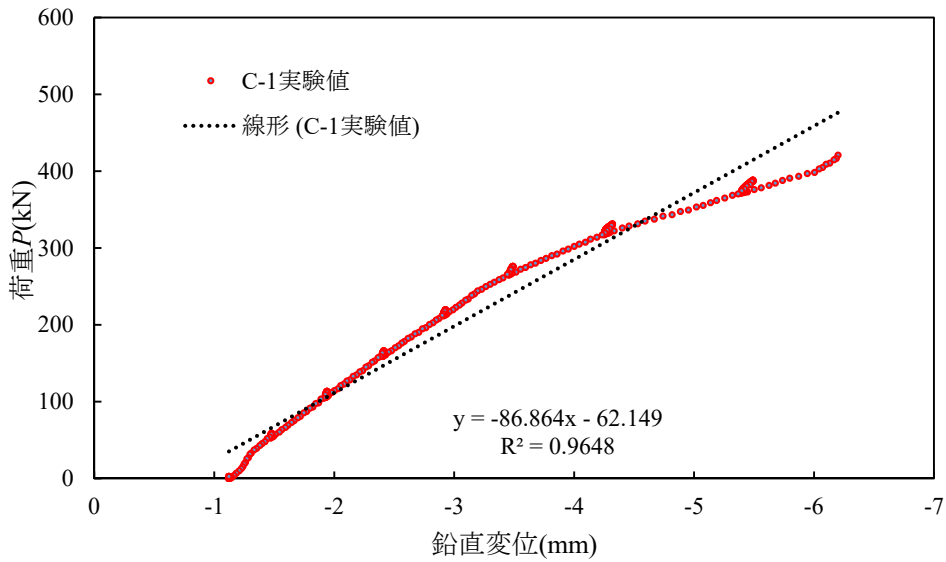


(b)2次曲線近似

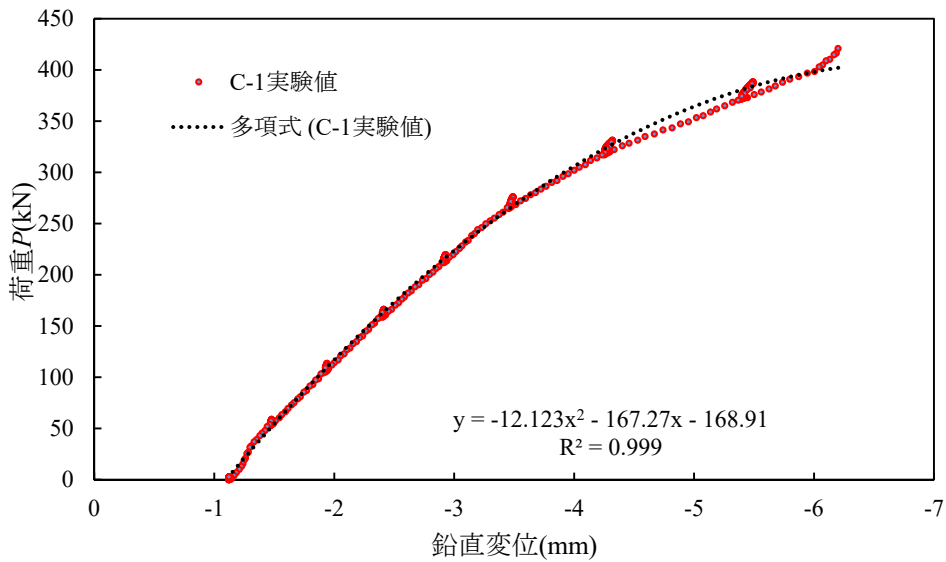


(c)3次曲線近似

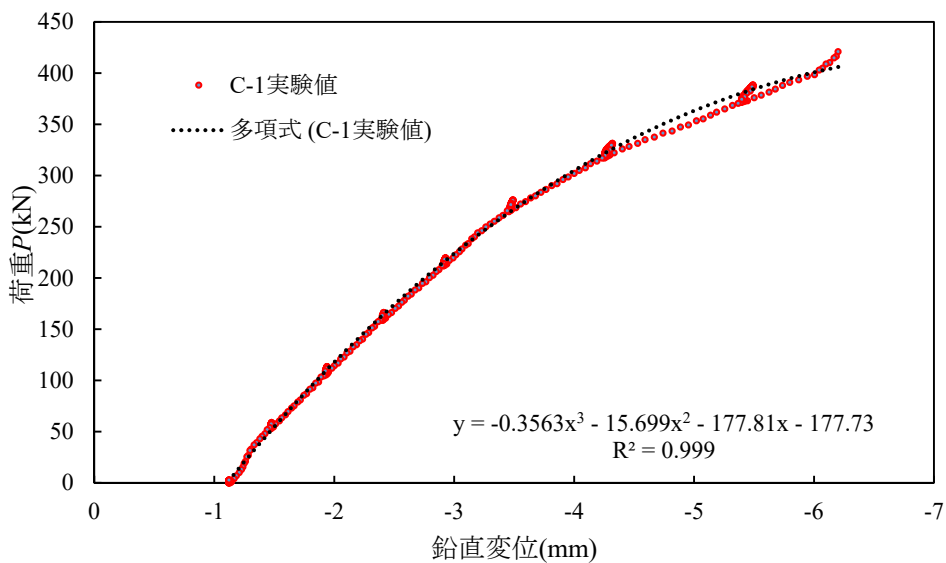
図-付 5.7 除荷時における荷重と鉛直変位の関係に対する近似曲線 (試験体 B-2)



(a)線形近似

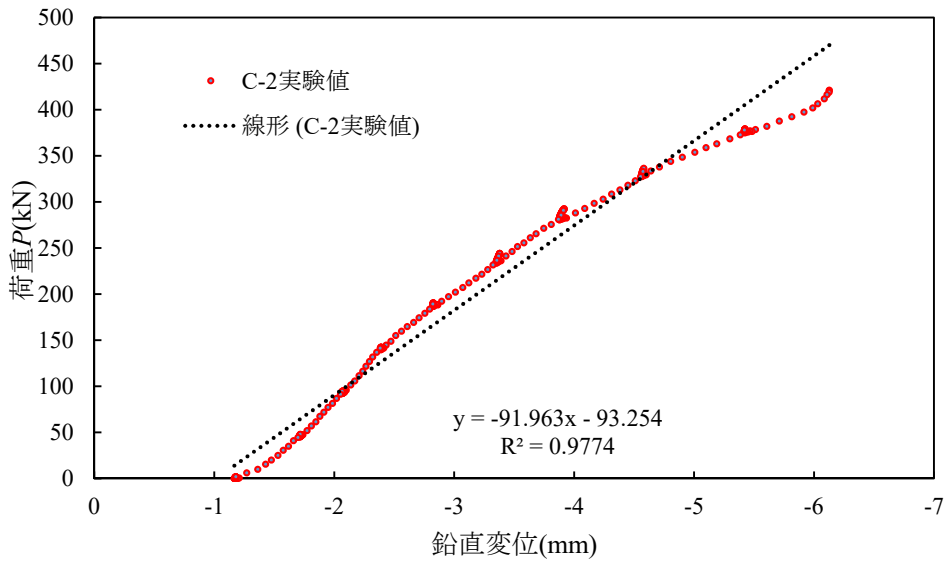


(b)2次曲線近似

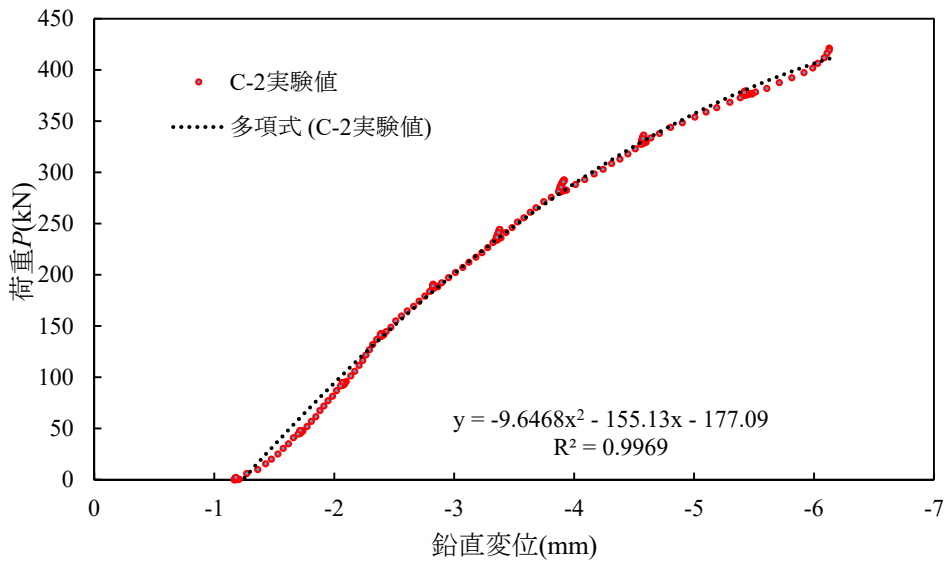


(c)3次曲線近似

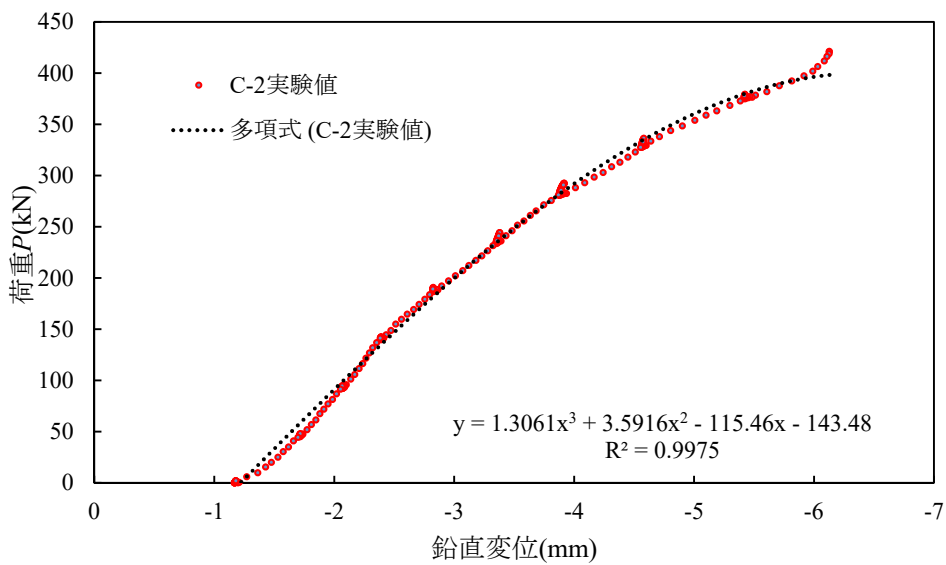
図-付 5.8 除荷時における荷重と鉛直変位の関係に対する近似曲線 (試験体 C-1)



(a)線形近似

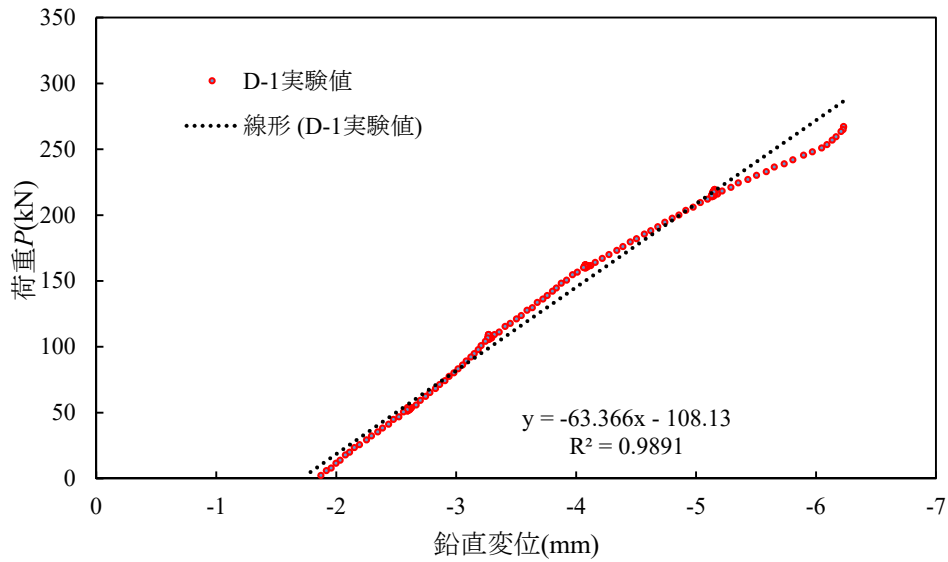


(b)2次曲線近似

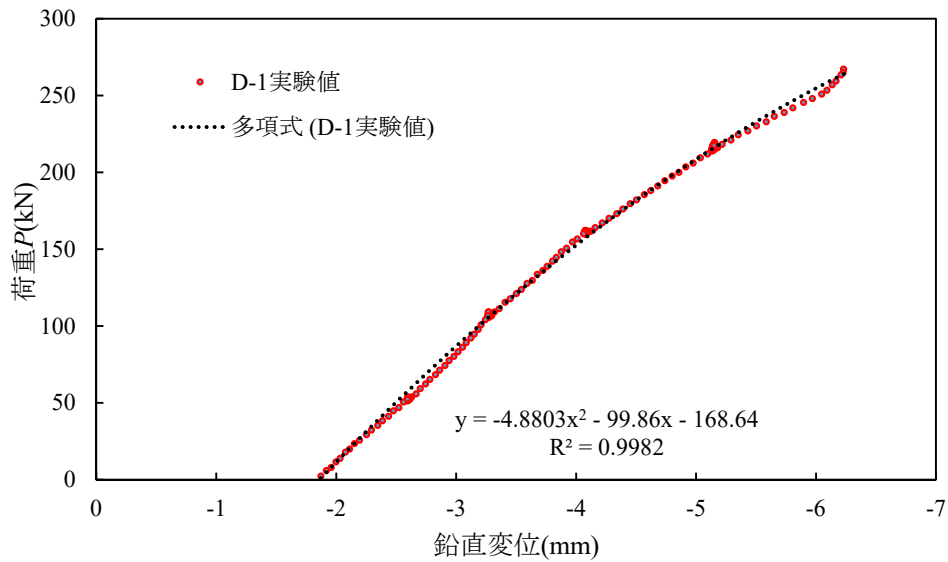


(c)3次曲線近似

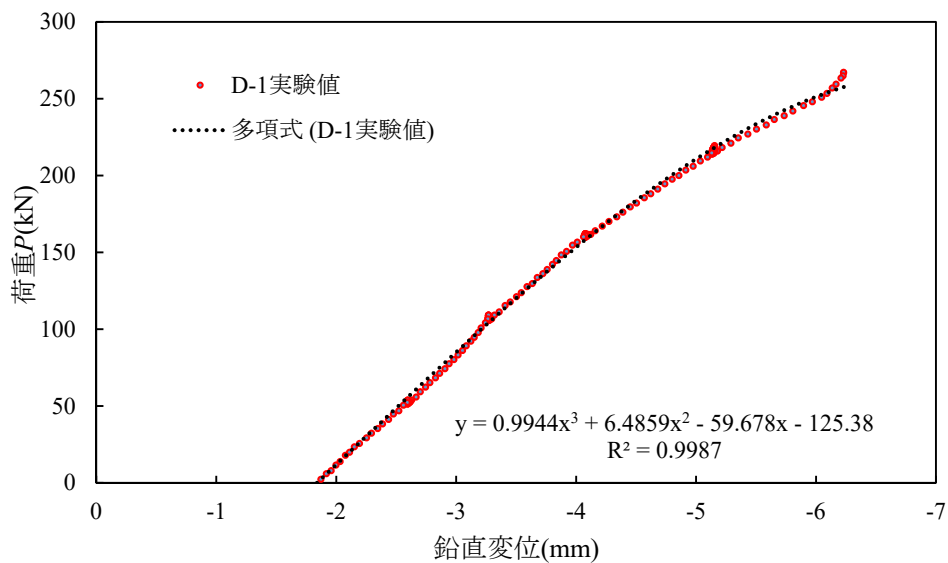
図-付 5.9 除荷時における荷重と鉛直変位の関係に対する近似曲線 (試験体 C-2)



(a)線形近似

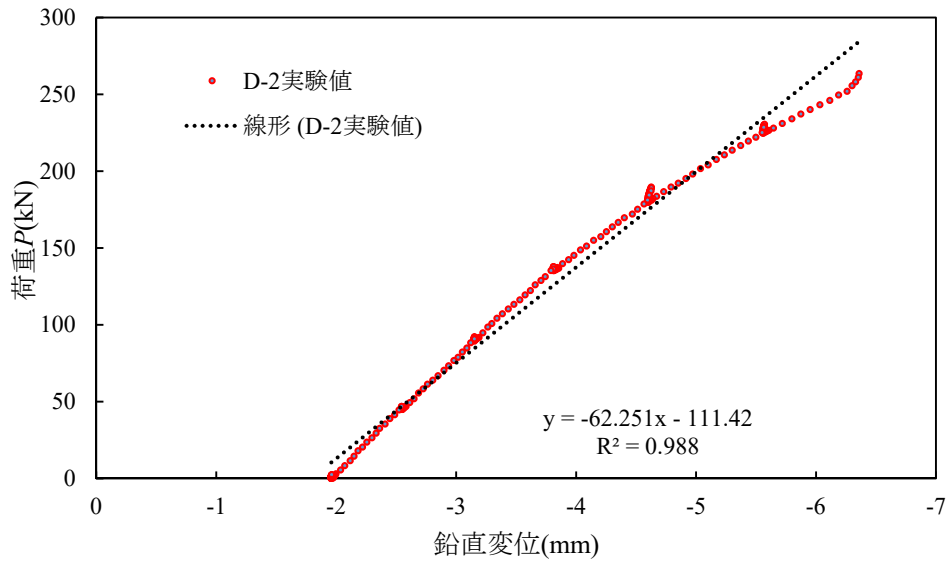


(b)2次曲線近似

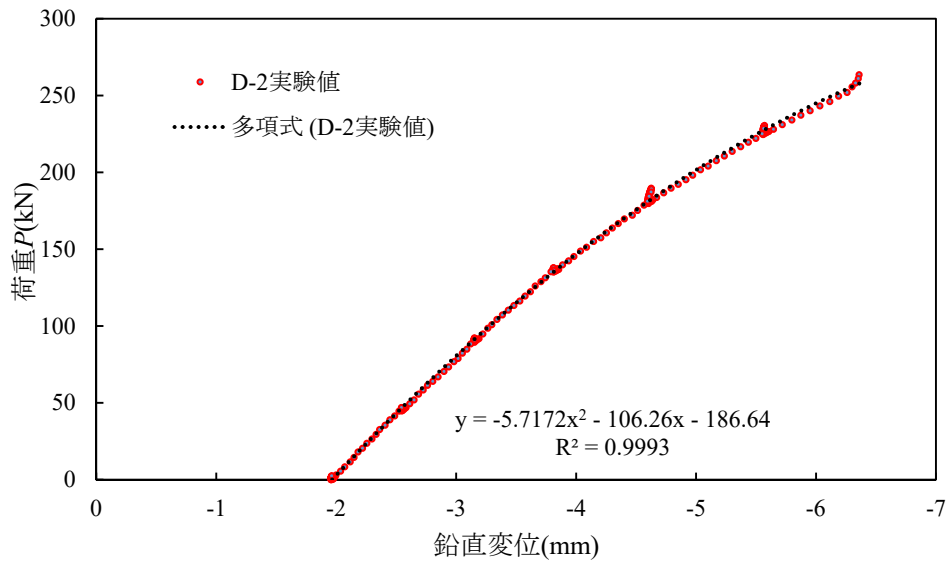


(c)3次曲線近似

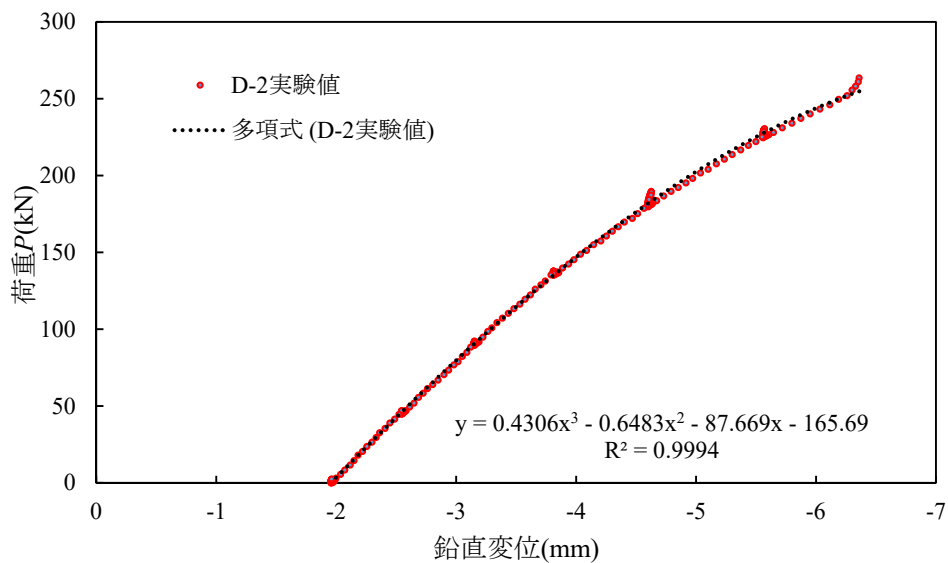
図-付 5.10 除荷時における荷重と鉛直変位の関係に対する近似曲線 (試験体 D-1)



(a)線形近似

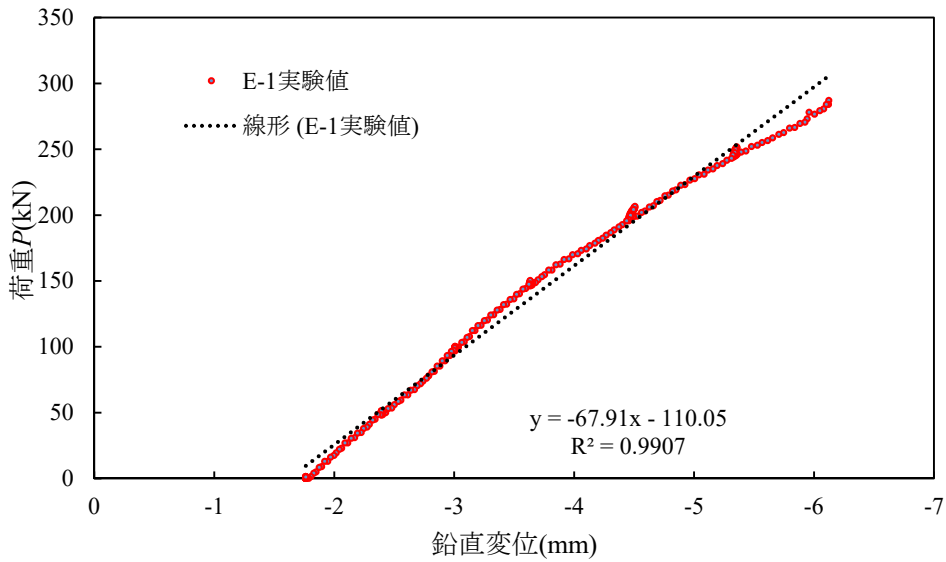


(b)2次曲線近似

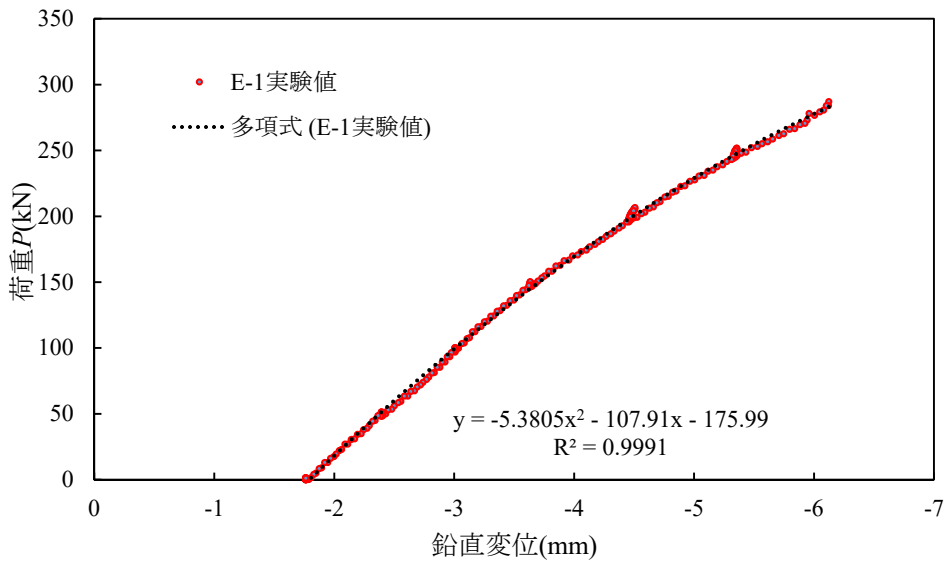


(c)3次曲線近似

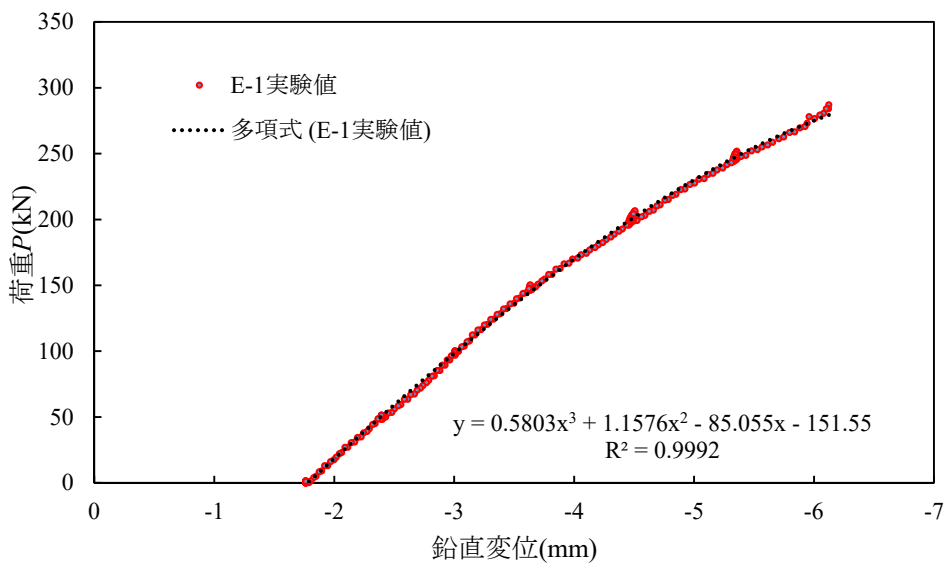
図-付 5.11 除荷時における荷重と鉛直変位の関係に対する近似曲線 (試験体 D-2)



(a)線形近似

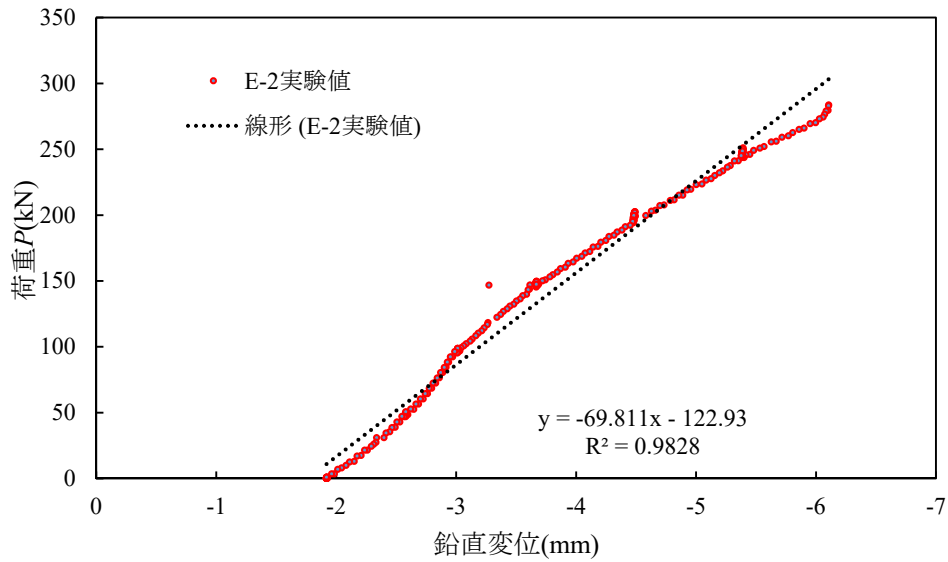


(b)2次曲線近似

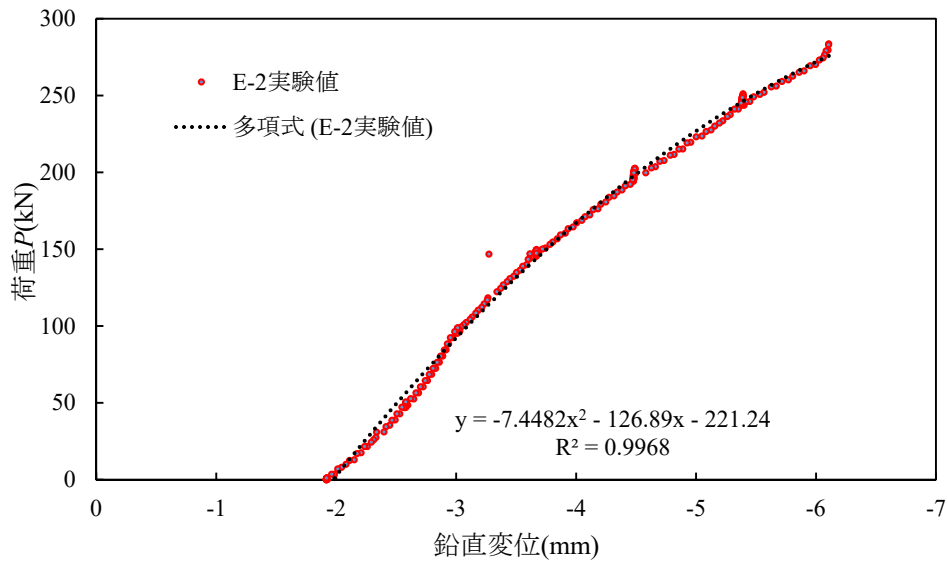


(c)3次曲線近似

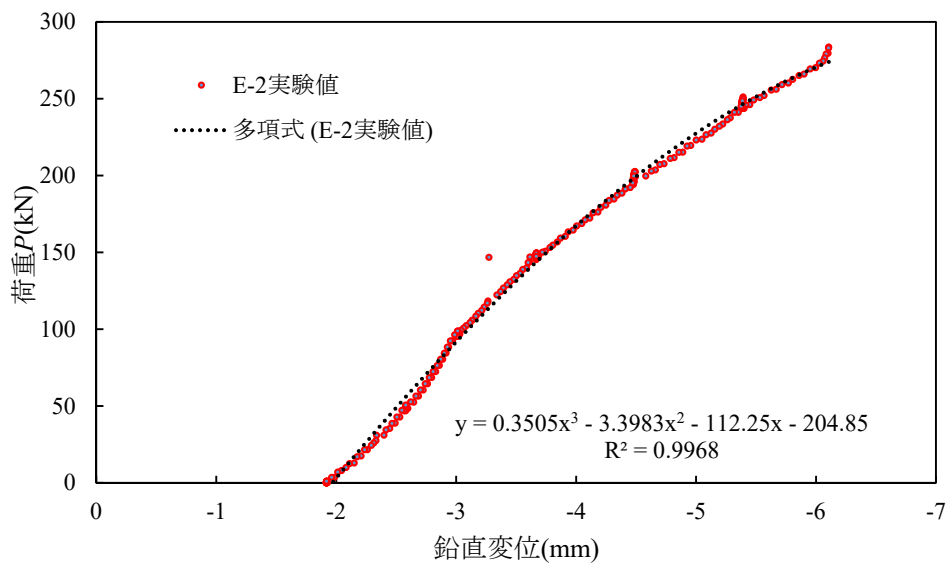
図-付 5.12 除荷時における荷重と鉛直変位の関係に対する近似曲線 (試験体 E-1)



(a)線形近似

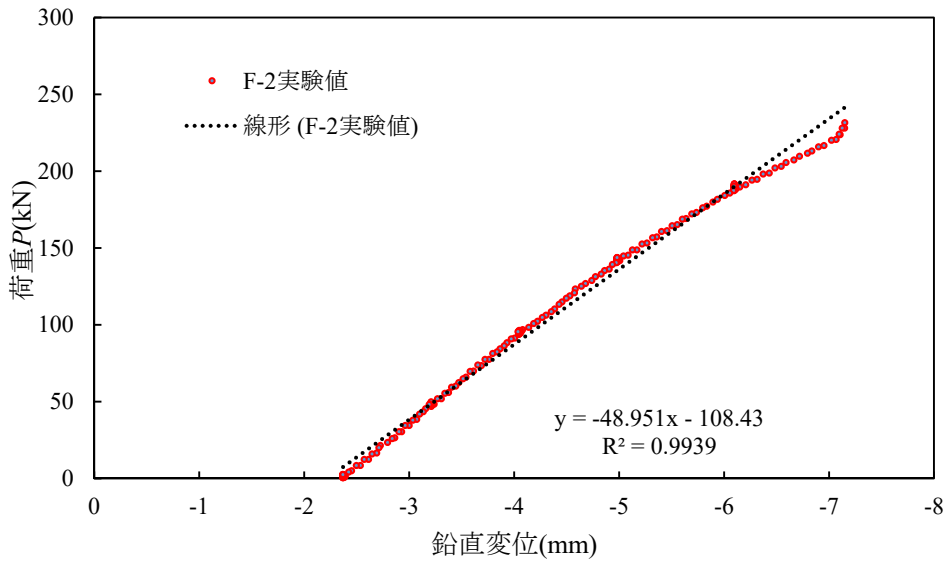


(b)2次曲線近似

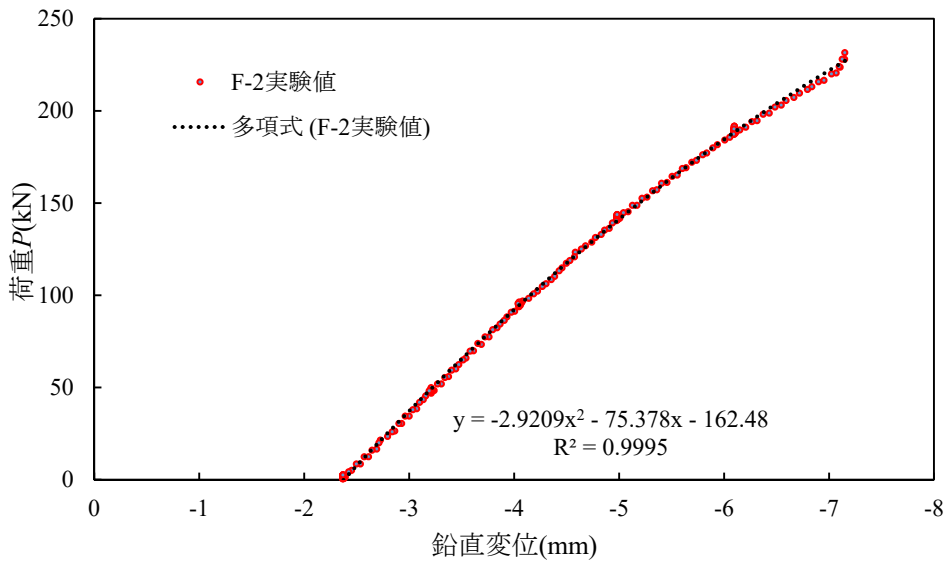


(c)3次曲線近似

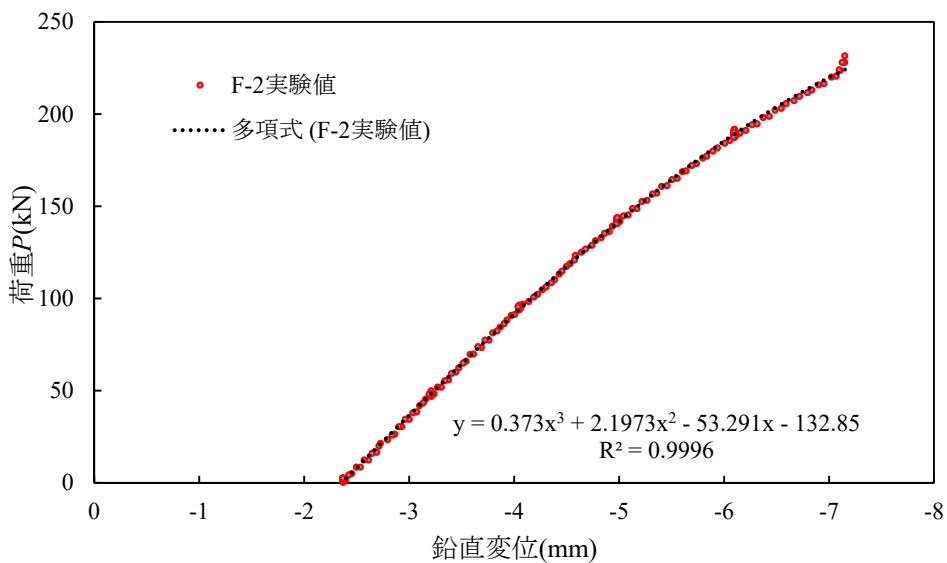
図-付 5.13 除荷時における荷重と鉛直変位の関係に対する近似曲線 (試験体 E-2)



(a)線形近似

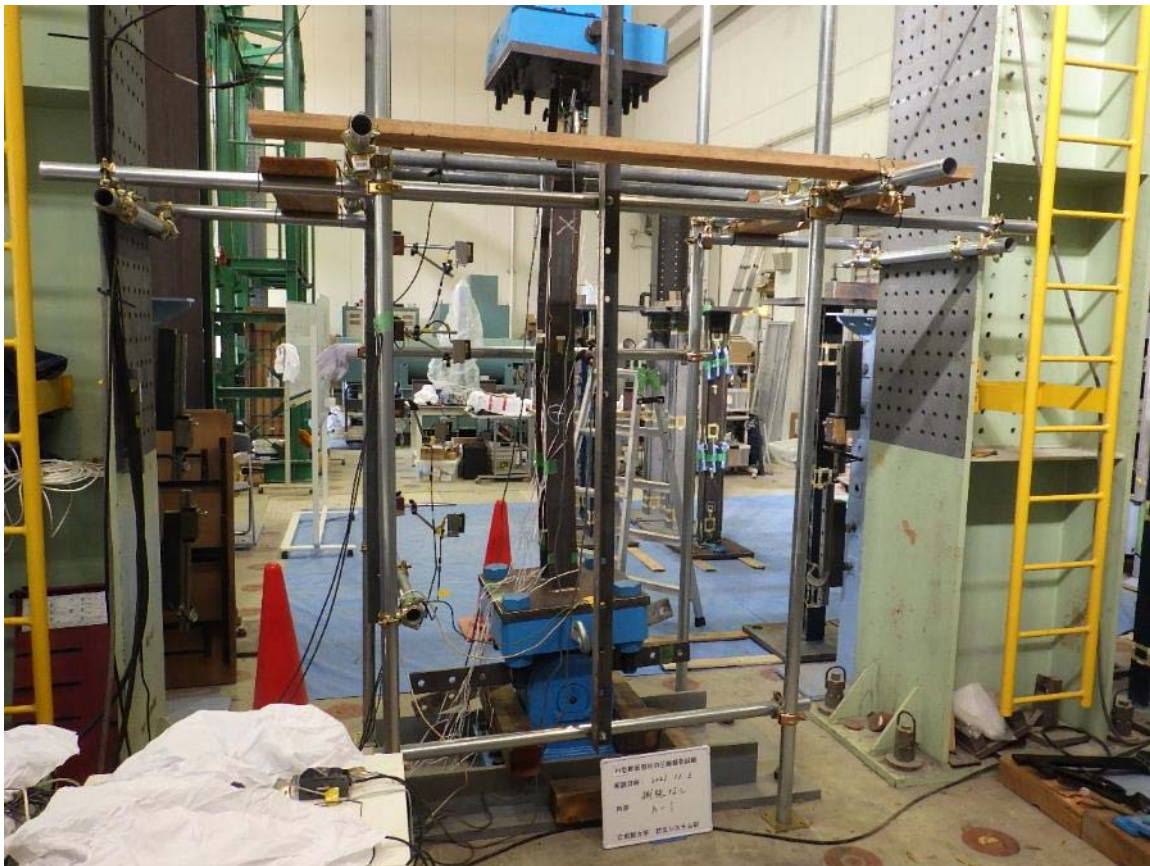


(b)2次曲線近似



(c)3次曲線近似

図-付 5.14 除荷時における荷重と鉛直変位の関係に対する近似曲線 (試験体 F-2)



(a)試験体 A-1



(b)試験体 A-2

写真-付 5.5 圧縮載荷試験終了後の試験体 (その 1)



(a)試験体 C-1



(b)試験体 C-2

写真-付 5.6 圧縮荷重試験終了後の試験体 (その 2)



(a)試験体 D-1



(b)試験体 D-2

写真-付 5.7 圧縮載荷試験終了後の試験体 (その 3)



(a)試験体 E-1



(b)試験体 E-2

写真-付 5.8 圧縮載荷試験終了後の試験体 (その 4)

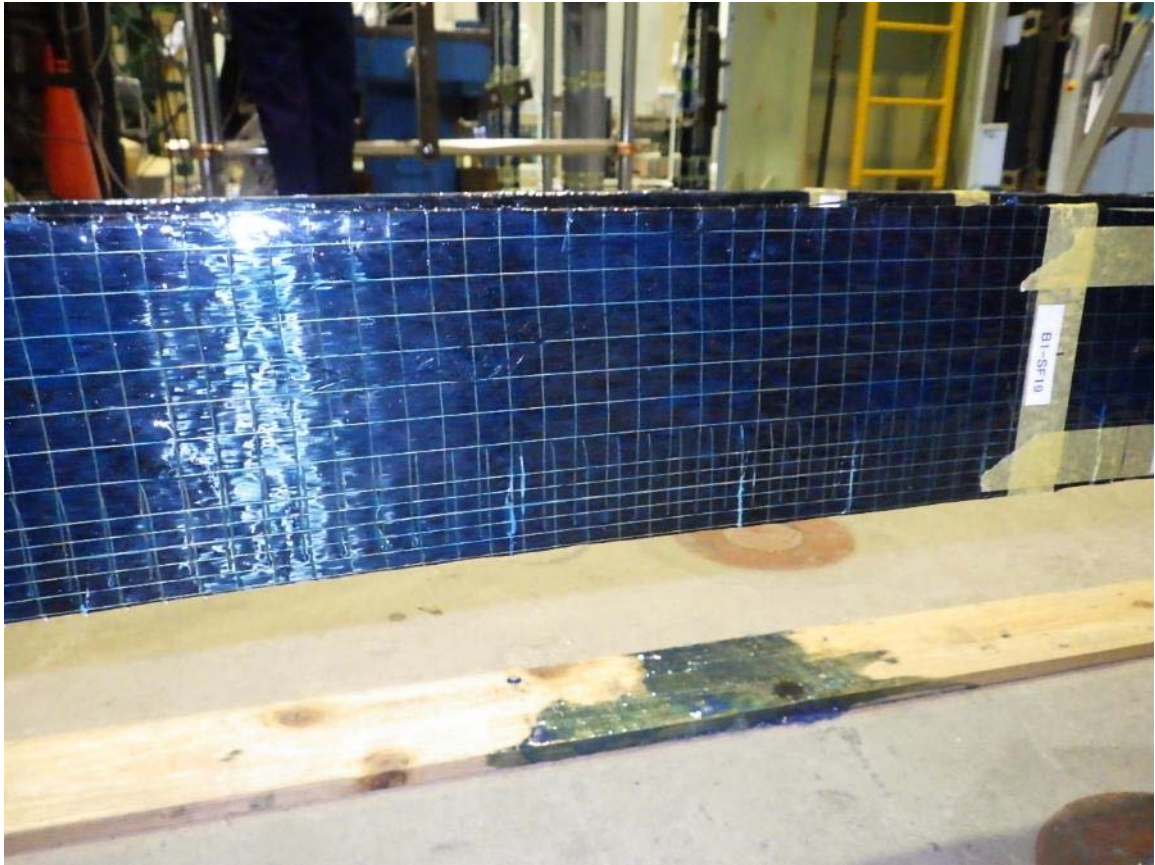


(a)試験体 F-1



(b)試験体 F-2

写真-付 5.9 圧縮荷重試験終了後の試験体 (その 5)

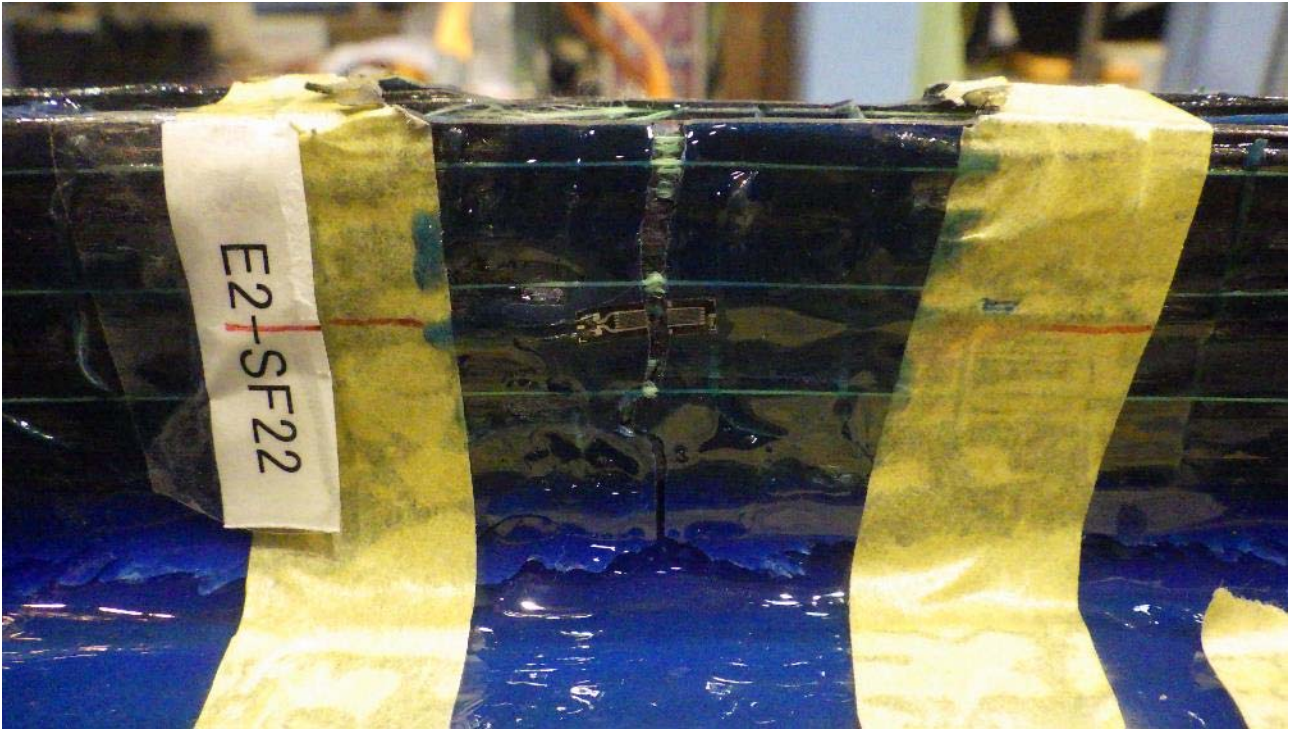


(a)試験体 B-1



(b)試験体 B-2

写真-付 5.10 圧縮載荷試験終了後の CFRP 表面 (その 1)

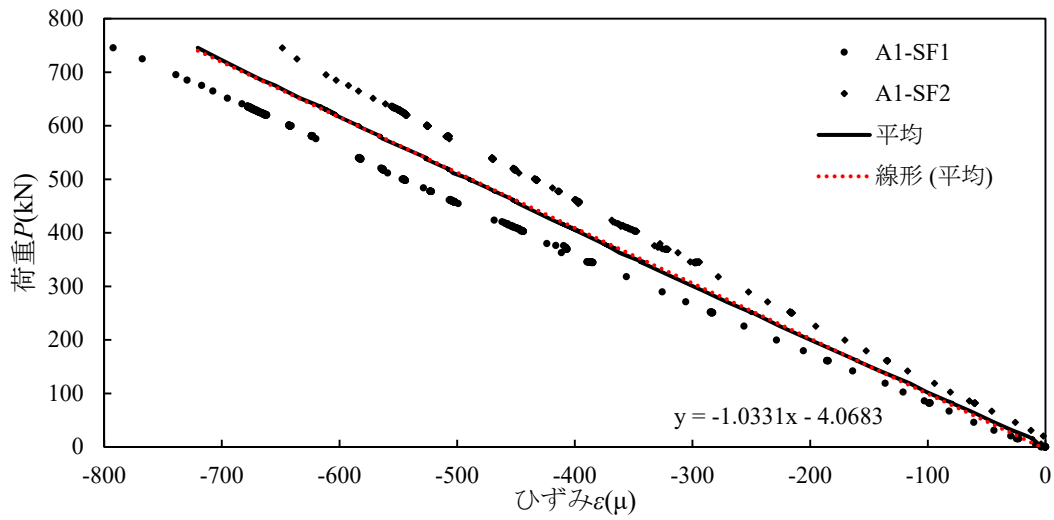


(a)試験体 E-2 (接写)

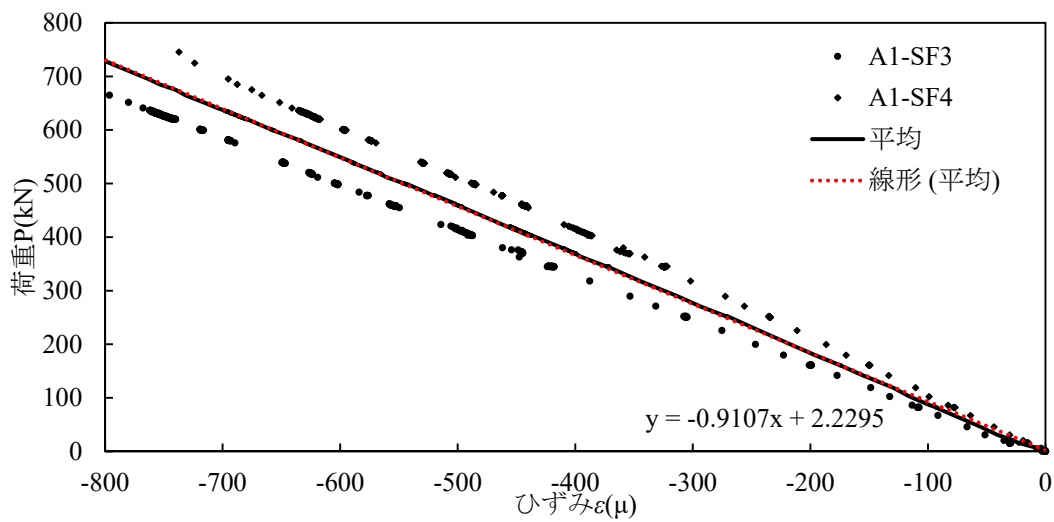


(b)試験体 E-2 (接写)

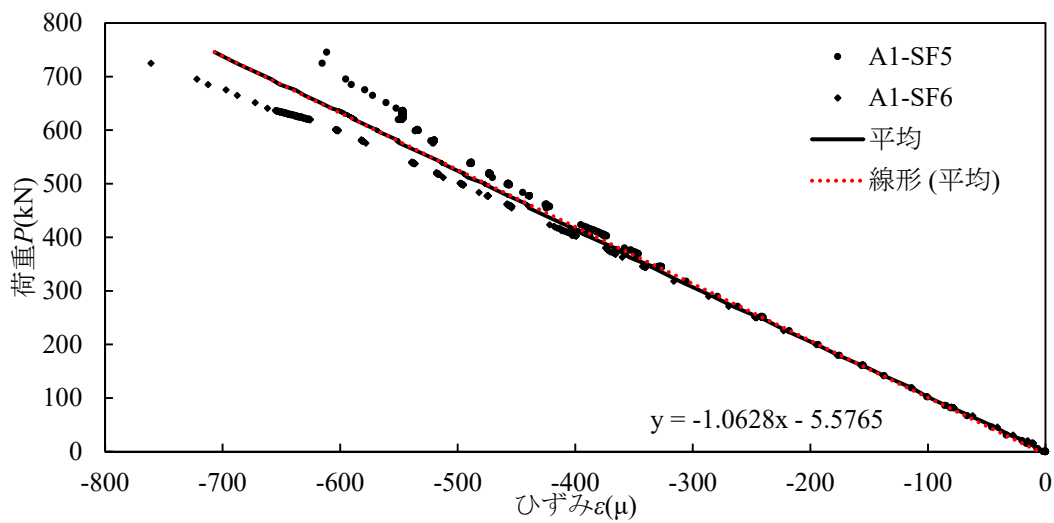
写真-付 5.11 圧縮載荷試験終了後の CFRP 表面 (その 2)



(a) 計測位置 SF-1,SF-2

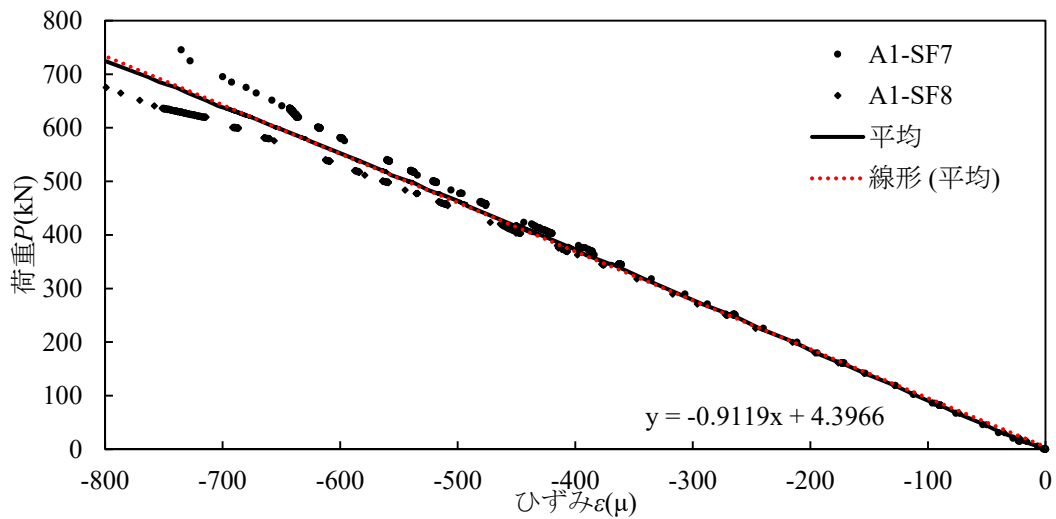


(b) 計測位置 SF-3,SF-4

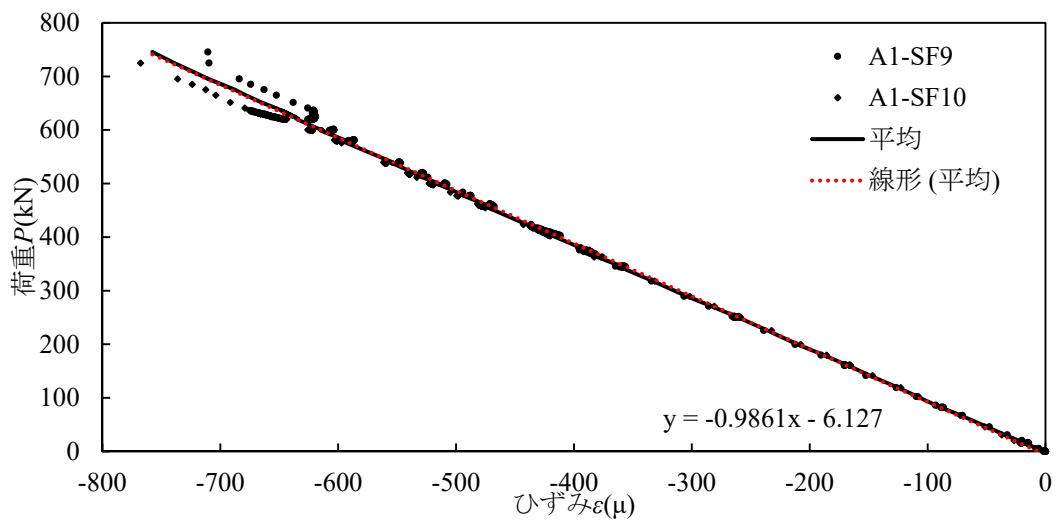


(c) 計測位置 SF-5,SF-6

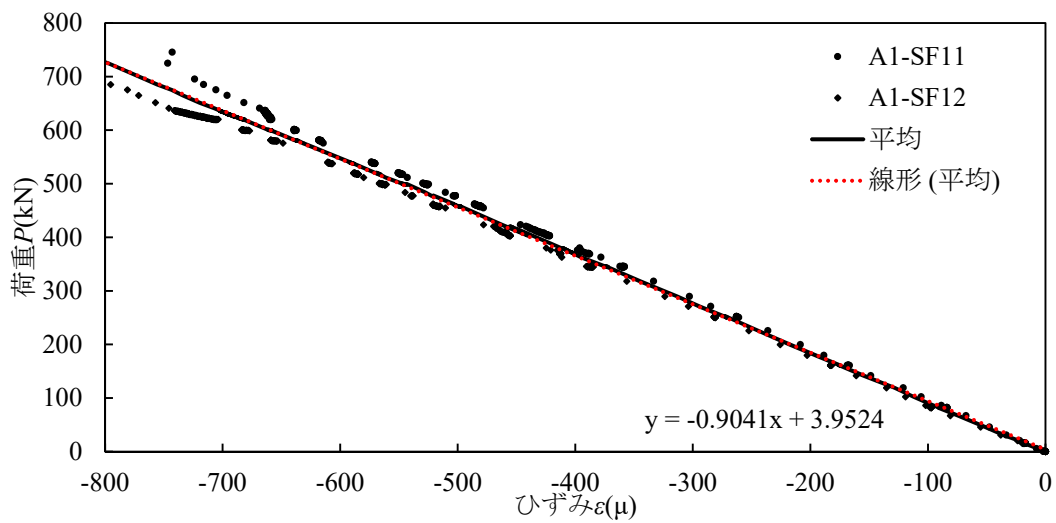
図-付 5.15 圧縮載荷試験における鉛直荷重－ひずみ関係と近似直線（鋼材部）（試験体 A-1 その 1）



(a) 計測位置 SF-7,SF-8

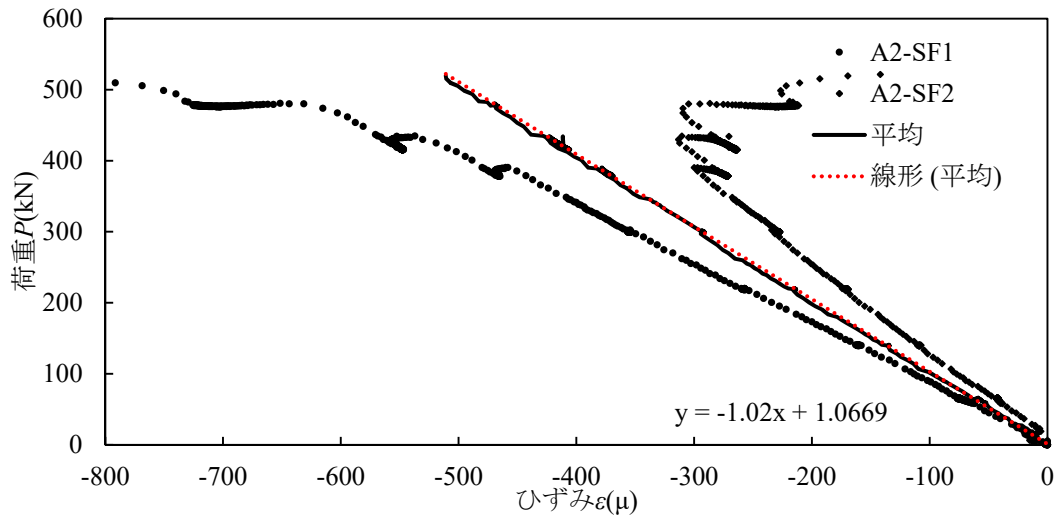


(b) 計測位置 SF-9,SF-10

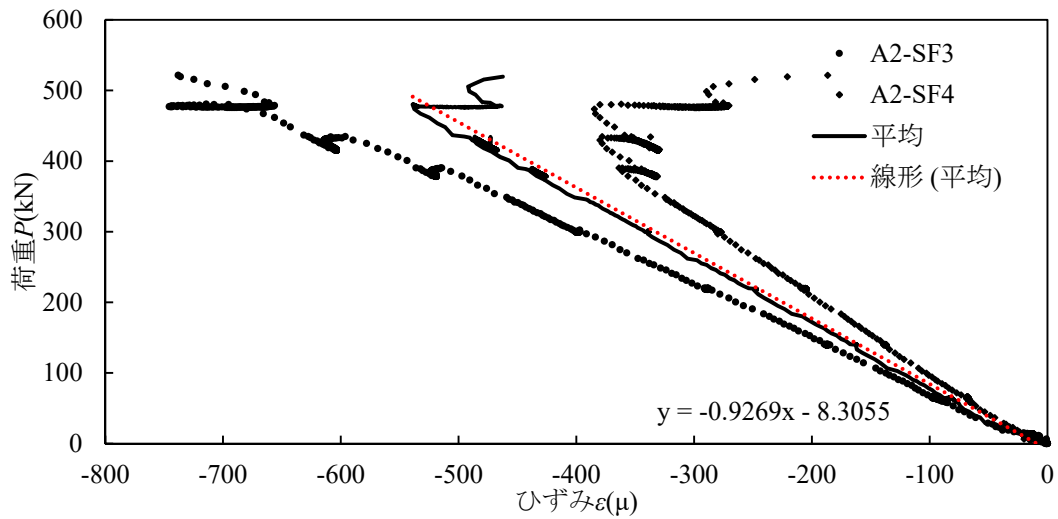


(c) 計測位置 SF-11,SF-12

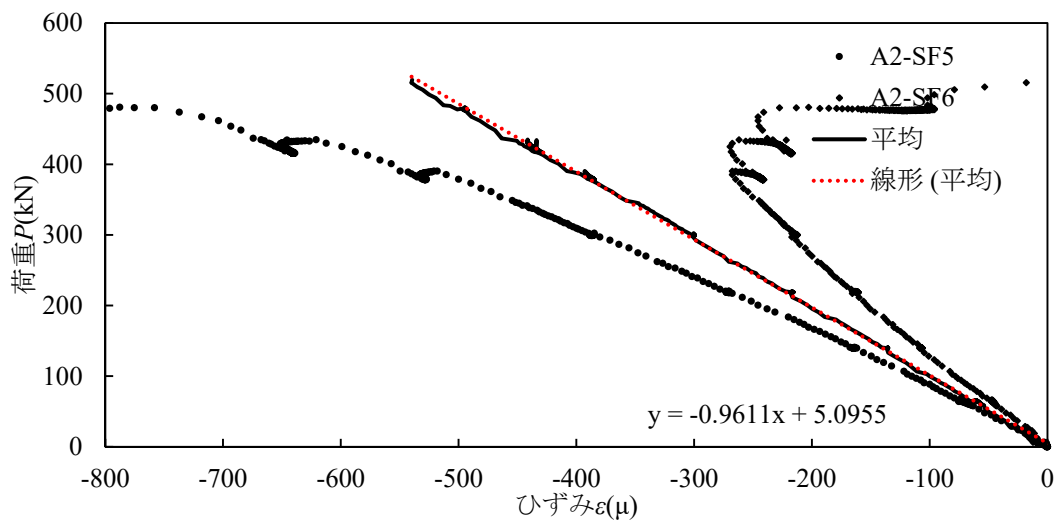
図-付 5.16 圧縮載荷試験における鉛直荷重－ひずみ関係と近似直線（鋼材部）（試験体 A-1 その 2）



(a) 計測位置 SF-1,SF-2

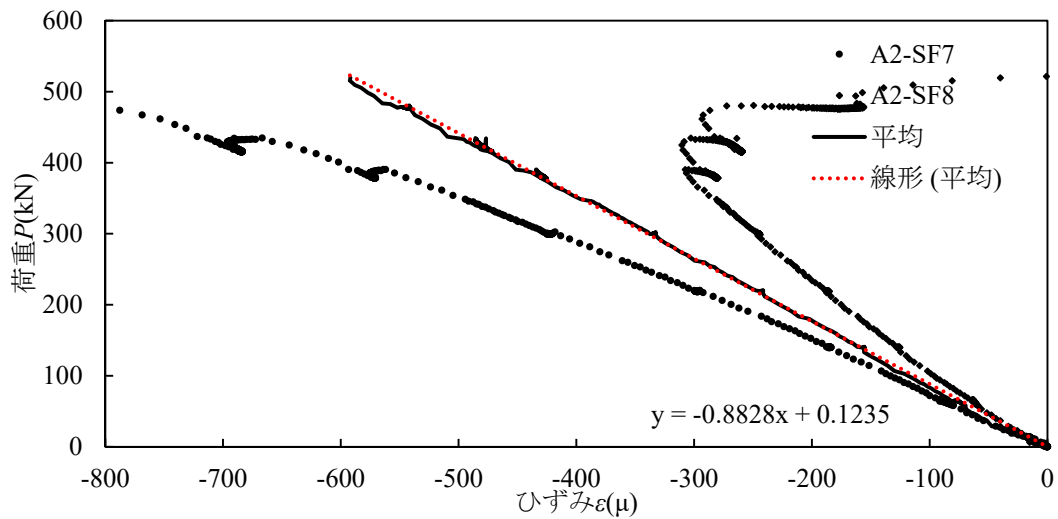


(b) 計測位置 SF-3,SF-4

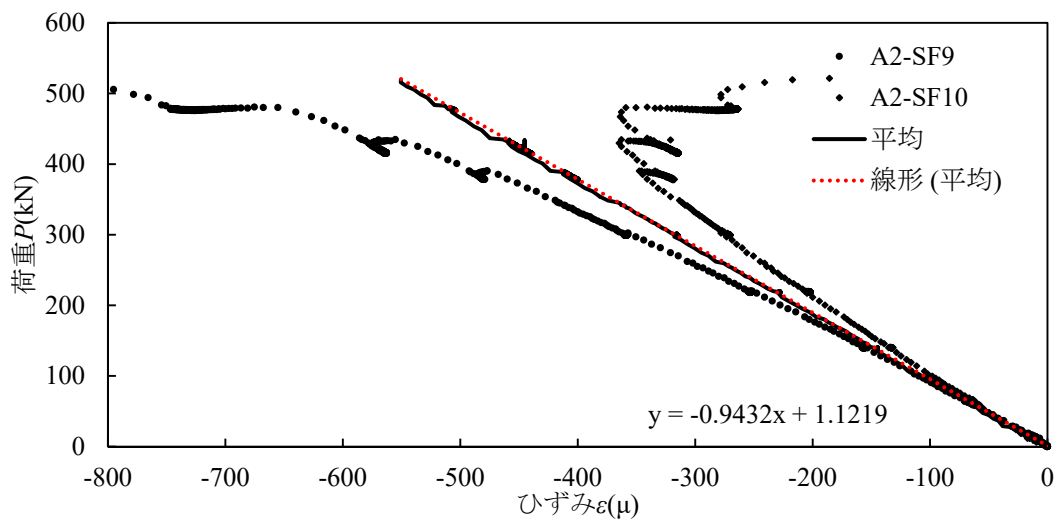


(c) 計測位置 SF-5,SF-6

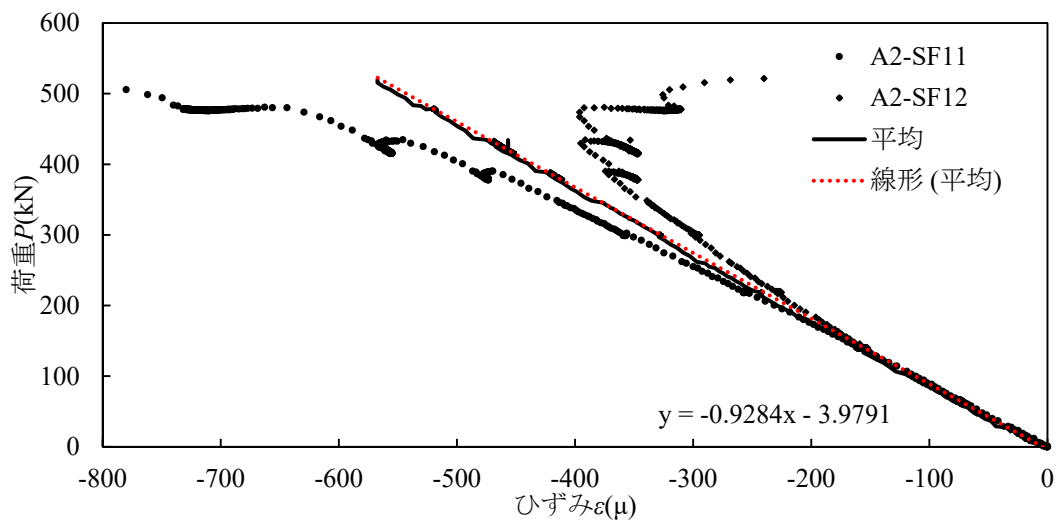
図-付 5.17 圧縮載荷試験における鉛直荷重－ひずみ関係と近似直線（鋼材部）（試験体 A-2 その 1）



(a) 計測位置 SF-7,SF-8

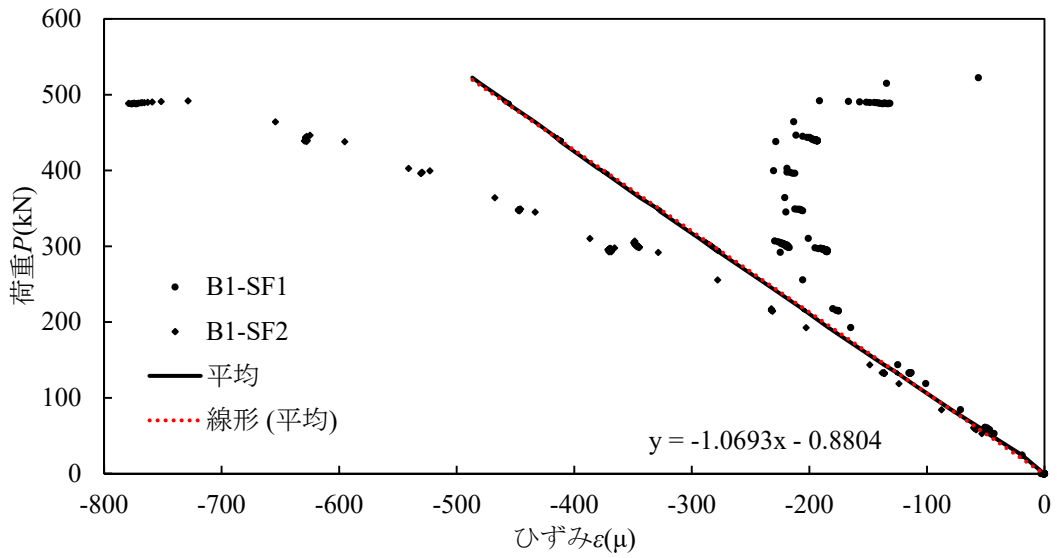


(b) 計測位置 SF-9,SF-10

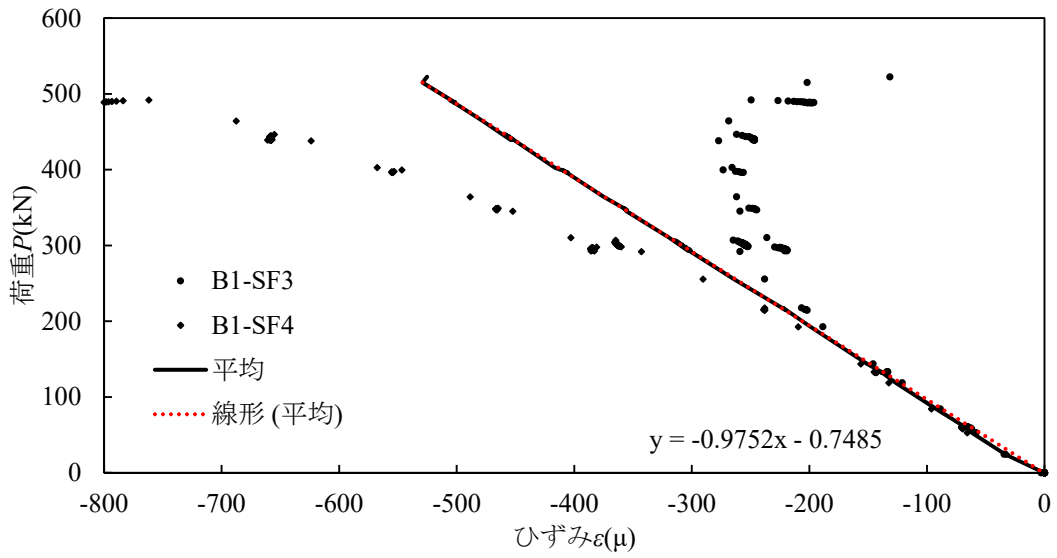


(c) 計測位置 SF-11,SF-12

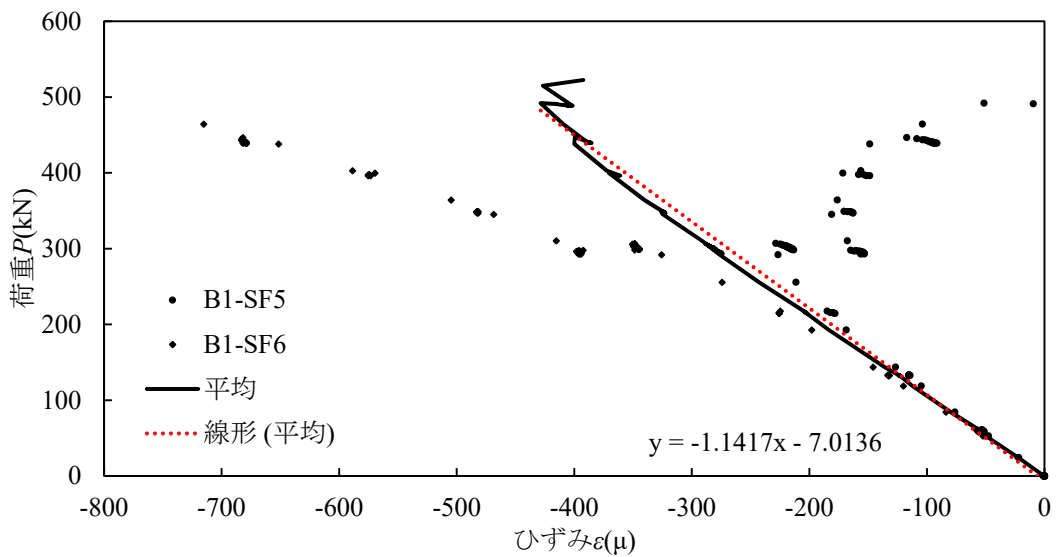
図-付 5.18 圧縮載荷試験における鉛直荷重－ひずみ関係と近似直線（鋼材部）（試験体 A-2 その 2）



(a) 計測位置 SF-1,SF-2

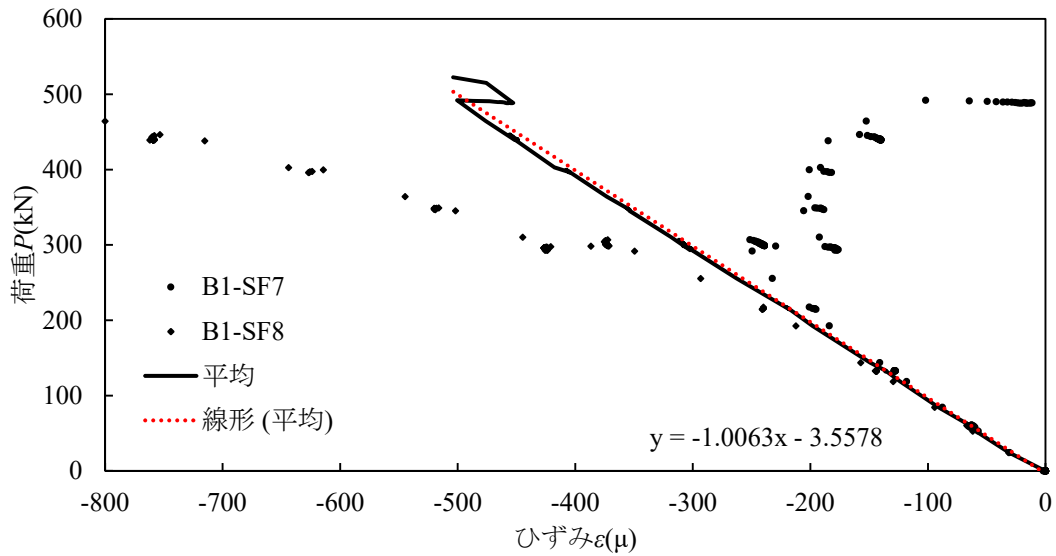


(b) 計測位置 SF-3,SF-4

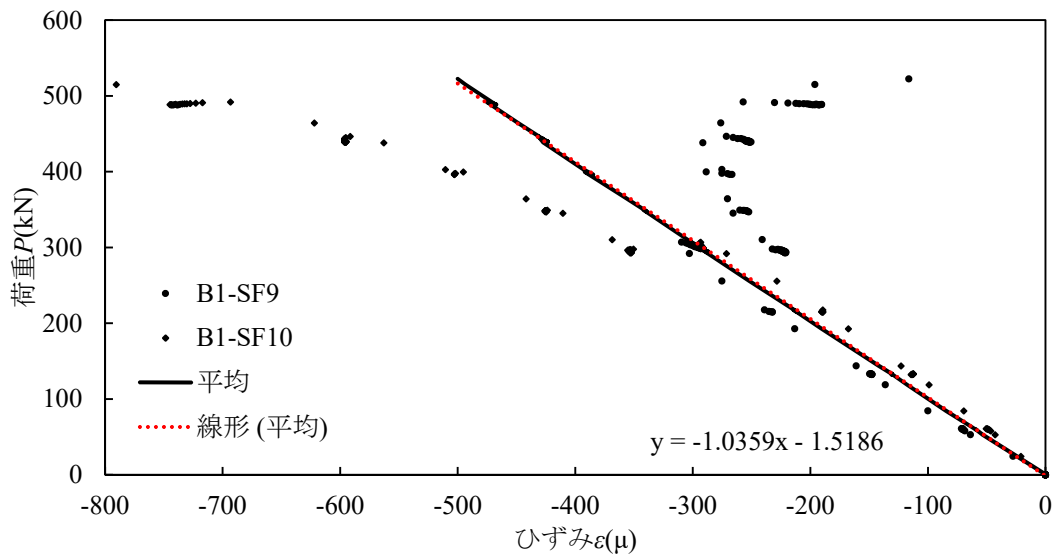


(c) 計測位置 SF-5,SF-6

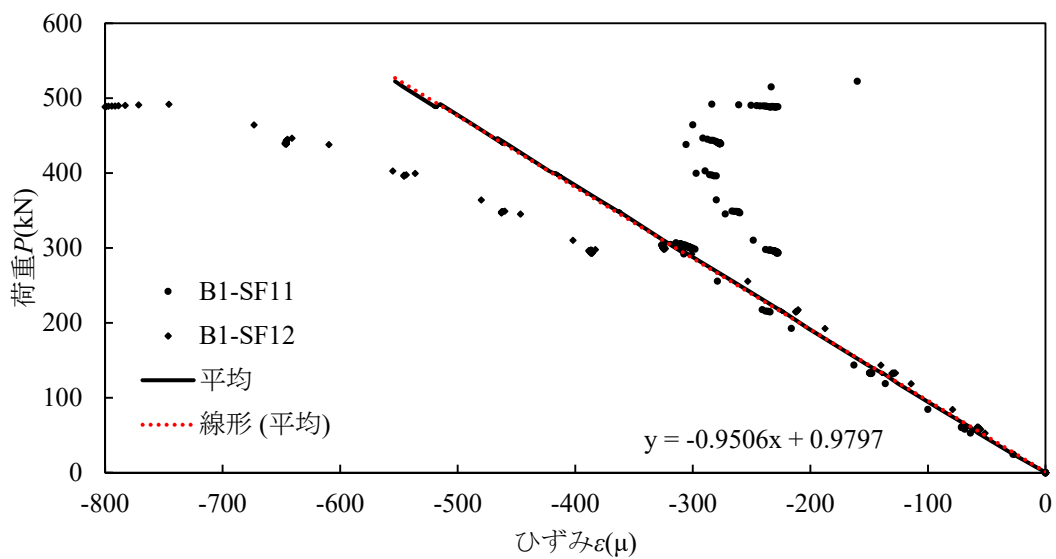
図-付 5.19 圧縮載荷試験における鉛直荷重－ひずみ関係と近似直線（鋼材部）（試験体 B-1 その 1）



(a) 計測位置 SF-7,SF-8

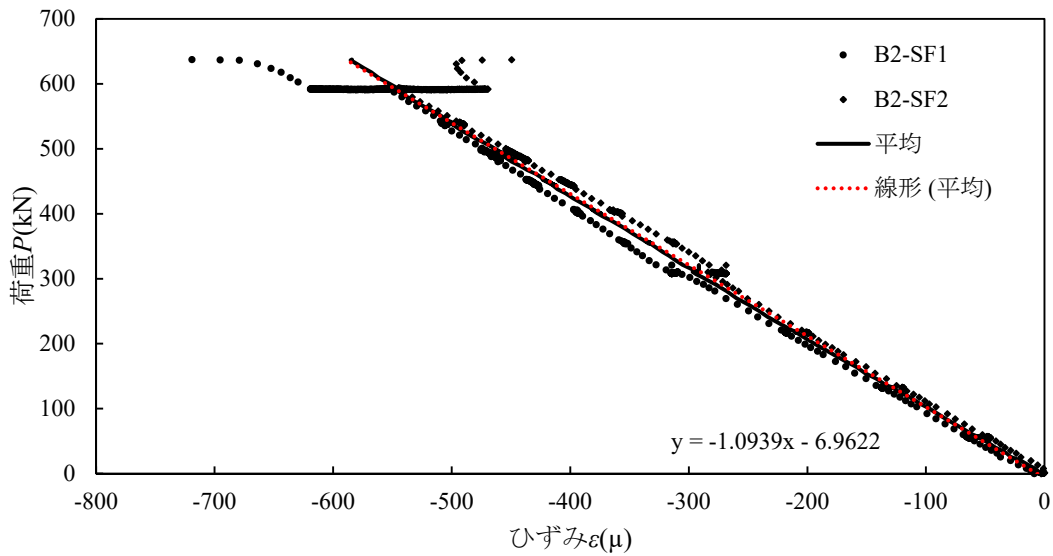


(b) 計測位置 SF-9,SF-10

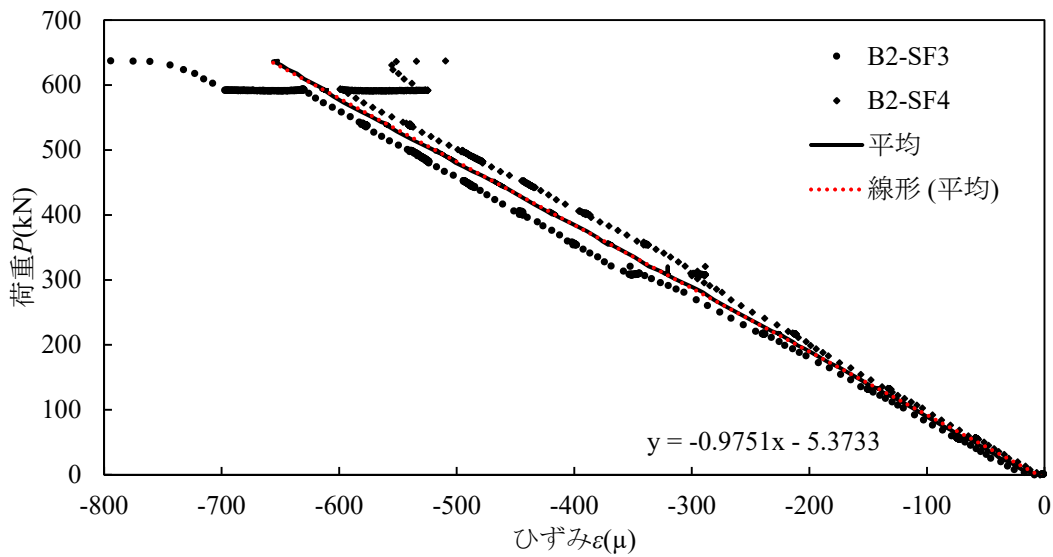


(c) 計測位置 SF-11,SF-12

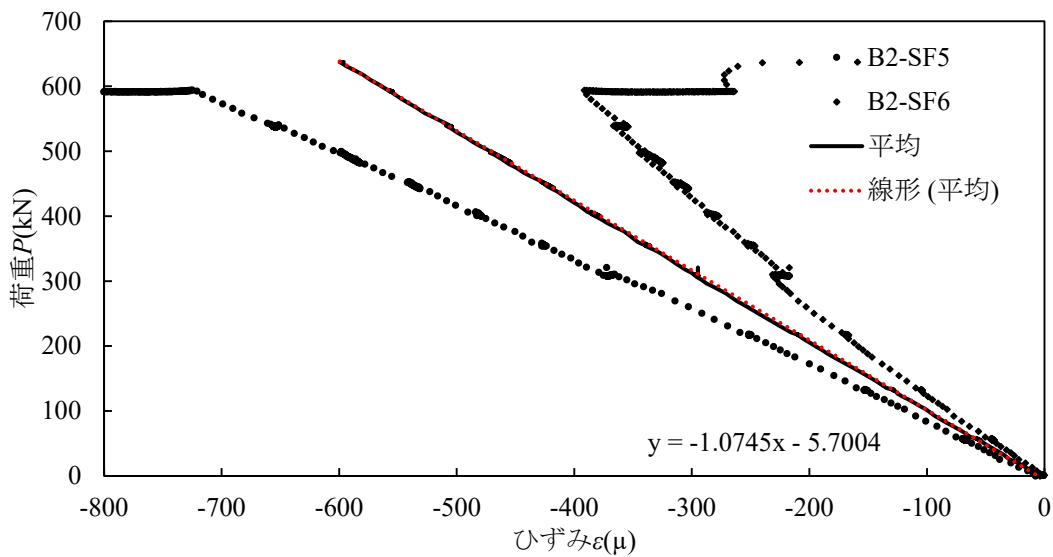
図-付 5.20 圧縮載荷試験における鉛直荷重－ひずみ関係と近似直線（鋼材部）（試験体 B-1 その 2）



(a) 計測位置 SF-1,SF-2

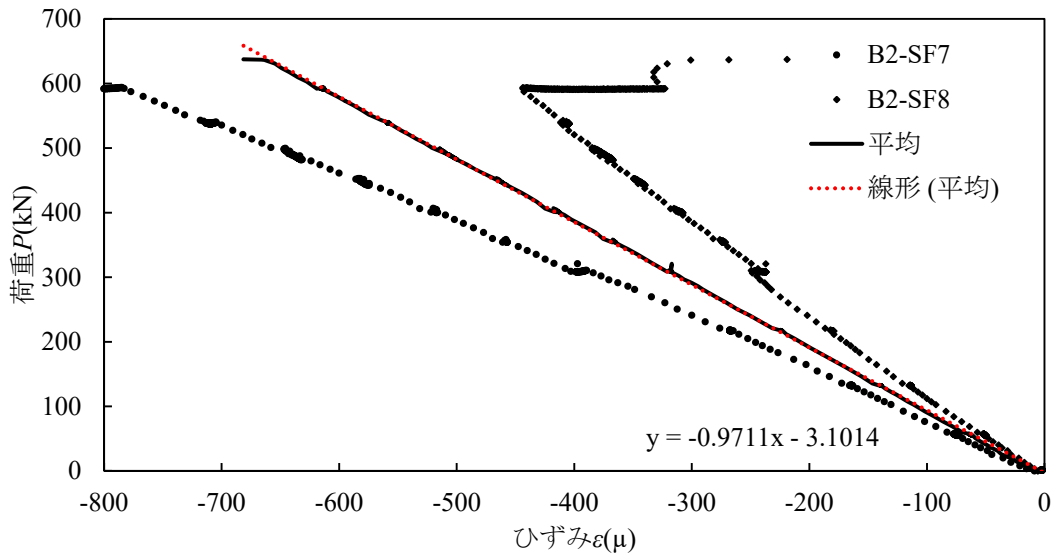


(b) 計測位置 SF-3,SF-4

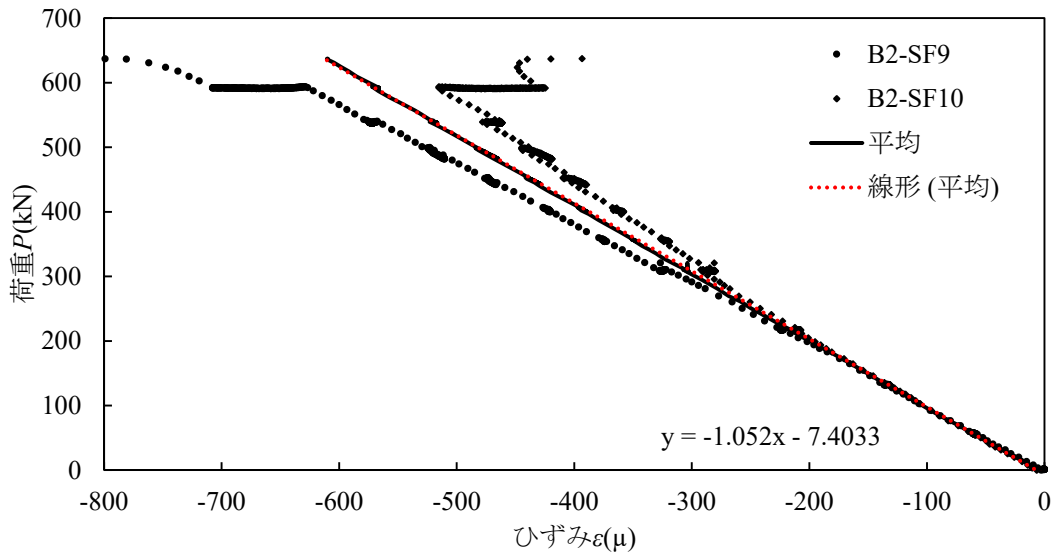


(c) 計測位置 SF-5,SF-6

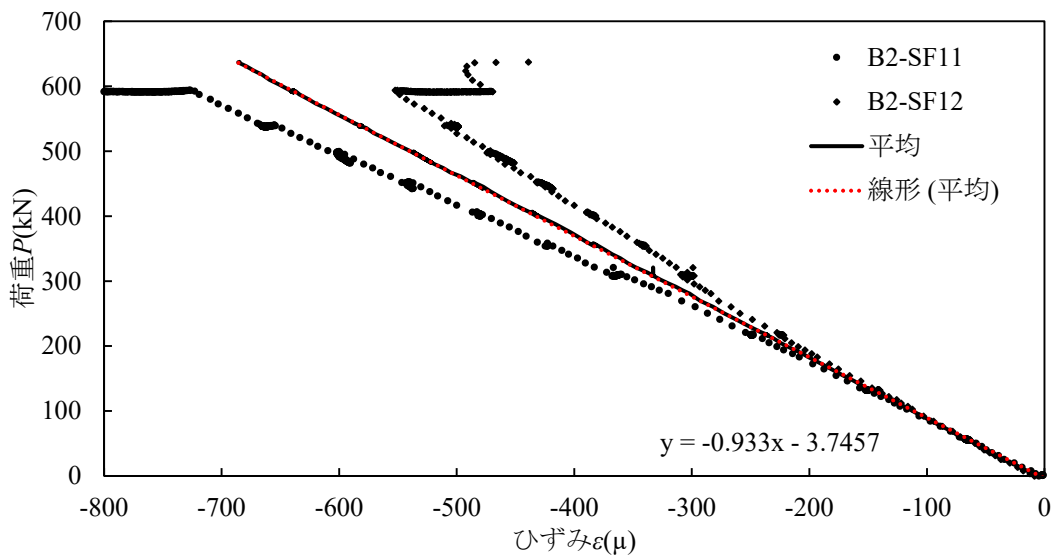
図-付 5.21 圧縮載荷試験における鉛直荷重－ひずみ関係と近似直線（鋼材部）（試験体 B-2 その 1）



(a) 計測位置 SF-7,SF-8

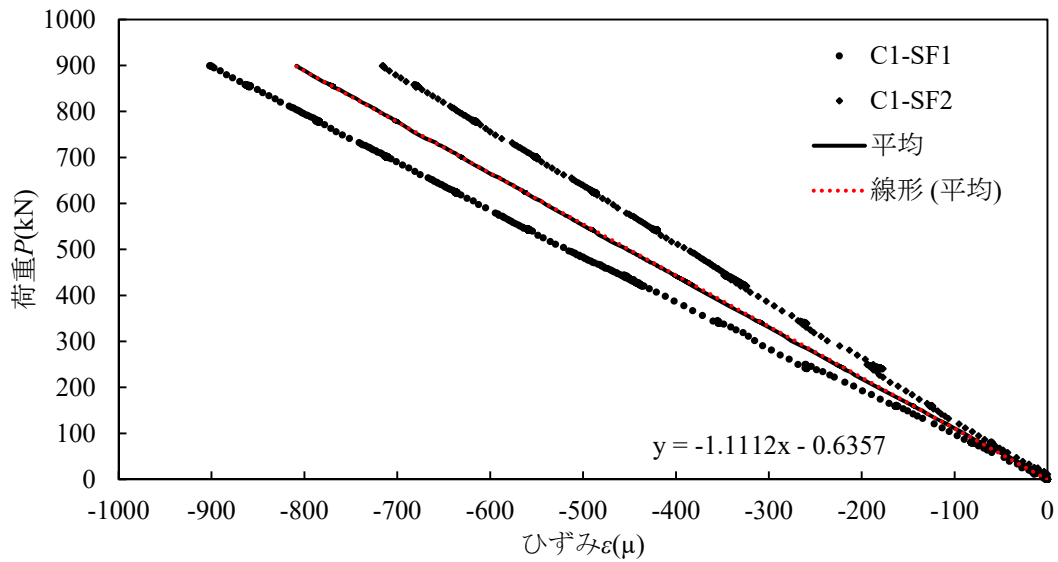


(b) 計測位置 SF-9,SF-10

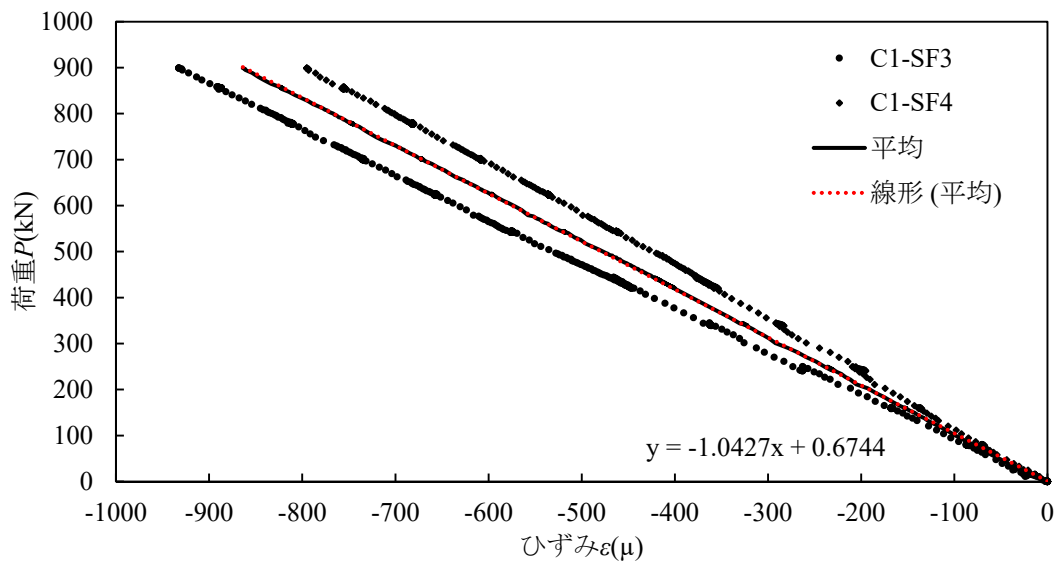


(c) 計測位置 SF-11,SF-12

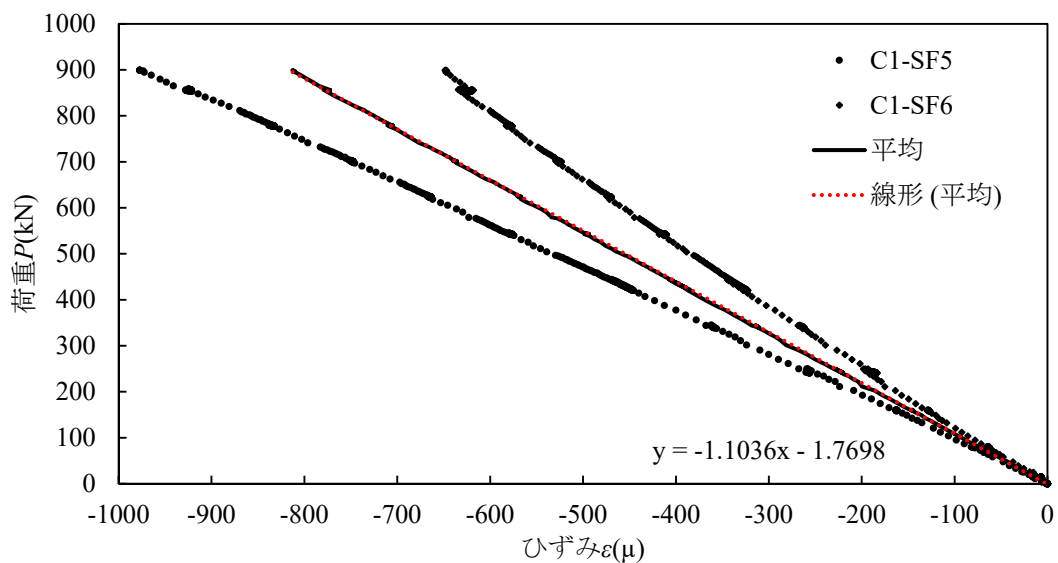
図-付 5.22 圧縮載荷試験における鉛直荷重－ひずみ関係と近似直線（鋼材部）（試験体 B-2 その 2）



(a) 計測位置 SF-1,SF-2

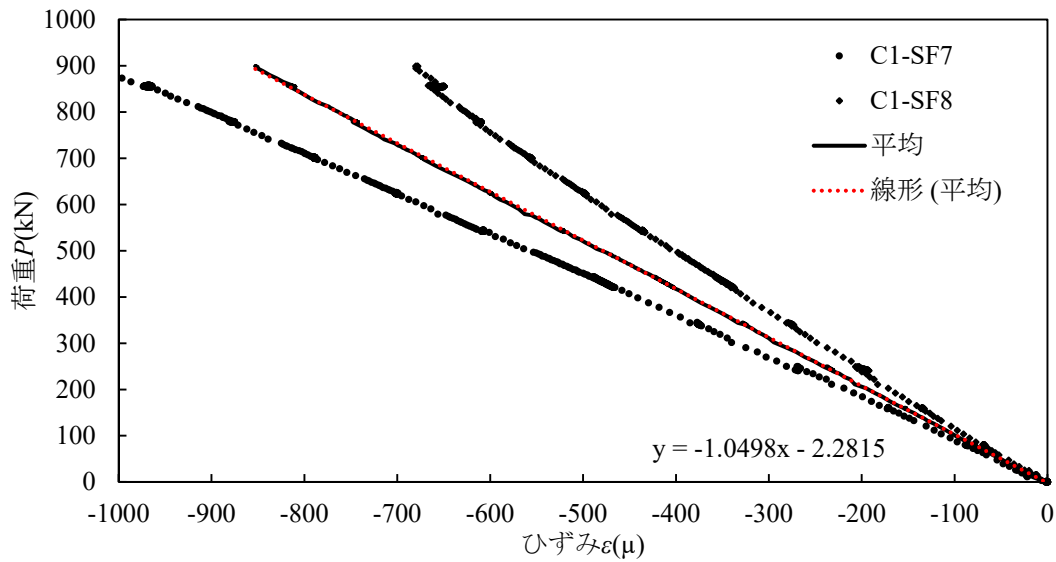


(b) 計測位置 SF-3,SF-4

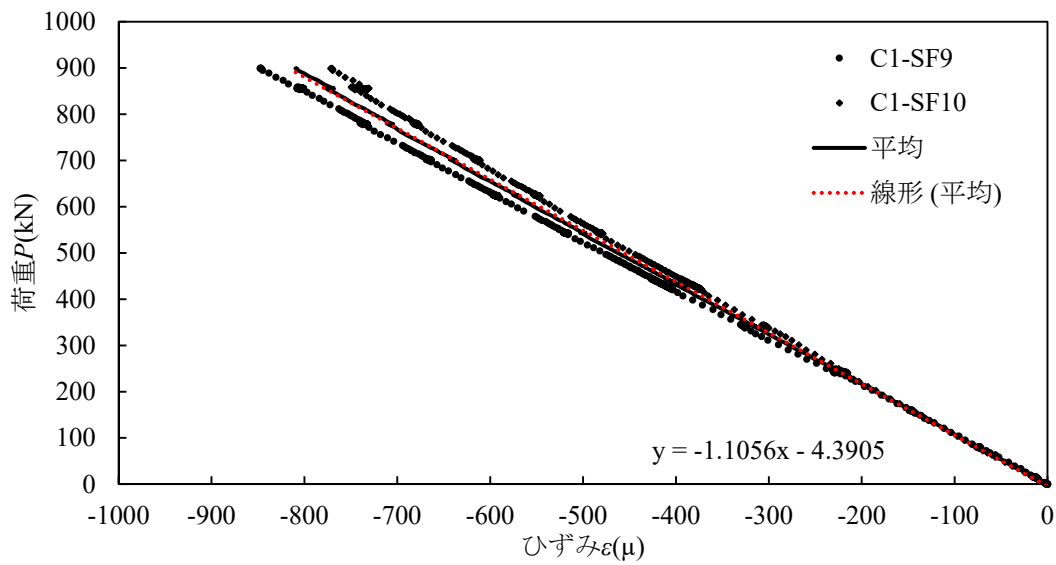


(c) 計測位置 SF-5,SF-6

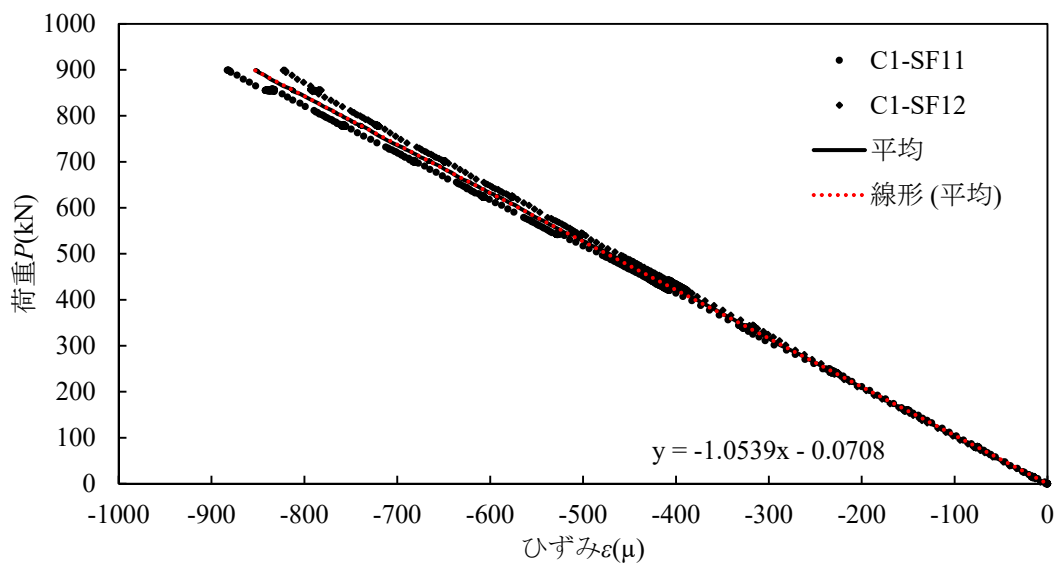
図-付 5.23 圧縮載荷試験における鉛直荷重－ひずみ関係と近似直線（鋼材部）（試験体 C-1 その 1）



(a) 計測位置 SF-7,SF-8

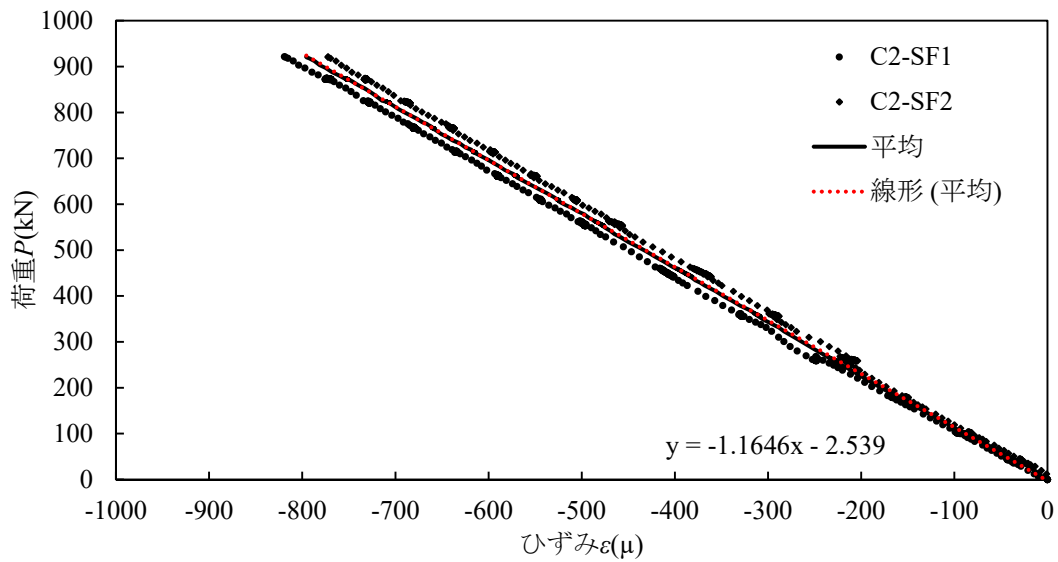


(b) 計測位置 SF-9,SF-10

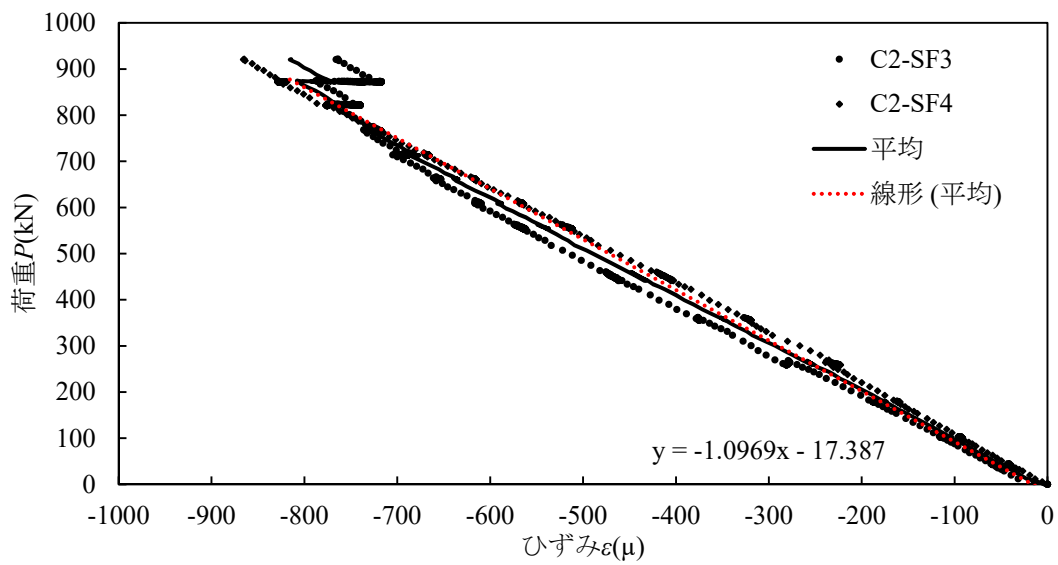


(c) 計測位置 SF-11,SF-12

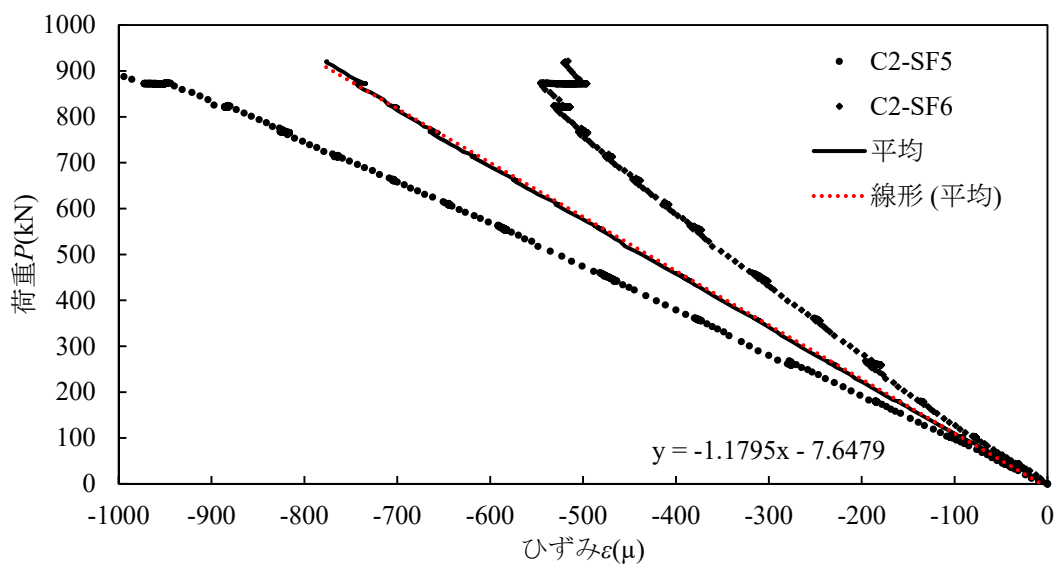
図-付 5.24 圧縮載荷試験における鉛直荷重－ひずみ関係と近似直線（鋼材部）（試験体 C-1 その 2）



(a) 計測位置 SF-1,SF-2

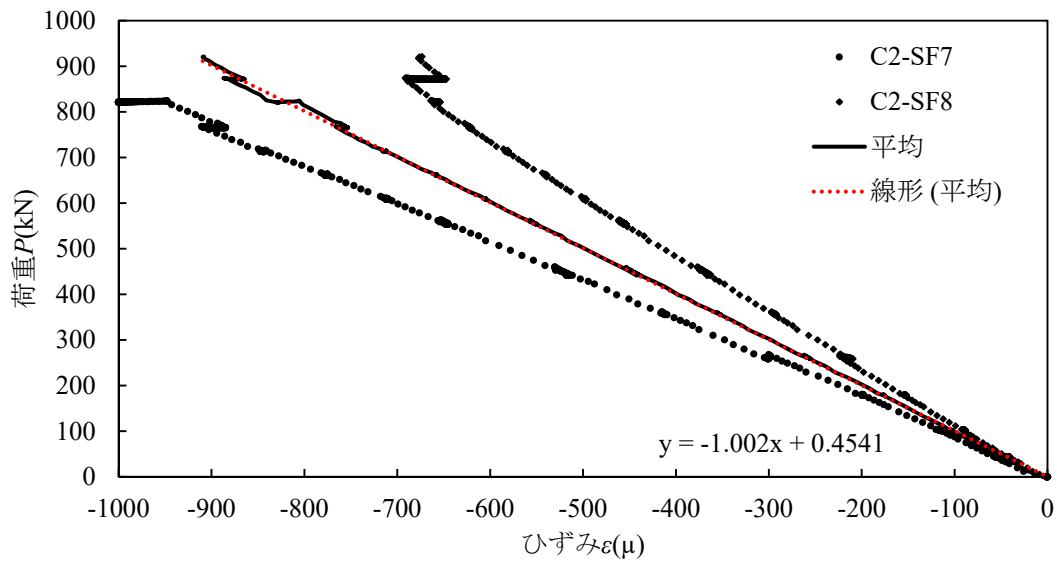


(b) 計測位置 SF-3,SF-4

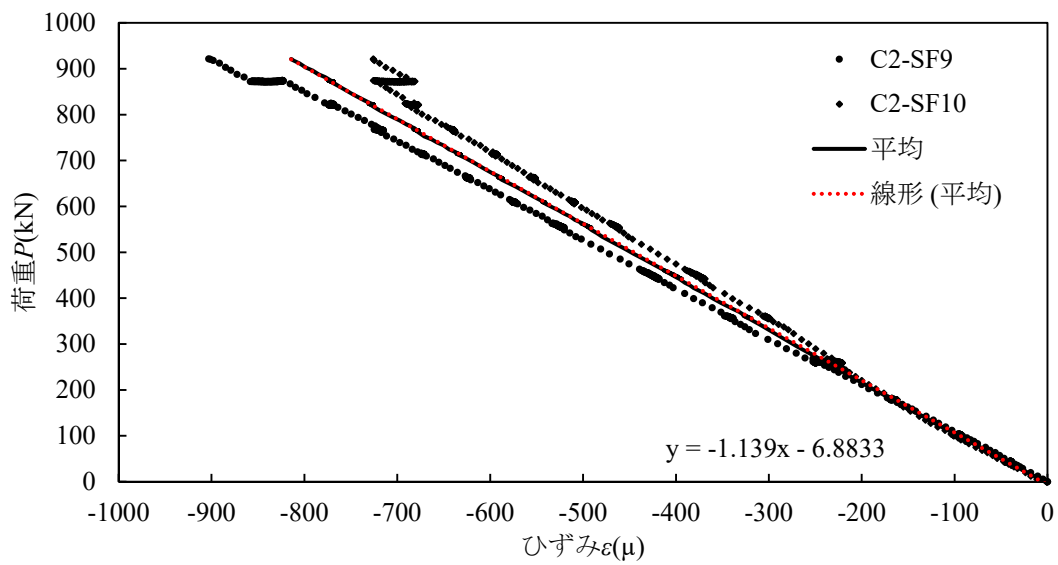


(c) 計測位置 SF-5,SF-6

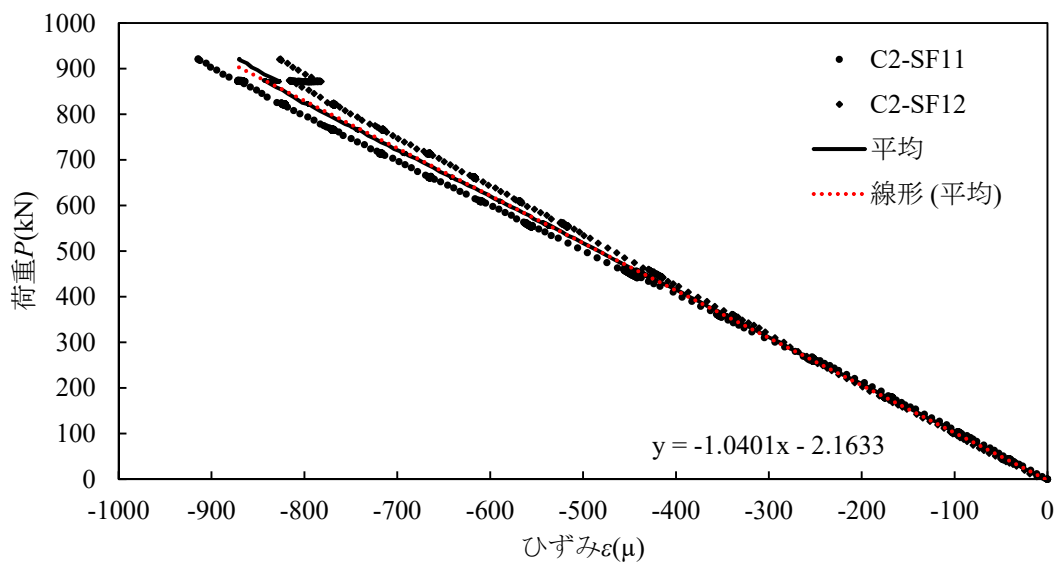
図-付 5.25 圧縮載荷試験における鉛直荷重－ひずみ関係と近似直線（鋼材部）（試験体 C-2 その 1）



(a) 計測位置 SF-7,SF-8

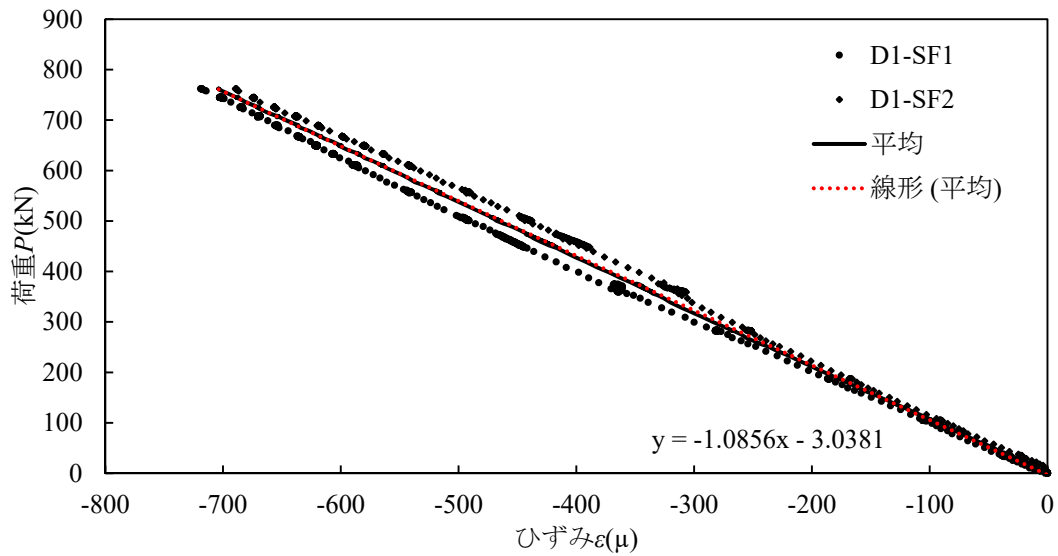


(b) 計測位置 SF-9,SF-10

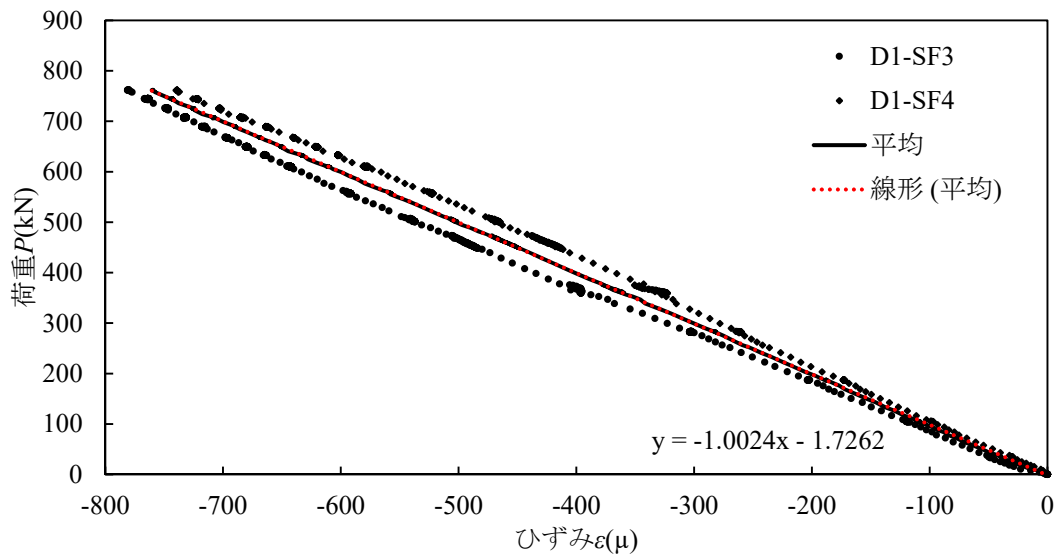


(c) 計測位置 SF-11,SF-12

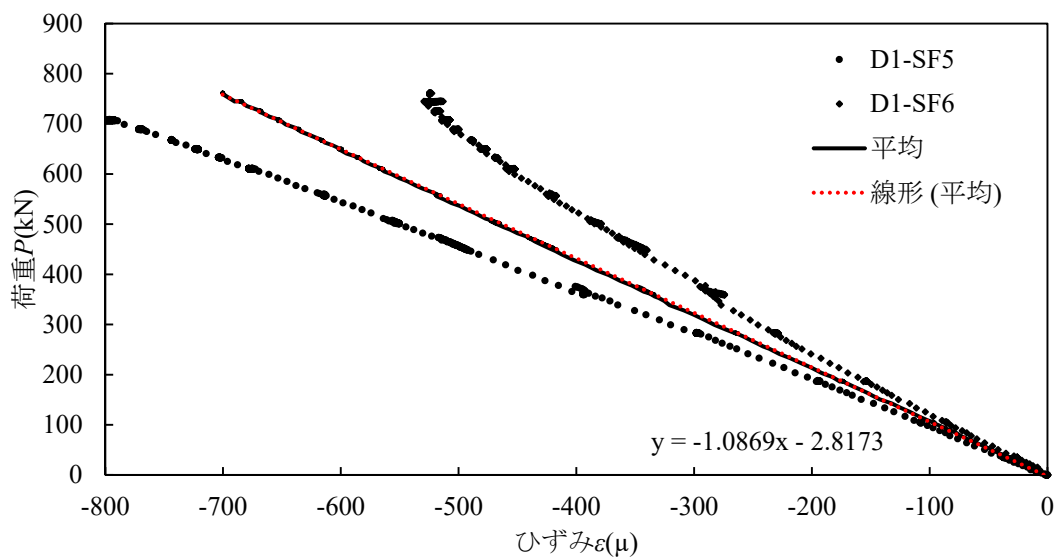
図-付 5.26 圧縮載荷試験における鉛直荷重－ひずみ関係と近似直線（鋼材部）（試験体 C-2 その 2）



(a) 計測位置 SF-1,SF-2

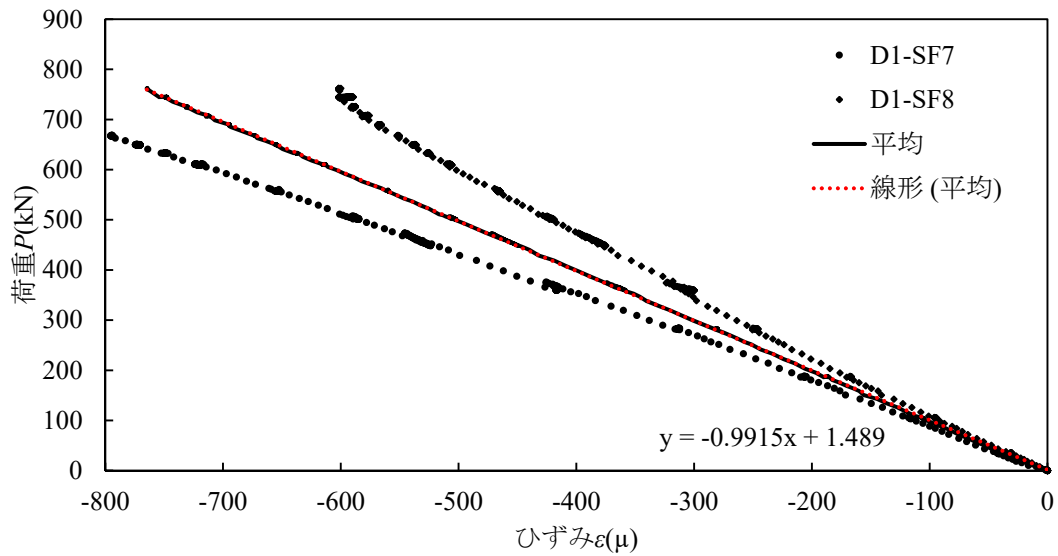


(b) 計測位置 SF-3,SF-4

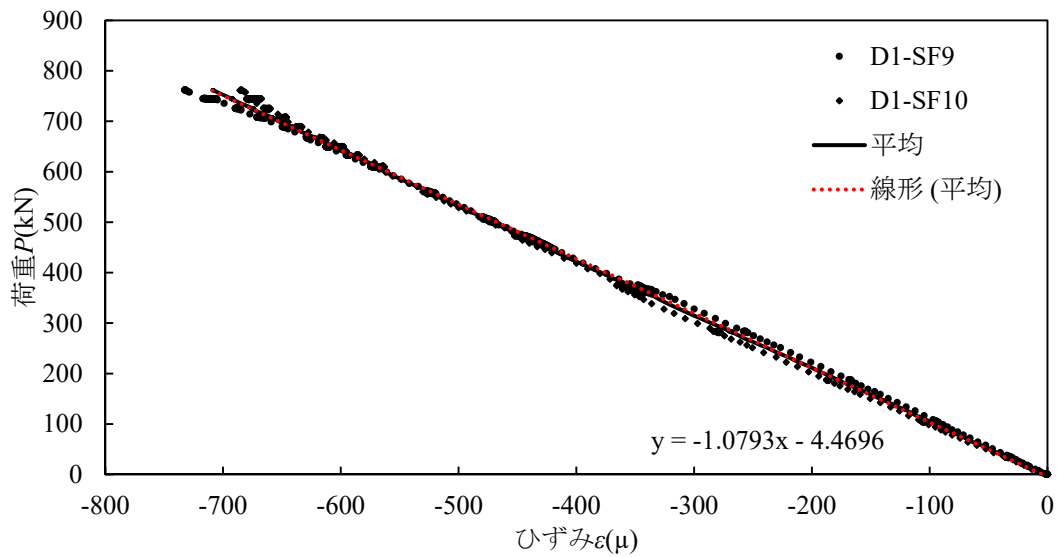


(c) 計測位置 SF-5,SF-6

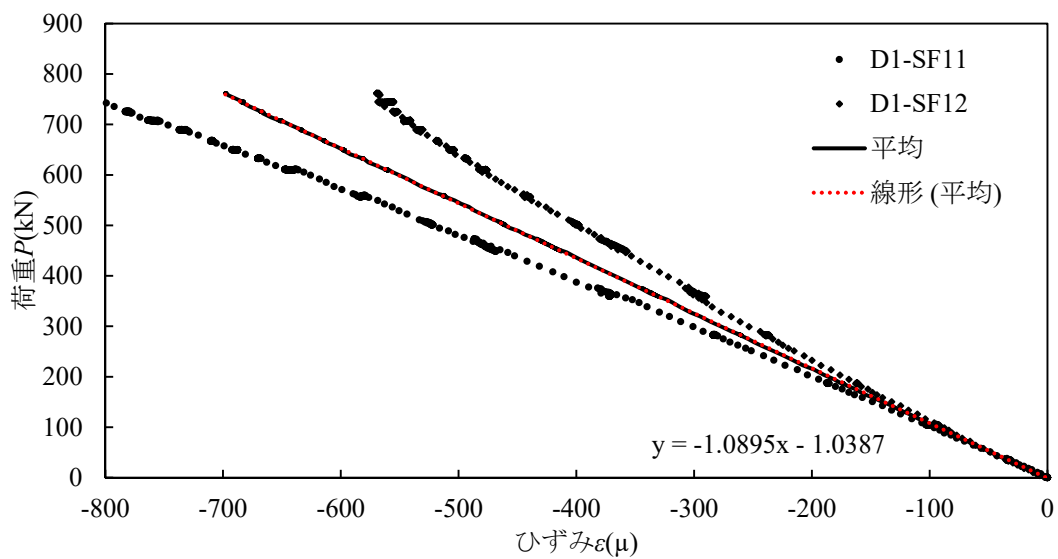
図-付 5.27 圧縮載荷試験における鉛直荷重－ひずみ関係と近似直線（鋼材部）（試験体 D-1 その 1）



(a) 計測位置 SF-7,SF-8

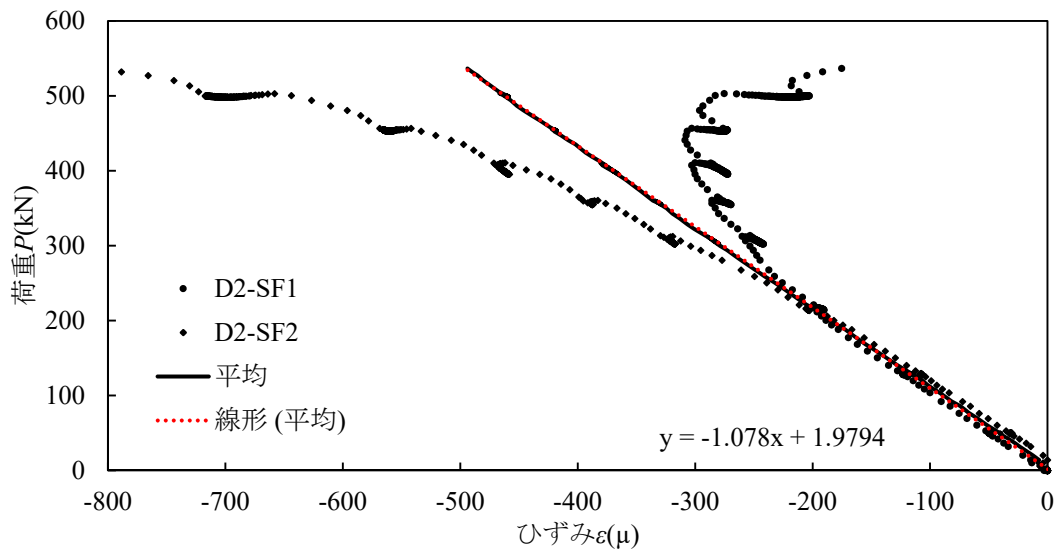


(b) 計測位置 SF-9,SF-10

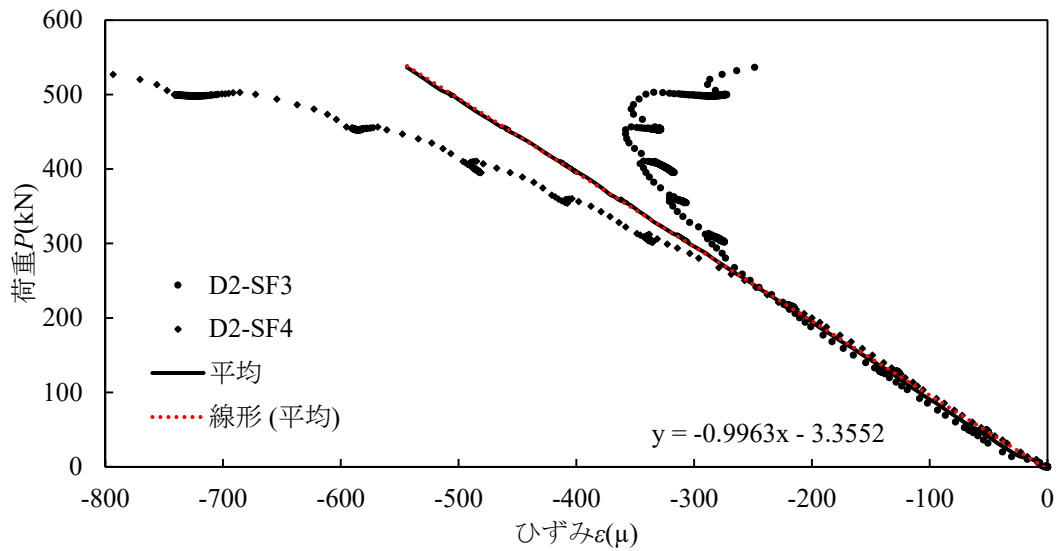


(c) 計測位置 SF-11,SF-12

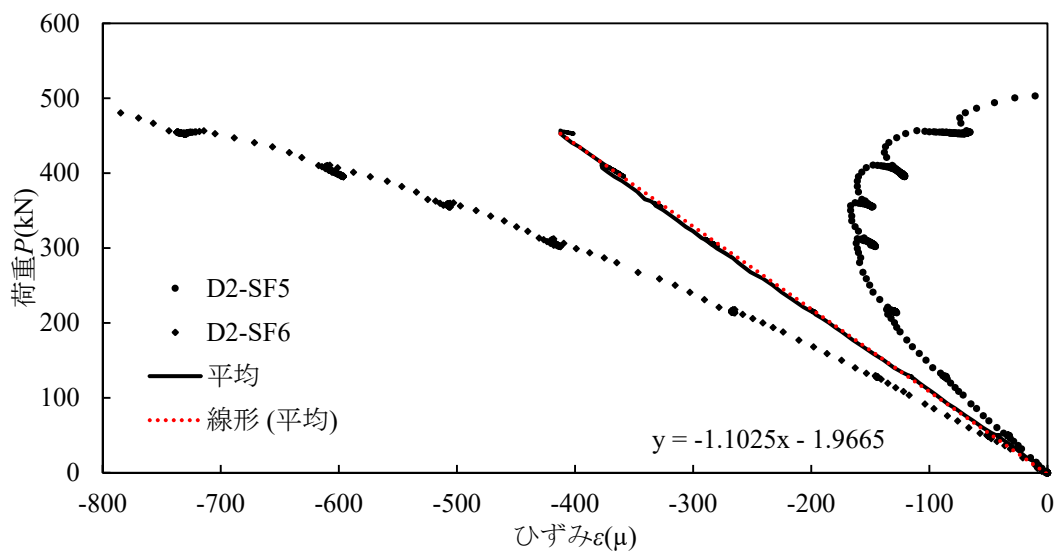
図-付 5.28 圧縮載荷試験における鉛直荷重－ひずみ関係と近似直線（鋼材部）（試験体 D-1 その 2）



(a) 計測位置 SF-1,SF-2

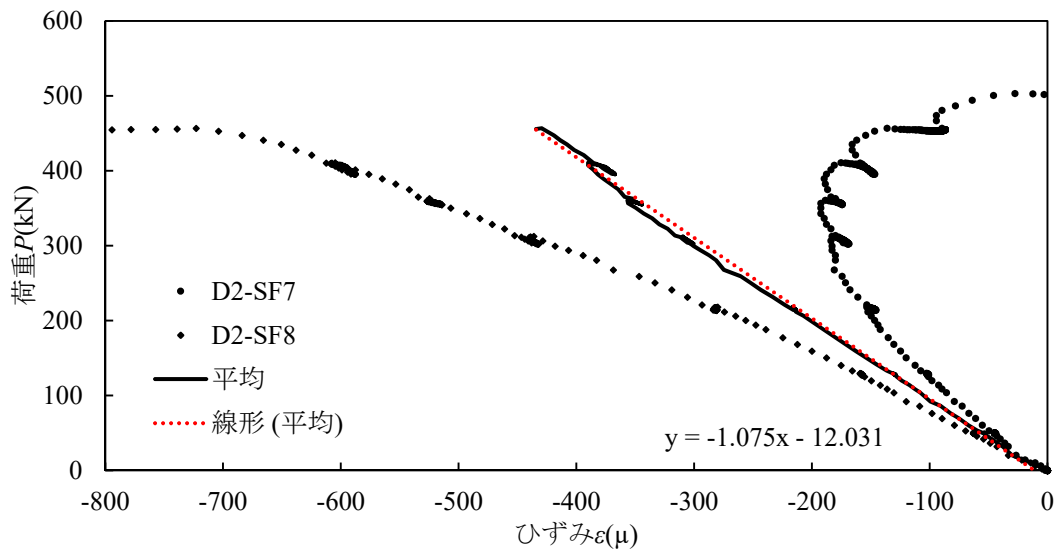


(b) 計測位置 SF-3,SF-4

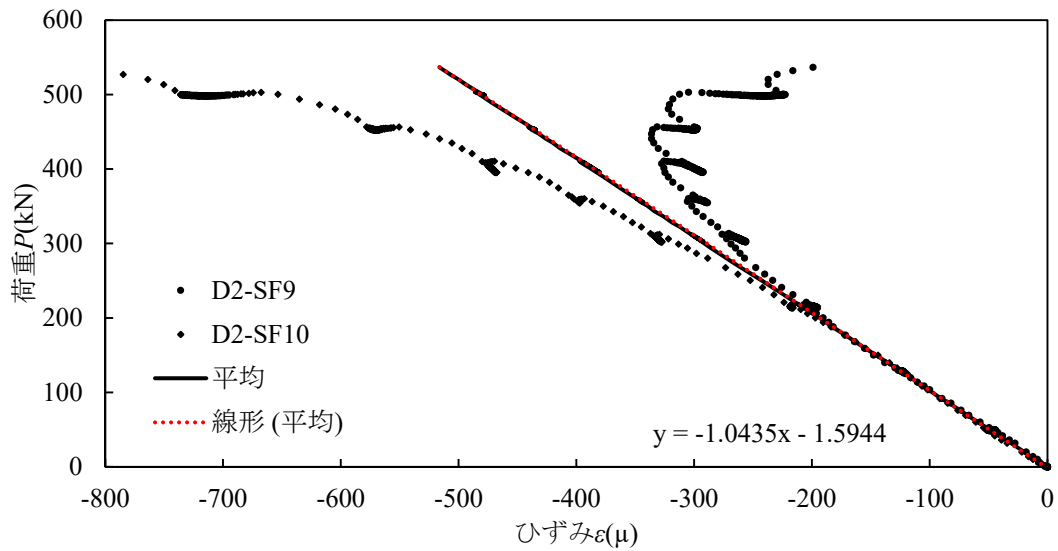


(c) 計測位置 SF-5,SF-6

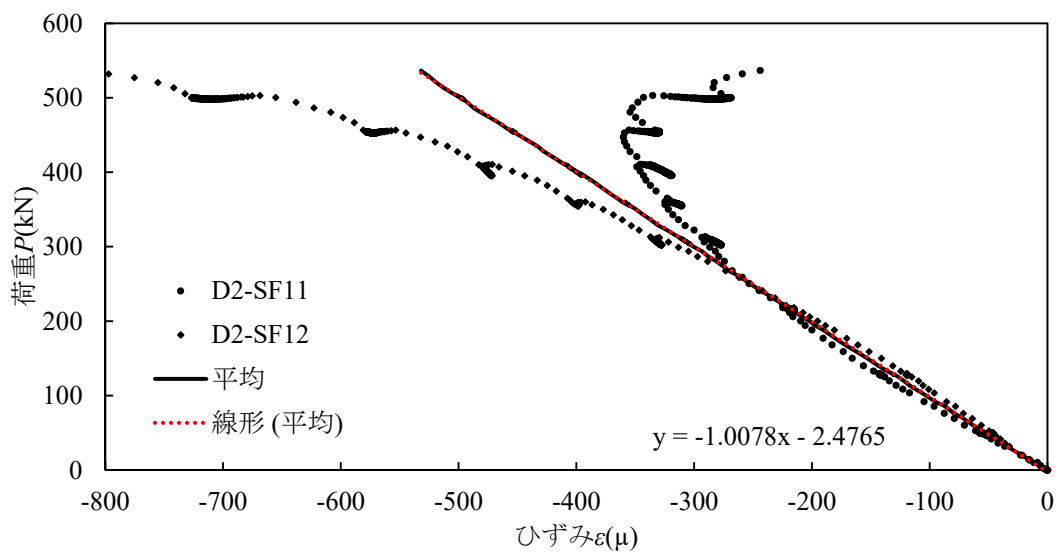
図-付 5.29 圧縮載荷試験における鉛直荷重－ひずみ関係と近似直線（鋼材部）（試験体 D-2 その 1）



(a) 計測位置 SF-7,SF-8

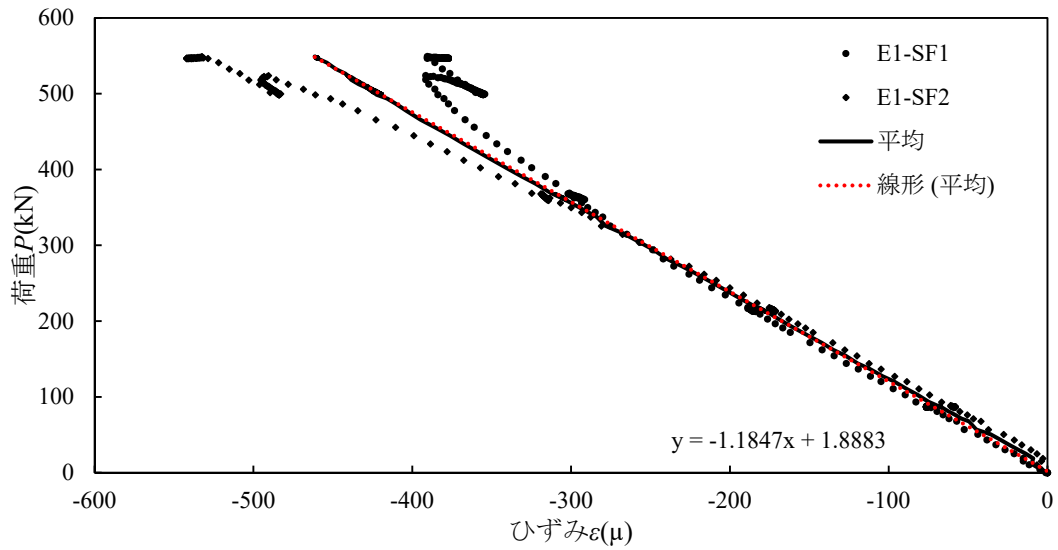


(b) 計測位置 SF-9,SF-10

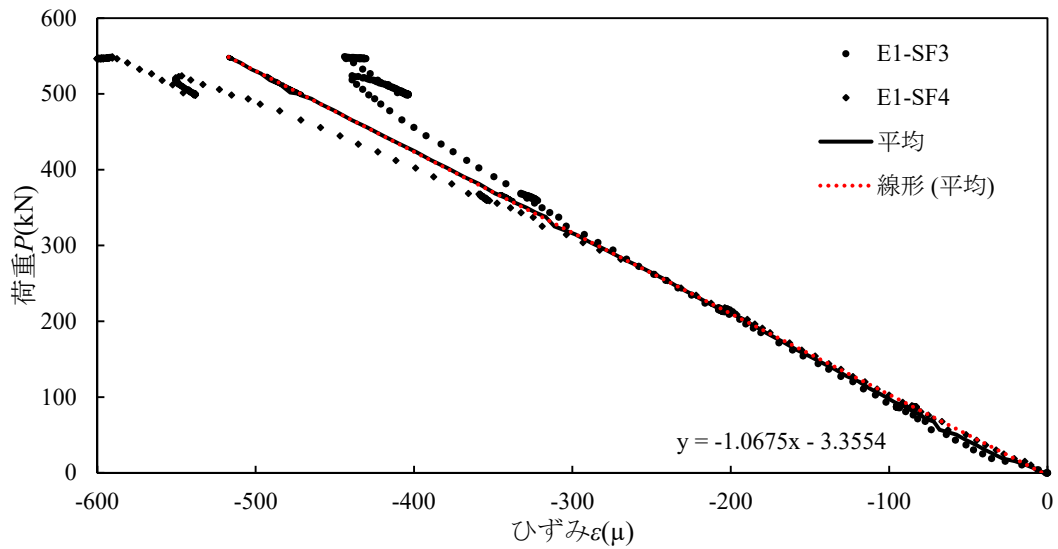


(c) 計測位置 SF-11,SF-12

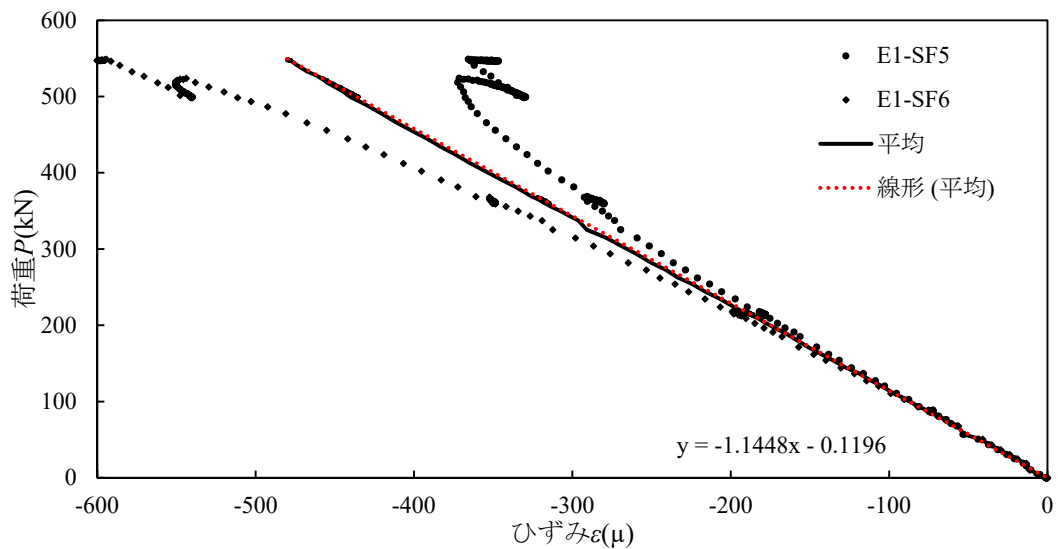
図-付 5.30 圧縮載荷試験における鉛直荷重－ひずみ関係と近似直線（鋼材部）（試験体 D-2 その 2）



(a) 計測位置 SF-1,SF-2

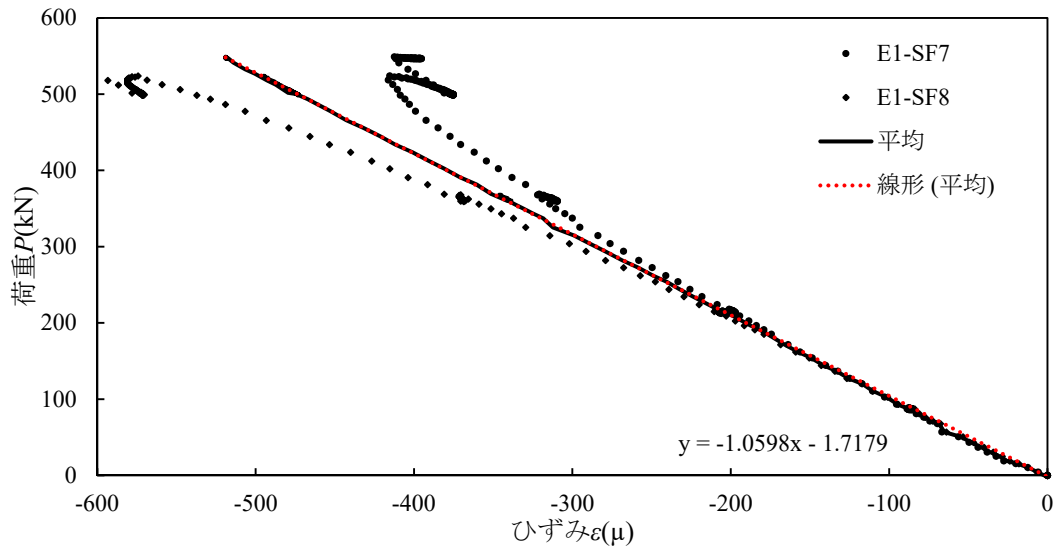


(b) 計測位置 SF-3,SF-4

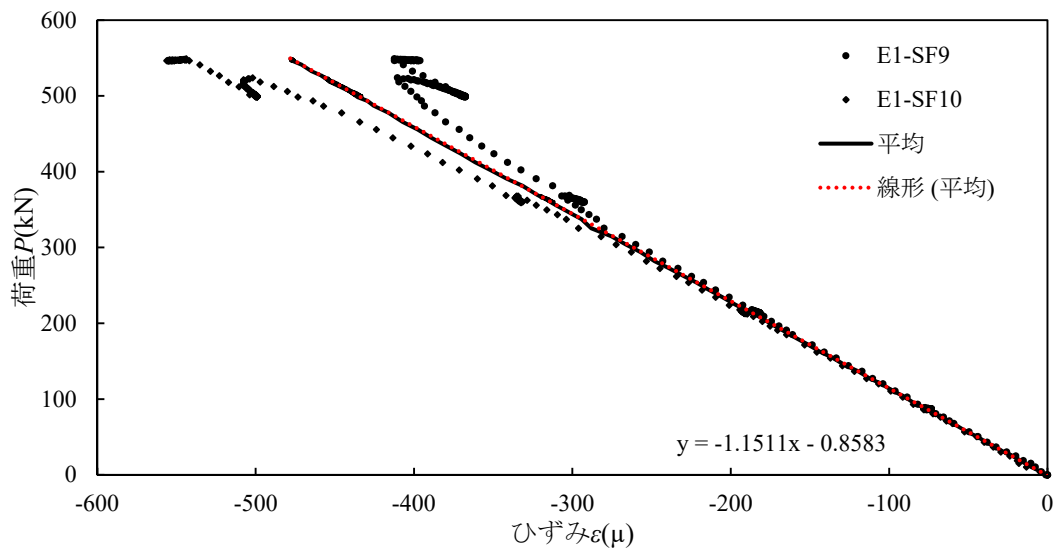


(c) 計測位置 SF-5,SF-6

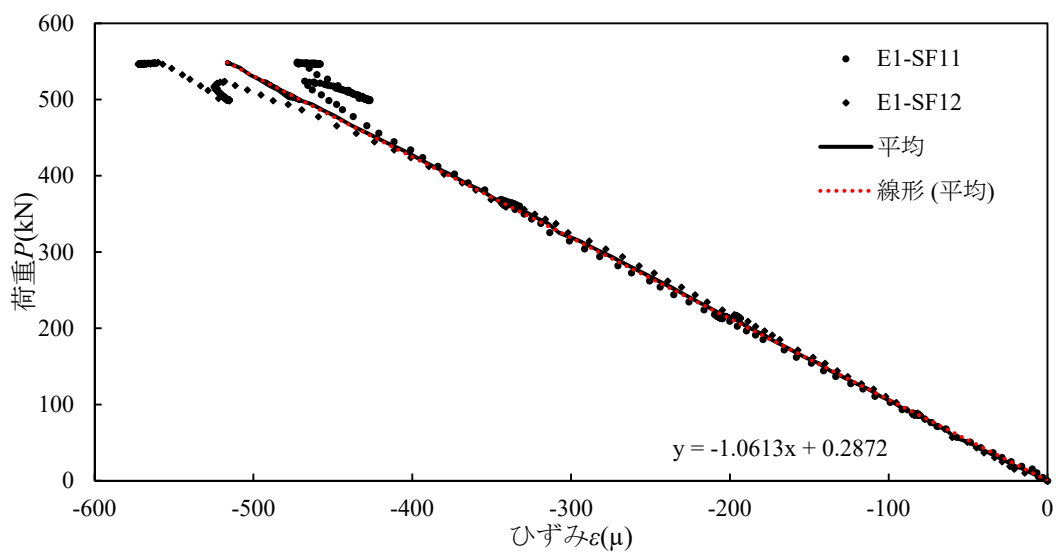
図-付 5.31 圧縮載荷試験における鉛直荷重－ひずみ関係と近似直線（鋼材部）（試験体 E-1 その 17）



(a) 計測位置 SF-7,SF-8

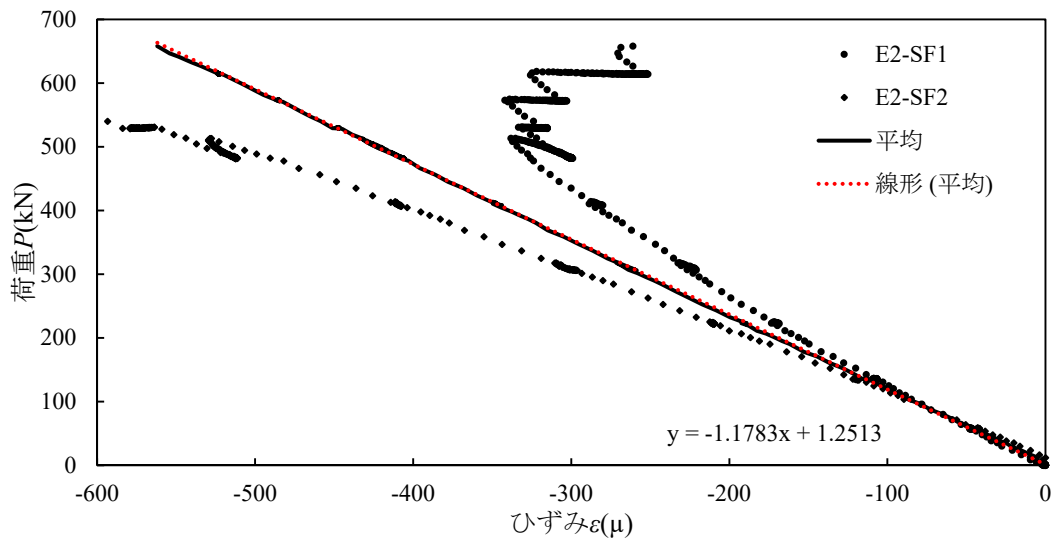


(b) 計測位置 SF-9,SF-10

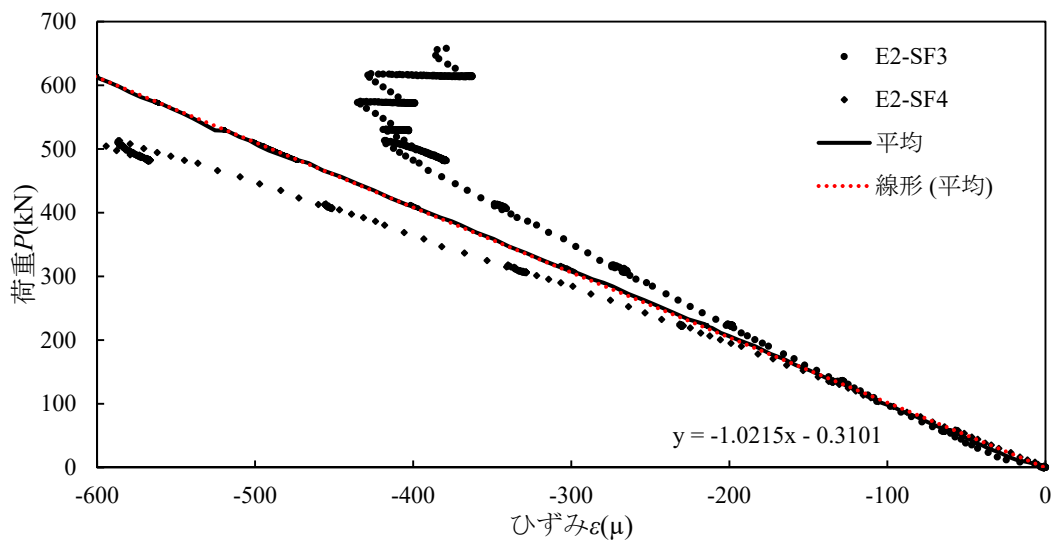


(c) 計測位置 SF-11,SF-12

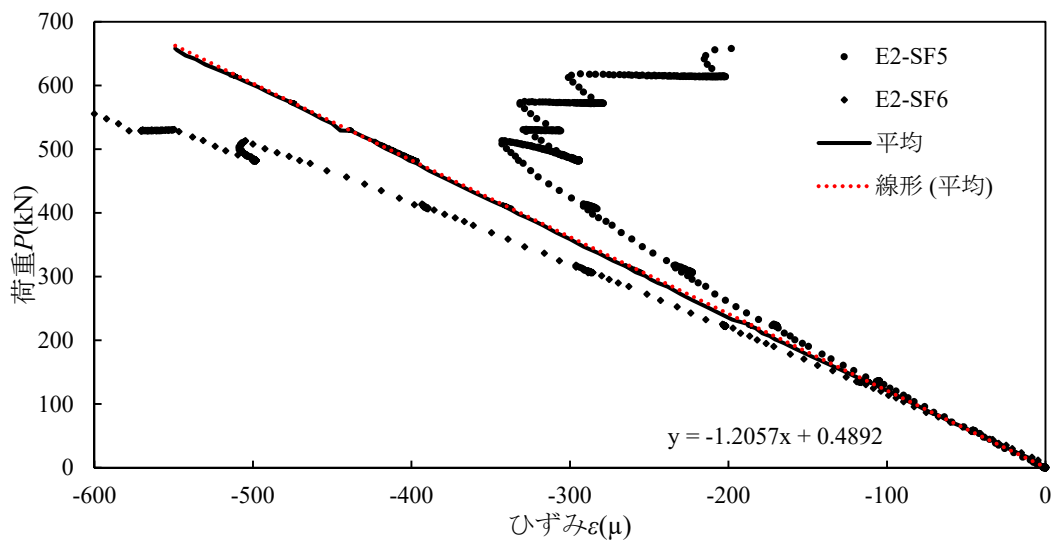
図-付 5.32 圧縮載荷試験における鉛直荷重－ひずみ関係と近似直線（鋼材部）（試験体 E-1 その 18）



(a) 計測位置 SF-1,SF-2

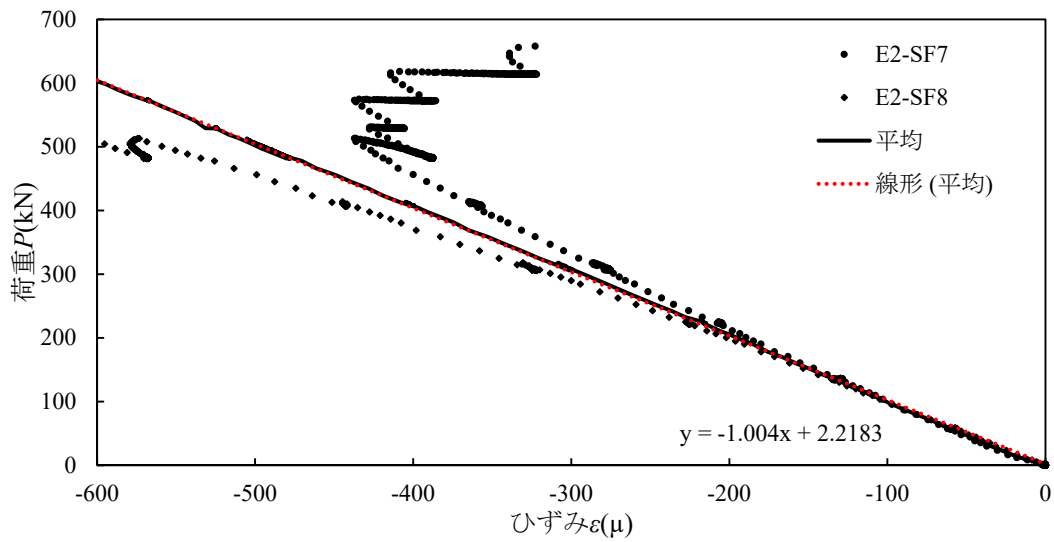


(b) 計測位置 SF-3,SF-4

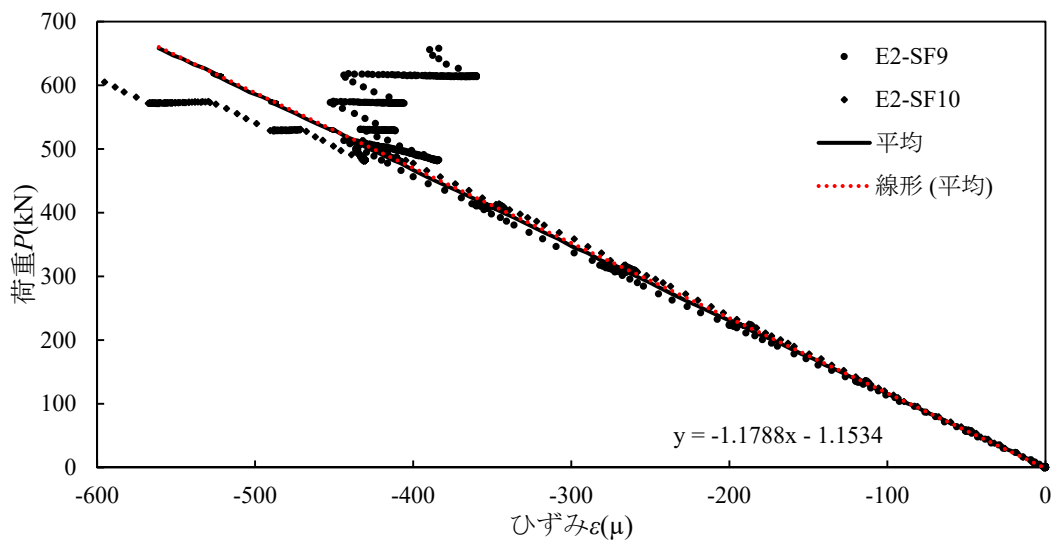


(c) 計測位置 SF-5,SF-6

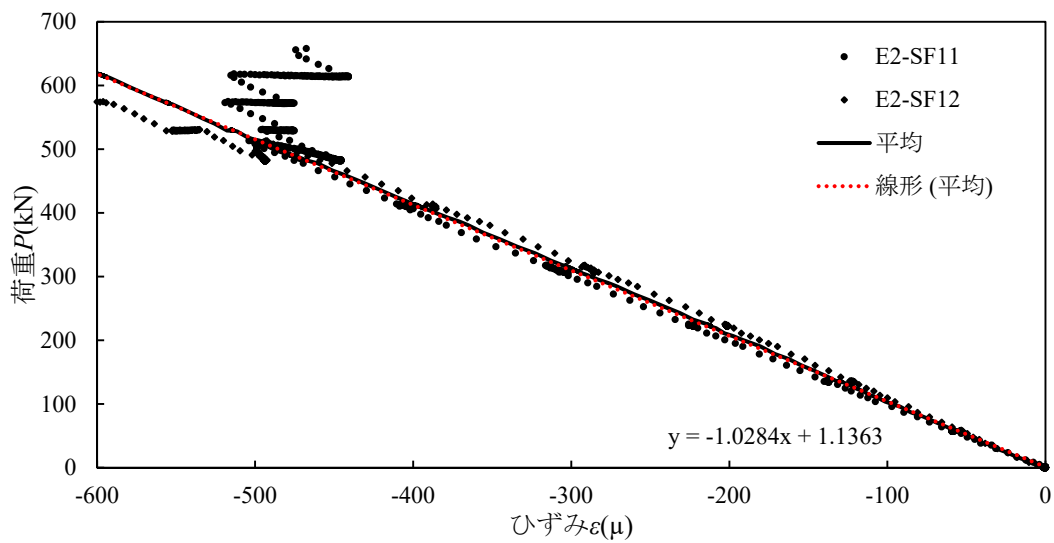
図-付 5.33 圧縮載荷試験における鉛直荷重－ひずみ関係と近似直線（鋼材部）（試験体 E-2 その 1）



(a) 計測位置 SF-7,SF-8

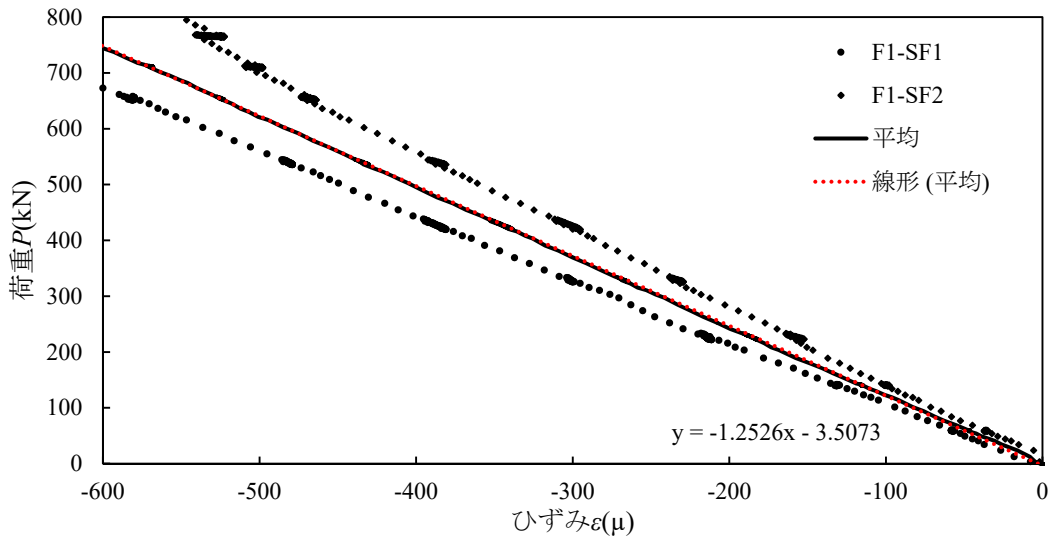


(b) 計測位置 SF-9,SF-10

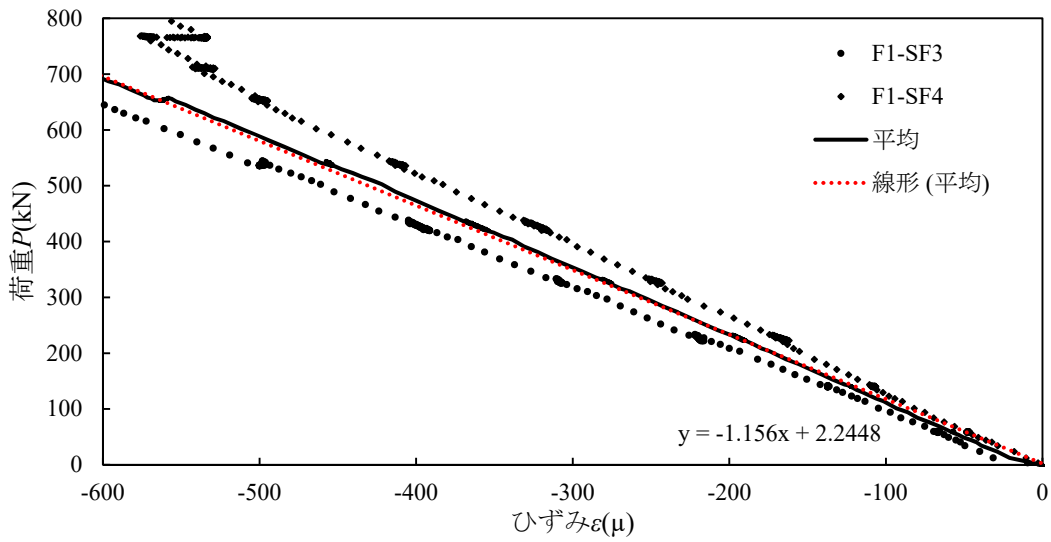


(c) 計測位置 SF-11,SF-12

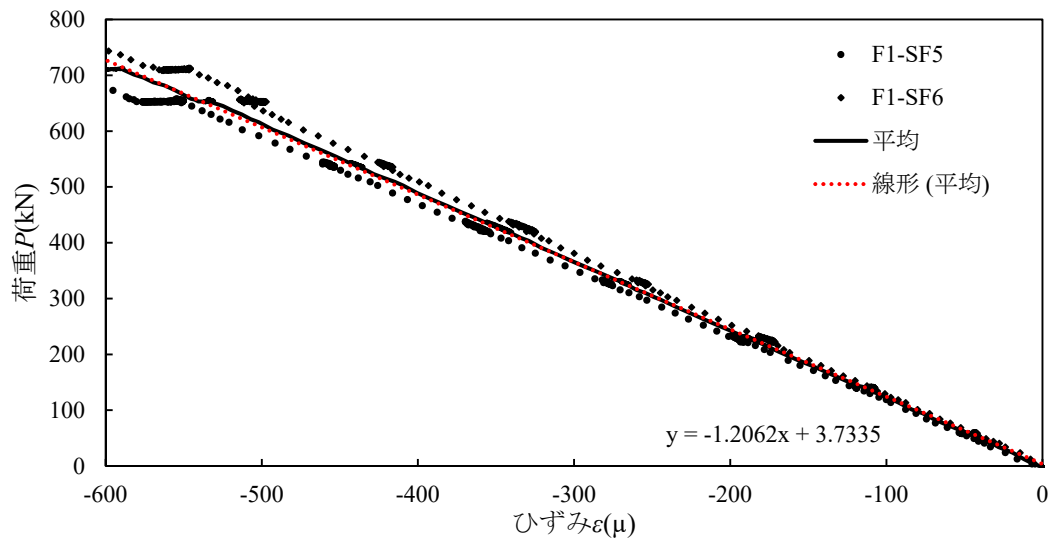
図-付 5.34 圧縮載荷試験における鉛直荷重－ひずみ関係と近似直線（鋼材部）（試験体 E-2 その 2）



(a) 計測位置 SF-1,SF-2

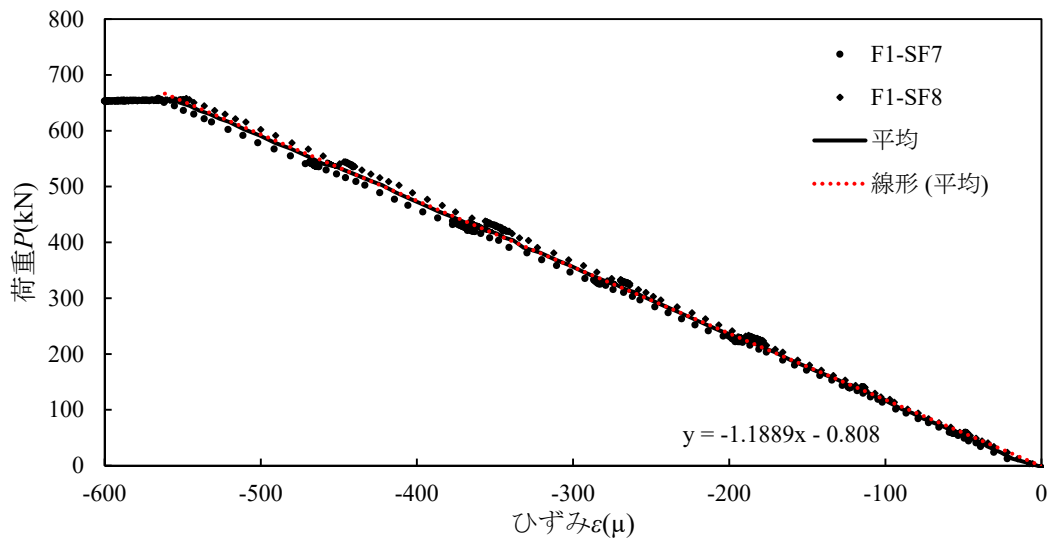


(b) 計測位置 SF-3,SF-4

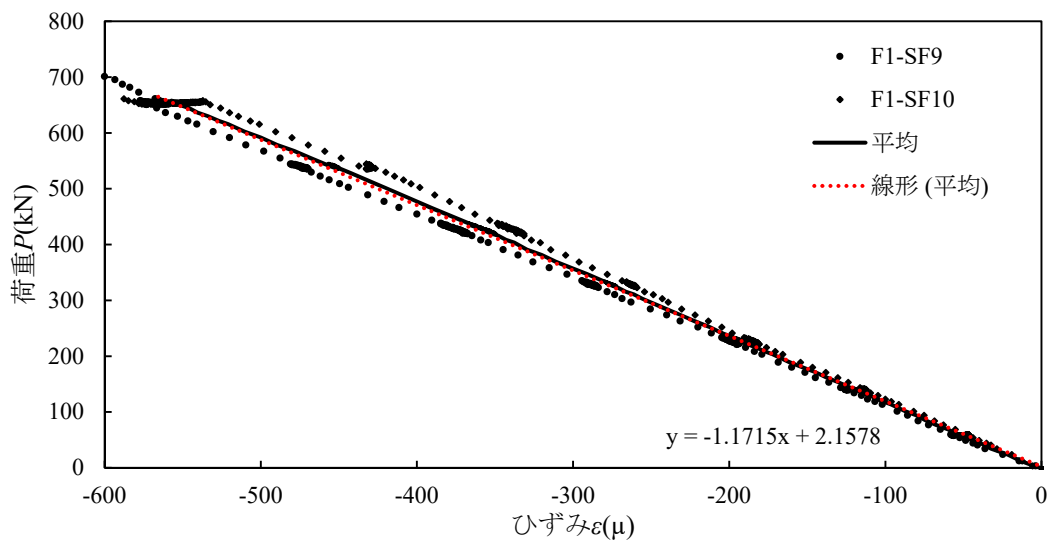


(c) 計測位置 SF-5,SF-6

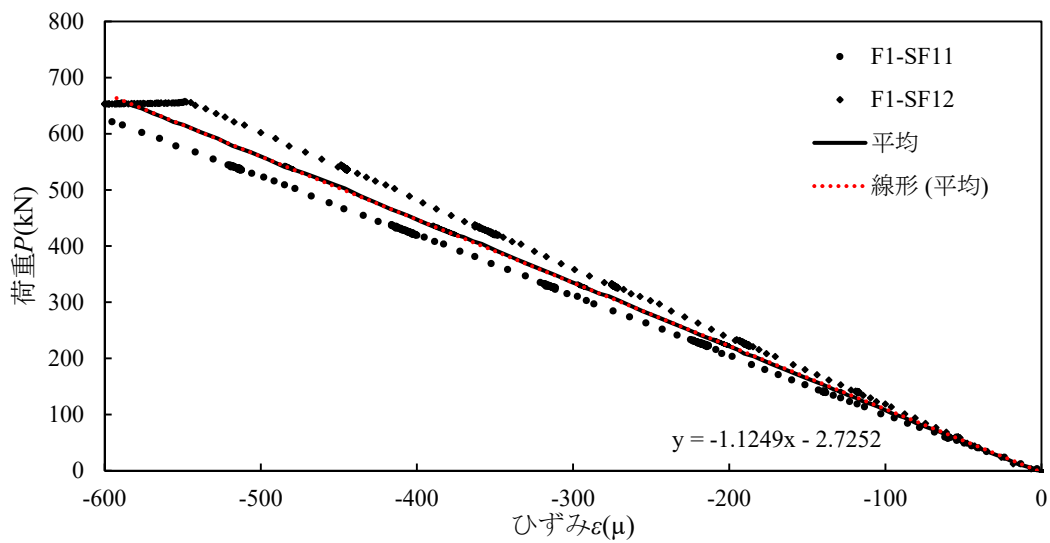
図-付 5.35 圧縮載荷試験における鉛直荷重－ひずみ関係と近似直線（鋼材部）（試験体 F-1 その 1）



(a) 計測位置 SF-7,SF-8

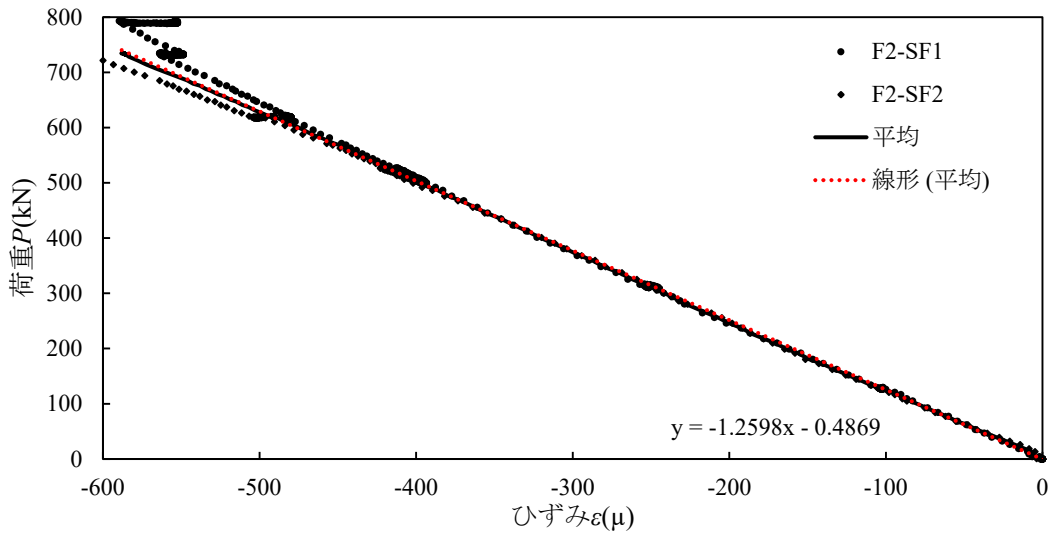


(b) 計測位置 SF-9,SF-10

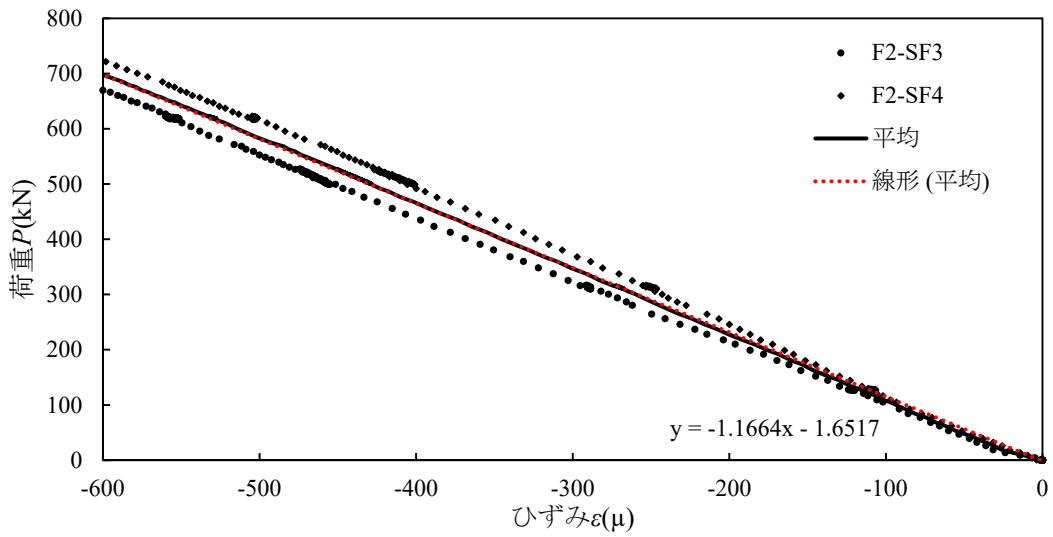


(c) 計測位置 SF-11,SF-12

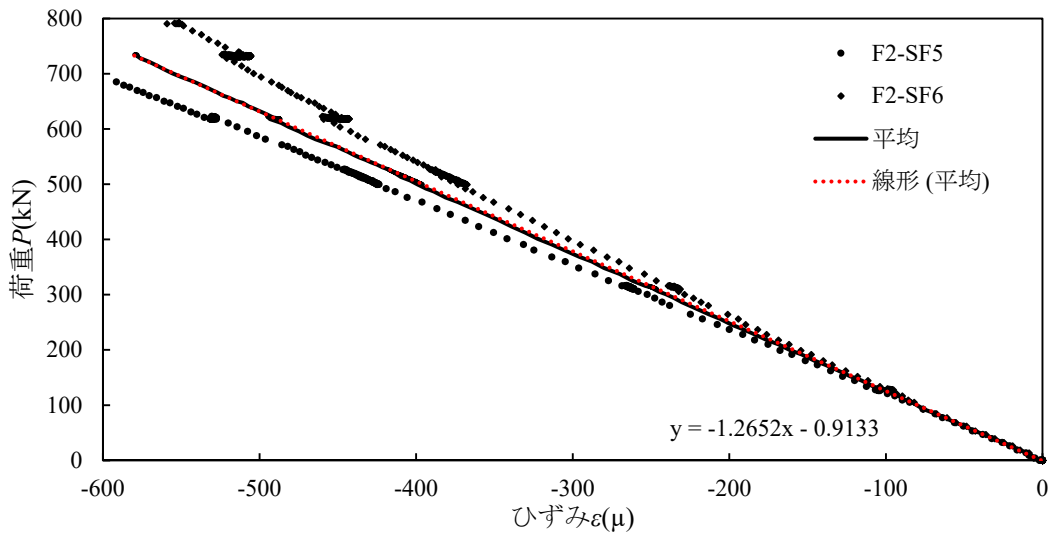
図-付 5.36 圧縮載荷試験における鉛直荷重－ひずみ関係と近似直線（鋼材部）（試験体 F-1 その 2）



(a) 計測位置 SF-1,SF-2

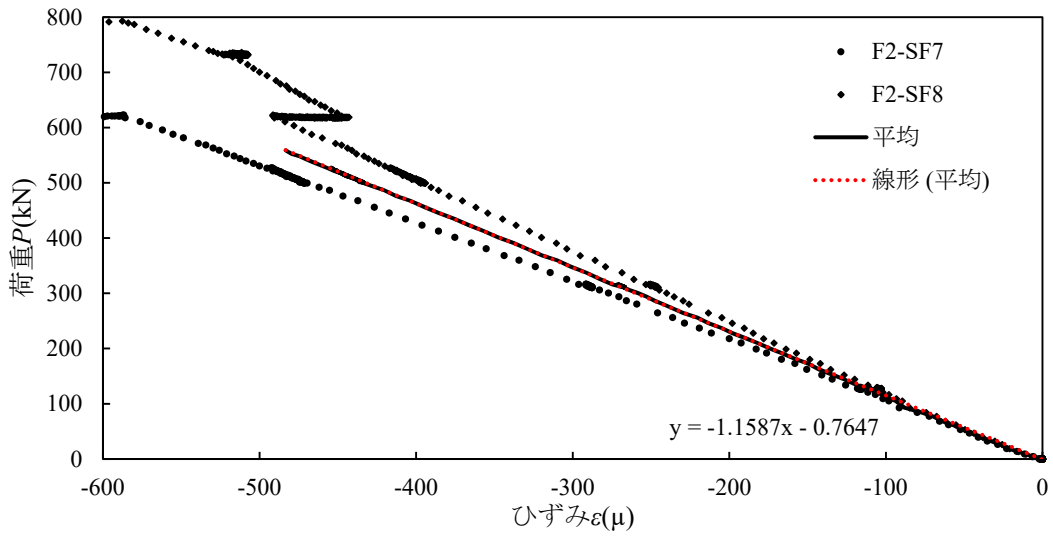


(b) 計測位置 SF-3,SF-4

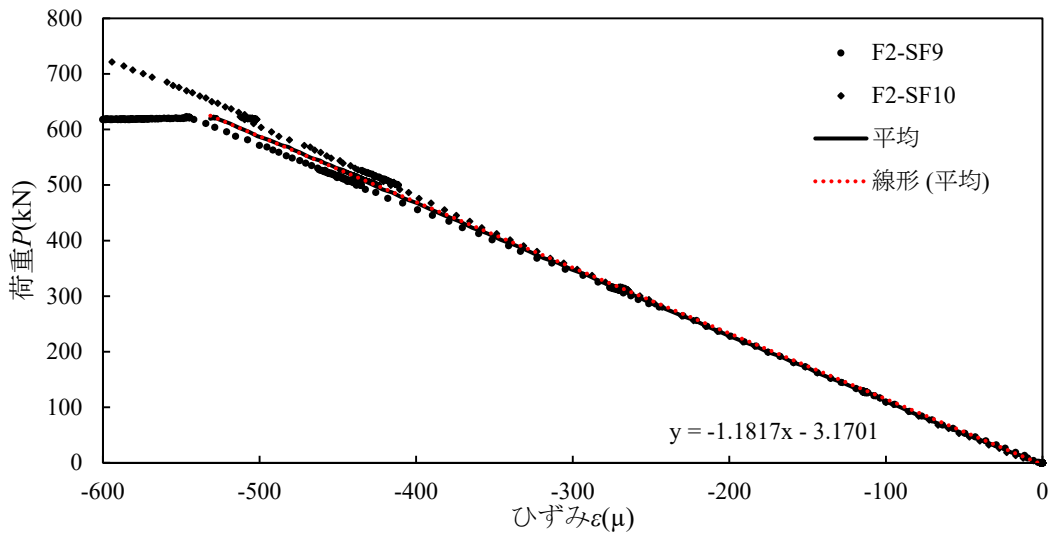


(c) 計測位置 SF-5,SF-6

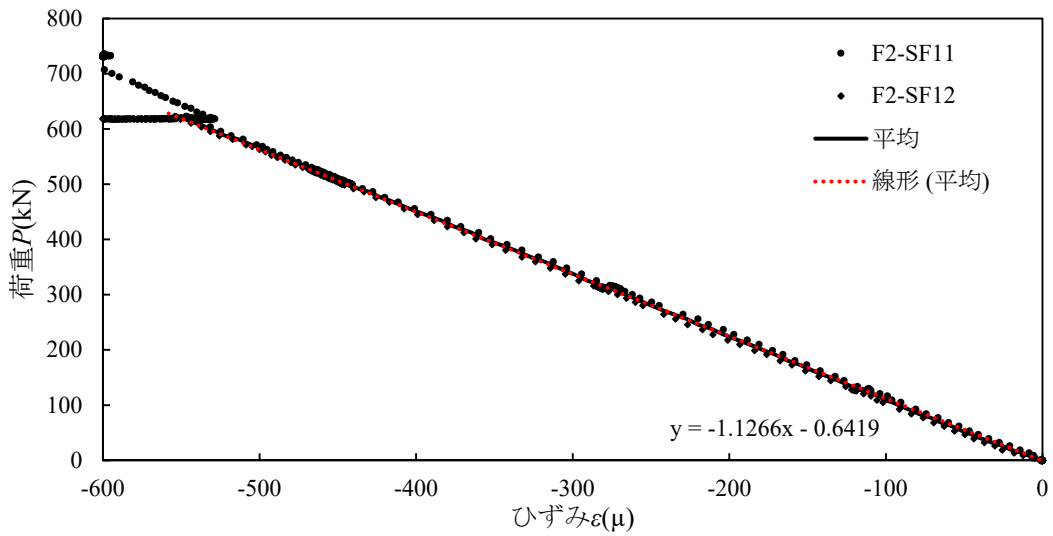
図-付 5.37 圧縮載荷試験における鉛直荷重－ひずみ関係と近似直線（鋼材部）（試験体 F-2 その 1）



(a) 計測位置 SF-7,SF-8



(b) 計測位置 SF-9,SF-10



(c) 計測位置 SF-11,SF-12

図-付 5.38 圧縮載荷試験における鉛直荷重－ひずみ関係と近似直線（鋼材部）（試験体 F-2 その 2）

表-付 5.9 式(5.15)および(5.16)により算出した座屈耐荷力の一覧

試験体	鋼材の ヤング係数 $E_s(\times 10^5 \text{N/mm}^2)$	有効座屈長 $l(\text{mm})$	断面二次半径 $r_{s+c}(\text{mm})$	細長比パラメータ $\bar{\lambda}$	実験値による座屈荷重 $P_{cr}(\text{kN})$	式(5.16)による降伏荷重 $P_{ys}(\text{kN})$	式(5.15)による座屈耐荷力 σ_{cr}/σ_y
A-1	2.000	2424	18.822	1.624	398.3	1400.4	0.284
A-2					396.9		0.283
B-1			19.515	1.567	503.9		0.351
B-2					521.4		0.372
C-1			20.100	1.521	639.3		0.456
C-2					621.2		0.444
D-1			19.566	1.563	515.8		0.368
D-2					503.5		0.360
E-1			20.161	1.516	610.0		0.436
E-2					589.7		0.421

表-付 5.10 式(5.15)および(5.17)により算出した座屈耐荷力の一覧

試験体	鋼材の ヤング係数 $E_s(\times 10^5 \text{N/mm}^2)$	有効座屈長 $l(\text{mm})$	断面二次半径 $r_{s+c}(\text{mm})$	細長比パラメータ $\bar{\lambda}$	実験値による座屈荷重 $P_{cr}(\text{kN})$	式(5.17)による降伏荷重 $P_{ys+c}(\text{kN})$	式(5.15)による座屈耐荷力 σ_{cr}/σ_y
A-1	2.000	2424	18.822	1.624	398.3	1400.4	0.284
A-2					396.9		0.283
B-1			19.515	1.567	503.9	1502.9	0.328
B-2					521.4		0.347
C-1			20.100	1.521	639.3	1605.4	0.398
C-2					621.2		0.387
D-1			19.566	1.563	515.8	1546.8	0.333
D-2					503.5		0.326
E-1			20.161	1.516	610.0	1693.1	0.360
E-2					589.7		0.348

表-付 5.11 式(5.15)および(5.18)により算出した座屈耐荷力の一覧

試験体	鋼材の ヤング係数 $E_s(\times 10^5 \text{N/mm}^2)$	有効座屈長 $l(\text{mm})$	断面二次半径 $r_{s+c}(\text{mm})$	細長比パラメータ $\bar{\lambda}$	実験値による座屈荷重 $P_{cr}(\text{kN})$	式(5.18)による降伏荷重 $P_{y_{s+c}}(\text{kN})$	式(5.15)による座屈耐荷力 σ_{cr}/σ_y
A-1	2.171	2424	18.822	1.559	398.3	1400.4	0.284
A-2	2.116			1.579	396.9	1400.4	0.283
B-1	2.143		19.498	1.515	503.9	1508.7	0.327
B-2					521.4	1489.3	0.350
C-1			20.075	1.471	639.3	1579.0	0.405
C-2					621.2	1616.9	0.384
D-1			19.543	1.511	515.8	1546.9	0.333
D-2					503.5	1539.0	0.327
E-1			20.127	1.467	610.0	1628.4	0.374
E-2					589.7	1615.6	0.365

【第6章の図表および写真】

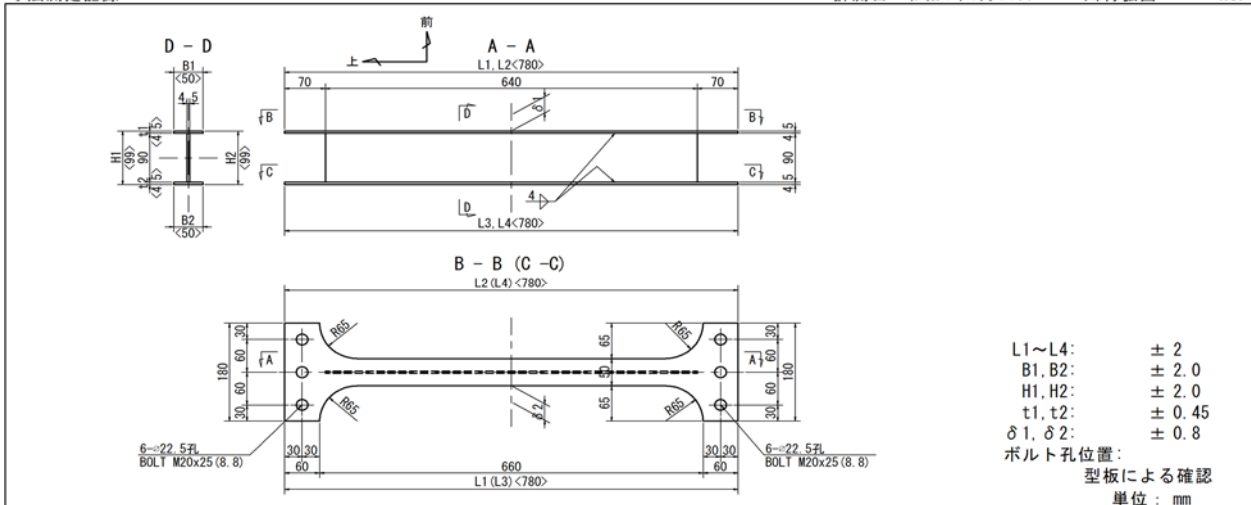
表-付 6.1 試験体の製作寸法測定記録 (その1)

寸法測定記録

計測日: 令和4年5月31日

川村弘昌

No. 1



		部材長さ				フランジ幅		桁高		フランジ板厚		圧縮材の曲がり	
		L1	L2	L3	L4	B1	B2	H1	H2	t1	t2	δ1	δ2
A-t-N	規定値	780.0	780.0	780.0	780.0	50.0	50.0	99.0	99.0	4.5	4.5	50.0	50.0
	計測値	778.0	778.1	777.0	777.9	49.6	49.5	98.0	98.0	4.4	4.4	50.0	50.0
	誤差	-2.0	-1.9	-3.0	-2.1	-0.4	-0.5	-1.0	-1.0	-0.1	-0.1	0.0	0.0
A-c-N	規定値	780.0	780.0	780.0	780.0	50.0	50.0	99.0	99.0	4.5	4.5	50.0	50.0
	計測値	778.6	778.0	778.6	777.2	49.6	49.5	98.3	98.2	4.4	4.4	50.0	51.0
	誤差	-1.4	-2.0	-1.4	-2.8	-0.4	-0.5	-0.7	-0.8	-0.1	-0.1	0.0	1.0
A-a-N	規定値	780.0	780.0	780.0	780.0	50.0	50.0	99.0	99.0	4.5	4.5	50.0	50.0
	計測値	778.0	778.9	773.0	779.0	49.6	49.5	98.3	98.0	4.5	4.4	49.5	50.5
	誤差	-2.0	-1.1	-7.0	-1.0	-0.4	-0.5	-0.7	-1.0	0.0	-0.1	-0.5	0.5
B-t-N	規定値	780.0	780.0	780.0	780.0	50.0	50.0	99.0	99.0	4.5	4.5	50.0	50.0
	計測値	778.2	778.0	778.0	778.6	49.6	49.6	98.1	98.0	4.5	4.4	50.0	50.0
	誤差	-1.8	-2.0	-2.0	-1.4	-0.4	-0.4	-0.9	-1.0	0.0	-0.1	0.0	0.0

日本橋梁株式会社

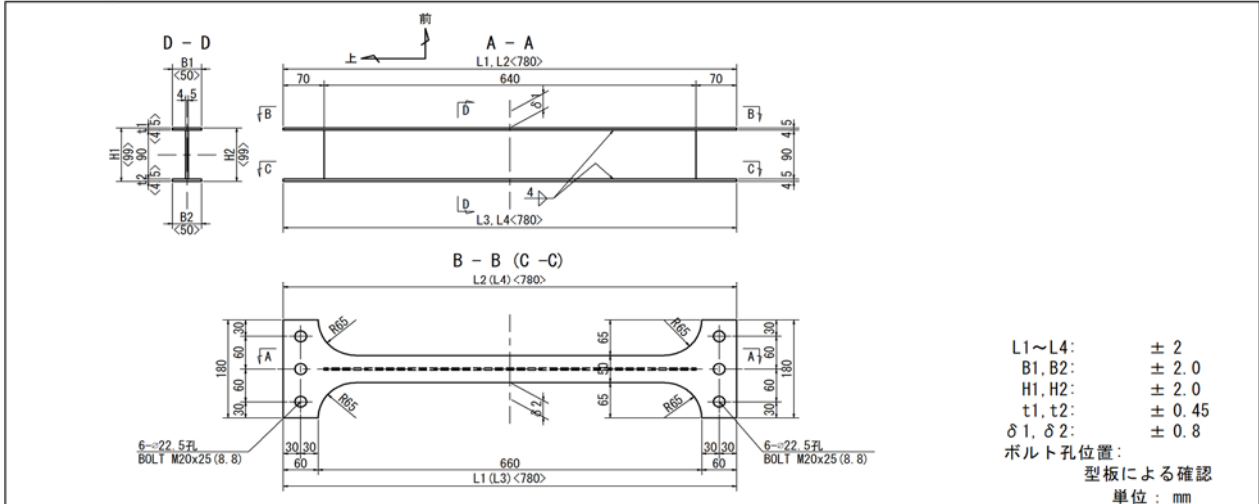
表-付 6.2 試験体の製作寸法測定記録 (その2)

寸法測定記録

計測日: 令和4年5月31日

川村弘昌

No. 2



		部材長さ				フランジ幅		桁高		フランジ板厚		圧縮材の曲がり	
		L1	L2	L3	L4	B1	B2	H1	H2	t1	t2	δ1	δ2
B-t-P1	規定値	780.0	780.0	780.0	780.0	50.0	50.0	99.0	99.0	4.5	4.5	50.0	50.0
	計測値	778.6	778.4	778.6	777.1	49.6	49.6	98.0	98.1	4.4	4.5	50.0	50.0
	誤差	-1.4	-1.6	-1.4	-2.9	-0.4	-0.4	-1.0	-0.9	-0.1	0.0	0.0	0.0
B-t-P2	規定値	780.0	780.0	780.0	780.0	50.0	50.0	99.0	99.0	4.5	4.5	50.0	50.0
	計測値	777.1	778.7	778.5	778.5	49.4	49.5	98.3	98.2	4.4	4.5	50.5	50.0
	誤差	-2.9	-1.3	-1.5	-1.5	-0.6	-0.5	-0.7	-0.8	-0.1	0.0	0.5	0.0
B-c-N	規定値	780.0	780.0	780.0	780.0	50.0	50.0	99.0	99.0	4.5	4.5	50.0	50.0
	計測値	777.8	778.5	777.4	777.9	49.6	49.6	98.3	98.0	4.5	4.5	50.0	50.0
	誤差	-2.2	-1.5	-2.6	-2.1	-0.4	-0.4	-0.7	-1.0	0.0	0.0	0.0	0.0
B-c-P1	規定値	780.0	780.0	780.0	780.0	50.0	50.0	99.0	99.0	4.5	4.5	50.0	50.0
	計測値	777.0	778.4	778.0	778.5	49.6	49.5	98.4	98.2	4.4	4.4	50.0	49.5
	誤差	-3.0	-1.6	-2.0	-1.5	-0.4	-0.5	-0.6	-0.8	-0.1	-0.1	0.0	-0.5

日本橋梁株式会社

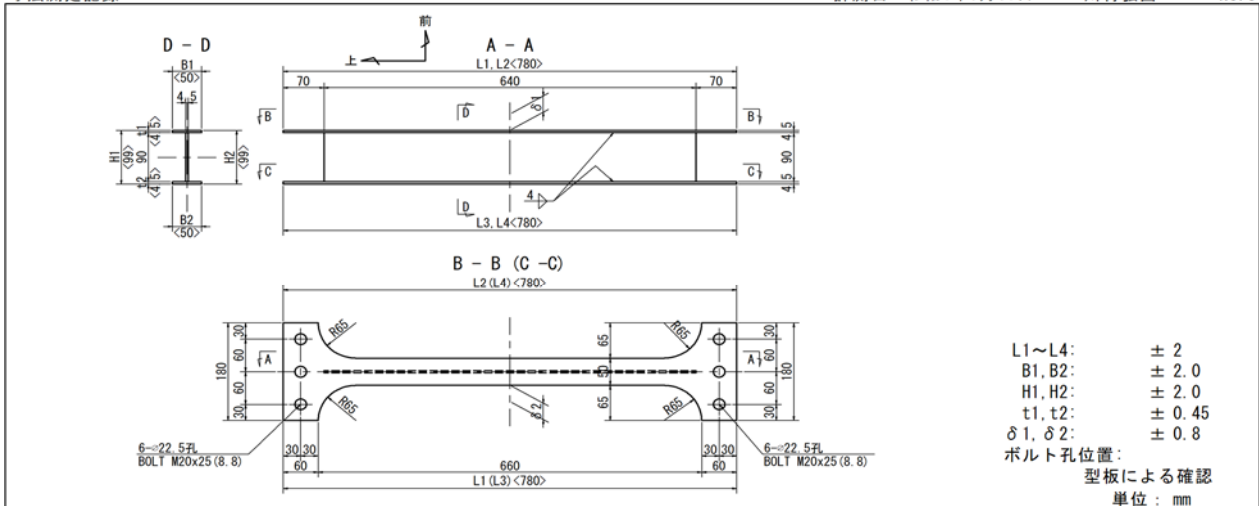
表-付 6.3 試験体の製作寸法測定記録 (その3)

寸法測定記録

計測日: 令和4年5月31日

川村弘昌

No. 3



		部材長さ				フランジ幅		桁高		フランジ板厚		圧縮材の曲がり	
		L1	L2	L3	L4	B1	B2	H1	H2	t1	t2	δ1	δ2
B-c-P2	規定値	780.0	780.0	780.0	780.0	50.0	50.0	99.0	99.0	4.5	4.5	50.0	50.0
	計測値	777.9	778.5	777.0	778.7	49.6	49.6	98.2	98.5	4.4	4.5	50.0	49.5
	誤差	-2.1	-1.5	-3.0	-1.3	-0.4	-0.4	-0.8	-0.5	-0.1	0.0	0.0	-0.5
B-a-N	規定値	780.0	780.0	780.0	780.0	50.0	50.0	99.0	99.0	4.5	4.5	50.0	50.0
	計測値	778.5	778.0	778.0	778.8	49.5	49.5	98.3	98.0	4.4	4.4	50.0	50.0
	誤差	-1.5	-2.0	-2.0	-1.2	-0.5	-0.5	-0.7	-1.0	-0.1	-0.1	0.0	0.0
B-a-P1	規定値	780.0	780.0	780.0	780.0	50.0	50.0	99.0	99.0	4.5	4.5	50.0	50.0
	計測値	777.3	778.3	778.1	778.2	49.6	49.5	98.2	98.2	4.4	4.5	50.5	50.0
	誤差	-2.7	-1.7	-1.9	-1.8	-0.4	-0.5	-0.8	-0.8	-0.1	0.0	0.5	0.0
B-a-P2	規定値	780.0	780.0	780.0	780.0	50.0	50.0	99.0	99.0	4.5	4.5	50.0	50.0
	計測値	778.7	777.6	778.7	777.0	49.5	49.5	98.4	98.3	4.4	4.4	50.0	50.5
	誤差	-1.3	-2.4	-1.3	-3.0	-0.5	-0.5	-0.6	-0.7	-0.1	-0.1	0.0	0.5

日本橋梁株式会社

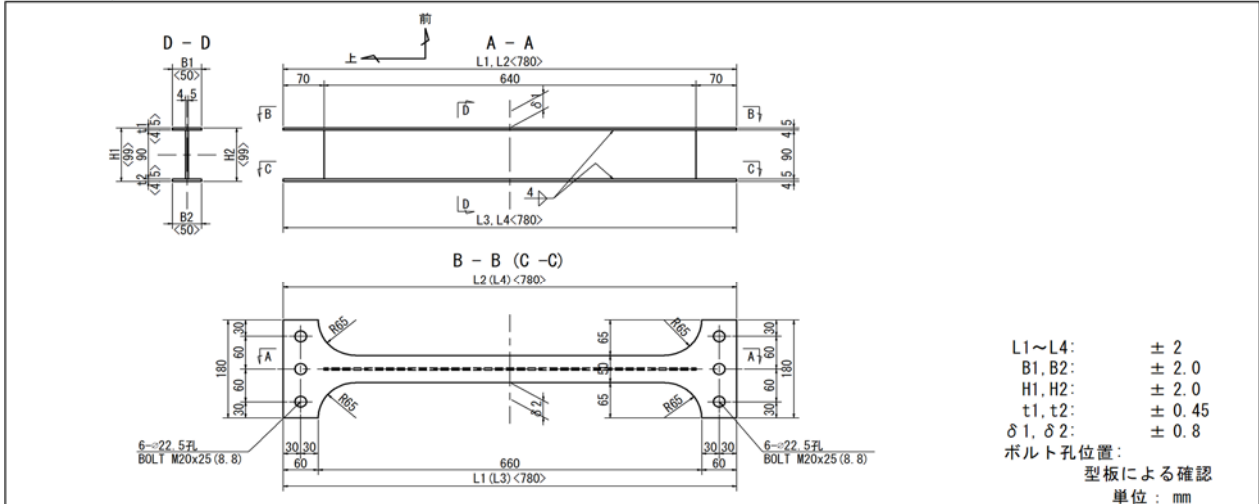
表-付 6.4 試験体の製作寸法測定記録 (その 4)

寸法測定記録

計測日: 令和4年5月31日

川村弘昌

No. 4



		部材長さ				フランジ幅		桁高		フランジ板厚		圧縮材の曲がり	
		L1	L2	L3	L4	B1	B2	H1	H2	t1	t2	δ1	δ2
C-t-N	規定値	780.0	780.0	780.0	780.0	50.0	50.0	99.0	99.0	4.5	4.5	50.0	50.0
	計測値	777.3	778.1	778.2	777.9	49.5	49.4	98.3	97.6	4.4	4.4	50.5	50.0
	誤差	-2.7	-1.9	-1.8	-2.1	-0.5	-0.6	-0.7	-1.4	-0.1	-0.1	0.5	0.0
C-t-P1	規定値	780.0	780.0	780.0	780.0	50.0	50.0	99.0	99.0	4.5	4.5	50.0	50.0
	計測値	778.4	778.3	777.3	778.7	49.5	49.5	98.2	98.1	4.4	4.4	50.0	50.0
	誤差	-1.6	-1.7	-2.7	-1.3	-0.5	-0.5	-0.8	-0.9	-0.1	-0.1	0.0	0.0
C-t-P2	規定値	780.0	780.0	780.0	780.0	50.0	50.0	99.0	99.0	4.5	4.5	50.0	50.0
	計測値	778.8	778.2	777.2	778.7	49.5	49.3	98.2	98.1	4.4	4.4	50.0	50.0
	誤差	-1.2	-1.8	-2.8	-1.3	-0.5	-0.7	-0.8	-0.9	-0.1	-0.1	0.0	0.0
C-c-N	規定値	780.0	780.0	780.0	780.0	50.0	50.0	99.0	99.0	4.5	4.5	50.0	50.0
	計測値	778.0	778.4	776.8	778.3	49.5	49.5	98.1	98.3	4.4	4.4	49.5	50.0
	誤差	-2.0	-1.6	-3.2	-1.7	-0.5	-0.5	-0.9	-0.7	-0.1	-0.1	-0.5	0.0

日本橋梁株式会社

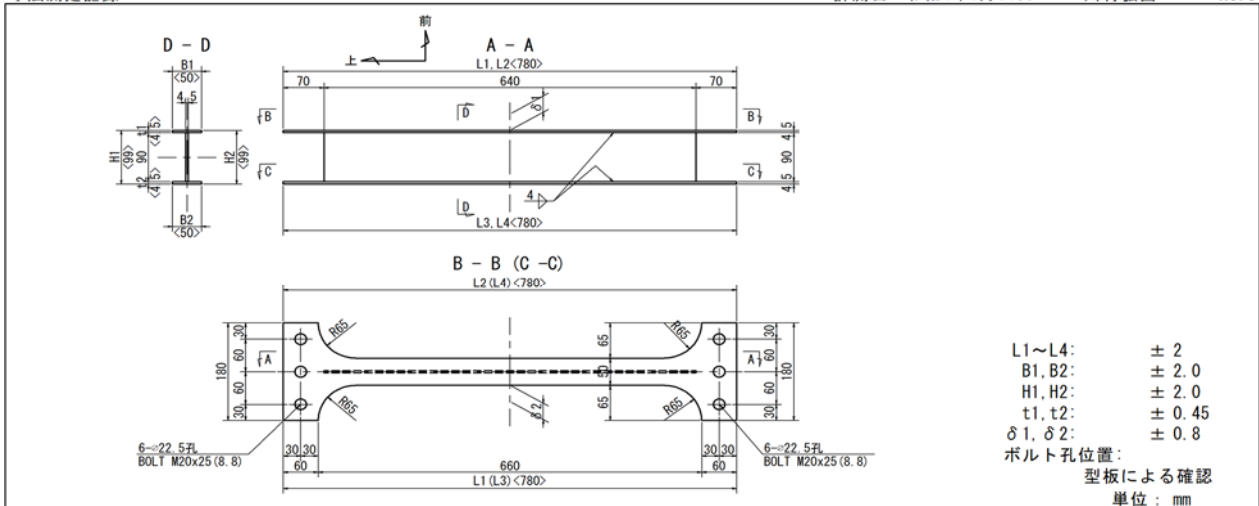
表-付-6.5 試験体の製作寸法測定記録 (その 5)

寸法測定記録

計測日: 令和4年5月31日

川村弘昌

No. 5



		部材長さ				フランジ幅		桁高		フランジ板厚		圧縮材の曲がり	
		L1	L2	L3	L4	B1	B2	H1	H2	t1	t2	δ1	δ2
C-c-P1	規定値	780.0	780.0	780.0	780.0	50.0	50.0	99.0	99.0	4.5	4.5	50.0	50.0
	計測値	777.6	778.3	777.0	778.4	49.6	49.6	98.0	98.3	4.4	4.4	50.0	49.5
	誤差	-2.4	-1.7	-3.0	-1.6	-0.4	-0.4	-1.0	-0.7	-0.1	-0.1	0.0	-0.5
C-c-P2	規定値	780.0	780.0	780.0	780.0	50.0	50.0	99.0	99.0	4.5	4.5	50.0	50.0
	計測値	778.5	778.2	779.0	777.2	49.5	49.6	98.2	98.0	4.5	4.5	50.0	51.0
	誤差	-1.5	-1.8	-1.0	-2.8	-0.5	-0.4	-0.8	-1.0	0.0	0.0	0.0	1.0
C-a-N	規定値	780.0	780.0	780.0	780.0	50.0	50.0	99.0	99.0	4.5	4.5	50.0	50.0
	計測値	778.2	777.0	777.9	778.2	49.5	49.4	98.2	98.0	4.4	4.4	50.0	50.0
	誤差	-1.8	-3.0	-2.1	-1.8	-0.5	-0.6	-0.8	-1.0	-0.1	-0.1	0.0	0.0
C-a-P1	規定値	780.0	780.0	780.0	780.0	50.0	50.0	99.0	99.0	4.5	4.5	50.0	50.0
	計測値	778.2	778.4	777.8	777.8	49.5	49.6	98.3	98.0	4.5	4.4	50.0	50.0
	誤差	-1.8	-1.6	-2.2	-2.2	-0.5	-0.4	-0.7	-1.0	0.0	-0.1	0.0	0.0

日本橋梁株式会社

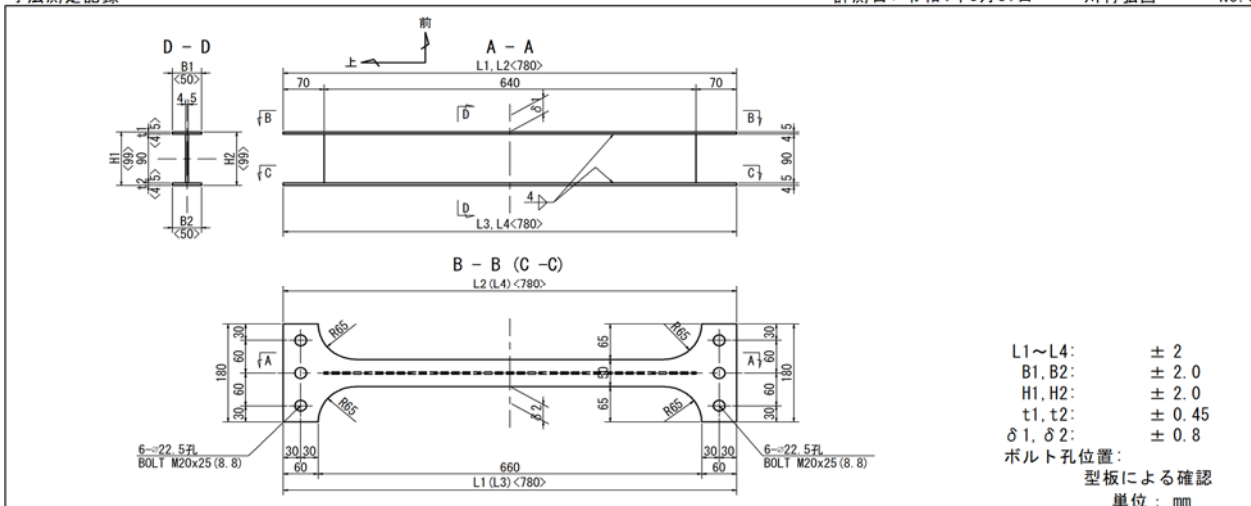
表-付 6.6 試験体の製作寸法測定記録 (その 6)

寸法測定記録

計測日: 令和4年5月31日

川村弘昌

No. 6



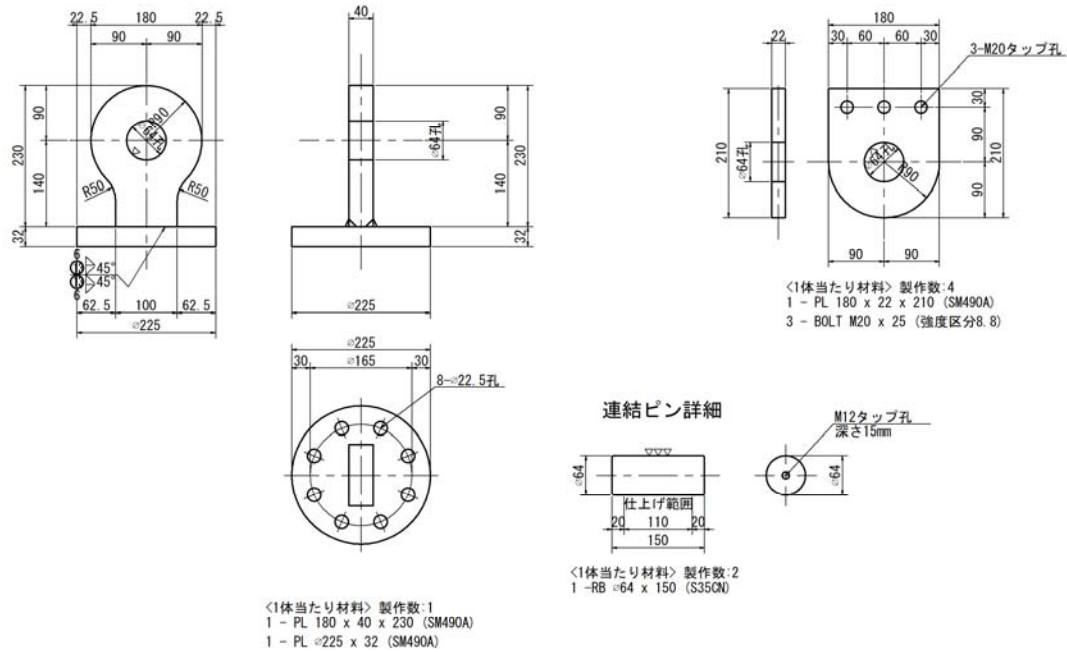
		部材長さ				フランジ幅		桁高		フランジ板厚		圧縮材の曲がり	
		L1	L2	L3	L4	B1	B2	H1	H2	t1	t2	δ1	δ2
C-a-P2	規定値	780.0	780.0	780.0	780.0	50.0	50.0	99.0	99.0	4.5	4.5	50.0	50.0
	計測値	778.6	777.0	778.1	777.8	49.5	49.5	98.2	98.0	4.4	4.4	50.5	50.5
	誤差	-1.4	-3.0	-1.9	-2.2	-0.5	-0.5	-0.8	-1.0	-0.1	-0.1	0.5	0.5
	規定値												
	計測値												
	誤差												
	規定値												
	計測値												
	誤差												

日本橋梁株式会社

表-付 6.7 CFRP シートの貼り付け作業フロー

作業工程	作業内容	使用材料
下地処理	1. プラスト処理 (鋼材表面の錆, 塗膜の除去)	
エポキシプライマー塗布	1. プライマーの調合 (主剤:硬化剤 4 : 1 重量比) 2. プライマーの塗布 (標準塗布量 : 0.15kg/m ²) 3. 指触乾燥確認	プライマー (FP-N9)
高伸度弾性パテ材用 プライマー塗布	1. プライマーの調合 (主剤:硬化剤 1 : 1 重量比) 2. プライマーの塗布 (標準塗布量 : 0.15kg/m ²) 3. 指触乾燥確認	プライマー (FP-UL1)
高伸度弾性パテ材塗布	1. パテ材の調合 (主剤:硬化剤 1 : 3 重量比) 2. パテ材の塗布 (標準塗布量 : 1.0~1.1kg/m ²) 3. 指触乾燥確認	高伸度弾性パテ材 (FU-Z)
CFRP シート貼付け (各層繰り返し)	1. CFRP シートの切断 2. 含浸・接着樹脂の調合 (主剤 : 硬化剤 3 : 1 重量比) 3. 含浸・接着樹脂の下塗り (標準塗布量 0.4kg/m ²) 4. CFRP シートの貼り付け, 含浸・脱泡 5. 含浸・接着樹脂の上塗り (標準塗布量 0.2kg/m ²)	CFRP シート (FTS-C5-30) 含浸・接着樹脂 (FR-E9P)

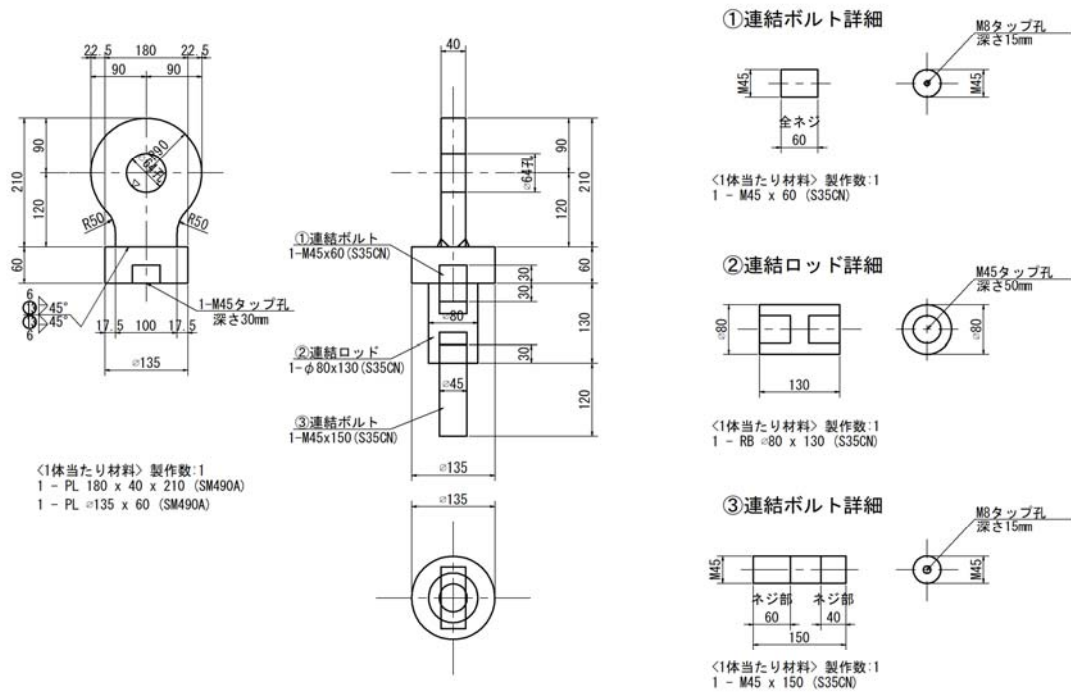
2022年度 FRP補強による座屈実験治具（その1） S=1:5



注)
・ピン孔は実際使用する連結ピンにより貫通確認を行うこと。

図-付 6.1 固定治具の詳細図（その1）（単位：mm）

2022年度 FRP補強による座屈実験治具（その2） S=1:5



注)
・ピン孔は実際使用する連結ピンにより貫通確認を行うこと。

図-付 6.2 固定治具の詳細図（その2）（単位：mm）

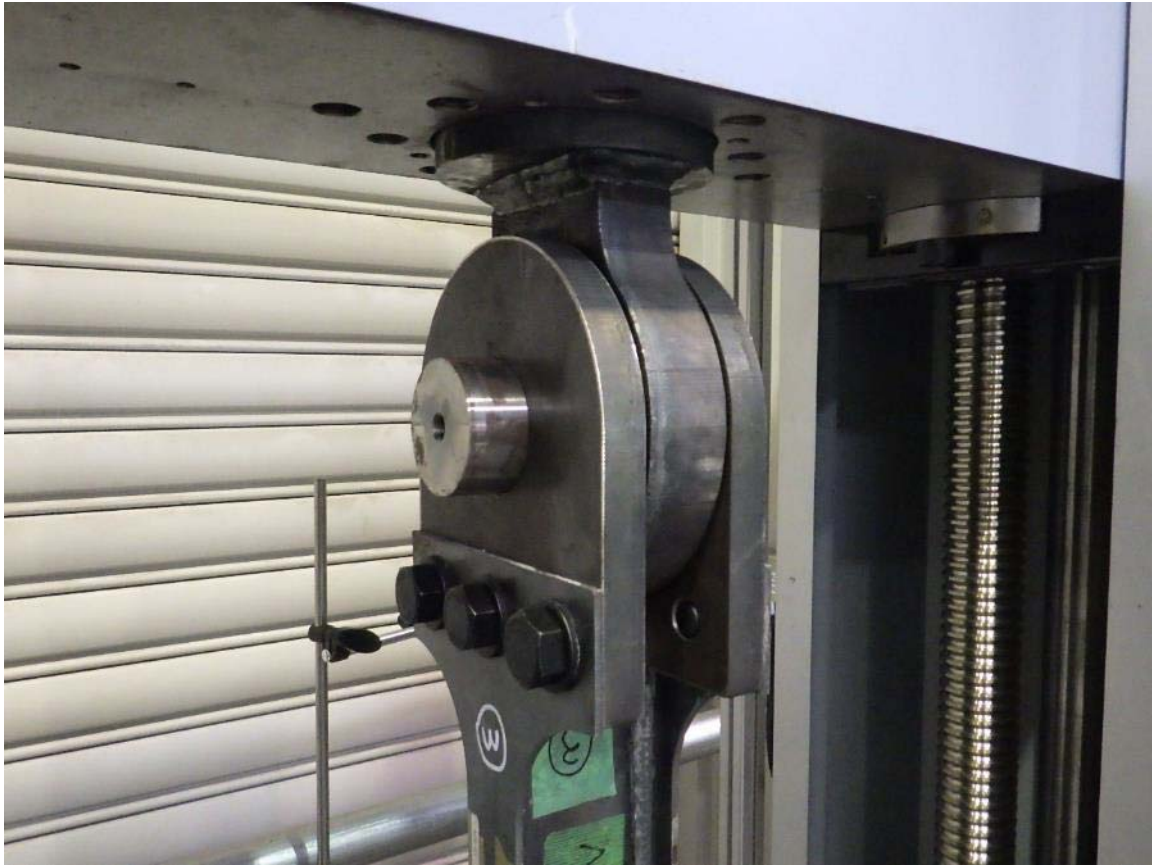


写真-付 6.1 上側ヒンジ部の設置状況



写真-付 6.2 下側ヒンジ部の設置状況

表-付 6.8 万能試験機の仕様

定格	型番	オートグラフ AG-300kNX (株島津製作所製)
	負荷重量	300kN
	クロスヘッド速度	0.0005～250mm/min
	クロスヘッド～テーブル間隔	最大 1440mm
	有効試験幅	595mm
	フレーム剛性	400kN/mm
付属品	ロードセル	300kN 用
	引張試験用つかみ具	手動式定位置くさび形つかみ具 (300kN 用)
	曲げ試験用キッド	
所要条件	大きさ	試験機本体：W1186mm×D752mm×H2414mm 計測制御装置：本体内蔵 スマートコントローラ：W80mm×D50mm×H250
	質量	約 960kg
	電源	3 相 200～230V 50-60Hz 7.5kVA(2.5kW)

表-付 6.9 記録装置の仕様

データロガー	型番	TDS-530 (株東京測器研究所製)
	センサーモード	直流電圧測定 (荷重, 変位) : 電圧 1/100 ひずみゲージ : 1 ゲージ 4 線式
	内部スイッチボックス	測定点数 : 30 点
	インターフェース	USB2.0 プロトコル互換
	大きさ	W320mm×D440mm×H130mm
	重量	約 8kg
	電源	定格電圧 : AC100～240V 最大消費電力 : 104VA

表-付 6.10 ひずみゲージの仕様

ひずみゲージ	型番	FLAB-5-11-3LQM-F (株東京測器研究所)
	ゲージ長	5mm
	ゲージ幅	1.5mm
	ベース長	10mm
	ベース幅	3mm
	抵抗値	120Ω
	リード線	ポリプロピレン4平行線 (モジュラ付)
	リード線長さ	3m

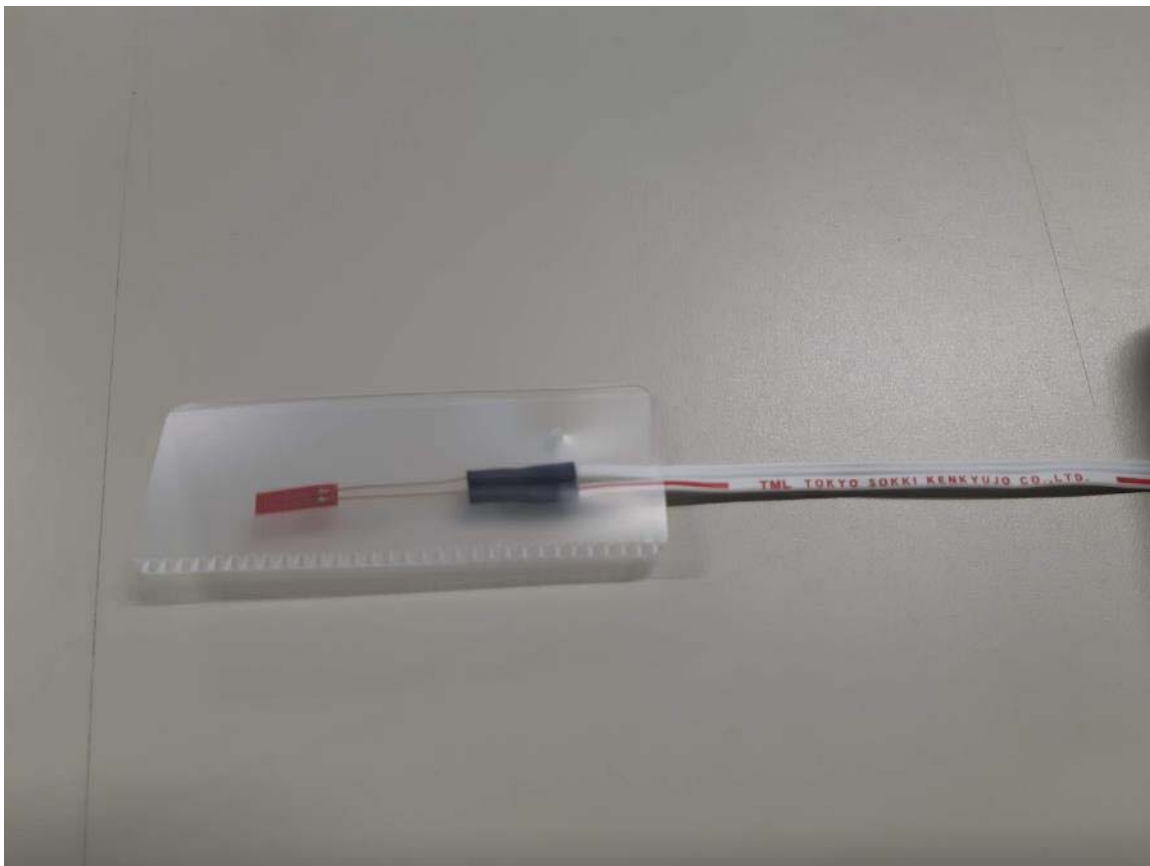


写真-付 6.3 ひずみゲージ (FLAB-5-11-3LQM-F)

表-付 6.11 変位計の仕様

レーザー変位センサー	型番	IL-300 (株式会社キーエンス)
	基準距離	300mm
	測定距離	160~450mm
	繰り返し精度	30 μ m

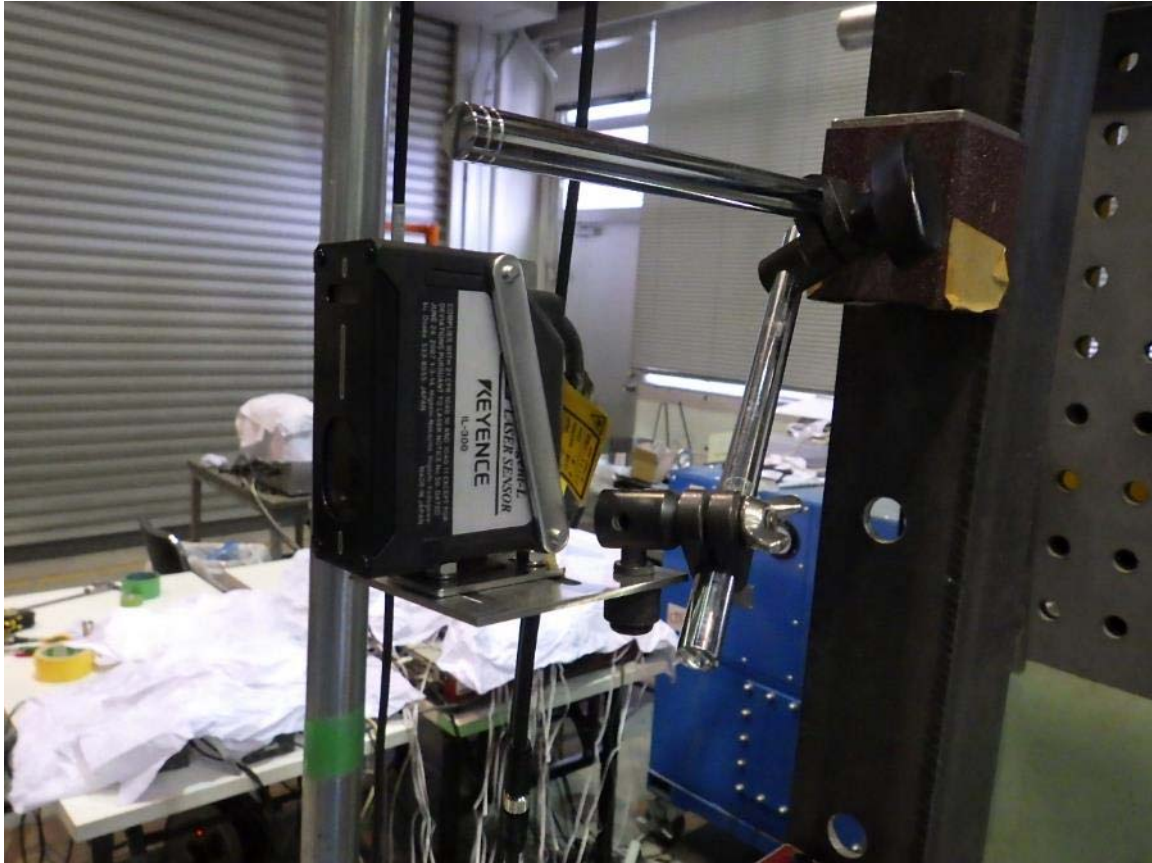
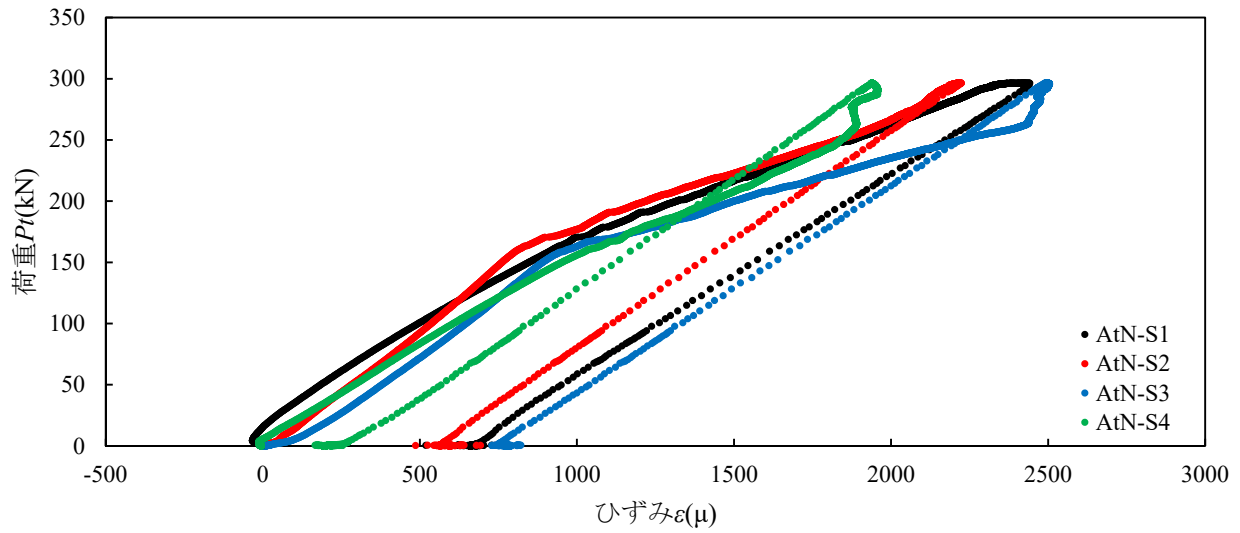
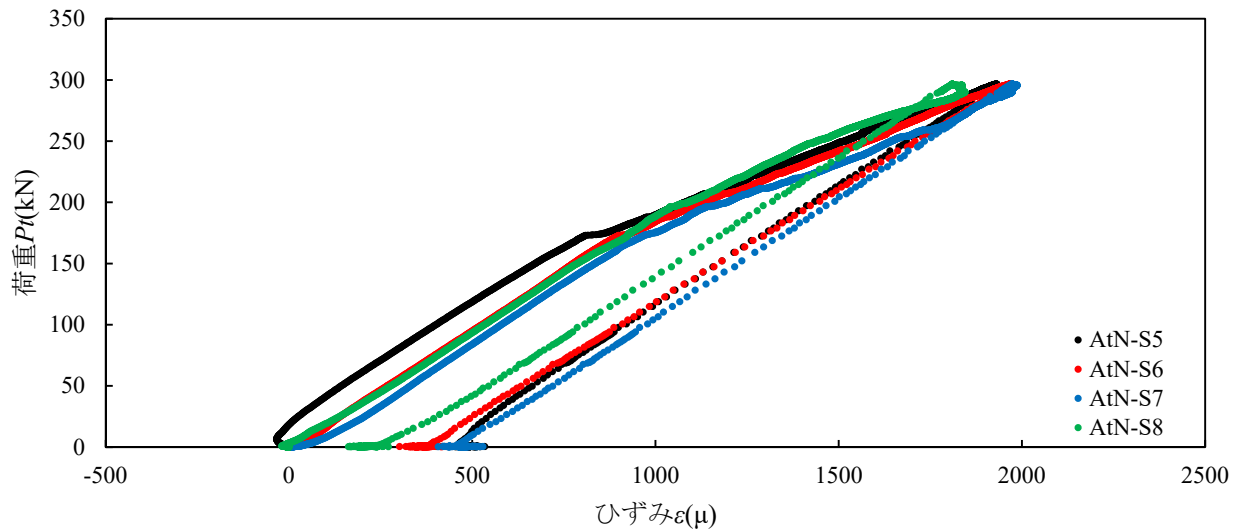


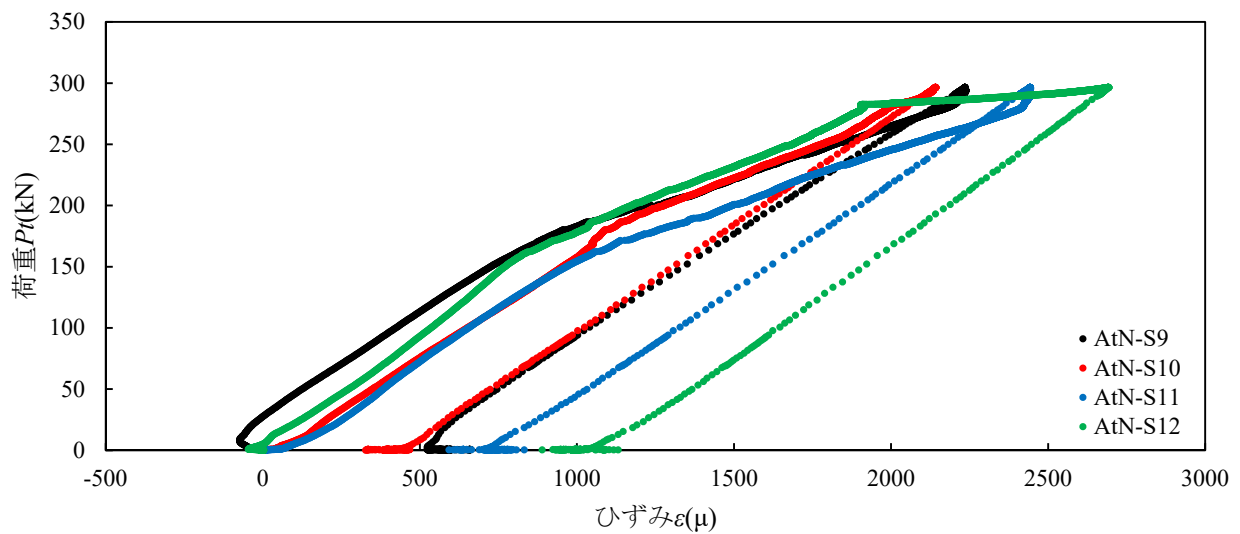
写真-付 6.4 レーザー変位センサー (IL-300)



(a)上段部

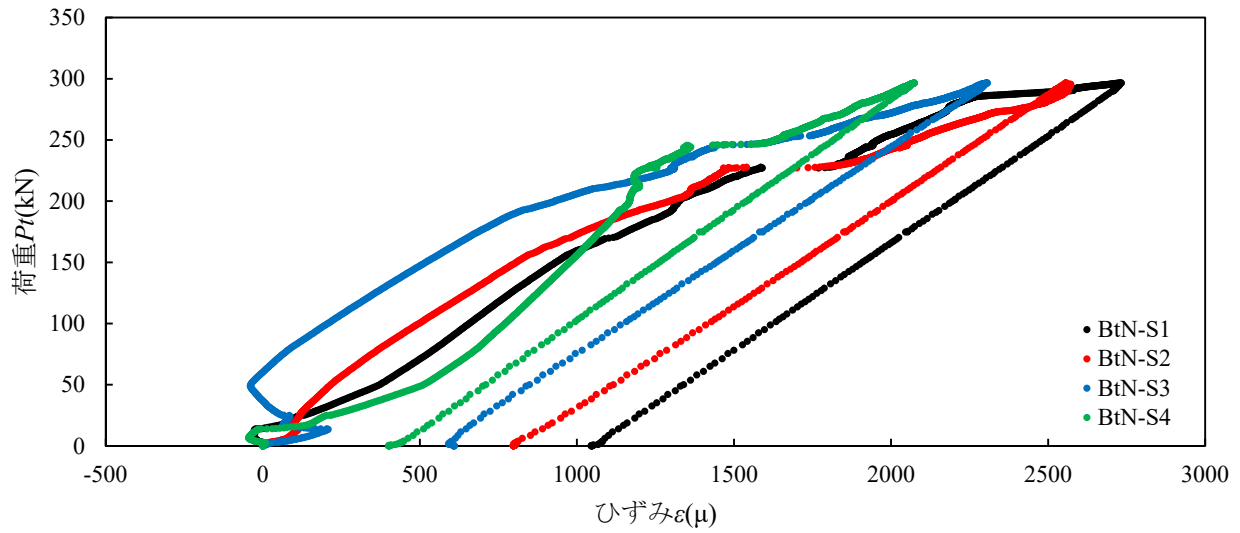


(b)中段部

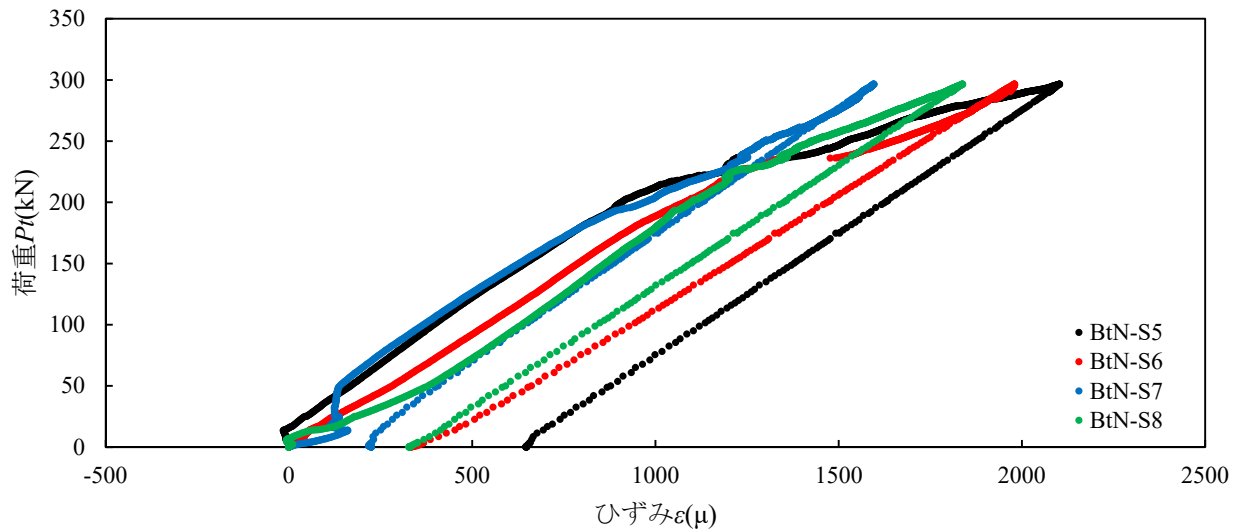


(c)下段部

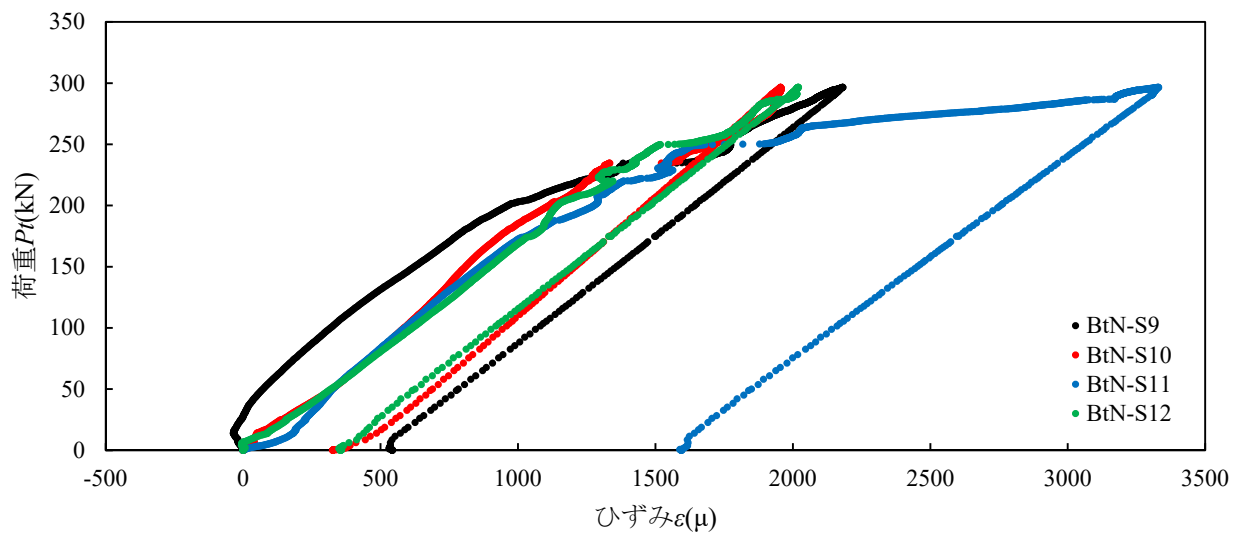
図-付 6.3 引張載荷試験における鉛直荷重－ひずみ関係（鋼材部）（試験体 A-t-N）



(a)上段部

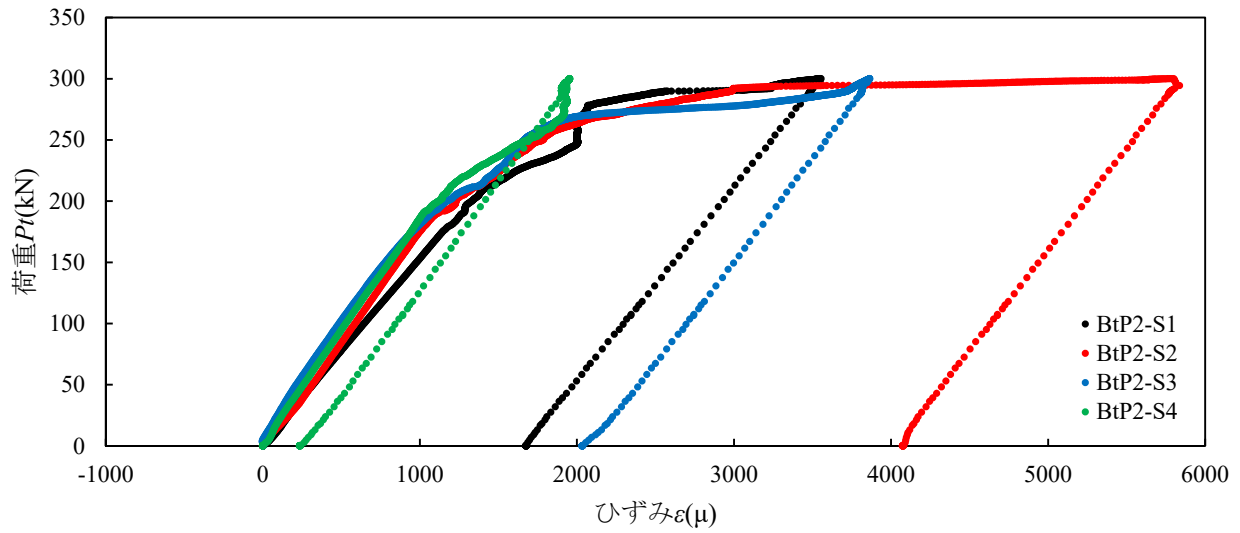


(b)中段部

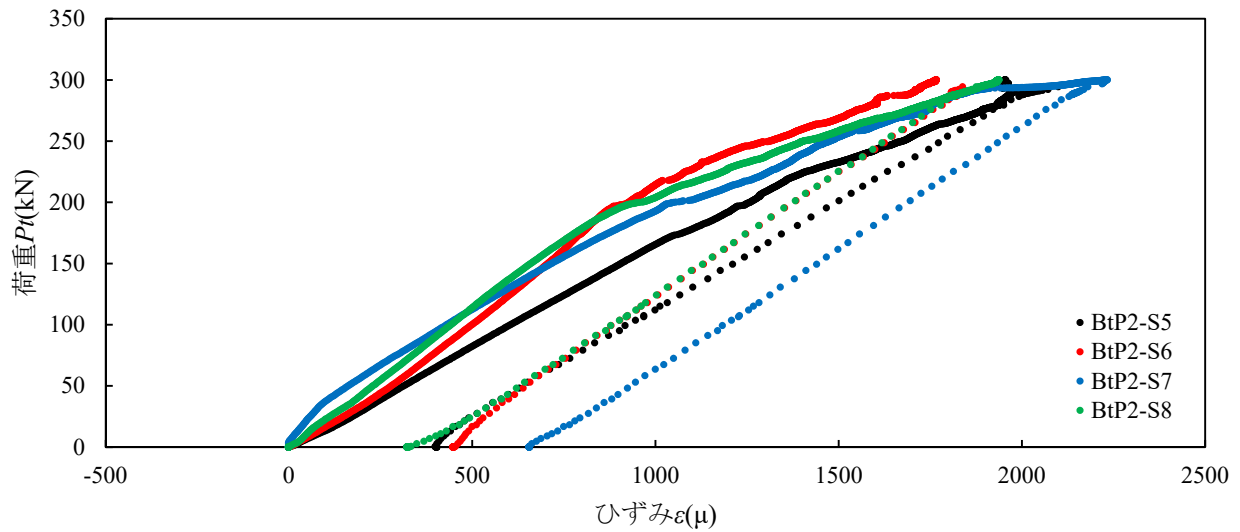


(c)下段部

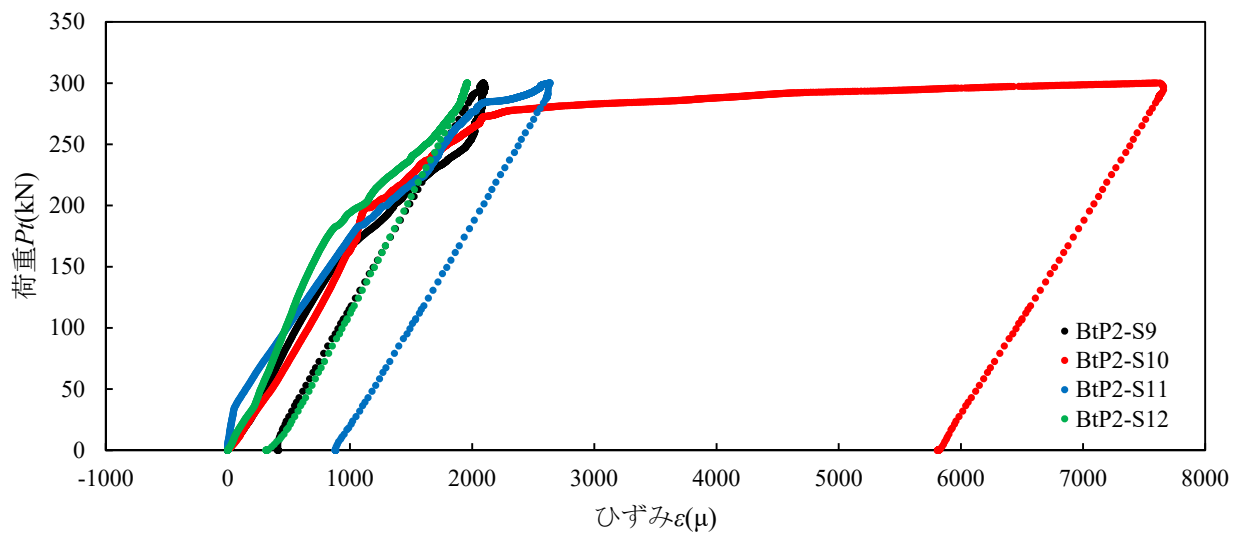
図-付 6.4 引張載荷試験における鉛直荷重－ひずみ関係（鋼材部）（試験体 B-t-N）



(a)上段部

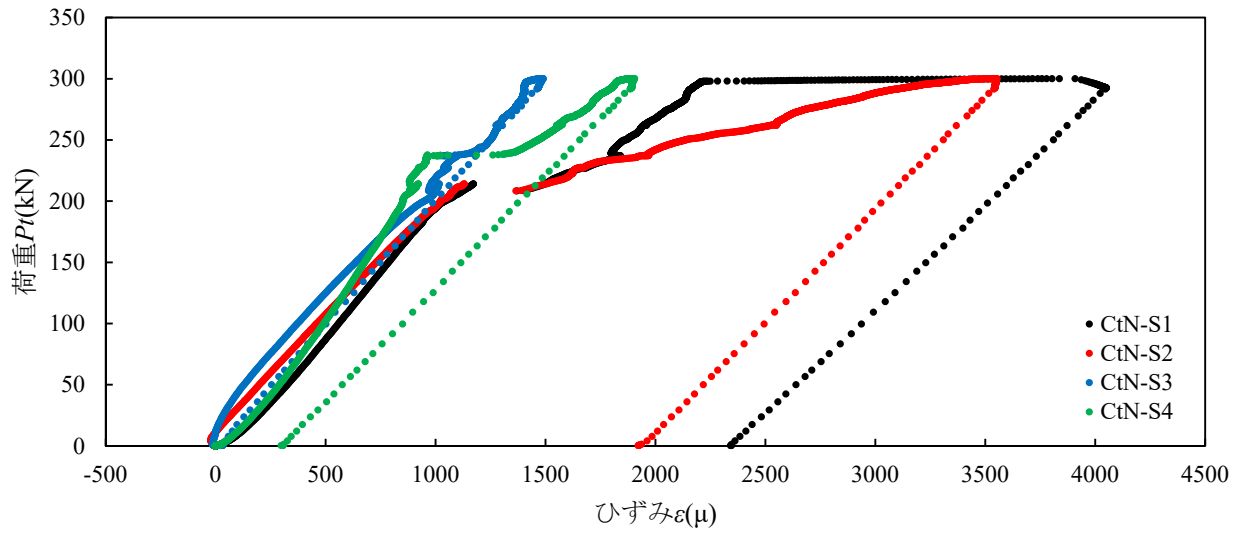


(b)中段部

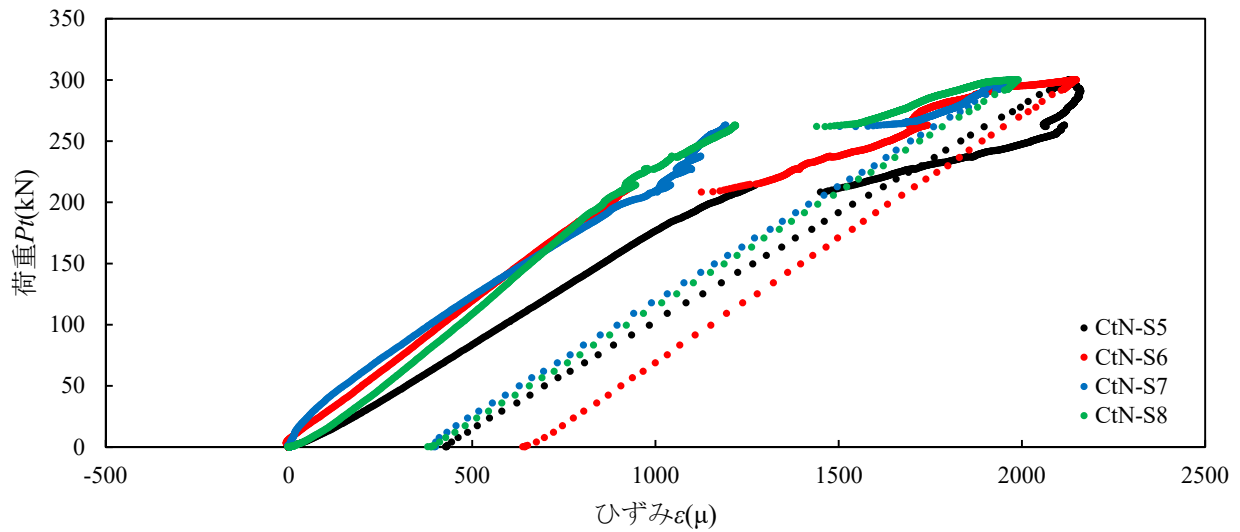


(c)下段部

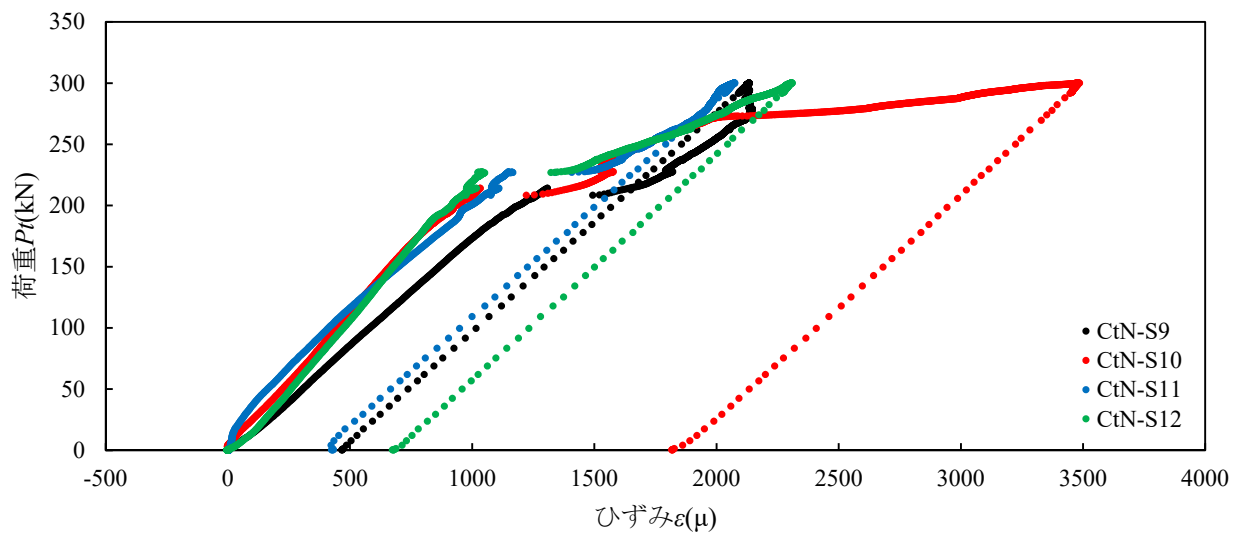
図-付 6.5 引張載荷試験における鉛直荷重－ひずみ関係（鋼材部）（試験体 B-t-P2）



(a)上段部

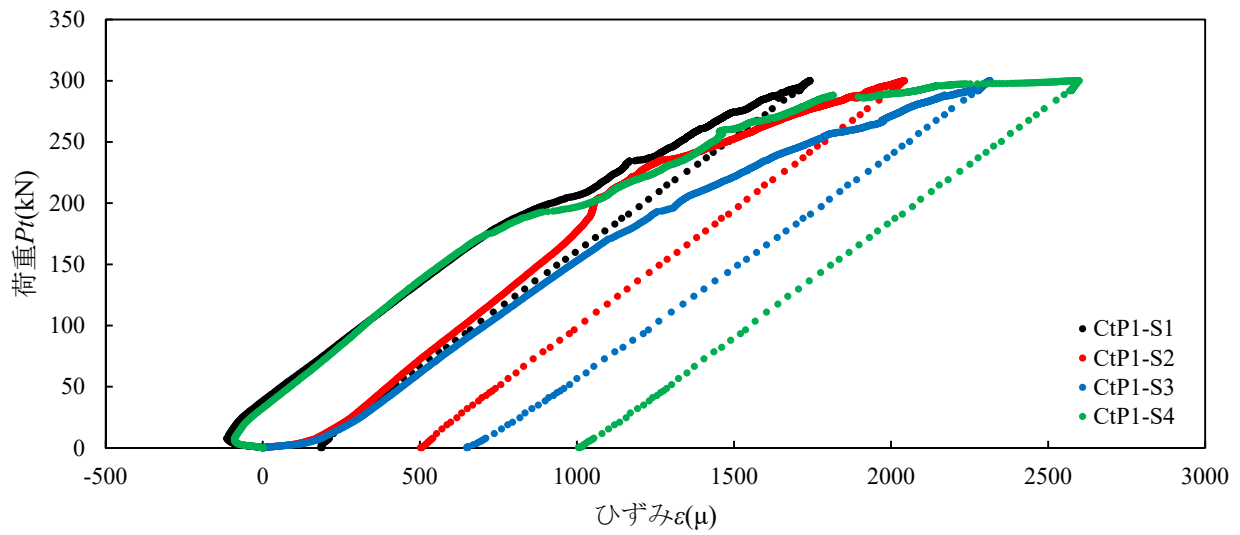


(b)中段部

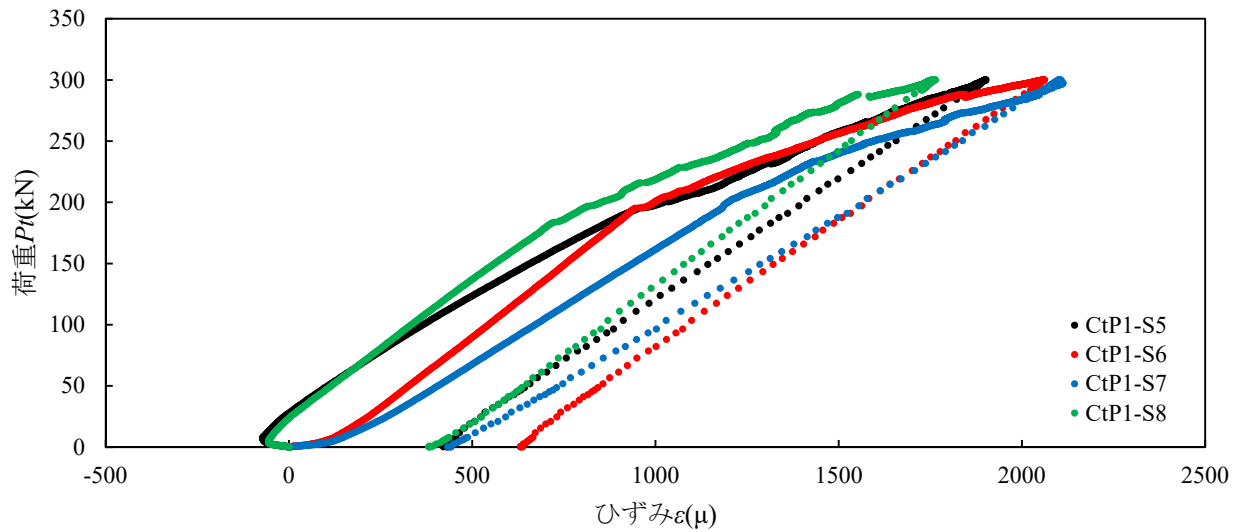


(c)下段部

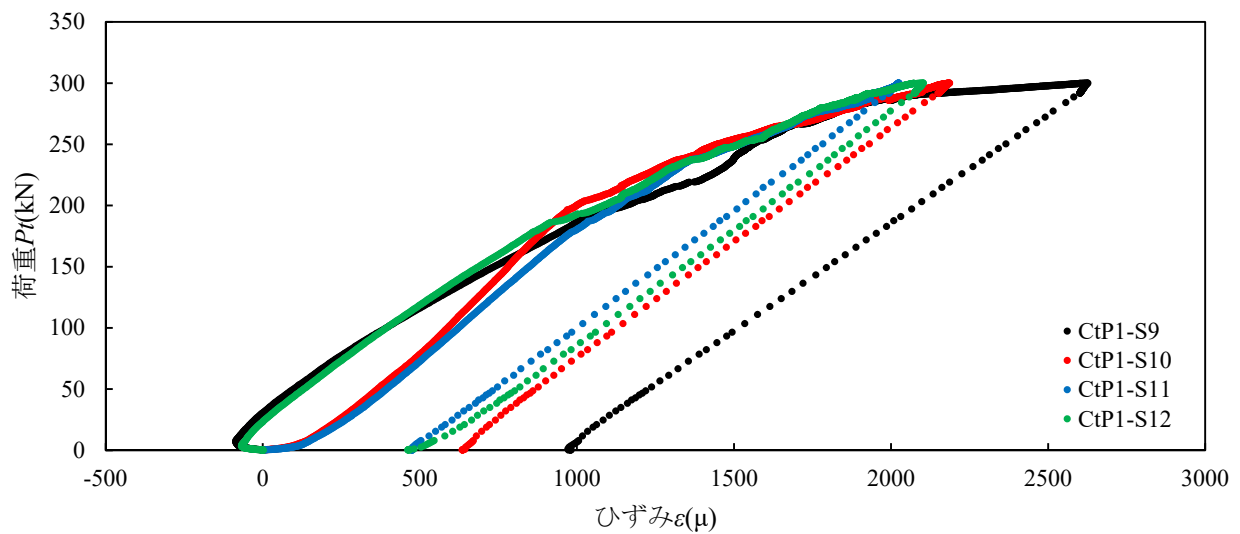
図-付 6.6 引張載荷試験における鉛直荷重－ひずみ関係（鋼材部）（試験体 C-t-N）



(a)上段部

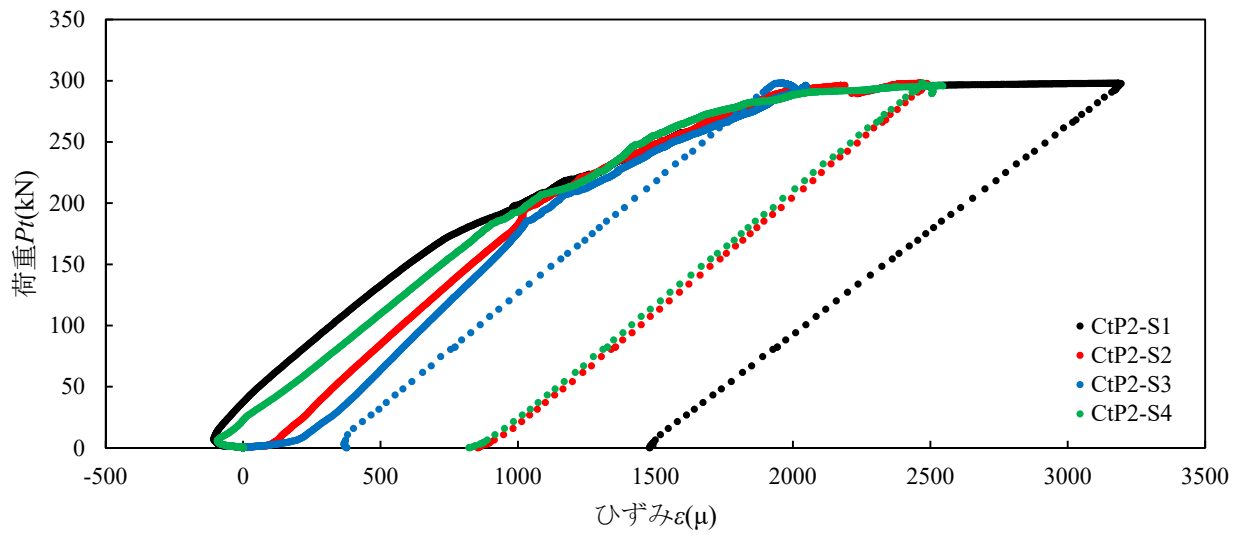


(b)中段部

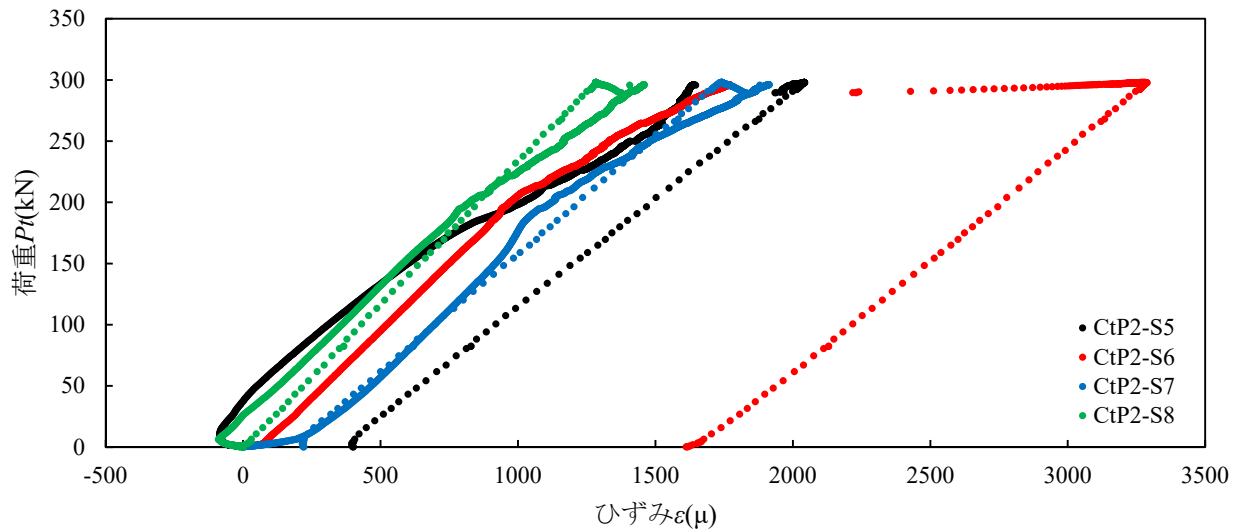


(c)下段部

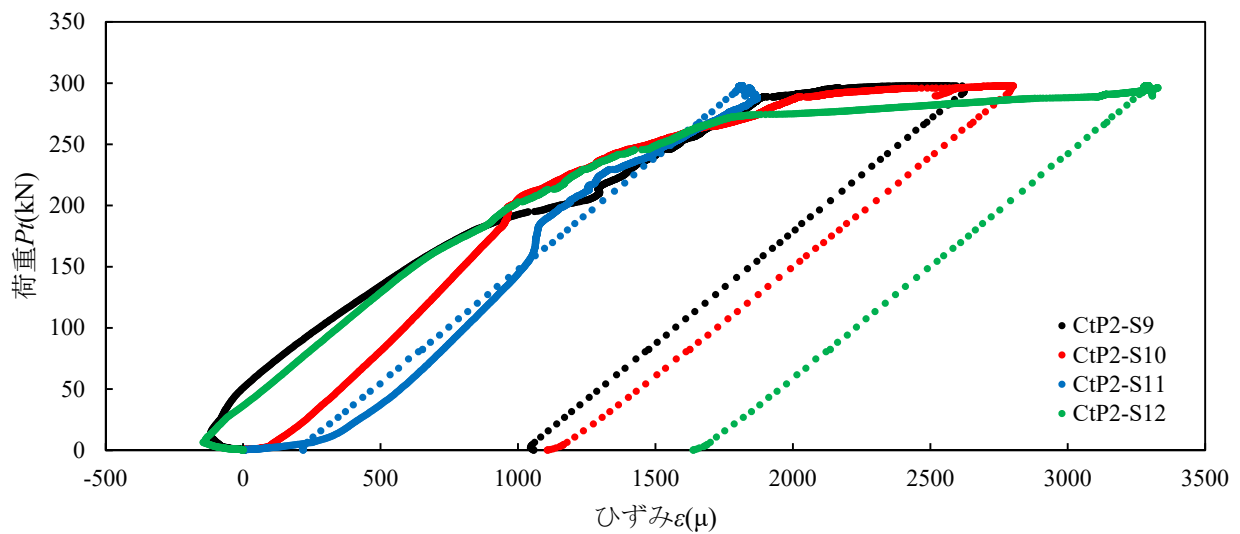
図-付 6.7 引張載荷試験における鉛直荷重－ひずみ関係（鋼材部）（試験体 C-t-P1）



(a)上段部

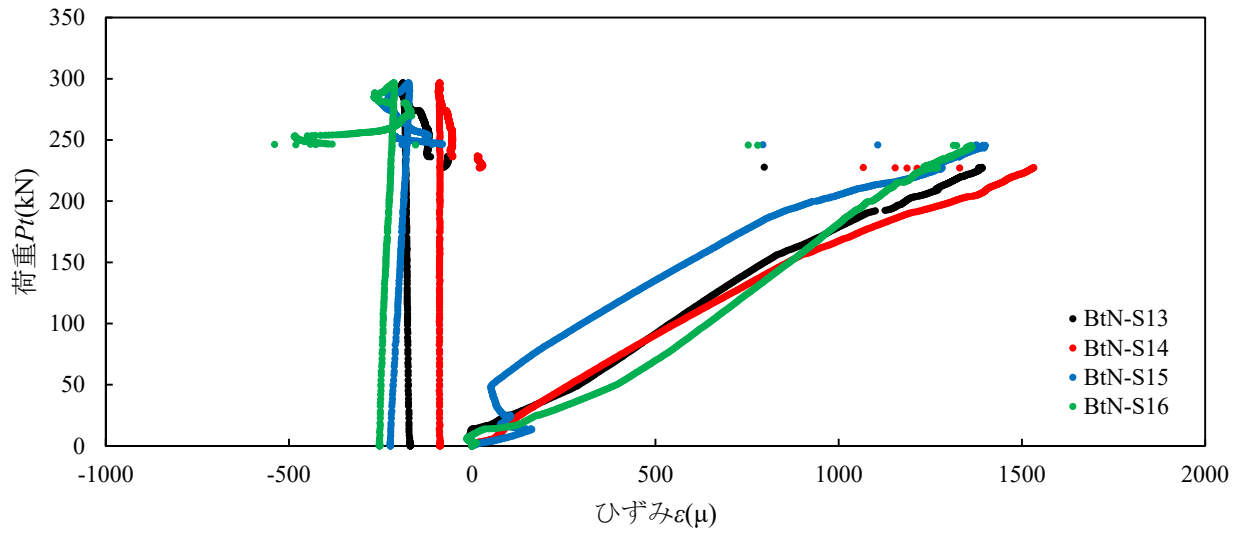


(b)中段部

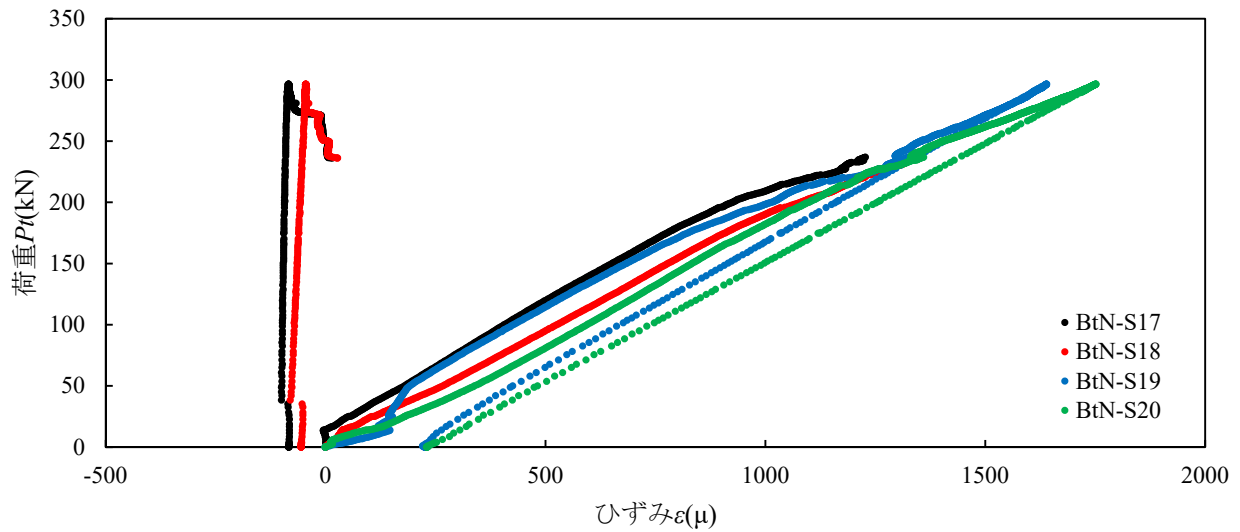


(c)下段部

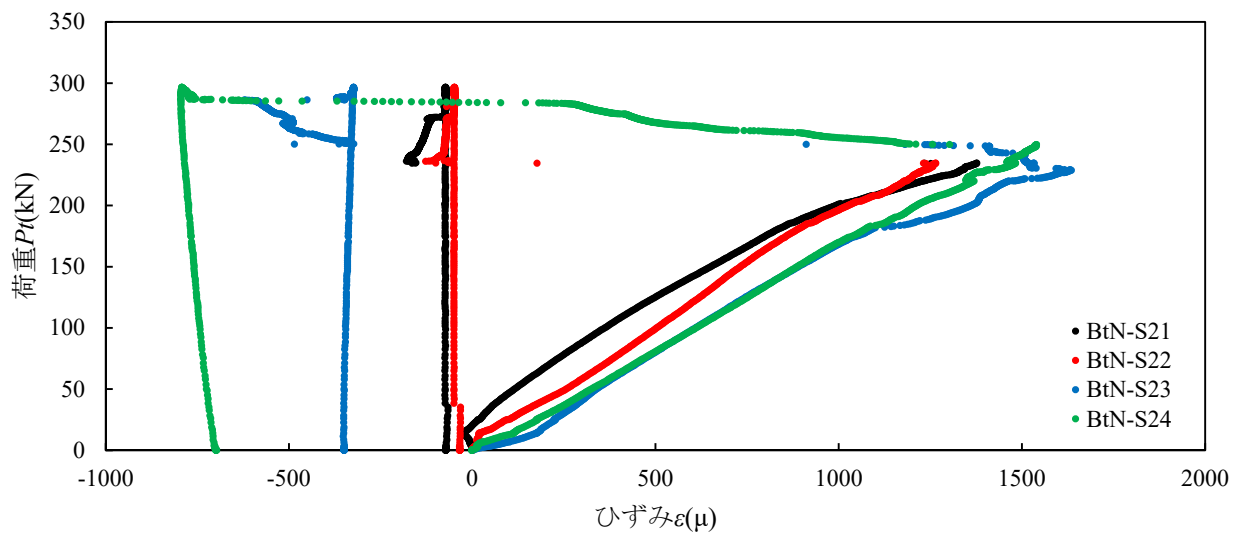
図-付 6.8 引張載荷試験における鉛直荷重－ひずみ関係（鋼材部）（試験体 C-t-P2）



(a)上段部

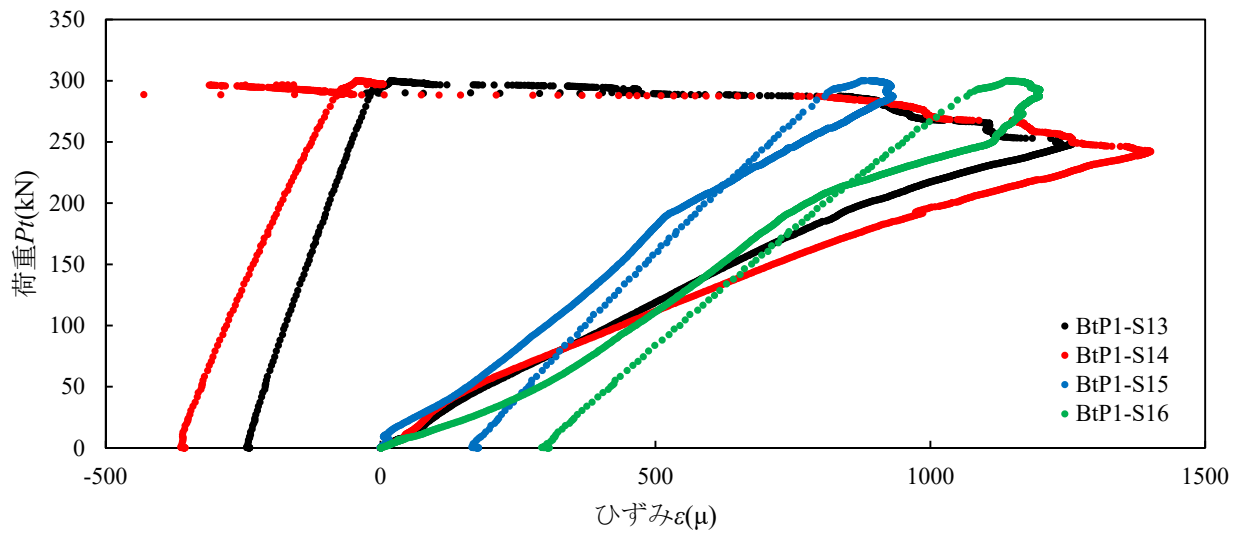


(b)中段部

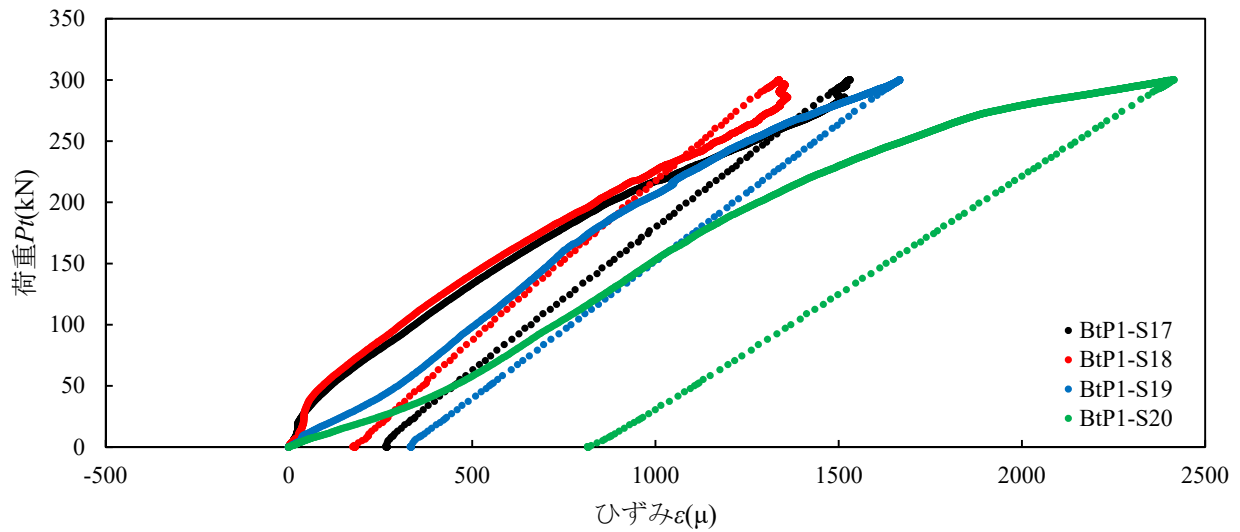


(c)下段部

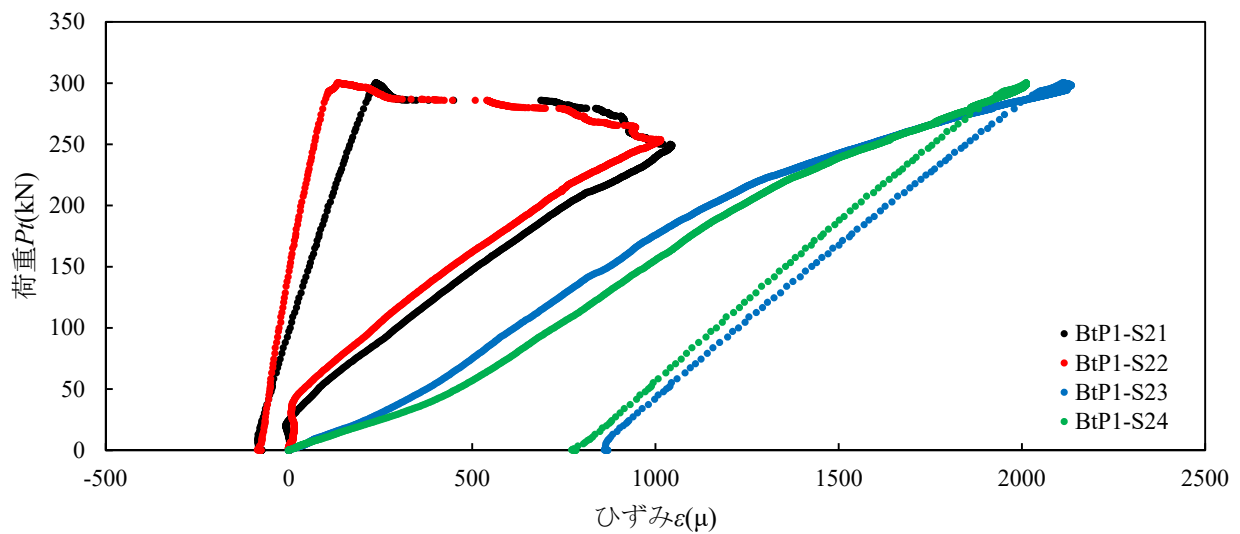
図-付 6.9 引張載荷試験における鉛直荷重-ひずみ関係 (CFRP 補強部) (試験体 B-t-N)



(a)上段部

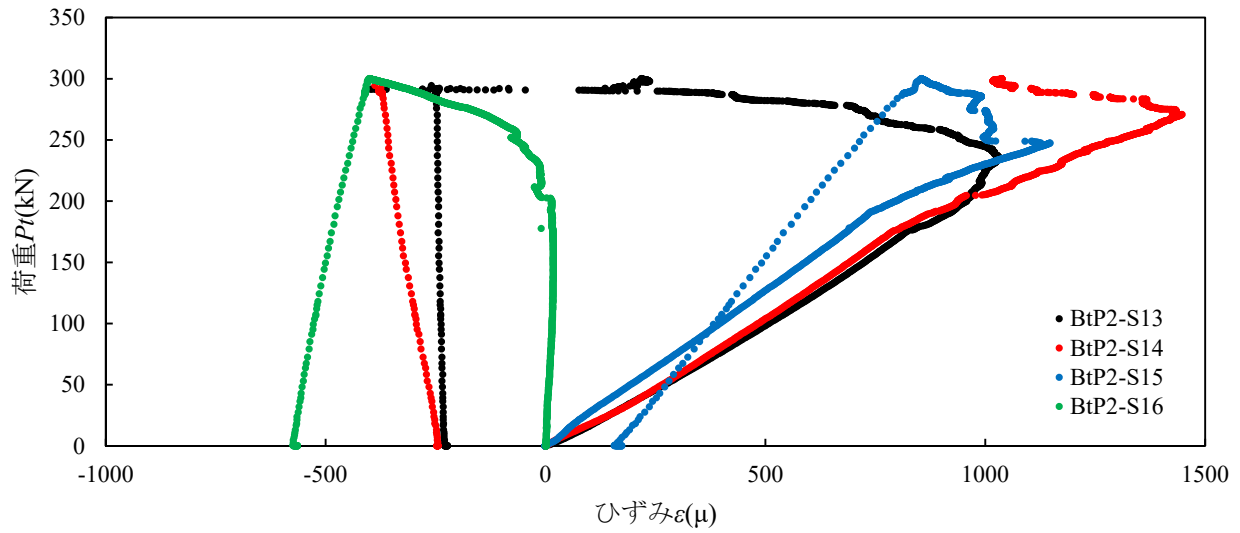


(b)中段部

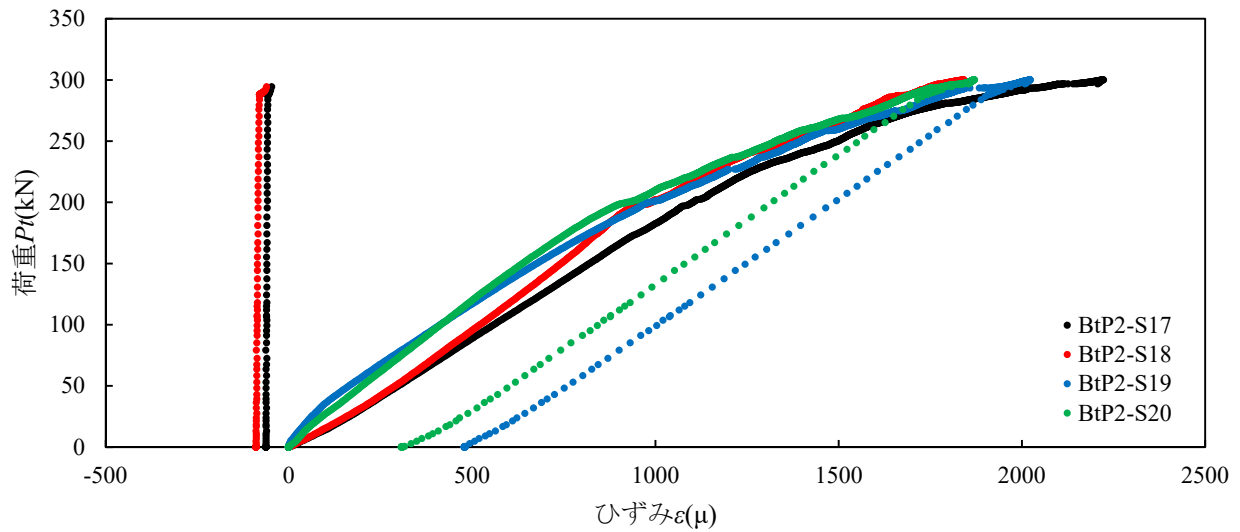


(c)下段部

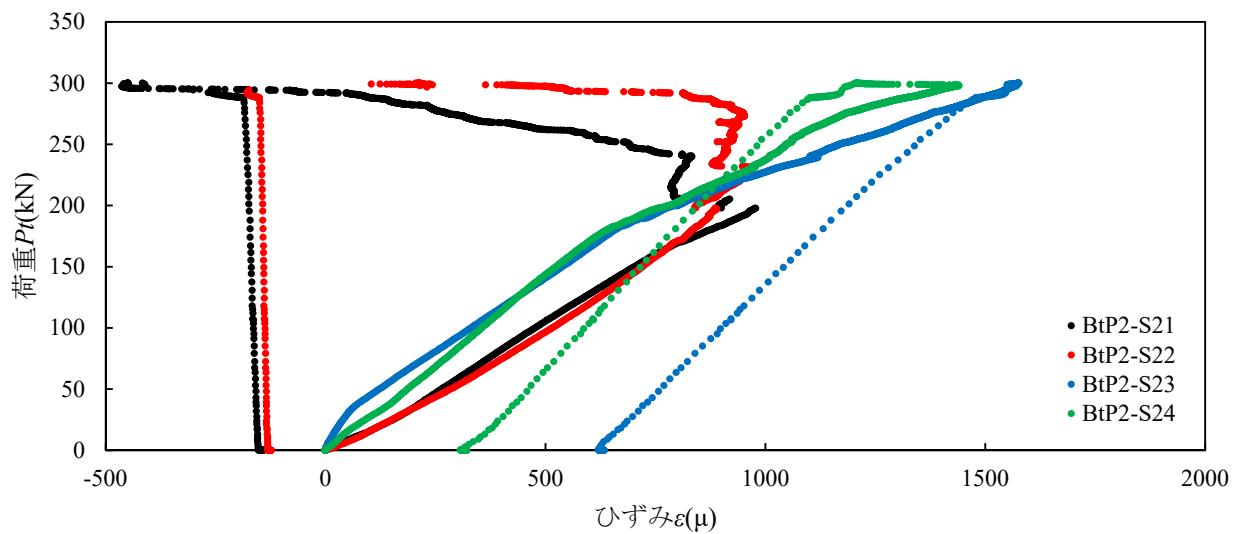
図-付 6.10 引張載荷試験における鉛直荷重－ひずみ関係 (CFRP 補強部) (試験体 B-t-P1)



(a) 上段部

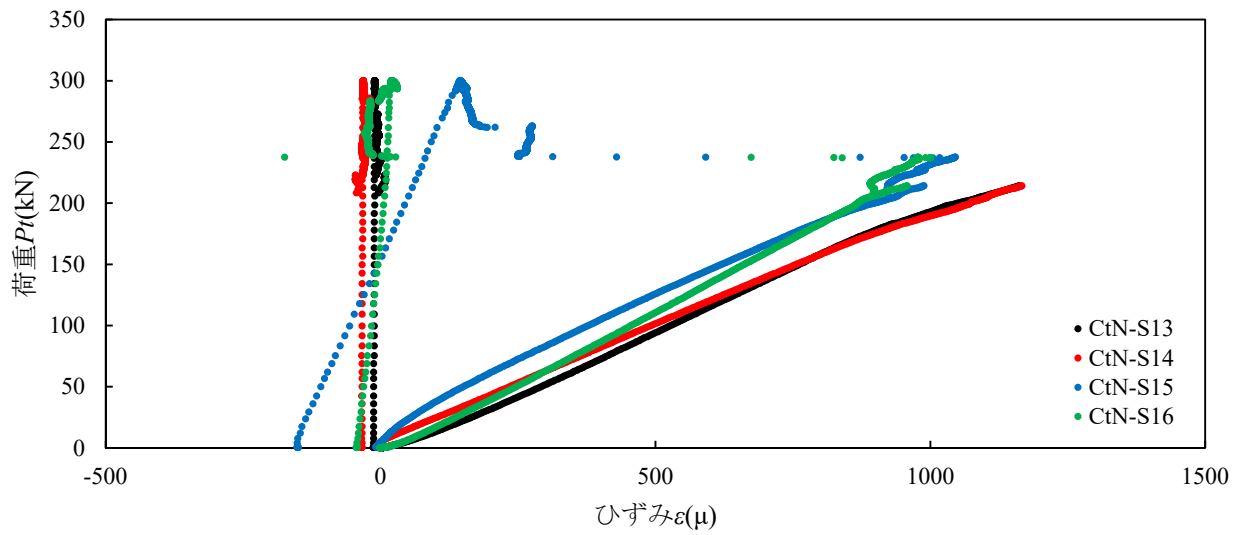


(b) 中段部

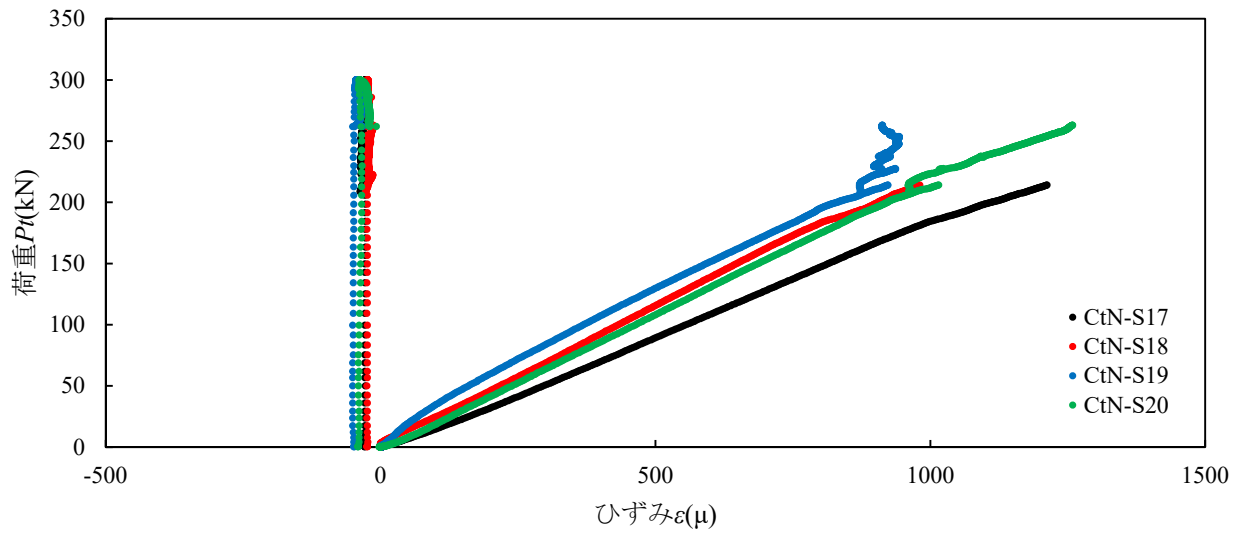


(c) 下段部

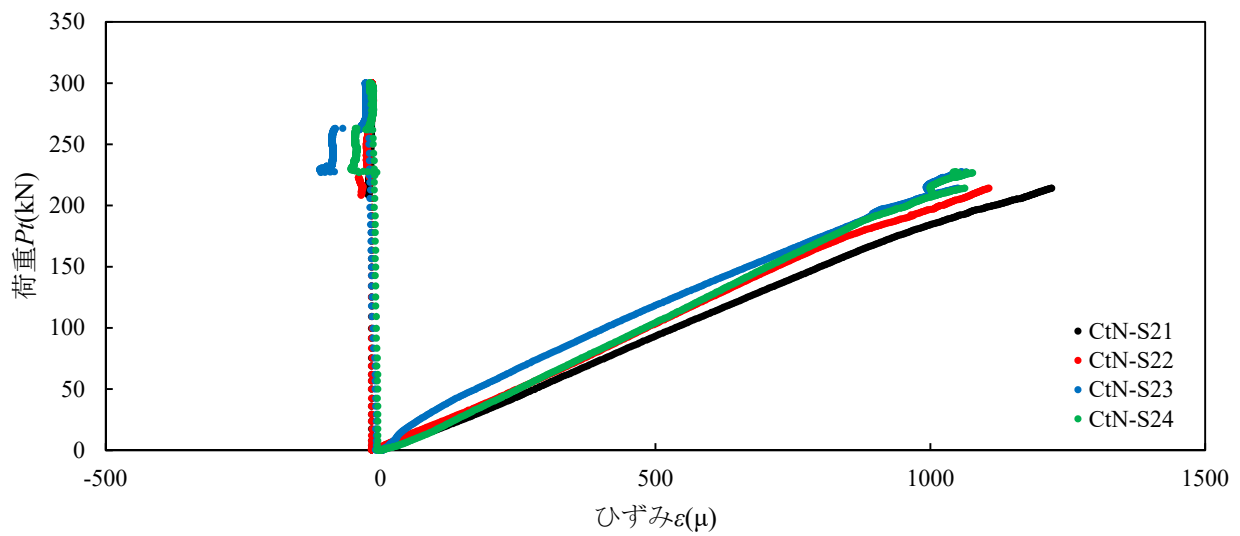
図-付 6.11 引張載荷試験における鉛直荷重-ひずみ関係 (CFRP 補強部) (試験体 B-t-P2)



(a)上段部

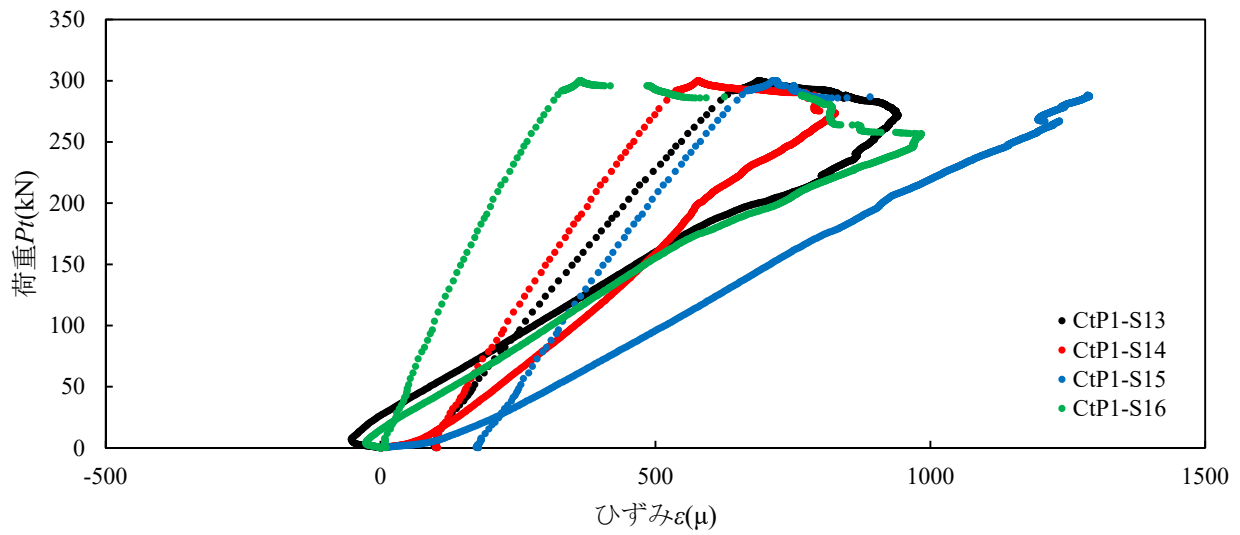


(b)中段部

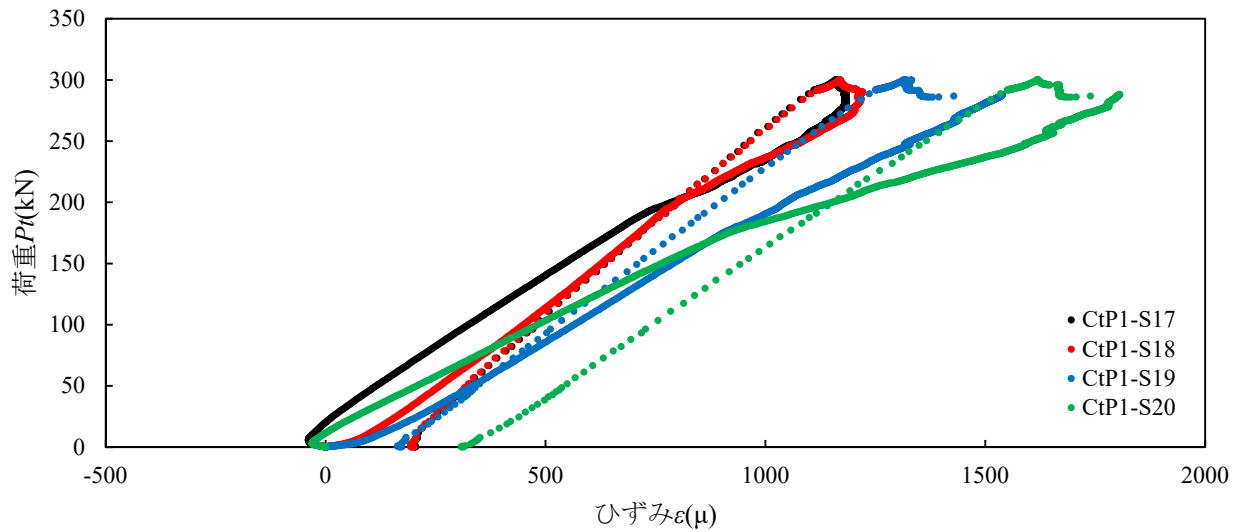


(c)下段部

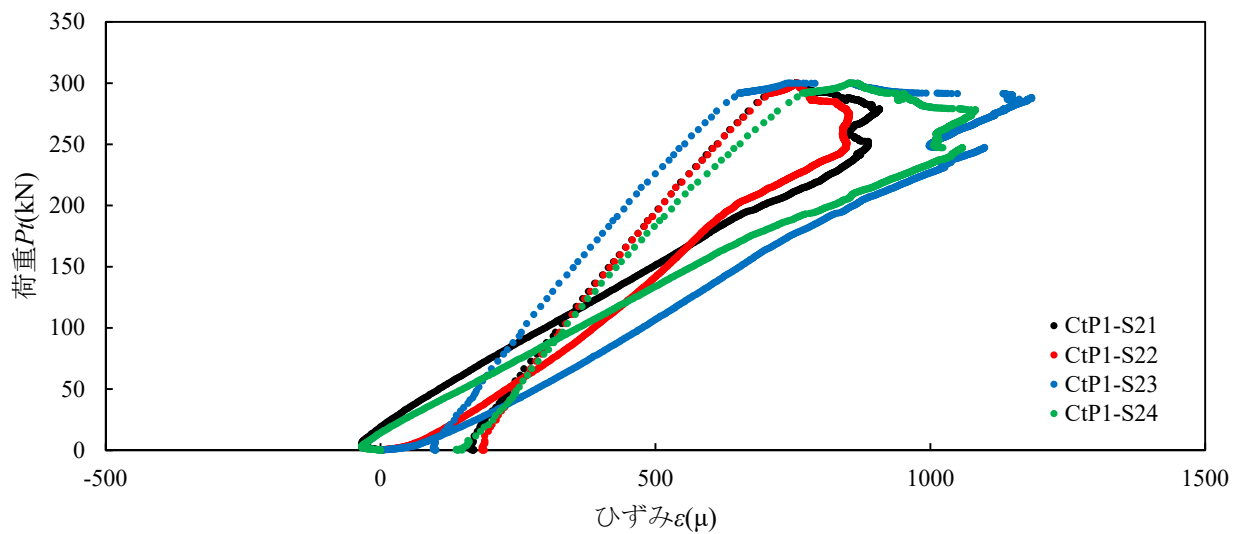
図-付 6.12 引張載荷試験における鉛直荷重－ひずみ関係（CFRP 補強部）（試験体 C-t-N）



(a)上段部

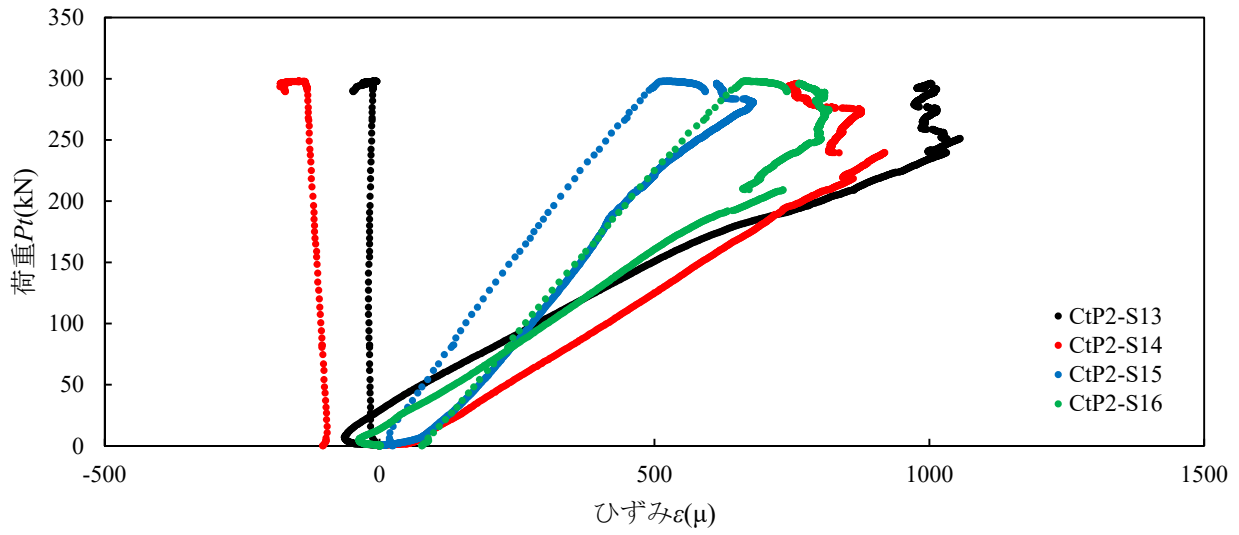


(b)中段部

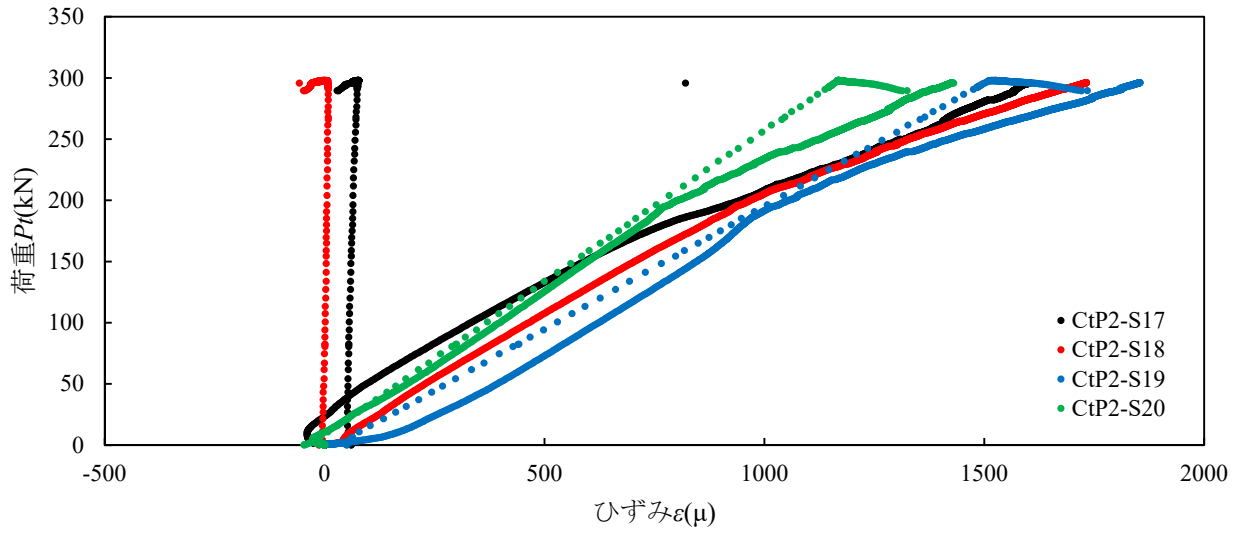


(c)下段部

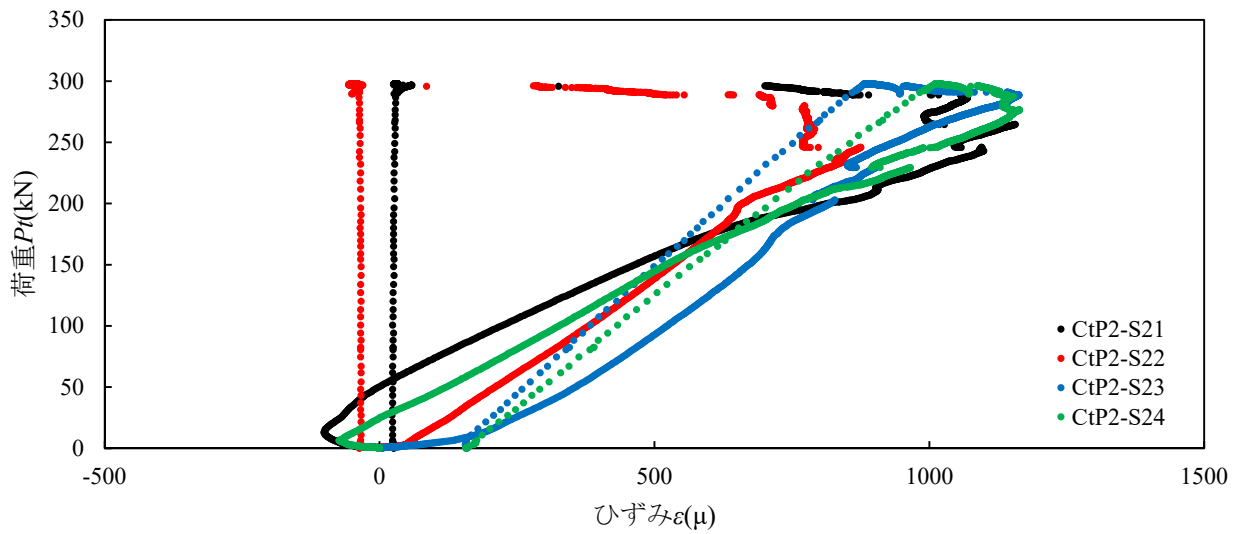
図-付 6.13 引張載荷試験における鉛直荷重－ひずみ関係 (CFRP 補強部) (試験体 C-t-P1)



(a)上段部



(b)中段部



(c)下段部

図-付 6.14 引張載荷試験における鉛直荷重－ひずみ関係 (CFRP 補強部) (試験体 C-t-P2)



写真付-6.5 引張試験後の試験体（試験体 A-t-N）（その 1）



写真-付 6.6 引張試験後の試験体（試験体 A-t-N）（その 2）

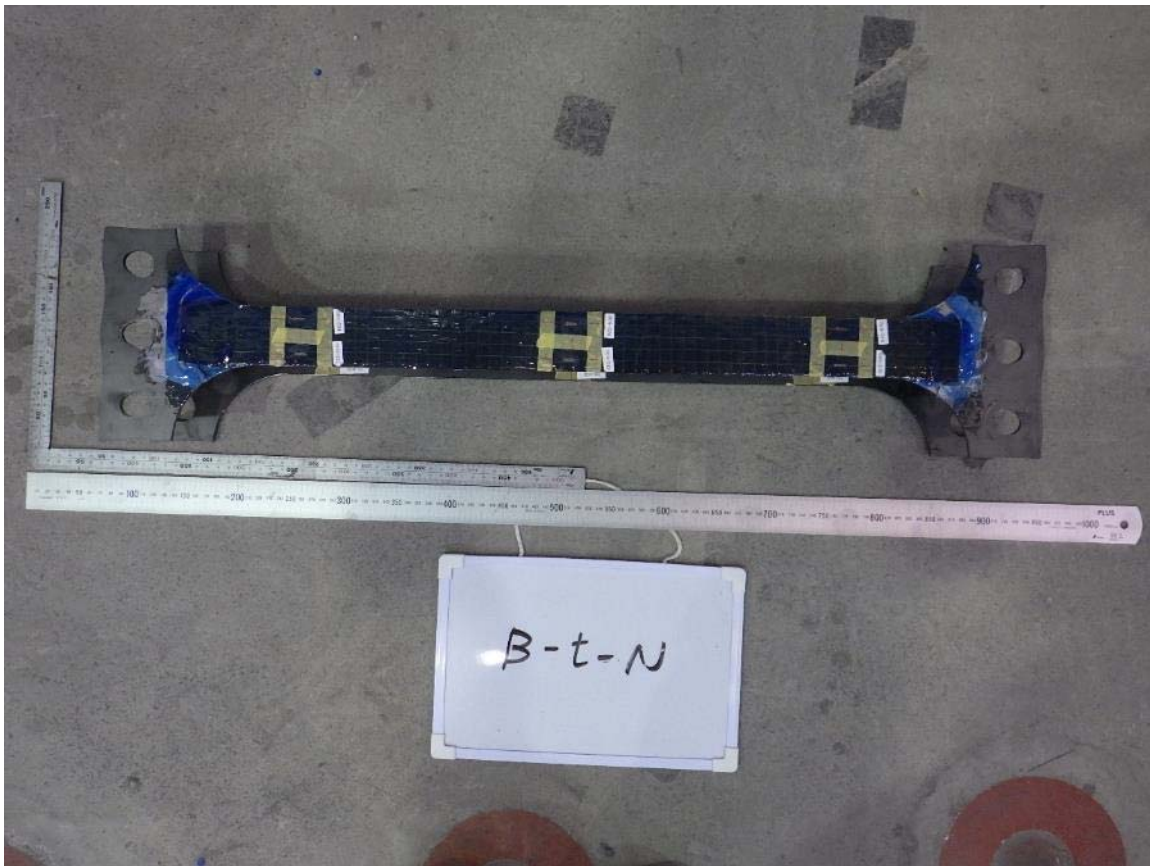


写真-付 6.7 引張試験後の試験体 (試験体 B-t-N)

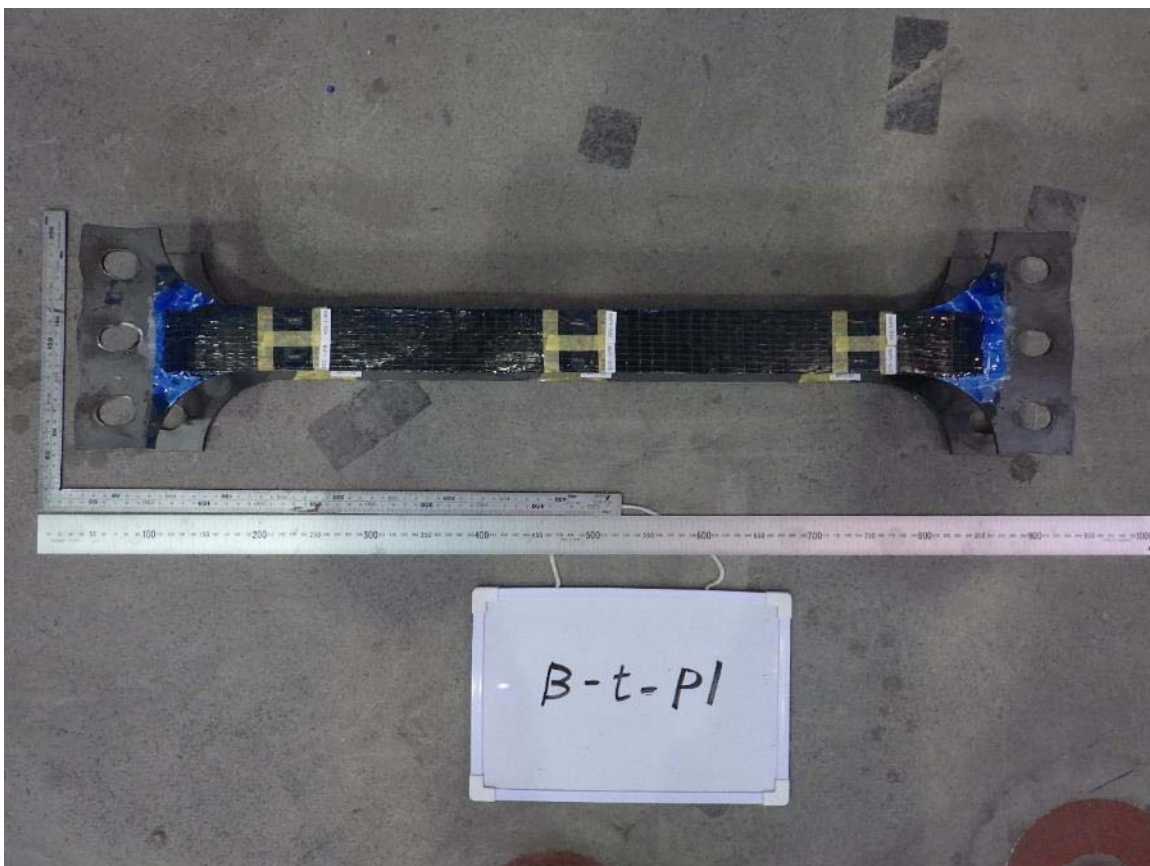


写真-付 6.8 引張試験後の試験体 (試験体 B-t-P1)



写真-付 6.9 引張試験後の試験体（試験体 B-t-P2）（その 1）



写真-付 6.10 引張試験後の試験体（試験体 B-t-P2）（その 2）



写真-付 6.11 引張試験後の試験体（試験体 C-t-N）（その 1）



写真-付 6.12 引張試験後の試験体（試験体 C-t-N）（その 2）

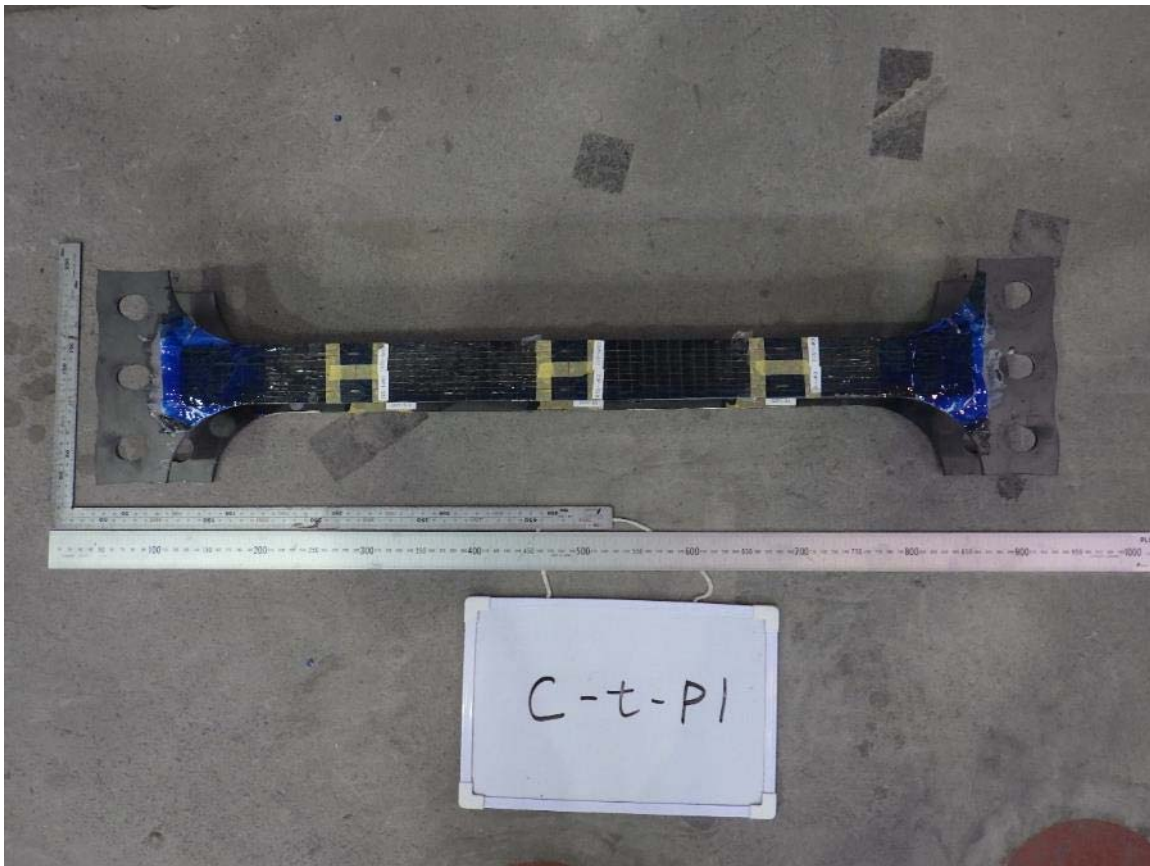


写真-付 6.13 引張試験後の試験体（試験体 C-t-P1）（その 1）



写真-付 6.14 引張試験後の試験体（試験体 C-t-P1）（その 2）

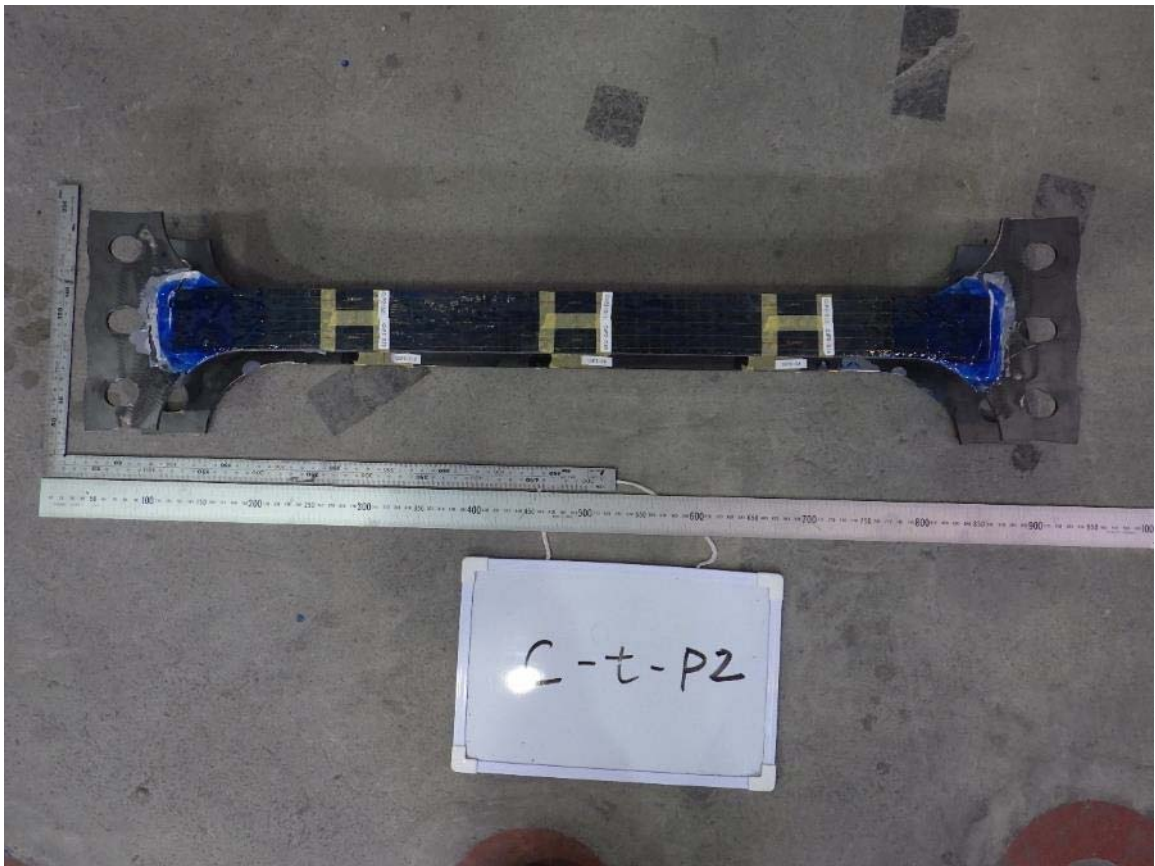
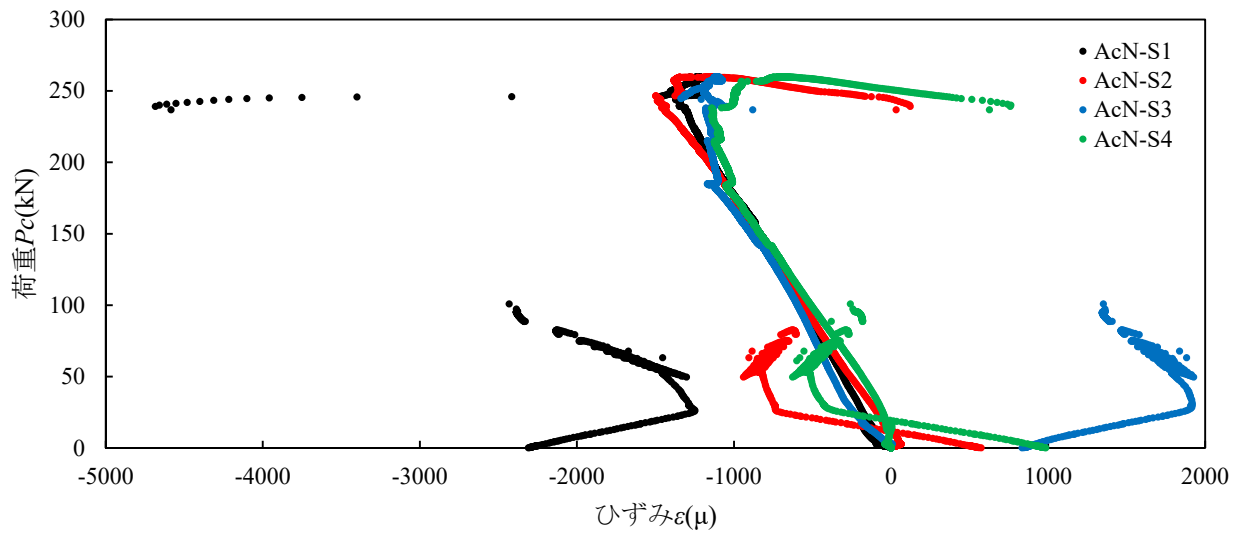


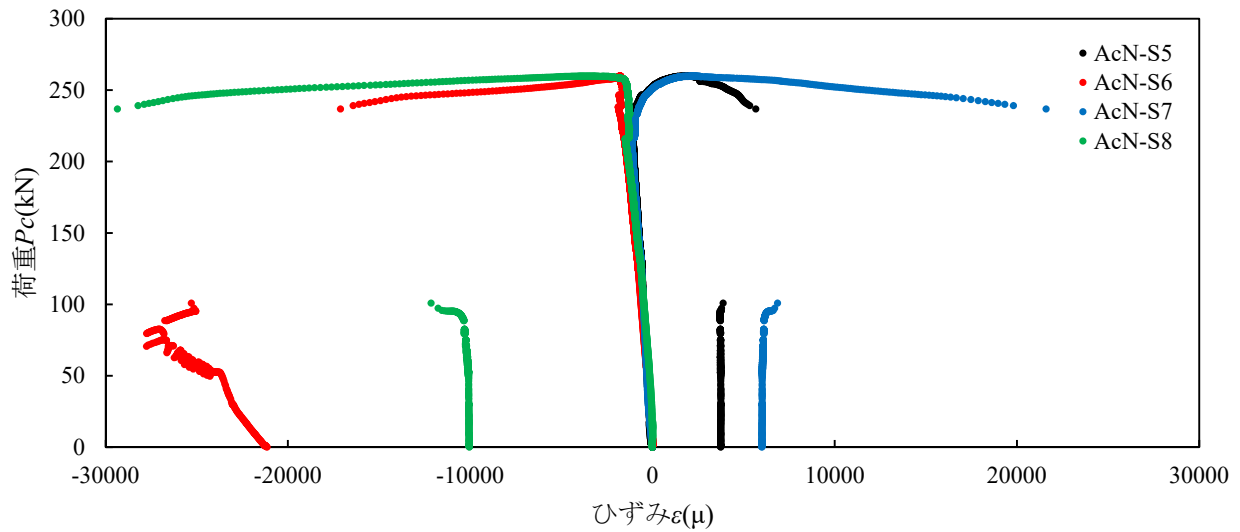
写真-付 6.15 引張試験後の試験体（試験体 C-t-P2）（その 1）



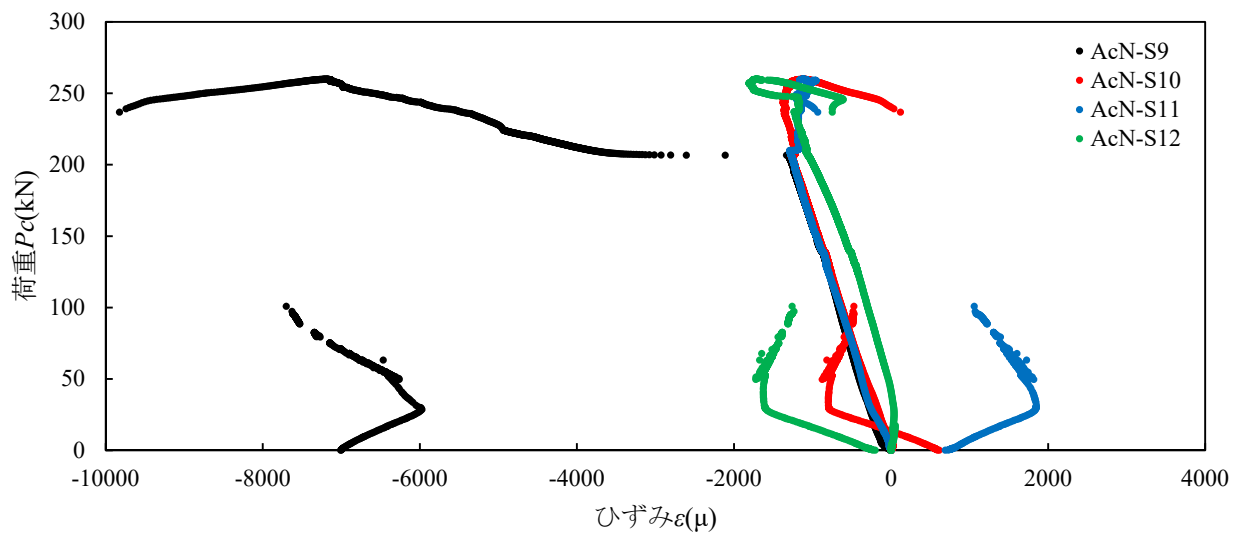
写真-付 6.16 引張試験後の試験体（試験体 C-t-P2）（その 2）



(a)上段部

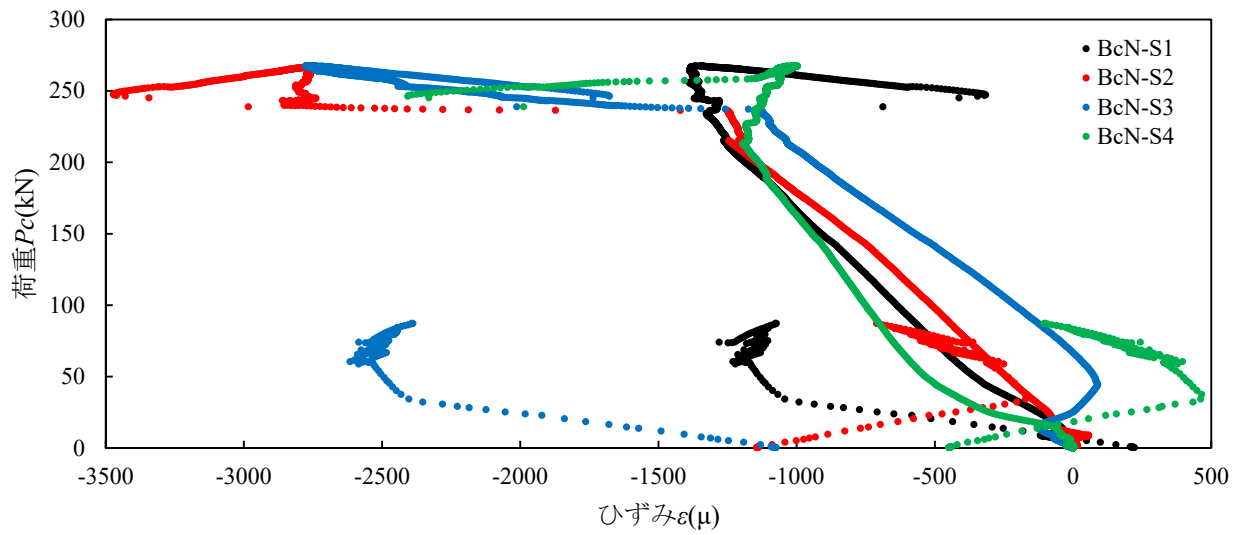


(b)中段部

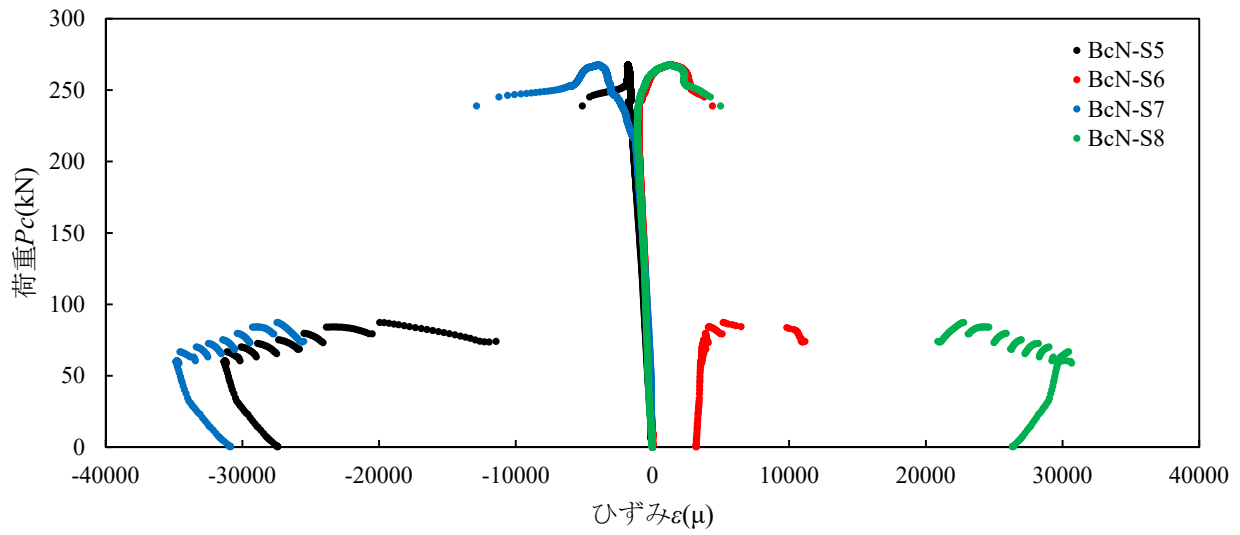


(c)下段部

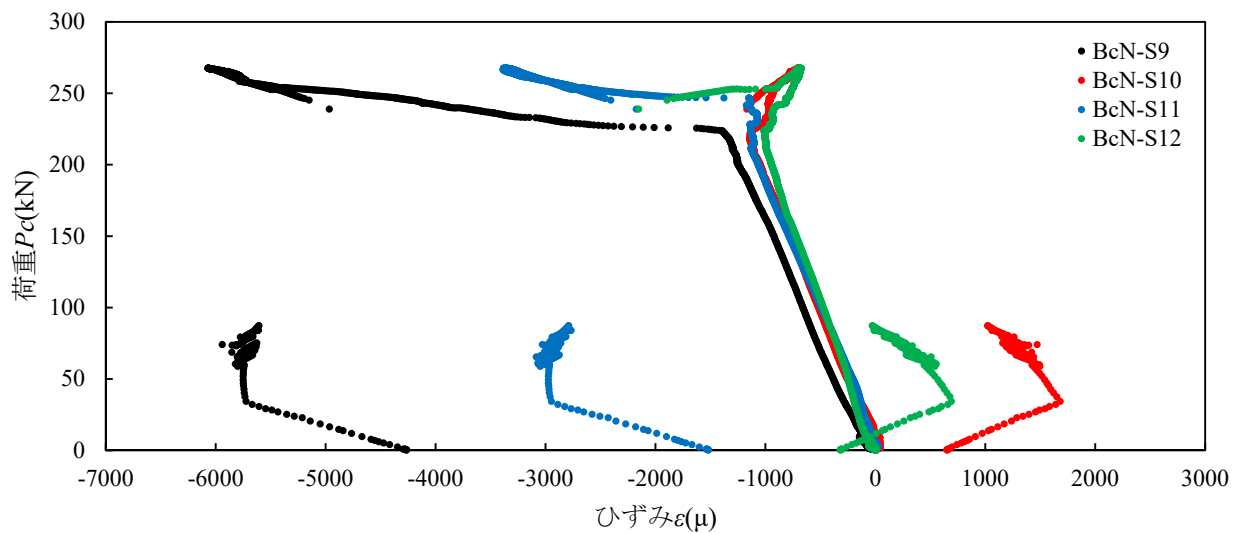
図-付 6.15 圧縮載荷試験における鉛直荷重－ひずみ関係（鋼材部）（試験体 A-c-N）



(a)上段部

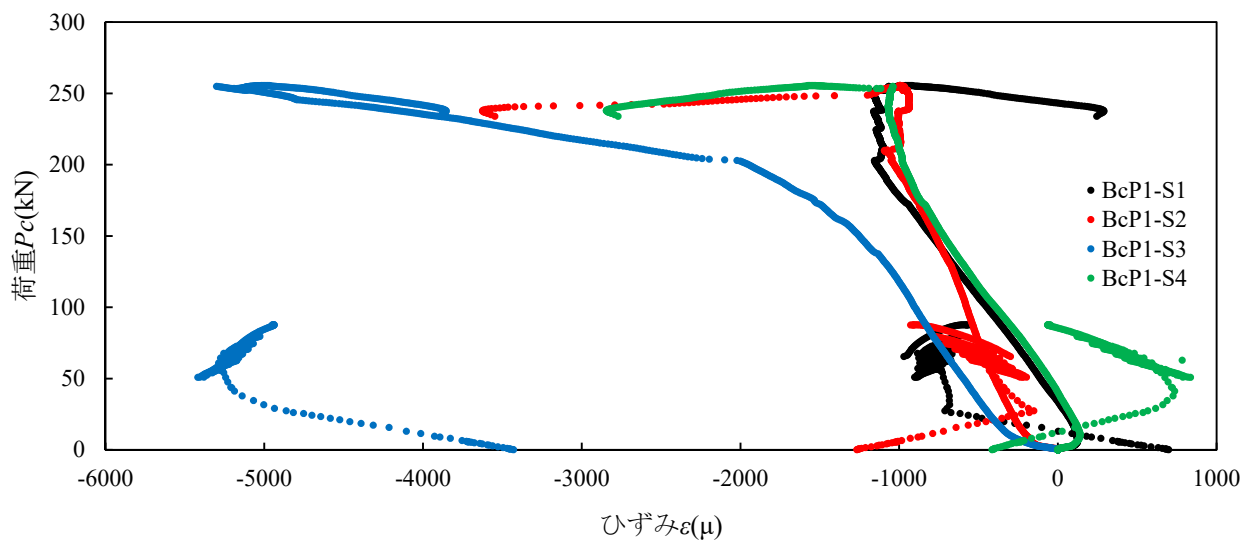


(b)中段部

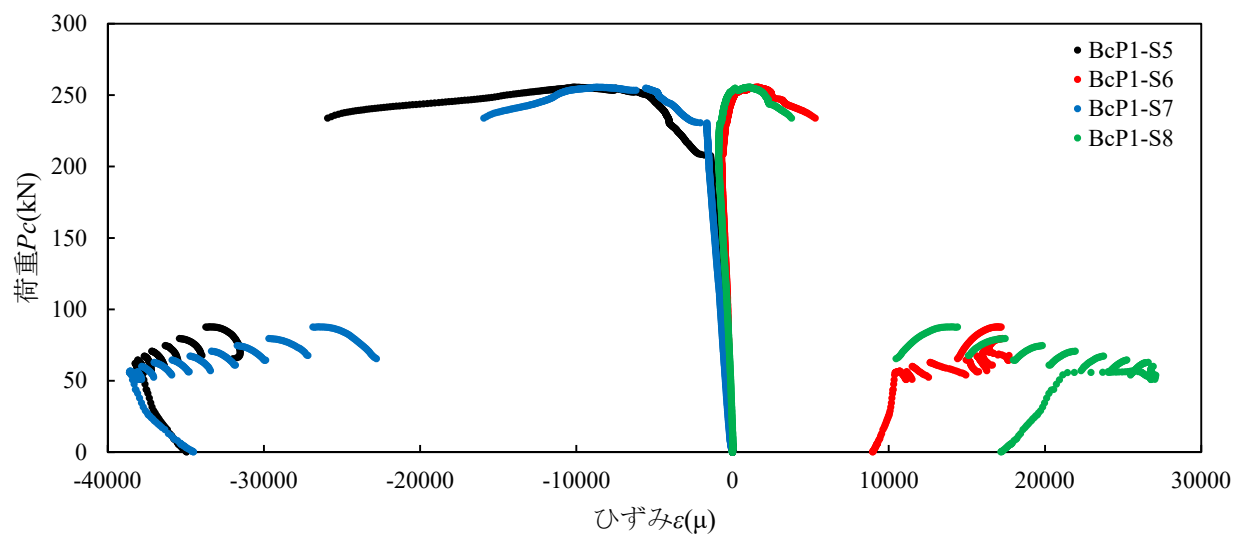


(c)下段部

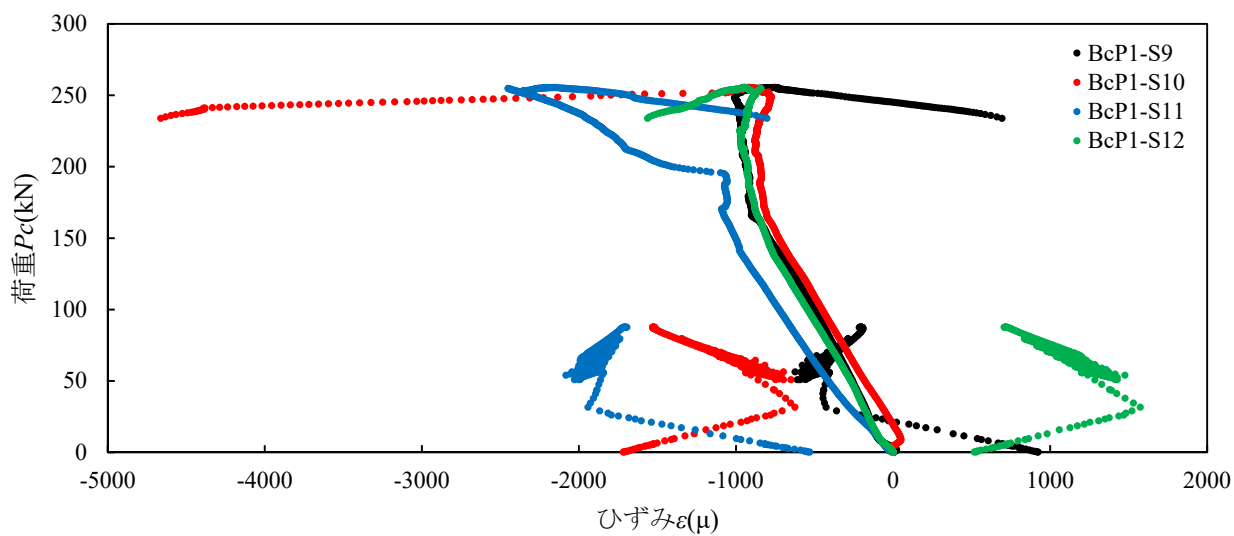
図-付 6.16 圧縮載荷試験における鉛直荷重—ひずみ関係 (鋼材部) (試験体 B-c-N)



(a)上段部

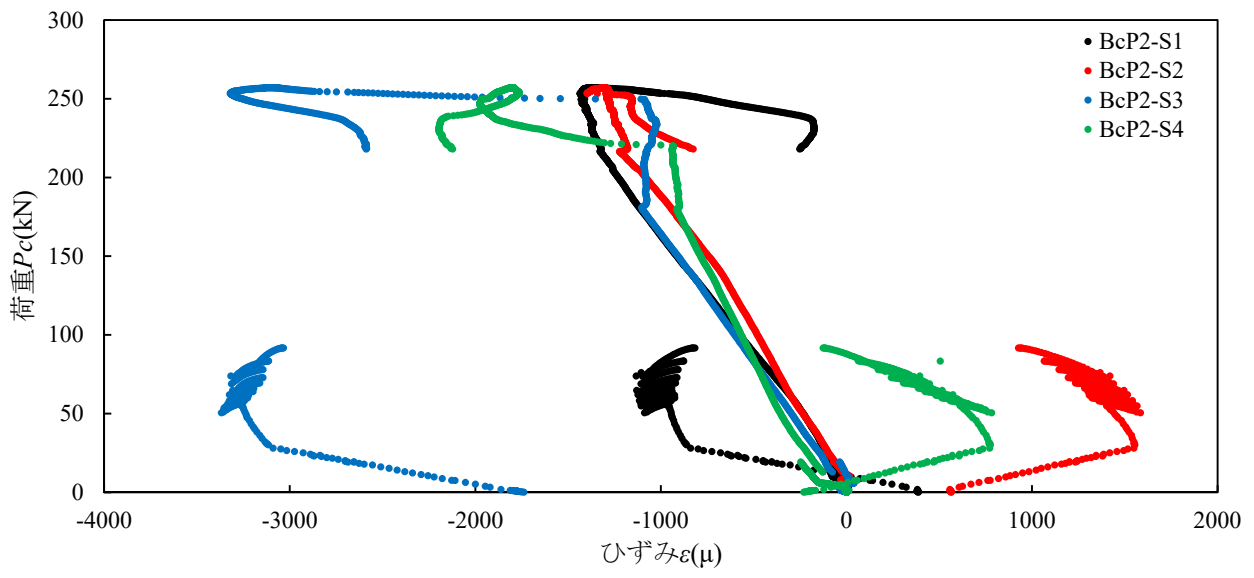


(b)中段部

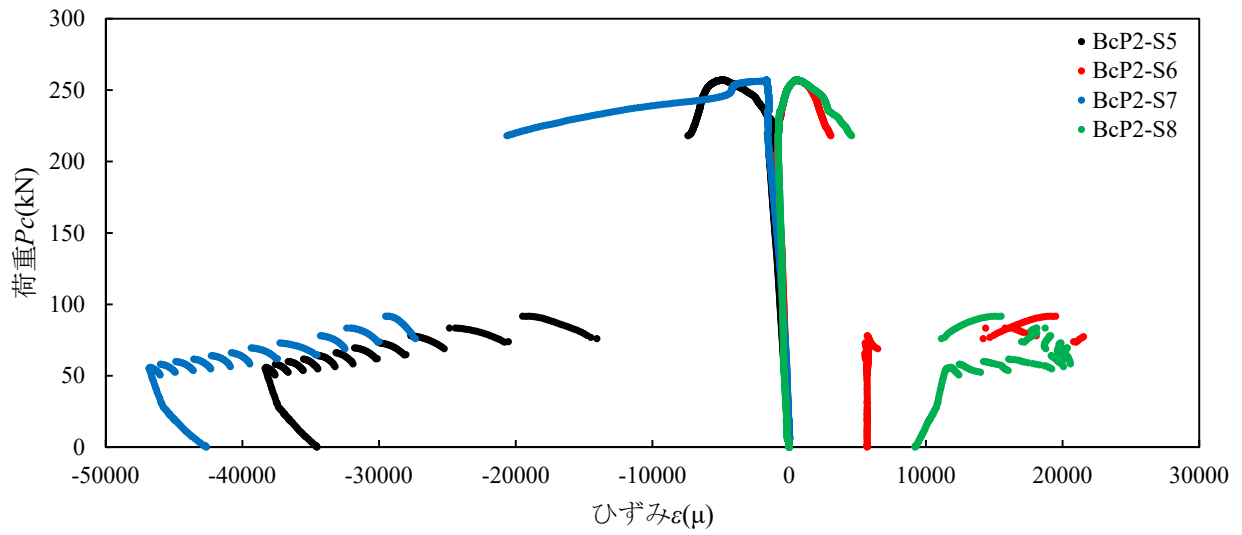


(c)下段部

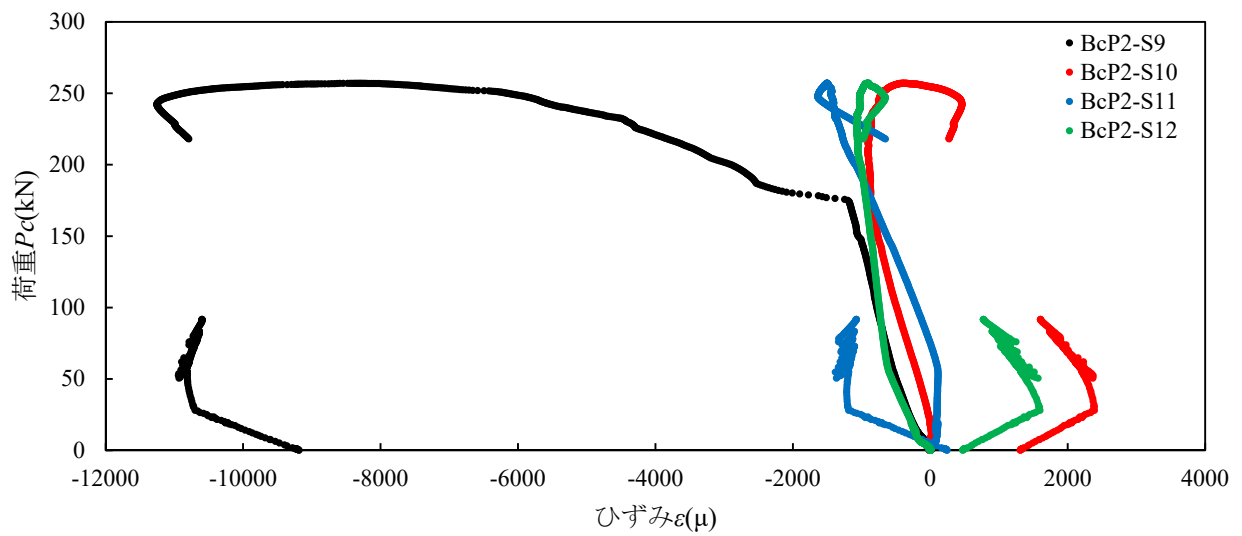
図-付 6.17 圧縮載荷試験における鉛直荷重－ひずみ関係（鋼材部）（試験体 B-c-P1）



(a)上段部

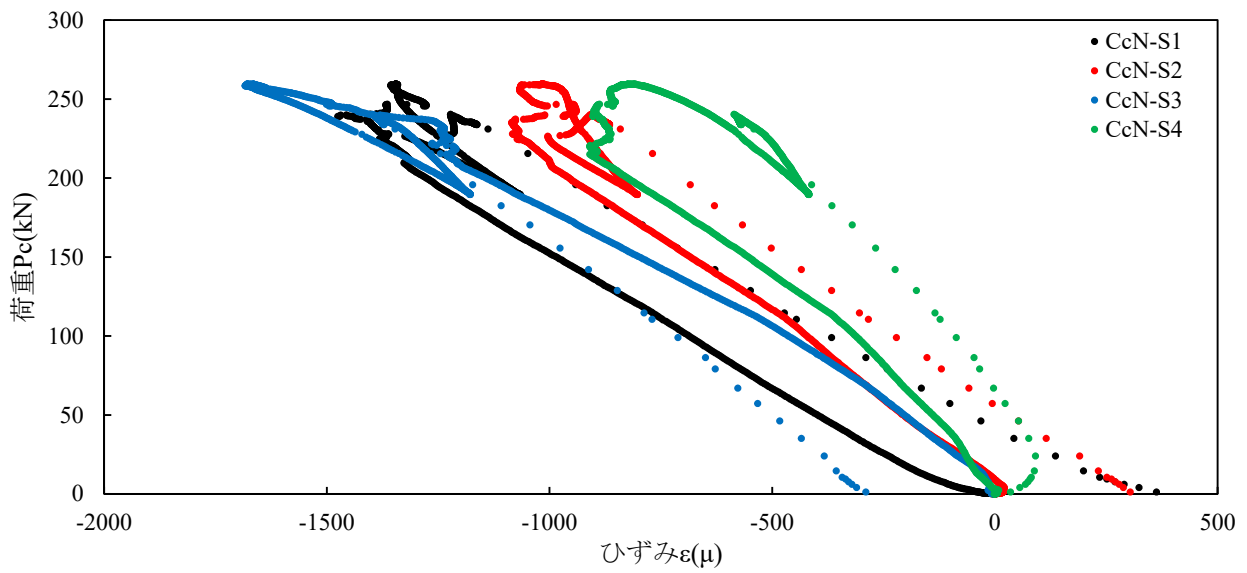


(b)中段部

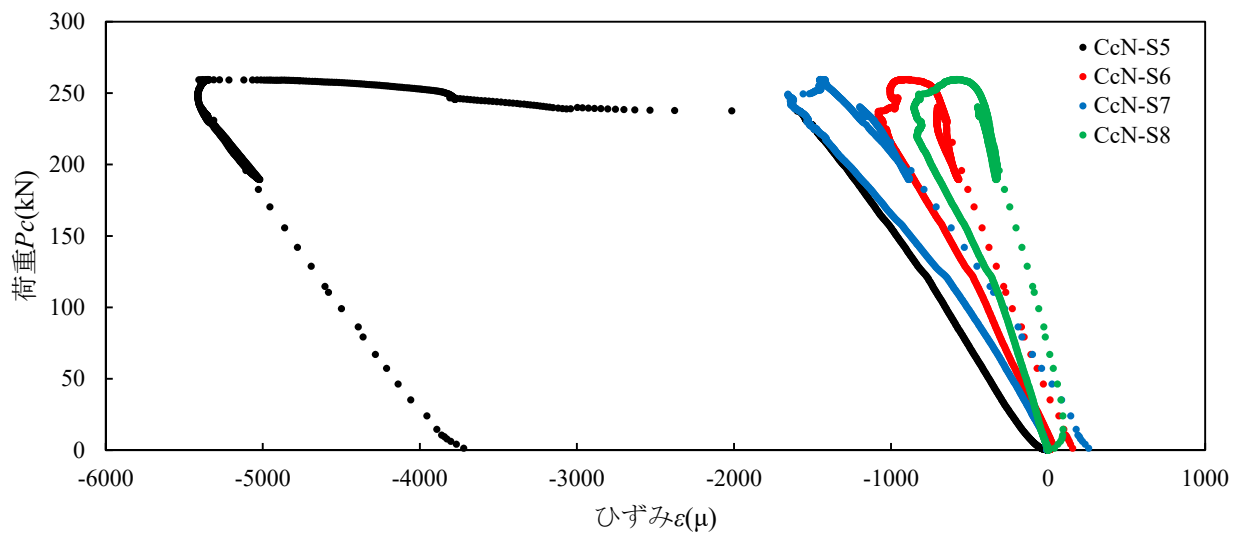


(c)下段部

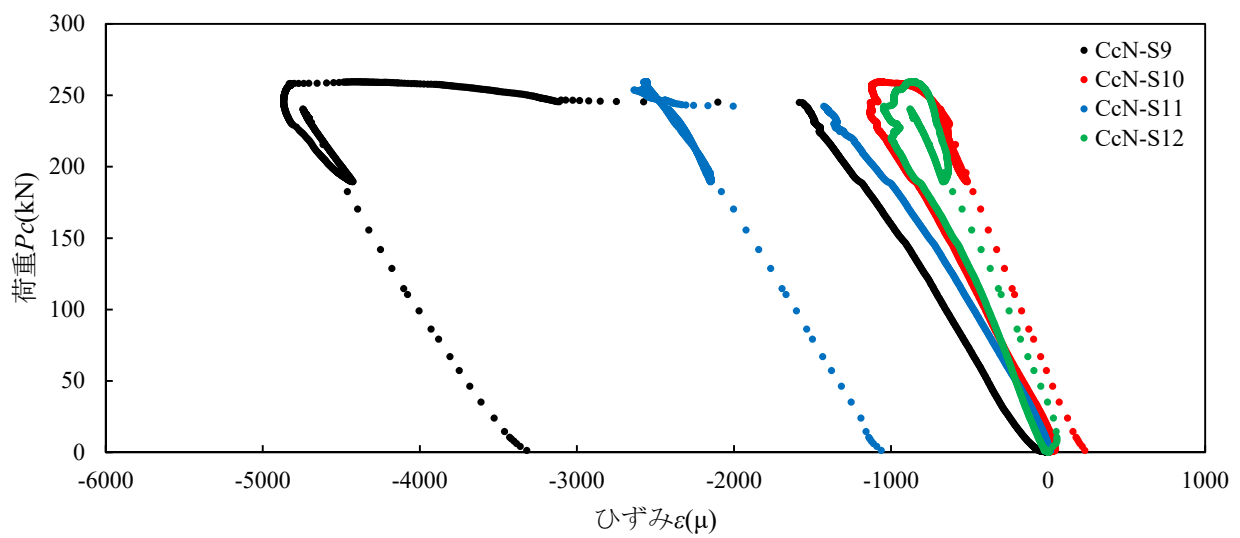
図-付 6.18 圧縮載荷試験における鉛直荷重－ひずみ関係（鋼材部）（試験体 B-c-P2）



(a)上段部

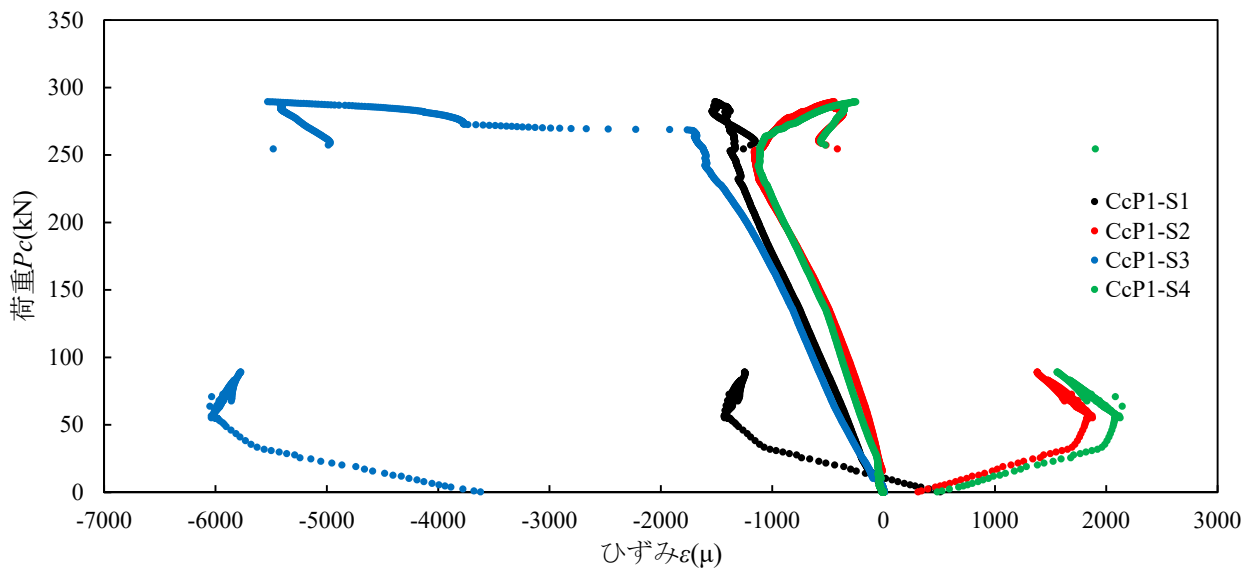


(b)中段部

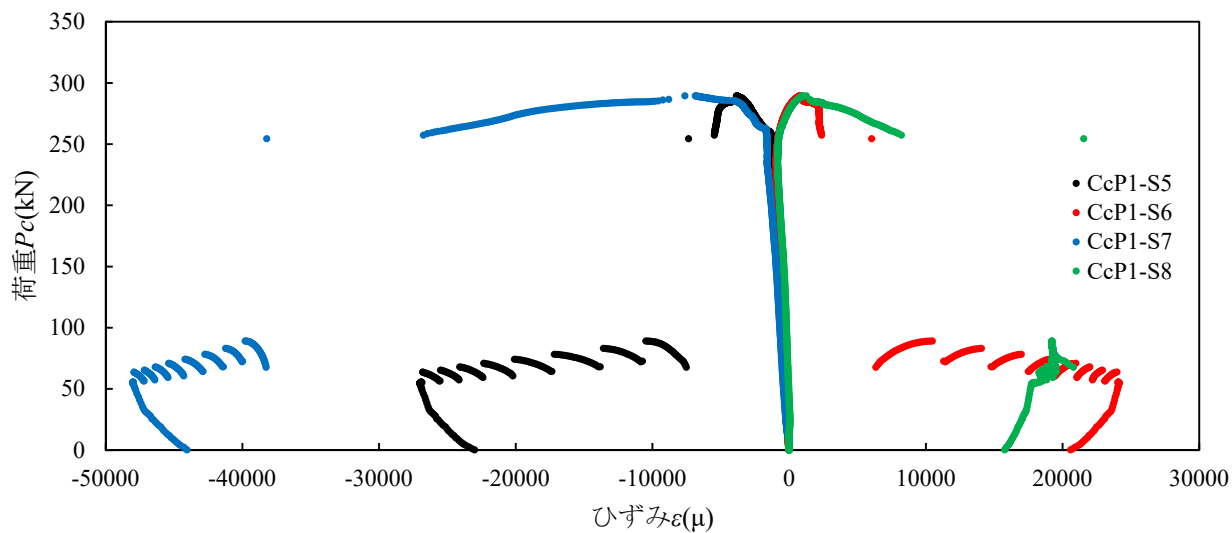


(c)下段部

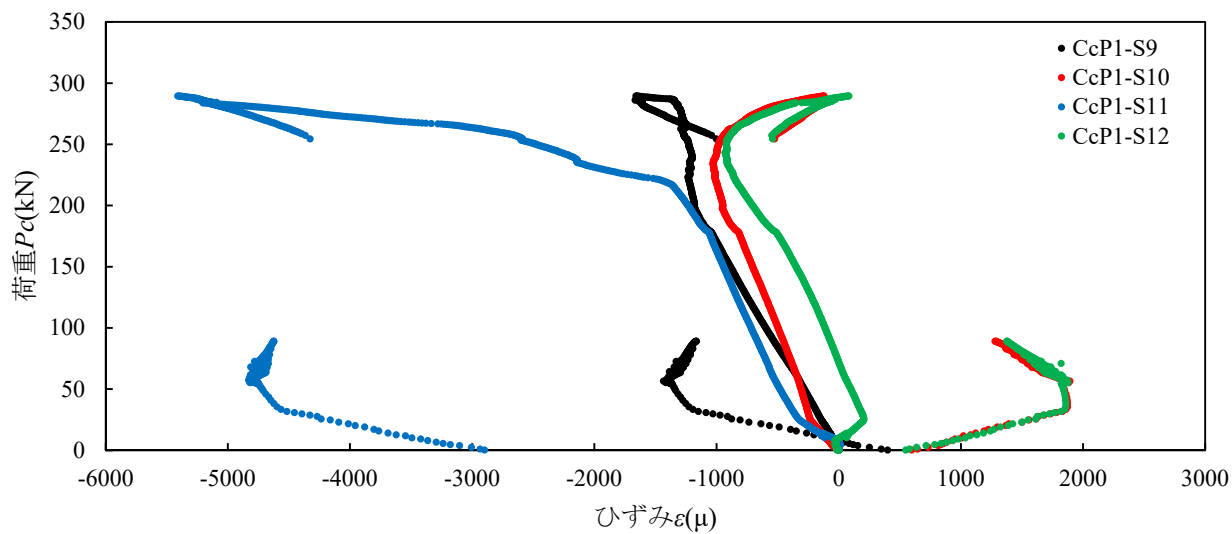
図-付 6.19 圧縮載荷試験における鉛直荷重—ひずみ関係（鋼材部）（試験体 C-c-N）



(a)上段部

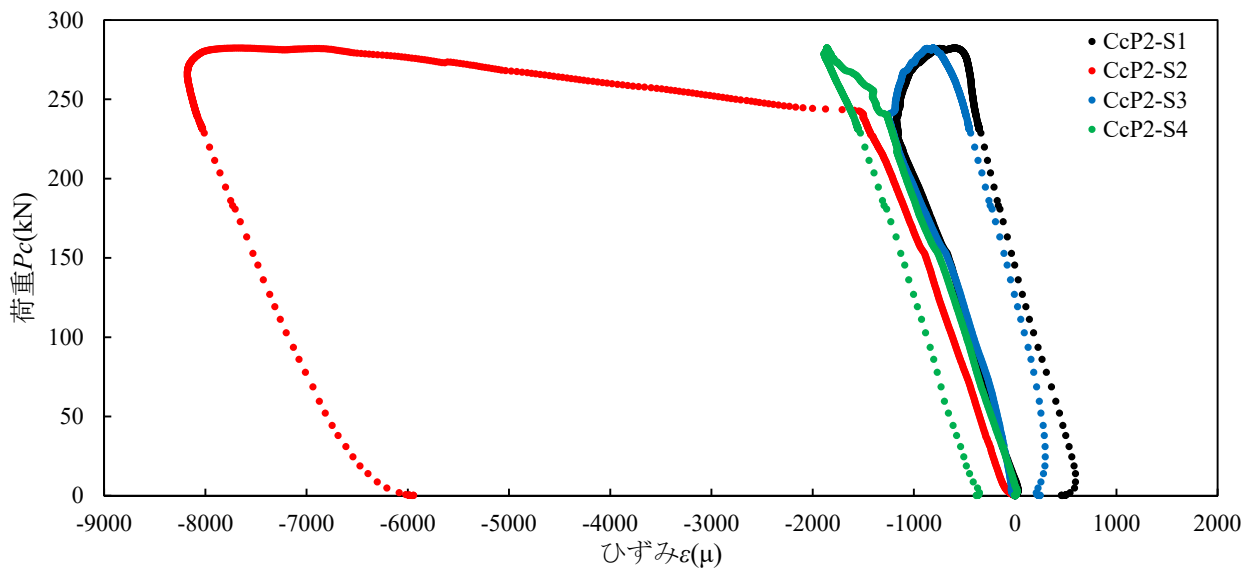


(b)中段部

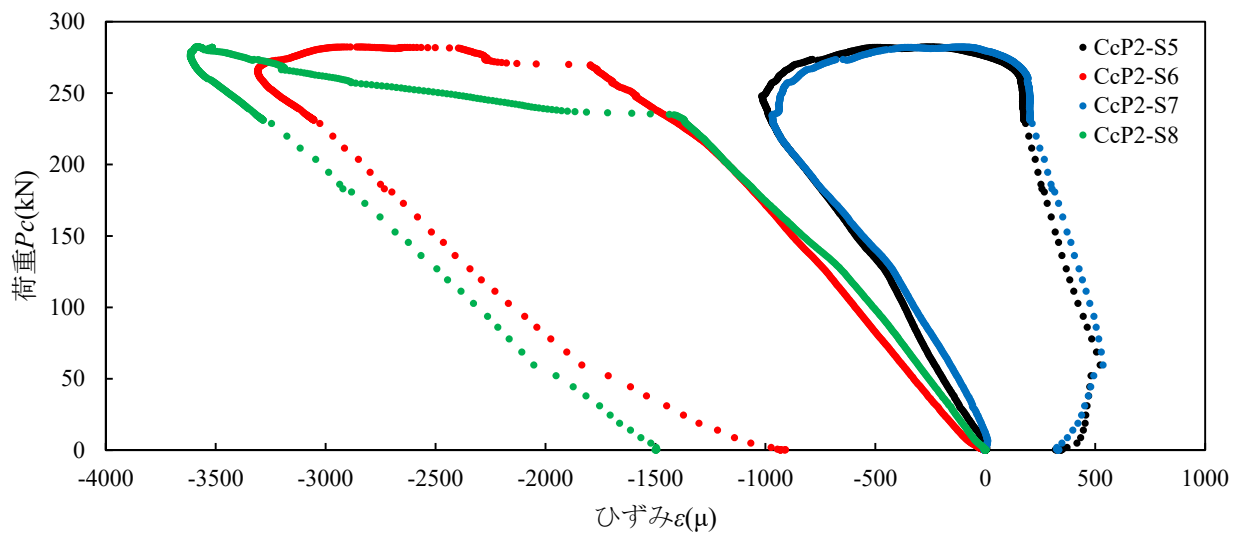


(c)下段部

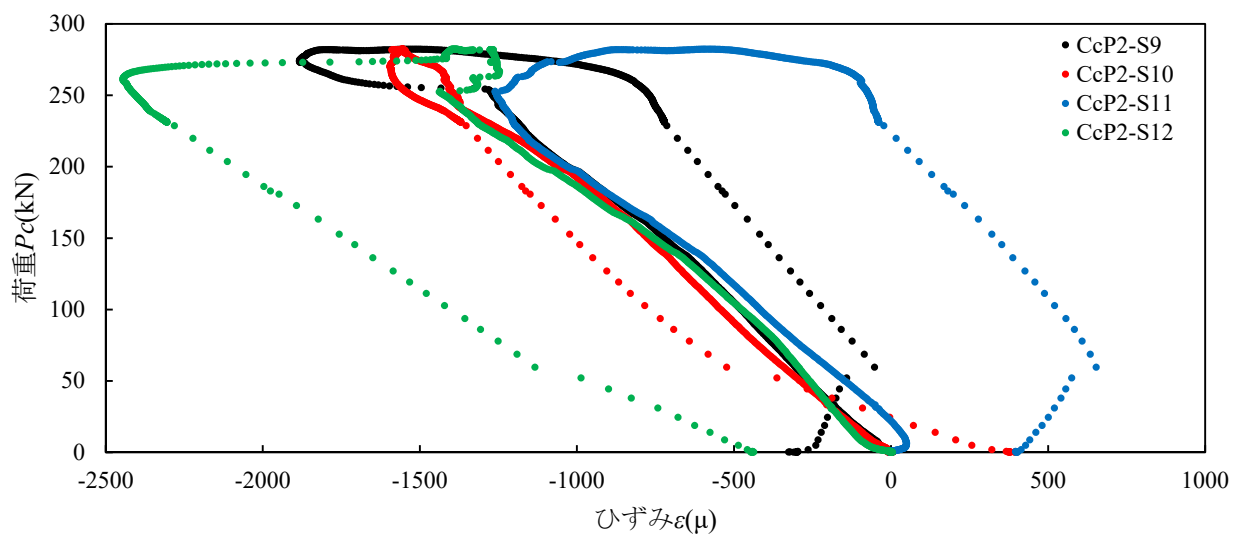
図-付 6.20 圧縮載荷試験における鉛直荷重－ひずみ関係（鋼材部）（試験体 C-c-P1）



(a)上段部

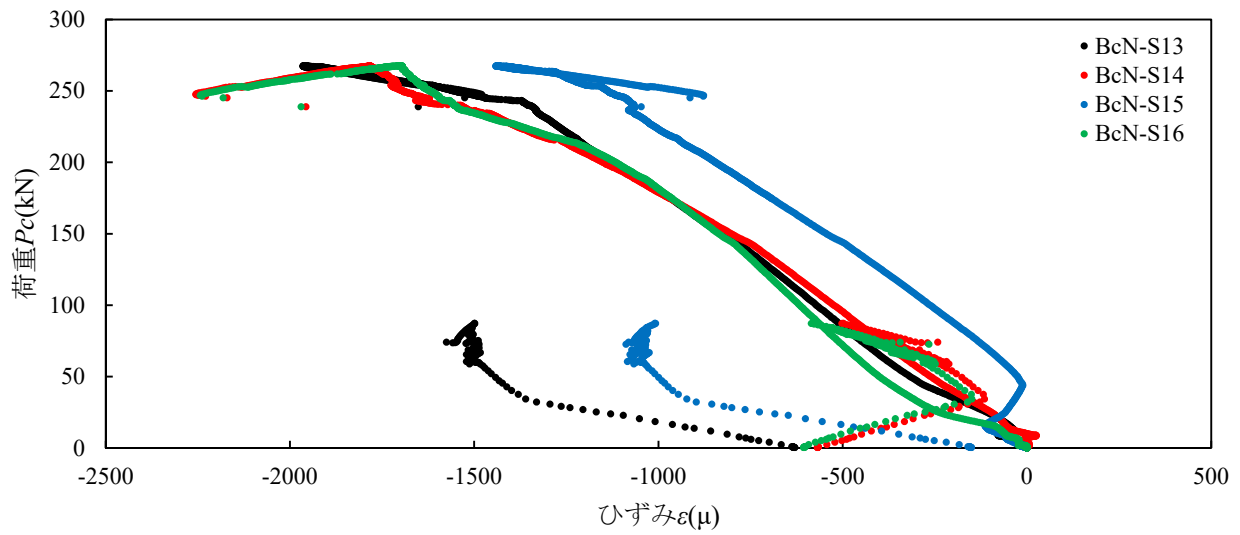


(b)中段部

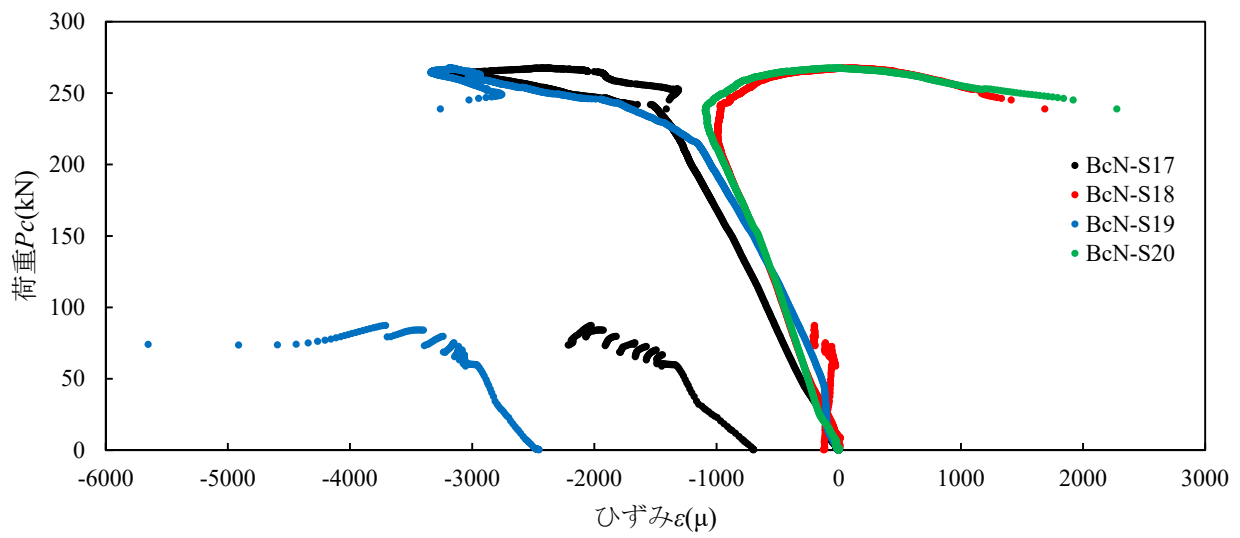


(c)下段部

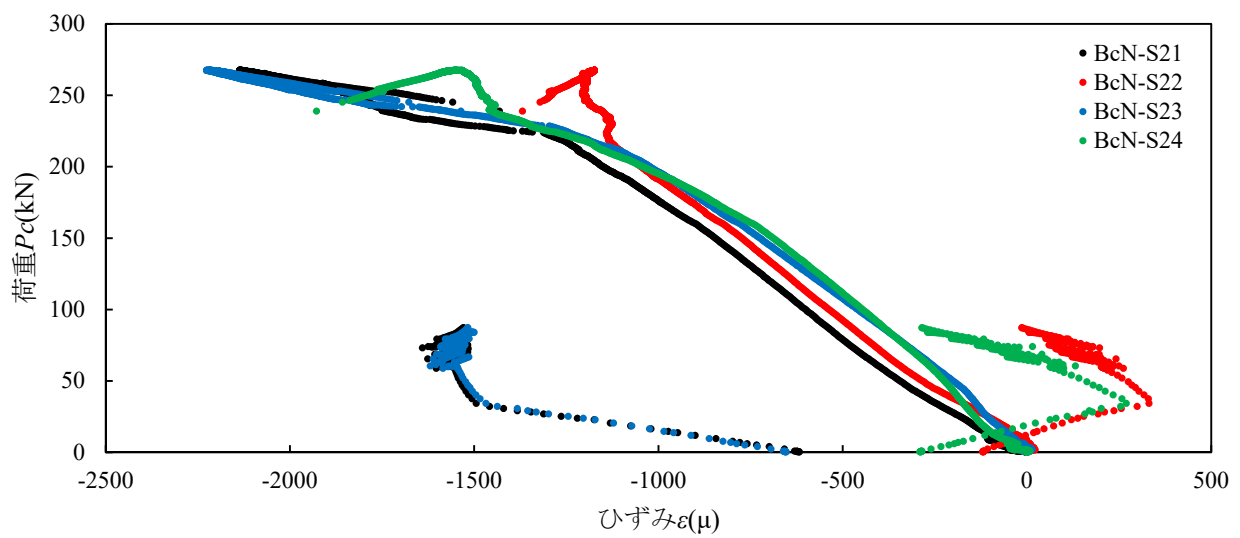
図-付 6.21 圧縮載荷試験における鉛直荷重－ひずみ関係（鋼材部）（試験体 C-c-P2）



(a)上段部

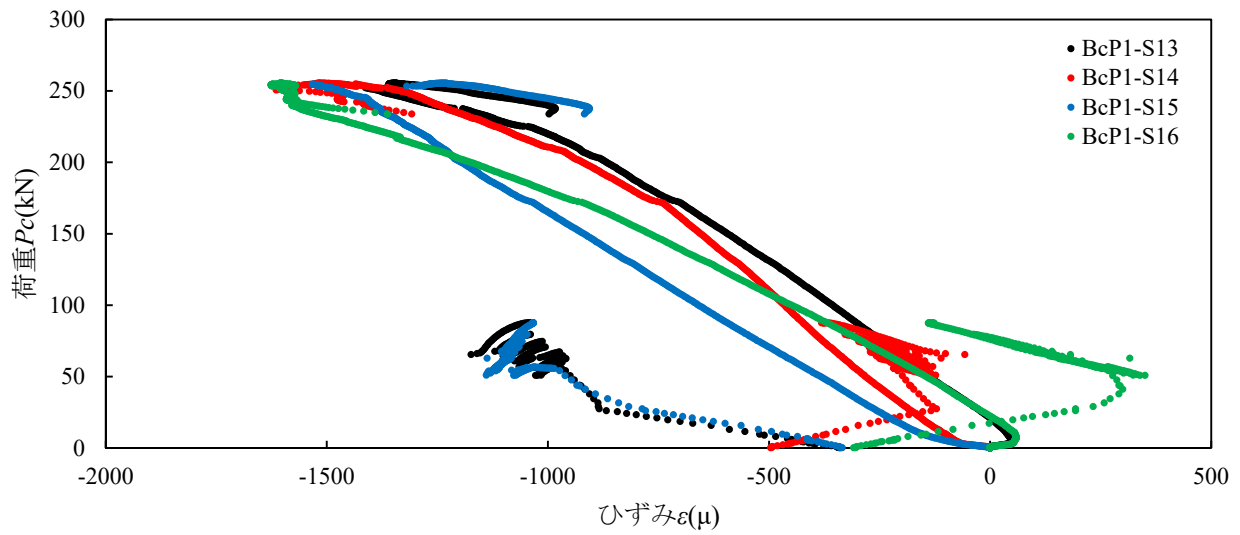


(b)中段部

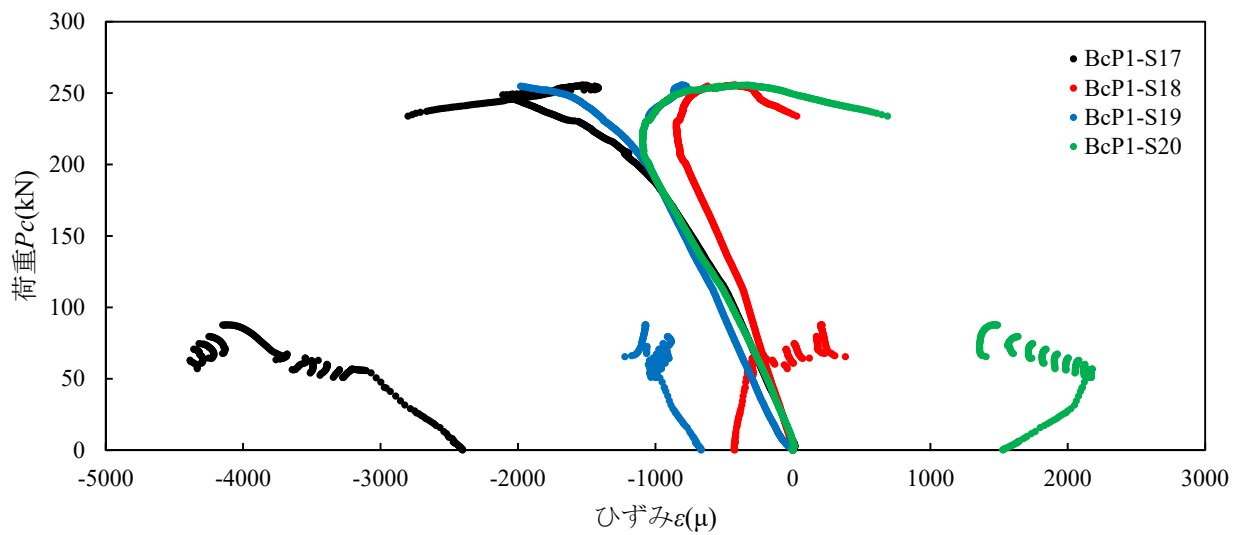


(c)下段部

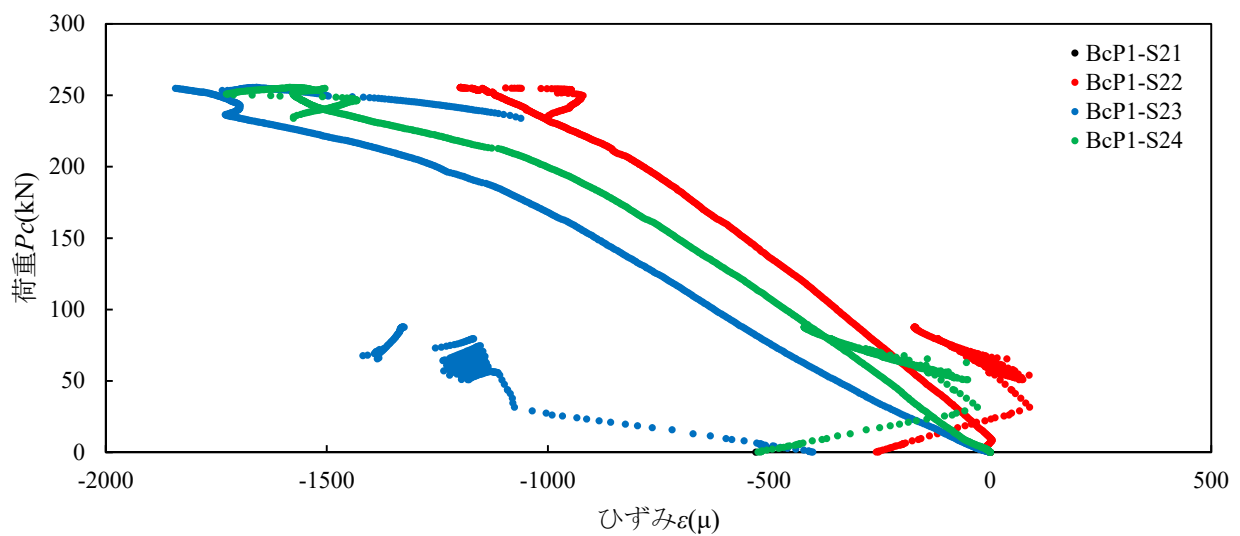
図-付 6.22 圧縮載荷試験における鉛直荷重－ひずみ関係（CFRP 補強部）（試験体 B-c-N）



(a) 上段部

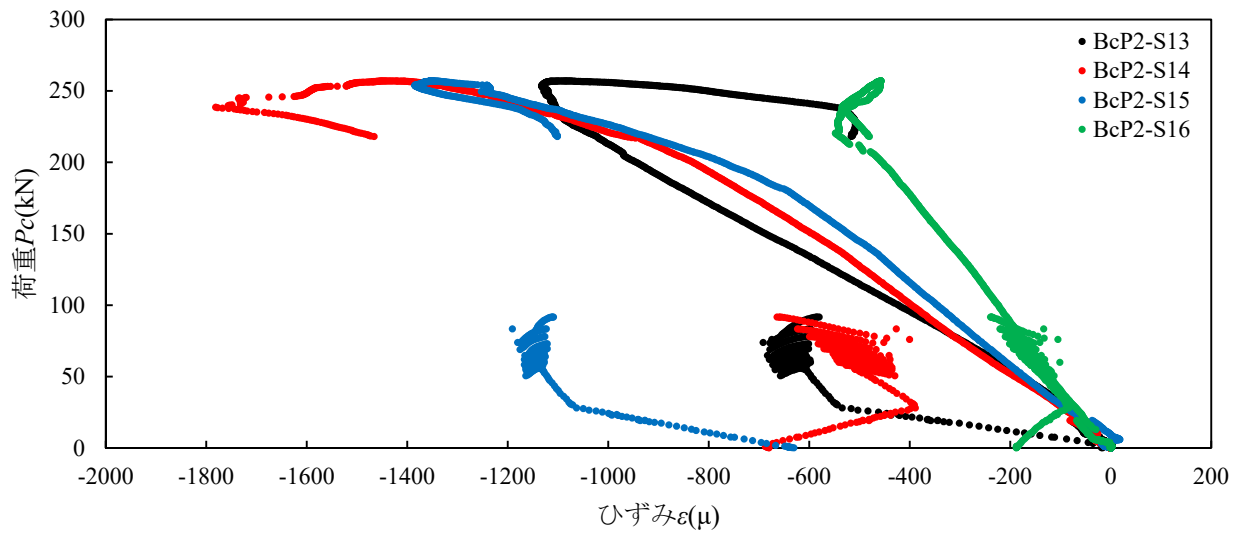


(b) 中段部

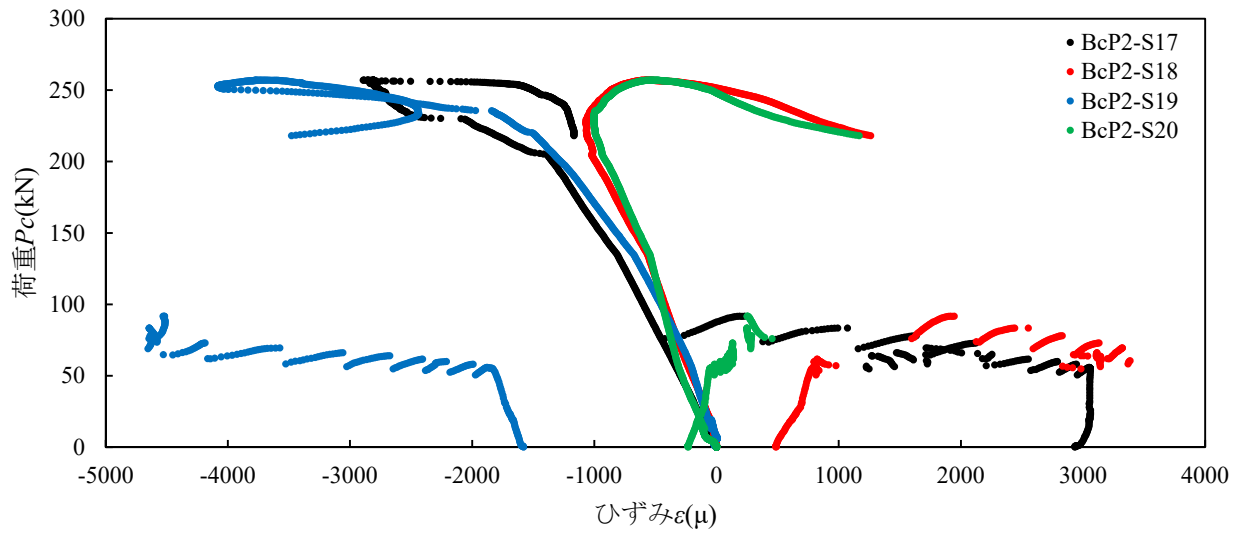


(c) 下段部

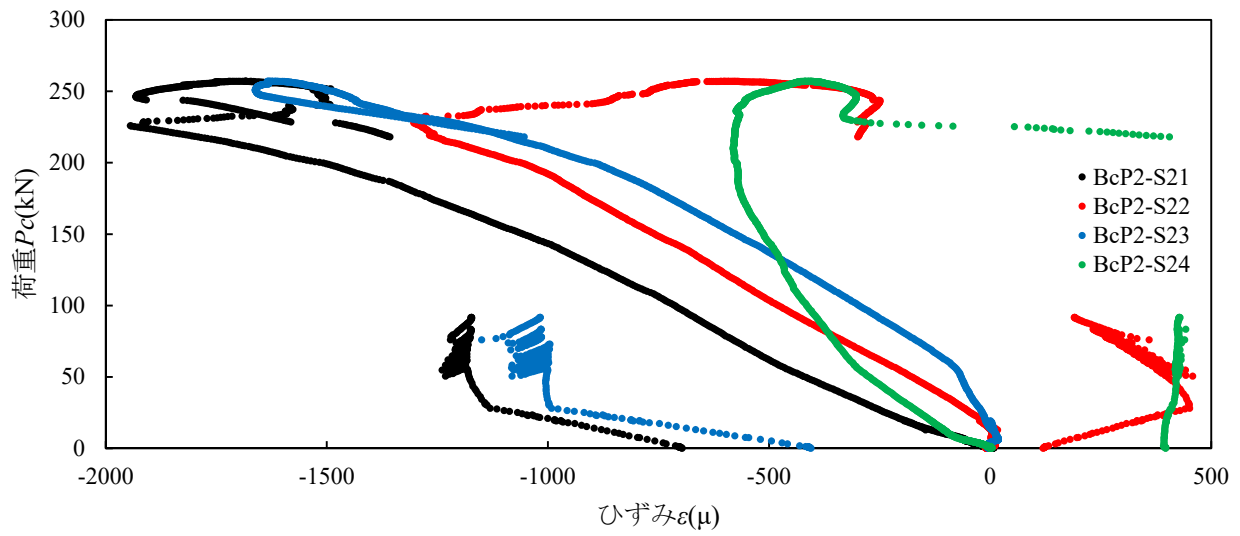
図-付 6.23 圧縮載荷試験における鉛直荷重-ひずみ関係 (CFRP 補強部) (試験体 B-c-P1)



(a)上段部

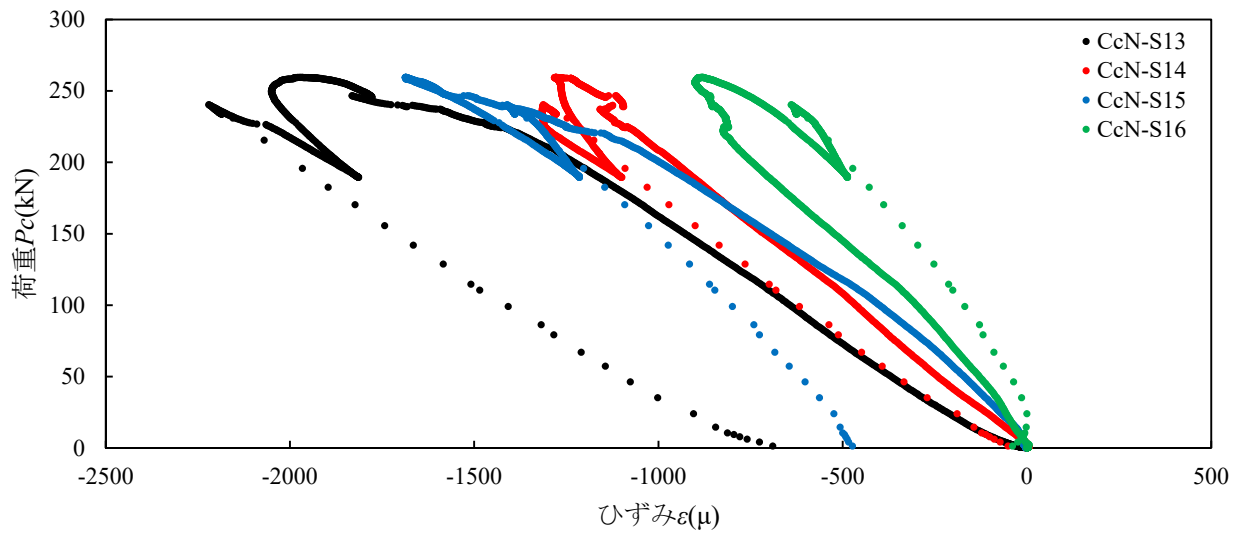


(b)中段部

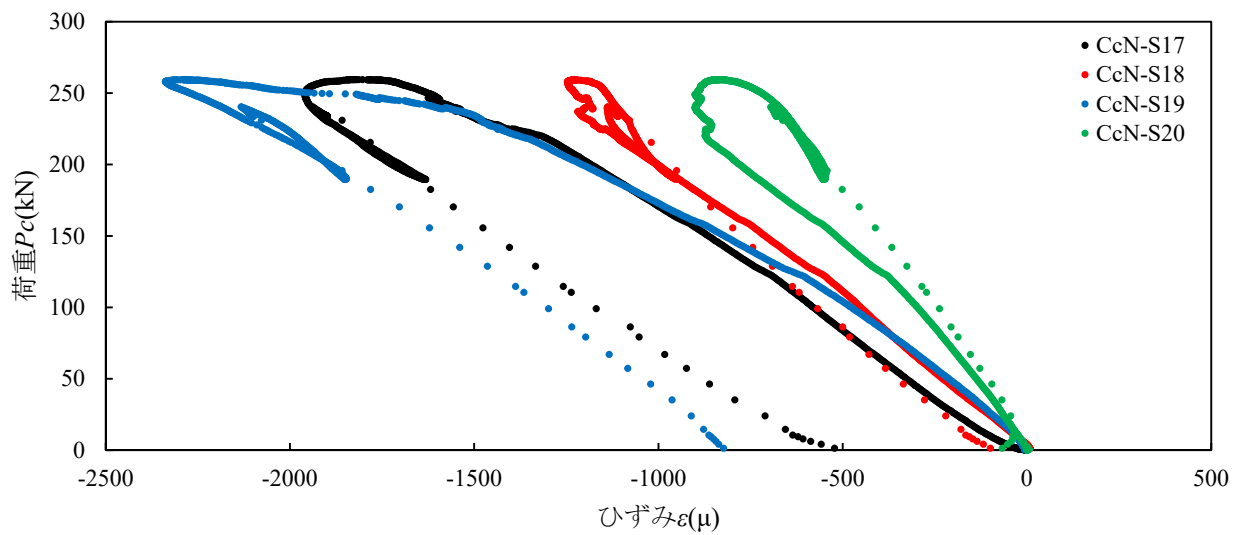


(c)下段部

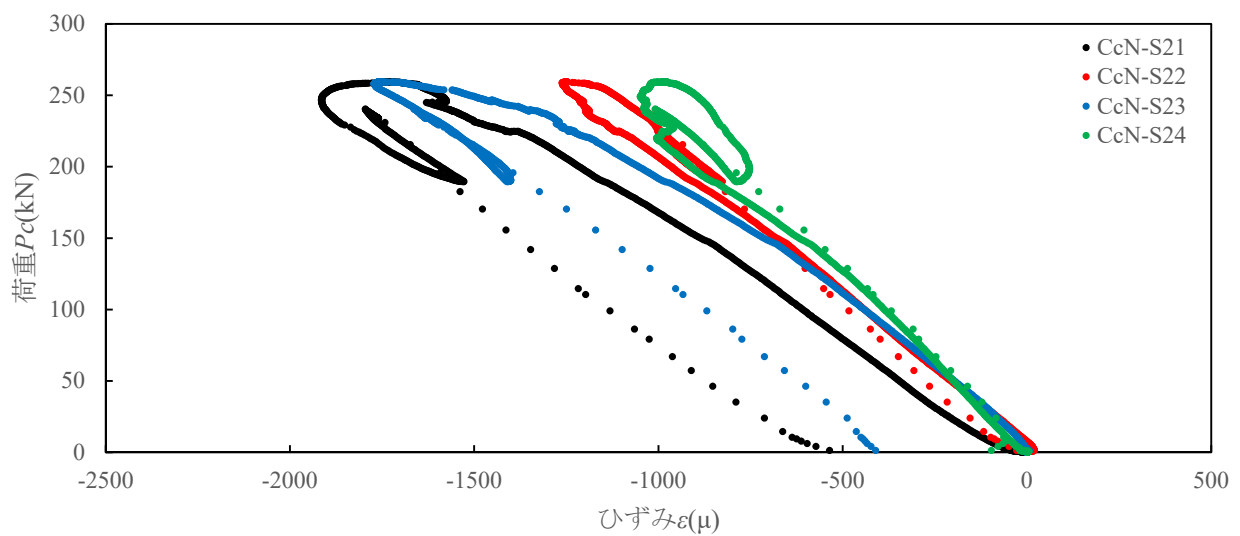
図-付 6.24 圧縮載荷試験における鉛直荷重－ひずみ関係（CFRP 補強部）（試験体 B-c-P2）



(a) 上段部

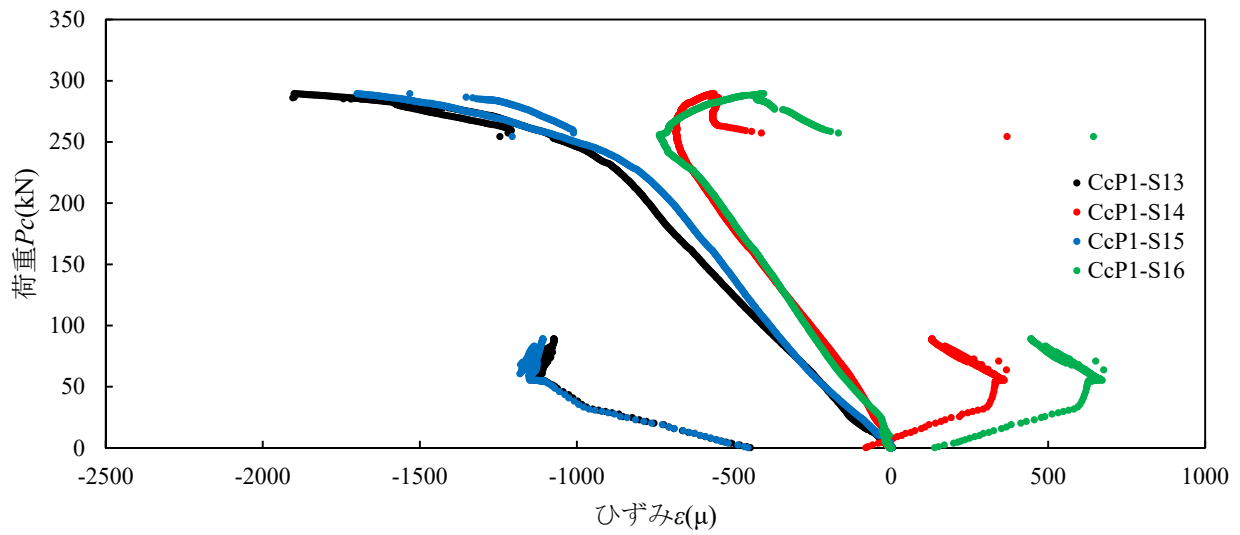


(b) 中段部

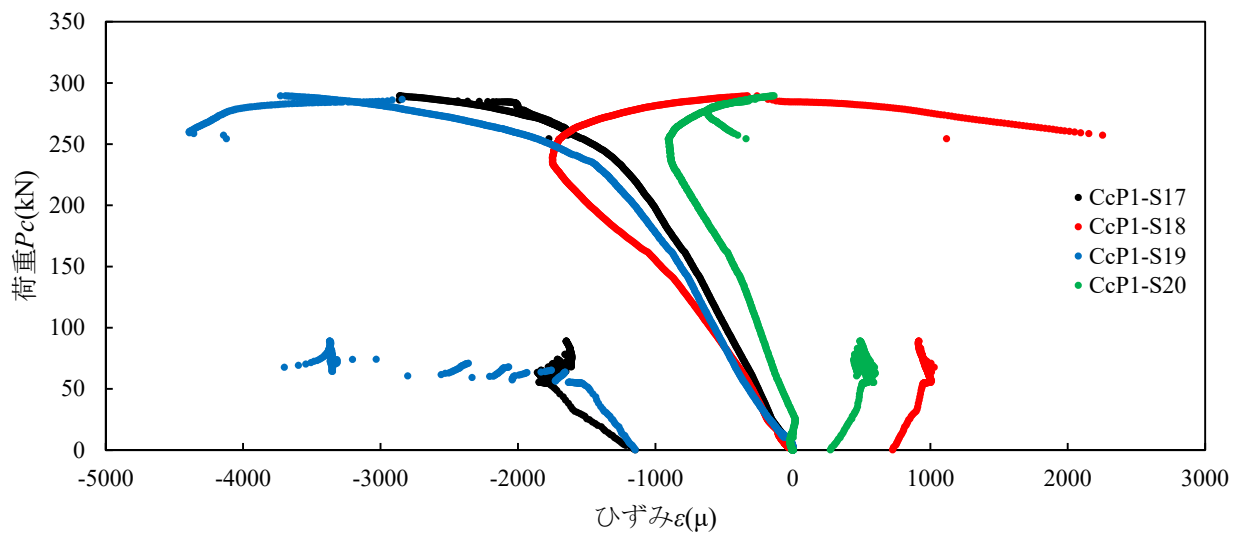


(c) 下段部

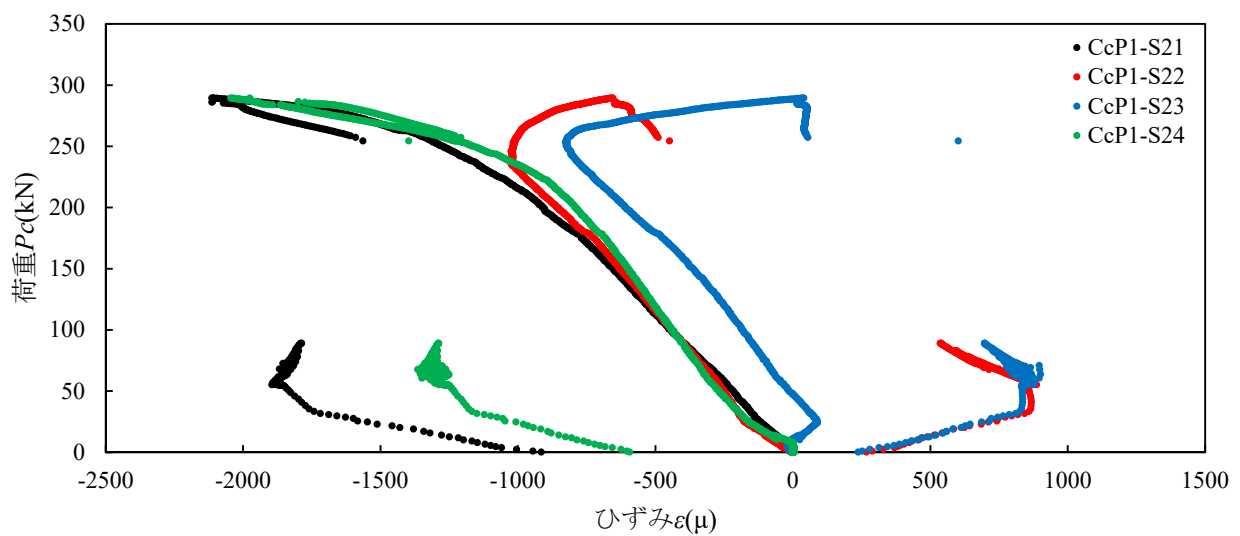
図-付 6.25 圧縮載荷試験における鉛直荷重－ひずみ関係 (CFRP 補強部) (試験体 C-c-N)



(a)上段部

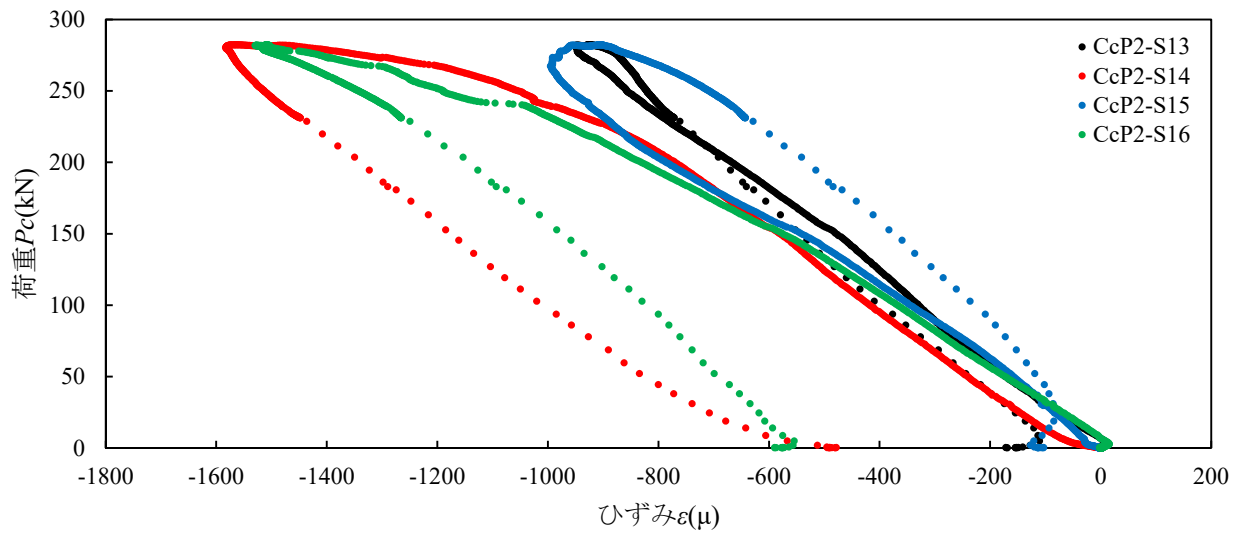


(b)中段部

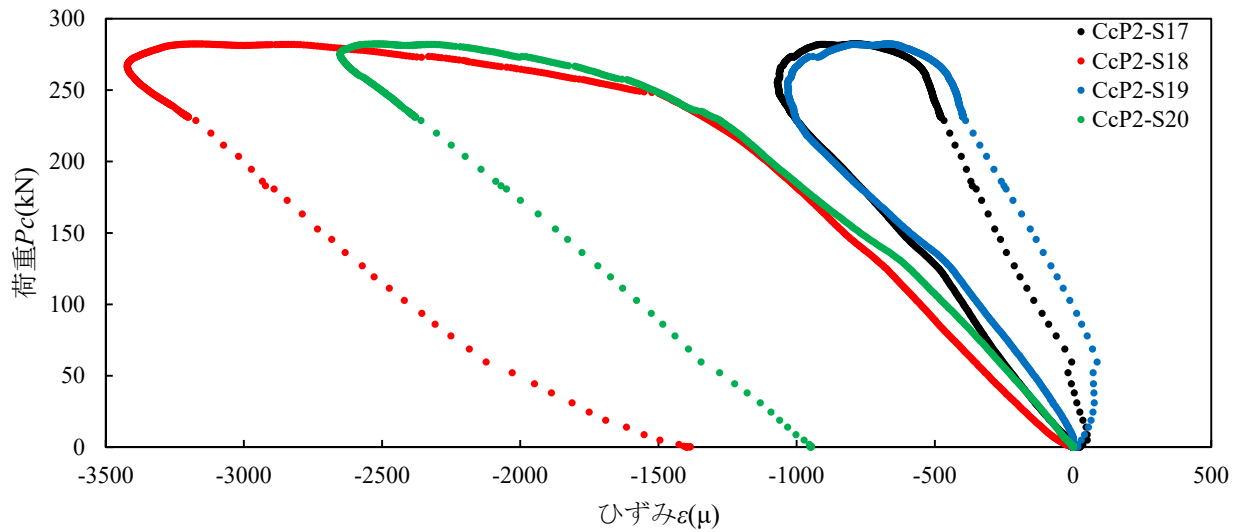


(c)下段部

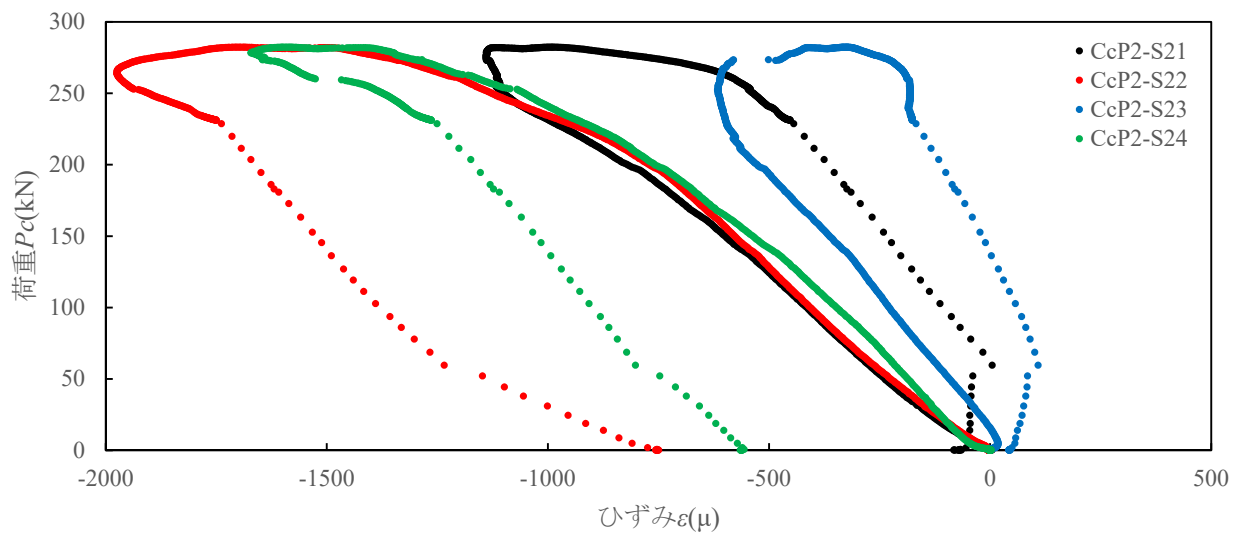
図-付 6.26 圧縮載荷試験における鉛直荷重-ひずみ関係 (CFRP 補強部) (試験体 C-c-P1)



(a) 上段部



(b) 中段部



(c) 下段部

図-付 6.27 圧縮載荷試験における鉛直荷重－ひずみ関係 (CFRP 補強部) (試験体 C-c-P2)



写真-付 6.17 圧縮試験後の試験体（試験体 A-c-N）（その 1）



写真-付 6.18 圧縮試験後の試験体（試験体 A-c-N）（その 2）



写真-付 6.19 圧縮試験後の試験体（試験体 B-c-N）（その 1）

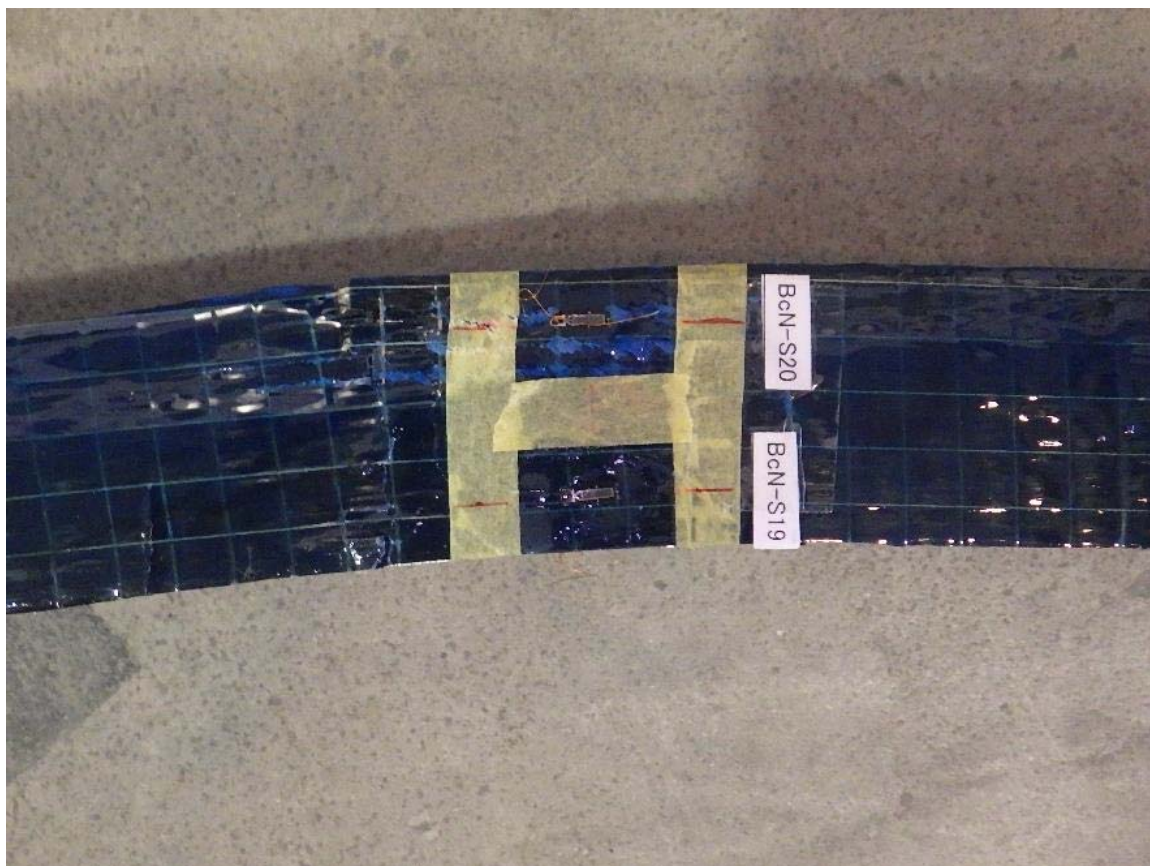


写真-付 6.20 圧縮試験後の試験体（試験体 B-c-N）（その 2）



写真-付 6.21 圧縮試験後の試験体（試験体 B-c-P1）（その 1）



写真-付 6.22 圧縮試験後の試験体（試験体 B-c-P1）（その 2）



写真-付 6.23 圧縮試験後の試験体（試験体 B-c-P1）（その 3）



写真-付 6.24 圧縮試験後の試験体（試験体 B-c-P1）（その 4）



写真-付 6.25 圧縮試験後の試験体（試験体 B-c-P2）（その 1）

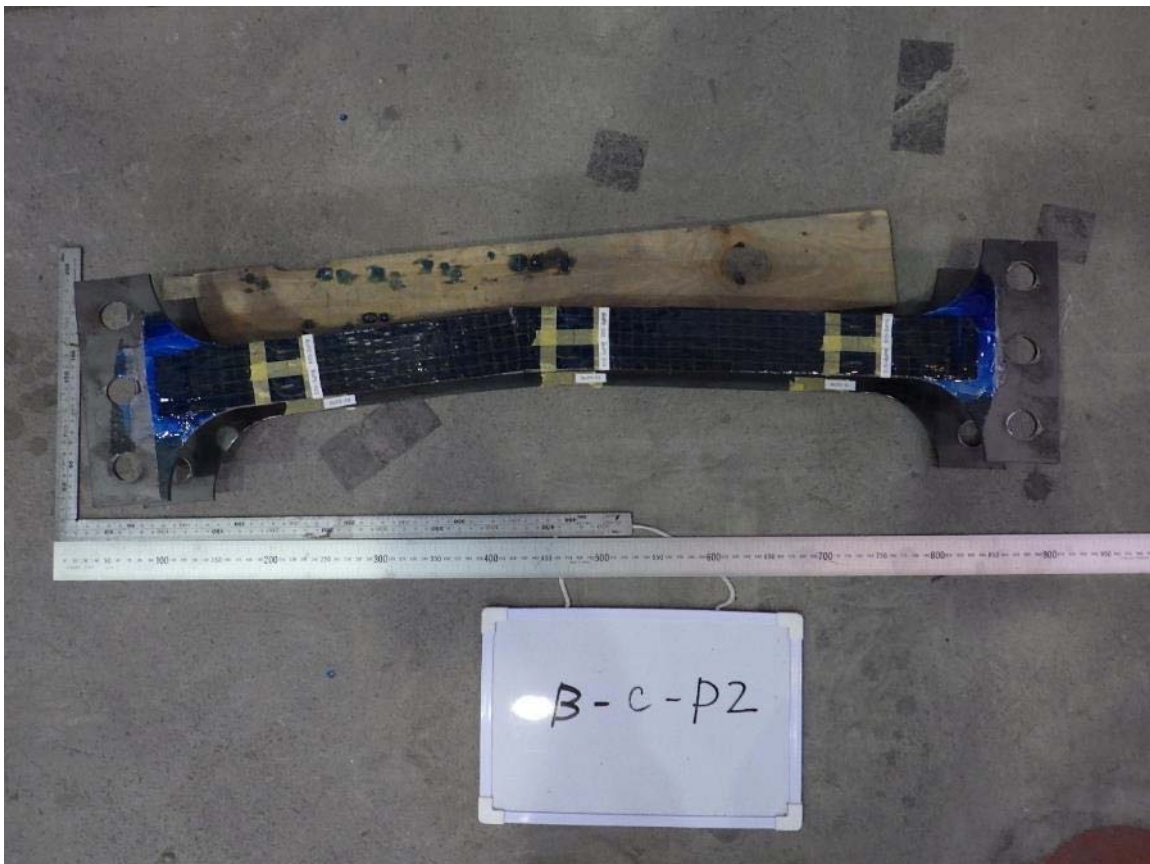


写真-付 6.26 圧縮試験後の試験体（試験体 B-c-P2）（その 2）



写真-付 6.27 圧縮試験後の試験体（試験体 B-c-P2）（その 3）

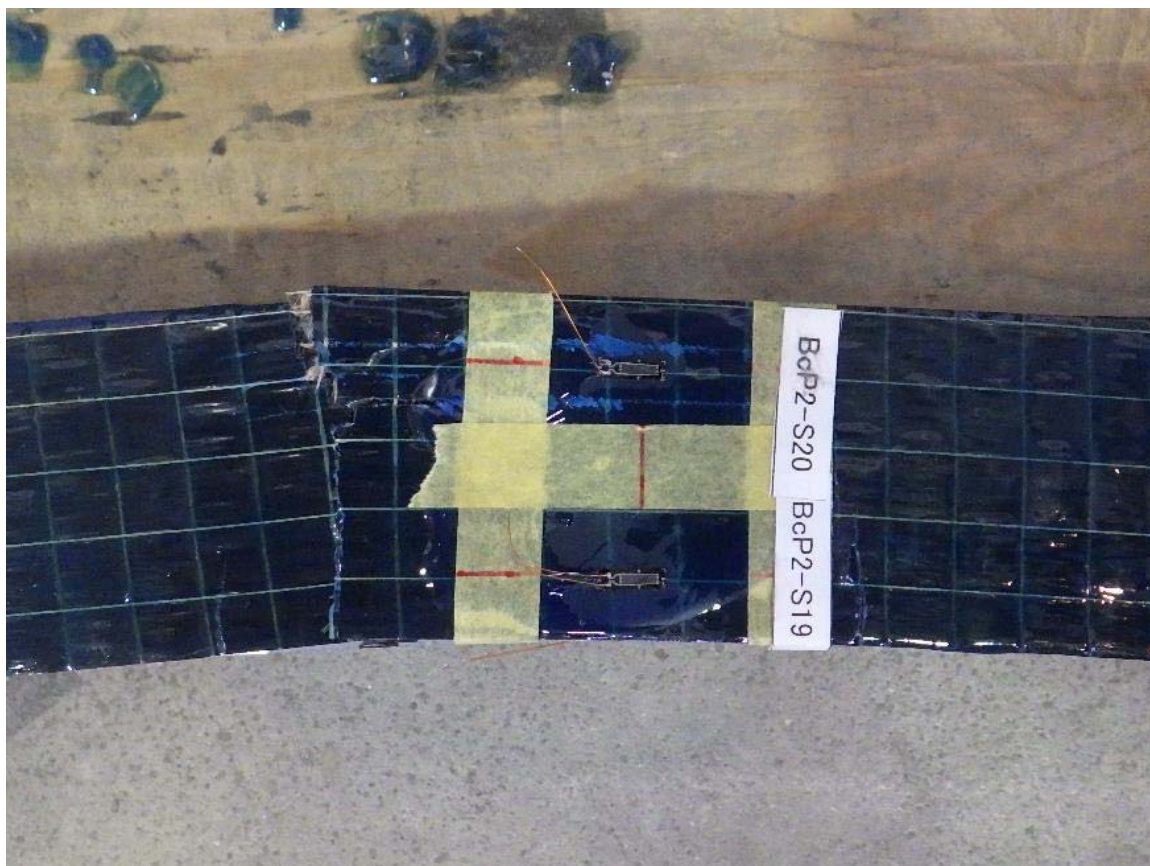


写真-付 6.28 圧縮試験後の試験体（試験体 B-c-P2）（その 4）



写真-付 6.29 圧縮試験後の試験体（試験体 C-c-N）（その 1）



写真-付 6.30 圧縮試験後の試験体（試験体 C-c-N）（その 2）



写真-付 6.31 圧縮試験後の試験体（試験体 C-c-P1）（その 1）



写真-付 6.32 圧縮試験後の試験体（試験体 C-c-P1）（その 2）

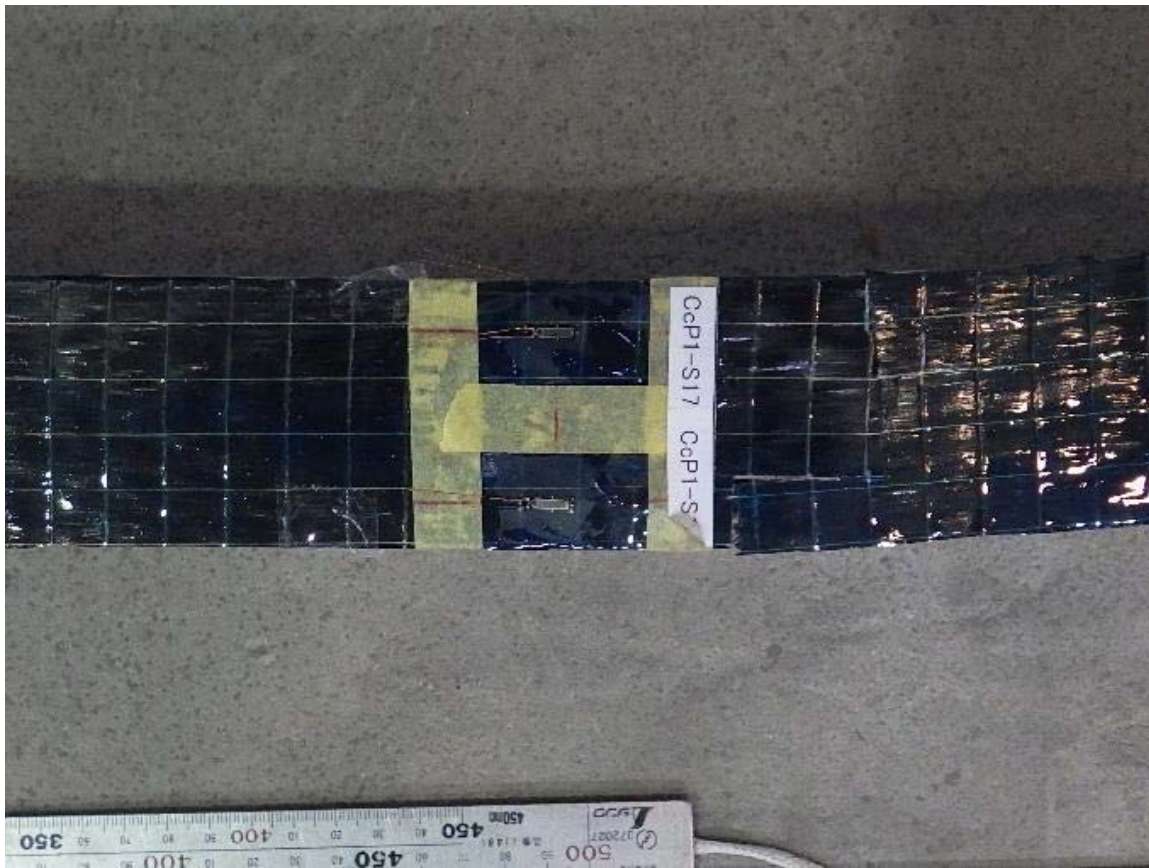


写真-付 6.33 圧縮試験後の試験体（試験体 C-c-P1）（その 3）



写真-付 6.34 圧縮試験後の試験体（試験体 C-c-P1）（その 4）

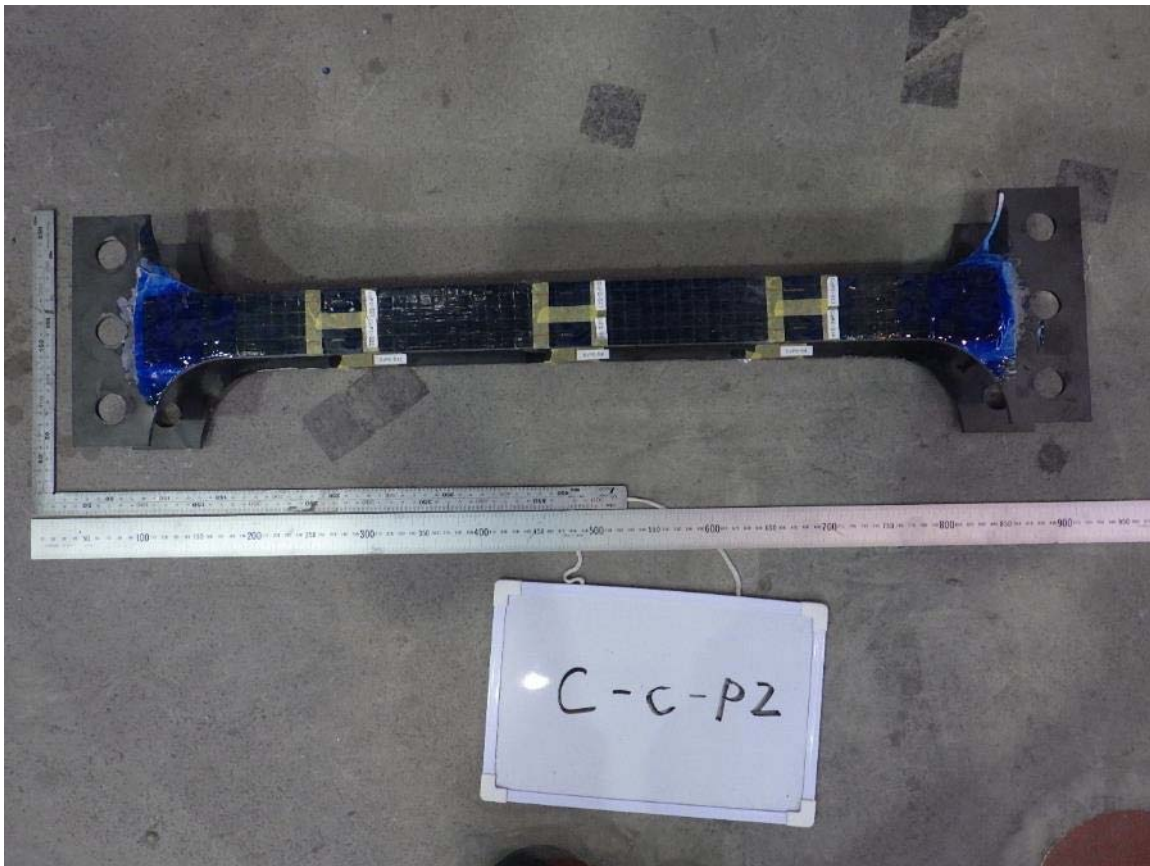


写真-付 6.35 圧縮試験後の試験体（試験体 C-c-P2）（その 1）

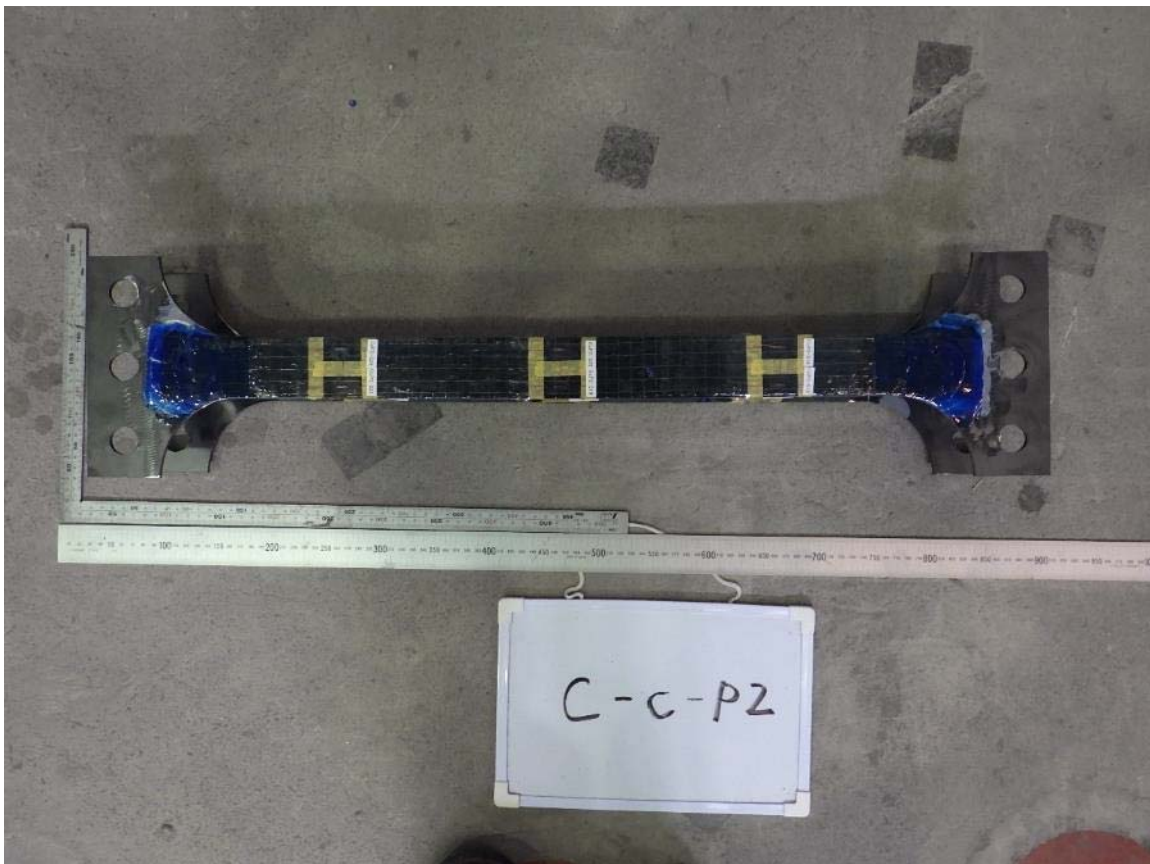


写真-付 6.36 圧縮試験後の試験体（試験体 C-c-P2）（その 2）

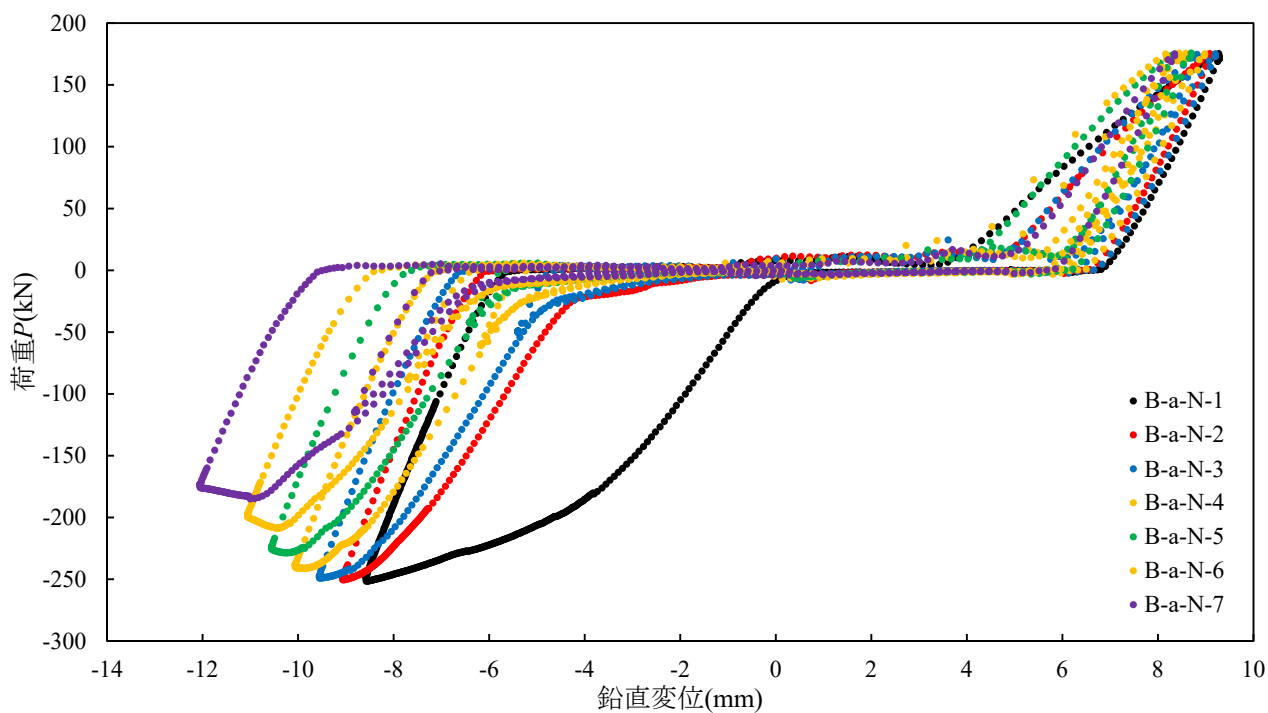


図-付 6.28 交番载荷試験における鉛直荷重—鉛直変位関係 (試験体 B-a-N)

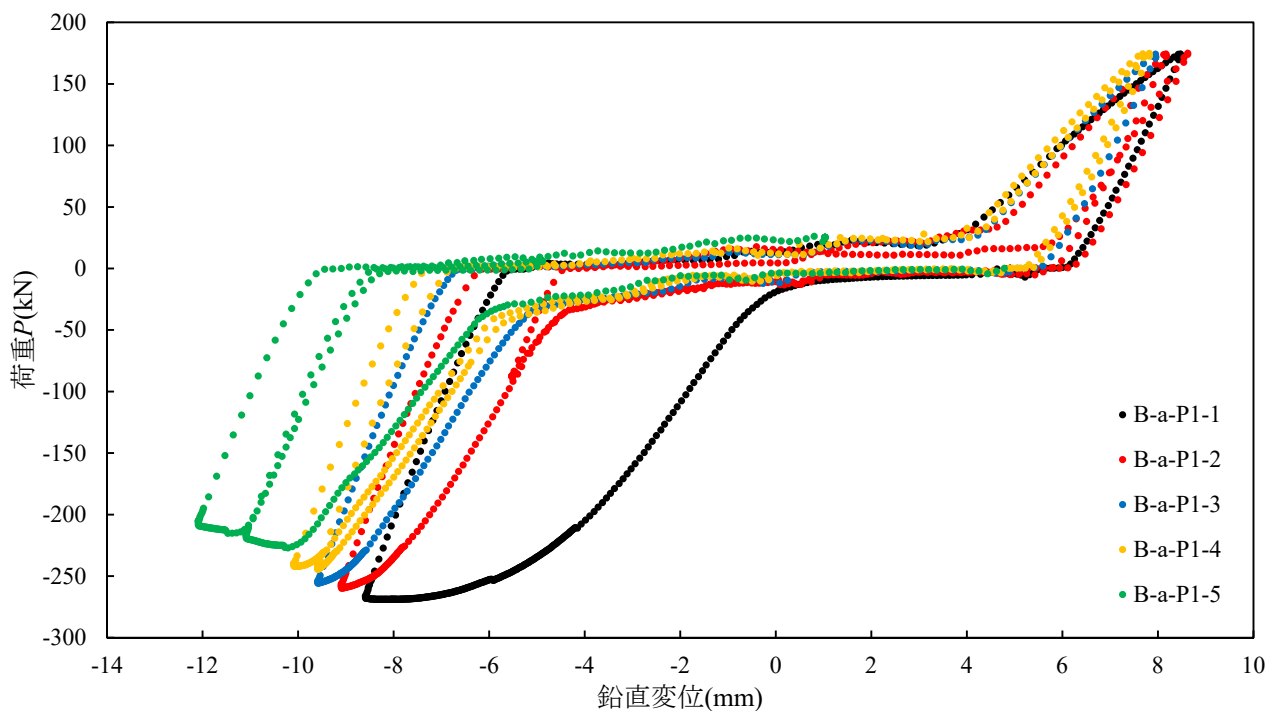


図-付 6.29 交番载荷試験における鉛直荷重—鉛直変位関係 (試験体 B-a-P1)

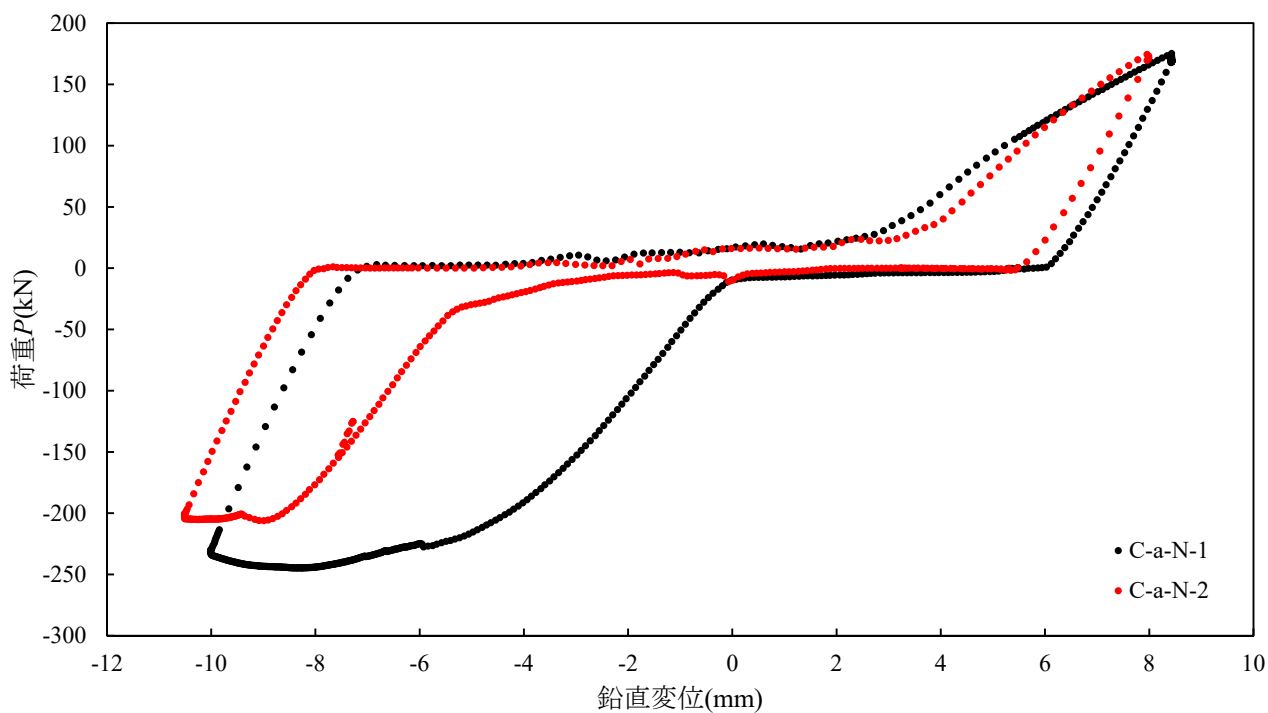


図-付 6.30 交番载荷試験における鉛直荷重—鉛直変位関係 (試験体 C-a-N)

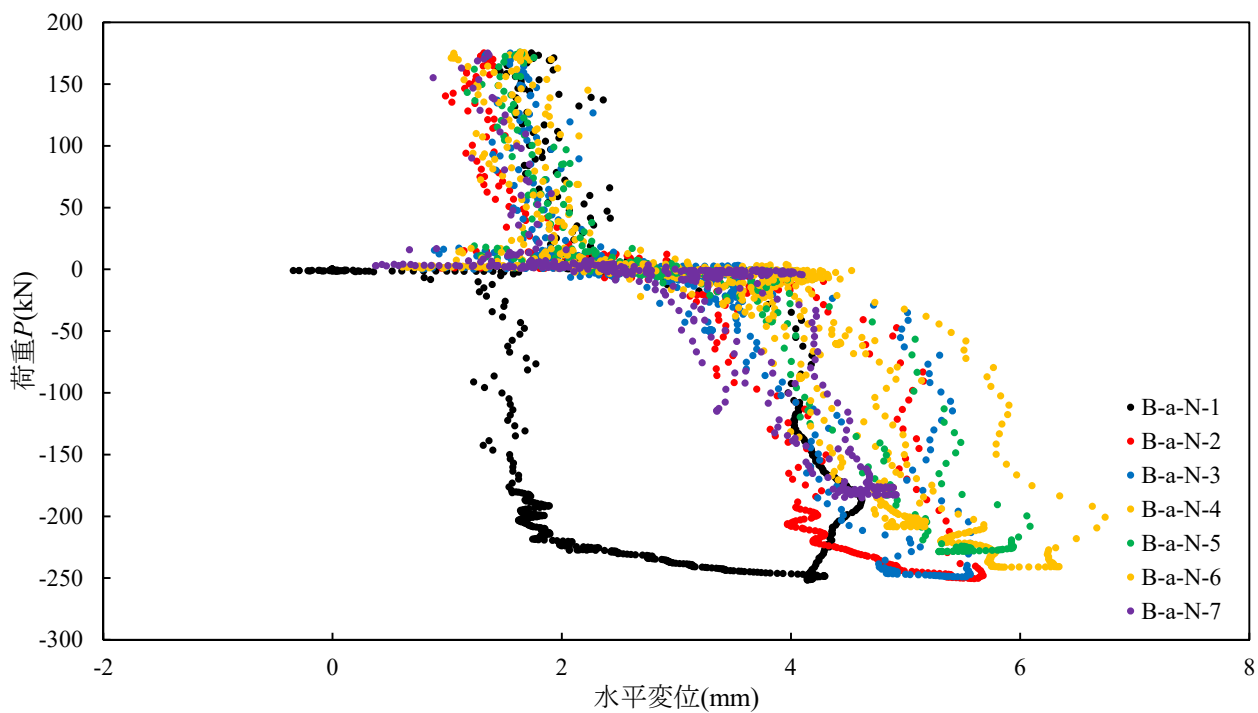


図-付 6.31 交番载荷試験における鉛直荷重—水平変位関係 (試験体 B-a-N)

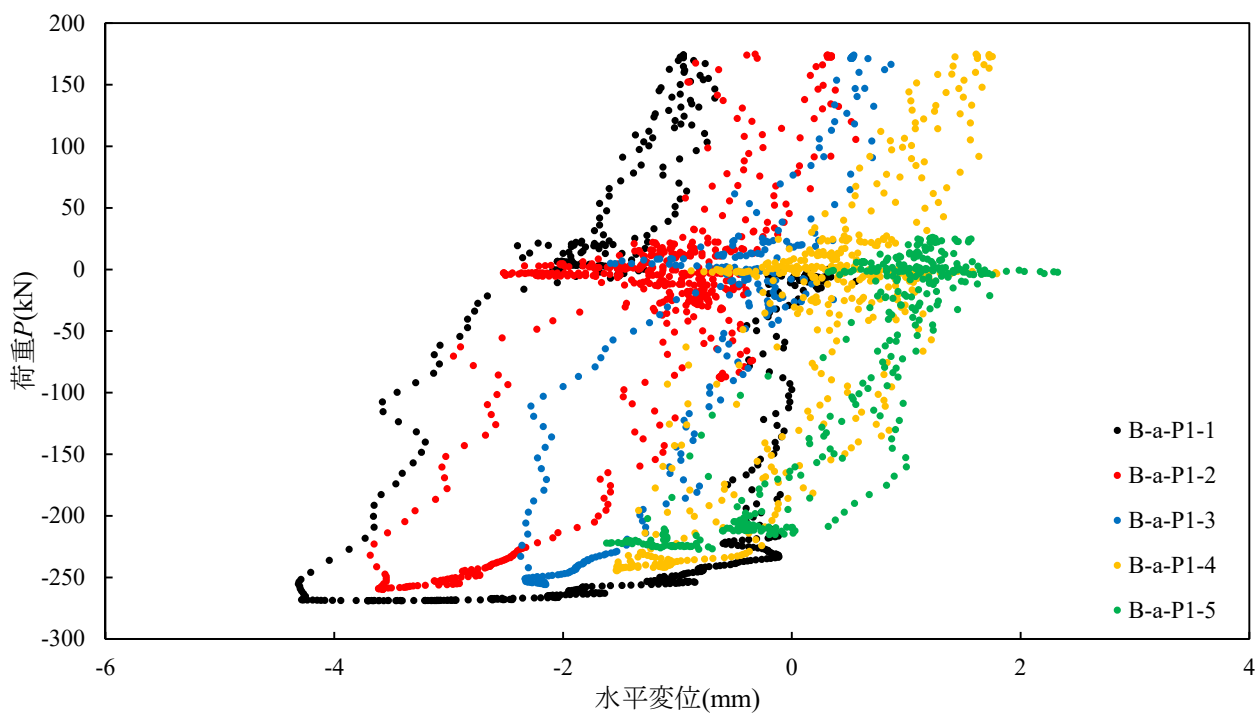


図-付 6.32 交番载荷試験における鉛直荷重－水平変位関係（試験体 B-a-P1）

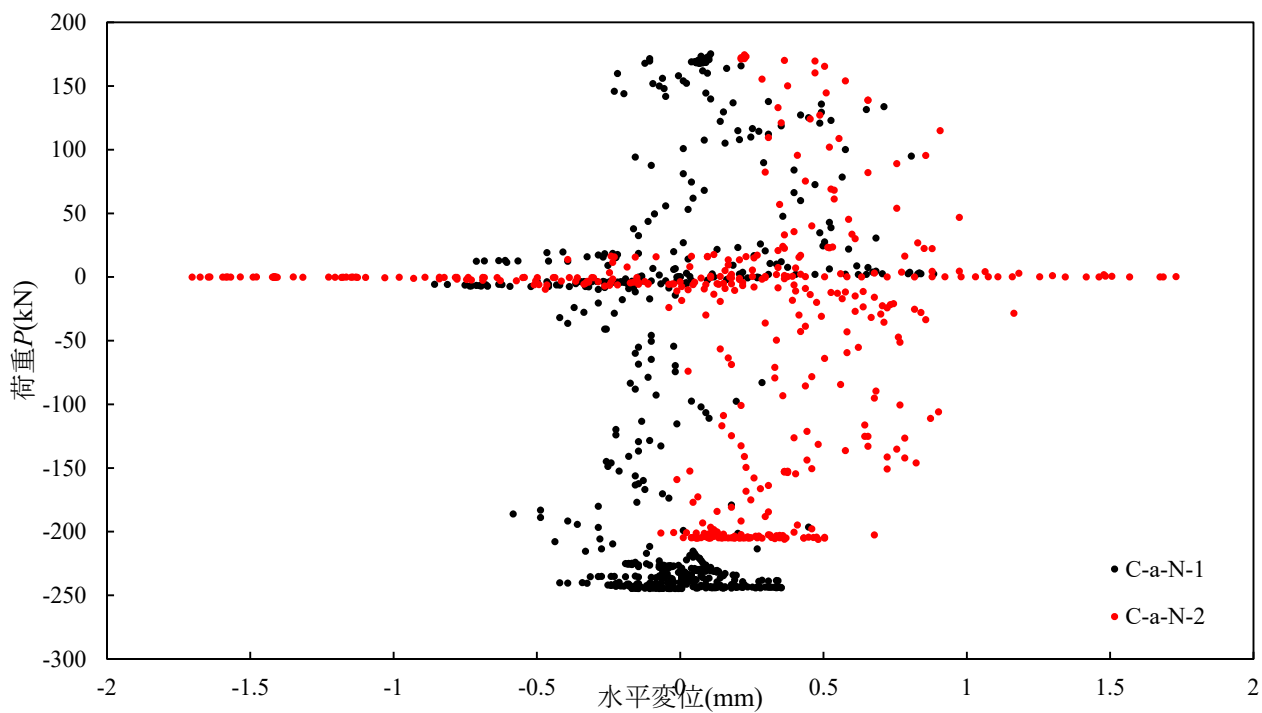
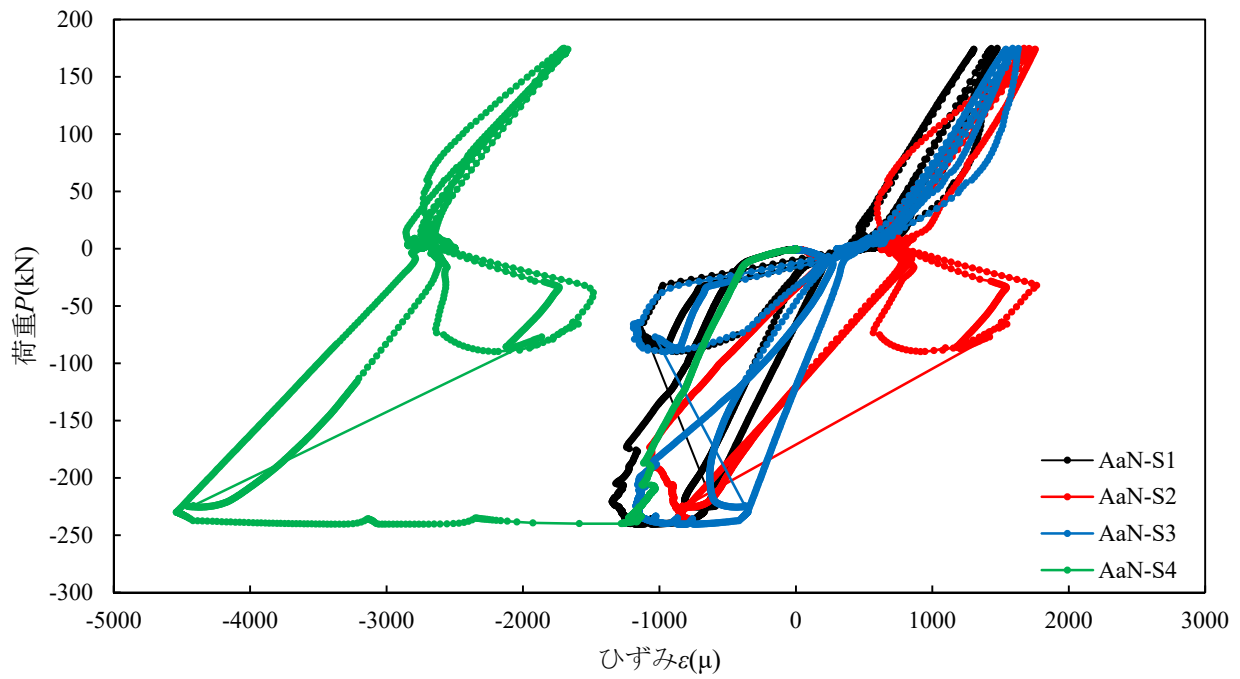
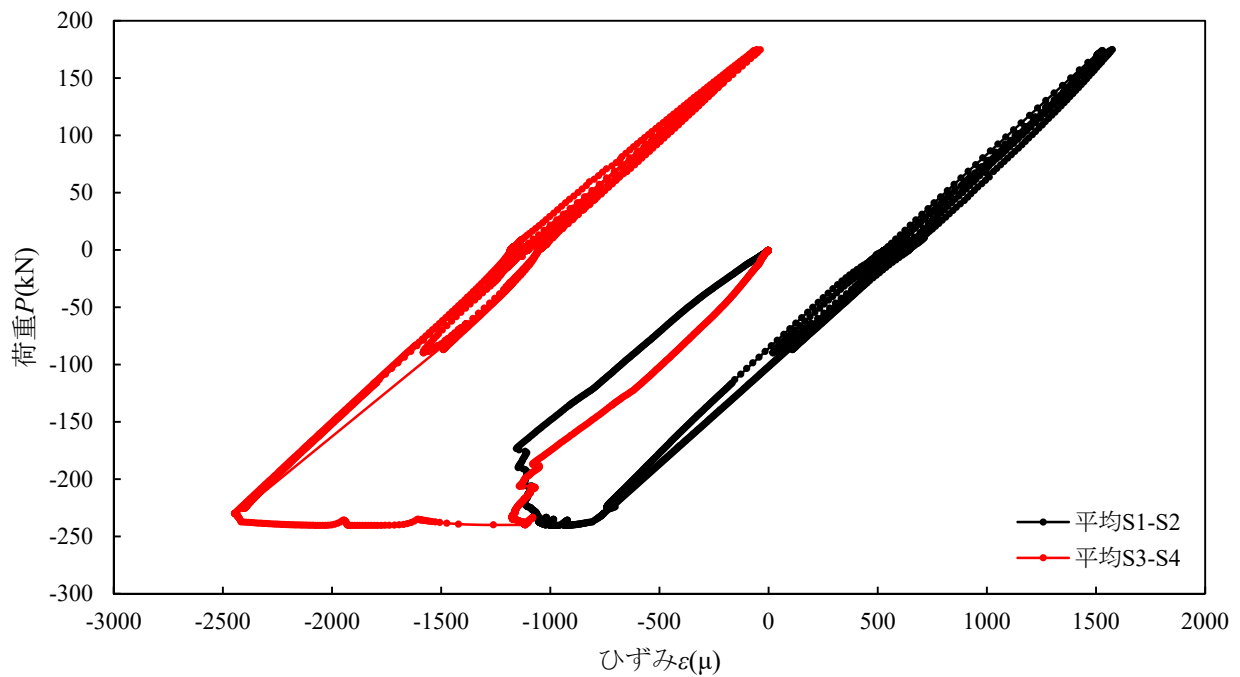


図-付 6.33 交番载荷試験における鉛直荷重－水平変位関係（試験体 C-a-N）

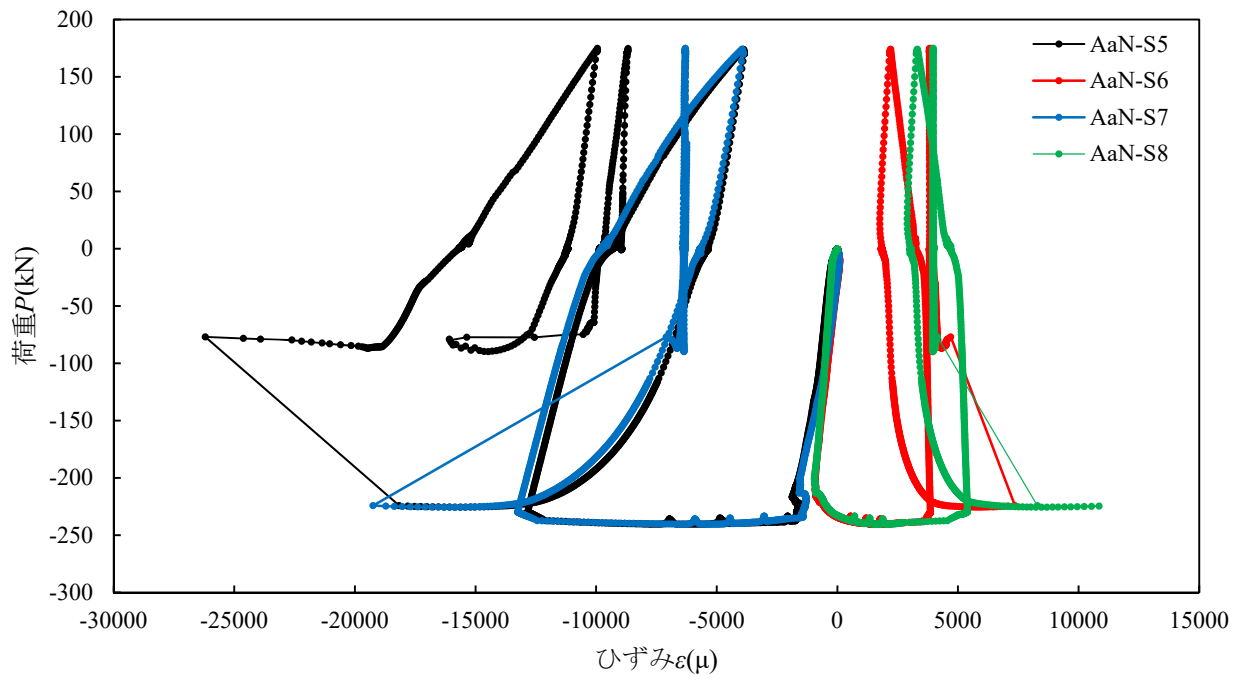


(a)計測データ (計測位置 S1~S4)

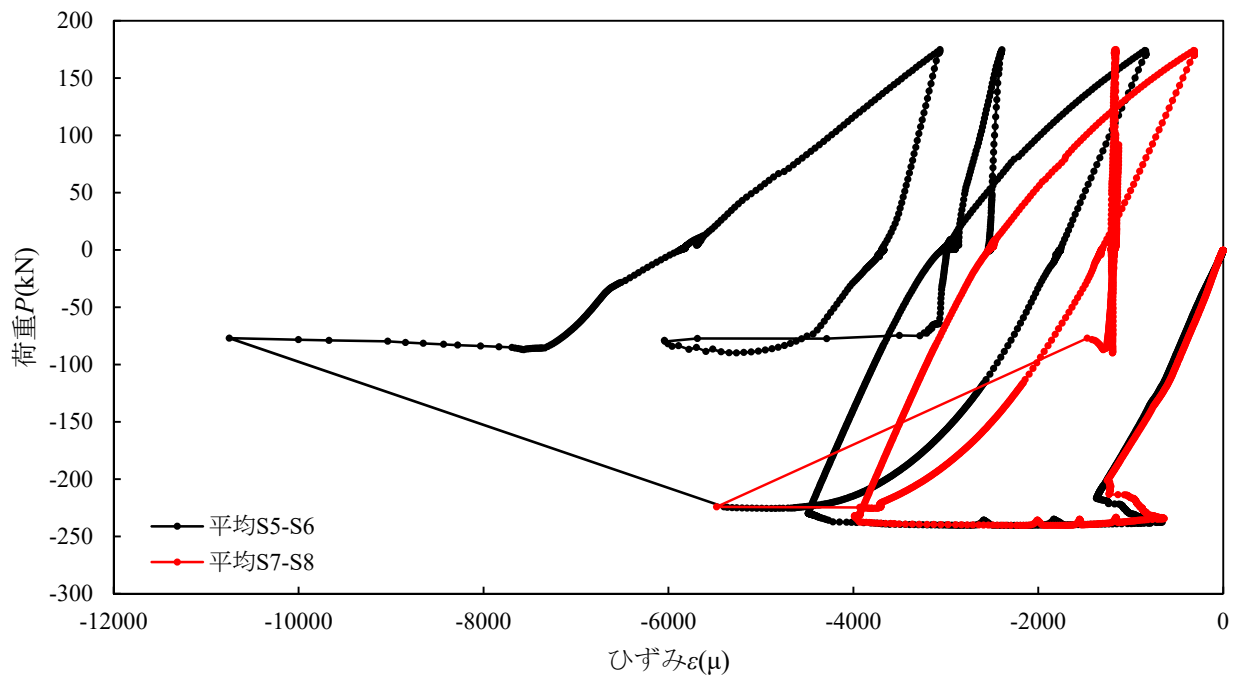


(b)平均データ (計測位置 S1-S2, S3-S4)

図-付 6.34 交番载荷試験における鉛直荷重-ひずみ関係 (試験体 A-a-N) (鋼材部ひずみ S1~S4)

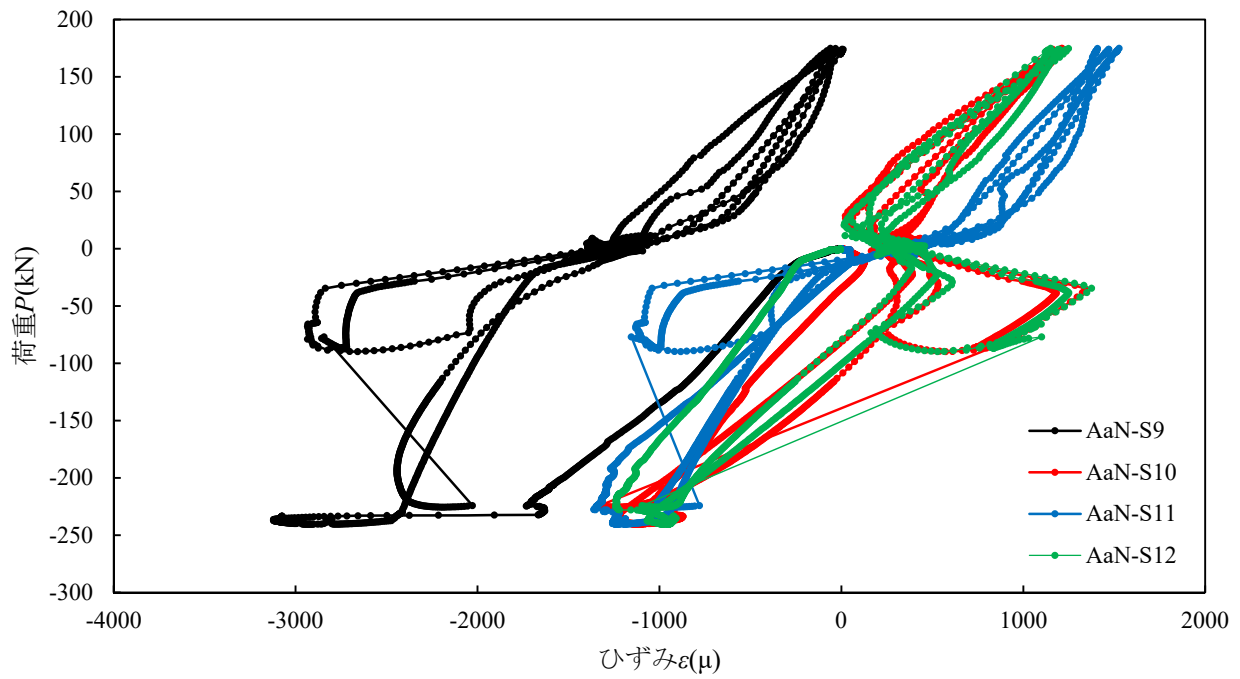


(a)計測データ (計測位置 S5~S8)

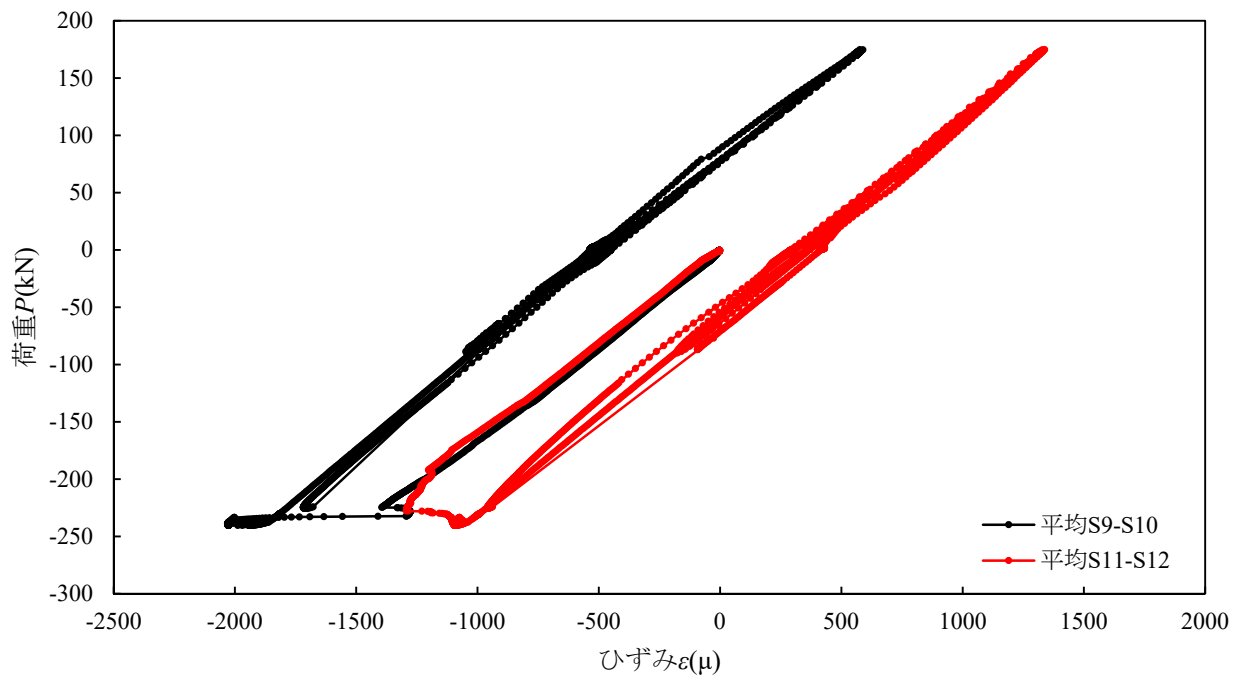


(b)平均データ (計測位置 S5-S6, S7-S8)

図-付 6.35 交番載荷試験における鉛直荷重-ひずみ関係 (試験体 A-a-N) (鋼材部ひずみ S5~S8)

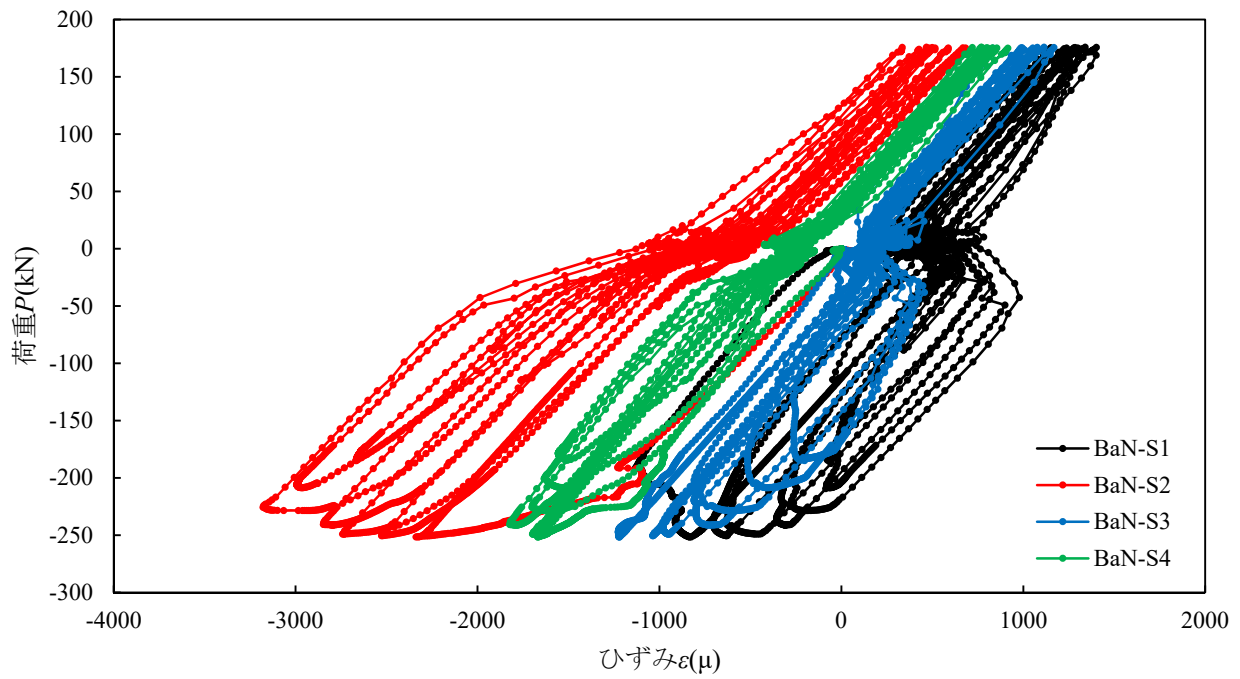


(a)計測データ (計測位置 S9~S12)

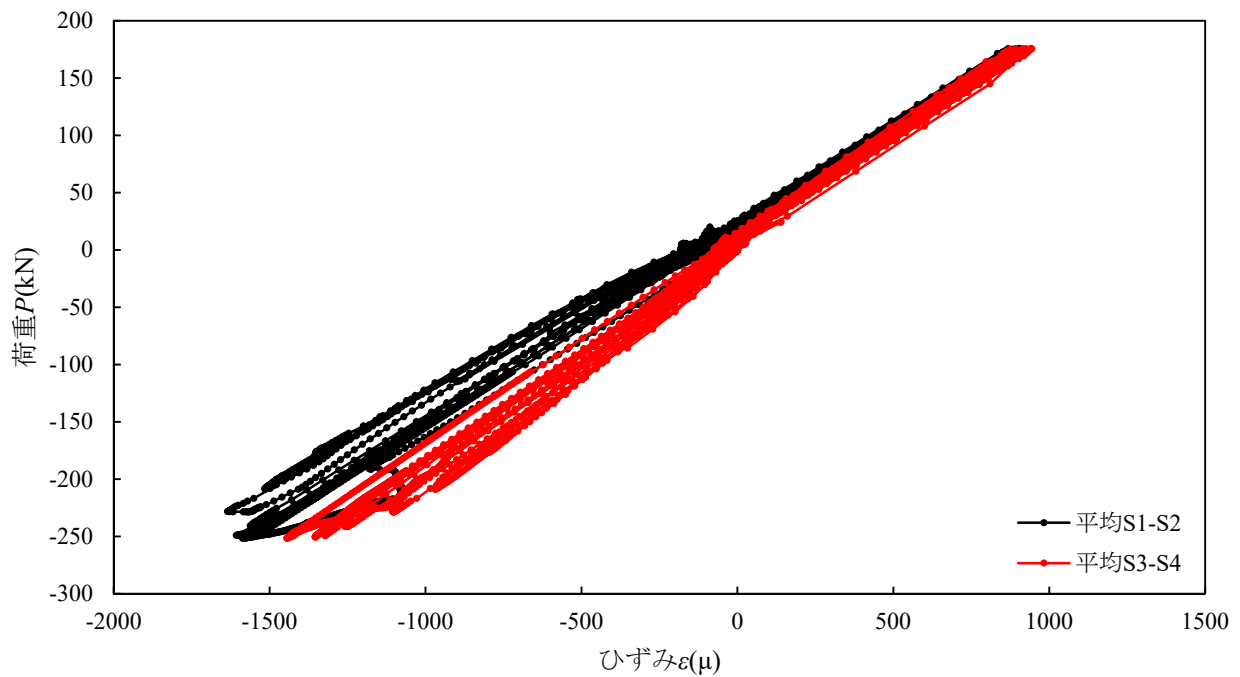


(b)平均データ (計測位置 S9-S10, S11-S12)

図-付 6.36 交番載荷試験における鉛直荷重－ひずみ関係 (試験体 A-a-N) (鋼材部ひずみ S9～S12)

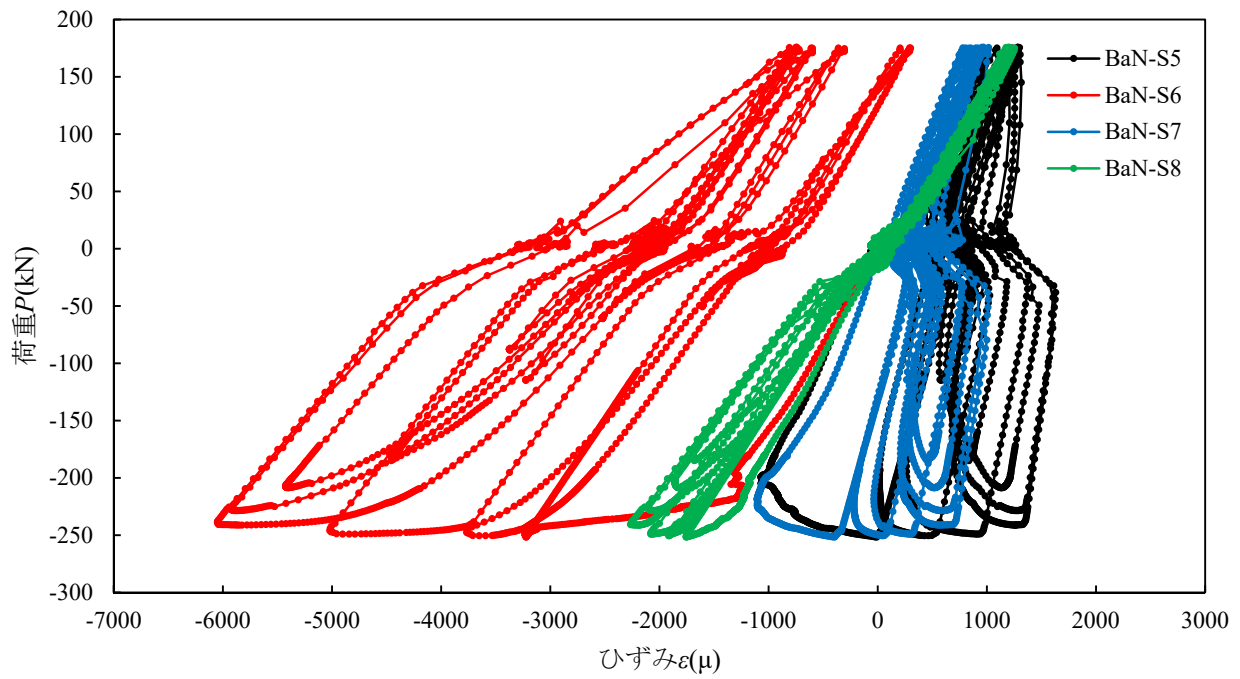


(a)計測データ (計測位置 S1~S4)

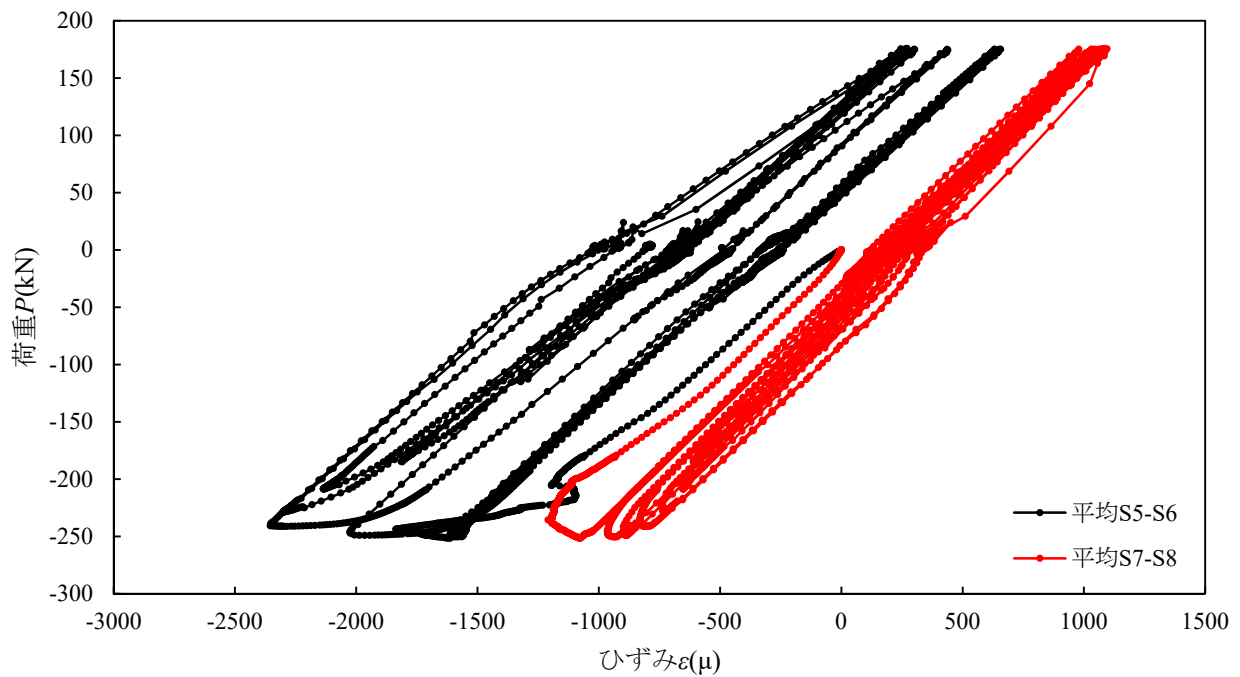


(b)平均データ (計測位置 S1-S2, S3-S4)

図-付 6.37 交番載荷試験における鉛直荷重-ひずみ関係 (試験体 B-a-N) (鋼材部ひずみ S1~S4)

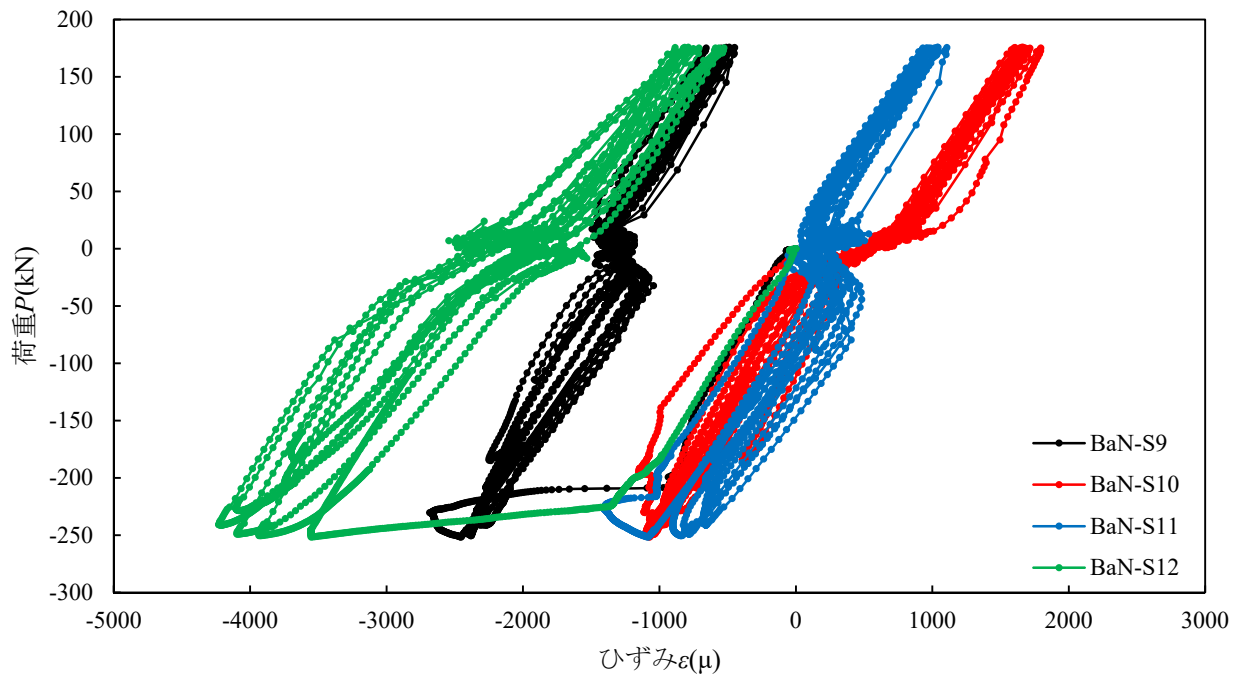


(a)計測データ (計測位置 S5~S8)

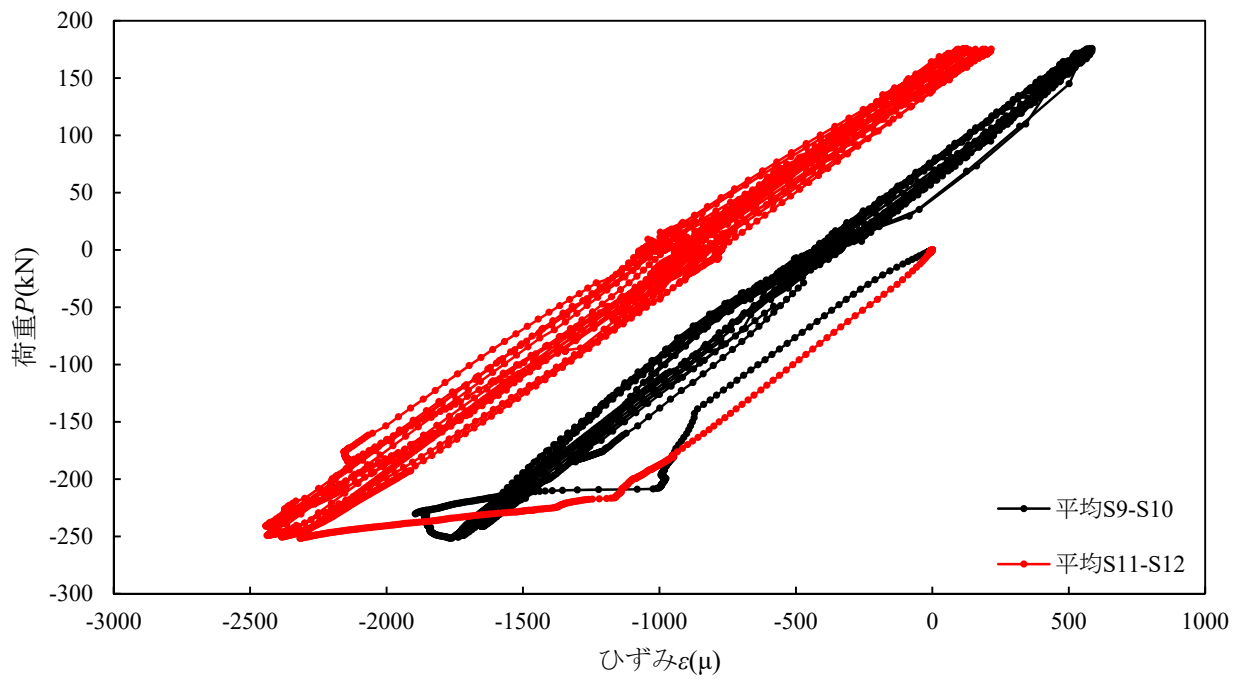


(b)平均データ (計測位置 S5-S6, S7-S8)

図-付 6.38 交番載荷試験における鉛直荷重-ひずみ関係 (試験体 B-a-N) (鋼材部ひずみ S5~S8)

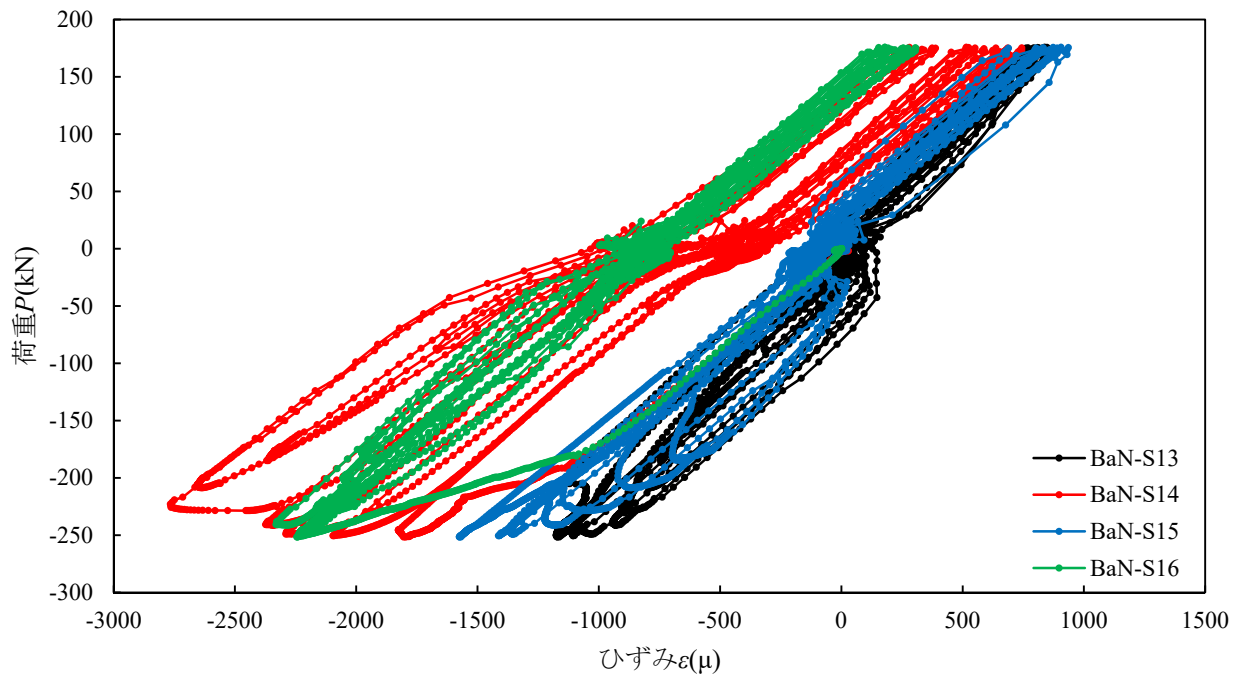


(a)計測データ (計測位置 S9~S12)

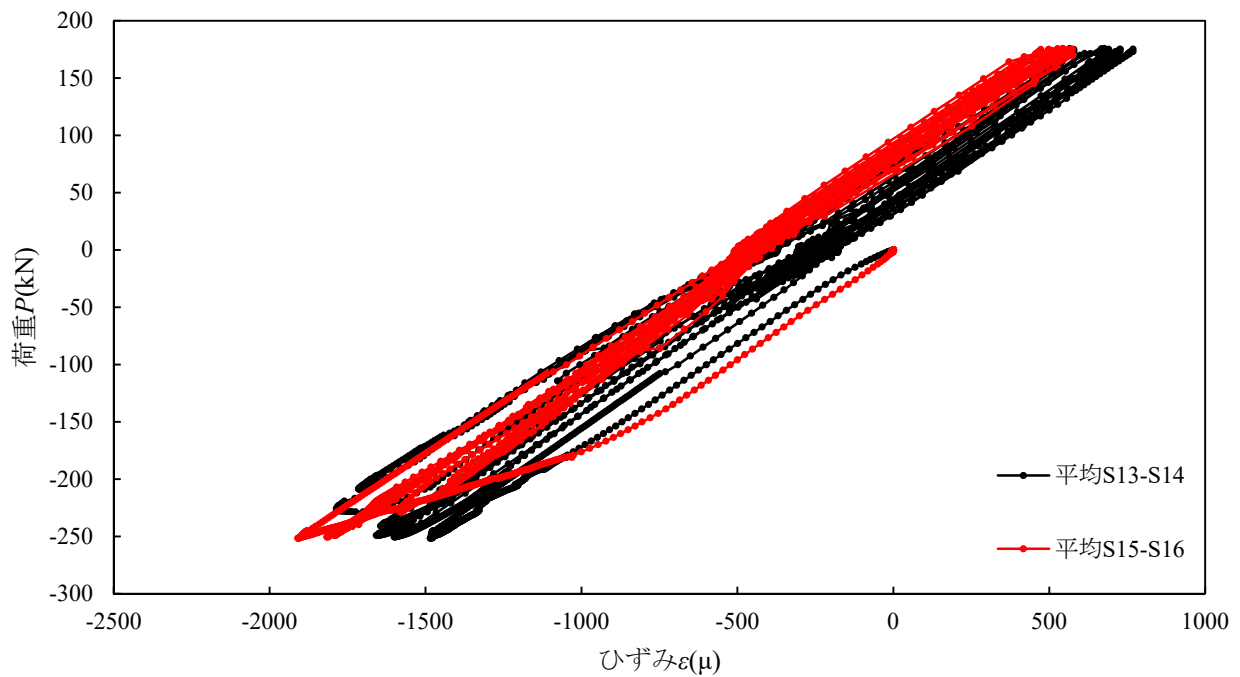


(b)平均データ (計測位置 S9-S10, S11-S12)

図-付 6.39 交番载荷試験における鉛直荷重-ひずみ関係 (試験体 B-a-N) (鋼材部ひずみ S9~S12)

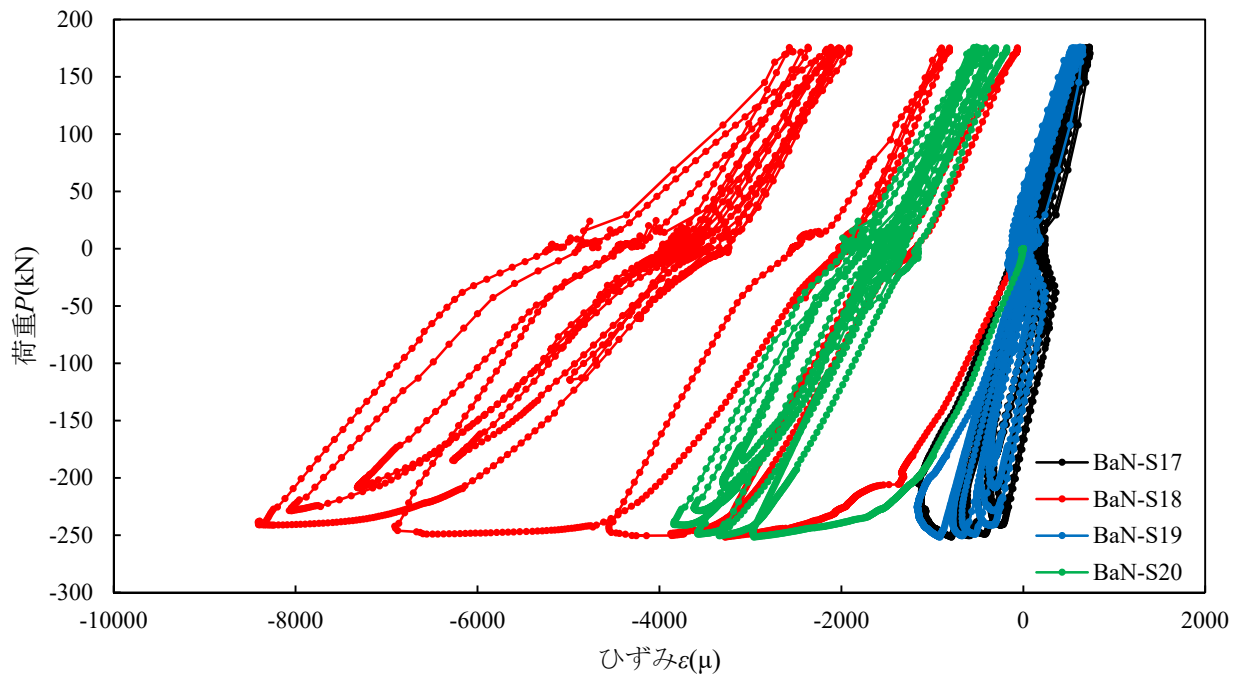


(a)計測データ (計測位置 S13~S16)

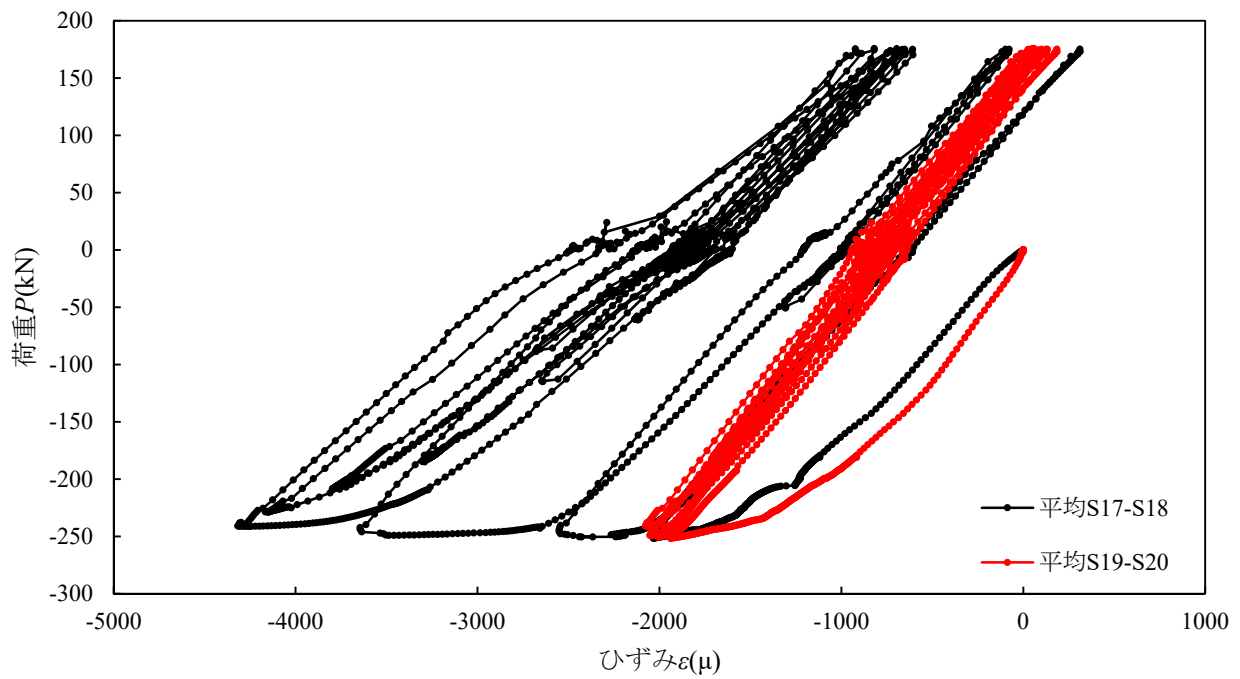


(b)平均データ (計測位置 S13-S14, S15-S16)

図-付 6.40 交番载荷試験における鉛直荷重-ひずみ関係 (試験体 B-a-N) (CFRP 部ひずみ S13~S16)

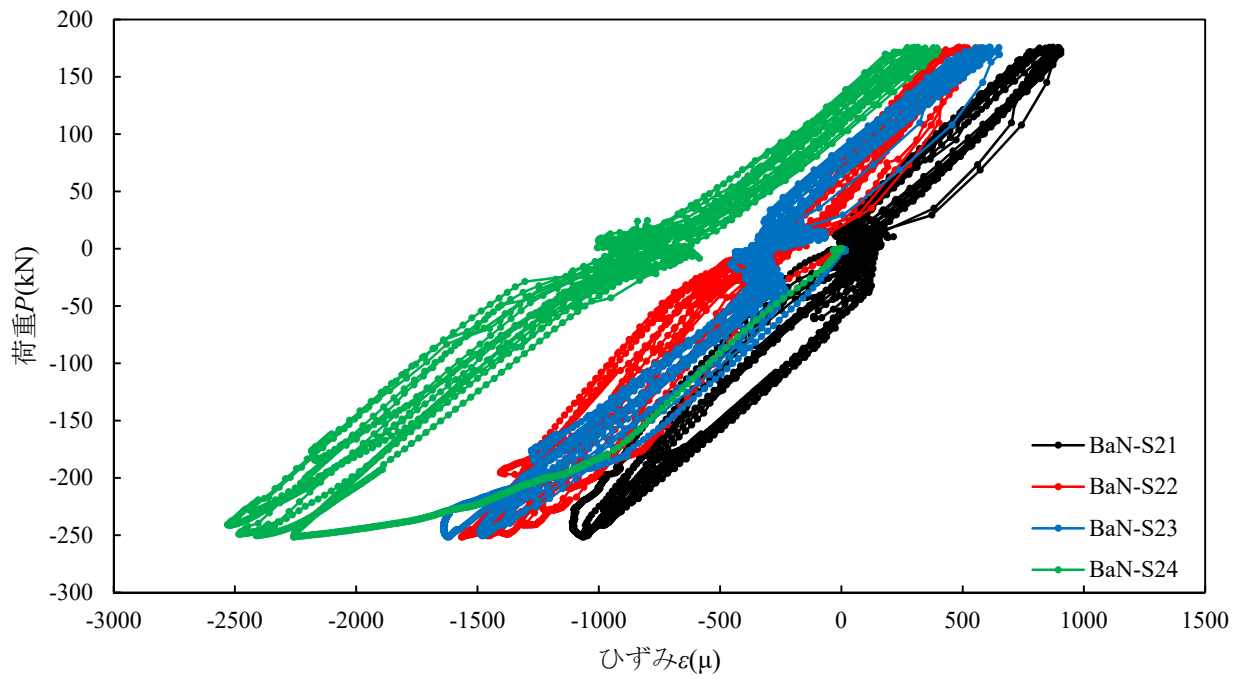


(a)計測データ (計測位置 S17~S20)

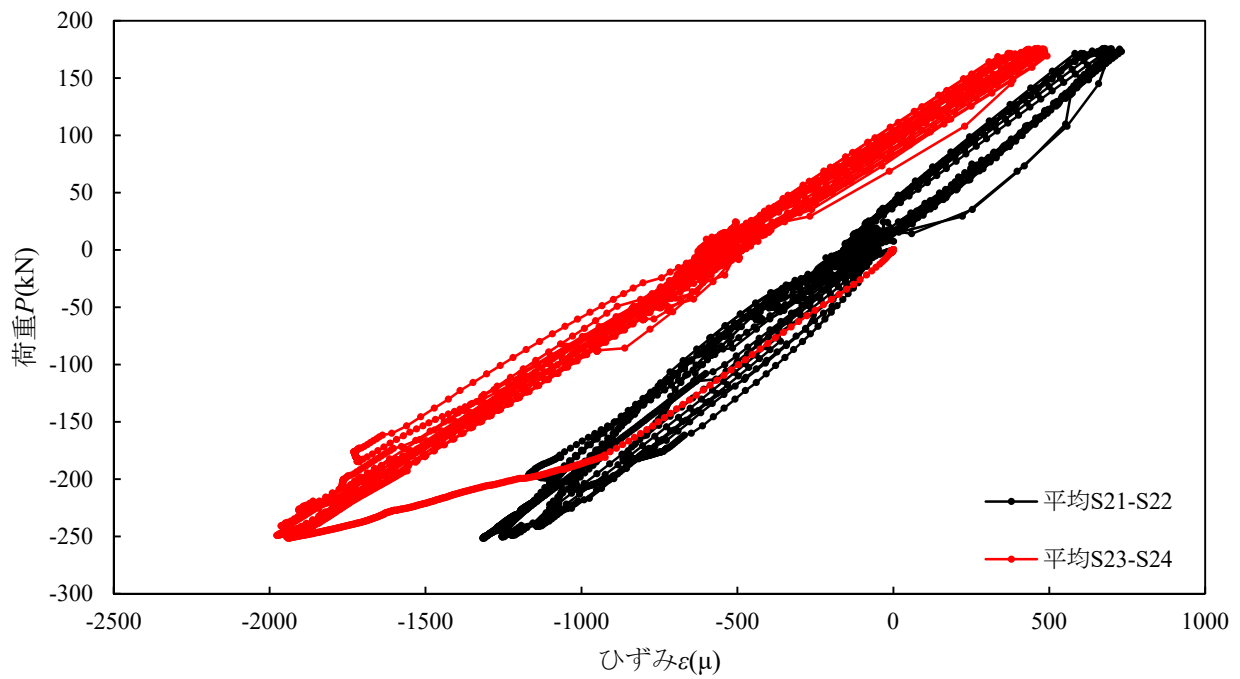


(b)平均データ (計測位置 S17-S18, S19-S20)

図-付 6.41 交番载荷試験における鉛直荷重-ひずみ関係 (試験体 B-a-N) (CFRP 部ひずみ S17~S20)

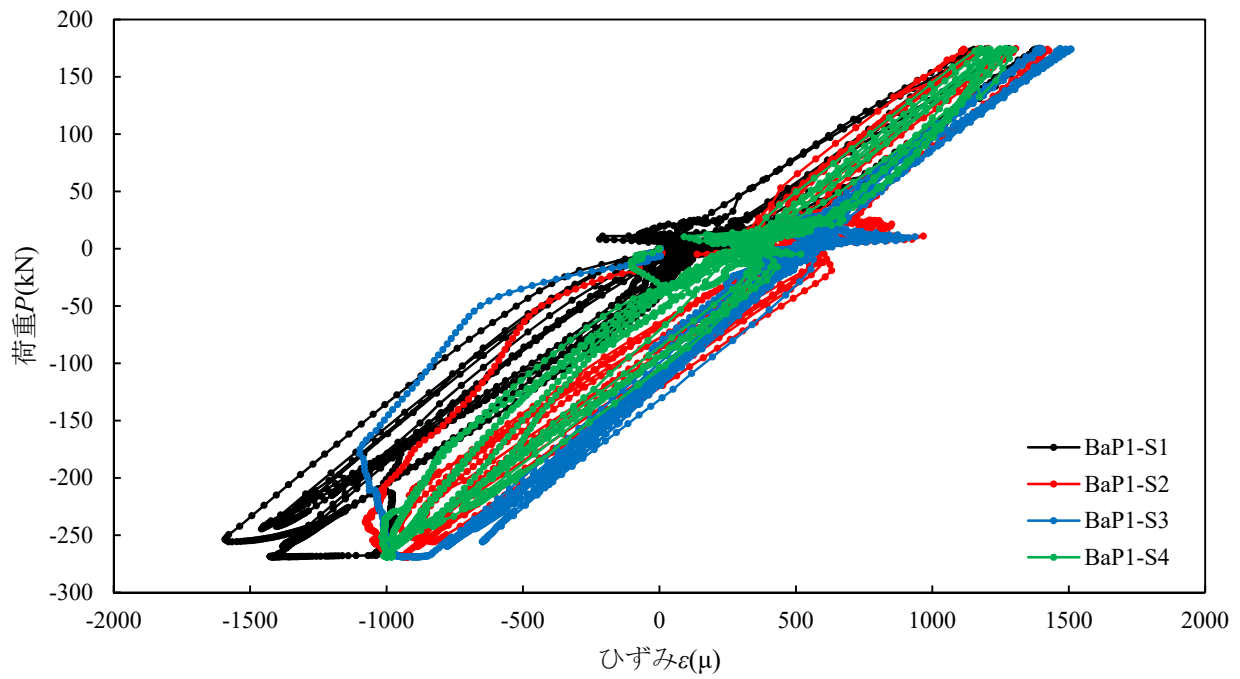


(a)計測データ (計測位置 S21～S24)

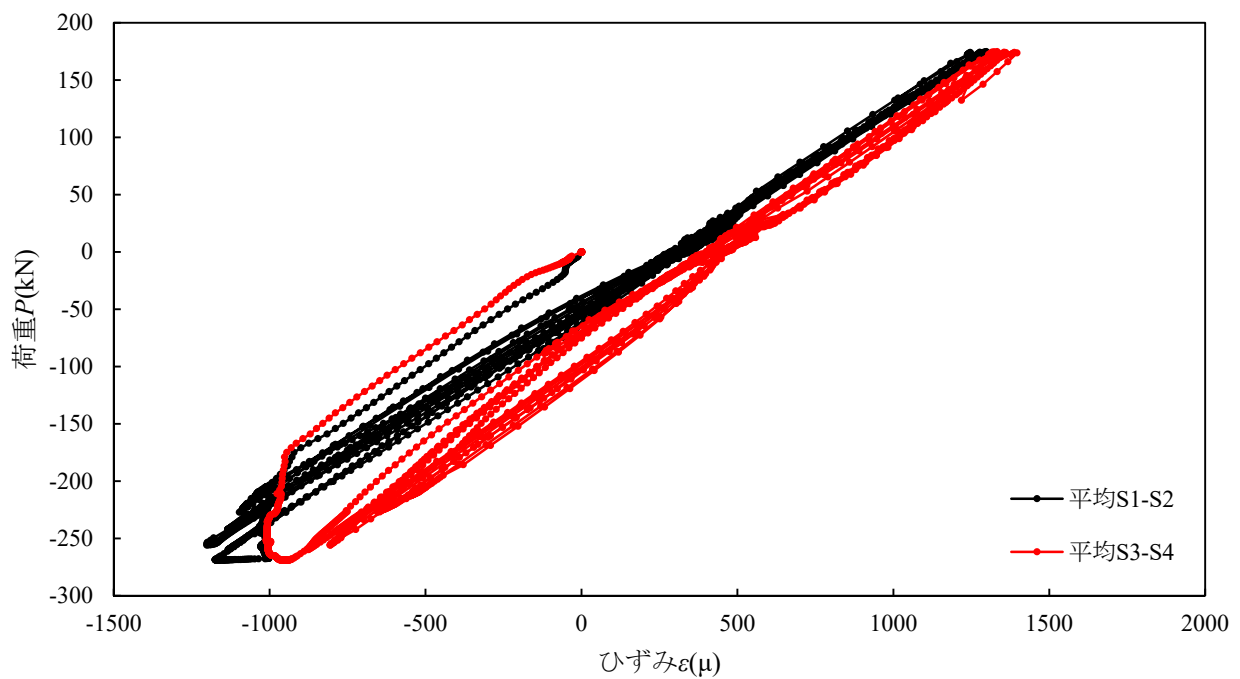


(b)平均データ (計測位置 S21-S22, S23-S24)

図-付 6.42 交番載荷試験における鉛直荷重－ひずみ関係 (試験体 B-a-N) (CFRP 部ひずみ S21～S24)

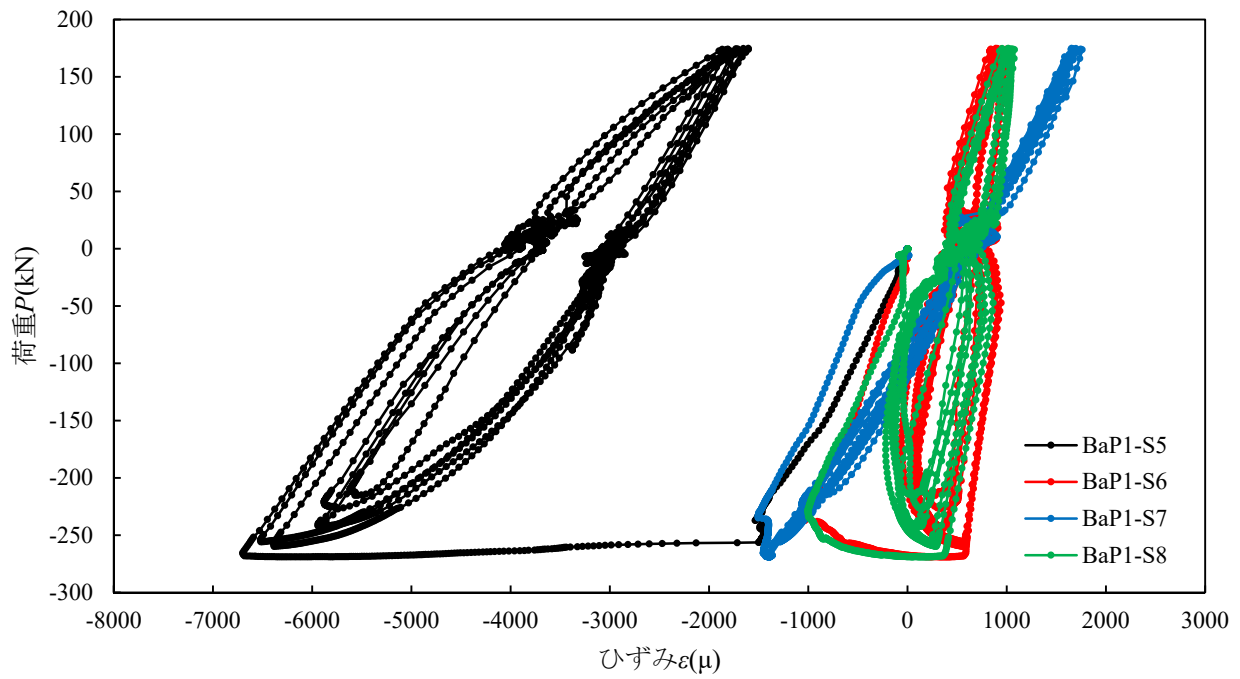


(a)計測データ (計測位置 S1~S4)

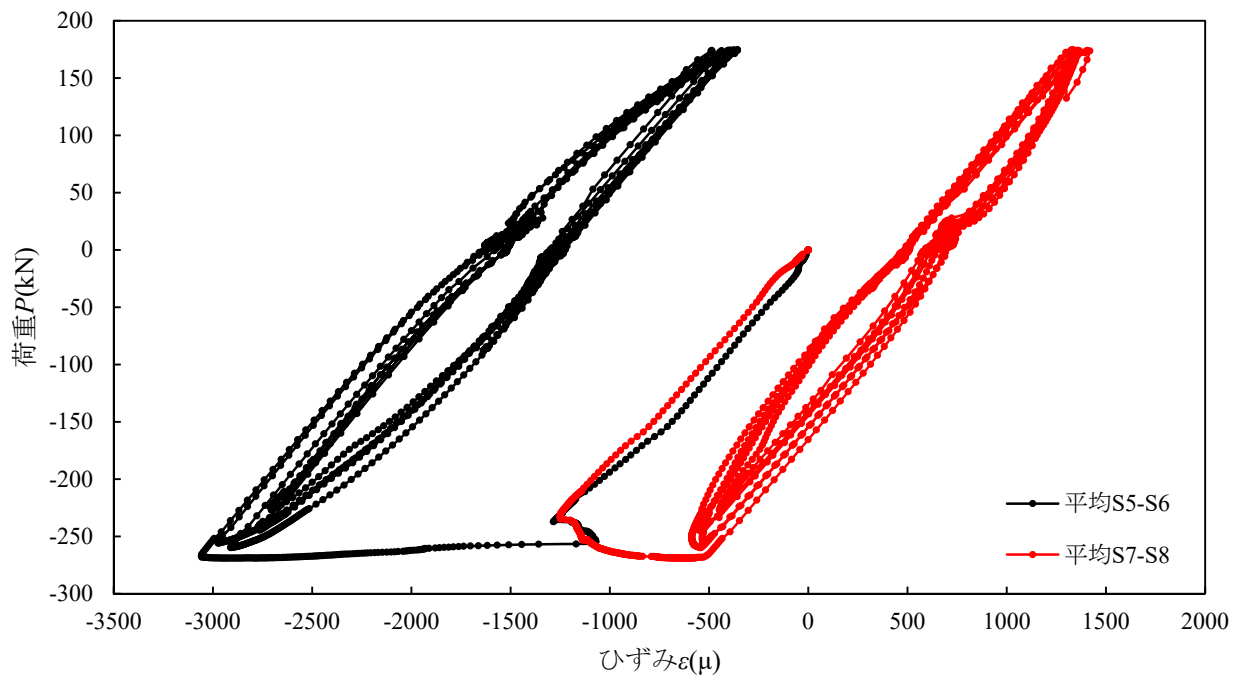


(b)平均データ (計測位置 S1-S2, S3-S4)

図-付 6.43 交番載荷試験における鉛直荷重-ひずみ関係 (試験体 B-a-P1) (鋼材部ひずみ S1~S4)

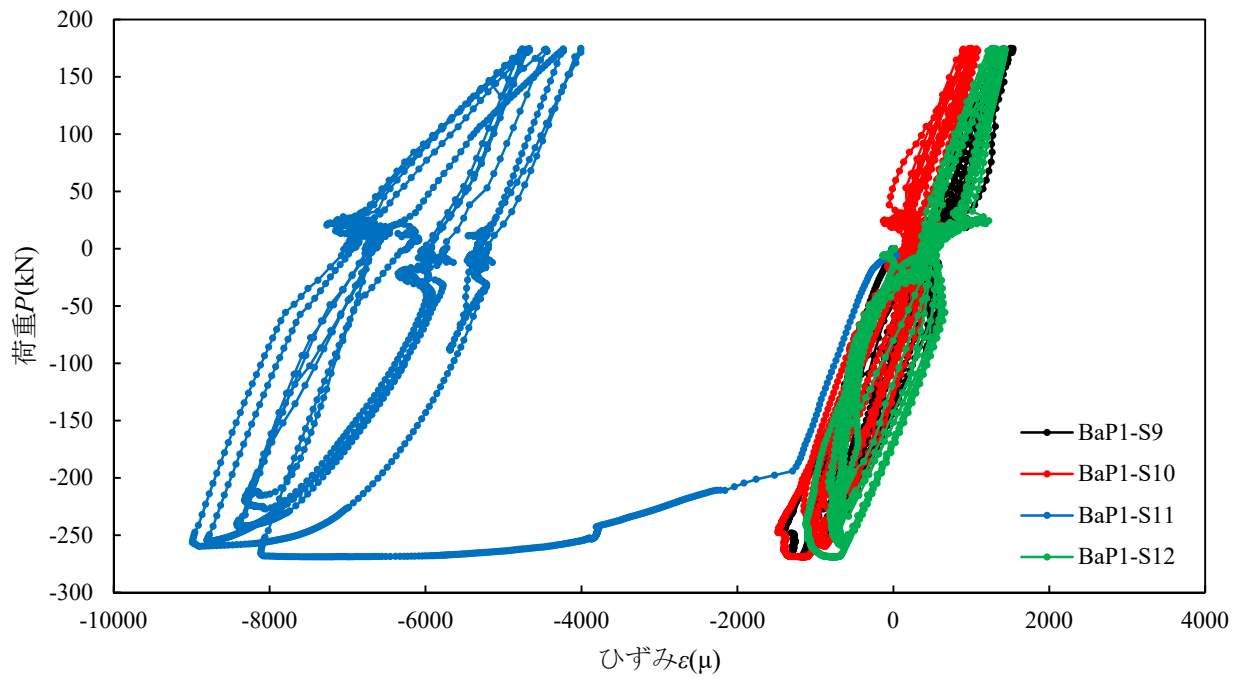


(a)計測データ (計測位置 S5~S8)

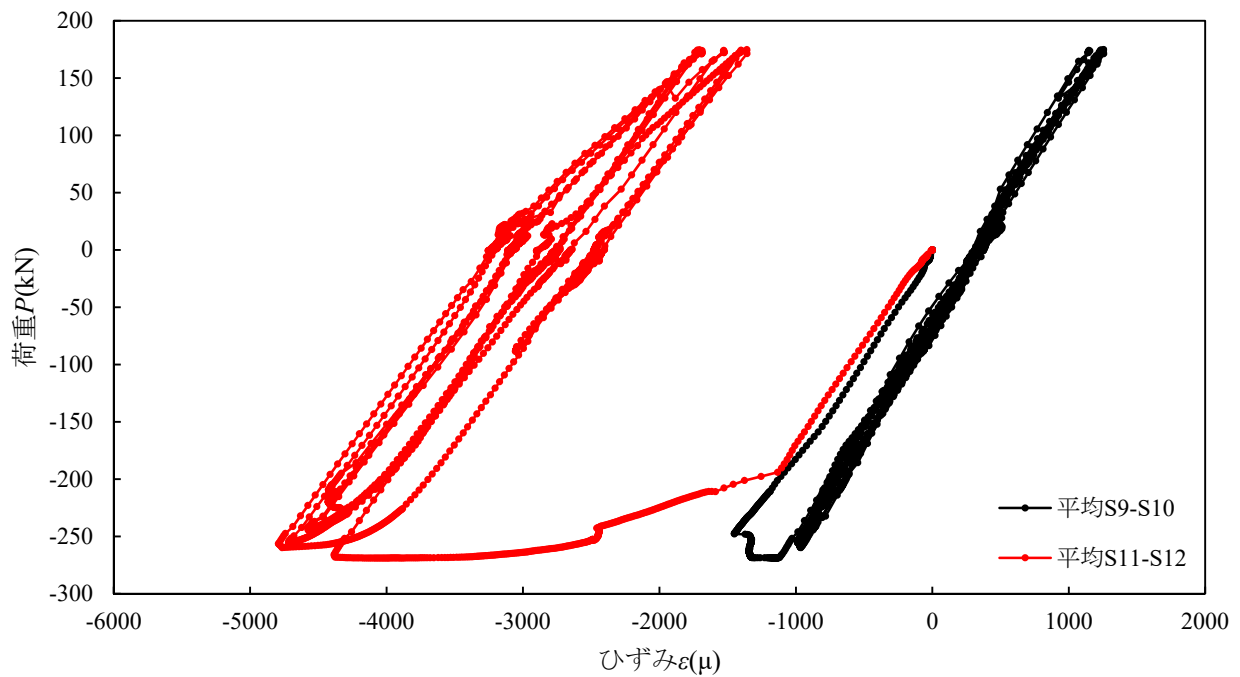


(b)平均データ (計測位置 S5-S6, S7-S8)

図-付 6.44 交番載荷試験における鉛直荷重－ひずみ関係 (試験体 B-a-P1) (鋼材部ひずみ S5~S8)

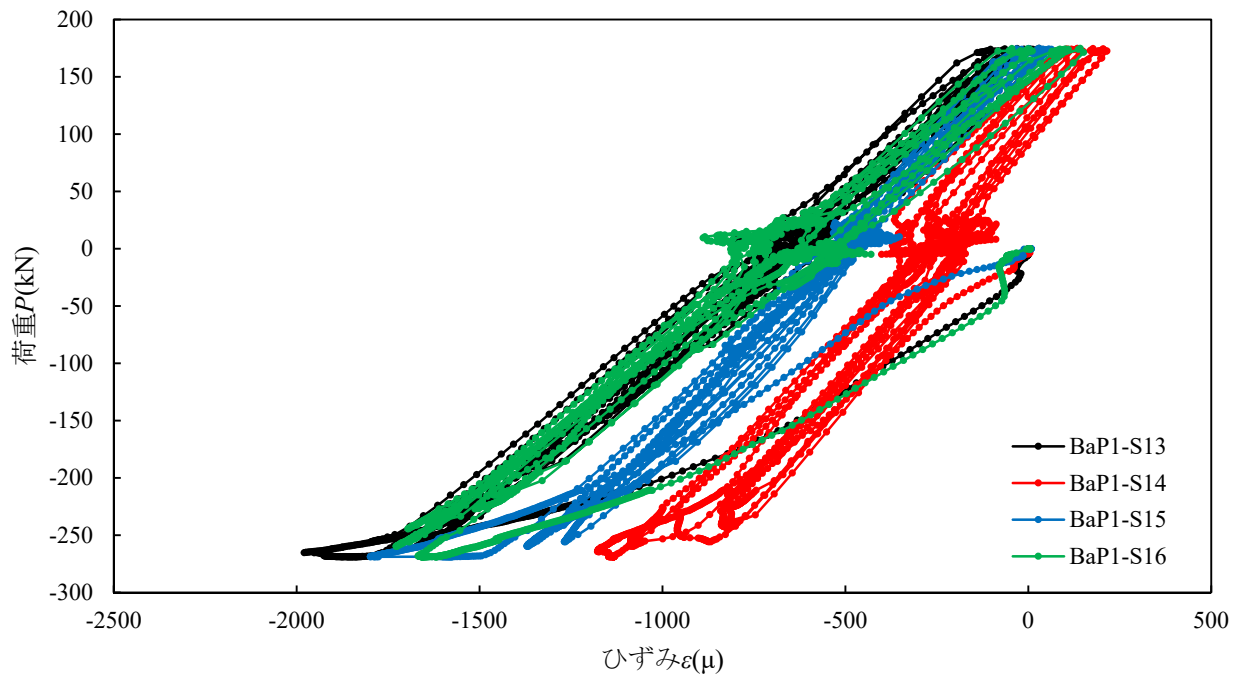


(a)計測データ (計測位置 S9~S12)

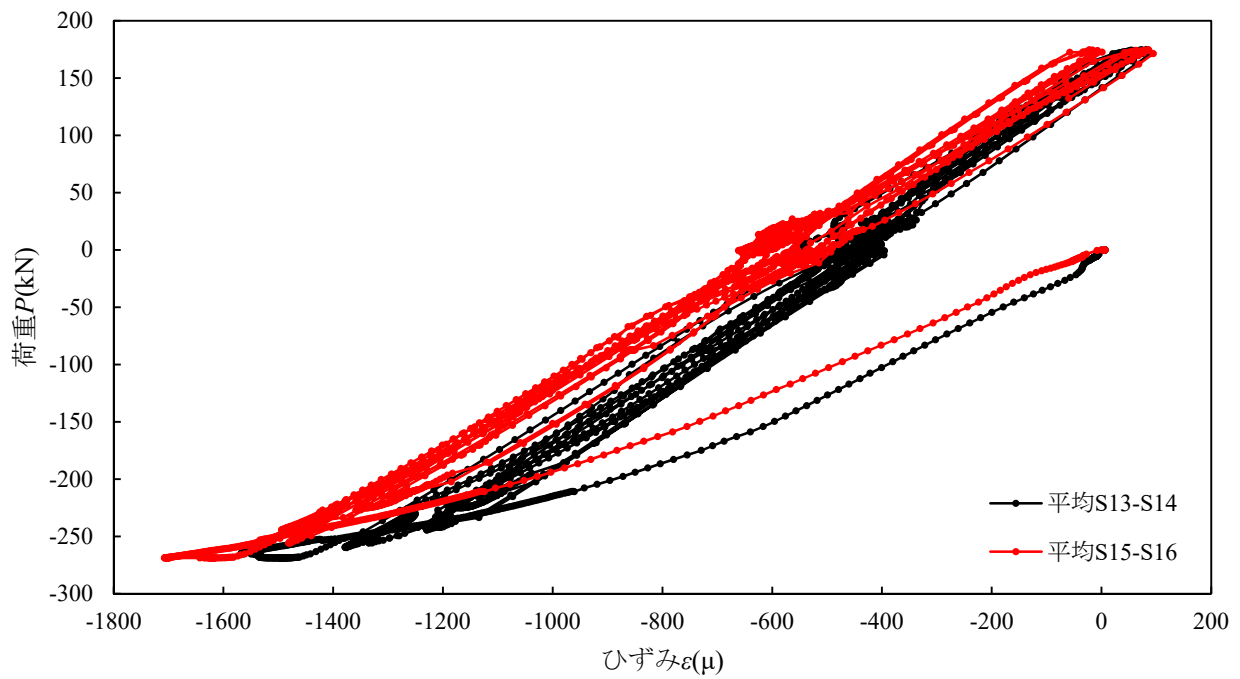


(b)平均データ (計測位置 S9-S10, S11-S12)

図-付 6.45 交番载荷試験における鉛直荷重-ひずみ関係 (試験体 B-a-P1) (鋼材部ひずみ S9~S12)

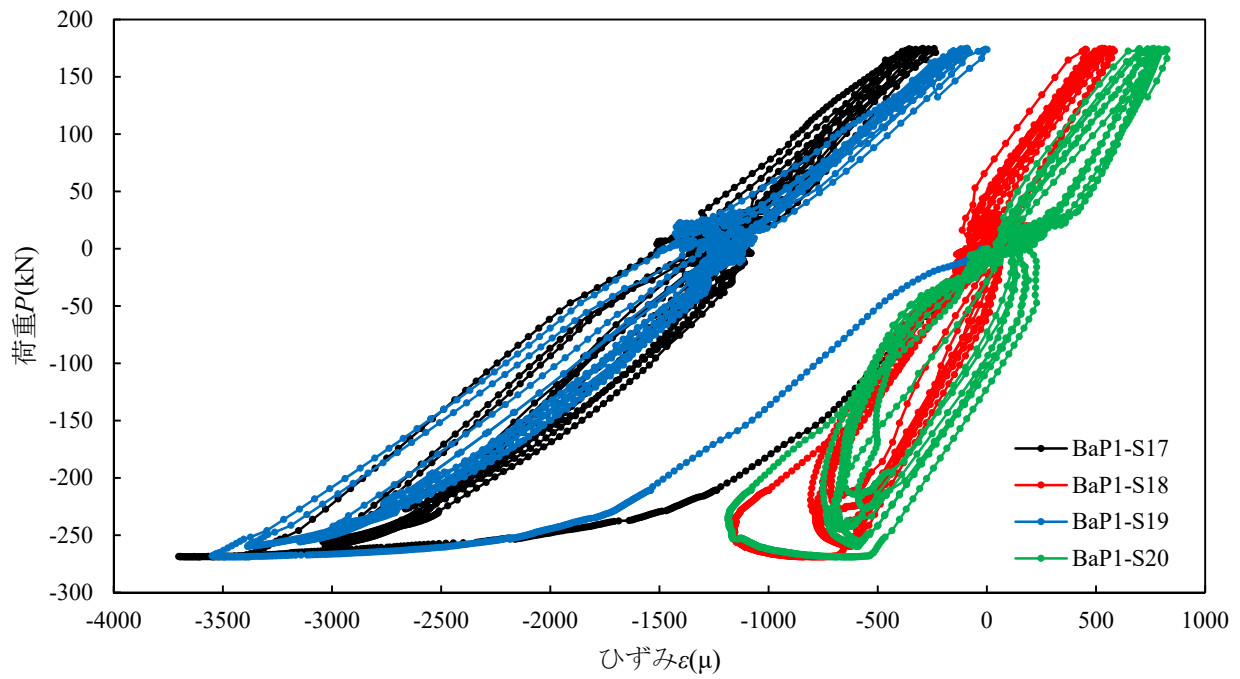


(a)計測データ (計測位置 S13~S16)

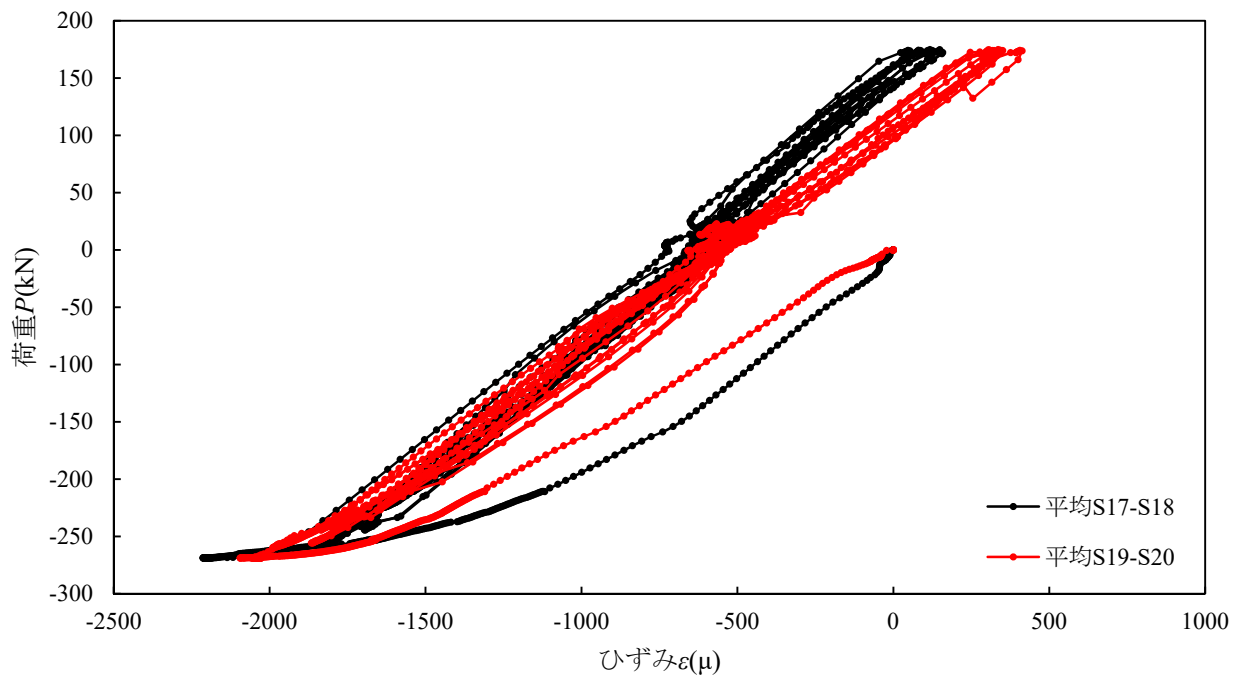


(b)平均データ (計測位置 S13-S14, S15-S16)

図-付 6.46 交番載荷試験における鉛直荷重－ひずみ関係 (試験体 B-a-P1) (CFRP 部ひずみ S13~S16)

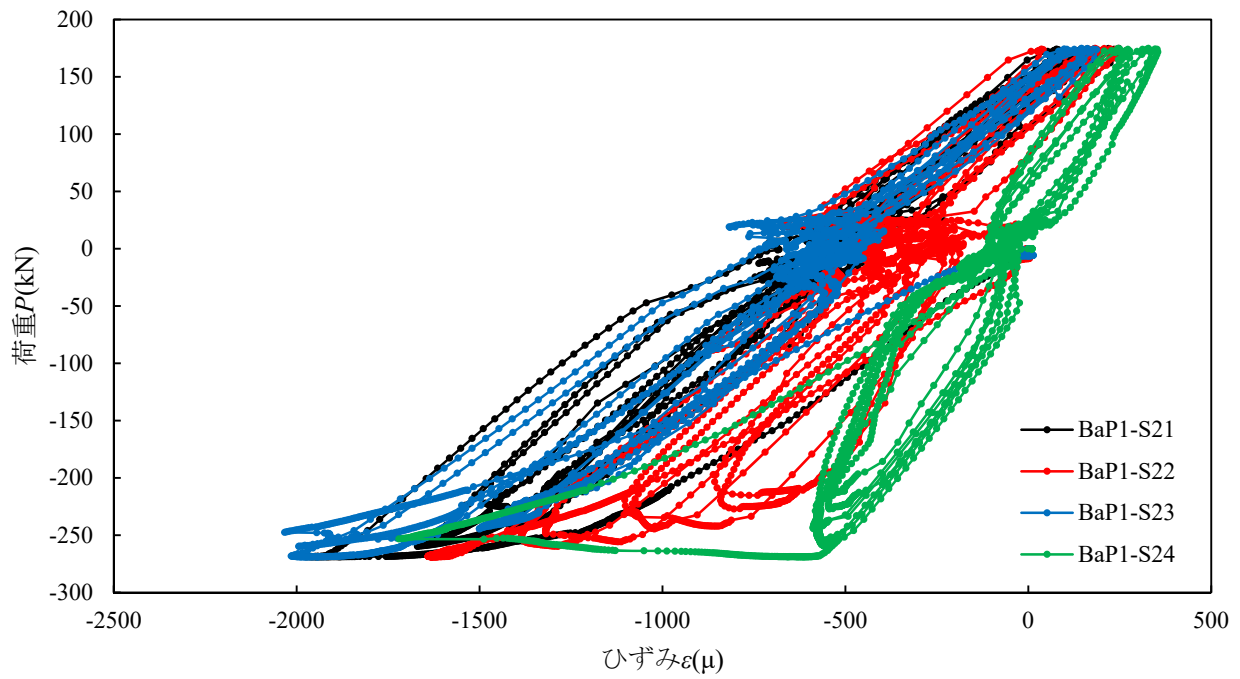


(a)計測データ (計測位置 S17~S20)

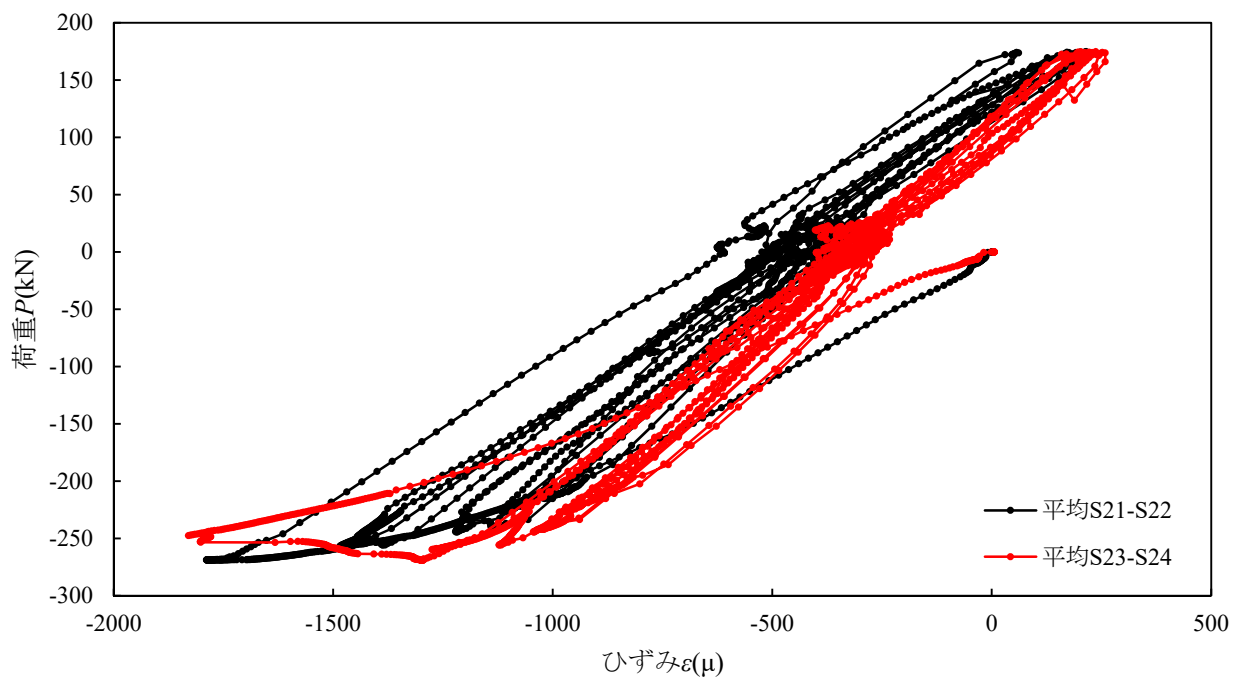


(b)平均データ (計測位置 S17-S18, S19-S20)

図-付 6.47 交番载荷試験における鉛直荷重-ひずみ関係 (試験体 B-a-P1) (CFRP 部ひずみ S17~S20)

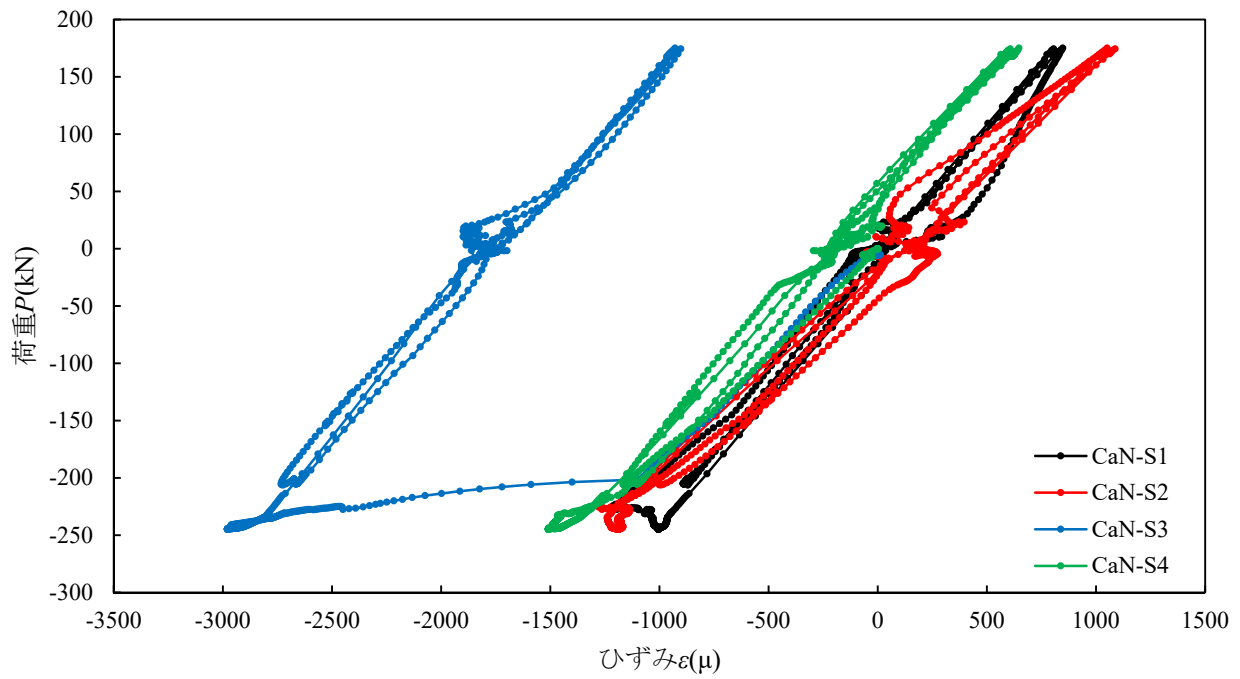


(a)計測データ (計測位置 S21~S24)

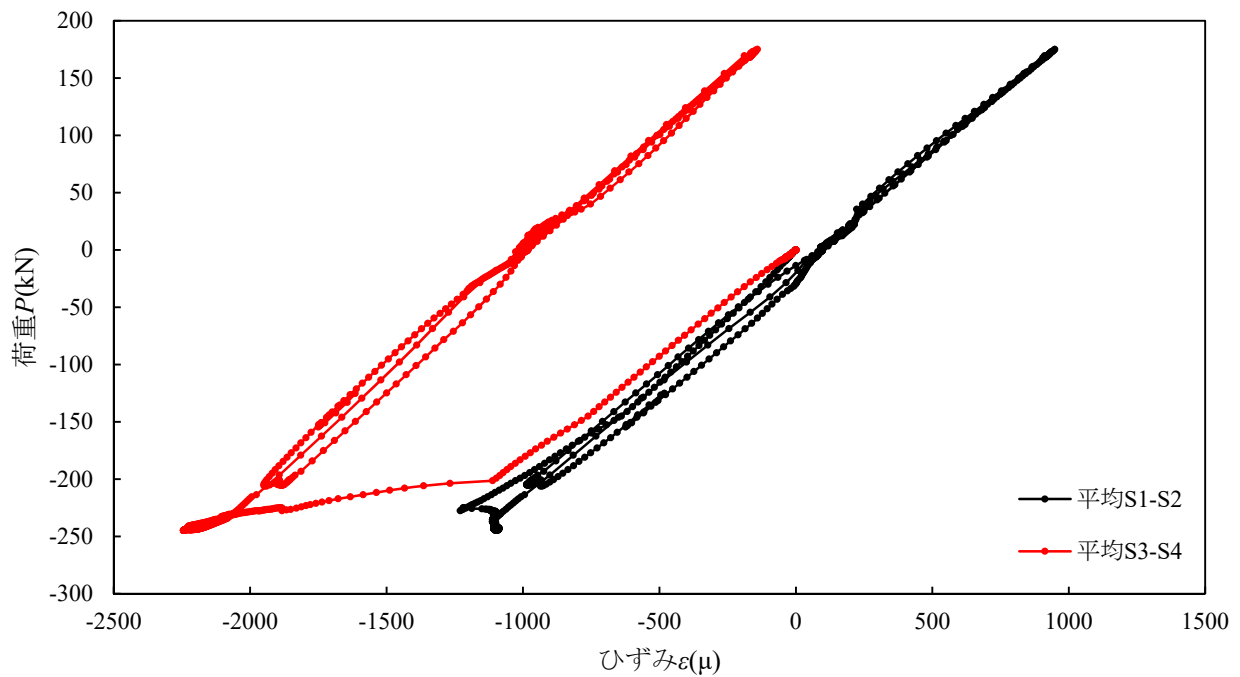


(b)平均データ (計測位置 S21-S22, S23-S24)

図-付 6.48 交番載荷試験における鉛直荷重-ひずみ関係 (試験体 B-a-P1) (CFRP 部ひずみ S21~S24)

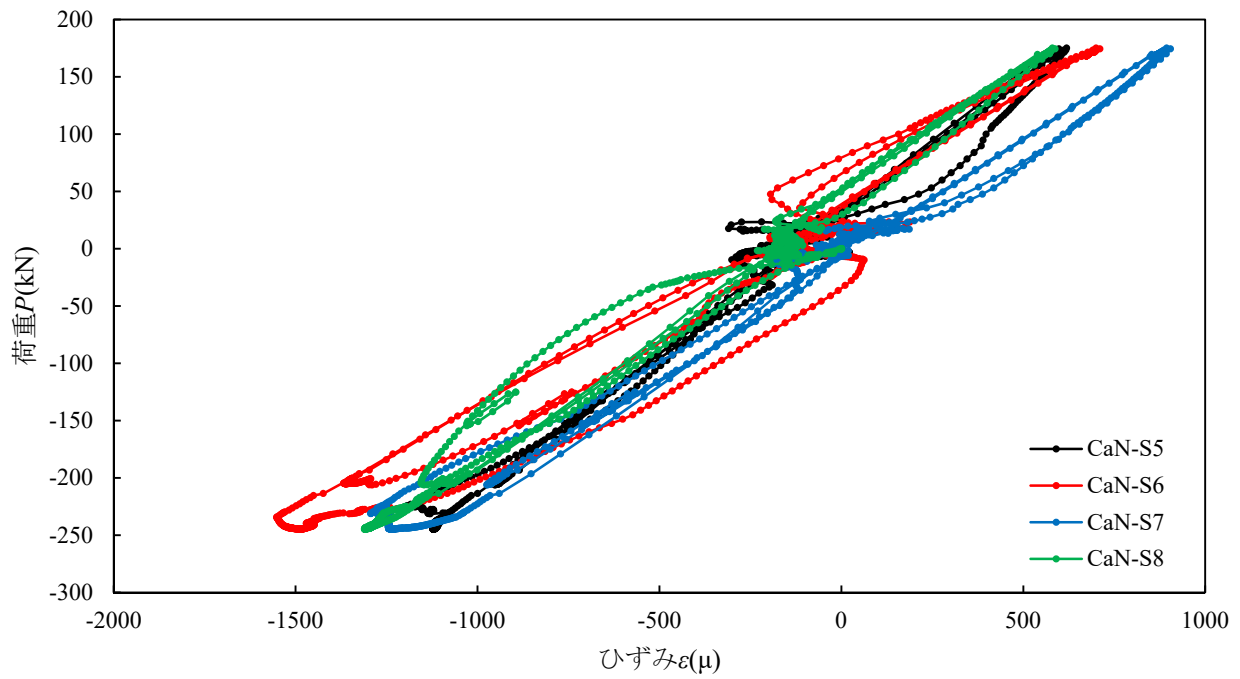


(a)計測データ (計測位置 S1~S4)

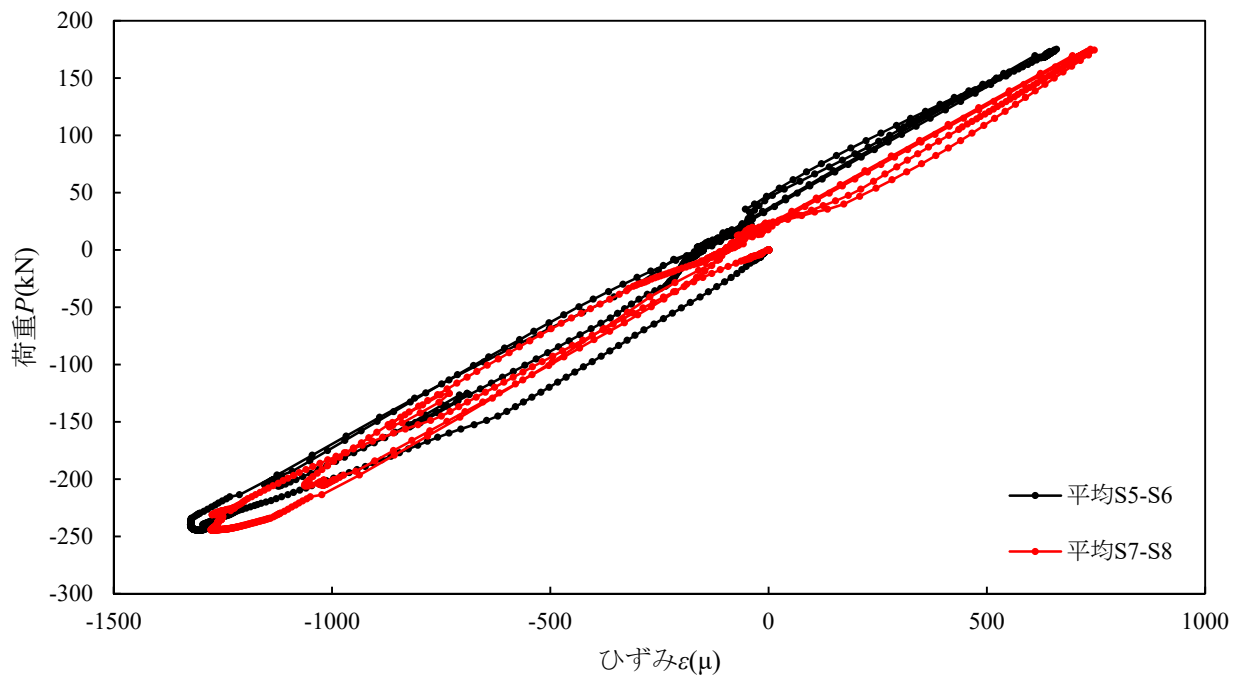


(b)平均データ (計測位置 S1-S2, S3-S4)

図-付 6.49 交番载荷試験における鉛直荷重-ひずみ関係 (試験体 C-a-N) (鋼材部ひずみ S1~S4)

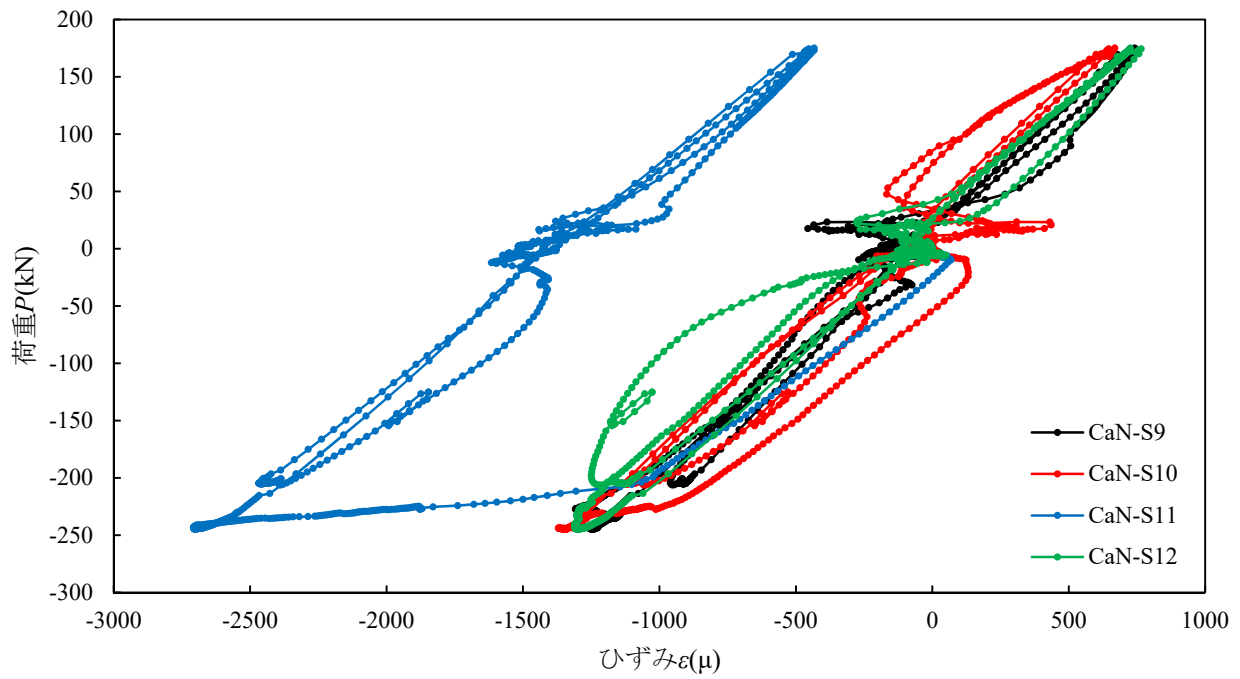


(a)計測データ (計測位置 S5~S8)

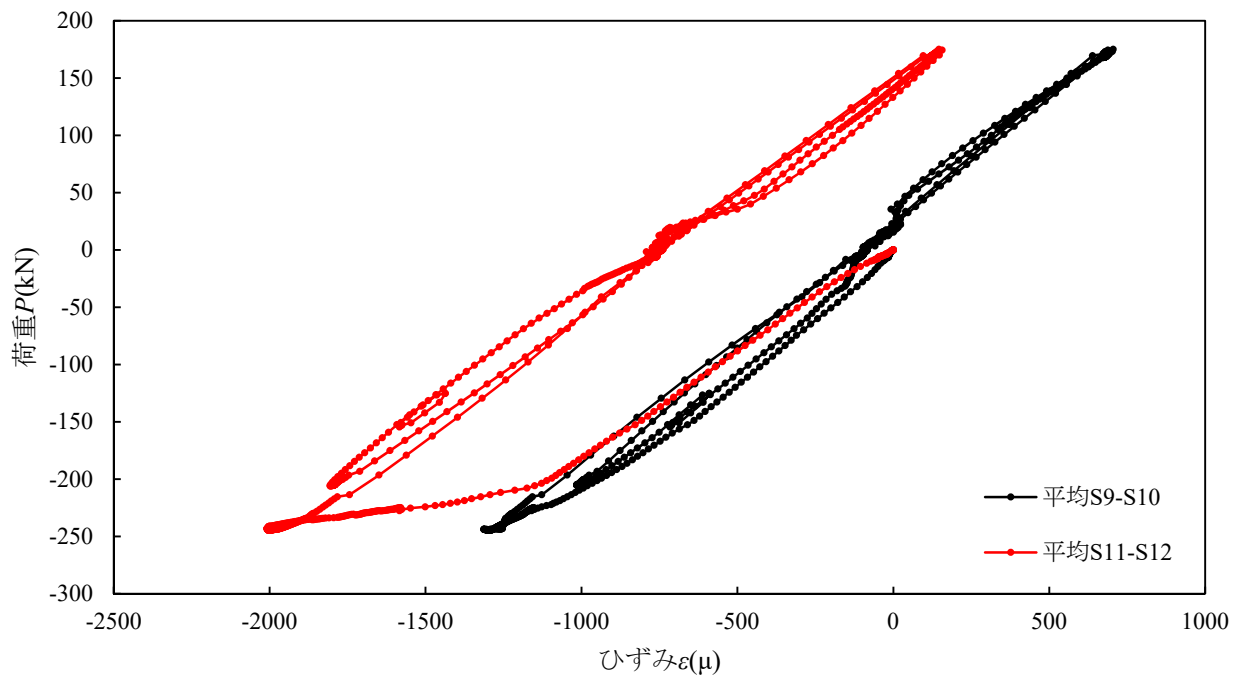


(b)平均データ (計測位置 S5-S6, S7-S8)

図-付 6.50 交番载荷試験における鉛直荷重-ひずみ関係 (試験体 C-a-N) (鋼材部ひずみ S5~S8)

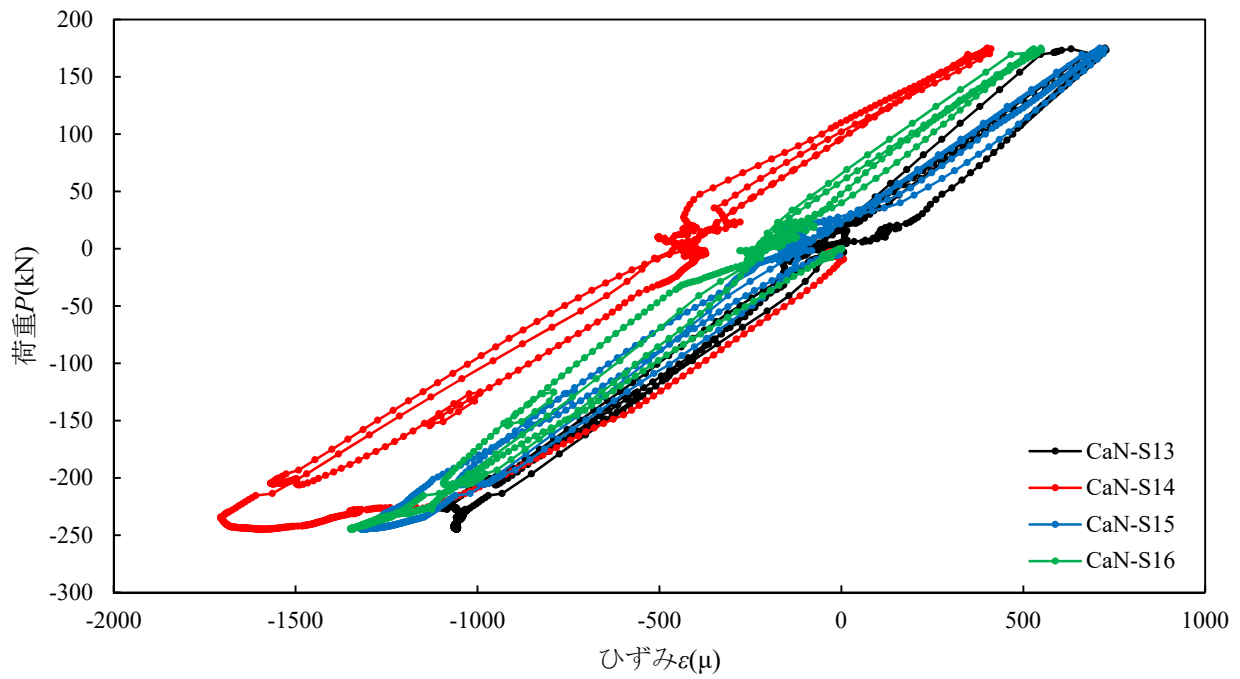


(a)計測データ (計測位置 S9~S12)

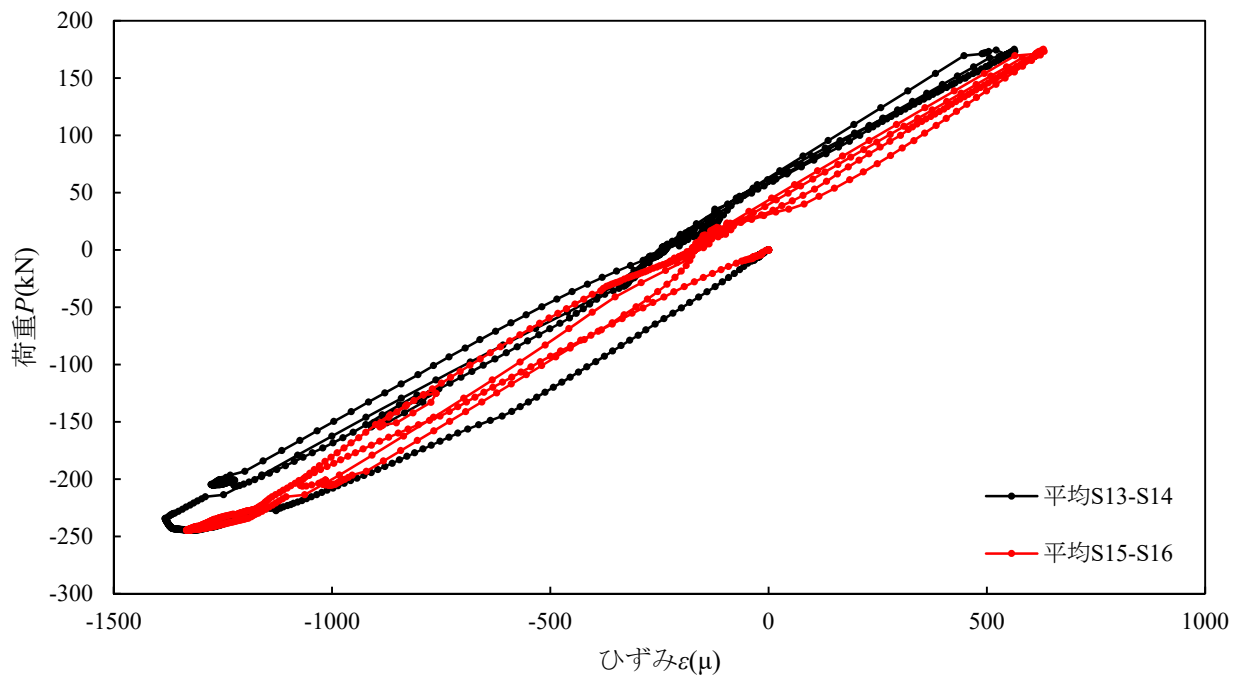


(b)平均データ (計測位置 S9-S10, S11-S12)

図-付 6.51 交番載荷試験における鉛直荷重-ひずみ関係 (試験体 C-a-N) (鋼材部ひずみ S9~S12)

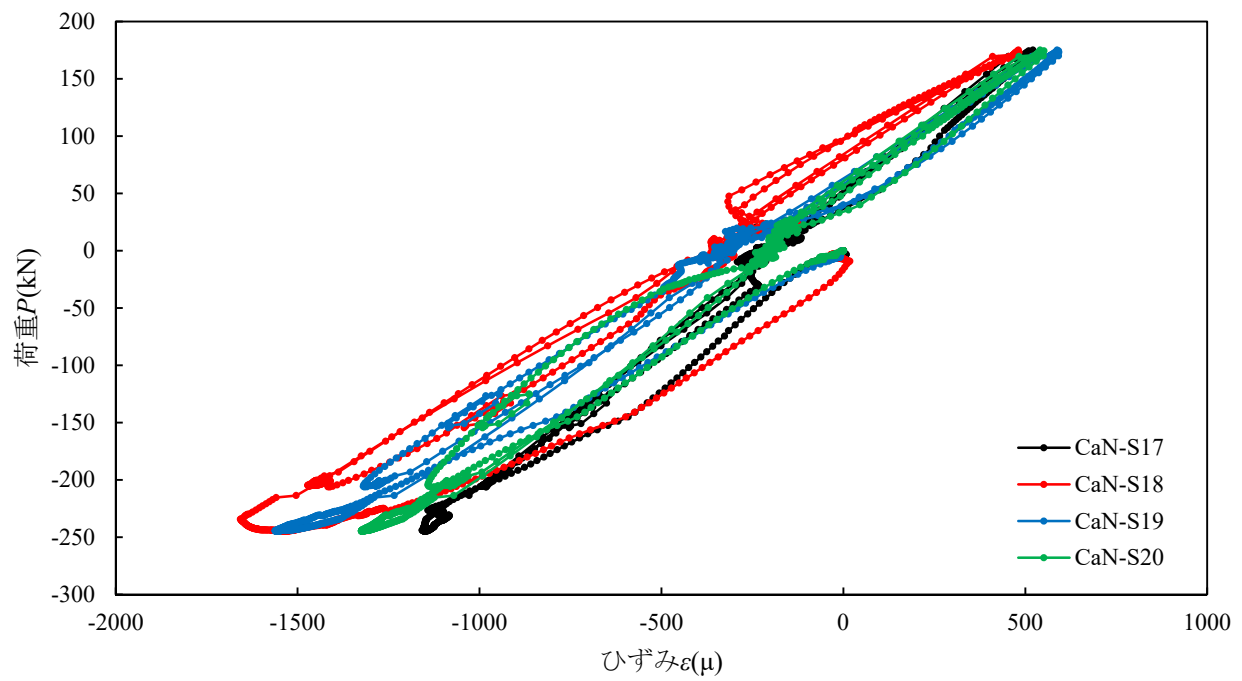


(a)計測データ (計測位置 S13~S16)

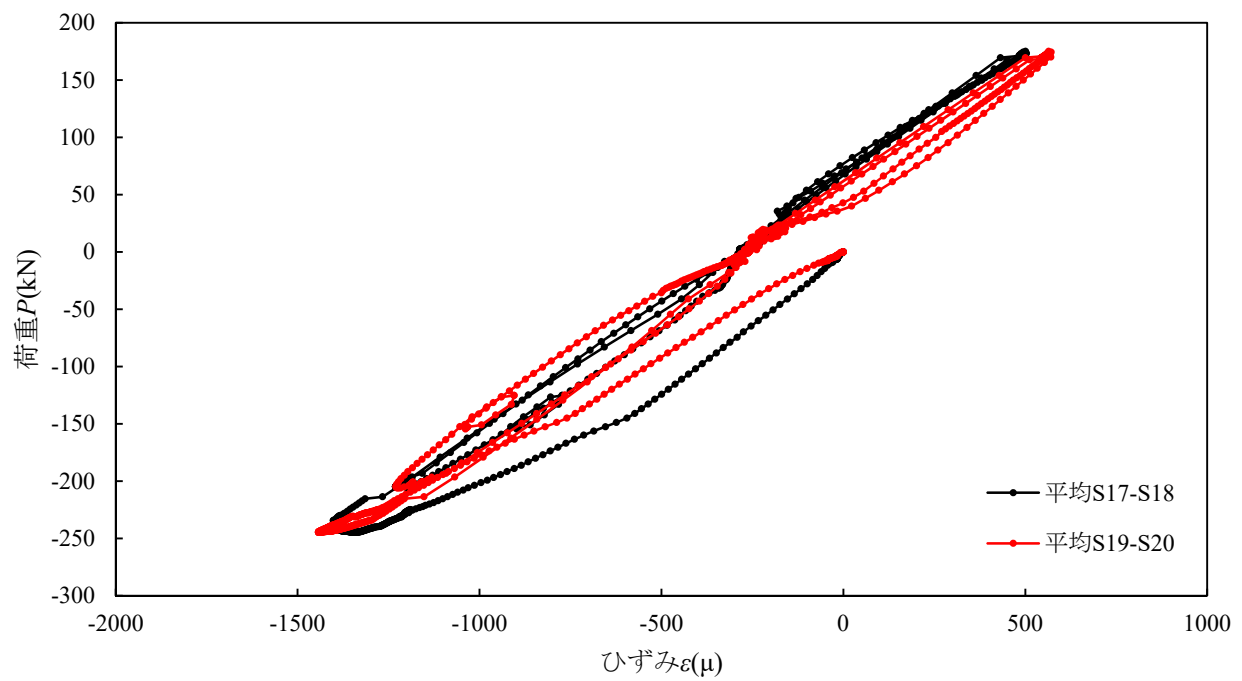


(b)平均データ (計測位置 S13-S14, S15-S16)

図-付 6.52 交番载荷試験における鉛直荷重-ひずみ関係 (試験体 C-a-N) (CFRP 部ひずみ S13~S16)

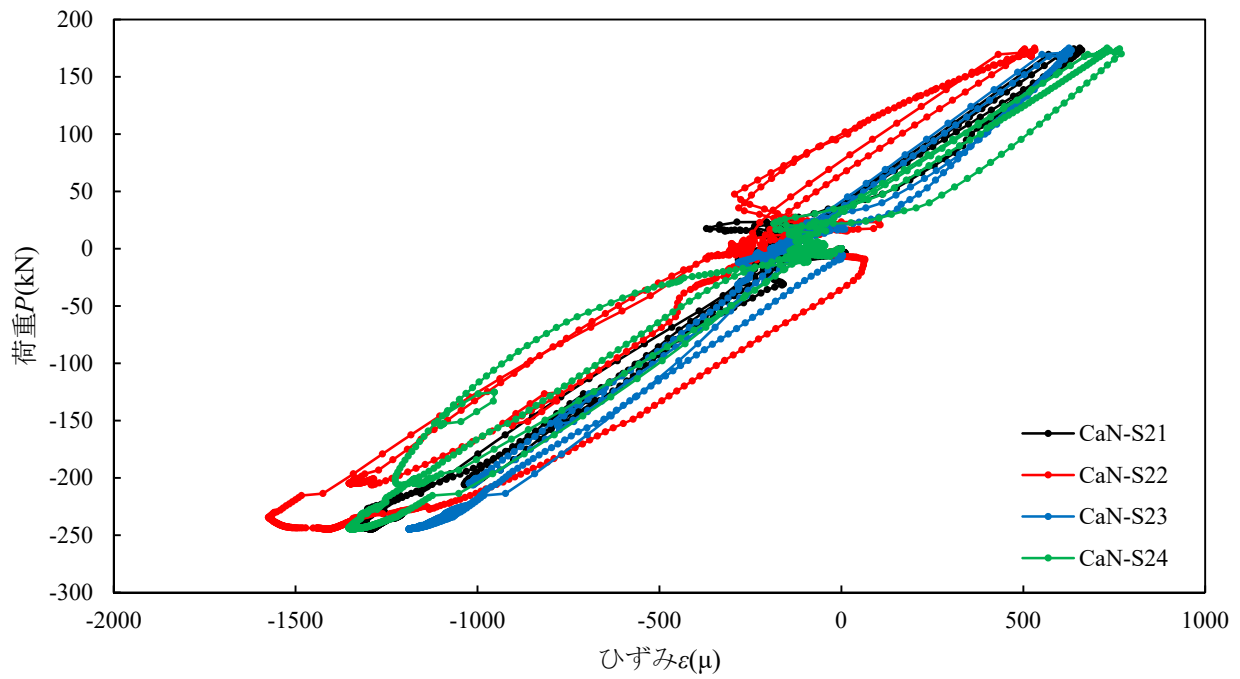


(a)計測データ (計測位置 S17~S20)

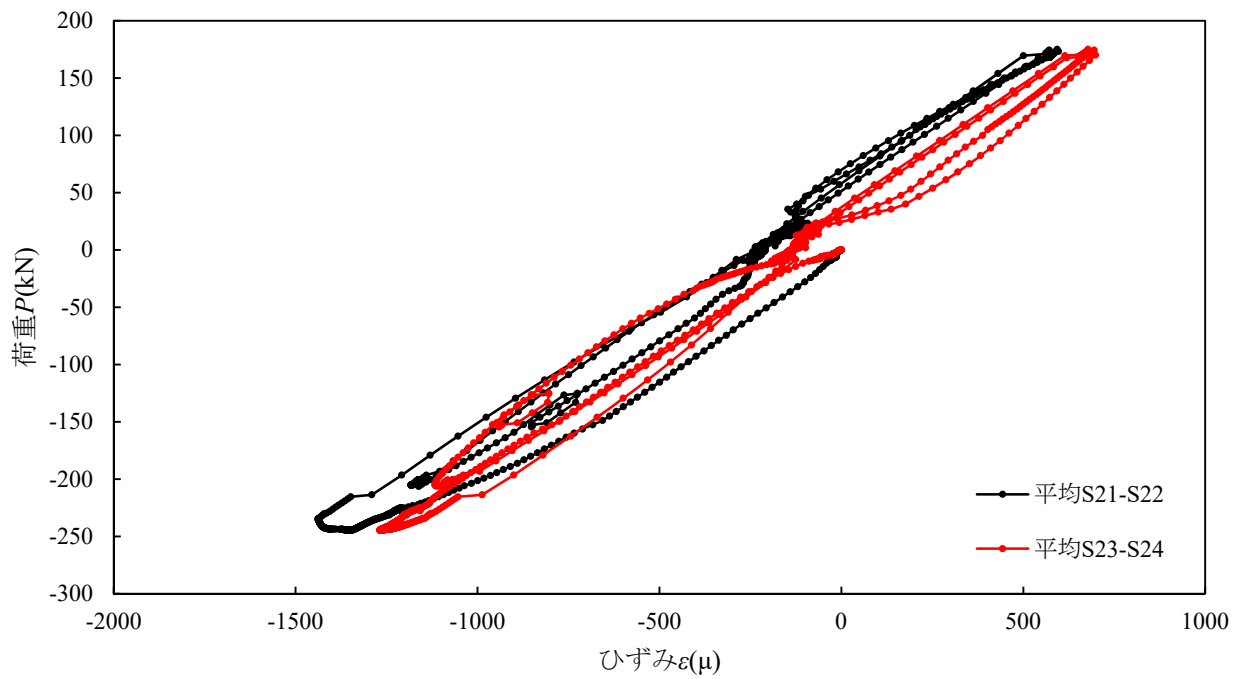


(b)平均データ (計測位置 S17-S18, S19-S20)

図-付 6.53 交番載荷試験における鉛直荷重-ひずみ関係 (試験体 C-a-N) (CFRP 部ひずみ S17~S20)

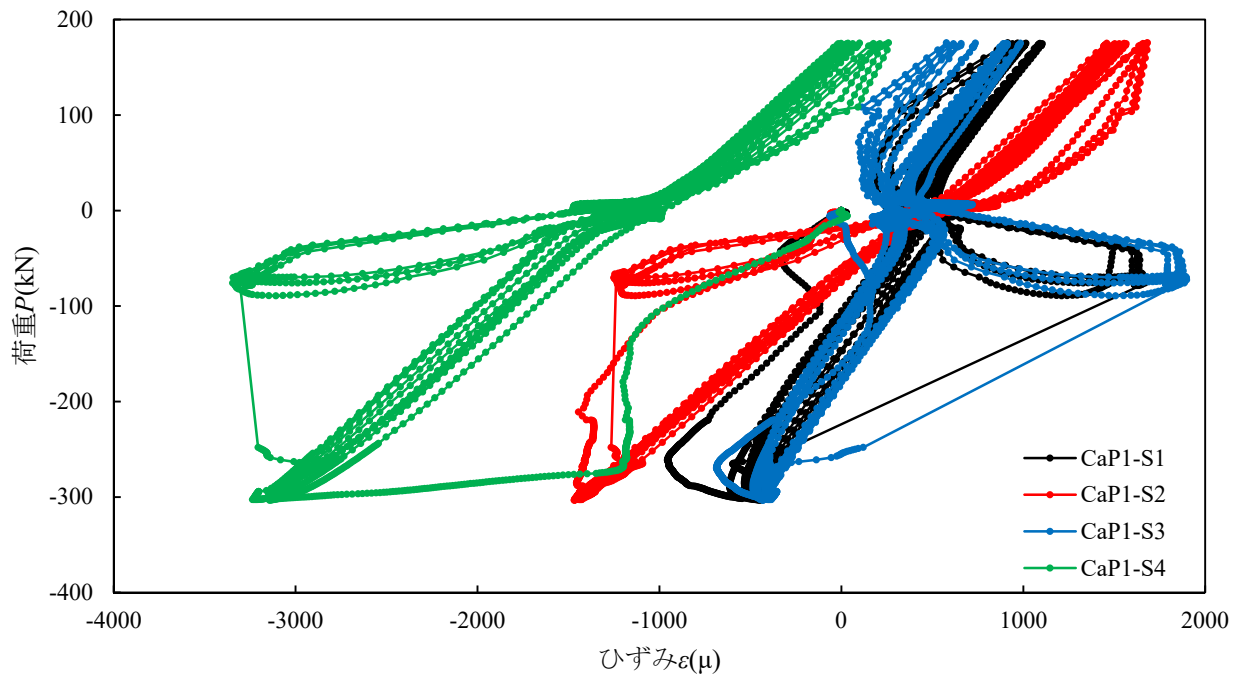


(a)計測データ (計測位置 S21~S24)

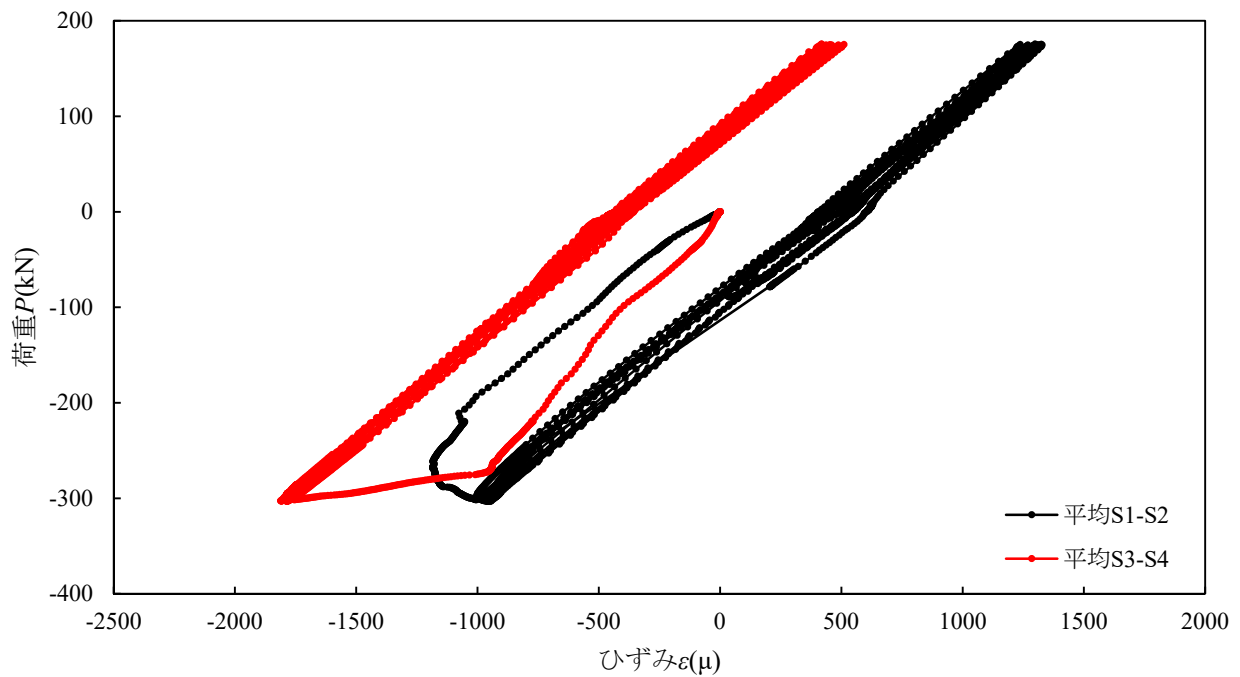


(b)平均データ (計測位置 S21-S22, S23-S24)

図-付 6.54 交番载荷試験における鉛直荷重-ひずみ関係 (試験体 C-a-N) (CFRP 部ひずみ S21~S24)

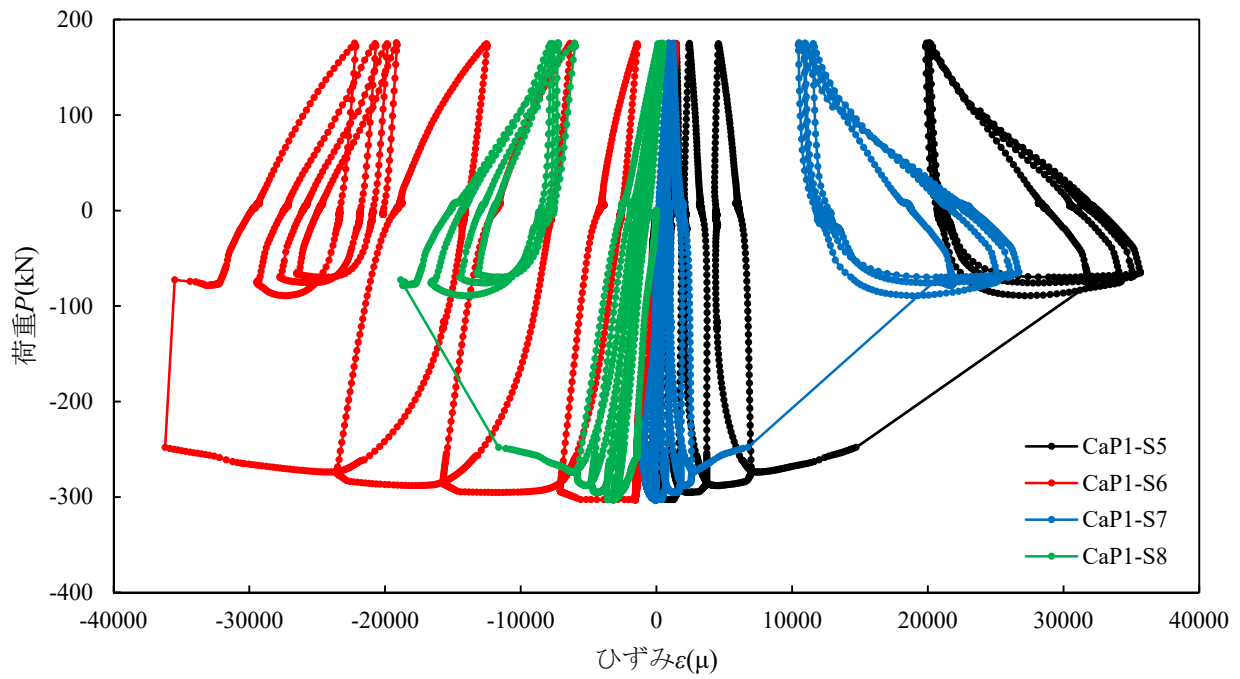


(a)計測データ (計測位置 S1~S4)

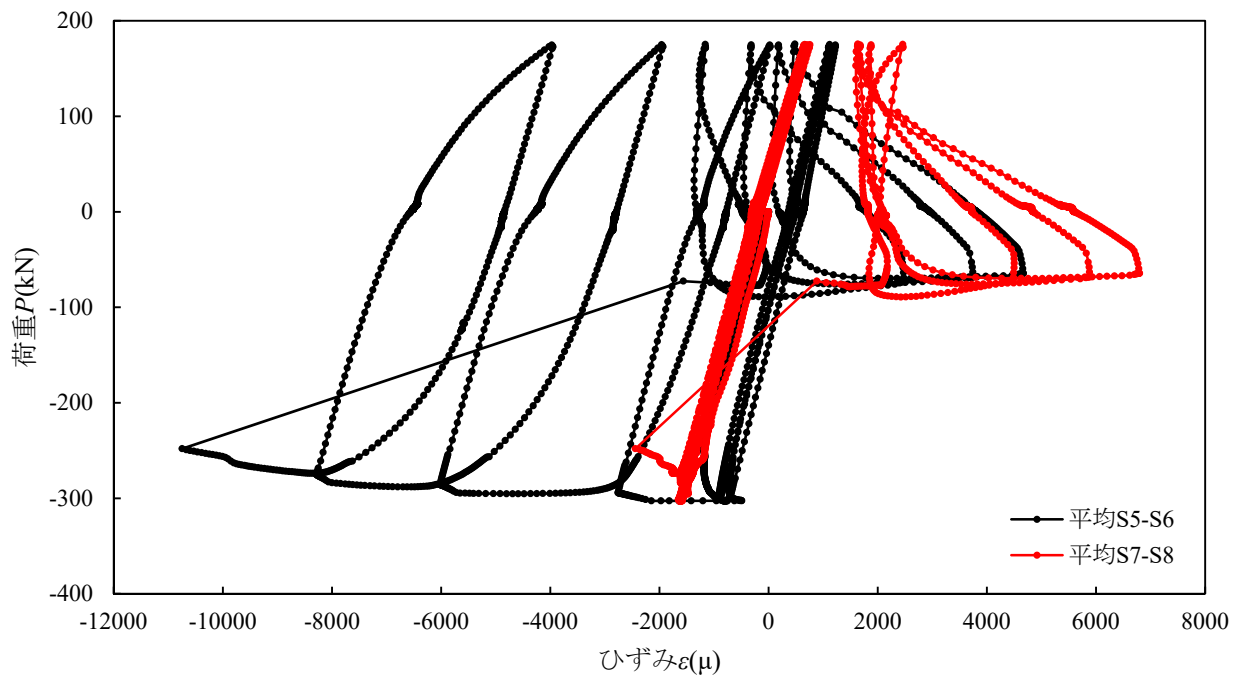


(b)平均データ (計測位置 S1-S2, S3-S4)

図-付 6.55 交番載荷試験における鉛直荷重－ひずみ関係 (試験体 C-a-P1) (鋼材部ひずみ S1~S4)

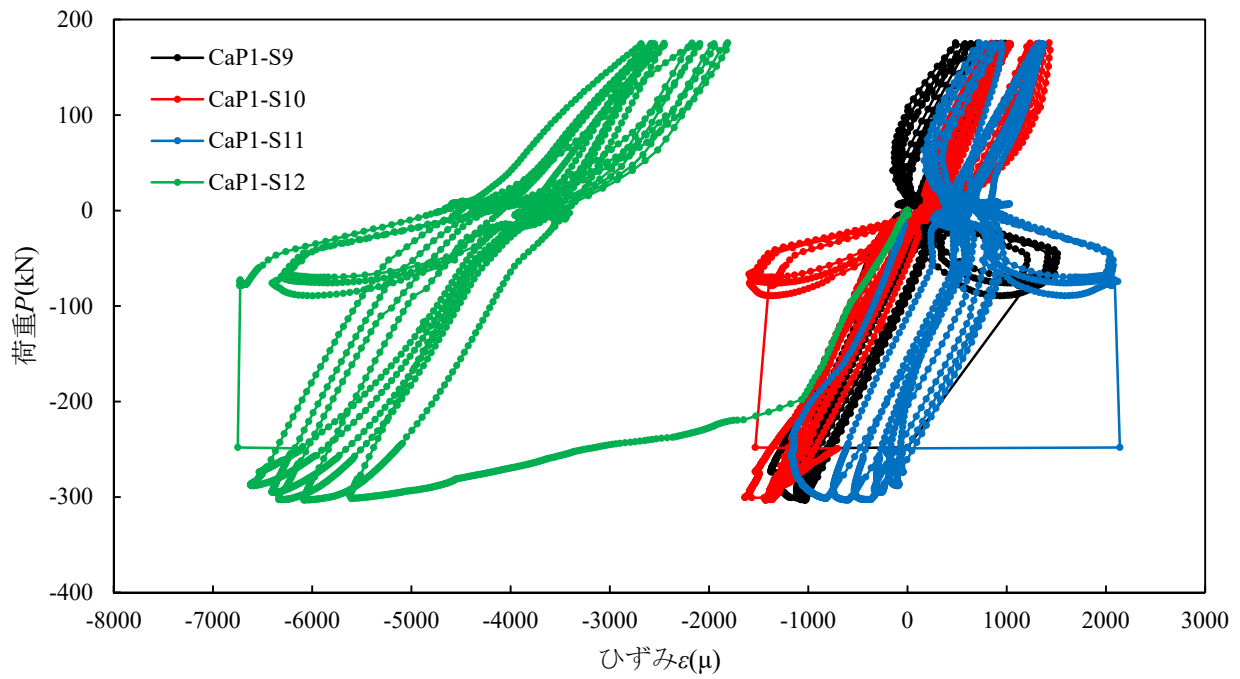


(a)計測データ (計測位置 S5~S8)

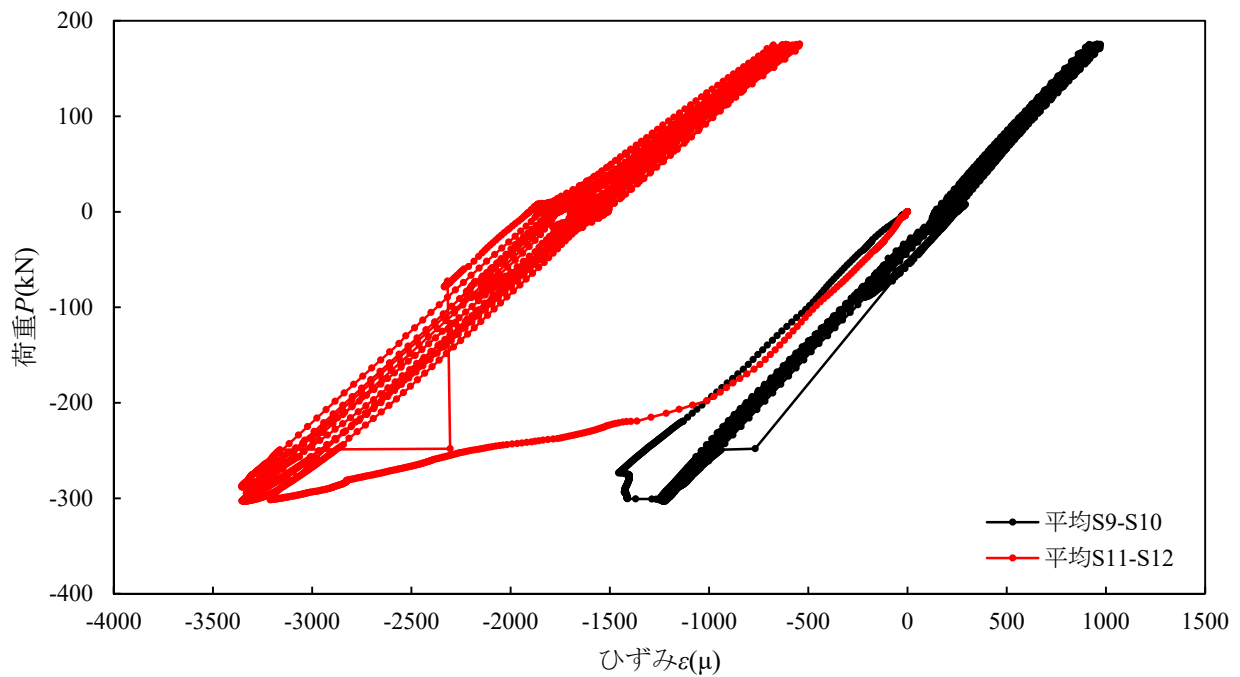


(b)平均データ (計測位置 S5-S6, S7-S8)

図-付 6.56 交番載荷試験における鉛直荷重－ひずみ関係 (試験体 C-a-P1) (鋼材部ひずみ S5~S8)

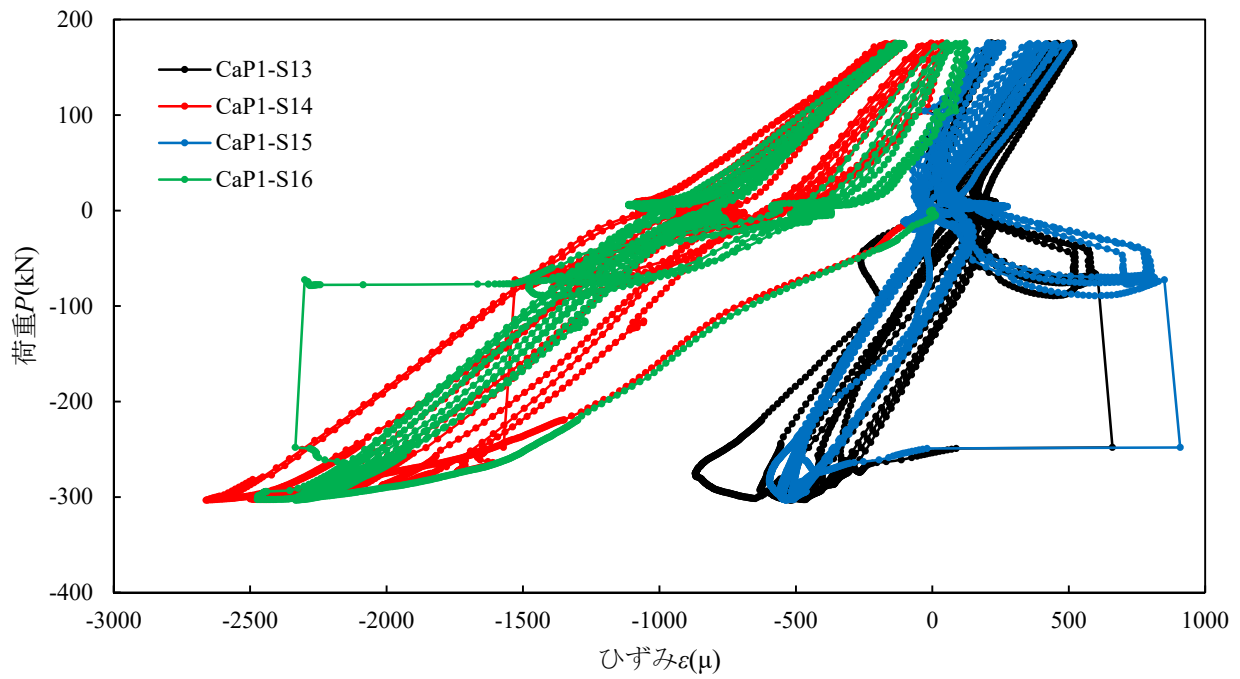


(a)計測データ (計測位置 S9~S12)

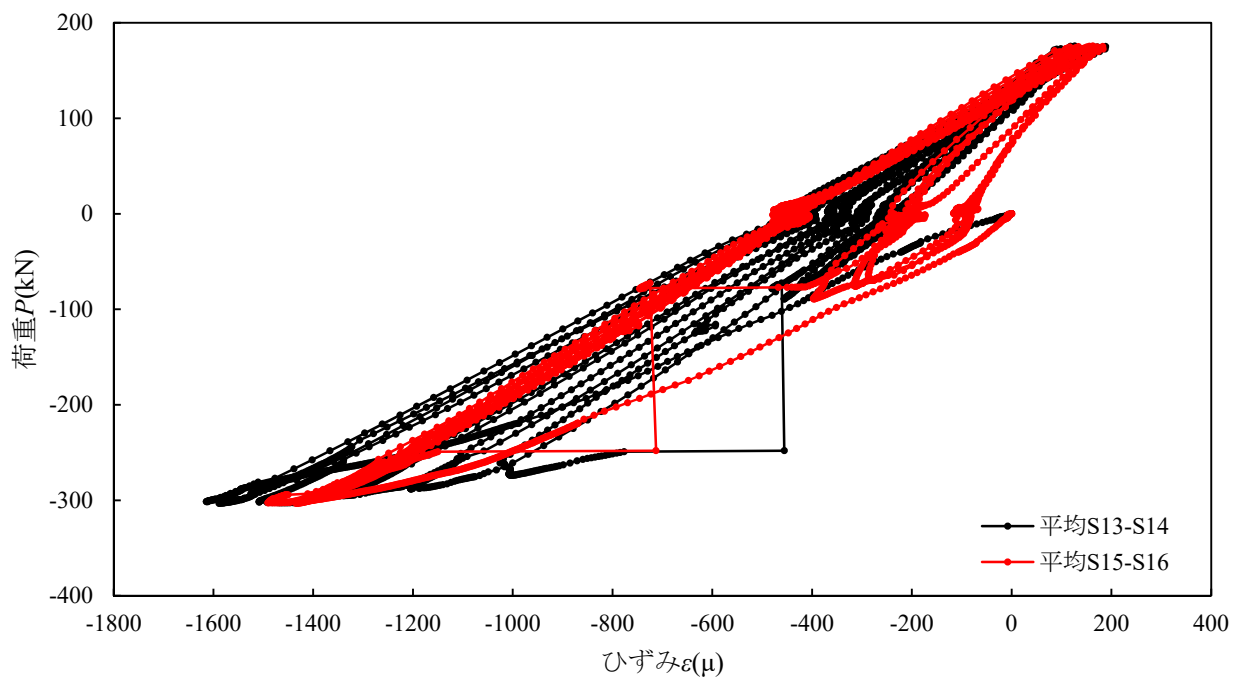


(b)平均データ (計測位置 S9-S10, S11-S12)

図-付 6.57 交番載荷試験における鉛直荷重－ひずみ関係 (試験体 C-a-P1) (鋼材部ひずみ S9～S12)

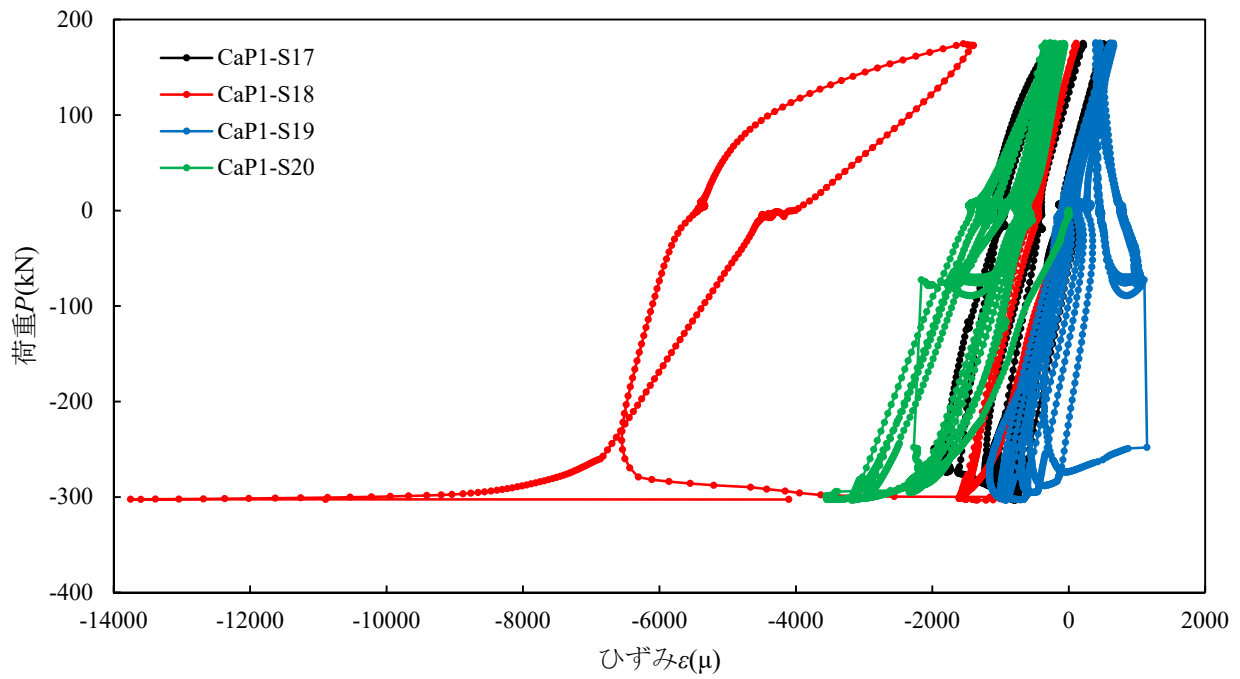


(a)計測データ (計測位置 S13~S16)

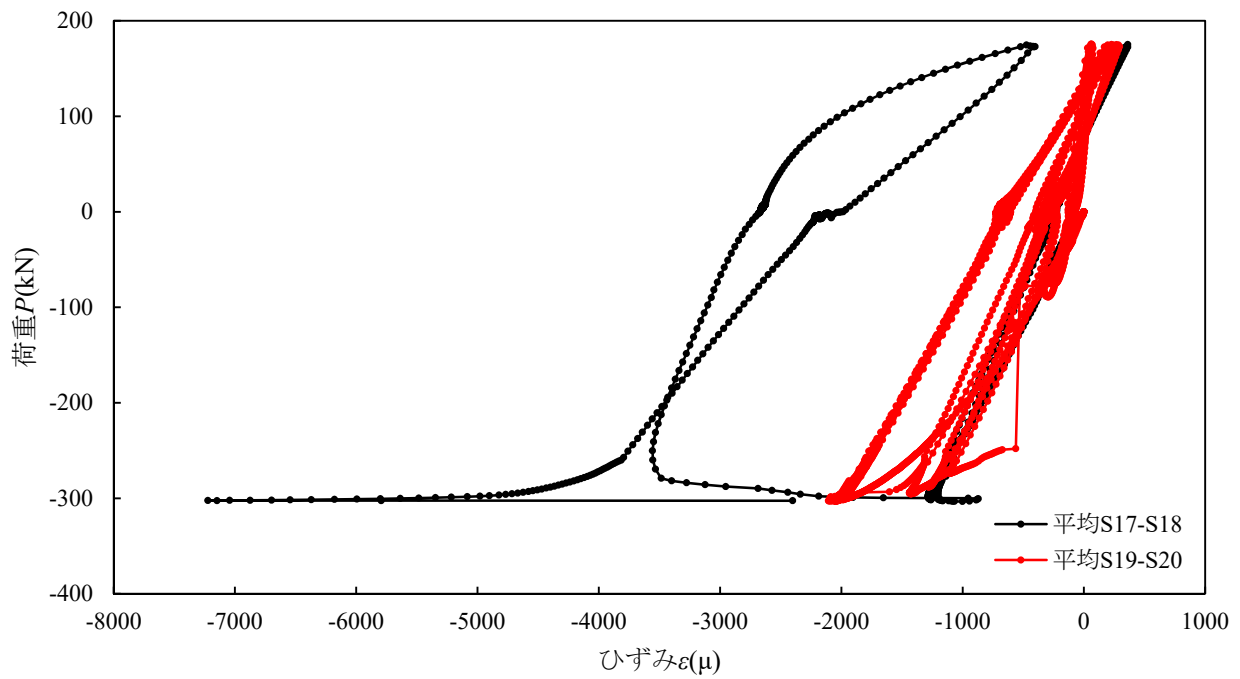


(b)平均データ (計測位置 S13-S14, S15-S16)

図-付 6.58 交番載荷試験における鉛直荷重－ひずみ関係 (試験体 C-a-P1) (CFRP 部ひずみ S13～S16)

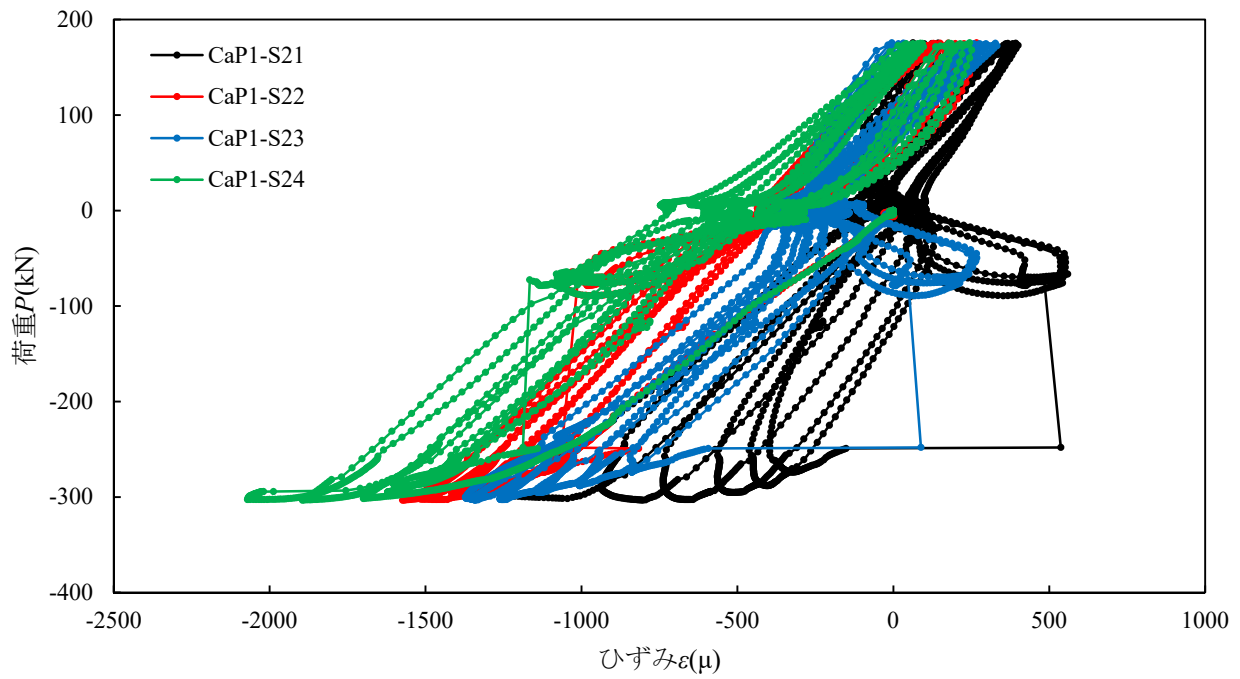


(a)計測データ (計測位置 S17~S20)

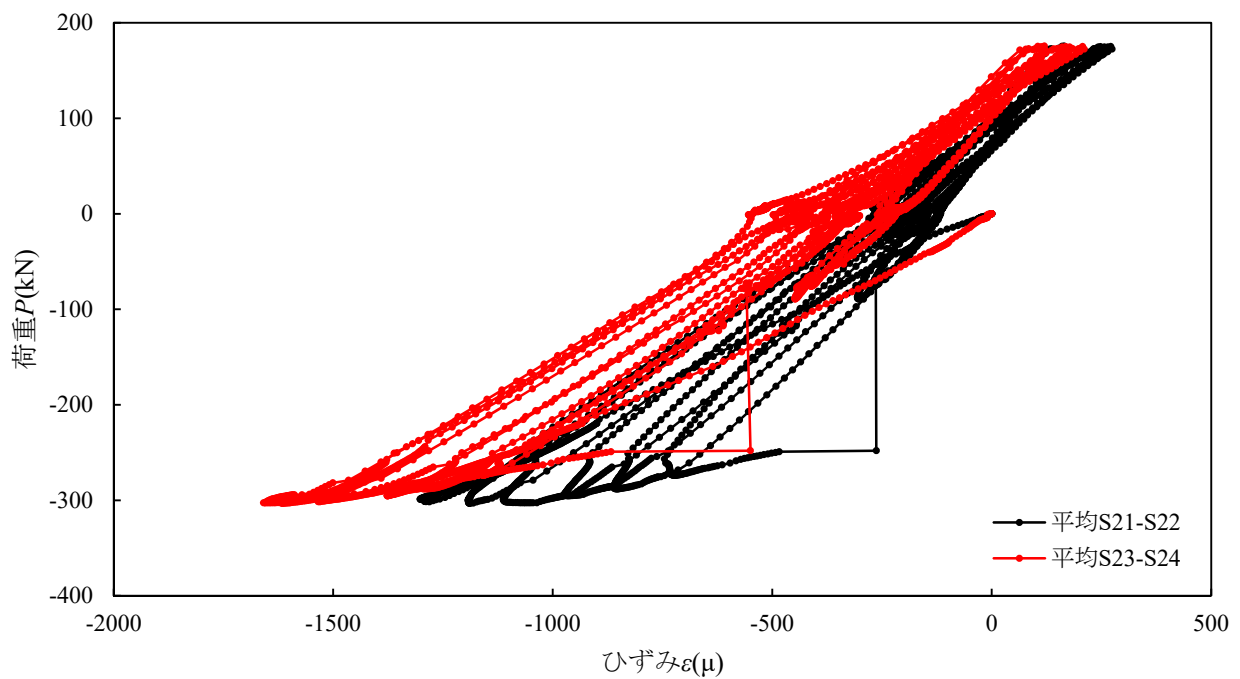


(b)平均データ (計測位置 S17-S18, S19-S20)

図-付 6.59 交番载荷試験における鉛直荷重-ひずみ関係 (試験体 C-a-P1) (CFRP 部ひずみ S17~S20)

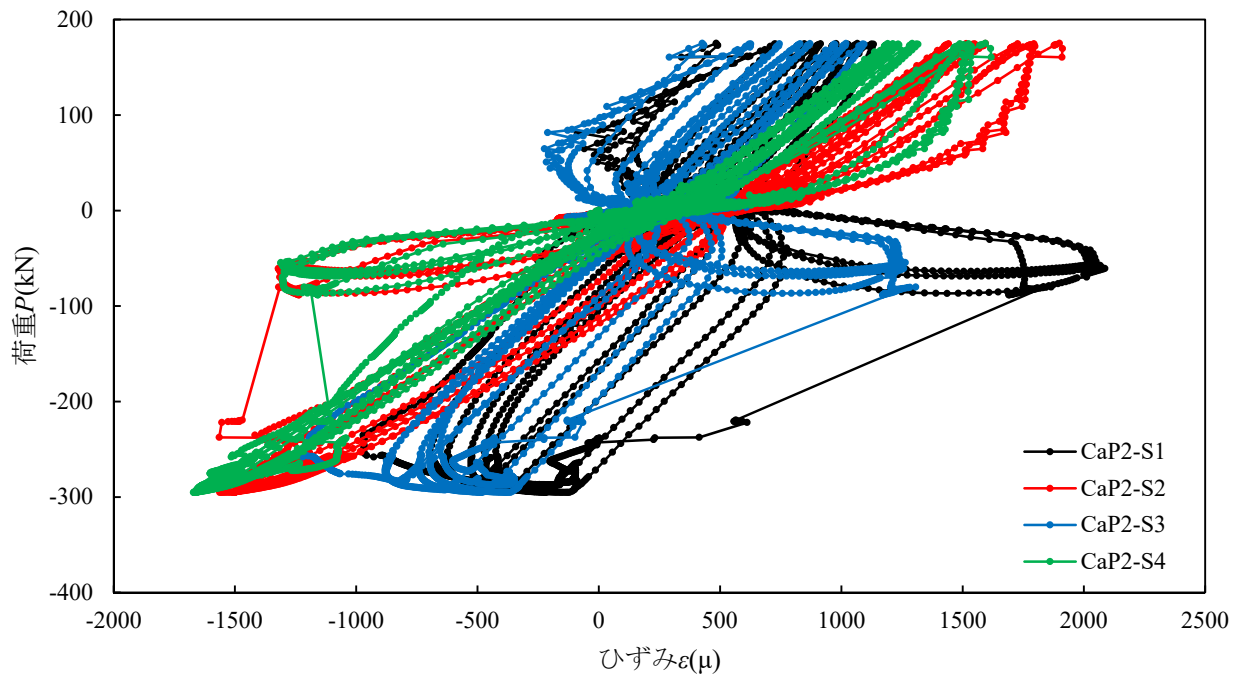


(a)計測データ (計測位置 S21~S24)

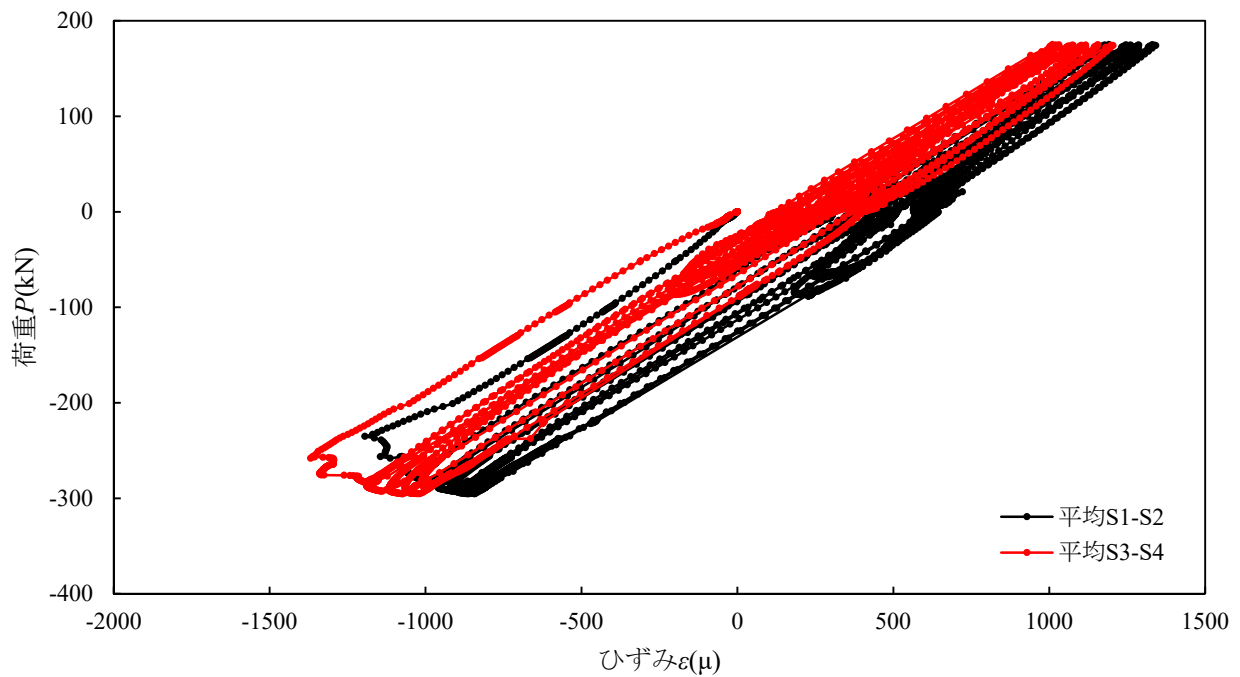


(b)平均データ (計測位置 S21-S22, S23-S24)

図-付 6.60 交番載荷試験における鉛直荷重－ひずみ関係 (試験体 C-a-P1) (CFRP 部ひずみ S21~S24)

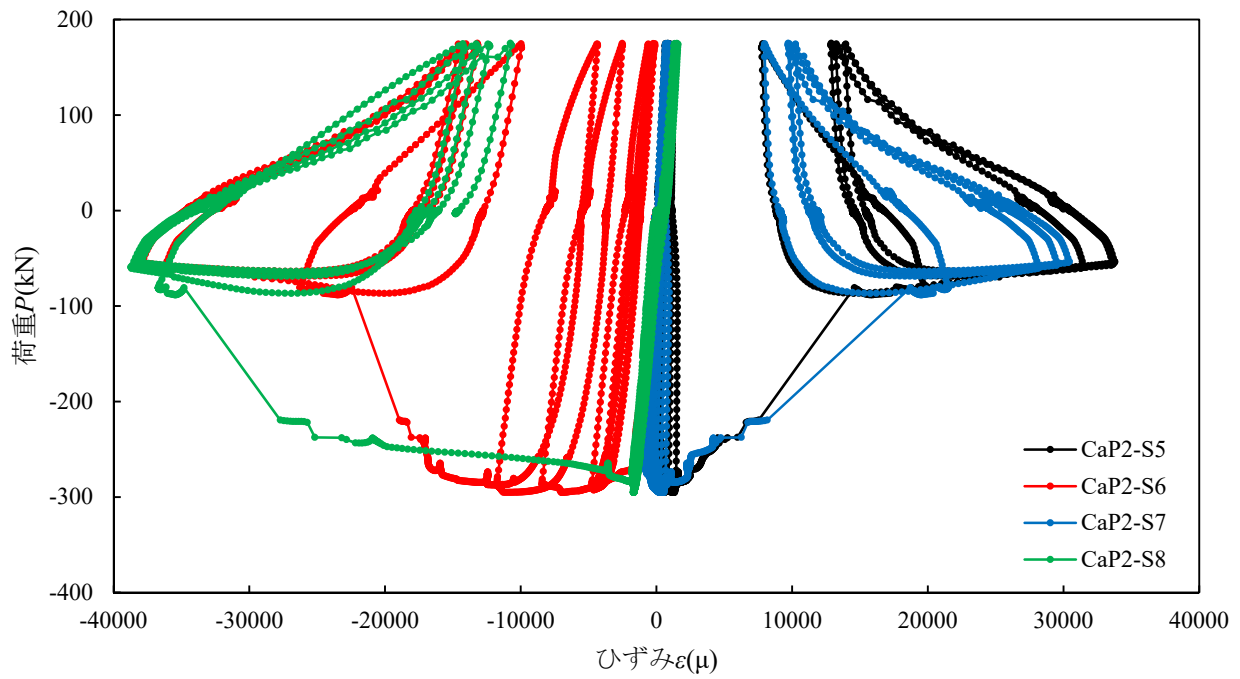


(a)計測データ (計測位置 S1~S4)

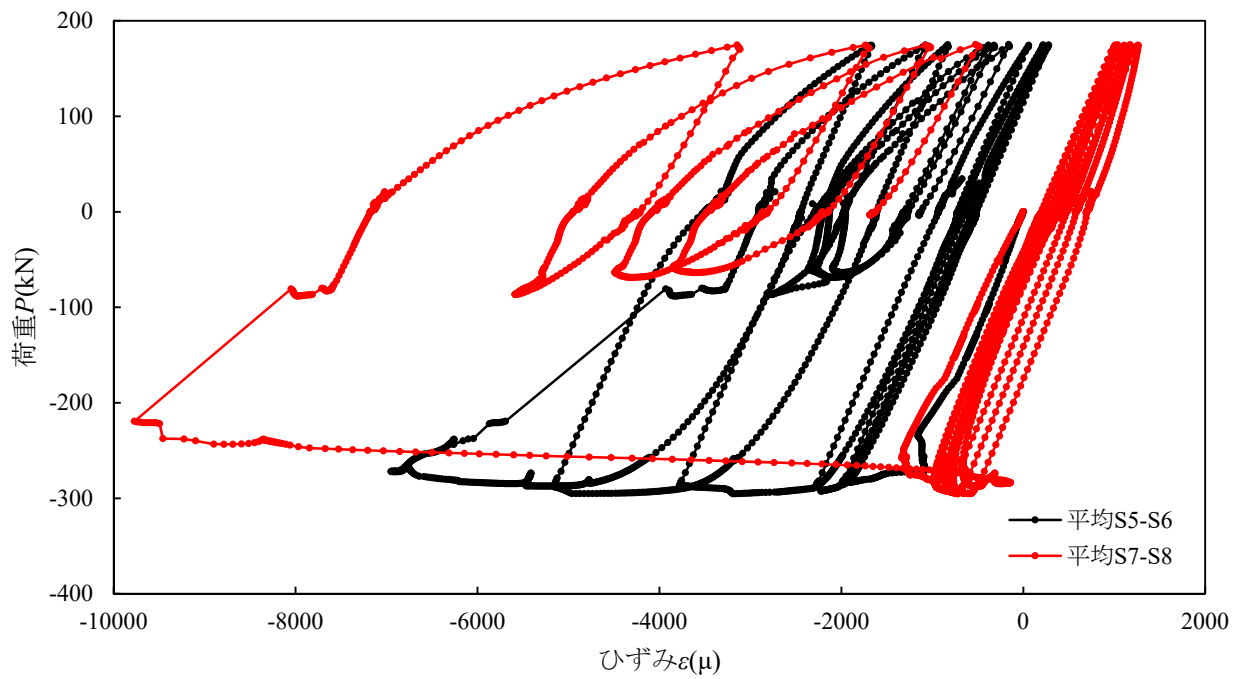


(b)平均データ (計測位置 S1-S2, S3-S4)

図-付 6.61 交番載荷試験における鉛直荷重—ひずみ関係 (試験体 C-a-P2) (鋼材部ひずみ S1~S4)

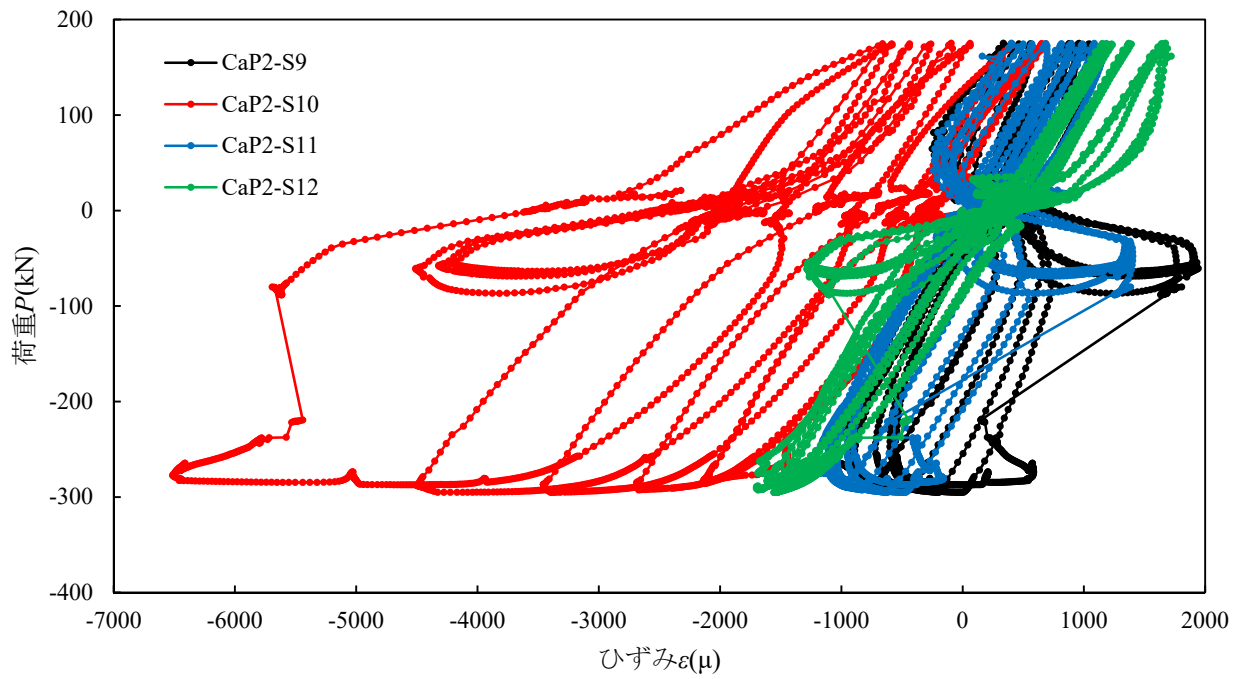


(a)計測データ (計測位置 S5~S8)

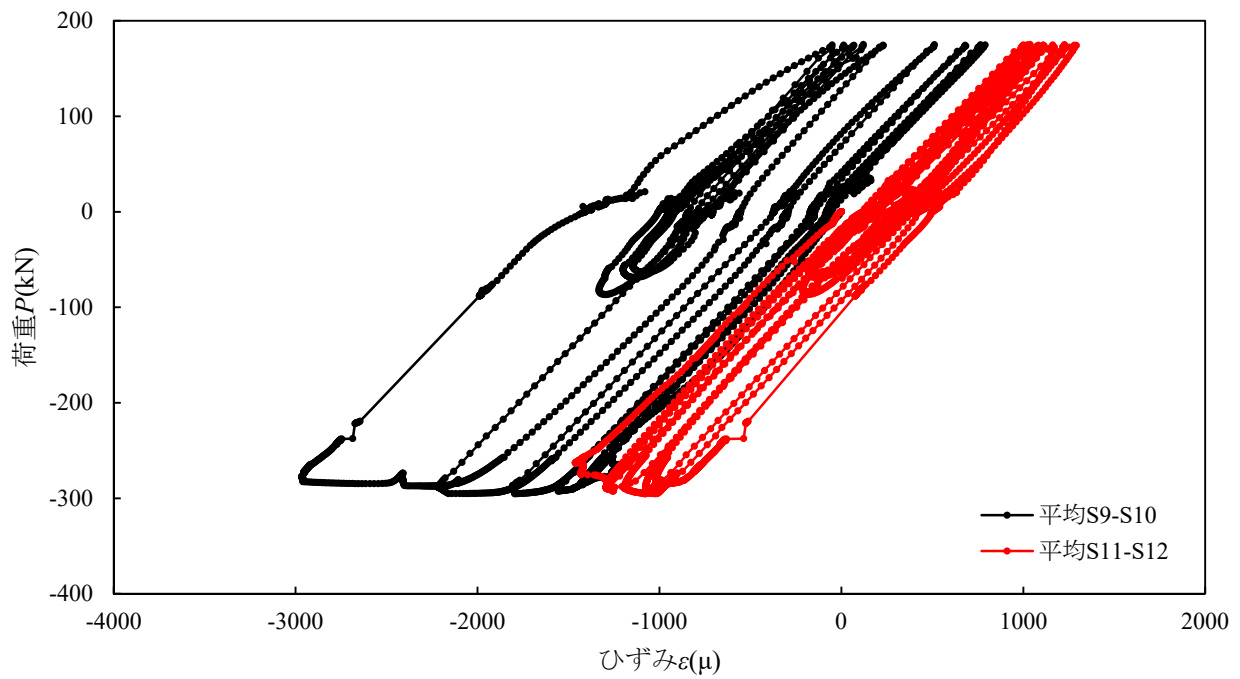


(b)平均データ (計測位置 S5-S6, S7-S8)

図-付 6.62 交番載荷試験における鉛直荷重-ひずみ関係 (試験体 C-a-P2) (鋼材部ひずみ S5~S8)

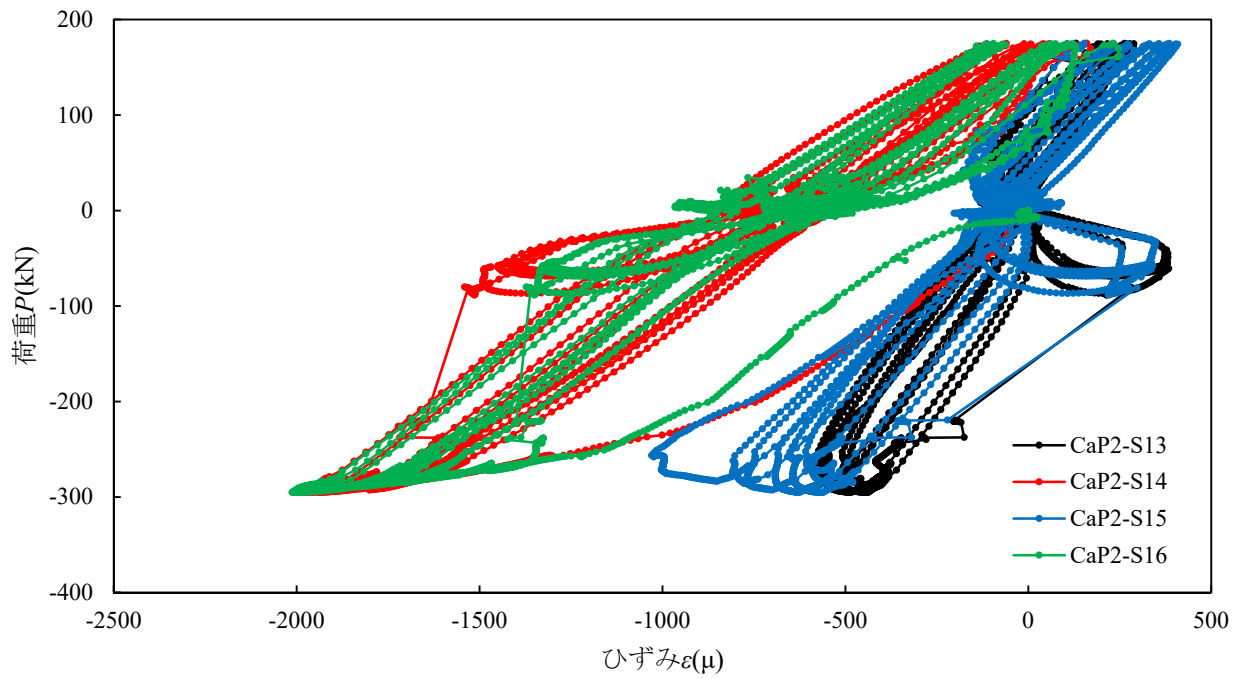


(a)計測データ (計測位置 S9~S12)

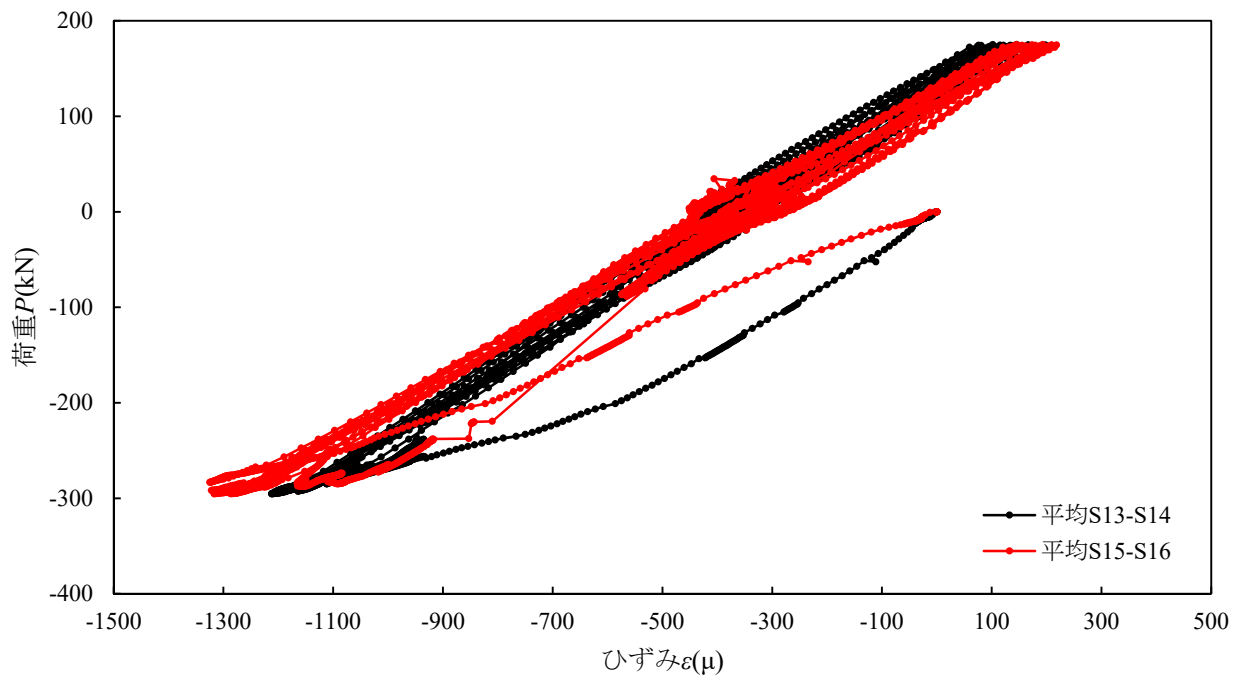


(b)平均データ (計測位置 S9-S10, S11-S12)

図-付 6.63 交番載荷試験における鉛直荷重－ひずみ関係 (試験体 C-a-P2) (鋼材部ひずみ S9~S12)

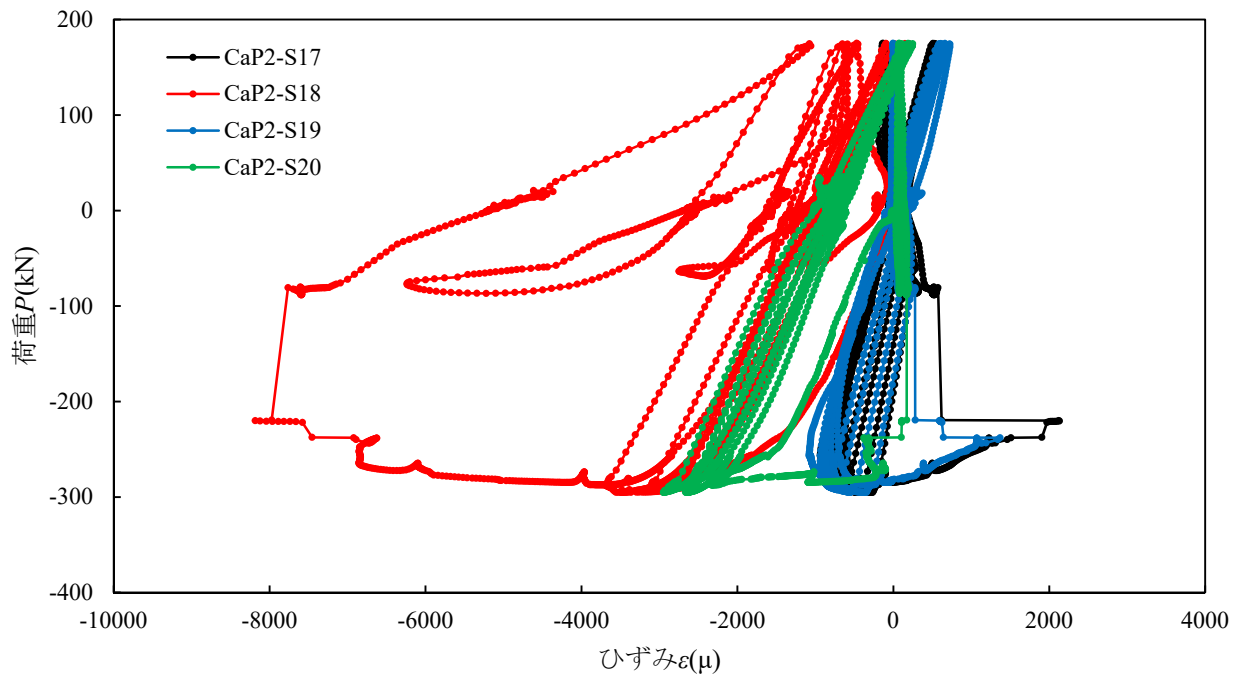


(a)計測データ (計測位置 S13~S16)

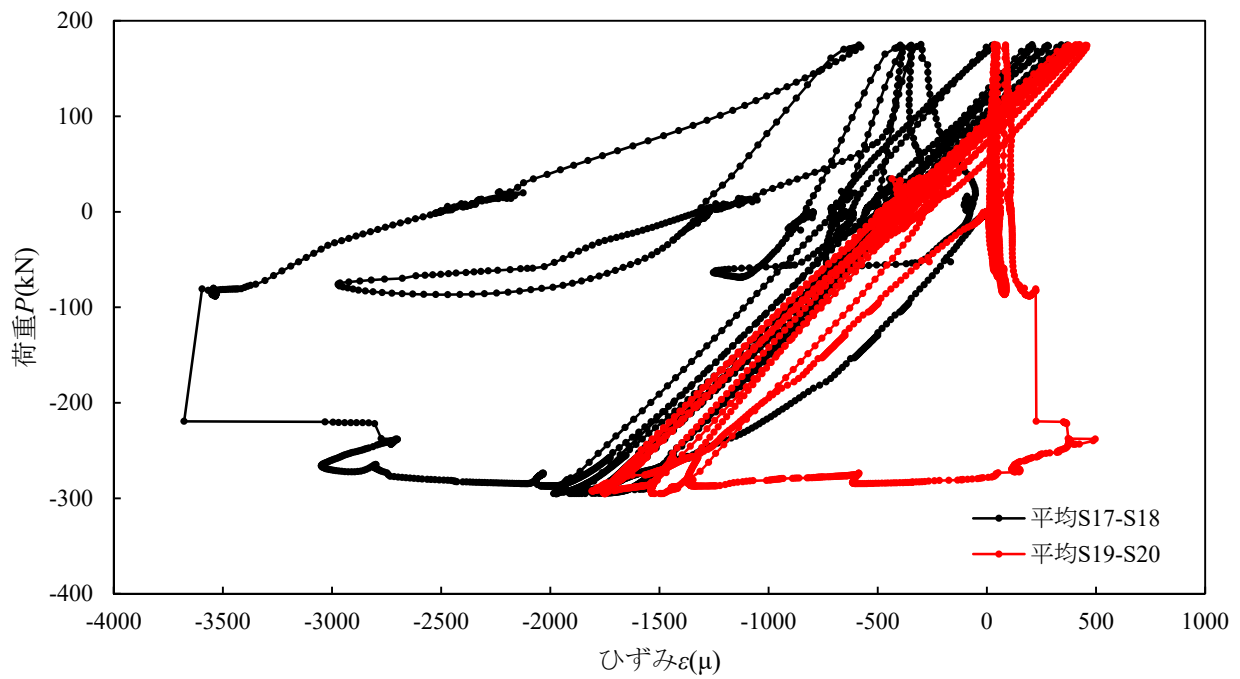


(b)平均データ (計測位置 S13-S14, S15-S16)

図-付 6.64 交番載荷試験における鉛直荷重-ひずみ関係 (試験体 C-a-P2) (CFRP 部ひずみ S13~S16)

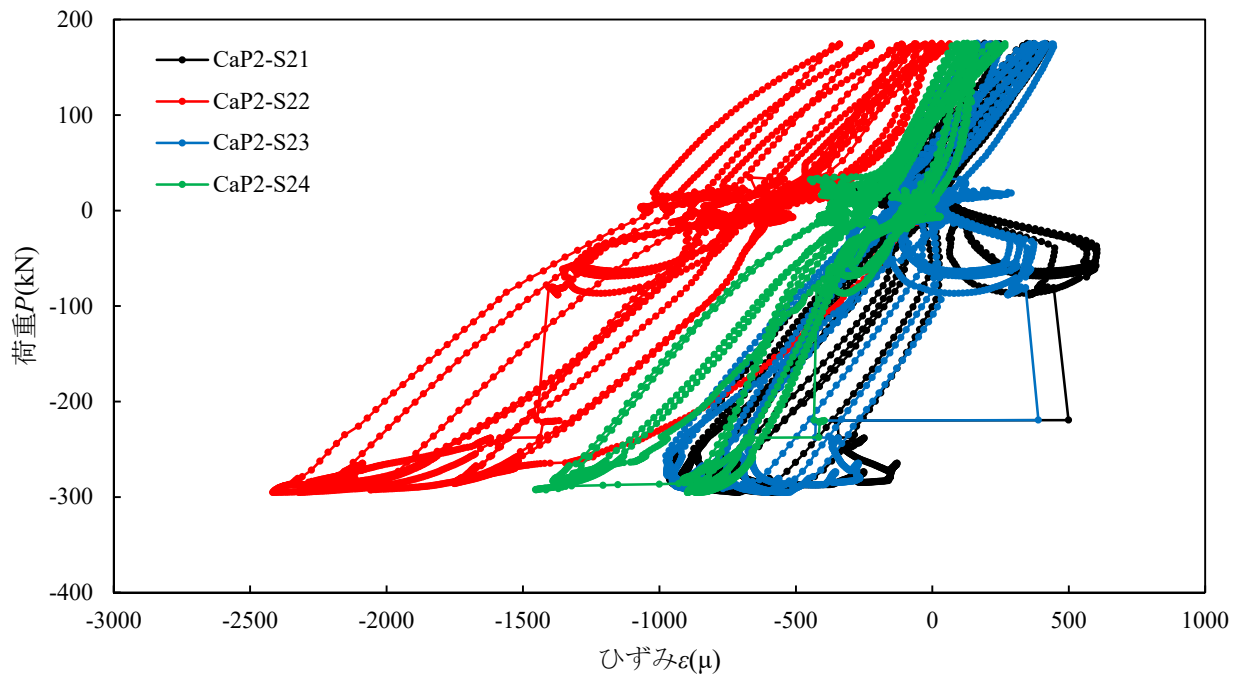


(a)計測データ (計測位置 S17~S20)

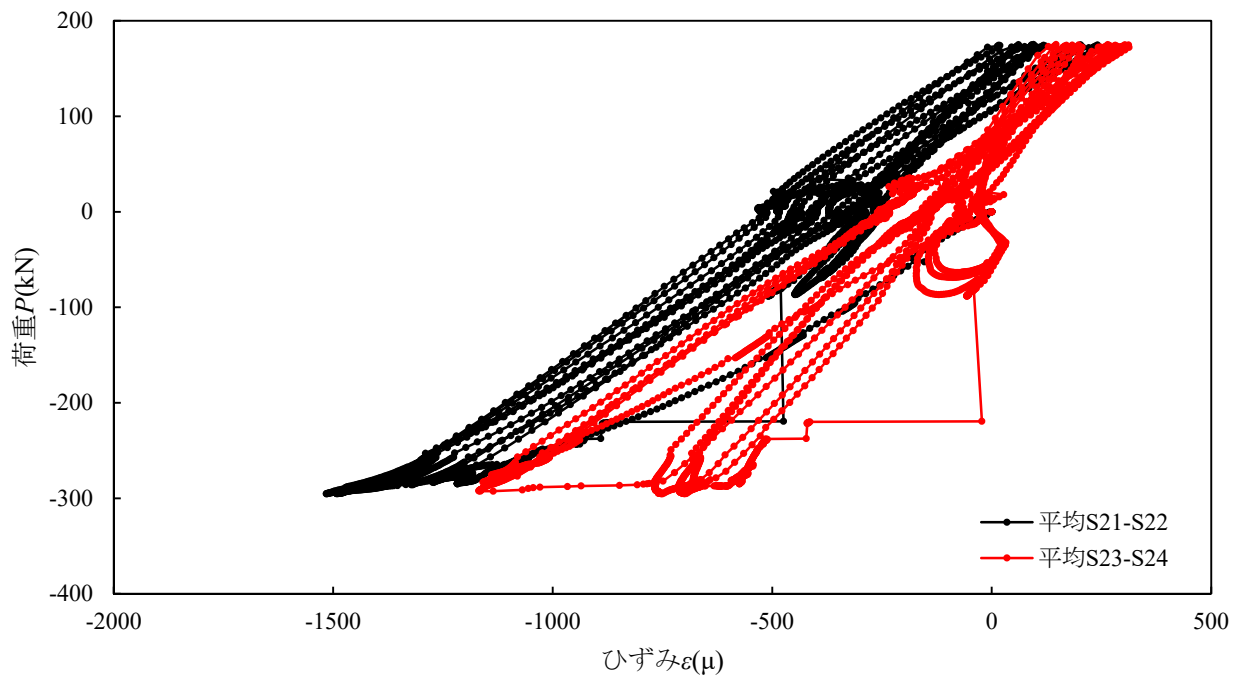


(b)平均データ (計測位置 S17-S18, S19-S20)

図-付 6.65 交番載荷試験における鉛直荷重－ひずみ関係 (試験体 C-a-P2) (CFRP 部ひずみ S17~S20)



(a)計測データ (計測位置 S21~S24)



(b)平均データ (計測位置 S21-S22, S23-S24)

図-付 6.66 交番載荷試験における鉛直荷重－ひずみ関係 (試験体 C-a-P2) (CFRP 部ひずみ S21~S24)



写真-付 6.37 交番載荷試験後の試験体（試験体 A-a-N）（その 1）



写真-付 6.38 交番載荷試験後の試験体（試験体 A-a-N）（その 2）



写真-付 6.39 交番载荷試験後の試験体（試験体 B-a-N）（その 1）



写真-付 6.40 交番载荷試験後の試験体（試験体 B-a-N）（その 2）

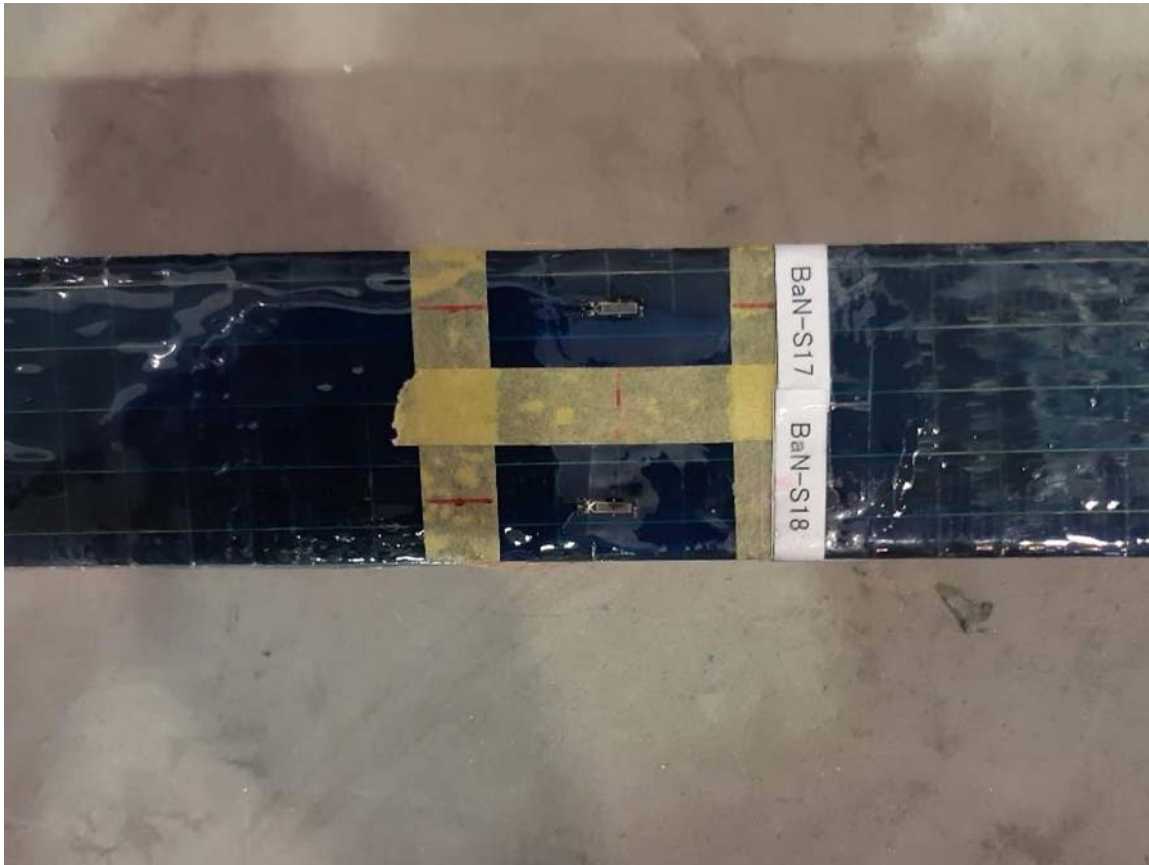


写真-付 6.41 交番载荷試験後の試験体（試験体 B-a-N）（その 3）

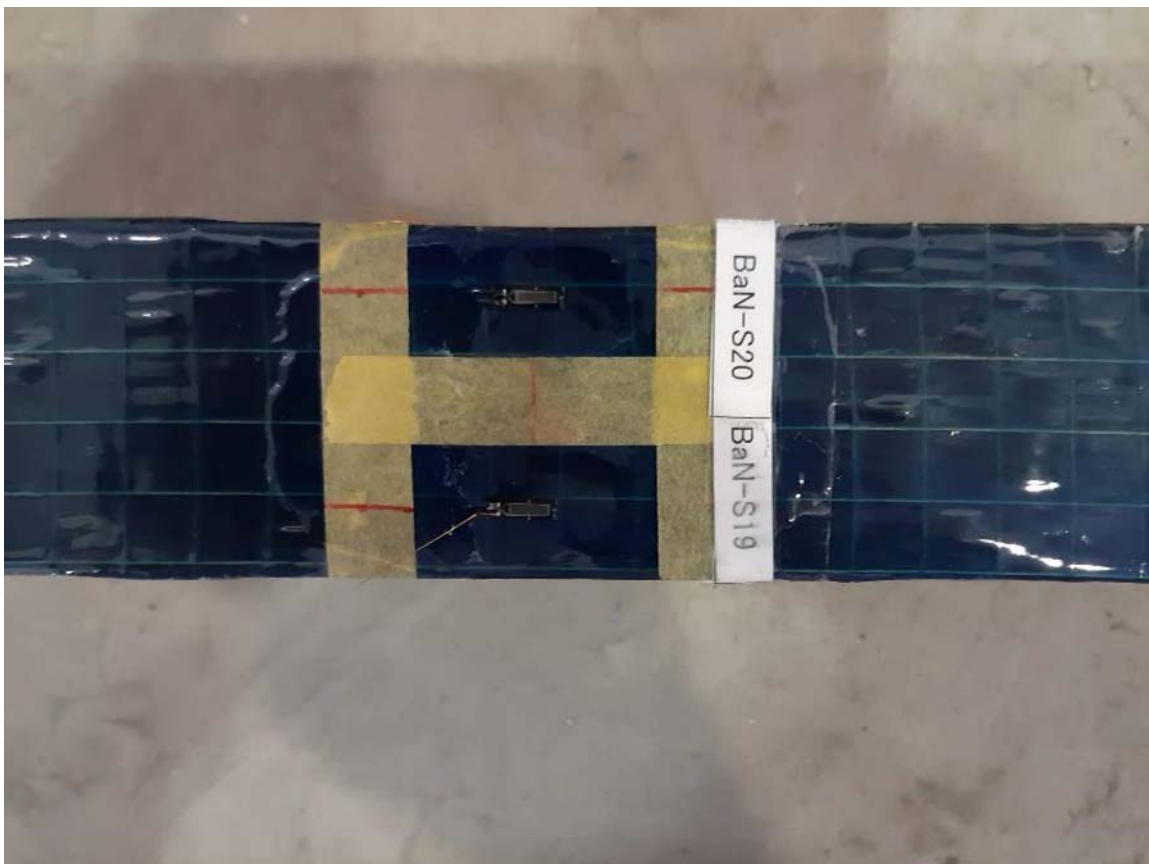


写真-付 6.42 交番载荷試験後の試験体（試験体 B-a-N）（その 4）



写真-付 6.43 交番载荷試験後の試験体 (試験体 B-a-P1) (その 1)



写真-付 6.44 交番载荷試験後の試験体 (試験体 B-a-P1) (その 2)

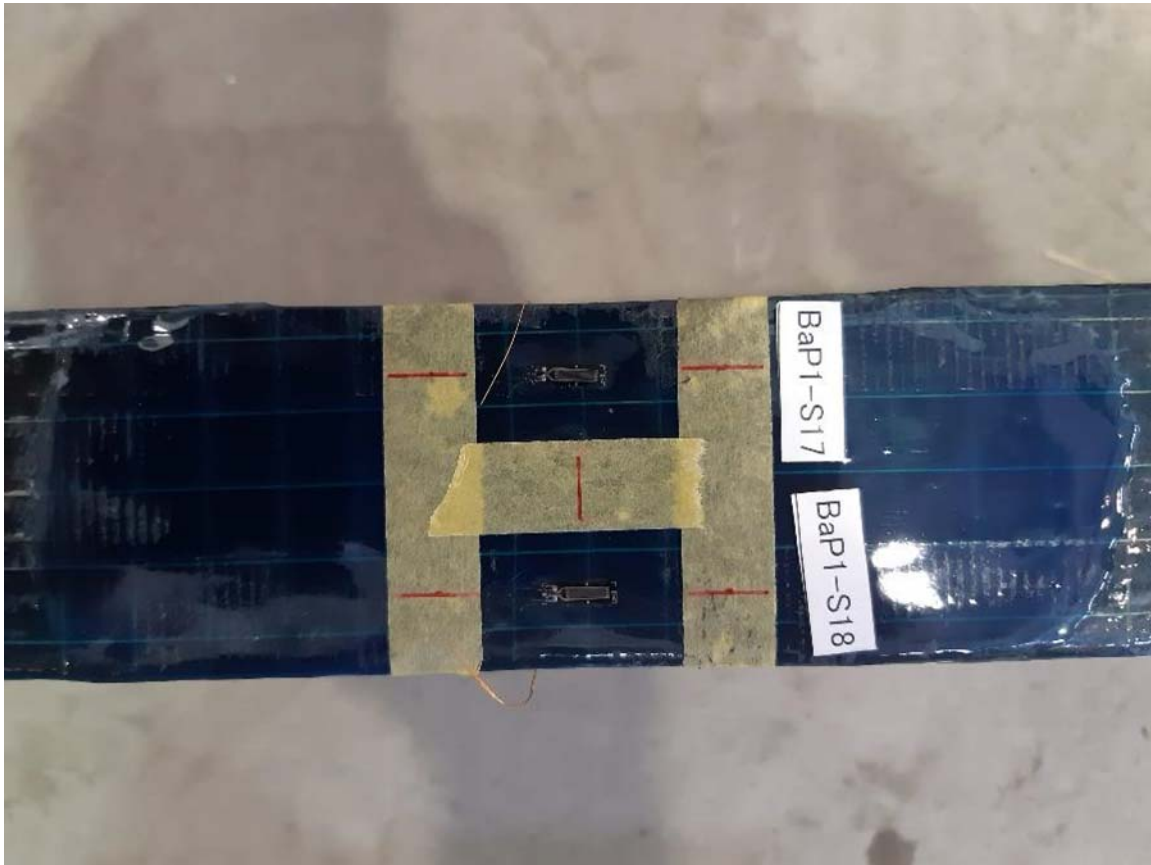


写真-付 6.45 交番载荷試験後の試験体（試験体 B-a- P1）（その 3）



写真-付 6.46 交番载荷試験後の試験体（試験体 B-a- P1）（その 4）



写真付-6.47 交番载荷試験後の試験体（試験体 B-a- P2）（その 1）



写真-付 6.48 交番载荷試験後の試験体（試験体 B-a- P2）（その 2）



写真-付 6.49 交番载荷試験後の試験体 (試験体 C-a-N) (その 1)



写真-付 6.50 交番载荷試験後の試験体 (試験体 C-a-N) (その 2)

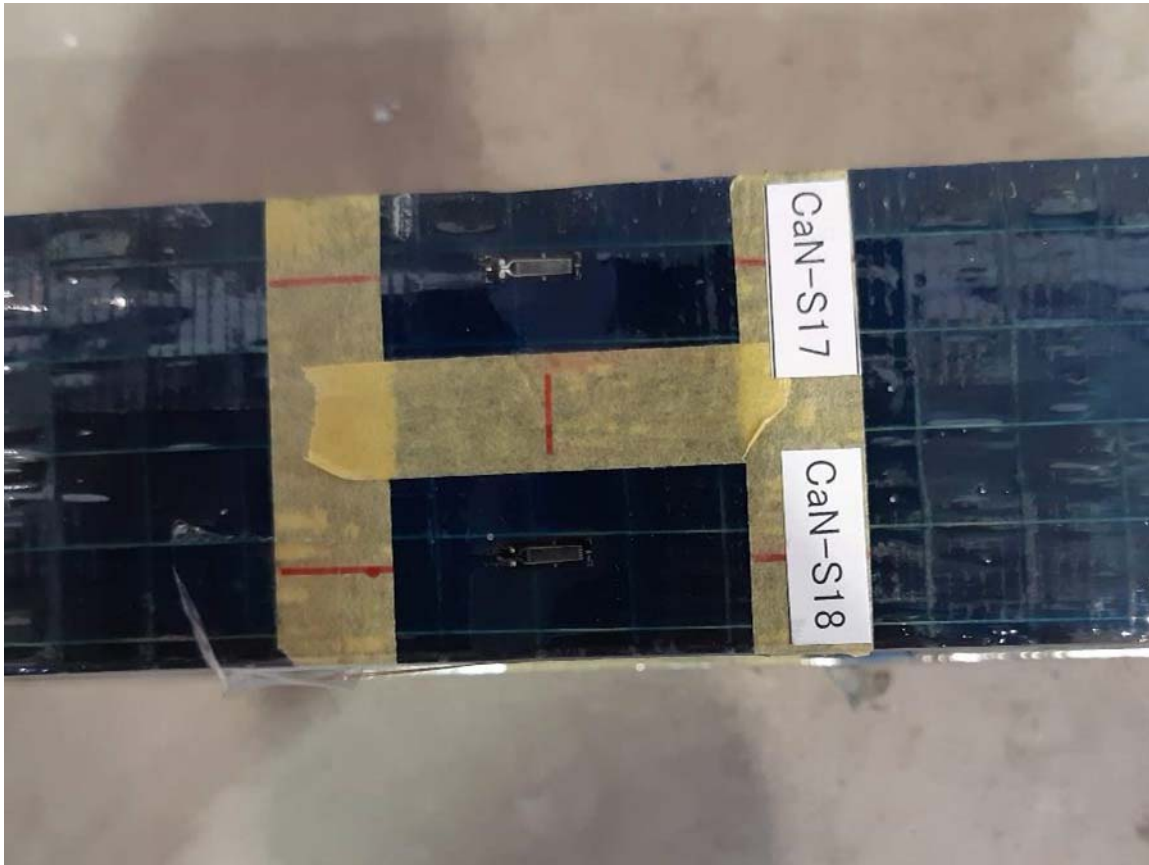


写真-付 6.51 交番载荷試験後の試験体 (試験体 C-a-N) (その 3)



写真-付 6.52 交番载荷試験後の試験体 (試験体 C-a-N) (その 4)



写真-付 6.53 交番载荷試験後の試験体（試験体 C-a-P1）（その 1）



写真-付 6.54 交番载荷試験後の試験体（試験体 C-a-P1）（その 2）



写真-付 6.55 交番載荷試験後の試験体（試験体 C-a- P1）（その 3）

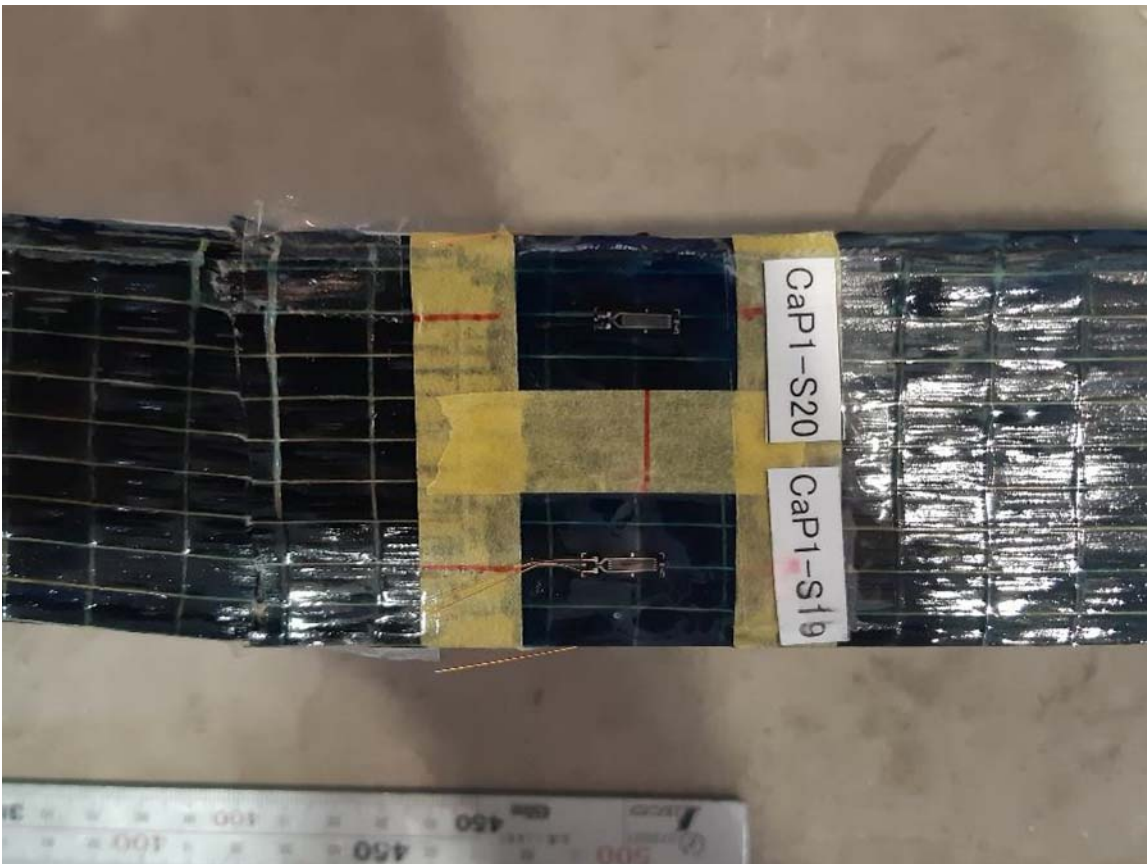


写真-付 6.56 交番載荷試験後の試験体（試験体 C-a- P1）（その 4）



写真-付 6.57 交番载荷試験後の試験体（試験体 C-a-P2）（その 1）



写真-付 6.58 交番载荷試験後の試験体（試験体 C-a-P2）（その 2）



写真-付 6.59 交番载荷試験後の試験体（試験体 C-a- P2）（その 3）



写真-付 6.60 交番载荷試験後の試験体（試験体 C-a- P2）（その 4）