

断面修復コンクリートの修復界面の形態と熱的挙動の関係

Relation between Shape and Thermal Behavior at Repaired Interface of Patched Concrete

神代康輔¹・吉富信太²・金侖美³・福山智子⁴

Kosuke Jindai, Shinta Yoshitomi, Yunmi Kim and Tomoko Fukuyama

¹立命館大学大学院 理工学研究科環境都市専攻 博士課程前期課程 (〒525-8577 滋賀県草津市野路東1-1-1)

Graduate Student, Graduate School of Science and Engineering, Ritsumeikan University

²立命館大学 理工学部建築都市デザイン学科 (〒525-8577 滋賀県草津市野路東1-1-1)

Professor, Ritsumeikan University, Dept. of Architecture and Urban Design

³立命館大学 総合科学技術研究機構 (〒525-8577 滋賀県草津市野路東1-1-1)

Research Organization of Science and Technology, Ritsumeikan University

⁴立命館大学 理工学部建築都市デザイン学科 (〒525-8577 滋賀県草津市野路東1-1-1)

Assoc. Professor, Ritsumeikan University, Dept. of Architecture and Urban Design

Recently, it has been reported that premature deterioration is observed in the patch repaired member of the RC building structures. This paper assumes that the thermal stress increases depending on a patching shape and causes premature deterioration of the patched concrete. In order to examine this assumption, experimental tests and FEM analysis are conducted and the thermal stress of the patched concrete is estimated. As a result, the thermal stress in the patched concrete is concentrated at the patching interface regardless of the patching shape. Those results support the possibility of premature redeterioration for the patched concrete member.

Keywords: RC structure, Patch repair method, Chipping, Redeterioration, Thermal stress, Polymer cement mortar

1. はじめに

近年、建設後長期間が経過した鉄筋コンクリート造（以下 RC 造）建物の維持管理が喫緊の課題となっている。歴史的建造物の再生・活用のための補強・補修に関しては、これまでに実施された様々な事例に基づいて手法の変遷や課題について検討がなされている^{1,2,3}。歴史的建造物の保存・修復において補強部を除去できる可逆性や当初材を残すことが前提となる。煉瓦造については構造躯体そのものが保存対象とみなされ手法が限定されるのに対し、RC 造建物については内外装や内部空間などの意匠が構造躯体とは切り離されて保存対象とみなされることが多く、構造躯体の価値をどう評価するかは定まっていない。RC 造の特徴として構造躯体が一体化していることがあり、躯体の保存が望まれる場合にも可逆性の確保や当初材の利用は困難と認識されている。近年では建物全体の免震化が図られる場合もあるが、費用面から劣化部を補修材で置き換える事例が多くみられる。RC 造構造物に経年劣化によって断面欠損が生じた場合、劣化部を除去して断面修復材で補填する断面修復工法を行う場合が多く、歴史的価値のある橋梁の補修などでも実際に用いられている⁴。しかし、補修後耐用年数に達する前に断面修復部分で再度ひび割れや剥離などの劣化を生じる事例がみられる⁵。建物の LCC (Life cycle cost) の観点からも補修部の再劣化メカニズムを解明し対策することが望まれる。

補修部の耐久性に関する研究としては、塩害や凍害による再劣化の研究⁶がある。断面修復コンクリートの再劣化の原因として、断面修復材選定時に熱的特性が考慮されていないことが挙げられるが、火災に伴う

熱的挙動や耐久性に関する検討はされているものの日射による熱的挙動の影響に関する検討は十分なされていない。断面修復材にはコンクリートよりも熱膨張率が大きいものがあり、環境の温度変化に伴う修復界面付近の断面修復材と躯体コンクリートの熱的挙動が異なると修復界面の剥離やひび割れの発生原因になると考えられる。

本研究では、RC造の外壁等の日射を受ける断面修復部を対象とし、再劣化を生じにくいはつり形状を明らかにするため断面修復部の形態が断面修復コンクリートの熱的挙動に及ぼす影響について検討を行う。そのため、断面修復コンクリートを模擬した試験体を対象に温度変化に伴う長さ変化を測定し、修復形態と熱応力の関係を明らかにする。本研究のように修復形態の違いが修復界面周辺の応力分布に及ぼす影響を知るためには、修復形態を細かく変更した全てのケースの試験体を作成して実験するよりも、解析を併用して検討の方向性や範囲の見通しを立てることで、実験計画の効率化が期待される。そのためには、実験における実現象を精度よく再現できる有限要素モデルの作成法の確立が望まれる。そこで本研究では、実験で得られた材料特性を与えた実験と対応する有限要素モデルを構築して解析を行い、実験結果と解析結果の比較より両者の対応関係について検討する。

2. 実験および解析による断面修復部の熱応力の検討

(1) 実験計画

実験計画を表1、コンクリートおよびポリマーセメントモルタル（以下PCM）の調合と基礎性状を表2、表3に示す。スランブ、各強度および静弾性係数等の基礎性状は、JISに記載された方法に基づいて評価する。スランブの値が一般的な普通コンクリートの示す値よりも低くなった原因として、骨材体積率を通常より大きく設計したためであると考えられる。熱膨張係数（以下CTE）は100×100×400mmの試験体を使用しダイヤルゲージ法を用いて行う。単一体および複合体の試験体の形状と計測部を図1および図2に示す。複合体試験体の寸法は400×250×50mmであり、断面修復部の形態は図2のように直線にしたType A、断面修復部を凹形にしたType B、凸形にしたType Cの計3種類とする。試験体は、各タイプの複合体と各タイプの断面修復形態に対応するコンクリートおよび断面修復材の単一体を各3体ずつ作製し、所定の養生を行ったものを用いる。

試験体中心部温度の管理は、水槽に試験体を浸漬し、水を加熱することで調整する。これは、コンクリートの乾燥収縮や測定中の急激な温度変化を防ぐためである。長さ測定は、JIS A 1129-9（コンタクトゲージ）法に基づいて行う。ゲージプラグは図1および図2に示すように界面または表層から25mm離れた部分に配置しエポキシ樹脂系接着剤を用いて取り付ける。コンタクトゲージによる測定間隔は100mmである。気温や日射の影響によりコンクリート表面部の温度が1日の間で20～60℃の範囲で変化すると報告されている⁷⁾。そこで、本実験において想定する温度変化を60℃から20℃の範囲とする。水温は60℃から開始し一定温度で4～5時間おいてから長さを測定し、10℃間隔で温度を変化させて同じ手順を繰り返す。測定された長さの変化量をもとの標点距離で除してひずみを計算し、温度—ひずみ関係を得る。なお、ひずみについては、3体の試験体の平均値を用いる。

表1 実験計画

断面修復材	修復部形態	測定温度	測定項目	測定部	
				単一体	複合体
PCM	Type A Type B Type C	20～60℃ (10℃間隔)	温度 ひずみ	界面 (図1 ①) 表層 (図1 ⑤)	界面 (図2 ①) 表層 (図2 ⑤)

※PCM：ポリマーセメントモルタル

表2 コンクリートの調合と基礎性状

W/C (%)	s/a (%)	単位質量(kg/m ³)				Air (%)	スランブ (mm)	強度(N/mm ²)			静弾性係数 (kN/mm ²)	CTE (×10 ⁻⁶ /°C)
		W	C	S	G			圧縮	引張	曲げ		
40	45	190	475	772	920	1	65	61	3.7	10.5	35.25	7.10

※CTE：熱膨張係数，C：セメント（普通ポルトランドセメント，密度：3.16g/cm³），S：細骨材（表乾密度：2.64g/cm³），G：粗骨材（表乾密度：2.56g/cm³）

表3 ポリマーセメントモルタルの調査と基礎性状

質量比(kg)		プライマー (kg/m ²)	強度(N/mm ²)			付着強度 (N/mm ²)	静弾性係数 (kN/mm ²)	CTE (×10 ⁻⁶ /°C)
主剤	硬化剤		圧縮	引張	曲げ			
4	1	0.30-0.50	26.08	2.11	5.85	1.96	10.37	10.267

※主材：ビニロン繊維・軽量骨材配合プレセミックセメント

硬化剤：カチオン性SBR樹脂

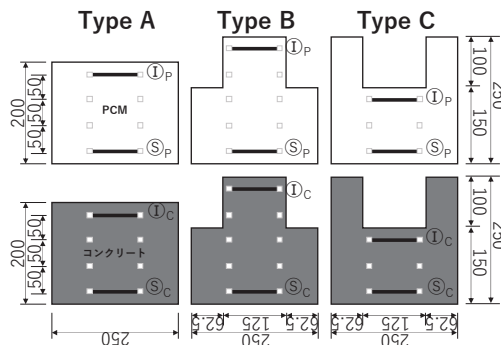


図1 試験体測定部 (単一体)

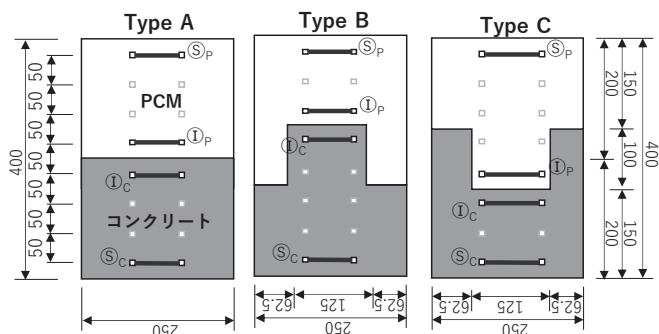


図2 試験体測定部 (複合体)

(2) 解析手法

解析モデルの妥当性を検討するためにMidas FEAを用いて有限要素解析 (FEM解析) を行い、実験結果と解析結果を比較する。精度の良い解析が可能になれば、一般的な梁・柱のモデルに応用することで設計の段階で再劣化を考慮に入れた設計の実現が期待できる。

解析モデルの寸法は実験に用いた試験体と同じとする。本解析で使用する各材料における材料特性を表4に示す。材料特性のうち静弾性係数、ポアソン比、CTEは実験により得られたコンクリートおよび断面修復材 (PCM) の値を用いる。また、熱伝導率、比熱については今回の実験では調べていないため参考文献⁸⁾を参照する。実験は短期間で行うためクリープや乾燥収縮の影響は小さいものと考え、解析では考慮しない。

解析条件として、変位の拘束条件は図3の黒丸部分について全方位拘束、破線部分の2辺についてZ軸方向のみ拘束する。温度条件は初期温度を20°Cとして実験同様60°Cから20°Cの範囲で10°Cごとに解析を行う。

表4 解析パラメータ

材料	静弾性係数 (kN/mm ²)	ポアソン比	CTE (×10 ⁻⁶ /°C)	質量密度 (kg/m ³)	熱伝導率 (kJ/m·h·K)	比熱 (kJ/kg·°C)
コンクリート	35.25	0.14	7.097	2350	9.2	1.05
PCM	10.37	0.16	10.267	1500	4.32	1.75

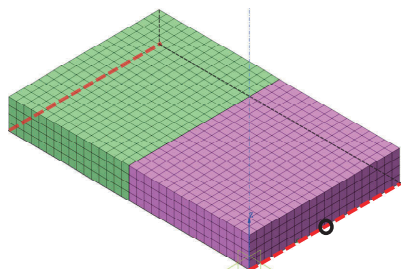


図3 モデル詳細

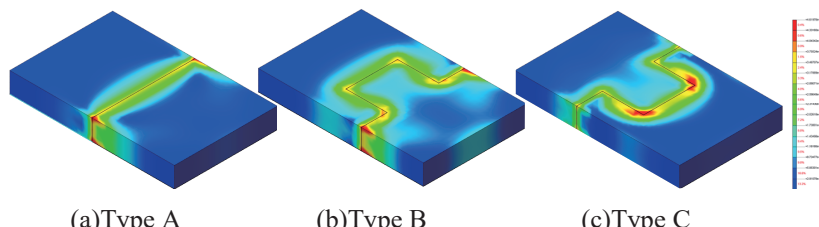


図4 熱応力分布 (60°C) (上部: PCM 下部: コンクリート)

3. 結果と考察

(1) 解析による熱応力の結果

解析による3タイプの形状ごとの熱応力分布の結果を図4に示す。図より、いずれも修復界面に応力が集中し、コンクリートと断面修復材の両側に広がっていることが確認できる。Type Aの場合は、修復界面の中心部は両側に均等に分布しているが利用端部はコンクリート側の応力が大きくなっている（図4の赤部）。これは、修復界面においてコンクリートとPCMでひずみが同じであっても、PCMより静弾性係数が大きいコンクリートの応力が大きくなるためである。Type BとType Cのように修復界面が角張っている場合、Type Aより修復界面の付着部の表面積が大きいため、修復界面を中心として広い範囲に応力が発生する。なお、Type BとType Cも修復界面の各部に熱応力が大きくなっているが、Type Cは特にコンクリート側に大きな熱応力が生じている。これは、Type Bにおいては熱膨張の大きなPCMがコンクリートの外側に対称に配置されているため、コンクリートには曲げが生じないのに対し、Type Cにおいては熱膨張の大きなPCMが内側にあり、外側のコンクリートは外側に押し広げられて付加的な曲げが生じるためである。また、異種材料接合における応力集中は、材料の静弾性係数、せん断弾性係数、ポアソン比の関係で決まるDundursの複合パラメータ⁹⁾により説明することができる。しかし、本研究で検討している複合体（Type A, B, C）はすべて同じ材料を使用していることから、断面修復部の修復形態が応力に影響していることがわかる。

この結果から、熱応力の発生において、材料の物性（静弾性係数、CTEなど）が異なり両材の界面には応力集中が発生するため、剥離やひび割れが生じる可能性が高いといえる。どのような損傷が生じるかは実験結果との比較を通じて材料強度や応力の方向を考慮したうえでさらに検討する必要がある。

(2) 単一体の実験および解析結果の温度—ひずみ

図5にType Aの単一体試験体の温度—ひずみ関係を表層部と界面において比較した図を示す。(a), (b)図はコンクリートとPCMの実測値、(c), (d)図はコンクリートとPCMの解析値である。図5(c), (d)より解析では温度上昇に伴いひずみが比例的に増加することがわかる。単一体では表層部と界面の形状は同じでコンクリートとPCMのお互いの拘束がないため、表層部と界面でのひずみが等しくなっている。またコンクリートの方がPCMよりひずみが小さいこともわかる。これは表2, 3よりCTEが3割程度異なっていることに対応していると考えられる。

実測についても図5(a), (b)より解析と同様の傾向が見られ、表層部と界面でのひずみが等しく、温度上昇に伴いひずみが比例的に増加し、コンクリートの方がPCMよりひずみが小さい。定性的には実測と解析は対応しているといえるが、定量的には解析値は測定値より約2倍大きい。ほとんどのケースで共通して解析の方が実験よりもひずみが約2倍になることが確認されたため、実験に比べて解析で用いた静弾性係数が小さいか、あるいはCTEが大きいことが要因として考えられる。静弾性係数についてはひずみゲージを用いた要素実験より評価したものであり、実験あるいは解析で生じる500 μ 程度のひずみでおおむね線形範囲であることを確認しており、2倍もの誤差を生じた主要因ではないと考えられる。もう一つの要因としてCTEのばらつきが考えられる。CTEの測定はコンクリートおよびPCMについて、 $\square 100 \times 400 \text{mm}$ の試験体を用いて試験体全体の伸縮に基づいて評価する。その際、温度分布やひずみの分布が試験体全体において一様であると仮定しているが、実験時に少なくとも試験体内部と表層部では温度が異なることが確認されており、内部と表層部または端部と中心部では温度やひずみの分布が異なる可能性がある。その場合、CTE測定用試験体と、図1, 2の試験体と形状が異なるためひずみに違いが生じる可能性がある。これまでに、CTEの測定方法とFEM解析で与えるCTEとの関連に関する検討は十分にはなされておらず、今回の計測では十分な考察も困難である。今後、CTE計測用の試験体を再現したFEMモデルを作成して熱応力解析を実施することで、現状のCTE計測法の妥当性についてさらに検討する必要がある。

図5と同様に、Type Bの結果を図6に、Type Cの結果を図7に示す。(c), (d)図より解析ではType A, B, Cの形状の違いによるひずみの違いはほとんど見られないことがわかる。図6, 7の(a), (b)図より、実測についても表層部と界面でのひずみが等しく、温度上昇に伴いひずみが比例的に増加するという傾向は確認できた。定量的にはType A, B, Cの形状の違いによってひずみの値にばらつきがみられる。

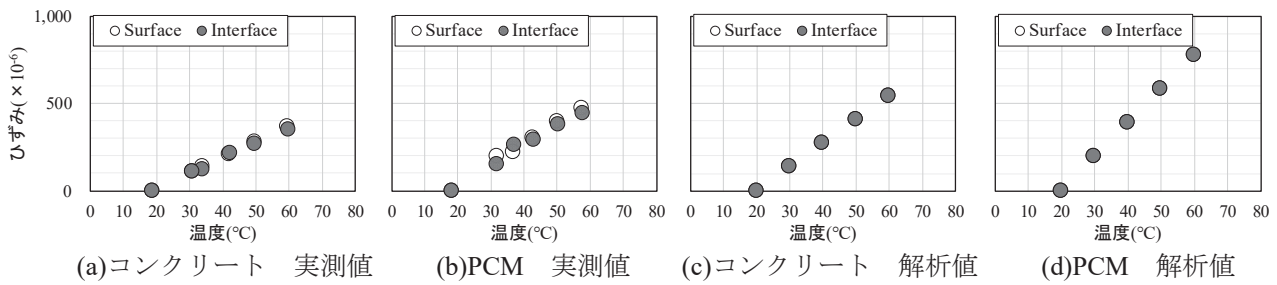


図5 単一体の温度—ひずみ関係 (Type A)

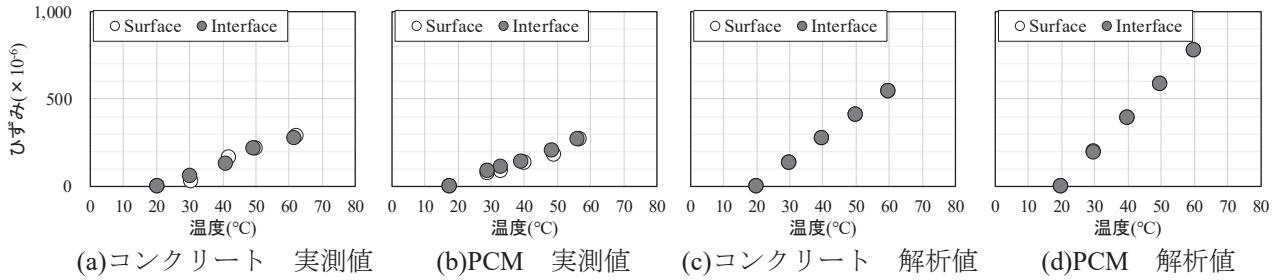


図6 単一体の温度—ひずみ関係 (Type B)

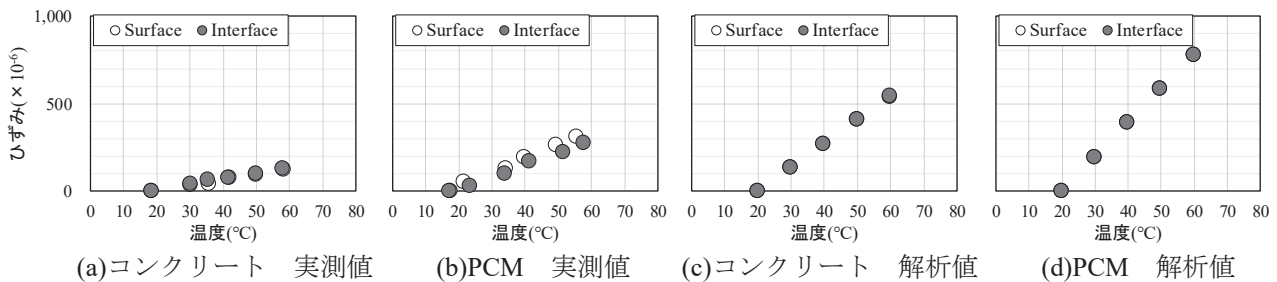


図7 単一体の温度—ひずみ関係 (Type C)

(3) 複合体の実験および解析結果の温度—ひずみ

図8にType Aの複合体試験体の温度—ひずみ関係を表層部と界面において比較した図を示す。(a), (b)図はコンクリートとPCMの実測値, (c), (d)図はコンクリートとPCMの解析値である。解析値については図(c), (d)より、複合体の場合も温度—ひずみ変化は、温度上昇に伴いひずみが比例的に増加することがわかる。一方、単一体と異なり複合体では修復界面におけるコンクリートによる拘束が生じるため、ひずみの大小関係は、PCMの表層部>PCMの界面部>コンクリートの界面部>コンクリートの表層部となっている。ひずみの大きなPCM側をひずみの小さなコンクリート側が拘束していることがわかる。

実測についても図(a), (b)より、温度変化とひずみ変化の比例関係が確認され、コンクリートは表層部のひずみが小さく、PCMは表層部のひずみ大きいという解析と定性的に対応した結果が得られた。定量的には単一体と同様に、解析のひずみは実測の2倍程度であるが、コンクリート界面部のひずみの方がPCM界面部のひずみより大きくなっている点は解析と異なる。

図8と同様に、Type Bの結果を図9に、Type Cの結果を図10に示す。解析値については、図(c), (d)よりType BとCの温度—ひずみ関係は定性的にはType Aと対応しており、定量的にはType Bが表層部と界面部の差が小さくなっている。Type BはCTEの大きなPCMでコンクリートを囲む形状になっており、結果的にコンクリートのひずみが抑えられていると考えられる。ひび割れ発生には引張応力が影響すると考えられるのでより詳細な熱応力の検討が必要である。

一方、実測値については図(a), (b)より温度—ひずみ変化では、特にコンクリート側では各測定部による大小関係が解析と逆になっている。これはコンクリートのCTEには骨材が大きく影響することが要因となっていると考えられる。コンクリート中の骨材の分布に偏りがある場合その偏りが原因でCTEにもばらつきが発生する。しかし、解析は入力した材料特性がモデル上に均等に反映される。また、コンクリートに比べてPCMの結果が解析と同じ傾向となっているのは粗骨材が含まれていないことで骨材分布のばらつきが起こら

ないからである。つまり、骨材の分布の偏りによってコンクリートの実験結果の値が解析結果とちがう傾向を示すことになったと考えられる。なお、解析値による温度—ひずみの関係に比べて温度上昇に従うひずみの大きさが抑えられていることが確認できる。これは、試験体の形状による変形の抑制が解析では考慮されていないからであり、温度—ひずみ関係が解析では直線になっているが、実験では曲線になっていることから示唆される。

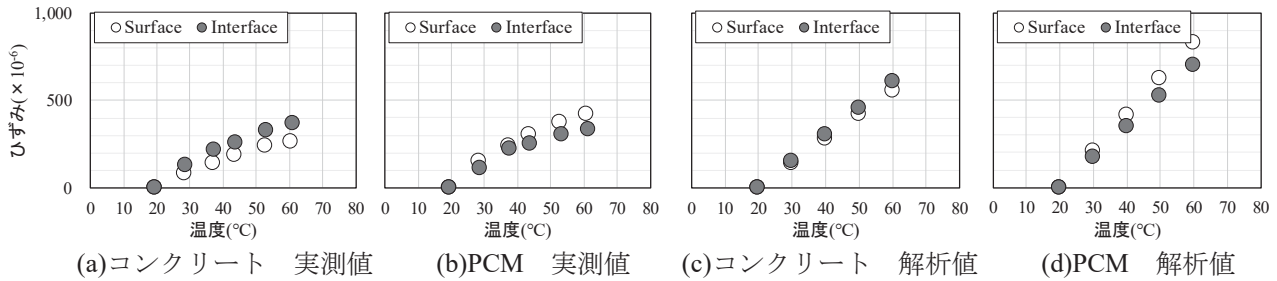


図8 複合体の温度—ひずみ関係 (Type A)

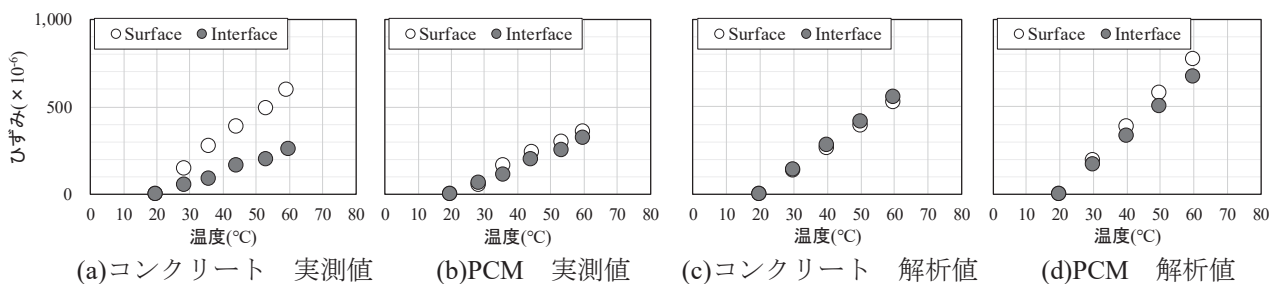


図9 複合体の温度—ひずみ関係 (Type B)

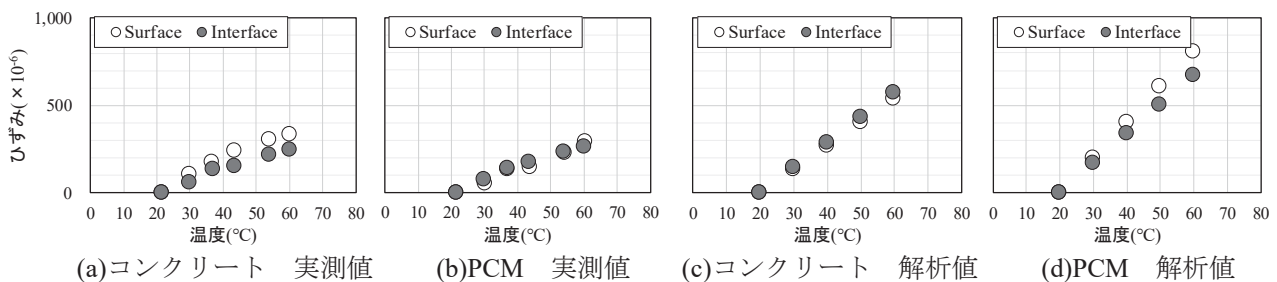


図10 複合体の温度—ひずみ関係 (Type C)

(4) 実験結果と解析結果における相関関係比較と考察

本節では (2), (3) 節の結果を、実測値と解析値を直接的に比較して考察する。図11, 12に20°C時点のひずみを0とした実測ひずみと解析によるひずみの相関関係を示す。実測時の温度にはばらつきがあるため、線形補間法で基準温度時のひずみを計算した。温度はシンボルの大きさを示す。実測値と解析値が同一であればグラフの対角線上にプロットされるが、前述のように実測のひずみ解析値の半分程度なのでプロットは全体としてグラフの下部にある。実験と解析で対応する諸元を用いているにもかかわらず定量的な差が見られた要因として、CTE評価のための試験体と図1の試験体の違いや、試験体のばらつきが考えられる。このばらつきは、(3)でも記載したように試験体中の骨材分布の偏りが原因となっていると考えられる。解析に用いるCTEと実測のCTEとの関連についてはさらなる検討が必要である。また解析において、参考文献を参照して与えた諸元も実験値を別途行って求めることで精度が向上すると考えられる。

単一体について、解析結果より補修形状の影響を受けずに3タイプいずれもひずみ値がほぼ等しいが、実測ひずみは試験体の種類や測定部によりばらつきが確認された。実測では全般にType Aのひずみが大きく、Type B, Cのひずみが小さい。コンクリートの場合は、前述のとおり各試験体および測定部それぞれの異なる骨材分布が原因であると考えられる。

複合体について、コンクリートとPCMのひずみ差が表層部より界面で小さくなる傾向が、解析と実験で確

認でき、界面での材料間の拘束の影響を実験と解析で評価できていているといえる。補修形状タイプの違いについては、ひずみの解析値はどの測定値においてもType A>Type C>Type Bとなり、形態ごとに異なる挙動を示していることが確認できる。しかしながら、解析で予想される補修形状ごとの差は小さく、ばらつきの大きな実験で補修形状の差を適切に評価するためには、実験方法の検討が必要である。

表層と界面の差や、コンクリートとPCMの差の方が相対的に大きな傾向は実験で把握できたが、補修形態の違いについては解析値と測定値がかなり異なる結果を示している部分が見られる。この原因として対象とするひずみが小さいため、加熱に伴う使用器具の不具合や測定作業によるばらつき等が考えられ、試験体を打設する段階で埋め込み式のひずみ計を埋め込むなど、人力ではなく機械的にひずみや温度を計測することで改善が期待される。

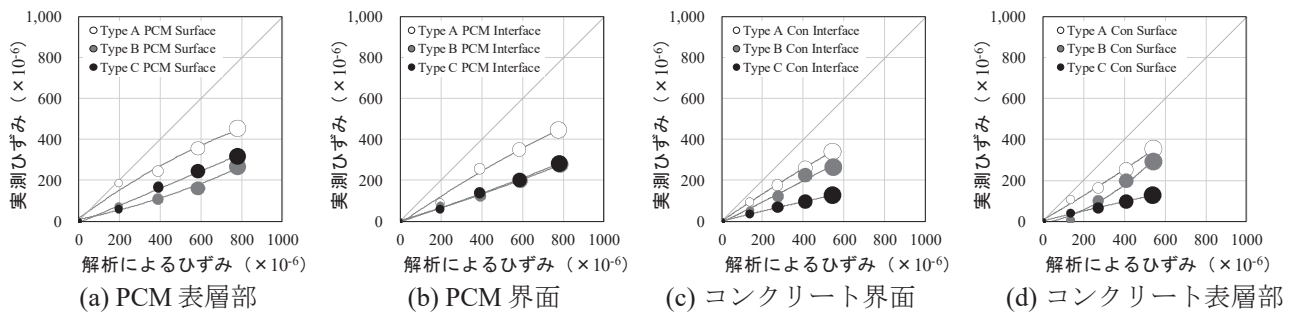


図 11 単一体の実測ひずみ—解析ひずみ

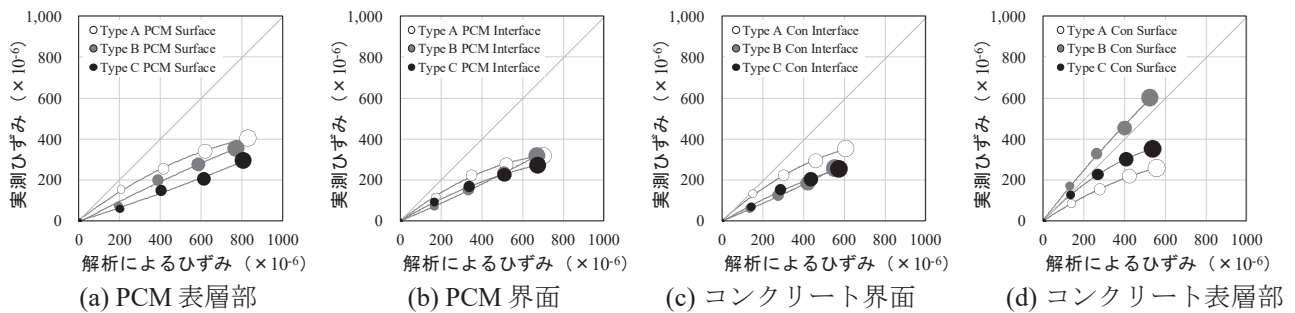


図 12 複合体の実測ひずみ—解析ひずみ

4. まとめ

断面修復工法を行ったコンクリート部材の修復形態が修復界面の応力に及ぼす影響について、実験および有限要素解析に基づいて検討した。得られた結果は以下のようにまとめられる。

- (1) 模擬実験や有限要素解析を行うことで、断面修復部の修復形態の違いが温度変化に及ぼす影響について検討した。
- (2) 実験の結果、温度に比例したひずみが計測され、またPCMとコンクリートのひずみの違いや、修復形態によるひずみ分布の差がみられた。
- (3) 実験で得られた材料特性を与えた有限要素解析の結果から、静弾性係数の大きなコンクリートの方が応力の負担が大きく、熱膨張の大きな修復材が内部にある修復形態での応力集中が大きくなった。
- (4) 実験で得られたひずみと比べて、有限要素解析のひずみが2倍程度大きいものの解析によるひずみと実測によるひずみに概ね比例関係があることがわかる。実験と解析で定量的・定性的に対応しない部分については、ひずみの温度変化の計測方法の精度向上や解析に用いる材料特性の計測法の妥当性検討や解析条件の改善等の課題あることがわかった。

参考文献

- 1) 林章二, 福和伸夫, 松波秀子: 歴史的建造物の保存修復事例に基づく保存方針と耐震補強方法の対応関係の分析, 構造工学論文集, 日本建築学会, Vol.57B, pp.653-664, 2011.

- 2) 田中和幸, 羽生修二: 近代日本のRC造建築における修復技術と理論に関する研究 - ヴェニス憲章にみる構造補強の区別について -, 日本建築学会計画系論文集, Vol.76, No.660, pp.490-502, 2011.
- 3) 国土技術政策総合研究所: 歴史的文化的価値を踏まえた高齢建造物の合理的な再生・活用技術の開発, 国総研プロジェクト研究報告, 第24号, 2009.
- 4) 市川紀一: 近代化遺産の補修・補強の課題 (コンクリート橋梁を対象に), 土木学会第56回年次学術講演会, pp.250-251, 2001.
- 5) 星野富夫: 劣化した鉄筋コンクリート建造物の補修工法に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.47, No.6, pp.28-35, 2009.
- 6) JCI北海道支部: 積雪寒冷地におけるコンクリート補修工法の設計施工に関する研究委員会報告書, pp.1-54, 2016.
- 7) 地濃茂雄: 日射に変えて赤外線を照射した場合のコンクリート表面の温度上昇, コンクリート工学年次論文集, Vol.30, No.2, pp.331-336, 2008.
- 8) 土木学会: 2017年制定 コンクリート標準示方書 [設計編], p.44, 2017.
- 9) 野田尚秋, 堀田源治, 佐野義一: 異種接合材の材料力学と応力集中, コロナ社, 2017.
- 10) 金侖美: 断面修復コンクリートの早期劣化に関する研究, 北海道大学博士論文, pp.1-99, 2018.