

景観に配慮した土木構造物における補強工法に関する基礎的な研究

Counter measure for the reinforcement of modern cultural heritage structures considering the scenery

原田紹臣¹・藤澤健一²

Norio Harada and Kenichi Fujisawa

¹三井共同建設コンサルタント株式会社 (〒552-0007 大阪市港区弁天1丁目2番1-1000号)

Mitsui Consultants Co., Ltd.

²日本ジッコウ株式会社 (〒651-2116 神戸市西区南別府1-14-6)

Nippon Jikkou Co., Ltd.

It is important for future generation to continue keeping the modern cultural structure which was made by several materials, e.g. brick, concrete. For effective countermeasures, it is necessary to consider the load capacity and work ability of material joint: i.e. concrete joints. It has been proposed that fiber-reinforced polymer cement replace conventional construction techniques in concrete joints. We compared the characteristics of this countermeasure with countermeasures such as chipping in laboratory experiments. The results suggested that fiber-reinforced polymer cement is appropriate for the concrete joints of reinforcement countermeasures.

Keywords : *antiseismic reinforcement, concrete joint, cultural heritage, experiments,*

1. はじめに

近年、明治以降に構築された歴史的土木構造物（例えば、アーチ橋：写真1）が重要文化財や登録有形文化財等として指定を受けており、今後はこれらの構造物を保存するために必要な補修や補強の手法を確立することが求められている。なお、近代（明治・大正・昭和）期における構造物は、それ以前の伝統的な木造構造物と異なる材料（例えば、図1）、構造および構工法によって構築されているものがあり、それらの特性に応じた効果的な対策が望まれる。

これまで、煉瓦やコンクリート等による一般的な構造物の材料劣化や耐震化等に対する補強については、一般的にコンクリート増厚や鉄板巻き立てにより、補強されてきた²⁾。しかしながら、今後もその構造を将



写真1 文化財に指定された碓氷峠めがね橋

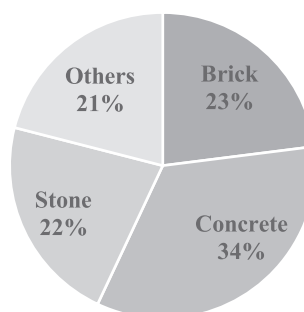


図1 重要文化財（土木構造物）の構造別種別²⁾

来に亘って保存すべき価値のある構造物については、景観保全の観点より内部的な補強工法による対策が望まれる²⁾。また、煉瓦造等における軽微な補修方法として、特殊材料を活用した注入剤による部分的な補修工法等が提案されている³⁾。一方、有限要素法等を用いて、煉瓦アーチ橋等の組積構造における煉瓦や目地材の強度特性を考慮した変形や応力伝達について解析する技術が提案⁴⁾されており、今後、材料間の境界面における強度特性等を考慮した高度な解析に基づく補強対策が期待される。その際、耐震化やコンクリート剥落等の補修・補強対策に際して、煉瓦とモルタルや新旧コンクリート間等に存在する境界面（打ち継ぎ目や目地）における処理が必要となる。一般的に、打ち継ぎや目地処理に関しては、材料間の一体化を目的とした境界面における十分な接着処理^{例えば、5)}が必要であると考えられる。

目地等の境界面処理に代表されるコンクリート打継ぎ時の新旧コンクリート接着面における継目処理は、一般的に機械的方法、物理的方法及び化学的方法に分類される⁶⁾。機械的方法に代表されるチップング処理に関して、藤倉・青景⁷⁾はコンクリート切剖面における処理方法の違いが打継ぎ後の付着強度に影響を及ぼすことを実験により明らかにしている。また、松田ら⁸⁾は接着面におけるコンクリート表面粗度の定量化と付着強度特性の関係性について提案している。ただし、これまで一般的に示されている考え方^{例えば、9)、10)、11)、12)}において、その処理方法（管理規定）等の整合が図られていないとともに、凹凸の処理密度等に関した詳細な内容が明示されていない。一方、チップング処理についてはこれまで多くの実績を保有しているが、機械を用いて打撃等の衝撃を与える施工となるため、施工時間の長期化や老朽化した重要な構造物における処理面のひび割れや粗骨材の緩みによる処理表面における強度低下が懸念される。

物理的方法に代表される噴射処理（ウォーター・ジェット工）に関して、足立ら⁶⁾は噴射処理による打継ぎ処理後の付着強度に関する優位性について、実験により示している。ただし、打撃等と同様に、旧構造物への影響が懸念される。

そこで、これらに比べて静的に施工が可能な化学的方法の一つであるポリマー系の接着材¹³⁾を対象に、新旧コンクリートの打継目接着材について着眼するものとする。本工法は大型の施工機械が不要であり、現場条件に応じた施工が比較的容易であるとともに、経済性においても従来工法と比較して顕著な差はないと考えられる。ポリマー系接着材に関して、森脇ら¹³⁾は一般的なポリマー系接着材（ポリマー・セメントモルタル）とチップングを併用した処理に関して、実験等により新旧コンクリートにおける打継目処理工としての有用性について示している。ただし、これらの実験は曲げ強度に着眼した実験が中心であり、地震時に想定される外力（例えば、水平力）において想定されるせん断強度についても検討することが望まれる。また、これまでのポリマー系接着材のオープン・タイム（塗布後から新コンクリートを打設するまでの期間）が少なくとも3日程度は必要であるとされており、全体形状を保持した状態での段階的な施工の場合、工期の短縮化が望まれる²⁾。そこで、一般的に懸念されるオープン・タイム中における接着材自体のひび割れ防止を目的に、従来の材料に繊維を加えて早期の強度発現を期待した繊維補強ポリマー・セメント系接着材を対象に、検討するものとする。

これらの背景より、本研究においてはモルタルやコンクリート等による土木構造物の更なる補強対策の一つであると考えられる新旧コンクリート等における打継目接着材（繊維補強ポリマー・セメント系接着材）の処理効果に関して、室内実験結果に基づいてその強度特性等について明らかにするものとする。

2. 新旧モルタルやコンクリート等における打継目接着材の概要

筆者らが提案する新旧モルタルやコンクリート等における打継目接着材（繊維補強ポリマー・セメント系接着材）は、表1に示す割合で配合する材料及び特性を保有している。なお、本工法は従来のチップング処理等と比べて施工時における負荷が少なく、施工条件に応じた塗布方法（吹付、左官工等）の選択が可能である。また、接着材としてこれまで一般的に採用されていたエポキシ系の接着材は接着材の硬化前に新コンクリートを打設する必要があったが、ポリマー系の接着材では接着材の硬化後においても新コンクリートの打設が可能である¹⁴⁾。さらに、本接着材の硬化後は緻密な不透水の構造体が形成され、新旧コンクリート間における水密性が確保されるため、一般的な土木構造物としては有効であると考えられる。

本接着材に関する施工方法の流れを図2に示す。図2に示されるとおり、旧コンクリート表面に存在する異物を水洗浄等により除去してから接着材を塗布する。また、ポリマー系の接着材は、前述にも示すとおり

オープン・タイムの調整が比較的容易である。

表 1 繊維補強ポリマー・セメント系接着材の概要

| Mix proportion | Powder: Admixture: Water | 1: 0.071: 0.149 |
|---|--------------------------|-----------------------------|
| Flow value (mm) | | 195 |
| Water-binding material ratio (%) | | 37.5 |
| Bending strength (N/mm ²) | | 7days: 8.2 28days: 10.6 |
| Compressive strength (N/mm ²) | | 7days: 52.1 28days: 62.6 |

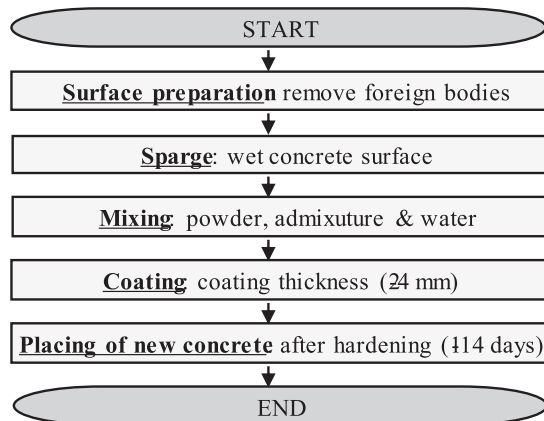


図 2 繊維補強ポリマー・セメント系接着材の打継目処理方法

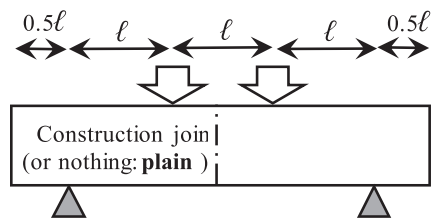


図 3 曲げ強度試験の概要

3. 接着材の打継目処理効果（耐荷性）に関する室内実験

新旧コンクリート等の接着面における処理に関して、提案する接着材（繊維補強ポリマー・セメント系接着材）の一般的な処理効果（耐荷性）について、室内実験により検証する。

(1) 曲げ強度に関する実験

繊維補強ポリマー・セメント系接着材の適用時における接着面の耐荷性に関して、先ず、これまでと同様に、曲げ応力について着眼するものとする。その際、一般的な曲げ強度試験により、提案する接着工法及び他工法（例えば、チップングやエポキシ樹脂系の接着等）と打継目のない一体となった供試体（Plain）とを比較して、それらの違いが与える曲げ強度への影響について考察する。

2点集中載荷の曲げ強度試験の概要を図3に示す。等モーメント区間の中央に、新旧コンクリートの打継目を設けた角柱供試体（15cm×15cm×53cm）と同形状で打継目の存在しない試験体（Plain）とをそれぞれ作成する。さらに、新旧のコンクリート供試体を対象に、打継目の存在しない供試体（Plain）に対する最大曲げ応力の比及び破壊時の状況について把握する。

なお、作成する旧コンクリート（15×15×26.5cm）は、型枠（15×15×53cm）の中央部に臨時的に合板を設けてコンクリートを打設し、湿布養生（60日間）する。その後、中央部の合板のみを脱型し、それぞれの条件によって打継目（接着面）の処理を行う。なお、チップングによる打継目処理については、工具（チス）を用いて、粗骨材が確認される深さ（約3mm程度）まで切削する。繊維補強ポリマー・セメント系接着材の塗布については、接着面を工具（ステンレス製のワイヤー・ブラシ）により簡単に研磨した後、ノギスにより両端の塗装厚（接着材自体の厚み）を管理しながら、工具（金ゴテ）で塗布する。エポキシ樹脂系の接着材の塗布については、同様に、ワイヤー・ブラシを用いて簡単に処理した後、工具（刷毛）により接着材を塗布する。なお、繊維補強ポリマー・セメント系接着材のオープン・タイムは24時間（1日）とし、エポキシ樹脂系は30分以内とする。実験に用いた新旧コンクリートの配合を表2及び表3に示す。ここで、表3にお

ける材料表記については、それぞれ、呼び強度、スランプ値、最大骨材及びセメントの種類を示している。

本接着材における施工条件の違いが耐荷性に与える影響を把握するため、塗布厚及びオープン・タイムをそれぞれ変化させて実験するものとする。

新旧コンクリートの接着面における処理工法の違いが曲げ強度に与える影響に関して、図4に実験結果を示す。なお、各処理工法における強度の違いを把握するため、プレーン供試体の曲げ強度との割合により表現する。

表 2 新旧コンクリート供試体の配合表

| | | 21-8-20-BB | 18-8-20-BB |
|--|------------------|------------|------------|
| Slump (cm) | | 8 | 8 |
| Air content (%) | | 4.5 | 4.5 |
| Coarse aggregate maximum diameter (mm) | | 20 | 20 |
| Water-cement ratio (%) | | 60 | 67 |
| Sand percentage (%) | | 46.4 | 47.7 |
| Compressive strength(N/mm ²) | | 30.8 | 26.4 |
| Unit weight (kg/m ³) | Water | 165 | 165 |
| | Cement | 275 | 246 |
| | Fine aggregate | 850 | 884 |
| | Coarse aggregate | 975 | 965 |
| | Admixture | 2.75 | 2.46 |

表 3 新旧コンクリート供試体の強度特性

| | Open time (days) | Concrete compressive strength (N/mm ²) | | | |
|------------------------------------|---------------------|--|------------|------------|------------|
| | | New | | Old | |
| | | 21-8-20-BB | 18-8-20-BB | 21-8-20-BB | 18-8-20-BB |
| Plain | | | | — | — |
| Chipping | — | | | | |
| Wire brush | | 30.8 | 26.9 | | |
| Epoxy rein | | | | | |
| | 0 | | | | |
| Fiber reinforced polymer cement | 1 | 31.6 | 25.9 | 31.2 | 26.7 |
| | 3 | 30.2 | 26.7 | | |
| | 7 | 30.0 | 26.1 | | |
| | 14 | 31.0 | 26.1 | | |

曲げ強度比 r_b は、

$$r_b = \sigma_{fi} / \sigma_f \times 100 \quad (1)$$

である。ここに、 σ_{fi} は各処理工法における曲げ強度 (N/mm²) 及び σ_f は打継目を有しない曲げ強度 (N/mm²) である。図4に示されるとおり、各接着材により処理された場合は、チッピング処理と比べて約1.2倍程度の強度であった (ただし、平均値)。一方、打継目が存在する全ての供試体はプレーン供試体の

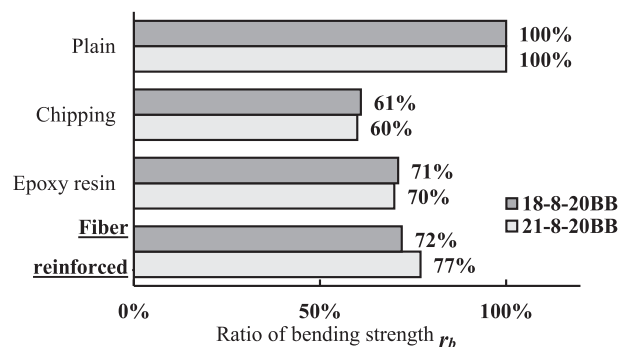


図 4 各表面処理方法の違いが曲げ強度に与える影響

強度を下回っていた。なお、同条件における各試験値は約10%程度の誤差がそれぞれ確認されているが、表3に示されるとおり、各供試体の強度自体についても誤差が確認されており、平均値として議論しても特に問題はないものと考えられる。また、供試体の破壊状況に関して、チッピング処理については接着面全体にわたる破壊であった。一方、接着材（エポキシ樹脂系、繊維補強ポリマー・セメント系接着材）については、主に引張り側における剥離による曲げ破壊であり、接着面に一部の新コンクリート破片が付着しているのが確認された。これらの結果より、曲げ応力が作用する構造体においては強度の低下が懸念されるため、打継目の処理に加えて、引張力に対する更なる補強が望まれることが考えられる。

次に、繊維補強ポリマー・セメント系接着材の耐荷性に関して、塗布厚の違いが曲げ強度に与える影響を図5に示す。図5に示されるとおり、塗布厚の違いは曲げ強度に対して殆ど影響をあたえないことが分かった。なお、接着材の塗布施工において、一般的に1mm程度以上の誤差が考えられるとともに、旧コンクリートの表面には凹凸が存在するため、塗布厚は少なくとも2mm程度以上とすることが望まれる。なお、オープン・タイム（ただし、1日から14日まで）の違いについても耐荷性に殆ど影響がなく、繊維による補強（早強性の付加）により施工条件に応じたオープン・タイムの設定が容易となることを確認している（図6）。

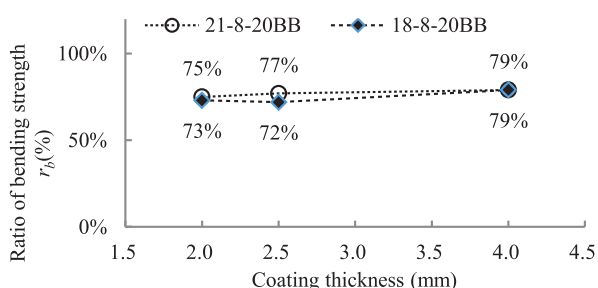


図5 塗布厚の違いが曲げ強度に与える影響の変化

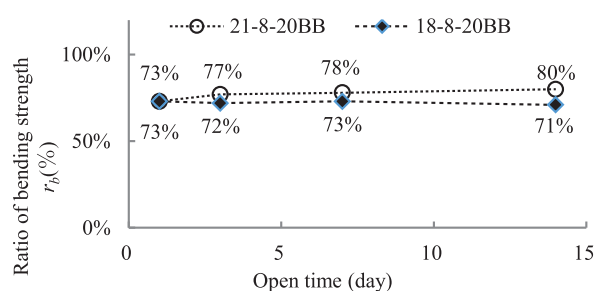


図6 オープン・タイムの違いが曲げ強度に与える影響の変化¹⁴⁾

(2) 圧縮（斜め）せん断強度に関する実験

次に、旧コンクリート背面部におけるせん断応力に着眼するものとする。そこで、まずは応力を単純化し、圧縮せん断試験（図7）^{15) 16)}により、曲げ強度試験と同様に他工法や打継目（接着面）のない一体となった供試体を作成してそれぞれ比較する。なお、新旧コンクリートの配合および特性は、前節の表2、表3と同じである。また、供試体の形状についてはφ12.5cm×25cmとし、本接着材における施工条件の違いが圧縮せん断強度に与える影響を把握するため、同様に塗布厚及びオープン・タイムをそれぞれ変化させて実験する。その際、新旧コンクリートの打継目が傾斜（図7）するように型枠等を工夫して、前述までと同様に打継目について処理し、供試体を作成するものとする。

新旧コンクリートの接着面における処理工法の違いが圧縮せん断強度に与える影響に関して、図8に実験結果を示す。なお、各処理工法における強度の違いを把握するため、プレーン供試体の強度との割合であるせん断強度比 r_s は、

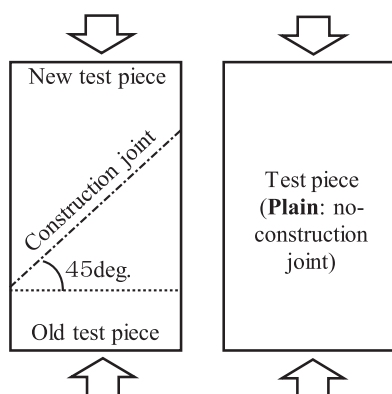


図7 圧縮（斜め）せん断強度試験^{15), 16)}の概要

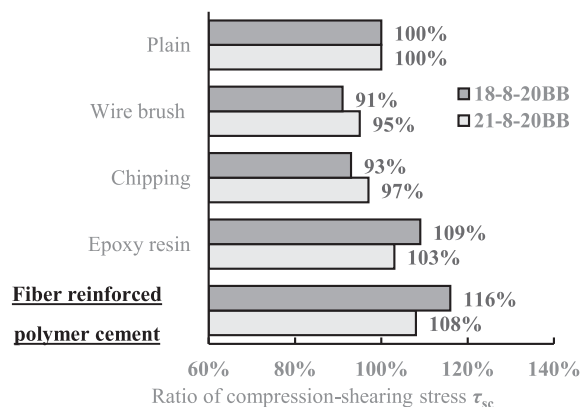


図8 各表面処理方法の違いが圧縮（斜め）せん断強度に与える影響¹⁴⁾

$$r_s = \tau_{fi} / \tau_f \times 100 \quad (2)$$

である。ここに、 τ_{fi} は各処理工法における破壊時における圧縮強度 (N/mm²)、 τ_f は打継目を有しない圧縮強度 (N/mm²)、である。図 8 に示されるとおり、ワイヤー・ブラシによる簡易な清掃の場合、接着面でのせん断破壊が確認された。一方、接着材による処理の場合、プレーン供試体と比較して強度が向上した。なお、前述にも示すとおり、各供試体の圧縮強度については顕著な誤差は確認されていない (表 3)。ここで、ワイヤー・ブラシにより処理された場合と接着材 (繊維補強ポリマー・セメント系) で処理された場合における供試体の破壊状況をそれぞれ写真 2 及び写真 3 に示す。写真 2 及び写真 3 に示されるとおり、ワイヤー・ブラシによる処理の場合には接着面 (a : 図 9) に沿って破壊を起こしているが、接着材による処理の場合においては接着面における抵抗が供試体の強度と同等以上であったことによる影響は殆ど受けにくいことを確認している (図 10、図 11)。



写真 2 ワイヤー・ブラシ
清掃処理の供試体破壊状況



写真 3 繊維補強ポリマー・セメント
により処理された供試体の破壊状況

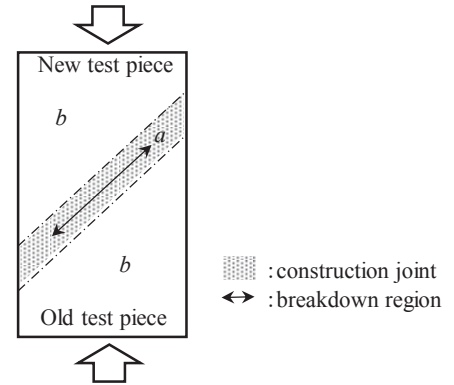


図 9 圧縮 (斜め) せん断破壊
位置に関する定義図

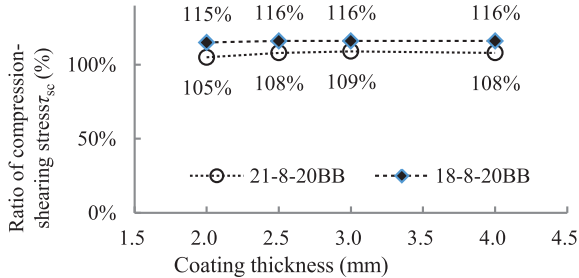


図 10 塗布厚の違いが圧縮 (斜め)
せん断強度に与える影響の変化¹⁴⁾

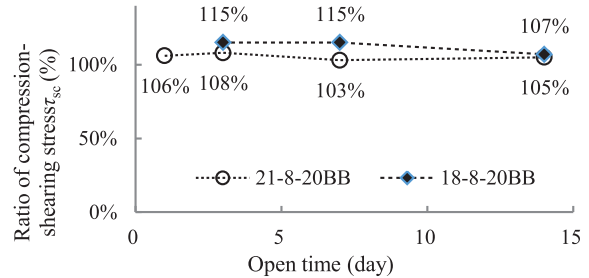


図 11 オープン・タイムの違いが圧縮
(斜め) せん断強度に与える影響の変化

(3) せん断強度に関する実験

(2) の圧縮によるせん断破壊結果 (図 8) において、ワイヤー・ブラシによる処理のみにおいてせん断的な破壊が確認されたため、他の処理におけるせん断強度に関する更なる検討が必要である。そこで、本検討では図 12 に示すせん断強度試験¹⁷⁾により詳細に検討するものとする。なお、実験に用いた供試体は、打継目が存在する供試体 (4×4×14.5cm×3 体) と一体型 (Plain) の供試体をそれぞれ作成した。ただし、試験装置の制約より小規模な実験となり、せん断応力への骨材の影響が顕著になることが考えられる。そこで、本実験においては、一般的なモルタル (ただし、普通ポルトランド・セメント : 標準砂 = 1 : 3、水セメント比 = 50%) を用いる。また、旧供試体については角柱 (4×4×14.5cm) を湿布養生にて作成し、接着面 (約 50cm²) に対して、同様にワイヤー・ブラシや接着材の塗布等の処理を行う。その後、2 つの供試体と型枠 (スペーサー) を用いて、図 12 に示す形状となるように新モルタルを打設する。なお、旧供試体及び新供試体の材齢はそれぞれ 84 日、28 日とし、オープン・タイムは 3 日とする。その際の旧供試体及び新供試体の圧縮強度は、それぞれ、材齢より $F_c=70\text{N/mm}^2$ 、 $F_c=36\text{N/mm}^2$ であった。

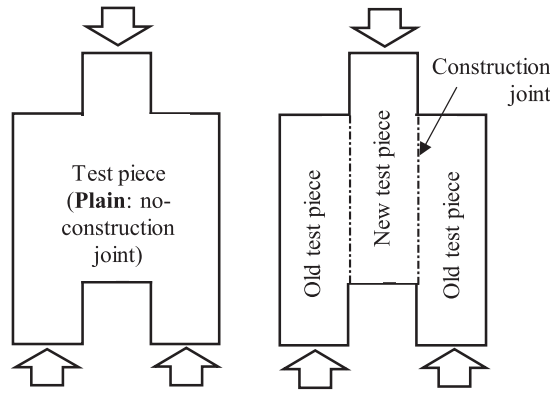


図 12 せん断強度試験¹⁷⁾の概要

新旧接着面における処理工法の違いがせん断強度に与える影響を写真 4 及び図 13 に実験結果を示す。図 13 に示されるとおり、ワイヤー・ブラシによる簡易な清掃やチップングにより処理された供試体はプレーン供試体と比べて、顕著にせん断強度が低下していた。一方、接着材（繊維補強ポリマー・セメント系）で処理された場合は、せん断強度が顕著に向上していた。ここで、写真 4 にも示されるとおり、本接着材で処理された破断面は、新モルタルと接着材との界面付近における、低強度である新モルタル内部での破壊であった。これより、繊維補強ポリマー・セメント系接着材により処理された場合、チップング処理に比べて、せん断強度が向上することが分かった。

今後は、煉瓦組積における繊維補強ポリマー・セメント系接着材の適用について、更に取り組む予定である。

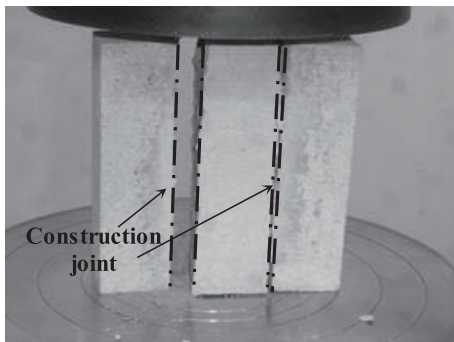


写真 4 破壊状況（繊維補強ポリマー・セメント）

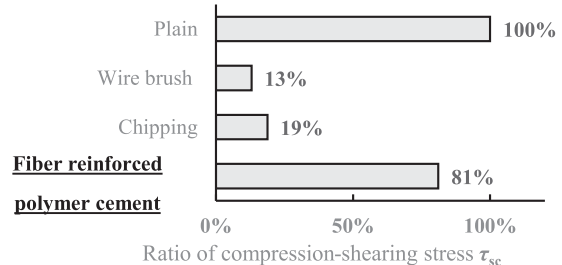


図 13 各表面処理方法の違いがせん断強度に与える

4. おわりに

本研究においてはモルタルやコンクリート等による土木構造物の更なる補強対策に向けた打継ぎ処理面の改良を目的に、新旧コンクリート等における打継処理として提案する接着材（繊維補強ポリマー・セメント系接着材）の処理効果に関して、室内実験によりその特性について示した。

本研究により得られた成果を以下に要約する。

- 1) 打継目処理時の新旧コンクリート接着面における曲げ強度やせん断強度に関して、繊維補強ポリマー・セメント系接着材は既往の研究で示されるとおり、従来の機械的方法等と比較して優位であることを確認した。
- 2) 施工現場に応じたオープン・タイムの短縮化にも対応するために、従来のポリマー・セメント系接着材に繊維を加えて、早強性を期待した場合においても、その後の強度特性において、特に問題とならないことが分かった。

- 3) また、塗布厚（ただし、2mm から 4mm まで）及び硬化後のオープン・タイム（ただし、1 日から 14 日まで）の違いが耐荷力にほとんど影響を与えないことが分かった。
- 4) 圧縮せん断試験において、繊維補強ポリマー・セメント系接着材で打継処理した供試体の強度は打継目の無いプレーン供試体と同等以上であることがわかった。
- 5) モルタル供試体を用いたせん断強度試験において、従来工法であるチップング等により処理された接着面では顕著に強度が低下することがわかった。

参考文献

- 1) 市川紀一：近代化遺産の補修・補強の課題，土木学会第 56 回年次学術講演会，pp.250-251，2001.
- 2) 谷川恭雄・辻 正哲・畑中重光・濱崎仁・青木孝義・佐々木孝彦・澤本武博・花里利一：委員会報告 歴史的建造物の診断・修復研究委員会の活動と成果の概要，コンクリート工学年次論文集，Vol.29，No.1，pp.9-18，2007.
- 3) 三浦康代・内田武夫・脇坂高光：碓氷峠めがね橋における劣化調査・補修方法，土木学会第 56 回年次学術講演会講演概要集，共通セッション，pp. 248-249，2001.
- 4) 岸 祐介・野阪克義・伊津野和行：レンガアーチ橋の数値解析モデル化手法に関する基礎的研究，構造工学論文集，Vol.56A，pp.102-110，2010.
- 5) 国土交通省 東北地方整備局：土木工事共通仕様書，2015.
- 6) 足立一郎・五十嵐英幸・迫田恵三・八尋輝夫：ウォータージェットを用いた新旧コンクリートの打継ぎ，コンクリート工学年次論文報告集，Vol. 18，No.1，pp.1353-1358，1966.
- 7) 藤倉祐介・青景平昌：補修・補強工事におけるコンクリート切断面の損傷程度が打継ぎ目ウォータージェットを用いた新旧コンクリートの打ち継ぎ後の付着強度に及ぼす影響，コンクリート工学年次論文報告集，Vol. 28，No.1，pp.1709-1714，2006.
- 8) 松田 浩・崎山 毅・森田千尋・和田真禎・小嶋 悟・中山沙織・仲村政彦・山本 晃・鶴田 健：コンクリート表面粗度の定量化と付着強度特性に関する研究，長崎大学工学部研究報告，Vol. 30，No. 55，pp.183-189，2000.
- 9) 一般財団法人 日本建設機械施工協会：橋梁架設工事の積算，2013.
- 10) 兵庫県土木整備部：土木技術管理規定集，2000.
- 11) 社団法人 土木学会：コンクリート建造物の補強指針（案），1999.
- 12) 財団法人 海洋架橋・橋梁調査会：既設橋梁の耐震補強工法事例集，2005.
- 13) 森脇貴志・辻 幸和・橋本親典・中島貴弘：ポリマー・セメントモルタルを打継ぎ材に用いた新旧コンクリートの打継ぎ強度特性，土木学会論文集，No. 538，V-31，pp. 15-26，1996.
- 14) 日本ジッコウ 株式会社：打継部の処理効果試験結果報告書，2012.
- 15) 近藤泰夫・坂 静雄：コンクリート工学ハンドブック，朝倉書店，1965.
- 16) Sanations of reinforced concrete bridges with the polymer based materials, *Proc. of the 2nd International Symposium on "Adhesion between Polymers and Concrete"*, pp. 311-317, 1999.
- 17) 西林新蔵・小柳 洽・渡邊史夫・宮川豊章：コンクリート工学ハンドブック，朝倉書店，2009.