

報告 高強度の断面修復材の耐摩耗性と加熱に対する爆裂抵抗性

平田 隆祥*1・川西 貴士*2・石関 嘉一*3

要旨：我が国は、高度経済成長期に大量に整備した社会基盤ストックの効率的な維持管理が課題となっている。材料面の対策方法の一つに、補修・補強に用いる材料の各種の性能を高めて、構造物の長寿命化を図ることでライフサイクルコストを低減する方法がある。そこで、筆者らは、強度や耐久性を向上した材料を用い、施工性を高めた断面修復工法を開発した。本報告は、この断面修復材の強度や耐摩耗性と、加熱に対する爆裂抵抗性について検討した結果を報告する。実験の結果、本断面修復材の耐摩耗性が高いこと、また、有機繊維を添加することで加熱に対する爆裂抵抗性を確保できることを明らかにした。

キーワード：補修・補強, リニューアル, 吹付け, 左官, 断面修復材, 高強度, 耐摩耗性, 爆裂抵抗性

1. はじめに

我が国の社会基盤ストックは、高度経済成長期に整備・建設されたものが多く、大半の構造物が供用開始から50年を超えるため、大規模な補修や補強を必要とする構造物が増大している¹⁾。一方、建設投資は伸び悩んでおり、社会基盤ストックを維持管理していくためには、効率的かつ生産性の高い手法が求められている。

材料面の対策の一つとして、補修・補強に使用する断面修復材の性能を高めて構造物の長寿命化を図り、ライフサイクルコスト（以下、LCCと呼称）を低減する方法がある。

筆者らは、従来の補修・補強用の材料の強度を高めて耐久性に関する各種の性能を向上し、コンクリート構造物の長寿命化を図る材料・工法を開発²⁾した。一般に断面修復材には、ポリマーセメントモルタル（以下、PCMと呼称）が使用されることが多い³⁾。しかし、PCMは、塩害や中性化による劣化の起こり易い海岸などの特殊な環境下では、断面修復部の周辺にマクロセル腐食による再劣化の発生が指摘⁴⁾されている。そこで、本断面修復材は、ポリマーの添加されていない材料とした。

また、大面積を修復する場合は吹付け工法を、小面積を修復する場合は左官工法を用いることが多いが、それぞれ異なる種類の材料を用いており、作業や施工管理が煩雑であった。そこで、開発した材料・工法は施工性を高めるために、**図-1**に示すように一材で吹付け工法と左官工法の両方に使用できる工法としている。

既設構造物の維持管理手法には、様々な方法があるが、効率的な維持管理には、複数の方法を組み合わせて適用し、生産性を高めることが合理的な対策になると考える。

本報告は、本断面修復材の基本物性と耐摩耗性、加熱に対する爆裂抵抗性について検討した結果を報告する。

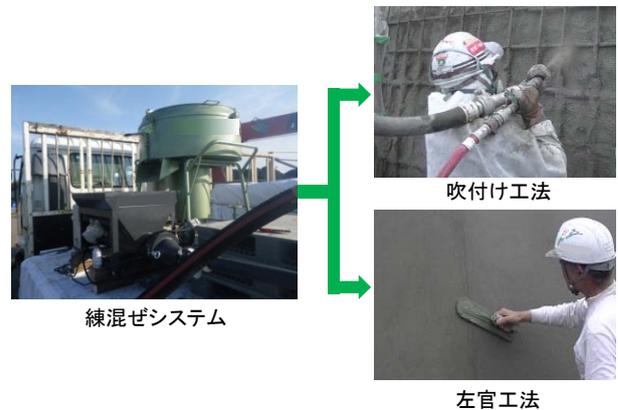


図-1 吹付け工法と左官工法の併用

表-1 断面修復材の配合

W/B※1 (%)	単位量 (kg/m ³)		補強用短繊維 (kg/m ³)
	W	P※2	OF※3
30.0	254	1989	26

※1 水結合材比

※3 OF：有機短繊維

※2 P：プレミックス粉体

表-2 断面修復材の物性例※1

項目	単位	試験値	試験規格
圧縮強度	N/mm ²	127	JIS A 1108
静弾性係数	N/mm ²	3.6×10 ⁴	JIS A 1149
曲げ強度	N/mm ²	10.7	JSCE-G 552
割裂引張強度	N/mm ²	7.6	JIS A 1113
付着強度	N/mm ²	2.4	JSCE-K 561

※1 試験材齢28日（標準養生）

2. 高強度の断面修復材の概要

この断面修復材は、**表-1**に示すように水結合材比を30%とし、**表-2**に示すように高強度化を図っている。

*1 (株)大林組 技術研究所生産技術研究部首席技師 工博 (正会員)

*2 (株)大林組 技術研究所生産技術研究部主任研究員 工修 (正会員)

*3 (株)大林組 技術研究所生産技術研究部主任研究員 工博 (正会員)

モルタルの結合材は、高強度が得られるプレミックス粉体を使用している。また、ひび割れ抑制を目的として、補強用短繊維を添加している。一般の PCM と本材料・工法の比較を表-3に示す。また、本断面修復材料の特徴を以下に示す。

- 1) 一般の PCM は、圧縮強度が 40N/mm² 程度であるのに対し、本断面修復材は、100N/mm² 以上の圧縮強度を発揮する。高強度の断面修復材とすることで、一般の PCM より小断面で同じ荷重を負担することができ、部材の厚さを低減することが可能となる。
- 2) 一般の PCM の耐用年数は 30 年程度であるが、本断面修復材料は、50 年以上の耐用年数の確保を目標としている。そのために、強度を高めることでセメント組織を緻密化し、二酸化炭素や塩分、水分等の浸透を抑制し、中性化、塩害および凍害に対する抵抗性を確保することとした。これにより、断面修復した構造物の長寿命化が図れ LCC の低減が可能となる。
- 3) 断面修復材に、チキソトロピー性を付与することで、吹付け工法と左官工法のどちらの工法にも使用できるよう配合を調整した。これにより、吹き付けた後でも、容易にこて仕上げができ、表面を平滑に処理できる。また、高強度の断面修復材であるため、母材コンクリートとの付着力は高い。

これにより建築構造物など比較的狭い範囲の施工から、栈橋の補修など土木構造物の広い範囲の施工に至るまで、一材で対応することが可能となる。

3. 実験内容

3.1 断面修復材の製造およびフレッシュ性状

所定のプレミックス粉体と練混ぜ水をモルタルミキサに投入して3分間練り混ぜた後、有機短繊維を投入し、さらに1分間練り混ぜた。練混ぜの状況を写真-1に示す。練り上がったフレッシュモルタルの品質は、JIS A 1171 に準拠し、小型のスランブコーンを用いたスランブ試験を実施した。スランブ値は45mmであった。スランブ試験の状況を写真-2に示す。

3.2 強度特性

高強度の断面修復材の練上がり温度と養生温度を 5℃、20℃、30℃と変化させ、封緘養生とした場合の圧縮強度の発現を確認した。圧縮強度の試験結果を図-2に示す。

実験の結果、いずれの養生温度でも、実強度で圧縮強度 100N/mm² が得られることを確認した。

このように、本断面修復材は、従来の材料より圧縮強度を高めた結果、表-2 に示すように、静弾性係数や曲げ強度、割裂引張強度、付着強度が高くなったと考える。

3.3 中性化に対する抵抗性

中性化に対する抵抗性は、JIS A 1153 に準拠した促進中



写真-1 断面修復材の練混ぜ状況



写真-2 スランブ試験の状況

表-3 一般の PCM と本断面修復材の比較

項目	一般のPCM	本断面修復材
圧縮強度	40N/mm ²	100N/mm ²
同じかぶりにおける 目標耐用年数	30年	50年
1回の施工で可能な 吹付け厚さ	20mm	40mm

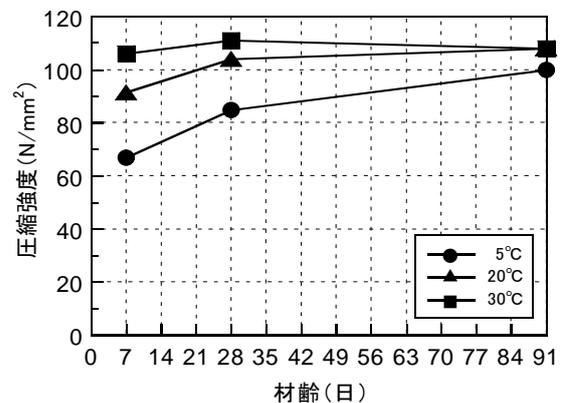


図-2 圧縮強度試験結果 (封緘養生)

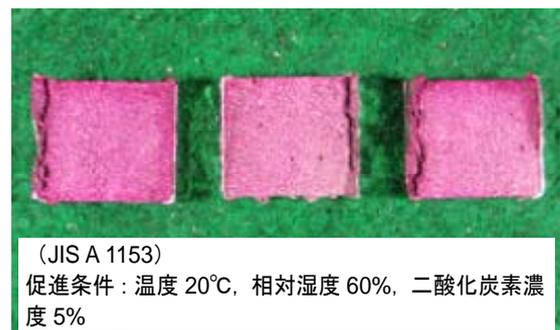


写真-3 促進中性化試験結果

性化試験により確認した。中性化深さの測定状況を写真-3に示す。

温度 20℃、相対湿度 60%、二酸化炭素濃度 5%の環境下で、1年間促進した後の中性化深さは 0.1mm 以下であった。このことから、本断面修復材は高い中性化抑制性能があることを確認した。

3.4 塩害に対する抵抗性

遮塩性は、JSCE-G 572 に準拠した塩分浸漬試験により確認した。温度 20℃で濃度 10%の塩化ナトリウム水溶液中に試験体を浸せきし、浸せき期間 6 か月および 12 か月の段階で、塩化物イオン濃度を JSCE-G 574 に準拠した EPMA 法により測定した。塩化物イオンの濃度分布および見掛けの拡散係数の算出結果を図-3、図-4に示す。

0.3 mm までの濃度は小さい結果となったが、浸せき期間 12 か月の結果から、拡散式で推定した見掛けの拡散係数は、 $0.046\text{cm}^2/\text{年}$ であった。鋼材の塩化物イオンによる腐食発生限界濃度を $1.2\text{kg}/\text{m}^3$ とした場合、かぶり 40mm で耐用年数 50 年の確保が可能となる。

3.5 凍害に対する抵抗性

凍結融解抵抗性は、JIS A 1148 に準拠した凍結融解試験の A 法により確認した。凍結融解試験結果を図-5に示す。凍結融解サイクル 1000 回の段階でも相対動弾性係数は 100%を維持できることが確認でき、高い凍結融解抵抗性を有していることが確認できた。

以上のように、中性化や塩害、凍害に対する抵抗性が向上する理由は、本断面修復材の強度を $100\text{N}/\text{mm}^2$ と従来の PCM に比べて 2 倍程度に高めることで、セメント組織が緻密化した結果、これらの耐久性に関する性能が向上したものと考えている。

3.6 摩耗に対する抵抗性

本断面修復材は強度が高いことから、耐摩耗性も優れると考えられるが、水流摩耗に対して、どの程度の性能を確保できるか実験を行った。摩耗試験は、電中研式⁵⁾のスチールロッド式摩耗試験を実施した。

1) 試験方法

摩耗試験方法を図-6、表-4に示す。スチールロッド式摩耗試験は、回転するドラムの外周内面に寸法：□ $135\times 150\times 300\text{mm}$ 、摩耗面の面積 367.5cm^2 の供試体を 6 個設置した。また、設置した供試体の内側に、摩耗材として寸法：φ $19\times 40\text{mm}$ 、総質量約 2.2kg の 25 個のスチールロッドを入れた状態で、水温 $15\pm 1^\circ\text{C}$ 、流量 $0.5\text{m}^3/\text{h}$ の水を流しながらドラムを毎分 50 回転させて、供試体の摩耗面に衝撃作用を与え、10 時間後に単位面積あたりの摩耗容積である単位摩耗量を求めた。なお、その間 1, 3, 5, 7 時間後の単位摩耗量も測定した。摩耗試験の状況を写真-4に示す。

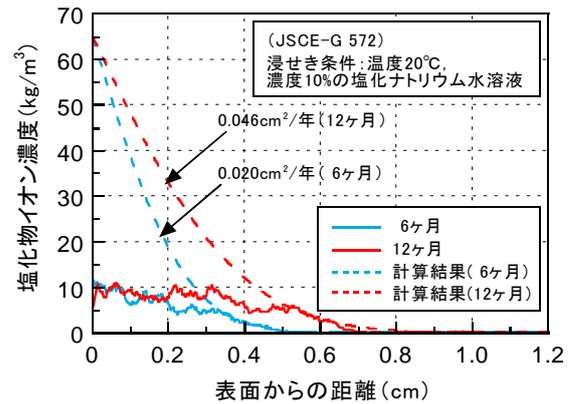


図-3 塩分浸漬試験結果

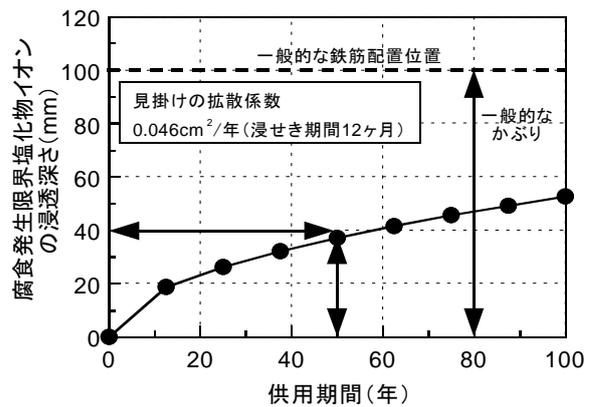


図-4 塩分浸漬結果

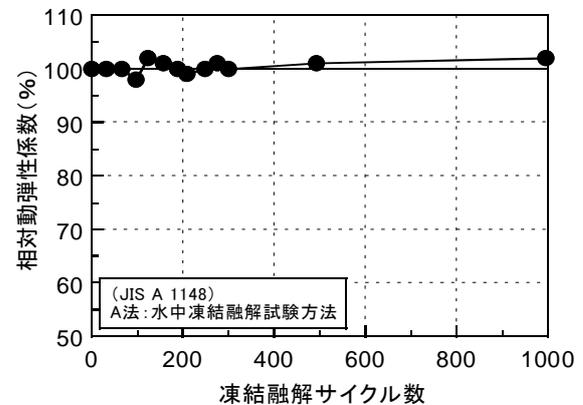


図-5 凍結融解試験結果

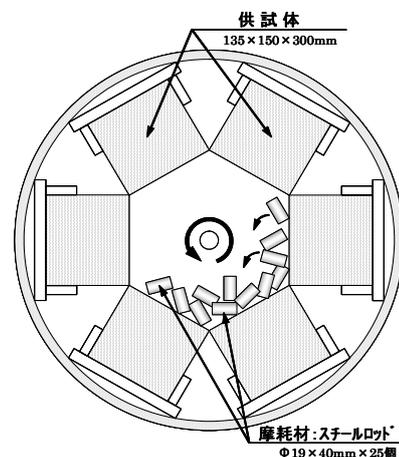


図-6 スチールロッド式摩耗試験機⁵⁾



写真-4 摩耗試験状況

表-4 電中研式のスチールロッド式摩耗試験

試験	方法
スチールロッド式 摩耗試験試験	スチールロッド式摩耗試験機により、材料の衝撃摩耗に対する抵抗性を求めた。 摩耗時間：10時間 供試体寸法：□135 × 150 × 300mm (3本/組)

2) 実験結果

スチールロッド式摩耗試験の結果を写真-5、図-7に示す。

本断面修復材の単位摩耗量は、一般のPCMに比べて、摩耗時間10時間後において半減している。これは、本断面修復材の圧縮強度が100N/mm²程度と大きく、かつ、有機短繊維が含まれていることから、モルタルの剥離を抑制したものと考えられる。実験の結果から、本断面修復材を用いた場合の摩耗に対する耐用年数は、同じ厚さを施工した場合、一般のPCMの2倍程度の期間を確保できることが明らかとなった。

3.7 加熱に対する爆裂抵抗性

1) 試験方法

断面修復を行った構造物の火災を想定して、加熱に対する爆裂抵抗性を確認するために耐火試験を行った。実験に使用した耐火試験体の寸法は、図-8に示すように縦1100mm×横1100mm×厚さ120mmのコンクリート製のベース試験体の表面に、本断面修復材を厚さ30mmで吹き付けた。

ベース試験体の表面にはアンカーを設置し、剥落防止用の金網を設置した。加熱に対する爆裂防止対策は、ナイロン繊維(NY繊維と呼称)を選定し、容積比で0.2, 0.3, 0.4, 0.5vol.%を外割で別添した。ベース試験体の表面を4分割し、繊維の混入率毎に吹き付けた。

耐火試験は、写真-6に示すように水平炉を使用し、耐火試験体表面の縦900mm×横900mmの範囲を加熱した。また、加熱曲線はISO標準曲線とし、加熱時間は180分間とした。

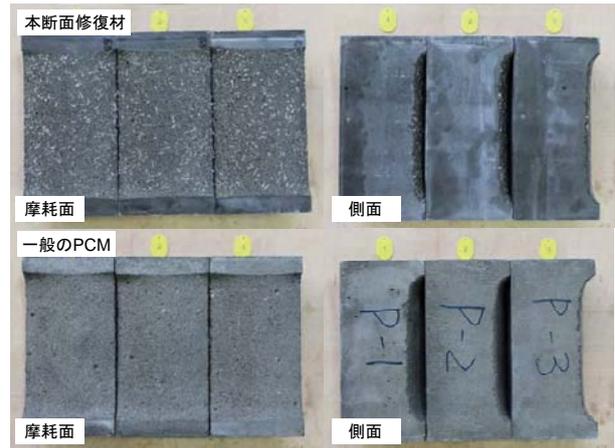


写真-5 摩耗試験結果の例

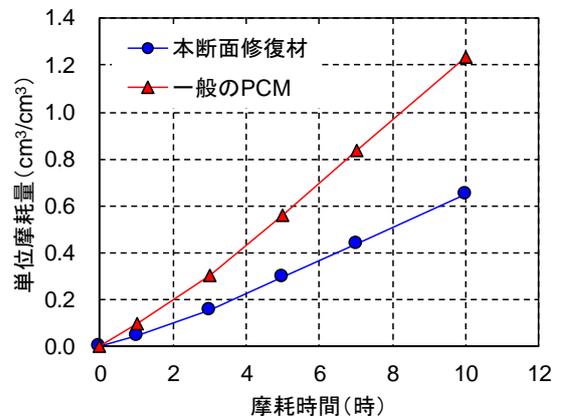


図-7 摩耗試験結果

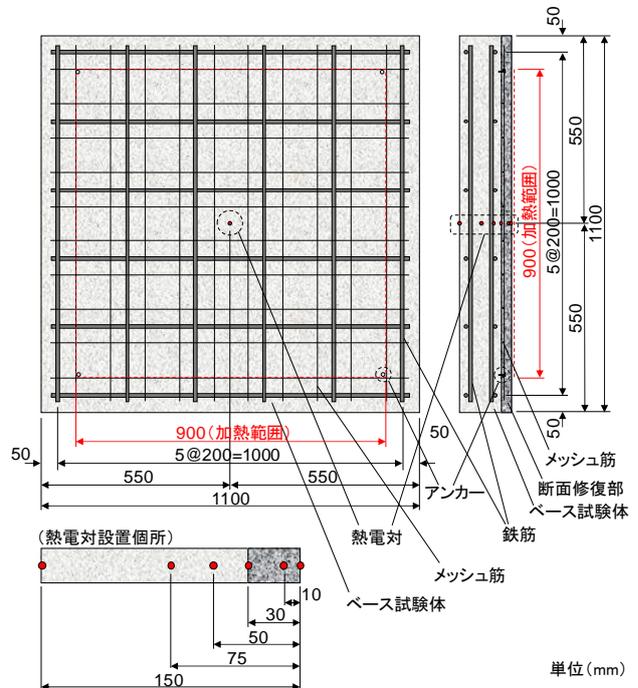


図-8 耐火試験体の概要

2) 実験結果

ISO標準曲線と耐火試験体の内部の温度分布を図-9に示す。また、耐火試験後の、断面修復材の表面の様子を写真-7に示す。

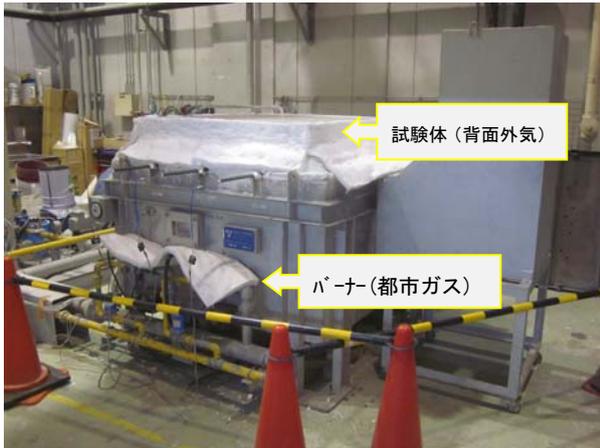


写真-6 耐火試験状況（水平炉）

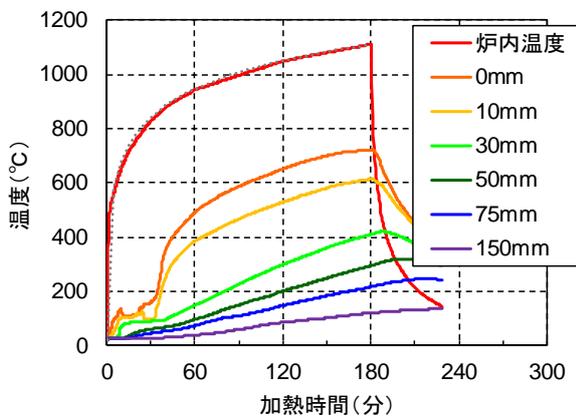


図-9 コンクリート温度の測定結果

耐火試験により、本断面修復材の加熱に対する爆裂抵抗性を確認した。爆裂防止対策として NY 繊維を 0.2～0.5vol.% 添加した結果、いずれの NY 繊維添加量でも微細なひび割れは観察されたが、加熱表面に爆裂は発生しなかった。このことから、NY 繊維を 0.2vol.% 以上混入することで、十分な耐火性能が得られることが明らかとなった。また、表面からの深さが 30 mm の位置の最高温度は 400°C 程度であり、今回の加熱条件で、断面修復材を含めたかぶりが 30 mm 確保できれば、火災による鉄筋等への影響は小さいと考えられる。

4. まとめ

従来の補修・補強用の材料の強度を高めて、耐久性に関する各種の性能を向上し、コンクリート構造物の長寿命化を図る高強度の断面修復材について、耐摩耗性と加熱に対する爆裂抵抗性について実験した結果、以下の知見が得られた。

- (1) 水結合材比を 30% とすることで、従来の断面修復材よりも強度を高めることができ、圧縮強度 100N/mm² の断面修復材が可能となった。本断面修復材は、吹付け工法と左官工法に併用できる。

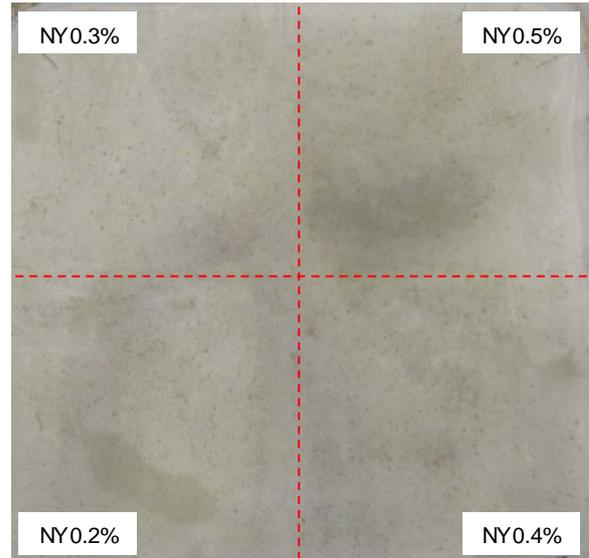


写真-7 耐火試験後の断面修復材表面の状況

- (2) 断面修復材を高強度にすることで、セメント組織が緻密になり、中性化や塩害、耐凍害性といった各種の耐久性に関する性能が高くなることを確認した。
- (3) 水流に対する耐摩耗性を、スチールロッド式の摩耗試験で確認した結果、一般のポリマーセメントモルタルよりも、耐摩耗性を出来、摩耗に対する耐用年数は、同じ厚さを施工した場合、一般のポリマーセメントモルタルの 2 倍程度の期間を確保できることを確認した。
- (4) 本断面修復材に、加熱に対する爆裂抵抗性の付与を目的として、ナイロン繊維を 0.2vol.% 以上添加することで、火災に対する爆裂抵抗性を有することを確認した。

謝辞 本実験の推進にあたり、宇部興産㈱の皆様にご協力いただきました。ここに感謝いたします。

参考文献

- 1) 国土交通省：国土交通白書，2016.7
- 2) 川西貴士，他：高強度かつ高耐久性のセメント系補修・補強材料，大林組技術研究所報，No.81,2017.12
- 3) 宮川豊章，他：コンクリート補修・補強ハンドブック，朝倉書店，pp.425-430，2011.6
- 4) 渡部正他：部分断面修復工法で補修した鉄筋コンクリート部材の鉄筋腐食性状に関する研究，土木学会論文集，E2 (材料・コンクリート構造)，Vol.69, No.3, PP.281-294，2013.7
- 5) 奥田徹，他：モルタルおよびコンクリートに耐摩耗性を与える材料のロッド方法によるスリヘリ試験，電中研報告書，1965

