

論文

断面修復工法における補修境界の密実化に対する後施工樹脂注入の効果

上野 和広*1, 岡本 貞二*2, 岡本 貞人*3, 加川 順一*4

Effects of Post-injected Resin on Solidity of Bonding Interface between Concrete and Repair Material

Kazuhiro UENO*1, Teiji OKAMOTO*2, Sadato OKAMOTO*3 and Junichi KAGAWA*4

要旨：断面修復工法では、劣化したコンクリートを除去した後に補修材料で断面の修復を行う。老朽化したコンクリート構造物の性能回復・向上を実現するには、補修材料と既設躯体が密実に一体化し、劣化因子の侵入や外力に抵抗する必要がある。しかしながら、鉄筋背面まで補修範囲が及んだ場合や、作業しづらい施工面の向きなど、補修材料の確実な充填が難しい場合がある。本研究では、実構造物を模擬した試験体を用い、断面修復工法による補修境界の密実化に対する後施工樹脂注入の効果を検証した。その結果、補修境界への樹脂の浸透と、注入孔を充填する樹脂のアンカー効果により、新旧材料の一体性や補修境界の密実性が向上することを確認した。

キーワード：断面修復工法、補修境界、密実化、後施工樹脂注入、アンカー効果

1. はじめに

老朽化したコンクリート構造物の性能回復あるいは向上を図るには、ライフサイクルコスト低減の観点を持ちながら、補修・補強あるいは改修といった対策を実施することが重要である。また、その中で適用される補修・補強工法には、期待される効果を確実に発揮する信頼性が求められる。さもないと、補修後の構造物に予想外の再劣化が生じ、劣化予測に基づいた計画的な維持管理が困難になる。

断面修復工法は、コンクリート構造物の補修・補強工法として用いられるものであり、劣化部の除去や損傷によって断面を喪失した箇所の断面修復を目的とする¹⁾。この目的を達成するため、断面修復材にはコンクリートと同等の強度、熱膨張係数および弾性係数を有すること、寸法安定性が良いこと、長期接着性に優れること、といった性能が要求され²⁾、これまでにポリマーセメントモルタル (PCM) など、各種材料が開発されてきた。また、補修・補強後の構造物の耐久性を考えると、塩化物イオンや二酸化炭素といった劣化因子に対する遮断性も要求される。

一方、補修後の構造物の再劣化防止を図るには、既設コンクリートと断面修復材の境界部(補修境界)も重要となる。補修境界に空隙や隙間が残存した場合、劣化因子や雨水の侵入による鉄筋腐食の進行や、

侵入した雨水の凍結融解作用などによる断面修復材の剥離・剥落が助長される恐れがある。しかしながら、鉄筋背面まで補修範囲が及んだ場合や、作業しづらい施工面の向きなど、断面修復材の密実な充填が困難な場合があることから、既設コンクリートと断面修復材の一体性や補修境界の密実性は施工者の技量に左右される。既往の研究では、コンクリート打継部や補修境界において、透気量が構成材料の値よりも大きくなること³⁾や、付着強度が構成材料の強度よりも小さくなること^{4) 5)}が報告されている。補修後の構造物の耐久性や安全性を担保するにあたり、補修境界の一体化・密実化は極めて重要である。

本研究では、実構造物を模擬した試験体を用い、断面修復工法後の補修境界において空隙や隙間の有無を確認した。また、補修境界の一体性・密実性の向上対策として、後施工樹脂注入の効果を評価した。

2. 実験方法

2.1 既設躯体の模擬

実構造物を模擬した試験体は、壁体などを想定した横向き施工用と、床版下面などを想定した上向き施工用の2種類とした。

(1) 横向き施工用既設躯体

横向き施工の既設躯体の作製には、表-1に示す配

*1 島根大学学術研究院環境システム科学系 助教

*2 株式会社岡貞組 取締役部長

*3 株式会社岡貞組 代表取締役

*4 SG エンジニアリング株式会社 代表取締役

表-1 コンクリートの配合

試験体	W (kg/m ³)	C (kg/m ³)	S (kg/m ³)	G (kg/m ³)	A (kg/m ³)
横向き	163	283	843	1,050	2.55
上向き	157	273	834	1,084	2.46

*W: 水, C: 高炉セメント, S: 細骨材, G: 粗骨材, A: 混和剤

*粗骨材最大寸法 $G_{max} = 20 \text{ mm}$

合のコンクリートを用いた。高さが 180 mm となるように設置した 1980×800×180 mm の型枠内へコンクリートを打設した後、コンクリートバイブレータで締固めを行い、打設面（上面）を左官ゴテで仕上げた。なお、本研究では老朽化に伴って品質が低下したコンクリートを模擬するため、打設面を気中に曝した状態で養生を行い、材齢 1 日で脱型した。脱型後、補修・補強に伴う劣化部の除去を想定し、打設面に対してはつり処理（深さ 50～90 mm 程度）を実施した。はつり処理は、図-1 に示すように 4 区画に分けて実施した。この 4 区画は、後施工樹脂注入の有無と施工者の技量（熟練者、未経験者）の影響を評価するために設置した。

(2) 上向き施工用既設躯体

上向き施工用の既設躯体の作製には、表-1 に示す配合のコンクリートを用いた。上向き施工用の既設躯体は、鉄筋周辺の密実化についても検討を行うため鉄筋コンクリート構造とした。高さが 150 mm となるように設置した 1100×650×150 mm の型枠内へ鉄筋 (D13) を配置した後、コンクリートの打設を行った。なお、鉄筋の配置とはつり処理に伴う既設躯体の表面凹凸を模擬するため、鉄筋を挟むように発泡スチロール製化粧型枠（コンクリートと接する面が凹凸）を型枠内に設置し、その上へコンクリートの打設を行った。また、ジャンカの存在を模擬するためコンクリートバイブレータによる締固めは行わず、自重による充填とした。打設面を気中に曝した状態で養生を行い、材齢 1 日で脱型した。脱型後、鉄筋周辺の化粧型枠を除去することで、鉄筋背面まで補修範囲が及んだ場合はつり状況を模擬した。上向き施工用の既設躯体は、後施工樹脂注入の有無による影響を評価するため、2 体作製した（図-2）。

2.2 断面修復工法

既設躯体に対する断面修復には、(1) 市販の PCM による断面修復工法と、(2) 断面修復と後施工樹脂注入を併用する工法、の 2 種類を用い、一般的に適用される断面修復工法と後施工樹脂注入を併用した工法の比較を行った。また、施工者の技量の相違による影響を評価するため、横向き施工のそれぞれの工法において、図-1 に示すように熟練者と未経験者による施工を実施した。なお、上向き施工では、両



図-1 横向き施工用の既設躯体



図-2 上向き施工用の既設躯体

工法を熟練者が実施した。

(1) PCM による断面修復工法

断面修復にはエポキシ系のプライマーと PCM を用いた。この PCM は、速硬性セメント、軽量骨材、耐アルカリガラス繊維を主体とした無収縮性無機質材料と、特殊高分子エマルジョンで構成される。施工面の清掃を行った後、プライマーを塗布し、タックが出た状態で PCM の施工を行った。1 層あたりの施工厚は 10～20 mm とし、PCM が既設躯体の表面へ達するまで PCM の層を重ねた。なお、PCM を塗り継ぐ際には、前層表面に櫛目状の筋を入れ、両層間が一体化するよう留意した。各層間の施工間隔は概ね 1 時間程度であり、前層の硬化開始による前々層との一体化が進行した後に次層を施工した。ただし、1 日で全ての PCM を施工できなかったため、層間の施工間隔が 1 晩となった箇所も存在する。

(2) 断面修復と後施工樹脂注入を併用する工法

断面修復に用いた PCM は、無機質結合材、骨材、添加剤からなる主材と、混和液（カチオン系アクリル樹脂エマルジョン）で構成される。この PCM は後施工樹脂注入との併用に特化したものであることから、「(1) PCM による断面修復工法」とは異なる。また、今回の実験では後施工で注入する樹脂による既設躯体と PCM の接合を期待し、プライマー処理は行っていない。ただし、両材料間のより一層の密実化に向け、プライマー処理を行った上で後施工樹脂注入を行うことも可能である。純粋な後施工樹脂注



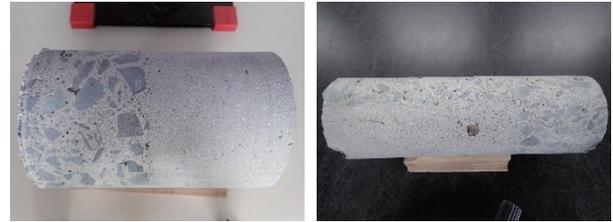
図-3 穿孔用ドリル



a) コア抜き状況



a) PCM 施工状況



b) 採取コア



b) 樹脂注入状況



c) 供試体

図-4 断面修復および後施工樹脂注入状況
(左：横向き施工，右：上向き施工)

図-5 供試体作製状況
(左：付着強度試験用，右：透気試験用)

入の有無による比較ではなく、工法間での比較を行った理由は、断面修復工法の多くがプライマー処理なども含めた形で開発されていることから、各工程を含めた工法間での比較を行う必要があると判断したためである。その他の PCM の施工方法は、「(1) PCM による断面修復工法」と同様である。

PCM の施工完了から 2 日経過後、図-3 に示すドリルで後施工樹脂注入のための注入孔(直径 7 mm)を穿孔した。このドリルは、循環型の給排水システムを備えており、ビット先端からの水の供給と削粉の回収を行うことで、注入孔の穿孔と洗浄を同時に実施することができる⁹⁾。注入孔の深さは 100 mm とし、既設躯体に達するまで穿孔を行った。注入孔の穿孔間隔は、横向き施工用の試験体では本工法の標準値である 166 mm (36 孔/m²) とした。上向き施工用の供試体では、鉄筋が交差する点付近を注入孔としたため、注入孔の穿孔間隔は長軸方向に 200 mm、短軸方向に 160 mm である。注入孔の穿孔後、低粘度エポキシ樹脂を 0.06 N/mm² 以下の圧力で注入した。図-4 に、横向き施工用と上向き施工用の既設躯体に対する施工状況を示す。

2.3 供試体の作製

前述の試験体に対し、コンクリート用コアドリルを用いて各種試験用の供試体を作製した(図-5)。補

修境界の一体性の評価では、既設躯体と PCM の間の付着強度を指標としたことから、JSCE-K 561 で規定される付着強度の測定方法の条件を満足するよう、内径 75 mm のコアドリルで PCM の打設面から既設躯体に達するまで切れ込みを入れた後、内径 100 mm のコアドリルで試験体を貫通するようにコアを抜くことで供試体を作製した(図-5c 左)。後施工樹脂注入を実施した試験体のコア抜きを行う位置は、横向き施工用の試験体では注入孔がある箇所とない箇所の 2 通りとし、上向き施工用の試験体では注入孔および鉄筋がない箇所とした。

補修境界の密実性の評価では、供試体の透気量を指標とした。補修境界と鉄筋を含む円盤型の供試体を作製するため、補修境界に対して平行方向に設置した内径 100 mm のコアドリルでコアを抜き、そのコアを高さ 40 mm に切断した(図-5c 右)。

2.4 補修境界の一体性・密実性の評価方法

(1) 付着強度の評価方法

付着強度の評価は、JSCE-K 561 で規定される付着強度の測定方法に準じて実施した。図-5c 左に示した供試体へ直径 75 mm の鋼製治具をエポキシ樹脂接着剤で接着した後、単軸引張载荷を実施した(図-6)。引張応力の増加率は毎秒 0.06 N/mm² である。供試体が破断するまで単軸引張载荷を継続し、その



図-6 単軸引張荷重の実施状況
(左：供試体，右：試験状況)

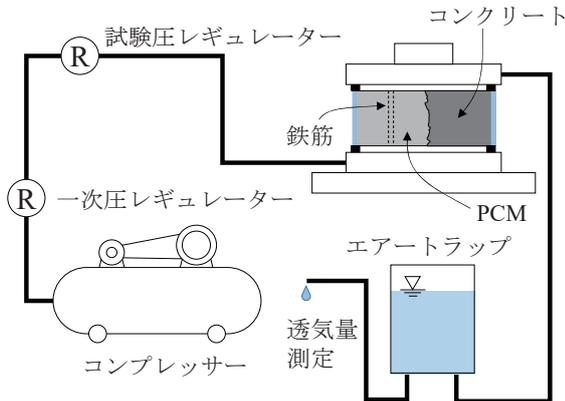


図-7 透気試験装置の概略図

間に示した最大引張荷重を供試体の断面積で除することによって付着強度を算出した。

(2) 透気量の評価方法

透気量の評価は、コンクリート打継部を対象とした既往の研究³⁾を参考に実施した。図-5c 右に示した供試体の気密処理を行った後、透気方向が補修境界と平行になるよう透気試験装置(図-7)へ設置した。所定の圧力(10 kPa)へ調整した空気圧を供試体へ与え、供試体を透過した透気量を計測した。透気量の計測にはエアートラップを用い、エアートラップからの排水量を透気量とした。なお、補修境界を構成する材料(コンクリートとPCM)自体の透気量を計測するため、コンクリートのみの供試体とPCMのみの供試体に対しても透気量の計測を行った。

3. 結果と考察

3.1 付着強度

図-8に、後施工樹脂注入を実施した付着強度試験用供試体のブラックライト下での写真を示す。注入孔を設けて後施工樹脂注入を実施したことにより、既設躯体とPCMの境界部に加え、PCMの層間の塗り継ぎ部といった補修境界へ樹脂が注入されたことを確認できる。さらに、既設躯体に存在する空隙や隙間へも樹脂が充填されており、PCMから既設躯体に至る区間の一体化が確認できる。また、それらの樹脂が注入孔を起点として広がることで、注入孔を充填する樹脂がアンカーとなり、既設躯体とPCMを

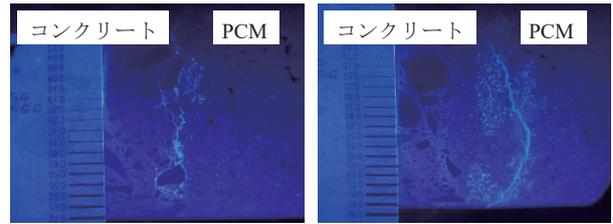


図-8 後施工樹脂注入による樹脂注入状況
(付着強度試験用供試体)

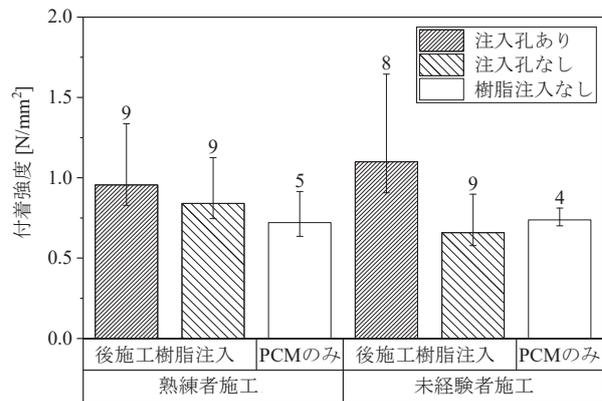


図-9 付着強度の評価結果(横向き施工)

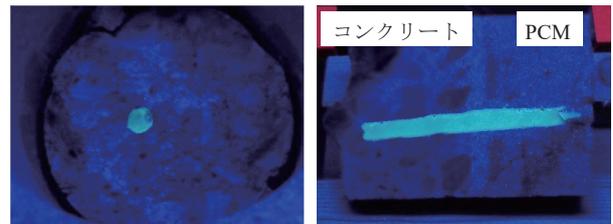


図-10 注入孔を充填する樹脂
(左：破断面，右：切断面)

強固に繋ぎ止める効果が期待された。

図-9に、横向き施工の試験体での付着強度の評価結果を示す。図中の数値は、サンプル数を表す。エラーバーは、正の値側が標準偏差、負の値側が標準誤差を表す。施工者の技量(熟練者、未経験者)によらず、付着強度は後施工樹脂注入(注入孔あり)の供試体で最も高くなった。この理由は、試験体に存在する補修境界や隙間など、弱部になり得る箇所を樹脂が接合するとともに、注入孔に充填された樹脂が既設躯体とPCMを繋ぎ止めるアンカー(図-10)の役割を果たしたためと考えられる。

一方、後施工樹脂注入(注入孔なし)とPCMのみ(樹脂注入なし)の間には大きな相違が認められず、後施工樹脂注入の効果が明確でなかった。この理由には、横向き施工の試験体では断面修復工法のみを適用した状態で補修境界がある程度一体化されていたことが考えられる。図-9のPCMのみの条件において、熟練者施工と未経験者施工の付着強度を比較すると、同程度の値になっている。これは、施工者

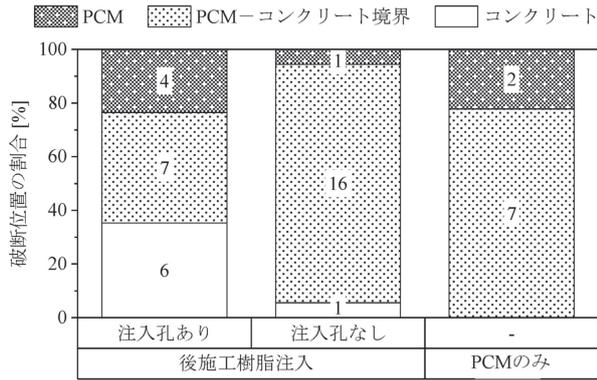


図-11 供試体の破断位置 (横向き施工)

の技量の差が顕著になるほど横向き施工が不利な施工条件ではなかったことを意味する。したがって、横向き施工の試験体においては、断面修復工法のみであっても補修境界がある程度一体化しており、後施工樹脂注入の効果が相対的に小さくなる状態であったと考えられる。

図-11 に、図-9 に示したデータを取得した際の供試体の破断位置を示す。図中の数値はサンプル数を表す。なお、図-9 で熟練者施工と未経験者施工の付着強度に大きな相違が見られなかったことから、図-11 では施工者の技量による区別は行っていない。PCM のみの破断位置は、全てが既設躯体と PCM の境界部あるいは PCM 間の塗り継ぎ部であり、補修後の構造物において補修境界が弱部となることが確認された。一方、後施工樹脂注入を実施した供試体の破断位置は、注入孔なしで約 6 %、注入孔ありで約 35 %が既設躯体であり、PCM のみと比較して既設躯体での破断が増加した。特に、注入孔ありでは既設躯体で破断した供試体の割合が高い。これは、注入した樹脂による補修境界の接合や、注入孔に充填された樹脂のアンカー効果によって既設躯体と PCM が一体化し、補修境界を含む補修箇所の強度が既設躯体と同等以上に高められたためと考えられる。

表-2 に、上向き施工の試験体での付着強度の評価結果を示す (後施工樹脂注入の有無それぞれで、サンプル数は 2)。後施工樹脂注入なしの付着強度は平均値で 0.48 N/mm^2 となり、横向き施工での値 (0.73 N/mm^2 : 熟練者施工と未経験者施工の平均値) よりも低い値を示した。一方、後施工樹脂注入あり (注入孔なし) の付着強度は平均値で 0.95 N/mm^2 となり、横向き施工での値 (0.75 N/mm^2) よりも高い値を示した。後施工樹脂注入の有無によって、施工条件に応じた付着強度の大小関係が異なる。この理由には、上向き施工の不利な施工条件が考えられる。上向き施工の試験体では、自重による PCM の剥がれ落ち

表-2 付着強度の評価結果 (上向き施工)

後施工樹脂注入の有無	付着強度 (N/mm^2)	破断位置
あり	1.14	PCM 塗り継ぎ部
(注入孔なし)	0.75	PCM 塗り継ぎ部
なし	0.34	PCM-コンクリート境界
	0.62	PCM-コンクリート境界

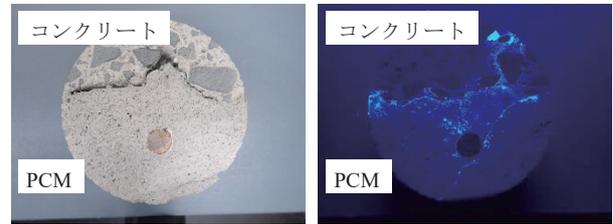


図-12 透気試験用供試体

(後施工樹脂注入 左: なし, 右: あり)

に留意しながら、作業しづらい体勢で施工を行う必要がある。このため、上向き施工の試験体では、断面修復工法のみでの施工では空隙や隙間が補修境界に多く存在し、既設躯体と PCM の一体性が乏しい状態にあったと推察される (図-12 参照)。後施工樹脂注入を実施した試験体では、これら空隙や隙間を注入した樹脂によって接合・一体化したことから、表-2 に示すように付着強度が増加したと考えられる。したがって、後施工樹脂注入による補修境界の一体化は、不利な施工条件の補修箇所において、より高い効果を発揮すると言える。

3.2 透気量

図-12 に、上向き施工の試験体から作製した透気試験用供試体の写真を示す。後施工樹脂注入なしの供試体 (図-12 左) では、既設躯体と PCM の境界部を中心に空隙や隙間が残存しており、密実な補修境界が形成されていない。一方、後施工樹脂注入ありの供試体 (図-12 右) では、既設躯体と PCM の境界部、PCM 間の塗り継ぎ部および鉄筋周辺といった補修境界や、既設躯体に存在する空隙や隙間へ樹脂が充填されており、密実な補修境界が形成されている。

図-13 に、各供試体に対する透気量の評価結果を示す。なお、図-13 の透気量は、供試体の単位断面積、単位時間あたりの値である。後施工樹脂注入なしの試験結果を見ると、補修境界を含む供試体の透気量は、供試体を構成する材料 (コンクリートと PCM) の透気量と比較して非常に大きい。これは、補修後の構造物では、補修境界が劣化因子や雨水の主要な侵入路になる可能性が高いことを意味する。したがって、補修後の再劣化を防止するには、補修材料自体の性能に加え、実環境中における施工条件も踏まえた対策工の検討を行い、できる限り密実な補修境界となるよう努めることが重要となる。

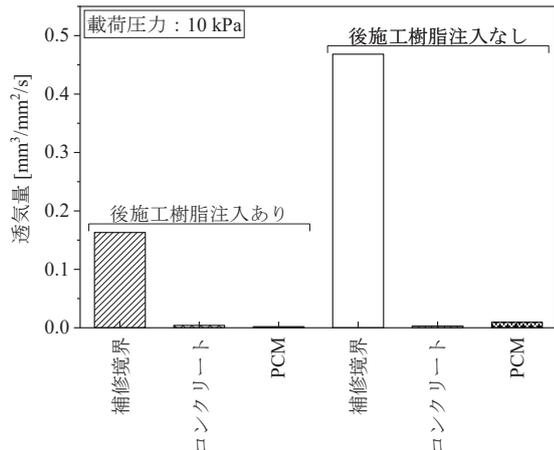


図-13 透気試験結果

次に、補修境界の透気量を後施工樹脂注入の有無で比較すると、後施工樹脂注入ありの透気量が後施工樹脂注入なしの透気量よりも非常に小さい（約 35%）。これは、断面修復工法のみを適用した段階で残存する空隙・隙間へ樹脂が充填され、供試体が密実なものになったためと考えられる（図-12）。したがって、補修後の構造物における密実な補修境界を実現するにあたり、後施工樹脂注入は有効な対策の 1 つになり得ると言える。ただし、後施工樹脂注入ありの供試体であっても、供試体を構成する材料の透気量までは低下していないことから、後施工樹脂注入による補修境界の空隙や隙間の充填には、まだ改善の余地がある。そのため、今後も密実な補修境界の実現に向けた取り組みを継続し、材料・工法の両面から改良を行うことが必要である。

4. まとめ

実構造物を模擬した試験体を用い、補修境界の一体性・密実性の向上に対する後施工樹脂注入の効果を評価した。得られた知見を以下に示す。

- 1) 断面修復工法のみを適用した試験体では、既設躯体と PCM の境界部、PCM 間の塗り継ぎ部および鉄筋周辺といった補修境界に空隙や隙間が残存した。このような空隙や隙間へ劣化因子や雨水が侵入し、鉄筋腐食や断面修復材の剥離・剥落を助長する恐れがある。
- 2) 断面修復工法を施工した後に注入孔を設けて樹脂を注入することにより、補修境界や既設躯体に存在する空隙や隙間を樹脂で充填し、密実化することが可能である。
- 3) 後施工樹脂注入を行った試験体では、樹脂による補修境界の接合や、注入孔を充填する樹脂によるアンカー効果によって PCM と既設躯体間

の付着強度が向上した。この効果は、上向き施工など、不利な施工条件での断面修復においてより顕著であった。

- 4) PCM のみで補修（樹脂注入なし）した供試体の付着強度試験での破断位置は、全て補修境界であった。一方、後施工樹脂注入を実施した場合、既設躯体で破断する供試体が増加した。これは、注入した樹脂による補修境界の接合や、注入孔に充填された樹脂のアンカー効果によって既設躯体と PCM が強固に接合されたためと考えられる。
- 5) 補修境界を含む供試体の透気量は、供試体を構成する材料（コンクリートと PCM）の透気量と比較して非常に大きな値となった。そのため、補修後の構造物では、補修境界が劣化因子や雨水の主要な侵入路になる可能性が高い。
- 6) 後施工樹脂注入を実施することで、補修境界を含む供試体の透気量が大きく低減した。これは、補修境界や空隙・隙間へ樹脂が充填され、供試体が密実化したためと考えられる。

謝辞

本研究では、元島根大学学生の長衛諒哉氏および株式会社岡貞組の皆様に多大なるご協力を頂きました。ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 日本コンクリート工学会，コンクリート診断技術 ‘11[基礎編]，pp. 252-253，2011.
- 2) 「コンクリート補修・補強マニュアル」編集委員会，コンクリート補修・補強マニュアル，産業調査会 事典出版センター，pp. 97-105，2003.
- 3) 氏家勲，菊地一義，佐藤良一，長瀧重義：新旧コンクリートの打継目の透気性状に影響を及ぼす要因に関する研究，コンクリート工学年次論文報告集，Vol. 17，No.1，pp. 747-752，1995.
- 4) 正井資之，嘉藤由香利，福崎道康，溝渕利明：ダム嵩上げに伴う新旧コンクリートの一体性に関する一考察，コンクリート工学年次論文集，Vol. 25，No.1，pp. 1127-1132，2003.
- 5) 古内仁，酒井亮，上田多門：ポリマーセメントモルタルの付着特性に与える界面粗度および粗骨材寸法の影響，コンクリート工学年次論文集，Vol. 28，No.2，pp. 1567-1572，2006.
- 6) 土木学会：技術推進ライブラリー No.20「コンクリート構造物における IPH 工法（内圧充填接合補強工法）の設計施工法」に関する技術評価報告書，pp. 13，2017