

コンクリート水利構造物に対する無機系補修・補強材料の付着性阻害 要因の解明

Clarification of factors causing a decrease in bond strength between inorganic repair material and concrete structure used for water supply

島根大学 助教 上野和広

(研究計画ないし研究手法の概略)

1) 研究の背景

コンクリート構造物の長寿命化を実現するには、老朽化した既設躯体と補修・補強材料が一体化し、劣化因子の侵入や外力へ抵抗することが不可欠である。実構造物に対する補修・補強を考えると、その対象の多くは供用中に長期間自然環境中へ暴露されたコンクリート構造物であり、こうした構造物では各種劣化作用によって既設コンクリートの変質が生じている可能性が高い。このようなコンクリートの変質は、補修・補強材料との相互作用によって決定付けられる両材料間の一体性（付着性）にも影響を及ぼす。しかしながら、劣化によって変質したコンクリートと補修・補強材料の付着性については、未解明な部分が多く残された状況にある。補修・補強工法を適用したコンクリート構造物の確実な機能・性能の回復あるいは向上を担保し、再劣化を防止するには、既設コンクリートの変質が補修・補強材料との付着性へ及ぼす影響とその原因を明確にし、下地処理方法や補修・補強工法の改善へ反映する必要がある。本研究では、水と接触する特殊な環境下で供用されるコンクリート水利構造物を主な対象とし、既設コンクリートからのカルシウム (Ca) 溶脱が補修・補強材料との付着性へ及ぼす影響を評価するとともに、その影響因子について検討を行った。

2) 実験の概要

本研究では、コンクリート水利構造物で確認される補修材料の付着性阻害の影響因子について検討を行うため、以下の2つの検討を実施した。

【検討1】

既往の研究¹⁾では、Ca溶脱したコンクリートに対する補修材料の付着強度が、Ca溶脱していないコンクリートに対するものと比較して小さくなることが確認された。また、コンクリート水利構造物では、セメント水和物からのCa溶脱に伴い、セメント硬化体の空隙率の増加や微小圧縮強度の低下が進行すると報告されている²⁾。これより、Caが生じた既設コンクリートにおける補修材料の付着強度低下のメカニズムとして、Ca溶脱に伴う既設コンクリート表層の脆弱化が推察された。この仮説を検証するため、強度を始めとする各種条件が異なる母材コンクリートへポリマーセメントモルタル (PCM) を打ち継いだ供試体を対象に付着強度試験を実施し、母材コンクリートと付着強度の関係を分析した。

本研究で採用した母材コンクリートの配合を **Table 1** に示す。セメントには、普通ポルトランドセメントを用いた。上記の母材コンクリートを28日間養生（水中あるいは気中）した後、PCMを打ち継ぐための下地処理と後述する表面吸水試験³⁾を行うため、気中養生を開始した。下地処理は、ワイヤーブラシによる析出物の除去とプライマー（エチレン酢酸ビ

ニル系)の塗布である。表面吸水試験は、母材コンクリートが吸水する水量を計測し、その表層品質を評価するために実施した。下地処理完了後、母材コンクリートの型枠面へPCMを打ち継いだ。PCMには、アクリル酸エステル系再乳化形粉末樹脂を配合したものを、水粉体比は18%とした。PCM打設後は、材齢2日で脱型し、5日間の水中養生を行った後、気中養生を開始した。そして、PCMの材齢が28日に達した後、一面せん断試験⁴⁾によって付着強度の評価を行った。一面せん断試験で付着強度を評価した理由は、応力が発生する領域を付着界面付近に限定可能であることから、母材コンクリートやPCMでの破断の発生を抑制できると考えたためである。供試体条件の一覧をTable 2に示す。

Table 1 コンクリートの計画配合

| W/C | W | C | S | G | AE |
|-----|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|---------------------|
| [%] | [kg/m ³] | [kg/m ³] | [kg/m ³] | [kg/m ³] | [g/m ³] |
| 40 | 179 | 448 | 638 | 1,033 | 90 |
| 50 | 179 | 358 | 699 | 1,044 | 72 |
| 60 | 179 | 298 | 755 | 1,036 | 60 |

*W/C: 水セメント比, W: 水, C: セメント, S: 細骨材, G: 粗骨材, AE: AE剤
*粗骨材最大寸法 $G_{max} = 20 \text{ mm}$

Table 2 供試体の条件 (検討1)

| 供試体名 | W/C | 養生条件 | W/P |
|--------|-----|------|-----|
| | [%] | | [%] |
| 40W-18 | 40 | W | 18 |
| 40A-18 | | A | |
| 50W-18 | 50 | W | |
| 50A-18 | | A | |
| 60W-18 | 60 | W | |
| 60A-18 | | A | |

*W/P: 水粉体比, W: 水中養生, A: 気中養生

【検討2】

本検討では、実際にCa溶脱を促進した母材モルタルへPCMを打ち継いだ供試体を用い、付着強度試験を実施した。また、比較用として、Ca溶脱を促進していない母材モルタルを用いた供試体についても同様の試験を実施するとともに、母材モルタル表面付近の微小部硬度の計測を併せて行うことで、Ca溶脱に伴う母材モルタル表層の脆弱化と付着強度の関係を分析した。微小部硬度の計測は、JIS Z 2244に準じて実施し、試験力を0.98 N、試験力の保持時間を30 secとした。

母材モルタルには、普通ポルトランドセメントを用い、水セメント比50%、砂:セメント=3:1の配合で作製したモルタルを用いた。Ca溶脱の促進には、浸漬法^{5), 6)}、通水法⁵⁾、電気化学的促進方法⁶⁾など複数の手法がある。本研究では、当初、Ca溶脱促進手法として実績¹⁾のある電気化学的促進方法を用いる計画としていた。しかしながら、そのために必要な装置の製造が種々の要因によって滞る状況となることが判明したため、既往の研究⁷⁾を参考に、硝酸アンモニウム(NH₄NO₃)溶液(濃度480 g/L)へ母材モルタルを浸漬させる手法を用いることとした。浸漬期間は14日間とし、Ca溶脱を行わない母材モルタルは、この間水中で保管した。浸漬後、母材モルタルの切断面を対象に、フェノールフタレイン(PP)溶液の噴霧による呈色状況と、微小部蛍光X線装置(microXRF)を用いて計測したCa濃度分布からCa溶脱深さを評価した。

その後、それぞれの母材モルタル表面へプライマーの塗布を行った上で、PCMを打ち継いだ。プライマーには代表的な3種類として、ポリアクリル酸エステル系(PAE)、エチレン酢酸ビニル系(EVA)、エポキシ樹脂系(EP)を使用した。また、PCMで使用する

Table 3 供試体の条件 (検討2)

| 供試体名 | プライマー | PCM | P/C |
|---------|-------|-----|-----|
| | | | [%] |
| EP-PAE | EP | PAE | 10 |
| PAE-PAE | PAE | PAE | |
| EP-EVA | EP | EVA | |
| EVA-EVA | EVA | EVA | |
| EP-SBR | EP | SBR | |
| PAE-SBR | PAE | SBR | |
| EVA-SBR | EVA | SBR | |

*P/C: ポリマーセメント比

ポリマーには、ポリアクリル酸エステル系 (PAE), エチレン酢酸ビニル系 (EVA), スチレンブタジエンゴム系 (SBR) を使用し, Ca 溶脱の有無や補修材料 (プライマー, PCM) の仕様と, 付着強度の相互関係を分析した. 試験条件の一覧を **Table 3** に示す. いずれの試験条件においても, 母材モルタルへ Ca 溶脱を施した供試体と, 施していない供試体を用意した.

(実験調査によって得られた新しい知見)

【検討 1】

Fig. 1 に, 母材コンクリートの圧縮強度 f'_c と割裂引張強度 f_t から算出したせん断強度 τ_f を示す. なお, せん断強度 τ_f は, 式 (1) から算出した値である.

$$\tau_f = \sqrt{\frac{f'_c \cdot f_t}{2}} \quad (1)$$

母材コンクリートの各強度は, 水セメント比 W/C が小さいほど高い, 気中養生よりも水中養生の方が高い, といった一般的な傾向を示し, $W/C = 40\%$ の気中養生と $W/C = 50\%$ の水中養生, $W/C = 50\%$ の気中養生と $W/C = 60\%$ の水中養生が, それぞれ類似した値を示した.

Fig. 2 に, 表面吸水試験によって評価した各母材コンクリートの累積吸水量 w を示す. なお, **Fig. 2** では一部区間を省略して表示している. 累積吸水量 w は, 気中養生を行った母材コンクリートで極めて大きな値を示すとともに, 水セメント比 W/C の増加に伴って大きくなる傾向を示した. これは, 気中養生を行った母材コンクリートにおいて養生中の水和反応が十分に生じなかったことや, 水セメント比 W/C の増加に伴って緻密でない組織構造が形成されたためと考えられる.

Fig. 1 と **Fig. 2** に示した母材コンクリートの強度や表層品質とせん断付着強度 $(\tau_b)_f$ の関連性を分析するため, せん断付着強度 $(\tau_b)_f$ をせん断強度 τ_f に対してプロットした (**Fig. 3**). なお, **Fig. 3** 中の各データポイントの内部は, 供試体の破断位置を表す. せん断付着強度 $(\tau_b)_f$ は, せん断強度 τ_f の増加に伴って高くなる傾向を示した. 母材コンクリートで破断した供試体だけでなく, 付着界面で破断した供試体においてもこの傾向が確認されたことから, 一見すると付着界面で破断したように見える場合であっても, 付着界面近傍の母材コンクリートの力学的特性が付着強度の発現に影響を及ぼしたものと考えられる. また, **Fig. 3** で母材コンクリートの表層品質がせん断付着強度 $(\tau_b)_f$ へ及ぼす影響に着目すると, 大きな累積吸水量 w を示した母材コンクリート (気中養生) の方が, 水中養生を行った母材コンクリートよりも高いせん断付着強度 $(\tau_b)_f$ を発現したことを確

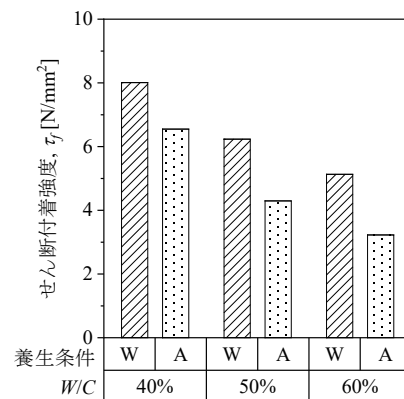


Fig. 1 各母材コンクリートのせん断強度

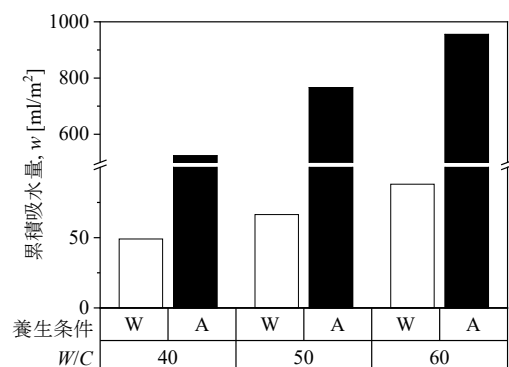


Fig. 2 各母材コンクリートの累積吸水量

認できる．さらに，気中養生を行った供試体では，破断位置の多くが母材コンクリートであることから，付着界面での剥離を生じさせるための応力は，**Fig. 3** に示す付着強度よりも大きな値になる．これより，母材コンクリートの強度が等しい条件においては，累積吸水量 w が大きいほど付着強度が高くなると考えられる．これは，母材コンクリートの組織構造が緻密でなかったことから，プライマーやPCMの成分が母材コンクリート内へ浸透し，投錨効果⁸⁾によって付着界面の一体性が高まったためと考えられる．

上記の実験結果を踏まえ，Ca溶脱がPCMとの付着性へ及ぼす影響について考えると，Ca溶脱が生じたコンクリートでは微小圧縮強度の低下やセメント硬化体の空隙率の増加が生じることから，母材コンクリートの強度の低下による負の効果と，補修材料の浸透性向上による正の効果の双方が生じる可能性がある．そのため，Ca溶脱が付着性へ及ぼす影響を判断するためには，母材コンクリートからのCa溶脱に伴う力学的特性と組織構造の変化を総合的に評価する必要があると言える．

【検討 2】

Fig. 4 に，PP溶液噴霧後の呈色状況とmicroXRFによるCa濃度分布（左側が NH_4NO_3 溶液との接触面）を示す． NH_4NO_3 溶液との接触面からCa濃度が低い（寒色）領域が深さ5~6 mm程度まで広がっていることから，母材モルタル表面からのCa溶脱を確認できる．なお，このCa溶脱領域はPP溶液噴霧後における非呈色領域と概ね一致している．

Fig. 5 は，**Fig. 4** と同様な母材モルタル切断面を対象に計測した，ビッカース硬さ（HV0.1/30）の深さ方向分布である．Ca溶脱なしの場合，ビッカース硬さは概ね同一の値で推移していることから，母材モルタルは比較的均質な力学的特性を有することを確認できる．一方，Ca溶脱ありの場合は， NH_4NO_3 溶液接触面からの深さ7 mm以深において，Ca溶脱なしと同様なビッカース硬さを示すものの，その値は NH_4NO_3 溶液接触面に近くなるほど小さくなる傾向を示した．これより，Ca溶脱に伴う母材モルタル表層部の脆弱化が確認された．

Fig. 6 に，**Table 3** に示した各試験条件下でのせん断付着強度 $(\tau_b)_f$ の計測結果を示す．

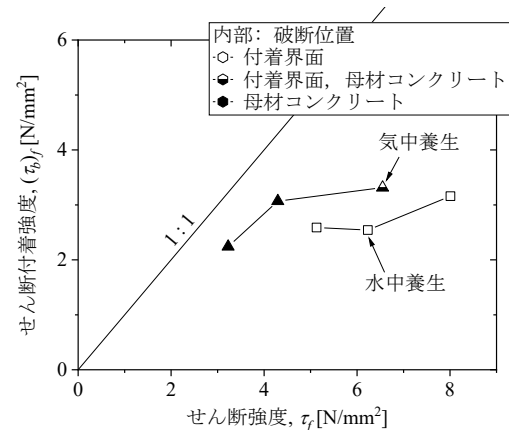


Fig. 3 せん断付着強度とせん断強度の関係

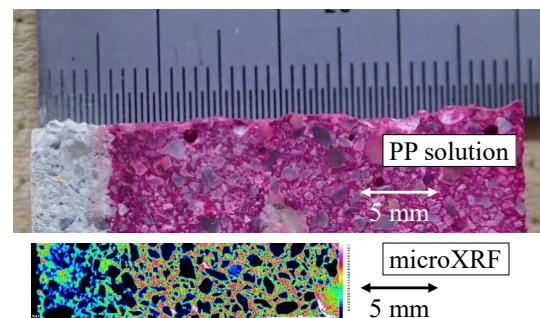


Fig. 4 NH_4NO_3 溶液浸漬によるCa溶脱状況

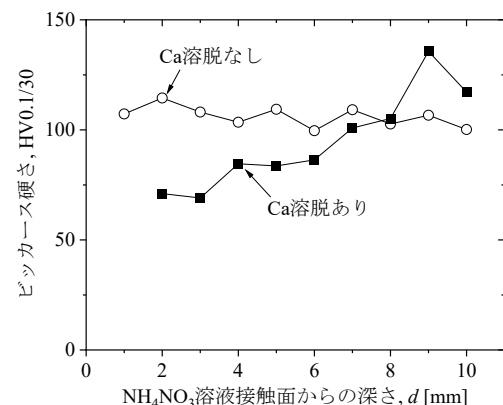


Fig. 5 ビッカース硬さの深さ方向分布

また、Fig. 7 に、Fig. 6 の結果を得た時の供試体の破断位置を示す。なお、Fig. 6 中のエラーバーは標準誤差を表す。EVA-EVA を除く全ての条件において、Ca 溶脱ありの供試体の方が小さなせん断付着強度 $(\tau_b)_f$ を示した (Fig. 6)。これは、Ca 溶脱によって母材モルタル表層の脆弱化が生じ、それによって Fig. 3 で確認したようなせん断付着強度 $(\tau_b)_f$ の低下が生じたためと考えられる。一方、Fig. 7 を見ると、Ca 溶脱なしの供試体の多くが付着界面での破断となっているのに対し、Ca 溶脱ありの供試体の多くが母材モルタルでの破断であった。母材モルタルで破断した供試体においては、付着界面での剥離を生じさせるための応力は、Fig. 6 に示す付着強度よりも大きな値になる。そのため、「付着界面での剥離」で定義する真の意味での付着強度に対する Ca 溶脱の影響は、Fig. 6 に示すものよりも小さくなる可能性がある。

次に、補修材料の条件がせん断付着強度 $(\tau_b)_f$ へ及ぼす影響について論じる。PAE を混入した PCM を打ち継いだ条件において、プライマーの種類 (EP, PAE) による影響を比較すると、Ca 溶脱なしとありの双方において同程度のせん断付着強度 $(\tau_b)_f$ が示された。しかしながら、他の PCM (EVA, SBR を混入) については、EP のプライマーを用いた条件の方が、他のプライマーを用いた条件 (PAE, EVA) よりも高いせん断付着強度 $(\tau_b)_f$ を発揮している。これは、EP が接着剤としての機能を期待するエポキシ樹脂系プライマーであることから、母材モルタルへ浸透して脆弱部を強化するとともに、PCM との接着性を高めたためと考えられる。また、Ca 溶脱した条件下においても、EP のプライマーを用いた際に高いせん断付着強度 $(\tau_b)_f$ が発揮されたことから、EP のプライマーによる脆弱部の強化と補修材料との付着性向上は、コンクリート水利構造物の補修時において有効な手段となる可能性が高い。

【まとめ】

本研究では、コンクリート水利構造物を主な対象とし、母材コンクリートあるいはモルタルからの Ca 溶脱が PCM との付着性へ及ぼす影響を評価するとともに、その影響因子について検討を行った。各種条件の異なる母材コンクリートを用いた基礎的な検討と、実際に Ca 溶脱を促進した母材モルタルを用いた検討を実施し、Ca 溶脱に伴う表層部の脆弱化が付着性低下の主な要因であることを示した。しかしながら、Ca 溶脱が生じる際には、他の元素についても溶脱や移動が生じると考えられる。今後さらに研究を進め、水との接触に伴うコンクリート表層部の化学組成の変化が、補修材料との付着性へ及ぼす影響を明確にする必要

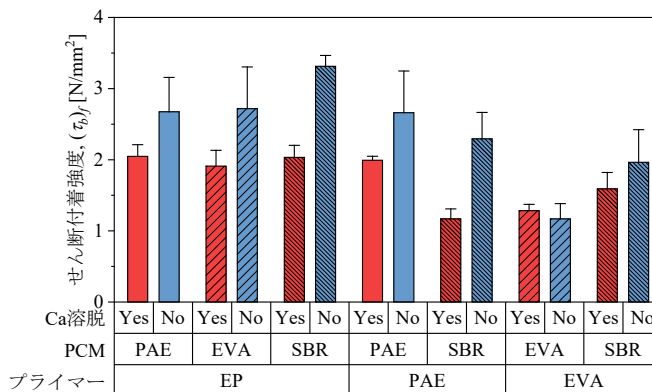


Fig. 6 せん断付着強度の計測結果

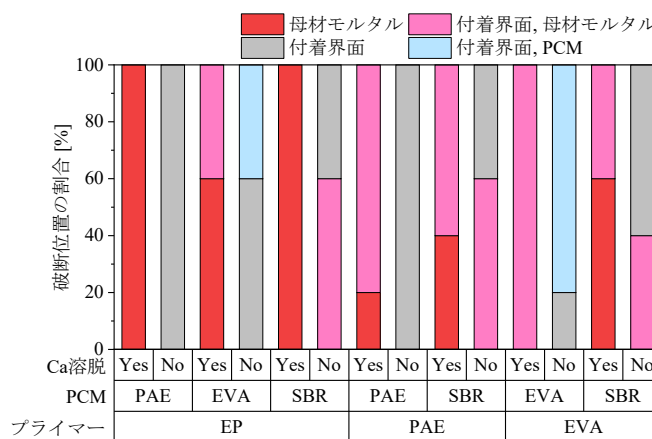


Fig. 7 せん断付着強度での供試体破断位置

がある.

参考文献

- 1) 上野和広, 森山 翼, 森 充広, 川邊翔平, 石井将幸 (2021): カルシウム溶脱がコンクリートと無機系補修材料とのせん断付着強度へ及ぼす影響, 農業農村工学会論文集, 313, I_333-I_341.
- 2) 橋本勝文, 大即信明, 松土真也, 西田孝弘 (2007): モルタルからの Ca 溶脱に伴う化学的変質及び物理的変質に関する基礎的研究, コンクリート構造物の補修, 補強, アップグレード論文報告集, 7, 361-368.
- 3) 林 和彦, 細田 暁 (2011): コンクリート実構造物に適用できる表面吸水試験方法の開発, コンクリート工学年次論文集, 33(1), 1769-1774.
- 4) 上野和広, 浅野純平, 長束 勇, 石井将幸, 西山竜朗 (2019): 無機系材料間のせん断付着強度の評価に関する基礎的研究, 農業農村工学会論文集, 308, I_17-I_25.
- 5) 渡邊賢三, 横関康祐, 小関喜久夫, 大門正機 (1999): 水中へのセメント系材料のカルシウム溶出に関する実験的評価, コンクリート工学年次論文報告集, 21(2), 967-972.
- 6) 斎藤裕司, 田島孝敏, 中根 淳 (1997): 拡散と電気化学的促進手法によるモルタルの Ca 溶出に伴う変質試験, コンクリート工学年次論文報告集, 19(1), 1009-1014.
- 7) M. Jebli, F. Jamin, C. Pelissou, E. Malachanne, E. Garcia-Diaz and M. S. El Yousoufi (2018): Leaching effect on mechanical properties of cement-aggregate interface, Cement and Concrete Composites, 87, 10-19.
- 8) 小林直樹, 秋本雅人, 石原新也, 大河原 義明, 片岡優子, 鈴木 修, 若森達也, 金田俊和 (2020): 接着剤読本, 日本接着剤工業会, 14-16.

(発 表 論 文)

- 1) 吉田美里, 上野和広, 石井将幸 (2023): カルシウム溶脱した母材モルタルに対する各種ポリマーセメントモルタルの付着性, 2023 年度 (第 72 回) 農業農村工学会大会講演会, 2023.8, 発表予定
- 2) 上野和広, 吉田美里, 石井将幸: コンクリートの諸条件が無機系補修材料とのせん断・単軸引張付着強度へ及ぼす影響, 農業農村工学会論文集, 投稿中