

報告 ポリマーセメントモルタルの耐久性能の非破壊検査による評価

大久保 誠^{*1}・中井 裕司^{*1}・辻 総一朗^{*2}・豊福 俊泰^{*3}

要旨: ポリマーセメントモルタルの優れた耐久性能は、定められた試験方法に準じて実証されているものの、実構造物に施工されたポリマーセメントモルタルの性能を確認し評価する事例は少ない。本研究は、実施工後後を想定し養生条件を変えたポリマーセメントモルタルに対して非破壊検査試験を実施し、その表層品質による耐久性評価と既往の研究で示されているコンクリートとの関係性について検証した。その結果、養生条件によって変動する表層品質を非破壊検査試験により測定可能であることを確認し、さらにコンクリートに比べて耐久性能が優れていることを明らかにした。

キーワード: ポリマーセメントモルタル, 初期養生, 透水性試験, 透水係数, 透気係数, 非破壊検査

1. はじめに

ポリマーセメントモルタル(以下:PCM)は、エマルジョンとセメントを練り混ぜることで得られるモルタルの一種で、優れた耐久性能を有する。現在、PCMの開発は盛んに行われており、多種多様なPCMがコンクリート構造物の補修・補強工事に採用されている。使用するポリマーの種類や配合などにより、PCMの性状や施工性は大きく異なるが、その品質はJIS A 1171の試験方法で評価することが定められおり、養生方法は相対湿度90%環境で2日間経過した後、5日間水中養生し、その後材齢28日まで気中養生の組合せで示されている。しかし、施工現場においてPCMの想定している品質を確保するためのJIS A 1171に準拠した養生を行う事は非常に困難であり、代替の養生方法の多くは現場に委ねられている。上記の如何は、補修・補強材料としてPCMに求められている性能が発揮されず再劣化に至る原因の一つになっていると考えられており、施工後のPCMの品質を非破壊検査で評価することが重要となる。

著者らは、PCMの設計・施工に関する指針を出版し、PCMの養生方法に関する提案を行っている¹⁾。現在の知見では、「打設後2日間は相対湿度90%の雰囲気相当に置く養生」を求めている²⁾。具体的には、2日間の湿布養生、封緘養生、RH90%の養生および養生剤の塗布養生などを提案している。

コンクリート構造物の場合、現場で表層コンクリートの品質を非破壊検査する方法としては、R.Torrentによって提案され、豊福らが技術開発したダブルチャンバー透気性試験法(吸気圧法)、ダブルチャンバー透水性試験法(送水圧法、図-1)およびダブルチャンバー透気性試験法(送気圧法)などが実用化されるに至っている^{3),4)}。特に、ダブルチャンバー透水性試験法(送水圧法)は、床版下面側や橋脚側面など全方向の透水性が20分程度で測定可

能であり、現場測定に適した方法である。しかし、コンクリートに対して実用化されている非破壊検査をPCMに適用している事例は少ない。

そこで、本研究では、施工後のPCMの品質を確認することを想定し養生条件をパラメータとしたPCMの表層品質を非破壊検査で評価する。さらに、コンクリートの品質との比較を行い、PCMの耐久性能を検証する。

2. 試験概要

2.1 使用したPCM

使用したPCMは3種類で、表-1に基本配合を示す。試験体名のAは、エマルジョンと粉体の2材型PCMで、有効水結合材比W/B=31.6%、ポリマーセメント比P/C=11.7%である。Bは粉末樹脂があらかじめ粉体内に混入されている1材型PCMで、有効水結合材比W/B=38.4%、ポリマーセメント比P/C=10.1%である。Cも1材型PCMで、有効水結合材比W/B=34.9%、ポリマーセメント比P/C=8.1%である。Aは一般的に製品化されているPCMと比べるとポリマー量が多く2材型である事が特徴で、補強工事での使用事例が多い。主な施工方法は、湿式吹付け施工である。Bは汎用的な断面修復材、Cは耐摩耗性に優れ水路等の表面被覆材として用いられている。BおよびCの施工方法は左官施工が多い。

2.2 供試体作製方法

供試体は3種類である。表-2の○に示す型枠は、塩ビ管VU150(内径φ154mm)を厚さ40mmに切断して、塗

表-1 各種PCMの基本配合(%)

試験体名	W/B	P/C	材料形態
A	31.6	11.7	2材型
B	38.4	10.1	1材型
C	34.9	8.1	1材型

W:水, B:有効結合材, P:ポリマー, C:セメント

*1 前田工織(株) 構造物メンテナンス推進部(正会員)

*2 前田工織(株) 開発技術部

*3 九州産業大学 工学部都市基盤デザイン工学科教授 工博(正会員)

装合板の上に設置し、両面テープなどを用いて固定したものをを用いた。各 PCM は 2 層に分けて打設し、型枠周囲にセメントナイフを差し込み空隙が生じないように締め固めた。最後にテーブルバイブレーターを 10 秒間使用し金コテで表面を仕上げた。□に示す型枠は、塗装合板を使用し寸法が 150×150×150mm 立方体となるよう作製した。各 PCM は 3 層に分けて上記同様に締め固めた。最後にテーブルバイブレーターを 20 秒間使用し金コテで表面を仕上げた。△は、φ50×100 のプラスチックモールドを用いて、各 PCM を 2 層に分けて打設し空隙が生じないように締め固めた。

供試体は、いずれも標準配合とし、材料 A はモルタルミキサーにて練混ぜ、コンパネに吹付けた材料を採取し使用した。材料 B および C は、ハンドミキサー(回転数：550rpm)にて 3 分間練混ぜた。養生条件は 4 水準で、試験体数は各水準で 3 体とした。

気中養生：PCM を打設後、20℃、相対湿度 RH60% の環境に静置する。

被膜養生：PCM を打設後、表面活性剤型膜養生剤(フィニッシュコート)を刷毛で PCM に塗布し、2 日後水洗いした。その後、気中養生と同一とする。

湿布養生：PCM を打設後、材齢 2 日の湿布養生とする。その後、気中養生と同一とする。

JIS 養生：PCM を打設後、「JIS A 1171」に従い、RH90% 環境で 2 日静置し、5 日間水中養生し、その後、気中養生と同一とする。

15M、22M および 30M は、圧縮強度 15、22 及び 30N/mm² の普通コンクリートの粗骨材分布の影響を受けないようにモルタル成分のみを用いて作製した供試体である⁴⁾。

表-2 PCM と養生条件のパラメータ

試験体名	養生条件			
	気中	被膜	湿布	JIS
A	○	○	○	○、□、△
B	○	○	—	○、△
C	○	○	—	○、□、△
15M	○	—	—	—
22M	○	—	—	—
30M	○	—	—	—

○：円柱(φ154×40 mm)

□：立方体(150×150×150 mm)

△：円柱(φ50×100mm)

表-3 フレッシュ性状と強度

試験体名	フロー(mm)	単位容積質量(kg/l)	空気量(%)	曲げ強度(N/mm ²)	圧縮強度(N/mm ²)
A	132	2.18	5.0	11.1	54.5
B	149	2.07	6.3	10.4	48.3
C	141	2.03	7.3	8.2	45.3

2.3 フレッシュ性状と強度試験

PCM のフレッシュ性状のフロー値、単位容積質量および空気量の測定は、「JIS A 1171 : 2000-6.1 フロー試験」、「JIS A 1171 : 2000-6.3 単位容積質量試験」に、圧縮強度および曲げ強度は、寸法 40×40×160mm の 3 連型枠を使用し JIS に定められた養生後、「JIS A 1171 : 2000-7.2 曲げ強さ及び圧縮強さ試験」に準じて測定した。試験結果を表-3 に示す。

2.4 ダブルチャンバー透水性試験(送水圧法)

トヨフク法透水試験機(図-1)は、測定部が内側チャンバーと外側チャンバーを有する構造からなり、透水性は、内側チャンバーの透水量によって評価される³⁾。外側チャンバーの吸引圧力(真空圧 70kPa、図-1 の②)とシール材によりダブルチャンバーが構造物の表面に完全に密着するため、内側チャンバーからの水の流出(同①)が防止され、結果として内側チャンバー下に透水(浸透)の流れ(同③)が形成される。水圧状態で漏水なしに測定可能とするため、コンクリート表面に貼付けたシール材に、チャンバー部表面の極軟質ゴムを接することにより、真空圧で密着させる方法とする。試験条件(透水水圧 55kPa、透水時間 20 分)とすると、式(1)より透水(浸透)量 $w(\text{cm}^3)$ を測定し、式(2)より透水係数 $P(\text{m}/\text{sec})$ (以後 P 値とする)を求める。

$$w = w_1 - w_0 \quad (1)$$

$$P = \frac{G\rho w^2}{2tA^2P_u} \times 10^{-4} \quad (2)$$

ここで、 w_1 ：透水終了時の水量(cm^3)、 w_0 ：透水開始時の水量(cm^3)、 G ：重力加速度(m/sec^2)、 ρ ：水

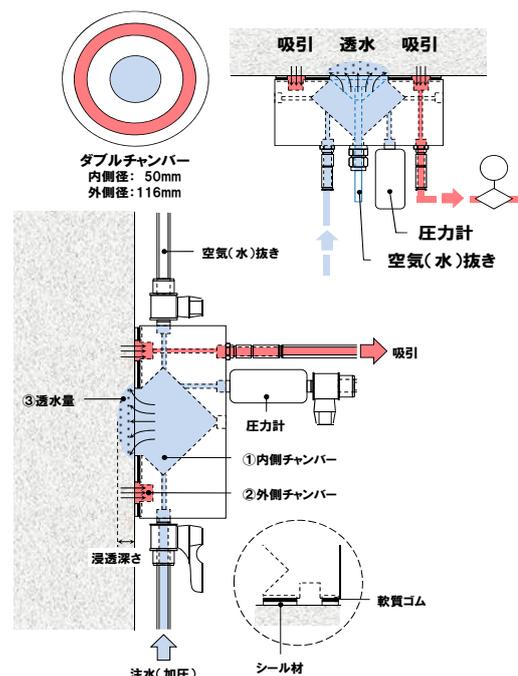


図-1 ダブルチャンバー透水性試験の試験原理

の単位容積質量(g/cm^3), t : 透水時間(sec), A : 内側チャンバーの断面積(cm^2), P_u : 透水水压 (kPa)

2.5 ダブルチャンバー透気性試験(吸気圧法)

ダブルチャンバー透気性試験(吸気圧法)は, 測定部が内側チャンバーと外側チャンバーを有する構造(図-2)からなり, 透気性は, 内側チャンバーの圧力から式(3)によってコンクリートの透気係数 $k_t(\times 10^{-16}\text{m}^2$, 以後 K 値とする)を測定する。

$$k_t = 4 \left(\frac{V_c (dP_i / dt)}{A (P_a^2 - P_i^2)} \right)^2 \frac{\mu P_a}{\varepsilon} \int_{t_0}^t \left[1 - \left(\frac{P_i}{P_a} \right)^2 \right] dt \quad (3)$$

ここで, V_c : 内部チャンバーと接続要素(ホース等)の容積(m^3), ε : コンクリートの空隙量 (m^3/m^3), P_i : 内部チャンバーの圧力(N/m^2 , 図-2 の①), P_a : 大気圧(N/m^2), A : 仮定された栓流の断面積(m^2 , 図-2 の④)

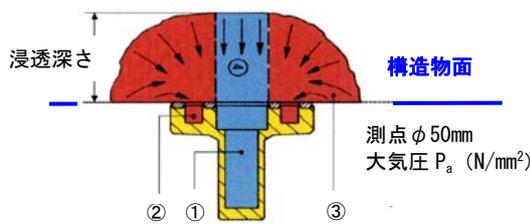


図-2 ダブルチャンバー透気性試験の試験原理

2.6 ダブルチャンバー透気性試験(送気圧法)

ダブルチャンバー透気性試験(送気圧法)は, ダブルチャンバー透水性試験(送水压法)で水を空気に変えた「送気圧法」である。内側チャンバー中の一定の送気圧(55kPa)がスタート後 0(kPa)となるまでの圧力低下時間 $t(\text{sec})$ を透気時間 $K_t(\text{sec})$ とするもので, 送気圧法の K_t と吸気圧法の K 値との関係は, 強い相関が確認されている³⁾。今回の対象としたPCMの計測では, 圧力低下が少なかったため, 式(4)によって試験開始から 600秒後の圧力から透気速度指数 $K_v(\text{kPa}/\text{sec})$ を求める。

$$K_v = (P_{a0} - P_{a1})/t \quad (4)$$

ここで, P_{a0} : 透気開始時の圧力(kPa), P_{a1} : 透気終了時の圧力(kPa), t : 圧力低下時間(600sec)

2.7 エコーチップ

エコーチップ試験は, 鋼材の硬さ試験用のエコーチップ硬さ試験機(G型)を使用し, 直径5mmの球状テストチップの打撃によるエコーチップ値 $E_{co}(=1000 \times \text{反発速度}/\text{打撃速度})$ を測定する。

2.8 中性化深さ試験

中性化深さは, 「JIS A 1171-7.7 中性化深さ試験」に準

じて, 促進試験期間8週間で実施した。本論では, 養生方法に着目しているため, 仕上げ面を対象とした過去の試験データを用いた²⁾。

2.9 塩分イオン浸透深さ試験

塩化物イオン浸透深さ試験は, 円柱供試体($\phi 50 \times 100$)に対して JSCE-G572-2007を準用し, 濃度10%の塩化ナトリウム水溶液中に10日間浸漬後, 割裂面に0.1mol/l硝酸銀溶液を噴霧し, 変色境界までの平均深さ $DC(\text{mm})$ を測定する。

2.10 すりへり深さ試験

すりへり深さ試験は, 寸法が $150 \times 150 \times 150\text{mm}$ の立方体を滞水した状態で, 鋼球を落下・衝突させて行う。測定面は, 仕上げ面とする。鋼球の仕様は, 質量500g, 直径 $\phi 50\text{mm}$ であり, 落下高さは94cm, 鋼球の衝突角度は 30° とした(図-3)。衝突回数は, 計800回である。すりへり深さは, 最大すりへり深さをノギスで測定し, 式(5)によって摩耗速度係数 $\beta(\text{mm}/\sqrt{\text{J}})$ を求める。

$$Ad_{\max} = \beta \cdot \sqrt{E_R} \quad (5)$$

ここで, Ad_{\max} : 最大すりへり深さ(mm), E_R : 累積衝突エネルギー(J)

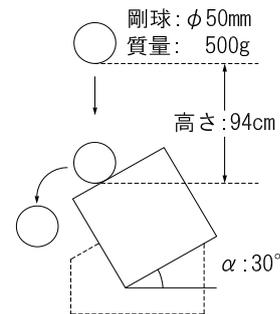


図-3 すりへり深さ試験の概要

3. 試験結果と考察

3.1 養生条件について

養生条件を変動させた各材料の非破壊検査結果を図-4~6に示す。PCMとの比較材料として, 気中養生で材齢5年が経過した15M, 22Mおよび30Mに対して, 本測定前に吸水防止材を塗布した供試体を用いた。

材料に着目すると, 比較に用いた供試体に比べてPCMはP値およびK値ともに低い値を示している。特に試験体名のAのP値と全PCMのK値において, その傾向が確認できる。比較に用いた供試体は, 測定結果にバラつきがあるが, K値において高い強度のモルタルの供試体の品質の方が優れた結果であった。PCMの種類で比較すると, 最も品質が優れるのがA, 次いでB,Cの順である。この結果は, PCMのポリマーセメント比P/Cの関係と同様であり, PCMのポリマー含有量がPCMの表層品質に影響を与えたと考えられる。

養生条件に着目すると、P 値およびK 値ともに初期材齢時に水分が供給される JIS 養生を行った供試体が、最も低い値を示した。各養生条件下での P 値の順番は、養生条件に関らず A 次いで B、C の順の傾向であったが、K 値においてはその傾向は確認できなかった。既往の研究より、気中養生より湿布養生および被膜養生の耐久性指標が向上する事が確認されている²⁾が、今回使用した試験法では、被膜養生および湿布養生の結果が気中養生と同程度であった。今回の測定結果は、各材料 3 供試体に対して各 1 回測定し計 3 回の平均値としている。測定数を増やせばさらにつきの影響を確認した上で、既往の研究結果の傾向と再度比較することが必要である。

3.2 PCM の水密性について

PCM の有効水結合材比とトヨフク法透水性試験から求めた透水係数 P 値との関係を、図-7 に示す。赤破線はコンクリート標準示方書が示すコンクリートの透水係数の特性値で、黒線は比較対象のコンクリートの測定値の回帰式である。PCM の P 値は、同一の W/B に対して 1 桁程度小さく、補修・補強を対象とする W/B が 50%弱のコンクリートに比較して 2 桁小さい。

3.3 PCM とコンクリートの表層品質の相違

非破壊検査の試験値 P 値、K 値および Eco と α_c 、 f_c および β との関係を図-8~11 に示す。各図は、コンクリートの試験結果を白抜き印、PCM の試験結果を■印として示している。比較するコンクリート供試体は、呼び強度 15~60 のレディーミクストコンクリートで、打設時のブリーディングや雨掛かり等の条件に偏りの少ない柱部材側面を対象としている。比較用のコンクリートは材齢 10 年を経過しているものもあり、PCM と比べて長期暴露されたものである⁴⁾。図-8~11 の検査結果を縦方向に概観すると、PCM の P 値は、コンクリートの傾向から外れており高強度のコンクリートと比較し 1/10 程度と小さい値を示した。これは PCM に多量のポリマーが含まれるために透水係数が小さくなっていると考えられる。PCM にダブルチャンバー透水性試験(送水圧法)を用いて、表層品質を評価するには、コンクリートと異なった PCM に適した指標範囲が必要であることがわかった。一方、PCM の K 値および Eco は、コンクリートの分布の中に含まれている。K 値は、材料に含まれる空気量の絶対値に比例する傾向があるので、コンクリートと

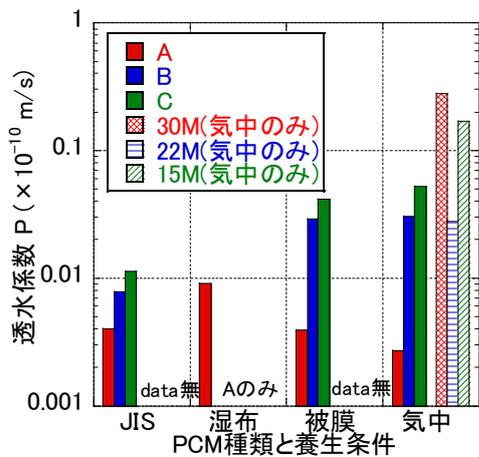


図-4 P 値に対する養生条件の影響

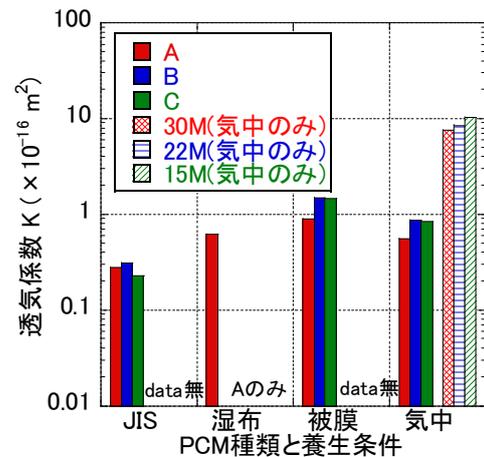


図-5 K 値に対する養生条件の影響

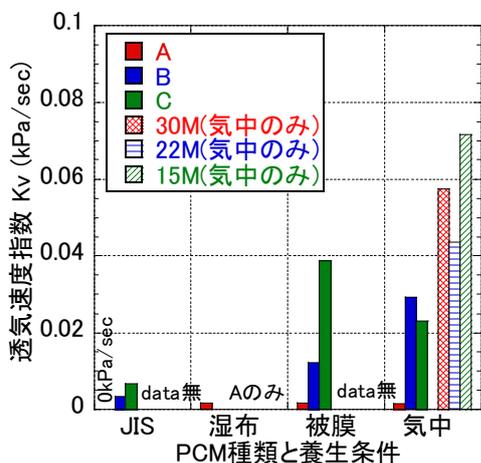


図-6 Kv 値に対する養生条件の影響

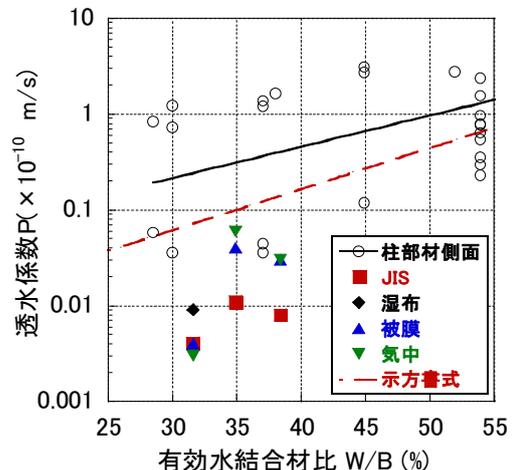


図-7 P 値と有効水結合材比の関係

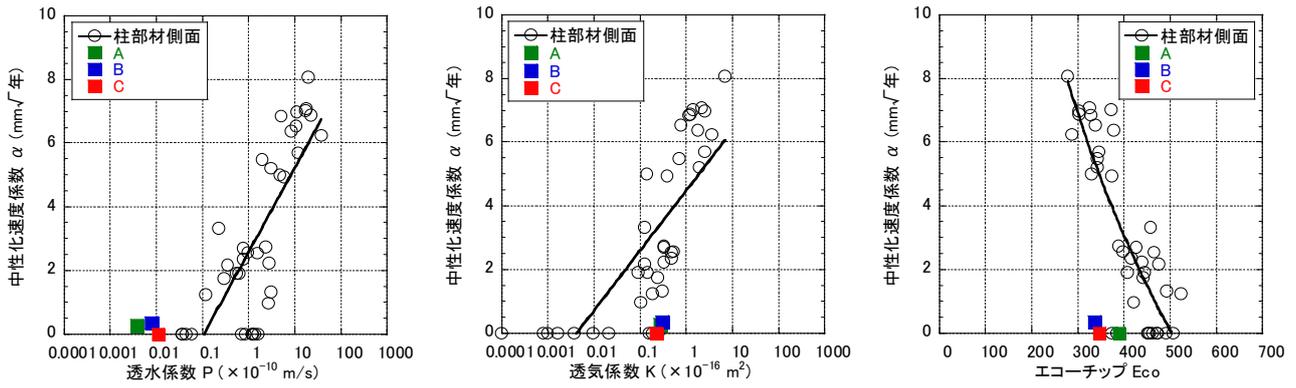


図-8 中性化速度係数 (α) と非破壊検査法の試験値 (P 値, K 値, E_{co}) との関係

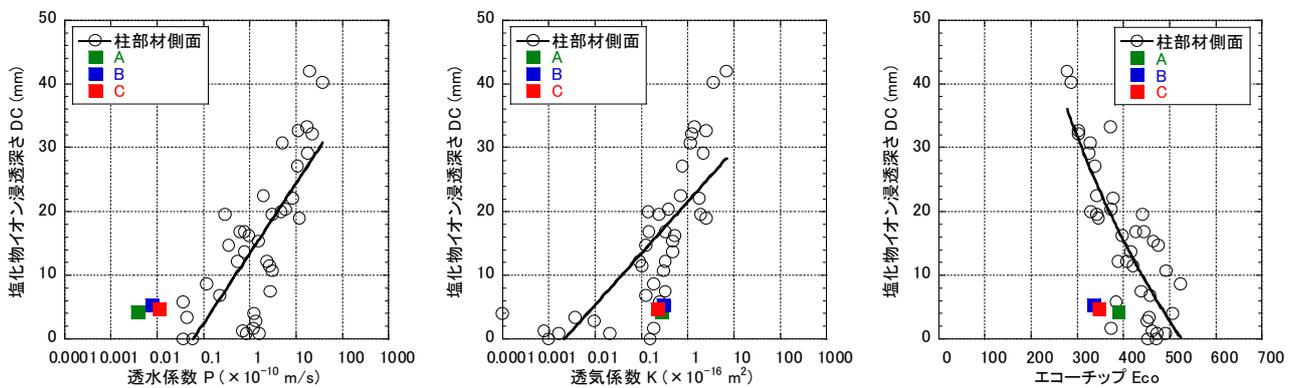


図-9 塩化物イオン浸透深さ (DC) と非破壊検査法の試験値 (P 値, K 値, E_{co}) との関係

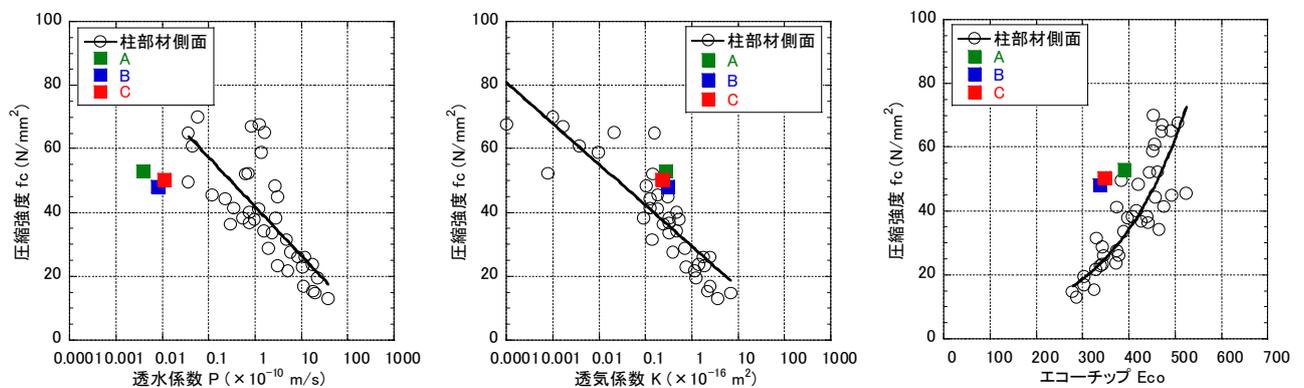


図-10 圧縮強度 (f_c) と非破壊検査法の試験値 (P 値, K 値, E_{co}) との関係

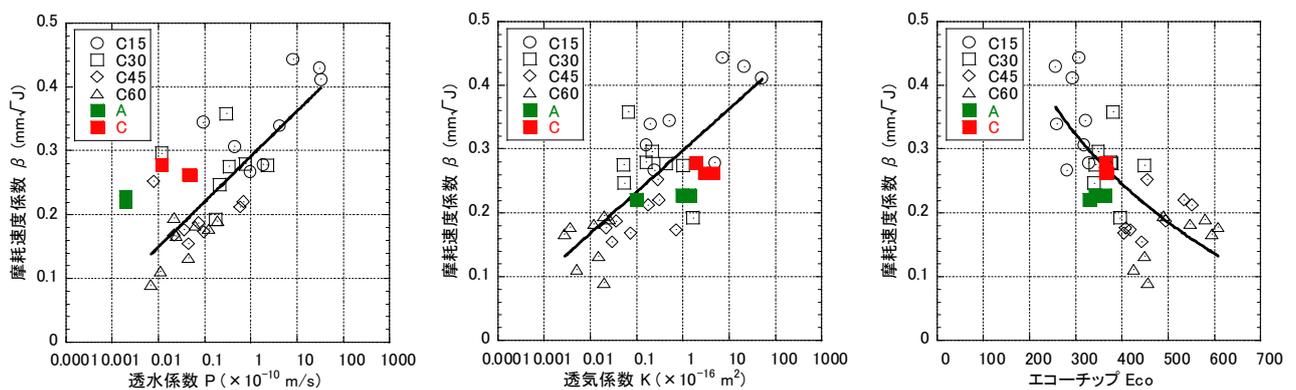


図-11 摩耗速度係数 (β) と非破壊検査法の試験値 (P 値, K 値, E_{co}) との関係

同様のK値の内にある。Ecoは強度指数であるので、PCMは柔らかい割に耐久性指標が優れていることがわかる。今後、PCMの耐久性との関係性を評価する試験法とするためには、コンクリートとは異なる評価範囲にあるP値の傾向を把握することが重要であると考え。

(1) 中性化深さとの関係

中性化速度係数 α と各品質との関係を、図-8に示す。PCMの α は、いずれも $1\text{mm}/\sqrt{\text{年}}$ 以下の値を示しており、高強度のコンクリートと同程度である事が分かる。一般に、中性化進行の要因は、大気中の二酸化炭素がコンクリート内に浸入することであり、乾燥した状態においてその進行は速くなると言われているが、コンクリートの α と各品質との関係ではP値との相関性が最もあると報告されている³⁾。少ない試験の範囲ではあるが、PCMはP値が小さいことから、中性化に対する抵抗性に対して、既往の研究と同様の傾向を確認することができた。

(2) 塩化物イオン浸透深さとの関係

塩化物イオン浸透深さDCと各品質との関係を、図-9に示す。PCMのDCは、いずれも5mm程度であった。PCMに対する非破壊検査の結果は、中性化深さとの関係と同様の傾向を示した。塩化物イオンの浸透は、コンクリートの水セメント比や乾湿繰返しによる水分の移動が大きく関係する。つまり、PCMはP値が小さいことから、塩害に対する抵抗性を有していると言える。

(3) 圧縮強度との関係

圧縮強度 f_c と各品質との関係を図-10に示す。Ecoとの関係より、PCMは同じ圧縮強度のコンクリートより低い値を示した。これは、PCMのヤング係数がコンクリートに比べて小さいことから妥当な結果といえる。また、PCMの圧縮強度はコンクリートと同程度であり補修材料としての性能を有していると言える。

(4) 摩耗速度係数との関係

摩耗速度係数 β と各品質との関係を図-11に示す。PCMの摩耗速度係数はコンクリートと同程度である。PCM(AとC)および圧縮強度 $15\text{N}/\text{mm}^2$ と $30\text{N}/\text{mm}^2$ のコンクリ

ートの最大すりへり深さと摩耗を生じさせる累積衝突エネルギーの関係を図-12に示す。PCMの耐摩耗性は $30\text{N}/\text{mm}^2$ のコンクリート以上であり、水路などの補修材料としての十分な耐摩耗性能を有している。

4. まとめ

PCMは耐久性に優れており、補修・補強材料として多くの実績を有しているが、施工後のPCMの品質性能を確認し評価する事例は少ない。本研究は、実施工後を想定し養生条件を変えたPCMに対して非破壊検査を実施し、その表層品質の評価が行えるかどうかを検証した。また、その結果と既往の研究で示されているコンクリートとの関係性について比較したものであり、以下の結論が得られた。

- (1) トヨフク法透水試験で求まるP値は、PCMの表層品質評価の可能性を有することが示唆された。
- (2) PCMは、初期材齢時に水分が供給されるJIS養生ほど表層品質が優れており、養生条件の違いはP値で評価される。
- (3) ポリマーセメント比が高いPCMほど、P値が小さくなる傾向があることが分かった。
- (4) PCMのP値は、呼び強度60程度の高強度コンクリートと比較し1/10程度と小さい。

今後は、トヨフク法透水試験による測定数を増やし、PCMのP値の傾向を把握することで、PCMの耐久性との関係性を評価する有効な試験法になりうると考える。

参考文献

- 1) PAE系ポリマーセメントモルタルを用いたコンクリート構造物の補修・補強工法技術委員会：PAE系ポリマーセメントモルタルを用いたコンクリート構造物の補修・補強に関する設計・施工マニュアル(案)，2014.12
- 2) 内田明，中井裕司，辻総一郎，豊福俊泰：施工現場におけるポリマーセメントモルタルの養生方法の提案，コンクリート工学年次論文集，Vol.36，No.1，pp.1972-1977，2014.6
- 3) 豊福俊泰，春日井俊博，松尾栄治，永松武則，高橋典子：ダブルチャンバー透水性試験・透気性試験による表層コンクリートの非破壊検査法の開発，コンクリート構造物の非破壊検査シンポジウム論文集 (Vol.5)，pp.277-282，2015.8
- 4) 豊福俊泰，高橋典子，永松武則，細川土佐男：ダブルチャンバー透気性試験・ダブルチャンバー透水性試験による表層コンクリートの非破壊検査法の技術開発，コンクリート工学年次論文集，Vol.37，No.1，pp.1801-1806，2015.6

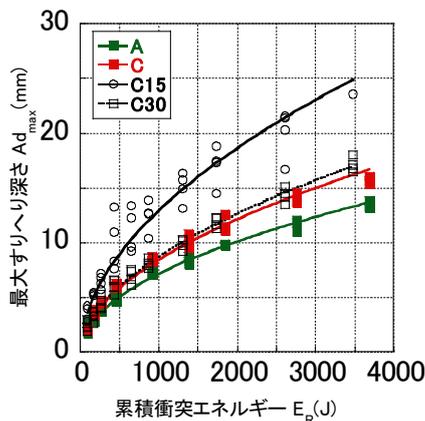


図-12 累積衝突エネルギーと最大すりへり深さとの関係