表面保護工におけるポリマーセメントモルタルと コンクリートとの界面抵抗に関する実験的考察[†]

松田 康紀* 杉山 隆文**
峠坂 直樹* 辻 幸和***

Interface Resistance between Polymer Cement Mortar and Concrete Substrate of Repaired Concretes

by

Yasunori MATSUDA*, Takafumi SUGIYAMA**, Naoki TOUGEZAKA* and Yukikazu TSUJI***

In order to improve the durability of concrete structures under harsh chloride-laden environments the use of surface coating and cross sectional restoration methods has been increased. For these methods polymer cement mortar becomes of a primary repair material. Then interface phenomena between the polymer cement mortar and concrete as the substrate needs to be clarified with regard to chloride penetration. In this paper the results of electrical resistance tests and chloride migration tests have been provided. Interface resistance of repaired concretes has been studied by comparing electrical resistance obtained experimentally and by calculations using the ohm's law on a series circuit. It is found that the interface resistance is controlled by the type of polymer cement mortars, mix proportions of concrete and the ages. Increased interface resistance is verified by decreased flux in the chloride migration tests. For repaired concrete by cross sectional restoration, the interface resistance may be ignored where the resistance obtained by the experiment and calculation was equal.

Key words: Surface coating, Cross sectional restoration, Polymer cement mortar, Interface resistance, Chloride migration

1 緒 言

厳しい塩害環境下におけるコンクリート構造物の耐久性を確保するため、表面保護工や電気化学的防食工を採用する場合が増えつつある。これらの効果を示すため、特に表面保護工を施工したコンクリート構造物では、その塩害照査が必要であり塩化物イオンの浸透を計算によって求めなければならない。また、電気防食工法では、電流の効率的な供給が欠かせない。

表面保護工には、表面被覆工法と断面修復工法があり、無機系の表面被覆材として、ポリマーセメントモルタルが多く使用される。^{1), 2)} また、配合や使用材料は異なるが、断面修復材としてもポリマーセメントモルタルが使用される場合がある。したがって、ポリマーセメントモルタル中での塩化物イオンの浸透を的確に把握して、塩害照査に反映させることが重要であると考えられる。

本研究では、表面保護工で使用される各種のポリマーセメントモルタルとコンクリートとの界面について研究した。すなわち、異種材料と接することで存在する界面が、塩化物イオンの浸透に及ぼす影響を把握するため、界面の電気抵抗を調べた。また、界面抵抗は断面修復コンクリートと併用される電気防食工における、電流の効率的な供給方法を把握するためにも重要と考えた。

実験は、3種類のポリマーセメントモルタルと3種類のコンクリートに対して、電気抵抗試験および電気泳動試験を実施した。供試体は、ポリマーセメントモルタル単体、コンクリート単体、表面被覆コンクリート、断面修復コンクリートである。そして、表面被覆コンクリートおよび断面修復コンクリートの界面抵抗は、実験から求めた抵抗と、それぞれ単体の試験から求めた抵抗を用いて、直列回路のオーム則から計算した抵抗を比較することで考察した。また、流束についても実験値と計算値を比較することで、界面抵抗を検証した。

2 実験概要

2・1 供試体の概要と作製方法

(1) コンクリート

コンクリート供試体の配合および諸性状を Table 1 に示す。供試体は、幅が 50mm、高さが 150mm、長さが 730mm の鋼製型枠にコンクリートを打込み、24 時間後に脱型した。28 日間の湿布養生を行った後、幅方向に貫通するよう、厚さが 50mm、直径が 100mm のコアを採取し、円盤型のコンクリート供試体を作製した。

(2) 表面被覆コンクリート

表面被覆材の諸性状を Table 2 に示す。表面被覆材はポリマーセメントモルタルであり、製造メーカーの分類に

[†] 原稿受理 平成 18 年 11 月 6 日 Received Nov. 6, 2006 ©2007 The Society of Materials Science, Japan

* 群馬大学大学院工学研究科 〒376-8515 桐生市天神町, Dept. of Civil Eng., Gunma Univ., Tenjin-cho, Kiryu, 376-8515

** 正 会 員 北海道大学大学院工学研究科 〒060-8628 札幌市北区北十三条西, Dept. of Civil Eng., Hokkaido Univ., Kita-ku, Sapporo, 060-8628

*** 正 会 員 群馬大学工学部建設工学科 〒376-8515 桐生市天神町, Dept. of Civil Eng., Gunma Univ., Tenjin-cho, Kiryu, 376-8515

Table 1 Mix proportions and compressive strength of base concrete.

Base specimen No.	Max aggregate size(mm)	W/B (%)	FA/(C+FA) (%)	s/a (%)	Unit weight of material (kg/m ³)						Air (%)	Slump (cm)	Strength ^{*3} (N/mm ²)
					Water W	Cement C	Add ^{*1} FA	Fine S	Coarse G	Add ^{*2} AE			
N55		55	-		172	313	-	878	1008	1.10	3.8	8.5	39.4
N65	20	65	-	49	172	265	-	897	1030	0.93	4.0	8.0	32.2
FA55		55	30		172	219	94	866	993	0.63	3.8	8.5	30.1

^{*1} Fly ash : Type II (JIS A6201-1999)^{*2} AE water reducing agent ((C+FA)×0.35% or 0.2%)^{*3} Compressive strength at 28 days

Table 2 Basic properties of polymer cement mortar as surface coating and cross sectional restoration material.

Sign of mortar	PCM-N	PCM-S	PCM-B
Purpose to use materials	Surface coating material		Cross sectional restoration material
Type of polymer	Acrylate type		VAVeova
W/C (%)	43	68	45
P/C (%)	22	65	7
Compressive strength (N/mm ²)	49.2	-	45.0
Permeability of chloride ion (JSCE-K524-1999)	Standard: 0mm (Permeability of Cl ⁻)		-
Bond strength (JSCE-K531-1999)	>1.0 N/mm ² (Standard type)	>0.7 N/mm ² (Soft type)	-
Elongation performance of crack (JSCE-K532-1999)	> 0.4mm (Elongation performance)		-

よると標準形 (PCM-N) と柔軟形 (PCM-S) の 2 種類である。表面被覆コンクリートの施工は、前準備として、表面被覆するコンクリートの片面を #150 の研磨紙で削り、目荒らしを行った後、水洗いをして湿布養生した。なお、表面被覆するコンクリート面は鋼製型枠と接していた面である。養生後、ポリマーセメントモルタルをコンクリート表面に薄く吹き付け、ブラシでよく擦り込んだ。再度、被覆材を吹き付け、温度 20 ± 2℃、湿度 60 ± 5% の室内で気中養生を行った。この工程を 2 回繰り返す。コンクリートへの表面被覆材の厚さを約 2mm とした。表面被覆コンクリートの概略図を Fig. 1 に示す。

表面被覆コンクリートは、標準形被覆材を被覆した N シリーズと柔軟形被覆材を被覆した S シリーズについて試験を行った。表面被覆材の塗布後、表面被覆コンクリートは、実験を開始するまで湿布養生した。N シリーズは、コンクリートの材齢が 140 ~ 150 日で試験を開始した供試体を N55-PCM-N-a と表示し、材齢 360 ~ 450 日で試験を開始した供試体を N55-PCM-N-b と表示する。S シリーズは、材齢 100 ~ 120 日で試験を開始した。

Fig. 1 Schematic view of test specimen.

(3) 断面修復コンクリート

断面修復材の諸性状を Table 2 に示す。断面修復材 (PCM-B) は、ポリマーセメントモルタルにアクリル繊維を含有している。P/C が小さく表面被覆材よりポリマー含有量は少ない。断面修復コンクリートには、N55 および FA55 のコンクリートを用いた。供試体は、厚さが 35mm または 15mm に切断したコンクリートに 15mm または 35mm の断面修復材を施工し、全体の厚さが 50mm になるように作製した。断面修復コンクリートの概略図を Fig. 1 に示す。また、Fig. 2 は断面修復コンクリートの一例写真である。断面修復材と接するコンクリート表面は目荒らしのために 3 号珪砂でサンドブラスト処理した後に、吹付け工法で施工した。吹付けの方向は鉛直下向きである。なお、断面修復材を吹付けるにあたって、

Fig. 2 Appearance of cross sectional restoration concrete specimen.

成形および所定の厚さになるように、塩ビ管を型枠として用いた。

供試体は、コンクリートの材齢が 360 ~ 370 日 (N55) または 440 ~ 450 日 (FA55)、つまり断面修復材の施工後、100 ~ 110 日 (N55) または 180 ~ 190 日 (FA55) で試験を開始した。それまでは、湿布養生した。なお、コンクリートの厚さが 15mm の供試体を N55-15, FA55-15, コンクリート厚さが 35mm の供試体を N55-35, FA55-35 と表示する。

2・2 電気抵抗試験³⁾

比抵抗の測定は、周波数が 950Hz、印加電圧が 15V の交流電源装置を使用した。測定は、Fig. 3 に示すように電流、電圧である。電極は、直径 100mm のステンレス円板を用いて、供試体との接触には W/C = 45% のセメントペーストを用いた。比抵抗測定は、電気泳動試験の前後に行ったが、今回は試験前についての値を用いた。

2・3 電気泳動試験方法

電気泳動試験装置の概略図を Fig. 4 に示す。試験は JSCE-G571-2003 に準拠し、恒温室 (20 ± 2℃) で行った。試験溶液は、陽極側に NaOH 溶液 (0.3mol/L)、陰極側に NaCl (0.51mol/L) を使用し、印加電圧は 15V とした。しかし、表面被覆材単体の試験では、厚さを考慮して異なる印加電圧で試験した。表面被覆コンクリート、断面修復コンクリートは表面被覆材、断面修復材が NaCl 溶液に接するように設置した。両極の溶液は適宜サンプリングし、溶液の温度、電流、電圧、塩化物イオン濃度を測定した。また、常に溶液濃度を一定に保つために、両極の溶液交換を行った。試験は、陽極側の塩化物イオン濃度の増加割合が一定になった段階を定常状態とし、試験を終了した。定常状態での陽極側の塩化物イオン濃度変化を用いて、式 (1) よりフラックスを算出し、式 (2) より塩化物イオンの実効拡散係数を算出した。

$$J_{Cl} = \frac{V}{A} \times \frac{dC_{Cl}}{dt} \quad (1)$$

ここで、 J_{Cl} ：定常状態での塩化物イオンの流束（フラッ

Fig. 3 Schematic view of electrical resistance test.

Fig. 4 Schematic view of electrical migration test.

クス) (mol/(cm² · s)), V ：溶液体積 (L), A ：供試体の断面積 (cm²), dC_{Cl}/dt ：定常状態での陽極側の塩化物イオン濃度変化。

$$D_{Cl} = \frac{R \times T}{Z_{Cl} \times F \times \left(\frac{\Delta E - \Delta E_c}{L} \right) \times C_{Cl}} \times J_{Cl} \quad (2)$$

ここで、 D_{Cl} ：実効拡散係数 (cm²/s), R ：気体定数 (8.314J/(mol · K)), T ：絶対温度 (K), Z_{Cl} ：塩化物イオンの電荷数, F ：ファラデー定数 (96500C/mol), C_{Cl} ：陰極側溶液の塩化物イオン濃度, L ：供試体の厚さ, $\Delta E - \Delta E_c$ ：測定電位 (V)。

2・4 全塩分量測定

全塩分量測定は JCI-SC4 の「硬化コンクリート中に含まれる塩分の分析方法」に準じて行った。電気泳動試験が終了した供試体について、表面被覆コンクリートはコンクリート部を 10 層と表面被覆部 1 層の 11 層に分割して、各層について分析した。断面修復コンクリートは、コンクリート部、断面修復材部をそれぞれ 5mm ずつに分割し、10 層について分析した。

3 実験結果

3・1 電気泳動試験結果（断面修復コンクリート）

Fig. 5 は、電気泳動試験における陽極側の塩化物イオン濃度の経時変化である。それぞれ同一種類の供試体 3 体について試験を行った。N55 シリーズは、コンクリートの厚さが異なるにも関わらず、陽極側における塩化物イオン濃度の経時変化を示す傾きは同程度を示した。しかし、コンクリートが厚いほど定常状態に達する時間は早い。FA シリーズは、多少のばらつきはあるが、コンクリートが厚いと塩化物イオン濃度の経時変化は小さくなった。しかし、定常状態に達する時間は、厚さに関わらずほぼ同時期である傾向を示した。

Fig. 5 Concentration of chloride ions in anode compartment during test.

3・2 実効拡散係数の比較

実効拡散係数の算出結果を、Fig. 6に示した。コンクリート単体 (N55, N65, FA55) は各3体、表面被覆材単体 (厚さが20mmで試験: PCM-N20, PCM-S20) は各2体、断面修復材単体は3体、断面修復コンクリートは各3体、表面被覆コンクリートのNシリーズおよびSシリーズは各3体についてのそれぞれの平均値である。また、材齢が510～520日におけるコンクリート単体 (N55およびFA55)、表面被覆材単体 (PCM-N20)、断面修復材単体 (PCM-B) については、相当材齢における表面被覆コンクリート (N55-PCM-N-b, FA55-PCM-N-b) および断面修復コンクリートと比較する目的で、電気抵抗試験から次式 (3)を用いて実効拡散係数を計算した。³⁾

$$D_{el} = \frac{RTt_{Cl}}{Z_{Cl}^2 F^2 c_{Cl} \rho} \quad (3)$$

ここで、 t_{Cl} : 塩化物イオンの輸率 (0.5), ³⁾ ρ : 比抵抗 ($\Omega \cdot \text{cm}$)、 D_{el} : 拡散係数 (電気泳動) (cm^2/s)。

コンクリート単体の実効拡散係数は、W/Cの大きいくほど大きくなり、フライアッシュコンクリートでは小さくなった。また、試験開始時の材齢が長期的になると、フラ

イアッシュコンクリートの実効拡散係数は著しく減少した。これは既往の知見³⁾と一致している。

表面被覆材単体ではPCM-S20の実効拡散係数が小さい。そして、断面修復材単体での実効拡散係数は、表面被覆材単体よりも大きい。これは、表面被覆材のポリマー結合材比が、断面修復材よりも大きく、塩化物イオンの浸透抵抗性が増大したためであると考えられる。同様に、表面被覆材単体のPCM-S20は、PCM-N20に比べてポリマー結合材比が大きいため、実効拡散係数が小さくなったと考えられる。⁴⁾

断面修復コンクリートN55シリーズの実効拡散係数は、コンクリートの厚さに関わらず、同程度である。一方、FAシリーズの実効拡散係数は、コンクリート厚さが大きいほど (断面修復材の厚さが小さいほど) 拡散係数は小さい値を示した。これは、フライアッシュコンクリート単体の実効拡散係数が、相当材齢における断面修復材の実効拡散係数よりも小さいためである。

表面被覆コンクリートNシリーズの実効拡散係数は、Sシリーズよりも大きい値を示した。これは、表面被覆材単体の実効拡散係数の結果と一致した。また、N55, FA55, PCM-N20の各材料単体では、材齢の増加で実効拡散係数は減少しているが、表面被覆コンクリートでは材齢の影響は認められない。

3・3 表面被覆コンクリートの界面抵抗

電気抵抗試験から求めた表面被覆コンクリートの抵抗を計算値と比較し、その差から界面抵抗を考察する。直列回路のオーム則から式 (4)を用いて計算した。

$$R_{sc} = \frac{\rho_p L_p + \rho_c L_c}{A_{sc}} \quad (4)$$

ここで、 R_{sc} : 表面被覆コンクリートの抵抗 (Ω)、 ρ_p , ρ_c : 表面被覆材、コンクリートの比抵抗 ($\Omega \cdot \text{cm}$)、 L_p , L_c : 表面被覆材、コンクリートの厚さ (cm)、 A_{sc} : 表面被覆コンクリートの断面積 (cm^2)。

表面被覆コンクリートの流束は、電気泳動試験からコンクリート単体および表面被覆材単体の実効拡散係数を用いて、式 (5)より計算した。

Fig. 6 Effective chloride diffusion coefficients.

$$J = \frac{Z \times F}{R \times T} \left(\frac{E_1 - E_3}{\frac{L_p}{D_p \times C_p} + \frac{L_c}{D_c \times C_c}} \right) \quad (5)$$

ここで, D_p , D_c : 表面被覆材, コンクリートの実効拡散係数, $E_1 - E_3 = \Delta E - \Delta E_c$: 測定電位 (V), $C_p = C_c = C_{Cl}$: 陰極側溶液の塩化物イオン濃度.

Fig. 7 は, 表面被覆コンクリートの抵抗を実験値と計算値で比較した図である. 比較的短い材齢で電気抵抗試験を行った結果, N シリーズおよび S シリーズで実験値が計算値よりも大きい結果になった. 特に, S シリーズはコンクリートの配合によらず実験値が著しく大きい. つまり, 表面被覆材 S とコンクリートとの界面抵抗が大きいことを意味している. 一方, 材齢が比較的長い N シリーズの b の表面被覆コンクリートでは, 実験値と計算値が一致している. これは, 材齢の増加に伴い界面抵抗が減少したためと考えられる.

Fig. 8 は, 表面被覆コンクリートの流束を実験値と計

Fig. 7 Comparison of resistance for surface coated concrete.

Fig. 8 Comparison of flux for surface coated concrete.

算値で比較した図である. 抵抗と同様に, 材齢が比較的短い N シリーズと S シリーズで実験値の流束が計算値よりも小さく, 実験値の抵抗が大きくなったことと一致する. つまり, 流束はイオンの移動する速度に関係しており, 抵抗が大きいほど小さくなる. N シリーズの b の表面被覆コンクリートでは, 実験値と計算値がほぼ等しく, 抵抗が一致したことと同じ結果になった.

このように, 表面被覆コンクリートにおける界面抵抗は, イオンの移動に密接に関連していることが明らかになった. そして, この界面抵抗は, 表面被覆材の種類や材齢に影響を受けると推察された.

3・4 断面修復コンクリートの界面抵抗

断面修復コンクリートの抵抗および流束についても, 式 (4) および (5) を用いて, それぞれ表面被覆材に関連する値を断面修復材に代えて計算した. Fig. 9 および Fig. 10 は, それぞれ抵抗および流束についての実験値と計算値の比較である.

Fig. 9 Comparison of resistance for cross sectional restoration concrete.

Fig. 10 Comparison of flux for cross sectional restoration concrete.

断面修復コンクリートの抵抗について、実験値は計算値とほぼ等しく、界面抵抗は無視できると思われる。このことは、流束についても実験値と計算値がほぼ一致することからも確認できる。

また、FA55-15とFA55-35では、コンクリートが厚いほど抵抗が大きな値を示す結果となり、抵抗値はコンクリートの厚さに依存していると考えられる。これはFA55の実効拡散係数が断面修復材単体(PCM-B)よりも小さいためであり、抵抗値は実効拡散係数の小さい材料の厚さに依存すると考えられる。N55-15、N55-35では、コンクリート単体(N55)と断面修復材単体(PCM-B)の実効拡散係数の差が小さいため、コンクリートの厚さが異なっても抵抗値の大きさに影響しないと考えられる。

3・5 全塩分量分布による考察

Fig. 11は、電気泳動試験後の表面被覆コンクリートおよび断面修復コンクリートの全塩分量分布である。コンクリートはN55である。断面修復部および表面被覆部における全塩分量はコンクリート部よりも大きくなった。これは、単位体積あたりで表示しているためである。また、断面修復材、表面被覆材と接するコンクリート層で、全塩分量は他の層よりも大きい値を示した。これらの供試体では、前節で述べたように、界面抵抗は無視できる結果であったが、塩化物イオンは界面付近のコンクリ

ト部で濃縮していたことが考えられる。この理由は現時点では明らかでない。

4 結 言

本研究の範囲内で次のことが明らかになった。

(1) ポリマーセメントモルタルとコンクリートとの界面抵抗は、ポリマーセメントモルタルおよびコンクリートの種類や材齢に影響を受ける。

(2) 表面被覆コンクリートは、柔軟形で実効拡散係数が小さい表面被覆材の場合、コンクリートの配合に関わらず、実験より求めた抵抗が計算よりも大きい値を示した。流束は、計算値が大きい値を示した。

(3) 断面修復コンクリートの抵抗は、実験値と計算値はほぼ等しく、流束もほぼ等しい値を示した。

(4) 電気泳動試験後に求めた全塩分量分布から、表面被覆材および断面修復材における濃度は、コンクリートよりも大きい値を示した。

本研究は、科学研究費補助金(基盤研究(B)、課題番号:16360215、代表:杉山隆文)を受けて実施したものです。また、実験に際して、室伏 瞳氏(群馬大学大学院修了)の協力を受けました。ここに付記して謝意を表します。

参 考 文 献

- 1) Japan Society of Civil Engineers, "Recommendation for concrete repair and surface protection of concrete structures", Concrete library 119, Japan Society of Civil Engineers, pp.10-19 (2005).
- 2) T. Sugiyama, "Surface coating of inorganic-type materials", Cement and Concrete, No.713, pp.27-32 (2006).
- 3) T. Sugiyama, S. Vira, Y. Tsuji and T. Oshiro, "Application of the steady-state chloride migration test for evaluating chloride ingress into fly ash concrete", Journal of Materials, Concrete Structures and Pavements, Japan Society of Civil Engineers, No.711/V-56, pp.191-203 (2002).
- 4) H. Murofushi, T. Sugiyama, N. Tougezaka and Y. Tsuji, "Chloride migration test surface-coated concrete by polymer cement mortar", Proceedings of the Concrete Structure Scenarios, The Society of Materials Science, Japan, Vol.6, pp.43-48 (2006).

Fig. 11 Profile of total chloride ions content.