

コンクリート表層ならびにコンクリートと補修材との 界面における水分移動

上田 洋* 鈴木 浩明*

Water Penetrability in the Surface Concrete and at the Interface between the Concrete
and the Repair Materials

Hiroshi UEDA Hiroaki SUZUKI

As water is related to many kinds of deterioration mechanisms of the concrete structures, knowledge on the water movement behavior in the concrete is very useful in order to perform appropriate maintenance of the concrete structures. In this study through many experiences with us of monitoring sensors embedded in concrete samples, it was clarified that water penetration properties in the surface concrete are different depending on concrete varieties such as using materials, mix proportions and curing methods. It was also made clear that water penetration behavior at the interface between the concrete and the cross section repair materials depends on the pretreatment methods applied before setting restoration materials.

キーワード：コンクリート，フライアッシュ，水，浸透，補修，耐久性，維持管理

1. はじめに

コンクリート構造物は一般に高い耐久性を有するが、何らかの原因により劣化を生じるとその耐久性が低下し、維持管理に多大な労力を要する。したがって、コンクリート構造物の維持管理を確実かつ効率的に行うためには、劣化を極力生じさせないことが求められる。

これまで、コンクリート構造物の劣化は、例えば中性化では中性化域が鋼材近傍に達すると鋼材が腐食を開始するとみなして予測や評価が行われ、塩害では鋼材位置での塩化物イオン量が鋼材腐食開始の指標とされてきた。これらの指標により、コンクリート構造物の良質な維持管理が図られてきたが、鋼材腐食の化学反応という視点からみると、鋼材の腐食反応が進行するには水が必要であり、言い換えれば水を制御する¹⁾ ことができれば、鋼材腐食を抑制することができる²⁾ともいえる。このことは、コンクリート構造物の補修にもあてはまり、水を上手に制御する補修ができればその補修効果は高まり、逆に水の制御に失敗すれば補修効果は著しく低減する。さらに、コンクリート構造物への水の作用は、凍害や化学的侵食、アルカリシリカ反応等の劣化にも大きく影響する。

実構造物に生じた劣化を観察すると、図1に示すように漏水等の水がかりがある箇所で鋼材腐食を生じていることが多く²⁾、アルカリシリカ反応による劣化も水のかかる箇所で目立つ。したがって、コンクリート構造物をより適切に維持管理するためには、コンクリート中の水の挙動を知ることが必要になる。

* 材料技術研究部 コンクリート材料研究室

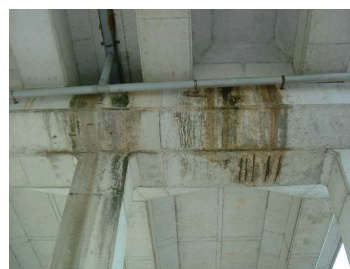


図1 水がかり箇所での鋼材腐食

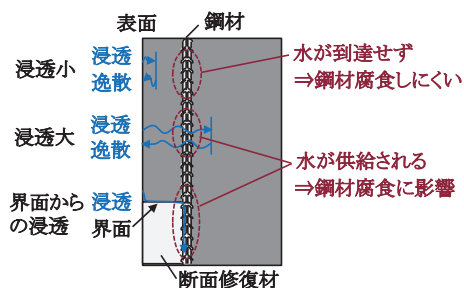


図2 水分浸透と鋼材腐食との関係

コンクリート表面に外部から作用する水が鋼材腐食に及ぼす影響を考えた時、図2のようにコンクリート表面から内部への水の浸透深さが大きく、水が鋼材位置に達するような場合には、水に含まれる溶存酸素の影響³⁾も含めて鋼材が腐食しやすい環境になり、鋼材近傍のコンクリートにおいて細孔溶液のpHが低下したり、塩化物イオンが多く含まれていたりすると、変状として顕在化しやすくなる。実際には、水の動きに加えて酸素の動きも考慮した判断が必要であるが、降雨や漏水等により乾燥と湿潤とを繰り返すような環境では、こうした水の浸

表1 水分浸透試験用の使用材料

材料(記号)	名称等	物性等
セメント(C)	普通ポルトランドセメント	密度: 3.16g/cm ³
フライアッシュ(FA)	JIS II 種品	強熱減量: 1.6% 密度: 2.32g/cm ³ 比表面積: 3430cm ² /g
細骨材(S)	S①	千葉県君津産山砂 表乾密度: 2.63g/cm ³ 吸水率: 1.88%
	S②	静岡県大井川水系 表乾密度: 2.59g/cm ³ 吸水率: 1.92%
粗骨材(G)	G①	埼玉県両神産砕石 1505 表乾密度: 2.72g/cm ³ 吸水率: 0.57%
	G②	埼玉県両神産砕石 2015 表乾密度: 2.72g/cm ³ 吸水率: 0.64%
	G③	東京都青梅産 2005 表乾密度: 2.66g/cm ³ 吸水率: 0.50%
混和剤	A①	AE 減水剤 リグニンスルホン酸化合物と ポリオール複合体
	A②	AE 剤 アルキルエーテル系 陰イオン界面活性剤
練混ぜ水(W)	上水道水	—

透深さと鋼材のかぶりとの関係が重要になると考えられる。そのためには、降雨や漏水等の作用時間中にコンクリートに水が浸透する深さを知ることが必要になる。

一方、コンクリート構造物の汎用的な補修工法として断面修復工法があり、コンクリート構造物の耐久性を回復させるために活用されている。この時、コンクリートと断面修復材との界面では水が通りやすい傾向にあり⁴⁾、界面に水が作用する環境では補修後の耐久性が低下することが懸念される。したがって、このような界面における水分浸透性が重要になるが、界面の性状はコンクリートのはつり方や下地処理の方法によっても大きく影響されると考えられ、これらの影響を知ることが必要になる。

そこで、本研究ではコンクリート表層における水の浸透性状を知るために、品質を変えたコンクリート試験体を作製してその一部を水に浸す試験を行い、セメントの種類や水結合材比(以下 W/B)、養生方法が水分浸透性に与える影響について検討した。なお、セメントの種類としては、普通ポルトランドセメント(以下 OPC)に加えて、塩化物イオンの浸透抑制効果等が報告され⁵⁾、水分浸透においても OPC とは異なる可能性の高いフライアッシュ(以下 FA)を混和した系についても対象とした。また、断面修復材を施工した時のコンクリートと断面修復材との界面における水分浸透抑制について、断面修復材の施工前に行う下地処理の効果に着目して検討した。

2. 試験方法

2.1 コンクリート表面からの水分浸透試験

2.1.1 供試体作製

作製した供試体は、寸法が 100 × 100 × 100mm、200 × 200 × 150mm および φ 100 × 200mm (圧縮強度試験用)のコンクリートであり、表 1 に使用材料を、表 2 に配合を示す。FA を混和した供試体は、OPC のうち質量で 15% を FA II 種で置換した。200 × 200 ×

表2 水分浸透試験に用いたコンクリートの配合

(a) 普通ポルトランドセメント (OPC)

名称	W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)					混和材添加量 C × %	
			W	C	S ①	G		A ①	A ②
						①	②		
OP60	60	47	155	259	886	623	415	0.25	0.00050
OP50	50	45	155	310	831	631	420	0.25	0.00075
OP40	40	43	155	388	765	631	420	0.25	0.00200

W/C: 水セメント比, s/a: 細骨材率

(b) フライアッシュ混和 (FA)

名称	W/B (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)					混和材添加量 C × %	
			W	C	FA	S ②	G ③	A ①	A ②
FA60	60	47	150	213	37	878	1019	0.25	0.006
FA50	50	45	150	255	45	821	1032	0.25	0.006
FA40	40	43	150	319	56	756	1032	0.25	0.008

W/B: 水結合材比, s/a: 細骨材率

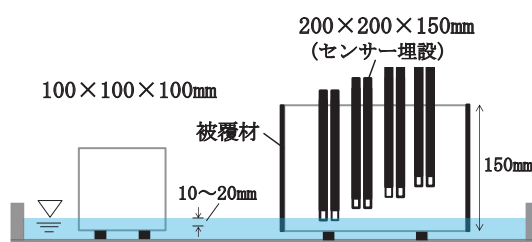


図3 浸漬試験の概念図

150mm の供試体には内部含水率センサー(電気抵抗式水分計用、長さ: 150mm)を埋設し、埋設深さはセンサーの先端が打込み時の側面から 10, 30, 50, 70mm となるようにした。センサー先端のブラシ部には同配合のコンクリートをウェットスクリーニングして得たモルタルを塗り込ませた。

2.1.2 養生

供試体は、打込み後 1 日で脱型し、20°C、60% R.H. 環境下で静置する気中養生、コンクリートから水分が逸散しないようにその表面を被覆し、20°C 環境下に静置した封緘養生、および 20°C の水中に浸漬して静置した水中養生の 3 種類の養生を行った。各養生を材齢 28 日まで行い、さらに 20°C、60% R.H. 環境下で材齢 83 日まで静置した。

なお、センサーを埋設した供試体については、材齢 76 日に浸漬面とその反対側の面は開放し、残り 4 面をビニールテープで被覆した。

2.1.3 浸漬試験および圧縮強度試験

静置後に、図 3 に示すように供試体打込み時の側面が 10 ~ 20mm 程度浸漬するようにした一面浸漬試験を最大 7 日間行った。この試験は、雨がかりや漏水などがコンクリート表面から毛管浸透により作用する場合を模擬している。測定項目としては、寸法 100 × 100 × 100mm の供試体では 0, 3, 6, 12 時間および 1, 2, 3, 7 日間それぞれ浸漬した後に、供試体の質量を測定してその変化を調べるとともに供試体を割裂し、水に触れると赤色に発色する市販の水漏れ検査剤を用いて発色域を調べることで水分の浸透深さを測定した。また、寸法 200 ×

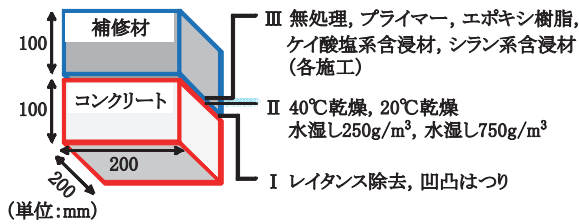


図4 浸漬試験の概念図

200 × 150mm の供試体では、市販の電気抵抗式水分計を用いて内部含水率を各一点測定した。また、圧縮強度は28日間の各養生後に測定した。

2.2 コンクリートと補修材との界面における水分浸透試験

2.2.1 供試体作製

供試体は、はじめにコンクリート母材を作製し、図4のように同寸法の補修材を鉛直下向きに打ち込んだ。表3に、コンクリートの配合と養生条件を示す。補修材との界面となるコンクリート面に対し、(I) ディスクサンダーを用いて表面の微粒分を除去する処理（以下、レイタンス除去）、または電動ピックを用いて凹凸を持つようにはつる処理を行った。次に、(II) コンクリート表面に対し、40℃乾燥、20℃乾燥、250g/m²で水湿し、750g/m²で水湿しのいずれかを行った上で、(III) 界面処理としてプライマー、エポキシ樹脂、ケイ酸塩系含浸材（反応型）施工および比較のため無処理とシラン系含浸材施工から選択して行った。補修材には市販のポリマーセメント系断面修復材2種類（補修材A、B）をそれぞれ使い、配合と施工方法は各メーカーの仕様に基づいた。補修材の施工から2日間20℃、60%R.H.の恒温恒湿室内で養生を行った。

2.2.2 表層透気試験、透水試験と電子顕微鏡観察

養生後、打込み方向側面のコンクリートと補修材との施工界面部分を平滑にし、界面を含む面の中心を測定点としてトレント法による表層透気試験を行った。また、表層透気試験を行った面に対してφ100 × 200mmのコアを一部採取し、アウトプット法ないしインプット法による方法に基づき透水試験を行った。さらに、施工界面に対して電子顕微鏡観察を行った。

3. 試験結果

3.1 コンクリート表面からの水分浸透試験

3.1.1 水分浸透深さと質量変化率

図5に、水セメント比（以下W/C）50%、封緘養生の供試体を一面浸漬試験後に割裂し、水漏れ検査剤を噴霧した後の発色域の状況を示す。打込み面付近で発色域が深くなっているが、これはブリーディング等の影響を

表3 コンクリートの配合と養生条件

W/C (%)	s/a (%)	単用量 (kg/m ³)					混和剤 (C%)	
		W	C	S	G		減水剤	助剤
					1305	2013		
50	45	152	304	833	724	634	0.25	0.002

20℃ 60% R.H. 環境下で、5日間封緘養生した後脱型し約10カ月静置

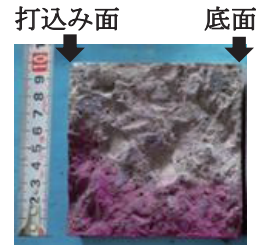
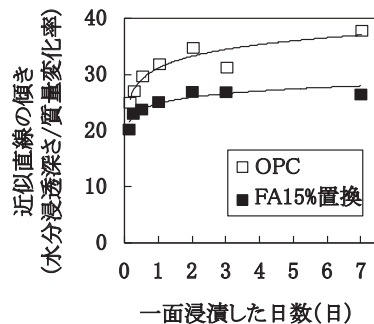
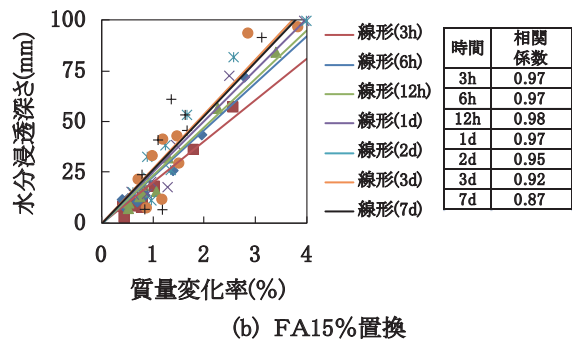
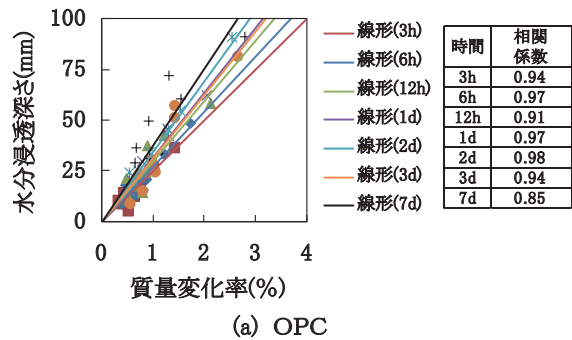


図5 供試体の割裂面における水分浸透状況



(c) 近似直線の傾きの時間依存性

図6 質量変化率と水分浸透深さとの関係

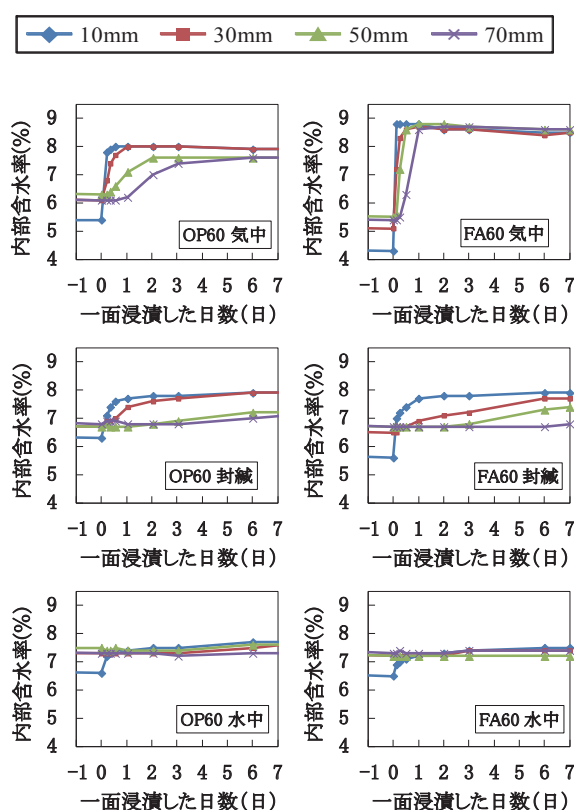


図7 内部含水率の経時変化（水結合材比 60%）

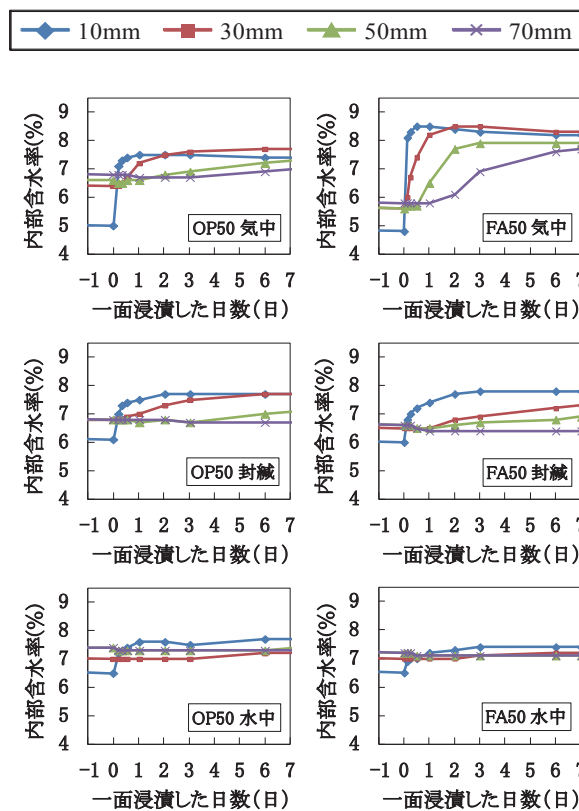


図8 内部含水率の経時変化（水結合材比 50%）

受け、打込み面付近に粗な層が形成されたためと考えられる。また、打込み時の底面でもコンクリート表面を伝わった水の影響がある試験体も見られたことから、ここではこれらの影響を受けにくい供試体中央部の発色域深さを水分浸透深さとした。

図6 (a) および図6 (b) に、このようにして測定した水分浸透深さと質量変化率との関係を OPC と FA のそれぞれについて浸漬期間ごとに示す。両者は比例関係にあり、各相関係数も 0.85 ~ 0.98 と高く、水分浸透に伴い質量が増加することがわかる。その一方で、これらの近似直線の傾きには時間依存性があり、同じ質量変化率でも浸漬時間の経過とともに水分浸透深さが大きくなった。さらに、図6 (c) に示すように、FA ではその傾きはいずれの時間においても OPC と比べて小さい傾向にある。このことから、コンクリートに一定量の水分が浸透した場合、FA の水分浸透深さが小さくなると考えられ、FA 置換コンクリートは OPC と比べて全体として水分浸透抵抗性に優れていると考えられる。なお、配合や養生による違いについては次項で述べる。

3.1.2 内部含水率

図7~図9に、一面浸漬試験における内部含水率の測定結果を W/B ごとに整理し、OPC と FA とを比較して示す。なお、これらの図には浸漬前の含水状態を示すため浸漬前日 (-1日と表記) から表示した。

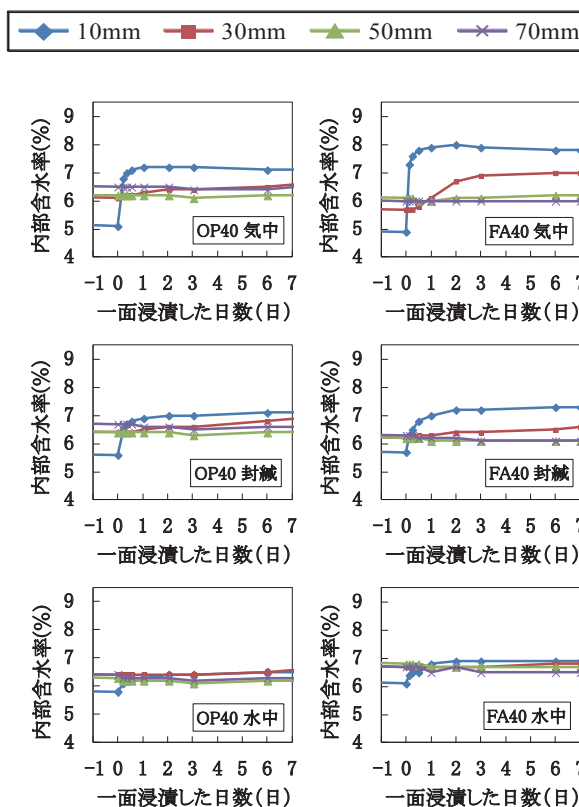


図9 内部含水率の経時変化（水結合材比 40%）

はじめに OPC に着目すると、OP60 の気中養生では、浸漬直後に深さ 10mm の内部含水率が上昇し、その後深さ 30,50,70mm の順に内部含水率が上昇しており、水がコンクリート内部に徐々に浸透していることがわかる。一方で、OP60 の封緘養生では深さ 50, 70mm での内部含水率はほとんど変化せず、7 日間の浸漬で水の浸透は深さ 50mm 未満に留まっている。水中養生では深さ 30mm も変化せず、養生方法により水の浸透性が大きく異なること、水中養生や封緘養生等の湿潤な養生により水の浸透を抑制できることがわかった。

OP50 および OP40 では、OP60 と比べて水の浸透が抑制され、水中養生や OP40 の封緘養生では 7 日間の浸漬での水の浸透深さは 30mm 未満となった。一方、いずれの供試体でも深さ 10mm には水が浸透することもわかった。

FA でも、養生条件や W/B による違いについては OPC と似た傾向を示している。FA と OPC とを比べると、気中養生ではいずれの W/B においても FA でより早く水が浸透しており、OPC と比べて水分浸透抵抗性が低い。しかしながら、封緘養生では W/B=60% および 50% の深さ 30mm に着目すると、FA で内部含水率の上昇が遅く、水分浸透抵抗性が高くなった。水中養生や W/C=40% の封緘養生では、どちらも水が浸透しにくく顕著な違いは見られなかった。以上のことから、FA は気中養生では OPC と比べて水分浸透抵抗性が低くなるが、十分な封緘養生を行うことで OPC よりも水分浸透抵抗性が高くなることがわかった。したがって、フライアッシュを混和したコンクリートでは、乾燥傾向となる養生を避け、湿潤な養生を行うことで普通コンクリートよりも水分浸透抵抗性に優れたコンクリートになると考えられる。

3.1.3 圧縮強度と水分浸透深さとの関係

図 10 に、材齢 28 日までの各養生後に測定した OPC の圧縮強度と、浸漬試験における水分浸透深さとの関係を示す。全体的には、圧縮強度が高いほど水分浸透深さが小さくなるが、OP60 の水中養生と OP50 の気中養生とは同程度の圧縮強度であるにも関わらず OP50 の気中養生で水分浸透深さが大きく、その差は 2 倍近い。なお、FA でも類似の傾向を示した。したがって、圧縮強度のみで水分浸透性を評価することは困難であると考えられる。

3.2 コンクリートと補修材との界面における水分浸透試験

3.2.1 表層透気係数測定

図 11 に、コンクリートの下地処理方法と表層透気係数との関係を示す。レイタンス除去と凹凸はつり処理とを比較すると、無処理では値の変化はほとんどなく、プ

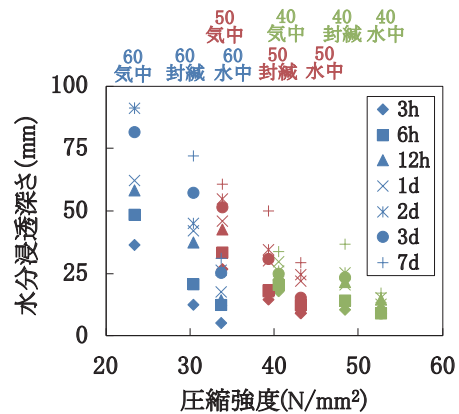


図 10 圧縮強度と水分浸透深さとの関係 (OPC)

ライマー施工ではレイタンス除去の値が小さい。次に、乾燥と水湿しとを比較すると、補修材や下地処理方法の違いによらず水湿しの値が小さい傾向があるものの、いずれもばらつきが大きい。さらに、各施工を比較するとプライマー施工の値が小さく、ばらつきが少ない。ただし、凹凸はつり処理をしたものではばらつきがあり、母材コンクリートに生じた微細ひび割れに起因するとみられる。また、エポキシ樹脂、シラン系含浸材、ケイ酸塩系含浸材の施工は空気移動抵抗性の観点では特に効果は確認されなかった。

3.2.2 透水係数測定

図 12 に、コンクリートの下地処理方法と透水係数との関係を示す。なお、水圧 1MPa で 48 時間加圧し水の排出が認められたものについてはアウトプット法、認められないものについては平均浸透深さをを用いインプット法により透水係数を求めた。レイタンス除去と凹凸はつり処理をしたものを比較すると、プライマー施工ではレイタンス除去の透水係数が小さい。さらに、乾燥と水湿しでは水湿しの値が小さい。各施工を比較すると、プライマー施工の値が小さくばらつきも少ないが、凹凸はつり処理をしたものでは値が大きい。また、エポキシ樹脂、シラン系含浸材、ケイ酸塩系含浸材の施工においては、ケイ酸塩系含浸材以外は水分移動抵抗性の観点では一定の効果が見られた。特に、シラン系含浸材は材料特性として撥水効果を持つため、空気移動抵抗性の向上には効果が確認されなかったものの、水分移動抵抗性向上に大きく寄与したと考えられる。

3.2.3 界面周辺の電子顕微鏡観察

図 13 に、レイタンス除去、乾燥 20℃とした後、界面処理として界面処理材の使用なしおよびプライマー施工とした供試体における界面付近の電子顕微鏡観察例 (反射電子像) を示す。プライマー施工をした界面は無処理に比べ様に良く充てんされていることがわかる。これは、プライマー施工により吸水防止効果が発揮され、補修材中のセメント粒子の水和に必要な水分がコンクリー

特集：材料技術

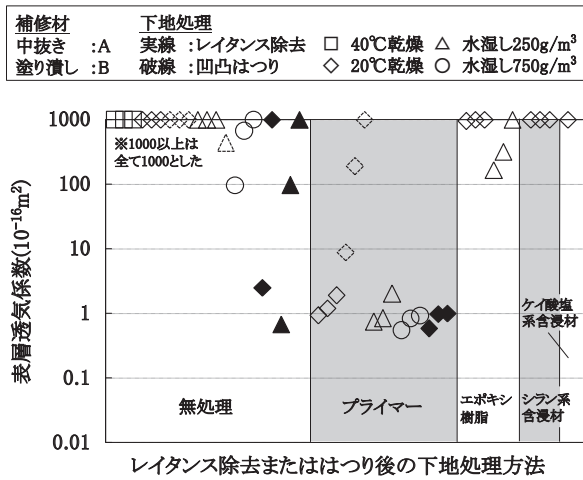


図 11 下地処理方法と表層透気係数との関係

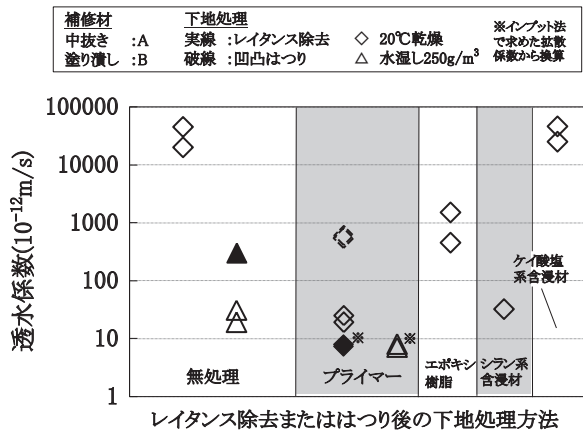


図 12 下地処理方法と透水係数との関係

に吸収されず、コンクリートと補修材間の界面に水和物が十分に形成されたためと考えられ、その結果、表層透気係数および透水係数が小さくなったと考えられる。このことから、コンクリートと補修材との界面において水分等に対する移動抵抗性を高めるためには、プライマー施工は有用であると考えられる。

4. まとめ

本研究で得られた成果を、以下にまとめる。

- (1) コンクリートへの水分浸透は、水結合材比のほかに養生方法によっても大きく異なり、湿潤状態を保つ養生により水分浸透に対する抵抗性が高くなる。
- (2) セメントの15%をフライアッシュで置換したコンクリートでは、気中養生では普通ポルトランドセメントのみを用いたコンクリートよりも水が浸透しやすいが、封緘養生では逆に浸透しにくくなった。フ

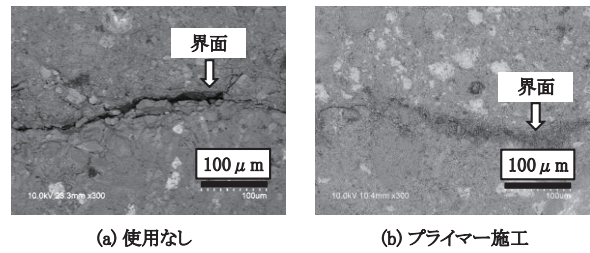


図 13 プライマー施工の有無による界面の充填状況の違い

ライアッシュを混和したコンクリートは、湿潤状態を保つ養生を行うことで、普通ポルトランドセメントのみを用いたコンクリートよりも水分浸透抵抗性に優れたコンクリートになると考えられる。

- (3) コンクリートへの水分浸透深さは、圧縮強度と概ね反比例するが、圧縮強度がほぼ同等であっても水分浸透深さに2倍程度の違いを生じることもあり、圧縮強度のみで水分浸透性を評価することは困難であると考えられる。
- (4) コンクリートと断面修復材との界面における水分浸透性は、断面修復材施工前の下地処理方法により大きく異なり、プライマーを用いることで水分浸透抵抗性が高くなる。ただし、電動ピックではつり取った際には母材コンクリートへの微細ひび割れに起因するとみられる水分移動抵抗性の低下がみられた。今後とも、このような水の動きを調べることを通じて、耐久性の高いコンクリート構造物の建設と、既設コンクリート構造物の良質な維持管理に役立てていきたい。

文献

- 1) 岸利治, 上田洋: 水の理解とその制御・活用に向けて, セメント・コンクリート, No.812, pp.1-6, 2014
- 2) 上田洋: 水の動きからみたコンクリート構造物のメンテナンス, RRR, Vol.68, No.4, pp.22-25, 2011
- 3) 飯島亨, 上田洋: 練混ぜ水の溶存酸素量を変化させたモルタル中のみがき鋼棒の腐食速度について, 土木学会第68回年次学術講演会, V部門, pp.395-396, 2013
- 4) 上田洋, 工藤輝大, 玉井謙: セメント系補修材の耐久性評価, 鉄道総研報告, Vol.24, No.8, pp.5-10, 2010
- 5) 高橋佑弥, 岸利治, 山田義智, 岡本賢志: フライアッシュを含む護岸コンクリートの塩化物イオン浸透性状と見かけの拡散係数の調査時材齢による相違, コンクリート中の鋼材の腐食性評価と防食技術研究小委員会(338委員会)シンポジウム論文集, pp.425-432, 土木学会, 2009