

# 論文 異なるけい酸塩系表面含浸材の微細ひび割れに対する補修効果の比較

室谷 卓実\*1・小出 至也\*2・五十嵐 心一\*3

**要旨:** ひび割れを導入したコンクリート供試体に対して種類の異なるけい酸塩系表面含浸材を塗布し、修復効果が電気伝導特性に与える影響を明らかにした。また、マイクロスコープによるひび割れ部の観察によりひび割れ閉塞の可能性について検討を行った。その結果、固化型けい酸塩系表面含浸材ではひび割れの閉塞が可能であり、塗布後初期に電気伝導率が低下する傾向が確認された。一方、反応型けい酸塩系表面含浸材ではひび割れの閉塞は確認されなかったものの、塗布後 14 日程度で固化型けい酸塩系表面含浸材と同等な電気伝導率を示した。

**キーワード:** けい酸塩系表面含浸材, ひび割れ修復, 電気伝導率, 毛細管空隙, 反応型, 固化型

## 1. はじめに

高度経済成長期に建設された我が国のコンクリート構造物は現在、建設されてから 40 年以上が経過し、劣化抑制に関する補修の重要性が高まっている。コンクリートの劣化現象はひび割れや毛細管空隙に浸透した水分や塩分等に起因することから、コンクリートの補修技術の一つである表面保護工法が近年広く注目されている。表面保護工法の一つである表面含浸工法のうち、けい酸塩系表面含浸材を用いた表面含浸工法は、2012 年に関連の技術や試験方法が整備され、土木学会より設計施工指針(案)として発刊されるに至っている<sup>1)</sup>。このような関連規準の整備によって技術の適用範囲が明確にされ、その施工の容易性や経済性を考慮すると、今後ますます適用事例が増大していくものと考えられる。

表面含浸工法に用いられるけい酸塩系表面含浸材は、けい酸ナトリウムおよびけい酸カリウムを主成分とする反応型けい酸塩系表面含浸材とけい酸リチウムを主成分とする固化型けい酸塩系表面含浸材に大別され、それぞれ改質メカニズムが異なる。反応型けい酸塩系表面含浸材はコンクリート中の水酸化カルシウムとの反応により C-S-H ゲルを生成することでコンクリート中の空隙を充填し、また乾燥固形分として残存したとしても水分の供給により再溶解することで、水酸化カルシウムとの継続的な反応が可能な材料である。一方、固化型けい酸塩系表面含浸材は材料自体の乾燥により固化が進行し、その固化物によりコンクリート中の空隙を充填する材料である。このような改質メカニズムの違いにより、反応型けい酸塩系表面含浸材では、含浸材塗布後に湿潤養生が必要であるのに対して、固化型けい酸塩系表面含浸材では乾燥養生が必要とされるなどそれぞれ養生方法が異なる。

けい酸塩系表面含浸材に期待される補修効果として、表層の毛細管空隙の充填による組織の緻密化が挙げられる。この場合の充填機構が、けい酸塩自体の乾燥固化またはけい酸塩と水酸化カルシウムの反応であることを考えると、微細なひび割れの閉塞に対しても有効な方法になり得ると考えられている。しかしながら、けい酸塩系表面含浸材のひび割れの補修効果に関する研究は、中性化や塩害などの耐久性関連の劣化現象を対象とした研究に比べて少ないようである。さらに、微細な空隙の充填についても遠藤ら<sup>2)</sup>が全空隙径の範囲において空隙量が減少すると報告している一方で、志賀ら<sup>3)</sup>は、およそ 0.5 ~ 2 μm の範囲にて空隙量が減少すると述べており、けい酸塩系表面含浸材による空隙の充填に関する統一的な知見は得られておらず、よってけい酸塩系表面含浸材によって閉塞可能なひび割れ幅についても必ずしも明らかではない。例えば山本ら<sup>4)</sup>は、ひび割れを導入したコンクリートに対して加圧透水試験を行い、けい酸塩系表面含浸材は微細なひび割れを充填し透水効果を発揮するものの、ひび割れが大きくなると透水が完全に収束されるには至らないことを報告しているが、閉塞可能なひび割れ幅に関しては言及していない。その一方で JSCE-K 572<sup>1)</sup> においては、けい酸塩系表面含浸工法では 200 μm 以下のひび割れを対象とすることが想定されており、実構造物に生ずるひび割れの中でも微細なひび割れを対象とすることが一般的と考えられる。しかしそのような微細なひび割れであっても、けい酸塩系表面含浸材は塗布後からひび割れ閉塞まである程度の期間を要する。これを評価するために実施されるひび割れ透水試験では、試験実施に時間を要するため、ひび割れ修復と塗布後材齢の期間を正確に把握することは容易ではない。

\*1 金沢大学 理工学域環境デザイン学類 (学生会員)

\*2 金沢大学大学院 自然科学研究科環境デザイン学専攻 (学生会員)

\*3 金沢大学 理工学域環境デザイン学類教授 博(工) (正会員)

表-1 コンクリートの示方配合

スランプ(cm)	W/C(%)	空気量(%)	S/a(%)	単位量(kg/m <sup>3</sup> )			混和材(cc/m <sup>3</sup> )		
				水	セメント	細骨材	粗骨材	AE減水剤	AE助剤
12±2	50	5±0.5	40	150	300	736	1083	360	990

本研究においては、他の試験方法に比べて測定時間が短く、かつ測定が簡便である直流回路による電気伝導率がけい酸塩系表面含浸材の改質効果を反映する<sup>5)</sup>ことに着目した。電気伝導率を用いて、けい酸塩系表面含浸材の種類によるひび割れの補修効果の相違を明らかにすることを目的とした。また、マイクロSCOPEによるひび割れ観察により、けい酸塩系表面含浸材の種類による修復可能と思われるひび割れ幅の条件について検討した。

## 2. 実験概要

### 2.1 使用材料および供試体の作製

セメントには普通ポルトランドセメント（密度 3.15g/cm<sup>3</sup>、比表面積 3310cm<sup>2</sup>/g）を使用し、骨材には川砂（密度：2.60g/cm<sup>3</sup>、吸水率：2.03 g/cm<sup>3</sup>）および川砂利（密度：2.58g/cm<sup>3</sup>、吸水率：1.98 g/cm<sup>3</sup>、G<sub>max</sub>：25mm）を用い、AE 減水剤をセメント質量に対して 0.12%、AE 助剤を 3.3% 添加した。コンクリートの示方配合を表-1 に示す。けい酸塩系表面含浸材には、市販のけい酸ナトリウムおよびけい酸カリウムを主成分とする反応型けい酸塩系表面含浸材（固形分率 23%、密度 1.2g/cm<sup>3</sup>）と、けい酸リチウムを主成分とする固化型けい酸塩系表面含浸材（固形分率 23%、密度 1.2g/cm<sup>3</sup>）を用いた。JSCE-K 572 におけるひび割れ透水性試験を参考にし、JIS R 5201 に準じて水セメント比が 0.5 のコンクリート円柱供試体（直径 83mm、高さ 50mm）を JIS K 6741 に規定される呼び径 75mm の VU 管に打設した。打ち込み後 24 時間にて脱型し、水中養生(20℃)を行った。

### 2.2 ひび割れ導入と含浸処理

材齢 28 日にて JSCE-K 572 におけるひび割れ透水性試験を参考にし、JIS A 1113 に規定された割裂引張試験に準拠し、VU 管と一体化した供試体に圧縮試験機を用いて供試体の両側面から線荷重を載荷することで、0.2mm 以下のひび割れを供試体両面に導入した。その後、素地調整として供試体を恒温室（温度 20℃、湿度 60%）に静置することで、供試体表面を含浸材の種類による適度な水分状態に調整を行い、含浸材製造業者の仕様に従って含浸材を刷毛塗りにより円板状供試体に所定量塗布した。反応型けい酸塩系表面含浸材については、塗布完了後、含浸材の反応を促すために所定の材齢まで湿空養生（相対湿度 80%）を行い、原状供試体は水中養生 28 日後に含浸処理を施さずに所定材齢まで湿空養生を行った供試体とした。固化型けい酸塩系表面含浸材については、塗

表-2 反応性試験における配合

No.	純水(%)	含浸材(%)	飽和水酸化 カルシウム水溶液(%)
1	100	—	—
2	—	100	—
3	—	—	100
4	—	95	5
5	—	90	10
6	—	80	20
7	—	70	30

布完了後、含浸材の反応を促すために所定の材齢まで乾燥養生（相対湿度 60%）を行い、原状供試体は水中養生 28 日後に含浸処理を施さずに所定材齢まで乾燥養生を行った供試体とした。また、画像解析用の供試体として同一の水セメント比のセメントペースト供試体を作製し、同様の表面含浸材塗布および塗布後養生を行った。

### 2.3 反応性試験<sup>1)</sup>

JSCE-K 572 におけるけい酸塩系表面含浸材の反応性確認試験に準拠し、反応性試験を行った。著者ら<sup>6)</sup>はフライアッシュのポゾラン反応により水酸化カルシウムが減少した供試体に対して、単純に反応型けい酸塩系表面含浸材を塗布した場合の改質効果は小さいものの、塗布前に外部から水酸化カルシウムを供給することで改質効果の増大が可能であることを報告している。また、染谷ら<sup>7)</sup>は普通コンクリートへのけい酸塩系表面含浸材塗布後に外部から水酸化カルシウムを供給することで、改質効果が増大することを報告しており、けい酸塩系表面含浸材の反応および改質効果と水酸化カルシウム量には密接な関係が存在すると考えられる。また前述のけい酸塩系表面含浸材は塗布後から空隙やひび割れ閉塞まである程度の期間を要するが、実施工を考慮した場合、塗布後速やかなひび割れ閉塞が要求される。そのため、けい酸塩系表面含浸材と飽和水酸化カルシウム水溶液を混合後に塗布することで反応が促進され、早期の改質効果の発現が期待できると考えた。そのためけい酸塩系表面含浸材と飽和水酸化カルシウム水溶液の最適な混合比を決定するため、表-2 に示す配合で反応性試験を行った。この際、けい酸塩系表面含浸材と飽和水酸化カルシウム水溶液の混合が粘性へ影響を与えないことを確認した。

### 2.4 電気伝導率試験

2.1 で作製した円板状供試体を用いて、塗布後材齢 3,

7, 14, 28 日にて直流電源を用いた電気泳動法による電気伝導率の測定を JSCE-G 571 および ASTM C 1202 に準じて行った。所定材齢前日にて、供試体側面にエポキシ樹脂を塗布した。樹脂の硬化後、24 時間の真空飽水処理を行った。セル溶液として 0.3mol/L の水酸化ナトリウム溶液を使用し、直流電源により 30V の電圧を負荷した。通電開始直後に電流値は速やかに安定するので、Nokken らの提案<sup>8)</sup>に基づき、通電開始 15 分後の電流値を用いて、式(1)により、所定材齢における電気伝導率  $\sigma$  を算出した。測定に用いた装置の模式図を図-1 に示す。

$$\sigma(\mu\text{S}/\text{cm}) = \frac{I \cdot L}{V \cdot A} \quad (1)$$

ここに  $I$  は電流値 (amps),  $L$  は供試体長さ (cm),  $V$  は電圧値 (V),  $A$  は供試体の投影面積 ( $\text{cm}^2$ ) を表わす。

## 2.5 画像解析

### (1) 電子顕微鏡試料の作製

所定材齢にて供試体表面部から試料を切り出し、エタノールに 24 時間以上浸漬し、傾斜溶媒置換により内部水分を除去した。さらにエタノールと  $t$ -ブチルアルコールの混合比を変化させながら、エタノールを  $t$ -ブチルアルコールに完全に置換した。凍結真空乾燥装置による試料乾燥後、真空樹脂含浸装置を用いてエポキシ樹脂を含浸させた。樹脂の硬化後、耐水研磨紙およびダイヤモンドスラリーを用い試料観察面を慎重に研磨し、金-パラジウム蒸着を行い反射電子像観察試料とした。

### (2) 反射電子像の取得

観察倍率 500 倍にて研磨面の反射電子像を取得した。1 画像は  $1148 \times 1000$  画素からなり、1 画素当たりの寸法は約  $0.22 \mu\text{m}$  である。取り込んだ反射電子像に対してグレースケールに基づく 2 値化処理を施し、未水和セメントおよび分解能以上の毛細管空隙（以下、粗大毛細管空隙と称す）を抽出した。画像解析ソフトウェアの機能を用いて、取得した 2 値画像の面積率を算出した。2 次元の画像データから 3 次元空間データの推定手法として知られるステレオロジーの原則に従い、構成相の面積率は対象とする相の体積率に等しいとした。得られた未水和

セメント粒子の体積率と初期のセメント体積率の差から、式(2)に基づき、水和度  $\alpha$  を計算した。

$$\alpha = 1 - \frac{V_c}{V_{c0}} \quad (2)$$

ここに、 $V_c$  は画像から取得した未水和セメント粒子の体積率、 $V_{c0}$  は初期のセメントの体積率である。

### (3) Powers モデルによる構成相の推定

(2)にて算出した水和度を用い、Powers の水和反応モデル<sup>9)</sup>を適用して水和反応生成物量および全毛細管空隙量を求めた。セメント 1g が水和反応すると 0.23g の水と結合して水和反応生成物の固体相を形成し、このときの化学収縮による体積減少量は結合水体積の 0.254 倍とした。また、水和反応生成物中のゲル空隙の空隙率は 0.28 とし、ゲル空隙は水で満たされて、そのゲル空隙水和反応生成物固体相が一体となってセメントゲルを構成するとした。(2)にて求めた水和度から Powers モデルにより生成されたセメントゲル体積を求め、全体積から未水和セメントおよびセメントゲルを差し引くことによって全毛細管空隙を求めた。全毛細管空隙から画像解析によって求めた粗大毛細管空隙を差し引いた残りの空隙は分解能以下の空隙であり、これを微細毛細管空隙<sup>10)</sup>とし、セメントペーストの構成相割合を得た。

## 3. 結果および考察

### 3.1 ひび割れ導入

材齢 28 日におけるひび割れ導入後の供試体全景およびひび割れ部の拡大写真を図-2 に示す。いずれのひび割れ箇所においても、ひび割れ幅は概ね 0.1mm 程度であり、JSCE-K 572 に規定される 0.2mm 以下のひび割れの導入を確認した。

### 3.2 反応性試験

図-3 に反応性試験の結果を示す。浸漬 3 日において、飽和水酸化カルシウム水溶液置換率 0% および 5% では、白濁はセメントペースト片周囲に限られる(図-3 (a))。一方、置換率が 10% 以上になると試験管全体に薄い白濁が確認された。すなわち、飽和水酸化カルシウム水溶液

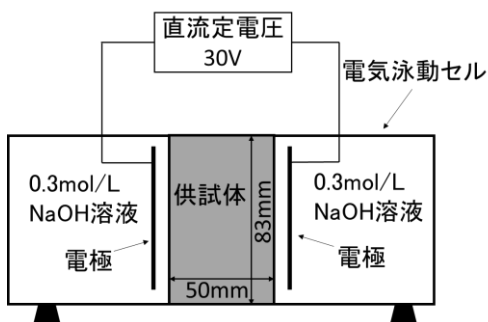


図-1 測定装置模式図

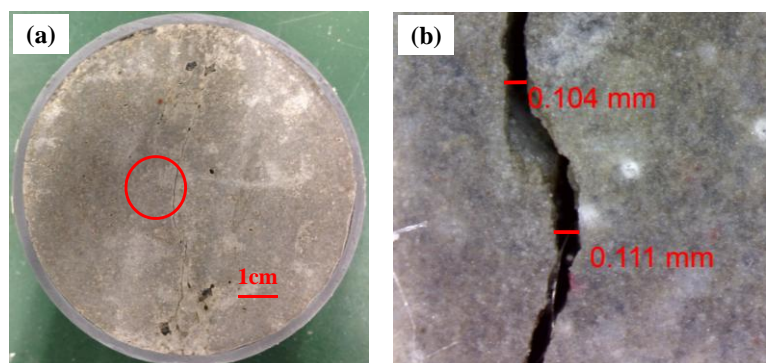


図-2 ひび割れ部の様子 (a) 供試体全断面 (b) ひび割れ部拡大

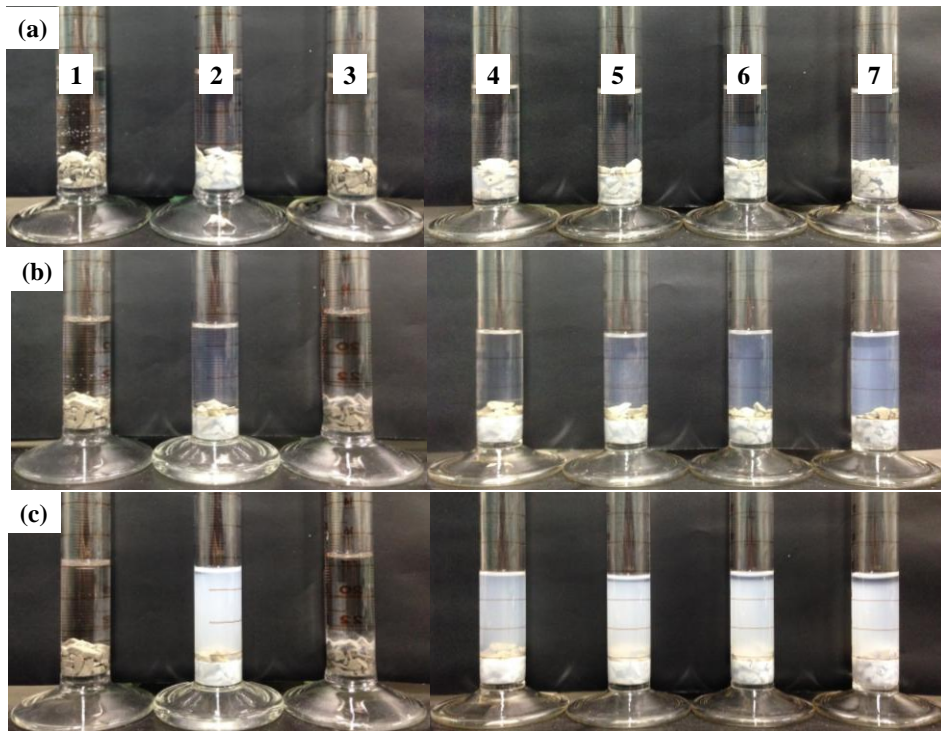


図-3 反応性試験の白濁の経時変化 (a)反応性試験開始後3日 (b)7日 (c)28日

と置換することで、けい酸塩系表面含浸材の反応が促進されたと考えられる。浸漬7日では、置換率10%以上における試験管全体の白濁が顕著になる(図-3(b))。浸漬28日ではけい酸塩系表面含浸材を投入した試験管の白濁の程度は同程度である(図-3(c))。すなわち、飽和水酸化カルシウム水溶液とけい酸塩系表面含浸材を一部置換したことにより、けい酸塩系表面含浸材の反応の促進が可能となる一方で、最終的な反応の程度は目視上同程度のようなものである。以上の反応性試験結果をもとに飽和水酸化カルシウム水溶液の置換率は20%と決定した。

### 3.3 電気伝導率試験

図-4に電気伝導率試験の結果を示す。ひび割れの導入により電気伝導率が $20\mu\text{S/cm}$ 程度増加した。これよりひび割れの導入により電気伝導経路が増加もしくは、

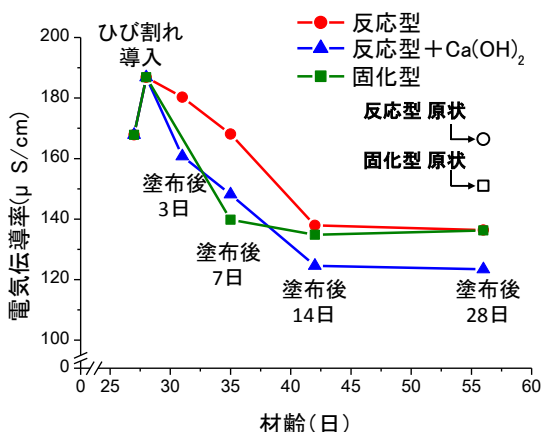


図-4 電気伝導率試験結果

伝導が容易になったことによる電気伝導率の増加が確認された。材齢56日における電気伝導率は、それぞれの含浸材を塗布した供試体で原状供試体に比べ低い値を示した。すなわちけい酸塩系表面含浸材による改質効果が電気伝導特性の変化として確認された。

塗布後3日に行った電気伝導率試験の結果を見ると、飽和水酸化カルシウム水溶液を混合した含浸材を塗布したことにより、単純に塗布した場合に比べて電気伝導率が10%程度低下している。このことは、反応性試験における結果と一致しており、飽和水酸化カルシウム水溶液を混合したことによってけい酸塩系表面含浸材の反応が促進され、これが電気伝導特性の変化として表われたと考えられる。図-5に塗布後3日における反応型けい酸塩系表面含浸材塗布供試体のひび割れ部の様子を示す。図-4に示したように電気伝導特性に差異が確認されたが、ひび割れ部においては反応生成物によるひび割れの充填等は確認されなかった。すなわち、飽和水酸化カル

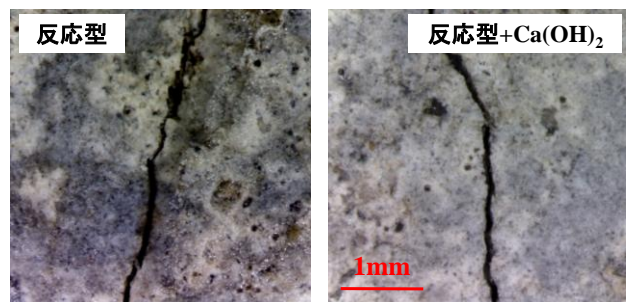


図-5 ひび割れ部の拡大写真(塗布後3日)

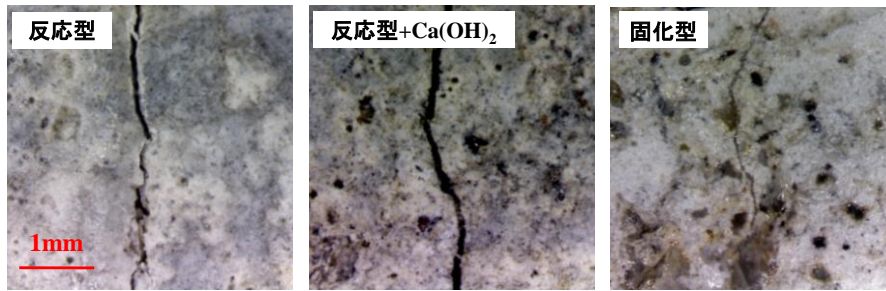


図-6 ひび割れ部の拡大写真（塗布後 7 日）

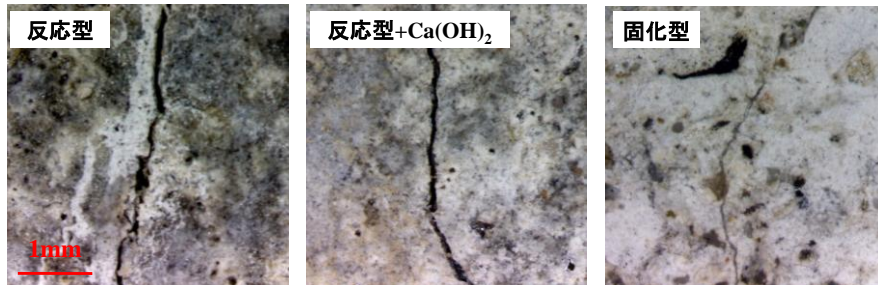


図-7 ひび割れ部の拡大写真（塗布後 28 日）

シウム水溶液を混合した含浸材を塗布した供試体においては、表面のひび割れが閉塞されていないにも関わらず、ひび割れ導入前よりも小さな電気伝導率を示したことになる。

塗布後 7 日に行った電気伝導率試験の結果を見ると、反応型けい酸塩系表面含浸材塗布供試体は塗布後 3 日と同様に、飽和水酸化カルシウム水溶液を混合した含浸材を塗布したことにより、単純に塗布した場合に比べて電気伝導率が 10%程度低くなっている。一方、固化型けい酸塩系表面含浸材塗布供試体の電気伝導率は最も低く、単純に反応型けい酸塩系表面含浸材を塗布した場合に比べて 20%程度低い結果となった。図-6 に塗布供試体のひび割れ部の拡大写真を示す。反応型けい酸塩系表面含浸材塗布供試体ではひび割れ部における反応生成物の充填やひび割れの閉塞は確認されなかった。一方、固化型けい酸塩系表面含浸材塗布供試体の表面では、含浸材の固化物によるひび割れの閉塞が確認された。このようなひび割れの閉塞により、電気伝導経路が遮断され最も低い電気伝導率を示したと考えられる。

電気伝導率試験の塗布後 14 日の結果を見ると、反応型けい酸塩系表面含浸材を単純に塗布した供試体は固化型けい酸塩系表面含浸材塗布供試体と同様な電気伝導率であるが、飽和水酸化カルシウム水溶液を混合した含浸材を塗布した供試体がさらに低い電気伝導率を示している。一方、固化型けい酸塩系表面含浸材塗布供試体では、塗布後材齢 7 日と同様の電気伝導率を示し、電気伝導率で示される改質効果に変化は認められない。

電気伝導率試験の塗布後 28 日の結果を見ると、全ての塗布供試体で塗布後 14 日の電気伝導率と同様な値を

示している。図-7 にひび割れ部の様子を示すが、塗布後 7 日のひび割れの状況（図-6）と大きな差は認められない。反応型けい酸塩系表面含浸材塗布供試体の表面においてひび割れの閉塞が確認されない一方で、固化型けい酸塩系表面含浸材塗布供試体では、ひび割れの閉塞が多くの箇所を確認された。

以上の結果より反応型けい酸塩系表面含浸材を単純に塗布した場合はひび割れの閉塞は期待できず、塗布後の短期間における電気伝導率の低下は小さい。しかしながら、塗布後 14 日程度で固化型けい酸塩系表面含浸材塗布供試体と同様の値にまで電気伝導率は低下した。また、けい酸塩系表面含浸材の一部を飽和水酸化カルシウム水溶液と置換することにより、塗布後短期間から電気伝導率の低下が大きく、最終的に最も低い電気伝導率を示した。一方、固化型けい酸塩系表面含浸材においては、ひび割れの閉塞が期待できるが、ひび割れ閉塞以降の物質透過性へ与える影響は小さいようである。すなわち、反応型けい酸塩系表面含浸材においては表面のひび割れの閉塞が行われないものの、ひび割れが閉塞された固化型けい酸塩系表面含浸材と同等かそれ以下の電気伝導率を示したことになり、ひび割れ導入供試体内部の微小な空隙やひび割れ部において、反応生成物による伝導経路の局所的な遮断が行われていると考えられる。

### 3.4 画像解析による微小组織変化

図-8 は画像解析により求めた水相度と Powers のモデルを組み合わせて求めたセメントペーストの構成相割合を示したものである<sup>8)</sup>。図より明らかなように、固化型けい酸塩系表面含浸材塗布供試体の表層の粗大毛細管空隙率は、反応型けい酸塩系表面含浸材塗布供試体に比べ

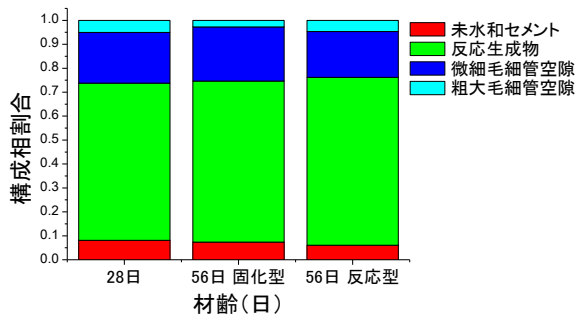


図-8 構成割合

て明らかに小さい。一方、反応型けい酸塩系表面含浸材塗布供試体の表層では、画像分解能以下の微細毛細管空隙率がやや小さくなっており、全毛細管空隙量も小さい。固化型けい酸塩系表面含浸材でひび割れの閉塞が可能であったことを合わせて考慮すれば、固化型けい酸塩系表面含浸材においては、充填対象となる空隙やひび割れが、反応型けい酸塩系表面含浸材によって充填可能なそれらと比べて大きいと判断してよいと考えられる。これに対して反応型けい酸塩系表面含浸材では、画像分解能以下の微細な毛細管空隙を充填し、電気伝導経路を遮断することで、物質移動特性の改善が可能なのである。すなわち、補修および予防保全工法としてけい酸塩系表面含浸材を使用する場合には、上記のようなけい酸塩系表面含浸材の種類による特性の相違に注意する必要があるといえる。

#### 4. 結論

ひび割れを導入した供試体に対して異なる種類のけい酸塩系表面含浸材を塗布し、修復効果を電気伝導特性の相違として評価した。また、マイクロスコープによるひび割れ部の観察によりひび割れ閉塞可能性について検討を行った。本研究によって得られた主な結果は以下の通りである。

- (1) 固化型けい酸塩系表面含浸材は 0.1mm 程度のひび割れの閉塞が可能であり、塗布後比較的短期間で物質透過特性の改善が可能である。
- (2) 反応型けい酸塩系表面含浸材は 0.1mm 程度の表面のひび割れの閉塞が困難であるが、単に塗布した場合は塗布後 14 日程度で固化型けい酸塩系表面含浸材と同様な電気伝導率を示した。
- (3) 塗布後初期からの物質透過性の改善を期待する場合は、飽和水酸化カルシウム水溶液と一部置換する方策が有効なようであり、適切な混合割合は JSCE-K 572 における反応試験により評価できる。
- (4) けい酸塩系表面含浸材の種類により、充填可能な空隙径およびひび割れ幅の範囲が異なり、改質効果が

物質透過性に与える影響も異なる。このような特性を把握したうえでひび割れの補修計画の立案が必要である。

#### 謝辞

本研究は日本学術振興会科学研究費補助金基盤研究(A) (課題番号: 23246081, 研究代表者: 武若耕司(鹿児島大学)), および基盤研究(C) (課題番号: 21560482) の交付を受けたものである。ここに記し謝意を表す。

#### 参考文献

- 1) コンクリートライブラリー137 けい酸塩系表面含浸工法の設計施工指針(案), 土木学会, 2012
- 2) 遠藤裕丈, 田口史雄, 小野俊博, 登靖博: ケイ酸塩系表面含浸材を施工したコンクリートのスケーリング抵抗性の基礎的評価, コンクリート工学年次論文集, Vol.29, No.1, pp.1203-1208, 2007
- 3) 志賀正和, 黒井登起雄, 金久保雅之, 松村仁夫: 表層改質剤によるコンクリートのモルタル層の特性変化, 土木学会第59回年次学術講演会講演概要集, pp.1131-1132, 2003
- 4) 山本昌宏, 今井啓一, 宮崎保, 遠藤裕丈, 守屋進: けい酸塩系表面含浸材による微細ひび割れの透水防止性に関する検討, 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, 第11巻, pp.349-354, 2011
- 5) 渡辺晋吾, 五十嵐心一: けい酸塩系表面含浸材によるセメントペーストの微視的構造の変化, コンクリート工学年次論文集, Vol.34, No.1, pp.1606-1611, 2012
- 6) 小出至也, 五十嵐心一, 渡辺慎吾: けい酸塩系表面含浸材によるフライアッシュ混入セメントペーストの組織変化, コンクリート工学年次論文集, Vol.35, No.1, pp.1621-1626, 2013
- 7) 染谷望, 加藤佳孝: 塗布後の養生方法が表面含浸材の改質効果に及ぼす影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.35, No.1, pp.1687-1692, 2013
- 8) Nokken, M.R. and Hooton, R.D.: Using pore parameters to estimate permeability or conductivity of concrete, Materials and Structures, Vol.41, No.1, pp.1-16, 2008
- 9) Powers, T.C.: The non-evaporable water content of hardened Portland cement paste, ASTM Bulletin, No.158, pp.68-76, 1949
- 10) Igarashi, S., Watanabe, A. and Kawamura, M.: Evaluation of capillary pore size characteristics in high-strength concrete at early ages, Cement and Concrete Research, Vol.35, No.3, pp.513-519, 2005