

報告 表面含浸材の基本性能とひび割れ改質効果に関する検討

澤田 巧^{*1}・福手 勤^{*2}・井上 雄太^{*3}・小笠原 哲也^{*4}

要旨：一般に市販されているコンクリート表面含浸材について、水や炭酸ガス、塩化物イオンなどの劣化因子の遮断性に関する性能比較試験を行い、JSCE-K 571-2005「表面含浸材の試験方法」で規定される試験で得られた性能は、既往の文献に示される性能を裏付けるものであることを確認した。また、これらのコンクリート表面含浸材をすでにひび割れが生じている既設構造物へ適用することを想定し、幅が 0.1mm および 0.2mm のひび割れ部へ適用したときの吸水抑制性能に関する実験を実施した。その結果、シラン系、けい酸塩系とも十分な吸水抑制効果を有していることが確認できた。

キーワード：表面含浸材, ひび割れ, 補修, 耐久性, 中性化, 塩害

1. はじめに

わが国では、高度経済成長期に建設されたコンクリート構造物が更新時期を迎えているが、社会情勢・経済情勢から、適切な維持管理によるコンクリート構造物の延命化が求められている。また、新設されるコンクリート構造物においても、長期耐久性を確保することが求められている。そのため、コンクリート構造物の長寿命化に関する技術開発が鋭意進められている状況にある。

コンクリート構造物はそれが置かれている環境中の劣化因子の侵入により様々な変状を生じる。劣化因子には、水分、炭酸ガス、塩化物イオンなどがあるが、それらの侵入を抑制することで、コンクリート構造物の延命化を図ることが可能となる。劣化因子の侵入防止の技術としては、表面被覆材や表面含浸材などこれまで多くのものが開発されている。それらの性能や施工に関する知見は、土木学会「表面保護工設計施工指針(案)」¹⁾などにまとめられている。

表面保護工法のうち表面含浸材は塗布後も外観の変化がほとんどなく、コンクリート構造物表面の目視による診断も塗布前と変わらず行うことが出来るため、多くの構造物に適用しやすい材料といえる。また、表面含浸材は、既往の文献や研究から、確実な施工を行えば劣化因子の侵入抑制効果は高いことがわかっている。そのような特長から、最近では表面含浸材が使用される機会も増え、その種類も増加してきている。

一方、既設のコンクリート構造物への表面含浸材の塗布を考えた場合、ひび割れ注入工法が行えないような微細なひび割れが発生している箇所へ適用することも考えられる。しかし、ひび割れ部へ表面含浸材を塗布した場合の劣化因子の侵入抑制効果については明らかでは

ない。

そこで、本報告では表面含浸材の一般的性状はじめ、0.2mm 以下のひび割れへ適用したときの劣化因子の侵入抑制効果の把握を主たる目的として検討を行った。

2. 実験概要

2.1 使用材料

実験に使用する表面含浸材としては、市販されているものから使用実績が多いと思われる 7 種類を選定した。その 7 種類の表面含浸材の分類を表-1に、含浸材を塗布した供試体を作製するためのモルタル基板に用いた材料を表-2に示す。

表-1 実験に使用した表面含浸材の種類および分類

銘柄	分類	主成分	備考
A	シラン系	シランオリゴマー	1回塗布
B		シランモノマー	2回塗布
C		シランモノマー	1回塗布
D	併用系	シラン+けい酸	1液型
E		シラン+けい酸	2液型
F	けい酸塩系	けい酸ナトリウム	2回塗布
G		けい酸ナトリウム	2回塗布

表-2 供試体の作製に用いた材料

材料	説明	適合規格
水	上水道水	JIS R 5308
セメント	普通ポルトランドセメント	JIS R 5210
砂	標準砂	JIS R 5201

*1 五洋建設(株) 技術研究所 耐震構造チーム 研究員 (正会員)

*2 東洋大学 理工学部 都市環境デザイン学科 教授 工博 (正会員)

*3 東洋大学 大学院工学研究科 環境デザイン専攻 修士課程 (非会員)

*4 五洋建設(株) 技術研究所 耐震構造チーム 課長 (正会員)

2.2 試験方法

本研究で行った試験は以下の通りである。まず、JSCE-K 571-2005「表面含浸材の試験方法」により各種表面含浸材の基本性能の確認を行った。次に、幅が0.1mmおよび0.2mmのひび割れを模擬した箇所へ適用した時の吸水抑制性能については、文献2)を参考として作製した供試体を用いて実験を行った。表面含浸材の種類と実施した試験との対応を表-3に示す。

3. 基本性能確認試験

3.1 供試体の作製

表-1に示した表面含浸材の基本性能を土木学会規準 JSCE-K 571-2005「表面含浸材の試験方法」により確認した。供試体を作製するためのモルタル基板は JSCE-F 505「試験室におけるモルタルの作り方(案)」に準拠し、水セメント比50%、砂セメント比3のモルタルを練り混ぜて作製した。モルタルを打込み後、材齢24時間で脱型を行い、6日間水中養生を行った。その後、各試験で用いる供試体の所定のサイズに切断し、28日間の気中養生を行った後、含浸材の塗布を行った。含浸材の塗布は、含浸面を鉛直とし、浸透方向が水平方向となるように塗布を行った。基本性能確認試験に用いる全ての供試体に共通な作製工程を表-4に示す。なお、選定した含浸材それぞれが最も有効に性能を発揮するための、塗布時の材齢、塗布後の養生期間などは異なるが、本研究では、試験材齢を統一するために、全ての含浸材について供試体の作製工程を表-4のとおりとした。

3.2 試験結果

(1) 含浸深さ試験

含浸深さ試験では上記の手順で100mm×100mm×100mmの供試体を作製した後、含浸面を2分割するよう割裂し、はっ水部分の幅を測定することで含浸深さを求めた。なお、含浸深さは水を噴霧することで撥水部分が明確に計測できるシラン系含浸材のみについて測定した。試験結果を図-1に示す。

含浸深さは各銘柄ともカタログ値より小さい値となった。その理由としてはまず、鉛直面に表面含浸材を塗布したため、水平面に向き塗布するよりも浸透力に劣ったこと、次に本試験では供試体がW/C=50%のモルタルであったため、各カタログの試験で使用している材料よりも密な構造で空隙が小さく、浸透しにくい状態であったことも理由の一つとして挙げられる。また、一般的には主成分の分子構造が小さい方が浸透力に優れているが、本試験の結果でも主成分が分子構造の大きいオリゴマー系の含浸材よりも、より小さい分子構造を持つモノマー系のもののほうがより奥深く浸透したこと

がわかる結果となった。

(2) 吸水率試験

吸水率試験では100mm×100mm×100mmの供試体を蒸留水に7日間浸漬し、浸漬前後の重量変化を吸水率として算定した。試験結果を図-2に示す。

表-3 適用した試験の一覧

試験方法		対象銘柄
JSCE-K 571	含浸深さ	A~C
	吸水率	A~G
	透湿度	A~G
	中性化に対する抵抗性	A~G
	塩化物イオン浸透に対する抵抗性	A~G
ひび割れ改質効果(幅0.1mm)		A~C, E~G
ひび割れ改質効果(幅0.2mm)		A~C, E~G

表-4 供試体の作製工程

材齢(日)	0	1	2~6	7	8~34	35	36~49
打込み	■						
脱型		■					
水中養生		■	■				
切断				■			
気中養生				■	■		
シール処理					■		
含浸材塗布						■	
含浸材養生							■

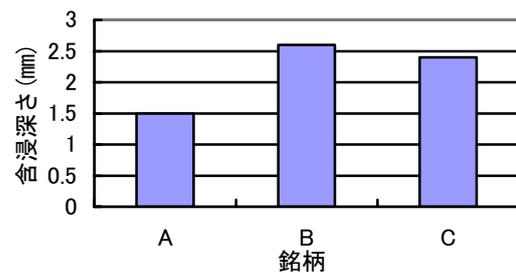


図-1 含浸深さ試験

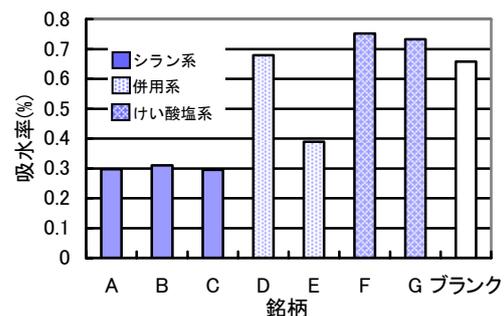


図-2 吸水率試験

吸水率は既往の文献¹⁾に示される性能を裏付けるような結果であり、シラン系のものがけい酸塩系のものより小さな吸水率を示した。ここではシランモノマー系、オリゴマー系の間で有意な差は認められなかった。一般的には主成分がオリゴマー系のものの方が撥水性能に優れると言われているが、本試験のような比較的穏やかな環境下における浸漬では、含浸深さや、撥水性能による吸水率の差は生じなかった。

また、けい酸塩系および1液型の併用系ではブランク供試体よりも吸水率が大きい値となったが、この理由として、けい酸塩系含浸材を塗布した面は親水性を示すために、表層部により水分が吸着したことも可能性として挙げられる。また、C-S-Hの水和物を生成する反応速度は遅く、本試験のような短期間では細孔や空隙中で十分に結晶化されず、所定の吸水抑制効果が発揮されていないことも可能性として挙げられる。

(3) 透湿度試験

透湿度試験は100mm×100mm×20mmの供試体を蒸留水に72時間浸漬し吸水させた後に、含浸材を塗布した1面を残しその他の面をエポキシ樹脂およびアルミテープで封緘し、7日間の気中養生を行った。気中養生の前後での重量変化を透湿度として算定した。試験結果を図-3に示す。

透湿度は、含浸材A、Bでブランクに対し低い値となったものの、全体として有意な差は生じなかった。

(4) 中性化に対する抵抗性試験

中性化に対する抵抗性試験では、100mm×100mm×100mmの供試体を促進中性化試験機を用いて28日間の促進中性化を行った。その後、割裂しフェノールフタレイン溶液を噴霧し変色域までの幅を測定することで中性化深さを確認した。試験結果を図-4に示す。

中性化深さは含浸材Eが最小値を示した。また、全ての種類においてブランク供試体よりも小さい値を示した。シラン系含浸材は空隙を充填しないので通気性を妨げないとされているが、メチル基を含んだ分子が細孔表面に水素結合により配置されるため、ブランク供試体に比べて通気性が低下したと考えられる。また、シラン系とけい酸塩系とは明確な差異は見受けられなかった。ここで透湿度試験においても中性化に対する抵抗性試験においても、含浸面の通気性がその結果を左右するために、透湿度と中性化深さでは同様の結果になると考えられるが、ここでは関係性は認められなかった。

(5) 塩化物イオン浸透に対する抵抗性試験

塩化物イオン浸透に対する抵抗性試験では、100mm×100mm×100mmの供試体を3%の塩化ナトリウム水溶液中に63日間浸漬した。その後、割裂し硝酸銀溶液を噴霧することで発色部分の幅を測定し、塩化物イオンの浸

透深さの値とした。なお、ブランク供試体の値は全ての供試体における無塗布側の面の計測値の平均をその値としている。結果を図-5に示す。

結果としては、吸水率試験と同様に、塩化物イオン浸透量はシラン系および2液型の併用系で小さい値となり、1液型の併用系およびけい酸塩系ではブランクとほぼ同等か、やや大きい値となった。シラン系および2液型の併用系は塩化物イオン浸透抑制効果に優れていることがわかる。ただし、銘柄D、Gはブランクよりも浸透深さが大きくなった。この原因としては、表層部が親水性

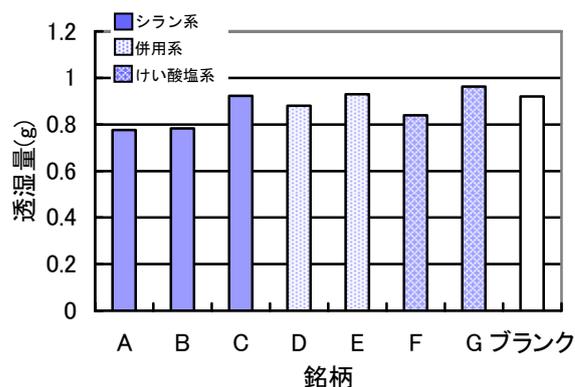


図-3 透湿度試験

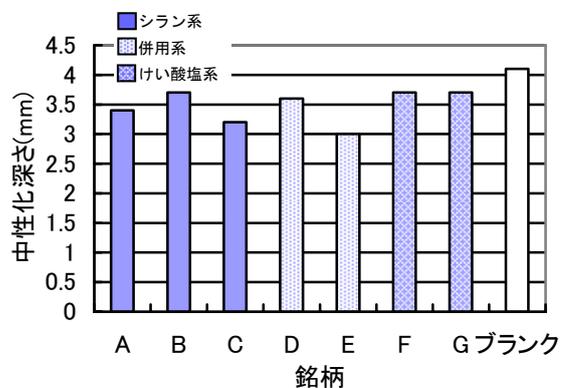


図-4 中性化に対する抵抗性試験

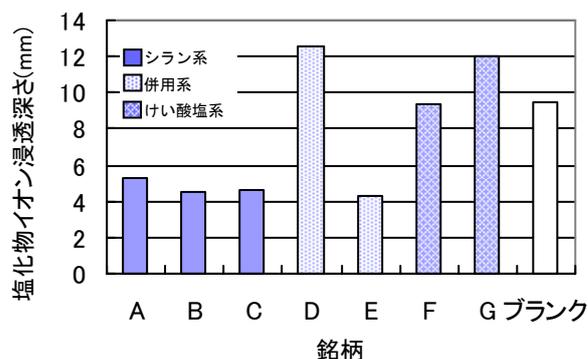


図-5 塩化物イオン浸透に対する抵抗性試験

に変わったためによるもの、もしくはけい酸塩系の含浸材を塗布すると、その成分によりその後の水和が阻害され、空白供試体に比べ表層部の構造が水和反応により密実化されなかったことなどが考えられる。

4. ひび割れの改質効果に関する検討

4.1 供試体の形状

幅 0.1mm および 0.2mm のひび割れの改質効果を確認するために以下に示す実験を行った。比較する含浸材は、Dを除く 6 種類とし、改質効果の確認のために空白を加えた。供試体は表-2 に示した材料を用い、水セメント比 50%、砂セメント比 3 のモルタルで作製した。供試体の寸法は直径 100mm、厚さ 50mm の円柱で、上面にはひび割れを模擬して、深さが 30mm で幅が 0.1mm および 0.2mm のスリットを設けた。供試体の形状を図-6 に示す。供試体の個数は含浸材 1 銘柄につき、ひび割れ幅が 0.1mm と 0.2mm の各々について 3 体ずつの計 6 体を作製した。なお、空白供試体のみ同じ形状でひび割れない供試体も 3 体作製し、ひび割れ 0.1mm と 0.2mm のものを合せて計 9 体を作製した。

0.20mm から 0.22mm のひび割れ幅となっていることを確認した。含浸材の塗布後はけい酸塩系の含浸材が C-S-H の水和物を十分生成する時間を考慮して、「表面含浸材の試験方法」に規定されている 14 日間より長い 28 日間の気中養生とした。作製手順を図-7 に、作製工程を表-5 に示す。

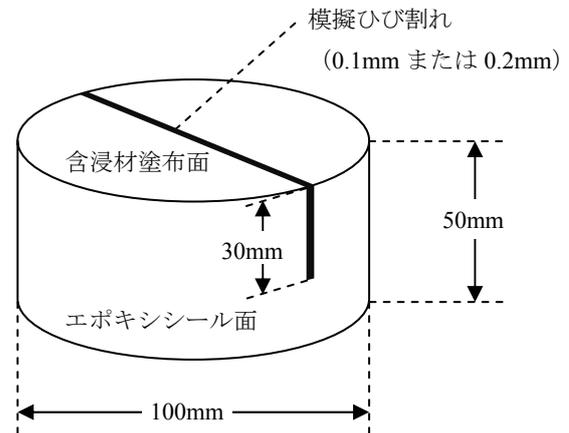


図-6 ひび割れ供試体の形状寸法

4.2 供試体の作製方法

供試体は、0.1mm および 0.2mm の厚さのテフロンシートを打設前に型枠に設置しておき、テフロンシートを挟み込むようにモルタルを打ち込み、硬化後テフロンシートを除去することで、所定の幅のひび割れを模擬した。

型枠は直径 100mm 高さ 200mm の円柱供試体用鋼製型枠を用いた。鋼製型枠の側面が半割りとなる継ぎ目部に所定の厚さのテフロンシートを挟み込んでおき、そのままモルタルを打ち込み、脱型後供試体を厚さが 5cm になるように切断を行い、中央部の 2 つのスライスを供試体とした。テフロンシートは切断の翌日に除去した。脱型翌日にテフロンシートを除去した理由は、脱型直後にはテフロンシートとモルタルが付着しており引き抜けないが、翌日まで気中養生とすることで硬化収縮によりテフロンシートの引き抜きが容易となるためである。テフロンシート除去後は引き続き気中養生を行い、側面と底面をエポキシ樹脂でシール処理を行った。側面はひび割れを覆い、かつひび割れ内部にエポキシ樹脂が浸透しないように塗布した。その後ひび割れを有する面に鉛直下向き方向が浸透方向になるよう含浸材を塗布した。塗布量は、 $\phi 100\text{mm}$ の断面積 7854mm^2 に相当する量とし、ひび割れがあるために含浸量を増やすといった処置は行っていない。なお、含浸材の塗布前にひび割れが所定の幅であるかショップ顕微鏡を用いて確認した。その結果、0.1mm のテフロンシートを挟みこんでいたもので 0.10mm から 0.11mm、0.2mm を挟み込んでいたもので

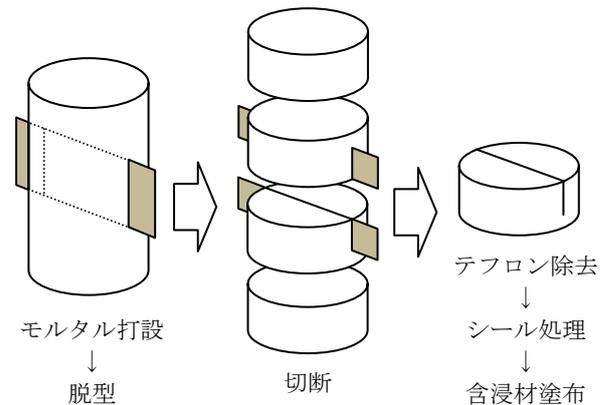


図-7 ひび割れ供試体の作製手順

表-5 作製工程表

材齢 (日)	0	1	2~6	7	8	9~34	35	36~63
打込み	■							
脱型		■						
水中養生		■	■					
切断				■				
シート除去					■			
気中養生					■	■		
シール処理						■		
含浸材塗布							■	
含浸材養生								■

4.3 試験方法

ひび割れの改質効果の確認方法は、図-6に示す供試体を用いて JSCE-K 571-2005「表面含浸材の試験方法」の吸水率試験と同様に、7日間の浸漬前後での重量変化率により吸水率を算定することとした。ただし、浸漬中の供試体の置き方は、含浸面を上面とし、その面が水面下20mmとなるようにした。

4.4 試験結果

(1) ブランク供試体

ひび割れ面に含浸材を塗布しなかったブランク供試体について行った吸水率試験の結果とひび割れ幅の関係を図-8に示す。これより模擬ひび割れがあると吸水率が大きく上昇しており、ひび割れから吸水されていることが理解できる。また、ひび割れ幅が0.1mmと0.2mmの間で吸水率に大きな差はなかった。その理由としては、幅は異なっても吸水する面積に差がないためであると推察される。

(2) ひび割れ幅 0.1mm

ひび割れ幅 0.1mm の供試体について行った吸水率試験結果を図-9に示す。いずれの含浸材を塗布した場合もブランク供試体より吸水率は小さくなった。すなわち、模擬ひび割れが幅0.1mm深さ30mmであれば、含浸材を塗布することで吸水抑制効果は十分期待できるものと考えられる。特にシラン系のA、Bおよび併用系のEが吸水抑制効果に優れていることがわかる。

(3) ひび割れ幅 0.2mm

ひび割れ幅 0.2mm の供試体について行った吸水率試験結果を図-10に示す。0.1mmのもの比べて吸水率に大きな差はなく、全ての含浸材において、ブランク供試体よりも吸水率が小さな値となっていることがわかる。すなわち、ひび割れ幅が0.1mmの場合と同様に、含浸材を塗布することで吸水抑制効果は十分期待できるものと考えられる。ここでもシラン系のA、Bおよび併用系のEが吸水抑制効果に優れていることがわかる。

(4) ひび割れ幅による比較

各含浸材の吸水率とひび割れ幅の比較を図-11に示す。ひび割れ幅が0.1mmと0.2mmではその間に大きな差は生じなかった。その理由としては、今回作製した供試体のひび割れ深さは30mmであり、この程度の深さだと、ひび割れ内部に一樣に含浸材が浸透し、ひび割れ幅による差が生じにくかったことが考えられる。

ここで基本性能確認試験における吸水率試験ではシラン系含浸材のA、B、C間でほとんど差はなかったが、ここでは含浸材Cが含浸材A、Bよりも明らかにひび割れの吸水抑制効果に劣るということが言える。この理由としては、ひび割れ部への浸透性を考えた場合、0.1mm

や0.2mmといったような幅がある場合、その浸透性に主成分がモノマーやオリゴマーであるといった分子の大小は関係せず、ひび割れ内部で主成分が結合する際の構造で差が生じたことも可能性として考えられる。また、含浸材Cが最も粘性が高かったためにひび割れに浸透しにくかったことも可能性の一つとして考えられる。

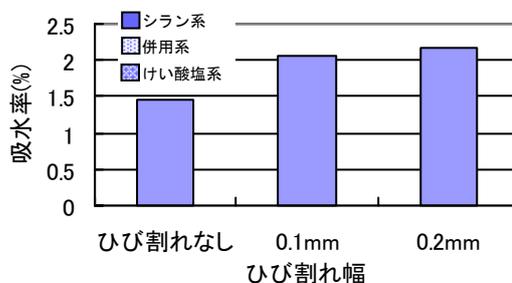


図-8 ひび割れ幅と吸水率の関係 (ブランク)

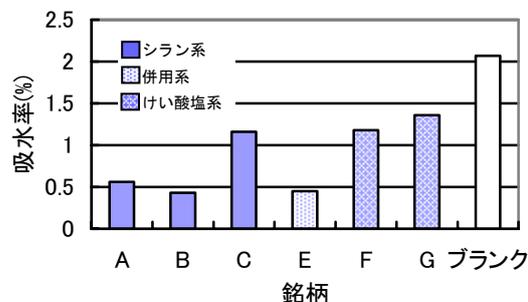


図-9 ひび割れ改質効果 (0.1mm)

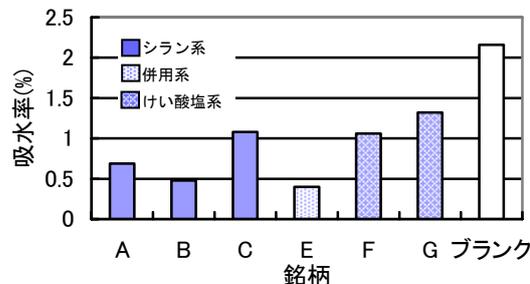


図-10 ひび割れ改質効果 (0.2mm)

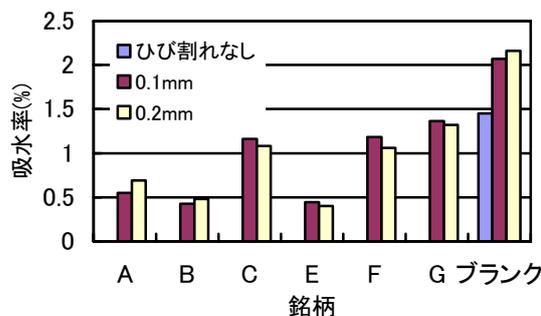


図-11 ひび割れ幅による比較

また、基本性能確認試験においてけい酸塩系含浸材は吸水抑制効果が認められない結果となったが、ひび割れの改質効果確認実験では 0.2mm のひび割れがあってもけい酸塩系含浸材を塗布することで、ひび割れがないブランク供試体と同程度か、それ以下の吸水率となった。これは、ひび割れの改質効果確認実験では浸透方向が鉛直下向きとなるよう水平面に含浸材を塗布したことで、その主成分がよりひび割れや細孔、空隙に充填しやすかったためと考えられる。

5. まとめ

本報告の結果をまとめると以下のとおりとなる。

- (1) 吸水抑制および塩化物イオン浸透抑制効果はシラン系含浸材、および 2 液型のシランとけい酸塩の併用系含浸材が優れている。
- (2) シラン系含浸材の含浸性は主成分がシランオリゴマーのものに比べシランモノマーのものの方が優れている。
- (3) テフロンシートを用いて設けた模擬ひび割れの改質効果確認実験ではシラン系、けい酸塩系、併用系ともに吸水抑制効果があることを確認した。
- (4) 本報告で行った実験の範囲では表面含浸材を塗布する方向で改質効果が異なる傾向が見られた。
- (5) テフロンシートを用いて幅が 0.1mm の模擬ひび割れを作製することが可能であることがわかった。

6. おわりに

今回行った一連の実験では含浸材の、特にシラン系および 2 液型の併用系含浸材で高い劣化因子侵入抑制効果

が認められた。一方、けい酸塩系の含浸材については塗布方法、養生方法の差異等から、詳細な評価ができなかった。けい酸塩系含浸材のより適切な実験方法の提案も必要であろう。

また、一般的には注入、充填等の補修は必要とされないひび割れに対しても含浸材を塗布することである程度の劣化因子の侵入抑制効果は期待できると考えられる³⁾。本報告内ではテフロンシートを用いてひび割れを模擬したが、断面がスムーズであることやひび割れ深さが 30mm と限定的であったことから完全に実際のひび割れを模擬できているとは考えられない。そのため、より実際のひび割れの形状に則した改質効果の実験も必要である。

含浸材は施工が容易であり、塗布後もその外観にほぼ変化がないことから、使用しやすい材料である。含浸材を塗布することで高い劣化因子の侵入抑制効果が期待できるのは、既往の研究から明らかであるため、より細かな適応性の範囲や、塗布方法による性能の変化を明確にすることが今後、必要であろう。

参考文献

- 1) コンクリートライブラリー119, 表面保護工法設計施工指針 (案), 土木学会, 2005.4
- 2) 権代由範, 月永洋一, 庄谷政美, 阿波稔: 表面含浸材によるコンクリートのひび割れ閉塞効果に関する実験的検討, セメント・コンクリート論文集, No.62, pp.485-492, 2008
- 3) コンクリートのひび割れ調査, 補修・補強指針—2009—, (社) 日本コンクリート工学協会