

# 論文 低圧注入法によるコンクリートの微細ひび割れ検査における注入材の実験的評価

緒方 英彦<sup>\*1</sup>・山崎 大輔<sup>\*2</sup>・周藤 将司<sup>\*3</sup>・兵頭 正浩<sup>\*4</sup>

**要旨**：コンクリートの微細ひび割れの評価方法には、顕微鏡観察による方法や蛍光エポキシ樹脂含浸法がある。本研究では、これらに加わる新たな試験方法として、表面含浸材の一つであるシランオリゴマーを低圧注入器具により注入し、ひび割れ周囲のセメント硬化体内に浸透させることで、微細ひび割れを可視検査する方法を検討した。注入材としてのシランオリゴマーの適性評価は、荷重でひび割れを導入したコンクリート供試体で行い、比較対象であるエポキシ樹脂やシリコンオイルの結果も踏まえ、シランオリゴマーにより微細ひび割れの可視検査が可能であることを明らかにした。

**キーワード**：微細ひび割れ、可視化、低圧注入、シランオリゴマー、シリコンオイル、エポキシ樹脂

## 1. はじめに

コンクリート構造物には、コンクリートの材料・配合、施工、供用環境、構造・外力による多様なひび割れが発生する。耐久性上有害となるひび割れは、鉄筋腐食先行型、ひび割れ先行型、劣化ひび割れに大別され<sup>1)</sup>、構造物の長寿命化を図るためには、これらのひび割れを精度よく診断し、適切な補修・補強対策を施すことが必要である。ひび割れの診断は、目視調査によるひび割れ発生状況の把握からはじまり、現地における非破壊試験あるいは採取コアを分析することでひび割れ深さや範囲を定量的に評価し、ひび割れの発生原因を明らかにした上で、対策を必要とする箇所を特定する作業である。

ひび割れの定量的な評価方法としては、コンクリート表面に発生しているひび割れの深さに関して、超音波法<sup>2),3)</sup>による Tc-To 法、修正 BS 法、直角回折波法や、衝撃弾性波法<sup>4)</sup>による位相反転法、伝播時間差法があり、幅に関して、クラックスケール、CCD カメラや光学原理による測定器を用いた方法<sup>2),5)</sup>がある。また、コンクリート内部に発生しているひび割れについては、電磁波レーダ法<sup>6)</sup>、衝撃弾性波法、AE 法、放射線透過法<sup>7)</sup>がある<sup>8)</sup>。一方、微細ひび割れの評価に関しては、顕微鏡観察による方法<sup>9),10)</sup>や蛍光エポキシ樹脂含浸法<sup>11)</sup>がある。

このようにひび割れの定量的な評価方法は、多種多様開発され実用されているが、本研究では、微細ひび割れの評価に加わる新たな試験方法として、表面含浸材の一つであるシランオリゴマーを低圧注入器具により注入し、ひび割れ周囲のセメント硬化体内に浸透させることで、微細ひび割れを可視検査する方法を検討し提案する。このシラン低圧注入による微細ひび割れ検査法は、蛍光エ

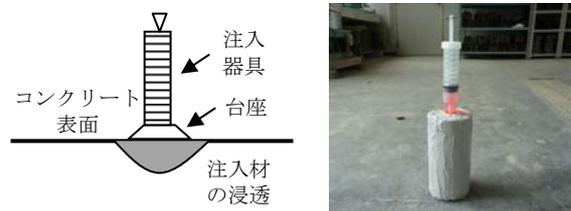


図-1 シラン低圧注入による微細ひび割れ検査法の概要図

ポキシ樹脂含浸法を特に念頭におき、評価対象にしているひび割れは、蛍光エポキシ樹脂含浸法で想定しているコンクリート表面から内部に至る微細ひび割れである。本検査法の特徴は、蛍光エポキシ樹脂含浸法で必要になる蛍光塗料、紫外線を照射するためのブラックライトや暗室を必要とせず、現地で目視により微細ひび割れの発生位置や発生範囲を確認できることである。

本論文では、荷重によりひび割れを導入したコンクリート供試体を対象に、エポキシ樹脂、シリコンオイル、シランオリゴマーの3種類を低圧注入器具によりそれぞれ注入し、ひび割れの可視方法の特徴を明らかにした上で、微細ひび割れ検査法における注入材としてのシランオリゴマーの適性を実験的に評価した結果について示す。

## 2. 実験概要

### 2.1 低圧注入法

本研究で検討するコンクリートの微細ひび割れ検査法は、図-1に示すように注入材を低圧注入器具で注入し、ひび割れ周囲のセメント硬化体内に注入材を浸透させることで、微細ひび割れを可視検査する方法である。

\*1 鳥取大学 農学部生物資源環境学科 准教授 博士(農学) (正会員)

\*2 ショーボンド建設株式会社 技術本部技術部 課長 (正会員)

\*3 松江工業高等専門学校 環境・建設工学科 助教 博士(農学) (正会員)

\*4 鳥取大学 農学部生物資源環境学科 助教 博士(農学) (正会員)

低圧注入法を選択した理由は、コンクリート表面から浸透した注入材、あるいはコンクリート表面のひび割れから浸透した注入材が、注入器具による加圧によりコンクリート内部の微細ひび割れに浸透することを促し、ひび割れ周囲のセメント硬化体内に浸透するのを促すためである。また、刷毛やローラー刷毛による表面塗布では作業による塗りむらが生じる可能性があり、塗布表面が外気に曝される場合はコンクリート表面の環境条件が変化することで浸透状況が異なる可能性がある。低圧注入法では、自動式低圧樹脂注入工法で採用されている専用の注入器具（加圧は0.4N/mm<sup>2</sup>以下<sup>12)</sup>を用いることで注入条件を一定に保つことができ、また注入器具を取り付けるための台座により注入後のコンクリート表面の環境条件を一定に保つことができる。このような理由から、本研究では低圧注入法を選択することにした。

自動式低圧樹脂注入工法の注入器具には、ゴム製とプラスチック製があるが、分子量の小さいシランオリゴマーはゴムを溶解し、注入時にゴム製注入器具が破裂することが事前実験で確認されたことから、本研究ではプラスチック製の注入器具を用いることにした。例として、**図-1**に蛍光塗料を混入した注入材をプラスチック製の注入器具で円柱供試体に注入している状況を示す。

## 2.2 注入材

本検査法において注入材に求められる条件としては、セメント硬化体内に浸透できる浸透性、浸透している状況を目視で判断できる可視性である。本研究では、この条件を満たす材料として、表面含浸材として現場での取り扱い実績も十分にあるシラン系表面含浸材を選択した。シラン系表面含浸材は、浸透性に優れ、皮膜形成機能、撥水機能を利用して浸透範囲を目視で判断することが可能な材料である。

シラン系表面含浸材には、重合度の違いによりシランモノマー（アルキルアルコキシシラン）、シランオリゴマー（アルコキシシロキサン）がある。両者ともアルカリ水と反応して撥水層を形成するが、特にシランオリゴマーは硬化剤の添加により湿気と反応して速やかに皮膜を形成することが可能である。また、シランオリゴマーはシランモノマーに比べて揮発性が小さいという特徴がある。本検査法は、現地における適用を念頭においていることから、注入後のコンクリート表面の環境条件によっては注入材が揮発し浸透範囲の把握が難しくなることを踏まえ、揮発性の小さいシランオリゴマーを注入材として採用することにした。

本研究では、コンクリートの微細ひび割れ検査法における注入材としてのシランオリゴマーの適性を実験的に評価するが、一方で、ひび割れ注入材として広く使用されているエポキシ樹脂、反応型であるシランオリゴマー

表-1 エポキシ樹脂の仕様 (20°C)

注入材番号	粘度 (mPa・s)			配合比 (主剤：硬化剤)	可使用時間 (分)
	主剤	硬化剤	混合物		
E1	6,350	600	2,150	110 : 42	49
E2	2,600	600	1,300	120 : 46	53
E3	1,375	600	990	130 : 50	57

表-2 シリコンオイルの仕様 (25°C)

注入材番号	粘度 (mPa・s)	動粘度 (mm <sup>2</sup> /s)	比重	揮発性：150°C/24時間 (%)
O1	96.5	100	0.965	0.5 以下
O2	970	1,000	0.970	0.5 以下
O3	9,750	10,000	0.975	0.5 以下

表-3 シランオリゴマーの仕様 (25°C)

注入材番号	粘度 (mPa・s)	動粘度 (mm <sup>2</sup> /s)	比重	特徴
S1	5.40	5	1.08	低重合体
S2	28.75	25	1.15	中重合体
S3	118.0	100	1.18	高重合体

表-4 コンクリートの示方配合

Gmax (mm)	スランブ (cm)	W/C (%)	空気量 (%)	細骨材率 (%)
20	8±2	55	6±1	40.2
単位量 (kg/m <sup>3</sup> )				
水	セメント	細骨材	粗骨材	混和剤 (g/m <sup>3</sup> )
165	300	710	1,058	2,700

に対して未反応型であるシリコンオイルについても同様の実験を行い、考察を加えることにする。本研究で使用したエポキシ樹脂の仕様を表-1に、シリコンオイルの仕様を表-2に、シランオリゴマーの仕様を表-3に示す。エポキシ樹脂は2液型で粘度の異なる3種類(E1～E3)、シリコンオイルはジメチルシリコンオイルで粘度の異なる3種類(O1～O3)、シランオリゴマーは有機置換基がメチル、アルコキシ基がメトキシで粘度の異なる3種類(S1～S3)である。ここで、注入時のシランオリゴマーには硬化剤は添加していない。表中の値は、エポキシ樹脂が20°C時、シリコンオイルとシランオリゴマーが25°C時のいずれも一般特性である。

## 2.3 供試体および試験片の作製

本研究で作製した供試体は、φ10×20cmの円柱供試体である。コンクリートの示方配合を表-4に示す。セメントは高炉セメントB種（密度3.15g/cm<sup>3</sup>）、細骨材は鳥取県産陸砂で密度2.59g/cm<sup>3</sup>、吸水率1.59%、F.M.1.83、粗骨材は鳥取県産碎石で密度2.59g/cm<sup>3</sup>、吸水率1.62%、F.M.6.68である。混和剤は、ポリカルボン酸エーテル系化合物の高性能AE減水剤である。供試体は、材齢25日

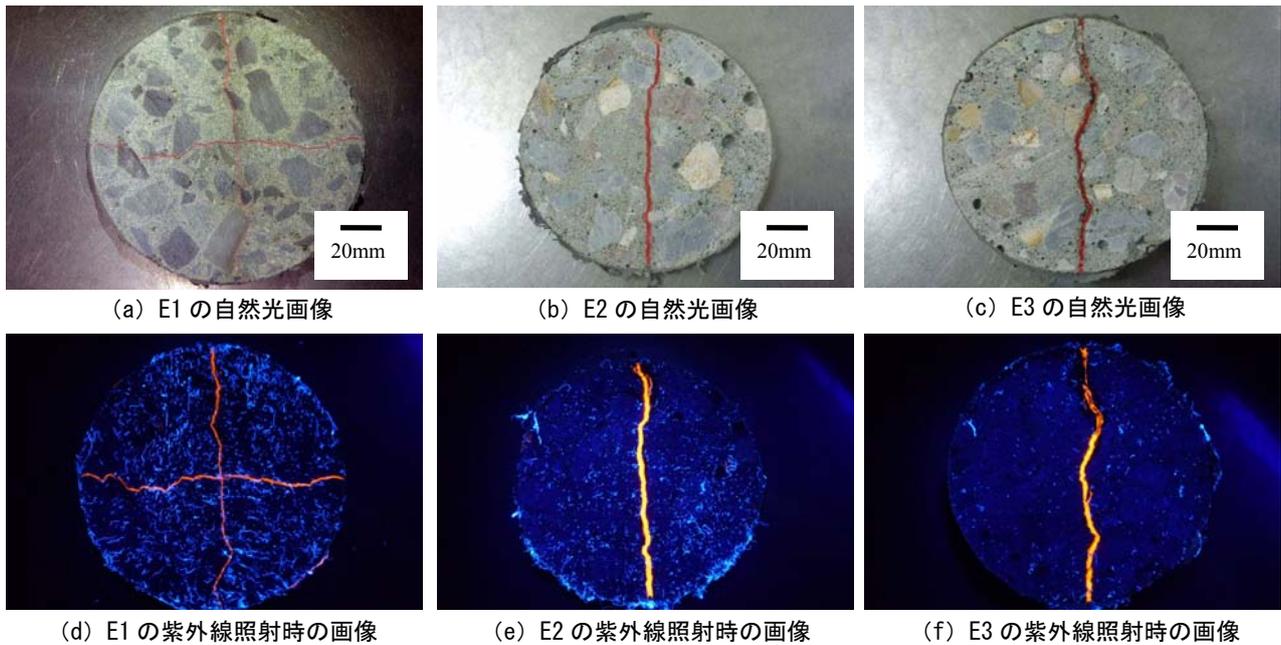


写真-1 エポキシ樹脂を注入した試験片におけるひび割れの可視状況

まで水温  $20 \pm 1^\circ\text{C}$  の標準水中養生を行い、その後に割裂引張強度試験の要領で供試体の横に载荷しひび割れを導入した。载荷は、供試体の破断を抑制する目的で供試体を凍結融解試験用のゴムスリーブの中に入れて行った。

各注入材の注入試験は、载荷によりひび割れを導入した円柱供試体の端面に注入器具を設置するための台座をエポキシ樹脂系のシール材を用いて固定し、注入材の漏出を予防するために全面をエポキシ樹脂系のシール材で被覆したうえで行った。注入器具は、自動式低圧樹脂注入工法で採用されているプラスチック製の注入器具（加圧は  $0.4\text{N}/\text{mm}^2$  以下<sup>12)</sup>を用いた（図-1を参照）。注入材には、蛍光塗料を重量比 0.3% で混入し、紫外線照射により注入材が注入されたひび割れが確認できるようにした。供試体の数は各注入材それぞれ 3 本であるが、本論文で示す画像は紙面の都合上、その中の一つとする。

注入材を注入した供試体は、注入後 3 日経過した後に、载荷により導入したひび割れの発生状況を踏まえ、注入した端面から 5cm の位置で切断機を用いて切断した。注入状況の確認は、切断した試験片を室内で自然乾燥し、切断面が概ね乾燥した状態（コンクリート・モルタル水分計 HI-520 により測定した表面水分率が概ね 5% 前後）になった後に行った。注入試験および切断面の画像の撮影は、概ね室温  $25^\circ\text{C}$  に調整した室内で行った。

### 3. 注入試験結果

#### 3.1 エポキシ樹脂

エポキシ樹脂を注入した試験片における自然光および紫外線照射時の画像を写真-1 に示す。ここで、紫外線照射時の画像において白く発光しているのは、表面の濡

れを拭き取った時のウエスの繊維の残りである。

エポキシ樹脂を用いた低圧注入工法の適用範囲は、ひび割れ幅  $0.2 \sim 1.0\text{mm}$  とされており<sup>13)</sup>、 $0.05\text{mm}$  のひび割れ幅にも注入できるとされている。また、一般的なエポキシ樹脂系ひび割れ注入材の品質規格は、粘度  $1,000\text{mPa} \cdot \text{s}$  以下<sup>14)15)</sup>とされている。本研究で载荷により導入できた最小のひび割れ幅は  $0.3\text{mm}$  であり、 $0.3\text{mm}$  以下のひび割れに対する考察を加えることはできないが、本研究では低圧注入器具により  $2,150\text{mPa} \cdot \text{s}$  (E1 の  $20^\circ\text{C}$  の一般特性) の粘度までは注入でき、ひび割れの可視検査を行えることが確認された。また、エポキシ樹脂が注入されているのは、注入箇所である供試体の端面から内部に連続して発生しているひび割れだけであり、他のひび割れやひび割れ周囲のセメント硬化体内には浸透していないことが確認された。このことからエポキシ樹脂を注入材とした微細ひび割れ検査法の特徴は、ひび割れに注入されたエポキシ樹脂の存在を直接的に確認することでひび割れの位置を評価する方法であることがわかる。

#### 3.2 シリコンオイル

シリコンオイルを注入した試験片における自然光画像を写真-2 に示す。紫外線照射時の画像は、作業上の不手際により撮影できていない。

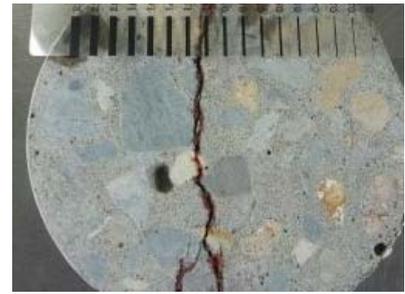
ひび割れからセメント硬化体へ浸透したシリコンオイルの最大浸透深さは、デジタルマイクロスコープ (KEYENCE, VHX-200) による測定において O1 が  $9.1\text{mm}$ 、O2 が  $3.7\text{mm}$ 、O3 が  $1.4\text{mm}$  であった。シリコンオイルのセメント硬化体への浸透深さは、粘度が低いほど大きく  $\text{O3} < \text{O2} < \text{O1}$  となることがわかる。この結果として、粘度の高い O3 では、ひび割れの極近傍のセメ



(a) O1 の自然光画像

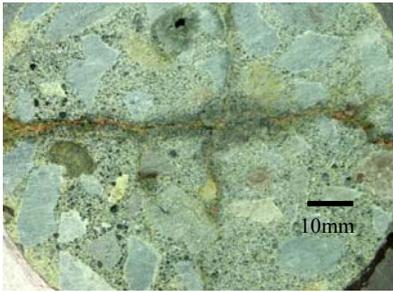


(b) O2 の自然光画像

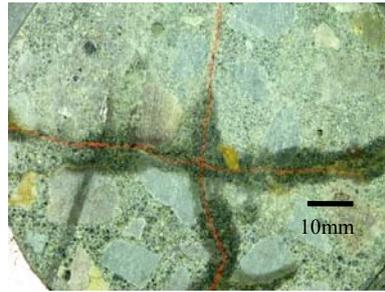


(c) O3 の自然光画像

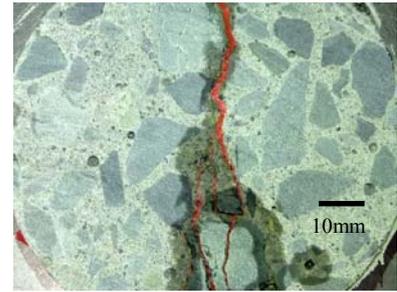
写真-2 シリコンオイルを注入した試験片におけるひび割れの可視状況



(a) S1 の自然光画像



(b) S2 の自然光画像



(c) S3 の自然光画像

写真-3 シランオリゴマーを注入した試験片におけるひび割れの可視状況

ント硬化体だけにシリコンオイルが浸透し、ひび割れを若干浮き上がらせる程度であるが、粘度が低くなる O2, O1 ほどセメント硬化体への浸透深さが大きくなり、浸透部分と見なされる濡色の広がりからひび割れの可視検査がより巨視的に行えることがわかる。このように、シリコンオイルが浸透した部分が濡色として目視できるのは、シリコンオイルが浸透していないセメント硬化体では水分が蒸発することで乾いた状態となり、シリコンオイルに含まれる油が濡色として残るからである。

シリコンオイルを注入材とする微細ひび割れ検査法は、注入箇所から連続するひび割れの周囲のセメント硬化体にシリコンオイルが浸透し、残存する濡色を利用してひび割れの位置を評価する方法であり、エポキシ樹脂を注入材とする場合とひび割れの可視方法が異なる特徴を有する。本研究においてシリコンオイルの濡色からひび割れの位置を確認できた最小ひび割れ幅は  $5\mu\text{m}$  であった。このことから、O1 と O2 の間の動粘度  $100\sim 1,000\text{mm}^2/\text{s}$  であれば、本研究で確認できた範囲内において、 $5\mu\text{m}$  程度までのひび割れの位置は可視検査が可能であるといえる。ここで、シリコンオイルを注入材とする微細ひび割れ検査法の現地適用に際しては、未反応性のシリコンオイルはコンクリート中に油を残留することになり、この油がコンクリートから溶出することで周辺環境に影響を及ぼす可能性もあることに留意する必要がある。

### 3.3 シランオリゴマー

シランオリゴマーを注入した試験片における自然光画

像を写真-3 に示す。紫外線照射時の画像は、紙面の都合上、割愛する。

本研究で試験したシランオリゴマーは、シリコンオイルでの結果を踏まえ、動粘度  $100\text{mm}^2/\text{s}$  以下のものとしている。粘度が最も低い S1 は、注入箇所から連続するひび割れの周囲のセメント硬化体に浸透していることは確認できるが、一般的に分子量が小さいほど粘度が低く揮発性が高くなることから、浸透部分と見なされる濡色の部分が淡くしか目視できない。一方、S2, S3 と粘度が高くなるにしたがい、浸透部分と見なされる濡色の部分が濃くなり、シリコンオイルでの結果と同様に、注入箇所から連続するひび割れの周囲のセメント硬化体にシランオリゴマーが浸透し、残存する濡色を利用してひび割れの位置を可視検査できることがわかる。デジタルマイクロスコープで測定したひび割れからセメント硬化体へ浸透したシランオリゴマーの最大浸透深さは、S2 が  $5.4\text{mm}$ 、S3 が  $5.9\text{mm}$  であった。ここで、シランオリゴマーが浸透した部分が濡色として目視できるのは、シランオリゴマーが浸透していないセメント硬化体では水分が蒸発することで乾いた状態となり、揮発していないシランオリゴマーが濡色として残るからである。本研究においてシランオリゴマーの濡色からひび割れの位置を確認できた最小ひび割れ幅は  $5\mu\text{m}$  であった。その画像を写真-4 に示す。この結果からは、動粘度  $100\text{mm}^2/\text{s}$  (S3 の  $25^\circ\text{C}$  の一般特性) 程度のシランオリゴマーであれば、本研究で確認できた範囲内において、 $5\mu\text{m}$  程度までの微細ひび割れの位置は可視検査が可能であるといえる。

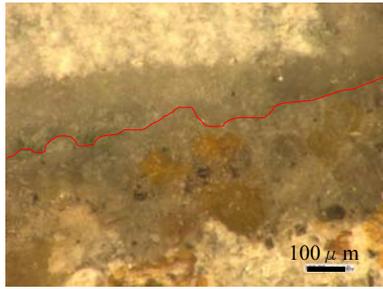


写真-4 S3の微細ひび割れへの浸透状況

本研究では、蛍光塗料を注入材に混入せず紫外線照射を必要としない、現地目で視により微細ひび割れを検査できる方法を目指しており、そのためにはシランオリゴマーの浸透の有無によるセメント硬化体の境界がより明瞭であるのが望ましい。この観点からは、本研究で検討した粘度の範囲内において、動粘度  $100\text{mm}^2/\text{s}$  (S3) が適当であると言える。また、シランオリゴマーは、未反応型のシリコンオイルと異なり反応型であるため、最終的にはセメント硬化体の中に固定されることで周辺環境への影響もほとんどないことから、現地適用に際しては、環境への配慮の観点からもシリコンオイルよりシランオリゴマーが適していると言える。

現地適用に際しては、温度により粘度が異なることにも留意する必要がある。JIS K 6833 : 2008 (接着剤-一般試験方法-) に準じて BH 型粘度計で測定した結果からは、図-2 に示すように、 $-10^\circ\text{C}$  以上において、一般的なエポキシ樹脂系ひび割れ注入材の品質規格の粘度  $1,000\text{mPa}\cdot\text{s}$  を満足し、合わせてシリコンオイルでの検討で明らかになった粘度の範囲を満足することから、 $-10\sim 40^\circ\text{C}$  の範囲であれば流動性が確保され注入可能であり、セメント硬化体への浸透状況から微細ひび割れの可視検査が可能であるといえる。

#### 4. シラン低圧注入による微細ひび割れ検査法の作業手順

本研究で得られた結果を踏まえ、シラン低圧注入による微細ひび割れ検査法の作業手順を以下に示す。

- 検査対象とするコンクリート表面に注入器具を設置するための台座をエポキシ樹脂系のシール材を用いて固定する。
- プラスチック製の注入器具に動粘度  $100\text{mm}^2/\text{s}$  のシランオリゴマーを所要量入れ、台座に設置した後、注入する。
- 24 時間経過後に注入器具を取り外し、台座を中心にしてコア採取機でコアを採取する。
- 採取したコアを自然乾燥し、コアの側面に見られるシランオリゴマーが浸透した濡色の部分を観察することで、微細ひび割れの発生位置を評価する。
- 切断機を用いてコアを高さ方向に切断した後に自

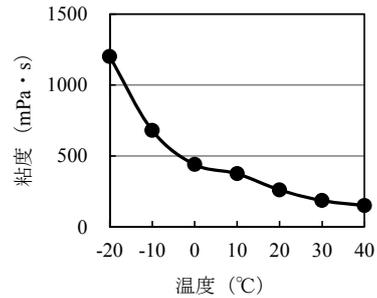


図-2 シランオリゴマーの粘度の温度変化

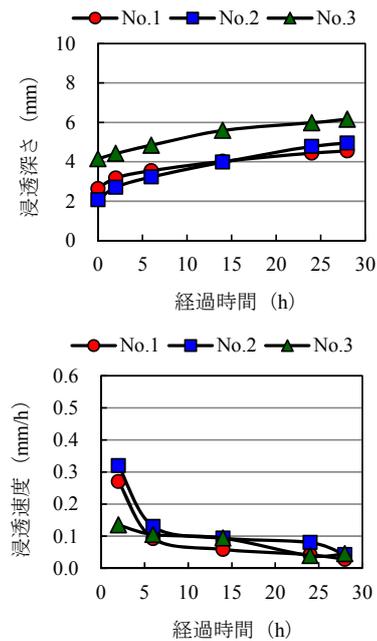


図-3 シランオリゴマーの浸透深さと浸透速度

然乾燥し、切断面に見られるシランオリゴマーが浸透した濡色の部分を観察することで、微細ひび割れの発生位置を評価する。

ここで、コアの側面および切断面におけるシランオリゴマーの浸透範囲は、自然乾燥を続ける過程で変化する。これは、コンクリートが乾燥することで水が存在した空隙にシランオリゴマーが浸透できるようになるためである。シランオリゴマーの浸透が安定する時間を明らかにするために、表-4 に示す配合で作製した円柱供試体(載荷によるひび割れ無し、材齢 25 日まで水温  $20\pm 1^\circ\text{C}$  の標準水中養生)に動粘度  $100\text{mm}^2/\text{s}$  (S3) のシランオリゴマーを低圧注入法で注入し、浸透深さの時間変化とその差分から求められる浸透速度を評価した。その結果を図-3 に示す。浸透速度は、3 本の供試体 (No.1~No.3) とも切断後 6 時間まで急速に減少し、その後少しずつ減少する傾向を示すが、24 時間以降は概ね  $0.03\text{mm}/\text{h}$  で収束する。このことから、シランオリゴマーによる微細ひび割れの評価は、セメント硬化体への浸透範囲が自然乾燥の条件下において切断後 24 時間まで変化するのを踏まえ、切断後 24 時間経過を待って実施した方がよいこと

がわかる。一方、シランオリゴマーを注入してからコアを採取するまでの時間を24時間経過後としているが、これはこの結果を参考に決めたものである。

作業手順からもわかるように、シラン低圧注入による微細ひび割れ検査法は、蛍光エポキシ樹脂含浸法で必要になる蛍光塗料、紫外線を照射するためのブラックライトや暗室を必要とせず、現地で目視により微細ひび割れの位置を確認できる方法になり得る。

## 5. おわりに

本研究では、低圧注入法による微細ひび割れ検査における注入材の適性を実験的に評価した。本研究から得られた知見を以下にまとめる。

- (1) シリコンオイルとシランオリゴマーを低圧注入法で注入した場合、エポキシ樹脂を注入材とする場合とひび割れの可視方法が異なり、注入箇所から連続するひび割れの周囲のセメント硬化体に浸透した注入材の濡色を利用してひび割れの位置を評価することができる。
- (2) 注入材としてのシリコンオイルとシランオリゴマーの好適な粘度は、本研究において動粘度 $100\text{mm}^2/\text{s}$ である。また、両者とも、 $5\mu\text{m}$ 程度までの微細ひび割れであれば、可視検査が可能である。
- (3) 動粘度 $100\text{mm}^2/\text{s}$ のシリコンオイルとシランオリゴマーは、微細ひび割れ検査法の注入材としてほぼ同じ性能を有する。しかし、未反応性のシリコンオイルはコンクリート中に残留した油が溶出することで、現地試験において周辺環境に影響を及ぼす可能性があることから、環境配慮の観点からはシランオリゴマーの方が適当である。

本研究で示しているセメント硬化体へのシランオリゴマーの浸透状況は、高炉セメントB種、水セメント比55%の配合のコンクリートで得られたものであり、配合などによりセメント硬化体の品質が変わる場合には異なる結果が得られることになる。セメント硬化体の品質に応じたシランオリゴマーの浸透状況の変化は、今後の研究により明らかにしていきたい。また、本論文は微細ひび割れ検査法における注入材としてのシランオリゴマーの適性を実験的に評価したものであるが、本検査法は蛍光エポキシ樹脂含浸法で評価が可能であるとされている酸劣化に伴い硬化体組織が多孔質化した箇所の評価あるいは凍結融解の繰返し作用によりコンクリート組織が変質し物質移動抵抗性が低下した凍害劣化箇所の評価にも適用できる可能性があり、これらについても今後の研究により明らかにしていきたい。

謝辞: 本研究の一部は、科学研究費補助金(基盤研究(B)):

課題番号: 24380132, 研究代表者(緒方英彦)の助成を受けて実施した。ここに記して謝意を表する。

## 参考文献

- 1) 日本コンクリート工学会: コンクリート診断技術'12 [基礎編], pp.16-22, 2012.2
- 2) 日本非破壊検査協会: 新コンクリートの非破壊試験, pp.209-217, 2010.3
- 3) 鎌田敏郎, 岩波光保, 長滝重義, 大即信明: 超音波によるコンクリートのひび割れ高さ推定法に関する一提案, 土木学会論文集 538, pp.81-93, 1996.5
- 4) 土木学会コンクリート委員会弾性波法の非破壊検査研究小委員会: 弾性波法の非破壊検査研究小委員会報告書および第2回弾性波法によるコンクリートの非破壊検査に関するシンポジウム講演概要集, pp.18-24, 2007.2
- 5) 田村雅紀, 近藤照夫, 茨田匠, 長谷川拓哉, 梅津裕二, 斎藤順一: 光学原理による携帯型ひび割れ幅測定器の開発と性能評価, 日本建築学会技術報告集 (19), pp.33-38, 2004.6
- 6) 土居賢彦, 田中正吾, 城本政一: 電磁波レーダによるコンクリート構造物内部劣化の非破壊検査に関する研究, 第4回コンクリート構造物の非破壊検査シンポジウム論文集, pp.243-252, 2012.8
- 7) 大塚浩司, 武田三弘: X線造影撮影によるコンクリート構造物内部のひび割れ検出技術の開発に関する研究, 土木学会論文集 725, pp.143-156, 2003.2
- 8) 前掲2), pp.55-98
- 9) 最知正芳, 四戸英男, 三橋博三: 凍結融解作用を受けたコンクリート内部の微細き裂の定量化と損傷度評価への応用, コンクリート工学論文集, 13(1), pp.13-24, 2002.1
- 10) 桂修, 松村宇: コンクリートの凍害劣化度評価と予測法に関する研究, コンクリートの試験法に関するシンポジウム, 日本建築学会, pp.2-11~2-16, 2003.11
- 11) 岩城圭介, 加藤淳司, 平間昭信, 塩谷智基: 微視的断面観察による酸劣化したコンクリートの微細構造の評価, コンクリート工学年次論文集 26(1), pp.999-1004, 2004.7
- 12) 低圧樹脂注入工法協議会: 自動式低圧樹脂注入工法ガイドブック, 2008
- 13) 日本コンクリート工学協会: コンクリートのひび割れ調査, 補修・補強指針-2009-, pp.127-129, 2009.3
- 14) 土木研究センター: コンクリートの耐久性向上技術の開発, p.237, 1990.5
- 15) 東日本・中日本・西日本高速道路株式会社: 構造物施工管理要領, p.3-18, 2013.7