

蛍光エポキシ樹脂含浸法によるコンクリートコアサンプルの 微細ひび割れの可視化手法

The Method to visualize minute cracks of concrete core sample by using fluorescent epoxy resin Fchitahou

(株) ジオテック ○正会員 手塚 喜勝 (Yoshikatu Tezuka)
 (株) リテック 正会員 朝倉 啓仁 (Keiji Asakura)
 (株) ジオテック 中村 眞一 (Shiniti Nakamura)
 (株) ジオテック 佐々木 元茂 (Motoshige Sasaki)

1. はじめに

コンクリートコアサンプルの微細ひび割れを「蛍光エポキシ樹脂含浸法」を用いて微視的断面観察する手法が提案¹⁾されている。この手法は、コンクリート構造物から採取した微細ひび割れを有するコアサンプルに、蛍光染料を添加した超低粘度形注入用エポキシ樹脂を低真空状態で注入・硬化させ、コア切断面に紫外線を照射して微細ひび割れ等を可視画像として評価化するものである。

しかしこの可視化手法は規準化されているものではなく、微細ひび割れへの注入性能は、使用材料、作業手順や使用機器の性能により異なると考えられる。一方、入手が容易な材料や機器を用いた簡易な試験により十分な注入性が得られれば、汎用的な試験技術として普及することが出来る。

このため、微細なひび割れを有するコアサンプルを用い、一定の作業条件下でひび割れに蛍光エポキシ樹脂を真空脱泡注入し、紫外線照射画像およびデジタルマイクロスコプを用いて樹脂の注入深さ、注入幅を測定し、注入性を評価した。

結果、本注入試験では $12\mu\text{m}$ 程度の微細ひび割れまで樹脂が注入され、微細ひび割れの観察に有効であることが確認出来た。

2. 真空脱泡注入の原理

コンクリートコアサンプルへの真空脱泡による樹脂注入の原理は以下の通りである。

一定温度の大気圧中でコンクリートコアを樹脂容器槽の中に浸漬した時、コア外面と通じているひび割れなどの空隙体積を v とする。

図 1a)に示す大気圧中では、空隙を充填している気体体積はこの空隙体積 v に等しい。

図 1b)に示す $1/100$ 気圧の低真空状態に減圧すると、空隙を充填していた気体体積 v はボイルの法則（気体の体積は圧力に反比例して変化する）に従い、 $100v$ に膨張する。ひび割れの空隙体積は v であるから $99v$ の気体は樹脂中に気泡として脱泡される。

図 1c)低真空状態で気泡が消泡した後、大気圧まで除圧すると気体体積は $1/100 \cdot v$ に圧縮され、 $99/100 \cdot v$ の空隙には樹脂が注入される。

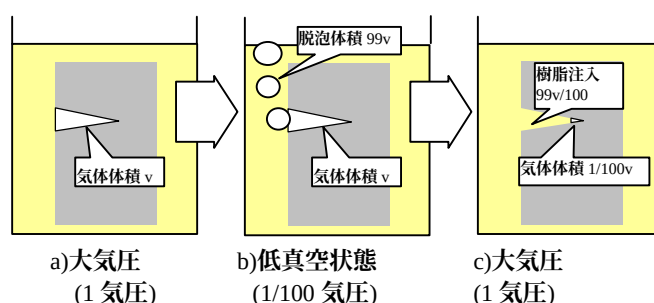
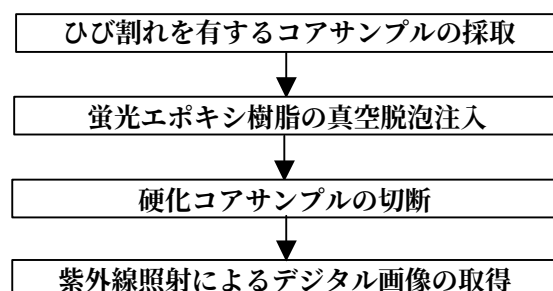


図1 真空脱泡注入の模式図

3. 可視化の作業手順

可視化の作業手順と使用した材料や機器の仕様を併せて以下に示す。

3-1 作業フロー



3.2 コアサンプル

コンクリート構造物の劣化箇所からコアサンプルを採取し、微細ひび割れを評価する場合には、直径の大きいものほどひび割れの評価面積が増え平均的な評価を与えることができる。しかし、構造物への損傷を最小限とし、また配置されている鉄筋に損傷を与えないことを考慮すると、直径 $\phi 100\text{mm}$ が現実的な最大径と考えられる。

本注入試験では、微細なひび割れを有するコアサンプルとして、アルカリ骨材反応による膨張ひび割れが確認されている擁壁の地覆側面から採取した直径 $\phi 100\text{mm}$ のコアサンプルを用いた。

3.3 蛍光エポキシ樹脂の真空脱泡注入

(1) 超低粘度形注入用エポキシ樹脂

ひび割れ注入材料は従来注入の難しかった微細なひび割れへの注入に対応出来ると言われている超低粘度形の樹脂を用いた。樹脂の性状を表1に示す。

表1 超低粘度形注入用エポキシ樹脂の性状²⁾

項目	主剤	硬化剤	混合物
主成分	エポキシ樹脂	変性脂肪族ポリアミン	—
外観	淡黄色透明液	淡黄色透明液	淡黄色透明液
混合比	主剤：硬化剤＝3：1（質量比）		
混合粘度	130±20mPa・s（20℃）		
可視時間	45±10 分（20℃, 500g）		

(2) 蛍光染料

紫外線照射により蛍光発色するエポキシ樹脂混合用の蛍光染料をエポキシ樹脂（硬化剤）に添加した。蛍光染料はエポキシ樹脂（主剤）の約 2%とした。蛍光染料はバイオレットとイエローを 2:1 の比率で混合した。

写真1 蛍光染料³⁾

a)室内可視光



b)紫外線照射



(3) 低真空状態で樹脂の脱泡注入

エポキシ樹脂の主剤と蛍光染料を添加した硬化剤とを混合攪拌した後、樹脂槽容器にコアサンプルを浸漬し、速やかに透明なアクリル製の真空脱泡装置内に設置する。真空脱泡装置内を約 1/100 気圧の低真空状態とすることにより、コア中の微細なひび割れに閉じこめられていた気泡が膨張し、樹脂中に放出・脱泡され大気圧に戻す事で、ひび割れ中に樹脂が注入される（写真 2(a)）。この状態をコアサンプルから放出される気泡が消泡するまで続ける（写真 2(b)）

写真2 脱泡注入状況

(a)脱泡注入開始



(b)脱泡注入終了（消泡）



(4) 真空脱泡装置

真空脱泡装置はその到達圧力により 10 万円台から数百万円の高価なものまで市販されているが、本脱泡注入では低真空と言われる性能の低い領域の装置を用いた。

表2 真空脱泡装置の性能

項目	諸 値
ポンプ到達圧力	約 1000hPa（約 1/100 気圧）
真空容器内寸法	260 幅×180 奥行×260 高さ(mm)

写真3 真空脱泡装置
全景



3.4 硬化コアサンプルの切断による観察面の作成

樹脂硬化後、写真4の送水式コンクリートカッターを用いて任意の観察面となるように硬化コアサンプルを切断する。切断後の硬化コアサンプルの全景を写真5に示す。尚、作業行程を簡略化するため切断後に観察面の研磨を行わず、直接観察面とした。

写真4 送水式コンクリートカッター



写真5 切断後の全景



3.5 紫外線照射によるデジタル画像の取得

(1) 紫外線の照射とデジタル写真撮影

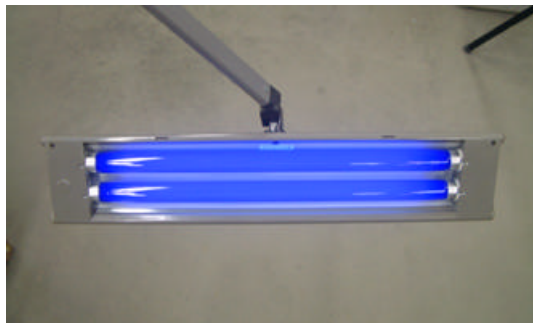
切断面に紫外線を照射した状態で、蛍光に発色する微細なひび割れを高画質のデジタルカメラにより撮影し、デジタル画像として記録する。コンクリート切断面の骨材分布と蛍光発色する微細なひび割れを同時に可視画像として記録するために室内照明下で紫外線蛍光灯（ブラックライト）を用いて観察面を照射した。

今回用いた紫外線蛍光灯の仕様を表3に、外観を写真6に示す。

表3 紫外線蛍光灯の仕様⁴⁾

項 目	諸 値
型 式	型式=FL15BLB（東芝製）
形 状	管径=25.5mm 管長=436mm
定格ランプ電力	15W
紫外線強度	21 μ W/cm ²
紫外線出力	2.0W
その他	卓上式スタンドライトに装着

写真6 使用した紫外線探傷灯の外観



また、デジタル画像の取得に用いたデジタルカメラの仕様を表4に示す。

表4 デジタルカメラの仕様

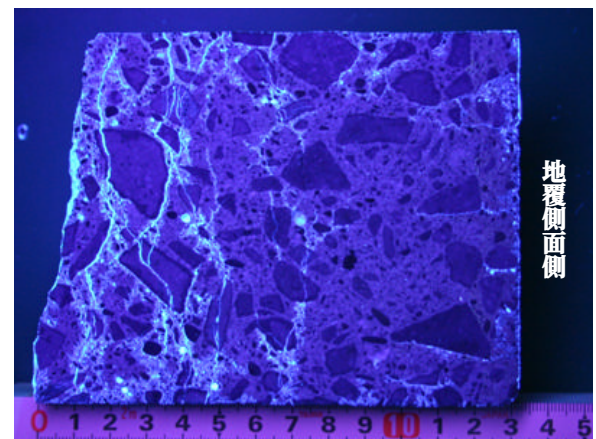
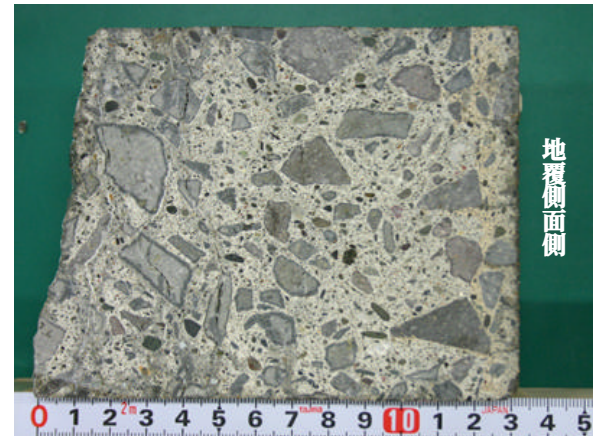
項目	諸値
形式	一眼レフ デジタルカメラ
撮像素子	23.7×15.6 mmサイズ原色 CCD 総画素数 547 万画素 有効画素数 533 万画素(4,024×1,324) 12 ビット記録
記録画素数	3,008×1,960 ピクセル
撮像感度	ISO 800 相当

(2) コアサンプル切断面の紫外線照射画像

写真7は地覆表面から約13cm深さの縦割り断面の可視光と紫外線照射による画像である。

写真7 紫外線照射画像（縦割り断面）

（上段：可視光，下段：紫外線照射）



4. ひび割れ注入性の評価

4-1 評価方法

樹脂の浸透深さは、直径φ100mmの縦割り断面の紫外線照射画像を用いて、樹脂が注入された到達深さを目視で観察する。

樹脂の注入幅は、蛍光発色しているひび割れ箇所から微細な部分を選び、デジタルマイクロスコープにより計測する。使用したデジタルマイクロスコープの性能を表5に示す。

表5 デジタルマイクロスコープの性能⁵⁾

項目	諸値
形式	VH-5000
撮像素子	1/2 インチ 90 万画素 CCD イメージセンサ 総画素数 90 万画素 有効画素数 84 万画素(850×984)

4-2 評価結果

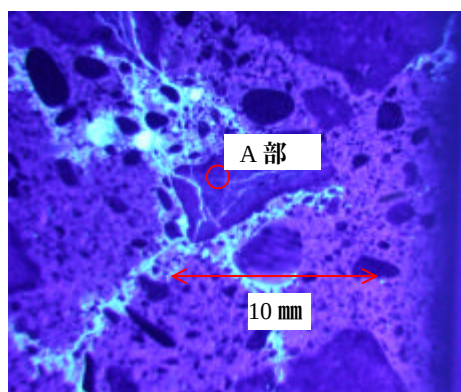
(1) 樹脂の浸透深さ

微細なひび割れを有するコアサンプルの場合、約 1/100 気圧の低真空状態でひび割れ内に超低粘度のエポキシ注入剤を脱泡注入することにより、直径φ100mmの縦割り断面中心部まで注入されていることが確認できた。

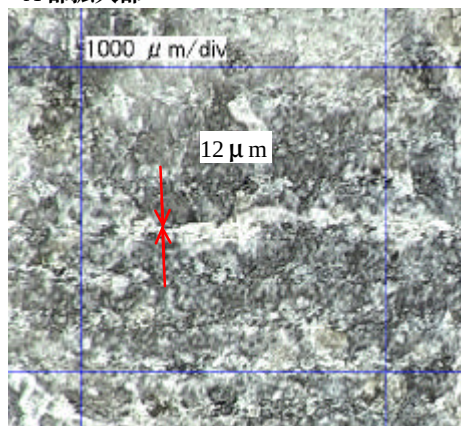
(2) 樹脂の注入幅

紫外線照射画像から蛍光樹脂が注入されている観察点を定め、デジタルマイクロスコープによりひび割れの幅を計測した。写真 8 のように幅 12μm のひび割れまで注入されていることが確認できた。

写真 8 マイクロスコープによる注入幅の計測結果



A部拡大部



4-3 適用上の留意事項

コンクリートコアサンプルに低真空状態で樹脂を注入する際の留意事項を以下に示す。

- (1) ひび割れがコアサンプル表面に連続しておらず、内部で閉塞している場合には注入出来ない。
- (2) ひび割れがコアサンプル表面に連続している場合でも、1/100 気圧の低真空脱泡の場合には、ひび割れ容積の約 1/100 程度の未注入空隙が残ると想定される。
- (3) 比較的健全なコアサンプルを用いる場合は、脱泡注入後に樹脂槽容器からコアサンプルを取り出し、コアサンプルのみを硬化させることが出来る。
- (4) 樹脂混合後の硬化開始時間内に脱泡注入が終了しない（消泡が終了しない）場合は、消泡不十分になると

共に、樹脂の硬化反応により容器が高温となり危険である。この場合には 10℃程度の低温に保ち、硬化開始の時間を延長する必要がある。

4-4 真空脱泡作業の作業性

今回のコアサンプルの真空脱泡作業に要した日数は 2 日、実作業時間は 3 時間である。

表 6 真空脱泡作業の所要時間(1 コアサンプル当たり)

作業工程	所要時間
コアサンプルの整形作業	0.5h
蛍光エポキシ樹脂の脱泡注入作業	1.0h
エポキシ樹脂硬化（室温放置）	1day
硬化サンプル切断作業	0.5h
紫外線照射によるデジタル画像化作業	1.0h
作業時間 合計	3.0h
最低最低日数	2day

5. おわりに

コンクリートコアサンプルの微細なひび割れを可視化する手法として、蛍光エポキシ樹脂の真空脱泡注入による方法は簡便な方法として有効である。

今回、その使用材料、機器の性能や作業手順を定め、ひび割れへの注入深さ、注入幅を測定した。その結果、使用したコア直径φ100mm のサンプルの場合には、サンプルの中心部まで注入が可能であり、また 12μm のひび割れ幅まで注入が可能であることが分かった。

コンクリートのひび割れは材料、施工、環境、構造・外力などに起因して生じる。一般に、コンクリート構造物を維持管理する上でひび割れが発生したと判断できるのは、コンクリート表面のひび割れ幅が目視により視認できるまで成長した時点であり、ルーペによっても視認が困難な微細なひび割れは実務上ひび割れはないと判断されている。この様な状況の中で微細ひび割れの可視化手法はコンクリートの維持管理分野について見れば、アルカリ骨材反応による膨張ひび割れの評価、凍結融解作用による劣化深さの評価など広く適用が可能な試験方法と考えられる。今後、アルカリ骨材反応や凍害を受けた構造物から採取したコアサンプルを用いて微細ひび割れを観察し、微細ひび割れの密度や到達深さなどが劣化評価の指標となりうるか否かを検討していく予定である。

参考文献

- 1) 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, vol.26, No.1, 2004
- 2) コニシ (株); ボンド E205 カタログ
- 3) プレニー技研; R-ZV(アクアバイオレット)及び R-ZE (フラビンイエロー)
- 4) 東芝ライテック(株); 2004 東芝ランプ総合カタログ
- 5) (株) キーエンス; デジタルマイクロスコープ VHX