

ひび割れ注入管理システムの研究開発

Development of concrete crack injection system

| | |
|-----------------|------------------|
| 原田 耕司* | 伊藤 幸広** |
| Koji Harada | Yukihiro Ito |
| 松田 浩*** | 深町 卓也** |
| Hiroshi Matsuda | Takuya Fukamachi |

要 約

ひび割れ注入工は、構造物の耐久性能を維持する対策として最も有効な方法である。しかし、その注入管理手法としては、注入量で管理する間接的な方法が一般的であり、ひび割れ内の注入材の充填状態を直接検査できる方法は未だない。本論文では、コンクリートのひび割れに蛍光材を添加した注入材を注入し、紫外線 LED ライトを光源とした構造物検査用内視鏡での、ひび割れ注入材の充填状態評価の可能性について検討を行った。検討の結果、構造物検査用内視鏡を用いると、高い精度でコンクリート内部のひび割れ幅を測定することができ、また、ひび割れ注入材の充填状態を確認できることを検証できた。

目 次

- § 1. はじめに
- § 2. 構造物検査用内視鏡について
- § 3. 実験概要
- § 4. 実験結果および考察
- § 5. まとめ

§ 1. はじめに

コンクリート構造物の補修工事では、ひび割れ注入工は数多くの現場で採用されている工種であり、構造物の耐久性能を維持する対策として有効な方法である。ひび割れ注入材の充填技術としては、自動式低圧注入器、超微粒子セメント注入材など新しい技術開発がなされているものの、ひび割れ内の注入材の充填状態を把握する合理的な検査方法の開発は進んでいない。

現状では、注入器具に残留する注入材の量より注入量を求め、充填深さ・面積を概略推定する方法や、注入した箇所から採取したコア供試体より充填状態を目視で確認する管理手法が採られている。しかし、前者は推定精度が低いこと、後者は比較的大きな装置を必要とし鉄筋を切断する可能性があることから検査点数を多く取ることができない等の課題がある。ひび割れ注入が不十分で

あると、構造物の耐久性を維持できないばかりか、再劣化の原因となる可能性があるため、構造物に与える損傷が小さく、簡易で精度の良いひび割れ注入材の充填状態の検査手法が求められていた。

著者らは、コンクリート構造物に穿孔した小径のドリル孔に専用の内視鏡（以下、構造物検査用内視鏡と呼ぶ）を挿入し、内部の劣化状況等を観察・計測する技術を開発してきた¹⁾。構造物検査用内視鏡では、小型ハンマードリルで穿孔した直径 14.5 mm の孔を利用するため、検査作業が簡易で鉄筋を切断する危険性がない。また、構造物検査用内視鏡の視野方向は側視であり、孔壁面の状況が視認でき、ひび割れを貫通するように穿孔すれば内部のひび割れ幅を観察・測定することができる。以上により、構造物検査用内視鏡は、簡易なひび割れ注入管理技術として応用できる可能性がある。

ここで提案する注入管理技術とは、計画から施工管理までの一連のシステムを示す。具体的には、事前調査として構造物検査用内視鏡によりコンクリート内部のひび割れ幅・深さの測定を行い、注入量等を概算し施工計画を立てる。次に注入材硬化後には、注入材が充填されているか検査し施工管理を行うことである。

本研究開発では、構造物検査用内視鏡によるひび割れ幅の測定精度を検証するとともに、注入材の充填状態の確認実験を室内および実橋において実施した。なお、検討した注入材は樹脂系およびポリマーセメント系であり、視認性を高めるために注入材に蛍光材を添加する方法について検討を行った。

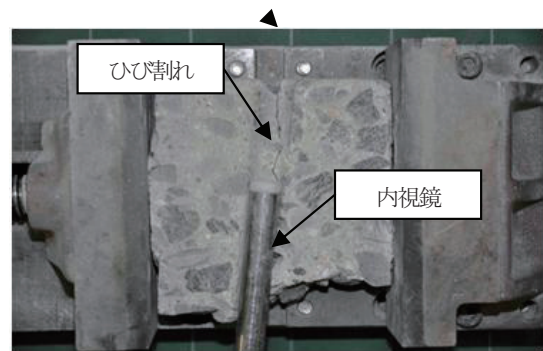
* 技術研究所土木技術グループ

** 佐賀大学大学院工学系研究科

*** 長崎大学大学院工学研究科



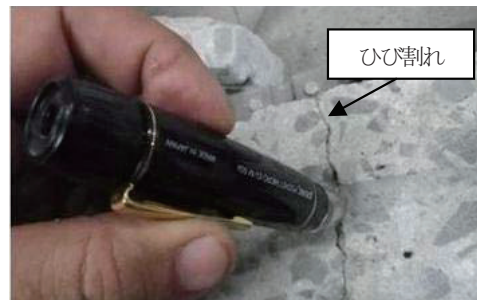
写真一 構造物検査用内視鏡



写真二 構造物検査用内視鏡による測定状況

表一 構造物検査用内視鏡の仕様

| 項目 | 仕様 |
|----------|-----------------------------|
| 全長 | 535 mm (カメラ含まず) |
| 計測プローブ外径 | 13.1 mm |
| 最大検査長 | 377 mm |
| 質量 | 567 g (カメラ含まず) |
| 光源 | ①白色 LED ライト ②紫外線 LED ライト |



写真三 ルーペによる測定状況

§ 2. 構造物検査用内視鏡について

2-1 機器構成

構造物検査用内視鏡は、写真一に示すように硬性鏡(内視鏡)、計測プローブ、白色 LED ライト、紫外線 LED ライト、接続リングおよびデジタルカメラで構成されている。

計測プローブとは、硬性鏡を覆う円筒管であり、先端部には視野方向を側視とするためのミラーが配置されている。また、計測プローブの側面には、側視ミラーの中央を基点とした目盛が刻まれており、観察箇所の高さが側面の目盛から測定できる。なお、ひび割れ幅等の測定のため、接眼レンズの内側にはマイクロスケールを取り付けている。

白色 LED ライトは通常のひび割れ観察用の照明であるが、注入材の充填状態を確認する場合には、蛍光材を添加したひび割れ注入材の目視確認が容易になるよう、紫外線 LED ライトを使用する。

なお、デジタルカメラは取外し可能になっており、記録が必要ない場合は、目視観察出来る構造となっている。

2-2 仕様

構造物検査用内視鏡の仕様を表一に示す。デジタルカメラを除く構造物検査用内視鏡の全長は 535 mm であり、計測プローブ挿入長さすなわち最大検査長は、390 mm である。また、構造物検査用内視鏡の質量は 567 g であり、デジタルカメラを装着しても総質量は 1,547 g と軽量である。

§ 3. 実験概要

実験項目としては、構造物検査用内視鏡によるひび割れ幅の測定精度の検証、小型供試体を用いた注入材の充填状態の確認および実橋における注入材の充填状態の確認である。

3-1 ひび割れ幅の測定精度の検証実験

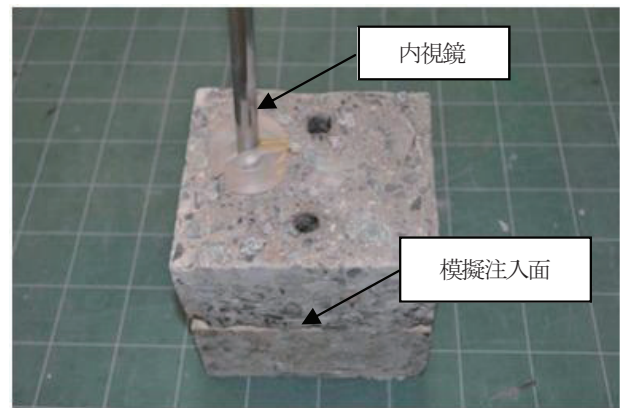
ひび割れ幅の測定に用いた供試体は、孔軸と平行なひび割れを発生させた供試体(縦ひび割れ供試体)の他、孔軸と直角のひび割れを発生させた供試体(横ひび割れ供試体)の2種類について測定を行った。

縦ひび割れ供試体の形状は、W 110 mm × B 110 mm × H 40 mm であり、横ひび割れ供試体は、W 150 mm × B 80 mm × H 40 mm である。縦ひび割れ、横ひび割れともに供試体の作製方法としては、コンクリート角柱供試体の中央部に φ 14.5 mm の孔をハンマードリルで穿孔した後、孔軸に沿ってコンクリートカッターで切断し、さらに孔内にひび割れが生じるようハンマーで叩き破断させた。

構造物検査用内視鏡によるひび割れ幅の測定方法は、写真二に示すようにひび割れ部に構造物検査用内視鏡の側視ミラーを当て、接眼レンズ内のスケール(最小目盛 0.11 mm)により肉眼で読み取る方法とした。また、確認のため写真三に示すようにスケール(最小目盛 0.02 mm)内蔵のルーペ(倍率×50)で、同一箇所のひび割れ幅を測定した。実験では、ひび割れ幅を 0.1 mm から 6.0 mm まで変化させた。

表一 2 蛍光材を添加した注入材の物性試験方法

| 注入材種類 | 試験項目 | 基準 | 試験方法 |
|-----------|----------|--------------------------|------------|
| 樹脂系 | 圧縮降伏強さ | 29 N/mm ² 以上 | JIS K 7208 |
| | 曲げ強さ | 15 N/mm ² 以上 | JIS K 7203 |
| | 引張強さ | 13 N/mm ² 以上 | JIS K 7113 |
| ポリマーセメント系 | スラリー流下時間 | 45 秒以内 | JSCE-K 542 |
| | 保水係数 | 0.30 ~ 0.65 | |
| | 収縮率 | 3.0% 以下 | |
| | 圧縮強度 | 規格なし | |
| | 曲げ強度 | 4.0 N/mm ² 以上 | |
| | 付着強度 | 4.0 N/mm ² 以上 | |



写真一 4 供試体および測定方法

3-2 注入材の充填状態確認実験

(1) 蛍光材を添加した注入材の物性試験

微細なひび割れに充填された注入材は、コア供試体を採取しても肉眼では確認できない。そこで、紫外線ライトを照射すると発光し視認性が高くなる蛍光材を注入材に添加するため、蛍光材を添加した注入材の物性試験を実施した。

蛍光材を添加した注入材の物性試験の一覧を表一 2 に示す。蛍光材の添加率は、樹脂系注入材では主剤質量の 0, 0.5, 1.0, 1.5 および 2.0% と変化させ、また、ポリマーセメント系注入材では粉体質量の 0, 0.5, 1.0, 2.0 および 3.0% と変化させた。樹脂系注入材に添加する蛍光材は紫外線ライトを照射すると、セメントポリマー系注入材に添加する蛍光材に比べ発光作用が大きいいため、最大添加率の設定を変えた。

樹脂系注入材に添加する蛍光材は液体のものを使用したが、ポリマーセメント系注入材に添加する蛍光材は、セメントスラリー中で分散性のよい粉体のものを使用し、その最大粒径はポリマーセメント系注入材の紛体の最大粒径と同じ 24 μm 程度のものとした。

なお、いずれの蛍光材もコンクリート中で識別し易いように黄色のものを採用した。

(2) 小型供試体を用いた注入材の充填状態の確認実験

構造物検査用内視鏡で、蛍光材を添加した注入材の充填状態を確認できるか検討を行った。

実験では、平面度の高い 2 つのコンクリートブロック間にスペーサーを挟み、注入材を充填した模擬ひび割れを作製した。供試体の形状は、W 130 mm × B 150 mm × H 160 mm であり、その外観を写真一 4 に示す。

蛍光材の添加率は、樹脂系注入材およびポリマーセメント系注入材とも、蛍光材を添加した注入材の物性試験と同様に変化させた。2 つのコンクリートブロック間に挟むスペーサーの厚さは、0.1 mm および 0.2 mm の 2 種類とした。

供試体の作製方法としては、ブロック上面の四隅にスペーサーを配置し、注入材を塗布した後もう一つのブロックを載せ固定し、注入材が硬化するまで養生した。

構造物検査用内視鏡を用いて、ひび割れ内に充填され



写真一 5 実験に使用した橋梁

た注入材の幅を測定する方法としては、まず供試体上面から小型ハンマードリルを用いてひび割れ面に垂直な孔を穿孔し、ブラシ等で孔内を清掃した。なお、穿孔と清掃は、乾式で作業を行った。次いで、写真一 4 に示すように構造物検査用内視鏡を孔内に挿入しひび割れ部の画像を撮影し、取得した画像から注入材の幅を測定した。注入材の幅の測定は、供試体 1 個につき 2 箇所穿孔して行った。

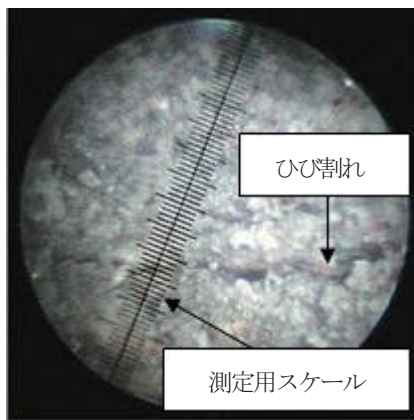
また、確認のため孔に沿ってコンクリートカッターで供試体を切断し、スケール内蔵のルーペ（倍率×50）で注入材の幅を測定した。

(3) 実橋による注入材の充填状態の確認実験

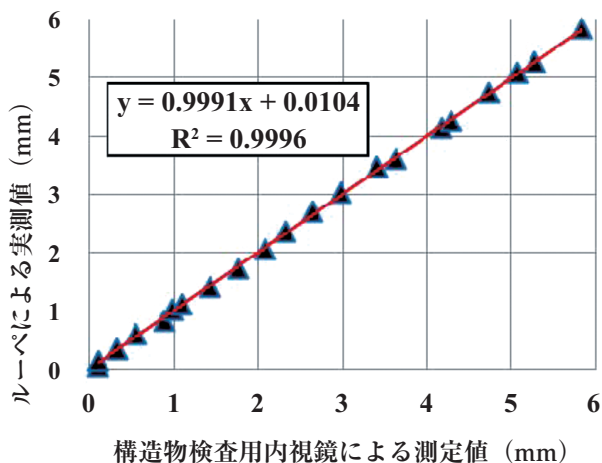
竣工後 48 年経過した PC 橋に発生したひび割れに注入材を注入し、構造物検査用内視鏡による充填状態の確認実験を実施し、現場における適用性を検証した。注入材は、樹脂系およびポリマーセメント系注入材を用い、それぞれの施工要領書に準拠しひび割れ注入を行った。

ひび割れ注入を行った箇所は、PCT 桁のウェブ部であり、ひび割れ幅は 0.10 mm ~ 0.55 mm で、ひび割れの種類としては、桁端の PC 鋼線定着部における支圧破壊によるひび割れと、横締め定着具用箱抜き付近の乾燥収縮ひび割れと推定された。

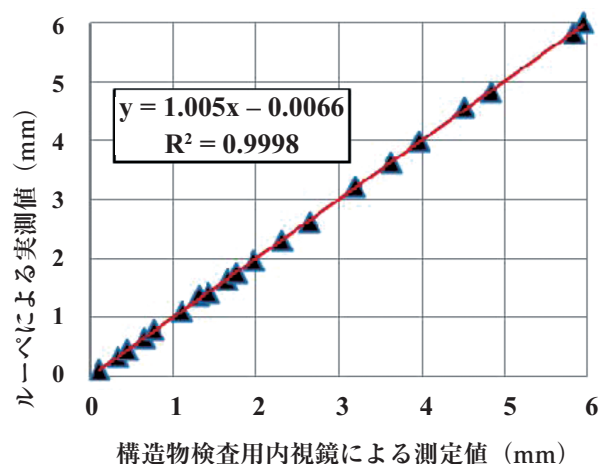
なお、実験に使用した橋梁の全景を写真一 5 に示す。



写真—6 ひび割れ幅の測定状況



図—1 縦ひび割れ供試体の結果



図—2 横ひび割れ供試体の結果

§ 4. 実験結果および考察

4-1 ひび割れ幅の測定精度の検証実験結果

構造物検査用内視鏡により、ひび割れを撮影した画像を写真—6に示す。スケールは、計測プローブ内で硬性

表—3 蛍光材を添加した樹脂系注入材の物性試験結果

| 蛍光材添加率 (%) | 圧縮降伏強さ (N/mm ²) | 曲げ強さ (N/mm ²) | 引張強さ (N/mm ²) |
|------------|-----------------------------|---------------------------|---------------------------|
| 0 | 70 | 57 | 37 |
| 0.5 | 67 | 52 | 39 |
| 1.0 | 67 | 51 | 38 |
| 1.5 | 69 | 49 | 38 |
| 2.0 | 67 | 49 | 35 |

表—4 蛍光材を添加したポリマーセメント注入材の物性試験結果

| 蛍光材添加率 (%) | 流化時間 (秒) | 保水係数 | 収縮率 (%) | 圧縮強度 (N/mm ²) | 曲げ強度 (N/mm ²) | 接着強度 (N/mm ²) |
|------------|----------|------|---------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|
| 0 | 11.8 | 0.46 | 0.43 | 25.7 | 5.3 | 4.7 |
| | 12.5 | | | | | |
| 0.5 | 12.1 | 0.48 | 0.50 | 24.8 | 5.2 | 4.6 |
| | 13.1 | | | | | |
| 1.0 | 11.9 | 0.43 | 0.58 | 28.3 | 6.4 | 4.4 |
| | 13.3 | | | | | |
| 2.0 | 11.7 | 0.43 | 0.56 | 27.0 | 5.6 | 4.4 |
| | 13.0 | | | | | |
| 3.0 | 12.8 | 0.40 | 0.35 | 24.3 | 4.9 | 4.2 |
| | 13.5 | | | | | |

鏡を回すことにより任意の方向に回転できるので、ひび割れと直行する方向に目盛を合わせてひび割れ幅の測定を行った。

図—1 および図—2 は、それぞれ縦ひび割れ供試体と横ひび割れ供試体の測定結果を示す。いずれの供試体も、構造物検査用内視鏡による測定値とルーペによる実測値との間には高い相関が確認できる。ルーペによる実測値に対する構造物検査用内視鏡の誤差の絶対値の平均は、縦ひび割れ供試体では 0.03 mm であり、横ひび割れ供試体では 0.02 mm となった。

以上より、構造物検査用内視鏡により、ひび割れ幅を高い精度で測定できることを確認した。

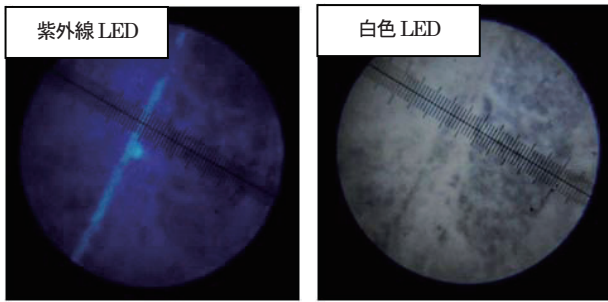
4-2 注入材の充填状態確認実験結果

(1) 蛍光剤を添加した注入材の物性試験結果

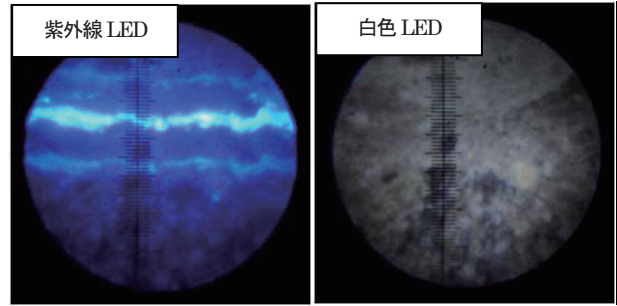
表—3には、蛍光材を添加した樹脂系注入材の物性試験結果を、また表—4には蛍光材を添加したポリマーセメント系注入材の物性試験結果を示す。

樹脂系注入材では、蛍光材無添加のものに対し、蛍光材を添加すると若干強度が低下する傾向が見られるが、すべての試験項目で、ひび割れ注入工法用エポキシ樹脂系ひび割れ注入材の品質規格を満足していた。

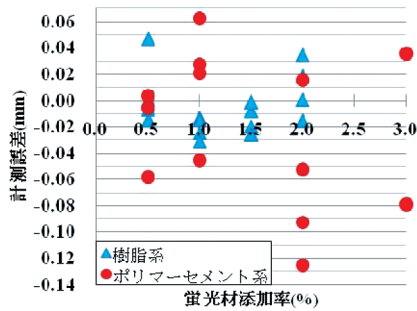
一方、ポリマーセメント系注入材では、フレッシュ時



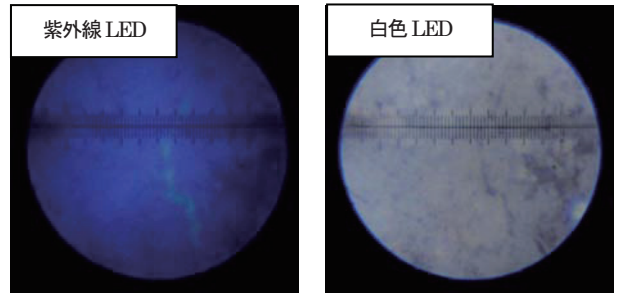
写真一七 蛍光材を添加した樹脂系注入材の模擬ひび割れ部の観察結果



写真一八 蛍光材を添加したポリマーセメント系注入材の模擬ひび割れ部の観察結果



図一三 構造物検査用内視鏡の測定値の誤差



写真一九 実橋の観察結果

の性状であるスラリー流下時間は、蛍光材の添加により若干長くなる傾向にあるが、ひび割れ充填性能に影響を与えない範囲であった。また、硬化後の物性である圧縮強度、曲げ強度および接着強度は、添加率3%になると、いずれの値も僅かな低下が見られるが、2.0%以下では蛍光材の添加による影響はほとんどないことが分かった。

以上より、蛍光材の添加率は、樹脂系注入材およびポリマーセメント系注入材ともに、2%以下であればその物性値に影響を及ぼさないことを確認した。

(2) 小型供試体を用いた注入材の充填状態の確認実験結果

写真一七には、蛍光材を添加した樹脂系注入材の模擬ひび割れ部の画像の一例を示す。設定ひび割れ幅は0.1 mm であり、蛍光材の添加率は1.0%の場合である。なお、右側の画像は光源を白色 LED ライトで撮影したものであり、左側の画像は紫外線 LED ライトを光源として撮影したものである。

樹脂系注入材では、白色 LED ライトの場合、僅かに注入材の位置が確認できるが、注入材の幅の正確な測定は困難である。一方、紫外線 LED ライトの場合には、注入材の位置および形状が明確になり、スケールによる幅の測定が容易となっている。なお、注入前において白色 LED ライトでもひび割れが明確に確認できるのは、ひび割れ部に白色 LED ライトによる影が出来るためである。

同様に蛍光材を添加したポリマーセメント系注入材のひび割れ部の画像を写真一八に示す。設定ひび割れ幅および蛍光材の添加率は、樹脂系注入材と同じものである。白色 LED ライトを光源とした右側の画像では、注入材の位置は確認できない。これは、ポリマーセメント系注入材とコンクリートがほぼ同色のためである。紫外線 LED

ライト光源とした左側の画像では、注入材の位置および幅ともに明瞭に確認できる。ただし、発光した光量が大きく、側視ミラーの反射により像が3重に写っている。具体的には、中央の最も明るい線が注入材であり、両側の平行線が反射像である。

樹脂系およびポリマーセメント系注入材ともに蛍光材を添加した場合は、今回の実験で行った最小添加率 0.5% および設定ひび割れ幅 0.1 mm という条件においても、注入材位置の確認および幅の測定が可能であった。また、ひび割れ部と注入材の界面に隙間が無いことも確認でき、注入材の付着状態の評価も出来ることが明らかになった。

図一三は、樹脂系およびポリマーセメント系注入材におけるルーペによるひび割れ幅の測定値に対する構造物検査用内視鏡での測定値の誤差を、蛍光材の添加率毎に示したものである。樹脂系は添加率の変化によらず高い精度で注入材の幅を測定できており、誤差は最大でも +0.05 mm であった。また、ポリマーセメント系注入材では、添加した蛍光材の発光量が大きく複数の像が写り込むこともあり若干誤差は大きくなったが、1つの測定結果を除き 0.1 mm 未満となった。

(3) 実橋における注入材の充填状態の確認実験結果

写真一九は、PCT 桁のウェブ部に発生したひび割れに蛍光材を添加した樹脂系注入材を注入し、構造物検査用内視鏡により充填状態を撮影した画像の一例を示す。写真一七に示す室内試験での模擬ひび割れの結果と同様に、コンクリート構造物に実際に発生したひび割れに、現場において注入器具を用いて注入を行った場合でも、蛍光材の効果により充填状態を確認できることが分かる。

表一五は、実橋における注入材の充填状態確認実験結

表一五 実橋における注入材の充填状態確認実験結果

| 注入材種類 | 測定箇所 | | 測定深さ (mm) | 充填状況 | 構造物検査用内視鏡による測定値 (mm) | | | 注入材の幅の 平均値 (mm) | |
|-------|-----------|------|--------------|------|----------------------|------|------|--------------------|------|
| | | | | | 1 | 2 | 3 | | |
| 樹脂系 | G1-1 | No.2 | 30 | ○ | 0.20 | 0.18 | 0.20 | 0.20 | |
| | | G3-1 | No.1 | 10 | ○ | 0.25 | 0.18 | 0.11 | 0.18 |
| | 40 | | | ○ | 0.18 | 0.13 | 0.21 | 0.17 | |
| | No.3 | | 30 | ○ | 0.26 | 0.18 | 0.18 | 0.21 | |
| | G3-3 | No.1 | 20 | ○ | 0.09 | 0.09 | 0.10 | 0.09 | |
| | | | 30 | ○ | 0.39 | 0.17 | 0.25 | 0.27 | |
| | | | 45 | ○ | 0.34 | 0.51 | 0.56 | 0.47 | |
| | | No.3 | 40 | ○ | 0.40 | 0.17 | 0.39 | 0.32 | |
| | | | 45 | ○ | 0.16 | 0.39 | 0.31 | 0.29 | |
| | | | 47 | ○ | 0.43 | 0.32 | 0.35 | 0.37 | |
| | | | No.8 | 10 | ○ | 0.17 | 0.22 | 0.22 | 0.20 |
| | ポリマーセメント系 | G3-4 | No.1 | 30 | ○ | 0.24 | 0.27 | 0.23 | 0.25 |
| | | | No.2 | 45 | ○ | 0.56 | 0.27 | 0.32 | 0.39 |
| G3-5 | | No.3 | 27 | ○ | 0.33 | 0.30 | 0.20 | 0.28 | |
| | | No.4 | 30 | ○ | 0.27 | 0.24 | 0.22 | 0.24 | |

* 充填状況の欄の○印は、注入材の位置・幅が確認出来たものを示す。

果をまとめたものである。樹脂系、ポリマーセメント系合わせて15箇所の充填状態の確認を行ったが、いずれも注入材の位置、幅が明確に確認できた。なお、G3-3、No.8の測定点においては、構造物検査用内視鏡による測定の後、孔を含むようにコアドリルで削孔し、測定箇所の供試体を採取した。その後、供試体を孔軸に沿って切断し、ルーペ（倍率×50）で注入材の幅を測定した。ルーペの実測結果に対する構造物検査用内視鏡による測定値の誤差は+0.01 mmとなり、高い精度で測定が可能であることを確認できた。

§5. まとめ

本研究開発より得られた結論を、以下に示す。

- (1) 構造物検査用内視鏡によって孔内のひび割れ幅を測定した結果、測定誤差は0.03 mm程度であり、ひび割れ幅を高い精度で測定できることを確認した。
- (2) 蛍光材を添加した注入材の物性試験より、今回実験を行った範囲内においては、蛍光材の添加による注入材の諸物性値に及ぼす影響は小さいことが明らかになった。

- (3) 小型供試体を用いた充填状態の確認実験の結果より、樹脂系およびポリマーセメント系注入材ともに蛍光材を添加した場合は、今回の実験で行った最小添加率0.5%および設定ひび割れ幅0.1 mmという条件においても、注入材位置の確認および幅の測定が可能であった。
- (4) ひび割れ部と注入材の界面に隙間が無いことも確認でき、注入材の付着状態の評価もできることが明らかになった。
- (5) 実際に劣化で発生したひび割れにも本システムが適用でき、構造物検査用内視鏡の現場適用性を検証することができた。

謝辞：本研究を実施するにあたり、住友大阪セメント(株)岡村達也氏およびコニシボンド(株)飯島義仁氏に多大なご協力を頂きました。ここに記して深く謝意を表します。

参考文献

- 1) 原田耕司, 伊藤幸広：構造物検査用内視鏡の開発, 西松建設技報, Vol. 30, pp. 109-110, 平成19年6月。