

構造物検査用内視鏡による ひび割れ注入管理技術について

原田耕司¹・伊藤幸広²・深町卓也³・松田浩⁴・出水亨⁵

¹正会員 博（工） 西松建設株式会社 技術研究所（〒105-8401 東京都港区虎ノ門一丁目20-10）

²正会員 博（工） 佐賀大学 大学院 工学系研究科（〒840-8502 佐賀県佐賀市本庄1番地）

³佐賀大学 大学院 工学系研究科（〒840-8502 佐賀県佐賀市本庄1番地）

⁴正会員 工博 長崎大学 大学院 工学研究科（〒852-8521 長崎県長崎市文教一丁目14）

⁵正会員 修（工）長崎大学 大学院 生産科学研究科（〒852-8521 長崎県長崎市文教一丁目14）

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把握できる合理的な検査方法は未だないのが現状である。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ものである。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の確認に有効であることが明らかになった。

キーワード：補修、ひび割れ、注入材、蛍光材、充填、管理

1. はじめに

我が国の経済が飛躍的に成長を遂げた高度経済成長期には、社会基盤施設が大量に整備された。これらの社会基盤施設は既に建設後 35～55 年経過しており、この先補修・補強の対象となるコンクリート構造物が急増すると予想されている。

コンクリート構造物の補修工事においては、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、前者の推定精度は低く、また、後者は比較的大きな装置を必要とすることや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。ひび割れ注入の施工管理が不十分であると、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。

一方、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 14.5mm 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るため、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。

以上の特徴から、構造物検査用内視鏡を用いれば簡易で安全性の高いひび割れ注入管理技術となる可能性がある。

ここで提案する注入管理技術とは、注入材を注入する前に事前調査として、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、注入材の選定および注入量を概算し施工計画を立て、次に、注入完了・硬化後には、所定の位置まで穿孔し注入材が充填されているか検査し施工管理

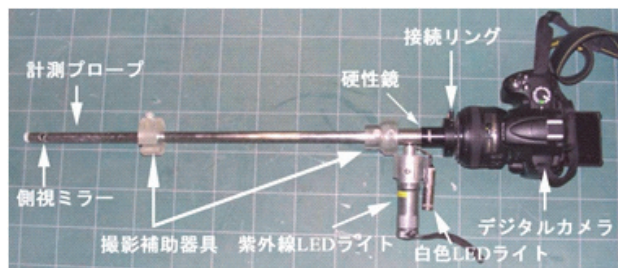


写真-1 構造物検査用内視鏡の構成

表-1 構造物検査用内視鏡の仕様

項目	仕様
全長	535mm (カメラ含まず)
最大検査長	390mm
計測プローブ外径	13.1mm
質量	567g (カメラ含まず)
白色 LED ライト	LR44 電池 3 個
紫外線 LED ライト	単 4 電池 3 本

を行うものである。

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試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。

2. 構造物検査用内視鏡について

(1) 機器構成

構造物検査用内視鏡は、写真-1 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、観察箇所深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、デジタルカメラがなくても目視観察出来る構造となっている。

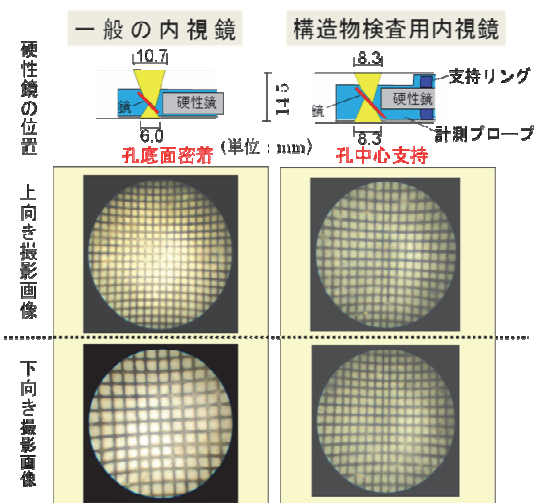


図-1 構造物検査用内視鏡の特徴

(2) 仕様

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

(3) 特徴

孔内のひび割れ幅を正確に測定するには、硬性鏡先端のレンズからのひび割れ面までの距離を常に一定にする必要がある。そこで、構造物検査用内視鏡では、図-1 に示すように、硬性鏡を孔軸の中心に支持し、孔壁面までの距離を常に一定になるように、計測プローブ内に支持リングを配置している。

図-1 の撮影画像は、孔壁面に 1mm 方眼紙を貼付け、構造物検査用内視鏡に接続したデジタルカメラで撮影したものである。外径の小さい一般の内視鏡では、上向き撮影と下向き撮影ではレンズまでの距離が異なるため、撮影した対象物の大きさが変化している。これに対し構造物検査用内視鏡では、支持リングによって上下、左右とも同じ倍率で撮影ができるため、接眼レンズの内側に取り付けたマイクロスケールによって対象物の正確な測定が可能な構造となっている。

なお、一般の内視鏡の外径に合わせて穿孔し孔径を小さくすると、視野範囲が狭くなるという問題が生じる。

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を検証する実験、小型供試体

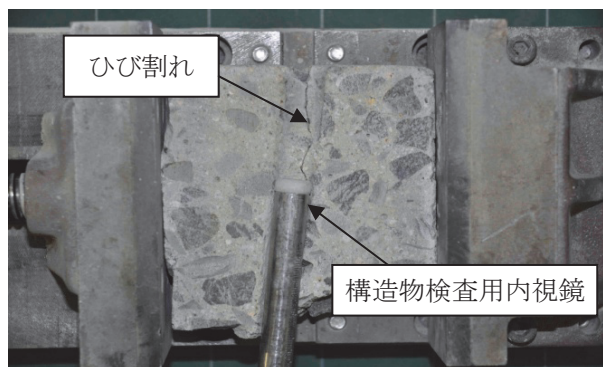


写真-2 供試体および測定方法（縦ひび割れ）

用いた注入材の充填状態の確認試験および実橋における注入材の充填状態の確認試験である。

(1) ひび割れ幅の測定精度の検証試験

ひび割れ幅の測定に用いた供試体は、写真-2 に示す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、W110mm×B110mm×H40mm であり、横ひび割れ供試体は、W150mm×B80mm×H40mm 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φ14.5mm 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-2 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 0.11mm）により肉眼で読み取る方法とした。また、確認のためスケール（最小目盛 0.02mm）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。なお、ひび割れ幅は 0.1mm から 6.0mm まで変化させた。

(2) 注入材の充填状態確認試験

a) 蛍光剤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。

本試験で用いた注入材は、樹脂系注入材およびポリマーセメント系注入材の2種類とした。それぞれの特性を表-2 および表-3 に示す。樹脂系注入材に添加する蛍光材は液体状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

表-2 樹脂系注入材の特性

項目		特性
樹脂名		エポキシ樹脂
未硬化時	粘度	370×10 ⁴ Pas
	可使時間	60min
	収縮率	1.70%
	密度	1.16 g/cm ³
硬化時	圧縮降伏強さ	72.3 N/mm ²
	曲げ強さ	63.3 N/mm ²
	引張強さ	43.8 N/mm ²

表-3 ポリマーセメント系注入材の特性

項目	特性
密度	粉体：2.99 g/cm ³
	液体：1.00 g/cm ³
比表面積	粉体：10100 cm ² /g
固形分	液体：17.8±1.0%（SBR系エマルジョン）
圧縮強さ	硬化時：37.9 N/mm ²
曲げ強さ	硬化時：5.3 N/mm ²
接着強さ	硬化時：5.1 N/mm ²

表-4 蛍光材を添加した注入材の物性試験一覧

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	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	

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と同じ24μm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。

蛍光材を添加した注入材の物性試験の一覧を表-4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。

b) 小型供試体を用いた注入材の充填状態の確認試験

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。

試験では、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、注入材を充填する模擬ひび割れを作製した。供試体の形状は、W130mm×B150mm×H160mm であり、その外観を写真-3に示す。

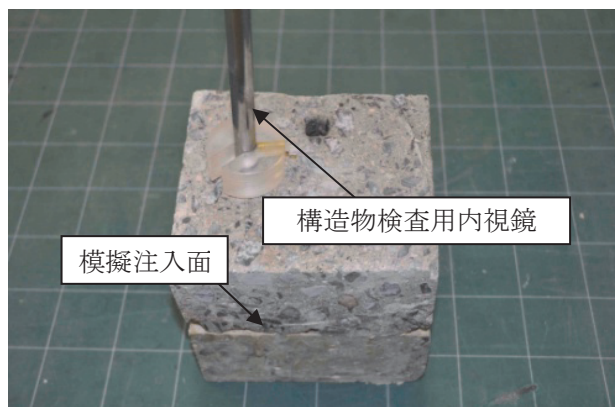


写真-3 小型供試体および測定方法

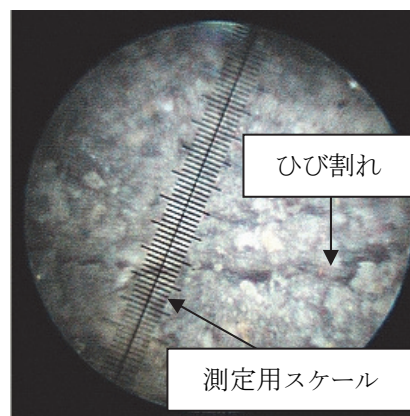


写真-5 ひび割れ幅の測定状況



写真-4 実験に使用した橋梁

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变化させた。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、0.1mm および 0.2mm 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-3 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試験

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試験を実施し、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 0.10mm～0.55mm 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-4 に示す。

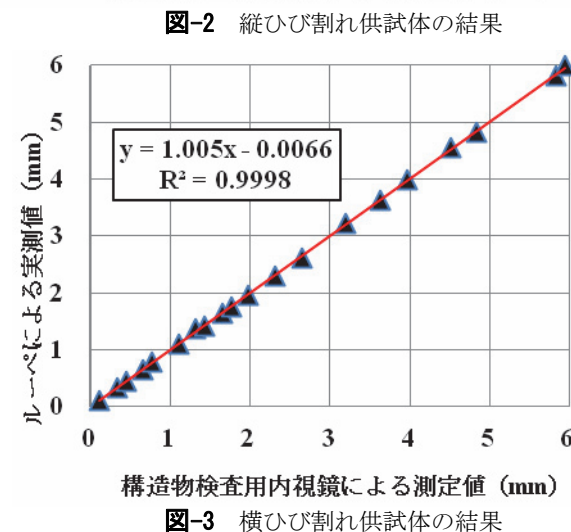
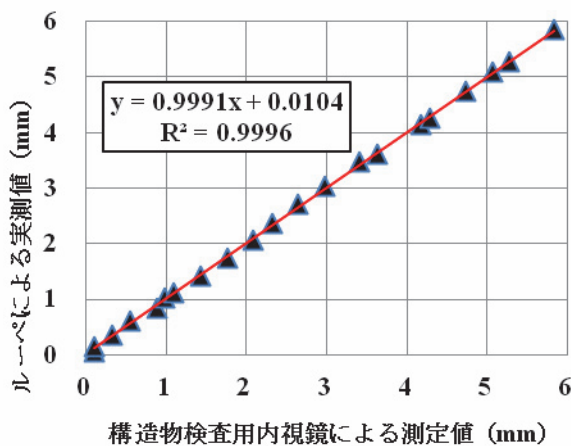
4. 実験結果および考察

(1) ひび割れ幅の測定精度の検証試験結果

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-5 に示す。スケールは、計測プローブ内で硬性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-2 および図-3 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 0.03mm であり、横ひび割れ供試体では 0.02mm 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。



(2) 注入材の充填状態確認試験結果

a) 蛍光剤を添加した注入材の物性試験結果

表-5 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-6 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ものの、いずれの場合も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。

表-5 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-6 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

蛍光材添加率 (%)	流下時間 (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					

※流下時間の欄で上段の値は練混ぜ直後、下段の値は 60 分経過後の結果を示します。

b) 小型供試体を用いた注入材の充填状態の確認試験結果

写真-6 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を示す。設定ひび割れ幅は 0.1mm であり、蛍光材の添加率は 1.0%とした。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。

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-7 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とした。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

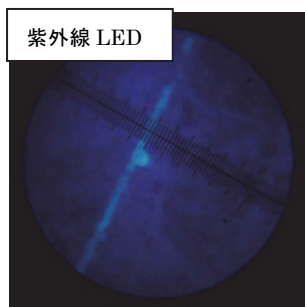


写真-6 蛍光材を添加した樹脂系注入材の
模擬ひび割れ部の画像

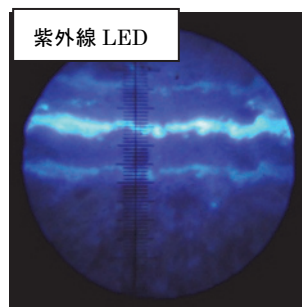
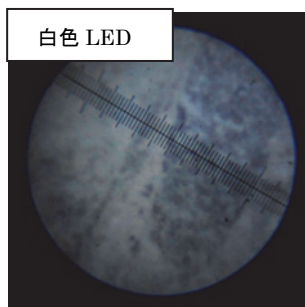


写真-7 蛍光材を添加したポリマーセメント系注入材の
模擬ひび割れ部の画像

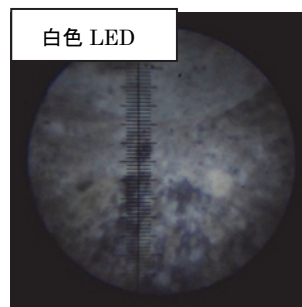


表-7 実橋における注入材の充填状態確認試験結果

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
	G3-5	No. 2	45	○	0.56	0.27	0.32	0.39
		No. 3	27	○	0.33	0.30	0.20	0.28
		No. 4	30	○	0.27	0.24	0.22	0.24

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 0.1mm 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。

(3) 実橋における注入材の充填状態の確認試験結果

写真-8 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充填し、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

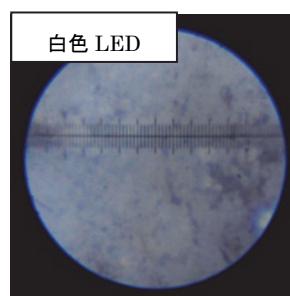
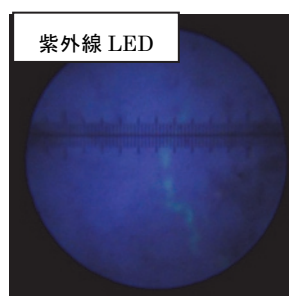


写真-8 実橋における蛍光材を添加した
樹脂系注入材のひび割れ部の画像

を示す。現場において注入器具を用いて実際に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を検証できた。

表-7 は、実橋における注入材の充填状態確認試験結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+0.01mm 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 0.03mm 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試験の結果より、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 0.1mm 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) 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注入材を注入し、構造物検査用内視鏡でその注入状態の観察を行った。その結果、実際に劣化で発生したひび割れにも本技術が適用でき、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