

論文 構造物検査用内視鏡を用いたひび割れ注入管理技術の開発

深町 卓也*1・原田 耕司*2・伊藤 幸広*3

要旨: ひび割れ注入工は補修・補強工事において数多くの現場で採用されているが、ひび割れ内の注入材の充填状況を把握する合理的な検査方法は未だない。本論文では、開発した構造物検査用内視鏡を用いて、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 光源で注入材の充填状況評価の可能性について検討を行ったものである。結果として、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況の確認に有効であることが明らかとなった。

キーワード: ひび割れ, 注入材, 内視鏡, 蛍光材, 充填状況

1. はじめに

高度経済成長期に社会基盤施設が大量に整備されたが、これらは既に建設後 35~55 年経過しており、この先補修・補強の対象となる構造物が増加することが予想されている。コンクリート構造物の補修・補強工事において、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。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況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況を目視で確認する管理手法がとられている。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、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、構造物の耐久性能を保持できないばかりか再劣化の原因ともなるので、構造物に与える損傷が小さく、簡易で精度の良い充填状況の検査手法が求められている。

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称す）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。ドリル孔の孔径は 14.5mm と小さく、穿孔には小型ハンマードリルを使用するため、検査作業が簡易で鉄筋を切断する危険性は無い。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・計測することができる。すなわち、小径ドリル孔の穿孔と構造物検査用内視鏡を用い

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、本方法により内部のひび割れ幅・深さの計測を行い、注入材の選定および注入量を概算し施工管理を行う。また、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を行うものである。

本研究では、構造物検査用内視鏡によるひび割れ幅の計測精度を検証するとともに、小径ドリル孔の穿孔と構造物検査用内視鏡による注入材の充填状況の確認試験を室内試験および実橋において行った。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という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

2.1 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る。計測プローブとは、硬性鏡を覆う円筒管であり、先端



写真-1 構造物検査用内視鏡の構成

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、ミラーの中央を

*1 佐賀大学 大学院 工学系研究科 都市工学専攻 (正会員)

*2 西松建設(株) 技術研究所 土木技術グループ 博士(工学) (正会員)

*3 佐賀大学 大学院 工学系研究科 都市工学専攻 准教授 博士(工学) (正会員)

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、ひび割れ幅等の計測のため、接眼レンズの内側にはマイクロスケールを取り付けた。白色 LED ライトは通常の観察用の照明であるが、注入材に蛍光材を添加し観察する場合は、紫外線 LED ライトを使用する。

2.2 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、すなわち最大検査長は377mmである。装置の質量は567gであり、一眼レフデジタルカメラを装着しても総質量は1547gと軽量である。

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)
計測プローブ全長	455mm
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

2.3 特徴

孔内のひび割れ幅を正確に計測するには、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。構造物検査用内視鏡は、図-1に示すように計測プローブ内に支持リングを配置し、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した。図中の撮影画像は、孔壁面に1mm方眼紙を貼付け、装置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する。なお、一般の内視鏡の外径に合わせて穿孔する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ずる。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となる。

3. 実験概要

実験項目としては、本装置によるひび割れ幅の測定精度を検証する実験、小型供試体を用いた注入材の充填状況の確認試験および実橋における注入材の充填状況の確認試験である。なお、充填状況確認試験に先立ち、蛍光材の添加が注入材の諸物性に及ぼす影響についても検討した。

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、写真-2に示すとおりであり、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としては、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。ひび割れ幅は0.1mmから6.0mmまで変化させた。

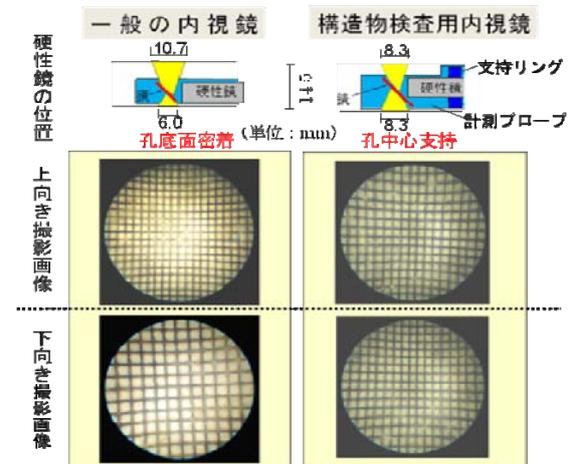


図-1 構造物検査用内視鏡の特徴

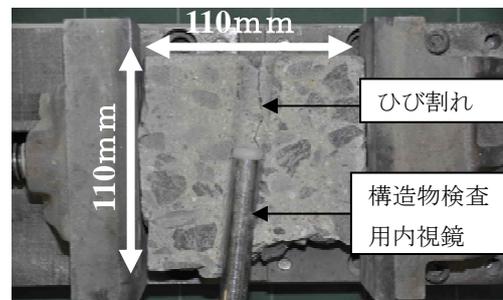


写真-2 供試体および測定方法(縦ひび割れ)

3.2 注入材の充填状況確認試験

セメント系注入材はコンクリートとほぼ同色であり、

特に微細なひび割れに充填されたものは、コア供試体を採取しても肉眼で確認できない場合がある。そこで、充填状況を確認しやすくするため、紫外線ライトを照射することにより発光し、視認性が高くなる蛍光材を注入材に添加し検討を行った。蛍光材を添加した注入材の物性試験も合わせて実施した。

(1) 注入材の物性試験

本実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種類である。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。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最大粒径と同じ $24\mu\text{m}$ 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やすいように黄色のものを用いた。

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。

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	$370 \times 10^4 \text{Pas}$
	可使用時間	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： $10100 \text{ cm}^2/\text{g}$
固形分	液体： $17.8 \pm 1.0\%$ (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

(2) 小型供試体を用いた注入材の充填状況の確認試験

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、注入材を充填する模擬ひび割れを作製した。供試体の形状は、 $130 \times 150 \times 160\text{mm}$ であり、その外観を写真-3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、 0.1mm 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、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する。次いで、写真-3に示すように本装置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個に付き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 $\times 50$ ）で注入材の幅を測定した。

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	

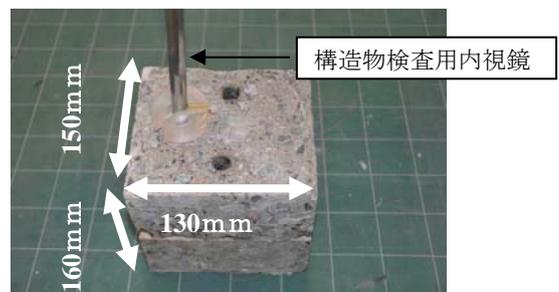


写真-3 小型供試体および測定方法

(3) 実橋における注入材の充填状況の確認試験

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況の確認試験を実施し、現場における適用性を検討した。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桁のウェブ部である。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である。なお、ひび割れ幅は 0.10mm ~ 0.55mm の範囲であった。現場における注入状況およ

び穿孔風景を写真-4 に示す。

小型供試体を用いた室内実験の結果より、注入材には蛍光材を添加するものとし、樹脂系およびポリマーセメント系注入材の添加率はいずれも 1.0% とした。



写真-4 現場実験風景

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デジタルカメラを接続し、ひび割れ部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、ひび割れと平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である。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あり、また、回帰式の傾きはほぼ 1 であり、y 切片も 0 に近い値となった。ルーペによる実測値に対する本装置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 であった。これより本装置でひび割れ幅を高い精度で測定できることが確認できた。

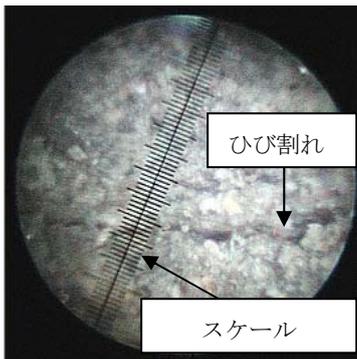


写真-5 ひび割れ幅の計測状況

4.2 注入材の充填状況確認試験

(1) 蛍光材を添加した注入材の物性試験結果

表-5 に蛍光材を添加した樹脂系注入材の物性試験結果を示す。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る。

蛍光材を添加したポリマーセメント系注入材の物性

試験結果は表-6 に示すとおりである。フレッシュ時の性状であるスラリー流下時間は、蛍光材の添加に伴い粘性が増加するため流下時間が長くなる傾向にあるが、ひび割れ充填性能の大幅な低下はない。硬化後の物性である圧縮強さ、曲げ強さおよび接着強さは、蛍光材の添加による影響はさほどないが、添加率 3% となるといずれの試験結果も強度低下が見られる。

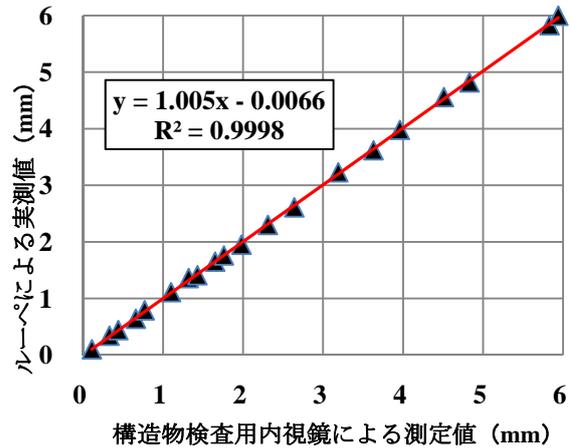


図-2 横ひび割れ供試体のひび割れ幅測定における構造物検査用内視鏡による測定値とルーペによる実測値との関係

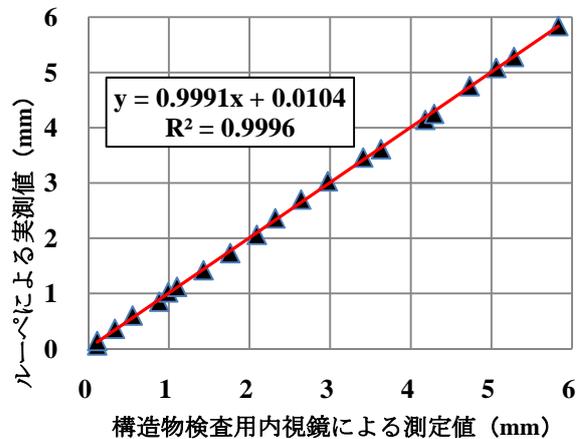


図-3 縦ひび割れ供試体のひび割れ幅測定における構造物検査用内視鏡による測定値とルーペによる実測値との関係

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

(2) 小型供試体を用いた注入材の充填状況の確認試験結果

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% である。なお、右側の画像は光源を白色 LED ライトとし撮影したものであり、左側の

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す

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。白色 LED ライトが光源の場合は、僅かに樹脂系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 ライトを光源とした場合は、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と同じである。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周辺のモルタル部がほぼ同色であるためである。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が、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。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、注入材の付着状況の評価もできることが明らかとなった。

図-4 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実測値に対する構造物検査用内視鏡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 +0.05mm 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 0.1mm 未満となった。本測定における最大誤差は -0.13mm であるが、注入材の像が明確に判別しにくいものであった。

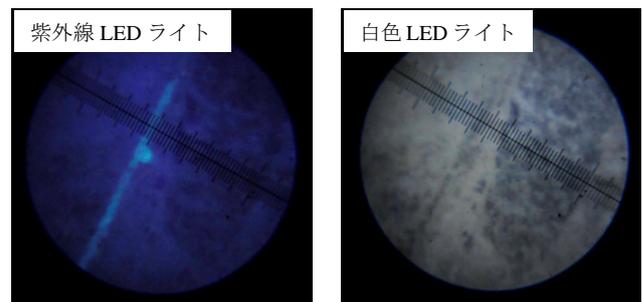


写真-6 蛍光材を添加した樹脂系注入材の模擬ひび割れ部の画像

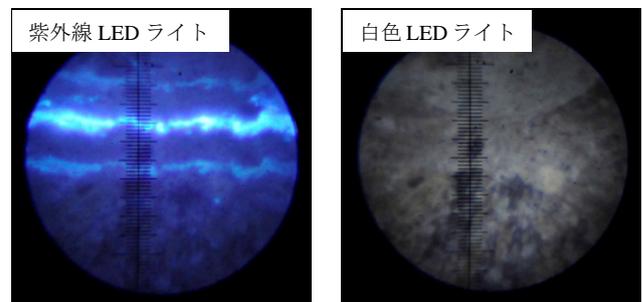


写真-7 蛍光材を添加したポリマーセメント系注入材の模擬ひび割れ部の画像

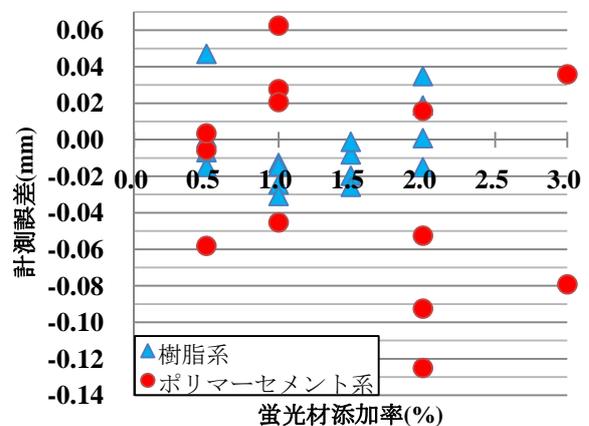


図-4 ルーペによるひび割れ幅の実測値に対する構造物検査用内視鏡測定値の誤差

表-7 実橋における注入材の充填状況確認試験結果

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
			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	

※充填状況の欄において○印は注入材の位置が確認できたもの

(3) 実橋における注入材の充填状況の確認試験結果

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撮影した画像の一例である。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況を確認することができた。

表-7 は、実橋における注入材の充填状況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 箇所の充填状況の確認を行ったが、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。供試体は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。ルーペの実測結果との誤差は+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。

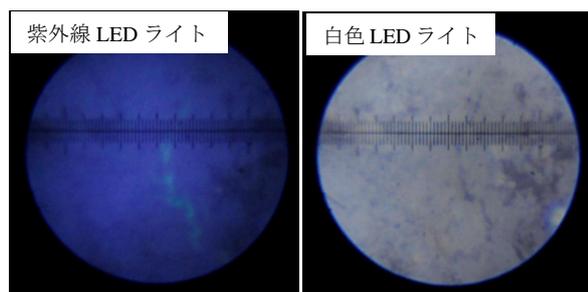


写真-8 実橋における蛍光材を添加した樹脂系注入材のひび割れ部の画像

5. まとめ

本実験より得られた結論を要約すると以下のとおりとなる。

(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検証した。

(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となった。

(3) 小型供試体を用いた充填状況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。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、注入材の付着状況の評価もできることが明らかとなった。

(4) 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充填し、構造物検査用内視鏡により充填状況の観察を行った。その結果、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充填状況を把握でき、本装置の現場適用性を確認することができた。

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。