プラスティック製光ファイバによる 充填検知システムの開発

横田 泰宏1*・山本 拓治1・小泉 悠1・芥川真一2・井本 厚3・道上 剛幸3

¹鹿島建設株式会社 技術研究所(〒182-0036東京都調布市飛田給二丁目19-1番地) ²神戸大学大学院 工学研究科市民工学専攻(〒657-8501兵庫県神戸市灘区一丁目1番地) ³株式会社ケー・エフ・シー 技術研究所(〒347-0010埼玉県加須市大桑一丁目19番地) *E-mail: yokotaya@jkajima.com

矢板工法により施工されたトンネルは,覆工背面と地山間に空洞が残りやすく,変状の発生をもたらす 可能性がある.対策として,裏込め注入が実施されるが,確実な注入管理方法が課題とされてきた.一方, 新設覆工コンクリートの打設管理に,振動センサや電気伝導度の変化を検知する充填検知装置が適用され ているが,センサ,計測システムとも高価であり,多点での計測管理は難しい.そこで,安価で多点計測 可能な充填検知システムの構築を目標とし,プラスチック製光ファイバによる充填検知システムを開発し た.本研究では,室内試験と新設トンネル覆工コンクリート充填確認試験および既設トンネル覆工背面空 洞への注入状況確認試験を行い,新システムの有効性を検証することができた.

Key Words : Plastic optical fiber, Filling detection techniques, Low-cost, Injection behind the lining

1. はじめに

矢板工法により施工されたトンネルは、覆工背面と地 山との間に空洞が残りやすく、そのようなトンネルでは しばしば変状が発生する.そこで、変状対策として、覆 工背面への注入(裏込め注入)が計画的に実施されてい る.裏込め注入を管理する上で、第一に、空隙を残さな いことが重要である.さらに、ひび割れが発生している 覆工や巻厚不足の覆工においては、覆工に過大な注入圧 力が作用しないよう管理することが求められる.従来の 充填管理方法では、隣接する注入管からのリークや注入 圧力の上昇により、注入完了(充填)と判断していた. しかし、このような管理方法では、空隙を残す可能性が 高く、より確実な方法が求められてきた.

充填管理を確実に行うために、近年、新設トンネルに おける覆エコンクリートの打設管理では、振動センサや 電気伝導度の変化を検知する充填検知装置が適用される ケースが増加している.これらのシステムを既設トンネ ルの覆工裏込め注入の管理手法として用いることも可能 と考えられるが、これらのセンサや計測システムは高価 であり、多点での計測管理は難しいと言える.そこで、 安価で多点計測可能な充填検知システムの構築を目指し、 プラスチック製光ファイバによる充填検知システムを開 発し、その適用性を検証した. 本研究では、まず初めに、一般にトンネルの裏込め注 入に用いられる注入材料(セメント系、ウレタン系)に 対する充填検知の精度を室内試験により確認した.次に、 従来の振動センサとの検出能力を比較することを目的と し、新設の覆工コンクリート打設中のコンクリート充填 状況確認試験をトンネル施工現場にて行った.最後に、 室内試験および現場実験から、有効性が検証された本シ ステムを採用し、既設トンネル覆工背面空洞の注入状況 の確認を行った.

2. 充填検知システム概要

本実験で用いた光ファイバは、高速大量通信回線や計 測で用いられるガラスファイバ製の光ファイバではない. 光を送受信する安価で曲げに強いプラスチック製の光フ ァイバであり、ファイバ先端での光の強度と色のみを利 用する^b.システムは、光源、光を送信するファイバ、 光を受信するファイバ、受信ファイバ先端部の光の強度 と色を表示及び記録するパソコンで構成される(**写真**-1).また、光送信ファイバと受信ファイバの先端部を 加工し、対面型センサ・反射型センサの2種類の光セン サを選択することができるようにした(**表**-1).

(1) セメント系材料

塩ビ管(ϕ 150mm)の内面側部に対面型センサ・反射 型センサを取り付け,水で満たした塩ビ管の底部からモ ルタルを注入した(写真-2).光の送信・受信ファイ バ先端間の離れ(以下,送受信離れdとする)を,セン サ1は1mm,センサ2は4mm,センサ3は7mmとし,比較 検討することとした.光強度と経過時間の関係を図-1 に示す.ここで,光強度とはシステムに組み込まれたカ ラーセンサのデジタル出力値(最大値7092)である.モ ルタル注入による濁度の変化に伴って光強度は低下し, モルタルが光センサ取り付け箇所に到達することで光強 度が0へと急減する傾向が,反射型センサ1を除くセンサ で認められた.反射型センサ1は,送受信離れが小さす ぎ,光強度を正しく計測できなかった.

その他のセンサでは、送受信離れを短くするほど、充 填前と後での光強度の差(コントラスト)が大きくなり、 濁り~充填までの状況をよく把握できた.従って、セメ ント系材料を対象とする場合、対面型は送受信離れ1mm, 反射型は送受信離れ4mmが適当と考えられる.

(2) ウレタン系材料

模擬空洞(鋼製型枠+透明アクリル板1,000mm× 1,000mm×300mm)に対面型センサを取り付け,発泡性 ウレタン(2液性の40倍発泡ウレタン)を底部から注入 した(写真-3).セメント系材料の試験と同様,送受 信離れをセンサ1は1mm,センサ2は4mm,センサ3は 7mmとした.光強度と経過時間の関係を図-2に示す.

センサ1は、充填前より光強度が不規則に変化し、充 填により一旦0となった後、光強度が再上昇する傾向が 見られた.これは、黒色で溶液状のウレタンが送受信間 を充填し、光を一旦遮断したものの、その後の発泡によ る体積膨張に伴って密度が低下し、光が再び透過し始め たものと考えられる.センサ2は、送受信離れが比較的 大きいため、光は透過しなかったと考えられる.以上、 ウレタン系を対象とする場合、対面型センサの送受信離 れは4mm程度が良いものと考えられる.

以上,上述した2つの試験結果より,次のことが確認 できた.

- 裏込め注入材(モルタル・ウレタン)が光センサに 到達した際,光強度は0へと急減した.
- ② 対面型センサ・反射型センサともに、送受信離れを lmmとした場合、光が強すぎたり、不規則な値を示 すことから、4mm程度が適当と考えられた。

これより、本システムがトンネルの裏込め注入の充填 検知に有効であることが確認できた.



写真-1 プラスティック製光ファイバによる充填検知システム

表-1 製作した光センサ概要



写真-2 モルタル充填状況(センサ2が強度0となった時点)



図-1 モルタル充填試験での光強度と経過時間の関係

3. 覆エコンクリート充填検知試験

既設トンネル覆エコンクリートの裏込め注入管理を確 実に行うためには、近年、新設トンネル覆エコンクリー ト打設時の充填管理で用いられる振動センサや電気伝導 度の変化を検知する充填検知装置を適用することも可能 と考えられるが、一般的にこれらのセンサや計測システ ムは高価であること、また、センサは埋設されてしまう ことなどから、多点での計測管理は難しいと考えられる。 そこで、室内試験より有効性が確認できた安価で多点計 測にも適したプラスティック製光ファイバによる充填検 知システムが、従来センサと同程度の検出能力があるこ とを確認することができれば、本システムの有効性は更 に向上するものと考えられる。

本章では、本システムを用い、新設覆工コンクリート 打設中の充填状況の確認を行うとともに、従来型センサ との比較検証を行った.

(1) 試験概要

図-3は、充填検知試験を行った覆工コンクリート1ス パンの平面図である(縦断方向L=10.5m、トンネル径 =11.2m). 同図に、光センサおよび振動センサを設置し た位置を拡大図として併記する. 図中、□で示した位置 は、コンクリート吹上口である. 未充填となる可能性が 高いと予想される天端4箇所にセンサをそれぞれ設置し た(地点①~④). 吹上口付近は、より充填されにくい であろう、吹上口と既設側端部間にセンサを設置した (地点①).

光センサは、対面型と反射型のうち、対面型センサを 用いた.センサ間隔は、前章の室内試験の結果をふまえ て離隔4.0mmと設定した.写真-4は、防水シート上に 貼りつけた光センサの拡大図である.本試験では、薄い 金属板にファイバをあらかじめ接着させたものを光セン サとして用いた.現場では、防水シートを水拭きした後、 両面テープでこの金属板を貼りつけた.光センサおよび 振動センサともに、ケーブルがたわまないように、モニ タリングする方向へ導き、それぞれ両面テープで固定し た.写真-5は、シート台車上でのセンサ設置状況であ る.各センサ設置完了後、試験前の動作確認を行い、正 常に機能することを確認した.

(2) 試験結果

図-4は、地点①~④までの試験結果である。光セン サの結果を見ると、吹上口に近い地点①②から時間の経 過とともに妻型枠側へコンクリートが順番に充填され、 光強度が0~と急減した状況が良く分かる.振動センサ による充填確認時刻と比較すると、数分の違いは見られ るものの、地点①②③は、ほぼ同時刻に充填が完了した









写真-4 設置した光センサ



写真-5 センサ設置状況(シート台車上)

ことを示した. 僅かな違いではあるが,光センサの方が 充填反応を早く示す傾向があることも見てとれる.

地点④は、両者の示す充填完了時刻が大幅に異なった が、その原因は、光センサの反応直後に、コンクリート を打設し終わり、次のアジテータ車が到着するまで、コ ンクリート打設を中断したためである.追加でコンクリ ートを打設した直後に振動センサが反応したことから、 光センサ側が反応した時には、振動センサ側には僅かに コンクリートが届いていなかったものと考えられる.

本試験では、全ての地点において光センサおよび振動 センサのどちらも適切に充填状況を捉えており、充填検 知能力としては、両者ともにほぼ同等であると評価でき る.一方で、地点①②③の結果では、光センサの方が若 干早く充填状況を捉えており、センサの特性上、感度と しては良好である可能性が指摘できる. 今後、この観点 で、定量的な考察を加え、評価していく所存である.

以上の結果より、プラスチック製光ファイバによる充 填検知システムを用いることで、従来とほぼ同等の充填 検知能力、同等以上の感度を確保しながら、安価で多点 計測可能なシステムを構築することができたと言える.

4. 既設トンネル覆工背面裏込め注入工への適用

前章までに説明したように、室内試験および新設トン ネル覆エコンクリート充填検知試験から、プラスティッ ク製光ファイバによる充填検知システムの有効性を確認 することができた.本章では、既設トンネルの覆工背面 空洞注入工事において、確実な注入管理を行うことを目 的とし、本システムを適用し、その有効性を確認した.

(1) 試験装置

使用した光センサの送信部と受信部は、表-3のよう に加工した設置台を用いた対面型センサを採用した.そ の光センサ設置台をガイド部材(VP50, HT20)上部に 一部切欠きを設け設置した(図-5, 6).ウレタン注入 用のセンサは、ガイド部材からも材料を注入できるよう、 ガイド部材の数か所に充填材が漏出できる φ 10mmの開 口部を設けた.また、センサケーブルは、管の外側を這 わせて設置した(写真-6).エアモル用のセンサは、 ガイド部材からの注入を行うことはないと想定されたた め、センサケーブルをガイド部材内に通すことで、セン サを圧迫しないよう設置した(写真-7).ガイド部材 の背面空洞への設置状況は、空洞部の高さを確認した後 に取り付けたため、光センサは空洞部の天端に設置でき るようになっている.



図-4 プラスティック製光ファイバセンサと振動センサの比較

表-3 センサ設置台



(2) 試験結果

実証試験例として、A, Bの2トンネルで行われた試験 結果を示す. 表-3は、それぞれのトンネルの充填工法、 充填材、光センサ数の一覧である.

各トンネルにおける試験結果を以下に示す.

・Aトンネル

図-7は、本トンネルにおける裏込め注入区間 (L=37.1m)である. 図中に示す●地点に光センサガイ ド管を挿入し、○地点から可塑性エアモルタルを注入し た. 光センサは空洞の天端に取付け、注入対象範囲が確 実に充填されていることを確認した. 裏込め注入は、一 次孔であるL7から順番に左側へ(L6, L5…L1)進み、 その後、二次孔の注入を行った.

図-8は、光センサによる充填状況確認結果である. センサ3は、L7から22.6m³注入した時に反応した.セン サ2は、L4から6.9 m³注入した時に反応し、センサ1は、 同じくL4から29 m³注入した時点で光強度が0となった. 計測中に一部光強度が低下した箇所が見られるが、モニ タリング側でセンサ部以外のケーブルを圧迫した際に、 このような低下が発生したことを確認している.

・Bトンネル

Bトンネルでは,確実な限定注入を行うことを目的とし,ウレタン注入工(12倍発泡)が採用された.



図-5 ウレタン用センサ 図-6 エアモルタル用センサ



写真-6 ウレタン用センサおよびガイド管



写真-7 エアモルタルセンサおよびガイド管

図-9は、ウレタン注入を行った区間の一部であり、
図中の○地点から番号順に注入を行った. 図-10は、光
センサによる充填状況確認結果である. 同図より、5
つのセンサ全てにおいて、光強度が0に急減したことを
確認した. センサの取付け位置は、空洞の天端であるた
め、確実な空洞充填が行えたと判断できた.

以上の結果から,注入材がエアモルタルおよびウレタ ンのどちらであっても,新しく開発したプラスティック 製光ファイバによる充填検知システムの有効性を現場施 工により確認することができた.今後,本システムを既 設トンネルのリニューアル工事に用いることによって, 確実な注入管理を行うことができ,結果として高品質な 施工を行うことにつながるものと考えられる.

表-3 裏込め注入仕様およ光びセンサ設置数

トンネル	充填材	ガイド 部材	センサ 数
А	エアモルタル	VP50	3本
В	ウレタン (12倍発泡)	HT20	9本







図-8 エアモルタル充填状況確認結果(Aトンネル)



図-9 注入位置と光センサの配置図(Bトンネル)



5. まとめ

本研究では、安価で多点計測可能な充填検知システム の構築を目標とし、プラスチック製光ファイバによる充 填検知システムを開発した.室内試験と2つの現場試験 より得られた知見を以下にまとめる.

- ・室内試験より
 - ・注入材(モルタル・ウレタン)が光センサに到達した際,光強度は0へと急減した.
 - ・対面型センサ・反射型センサともに、送受信離れを

1mmとした場合,光が強すぎたり,不規則な値を示す ことから,4mm程度が適当と考えられた.

- ・ 覆エコンクリート充填検知試験より,
 - ・従来の振動センサと比較し、同等の検知能力でコン クリート充填状況を把握できることを確認した.
 - ・感度は従来センサより良好である可能性が指摘できるため、今後定量的な評価を加える計画である。
- ・既設トンネル裏込め注入状況確認試験より,
 - ・製作した特殊ガイド管を用い,エアモルタルおよび ウレタン注入材の注入状況を把握でき,確実な注 入管理手法として用いることができることを確認 した.

最後に、プラスチック製の光ファイバは他のセンサに 比べ、価格のみならず、耐薬品性・曲げへの柔軟性にも 優れているため、厳しい現場環境でも計測が可能であり、 従来技術よりも経済的な多点計測を実現できると考えら れる.本システムを今回例示したような、既設トンネル のリニューアル工事に用いることで、確実な注入管理を 行えるようになり、高品質な施工にも貢献できると考え られる.また、リニューアル工事だけでなく、新設覆工 コンクリート打設、廃鉱山坑道の充填、薬液注入等の現 場でも適用が可能である.今後も、現場への適用や新し い分野での実証実験を行い、本システムの有効性を検証 していく所存である.

参考文献

- 西尾彰宣,松本優平,高橋厚志,町島祐一,芥川真 ー:光ファイバを用いた低コストモニタリング手法 に関する基礎的研究,第 13 回岩の力学国内シンポジ ウム予稿集, pp.33~37, 2013.
- 2) 山本拓治、伊達健介、小泉悠、井本厚、道上剛幸、 芥川真一、西尾彰宣:プラスチック製光ファイバに よる覆工背面空洞の充填検知システム、土木学会第 70回年次講演会、VI-323、pp.645~646、2015.

DEVELOPMENT OF FILLING DETECTION TECHNIQUES USING PLASTIC OPTICAL FIBER

Yasuhiro YOKOTA, Takuji YAMAMOTO, Yu KOIZUMI, Shinich AKUTAGAWA, Atsushi IMOTO and Takayuki MICHIGAMI

It has become more important to inspect and reinforce old existing infrastructures including tunnels in Japan. As part of these recent trends, particular attention has been paid to grouting method behind a tunnel lining using air mortar and polyurethane. Nevertheless, studies on proper management method for injection behind a tunnel lining are sparse. Therefore, the authors have developed low-cost grout filling detection techniques using plastic optical fiber. This paper presents results of laboratory test and two field experiment. From these results, newly-developed techniques are confirmed as high accurate and effective method.