

補強鉄筋区間の覆工への高充填コンクリートの適用と検証

Application of High-filling-concrete to Lining Concrete of Tunnels

山田 浩幸*1 Hiroyuki Yamada	為石 昌宏*1 Masahiro Tameishi	富澤 直樹*2 Naoki Tomisawa
斎藤 泰信*3 Yasunobu Saitou	寺西 克彦*3 Katsuhiko Teranishi	後藤 裕一*4 Yuichi Goto

要旨

覆工コンクリートの流動性を高めることにより充填性の向上を図り、トンネルの覆工コンクリートの品質および耐久性を向上させる「高品質高充填覆工コンクリート工法 K-F T L」を開発し、四国横断自動車道焼坂第二トンネル工事へ適用した。現場適用時の配合設計、施工時の型枠への配慮、長期材齢での追跡調査および工事竣工時のトンネル覆工初期点検結果について報告する。

キーワード：山岳トンネル 中流動覆工コンクリート 高流動性 高品質高耐久性

1. はじめに

近年、社会インフラを構成するトンネルなどのコンクリート構造物について、長寿延命化により維持管理の合理化を図り、ライフサイクルコストを低減することが強く求められるようになってきている。すなわち、構造物の重要な構成要素であるコンクリートの高品質化・高耐久性化が必要となってきた。特に山岳トンネルでは覆工コンクリートのはく落事故発生を契機に、新設トンネルの覆工コンクリートに対して、地山の変状（崩落、変位量の増大、未収束等）や、充填不足による空洞等などの構造的な欠陥、あるいは品質管理上の問題などに起因するひび割れ等や、第三者への被害を与えるはく離・はく落に対する社会的関心が高まり、これまで以上に覆工コンクリート施工時の品質の確保や耐久性の向上が重要となってきた。

これらの社会的要請に応えるため、当社は、覆工コンクリートの流動性を高めることにより充填性の向上を図り、トンネルの覆工コンクリートの品質および耐久性を向上させる「高品質高充填覆工コンクリート工法 K-F T L」を開発し、西日本高速道路株式会社四国支社“四国横断自動車道焼坂第二トンネル工事：(株)鴻池組・西武建設(株)特定建設工事共同企業体”において初めて適用した。本報告では、現場適用時の配合設計、施工時の型枠への配慮、打設後1年でのひび割れ等の不具合調査結果、コア供試体の強度試験などの結果について報告する。

2. 適用現場の工事概要

2.1 四国横断自動車道の概要

四国横断自動車道は、阿南市を起点として、徳島市、高松市、高知市、宇和島市を経由し、大洲市に至る延長約441kmの路線である。このうち須崎新荘～窪川間は、新直轄方式により整備され、一般国道56号線須崎道路を介し、須崎東で供用中の四国横断自動車道と接続する。

この区間の整備は高規格幹線道路ネットワークの機能強化、および東南海・南海地震等による災害時の代替路としての役割を担うとともに、高知県西南地域の発展に重要な役割を果たすものと期待されている。焼坂第二トンネル工事は、かつおの一本釣りで有名な中土佐町に計画された中土佐インターチェンジ近くに位置する。

2.2 工事概要

焼坂第二トンネル工事は、2本のトンネル（和田トンネル：L=156m、焼坂第二トンネル：L=920m）と明かり工事（切盛土工22万m³）とで構成される。

表1に工事概要を示す。

3. 覆工コンクリート新技術の適用

3.1 工法の目的

焼坂第二トンネル西坑口部の補強鉄筋区間（DⅢa：L＝

*1 大阪本店 土木技術部 *2 本社 土木本部工務管理部 *3 大阪本店 土木部 *4 高槻市(元：大阪本店 土木技術部)

79m)において、以下の目的で、高い流動性をもつコンクリートを用いた覆工「高品質高充填覆工コンクリート工法」を適用した。

①流動性の高いコンクリートを用いることで、これまでトンネル覆工コンクリートの課題とされてきた天端部の充填不足による空洞、ジャンカ、あるいはコールドジョイント等の欠陥の発生を抑制することとし、補強鉄筋区間で、その充填性と施工性の向上効果を確認した。

②強度増加による、地山の変形に起因する覆工変状発生への抑制効果と耐久性向上効果を確認した。

3.2 工法概要

今回の焼坂第二トンネルの設計配合は、T1-1 ($\sigma_{28}=18\text{N/mm}^2$ 、スランプ $15\pm 2.5\text{cm}$ 、 $G_{\text{max}}=40\text{mm}$)である。この配合のうちセメント量を増加した T3-2 ($\sigma_{28}=30\text{N/mm}^2$ 、スランプ $15\pm 2.5\text{cm}$ 、 $G_{\text{max}}=20\text{mm}$)相当をベースとして、単位水量、単位セメント量、および細骨材率を同一とし、スランプ $18\pm 2.5\text{cm}$ (以下、「S18」とする)とスランプフロー $40\pm 5\text{cm}$ (以下、「F40」とする)の異なる流動性を持つ2種類のコンクリートを配合設計した。繊維補強材の添加は、設計配合と同様に行っていない。

この2種の配合では、より流動性の高いF40の方が充填性に優れるが、型枠に作用する圧力が大きいこと、およびコストが高いことが課題となる。そこで、トンネル覆工用型枠(以下、セントルと称す)の補強を不要とするとともに、コスト低減を図るために、打ち始めからアーチ肩部までをS18、アーチ肩部から天端部打ち終わりまでをF40を使用して、同スパン内で流動性状の異なるコンクリートを使い分けて打ち重ねた。

3.3 配合上の特徴

配合上の特徴を以下に示す。

①(株)高速道路総合技術研究所において開発が進められている中流動覆工コンクリートの要求性能(案)¹⁾に準拠した。

②所定の性状が得られるように単位結合材量を調整し、高性能AE減水剤((株)フローリック SF500)を用いて単位水量の低減を図ることで、優れた流動性と分離抵抗性を併せ持ったコンクリートとした。

③単位水量、単位セメント量、および細骨材率S/aを変化させることなく、高性能AE減水剤の添加量の調整のみによりスランプ

表1 工事概要

工事名称	四国横断自動車道 焼坂第二トンネル工事	
工事場所	高知県高岡郡中土佐町久礼	
工 期	2006/3/28~2009/3/11	
発注者	西日本高速道路株式会社 四国支社	
施工者	(株)鴻池組・西武建設(株)特定建設工事共同企業体	
工事内容	明かり工事	切土: 22万 m^3 , 盛土: 10万 m^3 , 補強土壁工: 387 m^2 C-BOX: 1基 (L=41.7m)
	トンネル延長	和田トンネル 156m, 焼坂第二トンネル 920m
	トンネル断面	掘削断面積: 81.2 m^2 , 仕上り内空断面積: 72.3 m^2
	掘削工法	NATM, 補助ベンチ付き全断面掘削工法(発破掘削), ショートベンチ工法(機械掘削)

値15cmからスランプフロー値45cmまでの広い範囲のコンシステンシーを自在に調整、管理することが可能な配合とした。

④今回の適用では、膨張材を添加することにより収縮補償コンクリートとした。膨張材は(株)デンカ パワーCSAタイプRを使用した。

⑤粗骨材の最大寸法は20mmとし、鉄筋区間での充填性向上に配慮した。

⑥コンクリートに使用する材料は、通常の生コン工場・設備で供給できるものを用いた。

⑦フライアッシュ、石粉、あるいは補強繊維などの混和材を用いる配合への変更が容易に対応できるものとした。

表2に配合条件を、表3に配合表を示す。

膨張材の添加量は、土木学会コンクリート標準示方書構

表2 配合条件

項目	コンクリートの種別	流動化覆工コンクリート (F40)	高スランプコンクリート (S18)
	粗骨材最大寸法(mm)		20
スランプ(cm)		21 ± 2.5	18 ± 2.5
スランプフロー(cm)		45 ± 7.5	-
L型フロー (mm)	無振動	260以上	-
	振動	振動後500mmから750mmまでの振動到達速度6.4cm/s以上かつ750mm以上流動して分離がないこと	-
U型充填性高さ [障害無し] (mm)		280以上	-
空気量(%)		4.5 ± 1.5	4.5 ± 1.5

表3 配合表

種類	W/P (%)	S/a (%)	単 位 量 (kg/m ³)						
			W	C	EX	S	G	SP	AE剤
F40	47.3	47.0	175	350	20	802	929	5.18	3.5A
S18	47.3	47.0	175	350	20	802	929	2.96	2A

P; 結合材(C+EX), EX; 膨張材, SP; 高性能AE減水剤

造性能照査の収縮ひずみの算定式に基づき、今回の配合での収縮ひずみの最終量を以下のように想定し、設定した。

①湿度 60%での養生条件による供試体 (100×100×400) の収縮量算定値 (参考)

$$\varepsilon'_{sh①} = 779 \mu$$

②覆工実物寸法での収縮量算定値

$$\varepsilon'_{sh②} = 230 \mu$$

③膨張材を 20kg/m³ 添加した配合に対する、JIS A 6202 に準拠した試験結果

$$\text{膨張率} = 203 \mu \text{ (材齢 7 日、平均値)}$$

これらの結果より、③の試験結果は、②実物での収縮量算定値をほぼ相殺しており、収縮補償コンクリートとし適用できるものと判断した。

3.4 打ち重ねの事前確認試験

3.4.1 事前実証実験

本工法は流動性の異なる S18 と F40 を打ち重ねることに特徴があるが、これまで覆工コンクリートの実施工においては流動性の異なる 2 種類のコンクリートを打ち重ねた事例は報告されていない。そこで、明かり構造物における高流動コンクリートと普通コンクリートの打ち重ね施工の事

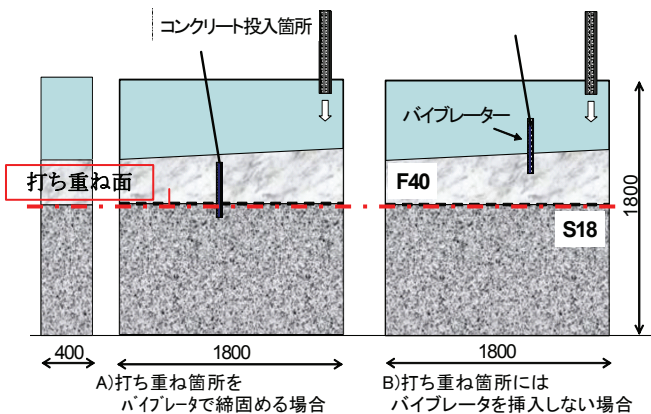


図 1 施工実験モデル図

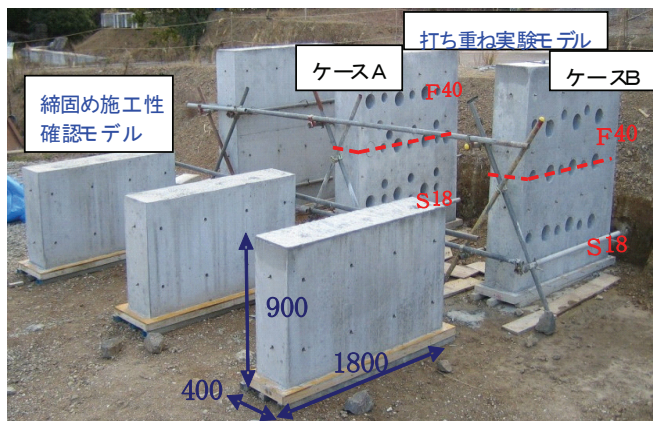


写真 1 事前実証実験供試体

例²⁾³⁾ や土木学会での覆工打ち重ねに関する研究の発表論文⁴⁾ を参考として、模擬型枠を用いた実証試験により、打ち重ねる各々のコンクリートの強度特性、一体性、および仕上がりなどに問題がないことを確認することとした。

打ち重ね部に関しては、図 1、写真 1 に示すように、打ち重ね部を含めてパイプレータで十分に締固めを行った場合 (ケース A) と、打ち重ね部にパイプレータを挿入せずかつ振動時間を 1~3 秒程度としてほとんど締固めを行わない場合 (ケース B) の 2 ケースについて試験を実施した。なお、打ち重ね部のコンクリート打設方法は実施工に合わせ、生コン車の入れ替え等の時間ロス 10 分を考慮した。

3.4.2 試験結果

1) 圧縮強度・割裂引張強度

供試体採取位置および試験箇所を図 2 に、試験項目とその結果の一覧を表 4 に示す。

圧縮強度試験は JIS A 1108 に、割裂引張強度試験は JIS A 1113 に準じた。打ち重ね部を含んだ供試体 (写真 2) を含めて、締固め方法やコンクリートの配合 (流動性) に関わらず、圧縮強度 (材齢 28 日コア供試体、φ 100mm) は 48N/mm²

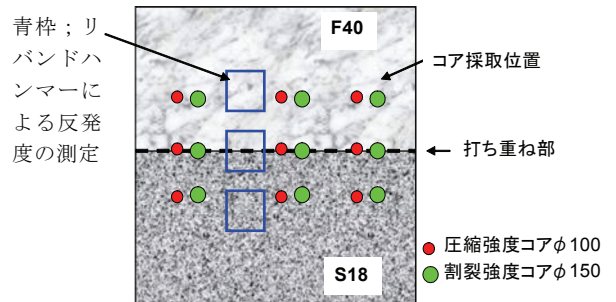


図 2 供試体採取位置および試験箇所

表 4 試験項目および試験結果 (平均値)

試験項目	ケース	F40 部	打ち重ね部	S18 部
圧縮強度 (N/mm ²)	A	48.7	47.4	48.3
	B	48.8	48.7	47.5
割裂引張強度 (N/mm ²)	A	3.66	3.48	3.56
	B	3.68	3.70	3.50
リバウンドハンマー反発度	A	39.2	40.3	38.9
	B	38.9	41.0	39.4

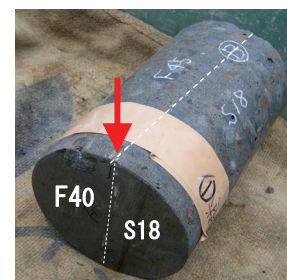


写真 2 割裂引張強度試験用コア状況 φ 150 (打ち重ね部) ↓ 矢印は割裂荷重方向を示す。

程度、割裂強度（同上、φ150mm）は 3.6N/mm² 程度であった。打ち重ねの影響はなく均一な状態であることが確認できた。以上のことにより、実構造物へ適用しても構造の一体性・均一性は確保できるものと判断した。なお、試験結果からはパイブレータによる締固めをほとんど行わなくてもよい結果となったが、実施工においてはパイブレータを十分に使用することとした。

2) 線膨張係数

打ち重ね試験時に採取したコアの線膨張係数の長期測定を実施した（写真3）。本試験においても、打ち重ね部を含んだ供試体を含めて、締固め方法やコンクリートの配合（流動性）に関わらず、材齢 91 日、180 日において線膨張係数 = $8.56 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ が得られた。したがって、現地の覆工についても S18、F40 および打ち重ね部で温度変化による有害な応力の発生はないと考えられる。



写真3 コア供試体の養生、および線膨張係数測定状況

3.5 現場への適用

写真4に、現場適用時の受入れ検査状況写真を示す。本施工時には(株)高速道路総合技術研究所の中流動覆工コンクリート開発担当の馬場氏の立会いを受けた。いずれも、所定の品質のコンクリートを受け入れることができた。

3.5.1 実施工時の圧力測定

図3に、セントルの設計荷重条件、配合の切替位置、および圧力測定位置を示す。セントルの構造計算は、図中の荷重条件を考慮し、コンクリート圧力（側圧）はコンクリート標準示方書の圧力（側圧）算定式を準用し設計荷重とした。本工法では流動性の高いコンクリートを使用するため、圧力が設定よりも高くなることが懸念された。そこで、S18を対象とするSL部と2段目部、およびF40を対象とする肩部の計3測点で圧力を測定した。なお、コンクリートの打設速度は、コンクリート打込み温度を考慮しセントルの設計荷重を超えない速度とした。

3.5.2 圧力測定結果

圧力測定は、高品質高充填覆工コンクリートに対して NO.2~7 の 6 スパンで、標準配合に対して NO.9 と NO.12 の 2 スパンで実施した。高品質高充填覆工コンクリート、および標準配合コンクリートの測定結果の一例を、それぞれ図4、および図5に示す。図中の実線折れ線は、コンクリート圧力が液圧分布で作用すると仮定した場合のSL部の圧力計算結果で、実際の打上り速度を基に計算した値である。

1) 高品質高充填覆工コンクリート

SL部の圧力は、打上りに応じて圧力も増加し、ほぼ設計荷重で一定となる。打設終了までに設計荷重を超えた圧力は作用していない。

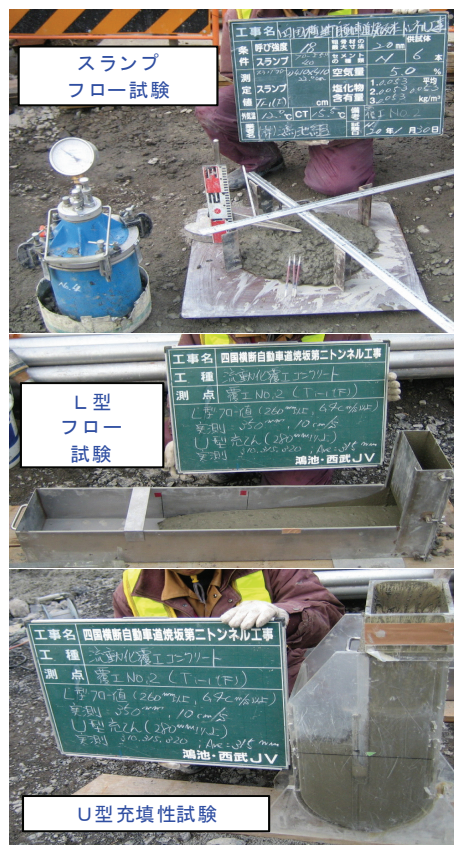


写真4 受入れ検査状況

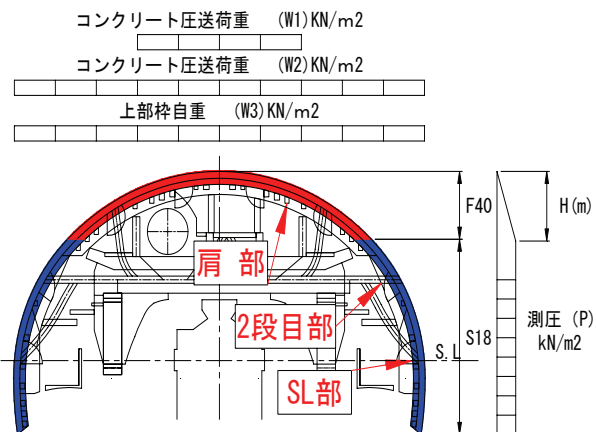


図3 セントルの設計荷重条件、配合の切替位置および圧力測定位置

2段目部の圧力もSL部と同様な傾向を示すが、SL部より圧力が高い傾向にある。配合を切替えた後に、一部設計荷重を越えた。また、標準配合に比べて、5割ほど大きい値を示した。肩部の圧力は、打設終了までに設計荷重を超えることはなかった。

いずれの測点も、打設終了後に圧力が増える傾向を示している。これは、膨張材による影響と推測される。

2) 標準配合

SL部の圧力は、打設終了前にわずかに設計荷重を超えた。2段目部、および肩部の圧力は、打設終了まで設計荷重を超えることはなかった。

3.5.3 圧力測定結果の考察

肩部までのS18使用区間、および肩部から打設完了までのF40使用区間のいずれにおいても、わずかに設計荷重を超えた圧力が測定されている。しかし、セントルの強度計算上は、仮に作用圧力が1.5倍であっても構造部材に生じる応力は労働安全衛生規則上の型枠支保工に使用する鋼材の許容応力度内に収まるため、従来のセントル設計方法で問題はないと判断した。

3.6 長期材齢試験（圧縮強度・静弾性係数・線膨張係数）

打ち重ね試験時に採取した各々部位のコアの長期材齢（材齢360日）での線膨張係数の測定結果、および圧縮強度試験結果を表5に示す。

供試体は、大阪市内において、約1年間、屋外で気中養生していたものであり、貫通したトンネル現場の覆工コンクリートの状態とほぼ同様と考えられる。

平均圧縮強度は、S18が47.3N/mm²、F40が49.4N/mm²であった。

平均静弾性係数は、S18が3.18×10⁴N/mm²、F40が3.26×10⁴N/mm²であった。これらの値はコンクリート標準示方書に記載される強度と静弾性係数の関係式から算出した結果とほぼ一致しており、一般的な範囲に収まっている。また、配合に関わらず、圧縮強度、および静弾性係数共に概ね同様の数値であり、両者には、違いがみられないことから、双方の物性は同一の力学的性状であると考えられる。

平均線膨張係数均は、S18が12.1×10⁻⁶/°C、F40が12.6×10⁻⁶/°Cであり、いずれも、一般的はコンクリートに対して示されている値10×10⁻⁶/°Cと概ね一致している。また、

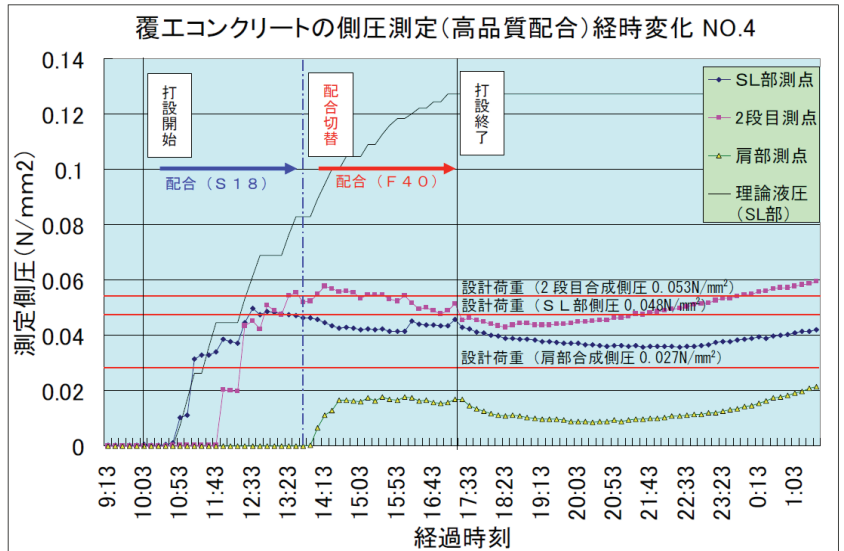


図4 高品質高充填覆工コンクリートの圧力測定結果

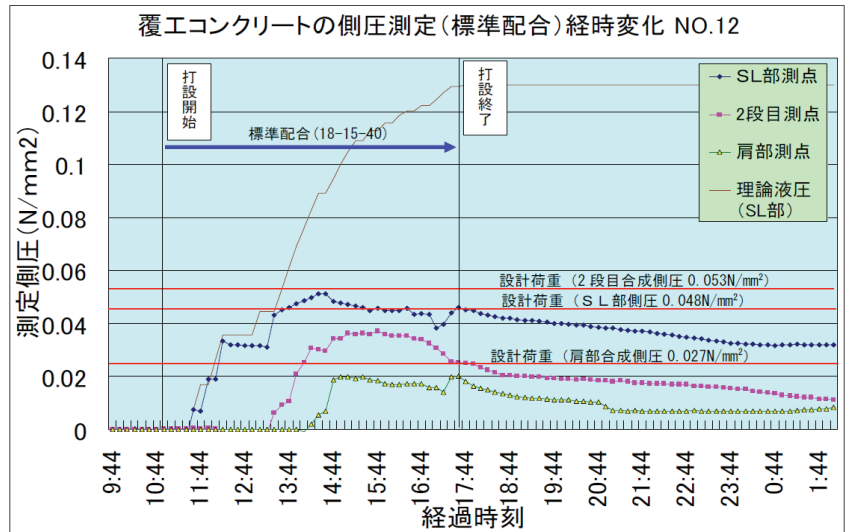


図5 標準覆工コンクリートの圧力測定結果

表5 長期材齢試験結果

	平均線膨張係数 (×10 ⁻⁶ /°C)	平均圧縮強度 (N/mm ²)	平均静弾性係数 (N/mm ²)
材齢	360日	360日	360日
F40	12.6	49.4	32,595
S18	12.1	47.3	31,782

両配合で値に差異がないことから、双方のコンクリートは温度変化の影響に対して一体となり挙動すると考えられる。

3.7 トンネル初期点検結果

本トンネルの竣工引渡し前に、トンネル初期点検として覆工コンクリートの不具合調査を実施した。初期点検は西日本高速道路エンジニアリング四国(株)へ委託し、デジタルカメラを用いた「トンネル損傷計測システム」で行った。

同システムは、以下の方法で覆工コンクリートの初期状態を厳密に記録するものである。

- ①事前に専門の点検員による目視およびハンマー打撃検査を行い、覆工の不具合箇所を白チョークでマーキングし記録する。
- ②高性能な魚眼レンズを搭載したデジタルカメラで1スパン毎にデジタル写真を撮影する。
- ③デジタル歪み補正により展開写真を作成する。
- ④展開写真を元に、発注者の様式に従った記録票を作成する。

表6に、点検結果と補修率をまとめて示す。これらより以下のことが言える。

- ・高品質高充填覆工コンクリート適用区間での不具合は、インバートの拘束による覆工脚部の鉛直ひび割れが4箇所(0.2mm以下)発生しただけである。また、このひび割れは覆工の性能、機能に問題がないため補修を実施していない。このため、未適用区間と比較した場合、補修率が大きく低減している。
- ・肩部から天端部にかけて空洞、はく離、および豆板が発生しておらず、未適用区間と比較した場合、良好な仕上がりが確認できた。

3.8 本工法の効果

以下に、高品質高充填覆工コンクリートを現場に適用した結果、確認できた効果をまとめて示す。

- ①異なる流動性のコンクリートを打ち重ねたが、品質、および仕上がりは均一であった(写真5)。
- ②補修を必要とするひび割れが発生せず、仕上がり・品質に優れた覆工コンクリートを構築できた。
- ③異なる流動性のコンクリートを打設部位で使い分けることで、既存セントルの補強が不要であった。
- ④標準的な覆工コンクリートの施工工程で施工することができた。

本工法の主目的である充填性の向上効果を数値的に評価することは困難であるが、打設時の状況と、覆工作業員へのヒアリングにより、天端部における吹き上げ口からの打設に関して以下のことが明らかとなった。

- ・流動時の抵抗が少なく、吹き上げ口周辺の鉄筋へのコンクリートの回り込みが良い。
- ・短時間のバイブレータ作業でコンクリートが鉄筋背面まで回り込み、締固めの作業性に優れる。
- ・流動性があるが粘性があるため骨材等の分離が見られず、ブリージングがほとんど発生しない。

これらのことより、良好な作業性を有すること、およびその結果として充填性に優れた工法であったと考えられる。

表6 点検結果と補修率

区間	項目	ひび割れ	豆板	はく離	その他	空洞	漏水
未適用 857m	不具合発生	67	30	13	5	1	14
	補修実施	22	42			1	10
	補修率	33%	88%			100%	71%
適用 63m No2~7	不具合発生	4	0	0	3	0	0
	補修実施	0	3			0	0
	補修率	0	100%			0	0

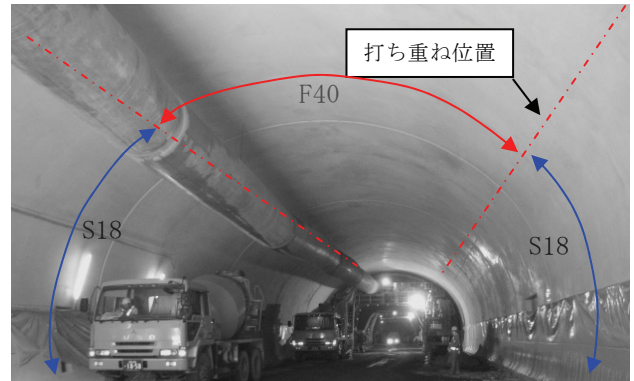


写真5 覆工コンクリートの出来形

4. おわりに

覆工コンクリートの流動性向上による充填性の改善により、補強鉄筋区間の覆工コンクリートの密実性・緻密性が向上し、有害なひびわれの発生を低減できた。また、今回使用した2配合は、打ち重ねても品質に差異を生じず、品質の均一性・一体化に何ら問題がないことを確認できた。

今後、断面変化部、妻部隅角部、箱抜き部などコンクリートの充填性に課題がある箇所へ適用することで、覆工全体の品質・耐久性の向上を図ることができると考えられる。

参考文献

- 1) 馬場弘二、伊藤哲男：中流動覆工コンクリートの開発検討、土木学会第60回年次学術講演会講演概要、6-010、pp.19-20、2005.9
- 2) 安部光史、川上正史：超流動コンクリートと普通コンクリートの打継ぎに関する一考察、土木学会第48回年次学術講演会講演概要、V-175、pp.376-377、1993.9
- 3) 楠見正人、水町実：配水場施設築造における高流動コンクリートの適用、土木学会第58回年次学術講演会講演概要、V-551、pp.1099-1100、2003.9
- 4) 馬場弘二、伊藤哲男、城間博通：トンネル覆工コンクリートの打重ねに関する実験的研究、土木学会論文集NO.735/VI-59、65-74、2003.6