

# 水路トンネルの補修・補強対策

## —サポートライニング工法の開発と施工事例—

岩井孝幸・森 康雄

我が国の水路トンネルは、大きく分けて水力発電所水路トンネルと農業用水路トンネルがあり、そのうち電力用は約4,700 kmに達する。農業用も加えれば数万 kmに達すると考えられる。これらの水路トンネルは、竣工後数十年から50年経過しており、覆工コンクリートの背面空洞、巻き厚不足、ひび割れなどが多く見られる。このため、水路トンネルの機能を損なわない補修・補強対策が望まれている。

本報文は、鋼製支保工によるトンネル補強において超高強度繊維補強コンクリート製埋設型枠を用いた工法（サポートライニング工法）の開発と施工事例について述べる。

キーワード：水路トンネル、補修、補強、超高強度繊維補強コンクリート、サポートライニング工法

### 1. はじめに

水路トンネルの現状は、覆工コンクリートの劣化対策や剝落防止対策だけでなく本格的な覆工補強へのニーズが高くなってきている。

水路トンネルの果たすべき役割は、トンネル内の流水をロスなくスムーズに流下させることにあり、以下の要求事項が指摘されている<sup>1)</sup>。

- ①トンネルの構造が安定なこと（構造物安定）
- ②流水抵抗が小さいこと（低粗度係数,  $n$ ）
- ③トンネル内の流水が所定以外の箇所から漏出しないこと（防水性）
- ④その他（保守の利便性、圧力トンネルの場合には内水圧に耐えうること等）

これらの要求事項を満足するためには、次のような検討が必要になる。

①については、構造物が安定していない場合、覆工内面補強を行うことにより内空断面が小さくなるため、所定の通水量を確保できる工法の選定が重要となる。

②については、材料の選定が重要となる。モルタル及びコンクリートの粗度係数は、 $n=0.013\sim 0.014$ 程度であるが、さらに粗度係数が低い材料を使えば有利になる。

③については、トンネルが地下水位より高い位置にある場合であるが、地下水位より低い位置にあるトンネルは、漏水対策が必要になる。供用年数が長い既設の水路トンネルは、漏水と共に土砂を流出させトンネ

ル背面に空洞を生じさせ安定性を損なう原因になる。

このように、水路トンネルの補修・補強は、立地条件、トンネルの構造（昭和50年代以前は矢板工法）、通水量、通水停止期間など諸条件により検討課題が異なる。

### 2. トンネル補強工法（サポートライニング工法）の開発

水路トンネルの覆工補強としては既に鋼板補強や鋼製支保工+内巻工が実施されているが、以下に示すような問題点がある。

- ①鋼製の支保材は、錆びが発生する。
- ②内巻工に普通コンクリートを用いると表面が摩耗しやすい。
- ③搬入口が狭いと材料等の搬入、施工が困難となる。
- ④溜まり水や漏水箇所では、材料分離するためコンクリートの品質が確保できない。
- ⑤支保工の組立てが煩雑であり、スライドフォーム+鋼製支保工の工法は経済性、施工性に劣る。

上述の課題を解決するために株式会社熊谷組（以下、当社）では、サポートライニング工法を開発した。

#### （1）開発のコンセプト

本工法開発のコンセプトを表1に示す。水路トンネルでは一定期間送水を止めて補修・補強を行うことが多く、資機材搬入用の立坑や坑口が少なく、周辺は狭隘な山岳地帯であるため、人力による施工が可能な

表一 トンネル補強工法開発のコンセプト

要求性能	課 題
内空断面の確保	できる限り内空断面の縮小を避けるため補強厚を小さくする。
トンネル内側面の耐久性の向上	水流などによる覆工表面の摩耗を抑制する。
裏込めコンクリートの品質確保	トンネル底版に溜まり水があることを想定して、材料分離抵抗性、水中不分離性を、補強厚さが薄くても裏込めコンクリートが打設できることを前提に、流動性、セルフレベリング性を確保する。
経 済 性	既存の補強工法よりも経済的であることが要求される。

工法であることが望ましい。また、設計流量量の確保は当然であるが、流水等による覆工面の洗掘も防止（抑制）しなければならない。さらに、送水を止めた状態でも、漏水や溜まり水がある環境でコンクリートを打設しなければならない。狭い箇所でも流動性が良く水中分離抵抗性を有するコンクリートが必要となる。

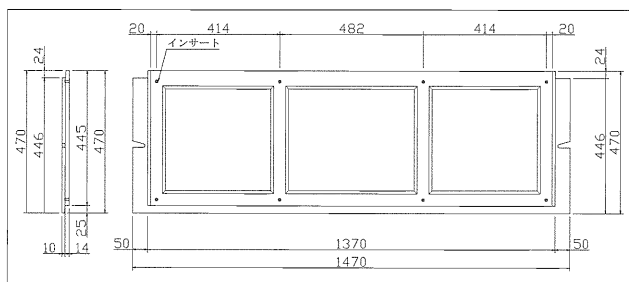
(2) 開発の内容

内巻きコンクリートの打設方法は、打込み型枠方式とし、型枠に使用する覆工板および裏込めコンクリートの開発を行い、鋼製の模擬トンネルを使用して本工法の施工性と補強効果の確認実験を行った。

3. 要素実験

(1) 覆工版の検討

覆工版は、軽量化と薄肉化を目指して超高強度繊維補強コンクリート製のパネルを検討した。実験に使用した覆工板（標準パネル）の形状を図一に示す。



図一 覆工版の形状

覆工板は、幅 1,470 mm、高さ 470 mm、厚さ 10 mm とし、質量約 30 kg と人力施工が可能な大きさとした。また、裏込め材と覆工板の一体性を確保するため覆工版背面にインサートを埋込んだ。

超高強度繊維補強コンクリートは、圧縮強度は約 200 N/mm<sup>2</sup>、曲げ強度は約 50 N/mm<sup>2</sup> である。

(2) 裏込めコンクリートの検討

裏込めコンクリートは、水路トンネルの要求性能を満たすため、粗骨材の最大寸法 ( $G_{Max}$ ) を 10 mm、

水中不分離性混和剤、膨張剤を混入した配合について検討した。基本配合を表二に示す。

表二 裏込めコンクリートの基本配合

材 料	数 量
W/C (%)	35.0
s/a (%)	38.0
単位水量 (kg/m <sup>3</sup> )	205
セメント*1 (kg/m <sup>3</sup> )	586
細骨材 (kg/m <sup>3</sup> )	552
粗骨材 (kg/m <sup>3</sup> )	901
Ad1 (C*%)	0.75~1.0
Ad2 (W*%)	1.75~2.0

\*1 単位セメント量中の 20 kg に膨張剤が含まれている。

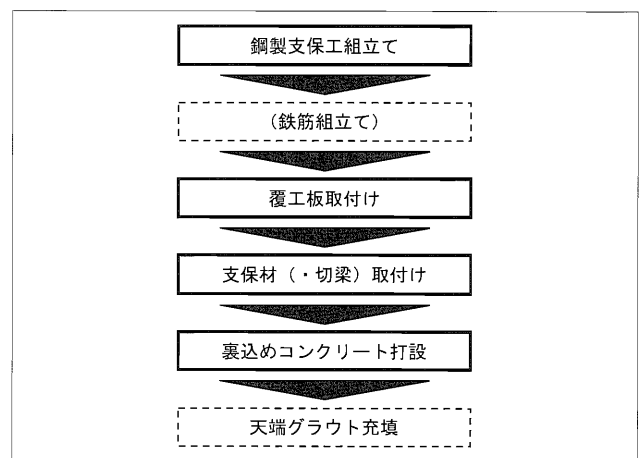
4. 施工性および補強効果の確認実験

(1) 施工性の確認

施工性確認実験<sup>2),3)</sup>で使用した材料の仕様を表三に、補強工法の施工フローを図二に示す。

表三 使用材料の仕様

材 料	仕 様
鋼 製 支 保 工	溝型鋼 (75×40×5×7)×2, φ 1.5 m
鉄 筋	D13, 主筋 (延長方向) φ 150 mm, 配力筋 (断面方向) φ 300 mm
覆 工 板	1,470 mm×470 mm×厚さ 10 mm, 超高強度繊維補強コンクリート製標準パネル (グラウト孔有無・2種類), 天端パネル
支 保 材	角形鋼管□-100×100×3.2
裏込めコンクリート	水中不分離性コンクリート
グ ラ ウ ト	プレミックスモルタル



図二 施工フロー図

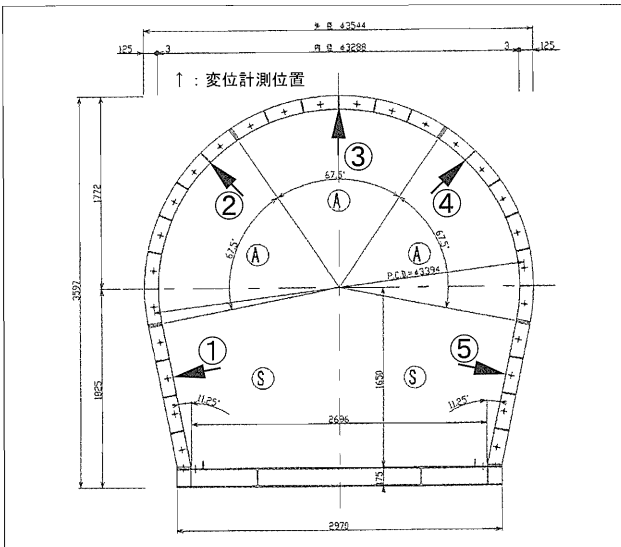
写真一に実験状況を示す。覆工板は、鋼製支保工にあらかじめ溶接で固定したボルトを介して仮止めし、支保材で固定した。この結果、すべての補強を人力で施工できることが確認できた。

(2) 補強効果の確認実験<sup>4)</sup>

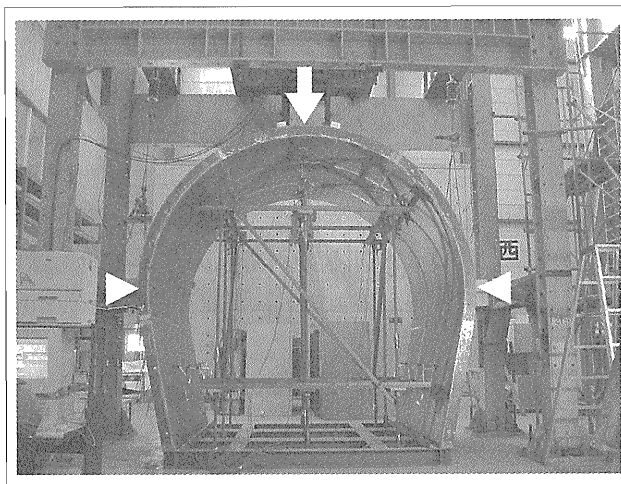
図三に本工法の開発に際して使用した模擬トンネ



写真—1 覆工板の取付け状況



図—3 模擬トンネル組立て図



写真—2 載荷装置および変位計

ルの組立て図を示す。断面形状は馬蹄形で、S型（平面）2枚とA型（曲面）3枚の鋼製セグメントにより構成されている。奥行き方向は1m幅のものを3組

繋ぐことにより延長3mとした。鋼製セグメントは主桁がSM490、その他の部材がSS400材で、セグメント同士は20mm普通ボルトを用いて接合した。

この模擬トンネル単体に載荷するのが「補強前」で、模擬トンネルに補強覆工を施工した後に載荷するのが「補強後」である。なお、補強後の載荷は裏込めコンクリート打設後32日目に実施した。

写真—2に載荷装置を示す。インバートを反力床に設置し、両スプリングラインの水平方向変位をゴム板を介して拘束した。載荷はトンネル頂部軸方向に載荷梁（H-400）を渡し、1,000kNジャッキにより強制変位を与え、一方向単調載荷とした。

### （3）実験結果

サポートライニング工法は、断面積が10~20m<sup>2</sup>のトンネルであれば、鋼製支保工の建込み、覆工板の取付けは人力で施工できることがわかった。

また、粘性が高い水中不分離性コンクリートは、1.5~2.0m<sup>3</sup>/h打設することができ、粗骨材の最大寸法が10mmのコンクリートであっても2インチの配管で打設可能である。

補強後の終局耐力を確認することはできなかったが、補強前後の剛性比較から本補強工法の効果を確認することができた。さらに、実験結果の解析により、既設覆工と補強体の変形メカニズムをシミュレーションすることができた。

## 5. 水路トンネルの補強対策工事（施工事例）

本工事は、中部電力東上田発電所の約50年経過した水路トンネル（延長12,807m）を補修する工事である。この中で、土被りが浅く（6.0m）、河川下に位置する補強区間（71m）は、技術提案型の公募となり、土圧、水圧に耐えられる対策工法の提案を行った。

本報文では、既設覆工のはつりについて実施したウォータージェット工法（ロボット及びハンドガン）の施工方法及び3分割プレキャスト版による補強方法の概要・施工状況について述べる<sup>5),6)</sup>。

3分割プレキャスト版（超高強度繊維補強コンクリート製のパネル）とは、サポートライニング工法の機械化施工方式であり、施工機械搬入坑および内空断面に余裕があるために採用したものである。

### （1）工事の概要

中部電力東上田発電所は、岐阜県の飛騨川上流域に位置し、最大使用水量40m<sup>3</sup>/s、最大出力35,000kW

の中規模な水路式発電所である。本水力発電所は、昭和29年の運転開始以来約50年経過しており、最近の水路点検の結果、導水路トンネルの各所に劣化状況が見られた。本導水路トンネルは無圧トンネルで、水路延長約12km、内径4.42m、覆工厚はアーチ部60cm、側壁部30cmである（表—4）。

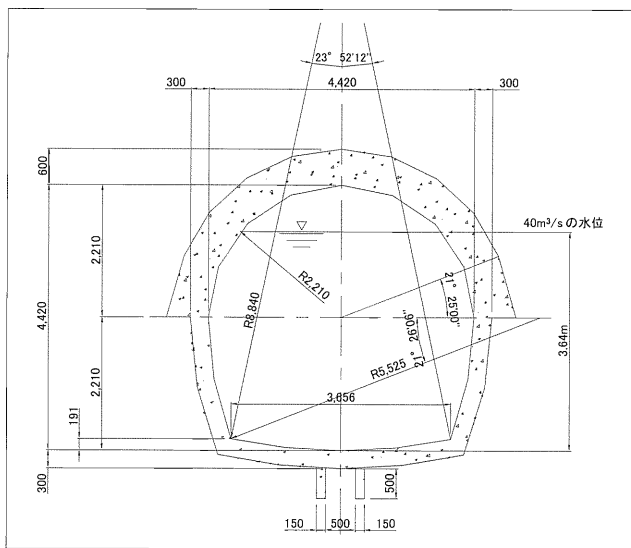
表—4 工事諸元

工事名	東上田発電所水路トンネル修繕工事
発注者	中部電力(株)
工事場所	岐阜県
工期	平成15年10月1日～平成16年3月19日
発電所停止期間	
断水日	平成15年11月25日
発電所停止期間	(水路トンネル内で作業できる期間) 平成15年11月26日～平成16年2月17日(84日間)
通水日	平成16年2月18日
請負者	(株)熊谷組・シーテック・金子工業共同企業体

工事内容及び工事数量は以下に示す。

①工事延長

水路トンネル延長12.807km、トンネル断面を図—4に示す。



図—4 トンネル断面

②水路トンネル補強工

トンネル延長71m、はつり工852.6m<sup>2</sup>、覆工内巻き工71m

③水路トンネル補修工

アーチ・側壁の防水工2,900.0m<sup>2</sup>、亀裂補修500.0m

(2) トンネル補強工法の選定

水路トンネルの補強断面は、以下に示す「基本仕様」が提示された。

①通水能力の確保

- ・仕上がり断面は、旧断面より5cm内側まで許容す

る

- ・仕上がり面の粗度係数は  $n=0.014$  以下とする

②補強に際しての耐力

- ・旧断面から最低5cmは、切削・はつりを実施すること

- ・新旧一体化後の覆工耐力は、許容値内に収まること  
対策工法の選定は、補強に対しての「基本仕様」の他に、下記に示す発注者からの要求事項に対して、すべて満足できる工法を選定し、技術提案を行った。

- ・通水能力を確保するため所定の断面と粗度係数を有すること

- ・導水路トンネルの断水期間を極力短縮すること

- ・地圧、水圧等の外圧に耐えうる強度を有すること

- ・施工期間中のトンネルの安定性を確保すること（はつり作業時の旧覆工体への損傷を最小限に抑え、かつ、はつり厚さを最小限とすること）

- ・既設コンクリートを有効に利用するため、新たな覆工が既設コンクリートと一体となって構造的に作用すること

(a) 既設覆工コンクリートのはつり工法

既設覆工コンクリートは、クラックや湧水等が発生しているが、コンクリートの圧縮強度は21N/mm<sup>2</sup>（設計基準強度18N/mm<sup>2</sup>）程度であり、コンクリート自体の劣化は生じていなかった。

はつり工に対する要求事項は、前項「発注者からの要求事項」に記したとおりである。

施工期間中のトンネル安定性確保については、油圧あるいは空圧式の打撃方式では、既設覆工に対して損傷（マトリックス部分及び粗骨材へのダメージ）が発生すると考えられた。また、はつり深さのコントロールが困難である。

既設コンクリートの有効利用については、新旧コンクリートの一体化を阻害するマイクロクラック<sup>7)</sup>を発生させない工法が必要となる。打撃により既設コンクリート表面部分にマイクロクラックが発生すると、付着力が低下し一体化が損なわれる。東日本高速道路株式会社（NEXCO 東日本）では、付着力を1.5N/mm<sup>2</sup>以上と規定している。

これらの条件を満足する工法として、超高圧水を利用してコンクリートをはつる工法を検討した。

(b) ウォータージェット工法の選定

本工法の特徴を以下に示す。

①ブレーカ、削岩機などの打撃破壊とは異なり、ノズルから噴射された高圧水のエネルギーにより、コンクリートのセメントモルタル部分を破壊するメカニズムであるため、振動が非常に小さく環境問題への

表-5 ウォータージェット工法の種類（コンクリート除去処理）

項目	ハンドガン			機械式							
	中高圧・小流量	中高圧・大流量	高圧・小流量	中高圧・小流量	中高圧・大流量					高圧・小流量	
吐出圧力 (MPa)	85~135	140	250	50~150	70	100	100	100~122	90~138	200	200
吐出量 (L/min)	30~35	80	20	3~22	77	180	180	130~200	83~265	28~35	13.6
動力 (kW)	40~80	180	80	2~55	90	300	300	210~400	120~600	90~110	45
主な実施国	日本	日本	スイス	日本	日本	スイス	スウェーデン	スウェーデン	アメリカ	日本	日本
出典	JACON		Locher社	JH	JH	Locher社	アクアカッター	コンジェット社	NLB社	JACON	JH

■：当社が提案するウォータージェット工法

対応も容易である。

- ②コンクリート構造物に与える変形、ひずみ、残留応力が少なく、マイクロクラックもほとんど発生しないため、新旧コンクリートの一体化が容易である。
- ③適切な圧力、流量をコントロールすることにより、鉄筋を傷めずにコンクリートの変状部分だけを除去する選択的なコンクリート除去処理が可能である。
- ④圧力の調整によって、対象物の塗膜や付着物だけを除去することが可能である。
- ⑤対象物とノズルが接触しないため、機械の遠隔操作化が容易で、自由な曲線・曲面の作業が可能で、さらに均一な施工品質が得られる。

ウォータージェット工法の概要及び特徴より、コンクリート除去処理工法が発注者の要求事項を満足していると判断し、同工法を採用した。

今回採用したウォータージェット工法は、「コンクリート除去処理」に相当するが、この工法は、表-5に示すように多くの種類がある。このため、現場での施工条件（はつり深さ 50 mm）等を考慮して工法を選定した。

工法は、機械方式と人力方式（ハンドガン）の併用工法とした。機械方式は、自動化、遠隔操作ができるため、高圧、大流量即ち高エネルギーの作業ができ、大規模施工に適している。

ハンドガンは、機械方式でコンクリート除去ができないデッドエリアの補助施工並びに部分的な補正作業に適している。機械方式は、坑内での作業性を優先して、小型で当社での施工実績もある表-5に示すスウェーデン製のアクアカッターを採用し、ハンドガンは、作業員の操作性が良く、後方設備の容量が小さい中高圧・小流量のタイプを選定した。

(c) トンネル補強工法の選定

トンネル補強工法は、ウォータージェットによるはつりと並行して先受け防護工を施工し、3分割プレキャスト版を建込み、裏込めコンクリートを打設する工法を選定した。

先受け防護工は、既設覆工コンクリートを 5 cm はつることにより断面欠損が発生し、覆工の耐荷力が減

少する。このため、地圧に対抗する防護工が必要となる。水圧に関しては、湧水を遮断しないため発生しないと考える。施工方法は、側壁部のはつりを先行させつつ、後続のアーチ部はつりと先受け防護とを組合わせて行う。すなわち一般的なトンネル掘削と同様にはつりと支保の繰返しで施工する。鋼製支保工は、建込み間隔 1.0 m で BH-100×50×12×9（高耐力 SS540）を使用する。5 cm のはつり深さに合わせるため高さ 50 mm、幅 100 mm の支保工を特注した。

トンネルの補強方法は、スライドセントルを使用した現場打ち覆工コンクリートを検討したが、巻厚 10 cm のコンクリートを打設することは困難であり、また工期短縮に寄与しない。このような施工条件では、打込み型枠方式が有利と考えられた。打込み型枠に使用するパネルは、補強材として使用するため、超高強度繊維補強コンクリートを採用しパネル化を行った。パネルの強度特性を表-6に示す。

表-6 パネルと高強度コンクリートの強度特性

	パネル	高強度コンクリート
密度 (g/cm <sup>3</sup> )	2.56	2.40
圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )	210	60
曲げ強度 (N/mm <sup>2</sup> )	45	9
引張強度 (N/mm <sup>2</sup> )	9	4

超高強度特性を有する材料をパネル化することの利点は、

- ①パネルの厚さを 30 mm に薄肉化できること
  - ②パネル表面は平滑で既設コンクリートに比べ粗度係数 ( $n=0.013$  以下) が低いため、通水能力を大幅に改善することができること
  - ③通水能力を改善できることにより、既設コンクリートのはつり幅を軽減できること
- などである。

写真-3に3分割プレキャストパネルを示す。

(d) ウォータージェット工法によるはつり工

ウォータージェットによるはつり作業は、アーチ部及び側壁部に関しては機械方式（以下、ロボットと呼ぶ）で施工を行い、根足部は人力方式（ハンドガン）で行った。これは、根足部より 1.0 m 上がりの範囲を

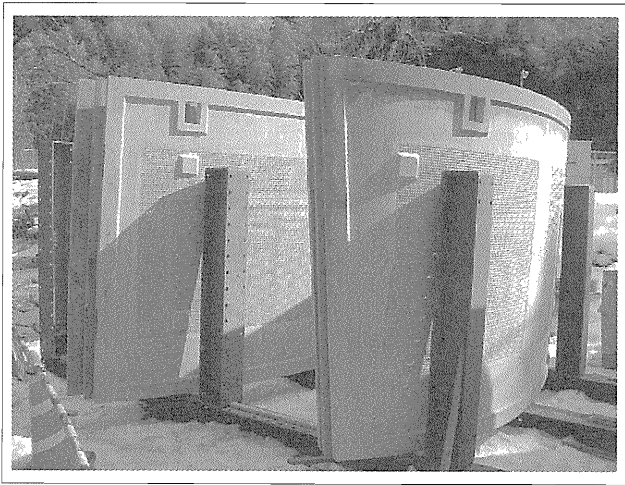


写真-3 プレキャストパネル



写真-5 パネル組立て状況

ロボットで施工できなかったためである。

ロボットは1組、ハンドガンは2組の組合わせで、当初昼間だけの並行作業を予定していたが、作業サイクルが合わないために、ロボットを昼間、ハンドガンを夜間作業として工程を確保した。写真-4に現場はつりロボットの施工状況を示す。

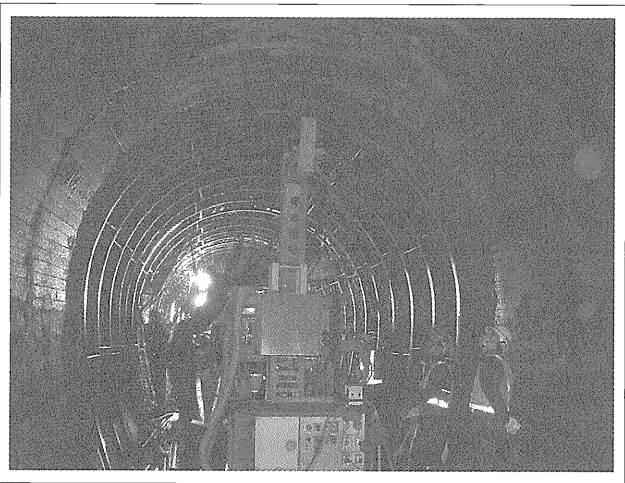


写真-4 ロボット使用現場はつり状況

#### (e) トンネル補強工

プレキャストパネルは、両側壁、頂版3分割でそれぞれに専用の取付け機械で運搬・設置を行った。1日当たりの施工は、3リング(2m×3リング=6m)の予定であったが、途中から工期確保のため、昼夜作業に変更し4リングの施工を行った。

裏込めコンクリートの打設は、シンテック社製(MKW-10SVH)のコンクリートポンプを使用し、生コン運搬は、キャリアダンプを改良してアジテータを搭載したものをを使用した。打設足場は、キャリアダンプに単管で足場を組み、移動式として使用した。写真-5にパネル設置状況を、表-7に施工実績を示す。

表-7 施工実績

全体施工数量	810.0 m <sup>2</sup> (施工延長 72.0 m : 36 リング)
1 リング (3 分割)	L=2.0 m, 22.5 m <sup>2</sup> (1 枚当たり約 7.5 m <sup>2</sup> )
パネル重量	側壁部 : 640 kg 頂版部 : 690 kg
パネル設置実績 (コンクリート打設含む)	14 日間, 2.6 リング/日
打設回数	10 回 (3 リング及び 4 リング毎)
打設時間	6 時間

#### (f) 施工結果

本工事は、平成 15 年 11 月 26 日から平成 16 年 2 月 17 日までの発電停止期間内(84 日間)に無事故・無災害で竣工させることが要求されている工事であった。実際には、平成 16 年 2 月 9 日に無事竣工し、8 日間の工期短縮を行うことができた。

ウォータージェット工法による既設コンクリートのはつり工は、劣化したコンクリートの損傷を抑制しながら所定の深さまではつることができた。この工法は、ポンプの設置場所、給水方法等が問題となる。特に、搬入経路が限られ、小断面の水路トンネルでは、機械設備の小型化が求められる。

## 6. ま と め

本報文は、水路トンネルの現状と補強対策について述べた後、株式会社熊谷組が開発したサポートライニング工法について報告した。今回の開発は人力施工を対象としたが、施工条件に恵まれたため、施工事例は機械化施工によるサポートライニング工法の紹介になった。この工法自体は、汎用性のある工法であるため、あらゆる施工条件にも対応できると考えられるので、今後施工実績を伸ばしていきたい。

超高強度繊維補強コンクリートパネルを用いた補強工法は、新しい材料を使用した工法であったが、その

特性を最大限に活用し、補強工法として確立することができた。施工性においては、組立て機械の改良、パネルの分割数・継ぎ手方法の改良等により異なる断面・施工条件にも対応できる工法として改善していきたい。

#### 《参考文献》

- 1) 土木学会岩盤力学委員会：トンネルの変状メカニズム，(社)土木学会，pp.7-8，2003年9月
- 2) 石川高志，松尾久幸，森 康雄，岩井孝幸：トンネル補強工法の開発(その1)―トンネル補強工法の提案と室内試験結果―，土木学会第59回年次学術講演会講演概要集，VI-340，2004年9月
- 3) 野中 英，佐藤孝一，金森誠治，森 康雄，岩井孝幸：トンネル補強工法の開発(その2)―裏込めコンクリートの配合および施工実験―，土木学会第59回年次学術講演会講演概要集，VI-341，2004年9月
- 4) 森 康雄，岩井孝幸，濱田 真，緒方明彦，石川高志，松尾久幸：トンネル補強工法の開発(その3)―トンネル補強前後の載荷実験―，土木学会第59回年次学術講演会講演概要集，VI-342，2004年9月
- 5) 織田晃治・小林 憲・光川 健(中部電力株式会社)：「水路トンネル改修におけるRPCを用いたPcaパネルの適用」，平成16年度土木学会全国大会第59回年次学術講演会，第VI部門6-134，2004.9.10

- 6) 駒谷恒雄，淵上幸彦，土井亮太，上西一成，植松澄夫，岩井孝幸：「合理的なトンネル補強対策工法の技術提案と施工」，熊谷組技術研究報告，No.63，pp.145-152，2004
- 7) 紫桃孝一郎・上東 泰・野島昭二・吉田 敦(日本道路公団試験研究所)：「ウォータージェット技術を利用した新旧コンクリート構造物の一体化処理」，コンクリート工学テクニカルレポート，Vol.38，No.8，pp.40-54，2000.8

J C M A

#### 【筆者紹介】

岩井 孝幸(いわい たかゆき)  
株式会社熊谷組  
土木事業本部  
環境・リニューアル技術部  
部長

森 康雄(もり やすお)  
株式会社熊谷組  
土木事業本部  
環境・リニューアル技術部  
副部長

## 橋梁架設工事の積算

——平成18年度版——

### ■内 容

国土交通省の土木積算基準，建設機械等損料並びに材料費・労務費の改正等に併せて内容の改訂・補充を行いました。

主な項目は以下のとおりです。

- (1) 架設用機械損料及び機械設備複合損料の改訂
- (2) 施工歩掛の新規及び一部追加掲載
  - ・歩道橋及び側道橋架設工
  - ・PCバイプレ工法セグメント桁の主桁組立工，及び同場所打桁の圧縮鋼材工
  - ・コンクリート床版の炭素繊維補強工法
  - ・その他(鋼床版吊り金具切削工，敷鉄板設置工，検査路用足場・アンカーボルト設置工，橋名板・高欄・排水設置工，PCコンボ橋床

版の側部足場設置工等)

- (3) 施工歩掛の改正
  - ・諸雑費率(主桁全断面溶接工，補修工事等)
  - ・補修コンクリートアンカー工
- (4) その他
  - ・TEG工法の紹介
  - ・工種内容の説明補足

■B5判 約1,100頁(カラー写真入り)

### ■定 価

非会員：8,400円(本体8,000円)  
会 員：7,100円(本体6,800円)  
送 料：会員・非会員とも  
沖縄県以外 700円  
沖縄県 450円(県内に限る)

※学校及び官公庁関係者は会員扱い

## 社団法人 日本建設機械化協会

〒105-0011 東京都港区芝公園3-5-8(機械振興会館)

Tel. 03(3433)1501 Fax. 03(3432)0289 <http://www.jcmanet.or.jp>