

水路トンネル補修工法の開発

Development of Effective Waterway Tunnel Repair Techniques

青木 義治・

Yoshiharu AOKI

A lot of hydro-electric power plants in Japan are noticeably aged, which have been operated for more than 50 years. The headrace tunnels among others are remarkably deteriorated by wearing and scouring. In the repair of waterway tunnels narrow and covering a long distance, difficulties have been encountered in terms of operation efficiency, cost performance and safety. We developed several tunnel repair techniques, aiming at solving such problems, that feature a systematized work sequence with mechanized and automated repair steps. They are put into practical use, contributing to reducing the period and cost of waterway tunnel repair projects. Development, overview and work records of the techniques will be discussed in the speech.

Keywords : tunnel repair, rapid work, robotized work, rapid hardening concrete, chipping robot,
TSL robot, TSL method, CIC method

1. はじめに

近年、我が国においてトンネルや橋梁などのコンクリート構造物の劣化に起因するトラブルが社会問題化している。このことは、社会資本である土木構造物の多くが今やメンテナンスの時代に入っていることの現れである。明治以来から建設され稼働を続けてきた多くの水力発電設備についても同様に老朽化が進んでいる。水力発電は原子力発電や火力発電に比べて起動や停止が容易なこと、また耐用年数が長いなどの特徴を活かして電力の安定供給の面で重要な役割を果たし、最近ではCO₂排出量の抑制効果が期待できるクリーンな純国産エネルギーとして再認識され、今後も継続して補修を行い機能を維持していくことが望まれている。しかしながら、水力発電設備のうち特に摩耗や洗掘等の劣化、変状が顕著である水路トンネルの補修工事においては、狭隘で長い作業範囲という現場条件であることから作業性、経済性、安全性の面で問題を有している。このような問題を解決するため、一連の補修作業を機械化、自動化することにより工事のシステム化を図った数種の水路トンネル補修工法を開発した。これらの水路トンネル補修工法は、実際の現場での実証試験により性能を確認した後、実用に供して水路トンネル補修工事の迅速化、低廉化等に効果を発揮している。また、現在では地下空間を創造する様々なトンネル構造物の維持、補修に応用可能な技術として期待されている。本稿では、これまでに開発した水路トンネル補修工法の開発経緯と概要および施工実績等について述べる。

キーワード：トンネル補修，急速施工，ロボット化施工，急硬性コンクリート，はつりロボット，

TSLロボット，TSL工法，CIC工法

* 正会員 技術士 鉄建建設㈱ エンジニアリング本部 技術企画部 課長

2. 水力発電所水路トンネルの現状

我が国の水力発電の歴史は古く、明治 23 年に琵琶湖疎水を利用した蹴上発電所が事業用として初めて運転を開始して以来、自家用発電も含めて約 1,770 カ所の水力発電所が建設されている。これらは、大正末期から昭和初期に建設されたものが多く、経年 50 年以上を経過する発電所は約 70% 以上を占め設備全般に老朽化が進みつつある。この水力発電設備のなかで、河川または貯水池などから水を取り入れて発電所に導いたり、使用後の水を河川に放流するための水路トンネルは総延長約 5,600km に及んでおり、経年による覆工コンクリートやインバートコンクリートの材質劣化、摩耗、洗掘、ひび割れ等の変状による粗度係数の悪化等により必要最大水量の確保が難しい状況が生じている。このため、変状の程度が著しいものから順に発電を停止して随時補修工事が行われているのが現状である。水力発電所水路トンネルの建設推移調査結果を図-1 に、また、建設年代別のクラック、敷洗掘、側壁・アーチ洗掘等の変状実態調査結果を図-2 に示す。

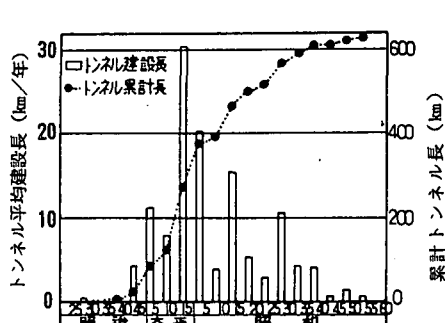


図-1 水路トンネルの建設推移（東京電力）

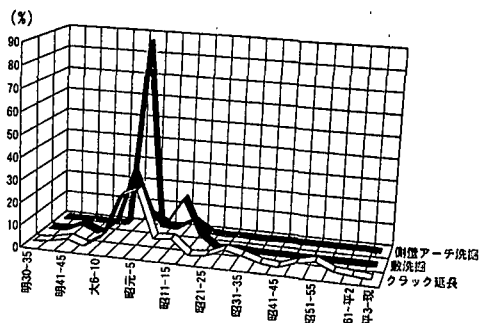


図-2 建設年代別の変状実態（中部電力）

3. 開発経緯

水路トンネルの補修工事は、既設コンクリートの劣化の程度や通水断面の余裕の有無等の状況に応じて巻替えや内巻きなどの補修方法がとられている。施工は人力を主体とした作業で行われており、ピックハンマまたはブレイカによるコンクリートはつり方法では能率や精度が悪い。また、覆工においても普通コンクリートの打設方法では薄肉施工や巻厚調整が難しく、吹付けコンクリートでは強度のバラツキや仕上り面の粗度が悪いなどの種々の問題がある。さらに、狭隘な現場条件のため作業性が悪く、安全管理にも十分な注意が必要なことから長い工事期間を要し工事費もかさむなどの問題を抱え、補修工事の省力化や迅速化が望まれていた。このような問題を解決するため、トンネル覆工全周を補修する「トンネル補修ロボット工法」を東京電力㈱と、またインバート部分を専用に補修する「水路インバート急速補修工法」を中部電力㈱と共同開発し、さらに小断面トンネル用として「小断面トンネル補修工法」を独自に開発した。これらのトンネル補修工法の開発経過を図-3 に示す。

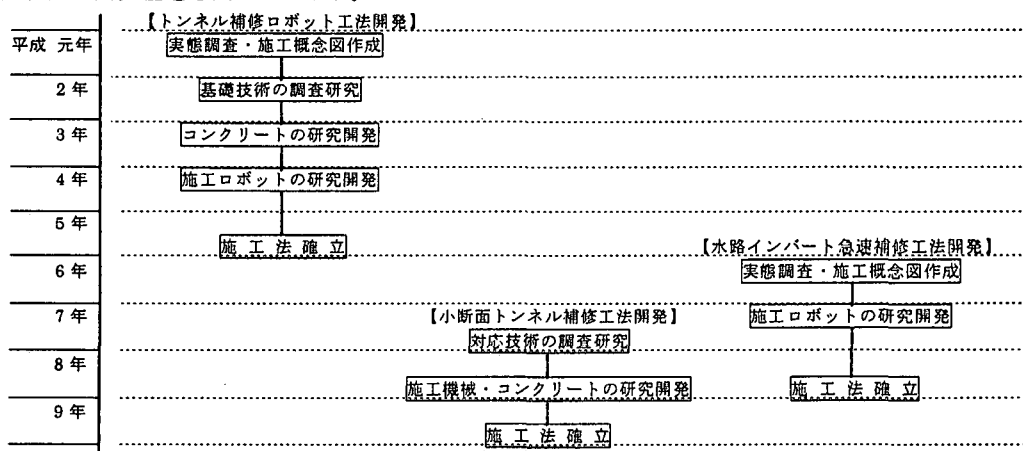


図-3 トンネル補修工法の開発経過

4. トンネル補修ロボット工法

4-1. 概 要

各発電所によって水路トンネルの断面形状や規模が種々異なるほか、通水断面の余裕の有無や劣化の程度によって内巻き、あるいはコンクリートはつりと内巻き併用等の補修方法が採用される。このため、既設コンクリートはつり作業と覆工コンクリート打設作業を各々個別に機械化し、両作業が連携して一体的に稼働する補修システムとした。そのうちの覆工コンクリート打設作業の機械化について、NATMにおけるコンクリート吹付け時の粉塵、はね返し防止を目的として開発されたTSL工法を応用することとし、水路トンネルの実態調査結果を分析して図-4に示すようなトンネル補修ロボット工法を構想し開発した。この工法は、種々のトンネル断面に対応可能でかつ機動性、操作性に優れた施工ロボットにより補修作業の機械化を図り、施工能率の向上や作業員の安全確保および作業環境の改善を可能とするものである。施工は、覆工表面の劣化した部分をコンクリートはつりロボットではつり取った後、コンクリート打設ロボット（TSLロボット）により高強度、高品質の覆工を形成して行われる。対象トンネル断面については、補修の必要性が高くかつ総延長の約70%以上を占める範囲を想定して内径2.50m～4.80mの馬蹄型および幌型断面と設定した。開発にあたっては表-1のように開発目標を設定して具体的な方策を定め、各種要素技術の開発、改良により実現させた。

表-1 開発目標と具体的方策

開発項目	開発目標	主な具体方策
はつりロボット	- はつり速度: 0.5m²/min以上 1回のはつり深さ: 0～10cm - はつり精度: ±20mm以内 - 発生粉塵量: 2.0mg/m³以下 - 操作の遠隔化, 自動化	- 横軸ツインカッタを採用してトンネル内周方向に旋回 - カッタドラムの回転動力に出力49kWのモータを採用 - カッタビットの配列間隔縮小およびアームの伸縮と旋回をコンピュータで自動制御 - アーム先端に散水装置を装備 - カッタヘッド位置を画面に表示して遠隔リモコン操作
TSLロボット	- 覆工打設速度: 0.3m²/min以上 - 施工サイクル: 120min/1サイクル以下 1回の打設厚さ: 5～40cm - 平滑な仕上がり面の確保 - 操作の遠隔化, 自動化	- 特殊配合の急硬性コンクリートを開発 - 伸縮アームによる移動型枠旋回方式の採用およびクローラ走行装置の装備 - 特殊ノズルを開発 - ポリウレタン質ベルトの採用及びアーム伸縮, 旋回とベルト回転, 押付力の同調を自動制御 - 打設時のアーム伸縮, 旋回および移動型枠の制御を遠隔リモコン操作
TSLコンクリート	- 初期硬化特性: $\sigma_{1h} \approx 1.0\text{N/mm}^2$以上 $\sigma_{24h} \approx 7.0\text{N/mm}^2$以上 - 一軸圧縮強度: $\sigma_{28} \approx 30.0\text{N/mm}^2$以上 - 引張強度: 1.0N/mm²以上 - 付着強度: 0.3N/mm²以上	- 急結剤と遅延剤の2種混合タイプのスラリー急硬剤を開発 - 配合条件 (W/C=57%, S/A=70%, C≈3.8kN/m³) - 付着面の清掃および吹込み打設方法の採用

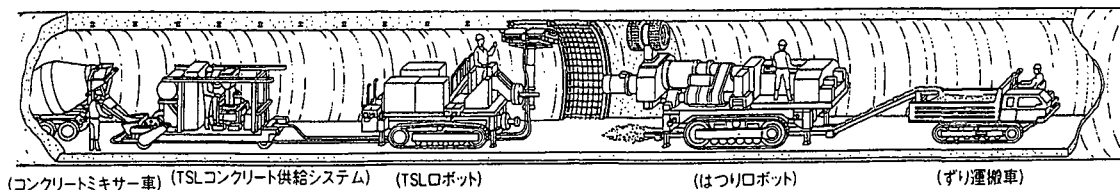


図-4 トンネル補修ロボット工法概要図

4-2. TSL (Tunnel Swift Lining) 工法

TSL工法は、図-5に示すようにトンネルの円周方向に移動するベルト式移動型枠と既設コンクリート面との間にノズルにより急硬性の高流動コンクリート（TSLコンクリート）を順次吹込み、その硬化速度に合わせてベルト式移動型枠を上昇移動させ、迅速に覆工を形成する工法である。このTSLコンクリートは、先に吹込んだコンクリートが流動性を保持している間に次のコンクリートを吹付け打設することにより一体化した覆工を形成する。施工は、左右の側壁部を順に打設した後、最後に天端部を打設して併合する手順で行われる。

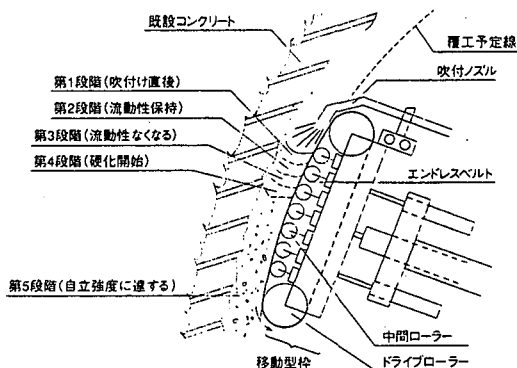
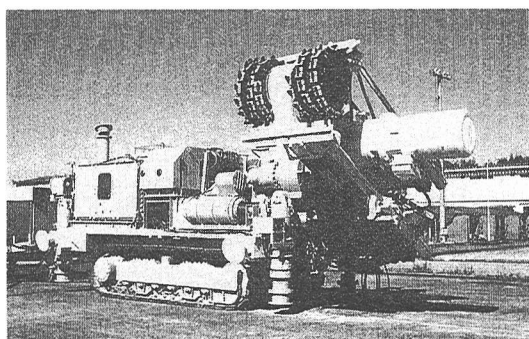


図-5 TSL工法の覆工メカニズム

4-3. 既設コンクリートはつり作業の機械化（コンクリートはつりロボット）

従来の機械的はつり技術であるブームヘッダ、チップングマシン、ショットブラスト、ウォータージェットについて基礎的実験を行い、その結果からはつり能力、はつり精度、はつり面平滑度、粉塵発生、覆工コンクリートに与える振動、衝撃等について総合的に実用化の可能性を検討し、最もはつり能力が優れかつ制御が可能と考えられたブームヘッダによるはつり方法を基本技術としてロボット化を行った。現状のブームヘッダは、新設トンネルの地山掘削機械として設計されているためはつり能力は十分であるが、トンネル補修工事に適用する場合には、はつり精度や粉塵発生およびはつり時の既設コンクリートに与える振動軽減等に対する改善が必要であり、各種の予備実験結果等を踏まえてコンピュータ制御による横軸ツインカット方式としてコンクリートはつりロボットを開発した。コンクリートはつりロボットの全景および仕様を写真－１、表－２に示す。



写真－１ コンクリートはつりロボット

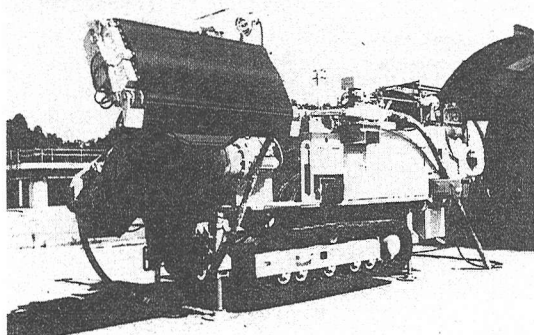
4-4. 覆工コンクリート打設作業の機械化

(1) コンクリート打設ロボット（TSLロボット）

覆工コンクリート打設作業に適用するTSL工法は、通常 $30.0 \sim 35.0 \text{ N/mm}^2$ の高強度コンクリートが得られるとともに $5 \text{ cm} \sim 40 \text{ cm}$ までの任意の覆工厚の施工が可能である。経年劣化した既設覆工内側にTSLコンクリートによる高強度の新設覆工を設けることにより、単独または既設コンクリートとの複合体の形成による補強効果が期待できることからTSL工法の技術を応用してロボット化を行った。従来のTSL工法の覆工機械は、トンネル断面と相似形のガイドフレームを用いて移動型枠の旋回を行っているため、各種断面への適用性、機動性、作業性等に課題がある。このためトンネル補修作業に適用する場合には種々の機能性向上に対する改善が必要であり、各種予備実験結果等を踏まえてコンピュータ制御の伸縮アームによる移動型枠旋回方式としてTSLロボットを開発した。TSLロボットの全景および仕様を写真－２、表－３に示す。

表－３ TSLロボットの仕様

種別	項目	仕様
本体部	適用断面	内径2.50m～4.80mの馬蹄・幌型断面
	機体寸法	全長6.40m、全幅1.60m、全高3.15m
	走行機構	クローラ方式(高速:20m/min、低速:10m/min)
	位置決め機構	超音波センサによる位置決め
	全体重量	約10 ton
型枠部	型枠形状寸法	巾1,500mm×長さ700mm(エンドレスベルト形式)
	型枠旋回機構	伸縮アーム支持による旋回方式
打設部	打設速度	30 cm/min
	ノズル形状	角型(先端部段段傾斜板取付)
	ノズル移動機構	型枠上部で横方向に反復移動
	粉塵	1.0 mg/m ³ 以下



写真－２ TSLロボット

(2) T S Lコンクリートおよびコンクリート打設装置

1) T S Lコンクリート

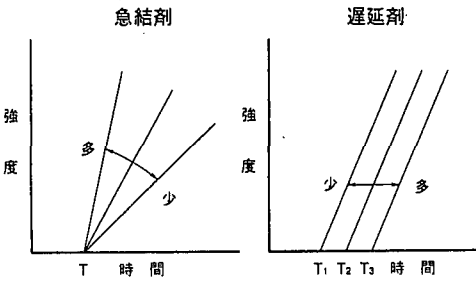
T S L工法によるトンネル補修作業のロボット化に伴い、コンクリートには次のような品質が要求される。

- ①. 急硬剤添加後、硬化開始までの初期流動性保持時間を30秒～3分程度まで調節できること。
- ②. 硬化開始から2分以内で $\sigma_c=0.2\text{N/mm}^2$ 以上に達する強度発現ができること。
- ③. 補修部材として必要な $\sigma_{28}=30.0\text{N/mm}^2$ 以上の強度と耐久性があること。
- ④. 内部はジャンカ等の欠陥がなく良好な品質であること。

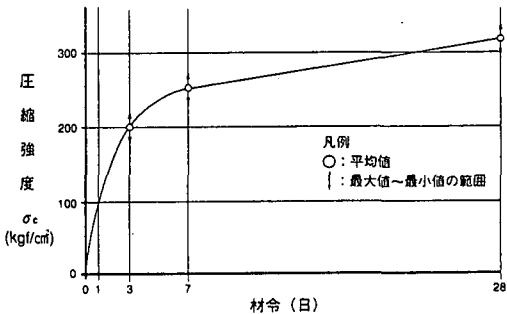
上記の要求品質を確保するため、初期流動時間の保持と短時間の自立強度発現を可能とするT S L用急硬剤を開発するとともに、高流動、高品質のコンクリート配合を実験により確立した。T S L用急硬剤はセメント鉱物系の急結剤とオキシカルボン酸塩系の遅延剤とからなり、両者とも粉末性状であり水に溶解しスラリー状にして使用する。表－4にT S Lコンクリートの標準配合を、図－6に急結剤および遅延剤の作用効果を、図－7にT S Lコンクリートの強度発現推移を示す。

表－4 T S Lコンクリート標準配合

粗骨材の 最大寸法 (mm)	スラ ンプ の 範 囲 (cm)	空 気 量 の 範 囲 (%)	水セメ ント比 (%)	細 骨 材 率 (%)	単位量(≒ kN/m ³)						
					水 W	セメント C	細骨材 S	粗骨材 G	混和材料		
									流動化剤	急結剤	遅延剤
15	22±2	4±2	57	70	2.17	3.80	12.06	5.13	C×1%	C×15%	急×3%



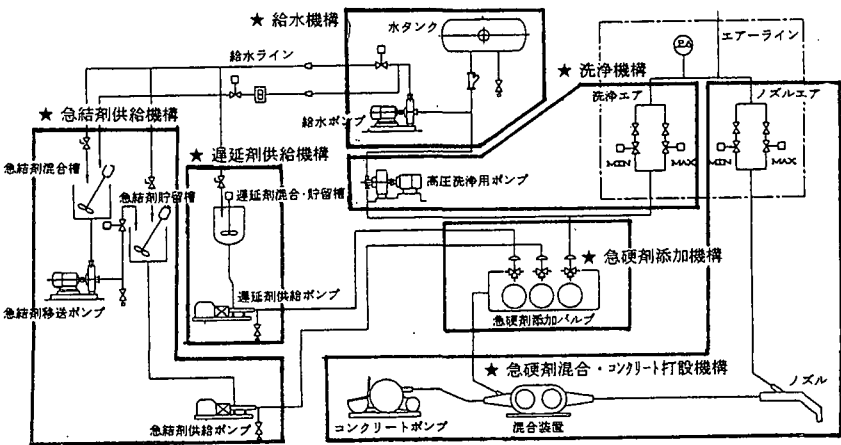
図－6 急結剤および遅延剤の作用効果



図－7 T S Lコンクリートの圧縮強度推移(標準値)

2) コンクリート打設装置

適正量のT S L用急硬剤をベースコンクリートに添加、混合して現場条件に適合したT S Lコンクリートを製造し、T S Lロボットに供給するとともに流し込み、吹込み、注入等の打設方法を切替え操作により選定可能とするコンクリート打設装置を開発した。図－8にコンクリート打設装置の系統図を示す。



図－8 コンクリート打設装置系統図

4-5. 施工実績

本工法は、平成5年度に全体システムが完成してからこれまでに5件の実工事に採用されており、そのうちの代表的な施工実績として東京電力岩室発電所の導水路トンネルにおける補修工事の実績を以下に示す。

(1) 工事概要

施工時期：平成6年10月～平成7年3月
 トンネル断面：高3.64m×幅2.73mの幌形断面
 施工延長：L=212.4m
 補修方法：はつり厚 $t=2\text{cm}$
 覆工厚 $t=10\text{cm}$
 溶接金網（ $\phi 4\text{mm} \times 100 \times 100$ ）

（図-9参照）

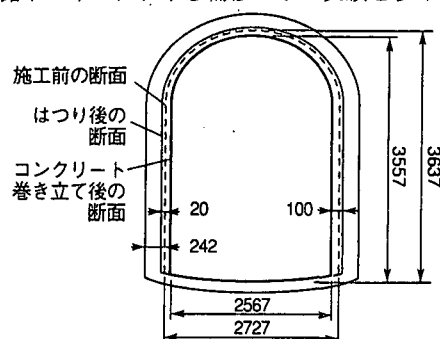


図-9 計画補修断面

(2) 施工結果

表-5、表-6に示す一軸圧縮強度、引張強度・付着強度の試験結果、および表-7、表-8に示す各ロボットの施工性能測定結果から、トンネル覆工としての品質確保、既設コンクリートとTSLコンクリートとの一体化効果、施工能力等について開発目標を十分満たすものであることを確認した。しかし、TSLコンクリートは高流動性、急硬性、凝結時間調節性等の相反するような性質を付加しているため、品質管理や施工管理の面で繊細な配慮が必要となり作業に負担がかかる結果となっている。このため、コンクリート配合や混和剤を再検討するとともに打設システムについても改善検討を行っている。

表-5 一軸圧縮強度測定結果（ N/mm^2 ）

試験体種別	材令	平均値	データ数	標準偏差
モールド試験体	σ_{3D}	12.01	15	6.5
	σ_{7D}	20.36	15	9.6
	σ_{28D}	31.56	15	7.6
ボーリングコア試験体	$\sigma_{34 \sim 50D}$	31.57	20	12.4

表-6 引張強度・付着強度測定結果（ N/mm^2 ）

試験体種別	試験項目	平均値	データ数	標準偏差
TSLコンクリート	圧裂引張強度	4.05	9	2.1
	純引張強度	1.21	9	1.7
TSL+既設	付着強度	0.52	21	1.3
TSL打継ぎ目	圧裂引張強度	3.87	6	2.9

表-7 コンクリートはつりロボットの施工性能

項目	測定結果
はつり能力	1.3 m^3/hr
施工速度	70 min/1.2m (1サイクル)
発生粉塵量	1.3～1.8 mg/m^3
はつり精度	-20～+25 mm (平均+6.1 mm)
はつり時の振動	0.27 g
はつり時の騒音	80～93 dB

表-8 TSLロボットの施工性能

項目	測定結果
覆工能力	6.0 m^3/hr
施工速度	120 min/1.2m (1サイクル)
発生粉塵量	0.1～0.3 mg/m^3
打設時の騒音	79～84 dB

5. 小断面トンネル補修工法

5-1. 概要

先に開発したトンネル補修ロボット工法は内径2.5m～4.8mのトンネル断面を対象としているが、この適用範囲から外れる内径2.5m以下の小断面トンネルについても水路トンネル総延長の約30%を占めており、同様に安全性、作業性、経済性等の向上が望まれた。この要望に応えるためトンネル補修ロボット工法の施工システムの小型化について研究を行い、小断面对応型コンクリートはつりロボットとセントル型枠を用いたTSL工法（TSL-C工法）による小断面トンネル補修工法を確立した。施工はトンネル補修ロボット工法と同様に、覆工表面の劣化した部分を小断面对応型コンクリートはつりロボットではつり取った後、セントル型枠にTSLコンクリートを打設することにより高強度・高品質の覆工を短時間で形成して行われる。

5-2. 小断面对応型コンクリートはつりロボット

基本的な切削機構や構造および制御方法は前項のコンクリートはつりロボットと同様であるが、小断面トンネル対応とするため走行装置をレールスライド方式に変更するほか、切削部の小型化を図り内径1.8mのトンネル断面まで対応可能とした。小断面对応型コンクリートはつりロボットの全体構想を図-10に示す。

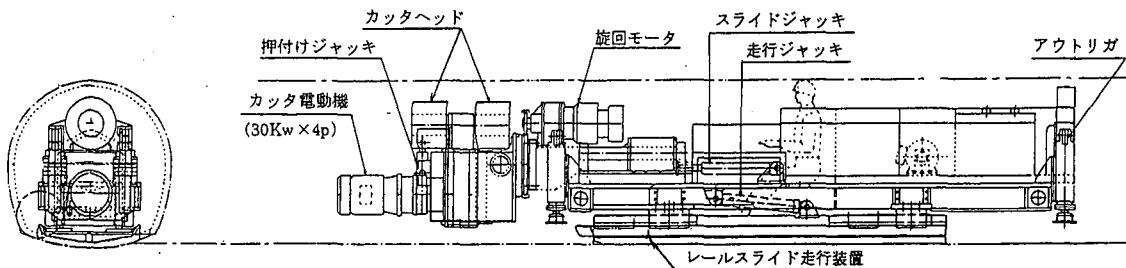


図-10 小断面对応型コンクリートはつりロボット全体構想

5-3. TSL-C工法

TSL-C工法は、図-11に示すようにトンネル用セントル型枠を用い、コンクリート打設装置でTSLコンクリートを製造、打設して短時間で既設コンクリートに密着した薄肉で高品質の覆工コンクリートを形成する工法である。従来のTSLコンクリートの技術を応用し、必要な高流動性、長時間の流動性保持および安定した急硬性能を確保するため、コンクリート配合や急硬剤の品質改善および添加量の調整を行った。また、コンクリート打設装置については、打設方法が注入方式だけとなるため図-8に示す機構のうち遅延剤供給機構、急硬剤添加機構、洗浄機構、ノズル等が簡略化され小型化、低廉化を可能とした。さらに、セントル型枠についても急硬性のTSLコンクリート打設作業であることを考慮して作業性や機動性の向上を目的とした装置の効率化を図った。型枠長はTSL工法と同等以上の施工能力を確保するため $L=4.50\text{m}$ とした。TSL-C工法用コンクリートの標準配合を表-9に示す。

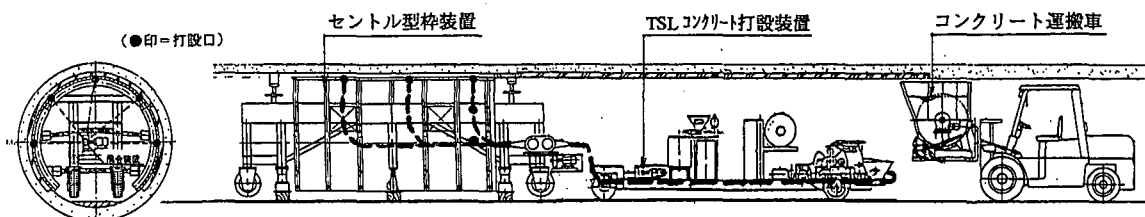


図-11 TSL-C工法概要図

表-9 TSL-C工法用コンクリート標準配合

粗骨材の 最大寸法 (mm)	スランプ の範囲 (cm)	空気量 の範囲 (%)	水セメ ント比 (%)	細骨 材率 (%)	単位量 (≒ kg/m^3)						
					水 W	セメント C	細骨材 S	粗骨材 G	混和材料		
15	22 ± 2	4 ± 2	57	70	2.17	3.80	11.86	5.13	フライアッシュ	流動化剤	急結剤
									$C \times 0.5\%$	$C \times 13\%$	急 $\times 7\%$

5-4. 施工実績

施工実績としては、本工法のうちのTSL-C工法と先に開発したコンクリートはつりロボットを組合わせた補修工法が沖縄県北部ダム調整水路トンネルの補修工事で採用されており、ここではTSL-C工法の施工実績について示す。

(1) 工事概要

施工時期：平成11年2月～平成11年4月

トンネル断面： $R=1.45\text{m}$ の円形

施工延長： $L=120.0\text{m}$

補修方法：はつり厚 $t=10\text{cm}$

覆工厚 $t=10\text{cm}$

鉄筋 ($D\phi 10\text{mm} \times 250 \times 250$)

(図-12参照)

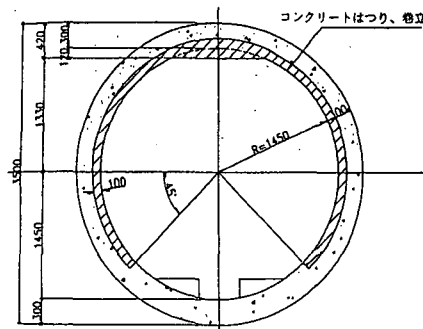


図-12 計画補修断面

(2) 施工結果

TSL-C工法の施工結果は表-10に示すとおりであり、開発目標を満たすとともに前項のTSL工法と比較しても同等以上の能力および品質であることを確認した。この工事では坑口から約700mの位置で施工を行ったが、将来的には2,000m以上奥の位置で施工することも考えられることから凝結開始を約2時間以上遅延させる必要があり、急結剤と遅延剤の長時間性能安定性に対する改善を行った。また、施工能力はコンクリート運搬能力に大きく左右されるため一度に極力多量のコンクリートを運搬する設備を検討している。

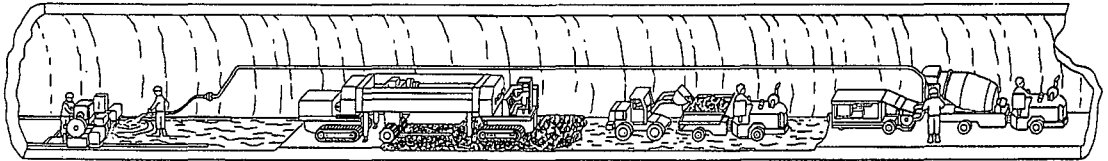
表-10 TSL-C工法の施工性能

項 目	開 発 目 標	施工実績(平均値)
覆工能力	3.60 m/日以上	4.50 m/日(1方あたり)
施工速度	10 hr/4.5m(1サイクル)	7 hr/4.5m(1サイクル)
流動性保持時間	60 min前後	30~60 min
自立強度	$\sigma_{3h} \geq 0.5 \text{ N/mm}^2$ 以上	$\sigma_{2h} \geq 0.6 \text{ N/mm}^2$
一軸圧縮強度	$\sigma_{28} \geq 30.0 \text{ N/mm}^2$ 以上	$\sigma_{28} \geq 37.5 \text{ N/mm}^2$

6. 水路インバート急速補修工法

6-1. 概 要

水力発電所水路トンネルのインバートは、アーチ覆工部に比べて摩耗や洗掘が著しく補修工事の頻度が多くなるため、冬季の渇水期間に一度に長距離区間を施工して工事による断水（発電停止）を極力少なくする施工法が求められていた。インバート補修工事にはコンクリート切削、ズリ搬出、コンクリート運搬・打設等の作業により行われるが、そのうちのコンクリート切削作業が合理化の障壁となっていた。このため、高能力、高精度のインバート専用切削ロボット（CICロボット）を開発するとともにズリ搬出、コンクリート運搬、打設等の周辺作業とのシステム化を図った水路インバート急速補修工法（CICロボット工法）を確立した。本工法は、下層の健全な部分を残して表層の劣化した部分のみを切削することにより切削ズリ量およびコンクリート打設量を減少させ、インバート補修工事の迅速化、低廉化を可能としたものである。施工は、CICロボットにより劣化部分のコンクリート切削を行いズリを搬出した後、ミキサ車で運搬してきたコンクリートを圧送ポンプにより切削作業力所を通過して打設位置まで圧送しフィニッシャにより新規のインバートを形成して行われる。図-13にCICロボット工法の施工概要を示す。



インバートコンクリート打設

インバート切削ロボット

ズリ積み・搬出

コンクリート圧送

図-13 CICロボット工法概要図

6-2. CIC (Channel Invert Chipping) ロボット

表-11 要求機能と基本方針

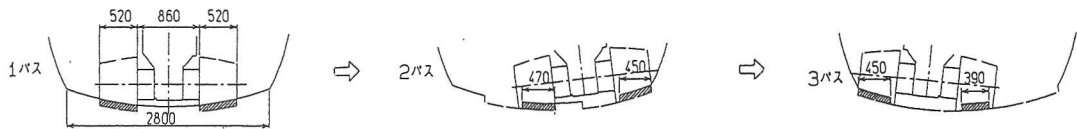
CICロボットの開発にあたっては、従来の切削機械の概念的な既成にとらわれず、表-11に示すように施工に必要とされる要求機能の確保を主眼として基本方針を検討するとともに実験等により具体的な仕様を確認して設計・製作を行った。設計段階において特に重視した点は、各種断面への対応性、施工能力（40m/日以上）および切削精度（ $\pm 20 \text{ mm}$ 以内）の確保である。このため、効率的な切削機構の検討を行うとともにコンピュータによる自動制御機構を検討してロボット化を図った。

要 求 機 能	基 本 方 針
・ 施工速度: 40m/day以上	・ 横軸ツインカッタを採用してトンネル進行方向に切削し1回の機械セットで3mまでの範囲を
・ 断面对応: インバート幅員2.8m~4.5m	・ 本体を左右に分割可能なガイド枠構造とし間座により幅員調節
・ 機動性: 路線最小曲率 R=35m	・ ガイド枠の前後を走行装置で支持して前後を独立操作
・ 1回のはつり深さ: 0~10cm(最大15cm)	・ カッタドラムの回転動力に出力49kWのモータを採用
・ はつり精度: $\pm 20 \text{ mm}$ 以内	・ 円錐台形状のカッタヘッドを採用しピットの配列間隔縮小およびアームの伸縮と傾転をコンピュータで自動制御
・ 発生粉塵量: 2.0 mg/m^3 以下	・ アーム先端に散水装置を装備
・ 作業安全の確保	・ カッタヘッド位置を画面に表示して遠隔リモコン操作

(1). 切削機構

施工能力の向上を図るためには1回の機械セットで多くの範囲を切削する必要がある。これまでののはつり

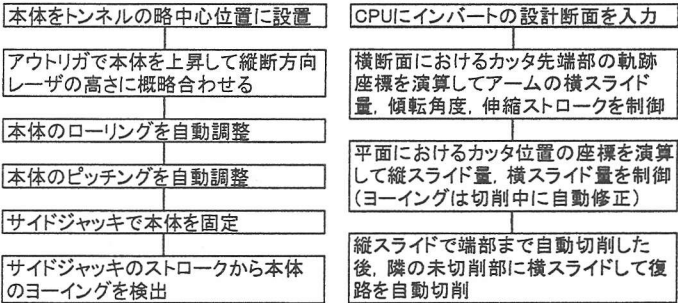
ロボットのような片持ちのアーム構造では機械のバランス的な面から設計が難しく、また部材強度確保のため全体重量が増大する等の理由から、ガイド枠によるカッタ移動方式を採用して前後を走行架台で支持する構造とした。この構造により左右のガイドを分離して間座の長さを調節することで各種の断面に対応可能とした。また、切削方式については、切削精度や側壁との隅角部切削形状の確保および切削時のアームに対する反力バランスの優位性から、インバート曲率に合わせた円錐台形状のツインヘッドとしてトンネル進行方向に移動させて切削する方式を採用した。さらに、切削ピックについては丸型と平型のピックによる切削実験結果から能力的に優位な平型ピックを選定した。カッタヘッドと切削パターンを図－１４に示す。



図－１４ カッタヘッドと切削パターン

(2) 自動制御機構

水路トンネルのインバートは様々な幅員や曲率の断面形状があり、補修工事は縦断勾配の確保に重点が置かれ、中心線については既設トンネルの現状の蛇行線形に追従して施工が行われる。このような現場条件に対応して精度良く迅速に施工するためＣＩＣによる自動制御とした。自動制御のアウトラインは、操作者が手で切削ロボットをトンネルのほぼ中央に移動させた以降は切削ロボット自身が本体位置を把握して所定の切削を行う機構とし、位置決め制御と自動切削制御により構成した。位置決め制御フローを図－１５に、自動切削制御フローを図－１６に示す。



図－１５ 位置決め制御フロー

図－１６ 自動切削制御フロー

(3) ＣＩＣロボット全体構成

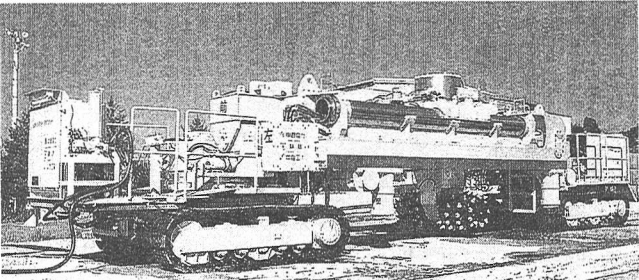
以上のように開発したＣＩＣロボットの全貌および仕様を写真－３、表－１２に示す。

6-3. 施工実績

本工法は、平成９年度に全体システムが完成してからこれまでに４件の実工事に採用されており、そのうちの代表的な工事として大断面・長距離施工の中部電力上麻生発電所水路トンネルにおける施工実績を以下に示す。

(1) 工事概要

施工時期：平成９年５月～平成１０年１月
トンネル断面：インバート幅員 $W=4.47\text{m}$ の馬蹄断面
施工延長： $L=5,314.0\text{m}$
補修方法：はつり厚 $t=10\text{cm}$
覆工厚 $t=10\text{cm}$
(図－１７参照)



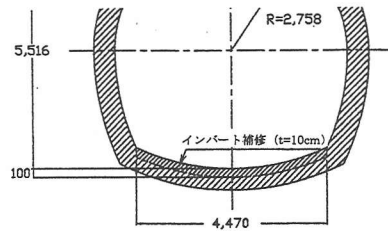
写真－３ ＣＩＣロボット

表－１２ ＣＩＣロボットの仕様

種別	項目	仕様
本体部	適用断面	インバート幅員 2.80m～4.50m
	機体寸法	全長 12.94m, 全幅 2.90m, 全高 3.00m
	走行機構	クローラ方式(高速:20m/min, 低速:3m/min)
	位置決め機構	自動姿勢制御と自動位置検出
	全体重量	約 50 ton
切削部	カッタ形式	ツインカッタ(インバートと同曲率の円錐台形状)
	カッタ支持機構	伸縮アームによる支持移動
	切削速度	50 cm/min～150 cm/min
	精度	± 10 mm以内
	粉塵	1.0 mg/m ³ 以下

(2) 施工結果

作業基地および搬入口はトンネル下流側に設け、上流側から下流側に向けて順次片押し施工を行った。その結果表－13に示すように開発目標を満たす施工結果が得られ、CICロボットの施工能力を確認するとともに大断面、長距離の施工に十分対応できることが実証できた。しかし、切削作業の急速な進捗に追従してインバートコンクリートを施工するためには壁面に設置するフィニッシャ用軌条の設置・撤去作業に多大の労力を要する結果となった。このことから、以後の工事についてはノンレール型のフィニッシャを開発して採用している。



図－17 計画補修断面

表－13 CICロボット工法の施工性能

項 目	開 発 目 標	施 工 実 績 (平均値)
施 工 能 力	920.0 m/月以上	1,060 m/月(最大1,270m/月)
施 工 速 度	40.0 m/day以上	47.8 m/day(最大61.8 m/day)
切 削 精 度	±20mm以内	－8～＋6 mm(平均－2.0 mm)
切削時の粉塵	2.0 mg/m ³ 以下	1.09 mg/m ³
切削時の振動	1.0 カイン以下	0.44 カイン

7. おわりに

これまでに開発した各水路トンネル補修工法は、劣化が顕著な水力発電所水路トンネルの補修工事における施工性の改善、工期の短縮ならびにコストダウンを基本コンセプトとして合理化施工方法の確立を行ったものである。このことにより種々の水路トンネルにおける内巻きあるいは巻替え等の多彩な補修方法に対応することが可能となった。これらの水路トンネル補修工法を従来工法と比較すると、概ね、作業員数で約40%の省力化、約20%の工期短縮、約10%のコストダウンの成果を上げている。また、工事による発電停止期間中の電力損失分を考慮した総コストでは約15%程度の低減になると思われる。しかしながら、これらの開発工法は機械化施工を主体としているため、従来工法に比べると資機材の搬入や機械損料等の仮設費が高くなるというマイナス要素もある。したがって、施工延長が短い場合は従来工法によった方が有利な状況もあり、新旧工法の経済性の分界点があると思われる。今後については、将来的に水路トンネルの老朽化が進む状況のなかで安全で効率の良い水路トンネル補修工法として広く採用されることを期待するとともに、道路や鉄道などの他のトンネル補修へも応用展開の可能性を有する工法として、更なる施工性の向上や周辺設備の充実および補修設計の標準化等について改善を加え、一層合理的な工法とするように考えている。

【参考文献】

- 1) 中村隆幸，菅沼康男：水路トンネル補修のロボット化構想，電力土木，No.243，pp40～48，1993/1
- 2) 菅沼康男，田中一成：新しいトンネル覆工工法に使用する急硬性コンクリートの研究，
第48回年次学術講演会講演概要集第6部，土木学会，pp286～287，1993/
- 3) 中村隆幸，菅沼康男，本間勉，青木義治，吉田典明：水路トンネル補修ロボット化工法の開発(その1～3)，
第49回年次学術講演会講演概要集第6部，土木学会，pp214～215，pp228～229，pp226～227，1994/
- 4) 中村隆幸，菅沼康男，本間勉，青木義治：導水路トンネルの補修をロボット化，
トンネルと地下，vol. 26，No.10，pp17～23，1995/10
- 5) 野池悦雄，青木義治，吉池章：水路インバート切削ロボットの開発，電力土木，No.263，pp63～70，1996/5
- 6) 野池悦雄，青木義治，吉池章：水路インバート切削ロボットの開発（設計と性能確認），
第51回年次学術講演会講演概要集第6部，土木学会，pp124～125，1996/
- 7) 野池悦雄，千々岩三夫，吉池章：水路インバート急速補修工法(CICロボット工法)の開発，
建設の機械化，No.572，pp10～16，1997/10
- 8) 野池悦雄，青木義治，吉池章：水路インバート切削ロボットを用いた急速補修工法の本格実証，
電力土木，No.275，pp16～21，1998/5