

覆工再生工に関する技術開発業務の報告 Development of lining renewal method for mountain tunnel

伊藤 翔平* 鈴木 健**
Shohei Ito Takeshi Suzuki

要 約

矢板工法で建設されたトンネルは、建設後数十年以上経過し、老朽化が進んでいる。特に、降雪地域の冬期については、覆工のひび割れ箇所から生じた漏水が凍結して氷柱（つらら）を形成し、氷柱対策を実施するため多くの渋滞が発生している。このため、中日本高速道路金沢支社では、老朽化した覆工コンクリートの補修・補強を併用しながら施工する「覆工再生工」に関する技術検討を実施し、技術資料を発行した。加えて、覆工再生工を実際に施工することを想定した要求要件を設定し、技術開発業務として「北陸自動車道 覆工再生工に関する技術開発業務」が発注された。当社は、これを受託し、技術実証ヤードにて実大規模で「覆工切削技術開発」、「防護工技術開発」および「再生覆工コンクリート（現場打ち）技術開発」の3つの技術開発や技術実証試験を実施し、発注者が提示した要求要件を全て満足することができた。

目 次

- § 1. はじめに
- § 2. 技術開発業務の概要
- § 3. 技術開発成果
- § 4. まとめ

§ 1. はじめに

高速道路の構造物は、老朽化が進んでおり現状のまま進むと2030年には、開通から30年以上経過した道路が約8割になる¹⁾と言われている。そこで高速道路会社は「高速道路リニューアルプロジェクト²⁾」として、高速道路の本体構造物の大規模更新工事を進めている。このような背景の中で、中日本高速道路（株）金沢支社は、老朽化した矢板工法で建設された山岳トンネルに対して、供用下で補修・補強が可能な「供用下における矢板工法トンネル覆工再生工に関する手引き（案）³⁾」（以下、「手引き」と称す）を発行した。

「覆工再生工」とは、覆工補修後の長期耐久性を確保するために、事前にロックボルトで補修した後、矢板工法で施工されたトンネルの覆工を切削し、防水シートを施工後、新たな覆工を施工することをいう。

覆工再生工の施工においては、原則、1車線を確保した供用下施工を想定している。ロックボルトについては、

片側車線規制下で施工し、覆工切削工、防水工、再生覆工コンクリートについては、トンネル中央部に、一般車両の安全確保のために「防護工」を設置した状態で施工することとなっている³⁾。図-1に覆工再生工の概略施工手順図を示す。

中日本高速道路金沢支社敦賀保全・サービスセンターは、今後の山岳トンネルリニューアル工事を覆工再生工で実施することを考慮して、「北陸自動車道 覆工再生工に関する技術開発業務」（以下、「技術開発業務」と称す）を発注した。当社は、これを受託し、実大実験を実施して上記業務が設定する要求要件に対して満足する技術開発等を実施した。本論文では、この技術開発成果について報告する。

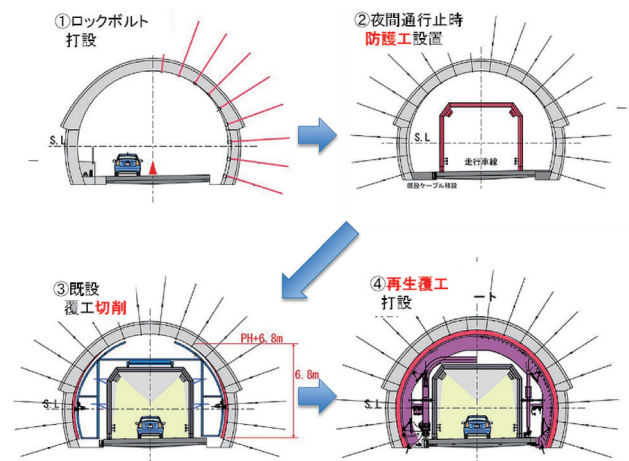


図-1 覆工再生工施工手順

* 技術研究所土木技術グループ

** 技術研究所土木技術グループ

(現：土木技術部リニューアル課)

§2. 技術開発業務の概要

技術開発業務では、「覆工切削技術開発」、「防護工技術開発」および「再生覆工コンクリート（現場打ち）技術開発」の3技術開発を実施した。これら技術開発には、技術開発成果が施工可能な技術に反映できるよう「基本性能・基本条件書⁴⁾」に各技術開発に対する「要求要件」が設定されていた。そこで、この要求要件を満足させるための技術開発を実施するため、埼玉県熊谷市内（旧大里機材センター）に技術実証ヤードを構築し、実大の2車線断面の模擬トンネル（圧縮強度30 N/mm²、無筋）を10.5 m構築後、各種技術開発を実施した。

§3. 技術開発成果

3-1 覆工切削技術開発

覆工切削は「手引き」では、機械切削を原則とする、と規定されている。既設コンクリートの機械切削には、山岳トンネル工事（機械掘削）で使用する油圧切削機（切削ドラムによる切削）を用いた事例⁵⁾等がある。しかしながら、切削機を使用すると、切削機および切削時に発生する粉塵除去のために、機械設備規模が大きくなること、切削時の振動によって既設覆工への影響が大きくなる可能性があること等の課題があると考えた。そこで、切削技術を調査した結果、車線規制内での施工が可能であり、既設構造物への影響が小さい工法であるウォータージェット（以下、WJ）切削を採用することとした。WJでは、深度方向切削制御が重要となる。そこで、2つのノズルから水を噴射・衝突させるコリジョンジェット工法⁶⁾を採用し、設計以上の切削を防止した。

3-1-1 要求要件

覆工切削技術開発の要求要件を抜粋して記載する。

(1) 切削ヤード幅

実際の覆工再生工事を想定し、覆工切削工における防護工と既設覆工間の施工空間として「切削ヤード幅1.7 m以下（片側）」と設定されている。

(2) 切削能力

高速道路上で、かつ供用下での施工となることから、「切削能力約63 m/月以上」が設定されている。

3-1-2 実験概要および実験結果

(1) 切削ヤード幅

WJ切削試験は、実大の2車線断面の模擬トンネルを構築し、その内部に防護工を配置した状態で実施した（写真一）。WJ切削は、上記の通り、コリジョンジェット工法を使用して実施し（写真二）、最大切削深さは、要求要件から20 cmとした。防護工と既設覆工間の離隔距離は1.69 mで設定し、要求要件の通り1.7 m以下とした。

(2) 切削能力

WJ切削の施工サイクルについて、切削殻の除去は、切削完了後に、バックホウによる積込作業やバキュームによる吸引除去を実施することが多い。そこで、施工時間の短縮や省人化を目的に、切削と切削殻の回収を同時に実施できる「切削殻回収システム」を開発した。

「切削殻回収システム」は、WJ切削範囲最下段に専用の回収ホッパー（図一）を配置し、WJ切削によって発生する切削殻を回収する。回収ホッパーは、防護工と既設覆工間に配置でき、かつ、人力で移動できる構造として、幅590 mm×高さ400 mm×延長3600 mmとし、ホッパー脚部には車輪を設けた。

回収ホッパーに堆積した切削殻は、毎分40 l/minの高圧水と最大吸引量18 m³/minの真空ポンプにて吸引輸送してトンネル外に搬出した。トンネル場外には、全自動連続吸引排泥分級ユニットを設置し、切削殻と切削水を連続的に分離した。分離した切削殻は車線規制下での作業を想定して、軽ダンプトラックの荷台に集積・搬出し（写真三）、切削水は濁水処理設備にて処理した。なお、これら一連の設備は、トンネル外の片側車線規制範囲内に配置できるよう、設備幅は全て2.5 m未満とした。WJ切削設備の配置状況を写真四に示す。WJ切削試験は、上記システムを稼働しながら実施した。その結果、切削殻は連続的に回収でき、かつ、吸引用配管の閉塞もなかった。模擬トンネル10.5 mを切削した実測時間と一般的な切削殻回収方法に要する時間を比較した結果、175分の短縮が確認できた。



写真一 WJ切削試験全景



写真二 コリジョンジェット工法による切削状況

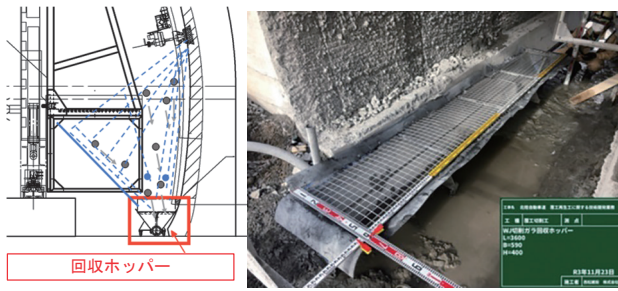


図-2 切削殻回収ホッパー (左：概念図、右：写真)



写真-3 切削殻、切削水の分離



写真-4 WJ 切削設備配置状況

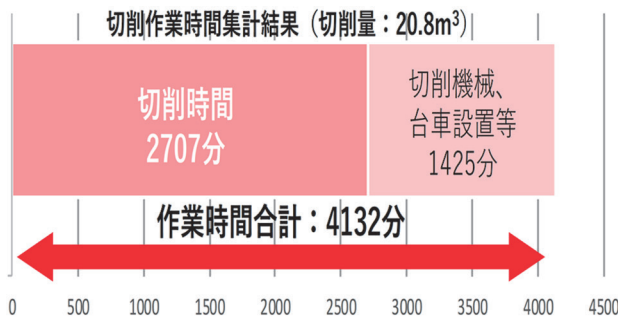


図-3 WJ 切削サイクルタイム集計結果

WJ 切削時の切削能力は、模擬トンネル 10.5 m 切削に要した時間を日々計測し、作業別に集計して、時間当たりの切削能力を算出した。なお、WJ 切削機は、左右 1 台設置し、左右同時施工で実施した。その結果、WJ 切削量 20.8 m³ に対して、切削機械、台車の設置時間も含めた切削作業に必要な時間は 4,132 分となった (図-3)。

この計測時間から、切削能力 T を算出すると、以下の通りとなった。

$$T_0 = (\Sigma V_1 \div \Sigma T') \times 60 = 20.8 / 2707 \times 60 = 0.461 \text{ m}^3/\text{h} \quad (1)$$

$$T = (\Sigma V_1 \div \Sigma T_1) \times 60 = 0.302 \text{ m}^3/\text{h} \quad (2)$$

ここに、T₀：切削時間から算出した切削能力 (m³/h)

ΣT'：切削時間 (= 2707 min)

T：総作業時間を考慮した切削能力 (m³/h)

ΣV₁：WJ 切削試験総切削量 (= 20.8 m³)

ΣT₁：切削作業に要した時間 (= 4132 min)

得られた切削能力から、要求要件「月進 63 m 以上」を確保するための 1 日あたりの必要作業時間 T_{req} を算定した結果、12.1 時間となった。よって、実施工の施工計画においては、今回の実験結果から、対策①：WJ 切削機を 2 台から 4 台に変更する。対策②：WJ 切削に使用する「高圧水発生装置」を 1 台から 2 台に変更し、単位切削能力を向上させる。対策③：作業時間を延長する。等を考慮する必要があることが分かった。

【必要時間算出】

$$\Sigma V_2 = V_2 \times L = 1.16 \times 63 = 73.1 \quad (3)$$

$$T_2 = \Sigma V_2 / T = 73.1 / 0.302 = 242 \quad (4)$$

$$T_{req} = T_2 / D = 242 / 20 = 12.1 \quad (5)$$

ここに、ΣV₂：特記仕様書⁴⁾で設定されたトンネルの奥行 1 m あたりの切削量 (= 1.16 m³/m)

L：要求要件月進 (= 63 m)

T₂：ΣV₂ を切削するために必要な時間 (min)

D：1 ヶ月の施工可能日数 (= 20 日と設定)

T_{req}：1 日あたりの必要作業時間 (h)

3-2 防護工技術開発

防護工は、「手引き」においては「鋼材で製作」されることが想定されている。構造については、「通行車両の安全を確保できるようにその目的、作用荷重に対して合理的な構造」となるよう設計するよう規定されている。設計時に考慮する作用荷重は、「鋼材荷重、衝撃荷重 (コンクリート片) および車の衝突による衝突荷重等」となっている。そこで、防護工の材料は、全断面スライドフォーム (以下、セントルと称す) と同等の SS400 材とした。1 ピース当たりの部材幅は 1.5 m とし、部材間連結、ピース間連結は、普通ボルト (M20) を採用した。技術実証では、防護工を模擬トンネルと同等の長さとなる 10.5 m 製作 (1 ピース 1.5 m × 7 函) し、運搬、設置、衝突実験等を実施した。

3-2-1 要求要件

防護工技術開発の要求要件を抜粋して記載する。

(1) 防護工運搬設置

「1夜間（21時～翌4時）で延長30m以上の防護工（分割可）を施工場所（防護工台車組立基地からの移動距離約2km：最大縦断勾配約4.5%）へ自走又は牽引で移動・設置又は撤去できること」と設定されている。

(2) 衝突実験

実際の工事において、防護工外側の作業員の安全性を確保と、防護工が一般車両が衝突しても変状しない構造するため、「衝突条件A⁷⁾の作用に対して、防護工が作業空間を阻害しないこと。なお、防護工の移動防止に関して既設覆工や監査歩廊、路面、排水工などにアンカー等で引張強度を期待しない」と設定されている。

3-2-2 実験概要および実験結果

(1) 防護工運搬設置

防護工の運搬に使用する車両は、25tトレーラーとし、荷台には防護工設置用の昇降架台を製作、搭載した（写真-5）。防護工の運搬は、クレーンにて防護工を昇降架台に仮置きして運搬した。1回当たりの防護工運搬は、車両総重量から、2ピース分（L=3.0m）とした。なお、防護工設置用の昇降架台は、油圧ジャッキの操作により上下左右前後に稼働でき、設置時の微調整が可能な装置とした。防護工の設置運搬試験は、作業員4名で3回実施し、作業時間を計測して検証した。防護工設置完了の状況を写真-6に示す。

実証実験の結果、防護工10.5mを設置するために必要な時間は272分となることが確認された（図-4）。この結果から要求要件である1夜間で設置延長30mを達成するには、以下の対策が必要であることが考察できた。

【対策（案）】

- 1 運搬当たりの防護工の延長の増加
25tトレーラーでは机上検討で4.5m（3ピース）の運搬が可能である。これにより、運搬回数が3.0m（2ピース）運搬時に対して2/3回となる。
- 作業員の増加
作業員を8名に増員し、左右に分かれてボルト締結作業を実施する場合は、作業時間は389minに短縮可能である（作業員へのヒヤリングで施工可能であることを確認）。
- ピース間連結に必要なボルトの削減
今回製作した防護工のピース間連結用ボルトは120個であり、ボルト締結時間に多くの時間が必要である。運搬設置時間の短縮を目的に、ピース間の連結では60個のボルトのみ締結し、防護工設置完了後に、残りの60個を締結することを追加要素試験したところ、問題なく防護工の設置ができた。これにより、運搬設置時のボルト連結作業時間が1/2となる。

(2) 衝突実験

実証実験は、要求要件を確認するため、実機による衝突実験を実施し、防護工の変動量を確認した。ここで、衝突条件Aとは、質量25tの車両が45km/hで衝突角度15°で防護柵に衝突した場合である⁷⁾。

実機による衝突実験は、2回実施した。1回目の衝突実験は、予備実験として防護工と既設覆工間に強力サポートを設置して2021年12月上旬に実施した。この実験結果を用いて衝突解析を実施し、実験結果と解析結果を同定をしたうえで、要求要件通りに補強材がない場合の衝突解析を実施して、防護工の変動量を推定した。なお、衝突に対する影響軽減対策について、有識者に意見照会したところ「防護工脚部に配置したレール底面にゴムを敷設して、摩擦抵抗を向上させてはどうか」と回答があったため、2回目の衝突実験では、これを採用した。

衝突実験の2回目は、2022年3月上旬に、発注者立会のもと実施した。衝突実験は、衝突条件Aの通りに、ダンプトラックを防護工に設置した防護柵に衝突させることができた（写真-7）。なお、実験はドライバー含めて無事故無災害で完了できた。

衝突後の変位計測結果から、再度、衝突解析にて同定解析をしたところ、精度良く再現できた（図-5）。この結果については、有識者から同定精度良好と判定され、実施工を想定して防護工が31.5m設置された場合の衝突解析を実施したところ、防護工の変動量は17mmとされた（図-6）。以上より、防護工へ衝突条件Aが作用しても、防護工外側の作業区間は確保できることが確認できた。

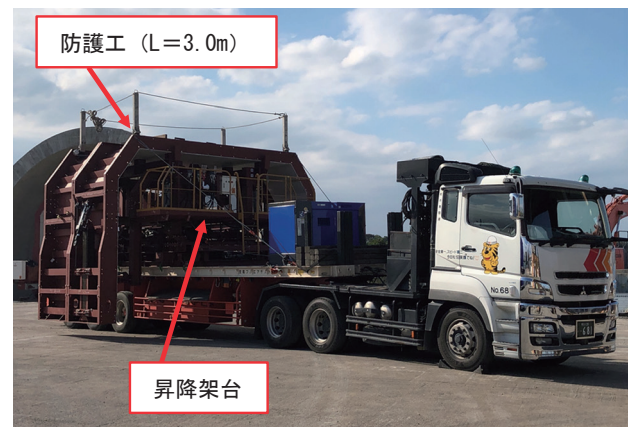


写真-5 防護工運搬状況

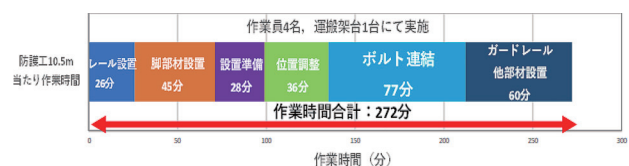
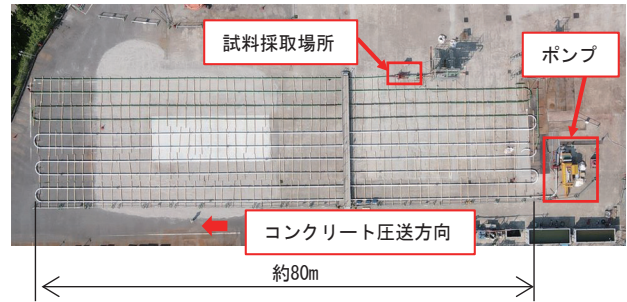


図-4 防護工設置作業時間



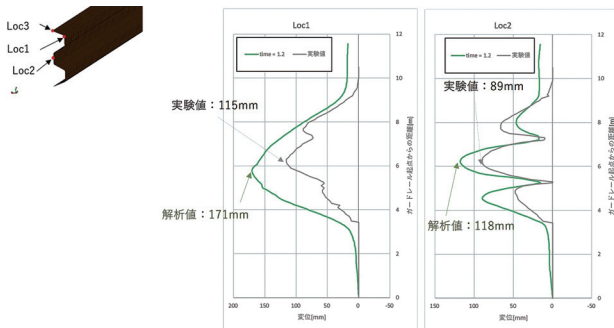
写真一六 防護工設置完了全景



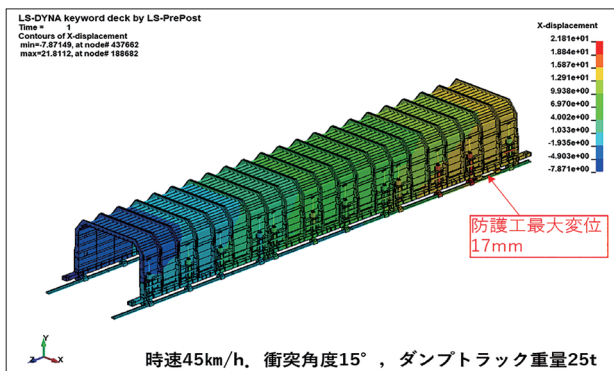
写真一八 長距離圧送配管敷設全景



写真一七 衝突実験 (2回目)



図一五 ガードレール変位の解析と実測比較



図一六 防護工 31.5 m 設置時衝突解析結果

表一 再生覆工コンクリート配合

W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)						
		W	C	S	G	混和剤 ①※1	混和剤 ②※2	繊維
41.6	53.6	175	420	909	798	5.36	7.14	2.73

※1：高性能 AE 減水剤（ベースコンクリート）

※2：流動化剤（後添加，c×0.6%）

3-3 再生覆工コンクリート（現場打ち）技術開発

再生覆工コンクリート（現場打ち）は、「手引き」においては「現場打ちのコンクリートを原則とする」のみ規定されている。しかしながら、技術開発業務では、供用下での施工を想定して、長距離圧送に対する要求要件が求められた。

3-3-1 要求要件

再生覆工コンクリート（現場打ち）技術開発の要求要件を示す。

(1) 長距離圧送

再生覆工コンクリートの打設箇所は、図一八の通り、防護工区間であり、かつ防護工前後は車線規制区間である。このことから要求要件は、「長距離（最大 850 m）の運搬を必要とする再生覆工コンクリートは現場打ちコンクリートとし、必要な品質及びワーカビリティを有すること」と設定されている。

(2) 再生覆工コンクリート（現場打ち）

再生覆工コンクリート（現場打ち）の使用するコンクリートの品質に関する要求要件として「再生覆工コンクリートは繊維混入とし、最小覆工厚さは 20 cm で、圧縮強度 36 N/mm² を満足すること」と設定されている。

3-3-2 実験概要および実験結果

(1) 長距離圧送試験

技術実証では、コンクリート圧送用配管（5 inch）を蛇腹状に延長 L=850 m（水平換算距離約 1000 m）敷設（写真一八）し、圧送前後でのコンクリート性状を各品質試験にて確認し、長距離圧送に伴う変化を検証した。

長距離圧送試験は 2 種類の試験を各々 1 回実施（予備試験含まず）した。1 回目は、アジテータ車に繊維及び流動化剤を投入、混合後に圧送する方法とした（以下、先混合試験と称す）。2 回目は、長距離圧送に伴う材料変化

や閉塞リスクを考慮し、ベースコンクリートを圧送し、筒先到達後に今回開発した「再アジテート設備」を使用して繊維を連続的に混合させた（以下、後混合試験と称す）。なお、長距離圧送試験時では、再アジテート設備が開発途中だったため、流動化剤の添加は、モビル車を使用した。コンクリートの配合は、既往の実績を参考に、表1の通りとした。目標スランプフローは、再生覆工コンクリート厚が20 cmであることから、60 cmとした。

先混合試験では、長距離圧送前のスランプフロー値69.7 cm×69.6 cmであったが、850 m 圧送後のスランプフロー値は最も大きく低下したもので50.0 cm×47.5 cmとなり、スランプフロー許容値60±10 cmを下回った結果となった。

後混合試験では、ベースコンクリートの長距離圧送前後のスランプの変化は、22.5 cm から21.0 cm と1.5 cm ロスのみであった。長距離圧送後に繊維、流動化剤を混合し各品質試験を行った結果、品質管理項目は全て規定値内（合格）となった。今回の結果から、再生覆工コンクリートを長距離圧送する際は、ベースコンクリートを圧送し、圧送先で繊維および流動化剤を混合添加（再練り混ぜ）した方が品質の変動が少ないコンクリートを製造することが確認できた。

(2) 再生覆工コンクリート（現場打ち）

再生覆工コンクリート（現場打ち）は、模擬トンネルの覆工切削完了後の2022年1月中旬に実施した。セントルのセットは、実際の覆工再生工事（防護工がある状態）を想定して、トータルステーションを用いた自動セット方式⁸⁾とし、問題なくセットすることができた。再生覆工コンクリート打設時は、再生覆工厚が20 cmであることから、人力によるパイプレータワークは困難と考え、型枠パイプレータをセントル全周に70個配置し、タブレットで集中制御することとした。加えてセントルにはコンクリート圧力検知センサーを設置して、圧力にて打設速度や打設高さを確認（タブレットによる確認）しながら実施した。コンクリートの製造については、今回開発した再アジテート設備（写真-9）を使用して繊維混入流動化コンクリートを打設直前に製造した。再生覆工コンクリートの打設は、再練混ぜを含めて問題なく完了した（写真-10）。なお、要求要件の圧縮強度は、52.6 N/mm²となり、要求要件を満足した。

打設完了の出来栄について、目視点検表にて行ったところ、全体的には良好だったものの、覆工脚部にアバタが散見された。今回は、スランプフロー60 cmのコンクリートを打設したため、パイプレータワークを最大10秒で設定した。しかしながら打設時のコンクリート性状や、出来栄から考察すると、パイプレータワークは、より入念に実施すべきだったと考えられる。

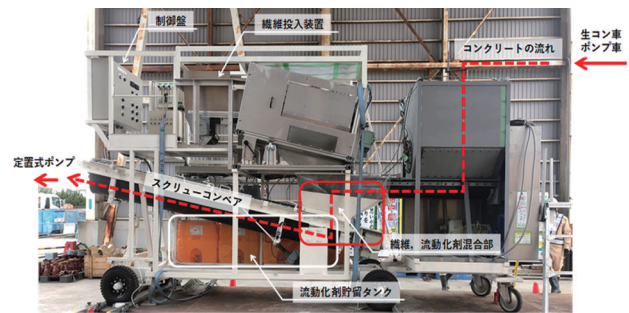


写真-9 再アジテートシステム



写真-10 再生覆工コンクリートの打設完了

§ 4. まとめ

- ・覆工切削技術開発では、切削作業時間全体の短縮を目的に、WJ 切削時に発生する切削殻を切削と同時に回収できる「切削殻回収システム」を開発した。WJ 切削試験では、このシステムを使用して実施した結果、一般的な工法に比べて作業時間を短縮できることが確認できた。
- ・防護工技術開発では、実機による衝突実験と衝突解析を実施し、実施工時の防護工への実機衝突時の影響を検証した。その結果、実機が防護工に衝突しても、防護工の変動は小さく、作業空間を阻害しないことを確認した。
- ・再生覆工コンクリート（現場打ち）技術開発では、長距離圧送によるコンクリート性状の変化や閉塞リスクを考慮して、「再アジテート設備」を開発し、打設直前で繊維および流動化剤を投入して、繊維混入流動化コンクリートを製造することを試みた。この装置を使用して実大の再生覆工コンクリート打設試験を実施したところ、トラブルなく打設することができた。

謝辞。本技術開発業務を遂行するにあたり、本社土木事業本部、土木営業部、トンネル委員会、土木技術部、技術研究所、機材部、安全部等、多くのご支援、ご鞭撻を頂きました。その結果、本技術開発業務は無事故無災害で完了することが出来ました。ここに感謝の意を示します。

参考文献

- 1) 高速道路機構の概要 2021 (パンフレット), 独立行政法人日本高速道路保有・債務返済機構
- 2) 高速道路リニューアルプロジェクト, 中日本高速道路株式会社, <https://www.c-nexco.co.jp/koushin/>, (参照 2023-04-20)
- 3) 供用下における矢板工法トンネル覆工再生工に関する手引き (案), 中日本高速道路株式会社金沢支社, 2020年1月
- 4) 北陸自動車道 覆工再生工に関する技術業務契約図書 (特記仕様書, 基本性能・基本条件書), 中日本高速道路金沢支社敦賀保全・サービスセンター, 令和3年3月
- 5) 鶴田ダムにおける堤体削孔工事, 渡部成雄, 西松建設技報 VOL. 37, 2014. 6
- 6) ウォータージェット工法, コンクリートコーリング株式会社, <https://www.concrete-coring.co.jp/technology/method/waterjet.html>, (参照 2023-04-20)
- 7) 設計要領第5集交通安全施設【防護柵編】2-2, 中日本高速道路株式会社他, 2016年8月
- 8) 山岳トンネル覆工用自動化セントルの開発, 椎名他, 西松建設技報 VOL. 44, 2021. 6