

TDR ショット工法の道路トンネル坑口部補強工事への適用 —硬化促進剤を用いた無機系特殊モルタルの湿式吹付け工法—

川 端 康 夫・中 山 佳 久

本工法は、劣化したコンクリートを除去した後に断面修復する補修工法で、良質な混和材料を配合した無機系特殊モルタルを混練り、圧送し、口先で硬化促進剤を添加した圧縮空気により、モルタルを補修面に吹付ける湿式吹付け工法である。ポリマーセメントモルタルに匹敵する品質を確保し、硬化促進剤の効果により、高い厚付け性能を有している。今回、昭和30年代に構築されたトンネル坑口部の覆工コンクリートに耐力不足が確認されたことから、NATMの坑口仕様と同等の保有耐力を得ることを目標に補強設計を行い、各種制約条件を考慮した上で本工法を適用した。

キーワード：坑口補強、無機系特殊モルタル、硬化促進剤、湿式吹付け工法

1. はじめに

TDR ショット (Tough and Durable Repair Shot) 工法は、中性化や塩害などの劣化外力により損傷を受けたコンクリート構造物を無機系特殊モルタルの湿式吹付けによって断面修復する工法である。本工法は、高品質な無機系材料を使用することで従来のポリマセメントモルタルを用いる断面修復工法と同等以上の品質を確保し、さらに硬化促進剤を用いることで、高い厚付け性能を実現し、施工性を向上させている。

今回、昭和30年代に構築されたトンネル坑口部の覆工補強を目的に本工法を適用した。当該箇所では、坑口部の覆工に変状並びに耐力不足が確認されたため、現在の山岳トンネル (NATM) の坑口仕様と同等の保有耐力が得られることを目標に、既存覆工内側に鉄筋を配置し、本工法による吹付けによって、覆工との一体化を図った。

ここでは、TDR ショット工法の特徴を示し、道路トンネルへの適用事例について報告する。

2. TDR ショット工法の概要

本工法は、図-1に示すように、パン型ミキサーで材料を練混ぜ、スクイズポンプでモルタルを圧送、ノズル吐出口手前で圧縮空気と硬化促進剤を混合して、補修面に吹付けることを基本的なシステムとしている。本工法は、良質な各種混和材を配合した無機系特殊モルタルと硬化促進剤を用いることで、以下の特

徴を有している。

- ①硬化促進剤を用いることで15 cm程度の厚付けが可能である (写真-1)。
- ②早期強度の増進が早く、振動下での施工に強い。補修部材の早期の再利用にも対応できる。
- ③モルタルの流動性が高く、約50 mの長距離圧送に対応できる。
- ④硬化促進剤の添加量を調整することでコテ仕上げが可能で、平滑な部材表面が形成できる。

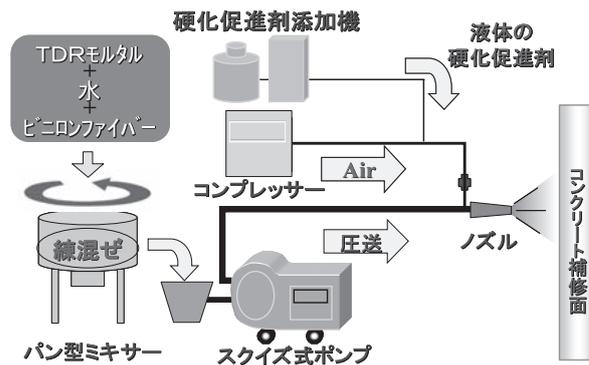


図-1 施工システム

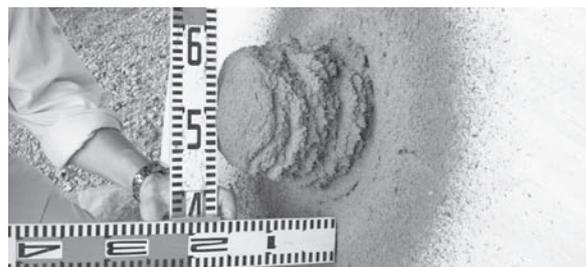


写真-1 厚付け性能

- ⑤湿式工法で粉塵・リバウンドが少なく，市街地での施工にも対応できる。
- ⑥硬化収縮特性，耐久性は，ポリマーセメントモルタルに匹敵する性能を有している。
- ⑦施工能力の向上，材料単価の圧縮により，従来の断面修復用吹付け工法よりローコストを実現した。

3. 覆工補強の要求性能と実験的検証

(1) 複合部材の耐力試験

覆工補強の保有耐力の検討では，補強部材と既設の覆工が一体となって，外力に対抗する構造を前提としないといけない。しかし，実際の部材では，補強部材と覆工が終局状態まで，一体となって挙動することが確認されておらず，各々の部材が荷重の作用する過程でひび割れや界面剥離などで個別に挙動することがあれば，補強の効果が得られない。そこで，複合構造（既存コンクリートと補強部材）とコンクリートだけの単純構造の梁試験体を用い，「曲げせん断破壊型」の破壊形態を想定した上で，部材寸法，鉄筋量を決定し，耐力試験を実施した。

(2) 試験方法

耐力試験用の試験体は，コンクリートと吹付け材からなる試験体（複合型）とコンクリートを一体成型した試験体（一体型）を用いた。「複合型」は，コンクリートを材齢 2 週まで湿潤養生した後，TDR ショット工法で高性能吹付けモルタルを吹付け，吹付け後材齢 28 日で耐力試験を実施した。その間の養生は，湿潤養生とした。載荷は，3 等分点載荷方法により実施している。

(3) 試験結果

図-2 に荷重—変位曲線およびひび割れ発生状況を示す。荷重—変位曲線より，「複合型」および「一体型」ともに，ほぼ同等の曲げ・せん断耐力を有していることが確認できる。また，試験体のひび割れ発生状況も同様の傾向を示しており，先行して部材中央付近に曲げひび割れが発生し，終局時には下面支点付近から試験体天端中央に向け，せん断ひび割れが延伸して破壊に至っている。

「複合型」では，そのひび割れが，打継ぎ面界面を斜め（45°）方向に横断しており，ひび割れが界面に展開したり，付着切れを起こすようなことは確認されなかった。

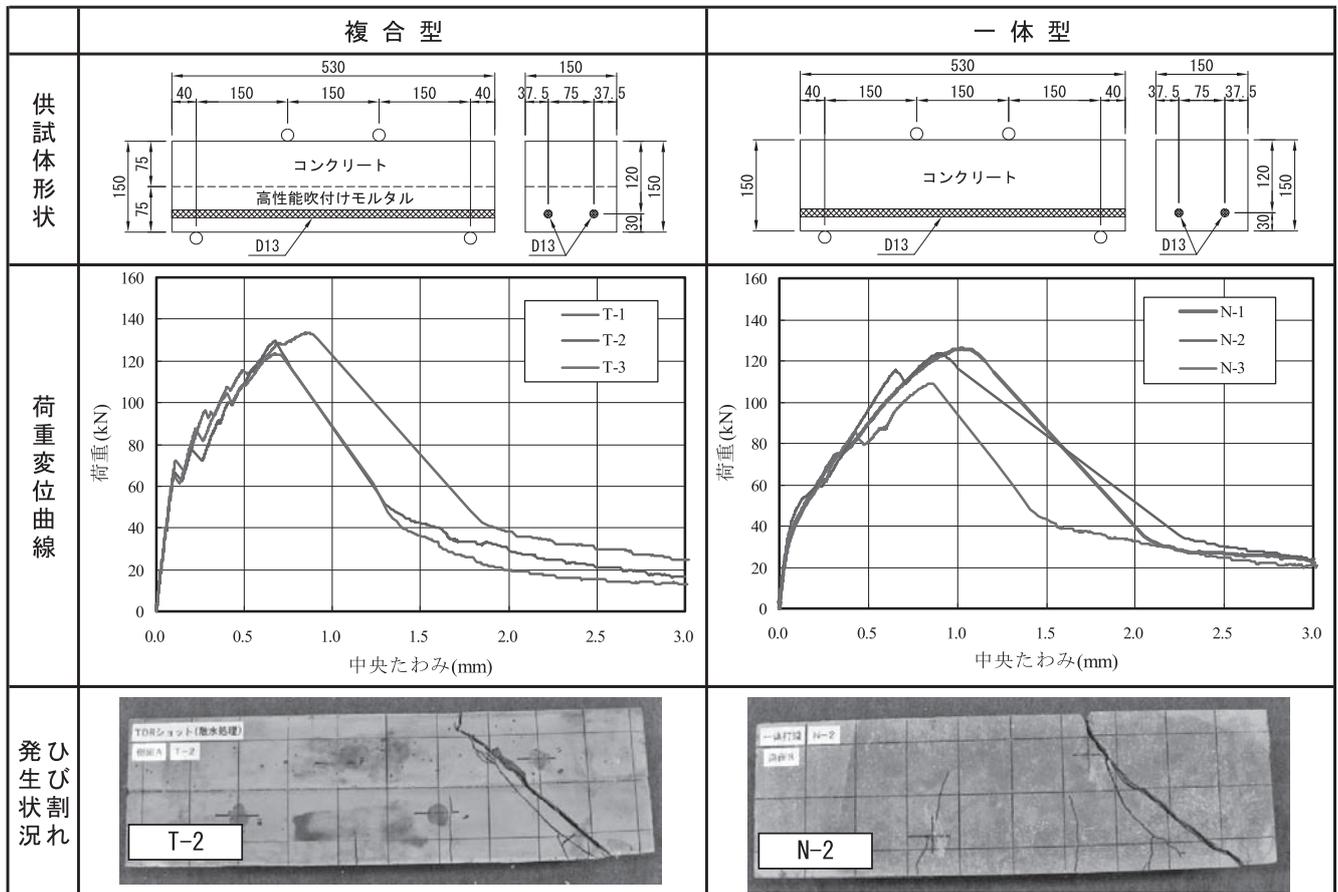


図-2 荷重—変位曲線およびひび割れ発生状況

(4) 複合部材の性能評価

試験結果より、既存（旧）コンクリートと無機系特殊モルタルの複合部材の性能として、以下が確認できた。

- ①荷重—変位曲線およびひび割れ発生状況より、終局状態に至るまでのどの段階においても、既存コンクリートと高性能吹付けモルタルの界面剥離は発生しない。
- ②既存コンクリートを高性能吹付けモルタルで補強すれば、一体型コンクリートと同等以上の曲げ、せん断耐力を得ることができる。
- ③既存コンクリートと高性能吹付けモルタルの界面剥離が発生しないことから、平面保持の仮定を用いて、曲げ、せん断耐力、変形性能を検討することができる。

4. TDR ショット工法の覆工補強への適用

(1) 工事概要

工事名：北 41 工区トンネル改築工事その 1

発注者：福岡北九州高速道路公社

場所：北九州市門司区大字黒川～奥田四丁目地内

工期：平成 17 年 9 月 6 日～平成 20 年 3 月 15 日

路線名：北九州都市高速道路 4 号線（上り線）大里 IC～春日 IC

施工者：飛鳥・松山特定建設工事共同企業体

補強対象：奥田トンネル・黒川トンネル坑口覆工

(2) トンネル概要と覆工の変状¹⁾

高速 4 号線において、もっとも古いトンネルは奥田・黒川トンネル（上り線）で、1958 年に竣工している。両トンネルの施工記録は残っておらず、標準断面図のみ現存している。施工年代から考察すると、木

製支保工を用いた在来工法による施工であったと考えられる。同時期に建設が進められていた「関門国道トンネル」の記録によると、同トンネルではスランプゼロに近い固練りコンクリートが使用されていた。木製支柱支保工において盛り替えが容易となるように、当時の覆工コンクリートは「固練りコンクリート」を使用することが一般的であった。採取したコンクリートコアを観察すると骨材の分布が不均一であり、空隙が確認されていることからコンクリートは建設現場で製造し、「木はずしによる手ばね打設」で施工されていたものと考えられる。ただし、正常に採取されたコンクリートコアからは、おおむね 40 N/mm² 以上の高い強度が得られており、「固練り」の効果が現れていた。

奥田トンネル出口側の覆工厚は、設計覆工厚 500 mm に対して、追越し車線側の天端から肩部にかけて 150～200 mm の厚さの箇所が比較的広く分布しており、局所的に 150 mm を下回る箇所があった。また、ひび割れの発生頻度が多く、ひび割れから漏水が確認されていた。

(3) 対策工の検討

表—1 に示すように奥田トンネル入口、出口および黒川トンネル入口は、損傷状態に違いが確認されたため、各々の状況に応じた対策工を選定した。表—2 に覆工補強対策工の比較表を示す。工法検討の結果、奥田トンネル入口では、炭素繊維シート工、奥田トンネル出口では、「鉄筋配置＋無機系特殊モルタル」による増し厚工、黒川トンネル入口では、「カーボングリッド配置＋無機系特殊モルタル」による覆工増し厚工を選定した。吹付けモルタル工法は、1 回の吹付け厚さが厚く、工程が有利となる TDR ショット工法を採用した。

表—1 各坑口覆工の損傷状態と課題

施工箇所	損傷の状態	坑口対策工としての課題
奥田トンネル 入り口	・覆工の巻厚不足 ・部分的な空洞（30 cm）	湧水もなく、ひび割れ、変状も少ないことから炭素繊維による剥離・剥落対策を基本とする。
奥田トンネル 出口	・極端な巻厚不足（15～20 cm） ・面壁背面の地質は脆弱層が厚い。 ・コンクリートの剥離 ・打継ぎ、ひび割れからの漏水が多い。	対象箇所は漏水が多く、繊維シートは適さない。脆弱層が厚く、極端に巻厚の薄い箇所があるため、補強対策が必要である。
黒川トンネル 入り口	・天端部の巻厚不足（25 cm 程度） ・縦横断にひび割れが発生しており、ひび割れ密度が高い。 ・覆工背面に空洞が広がっている（30 cm） ・打継ぎ、ひび割れからの漏水が多い。	対象箇所は漏水が多く、繊維シートは適さない。

表一 覆工補強対策工の比較表

工 法	断面修復工(※) + 炭素繊維シート工	カーボングリッド + 無機系特殊モルタル	断面修復工(※) + 鋼板接着工	樹脂塗装補強鉄筋 + 無機系特殊モルタル
工法概要	<p>標準的な剥離・剥落対策である。</p>	<p>カーボングリッドを配置し、厚さ50mmで無機系特殊モルタルを施工する。</p>	<p>工場で成型、塗装された鋼板をケミカルアンカーボルトで固定し、エポキシ樹脂を充填、接着する。</p>	<p>D19@200の樹脂塗装鉄筋を配置し、厚さ80mmで無機系特殊モルタルを施工する。</p>
性 能	剥離剥落対策として使用される。	補強効果は期待できるが、NATMの坑口覆工までの耐荷力を有さない。	NATMの坑口覆工の耐荷力を目指すことが可能。	NATMの坑口覆工の耐荷力を目指すことが可能。
建築限界の許容性	厚さが薄く、支障はない。	建築限界を侵す箇所をハツリ取ることに対処できる。	検討を要す。	建築限界を侵す箇所をハツリ取ることに対処できる。
供用下の安全性	1車線規制内で作業可能である。	・1斜線規制内で作業可能である。 ・粉塵等の養生が必要である。	・1斜線規制内で作業可能である。 ・重量物で施工性が悪い。	・1斜線規制内で作業可能である。 ・粉塵等の養生が必要である。
工 程	短期間	短期間	鋼板製作に時間を要す。 (4~6ヶ月)	短期間
経済比率	1.0	1.8	3.0	2.5
実 績	補強を目的として使用しない。	実績有り	実績有り	実績有り
施工箇所	奥田トンネル入口部に採用	黒川トンネル入口部に採用	—	奥田トンネル出口部に採用

※ 表中の断面補修工は、表面の不陸修正を目的としている。

(4) 奥田トンネル出口側坑口覆工の補強設計

補強設計では、作用荷重だけで補強構造を計画するのではなく、坑口部の現構造並びに変状、巻厚などを考慮して、NATMの坑口覆工と同等の構造性能を目指し、増し厚工の耐荷力を照査した。検討モデルを図一3に示す。覆工断面をフレームでモデル化し、限界状態設計法により検討した。現状覆工は、覆工厚の調査結果を基に最小厚150mmとし、覆工補強は現状覆工と「鉄筋配置+無機系特殊モルタル」の一体構造としてモデル化した。検討結果として、図一4に各検討モデルのM-N耐力線比較図を示す。これより、

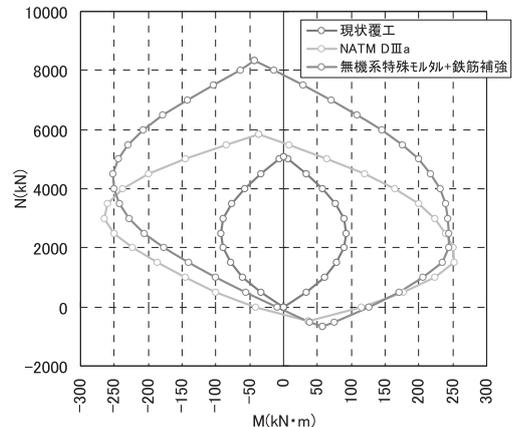
次の事項が確認できた。

- ① 現覆工は、無筋構造であり、引張力に対する抵抗がなく、許容できる曲げモーメントに限られる。
- ② NATMの坑口覆工や「鉄筋配置+無機系特殊モルタル」による補強は、鉄筋による補強効果により、許容可能な曲げモーメントが現状覆工より大きい。
- ③ 「鉄筋配置+無機系特殊モルタル」による補強は、NATMの坑口覆工と許容可能な曲げモーメントがほぼ同一であり、現状覆工を補強することで、同等の耐荷力を有する構造に回復できる。

CASE	基本条件		概略図
現状覆工	コンクリート	設計基準強度	40 (N/mm ²)
		覆工厚さ	150 ^(※) (mm)
	鉄筋	なし	
NATM	コンクリート	設計基準強度	18 (N/mm ²)
		覆工厚さ	350 (mm)
	鉄筋	D19@200	
吹付けモルタル+鉄筋補強	無機系特殊モルタル	設計基準強度	40 (N/mm ²)
		覆工+モルタル厚さ	150 ^(※) +80 = 230 (mm)
	鉄筋	D19@200	

※ 現状覆工厚さは、最小巻厚でモデル化した。

図一3 検討モデル



図一4 M-N耐力線比較図

(5) 奥田トンネル出口側覆工補強工の施工

主鉄筋としてD19を200mm間隔で配置し、表—3に示す配合で、80mmの増し厚吹付けを実施した。なお、施工前に漏水が確認されており、鉄筋かぶりも少ないことで、将来的に鉄筋の発錆が生ずる可能性があるため、樹脂塗装鉄筋を採用している（写真—2）。また、建築限界の制約が厳しい肩部については、既設覆工の巻き厚に余裕があることを確認した上で、吹付け前に既存覆工を切削し、建築限界を確保した。

施工は、終日の車線規制ができなため、すべての資機材をトラックに載せた車上プラント方式とし、準備・片付け作業の効率化を図った。また、高所の吹付け作業には、写真—3に示すように高所作業車を使用し、片側規制の状態で行っている。写真—4に完成写真を示す。

表—3 配合表（1 m³当たり）

目標強度	TDR モルタル	ビニロン ファイバー	水	減水剤
45 N/mm ²	1,975 kg	6.5 kg	253 kg	4 kg



写真—2 樹脂塗装鉄筋の配置



写真—3 TDR ショット工法吹付け状況



写真—4 覆工補強完成

5. おわりに

本工事は、片側車線規制という限られた作業範囲で、常に第三者の安全に留意しながら、施工を実施した。本報告が今後の類似工事の参考になれば幸いである。

最後に、本工事の実施にあたりご指導をいただきました。関係機関、関係者の方々に謝意を表します。

JCMA

《参考文献》

- 1) 伊川幹夫, 西恭太, 中山佳久: 施工年代におけるトンネル変状の特徴, シビルエンジニアリングジャーナル・シリーズ1「土木の新時代」, pp.78-84, 2007.4.

【筆者紹介】



川端 康夫 (かわばた やすお)
飛鳥建設㈱
土木事業本部土木技術部
環境リニューアルグループ



中山 佳久 (なかやま よしひさ)
飛鳥建設㈱
土木事業本部土木技術部
トンネル技術グループ