

# 繊維シート埋設による覆工補強

## 道路トンネル新設工事における T-FREG 工法の適用

宇野 洋志城・京 免 継 彦

筆者らは、トンネル覆工コンクリートのはく落防止を目的とした保全予防技術の一つとして、T-FREG 工法(Tunnel-Fiber Reinforced EdGing 工法)を開発し、道路トンネル新設工事において実施工に適用した。

本工法は、覆工コンクリート表層近傍に繊維シートを埋設することで、脱型時からはく離、はく落現象を未然に防止するものであり、その耐久性と施工性の優れた点は実証実験ならびに実施工を通じて明らかとなった。

本工法は今後のトンネル工事において覆工の長寿命化を図る上で有効な対策の一つと考えられる。

キーワード：トンネル、覆工コンクリート、はく落、保全予防、繊維シート、長寿命化

### 1. はじめに

最近のトンネル新設工事における技術提案には、覆工コンクリートの品質や耐久性の向上を目的とする対策が多く挙げられる。そのため、施工段階における覆工コンクリートの充てん確保やひび割れ発生の抑制、および打込みから脱型後に至るまでの養生管理方法に関連する提案の多様さに比べて、ひび割れ発生後の保全管理を見込んだ提案は極めて少ない。

今回、筆者らが開発、適用したトンネル覆工コンクリートのはく落防止を目的とした保全予防技術は、新設トンネル覆工コンクリートのはく落を防止するものである。具体的には、覆工コンクリート表層近傍に繊維シートを既に埋設した状態で供用開始する、脱型時点からはく離、はく落現象を未然に防止する技術(T-FREG 工法：Tunnel-Fiber Reinforced EdGing 工法)である。

事前の計画、設計段階から将来のはく落に備えた対策を盛り込むことで機能を永く維持し、保全行為自体

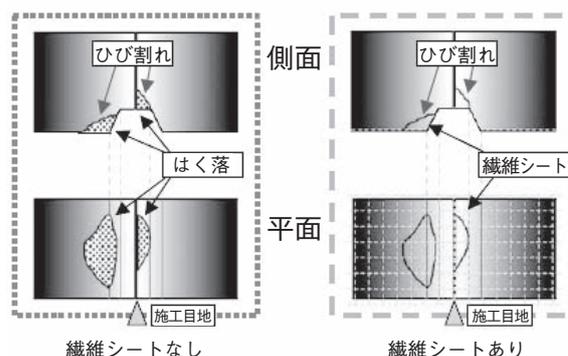


図-2 はく落防止のイメージ

を不要とする、はく落リスクを低減させることを目指したものであり、「保全予防」の概念<sup>1)</sup>に基づく覆工コンクリートの保全予防技術の一つである。本工法の適用イメージを図-1、2に示す。

本報告では、T-FREG 工法を道路トンネル新設工事へ適用した事例について述べ、その耐久性と施工性に関する実証実験の結果から明らかとなった内容を示す。

### 2. 適用条件

#### (1) トンネルの概要

今回 T-FREG 工法を適用した道路トンネル新設工事は2トンネルであり、宮崎県に位置する東九州自動車道路の一区間である。

トンネルの概要を表-1に示す。適用対象は2トンネルで28ブロック(Nトンネル10ブロック、Kトンネル18ブロック)であった。

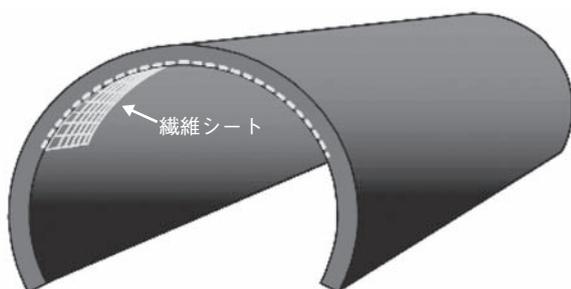


図-1 T-FREG 工法の適用イメージ

表一 トンネルの概要

項目	Nトンネル諸元	Kトンネル諸元
地山岩種	頁岩・砂岩	頁岩・砂岩
線形勾配	平面線形 R=4,000m~R=5,000m 縦断勾配 2.20%	平面線形 R=7,500m 縦断勾配 2.20%
トンネル延長	215 m	243 m
内空断面積	C I, C II 66.9 m <sup>2</sup> , D III 73.4 m <sup>2</sup>	C I, C II 66.9 m <sup>2</sup> , D III 73.4 m <sup>2</sup>
トンネル工法	NATM	NATM
掘削方式	発破掘削	発破掘削
掘削工法	補助ベンチ付全断面掘削方法 上半先進ショートベンチカット工法 (D IIIa)	補助ベンチ付全断面掘削方法 上半先進ショートベンチカット工法 (D IIIa)
補助工法	充填式フォアポーリング (D IIIa)	充填式フォアポーリング (D IIIa)

C I a 断面

D IIIa 断面

(2) 覆工の条件

覆工コンクリートには、粗骨材の最大寸法が20 mmの配合を使用した。NトンネルではすべてT1-1配合、Kトンネルでは13ブロックがT1-1配合、5ブロックがT3-1配合（ポリプロピレン繊維入り配合）とした。

配合表を表一2に示す。

目標のスランプと空気量は、T1-1配合で19 ± 1.0 cm, 5.0 ± 0.5%, T3-1配合でポリプロピレン繊維混入後に19 ± 1.0 cm, 5.0 ± 0.5%とした。

表一2 配合表 (2トンネル分)

区分	W/C (%)	s/a (%)	単体量 (kg/m <sup>3</sup> )						
			W	C	S1	S2	G	Ad	Fiber
Nトンネル T1-1	57.0	48.3	172	302	631	236	927	2.57	—
Kトンネル T1-1	58.4	52.0	163	279	475	473	880	2.93	—
Kトンネル T3-1	48.5	53.0	173	357	459	458	820	3.21	2.73

2トンネル共通/C:高炉セメントB種, Ad:高性能AE減水剤  
S1:延岡市大武長産海砂, G:東郷町山陰産砕石  
Nトンネル /S2:津久見市産砕砂  
Kトンネル /S2:東郷町山陰産川砂, Fiber:ポリプロピレン

3. 施工方法

(1) 繊維シート

コンクリート打込み前の型枠面に連続繊維シートを敷設し、脱型時からコンクリートの表層近傍に埋設した状態で供用開始する工法に関しては、これまでに橋梁上部工の下面（交差部の橋梁下面）<sup>2)</sup>や二次製品のシールドトンネル用セグメントの内面（高流動コンクリートセグメント）<sup>3)</sup>を対象に実用化されているが、山岳トンネルにおける覆工コンクリートへの適用例は

未だない。

過去の実績では、橋梁上部工の下面にはアラミド繊維シート、シールドトンネル用セグメントの内面には耐アルカリガラス繊維シートが使用されている。各繊維シートの諸元を表一3に示す。

表一3 各繊維シートの諸元

繊維の種類	アラミド	耐アルカリガラス
形状	40mmの3軸メッシュ	7mm×5mmの開口
密度	400g/m <sup>2</sup> 以上	400g/m <sup>2</sup>
引張強度	30kN/m	≧60kN/m, ≧38kN/m
特徴	片面に3号硅砂を付着	厚さ0.85mm
外観		

橋梁上部工に適用する場合には底面あるいは側面の型枠内面に独自の治具を用いて固定しており、その治具を外すことなくコンクリートの打込み作業が行われ、シールドトンネル用セグメントに適用する場合には型枠底面に鉄筋かごとスペーサーを利用して固定しており、そのまま高流動コンクリートの打込み作業が行われる。

ともに上方から目視確認でき、コンクリート打込み作業の段階で繊維シート周辺への充てん状況と繊維シートのよれやたるみなどの変形、ずれや移動具合をチェック、修正も可能である。

しかしながら、覆工コンクリートを対象とする場合、とくにアーチ天端部分では打込み方向が上方になり、限られた吹上げ口からコンクリートが型枠内面を横移動しながら充てんする。その結果、吹上げ口付近の織

繊維シートはコンクリートによって大きく乱される可能性があるが、目視によるチェック、修正ができない条件となる。さらに、覆工コンクリートの一部はく落を問題視する観点から、固定治具は打込み終了時に撤去することを目標としたため、埋設型の固定治具は使用できない方向で施工方法を検討した。

そこで、実規模レベルでの施工性検証実験を行うことで繊維シートの固定に関する検討を行い、使用実績のある2種類の繊維シートのうち、曲率のあるトンネル用型枠（以降、セントルと称する）に対しても確実に固定でき、かつ打込みによるコンクリートの圧力により繊維シートのよれやたるみなどの変形、ずれや移動の生じない点から、使用する繊維シートは耐アルカリガラス繊維シートとした。

(2) 適用範囲

繊維シートの適用範囲のイメージを図-3に示す。縦断方向には施工目地部を中心に幅1m程度の範囲とした。

コンクリート打込みの際にはセントルの両端部分50cm程度に繊維シートを固定し、最終的に目地部を挟んで1m程度の範囲で両側コンクリートの表層近傍に繊維シートが埋設されている状況を実現した。

ラップ側での目地部分にはウレタン状の材質を使用することで問題なく繊維シートを設置、固定することができた。

今回使用した目地形状は台形であったが、仮に目地形状が三角形であっても繊維シートの固定に関しては問題なく、事前に繊維シートに折り曲げるなどの加工をすることで十分に対応できることも検証した。

横断方向には建築限界をカバーし、かつセントルをジャッキダウンできる範囲とし、今回は天端をカバーしつつ肩部まで含めた120°の範囲とした。(円周方向の長さ11.8m程度)

(3) 施工手順

繊維シートの設置から固定までの作業は、通常作業

と並行して行った。

施工手順の例を図-4に示す。

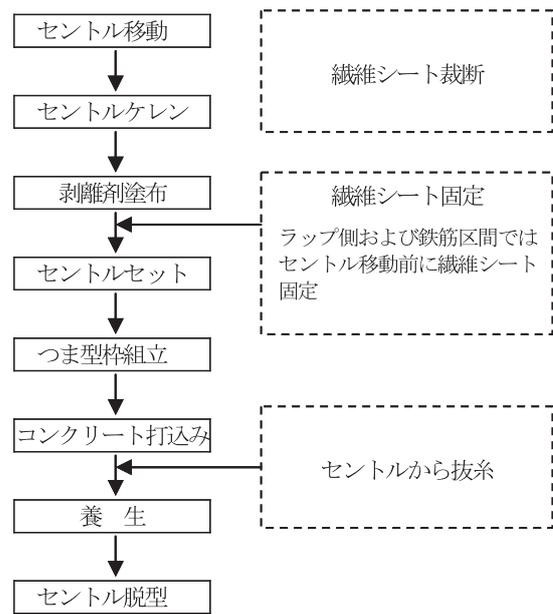


図-4 施工手順の例

繊維シートの固定方法には、セントルに開けた孔と釣り糸を利用した（特許出願中）。基本的には従来のスライドセントルを使用し、加工はごく僅かで済み、繊維シート適用のための特殊機械は不要である。

事前に鋼製型枠を用いて実規模レベルで行った施工性検証実験では、スランプ8cmから21cmまでの配合を使用してコンクリートのコンシステンシーが繊維シートに及ぼす影響を確認した。

また、その際に締固めに使用した高周波の棒状振動機は、一般にトンネル施工現場で使用する振動部外径を43mmとするタイプとし、繊維シートに振動部の先端が激しく当たる状況を再現しつつ、入念な締固めを行った。

その結果、締固め作業中に繊維シートがよれたり、変形することはなく、脱型後の確認でも繊維シートが目標の位置から移動したり、繊維シート自体が傷んだような状況は認められなかった。

上記の実験結果を踏まえ、本施工の際にも同タイプ

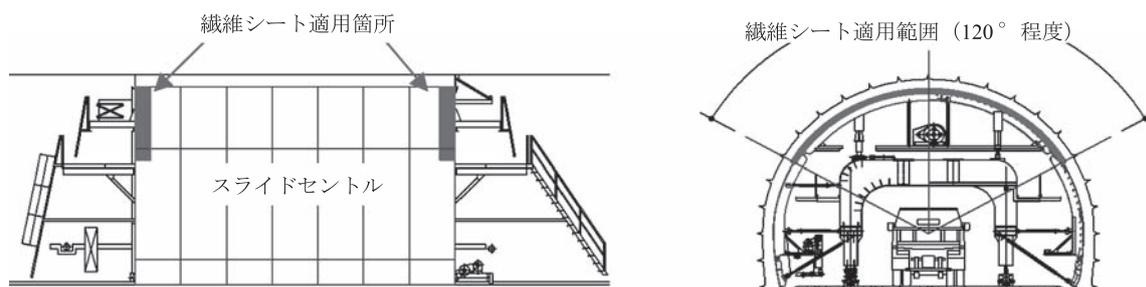


図-3 適用範囲のイメージ

の高周波の棒状振動機を使用し、繊維シートに先端部が当たることを気にせず通常どおり入念な締固め作業を行った。

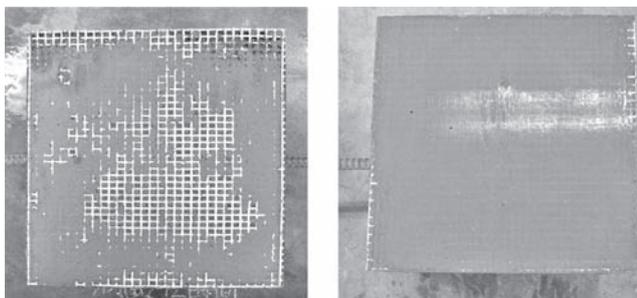
#### 4. 検証結果

##### (1) 繊維シートの付着性

繊維シートには、脱型直後の段階から覆工コンクリートとの一体化が要求される。脱型時に繊維シートが十分に付着していることは最低条件であり、脱型が行われるのは極めて若材齢であることから、繊維シートがセメントと一緒にコンクリートからはく離しない条件を検証するため、JIS A 6909（建築用仕上塗材）に準拠して建研式の簡易型短軸引張試験機を用いた接着力試験を実施した。

その結果、圧縮強度  $0.20 \text{ N/mm}^2 \sim 0.47 \text{ N/mm}^2$  程度で脱型した場合には、繊維シートはコンクリート側に残るもののモルタルペーストが型枠と一緒にはく離した。さらに圧縮強度が  $1.10 \text{ N/mm}^2$  程度に達してから脱型した場合には、モルタルペーストもはく離せず、美観上望ましい出来形となった（写真—1 参照）。

型枠の取り外し時期としてトンネル標準施工方書では  $2.0 \text{ N/mm}^2 \sim 3.0 \text{ N/mm}^2$  程度が目安<sup>4)</sup>とされていることから、一般にトンネル施工時の脱型強度は  $2.0 \text{ N/mm}^2$  以上であることが多い。



圧縮強度  $0.20 \text{ N/mm}^2$

圧縮強度  $1.10 \text{ N/mm}^2$

写真—1 脱型後の出来形

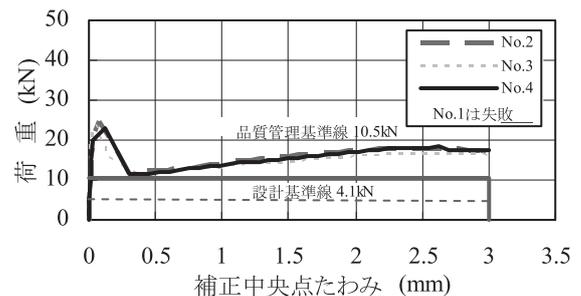
したがって、通常の施工では、脱型時に繊維シートがはく離する可能性はないと判断した。

また、材齢 28 日時点で母材の接着強度と比較した結果、若材齢で脱型することで繊維シートの付着が劣ることはなかった。

##### (2) 曲げ靱性

はく落防止性能を検証するため、JHS 730-2003『繊維補強覆工コンクリートの曲げ靱性試験方法』<sup>5)</sup>に準拠して曲げ靱性係数を求めた。

試験結果を図—5に示す。曲げ靱性係数は平均値で  $2.02 \text{ N/mm}^2$  が得られ、繊維補強覆工コンクリートの曲げ靱性係数の基準である  $1.40 \text{ N/mm}^2$  を十分上回る結果を示した。その数値は非鋼繊維を容積混入率で 0.3% 使用した場合の短繊維補強コンクリートが示す水準を超えており<sup>6)</sup>、曲げ靱性係数のばらつきも明らかに小さい。その要因は繊維シートによる繊維配列方向が短繊維の分散状況に比べて安定していることに関係していると考えられた。



図—5 曲げ靱性試験結果

##### (3) 押抜きせん断耐力

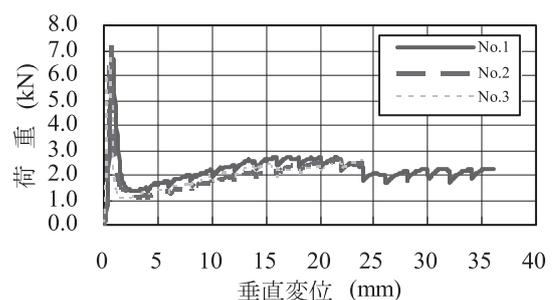
はく落防止性能を検証するため、JHS 424-2004『はく落防止の押抜き試験方法』<sup>7)</sup>に準拠して押抜きせん断耐力を求めた。

載荷速度は開始時点で  $0.2 \text{ mm/min}$ 、以降変位  $2.0 \text{ mm}$  から終了までは  $1.0 \text{ mm/min}$  とし、 $2.0 \text{ mm}$  の変位毎に 2.0 分間載荷を停止して載荷面反対側のはく離範囲を目視観察し、はく離範囲をマーキングした。

最終変位は  $23 \text{ mm}$  とし、その時点での最大荷重を記録するが、変位  $10 \text{ mm}$  までに得られた最大荷重データは考慮しなかった。

試験結果を図—6に示す。変位  $10 \text{ mm}$  以上における最大荷重は平均値で  $2.62 \text{ kN}$  が得られ、連続繊維シート後貼り工法の基準である  $1.5 \text{ kN}$  を十分上回る結果を示した。

これより、前項の曲げ靱性試験結果と併せて判断して、T-FREG 工法は十分なはく落防止性能があると考えられた<sup>8)</sup>。



図—6 押抜き試験結果

#### (4) 発熱性

覆工コンクリートをトンネル構造物内での施設の一部とすれば、他施設と同レベルの耐火性能が求められると考え、平成12年に改正された建築基準法で定める防火材料3ランク（不燃材料、準不燃材料、難燃材料）のうち準不燃材料ランクに適合することを検証するために、発熱性試験<sup>9)</sup>を実施した。

その結果、10分間の総発熱量は基準値上限8MJ/m<sup>2</sup>の1/10以下であり、最高発熱速度も基準値上限200kW/m<sup>2</sup>の1/100程度までにしか達しなかった。繊維シートは着火することなく10分間の加熱時間を終了し、有害な亀裂や損傷は認められなかった。

#### (5) ガス有害性

準不燃材料ランクに適合することを検証するため、同様にガス有害性試験<sup>9)</sup>を実施した。

その結果、有害なガスは発生せず、発熱性試験における燃焼するものがないことを裏付けた。

これより、前項の発熱性試験の結果と併せて判断して、T-FREG工法は十分な耐火性能があると考えられた<sup>10)</sup>。

#### (6) 施工手間

施工時において一連の作業に要した時間を整理した結果、施工対象区間28ブロックの総施工面積352.8m<sup>2</sup>に対して、繊維シートの準備から設置、固定までに要した時間の実績は約12.4分/m<sup>2</sup>であった。

今回の繊維シート適用範囲面積は約12.6m<sup>2</sup>であることから、全工程で約156分/ブロックの作業時間を要したことになるが、事前の準備や並行作業が可能であるものが多く、結果的に作業員の増員や時間外作業も必要なく、通常の作業サイクルに作業を吸収できた。

### 5. おわりに

覆工コンクリート表層近傍に繊維シートを既に埋設した状態で供用開始することで脱型時から離、はく落現象を未然に防止する技術（T-FREG工法：

Tunnel-Fiber Reinforced EdGing工法）を道路トンネル新設工事に適用した結果、その耐久性と施工性の優れていることを明らかにすることができた。

本工法は、トンネル覆工コンクリートのはく落防止を目的とした保全予防技術として開発したものであり、その適用は今後のトンネル工事において覆工の長寿命化を図る上で有効な対策の一つと考えられる。

JICMA

#### 《参考文献》

- 1) 例えば土木学会：コンクリート技術シリーズNo.71 材料劣化が生じたコンクリート構造物の構造性能，pp.169-177，2006.9
- 2) 寺田典生，青木圭一，中井裕司：繊維シートによる剥落防止対策の開発，橋梁と基礎，pp.27-32，2003.11
- 3) 玉井攻太，木村定雄，松浪康行，倉木修二，水上博之：コンクリート系セグメントの表面補強材としての繊維シートの適用，トンネル工学報告集，Vol.14，pp.389-394，2004.11
- 4) 土木学会：トンネル標準示方書〔山岳工法〕・同解説，pp.173，2006.7
- 5) 東日本高速道路，中日本高速道路，西日本高速道路：トンネル施工管理要領，2006.10
- 6) 宇野洋志城，歌川紀之，小泉直人：長期耐久性を向上させるための覆工コンクリートの配合検討，トンネル工学報告集，Vol.17，pp.221-226，2007.11
- 7) 東日本高速道路，中日本高速道路，西日本高速道路：試験方法第4編 構造関係試験方法，2006.10
- 8) 宇野洋志城，歌川紀之，川崎真史，小泉直人，上野清，田中康一郎：T-FREG工法による二次覆工コンクリートのはく落防止対策，土木建設技術発表会2009 概要集，pp.1-6，2009.11
- 9) 建材試験センター：防耐火性能試験・評価業務方法書，pp.50-59
- 10) 宇野洋志城，歌川紀之，木村定雄：繊維シートを用いたはく落防止技術（T-FREG），平成21年度建設技術報告会報文集，pp.109-112，2009.10

#### 【筆者紹介】

宇野 洋志城（うの よしき）  
佐藤工業㈱  
土木事業本部 技術研究所  
主任研究員



京免 継彦（きょうめん つぐひこ）  
佐藤工業㈱  
土木事業本部 土木企画部 機電課  
課長

