

繊維補強吹付けコンクリートの開発と シールド二次覆工への適用

Application for Shield Tunnel Lining Works by Reinforced Polypropylene Fiber Shotcrete

高橋 秀樹*	椎名 貴快**
Hideki Takahashi	Takayoshi Shiina
細田 道敏***	鈴木 嘉昌***
Michitoshi Hosoda	Yoshimasa Suzuki

要 約

新しく開発した十字形状ポリプロピレン短繊維を混入した高強度繊維補強コンクリートを用い、変状トンネルの耐荷力と機能の強化・保持を目的とした「既設トンネルの薄肉補強工法」を開発した。独土木研究所で実大規模の載荷実験を行い、補強効果と施工性を検証しており、内空断面に余裕がない場合でも十分な耐荷力を低コストで実現できることを確認した。

本工法の特長を生かした新たな利用方法として、共同溝シールドトンネルの二次覆工が狭小となる鋼製セグメント使用区間に適用し、良好な施工性と品質が得られることを確認したので、この施工事例について報告する。

目 次

- § 1. はじめに
- § 2. PP ファイバーショット工法
- § 3. PP ファイバーショット工法の適用
- § 4. おわりに

§ 1. はじめに

変状トンネルの耐荷力と機能の強化・保持を目的とし、高強度の繊維補強コンクリートを用いた「既設トンネルの薄肉補強工法」を西松建設(株)、戸田建設(株)と独土木研究所で共同開発した。

本工法(PPファイバーショット工法)を、共同溝シールドトンネルの鋼製セグメント使用区間の二次覆工に適用した。一般に、シールドトンネル鋼製セグメント使用区間の二次覆工は、場所打ちコンクリートで施工している。本適用工事では、鋼製セグメントのリブ高が高く、二次覆工厚さが薄くなる区間に場所打ちコンクリートに替わる工法として、充填性などの施工性、品質および経済性に優れた本工法を提案し、採用されたものである。

* 技術研究所技術研究部

** 技術研究所技術研究部土木技術研究課

***東北(支) 東部共同溝(出)

§ 2. PP ファイバーショット工法

2-1 工法の概要

(1) 開発コンセプト

土圧などによって変状が発生したトンネルに対し、内空断面に余裕がない場合に圧縮力に対しても十分な補強効果が期待できる補強対策が少ないのが現状である。

一方、トンネル覆工の補強工法としては、繊維シートや鋼板接着などによる内面補強工法、セントル補強や場所打ちコンクリート、吹付けコンクリートなどによる内巻工法がある。(図-1参照)これらの補強工法のうち、高強度の薄肉補強が可能、かつ剥落防止効果が期待でき、さらに型枠が不要で工期短縮が可能な工法として繊維補強吹付けコンクリートに着目した。なお、繊維としては、鋼繊維のような錆の発生がなく、トンネル内で火災が起

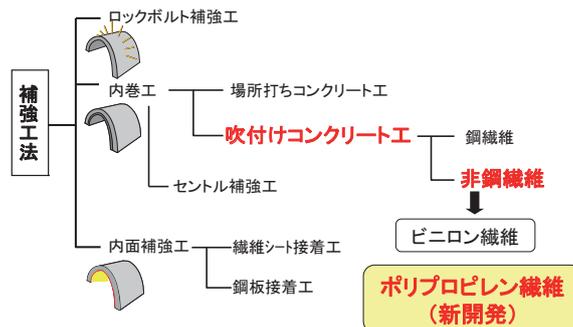


図-1 開発工法の位置づけ

きた場合にも爆裂防止効果が期待できる材料として、ポリプロピレン繊維を選定した。

本開発工法のコンセプトを以下に示す。

① 補強コンクリートの薄肉化

高強度コンクリートをベースとした繊維補強吹付けコンクリートを用いることで、補強に必要なコンクリートの薄肉化（標準巻厚 125 mm）を実現し、トンネルの内空断面に余裕がない場合でも、補強が可能となる。

② 補強工事の工期を短縮

急結剤を用いた吹付け施工を行うため型枠が不要であり、他の補強工法と比較して工期の短縮が可能となる。したがって、緊急工事のような工事期間が比較的短い場合には特に有効となる。

③ 工事コストの縮減

従来の繊維補強材料と比べて材料費を低減できるとともに、工期短縮も可能なため、工事全体でのコスト縮減が期待できる。

④ 高い施工の自由度

吹付け範囲を任意に設定でき、一部供用下のトンネルでの施工など、トンネル占用形態に応じた施工が可能となる。

(2) ポリプロピレン短繊維

新しく開発したポリプロピレン短繊維は、断面形状が十字型で、コンクリートの付着性を高めるため側面にエンボス（凹凸）加工を施したものである。

ポリプロピレン短繊維の物性を表-1 に、短繊維の断面、加工状況を写真-1、写真-2 に示す。

表-1 ポリプロピレン短繊維の物性

項目	数値
比重	0.91
換算直径 (mm)	0.68
繊維長 (mm)	30
引張強度 (N/mm ²)	500

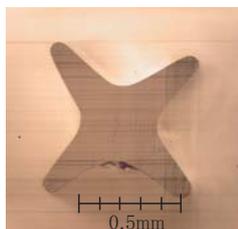


写真-1 繊維の断面

写真-2 繊維の凹凸加工状況

(3) 高強度繊維補強吹付けコンクリートの配合と施工

高強度繊維補強吹付けコンクリートの配合を表-2 に示す。吹付け後の設計基準強度を 36 N/mm² と設定し、急結剤は添加量の調整が容易で粉塵・はね返りの少ない

表-2 高強度繊維補強吹付けコンクリートの配合

設計基準強度 (N/mm ²)	スランプフロー (cm)	Gmax (mm)	W/C (%)	s/a (%)	単位セメント量 (kg/m ³)	繊維混入量 (Vol.%)	液体急結剤 (%)
36	50±7.5	15	40	60	480	0.3	7

液体急結剤を採用した。

本工法の施工は、ポリプロピレン短繊維を混入した高強度繊維補強コンクリートを覆工表面に吹き付けることにより、覆工コンクリートに曲げ靱性を付与して十分な剥落防止効果が確保できるものである。

吹付けに際しては、付着を良好にするためアンカー筋や溶接金網などを覆工表面に取り付ける。繊維補強吹付けコンクリートはポンプで圧送し、ノズル手前で液体急結剤を混入し、人力で水平方向に吹付ける。

2-2 補強効果検証実験

(1) 覆工載荷実験

損傷した覆工内面に補強工を施した複合構造の破壊形態、耐荷力を調べる目的で、実大規模の覆工載荷実験を行った。

覆工試験体は、2車線道路トンネルを模擬した外径 9.7 m の半円形、覆工厚 30 cm とし、水平に置いて載荷した。なお、作用荷重は、トンネル上方の地山が緩み、ある高さ相当の地山重量が覆工天端に直接荷重として作用する、いわゆる緩み土圧を想定した荷重形式とした。

覆工損傷の模擬と実験手順については、覆工試験体の天端部 3 箇所 (80°, 90°, 100°) の油圧ジャッキによる静的載荷により、試験体に損傷 (ひび割れ、圧壊等) を与えた後 (損傷載荷)、荷重が最大値の 95% 程度まで低下した時点で除荷した。次に、この損傷を与えた覆工試験体の内面に、ポリプロピレン短繊維を混入した高強度コンクリートを吹付けて内巻き補強し、補強効果を確認するための試験体を製作した。載荷実験の概要を図-2、載荷実験状況を写真-3 に示す。

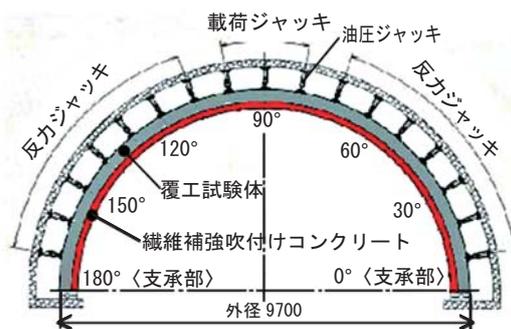


図-2 載荷実験の概要



写真-3 載荷実験状況

(2) 試験体の作製

1) 無垢の覆工試験体の仕様

無垢の覆工試験体の仕様を表一三に示す。試験体は、現状の2車線道路トンネルの覆工と同程度の仕様とした。

表一三 覆工試験体の仕様

配合	普通 18-12-40 N
覆工厚	300 mm
形状寸法	外径 9,700 mm 高さ 1,000 mm

2) 試験体の作製

繊維補強コンクリートは、ポンプで圧送し、ノズル手前で空気を混入し、人力にて水平方向に吹付けた。吹付け方法を表一四に示す。なお、繊維補強吹付けコンクリートの配合は表一二の通りである。

吹付け厚は 150 mm とし、吹付け前荷重により損傷を与えた覆工試験体との付着性を向上させるため、溶接金網 (φ5-150×150) をアンカーで取付け一体化を図った。

表一四 吹付け方法

吹付機の種類	コンクリートポンプ方式(ノズル部：人力)
急結剤添加装置	液体急結剤供給装置
配管条件	ノズル部配管径：φ 50 mm 急結剤添加位置：ノズルから 1.0 m 手前
吐出量	3.0 m ³ /hr
吹付け方向	水平
吹付け距離	1.0 m (吹付け面とノズル先端の距離)

(3) 実験結果

1) 強度試験結果

覆工試験体及び繊維補強吹付けコンクリートの強度試験結果(損傷荷重時、補強後荷重時)を表一五に示す。

繊維補強コンクリートに関して、吹付け後(切出し)の各値は吹付け前と比較して、ペースト分の飛散や急結剤の添加、空気の巻き込み等の影響によって2~3割程度低下したものの、施工上の要求性能を十分満足する結果であった。

表一五 強度試験結果

試験体	実験区分	供試体区分	材齢(日)	圧縮強度(N/mm ²)	曲げ強度(N/mm ²)	曲げ靱性係数(N/mm ²)
覆工	損傷荷重	荷卸し時	14	18.4	-	-
			28	21.7	-	-
繊維補強	補強後荷重	吹付け前	14	58.2	4.64	1.39
		吹付け後	14	40.3	4.26	0.89

2) 耐久性試験結果

繊維補強吹付けコンクリートの耐久性試験結果を表一六に示す。吹付け前後で相対動弾性係数 80% 以上、質量減少率は 0.5% 程度であることから、十分な凍結融解抵抗性を有していた。長さ変化率は、吹付け後の方が吹付け前に比べて 0.02% 収縮率が大きい結果となった。吹付け後の中性化深さは 7.5 mm となり、溶接金網の最小かぶり 35

mm を考慮すると、十分な耐久性を有していると判断できる。

表一六 耐久性試験結果

試験	測定項目	試験材齢	単位	区分	
				吹付け前	吹付け後
凍結融解	相対動弾性係数	300 サイクル	%	97.4	87.2
	質量減少率	300 サイクル	%	-0.5	-0.4
長さ変化	長さ変化	26 週	μ	550	770
促進中性化	中性化深さ	26 週	mm	4.80	7.50

(4) 覆工載荷実験結果

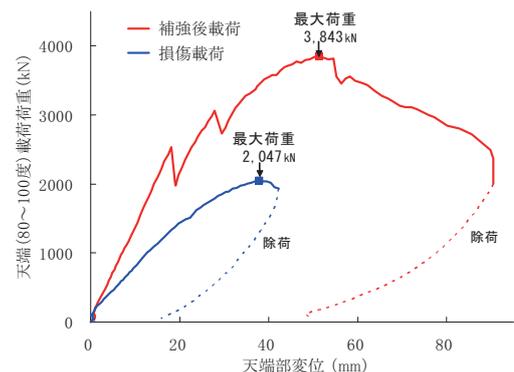
損傷荷重時、補強後荷重時における荷重変位曲線および躯体損傷状況をそれぞれ図一三および図一四に示す。

天端外面と両肩部内面に圧壊を生じた覆工を本工法(補強厚 t=150 mm)で補強した場合の耐荷力は、無垢の覆工の耐荷力(最大荷重 2047 kN：変位 38 mm)の約 2 倍(最大荷重 3,843 kN：変位 51 mm)となった。

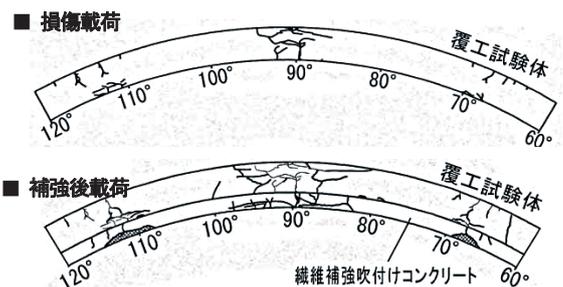
最終破壊は、天端外面覆工コンクリート圧壊による剥落により生じ、天端、両肩内面の繊維補強吹付けコンクリートには浮上りが生じたものの剥落には至らなかった。

なお、無垢の覆工試験体の耐荷力は最大荷重以降、曲げモーメントの集中する天端外面補強後の試験体の荷重変位に関して荷重 2,500 kN (90° 付近)、および両肩部内面 (70°, 110° 付近) でコンクリートの圧壊が進展し、荷重低下から除荷に至った。

また、補強後の試験体の荷重変位 2,500 kN, 3,000 kN 付近で荷重低下がみられた。これは、覆工試験体と補強部との界面で部分的な付着切れが起きたためと考えられる。



図一三 荷重変位曲線



図一四 試験体損傷状況

§ 3. PP ファイバーショット工法の適用

3-1 工事概要

本工事は、1.37 km、仕上り内径φ4.35 m の共同溝をシールド工事で構築する。工事概要を以下に示す。
共同溝断面を図-5 に示す。

工 事 名：仙台東部共同溝工事
 発 注 者：国土交通省 東北地方整備局
 工事場所：仙台市青葉区本町～宮城野区小田原
 工 期：平成 15 年 3 月 27 日～平成 19 年 3 月 23 日
 施 工 者：西松・アイサワ特定建設工事共同企業体
 工事延長：1,370 m
 工 法：泥土圧シールド工法（シールド外径φ4.88 m）

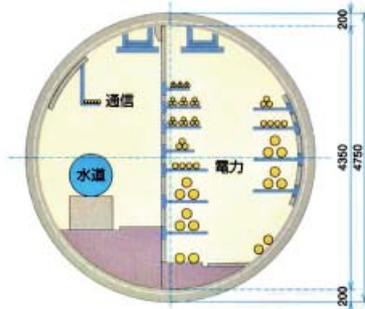


図-5 共同溝断面図

3-2 適用工事

管路部には共同溝内に設置される施設（電力管路）の分岐部 E1, E2 が計画されている。この施設の分岐部は鋼製セグメントにより一次覆工を構築し、場所打ちコンクリートによる二次覆工が計画されていた。

この分岐部は、二次覆工厚はリブ部で 50 mm と薄く、10 mm の補強筋が格子状に配置されることもあり、セントル（型枠）を用いた場所打ちコンクリートではコンクリートの充填不良が懸念された。

また、セントルを用いた施工では、セントルの設置・撤去などの工程延長や型枠費用など不利な条件も加わるため、検討を進めていく中で充填性、施工性および経済性にも優れた PP ファイバーショット工法が採用された。

適用箇所的位置を図-6 に、E1, E2 分岐部を図-7 に示す。さらに、二次覆工の断面詳細を図-8 に示す。

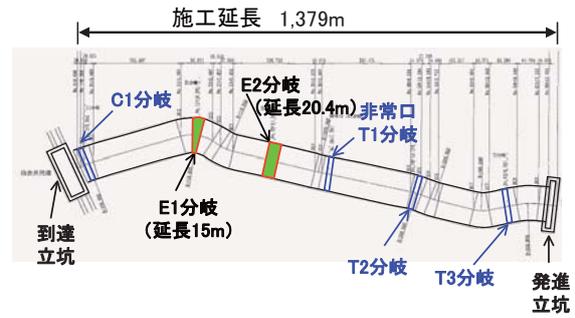


図-6 適用箇所位置（平面図）

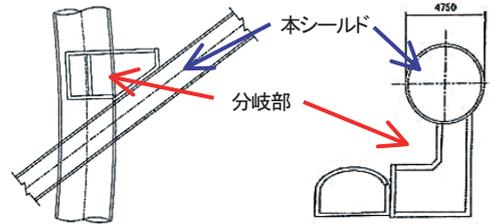


図-7 E1, E2 分岐部

3-3 PP ファイバーショット工法の施工

(1) 施工の概要

2006 年 9 月、電力管路分岐箇所 E1（延長 15 m）に高強度繊維補強吹付けコンクリート 20 m³（設計 14 m³）を、さらに 2006 年 12 月末から 2007 年 1 月にかけて、電力管路分岐 E2 部（延長 20.4 m）に高強度繊維補強吹付けコンクリート 24 m³（設計 16 m³）の施工を行った。

吹付け施工は、経済性を考慮し、全体の覆工厚 200 mm に対し、一次吹付けとして、通常の吹付けコンクリート（18 N/mm², t=100 mm）の施工を行い、さらに二次吹付けとしては、急結剤量調整による仕上げが可能な本繊維補強吹付けコンクリート（t=100 mm）を施工した。1 日の吹付けコンクリート施工量は、表面仕上げを考慮し、スクリュークリートに 1 m³ を積載し、2～4 回に分けて施工し、最大施工量は 4 m³ であった。吹付け施工設備の坑内配置状況を図-9 に示す。

(2) 施工手順

施工手順を以下に示す。

- ① 生コン工場でベースコンクリートを製造
- ② 生コン車で現場まで運搬
- ③ 現場立坑でアジテータ車内に繊維を投入・攪拌し、

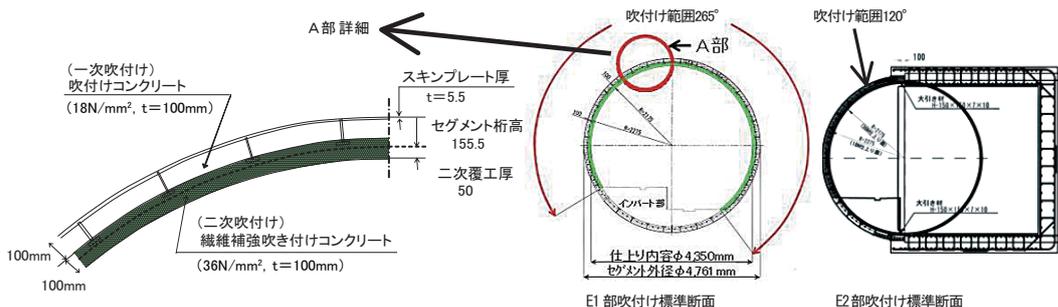
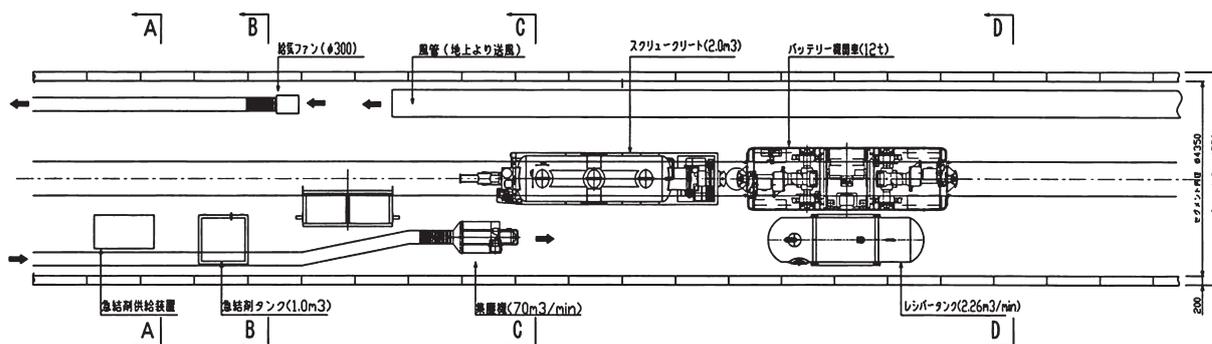


図-8 二次覆工の断面詳細図



図一9 吹付け施工設備の坑内配置状況

繊維補強吹付けコンクリートを製造（繊維の投入状況写真を写真一4、写真一5に示す。）

- ④ 製造した繊維補強吹付けコンクリートをシュートで立坑下（約 20 m）まで搬送（写真一6）
- ⑤ シールド坑内をアジテーターカー（スクリュークリート）により、取付け部打設箇所まで運搬（写真一7）
- ⑥ 定置式ポンプに移送して、吹付け施工（写真一8）
- ⑦ 既設 RC セグメント覆工と同様に、表面を平滑にするための左官仕上げ（仕上げ状況を写真一9、写真一10、完成状況を写真一11に示す。）

(3) 品質管理試験結果

品質管理試験結果を表一4に示す。

圧縮強度は 39.6 N/mm²、コア強度 38.8 N/mm² と、設

計基準強度 36 N/mm² 以上を満足した。また、24 時間の初期強度（プルアウト試験）についても、6.2 N/mm²（基準 5 N/mm²）と基準の強度以上を発現した。

洗い試験による繊維の分散性は、繊維混入量 0.3% に対



写真一4 繊維の投入状況（全景）



写真一6 立坑下への搬送状況



写真一5 繊維の投入状況



写真一7 アジテーターカーへの搬送状況



写真一八 吹付け施工状況



写真一十 吹付け仕上り状況



写真一九 吹付け仕上げ状況



写真一十一 吹付け施工完成状況

し0.298%，曲げ靱性係数は1.82 N/mm²（基準1.4 N/mm²）と何れも良好な結果であった。

表一四 品質管理試験結果

試験	試験結果	
	ベースコンクリート	繊維投入後
スランプフロー (cm)	51.5	51.0
空気量 (%)	4.3	4.5
繊維分散性試験 (%)	0.298%	
圧縮強度 (N/mm ²)	39.6 (材齢4週)	
コア強度 (N/mm ²)	38.8 (材齢4週)	
初期強度 (プルアウト) 試験	6.2 (24時間)	
曲げ靱性係数	1.82	

3-4 工法適用の効果

本工法を適用した効果を、以下に述べる。

① 施工性と仕上り

吹付け施工は、型枠がないため施工性・充填性とも良好であったが、一次覆工鋼製セグメントに最初に吹き付けた場合のリバウンド量は多く、最終リバウンド量は実測していないが打設量から推測すると30%程度であった。

仕上がりは、左官で仕上げた結果、RCセグメント程ではないが、遜色ない仕上がりであった（写真一十一参照）。

② 経済性

本工事では、吹付け施工後、表面を平滑に仕上げるため、1日の施工延長を5m程度に設定して分割施工した関係で、工期短縮には繋がらなかった。

しかし、セントル（型枠）を考慮した場所打ちコンクリートと比較すると20%程度のコストダウンが図れた。

§4. おわりに

今後は、仕上げの機械化など施工性のさらなる向上を目指して改善を行い、既設トンネルの補強工法にとどまらず、下水道工事の二次覆工やNATM工法の一次覆工などへの適用も視野に入れて、積極的な技術提案・営業展開を図っていく予定である。

最後に、本工事の施工にご支援戴いた協力業者をはじめとする関係各位に深く感謝するものである。

参考文献

- 1) 獅土木研究所，戸田建設(株)，西松建設(株)：繊維補強吹付けコンクリートを用いたトンネル補強方法の開発に関する共同研究報告書，平成18年3月
- 2) 高橋秀樹，鈴木嘉昌：繊維補強吹付けコンクリートのシールド二次覆工への適用，電力土木 No. 328, pp. 80~82, 2007.3.