

報告 PVA 繊維マットを用いた補修・補強工法の既設トンネルへの適用

西脇 敬一^{*1}・松岡 茂^{*1}・山村 康夫^{*2}・千々岩 三夫^{*2}

要旨：PVA 繊維マットを覆工内面に取り付け、マット中にセメントミルクを注入することによって補強層を構築する新しい補修・補強工法を既設鉄道トンネルに試験施工として適用した。その結果、列車の運行に影響を与えることなく、夜間の限られた作業時間内で施工が行え、本工法が既設トンネル覆工の補修・補強対策の一つとして適用可能であることが確認された。

キーワード：補強工法, PVA 繊維, トンネル

1. はじめに

近年、トンネル覆工コンクリートの剥落事故を契機に、既設トンネルの維持管理や補修・補強対策に関心が寄せられている。

コンクリート片の剥落防止を目的とした補修工法としては、炭素繊維やガラス繊維などのシート接着工法が提案されている。一方、補強工法は、既設覆工の内側に新たにコンクリートを打ち足す内巻き工法などが行われているものの、それらの多くはトンネルの供用を施工期間中停止する必要があることから、供用したまま施工できる補強工法の確立が望まれている。

そこで、このような施工条件に対応でき、また優れた補強性能を有する PVA 繊維マットを用いた補修・補強工法である REDEEM(リディーム)工法の開発を行った¹⁾。本稿は、この REDEEM 工法を供用中の鉄道トンネルに試験施工として適用したので、その結果について報告するものである。

2. REDEEM 工法

2.1 工法概要

REDEEM(Revival technique using Ductility mortar in Effective and Efficient Maintenance of concrete structures)工法は、**図-1**に示すように、既設トンネル覆工内面に PVA 繊維マットを設置し、その上から埋め込み型枠となる短繊維補強ボードを固定し、ボードに設けた注入口から

セメントミルクを注入して覆工内面に補強層を構築するものである。

2.2 構成材料

構成材料の特徴を以下に示す。

(1) PVA 繊維マット

PVA 繊維マットは、**写真-1**に示すように繊維径約 $100\mu\text{m}$ の短繊維をマット状(寸法 $1000\times 2000\times 70\text{mm}$ 、目付量 700g/m^2)に成型したものである。トンネルの壁面の凹凸に対応できるため厚さ約 70mm のマットを 50mm に押し縮めて施工することを基本としている。 50mm に押し縮めて使用した場合、PVA 繊維混入率は、約 $0.9\text{vol}\%$ となる。

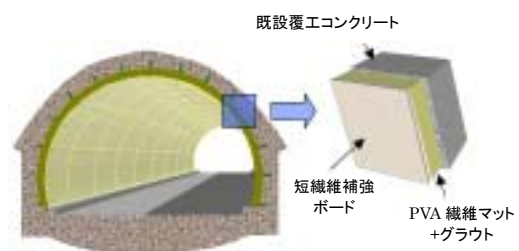


図-1 REDEEM 工法概要図

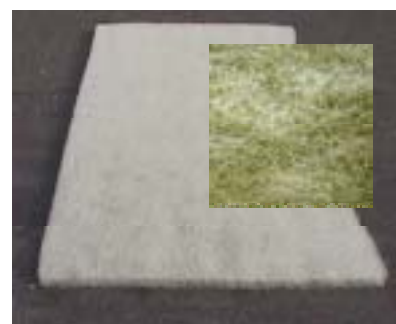


写真-1 PVA 繊維マット

*1 鉄建建設(株) 技術研究所土木技術開発グループ (正会員)

*2 鉄建建設(株) 技術研究所施工技術開発グループ

(2) 短繊維補強ボード

埋め込み型枠として用いる短繊維補強ボード(寸法 910×1820×5.5mm)は、繊維径 26~100 μ m の PVA 短繊維を 3vol% 混入したセメント系材料である。このボードは、高靱性セメント複合材料²⁾の一種であり、優れた引張特性を有しているため、大きな変形に追従でき、トンネル覆工の曲面に合わせて設置することができる。さらに、耐衝撃性に優れており、切断や削孔などの加工が容易にでき、合板と同様の方法で型枠として組み立てることが可能である。

(3) グラウト

グラウトは、セメントミルクを基本とし、所要の圧縮強度が得られるように水結合材比の調整を行う。

フレッシュ時の必要性能は、流動性と材料分離抵抗性とし、JA 漏斗流下時間で 40±15 秒、ブリーディング率 0% を基本とする。

(4) PVA 繊維シート

PVA 繊維シートは、PVA 繊維で形成された厚さ 1mm の高密度の不織布であり、短繊維補強ボードの目地部に設置し、グラウト材の漏洩防止に用いるものである。

(5) ステンレスメッシュ

PVA 繊維マットに生じる引張応力を隣接したマットに確実に伝達するために、マット間の継ぎ目部に配置するものである。これにより、継ぎ目部が強度上の弱点になることを防止することが可能である¹⁾。

2.3 硬化後の強度特性

PVA 繊維マットにグラウトを注入した硬化体(以下：ダクティリティモルタルと称す)の引張破壊特性を確認する目的で直接引張試験と曲げ試験を行った。引張試験は、図-2 に示すように 100mm 角の供試体の中央部 4 辺に深さ 10mm の切り欠きを設け、直接引張力を与えた。曲げ試験は、「JSCE-G 552 鋼繊維補強コンクリートの曲げ強度および曲げタフネス試験方法」に準拠した。

図-3 に示すように、引張応力はひび割れの

発生に伴って急激に低下するものの、再び引張強度付近まで増加し、その後は緩やかに低下する傾向が見られた。一方、曲げ試験では、図-4 および写真-2 に示すように、載荷点間に複数のひび割れが発生し、最終的に 1 本のひび割れが進展することによって荷重が低下する結果となった。

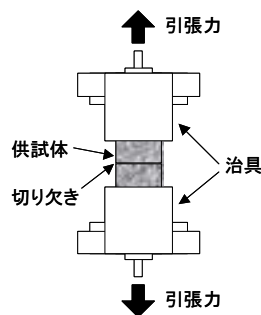


図-2 引張試験概要図

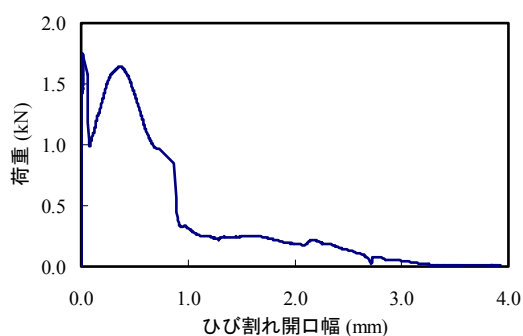


図-3 引張試験結果

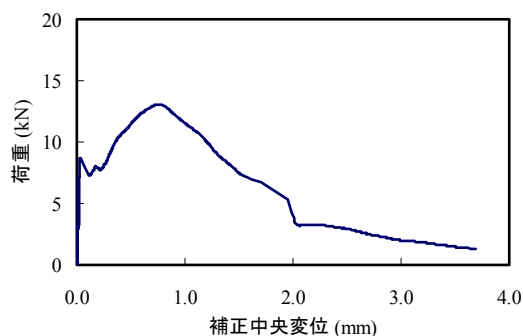


図-4 曲げ試験結果



写真-2 ひび割れ状況

これらより、ダクティリティモルタルは、PVA 繊維マットによって、曲げ耐力と変形性能に優れ、トンネル覆工の補強材料に適していると判断される。

3. 工事概要

今回、本工法を適用したトンネルの外観を写真－3に示す。本トンネルは、図－5に示すように幅が約 4.8m、高さが約 5.4m、覆工材がコンクリートで形成される供用中の非電化単線鉄道トンネルである。

施工前の外観調査では、写真－4に示すようにひび割れや湧水が観察されたものの、直ちにトンネルの安定に影響するような覆工損傷は確認されなかった。

今回の補修・補強は、トンネル総延長約 1,900m の中の約 16.8m の区間で、トンネル全周を対象とした。ダクティリティモルタルの厚さは、30mm と 60mm の 2 種類とし、厚さ 30mm の区間については、コンクリート片などの剥落防止を目的とした補修対策としての適用性検討のために実施した。補強区間の面積は約 90m²、補修区間の面積は約 110m² となった。

4. 施工概要

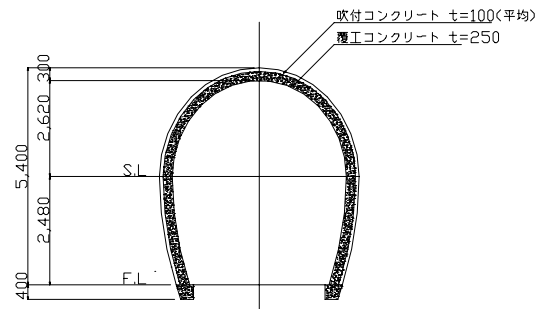
4.1 施工手順

今回の施工条件としては、鉄道営業線であるため、作業は列車の運行がない夜間の線路閉鎖時間に制限され、さらに通常の列車運行に影響を及ぼさないことがあげられた。

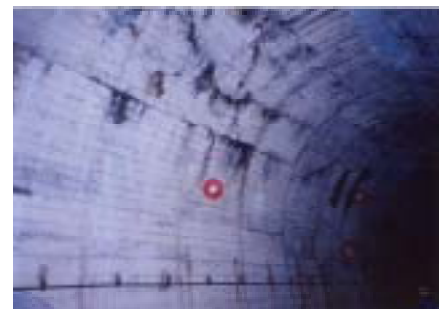
施工手順を図－6に示す。まず、内巻き工法で、補強層に生じる軸力を支えるために必要とされる脚部の足付け³⁾として、75mm のアングルをアンカーボルトで固定する。次に覆工面の断面修復等を行い、短繊維補強ボード等を取り付けるためのアンカーを打設し、PVA 繊維マットをアンカーボルトに突き刺すようにして固定する。PVA 繊維マット上に短繊維補強ボードを取り付け、押さえ枠あるいは短管パイプで拘束する。最後にグラウトの注入を行い、養生後、



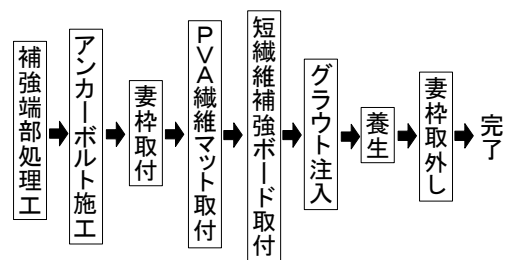
写真－3 トンネルの外観



図－5 トンネルの断面



写真－4 トンネルの変状



図－6 施工手順

妻枠を取り外し完了とする。

4.2 グラウト

(1) 使用材料および配合

使用材料を表－1に示す。結合材には、温度ひび割れや収縮ひび割れを抑制するため、低熱ポルトランドセメントと膨張材を用いた。混和剤は、ブリーディングの発生を押さえるためにノンブリーディング型のものを使用した。

グラウトの配合は，設計基準強度を 60N/mm^2 (設計基準材齢 56 日) に設定し，事前の試験練りの結果から表－2 のように定めた。

(3) 練混ぜ方法

グラウトの練混ぜは，施工箇所が坑口から約 600m 離れていたことより，写真－5 に示す軌陸車を簡易プラントとし，図－7 に示す方法で行った。1 バッチの練混ぜは，ハンドミキサを

表－1 使用材料

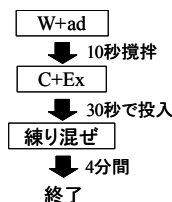
種類	記号	物性および主成分
セメント	低熱ポルトランド C	密度 3.22g/cm^3
混和材	膨張材 Ex	カルシウムサルホアルミネート系，密度 3.14g/cm^3
混和剤	ノブリーディング型 ad	マリンシルホン酸系化合物 水溶性高分子エーテル系化合物

表－2 グラウトの配合(1 バッチ)

W/B (%)	1 バッチ(kg)			
	W	B		ad
		C	Ex	
43.0	11.1	25.0	0.76	0.232



写真－5 軌陸車



図－7 練混ぜ方法



写真－6 練混ぜ状況

用いたため，セメント 1 袋分とし 19.1 リットルで行った。練混ぜ状況を写真－6 に示す。

(4) 品質管理

グラウトの品質管理項目，管理方法および管理値を表－3 に示す。なお，打設区画を 5 ブロックに分割したため，品質管理試験は各々のブロック毎に行った。

4.3 施工結果

(1) PVA 繊維マットおよび短繊維補強ボード取付け

今回の施工では，トンネル内に足場を常設することができないため，作業用足場は，おもに写真－7 に示す軌陸車を利用した移動足場を用いた。

PVA 繊維マットの取付け状況を写真－8 に示

表－3 グラウトの品質管理方法

品質管理項目	品質管理方法	管理値
流動性	JA漏斗流下時間 JSCE-F 531 PCグラウトの流動性試験方法	40±15秒
材料分離抵抗性	ブリーディング率 JSCE-F 532 PCグラウトのブリーディング率および膨張率試験方法	0%
強度	圧縮強度 JSCE-G 531 PCグラウトの圧縮強度試験方法 (材齢56日)	60N/mm^2



写真－7 軌陸車を用いた移動足場



写真－8 PVA 繊維マット取付け状況

す。本工法では、既設覆工面の凹凸が著しい場合、凹部においては繊維混入率が小さくなる恐れがある。よって、PVA 繊維マットの取付けでは、部分的に PVA 繊維マットを 2 層とするなど、全断面で所要の繊維混入率以上となるように留意して行った。

次に短繊維補強ボードの取付け状況を写真-9 に示す。短繊維補強ボードは、通常の合板と同様に 1 人あるいは 2 人で組立てができ、また、写真-10 に示すように押さえ枠でトンネル内空を侵さずに拘束することが可能であった。

(2) グラウト注入および品質管理結果

施工当初においては、流動性が小さく、JA 漏斗流下時間が管理範囲外となる場合が見られた。これは、練上がり温度が試験練り時に比べ、10℃程度低くなったことに起因すると考えられた。そこで、練混ぜ水を 20℃程度に加熱し、グラウトの練上がり温度が $20 \pm 3^\circ\text{C}$ の範囲となるように練上がり温度の管理を行った。その結果、JA 漏斗流下時間は、管理範囲内となり、良好な流動性状が得られた。

また、材料分離抵抗性を示すブリーディングの発生は認められず、フレッシュ時における所要の性能を有するグラウトの製造が行えた。

グラウトの注入状況を写真-11 に示す。グラウトの注入は、短繊維補強ボードに設けた複数の注入口より、順次盛り換えながら下部より打ち上げる方法で行い、注入速度は、5 リットル/min を標準とした。なお、注入時には、注入速度と注入量を管理し、天端に設けたエア抜き孔からグラウトが流出したことを確認して、注入を終了した。

圧縮強度は、平均で材齢 28 日 46.4N/mm^2 、材齢 56 日 69.1N/mm^2 であり、所要の強度を有することが確認された。

参考として、施工時に採取したダクティリティモルタルの材齢 28 日の曲げ試験結果の一例を図-8 に示す。ひび割れは、PVA 繊維マットによって分散し、優れた変形性能を有していることが確認できる。



写真-9 短繊維補強ボード取付け状況



写真-10 組上がり状況



写真-11 グラウト注入状況

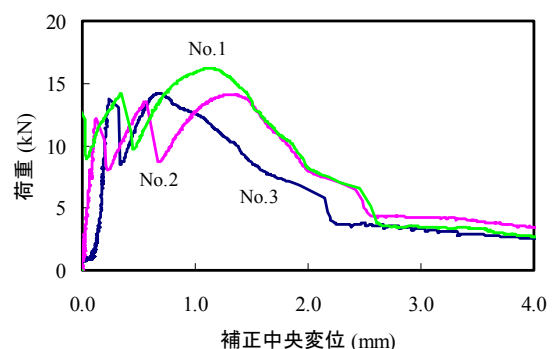


図-8 曲げ試験結果

(3) 施工後の検査

施工完了後の状況を写真－１２に示す。

ダクティリティモルタルの厚さをスケールで測定した結果を表－４に示す。厚さ 30mm および 60mm の区間ともに、所要の厚さを有していることが確認された。

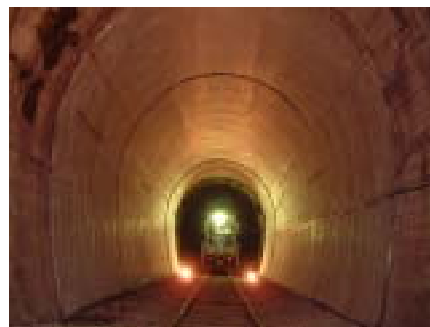
次にグラウトの充てん状況を確認するために採取したコアの外観、および採取後の状況を写真－１３と写真－１４に示す。これらより、グラウトは、PVA 繊維マットの繊維間に密実に充てんされ、またダクティリティモルタルが、既設覆工面と隙間なく密着していることが確認された。しかしながら、採取したコアのいくつかでは、ダクティリティモルタルと短繊維補強ボードが付着していないものが見られた。現状では、短繊維補強ボードを強度部材として設計上考慮していないため問題とならないが、本ボードは、強度特性、耐久性能およびひび割れ分散性能に優れていることより、今後は押さえ枠や短管の存置期間を長くするなどにより、これらの改善を計っていく予定である。

５. まとめ

PVA 繊維マットを用いた新しい補修・補強工法を既設鉄道単線トンネルに用いた結果を以下にまとめる。

- (1)作業時間が夜間に限定され、さらに最寄りの坑口から約 600m 離れていた厳しい施工条件下であったものの、列車の運行に影響を与えることなく施工が可能であった。
- (2)グラウトは、繊維マット内に密実に充てんされ、構築された補強層は所要の強度および変形性能を有していた。
- (3)以上のことより本工法が、既設トンネル覆工の補修・補強対策の一つとして有用であることが確認できた。

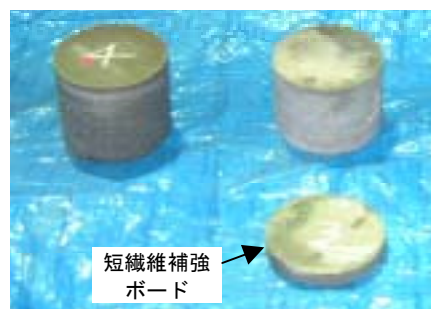
最後に、今回の試験施工に際して、試験場所を提供いただきました東日本旅客鉄道株式会社および関係各位に感謝の意を表します。



写真－１２ 施工完了後の外観

表－４ 補修・補強厚さ測定結果

区間	断面	測定結果(mm)		
		側壁部	天端部	側壁部
補強 (設計厚さ60mm)	断面A	—	60	—
	断面B	60	60	65
補修 (設計厚さ30mm)	断面D	30	35	30
	断面E	40	40	—
	断面F	35	50	—



写真－１３ 採取したコアの外観



写真－１４ コア採取後の状況

〔参考文献〕

- 1) 土井至朗, 松岡茂, 齋藤雅春, 松尾庄二 : ビニロン繊維マットを用いた補修・補強, コンクリート工学年次論文集, Vol.24, No.1, pp. 1701-1706, 2002.6
- 2) 日本コンクリート工学協会 : 高靱性セメント複合材料の性能評価と構造利用研究委員会報告書, 2002.1
- 3) 鉄道総合技術研究所 : 変状トンネル対策工設計マニュアル, 1998.10