

セメント系繊維補強材料による コンクリート構造物の補強工法

千々岩三夫¹・松岡 茂²・齋藤雅春¹

¹正会員 鉄建建設(株) エンジニアリング本部 技術研究所 (〒286-0825千葉県成田市新泉9-1)

²正会員 工博 鉄建建設(株) エンジニアリング本部 技術研究所 (〒286-0825千葉県成田市新泉9-1)

REDEEM (リディーム) 工法は、コンクリート構造物の補修・補強工法として開発したもので、短繊維補強ボードを埋め込み型枠として用い、これと既設コンクリート面の間にPVA (ポリビニールアルコール) 繊維マットを挟み込み、この部分にモルタルを注入することによって、薄肉でじん性能に優れたセメント系の補修・補強層 (ダクティリティモルタル) を形成するものである。既設トンネルの内巻き補強などに適用した場合、内空断面積の縮小を最小限に抑えることが可能である。また、要求性能に応じて、補強層厚あるいは繊維混入率を変えることにより、最適の補修・補強効果を発揮できる。

本文では、工法の概要と供用中のトンネルでの施工状況と結果について報告する。

キーワード: REDEEM, リディーム, コンクリート構造物, 補修, 補強, PVA 繊維, 高じん性, 埋め込み型枠, グラウト材

1. はじめに

1999年に発生したトンネル覆工コンクリートの剥落事故を契機に、既設トンネル覆工の保守管理に対する認識が重要視されている。既設トンネル覆工の中には、ひび割れなどの損傷が発生し、直ちに覆工の補修・補強を要するものがあることが、剥落事故以降に実施したトンネル点検結果などで指摘されている。コンクリート片剥落防止を主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繊維シート接着方法が提案されている。また、膨張性地山などのように覆工に外力が作用して損傷が発生している場合には、覆工自体の耐荷力を増加する補強工法が必要である。補強工法としては、既設覆工内面側に新たにコンクリートを打設する内巻き工法などが提案されている。しかしながら、提案されている補強工法の多くは、トンネルの供用を施工期間中は停止する必要があることから、供用中のトンネルに適用することが困難であり、供用しているトンネルを対象とした補強工法の確立が望まれていた。現状、鉄道トンネルなど列車通行制限が困難な場合は夜間の制限時間内での施工が可能な工法、道路トンネルなど車線規制ができる場合は片側半々をセンター部で連結させる施工が可能な工法で、なお、施工中でも建築限界を侵さないことが最低の必要条件となる。それらの難しい施工条件に対応でき、優れた補強性能を有した新しい補強工法 (REDEEM工法) が開発された。

本文では、工法の概要と供用中のトンネルでの施工状況と結果について報告する。

2. REDEEM工法

(1) 工法の概要

REDEEM (Revival technique using Ductility mortar in Effective and Efficient Maintenance of concrete structures) 工法とは図-1 に示すように、既設トンネル覆工内面にPVA (ポリビニールアルコール) 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。ボードとボードの目地部にはグラウト材の漏洩防止を目的に、高密度のPVA繊維シートを貼り付ける。また、トンネル断面方向の繊維マット間の突き合わせ部分には、ステンレス製のメッシュを配置することにより繊維マット間の連続性を確保している。表-1 にREDEEM工法で用いる材料の一覧を示し、以下に各材料の特徴について示す。

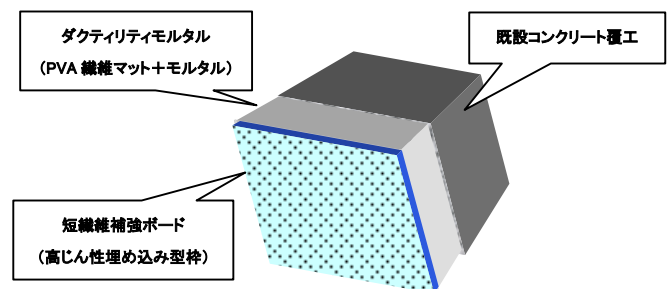


図-1 補強構造図

表-1 材料一覧表

材 料	仕 様
PVA繊維マット	寸法:1,000×2,000×70mm 目付量:700g/m ²
短繊維補強ボード	寸法:910×1,820×5.5mm
PVA繊維シート	目付量:100 g / m ²
ステンレスメッシュ	寸法:1,000×200 mm 線径:φ0.6 mm, 7 メッシュ
グラウト材	低熱ポルトランドセメント

a) PVA繊維マット

PVA繊維マットは、繊維径約100μmの短繊維を写真-1に示すようにマット状に成型したものである。



写真-1 PVA繊維マット

短繊維は、ほぼ均等に分散・配向しており、繊維間にグラウト材であるセメントミルクを充填することができる空隙を確保している。PVA繊維マットは、通常はトンネル壁面の凹凸に対応できるように厚さ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。このように補強厚を50mmと設定した場合のPVA繊維の混入率は約0.9vol%となる。実際の施工では、50, 75, 100mmの補強厚に対してPVA繊維マットは、1, 2, 2層の仕様で対応している。

b) 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は、繊維径26～100μm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、高じん性セメント複合材料¹⁾の一種であり、複数の微細なひび割れが発生するために母材のひび割れ発生強度である引張強度に達すると応力を保持した状態でひずみが増大する優れた引張特性を有している。このため、写真-2に示すように大きな変形が生じてボードは破断せず追従することが可能である。

短繊維補強ボードは平板で出荷され、現場でトンネル壁面の曲面に合わせて設置することが可能である。さらに、耐衝撃性能にも優れており、ボードの切断、削孔などの現場加工が容易であるため、合板の取り付け方法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。

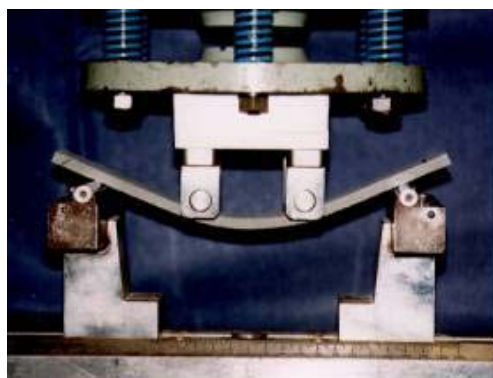


写真-2 曲げ試験

c) PVA繊維シート

グラウト材の漏洩防止用に用いるPVA繊維シートは、PVA繊維で製造された一種の不織布である。PVA繊維シートは、水分は通過するがセメント粒子は通過しない特徴を有しており、この繊維シートにグラウト材を浸透させるとセメント粒子により目詰まりが生じ、最終的にはグラウト材が浸透しなくなる。つまり、PVA繊維シートのフィルター効果により、短繊維補強ボードの目地部において、はじめは水分が繊維シートから外部に漏洩するが、徐々にセメント粒子により目詰まりが発生するために最終的にグラウト材の漏洩が止まる。この繊維シートの漏洩防止効果によって、グラウトの注入圧で短繊維補強ボードが弾性変位し、ボード間の目地部が多少開口してもグラウト材の漏洩を防止することが可能である。

d) ステンレスメッシュ

PVA繊維マットに生じる引張応力を確実に隣接したマットに伝達するために、PVA繊維マット間の継ぎ目部分には、図-2に示すようにステンレスメッシュでPVA繊維マットを挟み込むことで対応している。ステンレスメッシュをPVA繊維マット間の継ぎ目部分に設置することで、継ぎ目部が強度上の弱点となることを防止している。

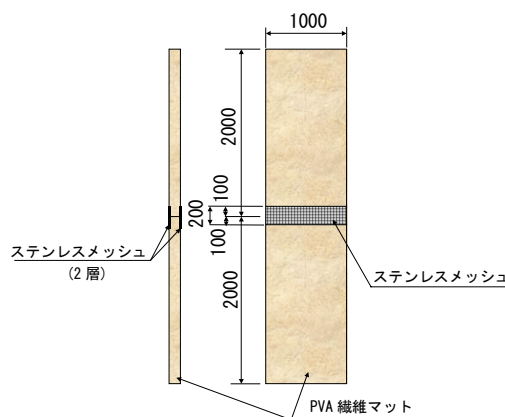


図-2 PVA繊維マット接合部

なお、ステンレスメッシュをPVA繊維マット間の継ぎ目部分に配置すると、その継ぎ目部分の曲げ耐力は他の部分と同等以上であることを実験で確認している。

e) グラウト材

グラウト材は、低熱ポルトランドセメントを使用したセメントミルクを基本としている。使用する単位セメント量などについては、必要に応じて決定するものとし、グラウト材の圧縮強度は $40\sim60\text{N/mm}^2$ を標準としている。グラウト材には収縮による悪影響を防止するための膨張材とブリージングを防止するための混和剤などを混入している。また、完全充填を行うためにグラウト材の流動性はJAフロー値²⁾で管理しており、その値は 40 ± 15 秒である。



写真-3 グラウト注入試験

なお、グラウト材の充填性能を確認するために、注入試験体を作成して注入試験を行った。注入試験体はPVA繊維マットをアクリル板で挟み込み、試験体下部に設置した注入口からグラウト材を注入できるものである。注入試験の結果、写真-3に示すようにグラウト材はほぼ水平に上昇しPVA繊維マットに完全に充填されていることが確認された。

(2) 補強層の強度特性

PVA繊維マットにセメントミルクを注入した補強層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。供試体は直接引張試験および曲げ試験ともに、 $100\times100\times400\text{mm}$ の型枠にPVA繊維マットを配置し、上部からグラウト材を流し込んで製作した。

直接引張試験は、図-3に示すように繊維混入率約0.9vol%の100mm角の角柱供試体の中央に、深さ10mmの切り欠きを4辺に設けて試験を行った。直接引張試験結果では、図-4に示すようにひび割れが発生すると引張応力が急激に低下するが、荷重を継続すると引張応力はひび割れ発生強度である引張強度付近まで達する。その後は、ひび割れ幅の増大に伴って引張応力は漸減する。このように、ひび割れが発生した後にPVA繊維で応力が伝達される。

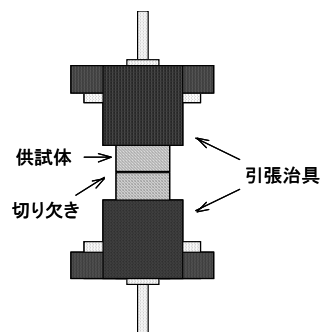


図-3 直接引張治具

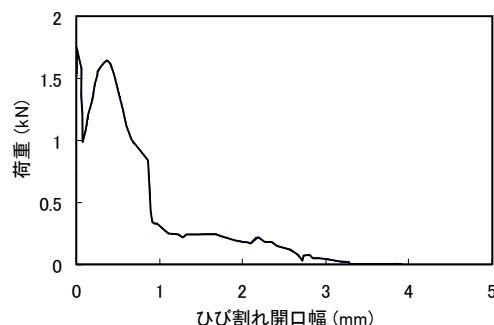


図-4 引張試験結果

曲げ試験は、土木学会の規準³⁾に従ってスパン(300mm)の三等分点に2点荷重とした。曲げ試験結果では、写真-4に示すように荷重点間の純曲げ区間で複数のひび割れが確認され、最終的には複数発生したひび割れの1本のみが開口することで荷重が低下した。純曲げ区間で複数のひび割れが発生するのは、ひびわれ面でPVA繊維により伝達される引張力が母材の引張強度と同等であるため、複数のひび割れが生じたと判断される。

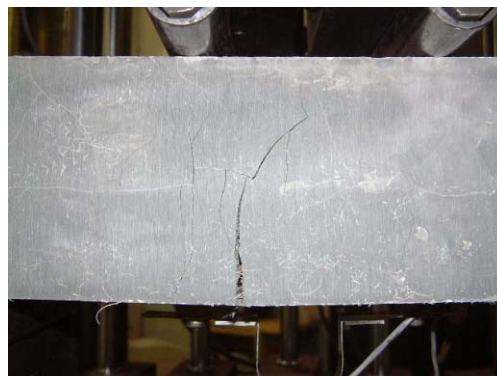


写真-4 曲げ試験のひび割れ状況

荷重とスパン中央の変位との関係は、図-5に示すようにひび割れが発生すると変位が増加するが、荷重は無筋コンクリートと異なり低下しない。ひび割れ発生後の荷重は、巨視的に見ると増加して最大荷重に達した後に低下する傾向を示す。ひび割れ発生から最大荷重に至る区間では、新たなひび割れが生じると荷重が一時的に低下するが直ぐに荷重は増加する。このようにPVA繊維マットを混入することにより、補強層は曲げ耐力と変形性能が向上することが確認された。

通常、トンネル覆工は周辺地山にばね支承されたアーチ構造と考えられており、部材に生じる断面力が局部的に部材断面耐力を越えてひび割れなどの損傷が生じて、直ちに破壊に至らないことが指摘されている⁴⁾。また、ひび割れなどの損傷を考慮したトンネル覆工の設計手法についても幾つか提案されている⁵⁾。これらの研究報告によると、トンネル覆工を曲げ変形性能に優れた材料で構築することで覆工全体の耐荷力が向上する場合がある。したがって、PVA繊維マットを混入した補強材は、曲げ耐力のみでなく曲げ変形性能も優れており、トンネル覆工の補強材料に適しているものと考えられる。

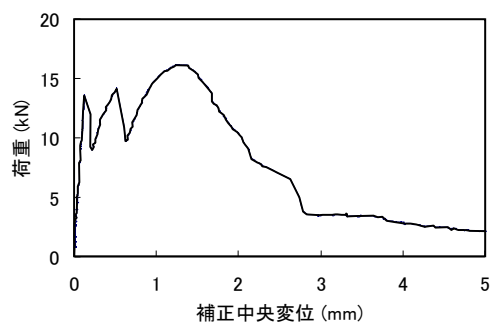


図-5 曲げ試験結果

(3) 施工手順

施工手順は施工条件などにより変わるが、一般的な施工手順を図-6に示す。

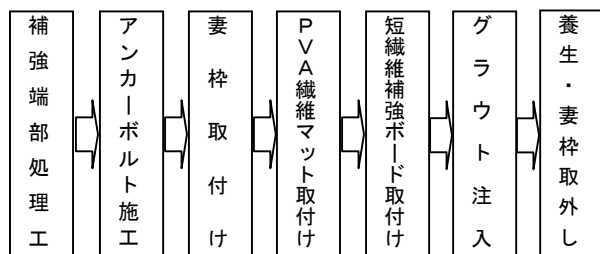


図-6 施工手順

- ①補強層を支持し施工基面となる脚部を施工する。
- ②既設コンクリートにPVA繊維マットおよび短繊維補強ボードを取り付けるためのアンカーを打設する。
- ③施工区間端部に妻枠を取り付ける。既設覆工面に妻枠パッキン押え治具をアンカーで固定し、ゴムとスポンジからなる2層構造のパッキンをトンネル断面形状に沿って取り付ける。
- ④打設したアンカーを利用してPVA繊維マットと埋め込み型枠となる短繊維補強ボードを所定の厚さになるように取り付ける。
- ⑤グラウト材の注入は、下部の注入口から行い、上部の注入口からグラウト材が流出した時点で注入する位置を順次上部へ移動する。

なお、トンネル天端部にはエア抜きの透明チューブを配置し、このチューブからグラウト材が流出することを確認して注入を完了する。

3. 施工例

本工法は、場所打ちで薄肉の補強層を形成できるため、鉄道トンネルから道路トンネルまで幅広く適用できる。施工は鉄道では夜間線閉時間、道路では片側車線規制にて実施した。表-2に施工実績を示す。

表-2 施工実績

実施例	施工規模				グラウト強度 σ_{56} N/mm ²	トンネル種別
	周長 m	延長 m	施工面積 m ²	補強厚 mm		
1	12.4	7.3	90	60	40	鉄道
	12.4	9.1	113	30		
	計	16.4	203			
2	13.1	10	131	75	40	鉄道
3	16.5	37.5	619	50	60	道路

(1) 施工状況

a) PVA繊維マット取り付け

PVA繊維マットの取り付けは人力にて行った。マット自体は1.4kg/枚と軽量で柔軟性に富んでおり、覆工面の凹凸に自由に追従する。また、カッター等で簡単に加工できるので、この性質を利用してコンクリート覆工面に取り付けたアンカーボルトに突き刺すようにして固定した。

なお、マット相互の円周方向の接合面にはステンレスメッシュを表裏に配置し、引張り力の伝達を図った(写真-5、図-7 参照)。



写真-5 ステンレスメッシュ取付状況

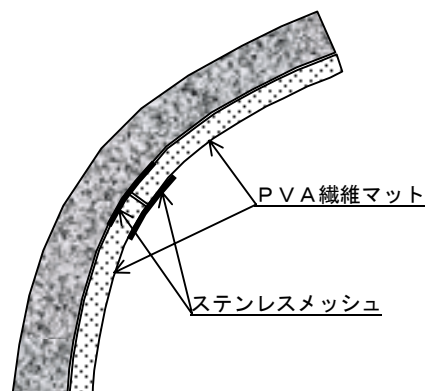


図-7 ステンレスメッシュの配置

b) 短繊維補強ボード取り付け

短繊維補強ボードは 15.5kg/枚と軽量であるため、PVA繊維マットと同様に人力による取り付けとしている（写真-6 参照）。平板のボードをアンカーボルトにナットで固定したが、曲げ性能に優れたボードは覆工曲面に追従するため、施工面から一定の補強層厚を確保した状態で取付可能である。



写真-6 短繊維補強ボード取付状況

取り付け穴は、事前に穴開け加工しておくことも、アンカー位置に合わせて後から穴開け加工することも容易である。

また、天端部分の閉合部分では、所定の寸法に合わせて丸ノコ等でボードを切断加工することにより、隙間のない良好な仕上がり精度を保つことができた。

ボード隙間からのグラウト材の漏出を防止するために、ボードの接合面となる部分にPVA繊維シートで裏打ちを行った。

ボードを取り付けた後、アンカーボルトを利用して単管パイプ等で固定しボードのはらみ防止を行った（写真-7 参照）。

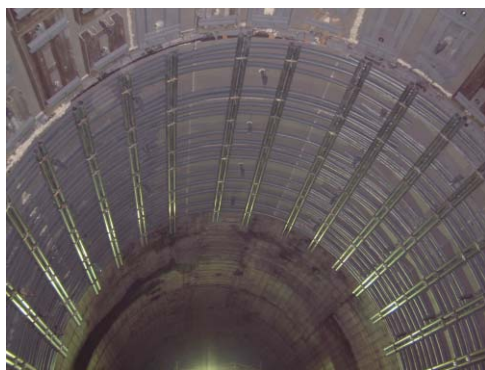


写真-7 短繊維補強ボード取付完了

c) グラウト材注入

ボード取り付け完了後、ボードと既設覆工の間にグラウト材を注入した。注入は、ボードに設けた注入口を順次盛り替えながら、下部から上部に向かって打上げていった（写真-8 参照）。

注入充填の確認は、下の注入口から打設して上の注入口より漏出することで確認した。また、打音によって充填状況は容易に確認でき、随時充填状況の

把握が可能であった。充填完了は、天端に設けたエア抜きより所定濃度のグラウト材がオーバーフローすることで確認した（写真-9 参照）。

なお、注入時にボード自体に過大な圧力がかかるのを防ぎ、また、目地部などからのグラウト材の漏れを最小限に抑えるために、1回の打上げ高さを2m程度とし、3～4回に分割して注入を行った。



写真-8 グラウト材注入状況



写真-9 グラウト材充填確認状況

硬化後に打音検査と点検孔により最終的な充填確認を実施している。

(2) 施工管理

a) 厚さの確認

補強層厚は、アンカーボルトにねじ込んだレジコンZの取り付け高さを水系やゲージ棒等で測定・調節して、ボードを貼り付ける前に所定の厚さを確認した（図-8、写真-10 参照）。

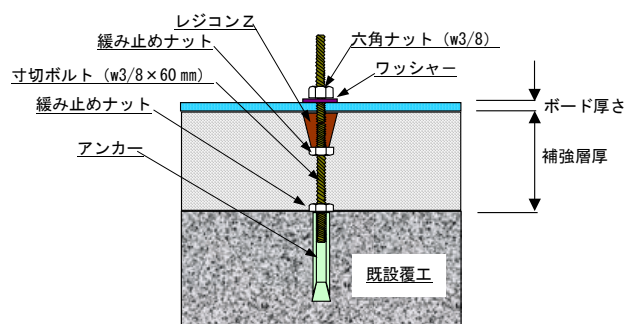


図-8 短繊維補強ボード固定概要図



写真-10 厚さ確認状況



写真-12 流量測定状況

b) グラウト材の管理

グラウト材の品質は、表-3 に示すように、使用材料、配合および性状について確認することにより行った（写真-11 参照）。特に、冬季など低温下での注入の場合は、練り混ぜ水の温度とミキサーの練り時間を基準に従って管理し、練上り温度が 20℃を下回らないように留意して行った。

表-3 グラウト材品質管理

管理項目	管理方法
使用材料	納品書（数量、仕様）および品質保証書の確認・照合
配 合	計量値と計画値の確認・照合
性 状	練り時間、練り上がり比重 フロー（JA ロート）値、温度計測
現場採取 供 試 体	強度試験用テストピース ブリージング測定



写真-11 性状測定状況

c) 注入量、注入圧管理

注入量は電磁流量計により確認し、注入圧力は注入ホースに取り付けた圧力計の目視の読みにより確認している（写真-12 参照）。また、型枠の変形、モルタルの漏出の目視確認を行い注入速度を調整し所定の量が確実に充填できるように管理を行った。

d) 脱枠強度確認

充填注入時に採取したテストピースを養生期間 10 時間から 24 時間まで 2 時間間隔で圧縮強度試験を実施して、そのときの平均圧縮強度で確認した。

これに基づき、妻枠は 3.5N/mm²、押えは 14N/mm²に達する時間を養生時間と決定し管理した。

e) 強度確認

グラウト材の仕様に準じ、所定日数経過後、現場採取供試体の強度試験を実施し、所要強度の発現を確認した。

(3) 施工設備

本工法の施工設備・工具類は表-4 に示すように、大掛かりな設備および重機類、特殊工具・器具を必要とせず、汎用の機械器具を使用するため、調達が容易で廉価である。

表-4 主要施工設備・工具類一覧

種別	機器名称
アンカー工	ハンマードリル
	ブロア
型 枠 工	万能はさみ
	カッターナイフ
	スケール
	金尺、差金
	電動丸のこ
注 入 工	グラウトポンプ
	グラウトミキサー
	ハンドミキサー
	ポリバケツ
	流量計
仕 上 げ 工	ベビーサンダー
仮 設 足 場	枠組足場
電 気 設 備	可搬式発電機
	水銀灯、投光器
	ケーブルドラム
給 水 設 備	給水ポンプ
	水 槽
測 量 機 器	トランシット
	レベル

a) 作業足場

本工法はトンネル全周を施工対象とし、自立した補強層を形成することを基本としている。供用中の鉄道トンネルのように、トンネル内に作業足場を常設することが出来ない場合は、写真-13、14 に示すような軌陸車あるいはトロ台車を利用した移動足場を採用する。または、図-9 に示すような簡易足場とし、その都度、設置撤去する方法とするか施工条件に応じて選定している。



写真-13 移動足場（軌陸車）の例

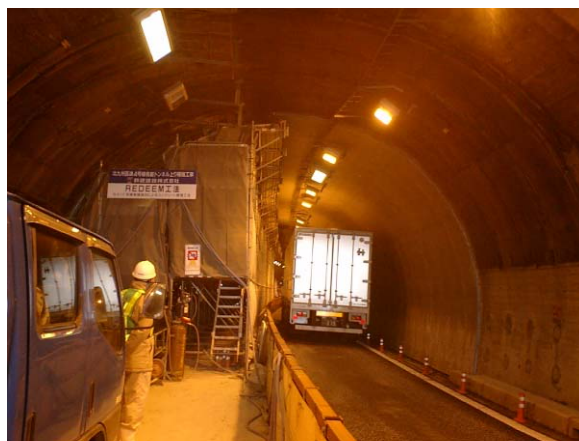


写真-15 片側車線規制施工



写真-14 移動足場（トロ台車）の例

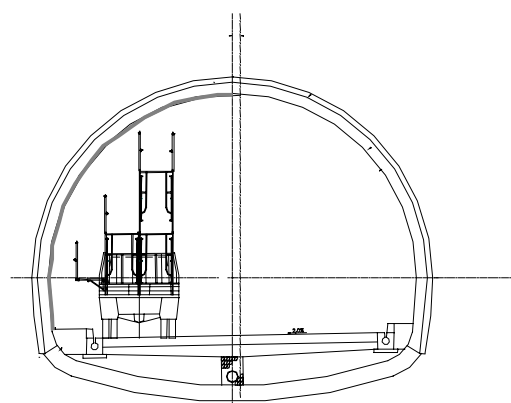


図-10 片側施工作業足場の例

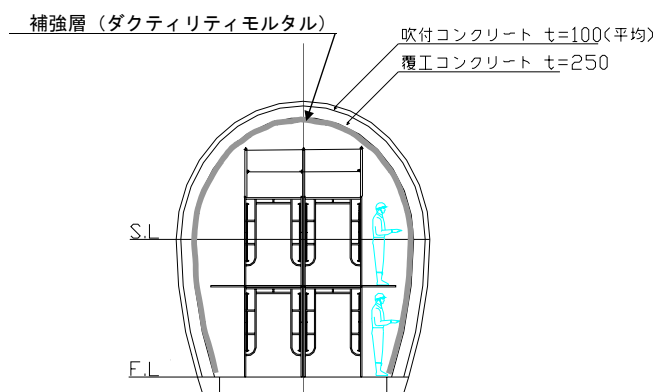


図-9 簡易足場の例

一方、道路トンネルのように、大断面で供用しながらの施工が要求される場合は、写真-15、図-10に示すように片側車線規制として常設の作業足場を設置する。

また、全面通行止めで施工する場合には、門型構造の作業足場とし両側からの同時施工とすることも可能である。

b) 注入設備

グラウト注入設備は、その施工規模により機種選定している。施工時間および運搬路に制限がある場合には、1回の注入量は少量となり、ポリバケツとハンドミキサーで混練し、小型のグラウトポンプで注入する可搬式プラントとし機動性を確保している。

一方、1スパンの施工面積が広い場合には、1回あたりの注入量が多くなり、PC工事のシースグラウトなどで用いるグラウトミキサー、グラウトポンプで簡易プラントを設置し施工している。

さらに、単位時間当りの注入量が多いあるいは注入箇所が分散する場合には、複数のプラントを設置することで対応している。

c) その他設備

以上のほかに、一連の作業に用いる工具類は表-4に示すように小型、小容量の汎用工具であるため、電気設備としては注入設備が最も大きな負荷設備であり、比較的小容量の可搬式発電機で対応が可能である。また、給水設備なども小規模でよく、仮設備は一般的で特異なものを必要としない。

(4) 施工結果

以上の施工事例から、他の補強工法と比較して次のような得失が確認された。

a) 施工性

本工法の施工上の特長として、型枠工とグラウト注入工を組合せた人力施工であり、特殊な技能も要しないこと。また、使用する機材類もほとんどが汎用機器を使用して施工可能であるということが挙げられる。作業時間の規制の有無で作業量は変わるが、現状では $8.5 \sim 11.5 \text{ m}^3/\text{日} \cdot \text{方}$ 、 $1.4 \sim 1.7 \text{ 人}/\text{m}^2$ である。

施工期間を短縮するために、分割施工できる特長を活用し、鉛直方向は型枠構造から注入高さが制限されるため、注入区間をできる限り長く取り、施工面積を確保することができる。現段階では、 $40 \text{ m}^3/\text{回}$ （注入高さ 2m 以内、注入区間 20m）の実績がある。

また、分割施工可能なことで作業時間の制約に柔軟に対応し、構築方法の自由度が大きいことなどにより、供用しながらの施工が可能であることを実証している。

b) 安全性

作業上の安全性については、多くの作業は人力による型枠作業が中心であり、騒音、振動を発生するような作業は伴わないこと、アンカー削孔時、ミキサーへのセメント投入時に粉塵が発生するため集塵、保護具の着用が局所的に必要な程度であることから、危険を伴わず安全性は高いと考える。

PVA 繊維マットは熱分解する有機材料であるため、近傍は火気厳禁であるが、通常の施工では鍛冶工が介在することは稀であり、一般的な防火管理で十分に対応可能と思われる。

c) 品質

現場で供試体を採取し、所定材令で圧縮、曲げ試験を実施した結果、何れの場合も要求性能を満足していたことから、前述したような施工管理によって所要の品質を確保した補強層を構築できることが確認された。

短繊維補強ボードを埋め込み型枠として残置することで、補強層の保護となり耐久性を向上させる効果が期待できる。また、場所打ちコンクリートに比べ、均一で美観に優れた仕上がり面を確保できる

（写真-16 参照）。さらに、補強層内部の PVA 繊維は火災などによる熱で分解し燃焼せずに外部に蒸発する性質があり、内部の水分の気化膨張等による爆裂を防止することが知られている。このように、無機系のセメントと有機系の PVA 繊維の双方の優れた性質が融合し、補強工法に求められる品質を確保している。



写真-16 施工完了後の状況

4. まとめ

セメント系材料による薄肉で自立した補強層を形成する本工法は、圧縮、引張耐力および曲げ変形性能に優れた特質が既設トンネルの覆工補強に有効であり、施工上も、鉄道、道路トンネルにおいて供用しながらの施工が可能で、施工性にも優れていることが確認できた。埋込型枠についても、補強層の耐久性向上、仕上りの美観など性能上の効果と施工性の良さが実証できた。また、マットの追従性および充填性についてこれまでの施工事例から検証された。

今後は、既設トンネル覆工の有効な補強工法として更なる施工性、経済性向上の追求のもとに、社会的に認められた技術としての確立に向けて努力するとともに、トンネル以外の構造物の補修・補強への展開を目指したい。

参考文献

- 1) 高じん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、日本コンクリート工学協会、2002. 1
- 2) コンクリート標準示方書〔規準編〕PC グラウトの流動性試験方法（JSCE-F 531-1999）、土木学会編
- 3) コンクリート標準示方書〔規準編〕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（JSCE-G 552-1999）
- 4) 今田徹、石橋正穂、平江哲；トンネルコンクリート覆工の強度に関する実験報告(1)、建設省土木研究所資料 No. 921, 1974
- 5) 松岡茂、益田彰久、松尾庄二、柳博文；ひび割れを考慮したトンネル覆工解析に関する研究、土木学会論文集 No. 554/Ⅲ-37, pp. 147-155, 1996. 12