

## 新しいトンネル二次覆工工法の開発



中村 大輔\* 四宮 卓夫\*\* 田村 隆志\*

総武・横須賀線のシールドトンネル区間においては、地下水位の上昇により、トンネル内への漏水が著しい。そのため、建設直後よりトンネル劣化対策のため止水を主目的とした二次覆工を施工している。今後、二次覆工の施工を必要とする延長は延べ4.3kmあり、従来の施工方法ではかなりの施工費用および施工期間を要するため、二次覆工施工方法のさらなるコストダウン、施工速度の向上が望まれていた。そこで、二次覆工の機能および構造について検討をおこない、従来のものより大幅に軽量化したパネルを用いた二次覆工工法を開発し、実際のトンネルでの施工を行った。

●キーワード：シールドトンネル、劣化対策、二次覆工、繊維補強

### 1 はじめに

横須賀線、東京・品川間の地下トンネル、通称東京トンネルは、東海道線の混雑緩和ならびに輸送力の増強を目的として1976年に建設された経年28年のトンネルである(図1)。



図1：トンネル位置図

本トンネルは、地下約30mの位置に建設されているが、東京都の地下水揚水規制(1972年)により周辺の地下水位が急激に上昇したことから、現在4,000~5,000m<sup>3</sup>/日という著しい漏水が発生している。この漏水は海水の影響により塩分を含んでおり、一次覆工セグメントの鉄筋・ボルト、レールおよび締結装置の腐食、路盤コンクリートの劣化、軌道回路の短絡による信号機故障を引き起こしている(図2~4)。また、漏水とともにトンネル内に砂が流入しており、これにともなう周辺地盤の緩み、地上構造物への影響、トンネル変形も危惧されており、その対応として土木部門だけで2,190万円/km・年の修繕費と人手がかかっている。

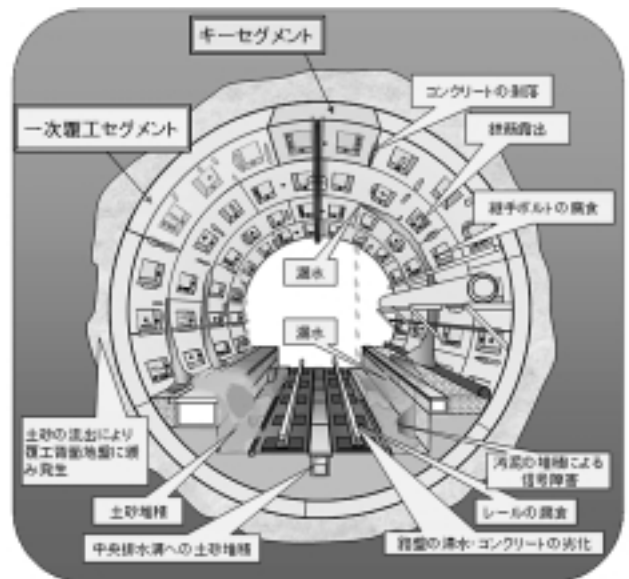


図2：トンネルの変状

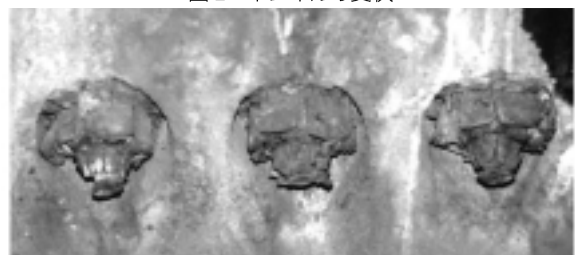


図3：セグメント継手ボルトの腐食

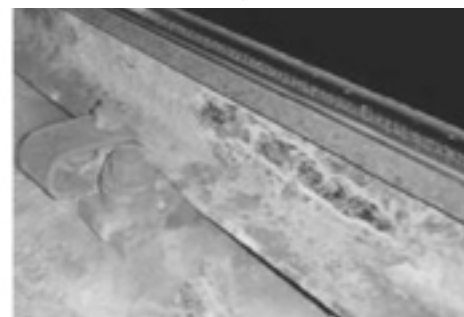


図4：レールの腐食

このような問題の対策として、トンネル二次覆工工法が施工されてきた。例えば総武快速線東京・錦糸町間の地下トンネル、通称総武トンネルにおいては、建設直後より止水を主目的とした二次覆工工法が施工されている。二次覆工の施工後は、漏水および輸送障害件数が減少しており、その有効性を十分に発揮している。

一方、東京トンネルにおいては、二次覆工を施工する必要がある延長が約4.3kmあり、総武トンネルと同じ工法で施工した場合、施工期間約20年、基地整備費等は除いても総額100億円規模の対策となると試算されている。そこで、二次覆工施工方法のさらなるコストダウン、施工速度の向上を図ることとした。

## 2 今までの二次覆工工法と問題点

1984～87年にかけては、現場打ちコンクリートによる二次覆工が施工された。平成元年からは、施工効率向上のため、鉄筋コンクリート製のプレキャスト板の機械化施工、通称PCW工法を施工している(図5)。

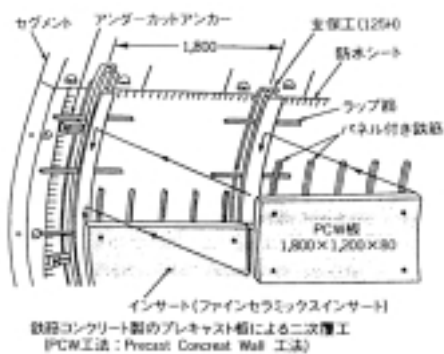


図5：PCW工法のイメージ

1999年にはPCW板の形状変更により、施工効率の向上を行っており、当初現場打ち工法では年100m程度の施工実績だったものが、年200m程度に向上した。

しかし今までのPCW工法では、パネルの重量が約400kgで専用の施工機械エレクター(図6、7)を使用する必要があり、施工速度に限界があるという問題点があった。



図6：エレクターによるPCW工法の施工

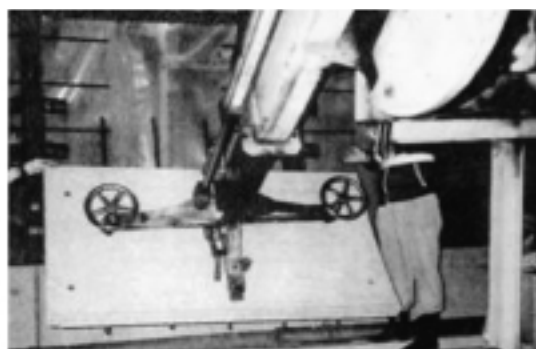


図7：エレクターアームとPCW板

## 3 新しい二次覆工工法の開発

### 3.1 基本的な考え方

今回の開発では、前述のPCW工法の問題点を踏まえ、パネルを軽量化することで施工の自由度および施工速度を向上させることとし、工期短縮による施工コスト削減を図ることとした。

新しい二次覆工工法の開発に先立ち、二次覆工に要求される基本的な機能を整理した。これらの考え方は従来のPCW工法のもを踏襲している。

- (1) トンネル内への漏水および砂流出の防止
- (2) 一次覆工セグメントの腐食抑制
- (3) 一次覆工キーセグメントの落下防止
- (4) 耐久性(概ね50年の耐用年数)を有すること
- (5) 所定の耐火性を有すること
- (6) 覆工表面は、後にボルト等を打ち込めること

基本構造として、①支保工を組みパネルを取り付ける、②パネルを一次覆工に直接アンカーで固定する、③パネルを円周方向に連結して自立する構造とする、等の案を比較検討した。その結果、将来的な補強を考慮すると支保工のある構造が望ましいこと、また、支保工部を施工目地とすることで誤差に対する

間隔調整がしやすいことから、①案を基本に開発を進めることとした。また、漏水防止については、完全に止水するのではなく、水の進入経路を長くすることでトンネル内への流入速度を抑える、すなわち見かけ上の透水係数を抑えることとし、二次覆工背面には防水シートを設置し、センタードレーンに導水し排水する構造とした。

### 3.2 構造の検討

基本構造は、支保工(H形鋼)に型枠兼用の軽量パネルを取り付け、裏込めモルタルを打設する構造とした。基本的な機能の中で、キーセグメントの落下防止等、トンネル構造の補強に関しては、支保工・裏込め材および鉄筋が負担することとし、軽量パネルは裏込め材打設時の型枠の機能とした。

軽量パネルの材質は、繊維強化プラスチック(FRP)と繊維補強セメントの2種類を検討した。これらの素材は、PCW工法で用いている鉄筋コンクリートと比較して引張強度及びじん性が高いため、パネル厚を薄くすることで大幅な軽量化を図ることができる。また、トンネルにおける耐火性を確保するため、FRPには熱硬化型プラスチックであるフェノール樹脂を用い、軽量化と曲げ剛性向上のためサンドイッチ構造とした。繊維補強セメントについては、高じん性であるPVA(ポリビニルアルコール)繊維を用いることとした。(図8、9)

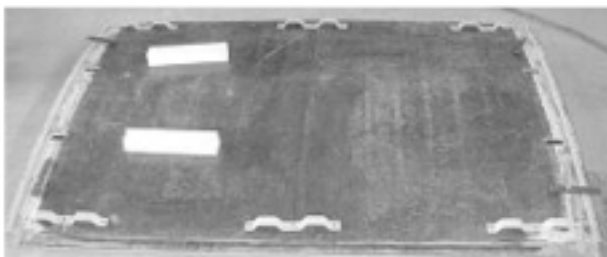


図8：フェノールFRPパネル

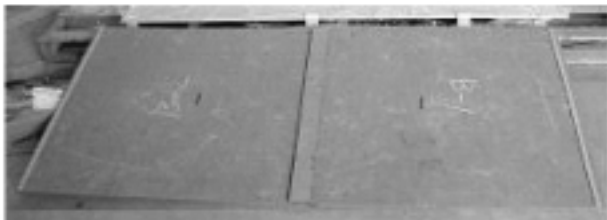


図9：繊維補強セメントパネル

ここで、軽量パネルを用いた場合、裏込めモルタル打設時に側圧によりパネルの変型(たわみ)が大きくなること、パネルに発生する応力が大きくなること、の2点が懸念されるため、たわみ抑制を目的とした仮設梁(角形鋼管)を併用することとした(図10)。

提案する二次覆工の施工手順を以下に示す。

- (1) 一次覆工に支保工および防水シートを設置
- (2) リング分の軽量パネルを支保工に設置
- (3) 仮設梁によりパネルを支保工に固定
- (4) パネルに設置した注入口より裏込めモルタルを打設
- (5) モルタル硬化後、仮設梁を撤去

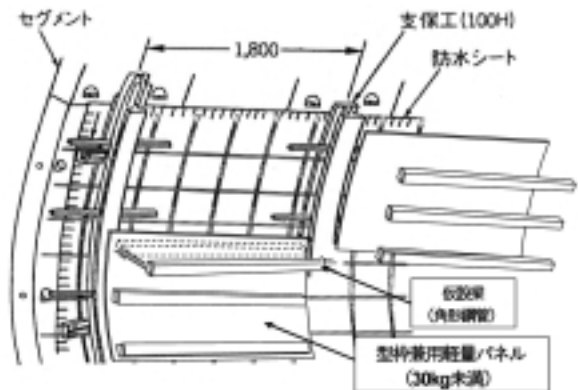


図10：軽量パネルを用いた二次覆工工法

### 3.3 模型試験

提案された基本構造について、基本性能、施工性等を確認する目的で、トンネル覆工の一部を模擬した実物大模型による施工試験を実施した。試験方法は、一次覆工および支保工を模擬した試験架台を製作し、軽量パネルおよび仮設梁を取り付けた後、裏込め材を打設する。試験に用いた模型の断面図を図11に示す。当試験により確認する項目は以下のとおりである。

- (1) 軽量パネル取り付け時について、パネル材質および固定方法を検証し、実用性と施工時間を確認する。
- (2) 仮設梁の取り付け時および撤去時について、固定方法を検証し、実用性と施工時間を確認する。
- (3) 裏込め材打設時に、軽量パネルおよび仮設梁のたわみ等を測定し、実用性と安全性を確認する。

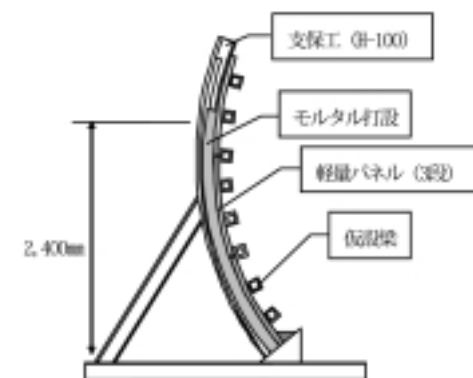


図11：模型試験断面図

### 3.3.1 模型試験の概要

パネル材料は前述のフェノールFRPおよび繊維補強セメントとし、支保工への固定方法は回転式の固定金具方式、カバープレート方式の2種類とした(表1)。仮設梁は、角形鋼管(100×100、t=3mm)を、パネル1枚あたり3本使用し、こちらも支保工への固定方法はフック方式とカバープレート方式の2種類とした。仮設梁固定方法の概要を表2に示す。裏込め材は、一般的に二次覆工工法における裏込め材として使用されている12モルタルを用い、打ち込み高さを最大2.4mとした。試験ケースは、パネル材料および固定方法を組み合わせ、表3に示す3ケースとした。

表1：軽量パネルの固定方法

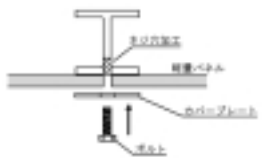
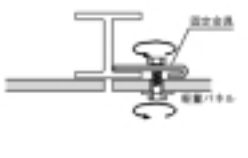
固定方法	カバープレート方式	固定金具(回転板)方式
		
特徴	<ul style="list-style-type: none"> <li>施工誤差等への対応が容易</li> <li>パネルの加工が不要</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>仮設物の撤去が必要無い</li> <li>支保工の加工が不要</li> </ul>

表2：仮設梁の固定方法

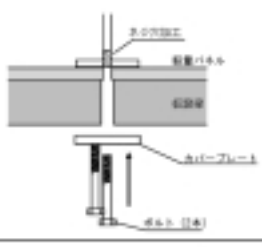
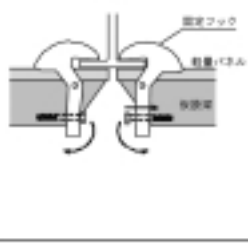
固定方法	カバープレート方式	フック方式
		
特徴	<ul style="list-style-type: none"> <li>施工誤差等への対応が容易</li> <li>パネルの加工が不要</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>ワンタッチ取り付け可能</li> <li>支保工の加工が不要</li> </ul>

表3：試験ケース

	No.1	No.2	No.3
軽量パネル	フェノールFRP (コンポジット構造) 1,790×1,153×16mm、約30kg		繊維補強セメント 1,790×900×8.5mm、 約25kg
仮設梁	□100×100×3.2mm、L=1800mm、約17kg/本、3本枚		
パネル固定方法	固定金具 (回転板)方式	カバープレート方式	カバープレート方式
仮設梁固定方法	フック方式	カバープレート方式	カバープレート方式
二次覆工構成枚数	12枚リング		16枚リング

### 3.3.2 模型試験の結果

#### (1) パネルおよび仮設梁の施工性

軽量パネル取り付け時の施工性については、カバープレート方式および固定金具(回転板)方式とも固定金具1箇所当たり約1分と良好であった。固定金具方式については、回転板が支保工に干渉し、固定不良となっている箇所が一箇所確認された。仮設梁取り付け時および取り外し時の施工性については、いずれの方法も施工時間は1本当りの取り付け約2分、取り外し約1分と良好であった。但しフック方式では、支保工間隔の狭い箇所に取り付ける際、フックが支保工と干渉する場合があります、支保工の立て込み誤差への対応が課題である。

#### (2) 裏込め材打設時

裏込め材打設時の側圧は、パネルの吸水、モルタルの硬化等の理由により、液圧とは一致しない。そこで、液圧を想定した側圧係数によりパネルに発生する応力および変位を評価するため、実測によるモルタル側圧と液圧の理論値を比較し計測値を補正する。理論値と実測値との比較グラフを図12に示す。

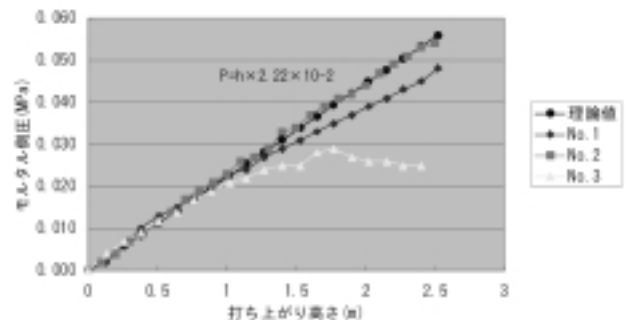


図12：モルタル側圧の比較

ケースNo.2と理論値はほぼ一致しており、側圧係数はおおむね1.0であるといえる。他のケースについては計測側圧にばらつきがあるため、液圧相当の側圧がかかったと仮定して補正した計測値を用いて評価した。

モルタル打ち上がり高さ2.4m時点で、パネルに発生する応力および変位量を表4に示す。発生応力が最大となったのは側

表4：軽量パネルに発生する応力および変位

	No.1	No.2	No.3
パネルの種類	フェノールFRP	フェノールFRP	繊維補強セメント
最大たわみ量(mm)	10.7	8.8	8.1
最大発生応力(N/mm <sup>2</sup> )	14.0	14.2	11.4
許容応力(N/mm <sup>2</sup> )*	29.7	29.7	25.7
安全裕度	2.1	2.1	2.3

\*許容応力は各パネルの基礎試験から得られた曲率剛度の2/3とした



圧の大きい最下段のパネルであったが、いずれのケースも安全裕度が2以上であった。

以上の試験結果より、支保工の立て込み誤差等、施工時の自由度の高さから、パネルおよび仮設梁の取り付け方法はカバープレート方式を基本とすることとした。軽量パネルの材質については、両材料とも施工性は良好で、たわみおよび発生応力が十分小さいことが確認できたが、耐火性能のグレードおよび材料コストの面から優れた繊維補強セメントを本施工において採用することとした。

### 3.4 支保工および配筋の検討

二次覆工の主な機能である、一次覆工キーセグメントの脱落防止については、支保工および裏込めモルタルが負担することとなる。そこで、支保工の断面および裏込めモルタルの配筋について、検討をおこなった。

荷重条件は、キーセグメント重量、背面の緩み土圧および二次覆工の自重とし、トンネル横断方向、縦断方向について、それぞれ確認した。

その結果、二次覆工の支保工および配筋の仕様を以下のとおりとした。

- (1) 支保工:H形鋼(SS400)100×100mm
- (2) 鉄筋(SD295)
  - 横断方向(円周方向):D10, ct c300mm
  - 縦断方向(Kセグメント箇所):D13, ct c150mm相当
  - 縦断方向(上記以外):D10, ct c300mm
- (3) 裏込め材:12モルタル、設計基準強度 $f_{ck}=40\text{N}/\text{mm}^2$

### 3.5 実トンネルにおける施工

以上の検討結果をもとに仕様を検討し、総武トンネル内で約10m(18m×5リング)の試験的な施工を実施した。施工状況を図13~16に示す。その結果、施工性、仕上がり等良好であることが確認された。



図13: 繊維補強セメントパネル設置



図14: 仮設梁取り付け



図15: 裏込めモルタル打設



図16: 施工完了

## 4 まとめ

今回、重量を大幅に軽量化したパネルを用いた、二次覆工工法を開発した。その結果、専用の施工機械を必要としないため、施工性、特に自由度が大幅に向上し、従来のPCW工法の単線トンネルでの施工速度200m/年に対して300m/年の施工が可能となり、施工工期は大幅に短縮できる見通しである。施工コストについては、従来のPCW工法に比べて10%程度のコストダウンが可能となった。さらに、二次覆工を施工することにより修繕費の削減が可能となる見込みである。

2003年より横須賀線東京トンネルにおいて本工法を採用し、5年間計画で延べ28kmの二次覆工を施工する工事が始まっている。今後は施工状況を勘案しながら、施工管理方法の検討や、さらなる施工速度向上と施工コスト縮減等の工夫に取り組んでいく必要があると考えられる。

### 参考文献

- 1) 植木保之、水野光晴、栗田功一；営業線シールドトンネルにおける二次覆工施工方法の開発、土木施工、山海堂、19994
- 2) 成嶋健一；鉄道施設協会総合技術講演会論文集、2004