

軽量パネルを用いたシールドトンネルの漏対策工事

Countermeasures against water leaks in a shield tunnel using lightweight panels

小野 桂寿¹・森山 智明¹・小泉 秀之¹・狩屋 守²・伊藤 祐二²

Keiji Ono, Tomoaki Moriyama, Hideyuki Koizumi,
Mamoru Kariya and Yuji Itou

¹正会員 東日本旅客鉄道(株) 建設工事部 構造技術センター (〒151-8578 東京都渋谷区代々木2-2-2)

E-mail:keiji-ono@jreast.co.jp

²東日本旅客鉄道(株) 東京土木技術センター (〒101-8612 東京都千代田区神田1-17-4)

The Tokyo Tunnel is a twin single-track shield tunnel on the Yokosuka railway line, 12.4 km long, opened in October 1976. At the time of construction, the groundwater level was lower than the tunnel. However, due to the restriction of groundwater pumping implemented in 1971, the ground water level suddenly rose. Consequently, much water leaked in the section not provided with the secondary lining, and various damages occurred in the tunnel, such as corrosion of steel.

The project presented here is to place the secondary lining (using lightweight panels) about 110 mm thick inside the shield tunnel section mentioned above as a permanent measure against water leaks.

Key Words : water leaks, secondary lining, Lightweight Panels

1. はじめに

横須賀線東京、品川間に位置する東京トンネルは、通勤客等の増加に伴い、輸送力増強を目的として1976年10月に開業した、総延長12.4km（うち約2.0kmは駅部で開削工法）の単線並列型のシールドトンネルである。当トンネルは1973年に開業した総武快速

線東京、錦糸町間に位置する総武トンネルに接続し、京浜、京葉地区を結ぶ重要路線である。

東京トンネルは、有楽町トンネル、汐留トンネル、浜松町トンネル、芝浦第1トンネル、芝浦第2トンネル等の総称である。地下約30メートルと深い深度に建設されており、建設当初、地下水位はトンネルより下面にあったが、1971年に東京都の地下水汲み上

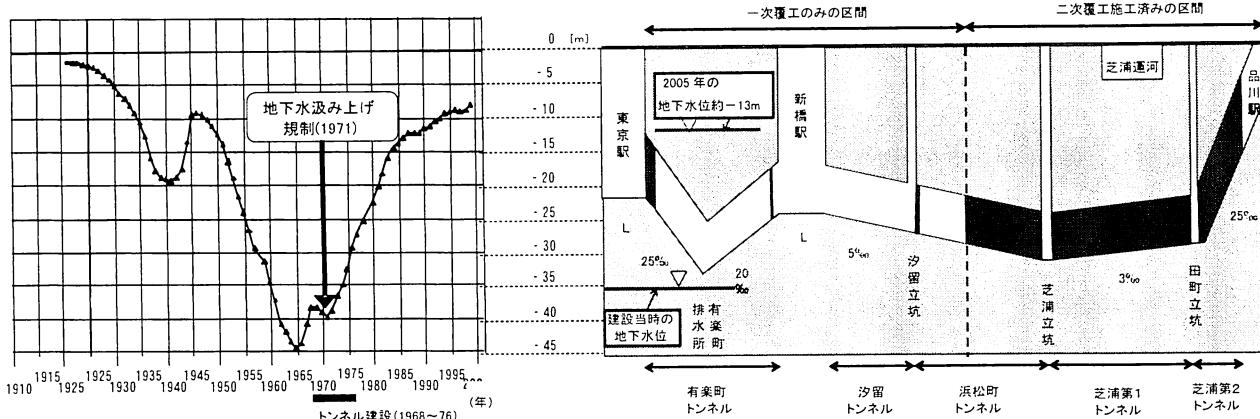


図-1 地下水位の時系列の変化

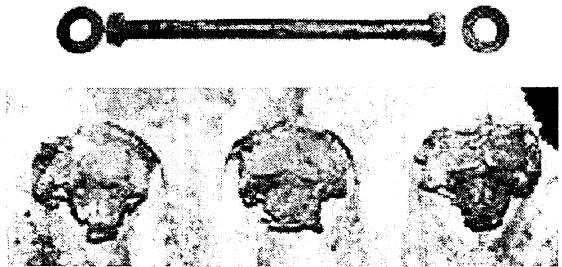


写真-1 中子型セグメント継手ボルトの腐食

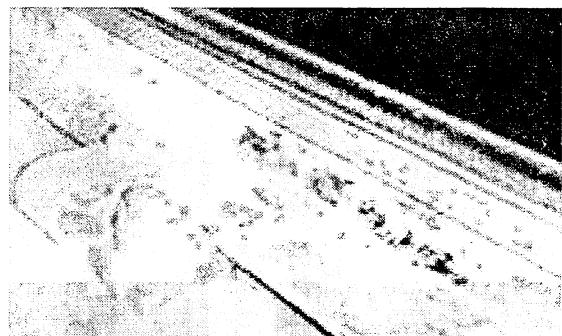


写真-2 レールに発生した腐食

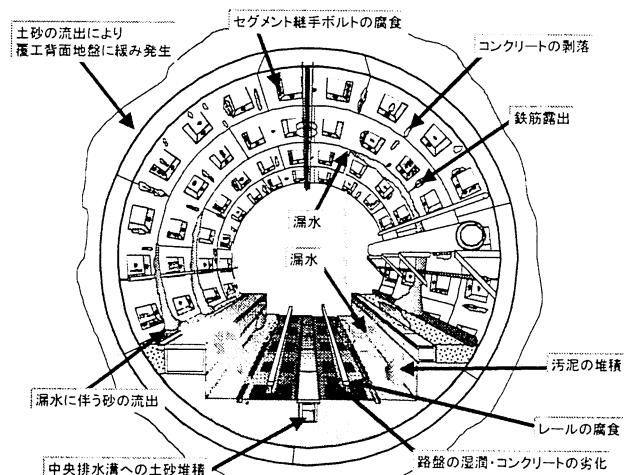


図-2 トンネル変状概要

げ規制が施行されたことから、地下水位は急激に上昇し(図-1)、トンネルは地下水位以下に水没することとなった。このため一次覆工のみの区間で漏水が発生し、トンネル内にはさまざまな変状が発生した。

本報告では、東京トンネルにおいて実施した漏水対策工事である二次覆工の施工を中心に、過去に施工した二次覆工の変遷について述べる。

2. トンネルに発生した主な変状

現在のトンネル内の漏水量は約4 000～5 000m³/日である。また、漏水中には塩化物イオンが含まれて

おり、その濃度は最も高い箇所で約4 100mg/Lであり、海水の20～30%程度の塩分を含んでいる。そのためトンネル内の鋼材腐食の進行が著しい¹⁾。

一次覆工には、設計上載荷重の違いにより中子型、コンポジット型等の5種類のセグメントが使用されている。建設途中よりトンネル内への漏水が多く発生した箇所(新橋、品川間約6.2km:全体の約59%)については、建設時に二次覆工が施工されている。

変状は、継手ボルト、コンポジットセグメントの鋼板部分、レール等に腐食が発生している(写真-1, 2)。また、路盤の湿潤により、軌道回路の短絡等、信号設備にも影響を及ぼし、輸送障害を発生させている。当該箇所のレールの軌道材料の交換頻度は、一般区間の3倍以上である。

中子型セグメントの区間においては、キーセグメントを下から挿入する形で、継手ボルトにより固定されている。そのため継手ボルトが腐食し、ボルトが切れることで、キーセグメントの落下の可能性も考えられる。

一方、漏水とともにトンネル周辺の土砂がトンネル内へ流入しており、これに伴う周辺地盤の緩みおよび地上構造物の沈下等の影響が懸念される。さらに、土砂がそのままトンネル内の排水溝や各排水所の沈砂槽等に堆積するため、定期的な浚渫が必要である²⁾。また、漏水中の塩分濃度が比較的高いことから、鉄筋の被りが薄いセグメント内部の鉄筋が腐食、膨張することでコンクリートの剥離、剥落等が発生し、点検時の叩き落しが必要となっている。

以上の変状対策として、毎年膨大な維持管理費用が必要となっている。

3. 二次覆工対策工事

現在実施している漏水対策は、一次覆工のみのシールドトンネル内側に、厚さ約110mmの二次覆工を施工している。まず第Ⅰ期工事として、ピン継手型セグメント、および中子型セグメント区間約2 750mを2003年8月に着手し2008年3月に完了した。現在、第Ⅱ期工事としてコンポジットセグメント区間約1 500mについて、2008年5月に施工着手した。

トンネル内の施工は、全て軌道モーターカー、作業足場台車等の保守用車により実施している。これらの保守用車は、上り線は両国基地(施工箇所まで約7.8km)から、下り線は品川基地(施工箇所まで約6.1km)から入線させて作業を行っている。そのため施工箇所までの移動の時間ロスがあり、列車の運行

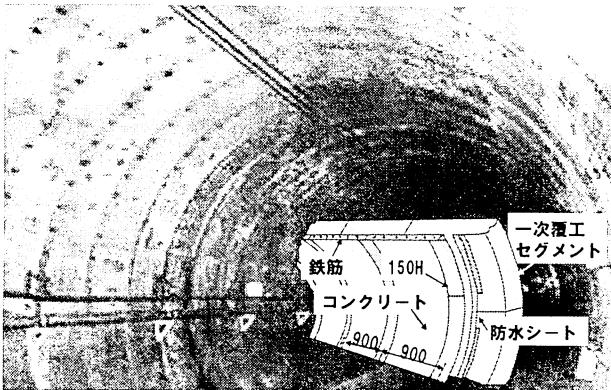


写真-3 場所打ちコンクリート工法

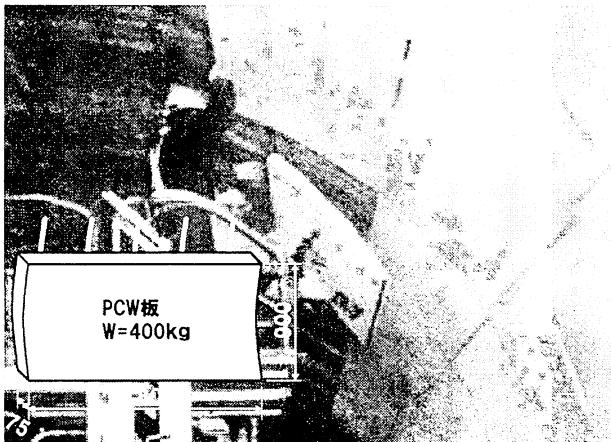


写真-4 鉄筋コンクリート製プレキャスト板(PCW板)による施工

が無い夜間の線路閉鎖間合い、および停電作業間合いであるため、実作業時間が概ね午前1時00分から同3時30分までの、2時間30分という作業条件となっている。

トンネル改良工事の全体の構成は、主体部分の二次覆工工事の他に、工事に使用する作業基地（両国基地、品川基地）の改良、覆工背面の地山緩みおよび空洞に対する背面注入、第Ⅱ期工事対象のコンポジットセグメント表面に施工されている吹付けモルタルの撤去等がある。

(1) 東京トンネル以前（総武トンネル）の二次覆工対策

横須賀線東京トンネルと東京駅で接続されている総武快速線東京、錦糸町間の総武トンネル（室町T、新日本橋T、小伝馬町T、馬喰町T、柳橋T等の総称、総延長3 199m）は、東京トンネルより開業が早く、漏水による変状が進行していたため、1984年から2003年にかけて二次覆工を施工している。

以下に過去に施工した漏水対策工法の概要について述べる。

a) 場所打ちコンクリートによる施工

1985年から86年にかけては、試験施工として場所打ちコンクリートによる二次覆工を実施した（写真-3）。これは支保工部材（H-150）に型枠を組んで施工するものである。支保工間隔は900mm、覆工厚は150mmである。しかし、支保工のフランジ部分が露出し鋼材の防錆処理が必要となる事や、ほとんどが人力施工であったため、型枠の設置や撤去に多くの人員、および時間を要する等の課題があった。

b) 鉄筋コンクリート製プレキャスト板（PCW板）による施工

1989年からは施工効率向上のため機械化施工ができるように、鉄筋コンクリート製プレキャスト板（以下、PCW板）を使用した。PCW板は、幅1 800mm×高さ900mm×厚さ75mm、重量約400kg/枚とした。支保工はH-125を1 800mm間隔で設置し、覆工厚を200mmとして二次覆工を施工した（写真-4）。

本施工方法では、支保工を組んだ後、専用の施工機械であるエレクター台車を使用して、PCW板を支保工に取り付け、セグメントとPCW板との間にモルタルを打設した。PCW板が埋設型枠となるため、H鋼支保工等の鋼材の露出もなく、また型枠の撤去を必要としない。そのため、場所打ちコンクリート工法では、100m/年程度の施工速度であったのに対し、PCW工法では、200m/年の施工と大幅に施工効率が向上した。

(2) 軽量パネルを用いた施工方法の開発

東京トンネルにおいては、二次覆工施工計画の総延長が約4 300mあり、総武トンネルと同様のPCW工法で施工した場合、施工期間が約20年を要すると試算された。そこで、施工速度の向上とコスト削減を目的とした二次覆工施工法を開発することにした。

総武トンネルで施工したPCW工法は、機械化施工により作業効率が向上したが、鉄筋コンクリート製プレキャスト板の重量が約400kg/枚であるため、人力のみの施工は不可能で、エレクター台車を用いて施工していた。施工速度はエレクター台車の施工能力（一晩でパネル14枚程度）に制約され、エレクターという専用の機械を必要とすることから、施工の編成数を増やすことが難しかった。そこで、二次覆工に使用するパネル重量の軽量化を図ることで、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。

一次覆工は地下水圧の作用を考慮しているため、二次覆工に要求される機能を以下のとおり整理した。

- ・トンネル内への漏水および背面土砂の流入防止

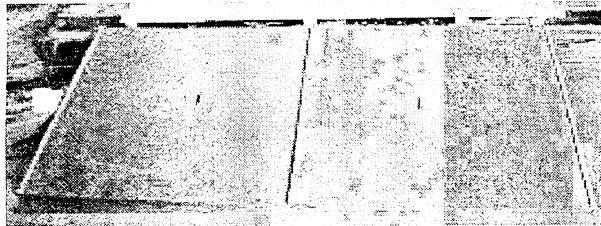


写真-5 繊維補強セメントパネル

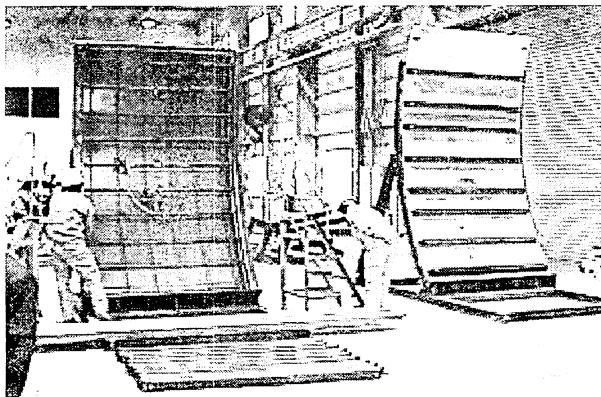


写真-6 実物大模型による施工試験

- ・一次覆工セグメント鋼材の腐食抑制
- ・一次覆工キーセグメントの落下防止
- ・所定の耐火性を有すること

基本構造については、誤差や曲線部に対する施工の自由度、将来的な補強等のしやすさを考慮し、支保工鋼材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。また、漏水対策に対しては、完全に止水するのではなく、二次覆工背面に防水シートを設置し、中央排水路に導水する構造とした。

軽量パネルの材質は、強度、耐久性等の面から、PVA（ポリビニルアルコール）繊維を用いた繊維補強セメントパネルを選定した（写真-5）。本パネルはPCW板で用いていた鉄筋コンクリート板と比較して、引張強度およびじん性が高く、パネルを薄くすることができますので、大幅な軽量化を図ることができる。

軽量パネルを用いた場合、裏込めモルタル打設時に側圧よりパネルの変形（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点が想定された。そこでたわみ抑制を目的とした仮設梁（角型鋼管）を併用した。

基本構造の検討およびパネル材質の性能や施工性を確認するため、トンネル覆工の一部を模擬した实物大模型による施工試験を実施した（写真-6）。

施工試験の結果、選定した繊維補強セメントパネルは、施工性が良好でたわみや発生応力が小さいこ

とが確認できたため、本パネルを採用することにした。よってパネルの重量は1枚あたり約400kgから約27kgと大幅に軽量化することができた。

パネルを軽量化し、人力によるパネル設置が可能となったため、PCW工法の施工速度200m/年にに対して、新パネル工法では300m/年の施工速度となった。また、専用のエレクターを必要とせず、一般的な保守用車を使用できるため、上下線同時の施工が可能となり、工期を大幅に短縮できる見込となった。

（3）軽量パネルを用いた二次覆工の施工

ここで、繊維補強セメントパネルを使用した工法の施工手順について説明する。

a) 側道の撤去

トンネルインバートまで二次覆工を施工するため、最初に側道の撤去を行う。なお、トンネル側道部には、特別高圧ケーブル、通信用ケーブル、信号用のケーブルや収納ボックスが付帯している。そのため、事前に仮設のブラケットを一次覆工に設置し、それらのケーブル類を仮移設する（写真-7）。

b) 防水シートの設置

次に一次覆工面に防水シートを設置する。中子型セグメントについては、防水シートの設置に先立ち、発泡スチロール（EPS）にてセグメント内側の段差を無くしてから、セグメント面に防水シートを貼り付けた（写真-8）。

c) 支保工の取り付け

防水シート取付け前に、あらかじめ打設しておいたアンカーに支保工を取り付ける。PCW工法では、H-125の鋼材を専用の機械で設置していたが、繊維補強セメントパネル工法では、H-100の鋼材としているため、人力による施工としている。

d) 鉄筋の組立て

支保工を取付けた後、工場にて格子状に組んでおいた鉄筋を支保工に取付ける。PCW工法ではコンクリートパネルに鉄筋が取付けられていたが、人力による施工速度向上を図ったため、パネルと鉄筋は別々に取付ける事とした（写真-9）。

e) 側道の復旧

一段目のパネルを組んだ後、撤去した側道を復旧し、仮設ブラケットに移設していた各種ケーブル類を新設したケーブル収納ボックスに戻す。

f) 繊維補強セメントパネルの設置

下段から上段へと順次パネルを組んでいく。PCW工法ではエレクターのアームが一本であったため、片側一枚ずつの施工であったが、繊維補強セメントパネルは人力で取付けられるため、両側同時のパネ

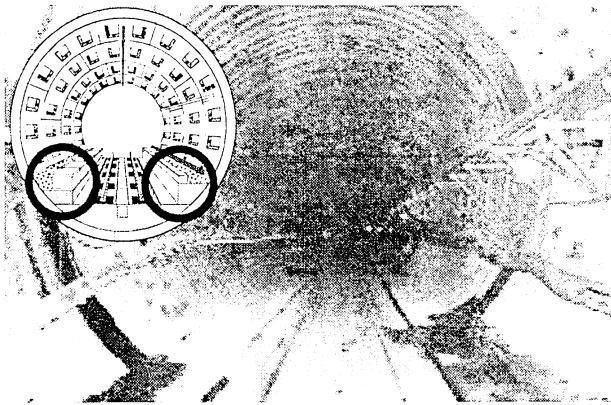


写真-7 側道の撤去

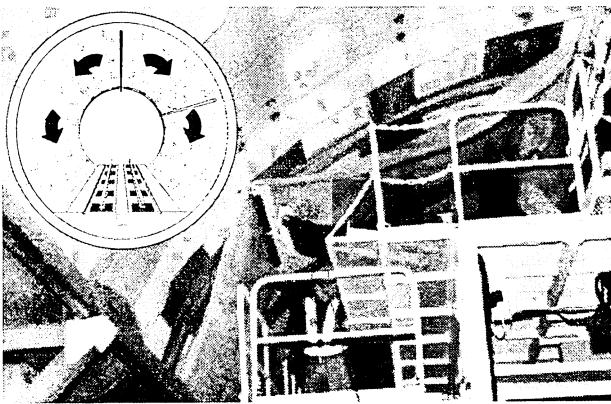


写真-8 防水シートの設置

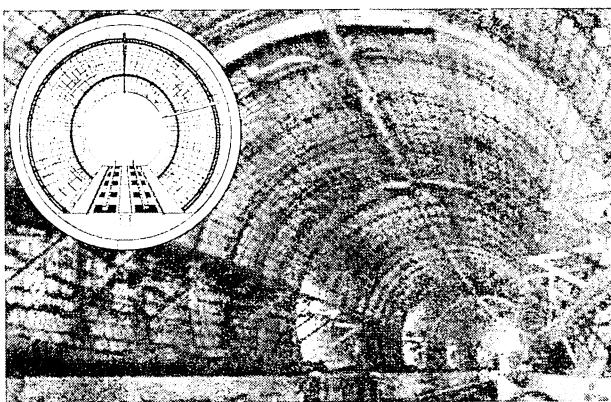


写真-9 鉄筋の組立て

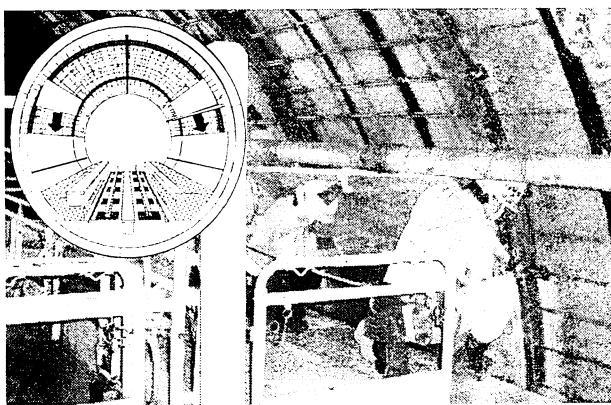


写真-10 繊維補強セメントパネルの設置



写真-11 軽量パネルの改良前：仮設梁間隔300mm



写真-12 軽量パネルの改良後：仮設梁間隔450mm

ル設置が可能となった（写真-10）。

g) 裏込めモルタルの打設

パネル設置後、パネルのたわみ防止のため、仮設梁をトンネル周方向に300mm間隔で設置し、各注入孔から裏込めモルタルを充填施工する。養生期間をおいて、仮設梁を撤去して二次覆工が完了となる。

(4) 軽量パネルの改良による仮設梁の削減

今回、軽量の繊維補強セメントパネルを採用し、施工速度向上を図ってきたところであるが、モルタル打設時のパネルのたわみを防ぐため、仮設梁の設置が必要となっている。仮設梁の設置と解体作業に時間を多く要していた。

仮設梁はモルタル打設後の養生期間中は存置しているため、列車運行時には落下させないように、ワイヤ等を用いて、仮設梁自身の落下防止の対策をしている。これは作業効率を下げる要因の一つになっている。そこで、仮設梁の設置本数を減らすことで、作業効率の向上を図ることにした。

繊維補強セメントパネルを採用した当初の仮設梁の設置は、仮設梁を300mm間隔で設置していた。そこで、人力で運搬、設置できる重量に抑えつつパネルの剛性を高め、仮設梁の本数を削減することについて検討した。パネルの剛性を高めるために、従来の8.5mmのパネルに4.5mmのパネルを張り合わせ、厚さ13mmのパネルとし、モルタル打設時のたわみ量

表-1 二次覆工の変遷

	場所打ち コンクリート (1985年～1986年)	鉄筋コンクリート製 プレキャスト板 (PCW板) (1989～2003)	軽量パネル板 (当初)	軽量パネル板 (改良版)
材 料 サ イ ズ 重 量	鉄筋コンクリート	鉄筋コンクリート板 1 800×900×75 400kg/枚	繊維補強セメント板 1 800×900×8.5 27kg/枚	繊維補強セメント板 1 800×900×13 42kg/枚
支保工 設置間隔	H-150 ctc 900	H-125 ctc 1 800	H-100 ctc 1 800	H-100 ctc 1 800
覆工厚	150mm	200mm	110mm	110mm
施工速度	100m/年	200m/年	300m/年	350m/年



写真-13 二次覆工施工前

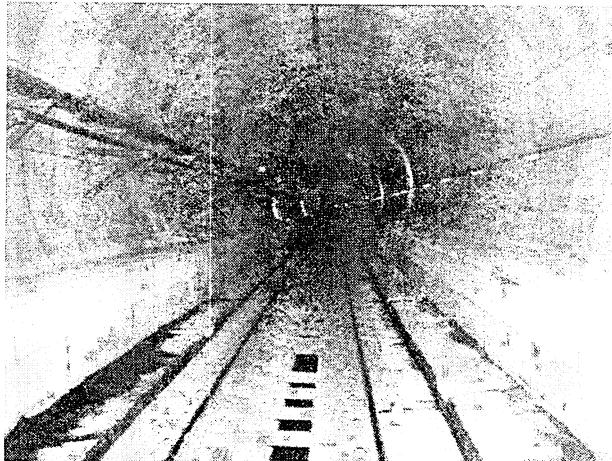


写真-14 二次覆工施工後

を押えることとした。その結果、仮設梁の間隔を300mm（写真-11）から450mm（写真-12）に広げることができた。パネル重量は約27kgから約42kgと増加したが、施工性に対する大きな影響はなく、仮設梁の必要本数の減少により、設置や解体時間が短縮でき、全体の施工速度の向上を図ることができた。

以上の改良により、年間施工量は従来300m/年に

して、350m/年と施工速度を向上させることができた。ここで表-1に二次覆工の変遷を示す。

（5）二次覆工を施工したことによる効果

施工前後の写真を写真-13と写真-14に示す。2003年より、第Ⅰ期工事として二次覆工を約2 750m施工した。その結果、覆工表面からの漏水が無くなり、路盤が乾燥状態となった。軌道関係ではレールの交換実績が漏水対策前に対して、約53%減となった。また信号設備関係の障害発生件数が約45%減となり、二次覆工の効果が現れてきている。

4. おわりに

今回の軽量パネルを用いたシールドトンネルの漏水対策工法は、供用を開始したトンネルにおいて、限られた作業時間内で、二次覆工が施工可能な工法である。

現在、第Ⅱ期工事として2008年5月より施工着手し、今回施工の中子型セグメントと異なるコンポジットセグメント区間にについて、支保工アンカーの打設方法や、さらなる施工速度向上と、効率的な作業の実施に向けて取り組んでいるところである。

参考文献

- 1) 山口 高嶺、鈴木 延彰、藍郷 一博：東京トンネルの変状と対策について、土木学会第59回年次学術講演会講演概要集、IV-131, pp.261-262, 2004年9月
- 2) 鈴木 延彰、渡邊 誠司、長谷川真吾：覆工背面地盤に緩みのある鉄道シールドトンネルに対する裏込め注入試験について、土木学会第58回年次学術講演会講演概要集、III-443, pp.885-886, 2003年9月