

## 薄肉覆工板によるトンネル補強工法の開発

### DEVELOPMENT OF THE TUNNEL REINFORCEMENT METHOD OF CONSTRUCTION BY THIN MORTAR BOARD

岩井 孝幸<sup>1)</sup>・木戸 和義<sup>2)</sup>・森 康雄<sup>3)</sup>・小寺 満<sup>4)</sup>・菊 広樹<sup>5)</sup>

Takayuki IWAI, Yoshikazu KIDO, Yasuo MORI, Misturu KODERA and Hiroki KIKU

The method of construction which reinforces established tunnel lining was developed. Inside established tunnel lining which deteriorated, lining board made from the steel fiber reinforcement mortar of super-high-strength is fixed with a joint bolt alternately, and the filler is poured into the crevice between established linings. The features of this method of construction are the human power construction by lightening of lining board, the thinning thickness of mortar board for securing the construction limit in the tunnel, and laborsaving of tunnel support by use of an anchor bolt and a spacer bolt. Here, the following was performed. The check of the dynamic characteristic by the load carrying test which used the imitation tunnel, development of a back filler, and check of realization possibility about the construction performance of a tunnel reinforcement method.

**Key words:** tunnel reinforcement, steel fiber reinforcement mortar, filling mortar, lining board

#### 1. はじめに

老朽化したトンネルの補修・補強工法は、トンネルの劣化状況、劣化原因に応じて、内空断面の確保、既設配線類への影響、夜間の短時間作業などの施工性を考慮して選定される。一般的には、繊維シート接着工、セントル補強工、鋼板やプレキャストコンクリート板等による内巻工など様々な工法が実施されている。筆者らは、トンネル覆工コンクリートの剥落防止工法として、超高強度の鋼繊維補強モルタル製の覆工板を用いたトンネル補強工法の設計・施工に係わる実証性の確認を行った。

#### 2. トンネル補強工法とは

トンネル補強・補修工法には、①地圧の増加により変状が生じたトンネル、及び変状の生じるおそれのあるトンネルを補強する地圧対策、②トンネル覆工の材料が劣化し、補修を要する場合の劣化覆工対策及び③トンネル内への漏水による被害を防止する漏水対策に大別される。

本工法は、トンネル覆工補強工法のひとつとして、劣化した既設トンネル覆工の内側に、厚さ 4cm、幅 40cm、長さ 1m の超高強度の鋼繊維補強モルタル製の覆工板を 1 枚ずつボルトで、既設覆工面に沿ってアーチ状に組み

- 
- 1) 正会員 (株)熊谷組土木本部土木技術部
  - 2) 正会員 (株)熊谷組土木本部シールド技術部
  - 3) 正会員 (株)熊谷組土木本部土木技術部
  - 4) 正会員 日本コンクリート工業(株)アドバック事業部
  - 5) 正会員 日本コンクリート工業(株)研究所



図-3に示すように、半径約 2.5m の鋼製トンネル (H-250×250 mm造) の内側に覆工板を 2 リング取付け、貫通インサート部から半径方向外側にスペーサーボルトを張り出して安定させた。載荷は、トンネル頂部から油圧ジャッキで既設覆工の剥落を想定した荷重 8kN (10kN/m) を載荷後、覆工板と模擬トンネルの隙間 (10 mm) を裏込め材で充填し、硬化後さらに載荷試験を行った。

### 3. 2 試験結果

#### (1)荷重～変位

図-4に載荷荷重とクラウン部鉛直方向変位の関係を示す。なお、図中のフレーム解析は剛性一様の 2 ヒンジアーチとして解析し、ピース間継手はピン結合に近い状態、曲げ剛性を半分として評価した。図より、裏込め充填前のカーブは、急な立ち上がりで進展するが 4kN を越えた付近から傾きは小さくなった。充填後の場合も 18kN まで直線的に増加するが、傾きが緩やかになり、その後徐々に水平に近くなった。最大荷重載荷後の荷重減少は緩やかで、除荷すると変位は減少し、14 mm 程度の残留変位となった。これから、本工法は変形能力および復元性が高いことが判る。裏込め充填前および充填後共、フレーム解析値に比較して、荷重が小さい範囲では傾きが多少大きい、荷重が増加するにしたがって傾きが小さい方向へ大きく変化した。これは、図-5のひずみ図から、トンネル内空側にひび割れが発生したために覆工板の曲げ剛性が低下したためと考えられる。

裏込め充填後に剛性が大きくなっている理由は、充填前にはアーチ状の薄板がスペーサーボルトによって部分的に支保されているのに対して、充填後は充填材が面的に板の変形を拘束していること、ピースおよびリング間継手剛性が増加することによるものと考えられる。

#### (2)荷重～ひずみ

図-5に載荷荷重とクラウン部覆工板の表面ひずみの関係を示す。変位と同様の挙動を示し、荷重の増加とともに傾きは小さくなった。短期許容応力度からひずみ換算した値と比較すると、載荷荷重 4kN 程度で許容値に達していることが判る。本覆工板に用いた鋼繊維補強モルタルは、200  $\mu$  程度で初期ひび割れが発生するものの、目視で判別できるひび割れに進展するまでには 2 倍以上の荷重増加を要したことからひび割れ分散性が非常に良いことが判る。

#### (3)破壊状況

裏込め充填後に最大荷重以降まで載荷を行ったあとの状況を図-6に示す。覆工板のひび割れは、載荷点であるクラウン部に集中し、載荷点と隣接するピースの部材中央にトンネル軸方向に沿ったひび割れが見受けられた。

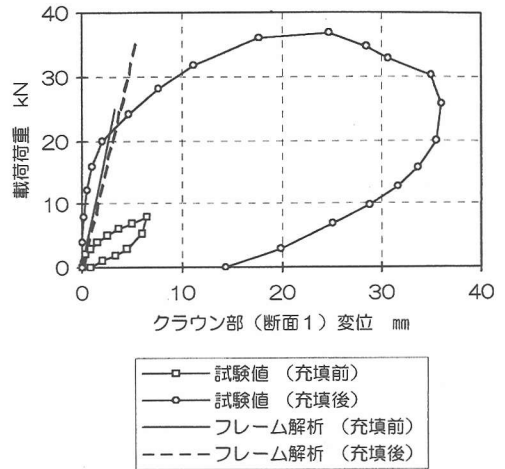


図-4 荷重と変位の関係

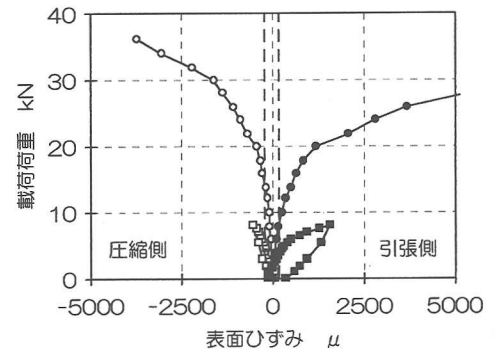


図-5 荷重と覆工板の表面ひずみの関係



図-6 破壊状況 (クラウン部)

3. 3 課題

裏込め充填前では剛性一様モデルでの解析値とは整合しないことから、今後、より適切な設計方法（設計荷重、解析モデル、許容値等）を検討する必要がある。

4. 裏込め充填材

本工法では、既設覆工と覆工板の間にモルタルを充填し、安定化を図るものであるが、従来のモルタルでは、材料の充填性や経済性の点で問題点が報告<sup>1)</sup>されており、さらに、供用中の鉄道トンネルでは夜間工事終了後、始発電車が通過するまでに、凝結が開始している必要がある。ここでは、これら要求性能を満足するための材料選定および配合について実験により検討した。

4. 1 実験概要

(1)使用材料

セメントは普通ポルトランドセメント(C)、細骨材は珪砂5号(S)、混和材は急硬性セメント混和材〔エトリンガイト系〕(AD1)、硬化遅延材(AD2)、増粘材〔アクリル系〕(AD3)、混和剤は高性能減水剤〔ポリカルボン酸系〕(CA)とした。使用材料は、本実験の目標性能・経済性を考慮して市販品から選定した。

(2)実験の要因と水準

表－2 実験の要因と水準

表－2に実験の要因と水準を示す。

(3)試験方法および目標性能

表－3に試験方法および目標性能を示す。流動性と材料分離抵抗性の目標値は、既に実績の有る市販の充填モルタルの管理値を目標とした。可使時間と圧縮強度は、鉄道トンネルの夜間工事を想定し、練混ぜ後1時間は使

|        | 要 因                |                           |                              |                          |            |
|--------|--------------------|---------------------------|------------------------------|--------------------------|------------|
|        | 砂結合材比<br>S/(C+AD1) | 水結合材比<br>W/(C+AD1)<br>(%) | 遅延材混入率<br>AD2/(C+AD1)<br>(%) | 単位増粘材量<br>AD3<br>(kg/m³) | 室温<br>(°C) |
| 水<br>準 | 1.0                | 30                        | 0.5                          | 3                        | 12         |
|        | 1.5                | 35                        | 0.6                          | 5                        | 20         |
|        | 2.0                | 40                        | 0.7                          | 10                       |            |
|        | 3.0                | 50                        | 0.8                          | 15                       |            |
|        |                    | 60                        | 0.9                          | 20                       |            |

用可能で、3時間

表－3 試験方法および目標性能

| 性能試験項目  | 試験方法（標準）                         | 目標性能                      |
|---------|----------------------------------|---------------------------|
| 流動性     | J <sub>14</sub> ロート試験(JSCE-F541) | 10±5 秒                    |
| 材料分離抵抗性 | ブリージング試験(JSCE-F542)              | 1%以下                      |
| 可使時間    | J <sub>14</sub> ロート試験(JSCE-F541) | 練混ぜ後1時間経過後 10±5 秒         |
| 圧縮強度    | 圧縮強度試験(JSCE-G541)                | 3時間後：1N/mm²、28日：24N/mm²以上 |
| 圧送性     | モデル試験 *1                         | 圧送速度 7.3 リットル/分以上         |
| 充填性     | モデル試験 *2                         | 充填モルタルの偏りの無いこと            |

に設定した。

\*1：トンネル天端部への施工を想定し、練混ぜ後 30 分経過したモルタルを内径が 1 インチ、長さが 10m のホースを使用し、高所（高さ 5.5m）への圧送試験。

\*2：隙間が狭い箇所への充填を想定し、高さ 60cm、長さ 150cm、幅 2cm の透明アクリル製型枠へモルタルを押し上げ式で充填した場合の充填試験。

4. 2 実験結果

(1)砂結合材比および水結合材比の選定

表－4より、砂結合材比が 2.0 と 3.0 の場合は減水剤の最大推奨混入率の 1.5%混入しても良好な流

表－4 流動性試験結果

| J <sub>14</sub> ロート試験結果（単位：秒） |    |       |      |     |     |
|-------------------------------|----|-------|------|-----|-----|
|                               |    | 砂結合材比 |      |     |     |
|                               |    | 1.0   | 1.5  | 2.0 | 3.0 |
| 水<br>結<br>合<br>%<br>材<br>比    | 30 | 閉塞    | ---  | --- | --- |
|                               | 35 | 10.9  | ---  | --- | --- |
|                               | 40 | 4.0   | 12.0 | 閉塞  | 閉塞  |
|                               | 50 | 2.4   | 3.5  | 閉塞  | 閉塞  |
|                               | 60 | 2.3   | ---  | 分離  | 分離  |

\*増粘材未使用

動性が得られず、J<sub>14</sub> ロート内で閉塞した。砂結合材比が 1.0 の場合、水結合材比 40、50%、砂結合材比が 1.5 の場合、水結合材比 50%で比較的良好な流動性が得られた。よって、経済性から砂結合材比が 1.5、水結合材比 50%を基本配合とした。ただし、全てのケースでブリージングが 3～5%程度発生したため以下のように増粘材の使用を検討した。

## (2)単位増粘材量の選定

図-7より、単位増粘材を 5 kg/m<sup>3</sup>混入した場合、J<sub>14</sub> ロート流下時間がほぼ目標値となり、ブリージング率も 0.7%まで低減出来た。

## (3)遅延材混入率の選定

急硬性セメント混和材を使用していることから、可使時間をコントロールするために遅延材を用いた。図-8は、遅延材混入率および室温がモルタルの可使時間に与える影響を検討した。図より、遅延材混入率を 0.5～0.9%に変化させることによりモルタルの可使時間を 5～135分にコントロールする事が出来るが、可使時間は温度依存性が高いため、モルタルの実施工の直前に現場で試し練りを実施して可使時間を把握しておく必要がある。

## (4)圧縮強度試験結果

図-8の遅延材混入率が 0.6%配合の圧縮強度試験結果を表-5に示す。表-3の目標強度を上回った。

## (5)圧送性および充填性試験結果

表-6より、圧送性は、表-3の目標値を上回り良好であった。充てん性は、注入圧 0 N/mm<sup>2</sup>でも幅 2cmの型枠内へのモルタルの充填は可能で、偏りも無く良好であった。

## 4. 3 課題

急硬性セメント混和材を使用しているため、セメント水和が促進され、水和熱による温度上昇が大きい。裏込め充填後も覆工板の温度上昇によりひずみが増加するため、覆工板に発生する応力での施工管理が困難である。また、温度依存性が高いため、施工に際しては現場の気温の変化に応じて配合について検討が必要である。

## 5. 施工性能

模擬トンネルを用いた試験施工等をもとに、覆工板の組立、裏込め充填材の注入における施工性に係わる留意点や課題について述べる。

### (1)覆工板組立

#### ①覆工板の質量

覆工板 1 枚の質量は 25kg としたが、30～35kg 程度でも人力による運搬、組み立てが可能である。

#### ②補強厚さ

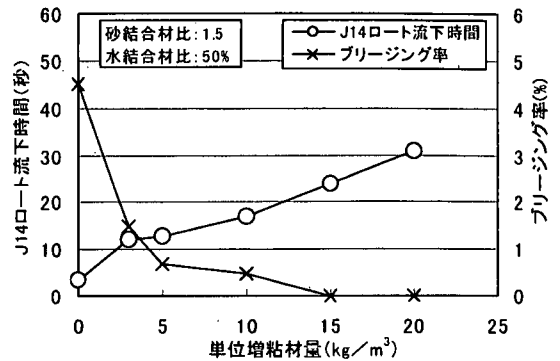


図-7 増粘材量と流動性・材料分離抵抗性の関係

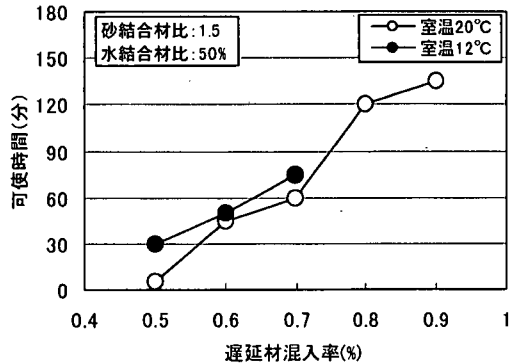


図-8 遅延材混入率とモルタル可使時間の関係

表-5 圧縮強度試験結果

| 配合条件           | 材齢  | 圧縮強度(N/mm <sup>2</sup> ) |
|----------------|-----|--------------------------|
| 遅延材混入率<br>0.6% | 3時間 | 1.2                      |
|                | 28日 | 46.9                     |

\*養生条件：室温 12℃，封緘養生

表-6 圧送性および充填性試験結果

| 性能試験項目 | モルタル温度(℃) | 注入圧(N/mm <sup>2</sup> ) | 圧送速度(リットル/分) |
|--------|-----------|-------------------------|--------------|
| 圧送性    | 17        | 0.045                   | 12           |
| 充填性    | 17        | 0                       | 4.7          |

\*配合条件は表-5の配合と同じ

覆工板は円弧状に規則的に組み立てることが原則となる。しかし、既設トンネルの断面形状は不規則であることが多いため、既設覆工面との隙間が数 cm～十数 cm となるところが発生する。従って、事前に既設トンネルの断面測量を行い、最適な断面形状を決定する必要がある。特に、鉄道トンネルでは信号や電気系統のケーブルが既設覆工面から数 cm のところに設置されているため、盛り換え工事が必要となり、補強のための覆工厚さが薄いことのメリットを十分に生かすことができない。

### ③組立方法

覆工板を組み立てる継ぎ手ボルトは、トンネル軸方向に対して 15° しか傾いていないため、覆工板ピース間の締結力は、覆工板リング間の締結力と比較して小さい。また、同一リングでは始点から一方向に順序に、覆工板を組み立てるため、トンネルのセンターラインを越えた範囲では覆工板の自重の影響でピース間の隙間が大きくなる傾向がある。

### ④覆工板の付着力

超高強度鋼繊維補強モルタルの表面付着力はほとんど期待できず、わずかな変位でも裏込め充填材とはく離するため、覆工板の背面には裏込め充填材とはく離を構造的に防止するために突起物を設けることが望ましい。

## (2)裏込め充填

### ①充填方式

充填材の良好な充填性が確保されることが事前に確認されていれば、自然流下方式で充填することが望ましい。押し上げ方式で、間欠的に充填を行う場合、注入口付近に通常液圧以上の圧力が作用するため、覆工板の変位を誘発させ、トラブルの原因となる可能性が高い。

### ②充填材の漏れ防止

裏込め充填時の覆工板接合部からの充填材の漏れを防止するために、覆工板接合面に止水材を接着する必要がある。ゴム系の止水材を用いると、裏込め充填により覆工板に荷重が作用した場合、覆工板が容易に変位する原因となる。従って、覆工板の組立によるボルトの締結力により厚さが極めて薄くなり、かつ、止水効果を発揮するスポンジ系の材料が好ましい。

### ③充填時支保方式

裏込め充填に際して覆工板の変位をアンカーボルトまたはスパーサーボルトで抑制することにより、支保工が不要となる。アンカーボルトは覆工板のトンネル内側への変位を、スパーサーボルトは覆工板のトンネル外側への変位を防止するものである。

## 6. まとめ

### (1)載荷試験

部材厚 4 cm のセメント系板で、覆工板自重、裏込め材液圧、既設覆工の剥落荷重等に対して抵抗できる部材および構造の実験的な確認ができた。

### (2)裏込め充填材

供用中の鉄道トンネルで薄肉覆工板によるトンネル補強を行うための裏込め充填モルタルを開発することができた。

### (3)施工性能

模擬トンネルを用いた試験施工等をもとに、薄肉覆工板によるトンネル補強工法の施工性に係わる実証性が確認された。

## (参考文献)

- 1) 橘ら：トンネル覆工背面新充填材料の開発，コンクリート工学論文集，第 11 巻第 3 号，2000.9