

鋼製支保工と内巻き工を併用したトンネル補強工法の開発

森 康雄*¹ 野中 英*² 濱田 真*³ 緒方明彦*⁴

過去に施工されたトンネルでは、様々な不具合が発生している事例が多く、補修・補強が必要とされることが多い。トンネルの補修・補強工法には、ひび割れ注入、繊維シート補強、裏込め充填、鋼板補強などの対策が取られている。本報告では、鋼製アーチ支保工と内巻き工を組み合わせたトンネル補強工法を提案するとともに、模擬トンネルを用いた室内実験について述べたものである。室内実験の内容は、施工性確認実験（5節）、補強効果を確認するための載荷実験（6節）である。実験、解析の結果、本補強工法の施工性および補強効果を確認することができた。

キーワード:トンネル補強工法, 超高強度繊維補強コンクリート, 施工性, 水中不分離性コンクリート, 補強効果

1. はじめに

竣工後 20~30 年以上を経過したトンネルでは、覆工背面の空洞、覆工コンクリートのジャンカ、コールドジョイント、巻き厚不足、ひび割れなどの施工不良や劣化現象が多く見られる。既設トンネルの地圧対策や劣化対策として、ひび割れ注入、繊維シート補強、裏込め充填、鋼板補強、吹き付けモルタル、ロックボルト打設などのさまざまなトンネル補修・補強工法が提案・採用^{1)~2)}されている。

本報告は、鋼製アーチ支保工と鉄筋コンクリートによる内巻き工を組み合わせたトンネル補強において超高強度繊維補強モルタル製埋設型枠（以下、「覆工板」と呼ぶ）を使用する工法を提案するとともに、鋼製模擬トンネルを用いた室内実験の結果及び解析、評価について報告する。

2. トンネル補強工法

いわゆるトンネルの補強・補修と呼ばれている対策には、目的に応じて地圧対策、劣化覆工対策、漏水・凍害対策がある。山岳トンネルの補修・補強工法の一例を Table1 に示す。

2.1 最近のトンネル補修・補強

トンネル施工の技術向上に伴い、施工時に十分な対策が講じられるため、最近のトンネルでは施工後の変状の進行に対する地圧対策を必要とすることは極めて少なくなっている。しかし、昭和 50~60 年以前においてトンネル掘削工法の主流であった、矢板工法で施工されたトンネルは、技術的に背面空洞、覆工の巻き厚不足、材料分

離、コールドジョイント、ひび割れ等が発生しやすいものであった。

鉄道・道路トンネルでは、覆工コンクリート片のはく落など、将来的な変状による第三者災害を防止することを目的に、覆工の補修・補強が行なわれている。

水路トンネルでは、経年劣化としてインパート部の洗掘に対して補修が行なわれており、部分的には地圧の増加、地殻変動、周辺環境の変化による活荷重の増加などに対して、補強が行なわれている。

2.2 トンネルの補修・補強における要求条件

これらトンネルの補修・補強を行なう上での共通の課題を以下に示す。

- ① 鉄道・道路トンネルでは供用しながらの施工となるため、施工時間または施工期間、施工場所（通行規制区域内）、資機材の搬出入等制約が多い。
- ② トンネルの機能を維持するための内空断面を確保する必要がある。

Table1 山岳トンネルの補修・補強工法

補強・補修対策	目的	対策工法
地圧対策	地圧の増加等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。	裏込め注入工 内巻き工 セントル補強工 ロックボルト工 根固め工 路盤コンクリート設置工 ストラット工 地山注入工
劣化覆工対策	トンネル覆工の材料が劣化したトンネルを補修する。	鋼板接着工 FRPシート接着工 金網、ネット設置工 内巻き工 補強セントル工
漏水・凍害対策	トンネル内の漏水及びその凍結による被害を防止する。	導水工 止水工 防水板 地下水位低下 背面注入工

*1 土木事業本部土木技術部リニューアルグループ

*2 技術研究所建設材料研究グループ

*3 技術研究所建築構造研究グループ

*4 土木事業本部土木設計部地質・基礎グループ

③ 明り構造物とは異なり、荷重条件だけでなく補強対策の効果についても不明確であることが多い。

2.3 既往のトンネル補強工法の開発

筆者らは地下鉄シールドトンネルの二次覆工のはく落防止対策として、以下に示すような考え方（コンセプト）のもとに対策工法の開発、試験施工を行なってきた^{3)~5)}。

① 人力施工

供用中の地下鉄シールドトンネル内での施工は、終電～始発までの間の3時間程度であり、大型の専用機械の導入は困難であるため、補強部材は、人力で運搬、組み立てできるように、25~30kg以下とする。

② 補強厚さ

建築限界、車両限界を侵さないように覆工の補強厚さはできるだけ薄くする（補強厚さ10cm以下を目標とした）。

③ 安全性の確保

補強体の構造線形をアーチ状にする（補強体の脚部を軌道敷きに接地させる）。

④ 経済性の確保

施工方法は、補強部材（質量25kg程度）を既設覆工面に沿って、リング状に1リングずつ組み立て、既設覆工面との隙間にモルタルを裏込め充填する。補強部材の材質として、ダクトル（超高強度補強繊維コンクリート）板及び薄肉鋼板（t=6mm）を使用した工法についてそれぞれ開発した。両者の比較表をTable2に示す。

設計はく落荷重に対して、梁-バネモデルで検討を行い、載荷実験で補強効果を確認して試験施工を行なった。

その結果、本工法は、①人力施工が可能であり、確実な補強効果が得られる、②補強厚さを10cm以下とすることができる、③補強部材は、トンネルの形状（曲率）に合わせてオーダーメイドで製作するため経済性に劣る、④トンネル内径3.4m、補強断面弧長15.5mでトンネル延

長1mあたり150万円（直接工事費、夜間施工）以上要することがわかった。

3. トンネル補強工法開発の概要

これまで開発してきたトンネル補強工は、主に覆工のはく落帽子を目的とするものであったが、水路トンネルなどでは、本格的な覆工補強へのニーズが高い。水路トンネルの覆工補強としては既に鋼板補強や支保工+内巻き工が実施されているが、以下に示すような問題点があり、ここでは、「鋼製支保工+内巻き工」の問題点を解消するために本工法を開発した。

水路トンネルは、水力発電所、農業用水、上水道等の用途に分類され、トンネルの断面は、馬蹄形、半径1~2m程度が多い。水路トンネルの中でも圧倒的に総延長の長い水力発電所の送水路トンネルは、昭和初期から昭和30年代に建設されたものが多い。当時は、施工方法が現在とはまったく異なっていたため、覆工の品質が十分に確保されていないトンネルも多く、ひび割れ、漏水、ジャンカ、コールドジョイントなどが顕在化している。これら水路トンネルの補強は、地圧の増加、地殻変動など活荷重の変化による変状に対して、主に鋼板補強工法や鋼製支保工+コンクリート内巻き工などの地圧対策が実施されている。

ただし、既存の「鋼製支保工+内巻き工」では、以下のような問題点がある。

- ① 支保工の表面が露出するために錆びが発生する。
- ② 内巻き工に普通コンクリートを用いると表面が磨耗しやすい。
- ③ 締固め等が不十分になるため、密実なコンクリートにはならない。
- ④ 溜まり水や漏水箇所では、材料分離するためコンクリートの品質が確保できない。
- ⑤ 内巻き工のための方枠支保工組み立てが煩雑であり、スライドフォーム+セントルの利用は経済性、施工性に劣る。

3.1 開発のコンセプト

本工法の開発コンセプトをTable3に示す。水路トンネルでは一定期間送水を止めて補修・補強を行なうことが多く、資機材搬入用の立坑や坑口が少なく、周辺は狭隘な山岳地帯であるため、人力による施工が可能な工法であることが望ましい。また、流水量の確保は当然であるが、流水等による覆工面の洗堀も防止（抑制）しなければならない。さらに、送水を止めた状態でも、漏水や溜まり水がある環境で内巻きコンクリートを打設しなければならない。狭隘な箇所でも流動性が良く水中分離抵抗性を有するコンクリートが必要となる。

3.2 開発の内容

以下の2点について使用材料の選定、要素実験（試作）

Table2 補強部材の諸元



補強部材	ダクトル (超高強度繊維補強 コンクリート)	薄肉鋼板
概要図		
寸法	40cm×1m×4cm	40cm×1m×6mm
質量	25kg	23kg
組立(配置)形式	千鳥配置	千鳥配置
組立方法	リング間	斜め継ぎ手ボルト
	ピース間	斜め継ぎ手ボルト
既設覆工面への固定	スパーサーボルトのみによる反発力のみ期待。引張り力は負担しない。	スパーサーボルトとアンカーボルトにより反発力と引張り力を負担する。ただし、組み立て用の仮設アンカーとして。
補強厚さ	10cm	5cm

Table3 トンネル補強工法開発コンセプト

要求性能	課題
内空断面の確保	できる限り内空断面の縮小を避けるため補強厚を小さくする。
トンネル内側面の耐久性の向上	水流などによる覆工表面の磨耗を抑制する。
裏込めコンクリートの品質確保	トンネル底版にたまり水があることを想定して、材料分離抵抗性、水中不分離性を、補強厚さが薄くても裏込めコンクリートが打設のように、流動性、セルフレベリング性を確保する。
経済性	既存の補強工法よりも経済的であることが要求され、ここでは、トンネルの断面形状に左右されない同一の埋設型枠を使用する。

Table4 覆工の材料と工法の比較

材料	埋設型枠(パネル化)		場所打ち	
	超高強度繊維補強コンクリート	アクリルポリマーコンクリート	高強度コンクリート	普通コンクリート
磨耗性	○	○	△	×
施工性	○	○	△	△
経済性	○	△	△	○
評価	○	△	△	×

Table5 コンクリートの要求品質

品質項目	要求品質
充填性	覆工厚さ 75mm, 延長 1.5m の型枠内に確実に充填できること
分離抵抗性	流動・充填時に分離しないこと
水中不分離性	導水路などの水の存在する箇所、湧水の発生している場所での打ち込みに際し、セメント粒子の逸散が認められないこと
ポンプ圧送性	2inch の配管を用いて圧送が可能であること
無収縮性	コンクリート打設後に肌別れ等が生じないこと

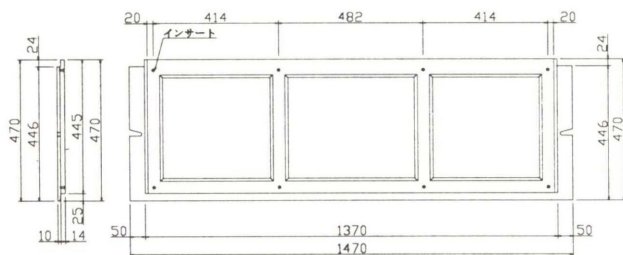


Fig.1 覆工板の形状 (グラウト孔無し)

を行い、鋼製の模擬トンネルを使って本工法の施工性と補強効果の確認実験を行なった。

- ・ 覆工表面の磨耗性の向上
- ・ 幅 10cm 程度の狭隘な箇所への打設可能な自己充填型・水中不分離性コンクリート

覆工表面の磨耗性の向上については、各種材料、工法について比較検討を行い、内巻き工施工用として超高強度繊維補強コンクリート製のパネルを埋設型枠として使用することとした。比較表を Table4 に示す。

4. 要素実験

4.1 覆工板の開発

既往のトンネル補強工法ではトンネル断面の曲率に応

じて覆工板をオーダーメイドしなければならず、組みあがった断面形状は円形になるが材料費は高くなる。そこで、本工法では、トンネル断面の曲率にかかわらず、レディメイドで同一形状の平板の覆工板を支保工に掛け矢板のように設置するような構造とした。この結果、断面形状は円形ではなく多角形になるが、内空断面を侵すこともなく、材料費も安くなる。

実験に使用した覆工板(標準パネル)の形状を Fig.1 に示す。覆工板は、幅 1470mm, 高さ 470mm, 厚さ 10mm とし、質量約 30kg と人力施工が可能な大きさとした。また、裏込め材と覆工板の一体性を確保するため覆工板背面にインサートを埋込んだ。覆工板として、標準パネル以外に裏込め材充填のため 2inch のグラウト孔を設けたものと天端パネルの計 3 種類を製作した。覆工板の板厚は、裏込めコンクリートの側圧に耐えるように決定した。

4.2 裏込めコンクリートの配合選定試験

配合選定試験では、Table5 に示すような要求品質を満たすため、粗骨材の最大寸法 (G_{MAX}) を 10mm, 水中不分離性混和剤、膨張剤を混入した配合を検討した。

Table6 に本実験で実施した配合選定試験の一例を示す。配合選定試験では、水セメント比、単位水量、細骨材率等についても検討を行ったが、特殊増粘剤および高性能減水剤の効果と比べて測定結果に差が少なかったため省略した。

Table7 にフレッシュコンクリートの品質および水中不分離度を示す。スランプフローは混和剤量が一定であれば特殊増粘剤量が多くなるほど大きくなり、特殊増粘剤量が一定であれば高性能減水剤量が多くなるほど大きくなる傾向が認められた。水中不分離度については、水中不分離性コンクリート設計施工指針(案)²⁾に示される基準値 pH12.0 以下をすべて満足する結果となった。以上の結果より、混和材量が多くなると流動性が増すが分離の傾向が大きくなり、特殊増粘剤量が多いと粘性が高くなり、少ないと分離の傾向が大きくなるので、自己充填性、材料分離抵抗性、水中不分離度を考慮して模擬トンネルに適用する配合は選定試験における No.1 の配合とした。また、模擬トンネルへの施工実験時に流動性を調整する際には、特殊増粘剤量の増減により流動性の調整を実施することとした。

5. 施工性確認実験

5.1 施工方法

施工性確認実験で使用した材料の仕様を Table8 に、補強工法の施工フローを Fig.2 に示す。

5.2 鋼製支保工と覆工板の設置

Photo.1 に実験状況を示す。覆工板は、鋼製アーチ支保工にあらかじめ溶接で固定したボルトを介して仮止めし、支保材で固定した。この方法によって、およそ 10m²/人

Table6 配合表 (配合選定試験)

No	W/C (%)	S/a (%)	単位水量	セメント ^{*1}	細骨材	粗骨材	Ad1	Ad2
			(kg/m ³)				C*%	W*%
1	35.0	38.0	205	586	552	901	1.00	1.75
2	35.0	38.0	205	586	552	901	1.00	2.00
3	35.0	38.0	205	586	552	901	0.75	1.75
4	35.0	38.0	205	586	552	901	1.50	1.75

*1 単位セメント量中の 20kg に膨張剤が含まれている

Table7 フレッシュコンクリートの品質および水中不分離度 (配合選定試験)

No.	スランブフロー (cm)	空気量 (%)	温度 (°C)	水中不分離度 pH
1	50.5×50.5 (5分) 57.5×57.0 (最終)	6.3	14.0	11.09 (7.7°C)
2	61.5×61.0 (5分) 69.0×68.0 (最終)	3.9	18.0	11.53 (8.6°C)
3	50.0×49.0 (5分) 57.0×56.0 (最終)	6.5	16.0	11.32 (8.6°C)
4	52.5×51.5 (5分) 59.0×58.5 (最終)	5.2	11.0	11.52 (3.0°C)

Table8 室内実験で使用した補強部材と材料の仕様

材料	仕様
鋼製アーチ支保工	溝型鋼 (75×40×5×7)×2, @1,000 mm
鉄筋	D13, 主筋(延長方向)@150 mm, 配力筋(断面方向)@300 mm
覆工板	1470 mm×470 mm×厚さ 10 mm, 超高強度繊維補強コンクリート製標準パネル(グラウト孔有無・2種類), 天端パネル
支保材	角形鋼管口-100×100×3.2
裏込めコンクリート	水中不分離性コンクリート
グラウト	プレミックスモルタル

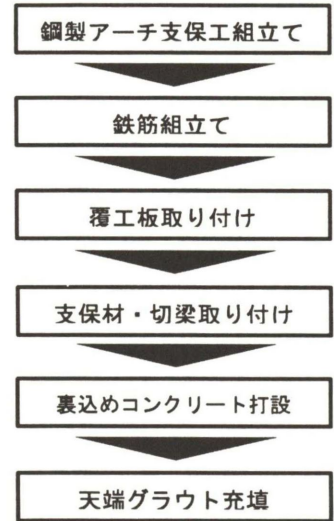


Fig.2 施工フロー



Photo.1 覆工板の施工状況

工の施工可能であることが確認できた。

5.3 裏込めコンクリート

5.3.1 実験概要

模擬試験体の施工実験では、2inch の配管での圧送の確認を行うとともに、裏込め充填厚さ 75mm, 延長 1.5m の型枠内に確実に充填が可能であることを確認した。要求品質に対する確認は、フレッシュコンクリートの品質確認試験、水中不分離度の測定、圧縮強度、ポンプ吐出量の確認、型枠内への充填性確認により実施した。Table9 に品質確認試験方法を、Table10 に使用材料を示す。なお、模擬トンネルの打設は 2 日 (1 日目の打設量 0.8m³, 2 日目の打設量 1.2m³) に分けて実施した。

5.3.2 実験結果

Table11 にフレッシュコンクリートの品質を示す。模擬トンネルの打設で使用した配合は、Table6 の No.1 の配合としたが、配合選定試験と比較してスランブフローが大きくなっている。これは、増粘剤の温度依存性によると推測される。また、2 日目では頂部の打設孔に移行する際、流動性を増すために特殊増粘剤量を W×1.50% まで減少させ、流動性の調整を実施した。

Table12 に吐出速度の測定結果を、Photo.2 に模擬トンネルへの打設状況を示す。吐出速度の測定結果は、1 日目が 1.1m³/h, 2 日目が 1.5m³/h であった。模擬トンネル

Table9 品質確認試験方法

試験項目	試験方法
フレッシュコンクリートの品質確認試験	フレッシュコンクリートの品質確認試験は、スランブフロー、空気量、コンクリート温度を測定した。
水中不分離度の測定	土木学会「水中不分離性コンクリート設計施工指針(案)付属書2 水中不分離性コンクリートの水中不分離度試験方法(案)」に規定される pH の試験に準拠して行った、なお、pH の測定については簡易型 pH 計を用いて実施した。
圧縮強度	圧縮強度試験は、JIS A 1108「コンクリートの圧縮強度試験方法」に準じて実施した。
ポンプ吐出速度の確認	型枠内への吐出速度は、配管の先端で吐出されるコンクリートを容器に入れ、30 リットル吐出するまで時間を計測した。
型枠内への充填性確認	型枠内への充填性の確認は、模擬試験体の裏側より打診して確認するとともに、妻型枠に明けた孔からのコンクリートの流出により確認した。

Table10 使用材料

セメント	普通ポルトランドセメント:比重 3.16
水	つくば市水道水:比重 1.00
細骨材	鬼怒川産川砂:比重 2.55
粗骨材	鬼怒川産豆砂利:比重 2.55, 粗骨材最大寸法 G _{MAX} =10mm
高性能減水剤 (Ad1)	カルボキシル基含有ポリエーテル系(ポリカルボン酸タイプ)高性能減水剤
水中不分離性混和剤 (2液型) (Ad2)	アルキルアリスルホン酸系特殊増粘剤
膨張材	エトリンガイト・石灰複合系膨張材

への打設時には、コンクリートの粘性が高いため、打設直後には打設孔下部でコンクリートが多く存在（山状に分布）する状況となったが、時間の経過とともにコンクリートは締め固め無しでほぼ水平になり、2inch 配管で75mmの型枠内に打設速度の最大が1.5m³/hで打設が可能であることを確認した。なお、配管の段取り替え等を考慮した打設速度は0.3m³/hであった。なお、圧縮強度試験結果をTable13に示す。材齢28日で56.7N/mm²で従来の覆工コンクリート強度（設計基準強度18N/mm²）を上回る結果となった。

6. 補強効果確認実験

6.1 試験体

Fig.3に本工法の開発に際して使用した模擬トンネルの組立図を示す。断面形状は馬蹄形で、S型（平面）2枚とA型（曲面）3枚の鋼製セグメントにより構成されている。奥行き方向は1m幅のものを3組繋ぐことにより延長3mとした。鋼製セグメントは主桁がSM490、その他の部材がSS400材で、セグメント同士は20mm普通ボルトを用いて接合した。この模擬トンネル単体に载荷するのが「補強前」で、模擬トンネルに補強覆工を施工した後に载荷するのが「補強後」である。なお、「補強後」の载荷は裏込めコンクリート打設後32日目に実施した。

6.2 载荷方法と測定項目

Photo.3に载荷装置を示す。インパートを反力床に設置し、両スプリングラインの水平方向変位はゴム板を介して拘束した。载荷はトンネル頂部軸方向に载荷梁（H-400）を渡し、1000kNジャッキにより強制変位を与え、一方向単調载荷とした。载荷梁は紙面左右方向のスウェイを防止するためにパンタグラフを取り付けた。変位はPhoto.3に示すようにトンネル内に計測フレームを反力床上に組み立て、Fig.3に示すようにトンネル円周方向の5ヶ所（矢印①～⑤）で円周方向と直角方向（面外）の変位を計測した。奥行き方向については3断面で計測した。荷重はジャッキと载荷梁の間に設置したロードセルにより計測した。载荷速度は約3.0kN/minとし、油圧は手動ポンプにより供給した。

6.3 実験結果および考察

6.3.1 载荷荷重—頂部変位関係および剛性比較

Fig.4に補強前後の载荷荷重—頂部変位関係を示す。頂部変位はFig.3における③下向き（矢印と反対向き）を正方向とした。

「補強前」の载荷は鋼製セグメントだけなので、その剛性を把握するために230kN程度までの载荷とした。载荷中は外見上全く変化は見られなかった。また除荷後の残留変位はほとんど無く弾性挙動を示していたと言える。

「補強後」の载荷は補強効果を確認するために破壊す

Table11 フレッシュコンクリートの品質

No.	スランブフロー (cm)	空気量 (%)	温度 (°C)
1日目 No.1	56.5×55.0 (5分) 65.0×64.0 (最終)	4.7	20.0
2日目 No.1	56.5×53.5 (5分) 62.0×61.0 (最終)	5.5	20.0
2日目 No.2	55.0×54.0 (5分) 62.0×61.5 (最終)	4.5	20.0

Table12 吐出量

No.	スランブフロー (cm)	空気量 (%)	温度 (°C)
1日目 No.1	56.5×55.0 (5分) 65.0×64.0 (最終)	4.7	20.0
2日目 No.1	56.5×53.5 (5分) 62.0×61.0 (最終)	5.5	20.0
2日目 No.2	55.0×54.0 (5分) 62.0×61.5 (最終)	4.5	20.0

Table13 圧縮強度試験結果

圧縮強度(N/mm ²)		
材齢2日	材齢7日	材齢28日
18.3	37.2	56.7



Photo.2 模擬トンネルへの打設状況

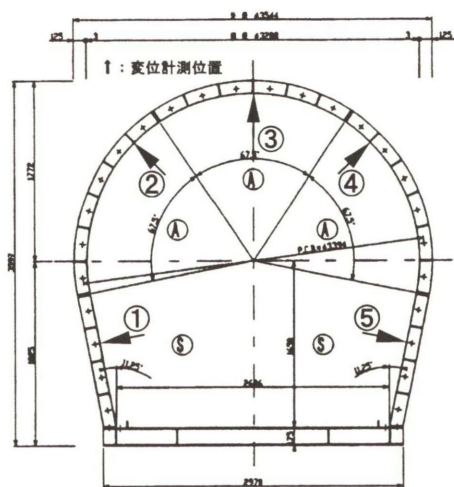


Fig.3 模擬トンネル組み立て図

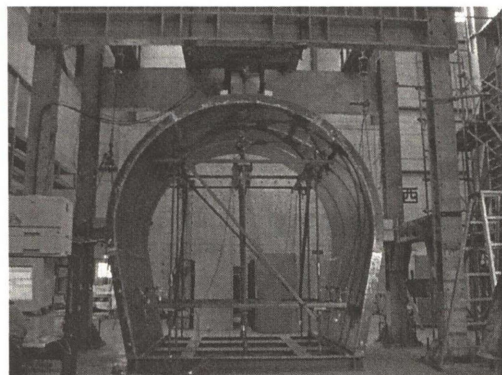


Photo.3 模擬トンネルへの打設状況

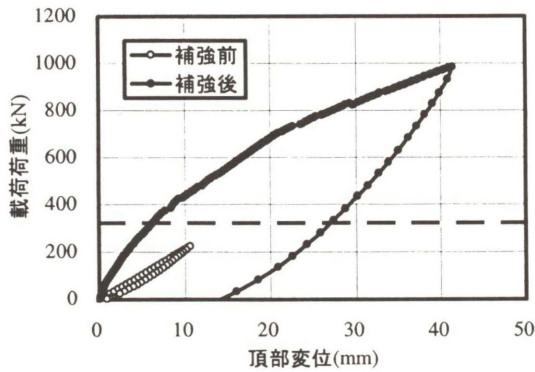


Fig.4 載荷荷重-頂部変位関係

Table14 補強前後の剛性比較

	補強前		補強後		剛性比 後/前
	剛性*1 kN/mm	剛性*2 低下率	剛性*1 kN/mm	剛性*2 低下率	
1mm	20.77	1.00	85.72	1.00	4.13
2mm	20.58	0.99	69.43	0.81	3.37
3mm	20.69	1.00	63.57	0.74	3.07
5mm	21.00	1.01	54.94	0.64	2.62
10mm	21.28	1.02	43.55	0.51	2.05

*1: 割線剛性 *2: 1mm時の剛性で基準化

るまで載荷する予定であったが、ジャッキ能力の1000kNまで載荷しても耐力低下を示すことはなかった。載荷途中で裏込めコンクリートが割れるような音、セグメントの接合部が滑るような音が発生した。除荷時の残留変位は15mmほど生じていることから、部分的に材料（セグメント、アーチ支保工、裏込めコンクリート）が塑性化したと考えられる。ただし、覆工板はひび割れの発生など、表面上変化はみられなかった。

「補強前」の載荷実験に関して、スプリングラインの拘束が載荷荷重に対して比例して拘束力が増えるバネを考えた平面骨組解析を行った結果、載荷位置の鋼製セグメントが降伏する耐力は322kNとなった。(Fig.4に表示)

本実験結果からは「補強前後」の耐力比較は出来ないため、荷重変形関係から得られる剛性について「補強前後」の比較を行なった。Table14に変形が1,2,3,5,10mm時の割線剛性と1mm時を基準とした剛性低下率と「補強前後」の剛性比を示す。また、Fig.5に剛性低下率と剛性比の変化を示す。「補強前」の剛性低下率はほぼ1.0で、前述したように弾性挙動をしていたと考えられる。一方、「補強後」の剛性低下率は、変形が大きくなるにつれて徐々に低下しており、変形の増大とともに塑性化が進んでいる様子が伺える。剛性比についてみると、3mmまでは3倍以上を、また10mmでは2倍まで確保している。以上のことから、補強覆工により剛性が高くなったので本補強工法の効果があったことを確認した。

6.3.2 その他変位挙動

Fig.6に「補強前」のFig.7に「補強後」の載荷荷重-変位①と⑤の関係を示す。なお、Fig.3における矢印の向きを正方向変位とした。「補強前」の関係をみるとFig.4と同様に残留変位もほとんどなくほぼ弾性挙動を示して

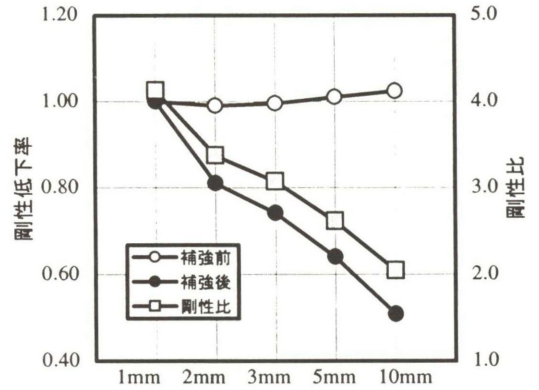


Fig.5 剛性低下率と剛性比の推移

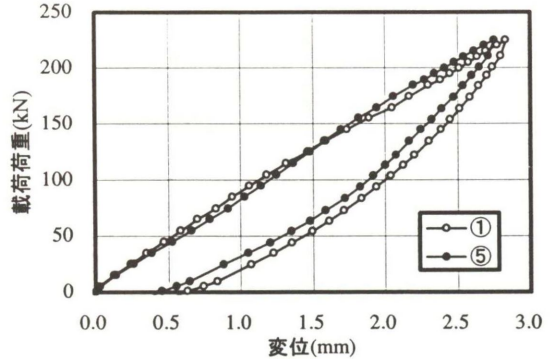


Fig.6 載荷荷重-①と⑤変位関係(補強前)

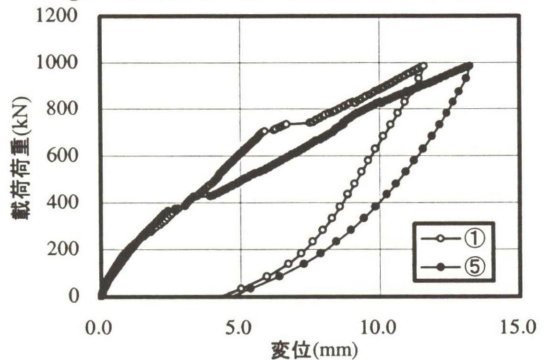


Fig.7 載荷荷重-①と⑤変位関係(補強後)

いるのが分かる。一方、「補強後」の関係では①が700kNあたりで、⑤が400kNあたり滑っている様子が分かる。この滑りの影響はFig.4の頂部変位には明確に表れていないが、裏込めコンクリートあるいは鋼製セグメントのいずれかに何らかの破壊が生じたものと考えられる。

6.4 補強効果の解析・評価

実験結果を、平面骨組計算によりシミュレーションした。その結果、剛性を、模擬トンネル+鋼製支保工+コンクリートの一体剛性と重ね剛性の部材を考慮することによりほぼ試験結果をトレースすることが出来た。(Fig.8参照)

当初、32.67kN/m (3m当り10t載荷)までは、すべての部材が一体剛性と考えた場合、ほぼ実験と同様の計算結果を得られた。その後、130.7kN/m (3m当り40t載荷)までは、模擬トンネルとコンクリートが頂部部分から

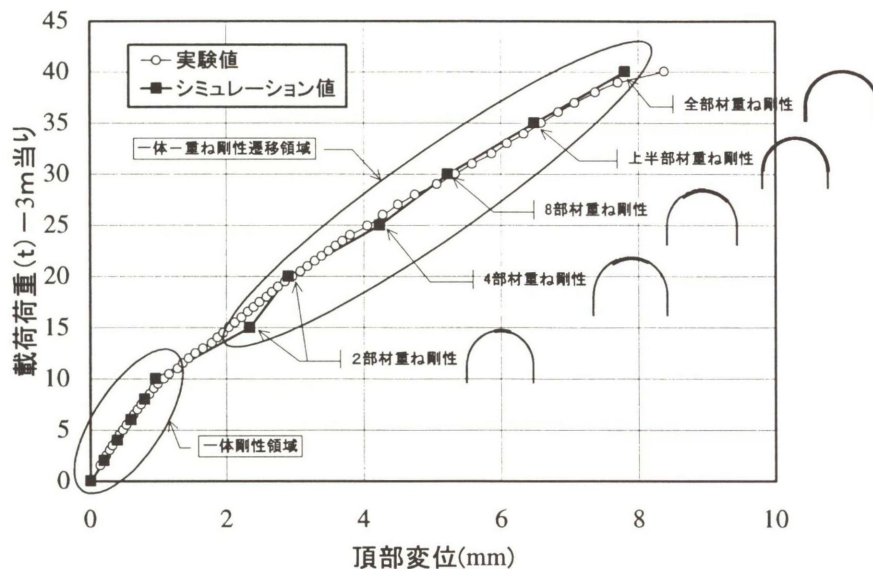


Fig.8 実験値とシミュレーションの比較

徐々に付着が切れて重ね剛性へ剛性低下が発生すると考えると、実験結果と同様の結果となった。

以上のことから、一体剛性から重ね剛性へと変化しその後、分担される断面力により個々に応力が発生することとなると考えられる。今後は、付着が切れるメカニズムの解明と重ね剛性からのシミュレーションを行っていく予定である。

7. まとめ

断面積が 10~15^m2 のトンネルであれば、鋼製アーチ支保工の建て込み、覆工板の取り付けは人力で施工可能であることがわかった。ただし、覆工板の取り付け効率向上のためには、鋼製アーチ支保工の建て込み精度が大きく影響し、精度が確保されていれば容易である。

また、水中不分離性コンクリートは粘性が高いため、連続打設はできなかったが、1.1~1.5^m3/h 打設することができた。粗骨材の最大寸法が 10mm のコンクリートであっても 2inch の配管で打設可能である。

補強後の終局耐力を確認することはできなかったが、補強前後の剛性比較から本補強工法の効果を確認することができた。実験結果の解析により、既設覆工と補強体の変形メカニズムをシミュレーションすることができた。

8. 今後の課題

今後の課題を以下に示す。

- 覆工板の部分的な改良（鋼製アーチ支保工への取り付け部の補強等）
- 裏込めコンクリートの施工効率の向上（水中不分離性を確保しつつ粘性を小さくする）
- 裏込めコンクリート打設時に切梁を設置せずに覆工板を支保できるシステムとする。（支保材のサイズ、覆工板の長さ、裏込めコンクリートの打設高さ等の検討）

- 補強設計をする際の許容基準の設定、既設覆工コンクリートと裏込め充填コンクリートの接着性の検討
- 鉄道トンネルや道路トンネルなどの大断面トンネル補強への応用

謝辞

本システムの開発は、日本コンクリート工業(株)と太平洋セメント(株)との共同開発であり、実験に際して多大なご協力を得ました。ここに謝意を表します。

参考文献

- 1) 財団法人鉄道総合研究所：変状トンネル対策工設計マニュアル，1998年2月
- 2) 独立行政法人土木研究所：土木研究資料3877号 道路トンネル変状対策工マニュアル（案），2003年2月
- 3) 岩井孝幸，森 康雄，荒生博夫，斎藤孝志，小寺 満，土田伸治：トンネル補強工法の開発（その1） - トンネル覆工補強工法の設計・施工に係わる実験的検討 -，土木学会第57回年次学術講演会，VI-233，2004年9月
- 4) 櫃尾恒次，佐々木亨，佐藤 豊，栗林健一：シールドトンネル二時覆工補修の検討と試験施工(2)，トンネルと地下，p49~p54，2003年11月
- 5) 土木学会：コンクリート・ライブラリー 水中不分離性コンクリート設計施工指針（案），1991年5月
- 6) 石川高志，松尾久幸，森康雄，岩井孝幸：トンネル補強工法の開発（その1） - トンネル補強工法の提案と室内試験結果 -，土木学会第59回年次学術講演会，VI-340，2004年9月
- 7) 野中 英，佐藤孝一，金森誠治，森 康雄，岩井孝幸：トンネル補強工法の開発（その2） - 裏込めコンクリートの配合および施工実験 -，土木学会第59回年次学術講演会，VI-341，2004年9月
- 8) 森康雄，岩井孝幸，濱田真，緒方明彦，石川高志，松尾久幸：トンネル補強工法の開発（その3） - トンネル補強前後の載荷実験 -，土木学会第59回年次学術講演会，VI-342，2004年9月

Development of the tunnel reinforcement method of construction used with steel supporting and inner lining

Yasuo MORI, Akira NONAKA, Makoto HAMADA, Akihiko OGATA

Synopsis

The tunnel reinforcement method of construction used with steel arch supporting and inner lining together is proposed and the indoor experiment using the imitation tunnel is stated. The contents of an indoor experiment are construction possibility check experiment (Section 5) and loading experiment for checking the reinforcement effect (Section 6). As a result of an experiment and analysis, construction possibility and the reinforcement effect of this reinforcement method of construction were checked.

Keywords

tunnel reinforcement, ultra high strength fiber reinforced concrete, construction possibility, underwater un-dissociated concrete, reinforcement effect
