

高強度埋設型枠を用いたトンネル内巻補強工法の設計法の検討と実施工への適用

田中俊行^{1*}・山本拓治¹・畝田篤志²・一宮利通¹

¹鹿島建設株式会社 技術研究所（〒182-0036 東京都調布市飛田給2-19-1）

²鹿島建設株式会社 土木設計本部（〒107-8348 東京都港区赤坂6-5-30）

*E-mail: ttoshiyu@kajima.com

供用中のトンネルの覆工補強工事に適用することを目的として、高強度埋設型枠を用いた新しいトンネル内巻補強工法を開発した。この工法は、繊維強化セメント板とアラミド繊維からなる埋設型枠と充填材を一体化させて既設覆工に複合補強部材を構築するものである。これまで、筆者らは、室内試験で選定した最適な埋設型枠の部材構成で複合補強部材の力学特性を検討した。また実物大の模擬トンネルで試験施工を実施して具体的な施工法を実証した。本論文では、埋設型枠のさらなる薄肉化を実現することを目的として、埋設型枠の設計法について検討し、軸力導入下で曲げ試験を実施して設計法の妥当性の検証を行った。さらに、本工法を供用中の高速道路トンネルの補強工事に適用した結果について報告する。

Key Words : *deformed tunnel , reinforcement method , high strength, buried form,mortal*

1. はじめに

近年、土木構造物の老朽化が進行しており、覆工コンクリートの変状に起因するトンネルの維持管理の問題がクローズアップされている。このうち、比較的大きな変状が発生したトンネルの耐荷力の強化を目的として、場所打ちコンクリート工、プレキャストコンクリート工法、埋設型枠工法、吹付工法等の内巻補強工が実施されている¹⁾。しかし、これらの工法では、内空断面を確保するのが困難であることや、既設覆工の撤去や車両の通行止めが必要となり、費用や工期が増大する場合がある。

そこで筆者らは、変状したトンネルを供用中に補強することを目的として、繊維強化セメント板とアラミド繊維からなる高強度埋設型枠を用いた新しいトンネル内巻補強工法を開発した。本工法は、補強部材厚を薄肉化することで仮設備を縮小し、軽量化することで施工効率を向上できること、また、既往の工法と比較して、トンネルの変状度合いに応じて断面厚さを変えることができること、さらに高強度の埋設型枠を使用することで補強耐荷力を向上でき、必要な金具類を減じることで工期が短縮できる等の利点がある。

本開発では、図-1 に示すフローに従って、これまで埋設型枠の最適な部材構成を室内試験から決定し、ボードと充填材から形成される複合補強部材の力学特性を

検討し、内巻補強工法としての有効性を確認した。そして、埋設型枠の設置方法や充填材の注入方法など具体的な施工法を確立するために、実物大の模擬トンネルを用いて試験施工を実施した。

本論文では、埋設型枠のさらなる薄肉化を実現することを目的として、埋設型枠の構造的な機能を評価できる設計法について検討すると共に、軸力導入下で曲げ試験を実施して設計法の検証を行った。さらに、本工法を供用中の高速道路トンネルの補強工事に適用して、厳しい施工条件の中、安全かつ合理的に施工した。これらの事例について報告する。

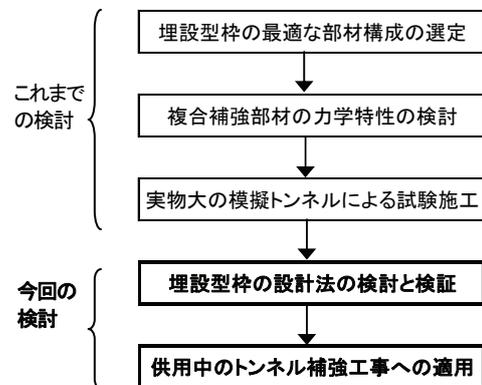


図-1 検討フロー

2. 工法概要

本工法は、図-2 に示すように既設覆工の内側に埋設型枠として繊維強化セメント板とアラミド繊維の積層構造からなるボードを設置して、ボードに設けた孔から充填材を注入して既設トンネル覆工に補強部材を構築する工法である。本工法の特長を次に示す。

- ・ 補強部材厚を薄肉化することで、大型の施工機械を用いることなく、仮設備を縮小できる。また、小断面のトンネルへの対応も可能である。
- ・ 高強度の埋設型枠を使用することで、補強耐荷力を向上できる。設置に必要なボルト等の金具の数量を減らし、施工速度を向上できる。
- ・ 既設覆工面に対してボードの位置を任意に設定することで、内巻補強部材の厚さを変えることができ、扁平に変状したトンネルに対して自由な形状に補強ができる。

以下にこれまでの検討結果を述べる²⁾。

(1) 使用材料

a) 埋設型枠

本工法で使用する埋設型枠は、繊維強化セメント板とアラミド繊維を積層構造として組み合わせることで、効率的に曲げ強度が得られ大きな曲げ靱性が発揮できるものである。繊維強化セメント板は、繊維によって補強され抄造方式(調合された紙をすいてボードをつくる技術)で製造された薄くて強度の大きなセメント系の板状素材であり、外壁などの外装材として使用実績がある。また、アラミド繊維は、トンネル覆工や高架橋等の既設コンクリート構造物の劣化によるコンクリート片はく落防止に実績がある。

埋設型枠の最適な部材構成を決定するために、図-3 に厚さ 12mm のセメント板単体、セメント板+アラミド繊維、セメント板+アラミド繊維+被覆材(4mm セメント板)の曲げ試験を実施した。その結果、最大曲げ荷重は、繊維強化セメント板にアラミド繊維を付加することで増大し、図-4 に示すようにボードは大きな変位が生じても破壊しなかった。すなわち、埋設型枠は、約 8% (=約 30mm/400mm) の変形が生じても十分な耐力を有すると考えられる。さらに、耐候性と不燃性および美観性を確保するため 4mm の繊維強化セメント板で被覆した結果、曲げ荷重は向上した。また、最大曲げ強度は、厚さ 16~20mm で 35~36N/mm²を示した。

b) 充填材

既設覆工とボードの間の補強部に注入する充填材は、①高流動性、②無収縮性、③ノンブリージング性が要求される。以上の要求性能を満足する無収縮モルタルについて性能試験を実施した結果、J14フロー 8 ± 2.5 秒

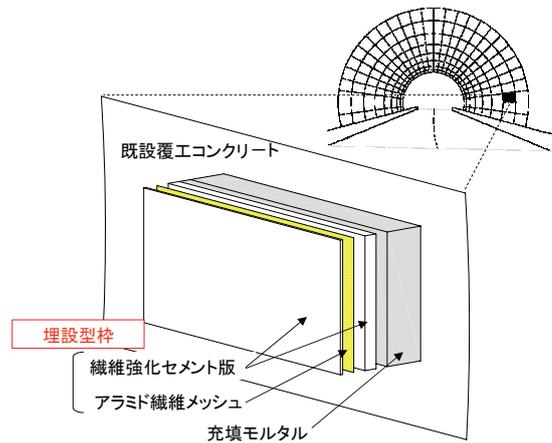


図-2 工法の概要

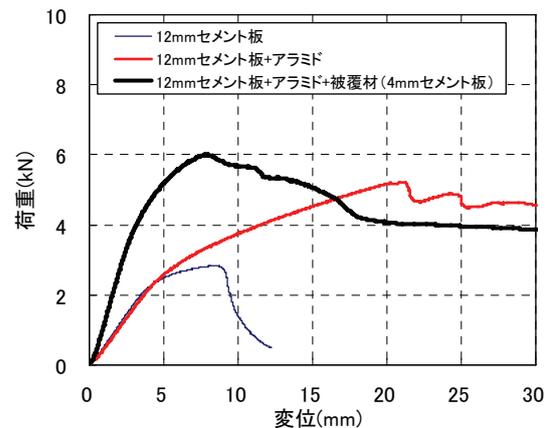


図-3 ボードの荷重～変位曲線

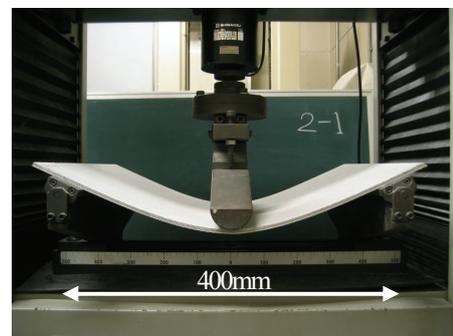


図-4 曲げ試験 (セメント板+アラミド繊維)

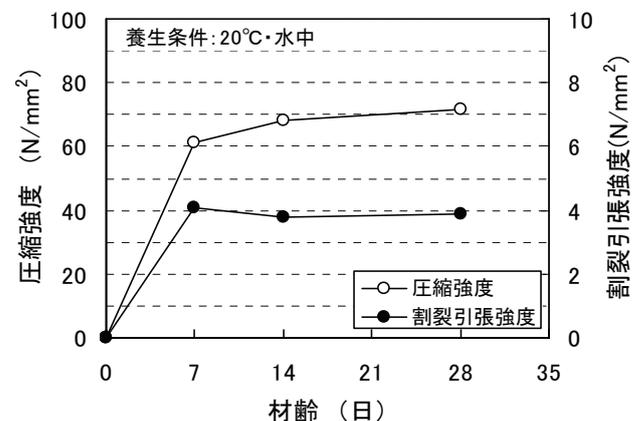


図-5 圧縮強度、割裂引張強度と材齢の関係

(JSCE-F541に準拠)の流動性で図-5に示す圧縮強度(JIS A 1108に準拠)、割裂引張強度(JIS A 1113に準拠)を有する材料を選定した。また、付着強度試験(JSCE-K 531に準拠)を実施した結果、いずれもボード内部で破断し、例えば目標値としてはく落防止対策工法で実施される断面修復材(断面欠損の生じた箇所をモルタルやパテ材で修復する方法)と同等の $1.5\text{N}/\text{mm}^2$ 以上の付着強度を確保できることを確認した。

(2) 補強部材の力学特性

ボードと充填材が一体化した複合補強部材の力学特性を把握することを目的として、曲げ試験を実施して打継ぎ目および継手の有無による耐力の違いを確認した。

試験ケースは、図-6に示す①充填材単体、②ボード+充填材、③ボード+充填材(打継ぎあり)、④ボード+充填材(継手あり)、⑤ボード+充填材(継手あり、打継ぎあり)の5ケースとした。ボード厚さは20mm、充填材は前述の無収縮モルタルを使用した。打継ぎ部は試験体中央に設けて、先行したモルタルが硬化後、後行のモルタルを打設した。継手部は幅100mmとしアラミド繊維を重ねた。

図-7にケース①②の場合の荷重～たわみ曲線を示す。この図から、ボードと充填材の複合部材は、充填材単体に比べて荷重の低下が見られず、たわみが5mm生じても大きな曲げ靱性が得られた。複合部材の材齢28日の曲げじん性係数は図-8に示すように約 $11\text{N}/\text{mm}^2$ であり、継手のある場合は約 $8\text{N}/\text{mm}^2$ の値が得られ、共に打継ぎの有無の影響は無かった。例えば、目標値として繊維補強覆工コンクリートの材齢28日における曲げじん性係数の基準値 $1.4\text{N}/\text{mm}^2$ に対して、継手の無い場合で約8倍、継手のある場合でも約5倍の曲げじん性を確保できる。

(3) 模擬トンネルにおける試験施工

次に、本工法のボード設置方法やモルタル充填方法を確立することを目的として、実物大の模擬トンネルで施工試験を行った。

a) ボードの設置方法

ボードは作業性および打設高さを加味して横 900mm ×縦 600mm ×厚さ 20mm (1枚あたり約 18.4kg)とした。第一に、既設覆工面に測量・墨出し後アンカーを打設しボルトを設置した。そして、図-9に示すボードを設置して所定の厚さにナットで固定した。ボードの継手部は、トンネル横断面方向にアラミド繊維の露出部分を設けて含浸接着した。この方法は、既設覆工面に対してボードの位置を任意に設定できるため、変状したトンネルに対しても自由な形状に補強できる。また、高強度のボードを用いることで、従来の工法に比べて設置に必要なボルト

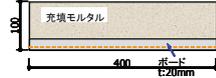
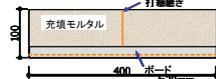
番号	模式図	ボード	打継ぎ
ケース①		無し	無し
ケース②		継手無し	無し
ケース③		継手無し	有り
ケース④		継手有り	無し
ケース⑤		継手有り	有り

図-6 試験ケース

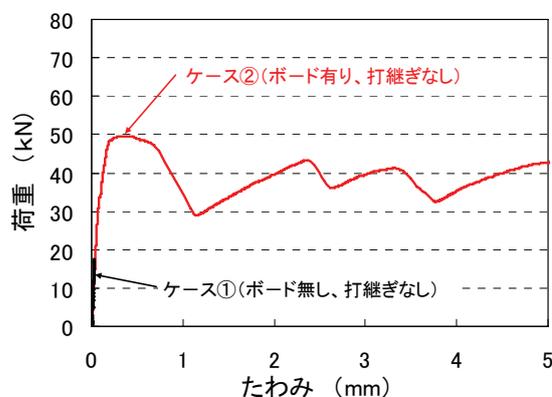


図-7 複合補強部材の荷重～たわみ曲線

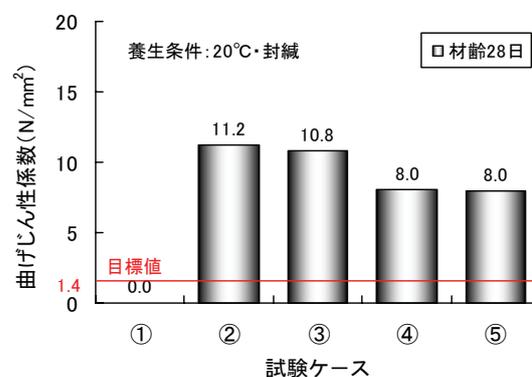


図-8 曲げじん性係数



図-9 ボードの設置方法

等の金具の数量を減らすことができる。

b) モルタル充填方法

充填材は、前述の力学性能を有する無収縮モルタルを用いた。品質管理基準は J14 フローで 8 ± 2.5 秒としてグラウトミキサで練混ぜた。注入は、**図-10** に示すリフトの最下段のボードに空けた注入孔からポンプで圧入した。注入中は孔口に取り付けた圧力ゲージで注入圧力の管理を行いながら、ボードの変形を目視観察した。充填状況は、センサー及びリークを確認する孔を適所に配置してボードとの間に隅々まで充填されているか確認した。その結果、注入圧力の急激な上昇もなく、ボードと覆工コンクリートの隙間を無く確実に充填できた。さらに、コアボーリングしてボード・充填モルタル・覆工コンクリートの一体化を確認した。

以上、模擬トンネルによる試験施工で、本工法による内巻補強工の施工性は良好であることを実証できた



図-10 充填モルタル注入

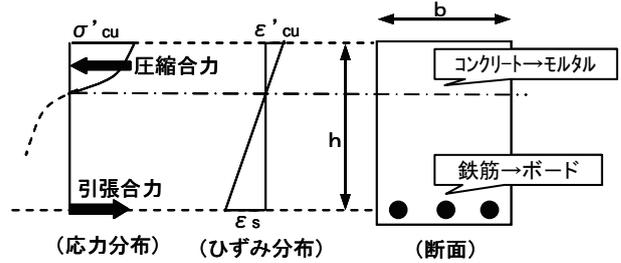


図-11 鉄筋コンクリートの終局限界状態

における断面耐力算定方法

3. 埋設型枠の設計法の検討

埋設型枠に必要な機能は、①施工時の充填モルタルの漏洩を防止すること、②充填モルタル打設時の側圧に耐える十分な強度と剛性を有すること、③補強部材としての十分な型枠強度を有すること等が挙げられる。埋設型枠の薄肉化を実現して本工法の合理化を図るためには、構造機能を正確に評価する必要があると考えられる。そこで、埋設型枠のさらなる薄肉化を実現することを目的として、本工法の設計法について検討を行った。検討内容は、埋設型枠の耐力算定方法を選定し、一軸直接引張試験結果に基づいてモデル化した応力とひずみ関係から耐力を算定した。そして、軸力導入下の曲げ試験を実施して、設計法の妥当性を検証した。さらに本工法の設計耐力曲線を作成して従来の覆工コンクリートの耐力曲線と比較した。

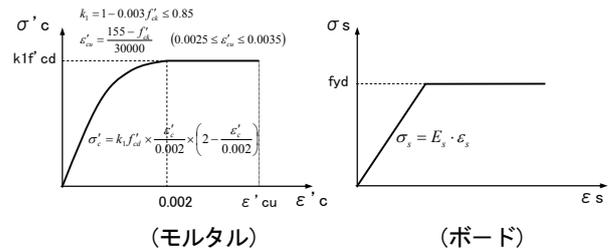


図-12 応力～ひずみ曲線

(1) 埋設型枠の耐力算定方法

埋設型枠の耐力は、**図-11** に示す鉄筋コンクリートの終局限界状態に対する断面耐力算定方法に基づいて、コンクリートを充填モルタルに、鉄筋をボードを置き換えて算定した³⁾。モルタルの引張応力は無視し、モルタルおよびボードの応力～ひずみ曲線は、**図-12** に従うものとした。ボード（厚さ20mm）の引張強度は、**図-13** に示す一軸直接引張試験を実施して求めた⁴⁾。なお、原標点間距離は170mmとした。そして、ボードの応力～ひずみ関係を**図-14**のようにモデル化した。また、ボードとモルタルが一体として挙動すると考えて、ボードの圧縮力は考慮しないことにした。**表-1**に各々の特性値を示す。

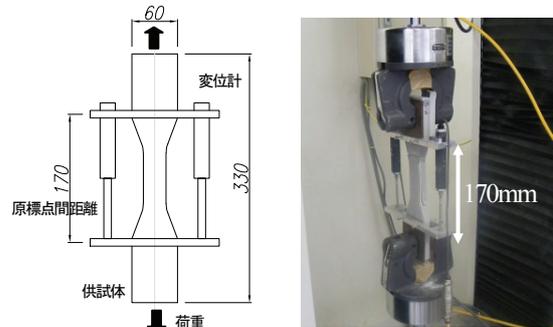


図-13 一軸直接引張試験

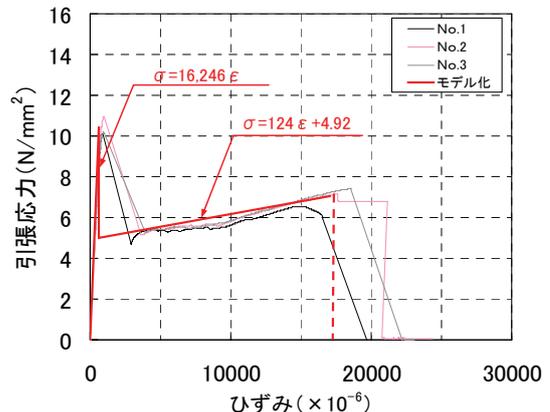


図-14 一軸引張試験結果（ボードのモデル化）

(2) 設計法の検証

図-15 に示す軸力導入下の曲げ試験を実施して、軸力と曲げモーメントを調べて、設計法の検証を行った。試験は、部材長さは 400mm とし厚さは①100mm (ボード 20mm+モルタル 80mm) , ②75mm (ボード 20mm+モルタル 55mm) , ③50mm (ボード 20mm+モルタル 30mm) とし、3 供試体ずつ行った。軸力は供試体の両端を球座を介してロードセルで 0~450kN の範囲の荷重を一定値に保持した。

図-16 に部材厚さ毎の軸力~曲げモーメント (平均値) の関係を示す。なお、前述のモデル化による耐力算定結果も併記した。この図に示すように、最大曲げモーメントは部材厚さの増加に伴って大きくなった。試験結果は、耐力算定結果とほぼ一致しており、今回検討した耐力算定方法は、高強度埋設型枠と充填モルタルからなる複合部材を鉄筋コンクリートと同様に算定できると考えられる。しかし、引張耐力が作用する曲げモーメントが大きくなる範囲で試験結果と算定結果に若干の差が見られた。それは、実際には約 4N/mm^2 を有するモルタルの引張強度を加味していないことが原因と考えられ、今後検討する必要があると思われる。

(3) 設計耐力曲線

安全係数を考慮した各々の設計耐力曲線を図-17 に示す。ここに、モルタルの材料係数 γ_{ck} は 1.3、ボードの材料係数 γ_{s1} は 1.0、部材係数 γ_b は、設計曲げおよび軸方向耐力算定時 1.1、軸方向耐力の上限値算定時 1.3 とした。また、参考として無筋の覆工コンクリート (厚さ 200mm, 設計強度 18N/mm^2) の結果も併記した。

この図に示すように、厚さ 100mm の継手の有る場合の耐力曲線は、継手の無い場合と比較して、最大曲げモーメント時および最小軸力時に若干低下が見られるがほとんど差は無かった。また、20mm の埋設型枠と 80mm の充填モルタルの組み合わせ (厚さ 100mm) で、厚さ 200mm, 18N/mm^2 の覆工コンクリートと同等以上の耐力を有することができることが分かった。

4. 供用中の道路トンネル補修工事への適用

本工法を供用中の高速道路の既設トンネルの補修工事に適用した結果について述べる。本トンネルは 1987 年に NATM 工法を用いて建設され、2006 年 9 月に内装板交換の際、覆工コンクリート側壁部に変状が発見された。地質は、古第三紀火山岩層で凝灰角礫岩を主体とするやや軟質な岩石から形成されていた。その原因は、地山の強度が低いために何らかの要因で地山の塑性変

表-1 モルタル・ボードの特性値

	記号	数値	単位
部材幅	b	50~100	mm
部材厚	h	100	mm
モルタル圧縮強度の特性値	f_{ck}	65	N/mm^2
モルタルの設計圧縮強度	f_{cd}	65	N/mm^2
ボードの降伏強度の特性値	f_{yd}	10.4	N/mm^2
ボードのヤング係数	E_s	16,246	N/mm^2
ボード断面積 (厚さ×幅)	A_s	200	mm^2

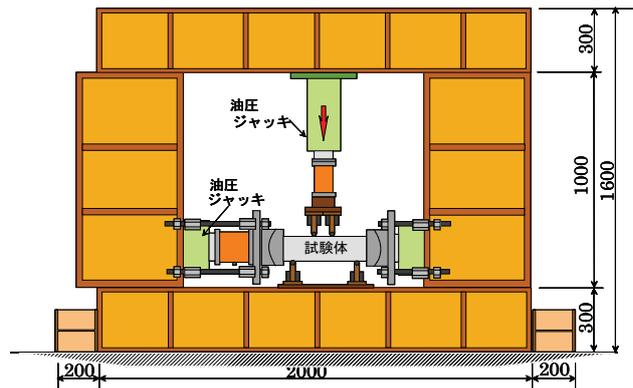


図-15 軸力導入下の曲げ試験

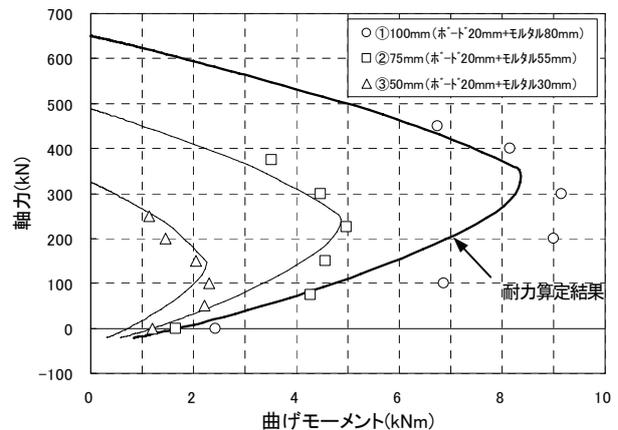


図-16 曲げモーメント~軸力の関係

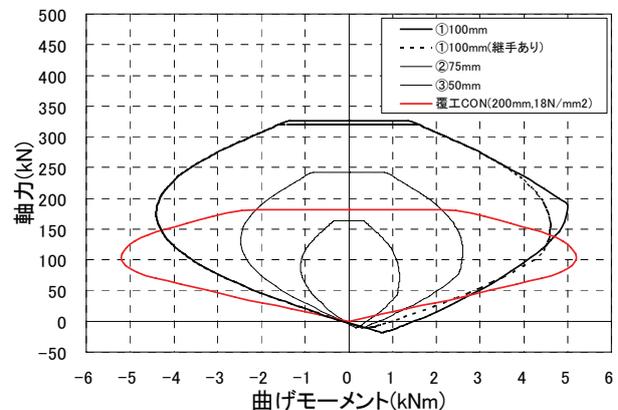


図-17 設計耐力曲線



図-18 天端部施工



図-19 本工法による内巻補強工

形（塑性圧）が増大したと推測された。そこで、トンネルの補強対策工は片側車線規制で施工可能であり、かつ建築限界を侵さないで高い耐荷能力が期待できる工法を選定する必要がある。したがって、大幅な覆工の打換えは不可能であるため、現覆工の内側に薄層の高強度補強材を施工する内巻補強工法で、施工性に優れた本工法を選定した。

工事は供用中の道路という厳しい施工条件の中、走行車線側および追越車線側を順次片側車線規制により、昼夜連続作業で行った。補強厚は100～300mmであり、注入は各々の側壁部および天端部の計11リフトに分けて行った。ボードの設置に用いた金具は、耐食性に配慮したものを使用し、落下防止対策を施した。また、天端部の施工は図-18に示すように足場および吊り足場を組み立てて行った。図-19に本工法による施工完成状況を示す。

5. おわりに

高強度埋設型枠と充填モルタルからなる新しいトンネル内巻補強工法を開発し、ボードの薄肉化を実現することを目的として、埋設型枠の構造機能を評価できる設計手法を提案した。さらに、本工法を供用中の道路トン

ネルの補強工事に適用した。

今後は、トンネルの変状度合いに相応した埋設型枠や充填モルタルの施工仕様を適切に選定して、市場のニーズに相応した安全かつ合理的な工法として検討を継続していく所存である。

謝辞：本工法を開発するにあたり、鹿島建設北陸支店佐藤敏亮氏、同関西支店中西祐輔氏、同技術研究所全振煥氏をはじめ、工事関係各位にご協力を頂いた。ここに謝意を表す。

参考文献

- 1) 例えば独立行政法人土木研究所：道路トンネル変状対策マニュアル(案)，土木研究所資料第 3877 号，pp.16-20, 2003.
- 2) 田中俊行，山本拓治，佐藤敏亮，中西祐輔，畝田篤志：高強度埋設型枠を用いたトンネル内巻補強工法の開発，第 12 回岩の力学国内シンポジウム&第 29 回西日本岩盤工学シンポジウム，pp.589-594, 2008.
- 3) 土木学会：コンクリート標準示方書（構造性能照査編），pp.19-45, 2002.
- 4) 土木学会：複数微細ひび割れ型繊維補強セメント複合材料設計・施工指針（案），コンクリートライブラリー-127，pp.試験 1-14, 2007.

NEW REINFORCEMENT METHOD OF TUNNEL INNER LINING USING HIGH STRENGTH BURIED FORM AND MORTAR

Toshiyuki TANAKA, Takuji YAMAMOTO, Atsushi UNEDA
and Toshimichi ICHINOMIYA

For the purpose of reinforcing inner lining of deformed tunnel, the authors developed the reinforcement method of tunnel inner lining using the high strength buried form and mortar. The high strength buried form is the laminate structure consisted of an aramid fiber mesh and fiber reinforced cement boards.

In this paper, for the purpose of realizing the further escalation of the buried form we examined the design method. And we carried out the bending test under the spindle power. Furthermore, this tunnel reinforcement method was applied by the reinforcement work of the actual road tunnel.