

構造欠陥を有する既設トンネル覆工の 補強方法の研究

小原 勝巳¹・真下 英人²・中村 明彦³・安井 成豊⁴・林 久資⁵
川端 康夫⁶・鯨井 巧⁷・佐竹 康伸⁸・進士 正人⁹

¹正会員 飛島建設株式会社 土木事業本部 土木技術部（〒108-0075 東京都港区港南 1-8-15）
E-mail: katsumi_obara@tobishima.co.jp

²正会員 一般社団法人 日本建設機械化協会 施工技術総合研究所（〒417-0801 静岡県富士市大淵 3154）
E-mail: mashimo@cmi.or.jp

³正会員 株式会社テムロ（〒101-0044 東京都千代田区鍛冶町 1-5-6 第3大東ビル 4F）
E-mail: akh-nakamura@tmr-eco.co.jp

⁴正会員 一般社団法人 日本建設機械化協会 施工技術総合研究所（〒417-0801 静岡県富士市大淵 3154）
E-mail: yasui@cmi.or.jp

⁵正会員 山口大学 大学院創成科学研究科（工学）（〒775-8611 山口県宇部市常盤台 2-16-1）
E-mail: hayashi@yamaguchi-u.ac.jp

⁶正会員 飛島建設株式会社 土木事業本部 リニューアル統括部（〒108-0075 東京都港区港南 1-8-15）
E-mail: yasuo_kawabata@tobishima.co.jp

⁷正会員 株式会社テムロ（〒101-0044 東京都千代田区鍛冶町 1-5-6 第3大東ビル 4F）
E-mail: t.kujirai@tmr-eco.co.jp

⁸正会員 飛島建設株式会社 土木事業本部 リニューアル統括部（〒108-0075 東京都港区港南 1-8-15）
E-mail: yasunobu_satake@tobishima.co.jp

⁹フェロー会員 山口大学 大学院創成科学研究科（工学）（〒775-8611 山口県宇部市常盤台 2-16-1）
E-mail: shinji@yamaguchi-u.ac.jp

矢板工法で施工されたトンネルの多くは、今後5～10年後に建設後50年を経過する事態となり、すでに多くのトンネル覆工が対策の必要な状態（健全度Ⅱa以上）にある。加えて、背面空洞や厚さ不足などの構造欠陥を有する覆工が多く、将来的にトンネルを効果的に維持管理するための対策が求められる。本研究では、施工時の初生的な構造欠陥を有する矢板工法のトンネルを対象とし、内空余裕の乏しい条件において、ゆるみ荷重（覆工への上載荷重）に対して引張補強材を配した内巻コンクリートで既設覆工を補強する施工方法を提案し、その断面設計上の考え方と効果の捉え方について示すものである。

Key Words: conventional tunneling method, concrete lining, repair method, structural defects

1. はじめに

「インフラ長寿命化計画（行動計画）」に基づき、各自治体において既存トンネルの点検と補強・補修計画が策定されており、今後、予防保全を念頭に置いた既設トンネルのリニューアル工事が増加することが予想される。特に、矢板工法で施工された昭和50年代以前のトンネルでは、覆工天端の巻厚不足や背面空洞などの構造欠陥を有する例が少なくなく、地山や覆工の経年劣化に伴っ

て構造的に有害なひび割れの増加とともに覆工の耐荷力・剛性が徐々に低下していくことが懸念されており、点検結果からその多くが予防保全の観点から対策の必要な状態にあると判定されている（例えば、山口県で約80%¹⁾、東京都で約50%²⁾）。さらに、工事対象となる矢板工法のトンネルでは、内空断面に余裕のないケースも予想され、覆工の耐荷力向上を意図した内巻工法などの補強対策を実施することが困難な場合も想定される。

本研究では、矢板工法で施工された構造欠陥を有する

内空余裕に乏しいトンネルにおいて、ゆるみ荷重により変状が進展している覆工コンクリートに対する合理的な補強方法を提案するものである。

2. 矢板工法による覆工補強に関する着目点

(1) 矢板工法によるトンネル覆工の特徴

矢板工法で施工されたトンネルの特徴を以下に挙げる。

a) 構造的特徴

矢板工法によるトンネルでは、鋼アーチ支保工や矢板などを仮設部材とし、覆工コンクリートが地山荷重を支持する構造として設計されている。また、坑口部などを除くほとんどの区間において無筋コンクリート構造となっている。このことから、覆工コンクリートには、荷重によって覆工断面に発生する曲げ引張応力に対して容易にひび割れが生じやすい構造といえる。一方で、トンネル覆工がアーチ構造であることから、良好に施工された覆工コンクリートにおいては、ひび割れの発生が直ちに覆工全体の安定性を損なうことはない。

このことは、箱石らによる実トンネル規模の載荷実験³⁾においても確認されている。同研究では、構造欠陥の無い覆工に対して天端部に鉛直荷重（ゆるみ荷重を想定）

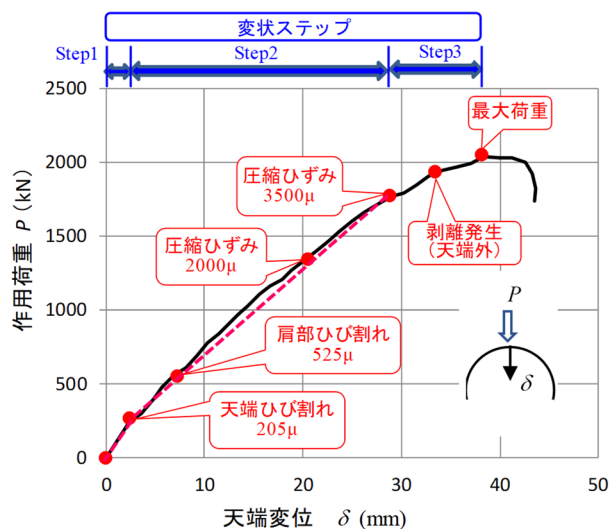


図-1 構造欠陥のない覆工の載荷実験における損傷
載荷時の荷重変位曲線（文献³⁾を加筆編集）

表-1 変状ステップと天端圧縮ひずみの関係

変状ステップ	記号	覆工天端地山側の圧縮ひずみ (μ)		覆工の変状発生段階
		始点	終点	
1	I_0	0	205	天端内空側のひび割れ発生前
2	I_1	205	525	肩部地山側のひび割れ発生前
		525	3,500	圧縮発生前
3	-	3,500	-	終局状態と想定

を作用させた実験（変状を発生させることを目的とした載荷；損傷載荷と呼んでいる）により、覆工コンクリートの破壊メカニズムについての考察を行っている。荷重変位曲線とひび割れ発生時期および覆工両面の最大圧縮ひずみの関連性を図-1、表-1 に示す。荷重増加に伴い最初に天端内空にひび割れが発生してアーチ剛性（曲線の傾き：記号 I ）が低下する（Step1→Step2）が、それ以降圧縮ひずみが 3,500μに達するまで（Step2）のアーチ剛性は極端に低下しない（ただし、図中の Step2 の区間は、筆者により端点を結ぶ直線に近似している）。このことから、ひび割れによって覆工コンクリートの有効断面高さが減少しても外力に対して覆工コンクリートがアーチ構造として耐荷力を維持できることがわかる。

b) 構造欠陥による耐荷力の低下

矢板工法では、天端部へのコンクリートの充填不良により、設計仕様に対して厚さ不足が生じている例が少なくない。このような構造欠陥を有する覆工コンクリートは耐荷力が顕著に低下する。

(2) 補強方法の検討における留意点

構造欠陥を有する既設トンネル覆工の補強を検討する際には、以下の点を考慮する必要がある。

1 点目は、覆工はひび割れ発生後もアーチ構造として圧縮破壊が生じるまで耐荷力を維持することから、覆工厚さを増すこと、補強材にじん性を持たせて引張ひび割れの発生を抑制することが重要である。

2 点目は、ひび割れにより損傷が進むとともにアーチの剛性が低下し耐荷力が低下する（図-1）ことから、既設覆工を活かす補強工法では、過度に変状が進行しないうちに補強する必要がある。

3 点目は、覆工背面空洞については、ゆるみ荷重などの外力の増加が予想される場合、変状発生の有無にかかわらず早期に空洞充填対策を実施することが重要である。

4 点目は、覆工補強は覆工内空と建築限界の余裕代に制約されることから、補強部位により引張補強と圧縮補強のいずれにも対応できる工法が求められる。

3. 内空余裕のない既設覆工の補強方法の提案

(1) 内空余裕のないトンネルへの既存技術の適用性

覆工内面の補強対策は、「内面補強工」と「内巻補強工」の2工法に大別される。前者の代表例として「繊維シート補強工」、後者には「吹付け工」や「場所打ち工」、「プレキャスト工」などの幾つかのバリエーションがある。これらの工法を構造欠陥を有する既設覆工に適用する場合、それぞれにおいて根本的な課題がある。

a) 内面補強工

内面補強工は厚さが薄いため、内空余裕のないトンネル覆工の補強に対しては優位である。しかしながら、その主要な効果は剥離防止や変形抑制にあり、覆工の強度を現在の劣化状態より向上させる効果やその設計方法は現状では明確にされていない。特に補強対象箇所の覆工の内面が圧縮応力となっている場合には、あまり補強効果を望めないと考えられる。

b) 内巻補強工

内巻補強工は、既設覆工の内空面に厚さを有する補強部材を設置する工法であり、内空余裕のないトンネルへの適用性に課題がある。

以上のように、既存の覆工補強技術では、内空余裕のないトンネルに対して構造的な強度を高める効果的な対策の選択肢が乏しい状況にある。

(2) 部分切削補強工法の採用

上記の課題を解決するため、供用中のトンネルの覆工表層部を部分的に切削し引張補強材を内包する内巻コンクリートに置き換える技術（図-2、以下「部分切削補強工法」と呼称する）の採用を提案する。

a) 適用条件

構造欠陥を有する矢板工法による供用中のトンネル覆工とし、特殊条件（塑性地圧、地すべりや断層運動など）下にあるトンネルを除く。

b) 補強目標

構造欠陥を有しひび割れが生じている既設覆工を新設時の設計仕様で期待される耐荷力を目標として補強する。

c) 供用性の確保（部分切削）

建築限界に対してクリティカルとなる肩部を含む側壁部を切削した後に内巻補強工を施工することにより、補強後の供用性を維持する。建築限界に対して余裕がある天端部分については切削を行わない。

d) 覆工切削時のトンネルの安定確保

覆工コンクリートを切削する際には、覆工コンクリートを1スパン単位の構造物として安定性が確保されるよ

うに施工手順を決定する。また、切削時の耐荷力低に対する補強を行うとともに、覆工に過度の振動を与えない切削機械を選定する。

e) 経済性の確保

既設覆工の残留強度を有効に活用した補強設計を行うとともに、工事の特殊性（特殊機械、特殊材料の使用）を極力排除し省力化を目指す。

(3) 施工方法の概要

a) 部分切削

覆工肩部では建築限界に対して内空余裕のない分の表面切削を行う。切削方法は、面状切削箇所にはウォータージェットまたはマルチブレード（多連装ダイヤモンドカッター）を、端部の溝状切削箇所にはダイヤモンドカッターもしくはウォータージェットの採用を検討中である。なお、切削は天端部を除いた肩部より側壁部の範囲とし、側壁部の既設覆工に十分な厚さを確保できるまでとする。

b) 補強部材

引張補強材を配置した内巻コンクリート（厚さ 10～30cm）をトンネルのアーチ部に設置する（図-2）。材料選択においては、補強後の断面剛性の設計仕様や既設覆工との一体化（付着せん断強度）、施工性及び経済性によって選択する。例えば、吹付けコンクリートによる断面補強工法（海外では SCL（Sprayed Concrete Lining）として実績がある）の採用を検討する。また、引張補強材として、補強レベルに応じて鉄筋、メッシュ筋などを設置する。切削面での付着力については、実験等により確認を行うものとする。

c) ロックボルトによる切削時補強

覆工の部分切削を行う際には、覆工の耐荷力の一時的な低下に対し、切削に先立ってロックボルトによる補強を行う（図-3）。

4. 部分切削補強工法の設計方法

(1) 補強前後の覆工耐荷力の考え方

無筋コンクリートのトンネル覆工では、元々、コンク

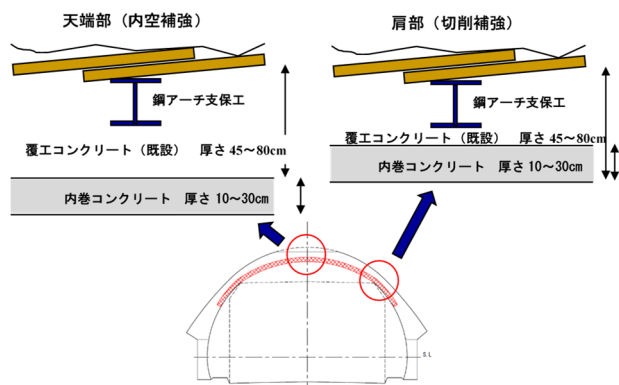


図-2 部分切削補強工法の概要図

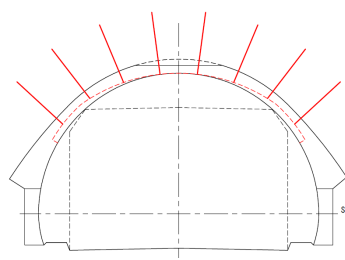


図-3 ロックボルト補強の配置例

リートの引張強度を考慮しないため、設計上の終局状態は明確に定義されていない。本研究では、既設覆工と内巻補強後の耐力を以下のように考える。

a) 既設覆工の耐力

矢板工法で施工された覆工コンクリートの多くは無筋構造となっているため、曲げモーメントが作用すると容易に曲げ引張りひ割れが発生し、曲げ剛性と軸剛性が低下する。また、覆工コンクリートが負担できる最大荷重は圧縮破壊（圧縮）の発生以降にある（図-1）。

現状、多くのトンネルに縦断方向のひび割れがみられるにも拘わらず安定性が確保された状態で供用されている理由は、上記の構造的特徴によるものと考えられ、覆工構造をトンネル周方向の軸力で支持されるアーチ構造とみなすことが合理的となる。また、覆工は通常 10.5m 幅のスラブ構造と考えられ、局所的な圧縮が生じてても耐力を維持し得ると考えられる。

以上の観点から、既設覆工の耐力は、アーチ構造として圧縮破壊が発生し始める状態と定義することが可能と考えられる。既往研究³⁾では、実験でのピーク荷重をとらえているが、覆工コンクリート断面の圧縮縁の最大ひずみが $3,500\mu$ となった時点耐力の目安としている。これは、土木学会のコンクリート標準示方書⁴⁾に記載されているコンクリートの終局ひずみに整合している。本研究では、構造欠陥の有無や程度にかかわらず、構造検討においては発生部位に関係なく圧縮ひずみが $3,500\mu$ となった時点耐力と定義する。

b) 補強後の耐力

既設覆工の内面に内巻補強工を施工し一体化することで、既設覆工と補強工の応力履歴の異なる2層の構造体が構築される。ゆるみ荷重が作用する覆工には、天端では引張応力、肩部では圧縮応力が生じる。このため、補強後の荷重増加に対してこれらの補強部位による補強機構も異なる（図-4）。

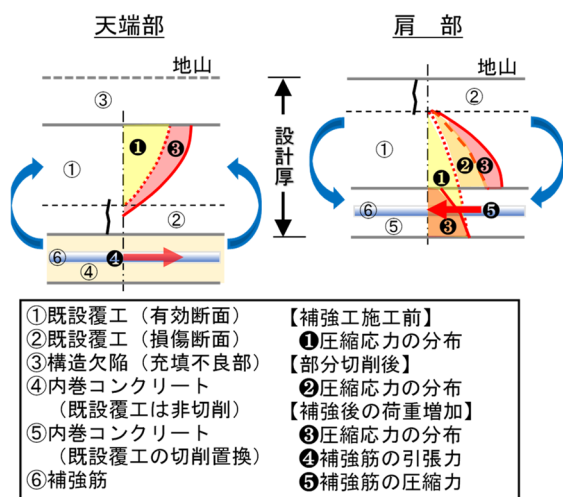


図-4 部位による補強効果の違い

覆工厚さが不足する天端部では、内空側にひび割れが生じて圧縮応力を負担できる断面積が縮小している（図-4左①①）が、補強後は内巻コンクリート（図-4左④）の補強筋が引張応力を負担する（図-4左⑥④）ことで圧縮応力の負担面積（図-4左③）が増えて断面の耐力の向上が期待できる。

一方、肩部では覆工内空側の一部が内巻コンクリートによって置き換わるため、補強前後の圧縮応力の変化（図-4右①→③）と既設覆工切削時の応力の増加（図-4右②）を照査し、剛性の高い内巻コンクリートと切削時の別途補強対策により補強効果を得る。

(2) 非線形領域における補強効果の検討

終局圧縮ひずみ（ $3,500\mu$ ）を耐力の目安として設定する場合、弾性限界を超える領域での構造解析を検討する必要性が生じてくる。その解決方法の一つとして、覆工にひび割れが発生して覆工全体の剛性が低下しながら破壊に至る実現象を再現することにより、非線形領域の挙動を取り込んだ検討が可能になると考えられる。

なお、変状過程での剛性低下については実トンネルで計測された例を見出せないため、本研究では、載荷実験³⁾の試験結果をトレースすることにより、構造解析的に覆工の補強効果を設定する。

5. アーチ剛性を使ったシミュレーション解析

(1) 解析方法

覆工コンクリートを面要素と地盤ばねを使用した解析モデルによる簡易的な線形FEM解析を行い、部分切削補強工法の補強効果を検証する。

a) 解析の手順

初めに、変状ステップ（表-1）ごとにコンクリートの弾性係数を変化させることで、既往実験³⁾における構造欠陥のない覆工の荷重変位曲線（図-1）を再現する（Step1：Case1-1，Step2：Case1-2）。変状に伴うアーチ剛性の変化は、主としてひび割れによる覆工部材の有効断面（断面積，断面二次モーメント）の減少が主要因と考えられるが、解析モデルの作成が難しいことから、コンクリートの弾性係数をパラメータとして用いた。

次に、天端部の覆工最小厚が設計厚の1/2（30cm→15cm）としたモデルにより、上記のCase1-1及びCase1-2で得た弾性係数を用いて解析（Step1：Case2-1，Step2：Case2-2）を行い、荷重変位曲線を作成する。Case1とCase2の遷移点は、構造欠陥がない場合と同様、覆工天端地山側の圧縮ひずみが 205μ （表-1）到達時とする。

最後に、天端部の厚さが15cmの既設覆工を変状Step2の段階で10cm厚の内巻コンクリートで補強した場合の

補強後の解析を行う（Case3）．既設覆工は Case1-2 で求めた弾性係数，内巻コンクリートは，高強度のコンクリートを想定して Case1-1 の2倍の弾性係数とする．

b) 解析ケース

解析ケースを表-2 に示す．

c) 解析モデル

解析モデルを図-5 に示す．図中上段は構造欠陥のない覆工の解析（Case1-1 および Case1-2）に用いるモデルであり，ばね位置を既往実験³⁾のジャッキ位置に合わせた配置としている．表-3 に解析条件を示す．

図中中段は天端部の厚さ不足を解析する．面要素の形状で覆工厚を 15cm とした（Case2-1 および Case2-2）．

図中下段は部分切削補強工法により内巻補強を行った解析モデルであり，図-2 と同様な形状をモデル化している．ただし，本解析では，補強時期によって異なる既設覆工の補強前の応力は考慮せず，既設覆工に Step2 に相当するコンクリートの弾性係数を入力することで，剛性比で補強の効果を表現する．

(2) 解析結果

a) 構造欠陥のない覆工のシミュレーション

Case1-1 は，図-1 に示した载荷実験³⁾における変状 Step1 の天端ひび割れ発生までを供試体試験で得られた弾性係数を用いて試算したものであり，Case1-2 は弾性係数を

低減させることで，天端ひび割れ発生以降の挙動の再現を試みたものである（図-6）．

Case1-1 の供試体による弾性係数を用いた解析では，天端ひび割れ発生までの荷重変位曲線がよく再現できている．また，ひび割れ発生以降の Case1-2 では，コンクリートの弾性係数を 0.4 倍とすると実験結果を再現でき，解析における天端の圧縮ひずみ 3500 μ 時点の変位と荷重は，実験結果での圧縮ひずみ 3500 μ 到達時の変位と荷重に一致する．このように，解析結果は，圧縮ひずみ，荷重および，変位ともに载荷実験の結果を再現できた．

b) 構造欠陥（天端部の覆工厚さ不足）時の耐荷力

Case2-1 および Case2-2 では，天端部の覆工厚さが 15cm の場合を想定し，Case1-1 および Case1-2 で得られた弾性係数を用いて解析を行った（図-6）．荷重変位曲線の傾きがいずれも構造欠陥のない場合のおよそ 1/2 に低下する．天端部の圧縮ひずみが終局ひずみ 3,500 μ に達する変位に関しては，構造欠陥の有無による差はほとんどない．また，その時の荷重（耐荷力）は 964kN となり，構造欠陥のない覆工の値（1,758kN）に対してほぼ覆工厚さに比例する関係となっている（図-6）．

表-2 解析ケース

解析ケース	構造欠陥	補強	変状ステップ	備考
Case1-1	なし	なし	Step1	模型実験 ³⁾ のシミュレーション解析
Case1-2	なし	なし	Step2	模型実験 ³⁾ のシミュレーション解析
Case2-1	天端覆工厚さが 1/2	なし	Step1	Case1-1 で求めた弾性係数を使用
Case2-2	天端覆工厚さが 1/2	なし	Step2	Case1-2 で求めた弾性係数を使用
Case3	天端覆工厚さが 1/2	内巻 10cm	Step2	部分切削補強工法による効果確認

表-3 解析条件

項目	入力項目	入力値
覆工コンクリート	圧縮強度 f_c	21.4 N/mm ²
	静弾性係数 E_c	17.5 kN/mm ²
	ポアソン比 ν	0.16
	覆工厚 t	30 cm
地盤反力	バネ値 K	200 MN/m

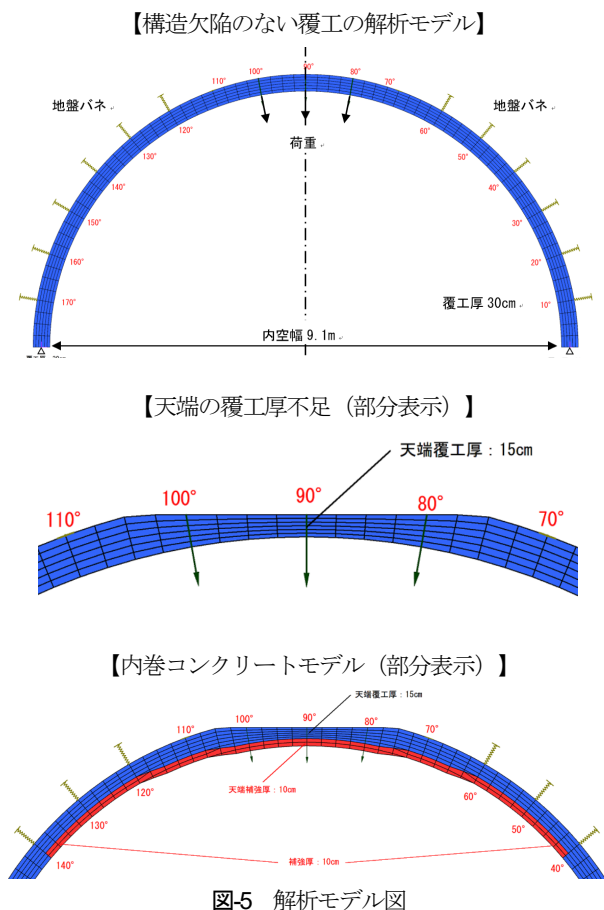
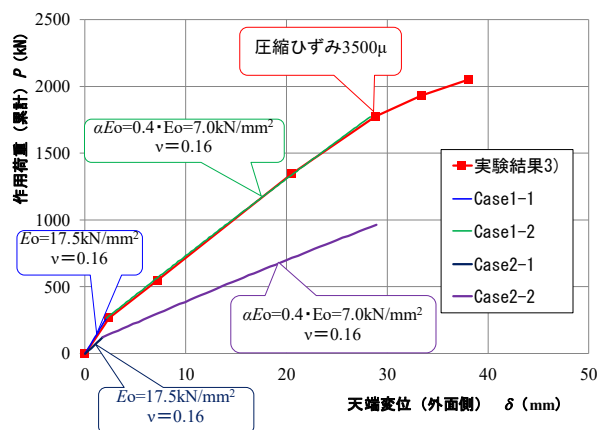


図-5 解析モデル図



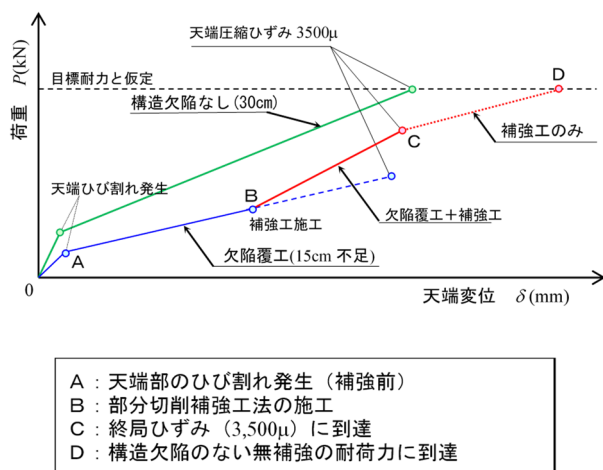


図-7 内巻コンクリート補強後のアーチ剛性と耐力

c) 内巻きコンクリートによる効果

図-7に覆工厚不足の既設覆工を補強した場合の荷重変位曲線を示す。

欠陥覆工の補強後（B点以降）は、補強効果（部材厚さおよび合成変形係数の増加）により、荷重変位曲線の傾きが大きくなり、C点で既設覆工部分の圧縮ひずみ（Case2-1～Case2-2のB点までの圧縮ひずみにCase3でのB～C間で発生する圧縮ひずみの加算したもの）は3500μに達する。補強時期が早い（B点が左側による）ほど、合成弾性係数が大きい（荷重変位曲線の傾きが大きい）ため、C点での荷重は大きくなり、補強効果は高くなる。

C点以降は、補強部材のみで荷重を受け持つと考えると荷重変位曲線の傾きがB～C間に比べて緩くなり、特に天端部では、全体構造の耐力が補強部材の耐力に依存することになる。補強工の設計において、構造欠陥のない覆工の耐力（圧縮ひずみ 3500μ）を目標耐力と仮定すると、内巻補強工により目標耐力を満足するためには、早い段階で補強を行うこと、最大圧縮ひずみ

の発生個所の応力増加を抑制すること（既設覆工+補強工の剛性を高くすること）、および耐力の大きな補強工を採用することが重要と考えられる。

5. おわりに

本研究では、構造欠陥を有する矢板工法のトンネル覆工において、内空余裕のないトンネルに対しても内巻補強工を適用可能とする部分切削補強工法を提案した。また、その断面設計の考え方、簡易的な構造解析の方法について記述した。実際の補強設計では、各トンネルにおいて天端や肩部など覆工厚などの違いや内空余裕に差があることと、ひび割れなどの変状状況も異なり、その補強時期に応じて期待される補強効果が異なるなど設計方法を詰めていくとともに、現場にて実用可能な具体的な施工方法と設計への反映を検討していくことが必要となる。このため、今後は複雑化する設計に対して標準パターン化も検討しながら研究を進めていく所存である。

参考文献

- 1) 山口県土木建築部道路整備課，山口県トンネル長寿命化修繕計画，p.18，平成28年3月
- 2) 東京都建設局，トンネル予防保全計画，p.2，p.16，平成27年11月
- 3) 箱石安彦，真下英人，石村利明，補強工を施した覆工の耐力の評価手法に関する研究，トンネル工学報告集，第15巻，pp.35-40，2005.12.
- 4) 土木学会：コンクリート標準示方書・同解説（設計編），p.181，2016.
- 5) 真下英人，日下敦，砂金伸治，木谷努，海瀬忍，トンネル覆工の破壊メカニズムと補強材の効果に関する実験的研究，土木学会論文集F，vol.64，No.3，pp.311-326，2008.9

(2019. 8. 9 受付)

STUDY ON THE REINFORCEMENT METHOD FOR EXISTING TUNNEL LININGS WITH STRUCTURAL DEFECTS

Katsumi OBARA, Hideto MASHIMO, Akihiko NAKAMURA, Shigetoyo YASUI, Hisashi HAYASHI, Yasuo KAWABATA, Takumi KUJIRAI, Yasunobu SATAKE and Masato SHINJI

Many tunnels constructed using the lagging method will be 50 years after construction in the next 5 to 10 years, and many tunnel linings are already in a state that requires countermeasures. Many of the linings have structural defects such as back cavities and insufficient thickness, and measures to maintain and manage the tunnel effectively are required. Proposed construction method to reinforce existing lining with inner-rolled concrete with tensile reinforcement against loosening load in tunnels with lagging method. The concept of cross-sectional design and how to estimate the effect are shown.