

# 巻厚不足の矢板工法トンネルにおける補強技術と補強設計手法

## Retrofit Method and Design for Timbering Support Method Tunnels with Insufficient Lining Thickness

石田 雄太郎 <sup>*1</sup> Yutaro Ishida	川端 康夫 <sup>*2</sup> Yasuo Kawabata	真下 英人 <sup>*3</sup> Hideto Mashimo	進士 正人 <sup>*4</sup> Masato Shinji
安井 成豊 <sup>*3</sup> Shigetoyo Yasui	井野 裕輝 <sup>*3</sup> Yuki Ino	細井 秀憲 <sup>*5</sup> Hidenori Hosoi	小原 勝巳 <sup>*6</sup> Katsumi Obara
阿部 隆英 <sup>*1</sup> Takahide Abe	林 久資 <sup>*7</sup> Hisashi Hayashi	中村 明彦 <sup>*8</sup> Akihiko Nakamura	鯨井 巧 <sup>*8</sup> Takumi Kujirai

### 【要旨】

本研究では、天端部の巻厚が不足した矢板工法トンネルの覆工を補強することを目的とし、既設覆工と内巻補強工を一体化させる補強工法を提案した。本補強工法では、既設覆工の内空側にエポキシ樹脂塗装鉄筋を配筋し、高強度のモルタルを吹付け、両者の一体性を確保した合成梁構造とするために、既設覆工と内巻補強工の接合面には円柱型のシヤキーとあと施工アンカーを施工する。接合面における応力伝達を設計で考慮するため、接合面の実大せん断実験を実施してその力学的挙動を把握した。その結果を踏まえ、①設計条件の整理、②補強断面の検討、③構造設計の3ステップで行う補強設計を提案した。そして、天端部の巻厚が不足した覆工の仮定断面を対象に、補強の目標を現在の坑口覆工仕様(覆工厚35cm, 単鉄筋)として実際に補強設計を行った。その結果、坑口部における覆工仕様の構造性能と同等まで補強が可能であることを示した。

【キーワード】 覆工コンクリート 構造欠陥 補強設計 M-N 破壊包絡曲線 有限要素法解析

## 1. はじめに

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などの構造欠陥を有する例が少なくない。また、山岳トンネルでは土被りの小さい坑口部や断層破碎帯などの脆弱部における耐震性の確保が重要視されているが<sup>1)</sup>、これらの箇所では地山条件などによる施工の困難さから巻厚不足が生じやすく、設計上の耐荷力を確保できていない場合がある。点検・診断の実施に伴い、その多くが予防保全上、対策の必要な状態であると判定されている。さらに、矢板工法で施工されたトンネルでは、内空断面に余裕のないケースもあり、覆工の耐荷力向上を目的とした内巻補強工などの補強対策を施すことが困難な場合もある。

巻厚が不足した覆工に対する既存の補強対策として、「内面補強工」と「内巻補強工」がある<sup>2)</sup>。「内面補強工」には「繊維シート補強工」や「鋼板接着工」などがあり、これらは既設覆工の内面を補強するもので、既設覆工の内面が圧縮状態となる場合には十分な補強効果を望むことは難しく、正規の巻厚での構造性能を保証するものではない。一方で、「内巻補強工」には「プレキャスト工法」

や「鋼材補強工」などがあり、一般的に既設覆工の耐荷力は見込まずに設計される。その結果として過剰な補強設計となりやすく、また建築限界の制限などから施工が困難となる場合も多い。

筆者らは、これまでに矢板工法で施工されたトンネル覆工において、内空断面に余裕がない場合にも内巻補強工を既設覆工と一体化し合成梁として機能させる補強工法を提案した<sup>3)</sup>。本研究はその補強工法を発展させ、既設覆工と内巻補強工を一体化させる具体的な補強工法と、その補強設計手法の提案を目的としたものである。

## 2. 提案する補強工法の概要

### 2.1 補強工法の概要

本研究で提案する補強工法の概要を図-1に示す。既設覆工の内空側にエポキシ樹脂塗装鉄筋(D19, SD345を基本とする)を用いて主筋および配力筋をともに200mm間隔を基本として配筋する。そして、表-1に示す仕様の高強度かつ高品質のモルタルをTDRショット工法(TDRショットライニングシステムを含む)により吹付ける<sup>4)</sup>。吹付けモルタルの厚さは、内空側のかぶり厚さ30mm

1.技術研究所 研究開発G 第四研究室 2.土木本部 土木FSC 3.一般社団法人 日本建設機械施工協会 施工技術総合研究所  
4.山口大学 5.株式会社 ジオ・ソリューション 6.営業本部 技術企画部 7.西日本工業大学 8.株式会社 テムロ

+内部鉄筋38mm+既設覆工側のかぶり厚さ12mmとして、80mmを基本とする。鉛直荷重に対して危険断面となる天端部における吹付けモルタルの厚さは補強設計の目標に応じて決定する。既設覆工と内巻補強工の接合面には、両者の一体性を確保するために、金属系のあと施工アンカー(M16)を500mm間隔で施工し、図-2に示す直径52mm、深さ11mmの円柱型のシヤキー<sup>9)</sup>を200mm間隔で施工することを基本とする。ただし、内巻補強工が建築限界を侵す場合には、必要最低限の範囲で既設覆工をウォータージェット切削した後にモルタルを吹付ける。

## 2.2 補強工法の特徴

本補強工法では、補強鉄筋を配置し、高品質のモルタルを吹付け施工することで高い補強効果が期待できるとともに、地震時における覆工の急激な崩壊を抑制する効果も期待できる<sup>9)</sup>。本補強工法を適用後に覆工背面からの湧水の滲出も懸念されることから、樹脂塗装鉄筋の適用を標準とする。吹付けモルタルの中酸化抵抗性は24N/mm<sup>2</sup>コンクリートの3倍、遮塩性は2倍程度で、高い耐久性能を有している<sup>4)</sup>。また、吹付けモルタルは2層仕上げを標準とし、表層20mmにはナイロンファイバーを添加することでひび割れも抑制する。以上より、耐震性だけではなく、耐久性にも優れた補強工法であるといえる。

環境劣化を受けるような条件でも既存躯体と新設躯体を一体化させる場合には、既存躯体の表層を研り、そこに新設躯体のコンクリートもしくはモルタルを打ち込み、凹凸の噛み合いにより機械的に一体化させることが求められる。施工性や経済性を踏まえるとウォータージェットによる切削が採用される場合が多いが、本研究で対象とする天端部の巻厚が薄い条件ではその施工が難しい。そこで、本補強工法では接合面に建築構造物の耐震補強用に開発された円柱型シヤキー<sup>9)</sup>を施工することで、従来の不規則な凹凸の目荒らしに比べて、確実かつ簡易に一体性の確保が期待できる。さらに、既設覆工と内巻補強

工を一体とすることで、建築限界の制約がある中においても内巻補強工の設計が可能となる。

なお、本補強工法は矢板工法によるトンネルのみでなく、NATMで施工されたトンネルで、巻厚不足のトンネルに対する補強にも適用可能である。さらに、NATMで施工された無筋構造の覆工区間に対して有筋構造とすることで耐震性能向上を図ることも可能である。

表-1 吹付けモルタルの仕様

(a) 標準配合

単位量 [kg/m <sup>3</sup> ]		硬化促進剤 <sup>**2</sup> [kg]
TDRモルタル <sup>**1</sup>	水	
1,900	266	38

<sup>\*\*1</sup>6.5kg(=0.5mol%)のビニロンファイバーを含む

<sup>\*\*2</sup>表層20mmにはナイロンファイバー50g/m<sup>3</sup>も添加

(b) フレッシュ性状と施工性

ミニスランブ [mm]	モルタル吐出量 [m <sup>3</sup> /hr]	はね返り率 [%]
95±25	0.2~1.0	2~5

(c) 材料諸元

設計基準強度 $f'_{mck}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	設計圧縮強度 $f'_{mc}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	設計引張強度 $f_{mt}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	ヤング係数 $E_m$ [N/mm <sup>2</sup> ]
40	30.8	7.00	20,000

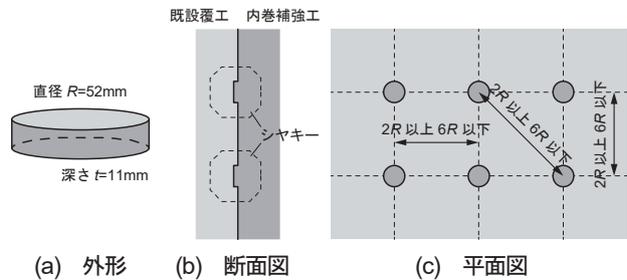


図-2 円柱型シヤキーの概要

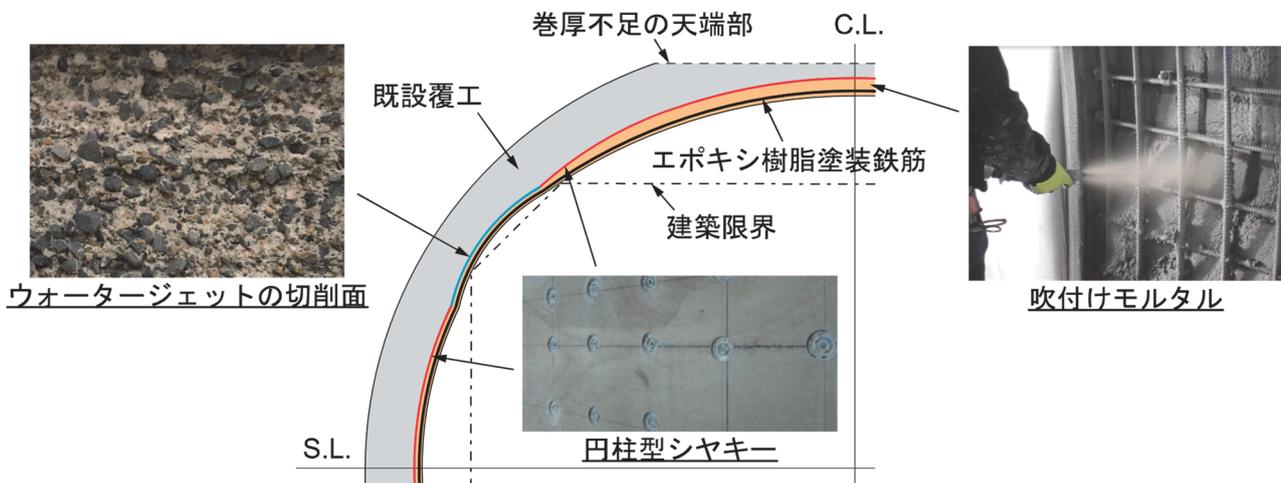


図-1 提案する補強工法の概要

### 3. 接合面の実大せん断実験

#### 3.1 実験概要

第2章で述べたように、本補強工法では、既設覆工と内巻補強工の接合面の一体性を確保することが重要となる。接合面には垂直応力とせん断応力が作用するが、垂直応力はあと施工アンカー、せん断応力はシヤキーもしくはウォータージェット切削面に応力を分担させる設計方針とする。あと施工アンカーの引張特性については具体的な設計法が確立されている<sup>7)</sup>などのに対し、シヤキーやウォータージェット切削面のせん断特性の設計法については具体的な設計法は確立されていない。以上のことから、本研究ではこれらの接合面のせん断特性を把握することを目的として、実大せん断実験を行った。

試験体のパラメータを表-2に示す。主なパラメータは接合面の仕様と既設部のコンクリート強度および接合面の平均圧縮応力度とした。

表-2 試験体パラメータ

No.	接合面の仕様	コンクリート強度 $F_c$ [N/mm <sup>2</sup> ]	平均圧縮応力度 $\sigma$ [N/mm <sup>2</sup> ]
1, 2	プライマー	30	0
3, 4			0.1
5, 6			0.5
7, 8	シヤキー		0
9, 10			0.5
11, 12	シヤキー		0
13, 14	+プライマー	0.5	
15, 16	ウォーター ジェット切削 +プライマー	18	0
17, 18		24	
19, 20		30	
21, 22		18	

#### 3.2 試験体概要

試験体の詳細を図-3、既設部のコンクリートと新設部の吹付けモルタルの材料諸元を表-3に示す。

試験体は既設覆工と内巻補強工の接合部を実大で模擬し、既設部の寸法は長さ580mm、幅650mm、高さ225mm、新設部の寸法は長さ540mm、幅360mm、高さ130mmとした。既設部には内部補強鉄筋(D10, SD295)を、新設部には主筋(D19, SD345)と配力筋(D16, SD345)、段取り筋(M10, SS400)を配筋した。試験体の上面には後述する加力ビームと緊結するためのあと施工アンカーを施工した。

接合面について、シヤキーを施工する試験体では9個のシヤキーを施工した。試験体No.1~6の全面とNo.11~14のシヤキー以外の部分はサンダー掛けを行ってからプライマーを塗布した。試験体No.15~22では、接合面をウォータージェット切削した後にプライマーを塗布した。

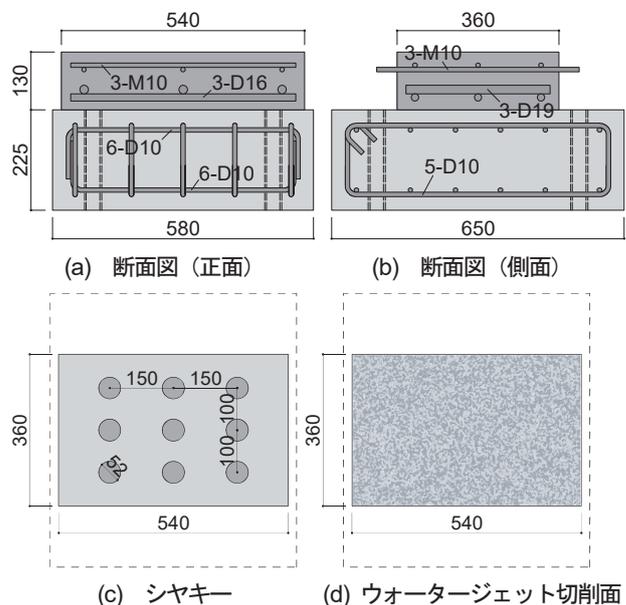


図-3 試験体詳細

#### 3.3 載荷装置と計測計画

##### (1) 載荷装置

載荷装置を図-4に示す。試験体の既設部を土台治具に緊結し、新設部の上面をコの字形の加力ビームに緊結した。この加力ビームの上面にはパンタグラフを取付け、平行を保持した。1500kNの油圧ジャッキを接合面の高さで水平に取り付け、接合面の中心に500kNの油圧ジャッキを鉛直に取り付けた。コの字形加力ビームを介して、所定の圧縮軸力を一定に与えながらせん断力を与えた。載荷は図-4の油圧ジャッキによる加力方向に示すとおり、引き切りの単調載荷とした。

##### (2) 計測計画

載荷装置と離れた不動治具から既設部および新設部の絶対水平変位を各2箇所計測し、相対水平変位の平均値をせん断変位とした。

表-3 コンクリートおよび吹付けモルタルの材料諸元

(a) No.1-14			
	圧縮強度 $f'_{cs}, f'_{mc}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	引張強度 $f_{ct}, f_{mt}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	ヤング係数 $E_c, E_m$ [N/mm <sup>2</sup> ]
Fc30	31.6	-	34,900
吹付けモルタル	43.1	-	17,500
(b) No.15-22			
	圧縮強度 $f'_{cs}, f'_{mc}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	引張強度 $f_{ct}, f_{mt}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	ヤング係数 $E_c, E_m$ [N/mm <sup>2</sup> ]
Fc18	23.9	1.95	21,400
Fc24	28.1	2.36	22,900
Fc30	35.4	3.09	25,200
吹付けモルタル	49.9	-	21,800

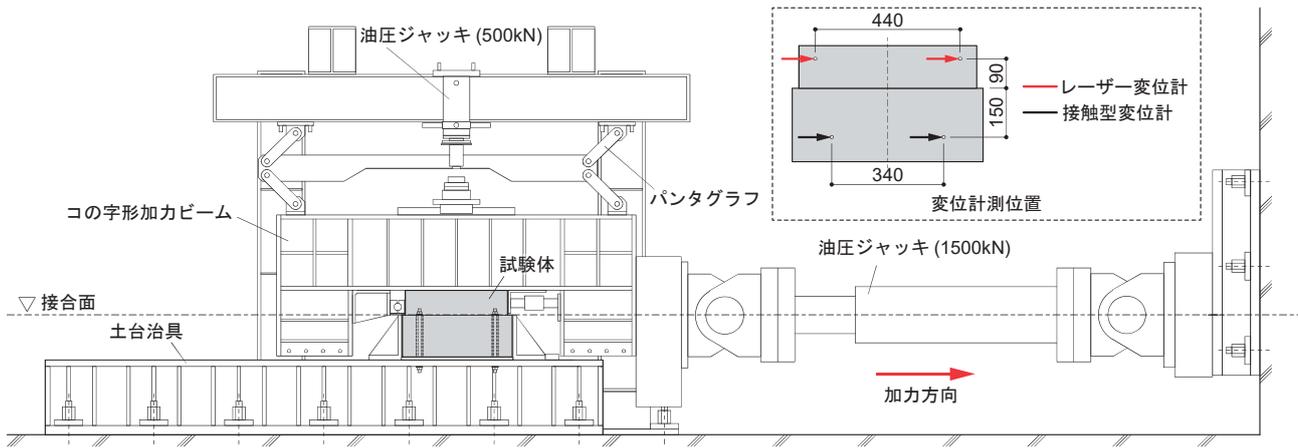


図-4 載荷装置

### 3.4 各接合面のせん断特性

#### (1) プライマー接合面のせん断特性

プライマー接合面のせん断特性を図-5に示す。図-5より、プライマー接合面の粘着力 $c_{bond}$ は $1.38\text{N/mm}^2$ 、内部摩擦角 $\phi_{bond}$ は $44.1\text{deg}$ とした。

#### (2) シヤキー+グリリス接合面のせん断特性

シヤキー+グリリス接合面のせん断特性を図-6に示す。また、No.7の破壊状況を写真-1に示す。写真-1より、破壊モードは吹付けモルタルが接合面の位置でせん断破壊するシアオフ破壊<sup>5)</sup>であることが確認でき、No.8~10についても同様であった。また、 $\sigma_0=0$ と $0.5$ のそれぞれで、同パラメータ2体の実験結果とその平均値が概ね一致しており、安定したせん断挙動を示した。シヤキー+グリリス接合面のせん断耐力は、シヤキーの総断面積 $A_{sky}$ と吹付けモルタルのせん断強度 $\tau_m$ の積で算出できることから、No.7, 8の実験結果から $\tau_m$ を逆算して $6.64\text{N/mm}^2$ とした。なお、内部摩擦角は $85.9\text{deg}$ であった。

#### (3) シヤキー+プライマー接合面のせん断特性

シヤキー+プライマー接合面のせん断特性を図-7に示す。シヤキー+プライマー接合面についても、シヤキー+グリリス接合面と同様に、破壊モードはシアオフ破壊であり、ばらつきが小さく安定したせん断挙動を示した。

ここで、シヤキー+プライマー接合面のせん断特性評価を試みる。シヤキー+プライマー接合面のせん断強度 $\tau_{sky}$ は下式により算出することができる。

$$\tau_{sky} = c_{sky} + \sigma_0 \tan \phi_{sky} \quad (1)$$

ここに、 $c_{sky}$ はシヤキー+プライマー接合面の粘着力、 $\phi_{sky}$ は同接合面の内部摩擦角である。

評価式の詳細は第4章にて記載するが、評価式によるシヤキー+プライマー接合面の粘着力 $c_{sky}$ は $1.90\text{N/mm}^2$ 、内部摩擦角 $\phi_{sky}$ は $41.1\text{deg}$ となり、図-7に示すように実験結果を精度よく評価可能であることが確認できる。また、最大耐力時のせん断変位 $\delta_s$ はNo.11~14のいずれにおいても $0.5\text{mm}$ 程度であったことから、 $\delta_s=0.5\text{mm}$ とした。

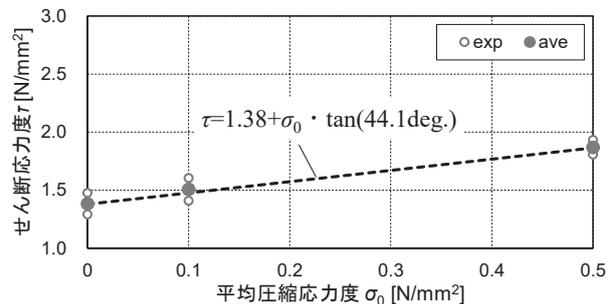


図-5 プライマー接合面のせん断特性

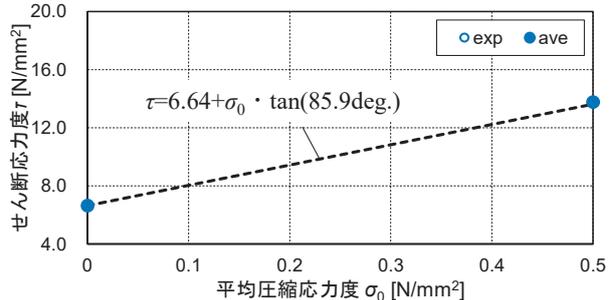


図-6 シヤキー+グリリス接合面のせん断特性



写真-1 破壊状況 (No.7)

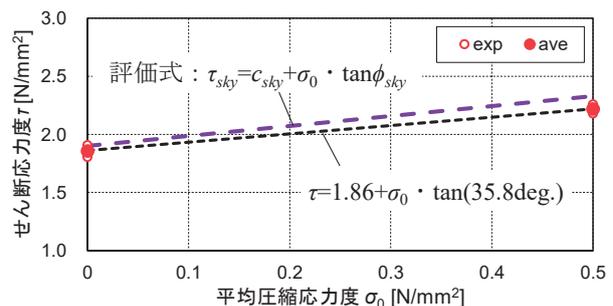


図-7 シヤキー+プライマー接合面のせん断特性

#### (4) ウォータージェット切削接合面のせん断特性

ウォータージェット切削接合面のせん断特性を図-8に示す。平均圧縮応力度 $\sigma_0=0$ の試験体であるNo.15~20の試験体に着目すると、既設部のコンクリート強度によらず同様なせん断特性であることが確認できる。また、破壊状況は写真-2に示すように、既設部が破壊しており、全試験体で同様であった。そのため、Fc18のNo.15, 16, 21, 22の実験結果から、ウォータージェット接合面のせん断特性を定めることとし、粘着力 $c_{wj}$ は $2.40\text{N/mm}^2$ 、内部摩擦角は $57.1\text{deg}$ とした。また、せん断剛性 $K_{swj}$ については、 $c_{wj}=2.40\text{N/mm}^2$ を $\sigma_0=0$ の実験結果(No.15, 16)による $\delta_s=0.73\text{mm}$ で除して $3.30\text{N/mm}^3$ とした。



写真-2 破壊状況 (No.16)

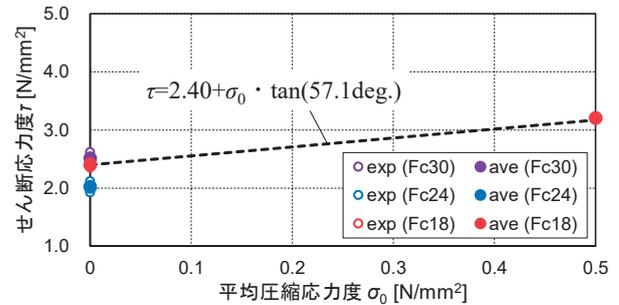


図-8 ウォータージェット切削接合面のせん断特性

## 4. 内巻補強工の設計

### 4.1 設計の基本

本補強工法において、内巻補強工による補強効果を十分に得るためには、既設覆工と内巻補強工の一体性を確保することが重要となる。

本設計では、既設覆工と内巻補強工を合成した部材が終局耐荷力に達するまで、既設覆工と内巻補強工の接合部で応力が伝達できている状態、すなわち接合部に生じる応力が接合部の強度以下である状態を一体性が確保できているものと定義する。既設覆工と内巻補強工の間における応力伝達を担保するためには、接合面の力学的挙動を考慮して設計を行う必要がある。

本章では、天端部の巻厚が不足した覆工の仮定断面を対象とした補強設計を例に挙げながら、提案する補強設計の手法について述べる。

### 4.2 設計フロー

本補強工法の設計フローを図-9に示す。本補強工法では、以下に示すように大きく3ステップに分けて行う。詳細は後述するが、各ステップの要点を以下に示す。

STEP 1では設計条件の整理を行う。事前調査に基づき既設覆工の諸元、周辺地山の地盤種別などの設計に必要な情報を整理、補強の目標とする要求性能を設定する。

STEP 2では補強断面の検討を行う。内巻補強工の断面は、現状の既設覆工における断面性能および補強目標とする断面性能を把握した上で検討する必要がある。ここで、覆工の断面には軸力と曲げモーメントが作用することから、本設計では必要な補強厚はM-N破壊包絡曲線を用いて検討することとする。目標とする断面性能に対して、現状の断面性能がどの程度不足しているのかを踏まえ、内巻補強工の厚さ、補強鉄筋の配筋を設定する。

STEP 3では既設覆工と内巻補強工の接合部を設計し、有限要素解析モデルを作成して構造計算を行う。既設覆工の外縁が設計圧縮強度に達する時の荷重を設計荷重とし、その時の接合部に生じる応力を照査する。そして、

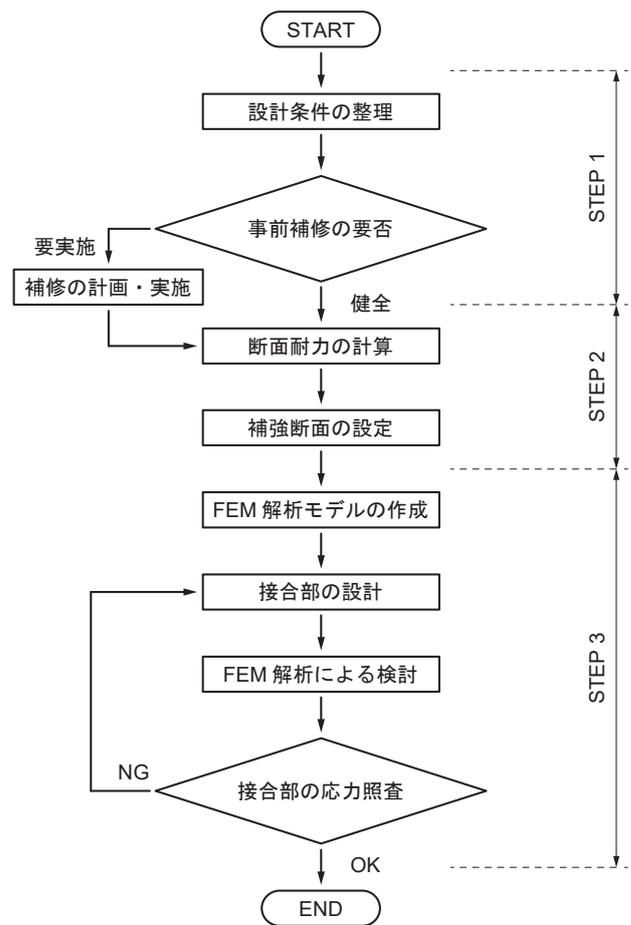


図-9 設計フロー

STEP 2で決定した補強断面が崩壊に至るまで、接合部が破壊せず一体性が確保されることを確認する。

### 4.3 STEP 1：設計条件の整理

#### (1) STEP 1の概要

本補強工法の設計を行うにあたり、補強後に期待する要求性能を設定するとともに、補強対象となる既設覆工の諸条件を確認し、設計条件を整理する必要がある。

本補強工法は、前述のとおり天端部の巻厚不足に伴う構造欠陥を有する覆工を対象としていることから、天端部を中心として巻厚の分布を把握することが重要となる。

#### (2) 補強目標の設定

補強設計では、補強目標の設定が必須である。設計荷重は設定されていない場合が多い一方で、経済性を考慮した合理的な要求性能を設定することが重要となる。期待される要求性能としては、標準的な覆工仕様(覆工厚30cm, 無筋)や坑口部覆工仕様(覆工厚35cm, 単鉄筋)などが想定される。

実際に天端部の巻厚が不足し、補強対象となり得るのは坑口付近が多いことが想定される。また、坑口付近は地震により周辺の地山が不安定となりやすい。そのため、ここでは現在の坑口付近の覆工仕様(NATM DIIIa, 覆工厚35cm, 単鉄筋)と同等の構造性能を補強目標とする。

#### (3) 既設覆工の諸条件

補強設計を行う際には、補強対象とするトンネルに関する諸条件を明確にすることが重要である。そのため、補強設計を行うにあたり、補強対象トンネルの設計概要(設計図面、設計仕様)、トンネル点検記録等(変状記録、変状発生要因、変状進展の有無)、調査記録(最小覆工厚、概略覆工強度、内空断面、背面空洞の有無)を事前に確認することが望ましい。特に、調査記録に関する情報は、建築限界で制限される内巻補強工の補強厚さや補強効果を解析検討する際に既設覆工に対して見込んでよい設計強度等を決定する上で必須である。

ここでは、図-10に示す既設覆工の仮定断面を補強対象とし、既設覆工の材料諸元は表-4に示す値とする。

#### (4) 内巻補強工の諸条件

内巻補強工における吹付けモルタルの材料諸元は表-5、補強鉄筋およびアンカーボルトの材料諸元は表-6に示すとおりとする。

ここで、内空の建築限界との兼ね合いで補強厚に制約が生じる場合には、切削を含めた設計検討も必要となる。具体的には、建築限界に余裕が無い肩部近傍の巻厚が、補強目標とする覆工厚より十分に大きい場合は、ウォータージェットによる切削を行い、断面を広げて補強厚を確保する。設計を進める上で必要となる情報が不足する場合には、別途調査(削孔や電磁波による巻厚探査など)を実施する。

#### (5) 周辺地山の状況

覆工の耐荷力を検討する際には、覆工全周に渡って地山反力が期待できる条件とする。特に天端覆工の巻厚が

不足し、その背面に空洞が存在した状態であると突発的に崩壊する可能性が懸念され、単に内面への補強のみで対応できるとは限らない。そのため、巻厚不足に伴う構造欠陥を有し、対策区間となる範囲において背面空洞が確認されている場合には、適切な背面空洞充填が実施されていることを前提とする。

ここでは、周辺地盤の地質が強風化層であると仮定して表-7に示す地盤ばねを設定し、既設覆工の地山側における地山反力を考慮する。

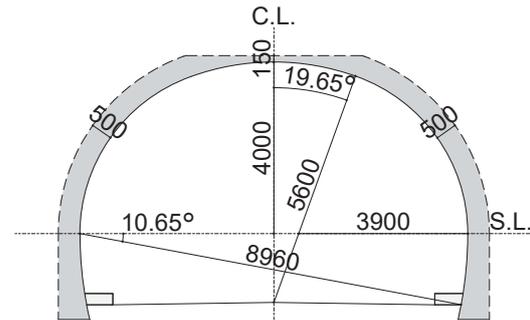


図-10 補強対象とする既設覆工の仮定断面

表-4 コンクリートの材料諸元

設計基準強度 $f'_{ck}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	設計圧縮強度 $f'_{cc}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	設計引張強度 $f_{ct}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	ヤング係数 $E_c$ [N/mm <sup>2</sup> ]
18	13.8	1.58	22,000

表-5 吹付けモルタルの材料諸元

設計基準強度 $f'_{mck}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	設計圧縮強度 $f'_{mc}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	設計引張強度 $f_{mt}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	ヤング係数 $E_m$ [N/mm <sup>2</sup> ]
40	30.8	7.00	20,000

表-6 鋼材の材料諸元

鋼種	設計引張強度 $f_u$ [N/mm <sup>2</sup> ]	設計降伏強度 $f_y$ [N/mm <sup>2</sup> ]	ヤング係数 $E_s$ [N/mm <sup>2</sup> ]
	主筋	490	345
配力筋			
アンカーボルト	490B	325	

表-7 地盤ばね

地層	変形係数 [kN/m <sup>2</sup> ]	法線ばね定数 [kN/m <sup>3</sup> ]	接線ばね定数 [kN/m <sup>2</sup> ]
強風化層	100,000	464,243	0

#### 4.4 STEP 2 : 補強断面の検討

##### (1) STEP 2の概要

補強断面の検討は、後述の構造解析に用いる断面仕様を設定することを目的とする。補強断面の検討では、断面耐力の把握および比較が重要となる。断面耐力の比較では、最も断面耐力が小さくなる巻厚不足の天端断面を対象として検討を行う。

断面耐力の比較方法には様々な手法が挙げられるが、本補強設計では図-11に示すような軸方向耐力と曲げ耐力の関係を表した曲線であるM-N破壊包絡曲線を用いて比較検討を行い、補強断面を検討する。M-N破壊包絡曲線の線上は軸力、曲げモーメントの割合に応じた断面耐力を表しており、その内側は耐力に到達しておらず安全であることを示す。そのため、安全性の照査にM-N破壊包絡曲線を用いる場合には、検討対象の断面によって決まるM-N破壊包絡曲線が、目標とする断面のM-N破壊包絡曲線と同等あるいは外側に大きくなるような補強断面を求める。なお、M-N破壊包絡曲線は、断面の大きさだけでなく、コンクリートと吹付けモルタルの強度および剛性の差や、内部鉄筋の配筋の影響により、縦軸に対して線対称にならないことに注意する必要がある。

##### (2) 断面耐力の計算

各モデルの天端部断面を図-12に示す。本補強工法は、既設覆工に内巻補強工を合成する補強工法であり、両者が離間すると断面内の応力状態が異なるため両者の一体性について検討が必要となる。しかし、断面耐力の計算において、このような離間条件を考慮することは困難であるため、既設覆工と内巻補強工は完全一体とし、平面保持が終局状態まで保たれると仮定する。

コンクリートの応力-ひずみ曲線は、コンクリート標準示方書<sup>8)</sup>に示されている非線形モデルを用いることとし、コンクリートの引張応力については見込まないものとする。鉄筋については、完全弾塑性モデルとする。本解析で用いる各物性値はSTEP1で示した数値とする。

##### (3) 補強断面の設定

補強断面は現状の既設覆工であるModel 1のM-N破壊包絡曲線を大幅に上回り、補強の目標とするModel 2と同等程度となるような補強厚と配筋仕様を検討する。同等程度と判断する目安としては、M-N破壊包絡曲線の頂点となる最大軸力および内巻補強工を引張縁とした際に作用する最大曲げモーメントの大きさに着目し、概ね同等であることを確認する。

各M-N破壊包絡曲線を比較したものを図-13に示す。まず、Model 1とModel 2を比較すると、目標とする断面耐力に対して既存覆工は大きく下回っていることがわかる。次に、Model 2と基本の補強厚8cmとしたModel 3を比較すると、Model 1から断面耐力が増加しているもののModel 2を下回っており、十分な補強効果が得られていないこと

が推察される。最後に、Model 2と内巻補強工の補強厚を18cmとしたModel 4を比較すると、全範囲においてModel 2のM-N破壊包絡曲線を上回っていることが確認できる。このことから、巻補強工の補強厚を18cmとすることで、補強の目標とするNATM DIIIaの覆工仕様と同等の断面性能まで補強可能であると判断できる。ここで、内巻補強工のみの断面(内空側のかぶり厚50mm)で検討した場合では、その巻厚は28cmとなる。したがって、既設覆工と一体化し、その耐力にも期待する本補強工法は効果的に既設覆工の補強が可能であると言える。

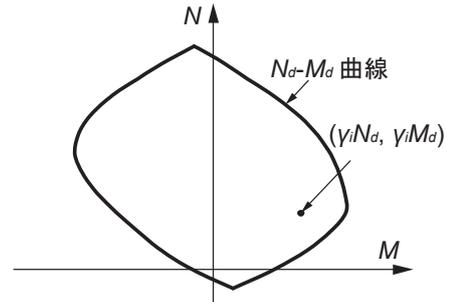
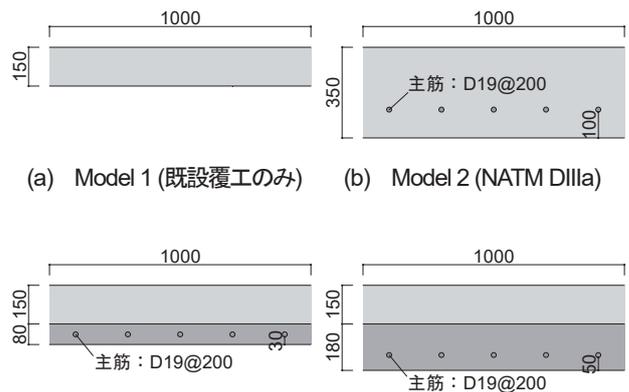


図-11 M-N破壊包絡曲線の概要



(a) Model 1 (既設覆工のみ) (b) Model 2 (NATM DIIIa)  
(c) Model 3 (基本補強厚) (d) Model 4 (補強厚検討)

図-12 各モデルの天端部断面

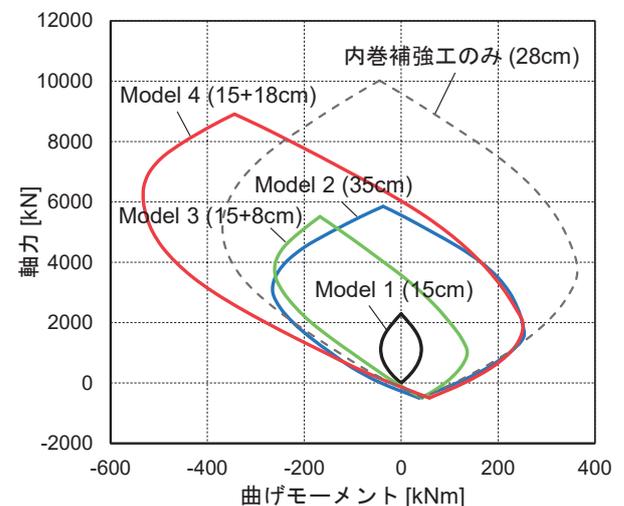


図-13 M-N破壊包絡曲線の比較(天端部断面)

#### 4.5 STEP 3 : 構造計算

##### (1) STEP 3の概要

STEP 2では、内巻補強工と既設覆工を完全一体とした条件の下で、内巻補強工の補強断面を設定した。STEP 3では、実際の内巻補強工と既設覆工の接合面における垂直方向およびせん断方向の特性に応じた挙動を踏まえて一体性が確保されていることを確認するため、接合面の力学的挙動を考慮した構造計算を有限要素解析により行う。天端部における縁応力が設計圧縮強度に達する時の荷重を設計荷重として定め、その設計荷重を与えた時の接合面に生じる応力を照査する。

##### (2) 有限要素解析モデル

有限要素解析モデルの覆工断面を図-14、有限要素解析モデルの概要を図-15に示す。本研究では2次元で有限要素解析を行った。既設覆工および吹付けモルタルは平面応力要素でモデル化した。内巻補強工の内部鉄筋はトラス要素でモデル化し、吹付けモルタルの節点と共有節点とすることで完全付着とした。内巻補強工と既設覆工の接合面は、後述する接合面の応力伝達特性を考慮したジョイント要素を用いてモデル化した。また、既設覆工の地山側には全周囲において、周辺地盤の特性に応じた地盤ばねをモデル化し、既設覆工と内巻補強工の脚部には自重を考慮したせん断ばねをモデル化した。

##### (3) 接合面の設計

第3章でも述べたように、既設覆工と内巻補強工の間では、垂直応力とせん断応力が伝達されるため、各応力に対して接合部を設計しなければならない。本設計では応力の分担を仮定し、垂直応力に対してはあと施工アンカー、せん断応力に対してはシヤキーまたはウォータージェットによる切削面で応力が伝達されるものとする。

まず、垂直応力に対するあと施工アンカーは、前述のとおり補強鉄筋を配筋するための段取り筋としての役割もあり、施工性や経済性を踏まえて、M16(SNR490B)の金属系あと施工アンカーを4本/m<sup>2</sup>の数量で配置することとした。引張強度はアンカーボルトの降伏強度とし、接合面から既設側に1d<sub>a</sub>、新設側に1d<sub>a</sub>の合計2d<sub>a</sub>の区間で変形すると仮定した。よって、接合面の引張特性は以下により算出することができる。

##### 引張強度

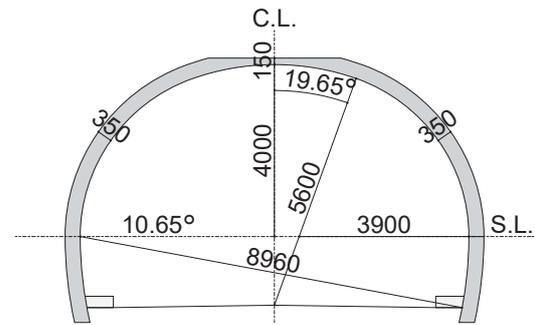
$$\sigma_T = \sigma_y \times s_c a \times n_a \quad (2)$$

##### 引張剛性

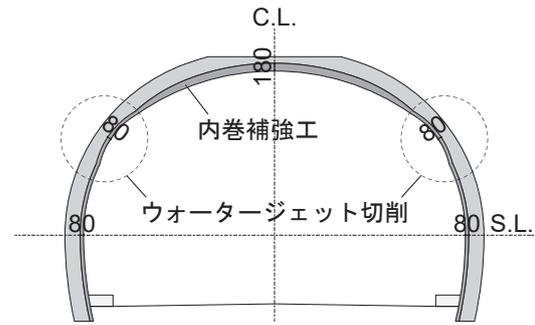
$$K_{nt} = \sigma_T / \delta_{va} \quad (3)$$

$$\delta_{va} = 2d_a \times \sigma_y / E_s \quad (4)$$

ここに、 $\sigma_T$ は単位面積あたりの引張強度、 $\sigma_y$ はアンカーボルトの設計降伏強度、 $s_c a$ はアンカーボルトの断面積、



(a) 既設覆工の寸法



(b) 内巻補強工の寸法

図-14 有限要素解析モデルの覆工断面

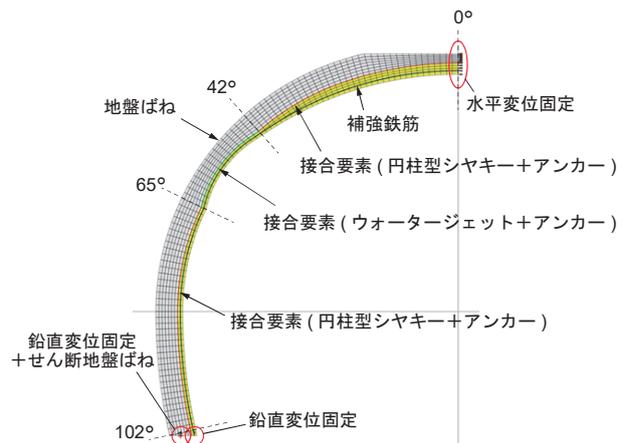


図-15 有限要素解析モデルの概要

表-8 接合面の垂直特性

引張強度 $\sigma_T$ [kN/m <sup>2</sup> ]	引張剛性 $K_{nt}$ [kN/m <sup>3</sup> ]	圧縮強度 $\sigma_C$ [kN/m <sup>2</sup> ]	圧縮剛性 $K_{nc}$ [kN/m <sup>3</sup> ]
204.1	3,925×10 <sup>3</sup>	∞	3,925×10 <sup>7</sup>

$n_a$ は単位面積あたりの本数、 $K_{nt}$ は引張剛性、 $\delta_{va}$ はアンカーボルトの伸び、 $d_a$ はアンカーボルトの直径、 $E_s$ はアンカーボルトのヤング係数である。

圧縮応力については、コンクリートと吹付けモルタルが接触することで応力が伝達されるため、十分に大きな圧縮剛性 $K_{nc}$ を与えることとし、ここでは便宜的に引張剛性 $K_{nt}$ の1.0×10<sup>4</sup>倍とした。

以上より求めた接合面の垂直特性を表-8に示す。

次に、せん断応力に対するシヤキーは直径 $R$ と深さ $l$ の比 $R/l$ を5以下として、前述のように破壊モードをシアオフ破壊とすることで、吹付けモルタルの材料強度で設計が可能となる。また、シヤキーの数量についても、あと施工アンカーと同様に施工性や経済性を考慮して、200mm間隔(=25個/m<sup>2</sup>)で施工することとした。よって、シヤキーを施工した接合面のせん断特性は以下により算出することができる。

### せん断強度

$$\tau_{sky} = c_{sky} + \sigma_0 \tan \phi_{sky} \quad (1)$$

### 粘着力

$$c_{sky} = \tau_m \times \frac{A_{sky}}{A_j} + c_{bond} \times \frac{A_{bond}}{A_j} \quad (5)$$

### 内部摩擦角

$$\phi_{sky} = \frac{(\tau_m + \tau_{bond}) - (\tau_m + c_{bond})}{\sigma_0} \quad (6)$$

$$\tau_{bond} = c_{bond} + \sigma_0 \tan \phi_{bond} \quad (7)$$

### せん断剛性

$$K_{ssky} = c_{sky} / \delta_s \quad (8)$$

ここに、 $\tau_{sky}$ はシヤキーを施工した接合面のせん断強度、 $c_{sky}$ はシヤキーを施工した接合面の粘着力、 $c_{bond}$ はプライマーを施工した接合面の粘着力(=1.38N/mm<sup>2</sup>)、 $\tau_m$ は吹付けモルタルのせん断強度(=6.64N/mm<sup>2</sup>)、 $A_j$ は接合面の単位面積(=1m<sup>2</sup>)、 $A_{sky}$ はシヤキーの総断面積、 $A_{bond}$ はプライマーの吹付け面積(=  $A_j - A_{sky}$ )、 $\phi_{sky}$ はシヤキーを施工した接合面の内部摩擦角、 $\phi_{bond}$ はプライマーを施工した接合面の内部摩擦角、 $\sigma_0$ は接合面に作用する平均圧縮応力度、 $\tau_{bond}$ はプライマーを施工した接合面のせん断強度、 $K_{ssky}$ はシヤキーを施工した接合面のせん断剛性、 $\delta_s$ はせん断強度時の変位(=0.5mm)である。

建築限界の制限から、既設覆工をウォータージェットにより切削した範囲については、第3章の実大せん断実験の結果から得られたせん断特性を用いる。

以上より求めた接合面のせん断特性を表-9に示す。

### (4) 接合面の応力照査

まず、天端部における既設覆工の圧縮縁が設計圧縮強度に達するまで鉛直方向に等分布荷重を与えた。この時の荷重は285kN/m<sup>2</sup>であり、本研究ではこれを設計荷重とすることとした。285kN/m<sup>2</sup>を与えた時の縁応力の分布を図-16に示す。図-16より、天端部における既設覆工の外縁が設計圧縮強度に達することが確認できる。

次に、設計荷重285kN/m<sup>2</sup>を与えた時の接合部の応力分布を図-17に示す。図-17より、接合面の全範囲において垂直応力度があと施工アンカーの引張強度を超えないこと、せん断応力度がシヤキーおよびウォーター

表-9 接合面のせん断特性

(a) シヤキー		
粘着力	内部摩擦角	せん断剛性
$c_{sky}$	$\phi_{sky}$	$K_{ssky}$
[kN/m <sup>2</sup> ]	[deg.]	[kN/m <sup>3</sup> ]
1,660	42.5	$3,320 \times 10^3$
(b) ウォータージェット切削		
粘着力	内部摩擦角	せん断剛性
$c_{wj}$	$\phi_{wj}$	$K_{sswj}$
[kN/m <sup>2</sup> ]	[deg.]	[kN/m <sup>3</sup> ]
2,400	57.1	$3,300 \times 10^3$

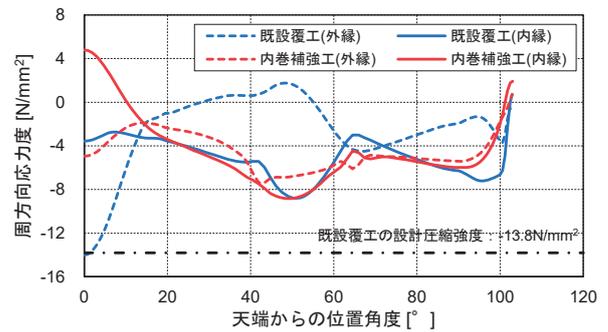
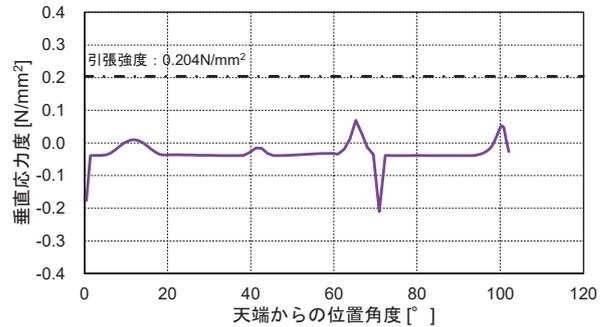
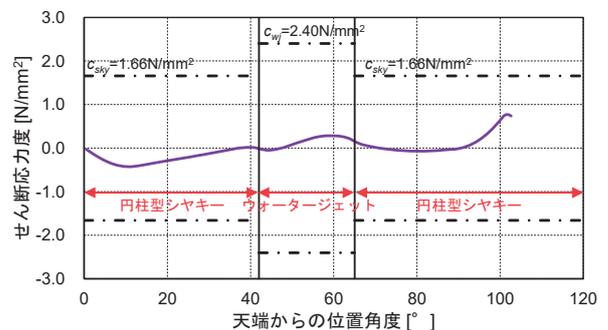


図-16 縁応力の分布 (荷重285kN/m<sup>2</sup>)



(a) 垂直応力の分布



(b) せん断応力の分布

図-17 接合部の応力分布 (荷重285kN/m<sup>2</sup>)

ジェット切削面のせん断強度を超えないことが確認できる。また、それぞれの最大値に着目すると、垂直応力は引張強度、せん断応力は粘着力に対して、それぞれ50%以下で

ある。以上のことから、内巻補強工と既設覆工の接合面では十分に応力伝達がなされ、一体性が確保されていることがわかる。

## 5. まとめ

本研究では、天端部の巻厚が不足した構造欠陥を有する矢板工法で施工された覆工を対象として、既設覆工の内空側に鉄筋と高品質な吹付けモルタルで構成される内巻補強工を一体化させる補強工法を提案した。また、既設覆工と内巻補強工の接合部を対象とした実大せん断実験を行い、接合面のせん断特性を把握した。そして、接合面の力学的挙動を考慮した補強設計の手法を提案し、既設覆工の仮定断面を対象として補強設計を行った。

以下に得られた知見を示す。

- 1) M-N破壊包絡曲線を用いた比較検討の結果より、本研究で提案する内巻補強工の補強厚は、内巻補強工単独の場合に比べて35%程度削減でき、効果的に補強が可能であることを示した。
- 2) 既設覆工の圧縮縁が設計圧縮強度に達する時の荷重を設計荷重として接合部の応力を照査した結果、垂直方向およびせん断方向ともにそれぞれの強度以下であった。安全率は2以上であり、設計荷重まで接合部の一体性が確保されることを示した。

本論文は土木学会 トンネル工学報告集第33巻に掲載した論文9)を、一部編集したものである。

## 【参考文献】

- 1) 土木学会：トンネルの地震被害と耐震設計—山岳トンネル・シールド・開削トンネル—トンネルライブラリー—33号, pp.25-148, 丸善出版, 2023.
- 2) 日本道路協会：道路トンネル維持管理便覧[本体工編](令和2年版), pp.280, 2020.
- 3) 小原勝巳, 真下英人, 中村明彦, 安井成豊, 林久資, 川端康夫, 鯨井巧, 佐竹康伸, 進士正人：構造欠陥を有する既設トンネル覆工の補強方法の研究, トンネル工学報告集, Vol.29, I-14, pp.1-6, 2019.
- 4) 川端康夫, 松尾勝弥, 名倉政雄, 平間昭信, 寺村悟, 荒木昭俊：新しい断面修復用湿式吹付け工法の開発, 土木学会土木建設技術シンポジウム, pp.311-312, 2004.
- 5) 阿部隆英, 樋渡健, 久保田雅春, 高瀬裕也, 香取慶一：コンクリート構造物の耐震補強の接合部に適用する円柱状シヤキーの提案と耐力式の構築 円柱状シヤキーを用いた間接接合部に関する研究, 日本建築学会構造系論文集, Vol.82, No.736, pp.873-883, 2017.
- 6) 土木研究所：山岳トンネル地震時挙動と耐震対策に関する研究報告書, 土木研究所資料第No.4358, pp.7-1-7-13, 2017.
- 7) 日本建築学会：各種合成構造設計指針・同解説, pp.253-397, 丸善出版, 2023.
- 8) 土木学会：コンクリート標準示方書[設計編], pp.508-511, 丸善出版, 2023.
- 9) 石田雄太郎, 川端康夫, 真下英人, 進士正人, 安井成豊, 井野裕輝, 細井秀憲, 小原勝巳, 阿部隆英, 林久資, 中村明彦, 鯨井巧：巻厚不足の矢板工法トンネルにおける補強設計の提案, トンネル工学報告集, 第33巻, I-24, 2023.11

**Summary** This study proposes a method for retrofitting tunnels constructed with timbering support with inadequate lining thickness at the highest point by integrating the existing lining with inner-wrap reinforcement. With this method, the lining is reinforced by placing epoxy resin coated steel bars on the inner surface of the lining and applying high-strength mortar. To achieve structural integrity as a composite beam structure, a cylindrical shear-key and anchors are installed at the joints of the existing lining. Full-scale shear tests were conducted to analyze stress transfer at the joint and to grasp dynamic behavior. Based on the results, we propose a retrofit design process consisting of the following three steps: (1) determination of the design conditions; (2) deliberations on the cross-section; and (3) structural calculations. This method was applied to a hypothetical tunnel section having insufficient lining thickness at the highest point to produce an actual reinforcement design that meets current tunnel lining specifications (lining thickness: 35 mm; single steel bar). The results indicate that the lining can be retrofitted to achieve structural performance equivalent to the lining specifications for the current tunnel entrance.

**Key Words** : Concrete Lining, Structural Defects, Retrofit Design, M-N Failure Envelope, Finite Element Analysis