

FRP グリッドを用いた PCM 吹付け工法による  
トンネル補強手法に関する解析的評価

東幸宏\* 李博\* 蔣宇静\*\*

Analytical Evaluation of Tunnel Reinforcement Effect  
by PCM Shotcrete Method using FRP Grid

by

Yukihiro HIGASHI\* Bo LI\* and Yujing JIANG\*\*

Degradation of lining concrete happens naturally in the tunnels that have been commissioned for several decades, which require proper maintenance to ensure their safety and effective functions. The PCM shotcrete method by means of FRP grid, with the characters of high strength, low weight, high workability, strong resistance to corrosion, and negligible influence on the existing structures, has been used in tunnel maintenance to repair the damaged lining of some aged tunnels. Up to now, the construction cases are still few, and the design routine of this method based on quantitative evaluation on the reinforcement effect has not been established. In this study, the shear bond strength and the shear stiffness of typical FRP grids were estimated by conducting direct shear tests on FRP-PCM specimens. Those parameters were input into a numerical model of tunnel to quantitatively estimate the displacement control effect of the FRP-PCM method on tunnel lining. The experiment and numerical simulation results show that the FRP-PCM method has good reinforcement effect on tunnel lining and has high potential to be applied extensively in the maintenance of aged tunnels.

**Key words:** Tunnel, Reinforcement method, FRP grid, Polymer Cement Mortar, Finite Difference Method

## 1 緒 言

日本は山岳が多く存在し、その地形的制約から特に高度経済成長期に社会資本整備事業として数多くのトンネル構造物が建設された。そのため近年では、供用年数が 30~40 年以上のトンネル構造物の数が多くなっており、それらの劣化現象が全国的に顕在化しつつあり、その維持管理が急務となっている。

損傷した覆工コンクリートの補修補強手法として様々な内面補強工（炭素繊維シート接着工、鋼板接着工、内巻き工など）や覆工コンクリート自体の打ち替えが行われてきた。特に、矢板工法により施工された多くのトンネルに対して、炭素繊維シート接着工が主な補強手法として用いられている。コンクリート片の剥落・落下防止や曲げ補強効果などは多くの実験データより効果が確認されている（例えば、文献<sup>1)</sup>）が、局所的な応力集中やシートの剥離が生じるため、補強効果を発揮するために必要となるシート量が多くなり他の内面補強工に比べ経済性に劣る点が指摘されている。また、接着材として樹脂等を用いることが多いため、耐火性が求められることや施工環境に大きく影響を受ける。

そこで、これまで橋脚や床版、ボックスカルバートなどの補修・補強工法に用いられてきた FRP（Fiber Reinforced Plastic）グリッドを用いた PCM（Polymer Cement Mortar）吹付け工法（以下、FRP-PCM 工法）が

トンネルの内面補強工として適用されてきている。

矢板工法により施工されたトンネルの多くは覆工背面に空洞を有しており、周辺岩盤において掘削および時間経過に伴う緩み圧・塑性圧の増大により覆工に損傷を与え、覆工の剥落や岩塊の崩落などの現象を誘発している<sup>2)</sup>。そのため、炭素繊維シート接着工のような覆工表面の補修のみではなく、既設の覆工コンクリートの耐荷性を向上させることが求められている。

FRP-PCM 工法は、高強度・軽量・耐薬品性に優れるといった特徴を有する FRP グリッドをポリマーセメントモルタルにより既設構造物と一体化させて耐荷性・耐久性の向上を図る工法である。その材料特性から、既設構造物への影響が小さく、維持管理が容易に行うことができるものである。

FRP-PCM 工法の強度特性や変形特性は既往研究<sup>3,4)</sup>における梁の曲げ試験や付着試験において検証されている。しかし、トンネルにおける FRP-PCM 工法の施工事例はまだ多くなく、トンネル構造物における補強効果の定量的な評価手法および合理的な設計手法が確立されていないのが現状である。そこで本研究では、FRP-PCM 工法により補強した覆工コンクリートの模擬供試体を用いた室内一面せん断試験により、材料の付着面強度パラメータを算出し、これらのパラメータを用いて矢板工法により施工されたトンネルモデルにおける数値シミュ

+ 原稿受理 平成 年 月 日 Received

\* 非 会 員 長崎大学 工学研究科 〒852-8521 長崎市文教町, Graduate School of Engineering, Nagasaki University

\*\* 正 会 員 長崎大学 工学研究科 〒852-8521 長崎市文教町, Graduate School of Engineering, Nagasaki University

ュレーションを実施することで、FRP-PCM 工法によるトンネル補強効果を解析的に評価することを目的とした。

## 2 FRP-PCM 工法の概要

FRP-PCM 工法は、床版や桁や橋脚、トンネル覆工コンクリート、ボックスカルバート、建築構造物等の既設構造物のコンクリート表面に FRP グリッドを配置して、増厚材として特殊ポリマーセメントモルタルを吹付け増厚あるいは巻立てて既設コンクリートと一体化することにより、耐荷性や耐久性の向上を図る工法である<sup>5)</sup>。Fig. 1 に FRP-PCM 工法の概要を示す。

FRP グリッドは、カーボンやガラスなどの高性能連続強化繊維を耐薬品性に優れた樹脂に含浸させながら、縦筋と横筋を格子状に一体成形したものであり、格子交差部はクロスラミネート構造となっている補強材料である。そのため、鉄筋と比較すると比重が 1.3~1.7 と非常に軽く、比強度は鉄筋の約 5 倍である。金属材料を使用しないため耐腐食性に優れており、格子交差部が同一面上にあるため鉄筋と比較して断面が薄く、運搬が容易で重機を不要とし、施工スペースにも制約が少ない。例えば、道路橋の床版下面を FRP グリッド増厚補強した場合、既設床版と増厚部が一体化し、FRP グリッドが引張力を負担するため、既設鉄筋応力、たわみを低減させ、耐荷性の向上を図るとともに、床版の機能を回復させ、床版の疲労耐久性を大幅に向上させることが可能である。

PCM は補強材である FRP グリッドと既設コンクリートを一体化させるために非常に重要な役割を有する。そのため、コンクリートと PCM との十分な付着性能が求められる。FRP-PCM 工法はグリッドを既設コンクリートに接触配置して PCM を吹付ける工法であり、増厚量をコンクリートによる増厚工法の約 1/12 程度に抑えることが可能である<sup>3)</sup>。吹付けでの施工により狭所への重点性に優れ、コテ塗り施工と比較して施工性・作業効率が向上する。FRP-PCM 工法では耐腐食性を有する FRP グリッドと無機系材料である PCM を用いることで、厳しい施工環境下においても薄いかぶりによる補強が可能である。

上述のように、FRP-PCM 工法では FRP グリッドが軸筋も格子交差部もきわめて高い強度を持ち、増厚材に確実に定着・一体化され、腐食の恐れのない耐久性に優れた材料を用いることから、厳しい環境・施工条件下において薄いかぶりでの補強も可能である。本研究では断面積の異なる 3 種類の FRP グリッド (CR4: 6.6 mm<sup>2</sup>, CR6: 17.5 mm<sup>2</sup>, CR8: 26.4 mm<sup>2</sup>) を用いて行う<sup>5)</sup>。

### 3 一面せん断試験によるせん断付着特性の評価

#### 3.1 試験概要

Fig. 2 に試験供試体の概要を、Fig. 3 に一面せん断試験機の概要<sup>6)</sup>を示す。供試体の作成については、まず金属製の型枠にコンクリートを流し込み、覆工コンクリート模擬供試体(寸法:高さ 50mm×幅 100mm×長さ 200mm)

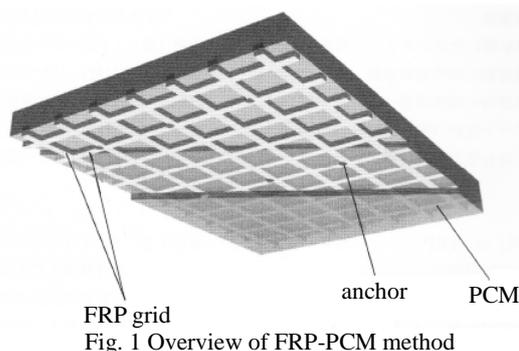


Fig. 1 Overview of FRP-PCM method

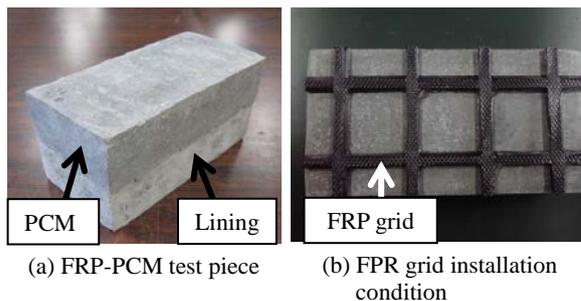


Fig. 2 View of the test piece

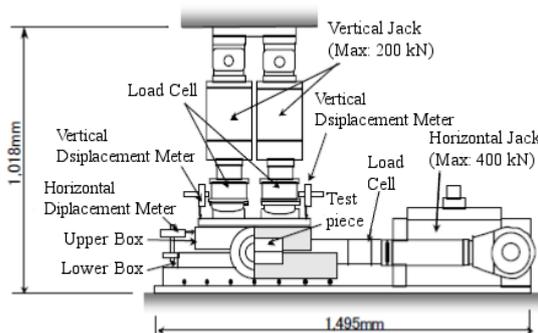


Fig. 3 Overview of direct shear test machine

Table 1 Test cases

FRP grid	CR4	CR6	CR8
Nomal stress	1MPa	2MPa	1MPa
	2MPa	3MPa	3MPa

を作成し、14 日間気中養生を行う。その後、Fig. 2 (b) に示すように FRP グリッドを設置し、コンクリート供試体と同寸法になるよう PCM を流し込み、さらに 14 日間気中養生を行って作成する。なお、PCM の養生期間は円柱供試体 (直径 50mm×高さ 100mm) による一軸圧縮試験で求めた圧縮強度が 30MPa 以上となる期間とした。Fig. 3 に示すせん断試験機はフィードバック機能を有する完全閉ループ方式の電気・油圧サーボシステムであ荷条件はコンピュータにより自動制御される<sup>6)</sup>。垂直ジャッキで上載圧を載荷させた後に水平ジャッキで下箱を水平に動かすことでコンクリートと補強材との境界面におけるせん断強度特性を把握する。

試験ケースは Table 1 に示すように、上載圧を 1 MPa, 2 MPa, 3 MPa と 3 パターンでそれぞれ一定とし、せん

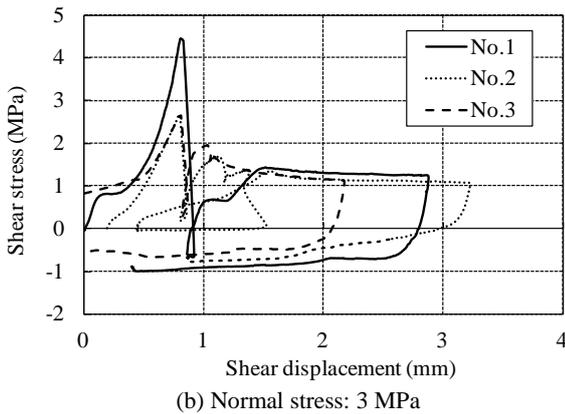
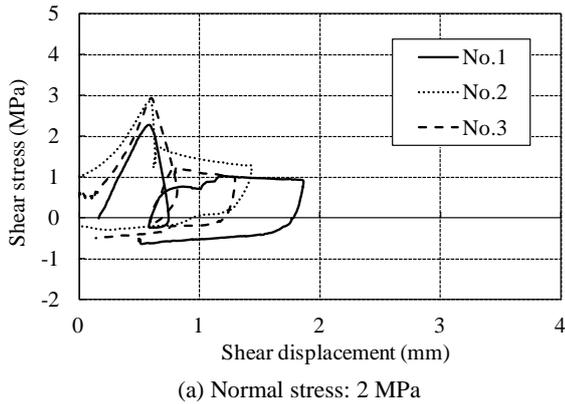


Fig. 4 Results of direct shear test (CR6)

断速度を 0.5 mm/min として実施した。

### 3・2 試験結果と付着面強度の算出

Fig. 4 に一面せん断付着強度試験の試験結果の一例として CR6 における試験結果を示す。本試験では、供試体の品質のばらつきを考慮して各ケースにつき供試体 2～3 体 (No.1～No.3) を用いて行った。なお、本試験では材料の接着性試験により算出された接着特性値である 2.0MPa を目標せん断強度とした。

Fig. 4 より、各供試体でばらつきはあるものの、垂直応力 2MPa のケースでは平均最大せん断応力が約 2.7MPa、3MPa のケースでは約 3.3MPa であり、前述の目標強度を超えることが確認され、十分な付着特性を持つことが分かった。ピーク強度に達した後、供試体が完全に剥離し、Fig. 4 に示すように強度が低下して、接触面の残留強度の状態へと移行した。

試験結果をもとに付着面における強度定数  $c$ 、 $\phi$  を算出した。強度定数は、定圧一面せん断試験における算出方法と同様に、定圧せん断強さ  $\tau_f$  と垂直応力  $\sigma_c$  をそれぞれピーク時におけるせん断強度および上載圧とし、各上載圧ごとのピークせん断強度の平均値を用いて算出した。Fig. 5 に強度定数の算出結果 ( $\tau$ - $\sigma$  曲線) を示す。Fig. 5 に示す包絡線より付着面の粘着力  $c$  は 2.217MPa、せん断抵抗角  $\phi$  は 17.7° と求まる。

次に、一面せん断試験により得られた各グリッドにおける付着面のせん断剛性を算出した。せん断剛性は以下の式 (1) を用いて算出される。

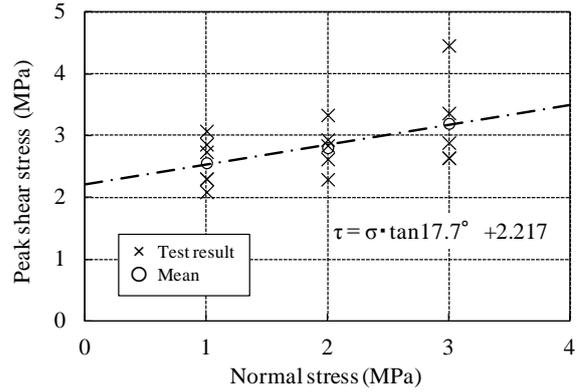


Fig. 5 Calculated result of shear bond strength

Table 2 Shear bond stiffness

Grid	Cross-sectional area (mm <sup>2</sup> )	Shear stiffness (MPa/mm)
CR4	6.6	5.298
CR6	17.5	6.394
CR8	26.4	13.369

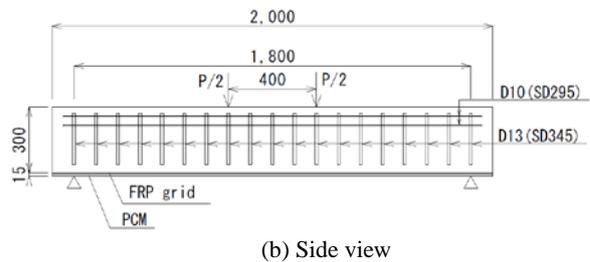
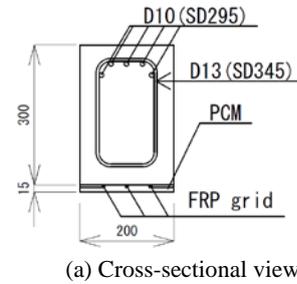


Fig. 6 Schematic view of the specimen for bending test

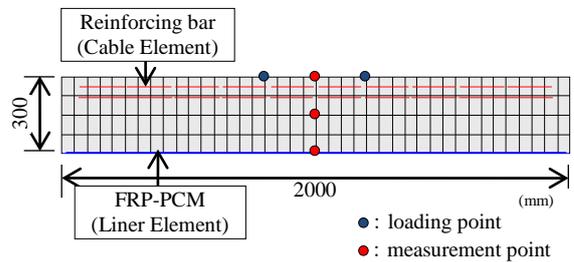


Fig. 7 Simulation model of bending test

$$\Delta\tau = k_s \cdot \Delta u \quad (1)$$

ここで、 $\Delta\tau$  はせん断応力増分 (MPa)、 $\Delta u$  はせん断変位増分 (mm)、 $k_s$  はせん断剛性 (MPa/mm) である。

一面せん断試験により得られた各 FRP グリッドにおける付着面せん断剛性を Table 2 に示す。グリッドの規格が高くなるにつれ、付着面のせん断剛性が高くなっていることが分かる。

Table 3 Properties of concrete

Compressive strength $\sigma_c$ (MPa)	Tensile strength $\sigma_t$ (MPa)	Poisson's ratio $\nu$	Young's module $E$ (MPa)
20.8	2.12	0.20	27220

Table 4 Properties of reinforcement

Material	Young's module $E$ (MPa)	Tensile strength $\sigma_t$ (MPa)	Friction angle $\phi_s$ (deg)	Cohesion $c_s$ (MPa)	Shear-stiffness $k_s$ (MPa/mm)
CR4					5.298
CR6	100000	1400	17.7	2.217	6.394
CR8					13.369
PCM	26000	4.6			-

\* $\phi_s$ ,  $c_s$  and  $k_s$  are the parameters of bonding surface

## 4 2点漸増曲げ載荷試験とその再現解析による FRP-PCM 工法のモデル化の検証

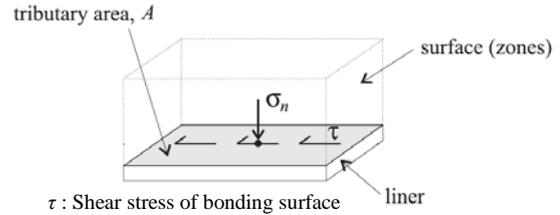
### 4.1 試験概要と再現解析の概要

本研究で補強対象としている矢板工法により施工されたトンネルの覆工コンクリートは無筋コンクリート構造であることが多いが、無筋構造の供試体を使用する場合、試験以前の運搬などにより破壊してしまうことなどが懸念される。そこで、本研究では供試体にせん断補強筋（帯筋）と圧縮補強筋（主筋）を配置し、覆工コンクリートの性状を考慮して引張補強筋を配置しない設計の梁供試体を用いて曲げ載荷試験を実施し、その再現解析により FRP-PCM 工法のモデル化手法を検証した。実験ケースは、格子筋断面積の異なる 2 種類のグリッド（CR6 および CR8）で補強したケースと無補強の計 3 ケースとした。

本試験で使用する供試体の構造図を Fig. 6 に、再現解析モデル図を Fig. 7 に示す。供試体は幅 200mm、長さ 2000mm、高さ 300mm としてコンクリートを木製の型枠に流し込み、気中養生を行う。供試体作成時に、直径×高さ:100mm×200mm の円柱供試体を作成して圧縮試験および割裂試験を実施し、コンクリート強度を計測した。Table 3 にコンクリートの物性値を、Table 4 に補強工の物性値を示す。FRP グリッドは、CR6 および CR8 の物性値を用いた。

FRP-PCM 工法による補強は、14 日間の気中養生を行った梁供試体の下部を表面処理した後に FRP グリッドを配置し、アンカーにより固定する。そして、プライマーを塗布・乾燥させ、PCM により増厚補強する。なお、本試験では補強範囲が比較的狭い範囲であることから、コテ塗り施工により PCM と供試体との密着性を確認しながら増厚することとした。その後、さらに 14 日間の気中養生（合計 28 日養生）を行う。本試験では、補強工の早期端部剥離を防止するために、供試体の左右両端まで補強を施し、端部でアンカー固定を行う端部定着とした。載荷点は供試体中央部から左右 200mm の 2 点とし、たわみ計測点は供試体の中央下部とした。

解析手法は三次元有限差分法解析（コード：FLAC3D）



$\tau$  : Shear stress of bonding surface  
 $\sigma_n$  : Normal stress of bonding surface

Fig. 8 Overview of Liner element<sup>8)</sup>

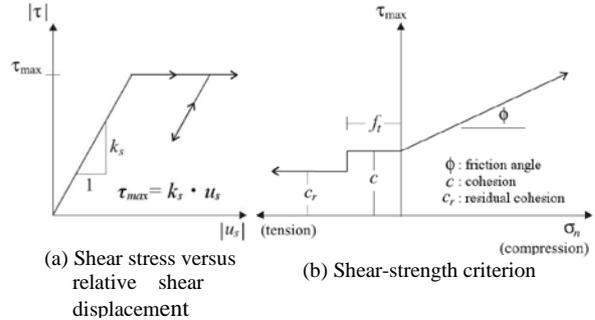


Fig. 9 Shear-directional behavior for Liner element<sup>8)</sup>

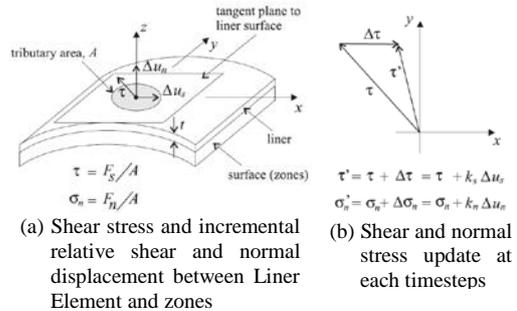


Fig. 10 Idealization of interface behavior at a Liner node<sup>8)</sup>

を用いることとした<sup>8)</sup>。解析モデルは供試体と同寸法とし、コンクリートは完全弾塑性体のメッシュでモデル化した。また主鉄筋は軸力や付着強度を考慮できる Cable 要素で、FRP-PCM 工法は合成部材として Liner 要素でモデル化した。なお、帯筋は曲げに対して作用しないものとしてモデル化していない。解析ケースは、曲げ試験と同様の 3 ケースとした。

### 4.2 補強工モデルの概要と力学特性

トンネル補強に関する既往研究<sup>9)</sup>において、本工法のような内面補強工をモデル化する際、曲げに対して抵抗する等方弾性体の面要素（Shell 要素）がよく用いられてきた。しかし、内面補強工による補強効果は既設の覆工コンクリートとの付着面強度に依存すると考えられる。そのため、本研究では付着面の剛性および強度を持ち、付着面の破壊・降伏を考慮できる等方弾性体の面要素（Liner 要素）によりモデル化することとした。

Liner 要素は面に作用する荷重のみでなく、付着面のせん断挙動を考慮することができ、付着面のせん断剛性や強度定数、材料の強度定数を有するため付着面の剥離や補強材料の降伏の判定、作用応力の計算などが可能なモデルである。Fig. 8 に Liner 要素の概要を、Fig. 9 にせん断方向の境界面挙動を示す。図に示すように、メッシュ

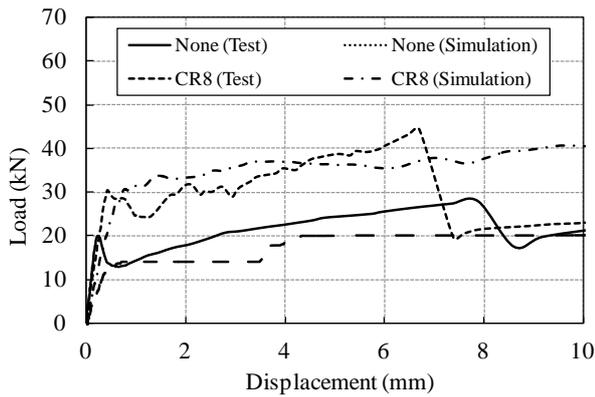


Fig. 11 Comparison between the results of test and simulation of bonding surface

に付着した Liner 要素で表現した付着面は完全弾塑性挙動を示し、付着面に作用するせん断応力はせん断剛性とせん断変位により算出され、付着面のせん断による剥離も判定することができる。境界面に作用する荷重および応力増分は Fig. 10 に示す関係式で計算される。

#### 4・3 試験結果と再現解析結果の比較

Fig. 11 に結果の一例として無補強のケース (None) と CR8 による補強ケースの実験結果および解析結果 (荷重-たわみ曲線) の比較を示す。試験結果に着目すると、FRP-PCM 工法による補強を行うことで最大荷重が約 2 倍程度に上昇しており、たわみ量が 0.3mm 程度に達した時点で供試体に亀裂が生じて弾性挙動から塑性挙動に移行していることが分かる。数値解析ではこれらの変形挙動を大まかに再現することができており、降伏時の荷重値などにおおむね合致している。初期弾性変形時の剛性は実験値よりも低くなっているが、これは帯筋のモデル化を行っておらず、モデル全体の剛性が相対的に低くなっていることが原因であると考えられる。

また、試験結果では無補強のケースにおけるたわみ量が約 8mm、CR8 による補強でのたわみ量が約 7mm に達した時点で荷重がピーク値となり、その後荷重が下がっている。無補強の場合、亀裂が供試体の上面に達した後に荷重の低下がみられる。それに対し、数値解析では塑性変形後における荷重のピークが明確に現れていない。これは前述のとおり完全弾塑性体のメッシュでモデル化した連続体解析であるため、亀裂の生成と進展による破壊後の荷重低下をうまく再現できなかったことが原因である。

このように、解析手法の特性上再現できない箇所があるものの、変形挙動の傾向や降伏前の曲げ耐力などにおいて概ね一致しており、Liner 要素による FRP-PCM 工法のモデル化が妥当なものであるとことを検証できた。この結果を基に、Liner 要素を用いて矢板工法により施工されたトンネルにおける補強シミュレーションを実施する。

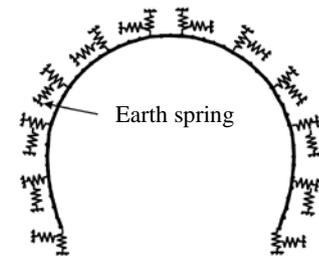


Fig. 12 Example of frame model<sup>9)</sup>

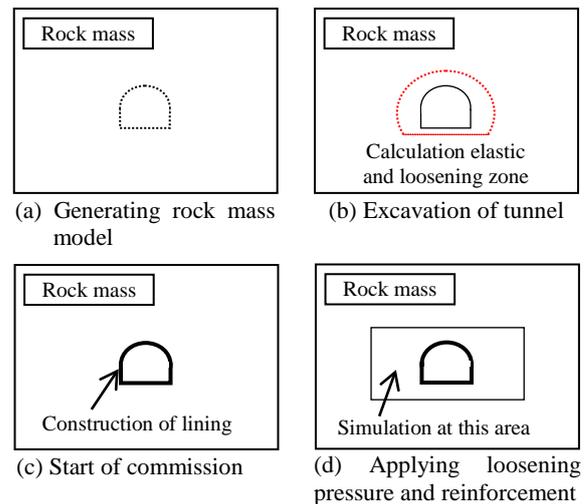


Fig. 13 Process of generating simulation model

## 5 緩み圧を考慮したトンネルにおける補強効果の評価

### 5・1 解析モデルの概要と物性値の設定

FRP-PCM 工法の補強対象となるトンネルの多くは矢板工法により施工されており、覆工背面に空洞を有していることが多く報告されている。このようなトンネルの場合、掘削や時間経過に伴い塑性域や緩み領域が進展し、緩み圧が覆工に作用することとなり、結果として覆工に亀裂が発生して、背面の岩塊やコンクリート片が剥落・落下するなど、突発的な崩壊現象の発生に繋がる。

実務におけるトンネルの補強設計では、Fig. 12 に示すように覆工コンクリートのみをフレームでモデル化し、周辺地山を地盤バネとして地山反力係数によりモデル化する骨組み解析<sup>10)</sup>を用いるのが一般的とされている。しかし、この解析手法では、地山と覆工との相互作用を考慮することができず、変形に伴う覆工への作用応力や掘削後の周辺材料の塑性化といった影響を考慮することができないなどの欠点がある。そこで本研究では連続体解析である有限差分法を用いて Fig. 13 に示すモデル化の流れに沿って解析モデルを作成することとした。本解析手法では、地山と覆工を有限要素メッシュでモデル化するため、掘削や周辺岩盤の塑性化に伴う覆工への作用応力が実現象と同様に再現できると考えられる。曲げ載荷試験の再現解析と同様に解析コードは FLAC3D を使用した。

まず、(a) に示すように対象とするトンネルの地山モデルを作成し、初期応力状態を再現した。その後、(b)

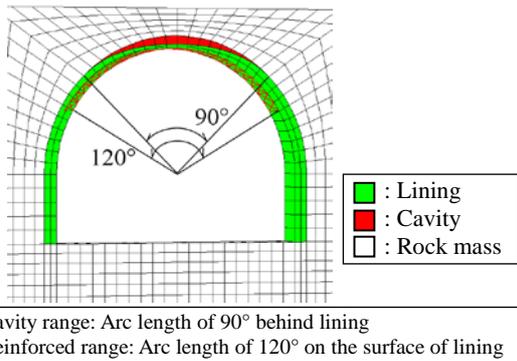
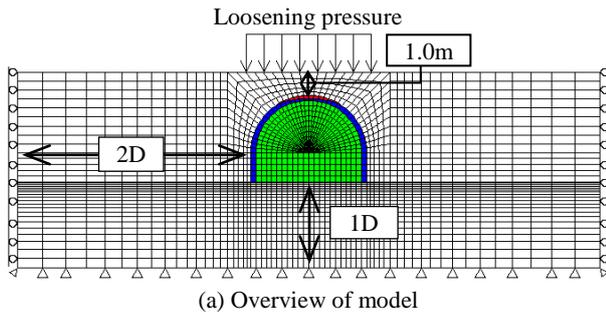


Fig. 14 Simulation model of a rock mass containing a tunnel

のようにトンネル（掘削半径：D=10m）を掘削する．掘削後の切羽進行および（c）に示す覆工の支保効果は応力解放法により表現し，供用開始の状態とした．覆工厚さは最大 45cm とし，天端の覆工厚さは道路トンネル維持管理便覧<sup>11)</sup>における突発性崩壊に対する健全度評価区分に基づいて最も危険な厚さとし，天端空洞厚が 30cm となるように 15cm（判定区分：3A）とした．その後，（d）に示すように供用開始後に緩み圧が覆工に作用するものとし，解析領域を天端から 1m のかぶりの範囲となるように切り出した．そして変位をリセットし，FRP-PCM 工法と背面空洞に対する裏込め注入工による補強を行い，モデル上面のトンネル掘削幅の範囲に上載圧として緩み圧を作用させることとした．

上記の手順で作成した解析モデルを Fig. 14 に示す．緩み圧はトンネル標準示方書<sup>12)</sup>より，トンネル掘削幅 D=10m において生じるとされる緩み高さである 3m, 6m, 1D とし，各緩み高さに相当する土圧を算出して求めた．地山，覆工コンクリート，裏込め注入工は Mohr-Coulomb モデルの弾塑性体とし，モデルの下端をピン境界，左右両端をローラー境界，上端を非拘束状態の平面ひずみ状態として外力は自重および緩み圧の弾塑性解析により計算した．FRP-PCM 工法は前章で示した Liner 要素によりモデル化し，背面空洞の範囲はトンネル中央から 90° とし，補強範囲は既往研究<sup>13)</sup>より空洞範囲を十分に補うことのできる 120° とした．

解析ケースは FRP グリッドの種類，地山等級，緩み高さにより設定し，Table 5 に示す．本研究で用いる岩盤物性は実務における FRP-PCM 工法の設計に向けて，土木学会等の適用基準より C 級・D 級の岩種を対象とした．

Table 5 Simulation cases

Crown lining thickness (cm)	Grid Type	Loosened Height	Rock Class
15.0	None	3m	CII
	CR4	6m	DI
	CR6	1D	DII
	CR8		

Table 6 Properties of materials

Property	Rock (CII)	Rock (DI)	Rock (DII)	Lining	Back-fill
$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	22.6	21.6	20.6	24.0	9.81
$E$ (MPa)	980	490	147	24500	12.0
$\nu$	0.3	0.35	0.35	0.2	0.13
$c$ (MPa)	0.98	0.49	0.20	5.21	0.5
$\phi$ (deg)	40	35	30	35	10
$\sigma_t$ (MPa)	0.23	0.14	0.07	2.0	0.20

Table 7 Loosening pressure

Loosened height	CII	DI	DII
3m	67.62	64.68	61.74
6m	135.24	129.36	123.48
1D	225.40	215.60	205.80

Unit: kPa

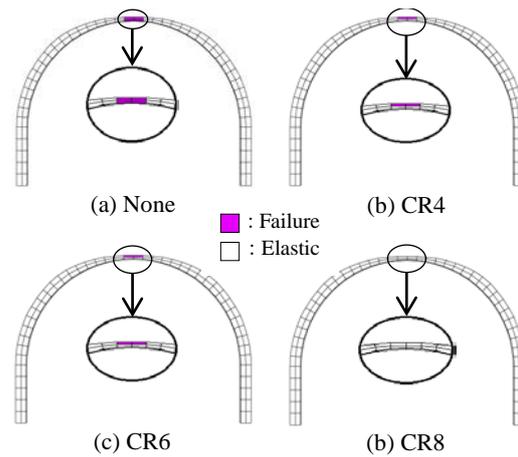


Fig. 15 Failure of lining (DI class, 1D)

裏込め材料としては可塑性エアモルタル，セメントミルクなどが用いられるが，覆工コンクリートの補修と並行して行う場合には硬化速度の速いウレタン系材料（たとえば文献<sup>14)</sup>）が用いられることが多い．そこで，本研究では裏込め材料としてウレタン系の材料を模擬することとして物性値を設定した．解析に用いた物性値を Table 6 に示す．補強工物性値は Table 4 に示す物性値を使用した．また各地山等級における緩み高さに相当する緩み圧を Table 7 に示す．

## 5.2 FRP-PCM 工法による覆工破壊抑制効果の検討

解析結果の例として，DI 級地山・緩み高さ 1D における解析結果について考察する．Fig. 15 に覆工の破壊領域図を示す．Fig. 15 より，無補強時には覆工天端部において破壊が生じていることが分かる．CR4, CR6 により補強を行った場合には内空側の破壊を抑制する結果となっている．内空側の破壊は引張破壊によるものであるの

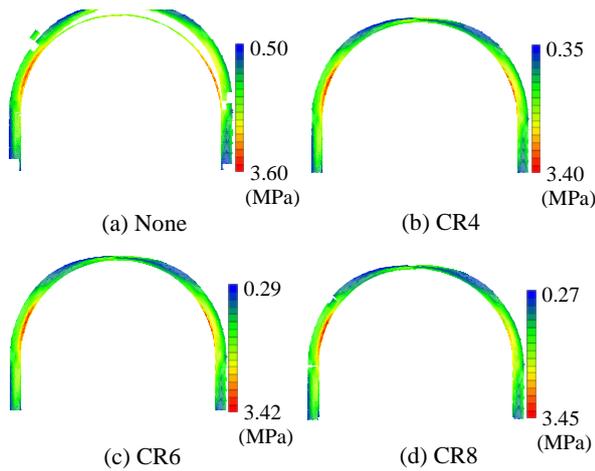


Fig. 16 Axial stress contour of lining

Case		None	CR4	CR6	CR8
Crown	inner	1.779	1.471	1.421	1.411
	outside	3.598	2.779	2.450	2.317

(MPa)

に対し、背面側の破壊は緩み圧の作用に伴う圧力による破壊であると考えられる。FRP-PCM 工法は引張補強工であるため、内空側の破壊が抑制されたが、背面側の破壊抑制までは発揮できなかったと考えられる。CR8 により補強した場合には、破壊を完全に抑制していることが分かる。これは、CR8 の格子筋断面積が最も大きく、3 パターンの中で剛性が最も高いため、緩み圧による変形を抑制し、覆工天端部の圧縮応力の軽減に作用したものと推測される。

そこで、各ケースにおける覆工に作用する軸応力を比較する。Fig. 16 に覆工に作用する軸応力コンター図 (+: 圧縮, -: 引張) を、Table 8 に覆工天端部の軸応力値を示す。Fig. 16 より、いずれのケースにおいても肩部内空側に大きな圧縮応力が作用していることが分かる。これは、緩み圧によりトンネル上半部分が沈下し、肩部の内空側で大きな曲げ圧縮が生じたためであると考えられる。これに伴いトンネルの天端中央部においても軸応力が大きくなっていることが確認できる。Table 8 より、FRP-PCM 工法による補強を行うことにより内空側で最大 21%、背面側で最大 36% の応力低減効果が得られている。損傷した覆工の断面増加率としては約 55% の効果が得られる結果となる。

### 5.3 付着面安全性の検討

Fig. 17 に補強工付着面のせん断応力コンター図を示す。いずれのケースにおいても補強工端部ではせん断応力が大きく作用していることが分かる。上述のように肩部で曲げ圧縮が生じ、補強工端部の付着面のせん断応力が大きくなると考えられる。このせん断応力が大きく生じている箇所では付着面のせん断剥離が生じる可能性があると考えられる。

付着面の破壊状態を詳細に調べるために、付着面にお

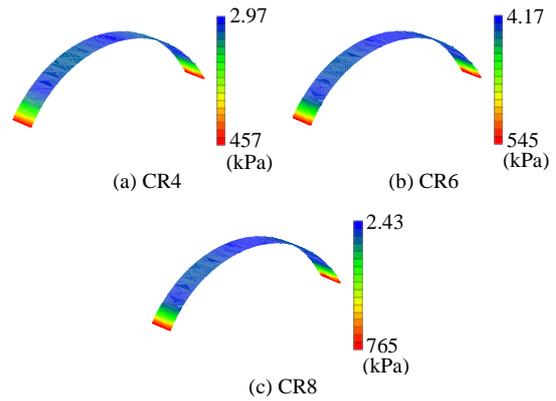


Fig. 17 Shear stress contour of bonding surface

Loosened height (m)	3	6	1D
CR4	18.882	7.743	4.369
CR6	15.776	6.509	3.687
CR8	11.294	4.653	2.643

(DI class)

ける安全率を算出した。付着面安全率  $f_s$  は補強工と覆工との付着面に生じるせん断応力値と付着面に作用する垂直応力および付着面強度定数  $c$ ,  $\phi$  を用いて以下の式 (2) より算出する。

$$f_s = \frac{\tau_{\max}}{\tau_c} \quad (2)$$

$$\tau_{\max} = c + \sigma_{\max} \tan \phi \quad (3)$$

ここで、 $\tau_{\max}$  は式 (3) で算出される最大せん断応力、 $\tau_c$  は補強工付着面に作用するせん断応力値、 $\sigma$  は付着面に作用する最大垂直応力、 $c$ ,  $\phi$  は付着面の強度定数である。

Table 9 に算出した付着面安全率の値を示す。グリッドの種類に着目すると、格子筋断面積の大きいグリッドほど付着面の安全率が低くなっていることが分かる。これは、格子筋断面積の小さいグリッドを用いた場合に補強工の剛性が比較的覆工の剛性と近い値となっているので、覆工の変形に追従しやすく、補強工端部に生じる付着面せん断応力が小さくなる傾向にあると考えられる。いずれのケースにおいても付着面安全率は 2.0 を超える結果となっており、緩み圧のみによる変形での付着面の剥離は生じにくいといえる。しかし本解析では緩み圧に起因する突発的破壊のみを考慮したものであるため、時間経過による塑性圧の増加や周辺岩盤・覆工コンクリートの劣化などその他の要因が混在する場合にこの付着面安全率はさらに小さくなる可能性があるため、十分な定着長の確保、あるいは補強範囲をスプリングライン付近から上半部分にする必要があると考えられる。

これらの結果から、FRP グリッドによる補強を行う場合、必ずしも補強工の剛性が高いほど高い補強効果が得られるというわけではなく、地山状態や想定される緩み領域の大きさ、覆工コンクリートの劣化状態などを考慮

した上で最適な補強材料の選定が必要であるといえる。

## 6 結 言

本研究では矢板工法により施工された背面空洞を有するトンネルモデルを対象として、FRP グリッドを用いた PCM 吹付け工法の緩み圧に起因する覆工崩壊に対する補強効果について、室内実験および数値解析を用いて評価した。以下に得られた知見を示す。

(1) FRP-PCM 工法により補強した覆工模擬供試体を用いた一面せん断付着強度試験を行い、補強工のせん断付着性能は材料特性値である付着強度を十分満たすことを確認した。また、一面せん断試験より付着面強度および付着面剛性を算出し、それらを数値解析に反映して、せん断付着性能を考慮した補強解析を実施した。

(2) 対象とした矢板工法トンネルの覆工状態を想定した梁供試体の2点漸増曲げ載荷試験とその再現解析を実施することで、Liner 要素を用いた本工法のモデル化の妥当性を評価した。本研究で用いた解析手法が連続体解析であるため、亀裂の発生と進展に起因する供試体破壊後の荷重低下などの点に対する表現はできていないが変形挙動や曲げ耐力などについて良好な一致が見られ、FRP-PCM 工法のモデル化の妥当性を検証できた。

(3) 矢板工法により施工されたトンネルにおける緩み圧を考慮したモデル化手法を提案し、補強解析を実施した。連続体解析による緩み圧を上載圧として作用できるモデルの提案により、実務で用いられている骨組み解析では一般的に考慮できない覆工コンクリートと地山との相互作用を考慮することが可能となり、骨組み解析と同様に任意の緩み圧を作用させることが可能となった。

(4) 補強解析の結果、FRP-PCM 工法による補強を行うことで覆工の破壊を抑制し、軸応力を軽減する結果となった。しかし、高い規格のグリッドによる補強の場合、補強工端部の付着面せん断応力が高くなり、付着面の安全率も低くなる傾向がある。そのため、十分な定着長の確保が必要である。また、補強対象の地山等級や想定される緩み高さに応じた補強材料および補強範囲の選定が必要である。

## 謝 辞

本研究を進めるにあたり、FRP グリッド工法研究会の研究助成をいただきました。ここに感謝を申し上げます。

## 参 考 文 献

- 1) T. Noguchi, F. Tomozawa, H. Lee, K. Shouji, "Flexural reinforcement effect by carbon fiber sheet in RC beam which modeled the rebar corrosion", In Proceedings of the Japan Concrete Institute, Vol.18, No.1, pp.1077-1082 (1996).
- 2) Committee on rock mechanics J.S.C.E, "Tunnel Deformation Mechanism", pp-10-17 (2003) Japan Society of Civil Engineers.

- 3) S. Nakamura, K. Yamaguchi, Amiruddin A. Arwin, K. Taniguchi, "Effect of bending reinforcement of RC beam using CFRP grid by contacted arrangement two layers by PCM shotcrete method", Concrete Engineering, Vol.31, No.2, pp.1429-1434 (2009).
- 4) H. Watanabe, S. Hino, K. Yamaguchi, Amiruddin A. Arwin, "Experimental research of bond strength in CFRP grid contacted two layers" Concrete Engineering, Vol.31, No.2, pp.1411-1416 (2009).
- 5) Technical Committee on FRP grid method, "Reinforcement method by FRP grid for concrete structure; Manual of design and construction (draft)", (2007) Technical Committee on FRP Grid Method.
- 6) Y. Jiang, J.Xiao, Y. Tanabashi, T. Mizokami "Development of an automated servo-controlled direct shear apparatus applying a constant normal stiffness condition", International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, Vol. 41, pp.275-286 (2004)
- 7) Japan Geotechnical Society, "Soil Test", pp.121-134 (2001)
- 8) Itasca Consulting Group, Inc. "FLAC3D User's manual: Structural Elements", pp.165-168 (2002) Minesota, USA.
- 9) Y. Jiang, Y. Higashi, Y. Tanabashi, S. Sugimoto, "Analytical examination in various effects of reinforcement method to displacement of road tunnel", the Symposium on Underground Space, Vol.15, pp.177-182 (2010) Committee on Underground Space J.S.C.E.
- 10) K. Yashiro, Y. Kojima, M. Ichiida, R. Sano, "Frame analysis of tunnel lining considering the defect", In Proceedings of the 56th Annual Conference of the Japan Society of Civil Engineers, CD-ROM, pp.34-35 (2000) Japan Society of Civil Engineers.
- 11) Japan Road Association, "Road tunnel maintenance manual", pp.124-137, (1993) Tokyo.
- 12) Japan Society of Civil Engineers, "Standard Specifications for Tunneling: Mountain Tunnels", pp.294-295 (2006) Tokyo.
- 13) Y. Higashi, Y. Jiang, K. Ishida, K. Taniguchi, D. Koga, Y. Yoneda, "Study on reinforcement effect of FRP-PCM method for tunnel constructed by conventional method", In Proceedings of The 33rd West Japan Symposium on Rock Engineering, pp.39-46 (2012).
- 14) M. Sakamoto, "Existing road tunnel backfill grouting method, set-form method, technical document", (2012) Society for the Chemical Form.