

## FRP グリッドを用いたトンネル覆工補強効果の評価

長崎大学工学部 学生会員 ○大隈 祥平  
 長崎大学大学院 フェロー会員 棚橋 由彦  
 さとうベネック(株) 正会員 石田 耕生 竹内 一博

長崎大学大学院 学生会員 東 幸宏  
 長崎大学工学部 正会員 蔣 宇静  
 日鉄コンポジット(株) 正会員 谷口 硯士  
 (株)エイト日本技術開発 正会員 米田 裕樹

## 1. 研究の目的・背景

近年、供用年数が30～40年以上のトンネル構造物の劣化現象が全国的に顕在化し、内空断面は建築限界の近いトンネルの安全な維持管理における様々な手法が開発されている。その中で、内面補強工として内巻工、炭素繊維シート接着工、鋼板接着工等が挙げられる。しかし、それらには漏水による鋼板の腐食や、現場環境の厳しさによる施工の手間、施工期間の長さなどの問題点がある。それらの問題点を踏まえ、より軽量で腐食がなく、施工性が高い補強材料として、FRP グリッドが開発された。そこで本研究では、この材料を実用化するにあたって、FRP グリッドを使ったせん断付着強度試験を行う。その結果より、補強面における FRP グリッドが与える影響やその状態、特徴を把握する。また、実験の結果を数値解析に反映させ、地山の強度低下時間依存性モデル(Burger-MC 劣化モデル)を用いてトンネル供用後の経時的変状とトンネル補強後の変状解析を行うことで FRP グリッドを用いた PCM 吹付け工法による変位抑制の効果を評価する。

## 2. FRPせん断付着強度試験

## 2.1 試験材料の特性と試験概要

FRP (Fiber Reinforced Plastics) は、耐腐食性、耐薬品性に優れていて、鋼材より軽量な材料である。高強度ポリマーセメントモルタル (吹付け用；以下 PCM) は、塩害、中性化、凍結融解作用に強く、耐候性に優れている材料である。これらの補強材料を使い、図-1のような供試体 (幅 100mm×長さ 200mm×高さ 100mm、28 日養生) を作製し、デジタル制御型一面せん断試験機を使って、FRP せん断付着強度試験を行う。実験ケースは表-1に示す。供試体作製のばらつきを考慮して、1 ケースにつき、2 回のデータを取得する。これらのケースはすべて同じ条件下(せん断速度 0.2mm/min、垂直応力 1.0MPa)で行う。

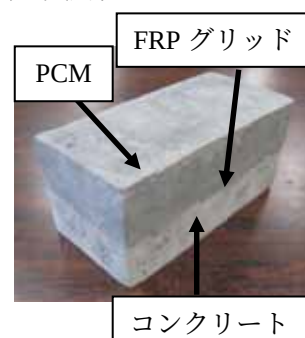


図-1 せん断試験用供試体

表-1 実験ケース

| ケース                    | 1  | 2   | 3    | 4    |
|------------------------|----|-----|------|------|
| グリッド                   | なし | CR4 | CR6  | CR8  |
| 断面積 (mm <sup>2</sup> ) | —  | 6.6 | 13.2 | 26.4 |

## 2.2 試験結果

図-2 に試験結果の一例として、ケース 4(CR8)のせん断変位 - せん断応力関係を示す。2 回分の平均最大せん断応力は 2.65MPa となり、PCM の必要物性である付着強度約 2.0MPa<sup>1)</sup> より大きい値となった。最大せん断応力とそれに対応するせん断変位を用いればせん断剛性を求めることができる。全ケースのせん断付着強度試験結果を整理すると、図-3 のようになり、グリッドの断面積が広くなるにつれ、最大せん断応力が小さくなるという予測が得られ、PCM とコンクリートの接着面積の広さと強度が比例関係にあると思われる。しかし、ケース 4(CR8)では、一番断面積が広いにも関わらず、他のグリッドケースより高い最大せん断応力が現れた。これは供試体のサイズが小さく品質が不均一であることと、コンクリート表面を削ったために接着面の間にPCMが入り込み、モルタルとコンクリートの接着面積が広がったためと思われる。

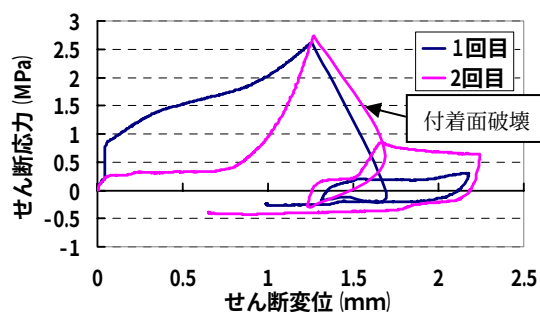


図-2 せん断応力 - 変位図(CR8)

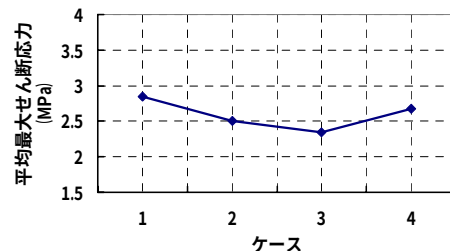


図-3 最大せん断応力のケース比較

### 3. 有限差分法によるFRP補強効果の評価

#### 3.1 解析概要

トンネル変状は、周辺地山の経年劣化が原因の 1 つであるため、本研究では時間の経過に伴い岩盤強度が低下するBurger-MC劣化モデルを用いる。このモデルはKelvinモデル、Maxwellモデル、Mohr-Coulomb(MC)モデルから成る。MCモデルの粘着力 $c$ と摩擦角 $\phi$ を時間と共に低下させ、岩盤の強度劣化を考慮することができるように修正したモデルをBurger-MC劣化モデル<sup>2)</sup>として図-4に示す。図中の $R_{thr}$ は岩盤の応力状態限界係数であり、応力状態係数 $R$ が $R_{thr}$ 値を超えると劣化を始める。 $\omega_c$ 、 $\omega_\phi$ は粘着力と内部摩擦角の劣化率であり、両者の経時変化は $R$ に比例する<sup>3)</sup>。

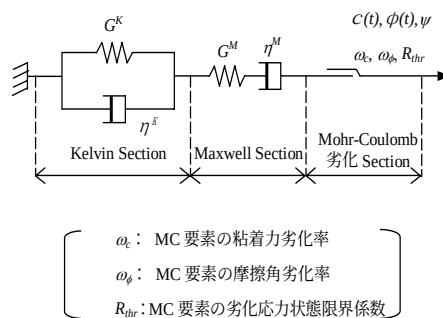


図-4 Burger-MC劣化モデル<sup>2)</sup>

表-2 補強工物性値

| 補強材      | 弾性係数<br>(MPa)       | ポアソン比 | FRP 厚さ<br>(mm) | せん断剛性<br>(MPa/m) |
|----------|---------------------|-------|----------------|------------------|
| PCM のみ   | 2.6×10 <sup>5</sup> | 0.3   | —              | 0.31             |
| FRP(CR4) | 1.0×10 <sup>6</sup> |       | 2.0            | 0.22             |
| FRP(CR6) |                     |       | 4.0            | 0.24             |
| FRP(CR8) |                     |       | 5.0            | 0.27             |

#### 3.2 解析モデル

せん断付着強度試験結果と中村らの既往研究<sup>4)</sup>の結果より解析を行う際に必要となるパラメータを算出した。表-2に補強工(FRPとPCM)のパラメータを示す。図-5に解析モデルの概略図を示す。この断面は補強工解析モデルの既往研究<sup>5)</sup>に用いられたものである。補強工はFRPとPCMの複合材料と考え、引張応力に優れ、曲げひび割れの開口を抑制する効果を持つことから、実際の厚さを反映したシェル要素でモデル化した。トンネル掘削直後から供用後5年の内空変位量を補強なし、CR4、CR6、CR8の4ケースで比較する。なお、供用後3年を施工時期とする。

#### 3.3 変状解析結果

解析結果を図-6に示す。これを各ケースの内空変位量について比較し、検討する。補強なしと比べ、全てのグリッドにおいて補強効果が現れている。中でも一番断面積と厚さのあるCR8がもっとも効果が現れており、内空変位量を約24.6%抑制していることが分かった。この結果から、内空変位量においての変状抑制効果は得られたと思われる。

#### 4. おわりに

本研究では、FRPグリッド各ケースの断面積とせん断付着強度との関係から、補強効果を評価するために必要なせん断付着強度、せん断剛性のパラメータが得られた。また、数値解析によって、FRPグリッドを用いたPCM吹付け工法により、内空変位において変状抑制効果が得られることが確認できた。今後、様々な条件下において他の補強工と比較し、施工性とコストから最適な補強工法の提案を目指していく。

【参考文献】1) FRPグリッド工法研究会：FRPグリッド増厚・巻立て工法によるコンクリート構造物の補修補強（設計・施工マニュアル）（案），2007。2) Guan Z., Jiang Y.,

Tanabashi Y. and Huang H.: A new rheological model and its application in Mountain Tunnelling, Tunnelling and Underground Space Technology, Vol.23, No.3, pp.292-299, 2008.3) 里優, 竹田直樹, 亀村勝美：強度の時間依存性に着目した岩盤の解析, 第18回土質工学研究発表会論文概要集, pp.817-820, 1983。4) 中村智, 山口浩平, Amiruddin A. Arwin, 谷口硯士：PCM吹付け工法による2層接触配置されたCFRPグリッドを用いたRCはりの曲げ補強効果, コンクリート工学年次論文集, Vol.31, No.2, pp.1429-1434, 2009。5) 東幸宏他：時間依存性を考慮した道路トンネルの変状予測と補強工効果の解析的評価, 土木学会西部支部研究発表会講演概要集(CD-ROM)III-86, 2009。

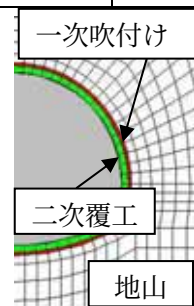
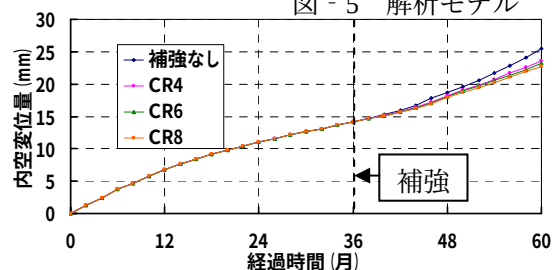
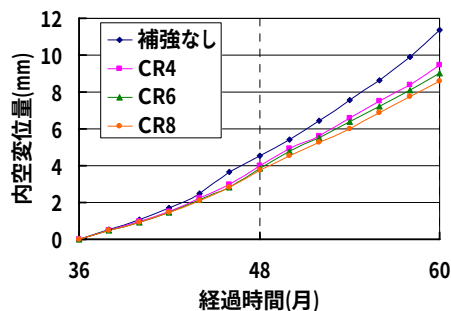


図-5 解析モデル



(a) 併用後の比較



(b) 補強後の比較

図-6 内空変位の経時変化