

# FRP グリッドを用いた PCM 吹付け工法による在来トンネルの補強効果の解析的評価

長崎大学大学院 学生会員 大隈 祥平 長崎大学大学院 フェロー会員 蔣 宇静  
 長崎大学大学院 正会員 李 博 日鉄コンポジット(株) 正会員 谷口 碩士  
 さとうベネック(株) 正会員 石田耕生 竹内一博 (株)エイト日本技術開発 正会員 米田裕樹  
 長崎大学大学院 学生会員 東 幸宏

## 1. はじめに

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、合理的な維持管理のための様々な補修・補強手法が求められている。そのため、内面補強工として内巻工、炭素繊維シート接着工、鋼板接着工等が開発・適用されているが、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。そこで、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。しかし、トンネル補強工法としての実例は少なく、補強基準は明らかにされていないのが現状である。

そこで本研究では、既往の実験的研究<sup>1)</sup>により得られたパラメータを数値解析に反映させ、数値解析による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効果を評価することを目的とする。

## 2. 補強工法の特徴

FRP(Fiber Reinforced Plastic)グリッドを用いたポリマーセメントモルタル(以下、PCM)吹付け工法による増厚工法は FRP が高強度、軽量で施工性に優れ、断面形状や重量の面において既設構造物に与える影響が小さく腐食しないため、橋梁やボックスカルバートなどの補強において広く用いられている。また近年では、道路トンネルの高齢化により劣化損傷した覆工の補修・補強としても本工法が用いられている。

## 3. 数値解析による補強効果の評価

### 3.1 解析モデルの概要

解析モデルは、在来工法で造られたトンネル(掘削径約 10m)を対象とし、周辺地山は弾塑性体によりモデル化した。「道路トンネル維持管理便覧」等を参考に、天端の覆工コンクリートが 45cm 未満、背面空洞厚が 30cm 以上であり、健全度判定区分<sup>2)</sup>の一番危険な 3A の状態とした。全断面掘削後に覆工コンクリートの打設を行い、

背面空洞に対する裏込め注入の施工と同時に本工法による内面補強を行った。既往研究<sup>3)</sup>より、解析を行う際に必要となるパラメータを算出した。トンネルモデルに適用する補強材料は高強度 FRP グリッド CR4、6、8 の 3 種類、PCM は高弾性型とした。表 2 に入力物性値を示す。内面補強工のモデル化について、材料の降伏と付着面強度、付着面剛性を考慮できる面要素(Liner 要素)を用いることにした

表-1 解析ケース

ケース	グリッド断面積 (mm <sup>2</sup> )	地山強度比 (Srp)	補強範囲	補強時期 (供用開始)
CR4	6.6	0.25 0.5 1.0 2.0	上半	10 年後
				20 年後
			扇形	10 年後
				20 年後
CR6	13.2	0.25 0.5 1.0 2.0	上半	10 年後
				20 年後
			扇形	10 年後
				20 年後
CR8	26.4	0.25 0.5 1.0 2.0	上半	10 年後
				20 年後
			扇形	10 年後
				20 年後

表-2 入力物性値

項目	地山	覆工	裏込め材	PCM	CR4	CR6	CR8
変形係数(MPa)	1000	2800	1200	26000	100000		
ポアソン比	0.3	0.2	0.13	0.2			
粘着力(MPa)	0.8	5.9	0.5	2.22			
内部摩擦角(deg)	30	40	10	1.77			
引張強度(MPa)	0.12	0.59	0.2	4.6	1400		
せん断剛性(MPa/m)	—				5.30×10 <sup>3</sup>		

3). なお、補強範囲はスプリングライン(S.L.)より上半補強と扇形補強の2種類とし、補強時期は供用開始後10年、20年、解析期間はトンネル構造物の寿命とされる50年間と設定した。この補強条件で地山強度比(Srp)を0.25,0.5,1.0,2.0と変化させ、補強効果を比較する。トンネル解析モデルの概要図を図-1に、補強工モデルを図-2に示す。

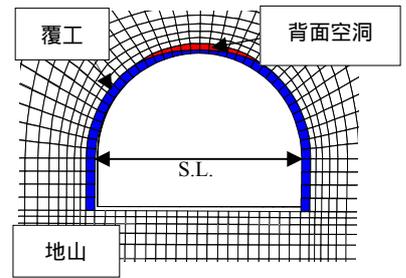
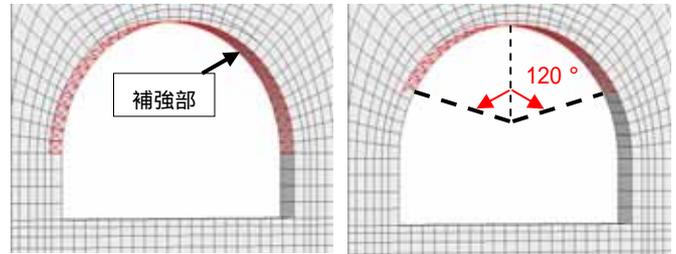


図-1 解析モデル概要図

### 3.2 解析結果と考察

図-3に供用開始10年後にCR6による上半補強のS.L.における内空変位の比較、図-4に供用開始20年後に補強された地山強度(Srp)別の内空変位の比較を以下の式(1)を用いて計算した相対変位量 $R_h$ で示す。図-5にグリッドタイプ別の各補強時期について、以下の式(2)を用いて各経過年での変位抑制率を算出し、上半補強のケースにおける変位抑制率 $R_a$ と扇形補強における変位抑制率 $R_s$ との比 $R_s/R_a$ により比較したものを示す。



(a)上半補強 (b)扇形補強

図-2 補強工モデル図

$$R_h = u / (HD / E) \quad (1) \quad R = \frac{u_T - u_r}{u_{rT} - u_r} \quad (2)$$

ここで、 $u$ は変位量、 $\gamma$ は単位体積重量、 $H$ は土被り、 $D$ は掘削半径、 $E$ は変形係数、 $u_T$ は $T$ 年時点での変位量(無補強)、 $u_r$ は補強工施工後における変位量、 $u_{rT}$ は $T$ 年経過後での変位量(補強時)である。

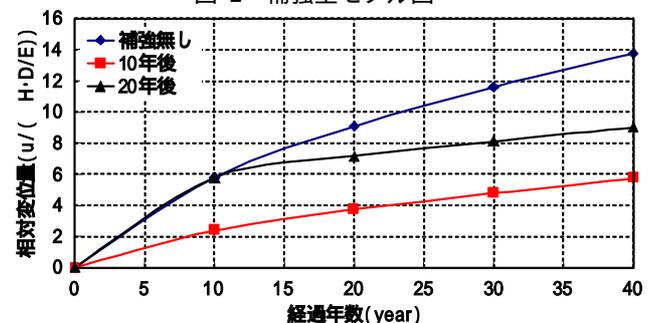


図-3 S.L.における内空変位比較 (CR6 上半, Srp=0.5)

図-3より、補強工が施工された後、変形量が大きく抑制されている。施工時期で比較すると、変位抑制率は10年後補強が約37%、20年後補強が約22%である。

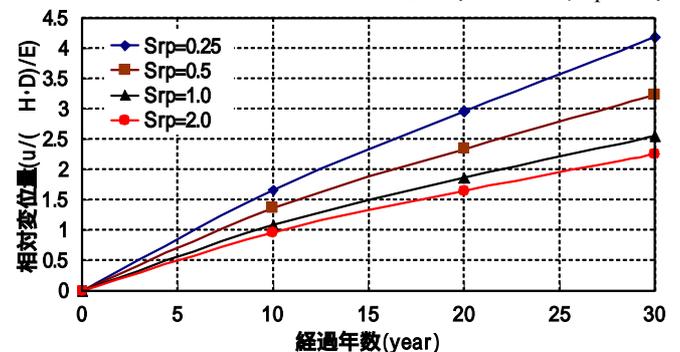


図-4 地山強度比別の内空変位比較 (CR6 上半)

図-4より、地山強度比が大きくなるにつれ、抑制効果が高くなるが、その効果の割合が小さくなっている。つまり、地山強度が高くなるにつれ、抑制効果の割合は減少する。

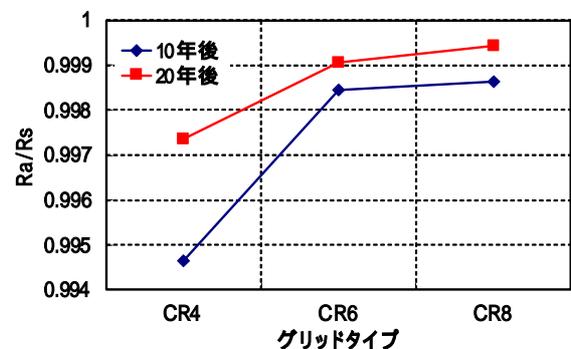


図-5 グリッドタイプ別の内空変位抑制率比較(Srp=0.5)

図-5より、全ケースとも1に近い値であることから、どのグリッドもほぼ同じ補強効果が得られている。

以上の結果より、実現場の状態や施工コストなどに応じて、最適な補強パターンを選別することが可能である。

### 4. おわりに

本研究では、在来工法で施工された背面空洞のあるトンネルモデルを対象にFRPグリッドを用いたPCM吹付け工法における施工時期、グリッドタイプ、地山強度比、補強範囲による変位抑制効果の違いを数値解析により明らかにした。今後は覆工経年劣化を考慮した解析を行い、各条件下におけるトンネルの最適な補強パターンを確立していく。

【参考文献】1)上野竜志ほか：トンネル補強材としてのFRPグリッドの付着強度と補強効果に関する考察，土木学会西部支部研究発表会講演概要集，pp.429-430,2011. 2)(社)日本道路協会編：道路トンネル維持管理便覧，1993.11 3)東幸宏ほか：FRPグリッドを用いたPCM吹付け工法による道路トンネル補強効果に関する解析的評価，土木学会西部支部研究発表会講演概要集，pp.427-428,2011.