

FRP-PCM 工法のトンネル構造物における補強効果に関する解析的評価

長崎大学大学院 学生会員 ○東 幸宏 平田 裕也
長崎大学大学院 フェロー会員 蔣 宇静 正会員 李 博
(株)さとうベネック 正会員 石田 耕生 竹内 一博
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 古賀 大陸

1. はじめに

近年、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に近いトンネルのための合理的な維持管理手法が開発されている。その中で、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 FRP グリッドが構造物の補修材料として注目を集めているが、施工事例は少なく補修効果の定量的評価はあまり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¹⁾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. FRP-PCM 工法の概要

FRP(Fiber Reinforced Plastic)グリッドを用いたポリマーセメントモルタル吹付け工法（以下、FRP-PCM 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. 有限差分法による補強効果の評価

3.1 解析モデル概要

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²⁾」等を参考に、天端の覆工厚さが 45cm 未満、覆工背面の空洞厚さが 30cm 以上とする健全度判定区分の一番危険な 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³⁾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-1 に解析ケースを、表-2 に入力物性値を示す。内面補強工のモデル化につ

表-1 解析ケース

ケース	グリッド断面積 (mm ²)	地山強度比 (Srp)	補強範囲	補強時期 (供用開始)
CR4	6.6	0.25	上半	10 年後
		0.5		20 年後
		1.0	扇形	10 年後
		2.0		20 年後
CR6	13.2	0.25	上半	10 年後
		0.5		20 年後
		1.0	扇形	10 年後
		2.0		20 年後
CR8	26.4	0.25	上半	10 年後
		0.5		20 年後
		1.0	扇形	10 年後
		2.0		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 ³		

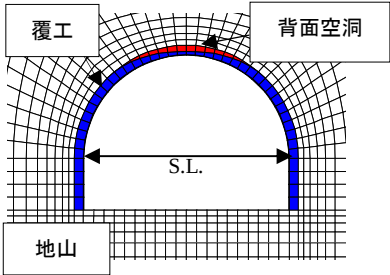


図-1 解析モデル概要図

いて、既往研究と同様に材料の降伏と付着面強度や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・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とし、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。

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 Ra と扇形補強における変位抑制率 Rs との比 Rs/Ra により比較したものを示す。

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

ここで、 u は変位量、 γ 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。また、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を有するトンネルモデルを対象として、様々な条件下におけるFRP-PCM工法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等を考慮した解析を行い、トンネルの最適な補強パターンを確立していく。最後に、本研究の実施にあたりFRPグリッド工法研究会の研究助成を頂きました。深く感謝を申し上げます。

【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.

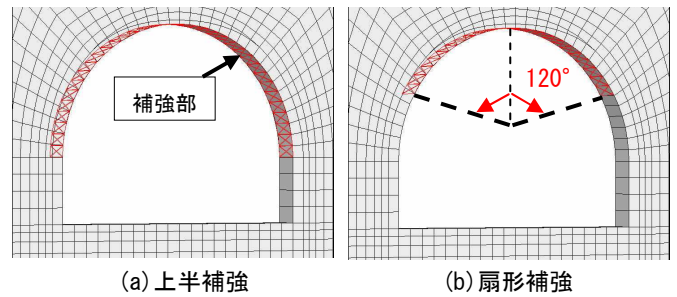


図-2 補強工モデル図

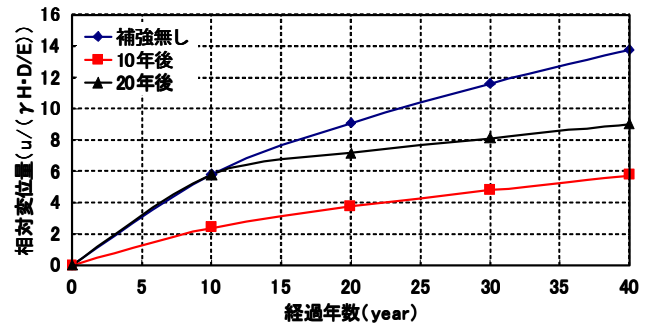


図-3 S.L.における内空変位比較 (CR6 上半, Srp=0.5)

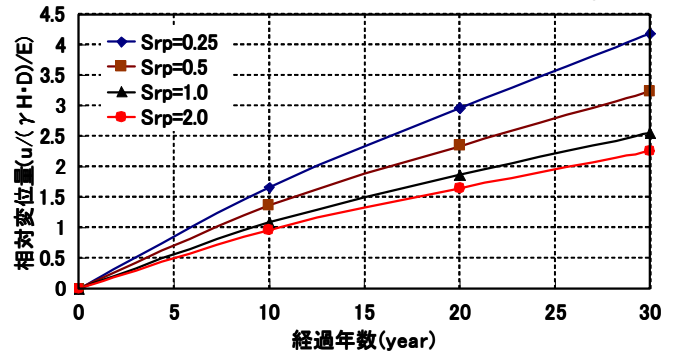


図-4 地山強度比別の内空変位比較 (CR6 上半)

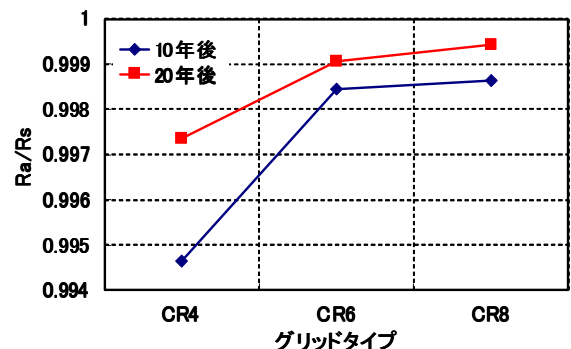


図-5 グリッドタイプ別の内空変位抑制率比較 (Srp=0.5)