

FRP グリッドを用いた PCM 吹付け工法によるトンネル補強効果の解析的評価

長崎大学大学院 学生会員 ○平井 光希 東 幸宏 平田 祐也

長崎大学大学院 フェロー会員 蔣 宇静 正会員 李 博

(有)サンセイ リーマテック社 正会員 石田 耕生 (株)インフラネット 正会員 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 米田 裕樹

1. 背景と目的

現在、供用後 40～50 年となり覆工劣化を生じたトンネルが多く、補修補強を行う必要のあるトンネルが増えている。そこで、近年、道路トンネルでの補修工法として 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) 吹付けによる増厚工法(以下、FRP-PCM 工法)が用いられている。FRP グリッドは、高強度・軽量という長所を持ち、施工性に優れているが、施工事例は少なくその補強効果の評価はあまりされていないのが現状である。本研究では、既往研究¹⁾により得られた物性値を用いて、緩み圧を考慮したトンネルのモデルを提案し、FRP-PCM 工法の補強効果の評価を行うことを目的とする。

2. 解析モデルの概要

FRP-PCM 工法の補強設計において背面空洞による緩み圧を考慮する解析を行う際、通常は図-1 に示すような覆工のみをフレームでモデル化した骨組解析を用いているが、この解析手法では、地山と覆工との相互作用を考慮できない。そこで、三次元有限差分法(解析コード：FLAC3D)を用いて覆工と地山が一体化し、緩み圧と地山の相互作用を考慮可能な解析モデルを用いて補強解析を実施した。

解析モデルの概略図を図-2 に、補強工の範囲を図-3 に示す。解析モデルは下端をピン境界、左右両端をローラー境界とし、上端は非拘束状態として上載圧を与えることとした。緩み圧を上載圧として与えるためトンネル天端部分からの被りは 1m、左右および下方のモデル領域は覆工への十分な地山反力の作用および掘削の影響を考慮して 2D および 1D(D:掘削径 10m)とした。また、偏圧を作用させることが可能なようにモデルは半断面ではなく全断面モデルとした。

解析モデル作成のイメージ図を図-4 に示す。なお、補強範囲は昨年度までの研究成果³⁾よりトンネル中央から 120°の範囲とする扇形補強とした。また、補強工は降伏及び付着面強度、付着面剛性を考慮できる面要素(Liner 要素)を用いてモデル化することとした。本工法の設計を実務に活かすため、土木学会等の適用基準より C 級 D 級の岩種を対象⁴⁾とし、トンネル標準示方書等より緩み高さを 3m・6m・1D と設定した。覆工厚は 45cm とし、天端覆工厚は既往研究³⁾と同様に道路トンネル維持管理便覧における

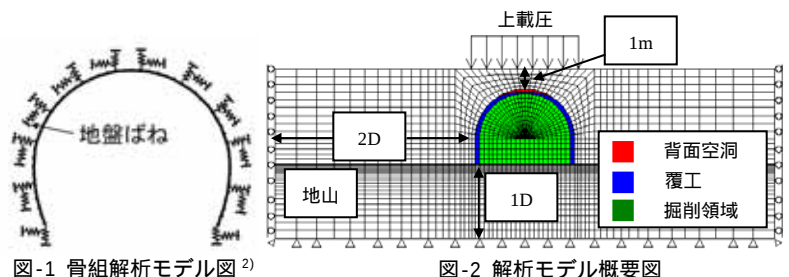
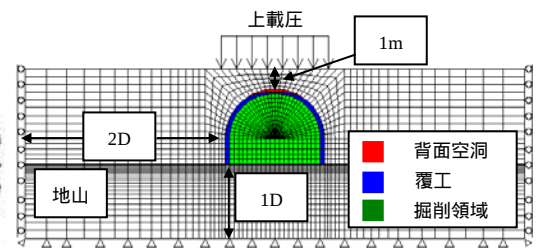
図-1 骨組解析モデル図²⁾

図-2 解析モデル概要図

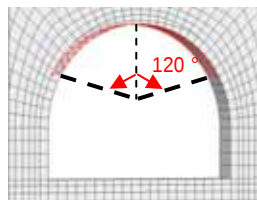


図-3 補強工範囲

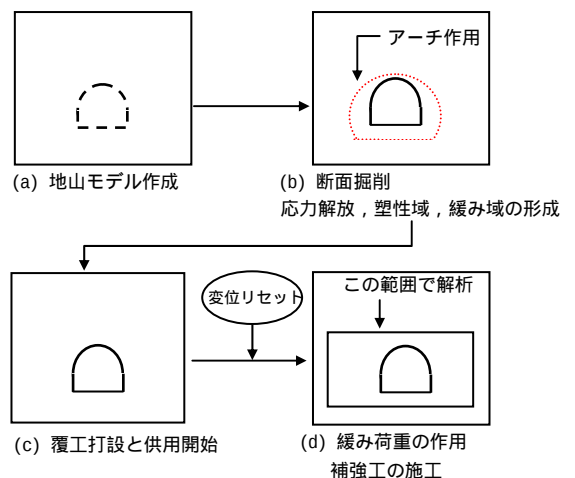


図-4 解析モデル作成のイメージ図

表-1 解析ケース

天端覆工厚 (cm)	グリッドタイプ	緩み高さ (m)	地山等級
15	無補強 CR4 CR6 CR8	3 6 1D	CII DI

キーワード：FRP グリッド、ポリマーセメントモルタル、緩み圧、トンネル、補強工

連絡先：〒852-8521 長崎県長崎市文教町 1-14 長崎大学工学部工学科社会環境デザイン工学コース，TEL：095-819-2626，

e-mail：jiang@nagasaki-u.ac.jp

突発性崩壊に対する健全度評価区分に基づき、最も危険な 15cm (判定区分: 3A) とした。解析ケースを表-1 に、材料物性を表-2 に、補強工物性を表-3 に示す。

3. 解析結果と考察

図-5 に覆工に作用する軸応力図を示す。覆工の肩部から側壁部にかけて大きな圧縮応力が発生しているが、FRP グリッドで補強することにより、最大圧縮応力とその発生範囲が狭くなり、覆工への負担を軽減していることが分かる。

図-6 に付着面のせん断応力分布図を示す。補強工の両端部で大きな付着面せん断応力が発生している。これは、肩部で補強工が断面の軸方向に圧縮されるためだと考えられる。したがって、覆工にかかる荷重がより大きくなる場合には端部剥離を起こす可能性があると言える。そこで数値解析により算出した付着面に作用する最大垂直応力、既往研究により算出した付着面における粘着力、内部摩擦角を用いて、モール・クーロンの破壊規準により、式(1)から最大せん断応力 τ_{max} を算出する。

$$\tau_{max} = c + \sigma \tan \phi \quad (1)$$

ここで c は付着面における粘着力、 σ は付着面に作用する最大垂直応力、 ϕ は付着面の内部摩擦角である。図-6 に示すように、 τ_{max} と補強工に作用する付着面せん断応力の最大値 τ_c を用いて、式(2)より付着面の安全率 f_s を算出した。

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

表-4 に付着面における安全率を示す。FRP ごとに比較すると、せん断剛性の高い順に安全率が低いことがわかる。これは CR4 の場合、せん断剛性が他のグリッドより低いため覆工の変形に追従するが、CR6、CR8 は CR4 よりもせん断剛性が高いため、覆工の変形に追従せず、変形が起こりにくいためである。したがって、地山等級・地山の状態に応じて、最適な補強パターンを選定する必要がある。

4. 結論

本研究では、FRP-PCM 工法による緩み圧を考慮したトンネルの補強効果の評価を行った。そして、応力状態や付着面での安全率を比較することによって、FRP グリッドの補強効果を定量的に評価することができた。今後は、より大きな土圧、偏圧が作用した場合、異なる地山等級、覆工の経年劣化による剛性低下なども検討することにより、より詳細な補強効果の評価を行うことが課題である。

[参考文献]

- 1) 東幸宏ほか：FRP グリッドを用いた PCM 吹付け工法の道路トンネル補強効果の評価手法に関する研究、第 32 回西日本岩盤工学シンポジウム論文集、pp.51-56、2011。
- 2) 野城一栄：欠陥を考慮したトンネル覆工の骨組み構造解析、土木学会第 56 回年次学術講演概要集、pp.34-35、2000。
- 3) 東幸宏ほか：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、土木学会第 67 回年次学術講演会講演概要集、pp.159-160、2012。
- 4) 建設省土木研究所トンネル研究室：土木研究所試料 トンネル掘削時地盤変状の予測・対策マニュアル(案)、pp.20-21、1994。
- 5) 可塑性グラウト協会エアバック部会：可塑性空洞充填材 エアバック工法 技術資料、1997。

表-2 材料物性⁴⁾⁵⁾

	単位体積重量 γ (kg/m ³)	変形係数 E (MPa)	ポアソン比 ν	粘着力 c (MPa)	内部摩擦角 ϕ (°)
CII	2300	980	0.3	0.98	40
DI	2200	490	0.35	0.49	35
コンクリート	2450	24500	0.2	6.99	40
裏込め材	1000	12	0.13	0.5	10

表-3 補強工物性¹⁾

	PCM	CR4	CR6	CR8
変形係数 E (MPa)	26000	100000		
ポアソン比 ν	0.2	-		
せん断剛性 k_s (MPa/m)	-	5.298×10^3	6.394×10^3	11.446×10^3
粘着力 c (MPa)	2.217			
内部摩擦角 ϕ (deg)	17.7			
引張限界 σ_t (MPa)	4.6	1400		
等価厚さ t (mm)	-	17.7	25.4	29.2

c , ϕ , k_s は付着面のパラメータ。

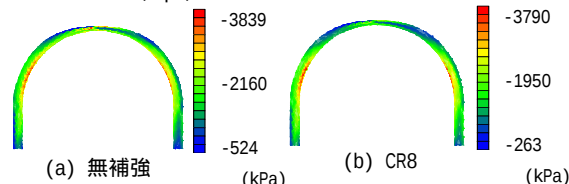


図-5 覆工に作用する軸応力図 (-: 圧縮, +: 引張)
(覆工厚 15cm, 地山等級 DI, 緩み高さ 1D)

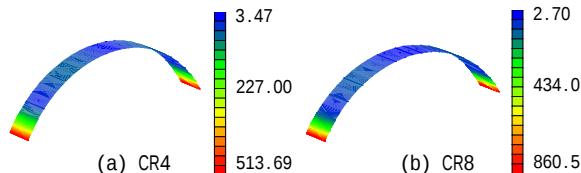


図-6 せん断応力分布図 (kPa)
(覆工厚 15cm, 地山等級 DI, 緩み高さ 1D)

表-4 付着面における安全率(DI)

緩み高さ (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