FRP グリッドを用いた PCM 吹付け工法によるトンネル補強設計モデルの検討(その 1)

長崎大学工学部　学生会員　○平井　光希　長崎大学大学院　学生会員　東　幸宏　平田　祐也
長崎大学大学院　フェロー会員　蒋　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. はじめに

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きている．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，施工性に優れていて，構造面からも断面形状や重量等の面において既設構造物に与える影響は小さく，鉄筋や鋼製支保工と異なり腐食しにくいため維持管理が容易である．しかし，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み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，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提案し，三次元有限差分法(解析コード：FLAC3D)を用いた．

図-1 骨組解析モデル図 [2]

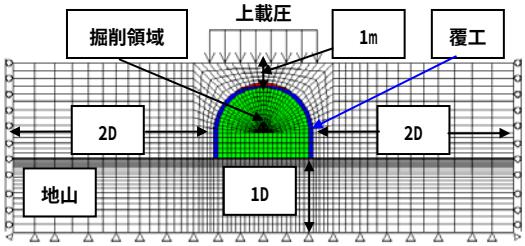


図-2 解析モデル概要図

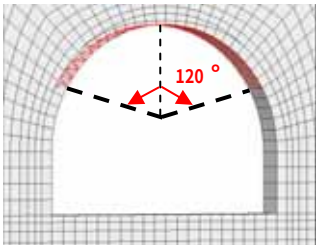


図-3 補強工範囲

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左右対象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．解析の流れとして地山モデルの作成，断面掘削，覆工打設した後に変位をリセットし，補強工（裏込め注入+FRP-PCM 工法）の打設，緩み圧を載荷させて変位が収束するまで計算を実施する．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．

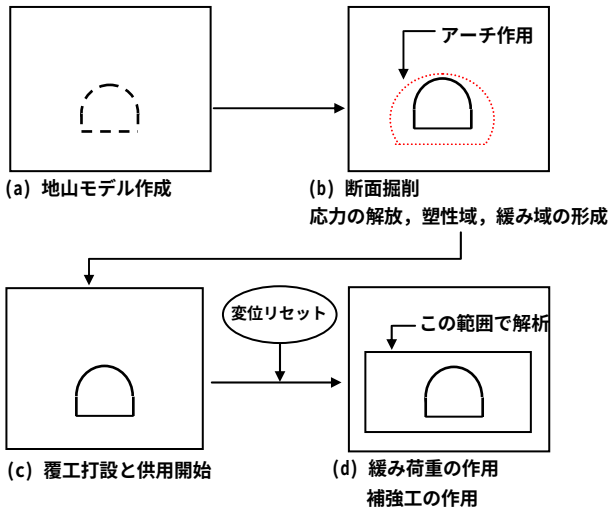


図-4 解析モデル作成のイメージ図

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 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・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．

表-1 解析ケース

Crown Thickness (cm)	Grid Type	Loosened Height (m)	Rock Class
15	無補強 CR4 CR6 CR8	3 1D	DI

表-2 材料物性 [4)5)]

Material	Unit Weight γ (kg/m³)	Young's Module E(MPa)	Poisson Ratio ν	Cohesion c(MPa)	Friction Angle φ(°)
Rock	2200	490	0.35	0.49	35
Concrete	2450	24500	0.2	6.99	40
Back-fill	1000	12	0.13	0.5	10

表-3 補強工物性 [1)]

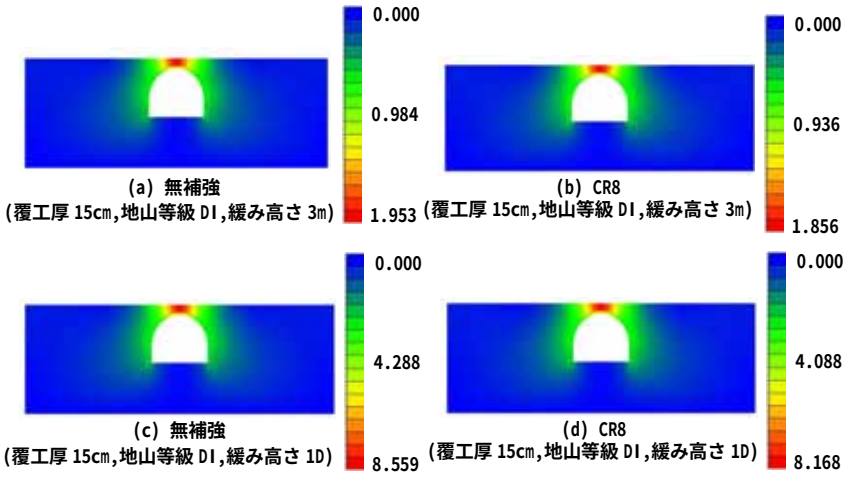
	PCM	CR4	CR6	CR8
Young's Modules (MPa)	26000	100000		
Poisson Ratio ν	0.2	-		
Shear Stiffness ks(MPa/m)	-	5.298×10^3	6.394×10^3	11.446×10^3
Cohesion c(MPa)	2.217			
Friction Angle φ(deg)	17.7			
Tension Limit σ_t(MPa)	4.6	1400		
Thickness t(mm)	-	17.7	25.4	29.2

※補強材物性の c，φ，ks は付着面パラメータ

3. 解析結果と考察

図-5 に変位コンター図を示す．緩み圧を載荷することによって，天端付近で変位が最も大きくなっている．覆工 15cm，地山等級 DI，緩み高さ 3m，無補強時・CR8 でそれぞれの最大変位量が 1.9mm，1.8mm となっており，補強工を打設することで変位量を抑制できることが分かる．覆工厚 15cm，地山等級 DI，緩み高さ 1D の場合でも同様に減少している．また FRP グリッドを打設することによってどれだけ変位を抑制できたかを示す変位抑制率を天端部分で見ると，緩み高さ 3m で 4.97%，緩み高さ 1D で 4.57%となり，緩み高さの低いほうが変位抑制率は大きくなった．

図-6 に覆工の破壊状況を示す．緩み高さ 1D の場合，無補強時で覆工の天端部分に引張破壊が生じていたが，CR8 を打設することにより覆工の破壊を抑制している．これは，FRP グリッドが引張補強材として機能し，引張破壊を抑制していると考えられる．緩み高さ 3m では，無補強･CR8 どちらも破壊しなかった．

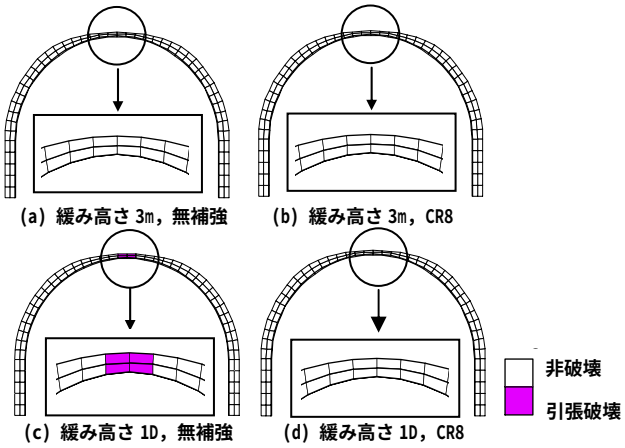


(a) 無補強 (覆工厚 15cm,地山等級 DI,緩み高さ 3m)
(b) CR8 (覆工厚 15cm,地山等級 DI,緩み高さ 3m)
(c) 無補強 (覆工厚 15cm,地山等級 DI,緩み高さ 1D)
(d) CR8 (覆工厚 15cm,地山等級 DI,緩み高さ 1D)

図-5 変位コンター図(mm)

4. おわりに

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，変位や塑性領域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手法の提案を目指していく．



(a) 緩み高さ 3m，無補強
(b) 緩み高さ 3m，CR8
(c) 緩み高さ 1D，無補強
(d) 緩み高さ 1D，CR8

図-6 覆工の破壊状況の比較（覆工厚 15cm，地山等級 DI）

[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, 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パック部会：可塑性空洞充填材　エアパック工法　技術資料，1997.