

変状トンネルにおける FRP グリッド補強工法の適用性の検討(その 1)–設計解析モデルの提案

長崎大学大学院 学生会員 ○東 幸宏 平田祐也 フェロー会員 蔣 宇静 正会員 李 博
リーマテック(株) 正会員 石田耕生 (株)インフラネット 正会員 竹内一博
日鉄コンポジット社 正会員 谷口硯士 (株)エイト日本技術開発 正会員 米田裕樹 古賀大陸

1. はじめに

近年、損傷した覆工コンクリートの補修補強手法として FRP (Fiber Reinforced Plastic)グリッドを用いた補強工法が用いられてきている。緩み圧に起因する変状に対して、FRP グリッドを含むトンネル覆工の内面補強工における補強設計では一般的に骨組み構造解析¹⁾が行われている。しかし、図-1 のように周辺岩盤を地盤ばねとしてモデル化する骨組み構造解析では覆工-地山間の相互作用を考慮することができない欠点を有している。そこで本研究では、連続体解析手法である有限差分法を用いて覆工-地山間の相互作用を考慮可能な設計解析モデルを提案し、地盤反力係数の比較によりその有用性を検討する。さらに、提案した作成手順に従って作成した設計解析モデルによる補強解析を実施し、FRP グリッド補強工法の補強効果を解析的に評価するとともに、その適用条件を提案する。本稿はその 1 として、設計解析モデルの提案とその有用性の評価について述べる。

2. 覆工-地山間の相互作用を考慮した設計解析モデルの提案

一般的に用いられている骨組み構造解析では覆工と地山との相互作用を考慮できない。そこで図-2 に示す作成手順に従って設計解析モデルを作成する。

まず、図-2(a)に示すように対象とするトンネルの地山モデルを作成し、初期応力状態を構成する。図-2(b)のようにトンネルの掘削解析を実施する。つぎに、図-2(c)に示すように覆工を施工し、供用開始状態とする。さらに、図-2(b)に示すような塑性領域や緩み領域の影響を反映させるため、図-2(d)のように供用開始後に緩み圧が覆工に作用するものとし、解析領域を天端から 1m のかぶりの範囲となるようにモデルを切り出す。最後に変位をリセットし、FRP-PCM 工法と背面空洞に対する裏込め注入工による補強を行い、モデル上面のトンネル掘削幅の範囲に上載圧として緩み圧を作用させる。上記の手順に従って作成した解析モデルの概要図を図-3 に示す。周辺地山、覆工および裏込め注入材はモールクーロンの降伏条件を考慮した弾完全塑性体でモデル化した。作成した解析モデルを用いて変状解析 (FRP グリッドによる補強なし) を実施し、地盤反力係数の比較により提案した設計解析モデルの有用性を検討する。

3. 地盤反力による覆工-地山間の相互作用の評価

3.1 入力物性値の設定

本解析では、土木学会などの適用基準より C 級および D 級の岩種²⁾を解析対象の地山とした。裏込め材料は、覆工コンクリートの補修と並行して行われる場合には硬化速度の速いウレタン系材料³⁾が用いられることが多いことから、ウレタン系の材料を想定して物性値を設定した。表-1 に入力パラメータを示す。また覆工劣化度 (覆工の経年劣化に伴う強度低下度合い) を考慮するため、表-2 に示すように劣化度に応じて物性値を低下させる。緩み高さ

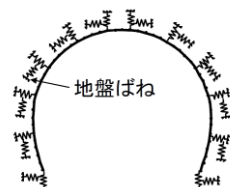


図-1 骨組み構造解析モデルの一例¹⁾

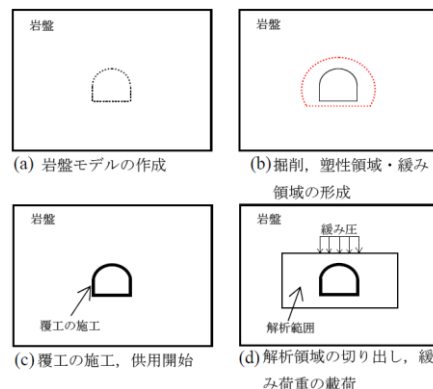


図-2 解析モデルの作成手順

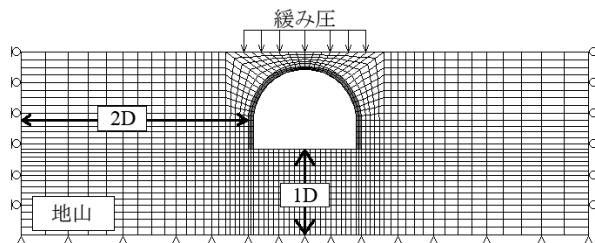


図-3 解析モデル概略図

はトンネル標準示方書⁴⁾を参考に 3m, 6m および 1D (D: トンネル掘削径, D=10m) とした。

3.2 地盤反力係数の比較

骨組み構造解析では、地盤反力係数を地盤ばね定数として以下の式(1)を用いて算出する⁵⁾。

$$k_h = \left(\frac{1}{30} \right) \alpha E_0 \left(\frac{B_v}{30} \right)^{-\left(\frac{3}{4} \right)} \quad (1)$$

ここで、 k_h ：設計水平地盤反力係数(kN/m³)、 E_0 ：地盤の変形係数(kN/m²)、 B_v ：载荷幅(m)、 α ： E_0 の推定方法による地盤反力係数の推定に用いる換算係数である($\alpha=4$)。CII 級と DI 級および DII 級地山の地盤反力係数の算出値は、それぞれ 297.86 MN/m³, 148.93 MN/m³, 59.57 MN/m³ となった。

提案モデルでは解析により得られた掘削壁面周辺（掘削壁面から 6m の範囲）のメッシュにおける水平方向応力 σ_{xx} (kN/m²) と該当メッシュの節点の水平変位量 u_x (m)を用いて以下の式(2)より地盤反力係数 k_{fdm} を算出する。なお、水平変位量 u_x は該当メッシュの有する全節点の平均値とした。

$$k_{fdm} = \frac{\sigma_{xx}}{u_x} \quad (2)$$

解析結果の一例として、図-4 に DII 級地山における地盤反力係数の比較を示す。図-4(a) は覆工劣化度 0%での緩み高さの違いによる比較を、図-4(b) は緩み高さ 1D における覆工劣化度の違いによる比較である。図-4(a) より、骨組み構造解析ではいずれの緩み圧においても各地山物性に対し地盤反力係数は定数として取り扱われる。一方、有限差分法解析では地山の変形量が入力した岩盤および覆工の物性値と発生応力より算出されるため、地盤反力係数は緩み圧や入力物性値に応じて変化していることが分かる。図-4(b) より、掘削面付近では覆工の変形係数および強度が低下するほど地盤反力係数が小さくなる傾向となっている。これは覆工の強度と変形係数が低下し、掘削面付近の岩盤に作用する応力が小さくなったためであると考えられる。また掘削面からの距離が離れるにつれて、いずれのケースにおいてもほぼ同様の値に収束している。これらの結果より、地盤反力係数は解析条件により大きく変化し、特に覆工や周辺地山に作用する応力に依存すると考えられる。

4. おわりに

本研究では、地盤反力係数は緩み圧や覆工物性値などの解析条件の変化により大きく異なることを明らかにした。そのため、地山-覆工間の相互作用を考慮し、周辺地山の状況を再現できる解析モデルを用いる必要がある。同題目その 2 では、本稿で提案した設計解析モデルを用いて、緩み圧に起因する変状トンネルにおける FRP-PCM 工法の補強効果を解析的に検討した。

本研究の実施にあたり、FRP グリッド工法研究会と(株)エイト日本技術開発より助成および助言を頂いた。ここに感謝を申し上げます。

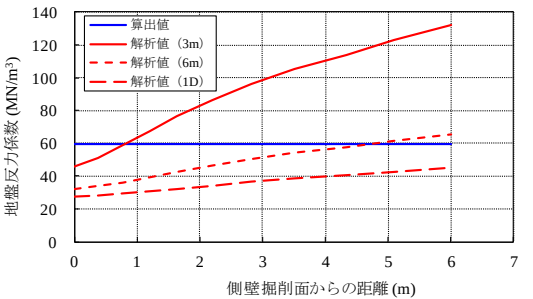
【参考文献】1) 真下英人ほか：山岳トンネルの構造解析手法に関する一考察，トンネル工学報告集，第 15 巻，pp.107-114，2005. 2) 建設省土木研究所 トンネル研究室：土木研究所資料 トンネル掘削時地盤変状の予測・対策マニュアル（案），1994. 3) ケミカルフォーム協会：既設道路トンネル裏込め注入工法技術資料，2012. 4) 社団法人土木学会：トンネル標準示方書 山岳工法・同解説，2006. 5) 社団法人道路協会：道路橋示方書・同解説IV 下部工編，pp.284-286，1996.

表-1 入力物性値

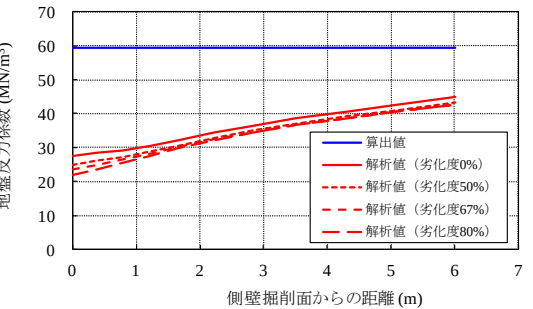
項目	CII地山	DI地山	DII地山	覆工	裏込め材
γ (kN/m ³)	22.6	21.6	20.6	24.0	9.81
E (MPa)	980	490	147	245000	12.0
ν	0.3	0.35	0.35	0.20	0.13
c (MPa)	0.98	0.49	0.196	6.99	0.50
ϕ (deg)	40.0	35.0	30.0	40.0	10.0
σ_t (MPa)	0.23	0.14	0.06	3.0	0.20

表-2 劣化度に応じた覆工物性値

覆工劣化度	E (MPa)	σ_c (MPa)	c (MPa)	ϕ (deg)	σ_t (MPa)
0% (σ_c)	24,500	30	6.99	40	3
50% ($\sigma_c/2$)	12,250	15	3.5		1.5
67% ($\sigma_c/3$)	8,166.67	10	2.33		1
80% ($\sigma_c/5$)	4,900	6	1.4		0.6



(a) 緩み高さによる比較(劣化度 0%)



(b) 覆工の劣化度による比較(緩み高さ 1D)

図-4 地盤反力係数の比較(DII 級地山)