

緩み圧に起因する変状トンネルの FRP グリッド工による補強効果の評価

長崎大学工学部 学生会員 ○金丸恭輔 工学研究科 フェロー会員 蔣 宇静
 長崎大学大学院工学研究科 学生会員 高 源 学生会員 張 学朋

1. はじめに

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 が高強度で軽量であり施工性に優れており, 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・補強が必要なトンネルが増えてきている. そこで, 道路トンネルの補修工法として本工法が用いられている. しかし, 施工事例はまだ多くなく, その補強効果についての定量的評価があまりなされていないのが現状である. そこで, 本研究では, 施工の段階で発生した覆工背面の空洞を有する緩み圧を考慮したトンネルの解析モデルを用い, 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

解析モデルを図-1 に示す. 解析モデルは下端をピン境界, 両端をローラー境界とし, 上端は緩み圧の一部を表す上載圧を与えることとした. 上端からトンネル天端までの被りは 1m, 左右及び下方のモデルの領域は覆工への十分な地山反力の作用及び掘削の影響を考慮して 2D 及び 1D (D:掘削径 10m) とした. また, 地山分類による物性値及び材料物性値を表-1 に, FRP グリッドの代表例と規格を表-2 に示す.

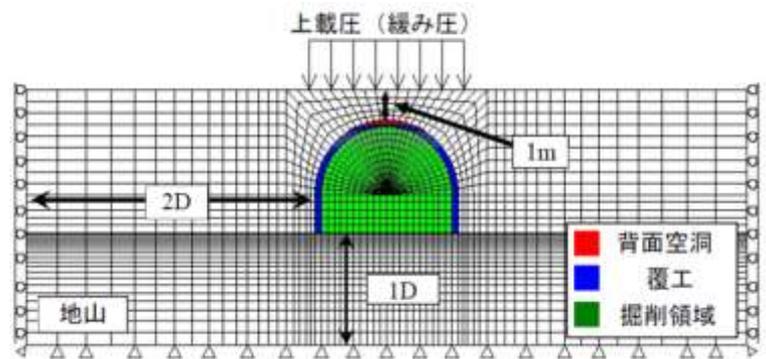


図-1 解析モデル

表-1 各種物性値

項目	CII	D I	DII	覆工
$\gamma(\text{kN/m}^3)$	22.6	21.6	20.6	24
$E(\text{MPa})$	980	490	147	24,500
ν	0.3	0.35	0.35	0.2
$c(\text{MPa})$	0.98	0.49	0.196	6.99
$\phi(\text{deg})$	40	35	30	40
$\sigma_c(\text{MPa})$	0.42	0.19	0.06	3

表-2 FRP グリッドの規格

筋番	公称断面積 (mm ²)	引張耐力 (kN)	引張強度 (N/mm ²)	ヤング係数 (N/mm ²)	設計厚さ (mm)
CR4	6.6	9.0	1400	100000	2.0
CR5	13.2	18.5			3.0
CR6	17.5	24.0			4.0
CR8	26.4	37.0			5.0
CR10	39.2	53.8			7.0
CR13	65.0	89.2			9.0

3. トンネルモデル解析による補強効果の評価

3.1 解析ケースの設定

前節の解析モデル・各種物性値を用いてトンネル断面における本工法による補強効果を解析的に評価する. 本解析に適用する補強材料の高強度 FRP グリッドは CR4, 6, 8, の 3 種類, PCM は高弾性型 PCM とし, 入力物性値を表-3 に示す. また, 本解析のトンネルの掘削径 D は 10m であることから, 緩み高さを 3.0m, 6.0m 及びより大きい土圧が作用すると仮定して 1D(=10.0 m), 2D(=20.0m) の 4 パターンを設定する.

表-3 入力物性値

	変形係数 (MPa)	せん断抵抗角 (deg)	粘着力 (MPa)	せん断剛性 (MPa/m)
地山	1000	30	0.577	-
吹付け	10000	35	3.904	-
覆工	20000	40	6.995	-
CR4	100000	17.7	2.22	5.30×10^3
CR6				6.39×10^3
CR8				13.37×10^3
PCM	26000			-

3.2 解析結果の評価

本論文では、紙面の関係で地山等級 CIIでの補強効果の結果のみを示す。図-2 に地山等級 CIIにおける天端部分の垂直応力比較を、図-3 に FRP グリッドに作用する最大モーメント比較を示す。図-2 より、天端部に作用する垂直応力は FRP グリッドの厚さが増加するにつれて小さくなっており、同様に、地山の緩み圧が大きくなるにつれて大きくなっていることがわかる。図-3 より、FRP グリッドに作用する最大モーメントは FRP グリッドの厚さが増加するにつれて大きくなっていることがわかる。また地山の緩み圧が大きくなるごとに最大モーメントも増加していることがわかる。

4. FRP グリッド補強による等価断面厚さ h' の検討

FRP グリッド補強による等価断面厚さの検討のための FRP グリッドとコンクリートの複合断面を図-4 に示す。複合断面の等価断面厚さ h' を計算するために、3 つの等価パラメータ (曲げ剛性(式 4.1), コンクリート上面の圧縮強度(式 4.2), コンクリート下面の引張強度(式 4.3)) を用いる。それぞれの計算結果を図-5 に示す。等価曲げ剛性と等価コンクリート圧縮強度は同じ傾向を示している。また、FRP グリッドが等価するコンクリートの厚さは FRP グリッド本体の約 3 倍であることがわかり、同時に、等価厚さは補強材料の厚さとともに増加することもわかる。等価引張強度の場合、FRP グリッドが等価するコンクリート厚さは FRP グリッド本体の約 7.5 倍である。同じ補強材料を用いた場合、等価引張強度は他の 2 つと比べると約 2 倍になっていることがわかる。等価引張強度では最も効果のある補強と言えるが、今後は室内実験などによる検証が必要であると思う。

5. おわりに

本研究では、地山等級 CIIを対象に緩み圧に起因する変状トンネルの FRP グリッド工による補強効果の評価を行い、FRP-PCM 工法の補強効果について考察を行った。その結果、等価曲げ剛性と等価コンクリート圧縮強度は同じ傾向を示し、等価引張強度はこの 2 つと比べると約 2 倍になっていることがわかった。今後は、異なる地山に対する補強効果を解明していく。

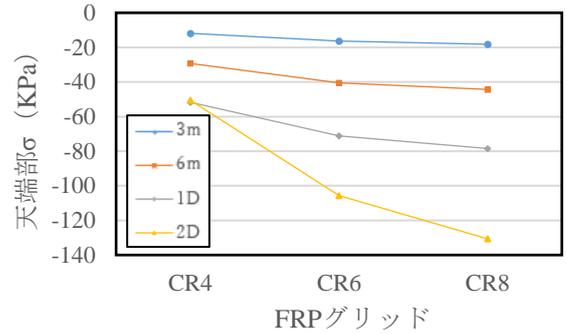


図-2 天端部の軸応力

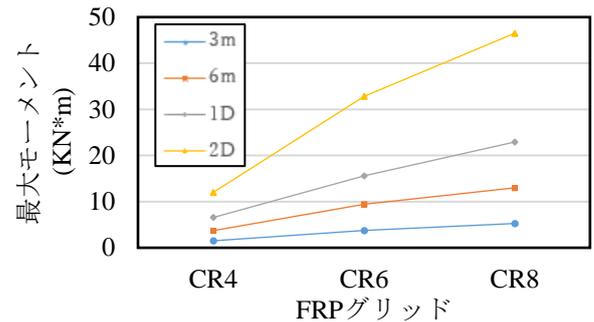


図-3 FRP グリッドに作用する最大モーメント

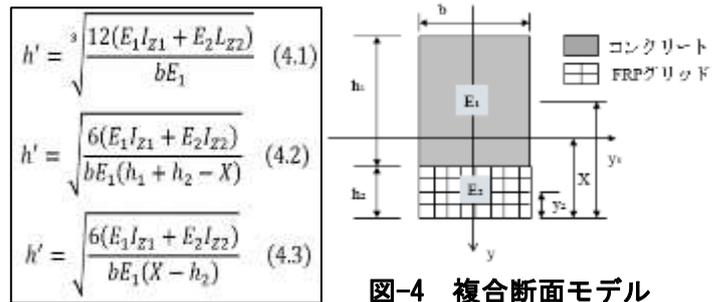


図-4 複合断面モデル

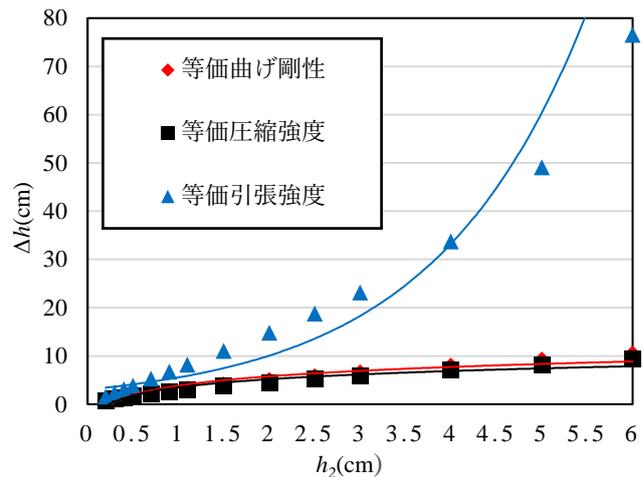


図-5 各条件での等価厚さ

参考文献: 1)土木学会:トンネル標準司法書 山岳工法・同解説 2)土木研究所:トンネル掘削時地盤変状の予測・対策マニュアル 3)土木学会:トンネルの変状メカニズム 4)李秀蓮:等效截面法求解異質双材料組合梁, 青海大学学报 Vol.26, No.6, pp.93-96, 2008. 5)施碧玉, 王社, 張亜亭, 等:組合梁の応力分析と実験 Vol.26, No2, pp.62-65, 2006. 6) American Concrete Institute: Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Concrete Structures, 2008