

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 2)-適用条件の解明

長崎大学大学院 学生会員 平田祐也 東 幸宏 フェロー会員 蔣 宇静 正会員 李 博
 リーマテック社(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 古賀大陸 米田裕樹

1. はじめに

近年、トンネル覆工の劣化現象が全国的に顕在化し、劣化損傷した覆工コンクリートの補修補強が急務となっている。その中で、FRP グリッドを用いた補強工法が適用されてきているが、施工事例は少なく補強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、同題目その 1¹⁾で提案した解析モデルを用いて、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、その適用条件を明らかにすることを目的とする。

2. FRP グリッド補強工法による補強効果の評価

2.1 解析ケースと物性値の設定

解析ケースを表-1 に示す。既往の研究²⁾を参考に補強範囲はトンネル中央から 120°補強および、スプリングライン(S.L)より上部を補強する 180°補強の 2 パターンとした。表-2 に補強材料の物性値³⁾を示す。地山などの物性値は同題目その 1 と同様とした。

2.2 解析結果

解析結果の代表例として地山等級 DI、緩み高さ 1D および覆工劣化度 67%のケースについて示す。図-1 に覆工の塑性領域を示す。この図より、補強を行うことで覆工の破壊を抑制する結果となっている。特に、CR4 を用いた場合、120°補強では覆工背面側の破壊を抑制できていないが、180°補強で完全に抑制していることがわかる。

次に一例として CR6 におけるに付着面に作用するにせん断応力分布図を図-2 に示す。図より、120°補強、180°補強ともに付着面の両端部で付着面せん断応力が大きくなっていることがわかる。これは、覆工の変形に伴い付着面でのせん断変形が進行し、付着面せん断応力が増大したと考えられる。他の解析結果も同様の結果が得られた。また、この箇所では、覆工と補強工との付着面で破壊あるいは剥離が生じる可能性がある。そこで付着面の安全率 f_s を式(1)より算出した。

$$f_s = \frac{\tau_{max}}{\tau_c} \quad (1)$$

ここで、 τ_c は付着面のせん断応力の解析値、 τ_{max} は付着面せん断応力の最大値であるが、付着面に作用する垂直応力が非常に小さく、付着性能は付着面粘着力に依存することから、付着面粘着力と等しいものとして算出した。

表-3 に付着面における安全率を示す。FRP グリッドごとに比較すると、せん断剛性の高い順に安全率が低くなっていることがわかる。CR4 の場合、せん断剛性が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、変形が生じにくいから CR4 より安全率が低くなる。また、いずれのケースにおいても安全率 1.0 を超える結果となっているが、構造物としての安全率と異なることに留意する必要がある。

表-1 解析ケース

地山等級	FRP グリッド	補強範囲	緩み高さ	覆工劣化度
CI	無補強			0%
DI	CR4	120°補強	3m	50%
DII	CR6	180°補強	6m	67%
	CR8		1D(D=10m)	80%

表-2 補強材料の物性値³⁾

補強材料	変形係数 E(MPa)	引張強度 σ_t (MPa)	粘着力 c_s (MPa)	せん断抵抗角 ϕ_s (deg)	せん断剛性 k_s (MPa/mm)
CR4	100,000	1,400	2.217	17.7	5.298
CR6					6.394
CR8					13.369
PCM	26,000	4.60			

c_s, ϕ_s および k_s は付着面のパラメータ

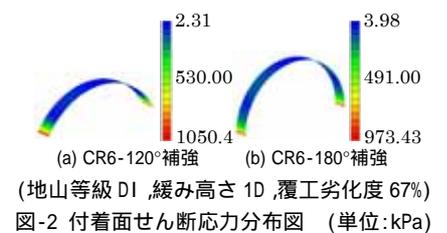
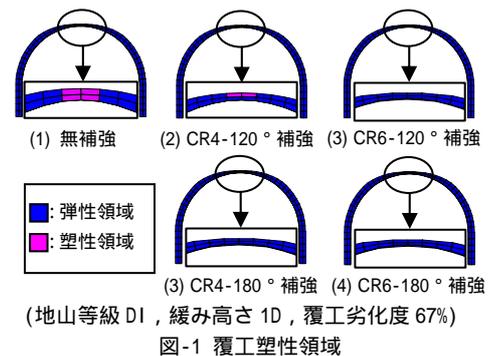
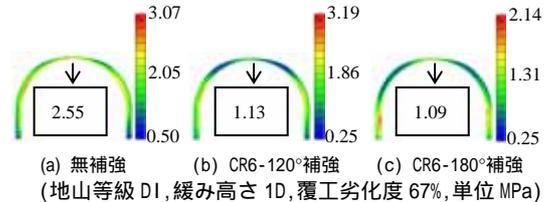


表-3 付着面安全率

項目	120°補強	180°補強
CR4	2.44	2.68
CR6	2.11	2.28
CR8	1.47	1.65

次に一例として無補強および、CR6 における覆工に作用する軸応力分布図を図-3 に示す。補強により天端部軸応力が低減される結果となった。天端部の軸応力を補強範囲で比較すると、大きな差は現れていない。また、補強工の端部周辺で軸応力が增大しているが、180°補強の最大値は 120°補強のケースより小さくなっている。

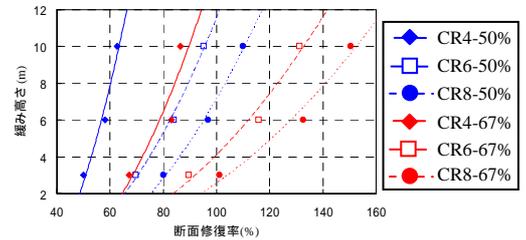


(a) 無補強 (b) CR6-120°補強 (c) CR6-180°補強
(地山等級 DI, 緩み高さ 1D, 覆工劣化度 67%, 単位 MPa)

ここで覆工断面修復率 R_r を算出した。断面修復率は以下の式(2)を用いて算出する。

$$R_r = \left(\frac{\sigma_{nr}}{\sigma_r} - 1.0 \right) \times 100 \quad (2)$$

ここで、 σ_{nr} は無補強時における軸応力値(MPa)、 σ_r は内面補強時における軸応力値(MPa)である。図-4 に補強覆工劣化度 50%および 67%、120°補強の覆工断面修復率を示す。なお、図中における実線および破線は回帰曲線である。これにより実務において期待する断面修復率を基にグリッドの規格の選定が可能となる。例えば地山等級 DI 覆工劣化度 50%、緩み高さ 8m、補強により 100%の断面修復率を期待する場合には CR8 による補強が必要であることがわかる。



(地山等級 DI, 120°補強, 覆工劣化度 50%・67%)
図-4 覆工断面修復率

表-4 覆工増加応力の許容値の目安⁴⁾

既設トンネル覆工の健全度判定区分	増加圧縮応力 (N/mm ²)	増加引張応力 (N/mm ²)
B,OK	$0.3\sigma_{ck}$	$0.06\sigma_{ck}$
A	$0.2\sigma_{ck}$	$0.04\sigma_{ck}$
AA	$0.1\sigma_{ck}$	$0.02\sigma_{ck}$

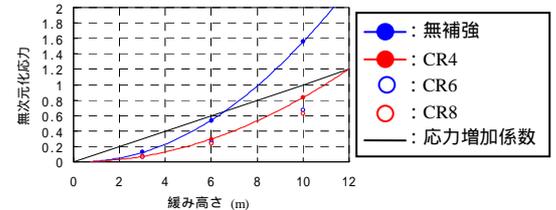
3. FRP グリッド補強工法の適用条件

トンネル覆工の安定性評価における許容値について覆工の軸応力と、その設計強度 σ_{ck} との比率を目安として表-4⁴⁾ に示す。本研究の対象となるトンネルは健全度判定区分における A ~ AA であることから、コンクリートの一軸圧縮強度の 0.2~0.1 倍として許容圧縮応力を設定し、覆工に作用する軸応力値を用いて式(3)により無次元化応力 σ' を算出する。

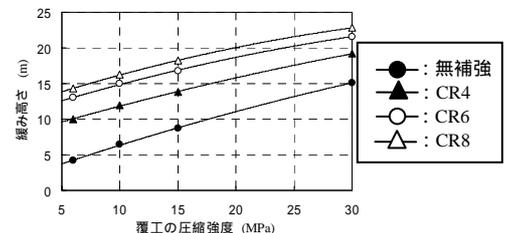
$$\sigma' = \frac{P_L}{\gamma D} \times \frac{\sigma_a}{\sigma_{cf}} \quad (3) \quad \alpha_1 = \frac{P_L}{\gamma D} \quad (4)$$

ここで、 σ_a は覆工天端部の軸応力値(N/m²)、 σ_{cf} は覆工の許容応力度(N/m²)、 P_L はトンネルに作用する緩み圧(N/m²)、 γ は周辺地山の単位体積重量(N/m³)、 D はトンネルの掘削径(m)、 α_1 は応力増加係数である。式(4)は軸応力と許容応力との比が 1 のとき、無次元化応力と等しくなる。

よって、無次元化応力値が応力増加係数を超える場合、覆工の補強が必要となる。算出例として地山等級 DI、120°補強、判定区分 A の結果を示す。図-5 に無次元化応力と緩み高さの関係を示す。図より、緩み高さが約 6.5m を超えるとき、無補強時の無次元化応力が応力増加係数を超えるため、補強が必要となることがわかる。ここで、各ケースにおいて緩み高さの上限値を求め覆工の圧縮強度と緩み高さに応じた FRP グリッド補強工法の適用条件を求めた。その結果を図-6 に示す。この図より判定するとき、例えば地山等級 DI、圧縮強度が 10MPa、緩み高さ 12m の条件では、CR6 以上の補強が必要となることがわかる。



(地山等級 DI, 120°補強, 覆工劣化度 67%, 判定区分 A)
図-5 無次元化応力と緩み高さ関係



(地山等級 DI, 120°補強, 判定区分 A)
図-6 FRP グリッド補強工法の適用条件

4. おわりに

本研究では地山条件、覆工劣化に応じた FRP グリッド補強工法による補強解析を実施し、定量的な補強効果の評価と緩み圧に起因する変状トンネルに対する適用条件を提案することができた。

本研究の実施にあたり、FRP グリッド研究会と㈱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) 東幸宏ほか：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，土木学会西部支部研究発表会講演概要集，2014。2) 東幸宏ほか：在来トンネルにおける FRP-PCM 工法による覆工補強効果に関する一考察，土木構造・材料論文集，第 28 号，pp.69-76，2012。3) 上野竜志ほか：トンネル補強材としての FRP グリッドの付着面強度と補強強度に関する考察，土木学会西部支部研究発表会講演概要集，pp.429-430，2011。4) 東・中・西日本高速道路株式会社：設計要領第三集トンネル編 トンネル本体工保全編(近接施工)，2009。