

老朽化トンネル覆工コンクリートの FRP グリッドによる補強効果の評価

蔣 宇静^{1*}・高 源¹・古賀大陸²

¹長崎大学大学院工学研究科(〒852-8131 長崎市文教町 1-14)

²株式会社エイト日本技術開発防災保全事業部(〒812-0013 福岡市博多区博多駅東 1 丁目 16-14)

* E-mail: jiang@nagasaki-u.ac.jp

本研究では、背面空洞を有する老朽化トンネルを対象に、FRP(Fiber Reinforced Plastic)グリッドを用いたポリマーセメントモルタル(PCM)吹付け工法による増厚工法 FRP-PCM の補強効果と適用条件を解明するものである。まずは、FRP グリッドで補強された PCM と覆工コンクリートとの間の接合強度を定めるために、室内一面せん断試験による方法を提案し、接合強度を求めることができた。次に、劣化度合いの異なる覆工コンクリートに対し、緩み荷重を受ける FRP-PCM の補強効果を数値解析手法により考察し、地山分類に応じる適用条件を検討した。

Key Words : Degraded tunnel lining, FRP-PCM method, reinforce, numerical simulation

1. はじめに

FRPグリッドを用いたポリマーセメントモルタル(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¹⁾。また近年では、トンネル構造物に限らず多くの構造物が寿命を迎えつつあり、これら多くの構造物における維持管理が急務となってきた。特に、コンクリート構造の寿命は約50年とされており、全国的に補修補強の時期を迎えようとしている現在、供用中トンネルの中でも供用後50年以上経過したのは全体の約1割程度であるものの、30年後には全体の約半数になると統計によって判明されている。

本研究はこのような背景に対し、まずFRP-PCM吹付け工法において使用される補強材料の力学的特性を確認するとともに有限差分法数値解析モデルの構築を検討する。次に、緩み圧に起因する変状トンネルを対象に補強設計

モデルを検討する。つまり、①覆工コンクリートの背面空洞を有する補強トンネルをモデルに、緩み圧の作用を考慮した有限差分変状解析に基づく検討ケースを選定する；②選定された解析ケースに対して、覆工コンクリートにおける軸力とモーメントの関係を示すM-N性能曲線を覆工コンクリートの劣化度合いを考慮しながら求めた上で、FRPグリッド-PCM工法による補強効果と適用条件を明らかにする。

2. 緩み圧の作用を考慮した解析モデル

緩み圧の作用を考慮した老朽化トンネルの数値解析モデルのイメージを図-1に示す。

モデルの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土被りは1m、左右および下方のモデルの領域は覆工への地山反力の作用掘削の影響を考慮して2D及び1D(D:掘削径10m)とした。

表-1 劣化状態に応じる覆工コンクリートの物性値

劣化状態	E (MPa)	σ_c (MPa)	c (MPa)	φ (deg)	σ_t (MPa)
0% (σ_c)	24,500	30.0	6.99	40	3.0
50% ($\sigma_c/2$)	12,250	15.0	3.50		1.5
80% ($\sigma_c/5$)	4,900	6.0	1.40		0.6

表-2 解析ケース

覆工厚(背面空洞箇所)	FRP グリッド	緩み高さ	地山等級	覆工劣化度
15m	無補強	1D(10m)	DI	0% (σ_c)
	CR4			50% ($\sigma_c/2$)
	CR6	2D(20m)	DII	80% ($\sigma_c/5$)
	CR8			

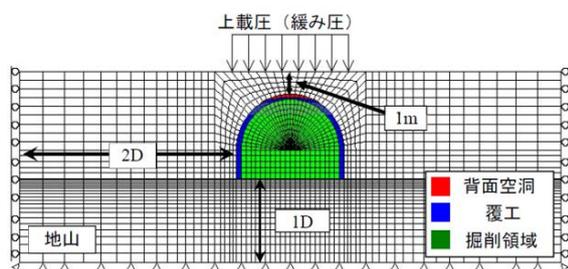


図-1 解析モデル (天端部に背面空洞あり)

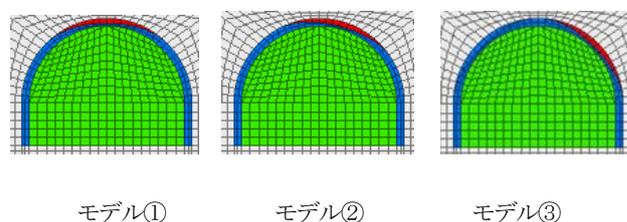


図-2 解析モデルにおける背面空洞の位置(赤い要素の部分)

数値解析モデルでの高強度 FRP グリッドは CR4, CR6, CR8 の 3 種類で、また、緩み高さは土圧が作用すると仮定して 1D(10.0m), 2D(20.0m)の 2 パターンを設定する。それに、対象としているトンネルは覆工コンクリートの劣化による変状も要因の一つであることから、覆工コンクリートの劣化度合いは、非劣化状態である覆工コンクリートの物性値の変形係数 E , 圧縮強さ σ_c , 引張強さ σ_t が 2 分の 1, 5 分の 1 (劣化度 : 50%, 80%) となるように設定した²⁾。

劣化した覆工の物性値は表-1 に示す。以上より、地山等級, FRP グリッドの規格, 覆工の劣化度により設定した解析ケースは表-2 に示す。

3. 背面空洞の位置による覆工損傷状況の比較

現地調査ではトンネル覆工コンクリートの背面にある空洞の位置は一箇所だけではないことが分かる。ここでは、覆工劣化度は 0% の場合に空洞位置によって一番損傷しやすいケース、いわゆる補強の需要が一番高いケースを抽出するために覆工コンクリート

の背面空洞が天端部①、天端部から少し偏移した部位②および肩部③にある三つのモデル (図-2) を比較することにした。

なお、設定した三つのモデルによるケーススタディは FRP グリッドの補強効果評価と適用条件の解明に活用される。

モデル①とモデル②の解析結果を比較すると、緩み高さ 1D の場合においては、DII 等級地山に対しモデル①の覆工天端部の地山側に引張破壊が発生しているが、モデル②では、地山側および内空側において引張破壊がともに発生している。

緩み高さ 2D の場合においては、地山等級の低下とともに地山側から内空側まで引張破壊が発生している。特に背面空洞の存在で覆工厚が薄くなった部位の地山側にせん断引張破壊が生じていることが分かる。

空洞が肩部にあるモデル③では、緩み高さ 1D の場合において、DII 等級地山に対し、天端部の内空側に引張破壊が発生している。一方、緩み高さ 2D の場合において、地山等級の低下とともに、引張破壊も覆

表-3 背面空洞の位置による覆工の損傷状況の比較 (劣化度 0%, 緩み高さ 2D)

背面空洞の位置	地山等級	覆工要素数(a)	塑性化した要素数(b)	損傷度(b/a) (%)
モデル①：天端	DI	92	4	4.3
	DII		18	19.6
モデル②：天端と肩部の間	DI	92	5	5.4
	DII		20	21.7
モデル③：肩部	D1	92	7	7.6
	DII		27	29.3

工の両側に拡大し、肩部の覆工が薄くなった部位の内空側にせん断破壊が発生した。また、表-3には覆工の劣化度0%で緩み高さ2Dに対応する覆工の損傷度の算出値を表す。地山等級DIからDIIまで変わると、覆工の損傷度は明らかに上がる。モデル③の結果に着目すると、覆工の損傷度は前者より約10%程度高くなる事が分かる。地山等級の低下とともに、せん断応力は次第に上がることで、モデル③の覆工におけるせん断応力はモデル①とモデル②のおよそ1.5倍になっていることが確認される。最大せん断応力が発生する箇所はいずれも覆工の肩部にあることが分かる。後節では、モデル③に対する覆工劣化度合いと補強方法の選定について理論的検討を加える。

4. FRP-PCM 工法補強効果の検討

(1) FRP グリッドによる補強範囲の設定

FRP-PCM 工法による変状トンネルの補強効果を詳細に考察するために、前章のモデルにおいてFRPグリッドによる補強範囲を90°と180°に分ける。図-3はそのイメージを示す。



図-3 範囲90°と範囲180°におけるFRPグリッド補強

(2) 覆工コンクリートのM-N性能曲線

覆工コンクリートに発生する断面力には一般的に、軸圧縮力、曲げモーメントおよびせん断応力があるが、トンネル覆工の局所的破壊に関しては、このうちの軸圧縮力と曲げモーメントが支配的要因となっ

て生じるケースが多い。すなわち、トンネル覆工の一部が塑性化する。塑性化によるトンネル覆工の崩壊は発生しなくても、トンネル内空に大きな変形が発生すれば、トンネルの走行性などの機能を著しく阻害したり、場合によってはその機能を失わせる状況に落ち込むので、トンネル限界状態の一つとして考慮しなければならない制約条件となる。

一方、トンネル覆工全体の限界状態を検討することは容易ではないために、覆工コンクリートの強度特性を十分に考えた上で、安全の確認を基本理念として、補強部材の限界状態を検討対象とすることが定められている³⁾。

覆工コンクリートと補強部材の限界状態を検討するためにM-N性能曲線が用いられる。ここでは、設計断面力の算定は、図-4に基づき、式(4.1)および式(4.2)によって行うものとする。

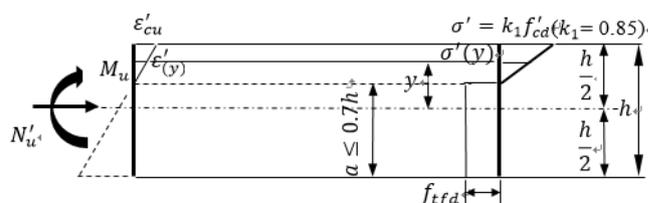


図-4 部材断面耐力の算定方法

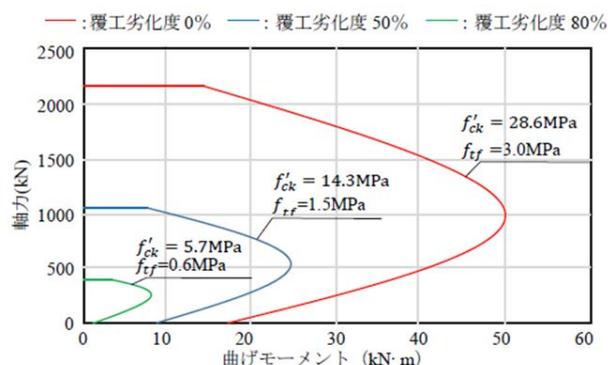


図-5 M-N性能曲線(背面空洞部位の覆工厚15cm)

また、引張側の応力状態は、ひび割れ深さ a までの範囲にSFの受け持つ設計引張強度 f_{tfd} が等分布になっているものとする。

$$M_{ud} = \frac{\int_{-h/2}^{h/2} \sigma'(y) \cdot y \cdot b dy}{\gamma_b} \quad (4.1)$$

$$N'_{ud} = \frac{\int_{-h/2}^{h/2} \sigma'(y) \cdot b dy}{\gamma_b} \quad (4.2)$$

ただし、 ε'_{cu} ：コンクリートの終局圧縮ひずみ

M_{ud} ：設計曲げ耐力

N'_{ud} ：設計軸方向圧縮耐力

h ：覆工厚

b ：単位幅（100cm）

γ_b ：部材係数（曲げ部材=1.15）

$k_1 = 0.85$

$$f'_{cd} : (=f'_{ck}/\gamma_c = f'_{ck}/1.3)$$

なお、設計軸圧縮耐力の上限値 N'_{oud} は、式（4.3）により算定するものとする。

$$N'_{oud} = (0.85 f'_{cd} \cdot A_c / \gamma_b) \quad (4.3)$$

ここに、 A_c ：覆工の断面積

f'_{cd} ：コンクリートの設計軸圧縮強度

γ_b ：部材係数（圧縮部材=1.3）

覆工の劣化度合いに対応したM-N性能曲線を図-5に示す。

図-6に、覆工コンクリートの劣化度0%で、緩み高さ2Dにおける覆工コンクリートに作用する軸応力と肩部における軸応力の分布を示す（+：圧縮，-：引張）。なお、図中の数字はFRPグリッドによる等

価厚さを表している。

いずれの地山等級においても軸応力の最大値には差はないが、肩部における軸応力を低減させており、FRP-PCM工法の施工により覆工の耐荷力の向上と覆工に生じる応力の低減効果が期待できる。また、その効果はFRPグリッドの規格が高いほど明らかになる。

また、覆工コンクリートの劣化度が大きいほど覆工に作用する軸力は低下している。上記の傾向は他の劣化度においても同様となることが分かる。緩み高に注目すると、いずれの地山等級においても緩み高が大きくなるにつれ、軸応力は大きくなり、肩部は約2倍となる。

FRP-PCM工法によるトンネル覆工コンクリートの補強効果を定量的に評価するために、まずは覆工に作用する軸応力およびモーメントを各ケース毎に算出して、図-5と照合する。つまり、性能曲線の内側（安全側）に位置するかどうかを確認する。

次式（4.4）により、覆工の各断面における最大モーメントを計算することはできる。

$$\sigma = \frac{M}{I} y \quad (4.4)$$

ここで、 σ ：覆工断面における最大軸応力（MPa）

I ：覆工断面中立軸に対する2次モーメント

$$\left(= \frac{bh^3}{12} \right)$$

y ：最大軸応力にある場所から中立軸までの距離 $\left(\frac{h}{2} \right)$

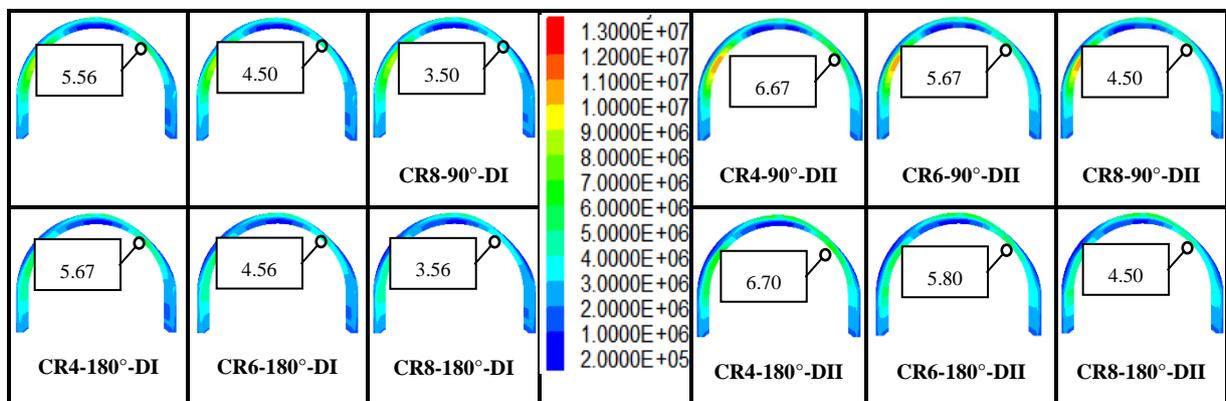


図-6 覆工に作用する軸応力の分布（劣化度0%、緩み高さ2D）（単位：Pa）

表-4 覆工肩部断面の最大モーメント(kN・m)

緩み山		CR4		CR6		CR8	
高等さ	級	90°	180°	90°	180°	90°	180°
1	DI	5.62	4.87	4.87	4.12	5.25	4.12
D	DII	2.62	2.62	3.00	2.62	2.25	1.87
2	DI	13.1	12.75	7.12	6.37	6.37	6.37
D	DII	2	6.75	4.87	7.12	4.87	6.00
3.37							
緩み山		CR4		CR6		CR8	
高等さ	級	90°	180°	90°	180°	90°	180°
1	DI	4.12	4.12	4.50	2.62	4.12	3.00
D	DII	4.87	3.37	3.00	3.00	3.00	2.25
2	DI	7.87	8.25	6.37	6.75	6.37	5.62
D	DII	8.62	6.75	8.62	6.37	8.25	6.00
6.00							
緩み山		CR4		CR6		CR8	
高等さ	級	90°	180°	90°	180°	90°	180°
1	DI	4.12	4.12	3.37	3.00	3.37	2.62
D	DII	4.87	4.12	4.12	9.37	4.12	3.75
2	DI	7.87	8.25	7.50	6.75	6.75	6.37
D	DII	8.62	8.25	7.87	6.37	7.87	6.37
6.37							

したがって、覆工各断面における最大モーメント M は次の式よりもとめられる。

$$M = \frac{\sigma b h^2}{6} \quad (4.5)$$

表-4 に覆工劣化度 0%, 50%, 80% の各ケースに対する覆工肩部の断面における最大モーメントの解析値を示す。全体的に見ると、覆工の劣化度が大きいほど覆工に作用するモーメントは増加している。同じ覆工劣化度においては、地山等級の低下とともにモーメントは低下していることが分かる。または、FRP グリッドの規格と補強範囲を上げると、モーメントも相対的に低下している。つまり、補強工はより多くのモーメントを分担していると考えられる。

前述のように、肩部に背面空洞があるケースでは健全度が顕著に下がる。これは、天端部の覆工の N-M 関係と肩部の N-M 関係を比較することから判明することができる。

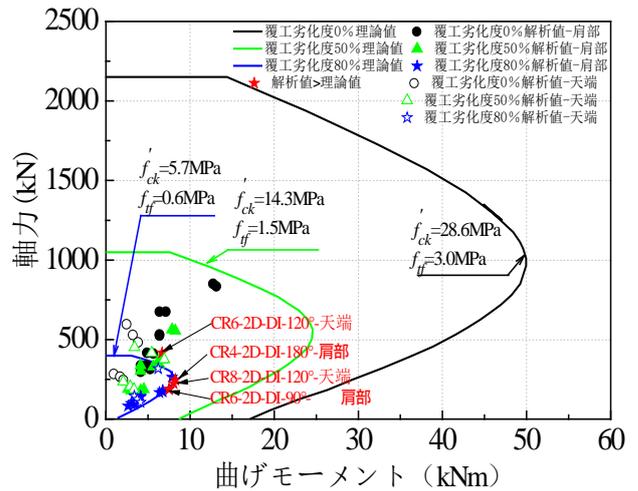


図-7 N-M の理論値と解析値 (地山等級 DI)

図-7 に、地山等級 DI における覆工の肩部と天端に作用するモーメントの解析値と図-4 によって計算された理論値の比較結果を示す。覆工劣化度 80% においては、CR4 補強ではなく、「CR6-2D-DI-120°-天端」と「CR8-2D-DI-120°-天端」、「CR4-2D-DI-180°-肩部」と「CR6-2D-DI-90°-天端」の 4 ケースの解析値は理論値を超え、破損することが分かる。その他のケースについては解析値が理論値に囲まれているので、健全性がよいとも言えよう。

一方、図-8 には、地山等級 DII の比較結果を示す。図によると、覆工コンクリート劣化度 80% において、「CR4-2D-DII-120°-天端」、「CR6-2D-DII-120°-天端」、「CR8-2D-DII-120°-天端」と「CR4-2D-DII-90°-肩部」、「CR4-2D-DII-180°-肩部」、「CR6-2D-DII-90°-肩部」、計 6 ケースの結果は理論値を超えているので、緩み圧の増加に伴い補強効果が下がっていくことが確認された。

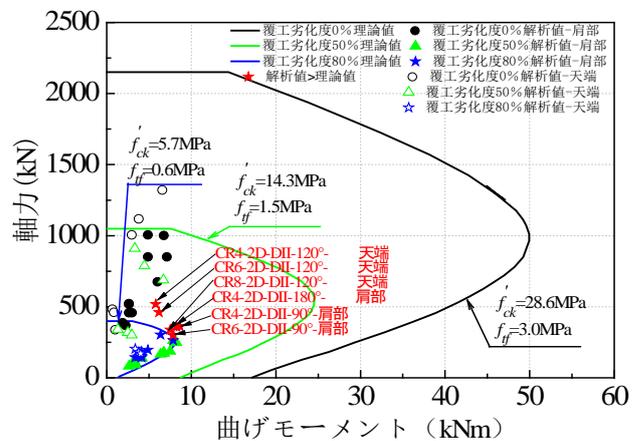


図-8 N-M の理論値と解析値 (地山等級 DII)

5. 終わりに

本研究では、緩み圧に起因する変状トンネルを対象に補強効果を検討するために、緩み圧の作用を考慮した有限差分変状解析に基づく検討の基づき、覆工コンクリートにおける軸力とモーメントの関係を示すM-N性能曲線を覆工コンクリートの劣化度合いと照合しながら求めた上で、FRP グリッド-PCM 工法による補強効果と適用条件を考察した。

覆工劣化度 0%と 50%の場合においては、規格の一番低いCR4 グリッドの補強であっても、解析値は理論値から離れているので、覆工を効果的に補強できることを明らかにした。しかしながら、覆工劣化度 80%の場合においては、緩み圧に応じてCR8 あるいはCR8 以上のFRP グリッドは必要になる。

参考文献：

- 1) 中村智, 山口浩平, Amiruddin A. Arwin, 谷口硯士:PCM 吹付け工法による2層接触配置されたCFRP グリッドを用いたRC はりの曲げ補強効果, コンクリート工学年次論文集 Vol.31, No.2, pp.1429-1434, 2009.
- 2) Yujing Jiang, Xiaoshan Wang, Bo Li, Yukihiro Higashi, Kenshi Taniguchi and Kosei Ishida: Estimation of Reinforcing Effects of FRP-PCM Method on Degraded Tunnel Linings, *Soil & Foundations*, Vol.57, No.3, pp.327-340, 2017.
- 3) 日本鉄鋼連盟鋼繊維補強コンクリート設計施工マニュアル(トンネル編)改訂委員会編:鋼繊維補強コンクリート設計施工マニュアル, 技報堂, 2002.

EVALUATION OF REINFORCING EFFECTS OF FRP-PCM METHOD ON DEGRADED TUNNEL LININGS

Yujing JIANG, Yuan GAO and Dairiku KOGA

In the present study, the reinforcing effect of FRP-PCM method on degraded tunnels was estimated. Laboratory direct shear test and bending test were carried out on the specimens reinforced with various grades of FRP grids to obtain the mechanical properties of bonding surfaces between PCM and concrete reinforced by FRP grids. Numerical modeling of reinforced tunnels by FRP-PCM method was performed to investigate the reinforcing performance of FRP-PCM method on degraded tunnel linings. In numerical models, tunnel health degrees were considered and applicable conditions under which the application of FRP-PCM method could effectively reinforce tunnel linings were proposed.