

トンネル耐震性向上のための FRP グリッドを用いた覆工内面補強効果の評価

長崎大学大学院 正会員 ○李 博 フェロー会員 蔣 宇静

長崎大学大学院 正会員 大嶺 聖 杉本 知史

1. はじめに

山岳トンネルは地震に強い構造物であると言われているが、兵庫県南部地震¹⁾や新潟県中越地震²⁾³⁾では、地震の規模や地山の状態、トンネルの構造によって山岳トンネルも地震による被害を受ける可能性があることが示された。現在、山岳トンネルの地震対策として内巻工や内面補強工が適用されているが、建築限界の確保が困難であることや、腐食や施工性の悪さ、施工の長期化などの問題点が挙げられている。そこで近年、上記のような問題点を改善するための工法として FRP グリッドを用いた補強工法（以下、FRP-PCM 工法）が注目されている。しかし、その施工事例はまだ少なく、山岳トンネルにおける耐震性向上のための補強効果に関する定量的な評価が少ないが現状である。そこで、本研究では、矢板工法と NATM 工法で施工されたトンネルを対象とし、地震時におけるトンネルの変状メカニズムを考察するとともに、FRP-PCM 工法の補強効果を評価することを目的とする。

2. 動的解析モデルの概要

図-1 (a), (b) に解析モデルの概略図を示す。本研究では、矢板工法と NATM 工法によるトンネルを対象とした。矢板工法においては、背面空洞がトンネルの天端部に存在、肩部に存在、存在しないモデルを作成した。また、NATM 工法によるトンネルモデルは、施工方法の違いが FRP-PCM 工法の補強効果に及ぼす影響を考察するために作成した。ここでは、一例として、矢板工法において背面空洞が覆工の天端部に存在するモデルと NATM 工法によるモデルを示している。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左右の領域を 2D (D: 掘削径 10m), 上下の領域を 1D とした。補強工は、面要素 (Liner 要素) を用いてモデル化し、補強範囲は、背面空洞を十分に覆うことが可能にするようにスプリングライン (S.L) より上部を補強する上半補強とした。背面空洞は、トンネル中央から 60° の範囲とした。

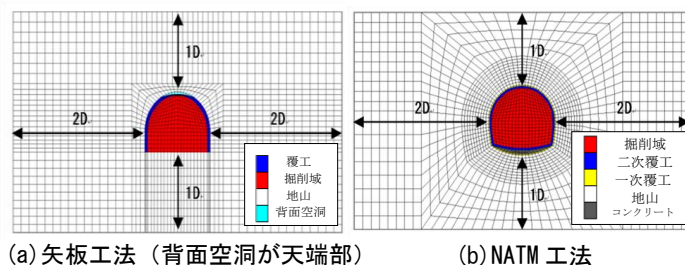


図-1 解析モデル概略図

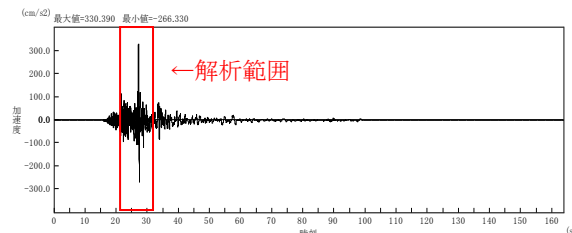


図-2 入力加速度

表-1 解析ケース

補強	地山等級	施工方法	背面空洞
無補強 補強	CI CII	矢板工法 NATM工法	天端部 肩部 なし

表-2 地山とトンネルの物性値

項目	CI級地山	CII級地山	覆工	裏込め材
γ (kN/m ³)	23.5	22.6	24	9.81
E (MPa)	1960	980	24500	12
ν	0.3	0.3	0.2	0.13
c (MPa)	1.96	0.98	6.99	0.5
ϕ (deg)	45	40	40	10
σ_t	0.39	0.23	3	0.2

表-3 補強材料の物性値⁵⁾

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)
FRPグリッド	100000	1400	2.217	17.7	13.369
PCM	26000	4.6			—

3. 地震動の概要

地震動については、新潟県中越沖地震を対象地震とし、観測地点 NIG019 小千谷⁴⁾の観測地震動（震度 6 弱）を選定した。図-2 に入力した加速度波形を示す。本解析で使用したのは、最大波形が観測される 20.8s~30.8s の 10 秒間である。また、最大加速度は、約 330gal である。

4. 解析ケースと物性値

表-1~表-3 にそれぞれ解析ケース、地山とトンネル物性値、補強材料の物性値⁵⁾を示す。解析ケースは、地山等級、施工方法、補強の有無、背面空洞の有無と位置関係により設定した。解析対象の地山は、土木学会等の適用基準より CI 級および CII 級の岩種⁶⁾とした。覆工厚は 45cm で、空洞部分の覆工

厚は 15cm とした。補強工の付着面における物性値はトンネル覆工を模擬した供試体を用いて、デジタル制御型一面せん断試験機による一面せん断付着強度試験を実施することにより算出し⁵⁾、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。

5. 解析結果と考察

以下の考察は、全て地震動を与えてから 6.7 秒付近のデータに基づくものである。6.7 秒付近は、加振後、解析モデルの右方向へ加速度が最大となる時刻である。

図-3, 4 に CII 級地山における覆工の塑性領域図を示す。矢板工法の場合、背面空洞の位置に関わらず破壊が覆工の肩部に発生し、特に背面空洞が覆工の肩部に存在する場合に破壊が顕著に現れていた。背面空洞が覆工の肩部に存在することにより覆工の断面積が小さくなり応力が集中するためである。しかし、すべてのケースで補強により破壊を抑制する結果となった。NATM 工法の場合は、覆工の肩部においては補強により覆工に生じる破壊を抑制しているが、すべてのケースで覆工とインバートの接合部で破壊は発生した。なお、CI 級地山におけるすべてのケースで破壊は生じなかった。

図-5 に覆工に作用する軸応力分布図を示す。正の値は圧縮、負の値は引張を意味する。図より、背面空洞の存在位置や有無、断面形状に関わらず、振動方向側の覆工肩部の内空側で大きな圧縮応力が生じた。

図-6, 7 に覆工の肩部における軸応力の最大値を示す。FRP-PCM 工法によるトンネル覆工の補強効果を定量的に評価するため、覆工に作用する軸応力の低減率 R_σ を式(1)により算出した。

$$R_\sigma = \frac{\sigma_{nr} - \sigma_r}{\sigma_{nr}} \times 100 \quad (1)$$

ここで、 σ_{nr} は無補強時における軸応力(MPa)、 σ_r は内面補強時における軸応力(MPa)である。背面空洞の位置で比較すると、背面空洞が覆工の天端部に存在するケースにおいては 27%の応力低減効果があるのに対し、背面空洞が覆工の肩部に存在するケースでは 52%であった。この結果、背面空洞が覆工の肩部に存在する方が補強効果が大きいことが分かる。施工方法の違いで比較すると、矢板工法における背面空洞がないケースでは 31%の応力低減効果があるのに対し、NATM 工法では 49%であった。この結果から、NATM 工法の方が補強効果が大きいことが分かる。

6. おわりに

本研究では、矢板工法と NATM 工法で施工されたトンネルを対象に、地震時における FRP-PCM 工法の補強効果の比較を行った。その結果、施工方法、補強の有無、地山等級、背面空洞の有無と位置関係等の条件によって補強効果に違いがあることが明らかになった。今後は、異なる地震動、より軟弱な地山等級、異なる空洞範囲、覆工の経年劣化なども考慮して、より詳細な補強効果の評価を進めていく。

【参考文献】

- 1) 阪神・淡路大震災調査報告委員会：阪神・淡路大震災調査報告 土木構造物の被害，1994.
- 2) 真下英人：新潟県中越地震における道路トンネルの被害，第 36 巻，第 11 号，pp.55-63，2005.
- 3) 清水満，斎藤貴，鈴木尊，朝倉俊弘：新潟県中越地震による鉄道トンネル被害調査結果，トンネルと地下，第 38 巻，第 4 号，pp.49-57，2007.
- 4) 防災科学研究所：強震ネットワーク K-NET. 2007.
- 5) 上野竜志，東幸宏，蔣宇静，李博，石田耕生，竹内一博，谷口硯土，米田裕樹：トンネル補強材としての FRP グリッドの付着強度と補強効果に関する考察，土木学会西部支部研究発表会講演発表集，pp.429-430，2011.
- 6) 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.
- 7) 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.

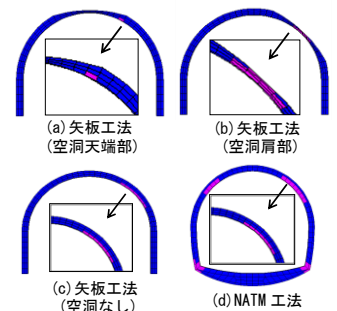


図-3 覆工の塑性領域図
(CII 級地山，無補強)

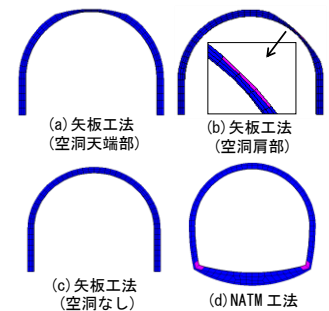


図-4 覆工の塑性領域図
(CII 級地山，補強)

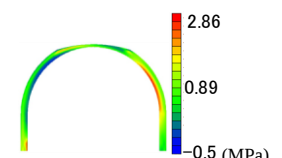


図-5 軸応力分布図
(CII 級地山，無補強，空洞なし)

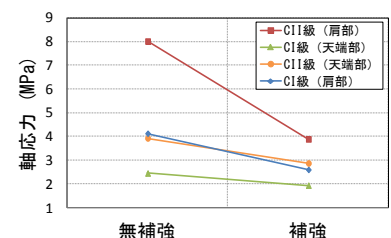


図-6 軸応力の最大値
(背面空洞の位置による比較)

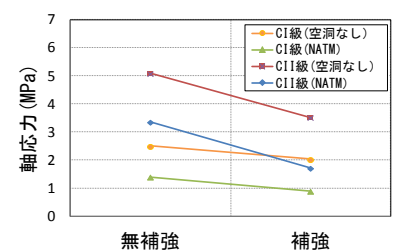


図-7 軸応力の最大値
(施工方法による比較)