

充填硬化材の加圧注入圧を利用した既設トンネルの補強技術の開発 ～3次元FEM解析による補強成立性の検討～

大成建設株式会社 正会員 〇猪口 泰彦 正会員 高倉 克彦
大成建設株式会社 正会員 鈴木 三馨 正会員 森田 泰司
一般財団法人エンジニアリング協会 正会員 竹東 正孝

1. はじめに

高度成長期以来構築されてきた建設物が、老朽化あるいは建設当時との荷重条件の相違による耐荷力不足の問題に近い将来直面することは、想像に難くない。都市部の地下に建設されている地下鉄、共同溝トンネルなどについても、都市再開発による外荷重変化に伴う覆工コンクリートの変状といった事案が浮かび上がってきており、都市の再生の観点からも、トンネルの補強技術に対する需要が高まっているといえる。

このような状況に鑑み、既設トンネルの補強を目的とした技術の開発を行っており、本編ではこの補強技術の成立性に関して行った3次元FEM解析結果について報告する。

2. 補強技術の概要と成立性のポイント

補強方法¹⁾は、図-1に示すように、既設トンネルの内面にゴムチューブを貼付け、その内側に補強リングを配置する。ゴムチューブ内にセメントミルクを加圧注入してゴムに圧縮応力を生じさせ、既設トンネルを外側(地盤側)へ押す圧力を作用させ、その反力を補強リングの軸圧縮力に負担させるものである。

補強技術の成立性のポイントとしては、①セメントミルクが液体から硬化体に変化する過程で、加圧注入圧が消失してしまわないこと、②既設トンネルに悪影響を与えない加圧注入の仕様を明確にすることが挙げられる。①については参考文献 2)において確認を行った。②については、補強リングを離散的に配置してセメントミルクの加圧注入を行うことから、セグメントのリング間継手に与える影響を考慮する必要があると共に、セグメント自体の軸圧縮力を低減させることから、引張鉄筋への影響を考慮する必要があるためである。以下に②について行った3次元FEM解析結果についてその概要を述べる。

3. 解析モデル

検討時期毎の解析モデル模式図を表-1に示す。セグメント間継手は回転ばねにモデル化し、隣接するセグメントリングの影響を考慮するために、着目するセグメントリングの両側に1/2幅のセグメントリングを設け、

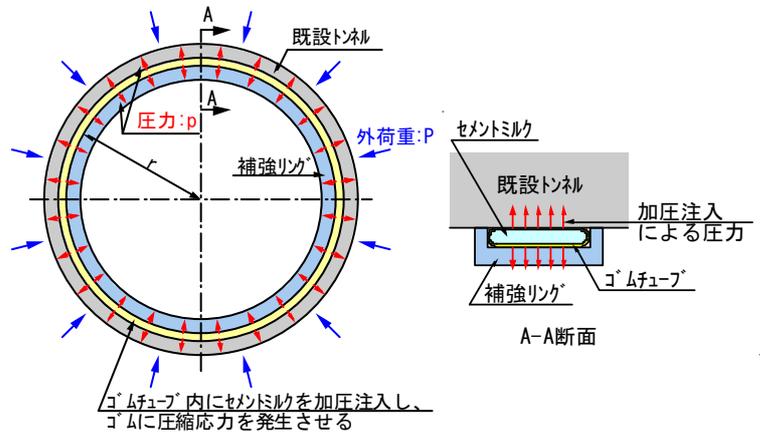


図-1 補強方法の概要

表-1 検討時期と解析モデル

解析モデル構成	既設トンネル(3リング)	既設トンネル(3リング) +補強リング(1リング)	既設トンネル(3リング) +補強リング(3リング)
検討時期	0. 設計荷重時	1. 充填材加圧注入時 2-1. 硬化後残存圧力作用時	2-2. 硬化後残存圧力作用時
解析モデル模式図			

その間のリング間継手をせん断ばねにモデル化している。変位制御ばねは、充填材が液体の状態から硬化時に発生する圧力を既設トンネルと補強リングに伝達する引張カットとしている。

4. 解析ケース

構造系として既設トンネル径を4.3m, 8.3mとし、土被りを15m, 30mに設定した4ケースとしている。荷重としては、設計荷重、充填材加圧注入圧、充填材硬化後残存圧力を各検討時期に作用させる。充填材加圧注入圧状況を図-2に示す。充填材硬化後残存圧力は、参考文献2)より、充填材加圧注入圧の2/3としている。なお、既設トンネルならびに補強リングの仕様は、標準セグメントの仕様を参考に設定している。

表-2 解析ケース

ケース名	D043-DE15	D043-DE30	D083-DE15	D083-DE30
トンネル外径Do (m)	4.3		8.3	
土被り厚Ho (m)	15	30	15	30
地下水位(GL-.m)	5			
設定土層	沖積砂層			
土質物性値	$\gamma=18\text{kN/m}^3$ ($\gamma'=8\text{kN/m}^3$), $\phi=20^\circ$, $c=0\text{kN/m}^2$, $\lambda=0.5$			
上載荷重 (kN/m ²)	10			
セグメント厚 (mm)	200		350	
セグメント幅 (mm)	1000			
補強リング断面形状				

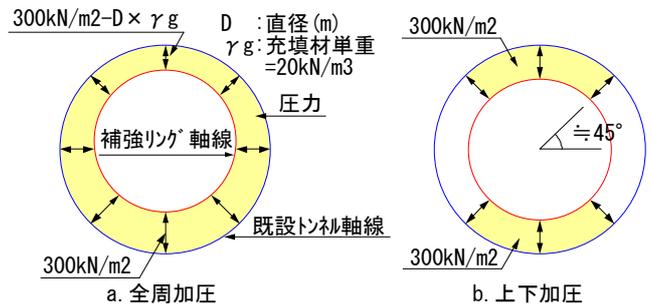


図-2 充填材加圧注入圧状況

5. 検討結果

3次元FEM解析結果から、各検討時期の断面力を抽出し、各部の応力を算出した。このとき、設計荷重時に許容応力度の85%が費やされているものとして、その後の付加荷重時の応力の設計荷重時からの増分応力が許容応力度の15%以内か否かに着目した。表-3に応力照査結果のまとめを示す。表中の着色部は、充填材加圧注入圧を300kN/m²に設定すると、各部の応力が許容値を超える場合を示しており、その場合には、充填材加圧注入圧を()内数値未満とする必要があることを示している。全体的に土被りが小さく、トンネル径が小さい場合が応力的に厳しくなっていると考えられる。

表-3 応力照査結果のまとめ

既設トンネル径(m)	4.3		8.3		4.3		8.3		
	土被り(m)		土被り(m)		土被り(m)		土被り(m)		
	15	30	15	30	15	30	15	30	
加圧注入範囲	全周加圧				上下加圧				
既設トンネル	セグメント	0.46 (138)	1.13 (>300)	0.65 (195)	1.36 (>300)	0.51 (153)	1.60 (>300)	0.43 (129)	0.99 (297)
	セグメント継手	0.35 (105)	2.04 (>300)	2.10 (>300)	2.59 (>300)	0.32 (96)	1.97 (>300)	1.18 (>300)	1.85 (>300)
	リング間継手	1.84 (>300)	4.34 (>300)	1.45 (>300)	1.56 (>300)	2.50 (>300)	2.34 (>300)	0.92 (276)	0.96 (288)
	ベース主桁	4.00 (>300)	3.99 (>300)	2.98 (>300)	2.98 (>300)	2.54 (>300)	2.53 (>300)	2.10 (>300)	2.10 (>300)
補強リング									

注1) 表中の数値は、許容応力度残存分/増分応力の値を示す。

2) 表中の()数値は、可能な充填材加圧注入圧推定値(kN/m²)を示す。

6. まとめ

3次元FEM解析結果から、種々のケースに関して、既設トンネルに悪影響を与えない充填材の加圧注入圧を推定できた。今後、円筒形の試験体に対する充填材加圧注入実験ならびに載荷実験を行っていく予定である。本研究は、公益財団法人JKAから機械工業振興補助事業の補助(26-72)を受けて、一般財団法人エンジニアリング協会 地下開発利用研究センターが、「平成26年度老朽化トンネル補強技術の研究」として検討を進め、その成果をとりまとめたものであり、大成建設株式会社は地下開発利用研究センターから検討の一部を受託して行ったものです。なお、本研究を進めるにあたっては、調査研究委員会(委員長 公立大学法人 前橋工科大学 辻幸和学長)が編成され、貴重なご意見を頂きました。関係各位に心から謝意を表します。

参考文献

- 1) 斎賀ほか、「充填硬化材の加圧注入圧を利用した既設トンネルの補強技術の開発～補強技術の概要～」土木学会第69回年次学術講演会, VI-109, 2014.9
- 2) 高倉ほか、「充填硬化材の加圧注入圧を利用した既設トンネルの補強技術の開発～充填材の硬化過程における残存圧力確認実験～」土木学会第69回年次学術講演会, VI-110, 2014.9