

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 ～2次元フレーム解析による3次元FEM解析の再現性について～

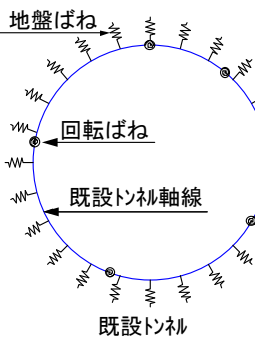
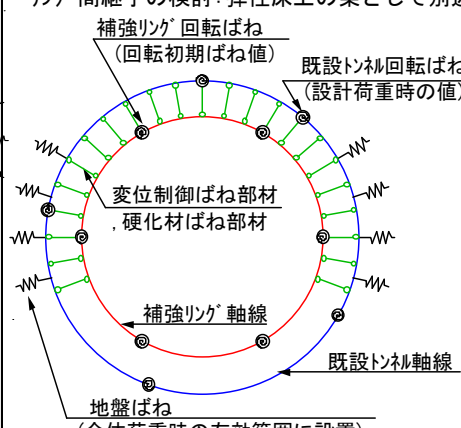
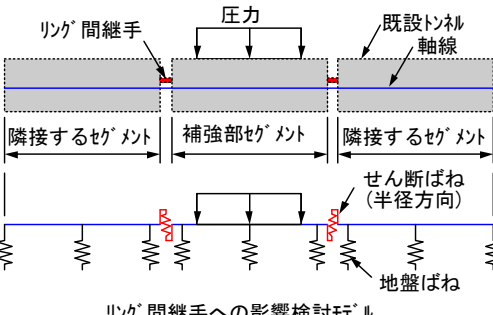
大成建設株式会社 正会員 〇高倉 克彦 正会員 森田 泰司
大成建設株式会社 正会員 斎賀 雄 正会員 猪口 泰彦
一般財団法人エンジニアリング協会 正会員 竹東 正孝

1. はじめに

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し、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て、既設トンネルを外側（地盤側）へ押す圧力を作用させる既設トンネルの補強技術の開発を行っているが、このような補強技術の適用検討にあたっては3次元FEM解析²⁾を用いることが望ましい。しかし、3次元FEM解析の実施については、解析プログラムの導入・維持・管理も一般的ではなく、パーソナルコンピュータの処理能力が格段に向上しているとはいえ、データ作成などにはかなりの労力を傾注する必要がある。そこで、普及している2次元フレーム解析プログラムによる3次元FEM解析結果の再現を試みた。以下のその概要を述べる。

2. 2次元フレーム解析による解析方法

表-1 2次元フレーム解析による解析方法

解析 ツール	検討ステップ		
	0. 設計荷重時	1. 充填材加圧注入時	2. 硬化後残存圧力作用時
3次元 FEM 解析	・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) 逐次解析、地盤ばね・回転ばねの非線形性考慮	・既設トンネル (3リング) +補強リング (3リング)
2次元 フレーム 解析	・既設トンネル (1リング) ・地盤ばね：繰返し計算 ・回転ばね：感度分析によって、3次元FEM解析結果の再現する値を採用。 	・既設トンネル (1リング) + 補強リング (1リング) ・設計荷重時からの増分。 ・地盤ばね：設計荷重時+各ステップまでの荷重を載荷したときの有効範囲に設定 (繰返し計算)。 ・回転ばね：既設トンネル→設計荷重時の値、補強リング→初期値に固定。 ・既設トンネルと補強リング間の部材：充填材加圧注入時→圧縮側_∞・引張側₀、硬化後残存圧力作用時→圧縮側₀・ゴム硬化材の直列ばね・引張側₀ (繰返し計算)。 ・荷重：充填材加圧注入時→既設トンネルへの影響に着目するために1/2分を載荷。 ・リング間継手の検討：弾性床上の梁として別途フレーム解析。 	

3次元FEM解析プログラムとして「ABAQUS」を、2次元フレーム解析プログラムとして「UC-1」を念頭におき、以後、それぞれを「3D-FEM」、「2D-フレーム」と呼ぶ。2D-フレームの制約としては、①3次元構造をモデル化できない、②ばね部材の非線形性を自動計算できない、③構造系の変化・荷重の変化に対する逐次計算ができないといった点が挙げられる。今回の2D-フレームによる解析においては、検討ステップに応じて表-1に示す対処を行うこととした。

キーワード 老朽化、トンネル、補強、充填硬化材、加圧注入

連絡先 〒245-0051 横浜市戸塚区名瀬町344-1 大成建設株式会社 技術センター土木技術開発部 TEL 045-814-7229

3. 比較結果

2D-フレームによって、既設トンネル径を4.3m, 8.3m, 土被りを15m, 30mの4種類の配置とし、充填材の加圧注入範囲を全周加圧と上下加圧〔文献2〕参照〕の2種類とした解析を行った。なお、検討ステップは表-1に示したとおりである。

表-2に設計荷重時においてセグメント間継手の回転ばねを変化させた場合の曲げモーメントの状況を示す。3D-FEMをよく表す回転ばね値は、回転ばね設定値の最大値(初期値)と考えられることから、以降の検討ステップにおいてもこの値を用いることとした。

表-3に既設トンネルに関する3D-FEMと2D-フレームの変位および断面力の分布形状についての比較結果例を示す。この結果からすると、2D-フレームは3D-FEMを概ね再現していると考えられる。

次に、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応力照査結果の比較を表-4に示す。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いる。全周加圧の場合には、2D-フレームは3D-FEMよりも安全側の値を示しており、上下加圧の場合には、一部を除いて逆の状況となっている。この結果からすると、全周加圧の場合には、2D-フレームを設計ツールとして適用できる可能性は高いと考えられる。

4. まとめ

2D-フレームによる3D-FEMの再現を試みたが、断面力等の分布形の再現性は高いが、応力照査結果を比べると、両者の差は小さいとはいえない。今後、ケーススタディや円筒形試験体に対する載荷実験等を行って2D-フレームの適用性も検討していく予定である。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) 猪口ほか、「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～3次元FEM解析による補強成立性の検討～」土木学会第70回年次学術講演会, 2015.9

表-2 セグメント間継手回転ばねの設定例(φ4.3m, 土被り15m)

解析ツール 回転ばね (kN・m/rad)	3D-FEM	2D-フレーム		
	非線形自動計算	55000 (最大値)	10000 (中間値)	3500 (最小値)
曲げ モーメント (kN・m)	最大:28.2, 最小:-31.8	最大:26.5, 最小:-28.7	最大:21.6, 最小:-24.6	最大:17.2, 最小:-19.9

表-3 解析結果(既設トンネル)の比較例
(φ4.3m, 土被り15m, 全周加圧)

指標	設計荷重時	充填材 加圧注入時	硬化後残存 圧力作用時
変位			
曲げ モーメント			
軸力			
せん断力			

注) 青線:3D-FEM, 赤線:2D-フレーム

表-4 応力度照査結果の比較

既設トンネル径(m)		4.3		8.3		4.3		8.3		
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	3D-FEM	0.46	1.14	0.65	1.36	0.51	1.86	0.43	0.99
		2D-フレーム	0.34	1.01	0.64	1.25	0.64	2.16	0.67	1.51
	継手	3D-FEM	0.35	2.04	2.10	2.59	0.32	1.97	1.18	1.85
		2D-フレーム	0.22	1.33	0.42	1.22	0.77	3.39	0.43	1.28

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。