

III-449 3次元FEM解析による垂直縫地ボルト効果のシミュレーション解析

日本鉄道建設公団盛岡支社工事部長 正会員 高野 彬
 (株)大林組 ○正会員 秋好賢治 正会員 三上哲司
 正会員 居相好信 正会員 野々上良男

1. はじめに 現在我が国におけるトンネル工法としては、吹付コンクリートとロックボルトを用いたNATMが標準工法となっている。この内ロックボルトは、地山と一体となってトンネル周辺地山の支保能力を積極的に利用するための有効な支保部材である。ロックボルトの利用法の一つとして、土被りの小さいトンネルにおいてロックボルトを地表面から垂直縫地ボルトとして打設することにより、地表面沈下抑制効果を発揮することが経験的に認められている。

一方、大型計算機を用いた数値解析技術は土木分野においても現在各方面で研究開発されている。その中でトンネルに関する数値解析は、地山評価・設計・施工・計測において広く利用されているが、トンネルの幾何学的形状および施工過程等から考えて、詳細な検討を行うに当たっては3次元解析が必要とされる。

本報告は、CADを用いた3次元FEM解析により垂直縫地ボルトを採用した土被りの小さなトンネルの地山挙動のシミュレーション解析を行い、垂直縫地ボルトの作用効果について検討を加えたものである。

2. 3次元FEM解析

2-1. 解析概要 3次元解析における問題点としては、モデル化とコーディング、解析結果の表示と評価が挙げられる。これらの問題を克服するため、大規模なFEM解析を可能にし、結果表示をモデルの任意断面のあらゆる角度から視覚的にカラーグラフィックで評価できるCADを用いた解析システムを確立した(図-1参照)。

本解析では、腐食性粘性土を介在した段丘砂礫層が堆積する不安定な地盤に施工された、土被り6~8m、高さ6m、幅5.4mの馬蹄形のNATMトンネルの坑口部をモデル化した。なお、本トンネルの地上には民家が存在するため、地表面沈下の抑制対策として、地表から垂直縫地ボルトを、トンネル内から岩盤固結法を施して地山を補強している。

解析条件は、図-2に示すように幅40m、高さ25.5m、奥行き22mの領域で、要素総数3230、節点総数3424のモデルを用いて、3次元弾塑性解析を行った(降伏条件:Drucker-Prager)。モデル化した材料を表-1に示す。掘削条件は全断面逐次掘削後、直ちに支保建込みとした。

以上の解析条件より、解析モデルを3次元的に表示したものが図-3メッシュ図である。

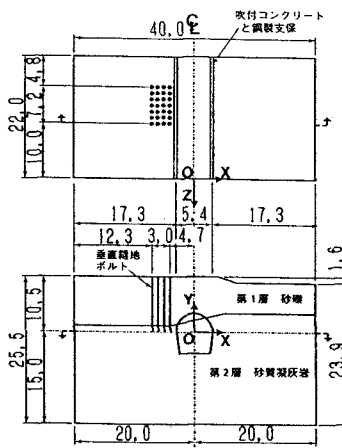


図-2. 解析モデル図

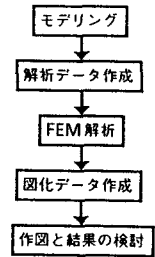


図-1. 解析システムフロー図

区分	種類	要素のモデル化	備考
地山	第1層 砂礫	8節点3次元ソリッド要素	N=50
	第2層 砂質凝灰岩	— + —	$\sigma_c = 83 \text{ kg/cm}^2$
支保	吹付コンクリートと鋼製支保	— + —	
	垂直縫地ボルト	2節点線形トラス要素	

表-1. 材料モデル

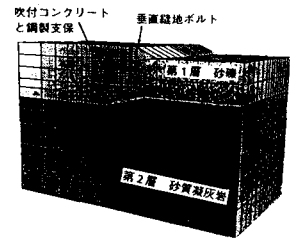


図-3. 解析メッシュ図

2-2. 解析結果と考察 解析結果の一例として、図-4に地表面沈下量コンタ経時変化図、図-5に局所安全率コンタ図を示す。図-4より、トンネル掘削の進行に従って順次地表面が沈下していくこと、垂直縫

地ボルト打設領域は他の部分と比べて地表面沈下量が小さいことが分かる。また図-5より、切羽前方約1D(D:トンネル径)以内では局所安全率が小さいことから、トンネル掘削により切羽前方地山が緩んでいくことが分かる。

次に、解析結果と計測結果の比較として、図-6垂直縫地ボルト軸力経時変化図を示す(解析結果と計測結果の最大値で無次元化)。ボルト軸力は、地表付近⑤で大きさが異なるが、概略傾向は同じである。即ち、ボルト軸力は、切羽接近段階では全体的に圧縮力を受け、さらに切羽がボルト前方1D以内まで接近すると地中深部②では圧縮力が急激に増加している。その後、切羽が離れるに従って、地表付近のボルト軸力は圧縮側から引張側へ移行している。

ボルト軸力の圧縮力発生原因は、垂直縫地ボルトがトンネル側方に打設されていること、ボルト先端が砂質凝灰岩層まで定着されていることから、切羽接近に伴うボルト周辺地山の複雑な挙動とボルトの杭的挙動を反映したものと考えられる。また、切羽の進行(計測断面の通過)に伴う引張側への移行は、ボルトの吊り下げ効果によるものと考えられる。

図-7に最終地表面沈下量(解析結果と計測結果の最大値で無次元化)を示す。これより、解析・計測結果ともにボルト打設領域は非打設領域に比べて最終地表面沈下量が20~30%程度小さくなっていることが分かる。

3. まとめ 以上、3次元FEM解析により垂直縫地ボルト効果をシミュレーション解析した結果、トンネル周辺地山挙動を詳細に検討する上で、3次元解析が非常に有効であると共に、①垂直縫地ボルトは、切羽前方から地表面沈下抑制および地山の緩み抑制に効果を発揮する。②垂直縫地ボルトの挙動は、打設位置、地層構成等により複雑な挙動を示す。③垂直縫地ボルトの作用機構は、杭的效果および吊り下げ効果と共に、定性的ではあるが地山せん断抵抗力の向上が考えられる。

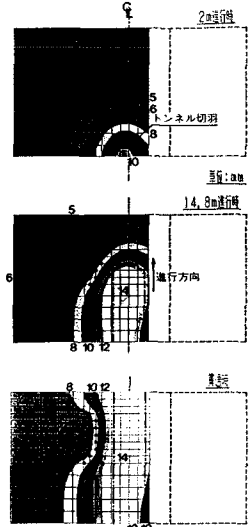


図-4. 地表面沈下量コンタ経時変化図

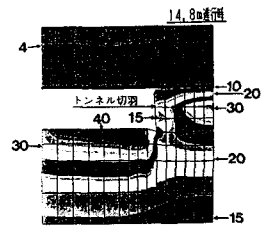


図-5. 局所安全率コンタ図

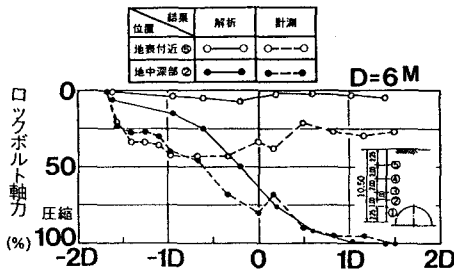


図-6. 垂直縫地ボルト軸力経時変化図

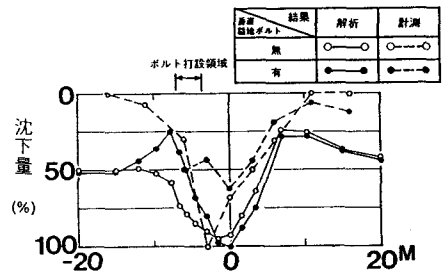


図-7. 最終地表面沈下量

4. あとがき トンネル等地下構造物の3次元解析を行うに当たっては、解析領域・掘削条件を含むモデル化、地山や支保部材の入力物性値等について、さらに研究を進める必要がある。

今後は、今回の結果をより詳細に検討して垂直縫地ボルトの作用効果機構等を解明すると共に、トンネル交差部等複雑なトンネル形状の地山挙動に関して、3次元解析を行い検討を加えたい。

【参考文献】 山口泰男・谷垣健司・池田 豊:民家下6mの段丘層を掘る,トンネルと地下, pp 39~47, Vol. 18, no. 10, 1987年10月。