

ボルトによる地盤補強のメカニズムについて

ケイ・エム調査設計株式会社 正 村尾典孝
 セントラルコンサルタント(株) 正 星野貴史
 山口大学工学部 学○足立光
 山口大学工学部 正 清水則一

1. はじめに

一般に、土被りの浅い未固結地山に掘削されたトンネルおよびトンネル周辺地山は、不連続体的な挙動を示し、通常よく用いられている連続体解析手法では、十分にその挙動を表現できないことが知られている。そこで筆者らは、自由度の高い不連続体的挙動を表すことができ、それにより、対象とする地山の挙動をよりよく表現できる可能性のある個別要素法(DEM)に基づく粒状体解析手法¹⁾を用いて、ボルトの効果のメカニズム等について考察している^{2,4)}。本報告では、トンネル掘削シミュレーションにより地山の挙動やボルト効果のメカニズムの考察を行う。

2. 粒状体解析

粒状体モデルは媒質を粒子の集合体として取り扱う。このモデルは動的挙動を扱うのに適している数値解析手法である個別要素法(DEM)に基づき、連続体とは異なり、個々の要素がお互いに離れたり、滑ったりすることができる点に大きな特徴がある。DEMでは各要素を剛体と考え、各要素の変形および力の伝達とは別の要素との接点のみで生じるものとしている。解析にはPFC2D(Itasca社汎用プログラム³⁾)を用いる。この特徴の1つは、粒子同士を連結させることで、鉄筋ボルトや覆工が模擬できることである。

3. トンネル掘削シミュレーション

3.1 解析条件

解析ケースは土被りが2Dの砂質地山で、掘削パターンは素掘り、覆工のみ、覆工とボルトを同時に考慮した3パターン行う。解析領域の概略図および材料パラメータを図1、表1に示す。図2はトンネル掘削前の解析モデルの応力分布であり、想定地山を再現しているといえる。

3.2 解析結果

掘削後の粒子分布および接触力分布を図3に示す。ここで接触力とは粒子間の圧縮力であり図3において、接触力の強さを線の太さで表している。素掘りでは自立できず崩壊しているが、覆工を施した結果と覆工にボルトを打設した結果は、視覚的には変形も生じておらず安定しているように見える。しかし接触力分布を見ると、素掘りはもちろんのこと、覆工を施した結果にもトンネル周辺に接触力が低下した領域、いわゆるゆるみ領域が生じているが、覆工にボルトを打設した結果では、かなり抑制されているのがわかる。

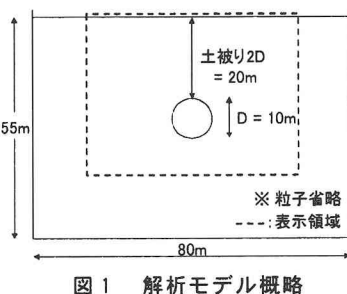


図1 解析モデル概略

表1 材料パラメータ	
領域サイズ(m ²)	55×80
粒径(m)	0.3~1.0
粒子数(個)	約53000
ばね定数(N/m)	粒子間 Kn 1.0×10 ⁸
	Ks 5.0×10 ⁷
壁-粒子間	Kn 1.0×10 ⁸
	Ks 5.0×10 ⁷
粒子間摩擦係数	0.5
粒子密度(kN/m ³)	200
Contact Bond (MN)	砂質 0
n_bond, s_bond	0

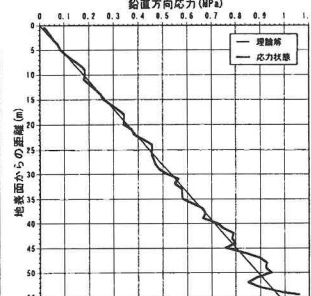


図2 応力分布

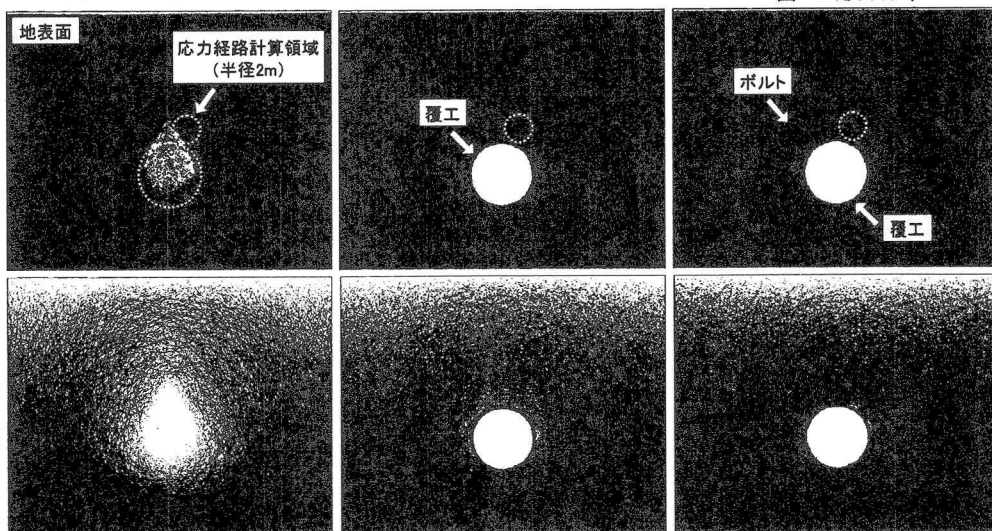


図3 崩壊後の粒子分布と接触力分布

(左:素掘り 中:覆工 右:覆工+ボルト)

次に、トンネル周辺の周方向応力 σ_θ と半径方向応力 σ_r の分布を調べる。ここで、粒状体解析では直接応力を求めることができないため、図4に示すようにある領域を指定し、その領域内の接触力から平均応力を求める。この方法により5方向の応力分布を調べた。結果の一例として、90°方向(図4の実線ライン上)の結果について図5に示す。素掘りでは、トンネル周辺の初期応力が完全に低下し、地表面付近ではアーチ効果によって σ_θ が増加しているのがわかる。覆工のみの場合、トンネルは一応安定しているが、 σ_θ のピークが天端頭上約4mの位置にあり、この位置までゆるみが広がっていると考えられる。覆工+ボルトの場合、弾性解の応力分布とほぼ同じ傾向であり、粒状体であるにもかかわらず、連続体的な挙動を示している。

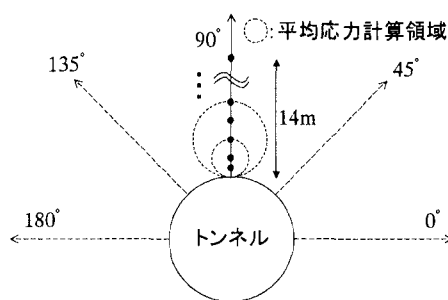


図4 平均応力計算領域

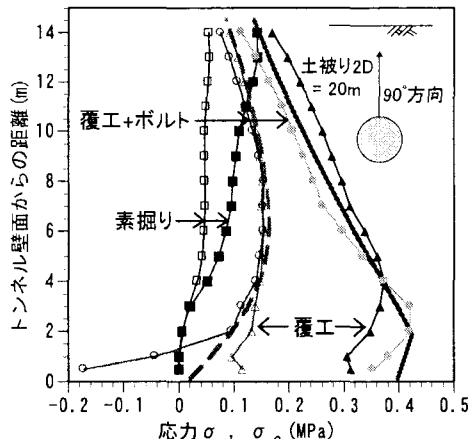
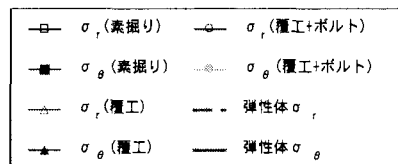


図5 90°方向応力分布

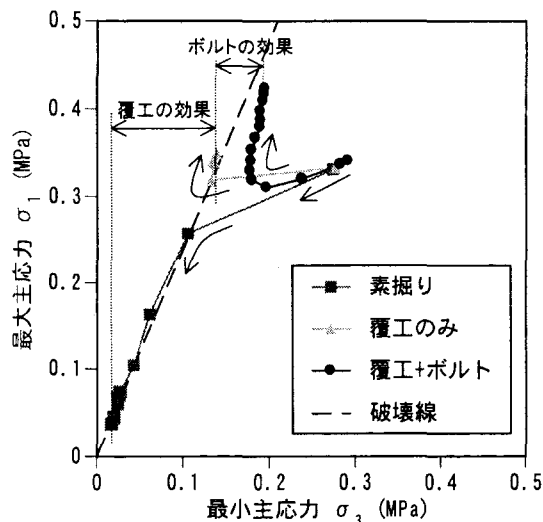


図6 応力経路(図3の点線領域)

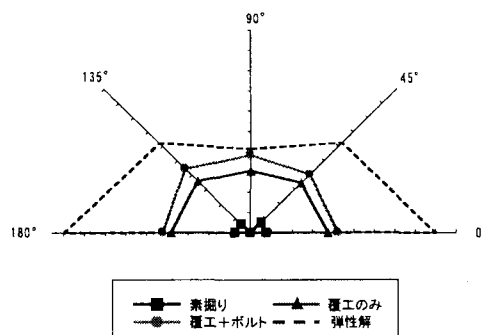


図7 トンネル周方向応力 σ_θ 分布[MPa]

図3に示す点線領域の応力経路の結果を図6に示す。素掘りでは崩壊が進み、応力が0に向かって収束しており、破壊線と一致しているが覆工+ボルト打設時の最小主応力 σ_3 が破壊線の手前でほぼ一定となり、最大主応力 σ_1 が増加した。これはボルトによって地山が拘束されたためだと考えられる。

次にトンネル周辺の σ_θ の分布を図7に示す。これはトンネル壁面より1mの位置の接線方向応力 σ_θ を5方向に対してプロットしたものである。これより、素掘り時のトンネル周方向応力 σ_θ は天端頭上が崩落しているので90°方向は0となり、全体的に非常に小さい。覆工および覆工にボルトを加えたものの結果は共にトンネル周方向応力 σ_θ が一様に分布していることがわかる。このばらつきの少ない応力の分布がトンネルの安定性につながっていると考えられる。

4. 結論

本研究の結論を以下に述べる。

- 1) ボルトを打設することにより、最小主応力が増加し、地山は安定化する。
- 2) ボルトを打設することによって粒子の挙動が抑制され、粒状体解析であるにもかかわらず連続体的な挙動を示す。

参考文献

- 1) Cundall, P. A. and Strack, O. D. L: A discrete numerical model for granular assemblies, *Geotechnique*, 29(1), pp47-65, 1979.
- 2) 澤江宏徳, 安部達也, 清水則一: 砂質地山におけるトンネルの支保効果のメカニズムに関する考察, 土木学会第57回年次学術講演会概要集(CD-ROM), III-259, pp.517-518, 2002.9.
- 3) 清水則一, 澤江宏徳, 重田佳幸, 安部達也: 砂質地山トンネルの力学的挙動と支保効果のメカニズムについて, 第12回トンネル工学研究論文・報告集第12巻, pp.153-158, 2002.11.
- 4) 星野貴史, 澤江宏徳, 清水則一: 未固結地山における併設トンネル周辺のゆるみ領域発生メカニズムに関する考察, 土木学会第58回年次学術講演会概要集(CD-ROM), III-038, pp.75-76, 2003.9.
- 5) Itasca: PFC2D ver.2.0 User's Guide, Itasca, 1999.