

未固結地山におけるトンネルのロックボルトの補強効果に関する考察

山口大学大学院

学。足立光 正 清水則一

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

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。筆者らは、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、粒状体の要素試験のシミュレーションにより、ボルトの効果について考察し、トンネル掘削シミュレーションで地山の挙動やボルト効果のメカニズムを調べる。

2. 粒状体モデル¹⁾

砂質地山を表すために、個別要素法に基づく粒状体モデルを用いる。個別要素法で取り扱う粒子1つ1つは剛体であるため、いわゆる応力やひずみといった連続体の概念は存在しない。そのため、粒状体解析では、粒子間接触力と位置から平均応力を式(1)のように定義している。

$$\bar{\sigma}_{ij}^{(p)} = \frac{1}{V^{(p)}} \sum_{N_c} x_i^{(c)} F_j^{(c)} \quad (1)$$

ここで、 $\bar{\sigma}_{ij}^{(p)}$ は粒子1つの平均応力テンソル(圧縮正)、 N_c は接触数、 $F_j^{(c)}$ は粒子 p の表面の接触点 c における接触力(圧縮正)、および $x_i^{(c)}$ は接触点 c の位置ベクトルである。

3. 要素試験シミュレーション

3.1 解析条件

解析にはPFC2D(Particle Flow Code, Itasca社)⁵⁾を用いる。供試体の上下面より変位速度 v (=0.1m/s)を等変位載荷し、側面には0.5, 1.0, 2.0MPaの側圧を与え、ボルトを0本, 1本, 3本, 9本を打設した場合の数値解析を行う。概略図を図1に示す。本研究では、弾性係数50MPa程度の地山材料を想定する。

3.2 解析結果

結果の一例として、側圧1.0MPaにおける解析結果を図2に示す。接触力分布を見るとボルト1本では、ボルト無しと大きな違いはみられないが、3本ではボルトで挟まれた領域の接触力が増加しており、9本になると供試体全体の接触力が均一に増加している。次に解析結果から求めた軸ひずみ-軸差応力結果の近似しているものを、軸ひずみ-平均軸力の関係と共に図3に示す。まず、case1の側圧0.5MPa・ボルト9本の結果においては、ひずみ5.55%時の平均軸力から導き出した等分布応力は0.0416MPaで、比較対象の側圧の差分0.5MPaよ

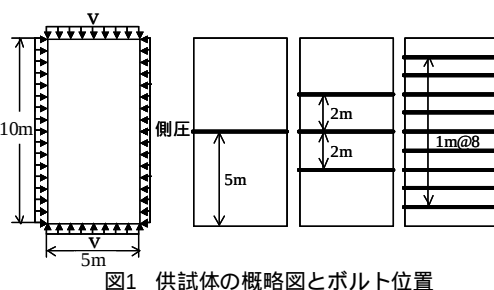


図1 供試体の概略図とボルト位置

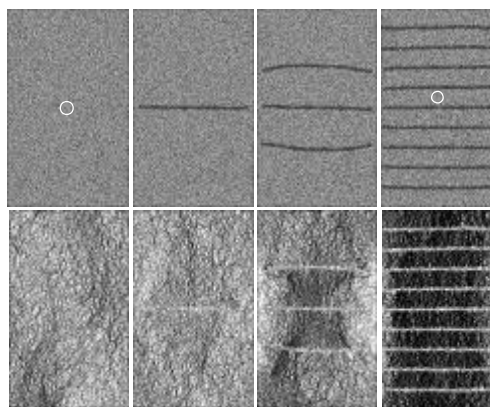
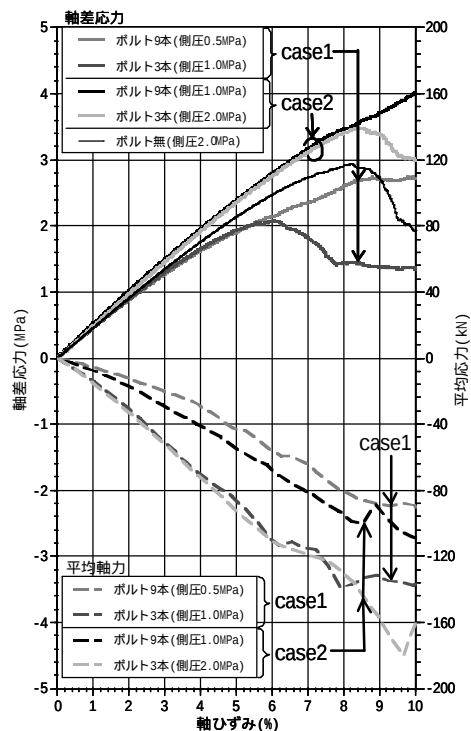
図2 側圧1.0MPaにおける解析結果
(上段: 粒子分布 下段: 接触力)

図3 軸ひずみ-軸差応力図

キーワード: トンネル, ロックボルト, 補強効果, メカニズム, 数値解析

連絡先: 〒755-8611 山口県宇部市常盤台2-16-1 山口大学理工学研究科社会建設工学専攻

TEL 0836(85)9334 e-mail: adachi@rock.civil.yamaguchi-u.ac.jp

りははるかに小さい値となった(表1 参照)．これは言い換えると側圧の差分0.5MPaをボルト6本で補っているともいえる．これをボルト1本が補っている軸力として換算すると約800kNもの軸力を発揮していることになり、ボルトの一般的な引張強度(約200~300kN)よりはるかに大きい値となった．これは、外部から側圧を与えて粒子を拘束するより、供試体内部にボルトを打設し粒子の挙動を抑制させることで、ボルトが通常の引張強度以上の効果を発揮し、側圧を与えるよりも有効的な補強ができているといえる．また、側圧1.0MPa・ボルト3本の結果ではひずみ6%付近で降伏しているのに対し、側圧0.5MPa・ボルト9本の結果は降伏しなかった．これはボルトを打設することにより延性効果が生じたといえる．case2においても上記と同様なことがいえる．さらに側圧2.0MPa・ボルト無しの結果と比較すると、側圧1.0MPa・ボルト9本の結果はもちろんのこと、側圧0.5MPa・ボルト9本でさえひずみ9%付近で軸差応力が上回るという結果となった．図2に示す点線領域の応力経路の結果を図4に示す．ボルトを打設していないものは破壊点付近で降伏し、線に沿って下降するが、ボルト9本打設したものは破壊線に沿って上昇し続けている．つまり、ボルトを加えることで最小主応力が増加し、応力低下が抑制され供試体は安定する．

4. トンネル掘削シミュレーション

4.1 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、素掘りと、覆工とボルトを同時に考慮したものの2パターンを行う．解析領域の概略図を図5に示す．なお、トンネル直径は10mとする．

4.2 解析結果

掘削後の粒子分布および接触力分布を図6に示す．素掘りでは自立できず崩壊している．覆工にボルトを打設した場合は、視覚的な変形も生じておらず、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の発生がかなり抑制されていることがわかる．

図6に示す点線領域における応力経路についても、ボルトを加えることにより最小主応力が増加し、応力低下が抑制されているという要素試験シミュレーションにおける応力経路の結果(図4参照)とほぼ同様の傾向をとる．

5. 結論

本研究の結論を以下に述べる．

- 1) ボルトは側圧を与えるよりも効果的に地山を補強できる．
- 2) 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．
- 3) 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), -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), -038, pp.75-76, 2003.9.
- 5) Itasca : PFC2D ver.2.0 User's Guide, Itasca, 1999.

表1 等分布応力値の算出

(a) case1			
側圧 (MPa)	本数 (本)	平均軸力 (kN)	等分布応力 (MPa)
0.5	9	-46.19	0.0416
1.0	3	-81.82	0.0245

(b) case2			
側圧 (MPa)	本数 (本)	平均軸力 (kN)	等分布応力 (MPa)
1.0	9	-41.98	0.0378
2.0	3	-80.46	0.0241

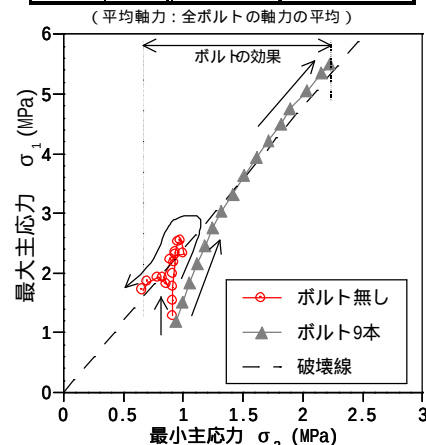


図4 1.0MPa時の応力経路
(図2の白円領域)

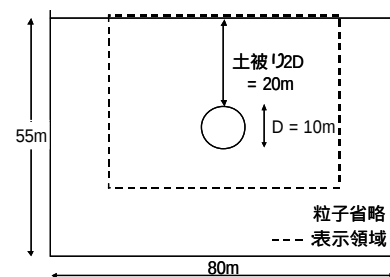


図5 解析モデル概略図

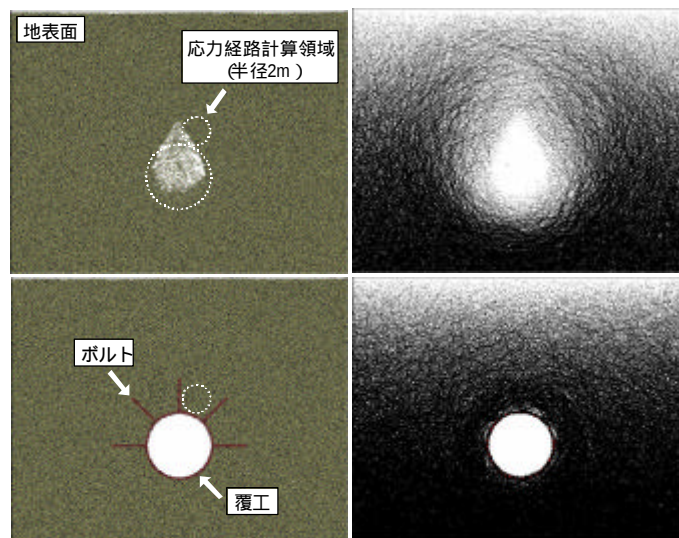


図6 崩壊後の粒子分布と接触力分布
(上段: 素掘り 下段: 覆工 + ボルト)