

3次元粒状体個別要素法を用いた長尺鏡補強工 の効果の評価

The Evaluation of the Effect of Long Face Bolting By 3D Distinct Element Method

御手洗良夫¹・手塚 仁²・羽馬 徹³・岡部 正⁴・蔣 宇静⁵
Yoshio Mitarashi, Hiroyoshi Tezuza, Haba Toru, Tadashi Okabe, Yujing Jiang

¹正会員 工博 株式会社 熊谷組 土木事業本部トンネル技術部 (〒162-8557 東京都新宿区津久戸町2-1)

²正会員 株式会社 熊谷組 関西支店 大谷トンネル作業所 (〒799-2651 愛媛県松山市堀江町甲1795-3)

³正会員 株式会社 ケー・エフ・シー 技術部 (〒105-0014 東京都港区芝2-5-10)

⁴正会員 株式会社 ケー・エフ・シー トンネル技術室 (〒105-0014 東京都港区芝2-5-10)

okabe.tadashi@kfc-net.co.jp

⁵正会員 工博 長崎大学工学部 社会開発工学科 助教授 (〒852-8521 長崎県長崎市文教町1-14)

In recent year, the mainstream analysis for mountain tunnel design or preliminary ground behavior assessment has been the continuum analysis approach, FEM for example. It has limitations, however, when applied to local behavior such as face collapse. In that case, application of the discontinuum analysis approach must be considered as well.

In this research, the authors simulated tri-axial compression test which made the size of the grain diameter, a gap rate change by using distinct element method for granular media.

In addition, this paper discusses how face behavior varies depending on the spacing of long face bolts by using distinct element method and continuum analysis method.

Key Words : three-dimensional distinct element, tri-axial compression tests , long face bolting

1. はじめに

近年、山岳トンネルは低土かぶり未固結地山等の厳しい条件下での掘削が要求される機会が多くなっている。これまで山岳トンネルの設計や地山挙動の事前評価のための解析においては、FEM等の連続体解析手法が主流であったが、切羽崩落挙動等の表現については限界があり、粒状体等による不連続体解析手法が注目されはじめている。

著者らは、これまでPFC3D (Particle Flow Code in 3 Dimensions) という3次元粒状体個別要素法の汎用プログラムを用いて、三軸試験をシミュレートし、粒状体の特性値と実際に試験より得られる特性値の関係について把握するとともに、トンネル掘削における切羽崩落現象をシミュレートしてきた。¹⁾

今回の報告では、粒状体個別要素法を用いる際、問題となる粒径の大きさ、空隙率について感度解析を行いその特性について検討した。

また、切羽が不安定な状況下において、長尺鏡補強工の配置パターンに関する検討を3次元連続体解析と比較しながら行い、3次元粒状体個別要素法解析の適用性について報告するものとする。

2. 粒状体個別要素法の概要²⁾

粒状体個別要素法(以下、PFCという。)における計算サイクルは、各粒子の運動法則や、各接触に対する力と変位の法則に基づく計算サイクルを繰り返しながら演算する方法である。図-1にPFC3Dにおける計算サイクル図を示す。構成モデルは接触モデル、スリップモデル、接着モデルの3つからなる。接触モデルは衝突の力と変位との間に弾性関係を構成する(バネ定数)役割を果たす。スリップモデルはせん断方向の接触間に滑る関係を生み出す。また、接着モデルは、粒子間を結びつける一種の接着剤として規定することができる。

3. 三軸圧縮試験シミュレートによる感度解析

(1) 目的

著者らはこれまで、PFC 3Dの物性特性を把握するため、地山を供試体とする三軸圧縮試験をシミュレートし、地山構造モデルを構成する粒状体間の接触強さ、接着力、摩擦力等の入力物性値が、実際に試験より得られる特性（弾性係数、粘着力、内部摩擦力）とどのような相関がみられるか検討してきた。そのときの問題点として、このような粒状体個別要素法を取り扱う場合、以下のような不確定要因による影響が考えられる。

- ①粒子の大きさの問題
- ②供試体の密度（間隙率）
- ③粒子の配列の問題

本報告では、上記の①、②について検討するものとし、粒子径、粒子の間隙をパラメーターとした感度解析を行った。

(2) 解析条件³⁾

図-2に三軸圧縮試験の供試体モデルを示す。供試体モデルは高さ2m、幅1m、奥行き1mの直方体とした。解析モデルは6つの壁により内側の直方体の供試体を制限し、トップとボトムに荷重を载荷することにより三軸圧縮試験がシミュレートされる。

粒子間の接触強さ、接着力、摩擦係数は、表-1に示すような値を設定した。粒子径、粒子の間隙率をパラメーターとした感度解析ケースを表-2に示す。

(3) 解析結果

(a) 粒子径に関する感度解析

図-3に各ケースにおける軸差応力-軸ひずみ関係を示す。それぞれの解析結果において、当初は弾性域では線形挙動を示し、ピーク値になった後は応力が低下し軟化挙動が示されている。また、弾性域については直線とならず強度を落としながらピーク値へと向かっていることが分かる。

解析結果より、 H/r （供試体高ささと粒径の比）が大きくなるにつれて、供試体の応力ピーク値は大きくなる傾向がみられる。これは、供試体のサイズを同一としているため、粒子径が小さいと粒子数は多くなり、その結果、粒子間の接触面積が増えることが要因であると考えられる。また今回の解析モデルにおいて、 H/r が20、10では、粒子径が大きく粒子数も少ないため、他のケースと異なったモードとなり、ある程度の小さな粒子径でなければ誤差が生じることが示されている。

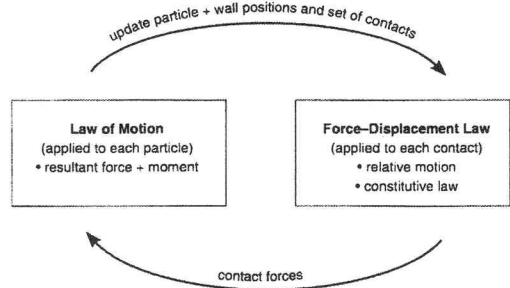


図-1 PFC3Dにおける計算サイクル

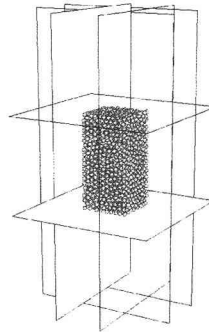


表-1 入力値（固定）

接触強さ (MN/m)	50
接着力 (MN)	0.01
摩擦係数	0.25

図-2 三軸圧縮試験モデル

表-2 入力値（感度解析）

供試体高さ H / 粒子径 r	$H/r = 80, 70, 60, 50, 40, 30, 20, 10$
間隙率	0.7, 0.6, 0.5, 0.4, 0.3, 0.2

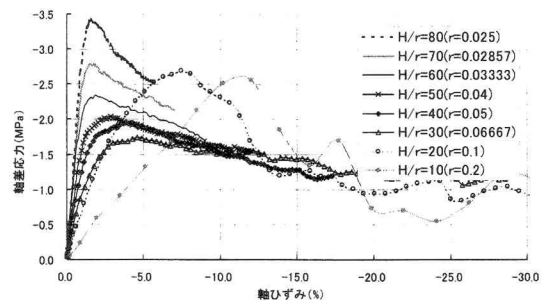


図-3 軸差応力-軸ひずみ関係（粒径変化）

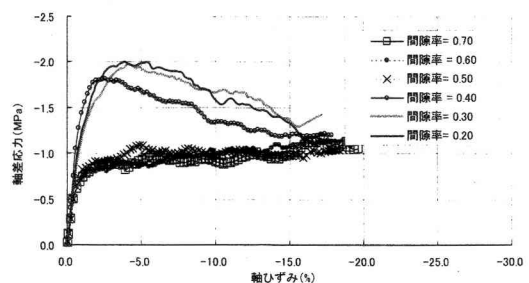


図-4 軸差応力-軸ひずみ関係（間隙率変化）

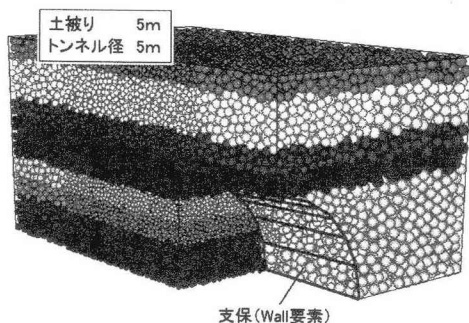


図-5 トンネル切羽周辺モデル

(b) 間隙率に関する感度解析

図-4に各ケースにおける軸差応力-軸ひずみ関係を示す。ここで間隙率とは供試体体積と空隙の比である。解析結果より、間隙率が小さくなるにつれて、応力のピーク値、またピーク値に達するまでの軸ひずみは大きくなる傾向がみられる。この結果についても粒子間の接触面積（接触点数）の影響によるためと考えられる。また、間隙率が0.5、0.6、0.7と大きくなると、応力-ひずみ関係はほぼ同じような挙動を示し、他のケース（間隙率0.2～0.4）に比較し、ピーク値は半分程度となっている。

以上より、PFC 3Dにおいて、粒状体の集合体としての特性を把握しようとする場合、粒子間の接触力、接着力、摩擦力の他、粒径、間隙の影響についても考慮しなければならないことが示された。今後、粒子間特性と粒子の配列についての組み合わせによるパラメータ解析を実施し、更に検討していく予定である。

4. トンネル周辺地山モデルにおける長尺鏡補強工のシミュレート

(1) 目的

PFC 3Dにより、トンネルの切羽周辺地山が不安定化するような条件下における長尺鏡補強工の配置パターンに関する検討を行った。

(2) 解析条件

図-5に切羽周辺地山を想定したトンネルの解析モデル図を示す（トンネル半径5m、土被り5m）。物性値を表-3に示す。この物性値について、前章と同様の三軸圧縮試験のシミュレートを行った結果、弾性係数80MPa、粘着力0.025MPa、内部摩擦角6°となった。解析ステップは切羽位置まで5m分を一括

表-3 トンネルモデル入力値

接触強さ (MN/m)	50
接着力 (kN)	1
摩擦係数	0.25

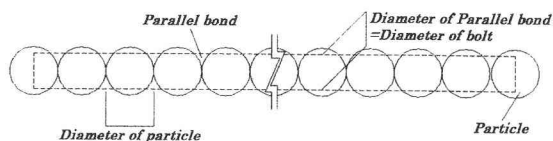
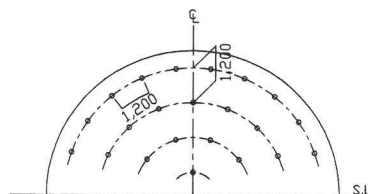


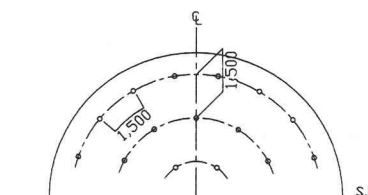
図-6 補強ボルトのモデル化

表-4 長尺鏡補強工の入力値

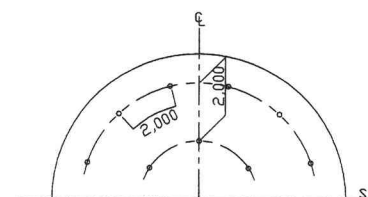
接触強さ (MN/m)	1,814
パラレルボンド強度 (MN/m ² /m)	200,000



(ボルトピッチ 1.2m)



(ボルトピッチ 1.5m)



(ボルトピッチ 2.0m)

図-7 長尺鏡補強工の配置パターン図

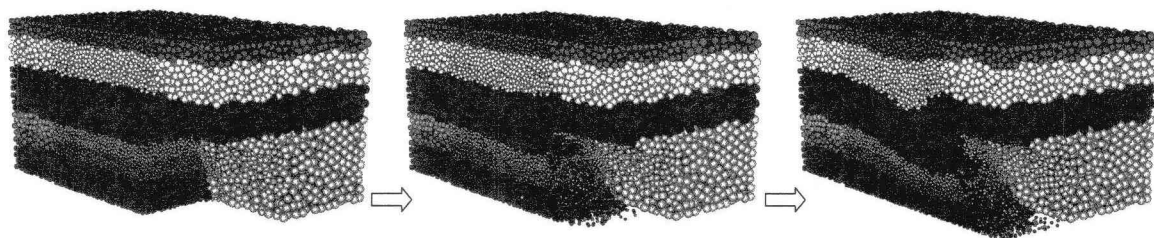
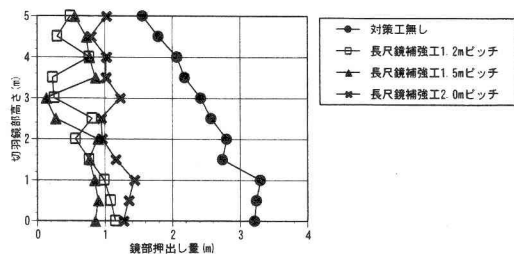
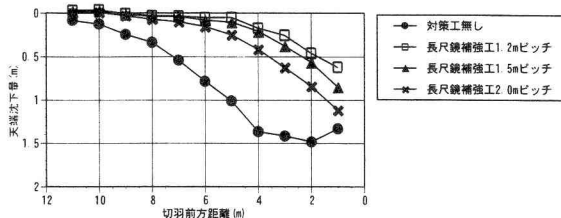


図-8 切羽の崩壊シミュレート結果（対策工無し）



（切羽鏡部押し出し量）



（切羽前方天端部沈下量）

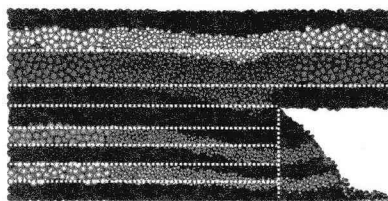
図-9 切羽周辺地山変位量

形、移動はしない。）によりモデル化した。

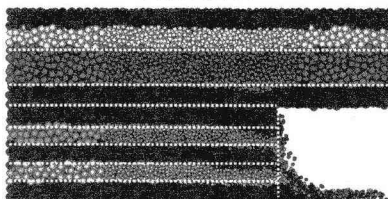
長尺鏡補強工は棒部材であるが、PFC3Dでは図-6に示すように粒子を平行ボンド（弾性ディスク状のボンド、力モーメントを伝達することができる。）により接合させることによりモデル化した。長尺鏡補強工の長さは10mである。平行ボンド要素の入力物性値を表-4に示す。また、注入効果として対策工周辺の粒子の接着力を1MN（想定）とした。今回の解析対象とした長尺鏡補強工の配置パターンを図-7に示す。

（3）解析結果

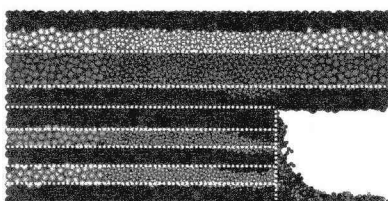
図-8に対策工無しの場合の切羽状況を示す。切羽周辺地山の不安定挙動は切羽前方の鏡部の破壊からはじまり、その後トンネル上部地山の沈下挙動として現れている。長尺鏡補強工（3パターン）がある場合の結果とともに、鏡部押し出し量（切羽より前方1m位置）、切羽前方地山の天端レベルでの沈下量を図-9に示す。また、切羽状況について図-10に示す。長尺鏡補強工を配置することにより、鏡部の押し出し挙動は抑制され、トンネル前方天端部の沈下挙動についても抑制効果がみられる。長尺鏡補強工の打設ピッチに着目すると、図-9よりボルト間隔が大きくなるとともに鏡部の押し出し挙動は大きくなり、切羽前方天端部の沈下挙動も大きくなる傾向。また、図-10からもボルト間隔の大きくなると切羽前方地山の沈下挙動が小さいボルト間隔に比べ大きくなっている。



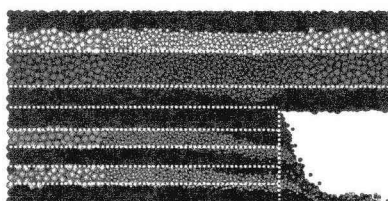
（対策工無し）



（長尺鏡補強工：ボルトピッチ1.2m）



（長尺鏡補強工：ボルトピッチ1.5m）



（長尺鏡補強工：ボルトピッチ2.0m）

図-10 切羽周辺地山状況

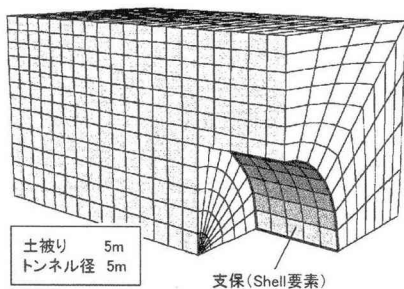


図-11 解析モデル図（連続体モデル）

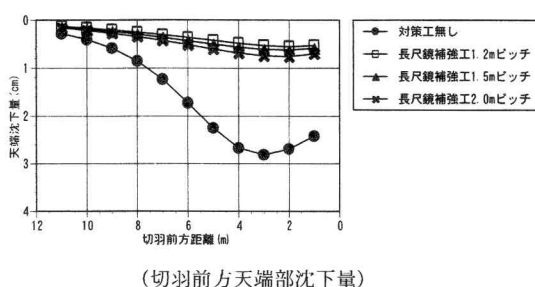
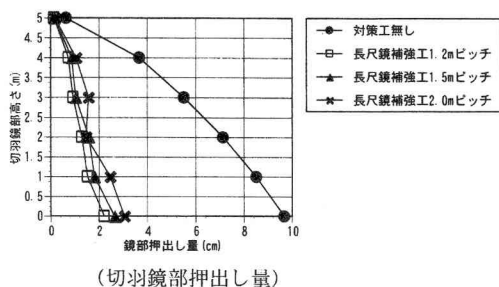


図-12 切羽周辺地山変位量

このことより、長尺鏡補強工の打設ピッチは切羽前方地山の安定性に関係があることが示された。

5. 連続体解析モデルとの比較解析

(1) 目的

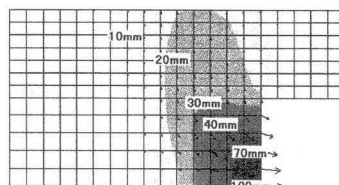
これまで、長尺鏡補強工等の補助工法の解析にはFEM、FDM等の連続体解析が多く用いられてきた。ここでは、別途に連続体解析モデルにより切羽周辺地山挙動をシミュレートし、不連続体解析手法のひとつであるPFC 3Dの解析結果と比較しながら、本研究で用いたPFC 3Dの適用性について評価することを目的とする。

(2) 解析条件

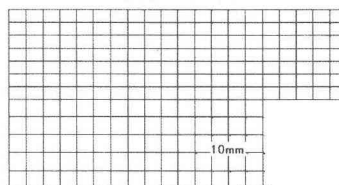
図-11に切羽周辺地山のFLAC3D（連続体モデル）によるモデル図を示す。トンネル径、土被り等は前章のPFC 3D（不連続体解析）の解析モデルと同様としている。尚、使用した解析コードは「FLAC3D（Itasca社製）」である。入力物性値は前章の三軸圧縮試験のシミュレートより得られた値（弾性係数80MPa、粘着力0.025MPa、内部摩擦角 6° ）とする。支保については鋼製支保工（H200）吹付けコンクリート（ $t=250$ ）を合成して、弾性曲面要素（Shell）により、モデル化した。長尺鏡補強工は梁要素によりモデル化し、長さは10mとした。支

表-5 支保・切羽対策工の入力値

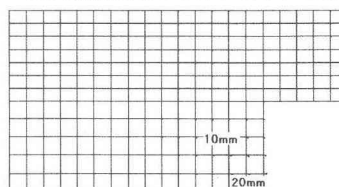
	単位体積重量 (γ) kN/m ³	弾性係数 (E) MPa	断面積 (A) m ²
支保 (鋼製支保工+ 吹付けコンクリート)	23	8,600	0.25
長尺鏡補強工	17.5	20,000	1.71E-03



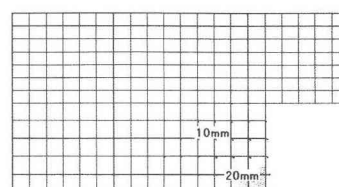
(対策工無し)



(長尺鏡補強工：ボルトピッチ 1.2m)



(長尺鏡補強工：ボルトピッチ 1.5m)



(長尺鏡補強工：ボルトピッチ 2.0m)

図-13 切羽周辺地山変位量分布図

保、長尺鏡補強工の入力物性値を表-5に示す。解析ステップは切羽位置まで5m間を一括掘削とした。

(3) 解析結果

図-12に鏡部押出し量（切羽より前方1m位置）、切羽前方地山の天端部の沈下量を示す。また、図-13に切羽状況（変位量分布図；トンネル縦断）を示す。切羽対策無しのケースについては、FLAC3D（連続体モデル）においてもPFC3D（不連続体解析）の解析結果と同様に切羽鏡の押出し量が大きく発生し、地表へと影響を及ぼすような変位モードがみられる。変位量については、PFC3D（不連続体解析）の解析結果に比較し値が小さいが、PFC3D（不連続体解析）の解析結果では崩壊現象（粒子間の接着の切断による）が生じているためである。長尺鏡補強工が配置されていることにより、切羽周辺地山の変位量抑制効果が顕著にみられるが、PFC3Dにおける解析結果（変位量）ほどの打設ピッチに違いによる差はみられない。このことより、FLAC3D（連続体モデル）では、ボルト間の局所的な剥離現象等の表現が難しく、特にボルト間からの地山の抜け落ちが発生するような地山において打設ピッチの検討を行う場合、PFC3Dのような不連続体モデルのほうがより安全側の結果を示す傾向がみられる。

6. まとめ

以上、PFC3Dによる三軸圧縮試験、切羽周辺モ

デルにおけるシミュレートを行った結果、以下のような知見が得られた。

- ・ 三軸圧縮試験により、粒状体の粒径、間隙率が粒状体の集合モデルとして強度特性に影響を与えることが示され、粒子の接触面積（接触点数）が要因のひとつとして考えられる。つまり、粒子間の接触・接着に関する定数が同一であっても、粒子の配列状況により異なった性質を示すということである。そのため、粒子の集合体としての強度特性を把握するには三軸試験を実施することが必要であると考えられる。
- ・ 長尺鏡補強工の効果について、PFC3D（不連続体解析）と連続体有限差分法の2つの手法により比較検討を行った。その結果、どちらの手法に関しても、切羽鏡部の安定性向上の対策工として長尺鏡補強工は有効である結果が示された。ただし、ボルトピッチの検討を行う際、連続体モデルでは、PFC3D（不連続体解析）に比較し、解析結果に差異は大きく現れず、その結果危険側の評価となる可能性があるため、注意する必要があると考えられる。

参考文献

- 1) 御手洗、手塚：粒状体個別要素法における切羽安定化対策工の効果の検討、トンネル工学報告集第14巻、2004.11、pp37-41
- 2) PFC3D manuals, Theory and Background, Itasca
- 3) PFC3D manuals, Users Guide, Itasca