

粒状体個別要素法による切羽安定化対策工 の効果の検討

Study on the Effect of Tunnel Face Stabilization Using the 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, Hiyoshi Tezuza, Haba Toru, Tadashi Okabe, Yujing Jiang

¹正会員 工博 株式会社 熊谷組 土木本部 トンネル技術部 (〒160-0004 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)

This study aims to investigate the effect of face stabilization using a three-dimensional distinct element program for granular media. First, tri-axial compression tests were simulated to study the correlations between the properties analytically determined, including the contact stiffness and the bond strength of particles forming ground, and the properties actually obtained through tests.

Furthermore, collapses at tunnel faces were simulated to study the mechanism of collapses that might occur around the face. The authors compared different face-stabilizing methods to verify the effect of the long face bolting. In addition, this paper discusses how face behavior varies depending on the spacing of long face bolts.

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、脆弱な地質等の厳しい条件化での掘削が要求される機会が多く、そのような中、地表面沈下、切羽崩壊の抑止を目的とした様々な補助工法が広く適用され評価されている。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要であったが、切羽崩落、滑り等の局所的な挙動については限界があり、そのような場合、不連続体解析手法についても検討する必要がある¹⁾。

本研究では、PFC3D (Particle Flow Code in 3Dimension, Itasca 社製) という汎用プログラムを用いた。まず、粒状体個別要素法の物性特性を把握するため、地山の三軸試験をシミュレートし、地山モデルを構成する粒状体の粒径、接着力等が、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た。

次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、その挙動を解析的に把握するとともに、近年、脆弱な地山において採用が増え続けている「長尺鏡補強工」の効果について解析的評価を実施し、その作用機構について検討した。

2. 使用した粒状体個別要素法の概要²⁾

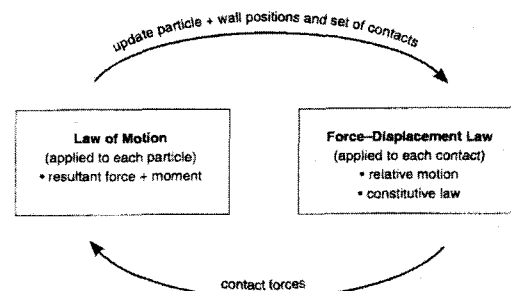


図-1 PFC3Dにおける計算サイクル

PFC3D 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。

PFC3D における素材の性質は3つの構成モデルから成る。以下に PFC3D における粒子間の構成モデルを示す。

(1)接触モデル

接触強さは法線方向、せん断方向において接触力と変位に弾性関係を生み出す。(バネ定数)

$$F_n = K_n \cdot U_n \quad F_s = K_s \cdot U_s \quad (\text{式-2.1})$$

n : 法線方向, s : せん断方向

F : 接触力, k : 接触強さ

u : オーバーラップ

(2)スリップモデル

スリップモデルは、せん断方向の接触強さの間に粒子間が滑る関係を生み出す。

$$F_{s\max} = \mu F_n \quad (\text{式-2.2})$$

μ : 摩擦係数

(3)接着モデル

接着モデルは、粒子間を結びつける一種の接着剤として想定することができる。接着モデルは、接触の点のみに作用するモデルと、粒子間を弾性のディスク状のもので連結され力、モーメントを伝達できるものがある。接着力が粒子間の引張力と同等もしくはそれを超えるならばその結合は壊される。

3. 粒状体個別要素法による三軸圧縮試験シミュレーション

PFC3D の特性の構成する主なパラメータには①粒子間接触強さ、②粒子間接着力、③粒子間摩擦係数等がある。PFC3D による三軸圧縮試験をシミュレートし、得られた弾性係数、粘着力、内部摩擦角より、これらのパラメータの特性を把握することを目的とする。

(1) 解析条件^{3), 4)}

図-2 に三軸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。このモデルは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試験がシミュレートされる。

粒子直径は 100mm とし、空隙率は 0.4 とした。

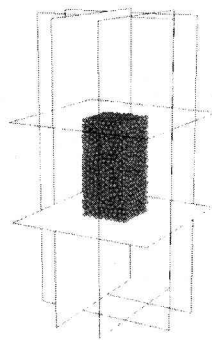


図-2 三軸圧縮試験モデル

表-1 三軸圧縮試験入力パラメーター

接触強さ (MN/m)	50, 100
接着力 (MN)	0, 0.05, 0.1
摩擦 係数	0.1, 0.25, 0.1

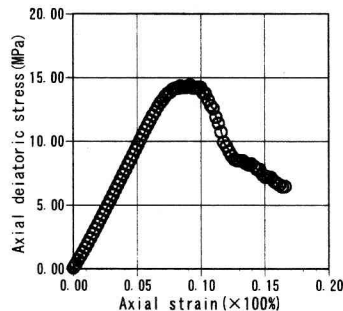


図-3 軸差応力-軸ひずみ
(接触力 50 MPa, 接着力 0 MN
摩擦係数 0.25)

表-2 三軸圧縮試験解析結果

接触強さ (MN/m)	接着強さ (MN)	摩擦係数	弾性係数 (MPa)	粘着力 (MPa)	内部摩擦角 (°)
50	0	0.1	—	—	—
		0.25	77	0.09	6
		0.5	80	0.07	19
	0.05	0.1	138	2.75	0
		0.25	156	1.77	19
		0.5	142	1.59	30
	0.1	0.1	163	6.25	0
		0.25	165	3.4	30
		0.5	165	2.67	41
100	0	0.1	—	—	—
		0.25	100	0.04	10
		0.5	133	0.07	19
	0.05	0.1	183	2.25	0
		0.25	241	2.75	0
		0.5	250	1.82	19
	0.1	0.1	245	5.25	0
		0.25	277	3.29	19
		0.5	279	3.29	30

粒子間の接触強さ、接着力、摩擦係数は、表-1 に示すようなパラメータを設定した。弾性係数については得られた軸差応力 ($\sigma_1 - \sigma_3$) と軸ひずみの関係より算出し、粘着力および内部摩擦角については側圧を 0.25MPa、0.5MPa とした場合の軸差応力の最大値よりモールの応力円から算出した。

(2) 解析結果

図-3に解析結果例として接触力50MPa、接着力0MN、摩擦係数0.25における軸差応力-軸ひずみ関係を示す。解析結果では軸差応力が14.5MPaの場合ピーク値となり、その後は塑性状態となっている。表-2に解析結果より得られたモデルの弾性係数(E)、粘着力(c)、内部摩擦角(ϕ)を示す。粒子間の接着強さ、摩擦係数が過小であるため、解析解が得られなかったケースについては値を表記していない。解析結果について物性値ごとにまとめたのが図-4である。図-4(a)より、弾性係数については、粒子間の接触力と相関があるようである。また、図-4(b)、(c)より、粘着力については、粒子間の接着力、内部摩擦角については摩擦係数との相関がおおよそ示された結果となった。但し、バラつきもみられるため、他の係数との関係についてもまだ吟味する必要がある。

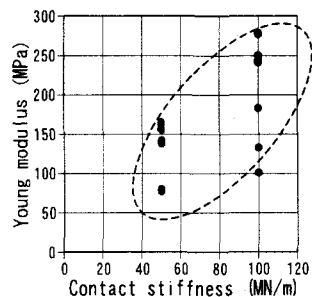
4. 粒状体個別要素法による切羽崩壊現象のシミュレーション

(1) 解析条件

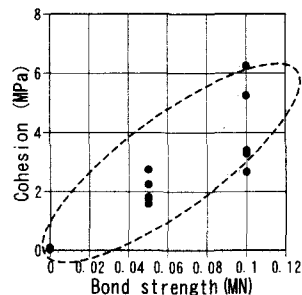
前章より地山の物性値と粒子間の特性値との関係がおおよそ把握された。次に地山条件の悪い状況においてトンネル切羽周辺モデルを用いて切羽前方挙動のシミュレートを行う。図-5 に切羽周辺地山を想定した解析モデル図を示す(トンネル径 6m、土被り 1D)。物性値を表-3 に示す。入力物性値については三軸圧縮試験より、弾性係数 80MPa、粘着力 0.05MPa、内部摩擦角 6° となる。また解析 STEP は切羽位置まで一括掘削とした。支保工については壁要素(wall)によりモデル化した。

(2) 解析結果

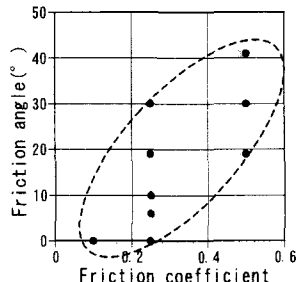
各ケースにおけるトンネル掘削後の切羽状況を図-6 に示す。解析結果より、崩壊現象ははじめに切羽前方鏡部から崩壊し、その後地表に向かって沈下が発生している。これらの結果より、対策工としては切羽鏡部の安定性向上ができる工法が有効であると考えられる。



(a) 接触強さと弾性係数の関係



(b) 接着力と粘着力の関係



(c) 摩擦係数と内部摩擦角の関係

図-4 三軸圧縮試験解析結果

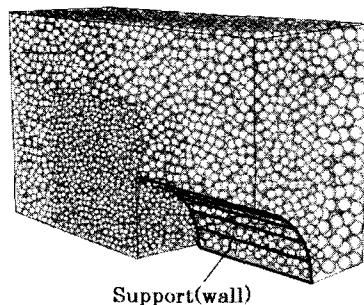


図-5 トンネル切羽周辺モデル

表-3 トンネルモデル入力値

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

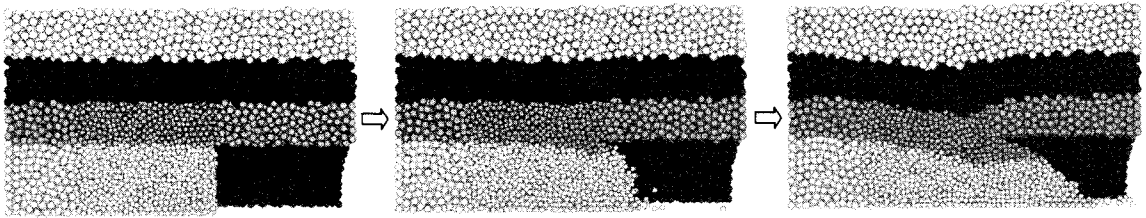
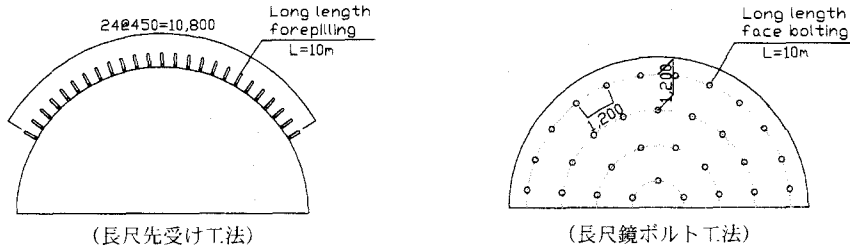


図-6 切羽前方地山崩壊シミュレーション結果



(長尺先受け工法)

(長尺鏡ボルト工法)

5. 切羽安定化対策工の比較検討

(1) 解析条件

切羽安定化対策工としては主に、トンネル外周から長尺ボルトを打設する長尺先受け工法、切羽鏡部に切除可能な GFRP による長尺ボルトを打設する長尺鏡ボルト工等がある。今回はこの2ケースについて比較解析を行う。解析対象とする切羽安定化対策工を図-7 に示す。また、地山の入力物性値を表-3 と同様のものを用いた。切羽安定化対策工はボルト部材であるが、PFC3D では粒子を平行ボンド（弾性ディスク状のボンド）により接着させる(図-8 参照)。各切羽安定化対策工の入力物性値を表-4 に示す。補強ボルトの入力値については母材の引張試験シミュレーションより決定した。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。

注入効果による入力値の向上に関しては今後研究の余地がある

(2) 解析結果

解析結果を図-9 に示す。長尺先受け工の場合、トンネル掘削時の解放面となる鏡部より押出し挙動が発生し、崩壊現象が発生している。長尺鏡ボルト工の場合、鏡部の押出し挙動は抑制され、切羽前方地山の崩壊現象はみられない。

6. 長尺鏡補強工の打設ピッチの検討

(1) 解析条件

長尺鏡補強工の設計時、ボルト長、ボルト打設間

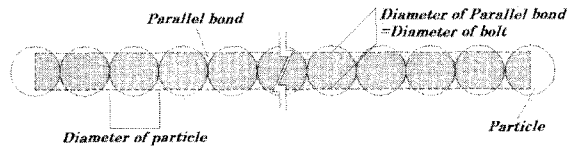
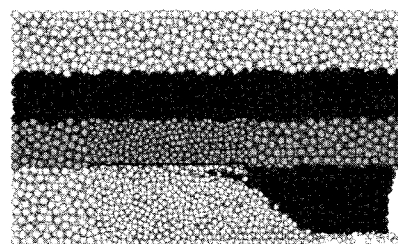


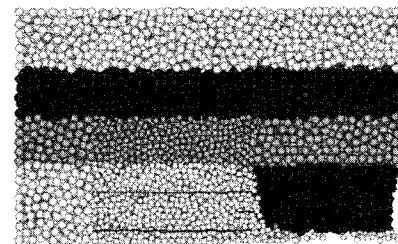
図-8 補強ボルトのモデル化

表-4 補強ボルト入力値

	長尺先受け工	長尺鏡ボルト工
接触強さ (MN/m)	18, 140	1, 814
平行ボンド 強度 (MPa/m)	2, 100, 000	200, 000



(長尺先受け工法)



(長尺鏡ボルト工法)

図-9 解析結果（切羽安定化対策工比較）

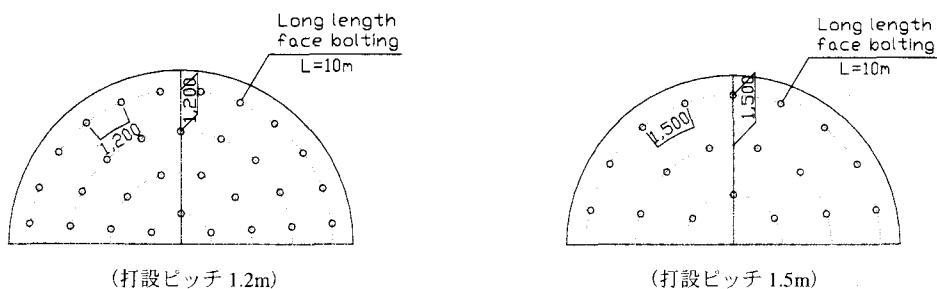


図-10 長尺鏡ボルト工法配置図

隔が問題となるが、今回はボルト打設間隔に着目し、検討することとした。長尺鏡補強工の打設配置図を図-10に示す。

(2) 解析結果

解析結果を図-11に示す。長尺鏡ボルト工の打設間隔が1.2mの場合、切羽鏡部は安定状態にみられるが、1.5mにした場合、切羽鏡部に若干の剥離現象がみられる。地山状況によっては長尺鏡ボルト工の打設間隔についても重要であることが示された。

7. まとめ

以上、PFC3Dによる解析結果より、以下のよう
な知見が得られた。

- ・ 粒状体個別要素法はこれまでの連続体解析法と比較し、その粒子間の入力値の設定は難しい問題であるが、いくつかの三軸試験のシミュレーションより、それらの入力値の特性がある程度把握できた。しかし粒状体個別要素法において解析解に影響を及ぼす因子としてまだ、粒状大きさ、粒状の空隙など他の特性値についても検討する必要があると思われる。
- ・ 切羽周辺地山モデルにおける切羽前方地山の崩壊シミュレーションにより、切羽の崩壊メカニズムが把握された。切羽の崩壊はまず開放部である鏡部より粒状体の移動がはじまりその後、上部地山へと影響範囲を広げていく。この結果より、切羽の安定化対策工については、切羽鏡部の押出し抑制効果が高い工法が有用であると考えられる。
- ・ 切羽安定化対策工の比較により長尺鏡ボルト工の効果が高いことが示された。また、地山状況によっては打設間隔も重要なファクターであることが示された。
- ・ 入力値の精度を高めることにより、注入材の効果、補強材の打設パターンの妥当性など幅広く

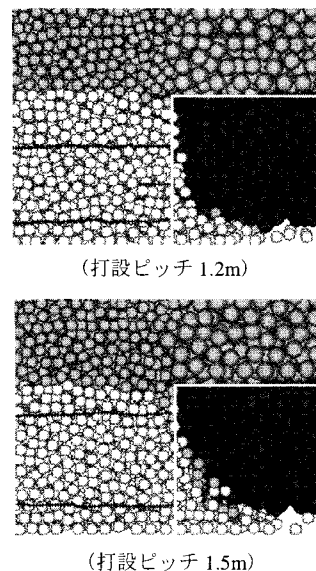


図-11 解析結果
(長尺鏡ボルト工法打設ピッチ比較)

検討が行える可能性が高い。

参考文献

- 1) 清水，安部：砂質地山トンネルの力学挙動と支保効果のメカニズムについて，トンネル工学研究論文・報告集第12巻，2002.11，pp153-158
- 2) PFC3D manuals, Theory and Background, Itasca
- 3) PFC3D manuals, Users Guide, Itasca
- 4) 久武，大野：動的解析によるトンネル切羽の安定性評価，トンネル工学研究論文・報告集第13巻，2003.11，pp501-506