

トンネルの安定性および支保効果の メカニズム考察における粒状体解析の活用

Numerical Analysis for Better Understanding Mechanism of Ground Support Effects on
Stability of Tunnels by Using Distinct Element Method

田中隆一郎¹・足立光²・星野貴史³・清水則一⁴

Ryuichiro Tanaka and Kou Adachi and Takashi Hoshino and Norikazu Shimizu

¹正会員 山口大学助手 工学部社会建設工学科 (〒755-8611 山口県宇部市常盤台2-16-1)

E-mail:rtanaka@yamaguchi-u.ac.jp

²正会員 山口大学大学院 理工学研究科 博士前期課程 (〒755-8611 山口県宇部市常盤台2-16-1)

³正会員 工修 セントラルコンサルタント(株) (〒755-8611)

⁴正会員 工博 山口大学教授 工学部社会建設工学科 (〒755-8611 山口県宇部市常盤台2-16-1)

In order to understand mechanism of ground support effects on tunnel stability, numerical simulations are conducted by using Distinct Element Method. Four cases of simulations for tunnels excavated in sandy ground are discussed in this paper; (1) effects of dowels and lining for a single tunnel, (2) effects of dowels and lining for parallel tunnels, (3) effects of fore-piling and face bolts on a single tunnel face, (4) effects of fore-piling and face bolts on opposite two tunnel faces.

It is found that the ground supports are effective for making discontinuous ground behavior continuous one. They help forming the ground arch in sandy ground. The detail discussions are given considering stress path and stress distribution.

Key Words : tunnels, ground support, mechanism, sandy ground, Distinct Element Method

1. はじめに

土被りの浅い未固結地山に掘削されたトンネルには、地山の安定を確保するため適切な支保や補強が必要とされる。これまで、さまざまな工法が適用されてきたが、実施された支保・補強工がどのようなメカニズムで効果を発揮しているのかなど未解明な問題は多い。

本研究は、ロックボルトや、縫地ボルト、フォアパイリング、鏡ボルトを対象に、その作用効果の基本的なメカニズムを数値解析によって考察することを目的としている^{1)~4)}。

本報告では、特に砂質地山に対する単設及び併設トンネルに対するロックボルトの効果、また、切羽安定に対するフォアパイル、鏡ボルトの効果についてそのメカニズムを考察する。

2. 個別要素法による粒状体解析の概要

一般に、山岳トンネルを対象とした数値解析では、連続体力学に基づいた有限要素法などの解析手法が用いられている。しかし、連続体力学の場合、基本的には、材料の分離、すべりなどの破壊を表すことは困難である。

本研究では、砂質地山や粘性の低い地山を対象とし、それらを粒状体によってモデル化した個別要素法(DEM)⁵⁾を用いる。DEMの特徴は、連続体解析とは異なり、個々の要素がお互い離れたり、滑ったりすることができる点である。本研究で用いるDEMでは、各要素を円形の剛体と考え、各要素の変形および力の伝達は他の要素との接触点のみで生じるものとしているため、いわゆる連続体における応力やひずみは、解析上は定義されていない。そのため、粒状体解析では応力を考察する場合、粒子間接触力に基づき、ある領域に対して平均応力を定義しなけ

表1 入力パラメータ

領域サイズ(m)	55×80	覆工厚(m)	0.4
粒径(m)	0.03~0.1	接着力(N)	n_bond 1×10 ⁹ s_bond 5×10 ⁹
粒子数(個)	約280000	ばね定数(N/m)	Kn 1×10 ¹⁰ Ks 5×10 ⁹
ばね定数(N/m)	粒子間	Kn	1.0×10 ⁹
	壁-粒子間	Ks	5.0×10 ⁷
壁-粒子間	Kn	1.0×10 ⁹	
	Ks	5.0×10 ⁷	
粒子間摩擦係数μ	0.5	長さ(m)	5
粒子密度(kg/m ³)	2000	本数(本)	5
Contact Bond (MN)	砂質 n_bond, s_bond	0	
		接着剛性(Pa/m)	Pb_Kn 7×10 ¹¹ Pb_Ks 8.4×10 ⁹
		接着力(Pa)	Pb_n 7×10 ¹² Pb_s 8.4×10 ¹⁰

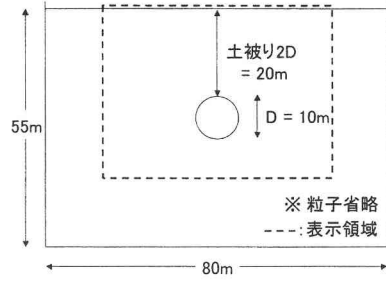


図1 解析領域図

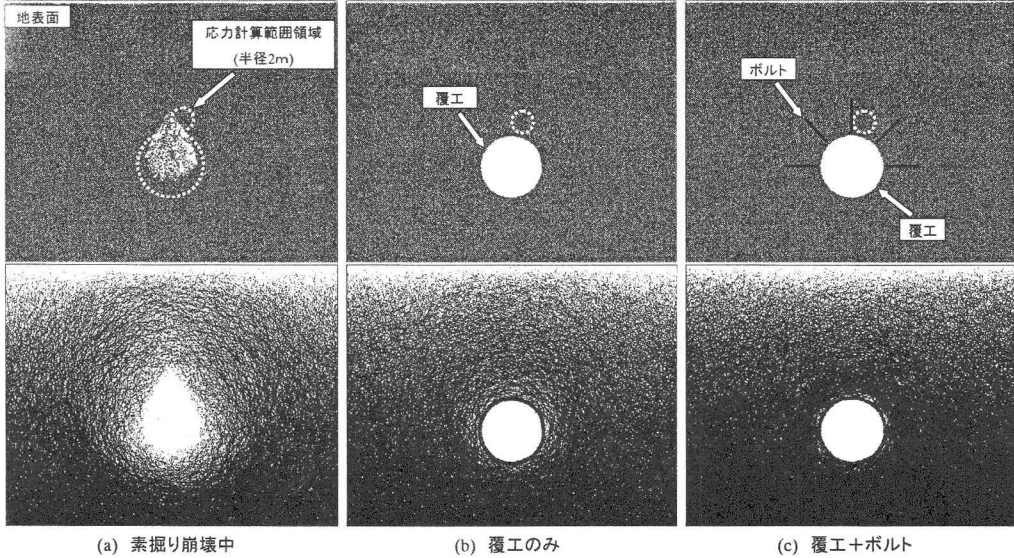


図2 掘削後の粒子分布および接触力分布

ればならない。その定義はいくつか考えられるが、ここでは式(1)⁶⁾のように定義する。

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

ここで、 $\bar{\sigma}_{ij}^{(p)}$ は粒子1つの平均応力テンソル(圧縮正)、 $V^{(p)}$ は平均応力を算出する対象となる領域 p の体積、 N_c はその領域内の接触点数、 $F_j^{(c)}$ は粒子間の接触点における接触力、および、 $x_i^{(c)}$ は接触点の位置ベクトルである。

解析にはPFC2D(Itasca社)⁷⁾を用いる。このコードでは、粒子同士を連結させることによりボルトや覆工を表現することができる。

本研究では、二軸要素圧縮試験のシミュレーション解析を数多く行い、解析に必要な入力パラメータである粒子間ばね係数KnおよびKs(それぞれ、粒子接触面に対して鉛直方向およびせん断方向のばね係数)、粒子間摩擦係数μ、粒子間接触強度(Contact bond)と、連続体としてとらえた巨視的な弾性係数E、ポアソン比ν、粘着力c、内部摩擦

角φを関係付た。

3. 未固結地山トンネル掘削シミュレーション

ここでは、いくつかの未固結地山トンネル掘削シミュレーションを行い、地山の挙動および支保効果のメカニズムについて考察する。

解析に用いた地盤物性値は、弾性係数E=50Mpa、ポアソン比ν=0.3、粘着力c=0、内部摩擦角φ=25~30°程度の砂質地山を想定している。表1に地盤および支保部材の入力パラメータを示す。

(1) 単設トンネルにおける支保の作用効果

砂質地山トンネルにおける支保の作用効果のメカニズムを評価する目的で解析を行う。

(a) 解析条件

図1に解析領域を示す。トンネルの外径を10m、土被りを20mとし、鉛直方向に55m、水平方向に80

mの砂質地山領域を設定した。

掘削パターンは素掘り、覆工のみ、覆工+ボルトの3パターンを行う。掘削は、まず解析領域に粒子の最大径を10cm、最小径を3cmとして、粒子数約280000個を、径を均等に、位置はランダムに配置し、静止土圧状態になるまで解析を進めたあと、トンネル部の粒子を取り除くことでシミュレートする。覆工及びボルトは、粒子を連結する（粒子間の接着強度を大きく取り、引張、せん断、回転に対する抵抗を増す）ことによって表現する。ここでは、支保の効果を明確に捉えるため、掘削と同時に支保を導入する。

(b) 解析結果

掘削後の粒子分布および接触力分布を図2に示す。ここでいう接触力とは、粒子間の圧縮力であり、図2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に崩壊している。また、図2から、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場合は、トンネル周方向の接触力が集中していることが確認できる。

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 の分布について検討を行う。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3に示すようにある領域を指定し、式(1)を用いて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、 0° 、 45° 、 90° 、 135° 、 180° の5方向の応力分布を算出した。結果の一例として、 90° 方向（図3の実線ライン上）の結果について図4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 が増加していることが確認できる。覆工のみの場合、 σ_θ のピークが天端頭上4mの位置にあることから、この位置までゆるみが広がっていると考えられる。覆工にボルトを打設した場合、弾性解の応力分布とほぼ同じであり、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2に示す点線領域の応力経路の結果を図5に示す。素掘りでは、応力は初期状態から破壊線に到達し、応力が0に向かい崩壊が進む。覆工のみの場合、素掘りの時に比べて最小主応力 σ_3 がやや大きい状態で破壊線に接している。さらに覆工にボルトを打設した場合、さらに σ_3 が増加し破壊線に到達していない。すなわち、トンネルは安定している。これは、ボルトによって地山が拘束され、最小主応力が増加し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6に示す。

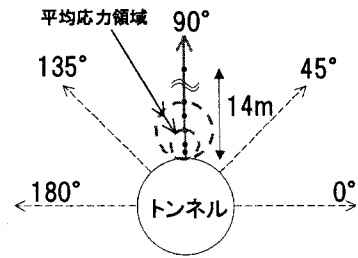


図3 平均応力計算領域

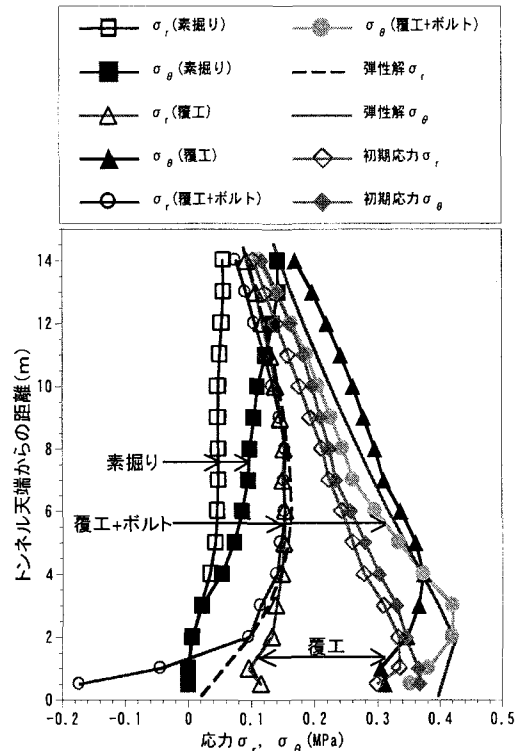


図4 90° 方向応力分布

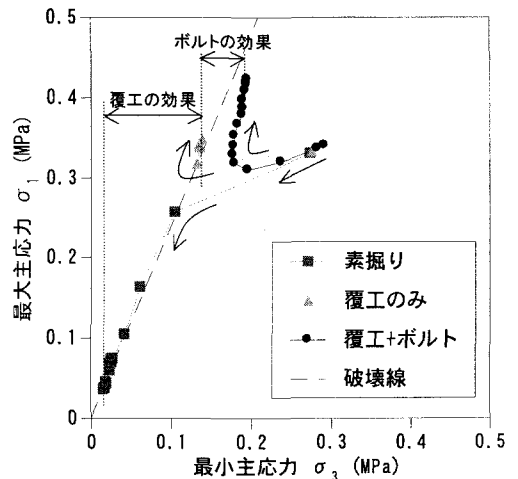


図5 応力経路（図2の点線領域）

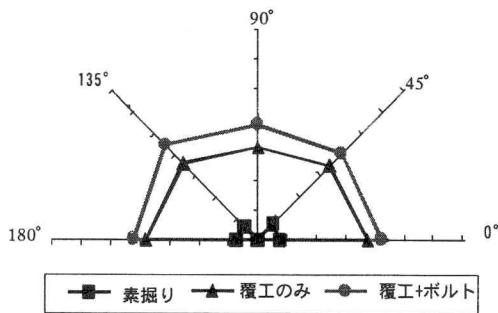


図6 トンネル周方向応力 σ_θ 分布 [Mpa]

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。これによると、素掘り時のトンネル周方向応力 σ_θ は、天端頭上が崩壊しているため、90°方向はほぼ0となるほか、他の方向についても非常に小さい。すなわち、地山は完全にゆるんでいる。覆工のみ、および、覆工にボルトを加えたケースの結果は、共にトンネル周方向応力 σ_θ が大きくなり一様に分布していることが分かる。この方向によってばらつきの少ない応力の分布がトンネルの安定性向上の要因となっていると考えられる。

(2) 併設トンネルにおける支保の作用効果

次に、併設トンネルを想定した掘削シミュレーション

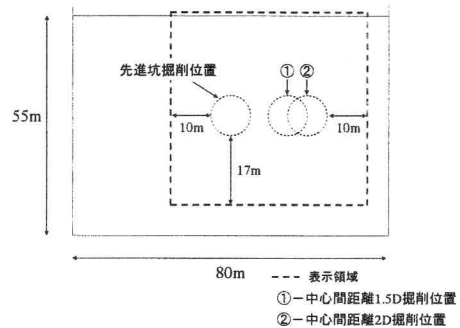


図7 解析領域図

を行い、近接した新設トンネル掘削による既設トンネルへの影響を考察する。

(a) 解析条件

砂質地山において後進坑掘削前にトンネル周辺にゆるみがある状態、および、締まった状態を想定するために、既設トンネルとなる先進坑には、覆工のみ、覆工にボルトを加える2つのケースを考える。施工位置は土被り2Dの位置に直径10mのトンネルを掘削する。後進坑掘削については、先進坑と同じ深さにトンネルを掘削し、先進坑と後進坑の中心間距離は1.5Dと2Dとする。解析領域を図7に示す。

(b) 解析結果

図8に後進坑の掘削パターンを素掘りとした場合

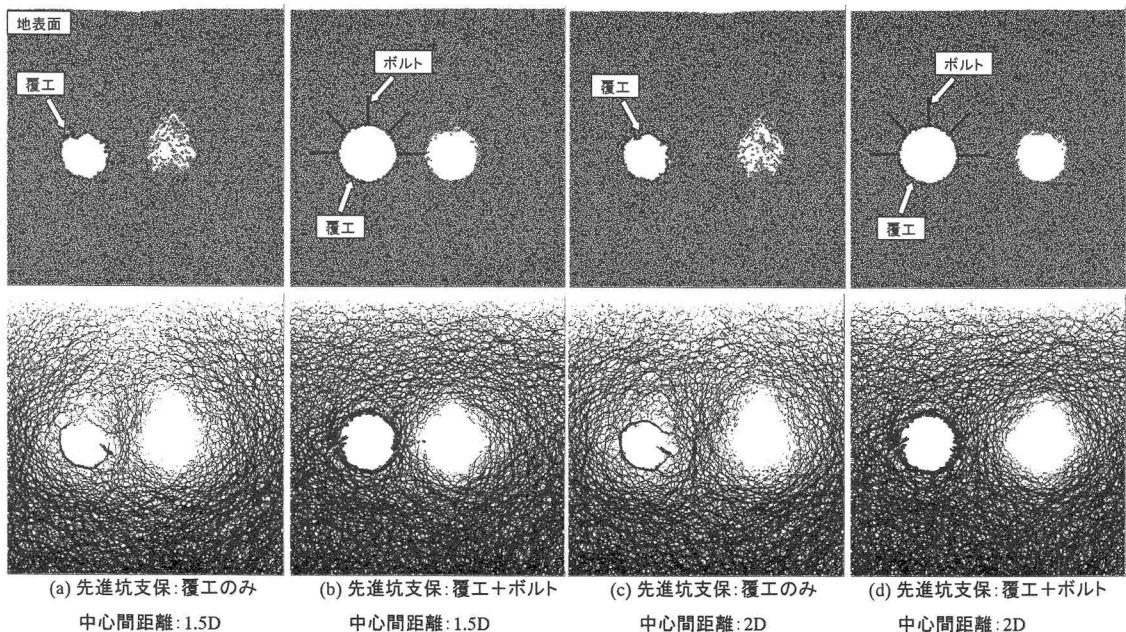


図8 粒子分布(上図)および接触力分布(下図)

の粒子分布および接触力分布を示す。後進坑は無支保のため崩壊しているが、先進坑のボルトの有無によりその度合いは大きく異なっている。先進坑の支保パターンが覆工のみの場合の (a) , (c) を比較すると、接触力分布において1.5Dの場合には、二つの緩み領域が重なって一つの大きなゆるみ領域となっているのに対し、2Dの場合には1.5Dの場合と比較して、2つのトンネルはそれぞれ個別のゆるみ領域を形成していることが確認される。一方、先進坑の支保にボルトが加わった場合 (b) , (d) では、先進坑側がボルトにより粒子の動きが拘束され、左壁部のゆるみ領域発生を抑制している。また、トンネル中心間距離が1.5Dの場合の (a) , (b) を比較すると、後進坑掘削前におけるゆるみ領域の有無によって、後進坑掘削後の全体的な接触力の分布に差が生じることが確認できる。つまり、先進坑周辺にゆるみ領域の存在していた覆工のみの場合では、後進坑を掘削することによってゆるみ領域がさらに拡大するが、ボルトを加えた場合では、ゆるみ領域の拡大が抑制される。

(3) 切羽付近における補助工の作用効果

トンネル掘削において安定性が最も重要視される切羽前方、および、上部の地山挙動における支保の

効果を検討する。ここでは、代表的な切羽安定対策工であるフォアパイリングと鏡ボルトを取り上げる。

(a) 解析条件

掘削については、砂質地山を対象とし、土被り2Dの位置に直径10mのトンネルを掘削する。切羽パターンは素掘り、フォアパイル($\phi=30\text{cm}$)、鏡ボルトの3パターンである。解析概略図を図9に示す。

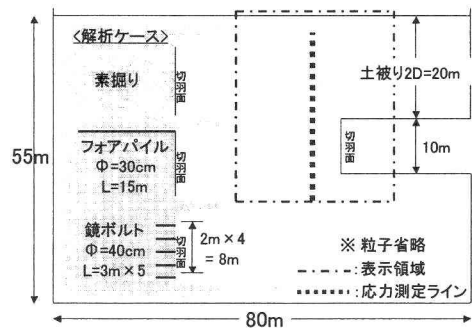


図9 解析領域図

(b) 解析結果

掘削後の粒子分布および接触力分布を図10に示す。粒子分布より、素掘りでは切羽が崩壊しているが、対策工を施すことにより切羽の崩壊が抑制されていることが確認できる。接触力分布を見ると、素掘り

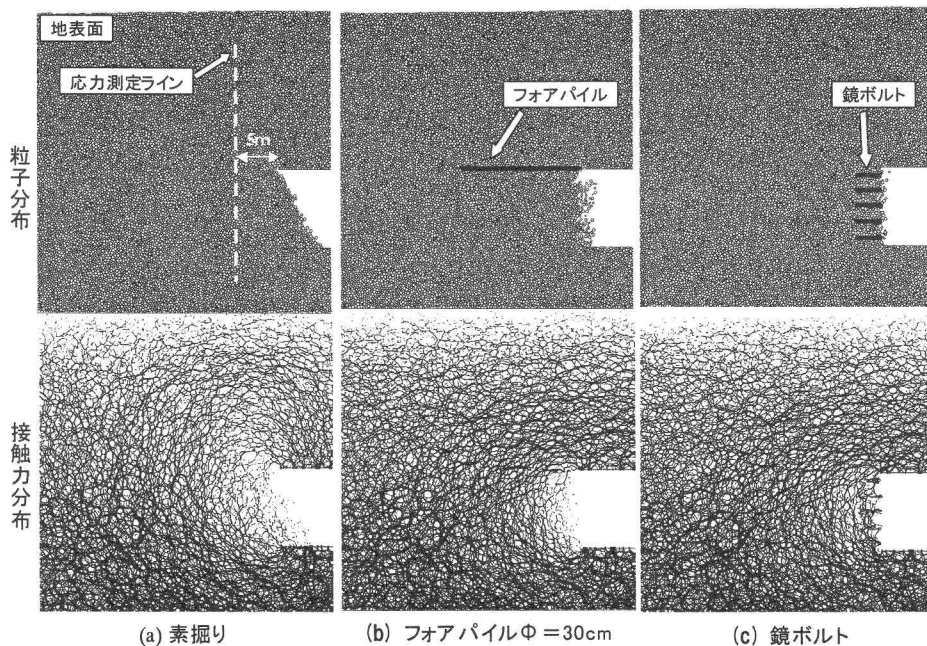


図10 粒子分布(上図)および接触力分布(下図)

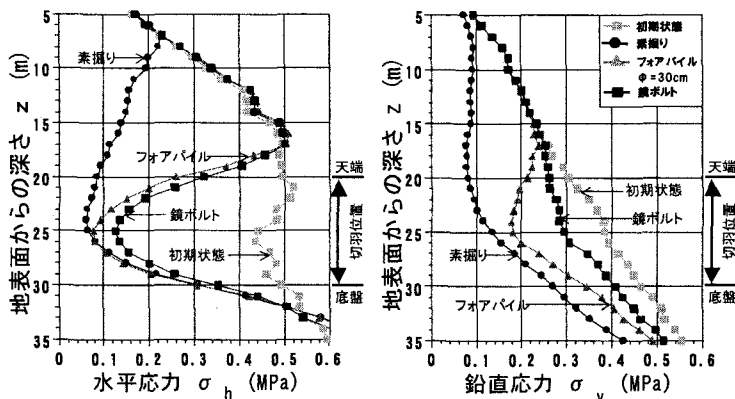


図 11 応力分布

のケースでは切羽前方から地表面へ向けて接触力が低下した領域、ゆるみ領域が確認できる。フォアパイル、鏡ボルトを打設するケースでは、切羽前方に多少のゆるみ領域が確認されるが、その外周に接触力が連結した粒子（切羽前方のアーチ効果）が確認できる。

次に、周辺地山の応力について検討を行う。粒状体解析では直接応力を求めることができないため、先ほどと同様、任意の円領域を設定し、その領域の接触力から平均応力を求める。結果の一例として、切羽前方5mのライン（図9の点線）の応力分布を図11に示す。素掘りの場合、切羽前方から上部にかけて、水平方向応力 σ_h 、鉛直方向応力 σ_v とも大きく低下し、ゆるみ領域が発生していることが確認できる。これに対してフォアパイルおよび鏡ボルトを打設するケースは、 σ_h 、 σ_v の低下が抑制されていることが確認できる。特に鏡ボルトに関しては、その抑制効果は大きい。

(4) 向い掘りにおける補助工の作用効果

向い掘りを想定し、切羽が近接するケースを解析する。

(a) 解析条件

解析条件は(3)と同じとする。図10の状態において、図中左から新たな切羽が接近するものとする。図12に解析領域を、図13に切羽間距離が2Dのケースの解析結果を示す。

(b) 解析結果

先進坑が素掘りのケースにおいては、後進坑の掘削により発生した2つのゆるみ領域が重なり、地表

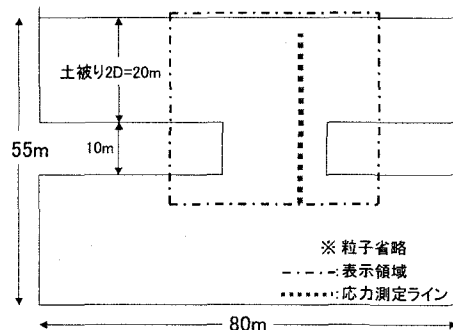


図 12 解析領域図

面から切羽周辺まで接触力は低下し、両切羽ともに崩壊している。また、地表面にも大きな沈下が確認される。先進坑にフォアパイルおよび鏡ボルトを打設するケースに関しては、先進坑から後進坑にかけての切羽天端付近の粒子が一体化するので、後進切羽側への天端周辺粒子が大きく流動することを抑え、切羽崩壊が抑制されている。接触力の連続性も切羽間で高くなっている。

また、切羽間における粒子の移動方向に着目すると、連続体弾性解析では、全体的に後進切羽側に引っ張られるような挙動を示しているが（図14）、粒状体解析で示した各パターンでは、向かい合うそれぞれの切羽に向かう挙動が見られる。ただし、フォアパイルおよび鏡ボルトを打設したケースについては、地山の一体化が図られたことにより、変位挙動はより弾性解析結果に近づいていることが確認できる。また、切羽前方5m（図12の点線）の応力分布を図15に示す。これより、素掘りでは応力が低下しているが、フォアパイルおよび鏡ボルトを打設したケースでは、天端上方5mまで初期応力が維持されていることがわかる。

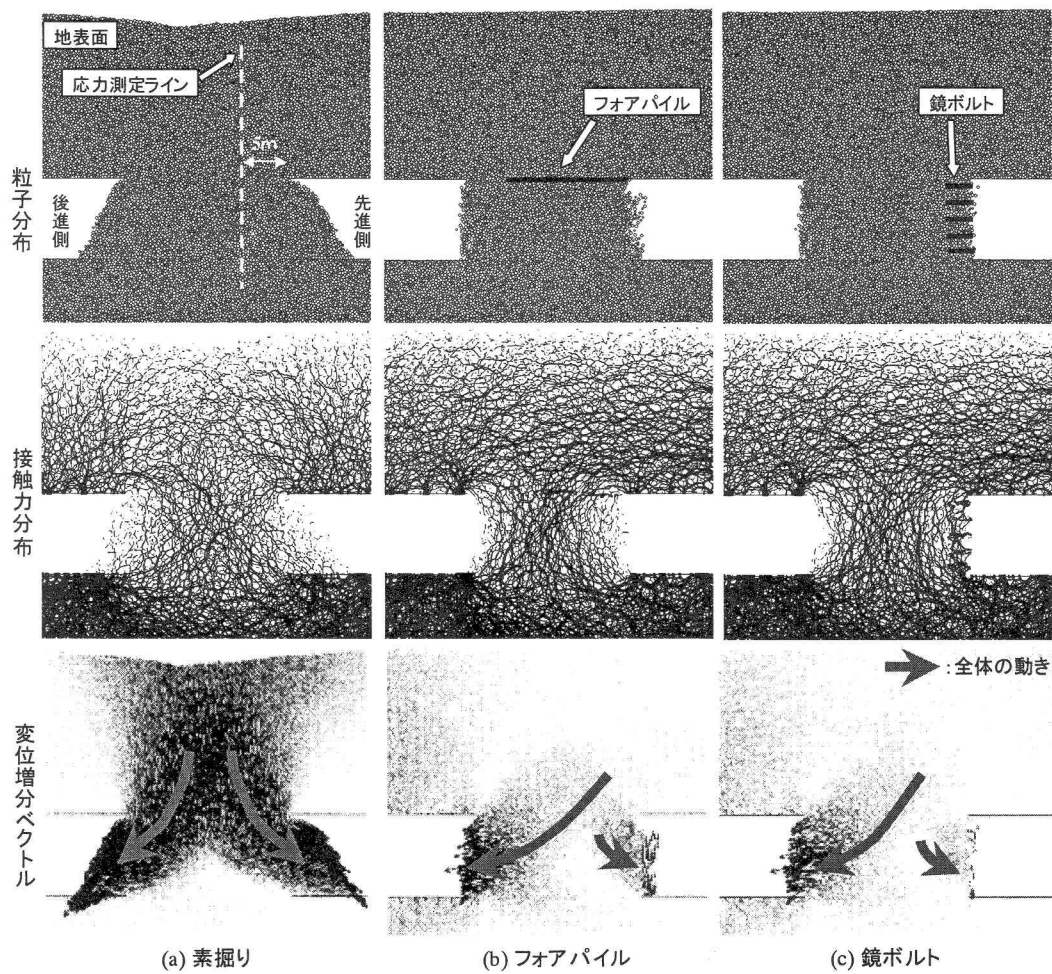


図 13 後進坑掘削による粒子分布(上図), 接触力分布(中図)および変位増分ベクトル(下図)

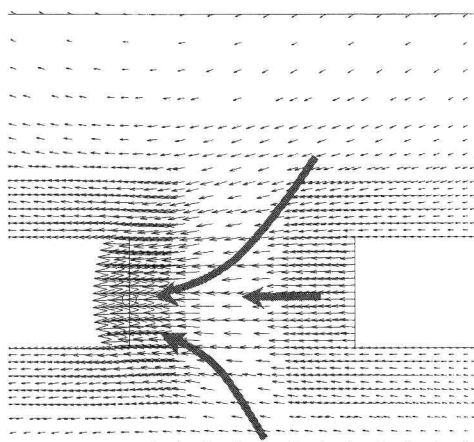


図 14 連続体(弾性)解析における増加変位分布

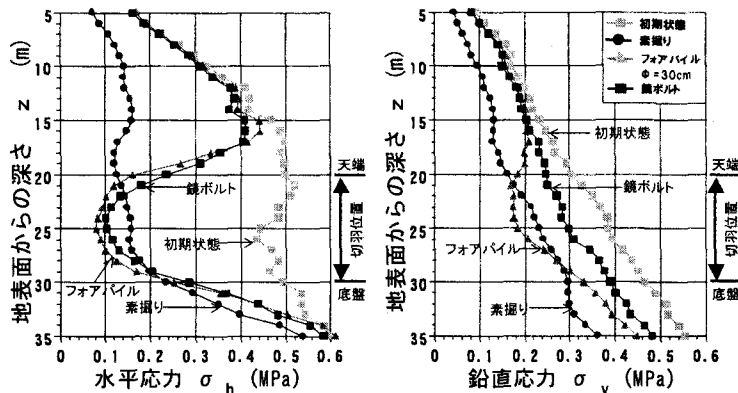


図 15 応力分布

4. むすび

本研究の結論を以下に示す。

- (1) 土被りの浅い未固結地山トンネルの掘削シミュレーションでは、ゆるみ領域やアーチアクションなどの連続体解析では表現しにくい挙動を比較的分かりやすく再現できた。
- (2) ボルトを打設することによってトンネル周辺地山の最小主応力の低下が抑制され、さらに周方向応力が増加することにより地山は安定する。
- (3) 効果的な支保および補助工によって、元々不連続体的挙動を示す地山においても連続体的挙動に近づけることができる。そして、それが地山の安定に結びつくと考えられる。

謝辞：本研究を遂行するに当たり、粒状体解析について共同研究を行った、T.G.Sitharam (Indian Institute of Science) に感謝する。また、多数の数値解析に協力頂いた本学卒業生、安部達也氏 (宇部市役所)、澤江宏徳氏 (八千代エンジニアリング(株)) に謝意を表す。

参考文献

- 1) 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), No.Ⅲ-038, pp.75-76, 2003.9.
- 2) 清水則一, 安部達也, 澤江宏徳, 重田佳幸：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, トンネル工学研究論文・報告集, 第12巻, pp. 153-158, 2002.12.
- 3) 澤江, 安部, 清水, 砂質地山におけるトンネル支保効

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), No.Ⅲ-259, pp.517-518, 2002.9.

- 4) 安部達也, 澤江宏徳, 清水則一, T.G.Sitharam：粒状体モデルによるトンネル掘削シミュレーションに関する基礎的研究, 第56回年次学術講演会講演概要集, No.Ⅲ-B339, pp.678-679, 2001.10.
- 5) Cundall, P.A., and Strack, O.D.L: A discrete numerical model for granular assemblies, Geotechnique, 29(1), pp.47-65, 1979.
- 6) Itasca :PFC2D ver3.0 Theory and Background, pp.3-8~3-11, 2002.
- 7) Itasca :PFC2D ver3.0, Itasca, 2002.