

個別要素法による浅層トンネルの 掘削シミュレーション解析

Simulation Analysis of Shallow Tunnel Excavation by Distinct Element Method

清水俊友¹・藤井健次²・楠見晴重³

Toshitomo Shimizu, Kenji Fujii and Harushige Kusumi

¹ 学生員 学士 関西大学大学院 地盤システム工学研究室 (〒564-8680 吹田市山手町 3 丁目 3 番 35 号)

E_mail: gj5m521@edu.kansai-u.ac.jp

² 正会員 工修 鹿島建設 (株) (〒107-8388 東京都港区赤坂 1-2-7)

³ 正会員 工博 関西大学教授 工学部都市環境工学科 (〒564-8680 吹田市山手町 3 丁目 3 番 35 号)

Recently, construction opportunity of the city tunnel increases, for the purpose of the effective utilization in the urban area. But, the design techniques for the shallow and large section tunnel are unsettled. Generally, as the method of analysis for tunnel excavations, the Finite Element Method is used. But it is difficult to express the slip action, because it handles the ground as a continuum.

Then, we tried to analyze the tunnel excavated actions by Distinct Element Method, the analysis for a discontinuity. It enables for bonding theory to express the supporting effect of Pre-Lining. Also, we tried to visualize the influences of closed double tunnels using double tunnel model.

Key Words: Distinct Element Method, Analysis, Pre-Lining, Double tunnel

1. はじめに

近年、人口の密集化、産業の集中化が進む都市部において都市再開発の必要性が高まっており、その中で地下空間の有効的な活用は重要な要素であると考えられている。これを受け、都市部におけるトンネル構造物の施工は増加しているが、従来の開削工法を用いた場合、用地取得や住居移転、施工時の環境対策など、困難な条件に対処しなければならない。非開削の工法としてはシールドマシンを用いる工法と、都市 NATM 工法が挙げられる。シールド工法は工期を短く、また、周辺に与える影響も最小限に抑えることが可能であるが、シールドマシンにかかる費用が莫大であることか

ら、トンネル延長によっては採算が合わないことも考えられる。都市 NATM 工法は、従来山岳部で用いられていた NATM 工法を都市部において適用したものである。シールド工法ほどの掘進速度は得られないものの、幅広い地山条件に対応可能で、費用面でも優れた工法であるといえる。砂質土からなる都市部の地山を NATM 工法で掘削する際、低固結度や地下水の影響に起因する地山強度の不足から切羽の自立性の確保が困難な場合がある。さらに、地上構造物や地中の既設構造物に与える影響を最小に抑える必要があり、周辺地山の变形挙動を把握することは極めて重要である。トンネル掘削を対象とした数値解析手法としては有限要素法が一般的であり各種解析コードを用い

た複雑な数値シミュレーションが実現場においても採用されている。しかし、有限要素法は連続体解析であり、浅層トンネル掘削時の変形問題を的確に再現することが困難である。また同様の理由から、滑り面発生等の不連続体挙動を表現することができない。これらの問題は砂質土地山を対象とした浅層トンネルの解析を行う上で重要な要素であると考えられる。そこで本研究では、不連続体解析に有用性の高い個別要素法を用い、浅層トンネルの掘削シミュレーションを行った。土被りの異なる地山モデルを作成し、掘削時の地山挙動の違いを評価するとともに、ボンディング理論を用いて補助工法であるブレイニング工法をモデル化し、その効果について検討を行った。また、双設トンネルの掘削モデルを作成し、近接したトンネルが相互に及ぼす影響について考察を行った。

2. 個別要素法

(1) 個別要素法の概要

個別要素法は P.A.Cundall¹⁾によって提案された数値解析手法であり、解析対象の構造体を粒子の集合体としてモデル化する。個々の粒子間には垂直方向、およびせん断方向の要素ばねを配置し、粒子同士がその重なりによって反発力を及ぼしあう。図 1 は粒子間の要素ばねの力学モデルを示したものである。この力から粒子には式(1a)に示す運動方程式が成り立つ。個々の粒子についての運動方程式を時間領域で差分化し、前進的に解くことによって、加速度、速度、変位を求め、これらを巨視的に追跡することでモデル全体の力学的挙動を把握することができる。

$$m\ddot{u} + C\dot{u} + F = 0 \quad (1a)$$

m : 粒子の質量 u : 粒子の変位
 C : 減衰係数 F : 粒子間作用力

(2) パラメータスタディ

個別要素法においてパラメータの的確な設定は最も困難な問題である。そこで本研究では、トンネル掘削時の天端部の挙動を再現する降下床実験²⁾を行い、解析結果との照合からパラメータスタディを行った。この結果、実験との整合性を得るためには、粒子数の変化に対して入力パラメータを変化させる必要があることが認められた。表-1 は単設トンネルの解析時に入力したパラメータの値である。また、図-1 は粒子数と垂直ばね定数の相関性を示したグラフである。表-1 の入力パラメータは、図-1 の相関性を適用して設定されたものである。

表-1 入力パラメータ (単設解析)

	粒子総数	ばね定数		減衰係数
		垂直方向	せん断方向	
H=0.5D	7,748	2.4×10^6	1.0×10^4	40
H=1.0D	9,176	2.7×10^6	1.0×10^5	40
H=2.0D	12,709	5.5×10^6	1.0×10^5	50

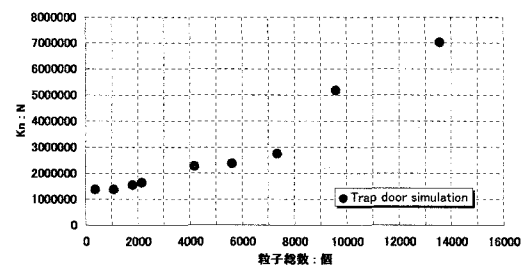


図-1 粒子総数と垂直ばね定数の相関性

さらにトンネル解析と同様の粒子を用いて供試体モデルを作成し、二軸圧縮シミュレーションを行った。この結果からモールの応力円を描き、入力パラメータによる粒子の見かけの物性値を推定した。表-2 に本解析における入力パラメータと、それに対する見かけの物性値を示す。

表-2 粒子群の物性値

	ばね定数		内部摩擦角 $\phi(^{\circ})$	粘性 $c(\text{Pa})$
	垂直方向	せん断方向		
H=0.5D	3.0×10^6	1.25×10^4	28.07	11.23
H=1.0D	5.5×10^6	2.0×10^5	32.57	24.82
H=2.0D	6.5×10^6	1.2×10^5	32.57	27.78

3. トンネル掘削解析の流れ

(1) 地山モデルの作成

単設、及び双設トンネルの初期モデルを、落下法によるパッキングシミュレーションを用いて作成した。その後それぞれの初期モデルを任意のy座標で切り取り、各土被りにおける地山モデルを作成した。

(2) 掘削法

パッキングによって作成した地山モデルのトンネル内空部に粒子を配置し、任意のステップにおいてこれらを除去することで掘削を表現した。解析開始から初期自重解析を経て、地山が定常状態になったところから掘削を開始するものとし、単設トンネルでは30万step、双設トンネルでは先進30万step、後進60万stepを掘削開始ステップとした。

(3) プレライニング工法のモデル化

プレライニング工法³⁾はトンネル掘削に先立って切羽をアーチ状にスリット掘削し、コンクリート又はモルタルを充填することで前方に連続したコンクリートの屋根を形成する補助工法である。これを本解析においてモデル化する際、特定のライニング粒子群に連続体としての性質を与える必要がある。そこで P.Mora⁴⁾ によって提案されたボンディング理論を適用し、粒子間に引張力として定義されるボンディング力を発生させ、アーチ形状の連続体を形成した。図-2 はボンディング力によって形成されるライニング粒子群の概要を示したものである。

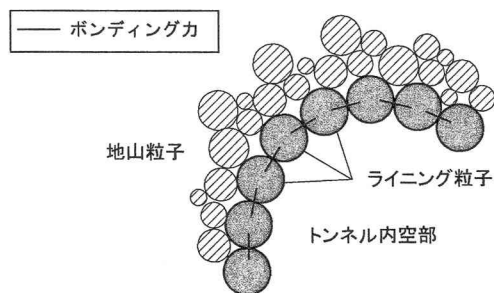


図-2 プレライニング粒子群の概要

4. 単設トンネル解析結果

(1) 土被りによる地山挙動の変化

a) 変位挙動

図-3 に土被り 0.5D、及び 2.0Dにおける変位収束時の変位分布を示す。土被り 0.5Dの場合、トンネル直上に大きな変位が生じ、その影響が地表面に達している様子が認められる。また、トンネル上方の地山と周辺領域の間に色の大きく異なる境界面が認められることから、この面に沿った滑り面が存在するものと考えられる。一方、土被り 2.0Dの場合、変位はトンネル上方の広い範囲に分布し、地山全体が一体となって変形するような挙動を示している。

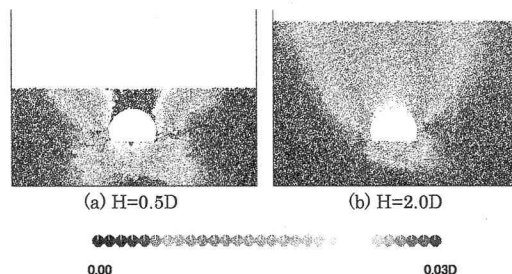
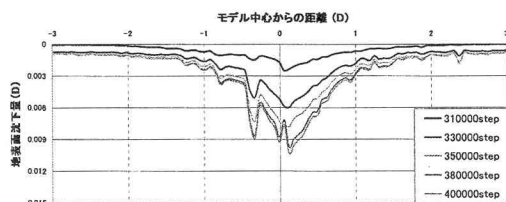
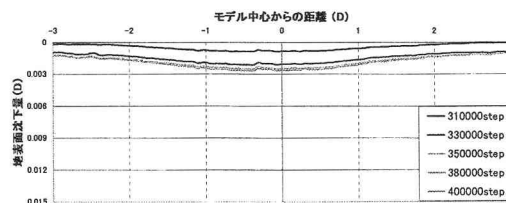


図-3 変位分布



(a) H=0.5D



(b) H=2.0D

図-4 地表面沈下量

図-4は土被り 0.5D、及び 2.0Dにおける地表面

沈下量の推移を示したものである。土被り 0.5D の場合、トンネル直上において大きな沈下が生じているのに対し、土被りの増加によって沈下が広範囲に広がり、局部的な沈下は見られなくなる。

b) 圧縮応力分布

図-5 は土被り 0.5D、及び 2.0D における圧縮応力分布を可視化したものである。これらの図は、トンネル掘削時の応力状態を初期状態（緑）とし、その状態と比較して応力が高くなるほど赤色に、低くなるほど青色に変化するようにして作成したものである。土被り 0.5D の場合、トンネル周辺の狭い領域に高い応力が集中し、トンネルを取り囲むような挙動を示している。この状態ではトンネル天端に作用する荷重が脚部に伝達されておらず、結果として地山の安定性の向上は見られない。それに対し土被り 2.0D では、トンネル脚部に高い応力域が発生しており、これによって地山内にグランドアーチが形成されていると考えられる。以上の結果はトンネル掘削時に形成されるグランドアーチの有無を、応力の観点から捉えたものである。

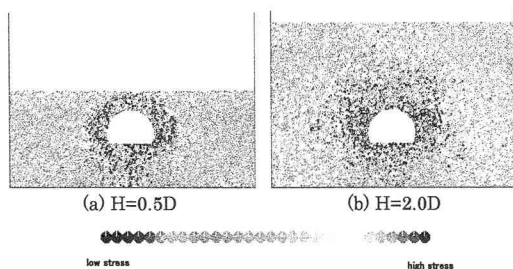


図-5 圧縮応力分布

(2) ライニング施工による効果

a) 地表面沈下量の変化

図-6 は、土被り 0.5D、及び 2.0D の地表面沈下量について、ライニングを施工した場合と無補強の場合を比較したグラフである。いずれの場合も沈下が抑制されているが、土被りが小さい場合、特にその効果が高いことがわかる。

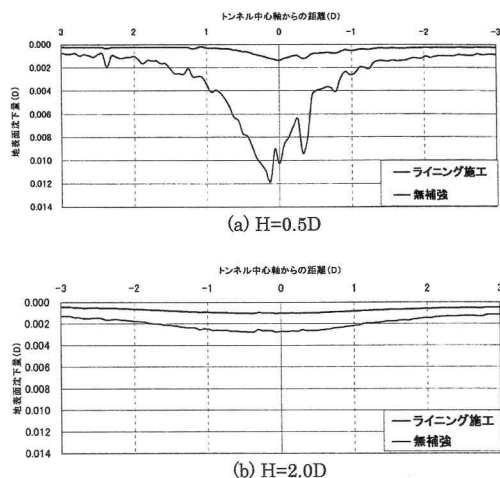


図-6 地表面沈下量に見るライニングの効果

b) ライニング施工時の圧縮応力分布

図-7 は、土被り 0.5D、及び 2.0D におけるライニング施工時の圧縮応力分布を示したものである。この図からライニングの粒子に高い応力が集中している様子が認められる。これはライニングの粒子自体がアーチとしての効果を発揮し、トンネル天端にかかる荷重を圧縮力としてトンネル脚部に伝達しているためであると考えられる。また、無補強時の応力状態と比較すると、明らかに周辺地山の応力の変動が減少していることが認められる。これは地山の変動を抑えるライニングの効果が現れた結果であるが、土被りが大きい場合、地山内に形成されるグランドアーチも見られなくなっている。このことから地山自身の強度を十分に発揮させるためには、土被りに対する最適な補強の程度を検討する必要がある、解析のデータはそれらの判断要素となると考えられる。

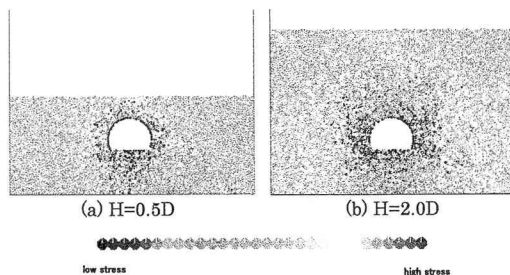


図-7 ライニング施工時の応力状態

5. 双設トンネル解析結果

(1) 解析の流れ

単設トンネルと同様の粒子を用いて双設トンネルモデルを作成し掘削解析を行う。単設と同じ3パターンの土被りについて、離隔距離 $S=0.5D$ 、 $1.0D$ の計6パターンの解析を行った。入力パラメータは降下床実験より得た相関性に基づき表-3のように設定した。なお、掘削は右、左の順に行うものとし、先進トンネル掘削による地山の変動が収束した後、後進トンネルの掘削を行った。

表-3 入力パラメータ (双設解析)

	粒子総数	ばね定数		減衰係数
		垂直方向	せん断方向	
H=0.5D	8,506	3.0×10^6	1.25×10^4	40
H=1.0D	10,389	5.5×10^6	2.0×10^5	40
H=2.0D	14,120	6.5×10^6	1.2×10^5	40

(2) 双設トンネル解析結果

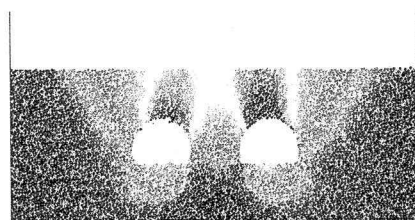
a) 変位挙動

図-8は土被り1.0Dにおける離隔距離0.5Dと1.0Dの変位分布を示したものである。先進トンネル掘削後に一度収束した変位が、後進トンネルの掘削によって再び増加する様子が認められる。この際、両トンネル上方に生じる変位は互いに引き寄せられるように増加しており、二つのトンネルの相互影響が現れている。また、離隔が狭い場合、その影響はより顕著に現れており、上方の地山全体が一体となって沈下するような挙動を示している。

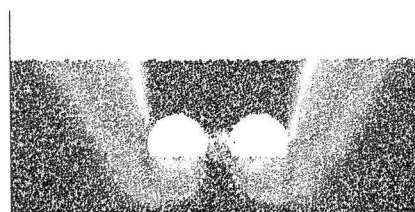
b) 地表面沈下量

図-9は、双設トンネル掘削解析におけるすべての解析パターンについて地表面沈下量を示したものである。いずれのパターンにおいても、先進トンネル上方の沈下量の方が後進トンネル上方の沈下量よりも大きくなったことから、一度安定したトンネルが再び乱された場合の方が、地表面の沈下に与える影響は大きいと考えられる。また土被りが小さい場合、離隔距離による沈下の違いが特に顕著に現れている。

すなわち離隔が広い場合、最大沈下はそれぞれのトンネル直上において生じているのに対し、離隔が狭い場合では最大沈下が両方のトンネルの中間点において生じており、一つの大きなトンネルを掘削したような結果となっている。これらの違いは土被りの増加に伴い沈下が広範囲に広がることによって見られなくなり、土被り2.0Dでは沈下量、形状ともに離隔距離による違いは認められない。



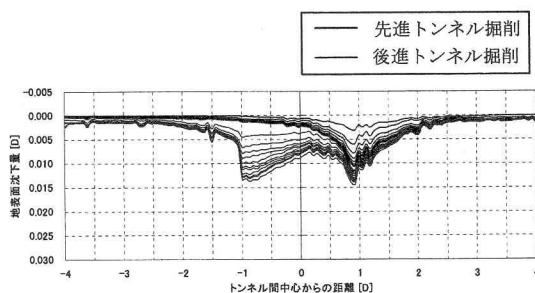
(a) $H=1.0D$, $S=1.0D$



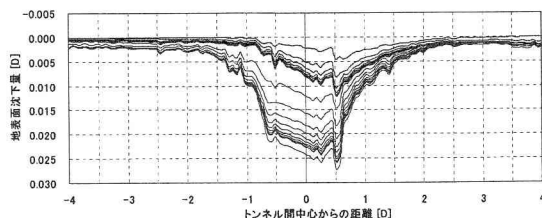
(b) $H=1.0D$, $S=0.5D$

0.00 0.03D

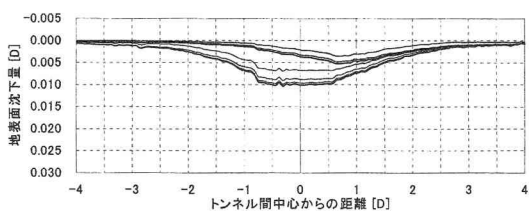
図-8 双設トンネル掘削時の変位分布



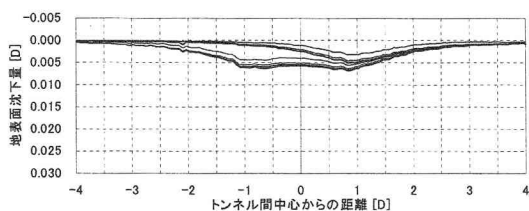
(a) $H=0.5D$, $S=1.0D$



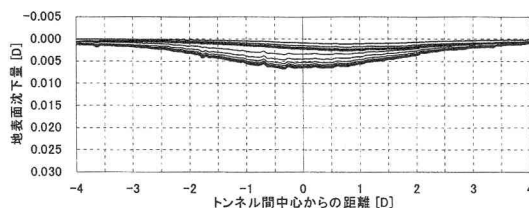
(b) $H=0.5D$, $S=0.5D$



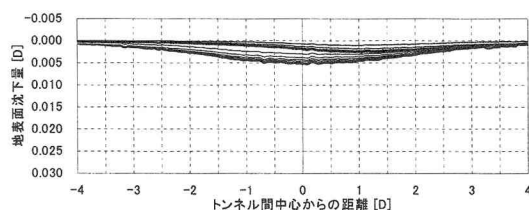
(c) $H=1.0D$, $S=0.5D$



(d) $H=1.0D$, $S=1.0D$



(e) $H=2.0D$, $S=0.5D$



(f) $H=2.0D$, $S=1.0D$

図-9 地表面沈下量の推移

c) 圧縮応力分布

図-10 は、双設トンネル解析におけるすべての解析パターンについて圧縮応力分布を示したものである。先進トンネル掘削の段階では、単設トンネルの解析と同様トンネル脚部に高い応力域が発生し、アーチの形成が認められた。ここに後進トンネルを掘削することにより新たな応力状態が形成されるが、この際、土被りと離隔距離の違いによって異なった挙動が現れる。すなわち離隔距離 $1.0D$ の場合、個々のトンネルの周囲にアーチの形成が認められるが、離隔距離 $0.5D$ の場合、両方のトンネルのアーチが

トンネル上部で閉合するような挙動を示し、地山全体に大規模なアーチを形成している。この大規模アーチは離隔距離が狭いほど形成されやすく、また、離隔距離 $1.0D$ であっても土被りが $2.0D$ の場合には同様の大規模アーチの形成が認められた。これらを総合すると大規模アーチの形成条件は、土被りが小さい場合には離隔距離に依存し、土被りが増加するに従い、その依存度が減少するものと考えられる。

ここで地表面沈下量の結果を照らし合わせると、離隔距離が小さい場合でも土被りの増加によって沈下が大幅に減少していることから、双設トンネル掘削時、特に離隔が狭い場合の地山安定性は、大規模アーチの形成によって向上するものと考えられる。



(a) $H=0.5D$, $S=0.5D$



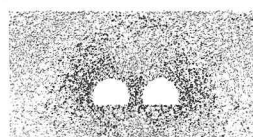
(b) $H=0.5D$, $S=1.0D$



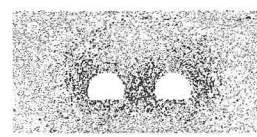
(c) $H=1.0D$, $S=0.5D$



(d) $H=1.0D$, $S=1.0D$



(e) $H=2.0D$, $S=0.5D$



(f) $H=2.0D$, $S=1.0D$

low stress high stress

図-9 圧縮応力分布（双設トンネル解析）

6. まとめ

個別要素法を用いた数値解析によって単設、及び双設トンネルの掘削シミュレーションを行い、様々

な条件における地山挙動について考察を行った。変位挙動、応力挙動に関するデータを可視化し、沈下の形態の違いやグラウンドアーチの形成を捉えることができた。しかし、本解析によって得られた結果は地山内の挙動を定性的に捉えたものであり、変位、応力等に関する定量的な評価は行っていない。今後、解析結果から側圧係数等のデータを出力し、理論的な式を適用することにより、地山挙動のメカニズム等に関して詳しい検討を行っていく必要がある。

謝辞：最後に本研究に関して多くの貴重なご教示を頂いた京都大学松岡俊文教授、岸田潔助教授に対しまして謝意を表します。

参考文献

- 1) P.A.cundall and Strack, O.D.L:A discrete numerical model for granular assemblies, Geotechnique, Vol.29,pp.47_65,1979
- 2) 藤井健次：個別要素法による浅層トンネル掘削時の地山挙動に関するシミュレーション解析/平成 17 年度関西大学修士学位論文 pp24_33,2005,3
- 3) 土木学会編 トンネル工学委員会：トンネルライブラリー10、プレライニング工法,pp7_27
- 4) F.Donze, P.Mora and S.Magnier : Numerical simulation of faults and shear zones, Geophys.J.Int. Vol.116,pp46_52,1979