

個別要素法を用いた多層地盤中における浅層トンネルの掘削シミュレーション解析

伊世健太郎^{1*}・楠見晴重²

¹関西大学大学院 工学研究科 ソーシャルデザイン専攻 (〒564-8680 大阪府吹田市山手町3-3-35)

²関西大学 学長 (〒564-8680 大阪府吹田市山手町3-3-35)

*E-mail: ua8m514@kansai-u.ac.jp

本研究では、個別要素法を用いて多層地盤中における浅層トンネルの掘削シミュレーション解析を実施している。解析モデルは物性値の異なる5層から構成される地山を想定して作成し、各層毎に異なる解析パラメータを与えた。解析パラメータについては、掘削シミュレーション解析に先立って二軸圧縮試験シミュレーション解析を行うことにより決定している。これらの地山モデル及び解析パラメータを用いて掘削シミュレーション解析を実施したところ、剛性の低い地質の強度を上げることにより、トンネル周辺地山の変形が抑制され、地表面への影響が小さくなることが確認された。本研究では、個別要素法を用いて多層地盤をモデル化し、剛性の低い地質がトンネル掘削に与える影響について把握することができた。

Key Words : shallow tunnel, distinct element method, simulation analysis, multilayered ground

1. はじめに

近年、都市機能の集中、人口の過密化により、都市トンネルの重要性が増してきている。しかしながら、我が国の都市部及びその近郊には沖積層、洪積層から成る砂質土地盤が広く分布しており、トンネル掘削に伴うそれらの挙動は、明確に把握されていない。都市部の浅層トンネル掘削時に最大の問題となる地表面沈下、地中既設構造物に対する影響などを的確に予測し、最適な対策工を早期に実施することは、施工全体における工期の短縮、ひいては工費の削減に直結する重要な問題である。これらの問題を事前に予測・評価することは、現在まで経験的になされてきたトンネル設計に対し、より合理的な設計を提案することになると考えられる、

そこで本研究では、地山の不均質性を再現することが可能である個別要素法を用いて、多層地盤中における浅層トンネルの掘削シミュレーション解析を実施した。トンネル掘削に伴う地山の変形をシミュレートし、地質構造がトンネル掘削に与える影響を把握を試み、最終的には、都市トンネルの合理的設計施工を可能とするトンネル解析シミュレータを構築することを、本研究の目的としている。

2. 個別要素法

個別要素法は、P.A. Cundall¹⁾によって考案された解析手法であり、主に岩盤や地盤といった不連続体を対象としている。数値シミュレーション対象を微小な粒子の集合体として巨視的に捉えることにより、その動力学的挙動を解析する方法である。個々の粒子間に仮定のばねを配し、その作用力から加速度、速度、変位を算出して粒子の挙動を追跡する。図-1に、粒子モデルの微視的な関係を示す。本解析手法では、ばね定数を接触距離(Δn)に乗ずることによって、粒子間の反発力を算出している。

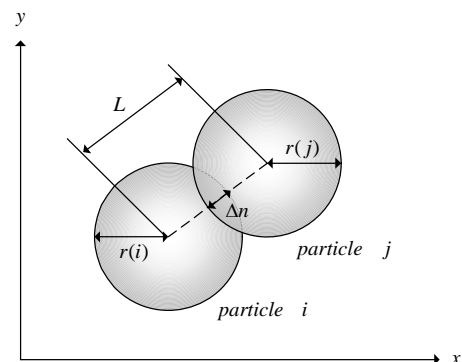


図-1 微視的な粒子モデルの関係

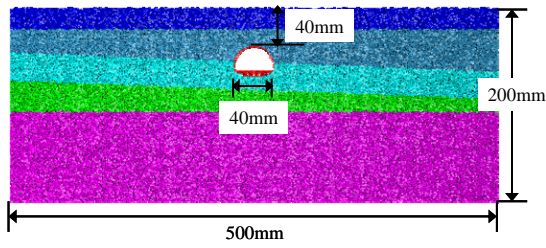


図-2 解析モデル

表-1 地盤物性値

	密度 (g/cm ³)	粘着力 (kPa)	内部摩擦角 (°)
火山灰層①	1.54	34.1	9.6
砂質土層①	1.49	18.7	37.5
粘性土層①	1.57	8.1	37.1
砂質土層②	1.72	3.4	34.2
砂質土層③	1.97	48.0	34.2

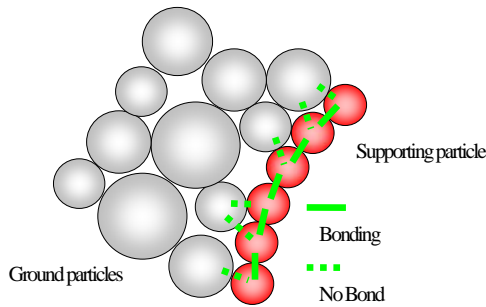


図-3 支保工粒子の概要

3. 解析モデルの作成

(1) 多層地盤のモデル化

本研究では、六角形格子状に発生させたランダム径粒子を重力落下によりパッキングを行うことで、解析モデルを作成した。

まず、予め粒子群の下方にトンネル形状に等粒径の粒子を配列させ、その粒子を変位拘束しパッキングを行うことで、トンネルを有する解析モデルを作成する。その後、層毎に粒子を色分けすることによって、物性値の異なる5層から成る多層地盤をモデル化した。図-2に、作成した解析モデルを、表-1に、本研究で想定した地山の物性値を示す。なお、各層の名称は、上部から火山灰層①、砂質土層①、粘性土層①、砂質土層②、砂質土層③とする。

(2) 支保工のモデル化

本解析においてコンクリートで形成される支保工をモデル化する際、それらの粒子に連続体としての性質を与える必要がある²⁾。そこで本研究では、P.Mora³⁾によ

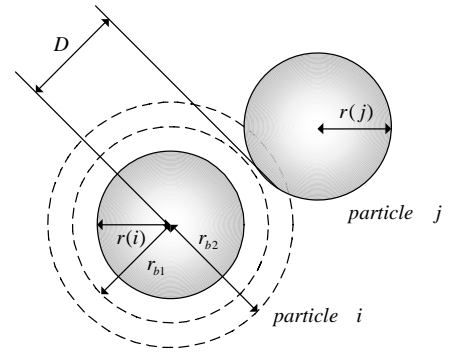


図-4 ボンディング力の作用領域

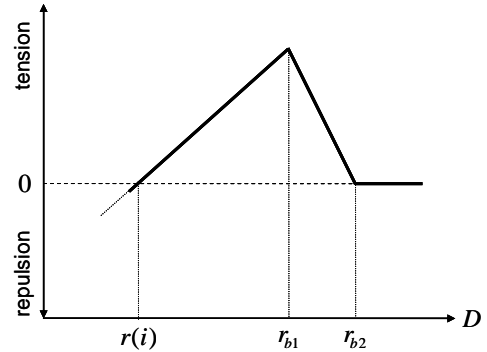


図-5 粒子間作用力

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-3は、ボンディング力によって形成される支保工の粒子群の概要を示したものである。

(3) ボンディング理論

支保工のモデル化の際に適用した、ボンディング理論の概要について述べる。

図-4に示すように、 r_{b1} と r_{b2} の2種類のボンディング半径を定義する。 r_{b1} は引張力が降伏に至る距離、 r_{b2} はボンディングが破断する距離を示している。すなわち、接触点である r から r_{b1} まで引張力は一時的に増加し、 r_{b1} を境に r_{b2} まで一時的に減少する。さらに、 r_{b2} に至るとボンディングは破断し、引張力は0となる(図-5)。以上のように定義された反発力及びボンディング力は以下のように定式化できる。

$$F_{ij} = \begin{cases} K \cdot \Delta n & (D < r(i)) \\ K \cdot (D - r(i)) & (r(i) < D \leq r_{b1}) \\ K \cdot (r_{b2} - D) & (r_{b1} < D \leq r_{b2}) \\ 0 & (D > r_{b2}) \end{cases} \quad (1)$$

ここに、 F_{ij} : 粒子iと粒子jに作用する接触力、 K : ばね定数、 Δn : 接触距離、 r_{b1} : ボンディング半径1、 r_{b2} : ボンディング半径2である。

表-2 二軸圧縮試験シミュレーション解析結果

	地盤物性値		解析パラメータ		解析結果	
	粘着力 (kPa)	内部摩擦角 (°)	減衰係数 (N・sec/m)	粒子間摩擦係数 (-)	粘着力 (kPa)	内部摩擦角 (°)
火山灰層①	34.1	9.6	145.00	0.08	34.40	10.74
砂質土層①	18.7	37.5	57.50	0.40	18.47	37.80
粘性土層①	8.1	37.1	4.25	0.40	8.15	38.93
砂質土層②	3.4	34.2	1.00	0.25	3.34	32.19
砂質土層③	48.0	34.2	120.00	0.50	48.29	34.32

表-3 解析パラメータ

Case	1	2	3
密度 (g/cm ³)	2.50	2.50	2.50
ばね定数 (法線) (MPa)	20.0	2.0	0.20
ばね定数 (接線) (MPa)	10.0	1.0	0.10
減衰係数 (N・sec/m)	100.0	100.0	100.0
粒子間摩擦係数 (-)	0.50	0.50	0.50
$\{r_{b1} / r(i) - 1\} \times 100$ (%)	0.01	0.01	0.01
$\{r_{b2} / r(i) - 1\} \times 100$ (%)	0.02	0.02	0.02

4. 解析パラメータの決定手法

(1) 二軸圧縮試験シミュレーション解析

表-1 に示したように、本研究ではそれぞれの層に対して異なる地盤物性値を設定している。そのため、各層毎に解析パラメータを設定し、掘削シミュレーションを行う必要があると考えられる。

個別要素法では、シミュレーション対象の物性値は粒子間のパラメータに支配される。しかしながら、本解析手法におけるパラメータ決定手法は確立されていないのが現状である。そこで本研究では、掘削シミュレーションに先立って個別要素法で二軸圧縮試験シミュレーション解析を行い、各層毎の粘着力及び内部摩擦角を表現できるパラメータを検討した⁴⁾。

a) 供試体モデル

掘削シミュレーションに用いる粒子群から、高さ 200mm、幅 100mm となるように切り取って、粒子総数およそ 5000 個の供試体モデルを作成した。

b) シミュレーション解析の概要

本研究では、解析パラメータ中の減衰係数と粒子間摩擦係数を変化させて二軸圧縮試験シミュレーション解析を行った。供試体に拘束圧に見合う水平力を作用させ、一定のひずみ速度で圧縮壁を降下させることで、供試体を圧縮する。粘着力及び内部摩擦角は、各ケースそれぞれについて 2 種類の拘束圧 (10kPa, 30kPa) でシミュレーション解析を実施し、モール・クーロンの破壊規準から求めた。この手順を目標とする粘着力及び内部摩擦角が得られるまで繰返し行い、各層毎の解析パラメータを決定した。

c) 解析結果

表-2 に解析結果を示す。想定した地盤物性値と解析結果を比較すると、粘着力に関しては 0.05kPa~0.30kPa、内部摩擦角に関しては 0.12°~2.05°の誤差が生じているが、ほぼ同等の値を示す結果となった。この解析結果を得るために繰返しシミュレーション解析を行っている際に、減衰係数を大きくすれば粘着力が増加し、粒子間摩擦係数を大きくすれば内部摩擦角が大きくなる

傾向が見られた。目標とする粘着力及び内部摩擦角を得るまでシミュレーション解析を繰返し行わなければならないという欠点はあるが、本解析手法を用いることによって、任意の強度を有する地質を表現することが可能であると考えられる。

5. 掘削シミュレーション解析

(1) 支保工粒子の解析パラメータの検討

各層毎の解析パラメータについては、前述した二軸圧縮試験シミュレーション解析より決定することが可能であるが、等粒径粒子を用いて形成されたアーチ形状の支保工粒子群に対して、同様の方法を適用することは困難である。また、ボンディング理論を適用して支保工をモデル化した既往の研究においても、支保工の解析パラメータ決定に関するシミュレーション等も行われていない。そこで本研究では、支保工の解析パラメータを変えたシミュレーションを数ケース実施し、地山の変位挙動の比較・検討を行った。

a) 解析条件

西村らの報告⁵⁾によると、実物の 1/n の幾何学的相似模型を nG (G: 重力加速度) の遠心加速度場においた場合、模型と実物に作用する鉛直応力は等しくなる。すなわち、遠心加速度場を想定したトンネル掘削解析を実施すれば、nG におかれた縮尺トンネル解析モデル内には、数 m の土被りを有する実トンネルと同等の荷重レベルを発生させることが可能となる。そこで本研

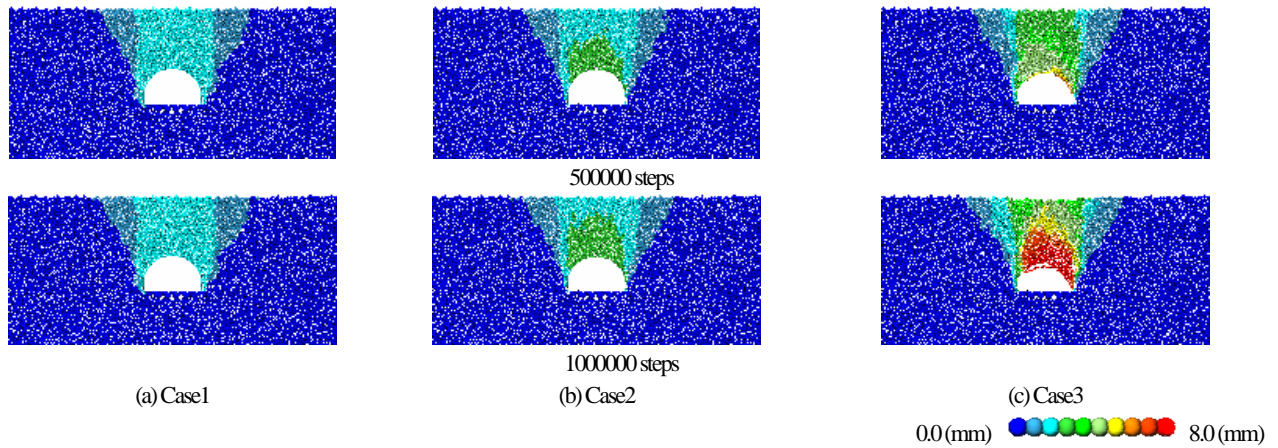


図-6 変位分布図

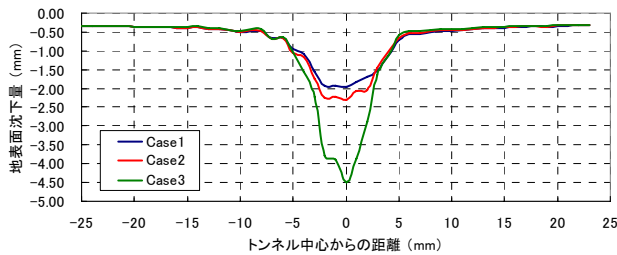


図-7 地表面沈下量

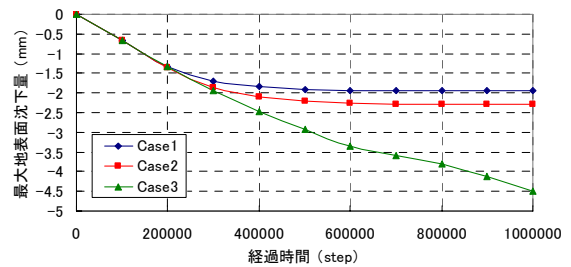


図-8 最大地表面沈下量の経時変化

究では、図-2 に示した解析モデルを 200G の遠心加速度場（換算土被り圧 8.0m）において、掘削シミュレーション解析を実施することにした。これにより、二軸圧縮試験シミュレーション解析で得た物性値を、そのままトンネル掘削解析に適用することが可能となる。

表-3 に支保工粒子の解析パラメータを示す。本研究では、支保工の強度特性に最も影響すると考えられるばね定数に着目し、これらを変化させた 3 ケースについてシミュレーション解析を行った。その他のパラメータについては、どのケースにおいても同様の値を用いた。

b) 解析結果

図-6 は、各ケースにおける変位分布図を示したものである。Case1 及び Case2 では崩落が生じず、Case3 のみで崩落が生じる結果となった。前述した式(1)より、支保工粒子のばね定数を大きくすることによって粒子間の反発力が大きくなるが、同時にボンディング力も大きくなる。すなわち、支保工粒子間に作用する引張力が大きくなり、解析モデルにおける支保工の強度も増加したと考えられ、この結果、Case1 及び Case2 ではトンネルの崩落が生じなかったと推測される。図-7 は各ケースにおける地表面沈下量、図-8 は最大地表面沈下量の経時変化をグラフにしたものである。これら図からも明らかのように、Case3 は他の 2 ケースと比較してトンネル直上の地表面沈下が極めて大きい。経時変化

表-4 砂質土層①と粘性土層①の解析条件

Case	4	5	6
砂質土層①			
粘着力 (kPa)	32.66	18.47	32.66
内部摩擦角 (°)	37.66	37.80	37.66
減衰係数 (N・sec/m)	112.50	57.50	112.50
粒子間摩擦係数 (-)	0.45	0.40	0.45
粘性土層①			
粘着力 (kPa)	8.15	24.00	24.00
内部摩擦角 (°)	38.93	35.87	35.87
減衰係数 (N・sec/m)	4.25	55.00	55.00
粒子間摩擦係数 (-)	0.40	0.42	0.42

を見ても、Case1 及び Case2 は 400000steps を過ぎた頃からほぼ一定の最大地表面沈下量を示しているが、Case3 では 1000000steps 以降も増加していき、さらに崩落が進行していくと考えられる。

(2) 地質構造の違いによる変位挙動の検討

本研究では、多層地盤中における浅層トンネルの掘削シミュレーションを実施し、地質構造がトンネル掘削に与える影響を把握することを目的としている。そこで、本解析において浅層トンネルが掘削されている砂質土層①及び粘性土層①に着目し、これらの層の強度を上げて掘削シミュレーション解析を行うことによって、地山の変位挙動の検討を行った。

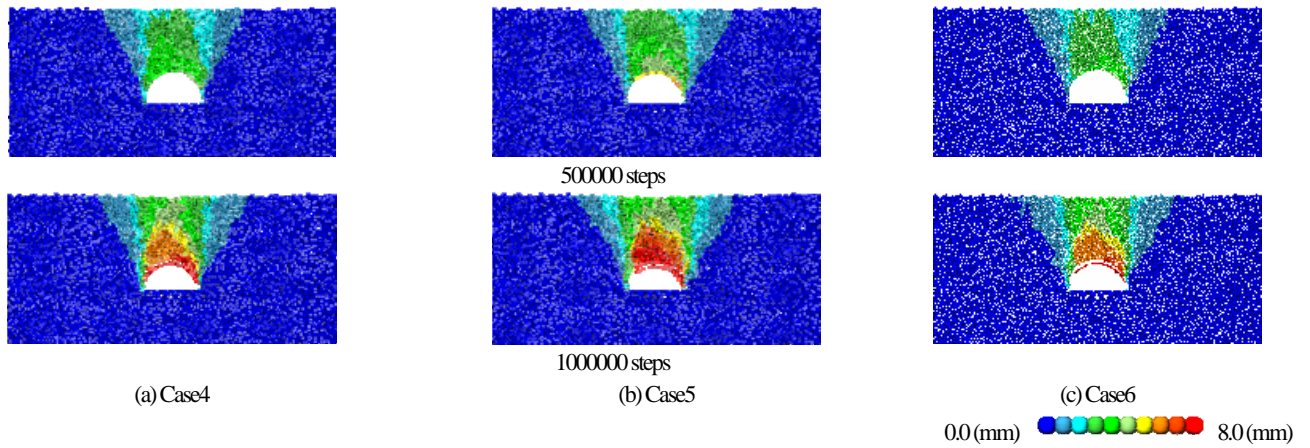


図-9 変位分布図

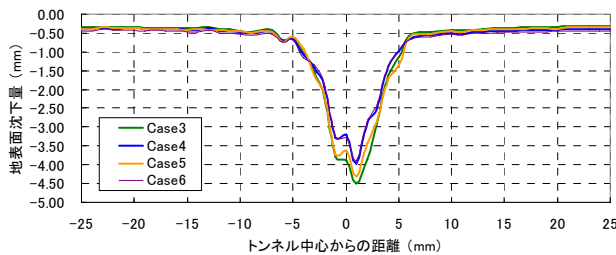


図-10 地表面沈下量

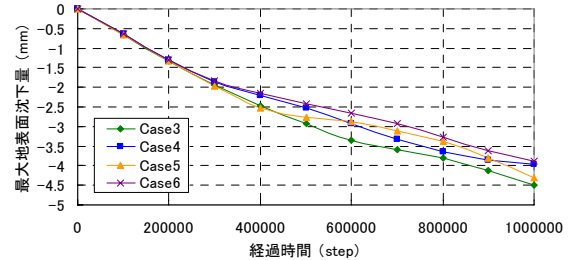


図-11 最大地表面沈下量の経時変化

a) 解析条件

砂質土層①の粘着力を約 15kPa, 粘性土層①の粘着力を約 15kPa, 砂質土層①と粘性土層①の両方の粘着力を約 15kPa 増加させた 3 ケースについて検討を行った. 表-4 に解析条件を示す. 支保工粒子の解析パラメータについては, これらの層がトンネル掘削に与える影響を把握しやすいように, 崩落の生じた Case3 の値を用いることにした. なお, 粘着力を増加させる際の減衰係数及び粒子間摩擦係数は, 事前に二軸圧縮試験シミュレーション解析を行い決定した.

b) 解析結果

図-9 に変位分布図を示す. いずれのケースも崩落が生じているが, 砂質土層①の粘着力を増加させている Case4, Case6 では, 増加させる前 (Case3) と比較して, トンネル直上の変位が小さくなる結果となった. 粘性土層①の粘着力のみを増加させている Case5 では, この傾向は見られなかった. すなわち, トンネルの天端部が掘削されている砂質土層①の強度が, トンネルの崩落に大きな影響を与えていると考えられる. 図-10 は各ケースにおける地表面沈下量, 図-11 は最大地表面沈下量の経時変化をグラフにしたものである. これらの図から, Case5 においても, わずかではあるが地表面沈下が抑制されていることがわかる. しかしながら, Case4 や Case6 ほどの効果は見られず, 粘性土層①の強度と本解析における崩落との間には, 関連性がほとん

どないと思われる.

以上の結果から, 本解析では解析パラメータの減衰係数と粒子間摩擦係数を変化させることで, 任意の粘着力及び内部摩擦角を表現することができ, これらをトンネル掘削シミュレーション解析に適用することが可能となった. また, 多層地盤中の砂質土層①の強度が, トンネルの崩落に大きな影響を与えていることが明らかになった.

6. 結論

本研究では, 個別要素法を用いた二軸圧縮試験シミュレーション解析より解析パラメータを決定し, 多層地盤中における浅層トンネルの掘削シミュレーション解析を実施した. 以下に, 本研究で得られた知見を示す.

- 1) 個別要素法にボンディング力を導入し, 連続体と不連続体の双方を解析できるプログラムを構築した. これにより, 連続体であるコンクリート支保工をモデル化することができ, 支保工を有するトンネルの掘削シミュレーション解析が可能となった.
- 2) 掘削シミュレーション解析に先立って個別要素法を用いた二軸圧縮試験シミュレーション解析を実施し, 解析パラメータを決定した. これにより任意の粘着

力及び内部摩擦角を有する地山をモデル化することが可能となった。

- 3) 支保工粒子のばね定数を変化させた 3 ケースの掘削シミュレーション解析を実施し、ばね定数が支保工の強度特性に大きな影響を与えていることが把握できた。しかしながら、支保工の圧縮強度、引張強度、曲げ強度との具体的な関係性については把握できておらず、さらなる研究が必要である。
- 4) 浅層トンネルが掘削されている 2 つの層の粘着力に着目し、これらを増加させて掘削シミュレーション解析を実施した。これにより、本解析におけるトンネルの崩落に砂質土層①の強度が大きな影響を与えていることが把握できた。

scale movement in blocky rock system, *Symp. ISRM Nancy France Proc., Vol.2, pp.129-136, 1971.*

- 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 年関西大学修士学位論文，pp.55-61，2005.
- 3) F.Donze, P.Mora and S.Magnier : Numerical simulation of faults and shear zones, *Geophys.J.Int. Vol.116, pp.46-52, 1979.*
- 4) 大槻敏，楠見晴重，松岡俊文：粒子間ボンディング力を適用した個別要素法による 2 次元岩盤斜面の崩壊シミュレーション解析，材料，Vol.56, No.9, pp.846-850, 2007.
- 5) 西村強，福田毅，辻野考治：岩盤斜面安定解析のための 2 次元個別要素モデル，第 38 回岩盤力学に関するシンポジウム講演集，pp.7-12，2009.

参考文献

- 1) Cundall, P.A. : A Computer model for simulation progressive, Large

SIMULATION ANALYSIS OF EXCAVATION OF SHALLOW TUNNEL IN MULTILAYERED GROUND BY DEM

Kentaro ISE and Harushige KUSUMI

In this paper, we try the simulation analysis of excavation of shallow tunnel in multilayered ground using DEM. A simulation model is composed of 5 layers that values of physical properties are different, and different analytical parameters are gave to each layer. These values are decided by doing the simulation analysis of biaxial compression test by DEM in advance of excavating simulation. Using the ground model and these analytical conditions, we tried to simulate a tunnel excavation, and it is recognized that the deformation of surrounding ground of tunnel and the effect of ground surface are inhibited by improving the layers of low-stiffness.