

個別要素法によるトンネル掘削時における地山内の力学的挙動 に関するシミュレーション解析

Simulation analysis of the ground action at the time of the tunnel digging using Distinct Element Method

藤井健次*・楠見晴重**・松岡俊文***・芦田譲****

Kenji FUJII, Harushige KUSUMI, Toshifumi MASTUOKA, Yuzuru ASHIDA

In case of excavation working of underground, initial stress is opened wide, and local subsidence occurs all over the foundation and it becomes the cause by which this gives destruction and modification in a surrounding natural ground. And in order to grasp the mechanical behavior of shallow tunnel excavation in the intersection, two dimensional trap door tests have been developed and performed. With changing overburden pressures, the variation of vertical earth pressure acting on trap doors, the distribution of earth pressure and the settlement of ground surface have been measured. Then, it tried to perform the simulation of a trap door test by Distinct Element Method, and from a viewpoint of the modification action of trap door or the model foundation, this research compared the experiment result and the analysis result, and the validity was examined by it.

Key Words : simulation analysis, dem, excavation of tunneling, mechanical behavior, trap door test

1. はじめに

地山の材料物性を把握し、その物性値を用いてトンネル周辺地山の応力・変形解析を実施し、その結果からトンネルの安定性を評価し、不安定と判断されれば対策を施す、というのがトンネル設計のあるべき姿である。しかしながら、現状では、このような流れでトンネルが設計される場合は極めてまれであり、地山分類などの経験的な手法を用いて設計される場合がほとんどである。

トンネルの設計があるべき姿になれない理由を以下に挙げる。まず、線状構造物であるトンネルは、様々な地質条件の中を掘削されるため、その遭遇するすべての地質に対してボーリングデータを取得して材料物性を把握することは、経済性等の理由で不可能である。たとえあるひとつの地質を取り出したとしても、その材料のあらゆる力学特性を完全に把握することは困難である。しかも、そのあらゆる力学特性を完全に表現しうる構成モデルは存在しない。そこで、トンネルの力学挙動に支配的な材料物性を表現し得るモデルを使おうとしても、その前段階として、材料のどのような物性が掘削時の力学挙動を支配するのかは、未だ明らかにされていない。そこで本研究では個別要素法により降下床実験のシミュレーションを行うことを試み、降下床土圧やモデル地盤の変形挙動の観点から、実験結果と解析結果を比較し、その妥当性について検討した。

* 学生員 関西大学大学院 工学研究科土木工学専攻

** フェロー 工博 関西大学教授 工学部都市環境工学科

*** 正会員 工博 京都大学大学院教授 工学研究科社会基盤工学専攻

**** 正会員 工博 京都大学大学院教授 工学研究科社会基盤工学専攻

2. 解析手法と実験概要

2.1 個別要素法

各粒子を仮想ばねによって結合すると、粒子間の距離が変化することによりフックの法則から復元力が生じる。その力を用い個々の粒子について運動方程式を解き、各粒子の加速度、速度、変位を計算する。このそれぞれ微小な粒子を集合体として巨視的に観察することにより、地盤などの動力学的挙動を解析する方法である。図-1 はモデルを微視的に見た時の粒子間に働く力を示したもので、それぞれの粒子 i 、 j についての運動方程式については(1)、(2)式より求まる。ただし C : 減衰係数とする。

$$m_i \cdot \ddot{u} + C \cdot \dot{u} + F_i = 0 \quad m_j \cdot \ddot{u} + C \cdot \dot{u} + F_j = 0 \quad (1)$$

作用力に関しては(3)式より求められ、土圧の算出は粒子間と同様の計算を粒子と壁との間でも行い、各作用力を足し合わせることで土圧と表現する。ただし k : ばね定数とする。

$$F_{ij} = F_{ji} = k \cdot \Delta n \quad (2)$$

2.2 実験概要

実験結果の比較には菊本らの研究報告³⁾を用いた。

2.2.1 地山材料

地山材料には、長さ 50 mm、直径 1.6 mm と 3.0 mm のアルミ棒を重量比 3 : 2 で混合したアルミ棒積層体（単位体積重量 $\gamma = 2.1 \text{ kN/m}^3$ 、内部摩擦角 $\phi = 30^\circ$ 、粘着力 $c = 0 \text{ MPa}$ ）を用いた。これは、豊浦ケイ砂の粒径加積曲線にほぼ平行になる割合である。このアルミ棒積層体を積み上げて地山を作成する。

2.2.2 実験装置

図-2 は実験装置の概要図である。幅 60cm の底板の中央に降下床を設け、降下床を降下させる。降下床の幅 B は 10cm である。装置底面は 40 個のアルミ製のブロック（幅 24.5 mm）を並べたもので構成されており、各ブロックの底面に貼り付けた荷重計により装置底面に作用する鉛直荷重分布の計測が可能である。また、隣接するブロックの間に 0.5 mm の間隔を設けることで、ブロック同士が互いに干渉しないように設計している。

地表面測定に関してはレーザー変位計を用いて測定している。

計測結果の整理法は、地表面を水平方向 1mm 間隔に分割し、区間ごとに得られたレーザー変位計から地表面までの距離の計測データを平均し、平均値から 20mm 以上離れたデータを異常値とみなして取り除く。そして、異常値を取り除いたデータから再度算出した平均値を各区間の代表値とする。しかし、これらのデータで、地表面形状を評価することは容易ではない。ゆえに、スムージング、すなわち地表面の各点の両側で幅 25 mm の範囲にあるデータの移動平均を取り、それを地表面形状としてプロットする手法を用いて、地表面形状、地表面変位の影響範囲を評価する事を容易にしている。

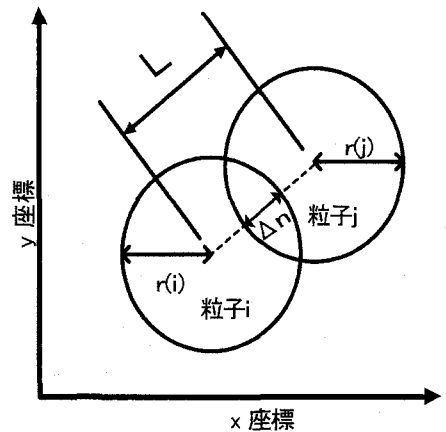


図-1 微視的な粒子間の関係

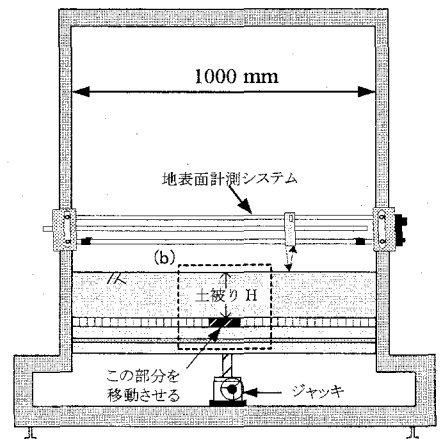


図-2 降下床実験装置

2.3 解析概要

解析モデルではより自然な地盤モデルを再現するためにランダム径粒子モデルを用いた。最小粒径 1.4mm から最大粒径

3.3mm までの粒子を乱数プログラムを用いて配列し、粒子群に鉛直方向の重力と水平方向に正弦波を用いた加速度を与えることにより、振動落下させることで粒子のパッキングを行った。また、定常状態を作るために水平方向の加速度に減衰関数を与え、定常状態となった粒子群を任意の形状に切り取ることでモデルを作成する。降下床モデルは実験と同じスケールとし、図-2 の実験装置と同条件で解析を行った。なお、本研究では土被り H=3D と H=1D の 2 ケースをモデル化し実験結果との比較を行う。

表-1 に各土被りにおける解析パラメータ値を示す。粒子間の剛性に関しては垂直ばね、せん断ばね、両者において粒子数に支配されることから、各土被りにおいて異なる値を設定している。運動方程式に適用されている粘性係数や粒子間のせん断方向に設置されているスライダのばね定数（摩擦係数）、また密度に関しては同様の値を設定している。

表-1 パラメータ値

土被り	粒子総数(個)	ばね定数(N/mm ²)		摩擦係数	粘性係数	密度(g/cm ²)
		垂直	せん断			
H=3D	4161	2.0×10^6	2.0×10^6	0.5	30	1.8
H=1D	1435	0.5×10^6	0.5×10^6	0.5	30	1.8

3. 実験結果と解析結果との比較と考察

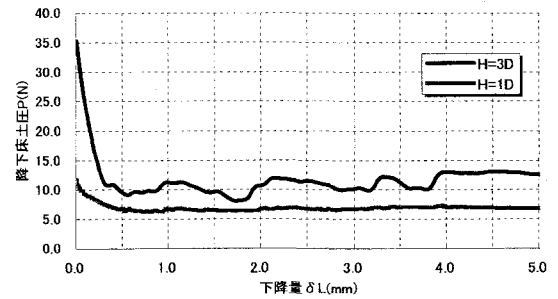
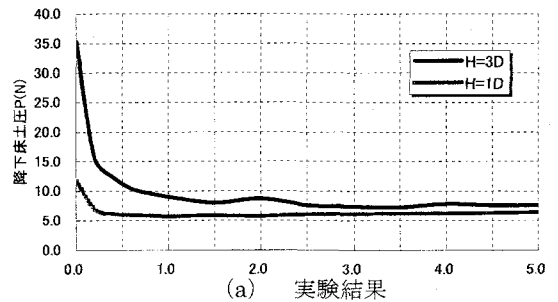
3.1 土圧に関する比較

3.1.1 降下床土圧

図-3 は降下床に作用する土圧に関する実験結果と解析結果である。土被り H=1D、H=3D 両者においても降下床を下降させると地盤内にアーチが形成されるため、降下床に作用する土圧が急激に減少している。また、そのアーチ効果も土被りが大きいほど顕著である。降下床を 0.5mm 程度下降させると降下床に作用する土圧は極小値に収束しており、その後はほぼ一定の値をとる結果となった。実験と解析の結果を比較すると、解析は実験を定性的に評価できているものと思われる。

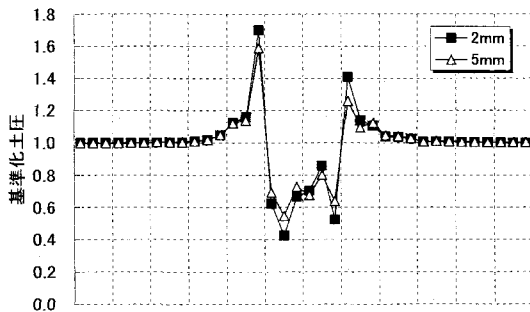
3.1.2 土圧分布

解析における土圧分布の算出に関して、モデル下方

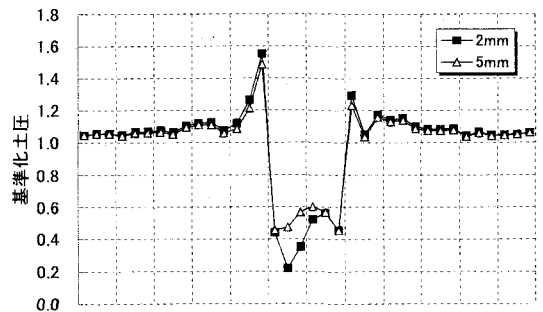


(b) 解析結果

図-3 降下床土圧



(a) H=1D



(b) H=3D

図-4 基準化土圧

の境界に実験と同様に 25mm ピッチで壁を設定し、各々の壁に作用する土圧を算出することで土圧分布を表現している。

図-4 は降下床下降量 $\delta_d = 2.0 \text{ mm}$ 、 5.0 mm における鉛直土圧の分布を、土被りごと($H=1D$ 、 $3D$)に示したものである。同図の縦軸に示す規準化土圧とは、実験各時点で計測した土圧を図中の左上に示す理論初期土圧で除して算出した値であり、各土被り圧に対する移動床に作用する鉛直土圧の比を表す無次元量である。これらの図より、どの土被りにおいても、移動床上では土圧が減少し、移動床周辺部では土圧が増加することがわかる。土圧分布形状に着目すると、移動床上では中心に比べて移動床端部に近いほど土圧の減少が顕著であり、周辺地山では移動床に近いほど土圧が大きいことがわかる。さらに、土被りが大きいほど移動床から離れた広い範囲において土圧の増加がみられる。

3.2 地表面沈下に関する比較

3.2.1 地表面沈下量

図-5 は各土被りにおける降下床 5mm 下降時の地表面沈下形状を示したものである。この図より土被りが小さいケースでは、地表面沈下は降下床の直上で生じており、降下床を下降させたときの影響範囲が小さいことが確認できる。土被りが大きい場合は、地表面沈下は広範囲で生じており、その沈下量も土被りが小さいケースと比較してかなり微小な値となっている。

図-6 は各土被りにおける最大沈下量と降下床の下降量との比較をしたものである。実験において、最大沈下量は降下床の下降量に対してほぼ線形的に増加していくのに対して、解析ではパイリニアの形状で増加する傾向にある。

3.2.2 変位分布

村山⁴⁾、村山・松岡⁵⁾は砂質土の 2 次元モデルとして、ある直径のアルミ棒を混合し、水平に積み上げたアルミ棒積層体を用いて 2 次元移動床下降実験を行った。その結果、図-7 に示すように移動床とともに変位する 1 次領域 (Zone-I) と、1 次領域に追従して変位する 2 次領域 (Zone-II)、そして 2 次領域の外側にあって変位しない 3 次領域 (Zone-III) に分かれることを明らかにした。

図-8 に降下床を下降させたときの粒子の変位を可視化した解析結果を示す。解析においても実験と同様に 3 つの領域が形成されていることが確認できる。また、土被りが大きいケースでは粒子の変位領域は降下床を頂点とした逆三角形の形状を示しており、地表面沈下は広範囲で生じていることが確認できるのに対して、土被りが小さいケースでは粒子の変位領域は降下床を底辺とした長方形の形状を示しており、地表面沈下は降下床の直上でのみ生じていることが確認できる。

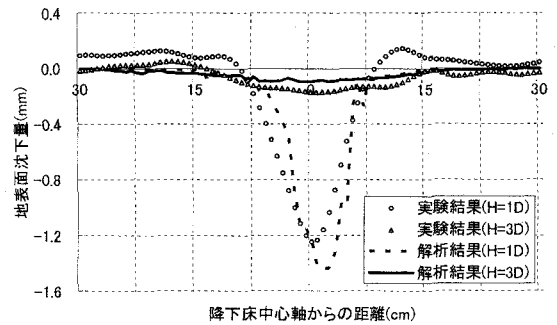


図-5 地表面沈下量

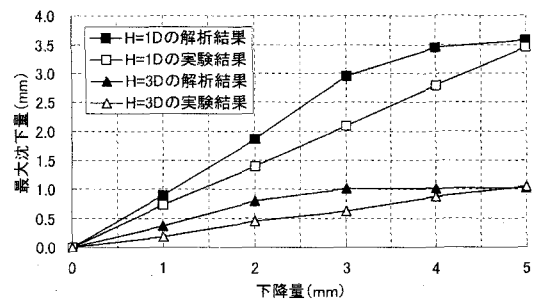


図-6 最大沈下量

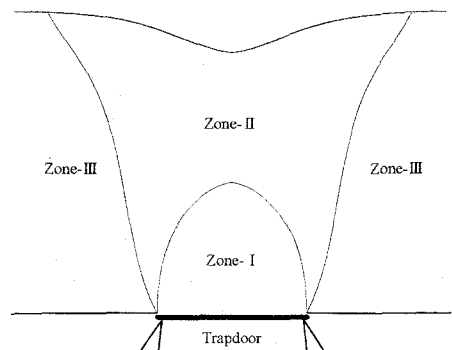


図-7 実験により得られた 1 次、2 次、3 次領域

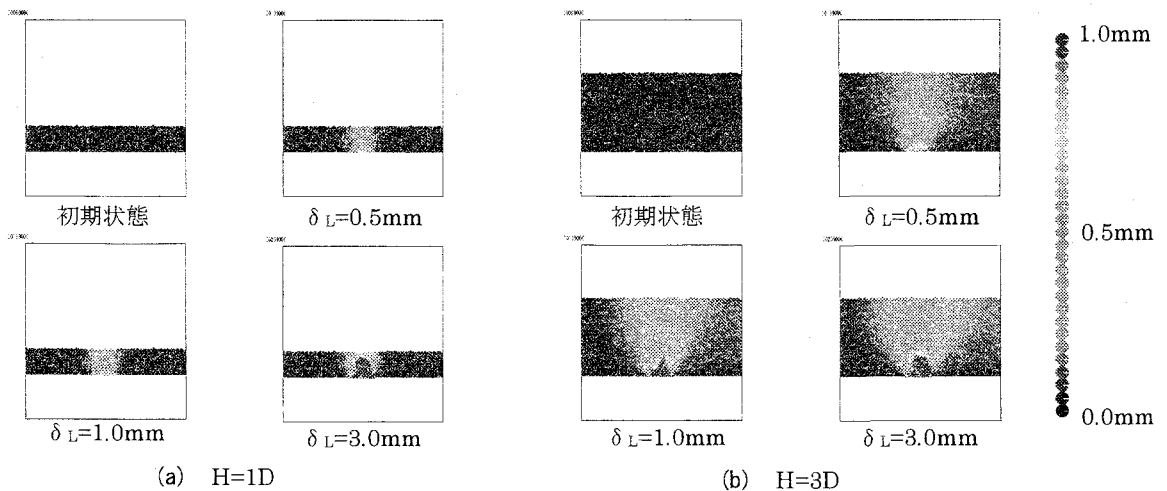


図-8 変位の可視化

3.2.3 変位ベクトル

初期座標から各ステップの粒子の座標データから残差を求め、それを移動データとして扱うことで変位ベクトルの作成を行った。変位をベクトル化することで、降下床を下降させたときのモデル地盤における粒子の軌跡を追跡することが可能となる。図-9 は H=3D における降下床 5mm 下降時の粒子の変位ベクトルである。これにより、1 次領域に存在する粒子は降下床に向かって鉛直に移動し、その移動量も大きいものに対して、2 次領域に存在する粒子は 3 次領域との境界面に沿って移動し、その移動量も小さい。

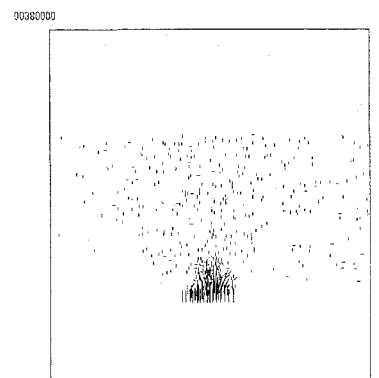


図-9 変位ベクトル

3.3 内部応力

円形要素を用いた個別要素法において、内部応力を算出する計算手法は、Cundall によって提案されている。本研究では粒子に作用する力を式 (4) のように成分分解し、その方向ごとに足し合わせて体積で除する（本研究では 2D-DEM を用いているので面積で除する）ことで応力テンソルを表現している。これにより、各粒子に作用する応力が算出でき巨視的に見た内部応力を示すことが可能となる。

$$\sigma_n = \frac{1}{V} \sum_{p=1}^N r_p \left\{ \sum_{c=1}^{m_p} [F_n]_j^c \right\} \quad \sigma_s = \frac{1}{V} \sum_{p=1}^N r_p \left\{ \sum_{c=1}^{m_p} [F_s]_j^c \right\} \quad (3)$$

ここで、 V は粒子の体積、 r_p は粒子の半径、 n_i^c は p 粒子に接触している c 粒子の単位法線、 F_n は p 粒子に接触している c 粒子の鉛直方向の作用力、 F_s は p 粒子に接触している c 粒子のせん断方向の作用力、 m_p は p 粒子に接触している粒子の数、 N は p 粒子の接触数である。

図-10 にシミュレーション解析から得られた、各粒子に作用する鉛直応力の分布状況を示す。図-10(a) は土被りが小さいモデルの応力分布状況を示したものである。降下床を下降させると初期応力が再分配されている様子が確認できる。降下床の上部に位置する粒子は初期応力から減少し、減少する範囲はアーチの形状を示している。降下床両端に位置する粒子の上方は降下床の下降に伴い、内部応力が増加している。また、これらの現象は降下床を 1mm 下降させた時点で生じており、降下床を 1mm 以上下降させても地盤内の内部応力の変化はあまりみられない。これにより、降下床下降による地盤内の応力の再分配は降下床を 1mm 下降未満に完了されていることが確認できる。図-10(b) は土被りが大きいモデルの応力分布状況を示したものである。応力の再分配の減少は土被

りが小さいケースと同様の挙動を示す。また、応力の減少する範囲は土被りが大きいケースと小さいケース、両者においても同様の形状を示すことから、地盤内に形成されるグランドアーチの規模は土被りに関係なくほぼ一定の形状を示すことが確認できる。

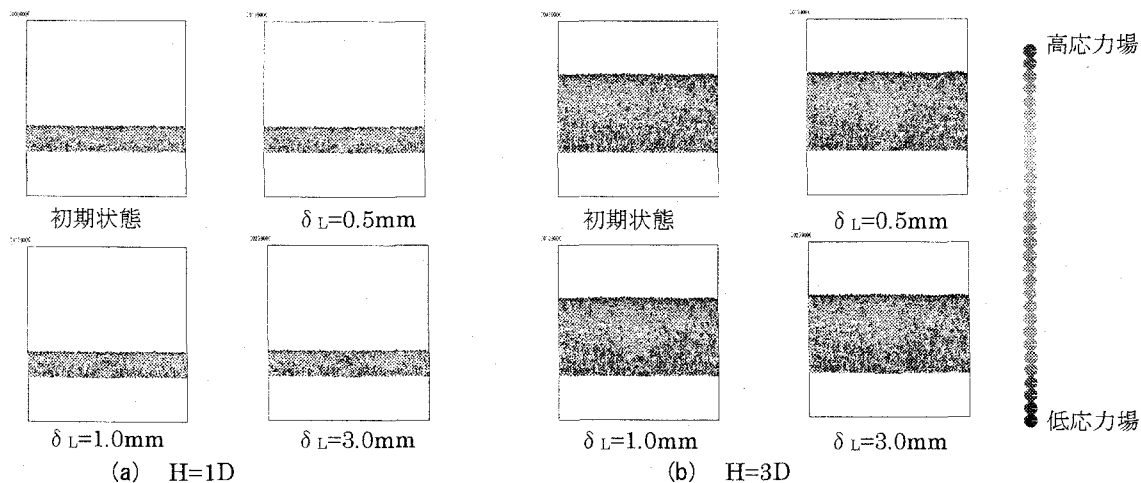


図-10 内部応力の可視化

4. まとめ

本研究ではトンネル掘削時の地山内の力学的挙動を解明することを目的とした降下床実験を個別要素法を用いてシミュレーションを行った。以下に本研究で得られた考察をまとめる。

- ・ 降下床に作用する土圧に関しては、実験と同様に降下床を下降させると地盤内にグランドアーチが形成されるために土圧が減少し、そのアーチ効果も土被りが大きいほど顕著にみられる結果となった。
- ・ モデル下方の境界壁に作用する土圧分布より、どの土被りにおいても降下床に作用する土圧は減少している。その分布形状は降下床の両端は減少量が少なく、降下床の中心に近づく程減少量が大きくなることから、緩み土圧も適切に再現できていると思われる。
- ・ 各粒子に作用する鉛直方向の作用力から内部応力を求め、降下床を下降させた時における地盤内の初期応力再分配の状況を可視化することができた。

以上のことから、本研究で提案する個別要素法、及びそれに用いるパラメータは砂質土を想定したトンネル掘削シミュレーションに十分適用可能であることが確認できる。今後は、現在の2D-DEMを3D-DEMに拡張し、実際のトンネル掘削シミュレーションを行う。

参考文献

- 1) 湯浅泰則・足立紀尚：アルミ棒積層体を用いた降下床実験とその解析に関する研究、第23回土質工学研究発表会講演集、pp.1891-1894、1988。
- 2) 足立紀尚・木村亮・岸田潔・小坂馨・坂山安男：3次元降下床実験によるトンネル交差部の力学挙動、No.638/Ⅲ-49,285-299,1999.12。
- 3) 菊本統・田村武・木村亮：トンネルに作用する土圧に関する移動床実験、土木学会年次学術講演論文集(2003)。
- 4) 村山朔郎：砂層内局部沈下部にかかる垂直土圧、京都大学防災研究所年報第11号B、pp.123-138、1968。
- 5) 村山朔郎、松岡 元：砂質土中のトンネル土圧に関する基礎的研究、土木学会論文報告集、第187号、pp.95-108、1971。