

個別要素法による多段降下床実験の数値解析

首都大学東京大学院 学生会員 ○伊藤 隆太
首都大学東京大学院 正会員 西村 和夫
首都大学東京大学院 正会員 土門 剛

1. 目的

近年，都市部を中心に地下空間の高度利用を目的としたトンネルの超近接施工が要求されている．トンネル断面の一部分を先行して掘削・支保し，次に同様に隣接した部分を掘削・支保し，最後にトンネルの全断面を構築する逐次掘削工法や NATM における断面分割工法は有効な工法である．
一般に単設トンネルの作用土圧の設計には，全土被り圧，あるいは Terzaghi の緩み土圧を従来用いている．逐次掘削工法ではトンネルの超近接施工による応力再配分により，作用する土圧が単設の場合と異なるが，そのメカニズムに関しては不明な部分が多い．このような背景から当研究室では逐次掘削を模擬した多段降下床実験を長期にわたって実施しており，降下順序によって，全土被り圧以上の荷重が作用することを明らかにしている．
今回，解析手法として DEM（個別要素法）を用いる．従来の解析では FEM（有限要素法）が現場において主に用いられている．FEM は弾性体及び連続体変形の解析に適しているが，不連続体の表現や地山の崩壊を模擬することは困難である．DEM は非連続的な変形を模擬することには適している．つまり，砂質土を模擬した本実験における粘着力のないアルミ棒積層体の挙動を再現するのに適している．
本研究では，実験結果と DEM シミュレーション結果を照らし合わせることで，DEM 解析モデルのこのような実験への適用性の検討を行い，定量的で合理的な設計モデルを提案する基礎とする．

2. 多段降下床実験

実際のトンネル掘削は三次元の現象であるが，本研究では繰り返し掘削履歴を受ける地山の静的な応力再配分を観察することを目的としているため，トンネル縦断方向の変位は考慮しない二次元実験とした．また，地山材料には，簡便で再現性も期待できることを理由に，表 1 に示す物性のアルミ棒積層体を使用した．5 連降下床を逐次掘削トンネルや MMST トンネルにおける部分掘削トンネルとし，降下床を順に降下させることによって，トンネルの逐次掘削による緩みを模擬した（図 1）．降下床の降下順序を逐次掘削トンネルの掘削順序とし，様々な順序で降下床を降下させることによって生じる降下床土圧を計測した．なお，本概要での降下順は，図 2 のように左から右へ順に ABC の 3 つの降下床を降下させたケースのみを示す．

表 1 地山材料の物性

材質	アルミ合金
長さ	100(mm)
径	1.6,3.0(mm)
混合比（重量比）	3:2
地山密度	≒ 21.5(kN/cm ³)
粘着力	≒ 0(kN/ cm ²)
内部摩擦角	30(°)

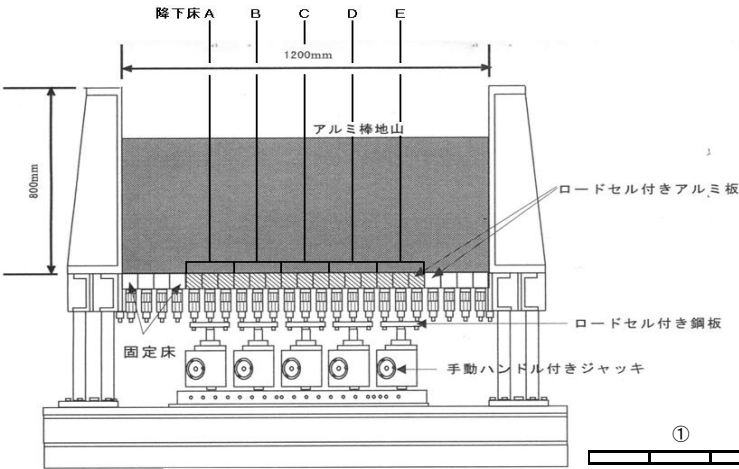


図 1 実験装置

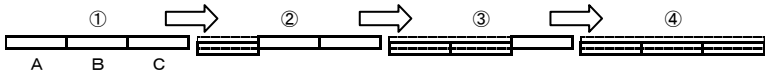


図 2 降下順 ABC

キーワード 逐次掘削工法，応力再配分，個別要素法，降下床実験
連絡先 〒192-0397 東京都八王子市南大沢 1-1 首都大学東京大学院 都市環境科学研究科

表 2 単純せん断解析の物性

	円要素間	円一線要素間	載荷板要素間
仮想縦弾性係数 k_n	3.0,4.0,5.0,10.0(N/mm ²)	6.0,8.0,10.0,20.0(N/mm ²)	5000(N/mm ²)
$s(=k_s/k_n)$	0.25		0.43
要素間摩擦角	12(°)		28(°)
粘着力	0.0(N/mm ²)		5.1
要素間引張強度	0.0(N/mm ²)		5.6(N/mm ²)
径	3.2,6.0(mm)		3.2(mm)
反発係数	0.0		
単位体積重量	2.7×10^{-5} (N/mm ³)		
ステップ毎の時間増分	1.0×10^{-7} (sec)		

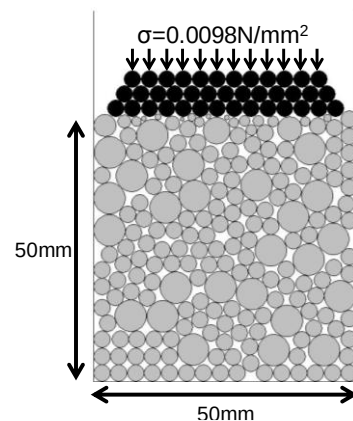


図 3 単純せん断試験モデル

3. DEM による単純せん断試験解析

仮想縦弾性係数 k_n を決定するために、DEM による単純せん断解析を行った。せん断抵抗は既往文献結果であり、図 3 のように上辺を自由とし、他の 3 辺が平行四辺形を形成するように変形できる単純せん断試験モデルである。解析で用いた単純せん断試験モデルは図 3 のように縦 50mm、横 50mm とし、上部境界のみ自由とした。物性は表 2 の通りである。実験においてアルミ棒の直径は 1.6mm と 3.0mm としているが、DEM では解析時間短縮のため 3.2mm と 6.0mm としている。また、載荷板要素を水平に維持するために載荷板要素の角速度 ω を 0.0(°/sec) と設定した。

解析結果と実験結果を比較すると $k_n = 4.0 \text{ N/mm}^2$ における解析結果が実験結果に一番近いので、多段降下床解析における仮想縦弾性係数を 4.0 N/mm^2 とした。

4. DEM による多段降下床解析

多段降下床モデルは解析時間短縮のため図 4 のように降下床は 3 つ、幅は 800mm とした。また、単純せん断試験解析と同様にアルミ棒要素の直径は 3.2mm と 6.0mm としている。物性は表 3 の通りである。降下順は ABC、BAC、ACB の 3 パターンの解析を行ったが、本概要では降下順 ABC の解析結果のみを示す。降下床土圧の推移に関して、図 5 に実験結果と解析結果の比較を示す。比較すると、DEM による多段降下床解析の結果は実験結果、算定結果とほぼ一致した。

5. 結論・課題

本研究より、DEM による単純せん断試験解析、多段降下床解析の実験結果への適用性が確認できた。

今後は地山内に作用する応力についても評価を行い、DEM 解析をベースとする簡便な物理モデルの提案の検討を更に進めていきたい。

表 3 多段降下解析の物性

	円要素間	円一線要素間
仮想縦弾性係数 k_n	4.0(N/mm ²)	8.0(N/mm ²)
$s(=k_s/k_n)$	0.25	
要素間摩擦角	12(°)	
粘着力	0.0(N/mm ²)	
要素間引張強度	0.0(N/mm ²)	
径	3.2,6.0(mm)	
反発係数	0.0	
単位体積重量	2.7×10^{-5} (N/mm ³)	
ステップ毎の時間増分	1.0×10^{-6} (sec)	

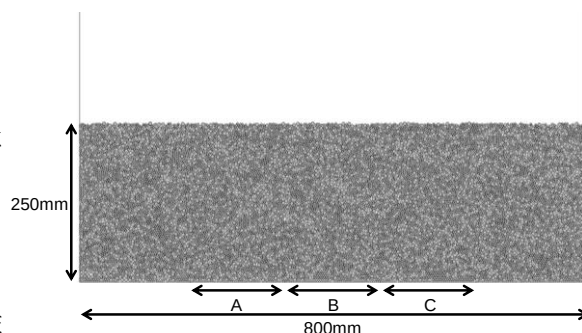


図 4 多段降下床モデル

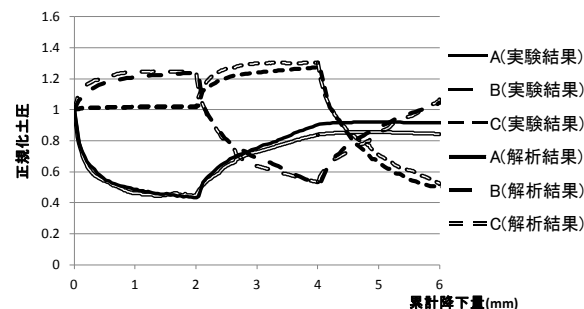


図 5 降下床土圧の推移