

トンネル掘削時の地表面沈下特性に関する 3 次元降下床実験とその解析

(財) 地域地盤環境研究所 フェロー 足立紀尚
京都大学 正会員 木村亮, 岸田潔
京都大学 学生員 ○ 菊本統

1.はじめに 本研究では、トンネル掘削時の応力開放を模擬した 3 次元降下床実験およびそれに対する 3 次元弾塑性有限要素解析を実施することで、トンネル掘削時の地山の力学挙動について検討した。本稿では、地表面沈下について実験および解析結果を示し、トンネル掘削時の地表面沈下特性に考察を加える。

2. 3次元降下床実験の概要 本研究では、図-1,2 に示す実験装置¹⁾を用いて 3 次元降下床実験を実施した。降下床(降下床幅 $D = 150 \text{ mm}$)は土槽底面に設けられており、下部に接続されたジャッキにより下降する。地表面の変位は、土槽上部に設置した地表面変位計測システム(図-1 上部)により計測した。また、降下床および荷重計測パネルの下部に設置した荷重計により各々に作用する荷重を、土槽底面の各部に設置した土圧計(図-2)により降下床およびその周辺部の詳細な土圧分布を計測した。本実験では、土被り $H = 0.5D, 1.0D, 1.5D, 2.0D$ の 4 パターンに対して実験を行ない、降下床下降各時点で諸量を計測しながら降下床、の順に下降量 2 mm まで下降させた。

地盤材料には乾燥した豊浦硅砂を用い、気中落下法により模型地盤を作成した。模型地盤の間隙比は 0.63、相対密度は 88 %である。

3. 3次元弾塑性有限要素解析 地盤材料の構成式には *Kinematic t_{ij} -Sand* モデル²⁾を用いた。本構成式は、(a)中間主応力の影響を妥当に評価できる、(b)繰り返し載荷時や主応力軸方向が回転する場合の砂の応力～ひずみ特性を説明できる、などの特徴を有している。数値解析に用いる材料パラメータは、側圧、軸圧および平均主応力一定条件下での豊浦硅砂の三軸圧縮・伸張試験の結果³⁾をもとに表-1のように決定した。

解析領域は、模型地盤がほぼ対称であると考えて、図-2 に破線で示す領域とした。図-3 に要素分割の一例を示す。領域境界の側面および降下床直上を除く底面では、面に垂直な方向のみ拘束した。

降下床の下降は、降下床直上の節点に鉛直下方への強制変位を与えることで模擬しており、降下床、の順にそれぞれ 2 mm(毎ステップ 0.01 mm、計 400 ステップ)の強制変位を与えた。また、初期応力状態は静止土圧係数 $K_0 = 0.6$ として計算した。

4. 結果と考察 表-2 に地表面沈下に関する実験結果および解析結果を示す。同表の上段は降下床 下降終了時点、下段は降下床 下降終了

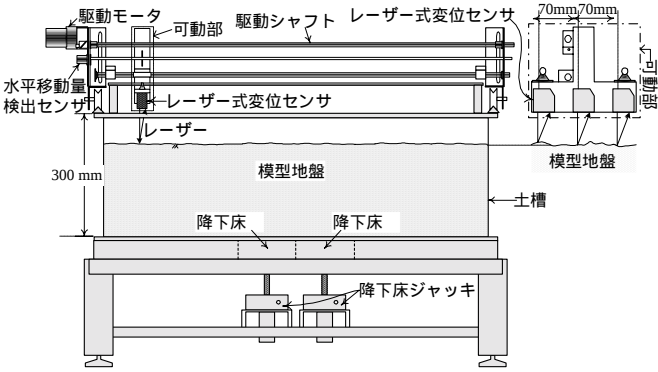


図-1 実験装置(立面図)

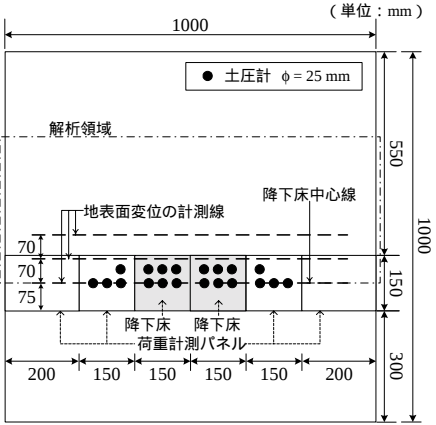


図-2 実験装置(土槽底面図)

表-1 材料パラメータ

C_t	0.84×10^{-2}
C_e	0.60×10^{-2}
m	0.3
$R_f = (\sigma_1 / \sigma_3)_{f(comp.)}$	4.7
$D_f = (d\epsilon_1 / d\epsilon_3)_{f(comp.)}$	-0.6
α	0.85
ξ	0.4
ν_e	0.2

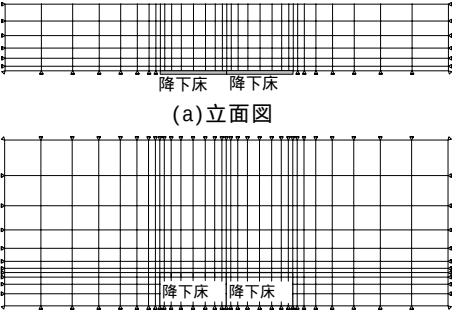


図-3 要素分割の一例 ($H = 1.0D$)

キーワード：降下床実験、地表面沈下、有限要素法、土被り、3次元

連絡先：〒606-8501 京都市左京区吉田本町 京都大学大学院工学研究科 TEL075-753-5106

表-2 実験結果および解析結果

	(a) 沈下形状の一例 ($H/D = 1.0$)	(b) 最大沈下量	(c) 沈下面積
降下床①下降終了時 ($\delta_{t1} = 2.0 \text{ mm}$ & $\delta_{t2} = 0.0 \text{ mm}$)			
降下床②下降終了時 ($\delta_{t1} = 2.0 \text{ mm}$ & $\delta_{t2} = 2.0 \text{ mm}$)			

点の実験・解析結果であり、実験値を実線、解析値を破線で示している。(a)列は降下床中心線(図-2 参照)直上の地表面における沈下形状の一例、(b)列は土被り比と最大沈下量の関係、(c)列は土被り比と沈下面積の関係である。なお、図-4 に示すように、最大沈下量は地表面沈下量の最大値、沈下面積は沈下した部分の面積の合計である。表-2 より以下のことがいえる。

- (1) (a)より、主に降下床の直上付近に地表面沈下が生じる。また、降下床下降後に比べて、降下床 下降後の沈下形状は非常に大きくなる。
- (2) (b),(c)より、降下床 下降終了時点(上段)に着目すると、土被りが小さいほど最大沈下量および沈下面積は大きく、特に土被り $H = 0.5D$ の場合における最大沈下量は顕著である。これより、土被りが大きくなるほど明確にアーチ作用が発揮されるものと考えられる。
- (3) (b),(c)より、降下床 下降時(上段)と比較して、降下床 下降時(下段)には沈下面積が著しく増加する。これは、降下床 下降時には地山が体積膨張することで、地表面沈下が抑制されるのに対して、降下床 下降時には降下床 の下降によって既に地山の密度が低下しており、地山が十分な耐力が発揮できないためと考えられる。
- (4) 実験(実線)と解析(破線)で、上述の(1)～(3)に示した傾向は同様に得られた。特に、降下床 下降時(上段)では解析結果が実験結果を精度良く追従していることがわかる。しかしながら、地表面沈下は土被りによらず解析値のほうが大きくなった。

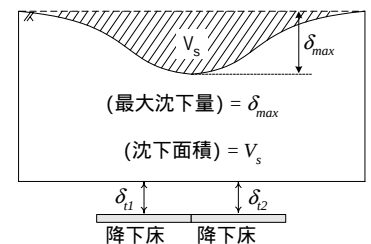


図-4 評価の指標

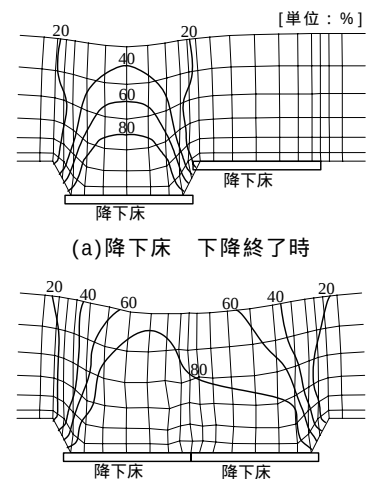
図-5 地盤内部の変形
(土被り $H = 1.0D$)

図-5 に降下床中心線上の地盤縦断面における変形図(解析値)を示す。同図には降下床下降量(2mm)に対する変位の比率を百分率コンターで示した。この図から、降下床 下降時には降下床 の下降によりゆるみの生じた降下床 直上の地山に変位が生じていることがわかる。

5.まとめ 本研究より、土被りが小さいほど生じる地表面沈下は大きく、特に、土被り $H = 0.5D$ の場合に顕著であることを確認した。また、降下床 下降時には、地山が耐力を発揮して地表面沈下を抑制するが、降下床 下降時には、降下床 の下降により生じたゆるみの影響により地表面沈下が顕著になることが分かった。

参考文献 1) 足立紀尚ほか：土木学会論文集，No.694/ -57，pp.277-296，2001。2) Nakai.T, et al.：Proc. NUMOG , Balkema, pp.36-45，1989。3) 中井照夫ほか：地盤工学会論文報告集，Vol.41，No.3，pp.107-124，2001。

謝辞 構成モデルの導入に際して名古屋工業大学 中井照夫 教授、数値解析プログラムの開発に際して岐阜大学 張 鋒 助教授に多大な御助力、御助言を賜りました。ここに記して謝意を表します。