

1. はじめに

近年、都市部における地下空間の有効利用が求められている。そこで、被りの浅い軟弱地盤にトンネルを掘削する際の土圧分布を解明する目的で、上昇床実験の解析を行う。ここで、トンネルの掘削時には、トンネルの周辺部分がトンネル部分に対して相対的に上昇し、トンネルの周辺部には受働土圧が作用しているものと見なしている。なお、上昇床実験、剛塑性有限要素法を用いた数値解析、足立ら [1] による簡易算定式、の 3 つの方法により求めた土圧分布を比較し、検討を行った。

2. 上昇床実験の概要

上昇床実験装置の概要を図-1 に示す。この実験装置に、地山材料として、長さ 5cm、直径 1.6mm と 3.0mm 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 $\gamma=2.1\text{gf/cm}^3$ 、見掛けの内部摩擦角 $\phi=30^\circ$ 、粘着力 $c=0\text{gf/cm}^2$) を被り高 $H=20\text{cm}$ もしくは 40cm まで積み上げた。底面には 40 個のアルミブロックが並んでおり、それぞれのブロックの底面に取りつけた荷重計によりアルミ棒積層体の荷重分布が分かる。中央 8 個のアルミブロックがジャッキに接続された上昇床 (幅 20cm) について、上下に可動である。各被り高において、上昇、降下の実験を行った。

3. 解析方法と解析モデル

剛塑性解析には Drucker-Prager の降伏関数に関連流れ則を適用した。パラメーター α, k は Drucker-Prager の降伏条件と Mohr-Coulomb の破壊条件を同時に満たすものとして、次のように決定した。

$$\alpha = -\frac{\sin \phi}{\sqrt{3(3 + \sin^2 \phi)}} \quad k = \frac{\sqrt{3}c \cos \phi}{\sqrt{3 + \sin^2 \phi}}$$

また、被り高 $H=20\text{cm}$ の場合の数値解析に用いたメッシュを図-2 に示す。なお、実験の幾何学的対称性を考慮して、半断面で数値解析を行った。

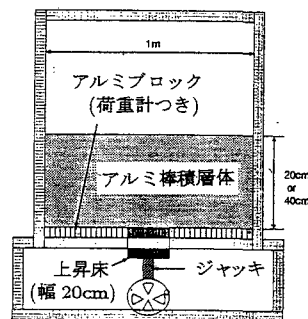
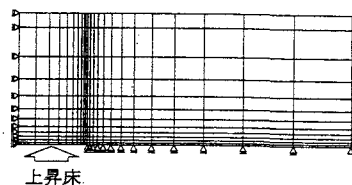


図 1: 上昇床実験装置

図 2: 解析モデル（被り高 $H=20\text{cm}$ ）

4. 上昇床面上土圧の簡易算定式

Terzaghi の鉛直土圧理論を上昇床問題に拡張すると、上昇床からの高さ z の面における平均鉛直応力 σ_z が得られる。[1] これを利用して、上昇床面上の底面土圧分布を導くと、以下の式が導かれる。ただし、 x 軸は上昇床中点から水平方向にとっている。

$$\sigma_z(x, 0) = \gamma H \left[1 + \frac{\alpha}{\beta \left\{ \exp\left(\frac{\alpha}{\alpha - \beta}\right) - 1 \right\}} \exp\left(\frac{\alpha}{\alpha - \beta} \frac{x}{B}\right) \right]$$

$$\alpha = -1 + \exp \beta \quad \beta = \frac{K_0 \tan \phi}{B} H$$

γ : 土の単位体積重量、 B : 上昇床の半幅、 K_0 : 側圧係数、 H : 被り高

5. 解析結果

(1) 塑性崩壊時の応力場

実験と同じ条件 ($c = 0\text{gf/cm}^2$, $\phi = 30^\circ$) における、上昇床実験の塑性崩壊時の応力場を、剛塑性解析によって求めた結果を図-3に示す。灰色のハッチのかかった要素は、歪み速度が非常に小さく、剛体的な挙動を示す部分である。これにより、上昇床の直上部は、上昇床の動きに伴って、剛体的に上昇していることが分かる。また、上昇床周辺部では、上昇床端部から地表面に至るすべり線を形成し、剛体部に付随して歪みながら上昇している。

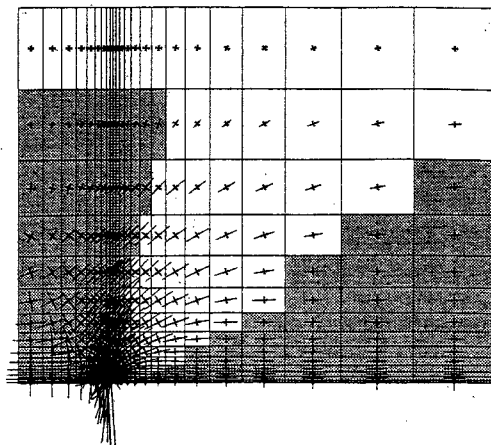


図 3: 砂地盤上昇床における塑性崩壊時の速度場

(2) 底面土圧分布の比較 (上昇床実験)

被り高 $H=40\text{cm}$ の上昇床問題の、実験、剛塑性解析、簡易算定式 ($K_0=0.5, 1.0$)、それぞれによって求めた底面土圧分布の結果を図-4に示す。縦軸には初期土圧で規準化した底面土圧をとっている。これによると、落し戸のごく近傍を除いては、実験、 $K_0=0.5$ の簡易算定式、剛塑性解析の結果は概ね一致している。一方、 $K_0=1.0$ の簡易算定式は過大な土圧分布を示している。また、被り高 $H=20\text{cm}$ の場合にも同様の結果を得たが、被り高 $H=40\text{cm}$ の時の方が、上昇床上での値は大きく、固定床部での影響範囲は広くなるという傾向を示した。剛塑性解析結果において、上昇床端部で過剰な応力集中が発生しているのは、上昇床端のような速度の急激に変化する点は特異点となるためである。

(3) 底面土圧分布の比較 (降下床実験)

被り高 $H=40\text{cm}$ の降下床問題の結果を図-5に示す。ここで簡易算定式については、降下床外の固定床部分が上昇したものとして考え、上昇床半幅 $B=40\text{cm}$ を適用している。また、併せて被り高 $H=20\text{cm}$ の剛塑性解析結果も示す。降下床実験でも、落し戸端のごく近傍を除いては、実験結果と $K_0=0.5$ の簡易算定式、剛塑性解析結果はよい対応を示している。剛塑性解析結果においては、かぶり高の増加によって、落し戸端部近傍の応力集中が軽減されるとともに、固定床部の影響範囲が広がっている。

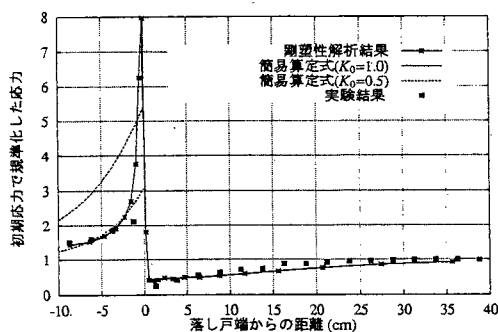


図 4: 底面土圧分布の比較
(上昇床実験、被り高 $H=40\text{cm}$)

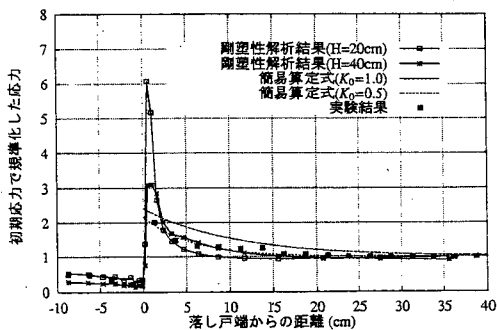


図 5: 底面土圧分布の比較
(降下床実験、被り高 $H=40\text{cm}$)

6. まとめ

本研究において実験を行った条件では、上昇床、降下床実験ともに、実験、剛塑性解析、簡易算定式 ($K_0=0.5$) は良い対応を示し、それぞれの結果に妥当性があることが確認できた。今後は、さらに土かぶりの深い場合など、様々な条件での対応を確認する必要がある。

参考文献 [1] T.Adachi, T.Tamura, M.Kimura and S.Aramaki: The passive earth pressure distribution on the trap door, Numerical Methods in Geomechanics, Vol.5, pp.693-696, 1995.