

京都大学工学研究科 正会員 田村 武
 京都大学大学院 学生会員○辻 鉄也

1.はじめに

近年、都市部の地下空間利用の輻輳化が顕著になっている。そこで本研究では被りの浅いトンネル掘削時のトンネル土圧発生メカニズムを解明するため、軸対称な地盤と円形の降下床を持つ理想化された条件での遠心力場における降下床実験の解析を行う。特にトンネル上部に薄い軟弱粘土層が存在する場合の緩み土圧について、剛塑性有限要素法を用いた解析とTerzaghiの緩み土圧の理論を用いて検証する。

2.円形降下床実験の概要

図-1に軸対称円形降下床実験の概要を示す。この実験装置は内径380mm、高さ300mmのステンレス製の円筒形土槽であり、底面中央部に円形降下床(半径25mm)が設けられている。この装置を遠心载荷装置にセットして40Gの遠心加速場で実験した。なお実験方法についての詳細は参考文献¹⁾を参照されたい。

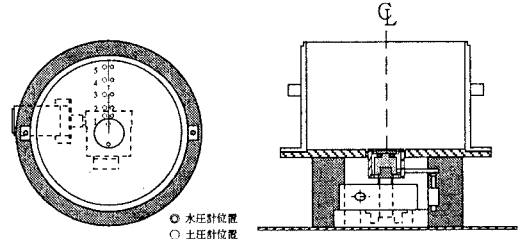


図-1 円形降下床装置の概要

3.解析方法とモデル

解析にはDrucker-Pragerの降伏関数に関連流れ則を用いた。パラメーター α, k は円柱材料の三軸伸張状態を考慮することにより、Mohr-Coulombの破壊規準とDrucker-Pragerの降伏条件が一致するように決定した。

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

ただし ϕ, c はそれぞれ土の内部摩擦角、粘着力である。また図-2に解析に用いた有限要素分割を示す。

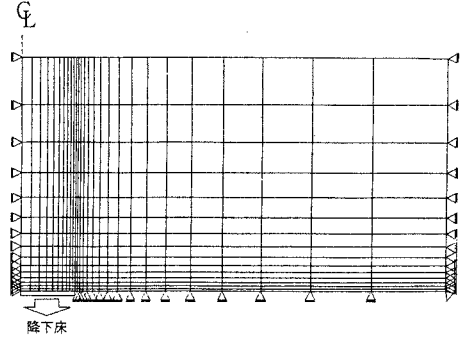


図-2 解析に用いたメッシュ (H=10)

4.軸対称複合地盤におけるTerzaghiの緩み土圧

Terzaghi²⁾の緩み土圧理論を軸対称問題に拡張すれば、円形降下床の平均土圧 $\bar{\sigma}_t$ について以下の式を得ることができる。ただし z は底面から鉛直上向きにとった座標軸である。

$$\bar{\sigma}_t(z) = \frac{\gamma R - 2c}{2K_0 \tan \phi} \left\{ 1 - \exp \left[-\frac{2K_0 \tan \phi}{R} (z - H) \right] \right\} \quad (1)$$

γ :土の単位体積重量、 R :降下床の半径、 c :粘着力
 K_0 :側圧係数、 H :土被り高、 ϕ :内部摩擦角

さらに図-3のように飽和砂-飽和粘土の互層構造をなす地盤については、上層について緩み土圧を求め、その後下層と上層の境界で土圧が連続するように解くことで下層における緩み土圧の式を得た。

$$\bar{\sigma}_t(z) = (\gamma_2 - \frac{2c_2}{R})(H_2 - z) + \frac{\gamma_1 R}{2K_0 \tan \phi_1} \left\{ 1 - \exp \left[-\frac{2K_0 \tan \phi_1}{R} H_1 \right] \right\} \quad (0 \leq z \leq H_2) \quad (2)$$

ここに添え字1,2はそれぞれ上層、下層を表す。

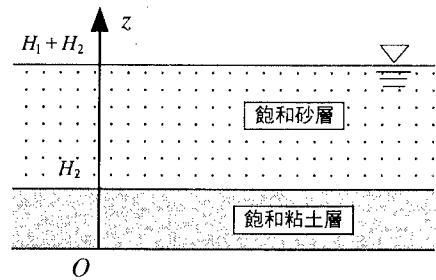


図-3 互層地盤のモデル化

5.解析結果

(1) 乾燥砂地盤の場合 ($c=0, \phi=35^\circ$)

図-4は乾燥砂地盤における土被り比と降下床土圧を示したものである。この解析結果から土被り比 $H/2R$ (R :降下床半径)が1を越えると地盤に完全なアーチが形成され、降下床土圧は増加しないといえる。また解析による降下床土圧は実験値やTerzaghiの土圧式の約半分であった。この理由の1つとして本研究では関連流れ則を用いたため、内部摩擦角を持つ材料に対してダイレタンシーを過大に評価し、砂のせん断抵抗が大きくなっていることが考えられる。

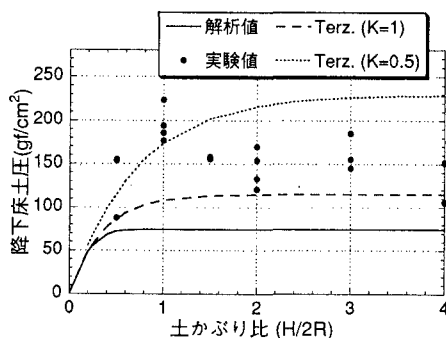


図-4 乾燥砂地盤の土被り比と降下床土圧

(2) 非排水状態の飽和粘土地盤の場合 ($c=75\text{gf/cm}^2, \phi=0^\circ$)

図-5は非排水条件の飽和粘土地盤において土被り高を変化させたときの降下床土圧を示したものである。解析の結果、飽和粘土地盤では乾燥砂地盤と異なり土被り高を大きくすると降下床土圧も同様に増加することが分かった。

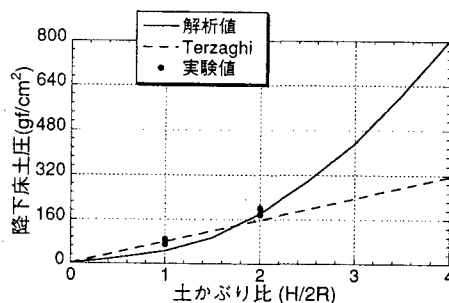


図-5 飽和粘土地盤の土被り比と降下床土圧

(3) 飽和砂-飽和粘土互層地盤の場合

図-6は下層に飽和粘土、上層に飽和粘砂の互層構造をなす地盤について、全体の層厚を一定に保ちながら下層の厚さの割合を変化させたときの降下床土圧である。解析および実験では全体の層厚を10cmとして、粘土層の割合を0から1.0まで変化させ、さらに下層の粘着力について $c=5, 40, 75$ (gf/cm^2)の3通りの解析を行った。その結果、まず下層の飽和粘土層の粘着力が大きい場合($c=40, 75$)、解析値とTerzaghiの値、および実験値($c=75$)はよく一致した。しかし下層の粘着力が小さい場合($c=5$)、飽和粘土層の割合が増加するにつれて解析結果では急激に降下床土圧が上昇し、粘土層の割合が0.2を越えると初期土圧に近い土圧を示した。一方、Terzaghi式ではゆるやかに土圧が増加した。これはTerzaghiの式が上層から順に微分方程式を解くため、下層の粘着力に関係なく下層と上層の境界面での土圧が決定されることに起因すると思われる。実際の地盤では下層に著しく弱い粘土層がある場合、全体としてアーチは形成されずに緩み土圧は発生しないと考えるのが妥当である。

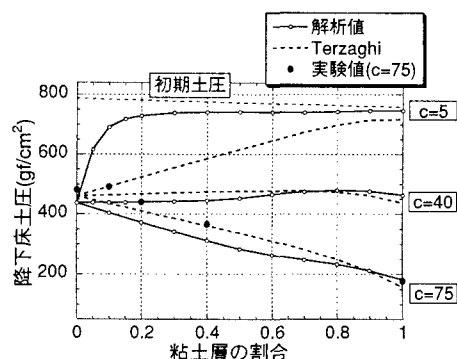


図-6 粘土層の割合と降下床土圧

6.まとめ

今回の解析の結果、トンネル上部に弱い粘土層が存在する場合、上層地盤の強度に関係なく急激に土圧が上昇し、初期土被り圧に近い土圧が発生することがわかった。したがってこのような地盤条件では拡張されたTerzaghiの緩み土圧式は適用できないと考えられる。また今後の応用として実際のトンネル断面を考えることで、様々な地盤条件でのトンネル土圧や土圧分布を解析することができると考える。

参考文献 1) 足立 紀尚, 木村 亮, 小坂 馨太, 神谷 信毅: 砂質および粘性地盤の遠心力場降下床実験, 第32回地盤工学会発表講演集, 1997. (投稿中)

2) Karl Terzaghi: Theoretical Soil Mechanics, John Wiley and Sons, New York, pp.66-75, 1943.