

III-23 砂地盤の非線形性・構造異方性を考慮したトンネル掘削挙動解析

鹿島建設(株) 正会員 永井文男
 鹿島建設(株) 正会員 林 寛
 鹿島建設(株) 正会員 菅原俊幸

1. はじめに

近年、社会的に重要度の高い既設構造物に近接したトンネル施工が増加しているため、その建設に際しては、既設構造物への影響を極力抑えることが要求されている。ところで、現状の予測解析手法では、実用上地盤を剛性が拘束圧に依存しない線形弾性体としてモデル化した有限要素法が多く用いられている。しかしながら、地盤は、剛性が拘束圧に依存し、ひずみレベルに応じた非線形性を呈し、また、構造異方性を持つ材料である。したがって、予測解析の精度を向上させるためには、上述した地盤の特性を考慮した解析モデルを用いる必要がある。筆者らは、ひずみレベルに応じた土の非線形性を精度よく表現できる構成モデル¹⁾²⁾を既に提案し、本モデルを用いたトンネル掘削挙動予測手法を開発して、トンネル模型実験の解析に適用した³⁾。本報では、本構成モデルの概要を述べるとともに、実地盤への適用を試みたのでここに報告する。

2. 提案モデルの概要

砂は、堆積面と主応力 σ_1' の作用方向とのなす角度 δ によって、その強度・変形特性が異なることが各種室内せん断試験により確かめられている。すなわち、せん断強度 τ_f 及び初期せん断剛性 G_0 は、 δ により変化する。本モデルでは、室内せん断試験結果を考慮し、 τ_f 及び G_0 に与える δ の影響がほぼ相似であると仮定した。したがって、

砂のせん断応力 τ ～せん断ひずみ γ 関係を τ_f 及び基準ひずみ $\gamma_r (= \tau_f / G_0)$ でそれぞれ無次元化すれば、 $Y(\tau/\tau_f) \sim X(\gamma/\gamma_r)$ の関係は、図-1に示すように δ によらないユニークな関係に集約される。また、この $Y \sim X$ の関係は、拘束圧に依存せず一本の曲線であると見なせる¹⁾。筆者らは、微小ひずみから大ひずみまでの $Y \sim X$ の関係を表現するため、従来良く用いられている双曲線モデルを一般化して(1)式に示すように定式化した¹⁾。

$$Y = g(X) = e^{-\alpha X} \cdot f(X, n_L) + (1 - e^{-\alpha X}) \cdot f(X, n_U) \quad (1)$$

ただし、

$$f(X, n) = \frac{(2/n \cdot X + 1)^n - 1}{(2/n \cdot X + 1)^n + 1}$$

ここで、 n_L 、 n_U は、砂の $\tau \sim \gamma$ 関係の非線形性を精度良く表現するために付加したもので、粒度分布に依らないパラメータであり、 $n_L = 0.3, n_U = 1.0$ と見なせる²⁾。一方、 α は、粒度分布に依存するパラメータである。 $n_L = 1.0$ 、 $n_U = 1.0$ のとき(1)式は、双曲線モデルに帰着する。一例として、図-2に豊浦標準砂の $\tau \sim \gamma$ 関係を示す。 $\alpha = 0.35$ と設定すれば、本モデルの方が双曲線モデルよりも精度良く $\tau \sim \gamma$ 関係を表現できることがわかる。

ところで、(1)式で示した砂の $\tau \sim \gamma$ 関係は、等方圧密状態からせん断力が作用した場合の定式化である。したがって、異方(K_0)圧密状態にある実地盤に適用するには、初期せん断力 τ_s の影響を考慮する必要がある。異方圧密された供試体の G_0 は、等方圧密されたそれとはほぼ等しい。そこで、図-3に示すように、(1)式の原点

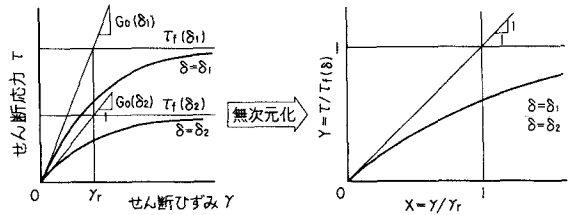
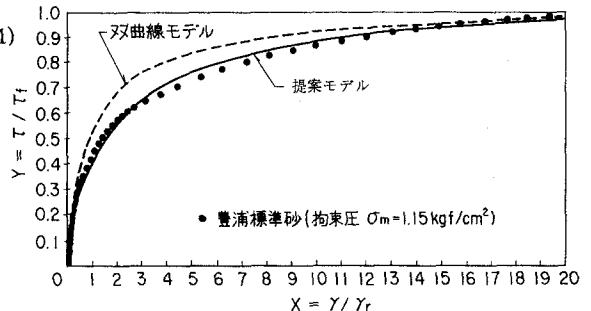
図-1 せん断応力 τ ～せん断ひずみ γ の無次元化

図-2 提案モデルの応力～ひずみ関係

を $(0, Y_0)$; $Y_0 = \tau_s / \tau_f$ に移動し、 $(0, Y_0)$ の点における勾配が1になるように以下に示す変換を行った。

$$Y = Y_0 + (1 - \text{SIGN}(X) \cdot Y_0) \times g\{X / (1 - \text{SIGN}(X) \cdot Y_0)\} \quad (2)$$

ここに

$$X \geq 0 : \text{SIGN}(X) = 1, X < 0 : \text{SIGN}(X) = -1$$

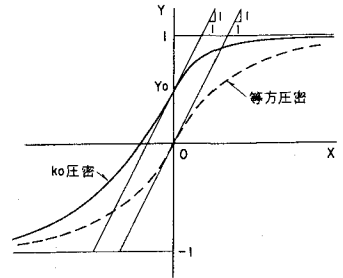


図-3 異方圧密状態への拡張

3. 実地盤への適用

本モデルの実地盤への適用性を検討するために、シールドトンネル掘削挙動の弾性及び非線形解析を実施した。土質柱状図及び解析断面を図-4に示す。シールド外径は4.49mで、テールボイド厚は7cmである。

地盤変状を抑制するため裏込め注入は同時注入を採用した。

解析手順は、地盤の初期応力を求め、掘削解放力を算定し、解放力を分割して設定した外力増分 ΔF ごとにせん断剛性 G を逐次更新する非線形弾性解析である。地盤の物性は、以下の手順で求めた。初期応力算定時に用いる静止土圧係数 K_0 は、Jakyの式($K_0 = 1 - \sin \phi$)により求めた。また、せん断波弾性速度 V_s から、地盤の初期せん断剛性 G_0 を評価した($G_0 = \rho V_s^2$)。さらに、構造異方性の影響は、豊浦標準砂のデータに準じるとした。非線形性を表わすパラメータ α は、粒度分布より $\alpha = 0.2$ とした。また、裏込め注入材の剛性は若材令(20分程度)の変形係数(100tf/m^2)を用いた。なお、弾性解析に用いた変形係数は、 N 値より算定した($E = 7N$)。

図-5に地中鉛直変位計測結果及び解析結果を示す。非線形解析の鉛直変位は、トンネル近傍部分で実測値と良く対応しているのに対し、弾性解析のそれは、実測値との対応が良くない。このことは、トンネル近傍のせん断ひずみの増加に伴うせん断剛性の低下現象を、本非線形解析では、比較的良く再現していると考えられ、本手法の有用性が確認された。

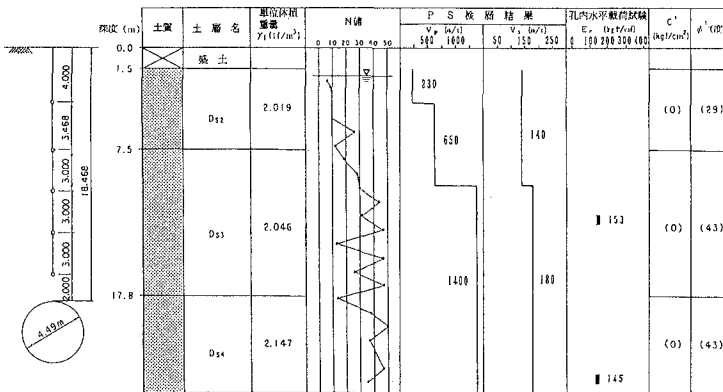


図-4 土質柱状図及び解析断面

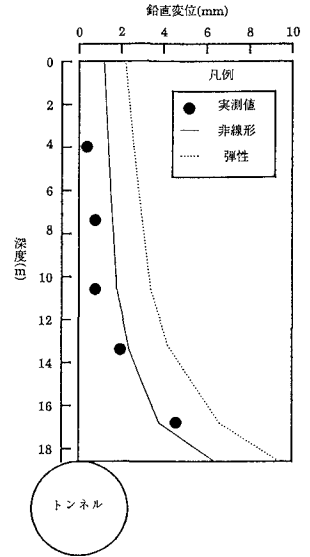


図-5 地中鉛直変位分布

4. おわりに

今回の検討により、本解析手法が十分な精度で実地盤の掘削挙動解析に適用できることがわかった。特に、地盤変状を極力抑制することが可能なシールドトンネル掘削については、地盤の初期剛性及び非線形性を評価できれば、地盤変状を精度良く予測できると考えられる。

参考文献

- 1) 林, 菅原: 土の非線形応力-ひずみモデルに関する研究, 鹿島建設技術研究所年報, No.38, pp155~160, 1990.
- 2) 林, 菅原: 土の非線形応力-ひずみモデルに関する研究(その2), 鹿島建設技術研究所年報, No.39, pp181~189, 1991.
- 3) 永井, 林, 菅原: 砂地盤の非線形性・構造異方性を考慮したトンネル掘削挙動解析手法の開発, トンネル工学研究発表論文・報告集, Vol.1, pp189~194, 1991.