

浸透水圧を考慮した地盤の剛塑性有限要素法解析について

数値解析 掘削土留 ボイリング

早稲田大学 学生会員 ○安藤 悠

早稲田大学 国際会員 赤木 寛一

公益財団法人 鉄道総合技術研究所 正会員 仲山 貴司

東京地下鉄株式会社 国際会員 小西 真治

1. はじめに

近年、集中豪雨による土砂崩れが各地で報告されており、被害を最小限とするための備えが必要となっている。地盤の崩壊には、降雨や地下水流が関係している場合が多く、自然災害のほか、土木工事におけるトンネルの切羽の崩壊や掘削土留め工のボーリング、なども同様のメカニズムで生じているものと考えられる。

著者らは、このような地盤の崩壊を事前予測するためのツールとして、浸透流解析と剛塑性有限要素法（以下、剛塑性解析）をカップリングさせた手法を研究している¹⁾。これは図-1に示すように、浸透流解析から得られた飽和度や浸透水圧を剛塑性解析に入力して地盤の安定性を判定するものである。ここでは、飽和砂質地盤のボーリングを対象として、実務で用いられる設計手法との比較から、本手法の妥当性と有効性を検証した結果を報告する。

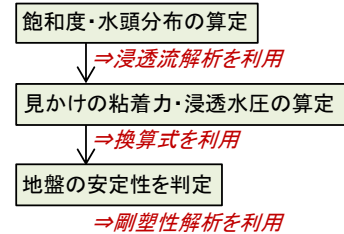


図-1 解析手法の流れ

2. 浸透水圧を考慮した剛塑性解析

図-1に示した本手法の流れのうち、浸透水圧の算定方法と剛塑性有限要素法について示す。

(1) 浸透水圧の算定方法

有限要素法における要素内の任意点の浸透水圧は、浸透流解析から得られた水頭分布と形状関数を用いて式(1)で表される。したがって、式(2)のように要素内で積分して、浸透水圧ベクトルに対応する等価節点外力を求めることができる。

$$p = \gamma_w \begin{Bmatrix} -\frac{\partial h}{\partial x} \\ -\frac{\partial h}{\partial y} \end{Bmatrix} = \gamma_w \begin{Bmatrix} -\sum_{j=1}^n \frac{\partial N_j}{\partial x} h \\ -\sum_{j=1}^n \frac{\partial N_j}{\partial y} h \end{Bmatrix} \dots (1), \quad \begin{cases} f_x = -\int_{\Omega} N^T \frac{\partial p}{\partial x} d\Omega \\ f_y = -\int_{\Omega} N^T \frac{\partial p}{\partial y} d\Omega \end{cases} \dots (2)$$

ここに、 p ：浸透水圧ベクトル、 γ_w ：水の単位体積重量、 h ：水頭、 N ：形状関数、 n ：節点数、 f_x 、 f_y ：等価節点外力成分

(2) 剛塑性有限要素法

剛塑性有限要素法とは、地盤が塑性流動する際の応力の釣合条件、ひずみ速度の適合条件を上界定理等で解き、破壊時の①応力分布、②変位速度分布、③荷重係数 μ を求めるものである。著者らの手法では、降伏基準にはMohr-Coulomb則、塑性流れにはDrucker-Prager則を適用している¹⁾。この解析は、遠心力載荷試験で破壊時の遠心加速度 $\mu \times g$ (g ：重力加速度)を求めるのと同様である。つまり、荷重係数 $\mu=1$ が通常重力場を表しており、1以上で地盤は安定、1未満で地盤は崩壊と判定することができる。

3. 解析概要

矢板周りのボーリング検討を対象とした。現在、実務で用いられる設計方法は、図-2のように地盤の破壊範囲を根入れの半分の幅 ($D/2$) と定め、その領域の土塊重量 (W) と下端に働く水圧 (U) との釣合式を解くものである。

$$F_s = \frac{W}{U} = \frac{1/2 \cdot D^2 \cdot \gamma'}{1/2 \cdot D \cdot \gamma_w \cdot h_a} = \frac{D \cdot \gamma'}{\gamma_w \cdot h_a} \dots (3)$$

ここに、 D ：根入長、 γ' ：土の水中位体積重量、 h_a ：矢板先端の平均間隙水圧

この h_a について、Terzaghiは $0.5 \times H$ としているが、掘削背面側地盤中の浸透流における水頭損失を無視しているなど不合理となることが知られており、補正方法が幾つか提案されている^{2), 3)}。例えば、鉄道構造物等設計標準・同解説

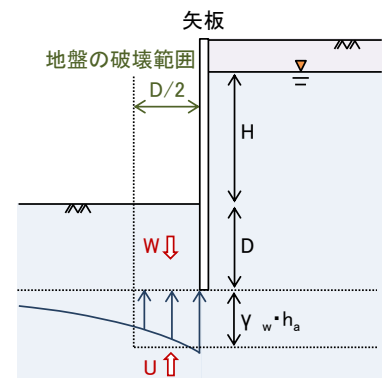


図-2 ボーリングの検討方法の概念図

開削トンネル（以下、鉄道標準²⁾）では、式（4）を提案している。

$$h_a = a \times (B/D)^{-b} \times H \quad \dots (4)$$

$$a = 0.57 - 0.0026H, \quad b = 0.27 - 0.0029H$$

ここに、 B ：掘削幅

4. 解析条件

図-3のように根入長1mの矢板を介して水頭差が存在する地盤を想定した。土の湿潤単位体積重量 γ は 16kN/m^3 、内部摩擦角 ϕ は大崎らの式で N 値を0とした最小値である 15° に固定し、水頭差 Δh と粘着力 c に対してパラメータスタディを実施した。浸透流解析、剛塑性有限要素解析では図-4の解析モデルを使用した。解析領域は $4\text{m} \times 4\text{m}$ とし、矢板壁間は二重節点を設けて表現した。なお、浸透流解析では地表面に水頭境界を設定し、剛塑性解析では側面は水平方向、底面は鉛直方向を固定とした。

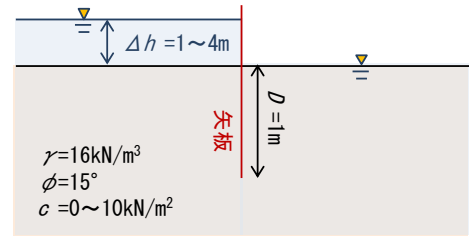


図-3 解析条件

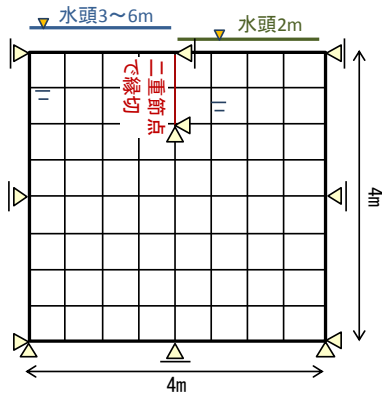


図-4 解析モデル

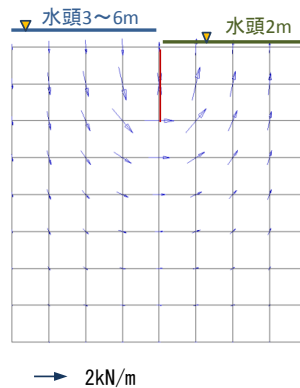


図-5 浸透水圧の等価節点外力
($\Delta h=2.5\text{m}$, $\phi=15^\circ$, $c=5\text{kN/m}^2$)

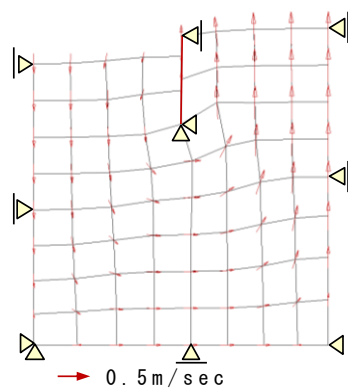


図-6 変位速度
($\Delta h=2.5\text{m}$, $\phi=15^\circ$, $c=5\text{kN/m}^2$)

5. 解析結果

図-5、図-6には、解析結果の一例として、浸透流解析の浸透水圧の等価節点外力ベクトル、剛塑性解析の変位速度ベクトルの分布を示す。浸透水圧、変位速度ともに水頭の低いほうに流動している結果が得られていることがわかる。また、剛塑性解析から、このケースの荷重係数 μ は3.37となり、この場合、ボイリングは生じていないという判定結果が得られた。

このように解析して得られた全ケースの荷重係数を図-7にまとめた。例えば $c=0\text{kN/m}^2$ の場合には水頭差 $\Delta h=1.7\text{m}$ で荷重係数 $\mu=1.0$ となるため、この水頭差 Δh でボイリングが生じると判定することができる。同図には、式(3)、式(4)に示した Terzaghi と鉄道標準の方法で求まる安全率 F_s も示した。これらの方法は荷重バランスのみの釣合い計算であり地盤の粘着力を考慮していないので、剛塑性解析の $c=0\text{kN/m}^2$ のときと鉄道標準の値がほぼ一致していることがわかる。また、粘着力の増加に伴い荷重係数値も増加している。例えば $c=10\text{kN/m}^2$ のときは $H=4\text{m}$ 以下ではボイリングは生じない判定となることがわかる。

6. おわりに

以上より、本手法は鉄道標準と同等の結果が得られること、また、従来の設計方法では考慮できない粘着力の影響を表現できることを示せた。通常、ボイリングの検討で安全率 F_s が1を下回る場合には、地盤改良による対策がとられるが、どの程度の対策をすればよいか評価する手法がない。今後、本手法をこのような場面に役立てていきたいと考えている。

参考文献

- 1) 小西真治, 仲山貴司, 田村武, 豊田浩史, 松長剛, 井浦智実：地下水圧および飽和度による粘着力の変化を考慮した切羽安定評価法, 土木学会論文集 F, Vol.69, pp.1-9, 2013.
- 2) (財) 鉄道総合技術研究所：鉄道構造物等設計標準・同解説 開削トンネル, (財) 研友社, 2001.
- 3) 日本道路協会：道路土工 - 仮設構造物工指針, 1999.

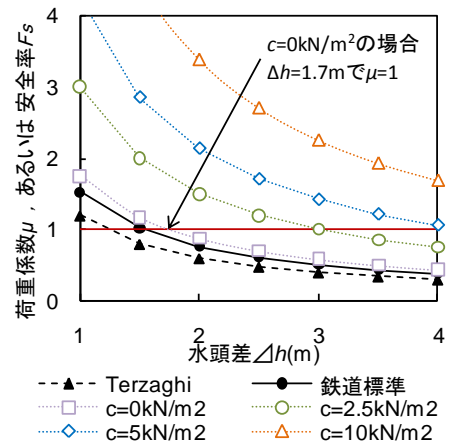


図-7 水頭差と荷重係数, 安全率の関係