

浸透流解析と剛塑性有限要素法を組み合わせた地盤構造物の解析手法について

数値解析 ボイリング 盛土

早稲田大学 学生会員 ○安藤 悠
 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 正会員 小西 真治
 早稲田大学 フェロー会員 赤木 寛一

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。降雨による盛土や斜面の崩壊は、雨水の浸透によるサクションの減少に伴うせん断強度の低下、自重の増加、地下水位の変動等の複合的な要因で引き起こされると考えられている。また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イリング、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。そこで著者らは、剛塑性有限要素法を用いてこれらの影響を考慮した地盤構造物の安定解析を実施し、対策工の評価や深層崩壊にも適用できるような合理的シミュレーション手法を検討している。

このうち本論文では、図-1 に示すように浸透流解析と剛塑性有限要素法解析を組み合わせた手法を考案し、その妥当性を飽和土、不飽和土を対象として、実務で用いられている設計手法や室内実験と比較検討した結果を報告する。

2. 飽和砂質地盤のボイリングを対象とした解析（飽和土）

(1) 解析概要

矢板周りのボイ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) との釣合式をもとに、安全率 F_s を求めている。

$$F_s = \frac{W}{U} = \frac{1/2 \cdot D^2 \cdot \gamma'}{1/2 \cdot D \cdot \gamma_w \cdot h_a} = \frac{D \cdot \gamma'}{\gamma_w \cdot h_a} \quad \dots (1) \quad \text{ここに、} D: \text{根入長、} \gamma': \text{土の水中単位体積重量、} h_a: \text{矢板先端の平均間隙水圧、水頭}$$

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ことが知られており、補正方法が提案されている。例えば、鉄道構造物等設計標準・同解説 開削トンネル（以下、鉄道標準）¹⁾ では、式 (2) を提案している。

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

$$a = 0.57 - 0.0026H, \quad b = 0.27 - 0.0029H \quad \dots (2) \quad \text{ここに、} B: \text{掘削幅}$$

(2) 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。

(3) 解析結果

図-5、図-6 には、解析結果の一例として、浸透流解析で得られた浸透水圧の等価節点外力ベクトル、剛塑性解析で得られた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する結果が得られた。また、剛塑性解析から、荷重係数 μ が 1 を下回るときに崩壊と判断できる。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 ($\Delta h=2.5\text{m}$ $\phi=15^\circ$ $c=5\text{kN/m}^2$) 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 (1)、式 (2) 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

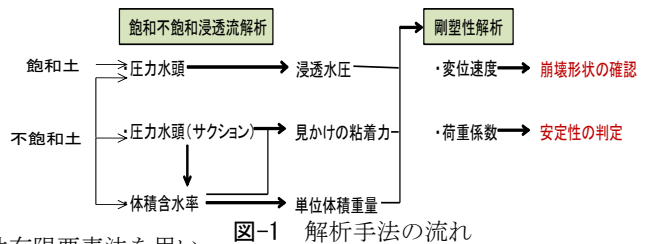


図-1 解析手法の流れ

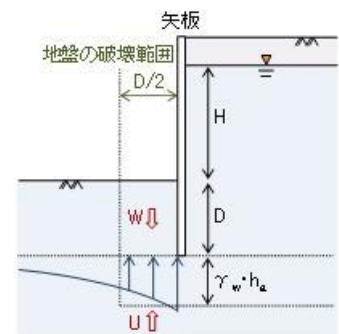


図-2 ボイリングの検討方法の概念図

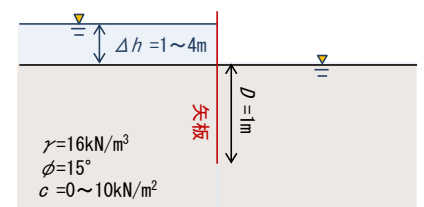


図-3 解析条件

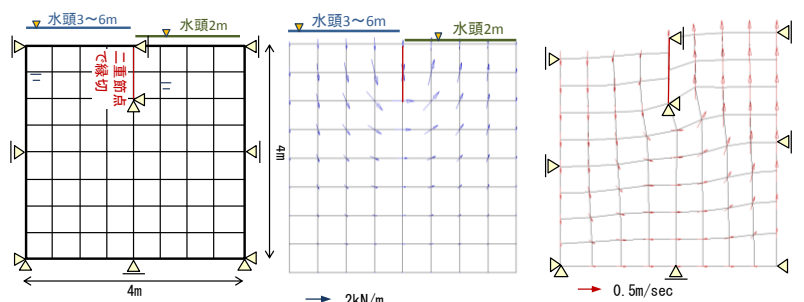


図-4 解析モデル

図-5 浸透水圧分布

図-6 変位速度

キーワード：数値解析, ボイリング 盛土

連絡先：〒169-8555 東京新宿区大久保 3-4-1 早稲田大学理工学術院赤木研究室 Tel.03-5286-3405

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。

3. 盛土斜面を対象とした解析（不飽和土）

(1) 解析概要

既往の盛土斜面の浸透、崩壊実験を対象とした。北村らによる室内土槽試験²⁾は、模型しらす斜面を作製し、浸透・崩壊状況を斜面の上面、背面、底面から注水して観察したものである。図-8-a)に示すように、地盤内部にはテンシオメータ、底面に間隙水圧計が設置され、間隙水圧の経時変化を計測している。このうち本研究では、底面注水した実験結果を解析対象とし、浸透・崩壊実験結果と今回提案する解析手法による結果を比較検討した。

(2) 解析条件

対象となる実験結果の解析モデルは、図-8-b)に示すような盛土斜面であり、4 節点 4 角要素を用いており、要素数は 1792、節点数は 1881 とした。

また、飽和不飽和浸透流解析では底面注水であるので境界条件は、図に示すように法面に浸出面境界、底面右端に定水位境界を設けた。実験条件より、要素内の初期圧力水頭は -800mm で一様とし、定水位境界値を 250mm に設定して浸透水圧の経時変化を計算した。表-1 に用いた地盤条件を示す。また、剛塑性解析でも図-8-b)と同じの解析モデルを用い、境界条件は底面を鉛直水平固定、側面は水平固定とした。

(3) 解析結果

図-9 には浸透水圧分布、図-10 には見かけの粘着力の経時変化を示している。図-11、図-12 には、実験による間隙水圧の測定結果と浸透流解析の結果を示しているが、実験の盛土斜面内の浸透水圧の絶対値および時間的変化状況を再現できたと言える。

図-11 に示した実験における崩壊時期と、図-13 の解析で得られた荷重係数 μ の変化を比較すると、荷重係数 μ が 1 を下回るときに崩壊と判断できるので、荷重係数 μ が極小値 (0.33) となる経過時間 100min は、実験での崩壊発生時期 120min と対応しており、また 200min のときに荷重係数 μ が再び極小値 (0.02) となり、実験結果における 2 回目の大規模崩壊と対応していることが分かる。

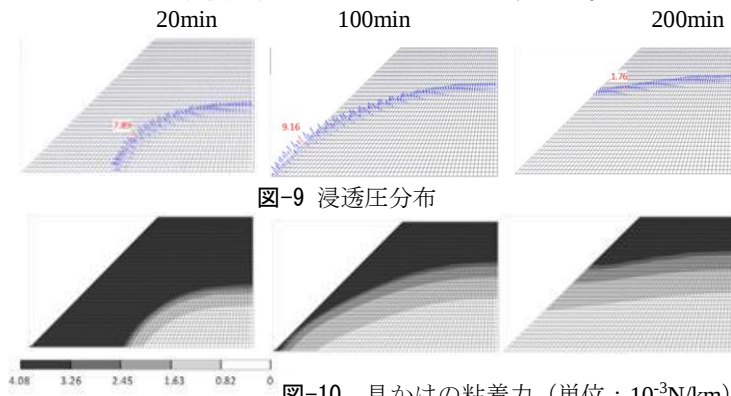


図-9 浸透圧分布

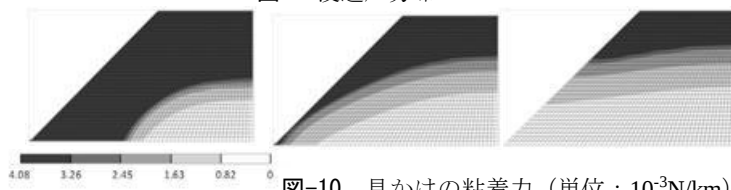


図-10 見かけの粘着力 (単位: 10^3 N/km)

4. おわりに

飽和砂質地盤のボーリングを対象とした解析では、本手法と鉄道標準は同等の結果を示すことが分かった。盛土斜面を対象とした解析では、本手法と別途行われた土槽試験とほぼ対応する結果が得られた。以上のことから、本手法は飽和土、不飽和土両方に対して有効であると考えられ、今後も地盤構造物の安定解析に使用していきたい。また降雨強度による盛土斜面の崩壊形状の違いについても検討していきたい。

謝辞：盛土斜面の浸透、崩壊実験の貴重なデータを鹿児島大学、北村先生、酒匂先生にご提供いただいたことを記し、謝意を表する。

参考文献

- 1) (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.
- 2) 北村良介、酒匂一成、加藤俊二、水島俊基、今西肇：降雨時のしらす斜面の浸透・崩壊に関する室内土槽試験、地盤工学ジャーナル Vol. 2、No. 3、pp. 149-163

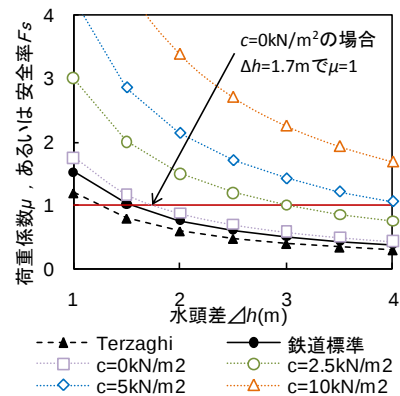


図-7 水頭差と荷重係数、安全率の関係

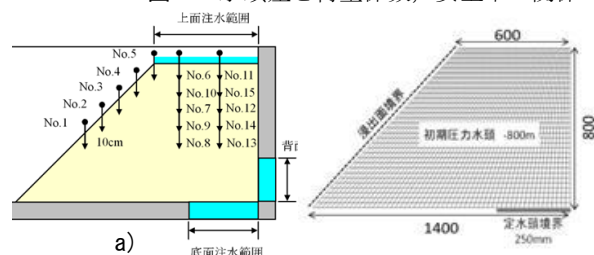


図-8 盛土斜面²⁾

表-1 地盤条件

水の単位体積重量 γ_w (kN/m ³)	9.81	一般値
土粒子の単位体積重量 γ_s (kN/m ³)	24.04	実験値
地盤の乾燥重量 γ_d (kN/m ³)	9.35	
間隙比 e	1.57	
内部摩擦角 ϕ (°)	38.0	
飽和透水係数 k (mm/sec)	5.75×10^{-2} (飽和度 86.7%)	
比貯留係数 S_s (1/mm)	1.00×10^{-5}	推定値
飽和時の粘着力 c (kN/m ²)	0.0	

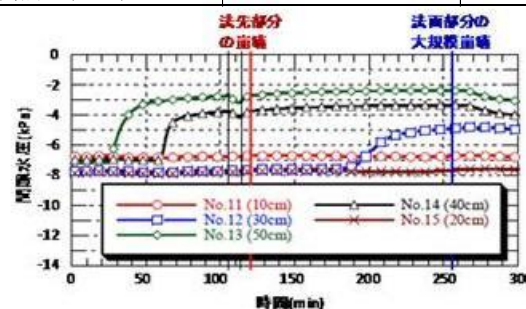


図-11 間隙水圧の測定結果

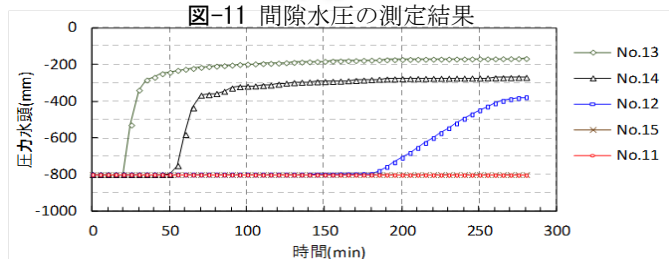


図-12 圧力水頭の解析結果

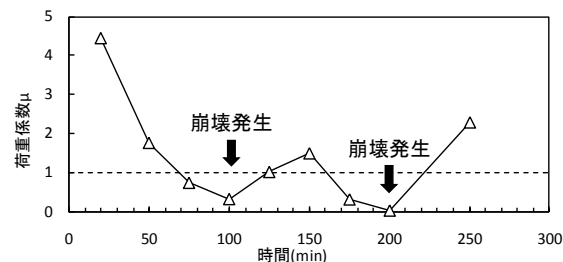


図-13 荷重係数 μ の推移