飽和－不飽和浸透流解析による地下水位の予測と 斜面の安定性評価

Evaluation of groundwater level and slope stability based on
numerical analyses of saturated-unsaturated seepage in soil

若井明彦* 蔡飛**
Akihiko WAKAI Fei Cai
鵜飼恵三***
Keizo UGAI

Abstract

The effects of the horizontal drains on the ground water level are predicted using the three-dimensional finite element analyses of water flow through unsaturated-saturated soils. The slope stability is evaluated by the total factor of safety, using the three-dimensional elasto-plastic finite element analyses based on the shear strength reduction method. In the elasto-plastic analyses, the initial effective stress in the slope is evaluated by the distribution of pore water pressure which has been given by the seepage flow analyses.

As indicated in this paper, in cases where the horizontal drains are constructed in inappropriate areas in the slope, the improvement of the total factor of safety is not satisfactory. It is confirmed that the analytical method presented in this paper is expected to be very effective for the evaluation of the performance of actual horizontal drains in slopes.

キーワード：斜面安定解析，浸透，弾塑性*，地下水，不飽和土，排水ボーリング工*，有限要素法

1. はじめに

降雨や融雪等により浸透した地下水が斜面内の間隙水圧を上昇させ、地すべりを誘発することが知られている。このため排水ボーリング工や集水井などの設置により、地すべり地内の地下水位を低下させる対策工を実施することが多い。3次元的な地下水面形状を把握するために、行われた長期地下水位計測の結果などによると、排水工の周囲では極端な水位低下が見られるものの、排水工から離れた位置では水位があまり低下しないことが指摘されている（丸山ら（1996）、曹ら（1998）、地すべり学会北海道支部（1999）など）。

一般に各種排水工法の評価は、地下水位の低下に関してごく定性的な検討に終始してしまう場合が多い。しかし排水工をより有効な形で設置するためには、排水効果が及ぶ具体的な範囲とそれがもたらす斜面の全体安全率の増加とを適切に評価することが望ましい。亀井ら（1996

b）は土の不飽和浸透特性を考慮した解析によりモデル斜面内の間隙水圧の挙動を調べている。また2次元的に簡略化した解析ではあるが、集水井の排水効果についても評価している（亀井ら（1996 a））。地下水の解析的研究は流出解析の分野などでも最近活発化している（例えば登坂ら（1996））。陸水循環をマクロな視点で捉えた解析的研究は、地域防災の観点からもきわめて重要である。

降雨時の斜面のより合理的な設計を実現するため、鵜飼ら（1998 a）は降雨時の不飽和浸透流解析により得られた斜面内各位置の間隙水圧値をもとに、せん断強度低減法に基づくFEM解析から斜面の全体安全率を求めている。またCaiら（1998）はこのような解析手法を排水ボーリング工の3次元解析に応用し、降雨時の斜面の安定性向上に寄与する排水ボーリング工の効果を定量的に評価している。

以上を受けて、本研究では排水ボーリング工設置による斜面内の常時地下水位の変化について検討するとともに、それがもたらす斜面の安定性向上について、弾塑性FEMにより得られた臨界すべり面の3次元的な形状などを踏まえて考察する。

* 群馬大学工学部講師，博（工）

** 群馬大学工学部助手，工修

*** 群馬大学工学部教授，工博

2. 解析の方法

ここでは定式化の概要を示すにとどめ、詳細は文献(鶴飼ら (1998 a))に譲る。

2.1 飽和-不飽和浸透流解析

飽和-不飽和土中の水の浸透現象に関する支配方程式は次式で表される。

$$\nabla \cdot (K(\theta) \nabla (\Phi + z)) = c(\theta) \frac{\partial \Phi}{\partial t} \quad (1)$$

ここに、 $K(\theta)$ は土の透水系数、 θ は体積含水率、 Φ は圧力水頭、 z は基準位置からの高さ、 t は時間、 $c(\theta)$ は比水分容量である。式(1)を離散化してFEMにより解く。

不飽和土の透水系数と比水分容量は体積含水率、従って圧力水頭の間数である。一般にこれらの間の関係は実験的に決定されるが、本研究では次式 (van Genuchten (1980))を用いた。

$$S_e = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} = (1 + |\alpha \Phi|^n)^{-m} \quad (2)$$

$$c(\theta) = \alpha(n-1)(\theta_s - \theta_r) S_e^{1/m} (1 - S_e^{1/m})^m \quad (3)$$

$$K(\theta) = K_s K_r = K_s S_e^{1/2} \{1 - (1 - S_e^{1/m})^m\}^2 \quad (4)$$

ここで S_e は相対飽和度である。 θ_r と θ_s はそれぞれ残留及び飽和体積含水率である。 K_s と K_r は飽和及び相対透水系数である。 α 、 n 及び m は定数であり、経験的に $m = 1 - 1/n$ ($n > 1$) の関係がある。

2.2 セン断強度低減法による斜面安定解析

飽和-不飽和浸透流解析により地盤内の水压分布が計算されると、同じ有限要素メッシュを用いてせん断強度低減有限要素法により、時々刻々と変化する斜面の全体安全率を計算できる。

土のせん断強度は Bishop (1959) の提案した係数 λ を用いて次式により与えられると仮定した。

$$\tau_f = c' + \{(\sigma - u_a) + \lambda(u_a - u_w)\} \tan \phi' \quad (5)$$

τ_f はせん断強度、 σ は全垂直応力、 u_a は間隙空気圧、 u_w は間隙水圧である。本研究では、 $\lambda = S_e$ と仮定した。

3. 解析対象とした斜面

解析の対象とした斜面は文献 (Cai ら (1998))と同一である。メッシュ分割図を図-1に示す。解析で仮定した初期地下水位は、それぞれ斜面の上流側(天端後方)ではメッシュ下端から14 m、下流側(法尻前方)では5 mとした。また排水ボーリング工は斜面の法尻から斜面内に水平に設置され、断面の垂直方向に一定間隔(2・S)で配置されていると仮定した。排水ボーリング工に沿って水は完全に排水されると仮定し、排水ボーリング工の位置にある節点での間隔水圧はゼロとした。

浸透流解析に用いる土質は、透水系数が比較的小さい粘土質ローム (Glendale clayey loam : GCL と略記 (van

Genuchten (1980))と、比較的大きいローム質砂 Bet Degan loamy sand : BLS と略記 (Russo ら (1980))の2種類とした。表-1にこれらの透水特性を表すパラメータ値を、図-2に水分保持曲線を示す。斜面内の初期相対飽和度は深さ方向に直線的に変化すると仮定した。斜面法尻での初期水分特性を表-2に示す。

一方、斜面安定解析における土質定数には、GCL と BLS のいずれの場合においても表-3の値を用いた。

図-1 有限要素メッシュ分割(排水ボーリング工を有する斜面)

表-1 土の透水特性

	Glendale clayey loam (GCL)	Bet Degan loamy sand (BLS)
α (m ⁻¹)	1.0601	2.7610
n	1.3954	3.0224
θ_r	0.106	0.044
θ_s	0.469	0.375
K_s (10 ⁻⁴ cm/s)	1.516	63.832

図-2 土の水分保持曲線

表-2 斜面法尻の高さでの初期水分特性

	Glendale clayey loam (GCL)	Bet Degan loamy sand (BLS)
θ	0.330	0.232
S_r	0.704	0.618
S_e	0.617	0.617

表-3 斜面の安定解析に用いた土質定数

ヤング率 E	98.1 MPa
ポアソン比 ν	0.3
単位体積重量 γ	17.66 kN/m ³
有効粘着力 c'	7.85 kPa
有効摩擦角 ϕ'	25°

4. 解析結果と考察

4.1 排水ボーリング工の効果

排水ボーリング工設置による斜面内の地下水位の低下について検討する。図-3は排水ボーリング工の無い場合の定常状態を初期値として、排水ボーリング工が設置された場合の斜面内各位置の間隙水圧の経時変化の様子を示したものである。ここで排水ボーリング工の長さ $L=15\text{ m}$ 、施工間隔 $2\cdot S=10\text{ m}$ とした。図中の点A～Dの斜面内の位置は図-1に示した。

図-3から分かるように、透水性の大きく異なるGCLとBLSとで水圧の変化する速さは異なるものの、十分に時間の経過した後（定常状態）においては両者の結果に差異のないことが分かる。以上より定常状態における地下水位分布は土の透水係数の大きさには依存しないことが確認された。

なお以降の議論では定常状態のみを対象とするため、透水性の異なる土質を用いても基本的に同一の解析結果

図-3 経過時間と圧力水頭の関係

図-4 定常状態での斜面内の水圧分布（単位：水頭（m））

が得られる。このため特に断りのない限り GLS や BLS といった土質名称は省略することに注意されたい。

図-4に排水ボーリング工の無い場合、有る場合（図-3の最終状態と同じ条件； $L=15\text{ m}$ 、 $2\cdot S=10\text{ m}$ ）の定常状態の間隙水圧分布を示す。排水ボーリング工の周囲で地下水位が極端に低下しているのが分かる。地下水位が低下した部分では有効応力が増加するため、斜面の全体安全率は増加していることが予想される。図中で水圧ゼロの線は地下水位に相当するが、この線の上の領域は計算上は若干の負圧が発生している。

4.2 排水ボーリング工の長さの影響

図-5、6および図-8は排水ボーリング工の長さ L を変化させた場合の定常状態における結果の相違を示している。図-5は各点の間隙水圧の値、図-6はせん断強度低減法に基づく弾塑性FEMで得られた斜面の全体安全率である。弾塑性解析の際に用いる各要素の初期応力（有効応力）は自重より計算される全応力と、浸透流解析で得られた間隙水圧により求めた。ただし間隙水圧が負の場合は無視してゼロとした。

図-5、6によると、排水ボーリング工が斜面の奥深くに達するにつれ、斜面内の間隙水圧すなわち地下水位も徐々に低下し斜面の全体安全率は増加することが分かる。ただし図-6から分かるように、排水ボーリング工の長さが20 m以上になると、それ以上排水ボーリング工を長くしても斜面の全体安全率の増加はさほど顕著に

図-5 排水ボーリング工の長さ L と圧力水頭の関係 図-6 排水ボーリング工の長さ L と全体安全率の関係

は見られない。これは斜面の臨界すべり面の位置が斜面の法尻からおおむね 20 m 以内に存在することを意味しており、斜面のすべりに寄与しない部分への排水対策工は重要でないことを示唆している。

臨界すべり面の位置を確認するため、全体安全率を求める際に得られた斜面内の八面体せん断ひずみ γ_{oct} の分布を図-7 に示す。これはせん断強度低減有限要素法における発散（崩壊）直前の各要素のひずみ値であり、ひずみの大きい部分で特に塑性化が進行していることを意味する。塑性化が進行した領域が帯状につながり斜面全体の崩壊機構を形成したものが臨界すべり面に相当する。

本ケースでは排水ボーリング工の有無に関わらず、斜面内の塑性化領域は法尻からおおむね 20 m 以内にとどまっていることが確認された。なお剛塑性体を仮定した極限解析法などの解と異なり、このように破壊に至るまでの変形を考慮した弾塑性解析では、塑性化領域が必ずしも不連続なすべり面を伴わないことに注意されたい。

また図-7 で示した各ケースのひずみ分布を比較すると、排水ボーリング工が長くなるにつれて塑性化領域は相対的に浅い位置に移動することがわかる。排水ボーリ

図-7 せん断強度低減法による崩壊直前の八面体せん断ひずみ γ_{oct} の分布（排水ボーリング工の長さ L を変化）

ング工の設置は斜面内の有効拘束圧の増加に寄与するため、排水が良好なケースほど、より拘束圧の大きな地盤深部の強度を増加させる結果となる。これは ϕ 材で臨界すべり面がより浅い位置に表われることと力学的に一致している。

図-8 は GCL および BLS を用いた場合の、排水ボーリング工からの排水量の比較である。図-5, 6 と同様に排水ボーリング工の長さを変化させた一連のケースについてプロットした。排水量 Q を土の飽和透水係数 K_s で除いた値を縦軸にとると、GCL と BLS とで結果に差異のないことが分かる。これは排水ボーリング工からの排水量が土の K_s に比例すると同時に、他の透水パラメータには依存しないことを意味する。

排水量 Q と飽和透水係数 K_s との関係は、排水ボーリング工の間隔を変化させた場合（次節参照）についても同様の傾向が見られるが本論文では省略する。

4.3 排水ボーリング工の間隔の影響

次に排水ボーリング工の間隔を変化させた場合の一連の解析結果について、前節と同様に定常状態に着目して議論する。図-9 は排水ボーリング工の長さ L が 7.5 m と 15 m のそれぞれの場合において、間隔 S が変化した時の斜面の全体安全率の値を示したものである。間隔が広くなるにつれて斜面の全体安全率は徐々に低下するが、排水ボーリング工の長さの影響に比べればその影響はあ

図-8 排水ボーリング工の長さ L と排水ボーリング工からの排水量の関係

図-9 排水ボーリング工の間隔 S と全体安全率の関係

まり顕著ではないことが分かる。これは間隔がある程度広くなくても、排水ボーリング工近傍の有効応力の大きい領域が斜面崩壊に対して卓越した抵抗力を発揮することを示している。

図-10は図-7と同様にせん断強度低減法により全体安全率を算出した際の、崩壊直前の八面体せん断ひずみ分布を示したものである。排水ボーリング工のある断面(断面A)および排水ボーリング工同士の間隔位置の断面(断面B)について、排水ボーリング工の間隔 S の異なる各ケースの結果をそれぞれ示した。なお $S=0$ は排水ボーリング工が奥行き方向に連続的(間隔なし)に続く場合を想定した二次元解析の結果である。

断面Aでは排水ボーリング工の間隔が狭くなるにつれて、ひずみの大きな領域が相対的に浅い位置に移動することがわかる。これは図-7で排水ボーリング工のより長いケースで見られた傾向と類似している。一方、断面Bのひずみ値は断面Aのものより全般的に大きめであるが、分布性状については断面Aのものに近い。すなわち斜面の臨界すべり面は排水ボーリング工の間隔によらず奥行き方向にほぼ同一の形状となることがわかる。

4.4 三本組みの排水ボーリング工の方向角の影響

実際には排水ボーリング工が一本単独で設置されるこ

とは少ない。ここでは図-11のメッシュ図(排水ボーリング工のある断面の平面図)に示すように、方向角で互いに α の違いを有する三本組みの排水ボーリング工(長さは三本とも L)の効果について検討する。なお解析では系の対称性を利用して、排水ボーリング工一本半を含む領域を対象とすることに注意されたい。

$L=7.5\text{ m}$, $S=7.5\text{ m}$ および $L=15\text{ m}$, $S=15\text{ m}$ のそれぞれの場合について、方向角 α を変えた時の各点の間隙水圧の値(定常状態)を図-12に示す。方向角の影響はさほど顕著ではない。排水ボーリング工のより長いケース($L=15\text{ m}$, $S=15\text{ m}$)において、 $\alpha=30^\circ$ 前後で水圧の極小値が見られる。これは α が小さ過ぎると排水ボーリング工一本の場合と同程度の排水効果しか得られないのに対して、逆に α が大き過ぎると斜面のより奥の位置にまで排水ボーリング工が届かないことから、やはり排水効果が低下してしまうことを示している。以上の効果が排水ボーリング工のより長いケースで特に現れたのは、排水距離が長いほど間隙水圧の消散する速度が場所ごとに大きく異なるためと考えられる。

以上、典型的な例題を通じて、斜面内の定常水位と排水ボーリング工との関係、また斜面の全体安全率への影響について述べてきた。このような解析手法により、実

図-10 せん断強度低減法による崩壊直前の八面体せん断ひずみ γ_{oct} の分布(排水ボーリング工の間隔 S を変化)

図-11 有限要素メッシュの平面図
(3本組の排水ボーリング工を有する斜面)

際の排水ボーリング工の長さや設置する位置、方向、間隔などに対して、合理的な指針を与えることが可能である。また地すべり地内の3次元的な地層構成を考慮（各種土質定数を把握）することで、3次元的な地下水位分布と3次元的な力の釣合いに基づいた、より適切な斜面の全体安全率の算定が可能となる。実際の設計業務における応用が期待される。

5. まとめ

本研究により得られた知見をまとめると以下のとおりである。

- (1) 斜面内の定常状態における地下水位分布は土の透水性には依存しないことが確認された。
- (2) 排水ボーリング工の周囲では地下水位が低下して有効拘束圧が増加する。斜面の安定性を高めるには、斜面の臨界すべり面付近の水圧を十分に低減させるような排水ボーリング工が有効である。
- (3) 排水ボーリング工の長さや間隔を変えた一連の解析から、排水ボーリング工の間隔を狭くするより、長さを十分に長くした方が、斜面の安定性向上に有効であることが分かった。
- (4) 排水ボーリング工が長くなるにつれて、また間隔が狭くなるにつれて、斜面の臨界すべり面位置は相対的に浅い位置に移動する。
- (5) 排水ボーリング工からの排水量は土の透水係数に比例すると同時に、他のパラメータには依存しない。
- (6) 斜面の臨界すべり面は排水ボーリング工の間隔によらず奥行き方向にほぼ同一の形状となる。
- (7) 有限要素法による飽和-不飽和浸透流解析と弾塑性解析（せん断強度低減法）を組み合わせることで、3次元的な地下水位分布や土の強度分布に基づいた適切な斜面の全体安全率の算定が可能となる。

参考文献

Bishop, A. W. (1959): The principle of effective stress, Publication 32, Norwegian Geotechnical Institute, Oslo, pp. 1-4.

図-12 排水ボーリング工の方向と圧力水頭の関係

- Cai, F., Ugai, K., Wakai, A. and Li, Q. (1998): Effects of horizontal drains on slope stability under rainfall by three-dimensional finite element analysis, Computers and Geotechnics, Vol. 23, pp. 255-275.
- Cai, F. and Ugai, K. (1999): Effects of horizontal drains on ground water level and slope stability, Int. Symp. on Slope Stability Engineering, IS-SHIKOKU '99, Matsuyama, Japan (to be published).
- Genuchten, M. T. (1980): A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils, Soils Science Society of America Journal, Vol. 44, pp. 892-898.
- 地すべり学会北海道支部技術小委員会 (1999): 北海道における地すべり対策工の最近の動向, 地すべり, Vol. 35, No. 4, pp. 43-50.
- 亀井健史・榎本雅夫 (1996 a): 飽和-不飽和浸透流解析による集水井工の評価, 地すべり, Vol. 33, No. 1, pp. 53-59.
- 亀井健史・榎本雅夫 (1996 b): 降雨および地下水流が斜面内の間隙水圧挙動に及ぼす影響, 地すべり, Vol. 33, No. 2, pp. 10-16.
- 丸山清輝・北島義則 (1996): 地すべり地における集水井の地下水排除効果に関する検討, 地すべり, Vol. 33, No. 3, pp. 13-18.
- Russo, D. and Bresler, E. (1980): Field determination of soil hydraulic properties, Water Resources Research, Vol. 24, pp. 453-459.
- 曹崇銘・太田猛彦・竹内美次・松浦純生・落合博貴 (1998): 集水井集水工法によるすべり面付近の間隙水圧の変動特性-埼玉県児玉郡児玉町平沢地すべり地を例として-, 地すべり, Vol. 35, No. 3, pp. 24-33.
- 登坂博行・小島圭二・三木章生・千野剛司 (1996): 地表面と地下水流とを結合した3次元陸水シミュレーション手法の開発, 地下水学会誌, Vol. 38, No. 4, pp. 253-267.
- 鵜飼恵三・蔡飛・阪上最一・若井明彦 (1998 a): 降雨時の斜面安定性の全体安全率による評価, 地すべり, Vol. 35, No. 1, pp. 19-23.
- 鵜飼恵三・蔡飛・阪上最一・若井明彦 (1998 b): 集水井工の効果に関する定量的評価手法の提案, 地すべり, Vol. 35, No. 3, pp. 1-7.

(原稿受理日 平成11年10月6日)