

大変形解析を用いた斜面の崩壊予測

中川光雄¹・蔣 宇静²

¹正会員 地層科学研究所 大阪事務所 (〒532-0011 大阪市淀川区西中島5丁目7-19)

E-mail:nakagawa@geolab.jp

²正会員 長崎大学 工学部社会開発工学科 (〒852-8521 長崎市文教町1-14)

斜面の安定性を数値解析を用いて評価する場合、従来より円弧すべり計算に代表される極限平衡法が用いられる。ここ最近、変形に着目して実際現象を評価したいとの考えにより有限要素法(FEM)の適用が議論されている。安全率の分布などにより評価するこれらの方法は崩壊挙動を再現することはできないので間接的な評価手法であると言える。本研究は、数値解析により斜面崩壊に対して直接的な評価を下すには正に斜面が崩壊した解析結果を得ることが必要であると考えて、動的に定式化された大変形挙動の取り扱いが可能な数値解析法の適用性を検討した。降伏後の崩壊挙動を表現できる本手法により、明らかな崩壊挙動や、刻々と崩壊していく過程での崩壊範囲の変動を再現することができた。

Key Words : slope stability, collapse, dynamic formulation, large strain, finite difference method

1. はじめに

新潟県中越地震、福岡県西方沖地震をはじめとして地震や降雨により発生した斜面崩壊や地すべりにより多くの被害が発生した。また、東南海・南海地震の発生が懸念され、今日では、市民レベルにおいても斜面災害の甚大性が認識されつつある。さて、斜面崩壊の可能性および発生箇所を予測・評価するための数値解析法として、従来より円弧すべり計算に代表される極限平衡法が用いられている。この方法は、1つの斜面全体に対して唯一の安全率が得られるメリットがある反面、斜面の変形挙動を評価することはできない。これに対して、ここ最近、変形に着目して実際現象を評価したいとの考えに基づき有限要素法(FEM)の適用が議論されている¹⁾。

局所安全率、あるいは、塑性領域の分布に加えて変形が情報として得られるという点では円弧すべり計算よりも有限要素法解析の方が有用であると思われる。ここで地盤工学分野で多用されている静的に定式化された微小変形理論に基づく有限要素法を対象とすると、上述のアウトプットによる崩壊の可能性の評価や不安定箇所の評価は初期応力場に基づくものとなる。そして、これらの手法は本来崩壊する斜面であっても正に斜面が崩壊してしまう解析結果を得ることができないため、間接的な評価方法であると言える。斜面崩壊は進行性破壊であり、これらの手法により評価された不安定箇所と崩壊が進展した大変形領域において得られた不安定箇所が同一であ

るとの保障は何も無い。因って、極限平衡法や有限要素法は、斜面の崩壊予測手段としてはいささか不十分ではないかと考える。従来より変形を考慮しない、あるいは、崩壊の開始点(初期応力場)に基づいた評価がなされてきた背景は、どちらかと言えば適用する数値解析法の限界に要因があると思われる。

徐ら²⁾、および、中井ら³⁾は、中心荷重と偏心荷重を受ける粘土地盤の遠心力載荷支持力実験に対して有限要素法を用いて微小変形解析、大変形解析それぞれの結果と実験結果を比較している。これより、降伏点付近までは微小変形解析と大変形解析の結果に差異はないが、沈下量が大きくなるにしたがい微小変形解析は大変形解析に比べて荷重を過小評価する結果が得られている。さらにそこでは、大変形解析の方は大きな変位まで実測値とよい一致が示されている。また、大変形時の変形を比較すると、大変形解析による変形には不自然さは見られないが微小変形解析はフーチング端付近で不自然な変形を呈する結果が得られている。これらは、微小変形解析の限界が露呈された一例であると言える。

本研究は、斜面の安定性を数値解析を用いて適切に評価するには解析結果として崩壊挙動を得ることが必要であると考えて、動的に定式化された大変形挙動を取り扱える数値解析手法を適用することが有効であると考え、これが可能な P.A.Cundall らが開発した有限差分法プログラム (FLAC3D)⁴⁾を用いてその適用性を検討した。本文では以降これを本手法と呼ぶ。本手法の特徴は、静的問

題を解くことを目的としながらも支配方程式として運動方程式を用いて独自の離散化手法を組み込むことにより、小さな荷重を受けた地盤の弾性状態から、大きな荷重による地盤の破壊状態に至る過程を逐次的に再現することができる点にある。さらに、陰解法に基づく有限要素法を非線形性の強い地盤材料に適用することは必ずしも容易ではないが、陽解法で定式化されている本手法はこれが比較的容易である⁵⁾。しかしながら、連続体力学に基づいた数値解析法における変形の表現には必ずと限界があり、崩壊の最終到達地点までを評価する場合は、本手法による解析結果を流体力学をベースにした解析手法⁶⁾へ引き継ぐことにより実現できると考える。

2. 本手法の定式化と大変形理論の導入

本手法は、応力と浸透の連成を取り扱うことが可能であり、以下にその定式化を示す。さらに、大変形解析を実現するため本手法に導入している大変形理論の定式化を示す。

(1) 本手法の定式化

a) 固体の力学

$$\frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_j} + \rho g_i = \rho \frac{d\dot{u}_i}{dt} \quad (1)$$

$$\dot{e}_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial \dot{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \dot{u}_j}{\partial x_i} \right) \quad (2)$$

ここで、 σ_{ij} は全応力、 ρ は密度、 u は変位、 g_i は物体力、 $\dot{e}_{ij}$ はひずみテンソルを示す。

b) 地下水の流れ

$$v_i = -k_{ij} \frac{\partial h}{\partial x_j} \quad (3)$$

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} = -\frac{\partial q_i}{\partial x_i} + q_v \quad (4)$$

ここで、 v_i は流速、 k_{ij} は透水係数テンソル、 ζ 単位体

積あたりの流体体積の変化、 q_v 流出入量を示す。

c) 固体と地下水の相互作用

$$\frac{\partial P}{\partial t} = M \left(\frac{\partial \zeta}{\partial t} - \alpha \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} \right) \quad (5)$$

$$\frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial t} + \frac{\partial P}{\partial t} \delta_{ij} = \frac{\partial \sigma'_{ij}}{\partial t} \quad (6)$$

ここで、 P は水圧、 ε は体積ひずみ、 σ'_{ij} は有効応力を示す。なお、 $M = K_v / n$ 、 $\alpha = 1$ とする。

(2) 大変形理論の定式化

a) 座標系の取り扱い

本手法は、式(7)に基づいて変形増分の各段階において参照規準を修正するUpdated-Lagrangian法を採用している。また、計算時間きざみ Δt を式(8)により制限しているため、1変形増分あたりを微小変形・微小回転として取り扱うことができる。

$$x_i^{(t+\Delta t)} = x_i^{(t-\Delta t)} + \dot{u}_i^{(t+\Delta t/2)} \Delta t \quad (7)$$

$$\Delta t \leq 2 \sqrt{\frac{m}{k}} \quad (8)$$

ここで、 x_i は座標、 m は最小質量、 k は最大剛性を示す。

b) ひずみ速度の取り扱い

a)で述べた座標更新において、式(2)に示すEulerのひずみ速度を適用することにより、微小変形解析と同様な線形なひずみの適用が可能となる。

c) 応力の取り扱い

a)で述べた座標更新において、1変形増分あたりに対してCauchy応力を適用する。これにより、微小変形解析と同様な応力の適用が可能となる。

d) 応力テンソルの回転補正

客観性の原理の要求により、式(8)に示したJaumanの応力速度を用いて各時間増分ごとに剛体回転による影響を補正する。この式は、各時間増分において微小回転した座標系について参照した応力テンソルを、空間固定した応力テンソルに戻す操作を行う。式(9a)の左辺は、空間固定の全体座標系を参照した応力テンソルであり、右辺第1項は微小回転した座標系についての応力テンソル、右辺第2項の括弧内はJaumanの応力速度であり、応力テンソルにおける上述した両座標系の差を表す。

$$\sigma_{ij} = \sigma_{ij} + (\omega_{ik} \sigma_{kj} - \sigma_{ik} \omega_{kj}) \Delta t \quad (9a)$$

$$\omega_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial \dot{u}_i}{\partial x_j} - \frac{\partial \dot{u}_j}{\partial x_i} \right) \quad (9b)$$

e) 応力-ひずみ関係

1増分あたりの変形を微小とした本手法では、地盤材料の力学特性は、微小ひずみ増分とこれに対応する応力増分を関係付けるものである。因って、微小変形解析で

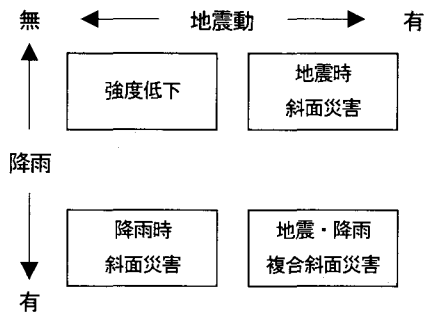


図-1 斜面の地すべり・崩壊の要因

表-1 地山の力学パラメータ

弾性係数 E (MPa)	ポアソン比 ν	密度 ρ (kg/m ³)	粘着力 c (MPa)	内部摩擦角 ϕ (deg)	残留粘着力 cr (MPa)	残留内部摩擦角 ϕ_r (deg)
500.0	0.4	2,200.0	0.1	30.0	0.05	15.0

表-2 解析検討ケース

ケース	内 容
1	風化などによる強度低下
2	降雨による水位上昇
3	地震動
4	先行降雨と地震動の複合

適用した応力-ひずみ関係を適用することが可能である。

3. モデル斜面によるシミュレーション

斜面の地すべり・崩壊の要因としては、一般に、風化などによる強度低下、降雨による水位上昇、地震動などが考えられる。また、先行降雨がある場合に地震動と複合して「すべり面液状化」が発生する事例⁷⁾も見受けられる。これを概念的に示すと図-1のようになる。

(1) シミュレーションの概要

ここでは、高さ10m、法面勾配1:0.6のモデル斜面に対してこれら4つの要因をそれぞれ与えて斜面の変形を観察することにより、崩壊発生の有無、崩壊位置・範囲の変動の有無を考察する。斜面崩壊は要因が静的であれ動的であれ降伏後の一方向への塑性流動であると考えて、地山の力学特性は表-1に示すパラメータに基づくMohr-Coulomb弾塑性体でモデル化した。また、簡略化のため透水は考慮しないが、式(5)により変形と水圧は連成させており、Mohr-Coulomb降伏条件は有効応力に基づいて評価される。ただし、有効応力の変化に対して剛性や強度は不変としているため本手法は厳密な意味での有効応力解析ではない。

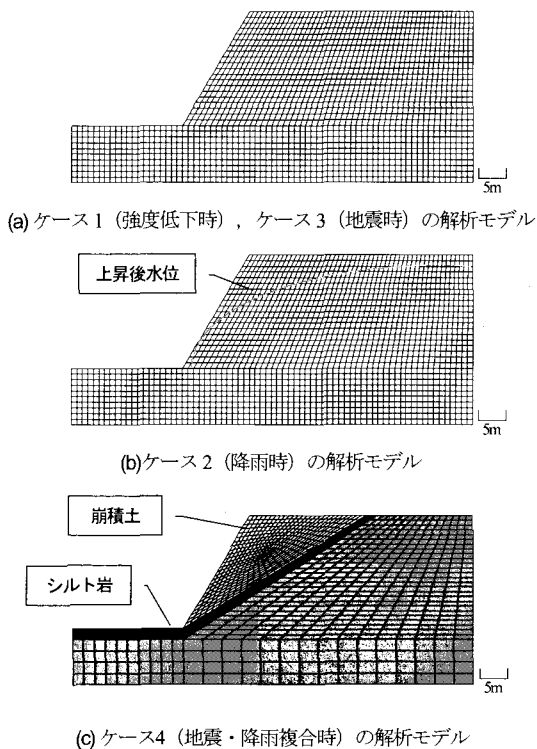


図-2 2次元斜面崩壊シミュレーションの解析モデル

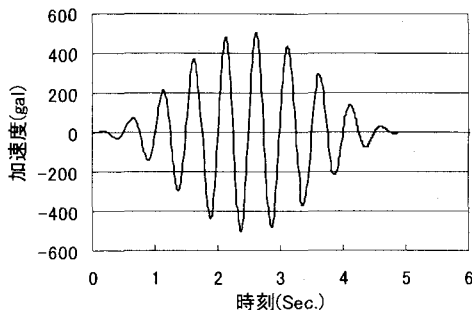


図-3 ケース3の入力地震動

(2) 解析検討ケース

解析ケースは表-2に示し、それぞれの概要は以下のようである。

a) ケース1（強度低下時）

自重による初期応力状態（平衡）の後、 c 、 ϕ をそれぞれ残留強度に低下させた。解析モデルは図-2(a)に示す。本来風化による地山強度の低下には時間依存性があり、斜面全体の強度が一樣に低下するものではないが、ここでは簡単のため、瞬時一様に強度を低下させた。

b) ケース2（降雨時）

自重による初期応力状態（平衡）の後、降雨により地下水位が上昇したと想定して図-2(b)に示す水位を与えた。

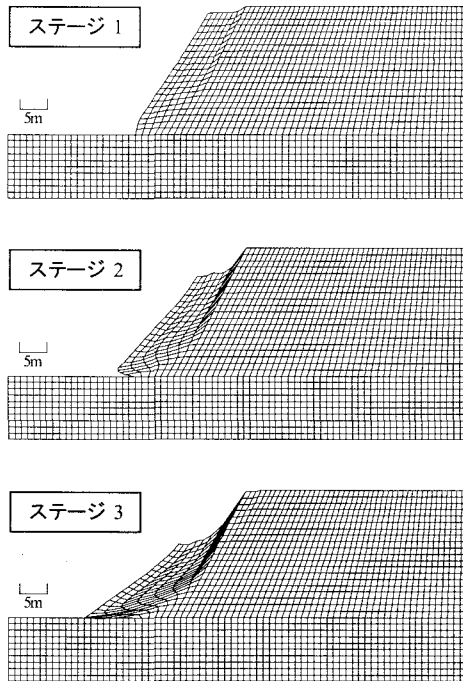


図-4 ケース 1 の解析結果 / 変形スケール=形状スケール

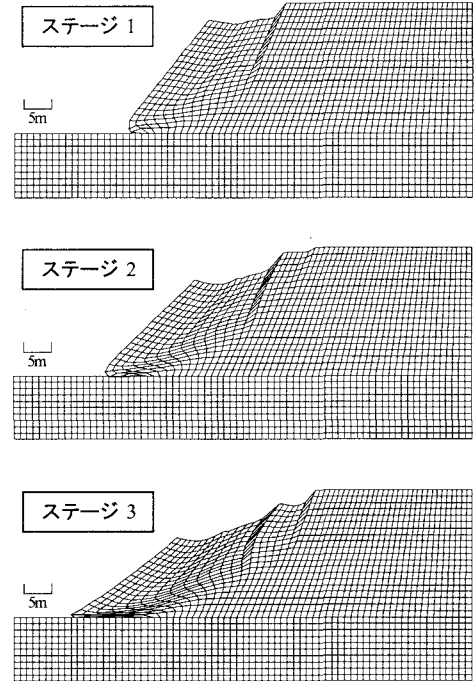


図-5 ケース 2 の解析結果 / 変形スケール=形状スケール

c) ケース 3 (地震時)

自重による初期応力状態（平衡）の後、図-3に示す最大振幅500gal、振動数4.0Hzの地震動をモデル底面に与えた。解析モデルは図-2(a)と同様である。

d) ケース 4 (地震・降雨複合時)

図-2(c)の解析モデルに示すように、透水性の低いシルト岩の上の崩積土で降雨により地下水が浸透し貯留され、そこへ地震動が与えられて間隙水圧が上昇し液状化のような状態となり、シルト岩をすべり台として地震の衝撃により滑動する状況を想定する。地震動による間隙水圧の発生は、式(9)に示す繰り返し載荷による体積変化に基づいて過剰間隙水圧が発生するMartin-Finn-Seedらの方法⁸⁾を適用した。自重による初期応力状態（平衡）の後、最大振幅400gal、振動数4.0Hzの正弦波を地震動として与えた。

$$\Delta \varepsilon_{vd} = C_1(\gamma - C_2 \varepsilon_{vd}) + C_3 \varepsilon_{vd}^2 / (\gamma + C_4 \varepsilon_{vd}) \quad (9)$$

ここで、 $\Delta \varepsilon_{vd}$ は体積ひずみ増分、 ε_{vd} は累積体積ひずみ、

$c_1 \sim c_4$ は水圧増分を支配するパラメータである。

(3) 解析結果と考察

図-4～図-9に得られた解析結果を示す。全てのケースにおいて明らかに崩壊している結果が得られたため、本斜面は与えられた条件に対して崩壊するとの評価を下すことができる。

a) ケース 1 (強度低下時)

図-4にケース1の解析結果を示す。崩壊が進行するに伴い崩壊の範囲に大きな変動は見られないが、法肩が大きく沈下するなど崩落岩塊が変形していく状況が再現されている。

b) ケース 2 (降雨時)

図-5にケース2の解析結果を示す。ステージ2まではステージ1で発生した崩壊の範囲に大きな変化は無いが、ステージ3では崩壊の範囲が法肩背面に拡大している様子が得られた。極限平衡法や有限要素法は、自重による初期応力場に基づいた初期の崩壊位置が得られるが、進行性破壊が再現できる本手法による結果は、崩壊位置が変動する実際現象に対応していると言える。

c) ケース 3 (地震時)

図-6にケース3の解析結果を示す。明瞭なすべり面位置が得られ、崩壊過程でその位置は変動していない。また、図-7より、地震動が停止した5秒以降も法肩の沈下が継続される状況が再現されている。

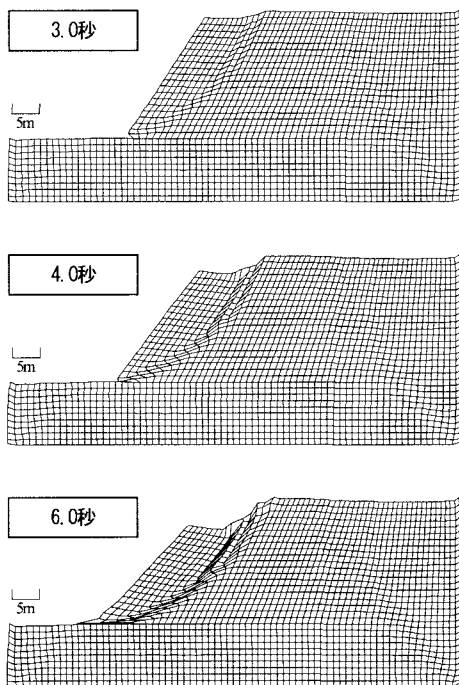


図-6 ケース3の解析結果 / 変形スケール=形状スケール

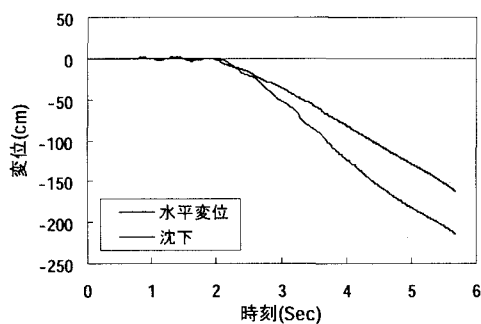


図-7 ケース3の解析結果 (法肩位置の変位)

d) ケース4 (地震・降雨複合時)

図-8に、ケース4の解析結果を示す。崩積土が斜面下に到達した時点で崩積土の法先付近の要素がクラッシュしたため、ここで計算を停止させた。しかしながら、シルト岩をすべり台として崩積土がすべり落ちた状況が再現されている。また、図-9にシルト岩直上付近の崩積土で発生した水圧の変化を示す。地震動の載荷開始から0.2秒付近まで水圧が急速に上昇している様子が分かる。これは、Martin-Finn-Seedらの間隙水圧発生モデルによる効果と思われ、有効応力の急速な低下が崩積土の崩壊を発生させたと考えられる。

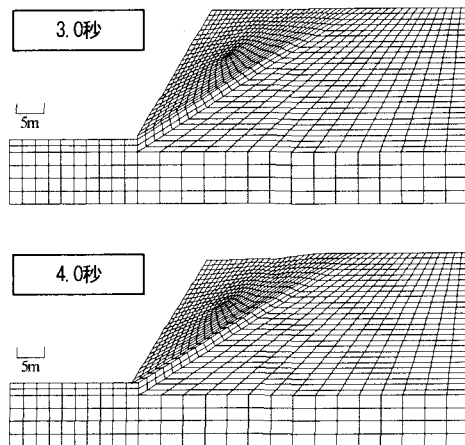


図-8 ケース4の解析結果 / 変形スケール=形状スケール

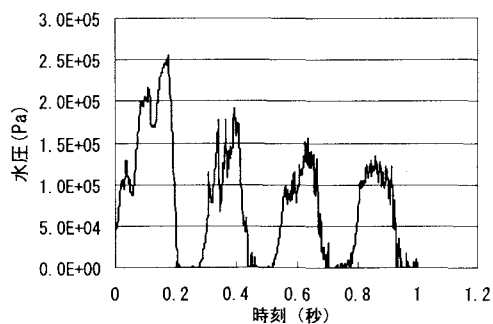


図-9 ケース4の解析結果 (水圧上昇)

4. 実在斜面によるシミュレーション

前章では2次元平面ひずみを仮定した解析モデルを用いて考察を行った。しかし実際の斜面は3次元であり、前章で得られた崩壊の大変形挙動や崩壊の進展に伴う崩壊範囲の変動などが3次元解析でも得られることを確認したい。そこで、巨れき混じり土砂あるいは強風化岩からなる実在斜面を対象として風化による強度低下を条件として与えて3次元解析を試みた。3章でも述べたが、本来地山強度の低下は時間依存性があり、斜面全体の強度が一様に低下するものではないが、ここでは簡単のため、自重による初期応力状態(平衡)の後、強度を瞬時一様に残留強度に低下させた。

図-10の上段に崩壊の進展状況を示す。また、図-10の下段に崩壊した箇所の切断面における崩壊の進展状況を示す。これより、崩壊が進展するに伴い崩壊の位置が切断面方向、切断面と直角方向共に法肩から法先の方へ拡大している状況が再現されている。

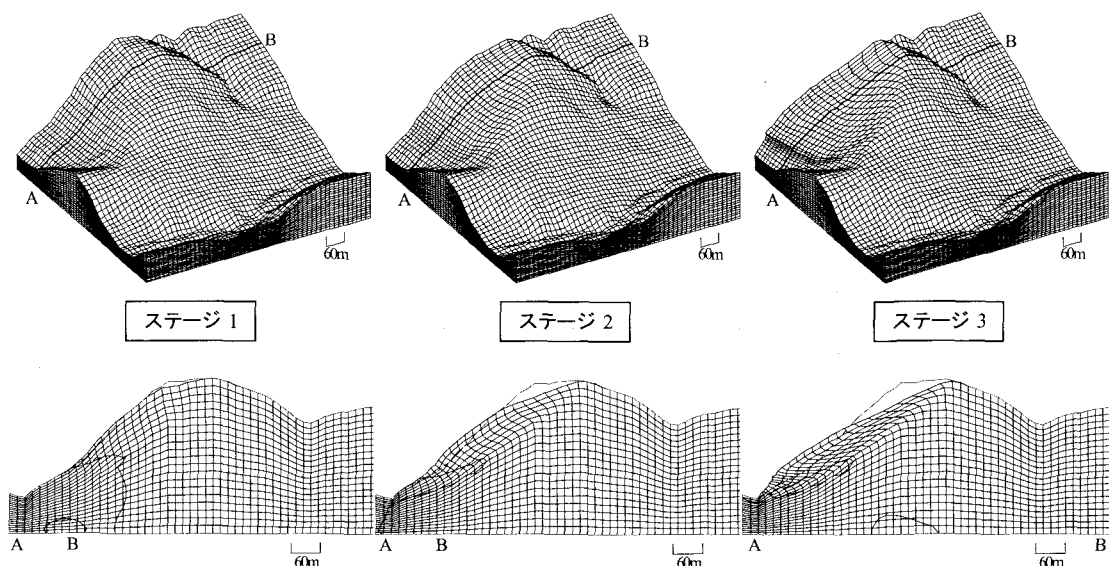


図-10 3次元解析の結果/変形スケール=形状スケール（上段：全体図，下段：崩壊中心での切断面/赤線は初期形状）

5. おわりに

斜面の崩壊予測に対して数値解析を用いて直接的な評価を下すには、正に斜面が崩壊する解析結果が得られる必要があると考える。また、斜面崩壊は移動速度によらず運動学的な現象である。本研究では、斜面の崩壊予測に対して動的に定式化された大変形理論に基づく数値解析法の適用性を検討した。降伏後の崩壊挙動を表現できる本手法により、明らかな崩壊挙動が得られ、刻々と崩壊していく過程における崩壊範囲の変動を再現することができた。今後は室内模型実験を実施して本解析手法の信頼性を検証する必要があると考える。

参考文献

- 1) 楠本ら：座談会/地すべり解析における FEM の今後の展望，地すべり学会誌，第 42 巻，第 2 号，pp.82-86, 2005.
- 2) 徐 連民，中井照夫：粘性土地盤の支持力問題の微小変形解析と有限変形解析，第 31 回地盤工学研究発表会，pp.1555-1556, 1996.
- 3) 中井照夫，徐 連民，国広 明：中心荷重および偏心荷重を受ける粘性土地盤の支持力問題の有限要素解析，土木学会第 51 回年次学術講演会，pp.426-427, 1996.
- 4) Cundall, P.A. and Board M.: A microcomputer program for modeling large-strain plasticity problems, Prepared for the 6th International Congress on Numerical Methods in Geomechanics, pp.2101-2108, 1988.
- 5) 中川光雄，蔣 宇静，江崎哲郎：大変形理論の岩盤挙動および安定性評価への適用，土木学会論文集，No.575/III-40, pp.93-104, 1997.
- 6) 森口周二：CIP 法に基づいた地盤材料の大変形解析，岐阜大学学位論文，2005.
- 7) 佐々恭二：科学技術振興調整費緊急研究・中越地震の成果概要，大規模地震時地すべりに対応・対策，日本地すべり学会関西支部シンポジウム公演論文集，pp.1-18, 2005.
- 8) Martin, G.R., Finn, W.D.L., and Seed, H.B.: Fundamentals of Liquefaction under Cyclic Loading, Journal of Geotechnical Engineering Division, ASCE, Vol.101, No.GT5, pp.423-438, 1975.

PREDICTION OF SLOPE FAILURE BY LARGE STRAIN ANALYSIS

Mitsuo NAKAGAWA and Yujing JIANG

The ultimate equilibrium method represented by circular slip method has been used usually when slope stability is estimated by using numerical analysis. The application of FEM has been discussed recently based on the idea that actual phenomenon should be estimated due to deformation. It should be said that those method, which the estimation is carried out by safety factor, is indirect one because collapse behavior is not presented by those methods. It is necessary to obtain collapse behavior as numerical analysis for direct estimation. In this study, the numerical method that is formulated dynamically and can be treated large strain is investigated for the estimation of slope stability.