

斜面の地震時確率的安定性評価に関する研究

吉田郁政¹・荒川武久²・北爪貴史³・大津仁史⁴

¹正会員 工博 東電設計（株） 地盤・構造部（〒110-0015 東京都台東区東上野3-3-3）
E-mail：dyoshida@tepsco.co.jp

²正会員 工修 東京電力（株） むつ調査所（〒035-0076 青森県むつ市旭町1-15）

³正会員 東電設計（株） 地盤・構造部（〒110-0015 東京都台東区東上野3-3-3）

⁴工修 東京電力（株） 原子力技術・品質安全部（〒100-8560 東京都千代田区千代田1-1-3）

本研究では斜面の地震時安定問題を対象として、危険なすべり線の抽出並びにその確率的安定性評価について検討を行った。危険なすべり線は2次元動的FEM解析結果に基づき遺伝的アルゴリズムを用いて探索した。その際、安全率最小となるすべり線は入力振幅レベルに応じて異なることから限界加速度（すべり安全率が1.0となるときの入力地震動の振幅レベル）が最小となるすべり線を探索した。限界状態は滑動力と抵抗力の釣り合い、あるいはすべり量から定義した。例題モデルについて数値検討を行い、残留強度の粘着力が危険なすべり線に大きな影響を持っていること、限界状態の定義によって選定されるすべり線は異なるもののすべり線の違いが損傷確率に与える影響は比較的小さいこと、などを示した。

Key Words : PSA, critical slip line, limit seismic intensity, slope stability, genetic algorithm

1. はじめに

ISO2394¹⁾やEurocode²⁾のような設計に関する国際規格では、限界状態の直接的照査及び安全裕度の確率論的定量評価を基本とした考え方が取りこまれている。国内の各種指針においても少しずつではあるが確率論的安全性評価の考え方が取りこまれる方向にある。また、原子力発電所等の重要構造物に関する耐震性裕度の定量的評価の重要性が認識されるようになり、確率的安全性評価PSA³⁾が注目されてきている。こうした設計法、評価法においては限界状態を正確に捉えることが重要であり、危険側の仮定はもちろんのこと、過度の安全側の仮定も排除する必要がある。

兵庫県南部地震以降、各種の耐震設計基準の改定が進められ、設計地震動の振幅レベルが増大する方向にあり、これまでの安全側の仮定に基づく照査法、評価法では所定の安全率が保証できない場合が多く生じている。このような背景からも過度の安全性を排し構造物が保有する耐震安全性をより正確に把握することが求められている。

重要構造物の周辺斜面の地震時安定性評価^{4),5)}では、極限釣り合い法ですべり線を決め、動的有限要素法で求めた応力分布からすべり線の安全率を評価する場合がある。しかし、動的解析結果に対して安全率最小となるすべり線は極限釣り合い法による安全率最小のすべり線と同じになる保証はない。こうした問題を踏まえ3次元動的解析結果から安全率最小となる危険なすべり線(面)を

直接探索する研究も報告されている⁶⁾。しかし、この場合にも地震動の振幅レベルに応じて安全率最小となるすべり線は異なることから安全率最小のすべり線が最も危険とは限らないため、危険側の仮定を行っている可能性がある。

一方、限界状態は滑動力と抵抗力の釣り合いから定義されることが多く、これは安全側の仮定となっている可能性がある。すなわち、地震中に瞬間的に力の釣り合いが保たれなくなったとしても、斜面が崩壊する、あるいは周辺構造物に不都合な影響を及ぼすとは限らないためである。そのため、斜面安定の終局限界状態をより適切に評価するには変形量に注目した評価が好ましい。

このような背景のもと、本研究では2次元動的FEM解析結果に基づき、限界加速度最小となるすべり線の探索を行う方法を提案する。前述のように、入力振幅レベルに応じて安全率最小となるすべり線は異なるため、本研究では安全率ではなく限界加速度に注目する。限界加速度はすべり安全率が1.0となるときの入力地震動の振幅レベルを表しており、より合理的に危険なすべり線を探索できる。なお、本論中における「危険なすべり線」とは「安全率最小あるいは限界加速度最小となるすべり線」を意味する。すべり線探索の方法としては遺伝的アルゴリズム^{7),8)}を用いる。

限界状態は力の釣り合いとすべり量の両方について検討する。変形量を評価する方法として、文献9)ではDEM、動的弾塑性FEM、Newmark法、累積変形解析による方法、

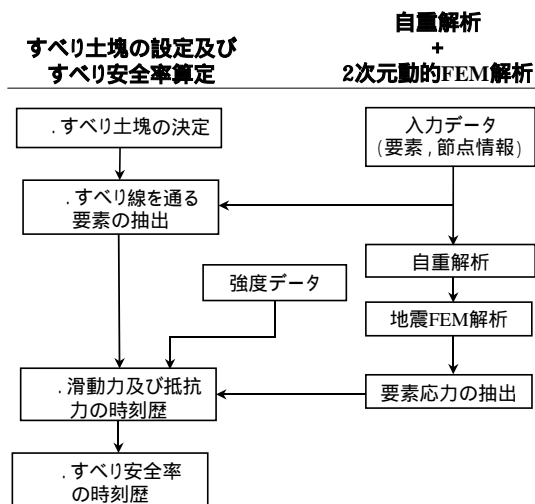


図-1 力の安全率算定フロー

その解析例について詳細に報告している．DEMや動的弾塑性FEM解析に基づく方法は詳細な解析方法として有望であるが，計算に要する労力も大きく確率的安定性評価を行うことを考えると困難である．累積変形解析はすべり面を伴う破壊現象を再現するには限界がある．そこで本研究では簡易なすべり量評価方法として広く使われているNewmark法を用いる．

2. 動的有限要素法を用いたすべり線の探索

(1) 力の釣り合いによる安全率の定義

本研究では力の釣り合いによる安全率を式(1)に示す抵抗力と滑動力の比によって定義する^{4),5)}．滑動力と抵抗力の時刻歴は2次元動的FEM解析(等価線形化法)によって算出した地震時増分応力とポアソン比 $\nu=0.49$ の静的FEM解析による自重解析結果(初期応力)とを重ね合わせて求める．安全率は抵抗力と滑動力の比の全時刻中の最小値とする．これを以下，力の安全率と呼ぶことにする．なお，3(3)で後述する限界加速度算出の際は，入力地震波の波形は変えず振幅レベルのみを変化させ， $F_{sf}=1.0$ となる最大振幅レベルを繰り返し計算によって求める．

$$F_{sf} = \min_t \left| \frac{R_d(t, A_{max}) + R_s}{S_d(t, A_{max}) + S_s} \right| \quad (1)$$

ここに， A_{max} ：地震波の最大振幅レベル(gal)

R_s ：初期応力状態における抵抗力

S_s ：初期応力状態における滑動力

$R_d(t, A_{max})$ ：最大振幅レベル A_{max} の地震波を入力とした際の時刻 t における抵抗力

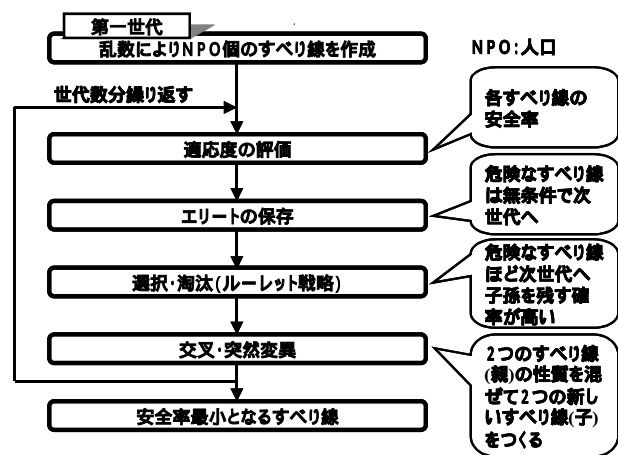


図-2 GAのフロー

$S_d(t, A_{max})$ ：最大振幅レベル A_{max} の地震波を入力とした際の時刻 t における滑動力

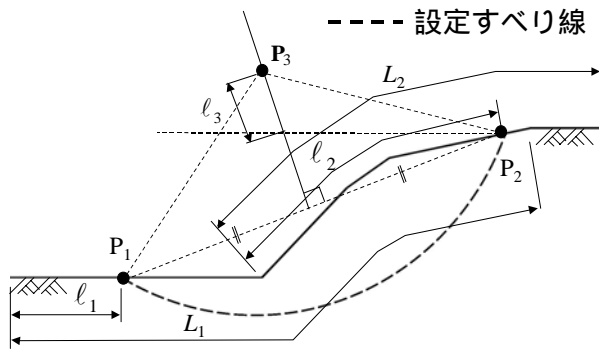
抵抗力や滑動力はすべり線が通る各要素の発生応力および強度特性から算定する．図-1に算定のためのフローを示す．

(2) 遺伝的アルゴリズムを用いたすべり線探索

すべり線探索問題を最適化問題としてとらえ，すべり安全率など危険の程度を定量的に示した指標を目的関数，すべり線を規定するパラメタを説明変数とする．目的関数を最小にする説明変数を探索することで危険なすべり線を定める．後述のように本問題は多峰性の問題となり大域解探索手法が必要となる．近年，遺伝的アルゴリズム^{7),8)} (Genetic Algorithm, 以下GAと記す)は工学の多くの分野で注目されており，様々な適用例が報告されている．本研究では実数交叉型¹⁰⁾のGAを用いて危険なすべり線の探索を行う⁶⁾．そのフローを図-2に示す．

危険の程度をどのように定量化するかによって選ばれるすべり線は異なる．通常，式(1)の安全率に基づく検討が行われるが，すべり量に基づく安全率や限界加速度によっても危険の程度を定量化することができる．こうした限界状態の定義によるすべり線の違いについては例題を通して議論する．

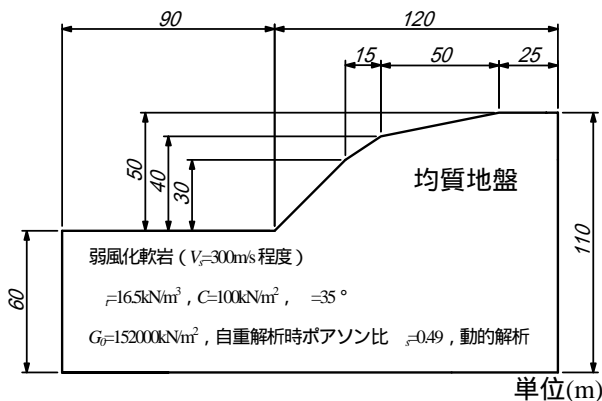
すべり線形状としては円弧すべりを対象として検討を進める．円弧すべり線は2次元問題では3個のパラメタで定義できる．最も単純には円弧の中心座標と半径の3つとすることが考えられる．図-2に示すように，GAにおける円弧すべり線は乱数により発生させるが，円弧を中心座標と半径で表す場合，半径が極端に小さな円弧で地表に達しないすべり線や，中心座標がモデル領域の端部に位置して円弧を呈さないすべり線などが生じる．ここでは図-3に示すように， P_1, P_2 及びこの両点間の垂直2等分線上の点 P_3 の3点で円弧すべり線を規定する． $P_1,$



$$\text{未知量ベクトル } \mathbf{x} = \begin{Bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} l_1/L_1 \\ l_2/L_2 \\ l_3/(1+l_3) \end{Bmatrix}$$

$$l_1 = L_1 x_1, \quad l_2 = L_2 x_2, \quad l_3 = \frac{x_3}{1-x_3}$$

図-3 設定した最適化のためのパラメタ



<境界条件> 側方：エネルギー伝達境界，下端：粘性境界

図-4 例題とした斜面モデル

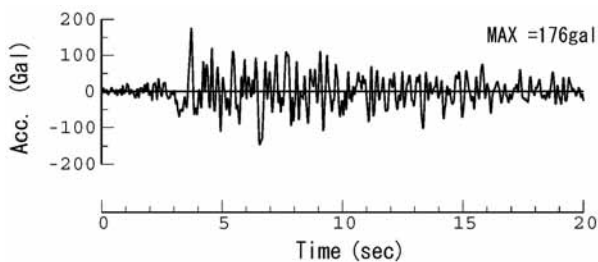
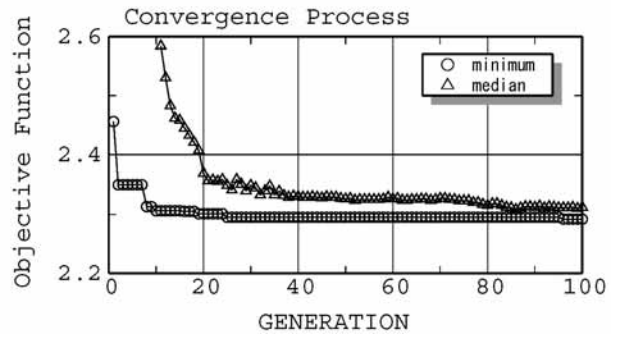
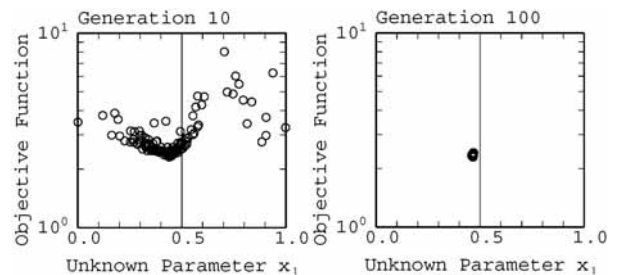
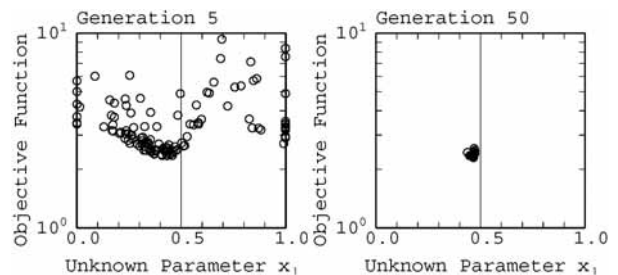
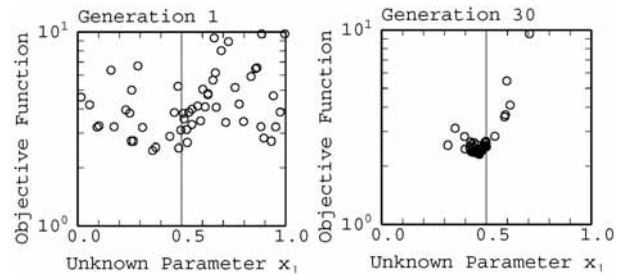


図-5 入力地震動(Taft波, S69E成分)

P_2 はそれぞれ L_1, L_2 の範囲内で必ず地表面上に位置する。こうした設定によりパラメタ空間の広い領域ですべり線が定義できるようになる。さらに、スケールリングすることにより3個のパラメタ (x_1, x_2, x_3) の定義域が全て0から1.0になる。このような工夫によりGAによる危険なすべり線探索の効率を向上させることが期待できる。



(1) GAによる目的関数(力の安全率)の収束過程



(2) GAによるパラメタ x_1 の収束過程

図-6 GAによる力の安全率最小となるすべり線探索の収束過程

3. 力の釣り合いに基づく危険なすべり線

(1) 例題とした斜面モデル

斜面のすべり崩壊の事例が多く報告されている第三紀泥岩層(堆積軟岩)を想定して、S波速度 $V_s=300\text{m/sec}$ 程度の弱風化軟岩層相当の斜面を例題モデルとした。図-4に斜面の形状、大きさ、主な物性値を示す。

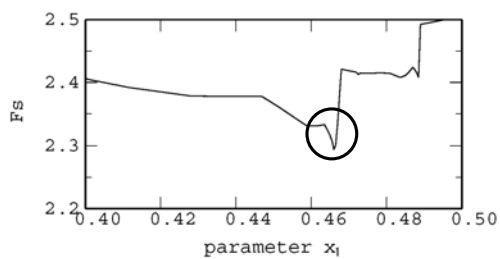
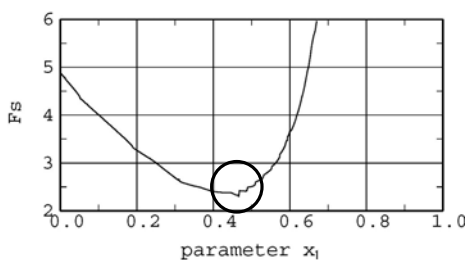
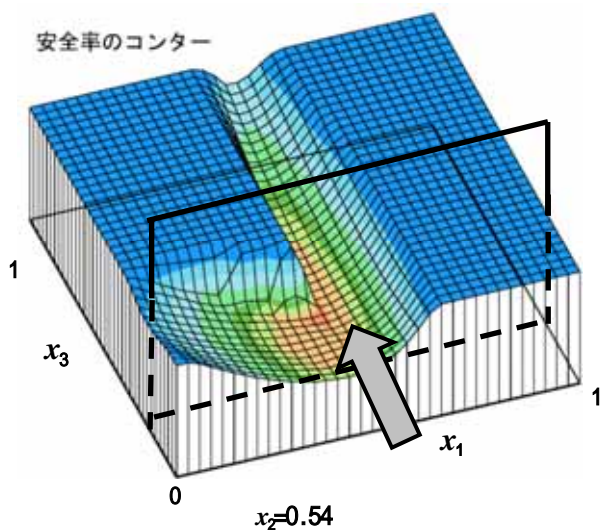
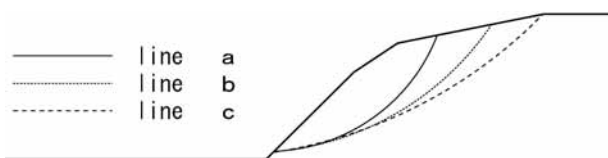


図-7 算定された解周辺の目的関数の様子

これについてFEMモデルを作成し、自重解析並びに周波数領域における動的解析を行った。動的解析モデルの下端は粘性境界条件、側方についてはエネルギー伝達境界条件とした。入力地震動はTaft波（1952年Kern County地震，S69E成分）を用いた。その加速度時刻歴を図-5に示す。

(2) 振幅レベルと探索されたすべり線

まず、常時の場合について力の安全率最小となるすべ



line	振幅レベル(gal)	安全率
a	0(常時)	2.30
b	400	1.67
c	1100	1.00

図-8 各振幅レベルにおける力の安全率最小すべり線

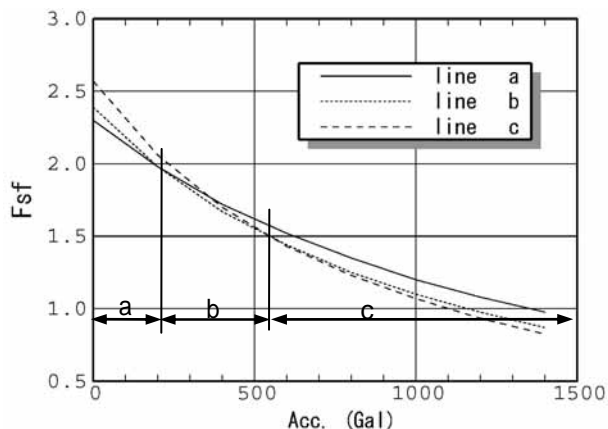


図-9 振幅レベルと力の安全率最小すべり線の関係

り線を探した。動的増分応力は発生しないので式(1)の安全率は、 $F_s = R_s / S_s$ と簡略化される。GAによる探索の収束過程を図-6に示す。人口数は150、世代数は100とした。図-6(1)では各世代中の目的関数（力の安全率）の最小値および中央値と世代の関係を示した。30世代程度でほぼ安定している。図-6(2)ではすべり線の出口位置を表すパラメタ x_1 と目的関数の関係を示した。世代の進行とともに1点に集中している様子がわかる。求められた解（安全率最小となるすべり線）の周辺の目的関数すなわち安全率の様子を図-7に示す。図-7上図では x_2 を最適値に固定して $x_1 - x_3$ 空間における目的関数の分布を示した。安全率5.0以上は5.0として図化した。図-7下図ではさらに x_3 も固定して x_1 と安全率の関係を拡大して詳細に示した。このように局所解が多数存在する多峰性の目的関数分布となっており、GAなどの大域解探索手法が必要であることがわかる。

次に、入力地震動の振幅レベルとすべり線位置の関係を調べる目的で、入力地震動(Taft波)の最大加速度振幅を400gal、1100galとした場合について安全率が最小となるすべり線を探した。求められたすべり線を、上述の常時の最小安全率すべり線とともに図-8に示す。得られた安全率も図中にあわせて示した。入力地震動(Taft波)の振幅レベルに応じてすべり土塊が大きくなっていることがわかる。

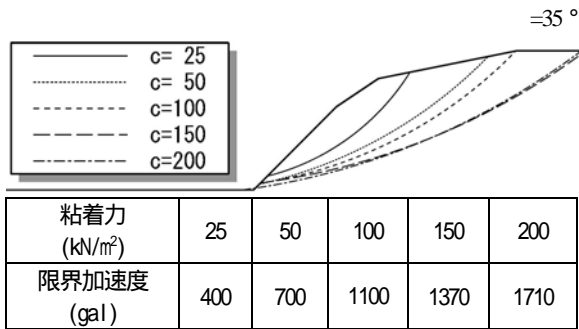


図-10 粘着力の違いによる限界加速度
最小すべり線

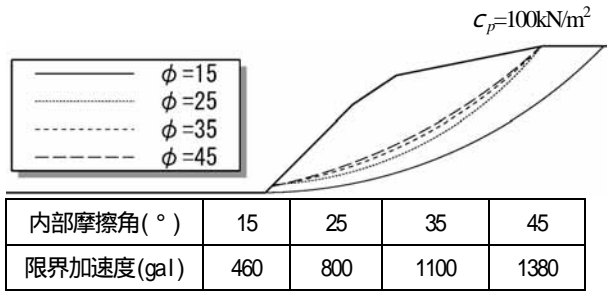


図-11 内部摩擦角の違いによる限界加速度
最小のすべり線

常時，最大加速度400，1100galに対して求められた3種類のすべり線a，b，cについて入力地震動(Taft波)の振幅レベルを変えて安全率の算定を行った．その結果を図-9に示す．すべり線aよりbの方が危険になるのがおよそ200gal，bよりもcの方が危険になるのがおよそ550galである．常時では3つの中で一番危険だったすべり線aが大きな振幅レベルでは一番安全となっている．このように入力地震動の振幅レベルに応じて力の安全率最小となるすべり線が変化していることがわかる．

(3) 限界加速度に注目したすべり線

前述のように，振幅レベルに応じて危険なすべり線が変化するため，安全率が1.0となる入力地震動の最大加速度を限界加速度と定義し，限界加速度が最小となるすべり線を探索する．各すべり線の限界加速度は，式(1)を用いて安全率1.0となるときに最大加速度を逆算すればよいが，陽な形では求まらないため繰り返し計算によって算定する．限界加速度の算定方法については文献(11)を参照されたい．図-8に示した問題では限界加速度最小となるすべり線はcであり，その限界加速度は1100galである．

強度特性のうち粘着力に関して5種類のケースを設定し，それぞれ限界加速度が最小となるすべり線をGAにより探索した．その結果を図-10に示す．粘着力の大きさに応じて，限界加速度最小となるすべり土塊も大きくなり，その限界加速度も大きくなっている．こうした傾向の原因としては，すべり線の長さやすべり土塊重量と抵

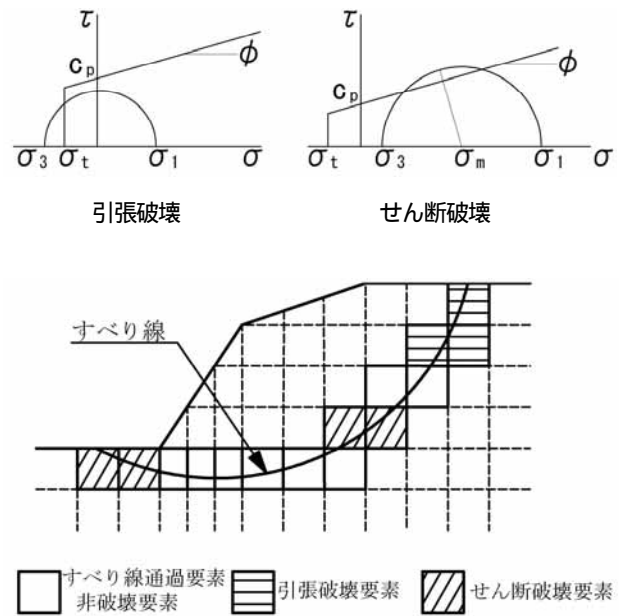


図-12 すべり線通過要素の破壊・非破壊

抗力の比例関係が挙げられる．滑動力はすべり土塊の重量にほぼ比例すると考えられ2次元問題では長さの2乗に比例する．それに対し，抵抗力側は内部摩擦角が卓越している場合にはほぼ重量に比例するが，粘着力が卓越している場合にはすべり線の長さに比例するため，大きい土塊の方がすべりやすくなると考えられる．なお，粘着力150と200ではほぼ同程度のすべり線が求められているが，この理由はモデルの境界にすべり線が達しているためであり，モデルを大きくすると粘着力200の場合のすべり線はより大きくなる．

同様にして，4種類の内部摩擦角に対して限界加速度が最小となるすべり線の探索を行った．求められたすべり線を図-11に示す．内部摩擦角に応じて限界加速度は大きくなっているものの，すべり土塊は粘着力に対する傾向とは逆にやや小さくなっていることがわかる．内部摩擦角が大きくなると深部では大きな強度が発揮されすべり線が浅い場所を通りやすくなると考えられる．

(4) 要素破壊を考慮したすべり線探索

これまでの検討では，ある要素において破壊(局所安全係数が1.0を下回る)と判定されてもピーク強度をそのまま用いて式(1)から安全率や限界加速度を算定していた．斜面安定解析における強度定数には残留強度などを適用する考え方があり^{(12),(13)}，原子力発電所基礎地盤及び周辺斜面の安定性評価などにおいても取り入れられている．そこで次に，要素破壊を考慮し，局所安全係数が1.0を下回った要素の強度は，それ以降残留強度が発揮されると考えて安全率時刻歴の算定を行う．抵抗力算定の際の要素破壊は図-12に示すように引張破壊とせん断

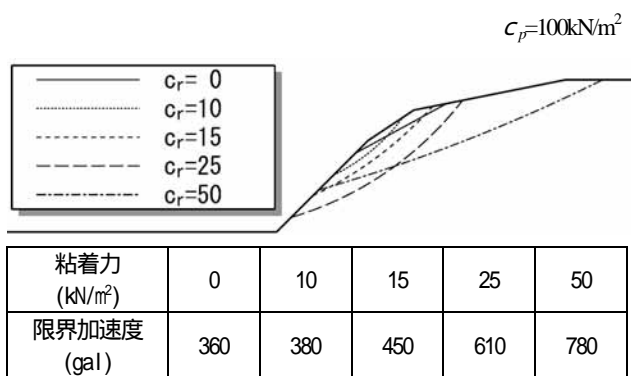


図-13 残留強度の違いによる限界加速度
最小のすべり線

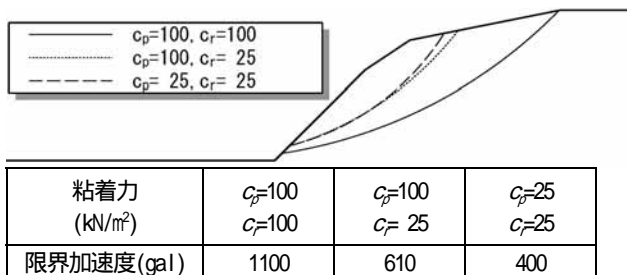


図-14 ピーク・残留強度の違いに対する
限界加速度最小のすべり線

破壊の2つを考える．その定義を以下に示す．

<要素破壊>

- 最小主応力 σ_3 が引張強度 σ_t を超えた場合を引張破壊とする．
- 応力円が破壊基準線を超えた場合をせん断破壊とする．

<破壊後の抵抗力(残留強度)>

- 引張破壊の場合，すべり面に直交する応力 σ_n が引張りの場合は抵抗力を0とし， σ_n が圧縮の場合は残留強度を適用した抵抗力とする．
- せん断破壊の際は残留強度を適用した抵抗力とする．
この仮定の下で再度限界加速度が最小となるすべり線の探索を行った．残留強度の粘着力(c_r)を5ケース設定し(内部摩擦角はピーク，残留ともに $\phi = 35^\circ$ で一定)，それぞれ危険なすべり線を探索した．その結果を図-13に示す．ピーク強度同様に残留強度の粘着力の大きさに応じて限界加速度が最小となるすべり土塊も大きくなり，その限界加速度も大きくなっている．逆に残留強度の粘着力が小さい場合には浅いすべり線が探索されている．ただし，その位置や大きさに関する傾向は図-10の場合とやや異なり複雑である．

ピーク強度，残留強度の粘着力 c_p, c_r に関する次の3ケースの比較を図-14に示す．

ケース1： $(c_p, c_r) = (100\text{kN/m}^2, 100\text{kN/m}^2)$

ケース2： $(c_p, c_r) = (100\text{kN/m}^2, 25\text{kN/m}^2)$

ケース3： $(c_p, c_r) = (25\text{kN/m}^2, 25\text{kN/m}^2)$

限界加速度はケース1, 2, 3で1100, 610, 400galと差が見られたが，すべり線はケース2, 3についてはほぼ同じであり，すべり線の位置や大きさは主に残留強度に依存することを示唆している．また，図-10, 11に示したように粘着力の方が内部摩擦角よりもすべり線に大きな影響を及ぼすことから，残留強度の粘着力を適切に評価することが危険なすべり線の推定に対して重要であることがわかる．

4. すべり量に基づく危険なすべり線

(1) Newmark法によるすべり量評価

力の安全率が1.0を瞬間的に下回ってもすべり量が小さければ一般に問題は生じない．そこで，すべり量に基づく限界状態を定義する．限界加速度は安全率に対するバイナリーサーチにより算定し，限界加速度最小となるすべり線はGAにより探索する．単純に基準すべり量 D_R と算定すべり量 D_S の比 D_R/D_S を安全率とするとすべりが生じていないすべり線の安全率は全て無限大となり安全余裕の区別がつかなくなる．そのためGAによる危険なすべり線探索の効率が悪くなる．そこで，すべり量に基づく安全率を次式のように定義する．

$$F_{sd} = \begin{cases} 10^{1-D_S/D_R}, & \text{if } D_S > 0 \\ 10F_{sf}, & \text{if } D_S = 0 \end{cases} \quad (2)$$

すべり量が生じていない場合には通常の力の安全率を10倍した値が安全率となり，すべりが生じ始める限界が10，すべり量が基準すべり量と等しくなったときに1.0，上回ると1.0より小さくなる．式(2)で定義される安全率をすべり量の安全率と呼び，前述の力の安全率 F_{sf} と区別し F_{sd} と記す．

すべり量は以下の運動方程式を解くことで算定する．

$$J\ddot{\theta} = (S_s + S_d(t) - R_s - R_d(t))l \quad (3)$$

ここに， J ：土塊の回転慣性

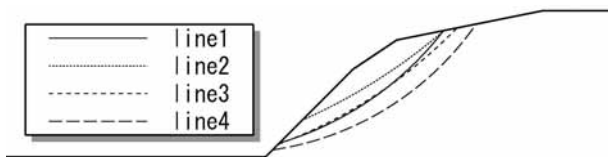
：回転角， l ：円弧の半径

R_s ：初期応力状態における抵抗力

S_s ：初期応力状態における滑動力

$R_d(t)$ ：最大振幅レベル A_{\max} の地震波を入力とした際の時刻 t における抵抗力

$S_d(t)$ ：最大振幅レベル A_{\max} の地震波を入力とした際の時刻 t における滑動力



すべり線	目的関数	得られた最小値
1	限界加速度(力)	610
2	限界加速度(10cm)	730
3	限界加速度(100cm)	990
4	力の安全率(300gal)	1.69

図-15 目的関数の違いによる目的関数最小のすべり線

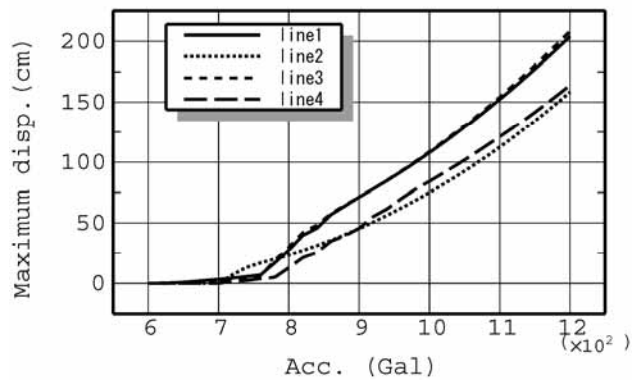


図-17 入力最大の加速度と最大すべり量の関係

滑動力が強度特性から決められる最大抵抗力より小さい場合には、滑動力と同じだけ抵抗力が発揮されるため、式(3)の右辺は0となり、滑動は生じない。最初に力の安全率が1.0より小さくなる、すなわち一度すべりだしたら、そのすべり線を通る要素は以後全て破壊後の強度（残留強度）を用いて、抵抗力を算定する。滑動が生じている間はすべりを止める方向に抵抗力が発揮される。すべり量の算定方法は基本的に藤野¹⁴⁾に従った。

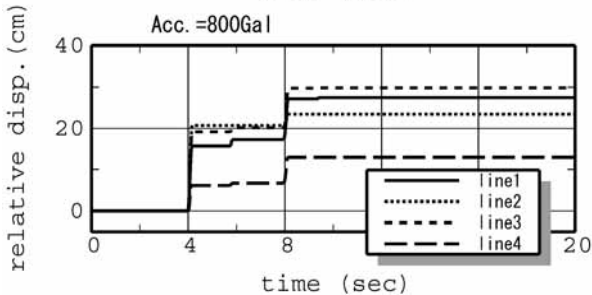
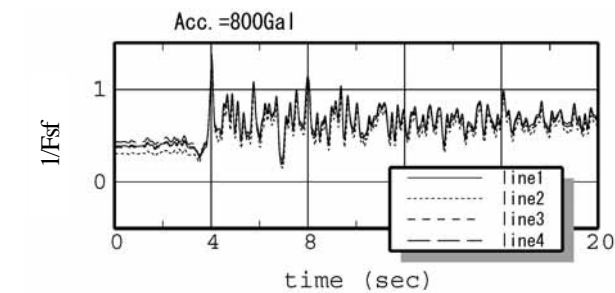
限界状態の定義に関して次のケース1から4を考えて危険なすべり線の探索を行った。ケース1では限界状態を力の釣り合いで定義し、限界加速度が最小となるすべり線を探索、ケース2、3では限界状態を基準すべり量10cm、100cmで定義し、限界加速度が最小となるすべり線を探索した。ケース4では入力最大の加速度を300galとした場合について力の釣り合いによる安全率が最小となるすべり線を探索した。いずれのケースも要素破壊を考慮した。

上記4ケースについて算定されたすべり線を図-15に示す。限界状態を基準すべり量10cmで定義したケース2が最も小さいすべり土塊となり、入力加速度を300galに固定したケース4が最も大きいすべり土塊となった。ケース4では振幅レベルが比較的小さいため、応答が大きくなる法肩近傍を除けば局所安全率が1.0を下回っている要素が少なく、全体的にはピーク強度が発揮されているためすべり土塊が大きくなったと考えられる。

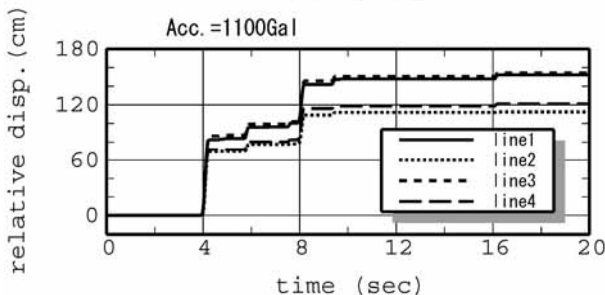
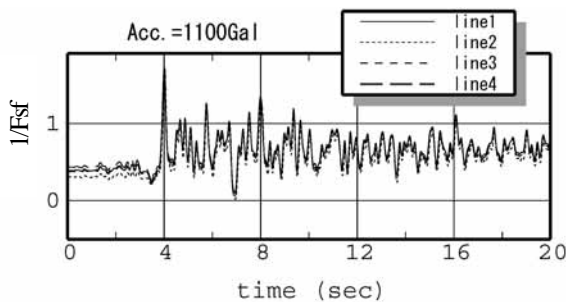
(2) 振幅レベルとすべり量

4(1)で探索された4ケースの目的関数に対して求められたすべり線(line1, 2, 3, 4)について、入力地震動の最大加速度が800galと1100galの場合の力の安全率の逆数とすべり量の時刻歴を図-16に示す。安全率の逆数が1.0を上回ったときにすべり変位が生じ、階段状にすべり量が累積されていることがわかる。すべりが生じる時刻には各すべり線で大差はない。

次に入力の振幅レベルを変えてすべり量の算定を行った。最大すべり量の算定結果を図-17に示す。入力の振



(1) 800galの場合



(2) 1100galの場合

図-16 安全率及びすべり量の時刻歴

幅レベルが750gal程度では4本のすべり線のうちケース2のすべり線 (line2) が最も大きな最大すべり量となっているが、約800gal以上ではケース1, 3のすべり線 (line1, 3) の方が大きくなっている。さらに約900gal以上ではline2とline4の大小関係が逆転しline2のすべり量が最も小さくなっている。このようにすべり量が小さい範囲の挙動は複雑である。

5. 損傷確率評価への影響

すべり線や限界状態の定義が損傷確率に与える影響について検討を行った。

(1) 限界加速度に基づく損傷度曲線の算定法

著者の一人は限界(地震動)指標を用いた効率的な損傷確率算定法について検討を行い、様々な問題に適用してきた^{11),15),16),17)}。以下、限界加速度を用いて損傷確率あるいは損傷度曲線を算定する式を示す。限界状態関数 g を用いて損傷領域を以下のように定義する。

$$g(S, \mathbf{x}_R) < z_0 \quad (4)$$

ここで、 S, \mathbf{x}_R, z_0 はそれぞれ外力レベル (本研究では入力地震動の最大加速度)、その他の不確定変数、損傷を定義する閾値である。 \mathbf{x}_R, z_0 が確定的に与えられたときに $g(S, \mathbf{x}_R) = z_0$ が成り立つ S を逆算する関数が $R(z_0, \mathbf{x}_R)$ で与えられるとすると、式(4)で与えられる損傷領域は次式でも表現できることになる。

$$R(z_0, \mathbf{x}_R) < S \quad (5)$$

ここで、外力 S とその他の不確定変数に関する確率密度関数が分離できると仮定する。

$$f(S, \mathbf{x}_R) = f_S(S) f_{\mathbf{x}_R}(\mathbf{x}_R) \quad (6)$$

以上の条件のもとで損傷確率は以下の式で求めることができる。

$$\begin{aligned} P_f &= \int_{g < z_0} f(S, \mathbf{x}_R) dS d\mathbf{x}_R \\ &= \int_{R < S} f_S(S) f_{\mathbf{x}_R}(\mathbf{x}_R) dS d\mathbf{x}_R \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} &= \int \left(\int_{R < S} f_S(S) dS \right) f_{\mathbf{x}_R}(\mathbf{x}_R) d\mathbf{x}_R \\ &= \int \left(\int_{R(z_0, \mathbf{x}_R)}^{\infty} f_S(S) dS \right) f_{\mathbf{x}_R}(\mathbf{x}_R) d\mathbf{x}_R \quad (7) \\ &= \int \{1 - F_S(R(z_0, \mathbf{x}_R))\} f_{\mathbf{x}_R}(\mathbf{x}_R) d\mathbf{x}_R \end{aligned}$$

また、損傷度曲線は、外力レベル S に対する条件付き損傷確率であることから、次式で求めることができる。

$$\begin{aligned} F_R(S) &= \int_{R < S} f(S, \mathbf{x}_R) d\mathbf{x}_R \\ &= \int U(S - R(z_0, \mathbf{x}_R)) f_{\mathbf{x}_R}(\mathbf{x}_R) d\mathbf{x}_R \end{aligned} \quad (8)$$

ここで、 $U(x)$ はステップ関数であり、 x が非負であれば1.0、負であれば0.0であることを表している。

式(7)(8)についてモンテカルロシミュレーション (以下、MCS と記す) によって得られたサンプル実現値を用いて積分を行う。確率密度関数 $f_{\mathbf{x}_R}(\mathbf{x}_R)$ に従って発生させた n 個のサンプル $\mathbf{x}_R^{(j)}$ ($j=1, n$) 及びディラックの関数を用いて、確率密度関数 $f_{\mathbf{x}_R}(\mathbf{x}_R)$ に関して次のように近似表現を行う。

$$f_{\mathbf{x}_R}(\mathbf{x}_R) = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \delta(\mathbf{x}_R - \mathbf{x}_R^{(j)}) \quad (9)$$

これを式(7)に代入して積分を実行すると損傷確率を算定する次式を得る。

$$P_f = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \left(1 - F_S(R(z_0, \mathbf{x}_R^{(j)}))\right) \quad (10)$$

同様にして、式(9)を式(8)に代入して積分を実行すると次式で損傷度曲線が求められる。

$$F_R(S) = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n U(S - R(z_0, \mathbf{x}_R^{(j)})) \quad (11)$$

計算手順としては確率密度関数 $f_{\mathbf{x}_R}(\mathbf{x}_R)$ に従って発生させたサンプルから単純に R を求め、 S 以下となる比率を算定すればよい。外力レベル S の逆算は通常の z_0 の計算よりも時間はかかるものの、一回のMCSで一本の損傷度曲線を求めることができ多くの場合効率的である。

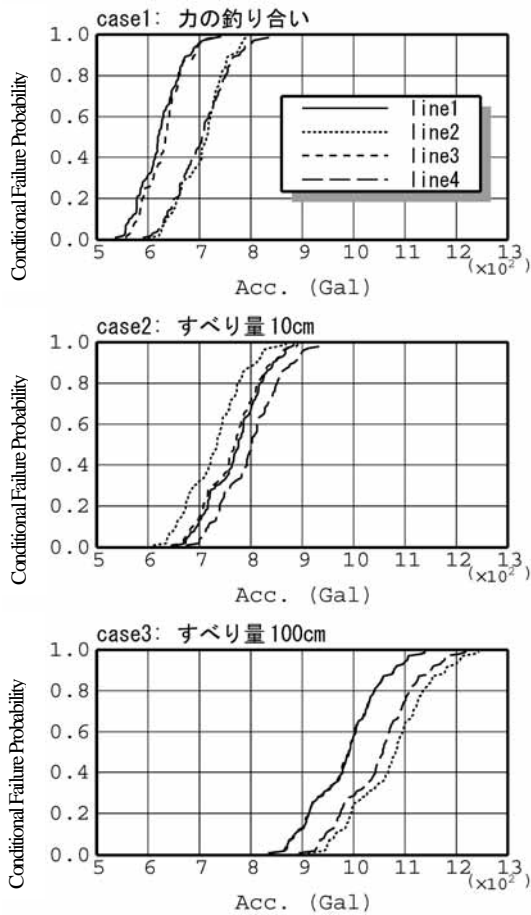


図-18 限界状態ごとの損傷度曲線

(2) 損傷度曲線及び損傷確率の比較

4 (2) に示した 4 種類のすべり線 (line1 から 4) について損傷確率の算定を行った。限界状態はケース 1, 2, 3 として力の安全率, 基準すべり量 10cm, 100cm の 3 種類を考慮した。すなわち 3 つの限界状態, 4 本のすべり線で, 計 12 個の損傷確率を求めた。考慮した不確定要因は単位体積重量 γ (変動係数(5%)), 初期せん断弾性係数 G_0 (25%), ピーク強度, 残留強度の粘着力 c_p, c_r 及び引張強度 σ_t (40%), 内部摩擦角 ϕ (10%) である。空間方向には完全相関であると仮定した。サンプル数は 100, サンプルングの方法はラテン方格法^{18), 19)}を用いた。

限界加速度に関する MCS によって算定された 12 本の損傷度曲線を図-18 に示す。限界状態の定義について注目して比較すると, 当然のことながらケース 1, 2, 3 の順に左側に損傷度曲線が位置している。すなわち, 限界状態を損なう条件付き確率が高くなっている。しかし, ケース 1, 2 のすべり線 2 のように差が小さい場合もある。これは力の安全率が 1.0 を下回ったときは比較的直ぐに 10cm 程度のすべり量が発生していることを意味する。

すべり線 1 はケース 1 の条件で探索された最も危険なすべり線であるため, ケース 1 の中では一番左側に位置する。同様にしてケース 2 ではすべり線 2, ケース 3 ではすべり線 3 が左側に位置している。すべり線 4 のよう

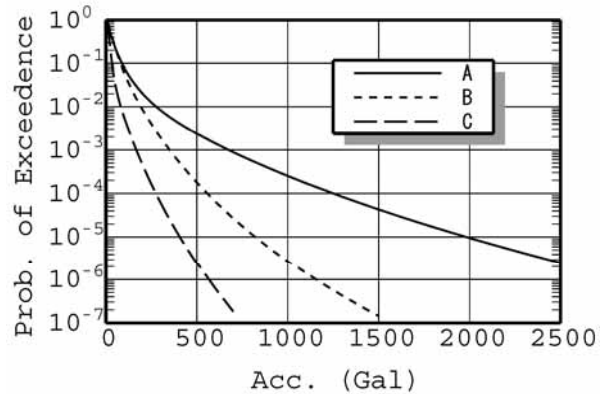


図-19 地震危険度曲線

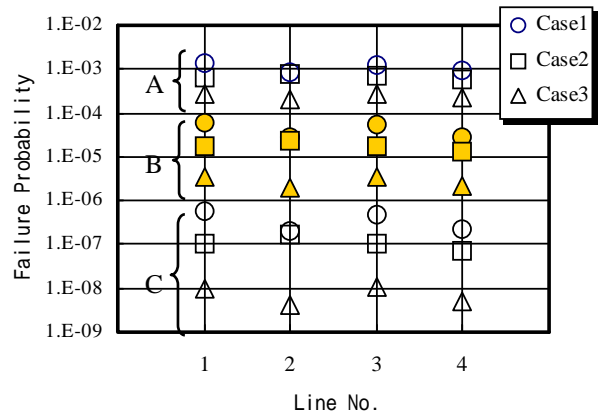


図-20 各すべり線, 限界状態, 地震危険度曲線に対する損傷確率

に固定された加速度で探索された場合は, 最も危険なすべり線に比較して 50 から 100gal 程度過大な耐力評価を行っていることになる。

地震危険度が異なる仮想地点を例題として, 限界状態の違いを反映した損傷度曲線及び損傷確率を算出し, すべり線位置や限界状態の定義が損傷確率に与える影響について考察する。損傷確率の試算地点として想定した A, B, C 地点の地震危険度曲線を図-19 に示す。地震危険度曲線はある最大加速度以上の地震動が 1 年間に発生する確率 (年超過確率) を表しており, 過去に発生した地震や地震発生メカニズムから地点周辺のモデルを作成して算定される^{20), 21)}。検討対象とした 3 地点のなかでは A, B, C の順番に地震危険度が高くなっている。これら地震危険度曲線と損傷度曲線から損傷確率を求め, 図-20 にまとめて示す。A, B, C 地点での損傷確率はそれぞれおおよそ 10^{-4} 以上, 10^{-4} から 10^{-6} , 10^{-6} 以下となり, A 地点が最も損傷確率が大きく, C 地点が最も小さい。

また, 各地点ともすべり線による損傷確率の違いは比較的小さい。例えば, A 地点のすべり線による違いは最大でも 1.5 倍程度である。一方, 限界状態の違いである力の釣り合い (ケース 1, すべり線 1) と基準すべり量 100cm (ケース 3, すべり線 3) では 5 倍程度の差が生じた。こうした傾向は B, C 地点でも変わらないが, 差

は地震危険度が小さなC地点の方が大きい。これは、図-19からも明らかなように地震危険度曲線の傾きはA、B、Cの順に小さく、最大加速度の変化に対して年超過確率の変化が小さいことが原因となっている。

なお、本検討においては地盤物性のばらつきは空間方向に完全相関と仮定したが、厳密には地盤物性の空間内のばらつきにより危険なすべり線も変化する。しかし、上記検討より明らかなようにすべり線の違いによる損傷確率への影響は比較的小さく、すべり線を固定した影響は少ないと考えられる。

6. おわりに

本研究では2次元動的FEM解析に基づき、斜面の地震時安全性評価について検討を行った。危険なすべり線を遺伝的アルゴリズムで探索し、その安全余裕度を限界加速度、損傷確率で示した。主な結論を以下に示す。

- 1) 安全率最小の条件で探索された危険なすべり線は地震動の振幅レベルに応じて大きくなるため、限界加速度最小のすべり線を探索することが合理的である。
- 2) 地盤の粘着力を大きくすると危険なすべり線も大きくなり、逆に小さい場合には表層すべりに近いような小さなすべり線が危険となる。内部摩擦角を大きくすると、危険なすべり線は逆にやや小さくなる。
- 3) 危険なすべり線の形状、大きさに対しては残留強度の粘着力の影響が大きい。
- 4) 特定の振幅レベルで探索したすべり線で損傷確率を評価すると危険側となる。しかし、その影響は総じて小さく、例題(A地点)ではすべり線による損傷確率の違いは1.5倍程度であった。
- 5) すべり量による限界状態から評価された損傷確率は、力の釣り合いによる損傷確率よりも当然のことながら小さくなる。例題(A地点)では基準すべり量10cmの場合では大差はなかったが、基準すべり量100cmとすると損傷確率は1/5程度に小さくなった。

今後は遠心模型実験を行い、地震時斜面が有する真の耐震余裕度について検討を行い、本論文で論じた危険なすべり線やその安全性の評価方法の妥当性について検証を行う予定である。

参考文献

- 1) 国際標準化機構 (ISO) : ISO2394, General principles on reliability for structures
- 2) CEN: Eurocode 1, Basis of design and actions on structure
- 3) 原子力安全委員会 原子力安全基準・指針専門部会: 耐震指針検討分科会会議資料, 震分第 8-4-2 号, 地震 P S A 評価

手法の概要について, 平成 16 年 2 月 27 日.

- 4) 土木学会原子力土木委員会: 「原子力発電所地質・地盤の調査・試験法および地盤の耐震安定性の評価手法」報告書, 土木学会, 1985.
- 5) 土木学会原子力土木委員会・地盤安定性評価部会: 上下動を考慮した原子力発電所基礎地盤及び周辺斜面の地震時安定性評価, 土木学会論文集, No.757/ -66, pp.21-31, 2004.
- 6) 金戸俊道, 高尾誠, 吉田郁政: 3次元性を考慮した斜面の安定解析, 電力土木, No.296, pp.16-21, 2001.
- 7) 三宮信夫, 喜多一, 玉置久, 岩本貴司: 遺伝アルゴリズムと最適化, システム制御情報ライブラリー-17, 朝倉書店, 1998.
- 8) 古田均, 杉本博之: 遺伝的アルゴリズムの構造工学への応用, 森北出版, 1997.
- 9) 土木学会地震工学委員会: 高地震力に対する土構造物の耐震設計法に関する研究小委員会報告書, 2000.
- 10) 小林重信, 小野功: 進化的計算に基づくシステム最適化, 計測と制御, 35-7, pp.508-513, 1996.
- 11) 大鳥靖樹, 吉田郁政, 石川博之, 武田智吉: 限界地震動指標による土構造物の年損傷確率評価, 第 5 回構造物の安全性・信頼性に関する国内シンポジウム, 講演論文集, pp.695-700, 2003.
- 12) 川上浩: 自然斜面の安定性を評価する上での 2,3 の問題, 土と基礎, 35-11, pp.3-8, 1987.
- 13) 中道育夫: 崩壊と地すべりに対する解析手法の適用, 土と基礎, 35-11, pp.51-56, 1987.
- 14) 藤野陽三, 佐々木有三, 伯野元彦: 地震動による物体のすべりについて, 地震研究所彙報, Vol.53, pp.461-480, 1978.
- 15) 吉田郁政, 鈴木修一: 限界地震動指標を用いた損傷確率の効率的な算定方法, 構造工学論文集, pp.201-206, 2003.
- 16) 興野俊也, 赤石沢総光, 吉田郁政, 鈴木修一, 長船徹: ケーソン堤の滑動破壊モードに着目した効率的損傷確率算定手法について, 海岸工学論文集, 第 50 巻, 2003.
- 17) 鈴木修一, 赤石沢総光, 吉田郁政, 地中 R C 構造物の劣化を考慮した常時・地震時の信頼性評価に関する基礎研究, 土木学会第 57 回年次学術講演会, VI-131, pp.261-262, 2002.
- 18) 応用力学シリーズ 6, 構造物系の非線形・不確定モデリング, 日本建築学会, 1998.
- 19) Schueller, G.I., Bucher, C., Bourgund, U. and Ouyompomsert, W.: On Efficient Computational Schemes to Calculate Structural Failure Probabilities, *Probabilistic Engineering Mechanics*, Vol.4, No.1, pp 10 - 18, 1989.
- 20) Annaka, T. and Nozawa, Y.: A probabilistic model for seismic hazard estimation in the Kanto district, Proc. of 9th WCEE, pp. 107-112, 1988.
- 21) 安中正, 末広俊夫, 弘重智彦: モンテカルロ手法に基づく地震ハザードの不確定性評価方法, 第 11 回日本地震工学シンポジウム講演論文集, No.15, pp.73-78, 2002.

(2003.11.20受付)

STUDY ON SEISMIC PROBABILISTIC SAFETY ASSESSMENT OF A SLOPE

Ikumasa YOSHIDA, Takehisa ARAKAWA, Takashi KITAZUME
and Hitoshi OOTSU

We studied the influence of size and position of assumed slip line and definition of limit state on estimated stability of a slope during an earthquake, performing search of critical slip lines and probabilistic safety assessment. The critical slip line is searched based on 2-dimensional dynamic analysis by Genetic Algorithm, in which not safety factor but limit acceleration is used as the objective function, because the critical slip line depends on the amplitude of input motion. The limit acceleration is defined as minimum peak acceleration of input motion that causes the failure event. The limit state is defined for both case, balance of slip force and resistance force, and slip displacement. It is indicated in numerical examples that cohesion of residual strength has large influence on position and size of critical slip line, but those of the slip line is not so sensitive to failure probability.