

3次元性を考慮した斜面の安定解析

金高 戸 俊 道
吉 尾 尾 尾 誠
 田 田 田 政
 郁 政

概要 地形の3次元効果を考慮した地盤安定性評価を行うために、3次元動的FEM解析手法をもとにした安定性評価手法を開発した。本手法では想定すべり面として①平面、②楕円体、③円筒+楕円体、の3種類を考慮できる。また、3次元問題では加振方向やすべり方向も問題となるため任意の方向の組み合わせを考慮できるようにした。最小安全率となるすべり面の探索には計算時間を短縮するため遺伝的アルゴリズムを用いている。いくつかの斜面モデルについて検討を行ったところ、3次元解析による安全率の方が2次元解析による安全率よりも大きく、従来の2次元解析に基づく評価は安全側の傾向にあることを定量的に示すことができた。

キーワード：地盤安定解析、動的FEM解析、3次元効果、遺伝的アルゴリズム

1. はじめに

斜面の地震時安定性検討を行う場合、極限平衡法に基づく方法¹⁾²⁾、FEM解析を用いる方法³⁾などがあり、既に実務においても広く用いられている。ただし、これらの解析手法の大部分は2次元解析であり、3次元効果を考慮した研究⁴⁾⁵⁾も行われているものの実務で広く用いられるところまでは至っていない。3次元効果を考慮した解析は不整形性の大きい地盤や特に地形効果の大きい斜面の安定性解析ではより実現象に則した手法と考えられる。3次元解析は従来の2次元解析と比較して高い計算機能力を必要とすることから、現状あまり多く用いられていないが、近年の大幅な計算機能力の向上から実務においても適用が可能になりつつある。

そこで、本研究では3次元斜面の安定性評価として3次元動的FEM解析に基づく安全率算定方法、遺伝的アルゴリズムを用いた最小すべり面の探索方法について報告する。遺伝的アルゴリズムは土木工学をはじめとして多くの分野で注目されている方法であり、特に工学分野では大域探索手法として用いられることが多くなってきた方法である⁶⁾⁷⁾。いくつかの斜面モデルについて検討を行い、安全率に対する3次元効果について論じた。

2.3 次元解析に基づく安全率算定手法

(1) 用いた3次元動的FEM解析手法の特徴

本研究で用いた3次元動的FEM解析では、時刻歴領域において直接積分を行って解を求める方法を採用している。側面、底面境界

は粘性境界とすることができ、側方粘性境界とする場合には図-1に示すように解析対象の3次元不規則領域の4面に独立な任意形状の2次元、4角に1次元のfree fieldを設定して解析を行うこととなる。加振方向は水平2方向に加え、鉛直方向加振も同時に考慮することができる。

(2) すべり面形状と安全率の算定法

すべり面形状について2次元解析では円弧や直線が用いられることが多く、本研究の3次元解析においても2次元解析で用いられている概念を拡張して採用することとした。3次元的なすべり面形状としていくつかの関数型が想定できるが、開発したプログラムでは①平面、②楕円体、③円筒+両端楕円体、の3種類のすべり面を考慮することができる。また、円筒あるいは楕円体の軸は各座標軸回りに任意の角度で回転できるようにした。

すべり安全率の算出は、従来2次元で行われている方法を拡張し、抵抗力と滑動力の比として定式化した。任意形状のすべり面はFEM要素の辺もしくは面とすべり面との交点を頂点とする三角形パネルの集合体で表現する。図-2に三角形パネル分割のイメージを示す。三角形パネルの分割は想定すべり面とFEM要素の交点を探索し(図-2ではc1~c4)、交点の数に応じて行う。

各三角形パネルの面積、三角形パネルを内包するFEM要素の応力、パネルの法線ベクトルを用いて抵抗力及び任意方向の滑動力を

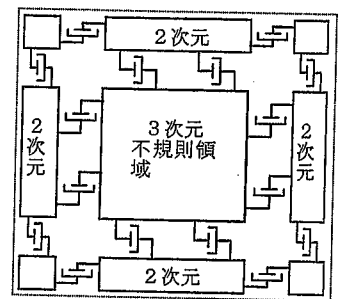


図-1 境界条件

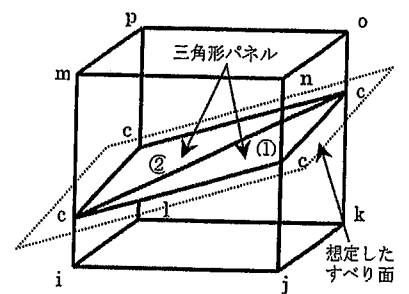


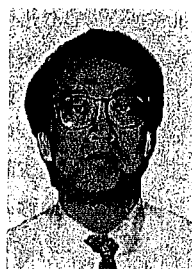
図-2 三角形パネル分割



金戸 俊道



高尾 誠



吉田 郁政

*東京電力(株) 原子力技術部 土木調査グループ 副主任 会員 kaneto.toshimichi@tepcoco.jp

**東京電力(株) 原子力技術部 土木調査グループ 副長 会員 takao.makoto@tepcoco.jp

***東電設計(株) 地盤・構造部 次長 dyoshida@tepscoco.jp

各三角形パネルに対して求め、その総和の比により安全率を求める。

$$S_f = \frac{\sum_{i=1}^n R_i \cdot A_i}{\sum_{i=1}^n S_i \cdot A_i} \quad (1)$$

ここに、 R_i ：せん断抵抗、 S_i ：作用せん断力、 A_i ：三角形パネルの面積である。

(3) 2次元斜面を用いた計算例

前述の3次元動的解析法に基づき安全率の算定を行い、従来の2次元すべり安定性評価手法との比較を行った。ここではすべり面の探索は行わず、所与のすべり面に対する安全率の比較を行った。2次元解析では、安定性検討で用いられることの多い、周波数領域のFEM解析プログラムSuperFlushを用いた。

a. 解析条件

勾配約1：1.5、高さ27mの2次元形状の斜面を有する地盤を対象として検討を行った。3次元モデルはこの2次元斜面を奥行き方向に単純に延長して作成した。2次元および3次元で設定したモデルを図-3に示す。作成した3次元解析モデルの諸言は200m×200m×81m(横(x)×奥行き(y)×高さ(z))である。

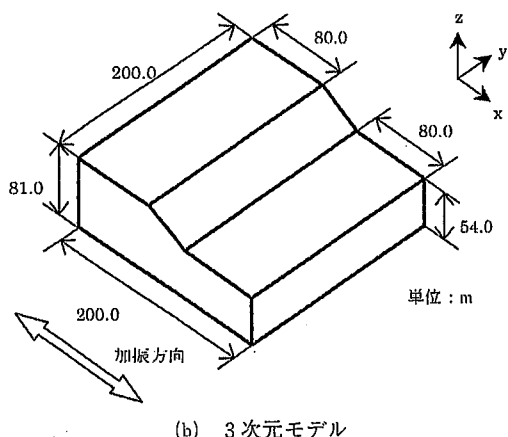
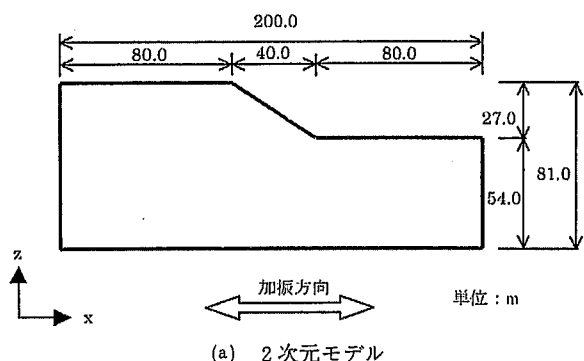


図-3 2次元および3次元で設定したモデル図

2次元モデルの境界条件は、自重解析時に底面固定および側方鉛直ローラー、地震応答解析時には底面固定、側方水平ローラーとした。3次元モデルの境界条件は、自重解析時には底面固定、側方鉛直ローラー、地震時応答解析時には、底面固定、x方向側方境界を水平ローラーとしたが、y方向側方境界は平面ひずみ条件で実施する2次元モデルの境界条件と等しくなるようにy方向の自由度も固定した。側方境界は粘性境界やエネルギー伝達境界とすることもできるが両モデルの条件を一致させるためここでは用いていない。

解析に用いた地盤物性値をまとめて表-1に示す。また、入力

表-1 解析用地盤物性値一覧

<変形特性>			
単位体積重量 (kN/m ³)	ポアソン比	せん断波速度 (m/sec)	せん断弾性係数 (MPa)
16.8	0.45	499.4	427

*) 減衰定数は一律3.0%とした

<強度特性>

粘着力 (kPa)	内部摩擦角 (deg.)	引張強度 (kPa)
1500	0.0	222

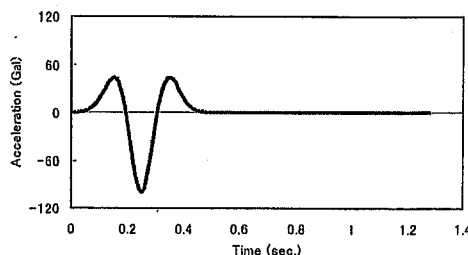


図-4 入力地震動

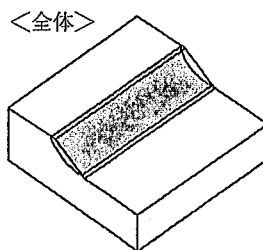
地震動は、図-4に示す最大加速度100gal、周期0.25秒のRicker Wavelet波とした。時間刻みは0.01秒で継続時間は1.28秒間である。加振方向は2次元断面の面内加振に相当する斜面最急勾配方向とした。

b. 想定したすべり線およびすべり面

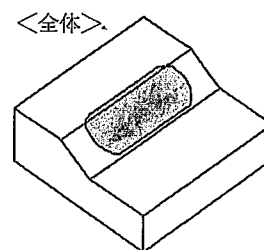
設定したすべり線、すべり面を図-5に示す。2次元モデルにおけるすべり線は円弧を、3次元モデルでは円筒(奥行きy方向に解析モデル境界まで同じ形状)と幅95mの円筒+両端楕円体の2つのすべり面を考えた。前者の円筒すべり面は奥行き方向に無限に連続



(a) 2次元モデル(3次元モデルxz断面)



(b) 3次元モデル(L=∞)



(c) 3次元モデル(L=95m)

<円筒> <円筒+両端楕円体>
図-5 想定したすべり線(2次元断面：円弧)

することを意味し、2次元モデルにおける円弧すべり線と等価である。図-5中、前者をL=∞、後者をL=95mと記している。

c. 2次元と3次元の安全率の比較

2次元モデル及び2種類の3次元モデルによって算定されたすべ

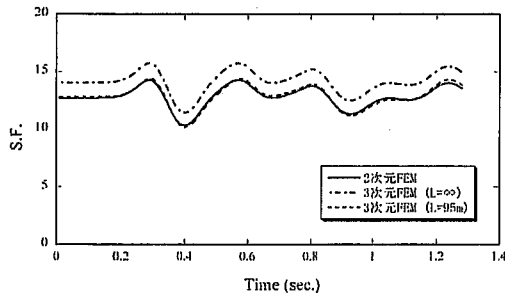


図-6 すべり安全率時刻歴

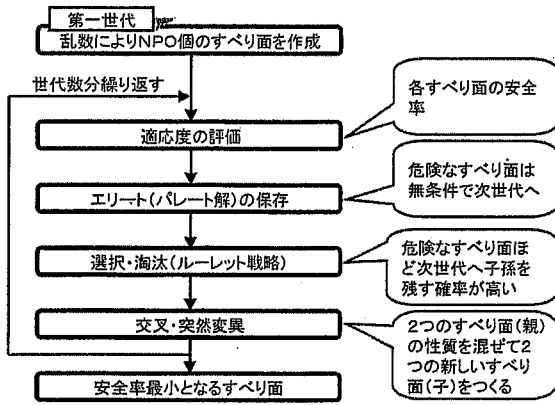


図-7 遺伝的アルゴリズムによるクリティカルなすべり面の探索

り安全率の時刻歴を図-6に示す。得られた最小安全率は2次元モデルでは10.2, 3次元モデル $L=\infty$ では10.3, 3次元モデル $L=95m$ では11.4となった。3次元モデル $L=\infty$ と2次元モデルによるすべり安全率は実質的に解析条件が等しいことから、すべり安全率もほぼ等しくなっている。安全率の若干の差異は解析手法の違い(周波数領域解析と時間領域解析の違い)により生じたものと考えられる。

3次元モデル $L=95m$ とした場合のすべり安全率は、常時におけるすべり安全率と等しい時刻も含め、地震時のすべての時刻において2次元FEMによるすべり安全率を上回っている。これは3次元FEM解析におけるすべり面の両端部である楕円体部が安全率を大きくしているためと考えられる。安定性評価手法を3次元に拡張することにより、2次元断面の奥行き方向における抵抗力を考慮できることから、より合理的な安定性検討を行うことができると考えられる。なお、本報告では示していないが、すべり面を平面とした解析も実施して2次元と3次元の比較を行っており、ほぼ同様の傾向が得られている。

3. すべり面の探索方法

前述の通り、すべり面は3次元楕円球等の関数型でモデル化しており、いくつかのパラメーターによってすべり面を規定することができる。最も危険なすべり面に対するパラメーターの探索は、2次元の解析ではランダムサーチにより行うことも多いが、3次元動的FEM解析結果に基づく場合は計算時間が膨大になるため、効率的な探索方法が必要となる。そこで、最も危険なすべり面を規定するパラメーターを実数交叉型の遺伝的アルゴリズム⁸⁾⁹⁾(以下、GAと記す)を用いて探索する方法について検討を行った。GAは生命の遺伝子の働きを模擬するアルゴリズムであり工学分野では大域探索

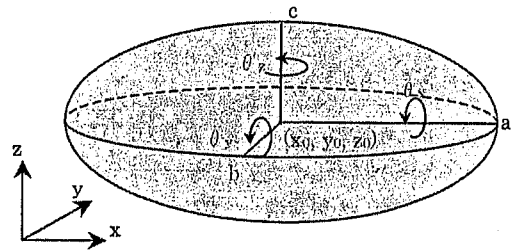


図-8 すべり面形状を規定するパラメーター

手法として用いられることが多い。GAを用いたすべり面探索の概略フローを図-7に示す。

(1) 計算条件

前節に示した2次元斜面モデルを対象としてクリティカルなすべり面の探索を行った。図-8に示すようにすべり面を規定するパラメーターは x_0, y_0, z_0, a, b, c さらに3つの軸に対する回転角の計9つあるが、ここでは簡略化のためGAによる探索の対象とする変数は x_0, z_0, a, c の4つとした。 y_0, b についてはそれぞれ100, 50に固定した。図-3からわかるように $y_0=100$ とすることはすべり面の中心をモデルのy方向の中央に設定することに相当する。GAのパラメーターは世代数40世代、人口150、突然変異にはコーシー分布に従うノイズを用いた。

(2) 探索結果

図-9にGAによる各世代の最も危険なすべり面の安全率と安全率の中央値を示す。最小値, 中央値ともに世代の進行とともに減少しており、両者の差は徐々に小さくなっている。これは世代の進行とともに各個体が洗練されて、特定のすべり面に集中してきていることを示している。最終的に得られた各パラメーターは $x_0=107, z_0=83, a=51, c=34$ であった。得られたすべり面を図-10に示す。斜面の全体を含む比較的大きなすべり面が最も危険なすべり面として算出された。

GAにより得られた安全率が最小安全率かどうかを証明することは難しいが、最小値の必要条件としてそれぞれのパラメーターの変化に対して解近傍で安全率が極小となってい

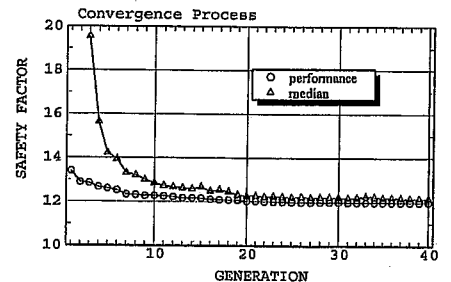


図-9 GAによる探索結果 (各世代における最小値と中央値)

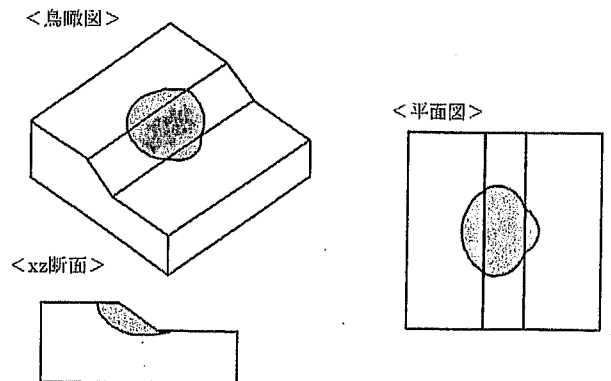


図-10 最終的に得られたクリティカルなすべり面

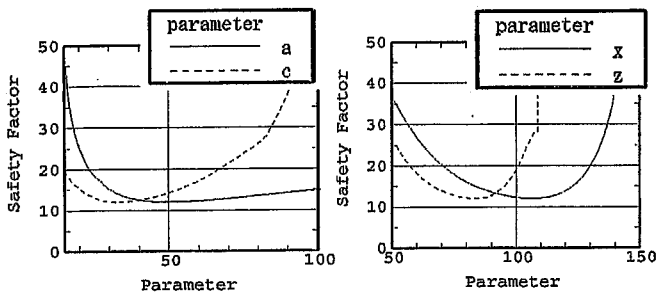


図-11 求められたパラメタ周辺のすべり安全率の様子

ければならない。図-11に4つの説明変数について得られた解の周辺での安全率の様子を示す。得られた解を極小として周辺で安全率が大きくなっており最小値の必要条件を満たしていることがわかる。

以上の解析はパラメータbを50に固定して行っているが、今度は逆に他のパラメータは得られた解に固定し、

bだけを0から100まで変化させた場合の安全率を算定した。その結果を図-12に示す。bを大きくするに従って安全率は小さくなり、無限大としたときには前述の3次元モデル $L=\infty$ のケースの安全率と一致する、すなわち2次元の結果と一致する。bは2次元断面から考えると奥行き方向のすべり面を規定しており、3次元効果を表すパラメータとなっている。図-12はbが小さくなると3次元効果によって安全率が大きくなることを示している。

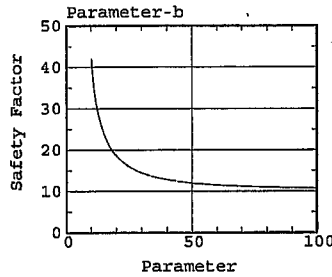
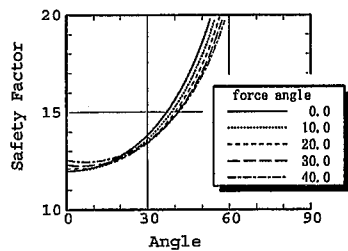


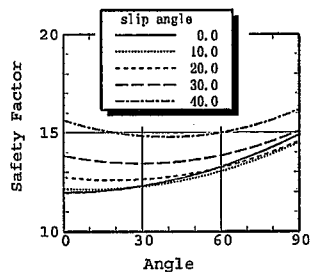
図-12 パラメータbを変化させた場合の安全率

(3) 加振方向とすべり方向の考慮方法

これまでの検討では加振方向、すべり方向ともに2次元断面の面内方向、すなわち、3次元モデルにおける斜面最急勾配方向に固定していた。しかし、複雑な3次元形状の地盤の場合には最も危険なすべり方向や加振方向も明らかではない。そこで、前述の得られたすべり面をもとに、加振方向とすべり方向の検討を行った。加振方向、すべり方向をそれぞれ0度から90度まで変化させたときの安全率を図-13に示す。加振方向を変化させている時はすべり方向を0, 10, 20, 30, 40度の5種類に固定、すべり方向を変化させているときも加振方向を同様に固定している。当然のことながらすべり方向、加振方向ともに斜面最急勾配方向、す



(a) 各加振方向ごとにすべり方向を変化させた場合



(b) 各すべり方向ごとに加振方向を変化させた場合

図-13 加振方向とすべり方向の関係

なわち、0度の時が一番小さくなっている。すべり方向は0度から離れるにつれて急激に安全率が大きくなっているが加振方向については比較的緩やかに大きくなっている。また、すべり方向を変化させたときの加振方向ごとの差はあまり小さくなく0度周辺が小さくなっている。一方、加振方向を変化させた場合にはすべり方向ごとに傾向が大きく変わっており、一番安全率が小さくなる加振方向もすべり方向と関連して変化している。すなわち、加振方向の影響に比べるとすべり方向の影響は大きいことが分かる。

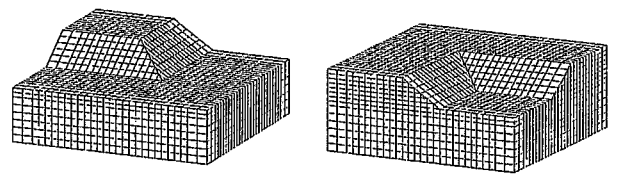
形状が複雑になるとこうした最も危険なすべり方向や加振方向は事前を知ることは困難であり、またすべり面形状と関連して決まることが予想される。そこで、すべり面を規定するパラメータに加え、最も危険なすべり方向、加振方向も同時にGAを用いて探索を行うこととした。検証のため、前述の2次元斜面のモデルを用いて滑り方向、加振方向も含めたGAによる探索を行った。この場合は形状が単純であり、常識的に考えても最急勾配方向が最も危険なすべり方向、加振方向となることが予想される。世代、人口等のGAのパラメータは前節同様である。a, c, x, zのパラメータに加えてすべり方向角、加振方向角も探索を行ったところ、すべり面パラメータは前節と同様の値が、すべり方向、加振方向はそれぞれほぼ0度が求められており、妥当な結果が得られた。

4. 3次元斜面に対する検討

これまでは2次元形状の斜面について検討を行い、2次元モデルによる検討結果との比較からその妥当性や3次元効果の検討を行った。ここでは、2種類の3次元斜面、凸台地形と凹台地形を考えて、その3次元効果について検討を行った。

(1) 計算条件

斜面形状として凸台地形と凹台地形の2種類を設定した。解析モデルを図-14に示す。斜面の勾配や高さは図-3に示したモデルと同様である。凸台地形の総節点数は8848、総要素数は7557、凹台地形の総節点数は11336、総要素数は9883である。下方境界および側方境界は粘性境界とした。地盤物性値については均質の場合や2層に分けた場合、強度について拘束圧依存を持たせた場合、持たせていない場合、等多くのケースを設定した。



(a) 凸台地形 (b) 凹台地形

図-14 解析用モデル図

(2) 加速度応答特性

凸台地形を例としてある時刻における応答加速度分布を図-15に示す。このケースではモデル全域を均質としてせん断波速度340m/s、ポアソン比0.48、減衰比0.0とした。入力波は前述のRicker wavelet波とし波形の主要動部分が崖の頂上付近に達した時刻についてY方向の応答加速度分布を示している。加振方向はX方向としているので3次元形状によって加振直交方向に振動している成分を示している。そのため応答加速度は斜面隅角部を中心に大きくなっており、応答性状が複雑になっていることを表している。応答特性をより定

量的に調べるために斜面偶角部法尻，法尻，偶角部から離れた点の法尻について入力動に対するスペクトル比を求め，これを図-16示す。ここではX方向加振の場合のX方向の応答を示している。法尻法尻ともに凹台地形に比べて凸台地形は全体的に応答が大きくなっている。偶角部から離れたC，C'は2次元斜面の応答に近いと解釈して法尻B，B'の応答に注目すると，凹台地形は2次元斜面と応答が同等あるいは周波数帯によっては小さく，凸台地形では応答が全体的に大きくなっていることが分かる。

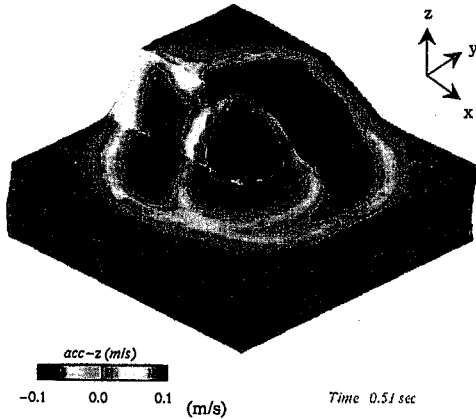


図-15 応答加速度分布図

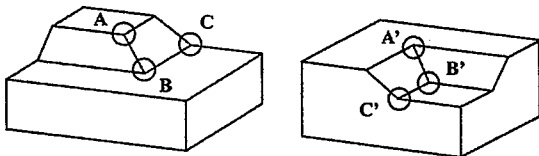
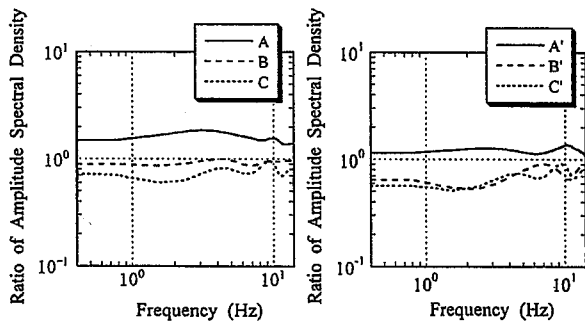


図-16 フーリエスペクトル比の比較

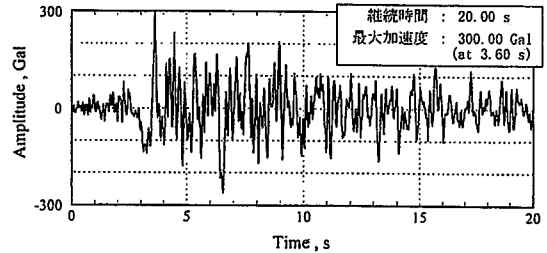
(3) 斜面の安定性評価

凸台地形，凹台地形の両者について最も危険なすべり面の探索を行い，安全率の算定を行った。比較のため2次元解析も行い安全率の算定を行った。2次元モデルは3次元斜面の最急勾配方向断面と一致するように設定した。入力波はTAFT波(EW成分)を最大加速度300galに調整したものを用いた。水平動の加振方向はすべり面パラメータとともにGAによって最も危険な方向を探索した。上下動も考慮することとし，水平動と同じ波形を最大加速度200galに調整したものを用いた。図-17に入力地震動の加速度時刻歴，フーリエスペクトルを示す。物性値は斜面法尻より上部と下部で2層に分けて設定した。検討に用いた物性値をまとめて表-2に示す。

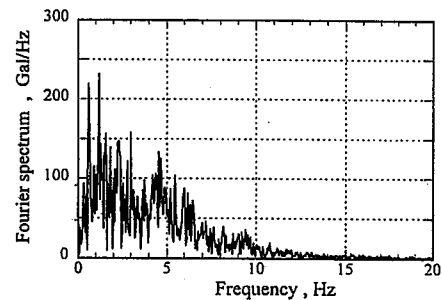
すべり面を楕円球と仮定して最も危険なすべり面の探索を遺伝的アルゴリズムを用いて行った。あわせて最も危険な加振方向，すべり方向も探索した。探索を行ったパラメータは以下の9個である。

x, y, z : 楕円球の中心座標, a, b, c : 楕円球の径の長さ
 θz : 楕円球のz軸回りの回転角, $\theta 1$: すべり方向,
 $\theta 2$: 加振方向

人口，等，遺伝的アルゴリズムに関わる各パラメータはこれまでと同様である。



(a) 加速度時刻歴波形



(b) フーリエスペクトル

図-17 入力地震動(TAFT波)

表-2 解析用地盤物性値一覧

<変形特性>				
	単位体積重量 (kN/m ³)	ポアソン比	せん断波速度 (m/sec)	せん断弾性係数 (MPa)
上部	17.8	0.48	337.6	210
下部	16.8	0.45	499.4	427

*) 減衰定数は一律3.0%とした

<強度特性>

	粘着力 (kPa)	内部摩擦角 (deg.)	引張強度 (kPa)
上部	98.1	38.6	0.0
下部	1500	0.0	222

凸台地形について求められた最も危険なすべり面を図-18, 19に示す。図-18はすべり面境界が3次元モデルの境界に接しないように制限を設けた場合，図-19は制限を設けていない場合のすべり面である。当然のことながら制限がない場合の方が安全率が小さく2.20，制限を設けた場合は2.38であった。2次元モデルについても同様にして最も危険なすべり線を遺伝的アルゴリズム用いて探索した。すべり線は楕円で表されるとした。その結果，求められた安全率は2.14であった。3次元の検討で制限を設けていない場合には加振方向，すべり方向ともに最急勾配方向を向いており2次元状態に近いすべり面が最も危険なことを示している。一方，何らかの理由で斜面奥行き方向にすべり面が大きくなれない場合には図-18に示すように滑り土塊も複雑な形状となり，危険なすべり方向，加振方向も最急勾配方向とは一致しなくなる。その場合にも加振方向とすべり方向はほぼ一致している。強度特性の与え方を変えた場合，斜

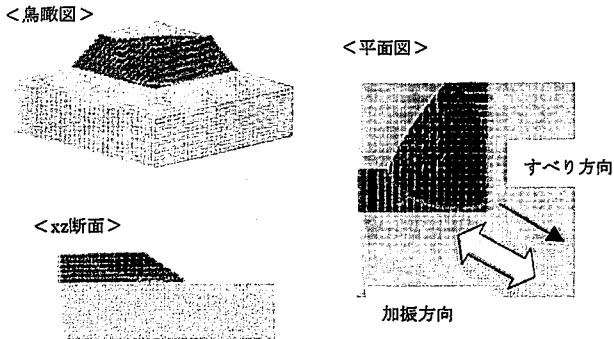


図-18 最も危険なすべり面(凸台地形：制限あり)

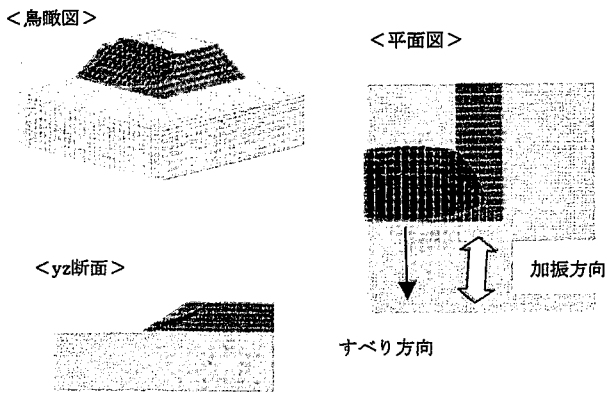


図-19 最も危険なすべり面(凸台地形：制限なし)

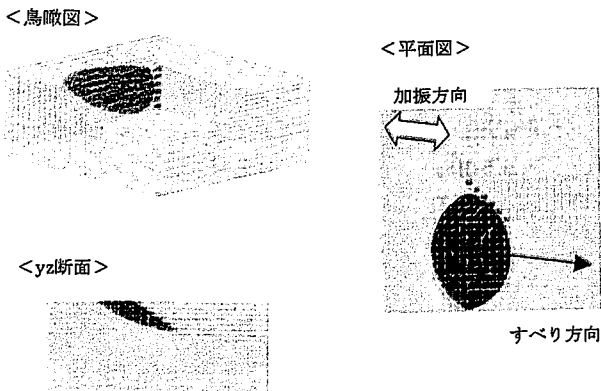


図-20 最も危険なすべり面(凹台地形：制限あり)

面の大きさを変えた場合、等、多くのケースの検討を行ったが、こうした傾向は共通に見られた。

凹台地形についても同様の条件で検討を行った。求められたすべり面を図-20に示す。すべり面にモデルの境界に接しないように制限を設けているにもかかわらず、すべり方向、加振方向は斜面の最急勾配方向とほぼ一致している。これは凸台地形と異なり凹台地形では隅角部で応答が押さえられているため、隅角部を避けるようにすべり面が生じていると解釈できる。算定された安全率は2.60であり、凸台地形の安全率よりも大きくなっている。

5. おわりに

本研究では3次元動的FEM解析に基づくすべり安全率算定手法について検討を行い、いくつかの斜面を対象とした計算例について報告を行った。今回行った検討の範囲内では凸台地形も含めて、3

次元解析による安全率は高くなることが示された。すなわち、従来の2次元解析による安定性評価は安全側にあることになる。こうした3次元効果は山体形状などの3次元形状や断層の有無、等、様々な条件で異なるため、全ての斜面で2次元解析による評価が安全側であると結論することはできないが、多くの斜面では3次元性を考慮することによって安全率が大きくなることが予想される。

各種耐震設計において設計地震動は増大する傾向にあり、より現実には合理的な評価手法が求められるようになってきている。3次元効果を考慮した安全性評価もそうした合理的評価のためのひとつの観点であり、近年の計算機能力の飛躍的向上を考えると近い将来重要な評価方法となると考えられる。本手法の実地盤への適用に当たっては地質を3次元的に把握する必要があり、そのための地盤調査法やクリッキング等の3次元物性値分布推定方法の研究が必要であろう。また、安定性評価そのものについては2つの方向での研究を考えている。ひとつはより簡易に3次元効果を考えた安定性評価を行うための、3次元極限平衡法とGAの組み合わせによる評価手法の開発であり、もうひとつはより詳細な評価のための動的弾塑性解析に基づく評価手法の開発である。

参考文献

- 1) 松島 篤; 太田秀樹; 大森晃治. 不連続岩体の三次元安定解析. 第30回土質工学研究発表会. 1995, p.1799-1802.
- 2) 永野太一; 三浦均也; 高原利幸. 湾曲した粘性土斜面の低部破壊を考慮した3次元安定解析. 第34回地盤工学会研究発表会. 1999, p.2177-2178.
- 3) 財団法人日本電気協会. 原子力発電所耐震設計指針. 1987.
- 4) 三浦房紀; 沖中宏志. 仮想仕事の原理に基づく粘性境界を用いた三次元構造物-地盤系の動的解析手法. 土木学会論文集. 第404号/I-11, 1989, p.395-404.
- 5) 若井明彦; 鶴飼恵三. 残留変形量を予測するための弾塑性地震応答解析. 地盤工学会誌. 第47巻, 第6号別冊, 1999, p.21-24.
- 6) 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.
- 7) 古田 均; 杉本博之. 遺伝アルゴリズムの構造工学への応用. 森北出版. 1997.
- 8) 小林重信; 小野 功. 進化型計算に基づくシステム最適化. 計測と制御. 35-7, 1996, p.508-513.
- 9) Yoshida, I. Comparison of Real Coded GA (Genetic Algorithm) and Binary Coded GA. International Conference on Monte Carlo Simulation (MCS2000). 2000, p.81-87.

ABSTRACT

In order to evaluate the stability of slope in consideration of the 3-D effect of geographical feature, the stability evaluation methodology based on the 3-D dynamic FEM analysis has been developed the stability evaluation methodology based on the 3-D dynamic FEM analysis. In this methodology, the genetic algorithm is employed in order to shorten calculation time in search of the critical slide surface that has minimum safety factor. According to the results of the examinations, the safety factors based on 3-D analysis are larger than those based on 2-D analysis. This result suggests us that the evaluation based on the conventional 2-D analysis be conservative.