

非線形性を考慮に入れた斜面の地震時挙動と安定性

三浦 房紀*・中川 浩二*・池田 敏之**

Dynamic Analyses of Nonlinear Behavior and Stability of a Slope during Strong Ground Motions

Fusanori MIURA, Koji NAKAGAWA and Toshiyuki IKEDA

Abstract

This study aims to examine dynamic behavior and dynamic stability of a slope during strong earthquake motions. Nonlinear finite element method is employed in this study. The effect of vertical excitation on the dynamic response of the slope was investigated first. It was clarified that the vertical excitation did not affect the horizontal acceleration, velocity, displacement and the vertical displacement. Then, material nonlinearity of soil was introduced to examine the effect of the nonlinearity on the response of the slope. The soil was assumed to be elasto-perfect plastic body here. The nonlinearity decreased response acceleration and increased response displacement. Response velocity was not affected by the nonlinearity. Finally, stability of the slope under the seismic load was examined. Safety factors against sliding obtained from the dynamic stresses in the slope were compared with those from conventional method, i.e., the Bishop's method. The safety factor obtained from the static method was lower than that from the dynamic analysis. This means that the actual slope would be safe even when the value from the static analysis is the value critical from sliding to take place.

1. まえがき

地震時の斜面崩壊による被害は、人的被害および物的被害に大別され、前者は最近の地域開発による丘陵地域の人口急増に伴い高い死傷率となる傾向にある。後者においても、丘陵地域への人口の進出に伴い、住宅、工場、その他の施設、地中のライフライン系埋設管、交通網の被害が急増している。従って、斜面の動特性を十分把握した上で、その安定性を評価し、有効な安全対策を講ずることは極めて重要である。そのためにも、合理的な斜面の動的安定解析法の開発が強く望まれている。

そのような解析手法として有限要素法の適用があげられる。安江ら¹⁾、岩崎ら²⁾、そして土岐ら³⁾は有限要素法を用いて実在斜面の地震応答解析を行い、慣用法との安定性の比較検討を試みている。渡辺ら⁴⁾は、非線形有限要素法により、斜面の動的な安定評価法を提

案している。また、土岐ら^{5, 6)}はジョイント要素を導入した非線形解析を用いて実在斜面の進行性破壊のシミュレーションおよび安定性の評価を試みている。

本研究では土岐らが解析の対象とした実在斜面の地震応答解析を行い、地盤の材料非線形性および上下動が斜面の応答に及ぼす影響を調べる。さらに、安定性に対して、従来の円弧すべり面法による結果と動的有限要素法による結果との比較検討を行う。

2. 斜面の地震応答特性

2.1 解析対象斜面および解析手法

解析の対象としたのは実在の斜面であり、その概要はFig. 1に示す通りである⁷⁾。斜面の基盤岩は粘板岩でその上方は風化しており、さらにその上に盛土が存在する。斜面の上側、下側には構造物が存在するが、法尻には石積みがあるのみで、斜面が崩壊した場合には両構造物への被害が懸念される。Fig. 1には詳細なボーリング調査ならびにP S検層の結果による地盤構成および弾性波速度が併せて示してある。また、土質

* 建設工学科

** 佐藤工業株式会社

試験により求めた材料定数をTable 1 に示す。

解析に用いた有限要素網を Fig. 2 に示す。図中A-B-Cは基盤に固着している構造物に接していることから、この線上の節点および基盤に接しているC-D線上の節点の変位は水平、鉛直両方向固定とした。すなわち、線A-B-C-Dから加速度を入力することになる。ここで用いる入力地震波は、El Centro NS,UD成分(Imperial Valley 地震, 1940), Jet Propulsion Laboratory (以下, J.P.L.と略記する) S82E, UD成分 (San Fernando 地震, 1971) の2種類であり、解析に際しては振幅のみを変化させて用いる。

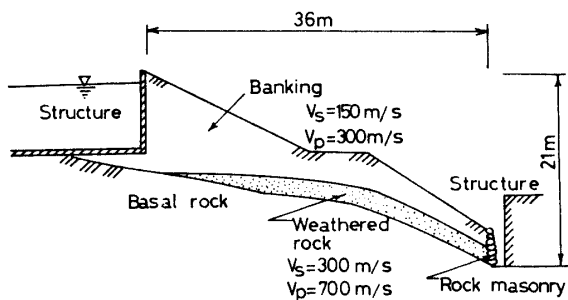


Fig. 1 A cross-section of the slope analyzed.

Table 1 Material constants of the slope.

	Unit Weight γ (tf/m^3)	Shear Wave Velocity V_s (m/sec)	Poisson's ratio	Cohesion C (kgf/cm^2)	Angle of internal friction ϕ (degree)
Embankment	1.6	150	0.4	0.1	29°
Weathered rock	1.9	300	0.4	0.1	45°

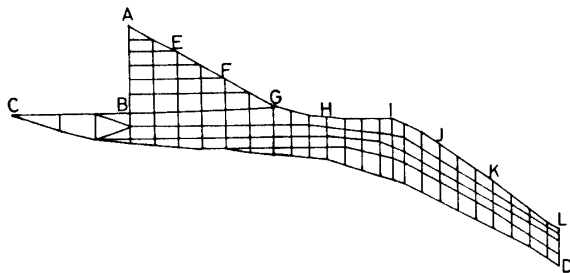


Fig. 2 Finite element mesh of the model slope.

地盤は弾性一完全塑性体と仮定して材料非線形性を導入している。降伏条件として Mohr-Coulomb の破壊規準を用いる。このように非線形性を取扱うので地震応答解析は Newmark の β 法 ($\beta = 1/4$) を用いて時間領域で行い、非線形の取扱いは荷重伝達法により処理している。荷重伝達法によれば、非線形動的解析が極めて効率的に行われることが確かめられている⁸⁾。なお、時間刻みは0.002秒で5000ステップ、すなわち10秒間の応答解析を行うこととした。減衰はRayleigh

減衰で与えることとし(ただし、剛性マトリクスにのみ比例)、斜面の1次の固有振動数に対して10%を仮定した。当然のことながら、地盤が非線形挙動を呈す際には、履歴減衰がこれに加わることになる。解析手法は文献(8)に詳しいので具体的解析手順についてはこれを参照されたい。

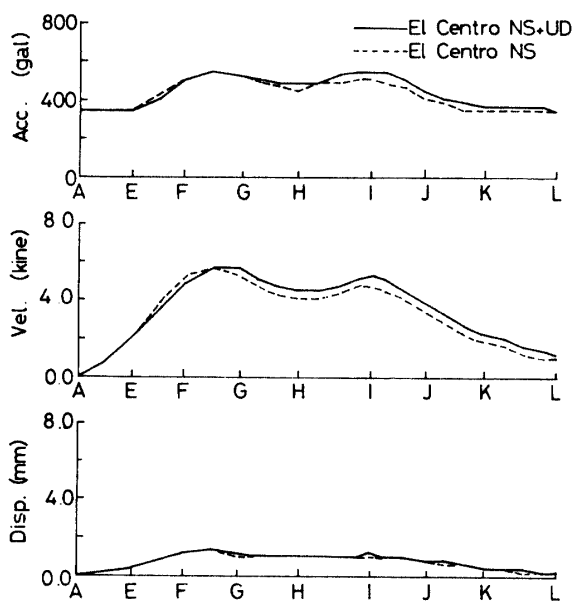
2.2 入力上下動が斜面の最大応答量に及ぼす影響

水平成分のみ入力した際の斜面表面の最大応答量の分布と水平・鉛直両成分を同時入力した際のそれを Fig. 3(a), (b), Fig. 4(a), (b)に示す。Fig. 3はEl Centro波形, Fig. 4はJ. P. L.波形に対する応答であり、図(a)は水平方向、図(b)は鉛直方向の応答である。加速度は絶対加速度であり、速度、変位は基盤に対する相対量である。図中、横軸のA~LはFig. 2に示してある地表面上の各点を意味する。これらの図から明らかのように、水平方向の応答には入力鉛直動はほとんど影響を及ぼさないことがわかる。また、鉛直方向の応答であっても、変位応答は速度応答に比較して鉛直動入力の影響を受けにくいようである。なお、ここでは材料非線形性は考慮しておらず、加速度記録は無修正で入力した。すなわち、El Centro NS, UD, J. P. L. S82E, UD 4成分の最大加速度はそれぞれ342, 206, 208, 126galである。

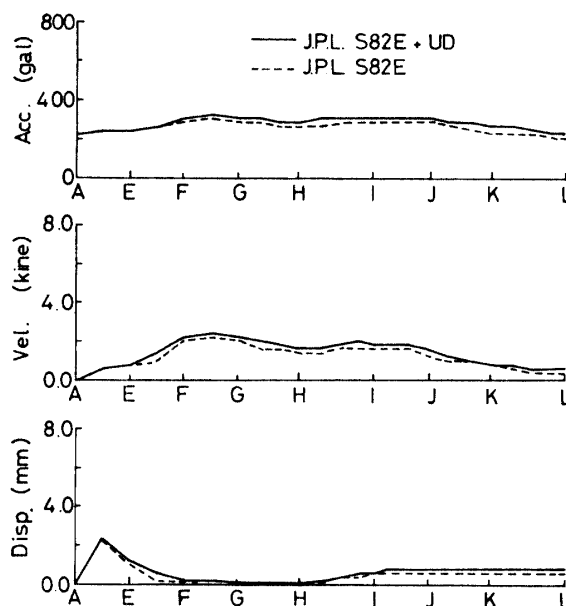
2.3 地盤の非線形性が斜面の応答に及ぼす影響

地盤を線形弾性体と仮定した場合と非線形性を考慮した場合の最大応答量の比較をFig. 5(a), (b), Fig. 6(a), (b), Fig. 7(a), (b)に示す。Fig. 5はEl Centro NS, UD両成分を、Fig. 6はJ. P. L. S82E, UD両成分を原波形のまま入力した際の応答であり、Fig. 7はEl Centro NS成分の振幅を510galに、UD成分もNS成分と同じ割合で増幅して入力した際の応答である。図(a)は水平応答、図(b)は鉛直応答であり、図中実線は線形解析結果、破線は非線形解析結果である。また、Fig. 8, 9はEl Centro波形の振幅を変化させたときの線形(L)と非線形の水平最大応答量(N)の比L/Nを示したものであり、Fig. 8は点F、Fig. 9は点Jのそれである。なお、横軸は入力水平加速度の最大振幅である。これらの図より以下のことが判る。

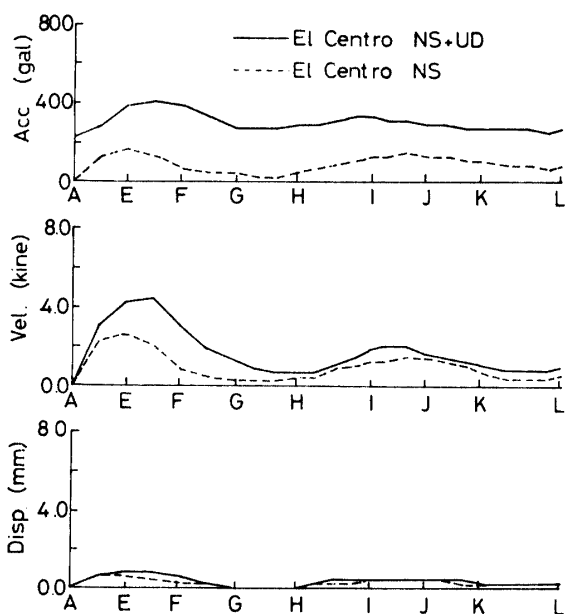
まず、水平加速度応答に関しては、点F~J間において材料非線形性の影響が大きく、入力振幅が大きくなるに従って線形解析結果に比較して応答量が低下している。一方、鉛直方向に関しては、入力振幅が510



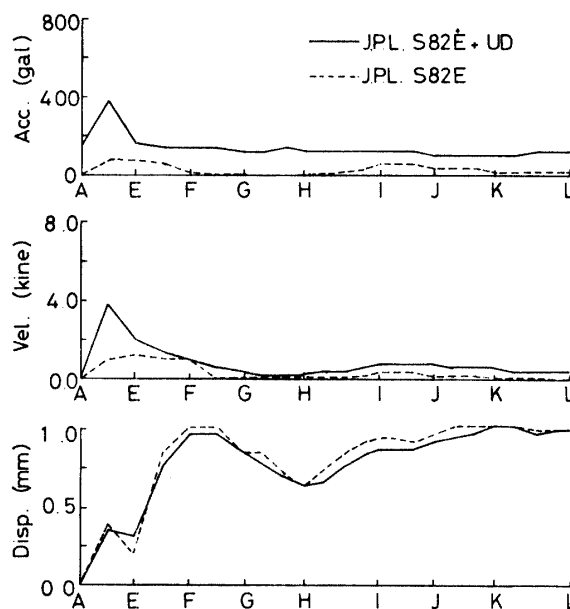
(a) Horizontal component.



(a) Horizontal component.



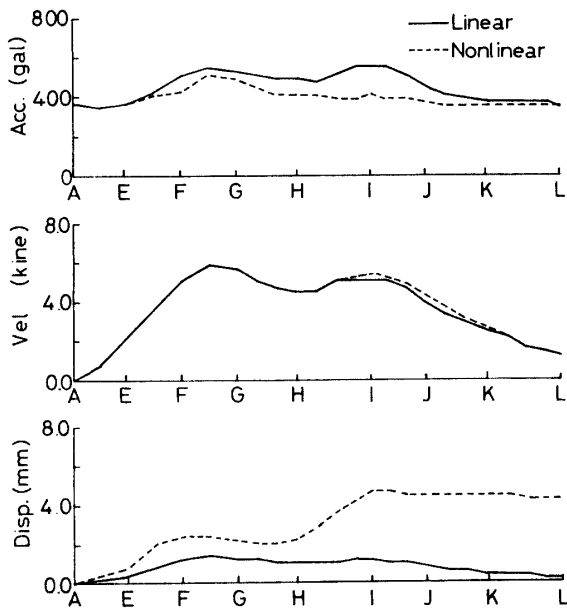
(b) Vertical component.



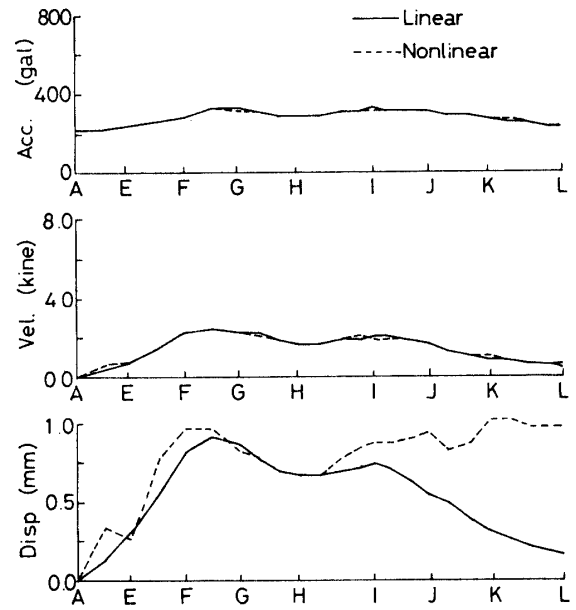
(b) Vertical component.

Fig. 3 The effect of vertical excitation on the maximum response acceleration, velocity and displacement (El Centro accelerograms).

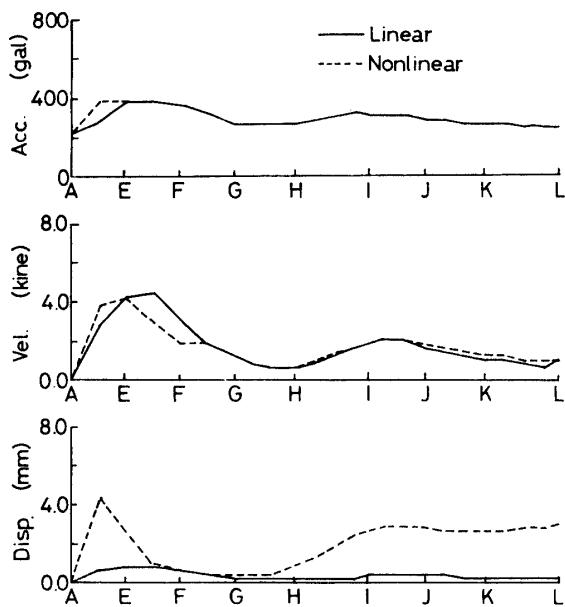
Fig. 4 The effect of vertical excitation on the maximum response acceleration, velocity and displacement (J. P. L. accelerograms).



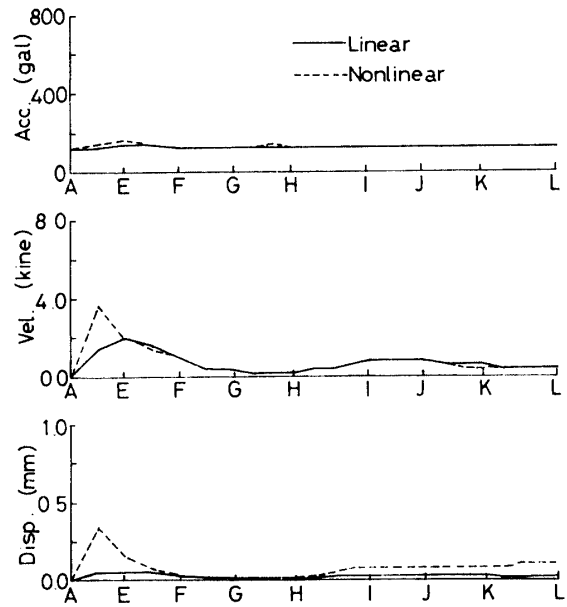
(a) Horizontal component.



(a) Horizontal component.



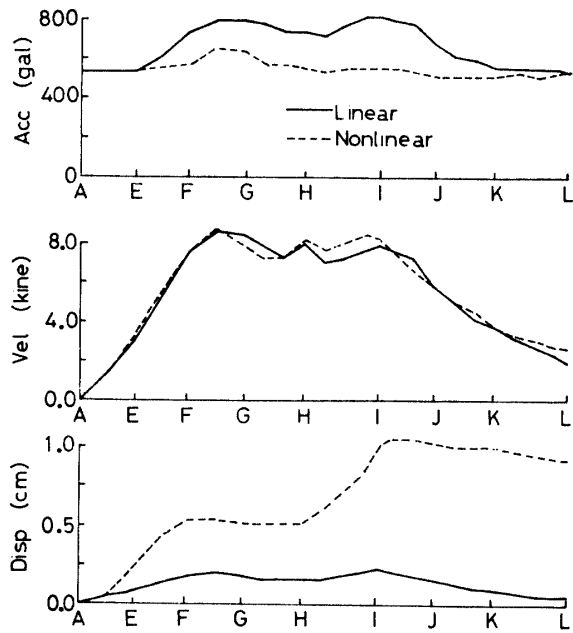
(b) Vertical component.



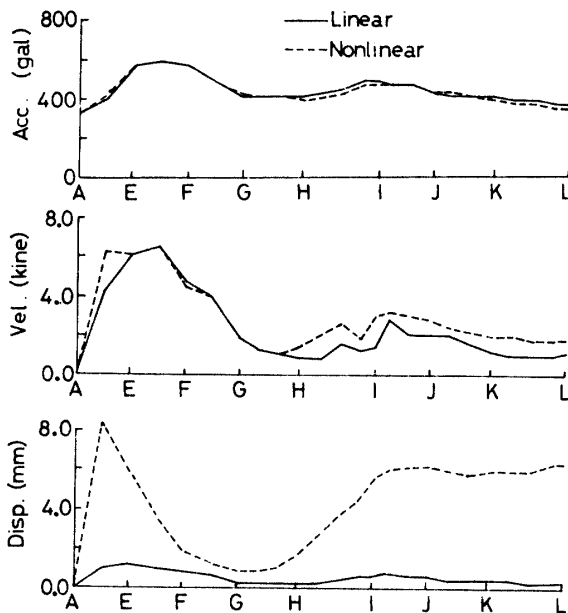
(b) Vertical component.

Fig. 5 The effect of material nonlinearity of soil on the maximum response acceleration, velocity and displacement (El Centro NS; 342 gal, UD; 206 gal).

Fig. 6 The effect of material nonlinearity of soil on the maximum response acceleration, velocity and displacement (J. P. L. S82E; 208 gal, UD; 126 gal).



(a) Horizontal component.



(b) Vertical component.

Fig. 7 The effect of material nonlinearity of soil on the maximum response acceleration, velocity and displacement (El Centro NS; 510 gal, UD; 307 gal).

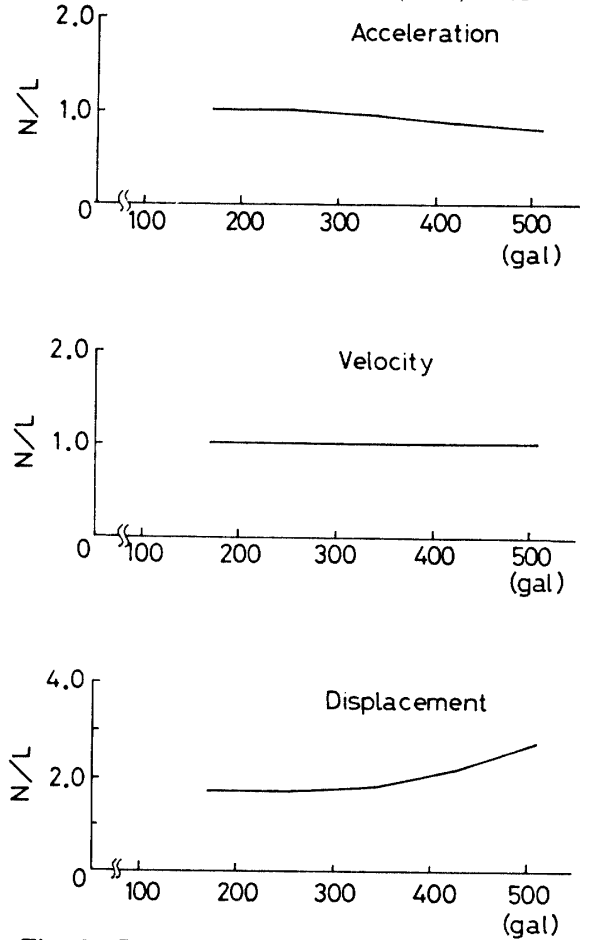


Fig. 8 Change of the ratio of the maximum responses obtained from nonlinear analyses to those from linear ones with the amplitude of excitation (Point F, El Centro accelerograms excitation).

galと大きくなってもほとんどその影響は現われていない。

次に、速度応答に関しては、水平・鉛直両成分ともあまり材料非線形性の影響を受けていない。

水平変位に関しては、E点のあたりから徐々に両解析手法の間に差が生じ始め、I点の近傍から顕著な差が生じ、材料非線形性によって大きな変位が生じている。鉛直方向は2ヶ所材料非線形性の影響の大きい箇所があり、これらはいずれも斜面勾配の急な場所に一致している。なお、I点から右方の大きい変位の生じている領域は、斜面の右下方への残留変形によるものであることが別途変位の時刻歴から確認されている。

3. 斜面の動的安定性の評価

3.1 解析手法

前章で用いた斜面の有限要素モデルに対して非線形

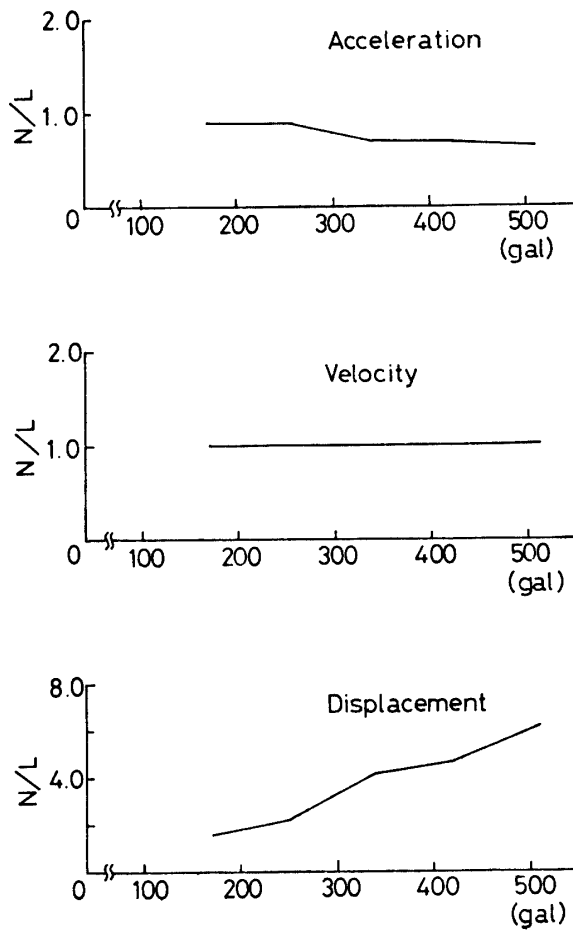


Fig. 9 Change of the ratio of the maximum responses obtained from nonlinear analyses to those from linear ones with the amplitude of excitation (Point J, El Centro accelerograms excitation).

地震応答解析を行う。そして、このとき降伏した領域を調べ、これが最も広範にわたる時刻を選び、その前後の時刻における潜在すべり線を決定する。ここに言う潜在すべり線とは渡辺らによって定義された潜在すべり線⁹⁾の概念を拡張したもので降伏領域を包絡するように決定された円弧である。すなわち、この潜在すべり線は動的荷重下におけるある瞬間のすべり線と考えることができる。こうして潜在すべり線が決定されたら、これによって包絡されるすべり土塊の各節点の応答加速度を用いて次式で定義される等価瞬間震度 $k_H(t)^9$ を求める。

$$k_H(t) = \frac{\iint_D \rho(x, y) \alpha(x, y, t) dx dy}{g \iint_D \rho(x, y) dx dy} \quad (1)$$

ここに、 $\rho(x, y)$ はすべり土塊の密度、 $\alpha(x, y, t)$ はすべ

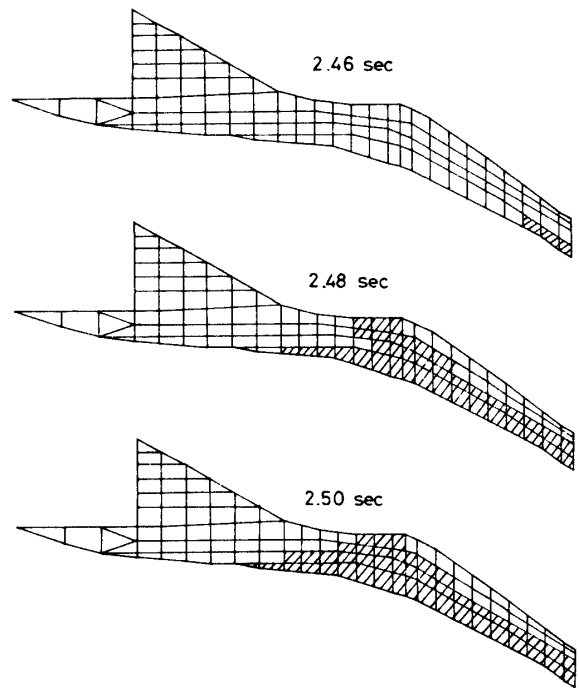


Fig. 10 Change of shear failure zone with time.

り土塊の各節点の時刻 t における水平方向の応答加速度である。また、 g は重力加速度であり D は潜在すべり線より上にある土塊の領域である。

本章では、この等価瞬間震度を用いて地震時の安定性を評価し、慣用法の一種である Bishop 法との対応関係を明らかにする。

3.2 解析結果

El Centro 波形の振幅を修正して潜在すべり線および等価瞬間震度を求めた。Fig. 10 は NS, UD 両成分の最大加速度をそれぞれ 257gal, 155gal に修正して入力した際の 2.46~2.50 秒における降伏領域を示したものであり、2.48 秒における降伏領域を参考にして決定した潜在すべり線を Fig. 11 に示す。Fig. 11 には仮定した 2 本のすべり線が示してある。厳密に言えば、入力レベルに応じて降伏領域は変化するから、潜在すべり線もそれに応じて変化するわけであるが、本研究では簡単のため Fig. 11 に示した 2 本のすべり線につ

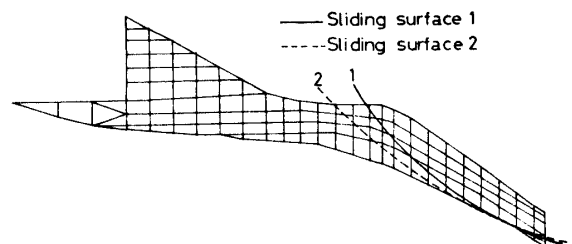


Fig. 11 Sliding surfaces used to estimate safety factors by the Bishop's method.

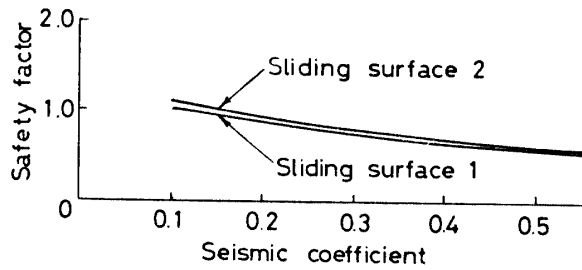


Fig. 12 Safety factors obtained from the Bishop's method for sliding surfaces 1 and 2.

Table 2 Equivalent seismic coefficient at each moment for various excitation levels.

Amplitude of horizontal input acceleration	Time	2.46(s)	2.48	2.50
171 (gal)		0.096	0.140	0.120
257		0.135	0.165	0.147
342		0.194	0.246	0.224
428		0.239	0.292	0.274
513		0.280	0.335	0.323

いて以下の考察を行うこととした。

Fig. 11のすべり面1, 2に対してBishop法を用いて求めた安全率をFig. 12に示す。これよりすべり面1の方が安全率は低く、安全率が1.0となる限界の水平震度は0.1である。一方、このすべり面に対して求めた等価瞬間震度をTable 2に示す。ここで、すべり面1を決めた水平入力振幅257galの2.48秒における等価瞬間震度をみると0.165である。(振幅171galの場合には降伏領域は狭くなるので、すべり面1に沿う安全率は1以上となっており、逆に振幅が257galより大きい場合にはすべり面1の安全率は1以下となっているので、振幅257gal, 2.48秒以外の等価瞬間震度とBishop法による結果とは直接比較はできない)。すなわち、静的に求めたBishop法による限界震度は0.1に対して、動的に求めたそれは0.165で65%動的に求めた震度が大きくなっている。このような結果は、すべり面にジョイント要素を配して動的なすべりに対する安全性を検討した土岐ら⁶⁾も指摘しているところである。このように、Bishop法等の震度法に立脚したすべり安定計算は安全率を低く評価する可能性のあることがわかる。

4. 結 論

本研究は、地震時における斜面の安定性を評価する

ために、非線形有限要素法による実在斜面の地震応答解析を行い、斜面の動的応答特性を調べた後、慣用法の一種であるBishop法と動的安定解析により斜面のすべりに対する安全性について比較検討したものである。本研究で得られた主な成果は以下の通りである。

- (1) 鉛直入力成分は水平応答量にはほとんど影響を及ぼさない。
- (2) 地盤の材料非線形性は、応答加速度を低下させ、応答変位を増大する。この傾向は斜面の急な箇所ほど強く現われる。
- (3) Bishop法と動的解析により、すべりに対する安全率が1.0となる限界震度を求めた結果、動的に求めた方がBishop法に求めたものより65%高いものであった。すなわち、震度法に立脚した静的な安定性評価法は安全率を低く見積もる可能性がある。

また、今後の検討課題としては、進行性破壊のシミュレーション解析、および土中水を考慮に入れた動的安定解析があげられる。

なお、本研究の解析は、京都大学防災研究所、耐震基礎部門で開発された非線形地震応答解析プログラム7 S-IIを用いて行った。

参 考 文 献

- 1) 安江朝光・岩崎敏男・川島一彦・仲野公章：斜面の地震応答特性の解析，土木技術資料，23-4, 21-26 (1981)。
- 2) 岩崎敏男・川島一彦：斜面の耐震性の解析，土木技術資料，24-3, 3-8 (1982)。
- 3) 土岐憲三・三浦房紀・中山基隆：斜面の地震時挙動と安全性の評価，土木学会昭和58年度関西支部年次学術講演会，1-28, (1983)。
- 4) 渡辺啓行・馬場恭平：フィルダムの動的解析に基づくすべり安定評価法の一考察，大ダム，No. 97, 1-14 (1981)。
- 5) 土岐憲三・三浦房紀・小国嘉之：地震時における斜面の安定解析，第6回日本地震工学シンポジウム論文集，681-688 (1982)。
- 6) K. Toki, F. Miura and Y. Oguni: Estimation of the Dynamic Stability of a Slope during Strong Earthquake Motions, Proc. 8th WCEE, Vol. III, 429-436 (1984)。
- 7) 京都市水道局・大阪土質試験所：浄水施設地震対策調査(その2)，1981。
- 8) 土岐憲三・三浦房紀：地盤-構造物系の非線形地震応答解析，土木学会論文報告集，No. 317, 61-68, (1982)。
- 9) 渡辺啓行・馬場恭平・平田和太：フィルダムの動的解析に基づくすべり安定評価手法の一考察，電力中央研究所研究報告，No. 381020, (1981)。

(昭和59年10月15日受理)