

(35) 地震時斜面安定性に関する考察

(財) 電力中央研究所 正員 O伊藤 洋 日比野 敏  
埼玉大学工学部 正員 渡辺 啓行

1. はじめに.

原子力発電所等の重要構造物に隣接する周辺斜面の安定性、特に地震時の安定性の評価が最近の重要な問題の一つであるが、現在、最も一般に使われている慣用設計法は震度法に基づく円弧すべり面法である。しかし、厳密で、しかも高い耐震性の評価が要求される場合には、この設計法が地震時の現象を正確に把握し、導入したものでないため、適切な設計法とはいえない。しかも、現行の設計では、設計荷重としての地震力を、設計基準地震動の最大加速度振幅と設計震度と等しいとしているが、これは実際の荷重条件としての地震力を過大評価しているものと考えられ、慣用設計法で得られる安全率は実際の現象に対してかなり余裕を持った値であるものと予測される。したがって、設計震度と時刻歴としての地震動との関係を明確にしておくことが慣用設計法を今後適用してゆくうえでの重要な課題の一つである。一方、地震時の挙動の特性を正確に把握するための検討方法の一つに、動的応答解析が上げられるが、慣用法で用いる入力条件(荷重、物性値、初期条件など)、安全率などと、動的解析のこれらの量との対応や相関性が実証されていないため、動的解析法による評価が静的解析法に比べて、一般に理解され難いものと思われる。そのためには同一基準の下で動的解析と慣用設計法との比較検討を行ない、動的挙動に対応する両者の評価結果のもつ意味を明らかにすることまた一つの大きな課題である。以上のような観点から、本報告は斜面の地震時安定性に関する研究の一環として、斜面の破壊に至るまでの挙動や破壊現象を、静的および動的な手法に基づく統一的な模型実験と数値解析により把握するために図-1に示す研究のフローに示したが、で検討し、斜面の地震時安定性評価法確立のための資料を得ることである。

2. 斜面の破壊現象の実験的解明

設計上考慮すべき斜面の荷重条件に対し、斜面がどのような挙動や破壊パターンとするかを把握するために、①、震度法を模擬した斜面の静的な傾斜破壊実験; ②、大型振動台を利用した模型斜面の振動破壊実験、を行なった。ここでは、これら二つの実験結果の概要を述べる。なお、両者の実験材料は、洪積砂の擾乱材料であり、密度( $\rho_s=1.4\text{g/cm}^3$ )、含水比( $w=14\%$ )を調整して用いた。

(1). 破壊過程の比較 図-2は傾斜実験の結果である。図に示すように、斜面ののり勾配がゆるい程、斜面の破壊が始まる傾斜角は大きくなるが、2割勾配以上になると斜面の破壊時傾斜角はほとんど変化しない。

また、天端幅の違いは破壊時傾斜角に影響しない。しかも、破壊に至るまでのフラックやすべり面の発生様式にはのり面勾配の違いによる差がほとんど認められなかった。すなわち、斜面傾斜角 $33\sim34^\circ$ (換算水平震度 $K_H=\sin\theta; 0.54\sim0.56$ )前後まで外見上変化がなく安定しており、傾斜角 $35\sim37^\circ$ ( $K_H=0.57\sim0.60$ )付近で傾斜側のり尻および天端等にテンションクラックが発生し、徐々に斜面内部にせん断によるすべり線が形成され、傾斜角 $38\sim39^\circ$ ( $K_H=0.62\sim0.63$ )で進行性破壊現象的な全体破壊とする。一方、振動破壊実験の場合、水平応答加速度、のり面上の鉛直応答加速度、応答土圧、斜面内部ひずみなどの各種物理量の応答は破壊直前までほとんど変化がなく、破壊時に急激に増大す

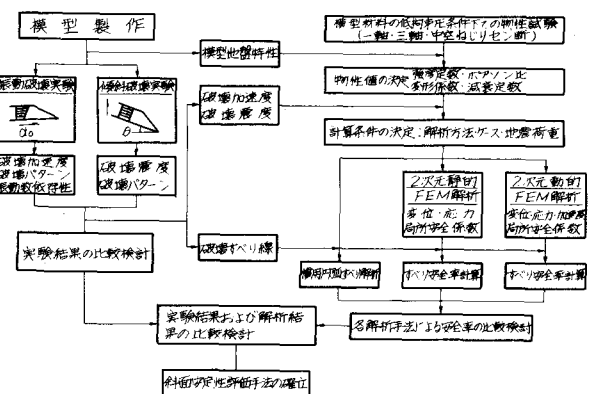


図-1. 大規模斜面の地震時安定性に関する研究のフロー

る。なお、図-3に示すように、斜面破壊時の地動加速度は振動数に依存し、100~400 gal の値であるが、天端応答水平加速度は若干ばらついていて、ものの共振振動数(約15 Hz)の場合とほとんど変わらず、約1000 gal とほぼ一定であった。以上のように、5~25 Hzの振動実験では1000 gal 規模の応答加速度が生じないかぎり、外見上、斜面は安定であるのに対し、傾斜実験では換算水平対応震度  $K_H=1.0$  を対応加速度980 gal と仮定した場合、633~643 gal で斜面は崩壊することを意味している。

(2). 破壊形状の比較 図-4に示すように、斜面の破壊形態は傾斜実験と振動実験とで顕著な相違が認められる。すなわち、傾斜実験では吊り上げ側斜面ののり肩付近と傾斜側ののり尻を結ぶ深い円筒状の全体破壊の形態を示し、のり肩部の小崩壊はしない。振動実験では斜面軸方向に沿う多くのクラックがのり肩周辺に集中して発生し、のり肩のみの小崩壊の形態を示す。ただし、振動数により破壊パターンはかなり異なり、低振動数の破壊は脆性的ですべり位置がやや深く、崩壊土量も多いが、共振時(15 Hz)の破壊はのり肩のゆっくりにした、クラックの多い小さな崩壊であり、高次の振動数ではクラックが高さ1/2付近の中腹部から発生し、徐々に上部に伝播してのり肩から崩壊する。

以上、(1)、(2)項で述べたことから、現在、斜面の安定性の検討で一般に行なっている基準地震動の最大加速度振幅を静的震度に換算し、これを地震力として円弧すべり面法等の静的評価法で検討することは、基準地震動の地震波の波形を入力する動的応答評価法に比べて、現象的にも過酷な評価であることが、総合的な条件での検討から実証された。

### 3. 斜面の地震時安定評価法とその考察

斜面のより合理的な地震時安定性評価手法の確立を目的として、模型斜面の振動破壊実験、傾斜破壊実験の他に、これら実験と模擬した慣用円弧すべり解析、二次元静的FEM解析、二次元動的FEM解析などの数値シミュレーションを行なった。ただし、これらの得られた結果の詳細等は文献(3, 4)を参照してもらうこととし、本報告では安定性の評価法について述べる。

(1). 安定性評価法 斜面の安定性を評価する際に用いる一般的な評価項目としては、すべり安全率と局所安全係数とがある。しかしながら、各種解析法で得られた結果は、荷重条件がおおの異なるため、お互いの相互関係が明確でなく、その評価項目の総合的な評価ができない。そこで、評価の際の物性値、荷重条件を同一基準の下で考える必要があり、その対応関係を明確にす

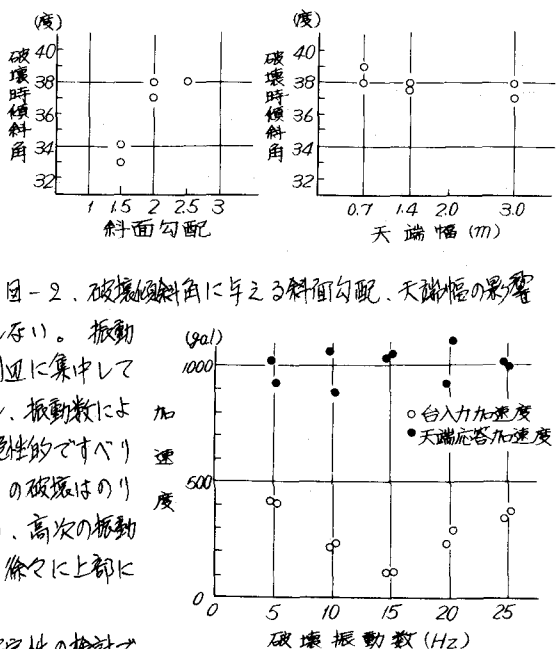


図-2. 破壊傾斜角に与える斜面勾配、天端幅の影響

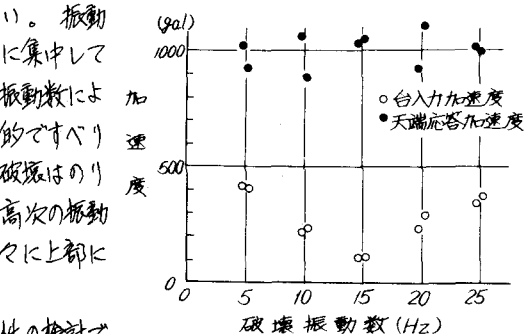


図-3. 破壊振動数と破壊時加速度

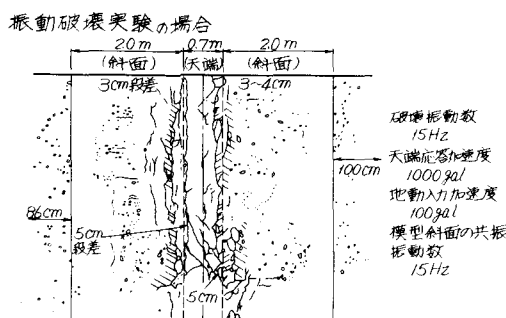
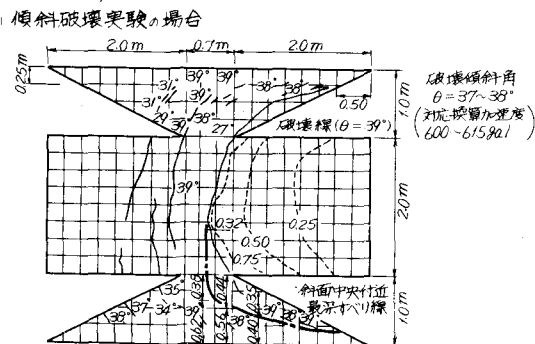


図-4. 傾斜破壊実験と振動破壊実験の破壊形態の比較

る方法として、等価瞬間加速度<sup>7)</sup>と地中震度(等価震度)<sup>6)</sup>の概念が提案されている。前者は解析で得られる応答加速度から時刻歴に応じてすべり線上の土塊に作用する慣性力の総和と等しい慣性力を土塊の加速度で表わしたもので、後者は地震時に生じる地盤内のせん断力と等価な静的外力として表わすもので、応答解析で得られる動的せん断力の時刻歴の最大値の分布から求める。本報告では、斜面形状、非線形特性が著しいことなどを考慮し、等価瞬間加速度の概念により、以下の項では検討、ならびに考察を行なった。

(2) 等価瞬間加速度の概念の適用例 表-1は前述の振動破壊実験の動的FEM解析結果を用いて、設定した各すべり線ごとに求めた最小すべり安全率とすべり線ごとの最大等価瞬間加速度の算定結果を示したものである。また、図-5には表-1に示すすべり線の円形No.5のすべり安全率と、円形すべり面法、静的FEM解析による結果と等価瞬間加速度による結果とを比較して示した。これらの結果から、各すべり線ごとの最大等価瞬間加速度はいずれの振動数の場合でも、表層の浅い円形ほど大きい値を示し、深い円形ほど小さい値となっている。すなわち、高さ、および土塊体積による影響が考えられる。一方、等価瞬間鉛直加速度は高次の振動数ほど鉛直成分が卓越し、振動数の違いによる振動モードの違いの影響がこの挙動に認められる。なお、各種評価法相互の結果の対応関係や解釈については次項で述べる。

(3) 各種算定評価手法による結果の相互比較と地震力の評価

前述したように、振動破壊実験が極めて大きな地動入力加速度の条件下で行なわれたにもかかわらず、のり肩表層付近の局部的な浅い崩落であるのに対し、震度法を模擬した傾斜実験は深い円形状のすべり面を有する全体破壊であることから、地震時の振動による斜面の崩壊は弱面等がなかりが、必ずしも大きな土塊の滑動とならないことを示唆している。一方、数値解析では、同一のすべり線を対象としたすべり安全率の大小関係は、表-1、図-5に示すように、(円形すべり面法) < (静的FEM解析) < (動的応答解析) となる。このような傾向の原因として、動的評価と静的評価に対しては、荷重の作用方向とその継続時間の差であり、円形すべり面法と静的FEM解析では、土塊要素の取り扱い(剛体が弾性体か)による差、すなわち、円形すべり面法では、剛体スライズ要素のため、応力の分散が考慮されず、静的FEM解析よりも過大な力がすべり面に作用することになり、すべり安全率が低下し、厳しい評価になるものと考えらる。

一方、表-2~4は各種の安定性評価法の結果の相互関係を、同一荷重条件下で行なうため、等価瞬間加速度の概念を用いて考察しようと試みたものである。表-2は前述した一連の実験と解析で評価した例であり、表-3は乾燥した震源砂を用いて著者が行なった実験と解析評価例である。さらに、表-4は実際の茨城地盤からなる斜面を対象に行なった解析評価例である。これらの表に示めされるように

表-1 最小すべり安全率および最大等価瞬間加速度

| ケース<br>(振動数) | 円形番号 | すべり安全率       |  | 等価瞬間加速度         |                 |
|--------------|------|--------------|--|-----------------|-----------------|
|              |      | S.F. min     |  | 水平 $U_{a \max}$ | 鉛直 $V_{a \max}$ |
| 10 Hz        | 1    | 4.28 (6/8)   |  | 430 gal (2/8)   | 49 gal (6.5/8)  |
|              | 2    | 3.61 (6/8)   |  | 405 (2/8)       | 9 (6.5/8)       |
|              | 3    | 3.26 (6/8)   |  | 391 (2/8)       | 10 (2.5/8)      |
|              | 4    | 2.02 (6/8)   |  | 387 (2/8)       | 9 (2.5/8)       |
|              | 5    | 1.88 (6/8)   |  | 351 (2/8)       | 7 (2.5/8)       |
| 15 Hz        | 1    | 2.97 (0.5/8) |  | 666 (4.5/8)     | 15 (5/8)        |
|              | 2    | 3.06 (0.5/8) |  | 544 (4.5/8)     | 33 (5/8)        |
|              | 3    | 2.96 (0.5/8) |  | 473 (4.5/8)     | 34 (5/8)        |
|              | 4    | 2.03 (8/8)   |  | 377 (4.5/8)     | 28 (5/8)        |
|              | 5    | 1.89 (8/8)   |  | 333 (4.5/8)     | 20 (5/8)        |
| 25 Hz        | 1    | 3.20 (4.5/8) |  | 426 (0/8)       | 473 (7.5/8)     |
|              | 2    | 2.93 (1.5/8) |  | 450 (5.5/8)     | 322 (7.5/8)     |
|              | 3    | 3.06 (1.5/8) |  | 361 (5.5/8)     | 243 (7.5/8)     |
|              | 4    | 2.35 (8/8)   |  | 259 (4.5/8)     | 182 (7.5/8)     |
|              | 5    | 2.63 (8/8)   |  | 157 (8/8)       | 100 (7.5/8)     |

・円形番号5は静的解析と同じ円形

・( )内は発生位相(振動)

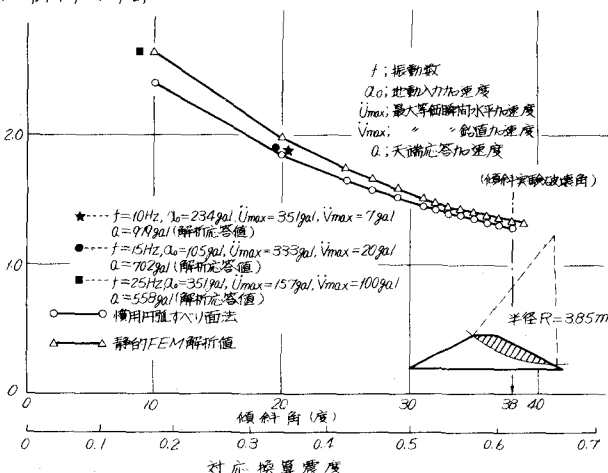
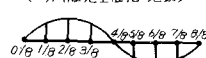


図-5 すべり安全率と各種評価法の対応関係

、実際の斜面の場合、等価瞬間加速度から求めた対応換算震度（等価瞬間加速度/重力加速度）と静的評価法で用いる震度との間に若干の差はあるが、動的解析の最小すべり安全率は、その瞬間でのすべり面の土塊の等価瞬間加速度から求めた対応換算震度を静的評価法の地震力である震度として与えた場合のすべり安全率とほぼ等しく、地動入力加速度の最大振幅を震度として与えた静的評価法の値よりも小さい。このことは、任意のすべり面上の土塊に同一震度（荷重）を与えれば、静的・動的各解析法と問わず、同一の安全率が得られ、両者の差は土塊の応答特性に伴う等価瞬間加速度の大小によって生じることと意味するものと考えらる。

以上の観点から、従来の静的評価法は動的評価法に比べて、過酷な評価手法であり、中でも従来から用いられている慣用円弧すべり面法が最も厳しい評価手法であるといえる。また、静的評価法では地震時の安定性を評価する際の地震力として、従来から地動入力加速度の最大振幅を震度として一様に与えて検討しているが、これは実際の応答現象としての地震力を過大評価していることになり、静的解析で動的解析と同一の荷重条件の下で安定性を評価するためには、すべり面上の土塊に働く等価瞬間加速度を静的な地震力の震度として与え、安全率を評価すればよいものと考えらる。

表-2. 振動破壊実験と各種評価法との対応関係(その-1)

| 振動破壊実験     |               |                |        |          |                 |         | 傾斜破壊実験**** |          |             |
|------------|---------------|----------------|--------|----------|-----------------|---------|------------|----------|-------------|
| 模型実験       |               |                |        | 動的評価法    |                 |         | 静的評価法      |          |             |
| 破壊振動数 (Hz) | 地動入力加速度 (gal) | 地動入力最大振幅 (gal) | 対応換算震度 | 最小すべり安全率 | 最大等価瞬間加速度 (gal) | 傾斜角 (度) | 対応換算すべり安全率 | 円弧すべり安全率 | 静的円弧すべり安全率  |
| 10         | 235           | 1012           | 1032   | 188      | 351             | 7       |            |          |             |
| 15         | 105           | 1027           | 1048   | 189      | 333             | 20      | 22         | 0.37     | 1.76 (1.52) |
| 25         | 351           | 998            | 1018   | 263      | 157             | 100     |            |          | 1.89 (1.71) |

\* 応答加速度を重力加速度で割った場合の地震力  $K_H$  の大きさ  
 $K_H = \sin \theta$ ;  $\theta$  は傾斜角を表わす。  
 \*\*\* ( ) 内の安全率はデモンストラティブな値  
 \*\*\*\* 傾斜破壊実験による破壊傾斜角  $\theta_f = 38^\circ$



#### 4. あとがき

本報告では、斜面の地震時の安定性評価のための一連の実験的・解析的検討により、斜面の挙動や破壊現象を把握するとともに、各種解析手法の統一的な評価法と各種手法で得られる結果の相互比較、動的荷重と静的荷重の大きさの持つ意味、存亡について考察を行ない、設計法の標準化のための有益な資料を与えたものと考えらる。最後に、本研究を進めるにあたり、御示唆、御協力といただいた当研究所地盤研究室関係各位に感謝の意を表します。

#### 参考文献

- 1) 伊藤、他; 電力中央研究所研究報告、381030
- 2) 渡辺、他; 電力中央研究所研究報告、380531
- 3) 伊藤、他; 電力中央研究所研究報告、382021
- 4) 伊藤、他; 電力中央研究所研究報告、382022
- 5) 渡辺、他; 大ダム、No. 97, 1981年、または電力中央研究所研究報告、381020
- 6) T. OKABE, etc; 1981, Proc. Int. Sym. on Weak Rock / Tokyo, Vol. 2, pp. 1241-1244.

表-1. 振動および傾斜破壊実験と各種評価法との対応関係(その-2)

|          |          | 動的評価法          |               |               |              |              |                 |         | 静的評価法   |         |         |
|----------|----------|----------------|---------------|---------------|--------------|--------------|-----------------|---------|---------|---------|---------|
|          |          | 振動破壊実験         |               |               |              | 動的FEM等価線形解析法 |                 |         | 傾斜破壊実験  |         |         |
| 対象すべり面形状 | 振動数 (Hz) | 振動台入力加速度 (gal) | 斜面基底加速度 (gal) | 斜面土体加速度 (gal) | 対地最大振幅 (gal) | 最小すべり安全率     | 最大等価瞬間加速度 (gal) | 傾斜角 (度) | 傾斜角 (度) | 傾斜角 (度) | 傾斜角 (度) |
| 円弧 No. 1 | 100      | 160~235        | 162~205       | 162~205       | 0.65         | 3.36         | 177             | 0.201   | 2.71    | 3.42    |         |
|          | 150      | 210~290        | 210~250       | 210~250       | 0.74         | 3.18         | 226             | 0.250   | 2.56    | 3.23    | 9       |
|          | 200      | 270~350        | 270~310       | 270~310       | 0.86         | 3.14         | 286             | 0.285   | 2.45    | 3.10    | 10      |
|          | 350      | 350~450        | 350~400       | 350~400       | 1.00         |              |                 |         |         |         | 0.174   |
| 円弧 No. 2 | 100      | 160~235        | 160~205       | 160~205       | 0.63         | 1.28         | 213             | 0.201   | 1.34    | 1.33    |         |
|          | 150      | 210~290        | 210~250       | 210~250       | 0.74         | 1.22         | 260             | 0.250   | 1.26    | 1.26    | 11      |
|          | 200      | 270~350        | 270~310       | 270~310       | 0.86         | 1.23         | 279             | 0.285   | 1.21    | 1.21    |         |
|          | 350      | 350~450        | 350~400       | 350~400       | 1.00         |              |                 |         |         |         | 0.191   |

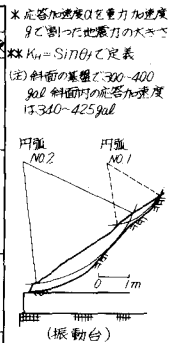
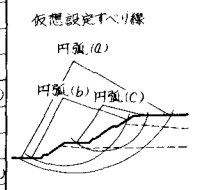


表-4. すべり安全率と各種評価法との相互関係

|        | 地震力の種類     | 安全率  | 動的FEM等価線形解析法           |           |         |               | 静的評価法   |         |
|--------|------------|------|------------------------|-----------|---------|---------------|---------|---------|
|        |            |      | 斜面の円弧すべり線の内定最大振幅 (gal) | 傾斜角 (度)   | 傾斜角 (度) | 傾斜角 (度)       | 傾斜角 (度) | 傾斜角 (度) |
| 円弧 (a) | $K_H$      | 1.54 | 500                    | 371       | 0.378   | 0.315         |         |         |
|        |            | 1.42 | 720                    | 379       | 0.387   | 0.360         |         |         |
|        | $K_H, K_V$ | 1.58 | 510                    | 328 (65)  | 0.335   | 0.30 (0.15)   |         |         |
|        |            | 1.24 | 610                    | 382 (73)  | 0.390   | 0.43 (0.215)  |         |         |
| 円弧 (b) | $K_H$      | 2.16 | 500                    | 367       | 0.374   | 0.277         |         |         |
|        |            | 1.64 | 720                    | 526       | 0.537   | 0.460         |         |         |
|        | $K_H, K_V$ | 1.95 | 500                    | 429 (37)  | 0.438   | 0.38 (0.19)   |         |         |
|        |            | 1.56 | 600                    | 511 (369) | 0.521   | 0.51 (0.255)  |         |         |
| 円弧 (c) | $K_H$      | 2.22 | 500                    | 380       | 0.388   | 0.245         |         |         |
|        |            | 1.74 | 700                    | 513       | 0.523   | 0.425         |         |         |
|        | $K_H, K_V$ | 1.97 | 500                    | 426 (102) | 0.435   | 0.404 (0.252) |         |         |
|        |            | 1.61 | 700                    | 506 (183) | 0.516   | 0.504 (0.252) |         |         |



(35) Some Consideration on the Seismic Stability of Large Slopes  
Surrounding the Nuclear Power Plant

Hiroshi ITO and Satoshi HIBINO  
Central Research Institute of  
Electric Power Industry

Toshiyuki WATANABE  
Saitama University

Abstract

As a series of the research on the seismic stabilities of a large scale slope surrounding the nuclear power plant, large model tests in the laboratory and those numerical simulations, and analysis of stability evaluation method are conducted and following discussions are done.

- 1) Comparison between the mechanical behaviours obtained by the static failure test(that is, inclination test) and dynamic failure test using the large shaking table.
- 2) Relation between an equivalent seismic coefficient obtained by static test and acceleration by dynamic test.
- 3) Correlation between static stability evaluation method(conventional circular arc slip method, static non-linear F.E. analysis) and dynamic one(2-dimensional dynamic F.E. analysis).

Several results on above mentioned investigation are summarized as follow.

- 1) Patterns of dynamic failure and static failure of slope are considerably different. That is, it is evident that sliding surfaces of failure in static tests are considerably deep whereas the failed parts are limited only to subsurface at the top in all dynamic test.
- 2) The results of numerical simulation by static and dynamic analysis concerning the mechanical properties of material and the failure mode are qualitatively corresponded with the behaviour of model test.
- 3) From the results of static and dynamic stability analysis, it is concluded that the conventional circular arc slip method gives the severest evaluation for slope stability.
- 4) It is proposed that the seismic coefficient for static slope stability analysis should be used the value of the equivalent instant acceleration.