

(49) 模型土質斜面の振動破壊実験とその数値解

埼玉大学 正会員 渡辺 啓行
電源開発(株) 正会員 五月女 敦

1. はじめに

盛土、フィルダムおよび自然斜面の耐震性評価のため、動的解析に基づいた耐震設計の新しい概念とその具体的手法が最近いくつか提案されている。例えば、土構造物に対して動的解析と材料試験から地震動による累積ひずみ量を予測し、これに相当する剛性の低下量を導入した静的解析により地震時沈下量を求め、その限界量との比較に基づいて地震時安定性を評価する手法¹⁾²⁾³⁾⁴⁾がある。また、著者達の一人は、ロックフィルダムに対してニューマークの概念に基づき、潜在すべり土塊の逐次すべり変形量を動的解析によって予測し、その限界量との比較に基づいて地震時安定性を評価する手法⁵⁾⁶⁾⁷⁾を提案した。

上記後者の手法では、連続体とした数値モデルに等価線形解析を適用するものであり、厳密には、土塊が一度すべり出すと、堤体からの慣性力はすべり面の強度以上には土塊に伝達されない筈であるので、土塊の慣性力を過大に評価している可能性がある⁸⁾。本論文では、上記連続体の等価線形数値モデルの動的応答挙動とジョイント要素を用いてすべりと剥離の不連続性を導入した数値モデルの動的応答挙動とを比較することにより上述した手法の誤差の程度を検討すると同時に、模型盛土の振動破壊実験を上記両数値モデルによってどの程度の精度でシミュレートできるかを検討するものである。

2. 模型実験の概要

模型斜面に用いた材料は、ある発電所地点において採取した洪積砂を自然乾燥した後含水比を調整したもので⁹⁾、日本統一分類法による粘土質砂SCである。物理特性は、真比重2.65、液性限界25.1%、塑性限界18.9%、最適含水比16.2%、最大乾燥密度 1.715g/cm^3 である。模型の平均間隙比は1.1、平均含水比は14%であり、これに対する強度は、低拘束圧三軸圧縮試験結果にゴムスリーブの影響を除く配慮を行った結果、内部摩擦角 $\phi=36^\circ$ 、粘着力 $c=12.7\text{gf/cm}^2$ が得られている。後述する動的破壊解析において材料の降伏値としてこれらが用いられる。模型材料の動的定数は、外径100mm、内径60mm、高さ100mmの中空円筒供試体について低拘束圧下の動的ねじりせん断試験を行い、次式のように求められている。

$$G = 950 \cdot \frac{(2.17 - e)^2}{1 + e} \cdot (\sigma_m^t)^{0.525} \cdot \frac{1}{1 + \sqrt{2.69 \times 10^{-4}}} \dots (1)$$

$$h = 0.14 \cdot \frac{\gamma}{\gamma + 2.69 \times 10^{-4}} \dots (2)$$

ここで報告する実験結果は、高さ1m、天端幅0.7m、斜面勾配1:2の対称断面を持つ盛土を振動台に固定した鋼製実験槽内に8層に分けて締め固めたものを四種の振動台加速度振幅で共振実験を行った後、振動数を固定して振動台加速度を20galピッチで段階的に増加して模型を破壊させた実験のものである。実験槽の内法寸法は、幅4.5m、長さ10m、高さ2mである。共振振動数は、台加速度が25~100galの範囲で20~14Hzに変動した。三種類の振動数における破壊パターンを図-1に示す。共振よりかなり低い振動数では、天端のみが一挙に崩落するが、共振付近では天端付近にクラックが入り、そこから小さい土塊がこぼれ落ちるだけである。高い振動数では、クラックが斜面下方に多く発生し、共振と類似の破壊状況を示す。破壊時の応答加速度分布を図-2に示す。天端付近の分布形状は振動数によらず類似のパターンを示している。

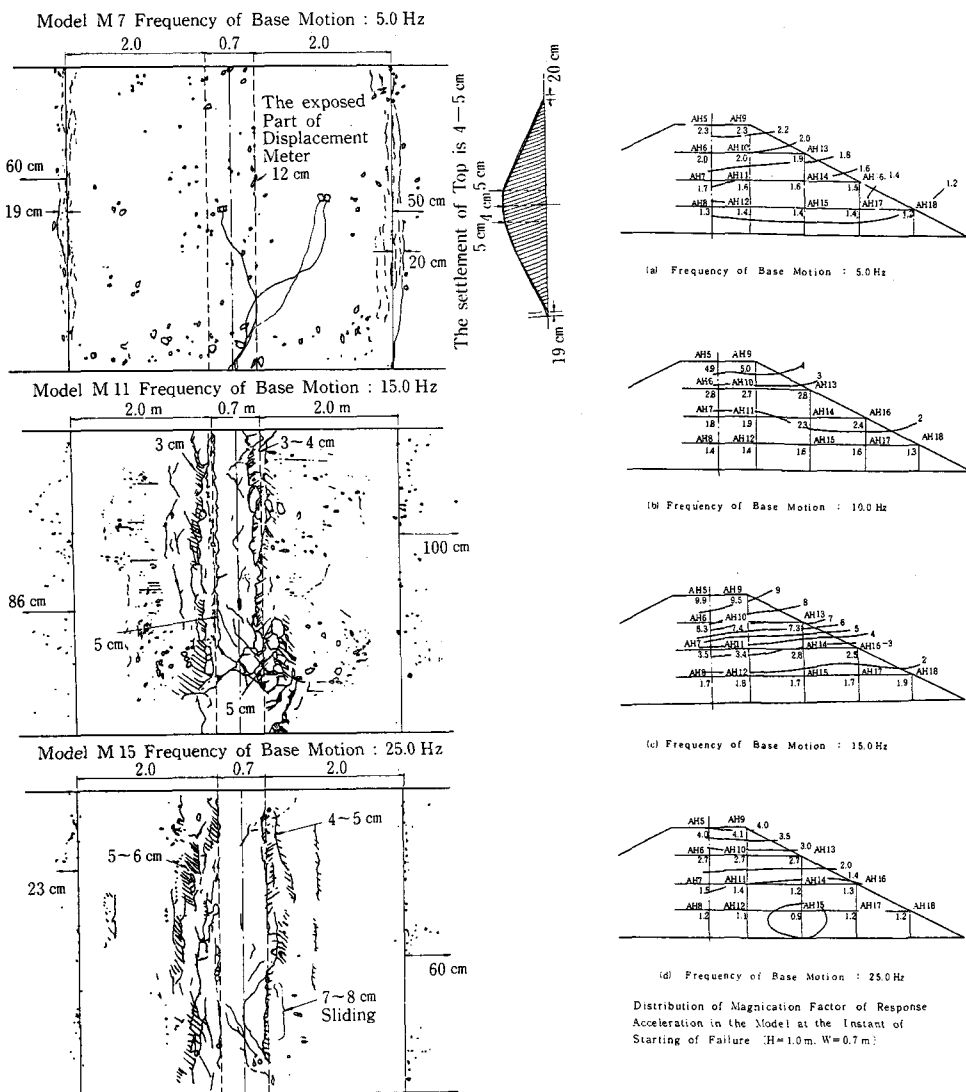


図-1 振動破壊のパターン

3. 共振応答の等価線形シミュレーション
共振曲線の実験結果と等価線形解析結果とを重ねてプロットした例を台加速度25galの場合について図-3に示す。共振振動数が計算値で約10%程度小さい以外は一次共振、二次共振を含めて形状、応答倍率とも良く一致している。図-4には、一次共振振動数、一次と二次の谷間の振動数および二次共振振動数の各々における水平応答加速度倍率の断面

図-2 破壊時の応答加速度分布

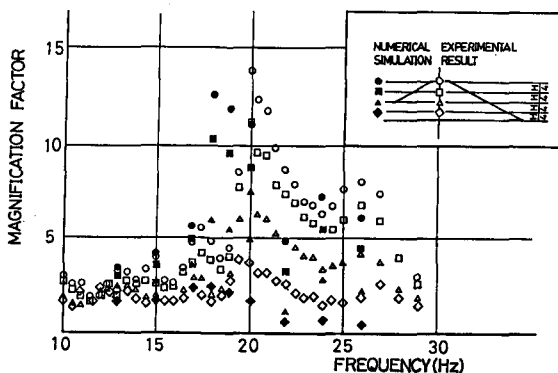


図-3 共振曲線の実験と計算との比較

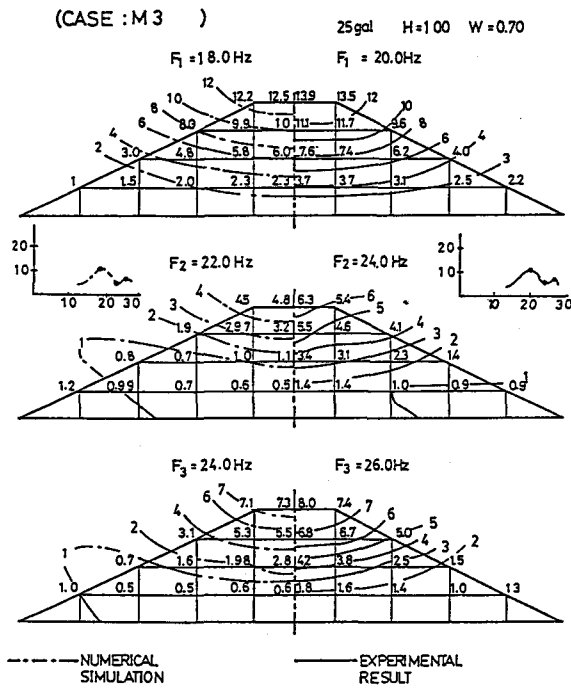


図-4 応答加速度倍率の分布の比較

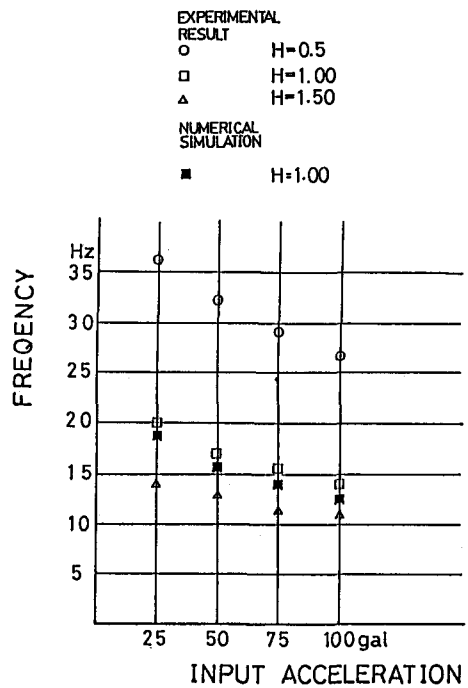


図-5 共振振動数の非線形特性の比較

内分布の実験値と計算値との比較を示す。分布形状、絶対値とも比較的良く一致しているといえる。図-5は、25~100galの台加速度の振幅に対して共振振動数が台加速度の増加につれて低下して行く状況を実験値と計算値について比較したものである。両者の一致は非常に良好であると言える。以上の計算には、(2)式の減衰定数を用いて次式に示すレーリー減衰係数を用いている。また、質量行列には塊状質量と分布質量との平均を用いている。

$$\{c\} = 1.4 \cdot h \cdot \omega_1 \cdot \{m\} + 0.6 \cdot \frac{h}{\omega_1} \cdot \{k\} \quad \dots (3)$$

4. 振動破壊実験のシミュレーション

振動破壊実験は、等価線形解析と有限要素の全ての境界にジョイント要素を配した図-6に示す数値モデルについての非線形解析により行った。ジョイント要素の降伏条件は図-7に示すようにせん断に対してはバイリニア構成関係を与え降伏応力は、前述の強度定数を持つモール・クーロンの基準に従うものとし、剥離に対しては、自重による垂直応力を越える引っ張り応力を限界応力とした。有限要素部分の動的定数は、等価線形解析で収束した動的定数を非線形解析にも与えた。非線形解析における応答変位には時間と共に一方向へ向かう永久変形が計算されるが、応答加速度は等価線形解析とほぼ同じ振幅が計算され、潜在すべり

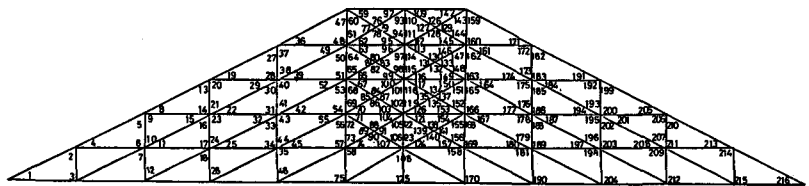


図-6 有限要素とジョイント要素から成る離散化モデル

が部分的に不連続となっても応答加速度の評価は等価線形解析によって十分高精度の評価が可能であることを示唆しているように思われる。図-8には、等価線形解析による動的破壊時の変形とモビライズドプレーンの向きの分布の例を示すが、これらを連ねて得られる潜在すべりが天端近傍の第一層にしか発生して居らず実験結果との一致が認められると考えられる。図-9には、同一条件での非線形解析による降伏状態と変形状態を示す。破壊による不連続状況は実験結果の破壊領域と良く一致し、この領域は、等価線形解析結果とも良く一致している。これらの一致は他の振動数の結果にも認められ、等価線形解析による永久変形評価の妥当性を示しているものと解釈できる。

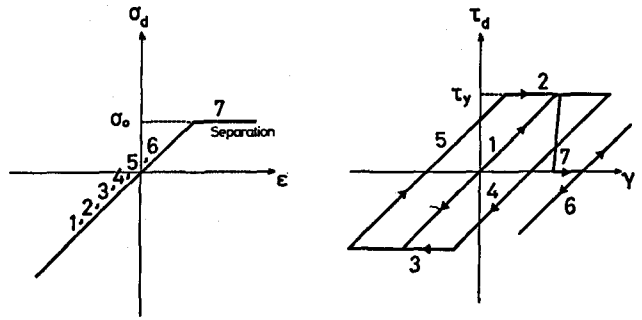


図-7 降伏構成関係

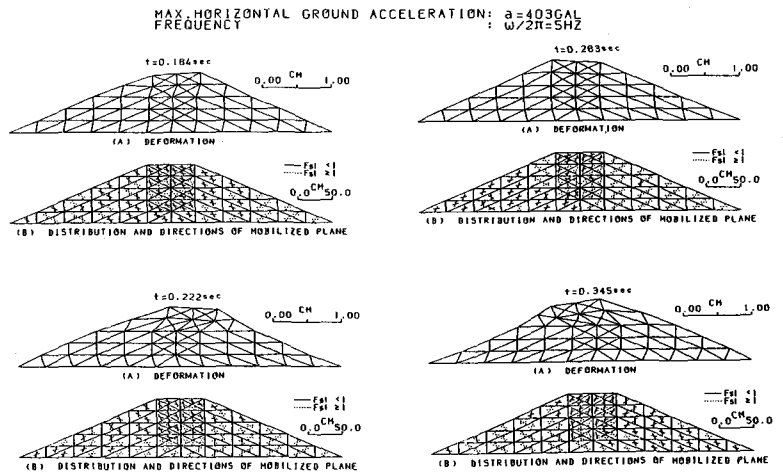


図-8 等価線形解析による変形とモビライズド面の分布

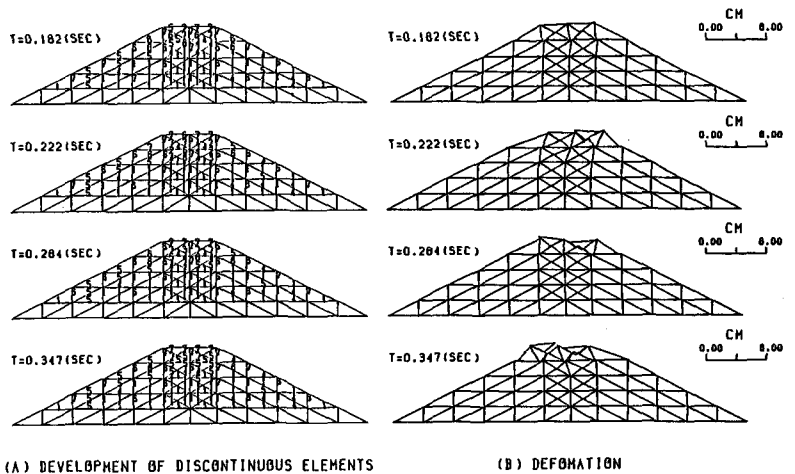


図-9 非線形解析による変形とすべり・剥離状況

参考文献

1) Seed, H. B., Lee, K. L., Idriss, I. M. and Makdisi, F., Analysis of the slides in the San Fernando Dams during the earthquake of February 9, 1971, EERC 73-2 Univ. Calif., 1973.
 2) Nakamura, K. et al., Proc 17th JNC SMFE, 1982, pp. 1889
 3) Taniguchi, E., Whitman, R. and Marr, W. E., Soils and Foundation, Vol. 23, No. 4, Dec., 1987.
 4) Seed, H. B., the Rankine Lecture 1979, Geotechnique 29, No. 3, 1979, pp. 215.
 5) Baba, K. and Watanabe, H. Trans. 13th ICOLD, New Dehli, Vol II, pp. 1049, 1970. 6) Watanabe, H. and Baba, K., Large Dams, No. 97, 1981
 7) Watanabe, H. et al., Soils and Foundations, Vol. 24, No. 3, 1984, pp. 1. 8) ibid. 7), Vol. 25, No. 4, 1985, pp. 143. 9) Watanabe, H. and Saotome, Proc. JSCE, No. 376/III-6, Dec. 1986, pp. 31.