

# 斜面上の直接基礎の地震時変位量予測

戸田建設(株) 正会員 菅野 靖幸  
愛媛大学大学院 正会員 ○岡村 未対  
愛媛大学大学院 学生会員 古川 直樹

## 1. はじめに

近年の基礎の設計は、性能設計へと移行しており、そこでは基礎の設計の基づいた設計が行われる。従って、変位量の評価法が重要となる。そこで、本研究では支持力曲面、変位ポテンシャル面を用いた斜面上の基礎構造物の地震時変位量予測法の検討を行った。

## 2. 振動台実験

実験で用いた試料は乾燥した豊浦砂で、空中落下法により相対密度  $Dr=85(\%)$  の密な地盤を作成し、高さ約 20cm の  $30^\circ$  の斜面を作成した。土槽は、幅 900mm×高さ 600mm×奥行 200mm である。模型構造物は底面幅  $B=40\text{mm}$ ×長さ  $L=200\text{mm}$  でアクリル板と真鍮板からなり、これらを組み合わせて作成した。表 1 に示す質量と重心高さが異なる 4 種類の構造物の実験を行った。構造物の変位量と加速度はレーザー変位計と加速度計を図 5 のように取り付け測定し、同時に地盤と振動台の加速度も測定した。加振は約 4 Hz、200gal の正弦波を 3 秒間与えた。

## 3. マクロエレメント法

マクロエレメント法は基礎 - 地盤系をマクロな要素として捉え、支持力曲面と変位ポテンシャル面を用いて基礎の挙動を記述するものであり、剛な基礎の鉛直・水平及び回転変位を同時に求めることができ、変位量予測法に応用されている<sup>1)</sup>。そこでは地盤の荷重-変位関係は剛塑性と仮定し、地盤反力と変位増分方向に関する以下の制約条件を与え、擁壁の運動方程式を解く。本論文における荷重(鉛直荷重  $V$ 、水平荷重  $H$ 、モーメント荷重  $M/B$ )、変位(鉛直変位  $v$ 、水平変位  $h$ 、回転変位  $B\theta$ )は基礎の底面の中央を基準とし、単位の整合を図るため、モーメント荷重は基礎幅  $B$  で除し、回転変位は  $B$  を乗じて表している。

- ① 地盤の支持力曲面は  $F=F(V,H,M/B)=0$  で表される。
- ② 変位増分ベクトルは変位ポテンシャル  $Q$  に直交する。

## 4. 計算の流れ

斜面上の構造物がある時刻  $t$  における外力  $E(t_i)=\{E_v(t_i), E_h(t_i), E_m(t_i)\}$  を受ける場合の変位量計算の流れを述べる。

Step1: 外力が支持力曲面内 ( $F<0$ ) のとき、外力  $E$  と反力  $R$  は釣り合っており、基礎と地盤の相対運動はない ( $E=R$ )。  $F>0$  となるまでこの釣り合いは成り立つ。

Step2: 外力が支持力曲面を越えた ( $F>0$ ) かどうかを調べる。  
 $F>0$  のとき、外力と地盤反力は等しくなく、 $E(t_i)-R(t_i)$  の力によって構造物は加速度運動し、このとき構造物の運動方程式は式(1)~(3)に示す。ここで  $m$  は構造物の質量、 $I$  は基礎底面中心の慣性モーメントである。速度と変位は式(4),(5)の

ように時間で積分することによって求める。地盤反力  $R(t_i)=\{V(t_i), H(t_i), M/B(t_i)\}$  は支持力曲面上にあり、変位ベクトルの方向は変位ポテンシャルから得られたものと、運動方程式から求めた  $\dot{s}(t_i)$  が一致するように決定しなければならないことから、 $R$  は支持力曲面上の一点に定まる。

表 1.実験条件

| 構造物 | 基礎幅(mm) | 質量(kg) | 重心高さ(mm) |
|-----|---------|--------|----------|
| ①   | 40      | 4.87   | 29.4     |
| ②   | 40      | 2.67   | 31.5     |
| ③   | 40      | 4.87   | 37.8     |
| ④   | 40      | 2.67   | 38.5     |

■ 加速度計  
← レーザー変位計

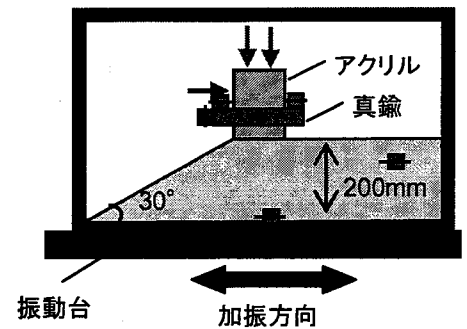
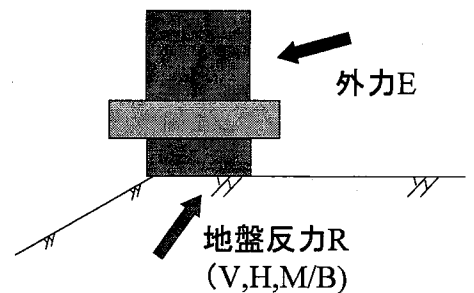


図 1.振動台実験の概



$$\text{鉛直方向} : E_v(t_i) - V(t_i) = m\ddot{v}(t_i) \quad (1)$$

$$\text{水平方向} : E_h(t_i) - H(t_i) = m\ddot{h}(t_i) \quad (2)$$

$$\text{回転方向} : E_m(t_i) - M(t_i) = I\ddot{\theta}(t_i) \quad (3)$$

$$\text{速度} : \dot{s}(t_i) = \int_{t_{i-1}}^{t_i} \ddot{s}(t) dt + \dot{s}(t_{i-1}) \quad (4)$$

$$\text{変位} : s(t_i) = \int_{t_{i-1}}^{t_i} \dot{s}(t) dt + s(t_{i-1}) \quad (5)$$

Step3: 構造物の速度が0になるまで Step2 を繰り返し、速度が0になった後は Step1 に戻る。

ここで、支持力曲面 F 及び変位ポテンシャル面 Q は以下の関数を用いた<sup>2)</sup>。

$$F = \left( \frac{H'}{0.58} \right)^2 + \left( \frac{M'}{B \cdot 0.36} \right)^2 - 4.17 \frac{H'M'}{B} - V' \left( 1 - \frac{V'}{V_{\max}} \right) = 0 \quad (6) \quad V' = \cos \theta_h \cos \theta_m V + \sin \theta_h \cos \theta_m H + \sin \theta_m M / B$$

$$Q = \left( \frac{H'}{0.8} \right)^2 + \left( \frac{M'}{B \cdot 0.55} \right)^2 - V' \left( 1 - \left( \frac{V'}{V_{\max}} \right)^2 \right) = 0 \quad (7) \quad H' = -\sin \theta_h V + \cos \theta_h H$$

$$M' / B = \cos \theta_h \sin \theta_m V + \sin \theta_h \cos \theta_m H + \cos \theta_m M / B$$

ここで  $V', H', M'/B$  は  $V-H-M/B$  の座標系を  $H-V$  面で  $4^\circ$ 、 $M/B-V$  面で  $-3^\circ$  時計周りに回転した荷重軸である。

## 5. 実験結果との比較

図3は基礎底面中心での変位量( $v, h, B\theta$ )の時刻歴であり、実験結果とともに予測結果を示してある。ここで、マクロエレメント法には、変位量によらず式(1)の支持力曲面を用いる剛塑性モデルと、地盤が一旦破壊すると残留強度まで低下する軟化モデルの2つを用いた(図2)。残留時の支持力曲面は式(6)の曲面を1/4.5倍としたものであり、変位ポテンシャル面においても式(7)と相似形であることが支持力実験により確認されているのでこれを用いた。

図3より、軟化モデルは実験結果と比べ変位を大きめに、剛塑性モデルは小さめに評価している。これは実際の荷重-沈下曲線に比べて、これらは両

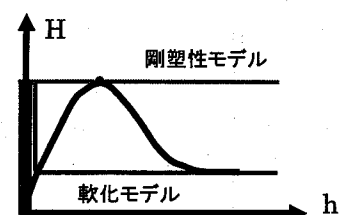


図2. 荷重-変位モデル

極端なためであると考えられるが、本研究では①～④の構造物に対しても同様の結果が得られており、この2つのモデルにより変位量はうまく挟み込むことができている。図4は①～④の構造物について、加速度が200galに達してから4波目までに発生した変位量を示した。実験では構造物の質量と重心高さが大きくなると変位量も大きくなり、予測法においても傾向をうまく捉えている。また、剛塑性モデルと軟化モデルの2つの予測法のいずれもこの傾向をうまく捉えており、いずれのケースでも予測結果が実験結果を挟み込めており、この2種類の予測法で上限と下限を与えることができる。

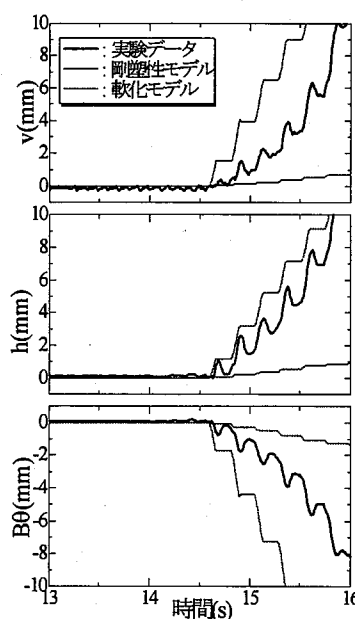


図3. 時刻歴による変位量増加

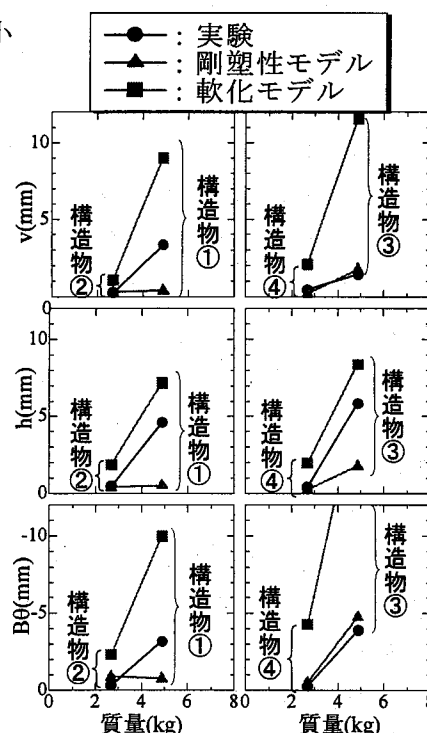


図4. 変位量の構造物比較

## 6. まとめ

本研究は、支持力曲面と変位ポテンシャル面を用いて挙動を記述するものであり、斜面上の剛な基礎の鉛直・水平及び回転変位を同時に求めることができる変位量予測法として発展させた。振動台実験により予測法の妥当性を検討した結果、剛塑性モデルと軟化モデルによりすべての構造物に対して、2つの予測法で変位量をうまく挟み込めており、発生変位量の上限と下限を求めることができている。

参考文献 1) Okamura, M. & Matsuo, O.: Soil and Foundation Vol.42, No.1, pp.131-138, 2002. 2) 菅野ら: 土木学会四国支部 技術研究発表会 (投稿中)