

繰返し載荷を受ける砂地盤の流動変形評価に関する解析法

北海道大学大学院工学研究科 正会員 ○横浜 勝司  
 北海道大学大学院工学研究科 フェロー 三浦 清一

1. はじめに

波浪のような繰返し載荷下の構造物・地盤系の支持力および変形特性は複雑であるが、その安定性の評価は合理的な設計のために重要である。本研究では、一連の有限要素解析および模型試験に基づいて、複雑な繰返し載荷条件下の構造物・地盤系の沈下および側方流動変形挙動に関する評価法を提案している。

2. 解析方法

本研究では2次元平面ひずみ条件の有限要素解析を行った。図-1は有限要素分割を示している。解析範囲は模型試験に対応した長さ2,000mm、深さ400mmである。また構造物の幅および高さは100mmである。これらのサイズは模型試験における地盤および構造物のそれである。なお模型試験では、豊浦標準砂(Dr=50%)の地盤を用いて試験を行っている。

境界条件として、地盤の底面および左右側面では鉛直および水平方向の変位が発生しないように固定端とした。解析に用いた構成モデルには、以下の形式で示される Mohr-Coulomb 型破壊基準  $F$  と塑性ポテンシャル関数  $\Psi$  を用いた<sup>1)</sup>。

$$F = (\sigma_1 - \sigma_3) - 2c \cdot \cos \phi - (\sigma_1 + \sigma_3) \sin \phi \quad \dots(1)$$

$$\Psi = (\sigma_1 - \sigma_3) - 2c \cdot \cos \psi - (\sigma_1 + \sigma_3) \sin \psi \quad \dots(2)$$

$\sigma_1, \sigma_3$ は要素に作用する最大・最小主応力、 $c$ : 粘着力、 $\phi$ : 内部摩擦角(=35°)、 $\psi$ はダイレイタンシー角(=0)であり、 $\psi \neq \phi$ とした非関連流動則としている。図-2は用いた記号の定義を示している。構造物の沈下量を  $S_{Vmajor}$ 、地盤内の水平変位量を  $\delta$  とした(模型試験では、直径1.9mmのスパゲティを地盤内に挿入し水平変位量を測定している)。また構造物が沈下した箇所の単位奥行き当りの体積を沈下土量  $V_\rho$ 、地盤が側方に変形した箇所の単位奥行き当りの体積を側方流動土量  $V_\delta$  とし、それらの比を土量比  $V_\delta/V_\rho$  として以下の議論に用いた<sup>2)</sup>。

3. 結果と考察

単純な繰返し載荷条件下では、図-3に示すように構造物の沈下に伴って地盤の剛性が一旦増加した後、急激に低下する挙動を示すことが模型試験結果より確認されている<sup>1)</sup>。また地盤の弾性係数を載荷の繰返し回数や構造物の沈下量の関数と仮定した解析法に基づくと、構造

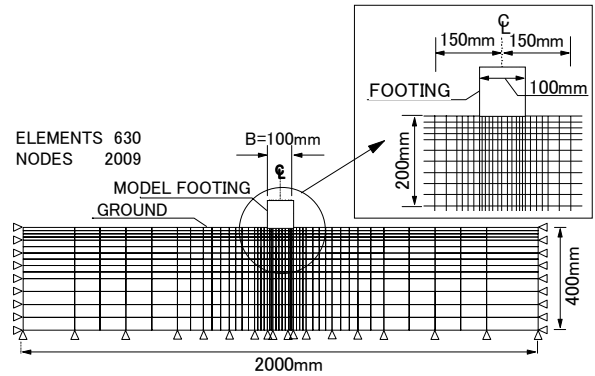


図-1 有限要素分割

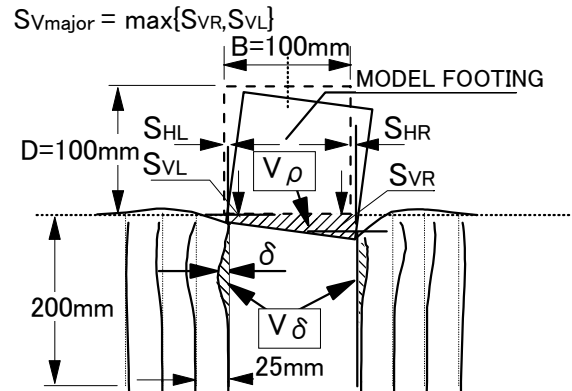


図-2 変位量の定義

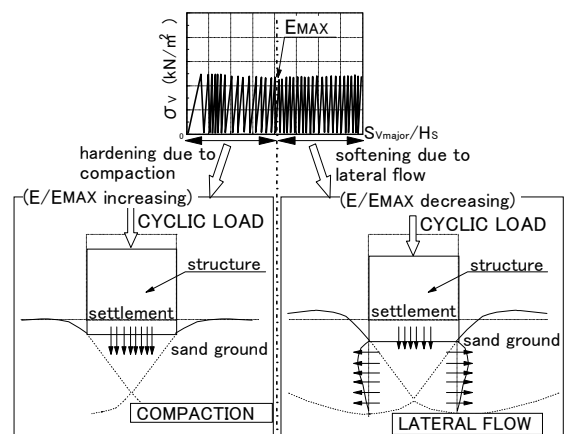


図-3 地盤の剛性変化挙動

キーワード：側方流動，有限要素解析，砂，変形

連絡先：〒060-8628 札幌市北区北13条西8丁目 北海道大学大学院工学研究科社会基盤工学専攻 TEL:011-706-6203

物・地盤系の沈下および側方流動挙動を評価可能であることが明らかにされている。そのような地盤の剛性変化は以下のような形式で評価できる<sup>1)</sup>。

$$E/E_0 = \frac{Nc}{a+b \cdot Nc} \quad \dots(3)$$

$$E/E_{MAX} = \frac{1}{1+(S_{Vmajor}/H_S)/(S_{Vmajor}/H_S)_{0.5}} \quad \dots(4)$$

Nc：繰返し回数，E：地盤の剛性(変形係数に相当，単位：kN/m<sup>2</sup>)，E<sub>0</sub>：Nc=1での剛性(単位：kN/m<sup>2</sup>)，E<sub>MAX</sub>：繰返し载荷中のEの最大値，(S<sub>Vmajor</sub>/H<sub>S</sub>)<sub>0.5</sub>はE/E<sub>MAX</sub>=0.5のときのS<sub>Vmajor</sub>/H<sub>S</sub>である。

式(3)および(4)を考慮した解析法が波浪のような繰返し载荷を受ける構造物・地盤系の流動変形挙動の評価に適用可能かを調べるために，繰返し鉛直载荷試験(Cyclic Vertical Loading Test)<sup>2)</sup>での解析および模型試験を行った。ここで用いた地盤パラメータはE<sub>0</sub>=3000 kN/m<sup>2</sup>，ポアソン比ν=0.3，内部摩擦角φ=35°，粘着力c=0とした<sup>1)</sup>。式(3)および(4)中の各パラメータはa=0.88，b=0.12，(S<sub>Vmajor</sub>/H<sub>S</sub>)<sub>0.5</sub>=0.07<sup>1)</sup>としている。さらに，繰返し载荷による砂地盤内の流動破壊挙動を詳細に評価する手法の一つとして，図-4のように構造物直下の範囲の要素を内部摩擦角のみを35°以下(本研究では30°)としながら地盤の剛性変化を考慮した解析も試みた。このすべり線形状はPrandtlの支持力理論(c=0，φ=35°)に基づいている。

図-5は解析および実測の構造物の沈下量を構造物幅で正規化した値(沈下量比と称する)S<sub>Vmajor</sub>/Bと繰返し回数Ncの関係を示したものである。なお繰返し回数Ncを100までとした。図には地盤内にすべり線を考慮しないケースの解析結果も併記した。これより，すべり線を考慮しないケースでは解析値が実測値を若干過小評価しきみであることが分かる。一方，すべり線を考慮した場合の解析では解析値と実測値の対応が良いようである。したがって，構造物・地盤系の沈下挙動を評価するには，地盤の剛性変化と地盤内のすべり線を考慮するような要素の設定法が有効であろう。

一方，地盤の側方流動変形挙動に関して調べるために，図-6は土量比V<sub>δ</sub>/V<sub>ρ</sub>と繰返し回数Ncの関係を示した。地盤内のすべり線を考慮しないケースでは，解析の土量比が0.6に収束しており実測を若干過小評価している。逆に载荷初期段階において解析値は実測値を過大評価する傾向にある。一方，地盤内のすべり線も考慮した解析法では，土量比の収束値が0.7程度となり実測値に近くなる。したがって，繰返し载荷下の構造物・地盤系の側方流動変形を適切に評価するためには，地盤の剛性変化と地盤内すべり線の発生を考慮した本解析法が有効と思われる。

参考文献 1) 横浜ら：地盤の剛性変化を考慮した構造物・地盤系の側方流動変形解析，応用力学論文集，Vol.4，pp.397-404，2001。  
2) 川村ら：波浪のような繰返し力を受ける構造物・地盤系の動的力学挙動，土木学会論文集，No.624，III-47，pp.65-75，1999。

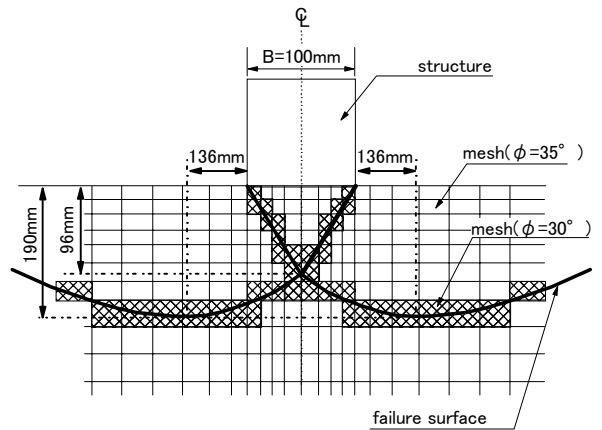


図-4 地盤内すべり線の設定

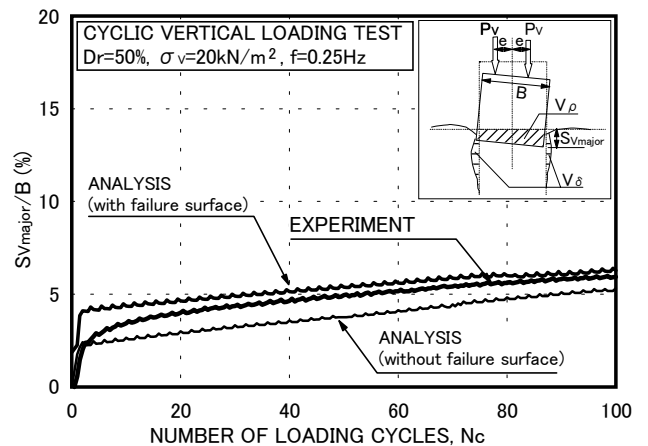


図-5 沈下量比 S<sub>Vmajor</sub>/B-Nc 関係

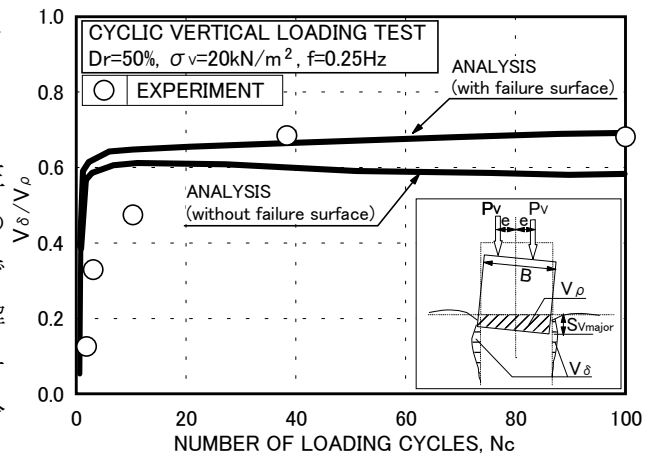


図-6 土量比 V<sub>δ</sub>/V<sub>ρ</sub>-Nc 関係