

波浪力のような繰返し载荷を受ける支持地盤の側方流動変形の推定法

Analysis method for lateral flow deformations of sand bearing structure subjected to cyclic load such as wave force

横浜勝司*, 三浦清一**

Shoji Yokohama and Seiichi Miura

*工修 北海道大学大学院助手 工学研究科社会基盤工学専攻 (〒060-8628 札幌市北区北 13 条西 8 丁目)

**工博 北海道大学大学院教授 工学研究科社会基盤工学専攻 (〒060-8628 札幌市北区北 13 条西 8 丁目)

In order to clarify mechanical behavior of sand ground-structure system under cyclic loading condition, a series of FEM analysis and model test were carried out. In the model test, it is found that the rigidity of sand ground changes with increasing of the settlement of structure. Softening behavior of sand deposits suddenly occurs if the lateral flow deformation due to cyclic loading exceeds a limit. Based on the results of model tests, a technique of analysis for lateral flow deformation of sand ground is proposed. By using the proposed technique, the settlement and lateral flow deformation of sand ground subjected to cyclic load such as wave force can be well simulated.

Key Words: FE analysis, model test, sand ground, lateral flow, elastic modulus

1. はじめに

波浪力のような複雑な载荷条件下の力学挙動は、外力-構造物-地盤の相互作用によって誘発される変形挙動が複雑なため、このような荷重条件下の安定性を評価する方法は確立されていない。海洋構造物等の合理的な設計法の開発のためには、まず種々の载荷を受ける構造物・地盤系の支持力および変形挙動を簡易に評価する手法を見出しておくことが求められる。

筆者らは、このような繰返し载荷を受ける構造物・地盤系の動的力学特性を明確にすることを目的として、一連の数値解析および 2 次元平面ひずみ模型試験^{1) 2)}を行ってきた。これまでに、波浪のような繰返し力によって構造物に沈下や傾斜が生じると、支持地盤内に側方流動の卓越する大変形が発生し安定性が急激に失われること、このような複雑な载荷条件の支持力および変形挙動は、簡易な载荷条件下の模型試験結果に基づいて評価されること等の事実が示されている。

本研究では、数値解析および模型試験を行い、構造物・地盤系の沈下および側方流動変形挙動の評価法について検討している。まず弾塑性有限要素解析に基づいて、基本的な载荷条件下の構造物・地盤系の側方流動変形挙動を評価する手法について検討する。次いで、波浪のような繰返し载荷場の構造物支

持地盤の動的変形挙動を調べるために模型試験を行い、変形挙動の基本的特性に関する考察を行った。その結果を基に、繰返し载荷を受ける地盤の側方流動変形挙動を評価するための 1 つの簡易な解析手法を提案し、その妥当性について論じている。なお、ここでは一連の模型実験で得た実測値と解析値とを比較することにより、提案された解析法の妥当性を検証している。

2. 変形解析

2.1 解析手法

本研究では、対象とした構造物・地盤系に関して図-1 に示されるような要素分割を行っている。これは、行った室内試験における二次元平面ひずみ条件下の模型地盤や構造物と同サイズである。すなわち、解析範囲は長さ 2000mm、深さ 400mm、要素数 630、節点数 2009 である。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。また地盤上にある構造物は剛体としている。なお地盤は排水条件とした。

ここで用いた要素は 8 節点四角形要素であり、Gauss の積分点は 4 点である。また、有限要素の離散化には Galerkin 法を用いている。

本研究では、繰返し载荷を受ける構造物・地盤系の変形解析を行うために、繰返し回数の増加に伴う

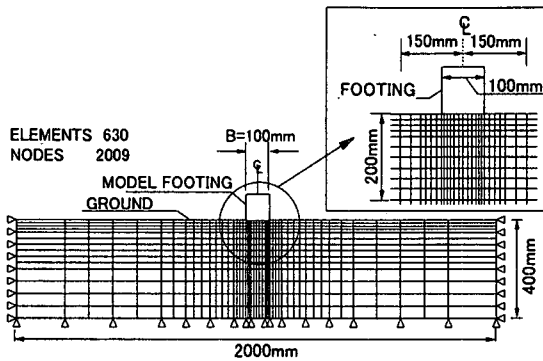


図-1 有限要素分割

地盤剛性の変化を考慮した弾塑性解析を試みた¹⁾。載荷－除荷の1サイクルの弾塑性解析を進めた後、次の載荷－除荷段階の解析において、地盤の弾性係数を新たに設定する解析法を用いている。この手法を用いることによって、後述する模型試験で見られるような繰返し載荷条件下にある砂地盤のダイレイタンス特性を考慮した変形解析が可能となっている。本研究では、このような地盤の剛性変化を考慮した解析法により、種々の繰返し載荷下の構造物・地盤系の側方流動型変形挙動の評価法について調べた。

2.2 地盤の構成モデル

本研究では、Mohr-Coulomb型の破壊規準を用いている。塑性ポテンシャル関数には、Mohr-Coulombの破壊規準と同形式の関数を採用している。すなわち、降伏関数と塑性ポテンシャル関数をそれぞれ F および Ψ とすると、2次元平面ひずみ条件下において、両者は以下の形式で表現される。

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

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

ここで σ_1 、 σ_3 はそれぞれ土要素に作用する最大および最小主応力、 c は粘着力、 ϕ は内部摩擦角、 ψ はダイレイタンス角である。なお本解析では、完全塑性平衡条件を前提としているため、ダイレイタンス角 ψ は0として解析を進めた。

また、弾塑性解析での全ひずみ増分ベクトル $\{d\epsilon\}$ は、以下のように弾性ひずみ増分と塑性ひずみ増分の和として計算されている。

$$\{d\epsilon\} = \{d\epsilon^e\} + \{d\epsilon^p\} = [D^e]^{-1} \{d\sigma\} + \lambda \frac{\partial \Psi}{\partial \{\sigma\}} \quad (3)$$

ここで $\{d\epsilon^e\}$ ：弾性ひずみ増分ベクトル、 $\{d\epsilon^p\}$ ：塑性ひずみ増分ベクトル、 $[D^e]$ ：弾性状態での剛性マトリックス、 $\{d\sigma\}$ ：応力増分ベクトル、 $\{\sigma\}$ ：応力ベクトル、 λ ：塑性ひずみを規定する定数であり、本研究では $\lambda=1.0$ とした。

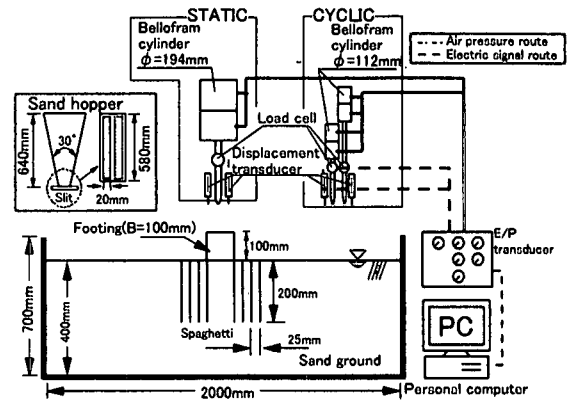


図-2 模型試験装置および載荷装置

3. 模型試験装置および方法

3.1 試験装置の概要

波浪場にある構造物・地盤系の沈下および側方流動変形挙動を詳細に調べるために、一連の模型試験が行われた²⁾。ここで用いた装置は2次元平面ひずみ条件の模型土槽と任意の載荷条件を再現可能な載荷装置である。図-2は装置図を示している。

模型土槽の内寸法は長さ2000mm、高さ700mm、奥行き600mmである。模型地盤には豊浦砂($\rho_s = 2.65 \text{ g/cm}^3$, $\rho_{dmax} = 1.648 \text{ g/cm}^3$, $\rho_{dmin} = 1.354 \text{ g/cm}^3$, $D_{50} = 0.18 \text{ mm}$, $U_c = 1.3$)を用いており、サンドホッパー(頂角 30° 、高さ640mm)から砂を空中落下させることによって地盤を作成した²⁾。ここでは地盤厚さ H_s が400mm、相対密度 Dr が50%となるようにしている。地盤作成後、間隙を飽和させるために、土槽底部に取り付けられた8個のポーラスストーン(直径50mm)から堆積構造を乱さないように通水している。

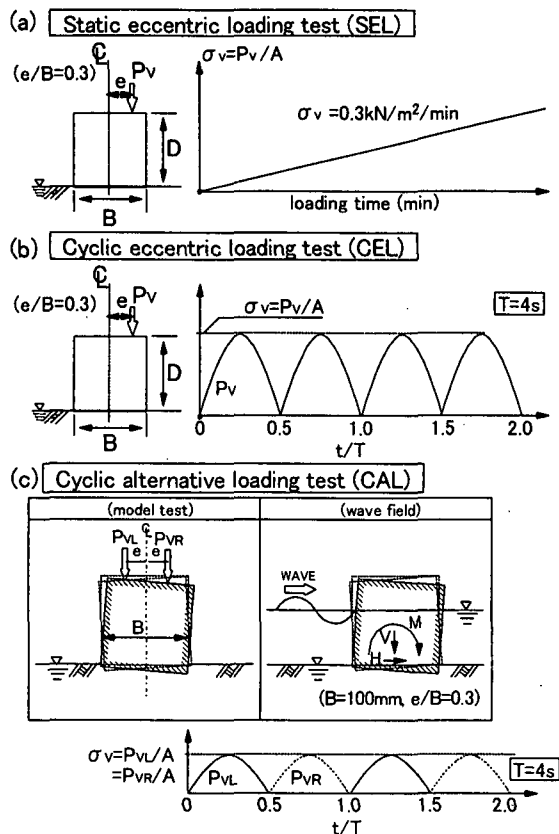
模型構造物は幅100mm、高さ100mm、奥行き580mm、質量13.2kgの直方体模型である。構造物と地盤の接触面条件を完全粗とするために、模型構造物底面にサンドペーパー(G120)を貼り付けて試験を行った。砂地盤上に乱れが起こらないように構造物を所定の位置に静置し、一連の試験を行っている。

なお、図-3に示すように模型構造物にベロフラムシリンダーを介して空気圧制御により載荷重を与えている。載荷装置には、ロードセルおよび変位計が具備されており、荷重と構造物の鉛直変位量を測定している。また載荷位置を任意に変えることが可能であり、荷重の偏心距離 e (構造物中心線から荷重の作用点までの水平距離)の違いによる地盤の力学特性の変化を調べることができるようになっている。本研究では偏心距離 e を構造物幅 B で除した偏心度 e/B を指標として用いた。

3.2 載荷方法

(1) 静的偏心載荷

構造物の沈下の進行に伴って発生する地盤の流動変形の基本的特性を調べるために、静的偏心載荷試



* A is area of structure base

図-3 荷重方法：(a) 静的偏心荷重 (SEL)，(b) 繰返し偏心荷重 (CEL)，(c) 繰返し鉛直荷重 (CAL)

験(Static eccentric loading, SEL と略称, 図-3(a) 参照)が行われた。模型構造物(幅 $B=100\text{mm}$)には、応力 $\sigma_v (=P_v/A)$ が毎分 0.3kN/m^2 の割合で与えられている。ここで P_v は荷重荷重, A は構造物と地盤の設置面積である。また偏心距離 e は模型構造物の中心から荷重点までの距離であり、荷重初期の荷重の偏心距離 e と構造物幅 B の比(偏心度 e/B)が 0.3 と設定されている。

(2) 繰返し偏心荷重

本研究では、繰返し荷重下の構造物・地盤系の基本的な動的力学特性を調べるために、図-3(b)のような荷重試験を行った。すなわち、荷重の偏心度 e/B を 0.3 (幅 $B=100\text{mm}$)に設定して繰返し荷重を行う繰返し偏心荷重試験 (Cyclic eccentric loading test, CEL と略称, (b) 図参照) が行われた。ここでは荷重を周期 4 秒で荷重している。なお予備実験において、荷重周期が $2\sim 20$ 秒の間では繰返し強度および構造物の沈下挙動に違いが見られなかったことが確認されているため^{1) 2)}、ここでは周期を 4 秒に設定した。

(3) 繰返し鉛直荷重

波浪力を受ける構造物支持地盤の支持力および変形特性を模型試験によって調べるために、図-3(c)に示すように、構造物を介して地盤内に伝達する力を鉛直、水平、モーメントの各成分に分け、それぞれが構造物・地盤系の動的変形特性に及ぼす影響を調べた。ここでは、波浪のような繰返し荷重条件下

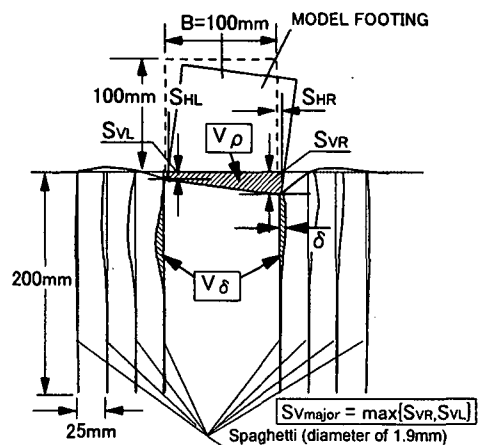


図-4 変形量の定義

にある構造物・地盤系の支持力特性について考察するため、図-3(c)に示すような繰返し荷重試験(Cyclic alternative loading test, CAL と略称)が行われた。この試験法は構造物上部の左右 2 地点で交互に繰返し荷重(P_{vL} および P_{vR})を与えるものである²⁾。荷重周期は CEL 試験と同様に 4 秒とした。本荷重法は、波浪場にある構造物が振動沈下する場合の支持地盤の力学挙動をある程度把握できることが示されている²⁾。

3.3 構造物・地盤系の変形量の定義

図-4は構造物および地盤が変形した状態を模式的に示している。解析および模型試験を基に地盤・構造物系の沈下・側方流動変形を評価するために、図中に示されるような各変形量を測定している。

ここでは、構造物下部の左右の沈下量をそれぞれ S_{vL} , S_{vR} とし、両者のうちの大きい方の値を S_{vmajor} とした。特に沈下量 S_{vmajor} は構造物幅 B で正規化した値を沈下量比 S_{vmajor}/B として構造物の沈下性状評価に用いている。

さらに、本模型試験の構造物・地盤系の側方流動変形を測定するために、直径 1.9mm のスパゲティ²⁾を地盤内に挿入し、試験中にそれらの変形量を測定している。スパゲティは構造物底部の左右端点、およびその点から 25mm 間隔に挿入されており、地盤の深さ 200mm まで挿入されている。なお、スパゲティは地盤の変形に影響を与えないような剛性(初期剛性の 4% 以下)になった後、荷重が開始されている²⁾。このスパゲティの水平変位量を測定することによって、地盤内の側方変形量が把握されている。その値を地盤の側方変位量 δ として測定している。

これらの構造物の沈下量およびスパゲティの変形量から沈下土量 V_p 、側方流動土量 V_δ が以下のように求められている(図-4 参照)。

- ・沈下土量 V_p : 構造物が地盤に沈下した部分の単位奥行当りの体積。
- ・側方流動土量 V_δ : 地盤が側方に変形した部分の単位奥行当りの体積。

さらに、構造物の沈下による地盤の側方流動変形

の割合を示すために、側方流動土量と沈下土量の比 V_s/V_p (以下、これを土量比と称する) を用いた。なお土量比 V_s/V_p は、種々の载荷下にある構造物・地盤系の支持力特性および流動破壊の程度を評価できるパラメータであることが過去の研究より明らかにされている^{1) 2) 3)}。これらの指標を用いて以下に示す解析と考察を進めた。

4. 変形挙動に及ぼす構造物・地盤間の接触条件の影響

構造物がたとえば波浪のような外力を受けて傾斜・沈下したケースの変形解析を行う場合、構造物と地盤の接触条件は解析結果に大きな影響を及ぼすものと考えられる。ここでは、静的偏心载荷条件(SEL)での解析を行うことでその影響を検討した。地盤の相対密度 Dr は 50% である。解析に用いたパラメータは、一連の排水三軸圧縮試験の結果に基づき弾性係数 E を 3000kN/m^2 、内部摩擦角 ϕ を 35° 、ポアソン比 ν を 0.3 とした。なお構造物・地盤間の接触条件を考慮した解析では、構造物と地盤の接触面にジョイント要素⁴⁾を設定した解析を行っている。ここでは、構造物・地盤間の相対変位の発生を許容するためにジョイント要素の剛性を地盤の弾性係数と同じとした。

図-5(a), (b) はそれぞれ $S_{vmajor}/B=20\text{mm}$ 時の、接触条件を考慮した解析および接触条件無考慮の解析結果を示したものである。比較のために模型試験から得られた結果を点線で併記してある。(a) 図より、ジョイント要素を設定した場合には構造物の傾斜に伴う地盤の側方変形挙動が表現されており、実測値と解析値で一致度が高いことが確認される。

一方、(b) 図のように構造物と地盤の接触条件を考慮しない場合では、構造物と地盤が一体となって変形が発生するため、地盤の側方変形量が(a) 図の場合より低めになっている。特に、地盤の深さが 50mm より浅い箇所において解析は実測値を過小評価している。したがって、側方変形が卓越して発生する地盤の比較的浅い箇所の流動変形挙動を評価するためには構造物・地盤間の接触条件を適切に設定することが必要といえる。

この影響をさらに調べるために、図-6 は土量比 V_s/V_p と沈下量比 S_{vmajor}/B の関係を示した。図より、ジョイント要素を設定した解析は実測値を比較的良く再現しているといえる。一方、ジョイント要素を設定しない場合では解析は実測値を過小評価する傾向にある。なお、過去の研究^{1) 2)}より土量比の収束値は地盤の側方流動変形の評価に有効であることが明らかにされている。したがって、特に構造物の傾斜を伴う沈下性状を示すケースの側方流動挙動の評価にあたっては、構造物と地盤間の接触条件を適切に考慮する必要があることが確認された。以下の解析では、このような接触条件を考慮して解析を行った。

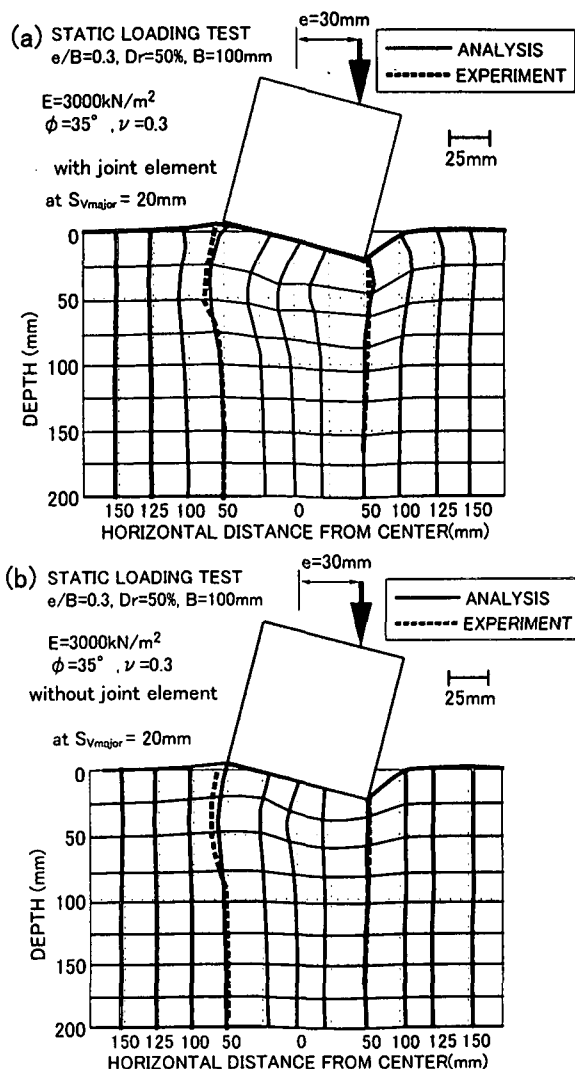


図-5 地盤内変形分布 (a) ジョイント要素設定時、(b) ジョイント要素無設定

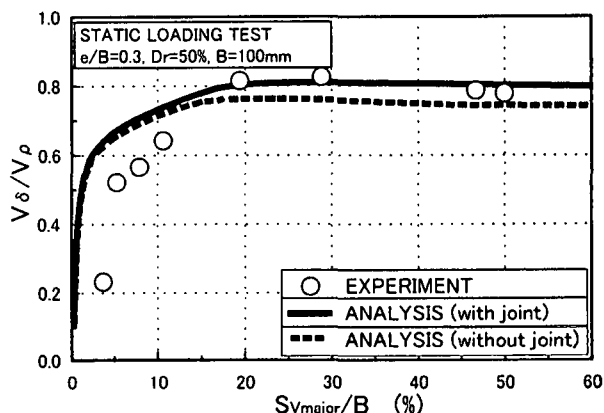


図-6 土量比-沈下量比関係(SEL)

5. 繰返し载荷条件での変形解析

5-1 繰返し偏心载荷下の構造物・地盤系の変形挙動 (CEL)

繰返し载荷を受ける構造物・地盤系では、そのダイレイタンス特性によって地盤内に側方流動型の変形が見られる^{2) 3)}。ここでは地盤内に発生するそ

のような変形挙動について調べてみた。

図-7 は繰返し偏心载荷試験(CEL)における構造物の沈下量 S_{vmajor} を模型地盤厚 H_s で除した値 S_{vmajor}/H_s (鉛直ひずみと称する) と繰返し载荷応力 σ_v (繰返し荷重を構造物底面積で除した値) との関係を示している。この試験条件は繰返し载荷応力 σ_v が 22kN/m^2 、载荷周期は4秒、地盤の相対密度 Dr が50%のケースである。

図より、各载荷段階における载荷応力 σ_v と鉛直ひずみ S_{vmajor}/H_s の比、つまり地盤の変形係数相当量 E (以下剛性と称する) に着目すると、その値が地盤の鉛直ひずみ S_{vmajor}/H_s の増加に伴って明らかに変化していることがわかる。

図-7 で示された剛性変化と地盤の変形挙動の関係について以下のように考察した(図-8 参照)。剛性が増加する範囲(図-7 において鉛直ひずみ S_{vmajor}/H_s が0.01まで)では、構造物直下および周辺地盤の締め固め効果による地盤の硬化挙動が誘発されているようである。さらに鉛直ひずみ S_{vmajor}/H_s が増加すると地盤の側方への流動変形が卓越し、剛性が低下する傾向を示すものと考えられる。

図-9 は任意の繰返し回数 N_c での地盤剛性 E をその最大値 E_{MAX} (図-7 参照) で正規化した値と鉛直ひずみ S_{vmajor}/H_s の関係を示している。前述のように、鉛直ひずみ S_{vmajor}/H_s の増加に伴う剛性の増加→低下挙動が明瞭に確認される。ここで、鉛直ひずみ $S_{vmajor}/H_s \geq 0.01$ の範囲で見られる地盤剛性の急減傾向は、室内要素試験^{5) 6)}で見られるせん断剛性の低下挙動に極めて類似している。

そこで、室内要素試験で見られるせん断剛性の低下挙動を表現できる等価せん断剛性率とせん断ひずみとの関係⁶⁾に基づきながら、模型試験において見られる地盤の剛性低下を再現可能か検討する。

まず、模型試験で実測された剛性比 E/E_{MAX} と鉛直ひずみ S_{vmajor}/H_s の間に、以下の関係が成り立つと仮定する¹⁾。

$$E/E_{MAX} = \frac{1}{1 + (S_{vmajor}/H_s)/(S_{vmajor}/H_s)_{0.5}} \quad (4)$$

ここで $(S_{vmajor}/H_s)_{0.5}$ は $E/E_{MAX}=0.5$ のときの鉛直ひずみである。なお、式(4)の分母第2項の鉛直ひずみ比は沈下量比 S_{vmajor}/B と $E/E_{MAX}=0.5$ での沈下量比 $(S_{vmajor}/B)_{0.5}$ との比と同等である。

また、過去の研究より载荷初期段階における地盤剛性 E と繰返し回数 N_c との関係は以下のように評価可能であることが示されている¹⁾。

$$E/E_0 = \frac{N_c}{c + d \cdot N_c} \quad (5)$$

これらの評価法の妥当性を調べるために、CEL 試験から得られた剛性比 E/E_0 と繰返し回数 N_c の関係を求めた(図-10 参照)。図中には式(4)および式(5)による推定値も併せて示している。なお、式(4)の $(S_{vmajor}/H_s)_{0.5}$ は0.07、式(5)中の定数 c 、 d はそれぞれ

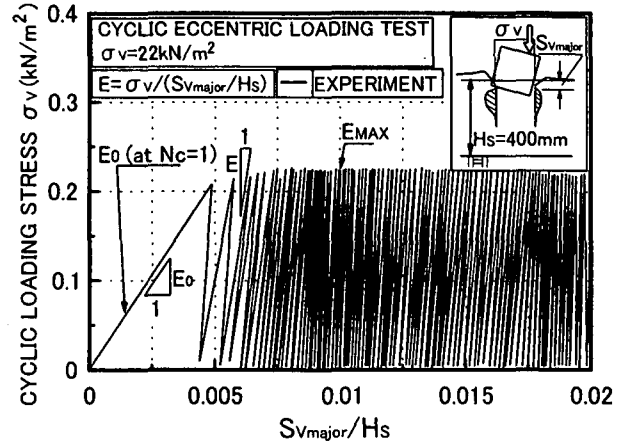


図-7 载荷応力-鉛直ひずみ S_{vmajor}/H_s 関係 (CEL)

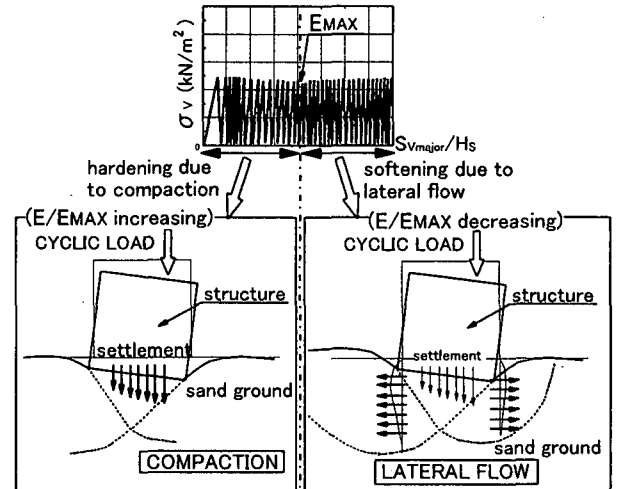


図-8 繰返し载荷による地盤内変形挙動

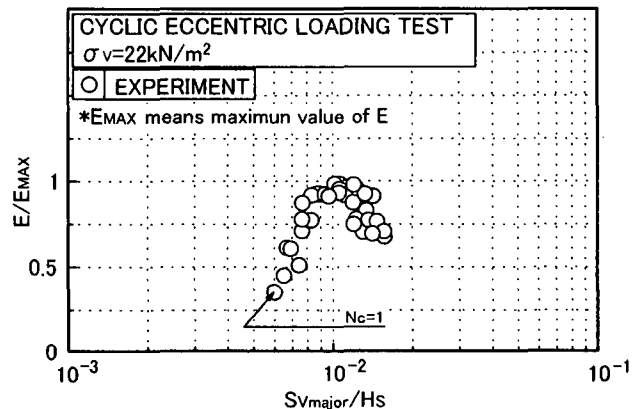


図-9 剛性比-鉛直ひずみ関係 (CEL)

$c=0.88$ 、 $d=0.12$ と仮定した¹⁾。これより、実測値と推定値の一致度が高いことが確認される。したがって、繰返し偏心载荷を受ける地盤の剛性変化は提案された手法によって評価可能であるといえる。

そこで、図-10 の関係のように地盤全体の弾性係数を変化させる本解析法が模型試験結果を再現可能か検討してみる。なお繰返し回数 $N_c=1$ での剛性 E_0 は 3000kN/m^2 とした。ここでは繰返し回数 $N_c=100$ までの解析を試みた。また、模型試験において繰返し载荷による過剰間隙水圧の蓄積が小さく地盤の

液状化に至らないため、解析では地盤を排水条件とした。

図-11は沈下量比 S_{vmajor}/B と繰返し回数 N_c の関係を示している。図中には地盤の剛性変化を考慮しない解析結果も示している。図より、地盤剛性の増加→低下挙動を考慮しない解析では実測値を過小に予測しているようである。一方、剛性変化を考慮した解析では、解析結果と実測値の対応が良好であることがわかる。このように、繰返し载荷下の構造物・地盤系の沈下挙動の解析では、载荷の進行に伴う地盤の剛性変化を評価することが有効であるといえる。

次に、構造物・地盤系の側方流動変形の全体的な傾向について調べるために、図-12に解析および実測の土量比 V_δ/V_p と繰返し回数 N_c の関係を示した。これより、解析結果と実測値は良く一致していることが確認できる。したがって、提案した解析法は偏心を伴う繰返し荷重による地盤の側方流動変形の挙動を評価可能といえる。

5-2 波浪のような繰返し载荷下での変形解析 (CAL)

提案した解析法が、波浪場のような载荷条件下の構造物・地盤系の変形挙動予測に関して適用可能か調べるために、繰返し载荷試験(CAL)に対する解析を試みた。なお、地盤の相対密度 $Dr=50\%$ 、载荷応力 σ_v は 20kN/m^2 のケースである。载荷応力が前述の繰返し偏心载荷試験(CEL)とほぼ同じであるため、地盤パラメータおよび剛性変化に関する定数はCELと同じ値を採用した。なお载荷繰返し回数は100回までとして解析している。

図-13はCAL試験および本解析で得られた沈下量比 S_{vmajor}/B と繰返し回数 N_c の関係を示している。これより、解析は実測値を若干過小評価しているが、沈下量比 S_{vmajor}/B の初期の増加率や N_c の増加に伴う沈下量比 S_{vmajor}/B の収束傾向は再現できているようである。

次に、地盤内側方変形について調べるために、図-14に $S_{vmajor}/B=5\%$ での構造物・地盤系の変形解析結果を示している。比較のために実測値を点線によって示している。これより、構造物左右端点の下部における地盤内側方変位量に関して、解析は実測値を若干過小評価するようである。これは、解析において構造物直下の変形が左右対称に発生しなかったために、実測を過小評価したものと思われる。

さらに、地盤内の全体的な側方流動挙動を調べるために、図-15に土量比 V_δ/V_p と繰返し回数 N_c の関係を示した。解析値が $N_c=20$ から V_δ/V_p が0.6に収束し実測値を若干過小評価済みである。このことは、側方流動変形挙動を詳細に評価するためには、地盤の剛性変化以外の要因を調べる必要があることを示唆している。

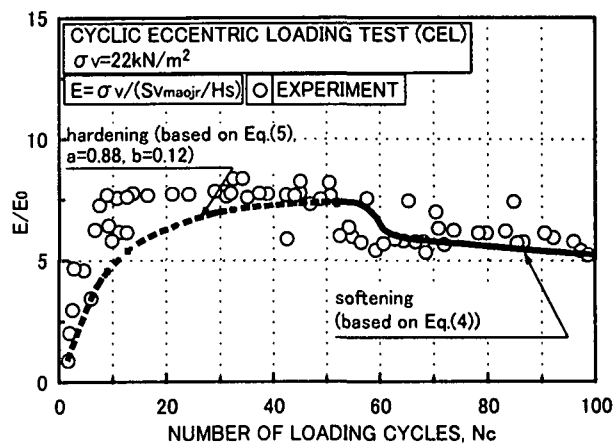


図-10 剛性比 E/E_0 —繰返し回数 N_c 関係 (CEL)

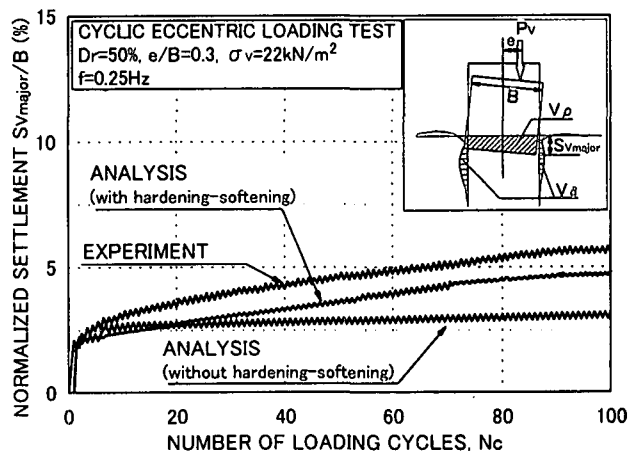


図-11 沈下量比 S_{vmajor}/B —繰返し回数 N_c 関係 (CEL)

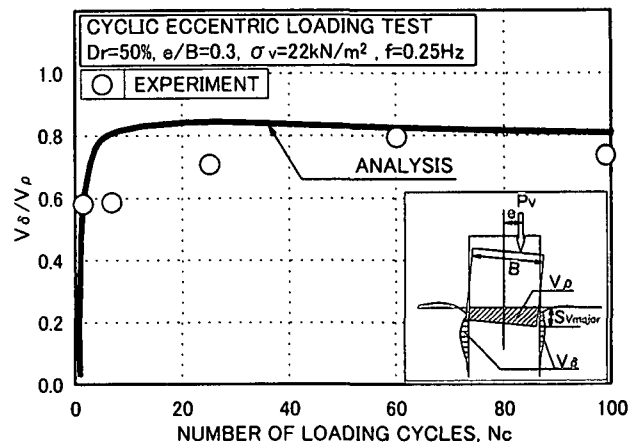


図-12 土量比 V_δ/V_p —繰返し回数 N_c 関係 (CEL)

5-3 繰返し载荷 (CAL) での側方流動変形解析

波浪場のような繰返し载荷条件下の砂地盤内の側方流動挙動を簡易に評価するための解析法を検討する。例えば、盛土等の安定性を有限要素解析によって検討する場合、すべり線が発生すると予測される箇所の強度パラメータ(粘着力や内部摩擦角)を他の部分より低く設定し解析を進める手法が示されている⁷⁾。ここでは、模型試験において地盤内にすべり線の発生が確認されたことから、図-16に示す地盤

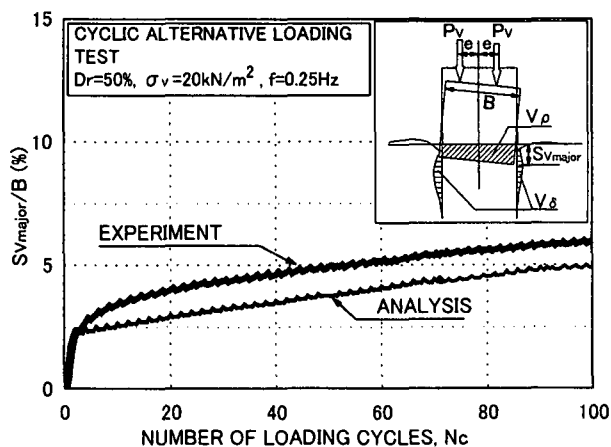


図-13 沈下量比 $S_{V_{major}}/B$ —繰返し回数 N_c 関係 (CAL)

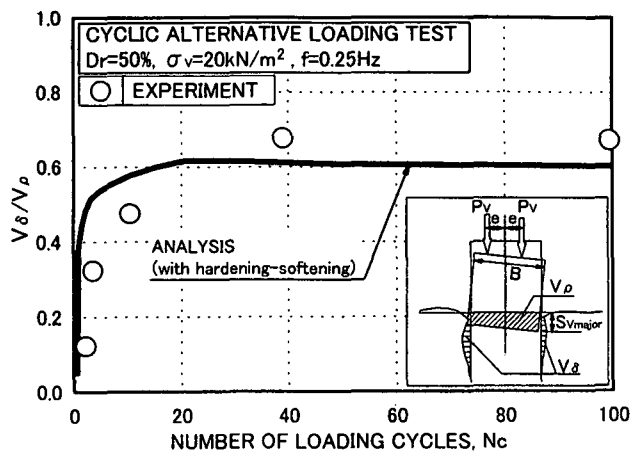


図-15 土量比 V_δ/V_ρ —繰返し回数 N_c 関係 (CAL)

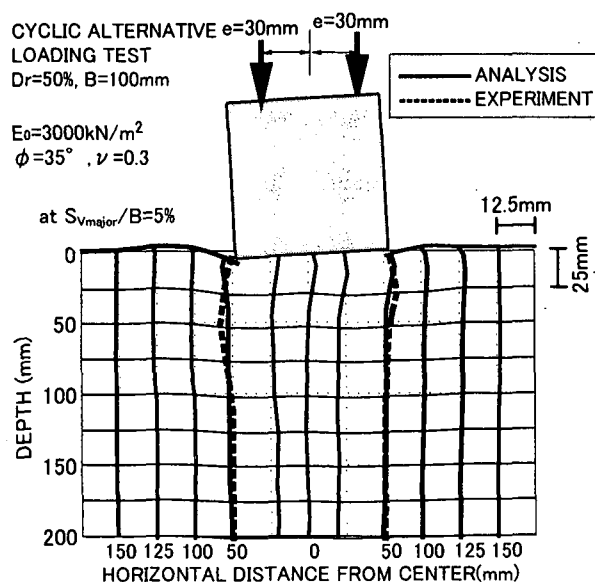


図-14 地盤内変形挙動 ($S_{V_{major}}/B=5\%$, CAL)

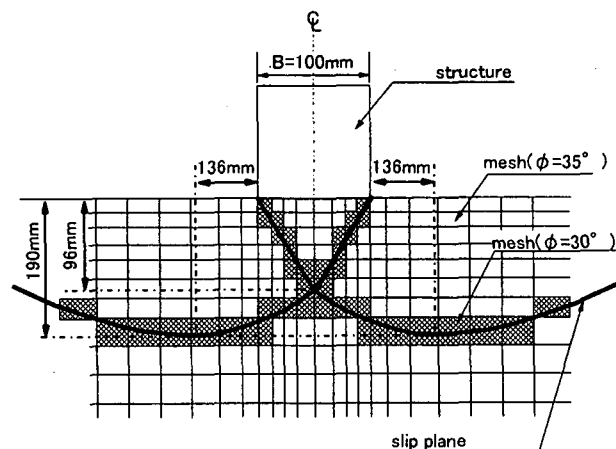


図-16 地盤内すべり線を考慮した要素分布 (CAL)

内すべり線⁸⁾を囲む要素(斜線部)において、地盤内のすべり発生後の残留強度を低減するために、排水三軸試験結果から得られる残留強度に基づいて内部摩擦角を小さく設定し(本研究では 30° のケースで検討)、併せて繰返し載荷による地盤の剛性変化を考慮した解析を試みた⁹⁾。なお、内部摩擦角を小さくした要素は Prandtl の支持力理論($c=0$, $\phi=35^\circ$)によって予測されたすべり線上の要素を対象とした。

図-17 は解析および実測の沈下量比 $S_{V_{major}}/B$ と繰返し回数 N_c の関係を示したものである。なお、実測の沈下量比が収束し始めた $N_c=100$ までの解析を行っている。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ている。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のみであるものの、すべり線を考慮した要素設定を行ったケースでは、解析値と実測値の対応がはるかに良くなることが確認された。すべり線を設定しないケースに比べて、本解析法では地盤内の変形が卓越して発生するために沈下量が生じ易くなったことが反映されている。

次に、地盤内の変形状況を調べるために $S_{V_{major}}/B$

$=5\%$ での構造物・地盤系の変形解析結果を図-18 に示した。図中には、点線によって実測値も併記している。これより、解析と実測の側方変位量が良く対応していることが分かる。さらに、構造物直下の領域における変形が中心線に対してほぼ対象に発生しているのが見られる。したがって、すべり線形状と地盤の剛性変化を同時に考慮した解析法によって、地盤内の側方変位量の発生挙動を妥当に評価できようである。

さらに、地盤の側方流動変形挙動に関して調べるために、図-19 に土量比 V_δ/V_ρ と繰返し回数 N_c の関係を示した。本解析法の有用性を検討するために、すべり線を考慮しない解析結果(図-15 参照)も併記した。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。一方すべり線を考慮した解析法では、土量比の収束値が 0.7 程度となり極めて実測値に近い評価を与えている。したがって、繰返し載荷下の構造物・地盤系の側方流動変形を適切に評価するために、地盤の剛性変化とすべり線形状を考慮した本解析法は有効な 1 つの手段となり得る。

6. 結論

一連の 2 次元平面ひずみ条件の弾塑性有限要素解

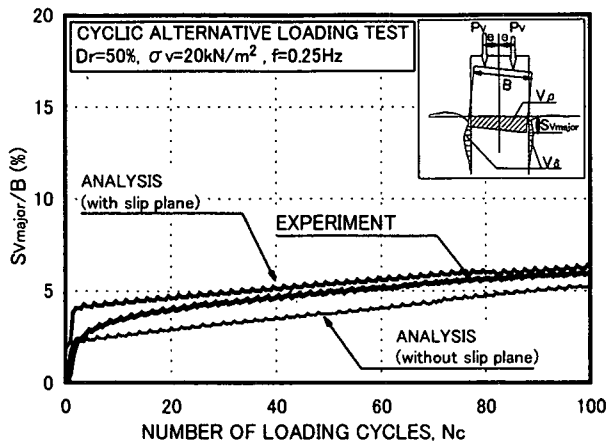


図-17 沈下量比 S_{vmajor}/B —繰返し回数 N_c 関係(CAL)

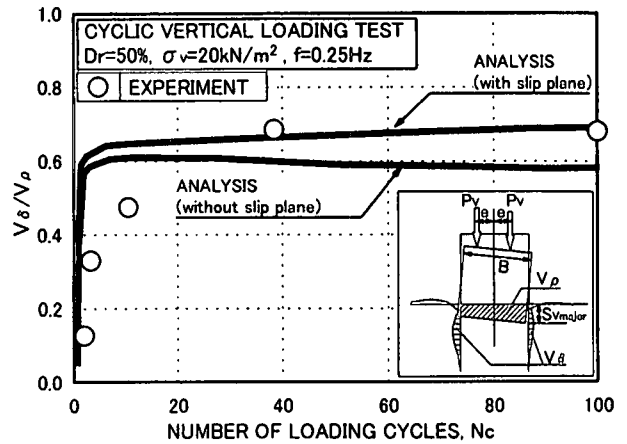


図-19 土量比 V_d/V_p —繰返し回数 N_c 関係(CAL)

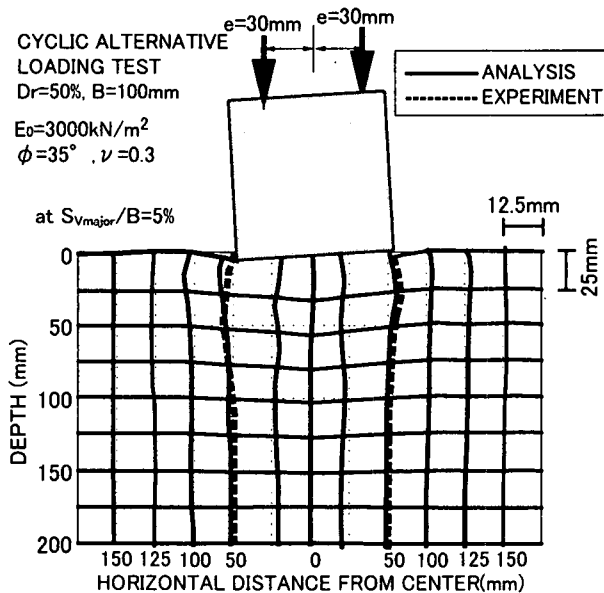


図-18 地盤内変形挙動 ($S_{vmajor}/B=5\%$, CAL)

析および模型試験より以下の結論を得た。

- (1) 静的偏心载荷条件で見られるように、構造物が傾斜・沈下するような場合、地盤の側方流動変形を正確に評価する必要がある。そのためには、構造物・地盤間の接触条件を適切に設定することが重要である。
- (2) 繰返し偏心载荷下の地盤の剛性変化挙動の評価法が示された。これは繰返し载荷を受ける構造物・地盤系の沈下・側方流動挙動を把握するために有効である。
- (3) 繰返し载荷により発生するすべり線を設定し、かつ地盤の剛性変化を考慮した解析法は、波浪力のような载荷下にある構造物・地盤系の側方流動変形挙動を良く説明する。

今後は地盤条件を変えた解析を行い、波浪のような複雑な载荷条件下での評価法を検討する予定である。

あとがき

今後は、本研究成果を実大構造物に合理的に適用する方法を明らかにしていきたい。なお、本論文の

作成にあたり室蘭工業大学工学部 川村 志麻 助手には貴重な討論を頂いた。また解析およびデータ整理に北海道大学 藤井聡君の協力を得た。記して深甚なる謝意を表します。

参考文献

- 1) 横浜勝司, 三浦清一, 川村志麻: 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) 川村志麻, 三浦清一, 横浜勝司, 宮浦征宏: 繰返し力を受ける構造物支持地盤の破壊とその防止策に関する実験, 土木学会論文集, No.624, III-47, pp. 77-89, 1999.
- 3) 宮浦征宏, 三浦清一, 川村志麻, 横浜勝司: 载荷条件の相違による砂地盤の支持力-変形挙動の変化とその評価, 土木学会論文集, No.673, III-54, pp.121-131, 2001.
- 4) Goodman, R. E., Taylor, R. L. and Brekke, T. L. : A model for the mechanics of jointed rocks, *Proc. of ASCE*, 94, SM3, pp.637-659, 1963.
- 5) 阿曾沼剛, 三浦清一, 渡辺則仁, 前宗孝: 原位置および室内試験より求めた火山灰土の動的変形定数, 地盤工学会北海道支部技術報告集, Vol.41, pp.19-28, 2001.
- 6) Iwasaki, T., Tatsuoka, H. and Takagi, T. : Shear moduli of sands under cyclic torsional shear loading, *Soils and Foundations*, Vol.18, No.1, pp.39-56, 1978.
- 7) Griffiths, D. V. and Lane, P.A. : Slope stability analysis by finite elements, *Geotechnique*, Vol.49, No.3, pp.387-403, 1999.
- 8) 川村志麻・柴田泰孝・三浦清一・勝世佑子: 堆積構造異方性地盤の支持力特性と载荷条件の関係, 地盤工学会北海道支部技術報告集, Vol.42, pp.247-256, 2002.
- 9) 横浜勝司・三浦清一: 繰返し载荷を受ける砂地盤の流動変形評価に関する解析法, 土木学会年次学術講演会発表講演集, Vol.58, 2002. (印刷中)

(2002年4月19日受付)