

支持地盤の剛性及び強度変化を考慮した海洋構造物・地盤系の変形解析法

横浜 勝司*・三浦 清一**・林 秀人***

波浪等の厳しい外力条件下にある海洋構造物は荷重を繰返し受けて振動している。この状況では構造物と支持地盤との動的相互作用によって下部地盤には側方流動型の大変形が発生し構造物・地盤系の安定性が低下することが考えられる。このような繰返し載荷が構造物・地盤系の安定性低下に及ぼす影響は大きく、その評価法を見出すことは極めて重要である。本研究では、一連の模型試験及び数値解析を行い構造物の沈下や傾斜に伴う支持砂地盤の変形挙動を評価する手法を検討している。特に砂の剛性変化および強度変化を考慮した解析モデルを組み込んだ解析法を提案した。解析結果と模型試験による実測値を比較することで本解析法の適用性を検討した。

1. はじめに

波浪等の厳しい外力条件においては、繰返し載荷によって海洋構造物が振動している。このような環境では構造物と支持地盤との動的相互作用による下部地盤の安定性が低下する可能性がある。特に波浪場にある構造物下部地盤で発生する洗掘や液状化現象、地盤内のせん断すべりや側方流動変形といった種々の変形が発生しており、これらが構造物・地盤系の安定性低下を引き起こす要因になると考えられる。地盤内の過剰間隙水圧の蓄積が顕著でないケースにおいても、地盤には側方流動型の大変形が発生し上部構造物の沈下が進行する可能性がある。

一般に海洋構造物・地盤系の安定性評価では支持地盤の静的支持力に基づく安定解析法を使うことが多いが、海洋構造物の維持・管理上、種々の繰返し外力によって構造物が振動する条件を考慮した地盤の安定性評価が極めて重要であると思われる。このような動的力学挙動を評価するために、多くの有効な解析法が提案されている。しかしながら、波力を繰返し受けて振動する構造物を支持する下部地盤の変形挙動を評価するためには、構造物の移動に伴う土骨格自体の剛性や強度変化に着目することは有効であると考えられる。

本研究では、繰返し載荷条件にある構造物・地盤系の沈下や地盤内変形挙動を評価可能な変形解析法を検討している。具体的には有限要素法を用いた一連の解析と模型試験を実施し、種々の繰返し載荷場にある構造物・地盤系で見られる複雑な力学挙動の簡易評価法について検討した。

2. 試験装置と方法

(1) 試験装置と模型地盤

構造物・地盤系の力学特性を調べるために 2 次元平面

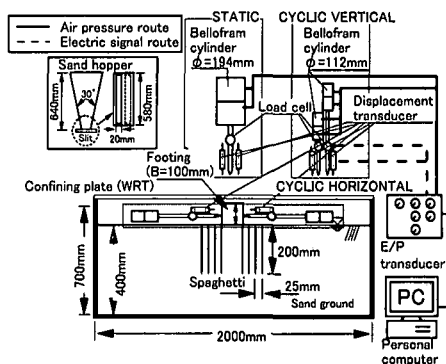


図-1 模型試験装置

ひずみ条件の模型土槽と種々の繰返し載荷可能な載荷装置(三浦ら, 1996)を用いた。図-1に試験装置の全体図を示す。模型土槽の内寸法は幅 2000 mm, 高さ 700 mm, 奥行き 600 mm である。本研究では、豊浦砂 ($\rho_s = 2.65 \text{ g/cm}^3$, $\rho_{d\max} = 1.658 \text{ g/cm}^3$, $\rho_{d\min} = 1.354 \text{ g/cm}^3$) を頂角 60° のサンドホッパーから自由落下させる手法によって地盤を作製した(川村ら, 1999)。なお、地盤厚は $H_s = 400 \text{ mm}$ 、地盤の相対密度 $Dr = 50\%$ (湿潤単位体積重量 18.76 kN/m^3) とした。その後、土槽底部より地盤構造を乱さないようにゆっくりと通水した。地盤中央部に模型構造物 (仕様は幅 100 mm, 高さ 100 mm, 奥行き 580 mm, 重量 0.127 kN) を静かに設置した。模型地盤との接触面を完全粗の条件とするために構造物底面にサンドペーパーが貼付けられている。これらの装置および地盤を用いて一連の試験を行った。

(2) 試験方法

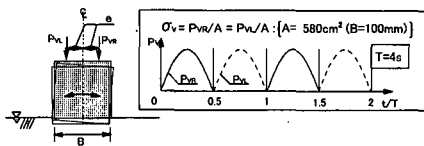
本研究では以下の試験が行われた。

a) 繰返し交互載荷試験 (Cyclic Alternate Loading Test, CAL と略称) :

繰返し載荷条件にある構造物・地盤系の支持力・変形特性を明らかにするために、構造物上部の左右 2 地点で交互に繰返し荷重を与える試験を行っている (図-2(a) 参照)。載荷周期は 4 秒とし、繰返しは 2000 回まで継続し

* 正 会 員 修(工) 北海道大学助手 大学院工学研究科
** フェロー 工 博 北海道大学教授 大学院工学研究科
*** 正 会 員 北日本港湾コンサルタンツ(株)

(a) CYCLIC ALTERNATE LOADING TEST (CAL)



(b) WAVE REPRODUCTION TEST (WRT)

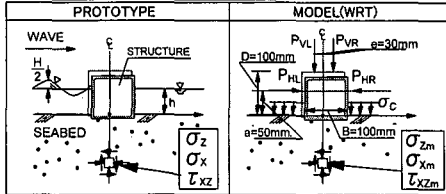


図-2 載荷方法 (a) CAL, (b) WRT

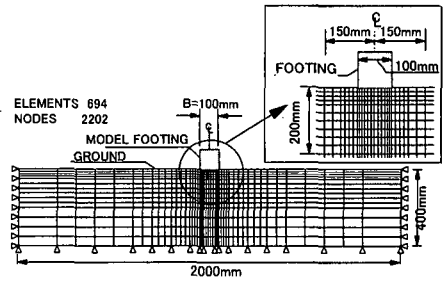


図-3 要素分割

ている。本載荷法によって、構造物が振動沈下する場合の地盤の支持力および変形特性を評価することが可能である (三浦ら, 1996; 川村ら, 1999)。

b) 波浪再現試験 (Wave Reproduction Test, WRT と略称)

本試験は、構造物に作用する鉛直力、水平力および構造物周辺に作用する変動水圧を適切に組合せて載荷することにより、波浪場のような繰返し載荷条件下の構造物・地盤系の変形特性を調べるものである (川村ら, 1999)。WRT での載荷方法の基本的な考え方を以下に示す。

図-2(b)は、WRT の試験方法の考え方を模式的に示したものである。ここで、実海域で誘発される地盤内の任意点の鉛直、水平、せん断応力を $(\sigma_z, \sigma_x, \tau_{xz})$ とし、また模型試験で各々に対応する応力を $(\sigma_{zm}, \sigma_{xm}, \tau_{xzm})$ とする。両者の間に以下のような関係が成り立つように、模型構造物および地盤に載荷する外力を決定した。

$$\left\{ \begin{array}{c} \sigma_z \\ \sigma_{z \max} \end{array} \right\}, \left\{ \begin{array}{c} \sigma_z \\ \sigma_{z \max} \end{array} \right\}, \left\{ \begin{array}{c} \tau_{xz} \\ \tau_{xz \max} \end{array} \right\} = \left\{ \begin{array}{c} \sigma_{zm} \\ \sigma_{zm \max} \end{array} \right\}, \left\{ \begin{array}{c} \sigma_{xm} \\ \sigma_{xm \max} \end{array} \right\}, \left\{ \begin{array}{c} \tau_{xzm} \\ \tau_{xzm \max} \end{array} \right\} \quad \dots \dots \dots (1)$$

ここで、 $\sigma_{zm \max}$ 、 $\sigma_{xm \max}$ はそれぞれ実海域場および模型試験で発生し得る鉛直応力の最大値を示す。この試験法のように鉛直・水平の繰返し荷重を適切に組合せることによって、波浪場の構造物・地盤系の力学特性を把握可能である。

3. 解析手法

(1) 解析手法および設定パラメータ

本研究では、繰返し荷重を受ける構造物・地盤系の変形挙動を調べるために二次元平面ひずみ条件の有限要素法を行った。図-3は解析に用いた要素分割を示している。要素数 694、節点数 2202 であり模型試験で用いた砂

地盤および構造物と同サイズである。境界条件として、地盤の底面および左右側面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た。模型試験において本載荷条件では地盤内の過剰間隙水圧の蓄積が顕著でないため、地盤を完全排水条件と仮定し数値解析を進めた。

本研究では降伏関数 F と塑性ポテンシャル関数 Ψ に基づく弾塑性解析を行った。土の全ひずみ増分ベクトル $\{de\}$ を、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している。

$$\{de\} = \{de^e\} + \{de^p\} = [D_e]^{-1} \{d\sigma\} + \lambda \frac{\partial \Psi}{\partial \{\sigma\}} \dots (2)$$

ここで $\{de^e\}$: 弾性ひずみ増分ベクトル, $\{de^p\}$: 塑性ひずみ増分ベクトル, $[D_e]^{-1}$: 弾性状態での剛性マトリクスの逆行列, $\{d\sigma\}$: 応力増分ベクトル, $\{\sigma\}$: 応力ベクトル, λ : ひずみ硬化・軟化パラメータである。ここで、地盤内に発生する進行的な変形挙動を再現する 1 つの手法として、剛性マトリクス $[D_e]$ に含まれる土要素の弾性係数を載荷の繰返し回数または構造物の沈下量の関数とすることにより、地盤の剛性が載荷の繰返しによって変化する様相を再現する解析となっている (横浜ら, 2002)。

本解析では Mohr-Coulomb の破壊規準を採用している。二次元平面ひずみ条件下では降伏関数 F と塑性ポテンシャル関数 Ψ は以下ようになる。

$$F = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} - \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} \sin \phi - c \cdot \cos \phi \dots \dots \dots (3)$$

$$\Psi = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} - \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} \sin \phi - c \cdot \cos \phi \dots \dots \dots (4)$$

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である。 c は粘着力、 ϕ は内部摩擦角、 ψ はダイレイタンシー角であって、本解析では $\psi = \phi$ とした非関連流動則を用いている。ここでは $\psi = 0$ とした。他の解析パラメータは表-1 に示している。これらは過去の模型試験および解析結果を基に決定されたものであり、静的条件下の載荷試験における支持力および変形挙動を適切に再現できることが確認されている (横浜ら, 2002)。

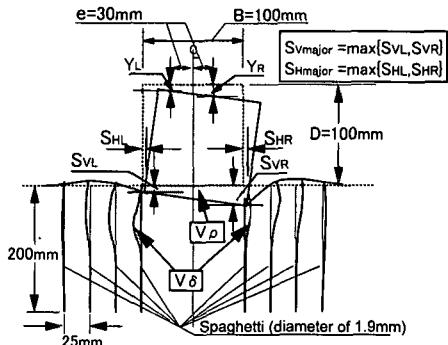


図-4 構造物・地盤系の変形量

表-1 解析パラメータ

wet unit weight γ_t (kN/m ³)	18.76	cohesion c (kN/m ²)	0
Elastic modulus at initial E_0 (kN/m ²)	3000	parameter λ	1.0
Poisson's ratio ν	0.3	dilation angle ϕ (°)	0
internal friction angle ϕ (°)	35		

(2) 各変形量の測定および変位の定義

構造物・地盤系の沈下および側方流動挙動を評価するために、図-4に示されるような変位量を定義した。模型試験においては、図に示される位置に設置された各変位計による計測値より構造物下部での左右端点の沈下量 S_{VL} , S_{VR} および左右の水平移動量 S_{HL} , S_{HR} を算出した。ここでは卓越する方の沈下量と水平移動量を S_{Vmajor} および S_{Hmajor} としている。

さらに、地盤内に直径 1.9 mm のスパゲティを挿入し、その側方変形量を測定することによって、地盤内の側方変形挙動を把握している(川村ら, 1999)。なお地盤の変形を妨げないようにスパゲティが十分に軟らかくなった後に実験を開始した。スパゲティの水平変位量測定値を地盤内の側方変位評価に用いている。

以上のような構造物の沈下量および地盤内の側方変位量に基づいて沈下土量 V_δ 、側方流動土量 V_δ を求めた(図-4参照)。ここに、

- ・沈下土量 V_δ : 構造物が地盤内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、
- である。これらの指標を用いて構造物・地盤系の沈下および側方流動変形の評価を行った。

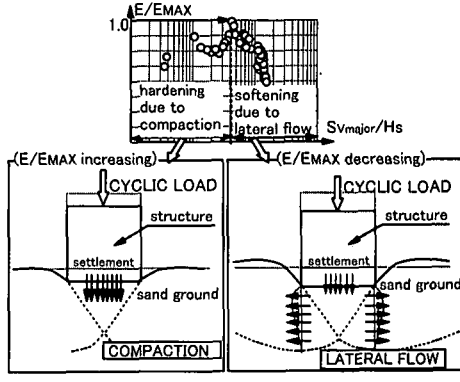


図-5 剛性変化と地盤内変形挙動

4. 繰返し交互載荷試験 (CAL) の変形解析法

(1) 繰返し載荷条件下の地盤内の剛性変化

外力を繰返し受けて振動する構造物と支持地盤では、繰返し載荷によって地盤の剛性が一旦増加した後、低下する挙動が見られる。また地盤の剛性が低下する際には、地盤内には顕著な側方流動変形が発生する。図-5は地盤の剛性変化挙動と構造物・地盤系の変形挙動の関係を模式的に示している。単純な繰返し載荷を受ける構造物・地盤系では、繰返し載荷初期段階において、構造物周辺地盤の締固め効果によって地盤の剛性が増加する。一方、構造物の沈下量 S_{Vmajor} と地盤厚 H_s の比(鉛直ひずみ S_{Vmajor}/H_s と称する)がある限界値に達すると、地盤の剛性が急激に低下するために、地盤内側方流動が卓越し構造物の沈下が進行する。このような構造物・地盤系の剛性変化挙動は以下の形式で評価されることが示されている(横浜ら, 2002)。

(剛性増加) $E/E_0 = \frac{Nc}{c+d \cdot Nc}$ (5)

(剛性低下)

$E/E_{max} = \frac{1}{1+(S_{Vmajor}/H_s)/(S_{Vmajor}/H_s)_{0.5}}$ (6)

ここで $(S_{Vmajor}/H_s)_{0.5}$ は $E/E_{max}=0.5$ のときの鉛直ひずみ、 Nc は載荷の繰返し回数、 E_0 は $Nc=1$ での弾性係数、 c および d は定数である。上式によって推定される剛性 E を剛性マトリクス中の弾性係数として設定することにより、繰返し載荷を受ける地盤の剛性変化を再現可能となる。しかしながら、この評価のみでは実測の構造物沈下量や地盤内側方変位量を若干過小評価する傾向にあることが過去の解析によって示されている(横浜ら, 2002)。

本研究では、基本的な繰返し載荷条件下の地盤内側方変形をさらに精度を高く評価するための評価法について検討する。

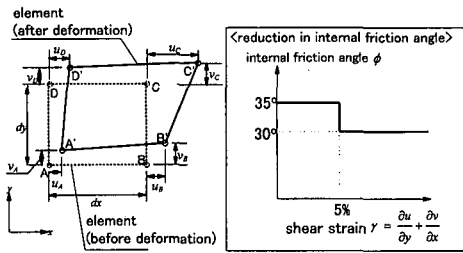


図-6 土の強度低下挙動モデル

(2) 剛性および強度変化モデルによる変形解析

地盤の剛性低下が収束するまで繰返し载荷が継続されただけの場合にも、地盤内には側方流動変形が発生している。このような変形挙動を評価するための1つの手法として、地盤の剛性変化と併せて内部摩擦角のひずみ依存性を考慮した解析を検討する。

砂の室内要素試験では土要素に载荷される応力の増加に伴いせん断が進行する。せん断ひずみがあるレベルに達するとその強度は残留強度に低下するような挙動が見られる。本研究では、このような砂のひずみ依存性を考慮するために、図-6に示すような単純なモデルを用いた。解析から得られた要素のせん断ひずみが5%に達した時、その要素の内部摩擦角を初期設定値の35°から30°へ漸次低減させるモデルを用いた解析を進めた。以下、式(4)および(5)の剛性変化と内部摩擦角の変化を用いた解析を行った。

図-7は解析および実測の沈下量比 S_{vmajor}/B と繰返し回数 N_c の関係を示している。図中には内部摩擦角 ϕ を変化させない解析結果も併記した。いずれの解析においても、地盤の相対密度 D_r が50%、载荷周期4秒、载荷応力 σ_v が20 kN/m² (静的支持力と同程度の大きさ) である。また式(5)、(6)中のパラメータには、それぞれ、 $c=0.88$ 、 $d=0.12$ 、 $(S_{vmajor}/H_s)_{0.5}=0.07$ を用いた。繰返し回数は実測の沈下量および地盤の剛性変化が収束する $N_c=100$ までとした。

これより、本解析結果と実測値との一致度は内部摩擦角のひずみ依存性を考慮しない場合よりも高いことが分かる。本解析法は、基本的な繰返し载荷を受ける構造物・地盤系の沈下挙動を良く表現できるといえる。

図-8は沈下量比 $S_{vmajor}/B=5\%$ での解析および実測の地盤内側方変位状況を示している。解析では構造物直下での側方変位発生量が卓越しており、実測値(図中の点線参照)と良い対応関係にある。

さらに構造物・地盤系の沈下および側方流動変形について調べるために、沈下土量 V_b および側方流動土量 V_s と繰返し回数 N_c の関係を図-9に示した。本解析法では、内部摩擦角を変化させない解析法よりも実測値に近

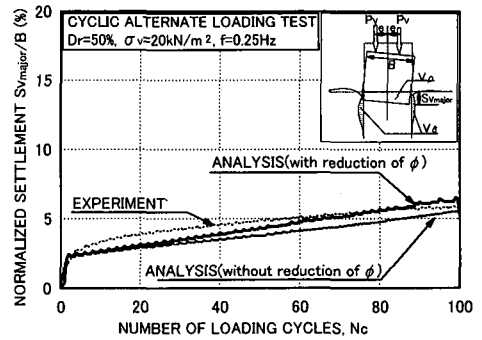


図-7 沈下量比と繰返し回数の関係 (CAL)

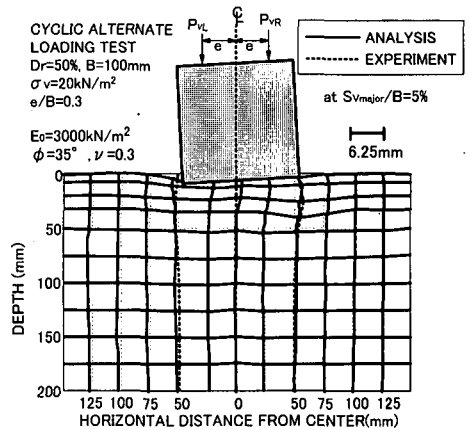


図-8 地盤内側方変形挙動 (CAL)

い評価を与えている。これより地盤剛性や強度を適切に変化させる手法を用いると、繰返し载荷を多数回受ける構造物・地盤系の沈下および地盤内側方流動変形を有限要素法のような数値解析手法によって評価可能であることが示された。

5. WRT の解析

提案した本解析法が、波浪のような载荷を受ける構造物・地盤系の変形解析を評価可能か検討する。図-10は地盤の相対密度 D_r が50%での、WRT試験で得られた構造物沈下量 S_{vmajor} を初期地盤厚 H_s で正規化した鉛直ひずみ S_{vmajor}/H_s と、鉛直载荷応力 σ_v との関係を示している。本試験は高さおよび幅が20 mの構造物に波高6.585 m、周期10秒の波が作用している条件を設定している。

図よりWRTの場合でも、各载荷段階において剛性 E (鉛直応力増分 $\Delta\sigma_v$ と鉛直ひずみ増分 $\Delta S_{vmajor}/H_s$ の比) の算出が可能であることが分かる。また、地盤の剛性が鉛直ひずみ S_{vmajor}/H_s の増加に伴い変化しているようである。さらにWRTに関する解析においても式(5)、

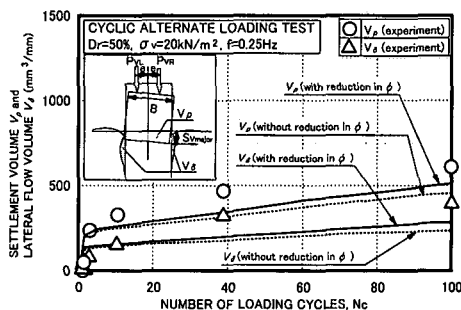


図-9 発生土量と繰返し回数の関係 (CAL)

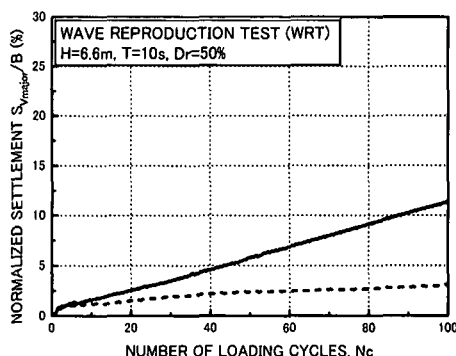


図-11 沈下量比と繰返し回数の関係 (WRT)

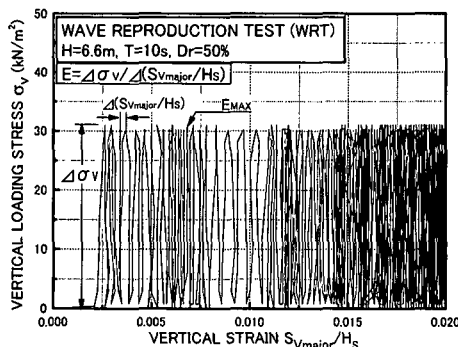


図-10 鉛直応力と鉛直ひずみの関係 (WRT)

(6)を適用し地盤の剛性変化を考慮した。さらに図-10の結果を基に式(5),(6)に含まれるパラメータをそれぞれ $c=0.83$, $d=0.17$, $(S_{vmajor}/H_s)_{0.5}=0.06$ とした。またCALの解析と同様に、地盤の剛性変化と併せて図-6のような内部摩擦角低下を考慮した解析を試みた。

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。繰返し回数が10回程度までは両者の一致度が高いことが分かる。しかし繰返し回数が10回以上になると解析値は実測値を過大評価する傾向にある。本解析法では地盤全体の弾性係数を一律に変化させているために両者の差が生じたと思われる。今後、地盤の剛性変化を再現させる領域や、さらに他の要因が地盤の剛性および強度に及ぼす影響を明確にできれば、本解析法に

よって、さらに実測値に近い評価を与えることができると考えられる。

6. 結 論

解析および模型試験より以下の結論が得られた。

1. 地盤の剛性変化および土の内部摩擦角の変化を考慮した本解析法は、構造物が振動沈下するパターンの地盤内側方流動変形挙動を良く再現する。
2. 提案した解析法は、繰返し水平および鉛直力が同時に作用する構造物の沈下を過大評価する傾向にある。このような条件で変形値を正確に予測するには、さらなる要因分析が必要である。

謝辞：室蘭工業大学 川村志麻 助手、北海道大学大学院 石川達也 助教授、三島英将 君には貴重な討論を戴いた。記して深甚なる謝意を表します。

参 考 文 献

- 川村志麻・三浦清一・横浜勝司・宮浦征宏 (1999): 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.
- 三浦清一・川村志麻・田中則男 (1996): 波浪を受ける消波構造物・地盤系の流動破壊とその評価, 海岸工学論文集, 第43巻, pp. 1016-1020.
- 横浜勝司・三浦清一・川村志麻 (2002): 静的及び繰返し荷重を受ける構造物・地盤系の変形挙動と推定法, 土木学会論文集, No. 715/III-60, pp. 263-275, 2002.