

海底地盤の異方性が海洋構造物の流動変形特性に 及ぼす影響とその評価

川村 志麻*・三浦 清一**・林 秀人***・佐々木徹也****

海洋構造物を支持する砂地盤の流動現象を評価するために、波浪のような外力条件を再現した一連の模型実験を行った。本研究では、特に種々の堆積条件下にある地盤の流動変形特性が調べられている。その結果、1) 海洋構造物が繰返し荷重を受け、ロッキング沈下するような場合は、載荷方向の違いによって地盤の強度や側方変形挙動に変化が現れる可能性がある、2) 支持地盤の側方流動変形の発達方向は、載荷方向の違いに関わらず、地盤の堆積角と最大主応力方向とのなす角に依存している、3) この側方変形発達方向は、載荷履歴や異方性の影響に起因する地盤の弾塑性挙動の変化によってもたらされている、等の事実が示されている。

1. ま え が き

現在、沿岸域の砂の流失・流動現象やそれに起因する支持地盤の破壊事例が数多く報告されている。今後はさらに海岸環境保全の重要性は増すと予想され、新たな設計手法の開発が望まれてくるであろう。しかし、構造物の沈下や消失、護岸の吸出し及び海底地盤の液状化現象等の地盤破壊の形態は外力の作用条件によって種々変化するから、破壊を支配する要因を明確にすることは非常に難しい。

本研究では、海洋構造物支持地盤の強度・変形は砂の流動特性に依存するという事実に基づき、その特徴を波浪のような荷重を再現した模型実験により詳細に調べた。特に、海底斜面に沿って砂が運搬された地盤のように強い異方性の存在が考えられる場合は、異方性の影響を把握することは重要である。得られた実験結果より、波浪のような繰返し荷重を受ける構造物・地盤系の流動変形方向を決定する要因を明らかにし、海底地盤の破壊防止策の提案に向けての基礎データを収集した。

2. 試験装置と試験概要

(1) 試験装置と模型地盤の作製方法

本研究で用いた試験装置の全体図を図-1に示す。模型土槽の内寸法は幅 2000 mm、高さ 700 mm、奥行き 600 mm である。載荷装置は、繰返し載荷装置(鉛直方向、水平方向)及び構造物周辺地盤の変動水圧を再現するための変動圧載荷装置と静的載荷装置である。なお、試験装置の詳細は川村ら(1999)に詳しい。

各載荷試験では、ペロフラムシリンダーからの荷重を模型構造物に任意に載荷できるようになっている。鉛直方向および水平方向の繰返し載荷装置には、それぞれ2組の変位計とロードセルが具備されており、模型構造物

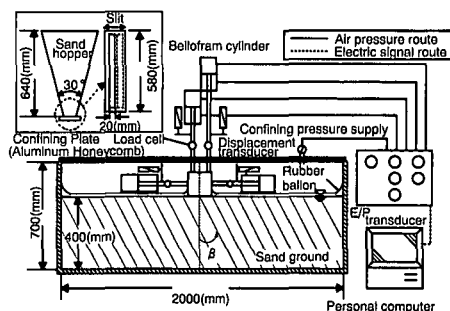


図-1 試験装置図

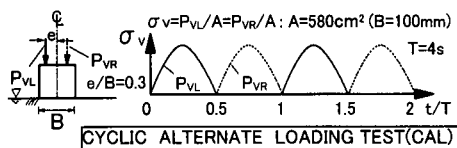
の変位量と作用する荷重が随時測定できるようになっている。なお、今回の試験では、繰返し鉛直載荷試験装置を使用し、構造物のロッキング現象をシミュレートした。堆積構造異方性を有する地盤は、図-1に示す模型土槽を目標とする堆積角 β になるように傾斜させ、豊浦砂($\rho_s=2.65 \text{ g/cm}^3$, $\rho_{dmax}=1.658 \text{ g/cm}^3$, $\rho_{dmin}=1.354 \text{ g/cm}^3$)をサンドホッパーから空中落下させることによって作製されている(川村・三浦, 2003)。本研究では、堆積角、すなわち鉛直方向と地盤の堆積面とのなす角 β が、 90° と 60° になるようにしている。なお、地盤厚は $H_s=400 \text{ mm}$ である。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模型地盤の飽和化を計った。

模型構造物は幅が 100 mm、高さ 100 mm、奥行き 580 mm、重量 0.127 kN であり、模型地盤との接触面を完全粗とするために底面にサンドペーパー (G 120) を貼付けている。

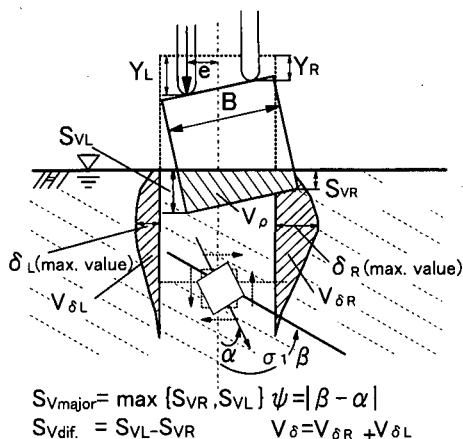
(2) 試験方法と変形量の定義

本研究では、海洋構造物が繰返し荷重を受けロッキング沈下し、それに起因して地盤が側方流動変形する場合の強度・変形特性を調べた。行った試験は、繰返し交互載荷試験 (Cyclic Alternate Loading Test; CAL 試験と略称) である。この試験では、地盤が流動破壊を起こすまで繰返し荷重を載荷している。図-2に示すように、CAL 試験では、偏心率 $e/B=0.3$ の下で半正弦波荷重 ($P_{VL}=P_{VR}$) を模型構造物に左右交互に与えている。なお、

* 正 会 員 工 博 室蘭工業大学助手工学部建設システム工学科
** フェロー 工 博 北海道大学大学院教授工学研究科
*** 正 会 員 北日本港湾コンサルタント株式会社計画2課係長
**** 学生会員 室蘭工業大学大学院工学研究科



圖—2 試驗方法



図一3 変形の定義

載荷方向の相違が地盤の強度・変形特性に影響を及ぼす可能性があるため、ここでは載荷1波目の方向が左側から始まる CAL-L 試験と右側から始まる CAL-R 試験の2ケースを実施している。各試験いずれも周期 T は4秒である。ここで偏心距離 e は、模型構造物の中心から載荷点までの距離と定義され、試験開始時の偏心度 e/B は0.3になるように設定されている。

図一3に示すように、構造物の左右の沈下量 S_{VL} , S_{VR} は変位計の計測値 Y_L , Y_R と構造物との幾何学的な関係により求められている。本研究では、卓越した方の値を沈下量 $S_{V\text{major}}$ 、左右の沈下量の差を不同沈下量 $S_{V\text{diff}}$ ($= S_{VL} - S_{VR}$) と定義した。地盤の側方変形は、直径 1.9 mm、長さ 200 mm のスパゲッティを構造物底端点から 25 mm 間隔で地盤内に 8 本挿入し、左右の水平変形量の最大値 δ_L , δ_R を測定することによって把握されている。なおスパゲッティが初期剛性の 2% 以下になった後、試験を開始している。また、異方性を示す尺度として堆積角 β と最大主応力方向 α とのなす角 ψ ($0^\circ < \psi < 90^\circ$) を用いている。なお、偏心荷重場の α は Boussinesq 解をもとに求められている。例えば $e/B = 0.3$ の α は 9.1° (反時計回りを正) になる (川村・三浦 2003)。さらに構造物の沈下による単位奥行当たりの体積を沈下土量 V_o (mm^3/mm)、スパゲッティの変位した単位奥行当たりの体積を側方流動土量 V_s (mm^3/mm)、その比を土量比 V_s/V_o と定義し、以下の議論に用いた。

3. 試験結果と考察

図-4は、 $\beta=90^\circ$ と 60° 地盤における繰返し強度を示したものである。 $\beta=90^\circ$ と $\beta=60^\circ$ 地盤の強度比較では、繰返し強度に明確な相違が認められる。これは単調荷荷場においても指摘されているように(例えば Oda・Koishikawa, 1979; Kimura ら, 1984; Tatsuoka ら, 1990), 異方性の影響が繰返し交互試験においても明らかに存在していることを示すものである。また、荷荷方向の相違によって、同一地盤の強度に差が現れていることは非常に興味深い。

次に、左右の側方変位量 δ_L 、 δ_R と沈下量比の関係を 図-5 に示した。各試験ともに δ_R に大きな差は見られない。しかしながら、 δ_L は CAL-R の方が小さくなっている。すなわち、載荷方向の違いによって、左側の側方変位量に影響が現れている。

図-6(a)と(b)は $\beta=60^\circ$ 地盤の沈下土量 V_p 及び側方流動土量 V_s と沈下量比の関係を示したものである。なお、図中には単調中心(SCL)及び繰返し中心(CCL)載荷試験結果(川村・三浦, 2003)も加筆している。図より、 V_p はSCL、CCLとCAL-L試験において、ほぼ同値を示しているが、CAL-R試験では他の試験と比べて V_p は減少していることがわかる。また側方流動土量 V_s においてもCAL-R試験のみが減少している。このように載荷方向の相違によって沈下土量や側方流動土量に変化が認められる。図-6で得られた結果に基づいて、土量比-沈下量比の関係を示した(図-7参照)。この土量比は支持力動員度や変形特性の把握に有効であることが明らかにされている(川村・三浦, 2003)。上述の強度変化と同様、強度の小さいCAL-Rの方が小さい値を示している。

次に、構造物の沈下方向と異方性の関係を調べてみた。図—8は各試験における載荷応力に対する不同沈下量 $S_{v.dif.}$ の関係を示したものである。ここで、各データは載荷回数 $N_c=2000$ 回時のものを採用している。なお構造物の不同沈下量が $S_{v.dif.}>0$ のとき左側が、 $S_{v.dif.}<0$ のとき右側が沈下することを示す。図より、 $\beta=90^\circ$ の地盤では、右側に沈下しているものが多いが、不同沈下量はほとんど生じていないことがわかる。

一方、 $\beta=60^\circ$ 地盤では載荷方向や載荷応力によらず、ほぼ左側に沈下している。挿入図に示したように、これらの沈下は地盤の堆積角 β の方向へ進行している。このことは、構造物支持地盤が完全塑性流動を生じる方向は地盤の堆積条件に強く影響を受けることを示すものであろう。特に CAL-R 試験では、載荷応力が増加するに従って不同沈下量も大きくなっており、より強い構造異方性への依存性を示すようである。一方、CAL-L 試験では、多

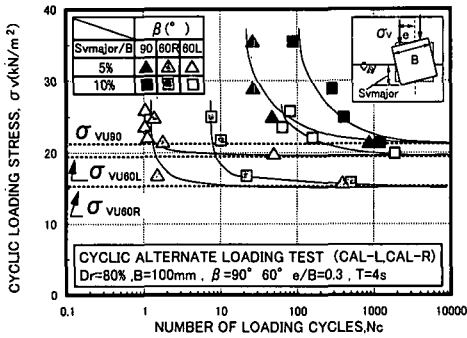
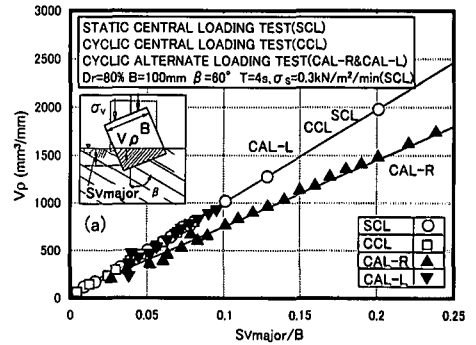


図-4 異方性地盤の繰返し強度



(a) 沈下土量

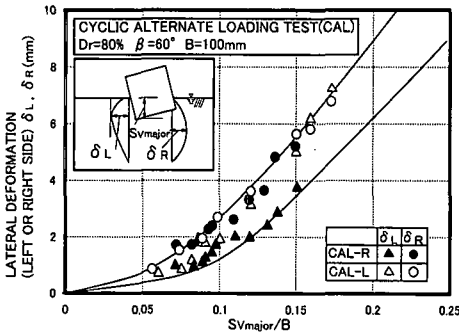
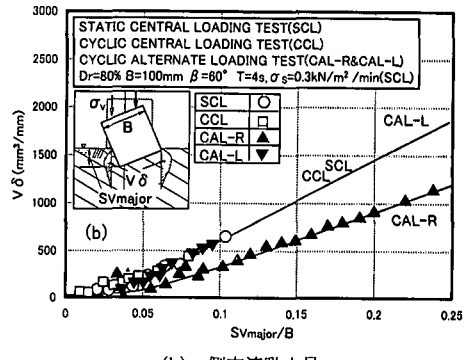


図-5 側方変位量と沈下量比の関係



(b) 側方流動土量

図-6 発生土量と沈下量比の関係

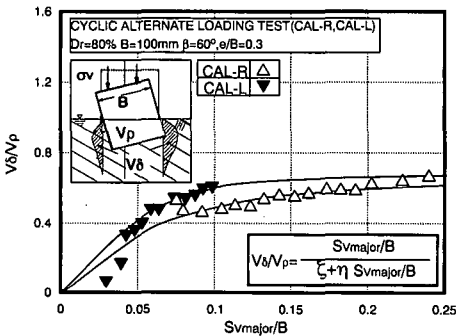


図-7 土量比と沈下量比の関係

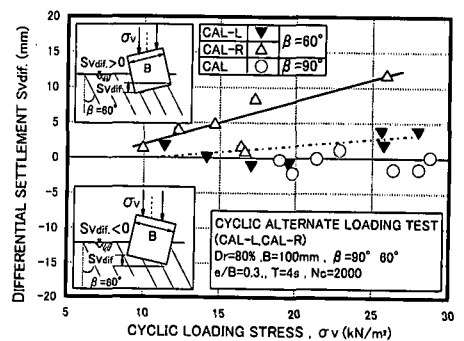


図-8 不同沈下量と載荷応力の関係

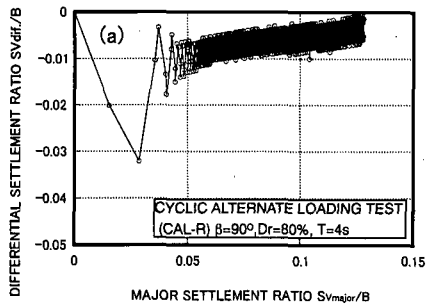
くは左に傾いているものの、CAL-Rと比べて不同沈下量はあまり大きくない。これらの事実は、載荷履歴と異方性の影響が構造物の沈下形態に極めて重要な役割をもっていることを示唆している。

このことをさらに詳細に調べてみた。図-9と図-10は各試験の不同沈下量、繰返し載荷による地盤の変形係数 E (E_L : 左側, E_R : 右側) と沈下量の代表的な関係を示したものである。ここでは、仮に変形係数を各載荷応力の増分 $\Delta\sigma_v$ をその時に生じる左右の鉛直ひずみ $\Delta(S_{vL}/H_s)$ または $\Delta(S_{vR}/H_s)$ (Δ : 各沈下量/地盤厚) でそれぞれ除した値として定義した。また、載荷の定義とし

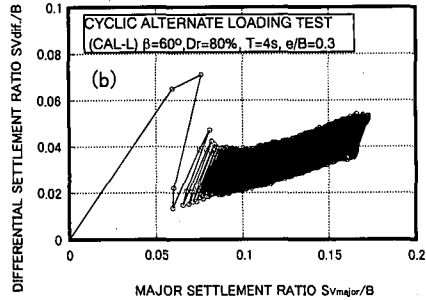
て CAL-R 試験では、右側が載荷 1 波目、左側が載荷 2 波目 (CAL-L 試験なら左側が 1 波目、右側が 2 波目) として、以下の考察に用いている。

図-9より、 $\beta=90^\circ$ 地盤では載荷 1 波目の影響により載荷初期に右側沈下が進行するが、最終的には、不同沈下はほとんど生じていないことがわかる。

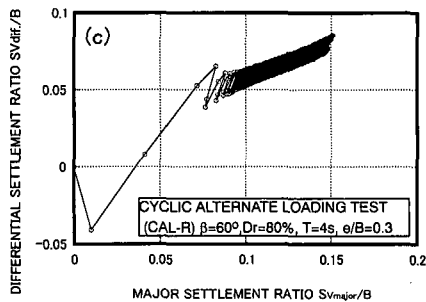
一方、 $\beta=60^\circ$ 地盤では載荷方向によらず、左側に沈下が卓越していることがわかる。これは、図-10(b)と(c)に示すように、地盤の弾性的な挙動の始まる時点の沈下量が左側よりも右側の方が小さいことに起因しているようである。なお $\beta=90^\circ$ 地盤では、載荷 2 波目の左側の地盤



(a) $\beta = 90^\circ$, CAL-R

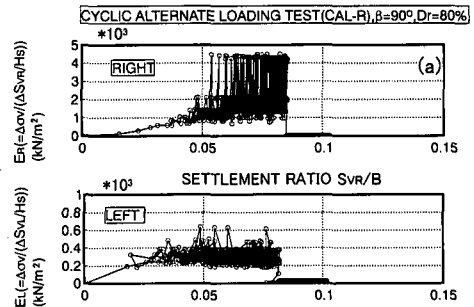


(b) $\beta = 60^\circ$, CAL-L

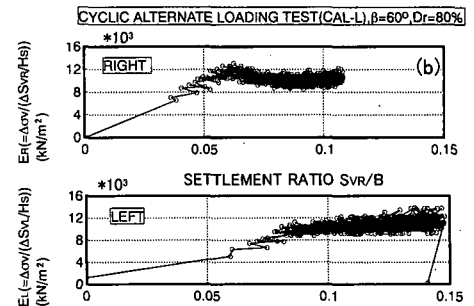


(c) $\beta = 60^\circ$, CAL-R

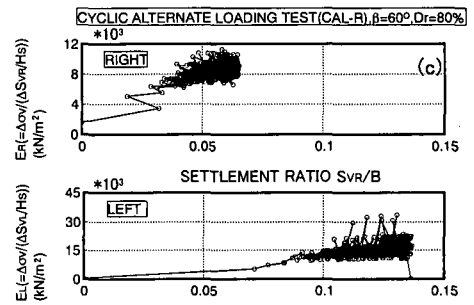
図-9 不同沈下量の発達方向



(a) $\beta = 90^\circ$, CAL-R



(b) $\beta = 60^\circ$, CAL-L



(c) $\beta = 60^\circ$, CAL-R

図-10 沈下に伴う左右の変形係数の変化

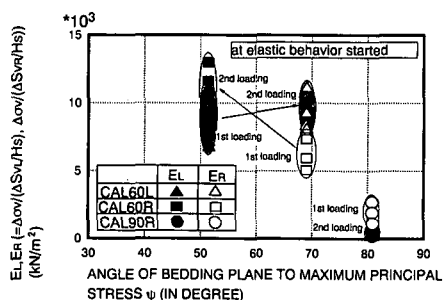
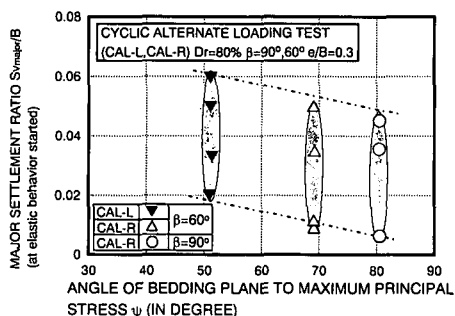
が先に弾性的な挙動に移行している (図-10(a)参照)。

この弾性的な挙動を始める時点の左右の変形係数 E_L , E_R と ψ との関係を示してみた (図-11 参照)。図より、載荷応力 σ_v の違いに起因して変形係数はある範囲内で変動しているが、載荷方向の ψ が大きいほど変形係数 E は小さな傾向にあることがわかる。

また、左右の ψ が同じケース ($\beta = 90^\circ$ 地盤, $\psi = 80.1^\circ$) では、載荷 1 波目の変形係数 E_R の方が 2 波目 E_L より大きくなっている。一方、 $\beta = 60^\circ$ 地盤の載荷 1 波目の ψ が大きい場合 (CAL-R60, $\psi = 69.1^\circ$) では、2 波目の方向の E_L はかなり大きくなっているが、載荷 1 波目の ψ が小さい場合 (CAL-L60, $\psi = 50.9^\circ$) では、2 波目の方向の E_R は 1 波目の E_L よりも若干大きい値かほぼ同じ値を示すよ

うである。 $\beta = 60^\circ$ 地盤では、左側に沈下 ($S_{var} > 0$) が進行していることから、 E_L の方が E_R よりも小さな値を示すものと予想された。しかしながら、本試験結果のように、地盤が弾性的な挙動を示した時の左右の E の大小と側方変形方向の間に正の相関はないようである。

図-12 は、同様に載荷 1 波目の方向の ψ と弾性的な挙動が始まる時点の沈下量の関係を示してみた。図より ψ が大きくなるにつれ、早い段階で地盤が弾性的な挙動になっていることがわかる。また前述のように、同一の堆積角 β においても載荷 1 波目の ψ の違いによって、その発生時点の沈下量は変化するようである。いずれにして

図-11 ψ と弾性挙動開始時の変形係数の関係図-12 ψ と弾性挙動開始時の沈下量の関係

も本模型試験では、 ψ が小さい方向(弾性的な挙動になるのが遅い方向)に側方流動変形方向が決定される。このように波浪のような繰返し荷重を受け、海洋構造物がロッキングする場合では、塑性くさびの発達に伴い、地盤は塑性から弾性挙動を示し、徐々に側方に流動が進行し破壊に至る。その側方流動方向は、構造物に作用する外力によって変化する ψ の影響を強く受け、特に本模型試験では、 ψ の小さい方向に変形が進行している。ただし、 ψ が左右同等の場合では、載荷履歴のみの影響を受

け、載荷1波目の方向に変形が卓越する。いずれにしても、これは載荷履歴や異方性の影響に起因する地盤内の弾塑性挙動の変化によるものである。

このように構造物の沈下方向が推定されれば、側方流動が起こるような構造物支持地盤の破壊を合理的に阻止できることが可能になるといえる。

4. 結 論

一連の模型試験と考察により、以下のような結果が得られた。

- (1) 堆積構造異方性は海洋構造物支持地盤の繰返し強度や沈下性状、側方変形挙動に大きな影響を及ぼしている。
- (2) 海洋構造物支持地盤のロッキング沈下に起因する側方流動は、構造物に作用する外力によって変化する ψ の影響を強く受け、その ψ の小さい方向に変形が進行する。

参 考 文 献

- 川村志麻・三浦淳一 (2003): 種々の載荷条件下にある構造異方性砂地盤の支持力-側方変形挙動, 土木学会論文集, No. 736, III-63, pp. 115-128.
- 川村志麻・三浦淳一・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研究, 土木学会論文集, No. 624, III-47, pp. 77-89.
- Kimura, T., O.Kusakabe and K.Saitoh (1985): Geotechnical model tests of bearing capacity problems in a centrifuge, Geotechnique, Vol. 35, No. 1, pp. 33-45.
- Oda, M. and I. Koishikawa (1979): Effect of strength anisotropy on bearing capacity of shallow footing in a dense sand, Soils and Foundations, Vol. 19, No. 3, pp. 15-28.
- Tatsuoka, F., M.Okahara, T. Tanaka, K. Tani, T. Morimoto and Siddiquee, M. S. A. (1991): Progressive failure and particle size effect in bearing capacity of a footing on sand, Proc. of Geotech. Eng. Congress, Special Publication, ASCE, No. 27, Vol. 2, pp. 788-802.