

海洋構造物を支持する砂地盤の側方流動破壊の 推定法に関する基礎的研究

川村 志麻*・三浦 清一**・林 秀人***・勝世 佑子****

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、波浪のような荷重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、海洋構造物支持地盤の堆積構造異方性は、側方変形挙動に強い影響を与えることが明らかにされた。得られた側方変形特性に基づいて、海洋構造物の天端における 2 点の鉛直変位から構造物の変位量、地盤内側方変形量及び側方流動量を推定する方法を提案している。提案式による推定値と観測された防波堤直下の側方変形量との比較から、本推定式の有用性が示されている。

1. ま え が き

現在、砂浜海岸域の砂の流失・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、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化化現象等の地盤破壊の形態は、外力の作用条件や地盤の堆積条件によって種々変化することから、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破壊は砂の流動特性に依存するという事実に基づき、流動現象を評価するための方法を検討した。波浪のような荷重を想定した模型実験の結果に基づいて、構造物天端の 2 点の鉛直変位から地盤内側方変形量及び側方流動量を推定する方法を提案している。ここでは、実測データと推定値を比較し、提案した推定式の有用性を検討している。

2. 試験装置と試験概要

2.1 試験装置と異方性地盤の作製方法

本研究で用いた試験装置を図-1 に示す(川村ら, 1999)。模型土槽の内寸法は幅 2000 mm、高さ 700 mm、奥行き 600 mm である。各載荷試験では、ベロフラムシリンダーから模型構造物に任意の荷重を載荷できるようになっている。また静的載荷試験では、載荷位置を変化させることにより偏心載荷が可能である。載荷装置には変位計とロードセルが具備されており、模型構造物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。

海洋構造物支持地盤の堆積条件の違い、すなわち地盤の堆積構造の違いが側方流動変形挙動に及ぼす影響を調べるために、種々の異方性地盤を作製した。それらは、以下のような手順によって作製されている(図-2 参照)。

・二次元平面ひずみ模型土槽を所定の角度 θ まで傾斜

- * 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)技術部計画課係長
- **** 学生会員 室蘭工業大学大学院工学研究科

させる(図-2(a) 参照)。

- ・落下高さ 800 mm、サンドホッパーの移動速度 20 cm/s で豊浦砂 ($\rho_s = 2.65 \text{ g/cm}^3$, $\rho_{d \max} = 1.658 \text{ g/cm}^3$, $\rho_{d \min} = 1.354 \text{ g/cm}^3$) を自由落下させる。
- ・模型地盤の深さが 400 mm になるように豊浦砂を堆積させる。土槽端部では、サンドホッパー底部にニ

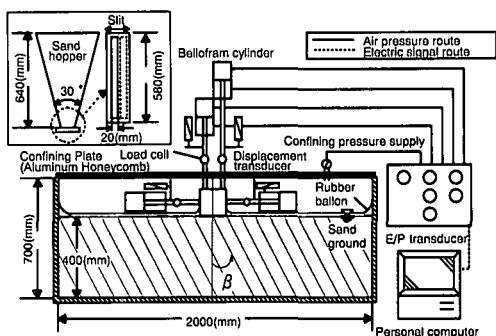


図-1 模型試験装置

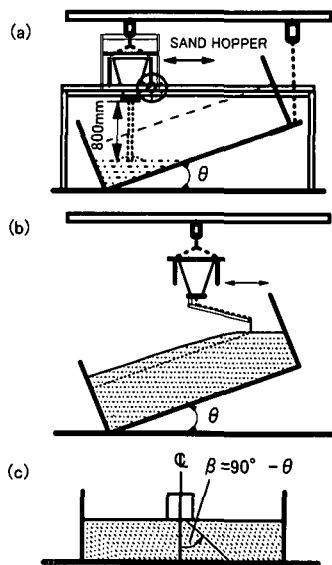


図-2 異方性地盤の作製方法

スでコーティングした木版を取付けて砂を堆積させている (図-2(b) 参照)。

- ・堆積後、模型土槽を水平に戻す。その後地盤の乱れが生じないように余分な砂を取除き、地盤の表面を整える (図-2(c) 参照)。

本研究では、鉛直方向と堆積面とのなす角 β (反時計回りを正) が 45, 55, 60, 75, 90° になるように模型地盤を作製している。なお、地盤の相対密度 D_r は 50 と 80% である。地盤作製後、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 (G120) を貼付けている。

2.2 試験方法と変形量の定義

本研究では、海底地盤が側方流動変形する場合の変形特性を調べるために、静的中心、偏心载荷試験 (それぞれ SCL, SEL と略称) 及び繰返し中心、偏心载荷試験 (それぞれ CCL, CEL と略称) を行っている。これらの試験では、地盤が流動破壊を起こすまで静的荷重や繰返し荷重を载荷し、構造物の沈下に伴う地盤の側方流動変形が調べられている。荷重条件として、静的载荷試験では、偏心度 e/B (偏心距離 e を構造物の幅 B で除した値) が 0, 0.15, 0.3, 0.5 になるように荷重 P_s を载荷している (図-3(a), (b) 参照)。なお、载荷速度は $0.3 \text{ kN/m}^2/\text{min}$ である。繰返し载荷試験では、偏心度 $e/B=0, 0.3$, 周期 4 秒で半正弦波荷重 P_v を载荷している (図-3(c), (d) 参照)。また、一連の試験では、荷重を構造物の左側から载荷している。

図-4(a) 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 $S_{V\text{dif}}$ ($=S_{VL}-S_{VR}$) 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 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。本研究では左右の卓越した方の側方変位を δ_{major} , 小さい方の値を δ_{minor} としている。側方変形の発生の仕方は鉛直方向と最大主応力方向とのなす角 α (反時計回りを正) と堆積角 β の関係に依存するという事実 (川村ら, 2002) に基づいて、ここでは δ_{major} の発生方向を図-4(b) に示すように定義した。図は β と α の関係を 6 つに分類して示している。すなわち α と β の関係がわかれば、 δ_{major} の発生方向 (構造物左側または右側) を把握することができることになる。なお、SEL 試験の α は Bous-

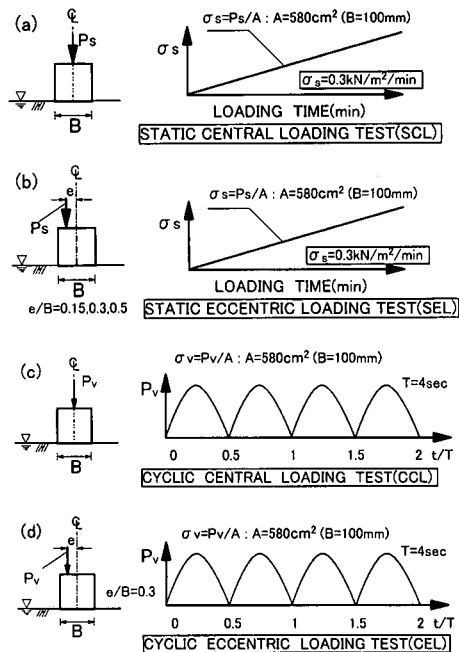


図-3 载荷方法 (SCL, SEL, CCL 及び CEL 試験)

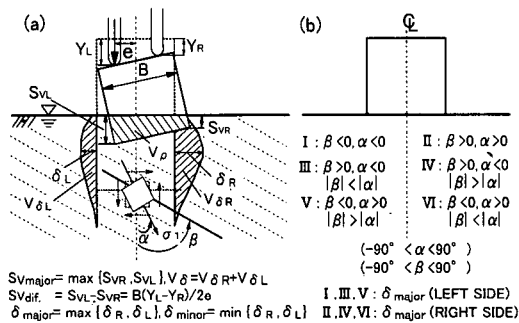


図-4 変位量の定義と最大側方変位量の発生方向

sinesq 解により求められている (川村ら, 2002)。さらに、構造物が沈下した部分の単位奥行当たりの体積を沈下土量 V_ϕ (mm^3/mm)、地盤が側方変位した部分の単位奥行当たりの体積を側方流動土量 V_s (mm^3/mm) と定義し、以下の議論に用いた。

3. 試験結果と考察

3.1 側方変形と沈下に及ぼす堆積構造異方性の影響

波浪場のような複雑な载荷条件下での構造物-地盤系の安定性を評価する上では、地盤内側方流動変形特性の把握は有用である (川村ら, 1999)。そこで、はじめに堆積構造の違いが地盤内の変形挙動に及ぼす影響を調べた。

写真-1 は、静的中心载荷 (SCL) 試験から得られた地

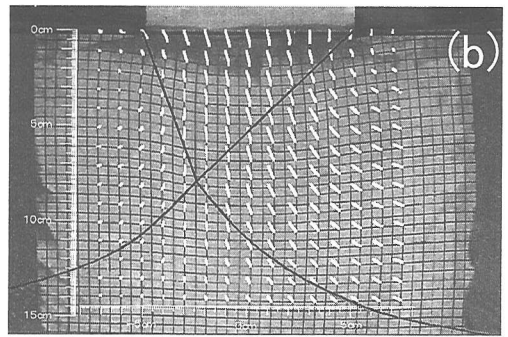
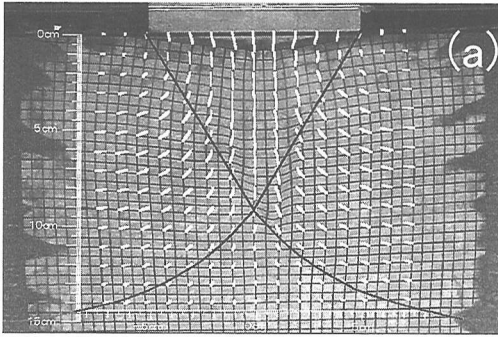


写真-1 地盤内の变形挙動 $D_r=80\%$: (a) $\beta=90^\circ$ (SEL), (b) $\beta=45^\circ$ (SEL)

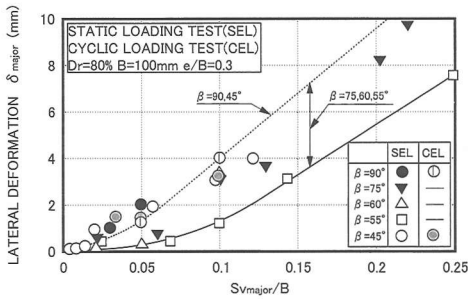


図-5 側方変形量と沈下量の関係

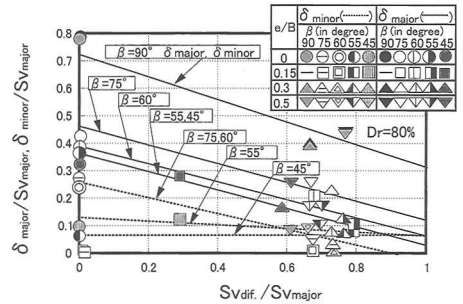


図-6 正規化側方変位量と不同沈下量の関係

盤内变形挙動の様子を示している。それぞれ構造物の沈下量が 10 mm に至るまでに移動する砂粒子の軌跡と塑性くさび及びすべり線の発生状況を表している。地盤条件は $D_r=80\%$ で $\beta=90, 45^\circ$ である。図より、 $\beta=90^\circ$ の地盤では塑性くさびの形成がほぼ左右対称であるのに対し、 $\beta=45^\circ$ の地盤では塑性くさびの頂点が左側に移動し、これに起因して左右の側方変形量に変化が現れていることがわかる。このことは、側方変形量によって海底地盤の安定性を評価するためには、地盤の堆積構造を的確に把握する必要があることを示唆している。

このことをさらに詳細に調べるために、卓越した方の側方変位量 δ_{major} と沈下量の関係を調べてみた(図-5 参照)。SEL, CEL 試験 ($e/B=0.3$) 結果についてプロットしている。上述の傾向と同様、 δ_{major} の発生の方は堆積構造の違いによって変化している。

以上のことから、地盤の堆積構造の違い、すなわち初期構造異方性は側方流動変形挙動と沈下挙動に影響を及ぼしていることが明らかとなった。

次に、沈下量と側方変位量との関係を調べてみた。ここでは、図-5 に示す側方変位量 δ_{major} と沈下量 $S_{v\text{major}}/B$ 関係において、 δ_{major} が急増するまでの範囲、すなわち、すべり破壊を起こす時点までの構造物-地盤系の変形挙動に着目している。

図-6 は、構造物-地盤系がすべり破壊を起こす時点

の側方変位量 $\delta_{\text{major}}, \delta_{\text{minor}}$ と不同沈下量 $S_{v\text{dif.}}$ との関係を示したものである。側方変位量 $\delta_{\text{major}}, \delta_{\text{minor}}$ 及び不同沈下量 $S_{v\text{dif.}}$ を沈下量 $S_{v\text{major}}$ により正規化した値との関係 ($\delta_{\text{major}}/S_{v\text{major}}, \delta_{\text{minor}}/S_{v\text{major}} - S_{v\text{dif.}}/S_{v\text{major}}$ 関係) として整理している。

いずれの試験条件においても、 $\delta_{\text{major}}, \delta_{\text{minor}}$ と不同沈下量の間には、ほぼ線形関係が存在することが明らかである。しかしながら、その発生の方は地盤堆積構造異方性によって変化している。特に δ_{minor} の勾配は、異方性の強い影響を受けている。

この事実に基づいて、地盤の側方変位量 $\delta_{\text{major}}, \delta_{\text{minor}}$ と構造物の沈下量 $S_{v\text{major}}$ 及び不同沈下量 $S_{v\text{dif.}}$ との関係を定式化した。すなわち、以下のように表現される。

$$\delta_{\text{major}} \text{ OR } \delta_{\text{minor}} = -a \cdot S_{v\text{dif.}} + b \cdot S_{v\text{major}} \quad \cdots (1)$$

a は図中の直線勾配、 b は直線の切片である。

図-7 は、式(1)の定数 a 及び b と地盤の堆積角 β との関係を示している。これより、 δ_{major} では定数 a は地盤の堆積角の違いに関わらず、一定値(ここでは 0.48)を示すが、 δ_{minor} ではある堆積角(本研究では $\beta=60^\circ$ 以下)から急激な低下が認められる。既往の研究では、異方性による支持力の変化も δ_{minor} の発達に強く依存していることが明らかにされており(川村ら, 2002)、得られた結果は過去の研究成果を支持するものである。一方、定数 b は堆積角 β の低下に伴って $\delta_{\text{major}}, \delta_{\text{minor}}$ とともに減少す

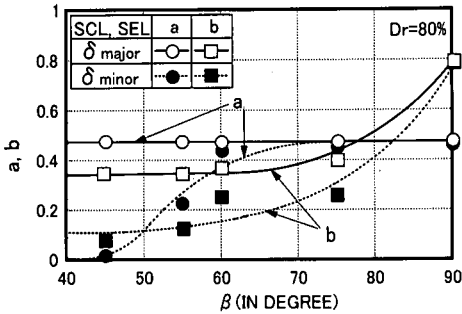
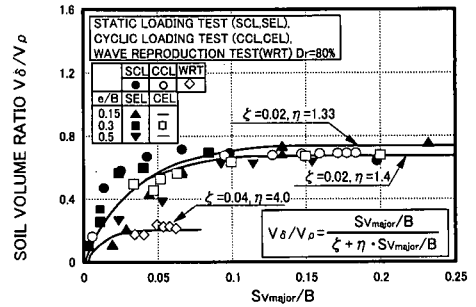
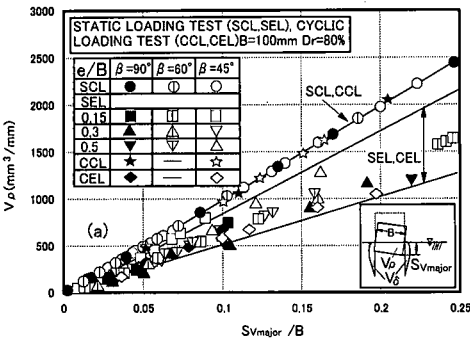
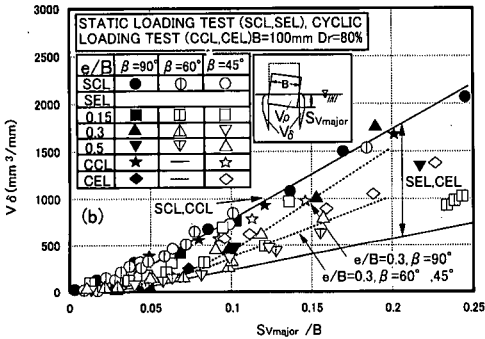

 図-7 定数 a, b と堆積角 β の関係


図-9 土量比と沈下量の関係

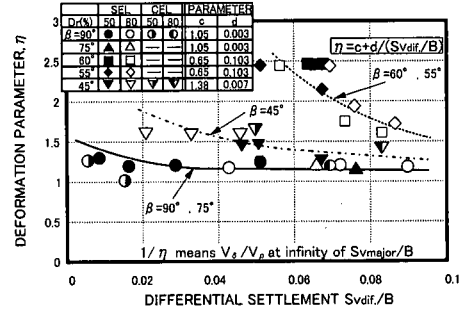


(a) 沈下土量



(b) 側方流動土量

図-8 側方流動土量と沈下量の関係


 図-10 η と不同沈下量の関係

強く受けていることがわかる。特に SEL, CEL 試験のような偏心载荷条件下において、その傾向は顕著である。

図-9 は側方流動土量 V_d を沈下土量 V_o で正規化した土量比 V_d/V_o と沈下量比 S_{vmajor}/B の関係を示している。図中には、滑動-沈下破壊モードを想定した波浪場再現試験 (WRT と略称) の結果も併せて示している (川村ら, 1999)。構造物の沈下に伴い土量比 V_d/V_o は増加傾向を示し、その後収束している。特に、地盤の堆積条件や、滑動-沈下破壊モード (WRT 試験) と沈下が卓越する破壊モード (SCL, CCL, SEL 及び CEL 試験) のような破壊形態の違い及び偏心度の違いによって、その収束値は変化しているが、それらの関係は双曲線近似できるようなのである。すなわち、以下ようになる。

$$V_d/V_o = (S_{vmajor}/B) / (\xi + \eta \cdot S_{vmajor}/B) \quad \cdots \cdots (2)$$

と、 η はそれぞれ初期勾配と極限值における土量比の逆数である。

次に、 η と不同沈下量の関係について調べてみた (図-10 参照)。 ξ に関しては、本実験範囲においてほぼ同値 ($\xi = 0.02 \sim 0.04$) を示しているの、 η について整理を行っている。また、不同沈下を起こさないような SCL, CCL 試験では、 V_d/V_o は一定 ($= 0.7$: 川村ら, 2002) になることから、ここでは不同沈下を生じさせる SEL, CEL 試験の結果について整理している。図より、不同沈下量と土量の間には偏心度の違いによらず一義的な関係が存在するものの、異方性の影響を強く受けていること

る傾向を示す。

以上のことから、本推定式のように沈下量と不同沈下量が把握できれば、左右の側方変形量を簡便に推定できようである。

3.2 側方流動土量に与える異方性の影響とその評価

ここでは、発生する流動土量に与える異方性の影響を定量化した。

図-8 は沈下土量 V_o 及び側方流動土量 V_d と沈下量の関係を示している。一例として、側方流動土量では $e/B = 0.3$ の場合を点線で示している。図より、沈下土量は異方性の影響を受けないものの、側方流動土量はその影響を

がわかる。この関係を表すと次のように表現される。

$$\eta = c + d / (S_{v \text{ dir.}} / B) \dots\dots\dots (3)$$

ここで c, d は図中に示す係数である。このように構造物天端の鉛直変位量より沈下量を求め、そのデータから沈下土量 V_p を算出すれば、式 (2), (3) によって側方流動土量 V_s を推定することが可能となる。海底地盤のように実際の側方流動量を計測することが困難な場合は、本推定式は極めて有用な情報を与えるものであろう。

3.3 海洋構造物支持地盤の側方変形量の推定法

ここでは、構造物の天端 2 点の計測値から沈下量を求め、得られた沈下量から側方変形量を推定する方法について検討した。筆者らは、波浪力のような繰返し荷重を受ける構造物の沈下量 $S_{v \text{ major}}$ を天端 2 点の計測値により求める方法を以下のように提案している (横浜ら, 2000)。

$S_{v \text{ major}}$

$$= \frac{Y_L + (B/2 - e_d)(Y_L - Y_R)/2e_d + a[(Y_L - Y_R)/2e_d]^2}{1 - (V_s/V_p)(C_p/C_s)(B/H_s)(Y_L - Y_R)/2e_d} \dots\dots\dots (4)$$

ここで、 Y_L, Y_R ($Y_L > Y_R$) : 構造物天端左右 2 点での鉛直変位計測値、 B : 構造物幅、 $2e_d$: 2 地点での鉛直変位測定点間の距離、 a : 波力の作用位置、 H_s : 地盤厚、 V_s/V_p : 式 (2) で与えられる土量比、 C_s, C_p : 側方流動及び沈下に関する変形パラメータである。また、不同沈下量は構造物との幾何学的な関係より、図-4 に示す算定式によって求めることができる。

これらの式と提案した式 (1) を用いて、天端 2 点の計測値から左右の側方変形量の推定を行った。なお、推定に必要なパラメータ C_p, C_s は模型実験によって簡単に求めることができる (横浜ら, 2000)。図-11 は実際の海洋構造物一地盤系における側方変位量の実測値と本推定値を比較した結果について示している。用いた実測値は、石巻港にある防波堤 (ケーソン No. 5, No. 24) に関するデータ (大槻ら, 1989) である。実測値が天端での 4 つの沈下量を平均して求められていることから、 $S_{v \text{ dir.}} = 0$ の条件で推定を行った。地盤条件は $\beta = 45^\circ, 90^\circ$ (相対密度 $D_r = 80\%$) のものである。図より、 $\beta = 90^\circ$ における推定値は実測値を上回るようであるが、 $\beta = 45^\circ$ における推定値は実測値に近づいていることがわかる。特に δ_{minor} は実測値と良く一致している。原位置では、一方の側方変形量しか計測されていないために、側方変形量の正確な把握は望めないが、左右の側方変形量の把握は海洋構造物一地盤系の安定性を評価する上で重要であると言えよう。

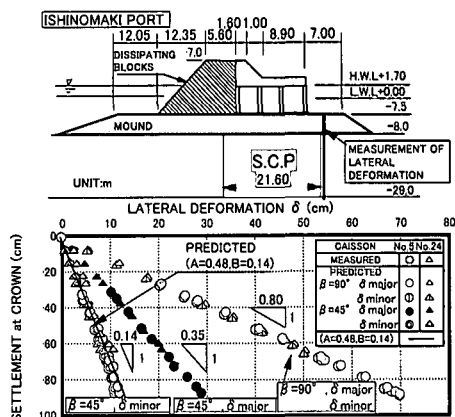


図-11 実測値と推定値の比較

以上のことから、本推定式は地盤内の変形、すなわち地盤の側方変位量やその発生方向及び流動土量を早急に把握することが要求される場合には、簡易手法として有用であると言える。

4. 結 論

一連の模型試験と考察により、堆積構造異方性は海洋構造物支持地盤の沈下性状や側方変形挙動に大きな影響を及ぼしていることが明らかにされた。また、堆積構造異方性を考慮した側方変位量推定法は、実際の海洋構造物一地盤系の側方変形挙動をある程度適切に推定できることが示された。

謝辞：本研究の一部に文部科学省科学研究費奨励研究 (A) (No. 13750465) の補助が与えられた。記して深甚なる謝意を表します。

参 考 文 献

- 大槻正紀・菅野典雄・池田 正 (1989)：砂強制置換地盤上の沈床式防波堤の挙動観測と解析，水産工学研究所技術報告，pp. 25-49.
- 川村志麻・三浦清一・横浜勝司 (2001)：構造物支持地盤の側方変形特性に及ぼす諸要因の影響，地盤工学シンポジウム論文集，地盤工学会，Vol. 46，pp. 287-292.
- 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研究，土木学会論文集，No. 624, III-47，pp. 77-89.
- 川村志麻・三浦清一・林 秀人・勝世佑子 (2002)：粗々の載荷条件及び堆積条件下にある砂地盤の支持力機構とその評価，第 57 回土木学会年次学術講演会概要集，第 III 部門。
- 横浜勝司・三浦清一・川村志麻・宮浦征宏 (2000)：波浪力のような繰返し荷重場にある構造物一地盤系の安定性評価に関する実験，海岸工学論文集，Vol. 47，pp. 936-940.