

地盤の変形特性を考慮した海洋構造物の変位量推定法

宮浦征宏*・三浦清一**・横浜勝司***・川村志麻****

1. まえがき

海洋構造物・地盤系の変位量を随時観測し、把握することは、海洋構造物の安定性を評価する上で極めて重要である。また、防波構造物を設計する上で構造物の変位量を考慮した設計手法が検討されている(下迫ら, 1998)ことから、今後は変形量を精度良く予測、計測することが望まれてくると言えよう。しかしながら、波浪場では気象条件、設置条件などの厳しい環境にあること、波浪条件などによって構造物・地盤系の破壊形態が変化することから、構造物の変位を予測することは非常に難しい。

このような背景から、筆者らは海洋構造物・地盤系の変位量を地盤の側方流動特性を考慮して推定することを目的として、二次元平面ひずみ模型土槽と種々の載荷が可能な装置を用いた模型試験を行った。得られた結果より、海底砂地盤で起こりうる変形特性について詳細な検討を行っている。また、従来より提案している変位量推定式が、徐々に進行するようすべり破壊を起こす海洋構造物の変位量を推定可能かどうかを併せて検討し、その有効性を確かめている。

2. 試験装置および模型地盤作製法

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。前面には厚さ 20 mm の強化ガラスが設置されており、地盤の変形挙動が観察できるようになっている。構造物に作用する波浪力を再現させるために用いた載荷装置は、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(三浦ら, 1998)と静的載荷装置である。

各載荷試験では、ベ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。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も可能である。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

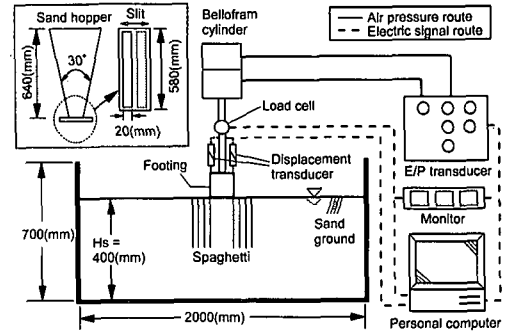


図-1 試験装置

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。

模型地盤は、豊浦砂 ($\rho_s = 2.65 \text{ g/cm}^3$, $\rho_{d\max} = 1.658 \text{ g/cm}^3$, $\rho_{d\min} = 1.354 \text{ g/cm}^3$) を空中落下法によって堆積させ、相対密度 $D_r = 50\%$ になるように作製された(地盤厚 $H_s = 400 \text{ mm}$)。また、土槽底部より通水し模型地盤の飽和化を計った。地盤内の変形量は、地盤内にスパゲッティを 8 本挿入し、それらを定点測定することによって把握されている(三浦ら, 1998)。

模型構造物は幅 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。

これらの装置および模型地盤を用いて一連の試験を行い、地盤-構造物系の変形特性を考慮した変位量推定法の提案を行った。

3. 試験方法

3.1 波浪場での地盤内要素点の応力状態を再現した試験

1g 場での模型試験においては、完全な相似則を満たすことは不可能である。そこで本研究では、図-2に示すように実波浪場と模型試験での地盤内の任意要素を考え、その要素における動的力学挙動を調べるための試験を行っている(三浦ら, 1998)。

今、実波浪場の地盤に発生する鉛直、水平、せん断応

* 学生会員 工修 室蘭工業大学大学院工学研究科建設工学専攻
** フェロー 工博 北海道大学大学院教授 工学研究科
*** 正会員 工修 専修大学北海道短期大学講師 土木科
**** 正会員 工修 室蘭工業大学助手 工学部 建設システム工学科

力を $\sigma_z, \sigma_x, \tau_{xz}$ とし、また模型試験での各応力を $\sigma_{zm}, \sigma_{xm}, \tau_{xzm}$ とする。これらに以下の関係が成立つように模型構造物に作用させる荷重を決定した。

$$\left\{ \begin{matrix} \sigma_z \\ \sigma_x \\ \tau_{xz} \end{matrix} \right\} = \left\{ \begin{matrix} \sigma_{zm} \\ \sigma_{xm} \\ \tau_{xzm} \end{matrix} \right\}$$

ここで $\sigma_{zmax}, \sigma_{xmmax}$ は、それぞれ実波浪場および模型試験での波浪1周期中に要素に発生する鉛直応力の最大値である。図-3は、本試験での載荷方法の一例を示している。高さ D 及び幅 B が 20 m の構造物に波高 7.5 m, 周期 10 s の波が作用したときの地盤内応力 (構造物直下 20 m の要素点) を、模型地盤内 (模型構造物直下 100 mm の要素点) に発生させるための繰返し鉛直荷重 (P_{VL}, P_{VR}), 水平荷重 (P_{HL}, P_{HR}), 変動水圧としての正弦波荷重 σ_c の時間的変化を示したものである。ここでは、変動水圧 σ_c 以外の値は繰返し鉛直力の最大値 P_{Vmax} (ここでは 0.214 kN) により正規化して示している。なお、このような載荷法による試験 (Wave Reproduction Test) を WRT と略称している。繰返し載荷は 2000 回まで継続し、模型構造物及び地盤の変位量を計測した。

3.2 海洋構造物の支持地盤がせん断すべり破壊をするような場合を想定した試験

波浪場にある地盤・構造物系の変形挙動を詳しく調べるために、海洋構造物の支持地盤がせん断すべり破壊をするような場合を想定した試験を行った。具体的には、模型構造物に所定の載荷速度で荷重を与えた静的載荷試験 (Static Loading Test; 以下 SLT と略) を実施した。SLT では中心載荷条件 (Central Loading Condition; 以下 SLT-CL と略) と偏心距離を変化させた試験 (偏心度 $e/B=0.3$; e は偏心距離, B は構造物の幅, Eccentric Loading Condition; 以下 SLT-EL と略) を行っている (宮浦ら, 1999)。なお、荷重は図-4 に示すように与えられ、載荷速度を $0.3 \text{ kN/m}^2/\text{min}$ に制御して試験を行っている。

3.3 各変形量の測定および変位の定義

図-5 は、構造物-地盤系の変形特性を定量化するための変位量の定義を示している。繰返し鉛直および水平載荷装置に設置されている変位計により測定される水平および鉛直方向の左右の変位測定量を、それぞれ (X_L, X_R) および (Y_L, Y_R) として、幾何学的関係 (三浦ら, 1996) から構造物の沈下量 S_{VL}, S_{VR} および水平移動量 S_{HL}, S_{HR} を算出している。ここでは、それぞれ卓越する方の変位量を S_{Vmajor}, S_{Hmajor} とし、また傾斜角 α を図中の算定式のように定義した。地盤内の変形量は、スパゲティを模型地盤内の深さ 150 mm まで 8 本挿入し、その水平方向変位量を測定することによって、評価している。WRT では繰返し載荷回数 N_c が 100, 200, 500, 1000, 1500, 2000 回時に、SLT-CL, SLT-EL では所定の時間ごとにスパ

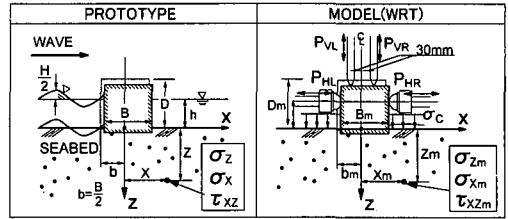


図-2 波浪場での構造物・地盤系の外力のモデル化

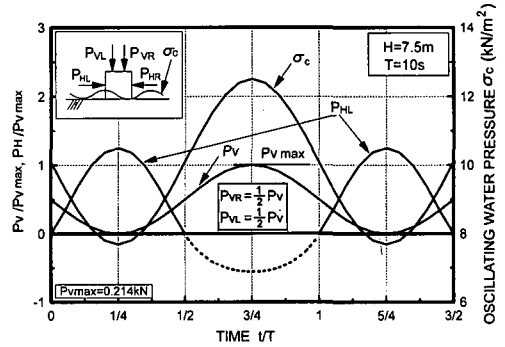


図-3 模型試験 (WRT) の載荷方法

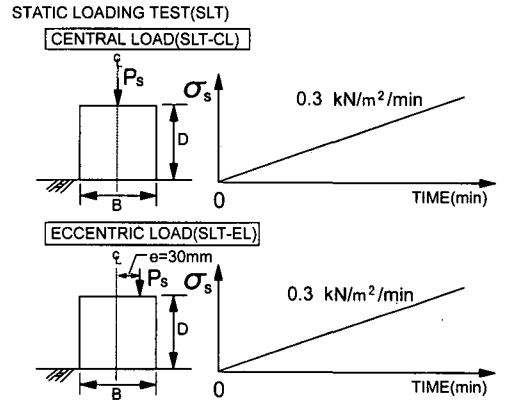


図-4 静的載荷試験 (SLT-CL, SLT-EL) の載荷方法

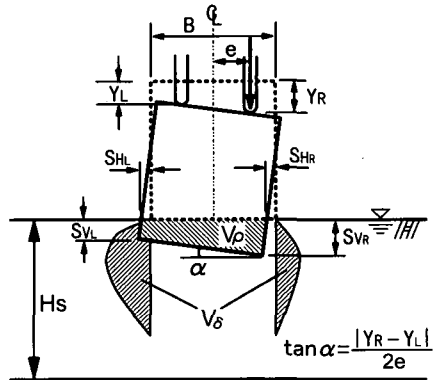


図-5 変位の定義

ゲッティの変位量を測定した。さらに、得られた変位量を用いて、沈下土量 V_p および側方流動土量 V_s を算出している。図示のように、沈下土量 V_p および側方流動土量 V_s は、それぞれ構造物が沈下した部分の面積、地盤が水平方向に変形した部分の面積を単位奥行当りの体積として示している。ここで側方土量は、構造物より左側の部分を V_{sL} 、右側の部分を V_{sR} としている。

これらの値から、種々の荷重場にある構造物-地盤系の変形特性を調べた。

4. 試験結果と考察

4.1 地盤の変形特性

図-6(a), (b), (c) は、構造物-地盤系の変形特性を調べるために、WRT, SLT-CL, SLT-EL における模型地盤内の変形を模式的に示したものである。ここで WRT で用いた波浪の条件は、波高 6.5 m, 周期 10 s である。各試験で得られた特徴を示すと以下ようになる。

(a) 図は、WRT における繰返し回数 2000 回時における変位量を示したものである。図より、構造物が沈下および水平移動するにつれて、地盤は構造物の傾斜する方向に側方流動的に変形していく様子が伺える。すなわち、模型構造物が移動した方向の地盤内水平変位が増大していくようである。

(b), (c) 図は、沈下量 $S_{vmajor} = 10$ mm における SLT-CL, SLT-EL でのスパゲッティ変位量を示している。両図ともに構造物の沈下によって地盤が側方に変形している様子が認められる。特に中心荷重の場合 (SLT-CL) では、左右対称な変形特性を有するが、偏心荷重が与えられた場合 (SLT-EL) には、沈下した方向とは逆方向においてスパゲッティの移動・変形が顕著になっている。

これらのことから、地盤内の変形挙動を知るためには構造物の沈下の仕方 (形態) を把握することが極めて重要であることがわかる。

次に荷重条件の違いが地盤の変形挙動に与える影響を調べるために、SLT-CL, SLT-EL 及び WRT における構造物の変位量と発生土量 V_s , V_p の関係を示した (図-7, 図-8 参照)。図-7 は、沈下量比 S_{vmajor}/B (沈下量を構造物の幅で正規化した値) と沈下土量 V_p を比較したものである。図より、各試験ともに線形的に増加していることがわかる。また SLT-EL と WRT での $V_p - S_{vmajor}/B$ 関係がほぼ等しいことから、地盤の沈下特性は構造物の荷重条件よりも、構造物の沈下量 S_{vmajor} と沈下する状態 (構造物が傾斜をとまう沈下をするかどうか) に依存すると指摘される。図-8 は、左右の側方流動土量 V_{sL} , V_{sR} と沈下量比 S_{vmajor}/B の関係を示している。 V_{sL} , V_{sR} は、 S_{vmajor}/B の増加にともない線形的に増加している。このことは各試験について言える。しかし、 V_{sL}

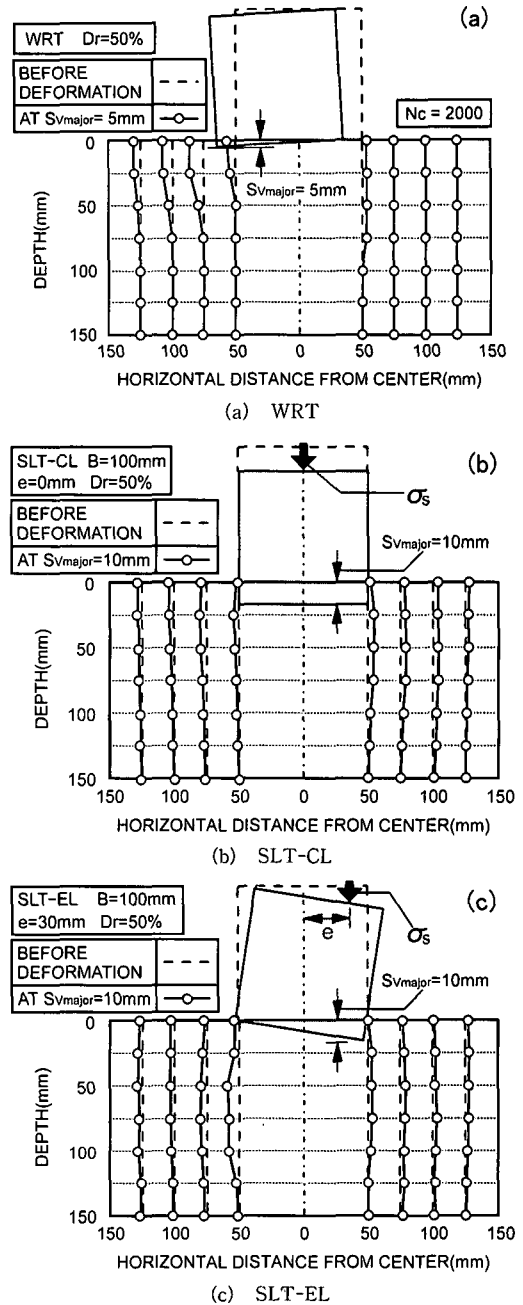


図-6 構造物の沈下と地盤内変形

$-S_{vmajor}/B$ 関係では、試験によってその勾配に変化が認められた (SLT-EL: Δ 印)。ただし、沈下が進行する方向の V_{sR} は、ほぼ一定の勾配を示すようである。一方、WRT 試験, SLT-CL 試験では、 V_{sL} と V_{sR} の直線勾配は同程度になっている。このことは、せん断すべり破壊のような沈下の進行を伴う側方流動破壊では側方変位量が急増することを示唆している。したがって、波浪場にある構造物支持地盤内の側方変位量を把握することは、安

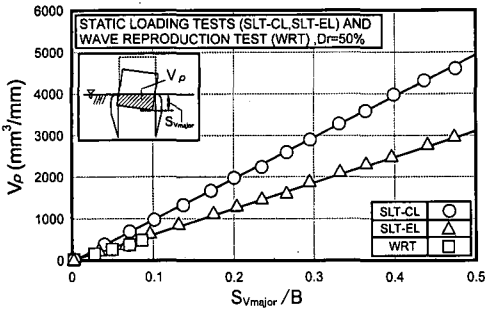


図-7 沈下土量と沈下量との関係

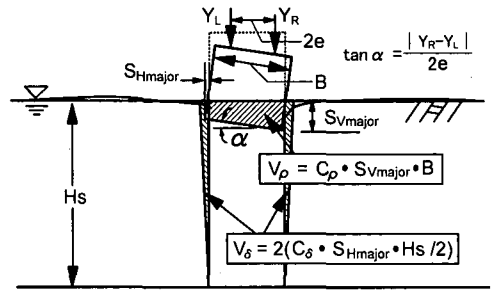


図-9 推定式における V_p , V_δ の仮定

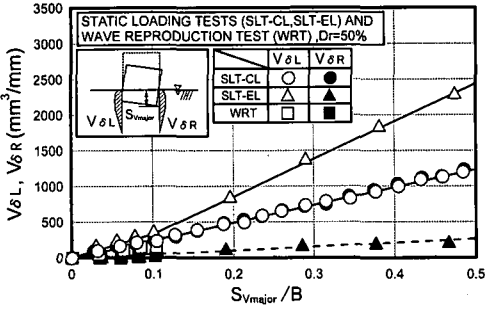


図-8 側方流動土量と沈下量との関係

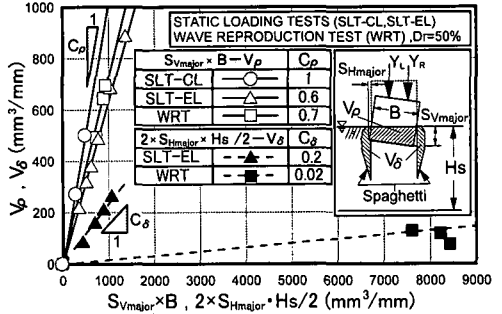


図-10 変形パラメータの算出法

定性を論じる上で非常に重要な問題になってくると思われる。

4.2 海洋構造物の変位量推定法

上述の結果を基に、過去に提案した構造物-地盤系の変位量推定式の妥当性を検討した。過去の研究では、波浪のような繰返し荷重を受けた構造物・地盤系の変形挙動を主に想定していたが、ここでは沈下が徐々に進行する場合やすべり破壊のような場合についての推定式の適用性を調べた。

本推定式は、図-9に示すように、側方流動特性をもとに構造物天端の中心から左右対称2測定点での鉛直変位測定値 (Y_L , Y_R とする) より、構造物の沈下量 S_{Vmajor} 、水平移動量 S_{Hmajor} を推定しようとするものである。なお推定式は、発生土量 V_p および V_δ が構造物の変位量 S_{Vmajor} および S_{Hmajor} で表現できるものと仮定することにより導かれている (三浦ら, 1997)。すなわち次式のように表現できる。

$$S_{Vmajor} = Y_R + (B/2 - e) |Y_R - Y_L| / 2e \dots\dots (1)$$

$$S_{Hmajor} = (V_\delta / V_p) (C_p / C_\delta) (B / H_s) S_{Vmajor} \dots\dots (2)$$

ここで、 Y_L , Y_R は天端で計測された左右の鉛直変位、 B は構造物の幅、 $2e$ は計測点間の距離及び H_s は土層厚を示す。 C_p , C_δ は沈下および側方流動に関する変形パラメータ (関口ら, 1986) を表している。

C_p , C_δ の特性を調べるために、図-10 は WRT, SLT-CL, SLT-EL 試験で得られた沈下土量 V_p と沈下量

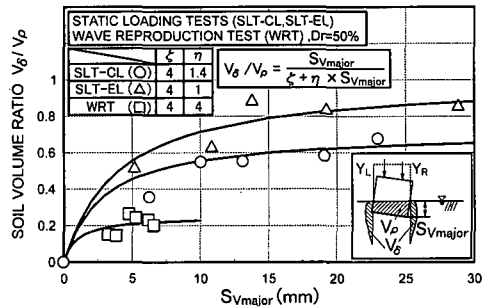


図-11 土量比と沈下量との関係

S_{Vmajor} 、側方流動土量 V_δ と水平移動量 S_{Hmajor} の関係を示している。図より、沈下量 S_{Vmajor} と沈下土量 V_p の関係は、試験によらずほぼ同様な直線関係となることが理解される。一方、水平移動量 S_{Hmajor} と側方流動土量 V_δ の関係には、顕著な相違が見られる。これは試験法の違い、すなわち破壊モードの相違によって側方流動の発達の仕方が異なることを意味している。

次に、式中のパラメータである土量比 V_δ / V_p と変形パターンとの関係を調べた。図-11に各試験における土量比と沈下量との関係を示している。図より、式中のパラメータである土量比 V_δ / V_p は、沈下量に対し、双曲線関係にあることがわかる。ここでは、これらの関係を以下のように表わした。

$$V_\delta / V_p = S_{Vmajor} / (\zeta + \eta \cdot S_{Vmajor}) \dots\dots (3)$$

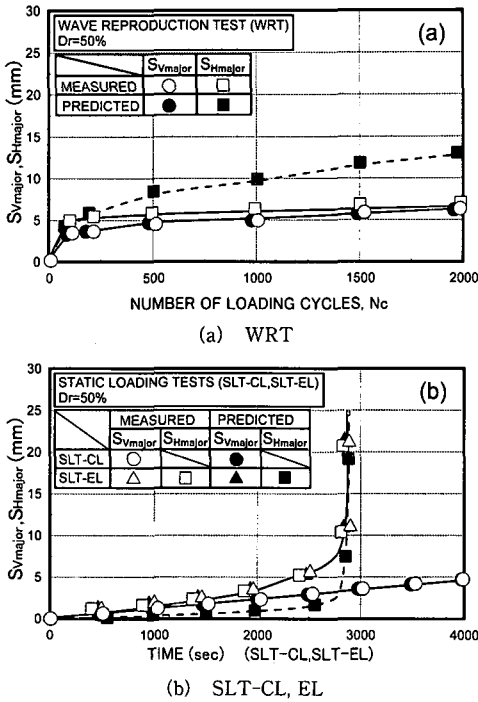


図-12 実験結果と推定結果

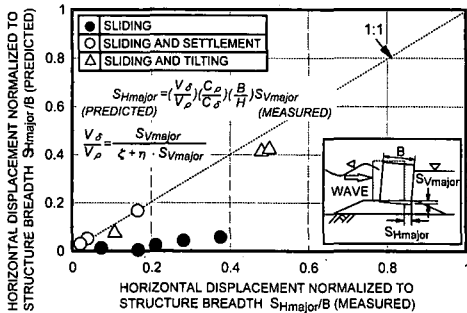


図-13 被災事例における実測値と推定結果

ζ と η は、双曲線関係式における各試験のパラメータである。過去の研究では、土量比を一定値(三浦ら, 1998)とみなしてきた。その結果、初期の変形挙動を表現できていなかったことから、本研究では構造物・地盤の初期変形挙動をより適切に表すことができる式(3)を採用した。式(3)は、構造物の変位が大きい場合の土量比も適切に表せるようである。この関係を用いて以下、推定式の検討を行った。図-12(a), (b)はWRTとSLT-CL, SLT-ELにおける沈下量 S_{Vmajor} , 水平移動量 S_{Hmajor} の実測値と推定値を比較して示したものである。図より、推定式は構造物の沈下の進行に伴って地盤が側方流動的に変形していく実測の挙動を良く説明するようである。また、破局的なすべり破壊が発生する場合(SLT-EL)においても、同様のことが言える。このように、地盤の変

形特性を正確に把握することができれば、構造物の変位量を精度良く推定できるようである。

次に、本推定式を用いて実際の海洋構造物の変位量(ケーソン混成堤の被災事例(川村ら, 1997))と推定式から得られた結果を比較した。図-13では、構造物の沈下量を既知量として水平移動量の推定を行った結果と破壊モード別に示した実測値との関係を示している。なお、実測値及び推定値は構造物の幅 B で正規化して示している。これより、滑動破壊モード以外では、両者の値に良い一致が見られていることがわかる。このように、地盤の変形挙動と構造物の変位量の関係を考慮し、地盤のダイレイタンスに基づく推定式は、波浪場にある海洋構造物・地盤系の変形挙動を予測する上で有効な手がかりを与えるものと考えられる。

5. 結論

本研究で得た主たる結論は、以下のようである。

(1) 地盤のダイレイタンスを考慮した推定式は、波浪場における地盤内応力を再現した試験の結果を良く説明している。また構造物の沈下の進行に伴って地盤が側方流動的に変形し、破局的なすべり破壊が発生する場合においても、推定値は実測の挙動を良く追跡するようである。

(2) 実際の構造物の変位データと推定結果の比較において、滑動破壊以外のモードでは両者に良好な対応関係が見られた。

最後に実験およびデータ整理に長谷一矢氏(北海道開発局), 松井淳氏(千歳市), 飯田和弘, 只野尚徳両君(室蘭工業大学大学院)の協力を得た。記して感謝の意を表します。

参考文献

川村志麻・三浦清一・横浜勝司(1997): 消波構造物・地盤系の破壊とその評価に関する実験的研究, 海岸工学論文集, 第44巻, pp. 936-940.
 下迫健一郎・高橋重雄・高山知司・谷本勝利(1998): 変形を許容した混成防波堤の新設計法の提案, 海岸工学論文集, 第45巻, pp. 801-805.
 関口秀雄・柴田 徹(1995): 軟弱地盤における側方流動, 京都大学防災研究所年報, Vol. 29 B-2, pp. 69-82.
 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.
 三浦清一・横浜勝司・川村志麻・田中則男(1997): 波浪場にある消波構造物を支持する砂地盤の流動特性とその防止に関する研究, 海岸工学論文集, 第44巻, pp. 921-925.
 三浦清一・横浜勝司・川村志麻・宮浦征宏(1998): 波浪力を受ける砂地盤の変形特性を考慮した海洋構造物の変位量推定法, 海岸工学論文集, 第45巻, pp. 876-880.
 宮浦征宏・川村志麻・長谷一矢・三浦清一・飯田和弘(1999): 種々の載荷条件下にある構造物支持地盤の破壊と変形挙動, 第34回地盤工学研究発表会発表講演集(投稿中).