

波浪のような繰返し力を受ける構造物支持地盤の流動破壊と 解析法に関する研究

横浜 勝司*・三浦 清一**・林 秀人***

波浪場にある構造物・地盤系では、外力-構造物-地盤の動的相互作用によって基礎地盤の支持力低下や側方流動型の大変形が誘発される現象が見られる。したがって、繰返し荷重を受ける構造物・地盤系の安定性を管理するために、地盤内の側方流動特性を把握することが重要となる。本研究では一連の有限要素解析および模型試験を行い、繰返し載荷場での構造物支持地盤の剛性変化特性を調べた。さらに地盤の剛性変化特性を考慮した変形解析法を提案した。提案法は波浪のような繰返し力を受ける地盤の流動変形を評価するために有効であることが示された。

1. はじめに

波浪場にある構造物・地盤系では、繰返し外力・構造物・地盤との動的相互作用によって地盤内に側方流動変形が誘発される。そのため、その安定性が低下し土木構造物としての機能が失われる可能性がある。そこで、海洋構造物・地盤系の安定性を管理するために支持地盤内の流動変形挙動を予測することが重要となる。

本研究では、繰返し荷重を受ける構造物・地盤系の流動変形特性の評価法を見出すために、一連の模型試験と数値解析を行った。特に、繰返し載荷による支持地盤の剛性変化特性を詳細に調べた。また、その結果に基づいた数値解析を行い、地盤内で発生する側方流動変形の評価法について検討している。

2. 試験装置と方法

2.1 試験装置と模型地盤

本研究では 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 (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 ($\rho_s = 2.65 \text{ g/cm}^3$, $\rho_{dmax} = 1.658 \text{ g/cm}^3$, $\rho_{dmin} = 1.354 \text{ g/cm}^3$) をサンドホッパーから空中落下させることによって地盤を作製している (川村ら, 2001)。なお、地盤厚は $H_s = 400 \text{ mm}$ 、地盤の相対密度 $Dr = 50\%$ 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模型地盤の飽和化を計った。

模型構造物の仕様は幅 100 mm, 高さ 100 mm, 奥行き 580 mm, 重量 0.127 kN である。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 (G120) 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。

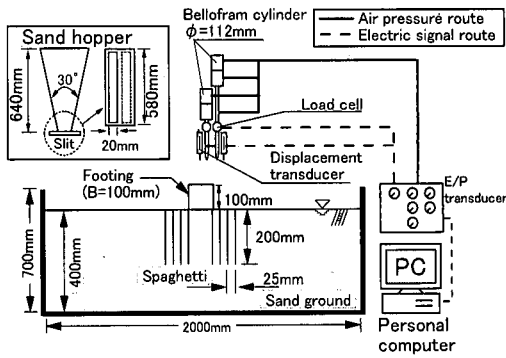


図-1 2次元平面ひずみ模型試験装置

2.2 試験方法

本研究では以下の試験が行われた。

- ・繰返し中心載荷試験 (Cyclic Central Loading Test, CCL と略称) : 基本的な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、構造物の中心線上に半正弦波荷重を載荷している (図-2(a) 参照)。なお載荷周期は 4 秒, 載荷の繰返しは 2000 回とした。
- ・繰返し載荷試験 (Cyclic Alternative Loading Test, CAL と略称) : 波浪場のような載荷条件にある構造物・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法である (図-2(b) 参照)。載荷周期は 4 秒とし、繰返しは 2000 回まで継続している。なお、本載荷法によって波浪場にある構造物が振動沈下する場合の地盤の動的力学挙動をある程度評価可能であることが明らかにされている (三浦ら, 1996; 川村ら, 1999)。

3. 解析条件

3.1 解析手法とパラメータ

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二次元平面ひずみ条件での有限要素法による評価を試みている。図-3 は解析に用いた要素分割を示している。要素数 630, 節点数 2009 であり模型試験で用いた地盤および構造物と同サイズである。

* 正 会 員 工 修 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ト(株)

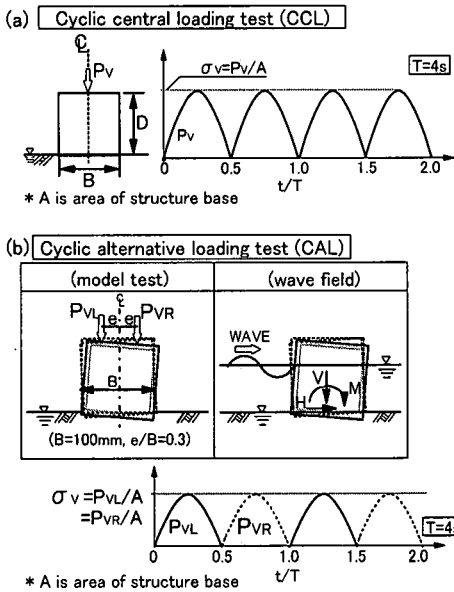


図-2 試験方法: (a) CCL, (b) CAL

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モデルとした。なお、本載荷試験の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(三浦ら, 1996), 地盤を完全排水条件と仮定した。

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 $\{d\epsilon\}$ 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。

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

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, $[D_e]^{-1}$: 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。なお、後述する繰返し載荷条件に関する解析では、剛性マトリクス $[D_e]$ 中の弾性係数を繰返し回数に関数であると仮定し、地盤の弾性係数を変化させた解析を行った。

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における降伏関数 F と塑性ポテンシャル関数 Ψ は以下のようなものである。

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

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

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 は内部摩擦角である。 ϕ はダイ

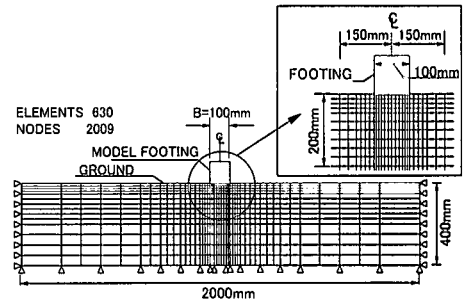


図-3 要素分割 (節点数 2009, 要素数 630)

レイタンシー角であって、本解析では $\psi \neq \phi$ とした非関連流動則を用いている。ここでは $\psi = 0$ として解析を進めた。

本解析では、飽和砂地盤を対象としているので粘着力 c は 0 とした。また過去の静的載荷条件での模型試験および解析結果を基に、地盤の弾性係数 $E = 3000 \text{ kN/m}^2$, 内部摩擦角 ϕ を 35° , ポアソン比 ν を 0.3 とした(横浜ら, 2001)。

3.2 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。変位計による計測値を基に、幾何学的関係(三浦ら, 1996)から構造物の沈下量 S_{vL}, S_{vR} を算出している。ここでは卓越する方の沈下量を S_{vmajor} とした。本研究では S_{vmajor} を構造物幅 B により正規化した沈下量比 S_{vmajor}/B によって構造物の沈下挙動を評価している。

さらに、地盤内の側方変形挙動を調べるために直径 1.9 mm のスパゲティを地盤内に挿入し、その側方変形量を測定した(川村ら, 1999)。なお、スパゲティの剛性が初期剛性の 4% 以下になった後に載荷を行った。これらの水平変位量を測定することで地盤内の側方変位量 δ を把握している。

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_p , 側方流動土量 V_s を求めた(図-4 参照)。ここに、

- ・沈下土量 V_p : 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_s : 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。さらに側方流動土量 V_s と沈下土量 V_p の比を土量比 V_s/V_p とし、構造物・地盤系の側方流動変形の評価に用いた。

4. 試験結果と考察

4.1 繰返し中心載荷試験 (CCL) での変形特性

基本的な繰返し荷重を受ける構造物・地盤系の変形特

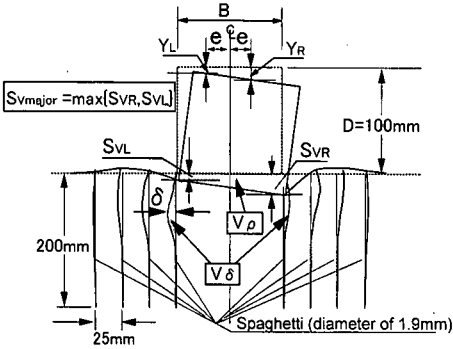
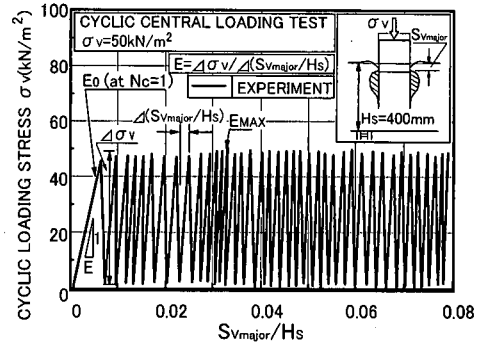


図-4 構造物・地盤系の変位量


 図-5 荷重応力 σ_v -鉛直ひずみ S_{vmajor}/H_s 関係 (CCL)

性を調べるために、図-5はCCL試験での構造物の沈下量 S_{vmajor} を初期地盤厚 H_s で除した S_{vmajor}/H_s (鉛直ひずみと称する) と荷重応力 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。ここでは荷重応力 σ_v が 50 kN/m^2 、地盤の相対密度 D_r は 50% である。

これより、鉛直ひずみの増加に伴って直線の勾配が変化していることが見られる。ここで各荷重時の荷重応力増分 $\Delta\sigma_v$ と鉛直ひずみ増分 $\Delta(S_{vmajor}/H_s)$ の比を剛性 E と定義すると、繰返し荷重によって E が変化すると考えることができる。

そこで剛性変化の特性を詳しく調べるために、図-6に E をその最大値 E_{MAX} で正規化した値と鉛直ひずみ S_{vmajor}/H_s の関係を示した。これより、鉛直ひずみの増加に伴って剛性が一旦増加し、その後低下する挙動が確認される。このような地盤の剛性変化特性を以下のような形式で表示する(横浜ら, 2001)。

(剛性低下挙動)

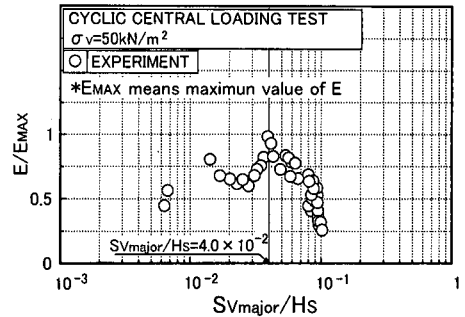
$$E/E_{MAX} = \frac{1}{1 + (S_{vmajor}/H_s) / (S_{vmajor}/H_s)_{0.5}} \quad \dots\dots (4)$$

(剛性増加挙動)

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

ここで $(S_{vmajor}/H_s)_{0.5}$ は $E/E_{MAX} = 0.5$ のときの鉛直ひずみ、 N_c は荷重の繰返し回数、 E_0 は $N_c = 1$ での弾性係数、 c および d は定数である。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。

式(4)、(5)が実測値を再現可能かどうかについて検証するために、上式による推定値およびCCL試験から得られた実測の E/E_0 と N_c の関係を図-7に示した。なお、模型試験結果に基づき $(S_{vmajor}/H_s)_{0.5} = 9.0 \times 10^{-2}$ 、 $c = 0.93$ 、 $d = 0.07$ とした(横浜ら, 2001)。これより、推定値と実測値は良く対応していることが確認される。したがって、式(4)、(5)は繰返し荷重を受ける地盤の剛性変化特性を評価可能であるといえる。

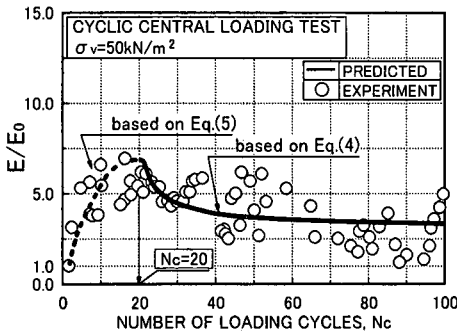
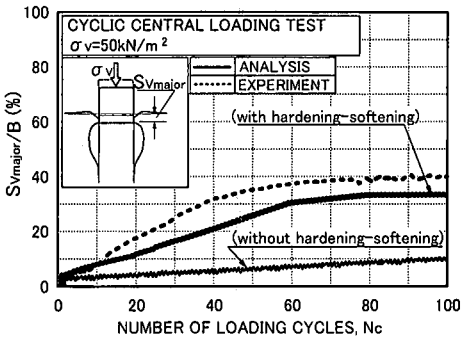

 図-6 剛性比 E/E_{MAX} -繰返し回数 N_c 関係 (CCL)

以下では、このような剛性変化特性に基づく有限要素解析を進めた。図-8は解析および模型試験(CCL)での S_{vmajor}/B と繰返し回数 N_c との関係を示している。ここで $N_c = 1$ での弾性係数を $E_0 = 3000 \text{ kN/m}^2$ とし、実測の沈下量の収束傾向が見られる100回まで解析を進めた。また、図中には地盤の剛性変化を考慮しない解析結果も併記している。

これより、本解析は実測値を若干過小評価のみであるが、沈下の発生挙動を良く再現していることが分かる。一方、剛性変化を考慮しない場合、解析値は実測値に比べ非常に小さい。また、繰返し初期段階で見られる沈下量の急増挙動と沈下量が収束する挙動が再現されていない。したがって、式(4)、(5)のような地盤の剛性変化評価法は、単純な繰返し荷重条件での構造物の沈下挙動を推定する上で有効である。

次に地盤内の変形状況について調べるために、図-9は構造物の沈下量比 S_{vmajor}/B が 10% での地盤内変位を示した。実線は解析値、点線は実測値を示している。地盤内の側方変位量に着目すると、解析は地盤の上層部において実測値を過小評価、下層部では過大評価する傾向にあるが、全体的な傾向は捉えているようである。

以上のように、解析値と実験値の一致度が比較的良好なことから、本解析法は繰返し荷重の構造物支持地盤の

図-7 剛性比 E/E_0 と繰返し回数 N_c の関係図-8 沈下量比 S_{vmajor}/B と繰返し回数 N_c の関係 (CCL)

側方流動挙動を把握するために有効であると考えられる。なお、地盤内の側方変位量の分布をより正確に再現するためには、剛性変化特性を考慮する以外の評価法も必要になると考えられる。

4.2 繰返し載荷試験 (CAL) での変形評価

地盤の剛性変化特性を考慮した解析法の適用性を調べるために、CAL 試験に関する解析を進めた。また解析の1つの試みとして、剛性変化と併せて地盤内に発生するすべり線形状を考慮した解析も行った。その際、図-10に示すように、Prandtlの支持力理論(粘着力 $c=0$ 、内部摩擦角 $\phi=35^\circ$ 、構造物幅 $B=100\text{ mm}$)に基づいて算出したすべり線を囲む要素(斜線部)において内部摩擦角を小さく(限界状態に相当)設定した。ここでは対象とした要素で内部摩擦角を 30° としている。(横浜ら, 2002)。

図-11はCAL試験および解析の沈下量比 S_{vmajor}/B と繰返し回数 N_c の関係を示したものである。ここでは載荷応力 $\sigma_v=20\text{ kN/m}^2$ 、地盤の相対密度 $Dr=50\%$ である。式(4)、(5)中のパラメータとして $(S_{vmajor}/H_s)_{0.5}=0.07$ 、 $c=0.88$ 、 $d=0.12$ を用いた(横浜ら, 2002)。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。一方、すべり線形状

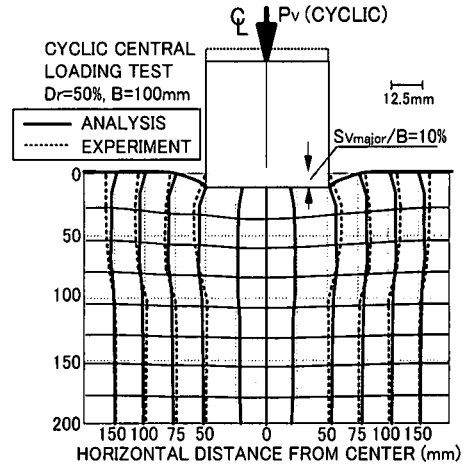
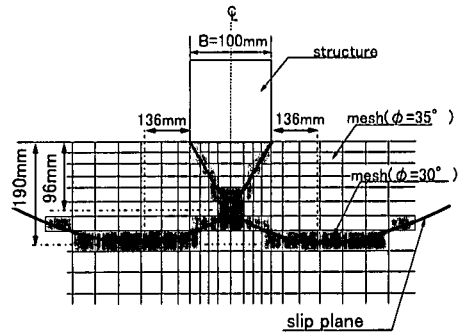
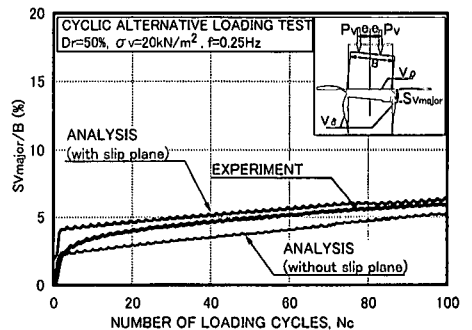
図-9 地盤内変形状況 (CCL, $S_{vmajor}/B=10\%$)

図-10 地盤内すべり線の要素設定 (CAL)

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

と剛性変化挙動の両方を考慮したケースでは、解析値と実測値の対応が良好であることが確認された。これは、地盤内に内部摩擦角の低い要素を設定したことによって、地盤内の変形が卓越して発生するために沈下が発生しやすくなったことが反映されている。

地盤内変形状況を調べるために、 $S_{vmajor}/B=5\%$ での地盤内変形図を図-12(a)、(b)に示した。両図中には点線

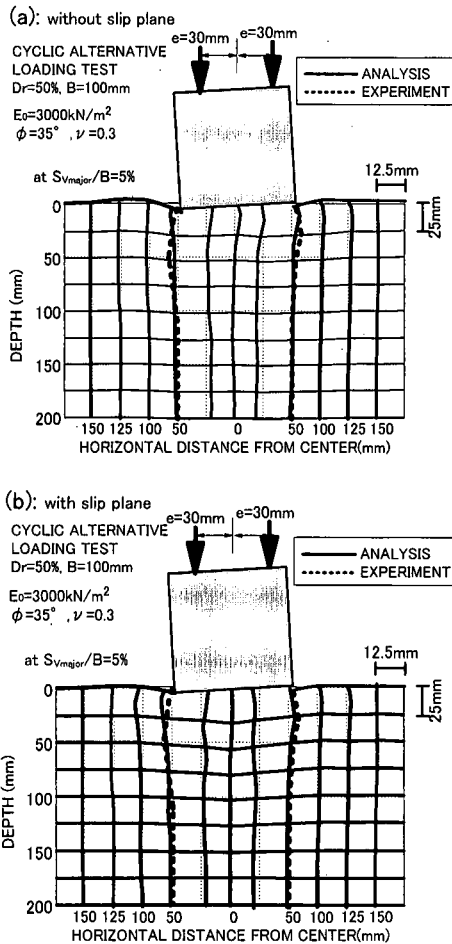


図-12 地盤内変形状況 (CAL, $S_{v \text{ major}}/B=5\%$): (a) すべり線なし, (b) すべり線要素あり

で実測値を併記している。(a) 図はすべり線を設定しないケースの解析結果を示しているが、構造物直下の領域において左右対称の変形が見られない。また、解析は実測の側方変位量を若干過小評価するようである。

また (b) 図に示すように、すべり線を考慮した解析では解析と実測の側方変位量が良く対応しているのが確認できる。また、構造物直下での変形が左右対象に発生していることも見られる。このことから、地盤内すべり線を設定した解析法の方が、地盤内の流動変形挙動を適切に評価可能であることが示唆される。

地盤内の全体的な流動変形挙動の傾向を調べるために、図-13 に土量比 V_s/V_p と繰返し回数 N_c の関係を示した。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過小評価している。一方、すべり線を考慮した解析では、土量比の収束値が 0.7 程度

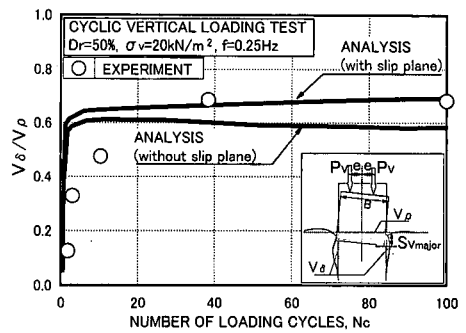


図-13 土量比 V_s/V_p と繰返し回数 N_c の関係 (CAL)

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、本解析法は波浪のような繰返し载荷下の構造物・地盤系の側方流動変形を適切に評価する上で、1つの有効な手法となり得る。

5. 結 論

一連の模型試験および解析結果から、以下の結論を得た。

- (1) 繰返し荷重条件下にある構造物支持地盤の剛性変化挙動の評価法を提案した。本提案式は模型試験で見られる地盤剛性変化を適切に表現可能である。
- (2) 提案された本解析法は、複雑な繰返し荷重を受ける構造物・地盤系の沈下・側方流動変形を適切に評価できる。

謝辞：室蘭工業大学工学部助手 川村志麻先生には貴重な議論を頂いた。解析およびデータ整理に藤井聡君(北海道大学)の協力を得た。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.
- 宮浦征宏・三浦清一・川村志麻・横浜勝司 (2001): 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.
- 横浜勝司・三浦清一・川村志麻 (2001): 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.
- 横浜勝司・三浦清一 (2002): 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 58 回年次学術講演会発表講演集, (印刷中)