

波浪力のような繰返し荷重場にある構造物-地盤系の安定性評価 に関する実験

横浜 勝司*・三浦 清一**・川村 志麻***・宮浦 征宏****

1. ま え が き

波浪場にある海洋構造物・地盤系では、外力の作用方向およびその大きさによって、破壊モードが変化するとされている。それゆえ、破壊のモードに対応した安定性の評価が重要となる。

防波堤のような海洋構造物に沈下や傾斜が生じ、支持地盤に過度な変形が誘発されれば、海洋構造物はその機能を失うことになる。そこで、そのような構造物が沈下した時の構造物・地盤系の安定性をその破壊モードを考慮して評価するために、一連の静的および繰返し載荷条件での模型試験を行った。特に、構造物の沈下に伴って発生する地盤の側方流動特性を把握できるパラメータについて検討している。このパラメータが、波浪のような繰返し荷重を受ける構造物・地盤系の支持力・変形挙動および安定性の評価に適用可能かどうかを詳細に議論した。また構造物の幅を変化させた模型試験も行っており、海洋構造物の大きさが異なる場合の下部地盤の支持力特性の変化についても調べている。

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)およ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。

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($\rho_s = 2.65 \text{ g/cm}^3$, $\rho_{d \max} = 1.658 \text{ g/}$

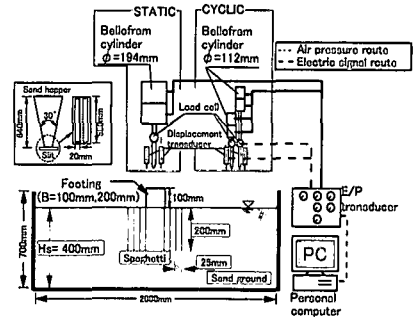


図-1 模型試験装置

cm^3 , $\rho_{d \min} = 1.354 \text{ g/cm}^3$) をサンドホッパーを介して空中落下することによって作製された(地盤厚 $H_s = 400 \text{ mm}$)。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 および 200 mm、高さ 100 mm、奥行き 580 mm、質量 13.2 kg 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っている。

2.2 試験方法

本研究では、繰返し荷重を受ける構造物が沈下し、地盤が流動的に変形した状態での支持力および変形特性を調べるために、以下のような模型試験を行っている。

・繰返し載荷試験(CVL, CEL および 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、構造物に半正弦波荷重(P_{VL} , P_{VR})を載荷している(図-2(a) および (b) 参照)。なお荷重の繰返し回数 N_c は 2000 回までとした。

・波浪場の応力状態を考慮した繰返し載荷試験(WRT と略称)：この試験は、波浪場にある地盤の任意要素点の応力状態を再現したものである(川村ら, 1999)。繰返し鉛直(P_{VL} , P_{VR})および水平荷重(P_{HL} , P_{HR})、さらに構造物の周辺地盤に変動圧 σ_c を適切に載荷させることによって実施されている(図-2(c) 参照)。この試験結果から、波浪のような繰返し荷重を受ける地盤の支持力・変形特性の評価を行った。

* 正 会 員 工 修 専修大学北海道短期大学講師 土木科
** フェロー 工 博 北海道大学大学院教授 工学研究科
*** 正 会 員 工 博 室蘭工業大学工学部助手 建設システム工学科
**** 学生会員 工 修 北海道大学大学院工学研究科

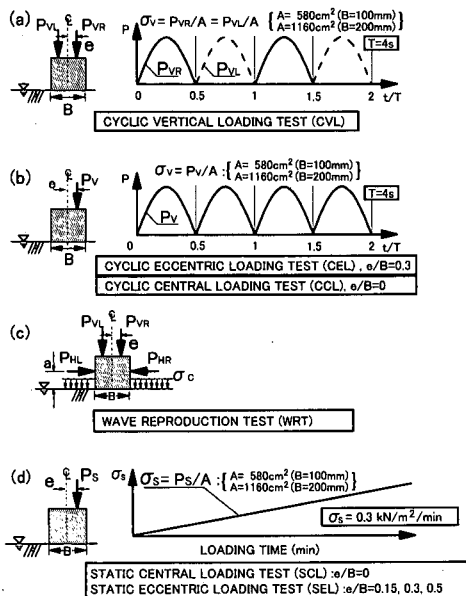


図-2 試験方法；(a) CVL, (b) CEL および CCL, (c) WRT, (d) SCL および SEL

・静的中心、偏心載荷試験 (SCL, SEL と略称)：この試験では、地盤が流動破壊を起こすまで静的荷重を載荷している。また、荷重条件として、偏心率 e/B (荷重の偏心距離を構造物の幅で除した値) が 0, 0.15, 0.3, 0.5 になるように荷重 P_s を載荷している (図-2(d) 参照)。

以上のような模型試験を行い、波浪力のような繰返し荷重を受ける構造物・地盤系の支持力および変形特性を評価する方法を検討した。

2.3 各変形量の測定および変位の定義

図-3 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具備されている変位計によって、測定される水平および鉛直方向の左右の変位量をそれぞれ (X_L, X_R) および (Y_L, Y_R) とし、それらの幾何学的関係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 (三浦ら, 1996)。ここでは、それぞれ卓越する方の変位量を S_{Vmajor}, S_{Hmajor} とした。なお、構造物の沈下量 S_{Vmajor} を構造物の幅 B により正規化した沈下量比 S_{Vmajor}/B を用いて、構造物の沈下を議論している。

地盤内の変形量は、模型地盤内に深さ 200 mm まで挿入された 8 本のスパゲティの水平方向の変位量を測定することによって評価されている (宮浦ら, 1999)。繰返し載荷試験 (CEL, CCL, CVL および WRT) では繰返し載荷回数 N_c が 100, 200, 500, 1000, 1500, 2000 回時に、また静的載荷試験 (SCL, SEL) では所定の時間ごとにスパゲティの変位量を測定した。本研究では、このようにして得た変位量を用いて、沈下土量 V_p および側方流動

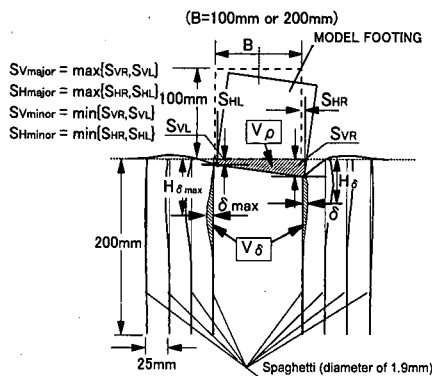


図-3 記号の定義

土量 V_{δ} を算出している。図-3 に示されるように、沈下土量 V_p および側方流動土量 V_{δ} は、それぞれ構造物が沈下した部分の単位奥行き当りの体積および地盤が水平方向に変形した部分の単位奥行き当りの体積として定義されている。

3. 試験結果と考察

3.1 地盤の支持力特性の評価

繰返し荷重を受ける構造物・地盤系の基本的な繰返し強度特性を調べるために、CVL 試験での繰返し応力 σ_v ($=P_v/A$ または P_{vR}/A , A は模型構造物の底面積である) と、沈下量比 $S_{Vmajor}/B=3, 5, 10\%$ に至るまでの繰返し回数 N_c との関係を図-4 (a) および (b) に示した。地盤の相対密度 D_r は 50 および 80% である。構造物の幅および地盤密度の相違による強度の変化は認められるが、両図より繰返し応力と繰返し回数との間に疲労曲線のような関係が存在していることが分かる。ここでは、 $S_{Vmajor}/B=10\%$ の曲線の収束値を繰返し強度 σ_{vu} として以下の考察に用いた。

図-5 は、WRT 試験で構造物に載荷したモーメント M と、沈下量比 $S_{Vmajor}/B=3, 5\%$ に至るまでの繰返し回数 N_c との関係を示したものである。ここでの WRT 試験は、波の周期 $T=10\text{s}$ 、水深 $h=15\text{m}$ に対応する模型試験として行われている。

WRT 試験においても、繰返し荷重 (波浪力) と N_c との間に一義的な関係があり、CVL 試験と同様な整理が有効である。そこで、CVL 試験と同じように、図-5 に示すように各曲線の収束する点のモーメントを WRT 試験での繰返し強度として評価してみた。この試験では沈下量比 $S_{Vmajor}/B=10\%$ の曲線は得られていないが、全ての曲線がある応力値に収束していることを考慮して、この値を WRT 試験における繰返し強度と考えた。

一方、静的載荷条件での地盤の極限支持力は、宮浦ら (1999) によって調べられている。沈下量比 $S_{Vmajor}/B=$

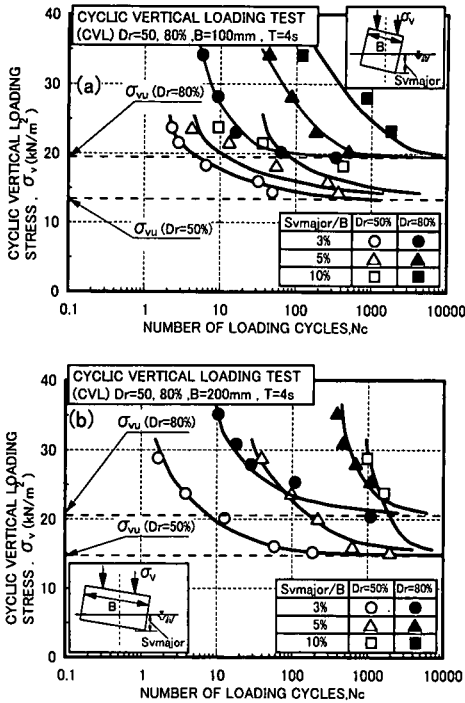


図-4 繰返し強度 (CVL) : (a) B=100 mm, (b) B=200 mm

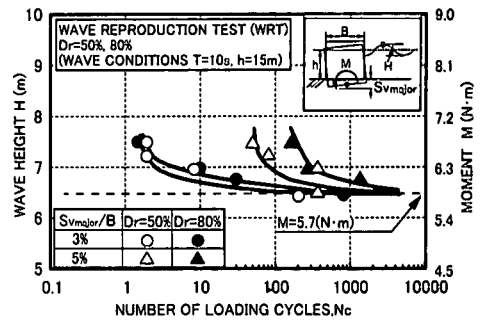


図-5 繰返し強度 (WRT)

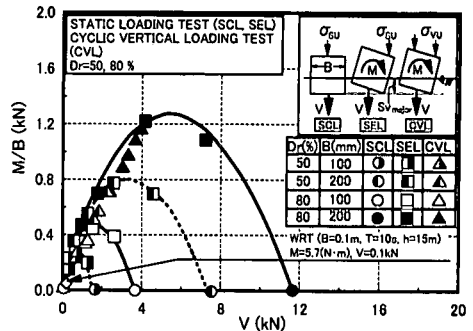


図-6 破壊基準線

0.1で極限支持力 σ_{su} に至ること、また荷重の偏心率が大きいほど極限支持力 σ_{su} が小さくなることが明らかにされている。

図-6は、繰返しおよび静的荷重を受ける地盤の強度を評価するために、構造物に作用するモーメント M を構造物の幅 B で正規化した M/B と鉛直力 V の関係を示したものである。相対密度 $Dr=50$ および 80% である。なお鉛直力 V は、地盤の繰返し強度 σ_{vu} および極限支持力 σ_{su} と構造物底面積の積によって算出されている。またモーメント M は、鉛直力 V を基に算出されており、構造物底面中心で求めたモーメントとしている。

図より、構造物幅や地盤の密度が同じであれば、繰返しおよび静的の載荷方法に関わらず、地盤の破壊性状はユニークな破壊包絡線 ($M/B-V$ 関係) によって表現されることが分かる。この破壊包絡線の形状は、例えば Butterfield ら (1994) によって提案されているような破壊曲線と同様であり、以下のような形式で表されるものである。

$$\left(\frac{H}{t_n}\right)^2 + \left(\frac{M}{B \cdot t_m}\right)^2 - a \cdot \left(\frac{M}{B \cdot t_n \cdot t_m}\right) H = \left[\frac{V}{V_{\max}} (V_{\max} - V)\right]^2 \dots\dots\dots (1)$$

ここで M , V , H は構造物底面に作用するモーメント、鉛直力および水平力 (繰返し載荷試験、静的載荷試験では0) であり、 $V_{\max}$ は破壊包絡線中の鉛直力 V の最大値

を、 a , t_n , t_m は包絡線の形状を示す係数である。

このように、繰返し荷重を受ける構造物・地盤系の支持力特性は、 $M/B-V$ 関係で評価可能であることが示された。

次に WRT 試験から得られた繰返し強度が、同様の破壊基準で評価可能であるかについて検討を行った。図-6中には、WRT 試験 (相対密度 $Dr=50\%$ 、構造物幅 $B=100$ mm) で得られた結果も併せてプロットしている。WRT 試験結果は、前述の破壊包絡線上をたどるようである。

このように、繰返し鉛直および水平荷重を受ける構造物・地盤系の支持力特性は、前述のような破壊包絡線により評価可能であり、波浪場のような複雑な荷重条件下の破壊を評価するための1つの手法となりうることが示唆された。

3.2 構造物・地盤系の側方流動特性

繰返し荷重を受ける構造物・地盤系の安定性を議論するためには、支持力特性の評価だけでなく構造物の沈下に伴う地盤の変形特性についても評価する必要がある。

そこで、構造物の沈下挙動と地盤の側方変形の関係を定量的に評価するために、土量比 V_0/V_0 をパラメータとして議論を進める。土量比は地盤の側方流動土量 V_0 を沈下土量 V_0 で除した値であり、構造物の沈下に伴う地盤の側方変形挙動を調べる上で有効なパラメータになる

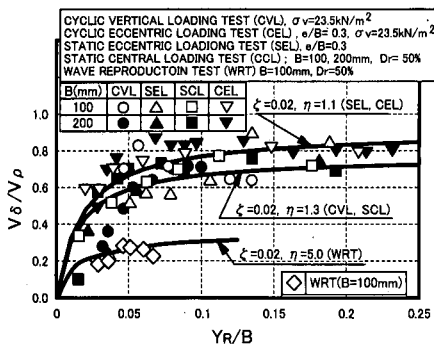


図-7 土量比と実測沈下量との関係

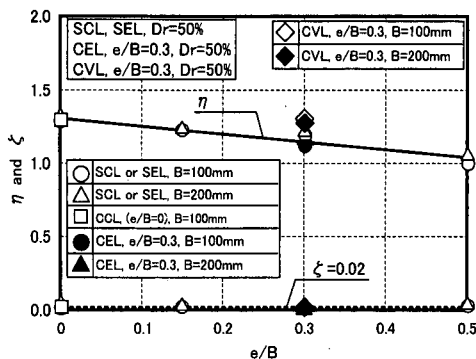


図-8 ζおよびηと偏心度の関係

ことが指摘されている(たとえば宮浦ら, 1999)。そこで、以下では構造物の天端での任意点での実測沈下量 Y_R のみを用いて、土量比 V_δ/V_ρ を推定することを試みる。

図-7 は $D_r=50\%$ の CVL, SCL, SEL, WRT 試験から得られた土量比 V_δ/V_ρ と構造物の実測沈下量比 Y_R/B の関係を示している。土量比 V_δ/V_ρ は実測沈下量比 Y_R/B が 0.05 程度までは、急増していることが分かる。このことは載荷方法の違いや構造物幅の違いによらず、またすべての条件において見られる。また沈下量比 Y_R/B が 0.05 以上になると、 V_δ/V_ρ 値は一定値に収束するようであり、その傾向は構造物幅 B によらないようである。

そこで、土量比 $V_\delta/V_\rho - Y_R/B$ 関係を以下のように定式化してみる。

$$\frac{V_\delta}{V_\rho} = \frac{Y_R/B}{\zeta + \eta \cdot Y_R/B} \quad \dots\dots\dots (2)$$

$$\lim_{S_{vmajor} \rightarrow 0} \left(\frac{\partial(V_\delta/V_\rho)}{\partial(Y_R/B)} \right) = \frac{1}{\zeta}, \quad \lim_{S_{vmajor} \rightarrow \infty} \left(\frac{V_\delta}{V_\rho} \right) = \frac{1}{\eta}$$

ここで ζ と η は、それぞれ初期の土量比の増加率および極限值を示す。

式(2)によって推定された結果を図-7 に示した。図から、式(2)は実測土量比の変化状況を良く説明しているものと判断される。したがって、上式のように地盤に発生する土量比と構造物の任意点での実測沈下量の関係を双曲線的に仮定することは妥当であると思われる。

ここで、載荷条件の違いがパラメータ ζ, η におよぼす影響を調べるために、得られた ζ および η 値と荷重の偏心度 e/B との関係で整理した(図-8 参照)。図より、 ζ は全ての載荷条件で同一($\zeta=0.02$)であることが明らかである。つまり、構造物の沈下が小さい時の土量比の発生割合は、試験条件によらないと言える。一方、 η は偏心度 e/B が大きくなるにつれて小さくなっている。しかし、静的および繰返し載荷試験で得られた η にそれほど差は認められていないことは注目してよい。

以上のことから、荷重の偏心度に応じたパラメータを

把握することによって、地盤の側方変形挙動を表わす土量比 V_δ/V_ρ を推定可能であると言えそうである。

3.3 側方流動特性を考慮した構造物の変位量の推定

地盤の側方流動特性を考慮した波浪場にある構造物の変位量を推定する方法が提案されている(三浦ら, 1998)。これは、構造物天端における任意の2点での実測沈下量(Y_L, Y_R)を基に、構造物の沈下量 S_{vmajor} および水平移動量 S_{Hmajor} を推定するものである。これらは以下のように表現される。

$$S_{vmajor} = \frac{Y_R + \left(\frac{B}{2} - e \right) \left(\frac{Y_R - Y_L}{2e} \right) + a \left(\frac{Y_R - Y_L}{2e} \right)^2}{1 - \left(\frac{V_\delta}{V_\rho} \right) \left(\frac{C_\rho}{C_\delta} \right) \left(\frac{B}{H_s} \right) \left(\frac{Y_R - Y_L}{2e} \right)} \quad \dots\dots\dots (3)$$

$$S_{Hmajor} = \left(\frac{V_\delta}{V_\rho} \right) \left(\frac{C_\rho}{C_\delta} \right) \left(\frac{B}{H_s} \right) \cdot \frac{\left[Y_R + \left(\frac{B}{2} - e \right) \left(\frac{Y_R - Y_L}{2e} \right) + a \left(\frac{Y_R - Y_L}{2e} \right)^2 \right]}{1 - \left(\frac{V_\delta}{V_\rho} \right) \left(\frac{C_\rho}{C_\delta} \right) \left(\frac{B}{H_s} \right) \left(\frac{Y_R - Y_L}{2e} \right)} \quad \dots\dots\dots (4)$$

ここで $2e$ は、沈下計測点間の距離、 B は構造物幅、 H_s は土層厚さ、 a は水平力の作用点と地盤表面との距離を示す。また、 C_ρ および C_δ はそれぞれ沈下および側方流動に関する変形パラメータであって、 C_ρ は構造物の沈下量と沈下土量 V_ρ の関係から、 C_δ は構造物の水平移動量と側方流動土量 V_δ の関係から得られることが明らかにされている(三浦ら, 1998)。

そこで載荷条件の違いによって、パラメータ C_ρ, C_δ がどのように変化するかを調べてみる。図-9(a), (b) はそれぞれ $C_\rho/C_{\rho 0}$ および $C_\delta/C_{\delta 0}$ と偏心度 e/B の関係を示したものである。ここで $C_{\rho 0}$ および $C_{\delta 0}$ は静的載荷試験(SCL および SEL, $B=100$ mm)の結果から得られた変形パラメータ C_ρ および C_δ を示す。

図より、構造物の幅 B が大きくなるにつれて、変形パラメータの値が低減する傾向にある。一方、繰返し載荷

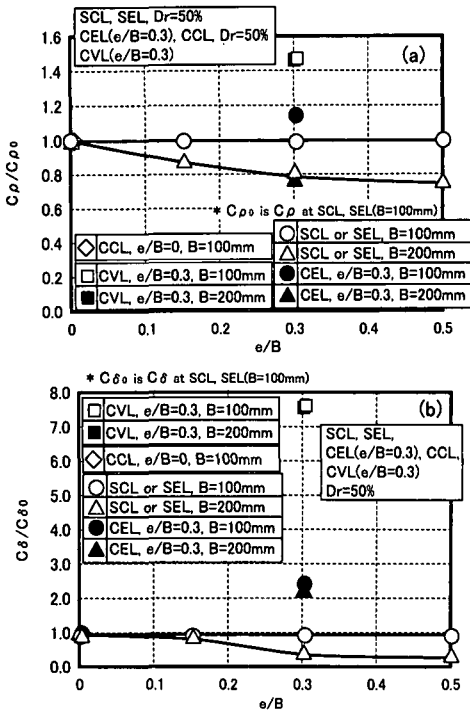
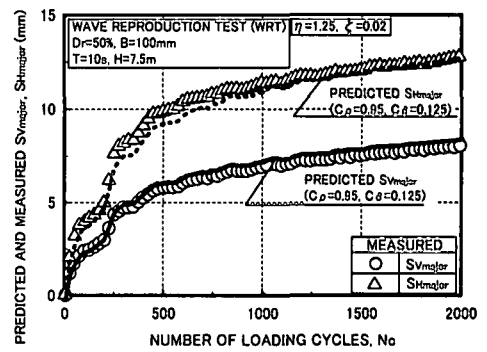
図-9 変形パラメータと偏心率の関係: (a) C_ρ , (b) C_δ 

図-10 実測値 (WRT) と推定値との比較

動量が卓越するような場合には、側方流動に関するパラメータ C_δ を適切に設定することが必要である。

このように、破壊モードや荷重条件 (本試験では偏心率 e/B) に応じたパラメータを用いると、ここで提示したような基本的な静的および繰返し載荷試験結果を基礎とする簡易な推定式によっても、波浪場のような荷重条件下にある構造物・地盤系の変位量を推定可能であると思われる。

4. 結 論

本研究で得た主たる結論は、次のようである。

- (1) 波浪のような荷重条件下にある構造物・地盤系では、 $M-V$ 空間の破壊基準を用いることによって、構造物・地盤系の支持力を適切に評価できる。
- (2) 基本的な静的模型試験結果から得られた推定式と、地盤の変形特性を考慮できるパラメータを用いることによって、波浪場のような繰返し荷重条件下にある構造物・地盤系の変位量を推定可能である。

謝辞: 実験およびデータ整理に、飯田和弘 (現 鹿島建設 (株)) 君の協力を得た。記して深甚なる謝意を表す。

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.
- 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・三浦清一・横浜勝司・川村志麻 (1999): 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, Vol. 46, pp. 936-940.
- Butterfield, R. and G. Gottardi (1994): A complete three dimensional envelope for shallow footings on sand, Geotechnique, Vol. 44, No. 1, pp. 181-184.

条件では、 C_ρ および C_δ は静的荷重条件下より高くなる傾向が見られる。特に CVL 試験結果から得られた C_ρ および C_δ ではそのような傾向が顕著に現れている。

したがって、このような C_ρ や C_δ の特性を考慮して式 (3) および式 (4) を用いると、複雑な荷重条件下にある構造物の変位量を推定可能であると言える。すなわち、実測沈下量と偏心率 e/B が分かれば、地盤の側方流動が生じるような沈下破壊モードにある構造物・地盤内変形量を推定できることを示すものである。

得られた結果に基づいて、ここでは繰返し鉛直および水平荷重を受ける構造物の変位量の推定を試みた。図-10 は WRT 試験で得られた構造物の変位量と、式 (3) および (4) により推定された S_{vmajor} および S_{Hmajor} を示したものである。ここで C_ρ 値は CVL 試験で得られた 0.95 を採用している。また C_δ 値については、沈下が卓越するモードでは CVL 試験で得られた値 ($=2.5$) を用いたが、滑動モードに関しては、側方流動土量 V_δ が CVL 試験での $1/20$ になっていること (三浦ら, 1998) を考慮して 0.125 としている。また式 (2) 中の V_δ/V_p に関するパラメータ ζ および η は、前述のようにそれぞれ 0.02 および 1.25 としている。

この図より、CVL 試験で得られたパラメータを用いると、沈下量および水平移動量に関して一致度は極めて良好である。このことより、CVL 試験に比べて側方流動変形が卓越しない WRT 試験の場合、すなわち構造物の滑