

波浪力を受ける消波構造物・地盤系の流動破壊とその評価

三浦清一*・川村志麻**・田中則男***

1. まえがき

最近の被災事例等の研究からも明らかのように、海底地盤の破壊は波浪力の大きさや作用方向によって、また海洋構造物の形状や位置によって多様な形態をとるようである(Oumeraci, 1994)。これは、波浪力/消波構造物/地盤の相互作用が極めて複雑なことによるものである(例えば, Zenら, 1991; Miuraら, 1995)。したがって、海岸工学の情報を十分に取り入れた地盤力学的研究を進めることが極めて重要である。

このような背景から、二次元平面ひずみ模型土槽と任意の繰返し波浪力場を再現する装置を用いて、一連の実験的研究を行っている(三浦ら, 1995)。本文では、特に、消波構造物のような繰返し鉛直・水平载荷を受ける構造物とその周辺地盤の変形・支持力特性に及ぼす基礎形状や波浪周期の影響が示されている。ついで、このような構造物の沈下とその評価法について考察している。

2. 試験装置と試験手順

本研究で用いた装置は、図-1に示すように二次元平面ひずみ模型試験土槽、波浪により構造物に与えられる外力を再現するための繰返し鉛直・水平载荷装置、変動水圧をシミュレートするための変動拘束圧装置、同制御装置及び模型砂層を圧密し任意の有効応力状態にするための拘束装置からなる(三浦ら, 1995)。

土槽の内寸法は長さ2000 mm、深さ700 mm、幅600 mmであって、砂層の深さHは400 mmである。土槽の前面及び側面には厚さ20 mmの高強度ガラスが設置されている。

模型地盤は、豊浦標準砂($\rho_s=26.1 \text{ kN/m}^3$, $\rho_{d\max}=16.0 \text{ kN/m}^3$, $\rho_{d\min}=13.2 \text{ kN/m}^3$)をサンドホッパーから空中落下する方法で作成し、所定の相対密度 D_r を有する地盤を得た。その後、土槽底部より通水を行い、飽和化を計った。通水後の水面の高さは、模型地盤の表面より+5 mmとなるようにしている。間隙水圧計は図に示

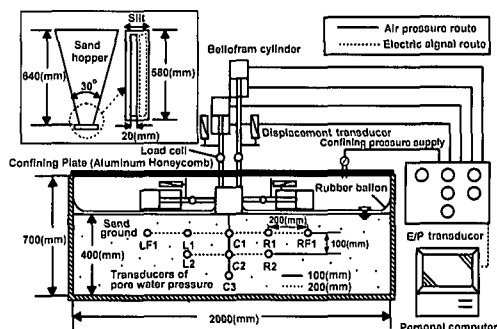


図-1 二次元平面ひずみ模型試験土槽装置

すように模型载荷板の中心の直下に100 mm間隔で3個、それらを中心として左右対称に200 mm間隔で6個、計9個設置されている。

模型载荷板は幅100 mm、高さ100 mm、奥行き580 mm、重量0.127 kNの直方体であって、基礎底面と砂層との接触面を完全粗とするため底面及び側面にサンドペーパー(G120)が貼り付けられている。なお基礎底面の形状を変化させるために、後述のような任意の側壁(長さ $l_w \leq 50 \text{ mm}$, 幅 $l_b \leq 18 \text{ mm}$: 図-5の挿入図参照)を設けているが、模型载荷板の重量は常に不変となるようにしている。この模型载荷板は鉛直・水平各2本のロッドを介して適切な荷重を加えることにより、波浪力を構造物に与えることができるようになっている(三浦ら, 1995)。

ここでは、図-2に示すように波浪により消波構造物に生じるモーメント M が最大または最小となる基本的な組合せの繰返し鉛直・水平载荷試験、並びに図-3に示す実波浪の波浪荷重を再現した試験(Miuraら, 1995)を行った。また本研究では異なる底面形状を有する模型载荷板について繰返し水平载荷試験を行い、すでに得られている繰返し鉛直载荷試験結果(三浦ら, 1995)と併せて検討を加えた。さらに、载荷周期(T)の影響を明らかにするために、 $T=2\sim 20 \text{ s}$ での繰返し鉛直载荷試験も実施されている。

繰返し鉛直・水平载荷試験および繰返し水平载荷試験では、基本的に、周期4秒の正弦波荷重を地盤に伝播さ

* 正会員 工博 室岡工業大学助教授 工学部建設システム工学科

** 正会員 工修 室岡工業大学助手 工学部建設システム工学科

*** 正会員 工博 (株)テトラ 常務取締役

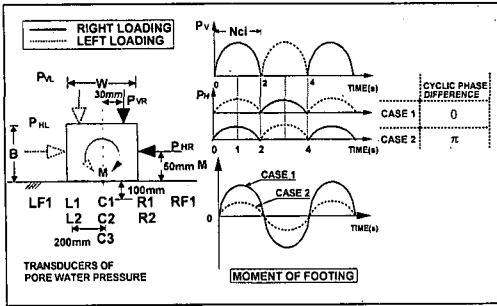


図-2 繰返し鉛直・水平載荷試験の載荷方法

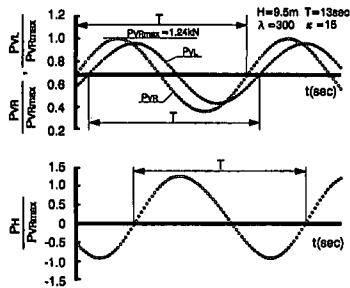


図-3 波浪荷重を再現した場合の分担力の経時変化

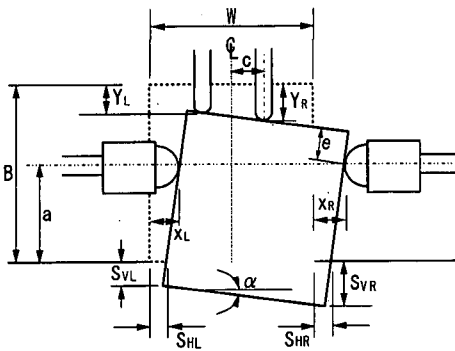


図-4 本研究で測定、計測される変形

せるために2本の載荷ロッドを用いて1周期2回の偏心荷重として与えている。なお、図-4に示すように地盤内の沈下量や水平変位量は、後述の手法によって載荷ロッドに設置されている変位計により計測される値(X_R , X_L , Y_R , Y_L)を基本に求められている。

3. 試験結果と考察

3.1 基礎底面の形状差による強度特性の変化

模型載荷板の基礎形状の違いが模型地盤の動的強度に与える影響を調べた。具体的には模型載荷板に図-5の挿入図に示すような根入れ幅 t_w と根入れ深さ l_w の側壁を設置した。側壁のサイズは $l_w=30$ mm に対して $t_w=3$

mm と $l_w=50$ mm に対して $t_w=3, 12, 18$ mm の4種類である。これらの形状を有する模型載荷板について一連の繰返し水平載荷試験を行った。

図-5(a), (b) は、繰返し鉛直載荷試験及び繰返し水平載荷試験の相対密度 $D_r=50\%$ 地盤についての結果を示している。なお、これらの結果は模型載荷板の左右どちらかの底端点の沈下量 (S_{VR} または S_{VL} : 図-4 参照) のうち卓越する方の沈下量 (S_{Vmax}) と載荷板の幅 W の比 (S_{Vmax}/W) に基づいて整理されている。両図から、繰返し載荷パターンの違いに関わらず側壁を設けることにより繰返し強度は確実に増加していることが理解される。

このことをさらに明確にするために、図-6は載荷回数 $N_c=1000$ 回時に卓越沈下量比 (S_{Vmax}/W) が3%に至るに必要な載荷板底部に作用する最大モーメントを側壁を設けない場合のモーメントで正規化したものと側壁の根入れ深さに対する幅の割合 t_w/l_w の関係として示したものである。図には $D_r=80\%$ の試験結果も併せて表示している。繰返し強度は、側壁を設けることにより増加するようであるが、その割合は、急激な増加とはならずある根入れ幅比 $t_w/l_w \approx 0.1$ を境に一定値となるようである。また、特にゆるい堆積条件に対する鉛直載荷試験(例えば図中の△のデータ)を除いて、相対密度による強度変化の傾向に差のないことが注目される。

以上のように、繰返し水平荷重が卓越するような場合

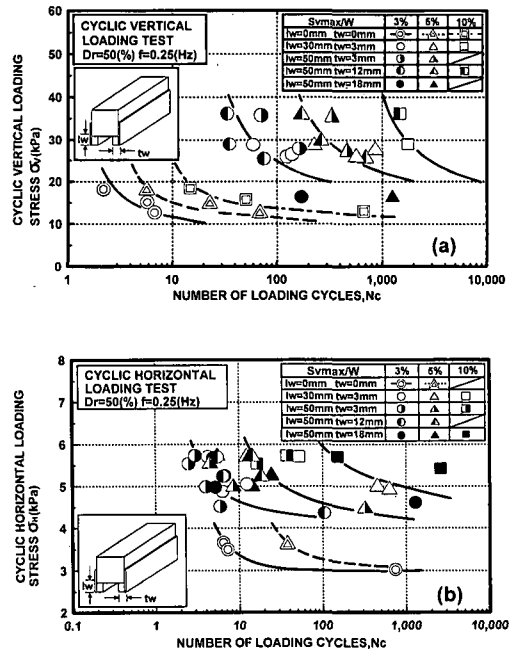


図-5 基礎底部の形状相違による繰返し強度の変化：

(a) 繰返し鉛直載荷試験, (b) 繰返し水平載荷試験

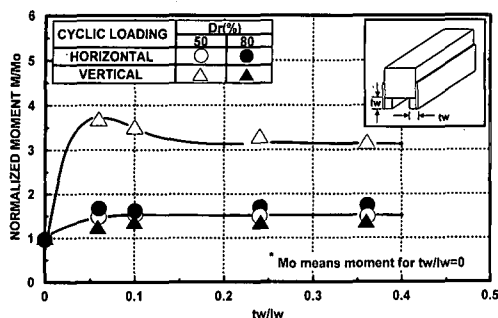


図-6 側壁有無によるモーメントの変化

においても繰返し鉛直載荷試験の場合 (三浦ら, 1995) と同様, 側壁を設けることは地盤の流動化破壊の阻止に効果をもたらしことが示されたが, 載荷条件や地盤の密度の違いによる破壊モードの相違によってこの阻止機構は異なることに留意したい。

3.2 発生間隙水圧と変形特性

次に間隙水圧発生挙動と沈下の関係を検討した。図-7 (a), (b) は繰返し鉛直及び水平載荷試験における繰返し回数 $N_c=1000$ と 2000 回時までの発生最大過剰間隙水圧 Δu_{max} を初期有効鉛直応力 σ'_{v0} で正規化して示している。なお, ここに代表的に示された結果は側壁が $l_w=50$ mm, $t_w=3$ mm のケースである。両図より, 発生間隙水圧は模型載荷板直下の C1 点において明確な上昇を示していることがわかる。その他の測点での間隙水圧の発生は, 載荷板から離れるに従って顕著ではなくなる。また, 図-7(a) の繰返し鉛直載荷試験では, 模型載荷板は大きく傾くため (不同沈下が大きくなる), 間隙水圧の発生特性に 1 つの特徴的な傾向が見られる。すなわち, 傾斜に伴う地盤の側方流動のため, 変形が卓越する方向の間隙水圧 (L や LF 点) が沈下の少ない方向の間隙水圧 (R や RF 点) に比べて低くなっていることが注目される。地盤破壊の進行性とともに側方流動に伴う地盤の変形モードの違いによるダイレイタンス挙動の相違 (圧縮型あるいは伸張型の破壊) を良く反映した結果となっている。

図-8 に C1 点における発生間隙水圧と沈下量との対応関係を調べてみた。図では, $N_c=2000$ 回時までの発生最大間隙水圧を, (a) 卓越沈下量 $S_{Vmax} (=S_{VL}$ または $S_{VR})$, (b) 平均沈下量 $S_{Vave} = (S_{VL} + S_{VR})/2$ 及び (c) 不同沈下量 $S_{Vdif} = |S_{VR} - S_{VL}|$ に対する表示が試みられている。これらの図より, 間隙水圧と沈下の対応関係は模型構造物の底部形状によって明瞭に異なっているが, 繰返し載荷法の違いはあまり受けにくいようである。また側壁の体積の増加 (すなわち $l_w, t_w \rightarrow$ 増加) は変形レベルの小さいところで急激な間隙水圧の上昇をもたらす, 引続き急激な低下を導く傾向にある。この急激な間隙水圧の低

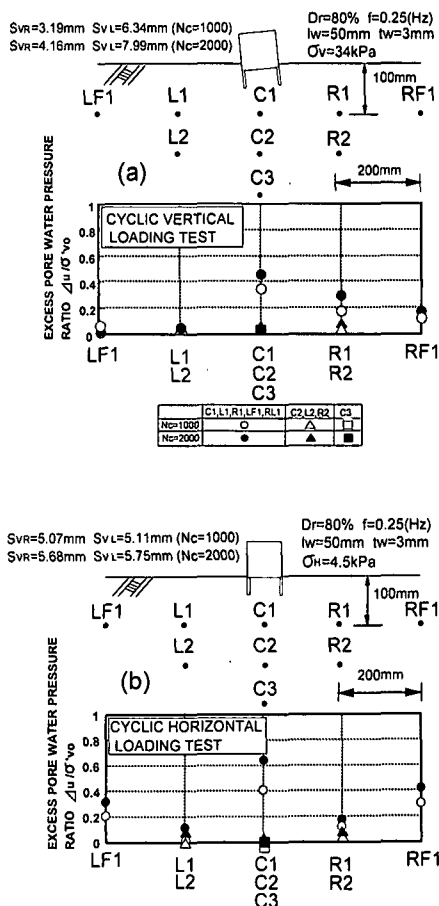


図-7 間隙水圧発生挙動と沈下の関係:

(a) 繰返し鉛直載荷試験, (b) 繰返し水平載荷試験

下を与える変形レベルは側方流動の開始点とほぼ符号することは興味深い。なお, これら 3 者の沈下量の表示のうち, S_{Vmax} と S_{Vave} は明確な発生間隙水圧の変化を表示するようである。

このことから, 消波構造物のような繰返し鉛直・水平載荷を受ける構造物の周辺地盤では確実な間隙水圧の蓄積がみられるものの, 液状化破壊とは本質的に異なる側方流動型破壊を呈すると予想される。

3.3 動的挙動に及ぼす載荷周期の影響

波浪のような繰返し荷重を再現する模型実験では, その載荷周期の違いが結果に及ぼす影響は非常に重要となる。そこで本模型試験での載荷周期の効果を検討した。

図-9 は, 載荷周期を $T=2 \sim 20$ s と変化した繰返し鉛直載荷試験の結果であり, 卓越沈下量比 S_{Vmax}/W が所定の値 (3, 5, 10%) に至るまでの繰返し載荷応力 σ_v と繰返し載荷回数 N_c の関係で示している。図から明らかに, いずれの変形レベルでも載荷周期の違いが地

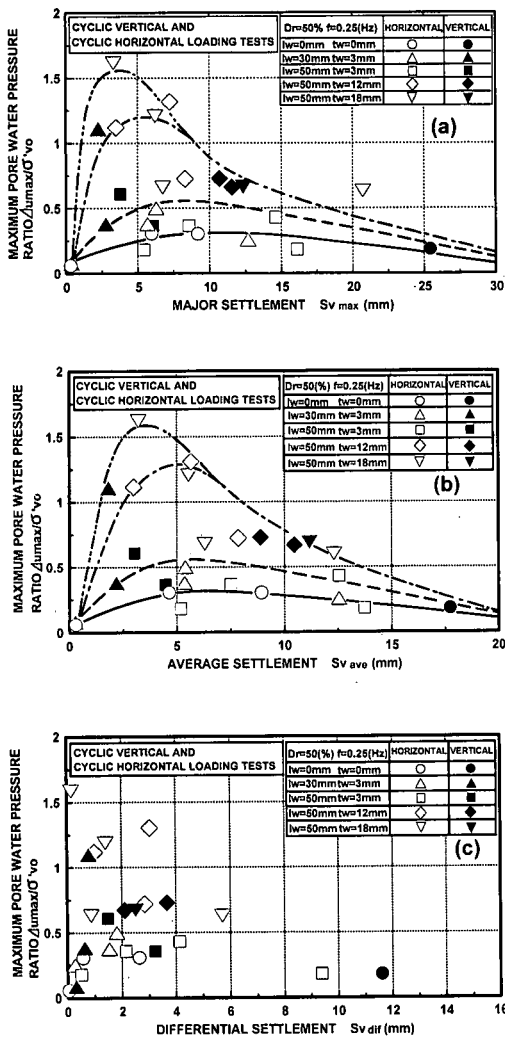


図-8 C1点における発生間隙水圧と沈下量の関係：

(a) 卓越沈下量, (b) 平均沈下量, (c) 不同沈下量

盤の繰返し強度に及ぼす影響は認められない。なお図示は省略したが、このことは側壁を有する場合にも同様に言える。このような地盤の繰返し強度が波浪周期に依存しないとする事実は、本研究のような1g場の模型試験法の物理的解釈をより明解にするものである。

3.4 消波構造物及び周辺地盤の変形の推定

簡便な位置で計測された変位量から地盤の厳密な沈下量及び水平変位量を推定することは、模型試験ばかりではなく実務上も極めて重要である。ここでは、消波構造物の天端面などで容易に得られる計測値から、周辺地盤の変形量を求める手法を検討した。

前述のように、図-4は本模型実験の消波構造物が外力の作用により沈下・傾斜した状態を示している。その

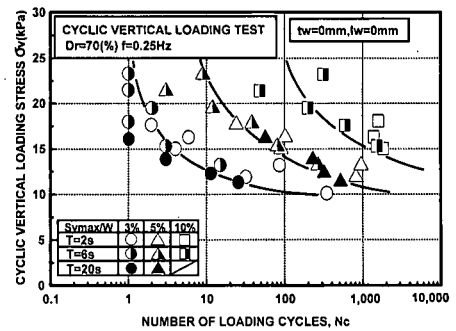


図-9 載荷周期の相違が動的強度に与える影響

時、地盤の沈下量は S_{VL} , S_{VR} である。ここで水平変位量は、左向きを正にとり S_{HL} , S_{HR} としている。さらに回転角 α は時計回りを正と定義している。計測される水平ロードと鉛直ロードの各2本の変位量はそれぞれ X_R , X_L , Y_R , Y_L である。図-4では、模型砂層での水平変位と構造物との間で満足すべき幾何学的な関係から、次式のような表現が可能である(川村ら, 1996)。

$$S_{VR} = (B - e) \cos \alpha - a \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$S_{VL} = S_{VR} - W \sin \alpha \quad \dots\dots\dots (2)$$

$$S_{HR} = X_R - a \cdot \tan \alpha \quad \dots\dots\dots (3)$$

$$S_{HL} = W(1 - \cos \alpha) + S_{HR} \quad \dots\dots\dots (4)$$

ここに、

$$X_R = W(\sec \alpha - 1) + X_L \quad \dots\dots\dots (5)$$

$$\alpha = \tan^{-1}((Y_R - Y_L)/2c) \quad \dots\dots\dots (6)$$

$$e = (B - a - Y_R)(\sec \alpha - \tan \alpha \cdot \sin \alpha) - (W/2 - c + X_R) \sin \alpha \quad \dots\dots\dots (7)$$

ここで、もし消波構造物のような天端面で計測される値に相当する Y_R と Y_L が与えられるとすれば、沈下量は具体的に次のように表わされる。

$$S_{VR} = Y_R + \{(W/2 - c)(Y_R - Y_L)\}/2c + (W/2H)(Y_R - Y_L)Y_R/2c + \{a + (W/2H)(W/2 - c)\} \cdot ((Y_R - Y_L)/2c)^2 \quad \dots\dots\dots (8)$$

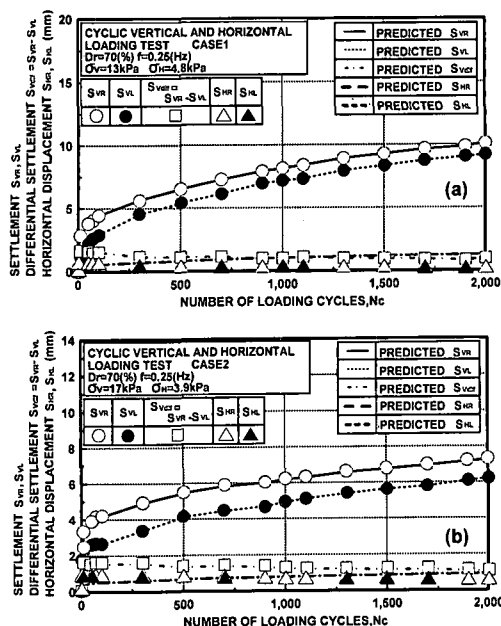
$$S_{VL} = Y_R - (W/2 + c)(Y_R - Y_L)/2c + (W/2H)(Y_R - Y_L)Y_R/2c + \{a + (W/2H)(W/2 - c)\} \cdot ((Y_R - Y_L)/2c)^2 \quad \dots\dots\dots (9)$$

なお、水平変位は地盤の側方流動量が模型構造物が沈下流動して生じた土量に等しいとの仮定(川村ら, 1996)に基づけば、次式で求められる。

$$S_{HR} = S_{VR} \cdot W/2H, \quad S_{HL} = S_{VL} \cdot W/2H \quad \dots\dots\dots (10)$$

ここに H は、砂層の深さである。

図-10は、 $D_r = 70\%$ 地盤に対する繰返し鉛直・水平載荷試験(図-2参照)で得られる沈下量と水平変位量を上式で推定した値と比較して示している。予測値は、実測



図一10 繰返し鉛直・水平載荷試験における各変位量と推定変位量の比較

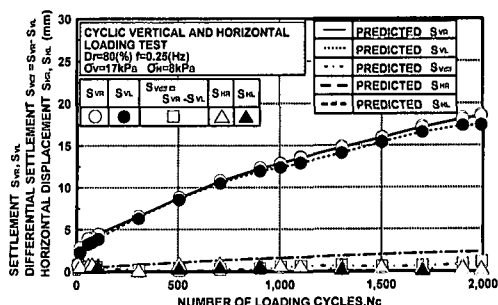
値の傾向を良く表現するようである。また、図一11は図一3に示すような波浪力に相当する载荷を与えた試験での実測値と解析値を比較している。図一10と同様に、実測値の挙動をうまく予測できるようである。地盤の側方流動特性を考慮して誘導された上式では、その未知量が構造物の天端面で得られる2点の計測値であることから、本方法は実用的であると思われる。

5. 結 論

(1) 波浪力による地盤の流動破壊に対する抵抗力は、基礎構造物の形状を工夫することによって高められることが示された。具体的には、側壁の設置は有効のようである。

(2) 発生間隙水圧と沈下挙動の間には载荷パターンの相違(破壊モードの違い)によらず一義的な関係が存在している。

(3) 消波構造物のような繰返し鉛直・水平载荷を受ける構造物の周辺地盤では間隙水圧の上昇がみられるが、その破壊はいわゆる液状化がもたらす沈下によるも



図一11 波浪力を再現した試験における各変位量と推定変位量の比較

のではなく側方流動によるところが大のようである。

(4) 本模型試験では、载荷周期の違いによる影響は見られなかった。このことにより、本模型実験のような1g場での模型試験法の物理的解釈がより容易になる。

(5) 天端面などの簡便な2カ所の位置での変位計測データのみによって、消波構造物と周辺地盤の沈下量、水平変位量を予測できる式を、地盤の側方流動特性を考慮して求めた。予測値は実測値の挙動を良く説明することが示されている。

最後に実験・データ整理に萩原義雄(鉄建建設(株))、横浜勝司、宮浦征宏(室蘭工業大学大学院)、吉田満和(大日コンサルタント(株))各氏の協力を得た。記して深甚なる謝意を表する。

参 考 文 献

- 川村志麻・三浦清一・横浜勝司・萩原義雄(1996): 波浪を受ける地盤・構造物系の変形挙動と評価, 第31回地盤工学研究発表会講演集, pp. 945-946.
- 三浦清一・田中則男・近藤徹郎・川村志麻・佐藤勝弘(1995): 消波構造物を支持する地盤の波浪による流動化機構に関する研究, 海岸工学論文集, 第42巻, pp. 1016-1020.
- Miura, S., Tanaka, N., Kondo, H., Sato, K., Kawamura, S. (1995): Sand flow failure induced by ocean wave and oscillation of coastal structures, Proc. of 1st ICEGE, Vol. 2, pp. 743-748.
- Oumeraci, H. (1994): Review and analysis of vertical break-water failures-lessons learned, Coastal Engineering, Vol. 22, pp. 3-29.
- Zen, K., Yamazaki, H. (1991): Field observation and analysis of wave-induced liquefaction in seabed, Soils and Foundations, Vol. 31, No. 4, pp. 161-179.