

波浪作用下における液状化の進展および凝固・圧密過程

宮本 順司*・佐々 真志**・関口 秀雄***

本研究では、波浪による、緩詰め砂質地盤の液状化の発生から進展、液状化土の凝固・圧密までの一連の過程を理論的に予測するとともに、予測結果を遠心力場波浪実験結果に基づいて検証している。その結果、地盤が液状化し、液状化領域が伝播した後、波浪作用下においても、過剰間隙圧が液状化最下層から消散し始め液状化土の凝固・圧密が起こること、凝固領域は地盤深部から浅部へと拡大していくことが見出された。また、波浪作用下において凝固・圧密した地盤では、液状化後に静穏な環境下において圧密した地盤よりも体積ひずみが著しく大きくなることがわかった。

1. はじめに

筆者らは、暴波浪来襲に起因した海岸保全構造物まわりの海底地盤変状を解明するために、波浪による砂質地盤の液状化に着目している。これまで、波浪伝播と地盤の圧密に関する時間相似則を同時に満足しうる遠心力場波浪実験法を用いて地盤液状化特性を明らかにしてきた (Sassa・Sekiguchi, 1999; 宮本ら, 2000)。すなわち、(1) 厳しい波浪負荷のもとで緩詰め細砂地盤は残留間隙圧の上昇により完全液状化に至ること、(2) 液状化領域は地盤深部へと伝播していくこと、(3) 液状化領域の伝播にともない地盤の流動変形が発達していくこと、(4) 流動変形の変達とともに、消波ブロック等の沈込みが増大していくことなどである。また、佐々・Sleath (2001) は、地盤の液状化が漂砂の発生、および最大漂砂層厚に影響を及ぼすことを理論的に説明している。しかし、暴波浪時の海岸構造物まわりの漂砂量や地盤の流動変形量を予測するためには、液状化の発生、伝播だけでなく、液状化状態の継続時間や、液状化領域が徐々に浅くなり液状化が終結していく過程 (凝固・圧密過程) も考慮する必要がある。ただし、現段階において液状化の終結に関する実証的研究や情報は少ない。

本研究では、水平砂質地盤を対象として、波浪作用下における液状化の発生、液状化領域の伝播、液状化土の凝固・圧密までの一連の過程を、過剰間隙圧応答、地表面振動の推移、地盤内の間隙比分布の変化に着目して調べることを目的としている。

本論文の構成は以下のとおりである。はじめに、波浪による地盤の液状化の発生から液状化領域の伝播までの過程を再現できる進行性液状化モデル (Sassa ら, 2001) を拡張し、波浪負荷中の液状化土の凝固・圧密過程を表現できるようにする。拡張モデルを用いて、液状化の発生から終結までの一連の過程を理論的に予測するとともに、予測結果の妥当性を遠心力場波浪実験結果に基づい

て検証する。

2. 波浪作用下における液状化土の凝固・圧密過程の予測

2.1 進行性液状化モデルの拡張

解析の対象とする領域は、上部から外部流体域、液状化領域、未液状化領域からなる (図-1)。進行性液状化モデル (Sassa ら, 2001) では、液状化領域全体を高密度の完全流体、未液状化土を繰返し塑性特性を有する弾塑性土としてモデル化していた。さらに、液状化領域と未液状化領域の境界面 ($z=z_L$: 液状化フロント) を移動境界として扱うことにより、液状化の発生から液状化フロントの進展が終了するまでの過程を表現可能としていた。

本研究では、液状化フロントの進展速度がゼロになった後におこる、液状化土の凝固・圧密過程を表現するために、2 種類の液状化土モデルを仮定する。1 つ目は、有効応力がゼロであるとともに、構造骨格は完全に壊され、流体的な挙動を示す液状化土である。この液状化土は Sassa ら (2001) と同様に、高密度の完全流体としてモデル化する。2 つ目は、有効応力は空間的に平均してゼロであるが、構造骨格は完全には壊れていない液状化土である。この液状化土は、僅かな剛性をもつ弾塑性土としてモデル化する。構造骨格が完全には壊れていない

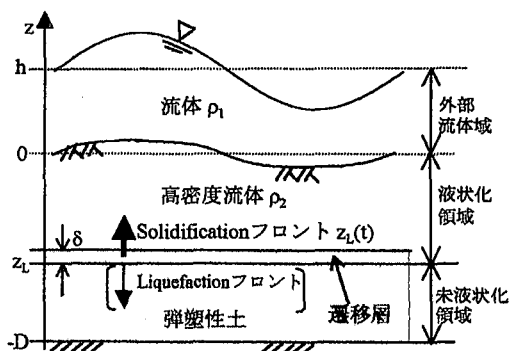


図-1 対象とする問題の設定

* 学生会員 修(工) 京都大学工学研究科土木工学専攻

** 正会員 博(工) 日本学術振興会特別研究員 京都大学防災研究所

*** フェロー 工 博 京都大学教授 防災研究所

液状化土は、その動きが比較的拘束される場所に現れると考えて、液状化領域の最下層に薄層領域 ($z_L < z < z_L + \delta$) として存在すると仮定する (図-1)。この薄層を以下では遷移層と呼ぶ。遷移層が地盤浅部から深部へ進展する場合には、液状化フロントの進展過程が再現され、地盤深部から浅部へ上昇する場合は、液状化土の凝固領域の拡大 (Solidification フロントの上昇) 過程が再現される。遷移層より上の液状化領域は完全流体とし、外部流体域と合わせて二層流体の波浪伝播理論を適用する。

遷移層以下の弾塑性土は、砂の繰返し塑性を考慮した次の圧密式に支配される。

$$\frac{\partial u_e^{(2)}}{\partial(\omega t)} = \frac{kM}{\gamma_f \omega} \cdot \kappa_0^2 \cdot \frac{\partial^2 u_e^{(2)}}{\partial(\kappa_0 z)^2} + M \frac{\partial \varepsilon_v^{(2)}}{\partial(\omega t)} \quad (\text{for } z_L + \delta > z > -D) \cdots (1)$$

ここに、 $u_e^{(2)}$: 残留過剰間隙圧, $\varepsilon_v^{(2)}$: 繰返しせん断に基づく塑性体積ひずみ, M : 土の体積剛性率 ($= \partial \sigma_v / \partial \varepsilon_v^{(1)}$; $\varepsilon_v^{(1)}$: 圧縮による弾塑性体積ひずみ), ω : 波浪角周波数, k : 透水係数, γ_f : 流体の単位体積重量, κ_0 : 波数である。式 (1) の右辺第二項は、繰返しせん断に基づく過剰間隙圧の発生項を表す。ただし、遷移層は液状化土の一部であり、過剰間隙圧は初期有効土被り圧に一致していることから、遷移層ではこれ以上の過剰間隙圧は発生しない。従って、遷移層においては式 (1) の右辺第二項をゼロにしている。

土の体積剛性率 M は、有効応力 σ_v に比例することを仮定している。ただし、この場合、 σ_v がゼロに近づくとき M もゼロに近づく体積ひずみが無限に大きくなってしまいう難点があるので、提案モデルでは、ある値 σ_{vc} 以下の σ_v に対して M は一定と仮定している。すなわち、構造骨格が完全には壊れていない液状化土では、 $\sigma_v = 0$ であっても、 M はゼロより大きい値となり、この値が遷移層における弾塑性土の体積剛性率となる。

本研究では、式 (1) を移動境界条件 ($z_L + \delta = z_L(t) + \delta$) の下で後退差分法で解くことにより、未液状化領域における波浪負荷中の残留過剰間隙圧 $u_e^{(2)}$ の消散過程を計算し、任意の時点における液状化フロント深さ、または Solidification フロント深さを同定している。

2.2 主要な予測結果

波浪負荷に対する過剰間隙圧応答、液状化にともなう地表面変動の推移、地盤内の密度分布の変化、地表面の沈下量に関して、提案モデルを用いて、以下の条件で予測を行った。遠心力場: 30 g, 液深: 80 mm, 波圧振幅: 3.0 kPa, 波浪周波数: 8 Hz, 地盤層厚: 85 mm, 地盤の相対密度: 30%, 透水係数: 0.25 mm/s. なお、遷移層の厚さ δ は 0.4 mm とおき、 $\sigma_{vc} = 0.12$ kPa を設定した。これらの値は、それぞれ土粒子 3 ~ 4 個分 (平均粒径 $D_{50} = 0.14$ mm) の深さと、その深さでの有効応力の値に対応す

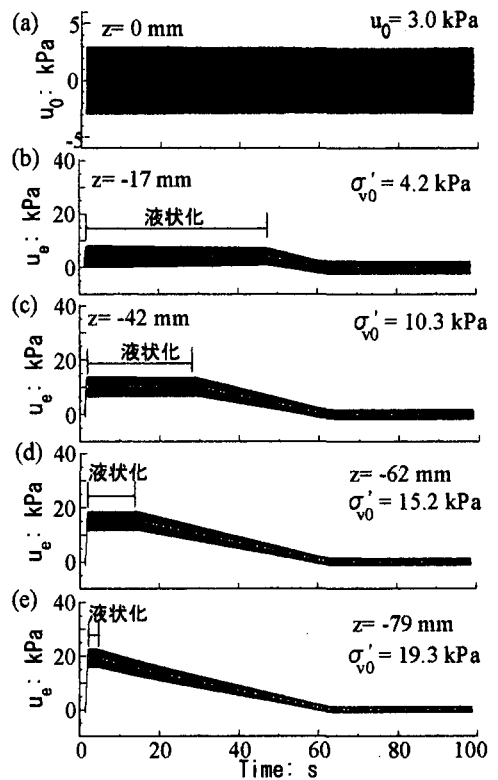


図-2 波浪作用下における液状化土の凝固・圧密過程の予測結果

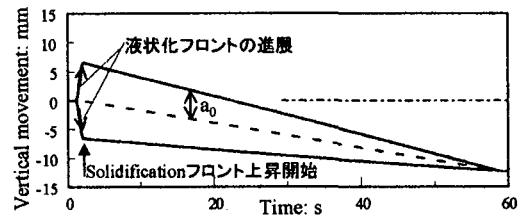


図-3 波浪負荷中における地表面振動の推移の予測結果

る。波浪負荷サイクル数を 8 波から 1000 波の間で変化させて、計 13 ケースの予測を行った。

設定地盤条件のもとでは、8 波の波浪で液状化フロントの進展が終了し $z = -82$ mm まで地盤は液状化した。以下、波浪サイクル数が 800 波のケースについてまず紹介する。過剰間隙圧応答の予測結果を図-2 に示す。波浪負荷中に地盤深部の液状化土が凝固し過剰間隙圧が消散し始めること、Solidification フロントが地盤深部から上部へと進展していくことなどが予測されている。

液状化にともなう地表面の鉛直変位変動の予測結果を図-3 に示す。本図は地表面振動の上端と下端の包絡線を示している。図中の点線はこれらの平均値の推移、すなわち地表面沈下を表している。液状化フロントの進展とともに地表面の振動振幅は大きくなっていく。そして、

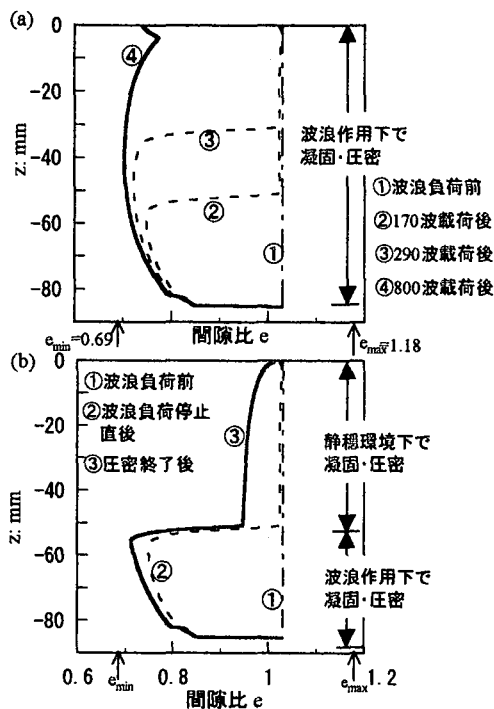


図-4 地盤内の間隙比分布の予測結果

Solidification フロントの上昇開始以降、波浪負荷が継続されているにもかかわらず、振動振幅は徐々に小さくなっていく。波浪負荷中に振動振幅の減少とともに、地表面が徐々に沈下していくのは、液状化土が凝固し、圧密するからである。

Solidification フロントの上昇過程における地盤内の間隙比分布の変化を図-4(a)に示す。Solidification フロントの上昇中はフロントの上下で密度に著しい差が生じていることがわかる。すなわち、波浪作用下における Solidification フロントの上昇とともに、フロント下部には著しい高密度化が生じている。フロントが地表面に達した以降も波浪負荷が継続されているので、最終的に地盤全体が最小間隙比 $e_{min}(=0.69)$ 近くまで高密度化している。

比較のために、波浪作用下において Solidification フロントが $z=-50$ mm まで上昇した直後に波浪負荷を停止させ、その後、静穏な環境下で圧密させた場合の地盤内間隙比分布を図-4(b)に示す。静穏な環境下で Solidification フロントが上昇した領域 (-50 mm $< z < 0$) では、密度が増加しているものの、その増加量は相対密度に換算して 15% 程度にとどまっている。

波浪負荷にともなう圧密完了後の地表面の最終沈下量を液状化フロント進展終了時以降の波浪負荷サイクル数に対してプロットすると図-5の結果を得る。ただし、本図の縦軸は地盤の最終沈下量を初期の地盤層厚で除した

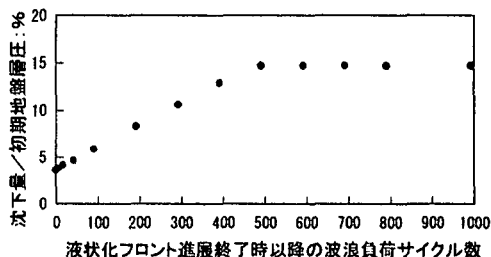


図-5 波浪負荷サイクル数と地表面沈下量の関係の予測結果

値(平均体積ひずみ)を示している。地盤の最終沈下量は、液状化フロント進展終了後の波浪負荷サイクル数に比例して大きくなっていき、500 波を超えたあたりでほぼ一定値になることがわかる。その理由は、図-4 で示したように、波浪負荷中に凝固・圧密した領域では著しい高密度化が occur することと関係する。

すなわち、液状化フロント進展終了後の約 500 波までは、波浪負荷数が多いほど波浪負荷中に凝固・圧密した領域が大きくなり、静穏環境下で圧密した領域が少なくなる。その結果として、地表面の沈下量も大きくなる。一方、液状化フロントの進展終了後 500 波以上の波浪負荷を継続しても、既に地盤全層がそれまでの波浪負荷中に凝固・圧密してしまっているため、地表面の沈下量は波浪負荷数によらず、頭打ちになる。

3. 遠心力場波浪実験による予測結果の検証

3.1 遠心力場波浪実験法

本章では、予測結果を遠心力場波浪実験に基づいて検証する。すなわち、間隙圧計を用いた過剰間隙圧応答の実測、CCD カメラを用いた液状化にともなう地表面振動の発達および終息過程の観察を行うとともに、波浪実験前後に定常浸透流試験を実施し、得られた透水係数分布から地盤内の間隙比分布の変化を推定した。実験に用いた造波水槽を図-6に示す。水槽脇部にストレージタンク

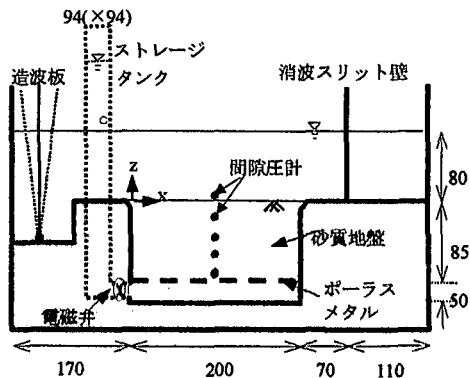


図-6 遠心力場波浪実験で用いた造波水槽

クが設けられており、電磁弁を開放すると、タンク内と水路内の水位差によって、地盤内に上向き浸透流を発生させることができる。波浪実験中は電磁弁を閉じているので、その場合の地盤底面は非排水境界となる。波浪実験および定常浸透流試験は、すべて遠心力場 30 g で行った。流体としては、波浪伝播と地盤の圧密に関する時間相似則を同時に満足させるために、高粘性 (30 cSt) のシリコンオイルを使用した。地盤材料には、ケイ砂 7 号 (土粒子比重 $G_s = 2.69$, $D_{50} = 0.14$ mm, $e_{\max} = 1.18$, $e_{\min} = 0.69$) を使用し、緩詰め地盤 (相対密度 $D_r = 29 \sim 41\%$) を作成した。入力波浪の周波数は 8 Hz である。

実施した波浪実験は 7 ケース (WJ09, WJ12, WJ16, WJ23, WJ40, WJ41, WJ42) であり、波浪負荷サイクル数 ξ を変化させている。ケース WJ23 では、 $\xi = 1100$ であり、WJ40 では、 $\xi = 800$ である。両ケースとも地盤全層が液状化した後も波浪負荷を継続することにより、波浪負荷中に液状化層が全層にわたって凝固・圧密することを可能としている。ケース WJ41 では、 $\xi = 20$ であり、地盤が全層液状化した直後に波浪負荷を停止することにより、液状化層が静穏環境下で圧密するようにしている。また、ケース WJ42 では、 $\xi = 280$ であり、全液状化層のうち下半分は波浪負荷中に凝固・圧密し、上半分は静穏環境下で圧密するようにしている。残りの 3 ケース (WJ09-WJ16) においては、 $\xi = 85 \sim 95$ である。

波浪負荷による間隙比分布の変化を推定するために、WJ40-WJ42 の 3 ケースに関しては、波浪実験前後に定常浸透流試験を行った。すなわち、浸透流試験により、透水係数 k の鉛直分布を求め、次式の経験式 (Taylor, 1948) を用いて地盤内の間隙比分布を推定した。

$$k_i = C \frac{e_i^3}{1 + e_i} \quad \dots\dots\dots (2)$$

ここに、 e_i と k_i はそれぞれ、地盤内の No. i の地層の間隙比と透水係数の値である。本実験では、地盤を 4 つの地層に分けているので i は 1 ~ 4 である。係数 C は粒径、粒子構造、間隙流体の粘性に依存するパラメータである。未知量の数はいずれの地層の e_i の値とパラメータ C の値の 5 つに対し、既知量の数はいずれの地層の k_i と地盤全体の体積から求められる平均間隙比 e_{ave} の 5 つである。従って、すべての地層における e_i 及びパラメータ C の値を求めることができる。

3.2 実験結果

ケース WJ40 から得られた波浪作用下における過剰間隙圧応答を図-7 に示す。厳しい波浪負荷のもとで地盤全層が液状化に至った後、しばらくして地盤底部の過剰間隙圧が消散し始め、液状化土の凝固が起こっていることがわかる (図-7(e))。その後の波浪負荷において、地盤中部、地盤浅部の順に液状化土の凝固が起こってい

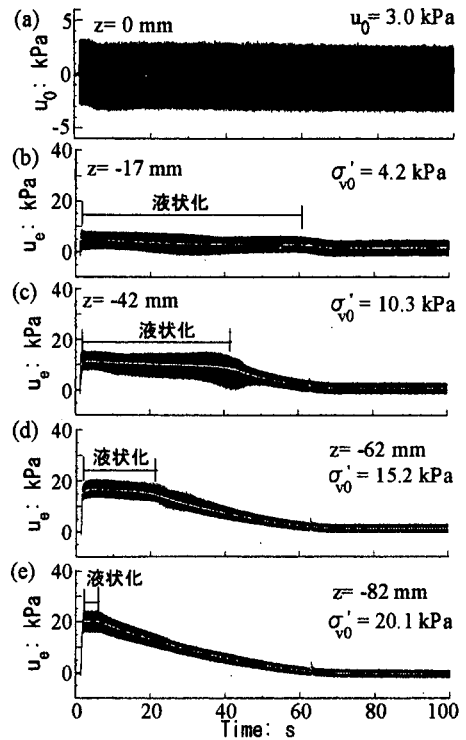


図-7 波浪作用下における液状化土の凝固・圧密過程の実測結果

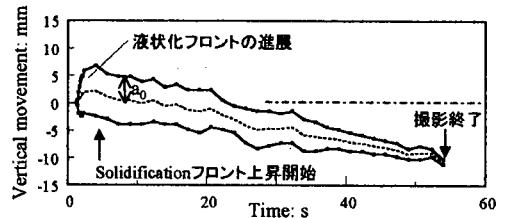


図-8 波浪負荷中における地表面振動の推移の実測結果

る (図-7(d) (c) (b))。このことから、全層液状化後も波浪負荷を続けると、Solidification フロントが地盤深部で発生し、地盤中部、浅部へと上昇していくことがわかる。

ケース WJ40 において、液状化にともなう地表面の鉛直変位変動を CCD カメラを用いて観察した (図-8)。図-8 は地表面振動の上端と下端の包絡線を示している。点線は振動の中心、すなわち地表面の沈下を表している。計測は $x = 135$ mm の位置でおこなった。液状化フロントの進展とともに地表面振動が大きくなっていく。その後、Solidification フロントの上昇とともに、振動は終息していくことがわかる。また、Solidification フロントの上昇とともに地表面の沈下が起こっていることがわかる。

浸透流試験結果から推定した、波浪実験前後の地盤内

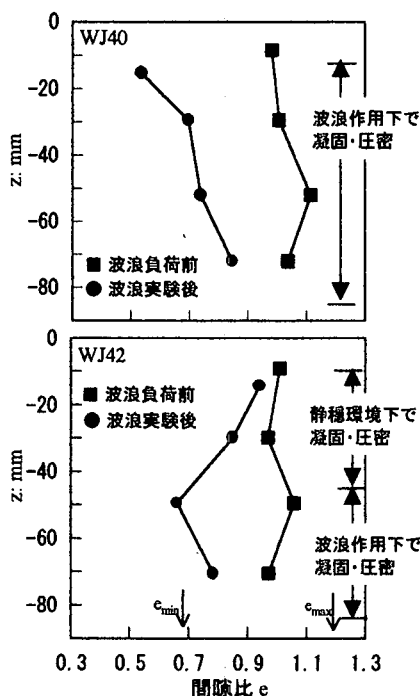


図-9 地盤内の間隙比分布の実測結果

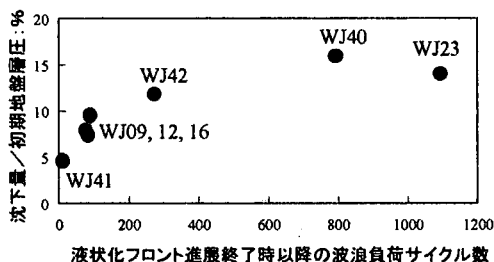


図-10 波浪負荷サイクル数と地表面沈下量の関係の実測結果

の間隙比分布の変化を図-9に示す。ケース WJ40 では、液状化層の全層が波浪作用下で凝固・圧密したが、全層にわたって著しく高密度化していることがわかる(図-9(a))。ケース WJ42 は、液状化層の下半分が、波浪作用下で凝固・圧密し、上半分が静穏環境下で圧密したケースである(図-9(b))。波浪作用下で凝固・圧密した領域と静穏環境下で圧密した領域とで、著しい密度差が生じていることがわかる。すなわち、波浪作用下で Solidification フロントが上昇する場合には、著しい高密度化をとまう。

液状化フロント進展終了時からの波浪負荷サイクル数と液状化後の圧密完了時における地表面の最終沈下量の関係を図-10に示す。本図の縦軸は図-5と同様に平均体積ひずみを示している。波浪負荷サイクル数の増加とともに最終沈下量は大きくなり、波浪負荷サイクル数が

ある限界値以上では最終沈下量は頭打ちになる傾向が認められる。WJ23 と WJ40 のケースは、ともに波浪負荷中に地盤全層、凝固・圧密したので、予測結果(図-5)から最終沈下量はほぼ同じになるはずである。なお、ケース WJ23の方が WJ40 よりも最終沈下量が小さくなった理由としては、初期相対密度の違いがあげられる。すなわち、WJ23の地盤の初期相対密度 41%であったのに対し、WJ40の地盤の初期密度は 29%であり、WJ23の地盤より、緩詰めであったことに留意したい。

4. まとめ

液状化フロント進展モデル(Sassa ら, 2001)を拡張し、液状化領域の最下層に僅かな剛性をもつ遷移層を導入した。この拡張により、液状化の発生から、液状化フロントの進展、液状化土の凝固・圧密までの一連の過程の予測が可能となった。すなわち、波浪負荷に対する過剰間隙圧応答、液状化にともなう地表面変動の推移、地盤内の間隙比分布の変化、地表面の沈下量を予測することができる。予測結果は、遠心力場波浪実験結果と整合した。得られた主要な結果は以下のとおりである。

(1) 厳しい波浪負荷のもとで地盤が液状化に至った後も波浪負荷を継続すると、過剰間隙圧は液状化最下層から徐々に消散し始め、液状化土の凝固が起こる。そして Solidification フロントは地盤深部から浅部へと上昇していく。

(2) 液状化フロントの進展にともない、地表面の振動振幅は大きくなっていき、Solidification フロントの上昇にともない、地表面振動は終息していく。

(3) 波浪作用下で凝固・圧密した地盤では、静穏環境下で圧密した地盤よりも高密度化の程度が著しい。従って、地表面の最終沈下量は、波浪作用下で凝固・圧密した地盤領域の大きさに比例して増大し、限界波浪サイクル数以上の波浪負荷に対しては頭打ちになる。

参考文献

- 宮本順司・佐々真志・関口秀雄 (2000): 波浪による砂質地盤の液状化と流動変形過程, 海岸工学論文集, 第 47 巻, pp. 921-925.
- 佐々真志・John Sleath (2001): 波浪による砂質地盤の液状化とシートフロー-漂砂-漂砂層厚に及ぼす液状化の影響一, 海岸工学論文集, 第 48 巻, pp. 516-520.
- Sassa, S. and H. Sekiguchi (1999): Wave-induced liquefaction of beds of sand in a centrifuge, *Geotechnique*, 49, No. 5, pp. 621-638.
- Sassa, S., H. Sekiguchi, and J. Miyamoto (2001): Analysis of progressive liquefaction as a moving-boundary problem, *Geotechnique*, 51, No. 10: pp. 847-857.
- Taylor, D. W. (1948): *Fundamentals of Soil Mechanics*, John Wiley & Sons, pp. 111-112.