

波浪作用による海底地盤の液状化挙動に及ぼす間隙水圧縮性と多次元性の影響  
The effects of compressibility of pore water and multi-dimensionality of wave load on  
wave-induced seabed liquefaction and solidification

飯島琢臣<sup>1</sup>, 豊田智大<sup>2</sup>, 野田利弘<sup>2</sup>

1 名古屋大学・工学研究科・ijjima.takumi.h3@s.mail.nagoya-u.ac.jp  
2 名古屋大学・工学研究科

概 要

波浪作用下において生じる海底液状化現象の水～土骨格連成解析においては、その有効応力変動をもたらす要因として、①間隙水の圧縮性、②波浪の多次元性、③接線流速の影響が考えられている。本稿では、①②に着目し、 $u-p$ 形式の水～土連成変形解析を用いて、これらの要因の違いに由来する有効応力経路および弾塑性変形の差異を調べた。まず議論を簡単にするため、海底地盤を弾性体と見做した場合の解を示す。有効応力変動の要因を①に求める場合（間隙水の圧縮性を仮定した一次元解析）と②に求める場合（間隙水を非圧縮とする二次元解析）とで、同様の有効応力経路が表現されることを示す。また、上記の弾性解析と同一の境界条件のもとで弾塑性解析を実施し、①②の要因に応じて、海底地盤における有効応力低下域の回復・圧密（Solidification）進展の向きに明確な差異を生じることを示す。

キーワード：海底液状化，水～土連成解析，間隙水圧縮性，波浪多次元性，弾塑性

1. はじめに

波浪外力による海底地盤の液状化（不安定化）現象は、液状化した近傍の海洋構造物の安定性に影響を及ぼすことが、現地観測から示唆されている<sup>1)</sup>。この現象理解のために模型実験が数多く実施されてきており、例えば宮本ら<sup>2)</sup>は、緩詰め砂質土盤の遠心力場波浪実験にて、海底面から発生する液状化（Liquefaction）の下方への進展、そして過剰間隙水圧の消散に伴う液状化土の圧密（凝固，Solidification）という一連の過程を観測している。また、この波浪作用による海底地盤の圧密は、一般的な圧密の進展方向とは異なることを明らかにしている（図1）。

一方で、数値解析的にそれら一連の波浪による海底地盤応答を表現し、理解する取り組みも行われてきた。三浦ら<sup>3)</sup>は、古典地盤力学による静的・一次元的な水位上昇の基では、有効応力の変化が生じないことを示した上で、変化の要因を①海底地盤内の空気存在に起因した間隙水の圧縮性によって説明し、さらに地盤を弾性体とした数値解析によってその変化を解いた。また有効応力変動のその他の要因としては、②波浪の多次元性による海底地盤の多次元的な変形<sup>4)</sup>と③海底地盤表面における接線方向流速の作用が考えられる。

これに対し本稿では、間隙水の土骨格に対する相対加速度を無視した  $u-p$  formulation に基づく水～土骨格連成解析コード **GEOASIA**<sup>5)</sup> を波浪外力作用下の海底地盤応答解析

に用いて、①間隙水の圧縮性と②波浪の多次元性のそれぞれが有効応力経路に及ぼす影響について整理する。また骨格構造概念に基づく弾塑性構成式 **SYS Cam-clay model**<sup>6)</sup> を使用した弾塑性解析をそれぞれの要因を考慮の下で実施し、弾性解析では解かれ得ない塑性的な応力経路・変形、とくに圧密が解かれうることを示す。

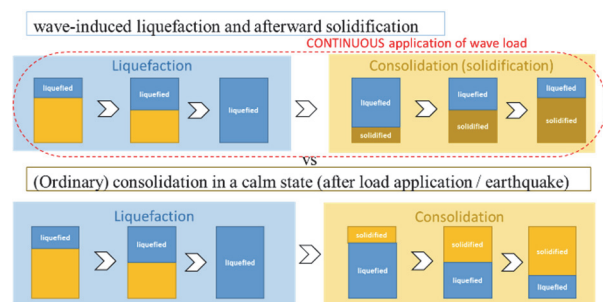


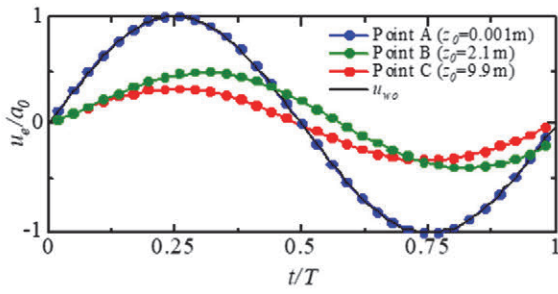
図1 海底液状化後の圧密（Solidification）（上）と一般的な静穏時の圧密（下）の進展方向の違い

2. 間隙水の圧縮性の影響（一次元解析）

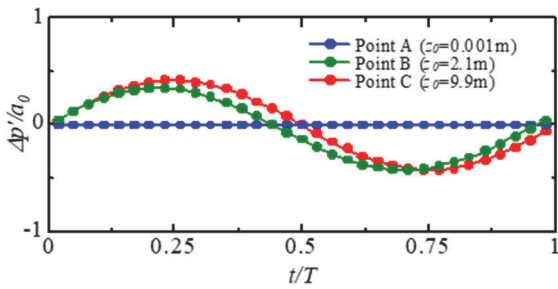
地盤内に間隙空気が存在する場合、空気の圧縮性によって非排水条件下においても体積変化が許容され、それによって有効応力が変化し得る。本研究では、解析コード **GEOASIA** における疑似三相系解析として、飽和土において式(1)で間隙水の真の密度  $\rho^f$ 、間隙水圧  $u_w$  と関係付けら



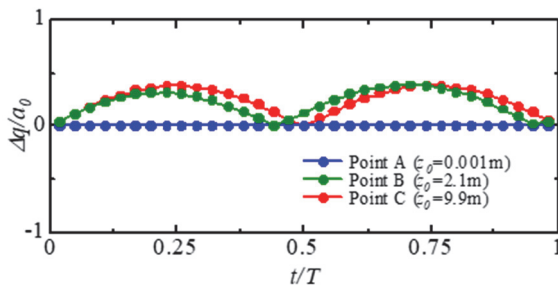
ら<sup>3)</sup>と同様)。結果的に、上記二つの効果により、より間隙水圧振幅の低減が起こっている要素 C と同程度の $p', q$ の変動が生じていることを確認した。



(a) 過剰間隙水圧 $u_e$ ~時間 $t/T$ 関係



(b) 平均有効応力 $\Delta p'$ ~時間関係

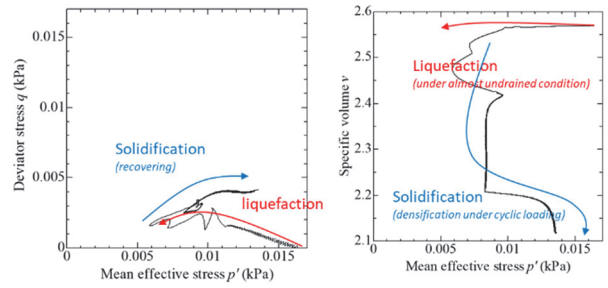


(c) せん断応力 $\Delta q$ ~時間 $t/T$ 関係

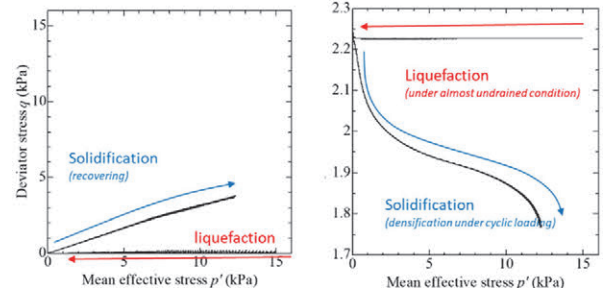
図3 一次元弾性解析結果 ※横軸は時間 $t$ を周期 $T$ で無次元化して示している

次に、同様の一次元解析を弾塑性体として行った結果について述べる。図4は各代表深さにおける平均有効応力 $p'$ とせん断応力 $q$ の関係、 $p'$ と比体積 $v$ の関係をプロットしたものである。いずれの深さにおいても、初期は $q$ の振動発生が構造の劣化を引き起こし、それに伴って残留的な $p'$ の低下が起こり、液状化に至った。その間、 $v$ は変化せず、非排水的な変化であることがわかる。その後は、過剰間隙水圧の消散に伴い、 $p'$ の回復による $v$ の減少、つまり圧密(Solidification)が起こる過程が解かれた。

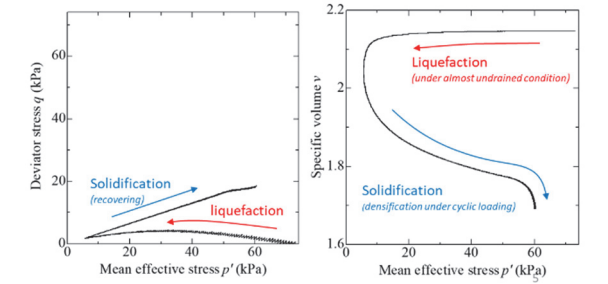
図5は、代表的な時点(1,10,100,1000,10000波経過直後)の $p'$ と $v$ の深さ方向の分布を表す。1000波経過まで( $t = 0 \sim 1.3 \times 10^4$  s)の分布のに着目すると、深さ方向に下向きに凸であることから、時間の経過に伴い、有効応力の低下(液状化)が地表から下向きに進展していること、またその後の $p'$ の回復と比体積減少が深部から地表に向かって上向きに進展している一連の過程が解かれた。



(a) 要素 A ( $z_0 = 0.001$  m)

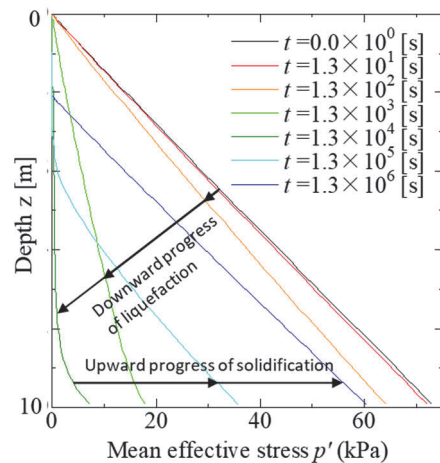


(b) 要素 B ( $z_0 = 2.1$  m)



(c) 要素 C ( $z_0 = 9.9$  m)

図4 各代表深さの要素挙動、平均有効応力 $p'$ ~せん断応力 $q$ 関係(左)と $p'$ ~比体積 $v$ 関係(右)



(a) 平均有効応力 $p'$

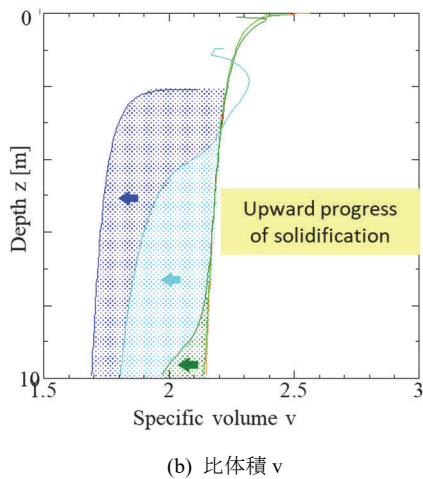


図 5 諸量のアイソクロン

### 3. 多次元的な変形の影響（二次元解析）

松島ら<sup>3)</sup>は二次元波浪（進行波と完全重複波）作用下では図 6 のような境界荷重のアンバランスによって海底地盤の液状化が起こることを指摘している。また地盤の応力変動としては、波の周期変化に伴って、完全重複波の節の下では、せん断応力変動 $\Delta\tau$ のみの変化（単純せん断）が起こり、腹の下では、軸差応力変動 $(\Delta\sigma'_v - \Delta\sigma'_h)/2$ 、 $(\sigma'_v$ ：鉛直有効応力、 $\sigma'_h$ ：水平有効応力)のみ（単純せん断）が起こることが考えられる。一方、進行波作用下では、それらの二つのせん断応力変動の組み合わせとして（楕）円軌跡を描く。

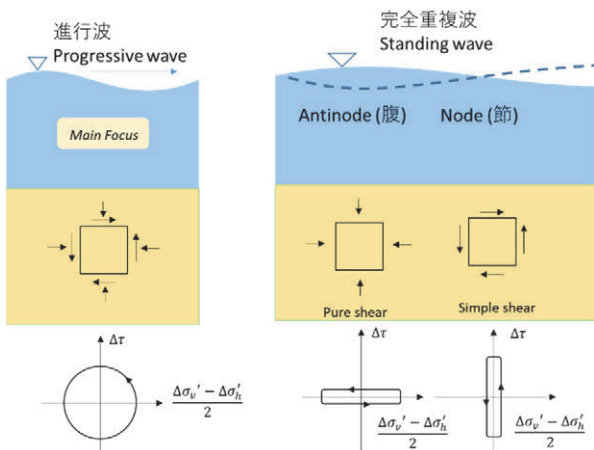


図 6 二次元波浪場での地盤の変形と応力変動（松島らに倣い作図）

#### 3.1 解析条件

解析に用いた二次元有限要素メッシュを図 7 に示す。図中の模型中央における緑色の柱内の深さの異なる 4 つの点・要素を同図内の表のように定義した。境界状態面に作用させた波浪は進行波とし、左端から入力した。波浪境界圧の条件は、振幅 $a_0$ を 0.49kPa とし、それ以外の諸量は前章の一次元解析と同様（表 1）とした。底面と側面は水平方向変位固定とし、非排水条件を課した。

使用した地盤材料パラメータは、前章と同様、緩砂を想定し、弾性・弾塑性いずれにおいても表 2 のように与えた。ただし、間隙水の圧縮性は無視した。また解析は平面ひずみを仮定し、弾塑性解析では、一次元解析と同様に、自重を考慮し地表面には土被り圧 0.01kPa を与えた。

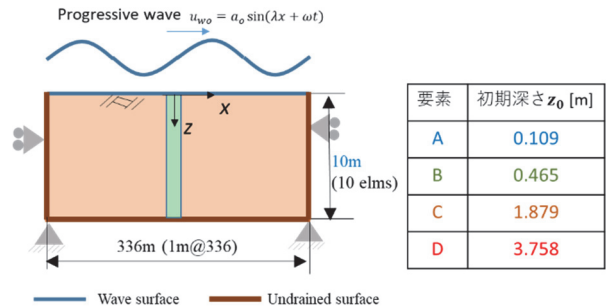


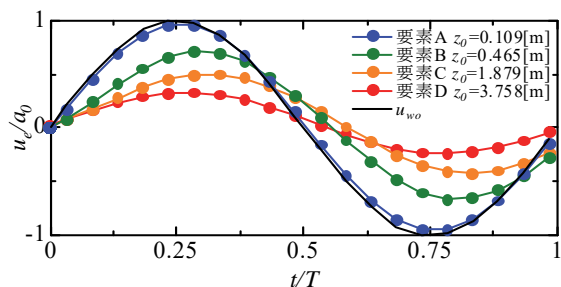
図 7 二次元解析モデル ※着目する真ん中の柱を緑で着色し、その中の 4 要素を右の表のように初期深さに応じて定義した。

#### 3.2 解析結果

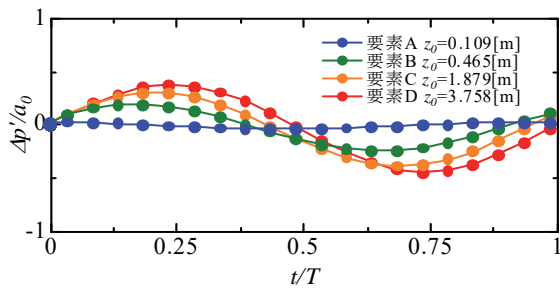
まず弾性解析による波浪外圧作用時の過剰間隙水圧 $u_e$ 、平均有効応力 $p'$ 、せん断応力 $q$ の初期値（いずれも 0 kPa）からの時間変動に着目する。図 8 は図 2 と同様に、境界圧振幅 $a_0$ で正規化した $u_e, p', q$ の代表深さ 4 点での時間変化を示す。まず地表近傍（要素 A）においての間隙水圧は、排水的な挙動として、境界圧変動に即時的に追従するため、 $p'$ の変化は生じない。一方、深さが大きくなるにつれて、 $u_e$ の変動振幅の低減が、前章の間隙水の圧縮性を考慮した解析結果と同様に起こる。また、ある程度の深さ（要素 B または C）で位相遅れが生じ、非排水的になる十分に深い位置（要素 A）では生じにくくなるという現象が確認できた。このことから、有意な $p'$ と $q$ の変動が（間隙水の圧縮性を考慮せずとも）得られた。

なお、Yamamoto<sup>9)</sup>より地盤層厚の半無限性を仮定する場合には、 $p'$ 及び $q$ は一定に保たれることから、ここでの有効応力変動は対象地盤の深さの有限性による。

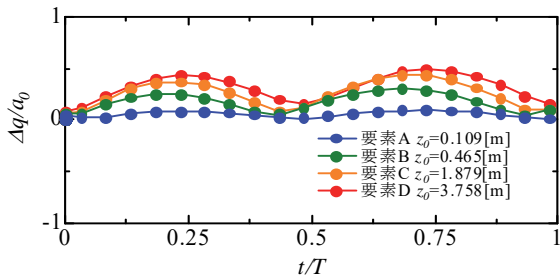
また、二次元解析では、全応力変動が深さ方向に小さくなるという結果が得られることも確認している。



(a) 過剰間隙水圧 $u_e$ -時間関係



(b) 平均有効応力  $p'$  ~ 時間  $t/T$  関係



(c) せん断応力  $q$  ~ 時間  $t/T$  関係

図 8 二次元弾性解析結果 ※時間  $t$  は解析モデル中央に波浪が作用し始めたタイミング以降とした。

次に、弾塑性解析結果として、図 9 にせん断応力比  $q/a_0$ 、構造の程度  $1/R^*$ 、過剰間隙水圧比  $u_e/p'_0$ 、平均有効応力比  $p'/p'_0$ 、比体積比  $v/v_0$  の時間変化を示す。波浪の進展に伴い、浅い位置でより大きなせん断応力変動・せん断を示し、それにより構造の程度の解消と相対的により大きな過剰間隙水圧の蓄積、また平均有効応力の低下がより早く起こることがわかる。

さらなる波浪作用が継続し、構造が十分に解消する ( $1/R^* \rightarrow 1$ ) と、平均有効応力低下が先に始まる浅い位置から、 $u_e$  が解消し、 $p'$  が回復し、 $v$  が減少し始める。これはおよそ 200 波経過直後の要素 A と 380 波経過後の要素 B の挙動から確認することができる。この  $p'$  の低下後の圧密現象は、浅場から深部に向かって進展し、前章の一次元の間隙水の圧縮性を考慮した解析とその進展の向きが異なることがわかる。これは、より排水的である浅い位置において起こる圧密進展速度が、下向きに進展する有効応力低下速度を上回ったためである。

また  $p'$  の回復については、200 から 400 波経過中の要素 A の  $p'$  の変化からわかる通り、一定には起こらず、回復と減少を繰り返す挙動を示す。これは、要素 A より深い位置まで有効応力減少が進行した際に、上向きの浸透を発生し、要素 A での  $p'$  の回復を阻害することによる。

以上の現象は、図 10 に示す各要素の  $p'$  ~  $q$  関係、 $p'$  ~  $v$  関係からも確認することができる。いずれの要素においても、液状化 (90%以上の  $p'$  の低下) は発生していないが、非排水的な  $p'$  の低下が初期解かれ、その後の  $p'$  の回復に伴う比体積の減少 (Solidification) が解かれた。図 4 に示される一次元解析結果と異なるのは、 $p'$  の回復が一意に起こるのではなく、圧密過程で  $p'$  の増減が起こり、 $p'$  が回復するタイミングで大きな塑性圧縮が進む。

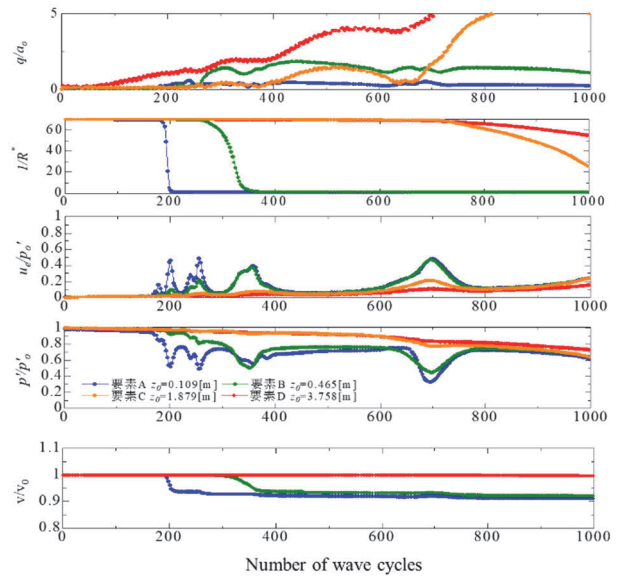
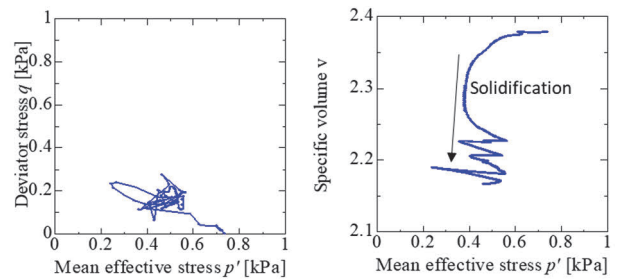
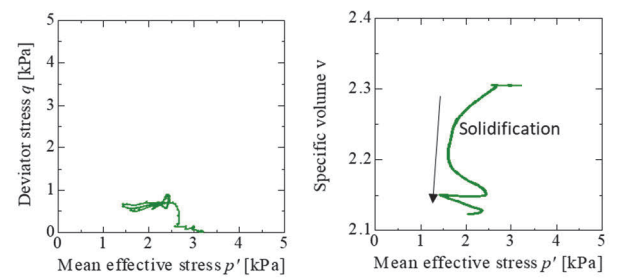


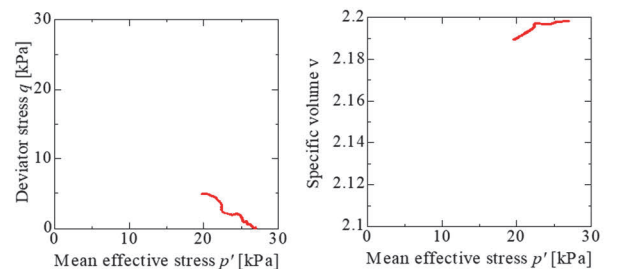
図 9 二次元弾塑性解析結果 ※上からせん断応力比  $q/a_0$ 、構造の程度  $1/R^*$ 、過剰間隙水圧比  $u_e/p'_0$ 、平均有効応力比  $p'/p'_0$ 、比体積比  $v/v_0$  と時間  $t/T$  の関係、ただし  $p'_0, v_0$  は初期値。



(a) 要素 A ( $z_0 = 0.109$  m)



(b) 要素 B ( $z_0 = 0.465$  m)



(c) 要素 D ( $z_0 = 3.758$  m)

図 10 各代表深さの要素挙動、平均有効応力  $p'$  ~ せん断応力  $q$  関係 (左) と平均有効応力  $p'$  ~ 比体積  $v$  関係 (右)

#### 4. おわりに

海底地盤の不安定化現象（液状化）の支配的要因の特定と弾塑性解析の重要性を明らかにすることを目的として、 $u-p$  解析を実施し、この解析手法で考慮し得る、①間隙空気の存在に起因した間隙水の圧縮性と②波浪の多次元性による海底地盤の多次元的な変形許容の二つの有効応力変動要因の影響を調べた。

弾性解析では、二つの要因による間隙水圧、平均有効応力、せん断応力の変動がどちらも同様に発生し、いずれの深さの挙動も排水性（位相遅れ）をもって説明できることを示した。一方、弾塑性解析では、平均有効応力の低下が地表から下向きに進展するという現象は、両要因考慮の下で同様に再現できた。しかし、その後の圧密（Solidification）の過程において、間隙水の圧縮性を考慮した一次元解析では、上向きに進展するのに対し、二次元波浪場での解析では、海底地表の要素から下向きに進展した。これは、有効応力の低下の下部への進展が、一次元解析では深さ方向に全域で即時的に起こるのに対し、二次元解析では地表から時間をかけて起こったため、液状化後の圧密（Solidification）では、前者では相対的にせん断の影響が小さい下部から上向きに進展し、後者では排水距離の短い地表から下向きに起こったためである。

また、有効応力低下後の残留的な圧密・沈下の現象は、弾塑性解析によってのみ表現し得た。

なお、第1章で述べた波浪による海底地盤の有効応力変動の要因としての③海底地盤表面の接線方向に作用する流速の影響を、本研究で用いた  $u-p$  解析では考慮しえないため、今後の研究課題として、 $u-w-p$  解析<sup>10)</sup> により検討していく。これにより波浪による海底液状化現象のメカニズムの包括的な理解となり、その対策等への応用が期待される。

#### 謝辞

本研究は JSPS 科研費 22K14324 の補助を受けた。

#### 参考文献

- 1) Oka, F., Yashima, A., Miura, K., Ohmaki, S. and Kamata, A. : Settlement of breakwater on submarine soil due to wave-induced liquefaction, 5th ISOPE, Vol. 2, pp. 237-242, 1995.
- 2) 宮本順司, 佐々真志, 関口秀雄, 波浪作用下における液状化の進展および凝固・圧密過程, 海岸工学論文集, 49 巻, pp. 846-850, 2002.
- 3) 三浦均也, 松田達也, 藤井湧大, ARIF Daniel bin Aami : 波浪に対する海底地盤の有効応力応答メカニズムの「空き缶モデル」による考察, 第31回中部地盤工学シンポジウム講演論文集, pp. 31-38, 2019.
- 4) 松島亘志, 成瀬元, 横川美和, 東良慶, 今泉文寿, 佐々真志, 田島芳満, 知花武佳: 土砂動態学, 2020
- 5) Noda, T., Asaoka, A. and Nakano, M. : Soil-water coupled finite deformation analysis based on a rate-type equation of motion incorporating the SYS Cam-clay model, Soils Found, Vol.48, pp.771-790, 2008.
- 6) Asaoka, A. and Noda, T.: All soils all states all round geo-analysis integration, Proc. Int. Workshop on Constitutive Modelling-Development, Implementation, Evaluation, and Application, Hong Kong, China, pp.11-27, 2007.
- 7) 中井健太郎: 構造・過圧密・異方性の発展則に基づく土の弾塑性構成式の開発とその粘土、砂、特殊土への適用性に関する基礎的研究, 名古屋大学学位論文, 2005.
- 8) Fredlund, D.: Density and compressibility of air-water mixtures. Canadian Geotechnical Journal. Vol. 13. pp. 386-396. 10.1139/t76-040, 2011.
- 9) Yamamoto, T. Koning, H. L., Sellmeier H., and Hijum, E. V. van.: On the response of a poro-elastic bed to water waves J Fluid Mech., Vol. 87, pp.193-20, 1978.
- 10) Noda, T. and Toyoda, T.: Development and verification of a soil-water coupled finite deformation analysis based on  $u-w-p$  formulation with fluid convective nonlinearity. Soils and Foundations, Vol. 59, pp.888 - 904 , 2019.