

圧縮性間隙流体と多次元波浪に着目した 海底地盤の液状化現象解明に向けた弾塑性 u-p 解析

海底地盤 液状化 弾塑性

名古屋大学 特別会員 ○飯島 琢臣
国際会員 野田 利弘, 豊田 智大

1. はじめに

波浪外力作用時の海底地盤の安定性照査にあたり、波浪の長期的な繰り返し作用による「海底液状化現象」を適切に評価するためには、地盤の材料非線形性・履歴依存性を評価可能な弾塑性力学に基づく数値解析手法が必要となる。本稿では、骨格構造概念に基づく土の弾塑性構成式SYS Cam-clay model¹⁾を搭載した水~土連成のu-p解析コードGEOASIA²⁾を用いるとともに、簡単な境界条件を設定して、海底地盤の密度の違いが有効応力変動に及ぼす影響を調べた。

1.1 海底液状化の3要因

飽和土の力学においては、一次元的な水位変動は全応力と水圧の増分が等しくなるため有効応力変動に寄与しないが、波浪外力により海底地盤の有効応力が変動する理由としては、以下の3つが考えられる。

- ① 地盤内の空気存在³⁾：地盤内に間隙空気が存在する場合、（飽和地盤ではないが、）水圧変動による空気の体積変化により、非排水条件においても土骨格は体積変化可能であり、それに伴って有効応力も変動する
- ② 波浪場の多次元性：多次元波浪場においては、（飽和地盤でも）水位差に起因するせん断が海底地盤内に作用する
- ③ 境界流速の影響：海底面における地盤に平行な流速によるせん断

本稿では、海底液状化の要因①、②を想定し、数値解析を通して、地震時の液状化と同様、地盤の初期状態が密であるほど、また波浪振幅が大きいほど平均有効応力が大きく低下することを示す。

2. 間隙流体の圧縮性を考慮した一次元弾塑性解析

2.1 解析条件 空気存在の影響（要因①）について検討する。解析コードGEOASIAは、空気存在に伴う「間隙水」の圧縮性を考慮した疑似三相系解析ができる。解析モデルは図1に示す側面の側方変形を拘束した一次元直方体メッシュとした。波浪外力の条件は三浦ら³⁾に倣い、領域上端に境界圧（全応力および水圧）変動を正弦波 $(P(t) = a_0 \gamma_w \sin(2\pi/T)t)$ 、振幅 $a_0 = 5\text{m}$ 、周期 $T = 13\text{s}$ 、水の単位体積重量 $\gamma_w = 9.81\text{ kN/m}^3$ 、下向きを正）で与えた。間隙水の圧縮性としては体積弾性率 $K_f = 4.24 \times 10^4\text{ kPa}$ を設定した。また重力場での初期間隙水圧分布は間隙水の圧縮性を考慮したLaplace方程式を解いて決定した。SYS Cam-clay modelの材料定数は三河珪砂⁴⁾の値を用い、初期状態は密砂、中密砂、緩砂の3種を想定した（表1）。初期過圧密比をモデル全体で一様としたが、本解析においては自重を考慮するため、初期比体積は自重に応じて非一様に分布する。

2.2 解析結果 まず密砂ケースの要素挙動としてせん断応力 q -平均有効応力 p' 関係に着目する。図2中の要素Aは、境界圧上昇時の塑性圧縮と減少時の除荷の繰り返しにより p' が減少し、正の過剰間隙水圧が累積した。なお、深部にあるこの要素では初期の p' が十分に大きいためさらに繰り返しを継続しても液状化には至らないことを確認し。一方、要素Bは、境界水圧の値がより大きいため吸水による比体積増加を伴う除荷が生じた後、塑性圧縮の累積に伴い p' が更に減少し、塑性膨張を伴って液状化した。なお、上述の深さ方向の要素挙動の特徴は中密砂、緩砂の場合も同様であった。

次に三つの密度の異なるケースの違いについて、平均有効応力残留率[※]の分布を比

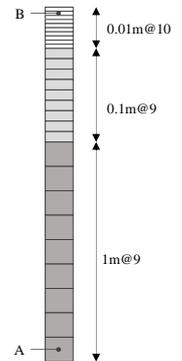


図1 一次元解析モデル

表1 初期状態⁴⁾

	密砂	中密砂	緩砂
過圧密比	39.65	4.23	1.25
構造の程度	1.26	3.25	69.89
異方性の程度	0.045	0.023	0.01
間隙比	0.79	0.91	1.08

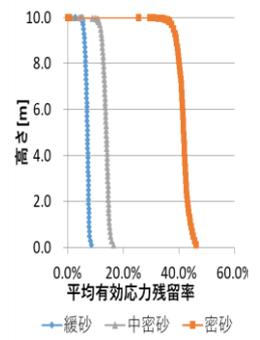
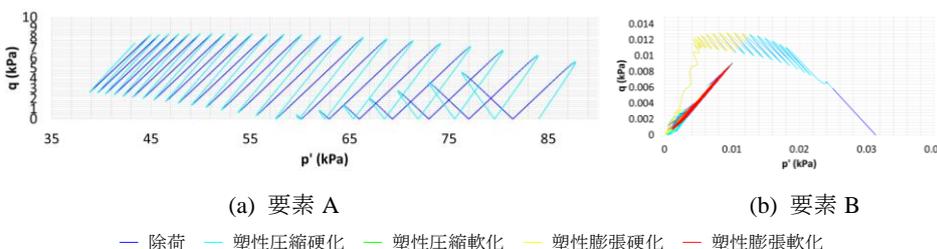


図3 平均有効応力残留率分布

※「平均有効応力残留率」：
解析初期の平均有効応力に対する
最小平均有効応力の比



(a) 要素A (b) 要素B
— 除荷 — 塑性圧縮硬化 — 塑性圧縮軟化 — 塑性膨張硬化 — 塑性膨張軟化

図2 (一般化)せん断応力 q -平均有効応力 p' 関係

較すると、地表近傍ほど p' の低下の程度が大きいという傾向は同様であるが、初期構造の程度が大きい緩砂ほど、地盤全体の p' の減少の程度が大きいことがわかった。

3. 二次元波浪場の弾塑性解析

3.1 解析条件 図4は解析モデルを示す。平面ひずみ条件下での二次元長方形メッシュ（要素数6384）である。上端に波浪境界圧として完全重複波 ($P(x,t) = a_0 a_0 \gamma_w \sin(2\pi/L)x \cdot \sin(2\pi/T)t$, 周期 $T = 13$ s, 波長 $L = 167.5$ m, 下向きを正, 周期および波長は三浦ら³⁾に準拠) を与え, 模型底面および両側面は水平変位を拘束するとともに非排水条件を課した。地盤の弾塑性パラメータは2.1と同一で, 密度の異なる砂地盤(密砂, 中密砂, 緩砂)の値を設定した。ただし, 間隙水の圧縮性は考慮していない。ここでは, 初期状態と境界圧振幅の異なる表2の5ケースについて解析結果を示す。

3.2 解析結果 まず Case A について, 完全重複波を100周期作用させた時点での p' の分布を図5に示す。波の腹の位置(柱 I, II)において p' が, 節の位置に比べて著しく低下している。図6は腹の位置における

表2 解析ケース

Case	振幅 a_0 (m)	材料
A	0.25	密砂
B	0.25	中密砂
C	0.25	緩砂
D	2.5	密砂
E	0.05	密砂

る深さ方向の要素挙動の違いを示す。初期段階に着目すると, 要素 A_I, A_{II} においては, 静水時からの境界圧上昇・下降の過程では, 鉛直方向全応力の作用により q の周期的な増加時に塑性圧縮硬化を示し, (波高がゼロの) 静水時に戻る過程で除荷を示す。ただし初期異方性の影響により, 異方性の軸 ($q = \zeta p'$) が傾いているため, 水位低下時の方が水位上昇時に比べて塑性圧縮の程度および p' の低下量が大きくなった。また誘導異方性の発達に伴い, q の下限値は繰り返し回数の増加とともに上昇してゆく。この特徴は要素 B_I, B_{II} についても同様であるが, 比体積 $v - p'$ 関係 (図は省略) をみると, 上部領域は下部領域の圧縮に起因した間隙水の供給により吸水膨張するが, 負荷過程では塑性圧縮により, 比体積上昇量が小さくなることを確認した。Case A, B, C を比較すると, 密度の違いに応じて, p' の低下量が異なることがわかる。図7は有効応力残留率の深度分布を表すが, 特に緩砂(Case C)の場合, 構造の急激な劣化に伴い, 一周周期経過後で既に波の腹直下地表付近を中心に p' が著しく減少し液化化した。また, Case A, D, E を比較すると, 波高が大きいほど q の振幅が大きくなるため, 領域全体の p' の低下量もまた大きくなった。

図6は腹の位置における深さ方向の要素挙動の違いを示す。初期段階に着目すると, 要素 A_I, A_{II} においては, 静水時からの境界圧上昇・下降の過程では, 鉛直方向全応力の作用により q の周期的な増加時に塑性圧縮硬化を示し, (波高がゼロの) 静水時に戻る過程で除荷を示す。ただし初期異方性の影響により, 異方性の軸 ($q = \zeta p'$) が傾いているため, 水位低下時の方が水位上昇時に比べて塑性圧縮の程度および p' の低下量が大きくなった。また誘導異方性の発達に伴い, q の下限値は繰り返し回数の増加とともに上昇してゆく。この特徴は要素 B_I, B_{II} についても同様であるが, 比体積 $v - p'$ 関係 (図は省略) をみると, 上部領域は下部領域の圧縮に起因した間隙水の供給により吸水膨張するが, 負荷過程では塑性圧縮により, 比体積上昇量が小さくなることを確認した。Case A, B, C を比較すると, 密度の違いに応じて, p' の低下量が異なることがわかる。図7は有効応力残留率の深度分布を表すが, 特に緩砂(Case C)の場合, 構造の急激な劣化に伴い, 一周周期経過後で既に波の腹直下地表付近を中心に p' が著しく減少し液化化した。また, Case A, D, E を比較すると, 波高が大きいほど q の振幅が大きくなるため, 領域全体の p' の低下量もまた大きくなった。

4. おわりに

弾塑性構成式を用いた二相系 $u-p$ 解析手法に基づいて, 波浪外力の作用に起因する非可逆的な有効応力変動～海底液化化の解析を実施し, 端緒的ではあるが, 地盤の初期状態や波浪振幅の影響について検討した。今回解析を行った範囲では, 地震と同様, 地盤が緩いほど, 振幅が大きいほど顕著な平均有効応力低下が生じることを確認した。本稿では現象解明の第一歩として, 平均有効応力の変化要因の着眼点として①間隙流体の圧縮性, ②波浪の多次元性を別個に取り上げた。今後は, 波浪の周期・波長, 進行波や透水係数の影響に関する検討のほか, 水～土連成の $u-w-p$ 解析⁵⁾を用いて③流速の影響についても系統的に調べるとともに, これらの因子が複合的に寄与する場合についても解析を実施してゆく。また, 境界圧変動を十分な時間作用させた後の地盤の初期状態を数値解析的に予測することで, 海岸構造物建設時の海底地盤の初期状態を想定/設定する上での手がかりを与えられるのではないかと考えている。

参考文献

- Asaoka, A., et al. (2002): An elasto-plastic description of two distinct volume change mechanisms of soils, *S&F*, **42**(5), 47-57.
- Noda, T. et al. (2008): Soil-water coupled finite deformation analysis based on a rate-type equation of motion..., *S&F*, **48**(6), 771-790.
- 三浦, 松田, 藤井, ARIF (2019): 波浪に対する海底地盤の有効応力応答メカニズムの..., 第31回中部地盤工学シンポジウム, 31-38.
- 中井 (2005): 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..., 名古屋大学学位論文, 99-156.
- Noda, T. and Toyoda, T. (2019): Development and verification of a soil-water coupled finite deformation analysis..., *S&F*, **59**(4), 888-904.

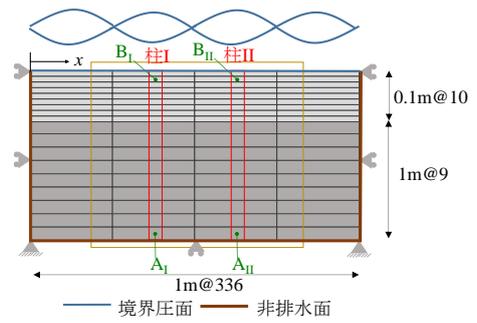


図4 二次元解析モデル

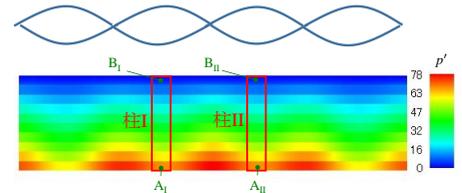


図5 $t = 1300$ s 平均有効応力分布 (Case A)

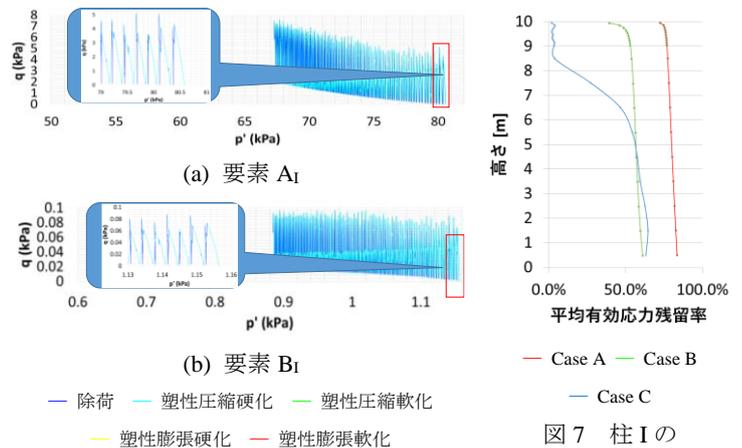


図6 Case A 柱 I $p' - q$ 関係

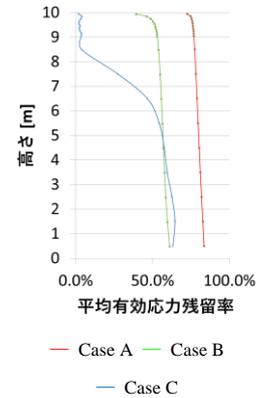


図7 柱 I の平均有効応力残留率分布