

波浪の継続作用下での海底地盤のくり返し塑性を考慮した有効応力解析

海底液状化，弾塑性，圧密

名古屋大学 正会員 ○飯島 琢臣

国際会員 豊田 智大，野田 利弘

1. はじめに

波浪作用下の海底地盤の液状化解析において地盤は弾性体としてモデル化されることが多い。しかしながら，波浪荷重の繰り返し作用による地盤の剛性低下，有効応力減少を適切に評価するためには，土の弾塑性特性を考慮することは必須である¹⁾。本稿では，二次元波浪応答解析結果から，線形弾性地盤では有効応力・軸差応力ともに一切変動しない「地盤層厚が非常に大きい条件」下であっても，弾塑性地盤ではこれらの値に変化が生じうることを示す。また，解析結果について，要素挙動やその他諸量の非可逆的な時間変化等に注目して考察する。

2. 波浪作用下にある二次元弾塑性地盤の変形解析

進行波外力作用下の半無限層厚と間隙水の非圧縮性を仮定した二次元平面ひずみ均質弾性地盤の平均有効応力変動 $\Delta p'$ と偏差応力変動 Δq は Yamamoto の理論解²⁾より，下記の式により与えられる。

$$\Delta p' = 0, \quad \Delta q = \sqrt{3}a_0\lambda z \exp(-\lambda z) \quad (1)$$

ここに， a_0 は境界圧振幅， λ は波数， z は海底面を基準とする座標（下向きを正）である。上式より，弾性地盤においては（有効応力テンソルの各成分は経時変化を示すが）平均有効応力および軸差応力は一定で，ゆえに，体積変化も相当ひずみも一切変化しない。このことは，有効応力変動を説明するには地盤層厚の有限性や間隙水の圧縮性を仮定する必要性を意味するが，それでも波浪作用後に静穏状態に戻れば元の無変形状態に戻り，非可逆的な有効応力変動および残留変形を説明できない。これに対し，地盤の弾塑性を考慮した解析では，塑性変形の履歴の進展に伴い，平均有効応力と軸差応力の変化が解かれることが期待される。そこで，本報では，十分に大きい地盤層厚（1000m）を設定した場合について，SYS Cam-clay モデルを搭載した有限要素解析コード **GEOASIA** を用いて実施した変形解析結果を示す。

2.1 解析条件 解析モデルを図 1 に示す。上端面には左端から x 方向（水平方向）に進行波となる境界圧（全応力と水圧）変動を与え，側壁は非排水・水平変位固定，底面は非排水・鉛直水平変位固定を境界条件として与えた。実際の海岸構造物に対する海底地盤の安定性照査では，表層近傍での応答をとらえることが大事であるため，今回は同図中のモデル上端中央近傍の黄色で囲まれた範囲に着目した。解析に用いた物性値と波浪外力の条件を表 1 に，SYS Cam-clay モデルの典型的な緩い砂の材料定数と初期条件を表 2 に示す。なお，地盤の有限変形，慣性力，自重を考慮している。

2.2 解析結果 図 2 は領域中央近傍における各種状態量のコンター図である。図 2(a)より平均有効応力 p' が浅部から減少すること，図 2(b)より偏差応力変化 Δq は，式(1)に示されるような深さに応じた分布に至るような変化を示している。また上記二つの応力値変化の結果として，弾性解析では評価できない塑性的な変位（同図(c)）と比体積変化（同図(d)）

表 1 物性値，外力条件

物性値	
透水係数 k [cm/s]	1.0×10^{-2}
ポアソン比 ν	0.3
水の体積弾性係数 K_f [kN/m ³] ※	infinity
水の単位体積重量 γ_w [kN/m ³]	9.81
土粒子密度 ρ_s (g/cm ³)	2.65
外力条件	
波高 H [m]	1.0
境界圧振幅 $a_0 (= H\gamma_w/2)$ [kPa]	4.9
周期 T [s]	13.0
角速度 $\omega (= 2\pi/T)$ [rad/s]	0.483
波長 L [m]	167.5
波数 $\lambda (= 2\pi/L)$ [rad/m]	0.38
波速 $C (= L/T)$ [m/s]	12.88

表 2 弾塑性材料定数と初期条件

弾塑性パラメータ	
圧縮指数 λ	0.050
膨潤指数 κ	0.012
限界状態定数 M	1.00
正規圧密線の切片 N	1.98
発展則パラメータ	
正規圧密土化指数 m	0.060
構造劣化指数 a	2.2
回転硬化指数 b_r	0.0
回転硬化限界定数 m_b	0.0
初期条件 ※1※2	
初期過圧密比 $1/R_0$	1.25
初期構造の程度 $1/R_0^*$	69.89
初期土圧係数 K_0	1.0
初期間隙比 e_0	分布

※1 典型的な緩い砂 中井³⁾より

※2 地盤内は等方応力状態を仮定

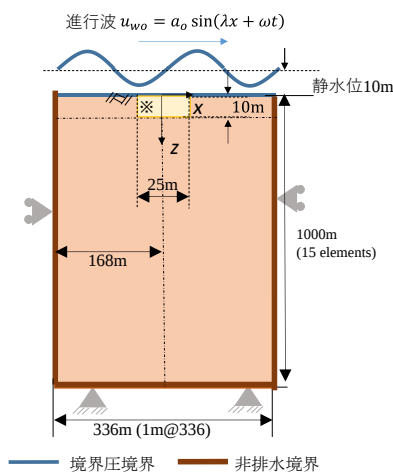
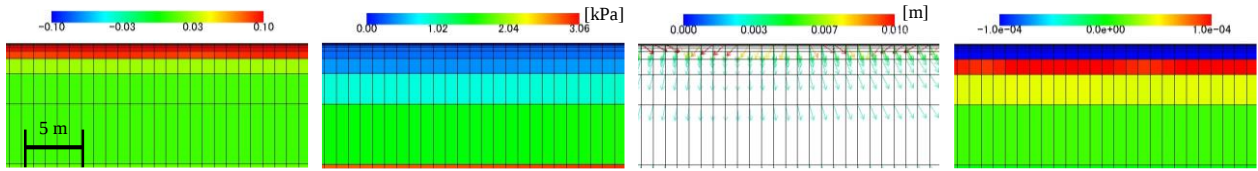


図 1 解析モデル ※注目領域

※飽和状態（間隙水の非圧縮）



(a) 有効応力減少比 $-\Delta p'/p'_0$ (b) 軸差応力変化 Δq [kPa] (c) 変位 [m] (d) 比体積変化 Δv

図2 弾塑性解析コンター図 (中央において4.4波到達直後)

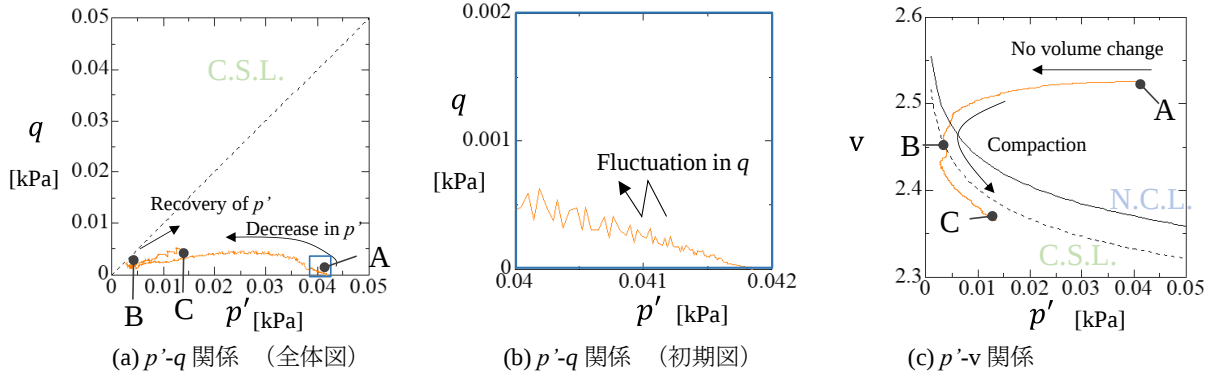


図3 要素挙動 ($x_0 = 167.5\text{m}$, $z_0 = 0.005\text{m}$) ※図(a)の青線で囲まれた部分が図(b)と対応

が解かれる．以上の地盤の応答は，図3の解析領域上端中央 ($x_0 = -0.5\text{m}$, $z_0 = 0.005\text{m}$) の要素挙動からも確認できる．断続的な波浪作用下で，解析初期 (A～B) では非排水的条件下での塑性圧縮により平均有効応力 p' は減少し，過剰間隙水圧 u_e (間隙水圧から静水圧を引いた値) が発生してゆく．その後，B～C にかけては， u_e の消散に伴う p' の回復とともに，比体積 v の有意な減少 (圧密) が生じている．また p' - q 関係を拡大して示している同図 3(b) より，波圧の継続作用による偏差応力 q の増減が確認でき，これにより負荷過程での塑性変形が一連の過程で起こり続けている．

次に，具体的な上記の現象の更なる理解のために，解析により得られた領域中央 ($x_0 = -0.5\text{m}$) ・表層近傍の二つの要素 ($z_0 = 0.005\text{m}, 0.015\text{m}$) における諸量の経時変化に注目する (図4)．まず2波分の経過までに着目すると，いずれの要素も波の進展に伴い， q の変動とそれに起因した塑性履歴による構造の低位化が生じる．その後，上部要素 ($z_0 = 0.005\text{m}$) において u_e の消散が起こり， p' の回復と v の減少が起こる．しかしおよそ3波分が経過した時点で， p' ， v ともに時間変化率が小さくなる．これは，下部要素 ($z_0 = 0.015\text{m}$) において，緩やかな u_e の消散が始まるが，その圧縮に伴う上向きの水の流れが，上部要素の圧密を妨げるためである．

3. おわりに

本稿では，十分な層厚を有する二次元地盤の波浪作用時の応答解析を実施し，弾性地盤では平均有効応力 p' ，軸差応力 q のいずれも時間変化しないが，弾塑性地盤では継続的な q の変動に伴う塑性圧縮により p' が大きく減少し，その後，過剰間隙水圧の消散とともに p' の回復と比体積の減少が進展する様子を示した．このように，地盤の一連の非可逆過程を追跡するには，土の弾塑性特性を把握・考慮することが不可欠であることがわかる．今後は，弾塑性解析において地盤物性，外力条件等を系統的に変えた計算を実施し，海底液化化についてより体系的な現象の理解につなげてゆきたい．

謝辞 本研究は，科学研究費補助金 (若手研究：課題番号 22K14324) の補助を受けて実施した．

参考文献

- 1) 飯島，豊田，野田 (2021)：圧縮性間隙流体と多次元波浪に…，第56回地盤工学研究発表会，submitted.
- 2) Yamamoto, T. et al (1978)：On the response of a poro-elastic bed to water waves, J. Fluid Mech., 87, pp.193-206.
- 3) 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，pp.99-156.

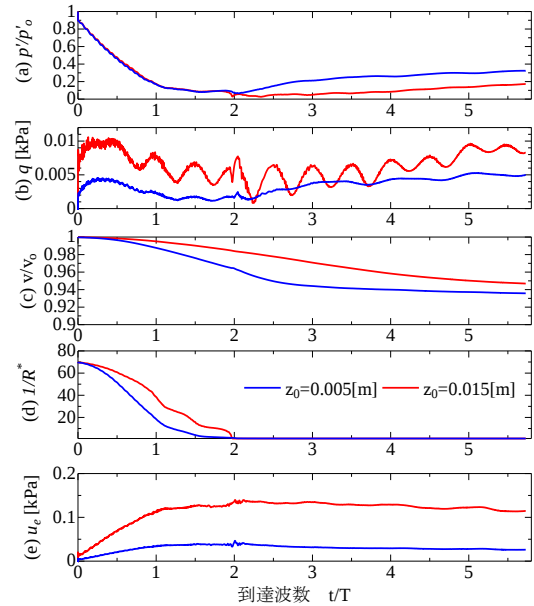


図4 各種パラメータの時間変化図※1 (a) 有効応力変化比 p'/p'_0 (b) 軸差応力 q (c) 比体積変化比 v/v_0 (d) 構造の程度 $1/R^*$ ※2 (e) 過剰間隙水圧 u_e
※1 横軸は到達波数， t は直上に波が到達してから時間 ※2 下限は1である．