# 波浪作用下にある海底地盤の変形解析における 土の弾塑性特性の重要性

Importance of elasto-plasticity of soil for deformation analysis of seabed ground under wave loading

飯島琢臣1),豊田智大2),野田利弘3)

Takumi Iijima, Tomohiro Toyoda , and Toshihiro Noda

1) 修 (工	.) 名古屋大学	工学研究科(	F 464-8603	名古屋市千種区不老町, E-:	mail: iijima.takum.h3	@s.mail.nagoya-u.ac.jp)
---------	----------	--------	------------	-----------------	-----------------------	-------------------------

2) 博 (工) 名古屋大学 工学研究科 助教 (〒 464-8603 名古屋市千種区不老町, E-mail: toyoda@civil.nagoya-u.ac.jp)

3) 博 (工) 名古屋大学 工学研究科 教授 (〒 464-8603 名古屋市千種区不老町, E-mail: noda@civil.nagoya-u.ac.jp)

The numerical analysis focuses on the elasto-plastic properties of soils leading to instability, such as liquefaction, of seabed ground under ocean wave loading. The decrease in mean effective stress (MES), which cannot be explained by elastic models, is expressed as loss of structure due to cyclic shear loading. Furthermore, the recovery of MES due to drainage and plastic compression during subsequent permanent wave loading is also represented.

Key Words : Seabed Liquefaction, Elasto-Plasticity, Finite Element Method

# 1. はじめに

波浪と海底地盤の相互作用問題として波浪の作用によ る有効応力変動(海底液状化)を数値解析的に解く場合, 特に海岸工学分野において,地盤は弾性体としてモデル 化されることが多い.しかし,実際の海底地盤は不可逆的 かつ履歴依存の変形特性を有する弾塑性体であるから, 海底地盤の応答を数値解析により精緻に評価する上で, 弾性力学からの脱却が必須であることは言うまでもない.

そこで著者らは、骨格構造に基づく地盤の弾塑性構成 式SYS Cam-clay model[1]を用いて、一次元海底地盤を対象 に、地盤の弾塑性が地盤の変形および有効応力変動に与 える影響について数値解析的に考察してきた[2].

ところで、一次元地盤の波浪応答解析においては海底 地盤の不飽和、それによる間隙水の圧縮性を考慮しない 限り有効応力変化の説明ができないことが知られている [3].

一方,二次元波浪場においては,間隙水の非圧縮条件下 においてもせん断変形が可能であり,有効応力も変化し 得る.しかし二次元地盤の(水平無限地盤,半無限層厚, 進行波)弾性を仮定したYamamotoの波浪応答解[4]におい ては,水の非圧縮性を仮定した場合,平均有効応力p',偏 差応力qは時間変化しない形で導出され,初期値を基準と した各増分Δp', Δqは次式で与えられる.

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

ここに, *a*<sub>0</sub>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)を表す.

本研究では、Yamamotoと同様の境界条件下で二次元弾 塑性解析を行い, p', qが経時変化することを示すとともに、 p'の減少とその後の塑性圧縮を伴うp'の回復のメカニズ ムについて考察する.また付録として最後に,初期密度の 違い,解析層厚・底面拘束,自重考慮の有無の弾塑性地盤 の波浪応答への影響について評価する.

## 2. 解析条件

解析に用いた地盤モデルを図-1に示す. 波浪外力(水圧 と鉛直全応力)が作用する上端面は排水条件,底面と側面 は非排水条件を課した.また波浪外力は進行波として左 端から右向きに表-1の条件の通り与えた.また解析対象と して砂地盤を想定し,設定した物性値,材料パラメータ, 初期密度パラメータは表-2に示す.



表-1 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物性値、材料パラメータ、初期条件

物性値					
透水係数 k [cm/s]	0.01				
ポアソン比 ν	0.3				
水の体積弾性係数 K <sub>f</sub> [kN/m <sup>3</sup> ] ※1	infinity				
水の単位体積重量 yw [kN/m <sup>3</sup> ]	9.81				
土粒子密度 $\rho^{s}$ (g/cm <sup>3</sup> )	2.65				
弾塑性パラメータ					
圧縮指数 λ	0.050				
膨潤指数 <del></del> <i>к</i>	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 br	0.0				
回転硬化限界定数 mb	0.0				
初期条件 ※2※3					
初期過圧密比1/R <sub>0</sub>	1.25				
初期構造の程度1/R <sub>0</sub> *	69.89				
初期土圧係数 K <sub>0</sub>	1.0				
初期間隙比 e <sub>0</sub>	分布				

※1 飽和を仮定(間隙水は非圧縮) ※2 典型的な緩砂 中井[5]より ※3 地盤内は等方応力状態を仮定

# 3. 波浪に対する弾塑性海底地盤挙動

図-2は中央において4.4波到達直後の解析領域上端中央 近傍(-12.5  $\leq x \leq 12.5$ ,  $0 \leq z < 12.5$ )におけるケース0 の平均有効応力減少率 $-\Delta p'/p'_0$ と偏差応力変動 $\Delta q$ のコン ター図である.  $\Delta q$ については,式(1)で表される深さに 応じた分布が理論解と同様に得られたのに対し,p'の減少 が上端から生じていることを確認した.



図-3は、解析領域上端中央 ( $x_0 = -0.5m$ ,  $z_0 = -0.005m$ ) における土要素の挙動を示す. 波の進行に伴い初期 (A → B) において、非排水 (v一定) のまま同図(b)に見られる qの小さな変動に伴いp'が減少する. その後 (B → C) 過剰 間隙水圧 $u_e$ の消散に伴い、p'の回復と塑性体積圧縮 (vの 減少)を示す. これは松島ら[6]によって弾塑性的な海底 地盤挙動として実現象として観察されていることと一致 する.



図-3 要素挙動(x<sub>0</sub> = -0.5m, z<sub>0</sub> = 0.005m) ※図(a)の青線で囲まれた部分が図(b)と対応 図-4は、図-3で示した土要素とその直下の土要素 ( $x_0 = -0.5m$ ,  $z_0 = 0.015m$ )の各種状態量の経時変化を示す. 波 がおよそ2波到達する ( $0 \le t/T \le 2$ )間,非排水的にqが 増減を繰り返しながら構造が喪失 ( $1/R^* \rightarrow 1$ )し,  $u_e$ が蓄 積しp'が減少した.その後 (2 < t/T),上部の要素から  $u_e$ が消散してp'の回復(増加)し,それに伴い塑性圧縮(圧 密)をしている.なお上部の要素における塑性圧縮の進展 は、下部要素の圧密に伴う過剰水圧発生による上向き浸 透力の作用により抑制されていることが確認されている.



図-4 各種パラメータの時間変化図※ (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 $1/R^*$  (e) 過剰間隙水圧 $u_e$ ※横軸は到達波数を表し, tは直上に波が到達後からの時間 を表す.

# 4. おわりに

本稿では,波浪外力作用下にある二次元地盤の応答を 土の骨格構造を表現できる弾塑性構成式(SYS Cam-clay model)を用いて数値解析的に解くことによって,土を弾 性体(かつ半無限層厚と水の非圧縮)と仮定した場合には 解き得ない平均有効応力p'と偏差応力qの時間変化,そし て塑性的な変形が解かれることを確認した.また波浪作 用面から起こる平均有効応力の低下のメカニズムとして, 弾塑性地盤の深さによる剛性の違いがもたらす,波圧変 動の継続的作用下でのqの変動が,構造の程度1/R\*の損失 を引き起こし,塑性圧縮に起因するp'の減少とそれに伴う 過剰間隙水圧u<sub>e</sub>の湧き出しが解かれた.その後はu<sub>e</sub>の消 散に伴うp'の回復(増加)と有意な塑性圧縮が解かれた.

さらに,付録においての弾塑性地盤の波浪応答解析に おける各種計算条件の解への影響を調べる一連の計算を 通して以下の結論が得られた.

- 初期に地盤が密であるほど、構造の損失が起きにくく、 p'低下が低減された.
- 地盤の鉛直方向解析層厚は、値が大きいほど地表に

近い位置の変位が大きくなる傾向が示された一方, ある程度の層厚以上では,変位の大きさが変わらな くなることが確認できた.

- 底面の水平変位固定の有無は、鉛直変位分布に大きな変化を与えなかった。
- 自重を考慮した場合、考慮しなかった場合と比べて 1/R\*とp'の減少は大きく低減されることが示された. これが示唆することは、従来の自重を考慮しない弾 性地盤の波浪に対する応答解析は、応力変形ともに 過大評価し得る可能性である.

**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.

# 付録:各種条件が弾塑性地盤の波浪応答に及ぼす影響 (1)解析条件

解析に用いたモデルを図-1に示す.基本的な境界条件, 波浪外力条件,材料定数は2章における解析条件と一致さ せた.初期密度,解析層厚dと底面の拘束条件,自重考慮 の有無の影響をそれぞれ個別にみるために諸条件を表-3 のように設定した8ケースの解析を実施した.初期密度と しては表2にある緩砂のケースに加えて,同じく中井[3]よ り,で表される密砂のパラメータセット(初期過圧密比  $1/R_0 = 39.65$ ,初期構造の程度 $1/R_0^* = 1.26$ ,比体積分布) を用いた. 自重を考慮しない計算においては9.8kPaの拘 束圧を全ての要素に一律に与えた.



図−1 解析モデル

- ※1 表1に示す境界条件によって異なる.
  ※2 メッシュ数は10m 層厚の場合は10要素,その他は15要素
  ※3 注目領域は水平方向の拘束の影響が小さい中央であり,緑色で塗
- りつぶされている.

ケース	材料の	層厚	底面の	
番号	初期密度	<i>d</i> [m]	固定条件	自重
1 (Base)	緩	10	固定	-
2	密	10	固定	-
3	緩	100	固定	-
4	緩	1000	固定	-
5	緩	10	自由	-
6	緩	100	自由	-
7	緩	1000	自由	-
8	緩	10	固定	考慮

表-4 解析ケース諸条件

# (2) 初期密度の影響

ケース1 (緩砂) と2 (密砂) の解析結果に注目する. 図 -5は、平均有効応力変化率 $p'/p'_0$ と構造の程度1/ $R^*$ の領域 中央 ( $x_o = -0.5m$ ) での4つの深さに対する経時変化を示 す. 緩砂のケースでは、100波到達までに浅い地点 ( $z_o >$ 0.5m) で、3章の解析結果と同様、土要素は1/ $R^*$ の解消と それに伴うp'の減少、そしてその後のp'の回復を示すのに 対し、密砂のケースでは、1/ $R^*$ が浅い位置においても変 化が小さく、その結果、p'の減少も抑えられた.



### (3) 層厚と底面の水平変位拘束の影響

ケース1と3~7の結果を比較し,層厚(鉛直方向解析領 域打ち切り)と底面の固定条件の影響について考察する. 図-6は,領域中央の鉛直方向における水平変位 $\xi$ と鉛直変 位 $\eta$ のアイソクローン(等時線図)(範囲: $0 \le z \le 100$ ) を示す.記載時刻は,各諸量が外力水圧変動に対して位相 遅れの無い場合に最大値をとるよう, $\xi$ 分布については直 上で波が4波到来時, $\eta$ 分布については4.25波到来時とした.

まず層厚の影響については,層厚が大きいほどどちらの変位も大きくなるという傾向を示したが,100mと 1000mの変位の最大値の差は小さい.これは層厚1000mの 場合は,上部100mにおける挙動が支配的となりそれ以深 の応力やひずみは絶対値が小さいために上部に影響を与 えないからである.

次に底面での水平変位拘束の影響について,拘束と非 拘束の差異は $\xi$ の分布に大きく見られ, $\eta$ には大きな影響 を与えていない.また $\xi$ の分布は,拘束条件に関わらず傾 きが類似しており,拘束の場合は非拘束の場合に対し,底 面で $\xi$ が0になるように平行移動している.



## (4) 自重の影響

自重を考慮したケース8について、図-5(自重ありのケ ース1)と同様に解析領域中央の異なる鉛直位置における p'/p'oと1/R\*の経時変化を図-7に示し、図-5と比較する. 自重を考慮した計算では、上端に近い要素であっても、 100波経過までに1/R\*の減少が殆どみられず、結果として p'の減少も起こらなかった.この結果は、弾塑性解析にお ける自重を考慮した計算の重要性を示しており、同じ材 料であっても自重の考慮によって波浪外力に対する抵抗 が著しく大きくなることを示唆する.



#### 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.
- [2] 飯島琢臣,豊田智大,野田利弘(2021): 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,第56回地盤工学研究発表会,12-9-3-03.
- [3] 三浦均也,松田達也,藤井湧大,ARIF Daniel bin Aami (2019): 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,31-38.

- [4] Yamamoto, T. et al (1978): On the response of a poroelastic bed to water waves, J. Fluid Mech., 87, pp.193-206.
- [5] 中井健太郎 (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.
- [6] 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, 共立出版, 2020