

波浪外力継続作用下の海底地盤の液状化に伴う圧密（Solidification）のメカニズム解明

海底液状化，圧密，弾塑性

名古屋大学 正会員
国際会員

○飯島琢臣
豊田智大 野田利弘

1. はじめに

Miyamoto et al.¹⁾は遠心模型実験（30g 場）により，緩く堆積した珪砂地盤への波浪外力の継続作用下において，A) 正の過剰間隙水圧 u_e の蓄積を伴う液状化から B) u_e の消散に伴う圧密（Solidification）へと現象が段階的に進行することを示した．また，波浪作用による液状化後に波浪の入力を止めて生じる静穏下での圧密との比較から，Solidification の特徴として，①圧密収束にかかる時間が長い，②より大きな体積圧縮を伴うことが示されている．液状化～Solidification の過程を数値解析により再現し，そのメカニズムを解明することは，実海底地盤の堆積環境や力学的状況（密度や応力）を正確に推定する上でも有用な情報を提供しうる．そこで本稿では，弾塑性構成式 SYS Cam-clay model を搭載した地盤の有限変形解析コード **GEOASIA**²⁾により，波浪外力作用下で海底地盤が液状化した後，波浪外力継続作用下で発生する圧密（Solidification）と波浪外力を止めて静穏下で発生する圧密の両方を Miyamoto et al.の実験に倣い表現することを試みる．また，上記解析による結果を考察することで，Solidification のメカニズムを静穏下の圧密と比較して明らかにする．

2. 弾塑性構成式を用いた海底地盤の波浪外力による液状化と圧密解析

Miyamoto et al.は図 1 に示す模型の中央に珪砂を緩く堆積させ，30g の遠心場の下で進行波外力を堆積砂地盤に作用させた．地盤中央の同図 A-D で示される位置で間隙水圧を計測しその時刻歴を調べるとともに，実験前後において模型下部を被圧させて鉛直浸透流を生じさせる透水試験により間隙率の鉛直分布を予測し，その変化を調べた．波浪外力の入力回数（1 波を 1 回）を変えた実験を数ケース実施しているが，本稿では，液状化後に全域が波浪外力継続作用下で圧密（Solidification）した 800 回，下半分のが Solidification した時点で波浪を停止し，上部は静穏下で圧密した 285 回，地盤全域が液状化後に波浪を停止し，静穏下で圧密させた 23 回の 3 ケースに着目し，**GEOASIA**²⁾を用いて同様の条件での数値解析を実施した．

2.1 解析条件 Miyamoto et al.の実験に対し，相似則を考慮して作成した

解析モデルを図 2 に示す．境界条件として，底面と側面には非排水条件を課し，面に垂直方向の変位のみを固定した．上端面には波浪外力として，左端から水平方向（ x 方向）に進行する境界圧（全応力と水圧）変動を正弦波で与えた．解析に用いた物性値，外力条件を表 1 に，SYS Cam-clay model の各種パラメータおよび初期条件を表 2 に示す．初期条件については，Miyamoto et al.にならい，間隙率を相対密度 30%となるように一様分布させた．なお，有限変形，慣性力，自重，および透水係数の間隙比依存性を考慮している．

2.2 解析結果 Miyamoto et al.の実験と数値解析結果を比較する．図 3 は，底部近傍の位置 D における過剰間隙水圧 u_e の時刻歴について，波浪入力回数の異なる 3 ケースの結果を示す．実験で示された波浪外力の継続作用下での圧密（Solidification）の特徴①である u_e の消散にかかる時間が静穏下での圧密より長いことが数値解析においても再現できている．図 4 は波浪外力入力前と圧密後の間隙比 e の鉛直分布について，入力波浪回数が 800（全域 Solidification）と 285（下部 Solidification，上部は静穏下の圧密）の結果を示す．実験結果が示す Solidification の特徴②である e の低下量（圧縮量）が静穏下での圧密より大きいことが，数値解析においても再現できている．

2.3 Solidification のメカニズム

上記の数値解析結果を考察することで，Solidification のメカニズムを解明する．まず波浪外力作用下での液状化（過剰間隙水圧 u_e の上昇）並びに圧密（ u_e の減少）が発生するメカニズムを説明する．支

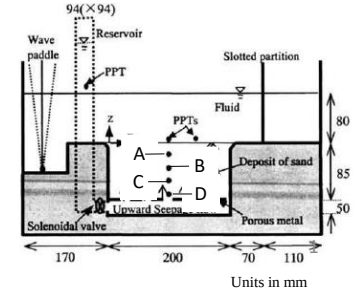


図 1 Miyamoto et al.の実験装置

（※元図を加工）

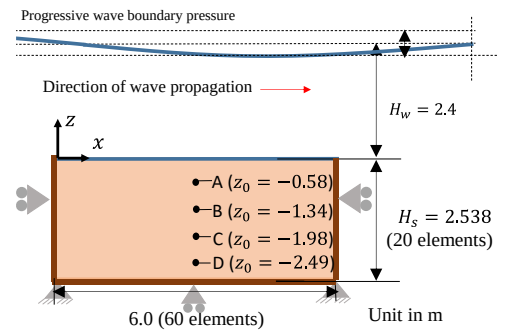


図 2 解析モデル

表 2 弾塑性材料定数と初期条件

弾塑性パラメータ※2	
圧縮指数 λ	0.045
膨潤指数 κ	0.002
限界状態定数 M	1.20
正規圧密線の切片 N	1.98
発展則パラメータ※2	
正規圧密土化指数 m^{*6}	0.02
構造劣化指数 a ($b = c = 1.0$)	2.2
回転硬化指数 b_r	3.5
回転硬化限界定数 m_b	0.9
初期条件	
初期過圧密比 $1/R_0$	分布
初期構造の程度 $1/R_0^*$	2.00
初期土圧係数 K_0	0.6
初期異方性 K_β	0.6
初期間隙比 e_0^{*7}	1.033

※1 Taylor の式より間隙比に応じて変化 ※2 珪砂 7 号 (Tani et al. ³⁾より) ※3 飽和度 99.3% 相当 ※4 Miyamoto et al.¹⁾より ※5 微小振幅波より算出※6 Tani et al. ³⁾より小さな値 ※7 相対密度 30%に対応

表 1 物性値，外力条件

物性値	
初期透水係数 k_s [cm/s] ※1	1.9×10^{-2}
ポアソン比 ν ※2	0.15
水の体積弾性係数 K_f [kN/m ²] ※3	4.24×10^4
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) ※4	2.69
外力条件	
境界圧振幅 p_0 [kPa] ※4	3.0
周期 T [s] ※4	3.75
波長 L [m] ※5	16.1

配方程式である水～土連成式において、波浪1周期間 T での時間積分をとり、簡単のため土骨格の慣性と間隙水の圧縮性の項を無視すると、式(1)のようにその間での弾性体積ひずみ ε_v^e が塑性体積ひずみ ε_v^p と間隙水の流出入収支を表す項の和で表せる(h は全水頭、 J はヤコビアン)。波浪外力が作用して領域が液状化するまでの短い間では、右辺第2項が表す要素内間隙水の流出入収支がほとんどない中で、領域全体が若干過圧密の状態のため、限界状態線下側での土骨格の塑性圧縮(正の ε_v^p)が大きく発生する。これにより式(1)から負の ε_v^e (弾性膨張)が発生する。土骨格の弾性構成則から平均有効応力 p' は小さくなり(液状化)、有効応力の原理から外力一定条件下で u_e は増加する。そして領域全体が液状化した時、波浪外力入力前の有効応力のように、過剰間隙水圧が鉛直方向に三角形の分布をとるようになる。このとき、領域中央では、間隙水の流出入収支がないが(右辺第2項がゼロ)、底部では下面が非排水境界で上方との動水勾配は上向きであるため、常に右辺第2項が有意に正の値(要素内間隙水の流出)をもつことになる。これにより土骨格の塑性圧縮による正の過剰水圧の発生が間隙水流出に伴う過剰水圧消散を下回ると、 ε_v^e が正の値をとり p' は増加し、 u_e は減少、つまり圧密が開始する。そして一度、底部要素での圧密が完了し間隙水の上方への供給が途絶えると、その直上の要素においても、先の底部の要素と同様に圧密が始まる。このように波浪外力作用下での圧密は下から発生し、上方に伝播する(cf. 凝固フロントの上方遷移)。上記の詳細は別報⁵⁾に譲る。本稿ではさらに、なぜ波浪外力の継続作用下での圧密が静穏下での圧密より、①遅く進展し、②大きな体積圧縮を伴うか?という問いへの答を提示したい。図5は、浅い位置Aにおける要素の285波入力後、波浪を停止し静穏下にした時(赤破線)と波浪外力を入力し続けた時(緑実線)の軸差応力 q 、 ε_v^p および u_e の時間変化を示す。同図から、波浪外力を作用し続けた場合、 q はその後増減を繰り返す、これに伴う限界状態線下側での繰返し塑性により ε_v^p が大きく発生する(②の説明)。したがって、式(1)より $\varepsilon_v^e(>0)$ は小さくなり p' の回復は遅れ、 u_e の減少、つまり圧密が妨げられることがわかる(①の説明)。

$$\varepsilon_v^e = -\varepsilon_v^p + \int_0^T \{-Jk_s \text{div}(\text{grad}h)\}dt \quad (1)$$

3. おわりに

GEOASIA²⁾を用いた数値解析により、Miyamoto et al.¹⁾の実験で観測された波浪外力継続作用下での圧密(Solidification)と静穏下の圧密のどちらも再現できることを確かめた。またSolidificationでは、静穏下での圧密と比べて、波浪外力によるせん断応力の増減に起因した塑性圧縮体積ひずみの継続発生により②大きな体積圧縮が発生し、また、過剰間隙水圧の継続的な発生が圧密の進行を妨害することで、①圧密終了までの時間が長くなることを説明した。今後は、波浪外力特性が海底地盤の弾塑性挙動(液状化と圧密)に与える影響を検討していく。

参考文献)

- 1) Miyamoto, J., Sassa, S., Sekiguchi, H. (2004): Progressive solidification of a liquefied ..., Géotechnique, 54, 617-629.
- 2) Noda, T. Asaoka, A., Nakano, M. (2008): Soil-water coupled finite deformation analysis based on a rate-type equation ..., S&F, 48, 771-790.
- 3) Tani, K., et al. (2015): Liquefaction countermeasures by shallow ..., Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 79, 401-414.
- 4) 土木学会 (1994): 海岸波動: 波・構造物・地盤の相互作用の解析法.
- 5) Iijima, T., Noda, T. (2025): Numerical reproduction of the sequential elastoplastic seabed behavior..., ICSMGE 2026, submitted.

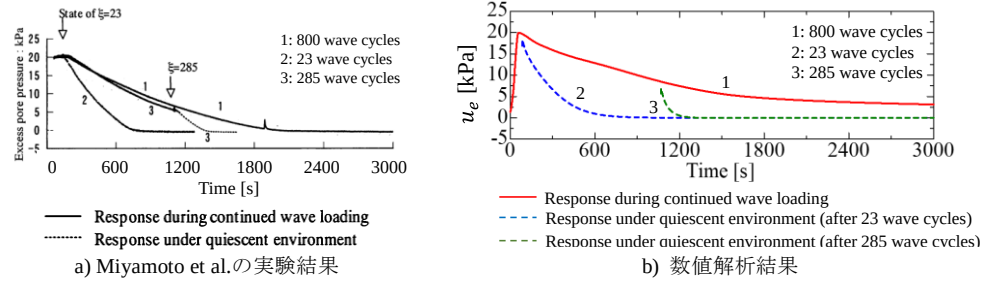


図3 異なる波浪入力回数ごとの底部(位置D)における過剰間隙水圧の時間変化トレンド

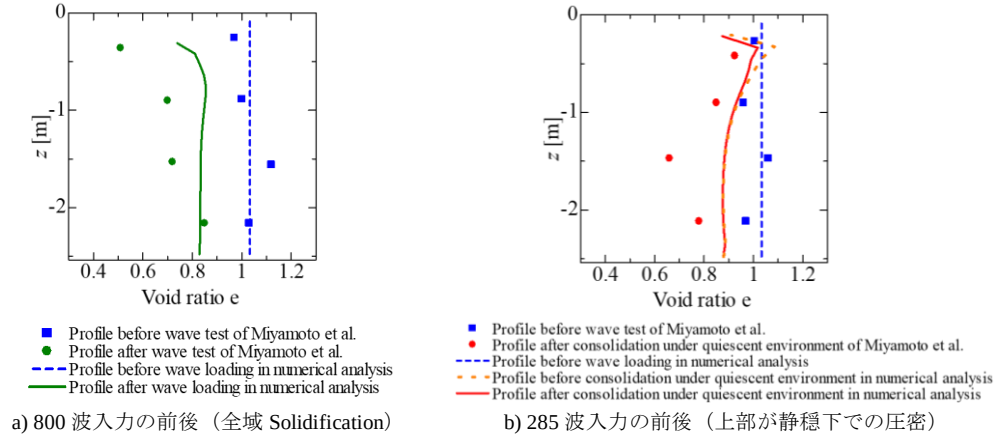


図4 異なる波浪入力回数ごとの間隙率の鉛直分布(実験結果と解析結果の比較)

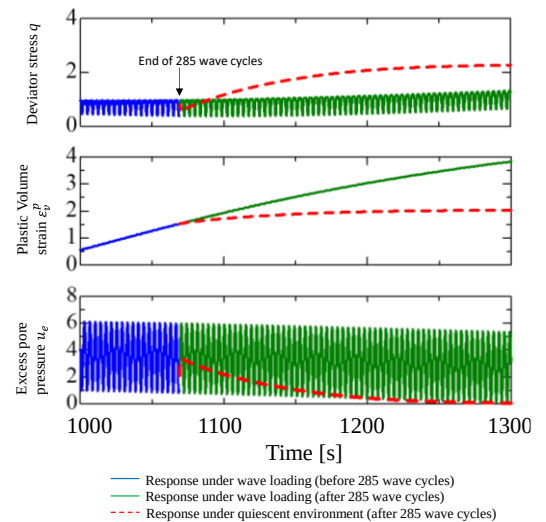


図5 位置Aにおける波浪外力継続作用前、後、静穏下での諸量の時間変化