

砂泥質土の波浪応答および自重圧密特性に関する研究

Wave-Induced Liquefaction and Self-Weight Consolidation of Sand-Mud Mixture

熊谷隆宏¹・上田正樹²

Takahiro KUMAGAI and Masaki UEDA

The dynamics of sand and mud are dealt with separately in a lot of theoretical and experimental studies because of their different behaviors to hydrodynamic force. Regarding the dynamics of sand-mud mixture, only the erodibility is focused on parameterising critical shear stress in conventional studies. Wave-induced liquefaction of sand-mud mixture is found to occur resonantly with the significant amplification of oscillatory pore-water pressure. The mechanism of its resonant fluidization is revealed by use of the theory of seepage channeled flow of Foda (1994). In addition, the characteristics of self-weight consolidation of sand-mud mixture in intertidal zone are elucidated experimentally in comparison with the laminated subsoil with highly-permeable sand and clay layers.

1. はじめに

河口域の干潟の地盤環境の形成過程において、砂・礫分が供給される河川出水時には、シルト・粘土分に比べて土粒子重量が大きい砂・礫分が、分離して先に沈降・堆積すると考えられる。河口域では、新たに堆積する砂・礫分が既存の軟弱な底泥層内に食い込むことによる砂泥混合層や、砂・礫層と粘性土層の互層構造が見られることが知られている。既往の研究では、砂と粘土（底泥）は、それぞれ異なる底質として扱われることが多く、砂と粘土が混合した砂泥質土の挙動に関する研究は非常に少ない。例えば、Kamphuis・Hall (1983)は、砂泥質土の侵食性に着目し、土質特性として、粘土含有量、せん断強度、塑性指数が増加するとともに、一樣流に対する侵食抵抗性が強くなることを実験で明らかにしている。また、Mitchener・Torfs (1996)は、シルト・粘土分が30-50%含有されるときに、一樣流に対する侵食抵抗性が最も強いことを示すと同時に、砂分を含まない粘性土と比較して、20-40%の砂分を含む混合土が波浪作用に対して抵抗力を持つことを示している。Panagiotopoulos ら (1997)は、砂に比べて、粘土・シルト分が5-10%以上含まれる混合土は、一樣流のみならず、振動流に対しても、強い侵食抵抗性を持つことを実験により示している。しかしながら、この実験では、波浪作用を再現する際に、動圧力の作用が無視された振動流のみが与えられている。熊谷ら (2006a)は、波浪作用下の実験を行い、10%程度の粘土分を含有する砂泥質土は、初期形成時に未圧密土としての特徴を持ち、地盤骨格が弱いと同時に、粘土分が発揮する粘着抵抗力が弱いため、砂であれば、掃流砂、浮遊砂の漂砂形態が生じる程度の小さい波浪作用に対して、著しい液状化が発生することを明らかにしている。

また、熊谷ら (2006b)は、粘性土層と高透水性の砂・

礫層の互層構造が潮間帯に形成されている場合、干出時に、有効圧密圧力として作用する透水力の影響が現れ、粘性土の自重圧密が促進されることを示している。

本研究は、波浪および冠水・干出の繰り返し作用下における砂泥質土の挙動に着目し、粘土分が比較的少ない条件で特徴的に現れる波浪による液状化現象のメカニズムを明らかにするとともに、粘土分が多い条件で特徴的な自重圧密特性を明らかにすることを目的とする。

2. 砂泥質土の波浪応答特性

一般に、砂と粘土の土質特性の違いにより、砂の含有率によって、砂質土（砂の含有量が80%以上）、中間土（砂の含有量が50-80%）、粘性土（砂の含有量が50%未満）と分類される（日本港湾協会, 2007）。ただし、本研究では、砂と粘土の混合土を総称して、砂泥質土と定義する。

砂地盤の波浪応答特性として、底面の水圧変動に対して遅れを伴う変動過剰間隙水圧と、地盤のせん断変形に伴う体積収縮（負のダイレイタンス）によって蓄積する残留過剰間隙圧が発生し、地盤の有効応力がゼロに至ると、液状化が生じることが知られている（例えば、善ら, 1987）。また、軟弱な粘土（底泥）の波浪応答特性に関して、熊谷ら (2007)は、液性限界を超える高い含水比を持つ軟弱な粘性土層が、波浪作用により流動化するとき、周期的な波圧の作用によって、引張応力および主応力の回転に伴う繰り返しせん断応力が地盤内に作用し、亀裂が発生すると同時に、亀裂の発生により圧密が促進される特性を明らかにしている。

砂泥質土の波浪応答特性として、熊谷ら (2006a)は、10%程度の少量の粘土を含有して形成された砂泥質土は、初期において、地盤骨格が弱いため、小さい波浪に対しても、容易に液状化が発生することを明らかにしている。特に、その液状化現象において、砂地盤と異なり、地盤内の変動間隙水圧が底面変動水圧の2-4倍に著しく増幅し、Foda・Tzang (1994)に示される共振流動応答が特徴として現れる。本研究では、この共振流動状態の液状化

1 正 会 員 Ph.D. 五洋建設(株)技術研究所
2 正 会 員 (元)五洋建設(株)東京支店土木技術部

実験を行い、初期の地盤条件に応じて、液状化に伴う共振流動応答 (Resonant fluidization response)、液状化に伴う非共振流動応答 (Nonresonant fluidization response)、非液状化応答 (Unfluidization response) の3形態が現れることを示している。共振流動応答では、底面変動水圧の最大4倍程度にまで、変動間隙水圧が増幅する現象が現れている。特に、緩い状態で作成され、地盤骨格が弱い地盤条件で、こうした現象が生じることが報告されている。

共振流動応答のメカニズムについて、Foda (1994) は、地盤内に、亀裂状の細い流路に集中する浸透流 (Channeled seepage flow) が生じる仮説を立てて説明している。均質部と流路形成部の状態を図-4に示す。Fodaは、流路内を振動する浸透流を波動理論でモデル化するとともに、周囲の地盤挙動を弾性理論でモデル化し、これらの相互作用を理論的に表現し、浸透流の波動運動に関する分散関係式(式5)を導いている。そして、波動運動する浸透流が流路区間内で反射し、形成される重複波が共振により増幅することにより、共振流動応答を説明している。

$$2(1-\nu)-H\sigma^3 = \frac{H \tan \alpha}{2\alpha} [2\sigma^2 - (1-2\nu)]$$

$$\left[\frac{(1-2\nu)-(1-\nu)\sigma H \tan \alpha / \alpha}{2\sigma - (1-\nu)H \tan \alpha / \alpha} - \sigma \right] \cdots (5)$$

$$\alpha = \sqrt{i\rho\omega b^2/4\mu}, \quad \sigma = \lambda/S, \quad H = Sb, \quad S = \sqrt{\rho\omega^2/G} \quad (6)$$

ここに、 ρ 、 μ ：流路内の流体密度および粘性係数、 b ：流路幅、 G 、 ν ：地盤骨格のせん断弾性係数およびポアソン比である。上式は、複素方程式であり、実部の解が振動浸透流の波数、虚部の解がエネルギー減衰率を表す。図-5に、無次元波数の数値解を示す。

次に、式(5)の分散関係式を用いて、熊谷ら(2006a)の砂泥質土の実験における共振流動応答の発生条件を検討する。まず、式(5)で用いられるせん断弾性係数については、土田ら(2005)の数値波動水路とVoigt型粘弾性FEMモデルの連成解析モデルを用いて、適切な値を評価する。実験では、流動化した砂泥質土上を通過する波の伝達率は、土槽中央部で、概ね0.8-0.85の範囲にあることが確認されている(図-2)。この結果を検証値として、

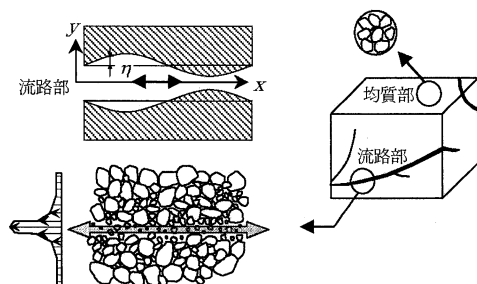


図-4 Channeled seepage flow理論におけるモデル化

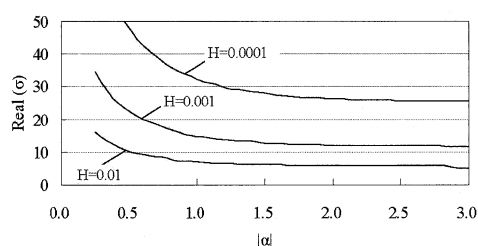


図-5 振動浸透流の無次元波数の数値解

表-1 解析で与える物性パラメータ

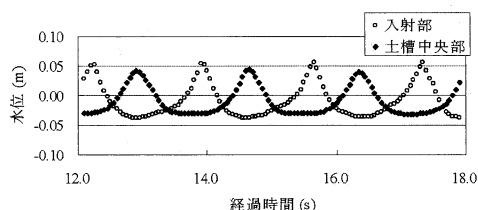
空隙率 n	ν	G (kN/m ²)	水の体積弾性率 β (m ² /kN)	透水係数 k (cm/s)	粘性係数 β'
0.5	0.33	5.0	1.0×10^{-5}	2.0×10^{-6}	0.1

解析を行った結果、地盤のせん断弾性係数は、5.0kN/m²程度の大きさであることがわかった。解析で与えるパラメータを表-1に示すとともに、解析結果例を図-6に示す。

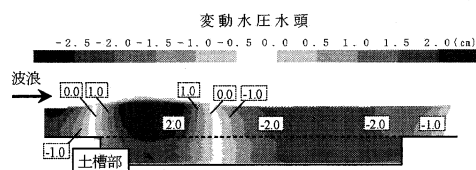
せん断弾性係数を5.0kN/m²と評価した上で、Fodaにならない、浸透流の流路幅 b を1mmに設定するとともに、 $\nu=0.33$ 、 $\omega=3.7$ rad/s、流路内の渦動粘性係数を 1.0×10^{-6} m²/sに設定する。このとき、式(5)より波数=21.5(1/m)が得られる。共振応答は、流路の両端で振動浸透流の波が反射し、形成される重複波が増幅する条件で現れると考えられ、波長の1/2にあたる0.15mが、共振応答を生じさせる最短の流路長と評価される。熊谷らの実験では、液状化厚は、0.1-0.15m程度であることが確認されており、Channeled seepage flow理論を用いて評価される共振応答を生じさせる流路長と概ね一致する。Channeled seepage flowの仮説により、砂泥質土の液状化時における変動間隙水圧の増幅特性を説明できることがわかった。

(3) 液状化後の体積変化特性に関する検討

Ishihara・Yoshimine(1992)は、粒径の揃った砂を対象にして、地震による液状化安全率と液状化後の過剰間隙水圧消散(排水)の過程で現れる体積ひずみの関係を実験



(1) 水位変動



(2) 変動水圧分布

図-6 VOF-粘弾性FEM連成モデルによる解析結果例

的に明らかにしている。この研究成果によれば、相対密度が30%程度で非常に緩い砂地盤が完全に液状化しても、最大で5%程度のひずみしか現れないことがわかる。

一方、熊谷らの実験では、粘土分を10%含有する砂泥質土の液状化後に、5-15%の大きなひずみが生じることが確認されている。せん断力の作用により生じるダイレイタンスーの効果が、過剰間隙水圧の消散に伴う圧縮性を増加させることが知られているが（例えば、吉田・規矩, 1997）、砂泥質土は、砂に比べて体積変化量が大きいことがわかる。この原因について、砂泥質土の圧密特性より検討する。実験で用いた砂泥質土の圧密試験結果を図-7に示すように、含有する粘土が少量でも、砂泥質土は有意な圧縮性を示す。圧縮指数の大きさとして、一般に砂では、0.001-0.05程度である一方、含有する粘土が少量でも、砂泥質土では、0.1程度に大きくなることからわかる。すなわち、砂泥質土の体積変化特性には、せん断によるダイレイタンスー効果だけでなく、粘土中の間隙水の排水による圧密の影響が大きいと考えられる。

また、粗い砂で砂泥質土が形成される場合は、熊谷らが指摘するように、砂粒子に付着している粘土が流出して生じる空隙に、砂粒子が詰まることにより、ひずみが増加する効果が同時に現れると考えられる。

3. 砂泥質土の自重圧密特性

粘土含有量が多い砂泥質土では、粘土分が発揮する粘着抵抗力が強いため、過剰間隙水圧の増大に伴って有効応力がゼロになるような液状化は発生しにくい一方、粘土中の間隙水の排水に伴う圧密現象が支配的に現れる。熊谷ら(2006a)の実験では、粘土含有率を20%に増加させ、かつ含水比を抑えた条件では、与えた波浪条件に対して、液状化が生じないとともに、漂砂に伴う砂澱の形成や地形変化がほとんど生じないことが確認されている。

一方、熊谷ら(2006b)は、潮間帯において粘性土と砂・礫が存在する地盤の形成過程の解明に向けて、粘土層と高透水性の砂・礫層の互層構造が形成されている条件に対して、冠水・干出を伴う潮位変動下の圧密実験を実施した。本研究では、このような互層地盤条件と比較しながら、砂泥混合土の自重圧密特性を解明するために、圧密実験を行う。図-8に実験装置を示す。使用した粘土は、

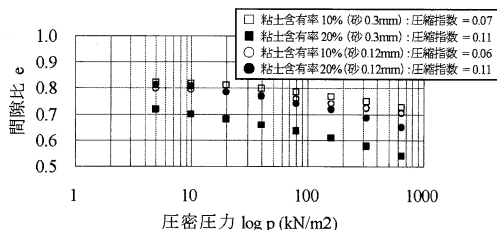


図-7 砂泥質土の標準圧密試験結果 (e-log p 関係)

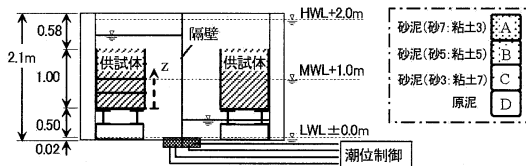
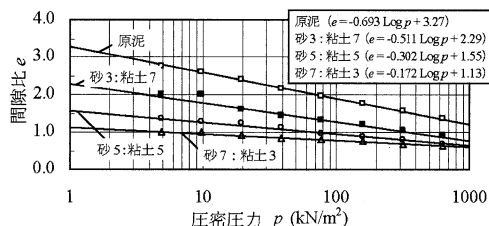
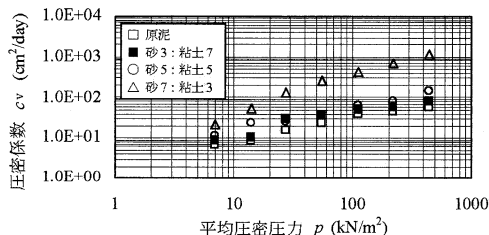


図-8 圧密実験装置概略図 (断面図)



(1) e-log p 関係



(2) c_v -log p 関係

図-9 砂泥質土の標準圧密試験結果

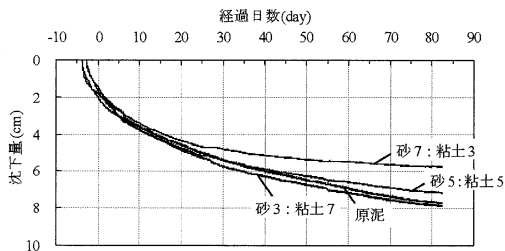


図-10 沈下量の経時変化

前章の波浪応答実験に使用した粘土と同一であり、粘土の含水比を液性限界の1.3倍にあたる145.1%（密度1.34g/cm³）に調整した後、粒径0.3mmの砂との混合比を7:3, 5:5, 3:7に設定した。このときの砂泥質土の含水比は、それぞれ43, 72, 100%であり、密度は、それぞれ1.78, 1.59, 1.47g/cm³である。実験では、地盤の冠水・干出を伴う周期12hr, 振幅1mの潮位変動を3ヶ月間与えた。

砂泥質土の圧密試験結果と沈下計測結果を図-9, 10にそれぞれ示す。砂泥質土では、砂の含有量の増加に伴い、圧縮性は小さくなるものの、自重が大きくなるため、砂と粘土の混合比が3:7の条件では、原泥より圧密沈下量が大きく生じることがわかった。また、砂と粘土の混合比が7:3のように、粘土が少ないケースにおいても、混合土の透水性は、粘土の影響を大きく受け、圧密速度は、原

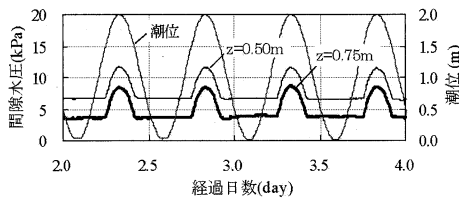


図-11 潮位変動下の間隙水圧変動 (砂5:粘土5のケース)

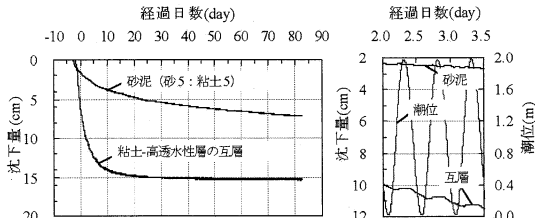
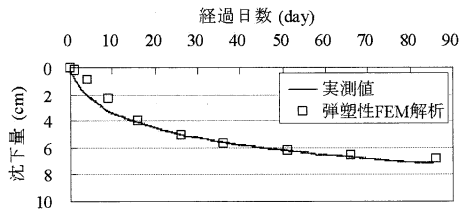


図-12 砂泥質地盤と粘土・高透水性層地盤の圧密沈下特性

図-13 弾塑性FEMモデルの適用性の検証
(砂5:粘土5のケース)

泥の状態からそれほど上昇しないことがわかった。

地盤内間隙水圧の変動例(砂5:粘土5のケース)を図-11に示す。砂と粘土が均一に混合した砂泥質土では、潮位が地表面(DL+1.5m)より高い冠水時には、間隙水圧は潮位変動に追従し、静水圧分布を形成しながら変動する。一方、干出時には、地盤内水位は低下せず、地表面位置に維持され、間隙水圧は地盤内の深度に対応した値になっている。こうした挙動を示すとき、有効圧密圧力は変動しないため、冠水・干出の繰り返し作用が圧密特性に与える影響は非常に小さい。これは、他の砂泥質土や原泥のケースでも、同様に観察されている。

一方、粘土層と砂・礫等の高透水層が互層に存在する場合、透水層近傍の間隙水圧は、透水層の冠水時には、潮位に追従して静水圧分布を形成しながら変動する一方、干出時には、大気圧レベルまで低下する(熊谷ら, 2006b)。このような透水層部の圧力低下時には、地盤内と透水層部の水頭差に起因する透水力が地盤内に作用するため、圧密が促進される。図-12に、本研究における砂5:粘土5の砂泥質地盤と、熊谷ら(2006b)における0.25m間隔で高透水層が存在する粘土地盤の沈下特性を比較する。干出時における透水力の作用や排水距離の違いにより、沈下量および圧密速度が大きく異なることがわかる。

また、砂泥質土の自重圧密沈下特性は、熊谷ら(2006b)

に示される未圧密地盤の自重圧密に関する解析手法を用いて、Sekiguchi・Ohta(1977)の弾塑性構成則に基づくFEMモデルにより、表現できることを検証した(図-13)。

4. おわりに

本研究では、粘土分が比較的少ない砂泥質土において、波浪応答として特徴的に現れる共振流動状態の液状化のメカニズムを、Foda(1994)のSeepage channelled flow理論により説明できることを明らかにした。ただし、Seepage channelled flowの存在については実証されておらず、今後の課題である。また、粘土分が多い砂泥質土の冠水・干出を伴う潮位変動下の圧密特性に関して、原泥状態と高透水性の砂礫層が地盤内に存在するケースを併せて比較し、それぞれの地盤における圧密特性を明らかにした。

参考文献

- 熊谷隆宏(2001): 波浪と液状化地盤の相互干渉に関する理論的考察, 海工論文集, 第48巻, pp.966-970.
- 熊谷隆宏・池野勝哉・土田孝(2006a): 波浪作用下における砂泥質土の粗粒化および液状化特性について, 海工論文集, 第53巻, pp.426-430.
- 熊谷隆宏・上田正樹・池野勝哉・渡部要一・佐々真志(2006b): 潮間帯における粘性土地盤の圧密特性に関する研究, 海工論文集, 第53巻, pp.436-440.
- 熊谷隆宏・土田孝・大坪政美・渡部要一・五明 美智男・塩田耕司(2007): 波浪作用下における底泥表層の圧密促進メカニズム, 地盤工学ジャーナル, Vol. 2, No. 3, pp.223-235.
- 榊山勉・Bijker E. W. (1988): 波による海底粘性土の質量輸送速度, 電中研報告, pp.1-37.
- 善功企・山崎浩之・渡辺 篤(1987): 海底地盤の波浪による液状化および高密度化, 港研報告 第26巻 第4号, pp.125-180.
- 土田孝・熊谷隆宏・池野勝哉・渡部要一・五明美智男(2005): 波浪作用下の底泥の挙動に関する解析手法について, 海工論文集, 第52巻, pp.451-445.
- 日本港湾協会(2007): 港湾の施設の技術上の基準・同解説(上), pp.315-319.
- 吉田望・規矩大義(1997): 液状化解析に用いる体積変化特性モデルに関する検討, 第32回地盤工学研究発表会, pp.889-890.
- Darbymple A. R. and Liu P. L.-F. (1978): Wave over soft muds: A two-layer fluid model, J. Phys. Ocean. 8, pp.1121-1131.
- Foda M. A. (1994): Inertial (non-Darcian) channelled seepage flow, J. Geophys. Res., Vol.99 (C10), pp.20477-20485.
- Foda M. A. and Tzang S.Y. (1994): Resonant fluidization of silty soil by water waves, J. Geophys. Res., Vol.99 (C10), pp.20463-20475.
- Ishimine K. and Yoshimine M. (1992): Evaluation of settlement in sand deposit following liquefaction during earthquake, Soils and Foundation, Vol.32, No.1, pp.173-188.
- Kamphuis J.M. and Hall K.R.(1983): Cohesive Material Erosion by unidirectional current, J. Hydraul. Eng., Vol.109, pp.49761.
- Mitchener H. and Torfs H. (1996): Erosion of mud/sand mixtures, Coast. Eng. 29, Elsevier, pp.1-25.
- Panagiotopoulos I. et al. (1997): The Influence of clay on the threshold of movement of fine sandy bed, Coast.Eng.32, Elsevier, pp.19-43.
- Sekiguchi H. and Ohta H. (1977): Induced Anisotropy and Time Dependency in Clays, Proc. of the 9th Int. Conf. on Soil Mech. and Foundation Eng. Specialty Session 9, Tokyo, pp.229-238.