

波浪による砂質地盤の液状化とシートフロー漂砂

——漂砂層厚に及ぼす液状化の影響——

佐々真志*・John Sleath**

1. はじめに

波浪場における漂砂層厚の予測は、海岸漂砂過程を記述する上で最も根本的な課題のひとつである。高波によるシートフロー条件下では、漂砂層底面において次の関係式 (1) が成り立つといつてよい (Nielsen, 1992) :

$$|\tau_{zx}| = K\sigma'_z \dots\dots\dots (1)$$

ここに、 τ_{zx} は水平せん断応力、 σ'_z は土の鉛直有効応力、 K は土骨格の摩擦係数である。これまで、波浪場の往復振動流によるせん断応力の変化は、流体力学の知見に基づきよく記述されてきた。しかし、地盤内の正弦的ならびに残留間隙水圧の変動に起因する有効応力変化のモデル化は、その対象外であった。すなわち、このような波浪場における地盤挙動を合理的に記述するためには、流体力学と地盤力学の一体化した活用が不可欠となる。

本研究では、波浪場における漂砂層厚に関する一連の多孔質弾性及び弾塑性解析を実施することにより、漂砂層厚に及ぼす間隙水圧変動の影響、とりわけ残留間隙水圧の上昇による地盤液状化の影響を、定量的に明らかにすることを目的としている。

本論文の構成は、以下の通りである。波浪作用すなわち波圧変動・往復振動流共存場における漂砂層厚に関する解析解を誘導し、既存の振動流下における解 (Sleath, 1994) と比較している。その知見をふまえた上で、波圧変動・往復振動流共存場における一連の多孔質弾塑性有限要素解析を実施し、細砂やシルト質地盤における液状化特性ならびに液状化にともなう漂砂過程について詳しく調べている。

2. 波圧変動・振動流共存場における漂砂層厚の解析解

波数 κ と波浪周波数 ω の微小振幅波の下で、水平地盤表面における境界条件は、次式のように与えられる。

$$\left. \begin{aligned} \tilde{u}_0 &= u_0 \cos(\kappa x - \omega t) \\ \sigma_z &= \tilde{u}_0 \\ \tau_{zx} &= \frac{1}{2} \rho f_w U_0^2 \cos(\kappa x - \omega t - \phi) \\ \text{on } z &= 0 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (2)$$

ここに、 u_0 は地表面における波圧変動振幅、 U_0 は地表面における振動流の速度振幅、 ρ は水密度、 f_w は Jonsson (1963) による摩擦係数、 ϕ は地表面における振動流とそれによる水平せん断応力変動の位相差である。波圧変動 $\tilde{u}_0$ により地盤内に誘起される繰返し水平せん断応力の成分と鉛直有効応力変動に関して、既往の多孔質弾性解 (Madsen, 1978; Yamamoto et al., 1978) を援用すると、代表点 ($x=0$) での漂砂層の底面深さ $z \leq 0$ において式 (1) は次式のように表現できる。

$$\begin{aligned} |0.5 \rho f_w U_0^2 \cos(\omega t + \phi) + \kappa u_0 z \exp(\kappa z) \sin(\omega t)| \\ = K \left(-\frac{\rho_s - \rho}{1+e} g z - \kappa u_0 z \exp(\kappa z) \cos(\omega t) \right) \end{aligned} \dots\dots\dots (3)$$

ここに、 ρ_s は土粒子密度、 e は間隙比である。上式 (3) において、波圧変動振幅 u_0 は、微小振幅波理論により振動流の速度振幅 U_0 と、 $u_0 = \rho U_0 \omega / \kappa$ のように関係づけられる。結局、上式 (3) は、次式のかたちとなる。

$$\begin{aligned} S^2 \left[\left(\frac{z}{af_w} \exp(\kappa z) \right)^2 + 0.25 - \frac{z}{af_w} \exp(\kappa z) \sin(\phi) \right] \\ \cdot \cos^2(\omega t + \theta) = \left(\frac{K}{1+e} \right)^2 \left(\frac{z}{af_w} \right)^2 \\ \cdot (1 + S(1+e) \exp(\kappa z) \cos(\omega t))^2 \dots\dots\dots (4) \end{aligned}$$

ここに、 $a = U_0 / \omega$ は地表面における水粒子の軌道振幅、 S は振動流負荷の厳しさを示す指標 (Sleath, 1994) であり、次式によって表現される。

$$S = \frac{\rho U_0 \omega}{(\rho_s - \rho) g} \dots\dots\dots (5)$$

また、上式 (4) 中の θ は、次式で与えられる。

$$\tan(\theta) = \tan(\phi) - \frac{2}{\cos(\phi)} \frac{z}{af_w} \exp(\kappa z) \dots\dots\dots (6)$$

ここに、 $0 \leq \theta \leq \pi/2$ である。上式 (4) ~ (6) によると、任意の波 1 サイクルに対する漂砂層深さの時間変化を予測することができる。本解による予測結果の例を図一1

* 正会員 博(工) 日本学術振興会特別研究員 京都大学防災研究所
** Ph.D. Reader Cambridge University

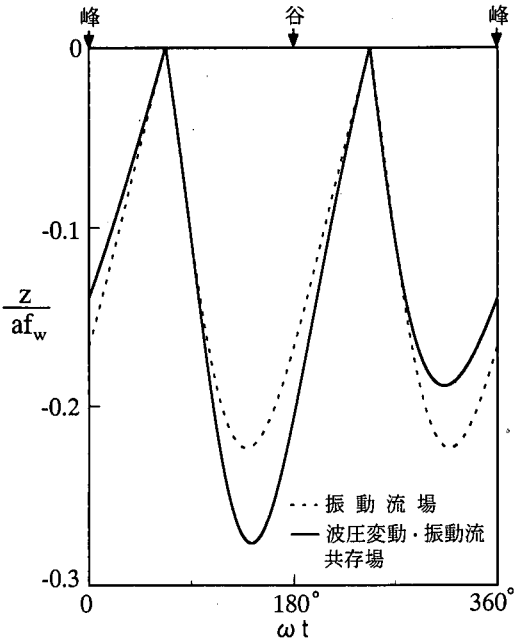


図-1 1 サイクルあたりの漂砂層深さの時間変化
($S=0.12$, $\phi=22.5^\circ$, $e=0.6$, $K=0.53$)

に示す。同図中には、純振動流場における Sleath (1994) による予測結果も合わせて示している。両者の予測波形とも正弦的ではなく、既往の往復振動流実験における観測事実 (Zara Flores and Sleath, 1998) と整合している。しかし、波圧変動・振動流共存場における最大漂砂層深さは、純振動流場の際と異なり、当該波浪の谷近傍 ($\omega t \cong 140^\circ$) で現れていることがわかる (図-1)。

上述のような波圧変動・振動流共存場における地盤内有効応力変動の影響は、本解にもとづく無次元最大漂砂層厚 $\delta_{\max}/af_w$ と S の関係によく反映されている (図-2)。すなわち、両解とも低い S 値 ($S \leq 0.1$) に対しては、 $\delta_{\max}/af_w - S$ 関係は直線的となり一致する。換言すれば、当該 S 値に対しては有効応力変動の影響はほとんどない。しかし、高い S 値 ($S > 0.1$) に対しては、 $\delta_{\max}$ 値は急激に上昇し、波浪場のパラメタ κaf_w に強く依存することがわかる (図-2)。

3. 波圧変動・振動流共存場における弾塑性有限要素解析

厳しい波浪条件の下では、砂質土の繰返し塑性特性により残留間隙水圧の上昇に起因する液状化が発生する。本研究は、Sassa and Sekiguchi (2001) によって開発された弾塑性有限要素解析コードを、波浪場の往復振動流によるせん断応力成分を考慮できるように拡張している。そして、細砂やシルト質地盤において実験的に観

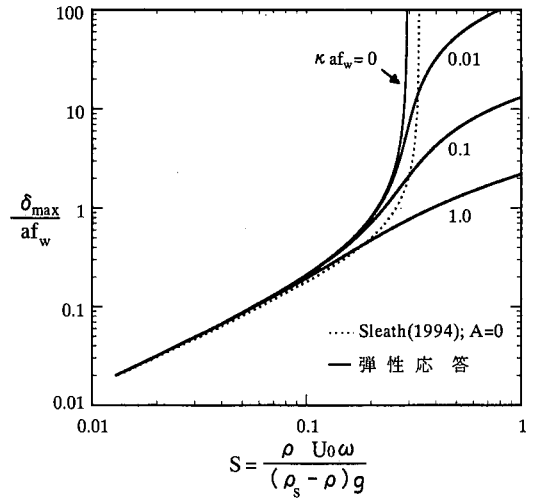


図-2 1 サイクルあたりの最大漂砂層厚の S にもとまる変化

測された液状化過程を再現する目的で、一連の有限要素解析を実施した。

解析対象とした進行波荷を受ける地盤モデルを図-3 に示す。図-3(a) に示す波浪及び地盤条件は、Sassa and Sekiguchi (1999) による緩詰め細砂地盤 (平均粒径 $D_{50}=0.15$ mm) に対する遠心力場波浪実験の実スケールに対応している。図-3(b) は、Foda and Tzang (1994) によるシルト質地盤 ($D_{50}=0.05$ mm) に対する波浪実験条件を示している。この際、地盤の部分排水指標 ϕ (Sassa and Sekiguchi, 1999) は、次式で与えられる。

$$\phi = \frac{k_D}{m_v \gamma_f \omega} \kappa^2 \dots \dots \dots (7)$$

ここに、 k_D は地盤の透水係数、 m_v は地盤の体積圧縮係数、 γ_f は流体すなわち水の単位体積重量である。細砂地盤に対する ϕ 値は、 $\phi=4.7 \times 10^{-3}$ 、シルト質地盤に対する ϕ 値は、 $\phi=1.8 \times 10^{-6}$ とした。波浪場のパラメタ κaf_w は、それぞれ $\kappa af_w=0.001$, 0.002 である。

一連の解析に際しては、地盤表面における波圧変動振幅 u_0 と振動流の速度振幅 $U_0 = \kappa u_0 / \rho \omega$ の双方を制御し、各ケースにおいて 15 波負荷を行った。

3.1 細砂地盤の液状化特性

細砂地盤の液状化特性に関する解析結果のまとめを図-4 に示す。図中横軸は、波圧変動による負荷の厳しさを表す繰返し応力比 $\chi_0 = \kappa u_0 / \gamma'$ (Sassa and Sekiguchi, 1999) であり、上述の振動流による負荷の厳しさを表すパラメタ S と、 $\chi_0 = S \cdot (1 + e)$ の関係がある。ここに、 γ' は土の有効単位体積重量である。図中縦軸は、残留間隙圧比 $u_{\max}/\sigma'_{v0}$ と有効応力比 p^*/σ'_{v0} であり、 $\sigma'_{v0} = -\gamma' z$ は、初期鉛直有効応力である。同図中には、地盤浅部 ($x=0$,

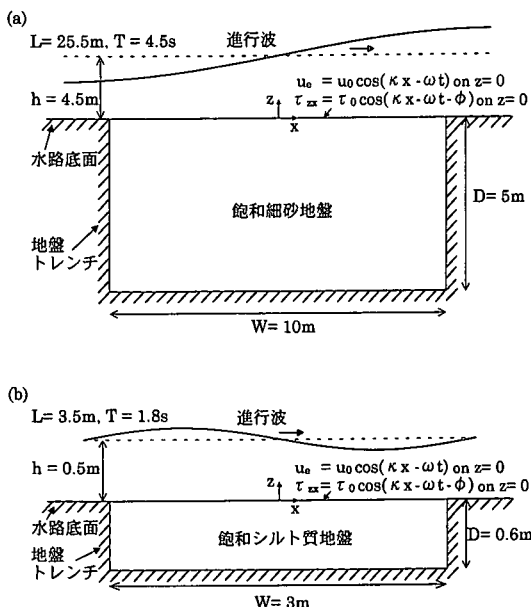


図-3 進行波負荷を受ける細砂地盤及びシルト質地盤モデル

$z = -75 \text{ cm}$)における予測値をプロットしている。また、緩詰め細砂地盤に対する50g場での進行波負荷実験 (Sassa and Sekiguchi, 1999) において、地盤浅部 ($z \approx -1.5 \text{ cm}$) で観測した $u_{\max}/\sigma'_{v0}$ 値も合わせて図-4(a) に示している。同実験では、粘性スケーリングの導入により、波浪伝播と地盤圧密に関する時間相似則を同時に満足していることに留意したい。

図-4中の予測結果によると、繰返し応力比 χ_0 が大きくなるにつれて、地盤は強い非線形塑性挙動を示すことがわかる。実際、 χ_0 値が0.14になると、残留間隙圧比 $u_{\max}/\sigma'_{v0}$ の値は0.95に達している。それにもない有効応力比 p^*/σ'_{v0} の値も0.04と著しく小さくなっており、当該地盤浅部において液状化が発生している (図-4(a), (b))。また、より厳しい波浪負荷の下でも、同様に液状化が発生している。結局、本細砂地盤における液状化発生の有無を決定する限界繰返し応力比 χ_{cr} の予測値は、 $\chi_{cr} = 0.14$ となる。

上述のような厳しい進行波負荷の下での地盤液状化過程の予測結果は、遠心力場進行波負荷実験における残留間隙圧応答の実測結果とよく整合している (図-4a)。

3.2 液状化によるシートフロー漂砂

厳しい波浪条件 ($\chi_0 = 0.14$) での地盤浅部における液状化発生にともなう、漂砂の発生過程の予測結果を図-5に示す。同図は、地盤浅部における過剰間隙圧変動 u_e 、水平せん断応力変動 τ_{ex} と鉛直有効応力変動 σ'_v に関する時刻歴の予測結果を示している。この際、過剰間隙圧変

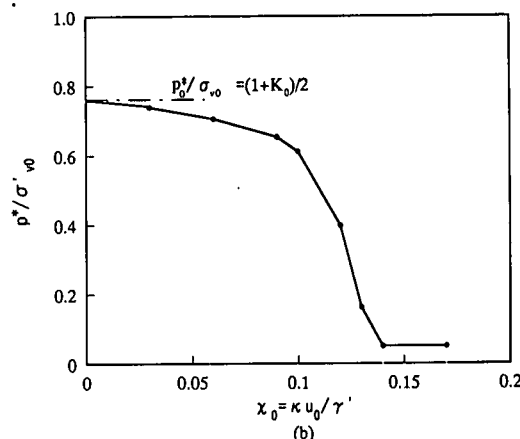
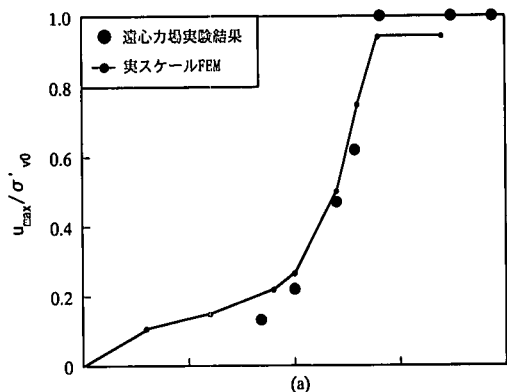


図-4 残留間隙圧比と有効応力比の χ_0 にもなう変化：予測結果と実験結果

動 u_e は、正弦的な変動成分 $u_e^{(1)}$ と残留的な変動成分 $u_e^{(2)}$ の和で表されることに留意する。継続的な厳しい波浪負荷の下で地盤内の残留間隙圧 $u_e^{(2)}$ (図中点線) が上昇している (図-5(a), (b))。それに対応して地盤内の鉛直有効応力 σ'_v 値も徐々に減少していく (図-5(b))。15波目には、残留間隙圧 $u_e^{(2)}$ の値が、当該地点の初期鉛直有効応力 σ'_{v0} のレベルまで上昇している。このような地盤液状化の発生にともなう、上式(1)により当該地点で漂砂が発生している。

上述の弾塑性解析による最大漂砂層厚に関する予測結果のまとめを図-2に重ねる (図-6)。この際、同図中の弾性応答は、正弦の間隙圧のみで残留間隙圧が実質的に存在しないような密な粗砂、すなわち高い ϕ 値に対応している。しかし、低い ϕ 値 4.7×10^{-3} をもつ緩詰め細砂地盤では、最大漂砂層厚 $\delta_{\max}/af_w$ は、地盤内の残留間隙水圧上昇の影響により、より低い S 値 0.05 において非線形に増加し始める (図-6)。そして、当該細砂地盤における液状化限界応力比 $\chi_{cr} = 0.14$ に対応する S 値 0.075 においては、無次元漂砂層厚 δ/af_w の値は148にまで達し

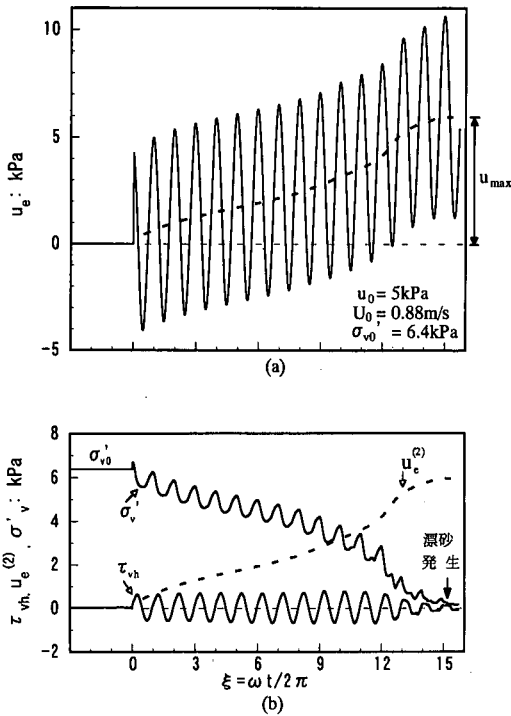


図-5 漂砂層底面における各応力変動の弾塑性解析結果

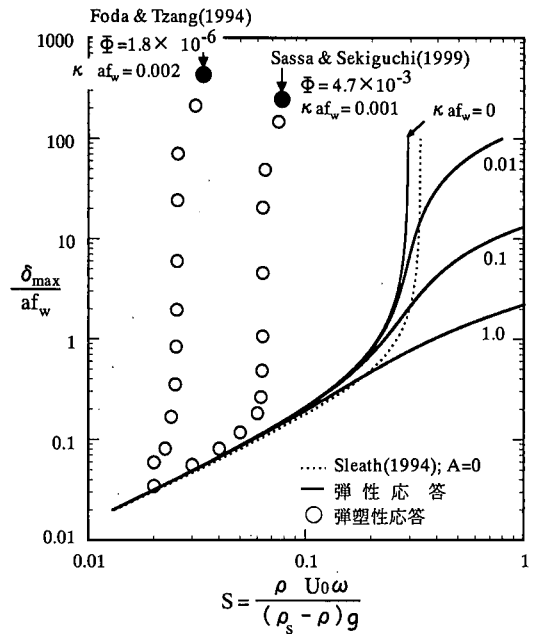


図-6 最大漂砂層厚に関する多孔質弾性及び弾塑性解析結果のまとめと細砂とシルト質地盤における液状化層厚の観測結果

ている。このような液状化の影響は、さらに低い Φ 値 1.8×10^{-6} を有するシルト質地盤において、より顕著となっている。実際、 $S=0.02$ という低い波浪負荷レベルにおいても、残留間隙圧の影響がでていることがわかる(図-6)。そして、 $S=0.03$ になると、無次元漂砂層厚 δ/af_w の値は 212 まで達している。

既往の細砂やシルト質地盤に対する進行波負荷実験 (Sassa and Sekiguchi, 1999; Foda and Tzang, 1994) における液状化層厚の観測結果を、図-6 に合わせてプロットする(●印)。両地盤における観測結果とも、上述の弾塑性解析による予測結果と定量的に整合している(図-6)。

4. まとめ

(1) 波圧変動・往復振動流共存場における正弦的有效応力変動の影響を考慮した漂砂層深さの解析解(式(4))を得た。本解によると、最大漂砂層厚は、波浪の谷近傍で現れる(図-1)。また、振動流場における解(Sleath, 1994)と比較することにより、正弦的有效応力変動の影響は、 S 値の上昇とともに現れることを示した(図-2)。

(2) 流体力学的アプローチと一体化した、多孔質弾塑性有限要素解析コードを開発した。波圧変動・振動流

共存場において水平細砂ならびにシルト質地盤応答に関する一連の応力・変形/浸透連成解析を実施した。そして、細砂地盤における残留間隙圧上昇に起因する液状化過程の観測結果を定量的によく再現することを示した(図-4)。

(3) 本解析結果によると、任意の波浪及び地盤条件に対応して最大漂砂層厚を整合的に予測することができる。特に、細砂やシルト質地盤においては、残留間隙圧の上昇に起因する液状化が、漂砂の発生過程ひいては最大漂砂層厚に甚大に影響を及ぼすことを明らかにした(図-5, 図-6)。

参考文献

- Foda, M. A. and S.-Y. Tzang (1994): Resonant fluidization of silty soil by water waves, *J. Geophys. Res.*, 99, C10, pp. 20, 463-20, 475.
- Jonsson, I. G. (1963): Measurements in the turbulent wave boundary layer, *Proc. 10th Congress IAHR*, London, pp. 85-92.
- Madsen, O. S. (1978): Wave-induced pore pressures and effective stresses in a porous bed, *Geotechnique*, 28, No. 4, pp. 377-393.
- Nielsen, P. (1992): Coastal bottom boundary layers and sediment transport, Singapore, World Scientific.
- Sassa, S. and H. Sekiguchi (1999): Wave-induced liquefaction of beds of sand in a centrifuge, *Geotechnique*, 49, No. 5, pp. 621-638.
- Sassa, S. and H. Sekiguchi (2001): Analysis of wave-induced liquefaction of sand beds, *Geotechnique*, 51, No. 2, pp. 115-

- 126.
- Sleath, J. F. A. (1994): Sediment transport in oscillatory flow, In Sediment Transport Mechanisms in Coastal Environments and Rivers (eds. M. Belorgey, R. D. Rajaona and J. F. A. Sleath), Singapore, World Scientific.
- Yamamoto, T., H. L. Koning, H. Sellmeijer and E. Hijum (1978): On the response of a poro-elastic bed to water waves, J. Fluid Mech., 87, pp. 193-206.
- Zala Flores, N. and J. F. A. Sleath (1998): Mobile layer in oscillatory sheet flow, J. Geophys. Res., 103, C6, pp. 12,783-12,786.
-