

徳島大学工学部 正員○中野 晋
熊谷組 正員 井上 洋

1. はじめに 波浪による海底地盤の液状化と漂砂現象が深く関わっていることが近年多くの研究で明らかになってきた。本研究では Yamamoto et al.¹⁾ の理論に基づいた底質内部の有効応力解析と塩化ビニル粒子を用いた水槽実験を通じ、底質の液状化とシートフローとの関係について調べた。

2. 理論解析

1)基礎式 Yamamoto et al. と同じく次の3式を用いる。

$$\frac{k_d}{\chi} \nabla^2 p = \frac{n}{K'} \frac{\partial p}{\partial t} + \frac{\partial \varepsilon}{\partial t}, \quad G \nabla^2 u + \frac{G}{1-\gamma_2} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x} = \frac{\partial p}{\partial x}, \quad G \nabla^2 w + \frac{G}{1-\gamma_2} \frac{\partial \varepsilon}{\partial z} = \frac{\partial p}{\partial z} \quad (1)$$

ここで、 k_d は透水係数、 γ は間隙水の単位体積重量、 P は変動間隙水圧、 n は間隙率、 K' は間隙水の見かけの弾性係数、 ε は底質骨格構造の体積ひずみ、 G は底質のせん断弾性係数、 u, w は底質の水平、鉛直変位、 ν は Poisson 比である。また K' は飽和度 S_r 、絶対間隙水圧 P_0 、間隙水の真の弾性係数 K を用いて、 $K' = [K^{-1} + (1 - S_r)/P_0]^{-1}$ で表される。また水平および鉛直の有効応力とせん断応力は

$$\sigma_x = 2G \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\nu}{1-2\nu} \varepsilon \right), \quad \sigma_z = 2G \left(\frac{\partial w}{\partial z} + \frac{\nu}{1-2\nu} \varepsilon \right), \quad \tau_{xz} = G \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right) \quad . \quad (2)$$

$u = U(z) \exp\{i(kx + \omega t)\}$, $w = W(z) \exp\{i(kx + \omega t)\}$, $p = P(z) \exp\{i(kx + \omega t)\}$,
のように解を仮定すると, U , W , P の一般解は次のように表される. ここで k は波数, ω は角周波数である.

$$U = a_1 \exp(kz) + a_2 \exp(-kz) + a_3 z \exp(kz) + a_4 z \exp(-kz) + a_5 \exp(\lambda z) + a_6 \exp(-\lambda z) \quad (3)$$

$$W = b_1 \exp(kz) + b_2 \exp(-kz) + b_3 z \exp(kz) + b_4 z \exp(-kz) + b_5 \exp(\lambda z) + b_6 \exp(-\lambda z) \quad (4)$$

$$\begin{aligned}
P &= c_1 \exp(kz) + c_2 \exp(-kz) + c_5 \exp(\lambda z) + c_6 \exp(-\lambda z) \\
\lambda^2 &= k^2 + i\omega' , \quad a_1 = i(b_1 + s b_3) , \quad c_1 = 2G b_3 / (1+m) , \\
\omega' &= \gamma \omega (2nG/K' + \beta^{-1}) / 2k_d G , \quad a_2 = i(-b_2 + s b_4) , \quad c_2 = 2G b_4 / (1+m) , \\
\beta &= (1-\nu) / (1-2\nu) , \quad a_3 = i b_3 , \quad c_5 = 2\beta G \omega' b_5 / \lambda , \\
m &= nG/K' (1-2\nu) , \quad a_4 = -i b_4 , \quad c_6 = -2\beta G \omega' b_6 / \lambda . \\
s &= k_d^{-1} \{1 + 2nG/K' (1+m)\} , \quad a_5 = i(k/\lambda) b_5 , \\
&\quad a_6 = -i(k/\lambda) b_6 .
\end{aligned} \tag{5}$$

2)境界条件　海底面 ($z=0$) では

$$\sigma_z = 0, \quad \tau_{xz} = 0, \quad p = p_b = P_b \exp\{i(kx + \omega t)\},$$

$z = h_2$ (h_2 は底質厚さ) で

$$u=0 \quad , \quad w=0 \quad , \quad \partial p / \partial z = 0$$

の条件を考えることにより, $b_1 \sim b_6$ に関する連立方程式が得られる. これを解くことにより変動有効応力などが求められる.

3. 実験方法 図1に示す長さ16.8m、幅49cmの造波水槽の中央に底質床部（深さ7cm、長さ3m）を設け、塩化ビニル粒子（PVC、粒径0.1mm、比重1.254、透

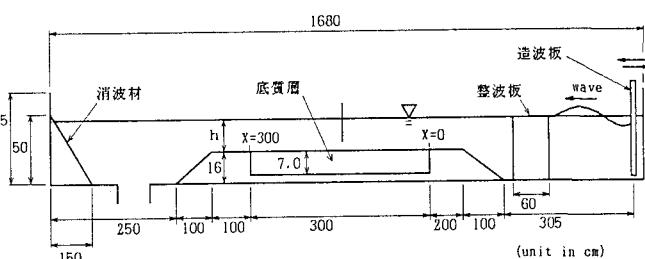


図1 実験水槽

水係数 $4.2 \times 10^{-5} \text{m/s}$, 間隙率 0.658) を敷設した。底質床中央部の深さ 3cm と 6cm の位置に土圧計、間隙水圧計を並べて設置し、その直上で波高計により水位変動を測定し、同時に砂漣形状を観察した。水深は 0.3 と 0.4m, 周期は 0.8~1.2s, 波高は 1.5~7.5cm の範囲で変化させた。なお前野ら²⁾と同様、変動鉛直有効応力 σ_z は各時刻の土圧変動 P_0 から間隙水圧変動 P_z を引いて求めた。

4. 結果と考察

理論計算のために G , S_r , ν を与える必要がある。PVC のヤング率は約 34ton/cm² であり、 $\nu = 1/3$ とすると $G = 1.2 \times 10^9 \text{ Pa}$ となる。なお、砂の場合にはこれより 1 オーダー程度大きい。 γ は 9.8kN/m³, P_0 は $2.05 \times 10^9 \text{ Pa}$ を用いた。図 2 は表面下 3cm での変動有効応力振幅比 $P_e/\gamma' z$ (P_e : 変動有効応力振幅, $\gamma' z$: 有効土被り圧) と Shields 数 ψ の関係を飽和度を変化させて計算した結果と比較したものである。なお Shields 数の計算の際に摩擦係数は Swart³⁾ の式から求め、周期、水深はそれぞれ 1.2s, 0.3m とした。図から $P_e/\gamma' z$ が ψ の増加に伴い単調に増加することや $\psi > 0.3$ で振幅比が 1 に近づくとシートフローが生じることがわかる。海底地盤の液状化限界として次式が提案されている⁴⁾。

$$\sigma_z' = -\gamma' z + \sigma_z' \leq 0 \quad (6)$$

この条件が 1 周期の間に部分的にも液状化が発生する条件と考えれば $P_e/\gamma' z \geq 1$ と同じであり、液状化の発生とシートフローへの移行がほぼ同時に生じていることがわかる。実験値は $S_r = 0.99$ の計算曲線で概ね説明できるので図 3 は $S_r = 0.99$ の場合の深度の違いによる振幅比の変化を計算したものである。図から $z \leq 1 \text{ cm}$ では $\psi \geq 0.5$ で式(6)を満たす状況となり、液状化が発生することがわかる。図 4, 図 5 は表面での水圧変動振幅の微小振幅波による計算値で除した無次元有効応力振幅と ψ の関係である。 $z = 3 \text{ cm}$ では ψ が変化してもこれはほぼ一定値を示すが、 $z = 6 \text{ cm}$ では図 4 中に示した前野らと同様 ψ が大きくなるにつれ振幅が小さくなる傾向がある。しかし計算結果はいずれの深度でも ψ には関係なく一定であり両者に相違が見られる。現時点では理論計算は実験結果を十分表していない。境界条件や底質定数などをさらに検討する必要があろう。

謝辞：本研究は文部省科学研究費奨励研究 A の補助の下に実施された。ここに記して謝意を表する。

- 参考文献 1) Yamamoto et al. (1978), J. Fluid. Mech., 87(1), 193~206.
 2) 前野ほか(1989), 36回海講論文集, 789~793.3)たとえば水村和正(1992), 海岸海洋工学, p. 72; 共立出版
 4) Mei and Foda (1981), Geophys. J. R. astro. Soc., 66, 597~631.

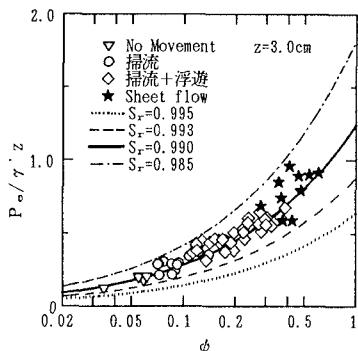


図 2 有効応力振幅比と Shields 数

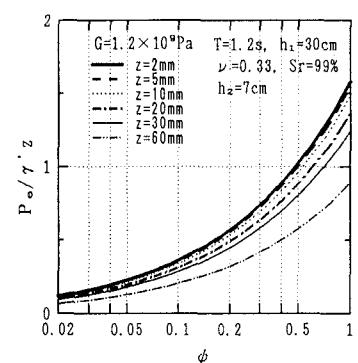


図 3 有効応力振幅比と深度

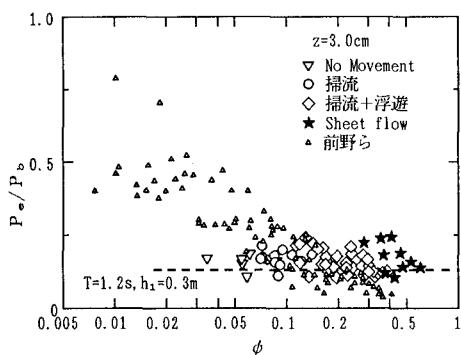


図 4 無次元有効応力振幅と Shields 数 (z=3cm)

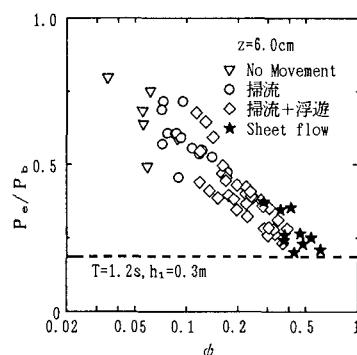


図 5 無次元有効応力振幅と Shields 数 (z=6cm)