

海底地盤の波浪応答における海底面摩擦の効果

Effects of Wave-induced Bottom Shear on Seabed Response to Waves

酒井 哲郎*・裏本 賢**・間瀬 肇*

T. Sakai, K. Uramoto and H. Mase

A new solution for the seabed response to surface waves, in which the effects of the wave-induced bottom shear is taken account for, is derived. The effects of the bottom shear on the shear stress of the solid skeleton is significant in the seabed near the bed surface. For some conditions, the vertical effective stress of the solid skeleton near the bed surface becomes 0 after the wave crest passes. The shear stress takes a negative maximum in this phase. This maximum does not depend on the seabed conditions, but depends only on the wave conditions.

Keywords : seabed response to waves, wave-induced bottom shear, shear stress

1. まえがき

海底地盤の波浪応答モデルにおいては、一般に波浪による海底面摩擦は無視されている。砕波帯のような浅海域では波浪による海底面摩擦は無視できない。著者ら（酒井ら、1989a）はその効果を考慮したモデルをすでに発表し、間隙水圧変動に対してはその効果を検討した。また海底地盤骨格のせん断応力についてもその効果を若干検討した（酒井ら、1990a）。しかしながらそのモデルは間隙水と地盤骨格の加速度をも考慮した解であり、きわめて複雑な式となっていた。

ここではまず、加速度の効果を無視し海底面摩擦の効果のみを考慮した解を導く。つぎに、すでに若干検討していた間隙水圧変動およびせん断応力に加えて鉛直有効応力変動に関して、あらためて海底面摩擦の効果を一般的に議論する。さらに、すでに若干検討されている砕波帯での海底面付近のせん断応力の挙動（酒井ら、1990a）について、鉛直有効応力（0になると地盤の一時的な液化の可能性が生じる）の位相変化と比較しながらより一般的に検討する。

2. 海底面摩擦を考慮した海底地盤の波浪応答の近似解

海底地盤の波浪応答における波浪による海底面摩擦の効果については、Mei and Foda(1981)の境界領域近似の考えに基づく間隙水と地盤骨格の加速度の効果を考慮した近似解（酒井ら、1988）の延長として、海底面摩擦をも考慮した解としてすでに発表している（酒井ら、1989a）。ただしそこでは間隙水圧変動についてのみ解を示している。せん断応力については別に発表した（酒井ら、1990a）。いずれも間隙水の存在を考慮した弾性体としての圧縮波とせん断波の波速に関する係数を含む複雑な形をしており、しかも加速度の効果が小さいために、係数の分母、分子が極めて0に近い値をとる形であった。北野（1991）は、通常の波浪条件および海底地盤条件では加速度の効果はきわめて小さいことから上述の複雑な表現を近似し、間隙水圧変動、鉛直全応力変動、せん断応力については近似表現を示した。ただしそこで用いているパラメータがMeiらのものと異なること、また若干の誤りがあったので、ここであらためてMeiらのパラメータを用いて間隙水圧変動、鉛直有効応力変動およびせん断応力の解を示す。途中の経過は複雑なため、ここでは結果のみを示す。

間隙水圧変動：

$$p' = p_0 \frac{1}{1+m} \exp\left(\frac{2\pi}{L} z\right) \cos \theta + p_0 \frac{m}{1+m} \exp\left(\frac{z}{\sqrt{2}\delta}\right) \cos\left(\theta - \frac{z}{\sqrt{2}\delta}\right) + b \frac{1}{1+m} \left\{ \exp\left(\frac{2\pi}{L} z\right) \sin \theta - \exp\left(\frac{z}{\sqrt{2}\delta}\right) \sin\left(\theta - \frac{z}{\sqrt{2}\delta}\right) \right\} \quad (1)$$

* 正会員 京都大学工学部土木工学科（〒606 京都市左京区吉田本町）

** 住友商事

鉛直有効応力変動：

$$\begin{aligned} \sigma'_{zz} = p_0 \left(-\frac{m}{1+m} + \frac{2\pi}{L} z \right) \exp\left(\frac{2\pi z}{L}\right) \cos \theta + p_0 \frac{m}{1+m} \exp\left(\frac{z}{\sqrt{2}\delta}\right) \cos\left(\theta - \frac{z}{\sqrt{2}\delta}\right) \\ + b \left(\frac{1}{1+m} + \frac{2\pi}{L} z \right) \exp\left(\frac{2\pi z}{L}\right) \sin \theta - b \frac{1}{1+m} \exp\left(\frac{z}{\sqrt{2}\delta}\right) \sin\left(\theta - \frac{z}{\sqrt{2}\delta}\right) \end{aligned} \quad (2)$$

せん断応力：

$$\sigma'_{zx} = -p_0 \frac{2\pi}{L} \exp\left(\frac{2\pi z}{L}\right) \sin \theta + b \left(1 + \frac{2\pi}{L} z \right) \exp\left(\frac{2\pi z}{L}\right) \cos \theta \quad (3)$$

せん断応力は、式の形から分かるように無次元パラメータ m および境界領域厚さ δ を含まない。このことは後に示す式(5)および(6)から分かるように、せん断応力は地盤骨格のせん断弾性係数 G 、間隙水の有効体積弾性係数 β および透水係数 k のいずれにも関係しないことを意味する。

なおこれらは、海底面に次式で与えられる微小振幅波の波圧 p_b と、それに同位相で同じ波形の振幅が b のせ

$$p_b = p_0 \cos \theta \quad (4)$$

ん断応力が作用した場合の応答である。従って $b = 0$ とすれば加速度も海底面摩擦も考慮しない Mei and Foda (1981) の解と一致する。海底面に働く波浪によるせん断応力は、一般に波浪による波の進行方向水粒子速度の二乗に比例すると考えると、微小振幅波理論の範囲では水粒子速度は波圧と同位相であるが、せん断応力は波圧と同じ波形にはならない。ここでは解析解が得られ易いことを考えて上記の様な仮定を行っている。

ここで、 p_0 ：海底面での波圧振幅、 L ：波長、 z ：海底面を原点とし鉛直上向き正とする鉛直座標、 $\theta = \lambda x - \omega t$ 、 $\lambda (= 2\pi/L)$ ：波数、 x ：波の進行方向座標、 ω ：波の角周波数、 t ：時間である。また無次元パラメータ m および境界領域厚さ δ ($\ll L$) は、次式で与えられる。

$$m = \frac{n}{1-2\nu} \times \frac{G}{\beta} \quad (5)$$

$$\delta = \left(\frac{KG}{\omega} \right)^{\frac{1}{2}} \times \left(\frac{nG}{\beta} + \frac{(1-2\nu)}{2(1-\nu)} \right)^{-\frac{1}{2}} \quad (6)$$

ここで、 n ：間隙率、 ν ：ポアソン比、 G ：地盤骨格のせん断弾性係数、 β ：間隙水の有効体積弾性係数、 $K = k / (\rho_w g)$ 、 k ：透水係数、 ρ_w ：海水の密度、 g ：重力加速度である。

3. 波浪による海底面摩擦の効果

これまで、著者らは波浪に対する海底地盤応答における加速度および海底面摩擦の効果を、幾つか部分的に検討してきた。酒井ら(1988)は加速度項を含めた間隙水圧変動に関する境界領域近似解を求め、地盤骨格の体積弾性係数 G がきわめて小さい場合には波浪による海底地盤内の間隙水圧変動において加速度項が無視できない可能性があることを示した。次いで酒井ら(1989a)は酒井ら(1988)の加速度項を考慮した境界領域近似において、さらに波浪による海底摩擦力を考慮した間隙水圧変動の解を導き、海底面摩擦の効果を検討した。その結果間隙水の有効体積弾性係数 β の値が増加すると、間隙水圧変動に対して摩擦力の影響が若干現れることを計算で確認した。さらに酒井ら(1990a)は加速度および海底面摩擦を考慮した解(酒井ら, 1989a)を用いてせん断応力の計算を行い、せん断応力に対する海底面摩擦の効果の検討を特定の条件下で行った。その結果、海底面近くの海底地盤では海底面摩擦の効果がかなり現れることを示した。

2. では、間隙水圧変動 p' 、鉛直有効応力変動 σ'_{zz} およびせん断応力 σ'_{xz} について海底面摩擦のみを考慮した近似解を示した。加速度と海底面摩擦を考慮しない場合の解はここでは示していないが、Mei and Foda(1981) の解がこれに対応する。

ここではこれまで部分的に検討されてきた海底面摩擦の効果を、改めて重要なパラメーターの値を変化させて2種類の解を比較することによって検討する。波や海底地盤に関するパラメーターを変化させて比較すれば、海底面に働く波浪による摩擦が、どのような状態の場合に重要であるかが一般的に検討できるはずである。波浪による海底地盤の応答に重要であると思われる地盤骨格のせん断弾性係数 G 、間隙水の有効体積弾性係数 β 、そして透水係数 k の3つのパラメーターの影響(酒井ら, 1990b)について検討してみることにする。

表—1 計算の基本条件

水深	$h = 4.0\text{m}$
波の周期	$T = 7.0\text{sec}$
波高	$H = 3.0\text{m}$
波による海底面摩擦応力振幅	$b = 1/10 \cdot p_0$
間隙率	$n = 1/3$
ポアソン比	$\nu = 1/3$
地盤骨格せん断弾性係数	$G = 1.0 \times 10^8 \text{N/m}^2$
間隙水有効体積弾性係数	$\beta = 1.0 \times 10^7 \text{N/m}^2$
透水係数	$k = 2.8 \times 10^{-4} \text{m/sec}$

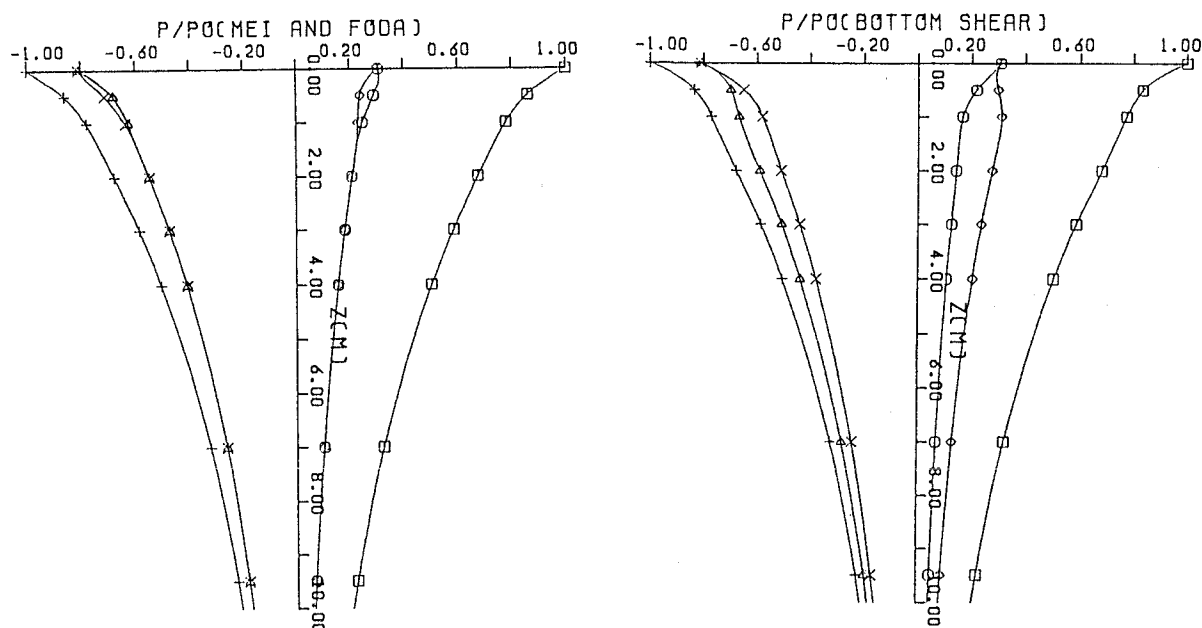
表—2 図—1 および図—2 における記号と波の位相 θ の対応

$\square$	$: 2\pi\theta = 0$
$\bigcirc$	$: 2\pi\theta = 0.2$
$\triangle$	$: 2\pi\theta = 0.4$
$+$	$: 2\pi\theta = 0.5$
$\times$	$: 2\pi\theta = 0.6$
$\diamond$	$: 2\pi\theta = 0.8$

そのために、一般的と考えられる基本条件を定め、それを基準に各パラメーターを変化させることにする。定めた基本条件は、表—1 の通りである。計算は次のような手順で行った。基本条件から変化させるパラメーターは G, β, k の3つで、例えば G を変える場合は他のパラメーターは基本条件のままで計算する。2つの解を計算することによって、そのパラメーター自体が海底面摩擦の効果にどれ位の影響をもたらすかがわかるはずである。 G は $1.0 \times 10^6, 10^7, 10^8, 10^9 \text{ N/m}^2$, β は $1.0 \times 10^6, 10^7, 10^8, 10^9 \text{ N/m}^2$, k は $2.8 \times 10^{-3}, 10^{-4}, 10^{-5}, 10^{-6} \text{ m/s}$ の4通りずつの値で、間隙水圧変動 p' , 鉛直有効応力変動 σ'_{zz} , せん断応力 τ_{xz} の計算を行った。

なお、以下に示す図ではいずれの値も p_0 で無次元化してある。また、 $\theta = 0$ は式(4)からわかるように波の峯の位相である。図中の各種の記号は位相を表すもので、表—2 に示したとおりである。また図中の説明では基本条件から変化させた値のみを表示しており、表示がない場合は基本条件である。また P/P_0 は p'/p_0 、 SIGMA は σ'_{zz}/p_0 , TAU は τ_{xz}/p_0 を意味する。さらに MEI AND FODA は Mei and Foda (1981) の解、BOTTOM SHEAR は波による海底面摩擦を考慮した解であることを意味する。

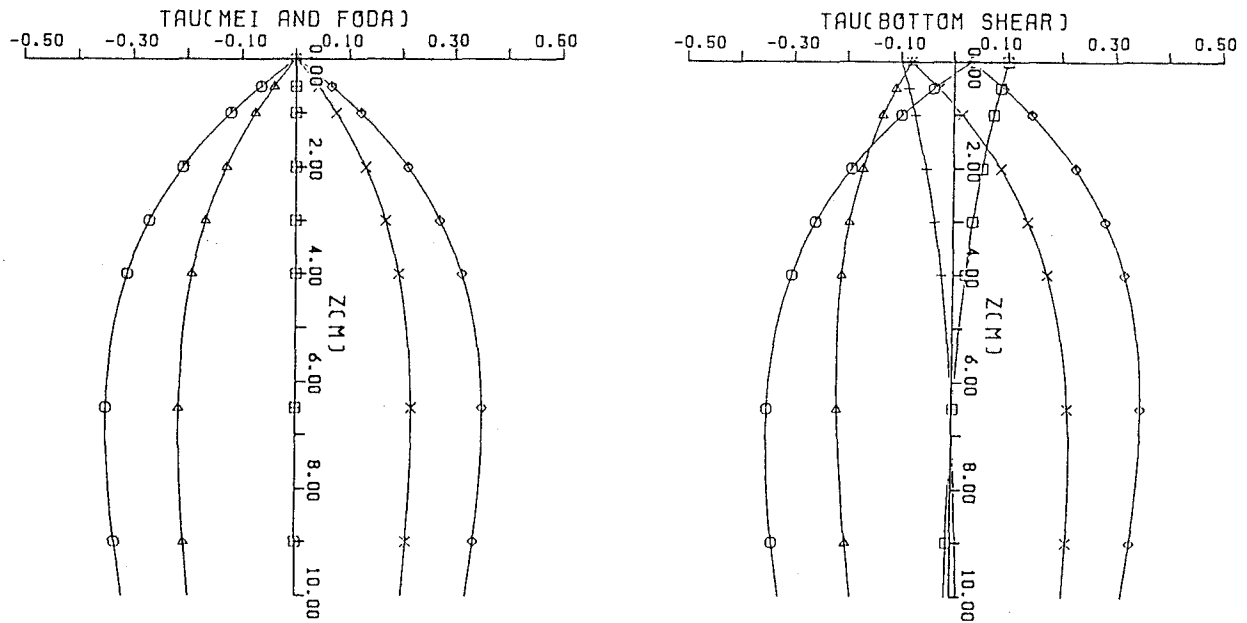
計算の結果、間隙水圧変動 p' については、以下のことが分かった。海底面摩擦の効果は間隙水の有効体積弾性係数 β の大きい場合に若干現れる。また地盤骨格のせん断弾性係数 G の小さい場合に若干現れる(図—1)。透水係数 k を変化させても、海底面摩擦の効果はほとんど現れない。



図—1 間隙水圧変動に及ぼす波による海底面摩擦の効果 ($G = 1.0 \times 10^6 \text{N/m}^2$)

鉛直有効応力変動 σ'_{zz} については、 β にあまり関わりなく海底面摩擦の効果が若干現れる。また G に関係なく若干見られる。さらに k に関係なく若干ある。

せん断応力変動 σ'_{xz} については、摩擦の効果は β, G および k に関係なく大きい(図—2)。せん断応力変動 σ'_{xz} は海底面摩擦を考慮した解(式(3))からわかるように G, β および k には無関係である。

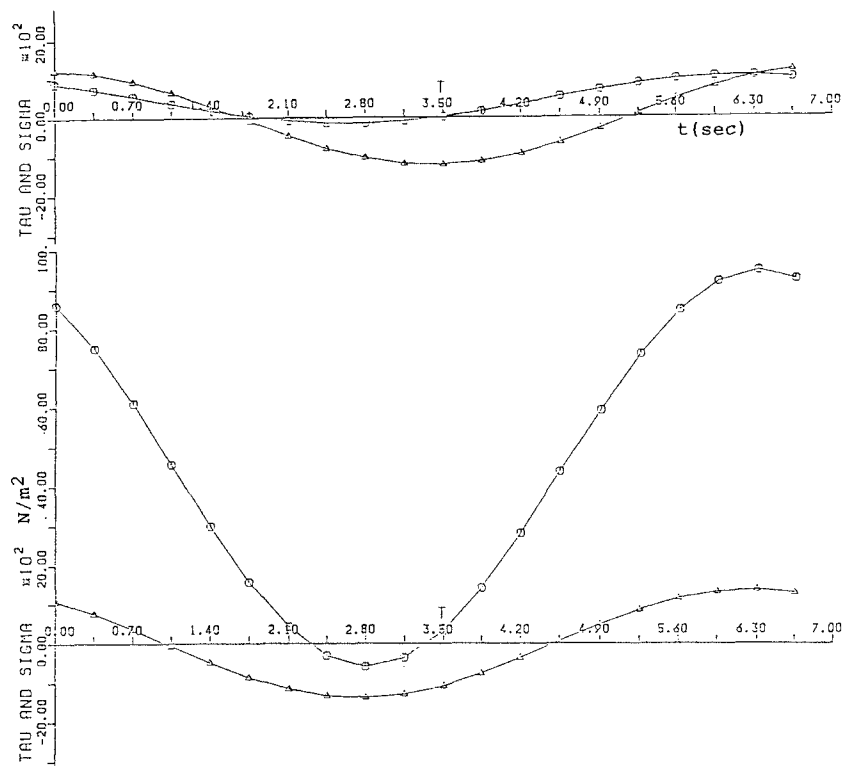


図一 二 地盤骨格のせん断応力に及ぼす波による海底面摩擦の効果

4. 海底面近傍でのせん断応力と鉛直有効応力

土の自重や外力の作用によって地盤内部にせん断応力が発生すると、土はせん断変形を生じる。せん断応力が増せば変形も大きくなりついには土は破壊する。このような一般的な破壊を説明する理論として最もよく用いられているのが Mohr の破壊理論である。土中の応力状態は 縦軸にせん断応力、横軸に垂直応力を取り Mohr の応力円で図示する。しかしながら 3 年前の第 14 回のこのシンポジウムで発表したように (酒井ら、1989b)、碎波帯の波高の大きな波の峰の通過後の海底面近くの地盤で一時的に鉛直有効応力がきわめて小さくなる状態では、地盤そのものが流体に近い状態になっていることが考えられる。Mohr の応力円でその状態を図示することは適切でないと考えられる。流体に近い状態ではせん断応力そのものの大きさが重要になると考え、せん断応力の一周期の位相変化を、地盤深度や地盤のパラメータを変えて、鉛直有効応力の変化と重ねて考えることによって、海底面近くの応力状態について考えてみることにする。

図一 3 は波浪による海底面摩擦を考慮した解 (式 (2) および (3)) による基本条件 (表一 1 参照) での、地盤深度 0.05m と 0.50m でのせん断応力と鉛直有効応力一周期の時間変化を示したものである。鉛直有効応力は式 (2) の変動分に土被り圧を加えたものである。土被り圧は



図一 3 地盤骨格のせん断応力 (Δ) と鉛直有効応力 ($\circ$) の位相変化
(上図: $z = -0.05\text{m}$ 、下図: $z = -0.50\text{m}$)

$-\gamma' z$ で与えている。ここで、 γ' は土の単位体積重量で、計算では 910 kgf/m^3 としている。

図からわかるように、 $z = -0.5 \text{ m}$ の方が $z = -0.05 \text{ m}$ より平均値としての鉛直有効応力は大きく、また変動も大きい。平均値が大きいのは土被り圧が大きいことによる。変動が大きいのは、間隙水圧変動の海底面波圧からの減衰が大きい事による。せん断応力はほとんど変化しない。これは図—2の右図からも明らかである。せん断応力はここではその作用方向を問題にしないので、負の部分は絶対値が同じ正の値に置き換えて考える。

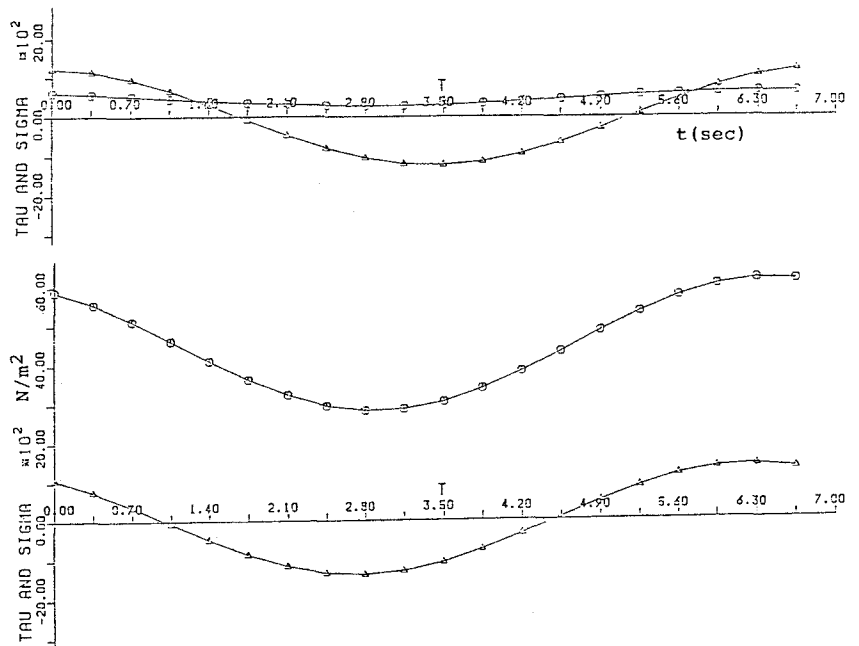
$z = -0.50 \text{ m}$ では鉛直有効応力は $t = 2.3 \sim 3.3 \text{ sec}$ の付近（すなわち波の谷の位相（ $t = 3.5 \text{ sec}$ ）のやや前）で 0 となり、その位相付近ではせん断応力が負の最大値をとる。 $z = -0.05 \text{ m}$ では、鉛直有効応力はその平均値も変動も小さくなるが、0 となる位相は $t = 1.9 \sim 3.5 \text{ sec}$ と広がっており、その位相付近ではせん断応力は -0.5 m の場合とほとんど同じで負の最大値が生じている。

図—4 は基本条件から β のみを $1.0 \times 10^8 \text{ N/m}^2$ にかえたものである。図—3 と比較して鉛直有効応力の変動は $\beta = 1.0 \times 10^7 \text{ N/m}^2$ の場合と比べて小さくなり $z = -0.05 \text{ m}$ でも 0 にはならない。これは G/β の値が小さくなると液状化の可能性が減るという畑中(1990)の結果に対応する。一方せん断応力は、2. および 3. で述べたように β の値に関係しないので、 $\beta = 10^7 \text{ N/m}^2$ の場合とおなじである。その値は海底面での波浪によるせん断応力とほぼ同じである。

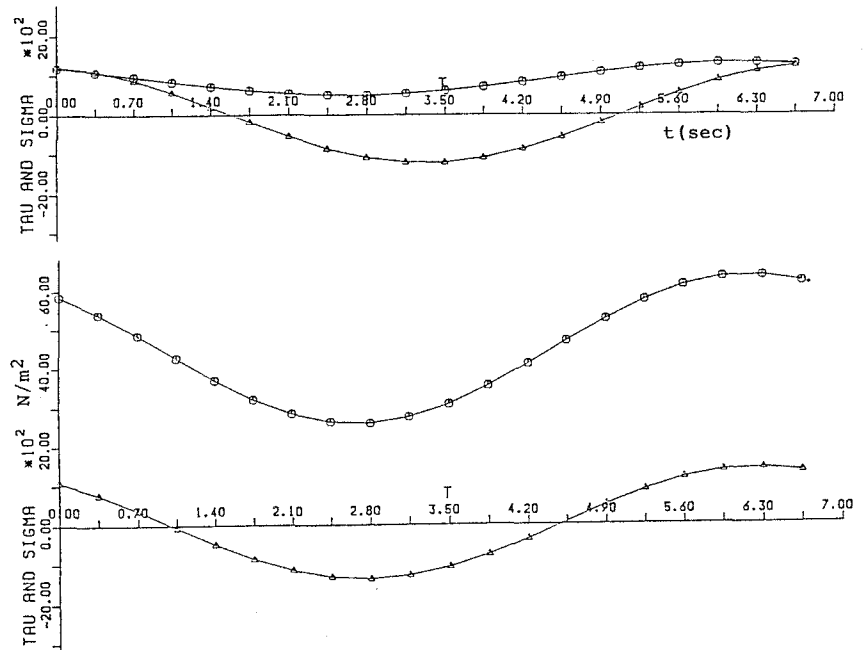
図—5、6 は透水係数 k のみをそれぞれ $2.8 \times 10^{-3} \text{ m/sec}$ および $2.8 \times 10^{-6} \text{ m/sec}$ に変えたものである。

図—5 では $\beta = 1.0 \times 10^8 \text{ N/m}^2$ にした場合と同様に鉛直有効応力の変動が小さくなり 0 にはならない。せん断応力は透水係数に関係しないため基本条件の場合と変わらない。一方図—6 では鉛直有効応力の変動は基本条件の場合よりさらに大きくなっており、値が 0 になる位相も広がっている。一方せん断応力はその変動に変化はない。透水係数の効果は、 $kG/\rho_w g^2 TH$ が減少すると液状化の可能性が大きくなるという畑中(1990)の結果に一致する。

いずれにしても、波の峰の通過後の位相で地盤骨格の鉛直有効応力が計算上負になる条件では、海底面近くの



図—4 地盤骨格のせん断応力 (Δ) と鉛直有効応力 ($\circ$) の位相変化
(上図: $z = -0.05 \text{ m}$ 、下図: $z = -0.50 \text{ m}$)
($\beta = 1/0 \times 10^8 \text{ N/m}^2$)



図—5 地盤骨格のせん断応力 (Δ) と鉛直有効応力 ($\circ$) の位相変化
(上図: $z = -0.05 \text{ m}$ 、下図: $z = -0.50 \text{ m}$)
($k = 2.8 \times 10^{-3} \text{ m/sec}$)

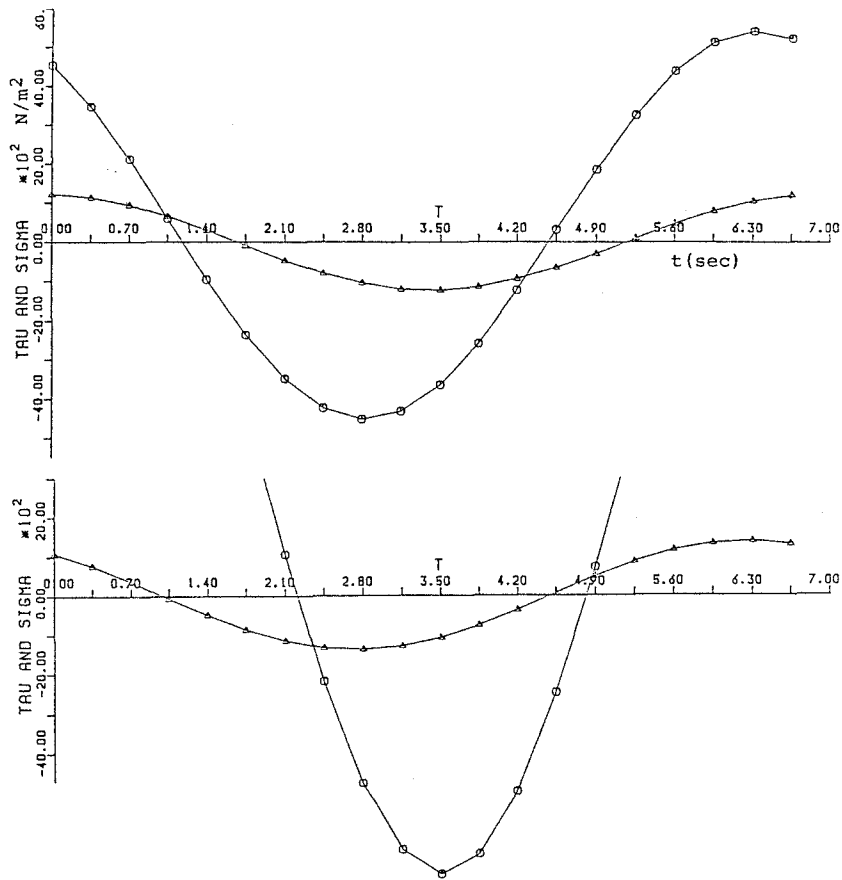
せん断応力はその条件に関係なく波による海底面摩擦応力とほぼ同じ値になるため、地盤が流動しやすい状態になる。

5. 結論

海底地盤の波浪応答の解として、波浪による海底面摩擦の効果を考慮した境界領域近似解を導いた。この解は海底面摩擦を考慮しない Mei ら (1981) の解に海底面摩擦による項が加わった形になっている。

波浪による海底面摩擦の効果は、間隙水圧変動と地盤骨格の鉛直有効応力変動に対しては少ないが、せん断応力に対しては地盤骨格のせん断弾性係数、間隙水の有効体積弾性係数および透水係数の値に関係なく大きい。

波の峰の通過後の位相で地盤骨格の鉛直有効応力が計算上負になる条件では、海底面近くのせん断応力はその条件に関係なく波による海底面摩擦応力とほぼ同じ値になるため、地盤が流動しやすい状態になる。



図—6 地盤骨格のせん断応力(△)と鉛直有効応力(○)
(上図: $z = -0.05\text{m}$ 、下図: $z = -0.50\text{m}$)
($k = 2.8 \times 10^{-6}\text{m/sec}$)

参考文献

北野利一(1991): 波浪による間隙水圧変動を支配する無次元パラメータと海底面摩擦の効果、京都大学工学部土木工学科卒業論文。
酒井哲郎・間瀬 肇・松本明男(1988): 波浪による海底地盤内の間隙水圧変化に及ぼす慣性項の効果、第 32 回水理講演会論文集、土木学会、pp.589-594。
酒井哲郎・服部明彦・間瀬 肇(1989a): 波浪に対する砂浜地盤応答における海底摩擦の効果、海岸工学論文集、第 36 巻、土木学会、pp.794-798。
酒井哲郎・服部明彦・間瀬 肇(1989b): 波浪による砕波帯海底地盤の有効応力ゼロ領域の発生、海洋開発論文集、Vol.5、土木学会、pp.79-84。
酒井哲郎・畑中克也・間瀬 肇(1990a): 砕波帯海底砂地盤のせん断応力、土木学会第 45 回年次学術講演会講演概要集第 2 部、pp.682-683。
酒井哲郎・畑中克也・間瀬 肇(1990b): 波浪による海底地盤内間隙水圧変動解の適用性と地盤の液状化条件、土木学会論文集、第 417 号/ II-13、pp.275-283。
Mei, C.C. and Foda, M.A.(1981): Wave-induced responses in a fluid-filled poroelastic solid with a free surface - a boundary layer theory, Geophys. J. R. astr. Soc., Vol.66, pp.597-631.