

波圧の時間変動の上下非対称性と海底地盤の動的応答特性

桑原久実*・玉井佐一**

1. 緒 言

一般に、海岸および海洋構造物の設計を行う場合、波浪、海流および潮流等の流体力に関する水理学的な検討だけでなく、構造物の基礎地盤の安定性に関する土質力学的な検討も重要な課題である。このため、波浪による海底地盤の応答特性については、数多くの研究が行われている。初期の研究は、地盤骨格、間隙流体を非圧縮性とし、地盤中の間隙水がポテンシャル流れに従うものとして進められた。ここ十数年間では、間隙水と地盤骨格の挙動の相互作用を考慮した Biot (1941) の圧密理論を基礎とする研究が、Madsen (1978), Yamamoto ら (1978) および Okusa (1985) によって行われている。また、前野ら (1984) は、浅海域にも適応可能なように波形勾配を考慮した実験式を提案している。しかし、いずれの研究も正弦波のような時間的に対称な波圧変動を用い海底地盤の挙動を考察したものであり、波圧変動の非対称性を考慮したものは見あたらないようである。

既に、桑原ら (1990) は、波圧の時間変動の前・後傾化による海底地盤の動的応答特性について検討しており、ここでは、波圧変動が上下非対称な場合の海底地盤の応答特性について検討することにした。

波の上下非対称性については、波が浅海域を進行するに従い、波の峰で尖り、谷で平坦となることが知られており、また、現地観測では、深海波 (合田ら, 1974)、浅海波 (柿沼ら, 1973) における上下非対称を歪度、尖鋭度などをもとに示している。ここでは、これらの研究成果をもとに、波の諸量等から海底面波圧変動の上下非対称性が得られた後の段階から議論を始めることにする。ここで用いた波形モデルは、波圧が静水圧以上となる時間と以下となる時間を変化させて波圧の上下非対称性を表現することにした。

また、地盤応答の解析手法は、既に、Nago ら (1986)、善ら (1987) が、Biot の圧密式を用いて正弦波の水圧変動による鉛直 1 次元地盤の動的応答特性を検討したも

のにならない、差分式により数値計算を行った。

2. 理論解析手法の概要

波圧変動による海底地盤内の動的応答特性は、善ら (1987) により次のように求められている。

いま、図-1 に示すような鉛直 1 次元地盤の浸透場を考える。微小時間 Δt における地盤要素への水の流入量 Δq_w は Darcy の法則に従うと次式のようになる。

$$\Delta q_w = \frac{k}{\rho_w g} \frac{\partial^2 p_m}{\partial Y^2} \Delta Y \Delta t \dots \dots \dots (1)$$

ここに、 k : 透水係数、 ρ_w : 水の密度、 g : 重力加速度、 p_m : 間隙水圧である。

また、 Δt 時間における地盤要素からの間隙水の流出量 Δq_m は次式のようになる。

$$\Delta q_m = \left(-m_v \frac{\partial \sigma_v'}{\partial t} + n m_w \frac{\partial p_m}{\partial t} \right) \Delta Y \Delta t \dots \dots \dots (2)$$

ここに、 σ_v' : 鉛直有効応力、 n : 間隙率、 m_v : 地盤の圧縮係数、 m_w : 間隙流体の圧縮係数であり $(1-S_r)/(h+P_0)+S_r m_{w0}$ (S_r : 飽和度、 P_0 : 大気圧、 m_{w0} : 水の圧縮係数) である。

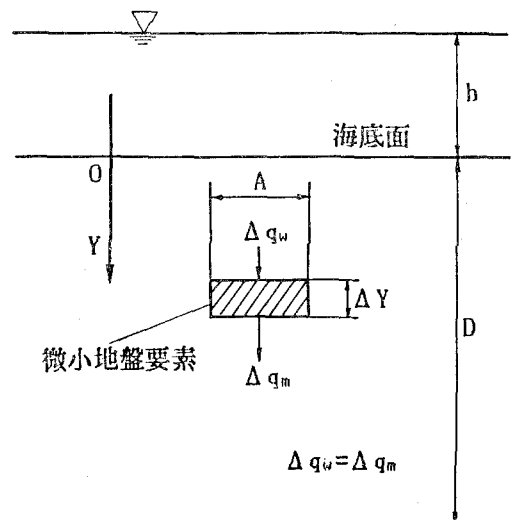


図-1 地盤要素内の流れの説明図

* 学生員 農修 愛媛大学大学院 連合農学研究科

** 正員 工博 高知大学教授 農学部農業工学科

鉛直有効応力が、次式で示せるものとする。

$$\sigma_v' = \sigma_{v0}' + (p_b - p_m) \dots \dots \dots (3)$$

ここに、 p_b : 波圧変動、 σ_{v0}' : 初期の鉛直有効応力 (= $\gamma'Y$, γ' : 土の単位体積重量)、 $\sigma_v' \leq 0$ ならば地盤深さ Y で液化化することを示す。

質量保存則 $\Delta q_w = \Delta q_m$ より次の基礎式が得られる。

$$\frac{k}{\rho_w g m_v} \frac{\partial^2 p_m}{\partial Y^2} = \left(1 + \frac{nm_w}{m_v}\right) \frac{\partial p_m}{\partial t} - \frac{\partial p_b}{\partial t} \dots (4)$$

また、初期及び境界条件は、 $t=0$ で $p_m=0$, $Y=0$ で $p_m=p_b$, $Y=D$ で $\partial p_m / \partial Y = 0$ で与えられる。

地盤内の間隙水圧は、基礎式(4)式と初期、境界条件のもとに差分法を用い数値計算して求められるが、この際の時間、空間の計算ステップは、善ら(1987)にない、 $\Delta t = T/1000$ (T : 波の周期)、 $\Delta Y = D/10$ としている。

海底面の波圧変動は、図-2のように波の上下非対称度を一定数 α_2 で示す波形モデルを用いている。しかし、この波形モデルは、 $\omega t = 0, \alpha_2\pi, 2\alpha_2\pi, (1+\alpha_2)\pi$ で不連続となるため Fourier 展開し連続波形にして用いている。図-2に併記した式の定数 C は p_b/p_{b0} の最大、最小値を ± 1 とするのための補正係数である。また、級

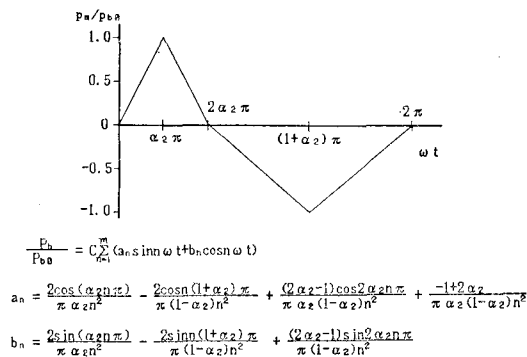


図-2 波圧の上下非対称性モデルとその Fourier 式

表-1 解析の基準とした地盤及び波圧の特性値

波高 (H)	5.0m
周期 (T)	8.0sec
水深 (h)	10.0m
土粒子の密度 (ρ_s)	$2.65 \times 10^3 \text{kg/m}^3$
水の密度 (ρ_w)	$1.0 \times 10^3 \text{kg/m}^3$
空気含有率 (n_a)	0.005
水の含有率 (n_w)	0.40
地盤の圧縮係数 (m_v)	$1.0 \times 10^{-4} \text{m}^2/\text{N}$
水の圧縮係数 (m_w)	$4.2 \times 10^{-11} \text{m}^2/\text{N}$
透水係数 (k)	0.0001m/sec
地盤の厚さ (D)	5.0m

数和の項数 m は 5 としている。なお、上下非対称度を示す α_2 は 0~1 の値をとり、 $\alpha_2 < 0.5$ では波の峰で尖り、 $\alpha_2 = 0.5$ では対称、 $\alpha_2 > 0.5$ では谷で尖る。

また、海底地盤の動的応答特性は、波圧、地盤特性を種々変化させて計算したが、この際、表-1 のような条件を基準にして計算を進めている。

3. 計算結果及び考察

3.1 海底地盤の一般的な変動特性

図-3 は、波圧変動の上下非対称性と海底地盤の一般的な変動特性を示している。i), ii) 及び iii) は、間隙水圧、有効応力及び過剰間隙水圧の変動を示し、a), b) は、上下非対称度 α_2 が 0.3 及び 0.7 の状態を示している。また、ii) の縦軸は有効応力を示しており、0 以下であると液化化していることを表し、iii) の過剰間隙水圧曲線と σ_v' / p_{b0} (破線) との交点は液化化深さを示す。なお、計算条件は表-1 に示すものである。

間隙水圧、有効応力の変動は、地盤内部に入るに従い減衰し、位相差を増加しているが、波圧変動の特性に応じた変動を示しており上下非対称なものとなっている。過剰間隙水圧の分布は、波の峰で尖ると正で大きくなり、波の谷で尖ると負で大きくなっている。また、ii), iii) から、液化化は波の谷の時に生じており、その深さは波の谷で尖るほど大きくなる傾向にある。

3.2 変動間隙水圧の振幅、位相差の分布

図-4 は、波圧変動の上下非対称度による間隙水圧の伝播特性について地盤、波圧を変化させて示したものである。(a)~(g) の各々の左図が変動間隙水圧の振幅を、右図が位相差を示している。変動間隙水圧の振幅は p_m/p_{b0} が正の場合のものを示し、位相差は海底面の波圧変動を基準とし間隙水圧が正から負となる時刻の時間差 T_l を示している。

地盤、波圧特性による間隙水圧伝播の変化は、空気含有率が大きく、地盤の圧縮係数、透水係数、波の周期及び水深が小さいほど、地盤内の海底面付近で変動間隙水圧は大きく減衰し、位相差も大きく変化している。

波圧の上下非対称度による変化は、いずれの地盤、波圧条件でも波の峰で尖るほど変動間隙水圧の減衰は大きくなる。また、空気含有率、透水係数、波の周期が大きく、地盤の圧縮係数、水深、地盤厚さが小さいほど波圧の上下非対称性による変動間隙水圧分布の違いは大きくなる傾向にある。

なお、 p_m/p_{b0} が負の場合の変動間隙水圧の振幅、変動間隙水圧が負から正となる時の位相差は、図-4 の実線が $\alpha_2 = 0.7$ 、破線が $\alpha_2 = 0.3$ を示し逆となる。

3.3 液化化深さ

図-5 は、波圧変動の上下非対称度による海底面から

の液状化深さについて地盤、波圧を変化させて示したものである。縦軸は液状化深さ D_L と波圧の振幅 a_0 の比を示している。

地盤、波圧特性による液状化深さは、空気・水の含有率が大きく、地盤骨格の圧縮係数、透水係数、水深が小さいほど大きくなる傾向にある。

波圧の上下非対称度による液状化深さは、いずれの場合も α_2 が 1.0 に近づき波の谷で尖るほど大きくなることわかる。また、波圧の上下非対称性による液状化深さの相違は、空気含有率が小さく、地盤骨格の圧縮係数、透水係数、水深が大きいほど大きく表われている。

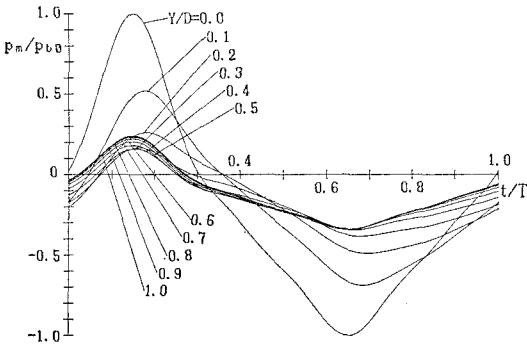
4. 結 言

本研究により次のことが明らかとなった。

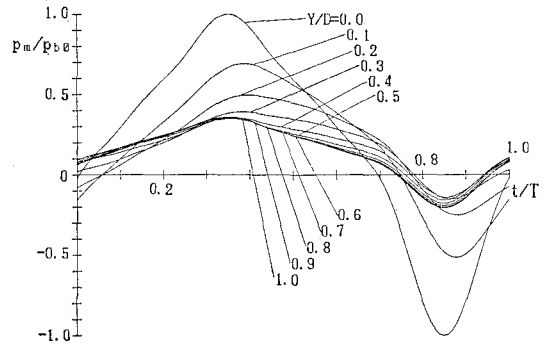
1) 空気含有率、透水係数、波の周期が大きく、地盤の圧縮係数、水深、地盤厚さが小さいほど波圧の上下非対称性による変動間隙水圧分布の相違は大きくなる。

2) 波圧変動の上下非対称性による液状化深さは、波の谷で尖るほど大きくなる。

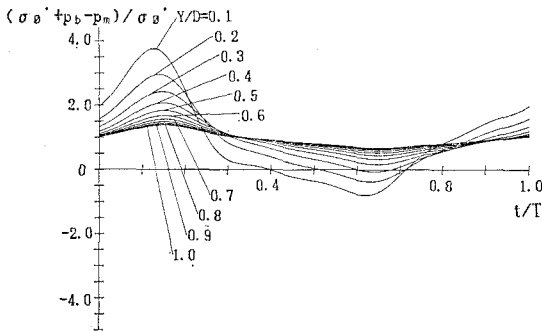
3) 波圧の上下非対称性による液状化深さの変化は、空気含有率が小さく、地盤骨格の圧縮係数、透水係数、水深が大きいほど大きくなる。



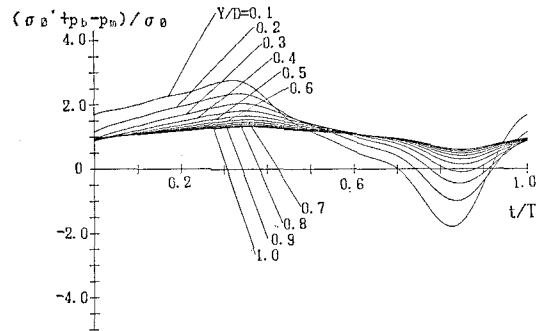
i) 変動間隙水圧



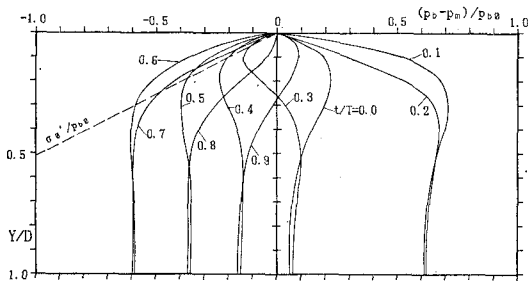
ii) 変動間隙水圧



iii) 変動有効応力

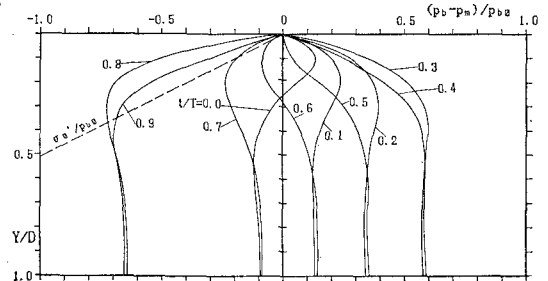


iv) 変動有効応力



iii) 変動過剰間隙水圧の分布

a) $\alpha_2 = 0.3$



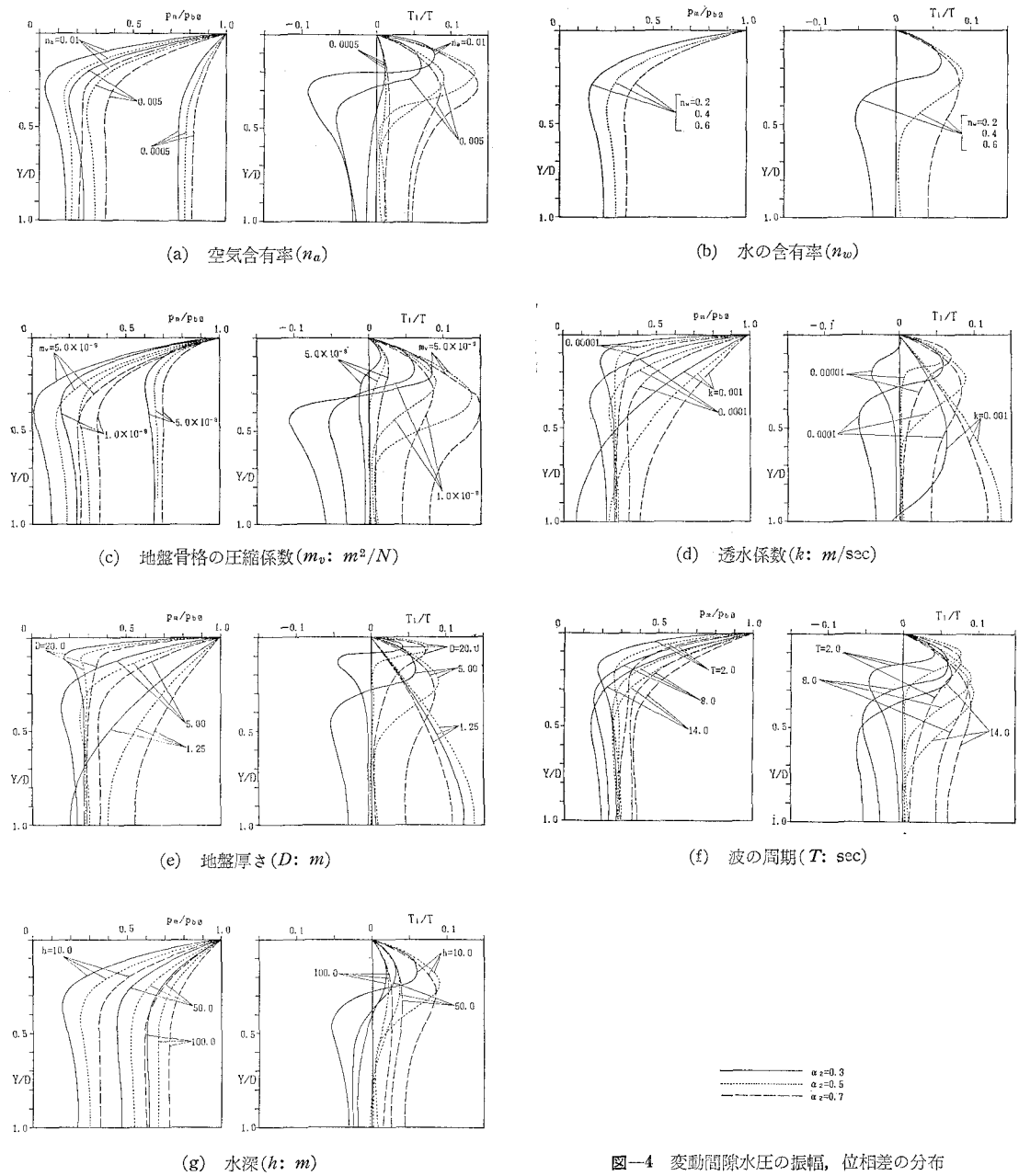
iii) 変動過剰間隙水圧の分布

b) $\alpha_2 = 0.7$

図-3 波圧変動の上下非対称性と地盤の一般的な動的応答特性

さらに、今後、Goda (1970) の不規則波発生シミュレーションを用いて種々の波浪スペクトルによる海底地盤

の応答特性、wave grouping が海底地盤の安定性に与える影響等について検討して行きたいと考えている。



図—4 変動間隙水圧の振幅、位相差の分布

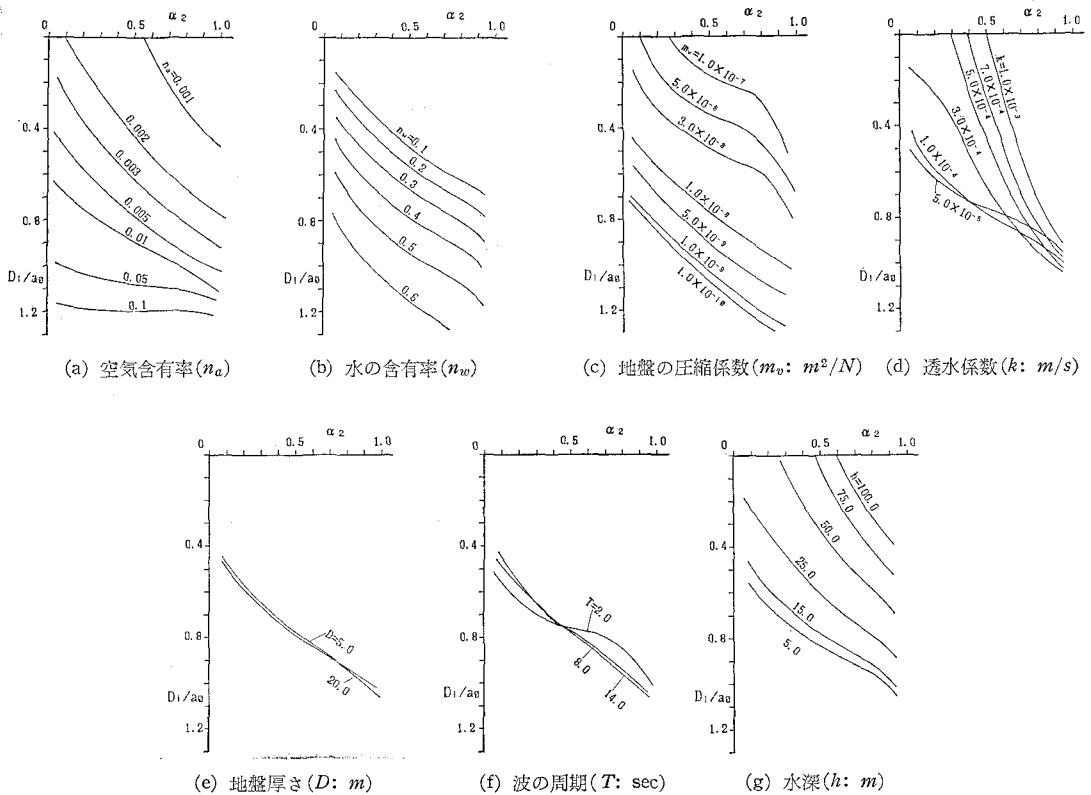


図-5 海底地盤の液状化深さ

参考文献

- 柿沼忠男・ニツ谷敏雄・川合 茂 (1973): 大潟海岸における波浪の変形について(2), 第20回海岸工学講演会論文集, pp. 535~538.
- 桑原久実・玉井佐一 (1990): 波圧の時間変動の前・後傾化による海底地盤の動的応答特性, 第15回海洋開発論文集 pp. 199~204.
- 合田良実・永井康平 (1974): 波浪の統計的性質に関する調査・解析, 港研報告, 第13巻, 第1号, pp. 3~37.
- 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.
- 豊野賀彦・長谷川高士 (1984): 波浪による砂層内の間隙水圧の特性, 第31回海岸工学講演会論文集, pp. 596~600.
- Biot, M. A. (1941): General theory of three-dimensional consolidation, J. of Applied Physics, Vol. 12, pp. 155~

164.

- Goda, Y. (1970): Numerical experiments on wave statistic with spectral simulation, Rept., PHRI, Vol. 9, No. 3, pp. 3~57.
- Madsen, O.S. (1978): Wave-induced stresses in unsaturated submarine sediments, Geotechnique, Vol. 32, No. 3, pp. 235~247.
- Nago, H., Maeno, S. (1986): Pore pressure and effective stress in a highly saturated sand bed under water pressure variation on its surface, Natural Disaster Science, Vol. 9, No. 1, pp. 23~35.
- Okusa, S. (1985): Wave-induced stresses in unsaturated submarine sediments, Geotechnique, Vol. 32, No. 3, pp. 235~247.
- Yamamoto, T., Koning, H., Sellmeier, H., Hijum, E. V. (1987): On the response of a poroelastic bed to water waves, J. Fluid Mech., Vol. 87, No. 1, pp. 193~206.