

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

愛媛大学大学院連合農学研究科 学生員 桑原久実
高知大学農学部 正会員 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Laplace式に基づくポテンシャル流れに従うものとして進められた(たとえば、Putnum, 1949)。ここ数十年間では、間隙水と地盤骨格の挙動の相互作用を考慮したBiotの圧密理論(1941)を基本とする研究が、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(1985)は、浅海域にも適応可能なように波形勾配による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の影響を検討したものは見あたらないようである。

一般的に波圧の時間的な変動は、風、海底地盤及び構造物等の影響を受け非対称なものとなっている。なかでも、浅海域に波が進行して来ると波形が前傾化して来ることが古くから知られており、ここでは、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を数値計算によって検討することにした。

波の前傾化については、Adeyemo(1968)は波形の前傾度を指標でまとめ、また、岩垣・酒井(1971)は波形が前傾化する機構を解明するなど、数多くの研究が行われている。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の前後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、浅野ら(1989)が波形の前傾化による底面せん断力の影響を調べる際に用いたHansen-Svendsen(1987)による"saw-tooth wave"モデルを用いることにした。このモデルは波形の前傾化度を1つの定数で表すことができ、数値計算に容易に取り入れることができる。

変動水压下にある地盤の応答解析手法は、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法を用いて行った。

2. 理論解析手法の概要

波圧変動により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の法則に従うとすると次式のようにになる。

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

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

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。

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

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

鉛直有効応力 σ_v' が、次式で示されるものとする。

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

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 で液状化していることを示す。

質量保存則 $\Delta q_w = \Delta q_m$ が成立するとすると、基礎式は次のように導ける。

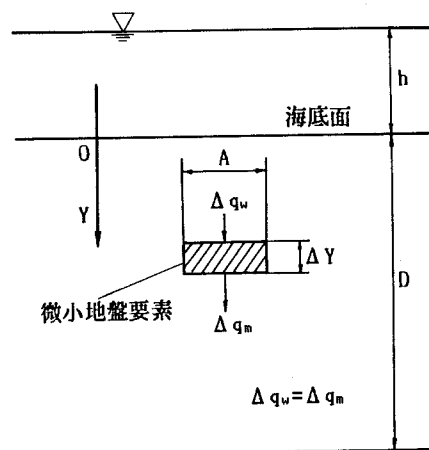


図-1 地盤要素内の流れの説明

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

また、初期及び境界条件は次のように与えられる。

$$\begin{aligned} t=0 \text{ で } & p_m=0 \\ Y=0 \text{ で } & p_m=p_b \\ Y=D \text{ で } & \partial p_m / \partial Y=0 \end{aligned} \quad (5)$$

地盤内の間隙水圧は、基礎式の(4)式を(5)の初期及び境界条件のもとで差分法を用い数値計算で求めるが、この際の時間、空間の計算ステップは、試行の結果、 $\Delta t = T/1000$ (T :波の周期)、 $\Delta Y = D/10$ としている。

海底面の波圧変動は、次式のような波の前傾化度を1定数 α_1 で示す"saw tooth wave"モデルを用いている。これを図示すると、図-2のようになる。

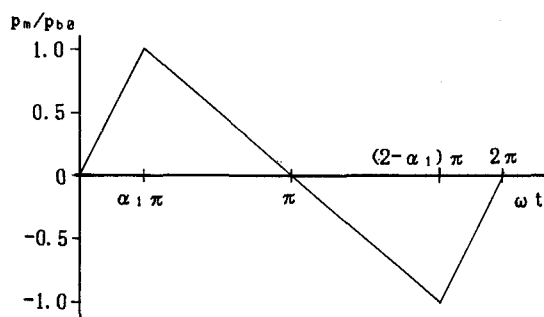


図-2 波圧の前・後傾化モデル(saw tooth wave)

$$\frac{p_b}{p_{be}} = \begin{cases} \omega t / \alpha_1 \pi & 0 < \omega t < \alpha_1 \pi \\ (\pi - \omega t) / (1 - \alpha_1) \pi & \alpha_1 \pi < \omega t < (2 - \alpha_1) \pi \\ (\omega t - 2\pi) / \alpha_1 \pi & (2 - \alpha_1) \pi < \omega t < 2\pi \end{cases} \quad (6)$$

しかし、上式は、 $\omega t = \alpha_1 \pi$ 、 $(2 - \alpha_1) \pi$ で波圧変動が不連続となるため、次式のようにFourier展開し連続波形にして用いることにした。この式の定数 C は、 p_b/p_{be} の最大、最小値を ± 1 とするための補正係数である。また、級数中の項数は $m=5$ とした。なお、前傾化度を示す α_1 は、 $0 \sim 1$ の値を取り、 $\alpha_1 < 0.5$ で前傾し、 $\alpha_1 = 0.5$ で対称、 $\alpha_1 > 0.5$ で後傾する。

$$\frac{p_b}{p_{be}} = C \sum_{n=1}^m a_n \sin n \omega t \quad (7)$$

$$a_n = \frac{2}{\pi^2 \alpha_1 (1 - \alpha_1) n^2} \sin n \alpha_1 \pi \quad (8)$$

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の計算条件を基準にして計算を進めている。

3. 結果及び考察

3.1 海底地盤の一般的な変動特性

図-3は、波圧変動の前・後傾化による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、a)、b)は前・後傾化 α_1 が0.1及び0.9の状態を示している。ii)の縦軸は有効応力を示しており、0以下であると液状化していることを示し、iii)の過剰間隙水圧曲線と σ_v'/p_{be} (破線)との交点が液状化深さを表す。なお、計算条件は表-1に記したものである。

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前・後傾化したものとなっている。過剰間隙水圧の分布は、前傾化する場合、正で大きくなり、後傾化する場合、負で大きくなる傾向にある。また、ii)、iii)から、液状化は、波圧が低下し波の谷付近となった時、地盤表面付近で発生していることがわかる。

3.2 変動間隙水圧の振幅、位相差の分布

図-4は、波圧変動の前・後傾化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_{be} が正の場合のものであり、位相差は海底面の波圧変動を基準とし間隙水圧

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)	$1.0 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$
空気の含有率(n_a)	0.005
水の含有率(n_w)	0.40
地盤の圧縮係数(m_v)	$1.0 \times 10^{-8} \text{ m}^2/\text{N}$
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

の変動が正から負となる時刻の時間差 (T_1) で示している。

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において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。

波圧変動の前・後傾化による変化は、全体的に変動間隙水圧の減衰は前傾化するほど大きくなっていることがわかる。また、空気含有率、地盤厚さが小さく、地盤の圧縮係数、透水係数、波の周期、水深が大きいくほど波圧の前・後傾化による変動間隙水圧の分布の違いは大きくなる傾向にある。

なお、 p_m/p_{be} 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 $\alpha_1=0.9$ 、破線が $\alpha_1=0.1$ を表し逆になる。

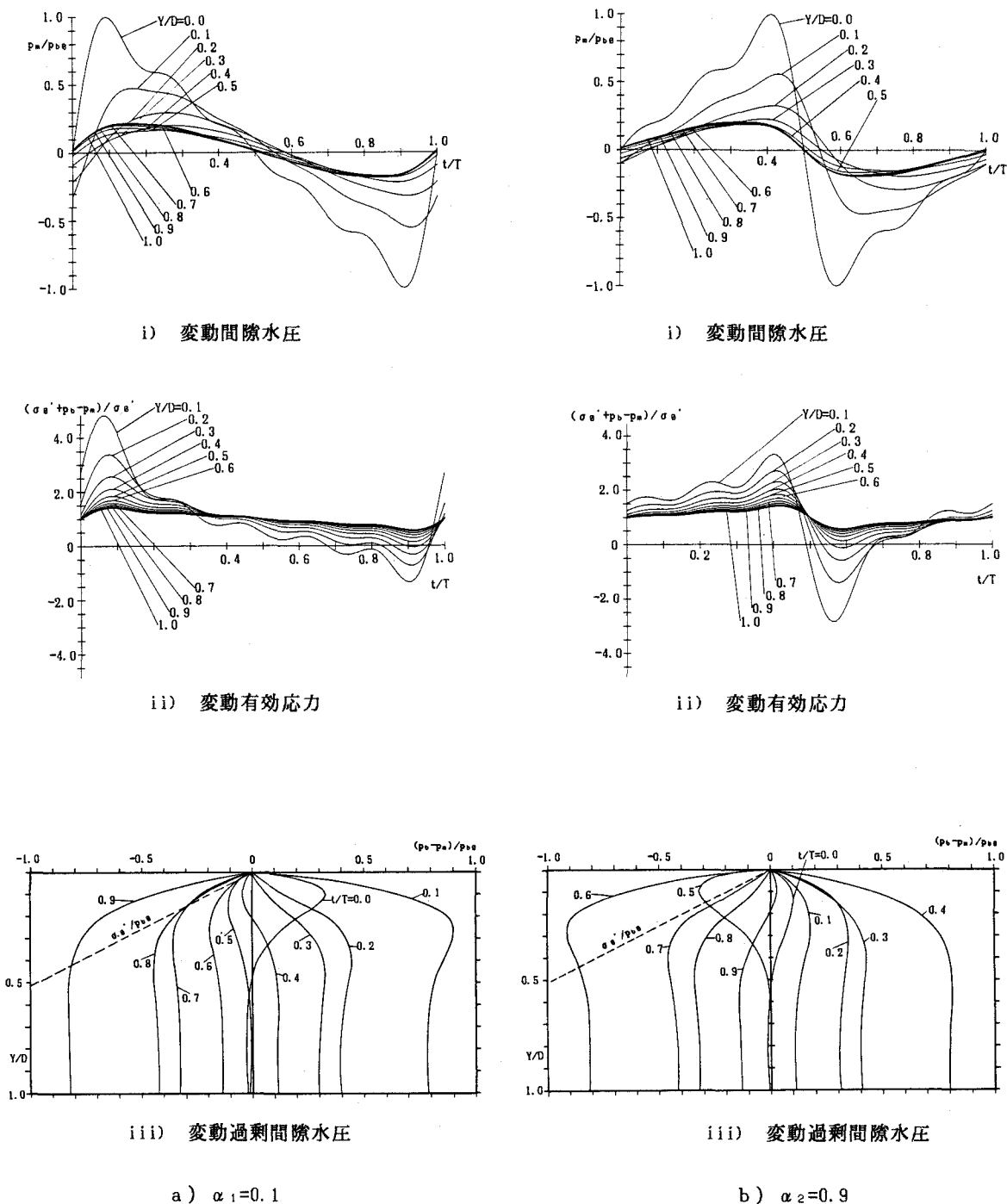


図-3 波圧の前・後傾化による地盤の一般的な応答特性

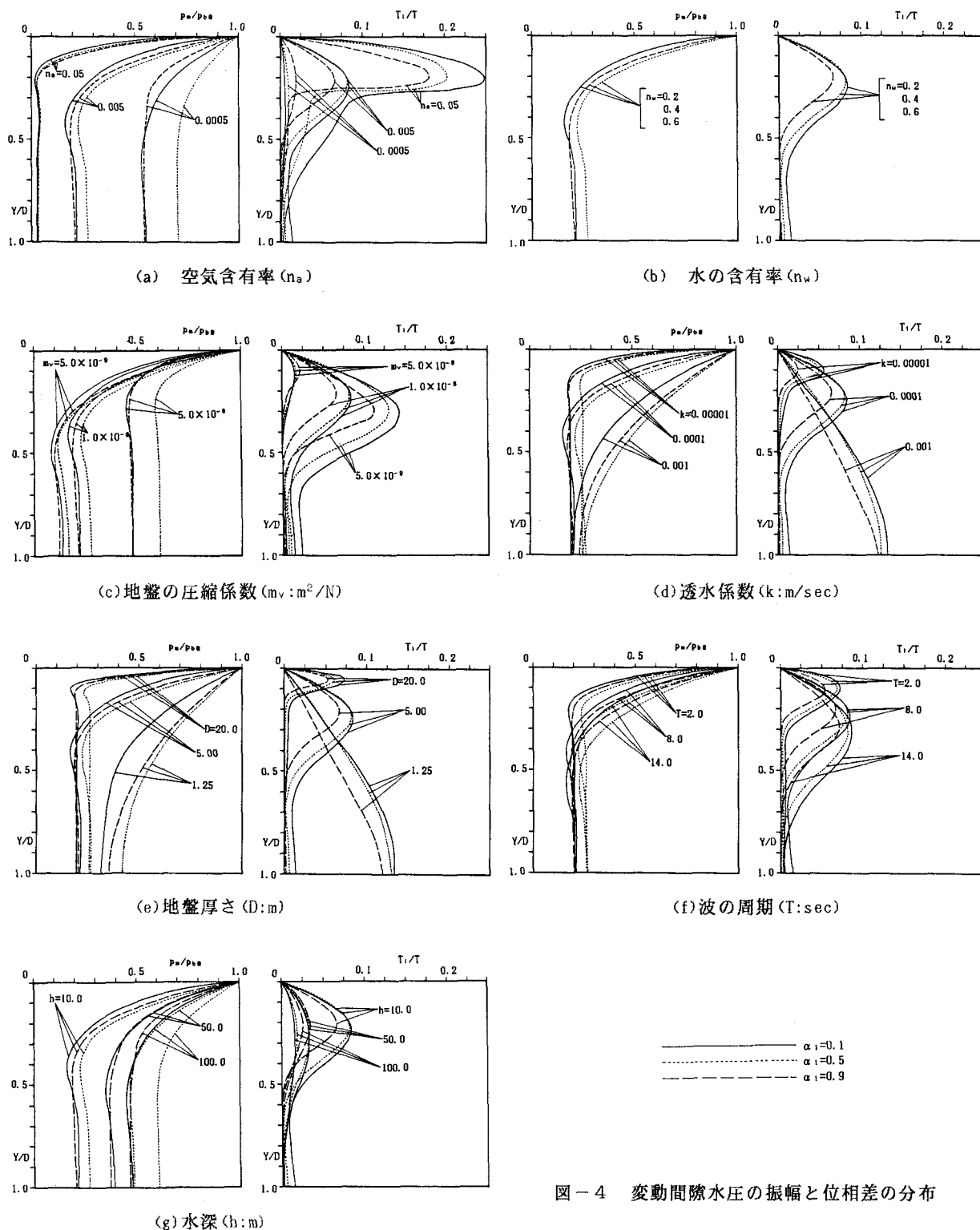


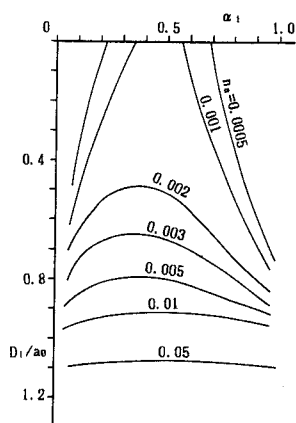
図-4 変動間隙水圧の振幅と位相差の分布

3.3 液状化深さ

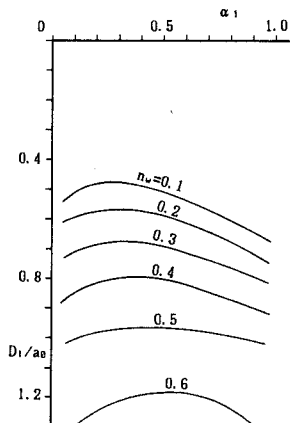
図-5は、波圧変動の前・後傾化度による海底面からの液状化深さについて、地盤、波圧を変化させて示したものである。縦軸は液状化深さ D_l と波圧の振幅 a_u の比を示している。

地盤、波圧特性による液状化深さの変化は、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。

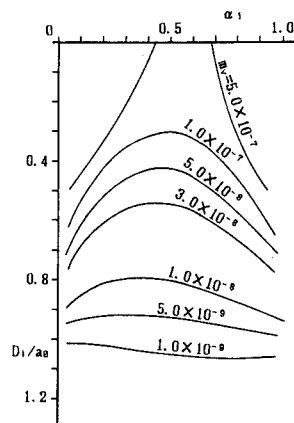
波圧の前・後傾化による液状化深さは、いずれの場合も α_1 が0または1に近ずき、前傾及び後傾の度合いが強くな



(a) 空気含有率 (n_a)



(b) 水の含有率 (n_w)



(c) 地盤骨格の圧縮係数 ($m_v: m^2/N$)

るほど、大きくなる傾向にあることがわかる。また、波圧の前・後傾化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表れることが認められる。

4. 結言

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をBiotの圧密式を用いて数値計算した結果、次のことが明かとなった。

1) 空気含有率、地盤厚さが小さく、地盤の圧縮係数、透水係数、波の周期、水深が大きいほど波圧の前・後傾化による変動間隙水圧の分布の違いは大きくなる。

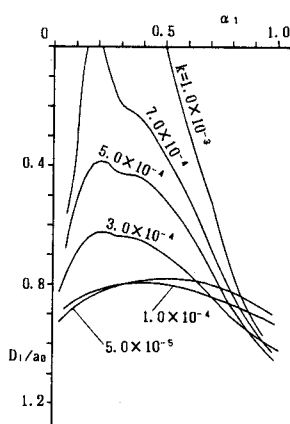
2) 波圧の前・後傾化度による液状化深さは、前傾及び後傾の度合が増加するほど大きくなる。

3) 波圧の前・後傾化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。

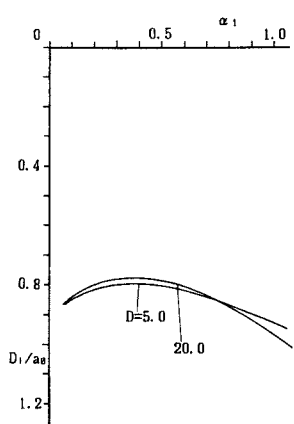
今後、Goda (1970) の不規則波発生シミュレーションを用いて種々の波浪スペクトルによる海底地盤の応答特性、wave groupingが海底地盤の安定性に与える影響などについて検討して行きたい。また、一般に海底地盤は、いくつかの層から構成されており、層を持つ地盤の動的応答特性についても検討して行きたいと考えている。

参考文献

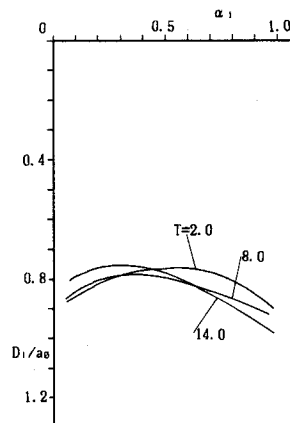
- 浅野敏之・栗林賢一・酒井哲郎 (1989) : 前傾した波の下での底面境界層の解析, 第36回海岸工学論文集, pp. 6-10.
 岩垣雄一・酒井哲郎 (1971) : 一様斜面上の有限振幅長波について, 土木学会論文報告集, 第196号, pp. 65-74.
 善功企・山崎浩之・渡辺篤 (1987) : 海底地盤の波浪による液状化および高密度化, 港研報告, 第26巻, 第4号, pp. 125-180.
 前野賀彦・長谷川高士 (1984) : 波浪による砂層内の間隙水圧の特性, 第31回海講論文集, pp. 596-600.



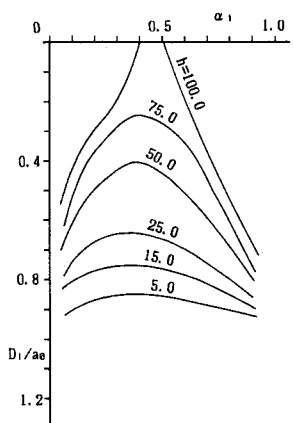
(d) 透水係数 ($k: m/sec$)



(e) 地盤厚さ ($D: m$)



(f) 波の周期 ($T: sec$)



(g) 水深 ($h: m$)

図-5 液状化深さ

- Adeymo, M. D. (1968): Effect of beach slope and shoaling on wave asymmetry, Proc. 11th Conf. Coastal Eng., pp. 145-172.
- 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 statistics with spectral simulation, Rept., PHRI, Vol. 9, No. 3, pp. 3-57.
- Hansen, J. B. and I. A. Svendsen (1987): The cross shore motion over a barred profile, 2nd Int. Conf. Coastal Port Eng. of Developing Countries Beijing, Vol. 2, pp. 1867-1879.
- Madsen, O. S. (1978): Wave-induced pore pressures and effective stress in a porous bed, Geotechnique, Vol. 28, No. 4, pp. 377-393.
- Nago, H., Maeno, S. (1978): 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.
- Putnam, J. A. (1949): Loss of wave energy due to percolation in a permeable sea bottom. Trans., Am. Geophysical Union, Vol. 30, pp. 349-356.
- Yamamoto, T., Koning, H., Sellmeier, H., Hijum, E. V. (1978): On the response of a poroelastic bed to water waves. J. Fluid Mech. Vol. 87, No. 1, pp. 193-206.