

有限振幅波による海底地盤の動的応答特性

Seabed Response by Finite Amplitude Wave

桑原久実* ・ 玉井佐一**

By Hisami KUWAHARA and Saichi TAMAI

The stability of the seabed under wave pressure is an important problem in the design of pipelines, anchors and offshore gravity structures. Recently, many studies of wave-seabed interaction are reported. However, in most cases, such studies discuss on the seabed response to the sinusoidal pressure variation. The aim of the present paper is to study the effect of the finite amplitude wave pressure variation on the seabed response. The seabed response are analyzed by the finite difference method with the Biot's equation for the consolidation in the vertical, one dimensional model. The effects of the wave steepness, the relative depth, the amount of air and water, the permeability and the compressibility in the seabed response are investigated by various example.

keywords: seabed, liquefaction, finite amplitude wave

1. 緒言

最近、我国ではウォーターフロントが注目されるようになり、海岸地帯に構造物を設置する機会が増加し、基礎地盤の安定性に関する土質力学的な検討が重要な課題となっている。また、波浪などの変動水圧によって地盤に発生する液状化は、地盤の侵食、洗掘及び吸い出し等の災害と密接な関係にあるものと考えられる。

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、Putnam¹⁾)。ここ数十年間では、間隙流体と地盤骨格の圧縮性とそれらの相互作用を考慮したBiotの圧密理論を基本とする研究が、Madsen²⁾、Yamamotoら³⁾およびOkusa⁴⁾らによって行われている。しかし、これらは正弦波のような波圧変動による海底地盤の応答を論じたものであり、風、水深及び構造物による波圧の時間変動の非線形性、非対称性が地盤応答へ与える影響については、不明な点が多いようである。このことから、筆者らは、既に、波圧の時間変動の前・後傾化⁵⁾及び上下非対称性⁶⁾が地盤に与える影響について検討している。さらに、ここでは、波が浅海域に達した場合を想定し、有限振幅波による海底地盤の応答特性を検討することにした。本研究で用いた解析手法は、既に、Nagoら⁷⁾、善ら⁸⁾が、Biotの圧密式を用い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と同様なものを用いている。地

* 学生会員 農博 愛媛大学大学院生 連合農学研究科

(〒783 高知県南国市物部乙200)

** 正会員 工博 高知大学教授 農学部農業工学科

(〒783 高知県南国市物部乙200)

盤の安定性は、波圧変動により地盤に生じる液状化深さに着目して評価している。また、微小振幅波により得られた地盤の応答結果と比較することにより、有限振幅波の影響が著しく現れる条件を考察している。

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⁹⁾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ようになる。

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

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

また、 Δt 時間における地盤要素からの間隙流体の流出量 Δq_m は、次式ようになる。

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

ここに、 σ_v' :変動有効応力、 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 $(1-S_r)/(\rho_w g h + P_0) + S_r m_{w0}$ で求まる(S_r :飽和度、 P_0 :大気圧、 m_{w0} :純水の圧縮係数)である。

変動有効応力 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、 $p_b - p_m$:変動過剰間隙水圧、 σ_{v0}' :初期の有効応力 $(\rho_s - \rho_w)(1-n)gY$ であり、 $\sigma_v' \leq 0$ ならば地盤深さ Y で液状化していることを示す。

ここで、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。

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

また、(4)式の初期及び境界条件は次のように与えられる。

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

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、善ら⁹⁾にならい $\Delta t = T/1000$ (T :波の周期)、 $\Delta Y = D/10$ としている。

なお、(4)式は排水係数 C と伝達係数 α を用いて無次元表示すると次式ようになる。

$$C \frac{\partial^2 \bar{p}_m}{\partial \bar{Y}^2} = \alpha \frac{\partial \bar{p}_m}{\partial \bar{t}} - \frac{\partial \bar{p}_b}{\partial \bar{t}} \quad (6)$$

ここに、 $\bar{p}_m = p_m / p_0$ ($p_0 = \rho_w g a_0$, a_0 :波の振幅)、 $\bar{p}_b = p_b / p_0$ 、 C :排水係数 $= kT / (\rho_w g m_v D^2)$ 、 α :伝達係数 $= 1 + n m_w / m_v$ 、 $\bar{t} = t/T$ 、 $\bar{Y} = Y/D$ である。

海底面の波圧変動を与えるにあたっては、Ursell数 ($Ur = HL^2/h^3$, H :波高、 L :波長、 h :水深) が25.0以下ならばStokes波の3次近似解⁹⁾を、 Ur が25.0以上ならばcnoid波の代わりに岩垣・塩田¹⁰⁾が導いたHyperbolic波の2次近似解を用いている。この有限振幅波の適応範囲については、種々の知見が得られているが、ここでは $Ur = 25.0$ をもって区別することにして、これらの波圧変動式については、各文献を参照していただきたい。図-2は、有限振幅波の適応境界 $Ur = 25.0$ におけるHyperbolic波とStokes波による海底面の波圧変動を示して

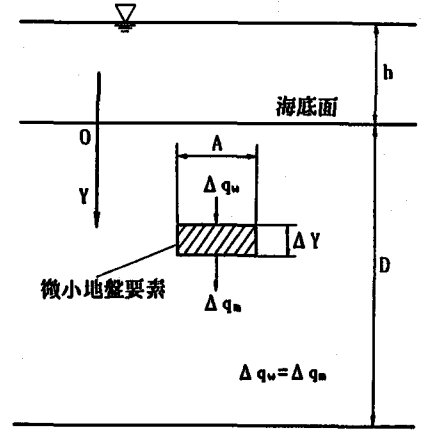


図-1 地盤要素内の流れの説明

いる。Stokes波がHyperbolic波と比較し、波の峰で大きく、谷で小さくなっており、両者は完全に一致しないことがわかる。また、波の砕波限界は種々提出されているが、ここではMicheの式により判定している。

また、海底地盤の動的応答特性は波圧、地盤特性を種々に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。

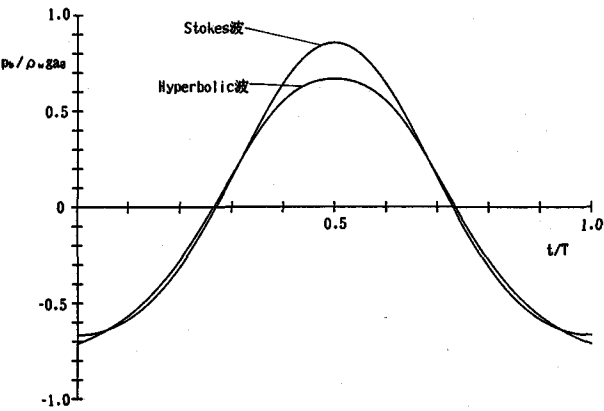


図-2 Ursell数(Ur)=25.0の波圧変動の相違
(H/L=0.04, h/L=0.117)

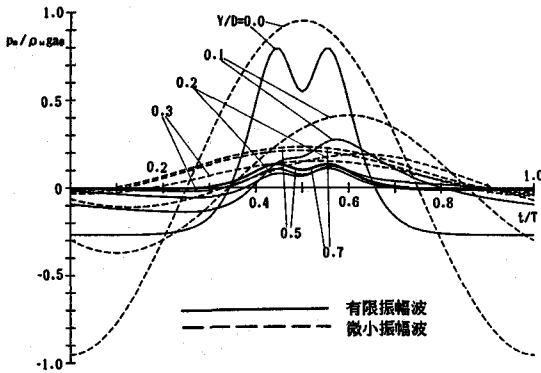
表-1 解析の基準とした地盤の特性値

η_0	0.01
η_w	0.4
$m_v(\rho_w g a_0)$	2.0×10^{-4}
$k/\sqrt{g a_0}$	0.00001
a_0/D	0.4
ρ_s/ρ_w	2.65
$m_{vs}(\rho_w g a_0)$	8.23×10^{-6}
$p_0/(\rho_w g a_0)$	5.17

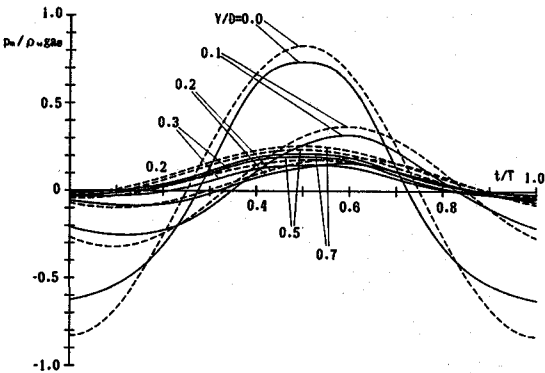
3. 結果及び考察

3・1 海底地盤の変動特性

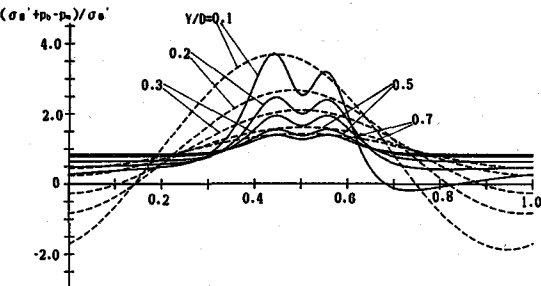
図-3は、有限振幅波の波圧変動による海底地盤の一般的な応答を示している。実線は有限振幅波、破線は微小振幅波による地盤の変動である。i)、ii)及びiii)は間隙水圧、有効応力及び過剰間隙水圧の変動を示しており、それらの(a)はH/L=0.04, h/L=0.05, Ur=320.0、(b)はH/L=0.04, h/L=0.10, Ur=40.0について示してい



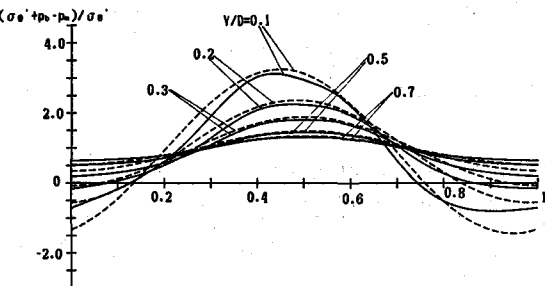
i) 変動間隙水圧



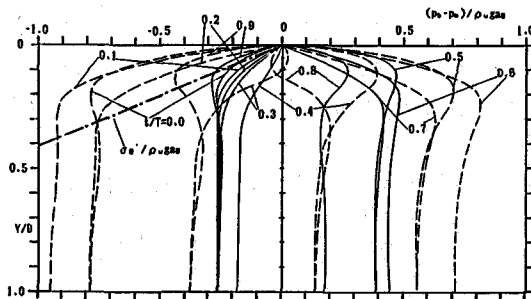
i) 変動間隙水圧



ii) 変動有効応力

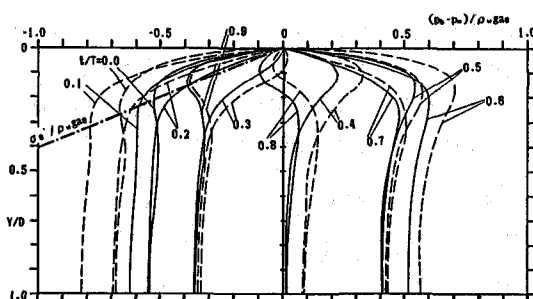


ii) 変動有効応力



iii) 変動過剰間隙水圧

(a) $H/L=0.04, h/L=0.05, Ur=320.0$ の場合



iii) 変動過剰間隙水圧

(b) $H/L=0.04, h/L=0.10, Ur=40.0$ の場合

図-3 有限振幅波による海底地盤の一般的な応答特性

る。また、ii)の縦軸は有効応力であり、0以下であると液状化していることを示し、iii)の過剰間隙水圧の分布曲線と $\sigma'_v / \rho_w g a_0$ (一点鎖線)との交点が地表からの液状化深さを表す。なお、計算条件は表-1に記したものである。

有限振幅波、微小振幅波による間隙水圧、有効応力の変動は共に、地盤内に入るに従い減衰し、位相差を増加していることがわかる。しかし、有限振幅波の波圧変動は(a)のようにUrsell数が大きいと波の峰では双峰形をなし、谷では平坦となるため、微小振幅波による地盤の変動特性と大きく異なったものとなることがわかる。地盤の液状化は波の谷あたりで生じ、その深さは微小振幅波で求めた方が大きく表れている。

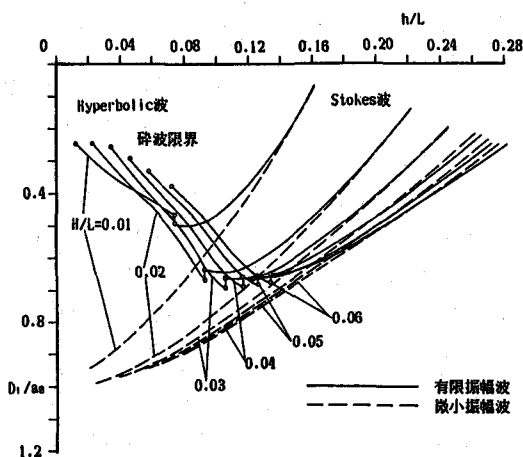


図-4 波浪特性による海底地盤の液状化深さ

3・2 波浪及び地盤特性による液状化深さの変化

図-4は、波浪特性による液状化深さの変化を示したものである。縦軸は液状化深さと波圧の振幅の比 D_1 / a_0 、横軸は相対水深 h/L 、パラメータは波形勾配 H/L を示している。図中の破線は微小振幅波、実線は有限振幅波によるものである。

微小振幅波による液状化深さの変化は相対水深が減少するに伴い増加しているが、有限振幅波では $Ur < 25.0$ のStokes波では液状化深さは増加し、ピークに達し、 $Ur > 25.0$ のHyperbolic波では減少しており、相対水深が減少するに従い凹形の曲線になっている。これらは、いずれの波形勾配においても同様な傾向にあるが、波形勾配が大きいほど、微小振幅波では液状化深さは大きく現れており、有限振幅波では液状化深さのピーク

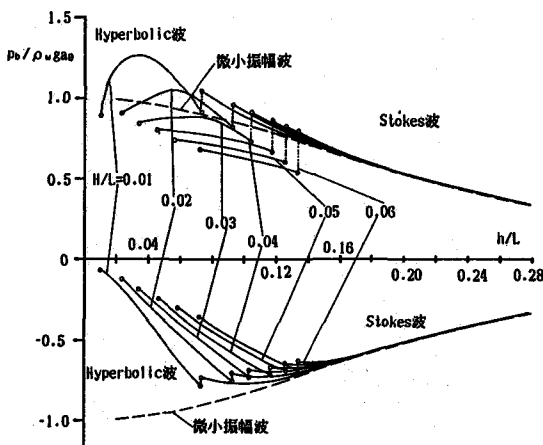


図-5 波浪特性による海底面の最大、最小波圧

に達する相対水深の値が 大きくなることからわかる。

このような液状化深さの変化の原因を見るために、図-5 は海底面波圧の最大、最小値の変化を示したものである。縦軸は波圧 $p/\rho_w g a_0$ をとっている。

海底面波圧の変化は、相対水深が減少するに従い、最大波圧はどちらかといえば増加するが、最小波圧は Stokes 波では増加し、Hyperbolic 波では減少することがわかる。このことから、有限振幅波による地盤の液状化深さの変化が、海底面の最小波圧の変化と同様な傾向にあり、密接な関係にあることがわかる。

図-6 は、地盤特性による液状化深さの変化を示したものである。縦軸は液状化深さ、横軸は地盤の特性を示す無次元量である。(a)~(d) は順に地盤の空気、水の含有率、透水係数及び地盤骨格の圧縮係数による変化を示している。

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、透水係数が小さいほど大きくなることわかる。また、波形勾配が大きく、相対水深が小さいほど、微小振幅波により求まる液状化深さは有限振幅波によるものより大きな値を示し、大きく異なることがわかる。

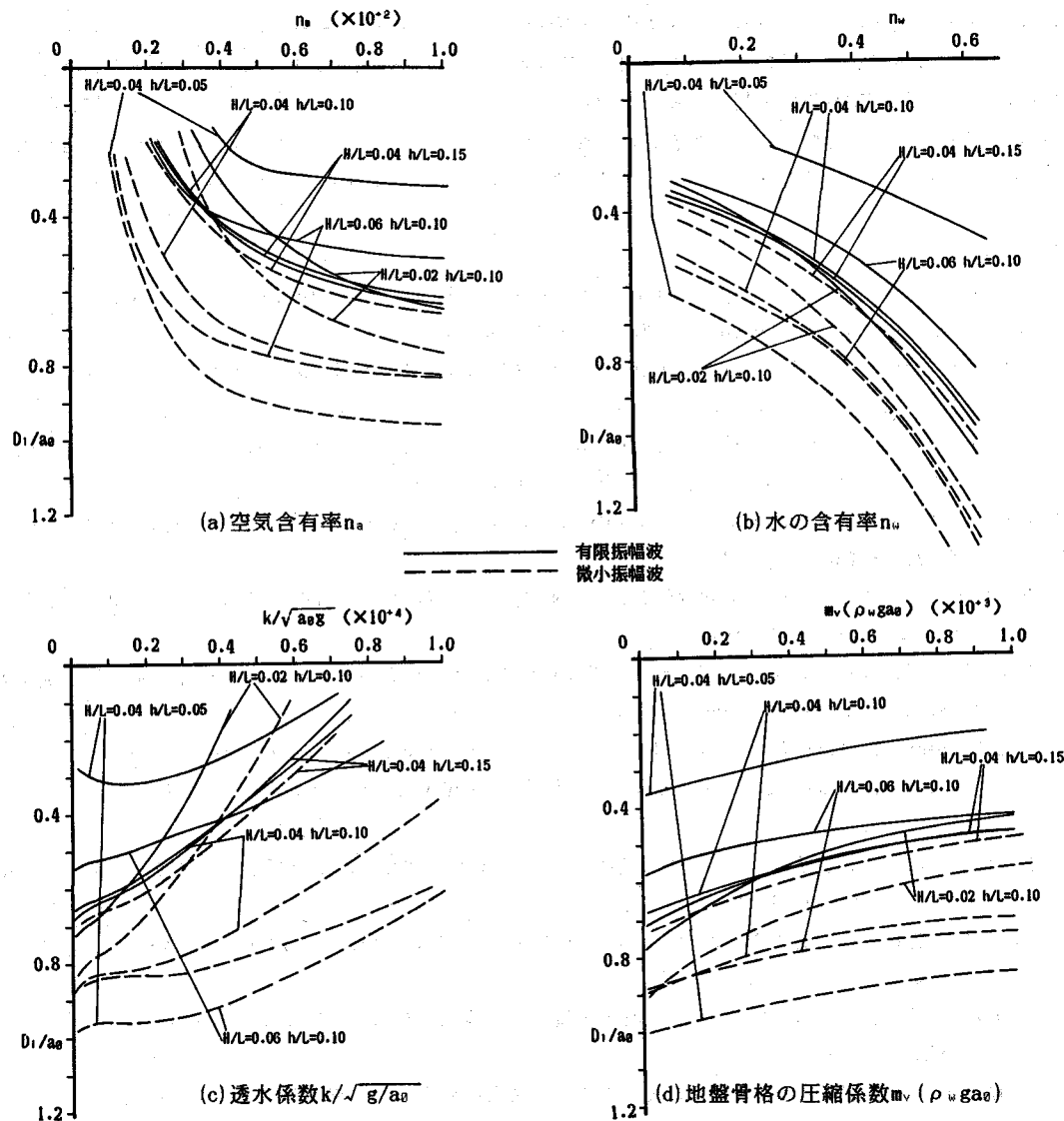


図-6 地盤特性による液状化深さ

図-7は排水係数、伝達係数による地盤の液状化深さの変化を示している。縦軸は液状化深さ、横軸は排水係数 C 、パラメータは伝達係数 α である。

排水係数が増加するに従い、液状化深さは減少する傾向にあるが、伝達係数が小さいほど、この傾向は強く現れることがわかる。また、他の波浪特性についても、これと同様な傾向が認められた。

4. 結言

有限振幅波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、上述したように種々のことが明かとなった。ただし、ここでの解析結果は、鉛直1次元モデルによるものであり、水平方向の影響を無視したものとなっている。特に、酒井ら¹¹⁾は波が浅海域に進行し、波の峰で尖り谷で平坦になるような場合、波が谷から峰へ立ち上がる時に、海底地盤に水平せん断破壊の生じる可能性のあることを示しており、この点についてもさらに検討を進めたいと考えている。

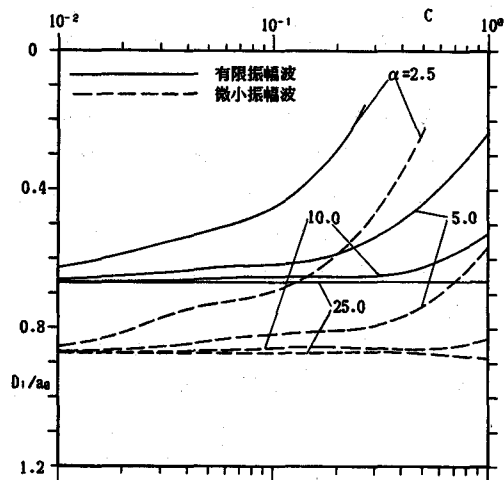


図-7 排水係数、伝達係数による
液状化深さ
($H/L=0.04, h/L=0.10, Ur=40.0$)

参考文献

- 1) Putnum, J.A.: Loss of wave energy due to percolation in a permeable sea bottom. Trans., Am. Geophysical Union, Vol.30, pp.349-356, 1949.
- 2) Madsen, O.S.: Wave-induced pore pressures and effective stress in a porous bed, Geotechnique, Vol.28, No.4, pp.377-393, 1978.
- 3) Yamamoto, T., Koning, H., Sellmeijer, H., Hijum, E.V.: On the response of a poroelastic bed to water waves. J. Fluid Mech. Vol.87, No.1, pp.193-206, 1978.
- 4) Okusa, S.: Wave-induced stresses in unsaturated submarine sediments, Geotechnique, Vol.32, No.3, pp.235-247, 1985.
- 5) 桑原久実・玉井佐一: 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, 海洋開発論文集, Vol.6, pp.199-204, 1990.
- 6) 桑原久実・玉井佐一: 波圧の時間変動の上下非対称性による海底地盤の動的応答特性, 海岸工学論文集, Vol.37, pp.399-403, 1990.
- 7) Nago, H., Maeno, S.: 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, 1987.
- 8) 善 功企・山崎浩之・渡辺 篤: 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, 1987.
- 9) 光易 恒・広本文泰: 波による水中圧力の変動について, 第12回海岸工学講演会講演集, pp.84-91, 1965.
- 10) 岩垣雄一・塩田啓介: ハイパボリック波の表現式の再検討, 第26回海岸工学講演会論文集, pp.31-35, 1979.
- 11) 酒井哲郎・畑中克也・間瀬 肇: 波浪による砕波帯海底面近くの地盤の挙動, 海岸工学論文集, Vol.37, pp.733-737, 1990.