

波浪による砂層の液状化傾向と波形勾配との関係

舞鶴工業高等専門学校	土木工学科	前野 賀彦	
京都大学	工学部	土木工学科	酒井 哲郎
京都大学	工学部	土木工学科	間瀬 肇

I. まえがき

砂地盤上の海洋構造物や消波ブロックの沈下現象の原因、また地盤の洗掘の原因として、繰り返し载荷による残留過剰間隙水圧の上昇による液状化とは異なり、波浪により引き起こされる砂層表面の波圧変動と砂層中の間隙圧変動との差圧が、砂層の有効土被り圧よりも大きくなることによる砂層表面の有効応力の減少として定義される液状化が考えられている。この種の液状化については、すでに、善・山崎・渡辺¹⁾が提案しており、アクリル円筒中の砂層に変動水圧を作用させて、軽量構造物としてピンポン玉を、重量構造物として矩形アルミ塊を用いて、それらがそれぞれ浮上および沈下することを実験的に示し²⁾、このような液状化の存在を確認した。また、大草³⁾は、波浪による有効応力の変動成分と水中有効土被り圧を用いた地盤の液状化条件を示している。一方、Biotの圧密理論に基づく海底地盤の間隙圧および有効応力の理論が多く提案されており^{1), 3), 5)}、著者らもBiotの式における加速度項と重力項の効果を検討している⁶⁾。

本論文では、著者らの一人⁴⁾により提案されている波浪により引き起こされる砂層内の間隙圧の発達特性に関する実験式を用いて、善らの定義に従い、液状化が発生する可能性のある範囲の推定を試みた。また、提案されている理論の妥当性の検討のためにも、それらの理論により得られる液状化範囲と実験式から得られる液状化範囲との比較を行った。

II. 波浪により引き起こされる海底地盤の液状化

Zen & Umehara⁷⁾ は、防波堤下の砂層地盤の液状化に関する一連の研究を行い、海洋構造物を介して波力が海底地盤に作用する問題について検討を行った。その後、善・山崎・渡辺¹⁾は、海底地盤が、直接波浪作用を受ける場合について、有効応力の概念に基づいて地盤の液状化の検討を行っている。それによれば、地盤の液状化と高密度化を引き起こす原因として、有効土被り圧、地盤表面の波圧変動振幅および地盤中の間隙圧変動振幅を挙げしており、液状化条件として次の式を示した。

$$\sigma_v' = \sigma_{v0}' + (P_b - P_m) \leq 0 \quad (1)$$

$$\sigma_{v0}' = \gamma' z \quad (2)$$

$$\gamma' = (1-n)(\rho_s - \rho_w)g \quad (3)$$

また、Mei & Foda⁵⁾ および Okusa³⁾ は、波浪により引き起こされる多孔質海底地盤内の有効応力に関する研究において、波浪による海底地盤の液状化条件を次のように示した。

$$\sigma_v' = \gamma' z + \sigma_v \leq 0 \quad (4)$$

ここで、 σ_v' は有効鉛直応力、 σ_{v0}' は有効土被り圧、 σ_v は有効鉛直応力変動分、 P_b は地盤表面の波圧変動振幅、 P_m は地盤中の間隙圧変動振幅、 γ' は砂の水中単位体積重量、 z は地盤深度、 n は間隙率、 ρ_s は砂粒子の密度、 ρ_w は水の密度、 g は重力加速度である。

ここでは、Maeno & Hasegawa⁴⁾が提案している波浪による砂層内の間隙圧の発達特性に関する実験式を用い、液状化する砂層地盤深度を求める。さらに、Maeno & Hasegawa⁸⁾が提案している手法を用いて、実験条件に対応した砂層の土質条件を定め、それらの数値を用いてBiotの圧密理論に基づくYamamoto⁹⁾の理論解を求め、先に示した各液状化条件により推定される液状化する砂層地盤深度を計算し、実験式により推定される値との比較を行った。

III. 砂層内の間隙圧の発達特性に関する実験式

Maeno & Hasegawa⁴⁾は、波浪による砂層内の間隙圧の発達特性が、波浪条件として波形勾配、地盤条件として

排水特性（密度）により整理されることを示し、次式に示す実験式を提案した。

$$P_z/P_s = -A \{ \log(H/L) + 3 \} + B_0 \exp\{-B_1(z/D_s)\} \quad (5)$$

$$P_s = \frac{\rho g H}{2 \cosh(N D)} + \frac{3 \rho g N H^2 \tanh(N D)}{16 \sinh^2(N D)} \left[\frac{1}{\sinh^2(N D)} - \frac{1}{3} \right] - \frac{\rho g N H^2 \tanh(N D)}{16 \sinh^2(N D)} \quad (6)$$

ここで、 P_z は砂層深度、 z における間隙圧変動振幅、 P_s は第2次近似のストークス波理論による地盤表面の推定波圧変動振幅である。また、 D は水深、 H は波高、 L は波長、 N は波数、 D_s は砂層厚である。また A 、 B_0 、 B_1 は、実験パラメータである。これらの実験パラメータは、砂層の密度との間に関係が認められることから、それぞれ図-1、2および3に示した。詳細については、原論文を参照されたい。

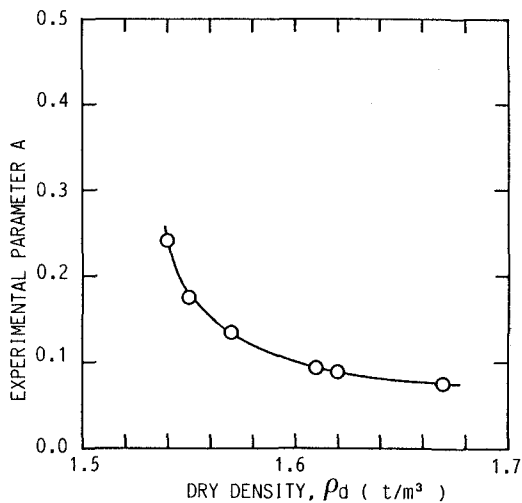


図-1 係数Aと砂層密度との関係

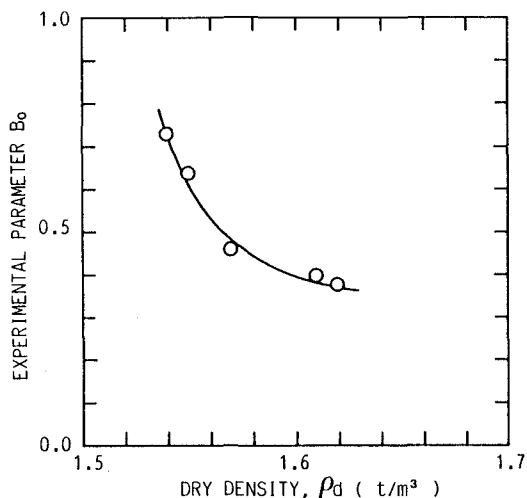


図-2 係数B0と砂層密度との関係

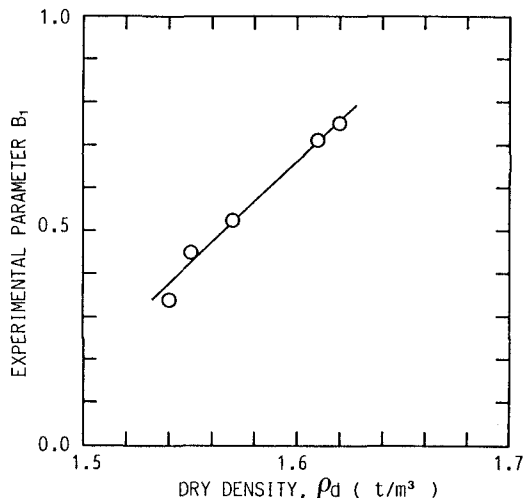


図-3 係数B1と砂層密度との関係

IV. 理論計算に用いる土質パラメータの推定

Maeno & Hasegawa⁴⁾ の示した実験データを用いた波浪による砂層の液状化条件の検討において、Biotの圧密理

論に基づいた多孔質海底地盤の有効応力および間隙圧の理論値の計算に当たっては、その実験条件に対応した土質パラメータが必要となる。そこで、Maeno & Hasegawa³⁾ が提案している土質パラメータの推定手法を以下に示すことにする。この手法は、間隙圧の減衰特性が各種土質特性値との間に相関を有していることから、間隙圧の減衰特性に関する理論モデルを次式のように導き、実験および現地観測により得られた間隙圧の減衰特性と比較して、土質特性値を推定するものである。

$$P = \frac{K_f(K_s - K_c)}{nG(K_s - K_f)[-N^* + i(1+m)\omega^*]} \{-[(1-Nz)(1+m) + m(1-2\nu)](-N^* + i\omega^*)\exp(-Nz) + mN^*\exp(-Nz)\} T \quad (7)$$

$$T = P_0 \exp[i(Nx + \omega t)] \quad (8)$$

$$N'^2 = N^2 + i\omega' \quad (9)$$

$$\beta = \frac{(1-\nu)}{(1-2\nu)} \quad (10)$$

$$\omega' = \omega/c \quad (11)$$

$$\omega^* = \beta(\omega'/N^2) \quad (12)$$

$$c = \frac{(k/\gamma)}{\{n/K_f' + (1-2\nu)/[2G(1-\nu)]\}} \quad (13)$$

$$m = \frac{nG}{K_f'(1-2\nu)} \quad (14)$$

$$N^* = \frac{(N' - N)}{N} \quad (15)$$

$$1/K_f' = 1/K_f + (1-S_r)/P_a \quad (16)$$

$$K_c = \frac{2(1+\nu)}{3(1-2\nu)} G \quad (17)$$

ここで、 P_a は砂層表面における波圧変動振幅であり、 N 、 ω 、 i はそれぞれ波数、角振動数、虚数単位である。 K_f' は見かけの流体の体積弾性係数であり、 K_c 、 K_s および K_f はそれぞれ混合体の体積弾性係数、土粒子骨格を構成する鉱物の体積弾性係数、流体の体積弾性係数である。また、 γ 、 k 、 n 、 P_a はそれぞれ間隙水の単位体積重量、透水係数、間隙率、絶対間隙水圧である。

この場合、間隙圧の減衰特性として、現地観測においては不規則波浪であることから、波圧変動と間隙圧変動のスペクトル比を用い、造波水槽による室内実験においては、砂層表面の波圧変動振幅の推定値 P_s で除した間隙圧変動振幅 P_z/P_s と周波数 f との関係を用いた。以後、この無次元間隙圧変動振幅を圧力の透過比と呼ぶことにする。(7)式中の土質パラメータの値の内、既知のものおよび土質の相違による値の変動の範囲が狭いものは予め与えるものとして、Table 1 に示した。

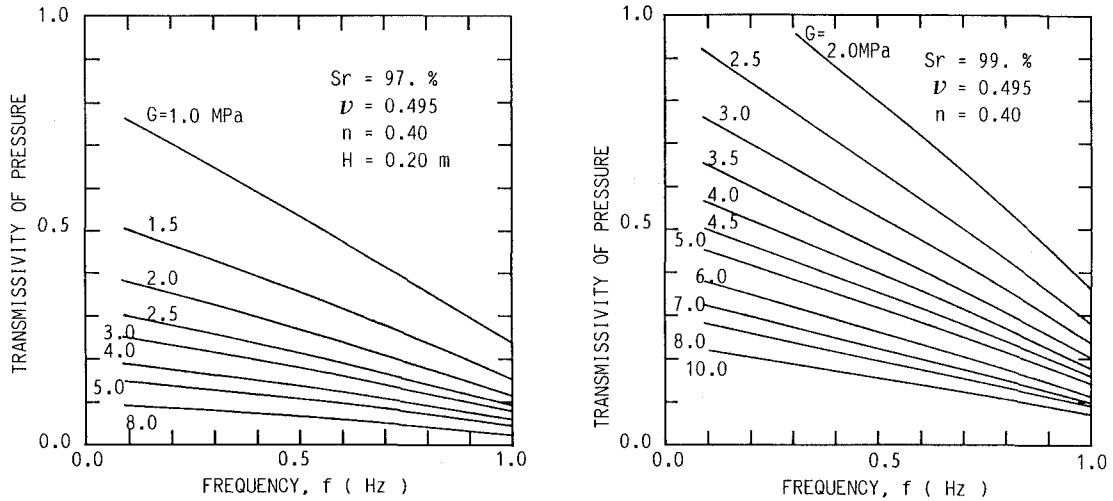
Table 1. Soil Parameters Used in Analyses.

Permeability, k	0.023	cm/s
Porosity, n	0.40	
Poisson's ratio, ν	0.495	
Bulk modulus of fluid, K_f	2.0	GPa
Bulk modulus mineral grains, K_s	36.0	GPa

最終的に、飽和度 S_r とせん断剛性率 G の両者を与えることにより、(7)式の間隙圧変動の周波数に対する減衰特性を求めることができる。なお、(7)式の理論モデルでは、砂層表面付近の地盤を対象としていることから、無限厚の砂層地盤に対応したモデルとしたが、有限厚の砂層地盤に対応したモデルに修正することは容易である。したがって、(7)式により得られる周波数に対する間隙圧の減衰曲線が、実験で得られた圧力の透過比と周波数との関係に最もよく一致するときの飽和度とせん断剛性率を推定値とする。しかしながら、試行錯誤を繰り返すことは効率的でないので、作業の簡便のため変動域が狭い飽和度の値をいくつか仮定して、代表的なせん断剛性率の

値について予め間隙圧の減衰曲線群を求めた。これらの減衰曲線図中から実験における圧力の透過比と周波数の関係に最もよく一致する減衰曲線を選び、それに対応するせん断剛性率 G と飽和度 S_r の値を推定することにした

今回の実験においては、飽和度の高い実験砂層を作成したことから、推定される飽和度の範囲がほぼ97%から99%の範囲にあるものと考えられるので、飽和度 $S_r=97\%$ と $S_r=99\%$ の場合について、各せん断剛性率に対応する(7)式の減衰曲線群を図-4に示した。



(a) 飽和度 $S_r=97\%$

(b) 飽和度 $S_r=99\%$

図-4 理論モデルによる砂層内間隙圧の減衰曲線

理論値との比較に用いた実験条件における圧力の透過比と周波数との関係は、図-5に示してある。それと最もよく一致する減衰曲線を、図-4(a)、(b)のそれぞれより選択して、飽和度 $S_r=97\%$ に対しては $G=2.51\text{MPa}$ 、飽和度 $S_r=99\%$ に対しては $G=7.53\text{MPa}$ と推定した。

図-6に、砂層内の間隙圧に関する実験値と理論推定値との比較を示した。それによると、実験式による減衰曲線は実測値よりも全体的に低いものとなっているが、砂層表面付近における急激な間隙圧の減衰特性とその後の直線的な減衰特性をよく再現している。ただし、砂層表面ではこの実験式は適用外となる。また、Biotの圧密理論に基づくYamamoto⁹⁾の理論曲線は、飽和度 $S_r=97\%$ でせん断剛性率 $G=2.51\text{MPa}$ のとき、実測値と砂層深部で一致しているが、砂層表面付近では減衰特性に相当の相違が認められる。また、飽和度 $S_r=99\%$ で $G=7.53\text{MPa}$ の理論曲線は、相当実測値と掛け離れたものとなっている。

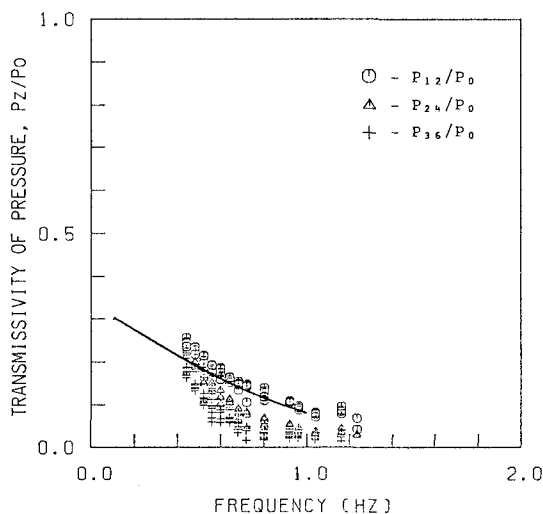


図-5 圧力の透過比と周波数との関係

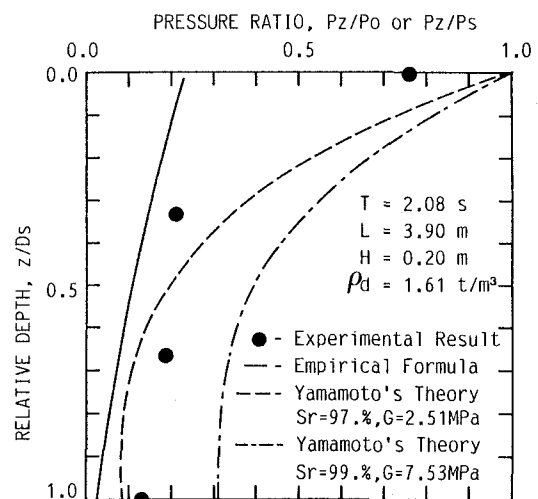


図-6 砂層内間隙圧に関する理論と実験との比較

V. 波浪による砂層内の液状化深度

以上示した手法により推定されたYamamotoの理論値とMaeno & Hasegawa⁴⁾の提案した実験式を用いて得られる波浪による砂層の液状化深度の検討を行う。

まず、Maeno & Hasegawaの実験式により得られる P_z を(1)式中の P_m に代入して推定した砂層内液状化深度 z と波の周期および波高との関係を、図-7および8に示した。それによれば、周期の増加に伴い液状化深度 z は増加傾向にあり、周期3秒以上では一定値に漸近している。また、その傾向は波高が大きい程顕著である。一方液状化深度は波高の増加に伴い増加傾向にあり、その傾向は周期が長くなるに従い顕著になる。このように液状化深度が波高と周期の両者に依存していることから、図-9に波形勾配との関連で整理した。それによれば、液状化深度は、ある一つの周期に注目すれば、波高が大きくなるに従って大きくなっていることが読み取れ、また一つの波高に注目すれば、周期が長くなるに従って大きくなっていることが読み取れる。

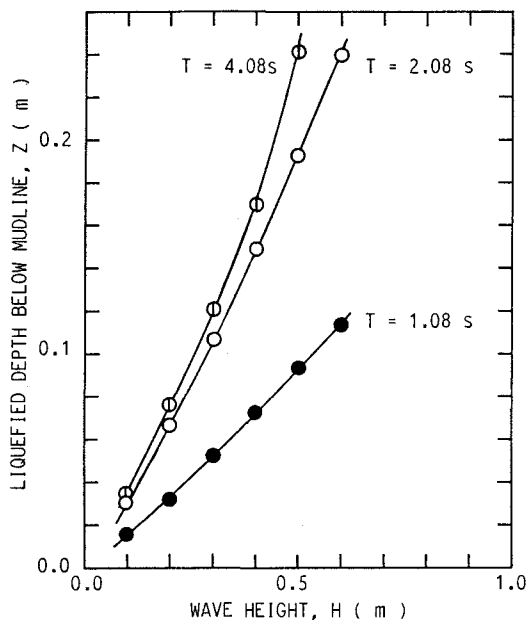


図-7 砂層内液状化深度と周期との関係

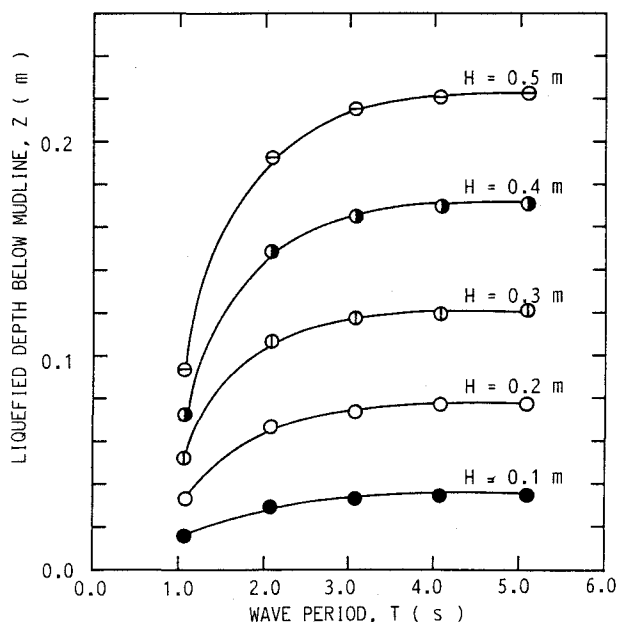


図-8 砂層内液状化深度と波高との関係

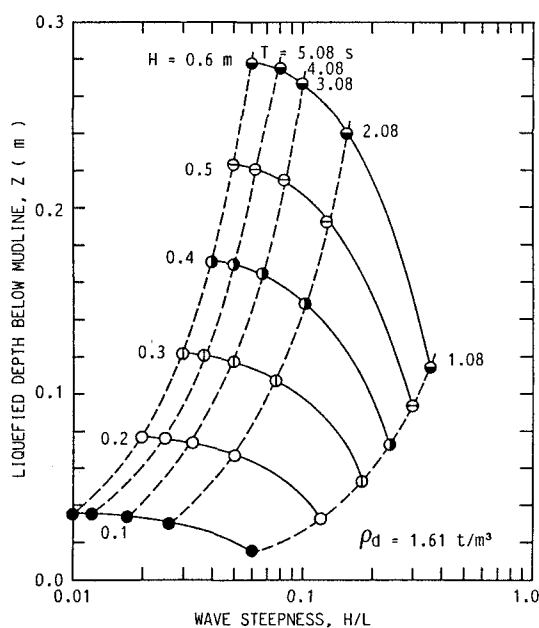


図-9 砂層の液状化深度と波形勾配の関係

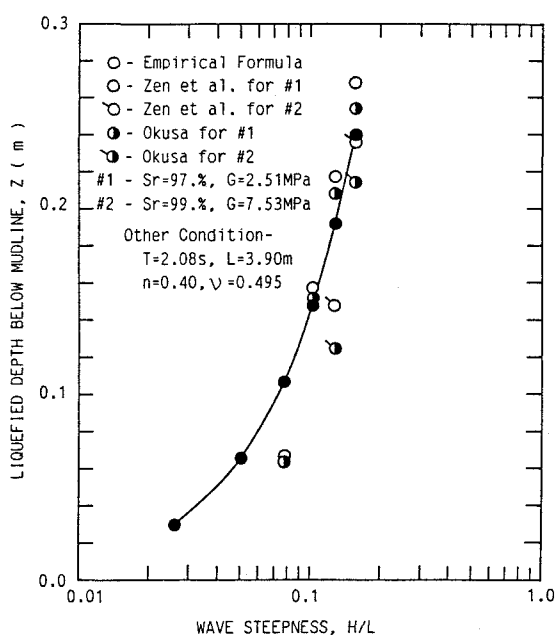


図-10 液状化深度に関する理論と実験式の比較

Yamamotoの理論を用いて推定された砂層中の間隙圧変動振幅および鉛直応力を、それぞれ(1)、(4)式に代入して得られる液状化深度 z と実験式による結果との比較を図-10に示す。これによると、小さな波形勾配では、両者はあまり一致していない。すなわち理論値の方が小さい値となっているが、波形勾配が大きくなるに従って理論値は実測値と一致する傾向にある。どちらかという、飽和度 $S_r=97\%$ でせん断剛性率 $G=2.51\text{MPa}$ の場合における理論値の方が、 $S_r=99\%$ の場合に比べて全体的に一致しているようである。しかし、波形勾配が大きい場合には、 $S_r=99\%$ で $G=7.53\text{MPa}$ の場合でもよい一致を示している。また、善ら¹⁾の定義による液状化範囲の方が、Okusa³⁾による定義による液状化範囲よりも大きくなる傾向にあり、その傾向は波形勾配が大きくなるに従って顕著となっている。この場合周期が一定であるので、波形勾配の変化は波高の変化とみなすことができる。

VI. まとめ

以上の考察の結果、次のような結論を得た。

(1) Maeno & Hasegawaの提案した波浪による砂層内の間隙圧の発達特性に関する実験式を用いることにより、砂層内の液状化深度と波形勾配、周期、波高との関係が得られ、これによると液状化深度は波高が大きくなるに従って、また周期が長くなるに従って増加する。ただし、周期が3秒以上になると液状化深度の増加傾向は目立たなくなる。

(2) Maeno & Hasegawaの提案した土質パラメータの推定手法に基づき得られた値と、Biotの圧密理論に基づくYamamotoの理論解を用いて推定される砂層の液状化深度は、実験式に基づく推定値と比べて、小さな波形勾配では相当小さいものとなるが、大きな波形勾配、ここでは $H/L > 0.1$ では良い一致を示す。

(3) 善ら¹⁾の定義による砂層の液状化深度の方が、大草³⁾、Mei & Foda⁵⁾らによる定義によるものより大きな値を示し、その傾向は波形勾配が大きくなるに従って顕著となる。

参考文献

- 1) 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、港湾技術研究所報告、第26巻、第4号、1987、pp.125-180.
- 2) 善功企・山崎浩之・渡辺篤：波浪による海底地盤の液状化現象の実験的検証、土木学会第42回年次学術講演会講演概要集、pp.130-131、1987.
- 3) Okusa, S.: "Wave-Induced Stress in Unsaturated Submarine Sediments, Geotechnique," Vol.35, No.4, 1985, pp.517-532.
- 4) Maeno, Y. and Hasegawa, T.: "Evaluation of Wave-Induced Pore Pressure in Sand Layer by Wave Steepness, Coastal Engineering in Japan, JSCE, Vol.28, 1986, pp.123-136.
- 5) Mei, C.C. & Foda, M.A.: "Wave-Induced Stresses around a Pipe Laid on a Poro-Elastic Sea Bed," Geotechnique, Vol.31, No.4, 1981, pp.509-517.
- 6) Sakai, T., Mase, H., and Matsumoto, A.: "Effects of Inertia and Gravity on Seabed Response to Ocean Waves," Modelling Soil-Water-Structure Interactions, Kolkman et al. (eds), 1988, pp.61-66, Balkema, Rotterdam.
- 7) Zen, K., and Umehara, Y.: "Analysis on Wave-Induced Pore Pressure in Sand Layers under Breakwater," Proc. of Int. Sympto. on Ocean Space Utilization, Vol.1, 1985, pp.467-474.
- 8) Maeno, Y. & Hasegawa, T.: "Evaluation of Wave-Induced Pore Pressure in Saturated Sand Bed," Coastal Hydrodynamics, ASCE, pp.686-700, 1987.
- 9) Yamamoto, T.: "Wave Induced Instability in Seabeds," Proc. of ASCE Specialty Conference, Coastal Sediments '77, 1977, pp.898-913.