

波浪による碎波帯海底地盤の有効応力ゼロ領域の発生

京都大学工学部 正会員 酒井 哲郎
(株)間組 服部 明彦
京都大学工学部 正会員 間瀬 肇

1. まえがき

沿岸域の開発にともなう、海洋構造物を建設することは今後ますます増加すると考えられる。その場合水深がそれほど大きくなければ、程度の差はあっても海底地盤にその支持を期待することが多い。海底地盤の支持力の評価に当たっては、粘土地盤の場合は地盤を一相として全応力法を用いることが多い。一方砂地盤の場合には、地盤の支持力が有効応力によって評価されることを考えると、間隙水の存在を考慮した二相モデルが好ましい。

海底地盤を地盤骨格と間隙水からなる二相の媒質と考えて、波浪による地盤の応答を扱った研究は既に10年前からあり、Yamamoto(1977), Madsen(1978), Nago and Maeno(1984) さらにOkusa(1985) が挙げられる。これらの研究では、いずれも結果的には圧密の基礎式である Biot(1941) 型の式を用いている。一方 Mei and Foda(1981) は、Biot 型の式が複雑なことから、mixture theory を用い、彼らの言う boundary layer approximation を用いてより簡単に解を導いた。

以上全ての研究においては、Biot(1941) の圧密の基礎式と同様に、地盤骨格と間隙水の加速度および重力の効果は無視されている。著者らは、上述の Mei and Foda(1981) の boundary layer approximation と同様の扱いによって、地盤骨格と間隙水の加速度項を含めた二相モデルの解を求め、その解を用いて加速度の効果を検討した結果を既に発表している(酒井・間瀬・松本(1988a))。また重力の効果についても重力項を加えた Biot 型の圧密の式を導き、有限要素法を用いてその効果を検討し、これも既に発表している(酒井・間瀬・松本(1988b))。

現実の海底地盤を考えると地盤定数は一様ではなく、上下方向に特性の異なった層をなしていることが多い。Yamamoto(1981) は、このような場合に対応するために自らの一様地盤に対する理論解(1977) を各層に適用し、層状の海底地盤の波浪応答を考えた。しかしその結果、解が接続面で急激に変化し、現実と一致しない事がわかった。有限要素法は、上下方向のみならず水平方向にも地盤定数が変化する非一様な地盤に対して適用可能である。昨年のこのシンポジウムでは、上述の Biot の圧密式の有限要素法解析により、非一様海底地盤の波浪による応答が計算できることを示した(酒井・間瀬・松本, 1988c)。

一方、海岸構造物の沈下に関して、波浪による間隙水圧変動の減衰と位相遅れによる地盤有効応力の減少がその原因であるという研究がある(名合(1982), 善(1985))。さらに善ら(1987) は、簡単な一次元の間隙水圧変動の式を用いて有効応力の減少に対する影響要因を検討するとともに、この考えを現地の海底地盤に適用して、有効応力が負になる地盤深さを計算している。しかしこの計算は一例に終わっており、一般的にどのような地盤条件および波浪条件の場合に有効応力が負になるかは明らかにされていない。昨年のこのシンポジウムでも、間隙水圧変動に関する経験式を用いた地盤有効応力のゼロ領域の計算例があるが、これも条件が限られており一般的ではない(前野ら, 1988)。

本研究では、上述の Mei and Foda(1981) による近似解を用いて、波浪および地盤に関する無次元パラメータと有効応力が負になる地盤深さとの関係を一般的に図示し、消波ブロック等の沈下深さ推定のための基礎資料とする。

2. 波浪による間隙水圧変動の近似解と地盤有効応力の変動

(1) 波浪による間隙水圧変動の境界領域近似解(Mei and Foda, 1981)

Mei and Foda は、Biot 型の圧密式が複雑なことから、mixture theory を用いて、地盤骨格と間隙水の連続式と運動方程式を、いくつかの仮定を用いて変形し、地盤骨格と間隙水の速度が等しいとして一相で扱う外部領域と、両者の相対速度が無視できない海底面近くの境界領域とで各々解を求め、両者の和を最終の解とする近似解法を示し、この結果は Yamamoto(1977) の厳密解とほとんど一致することを示した。上述の仮定には、微小変位の仮定、地盤骨格に関する線形弾性体の仮定(Hooke の法則)、間隙水におけるせん断応力の無視、間隙水圧と間隙水密度の線形関係の仮定、地盤骨格と間隙水の間の干渉力における Darcy 則の仮定、加速度と重力が無視できるという仮定が含まれる。

外部領域では、問題は正弦波状に変動する振動荷重が海底面を一定速度で移動する場合の弾性体の静的な変形という問題となり、既に解は求められている。一方境界領域では、問題は Terzaghi の1次元圧密の問題となる。両者の間隙水圧の解の和が海底面での波圧変動に一致することから、境界領域解の未知定数が決定される。海底面での波圧変動が微小振幅波理論による

$$p_b = p_0 \cdot \cos(\lambda x - \omega t) = 1/2 \cdot \rho_w g H / \cosh(\lambda h) \cdot \cos(\lambda x - \omega t) \quad (1)$$

で与えられる場合の間隙水圧変動は次式のように求められる。

$$p = p_0 \cdot 1/(1+m) \cdot \exp(-2\pi z/L) \cdot \cos(\lambda x - \omega t) \\ + p_0 \cdot m/(1+m) \cdot \exp\{-z/(\sqrt{2}\delta)\} \times \\ \times [\cos\{z/(\sqrt{2}\delta)\} \cdot \cos(\lambda x - \omega t) - \sin\{z/(\sqrt{2}\delta)\} \cdot \sin(\lambda x - \omega t)] \quad (2)$$

ここで、 p_0 ：海底面での波圧変動振幅、 ρ_w ：海水の密度、 g ：重力加速度、 H ：波高、 λ ：波数、 h ：水深、 x ：波の進行方向座標、 ω ：波の角周波数、 t ：時間、 z ：地盤深度（海底面を原点とし鉛直下向き正）、 L ：波長である。パラメータ m および境界領域厚さ δ は、次式で与えられる。

$$m = n/(1-2\nu) \cdot G/\beta \quad (3)$$

$$\delta = (KG/\beta)^{1/2} \cdot \{n \cdot G/\beta + (1-2\nu)/2(1-\nu)\}^{-1/2} \quad (4)$$

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）である。

式(2)の右辺第1項が外部領域解、第2項が境界領域解である。外部領域解は、波圧と同位相で地盤の深さ方向に減衰し、境界領域解は深さ方向に外部領域解よりかなり早く（ $\delta \ll L$ ）減衰すると共に、 δ のスケールで位相も変化することがわかる。両者の相対的な大きさはパラメータ m に依存し、 m が大きいほど境界領域解が支配的になる。

(2) 地盤有効応力の変動

海底地盤内のある点に働く鉛直全応力は、海底面付近では水中土被り圧と水圧の和として近似できる。水圧は、静水状態での静水圧と波圧変動の和として与えられる。一方間隙水圧は、静水状態での静水圧と間隙水圧変動の和として与えられる。有効応力は全応力と間隙水圧の差で与えられるので、

$$\text{地盤の鉛直有効応力} = \text{水中土被り圧} + \text{海底面での波圧変動} - \text{間隙水圧変動} = \gamma' z + p_b - p \quad (5)$$

となる（善ら(1987)）。ここで γ' は地盤骨格の水中単位体積重量である。

図-1 は、善ら(1987) の図-3 をそのまま示したものである。①の場合は波の谷での、②の場合は波の峯での間隙水圧を示している。(1)で述べたように間隙水圧変動は一般に深さ方向に減衰し、海底面での波圧変動よりその振幅が小さくなる。右の図の破線は水中土被り圧を示すが、波の谷の位相では式(5)の $p_b - p$ が負になり、海底面付近ではその絶対値が水中土被り圧より大きくなって、鉛直有効応力が負になる可能性があることを示している。

さらに詳しく検討するため、碎波帯の砂地盤を想定して、次のような条件で式(2)の間隙水圧変動を計算した。

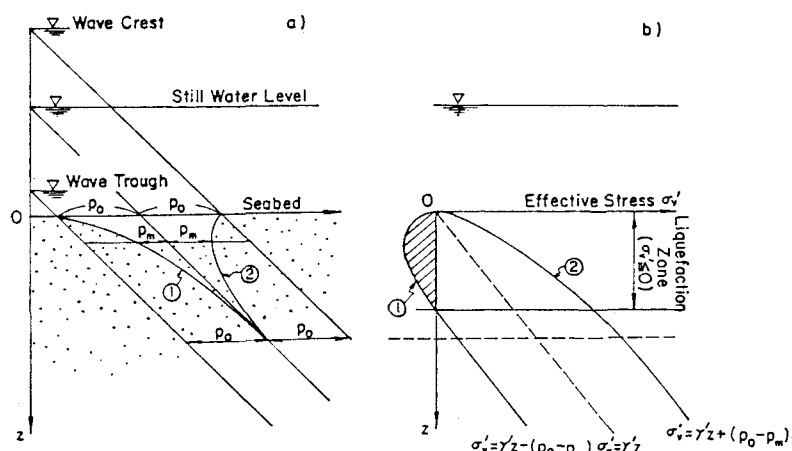


図-1 波浪による海底地盤内の鉛直有効応力の変動（善ら(1987)による）

波浪条件: $h = 4.0\text{m}$, $T = 7.0\text{sec}$, $H = 3.0\text{m}$,

地盤条件: $G = 1.0 \times 10^8 \text{N/m}^2$, $n = \nu = 1/3$, $\gamma' = 0.91 \text{gf/cm}^3$, $k = 2.8 \times 10^{-4} \text{m/sec}$.

ここで $T (= 2\pi/\omega)$ は波の周期である。間隙水の有効体積弾性係数 β は、間隙水の飽和度との間に経験的な関係があり (Mei, 1983), わずかな気体の混入によって大きく減少するとされている。完全飽和の場合は $\beta = 10^9 \text{N/m}^2$ であるのに対して, 1% の気体の混入によって 10^8N/m^2 に減少する。ここでは $\beta = 1.0 \times 10^7 \text{N/m}^2$ とし、図-2 の(1)に間隙水圧変動 p の鉛直分布を示す。ただし、 p は海底面での波圧変動の振幅 p_0 で無次元化されており、 $\theta = \lambda x - \omega t = 0$ は波の峯の位相である。

図からわかるように、間隙水圧変動は地盤深さ方向に急激に減衰するとともに、位相も変化している。一方図の(2)は、間隙水が完全飽和すなわち $\beta = 10^9 \text{N/m}^2$ の場合の結果である。図からわかるように、完全飽和の場合は、間隙水圧変動は地盤深さ方向にゆっくり減衰し、位相変化がない。

地盤深さ方向の位相変化は、図-1 に示した減衰とともに地盤骨格の鉛直有効応力が負になる可能性を高めるものである。(1)で述べたように、急激な減衰および位相変化とともに境界領域解によるものである。従って、間隙水の飽和度が減少してその有効体積弾性係数が減少すると、式(3)のパラメータ m が増加して相対的に境界領域解が支配的になり、鉛直有効応力が負になる可能性が増加することになる。一方境界領域解の減衰のスケールは、式(4)の δ で与えられる。 δ が小さいほど減衰が急激になり、鉛直有効応力が負になる可能性が増加する。式(4)からわかるように、 δ は地盤の透水係数 k に関係し、透水係数が小さいほど δ が小さくなって、地盤鉛直有効応力が負になる可能性が増すことになる。

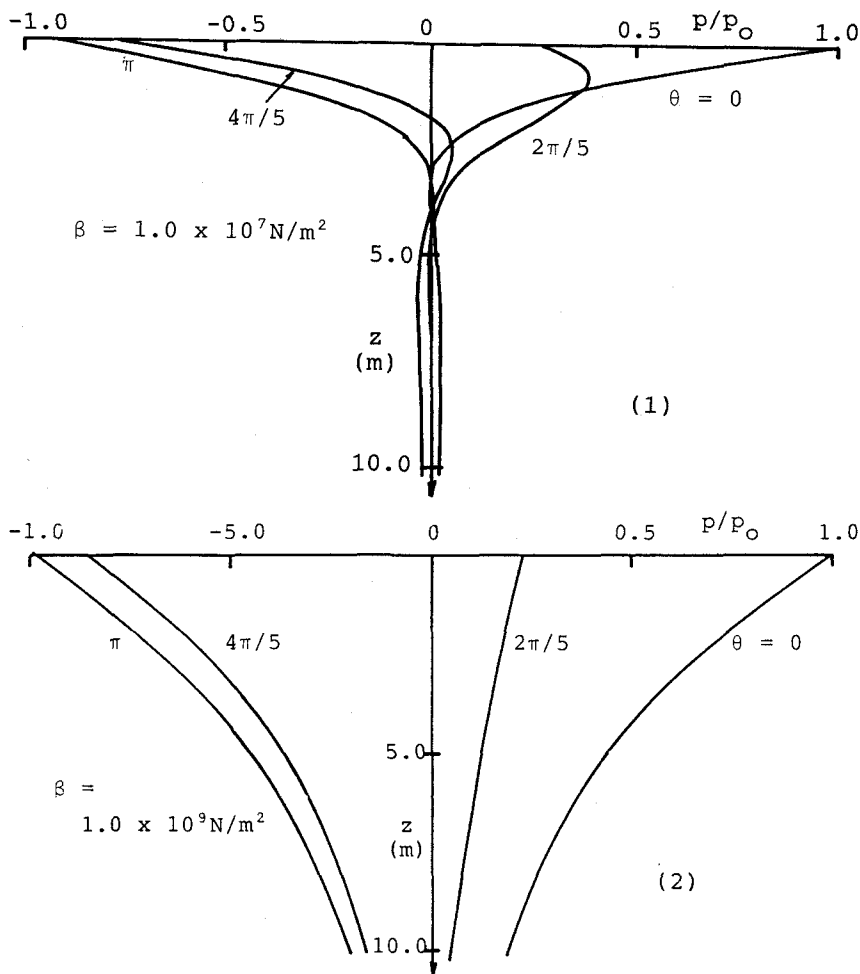


図-2 波浪による間隙水圧変動の鉛直分布の計算例

3. 砕波帯海底地盤の有効応力ゼロ領域の発生

式(1)~(5)を用いれば、海底地盤内のある点での鉛直有効応力の値を、波の1周期内の任意の位相で計算できる。ここでは砕波帯を想定し、図-2で用いた計算条件で具体的に計算する。ただし、間隙水の有効体積弾性係数に関しては、飽和度 99% を想定し $1.0 \times 10^8 \text{N/m}^2$ とする。計算条件の諸量のうち間隙率とポアソン比を除く各量の影響を検討するために、その量のみを変化させて有効応力ゼロ領域の発生およびその大きさの変化を調べた。図-3、(1)、(2)は、そのうち間隙水の有効体積弾性係数と透水係数の影響を示している。図から明らかなように、ここでの条件では海底面から最大約 1.5m 程度まで鉛直有効応力がゼロまたは負になる。また波の位相が谷の位相 ($\theta = 180^\circ$) の付近で有効応力が負になるが、かならずしも波の谷の位相で領域の深さが最大になるのではなく、やや遅れる。

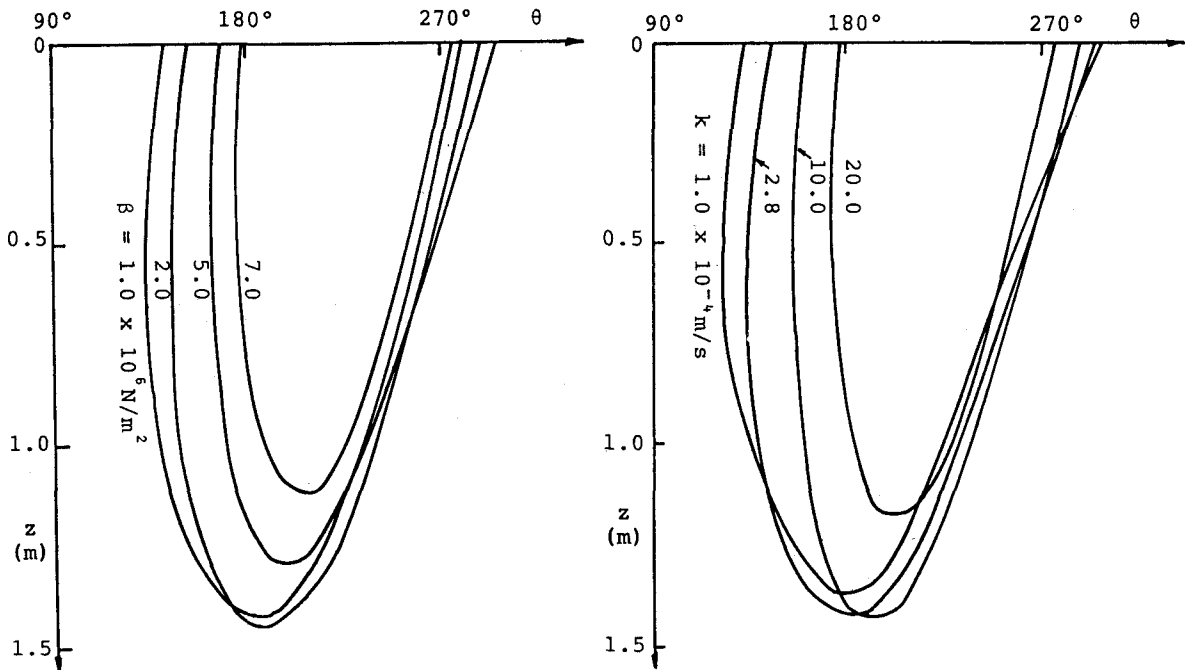


図-3 波浪による砕波帯海底地盤内の鉛直有効応力ゼロ領域に対する間隙水有効体積弾性係数と透水係数の影響

2. (2)で間隙水の有効体積弾性係数と透水係数の影響を議論したが、図-3の結果はそれと一致しており、間隙水の有効体積弾性係数が小さいほど、また透水係数が小さいほど有効応力ゼロ領域の大きさは増加する。他の諸量の影響に関しては、次のようになる。

- ① 地盤骨格の水中単位体積重量 γ' に関しては、式(5)から容易にわかるように、その値が小さいほど領域の大きさが増加する。
- ② 地盤骨格のせん断弾性係数 G に関しては、その値を変化させても領域の大きさはほとんど変化しない。
- ③ 水深 h に関しては、その値が減少するほど領域の大きさは大きくなるが、その程度は波の周期および波高に比べて小さい。
- ④ 波の周期 T に関しては、その値が大きくなるほど領域の大きさは増加する。
- ⑤ 波高 H に関しては、その値が大きくなるほど領域の大きさは増加する。

以上検討した諸量のうち、間隙水の有効体積弾性係数、透水係数、地盤骨格の水中単位体積重量、波の周期および波高に関しては、式(1)～(5)および2. (2)の議論から理解できるが、地盤骨格のせん断弾性係数および水深の影響に関しては、理解が困難である。せん断弾性係数に関しては、パラメータ m に対して間隙水の有効体積弾性係数とは逆の効果を有している。単純に考えると、せん断弾性係数の値が大きいほど m が大きくなって、境界領域解が支配的になり、鉛直有効応力がゼロになる領域の発生の可能性および大きさが増加すると考えられるが、計算結果ではほとんど変化しない。また、水深は波浪の浅水性を支配すると考えられ、波の周期とは逆にその値が小さくなるほど同じ波高に対して海底面での波圧が大きくなるため、有効応力ゼロ領域も大きくなると考えられる。計算結果でもそうになっているが、その変化の程度は波の周期のそれよりも小さい。このように単純に考えただけでは諸量の影響を明確にできないので、次に式(1)～(5)を無次元化し、海底地盤内の鉛直有効応力の値がゼロになる領域の大きさにおよぼす無次元量をすべて抽出するとともに、その影響を図示することを試みる。

4. 砕波帯海底地盤の有効応力ゼロ領域の発生および大きさを支配する無次元パラメータ

式(5)の p_b および p に式(1)および(2)を代入し、両辺を海底面での波圧変動の振幅 p_a で割って無次元化すると、次式の表現を得る。ただし、 σ_v' は鉛直有効応力であり、砕波帯を想定しているので、 $\cosh(\lambda h) \approx 1.0$ 、 $2\pi/\lambda \equiv \text{波長} \approx T\sqrt{gh}$ と近似している。

$$\sigma_v'/p_0 = 2 \cdot \gamma'/\rho_w g \cdot z/H + \cos \theta$$

$$- 1/(1+m) \cdot \exp(-2\pi z/L) \cdot \cos \theta$$

$$+ m/(1+m) \cdot \exp\{-z/(\sqrt{2}\delta)\} \cdot [\cos\{z/(\sqrt{2}\delta)\} \cdot \cos \theta - \sin\{z/(\sqrt{2}\delta)\} \cdot \sin \theta] \quad (6)$$

ここで, $\theta = \lambda x - \omega t$

$$m = n/(1-\nu) \cdot G/\beta \quad (7)$$

$$z/L = (T\sqrt{g/h})^{-1} \cdot H/h \cdot z/H$$

$$z/(\sqrt{2}\delta) = \{n \cdot G/\beta + (1-2\nu)/2(1-\nu)\}^{1/2} (kG/\rho_w g^2 Th)^{-1/2} \cdot z/L \quad (8)$$

上式からわかるように、無次元鉛直有効応力 σ_v'/p_0 は、地盤に関する無次元量 $\gamma'/\rho_w g$, n , ν , G/β および $kG/\rho_w g^2 Th$ と、波に関する無次元量 $T\sqrt{g/h}$ および H/h をパラメータとして、波の位相 θ と無次元深度 z/H の関数として与えられる。このうち地盤骨格の水中単位体積重量に関するパラメータ $\gamma'/\rho_w g$, 間隙率 n , ポアソン比 ν はそれほど大きく変化しない。また波に関する $T\sqrt{g/h}$ および H/h は、図-2 で用いた条件ではそれぞれ 11.0 および 0.75 となり、これらも砕波帯を対象とする以上それほど大きく変化しないと考えられる。

ここでは図-2 の計算条件を用いて、 $\gamma'/\rho_w g = 0.91$, $n = \nu = 0.33$, $T\sqrt{g/h} = 11.0$, $H/h = 0.75$ とする。残る2つの無次元パラメータの値は、図-3 で用いた計算の基準条件 ($\beta = 1.0 \times 10^8 \text{ N/m}^2$, $k = 2.8 \times 10^{-4} \text{ m/s}$) の場合は、それぞれ $G/\beta = 1.0 \times 10^2$, $kG/\rho_w g^2 Th = 1.0 \times 10^{-2}$ となる。この2つのパラメータの値を、それぞれ $1 < G/\beta < 10^3$, $10^{-3} < kG/\rho_w g^2 Th < 1$ の範囲で変化させた場合の、鉛直有効応力がゼロになる領域の深さ z_L の無次元量 z_L/H の値を図-4 に示す。この図から、全体の傾向として、 G/β が増加するほどまた $kG/\rho_w g^2 Th$ が減少するほど海底地盤の鉛直有効応力がゼロになる領域の深さが増加することが分かる。ただし詳細を見ると、両者が増加および減少するにつれ、一度最大値 0.49 に達したのち、若干減少して一定値 0.46 になる。

G/β の影響は、式 (1) からわかるように m を通して境界領域解の相対的な大きさに関係することによる。また $kG/\rho_w g^2 Th$ の影響は、式 (8) からわかるように、その二乗が境界領域厚さ δ に比例することによる。3. で述べた地盤骨格のせん断弾性係数 G が変化しても有効応力ゼロ領域の大きさが変化しない事実は、図-4 からわかるように、 G が変化しても縦軸と横軸のパラメータがともに変化し、図中の等 z_L/H 値線と平行に移動するためと考えられる。

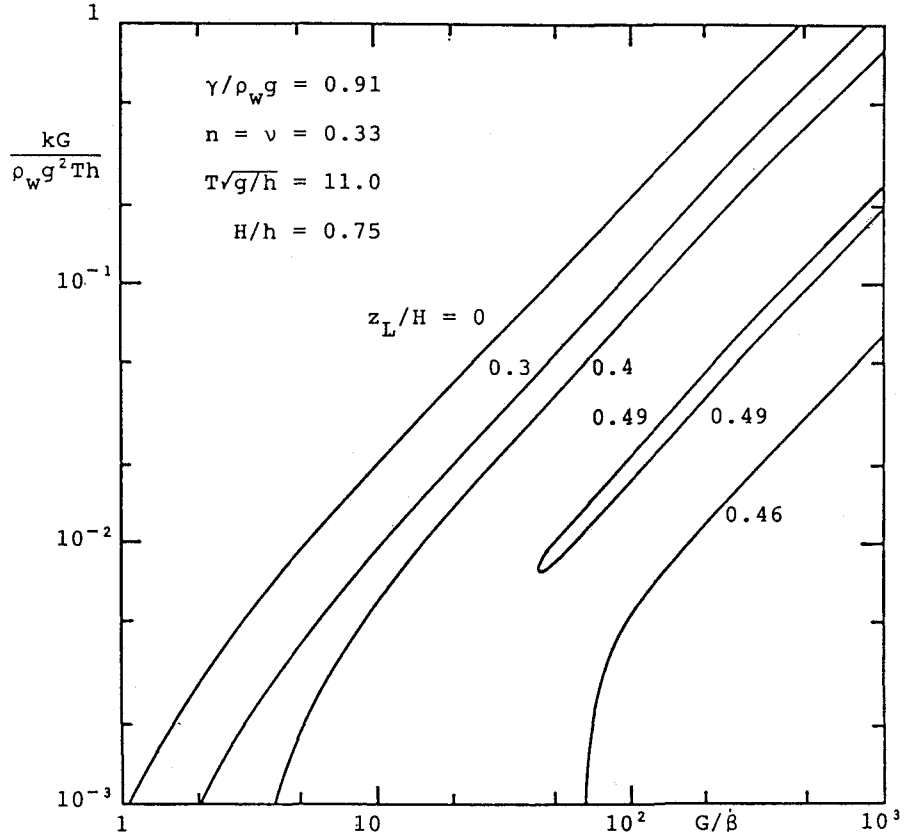


図-4 砕波帯海底地盤内の有効応力ゼロ領域の発生および大きさを支配する無次元パラメータ

5. あとがき

同様の図は、パラメータの値を変化させて容易に作成が可能である。ここで用いた無次元パラメータのうち、地盤骨格のせん断弾性係数 G および間隙水の有効体積弾性係数 β の値は、現実には測定が容易でない量であると思われるが、ここでは議論の明快さからこれらの量を用いた。以上の議論でわかるように、間隙水の有効体積弾性係数 β は有効応力の値をゼロにする2つの支配的な量の1つであるが、果して実際の砕波帯の海底地盤での β の値、したがって飽和度がどの程度の値を有するかは不明である。今後は、現地計測によってこの点を明らかにする必要がある。

この研究においては、名城大学理工学部岩垣雄一教授（京都大学名誉教授）および京都大学防災研究所土屋義人教授の有益な助言を得たことを記して感謝の意を表する。

6. 参考文献

- Biot, M.A. (1941) : General theory of three-dimensional consolidation, J. of Appl. Phys., Vol.12, pp. 155-164.
- Madsen, O.S. (1978) : Wave-induced pressures and effective stresses in a porous bed, Geotechnique, Vol. 28, pp. 377-393.
- 前野賀彦・酒井哲郎・間瀬 肇 (1988) : 波浪による砂層の液状化傾向と波形勾配との関係, 海洋開発論文集, 土木学会, Vol. 4, pp. 5-10.
- Mei, C.C. and Foda, M.A. (1981) : Wave-induced responses in a fluid-filled poro-elastic solid with a free surface - a boundary layer theory, Geophys. J. R. astr. Soc., Vol. 66, pp. 597-631.
- Mei, C.C. (1983) : The Applied Dynamics of Ocean Surface Waves, John Wiley & Sons, p. 679.
- 名合宏之 (1982) : 砂層内水圧変動と液状化, 1982年度（第18回）水工学に関する夏期研修会講義集, Aコース, 土木学会水理委員会, A-9.
- Nago, H. and Maeno, S. (1984) : Pore water pressure in sand bed under oscillating water pressure, Memoirs of the School of Engineering, Okayama Univ., Japan, Vol. 19, No. 1, pp. 13-32.
- Okusa, S. (1985) : Wave-induced stresses in unsaturated submarine sediments, Geotechnique, Vol. 35, pp. 517-532.
- 酒井哲郎・間瀬肇・松本明男 (1988a) : 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・間瀬肇・松本明男 (1988b) : 波浪による傾斜海底地盤の応答, 第35回海岸工学講演会論文集, 土木学会, pp. 737-741.
- 酒井哲郎・間瀬肇・松本明男 (1988c) : 地盤条件が非一様な海底地盤の波浪応答, 海洋開発論文集, 土木学会, Vol. 4, pp. 1-4.
- Yamamoto, T. (1977) : Wave induced instability in seabeds, Proc. of ASCE Special Conf. on Coastal Sediments '77, ASCE, pp. 898-913.
- Yamamoto, T. (1981) : Wave-induced pore pressures and effective stresses in inhomogeneous seabed foundations, Ocean Engineering, Vol. 8, pp. 1-6.
- 善 功企 (1985) : 波力を受ける構造物と海底地盤の動的挙動, 1985年度（第21回）水工学に関する夏期研修会講義集, Bコース, 土木学会水理委員会, B-4.
- 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, 港湾技術研究所報告, 第26巻, 第4号, 運輸省, pp. 125-180.