

海底地盤の波浪応答モデルの透水係数と 間隙水有効体積弾性係数

酒井 哲郎*・ 裏本 賢**・ 間瀬 肇***

1. はじめに

昨年の海岸工学講演会で、著者ら（酒井ら，1991）は、海底地盤の波浪応答のモデルの1つである Mei and Foda (1981) の近似解に含まれる数多くのパラメータのうち、特に間隙水の有効体積弾性係数 β の値を推定するため、波浪による間隙水圧変動の現地観測を行い、 β の値としては $1.0 \times 10^8 \text{ N/m}^2$ 程度が最も観測結果を説明することを示した。しかし観測時の波高が小さかったので、さらに他の現地観測結果として善ら（1989）の現地観測結果を用いて同様の検討も行い、その場合は $1.0 \times 10^7 \text{ N/m}^2$ から $1.0 \times 10^8 \text{ N/m}^2$ の間にばらつくことが分かった。

昨年の講演会では、同様の現地観測として中田ら（1991）が、新潟西海岸での昭和61年から4年間にわたる結果を取りまとめている。ここではこの観測結果を用いて同様の検討を行う。ただしここでは海底地盤の透水係数 k を主として検討する。

2. 中田ら（1991）の現地観測

中田らは新潟西海岸の突堤、離岸堤及び潜堤の近辺の海底面波圧及び海底地盤内の2点での間隙水圧を観測した。観測は日本海の冬期暴浪時に実施した。全体で4ケースあり、水深は2.0mから7.4m、上側の間隙水圧の測定点は海底面下0.9mから2.0m、下側測点は2.0mから4.0mである。

中田らは善ら（1987）の考えにしたがって、海底面波圧 p_b と間隙水圧変動 p' の差 Δp が地盤骨格の鉛直有効応力の変動分と考え、波の峰が通過した後の負の値の絶対値 $(-\Delta p_t)_{\max}$ が土被り圧より大きいと一時的に地盤が液状化する可能性があるとして、 $(-\Delta p_t)_{\max}$ と海底面水圧波高（海底面波圧の両振幅の水頭換算値） H_p と周期 T の比 H_p/T ($\equiv V$) との関係調べた。

中田らは、ケース2, 3, 4の結果についてその論文の図-6に示している。図-1はケース2および4の結

果であり、 Δp_1 , Δp_2 は夫々上側および下側の観測点での $(-\Delta p_t)_{\max}$ を意味する。図の上側と下側では、海底面水圧波高の1/3有義値 $H_{p1/3}$ 及び有義波周期 $T_{1/3}$ が異なる。中田らは $(-\Delta p_t)_{\max}$ と $V \equiv H_p/T$ の間に直線関係が成立しているとして、図中にその回帰直線を示している。

中田らが $(-\Delta p_t)_{\max}$ を支配する量として海底面での水圧波高と周期の比を取ったのは、海底面波圧と間隙水圧変動の差が負の値で大きくなるのは、波の峰の後の波圧が急激に減少する位相であるという観測事実からであり、このことは、既に著者ら（酒井ら，1990b）が明らかにしている。 $(-\Delta p_t)_{\max}$ と $V \equiv H_p/T$ の間に直線関係が成立するかどうかは、波浪による間隙水圧変動の理論を用いれば容易に検証出来るはずである。ここではまずその検証を行う。

Case②

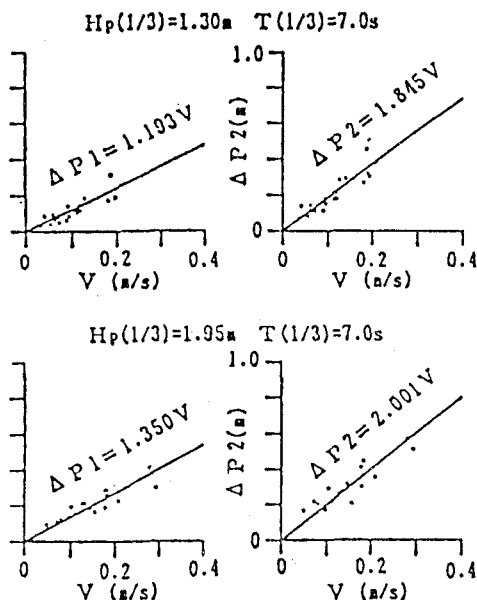


図-1 (1) $(-\Delta p_t)_{\max}$ と $V \equiv H_p/T$ の関係
(中田ら，1991) (ケース2)

* 正会員 工博 京都大学教授 工学部土木工学科

** 正会員 工修 (株)住友商事

*** 正会員 工博 京都大学助手 工学部土木工学科

Case④

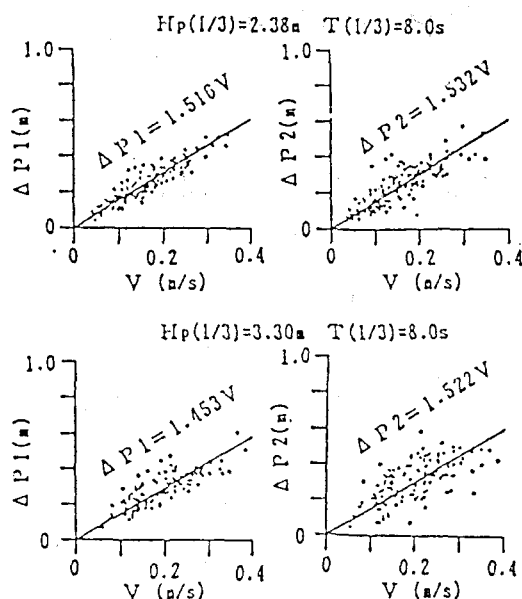


図-1(2) $(-\Delta p_t)_{\max}$ と $V \equiv H_p/T$ の関係
(中田ら, 1991) (ケース 4)

3. $(-\Delta p_t)_{\max}$ と $V \equiv H_p/T$ の間の関係

波浪による海底地盤内間隙変動の理論解として、ここでは Mei and Foda (1981) の境界領域近似解を用いる。海底面での波圧が p_0 が

$$p_0 = p_0 \cos \theta \quad \dots\dots\dots (1)$$

で与えられる場合、間隙水圧変動 p' は次式で与えられる。

$$p' = p_0 \frac{1}{1+m} \exp\left(\frac{2\pi z}{L}\right) \cos \theta + p_0 \frac{m}{1+m} \exp\left(\frac{z}{\sqrt{2}\delta}\right) \cos\left(\theta - \frac{z}{\sqrt{2}\delta}\right) \quad \dots\dots\dots (2)$$

ここで p_0 : 海底面波圧振幅, θ : 波の位相, L : 波長, z : 海底面を原点とする鉛直上向き座標であり、無次元パラメータ m と境界領域厚さ δ は次式で与えられる。

$$m = \frac{n}{1-2\nu} \times \frac{G}{\beta} \quad \dots\dots\dots (3)$$

$$\delta = \left(\frac{KG}{\omega}\right)^{1/2} \times \left\{\frac{nG}{\beta} + \frac{(1-2\nu)}{2(1-\nu)}\right\}^{-1/2} \quad \dots\dots (4)$$

ここで n : 海底地盤の間隙率, ν : 海底地盤骨格のポアソン比, G : 海底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, $K \equiv k/\rho_w g$, k : 海底地盤の透水係数, ρ_w : 水の密度, ω : 波の角周波数である。

海底面での波圧振幅は、微小振幅波理論で与えることにすると、

$$p_0 = \frac{1}{2} \frac{\rho_w g H}{\cosh\left(\frac{2\pi h}{L}\right)} \quad \dots\dots\dots (5)$$

ここで、 H : 波高, h : 水深である。

図-1 に例示した中田らの図-6 は全体で 12 の図からなっており、1つの図は、海底地盤内のある 1 点での間隙水圧変動の連続記録の 1 波ごとに H_p/T と $(-\Delta p_t)_{\max}$ を読み取ってプロットしたものと考えられる。式 (5) から、 H_p/T を変化させる量は周期 T と波高 H である。ここでは、他のパラメーターの値を一定にして周期と波高を変化させた場合の $(-\Delta p_t)_{\max}$ の値を計算する。一定としたパラメーターの値は、以下のとお

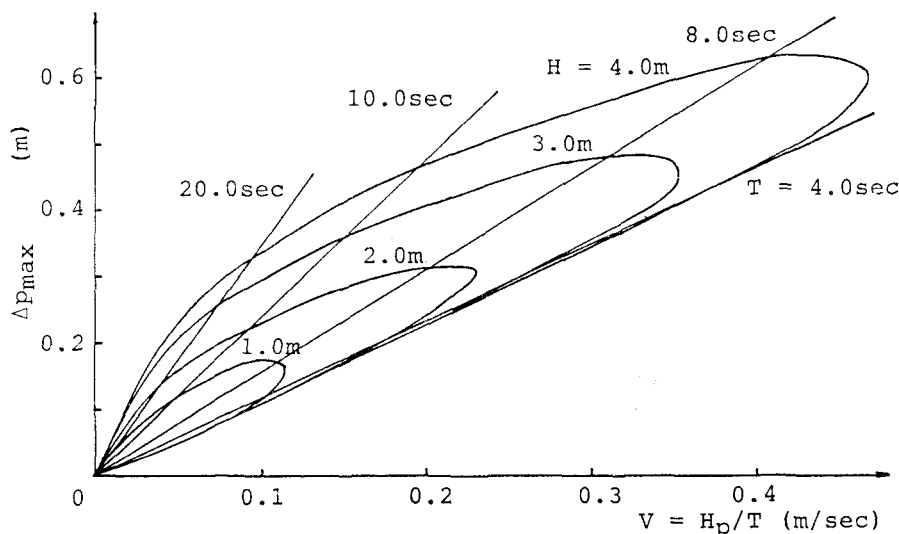


図-2 境界領域近似解 (Mei ら, 1981) による $(-\Delta p_t)_{\max}$ と $V \equiv H_p/T$ の関係

りである。 h (水深) = 6.0 m, n (海底地盤の間隙率) = 0.33, ν (海底地盤骨格のポアソン比) = 0.33, G (海底地盤骨格のせん断弾性係数) = 1.0×10^8 N/m², β (間隙水の有効体積弾性係数) = 1.0×10^7 N/m², k (海底地盤の透水係数) = 2.8×10^{-4} m/sec. 地盤深度 ($-z$) は 1.0 m と 2.0 m の 2 種類とした。

図-2 は、地盤深度が 2.0 m の場合である。図からわかるように、周期が一定の場合は波高が増加するほど H_p/T , $(-\Delta p_t)_{\max}$ とともに増加し両者は直線関係にある。一方波高が一定で周期が変化する場合両者の関係はループを描く関係にあり、直線関係ではない。図-1 で示した中田らの観測結果が直線関係からばらつく一因は、周期が変動する場合で説明できる。図-2 で周期が 8.0 sec の直線の近傍を見ると、中田らの観測における有義波周期 (5.0 sec ~ 8.0 sec) の場合、一波一波の周期が有義波周期の周りに変動すると、図上で観測値は周期が 8.0 sec の直線を横断する形で移動することが考えられる。

なお図には示していないが地盤深度が 1.0 m の場合は、図-2 に比べて $(-\Delta p_t)_{\max}$ の値が半分近くになる。これは海底面波圧と地盤内の間隙水圧変動の差が地盤深度 1.0 m より 2.0 m の方が大きいことを意味する。このことは、類似の条件 ($T=7.0$ sec, $H=3.0$ m) での鉛直有効応力変動 σ_{zz}' の鉛直分布から確かめられている (図-3)。

4. 海底地盤の透水係数 k と間隙水の有効体積弾性係数 β

1. で述べたように、著者らの大湊波浪観測所および善らの波崎海洋観測施設での波浪による海底地盤内間隙

水圧変動の観測結果から、 k (海底地盤の透水係数) = 2.8×10^{-4} m/sec として推定した β (間隙水の有効体積弾性係数) の値は 1.0×10^7 N/m² から 1.0×10^8 N/m² にばらついた。ここでは図-1 で例示した中田らの図-6 の 12 個の図の回帰直線の勾配の値から、上記の 2 種類の β (間隙水の有効体積弾性係数) の値に対して、図-2 と同様の理論直線 (周期一定の直線) の勾配が観測結果にあてはめた回帰曲線の勾配に最も合う k (海底地盤の透水係数) の値を決定する。

図-1 に例示した中田らの図-6 の 12 個の図の回帰直線と図-2 の周期一定の直線とを比較するために、各図の観測時の水深および地盤深度を用い、図の上を示されている有義波周期を周期として、透水係数以外の地盤のパラメータは図-2 で用いた値と同じ値を用いて、様々な透水係数の値に対して式 (2) の計算を行った。間隙水の有効体積弾性係数 β の値だけは、上記のように 2 種類の値を用いた。

なお波高は図-2 から分かるように、周期が一定の場合は波高を変化させても直線の勾配は変わらないので、ここでは便宜上 1.0 m とした。

表-1 はその結果である。表中透水係数の値が示されていないのは、透水係数をどのような値に取っても理論直線の勾配が観測結果の勾配に達しなかったことを意味する。全体として、2 種類の β の値のうち大きい値の方が透水係数の値が小さいことが分かる。また表からは分からないが、一般に β の値が一定の場合、透水係数 k の値が小さいほど直線の勾配は増加する。

これは、波の峰の通過後の一時的な鉛直有効応力の減少による液状化の深さを無次元表示した著者らの結果 (酒井ら, 1990a) から説明できる (図-4)。その結果に

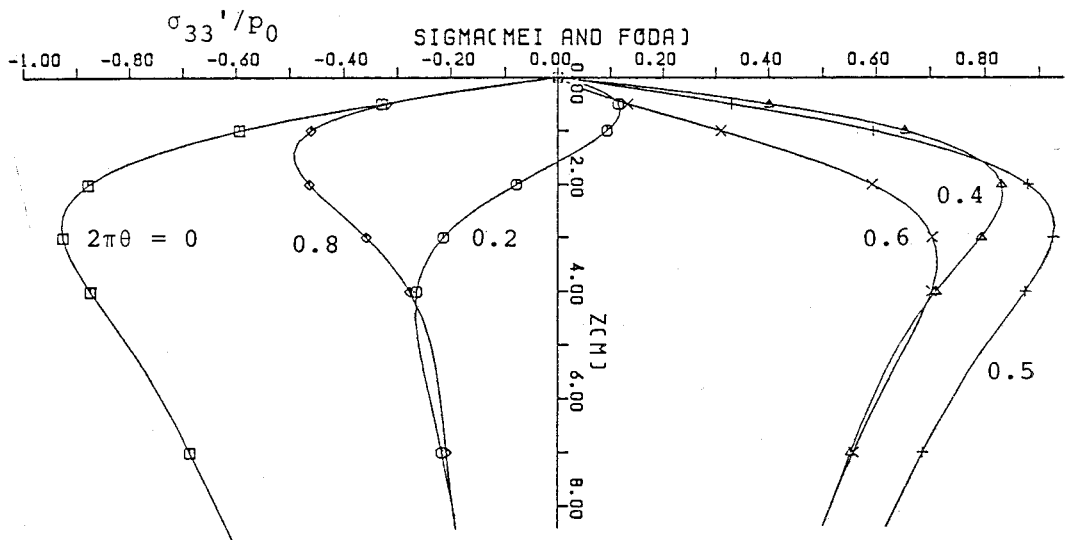
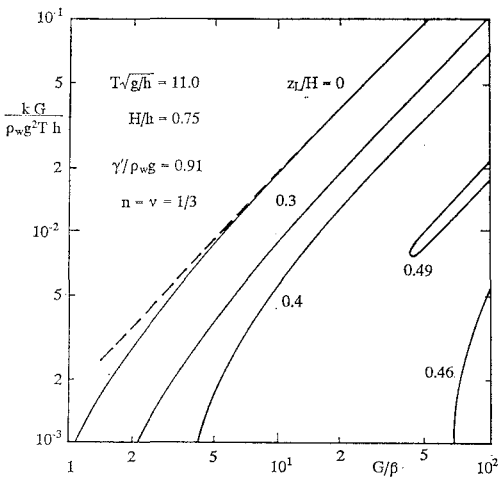


図-3 鉛直有効応力変動の鉛直分布 ($T=7.0$ sec, $H=3.0$ m)

表—1 中田ら (1991) の結果から推定される海底地盤の透水係数 k の値

β (N/m ²)	Case No.	$-z$ (m)	$H_{p1/3}$ (m)	$T_{1/3}$ (sec)	k (m/sec)
1.0×10^8	2	2.0	1.3	7.0	5.5×10^{-4}
			2.0	7.0	3.5×10^{-4}
		4.0	1.3	7.0	8.5×10^{-4}
			2.0	7.0	6.0×10^{-4}
	3	1.0	0.6	5.0	
			1.0	7.5	
		3.0	0.6	5.0	
			1.0	7.5	
	4	0.9	2.4	8.0	3.5×10^{-5}
			3.3	8.0	4.0×10^{-5}
		2.0	2.4	8.0	2.5×10^{-4}
			3.3	8.0	2.5×10^{-4}
1.0×10^7	2	2.0	1.3	7.0	8.0×10^{-3}
			2.0	7.0	5.0×10^{-3}
		4.0	1.3	7.0	10.0×10^{-3}
			2.0	7.0	8.0×10^{-3}
	3	1.0	0.6	5.0	4.0×10^{-4}
			1.0	7.5	7.0×10^{-4}
		3.0	0.6	5.0	4.9×10^{-3}
			1.0	7.5	3.5×10^{-3}
	4	0.9	2.4	8.0	1.0×10^{-3}
			3.3	8.0	1.0×10^{-3}
		2.0	2.4	8.0	4.5×10^{-3}
			3.3	8.0	4.5×10^{-3}



図—4 一時的液状化深さ (酒井ら, 1990a)

よれば一時的液状化の深さ Z_L の無次元量 Z_L/H は数多くの無次元パラメータに支配されるが、波浪に関するパラメータ $T(g/h)^{1/2}$, H/h , 地盤に関するパラメータ $\gamma'/\rho_w g$ (γ' : 地盤骨格の水中単位体積重量), n, ν が一定の場合, G/β が大きいほど, また $kG/\rho_w g^2 Th$ の値が小さいほど増加する。一時的液状化深さが増加するこ

とは, $(- \Delta p_t)_{\max}$ が増加することであり, 同じ β に対しては k が小さいほど $kG/\rho_w g^2 Th$ が減少して $(- \Delta p_t)_{\max}$ が増加, すなわち直線の勾配が増加する。また β が大きいと G/β が減少し $(- \Delta p_t)_{\max}$ が減少するため, 小さい k の値でないと直線の勾配を説明出来なくなる。

なお β (間隙水の有効体積弾性係数) $= 1.0 \times 10^8$ N/m² とした場合のケース 3 で透水係数が計算できなかったのは, 図—4 で液状化深さに最大値 (図中 0.49 と記されている) が存在していることに対応している。一般に図中に示されている無次元パラメータの値が一定の場合, G/β および $kG/\rho_w g^2 Th$ の値がどのような値をとっても液状化深さはある最大値以上にはならない。言い換えれば, 図—2 の直線の勾配に最大値が存在する。 $\beta = 1.0 \times 10^8$ N/m² の場合は, その最大値がケース 3 の観測結果の勾配より小さいことを意味する。

さて表—1 のケース 3 の場合は, 中田らの図—6 から分かるように, 観測値が図の原点付近に集中しており, 他のケースと比べて回帰直線の信頼性が乏しい。そのためここではケース 2 および 4 の結果のみに着目する。

β (間隙水の有効体積弾性係数) $= 1.0 \times 10^8$ N/m² とした場合, ケース 2 では透水係数 k の値は上側測定点では $3.5 \sim 5.5 \times 10^{-4}$ m/sec, 下側測定点では $6.0 \sim 8.0 \times 10^{-4}$ m/sec である。ケース 4 では, 上側測定点では $3.5 \sim 4.0 \times 10^{-5}$ m/sec, 下側測定点では 2.5×10^{-4} m/sec である。大潟波浪観測所および波崎海洋観測施設での観測結果から β の値を推定する際に用いた k の値 2.8×10^{-4} m/sec の周りにばらついている。

β (間隙水の有効体積弾性係数) $= 1.0 \times 10^7$ N/m² とした場合, ケース 2 では透水係数 k の値は上側測定点では $5.0 \sim 8.0 \times 10^{-3}$ m/sec 下側測定点では $8.0 \sim 10.0 \times 10^{-3}$ m/sec ある。ケース 4 では, 上側測定点では 1.0×10^{-3} m/sec, 下側測定点では 4.5×10^{-3} m/sec であり, 2.8×10^{-4} m/sec より 1 オーダ大きい。

このように間隙水の有効体積弾性係数を 1.0×10^8 N/m² とした場合には透水係数は 10^{-4} m/sec のオーダー, 1.0×10^7 N/m² とした場合は 10^{-3} m/sec のオーダーとなる。これは, 図—4 の 2 つの無次元パラメータ G/β および $kG/\rho_w g^2 Th$ が間隙水圧変動の鉛直分布形状を決定する量になっており, この 2 つのパラメータ言い換えれば β と k の値の組み合わせで鉛直分布の形状が決まることによる。

4. あとがき

中田ら (1991) の波浪による海底地盤内の間隙水圧変動の観測結果から得られた, 波の峰の通過後の海底面波圧と間隙水圧変動の差の絶対値の最大値 $(- \Delta p_t)_{\max}$ と

海底面水圧波高と波の周期の比 $V \equiv H_p/T$ との線形関係は、境界領域近似解 (Mei ら, 1981) を用いて説明できる。ただし、直線関係は波の周期が一定の場合にのみ成立する。

中田らの観測結果に基づく上記 2 量の直線関係の勾配の値を用いて、境界領域近似解のパラメータの間隙水の有効体積弾性係数 β と透水係数 k の値を推定したところ、 $\beta = 1.0 \times 10^8 \text{ N/m}^2$ とした場合は k は 10^{-4} m/sec のオーダー、 $\beta = 1.0 \times 10^7 \text{ N/m}^2$ とした場合は k は 10^{-3} m/sec のオーダーとなる。

参 考 文 献

- Mei, C. C. and M. A. Foda (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.
- 中田博昭・鈴木 勝・阿部勝雄・蜂須賀和吉・山下剛史 (1991): 波による海底地盤中の間隙水圧変動に関する現地観測, 海岸工学論文集, 第 38 巻, 土木学会, pp. 811–815.
- 酒井哲郎・畑中克也・間瀬 肇 (1990a): 波浪による海底地盤内間隙水圧変動解の適用性と地盤の液化化条件, 土木学会論文集, 第 417 号/II-13, pp. 275–283.
- 酒井哲郎・裏本 賢・間瀬 肇 (1990b): 現地砕波帯波浪による海底面近くの地盤の挙動, 海洋開発論文集, Vol. 6, 土木学会, pp. 211–216.
- 酒井哲郎・間瀬 肇・D. T. Cox・上田康浩 (1991): 波浪による海底地盤内間隙水圧変動の現地観測, 海岸工学論文集, 第 38 巻, 土木学会, pp. 816–820.
- 善 功企・山崎浩之・渡辺 篤 (1987): 海底地盤の波浪による液化化および高密度化, 運輸省港湾技術研究所報告, 第 26 巻, 第 3 号, pp. 125–180.
- 善 功企・川崎浩之・佐藤 泰 (1989): 海底地盤の波浪による液化化——現地観測および解析——, 運輸省港湾技術研究所報告, 第 28 巻, 第 3 号, pp. 29–58.