

海底地盤の圧密係数および間隙圧係数の測定法に関する研究

泉宮 尊司*・古俣 弘和**・阿部 一弘***

1. 緒 言

海岸構造物の沈下や破壊のメカニズムとして、波浪による波力が原因であるだけでなく、海底地盤の液状化の発生により起きることも考えられるようになってきた。これまでの波浪による海底地盤の液状化の理論的あるいは実験的研究により、どのような波浪条件および海底地盤条件で液状化が発生するのかが解明されつつある (Mei・Foda, 1981; Okusa, 1985; 善ら, 1987; 前野ら, 1988; 泉宮ら, 1989)。これらの研究により、液状化の発生は圧密係数や間隙圧係数の大きさに強く依存することが明らかとなっている。しかしながら、これらの係数を現地で直接測定することは容易ではなく、海底地盤のサンプルを持ち帰って実験室で測定しているのが現状のようである。このような測定法では、採取したサンプルを乱すだけでなく空気混入率も大きく変化し、圧密係数や間隙圧係数を正確に測定することはできない。そこで本研究では、現地海岸でも比較的容易に測定できる方法として、海底地盤内の2地点での間隙水圧変動記録を用いて、それらの係数を推定する方法を提案する。さらに、推定されたそれらの係数の波の周期等の依存性についても検討する。

2. 液状化発生条件に及ぼす海底地盤の特性

海底地盤の液状化の発生条件として、次に示すような判定規準が考えられている (たとえば, Okusa, 1985)。

$$\sigma'_0 = -(\rho_s - \rho)gz + \sigma'_z \leq 0 \quad \cdots \cdots (1)$$

ここに、 σ'_0 は鉛直有効応力、 ρ_s および ρ は海底地盤の密度および間隙水の密度、 z は海底面を原点とした鉛直上向きの座標、 σ'_z は波動による変動鉛直有効応力である。泉宮ら (1989) は、この判定規準と Biot の圧密方程式の理論解を用いて、液状化発生条件を算定し図化している。ここでは、その関係式において kz の値が十分に小さいので無視した簡略式を示す。

$$H = \frac{2(\rho_s/\rho - 1)z_L \cosh kh}{(1 - B'_1)} \cdot [1 + e^{-2\kappa_1 z_L} - 2e^{-\kappa_1 z_L} \cos(\kappa_2 z_L)]^{-1/2} \cdots \cdots (2)$$

ここに、 $\kappa_1 \doteq \kappa_2 \doteq (\pi/C_v T)^{1/2}$ 、 $z_L = 0.1 \text{ m}$ 、 H は液状化発生波高、 B'_1 は一種の間隙圧係数で Skempton の間隙圧係数と次のような関係にある (Okusa, 1985)。

$$\frac{B}{B'_1} = 1 + \frac{(1 - 2\nu)(1 - B)}{2(1 + \nu)} \cdots \cdots (3)$$

ここに、 ν は海底地盤の Poisson 比である。上式の関係より、 B'_1 の値と B 値はほぼ等しく、 B'_1 の値のほうがやや小さい値を示すことがわかる。式 (2) の関係をみると、 B'_1 の値が1に近いほど液状化発生波高が大きくなる、すなわち液状化が起こりにくくなることを意味している。また、海底地盤の密度が小さいほど液状化が発生しやすいことも容易にわかる。圧密係数との関係は、ある値を境にして液状化の起こりやすさが変化する。すなわち、

$$\exp\left[-\sqrt{\frac{\pi}{C_v T}} z_L\right] = 2 \cos\left[\sqrt{\frac{\pi}{C_v T}} z_L\right] \cdots \cdots (4)$$

を満たす圧密係数の値よりも大きい範囲においては、圧密係数の値が大きくなるほど、液状化が発生しにくくなる。逆に、小さい範囲においては圧密係数の値が小さくなるほど液状化が発生しにくくなる領域が存在する。これらは次のような物理的解釈によって説明できる。圧密係数が多い場合には、過剰間隙水圧の消散が速く生じ、有効応力の低減率が小さくなるために、液状化が発生しにくくなること、後者については圧密係数がかなり小さくなると地盤内の間隙水圧の変動振幅が極めて小さくなりすぎるために、液状化が生じなくなるためと考えられる。

式 (2) の関係より、次に示すような液状化発生指標 K_L を考えることができる。

$$K_L = \frac{(1 - B'_1)H}{2(\rho_s/\rho - 1)z_L \cosh kh} \cdot [1 + e^{-2\kappa_1 z_L} - 2e^{-\kappa_1 z_L} \cos(\kappa_2 z_L)]^{1/2} \cdots \cdots (5)$$

上式において、ある与えられた波浪条件および海底地盤条件に対して、液状化発生指標 K_L の値が1よりも大きくなれば液状化が発生することを意味する。ただし、式

* 正会員 工博 新潟大学講師 工学部建設学科

** 学生員 新潟大学大学院 工学研究科

*** 新潟県西川町役場

(2) が土粒子骨格が弾性変形する Biot の圧密方程式に基づいて導かれているので、厳密には 1 とはならないであろうが、液状化傾向を表す簡便で有効な指標となると思われる。

3. 圧密係数および間隙圧係数の測定法

(1) 理論

海底面上での圧力変動のスペクトルを $S_p(f)$ 、海底面下 $-z$ の地点での間隙水圧変動のスペクトルを $S_v(f)$ 、両者の変動の位相差を ε とすると、Biot の圧密方程式の理論解より、次のような関係式が得られる (泉宮ら, 1989)。

$$\frac{S_v(f)}{S_p(f)} = B_1^2 e^{2kz} + (1 - B_1^2) e^{2\varepsilon_1 z} + 2B_1(1 - B_1) e^{(\kappa_1 + \varepsilon_1)z} \cos(\kappa_2 z) \quad \dots\dots (6)$$

$$\tan \varepsilon = \frac{(1 - B_1) e^{\varepsilon_1 z} \sin(\kappa_2 z)}{B_1 e^{kz} + (1 - B_1) e^{\varepsilon_1 z} \cos(\kappa_2 z)} \quad \dots\dots (7)$$

式 (6) および (7) の関係は、波の周期および水深が与えられると、圧密係数および間隙圧係数のみの関数となるために、2 地点での間隙水圧変動を用いてこれらの係数を求めることができる。上式の関係は、規則波についても当然のことながら成立するのであるが、スペクトルおよび位相差を求める際に若干注意をしなければならない。規則波の場合、エネルギーが特定の周波数に集中しているので、変動振幅 A を用いてスペクトル密度関数を表すと、

$$S(f) = (A/2)^2 \delta(f - f_0) \quad \dots\dots (8)$$

となり、スペクトル密度関数の比は、

$$\frac{S_v(f)}{S_p(f)} = \left[\frac{A_v}{A_p} \right]^2 \quad \dots\dots (9)$$

となる。非線形性が効いている場合には、式 (9) の関係では誤差がでるため、それぞれの自己相関関数の値 $C(0)$ の比で算定することにした。規則波の場合の位相差を求めるには、相互相関関数の位相遅れ時間を用いて評価すると比較的精度よく求められる。

(2) 実験条件および実験方法

実験は、新潟大学工学部建設学科水工実験室にある二次元造波水槽を用いて行われた。その水槽に新潟東港付近で採取された平均粒径 0.18 mm の砂を勾配約 1/15 に敷いた。波高の測定には容量式波高計を用い、間隙水圧の測定には Druck 社製の直径 0.5 cm の間隙水圧計 3 台を用いた。間隙水圧計の設置場所は、水槽底面の影響ができるだけ少なくなるように、砂層厚 30 cm 以上の所を選び、1 台目を海底面に 2 台目を海底面下 5 cm の所に、3 台目を 10 cm の所に設置した。

波の条件は、表-1 に示すように波高および周期を変えて、合計 15 ケース行った。間隙水圧計の信号は、TEAC 社製 DR-F1 によって収録し、パーソナルコン

表-1 実験条件

CASE No.	入射波高 H_i (cm)	周 期 T (s)	沖波波高 H_0 (cm)	波形勾配 H_0/L_0	反 射 率 K_R
2-1	2.89	1.64	3.04	0.0073	0.188
2-2	3.30	1.44	3.57	0.0110	0.134
2-3	4.06	1.25	4.44	0.0182	0.071
2-4	5.06	1.00	5.47	0.0350	0.034
2-5	6.20	0.82	6.25	0.0595	0.051
2-6	3.76	1.61	3.98	0.0098	0.126
2-7	4.60	1.39	4.99	0.0166	0.118
2-8	5.16	1.25	5.62	0.0231	0.053
2-9	6.66	1.00	7.20	0.0461	0.064
2-10	8.04	0.80	8.33	0.0835	0.030
2-11	4.77	1.58	5.07	0.0130	0.114
2-12	5.24	1.40	5.69	0.0186	0.063
2-13	6.43	1.24	6.83	0.0285	0.022
2-14	8.54	1.00	9.23	0.0592	0.064
2-15	10.34	0.80	10.71	0.1073	0.019

ピュータを用いてデータ処理を行った。図-1 および 図-2 は、規則波および不規則波による間隙水圧変動を示している。振幅の大きい順に、それぞれ海底面上、海底面下 5 cm および 10 cm の所の記録を示している。地中深くなるほど、位相が遅れているのがわかる。

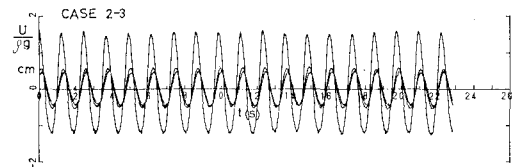


図-1 規則波による間隙水圧変動

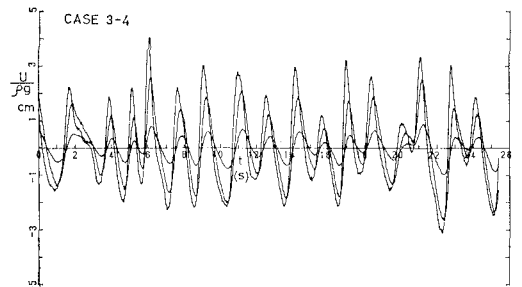


図-2 不規則波による間隙水圧変動

(3) 圧密係数および間隙水圧係数の算定

3 の (1) で述べたように、2 地点での間隙水圧変動のスペクトル比および位相差を求める必要がある。不規則波の場合には、得られた信号を高速フーリエ変換によりスペクトルおよびクロススペクトルを求め、位相差を

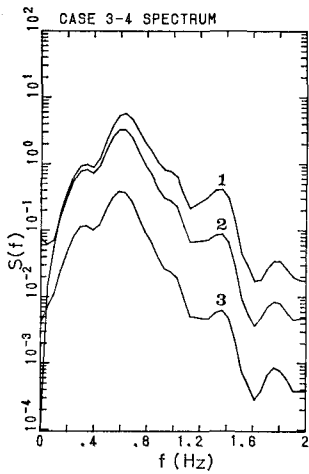


図-3 間隙水圧変動のスペクトル

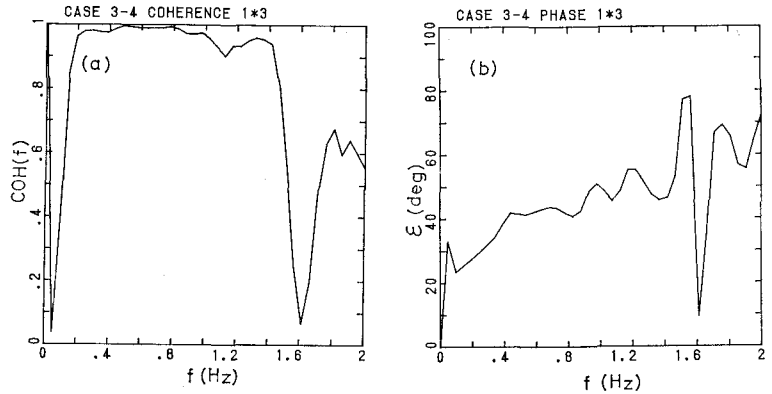


図-4 コヒーレンスおよび位相差

算定できる。ただし、高速フーリエ変換の結果をそのまま用いたのでは、変動の激しい不安定なものとなるので Hamming Window をかけた後、近傍3点の移動平均をとりスペクトル等を算定した。その結果を、図-3 および 図-4 に示す。図-3 はスペクトル密度関数を比較したもので、高周波数になるにつれて間隙水圧変動の減衰率が大きくなっているのがわかる。図-4 は、コヒーレンスおよび位相差を示したものである。全般的にコヒーレンスの値は高く、特に周波数 0.4~0.8 Hz の範囲において 0.95 以上の値を示している。以後の解析においては、このようなコヒーレンスの大きい範囲の周波帯のスペクトル比および位相差を用いた。位相差の変化については、高周波になるほど位相差が増加しているのが読み取れる。このような傾向は、Biot の圧密方程式の理論解からも推察できるものである。

圧密係数および間隙水圧係数を求めるために、式(6)および(7)を用いて、スペクトル比および位相差とそれらの係数との関係をプロットする。具体的には、波の周期および水深より波数 k を計算し、圧密係数および間隙水圧係数を適切な間隔で与えて、 κ_1 および κ_2 を計算し、スペクトル比および位相差を算定する。このようにして得られたのが、図-5 および 図-6 である。これらの図の中の●印は、それぞれ規則波および不規則波による実測結果を示したものである。これらの図より、圧密係数および間隙圧係数が容易に読み取れる。表-2 に位相差およびスペクトル比の実測値を、表-3 には上記の方法で得られた係数の値を示す。

4. 実験結果の考察

表-3 を見てみると、海底面上の間隙水圧計と海底面下 10 cm のものを用いた結果 (1*3 で表されている)

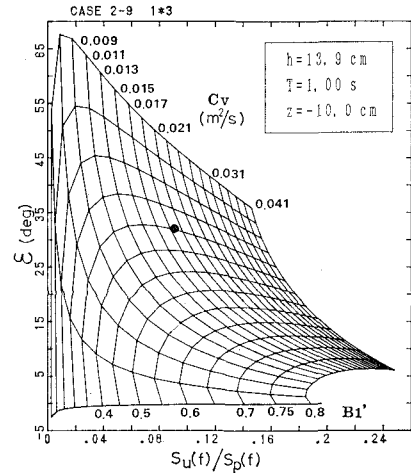


図-5 圧密係数および間隙圧係数の算定 (規則波)

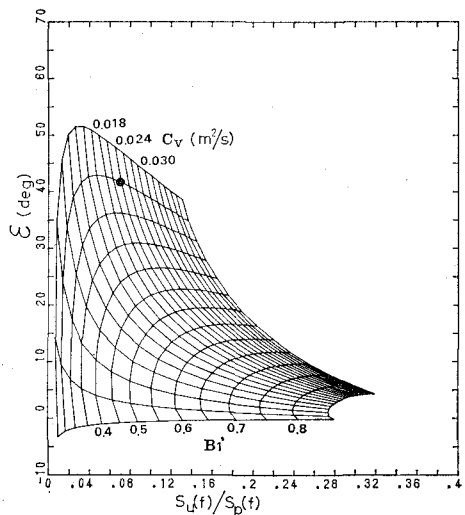


図-6 圧密係数および間隙圧係数の算定 (不規則波)

では、圧密係数はケース 2-6 を除き、 $0.013 \sim 0.020 \text{ m}^2/\text{s}$ で変動は比較的小さいようである。また、 B'_i の値は、 $0.20 \sim 0.45$ でありやや変動が大きい。これに対して、海底面下 5 cm の間隙水圧計を用いた方 (1*2) は、圧密係数の値が $0.003 \sim 0.005 \text{ m}^2/\text{s}$ と小さく、前者の $1/3 \sim 1/5$ 程度となっている。また、 B'_i 値は $0.33 \sim 0.45$ と前者より変動幅が小さくなっている。このような結果が得られたのは、同一の間隙水圧計によりほぼ同様な結果を示していることから、偶然的なものではないものと思われる。すなわち、実験室でこのような実験を行う場合、水槽に水のない状態で砂を敷き、ある程度締め固めを行うが、水槽幅が 40 cm 程度であるので、締め固まるのは砂面の表面のみであることが考えられる。また、間隙水圧計を地中に設置し、水槽に水を満たし数時間経っても土中の気泡がなかなか抜けにくいことも考ええられる。このようなことから、より深い所の間隙水圧計を用いた場合の方が、ゆる詰め状態の結果が得られたのかもしれない。今後、実験ケースを増やして確認しなければならない。

波の周期と圧密係数との関係を調べたのが、図-7 である。図中の○印は、間隙水圧計 1 (海底面) と 2 (深さ 5 cm) を用いて推定したものの示し、△印は間隙水圧計 1 と 3 (深さ 10 cm) を用いて推定したものである。全般的には、周期に対する依存度は低くほぼ一定とみてよいであろう。ただし、間隙水圧計 1 と 3 を用いたデータでは、周期 1.6 秒前後でやや大きな値を示している。この

ことは、後で述べる B'_i の値の周期に対する依存度にも何らかの関連があるようである。不規則波を用いて推定した圧密係数は、図-7 に△印で示されているように規則波によるものとはほぼ同様な結果を示していた。このことは、海底地盤内の間隙水圧が線形的な変動をしているためであり、非線形干渉の影響が小さいことを意味している。なお、○印に対応する不規則波のデータを示していないのは、不規則波を 2 分以上作用させると、砂連の移動および地形変化が有意に生じ、2 台の間隙水圧計の間隔を精度よく測定できないためである。

図-8 の (a) は、間隙水圧計 1 と 2 を、(b) は 1 と 3 を用いて推定された B'_i 値との波の周期との関係を表したものである。図 (a) では、間隙圧係数 B_i 値は周期には殆どよらずほぼ一定で約 0.4 であることがわかる。一方、図 (b) では周期 $0.8 \sim 1.0$ 秒の範囲で図 (a) の結果とはほぼ一致しているが、周期が 1 秒以上の範囲では、周期が大きくなるにつれて B'_i 値がやや減少する傾向にあるといえる。周期 1.6 秒前後でデータのばらつきが大きいのは、反射率が 10% から 19% とかなり大きく、その影響で位相差にばらつきが生じたのではないと思われる。なお、不規則波によって推定された値 (■印) も規則波のそれと同程度であることがわかる。

このように間隙圧係数の値が $0.3 \sim 0.4$ と小さいのは、砂層内の気泡の混入が大きく影響しているものと考えられる。田中・吉見ら (1987) によると、飽和度が 99% になると Skempton の間隙圧係数 B 値が 0.4 程度にまで低下することを図示している。したがって、今回の

表-2 位相差およびスペクトル比

CASE No.	1 * 3		1 * 2	
	位 相 差 ε (deg)	スペクトル比 S_v/S_p	位 相 差 ε (deg)	スペクトル比 S_v/S_p
2-1	40.7	0.14	25.6	0.17
2-2	31.6	0.12	26.8	0.16
2-3	33.5	0.11	25.3	0.16
2-4	27.7	0.08	24.2	0.13
2-5	30.4	0.05	26.0	0.09
2-6	34.7	0.19	19.4	0.23
2-7	37.8	0.11	22.5	0.14
2-8	36.0	0.10	24.9	0.13
2-9	31.5	0.09	24.0	0.14
2-10	26.0	0.06	20.2	0.10
2-11	38.0	0.14	24.3	0.18
2-12	32.5	0.10	27.7	0.13
2-13	36.6	0.10	28.1	0.14
2-14	31.5	0.07	28.2	0.11
2-15	31.1	0.05	30.4	0.09

表-3 推定された圧密係数および間隙圧係数

CASE No.	1 * 3		1 * 2	
	C_v (m^2/s)	B'_i	C_v (m^2/s)	B'_i
2-1	0.0195	0.35	0.0035	0.36
2-2	0.0147	0.33	0.0040	0.33
2-3	0.0180	0.30	0.0042	0.37
2-4	0.0133	0.41	0.0045	0.39
2-5	0.0155	0.39	0.0045	0.37
2-6	0.0280	0.17	0.0038	0.45
2-7	0.0165	0.25	0.0030	0.39
2-8	0.0160	0.29	0.0035	0.37
2-9	0.0200	0.35	0.0048	0.40
2-10	0.0170	0.45	0.0040	0.43
2-11	0.0195	0.20	0.0037	0.37
2-12	0.0130	0.32	0.0034	0.33
2-13	0.0175	0.32	0.0045	0.33
2-14	0.0130	0.37	0.0043	0.34
2-15	0.0165	0.39	0.0050	0.35

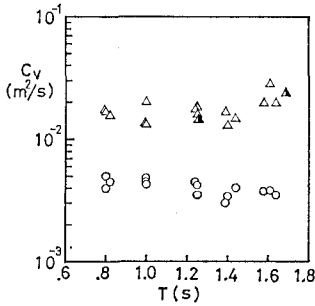
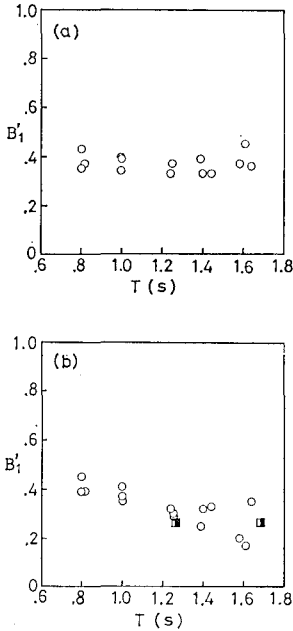


図-7 圧密係数と波の周期との関係


図-8 間隙圧係数 B_1' 値と波の周期との関係

実験においても飽和度が 100% であることは考えられず、若干の気泡混入があったためにこのような値が得られたのではないかと考えられる。

5. 結 論

本研究では、現地で海底地盤の圧密係数と間隙圧係数を容易に推定できる方法として、2地点での間隙水圧変動記録を用いる方法を提案し、実験室内で実験を行いそ

の方法の適用性について検討した。その結果、次のような事柄が明らかとなった。

(1) 2つの間隙水圧変動記録より、スペクトル比および位相差を求めるだけで、圧密係数および間隙圧係数を推定できるので簡便である。ただし、この方法は Biot の圧密方程式に基づいた間接的な方法である。

(2) 実験に用いた砂地盤の圧密係数は、深さ方向に有意に変化しており、10 cm 平均で $0.017 \text{ m}^2/\text{s}$ 程度、5 cm 平均では $0.004 \text{ m}^2/\text{s}$ 程度であった。なぜこのような差異がでるのかは、気泡の混入率の違いによると考えられるが、今回の実験だけでは確定できない。

(3) 推定された圧密係数は、波の周期には殆ど依存せず、ほぼ一定であることが確認された。

(4) 実験に用いた砂地盤の間隙圧係数の値は、0.3~0.4 の範囲にあることがわかった。なお、反射波の混入により位相差の算定精度が若干低下するために、推定される間隙圧係数の値の変動する可能性があることがわかった。

(5) 不規則波によって推定された両係数の値は、規則波によって推定された値とほぼ等しく、地盤内の間隙水圧変動の非線形性が比較的小さいことが確認された。

最後に、本研究の一部は文部省科学研究費一般研究 B (代表者：新潟大学理学部・立石雅昭助教授) の補助を受けたことを付記し、謝意を表します。

参 考 文 献

- 泉宮尊司・古俣弘和・飯田秀樹 (1989): 波浪による海底地盤の液状化発生条件および海底谷のある海浜への適用, 海岸工学論文集, 第 36 巻, pp. 784~788.
- 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, 運輸省港湾技術研究所報告, 第 26 巻, 第 4 号, pp. 125~180.
- 田中敬三・吉見吉昭・時松孝次 (1987): 飽和度が砂の繰り返しせん断強度に与える影響, 第 22 回土質工学研究発表会講演集, pp. 216~217.
- 前野賀彦・酒井哲朗・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, Vol. 4, pp. 5~10.
- Biot, M. A. (1941): General theory of three-dimensional consolidation, J. of Appl. Phys., Vol. 12, pp. 155~164.
- Mei, C. C. and M. A. Foda (1981): Wave-induced stresses around a pipe laid on a poro-elastic sea bed, Geotechnique, Vol. 31, No. 4, pp. 509~517.
- Okusa, S. (1985): Wave-induced stresses in unsaturated submarine sediments, Geotechnique, Vol. 35, pp. 517~532.