

変動間隙水圧計測による地盤定数の推定

名合宏之*・前野詩朗**・平井康隆***・西平福宏****

1. はじめに

著者らは、従来より、高波浪時に構造物周辺地盤に作用する強度の変動水圧により、地盤内の間隙水圧が時間的に変化することにより地盤が脆弱化し、海岸構造物が破壊に至ることを明らかにしてきている(名合ら; 1982, 1991, 1993)。このような波—地盤—構造物系の動的応答問題については、近年多くの研究が進められており、その理論的説明もある程度なされている。しかし、変動水圧場における地盤の動的挙動に影響を与える主要な因子である地盤内に含まれる極微量の空気量や地盤の圧縮率に関しては、これまでのところ確定した値が示されていない。今後、波による動的応答も考慮した構造物設計を行うためには、これらの不確定な地盤定数を知ることは重要な課題である。このようなことを考慮して、本研究では、まず、変動間隙水圧の伝播特性(振幅減衰比および位相の遅れ)を利用して、砂層の空気含有率および圧縮率の値を逆解析的に簡単に求める方法を提案する(泉宮ら(1994)も変動間隙水圧計測による地盤特性の同定を行っているが、論文では砂層の圧密係数および伝達係数の推定を行っている)。そして、鉛直1次元砂層模型により実験を行い、得られた間隙水圧の実験値を用いて逆解析し、これらの地盤定数の推定を行う。さらに、これとは別に砂層の空気含有率および圧縮率をそれぞれ独立に実験により求め、逆解析的に得られた値と比較することにより、提案した手法の妥当性を検証する。

2. 実験および逆解析法の概要

2.1 変動間隙水圧および空気含有率測定実験

変動間隙水圧計測に関する実験は、図-1に示すような鉛直1次元の試料容器(スチールパイプ)を用いた。砂層構成材料には、高飽和状態の豊浦標準砂($d_{50} \approx 0.25$ mm, 透水係数 $k = 1.5 \times 10^{-2}$ cm/s)を用いた。砂層の設置は、まず試料容器に適量の水を張り、乾燥させた標準砂を試料容器上部から自由落下させ、容器側部からハン

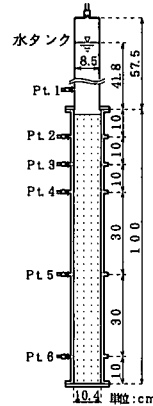


図-1 変動水圧実験装置

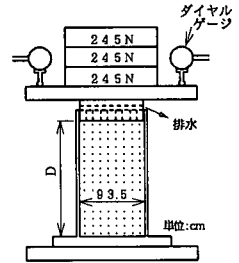


図-2 圧縮率測定装置

マーで振動を与えることにより間隙率約0.4~0.45程度となるようにした。本研究では3回の変動水圧載荷実験を行い、砂層間隙率はそれぞれ0.412 (Run 1), 0.438 (Run 2), 0.442 (Run 3)であった。その後、水タンク上部から変動空気圧を発生させ、砂層表面に振幅約30 cm, 周波数約1 Hzの変動水圧を1分間作用させ、変動間隙水圧をPt. 1~Pt. 6に取り付けた圧力変換器により測定した。

変動水圧計測後、水タンク上部から1~5 kgf/cm² (98~490 kN/m²)の空気圧を段階的に作用させ、このときの水位低下量より砂層内の空气の圧縮量を求めた。このようにして求めた圧縮量と空気圧との関係がボイルの法則に従うものとして砂層内の空気含有率を算出した。

2.2 砂層の圧縮率測定実験

砂層の圧縮率測定に関する実験は、善(1987)らが用いたのと同様な図-2に示すような実験装置を用いた。実験方法は、図-2に示すように25 kgf (245 N)のおもりを3つ用い、段階的に荷重の載荷・除荷を計5回繰り返し行い、そのときの砂層の変形量をダイヤルゲージにより測定した。砂層の圧縮率 α は次式により算出した。

$$\alpha = \frac{\varepsilon}{\sigma} = \frac{\delta y / D}{\delta P / A} = \frac{1}{\delta P / \delta y} \frac{A}{D}$$

ここに、 ε は砂層のひずみ、 σ は砂層の応力、 δy は砂層表面の沈下量、 δP は載荷荷重、 D は砂層の高さ、 A は砂層

* 正会員 工博 岡山大学環境理工学部環境デザイン工学科教授

** 正会員 工博 岡山大学環境理工学部環境デザイン工学科講師

*** 正会員 工修 (株)建設技術研究所

**** 正会員 工博 (株)建設・環境研究所技術三部主席研究員

の断面積である。上式からもわかるように、圧縮率 α は砂層の高さ D の影響を受ける。本研究では、砂層の高さ D の影響をみるため砂層の高さ D は、10, 15, 20, 40 cm の4種類を用いた。また、高飽和砂と乾燥砂の違いをみるため砂層の高さ 20 cm に関しては高飽和砂と乾燥砂を用いた実験を行った。その他のケースについては乾燥砂を用いた。砂層の間隙率はいずれの場合も 0.40 である。

2.3 逆解析法

変動水圧実験により得られる変動間隙水圧 H の分布式を次のように仮定する。

$$H(y, t) = a(y) \sin 2\pi f \{t - \tau(y)\} \quad \cdots \cdots (1)$$

ここに、 $a(y)$, $\tau(y)$ は砂層表面からの深さ y における振幅および位相の遅れである。振幅は指数関数的に減衰し、また、位相の遅れは直線的に増加するものと仮定し（これらの仮定の妥当性の検討結果については3.で示すことにする）、 $a(y)$, $\tau(y)$ を次式のように表すことにする。

$$a(y) = a_0 e^{-a_* y/D} \quad \cdots \cdots (2a)$$

$$\tau(y) = \tau_* y/Df \quad \cdots \cdots (2b)$$

ここに、 a_0 は水中部 (Pt. 1) での水圧振幅、 f は変動水圧周波数、 D は砂層の高さ、 t は時間である。また、 a_* , τ_* は無次元定数であり、実験値を用いて最小2乗法により算出した。しかし、実験結果得られる変動水圧は正確な正弦波ではなく若干正の方向に偏っているので、式(1)を次のようにおくことにする。

$$H(y, t) = a(y) \sin 2\pi f \{t - \tau(y)\} + \delta H \quad \cdots \cdots (3)$$

ここに、 δH は基線補正值であり、水中部 (Pt. 1) での変動水圧の正のピーク値と振幅 a_0 の差とした。

砂層中の間隙水圧 h は δH を考慮して次式のように表される。

$$h(y, t) = h_0 + a_0 \sin 2\pi f t + y + h'(y, t) + \delta H \quad \cdots \cdots (4)$$

ここに、 h_0 は平均水圧水頭、 h' は過剰間隙水圧である。よって変動間隙水圧 H は次のように表される。

$$H(y, t) = a_0 \sin 2\pi f t + h'(y, t) + \delta H \quad \cdots \cdots (5)$$

式(3)および式(5)が等しいことより過剰間隙水圧 h' は次のようになる。

$$h'(y, t) = a_0 \{e^{-a_* y/D} \sin 2\pi f (t - \tau_* y/Df) - \sin 2\pi f t\} \quad \cdots \cdots (6)$$

次に、砂層内変動水圧分布式は次式のように表される。(名合; 1982)。

$$\begin{aligned} & \left\{ \beta \lambda + \left(\frac{1}{\rho_f g h + P_0} - \beta \right) \frac{\rho_f g h_0 + P_0}{\rho_f g h + P_0} \bar{\lambda}_a + \alpha \right\} \frac{\partial h'}{\partial t} + 2\pi f a_0 \\ & \cdot \left\{ \beta \lambda + \left(\frac{1}{\rho_f g h + P_0} - \beta \right) \frac{\rho_f g h_0 + P_0}{\rho_f g h + P_0} \bar{\lambda}_a \right\} \cos 2\pi f t \\ & = \frac{k}{\rho_f g} \frac{\partial^2 h'}{\partial y^2} \quad \cdots \cdots (7) \end{aligned}$$

ここに、 $\bar{\lambda}_a$ は基準となる空気含有率、 α は砂層の圧縮率、

k は透水係数、 P_0 は大気圧、 λ は間隙率、 ρ_f は水の密度、 β は水の圧縮率、 g は重力加速度である。式(7)中には過剰間隙水圧 h' の時間 t および砂層表面からの深さ y に関する微分項が含まれている。これらの微分は式(6)を時間 t に関して1階微分することにより、また、砂層表面からの深さ y に関して2階微分することにより得られ、次式のようになる。

$$\frac{\partial h'}{\partial t} = 2\pi f a_0 \{e^{-a_* y/D} \cos 2\pi f (t - \tau_* y/Df) - \cos 2\pi f t\} \quad \cdots \cdots (8a)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 h'}{\partial y^2} &= a_0 e^{-a_* y/D} / D^2 \cdot \{a_*^2 \sin 2\pi f (t - \tau_* y/Df) \\ &+ 4\pi a_* \tau_* \cos 2\pi f (t - \tau_* y/Df) \\ &- 4\pi^2 \tau_*^2 \sin 2\pi f (t - \tau_* y/Df)\} \quad \cdots \cdots (8b) \end{aligned}$$

式(8)を式(7)に代入し、未知な地盤定数を空気含有率 $\bar{\lambda}_a$ および砂層の圧縮率 α とし、それらの地盤定数について整理すると式(7)は次のようになる。

$$\begin{aligned} & \left(\frac{\partial h'}{\partial t} + 2\pi f a_0 \cos 2\pi f t \right) \left(\frac{1}{\rho_f g h + P_0} - \beta \right) \frac{\rho_f g h_0 + P_0}{\rho_f g h + P_0} \bar{\lambda}_a \\ & + \frac{\partial h'}{\partial t} \alpha = \frac{k}{\rho_f g} \frac{\partial^2 h'}{\partial y^2} - \beta \lambda \left(\frac{\partial h'}{\partial t} + 2\pi f a_0 \cos 2\pi f t \right) \quad \cdots \cdots (9) \end{aligned}$$

式(9)の右辺は y, t の関数、左辺は $\bar{\lambda}_a, \alpha, y, t$ の関数である。ここで、式(9)の $\bar{\lambda}_a, \alpha$ の係数および右辺をそれぞれ次のようにおく。

$$\begin{aligned} f_1(y, t) &= \left(\frac{\partial h'}{\partial t} + 2\pi f a_0 \cos 2\pi f t \right) \left(\frac{1}{\rho_f g h + P_0} - \beta \right) \\ & \cdot \frac{\rho_f g h_0 + P_0}{\rho_f g h + P_0} \quad \cdots \cdots (10a) \end{aligned}$$

$$f_2(y, t) = \frac{\partial h'}{\partial t} \quad \cdots \cdots (10b)$$

$$\begin{aligned} f_r(y, t) &= \frac{k}{\rho_f g} \frac{\partial^2 h'}{\partial y^2} - \beta \lambda \left(\frac{\partial h'}{\partial t} + 2\pi f a_0 \cos 2\pi f t \right) \quad \cdots \cdots (10c) \end{aligned}$$

また、式(9)の左辺を $g_i(\bar{\lambda}_a, \alpha, y, t)$ とおくと次のようになる。

$$g_i(\bar{\lambda}_a, \alpha, y, t) = f_r(y, t) \quad \cdots \cdots (11)$$

上式を用いて、 $\bar{\lambda}_a, \alpha$ を推定するわけであるが、ここでは、その算出法として最小2乗法を適用する。すなわち、式(11)中の変数 y および t について、実験結果より得られる異なるデータ y_j, t_i (ここでは j は間隙水圧測点の数、 i は時系列データの数とする) を代入すると、式(11)の左辺 $g_i(\bar{\lambda}_a, \alpha, y_j, t_i)$ と右辺 $f_r(y_j, t_i)$ との間には残差 r_{ij} が生じ、その平方和は次式のようになる。

$$q = \sum_{i,j} r_{ij}^2 = \sum_{i,j} \{g_i(\bar{\lambda}_a, \alpha, y_j, t_i) - f_r(y_j, t_i)\}^2 \quad \cdots \cdots (12)$$

上式で表される残差の平方和 q を最小にするように $\bar{\lambda}_a$, α を決定すればよい。すなわち、式 (12) を未知地盤定数 $\bar{\lambda}_a, \alpha$ についてそれぞれ 1 階微分すると次式が得られる。

$$\frac{\partial q}{\partial \bar{\lambda}_a} = 2 \sum_{i,j} \{g_i(\bar{\lambda}_a, \alpha, y_j, t_i) - f_r(y_j, t_i)\} f_1(y_j, t_i) = 0 \quad \dots\dots\dots (13a)$$

$$\frac{\partial q}{\partial \alpha} = 2 \sum_{i,j} \{g_i(\bar{\lambda}_a, \alpha, y_j, t_i) - f_r(y_j, t_i)\} f_2(y_j, t_i) = 0 \quad \dots\dots\dots (13b)$$

式 (9), 式 (10) および式 (11) を式 (13) に代入することにより次の正規方程式が得られる。

$$\begin{bmatrix} \sum_{i,j} \{f_1(y_j, t_i)\}^2 & \sum_{i,j} f_1(y_j, t_i) f_2(y_j, t_i) \\ \sum_{i,j} f_2(y_j, t_i) f_1(y_j, t_i) & \sum_{i,j} \{f_2(y_j, t_i)\}^2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \bar{\lambda}_a \\ \alpha \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum_{i,j} f_1(y_j, t_i) f_r(y_j, t_i) \\ \sum_{i,j} f_2(y_j, t_i) f_r(y_j, t_i) \end{bmatrix} \quad \dots\dots\dots (14)$$

この正規方程式の解が未知な地盤定数 $\bar{\lambda}_a, \alpha$ の推定値となる。

3. 実験結果および地盤定数の解析結果

3.1 変動間隙水圧特性

図-3 は、Run1 の実験で得られた変動間隙水圧の約 1 周期分をプロットしたものである。これより変動水圧は砂層中を伝播する際、砂層の深さ方向に対して位相の遅れを伴い、また、振幅減衰することがわかる。図-4 は振幅減衰比および位相の遅れの実験値を示している。砂層の深さ方向に対して、振幅減衰比は指数関数的に減少し、位相の遅れは直線的に増加していることがわかる。図-4 中の実線および破線はそれぞれ、式 (2a) および (2b) を用いた振幅減衰および位相の遅れの近似式を図示したものである。この図より、近似式は実験値をよく説明しており、式 (2) の仮定が妥当であることがわかる。

3.2 砂層の圧縮率の実験結果

図-5 は圧縮率計測装置を用いた実験により得られた荷重と砂層の変形量の関係を示している。(a) は高飽和標準砂を用いた場合であり、(b)～(d) は乾燥標準砂を用いた場合である。まず、(a) および (d) より、高飽和砂と乾燥砂には砂層の変形量の違いはみられないことがわかる。また、沈下量と荷重との勾配についてみると、どのケースにおいても第 1 回目の荷重では砂層の変形量は大きく勾配は小さいが、第 2 回目以降の荷重では勾配は急になり第 5 回目までほぼ同じ勾配になっている。これらの結果を考慮して、本研究では、乾燥砂を用いた第 2 回目以降の荷重による砂層の変形量の平均値を採用して砂層の圧縮率を求めることとした。つぎに、圧縮率算出

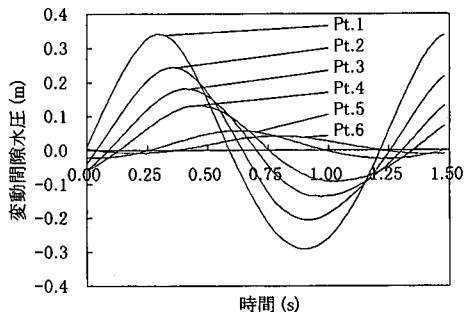


図-3 変動間隙水圧 (Run 1)

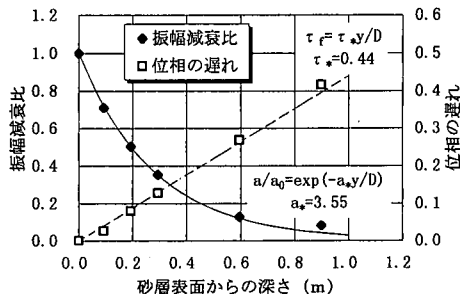
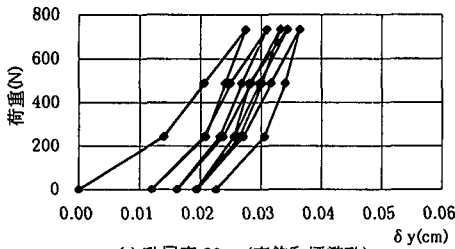


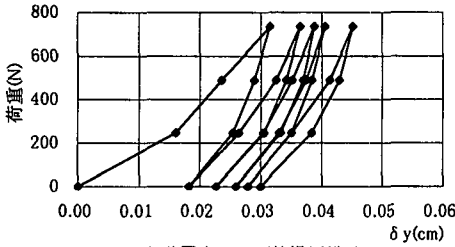
図-4 振幅減衰比および位相の遅れ (Run 1)

法のところでも述べたが、圧縮率を算出する際には砂層の高さが必要になる。表-1 は 2 回目以降の荷重時における砂層の変形量 (乾燥砂) の平均値を表にしたものである。これより、砂層の高さが 10～20 cm と大きくなるとつれて砂層の変形量は増加し、砂層の高さが 40 cm になると変形量は減少していることから、ある程度以上砂層の高さが大きくなると下層部の砂層は圧縮されず、砂層には圧縮される限界深さ (本研究では有効砂層厚と呼ぶことにする) が存在するものと考えられる。つまり、砂層の高さ 15, 20, 40 cm については砂層の変形量はほぼ同じ値になるとみなすことができ、本実験における砂層の有効砂層厚は 15～20 cm 程度であると推定できる。表-2 は、砂層の有効砂層厚を 15 cm として算出した砂層の圧縮率およびそれらの平均値を示している。これより、砂層の圧縮率の実験値は $10^{-6} \text{ m}^2/\text{N}$ 程度のオーダーであることがわかる。

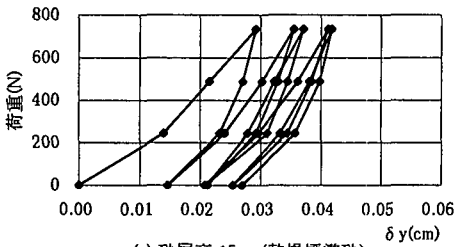
善 (1987) らは、豊浦標準砂 (相対密度 50%, 間隙率 ≈ 0.45) を用いて同様な荷重実験 (砂層高 35 cm, 直径 30.5 cm の円筒容器を用いている) を行い、荷重時の砂層の圧縮率 (原論文文中では体積圧縮係数) が $1.96 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{N}$ であるとしている。本実験結果よりもやや大きな値となっているが、これは、善らの実験における砂層間隙率が本実験のそれよりも大きかったことが原因ではないかと考えられる。また、円柱形の構造物を用いて、岩垣ら (1995) が行った変動水圧荷重実験および前野ら (1996) が行っ



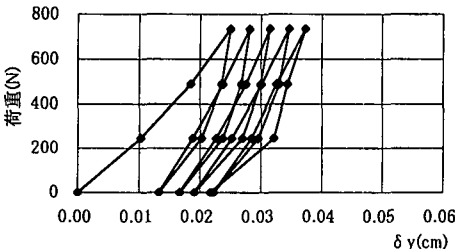
(a) 砂層高 20cm (高飽和標準砂)



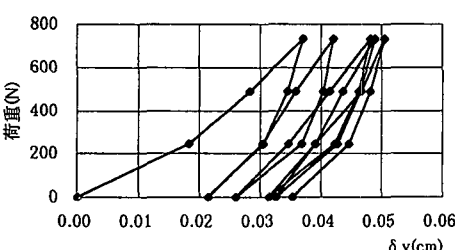
(b) 砂層高 10cm (乾燥標準砂)



(c) 砂層高 15cm (乾燥標準砂)



(d) 砂層高 20cm (乾燥標準砂)



(e) 砂層高 40cm (乾燥標準砂)

図一五 荷重と砂層の変形量

表一 砂層沈下量 (乾燥砂, 2 回目載荷以降)

砂層高 (cm)	10	15	20	40
平均沈下量 (cm)	0.0166	0.0184	0.0211	0.0196

表二 有効砂層厚 15 cm の時の圧縮率 (乾燥砂)

砂層高 (cm)	10	15	20	40	平均
圧縮率 (m^2/N)	1.55×10^{-8}	1.15×10^{-8}	1.31×10^{-8}	1.22×10^{-8}	1.31×10^{-8}

表三 砂層圧縮率および空気含有率

Run	間隙率	解析結果		実験値
		砂層圧縮率 (m^2/N)	空気含有率 (%)	空気含有率 (%)
1	0.412	0.62×10^{-8}	0.68	0.89
2	0.438	0.45×10^{-8}	0.60	0.73
3	0.442	0.23×10^{-8}	0.50	0.71

られる。しかしながら、いずれの実験結果においても圧縮率のオーダーとしては $10^{-8} \text{m}^2/\text{N}$ 程度であることが示された。

3.3 解析値と空気含有率の実験値

表一は、Run 1, Run 2 および Run 3 の変動間隙水圧測定結果を用いて、2.で示した逆解析法を適用して得られた砂層圧縮率および空気含有率の解析結果を示している。これらの逆解析値を求める際には、試料容器の底の影響を受けていると思われる Pt. 6 の計測データは含めていない。また、表中には空気圧を変化させることにより得られる砂層内の空気圧縮量より、ボイルの法則を適用して求めた空気含有率の実験値も併せて示している。表より、空気含有率の解析値は実験値よりも若干小さいが、両者は比較的良好に一致していることがわかる。得られた空気含有率は 1% 弱であり、著者が従来の研究で用いた (名合: 1982) 程度の大きさである。つぎに、砂層の圧縮率の解析値についてみると、静的な載荷実験で得られた圧縮率よりもやや小さいが、オーダー的には同程度であることがわかる。したがって、本逆解析法により、空気含有率および砂層の圧縮率を推定できることが示された。しかし、間隙率の違いによる圧縮率の大きさをみると、間隙率が大きくなるほど圧縮率が小さくなっており、この点については今後検討する必要がある。

表一は、波などの変動水圧場における地盤の動的挙動を取り扱った従来の研究で用いられている圧縮率の値を示している (原論文で圧縮率として取り扱われていない場合には、弾性体理論を用いて圧縮率に換算した)。この表より、砂層の圧縮率は $10^{-8} \sim 10^{-9} \text{m}^2/\text{N}$ 程度の大きさであり、本実験で得られた結果とほぼ一致していることがわかる。

た変動荷重載荷実験より構造物下面の荷重および変位を読みとり、有効砂層厚を 15 cm として砂層の圧縮率を計算すると、それぞれ $7 \times 10^{-8} \text{m}^2/\text{N}$ および $5 \times 10^{-8} \text{m}^2/\text{N}$ 程度となった。本実験結果よりも大きな値となったが、これは実験装置の 2 次元性の影響がでているものと考え

表-4 各研究者により用いられた砂層の圧縮率の値

研究者	土質材料	砂層の圧縮率 (m^2/N)
井上 (1975)	利根川砂 多摩川砂	1.8×10^{-8}
		2.0×10^{-8}
Yamamoto (1977)	細砂	4.6×10^{-8}
Madsen (1978)	密な砂	2.9×10^{-9}
善, 山崎ら (1987)	豊浦標準砂	9.9×10^{-9}
酒井, 間瀬ら (1991)	現地海岸砂	2.7×10^{-9}
Nago, Maeno (1987)	豊浦標準砂	1.0×10^{-9}
廣部, 石田ら (1996)	緩い砂 密な砂 シルト	7.5×10^{-9}
		2.6×10^{-9}
		9.7×10^{-9}

5. 結 論

著者らは、高波浪時に海底地盤に作用する強度の変動水圧により、砂地盤内の間隙水圧が時間的に変化し、地盤が脆弱化することについて研究を行ってきた。しかし、現象に最も大きな影響を与える地盤内に含まれる極微量の空気量や砂層の圧縮率はいずれも不確定な因子であった。そこで本研究では、変動間隙水圧特性を用いることにより、これらの地盤定数を逆解析的に推定する方法を提案するとともに提案した手法の妥当性を検証した。その結果、変動間隙水圧を用いた空気含有率および砂層の圧縮率の逆解析値は、静的加圧実験の結果にボイルの法則を適用して得られる空気含有率の実験値および載荷試験による圧縮率の実験値と比較的よく一致することが示され、本研究で提案した地盤定数推定のための逆解析法が妥当であることが明らかにされた。しかし、提案した手法で得られた砂層の圧縮率の値そのものについては、オーダー的にはどの砂層試料についても同じであるが、砂層の間隙率が大きくなると減少する傾向が認められている。この点については、逆解析する際に用いた変動間隙水圧の推定式に、名合 (1982) が示した基礎式の非線形性を考慮していなかったことなどが考えられ、今後、

検討していく必要がある。

最後に、本研究の一部は、文部省科学研究費基盤研究 (C) No. 08650609 (代表者：前野詩朗) の補助を受けて行われた。ここに記して感謝の意を表する次第である。

参 考 文 献

- 泉宮尊司・田辺 剛・石橋邦彦・山田貴之 (1994): 現地規模の圧力変動による海底地盤の応答とその地盤特性の同定法, 海岸工学論文集, 第 41 巻, pp. 606-610.
- 井上令作 (1975): 飽和度の高い砂層における間隙水圧の伝播, 土木学会論文報告集第 236 号, pp. 81-92.
- 岩垣雄一・奥田雄司 (1995): 変動水圧による水底地盤上重量構造物の沈下に関する基礎的研究, 海岸工学論文集, 第 42 巻, pp. 806-810.
- 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, 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状化および高密度化, 港湾技術研究所報告第 26 巻, 第 4 号, pp. 125-180.
- 名合宏之 (1982): 砂層内水圧変動と液状化, 水工学シリーズ 82-A-9, 土木学会水理委員会, pp. 1-15.
- 名合宏之・前野詩朗・西岡 操 (1991): 変動水圧による構造物の沈下機構に関する研究, 海岸工学論文集, 第 38 巻, pp. 826-830.
- 名合宏之・前野詩朗・清水雄一 (1993): 変動水圧によるブロックの沈下にもなう周辺砂地盤の流動の可視化, 海岸工学論文集, 第 40 巻, pp. 516-520.
- 廣部英一・石田啓・矢富盟祥・由比政年 (1996): 波浪による海底地盤内の有効応力の分布特性および地盤の破壊領域, 海岸工学論文集, 第 43 巻, pp. 1026-1030.
- 前野詩朗・名合宏之・小谷裕司・山本哲雄・西田秀紀 (1996): 変動水圧場におけるブロックの沈下に及ぼす鉛直変動荷重の影響, 海岸工学論文集, 第 43 巻, pp. 1031-1035.
- Madsen, O. S. (1978): Wave-induced pore pressure and effective stress in a porous bed, Geo-technique 28, No. 4, pp. 377-393.
- Nago, H. and Maeno, S. (1987): 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.
- Yamamoto, T. (1977): Wave induced instability in seabeds, Proceedings of the ASCE, Spec. Conference, Coastal Sediments, pp. 898-913.