

# 振動流・水圧変動共存下での地盤内間隙水圧分布

酒井哲郎\*・後藤仁志\*\*・川崎順二\*\*\*・高尾和宏\*\*\*\*

## 1. 緒 言

海岸構造物や消波ブロックの沈下・埋没などの被災に、波浪の伝播による海底地盤内間隙水圧の変動とそれに伴う地盤内有効応力の変動が介在していることはよく知られるところである。海底地盤内間隙水圧の変動特性については、室内実験(例えば、名合；1982, 善ら；1987), 現地観測(例えば、善ら；1989, 酒井ら；1991, 前野ら；1992)を問わず多くの計測が実施され、種々の解析モデルも提案されている。これらのモデルを現地に適用するには、モデル定数の適切な推定が不可欠であるが、種々の定数の中には現地計測では測定困難なものもある。泉宮ら(1994)は、地盤定数推定に観測された水圧変動のスペクトル特性を利用する方法を提案している。

このような既存のモデルの現地への適用の容易さの問題と同様に、モデルの構成要素の基本的特性を明らかにするための基礎的研究も重要である。海底地盤の波浪応答には、地盤と波浪に関する諸要因が複雑に関与しているため、全体像の把握には個々の要因の影響を抽出して把握する必要がある。名合ら(1995)は、被圧海底地盤の相似律について検討しているし、矢富ら(1995)は海底地盤の異方性が波浪応答特性に与える影響について解析的に検討している。

ところで、既往の室内実験の中には、地盤工学的観点から数メートルに及ぶ層厚を対象として実施されたものが多く、地盤面付近の変動特性の詳細に関してはデータの蓄積が充分ではない。現実の海浜では地盤内間隙水圧変動に誘起される地盤変動と漂砂現象との相互干渉領域は地盤表面付近に存在し、両者の相互作用の解明が必要である。

酒井ら(1993)は、この点に鑑み、地盤表面付近の間隙水圧変動について詳細な計測を行うとともに、1次元圧密方程式と同型の善ら(1987)の式を基に解析解を導出した。さらに、酒井ら(1994)は、水圧変動に対する地盤内間隙水圧の impulse 応答特性を把握するため、階

段関数的な水圧増加を与えて間隙水圧の緩和過程を計測し、畳み込み積分形式の緩和過程モデルを用いて、impulse 応答特性から正弦波型の水圧変動に対する応答の再現が可能であることを示した。

これら一連の室内実験では、実験装置の耐圧性能上の問題などから、作用水圧の範囲が比較的低く設定されていたので、酒井ら(1995)は、暴浪時の高波圧を想定して、既往の室内実験よりも高い圧力振幅の水圧変動の作用下での地盤の応答特性に関して実験的に検討した。

本研究では、間隙水圧変動に誘起される地盤変動と漂砂現象との相互干渉領域としての現実の海底地盤表面の挙動の基本的特性を把握するため、振動流・水圧変動共存場における地盤内間隙水圧の計測を実施する。

## 2. 実験装置、実験方法

実験は、図-1に示す水圧変動系付の振動流装置を用いて実施した。この装置は、鋼製の砂層水槽に振動流発生用のプロペラ付閉管路と水圧変動発生用の油圧式シリンドラを取り付けたもので、振動流・水圧変動共存場を模擬可能である。砂層水槽の大きさは  $140\text{ cm} \times 90\text{ cm} \times 30\text{ cm}$ 、流水断面は  $30\text{ cm} \times 30\text{ cm}$ 、砂層の断面は  $60\text{ cm} \times 30\text{ cm}$  である。間隙水圧センサーは地盤表面を基準に深さ  $z=0.0, 2.0, 4.0, 7.0, 10.0\text{ cm}$  の5点の壁面に埋め込まれて配置されており、間隙水圧変動の時系列がこれらのセンサーにより計測された。

また、この装置では、水圧変動および流速に関してパーソナルコンピュータによるフィードバック制御が導入されている。水圧のモニターは、砂層水槽の流水部の装置側壁に取り付けられた水圧センサーを通じて、流速のモニターは、閉管路に取り付けられた電磁流量計を通じて行われる。このフィードバックシステムは任意波形の水圧変動と流速を発生させることが可能であるが、ここでは、地盤内間隙水圧の基本的な特性の把握を目的として、正弦波型の変動を与えることとし、水圧変動と振動流を同位相で作用させた。

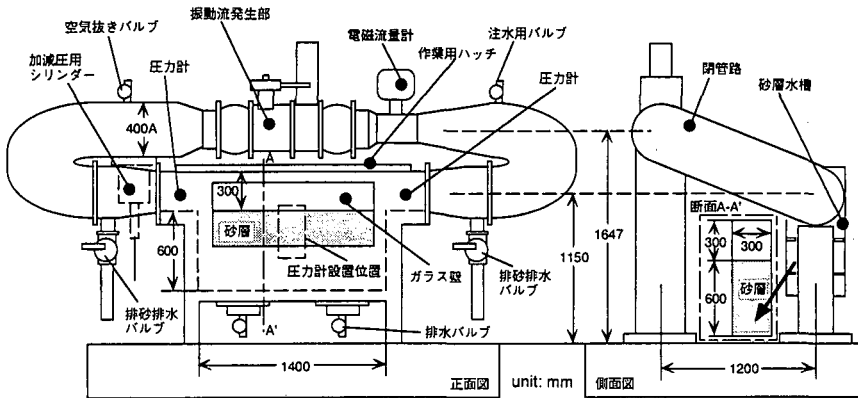
変動周期は、 $T=3.0, 6.0$  秒の2種類、水圧変動全振幅は、 $\Delta p=0.5, 1.0, 1.5\text{ m}$  の3種類を対象とした。地盤材料は、中央粒径  $d=0.025\text{ cm}$  の砂で、間隙比の最大

\* 正会員 工博 京都大学教授 工学研究科土木工学専攻

\*\* 正会員 工博 京都大学講師 工学研究科土木工学専攻

\*\*\* 正会員 工修 ニュージェック

\*\*\*\* 大阪府



図一 実験装置

値は  $e_{\max}=0.96$  であり,  $e_{\max}$  における透水係数は,  $k=3.9 \times 10^{-2} \text{ cm/s}$  であった.

ところで, この装置で水圧変動・振動流共存場を模擬する場合, 水圧変動振幅と流速振幅の任意の組み合わせが個々の系の性能の範囲内で可能であるが, 現実の波浪場では両者間に制約条件が存在する. ここでは, 水圧変動振幅と流速振幅を独立に変化させるケースの他に, 微小振幅波を対象として以下のような方法で両者の従属関係を考慮した実験ケースの設定を行った.

微小振幅波理論で底面近傍流速振幅  $U_b$  は, 波高  $H$ , 波長  $L$ , 周期  $T$  および平均水深  $h$  をパラメータとして,

$$U_b(H, L, T, h) = \frac{\pi H}{T} \frac{1}{\sinh 2\pi \frac{h}{L}} \dots\dots\dots (1)$$

と書ける. 底面近傍流速振幅は実験装置の流速振幅  $\Delta U$  に, 波高は水圧変動全振幅  $\Delta P$  に相当する. この実験装置は密閉型の装置であるから, 実験開始以前の注水量に応じて初期水圧が変化するが, この初期水圧がここで言う平均水深に相当する. 平均水深については, 装置の耐圧性能上の制約から,  $0.5 \sim 3.0 \text{ m}$  の範囲で変化させた. また, 波長については一様水深の下での関係

$$L = \frac{gT^2}{2\pi} \tanh \frac{2\pi h}{L} \dots\dots\dots (2)$$

を満足させるように算定した.

なお, 実験前に予備的な加減圧操作を行って地盤を締め固めて間隙比を調節し, 3 種類の地盤 (間隙比,  $e=0.85, 0.80, 0.75$ ) について実験を行った. なお, 予備的な加減圧操作と地盤の締め固め状態の関係に関しては試行錯誤的に検討した.

### 3. 水圧変動下の地盤内間隙水圧分布の特性

#### 3.1 地盤飽和度の影響の検討

地盤飽和度は, 実験前の予備的なボイリング操作に大きく依存するが, 昨年度までの実験 (例えば, 酒井ら, 1995) では, 間隙水圧センサーの設置場所付近の地盤のボイリングのみを行っていた. 本研究では, 砂層の全領域でボイリングを行ったので昨年度の計測より飽和度が高くなっていることが期待される. そこで, ボイリング操作の地盤内間隙水圧分布特性への影響を知るため, 2 つのボイリング条件での計測結果を比較した. 第 1 のケースは, 静水中に乾燥した砂を投入しボイリング操作を行わずに計測を実施する場合, 第 2 のケースは, 砂層に強制的に水を注入して砂層を攪拌し気泡を除去した場合である.

#### 3.2 地盤飽和度の影響

上記の 2 つのケースにおける計測結果について, ボイリング操作を行わなかった場合を図-2 に, ボイリング操作を行った場合を図-3 に示す. 両図ともに計測の条件は, 間隙比  $e=0.80$ , 水圧の変動周期  $T=6 \text{ s}$  で, 地盤表面の水圧振幅  $\Delta P$  を変化させた際の地盤内間隙水圧の変動振幅  $A_R$  と地盤内間隙水圧と地盤表面の作用水圧の位相差  $\theta$  の鉛直分布を示しており, 座標原点が地盤の表面に対応している. 図中の実線は, 酒井ら (1995) による地盤内間隙水圧分布の解析解であって

$$\frac{p}{P_0} = A_R \cos \left( 2\pi \frac{t}{T} + \theta \right) \dots\dots\dots (3)$$

$$A_R = \sqrt{\left( 1 - \frac{1}{\alpha} \right)^2 e^{2\varphi} + \frac{2}{\alpha} \left( 1 - \frac{1}{\alpha} \right) e^{\varphi} \cos \varphi + \frac{1}{\alpha^2}} \dots\dots\dots (4)$$

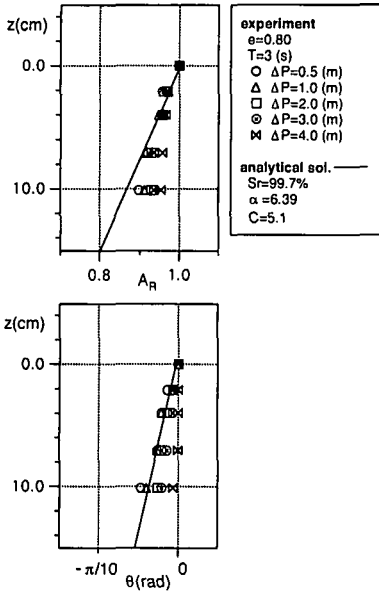


図-2 不飽和地盤内の間隙水圧分布

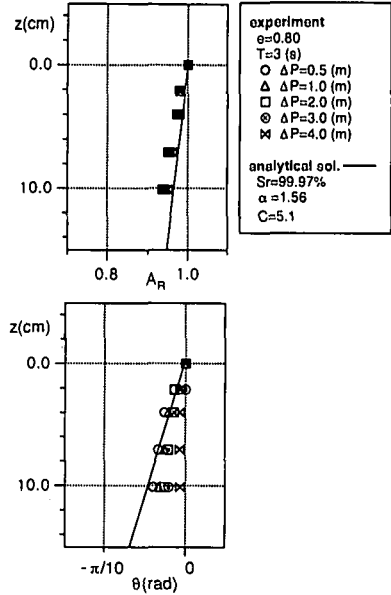


図-3 高飽和度地盤内の間隙水圧分布

$$\theta = \tan^{-1} \left\{ \frac{-\left(1 - \frac{1}{\alpha}\right) e^{\varphi} \sin \varphi}{\left(1 - \frac{1}{\alpha}\right) e^{\varphi} \cos \varphi + \frac{1}{\alpha}} \right\} \dots\dots\dots (5)$$

$$\alpha = 1 + \frac{nm_w}{m_v}, \quad C = \frac{k}{\gamma_w m_v} \frac{T}{l^2} \dots\dots\dots (6)$$

で与えられる。ここに、 $p$ : 深さ  $z$  における過剰間隙水圧、 $P_0$ : 砂層表面に働く水圧変動振幅 ( $P_0 = \Delta p/2$ )、 $t$ : 時間、 $k$ : 地盤の透水係数、 $\gamma_w$ : 水の単位体積重量、 $m_v$ : 土粒子骨格の体積圧縮係数、 $m_w$ : 間隙水の圧縮率、 $z$ : 砂層表面を原点とする鉛直下向き座標、 $n$ : 地盤の間隙率、 $l$ : 砂層厚程度の長さスケール、 $T$ : 振動周期である。なお、この式は、1次元圧密方程式と同型の善ら(1987)の基礎式を酒井ら(1993)が進行波による間隙水圧変動の解析解の誘導における Mei・Foda (1981)の方法を参考に、Stokes boundary layerの解を利用して解析的に解いた式を、水圧変動振幅と位相差とが陽に表れる形式で表示し直したものである。

高飽和度の場合の計測では、地盤表面作用水圧を増加させた場合の地盤内間隙水圧の圧力振幅の分布特性の変化が低飽和度の場合ほど顕著ではない。

そこで、解析解中のパラメータの中で地盤飽和度に関与する間隙水の圧縮率について、善ら(1987)による関係式

$$m_w = m_{w0} S_r + \frac{1 - S_r}{p_{mg}} \dots\dots\dots (7)$$

を導入し ( $m_{w0}$ : 飽和水の圧縮率、 $S_r$ : 地盤の飽和度、

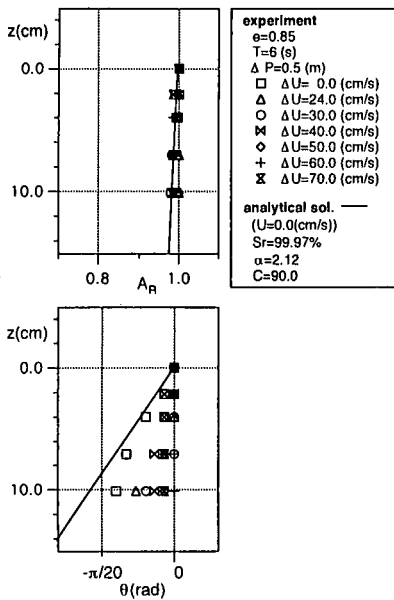
$p_{mg}$ : 絶対圧力で表した間隙水圧)、作用水圧の振幅が小さいケースにおいて解析解と計測結果とを一致させるように地盤飽和度を逆算することとした。ボーリングを行わないケースについては、 $S_r = 99.7\%$  が、ボーリングを行ったケースに関しては、 $S_r = 99.97\%$  が得られた。図-2 および図-3 の解析解と  $\Delta P = 0.5$  m の場合の計測結果とがほぼ良好に一致していることから、ここに見られるボーリングの有無による間隙水圧分布の特性の相違は、地盤飽和度の相違と解釈できる。

#### 4. 振動流・水圧変動共存場の地盤内間隙水圧分布

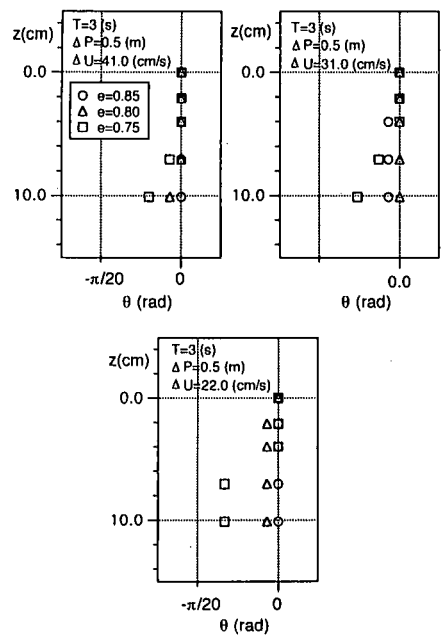
##### 4.1 流速振幅の変化の影響

図-4 は、間隙比  $e = 0.85$ 、地盤表面の水圧振幅  $\Delta P = 0.5$  m、水圧と振動流の変動周期  $T = 6$  s の条件で、振動流の流速振幅  $\Delta U$  を変化させた際の地盤内間隙水圧の変動振幅  $A_R$  と地盤内間隙水圧と地盤表面の作用水圧の位相差  $\theta$  の鉛直分布を示しており、座標原点が地盤の表面に対応している。図中には、酒井ら(1993)の解析解(水圧変動のみの場合が対象で、地盤の飽和度  $S_r = 99.97\%$  とした場合)を併示している。なお、この図に関しては、流速振幅の変化の影響を系統的に把握するため、振動流の流速振幅と地盤表面作用水圧の振幅の関係については式(1)、(2)の制約を満たさないケースも加えている。

間隙水圧の変動振幅  $A_R$  に関しては、図-3 で見られた地盤表面作用水圧の変動振幅を変化させた場合と同様



図—4 流速振幅の影響



図—5 微小振幅波の制約下の地盤内間隙水圧

に、振動流の流速振幅の変化が地盤内間隙水圧分布に及ぼす影響は顕著ではない。

一方、位相差  $\theta$  に関しては、水圧変動のみの場合 ( $\Delta U=0.0$  cm/s) には解析解と同様に、深い測点ほど地盤表面の作用水圧との位相差が増大し、地盤表面から深さ方向に間隙水圧変動が遅れて伝播することが示されている。同一の間隙比、水圧変動振幅、変動周期の下に振動流の流速振幅を徐々に増加させると、位相差は減少する。すなわち、地盤内間隙水圧の地盤表面作用水圧の変動に対する応答遅れは減少する。多少のばらつきはあるが、この傾向は流速振幅の増加とともに顕在化して、間隙水圧分布の一樣化傾向（変動の応答遅れの減少）は深い位置にまで及ぶようになる。このような分布特性の変化は、振動流の作用により砂層が水平方向にせん断されて、少なくとも砂層表層の近傍では砂粒子間の噛み合わせが外れやすくなり、砂粒子間の間隙が増大して砂層の透水性が増加し、その結果、水圧変動が地盤内に迅速に伝搬されたことが関連しているものと考えられる。

#### 4.2 微小振幅波の制約下の間隙水圧分布の特性

図—5 は、微小振幅波を対象として、水圧変動振幅と流速振幅の従属関係（式（1）、（2））を満足する実験ケースについて、間隙比の相違による位相差の分布の相違を示したものである。地盤表面の水圧振幅  $\Delta P=0.5$  m、水圧と振動流の変動周期  $T=3$  s の条件で、振動流の流速振幅  $\Delta U$  の異なる 3 つのケースの地盤内間隙水圧と地盤表面の作用水圧の位相差  $\theta$  の鉛直分布が示されており、座標原点が地盤の表面に対応している。何れの流速

振幅  $\Delta U$  についても、地盤の間隙比が大きくなるほど地盤内間隙水圧の地盤表面作用水圧に対する応答遅れが減少して、地盤内間隙水圧分布の一樣化傾向が強くなっている。

同一の間隙比（例えば、 $e=0.75$ ）について見ると、振動流の流速振幅の増大とともに間隙水圧の一樣化傾向が強くなることが分かる。このことは、図—4 で示されたことと同様であるが、ここでは、微小振幅波の制約を満足する水圧変動振幅と流速振幅の組み合わせについても、流速振幅が地盤内間隙水圧分布に与える影響が無視できないことが改めて示されたものと言える。

#### 5. 結 語

本研究では、間隙水圧変動に誘起される地盤変動と漂砂現象との相互干渉が活発な現実の海底地盤表層の挙動について、その基本的特性を把握するため、振動流・水圧変動共存場における地盤内間隙水圧の計測を実施した。振動流・水圧変動共存状態の計測に先だって、水圧変動のみの場合について地盤の飽和度が間隙水圧分布の特性に与える影響を検討し、飽和度の大小により地盤内間隙水圧の変動振幅の分布に大きな相違があることを確認した。高飽和の状態では、間隙水圧の変動振幅の鉛直分布は、地盤表面作用水圧の影響をあまり受けないのに対して、微細気泡が地盤内に混入した不飽和状態では、地盤表面作用水圧の変化とともに間隙水圧の変動振幅の鉛直分布も大きく変化する。

次に、振動流・水圧変動共存場に関して、特に振動流の流速振幅が地盤内間隙水圧の応答特性に与える影響について検討した。同一の間隙比、水圧変動振幅、変動周期の下に振動流の流速振幅を徐々に増加させると、流速振幅の増大とともに地盤表面作用水圧と地盤内間隙水圧の位相差は減少し、間隙水圧分布の一樣化傾向が顕在化する。この傾向は、微小振幅波の制約条件を満足する水圧変動振幅と流速振幅の組み合わせについても明瞭に確認された。

今後は、さらに広範囲の条件での計測を行い、広範囲の条件で地盤内間隙水圧分布の特性の系統的把握に努めるとともに、解析解から変倚した分布に関しても説明が可能な間隙水圧分布の計算法についても検討したい。

### 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.
- 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.
- 酒井哲郎・間瀬 肇・山本哲也 (1993): 水圧変動による地盤表面付近の間隙水圧変動, 海岸工学論文集, 第40巻, pp. 586-590.
- 酒井哲郎・後藤仁志・森川 淳・柏村真直 (1994): 海底面の水圧変動に対する地盤内間隙水圧の応答特性に関する基礎的実験, 水工学論文集, 第38巻, pp. 511-516.
- 酒井哲郎・後藤仁志・森川 淳・川崎順二 (1995): 高波圧を受ける海底地盤内間隙水圧の分布特性, 海岸工学論文集, 第42巻, pp. 1021-1025.
- 名合宏之 (1982): 変動水圧による砂層の液状化に関する研究, 第26回水理講演会論文集, pp. 589-594.
- 名合宏之・前野詩朗 (1995): 変動水圧作用下における高飽和度砂層の動的現象の相似律に関する研究, 土木学会論文集, No. 509/II-30, pp. 45-53.
- 前野賀彦・唐内仁司・鈴木芳博・矢部興一 (1992): 波浪による海底地盤の液状化と底質浮遊の現地観測, 海岸工学論文集, 第40巻, pp. 576-580.
- 普 功企・山崎浩之・渡辺 篤 (1987): 海底地盤の波浪による液状化—現地観測及び解析—, 運輸省港湾技術研究所報告, 第26巻, 第4号, pp. 125-180.
- 普 功企・山崎浩之・佐藤 泰 (1989): 海底地盤の波浪による液状化及び高密度化, 運輸省港湾技術研究所報告, 第28巻, 第3号, pp. 29-57.
- 矢富盟祥・由比政年・石田 啓・広部英一 (1995): 海底地盤の波浪応答に対する地盤の異方性の影響, 海岸工学論文集, 第42巻, pp. 1011-1015.
- Mei, C. C. and Foda, M. A. (1981): Wave-induced responses in a fluid-filled pore-elastic solid with a free surface - a boundary condition theory, Geophys. J. R. Astr. Soc., Vol. 66, pp. 597-631.