

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

Experiment on Dynamic Response of Porewater Pressure in Seabed

酒井哲郎*・後藤仁志**・森川 淳***・柏村真直***

By Tetsuo SAKAI, Hitoshi GOTOH, Jun MORIKAWA & Manao KASHIMURA

Time series of the porewater pressure in seabed under the action of the changing water pressure was experimentally investigated. Firstly, the response of porewater pressure to an abrupt change of the water pressure at the bed surface was measured. Secondly, a simple impulse-response model was proposed to estimate the time scale of the relaxation of porewater pressure on the basis of the experimental results. Finally, the transient process of porewater pressure under a sinusoidal change of the water pressure at the bed surface was reproduced by the proposed impulse-response model.

Key words: porewater pressure, seabed, impulse-response, relaxation, transient process

1. はじめに

波浪による海底地盤の有効応力の減少の繰返しは、海岸構造物や消波ブロックなどの沈下・埋没などの災害の有力な原因の一つである。有効応力の減少の機構を理解するには、地盤内間隙水圧の挙動の把握が重要であるとの認識から、これまでに多くの室内実験や現地観測が実施されてきた（例えば、名合¹⁾、善・山崎・渡辺²⁾、酒井・間瀬・Cox・上田³⁾）。また、これらと平行して、解析的な面からの研究も進められ、地盤内間隙水圧分布や有効応力分布についての種々の解析解が提案されている。

従来の研究の多くが地盤工学的観点に立っていたことから、間隙水圧の測定位置が深く設定されることが多かったが、著者ら⁴⁾は、最近、漂砂現象やそれに伴う洗掘現象と地盤との相互作用を明らかにするための基礎的知見を得ることを目的として、地盤表面付近の間隙水圧を測定する室内実験を行なった。著者らの実験では、U字管式振動流装置の両端を閉じて空気室とし、空気室への送風量を調節することでU字管内部の圧力を調節する方式の実験装置を用いたが、この装置の特性上の制約から、水圧変動時系列の詳細な制御が難しく、間隙水圧の最大振幅に絞って検討を行なった。

本研究では、新たに圧力変動の制御が容易な閉管路型の実験装置を作成し、水圧変動下における地盤表面

* 正会員 工博 京都大学教授 工学部土木工学教室
(〒606 京都市左京区吉田本町)

** 正会員 工博 京都大学助手 工学部土木工学教室

*** 学生会員 京都大学大学院 工学研究科土木工学専攻

付近の間隙水圧の時間変化の詳細な測定を試みる。新しい実験装置は、フィードバック制御の導入により、任意の波形に従う水圧変動を再現できる特徴を有している。そこで本研究では、従来の正弦波型の水圧変動に加えて、階段関数的な水圧変動に対する間隙水圧の応答過程の測定を行ない、緩和過程としての地盤内間隙水圧の動的特性の把握を試みる。さらに、実験結果に基づいて緩和時間スケールの推定を行ない、簡便な間隙水圧の応答モデルを提案し、正弦波型の水圧変動に対する応答過程の再現を試みる。

2. 実験装置および実験の概要

2.1 実験装置

実験装置は、図-1に示すような閉管路にプロペラと加減圧用シリンダーを取付けたもので、振動流と水圧変動を同時に発生させることができるが、今回は振動流を発生させず、圧力変動のみを生じさせて実験を行った。閉管路の水平部には砂槽水槽（幅30cm、深さ90cm、長さ140cm）が設けられており、被圧地盤の挙動を再現できる。計測部の流水断面は、幅30cm、深さ30cmで、砂層の深さは、60cmである。また、砂槽水槽の上面にはハッチがあり、砂の補給、地盤面の敷均しなどの作業が行なえる。加減圧はシリンダーを油圧制御することにより実現されるが、砂槽水槽の側方に取付けられた圧力計により検出された作用圧力に基づくフィードバック制御が行なわれるので、任意の水圧変動波形を再現可能である。この圧力制御は、専用のパーソナルコンピュータにより行なわれる。

地盤材料としては、中央粒径 $d_{50}=0.25\text{mm}$ の砂（株）林化成コニカル硅砂6号）を用い、砂槽水槽の中央断面での地盤内間隙水圧を計測した。間隙水圧は、図-2に示すように金属板に取付けられた5個の間隙水圧センサーにより測定された。最上部のセンサーの中心を地盤表面に一致させると深さ10cmまでの水圧測定が可能である。さらに、センサーを固定している金属板は側壁の溝に埋め込まれており、上下に移動可能である。今回の計測では、センサー取付け部を下方に移動させ、深さ0～24.5cmにわたって計測を行なった。

2.2 実験条件

実験は、(i)水圧急増（階段関数型）および(ii)正弦波型の水圧変動の2種類に大別され、水圧の最大・最

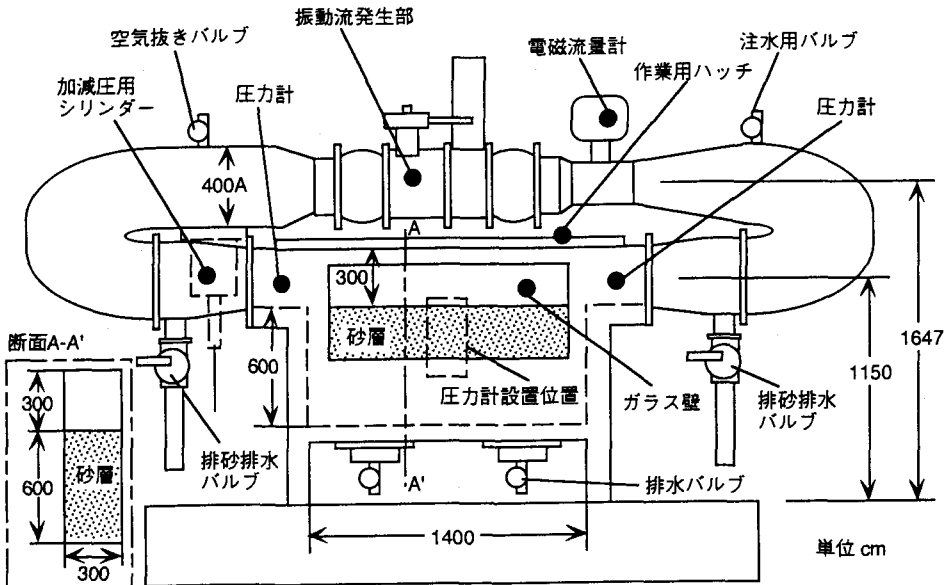


図-1 実験装置

表-1 実験条件

	$P_{\max}(m)$	$P_{\min}(m)$	$T(s)$
Run 1	0.22	0.17	impulse(∞)
Run 2	0.22	0.17	3
Run 3	0.22	0.17	6

小値を固定し、正弦波については振動周期を変えて、表-1に示すケースでの実験を行なった。間隙水圧計からの出力電圧は、AD変換されて、レコーダーに記録され、予め作成した検定曲線により圧力（単位 m）に変換された。実験に際しては、地盤内の気泡の残留を防ぐため、砂層の下部のバルブより徐々に注水し、砂層全体が水没した後に砂層を攪拌した。従って、砂層はかなり緩い状態となっている。

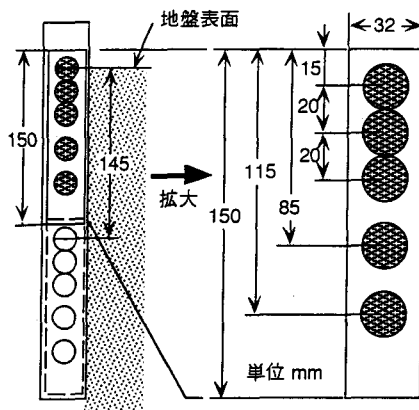


図-2 圧力センサーの配置

3. 階段関数的水圧変動に対する地盤内間隙水圧の応答

3.1 地盤内間隙水圧変動の緩和過程モデル

地表面の水圧変動が地盤中に伝播するには、間隙水が流動することが必要であるが、間隙水の流動は瞬時には生じないので、地表面の水圧変動と地盤内間隙水圧の変動の間には、遅れが生じる。本研究では、このような地盤内間隙水圧変動の本質的特性を簡潔かつ端的に表現するために、緩和過程モデルを採用する。

緩和過程としての基本的特性に関して考察するため、一定幅の水位上昇が瞬間的に生じる場合について考える。具体的には、図-3に示すように、時刻 t_0 に地盤表面の水圧が P_0 から P_1 に瞬間的に増加する状況を想定する。図中には、この場合の地盤内間隙水圧の変化について模式的に示しているが、このような地盤内間隙水圧の挙動 $P(t,z)$ は、次式で簡潔に定式化することができる。

$$P(t,z) = P_0 + \rho g z + (P_1 - P_0) \left[1 - \exp \left\{ -\frac{t}{\Gamma(z)} \right\} \right] \quad (1)$$

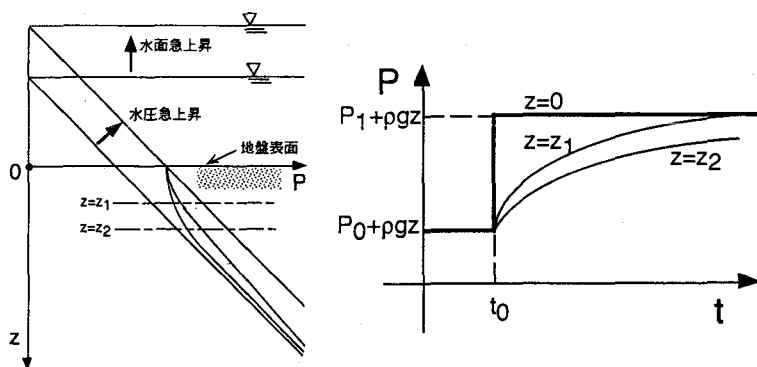


図-3 間隙水圧緩和過程の模式的表現

ここに、 z ：地盤表面を原点とした鉛直下向きの座標、 ρ ：水の密度、 g ：重力加速度、 t ：時間軸、 $\Gamma(z)$ ：深さ z における緩和時間スケールである。ところで、地盤表面では瞬間的応答が保障される必要があるから、地盤表面における境界条件は、

$$P(t_0, 0) = P_1 \quad \text{or} \quad \Gamma(0) = 0 \quad (2)$$

と書ける。さらに、応答過程としての本質的部分を抽出するため、初期水位における静水圧からの偏差を

$$p(t, z) = P(t, z) - P_0 - \rho g z \quad (3)$$

のように分離し、初期静水圧からの偏差について重畳積分を用いた一般形で表すと、

$$p(t, z) = \int_0^{\infty} p_b(t - \tau) T_R(\tau | z) d\tau \quad (4)$$

となる。ここに、 $p_b(t)$ ：地盤表面水圧の時間変化であり、ここで示した階段関数的変化だけでなく任意の時間変化を表している。また、 $T_R(\tau | z)$ は、深さ z における水圧変動の地盤表面水圧に対する応答関数であり、式 (1) で用いた指数的減衰を仮定すると、次式のようになる。

$$T_R(\tau | z) = \frac{1}{\Gamma(z)} \exp\left\{-\frac{\tau}{\Gamma(z)}\right\} \quad (5)$$

ところで、図-3 で想定したような地盤表面の水圧の瞬間的变化は、階段関数 (Heaviside 関数) を用いて、

$$p_b(t) = p_{b0} \cdot \text{He}(t) \quad ; \quad \text{He}(t) = \begin{cases} 0 & ; \quad t < 0 \\ 1 & ; \quad t \geq 0 \end{cases} \quad (6)$$

と記述される。ここに、 p_{b0} ：地盤表面での初期水圧の増分である。そこで、式 (6) を重畳積分型の式 (4) に代入し、応答関数として式 (5) を仮定して積分を実行すると、

$$p(t, z) = p_{b0} \cdot \int_0^{\infty} \text{He}(t - \tau) \frac{1}{\Gamma(z)} \exp\left\{-\frac{t - \tau}{\Gamma(z)}\right\} d\tau = p_{b0} \cdot \left[1 - \exp\left\{-\frac{t}{\Gamma(z)}\right\}\right] \quad (7)$$

が得られ、経験的に導出された式 (1) の関係は重畳積分型の一般式 (4) において指数型の応答関数を用いた場合に相当することが示される。

3.2 緩和時間スケールの推定

前節では、地盤表面水圧の階段関数的変化に対する地盤内間隙水圧の応答過程を緩和過程としてモデル化したが、実現象に適用するには緩和時間スケールの推定を行なう必要がある。

図-4 は、階段関数状の入力信号を与えた場合の、計測された間隙水圧の時系列の一例である。十分に時間が経過すると何れの測点の水圧も一定値に収束し、収束時には全ての測点で同一の水圧増分を示している。また、収束の速さは、測点の深さが増加するにつれて遅くなっており、深い測点ほど間隙水圧の応答が鈍化することが分かる。そこで、測点ごとの応答性を比較するため、収束に要する時間 t_R を次式で定義する。

$$\frac{p(t_R, z)}{p_{b0}} = \alpha_R \quad (8)$$

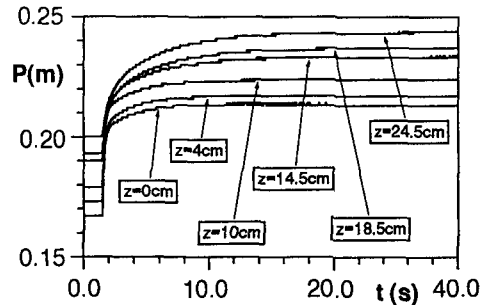


図-4 間隙水圧変動の時系列 (階段関数型)

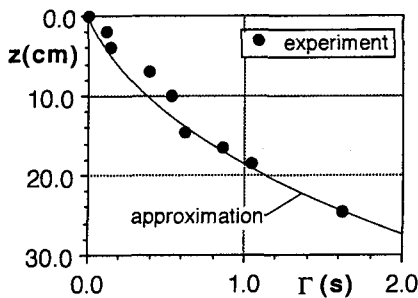


図-5 緩和時間スケール

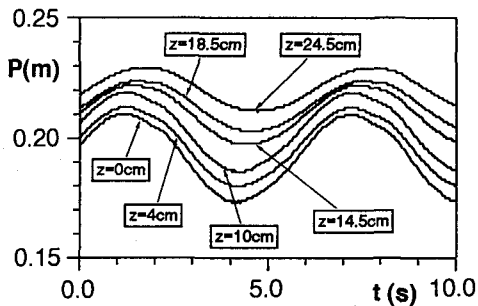


図-6 間隙水圧変動の時系列 (正弦波型)

ここに、 α_R ：打ち切り判定のための定数であり、ここでは、地盤表面での初期水圧の増分にほぼ完全に一致した時点で収束と判断し、 $\alpha_R=0.9999$ とする。さらに、間隙水圧の時間変化が式 (7) に従うものと仮定すると、緩和時間スケールは次式で記述できる。

$$\Gamma(z) = -\frac{t_R}{\ln(1-\alpha_R)} \quad (9)$$

ところで、観測された間隙水圧変動には、油圧装置や加圧用シリンダーなどの機械系の応答遅れが含まれている。ここでは、与えた電気信号（階段関数）に対する地盤表面の水圧の応答遅れを差し引くことにより、機械系の応答遅れを除去している。すなわち、緩和時間スケールを次式で補正する。

$$\Gamma(z) \equiv \Gamma'(z) - \Gamma_0 \quad (10)$$

ここに、 $\Gamma'(z)$ ：補正前の緩和時間スケール、 Γ_0 ：機械系の応答の緩和時間スケールであり、地盤表面の水圧の緩和時間スケールがこれに相当する。

図-4に示す変動時系列から収束に要する時間 t_R を読み取り、緩和時間スケールの深さ方向の変化を示したのが、図-5である。図中の実線は、緩和時間スケールの近似式

$$\Gamma(z) = -\alpha_R z (1 + \beta_R z) \quad ; \quad \alpha_R = 0.258, \beta_R = 0.059 \quad (11)$$

を示している。

4. 正弦波型水圧変動に対する地盤内間隙水圧の応答

ここでは、解釈の容易さおよび解析解の取り扱いの容易さに配慮して、正弦波を対象として、地盤表面に周期的な水圧変動が作用する際の間隙水圧の応答特性について検討する。地盤表面に周期的な水圧変動下における間隙水圧の時間変化の計測結果を図-6に示す。測点が深くなるにつれて平均圧力は増加するが、圧力振幅が減衰し、位相が遅れていることがわかる。

このような基本的性質を緩和過程として整理することを考える。この場合の地盤表面の水圧変動は、

$$p_b(t) = p_{b0} \cos(\omega t) \quad (12)$$

と書けるから、これを式 (4) に代入し、応答関数として式 (5) を用いて積分すれば、地盤内間隙水圧は、

$$\frac{p(t, z)}{p_{b0}} = \frac{1}{1 + \{\omega \Gamma(z)\}^2} \cos(\omega t) + \frac{\omega \Gamma(z)}{1 + \{\omega \Gamma(z)\}^2} \sin(\omega t) = A_R \cos(\omega t + \theta_R) \quad (13)$$

のようになる。ここに、 A_R ：地盤内間隙水圧の地盤表面の水圧変動に対する応答振幅、 θ_R ：地盤内間隙水圧

の地盤表面の水圧変動に対する位相差であり、緩和時間スケール $\Gamma(z)$ を用いて次式で与えられる。

$$A_R = \frac{1}{\sqrt{1 + \{\omega\Gamma(z)\}^2}} \quad ; \quad \theta_R = \tan^{-1}\{-\omega\Gamma(z)\} \quad (14)$$

次に、実験から求めた最大応答振幅と測点の深さとの関係を図-7 に、ピークの位相差と測点の深さの関係を図-8 に示す。図中の曲線は、式(11)の緩和スケール $\Gamma(z)$ を式(14)に代入して求めたものである。実験値は、周期の増加に伴って圧力振幅の減衰率が低下し、位相差が小さくなる傾向を示しているが、このことは、緩和過程としての基本的性質に他ならない。すなわち、地盤表面の水圧変動に間隙水圧が追従するには一定の時間遅れが必要であり、地盤の状態が変化しなければ時間遅れ（緩和時間スケール）は深さのみの関数となり、振動周期が長いほど追従性が向上して、応答振幅は増加し、位相差は減少する。緩和過程モデルの予測値は、詳細に見るとずれはあるものの、このような応答振幅と位相差の実験結果の傾向をほぼ良好に説明するものである。

5. おわりに

本研究では、新たに作成した閉管路型の実験装置を用いて、水圧変動下における地盤表面付近の間隙水圧の時間変化の詳細な測定を行なった。特に、地盤の応答特性を実験的に明らかにするため、階段関数的な水圧変動に対する間隙水圧の応答時系列を測定し、応答特性を規定するパラメータである緩和時間スケールを実験結果に基づいて推定し、求められた緩和時間スケールを用いて正弦波型の水圧変動時系列の圧力振幅や位相差などの特性量を説明した。本研究ではモデルの簡便性に主眼を置いて、線形応答モデルを採用したが、少なくとも本研究で行なった実験結果については、その基本的特性に関してほぼ良好な説明が可能であることが確かめられた。

今後は、より広範囲の計測を行ない、モデルの適用範囲の拡大に努めるとともに、ここで仮定した応答関数形や実験的に定めた緩和時間スケールを決定する物理機構についても考察を進める予定である。最後に、本研究は、平成5年度文部省科学研究費助成金・一般研究(B)「砂層の液状化、流動化を考慮した碎波帯の漂砂量則に関する研究」(研究代表：酒井哲郎, No.03452211)の補助により遂行されたものであることを付記する。

参 考 文 献

- 1) 名合宏之：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，土木学会，pp.589-594, 1982.
- 2) 善 功企・山崎浩之・渡辺 篤：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3号，pp.125-180, 1987.
- 3) 酒井哲郎・間瀬 肇・Cox, D.T.・上田康浩：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, 1991.
- 4) 酒井哲郎・間瀬 肇・山本哲也：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, 1993.

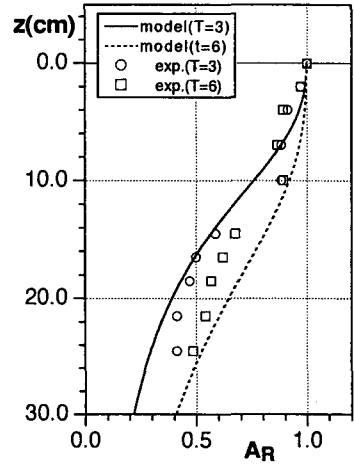


図-7 間隙水圧の応答振幅

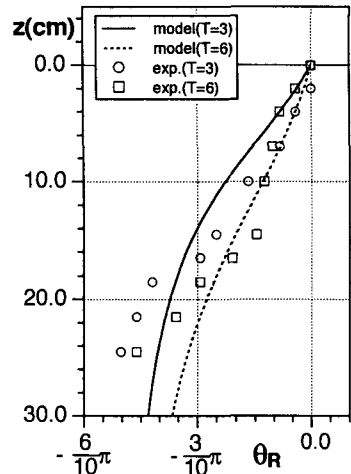


図-8 間隙水圧の位相差