

変動水圧作用下における砂地盤内の水圧分布特性

名 合 宏 之*・ 前 野 詩 朗**

1. ま え が き

離岸堤の沈下現象や土砂の吸い出しによる海岸堤防の損壊などは、波浪時における構造物周辺地盤の動的挙動と密接な関係があると考えられる。このような観点から、著者らは従来より、変動水圧が砂地盤の強度に及ぼす影響について理論的かつ実験的な研究をすすめてきている。図-1 に示されるように、水位変化により砂地盤上の水圧が変化している場合においては、地盤内の水圧は地盤上の水圧変化に対して時間的に遅れて変化し、地盤内では過剰間隙水圧 h' が発生する。このような現象については、著者らは鉛直 1 次元砂層モデルを用いて変動水圧作用下における砂層内の間隙水圧・有効応力の解析を行ない、変動水圧の影響により砂地盤が脆弱化するのみならず、ある条件のもとでは液状化することなどを明らかにしてきている¹⁾。本研究は、以上のような成果を踏まえ、より実際的な問題へのアプローチとして、砂地盤上に構造物を設置した場合の構造物周辺部における砂地盤の動的挙動を 2 次元的に説明することを目的として行なうものである。本報告では、とくに、鉛直 2 次元砂層モデルを用いた理論解析法の妥当性および間隙水圧分布特性と砂地盤の動的挙動との関連に対する若干の考察結果について述べる。

2. 鉛直 2 次元砂層モデルの理論解析法

2.1 鉛直 2 次元砂層モデル

鉛直 2 次元砂層としては、多くの砂地盤上の構造物周辺の形状を単純化した、図-2 に示されるような形状を対象とする。すなわち、厚さ D の砂層地盤内に、斜線で示される厚さ d の構造物が設置されている状態、およびその構造物の先端に長さ l の矢板を取りつけた状態を対象とする。変動水圧 $\rho g h_s(t)$ は構造物前面の砂層面上に作用するものとする。

砂層内における水および砂の運動は、弾性砂層内の浸透流問題と同様な手法^{2),3)}で解析される。すなわち、水の密度、空隙率および砂層の構造骨格は変化するものと

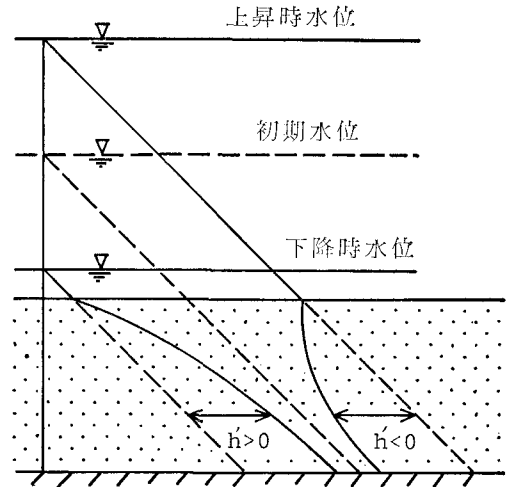


図-1 水位変化にともなう間隙水圧変化

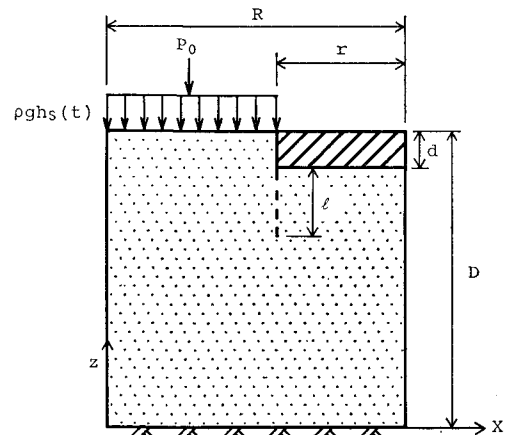


図-2 解析で用いる鉛直 2 次元砂層

する。空隙は水およびわずかの空気により占められており、空隙率 λ は水および空気の含有率 λ_w および λ_a の和によって表わされるものとする。水の流動は Darcy の法則に従い、気泡の体積は Boyle の法則に従うものとする。なお、砂層上面以外の境界は固定境界面とする。

2.2 基礎式

上述のモデルに対して、砂層内水圧分布を解析するた

* 正会員 工博 岡山大学教授 工学部土木工学科

** 正会員 工修 岡山大学助手 工学部土木工学科

めの基礎式は次式のように表わされる⁴⁾。

$$\rho g \left(\beta \lambda_w + \frac{\lambda_a}{P_0 + \rho g h} \right) \frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\partial u_x}{\partial x} + \frac{\partial u_z}{\partial z} \right) = k \left(\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} \right) \dots\dots\dots (1)$$

$$G \left(\frac{\partial^2 u_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u_x}{\partial z^2} \right) + \frac{G}{1-2\nu} \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial u_x}{\partial x} + \frac{\partial u_z}{\partial z} \right) = \rho g \frac{\partial h}{\partial x} \dots\dots\dots (2)$$

$$G \left(\frac{\partial^2 u_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u_z}{\partial z^2} \right) + \frac{G}{1-2\nu} \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\partial u_x}{\partial x} + \frac{\partial u_z}{\partial z} \right) = \rho g \frac{\partial h}{\partial z} \dots\dots\dots (3)$$

ここに、 β : 水の圧縮率、 ρ : 水の密度、 g : 重力加速度、 P_0 : 大気圧、 h : 間隙水圧水頭、 u_x, u_z : x, z 方向の砂層の変位、 k : 透水係数、 G : せん断弾性係数、 ν : ポアソン比である。

2.3 境界条件

上述の方程式系は以下の境界条件のもとで解析される。

矢板がない場合

$(0 \leq x \leq R-r, z=D)$ において $h=h_s(t)$,

$(0 \leq x \leq R, z=0)$ および $(R-r \leq x \leq R, z=D-d)$

において $\partial h / \partial z = 0, u_x = 0,$

$(x=0, 0 \leq z \leq D), (x=R, 0 \leq z \leq D-d)$ および

$(x=R-r, D-d \leq z \leq D)$ において $\partial h / \partial x = 0, u_x = 0$

矢板がある場合

上述の条件のほかに

$(x=R-r, D-d-l \leq z \leq D-d)$ において $\partial h / \partial x = 0,$

$u_x = 0$ がつけ加わる。

2.4 計算方法および計算条件

具体的な計算は重みつき残差法の1つであるガラーキン法による有限要素解析を用いて行なった。図-3に要素分割の1例を示す。

砂層面上に作用する変動水圧は実験によって得られる水中変動圧を用いる。基礎式に含まれる諸定数は以下に述べる実験条件をも考慮し、つぎのような値を採用する。

$$\lambda_a = 0.003, \lambda_w = 0.4, k = 0.015 \text{ cm/sec}$$

$$\beta = 43.8 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{kg} \quad (44.6 \times 10^{-11} \text{ m}^2/\text{N})$$

$$G = 1.69 \times 10^8 \text{ kg/m}^2 \quad (1.65 \times 10^7 \text{ N/m}^2)$$

$$\nu = 0.48$$

3. 実験装置および実験方法

実験には、図-4に示されるような鉛直2次元砂層模型を用いた。模型の奥行は40cmである。砂層構成材料としては、高飽和状態の砂試料(豊浦標準砂 $d_{50} \approx 0.25 \text{ mm}$)を用いている。構造物前面の砂層面上に約110cm

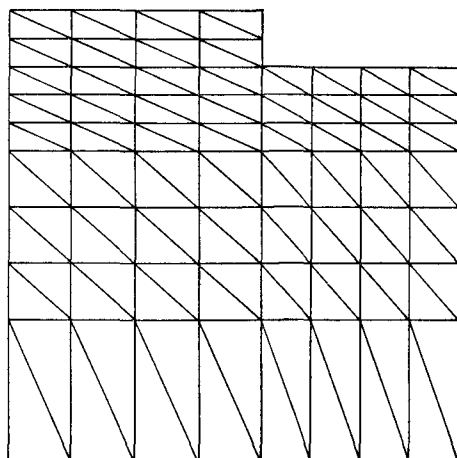


図-3 要素分割の例

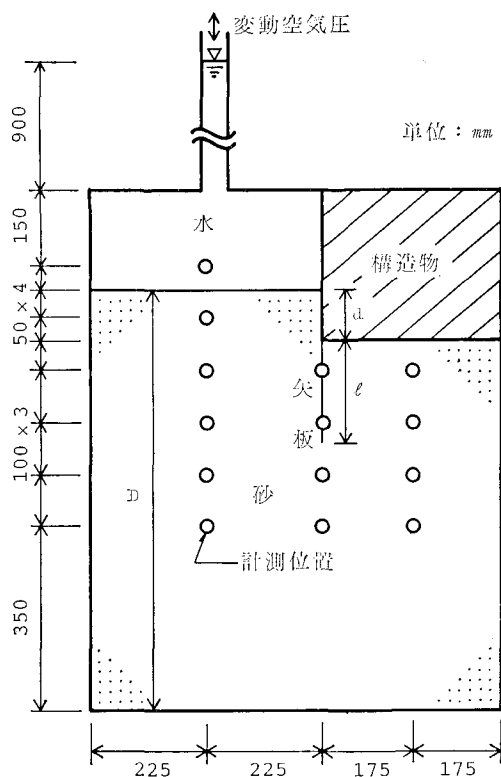


図-4 実験に用いた砂層模型

の水を張り、水面上に周期的変動空気圧を作用させることにより砂層面上に変動水圧を発生させている。その変動圧振幅は水頭にして約40cmであり、周波数は約0.9 Hzである。実験は、表-1に示されるcase 1からcase 4の条件のもとで行なった。case 1およびcase 2は、矢板を設置しない構造物について構造物の根入れ深さ d を変化させた場合であり、case 3およびcase 4は、case 1の状態に、図に示されるような長さ l の矢板を取

表-1 実験条件

case	構造物の根入れ深さ d (cm)	矢板の長さ l (cm)
1	10.0	0.0
2	30.0	0.0
3	10.0	20.0
4	10.0	30.0

りつけた場合である。なお、水中および砂層中の圧力は図中の○印の位置において拡散型半導体圧力変換器により側方から検出している。

4. 結果および考察

図-5 および 図-6 は、case 1 における間隙水圧の時間変化の鉛直方向分布について実験値と理論値を比較したものである。また、図-7 および 図-8 は、case 1 および case 3 におけるその水平方向分布を示している。これらの図における h_0 は変動水圧水頭 h_s の平均

値である。これらの図より、理論解析結果は実験結果の特性をよく説明していることがわかる。また、砂層中に置かれた構造物周辺においては、変動水圧は鉛直方向だけでなく水平方向にも振幅の減衰、位相の遅れを伴いつつ砂層中に伝播しているのがわかる。とくに、構造物の下部においては、水中変動水圧に比べて変動圧振幅は大きく減衰し、また、位相の遅れも大きくなっている。

図-9 は、20 cm の矢板を設置した場合 (case 3) について矢板周辺における間隙水圧の時間変化を示したものである。この図より、矢板を設置した場合も理論解析結果は実験結果をよく説明していることがわかる。矢板の内側においては、変動圧の振幅が大きく減衰しており、深さ方向の振幅の減衰、位相の遅れの差は小さくなっている。

図-10 は矢板がない場合 (case 1) とそれを設置した場合 (case 4) の構造物下部における振幅減衰と位相の遅れを示したものである。振幅減衰については、矢板が

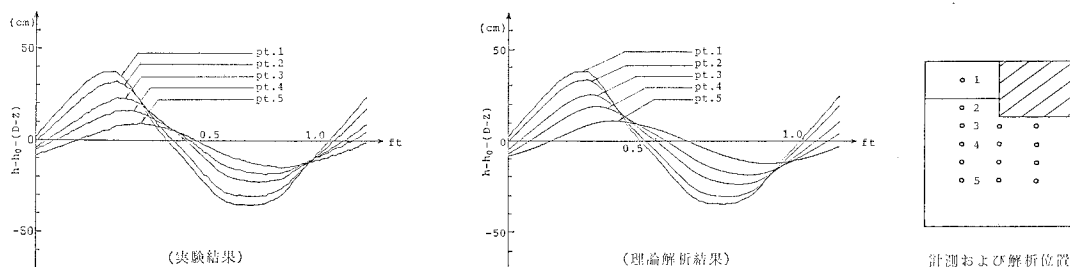


図-5 間隙水圧の時間変化 (case 1, 鉛直方向分布)

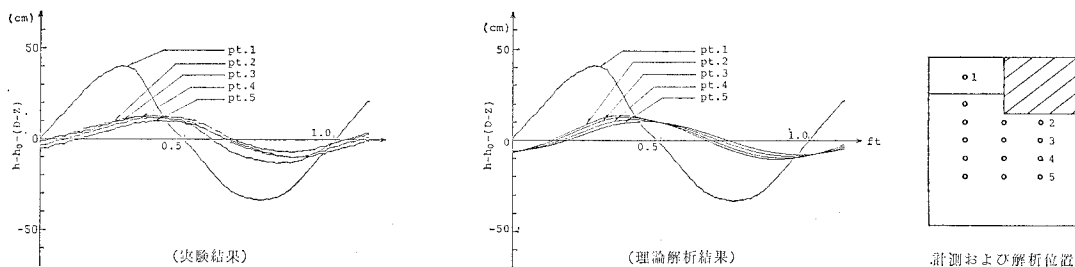


図-6 間隙水圧の時間変化 (case 1, 鉛直方向分布, 構造物下部)

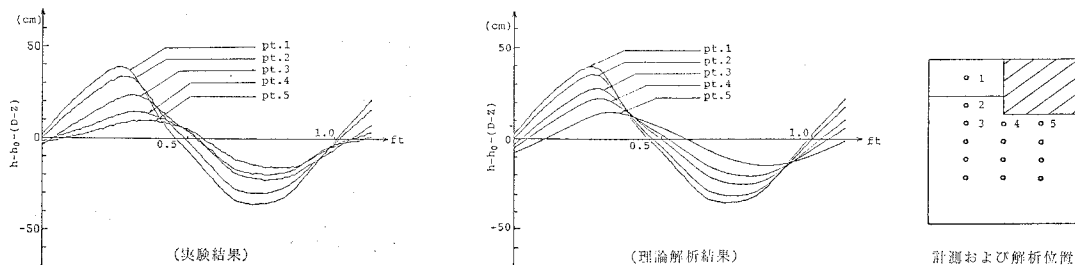
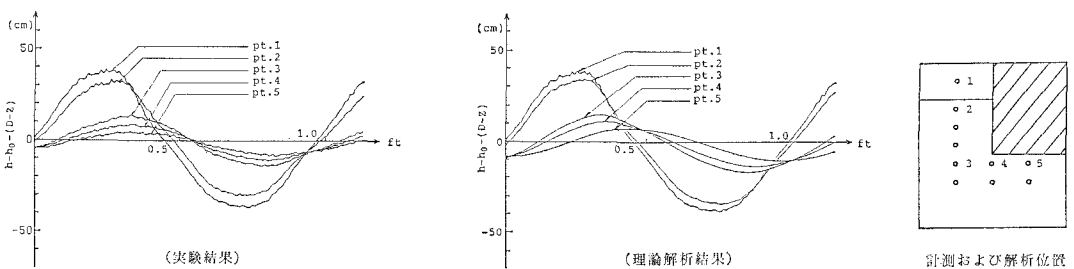
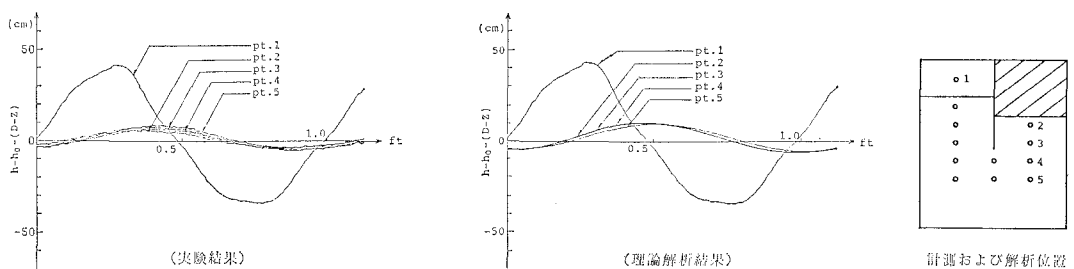


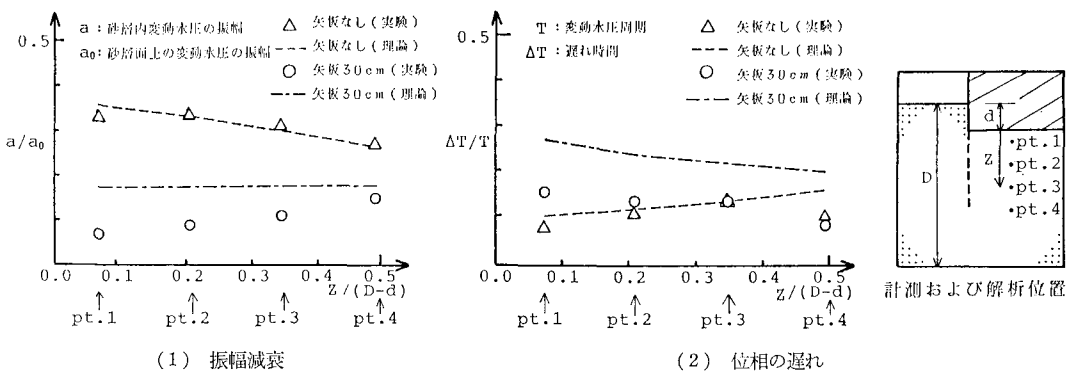
図-7 間隙水圧の時間変化 (case 1, 水平方向分布)



図—8 間隙水圧の時間変化 (case 2, 水平方向分布)



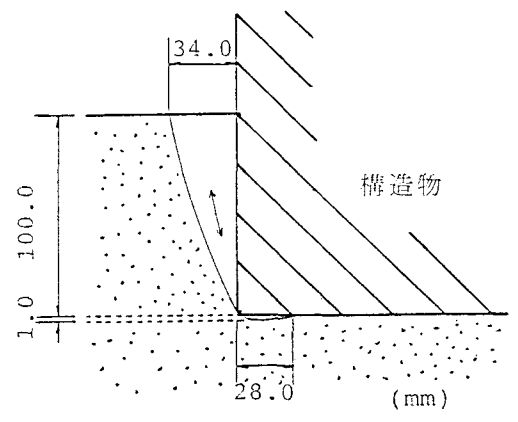
図—9 間隙水圧の時間変化 (case 3, 鉛直方向分布, 構造物下部)



図—10 構造物下部における振幅減衰および位相の遅れ

ない場合には上層から下層へ徐々に減衰し、矢板を設置すると逆に下層から上層へ向って減衰している様子がわかる。すなわち、矢板を設置することによって水圧の伝達経路が変化していることがわかる。位相の遅れについても同様の現象が生じていることがわかる。実験結果を理論結果と比較すると、矢板がない場合には両者は量的にもよく一致している。しかし、矢板を設置した場合には、増減の傾向は一致しているが量的にはかなり差が認められる。この点については本計算で用いた矢板先端近傍の要素分割についても検討の余地が残されている。

図—11 は case 1 の実験中にみられた構造物周辺の砂粒子の移動状況を示したものである。図中の空白部分が砂粒子の移動領域である。これは構造物の下部において



図—11 砂粒子の流動状況

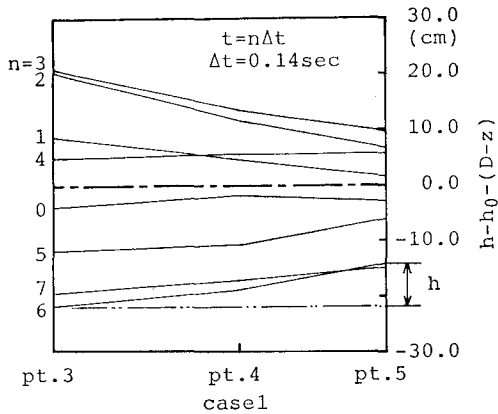


図-12 間隙水圧の水平方向分布

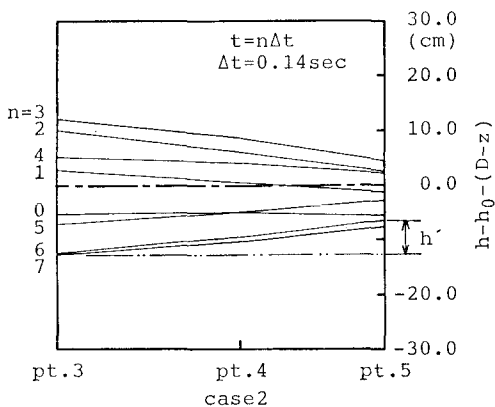


図-13 間隙水圧の水平方向分布

水平方向の変動水圧の振幅の減衰，位相の遅れがあるために，間隙水圧の差が生じ，その結果起る流動現象であると考えられる。

図-12 はこの実験における構造物下部の間隙水圧 (h

$-h_0-D+z$) の水平方向分布を示したものである。この図では，構造物前面の測点 (pt. 3) の水圧に対して構造物下部の測点 (pt. 5) の水圧が最大 $h' \approx 5\text{cm}$ 程度高くなっており，この水圧差による浸透力が砂粒子を移動させていると考えられる。図-13 は case 2 について同様の水圧分布を示したものである。この図では水圧差は case 1 の場合と同程度現われている。しかしこの場合は砂粒子の移動は認められていない。これは，case 3 は case 1 に較べて根入が深く上載荷重が大きくなるため，水平方向のせん断抵抗力が水圧差よりも大きくなるためとみなしてよいであろう。

5. 結 語

本研究で示した鉛直 2 次元モデルを用いた理論解析結果は，変動水圧作用下における砂地盤上の構造物周囲の水圧分布特性をよく説明しており，本解析法がほぼ妥当な解を与えるものであることが明らかにされた。構造物周囲の変動水圧分布と地盤の動的挙動との関連については本報告では定性的な説明にとどまったが，今後はその定量的評価法の確立に努めるとともに，土砂の吸出し現象や構造物の沈下現象に対する構造物の合理的設計法への応用について検討をすすめていくことが必要である。

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, 1982.
- 2) Biot, M. A.: General theory of three-dimensional consolidation, J. Appl. Phys. 12, pp. 155~164, 1941.
- 3) De Wiest, R. J. M.: Flow through Porous Media, Acad. Press, New York and London, pp. 337~344, 1969.
- 4) 名合宏之: 変動水圧による砂層の液状化と局所洗掘防止に関する研究, 昭和 58 年度文部省科学研究費・自然災害特別研究 (1) 研究成果報告書, 1984.