

変動水圧作用下における構造物周辺地盤内の応力分布特性

名 合 宏 之*・前 野 詩 朗**

1. ま え が き

波浪時においては、海岸構造物周辺には強度の水面変動が発生しており、構造物の周辺地盤には絶えず変動水圧が作用している。このように変動水圧が作用する場においては、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といった被害が多く発生しており、その発生機構は、変動水圧が作用す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、鉛直1次元および鉛直2次元砂層モデルを対象として基礎的な研究をすすめてきた。その結果、1次元モデルにおいて、変動水圧作用下では、砂層内の間隙水圧分布が時間的に変化することにより、砂層の強度が低下するのみならず、ある条件のもとでは液状化状態が発生することなどを明らかにしている¹⁾。また、2次元モデルを用いることにより、構造物周辺砂層地盤内における間隙水圧分布特性が理論的かつ実験的に明らかにされた²⁾。本研究ではこれらの成果をもとに、構造物周辺地盤の動的特性を地盤内応力の面からとらえ、その基本的特性について理論的に検討するものである。

2. 理論解析法の概要

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-1に示されるような形状を対象とする。すなわち、厚さ D の砂地盤内に、斜線で示される根入れ深さ d の構造物が設置されている状態を対象とする。構造物前面の砂層面上に図-2に示してある周期的な変動水圧 $\rho g h_s(t)$ が作用するものとしている。図における h_0 は変動水圧水頭 h_s の平均値である。砂層内の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^{3),4)}で解析される。すなわち、砂層の構造骨格、水の密度および間隙率は時間的に変化するものとする。また、間隙は水およびわずかの空気によって占められて

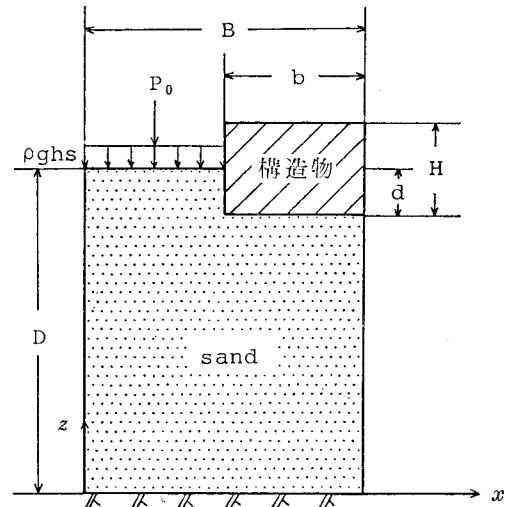


図-1 解析で用いる鉛直2次元砂層

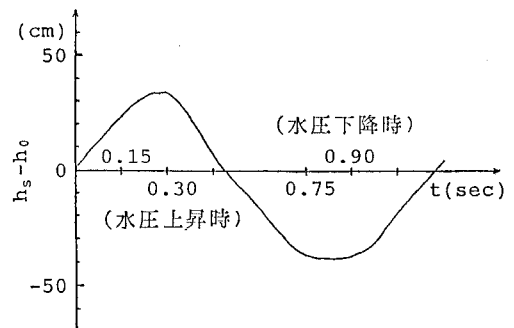


図-2 砂層面上に作用する変動水圧水頭

おり、間隙率 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。間隙水の流動は Darcy の法則に従い、気泡の体積変化は Boyle の法則に従うものとしている。なお、砂層表面以外はすべて不浸透境界面としている。

2.2 基礎式

上述のモデルに対して砂層内の水圧および応力分布を求めるための基礎式は次式のように表わされる⁵⁾。

* 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

$$\left. \begin{aligned} & \rho g \left(\beta \lambda_w + \frac{\lambda_a}{P_0 + \rho g h} \right) \frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\partial u_x}{\partial x} + \frac{\partial u_z}{\partial z} \right) \\ &= k \left(\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} \right) \\ & G \left(\frac{\partial^2 u_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u_x}{\partial z^2} \right) + \frac{G}{1-2\nu} \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial u_x}{\partial x} + \frac{\partial u_z}{\partial z} \right) \\ &= \rho g \frac{\partial h}{\partial x} \\ & G \left(\frac{\partial^2 u_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u_z}{\partial z^2} \right) + \frac{G}{1-2\nu} \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\partial u_x}{\partial x} + \frac{\partial u_z}{\partial z} \right) \\ &= \rho g \frac{\partial h}{\partial z} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (1)$$

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、 σ : ポアソン比である。

2.3 境界条件

上述の基礎式は以下の境界条件のもとで解析される。

- 1) $(0 \leq x \leq B-b, z=D)$ において $h=h_s(t)$
- 2) $(0 \leq x \leq B, z=0)$ および $(B-b \leq x \leq B, z=D-d)$ において $\partial h / \partial z = 0$
- 3) $(x=0, 0 \leq z \leq D)$, $(x=B, 0 \leq z \leq D-d)$ および $(x=B-b, D-d \leq z \leq D)$ において $\partial h / \partial x = 0, u_x = 0$

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⁵⁾。また、砂層内の応力状態を評価する方法として以下に示す2つの方法を試みた。すなわち、(1) 基礎式より求められる水平および鉛直方向の変位 u_x および u_z を用いて式(2)で示される応力-ひずみの関係より各応力を求め、図-3に示されるモールの応力円より、式(3)を用いて主応力 σ_1 および σ_2 を算出し、この主応力の大きさと方向を図示する方法と、(2) 原点とモールの応力円の接線が σ 軸となす角度 ϕ (以下応力角と呼ぶ) と砂の内部摩擦角 ϕ' との比較により検討する方法とによった。なお、破壊時

$$\left. \begin{aligned} \sigma_x &= 2G \left\{ \frac{\partial u_x}{\partial x} + \frac{\nu}{1-2\nu} \left(\frac{\partial u_x}{\partial x} + \frac{\partial u_z}{\partial z} \right) \right\} \\ \sigma_z &= 2G \left\{ \frac{\partial u_z}{\partial z} + \frac{\nu}{1-2\nu} \left(\frac{\partial u_x}{\partial x} + \frac{\partial u_z}{\partial z} \right) \right\} \\ \tau_{zx} &= G \left(\frac{\partial u_z}{\partial x} + \frac{\partial u_x}{\partial z} \right) \end{aligned} \right\} \dots\dots (2)$$

$$\left. \begin{aligned} \sigma_1 &= \frac{\sigma_x + \sigma_z}{2} + \sqrt{\frac{(\sigma_x - \sigma_z)^2}{4} + \tau_{zx}^2} \\ \sigma_2 &= \frac{\sigma_x + \sigma_z}{2} - \sqrt{\frac{(\sigma_x - \sigma_z)^2}{4} + \tau_{zx}^2} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (3)$$

$$\sin \phi' - \sin \phi \leq 0, \quad \left(\sin \phi = \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{\sigma_1 + \sigma_3} \right) \dots\dots\dots (4)$$

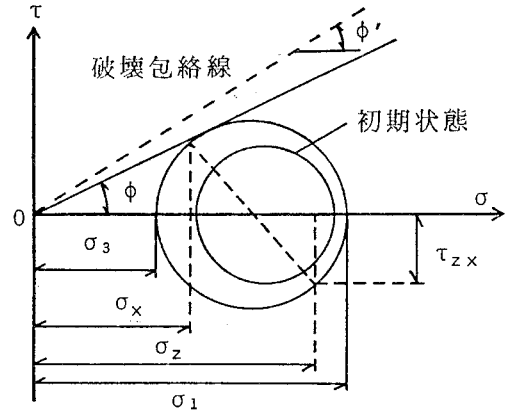


図-3 モールの応力円

における応力状態として、前者の場合は主応力が負になる状態、すなわち、引張領域が発生する状態を取り上げ、後者の場合は式(4)が成り立つ場合とし、ここでは内部摩擦角の値として $\phi' = 45^\circ$ を採用している。

計算条件として、図-1に示してある砂層モデルの各寸法および基礎式に含まれる諸定数の値はつぎのような値を採用している。

- $D=80 \text{ cm}, B=60 \text{ cm}, b=30 \text{ cm}$
- $d=10 \text{ cm}, H=20 \text{ cm}$
- $\lambda_a=0.003, \lambda_w=0.4, k=0.015 \text{ cm/sec}$
- $\beta=43.8 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{kg} \quad (44.6 \times 10^{-11} \text{ m}^2/\text{N})$
- $G=3.49 \times 10^7 \text{ kg/m}^2 \quad (3.42 \times 10^8 \text{ N/m}^2)$
- $\nu=0.48$

なお、図-1に示される構造物には自重があるものとしており、その自重としては比重 2.65 の構造物を想定している。実際の数値計算においては、自重による初期応力状態を求めたのち、この初期応力状態を初期条件として数値計算を開始している。

3. 地盤内応力の分布特性

ここでは、図-2に示されるような変動水圧が作用した場合に、砂地盤内における動的特性を特徴的に説明できるものと考えられる水圧上昇時 ($t=0.30 \text{ sec}$) および水圧下降時 ($t=0.75 \text{ sec}, t=0.90 \text{ sec}$) における砂層内の変動間隙水圧、応力角、主応力および変位をとりあげて、砂層内の動的特性を検討する。

3.1 間隙水圧分布特性

図-4は、変動間隙水圧水頭 h' (実線) および応力角 ϕ (破線) の分布を示したものである。この図より、等ポテンシャル線をみると、波の回折現象と同様に構造物下部へ伝播しているのがわかる。さらに、水圧上昇時には構造物周辺の流れは構造物下部へ回りこむようであり、また、水圧下降時にはほぼ逆向きの流れになっていることがわかる。すなわち、変動水圧作用下において

は、砂層内の水の流れは周期的に反転するのみならず、圧力の伝播に関しても、鉛直方向だけでなく水平方向にも伝播していくことを示している。

3.2 応力角分布特性

図—4 より応力角分布特性について検討する。なお、図中の斜線部分は応力角 ϕ が砂の内部摩擦角 $\phi'=45^\circ$ を越える領域であり、ここでは破壊領域と呼ぶことにする。この図より、初期応力状態では、構造物前面下端近傍での応力角の値が周辺に比べて大きくなっているのがわかる。また、水圧上昇時では、初期状態と比べ、構造物前面付近において応力角は大きくなるが、式(4)で示した破壊条件からみると十分安定な状態にあるといえる。しかし、水圧下降時においては、構造物前面砂層上部および構造物前面下端近傍で破壊領域がみられる。これらのことより、変動水圧作用下における構造物前面近傍の砂地盤は強度の面からみて非常に不安定な状態に置かれているものといえる。

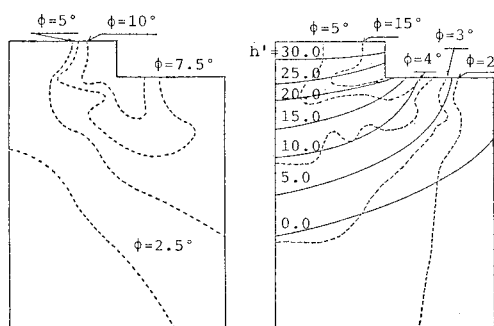
3.3 主応力分布特性

図—5 は、初期状態、水圧上昇時および水圧下降時における主応力分布を示したものである。図中の斜線部分は主応力が負となる引張領域を表わしている。この図よ

り、主応力面に関してみると、初期状態では構造物直下部の最大主応力 σ_1 の方向は鉛直では σ_3 に等しいといえる。また、水圧上昇時では初期状態と比較して主応力面は変化しているが、水圧下降時では初期状態と同様な主応力面を示すことがわかる。つぎに、主応力の大きさに関してみると、水圧上昇時には初期状態に比べ主応力の値は大きくなっているが、水圧下降時には小さくなっていることがわかる。さらに、水圧下降時($t=0.75$ sec)では構造物前面砂層上部で引張領域が発生し、有効応力が0になる液状化状態が発生していることがわかる。

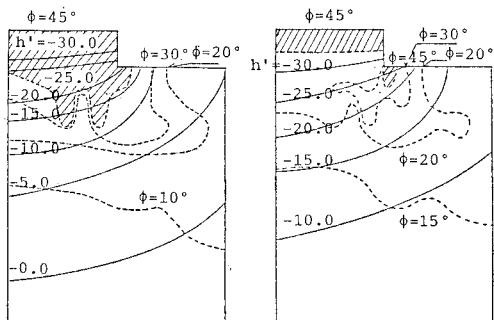
3.4 変位分布

図—6 は、水圧上昇時($t=0.15$ sec, $t=0.30$ sec)および水圧下降時($t=0.75$ sec, $t=0.90$ sec)における砂層内の変位状態を示したものである。この図より、水圧上昇時には、構造物直下部および構造物前面砂層においては鉛直方向の変位が卓越しており、水平方向の変位はほとんどない。しかし、砂層深くなるにつれて構造物下方へ向かう水平成分が大きくなっていくのがわかる。また、水圧下降時においては、変位の様子は水圧上昇時とはほぼ逆の変位状態となるのがわかる。このことより、変動水圧作用下においては、水圧上昇時に、変位は構造物前面下端部をまわりこんで構造物下部の砂層を持ち上げよう



(1) 初期状態

(2) 水圧上昇時 ($t=0.30$)



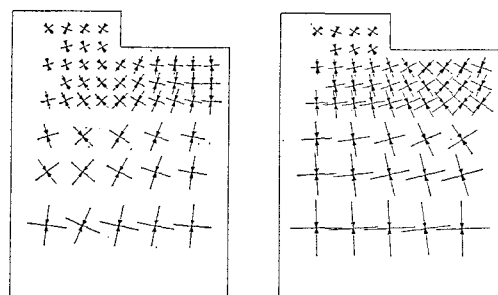
(3) 水圧下降時 ($t=0.75$)

(4) 水圧下降時 ($t=0.90$)

—— : 変動間隙水圧
----- : 応力角

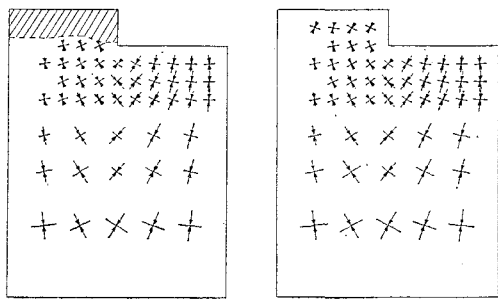
斜線 : 破壊領域

図—4 変動間隙水圧および応力角分布図



(1) 初期状態

(2) 水圧上昇時 ($t=0.30$)



(3) 水圧下降時 ($t=0.75$)

(4) 水圧下降時 ($t=0.90$)

← : σ_1
← : σ_3

斜線 : 引張領域

ρ_{50} (g/cm^2)

図—5 主応力分布図

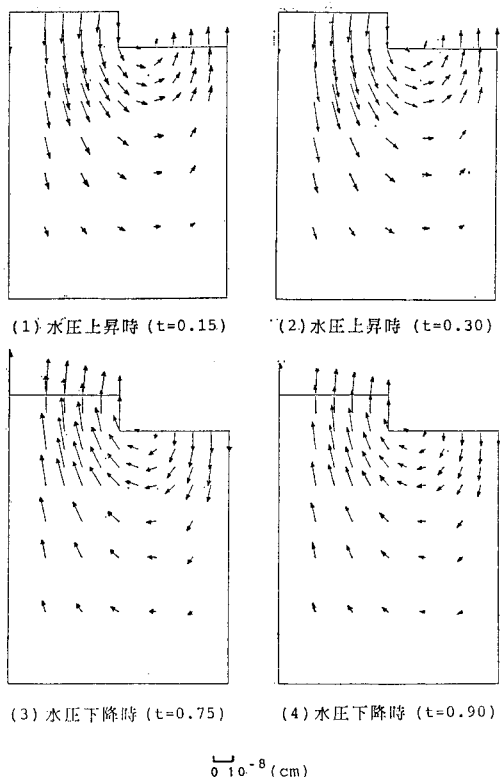


図-6 変位図

とする動きを示し、水圧下降時にはほぼ逆の動きを示すことがわかる。これは、砂層内の間隙水の流れが水圧上昇時と水圧下降時と逆になる傾向とよく一致している。

4. 結 語

本研究では、鉛直2次元モデルを用いて変動水圧が作用した場合の構造物周辺地盤内における動的特性を地盤内応力の面から理論的に検討した。その結果、変動水圧作用下における砂地盤内では、水圧下降時において構造物前面近傍において強度の面からみて危険な状態を呈すること、また、引張領域が発生し液状化状態がみられることなどを明らかにした。これらのことにより、本研究の手法によって構造物周辺の砂の流動とそれにとりまう構造物の沈下現象の力学的背景がある程度説明されるのではないかと考えている。今後は、以上に得られた結果をもとに、実際の海岸構造物を対象としたモデルの確立をはかるとともに、土砂の吸い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の確立に向けて研究をすすめていく必要があると考えている。

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) 名合宏之・前野詩朗: 変動水圧作用下における砂地盤内の水圧分布特性, 第31回海岸工学講演会論文集, 1984.
- 3) Biot, M. A.: General theory of three-dimensional consolidation, J. Appl. Phys. 12, pp. 155~164, 1941.
- 4) De Wiest, R. J. M.: Flow through porous media, Acad. Press, New York and London, pp. 337~344, 1969.
- 5) Nagō, H. and S. Maeno: Pore water pressure in sand bed under oscillating water pressure, Memoirs School of Eng., Okayama Univ., Vol. 19, No. 1, pp. 13~32, 1984.