

波による構造物周辺地盤の動的挙動に関する研究

名 合 宏 之*・前 野 詩 朗**

1. ま え が き

波浪時においては、海岸構造物周辺地盤上には強度の変動水圧が作用している。透水性地盤上に設置された構造物周辺地盤においては、地盤内に含まれるごく微量（含有率 0.3%～1%）の空気存在により、変動水圧は地盤中を振幅の減衰および位相の遅れを伴いながら伝播する。その結果、地盤内に過剰間隙水圧が発生し、地盤の強度が低下するものと考えられる。著者らは、従来より、このような現象が実際の構造物破壊、例えば、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密接な関係があるのではないかとこの観点から、鉛直 1 次元および鉛直 2 次元モデルを用いて理論的かつ実験的な研究をすすめ、変動水圧作用下における構造物周辺地盤内の水圧および応力分布の基本的な特性を明らかにしてきた^{1),2),3)}。本研究は、これらの成果をもとに、より実際的な問題へのアプローチとして波の作用を受ける防波堤を想定し、地盤特性および波浪特性が地盤の動的挙動に与える影響について検討しようとするものである。

2. 理論解析法の概要

2.1 モデルおよび基礎式

図-1 に示されるような 2 次元の地盤-構造物系において、構造物前側には重複波を生じ、後側では海面が完全に静穏に保たれている状態を解析対象とする。砂層内の間隙水圧分布および応力分布を求めるための基礎式は、砂層内の空隙中に含まれるごく微量の空気存在をも考慮して、弾性砂層内の浸透流問題と同様な手法^{4),5)}を用いて導びかれる次式を用いた⁶⁾。

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

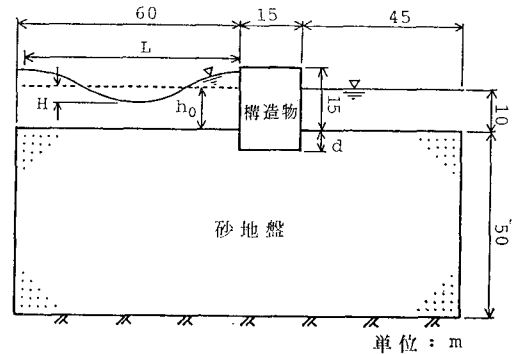


図-1 解析対象モデル

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

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

ここに、 h および u_x, u_z は間隙水圧水頭および x, z 方向の変位であり、それぞれ静水状態からの変動分である。また、 β : 間隙水の圧縮率、 g : 重力加速度、 P_0 : 大気圧、 k : 透水係数、 G : セン断弾性係数、 ν : ポアソン比、 λ_w, λ_a : 間隙水および空気の体積含有率である。

2.2 境界条件および計算条件

境界条件としては、構造物前面の砂層上には微小振幅波理論より得られる次式で表わされる水圧 p を作用させ、背後では平均水位 h_0 による水圧を与えている。

$$p = \frac{\rho g H}{\cosh(m h_0)} \cos(m x) \cos \left\{ n \left(t - \frac{T}{4} \right) \right\} + \rho g h_0$$

ここに、 H : 波高、 L : 波長、 T : 周期であり、 $m = 2\pi/L$ 、 $n = 2\pi/T$ である。なお、上式は海底面が不透透かつ剛であるという条件下で導びかれており、現問題のような浸透層上では、厳密には、若干異なった圧力分布になると考えられるが、ここでは簡単のため近似的に上式を採用した。また、砂層表面以外はすべて不透透境界としている。

* 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

計算条件は、地盤特性としては透水係数および根入れ深さ d 、波浪特性としては周期・波長および波高を取り上げ、表-1 に示されるように、Run 1 を基本モデルとして各要素を変化させた。すなわち、Case 1 では透水係数、Case 2 では根入れ深さ、Case 3 では周期および波長、Case 4 では波高を変化させている。表-1 に示す以外の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。

$$\lambda_a = 0.003, \quad \lambda_w = 0.4,$$

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

$$G = 3.49 \times 10^7 \text{ kg/m}^2 \quad (3.42 \times 10^8 \text{ N/m}^2),$$

$$\nu = 0.48$$

具体的な計算は、解析領域を三角形要素で分割し、ガラキン法による有限要素解析を適用することにより行った。砂層内の応力状態を評価する方法としては、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、応力-ひずみの関係により各応力 σ_x , σ_z および τ_{xz} を求め、モールの応力円より砂層内の応力状態を検討した。ここでは、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) により応力状態を検討するものである。すなわち、この応力角が大きくなるほど地盤は不安定になると考えられる。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 2.1 のコンクリート製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、この状態を初期条件として数値計算を開始している。

3. 結果および考察

ここでは、基本モデルとなる Run 1 の場合について、砂層内の変位、変動間隙水圧および応力角をとりあげて砂層内の動的特性を検討し、さらに、地盤特性および波浪特性の変化が砂層内の動的挙動に与える影響について検討する。

3.1 地盤内応力分布の一般特性

図-2 および 図-3 は、基本モデル Run 1 の場合の各時刻における砂地盤内の変位および間隙水圧分布と応力角分布を示したものである。これらの図より以下のことがわかる。

a) 変位: 構造物前面に波の峰がくる場合 ($t/T = 0.25$)、砂地盤の変位は波の節を中心として谷方向へ渦状に発生している。また、構造物前面に波の谷がくる場合 ($t/T = 0.75$)、波の節を中心として構造物方向へ渦状に変位が発生し、構造物直下では構造物を持ち上げる方向に変位している。

b) 間隙水圧分布: 砂地盤内の間隙水圧は、波の峰の部分では上昇し、波の谷の部分で低下する。このため、波の峰の部分から谷の部分に向かう流れが生じているものと考えられる。また、構造物直下部付近では、等ポテンシャル線の間隔がやや狭くなり他の部分に比べて圧力の減衰が大きく、構造物直下部付近の砂粒子の側方流動を促進するものと考えられる。構造物背後においては、間隙水圧の場所的な変化は小さく、この部分ではほとんど浸透流は生じていないものと考えられる。

c) 応力角分布: 静水時 ($t = 0.0, 0.50$) においては、構造物周辺地盤内には応力角の大きな領域は発生していない。しかし、構造物前面に峰および谷がくる場合、構造物前面下端近傍に応力角の大きな不安定領域が発生することがわかる。

表-1 計算対象条件

		k	d	T	L	H
		(m/s)	(m)	(sec)	(m)	(m)
Case 1	Run 1	0.0015	0.0	10.0	92.3	4.0
	Run 2	0.015	〃	〃	〃	〃
	Run 3	0.00015	〃	〃	〃	〃
Case 2	Run 1	0.0015	0.0	10.0	92.3	4.0
	Run 4	〃	5.0	〃	〃	〃
	Run 5	〃	2.5	〃	〃	〃
Case 3	Run 1	0.0015	0.0	10.0	92.3	4.0
	Run 6	〃	〃	12.0	113.2	〃
	Run 7	〃	〃	8.0	70.9	〃
Case 4	Run 1	0.0015	0.0	10.0	92.3	4.0
	Run 8	〃	〃	〃	〃	3.0
	Run 9	〃	〃	〃	〃	2.0

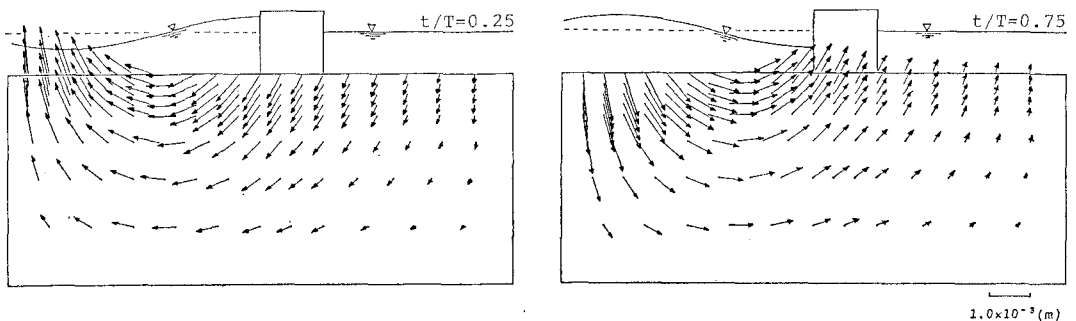


図-2 変位図 (Run 1)

3.2 地盤特性の影響

図-3 から 図-7 は各時刻における透水係数および根入れ深さの変化による間隙水圧および応力角の分布を示したものである。これらの図より以下のことがわかる。

a) 透水係数の影響: 間隙水圧分布より、透水係数が

小さくなるほど等ポテンシャル線の間隔は小さくなり、動水勾配が大きくなっていることがわかる。しかし、応力角分布をみると、透水係数の変化による差異はあまりみられない。

b) 根入れ深さの影響: 根入れ深さが大きくなるに従

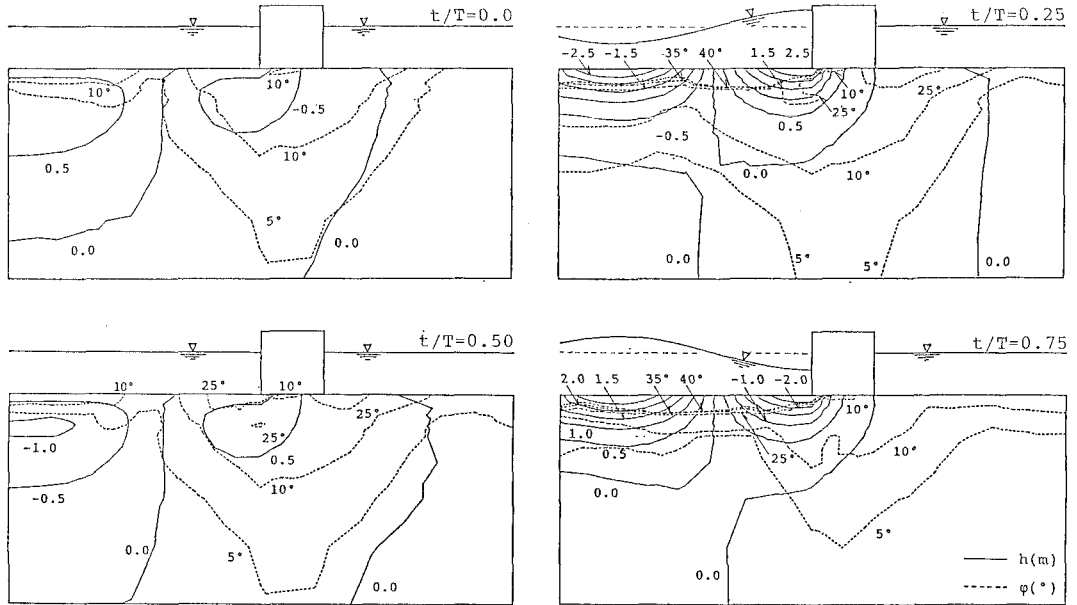


図-3 間隙水圧および応力角の分布 (Run 1)

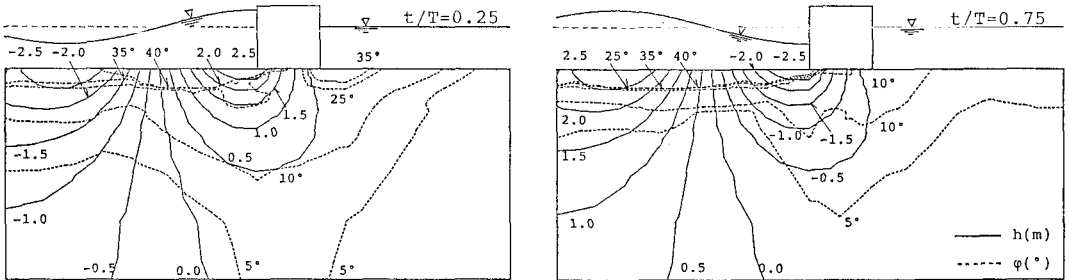


図-4 間隙水圧および応力角の分布 (Run 2)

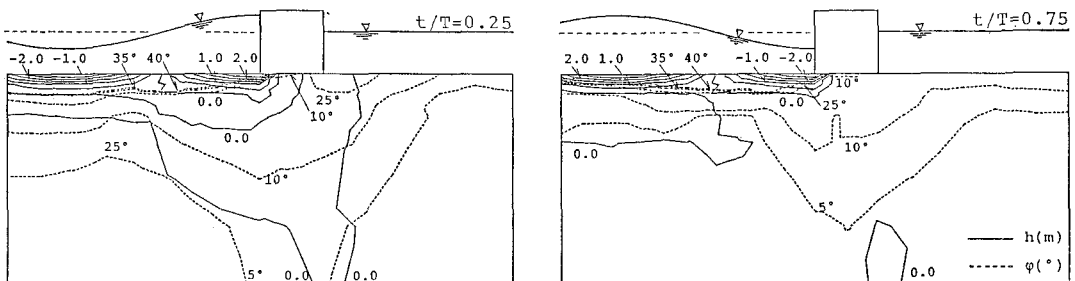


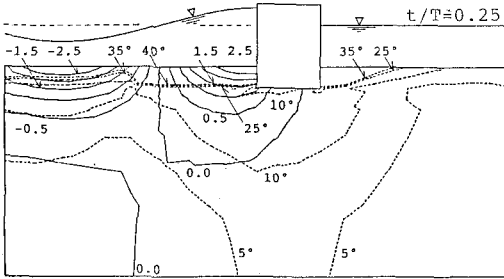
図-5 間隙水圧および応力角の分布 (Run 3)

い間隙水圧は構造物背後に伝播しにくくなることがわかる。また、応力角についてみると、根入れ深さが大きくなるほど構造物下部の地盤では応力角は小さくなり、より安全になっていることがわかる。

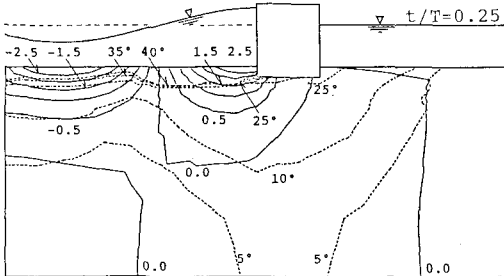
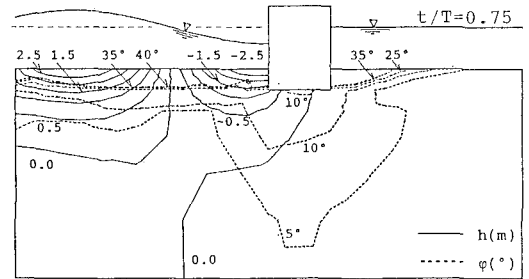
3.3 波浪特性の影響

図—3 および 図—8 から 図—11 は各時刻における周期・波長および波高の変化による間隙水圧および応力角の分布を示したものである。これらの図より以下のことがわかる。

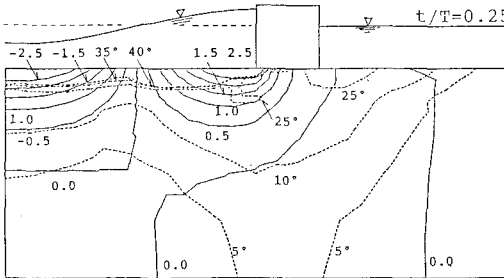
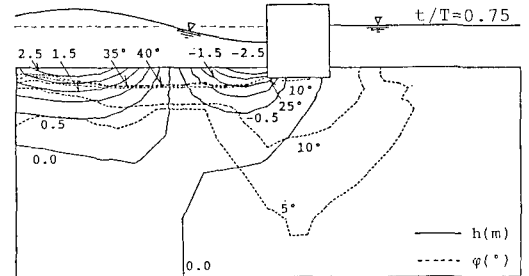
a) 周期および波長の影響: 周期および波長が小さく



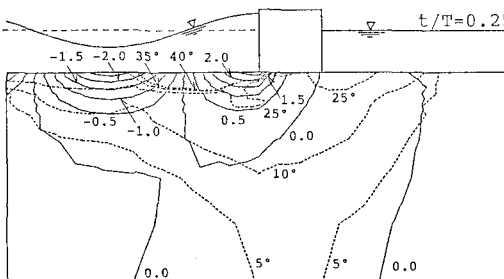
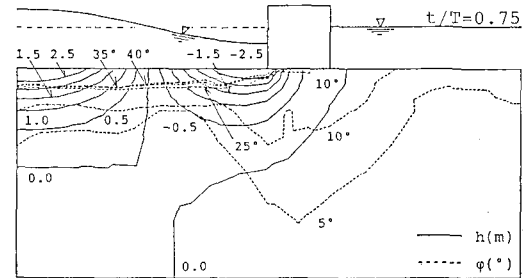
図—6 間隙水圧および応力角の分布 (Run 4)



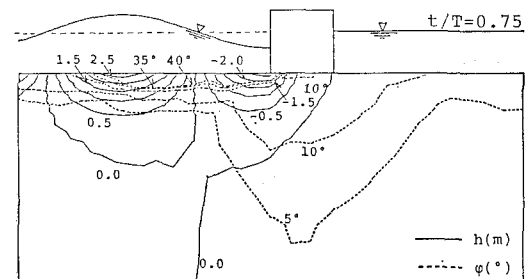
図—7 間隙水圧および応力角の分布 (Run 5)

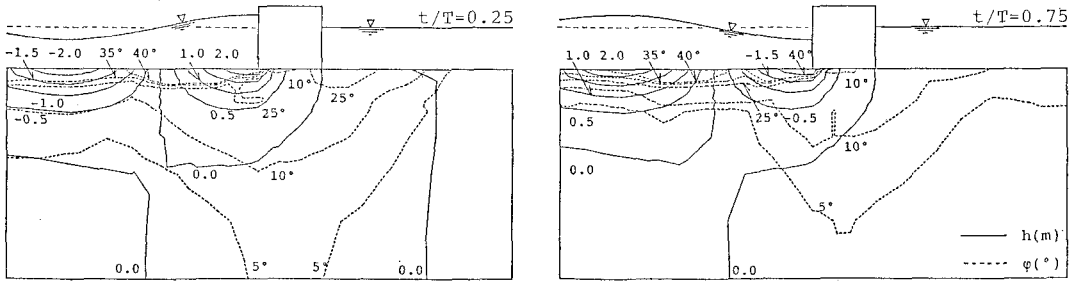


図—8 間隙水圧および応力角の分布 (Run 6)

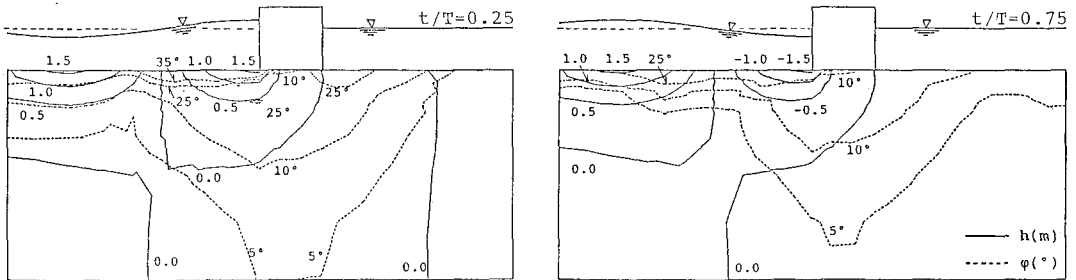


図—9 間隙水圧および応力角の分布 (Run 7)





図—10 間隙水圧および応力角の分布 (Run 8)



図—11 間隙水圧および応力角の分布 (Run 9)

なるに従い、間隙水圧は地盤内に伝播しにくくなるのがわかる。また、周期および波長の変化による応力角分布の差異はあまりみられない。

b) 波高の影響：波高が大きくなるに従い、間隙水圧の大きさは変化するが、その分布状態の変化はほとんどみられない。応力角分布をみると、波高が小さくなるにつれて、応力角の大きな不安定領域が減少してくることがわかる。このことより、波高の大きな波に対しては不安定領域が増加し、構造物の安定性が低下するものと考えられる。

4. 結 語

以上述べてきたように、構造物前面に波の峰および波の谷がくる場合、構造物周辺の地盤内には応力角の大きな不安定領域が発生することが示された。また、根入れ長の増大は構造物下部の不安定領域を減少させる効果があることが明らかにされた。今後は、複合地盤やマウンドが存在する場合の防波堤の安定性の問題など、より実現象を対象として検討していく必要があると考えている。

本研究は昭和 60 年度文部省科学研究費自然災害特別研究 (1)「変動水圧による砂地盤の強度低下と構造物の破壊に関する研究」の補助を受けて行われたことを付記して感謝の意を表する。

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，1982。
- 2) 名合宏之・前野詩朗・阿久根徹：変動水圧作用下における構造物周辺地盤内の水圧および有効応力分布特性，第 29 回水理講演会論文集，1985。
- 3) 名合宏之・前野詩朗：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，第 32 回海岸工学講演会論文集，1985。
- 4) Biot, M. A.: General Theory of Three-Dimensional Consolidation, J. Appl. Phys. 12, pp. 155~164, 1941.
- 5) DeWiest, R. J. M.: Flow Throgh Porous Media, Acad. Press, New York and London, pp. 337~344, 1969.
- 6) H. Nago and S. Maeno: Pore Water Pressure in Sand Bed under Oscillating Water Pressure, Memoirs of School of Eng., Okayama Univ. Vol. 17, No. 1, 1984.