

海岸ブロックの沈下防止法に関する研究

岡山大学工学部 正会員 名 合 宏 之
 岡山大学工学部 正会員 前 野 詩 朗
 水資源開発公団 正会員 佐々原 秀 史
 岡山大学大学院 学生員 西 岡 操

1. まえがき

著者らは、変動水圧が発生する場における各種水理構造物の被災原因の一つとして、変動水圧による構造物周辺地盤の強度低下があるのではないかとこの観点から、従来より、変動水圧と地盤強度との関係について研究を進めてきた。その結果、微量の空気を含む高飽和砂層においては、砂層表面に作用した変動水圧は時間遅れおよび振幅減衰を伴いながら砂層中を伝播し、砂層内に過剰間隙水圧を発生させ、ときによっては砂層が液化化することもあることを、鉛直1次元砂層を対象とした実験によって明らかにし、また、その力学機構が砂層を弾性体と仮定した浸透流理論によって説明されることを示した^{1), 2)}。

波によって発生する地盤内浸透流が地盤強度と密接な関係があることを、構造物設計との関連で最初に指摘したのは、海洋構造物の基礎周辺の洗掘が定常流中の橋脚周辺の洗掘形状とは全く異なることを実験的に観察した Posey³⁾ であろう。その後、とくに最近10年間、水と地盤さらに構造物をも含めた動的相互作用に関する研究が、Yamamoto⁴⁾, Madsen⁵⁾, Mei and Foda⁶⁾, Nago and Maeno⁷⁾, 善⁸⁾, 大草⁹⁾ および間瀬ら¹⁰⁾ によって盛んに行われてきている。これらの研究によって各種境界条件のもとにおける変動水圧と地盤内応力分布の関係が次第に明らかにされてきている。また、これらの研究で用いられる理論解析の基礎式は多少の違いはあるものの、基本的には Biot¹¹⁾ の圧密の基礎式であり、弾性体としての仮定や、地盤定数の不明確さなどに多少疑問点もあるが、現象の基本的特性はこのようなモデル化によって説明できるようである。

以上のような研究成果を背景として、著者らは、変動水圧が作用する場におけるより実際的な問題の一つとして、砂地盤上に設置される離岸堤や海岸ブロックが長期の波浪の作用により徐々に沈下する現象に着目し、コンクリートブロックを用いた模型実験を行い、変動水圧の作用下においてブロックが時間とともに沈下することを明らかにするとともに、沈下量に与える要因として、ブロックの接地面積、変動水圧振幅および砂層の間隙率などが主要なものであることなどを明らかにしてきた^{12), 13), 14)}。また、善ら¹⁵⁾ も名合ら¹²⁾ が用いたものと同様な鉛直1次元砂層模型を用いた実験を行い、変動水圧作用下では、重量構造物が沈下することを明らかにしている。このような砂地盤上に設置されるブロックの沈下現象では、周辺地盤の液化化による砂の側方流動を伴っていることが認められる。この側方流動の発生とその程度は地盤の応力状態とブロック底面近傍の間隙水圧分布に依存している。したがって、このような沈下を防止するには、応力状態あるいは間隙水圧分布の改善といった面から各種の方法が考えられる。本研究では、その一つの方法として、ブロック自体に細工を施すことによって側方流動を緩和し、沈下量を減少させる方法を提案し、その有効性について実験的かつ理論的に検討しようとするものである。

2. 実験および理論解析法の概要

2.1 実験装置および実験方法

実験には、図1に示すような鉛直2次元砂層模型を用いた。装置の奥行は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。砂層表面上に約110cm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表面上に変動水圧を作用させている。その変動水圧の振幅は水頭にして約40cmであり、周波数は約1Hzである。水中および砂層中の水圧は小型の拡散型半導体圧力変換器により図中の○印の位置において検出する。実験は図2に示されるような4種類の形状の有孔ブロックを用いて行った。孔の直径は5mmであり、最も多く孔の開いているブロックAの場合で体積の減少量は約3.6%である。また、この孔は砂が吸い出されないように砂の粒径より小さな金網で覆ってある。実験ケースは表1に示している。すなわち、Case1 からCase4 は図2

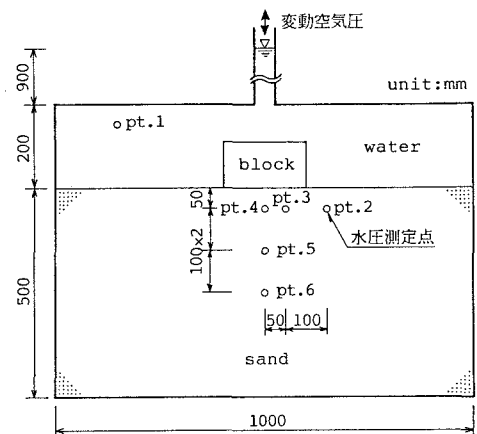


図1 実験装置

に示されるように、ブロックの透水性の有無および透水位置を変化させた場合である。Case5 はブロックAに重りを上載することにより接地圧を大きくした場合である。ブロックの比重は約2.14である。実験に際しては、砂層条件が同じになるように、パイプレーターにより砂層を締め固めるとともに変動水圧を5時間作用させた後実験を開始した。そのときの砂層の間隙率はいずれの場合も約0.39であった。なお、実験は実験開始後3000分間(50時間)行い、沈下量の計測はブロックの両端に取りつけてあるスケールにより計測した。

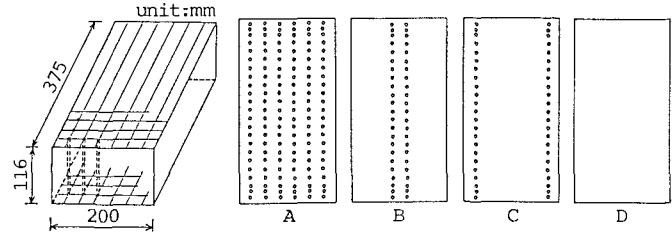


図2 ブロックの形状および孔の配置

表1 実験ケース

CASE	ブロック	接地圧 (g/cm ²)
1	A (全列透水)	13.25
2	B (中二列透水)	"
3	C (外二列透水)	"
4	D (全列不透水)	"
5	A (全列透水)	17.22

2.2 理論解析法

地盤上に変動水圧が作用する場合の地盤内における動的挙動を求めるための基礎式は、著者らが地盤内におけるごく微量の空気量(体積含有率にして約0.3%-1.0%)をも考慮して導いた以下の式を用いる⁷⁾。

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

ここに、 u_x, u_z : 水平および鉛直方向の変動変位、 h : 変動間隙水圧水頭、 G : セン断弾性係数、 ν : ポアソン比、 ρ : 水の密度、 β : 水の圧縮率、 λ_w, λ_a : 水および空気体積含有率、 P : 基準圧力(大気圧)、 g : 重力加速度である。上式は、非線型連立偏微分方程式であり、解析的に解を求めることは困難である。一般には差分法あるいは有限要素法などの数値解析法を用いて解を求めることができる。ここでは、有限要素法は任意の形状を表現し易いこと、境界条件を容易に表現し易いこと、種々の地盤材料からなるものへの適用が可能であることなどを考慮して、有限要素法を用いて数値解析を行った。有限要素法の定式化には重みつき残差法の一つであるガラーキン法を用いた。なお、著者らが先に導いた有限要素式⁷⁾は、間瀬ら¹⁰⁾が指摘したように荷重項が特殊な場合を除いて取り扱いにくい形になっていたため、著者らも従来より荷重項が取り扱い易いように以下の有限要素式を用いており、ここに示しておく。

$$\left(\begin{array}{ccc} \theta A_{ij} & \theta B_{ij} & \theta \rho g C_{ij} \\ \theta D_{ij} & \theta E_{ij} & \theta \rho g F_{ij} \\ \frac{1}{\Delta t} H_{ij} & \frac{1}{\Delta t} P_{ij} & \rho g \frac{\beta \lambda_w + \lambda_a / P}{\Delta t} Q_{ij} + \theta k R_{ij} \end{array} \right)^{t+\Delta t} \left\{ \begin{array}{c} a_j \\ b_j \\ c_j \end{array} \right\} = \left(\begin{array}{ccc} (\theta-1) A_{ij} & (\theta-1) B_{ij} & (\theta-1) \rho g C_{ij} \\ (\theta-1) D_{ij} & (\theta-1) E_{ij} & (\theta-1) \rho g F_{ij} \\ \frac{1}{\Delta t} H_{ij} & \frac{1}{\Delta t} P_{ij} & \rho g \frac{\beta \lambda_w + \lambda_a / P}{\Delta t} Q_{ij} + (\theta-1) k R_{ij} \end{array} \right)^t \left\{ \begin{array}{c} a_j \\ b_j \\ c_j \end{array} \right\} + \left\{ \begin{array}{c} F_i^{(1)} \\ F_i^{(2)} \\ F_i^{(3)} \end{array} \right\} \quad (2)$$

ここに、

$$\begin{aligned} A_{ij} &= (\lambda' + 2G) \int \frac{\partial N_j}{\partial x} \cdot \frac{\partial N_i}{\partial x} ds + G \int \frac{\partial N_j}{\partial z} \cdot \frac{\partial N_i}{\partial z} ds, & Q_{ij} &= \int N_j N_i ds \\ B_{ij} &= \lambda' \int \frac{\partial N_j}{\partial z} \cdot \frac{\partial N_i}{\partial x} ds + G \int \frac{\partial N_j}{\partial x} \cdot \frac{\partial N_i}{\partial z} ds, & R_{ij} &= \int \frac{\partial N_j}{\partial x} \cdot \frac{\partial N_i}{\partial x} ds + \int \frac{\partial N_j}{\partial z} \cdot \frac{\partial N_i}{\partial z} ds \\ C_{ij} &= H_{ij} = \int \frac{\partial N_j}{\partial x} N_i ds, & F_i^{(1)} &= \int (n_x \sigma_x + n_z \tau_{zx}) N_i d\ell \\ D_{ij} &= \lambda' \int \frac{\partial N_j}{\partial x} \cdot \frac{\partial N_i}{\partial z} ds + G \int \frac{\partial N_j}{\partial z} \cdot \frac{\partial N_i}{\partial x} ds, & F_i^{(2)} &= \int (n_x \tau_{zx} + n_z \sigma_z) N_i d\ell \\ E_{ij} &= (\lambda' + 2G) \int \frac{\partial N_j}{\partial z} \cdot \frac{\partial N_i}{\partial z} ds + G \int \frac{\partial N_j}{\partial x} \cdot \frac{\partial N_i}{\partial x} ds, & F_i^{(3)} &= k \left(\int n_x \frac{\partial h}{\partial x} N_i d\ell + \int n_x \frac{\partial h}{\partial x} N_i d\ell \right) \end{aligned}$$

$$F_{ij} = P_{ij} = \int \frac{\partial N_j}{\partial z} N_i ds$$

ここに、 a_j, b_j および c_j はそれぞれ u_x, u_z および h の節点値であり、時間だけに依存する関数である。 N_j は形状関数であり座標だけにに関する関数である。 $\sigma_x, \sigma_z, \tau_{zx}$ は有効応力成分を、 λ' はラメ定数を表わす。 n_x, n_z はそれぞれ x, z 方向の方向余弦を表わし、 ℓ は境界上での積分を表わしている。また、 $Fi^{(1)}, Fi^{(2)}, Fi^{(3)}$ はそれぞれ荷重項を示す。式(2)で得られる剛性マトリックスは各要素に対するものである。実際の解析では、この要素剛性マトリックスを全要素について重ね合わせて全体剛性マトリックスを形成し、連立1次方程式を得た後、微小な時間増分ごとの解を求めていけばよい。なお、時間微分項に関しては、本研究では解の安定性がよい中央差分法、すなわち、 $\theta=1/2$ を採用している。

数値解析では、実験装置が左右対称であることを考慮して、図3に示される領域を対象とした。領域の分割には三角形要素を用いた。ブロックの部分は非常に剛性の大きな物体であると考え、本研究においては厚さ2cmの鉄板を想定して解析を行った。境界条件および計算条件は実験条件をも考慮して以下のような条件を用いた。

1) 境界条件

- AG, BC, DH において、 $u_x=0$, $\partial h/\partial x=0$
- GH において、 $\partial h/\partial z=0$ 但し、ブロックに透水孔がある場合には、ブロック下部の孔の位置に境界条件として $h=h_s(t)$ を与えた。
- DC, FE において、 $h=h_s(t)$, $n_x \sigma_x + n_z \tau_{zx} = n_x \tau_{zx} + n_z \sigma_z = 0$

ここに、 $h_s(t)$ は実験結果より得られる水中変動水圧である。

2) 計算条件

砂層部 ; $\lambda_a=0.003$, $\lambda_w=0.39$, $k=0.015(\text{cm/sec})$, $\beta=43 \times 10^{-11}(\text{m}^2/\text{N})$, $G=3.5 \times 10^7(\text{N/m}^2)$, $\nu=0.43$
 ブロック部 ; $\lambda_a=0.0$, $\lambda_w=0.0$, $k=0.0(\text{cm/sec})$, $\beta=0.0(\text{m}^2/\text{N})$, $G=8.1 \times 10^7(\text{N/m}^2)$, $\nu=0.30$
 その他 ; $\Delta t=0.01(\text{sec})$, $g=9.8(\text{m/sec}^2)$, $\rho=1.0 \times 10^3(\text{kg/m}^3)$, $P=1.013 \times 10^5(\text{N/m}^2)$

実際の数値解析においては、ブロックの自重および砂の自重（砂の密度を $\rho_s=2.65 \times 10^3 \text{kg/m}^3$ としている）による初期応力状態を求めた後、変動状態の計算結果を加えている。地盤内の応力状態を検討する際には応力角を用いるが、これは、計算結果より得られる応力値によるモールの応力円の接線が σ 軸となす角度を表わし、この応力角が大きくなるほど地盤が不安定になるものと考えられる。以上の諸条件を適用して沈下ブロックを設置する前の状態を数値解析し、ブロック設置前の変動間隙水圧水頭の実験結果と比較したのが図4である。この図より、Pt.2,3,4の実験値において多少の違いはあるものの、間隙水圧が砂層中に伝播する際に発生する振幅減衰および位相の遅れともに計算結果は実験結果をよく再現しており、前述の計算条件はほぼ妥当な条件であるものと考えられる。

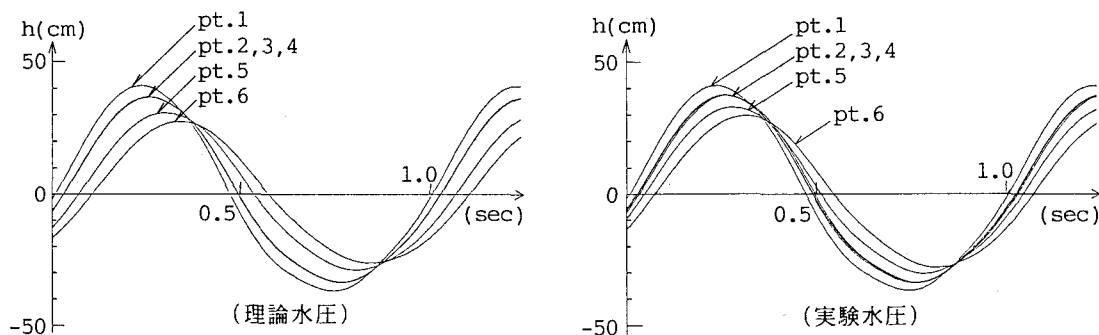


図4 理論水圧と実験水圧（ブロック設置前）

3. 結果および考察

3.1 実験結果

図5はブロックの透水孔の有無、配列の違いによる沈下量の時間変化を示したものである。また、図6は接地圧の違いによる沈下量の時間変化を示している（図6には参考のために Case4の場合の結果も示している）。これらの図より、以下のことがわかる。

(1) 透水性の有無および透水位置の違いによる沈下特性

ブロックに透水性を持たせた Case1,2,3は全く孔の開いていないCase4の場合に比べ、程度の差はあるものの

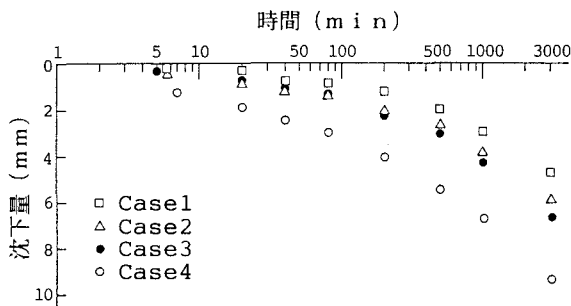


図5 孔の有無，配列の違いによる沈下量の時間変化

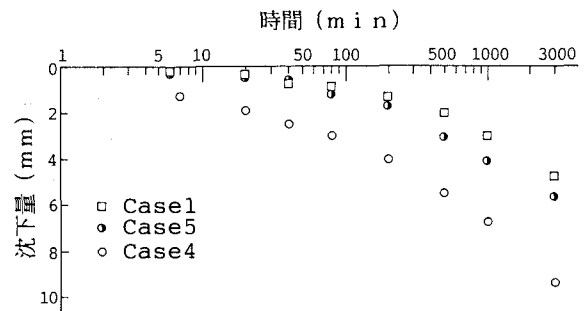


図6 接地圧の違いによる沈下量の時間変化

いずれの場合も沈下量が少なく、この種の細工を施したブロックが変動水圧による長期的な沈下に対して何らかの抑制効果を持つことがわかる。とくに、Case1 の場合は Case4 の場合と比較して、沈下の初期からその効果が現われており、本実験の終了段階（3000分後）においては沈下量が半分程度に減少しているのがわかる。次に、透水孔の配列の違いが沈下量に与える影響をみると、ほとんど差はないが、やや Case2 のブロックの中心の列に透水孔がある場合の方が沈下量が少ないようである。これは、ブロックの外側に透水孔を配列する Case3 の場合よりも Case2 の場合の方がブロック底面直下の砂層への水圧伝播がより均一になるためであると考えられる。

(2) 接地圧の違いによる沈下特性

接地圧を大きくした Case5 は Case1 に較べて多少沈下量は大きくなるものの Case4 の場合と比較してかなり沈下量が少ないことを考えるとその差はほとんどないと言って良い。このことは、著者らが従来行った実験により得られている接地圧の変化は沈下量にほとんど影響しないという結果とも一致する。

3.2 理論解析結果

前述の実験結果より、透水孔を設けるとブロックの沈下量を減少させる効果があることがわかったが、実験では砂層内の応力状態、とくにブロック周辺部の状態を知ることは困難であるので、ここでは、理論解析により砂層内の間隙水圧分布および応力状態を求めることにより透水孔の有無および配列による違いを検討する。

(1) 間隙水圧分布特性

図7 および図8 はそれぞれ実験開始直後における Case1 および Case4 の場合の 1/4 周期ごとの間隙水圧分布お

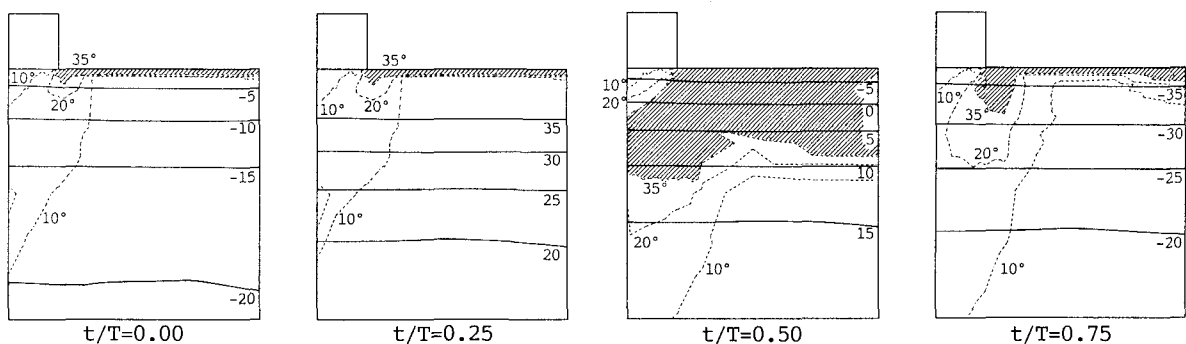


図7 変動間隙水圧および応力角 (Case1 ; ——変動間隙水圧, --- 応力角)

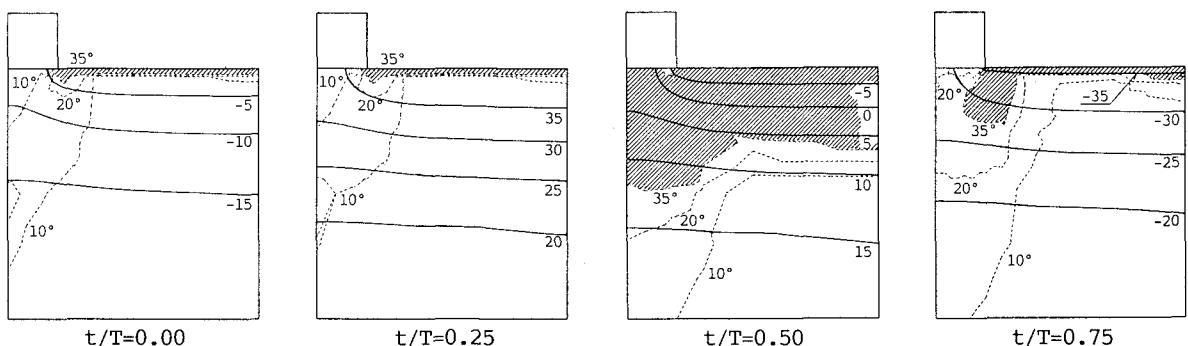


図8 変動間隙水圧および応力角 (Case4 ; ——変動間隙水圧, --- 応力角)

よび応力角分布を示したものである。これら両図より、ブロックに透水性がない場合には間隙水圧はブロック下部を回り込むように伝播し、ブロック下部において水平方向の動水勾配が発生している。とくに、水圧下降時 ($t/T=0.5$) にはブロック下部の砂粒子を外側に押し出そうとする浸透力が作用することがわかる。ところが、透水孔がある場合には間隙水圧はあたかもブロックがないかのような伝播をしているのがわかる。このような水圧伝播経路の変化は、ブロックに透水孔を設けた効果であると考えられ、これにより沈下量が抑えられるものと考えられる。図9および図10は透水孔の配列の違いすなわち Case2および Case3における 1/2周期ごとの間隙水圧分布および応力角分布を示している。この両図より、いずれの場合もブロックに透水性のない Case4 の場合よりも水圧分布は改善されているが、Case2 のブロック中心部に透水孔を設けた方がその効果は大きいようである。図11は Case5の接地圧が大きな場合であるが、この場合は Case1の場合とほとんど同じ分布である。

(2) 応力角分布特性

図7から図11の応力角分布においては、地盤内の応力状態が強度的に不安定であると考えられる応力角35度以上の領域を斜線で示している。これらの図より次のことがわかる。いずれの場合も水位上昇時には応力角の大きな領域は小さくなり、水位下降時にはこの領域は大きくなることわかる。とくに、この領域が最も大きくなるのはいずれの場合も砂層面上に作用する水圧が最も急激に減少する $t/T=0.5$ における状態であり、地盤の強度低下が大きいものと考えられる。この時間帯に着目して透水孔の有無および透水孔の配列の違いについてみると、Case4の場合にはブロック直下部にまで応力角の大きな領域が存在するが、Case3, 2, 1, 5の順に応力角の小さな安定領域が増加することがわかる。このことより、応力角の面からみても、透水孔をブロックに設ける効果が現われているものと考えられる。

(3) 主応力分布特性

図12および図13は Case1および Case4の場合の各節点における主応力のベクトル図を示したものである。

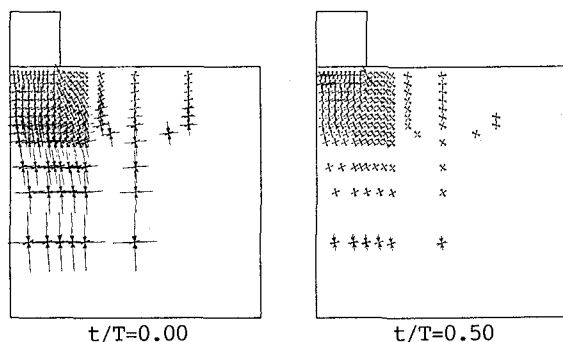
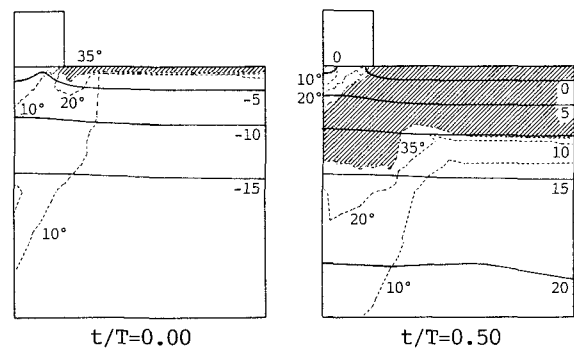
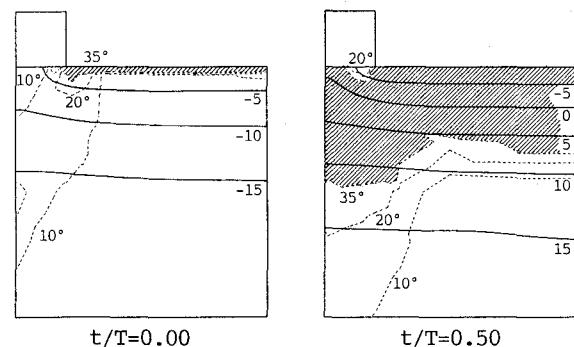


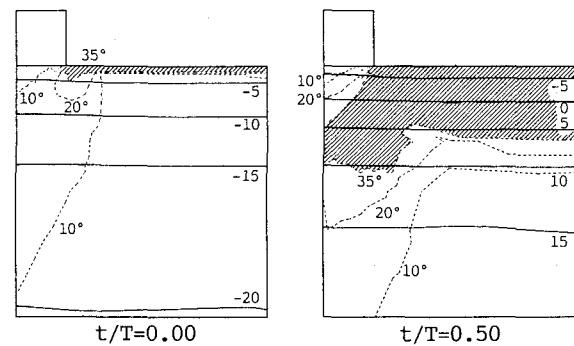
図12 主応力分布 (Case1)



——変動間隙水圧, --- 応力角
図9 変動間隙水圧および応力角 (Case2)



——変動間隙水圧, --- 応力角
図10 変動間隙水圧および応力角 (Case3)



——変動間隙水圧, --- 応力角
図11 変動間隙水圧および応力角 (Case5)

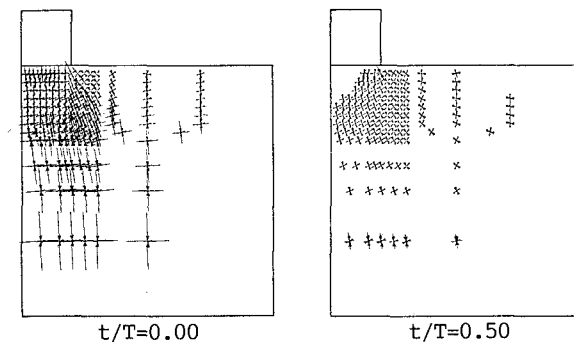


図13 主応力分布 (Case4)

これらの図より、水位上昇時には主応力は大きい、水位下降時には砂層全体にわたって主応力が小さくなるのがわかる。とくに、透水孔がない Case4の場合には主応力が負となる領域がブロック直下に発生するのがわかる。このことは、この部分の地盤が不安定になっているという、応力角分布が示す傾向とよく一致するものである。

4. 結 語

本研究では変動水圧が作用するような場における海岸ブロックの沈下現象に着目して、その防止法としてブロックに透水孔を設けることを提案し、その沈下防止効果について実験的かつ理論的な検討を行った。その結果以下のようなことが明らかになった。

- (1) 変動水圧が作用する地盤上にブロックを設置すると時間の経過とともにブロックは沈下するが、ブロックに透水孔を持たせることにより沈下量を減少させることができる。
- (2) ブロックに透水孔を設けることにより、間隙水圧分布および応力状態が改善されることが理論的に明らかにされた。

今後は、提案した手法を実際の海岸ブロックの設計等にいかに応用していくかが検討課題である。

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，pp.589-594，1982.
- 2) Nago,H. and S.Maeno.: Pore pressure and effective stress in a highly saturated sand bed under water pressure variation on its surface, Natural Disaster Sc., Vol.9, No.1, pp.23-35, 1987.
- 3) Posey,J.: Protection of offshore structures against underscour, Journal of Hydraulics Division, ASCE, Vol.97, No.HY7, pp.1011-1016, 1971.
- 4) Yamamoto,T.: Wave induced instability in seabeds, Proc. ASCE. Spec. Conf. Coastal Sediments 77, pp.898-913, 1977.
- 5) Madsen,O.S.: Wave-induced pore pressure and effective stresses in a porous bed, Geotechnique, Vol.28, No.4, pp.377-393, 1978.
- 6) Mei,C.C. and Foda,M.A.: Wave-induced responses in a fluid-filled poro-elastic solid with a free surface - a boundary layer theory, Geophys. J.R. astr. Soc., Vol.66, pp.597-631, 1981.
- 7) Nago,H. and Maeno,S.: Pore water pressure in sand bed under oscillating water pressure, Memoirs of the School of Engineering, Okayama Univ., Vol.19, No.1, pp.13-32,1984.
- 8) 善 功企：海洋開発における波と海底地盤の動的問題，昭和59年度港湾技術研究所講演会講演集，pp.77-133，1984.
- 9) Okusa,S.: Wave-induced stresses in unsaturated submarine sediments, Geotechnique 35, No.4, pp.517-532, 1985.
- 10) 間瀬 肇・酒井哲郎・西村喜弘・前野賢彦：多孔質弾性体理論による防波堤に作用する揚圧力および周辺地盤内の変動間隙水圧の解析，土木学会論文集第 411号，II-12, pp.217-225, 1989.
- 11) Biot,M.A.: General theory of three-dimensional consolidation, Jour. Appl. Phys., Vol.12, pp.155-164, 1941.
- 12) 名合宏之・前野詩朗・井場秀樹：液状化砂層における物体の沈下特性，土木学会中国四国支部第35回学術講演会概要集，pp.117-118, 1983.
- 13) 舟橋弘師・名合宏之・前野詩朗：変動水圧作用下の砂層における構造物の沈下特性，土木学会第39回年次学術講演会講演概要集第 2部，pp.341-342, 1984.
- 14) Maeno,S. and Nago,H.: Settlement of a concrete block into a sand bed under water pressure variation, Proceedings of the International Symposium on Modelling Soil-Water-Structure Interaction, pp. 67-76, 1988.
- 15) 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，港湾技術研究所報告，第26巻，第4号，pp.125-180, 1987.