

変動水圧による構造物の沈下機構に関する研究

名合 宏之*・前野 詩朗**・西岡 操***

1. 緒 言

波浪時における各種海岸構造物災害の原因のひとつが強度の変動水圧による構造物周辺地盤の強度低下によるものではないかという観点から、従来より、変動水圧による透水性地盤の動的挙動を間隙水圧分布および有効応力分布との関係より明らかにしてきた。その結果、ごく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の遅れおよび振幅の減衰を伴いながら砂層内を伝播し、砂層内に過剰間隙水圧を発生させ、時によっては砂層が液状化する状態もあることを、鉛直1次元および2次元砂層模型を用いた実験より明らかにした。また、その力学的機構が砂層を弾性体と仮定した浸透流理論によってほぼ説明されることを示した(名合, 1982, 1984, 1987)。

このような波と地盤との相互作用さらには構造物をも含めた動的相互作用に関する研究が最近の約10年間に多くの研究者によって盛んに進められてきている(Yamamoto, 1977; Madsen, 1978; Mei and Foda, 1981; Nago and Maeno, 1984; 善, 1984; Okusa, 1985; 間瀬ら, 1989)。これらの研究により各種境界条件のもとにおける変動水圧と地盤内の応力分布の関係が次第に明らかにされてきている。地盤定数の不明確さなどの点に多少の疑問点は残されてはいるものの、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ものである。

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、変動水圧作用下においてブロックが時間の経過とともに沈下することを確かめるとともに、沈下に与える要因などについて検討してきた(名合, 1983, 1990; Maeno, 1988)。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、ブロック周辺地盤の液状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。本研究は、半年以上にわたるコンクリートブロックを用いた沈下実験の結果をもとに、変動水圧作用下における砂地盤内の動的挙動の理論解析を行い、構造物周辺の砂の側方流動機構について検討するものである。

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 $d_{50} \div 0.25$ 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而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。ブロックの比重は約2.68である。砂層の間隙率は約0.38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

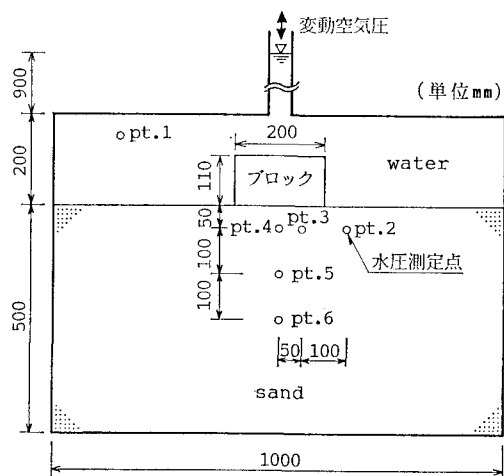


図-1 実験装置

* 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

*** 正会員 工修 (株)間組 土木設計部

検出する。

2.2 基礎式

透水性地盤上に変動水圧が作用する場合の地盤の動的挙動を求めるための基礎式としては、著者らが地盤内のごく微量の空気（体積含有率にして約 0.3%~1.0%）を考慮して導いた以下の式を用いる（Nago, 1984）。

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

ここに、 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 ：せん断弾性係数、 ν ：ポアソン比、 ρ ：水の密度、 β ：水の圧縮率、 λ_w, λ_a ：水および空気の体積含有率、 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。

2.3 解析モデルおよび解析条件

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-2 に示される領域を対象とした。領域の分割には図に示されるように三角形要素を用いた。

a) 境界条件

AB において、 $u_z=0, \partial h/\partial z=0$

AF, BC, ED において $u_x=0, \partial h/\partial x=0$

DC において $h=h_s(t)$ 、有効応力 $=0$

FE において $\partial h/\partial z=0$ およびコンクリートブロック上に作用する変動水圧を荷重項として与える。

ここに、 $h=h_s(t)$ は砂層面上に作用する変動水圧水頭である。

b) 計算条件

$\lambda_a=0.005, \lambda_w=0.38, k=0.015(\text{cm/sec}),$

$\beta=43 \times 10^{-11}(\text{m}^2/\text{N}), G=7 \times 10^7(\text{N/m}^2),$

$\nu=0.45, \Delta t=0.01(\text{sec}), g=9.8(\text{m/sec}^2),$

$\rho=1.0 \times 10^3(\text{kg/m}^3), P=1.013 \times 10^5(\text{N/m}^2)$

実際の数値解析においては、地盤内の応力およびひずみの算出はブロックの自重および砂の自重（砂の密度を $\rho_s=2.65 \text{ g/cm}^3$ としている）による初期応力状態を求めた後、式（1）によって得られる変動状態の計算結果を加えている。

3. 結果および考察

3.1 実験結果

実験は約30万分（約 211 日）行った。図-3 は実験によって得られた沈下量を示したものである。この図より、沈下は時間の経過とともに進行するが、実験開始後約二日程度（2880分）で全沈下量の約 1/3 に達し、その後徐々に沈下が進行し、この実験の終了時には沈下はほぼ終了していることがわかる。図-4 および 図-5 は沈下実験開始時（沈下前）および終了時（沈下後）における砂層内における変動間隙水圧水頭を示したものであ

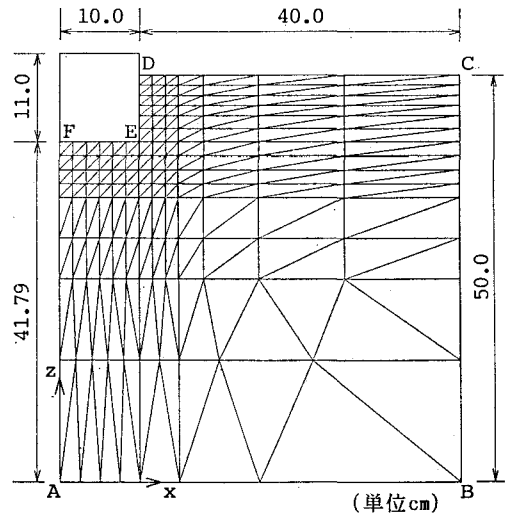


図-2 数値解析モデル

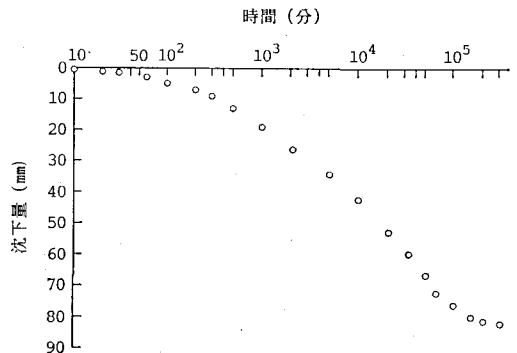
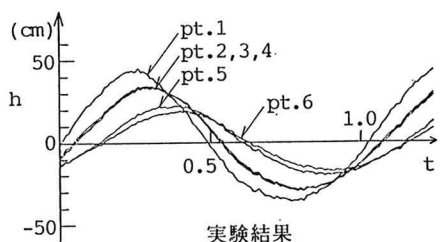


図-3 沈下実験結果

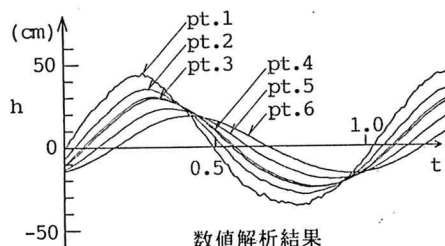
る。なお、それぞれの状態における砂層面上に作用する変動水圧を境界条件 $h_s(t)$ として数値解析した結果もあわせて示している。これらの図より、砂層面上に作用する変動水圧は振幅の減衰および位相の遅れを伴って砂層内に伝播するのがわかる。また、解析結果より、間隙水圧が砂層中に伝播する際に発生する振幅減衰および位相の遅れとも計算結果は実験結果をよく再現しており、採用した計算条件はほぼ妥当な条件であるものと考えられる。

3.2 砂の側方流動に関する検討

写真-1 および 写真-2 はそれぞれ実験開始後 1000

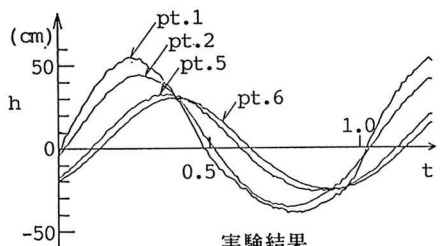


実験結果

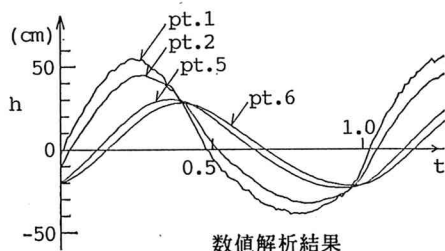


数値解析結果

図-4 変動間隙水圧 (沈下前)



実験結果



数値解析結果

図-5 変動間隙水圧 (沈下後)

分および 90000 分経過時の様子を示している。また 図-6 は実験時に観察された砂の流動状況を模式化したものである。これらの写真および図に示されるように、沈下はブロック下部の砂が外側に押し出されることによって徐々に進行することがわかる。

図-7 は数値解析結果得られた沈下前における構造物下端部直下の変動水圧水頭および各応力成分を示したものである (図中の応力成分は計算結果より得られる値の符号を変えて圧縮を正としている)。ここでは、砂層面上に作用する変動水圧としては、実験値とほぼ同じ特性を持つ、周波数 1Hz、変動水圧水頭 40 cm の正弦波を与えている。この図より、各応力成分は砂層内の間隙水圧 h の変動につれて時間的に変化していることがわかる。有効応力 σ_x , σ_z の変化をみると、側方流動が起こる水圧下降時には、それらの値が負となる時間帯が存在している。砂地盤においては有効応力が負となる状態は

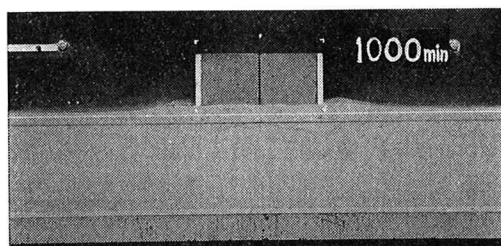


写真-1 沈下の進行状況 (実験開始後 1000 分)

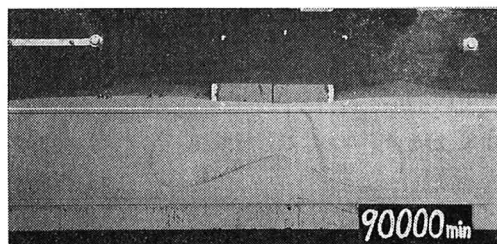


写真-2 沈下の進行状況 (実験開始後 90000 分)

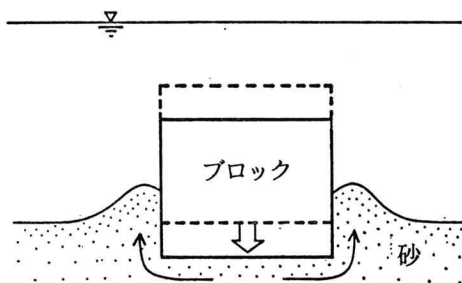


図-6 沈下に伴う砂粒子の移動状況

存在しないとみなされるから、この時間帯の計算結果は、砂層を弾性体と仮定した理論解析の不合理な点を示していると考えてよい。実際現象としてはこの時間帯では砂層は液状化していると考えられ、砂層の挙動は、弾性体とは異なるむしろ流体的な性質を考慮した支配方程

式によって記述されなければならないであろう。

砂粒子の運動が流体的であり、慣性力が無視できるとすると、水平方向の運動方程式は、

$$-\frac{\partial p}{\partial x} - \frac{\partial \tau'_{zx}}{\partial z} = 0 \dots\dots\dots (2)$$

と近似することができよう。ここで、 p は流体圧であり、図-4 および 図-5 のように間隙水圧の実験値と理論値がほぼ一致することを考えると、式(1)による ρgh の解析結果を用いてもよいであろう。 τ'_{zx} は流体としてのせん断抵抗と考えなければならず、弾性解析によって得られた結果を用いることができない。この τ'_{zx} の表示については現段階では未知であり、今後の検討が必要とされる。

ここでは、沈下現象における液状化領域を今後力学的に解析していくための基礎として、 $-\partial p / \partial x (\equiv F, \text{いわゆる浸透力})$ の性質について検討する。

図-8 および 図-9 は沈下前後における F の値を構造物周辺部について示したものである。各図の (a), (b), (c) はそれぞれの図中の解析位置に記されている線上の値であることを示している。これらの図より、 F の値はブロック直下の水圧下降時が最も大きく、ブロックから鉛直下方、水平方向とも、離れるにしたがって F の値は小さくなるのがわかる。また、沈下前後の比較をすると、沈下後の場合の方が F の値は小さくなっていることがわかる。このことより、浸透力の面からみるとブロック下部の砂粒子は水圧下降時、特に沈下実験開始直後のブロック下端部において側方流動を受け易くなっていることがわかる。

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ブロックの沈下現象に着目して、その力学機構をブロック周辺部における砂粒子の側方流動の面から検討を行った。

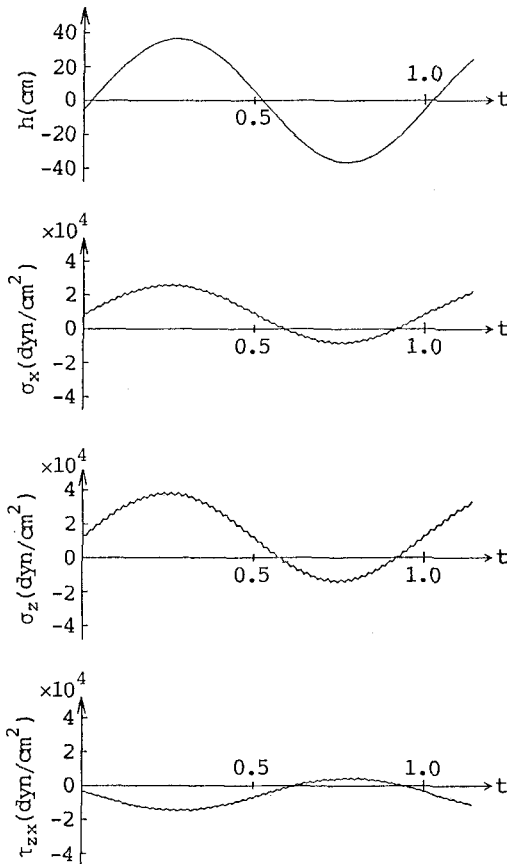


図-7 変動間隙水圧および各応力成分の時間変化

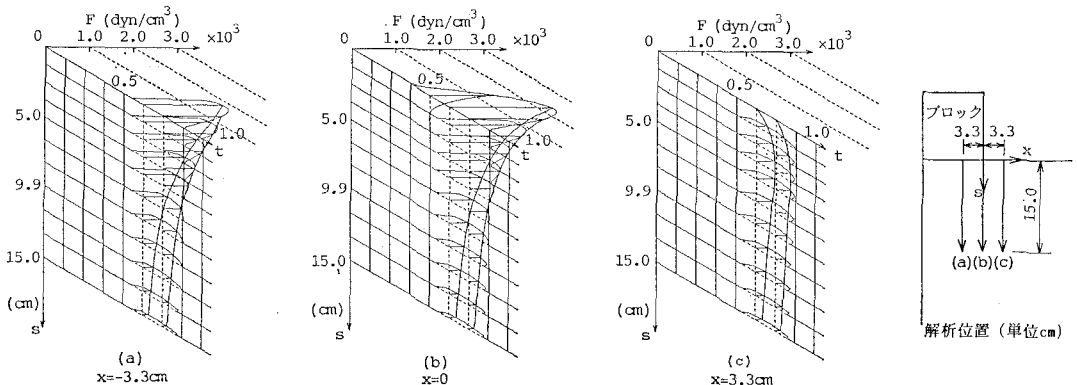
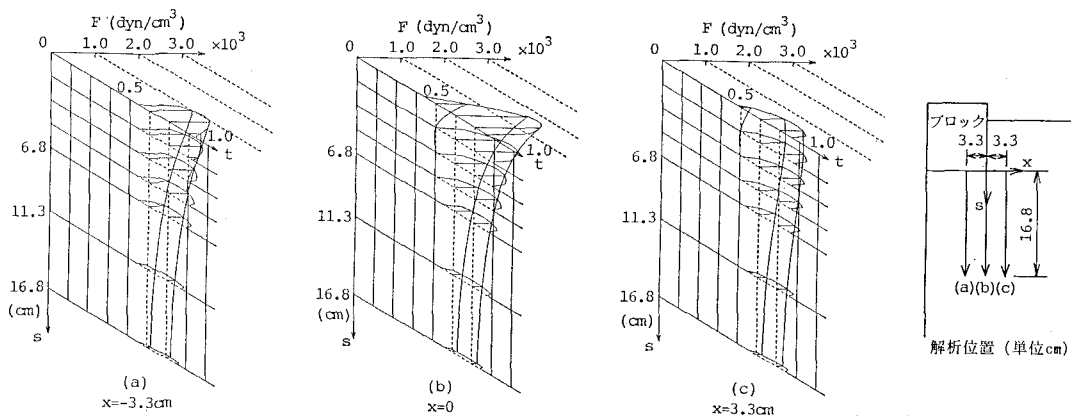


図-8 ブロック周辺部における水平方向の F の時間的・場所的变化 (沈下前)



図—9 ブロック周辺部における水平方向の F の時間的・場所的变化 (沈下後)

その結果、変動水圧が作用する地盤上にブロックを設置するとブロック周辺部における砂の側方流動により時間の経過とともにブロックは沈下することが示された。また、理論解析結果より、ブロック周辺の砂粒子は水圧下降時に側方流動を受け易い状態にあることが明らかにされた。今後は、液状化状態でのせん断抵抗力について検討を加え、砂の側方流動量を定量的に評価し、沈下量の予測手法を確立していくことが必要であると考えている。

参 考 文 献

- 善 功企 (1984): 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.
- 善 功企・山崎浩之・渡辺 篤 (1987): 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.
- 名合宏之 (1982): 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.
- 名合宏之・舟橋弘師・前野詩朗 (1984): 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.
- 名合宏之・前野詩朗・佐々原秀史・西岡 操 (1990): 海岸ブロックの沈下防止法に関する研究, 海洋開発論文集, Vol. 6, pp. 229-234.
- 間瀬 肇・酒井哲郎・西村喜弘・前野賀彦 (1989): 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, pp. 217-225.
- Madsen, O. S. (1988): Wave-induced pore pressure and effective stresses in a porous bed, *Geotechnique*, Vol. 28, No. 4, pp. 377-393.
- Maeno, S. and H. Nago (1988): 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.
- Mei, C. C. and, M. A. Foda (1981): 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.
- Nago, H. and S. Maeno (1984): 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.
- Nago, H. and S. Maeno (1987): Pore pressure and effective stress in a highly saturated sand bed under water pressure variation on its surface, *Natural Disaster Science*, Vol. 9, No. 1, pp. 23-35.
- Okusa, S. (1985): Wave-induced stresses in unsaturated submarine sediments, *Geotechnique* 35, No. 4, pp. 517-532.
- Yamamoto, T. (1977): Wave induced instability in sea beds, *Proc. ASCE. Spec. Conf. Coastal Sediments* 77, pp. 898-913.