

変動水圧によるブロックの沈下にもなう周辺砂地盤の流動の可視化

名合宏之*・前野詩朗**・清水雄一***

1. はじめに

近年の沿岸域の開発にともない、内湾域のみならず大きな波の作用を受ける外洋に面した地域における開発も多く進められている。このような地域に設置される海岸構造物は、波などに対する高い安全性が要求されている。ところが、台風や冬季風浪により毎年のように多くの海岸堤防や離岸堤などの損壊が報告されている。これらの被災例をみると、構造物そのものに直接作用する外力により構造物が破壊することもあるが、構造物周辺の地盤の破壊にともない破壊にいたる例も多くみられる。離岸堤の沈下や防波堤の裏込め土砂の吸い出しによる海岸構造物の損壊などがその例である。したがって、このような波による繰り返し荷重を受ける場に設置される海岸構造物の設計に対しては、波による構造物周辺地盤の動的相互応答に対する安全性も考慮する必要があるものと考えられる。

以上のようなことを考慮して、著者らは、従来より、波などによる変動水圧が砂地盤上に作用する場合の地盤の動的挙動について検討を行ってきた(名合, 1982; Nago・Maeno, 1984, 1987)。その結果、地盤内に含まれる極微量の空気(含有率0.3%~1%)の存在により地盤上に作用する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ことを示した。その結果、地盤内に過剰間隙水圧が発生し、地盤の有効応力が周期的に低下し、極端な場合には液状化が発生することなどを明らかにした。さらに、このような変動水圧が作用する場合における実際的な問題として、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沈下実験を行い、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(Maeno・Nago, 1988; 名合他, 1990, 1991)。その結果、砂地盤上に設置される海岸ブロックなどの沈下現象は、波浪時

に発生する変動水圧によるブロック周辺砂地盤の液状化にともなう砂の側方流動に原因の一つがあることを従来より明らかにしている。今後は、流動予測手法を確立し、沈下予測や沈下防止策を提示していく必要があるものと考えている。しかし、これまでの研究ではブロック下部の砂がどのような経路でどの程度流動するのかについては明らかにされておらず、流動予測をするためには可視化などの手法を用いて流動の内部構造を明らかにしておく必要がある。本研究は、砂の流動予測のための基礎的な資料を得ることを目的として、鉛直2次元砂層模型を用い、ブロックの周辺部に着色砂を層状および列状に設置することにより、変動水圧作用下におけるブロックの沈下にもなう周辺地盤の砂の流動の可視化を行い、流動の内部構造を実験的に明らかにしようとするものである。

2. 実験方法

実験は、図-1に示すような奥行き40 cmの鉛直2次元の容器を用いる。砂層構成材料には高飽和状態の豊浦標準砂を用いた。図-2は、実験に用いたブロックの形状を示している。図-2(a)に示される透水孔の無いブロックと、沈下を抑える効果のあることが従来の研究結果よ

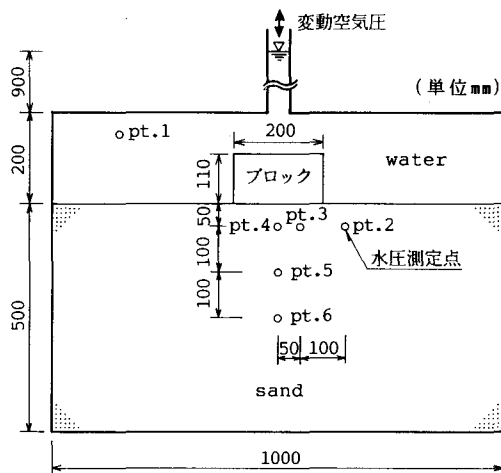


図-1 実験装置

* 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
 *** 学生員 岡山大学大学院 工学研究科土木工学専攻

り明らかにされている透水性を有するブロック（図-2（b）に示される位置に直径5mmの透水孔を開けたブロック）の2種類を使用した。変動水圧は周期的な変動空気圧を水面上に作用させることにより発生させた。構造物周辺地盤の砂の流動を可視化するために、標準砂を高温で焼いて黒色に着色した砂を図-3に示されるように層状および列状に設置する。この黒砂は、透水試験および比重試験を行った結果、標準砂とほぼ同様であった。砂層設置方法は、まず、規定量の標準砂を試料容器に入れ、バイブレーターを用いて所定の間隙率まで締め固め砂層表面をならす。つぎに、黒砂および標準砂を設置する部分では、所定の間隙率になるように黒砂および標準砂の重量を決定し、その重量分だけの砂を図-3に示される位置に設置した。その後、黒砂の設置方法にかかわらず砂層条件が同じになるように実験開始前に変動水圧を8時間作用させた。その時の砂層の間隙率はほぼ一様に0.395程度であった。その後、ブロックを砂層面上に設置し、変動水圧を3000分作用させた後排水し、ブロックを取り除いてブロック中央下部の砂層の断面を切り取り黒砂の移動量の計測および写真撮影を行った。実験終了後の間隙率の測定については、ブロック下部地盤の砂層

表-1 実験条件

Case	黒砂の配置	透水性の有無
1	層状	無
2	列状	無
3	層状	有
4	列状	有

を一定体積切り取り、その乾燥重量より間隙率を算出した。また、沈下量はブロックの両端に取り付けてあるスケールにより計測した。実験は表-1に示すように2種類のブロックについてそれぞれ黒砂を層状、列状に配置して4ケース行った。その他の実験条件は、変動水圧振幅が約40cm、周波数が1.0Hzである。

3. 実験結果および考察

3.1 ブロックの沈下特性

図-4は沈下量の測定結果を示している。この図より、透水性の無いブロックを用いた場合（Case 1、およびCase 2）についてみると、沈下はいずれの場合も実験開始後徐々に進行することがわかる。黒砂を層状に設置した場合と列状に設置した場合とで沈下量に多少の違いはあるものの、単位時間の沈下量は実験の初期の段階で大きく、時間の経過とともに小さくなるという沈下の変化傾向はほぼ一致しており、ほぼ同様な条件下で実験が行われたものと判断できる。つぎに、透水性を有するブロックを用いた場合（Case 3およびCase 4）についてみると、黒砂の配置の違いによる沈下量の変化はほとんどなく、沈下の傾向も前述の透水性の無い場合とほぼ同様である。実験の終了段階における沈下量は透水性が無い場合に較べて約半分程度に抑えられており、透水孔の効果があることがわかる。また、いずれのブロックを用いた場合も実験開始後300分から500分程度で本実験の終了時の沈下量の約半分程度沈下していることがわかる。

3.2 砂の流動特性

写真-1は黒砂を層状に設置したCase 1の場合のブ

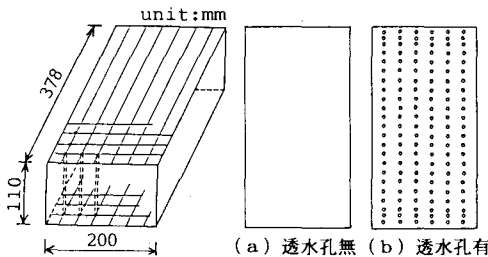


図-2 ブロックの形状および孔の配置

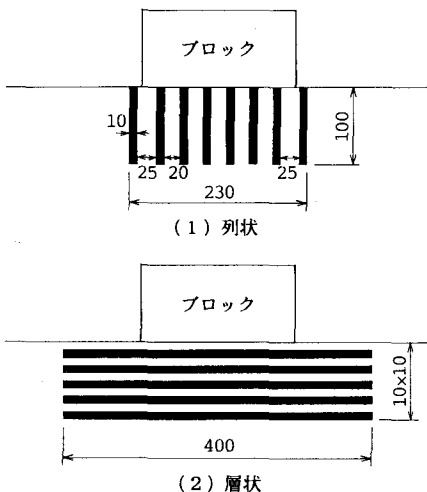


図-3 砂層設置図（単位 mm）

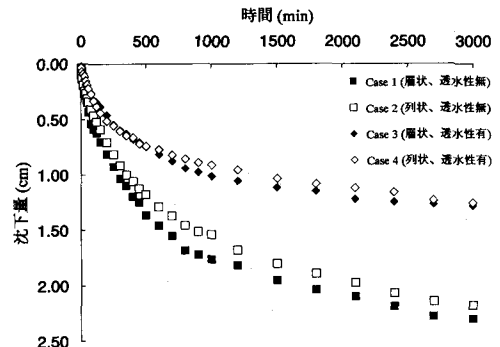


図-4 沈下量の時間変化

ロックの沈下の進行する様子を装置の前面より撮影したものである。この写真より、実験開始後ブロック下部の砂がブロック側面に吸い出されるのにもなってブロックは沈下し、時間の経過とともに吸い出された砂によってブロック側面の地盤が盛り上がっていく様子がわかる。なお、この写真においては、手前の側壁の影響により、ブロック下部において標準砂と黒砂が混ざった状態になっており、つぎに述べるブロック中央部の砂の移動状況とは異なっていることに注意する必要がある。

写真-2(a) および (b) はそれぞれ Case 1 および Case 2 の実験終了時におけるブロック中央下部断面の黒砂の移動状況を撮影したものである。これらの写真より以下のことがわかる。写真-2(a) (黒砂を層状に設置した場合)より、ブロック下部に設置した厚さ 1 cm の標準砂はブロック中央下部の一部を除いてほとんど吸い出され、最上層に設置した黒砂もかなり吸い出され、ブロック側面の盛り上がった部分に移動していることがわかる。鉛直方向への移動は、ブロック中央部では下方向に移動し、逆にブロック下部地盤の側方部では上向きに移動していることがわかる。写真-2(b) (黒砂を列状に設置した場合)

合)より、ブロック下部に設置した黒砂は中央部より両端部に向けて側方流動し、その量はブロック中央下部では小さく、ブロック両端部で大きくなっている。また、ブロック中央下部の 2 列を除いた列の黒砂がブロック側面の盛り上がった部分に糸を引くように吸い出されていることもわかる。図-5 は、実験終了時のブロック周辺部の黒砂の移動量をベクトル図として示したものである。このベクトル図を作成するに際しては、図-4 に示されるように、列状と層状とでは沈下量に若干の差が認められたが、両者をほぼ同一条件下での実験とみなし、ベクトルとしては層状の黒砂の鉛直方向の移動量と列状の黒砂の水平方向の移動量とを合成した。この図より、ブロック下端部の砂はブロック側面の砂の盛り上がった部分に移動しており、この部分の砂の移動量が最も大きいことがわかる。また、ブロック中央下部の砂は、ほぼ原型を保ちながらわずかに下方に移動するとともに横方向にも移動していることがわかる。

写真-3(a) および (b) は透水性を有するブロックを用いた Case 3 および Case 4 の場合の実験終了時の黒砂の移動状況を示している。これらの写真より以下のこと

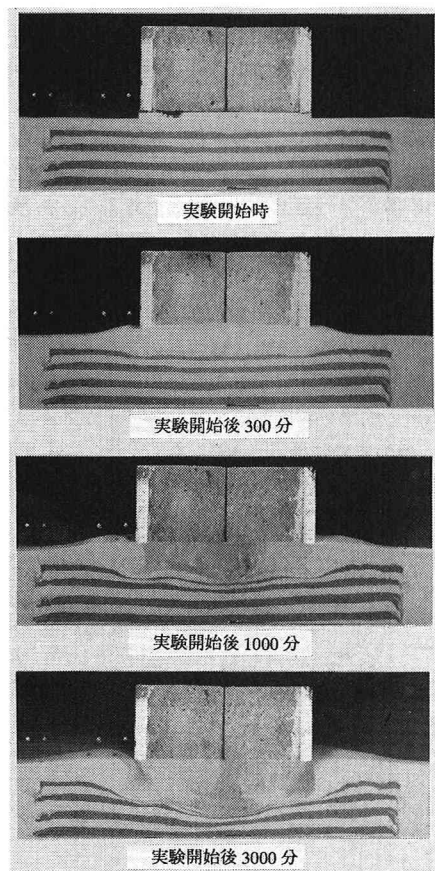
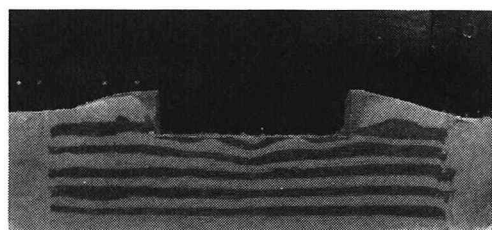
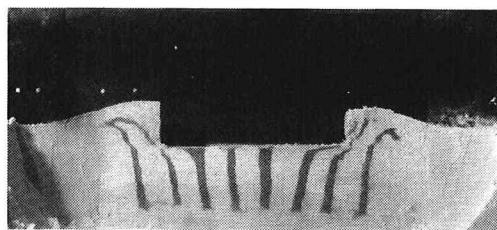


写真-1 沈下の進行状況 (Case 1)



(a) Case 1 (層状、透水性無)



(b) Case 2 (列状、透水性無)

写真-2 黒砂の移動状況

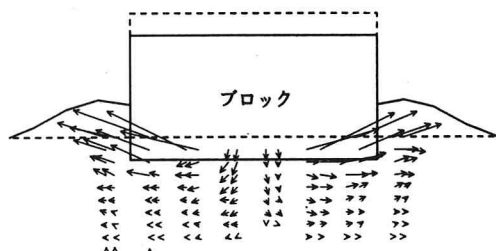


図-5 黒砂の変位分布

がわかる。写真-3(a) (黒砂を層状に設置した場合) より、ブロック下部の砂は両端部で吸い出されているもののその量は透水性の無いブロックを用いた場合よりもかなり少なくなっており、最上層の黒砂もこの場合はほとんど吸い出されていないことがわかる。写真-3(b) (黒砂を列状に設置した場合) は、ブロック下端部の砂は吸い出されているもののブロック下部の4列の黒砂は吸い出されていないことがわかる。このように、透水孔を開けるとブロック周辺部の砂の流動がかなり抑えられることが確認された。なお、この透水孔配置による砂の流動抑止効果は、ブロック周辺部の間隙水圧分布の改善によることをすでに明らかにしている (名合他, 1990)。

3.3 砂の吸い出しによる間隙率の変化

図-6 は、Case 1 の実験終了時のブロック周辺部の間隙率分布を示している。実験開始時の間隙率は前述のよ

うにほぼ一様に 0.395 である。この図に示されるように、ブロックからある程度離れた砂層部では間隙率の変化は見られない。しかし、ブロックの周辺部では右側下端部を除いて間隙率がわずかではあるが大きくなっており、砂層が全体的に緩くなっていることがわかる。このことは、変動水圧によりブロック下部の砂が吸い出される一方で、その場所への砂の新たな供給がないことが原因ではないかと考えられる。一般には、ブロックなどの構造物が沈下するとその下部地盤は締め固められているものと考えられているが、変動水圧による砂の吸い出しをとまなうようなブロックの沈下に関しては、逆に地盤が緩くなり地盤強度の面からも不安定となる傾向があることが本実験より示された。

3.4 ブロック周辺部の浸透圧と流動の関係

前述の実験結果より、ブロック下部の砂は変動水圧の長期にわたる作用により、砂があたかも流動体であるかのようにブロック下部から側方流動することが明らかにされた。著者らは、従来より行っている弾性解析により、砂層内では有効応力が負となる液状化状態が発生することなどを明らかにしているが、弾性解析では本研究で示したような液状化状態において発生する砂の流動は解析できない。図-7 は、実験開始時における液状化した時間帯 (周期 T でほぼ正弦的に変化する変動水圧が下降する時間帯 $t/T = 0.50 \sim 0.75$ 近傍) において、ブロック周辺部の砂をブロック下部から水平方向外側へ押し出そうとする力 F (浸透力) の解析結果 (名合他, 1991) を示した

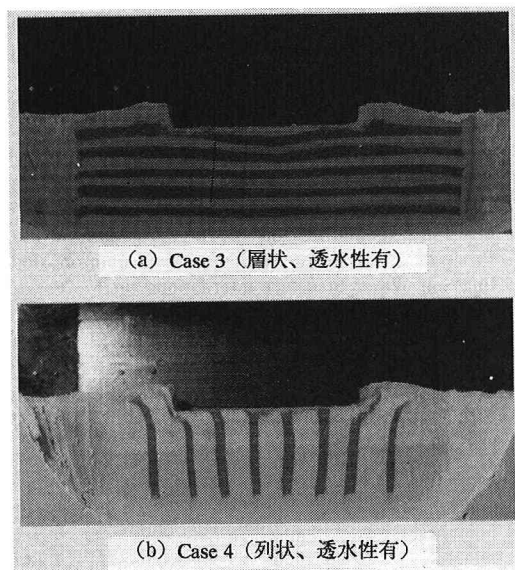


写真-3 黒砂の移動状況

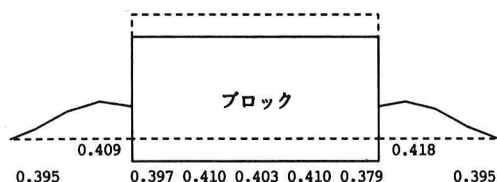


図-6 間隙率

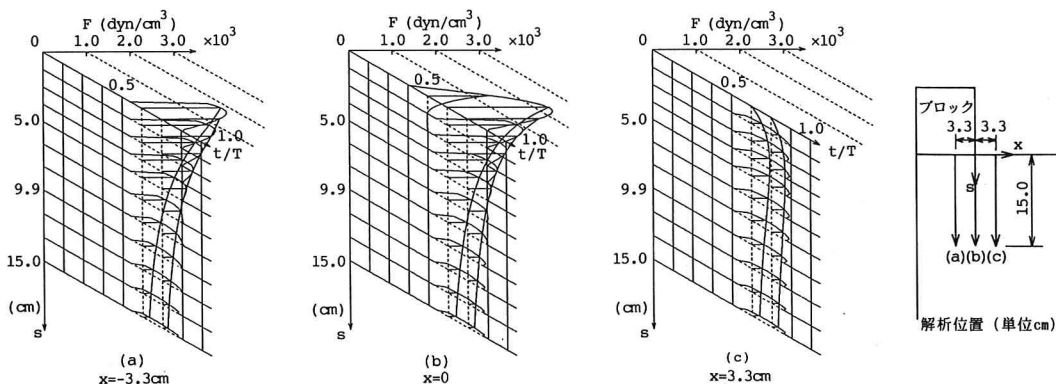


図-7 ブロック周辺部における水平方向の F の時間的・場所的变化 (沈下前)

ものである。この分布をみると、浸透力はブロック側面直下部の水圧下降時に最も大きくなることがわかる。また、ブロックから鉛直下方、水平方向ともにブロック下端部から離れるに従って F の値は減少することがわかる。このような変化傾向は、写真-2および3で示した黒砂を列状に配置した場合にみられたブロック下端部の砂の移動状況とよく対応している。したがって、液状化後の砂層を砂と水の混合流体と考え、ブロック側面下部の断面において流動する砂の量を解析することによりブロックの沈下量を予測することがある程度可能となるものと考えられる。今後、このような液状化後の砂を流動体と仮定した取扱いをすすめていく必要があろう。

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ともなう周辺地盤の流動の内部構造を知ることが目的として、ブロック周辺部の砂の流動の様子の可視化を行った。その結果、得られた主要な結論は以下のようである。

(1) ブロックの沈下は、ブロック下部の砂が変動水圧の作用を受けて側方に吸い出されることにより、徐々に進行する。その際、ブロック下部の砂は主として中央部より両端部に向けて側方流動するが、その量はブロック端部で最も大きくなることが明らかにされた。

(2) 透水性を有するブロックを用いると、地盤内の間隙水圧分布が改善されることにより、砂の移動量もかなり減少し、したがってまた沈下量も減少することが明らかにされた。

(3) 本実験で対象としたような変動水圧の作用による構造物の沈下現象では、下部地盤が吸い出しにより緩

くなり、強度の面からも不安定になる傾向があることが示された。

(4) ブロック周辺部における砂を水平方向に流動させようとする力(浸透力)の解析結果は、可視化の結果得られたブロック周辺部の砂の流動の様子とほぼ一致することが明らかにされた。

今後は、以上の本研究の成果をもとに流動量の予測手法の開発について検討をすすめていく必要がある。

謝辞: 本研究を遂行するにあたって、文部省科学研究費国際共同研究(代表者岡山大学教授名合宏之, No. 04044121)の補助を受けたことを付記し、謝意を表する。

参 考 文 献

- 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.
- Nago, H. and Maeno, S. (1984): Pore water pressure in sand bed under oscillating water pressure, *Memoirs of school of engineering, Okayama University*, Vol. 19, No. 1, pp. 13-32.
- Nago, H. and Maeno, S. (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.
- Maeno, S. and Nago, H. (1988): Settlement of a concrete block into a sand bed under water pressure variation, *Proceedings of the International Symposium on Modeling Soil-Water-Structure Interactions*, pp. 67-76.
- 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.
- 名合宏之・前野詩朗・西岡 操 (1991): 変動水圧による構造物の沈下機構に関する研究, *海岸工学論文集*, 第38巻, pp. 826-830.