

変動水圧場におけるブロックの沈下防止に関する研究

名合宏之*・前野詩朗**・清水雄一***・山本哲雄****

1. はじめに

近年、我々を取り巻く水辺環境の整備が盛んに進められている。その中でも特に沿岸域を対象としたウォーターフロントの開発が進められ、人と水辺空間との融合が図られている。このような沿岸域の開発に伴って設置される海岸構造物は、人命や沿岸域の施設を守るという面から、台風時の波浪や冬季風浪に対する高い安全性が要求されている。ところが、波浪により毎年のように多くの海岸堤防や離岸堤などが被害を受けているという現状をみると、波に対する構造物の安定性を検討する場合、従来より離岸堤などの設計に対して採用されてきた静的な耐波安定性の検討だけでは十分でなく、波による繰り返し荷重を考慮した構造物とその周辺地盤との動的相互応答をも含めた安定性を検討する必要がある。

以上のような背景のもと、波による変動水圧が地盤上に作用することによる地盤内の間隙水圧の変化ならびに地盤の動的挙動を取り扱った研究が大草 (1976)、Yamamoto (1977)、Madsen (1978) らによって発表されたのに続いて、名合 (1982)、Nago and Maeno (1984, 1987)、善 (1984)、前野 (1985)、Sakai et al. (1988) らによって盛んに行われてきている。これらの研究により、波浪時の波が強度の変動水圧として海底地盤上に作用し、地盤内の間隙水圧が時間的に変化すること、また、それに伴って、地盤の有効応力が時間的に変化し、極端な場合には液状化が発生することなどが明らかにされている。これらの基礎的研究の成果をもとに、著者らは、変動水圧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を受けて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、変動水圧場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。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

ック周辺砂地盤の浸透水圧の時間的変化にともなう砂の側方流動に原因の一つがあることを明らかにしている (Maeno and Nago, 1988; 名合他, 1990, 1991)。また、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、変動水圧場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ている (名合他, 1993)。この他にも、岩垣ら (1993) は、変動水圧場におけるブロックの沈下を検討し、砂地盤上の構造物が沈下するのは、構造物直下の砂層内部の弾性特性をもつ構造物の破壊による可能性があることを指摘している。また、酒井ら (1993) は、水圧変動と振動流が同時に存在するという実際現象に近い状況を再現可能な実験装置を用いて、ブロックの沈下実験を行い、水圧変動と振動流がともに作用する場合の沈下量は、場合によっては、それぞれが独立に作用する場合よりも大きくなることを示している。

以上のように、変動水圧場におけるブロックの沈下などの災害発生メカニズムがある程度明らかにされてきており、今後は、災害防止という面から検討を進めていく必要がある。本研究は、変動水圧場におけるブロックの沈下防止策を提示することを目的として、沈下防止工を施したブロックの沈下特性をブロック周辺部の砂の流動の面から実験的かつ理論的に検討するものである。

2. 実験方法

実験には、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。Case 1 として図-2 (a) に示される沈下防止工を取り付けていないブロック、Case 2 としてブロックの側面下部に 5 cm の矢板を沈下防止工として取り付けたブロック (図-2 (b)) および Case 3 として矢板の部分に 15 mm 間隔で直径 4.5 mm の孔を開けることにより透水性を持たせた矢板を沈下防止工として取り付けたブロック (図-2 (c)) の 3 種類を使用した実験を行った。ブロックの重量は約 22.2 kg である。なお、矢板の材料としては厚さ 1 mm のステンレス板を使用した。また、透水性を有する矢板については、砂が孔から流出し

* 正会員 工博 岡山大学教授 工学部土木工学科

** 正会員 工博 岡山大学助手 工学部土木工学科

*** 正会員 工修 中国電力(株)

**** 学生会員 岡山大学大学院 工学研究科土木工学専攻

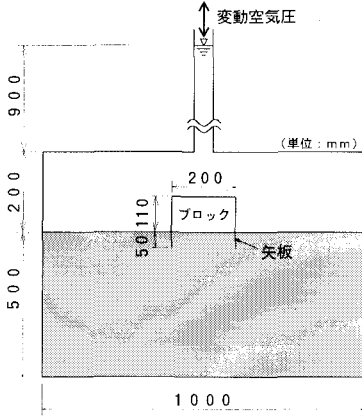


図-1 実験装置

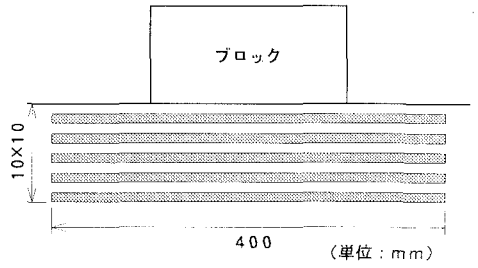
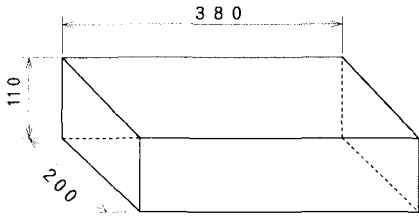
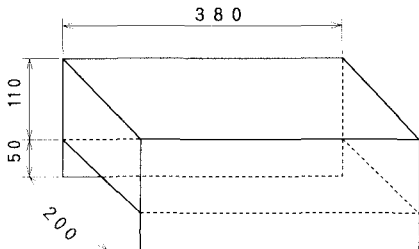


図-3 砂層設置図

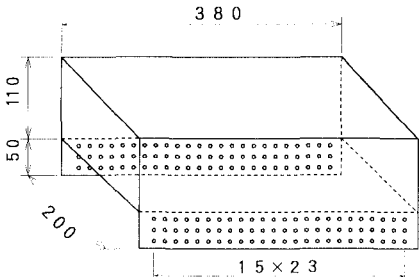
砂を図-3に示されるように層状に設置した。この着色砂は、透水試験および比重試験を行った結果、標準砂とほぼ同様であった。砂層設置方法は、まず、規定量の標準砂を試料容器に入れ、パイプレーターを用いて所定の間隙率になるまで締め固め砂層表面をならす。つぎに、着色砂および標準砂を設置する部分では、所定の間隙率になるように着色砂および標準砂の重量を決定し、その重量分だけの砂を図-3に示される位置に設置した。その後、砂層条件が同じになるように実験開始前に変動水圧を8時間作用させた。その時の砂層の間隙率は、各ケースとも約0.4であり、ほぼ同様な条件下で実験が行われたものと判断された。その後、ブロックを砂層面上に設置し、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着色砂の移動量の計測および写真撮影を行った。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。実験条件としては、いずれの場合も変動水圧振幅が約40 cm、周波数が1.0 Hzである。



(a) Case 1. 矢板無し



(b) Case 2. 矢板有り



(c) Case 3. 矢板に透水孔有り (単位: mm)

図-2 ブロックの形状および孔の配置

ないように砂の粒径より小さなメッシュサイズの金網を取り付けている。

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

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、沈下はいずれの場合も実験開始後徐々に進行し、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いる。また、実験開始後500~1000分程度で本実験の終了時の段階の沈下量の半分以上沈下していることがわかる。実験終了時の沈下量をみると、沈下防止工として矢板を取り付けたCase 2の場合は、沈下防止工を施していないCase 1の場合の6割程度に沈下量が減少していることがわかる。また、沈下防止工として透水性を有する矢板を取り付けたCase 3の場合は、Case 1の場合よりさらに沈下量が減少していることがわかる。

3.2 沈下防止効果の検討

写真-1、写真-2および写真-3はそれぞれCase 1、Case 2およびCase 3の場合の実験終了時におけるブロック中央周辺断面の着色砂の移動状況を撮影したもので

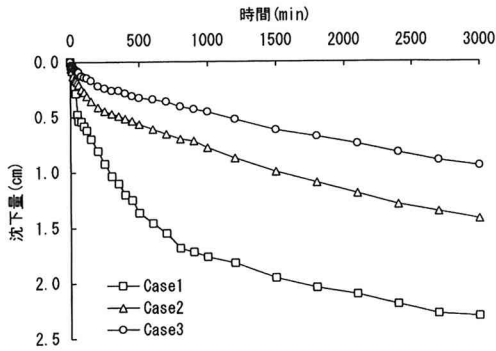


図-4 沈下量の時間変化

ある。これらの写真より以下のことがわかる。

ブロックに沈下防止工を施していない Case 1 の場合、層状に設置された着色砂のうち、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流出し、しかも最上層に設置した着色砂もかなり流出し、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、ブロック中央下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かなり上向きに移動していることがわかる。

ブロックに矢板を 5 cm 取り付けた Case 2 の場合には、矢板の外側では着色砂は上方向に移動し、ブロック側面に若干の盛り上がりが見られる。全体の移動量も Case 1 の場合に比較してかなり減少しており、可視化の手法により視覚的にも矢板による沈下防止効果が得られることがわかる。しかし、ブロックに取り付けられた矢板の先端周辺部においては着色砂が矢板を回り込むような形で流出している。これは、変動水圧の作用が矢板を回り込んで矢板の内部にまで及んでいることを示しているものと判断される。したがって、さらに長時間実験を進めると矢板に挟まれたブロック下部地盤から砂がさらに流出することが予測され、不透水性の矢板を設置する場合にはさらに砂層深くまで矢板を設置するか、あるいは、その他の沈下防止工を併用することにより沈下の進行を抑える必要があることがわかる。

ブロックに透水性を有する矢板を 5 cm 取り付けた Case 3 の場合には、変動水圧の作用により、ブロック側面の砂が若干盛り上がりを見せるが、ブロック下部地盤の砂はほとんど流動しなくなることがわかる。また、Case 2 でみられた矢板先端部での着色砂の回り込みもほとんど発生しなくなることがわかる。したがって、矢板に透水性を持たせることにより、ブロック下部地盤の砂の流動を抑え、沈下防止に対する効果をさらに大きくすることができることがわかる。

3.3 ブロック周辺部の浸透水圧と砂の流動との関係

前述の実験結果より、ブロック下部の砂は変動水圧の

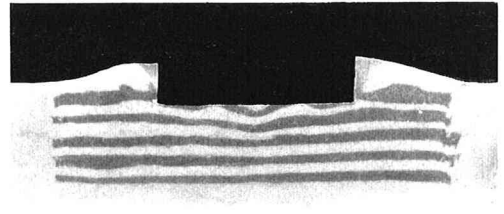


写真-1 着色砂の移動状況 (Case 1)

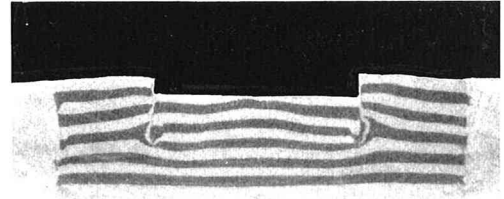


写真-2 着色砂の移動状況 (Case 2)

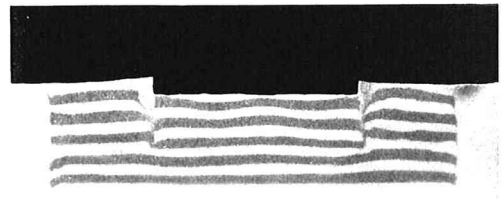


写真-3 着色砂の移動状況 (Case 3)

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。また、ブロックに矢板を取り付けることにより、沈下を抑えることが出来るが、不透水性の矢板の場合には沈下防止策としては万全ではなく、透水性を有する矢板を用いることが最も沈下防止に対する効果が大きいことなどを明らかにした。ここでは、著者らが従来より行っている有限要素法による数値解析(名合他, 1990)により、変動水圧場におけるブロック周辺部の浸透水圧分布と周辺砂地盤の流動との関係を検討する。解析には、実験装置が左右対称であることを考慮して、図-5 に示すような解析モデルを用いた。境界条件としては、砂層面 DC 上で、変動水圧の振幅 40 cm、周波数 1.0 Hz の正弦波を与え、その他の境界 (AB, BC, DH, GD, AG) は不透水境界としている。なお、不透水性の矢板の部分については、矢板を挟んだ左右の節点において水平変位が無いものとし、鉛直変位のみ有する条件を与えた。さらに、透水性の矢板の場合には、この条件の他に、矢板を挟んだ節点の位置における間隙水圧が矢板を挟んで等しくなるような条件で解析を行った。

図-6、図-7 および図-8 は、それぞれ Case 1, Case 2 および Case 3 の場合の砂層内の等間隙水圧および浸透水圧の分布を示したものである。これらの図は、砂層

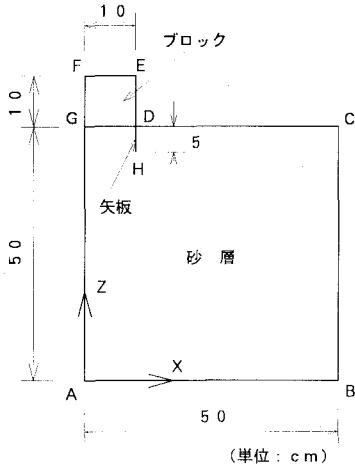


図-5 解析モデル

面上に作用する変動水圧が最も降下する時間帯 $t/T = 0.75$ について示したものであり、ブロック周辺部の砂が最も流出しやすいときの状況である。これらの図より以下のことがわかる。

ブロックに沈下防止工を施していない Case 1 の場合、ブロック下部の砂をブロック側面に押しだそうとする浸透水圧が作用することがわかる。また、この浸透水圧分布は写真-1 で示したブロック周辺の砂の流動形態とよく一致している。このケースの場合には、ブロック周辺部でこのような力が発生するにも拘わらず、砂の流動防止工がないため沈下量が多くなったものと考えられる。

ブロックに矢板を 5 cm 取り付け付けた Case 2 の場合には、間隙水圧が矢板を回り込むように伝播することがわかる。このことにより、矢板先端部では、先端部を回り込むような形で矢板内部の砂を外側へ押しだそうとする浸透水圧が発生する。この浸透水圧の発生は、実験において矢板を設置したにも拘わらず矢板先端部で着色砂の流動が発生したと密接に関係しているものと考えられる。また、ブロック先端部での浸透水圧の大きさが Case 1 の場合とほぼ同じ程度であるにも拘わらず実験において沈下量が減少したのは、矢板を設置することにより、ブロック下部地盤の砂の流出経路が長くなったことと、矢板前面の土かぶりによる押さえ効果があったことが原因であると考えられる。

ブロックに透水性を有する矢板を 5 cm 取り付け付けた Case 3 の場合には、砂層面上に作用する変動水圧は Case 2 の場合のように矢板を回り込まずに、矢板の透水孔の部分を通して直接ブロック下部地盤に伝播することがわかる。この場合には、浸透水圧は矢板を回り込むような方向には作用せずに、矢板の面に垂直な方向に作用する。したがって、矢板に透水性を持たせることは、ブロック

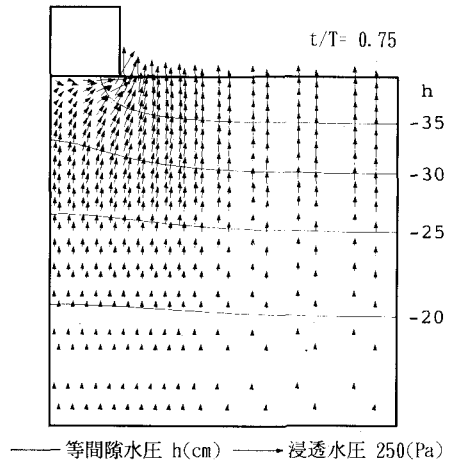


図-6 間隙水圧および浸透水圧分布 (Case 1)

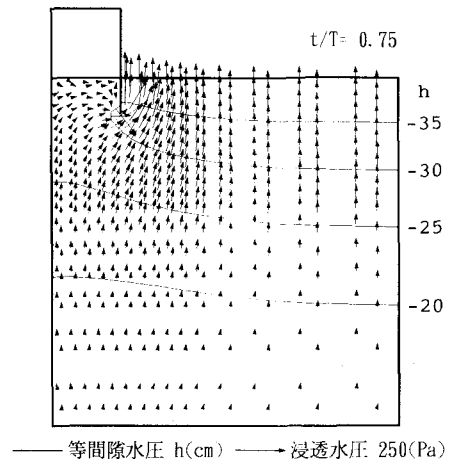


図-7 間隙水圧および浸透水圧分布 (Case 2)

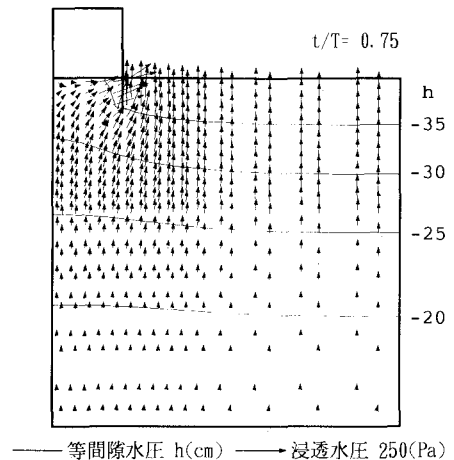


図-8 間隙水圧および浸透水圧分布 (Case 3)

下部の砂を流動させようとする浸透水圧の方向を変える効果があり、しかもこの場合には砂が流動しようとする方向に矢板が障害物として存在し、砂の流動を妨げるといふ2重の効果があることが解析結果よりわかる。これらの結果は、Case 3の実験で示されたブロック下部の砂の流動がほとんど発生しなかったことおよび沈下防止の効果が最も大きかったことをよく説明するものである。なお、矢板周辺部における浸透水圧が矢板の無いCase 1の場合と若干異なるのは、矢板の存在を考慮した解析を行ったためであると考えられる。

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防止策を提示することを目的として、沈下防止工を施したブロックの沈下特性をブロック周辺部の砂の流動の面から実験的かつ理論的に検討した。その結果、得られた主要な結論は以下のようである。

(1) 変動水圧場におけるブロックの沈下は、ブロック下部の砂が側方に流出することにより徐々に進行する。これは、変動水圧によりブロック周辺砂地盤内の間隙水圧分布が時間的に変化し、ブロック下部地盤の砂をブロック側方に押し出そうとする浸透水圧が発生することが原因であることが明らかにされた。

(2) 本研究で沈下防止工として示したブロックに矢板を取り付ける工法は、ブロック下部の砂の流出経路を長くするという面から沈下防止に効果があることが明らかにされた。また、透水性を有する矢板を用いると、変動水圧場において発生するブロック周辺砂地盤の間隙水圧分布の改善につながり、ブロック下部の砂の移動量もほとんどなくなり、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。

今後は、以上の本研究で得られた成果をもとに、現地における実際の海岸構造物の設計にいかに取り入れていくかが検討課題である。

謝辞：本研究は、文部省科学研究費国際学術研究（共

同研究）No. 04044121（代表者：名合宏之）の一環として行われたことを付記し、謝意を表する。

参 考 文 献

- 岩垣雄一・西口松男・奥田雄司（1993）：変動水圧による砂地盤と構造物の鉛直変位に関する研究，海岸工学論文集，第40巻，pp. 591-595.
- 大草重康・中村隆昭・内田篤志（1976）：波による海底地盤中の間隙水圧の変化，第11回土質工学研究発表会，pp. 781-784.
- 酒井哲郎・後藤仁志・山本哲也・柏村真直（1993）：水圧変動と振動流の同時作用下での砂地盤上のブロックの沈下，海岸工学論文集，第40巻，pp. 811-815.
- 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年港湾技術研究所講演会講演集，pp. 77-133.
- 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・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.
- 名合宏之・前野詩朗・清水雄一（1993）：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，海岸工学論文集，第40巻，pp. 516-520.
- 前野賀彦・長谷川高士（1985）：波浪作用下の海底砂層内に発生する間隙水圧の伝播特性，第32回海岸工学講演会論文集，pp. 273-277.
- 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 Interactions, pp. 67-76.
- Nago, H. and S. Maeno (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 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.
- Sakai, T., H. Mase and A. Matsumoto (1988): Effects of inertia and gravity on seabed response to ocean waves, Proceedings of the International Symposium on Modelling Soil-Water-Structure Interactions, pp. 61-66.
- Yamamoto, T. (1977): Wave induced instability in seabeds, Proceedings of the ASCE, Spec. Conference, Coastal Sediments, pp. 898-913.