

変動水圧場におけるブロックの沈下に及ぼす鉛直変動荷重の影響

前野 詩朗* ・ 名合 宏之** ・ 小谷 裕司***
山本 哲雄**** ・ 西田 英紀*****

1. はじめに

沿岸域の開発に伴って設置される海岸構造物やその保護工として用いられる消波ブロックなどが、台風や冬季風浪の作用を受けて沈下するという被害が多く報告されている。このように毎年のように繰り返される被害を防止するという観点から、海底地盤上に設置される構造物の沈下機構を解明することは重要な検討課題となっている。

このような背景のもと、波による海底地盤上の構造物の沈下現象を取り扱った研究が近年数多く進められてきている。すなわち、善 (1987) や Maeno・Nago (1988) が砂層模型を用いて、変動水圧による液状化砂層上に置かれるブロックなどの物体が徐々に沈下することを実験的に確かめたのに続いて、名合ら (1991, 1993)、岩垣ら (1992, 1993) および酒井ら (1993) によって、沈下に影響を及ぼす要因の解明がなされている。また、名合ら (1990, 1994) は、変動水圧場における構造物の沈下防止法に関する提案も行っている。これらの研究により、変動水圧場におけるブロックなどの構造物の沈下現象に与える要因は、ある程度解明されてきた。

沈下機構に関して、著者らは、ブロック周辺地盤上に作用する変動水圧が地盤内の間隙水圧を周期的に変化させることにより、ブロック下部の砂が徐々に側方流動することが、沈下の主要な要因ではないかと考えてきた。一方、岩垣ら (1995) は、沈下現象を鉛直変動荷重による地盤の弾塑性変形問題として捉えるのが妥当ではないかとの指摘をおこなっている。すなわち、ブロック周辺地盤面上に作用する変動水圧はブロック下部地盤に振幅減衰および位相の遅れを伴って伝播するため、波の峰と谷の状態では、図-1(a), (b) に示すように、ブロック上面に作用する変動水圧とブロック下面の間隙水圧とに差が発生し、その結果として、図-1(c) のような鉛直変動荷重がブロックを介して直接ブロック下部地盤に作用す

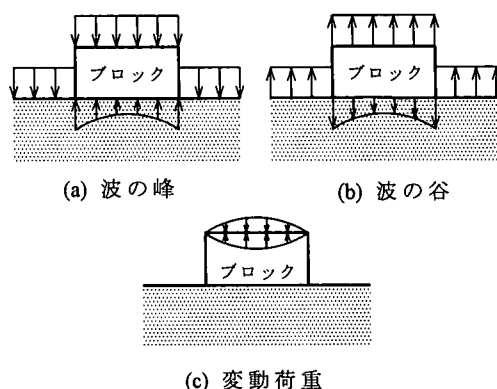


図-1 変動荷重の発生機構

ることになる。このような周期的なブロックの見かけの荷重の変化は、砂層面に対して局所的な繰り返し荷重となり、砂層面の弾塑性変形が生じ沈下が進行するとするものである。

著者らは、ブロック下部地盤の流動の可視化により (名合ら, 1993)、ブロック下部の砂が側方流動することにより沈下が進行することを実験的に確かめており、鉛直変動荷重が沈下に与える影響は小さいものと推定していたものの、鉛直変動荷重の影響については、これまでのところ定量的には評価していなかった。しかし、今後ブロック周辺地盤の砂の流動予測や沈下量予測をするうえで、岩垣らが指摘した鉛直変動荷重による影響がどの程度沈下に影響を与えるのかを明らかにしておくことは重要な課題である。このような観点から、本研究では、鉛直変動荷重のみが作用する場合を対象とした実験を行い、これまで行ってきた変動水圧場を対象とした実験結果と比較することにより、鉛直変動荷重が沈下に与える影響について検討するものである。

2. 実験方法

実験には、図-2 に示すような奥行き 40 cm の鉛直 2 次元の試料容器を用いた。砂層構成材料には、高飽和状態の豊浦標準砂 ($d_{50} \approx 0.25$ mm) を用いた。実験には直径 20 cm 高さ 8 cm の円柱形のブロックを用いた。ブ

* 正会員 工博 岡山大学環境理工学部環境デザイン工学科講師
** 正会員 工博 岡山大学環境理工学部環境デザイン工学科教授
*** 正会員 工修 岡山大学大学院自然科学研究科博士課程
**** 正会員 工修 日本下水道事業団
***** 正会員 工修 西松建設(株)技術研究所

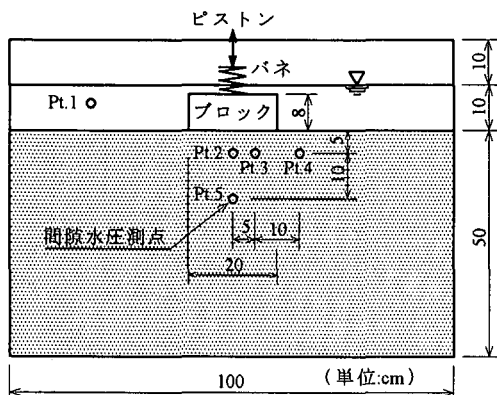


図-2 実験装置

ロックの比重は 3.65, 重量が 9.270 kgf (90.85 kN) である。砂層の設置方法は、試料容器に適量の水を張り、乾燥させた標準砂を所定の間隙率になるように水中自由落下させて行った。その後、ブロックを砂層面上に設置し、鉛直変動荷重を 1000 分間作用させ、規定時間間隔でブロック上部に取り付けたダイヤルゲージにより沈下量を計測した。変動水圧場における実験では、ブロックの沈下と同時に周辺砂層も沈下するが、本研究では、ブロックの絶対沈下量を沈下量とする。鉛直変動荷重は、ピストンによりブロック上部に設置したバネを周期的に伸縮させることによって作用させた。本研究においては鉛直変動荷重のみを対象としており、以下簡単のため、鉛直変動荷重を変動荷重と呼ぶことにする。変動荷重の設定に際しては、ブロック直下面の間隙水圧を直接計測することが困難であったため、数値解析により得られるブロック下面の変動間隙水圧とブロック上面の変動水圧との差より算出される変動荷重を採用することにした。なお、このような数値解析結果がブロック周辺の間隙水圧特性をよく再現するものであることはさきに検証されている (Maeno ら, 1996)。砂層間隙率 0.4, 変動水圧振幅 40 cm の場合について、上記の方法により変動応力を算出すると変動応力振幅は約 0.005 kgf/cm² (4.9 kN/m²) となり、水圧換算すると約 5 cm となる。以下、変動応力の値は水圧換算した値を用いることにする。実験では、変動水圧場において生じる程度の変動荷重を与えることのできるバネと、この他に強度の異なるバネを 2 種類用いて、変動応力の大きさによる沈下特性も検討することにした。さらに、変動水圧場においては、砂層の間隙率が砂層の動的挙動に大きく影響する (名倉ら, 1992) ことを考慮して、間隙率の違いによる沈下特性もあわせて検討した。

実験条件は、表-1 に示す通りである。Case 1 から Case 5 は、ブロック上面に変動荷重のみが載荷する条件

表-1 実験条件 (応力は水圧換算値)

Case	間隙率 λ	変動応力振幅 σ_a (cm)
1	0.40	5
2	0.40	20
3	0.40	40
4	0.45	5
5	0.45	20
6	0.40	変動水圧振幅 a_0 (40 cm)
7	0.45	変動水圧振幅 a_0 (40 cm)

であり、Case 6 および Case 7 は、著者らが従来から行っていた方法により変動水圧を作用させた場合である。ブロックに作用させる変動応力振幅は、Case 1 および Case 4 が、5 cm, Case 2 および Case 5 が、20 cm, Case 3 が、40 cm である。Case 3 の場合の 40 cm という荷重条件は、変動水圧振幅 40 cm がすべて変動荷重としてブロックに作用するものと仮定した場合である。砂層間隙率は、Case 1, Case 2, Case 3 および Case 6 が、0.40 であり、Case 4, Case 5 および Case 7 が 0.45 である。変動荷重の周期は 1.0 sec である。なお、著者らが従来より行っていた (名倉ら, 1993) 着色砂による砂の流動の可視化もあわせて行った。

3. 実験結果および考察

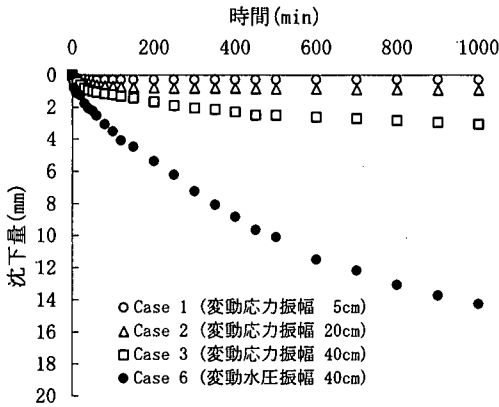
3.1 ブロックの沈下特性

a) 締め固まった砂層の場合

図-3 は、砂層が締め固まった条件、すなわち、砂層間隙率が 0.40 の場合の Case 1, Case 2 および Case 3 のブロックの沈下量の時間変化を示したものである。また、振幅 40 cm の変動水圧が作用する Case 6 の場合のブロックの沈下量の時間変化も示している。この図より以下のことがわかる。

変動荷重下におけるブロックの沈下は、実験の初期の段階において大きく、時間の経過に伴って単位時間当たりの沈下量は小さくなっていることがわかる。この傾向は変動水圧場における沈下傾向と一致する。とくに Case 1 においては、荷重載荷後 60 分以降は、ブロックの沈下は止まり、変動荷重によってブロック自体が 0.005 mm 程度周期的に上下動するのみであった。変動水圧振幅 40 cm の Case 6 の場合に対応する変動荷重条件を用いた Case 1 の場合の実験開始後 1000 分経過後の沈下量は 0.3 mm であり、Case 6 の変動水圧場の沈下量が 14.3 mm であるのに比べると無視できるほど小さく、変動荷重が沈下に与える影響は砂層がある程度締め固まっている場合には無視できることがわかる。

つぎに、荷重の大きさについてみると、変動荷重が大

図—3 沈下量 ($\lambda=0.40$)

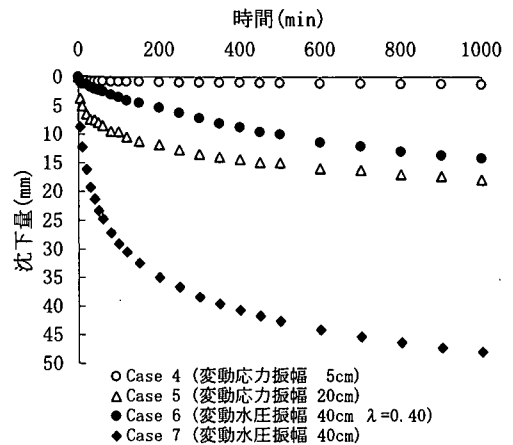
きくなるほど沈下量も大きくなることわかる。しかし、その大きさは、変動水圧がすべて荷重に変換されたと仮定した Case 3 でさえも、実験終了時の沈下量は 2 mm 程度であり、変動水圧場におけるブロックの沈下量に比べて非常に小さいことがわかる。なお、ブロックの上下動の大きさは Case 2 の場合は 0.022 mm、Case 3 の場合は 0.040 mm であり、荷重の大きさにほぼ比例するようにブロックの上下動も大きくなっていった。

これらのことより、変動荷重をブロックに作用させる場合、荷重が大きくなるほどブロックの沈下量は増加するものの、変動水圧場におけるブロックの沈下量に比べると、変動荷重がブロックの沈下に与える影響は小さいことが明らかにされた。また、変動荷重下における砂層は長期的に見るとわずかに変形しており、岩垣らが指摘したように塑性変形しているものと考えられるが、短期的なブロックの上下動からみると、ほぼ弾性体として挙動していると考えてよい。

b) 緩い砂層の場合

図—4 は、間隙率が 0.45 の緩い砂層に変動荷重が作用する場合を想定した Case 4 および Case 5 のブロックの沈下量を示したものである。また、変動水圧が作用する Case 6 および Case 7 の場合のブロックの沈下量もあわせて示している。この図より以下のことがわかる。

変動水圧場におけるブロックの沈下は、砂層間隙率が大きくなると (Case 7)、砂層間隙率が小さい場合 (Case 6) よりも、沈下量がかなり大きくなることわかる。しかし、変動水圧場においてブロックに作用する程度の変動荷重を用いた Case 4 の場合には、ブロックはほとんど沈下しないことがわかる。この場合の実験開始後 1000 分後の沈下量は 1.3 mm であり、Case 7 の変動水圧場における沈下量が 47.9 mm であるのに比べて無視できるくらい小さいことがわかる。しかし、大きな変動荷重を与えた Case 5 の場合には、実験終了時の沈下量は 18.0

図—4 沈下量 ($\lambda=0.45$)

mm とかなり大きくなる。

以上のことより、緩い砂層に変動荷重が作用する場合、変動水圧場において作用する程度の変動荷重のみが作用する条件下では、変動荷重が沈下現象に与える影響は少ないことが示された。

3.2 ブロック周辺砂層の流動特性

写真—1(a) は、変動荷重のみを作用させた実験ケースのうち、沈下量が最も大きかった Case 5 の場合の実験終了時 ($t=1000$ 分) の砂層中央部における着色砂の移動状況を撮影したものである。これは、緩い砂層に、変動水圧場において生じる変動荷重よりも大きな荷重を作用させた場合である。また、写真—1(b) および (c) は、変動水圧が作用する条件下で、砂層が締め固まった場合 (Case 6) および砂層が緩い場合 (Case 7) の着色砂の移動状況 ($t=3000$ 分) を示している。変動水圧場における状況は実験開始後 3000 分後の状況であり、変動荷重場における状況よりもかなり時間が経過しているが、沈下は実験開始後 1000 分以降ほとんど進行しておらず、実験開始後 1000 分の状況とほぼ同様と考えられる。これらの写真より以下のことがわかる。

まず、Case 6 および Case 7 の変動水圧場における着色砂の移動状況をみると、写真—1(b) および (c) に示されるように、ブロック下端部の砂が側方流動し、ブロック側面の砂が盛り上がっている様子がわかる。変動荷重のみが作用する場合においても、砂層が緩い場合でしかも変動荷重が大きくなると、写真—1(a) に示されるようにブロックはかなり沈下する。しかし、変動水圧場の沈下現象でみられたブロック下部砂層の側方流動はみられず、ブロック下部の砂層が下方に押し込まれるように沈下するだけである。また、変動水圧場における沈下現象にみられたブロック側面での砂の盛り上がりもみられず、逆に、ブロック側面の砂は周辺地盤よりも落ち込ん

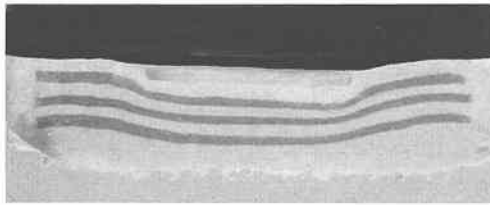
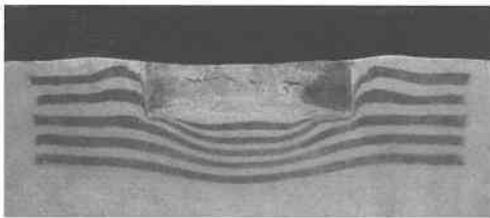
(a) Case 5 ($\sigma_z = 20$ cm, $\lambda = 0.45$, $t = 1000$ min)(b) Case 6 ($\alpha_0 = 40$ cm, $\lambda = 0.40$, $t = 3000$ min)(c) Case 7 ($\alpha_0 = 40$ cm, $\lambda = 0.45$, $t = 3000$ min)

写真-1 着色砂の移動状況

でいる。変動荷重のみが作用する条件の Case 1 から Case 4 の場合にも、ブロックの沈下量自体がわずかであったため、量的には小さいものの、同様なブロック周辺部での砂の落ち込みがみられた。

以上の砂の流動の可視化により、変動水圧場におけるブロックの沈下は、ブロック下部の砂の側方流動を伴うものであるが、変動荷重のみが作用する場における沈下現象では、ブロック下部の砂層が下方に押し込まれるように圧縮されるのみであり、沈下の発生機構が明らかに異なることが示された。

3.3 間隙水圧特性

図-5 は、Case 1 の変動荷重条件下におけるブロック周辺部の変動間隙水圧を示したものである。図中の σ_z は変動応力の状況を示しており、軸の値は応力を水圧換算した値である。また、図-6 は、Case 6 の変動水圧場におけるブロック周辺地盤の変動間隙水圧分布を示している。これらの図より、以下のことがわかる。

Case 6 の変動水圧場の結果より、砂層面上に作用する変動水圧はブロック周辺部の砂層内に振幅の減衰および位相の遅れを伴って伝播することがわかる。ブロック下部の Pt. 2 の測点では、間隙水圧の振幅が約 30 cm 程度

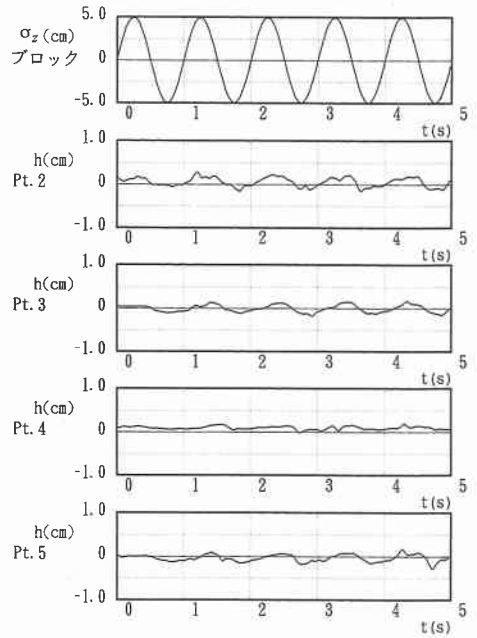


図-5 変動間隙水圧 (Case 1)

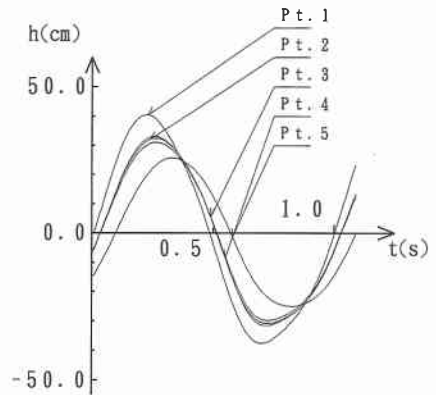


図-6 変動間隙水圧 (Case 6)

発生している。一方、Case 6 の変動水圧場において生じる程度の変動荷重を与えた Case 1 では、間隙水圧変化は発生しているものの量的にはわずかであることがわかる。紙面の都合上掲載していないが、変動荷重下の実験ケースのうち、最も変動間隙水圧が大きくなった Case 3 の場合でさえ、間隙水圧の振幅は約 1 cm 程度であった。

これらのことより、変動荷重下においても変動間隙水圧は発生するものの、間隙水圧の変動振幅は今回の実験の範囲内では最大で 1 cm 程度にとどまり、変動水圧場における間隙水圧の変化と比べて非常に小さいことが明らかにされた。したがって、変動水圧場のブロックの沈下現象をブロックのみかけの重量の変化による変動荷重

下の砂面の弾塑性変形の問題に置き換えて考える場合には、変動水圧場において発生するブロック周辺地盤の変動間隙水圧の影響も考慮する必要があるものと考えられる。

4. 結 論

著者らは、変動水圧場におけるブロックの沈下現象について詳細な検討を進め、ブロックの沈下現象に影響する因子の解明や沈下防止法の提案などを行ってきた。しかし、変動水圧場のブロック上面に作用する水圧とブロック下面の間隙水圧との水圧差により生じる変動荷重の影響については、これまで定量的には明らかにしていなかった。本研究は、この変動荷重がブロックの沈下現象に与える影響を実験的に検討したものである。得られた主要な結論は以下のようである。

(1) 変動荷重の作用によりブロックは沈下するが、変動水圧場において発生する程度の変動荷重が作用する場合には、ブロックの沈下量は変動水圧場における沈下量に比べて無視できるぐらい小さく、変動水圧場の沈下現象に与える変動荷重の影響はほとんどないことが示された。

(2) 変動荷重が大きくなるにつれてブロックの沈下量も大きくなる。量的には、砂層が締め固まっている場合には、変動水圧場における沈下量よりもかなり小さい。しかし、砂層が緩い状態で、変動荷重が大きい場合には、沈下量がかなり大きくなることがわかった。

(3) ブロック周辺部の砂の流動の可視化の結果、変動水圧場におけるブロックの沈下は、ブロック下部の砂の側方流動を伴うものであるが、変動荷重のみが作用する場における沈下現象では、ブロック下部の砂層が下方に押し込まれるように圧縮されており、沈下の発生機構が異なることが示された。

(4) 変動荷重下においては、変動間隙水圧はほとんど発生せず、変動水圧場においてみられるようなブロック周辺地盤での顕著な間隙水圧変動は発生しないことがあきらかにされた。

以上、本研究の結果、変動水圧場におけるブロックの沈下現象に与える鉛直変動荷重の影響はほとんど無視で

きることが明らかにされた。また、変動水圧場の沈下現象を変動荷重下におけるブロック周辺砂層の弾塑性変形の問題として取り扱う場合には、変動間隙水圧の影響をどのように考慮するかという問題が提起された。

参 考 文 献

- 岩垣雄一・西口松男 (1992): 水圧変動に伴う水底砂地盤構造物の沈下現象に関する基礎的研究, 海岸工学論文集, 第 39 巻, pp. 866-870.
- 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.
- 岩垣雄一・奥田雄司 (1995): 変動水圧による水底地盤上重量構造物の沈下に関する基礎的研究, 海岸工学論文集, 第 42 巻, pp. 806-810.
- 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・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・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・八幡泰史・松本高之 (1992): 変動水圧による緩い堆積砂層の高密度化過程, テクノ・オーシャン '92 国際シンポジウム論文集, Vol. 1, pp. 43-48.
- 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とま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.
- 名合宏之・前野詩朗・清水雄一・山本哲雄 (1994): 変動水圧におけるブロックの沈下防止に関する研究, 海岸工学論文集, 第 41 巻, pp. 601-605.
- 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 Modelling Soil-Water-Structure Interactions, pp. 67-76.
- Maeno, S. Yamamoto, T. and Nago, H. (1996): Numerical analysis of dynamic behavior of highly saturated sand bed around cylindrical block under cyclic loading of water pressure, Journal of The Faculty of Environmental Science and Technology, Okayama University, Vol. 1, No. 1, pp. 121-133.