

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

岩 垣 雄 一*・奥 田 雄 司**

1. はじめに

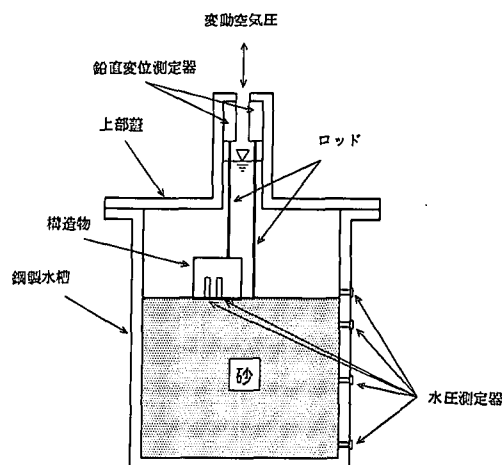
古くから海底地盤上の構造物や消波ブロックなどの沈下埋没現象が、その機構の解明を含めて大きな課題となっている。今まで、この沈下に関する要因を調べる研究が、過去 10 数年にわたって行われてきており、構造物沈下の原因は地盤の液状化にあると説明しているもの（善ら、1987；名合ら、1991）や、構造物の沈下量に影響を及ぼす要因を個別に取り上げているもの（酒井ら、1993；名合ら、1993、1994）など各種の研究がある。しかし、いずれの研究においても、液状化の発生は、地盤内の有効応力が負になるという条件を満足する箇所に起こるものと考え、どのような場合に液状化が発生するかという、発生の可能性を調べるのみで、それを実証した研究はみあたらない。ただ液状化が発生した証拠として、地盤上の構造物が、水圧変動によって沈下する現象を示す実験が行われるのみであった。これからわかるように、構造物の沈下は、液状化した地盤で起こるものとして取り扱われてきたのである。

われわれは、これに疑問を感じ、まず、実験水槽を用いて水圧変動下における重量構造物の沈下の詳細な挙動を調べ（岩垣・西口、1992）、ついで砂地盤と構造物の水圧変動に伴う鉛直変位を、変動振幅と周期を変えて調べた結果、沈下を起こさない限界振幅が存在し、かつ周期と沈下との間に密接な関係があることを見出した（岩垣・西口・奥田、1993）。また、沈下が必ずしも液状化の可能性がない場合でも発生することがわかった。そこで、この研究は沈下に液状化が必須条件ではないという立場から、液状化していない水底地盤上の重量構造物が、波浪のような水面の周期的変動によって、徐々に沈下していく現象を再現する。そして、構造物がどのような速度で、どのような位相時に、鉛直変位し沈下するかを、また構造物周辺の間隙水圧の変化が、沈下に対してどのような影響を及ぼしているのかを実験的に検討し、構造物の沈下機構を解明しようとするものである。

2. 変動水圧に伴う構造物の沈下実験と構造物 下面圧力の測定

（1）実験装置および実験方法

実験に用いた変動水圧型構造物沈下実験装置の概要を図一に示す。実験には、厚さが 1 cm で、高さ 70 cm、幅 40 cm、奥行きが 15 cm の鋼製水槽を使用し、これに水を満たしたうえ、その中に中央粒径 0.141 mm、比重 2.645、間隙率 0.426 の実験砂を高さ 50 cm まで詰め、砂地盤を作る。そして、水底砂地盤面に比重が 11.2 の鉛製円柱構造物を設置する。つぎに、2 本の測定ロッドをそれぞれ 2 台の鉛直変位測定器（新光電機 KK 製）に接続し、ロッドの末端を構造物上面と砂面に接触させて、水槽と上部蓋を万力で固定する。今回使用した鉛直変位測定器の精度は全ストローク 5 mm の $\pm 0.5\%$ である。また、水深が 39 cm となるよう水を給水口から注水し、変動空気圧発生装置からのビニルチューブを変動空気圧取入口に接続する。そして、モーターの回転によるピストン方式の変動空気圧発生装置により、変動空気圧を発生させ、これを水面に作用させて、変動水圧を与える。ここで変動水圧の最大値と最小値の差を水圧全振幅とよぶ。構造物の鉛直変位と水圧の測定値は、データレコー



図一 構造物沈下実験装置概略図

* フェロー 工博 名城大学教授 理工学部土木工学科

** 正 会 員 工修 大増コンサルタンツ(株)

デー（日本電気三栄製オムニエース）に記録される。

(2) 実験条件

水圧変動に伴う構造物の鉛直変位を調べる前に、砂層の圧縮性による砂層面自体の変動、すなわち構造物が存在しないときの砂層面の時間変化を調べた。ここでは、比重が1.07で厚さ1mm、直径41.0mmのプラスチック円板を地盤上に設置し、水圧変動に伴う円板の鉛直変位を測定し、それを砂層面の変位とした。ここで、水圧全振幅をほぼ0.1 kgf/cm²と一定に保ち、周期を1.97~10.12 secまで13種類に変化させた。また、同時に、砂層内の間隙水圧も測定した。

つぎに、構造物の沈下量におよぼす影響要因には①変動水圧の特性、②構造物の重量、③砂層の性質があるが、本実験では特に変動水圧の振幅と周期が及ぼす影響に注目した。まず、水圧全振幅をほぼ0.15~0.01 kgf/cm²に変化させ、それぞれの水圧全振幅に対して周期を5, 10, 20 secと変えて、実験を行った。また、沈下の周期特性については、水圧全振幅をほぼ0.15 kgf/cm²と一定に保ち、周期を2.05~20.33 secと変化させた。さらに、特に構造物下面圧力の周期特性を調べるために、水圧全振幅をほぼ0.1 kgf/cm²と一定に保ち、周期を2.00~16.84 secに変化させて実験を行った。

表-1に今回新しく使用した構造物L, M, Sの直径、高さ、底面積、重量、接地圧を示す。また、表-2に測定項目を示している。そして、図-2に対応する測定位置を示している。

表-1 構造物の直径、高さ、底面積、重量、接地圧

種類	直径 (cm)	高さ (cm)	底面積 (cm ²)	重量 (kgf)	接地圧 (gf/cm ²)
L	8.01	4.02	50.4	2.181	43.3
M	7.02	4.02	38.7	1.656	42.8
N	6.02	4.02	28.5	1.194	41.9

表-2 測定項目

構造物	変位: η (mm)	水圧強度: p (kgf/cm ²)
無	砂面: η_{s0}	地盤面: p_b
		砂層面下8cm: p_8
		砂層面下28cm: p_{28}
		砂層面下48cm: p_{48}
有	構造物上面: η_k	地盤面: p_b
	構造物近傍砂面: η_{s1}	構造物下面中心: p_c
	(構造物側面から約1cm)	下面中心から15mm: p_0

(3) 実験結果と考察

a) 砂層面の鉛直変位

まず、砂地盤を、水圧全振幅が0.18 kgf/cm²で周期が5.05 secの変動水圧55,000波により締固めた。図-3に変動水圧55,000波目から55,015波目までの砂層面鉛直

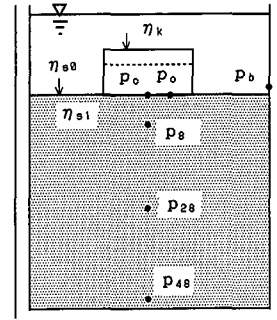


図-2 変位と水圧強度の測定位置

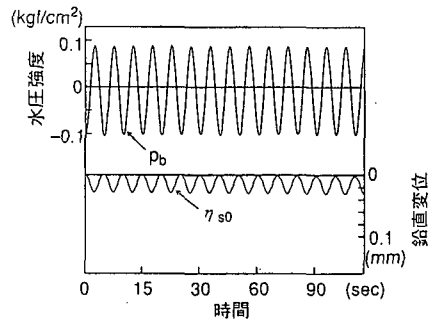


図-3 構造物がない場合の変動水圧55,000波から15波間の砂層面の鉛直変位と砂面上水圧の時間変化

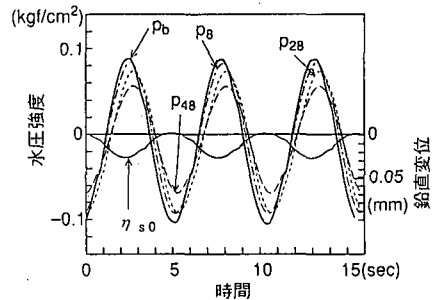


図-4 構造物がない場合の変動水圧55,000波から3波間の砂層面の鉛直変位と各点水圧の時間変化

変位 η_{s0} を示す。この図から砂層面は、変動水圧により上下動するが、必ず元の位置まで戻っているのが確認できる。また、図-4は、図-3の最初の3波で、各点の間隙水圧の変動も併せて示している。この図から、間隙水圧は砂層面から深くなれば、それに比例して水圧が減衰し、位相においても遅れが生じているのが確認できる。

また図-5に、周期が2, 5, 10, 20 secの時の砂層面の鉛直低下量と水圧全振幅の関係を示す。この図から、各周期とも水圧全振幅が大きくなれば、鉛直変位量もほぼ直線的に大きくなることがわかる。また、図-6は水圧

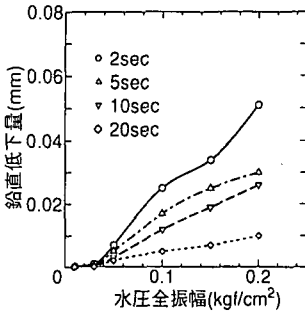


図-5 水圧変動の周期をパラメーターとした砂層面の鉛直低下量と水圧全振幅の関係

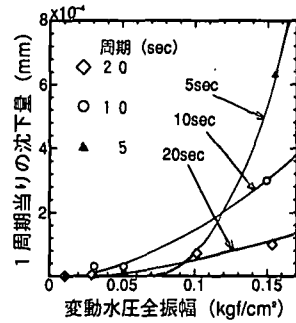


図-7 周期をパラメーターとした場合の構造物の沈下量と水圧全振幅の関係 (構造物 B)

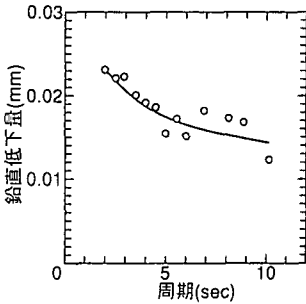


図-6 水圧全振幅がほぼ 0.1 kgf/cm² と一定の時の砂層面の鉛直低下量と周期の関係

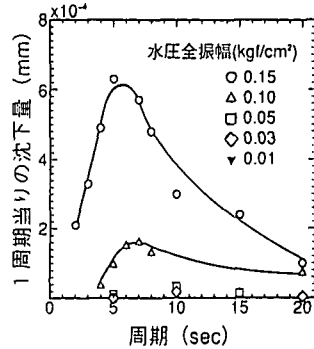


図-8 水圧全振幅をパラメーターとした場合の構造物の沈下量と周期の関係 (構造物 B)

全振幅がほぼ 0.1 kgf/cm² と一定のときの砂層面の鉛直変位と周期の関係を表している。この図から、砂層面の鉛直低下量は、当然のことながら周期が長くなると小さくなり、0 に近づくことがわかる。

b) 沈下量の周期特性

図-7 に前報 (岩垣・西口・奥田, 1993) で用いた構造物 B の実験結果から求められる 1 周期当りの構造物の沈下量 (鉛直変位の残差量) と水圧全振幅の関係を示す。ここで、水圧全振幅が大きければ沈下量も大きくなる。しかし、水圧全振幅が 0.10 と、0.15 kgf/cm² では、周期によって沈下量の順位が異なっており、周期が短くなると必ず沈下量が大きくなるというわけではない。また、水圧全振幅が約 0.05 kgf/cm² より小さくなると、沈下量がほぼ 0 となっている。このことから、前報で指摘したように、沈下量が 0 となる限界水圧全振幅が存在することが再確認された。図-8 に水圧全振幅を一定にしたときの構造物の沈下量と周期の関係を示す。ここで、周期が 20 sec から短くなるにつれて、沈下量が徐々に増加しているが、水圧全振幅が 0.15 kgf/cm² の場合を例にとると、周期が 5 sec 程度で最大値が現れ、それより周期が小さくなると、沈下量が減少しているのがわかる。これは、後述するように、構造物の上下面に作用する圧力差が圧

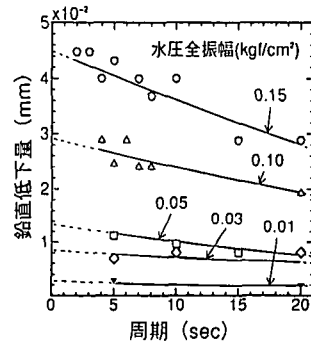


図-9 周期をパラメーターとした場合の構造物の鉛直低下量と水圧全振幅の関係 (構造物 B)

力変動周期に依存することを意味しており、非常に興味深いことである。つぎに、図-9 に構造物の最大鉛直変位量と周期の関係を示す。これにより、鉛直変位量は周期が長くなるにつれて、徐々に減少していることがわかる。

c) 構造物下面の圧力分布

図-10 は、砂層面に構造物 L を設置した場合の水圧 P_k, p_b, p_c, p_o および鉛直変位 η_k, η_{o1} の実験開始から 3 波

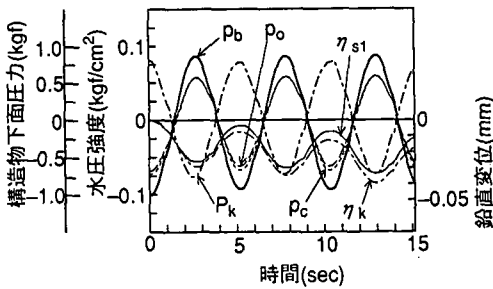


図-10 構造物直下の圧力変動と構造物の鉛直変位 (構造物 L)

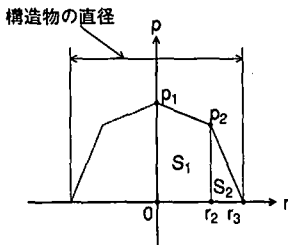


図-11 構造物の下面圧力計算のための説明図

の時間変化の例を示している。ここで、構造物下面圧力 P_k については d) で述べる。いま p_o , p_b の変動に注目する。 p_b のプラスの位相では p_o , p_b に差は見られないが、マイナス時では中心の水圧 p_c が中心より 15 mm 離れた p_b よりも絶対値が大きくなっている。しかし、位相については、とくに差がない。

d) 全圧力

ここで、構造物下面における水圧の実験結果から、圧力分布を求め、さらに全圧力の時間変化を算出して、それが構造物の鉛直変位にどのように関わっているかを検討する。まず、構造物下面圧力の計算方法であるが、砂面での水圧 p_b を基準にとって、構造物直下の中心圧力 p_c の値を p_1 とすれば、 $p_1 = (p_c - p_b)$ となり、中心より 15 mm 離れた点の圧力 p_b の値を p_2 とすれば、 $p_2 = (p_b - p_b)$ で表される。これを縦軸とし、横軸に中心からの測定位置の半径 $r=0, r_2, r_3$ をとる (図-11 参照)。つぎに、 p_1, p_2, p_3 の間の p は直線的に変化するものとして、 p 軸を中心に回転させ、それぞれの面積 S_1, S_2 に対応する体積 V_1, V_2 を算出し、その和から構造物下面の全圧力を求める。

図-10 は左縦軸に構造物下面圧力 P_k を取り、 p_b と η_k の時間変化との関係を示している。この図において、 P_k が正のとき構造物を上を持ち上げようとする力が働き、 P_k が負のときは構造物を下に押しつける力が働いていることになる。そして、図-10 を参照すれば、 p_b が正のとき、構造物は下降し、負のとき構造物は上昇している

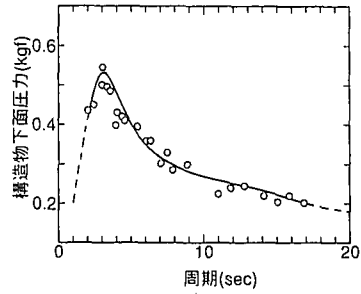


図-12 水圧全振幅が約 0.09~0.11 kgf/cm² の時の構造物 M の下面圧力と周期の関係

ことがわかる。

また、図-12 は構造物下面圧力のピーク値の周期特性を表したものである。ここで、周期が 17 sec から短くなるにつれて、構造物下面圧力が徐々に増加しているが、周期が 3 sec 程度になると最大値が現れ、それより周期が小さくなると、かえって下面圧力が減少していることがわかる。これより、構造物の上下面に作用する圧力差が、圧力変動周期に依存することが明らかである。また、図-8 と比較すると、沈下量の周期特性と下面圧力の周期特性は、ピークの現れる周期は異なるが非常によく似ていることがわかる。

3. 沈下機構に関する考察

(1) 構造物を置かない無荷重状態での砂層面は、水圧変動に応じて周期的に鉛直変位を繰り返しながら締め固まって、砂層面は少しずつ沈下するが、ある繰り返回数以後は、図-3、図-4 に示すように 1 周期ごとに元の位置にかえり、砂層面の沈下現象は起きない。これは、水圧変動が砂層内へ伝播するに伴って、砂層が弾性変形をするからである。このような状態では砂面近くで液状化は起こっていないと考えられる。もし、液状化が起こっているとすれば、弾性変形が期待できないからである。

(2) こうした砂層面上に構造物を置くと、図-10 でわかるように、構造物の下面に水圧変動 P_k が作用するが、その位相をよくみると、砂面の水圧 p_b とは完全に 180°位相が逆である。すなわち、 p_b が正のときは P_k は負であり、 p_b が負のときは P_k は正となる。したがって、 p_b が正のとき構造物の重量が見かけ上大きくなり、負のときに重量が小さくなる。図-10 で具体的に説明すれば、 P_k は 0.75 kgf であるから、構造物 L の水中重量約 2 kg が、 p_b のピーク時に 2.75 kgf となり、負のピーク時には 1.25 kgf に減少する。1.25 kgf と 2.75 kgf の間を周期的に見かけの重量が変動することを意味している。砂層面にこの繰り返し荷重が作用することが、構造物の沈下の原因であると考えられる。

(3) 沈下量の周期特性と構造物下面圧の周期特性で、ピーク周期に差が現れるのは、構造物が砂層面に繰り返し荷重を与える作用時間によって沈下量が異なるため、周期が小さくなると、繰り返し荷重が大きくても、作用時間が短いので、沈下量が小さくなるものと考えられる。

4. おわりに

著者らは、これまで水底砂地盤上の重量構造物が、波浪のような周期的圧力変動によって、徐々に沈下する現象を取りあげ、その沈下機構や特性を調べてきた。本研究は、1) 無荷重時の砂層面の鉛直低下量の水圧全振幅および周期の影響、2) 重量構造物の鉛直低下量あるいは沈下量に及ぼす水圧全振幅および周期の影響、3) 構造物下面直下の圧力測定を実施して、その周期特性を検討し、それらの結果を用いて、総合して構造物の沈下機構を考察したものである。得られた結論は次の通りである。

(1) 無荷重時の砂層面の最大鉛直低下量は、ほぼ水圧全振幅に比例して増大し、周期とともに減少する。

(2) 構造物の最大鉛直変位量も、砂層面の特性とよく似ている。1周期後の残差である沈下量の方は、水圧全振幅とともに増大するが、一方、それ以下では沈下しない限界水圧全振幅が存在することが再確認された。また沈下量は、ある周期でピークが現れるような周期特性をもつ。

(3) 構造物直下の圧力測定から、砂面の水圧が正のとき直下の下面圧力は負、砂面水圧が負のとき下面圧力は正となって、位相がほぼ逆となることがわかった。また、下面圧力は変動周期が小さくなると増加するが、ある周期でピークとなり、それ以下では逆に減少する。

(4) 変動水圧が正のとき下面圧力が負となるということは、構造物の見かけの水中重量が増加することであり、逆に変動水圧が負のときに下面圧力が正となって、見かけの水中重量が減少することを意味している。すな

わち、1周期中に構造物の見かけの水中重量が周期的に変動することが、沈下の原因であると推定される。

(5) 沈下量のピーク周期と下面圧力のピーク周期が異なるのは、周期が小さいと見かけの重量が大きくなるが、一方作用時間が短くなるので、沈下量も減少するためと考えられる。

以上の結論から期待されることは、水圧変動に伴う構造物の見かけの周期的な重量変化が沈下に関係ありとすれば、砂層面に対する局所的な繰り返し荷重による砂面の弾塑性変形の問題となるので、今後の研究方向が明確になってきたことであるといえる。

終りに、この問題に対して、熱心に討議に加わって頂いた名城大学理工学部板橋一雄助教授と原田守博講師並びに卒業研究として実験に参加した福山恒久(東洋建設)、渡辺陽一(ライト工業)、都築増治(愛知県)、八手秀樹(ヤマト工業)の諸君に謝意を表する。

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.
- 酒井哲朗・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ブロックの沈下, 海岸工学論文集, 第40巻, pp. 811-815.
- 普 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・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とりまわ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): 変動水圧場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.