

水圧変動に伴う水底地盤上構造物の沈下現象 に関する基礎的研究

岩 垣 雄 一*・西 口 松 男**

1. はじめに

最近、水面変動による水底地盤の応答の研究が進み、海岸における水面変動、中でも波浪によって、海底が細砂のような粒径の小さい底質で構成されている場合、海底地盤が液状化（流動化）し、そのため海岸・港湾構造物の基礎が洗掘されたり、異形ブロックなどの沈下や海底地すべりなどの現象が起こるものと説明されるようになった。

海底地盤の波浪応答に関する研究が始まってすでに10数年経過し、特に理論的研究が急速に発展してきたことは Mei (1983) の著書に詳しい。わが国でも名合 (1982) や Okusa (1985) らによって研究が開始され、最近では港湾技術研究所や京都大学などにおいても研究が盛んに行われるようになった。しかし、何れの研究においても液状化に至る可能性を迫及したものが多く、液状化によってどうなるかという現象そのものを対象とした研究はほとんどない。この研究は、海底地盤に置かれた重量構造物が、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取りあげ、その機構を主として実験的に解明しようとするものである。その場合、海底地盤が液状化を起こすから構造物が沈下するという発想ではなくて、構造物の沈下現象に液状化がどの程度寄与するのかといった、液状化と構造物の沈下とを切り離した考え方をして議論を進めたい。なお、このような構造物の沈下現象や地盤の液状化の現象を再現するには、実験水槽を用いて海底地盤を作り、それに周期的な圧力変動を付加する必要があるが、水槽に圧力変動を与えると、水槽自身がわずかではあるが変形し歪むという厄介なことが起こる。この水槽の歪みが、実験による現象の再現に影響を与えとなると問題である。したがって、最初に水槽の圧力変動に伴う実験水槽の歪みが、地盤の液状化現象や構造物の沈下に及ぼす影響をよく調べておく必要がある。

2. 変動圧力に伴う実験水槽の歪みの影響

波による海底地盤の液状化に関する実験は、多くの場合、水槽内に砂を入れ、水で飽和した砂地盤を作り、外部から周期的に変化させた圧力を与え、砂地盤に液状化した状態を模擬発生させようとするものである（名合、1982；善ら、1987）。しかし、水槽に変動圧力を与えると、水槽の材質や寸法、圧力の大きさなどによって、程度の差はあるが、変形を起こして歪む。ここでは、水槽の微小な歪みが、砂地盤上に置かれた構造物の沈下現象に及ぼす影響を調べて、水槽の歪みの許容限界を明確にする。

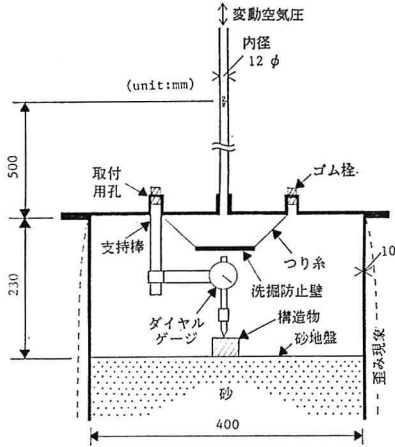
著者ら（岩垣・西口、1992）はすでに、水圧変動に伴う実験水槽の歪みが、例えば 0.21 mm 程度の微小な変形であっても、地盤内の間隙水圧の時間変化が、与えた変動圧力のようなきれいな正弦曲線を示さず、くずれてしまうこと、そして実験水槽を軽量アングルの補強材を用いて変形を抑制し、0.12 mm 程度に減少させると、間隙水圧曲線が、与えた水圧曲線と相似な正弦曲線を示すようになることを示した。この事実から、水槽を用いて行う海底砂地盤の液状化再現実験を行う以前に、歪みに関する許容限界を明らかにする必要にせまられた。そこで、次のような構造物の沈下実験を行って許容限界を調べた。

（1）実験装置および実験方法

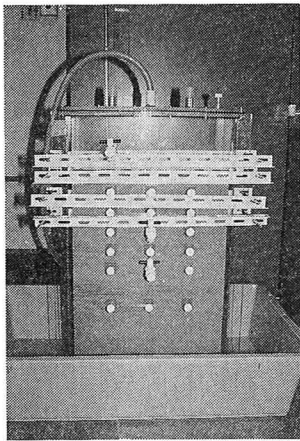
実験水槽は、厚さ 10 mm のアクリル板を用いて製作したものと、同じ厚さの銅板製によるものの2種類を使用した。水槽の寸法は図-1に示すように内法が 700×400×150 mm で上部は蓋になっており、内部に砂や水を出し入れできるようにしてある。また、名合が用いたように、モーターの回転によるピストン方式で周期的に変動空気圧を発生させ（名合、1982）、蓋に取付けたビニールチューブを通じて、変動圧力を与えた。水槽には、中央粒径 0.141 mm、比重 2.645、間隙率 0.426 の細砂を高さ 47 cm まで詰め、水を砂地盤面から 73 cm の高さまで注入した。砂地盤上には、図-1に示すように、高さ 2.9 cm、直径 4.0 cm、比重 11.2 の円柱状

* 正会員 工博 名城大学教授 理工学部土木工学科

** 学生員 名城大学大学院 工学研究科



図一 実験水槽の拡大説明図



写真一 軽量アングルで補強したアクリル実験水槽

の鉛製構造物を設置し、その表面の鉛直変位を、ダイヤルゲージを用いて測定することにした。ダイヤルゲージは、端子に接続してあるスプリングを取りはずして、構造物に力がかからないように水槽内に取り付けた。また、水圧変動によって水槽がわずかに歪むことにより、蓋につながっているチューブ内の水位が変動し、同時に水が蓋の口を通して水槽内に入出するときに水槽内に噴流を発生させ、砂地盤面を洗掘させるので、途中に防止壁をつるして噴流を遮断するようにした。ここに示す沈下量は、ダイヤルゲージが示す周期的に変動する沈下量のうち、目視によって求められる最大値を採用した。なお、写真一にアクリル水槽を軽量アングルで補強した状況を示す。補強材の数と設置位置によって歪み量を変化させることができる。

(2) 実験結果と考察

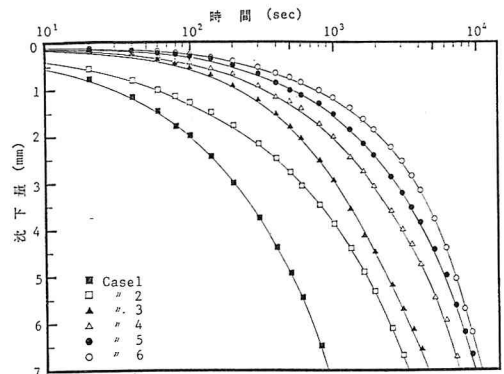
水槽の歪みは補強材の設置状況で変化するが、アクリ

表一 実験ケースと水槽の歪み率

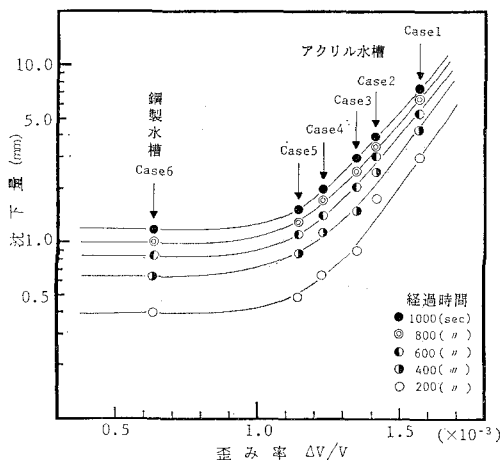
Case	歪み量 ΔV (cm ³)	水槽内の水の体積 V (cm ³)	歪み率 $\Delta V / V (\times 10^{-3})$
1	40.376	25,734.38	1.569
2	36.530	〃	1.420
3	34.721	〃	1.350
4	31.667	〃	1.231
5	29.518	〃	1.147
6	17.756	27,969.32	0.635

ル水槽を用いた場合を歪み率によって Case 1~5 に分け、また、鋼製水槽を使用した場合を Case 6 とした。ここで、歪み率とはチューブ内の水位の変動量から求められる水槽の変形体積 ΔV と水槽内の水の体積 V との比 $\Delta V / V$ である。Case 1~6 に対する歪み率を表一に示す。

図二は Case 1~6 における構造物の沈下量の時間変化を示したものである。この図から、水槽の歪みが大きいケースほど、鉛の円柱構造物は早く沈下し、構造物の沈下速度は大きくなることがわかる。さらに、図三は、Case 1~6 の水槽の歪み率と、実験経過時間がそれぞれ 200, 400, 600, 800, 1000 sec のときの構造物の沈下量との関係を示したものである。これから水槽の歪みを補強材を用いて減少させることによって、構造物の沈下量は急速に小さくなり、やがては一定値に落ち着く傾向にあることがわかる。すなわち、水槽の歪み率が、ある程度以下になれば、構造物の沈下に対し、水槽の歪みの影響はほとんどなくなることがわかる。特に、この実験の場合、鋼製水槽を用いた Case 6 のように、歪み率を 7.0×10^{-4} 程度以下に抑えれば、構造物の沈下実験に及ぼす水槽の歪みの影響は考えなくてよいことがわかる。



図二 構造物の沈下量の時間変化



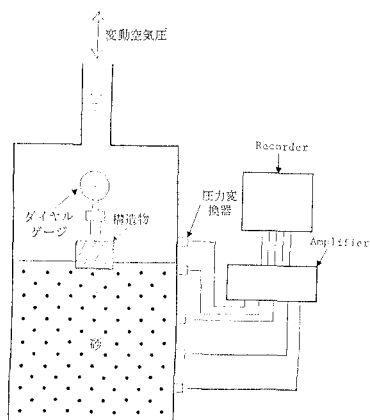
図—3 構造物の沈下量と水槽の歪み率の関係

3. 水圧変動に伴う構造物の沈下機構

前節では、水槽の歪みが構造物の沈下に及ぼす影響を調べ、厚さ 10 mm の鋼製水槽を用いると水槽の歪みの影響が構造物の沈下量に対して、無視できることがわかった。ここでは、その鋼製水槽を使用し、これに水圧変動を与えると、地盤面上に設置された鉛の円柱構造物が沈下する機構を実験的に検討する。

(1) 実験装置および実験方法

実験装置及び実験に用いる砂と沈下構造物は前節と同じものを用いた。砂層の高さを 42 cm にし、その地盤面に構造物を根入れ深さを 2 cm で設置した。そして、その変位はダイヤルゲージのダイヤル面をビデオによって撮影し、それを再生して沈下量を読みとった。また、地盤上の水深を 45 cm とし、図—4 の模式図に示すように、水槽側面に拡散型半導体圧力変換器を取り付け、砂地盤上の水圧と、地盤内の間隙水圧の変動が測定できるようにした。いま、変動水圧の大きさによって Case A, B, C に分け、それを表—2 に示す。



図—4 鉛円柱構造物の沈下実験装置の模式図

表—2 沈下実験ケースと変動水圧

Case	周期 (sec)	変動水圧 (kgf/cm ²)		全振幅 (kgf/cm ²)
		最大値	最小値	
A	4.1	0.1129	-0.0907	0.2036
B	4.1	0.0953	-0.0800	0.1753
C	4.1	0.0695	-0.0648	0.1343

(2) 実験結果および考察

図—5 は Case A, B, C の地盤面上の水圧と地盤面下 2 cm での間隙水圧の時間変化、ならびに構造物の鉛直変位量であるダイヤルゲージによる測定値を示す。これらの図によると、水圧の周期変動に対応してダイヤルゲージによる測定値が変動していることがわかる。変動水圧が増大する位相では、ダイヤルゲージによる沈下量が大きくなる、すなわち構造物上面の位置が低下することがわかる。反対に、変動水圧が減少する位相では構造物は上昇する。しかし、構造物が上昇しても最初の値には完全に戻らず、その差が一周周期ごとの沈下量となる。そして、実際の構造物の地盤面への沈下現象はこれが積み重なったものと考えてよい。

ところで、実験によって得られたダイヤルゲージによる測定値 z は、変動水圧を与えることによって生じる次の要素からなると考えられる。

- 1) 水槽の歪みによって砂層面が上下運動することによる変位量: z_1
- 2) 水圧変化による砂層の圧縮によって、砂層面が上下運動するときの変位量: z_2
- 3) 地盤内の水圧変化によって、水圧が最低の位相付近では、地盤内の有効応力が負となって液状化が起きる。そのときに生じる構造物の沈下量: z_3
- 4) その他の原因による構造物の変位: z_4

以上、四つの要素のうち図—5 に示すように、ダイヤルゲージによる測定値 z から、1) の水槽の歪みによる z_1 と 2) の砂層の圧縮による z_2 の和である砂層面の上下動を差し引く。そうして得られた値は、3) 地盤の液状化による構造物の沈下量 z_3 と 4) のその他の原因による構造物の変位量 z_4 とを合わせた値となる。そこで $(z_1 + z_2)$ である砂層面の上下動を次に示す方法で差し引いた。

a) $z_1 \ll z_2$ と考えられるので、一周期の地盤面上の変動水圧において、最小値から最大値までの変動分と、沈下量の値の最大値から最小値までの変動分から砂層面の圧縮係数 α を求める。

b) 構造物の変位と変動水圧の間に僅かな位相の遅れが生じているので両者の位相を合わせる。

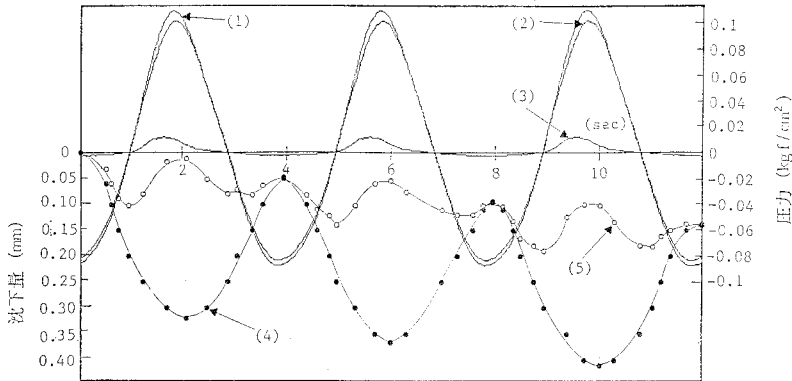
c) 測定間隔ごとの水圧変化 Δp に伴う砂層面の変位量 Δz を次式により計算する。

$$\Delta z = \Delta p a l \dots\dots\dots (1)$$

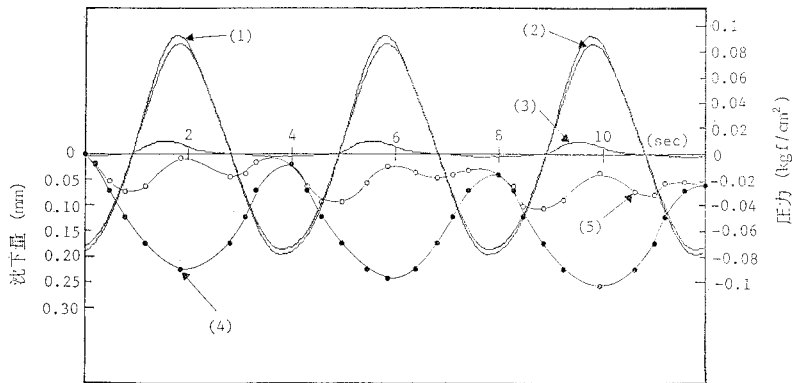
ここで、 l : 砂層の高さであって、 Δz を測定間隔ごとに加えて $(z_1 + z_2)$ とする。

このようにして求めた値 $(z_1 + z_2)$ をダイヤルゲージによる測定値 z から差し引いた値 $(z_3 + z_4)$ を「正味の沈下量」として図-5 に示した。さらに、実験によって

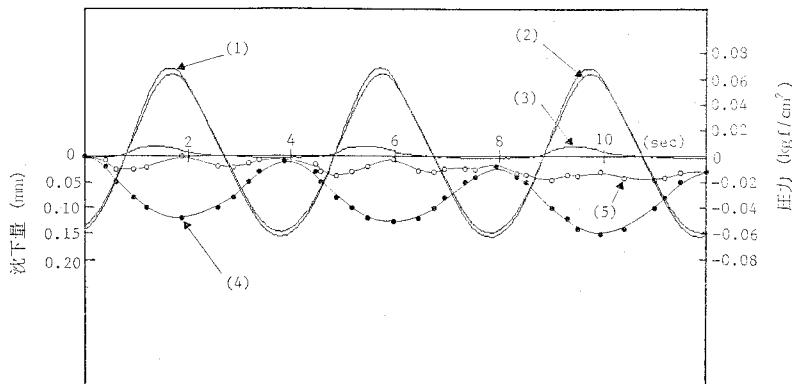
得られる間隙水圧から、有効応力の時間変化を求め、その結果も示した。これらの図から、正味の沈下量も周期的に変動していることがわかる。しかし正味の沈下量 $(z_3 + z_4)$ の変動をよくみると、地盤面や砂層内の間隙水圧変動と測定沈下量 z の変動（位相が水圧変動と逆になっている）が同じ周期であるのに対して、 $1/2$ の周



Case A



Case B



Case C

図-5 地盤上の水圧、間隙水圧、有効応力、鉛直変位量及び正味の沈下量の時間変化
(1) 地盤上の水圧, (2) 間隙水圧 (地盤面下 2 cm), (3) 有効応力 (地盤面下 2 cm), (4) ダイヤルゲージによる構造物の鉛直変位量, (5) 正味の沈下量

期(倍周波数)になっていることがわかる。また測定沈下量 z も、正味の沈下量 (z_3+z_4) についても、極大、極小の位相が水圧変動の位相より若干遅れている。この遅れは、ある大きさの質量をもつ物体が移動するときにはそれに作用する外力より少し遅れて変位することを示すもので、これは比重の大きい鉛円柱構造物の変位であることを考えると当然のことである。問題はなぜ正味の沈下量 (z_3+z_4) が倍周波数の変動に変わるかである。この点については、(z_1+z_2) の変位量の推定の仕方に、まだ十分でない点があるので、これをもとにしてより詳細な沈下の機構を検討することは、ここでは行わないことにする。

4. おわりに

本研究では、波のような水圧変動によって生ずる砂地盤上の重量構造物の沈下について、沈下実験を水槽を用いて再現するときの水槽の歪みの影響を検討するとともに、水圧変動のどの位相で沈下が起きるかを調べ、次のような結論を得た。

(1) 実験水槽に変動水圧を与えたときに生じる実験水槽の歪みは、本研究で使った鋼製水槽を使用すれば、構造物の沈下現象に及ぼす影響を無視することができる。

(2) 変動水圧が増大するときの構造物の沈下量と、減少するとき生じる上昇量の差が、一周期後の測定沈下量になることがわかった。

(3) 変動水圧を与えた時の構造物の上下動の測定値から、砂層面の上下動を差し引いた正味の沈下量の変動は、1/2 周期(倍周波数)の時間変化を示し、ほぼ水圧変動の谷と峰にそれぞれ一回ずつピークが現れる。

今後は、水圧変動による砂層の圧縮と砂地盤の上下動の正確な把握や液状化現象との関係について、さらに理論と実験の両面から検討する必要がある。なお、この問題を熱心に討議し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及び卒業研究として実験に参加した学生諸君に謝意を表す。また、この研究は文部省科学研究費補助金(一般研究B)による研究の一部であることを付記する。

参考文献

- 岩垣雄一・西口松男 (1992): 波動に伴う海底砂地盤の液状化現象と実験水槽の歪みとの関係, 名城大学理工学部研究報告, 第32号, pp. 132-139.
- 酒井哲郎・畑中克也・間瀬 肇 (1990): 波浪による海底地盤内間隙水圧変動解の適用性と地盤の液状化条件, 土木学会論文集, 第417号/II-13, pp. 275-283.
- 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.
- Mei, C. C. (1983): The applied dynamics of ocean surface waves, John Wiley & Sons, p. 673.
- Okusa, S. (1985): Wave-induced stresses in unsaturated submarine sediments, Géotechnique, Vol. 35, No. 4, pp. 517-532.