

# 地震による液状化地盤上の消波工の挙動に関する実験的研究

広島大学大学院工学研究科 学生会員 ○石田 裕章

広島大学大学院工学研究科 正会員 一井 康二

## 1. 背景・目的

地震時には護岸や防波堤に沈下及び水平変位が生じることが報告されており、その沈下量や水平変位の予測について、多くの実験や解析による研究がなされている。しかし、消波工下の地盤が地震によって液状化したときの消波工の挙動について、具体的なことは必ずしも明らかではない。

そこで本研究では、防波堤や護岸に設置された消波工個々のブロックの挙動に着目した模型実験を行った。

## 2. 実験方法

土槽(内寸  $390 \times 180 \times 320\text{mm}$ )に厚さ  $100\text{mm}$  の砂地盤を水中落下法により作成し、消波工の模型を設置する。防波堤として消波工のみを設置したケースと護岸としてケーソン前面に消波工を設置したケースを想定し、 $10\text{Hz}$ 、 $300\text{gal}$  の正弦波を  $5$  秒間入力した。Fig.2 に防波堤模型を、Fig.3 に護岸模型を示す。今回の実験では地盤の液状化による消波工の挙動を見るため地表面と水位を同じ高さにし実験を行った。試料には豊浦標準砂を用い、相対密度は  $60\%$  及び  $80\%$  とした。Fig.1 に測定全体図を示す。

モルタル製の消波工模型を用い、再現性を持たせるため規則的な水平二層積<sup>(1)</sup>とした。地表面から  $4\text{cm}$  と  $9\text{cm}$  の位置に間隙水圧計を設置する。個々の消波工の離散と回転の影響を見るため、下記の条件で実験を行った。

- ①：そのまま（消波工をただ積んだだけのバラバラな状態）
- ②：接着（それぞれの消波工を接着させ、消波工の離散・回転を制限し、相対変位を拘束した状態）
- ③：接着+板（それぞれの消波工を接着させた上、底面にアクリル板を設置し、接地面積を大きくして接地圧を低減させた状態）

実験ケース①と②を比較することで消波工の離散・回転が沈下や水平変位に与える影響を、実験ケース②と③を比較することで接地圧の違いによる影響を見る。Table.1 に実験ケースと結果を示す。

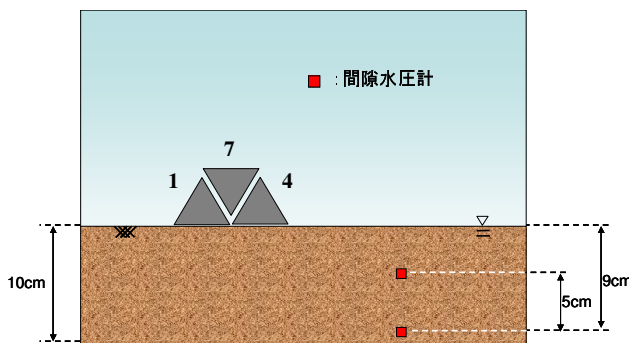


Fig.2 防波堤模型

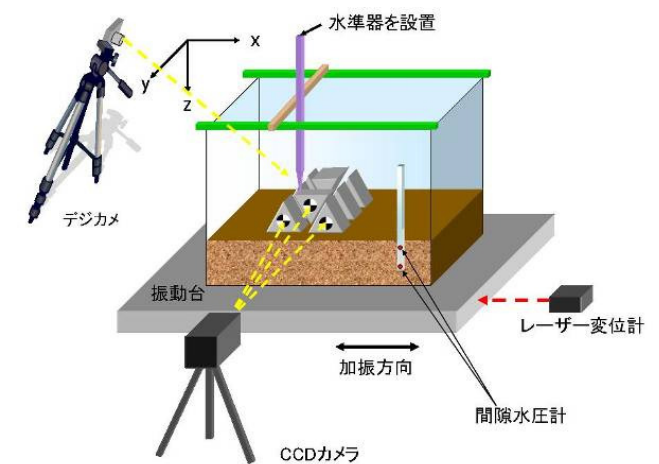


Fig.1 測定全体図

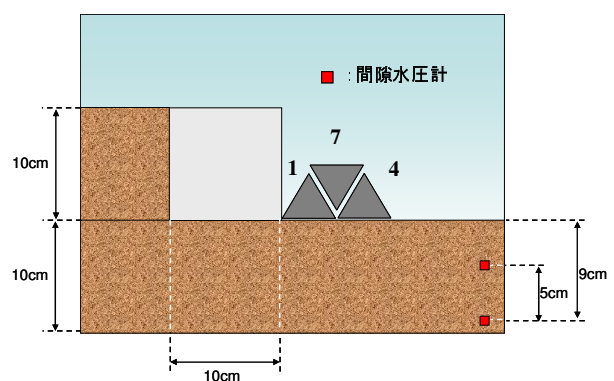


Fig.3 護岸模型

### 3. 実験結果

#### 3. 1 防波堤のケース

防波堤のケースの実験結果の例として、防波堤(Dr=60%)の消波工挙動を Fig.4 に示す。括弧内の数字は沈下量を表わす。また、消波工の回転量は大きさにより矢印の色を変化させて表示しており、回転量が大きいほど矢印の色を濃くしている。

Fig.4 から分かるように“そのまま”のケースの1段目の消波工の沈下量は“接着”のケースより約1.5倍～1.9倍大きく、水平変位も約1.3倍～3.8倍大きくなり、回転量も増加する。“そのまま”のケースの水平変位の特徴として、2段目消波工が落ちようとする影響により1段目消波工が左右に広がるような挙動を示している。

また、“接着”のケースと“接着+板”のケースを比較すると、“接着”のケースの沈下量は“接着+板”のケースより大きくなる傾向を示す。

次に防波堤のケースの消波工の回転方向について述べる。2段目消波工はそれぞれ1段目消波工と4点で接触している。均等に消波工の自重が4分割されて各点に作用しているとするれば、2段目消波工の作用点より1段目消波工それぞれの回転方向を推測することが出来る。Fig.5に2段目消波工の接触点を、Fig.6に接触点から予測される回転方向を示す。ただし、1つの消波工に接触点が2点ある場合は2点の中間に力が作用していると考えている。防波堤(Dr=60%)の“そのまま”のケースの実験結果と予想の回転方向を比較すると、消波工②,③,④,⑤番の回転方向が予想とほぼ一致している。消波工⑥番の回転量は非常に小さく、結果として消波工①番のみ予想と異なる。今回の実験で得られた結果では中央に位置し、2段目消波工との接触点

Table.1 実験ケースと結果

|     | 相対密度<br>(%) | 実験ケース | 加速度<br>(gal) | 1段目消波工<br>の平均水平変<br>位量<br>(cm) | 1段目消波工<br>の平均沈下<br>量<br>(cm) | 消波工の<br>回転量<br>(°) |
|-----|-------------|-------|--------------|--------------------------------|------------------------------|--------------------|
| 防波堤 | 60          | そのまま  | 400          | 0.9                            | 2.5                          | 4～26               |
|     |             | 接着    | 330          | 0.4                            | 1.5                          | 2                  |
|     |             | 接着+板  | 330          | 1.4                            | 1.3                          | 6                  |
|     | 80          | そのまま  | 430          | 0.7                            | 1.1                          | 3～10               |
|     |             | 接着    | 450          | 0.3                            | 0.8                          | 2                  |
|     |             | 接着+板  | 470          | 0.2                            | 0.2                          | 2                  |
| 護岸  | 60          | そのまま  | 330          | 1.7                            | 1.7                          | 13～27              |
|     |             | 接着    | 310          | 1.2                            | 1.3                          | 7                  |
|     |             | 接着+板  | 310          | 2.2                            | 0.8                          | 2                  |
|     | 80          | そのまま  | 470          | 0.6                            | 0.3                          | 2～7                |
|     |             | 接着    | 450          | 0.4                            | 0.6                          | 1                  |
|     |             | 接着+板  | 480          | 0.5                            | 0.2                          | 1                  |

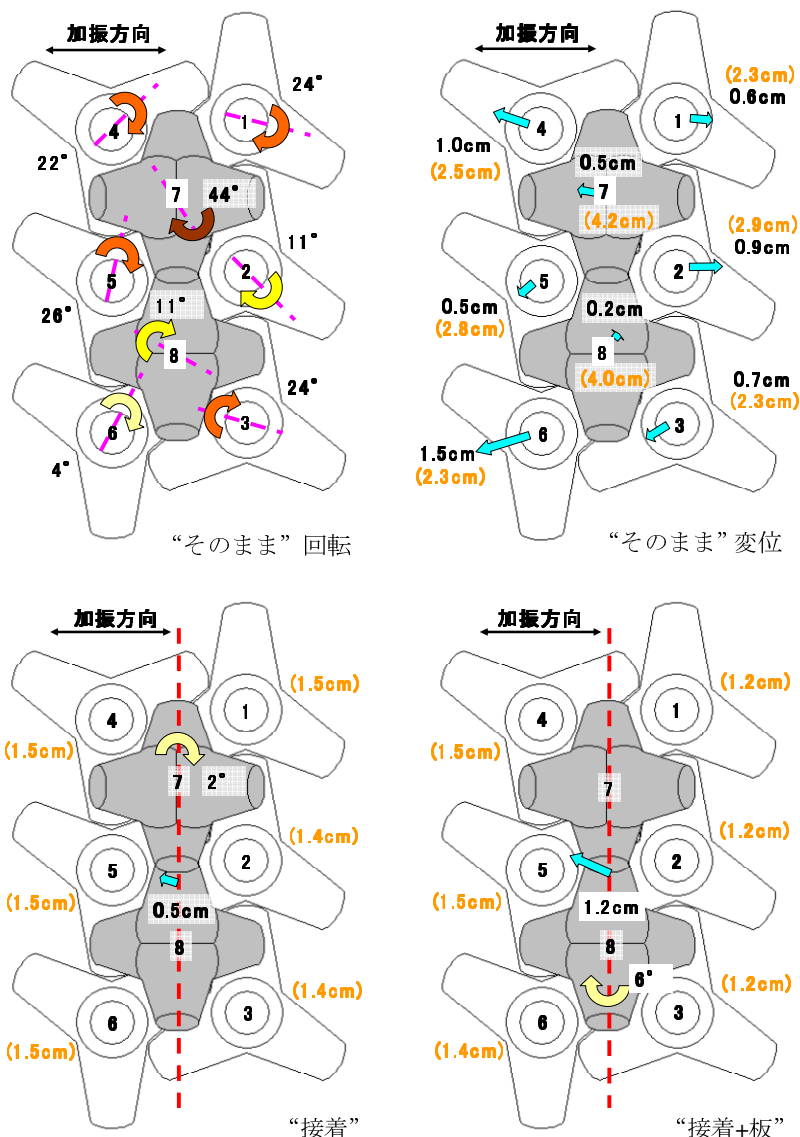


Fig.4 防波堤(Dr=60%)のケースの消波工挙動

が 2 点ある消波工②,⑤番の回転方向は Fig.6 に示した予想とほぼ一致している結果となった。つまり,2 段目消波工との接触点が多い 1 段目消波工の回転方向は,2 段目消波工の影響を受けていると判断できる。また,接触点の少ない消波工についても,①番を除き回転量が小さいか予想と一致した方向に回転するという結果になった。以上の結果は,消波工の接触点の荷重分布及び荷重伝達が評価できれば消波工の回転程度や方向が評価できる可能性があることを示唆している。

### 3. 2 護岸のケース

護岸のケースの実験結果の例として,護岸( $Dr=60\%$ )の消波工挙動を Fig.7 に示す。Fig.4 と同様に括弧内の数字は沈下量を示す。

護岸のケースでも防波堤のケースと同様に“そのまま”のケースの消波工の沈下量・水平変位量は“接着”のケースより大きくなり,また,“接着”のケースの沈下量は“接着+板”のケースの沈下量より大きくなる結果となった。

また,護岸のケースの沈下量の特徴として,ケーソン側の①～③番消波工の沈下量は海側の④～⑥番消波工の沈下量に比べて 50%～70%程度に小さくなる結果となった。これは Fig.7 に示すように,消波工の状態を変化させた 3 つのケース全てを通して言える。また,消波工間の相対変位を拘束していない“そのまま”のケースに関して,①～③番消波工の水平変位量は④～⑥番消波工の水平変位量に比べて小さい結果となった。1 段目消波工の回転方向に関しては,防波堤のケースで示した 2 段目消波工の接触点の影響による予想とは違う結果となり,ケーソンから離れる方向への回転が多く見られた。

護岸のケースの消波工の変位量や回転方向の特徴が防波堤のケースと異なる

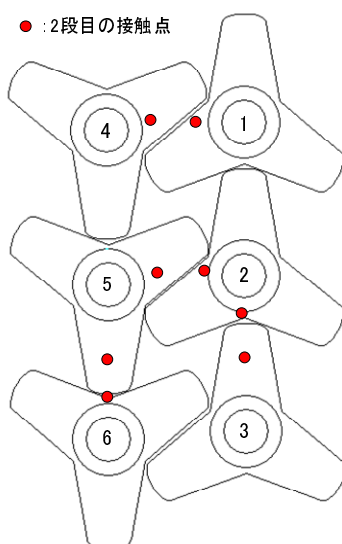


Fig.5 2 段目消波工接触点

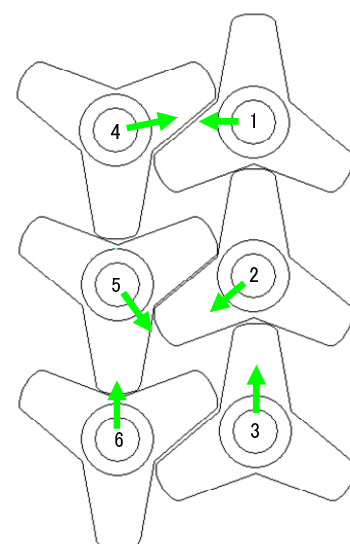


Fig.6 1 段目消波工の回転方向  
(予想)

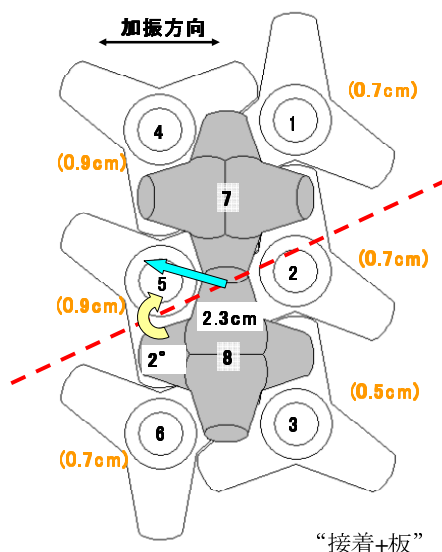
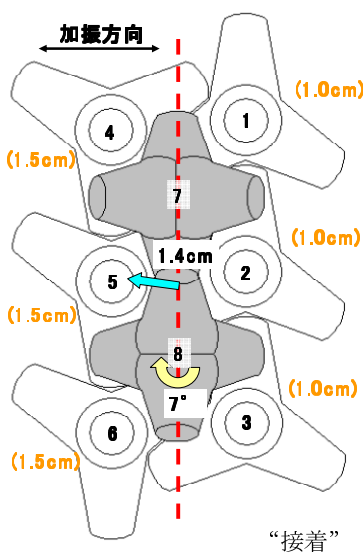
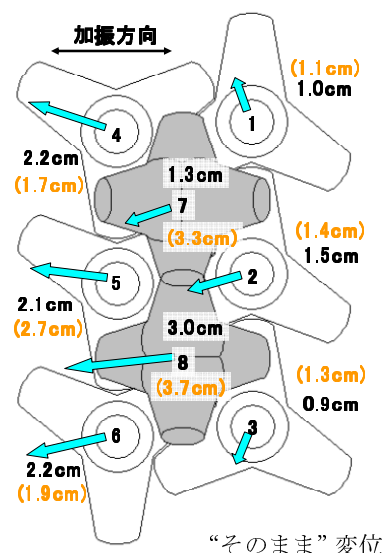
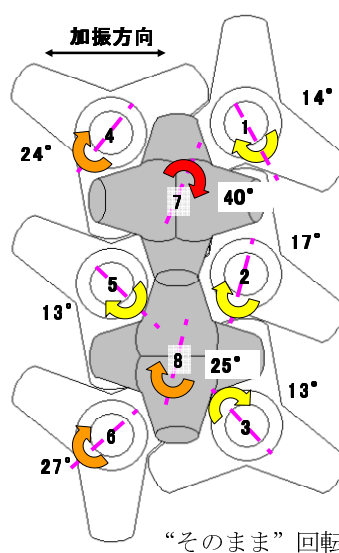


Fig.7 護岸( $Dr=60\%$ )のケースの消波工挙動

った要因としては、ケーソンと裏込め地盤の土圧が影響していると考えられる。つまり、ケーソンと裏込め地盤の直下地盤内の初期応力が変化し、液状化の程度や変形の傾向が変化したと考えられる。また、防波堤のケースでの 1 段目消波工は左右に広がるような水平方向の挙動を示していたが、護岸のケースではケーソンにより①～③番消波工の水平変位が制限された。さらに、ケーソンが背面の液状化土圧により海側へ若干押し出されたために、消波工も全体的に海側への水平変位を示したと考えられる。そして、消波工の回転方向も防波堤のケースとは異なる結果となった原因も同様ではないかと考えられる。

3. 3 護岸ケーソンの変位

Table.2 に護岸(Dr=60%)の各ケースの消波工の平均変位量を、Table.3 にケーソンの変位量を示す。Table.3 から分かるように“接着”と“接着+板”の 2 ケースに比べて“そのまま”のケースのケーソンの水平変位量が大きくなっている。それに伴い、“そのまま”のケースの消波工の水平変位が“接着”のケースより大きくなっていると考えられる。また、“接着+板”のケースの消波工の水平変位が“そのまま”のケースと同程度となっているが、これは板を接着させたことにより加振中に消波工が滑るような挙動を示していたためと考えられる。

Table.2 護岸(Dr=60%)消波工変位まとめ

| 実験ケース | 消波工変位量(cm) |      |         |      |
|-------|------------|------|---------|------|
|       | 水平変位(平均)   |      | 沈下量(平均) |      |
|       | ④～⑥番       | ①～③番 | ④～⑥番    | ①～③番 |
| そのまま  | 2.2        | 1.2  | 2.1     | 1.3  |
| 接着    | 1.2        |      | 1.5     | 1.0  |
| 接着+板  | 2.2        |      | 0.9     | 0.7  |

Table.3 護岸(Dr=60%)ケーソン変位まとめ

| 実験ケース | ケーソン変位量(cm) |      |       |
|-------|-------------|------|-------|
|       | 水平変位        | 沈下量  |       |
|       |             | 消波工側 | 背面地盤側 |
| そのまま  | 0.8         | 0.4  | 0.1   |
| 接着    | 0.3         | 0.2  | 0.1   |
| 接着+板  | 0.2         | 0.2  | 0.1   |

4. まとめ

Table.1 から分かるように、護岸の相対密度 80%のケースを除いて、消波工の離散と回転により沈下量・水平変位量が大きくなることが確認できた。また、“接着”のケースと“接着+板”のケースの実験結果より、接地圧を低減させることにより沈下量が減少することが確認できた。具体的な増減量は、それぞれのケースにより過剰間隙水圧比の値が異なり、液状化の程度に差があると考えられるため、今回の実験結果から定量的に考察することは難しい。また、今回の結果より、“接着+板”のケースがケーソン状の剛体構造物の挙動に相当すると見なすと、液状化地盤上の消波工の挙動はケーソン状構造物の挙動に比べ、水平変位が 0.5 倍～1.0 倍、沈下量が 1.0～5.0 倍になる可能性があると言える。従って、既に提案されている防波堤ケーソンの沈下量予測法を用いて消波工の沈下予測を行うと、沈下量が過小評価される可能性が高い。なお、消波ブロックの回転方向は上部の消波ブロックの接触点に大きく影響することが明らかとなった。

参考文献

・株式会社テトラ：テトラポッド設計要領，pp. 9 (1996).