

# 整備途中における混成堤堤頭部の波力特性について

(独) 土木研究所 寒地土木研究所 寒冷沿岸域チーム ○酒井 和彦  
上久保 勝美  
北海道開発局 港湾空港部 港湾建設課 林 誉命

施工規模が小さい場合でも効率的な防波堤整備を可能とする連結セルラーブロック工法がある。本工法は整備途中に天端が水中にある場合や水面にわずかに出ている状態などが想定される。堤幹部の波力特性は明らかとなってきたが、堤頭部の波力特性は明らかとなっていない。そこで堤頭部を再現するために平面実験を実施した。その結果、堤頭部においても、合田式により求められる波力よりも小さくなることが分かった。

キーワード：連結セルラーブロック工法，混成堤，波力，水理模型実験，堤頭部

## 1. まえがき

港湾施設の一つである防波堤に多く用いられるケーソン式混成堤の構造は急速施工が可能で大規模施工による効率化が図られることから、最も多く用いられる防波堤の構造形式である。しかし、ケーソン1函分のみの製作・据付等、施工規模が小さい場合には総事業費が割高になったり、施工期間が結果的に長くなることもある。そこで、施工規模が小さい場合においても効率的な防波堤の整備工法の検討が行われており、その一例として段階的な整備工法の一つである図-1に示す連結セルラーブロック工法がある。

連結セルラーブロック工法の整備手順例としては天端をわずかに水面よりも上にした(以下、低天端状態という)後に完成断面とする場合と天端を水中に位置するようにした(以下、没水状態という)後に完成断面とする場合がある。

連結セルラーブロック工法では暫定堤頭部を低天端状態あるいは没水状態で越年させ、翌年度に整備を再開することが考えられる。堤幹部において低天端状態となる場合の波力特性については中田ら<sup>1)</sup>や藤原ら<sup>2)</sup>、興野ら<sup>3)</sup>が、没水状態となる場合の波力特性については上久保ら

<sup>4)</sup>が明らかにしている。一方で堤頭部は回折波などの影響で堤幹部とは異なる波力特性となることが明らかとなっている<sup>5)6)</sup>。しかし、堤頭部が低天端状態あるいは没水状態となる場合の波力特性については明らかとなっていない。そこで、平面実験を実施して、堤頭部の波力特性を把握するものである。

## 2. 実験方法

平面実験は図-2に示す、不規則波発生装置を備えた平面水槽(長さ28.0m, 幅23.0m, 深さ1.0m)に勾配が水平な地形床を設け、縮尺を1/40として実験を行った。実験は波圧実験及び滑動実験を実施した。表-1に波圧実験条件を、表-2に滑動実験条件を示す。波圧実験及び滑動実験ともに天端高の違いによる波力特性を把握するため、天端高を現地換算で-4.5~+3.0mの3段階に変化させ、波浪は修正Bretschneider・光易型のスペクトルを有する不規則波とし、1波群の波数は150波とした。なお、図-3に示すように堤頭部のみ天端高を変化させた。図-4に波圧実験の堤体模型を示す。波圧はサンプリング周期0.005sで測定した。また、図-5に滑動実験の堤体模型を示す。

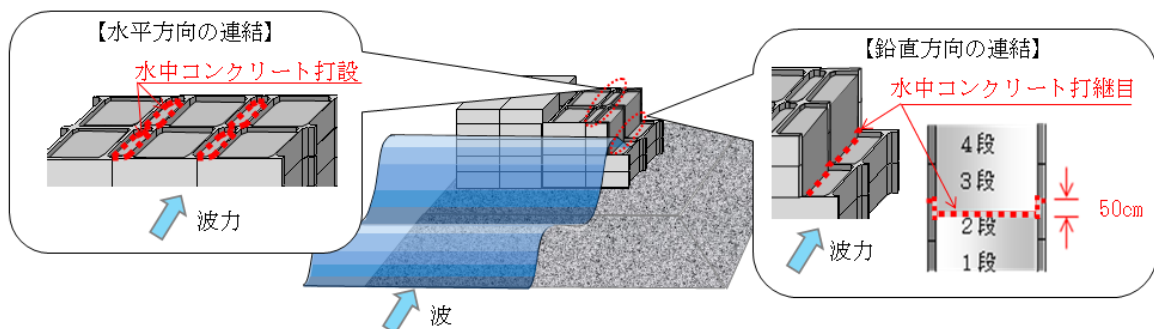


図-1 連結セルラーブロック工法の概要

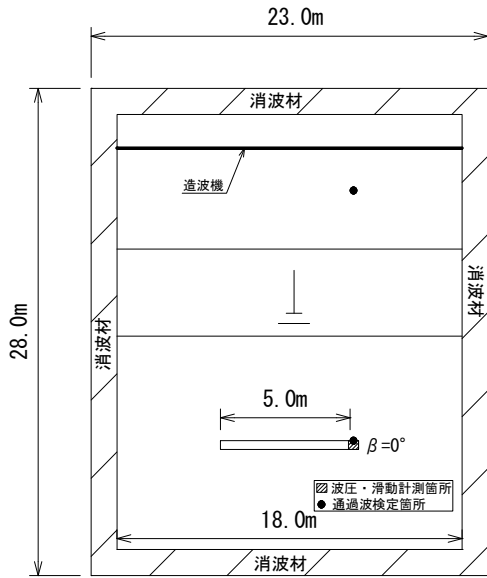


図-2 平面水槽の概要

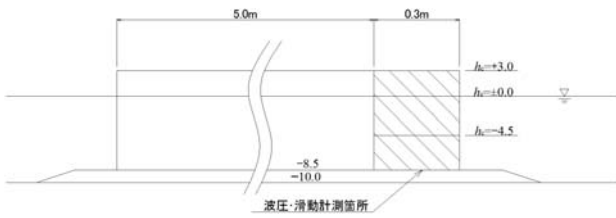


図-3 実験模型縦断面図

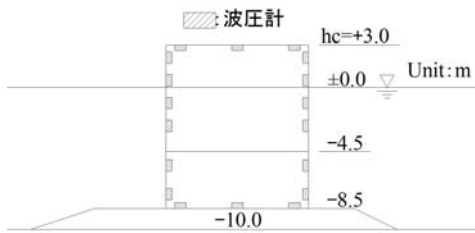


図-4 波圧計の設置位置(現地換算値)

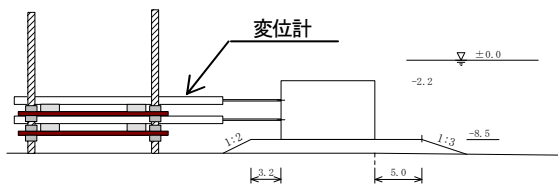


図-5 滑动実験模型例

### 3. 波圧特性

#### (1) 波圧の時系列変化

図-6(a)-(c)は有義波高 $H_{1/3}=3.0\text{m}$ , 有義波周期 $T_{1/3}=14.0\text{s}$ , 図-7(a)-(c)は有義波高 $H_{1/3}=4.0\text{m}$ , 有義波周期 $T_{1/3}=14.0\text{s}$ のときの各面に作用する波圧の時系列変化を示したもので, 滑动合成波力が最大となる瞬間の前後を示したものである. なお, 滑动合成波力とは次式で計算したものである.

$$P = P_H + \mu P_V \quad (1)$$

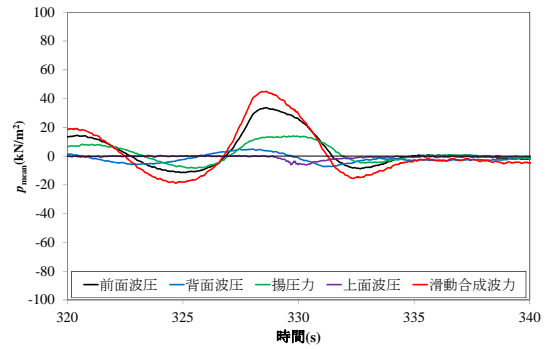
ここで,

表-1 波圧実験条件

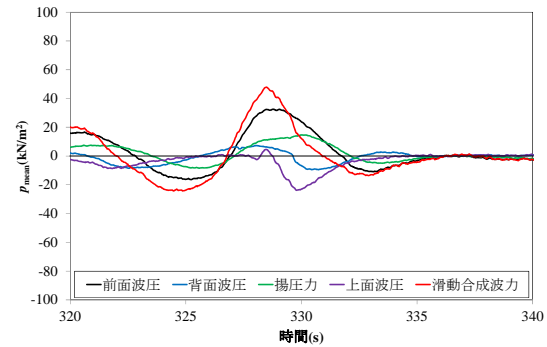
	実験値(cm)	現地換算値(m)
有義波高 $H_{1/3}$	7.5, 10.0	3.0, 4.0
有義波周期 $T_{1/3}$	1.58, 1.90, 2.21(s)	10.0, 12.0, 14.0(s)
天端高 $h_c$	-11.3, ±0.0, +7.5	-4.5, ±0.0, +3.0
水深 $h$	-25.0	-10.0
マウンド上水深 $d$	-21.3	-8.5
入射角 $\beta$	0°	0°

表-2 滑动実験条件

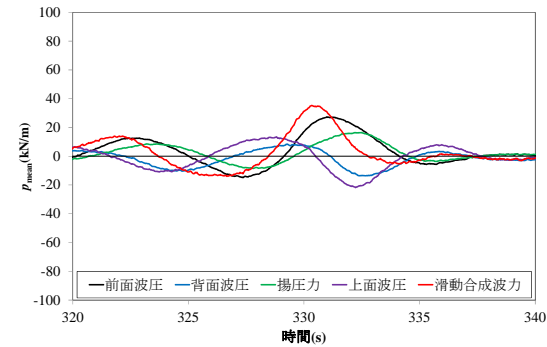
	実験値(cm)	現地換算値(m)
有義波高 $H_{1/3}$	7.5, 10.0	3.0, 4.0
有義波周期 $T_{1/3}$	1.90, 2.21(s)	12.0, 14.0(s)
天端高 $h_c$	-11.3, ±0.0, +7.5	-4.5, ±0.0, +3.0
水深 $h$	-25.0	-10.0
マウンド上水深 $d$	-21.3	-8.5
入射角 $\beta$	0°	0°



(a)  $h_c=+3.0\text{m}$



(b)  $h_c=\pm 0.0\text{m}$



(c)  $h_c=-4.5\text{m}$

図-6 波圧の時系列変化( $H_{1/3}=3.0\text{m}$ ,  $T_{1/3}=14.0\text{s}$ )

$P_H$ : 前面波力と背面波力の合力

$P_V$ : 揚圧力と上面波力の合力

$\mu$ : 摩擦係数

である。なお、摩擦係数は摩擦係数測定装置を用いた実験結果によって0.58とした。

$H_{1/3}=3.0\text{m}$ のときは前面波圧と揚圧力は完成時と低天端状態ではほとんど低減していないが、没水状態になると低減することが分かる。 $H_{1/3}=4.0\text{m}$ のときは前面波圧と揚圧力は完成時と低天端状態ではほとんど低減していないが、没水状態になると低減することが分かる。このように前面波圧が低減する要因として、直立壁に衝突するはずのエネルギーの一部が天端上を透過することが考えられる。また、 $H_{1/3}=4.0\text{m}$ のときの波圧の作用形態は完成時においては碎波圧であるが、没水状態においては重複波圧状に変化している。これは通常の防波堤では静水面付近で衝撃的な波力が作用するが、没水状態では衝撃的な波力が作用する面がなくなるためである。

上面波圧は  $H_{1/3}=3.0\text{m}$ ,  $4.0\text{m}$  ともに天端が高いときは前面波圧と揚圧力との位相差が大きく、没水状態では位相差が小さい。これは、天端が高いときは堤体に衝突して、一度、上方に飛び出した後に天端上に落下することに対して、没水状態では堤体前面の波が間を置かずに天端上を通過するために位相差が小さくなると考えられる。また、上向きに作用する揚圧力がピークとなる直後に下向きに作用する上面波圧が作用していることで、堤体を安定させる効果があることが分かる。

## (2) 波圧分布

図-8に  $H_{1/3}=3.0\text{m}$ ,  $T_{1/3}=14.0\text{s}$ 及び  $H_{1/3}=4.0\text{m}$ ,  $T_{1/3}=14.0\text{s}$ の条件における滑動合成波力が最大となる瞬間の波圧分布を天端高をパラメータとして示すとともに、天端高  $h_c=+3.0\text{m}$ の条件での合田式<sup>9)</sup>による計算結果を示したものである。前面波圧は天端が高い条件では合田式とほぼ

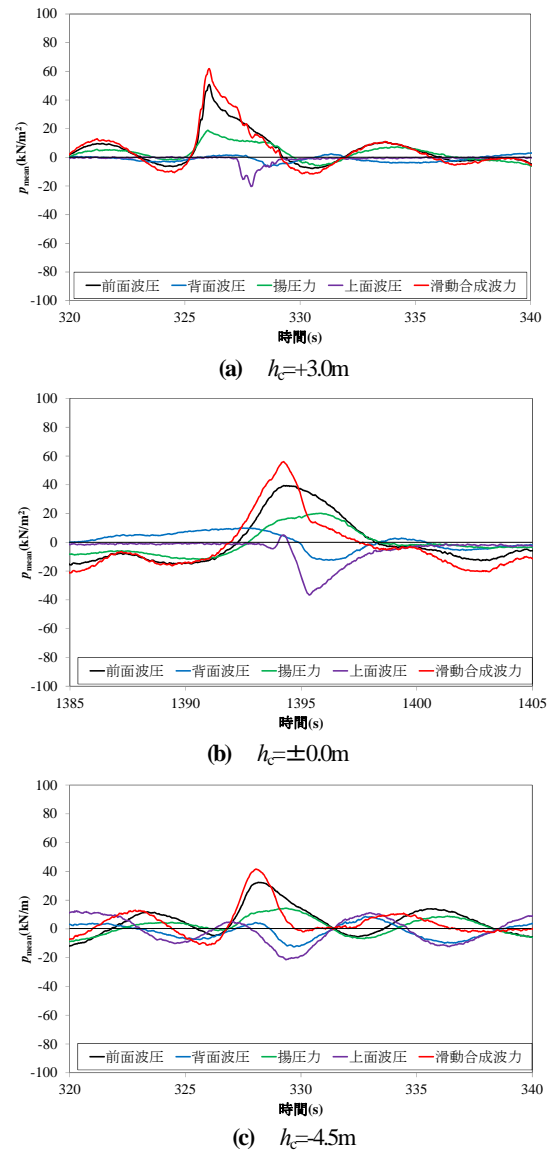


図-7 波圧の時系列変化( $H_{1/3}=4.0\text{m}$ ,  $T_{1/3}=14.0\text{s}$ )

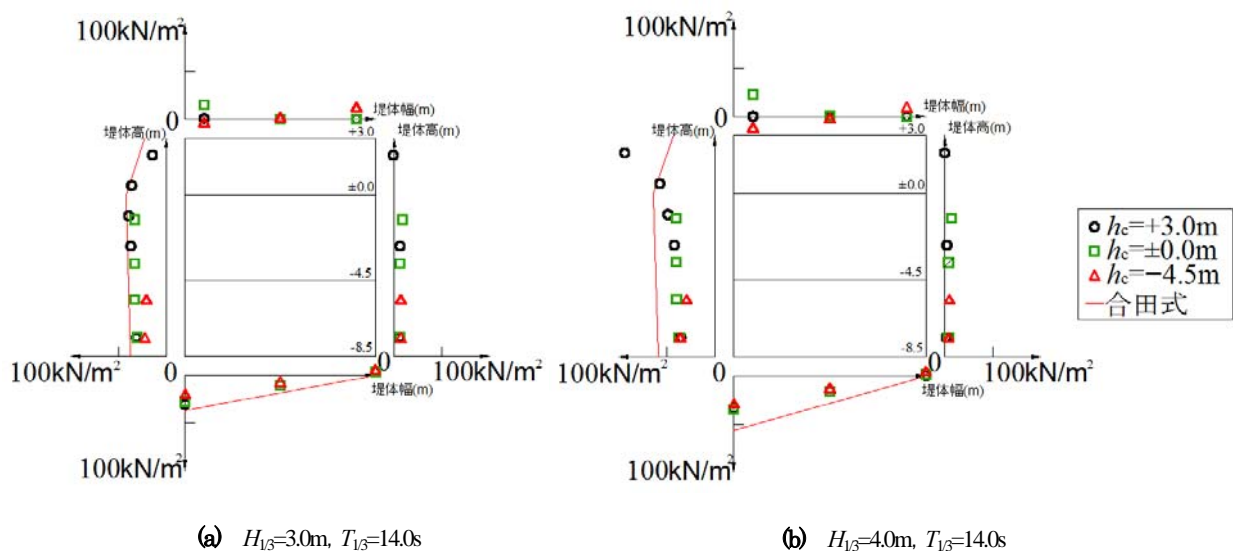


図-8 波圧分布

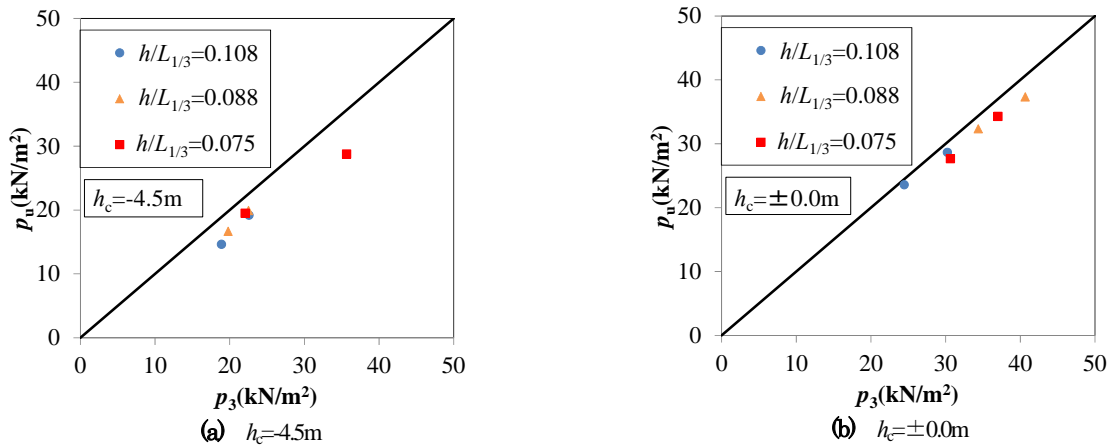


図-9 前趾揚圧力  $p_u$  と前面波圧強度  $p_3$  との比較

一致するが、没水すると波圧全体が小さくなる傾向にある。揚圧力についても同様に、天端が高い条件では合田式とほぼ一致するが、没水すると波圧分布は三角形分布を保つが、波圧全体が小さくなる傾向にある。

合田ら<sup>9)</sup>により、完成時の堤体底面前趾に作用する揚圧力は前面下端の波圧に支配されることを明らかとなっている。一方で低天端状態及び没水状態における前趾揚圧力と前面下端の波圧の関係は明らかとなっていない。そこで、図-9(a)に天端高  $h_c = 4.5\text{m}$  の場合、図-9(b)に天端高  $h_c = \pm 0.0\text{m}$  の場合の前趾揚圧力と前面下端の波圧の関係を示す。天端高にかかわらず、前趾揚圧力は前面下端の波圧よりも若干小さいものの、おおむね一致していることから、完成時と同様に前趾揚圧力は前面下端の波圧

はほぼ等しいといえるが分かった。

### (3) 波力低減について

前章で述べたように天端高が低くなると波圧は合田式と比較して低減する傾向にある。そこで、天端高と波力の低減の関係について調べた。

図-10(a)は天端高  $h_c$  と有義波高  $H_{1/3}$  の比である相対天端高  $h_c/H_{1/3}$  及び波圧実験結果より求めた水平波力  $P_{\text{exp}}$  と合田式より求めた水平波力  $P_{\text{cal(合田)}}$  の比である  $P_{\text{exp}}/P_{\text{cal(合田)}}$  の関係を示したもので、有義波高  $H_{1/3} = 3.0\text{m}$  の場合のものである。相対天端高  $h_c/H_{1/3}$  が低くなるに従って水平波力比  $P_{\text{exp}}/P_{\text{cal(合田)}}$  が低減する傾向にあることが分かる。

図-10(b)は相対天端高  $h_c/H_{1/3}$  及び波圧実験結果より求めた鉛直波力  $U_{\text{exp}}$  と合田式より求めた鉛直波力  $U_{\text{cal(合田)}}$  の比

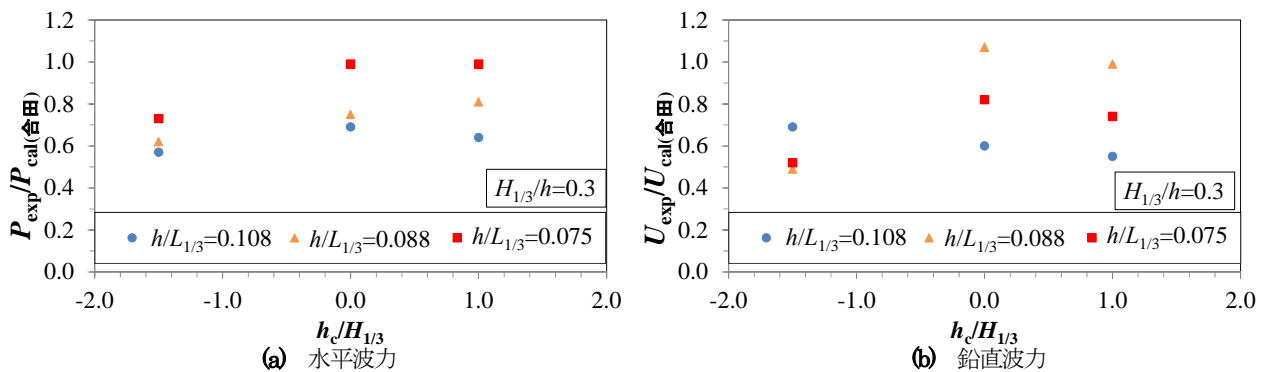


図-10 波力比と天端高の関係 ( $H_{1/3}/h=0.3$ )

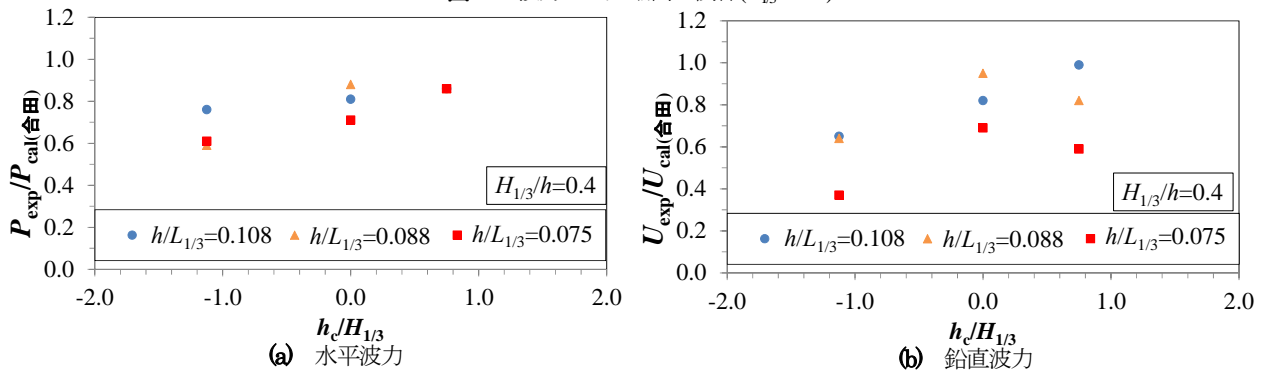


図-11 波力比と天端高の関係 ( $H_{1/3}/h=0.4$ )

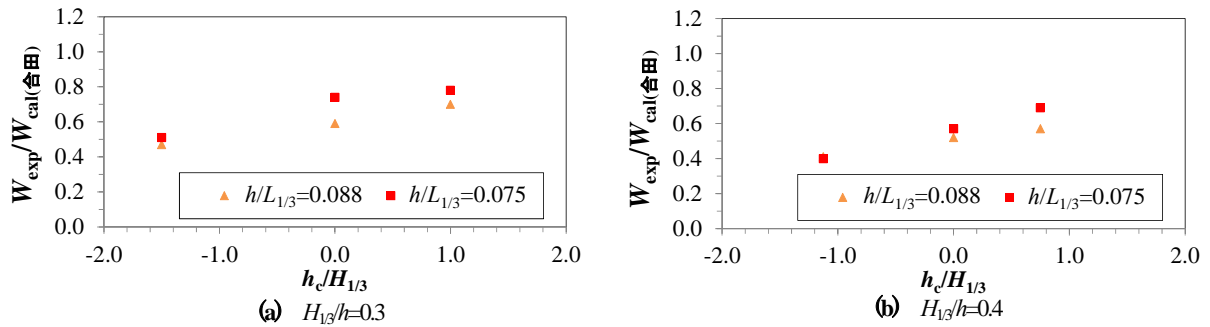


図-12 重量比と天端高の関係

である $U_{exp}/U_{cal(合田)}$ の関係を示したもので、有義波高 $H_{1/3}=3.0\text{m}$ の場合のものである。相対天端高 $h_c/H_{1/3}$ が低くなるに従って鉛直波力比 $U_{exp}/U_{cal(合田)}$ が低減する傾向にあることが分かる。

図-11(a)は相対天端高 $h_c/H_{1/3}$ 及び水平波力比 $P_{exp}/P_{cal(合田)}$ の関係を示したもので、有義波高 $H_{1/3}=4.0\text{m}$ の場合のものである。相対天端高 $h_c/H_{1/3}$ が低くなるに従って水平波力比 $P_{exp}/P_{cal(合田)}$ が低減する傾向にあることが分かる。

図-11(b)は相対天端高 $h_c/H_{1/3}$ 及び鉛直波力比 $U_{exp}/U_{cal(合田)}$ の関係を示したもので、有義波高 $H_{1/3}=4.0\text{m}$ の場合のものである。相対天端高 $h_c/H_{1/3}$ が低くなるに従って鉛直波力比 $U_{exp}/U_{cal(合田)}$ が低減する傾向にあることが分かる。

#### 4. 滑動実験結果

図-12は相対天端高 $h_c/H_{1/3}$ 及び滑動実験より求めた滑動限界重量 $W_{exp}$ と合田式より求めた所要重量 $W_{cal(合田)}$ の比である $W_{exp}/W_{cal(合田)}$ の関係を示したものである。完成時の重量比 $W_{exp}/W_{cal(合田)}$ は0.57~0.78程度であるが、相対天端高 $h_c/H_{1/3}$ が低くなるに従って $W_{exp}/W_{cal(合田)}$ が低減する傾向にあり、没水状態では0.40~0.51程度となることが分かった。

#### 5. まとめ

- 1) 堤幹部と同様に堤頭部においても、上向きに作用する揚圧力がピークとなる直後に下向きの上面波圧が作用していることで、堤体を安定させる効果があることが分かった。
- 2) 天端高が低くなるに従って、合田式と比較して波圧が低減することが分かった。
- 3) 低天端状態及び没水状態のときの前趾揚圧力は前面下端の波圧は完成時と同様に、ほぼ等しいことが分

かった。

本研究では、波の入射角度を直角入射のみとしたが、今後は入射角度を変えて実験を行う予定である。

#### 6. 参考文献

- 1) 中田邦夫, 寺内 潔, 西田仁志, 梅木 功: 低天端混成堤の諸特性について, 海岸工学論文集, 第31巻, pp.532-536, 1984
- 2) 藤原隆一, 貝沼憲男, 興野俊也, 石崎崇志, 小竹康夫, 津田宗男: 低天端ケーソン堤に作用する波力特性について, 海岸工学論文集, 第43巻, pp.761-765, 1996
- 3) 興野俊也, 貝沼憲男, 高橋由多加, 青野利夫, 藤原隆一: 現地観測に基づく低天端ケーソン堤の安定性評価, 海岸工学論文集, 第44巻, pp.836-840, 1997
- 4) 上久保勝美, 早川哲也, 林誉命, 掛水則秀, 酒井和彦, 山本泰司, 時沢武史, 木村克俊: セルラーブロックを用いた新たな防波堤整備工法の開発と現地への適用, 土木学会論文集 B2(海岸工学), Vol.70, No.2, pp.1056-1060, 2014
- 5) 国土交通省港湾局監修, 港湾の施設の技術上の基準・同解説, 1485p, 2007
- 6) 岸 哲也, 竹田英章: 防波堤堤頭部の安定性に関する研究, 土木試験所月報, 第351号, pp.16-18, 1982
- 7) 八尋明彦, 加藤博敏, 菅原邦彦, 黒澤忠男, 南 将人: 平面形状による防波堤に作用する波力の評価について, 海岸工学論文集, 第40巻, pp.731-735, 1993
- 8) 合田良実: 防波堤の設計波圧に関する研究, 港湾技術研究所報告, 第12巻, 第3号, pp.31~69, 1973
- 9) 合田良実, 福森利夫: 直立壁および混成堤直立部に働く波圧に関する実験的研究, 港湾技術研究所報告, 第11巻, 第2号, pp.3-45, 1972