

設置式鋼製フレーム防波堤の安定性検討

EXPERIMENTAL STUDY FOR WAVE FORCE AND STABILITY OF A STEEL - FRAMED BREAKWATER

本田秀樹¹・塩崎禎郎¹・米島幹雄²・末田明²

Hideki HONDA, Yoshio SHIOZAKI, Mikio YONESHIMA and Akira SUEDA

¹正会員 工修 JFE技研(株) 土木・建築研究部(〒210-0855 神奈川県川崎市南渡田町1-1)

²正会員 JFEエンジニアリング(株) 鋼構造事業部(〒230-8611 神奈川県横浜市鶴見区末広町2-1)

Several type of breakwaters for wave dissipation, a decrease of wave overtopping, an improvement of stability, and a function of water exchange have been developed. Recently, the development for the decrease of construction costs has been important. Therefore, the authors developed a new type of breakwater. This breakwater consists of steel-frames, concrete plates, and a capping.

In this paper, through the experiments of this breakwater using a 1/50 model, we proved the stability and defined the uplift pressure acting on the capping by diffracted waves.

Key Words : steel-framed breakwater, stability, uplift pressure

1. はじめに

防波堤構造は、反射波の低減、越波の低減、耐波安定性の向上、海水交換機能付加などを目指して、これまでに種々の構造形式の開発が行われてきた¹⁾。一方、近年では、公共事業における建設費縮減の要望が高まってきていることから、低コスト化を目指した構造の開発が重要になってきている。このような背景から、筆者らは、新形式防波堤である設置式鋼製フレーム防波堤を考案した。本論文では、設置式鋼製フレーム防波堤の実用化に向けて、その波力算定式と全体安定性を検討する目的で実施した水理実験結果について述べる。

2. 設置式鋼製フレーム防波堤の特徴

設置式鋼製フレーム防波堤の概略図を図-1に示す。本防波堤は、鋼製フレーム部材、港外側と港内側に分割した底版、斜面とした防波版から構成される構造形式である。このような構造形式とすることで、1)底面全体に作用していた揚圧力が低減する、2)斜面壁により耐波安定性が向上するため、主に上部工重量で波浪に対する安定性を確保できることが特徴である(図-2参照)。また、施工時の堤体重量が軽量であるため大型起重機船が不要であることや中詰砂省略による工期短縮といった利点も有している。

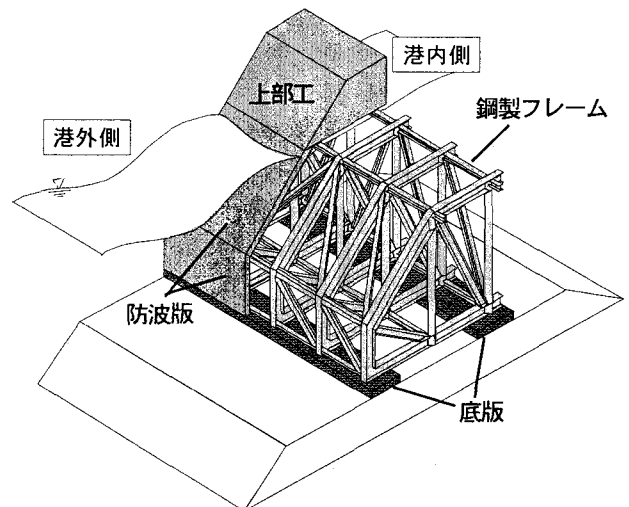


図-1 設置式鋼製フレーム防波堤概略図

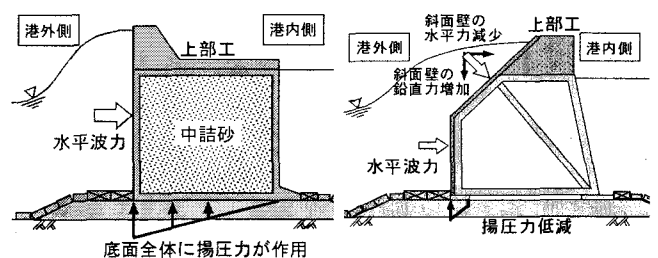


図-2 設置式鋼製フレーム防波堤の特徴

3. 実験概要

実験は、下記の2種類に分けて実施した。それぞれの実験概要を以下に示す。

①波圧・滑動実験

堤体の作用波圧を明らかにするための波圧実験と波圧実験より得られた波力算定式を用いて、全体安定性を検証するための滑動実験

②揚圧力実験

防波堤港内側に回りこむ回折波により上部工下面に作用する揚圧力(図-3参照)を把握するための実験

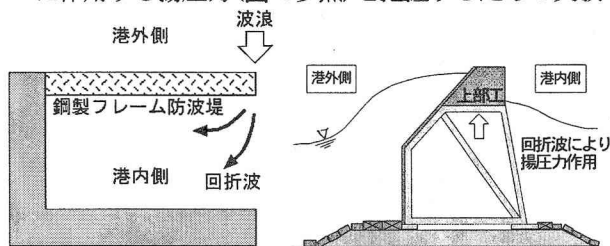


図-3 回折波による揚圧力

(1) 波圧・滑動実験

a) 実験対象断面

波圧・滑動実験における実験対象断面を図-4に示す。水深-12.0mを対象として、防波版斜面壁の没水深さは静水面より4.5m、傾斜角は45度とした。実験に用いた模型は、この断面を縮尺1/50でモデル化した。なお、模型はアクリル製であり、底板のみアルミニウム製とした。

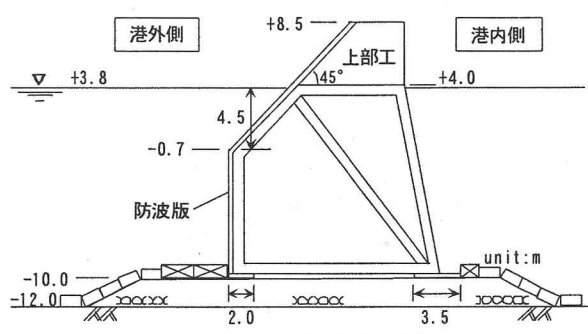


図-4 実験対象断面図

b) 実験条件

波圧・滑動実験は、規則波で行った。現地との縮尺率は1/50として、フルード相似則により実験条件を決定した。波圧実験での実験条件を表-1に示す。滑動実験は、周期11.0s(実験値1.56s)、波高3.0m(実験値6.0cm)から模型に明らかな滑動が生じるまで、少しずつ大きな波高を作用させた。

表-1 実験条件 (波圧実験)

水深	15.8m(31.6cm)
周期	9.0s(1.27s), 11.0s(1.56s), 14.0s(1.98s)
波高	4.0m(8.0cm), 8.25m(16.5cm)

() は実験値

c) 実験方法

吸収制御式の二次元造波水路(長さ13.5m×高さ0.8m×幅0.9m)を用いて実験を行った。水路内には1/50勾配の水路床を設け、砕石(粒径5mm~10mm)を用いた基礎マウンドに模型を設置した。模型は、防波堤法線方向に3分割(滑動量測定模型、波圧計測模型、ダミー模型)して設置した。模型の配置を図-5に示す。

波圧実験は、防波版・底板・上部工下面に波圧計を取付けて、波作用時の波圧を計測した。波圧計の配置を図-6に示す。滑動実験は、波圧実験結果より得られた波力算定式から波高5.0m(実験値10.0cm)に対して滑動安全率1.0となる堤体重量を算定し、この重量となるように模型に錘を取付け、波高を変化させた時の滑動量を変位計で計測した。滑動実験状況を写真-1に示す。滑動実験で堤体の安定性を評価する場合、模型と砕石との摩擦係数を求めておく必要がある。このため、水平載荷実験を行った結果、模型(底板はアルミニウム製)と砕石との摩擦係数 μ は0.61であった。なお、今回の波圧・滑動実験のデータは、サンプリング間隔0.01sで収集した。

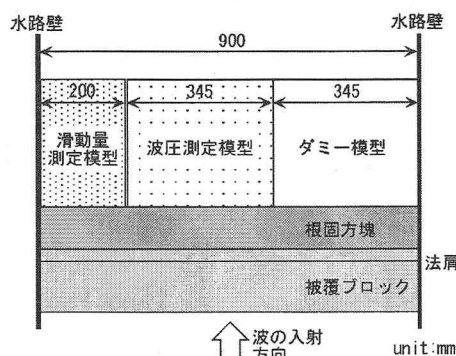


図-5 模型の配置

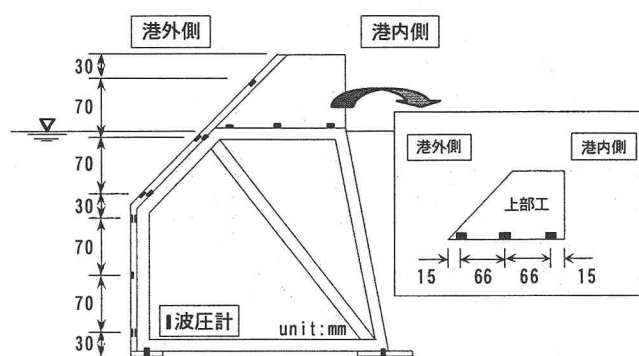


図-6 波圧計配置図(波圧実験)

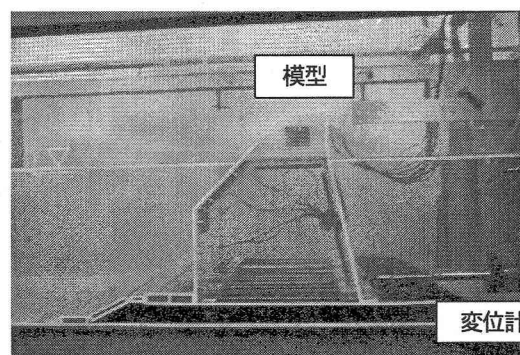


写真-1 滑動実験の状況

(2) 回折波による上部工下面の揚圧力実験

a) 実験対象断面

揚圧力実験における実験対象断面を図-7に示す。ここでは、防波堤の港内側へ回り込む回折波により、設置式鋼製フレーム防波堤の上部工下面に作用する揚圧力を把握することが目的である。このため、堤体天端を越波した波により回折波が乱れないように、堤体天端を高くして実験を行った。

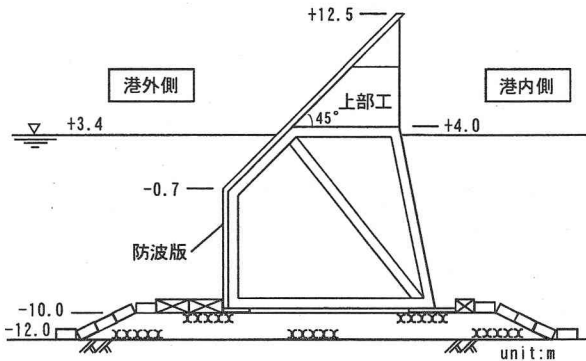


図-7 実験対象断面図

b) 実験条件

実験は、規則波で行った。現地との縮尺率は1/50として、フルード相似則により実験条件を決定した。実験条件を表-2に示す。周期・波高は一定として、上部工下面と静水面とのクリアランスによる揚圧力の影響をみるために、水深を変化させた。また、模型を傾斜させて設置(図-8参照)することで入射角を変化させた条件、揚圧力の低減を目指して堤頭部端部に側壁(図-9参照)を設置した条件についても実験を行った。

表-2 実験条件 (揚圧力実験)

周期	8.0s (1.13s)
波高	6.0m (12.0cm)
水深	17.2m (34.4cm), 16.0m (32.0cm), 15.4m (30.8cm), 14.8m (29.6cm), 14.2m (28.4cm)
入射角	90度, 60度, 45度
堤頭部の側壁高さ	90度入射: なし, 全面, 水面から0.5×波高 60度入射: なし, 水面から0.5×波高 45度入射: なし, 水面から0.5×波高

() は実験値

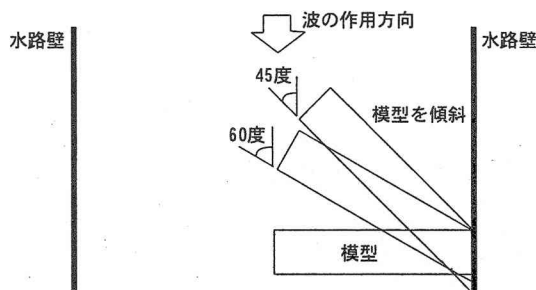


図-8 模型設置状況 (入射角変化)

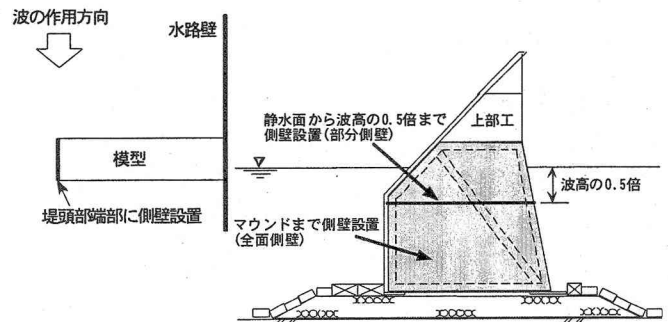


図-9 堤頭部端部への側壁設置

c) 実験方法

二次元造波水路(長さ60.0m×高さ2.0m×幅3.0m)を用いて実験を行った。模型は、回折波を生じさせるために、水路幅(3.0m)の半分まで設置した。模型の設置状況を写真-2に示す。この時の防波堤延長長さ(1.5m)は、実験波の波長の約0.9倍である。実験では、主に堤頭部近傍に作用する波圧を検証するために、堤頭部から8.0cm(0.05波長)の位置に波圧計を取付けて、波作用時の波圧を計測した。また、模型の港内側に波高計を設置して回折波高を計測した。波圧計と波高計の配置を図-10に示す。なお、波圧・波高データは、サンプリング間隔0.01sで収集した。

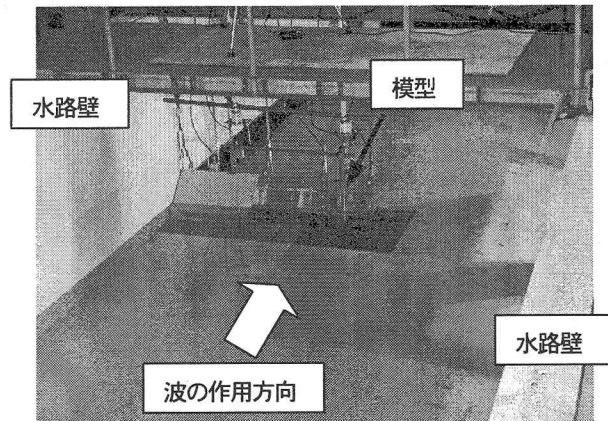


写真-2 模型設置状況

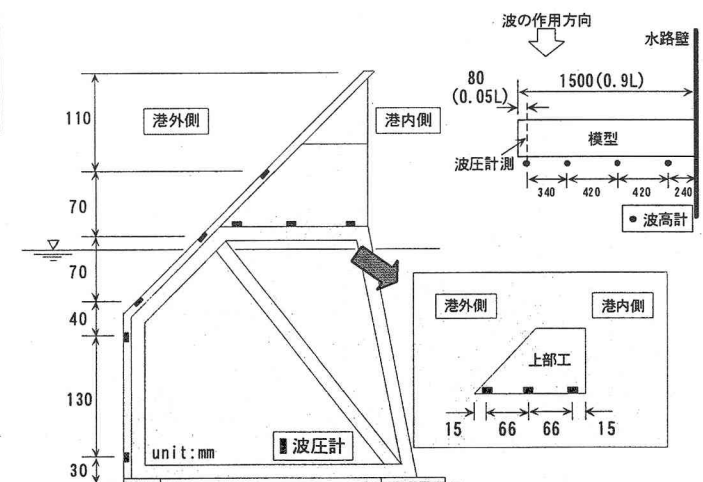


図-10 波圧計・波高計配置図(揚圧力実験)

4. 実験結果

(1) 波圧実験結果

波圧実験結果の一例として、周期11.0s、波高8.25mの条件における波圧分布を図-11に示す。図のプロットは、各波圧計の計測値に分担面積を掛け合わせた波圧合力から滑動合成波力を算定し、この滑動合成波力が最大(または最小)となる同時刻の5波分の平均値を示している。なお、防波版部分の波圧合力算定には、防波版の港外側と港内側の波圧値の差圧を用いた。図中の実線は、上部斜面堤の波力算定式として提案されている細山田式²⁾、および合田式による計算値を示している。その結果、防波版の作用波圧は、滑動合成波力最大時では細山田式とよく一致していた。ところが、滑動合成波力最小時では、現行設計(堤体前面の水位低下を $0.5 \times$ 設計波高)よりも

大きな波圧が作用しており、今回の実験では波高の1.0倍の水位低下に相当する波圧分布であった。これは、斜面壁の没水深さが影響しているためであり、斜面壁没水深さを浅くすることによって水位低下量を小さくできると考えている。実験時の波の作用状況を写真-3に示す。底版については、港外側は合田式による計算値以下であり、港内側底版には波圧が作用していなかった。波圧実験(断面実験)の場合、上部工下面には堤体を越波した波による揚圧力が作用する。上部工下面の波圧時系列と滑動合成波力時系列を図-12に示す。その結果、上部工下面の揚圧力は越波した波で生じるため、波圧の作用位相と滑動合成波力最大・最小時の位相は異なっていた。また、今回の実験条件では、その最大値は $0.2w_0H$ (w_0 :水の単位体積重量、 H :波高)であることがわかった。

波圧実験の結果から、滑動実験時の堤体重量を求める波力算定式を以下のように定めた。滑動実験に用いる波力算定式模式図を図-13に示す。

<滑動合成波力最大時>

- ・防波版：斜面部を補正した細山田式を用いる
- ・底版：港外側の底版のみ揚圧力(合田式)を作用させる
- ・上部工下面：波圧の作用なし

<滑動合成波力最小時>

- ・防波版：水位低下を波高の1.0倍とする
- ・底版：港外側の底版のみ揚圧力(合田式)を作用させる
- ・上部工下面：波圧の作用なし

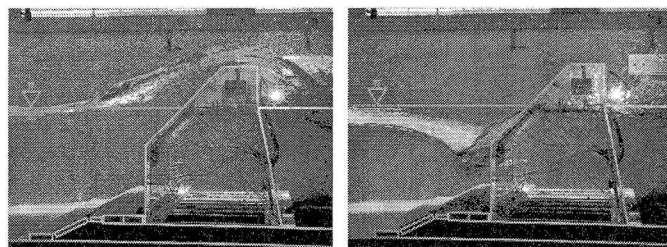


写真-3 波の作用状況 (左：押波時、右：引波時)

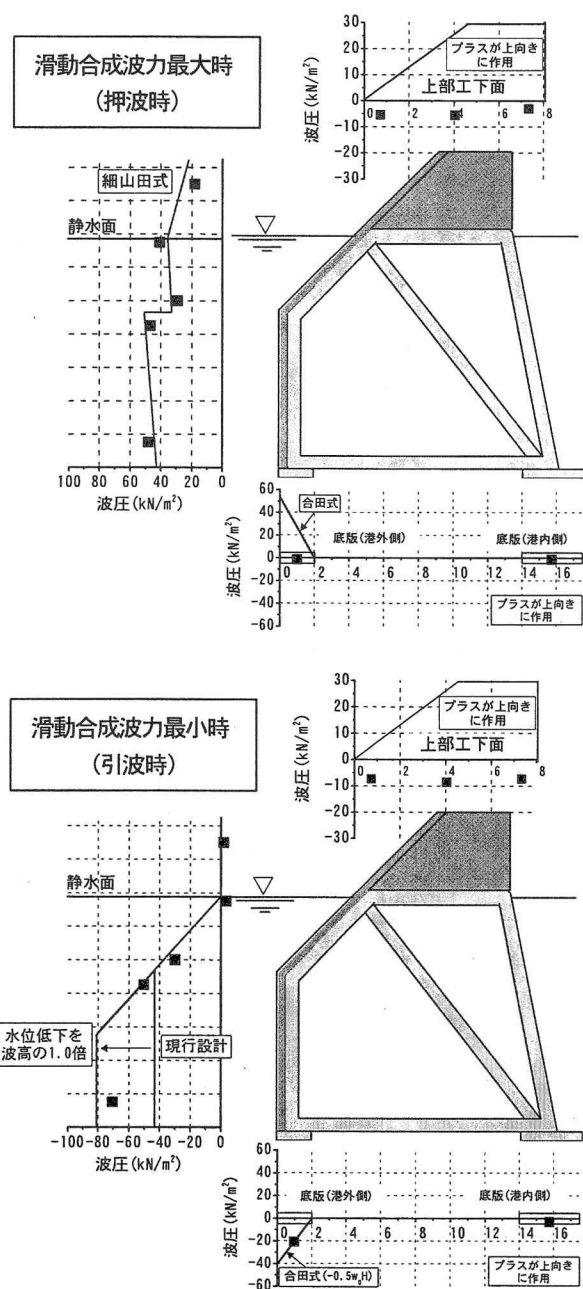


図-11 同時波圧分布(周期11.0s、波高8.25m)

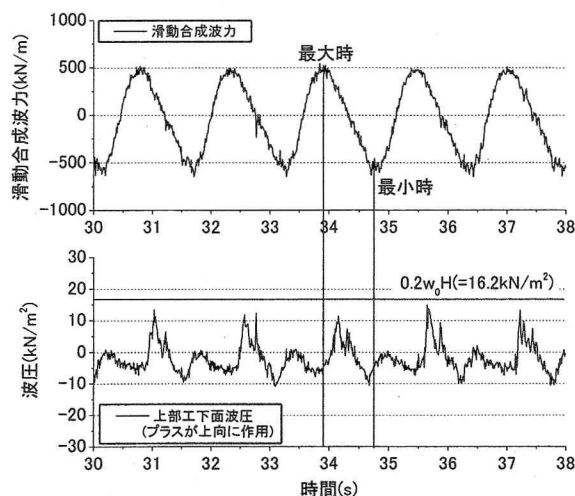
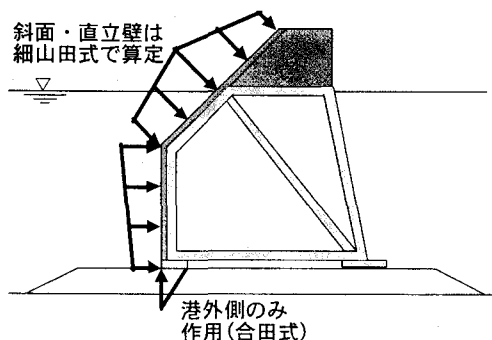


図-12 上部工下面の波圧時系列と滑動合成波力時系列

<滑動合成波力最大時>



<滑動合成波力最小時>

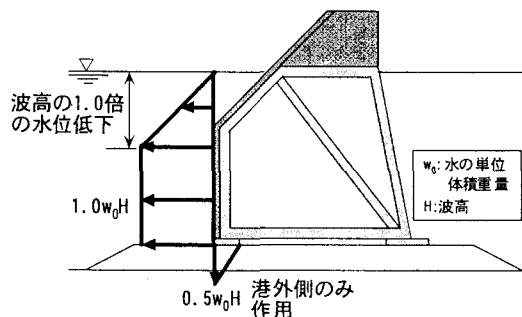


図-13 滑動実験に用いる波力算定式模式図

(2) 滑動実験結果

波力算定式(図-13参照)を用いて、波高5.0m(実験値10.0cm)に対して滑動安全率が1.0となるように模型重量を調整し、滑動実験を行った。今回の波力算定式の場合、滑動合成波力最小時(引波時)で滑動安全率が決まる。このため、模型が港外方向へも滑動可能な状態で実験を行った。滑動実験結果を図-14に示す。図のプロットは、約30波作用後の模型の滑動量(実験値)である。その結果、滑動安全率1.0以上では滑動が生じておらず、滑動安全率0.9以下の条件から滑動が生じていた。また、滑動が生じた全てのケースにおいて、模型の滑動は港外方向であり、今回のような滑動合成波力最小時(引波時)に堤体が最も不安定になることが再現できていた。以上のことから、波圧実験結果から仮定した波力算定式の妥当性を検証することができた。

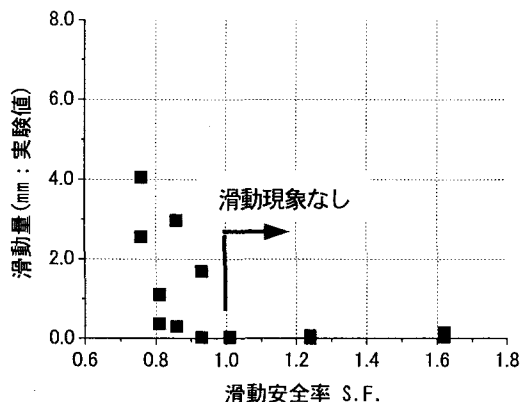


図-14 滑動実験結果

(3) 揚圧力実験結果

揚圧力実験では、回折波により上部工下面に作用する揚圧力に着目している。ここでは、実験波高(6.0m: 実験値12.0cm)が作用した時間帯において、上部工下面の波圧計測値から求めた波圧合力を等分布荷重に換算した平均波圧強度 P を用いて、実験結果を整理した。

a) 入射角90度における最大揚圧力と堤頭部端部への側壁設置による揚圧力低減効果

入射角90度の条件で行った実験結果を図-15に示す。縦軸は無次元化した平均波圧強度(w_0 : 水の単位体積重量, H : 入射波高), 横軸は上部工下面と静水面とのクリアランスと入射波高の比である。また、堤頭部端部の側壁なし、マウンド上までの全面側壁を設置、静水面から波高の0.5倍だけ没水させた部分側壁を設置した場合を示している。なお、図中のプロットがゼロとなっているのは、波圧が作用していなかった。その結果、側壁なしの場合、上部工下面に作用する揚圧力は、静水面とのクリアランスがゼロの時に最大となり、入射波高の0.25倍($=0.25w_0H$)であった。この時の回折波高(堤頭部から0.05L)は、入射波高の0.3倍であったことから、上部工下面の揚圧力は、回折波高の半分に相当する静水圧と動的な波圧(ここでは入射波高の0.1倍相当)であると考えられる。一方、堤頭部端部に全面側壁を設けた場合、揚圧力最大値は入射波高の0.1倍($=0.1w_0H$)、部分側壁では入射波高の0.15倍($=0.15w_0H$)にそれぞれ低減できることがわかった。

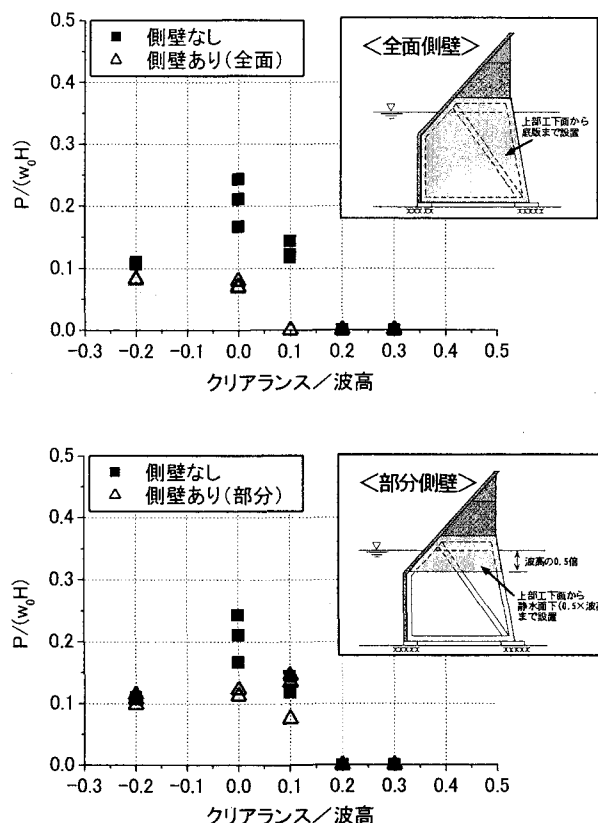


図-15 入射角90度での揚圧力の比較(側壁の有無)

b) 揚圧力の作用位相

回折波により上部工下面に作用する揚圧力は、波力算定式のどの位相に作用するのかを検証した。入射角90度、側壁なしと全面側壁において、実験波高の波が作用した時間(1周期分)の滑動合成波力時系列と上部工下面の平均波圧強度時系列を図-16に示す。滑動合成波力は、模型に設置した波圧計(図-10参照)の波圧合力から求めた。その結果、側壁なしの場合、上部工下面の揚圧力は、滑動合成波力最大時(押波時)に作用していたが、堤頭部端部に全面側壁を設置した場合では、上部工下面への波の進入が阻害されるため、その作用位相は異なっていた。これは、部分側壁の場合も同様であった。

以上のことから、回折波により上部工下面に作用する揚圧力は、滑動合成波力最大時(押波時)に考慮すれば安全側の設計になると考えられる。

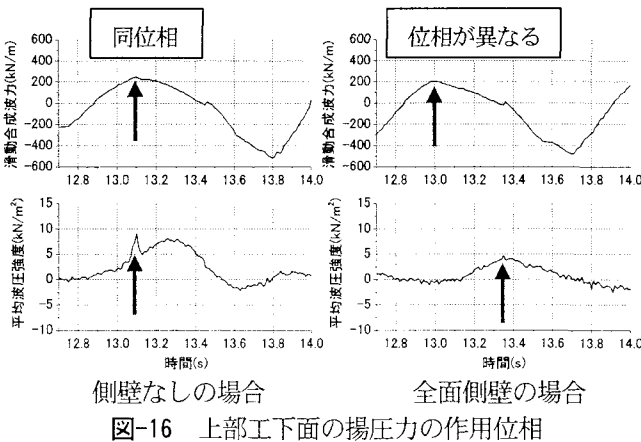


図-16 上部工下面の揚圧力の作用位相

c) 入射角による揚圧力の変化

現地での斜め入射を想定して、入射角による揚圧力の変化を検証した。入射角60度での実験結果を図-17、入射角45度の実験結果を図-18に示す。その結果、入射角60度の場合、側壁なしにおける最大揚圧力は入射波高の0.3倍(=0.3w₀H)、部分側壁では0.25倍(=0.25w₀H)であった。また、入射角45度では、側壁なしでの最大揚圧力は0.4倍(=0.4w₀H)、部分側壁では0.35倍(=0.35w₀H)であることがわかった。これは、斜め入射とすることで回折波高が大きくなるためである。

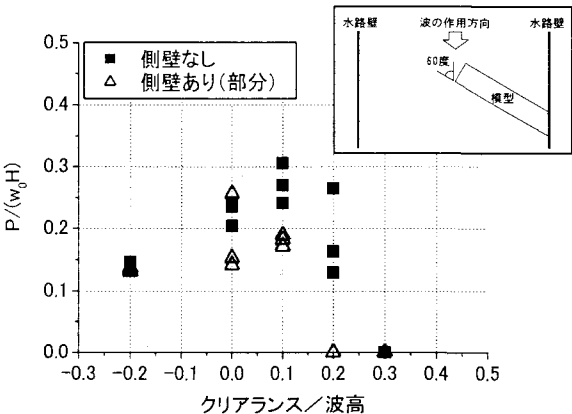


図-17 入射角による揚圧力の変化(入射角60度)

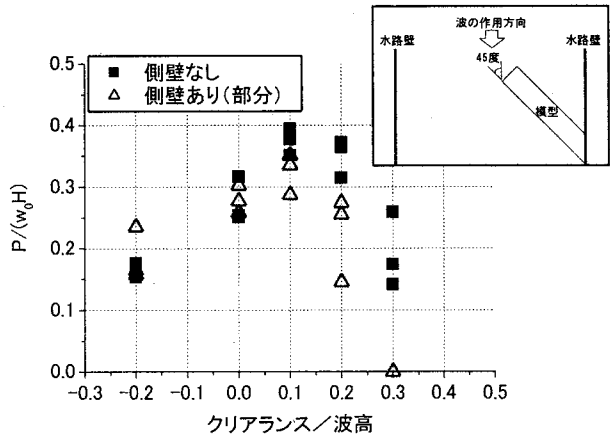


図-18 入射角による揚圧力の変化(入射角45度)

5. 結論

新形式防波堤である設置式鋼製フレーム式防波堤を考案し、その波力算定式や全体安定性を明らかにする目的で水理実験を行った。主要な結論を以下に示す。

- 1) 滑動合成波力最大時(押波時)における防波版の波圧分布は、上部斜面堤に提案されている細山田式が適用可能である。底版は、港外側のみ波圧が作用する。
- 2) 滑動合成波力最小時(引波時)の波圧分布は、今回の実験断面では、波高の1.0倍の水位低下に相当する静水圧分布であった。これは、防波版斜面壁の没水深さが影響しているためであり、斜面壁没水深さを浅くすると水位低下は小さくなると考えられる。また、底版については、港外側のみ作用していた。
- 3) 波圧実験から得られた波力算定式を用いて滑動実験を行った結果、今回の波力算定式の妥当性を確認することができた。
- 4) 回折波により上部工下面に作用する最大揚圧力は、入射角90度の場合、入射波高の0.25倍(=0.25w₀H)であった。また、堤頭部端部に側壁を設置することで、揚圧力を低減できることがわかった。
- 5) 回折波による上部工下面の揚圧力の作用位相は、滑動合成波力最大時に考慮すればよいことがわかった。
- 6) 斜め入射時の上部工の最大揚圧力は、部分側壁を設置した場合、入射角60度では0.25w₀H、入射角45度0.35w₀Hであった。

参考文献

- 1) 高橋重雄：新構造防波堤とその設計，第33回水工学に関する夏期研修会講義集，B-5-1～B-5-20，1997。
- 2) 細山田得三，高橋重雄，谷本勝利：離島港湾における上部斜面堤の適用性について，海岸工学論文集，第41巻，pp.706-710，1994。