

国立研究開発法人海上・港湾・航空技術研究所

# 港湾空港技術研究所 報告

---

REPORT OF  
THE PORT AND AIRPORT RESEARCH  
INSTITUTE

---

Vol.60 No.1 June 2021

NAGASE, YOKOSUKA, JAPAN

NATIONAL INSTITUTE OF MARITIME,  
PORT AND AVIATION TECHNOLOGY

## 総目次

1. 波の遡上域における海浜地形変化に及ぼす潮汐変動の影響に関する検討  
伴野 雅之・栗山 善昭
2. 2019年台風15号による横浜港に襲来したうねり性の波浪  
田村 仁・川口 浩二・岩本 匠夢・藤木 峻
3. 富山湾・寄り回り波の力学機構  
田村 仁・川口 浩二・藤木 峻
4. 仮設被覆工の耐波安定性について  
鈴木 高二朗・久保田 博貴・田中 敦
5. パラペット後退型護岸に働く波圧に関する検討  
鈴木 高二朗・久保田 博貴・鶴田 修己
6. プレート境界断層デコルマ帯におけるスロースリップ発生メカニズムに関する研究  
杉山 友理・橋 伸也・森川 嘉之
7. MPM-剛体シミュレーションのための最小二乗法を用いた摩擦接触アルゴリズムの開発と開端杭の地盤への貫入挙動への適用  
中村 圭太・松村 聡・水谷 崇亮

## パラペット後退型護岸に働く波圧に関する検討

鈴木 高二朗\*・久保田 博貴\*\*・鶴田 修己\*\*\*

### 要 旨

令和元年房総半島台風（台風 15 号）は最低中心気圧 955hPa と非常に強い勢力を保持して関東地方に接近し、9 月 9 日に三浦半島上陸後、東京湾を縦断した。本台風により、横浜市中央区の本牧ふ頭、金沢区の福浦地区と幸浦地区で護岸が倒壊し、越波による浸水被害が発生した。

被災護岸はケーソンに対してパラペットが陸側に設置された、いわゆるパラペット後退型護岸だった。パラペット後退型護岸は越波量を抑制する効果が確認されているものの、パラペットの後退量が小さい場合には大きな波力がパラペットに作用することが指摘されていた（合田・岸良, 1976；高橋ら, 1992）。被災した護岸でも大きな波力が作用した可能性がある。そこで本研究では、福浦地区の護岸を対象として台風襲来時を想定した大規模水理模型実験と数値シミュレーションを実施し、令和元年房総半島台風による福浦地区の護岸に作用した波力と越波量について検討するとともに、パラペット後退型護岸におけるパラペットの後退量や水深と波力及び越波量の関係性を明らかにすることとした。その結果、以下のことが明らかとなった。

1) 後退パラペットに働く波力は  $1.5 \sim 2.5 \rho g H$ 、最大値で  $3 \sim 4 \rho g H$  であり、後退パラペットでの越波の衝突状況、波圧の発生状況は高橋ら (1992) と同様の結果であった。2) 数値計算 (CADMAS-SURF/2D) による計算結果は、ばらつきがあるものの実験とほぼ合致していた。3) 水位が水叩きの天端に近い場合や、より水位が高い場合には高橋ら (1992) よりも波圧が大きくなる傾向があり、高橋らの式を 1.9 倍する修正係数を提案した。4) 後退距離が大きくなると波力が徐々に低減することが明らかとなった。

**キーワード**：後退パラペット，衝撃波圧，越波，令和元年房総半島台風，大規模実験

\* 耐波研究グループ長

\*\* 耐波研究グループ 依頼研修員

\*\*\* 海洋研究領域 主任研究官

〒239-0826 神奈川県横須賀市長瀬3-1-1 国立研究開発法人海上・港湾・航空技術研究所港湾空港技術研究所

電話：046-844-5043 Fax：046-842-3746 E-mail：suzuki\_k@p.mpat.go.jp

## Study on Wave Pressure acting on Receding Parapet type Seawall

**Kojiro SUZUKI\***  
**Hiroki KUBOTA\*\***  
**Naoki TSURUTA\*\*\***

### Synopsis

In 2019, a typhoon (Typhoon No. 15) with a minimum central pressure of 955 hPa approached the Kanto region, made landfall on the Miura Peninsula on September 9, and traversed Tokyo Bay. The typhoon caused seawalls to collapse at Honmoku D-Jetty, and at Fukuura and Sachiura Districts in Yokohama City, causing inundation damage due to wave overtopping. The damaged seawall was a so-called parapet-receding type seawall in which the parapet was installed on the landward side of the caisson. Although the receding parapet type seawall has been confirmed to be effective in reducing wave overtopping, it has been pointed out that a large wave force acts on the parapet when the receding distance of parapet is small (Goda and Kishira, 1976; Takahashi et al., 1992). There is a possibility that large wave forces also acted on the damaged seawall in Yokohama. In this study, large-scale hydraulic model experiments and numerical simulations were carried out on a seawall in Fukuura district, assuming a typhoon hit the seawall, to investigate the wave force and overtopping volume acting on the seawall in Fukuura district. In this study, the relationship between wave force and wave overtopping volume and the distance of parapet setback, water depth and wave force on the seawall with parapet setback were investigated. As a result, followings were clarified.

(1) The wave force acting on the receding parapet was 1.5 to 2.5  $\rho gH$ , and the maximum value was 3 to 4  $\rho gH$ . The collision of overtopping waves at the receding parapet and the generation of wave pressure were similar to Takahashi et al (1992). (2) The numerical results (CADMAS-SURF/2D) were in good agreement with the experimental results. (3) When the water level is close to the top of the caisson or higher, the wave pressure tends to be larger than Takahashi et al. (1992), and a correction factor of 1.9 was proposed. (4) The wave force gradually decreases as the setback distance of the parapet increases.

**Key Words:** Receding parapet, Impulsive Wave Pressure, Wave Overtopping, Typhoon Boso Peninsula in 2019, Large Scale Experiment

---

\* Head of Maritime Structures Group  
\*\* Visiting Researcher of Maritime Structures Group  
\*\*\* Senior Researcher, Coastal and Ocean Engineering Department  
3-1-1, Nagase, Yokosuka, Kanagawa 239-0826, Japan Port and Airport Research Institute  
Phone : +81-46-844-5059 Fax : +81-46-844-0255 E-mail : suzuki\_k@p.mpat.go.jp

## 目 次

要 旨 .....	3
1. 序 論 .....	7
2. 後退パラペット構造に関する既往の知見.....	8
3. 水理模型実験 .....	9
3.1 実験条件 .....	9
3.2 実験結果 .....	10
4. 数値計算による再現 .....	13
4.1 数値計算の概要 .....	13
4.2 数値シミュレーションの再現性 .....	16
4.3 福浦護岸におけるパラペット作用波圧の特徴 .....	17
5. 実験および数値計算と高橋式（1992）との比較 .....	19
6. パラペットの後退距離と波圧 .....	20
7. 福浦護岸における越波量の推定 .....	21
8. 結 論 .....	22
謝辞 .....	22
参考文献 .....	22

## 1. 序 論

令和元年房総半島台風（台風15号）は最低中心気圧955hPaと非常に強い勢力を保有して関東地方に接近し、9月9日に三浦半島上陸後、東京湾を縦断した（図-1.1）。本台風により、横浜市中心区の本牧ふ頭、金沢区の福浦地区と幸浦地区で護岸が倒壊し、越波による浸水被害が発生した（図-1.2～図-1.5）。これらの地域では、東京湾北東から発達した風波と東京湾口から伝達したうねりが合成し、約3.0mの高波が襲来したと推定されている<sup>1)</sup>。台風襲来時の潮位は概ね朔望平均満潮位程度であり、本牧ふ頭及び福浦・幸浦地区では前面水深が大きく、海底勾配が緩やかであることを踏まえると、一般的な砕波の条件とは合致せず、衝撃砕波力が護岸の倒壊要因では無いことが推測される。

被災護岸の構造に着目すると、図-1.6、図-1.7に示すとおりいずれもケーソンに対してパラペットが陸側に設置された、いわゆるパラペット後退型護岸だった。パラペット後退型護岸については合田・岸良（1976）<sup>2)</sup>が越波量を抑制する効果を確認し、パラペットの後退量に応じた換算天端高係数を示している。本台風においてもパラペットが倒壊しなければパラペットと護岸法線が一致した断面（以後、“前面パラペット”と呼称）よりも越波量が低減されたものと想定される。一方、パラペット後退型護岸では波力が増大することが指摘されており、被災した護岸についても大きな波力が作用した可能性がある。

そこで本研究では、福浦地区の護岸を対象として台風襲来時を想定した大規模水理模型実験と数値シミュレーションを実施し、令和元年房総半島台風による福浦地区の護岸に作用した波力と越波量を明らかにすることとした。また、水位およびパラペットの後退量と波力や越波量の関係性を明らかにすることを目的とした。

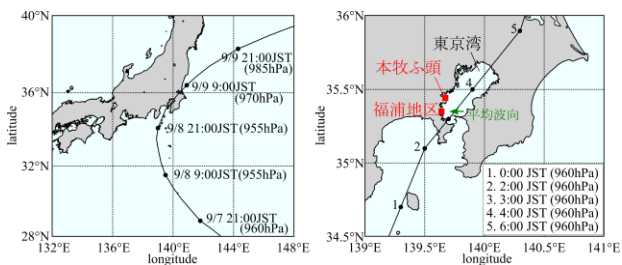


図-1.1 2019年台風15号の経路と中心気圧



図-1.2 福浦地区護岸パラペットの倒壊状況



図-1.3 本牧D突堤の護岸パラペットの破損状況



図-1.4 本牧D突堤の護岸パラペットの倒壊状況



図-1.5 福浦の護岸パラペット（写真右）の倒壊と浸水した背後地（写真左）の状況

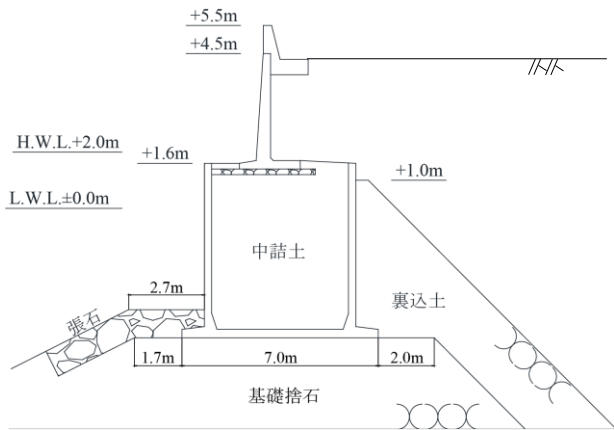


図-1.6 福浦地区の護岸断面図

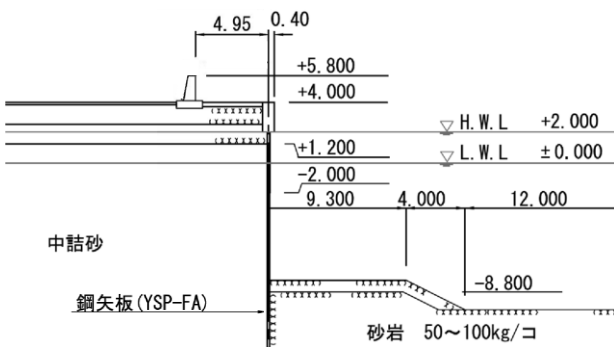


図-1.7 本牧D突堤の護岸断面図

## 2. 後退パラペット構造に関する既往の知見

後退パラペット護岸の越波に関しては、図-2.1に示すように合田・岸良(1976)<sup>2)</sup>が後退距離の増加とともに越波量が小さくなり、換算天端高係数を小さくすることができることを示している。最近では、平山ら(2018)<sup>3)</sup>がパラペット高さその後退距離による越波流量の変化とその推定法について検討している。これらの既往研究に示されるように越波量を低く抑えることができるため、後退パラペットを利用した護岸も数多くみられる。

一方、後退パラペットに働く波力についても過去から検討例がある。伊藤ら(1966)<sup>4)</sup>は水理模型実験を行った結果として、防波堤の場合、パラペットを後退させると、パラペットに波力が集中し、越波が増大するほか、前面洗掘の恐れがあるため、パラペットを後方へ設置するのは有効な方策とは言い難いと述べている。また、前述の合田・岸良(1976)<sup>2)</sup>も水叩きの天端が低い時に後退距離が不十分であると波力が異常に増大することがあると考えられるので、注意が肝要であると述べている。このように後退パラペットは、越波量を低減できるものの、パラペットに働く波力が増大するという問題を抱えている。

高橋らは(1992)<sup>5)</sup>は高速カメラを用いた大型実験により、越波現象を詳細に調べ、後退パラペットに働く波力の算定式を提案した。図-2.2は高速カメラによって捉えられた越波状況である。ケーソン前面では波が重複的になっており、水塊がケーソン壁を鉛直方向に移動することで、いったんケーソン前面で波が盛り上がり、その後、盛り上がった水塊がケーソン上を水平方向に走っていくのが分かる。高橋ら(1992)はこの越波現象をモデル化し、このモデルを後退パラペットに適用することで式(2.1)、(2.2)に示す波力補正係数を提案した。図-2.3は変数を説明する概要図である。この算定式は合田式による波圧 $P_G$ を基に容易に算定することが可能である。

$$P = \alpha_p \times P_G \quad (2.1)$$

$$\alpha_p = \begin{cases} 1.0 + 0.5 \times (x/l_{1G}) & : x < l_{1G} \\ 1.5 & : x > l_{1G} \end{cases} \quad (2.2)$$

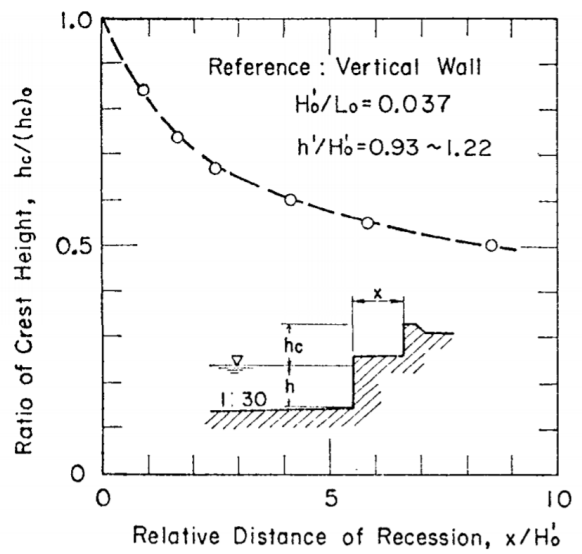


図-2.1 後退距離と換算天端高係数 (合田ら, 1976)



図-2.2 高速カメラで撮影された越波 (高橋ら, 1992)

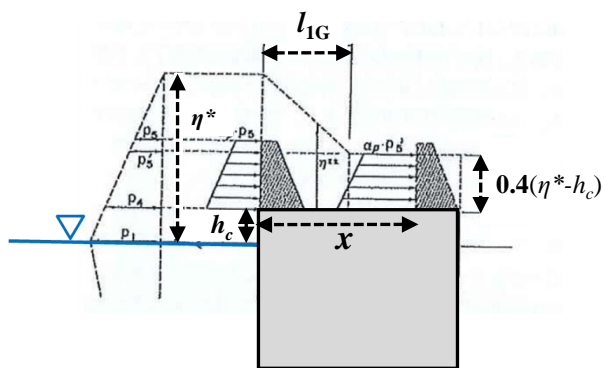


図-2.3 後退パラペットに働く波圧算定式の模式図  
(高橋ら, 1992)

### 3. 水理模型実験

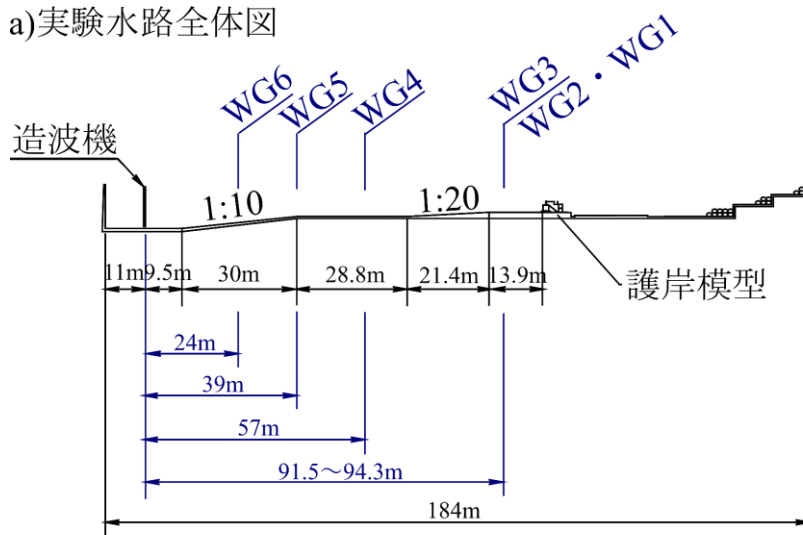
#### 3.1 実験条件

##### (1) 実験水路と実験模型

水理模型実験を184m, 最大深さ11m, 奥行き3.5mの大規模波動地盤総合水路にて実施した. 図-3.1に実験水路全体図及び護岸模型周辺拡大図, 波高計・波圧計の設置位置を示す. 水路床は三段階の水平床が1/10及び1/20勾配で繋がっており, 模型を設置する観測窓付近では水平となっている.

護岸模型は福浦地区における護岸の1/4スケールとした. まず, 厚さ0.3mのマウンドを割栗石(中央粒径0.2m)で作成した後, ケーソン模型(幅1.5m, 高さ1.5mのコンクリート方塊)を設置した. その後, 裏込石として割栗

#### a) 実験水路全体図



#### b) 護岸模型周辺図

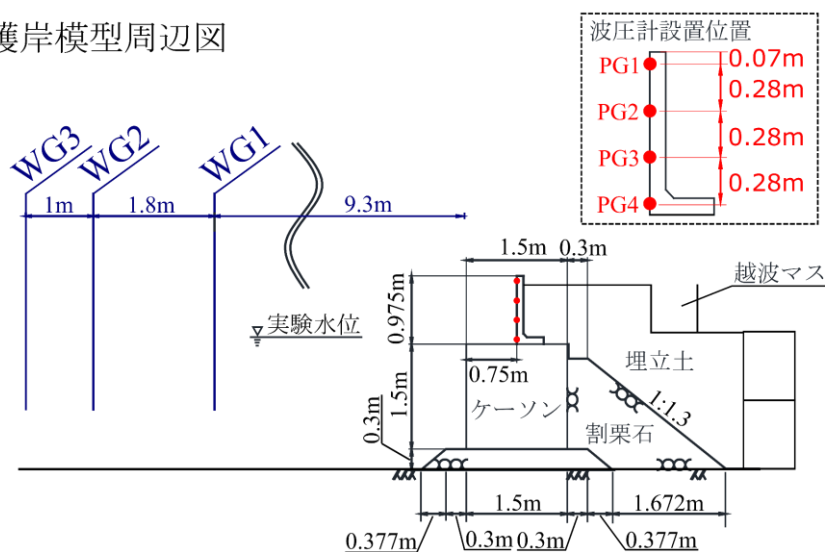


図-3.1 実験水路と護岸模型の断面図



石を設置した。

パラペット模型はケーソンから取り外し可能な構造とすることで前面パラペットと後退型パラペットを再現できるようにした。パラペットは波力によって滑動・転倒しないようにボルトでケーソンに固結した。なお、水路の観測窓から波の作用状況が見えるようにするため、観測窓と模型の位置を考慮しマウンドの高さを現地よりも低くして実験した。裏込石およびケーソンの上には埋立砂として中央粒径0.2mmのフラタリーサンドを設置した。

また、越波量を計測するため、砂地盤の背後に越波マスを設置し、幅0.2mの導水管を設置して越波水塊を越波マスまで導いた。計測器として波高計を6本、パラペットに波圧計を4個設置し、サンプリング周波数を1kHzとして計測した。

(2) 水位と波浪の条件

水位は現地の朔望平均満潮位と同じ高さを基本水位（護岸模型下部の水路床から1.9m）とした。この水位はケーソン模型の天端から0.1m上側に位置する。水位による波圧の変化を調べるため、このほか1.4~2.2mの水位を試した。なお、水位1.8mがケーソンの天端高（波叩き部の高さ）に相当する。作用させた波は吸収制御を伴う規則波であり、周期は2.8sとした。波高は造波器位置での設定で0.5~0.9mまでを0.1mピッチで変更した。

### 3.2 実験結果

(1) 後退パラペットに働く波圧（後退距離0.75m）

図-3.2に造波波高 $H=0.9\text{m}$ の規則波を対象とした実験の

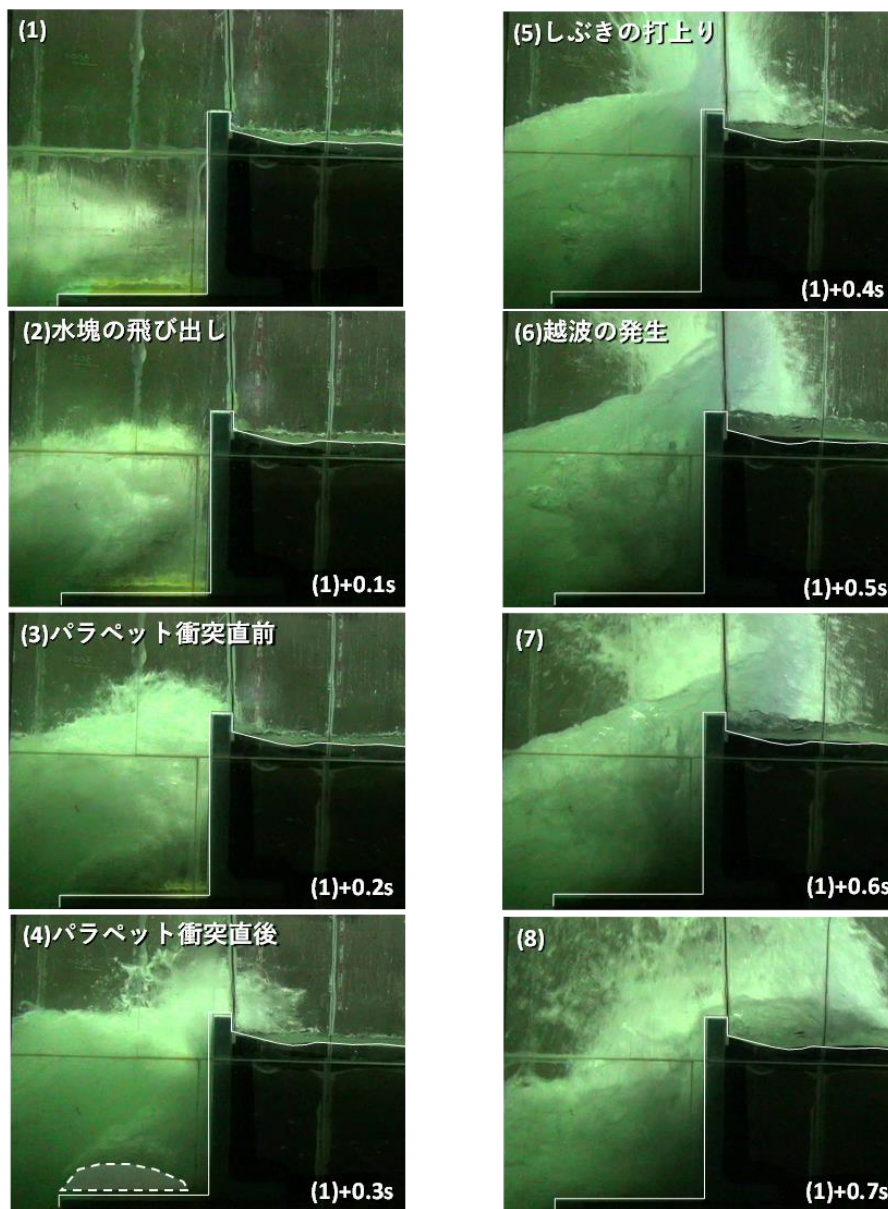


図-3.2 波の作用状況（パラペットの後退距離 0.75m, 波高 0.9m, 周期 2.8s）

特定の1波の側面写真を示す。写真はそれぞれ0.1秒毎に示している。ケーソン模型に到達した波はケーソン模型の天端から勢い良く飛び出し、大きな水塊となってパラペットに衝突する状況が見られる。実験の最中には、水塊がパラペットに衝突する度に非常に大きな衝撃音が聞こえていた。パラペットに衝突した水塊は飛沫となって高く打ち上がった後に模型背後に流れ込んでいる。また、水塊がパラペットに衝突した後、水塊とケーソン天端の間に形成されていた空間に水が流れ込み、時計回りの渦が形成される状況も確認できた。

図-3.3は造波波高 $H=0.9\text{m}$ の波圧の時系列である。計測位置が最も低いPG4では全ての波に対して比較的大きな波圧が長時間作用している一方、計測位置が高くなるにつれて波毎に計測される波圧の継続時間は短くなっている。いずれの波圧計についても波圧作用直後に瞬間的に大きな波圧が検出されるケースが見られる。これは、ケーソン法面から飛び出した水塊の衝突により瞬間的に非常に大きな衝撃波力が作用した状況だと考えられる。

図-3.4は造波板からの再反射波が到達する前で十分に発達した14波を対象とした造波波高毎のピーク波圧の箱

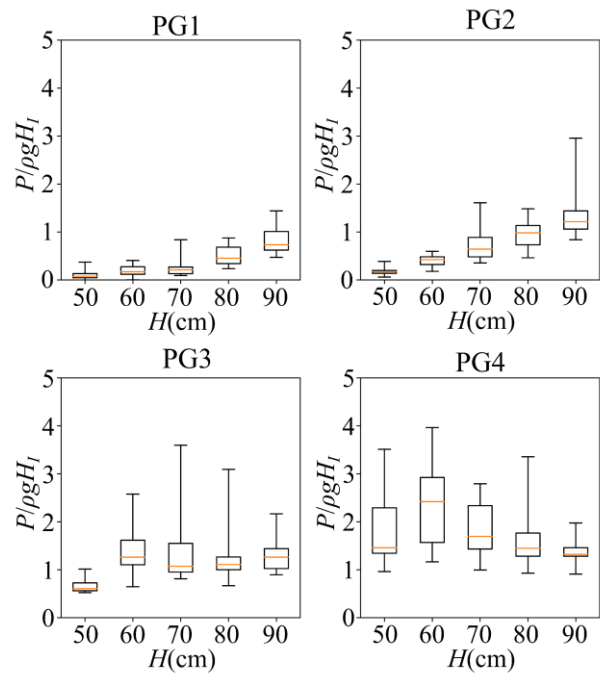


図-3.4 ピーク波圧の箱ひげ図

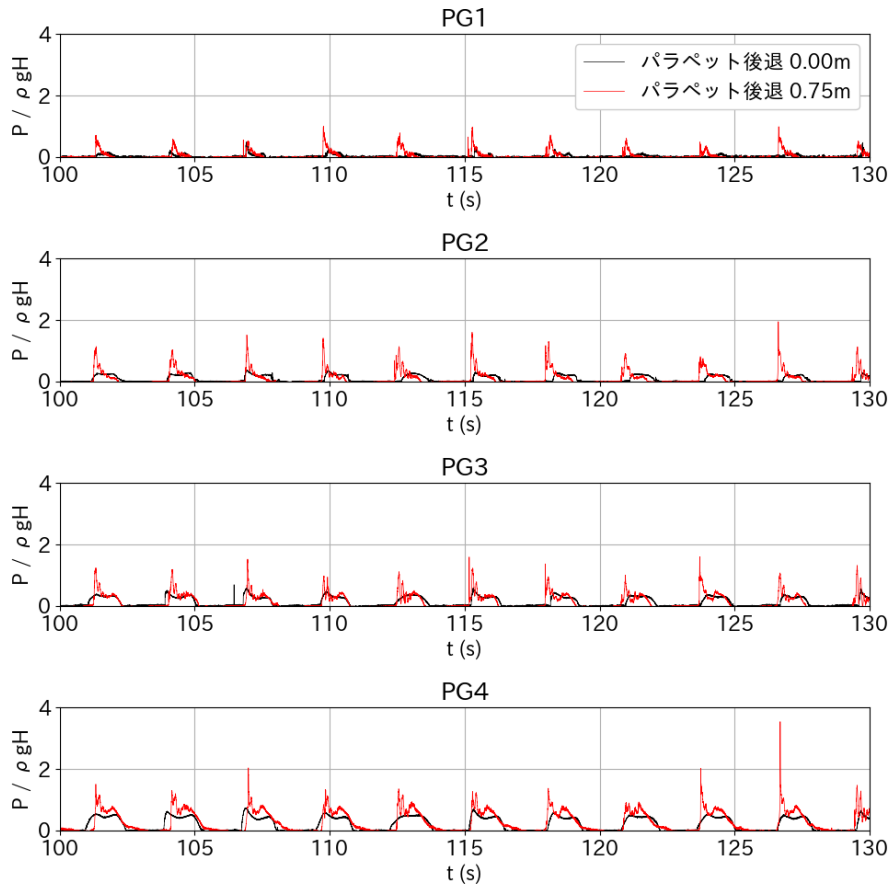


図-3.3 波圧の時系列波形 (パラペットの後退距離 0.75m, 波高 0.9m, 周期 2.8s)

ひげ図である。縦軸は、模型前面の2本の波高計データ(WG1, WG2)を用いて合田の方法9)により入射波成分HIの波高による  $\rho gHI$  で除した無次元波圧を示している。PG3とPG4では無次元波圧が4程度に到達するケースが見られる一方、 $H=0.9m$ では $H \leq 0.8m$ に比べて無次元波圧はむしろ小さくなっている。

PG2では $H=0.6m$ から無次元波圧の中央値、 $H=0.7m$ から最大値は徐々に大きくなっており、PG1では $H=0.8m$ から無次元波圧の中央値、 $H=0.7m$ から最大値が大きくなっていく。台風15号により福浦地区で発生したと想定される最高波高(約5.5m)を実験スケールに変換すると $H=140cm$ 程度であるため、PG1とPG2はより大きな波圧が現れる可能性がある。

(2) 後退パラペットに働く波圧(後退距離1.3m)

図-3.5は後退距離が1.3mの場合の波の作用状況であり、造波波高 $H=0.9m$ 、周期2.8sの規則波を対象とした実験の特定の1波の側面写真である。

位相2でケーソンから飛び出した水塊が弧を描くようにして水叩き部に衝突し(位相3)、その後、位相4でパラペットに衝突している。衝突後、水塊が高く打ちあがった後、一部の水塊がパラペット背後に越波している。

後退距離0.75m(図-3.2)と比較すると、水塊がパラペットに衝突する前にいったん水叩き部に当たり、ケーソン上部を走った後にパラペットに当たるという特徴がある。また、パラペットの高さは同じではあるものの、後退距離が1.3mの場合には水塊が鉛直上向きに飛び上がるこ

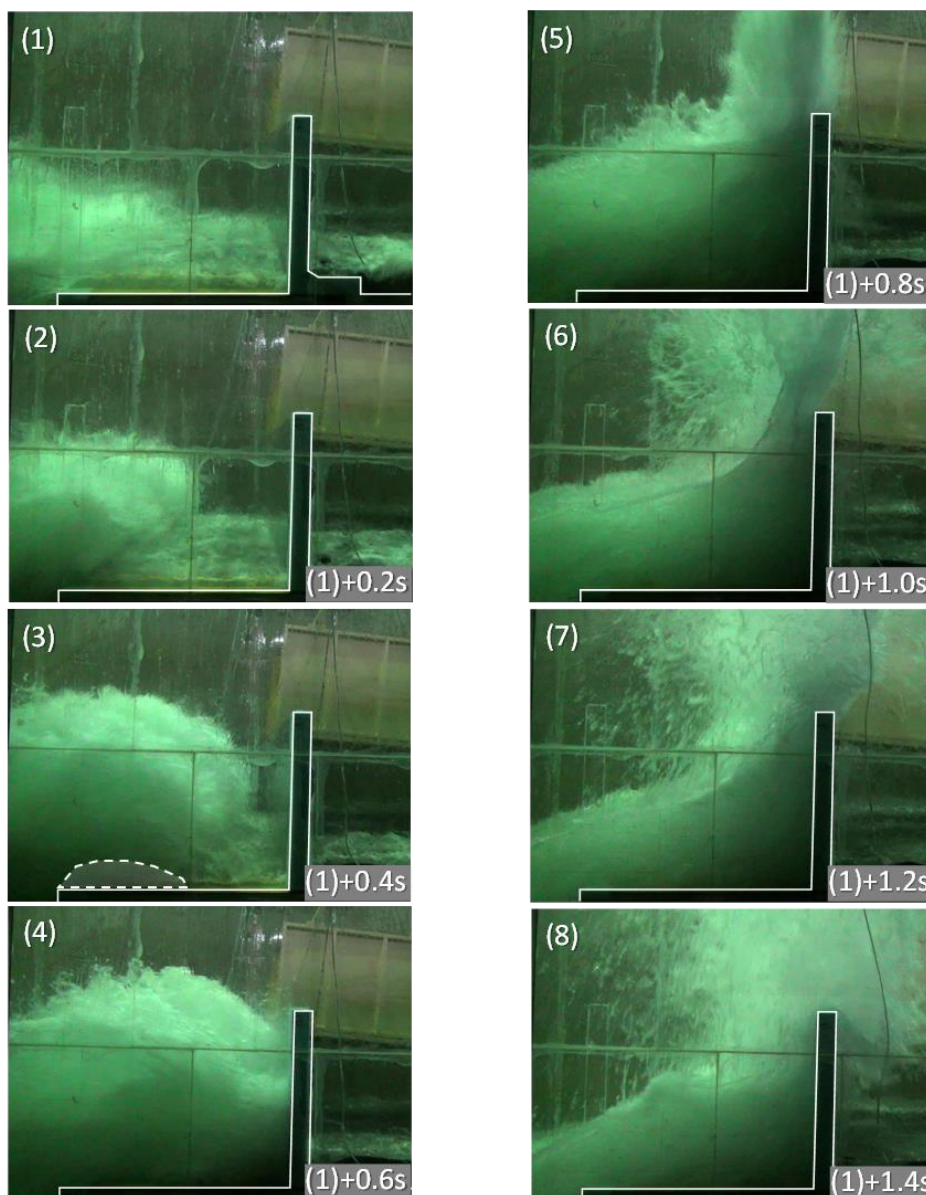


図-3.5 波圧の時系列波形 (パラペットの後退距離 0.75m, 波高 0.9m, 周期 2.8s)

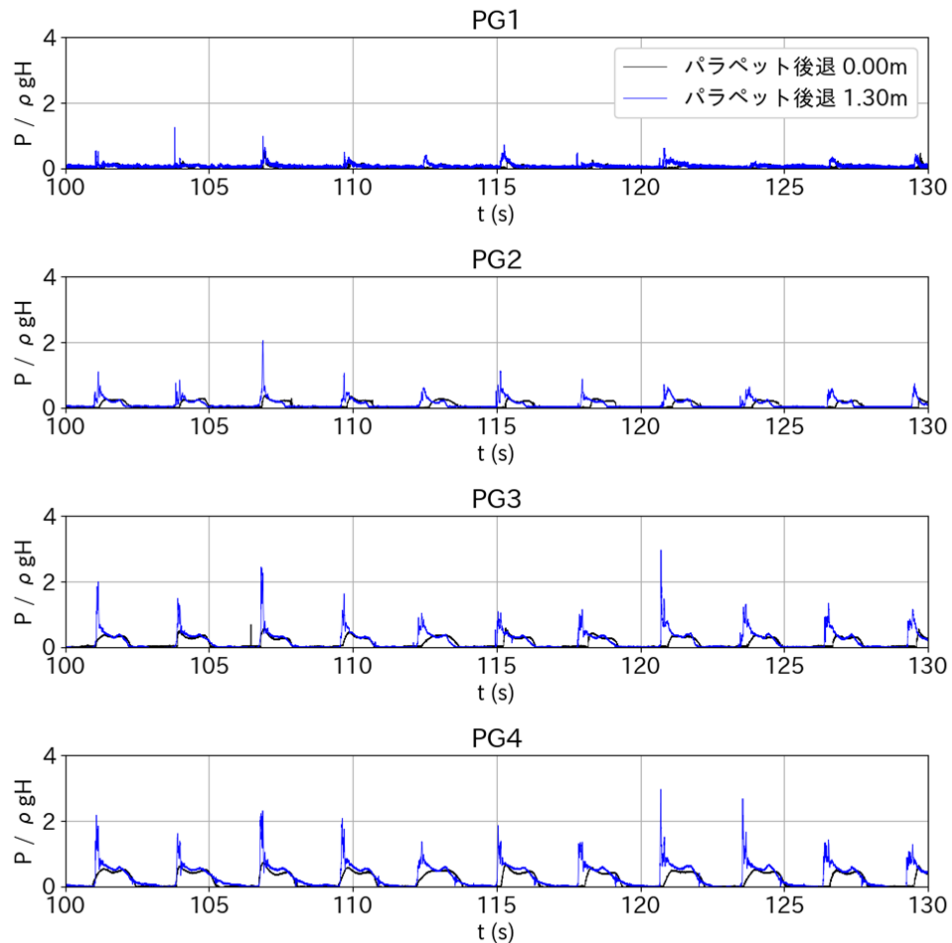


図-3.6 波圧の時系列波形 (パラペットの後退距離 1.3m, 波高 0.9m, 周期 2.8s)

で、堤体背後への越波量が減少していることが分かる。

図-3.6は後退距離が1.3mの場合の波圧の時系列波形である。同じ波浪条件で実施した図-3.3と比較すると、後退距離が1.3mの場合には、パラペット上部のPG1、PG2の波圧が後退距離0.75mの場合よりも小さくなっているのに対し、パラペット下部のPG3、PG4は逆に大きくなり、 $2\rho gH$ を超える波圧が発生しているのが分かる。

高橋ら(1992)が示すようにケーソンを乗り越えた直後の越波は水位が高いのに対し、乗り越えた後、水たたき部を越波水塊が進行すると水塊の水位が低くなり天端の上部にはあまり強い波圧が発生しないことを示している。一方で、水位が低下する際に位置エネルギーが運動エネルギーに変換されることで流速が速くなり、パラペットの下部には強い波力が作用しているものと考えられる。

#### 4. 数値計算による再現

##### 4.1 数値計算の概要

###### (1) 数値波動水路

使用する数値波動水路は、物理量をスタッガード格子で配置し、流体の運動方程式をSMAC法(Simplified Marker And Cell method)に基づいて離散化し、水表面をVOF法(Volume Of Fluid method)でモデル化したCADMAS-SURF(Super Roller Flume for Computer Aided Design of Maritime Structure)を用いた。CADMAS-SURFでは、規則波・不規則波の両方が造波可能であり、セルの占有率を考慮したポーラスモデルが実装されている。CADMAS-SURFにおける波高伝播や越波・波圧等の基礎的な検討を実施した事例は数多く、例えば有光ら<sup>6)</sup>は越波排水路を有する低天端護岸に対して、川崎ら<sup>7)</sup>はリーフ地形における波浪変形と越波に対して越波量の推算精度の検討を実施しており、有川・下迫<sup>8)</sup>は衝撃砕波力に対する再現性を確認している。



## (2) 基礎方程式

CADMAS-SURF の基礎方程式はポーラスモデルを考慮した連続式と Navier-Stokes 方程式であり、式(1)、式(2)で表される。

$$\frac{\partial \gamma_x u}{\partial x} + \frac{\partial \gamma_z w}{\partial z} = S_p \quad (1)$$

$$\lambda_v \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial \lambda_x u u}{\partial x} + \frac{\partial \lambda_z w u}{\partial z} = -\frac{\gamma_v \partial p}{\rho \partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left\{ \gamma_x \nu_e \left( 2 \frac{\partial u}{\partial x} \right) \right\} \quad (2)$$

$$+ \frac{\partial}{\partial z} \left\{ \gamma_z \nu_e \left( \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right) \right\} - D_x u + S_u - R_x$$

$$\lambda_v \frac{\partial w}{\partial t} = \frac{\partial \lambda_x u w}{\partial x} + \frac{\partial \lambda_z w w}{\partial z} = -\frac{\gamma_v \partial p}{\rho \partial z}$$

$$+ \frac{\partial}{\partial x} \left\{ \gamma_x \nu_e \left( \frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z} \right) \right\} \quad (3)$$

$$+ \frac{\partial}{\partial z} \left\{ \gamma_z \nu_e \left( 2 \frac{\partial w}{\partial z} \right) \right\} - D_z w + S_w - R_z - \gamma_v g$$

ここに、 $t$ ：時間、 $u$ 、 $w$ ：流速の水平成分、鉛直成分、 $\rho$ ：密度、 $p$ ：圧力、 $\nu_e$ ：分子動粘性係数と渦動粘性係数の和、 $g$ ：重力加速度、 $\gamma_v$ ：空隙率、 $\gamma_x$ 、 $\gamma_z$ ：水平方向、鉛直方向の面積透過率、 $D_x$ 、 $D_z$ ：エネルギー減衰帯のための係数、 $S_p$ 、 $S_u$ 、 $S_w$ ：造波ソースのためのソース項、 $R_x$ 、 $R_z$ ：ポーラス体からの抵抗力である。 $\lambda_v$ 、 $\lambda_x$ 、 $\lambda_z$ 及び $R_x$ 、 $R_z$ は次のとおりに表される。

$$\lambda_v = \gamma_v + (1 - \gamma_v) C_M \quad (4)$$

$$\lambda_x = \gamma_x + (1 - \gamma_x) C_M \quad (5)$$

$$\lambda_z = \gamma_z + (1 - \gamma_z) C_M \quad (6)$$

$$R_x = \frac{1}{2} \frac{C_D}{\Delta x} (1 - \gamma_x) u \sqrt{u^2 + w^2} \quad (7)$$

$$R_z = \frac{1}{2} \frac{C_D}{\Delta z} (1 - \gamma_z) w \sqrt{u^2 + w^2} \quad (8)$$

ここに、 $C_M$ ：慣性力係数、 $C_D$ ：抵抗係数、 $\Delta x$ 、 $\Delta y$ ：水平方向、鉛直方向の格子間隔である。本研究における慣

性力係数  $C_M$  と抵抗係数  $C_D$  は、過去の検討成果より  $C_M=1.2$ 、 $C_D=1.0$  と設定した。なお、本研究では乱流モデルは使用しないものとした。

## (3) 水表面のモデル化

前述のとおり、水表面のモデル化にはVOF法が採用されており、VOF関数 $F$ の輸送方程式は次のとおりに表される。

$$\gamma_v \frac{\partial F}{\partial t} + \frac{\partial \gamma_x u F}{\partial x} + \frac{\partial \gamma_z w F}{\partial z} = S_F \quad (9)$$

ここに、 $S_F$ ：造波ソースのためのソース項である。水表面セルの方向の決定にはNASA-VOF3D<sup>9)</sup>の方法、VOF関数 $F$ の移流項の離散化にはDonor-Acceptor法が用いられる。

## (4) 造波モデル

規則波の造波は、ストークス波第5次近似解から求めた水位 $\eta_0$ 及び流速 $U_0(z,t)$ を用いて、次のとおりにスケーリングを実施し、造波境界に与える。

$$U(z,t) = U_0(z^*,t) \cdot \left( \frac{\eta_0 + h}{\eta_s + h} \right) \quad (10)$$

$$z^* = \frac{\eta_0 + h}{\eta_s + h} (z + h) - h \quad (11)$$

ここに、 $\eta_s$ ：計算上の水位、 $h$ ：初期水深である。一方、不規則波については特定の $x$ 座標( $x_s$ )のセル中心に造波ソースを設定し、次式で造波させる。

$$S_p = q(z,t) \quad (12)$$

$$S_u = uq(z,t) \quad (13)$$

$$S_w = wq(z,t) + \frac{v}{3} \frac{\partial q(z,t)}{\partial z} \quad (14)$$

$$S_F = Fq(z,t) \quad (15)$$

$$q(z,t) = 2 \frac{U(x,t)}{\Delta x_s} \quad (16)$$

ここに、 $\Delta x_s$ ： $x$ 座標 $x_s$ における格子間隔である。

## (5) エネルギー減衰帯

エネルギー減衰帯は流速に比例する減衰項として、運動方程式中に現れる $D_x$ と $D_z$ は以下のとおりに表される。

$$D_x = \theta_x \sqrt{\frac{g}{h}} (N+1) \left( \frac{x-x_0}{l} \right)^N \quad (17)$$

$$D_z = \theta_z \sqrt{\frac{g}{h}} (N+1) \left( \frac{x-x_0}{l} \right)^N \quad (18)$$

ここに、 $l$  : エネルギー減衰帯の延長,  $x_0$  : エネルギー減衰帯の開始位置,  $N$  : 分布関数の次数,  $\theta_x, \theta_y$  : 無次元の係数である。本研究では、 $N=2, \theta_x=\theta_y=0.6$  と設定した。

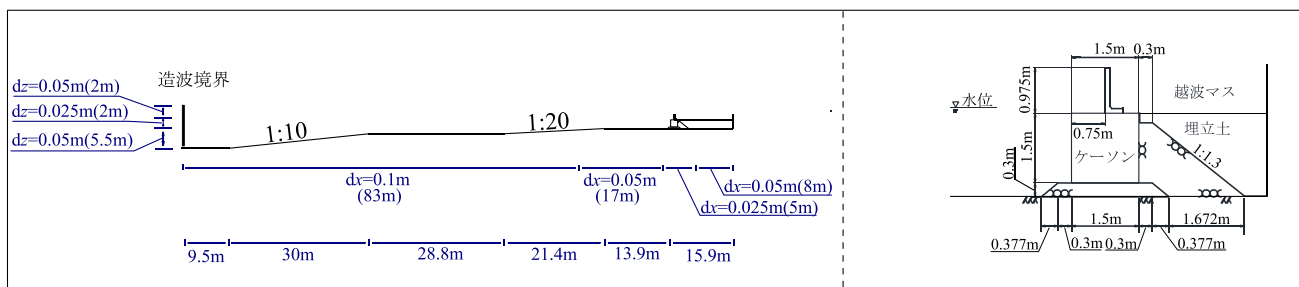
(6) 数値シミュレーション領域

図-4.1 に本研究における数値シミュレーションの領域を示す。数値シミュレーションはその目的に応じて三種類の領域で実施した。

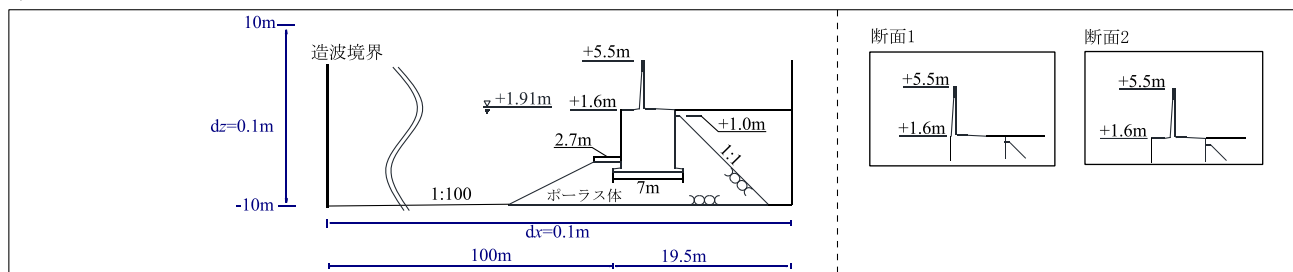
領域 a) は数値シミュレーションの再現性を確認するために実施したものであり、水路の延長や勾配及び模型は実験と同様である。造波する波の種類は規則波とし、領域の左端を造波境界として造波した。また、格子間隔は模型周辺で  $\Delta x = \Delta y = 0.025\text{m}$  とし、模型から離れるにしたがって大きな格子間隔を設定した。

領域 b), c) はいずれも福浦地区の護岸を現地縮尺のまま計算したものである。格子間隔によって計算精度は変化すると考えられるが、実験の縮尺が福浦地区の護岸の 1/4 スケールとしていることから、模型付近の格子間隔を領域 a) の 4 倍である  $\Delta x = \Delta y = 0.10\text{m}$  と設定した。領域 b) は規則波を対象とするため、領域の左端に造波境界を設けた。領域 c) は不規則波を対象とするため造波ソースを用いて造波し、領域の左端に 100m のエネルギー減衰帯を設けて反射波が発生しないように設定した。領域 b) と領域 c) のケーソン法面と造波位置の距離はいずれも 100m である。護岸前面水深は、海図から福浦地区の護岸前面水深が小さいエリアを参照して  $-7.17\text{m}$  と設定し、海底勾配は 1/100 の一定とした。

a) 計算領域1 (規則波)



b) 計算領域2 (規則波)



c) 計算領域3 (不規則波)

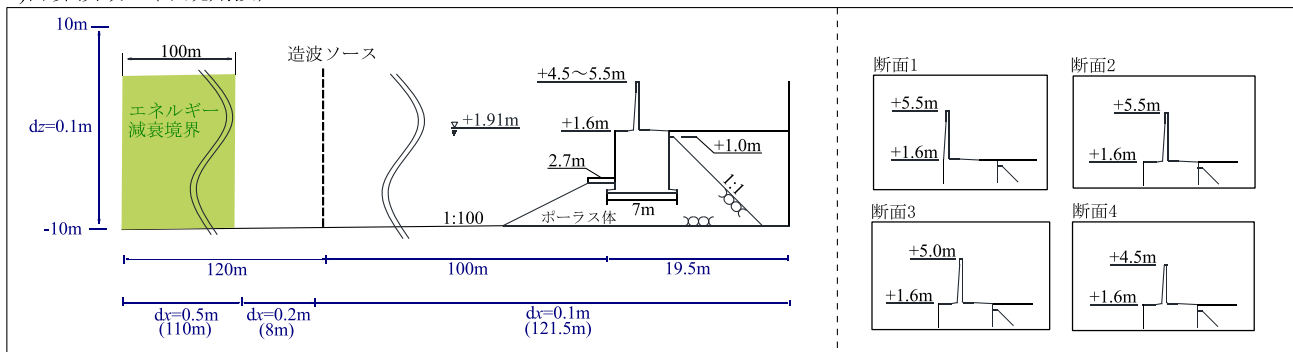


図-4.1 計算領域 (領域 1 : 実験スケール, 計算検証用, 領域 2 : 現地スケール, 規則波計算用, 領域 3 : 現地スケール, 不規則波計算用)

(6) 数値計算の条件

表-4.1 に数値計算の計算条件を示す。これらの条件は図-4.1 のすべての領域で同様である。計算時間刻みはクーラン数の上限値を 0.2 とした CFL 条件を満たすように設定し、移流項の離散化には中央差分 8 割と風上差分 2 割を足し合わせた VP-DONOR 0.2 と設定した。

気泡及び飛沫の移流については Timer-Door 法を用い、圧力のスパイクノイズを抑制するために 2 回のサブグループを設定した。造波する波高及び周期は、各計算領域で様々なケースを設定したため、検討項目毎に後述する。

4.2 数値シミュレーションの再現性

直立壁に対する作用波圧の CADMAS-SURF の再現性についてはある程度検討事例が存在し、その再現性が確認されているものの、後退型パラペットに対する波圧の検討事例はほとんどない。したがって、前述の実験を模擬する数値シミュレーションを実施し、その再現性を確認した。計算領域は図-4.1(a) であり、対象とする実験は造波波高  $H=60\text{cm}$  のケースとした。

表-4.1 計算条件

項目	設定
計算時間刻み	Auto (クーラン数 0.2)
水の密度	1000 kg/m <sup>3</sup>
水の動粘性係数	1.0×10 <sup>-6</sup> m <sup>2</sup> /s
移流項の離散化手法	VP-DONOR 0.2
圧力のポアソン方程式の反復計算	M-ILUBCGSTAB 法 ・ A-ERROR : 1.0×10 <sup>-12</sup> ・ R-ERROR : 1.0×10 <sup>-10</sup>
気泡の取扱い	Timer-Door 法 (上昇速度 0.2 m/s)
飛沫の取扱い	Timer-Door 法 (落下速度 : 自由落下)
水表面セルの流速推定法	勾配ゼロ
サブグループ	2 回

図-4.2 に実験と数値シミュレーションの水位と波圧の時系列を示す。図中の青色の線は実験値を示し、橙色

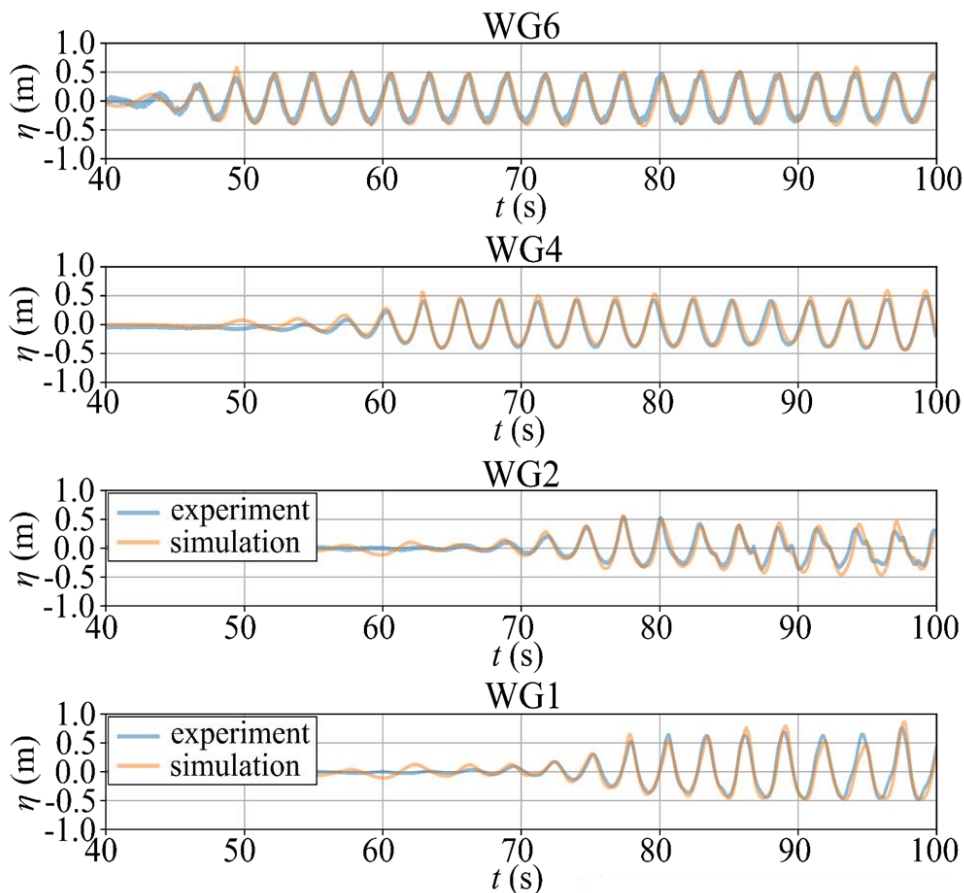


図-4.2 実験と数値計算での水面変位の比較 (波高 0.6m, 周期 2.8s)

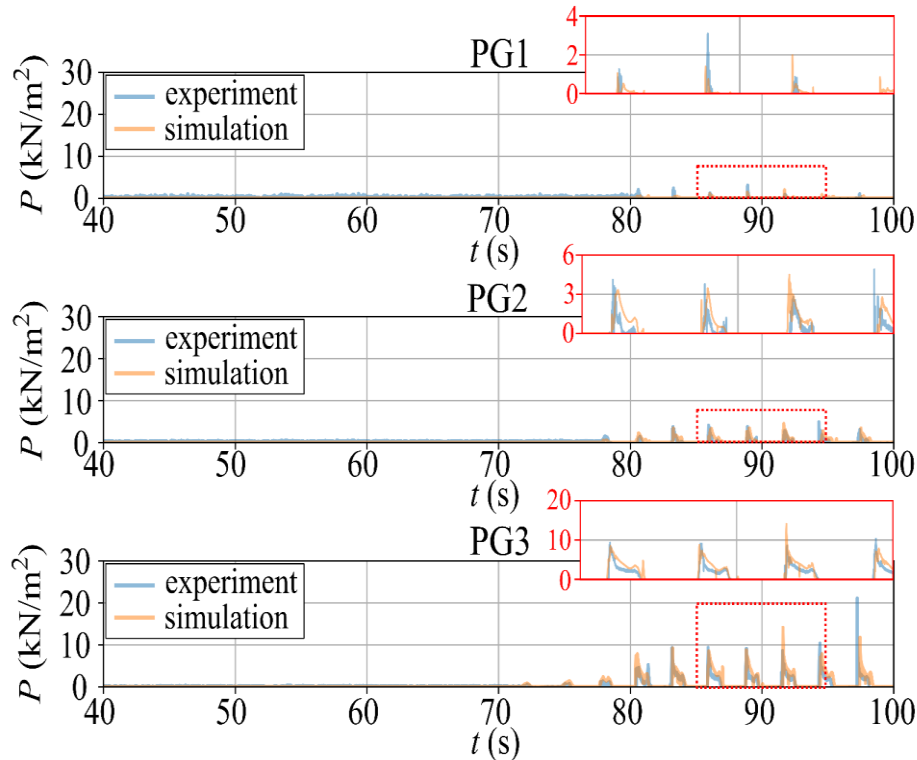


図-4.3 実験と数値計算での水面変位の比較 (波高 0.6m, 周期 2.8s)

の線は数値シミュレーションの値を示している。造波機に最も近い WG6 の水位を見ると、実験と数値シミュレーションの水位の波形はほぼ一致しており、造波された波の波高及び周期はほとんど同一であることが分かる。また、WG4, WG2, WG1 についても実験と数値シミュレーションで良好に一致しており、波浪伝播の計算精度は良好である。WG2 と WG1 の  $t=90\sim 100$ s の時刻ではピーク水位に若干の差異が見られるが、これは後退パラペット型の護岸模型からの反射波により生じたものと考えられる。また、波圧については、衝撃砕波を伴う数値シミュレーションにおいて良く見られる異常に大きな圧力のスパイクノイズが抑制されている。実験においても衝撃砕波力のピーク値はばらつきが大きいことを踏まえると、本研究における実験と数値シミュレーションの波圧のピーク値のスケールや波形は概ね一致していることから、数値シミュレーションモデルの波圧の再現性は概ね良好であると言える。

#### 4.3 福浦護岸におけるパラペット作用波圧の特徴

CADMAS-SURFを用いて福浦地区の現地断面を対象に規則波及び不規則波を作用させる数値シミュレーションを実施し、パラペットに作用する波圧の検討を実施した。

規則波は造波境界から造波するものとし、不規則波は造波ソースの沖側に120mの領域を設けて沖側100mにエネルギー減衰帯を設けた。最高波高が有義波高の1.8倍程度であると想定すると、有義波高の約3.0mの波の最高波高は約5.5mになることから、3.0, 4.0, 5.0, 5.5mの規則波を対象とした。

不規則波については有義波高3.0m, 有義波周期6.0sとして修正ブレットシュナイダー・光易型のスペクトルから不規則波の波形を作成し、100波程度作用させた。作成した不規則波の波形を図-4.4に示す。水位は福浦から最も近い横浜験潮所で観測されたD.L.+1.91mとした。

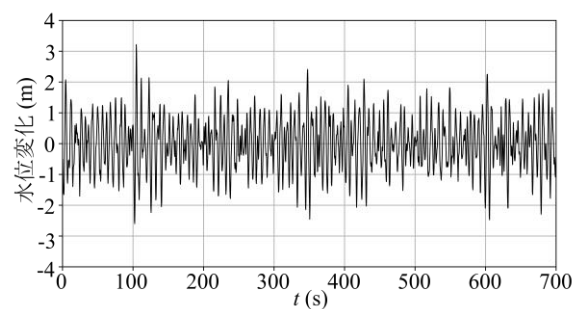


図-4.4 数値シミュレーションで入力した不規則波



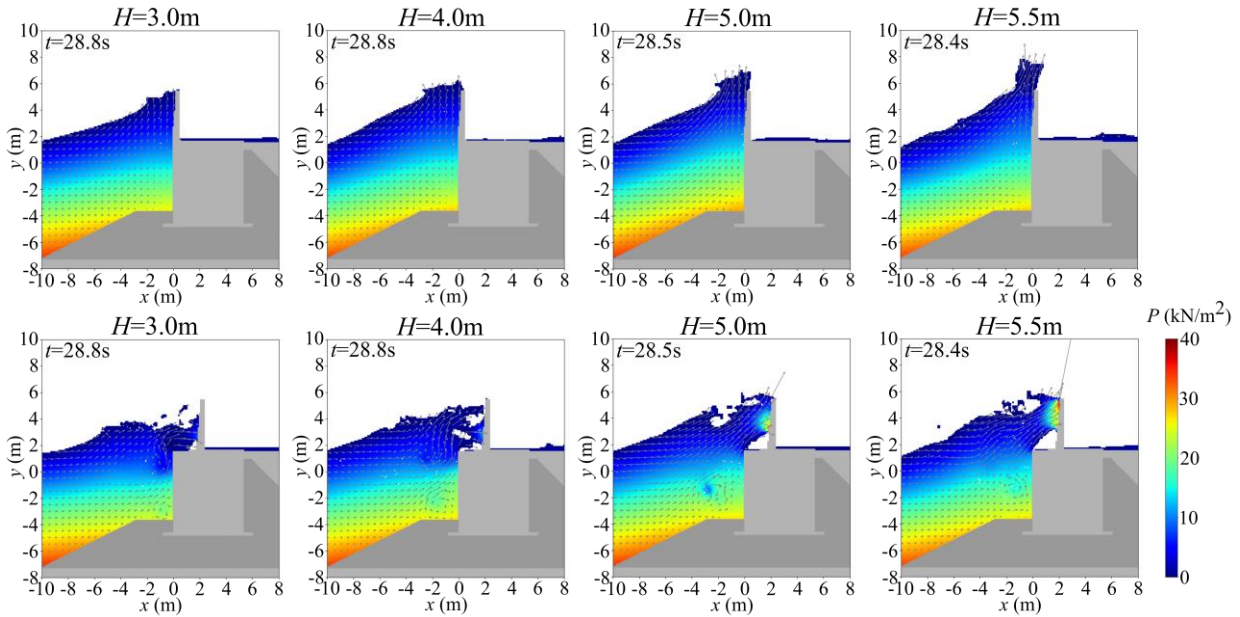


図-4.5 数値シミュレーションによる現地スケールでの波の作用状況（規則波）

図-4.5に規則波に対する計算結果について、第3波がパラペットに衝突する時刻のスナップショットを示す。前面パラペットの場合はいずれの波高についても護岸前面の水面は上下に大きく振動して重複波の様相を呈しており、波高が大きくなるにつれて水位の到達高さが高くなっている。一方、後退型パラペットについては、前述の実験と同様に、水塊がケーソンを飛び出してパラペットに衝突する様子が見て取れる。

図-4.6にパラペットの高さ4.5mの位置に作用する波力の時系列を示す。前面パラペットと後退型パラペットで波圧の作用時間や大まかな波形は同様であるが、後退型パラペットでは各波の波圧が検出された瞬間に非常に大きな波圧が現れている。これは、ケーソンから飛び出した水塊がパラペットに衝突することにより、水塊の運動エネルギーがパラペットに伝播したことで発生したと推察され、この瞬間的に大きな波圧により福浦のパラペットの倒壊が発生したと考えられる。

図-4.7に不規則波における600秒間に前面パラペットと後退型パラペットに作用したピーク波圧の分布を示す。十分に発達した波を除外するため、計算初期50秒間は対象外としている。図-4.7を見ると、不規則波についても前面パラペットよりも後退型パラペットの方が作用する波圧は各段に大きい。ピーク波圧の中央値及び25パーセンタイル値、75パーセンタイル値は前面パラペットと後退型パラペットで大きな変化はないが、ピーク波圧の最大値は前面パラペットに対して後退型パラペットは各段に大きくなっており、後退型パラペットでは非常に大きな波圧が作用していることが分かる。

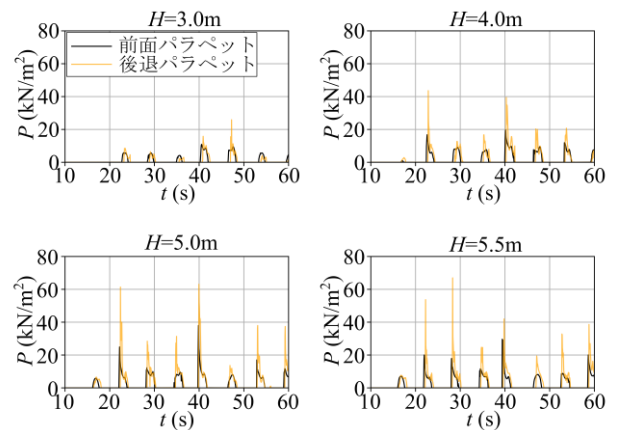


図-4.6 数値計算によるパラペット（高さ 4.5m）に作用する波圧の時系列（規則波）

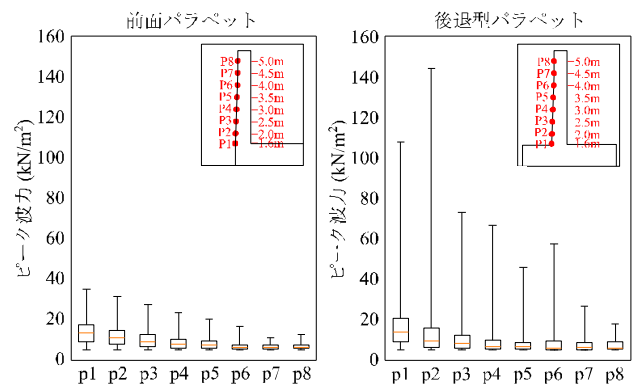


図-4.7 パラペットに作用する波圧の分布（不規則波）

値のいずれについても、前面パラペットに作用するピーク波圧が大きくなると、後退型パラペットに作用するピーク波圧は指数関数的に大きくなっていることが分かる。

図-4.8は、図-4.7の波圧計測箇所毎のピーク波圧の最大値及び平均値について、前面パラペットと後退型パラペットの関係を示したものである。ピーク波圧の中央値と最大値で値が大きく異なることから、値が0から1の間に収まるように、後退型パラペットにおけるピーク波圧の中央値(50パーセンタイル値)と最大値(100パーセンタイル値)の最大値で除している。波圧の中央値と最大値の両方において、前面パラペットよりも後退型パラペットの方が大きな波圧が作用していることが明確であり、この傾向はピーク波圧の最大値で顕著である。

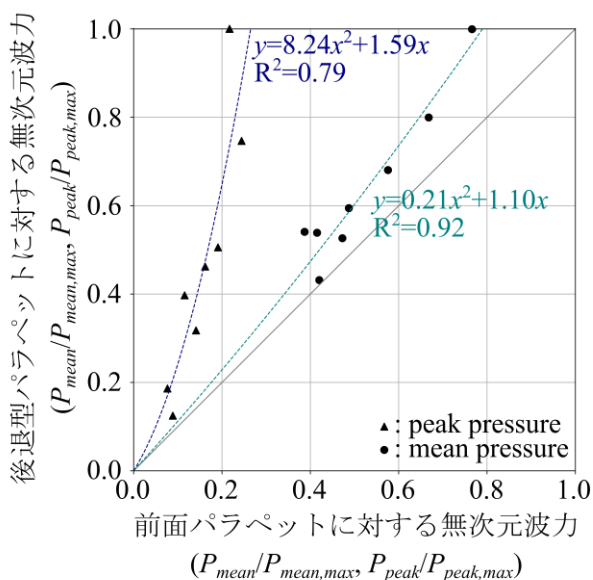


図-4.7 パラペットに作用する波圧の分布 (不規則波)

### 5. 実験および数値計算と高橋式 (1992) との比較

図-5.1は規則波での実験および数値計算と高橋式(1992)を比較したものであり、参考のため合田式による前面パラペットでの波圧も記載している。なお、波浪の条件は水位1.9m、波高0.76m、周期2.8s、パラペット後退量0.75mである。

実験と数値計算(CADMAS-SURFによる計算)結果はともにばらついており、実験は平均値を示している。数値計算結果の平均と実験はおおよそ近い値をとっている。高橋式と比較すると6割ほど大きくなっているのが分かる。高橋式は波叩き部よりも静水位が低い条件での実験結果から得られた算定式であり、水位が高い場合には波圧を過小評価する可能性がある。そこで、水位を変えた条件で、実験および数値計算を実施した。

図-5.2は水位と無次元波圧の関係であり、水位 $h$ は水叩き

部の天端高 $h_c$ との差 $(h-h_c)$ を、水叩き部の天端高 $h_c$ で除して無次元化している。負の場合には水位が水叩き部よりも低く、正の場合には水位が水叩き部よりも高いことを示している。なお、波の条件は、周期2.8s、波高0.5~0.9mであり、実験と数値計算は規則波の複数の波のうちの平均値である。

水位 $(h-h_c)/h_c$ が-0.2では、高橋式と一致しているものの、それよりも大きくなるにつれて実験と数値計算結果は徐々に大きくなっており、 $2\rho gH$ ほどの値をとっている。ばらつきがあるものの、水位が高い場合には、高橋式に以下の式(5.1)で表されるような補正係数 $\alpha_m$ をかけることで評価できるものと考えられる。

$$\alpha_m = 1.9 \quad : \quad (h - h_c)/h_c \geq 0 \tag{5.1}$$

$$\alpha_m = 4.5 * \frac{h - h_c}{h_c} + 1.9 \quad : \quad (h - h_c)/h_c < 0$$

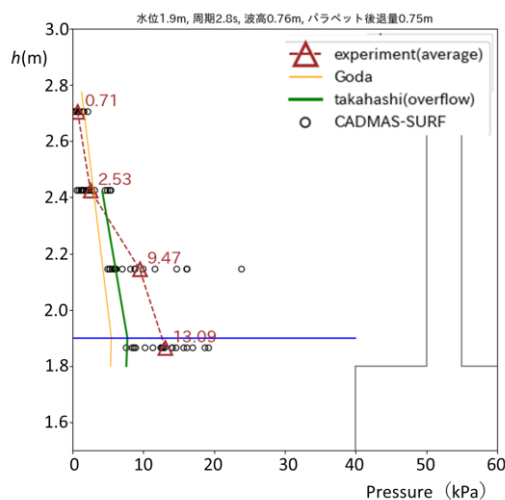


図-5.1 実験および数値計算と高橋式 (1992) の比較

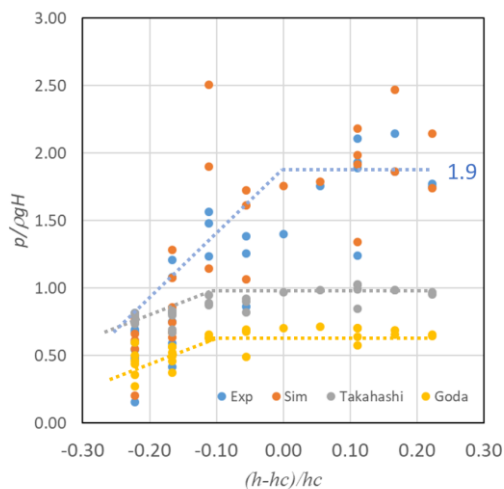


図-5.2 水深と無次元波圧の関係

## 6. パラペットの後退距離と波圧

これまでの検討結果から、パラペットを後退することでパラペットに作用する波圧が大きくなることが分かったが、ここでは後退距離がさらに大きくなった場合について調べる。大規模実験では後退距離を大きくするのが困難なため、数値計算で調べることにした。

図-6.1は後退距離を大きくした場合のパラペットに働く波圧の時系列であり、水深1.8m、波高1.2m、周期2.8sでの計算結果である。実験でのPG2,PG3,PG4の位置での波圧の時系列である。後退距離が大きくなるにつれて、パラペット上側のPG2では波圧が発生しなくなっている。越波水深が小さくなるためだと考えられる。

図-6.2は図-6.1の波圧のピーク値と後退距離の関係

係である。後退距離が0.95mでピークをとっており、その後

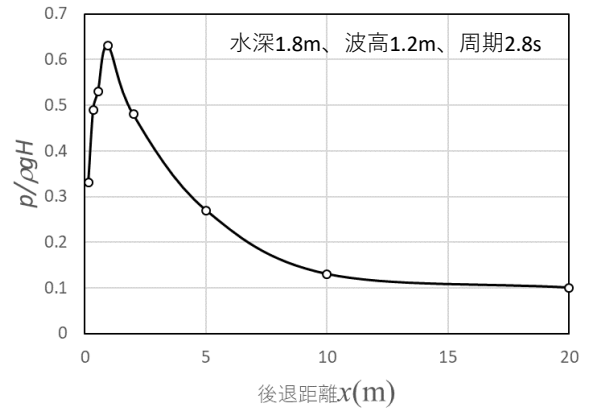


図-6.2 後退距離と波圧 (PG4) の関係

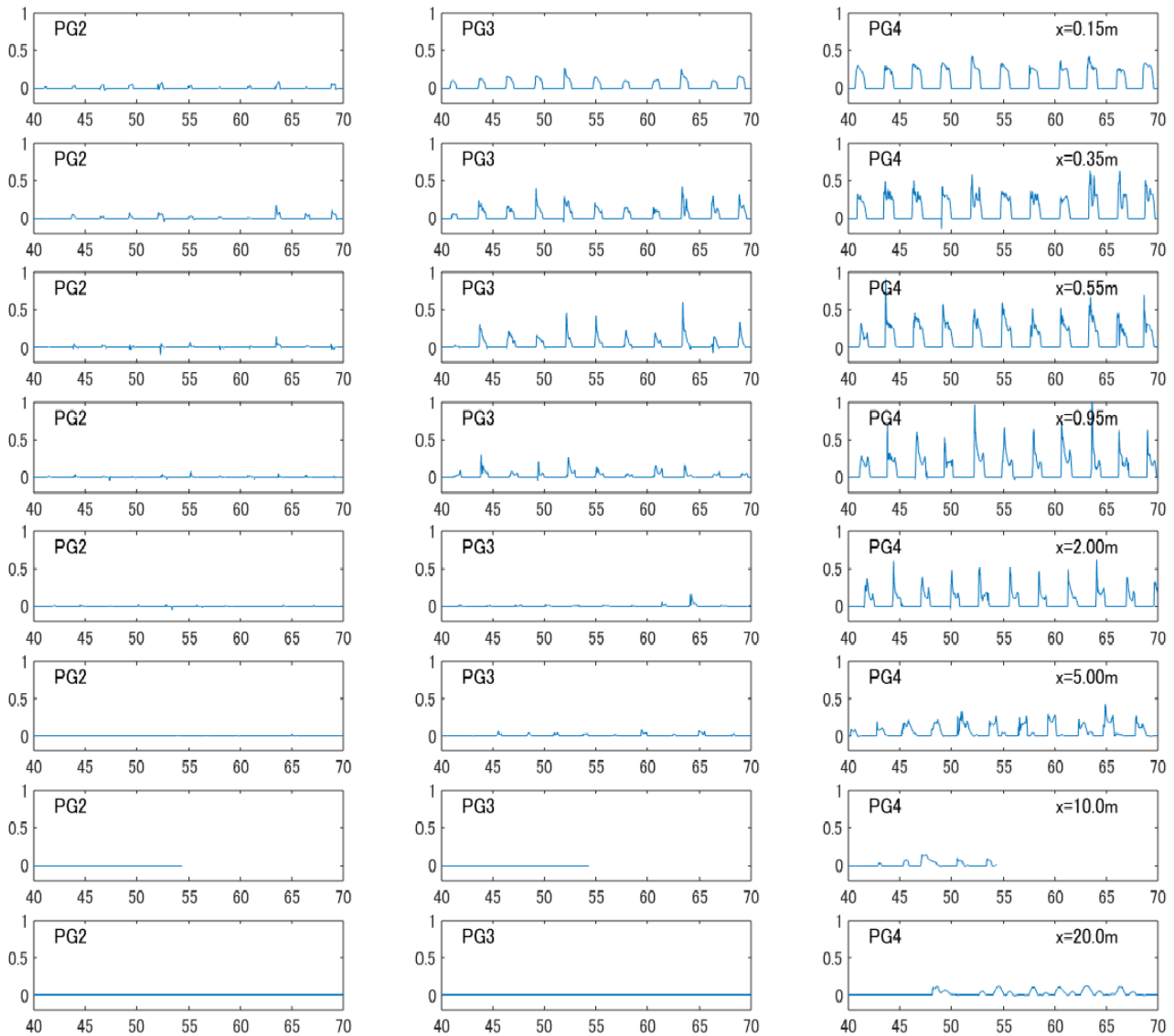


図-6.1 パラペットの後退距離と波圧 (規則波)

徐々に減衰している。実験は現地の1/4スケールであるので、現地量で20mほど離れることでだいぶ波圧が小さくなるのが分かる。後退距離を大きくすることで越波量が小さくなる、あるいは換算天端高を低くできるだけでなく、波圧も小さくできることが分かる。なお、この結果は限られた条件での計算結果であり、今後、実験、数値計算をとおして、特性を明らかにすることが望ましい。

### 7. 福浦護岸における越波量の推定

図-4.1(c)の断面図に示す福浦地区の現地の護岸を対象とした不規則波数値シミュレーションより、パラペット位置の変化やパラペット倒壊による天端高の低下を考慮した断面の越波状況の検討を実施した。不規則波は前章の波圧検討時と同様、有義波高3.0m、周期6.0sの修正ブレードシュナイダー・光易型のスペクトルから時系列波形を作成し、十分に発達した波が護岸に到達する前までの時間を除外するため、計算初期の50秒を除く600秒(約100波)を検討の対象とした。反射波の影響を抑制するため、造波ソースの沖側には延長100mのエネルギー減衰領域を設定した。後退型パラペットの倒壊については、現地調査のパラペット倒壊状況を参考に、50cm倒壊(天端高5.0m)と100cm倒壊(天端高4.5m)の二種類を対象とした。

図-7.1に越波量が最も多い $t=87.5\sim 88.0$ sにおける計算結果のスナップショットを示す。図中のa)前面パラペットでは護岸前面の水位が大きく上昇してパラペットの天端を乗り越えて越波が発生している。一方、後退型パラペットであるb), c), d)ではパラペットに衝突した波が大きく上方へ打ち上がっている状況を確認できる。また、c)では、水塊のパラペットからの飛び出しに伴う大きな空洞を確認できる。パラペットの倒壊がないb)では波の打ち上がりはパラペットと同じ法面で発生している。

次に、図-7.2に護岸前面水位と越波量の計算結果の時系列を示す。図中には越波流量 $q$ を併記している。前面パラペットa)では後退型パラペットb), c), d)と比較して前面水位が大きく上下に変動していることが分かる。しかし、パラペットの倒壊がないa)とb)を比較すると、後退型パラペットb)の越波流量は前面パラペットa)の1/3程度である。後退型パラペットの倒壊を考慮した場合、天端高が50cm低くなる毎に越波量は約2倍に増大しており、倒壊なしb)と100cm倒壊d)では約4.5倍の越波量となっている。後退型パラペットの断面において、前面パラペットa)と越波量が概ね一致するのはパラペットの倒壊が50cmのケースである。

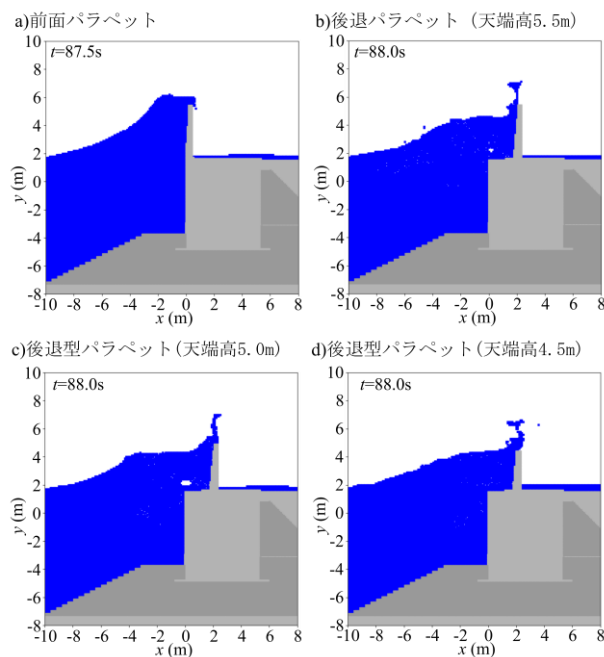


図-7.1 数値シミュレーションによる越波量最大時の計算結果のスナップショット(不規則波)

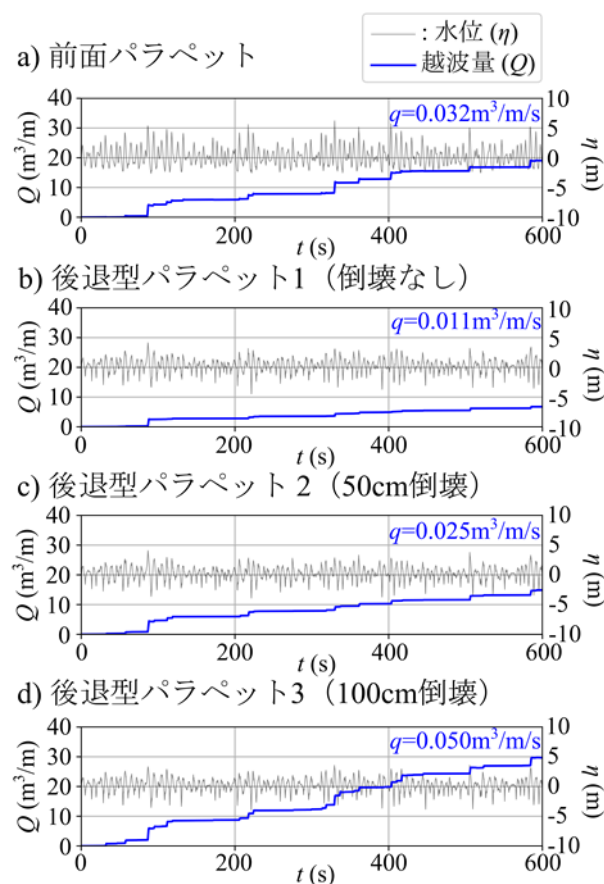


図-7.2 数値シミュレーションによる越波量の時系列

## 8. 結 論

研究2019年の台風15号で被災した福浦地区の護岸を対象として台風襲来時を想定した大規模水理模型実験と数値シミュレーションを実施し、令和元年房総半島台風による福浦地区の護岸に作用した波力と越波量について検討するとともに、パラペット後退型護岸におけるパラペットの後退量や水深と波力及び越波量の関係性を調べた。その結果、以下のことが明らかとなった。

- 1) 後退パラペットに働く波力は $1.5 \sim 2.5 \rho g H$ 、最大値で $3 \sim 4 \rho g H$ であり、後退パラペットでの越波の衝突状況、波圧の発生状況は高橋ら(1992)と同様の結果だった。
- 2) 数値計算(CADMAS-SURF/2D)による計算結果は、ばらつきがあるものの実験とほぼ合致していた。
- 3) 水位が水叩きの天端に近い場合や、より水位が高い場合には高橋ら(1992)よりも波圧が大きくなる傾向にあり、1.9倍とする修正係数を提案した。
- 4) 後退距離が大きくなると波力が徐々に低減することが明らかとなった。

(2021年6月4日受付)

## 謝辞

本研究の実施にあたっては、国土交通省港湾局、関東地方整備局、横浜市の関係各位に多大なるご支援、ご助言をいただいた。また、現地調査は耐波研究グループの朝比翔太研究員、川口真吾研究員と実施した。ここに記して心からの謝意を表す。

## 参考文献

- 1) 国土交通省関東地方整備局：資料-6 高波における被災メカニズム，東京湾における高波対策検討委員会，2019.
- 2) 合田良美，岸良安治：不規則波に対する護岸の越波流量特性について，海岸工学講演会論文集，pp. 176-181，1976.
- 3) 平山克也，濱野有貴，長沼淳也：護岸パラペット高さその後退距離による越波流量の変化とその推定方法に関する検討，土木学会論文集B2(海岸工学)，Vol. 74，No. 2，pp. I\_1027-I\_1032，2018.
- 4) 伊藤喜行，藤島睦，北谷高雄：防波堤の安定性に関する研究，港研報告，Vol. 5，No. 14.，pp. 3-134，1966.
- 5) 高橋重雄，遠藤仁彦，室善一朗：混成防波堤上の越波水の運動と波力に関する実験的研究—親水性港湾構造物に関する水工的研究（第1報）—，港研報告，Vol. 31，No. 1.，pp. 3-50，1992.
- 6) 有光剛，安岡恒人，川崎浩司：越波排水路を有する低天端護岸における越波現象に対する数値波動水路の適用性，海岸工学論文集，第54巻，pp. 726-730，2007.
- 7) 川崎浩司，菊雅美，嶋田宏，柴田哲郎，板橋直樹，馬淵幸雄：現地リーフ地形における波浪変形と護岸周辺の越波に関する数値解析，土木学会論文集B3(海洋開発)，Vol. 67，No. 2，pp. I\_286-I\_291，2011.
- 8) 有川太郎，下迫健一郎：CADMAS-SURFを用いた衝撃砕波力計算への適用性，港湾空港技術研究所資料，No. 1081，2004.
- 9) Torrey, M.D., Mjolsness, R.C., and Stein, L.R. : NASA-VOF3D: A Three-Dimensional Computer Program for Incompressible Flows with Free Surfaces, Rep. No. LA-11009-MS, Los Alamos National Laboratory, 1987.

港湾空港技術研究所報告 第60巻 第1号

2021.6

編集兼発行人 国立研究開発法人海上・港湾・航空技術研究所

発行所 港湾空港技術研究所  
横須賀市長瀬3丁目1番1号  
TEL. 046(844)5040 URL. <http://www.pari.go.jp/>

Copyright © (2021) by MPAT

All rights reserved. No part of this book must be reproduced by any means without the written permission of the President of MPAT

この資料は、海上・港湾・航空技術研究所理事長の承認を得て刊行したものである。したがって、本報告書の全部または一部の転載、複写は海上・港湾・航空技術研究所理事長の文書による承認を得ずしてこれを行ってはならない。

## CONTENTS

1. Cyclic Beach Morphological Changes in the Swash Zone  
due to Tidal Range Fluctuations  
Masayuki BANNŌ · Yoshiaki KURIYAMA
2. Ocean swells induced by the Typhoon Faxai hit Port of Yokohama in 2019  
Hitoshi TAMURA · Koji KAWAGUCHI · Takumu IWAMOTO · Takashi FUJIKI
3. Dynamics of ocean swells in Toyama Bay  
Hitoshi TAMURA · Koji KAWAGUCHI · Takashi FUJIKI
4. Study on Stability of Temporary Armor Units against Waves  
Kojiro SUZUKI · Hiroki KUBOTA · Tsutomu TANAKA
5. Study on Wave Pressure acting on Receding Parapet type Seawall  
Kojiro SUZUKI · Hiroki KUBOTA · Naoki TSURUTA
6. Study of slow slip mechanism on plate boundary fault decollement zone  
Yuri SUGIYAMA · Shinya TACHIBANA · Yoshiyuki MORIKAWA
7. Development of frictional contact algorithm using weighted least squares for MPM-rigid body  
simulation and its application to behavior of open-ended pile driven into the ground  
Keita NAKAMURA · Satoshi MATSUMURA · Takaaki MIZUTANI