

# 高潮・地震津波用フラップ式水門の 越波及び波力特性について

CHARACTERISTICS ON WAVE OVERTOPPING AND  
PRESSURE DISTRIBUTION ON THE FLAP TYPE GATE

清宮理<sup>1</sup>・下迫健一郎<sup>2</sup>・仲保京一<sup>3</sup>  
大久保寛<sup>4</sup>・長谷川巖<sup>5</sup>

Osamu KIYOMIYA, Ken-ichirou SHIMOSAKO, Kyouichi NAKAYASU,  
Hiroshi OOKUBO and Iwao HASEGAWA

<sup>1</sup>フェロー 工博 早稲田大学 (〒169-8555 東京都新宿区大久保3-4-1)

<sup>2</sup>正会員 工博 独立行政法人 港湾空港技術研究所 (〒239-0826 神奈川県横須賀市長瀬3-1-1)

<sup>3</sup>日立造船株式会社 (〒592-8331 大阪府堺市築港新町1-5-1)

<sup>4</sup>正会員 新日本製鐵株式会社 (〒229-1131 相模原市西橋本5-9-1)

<sup>5</sup>正会員 株式会社エコー (〒221-0052 神奈川県横浜市神奈川区栄町10-35)

As to the flap type gate for the protection against storm surge and tsunami, we are advancing the studies on design and construction by considering the hydraulic and hydrodynamic characteristics of the flap type gate. This paper presents the results derived by the hydraulic model tests using the 2-dimensional channel with wave maker and the model of scale 1: 25, in order to comprehend the characteristics about the amount of wave overtopping and pressure distribution on the flap body in waves.

*Key Words : Gate, flap, wave, storm, surge, tsunami, hydraulic model test*

## 1. はじめに

高潮, 津波の対策としてフラップ式水門<sup>1)</sup>を提案し, フラップ式水門の基本的な水理特性, 力学特性を把握し設計施工法の研究を進めている. フラップ式水門は図-1に示すように常時は海底に伏せた状態に設置され, 高潮や地震津波が予測されたときフラップ(扉体)に空気を送り込み, フラップに浮力を与えることで急速に浮き上がらせる構造になっている. このため常時は港口や航路を閉塞することなく, 船舶の航行や海水の流れを阻害しない. フラップの海底側はピン構造であり, フラップ内外の水位差により発生する水圧荷重は, 海底部ピン構造付近に設けた支持機構あるいはチェーン, 鋼棒などのテンション材を介して基礎構造部へ伝達される. 高潮, 津波が過ぎた後はフラップ内の空気を排気, 水を給水して, フラップを海底に沈降させ再度格納する.

フラップ式水門の技術的課題はいくつか挙げられるが, 本論文では波浪作用時のフラップ式水門の機能性及び安

定性に焦点を絞り, 越波特性及び波力特性を検討した. なお, ベネチアで現在建設中のフラップ式水門<sup>2)</sup>も, 浮力で浮上させるが, 起立時は陸側(水位の低い側)に傾斜して, 扉体の浮力によって海側の水位差(2m)と均衡するものであり波浪条件も比較的厳しくない. また特に支持機構がなく波浪中で動揺する機構である. しかし, 日本での設置条件は, かなり大きな水位差と波力が想定され, ベネチアと同様な構造形式で設計すると, 大きな浮力を得るために, 扉体が巨大となる. 今回提案しているゲートは起立時に海側(水位の高い側)に傾斜させることにより, 扉体は越波を防ぐ余裕高分の扉体重量を海面上に確保するための浮力を必要とするが, ベネチアよりかなり小さな扉体体積の構造を可能としている. また津波時にはフラップを固定しなければ所定の機能が発揮できず, 今回提案のフラップ式水門はベネチアのと基本的に構造が異なっている.

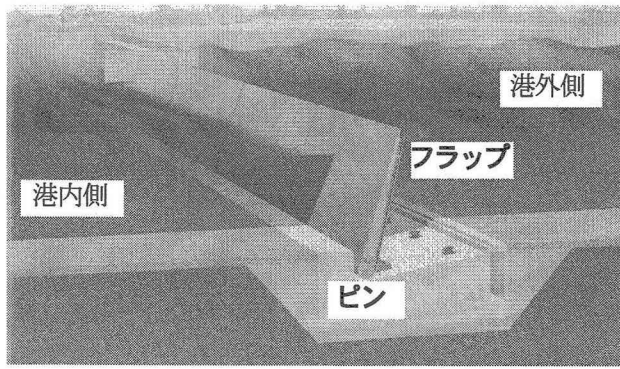


図-1 フラップ式水門の概要

## 2. 既往の研究

傾斜したフラップの水理特性に関しては1948年の Isaacson<sup>3)</sup>の傾斜した崖に作用する波力の理論的な研究が初めとされ、日本では岩垣ら<sup>4)</sup>、井上ら<sup>5)</sup>、<sup>6)</sup>による傾斜板の波力の研究がなされた。主に護岸で越波防止の波返しの効果的な形状を求めるための研究である。この研究では実験的かつ理論的に波圧分布と越波量の算定が限られた条件下でなされた。片岡ら<sup>7)</sup>はフレア護岸で傾斜板への衝撃波圧と越波量の検討を行い、最適な護岸形状を提案した。

フラップ式水門に関しては従来から小規模な水門として河川樋門などに利用されてきたが、水理的特性については深く検討されてこなかった。イタリアのベネチアの高潮防止の大型水門では、各種の構造形式からフラップ式水門が選定された。しかしこの地域では波浪条件が厳しくなく、波浪に対して自由振動する形式が選定され波浪動揺の検討<sup>8)</sup>が主となった。固定式のフラップ水門の検討は富田ら<sup>9)</sup>によりなされ、今回と同様な水理実験により波圧分布を得ている。また数値計算による斜板への波圧分布の計算<sup>10)</sup>もされるようになってきている。しかし固定式のフラップ式水門の波浪特性、波圧特性と越波特性について設計の際に必要な各種要因下での体系的な検討はなされてきていない。本研究ではこの体系的な検討の現段階で得られた成果について述べるものである。

## 3. 研究の内容

フラップ式水門の越波特性及び波力特性を把握するために、長さ105mの二次元造波水路において縮尺1:25の模型を用いて水理模型実験を行った。二次元造波水路は長手方向に隔壁により分割してあり、模型を設置した水路の幅は0.8mである。実験の種類と主要な条件は表-1のとおりである。用いた模型の諸元を図-2に示す。扉体模型は半円形の架台により任意の角度に固定できる。今回の実験は越波流量、反射率、波圧強度を検討するものであるため、扉体模型内に吸気や排気を行う必要はない。そこで、扉体模型は厚さ10mmのステンレス板として、角度

を固定して実験を実施した。フラップの起立角度を海底面から45度から120度まで変化させて、不規則波による越波実験と規則波による波力実験を実施した。不規則波の有義波周期は8, 10および14秒で、規則波の周期は5, 6, 8, 10, 12および14秒である。不規則波の周波数スペクトルは修正ブレットシュナイダー・光易型である。表-1に示した天端高は静止水面からの鉛直高さ $hc$ で、有義波周期 $T_{1/3}$ と有義波高 $H_{1/3}$ は通過波としての値である。水深 $h$ と天端高 $hc$ が同じであっても、図-2に示すようにフラップの角度によってフラップの長さ(高さ)は異なる。本論文では実験で得られた計測値を全て実機に換算し示した。

表-1 実験条件

| 実験種類    | フラップ条件                   |                      |      |       | 波浪条件          |                                  |              |     |       |    |     |      |       |    |
|---------|--------------------------|----------------------|------|-------|---------------|----------------------------------|--------------|-----|-------|----|-----|------|-------|----|
|         | 角度                       | 天端高                  | 波種類  | h (m) | $T_{1/3}$ (s) | $H_{1/3}$ (m)                    | H/L          | 波群数 |       |    |     |      |       |    |
| 越波・反射実験 | 45度<br>60度<br>75度<br>90度 | 4.0m<br>5.0m<br>6.0m | 不規則波 | 20    | 8             | 3                                | 0.034        | 2波群 |       |    |     |      |       |    |
|         |                          |                      |      |       |               | 10                               | 3            |     | 0.019 |    |     |      |       |    |
|         |                          |                      |      |       | 14            |                                  | 4            |     | 0.026 |    |     |      |       |    |
|         |                          |                      |      |       |               | 5                                | 0.032        |     |       |    |     |      |       |    |
|         |                          |                      |      |       | 3             | 0.01                             |              |     |       |    |     |      |       |    |
|         |                          |                      |      |       | 4             | 0.013                            |              |     |       |    |     |      |       |    |
|         |                          |                      |      |       | 5             | 0.016                            |              |     |       |    |     |      |       |    |
|         |                          |                      |      |       | 波圧実験          | 45度<br>60度<br>75度<br>90度<br>120度 | 高天端<br>(非越波) |     | 規則波   | 20 | 5   | 1    | 0.026 | 1回 |
|         |                          |                      |      |       |               |                                  |              |     |       |    |     | 1.56 | 0.04  | 1回 |
|         |                          |                      |      |       |               |                                  |              |     |       |    | 5.5 | 1.8  | 0.046 | 1回 |
| 1.88    | 0.04                     | 1回                   |      |       |               |                                  |              |     |       |    |     |      |       |    |
| 6       | 2.2                      | 0.04                 | 1回   |       |               |                                  |              |     |       |    |     |      |       |    |
|         | 3.3                      | 0.06                 | 1回   |       |               |                                  |              |     |       |    |     |      |       |    |
| 8       | 4                        | 0.072                | 1回   |       |               |                                  |              |     |       |    |     |      |       |    |
|         | 6                        | 0.06                 | 1回   |       |               |                                  |              |     |       |    |     |      |       |    |
| 10      | 7.2                      | 0.072                | 1回   |       |               |                                  |              |     |       |    |     |      |       |    |
|         | 6.2                      | 0.04                 | 1回   |       |               |                                  |              |     |       |    |     |      |       |    |
| 12      | 7.1                      | 0.06                 | 1回   |       |               |                                  |              |     |       |    |     |      |       |    |
|         | 9                        | 0.04                 | 1回   |       |               |                                  |              |     |       |    |     |      |       |    |
| 14      | 12.2                     | 0.04                 | 1回   |       |               |                                  |              |     |       |    |     |      |       |    |

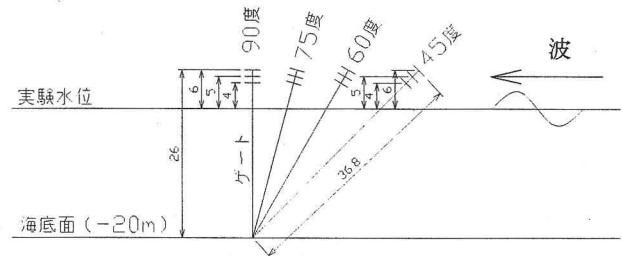


図-2 実験模型

## 4. 越波・反射実験

### (1) 実験方法およびデータ処理方法

フラップゲートの最適な扉体形状と規模を選定する上で越波量を把握することが非常に重要となる。本実験では、主にフラップ起立角度を波に向かって前傾させた場合の越波量を把握した。

実験はフラップ起立角度と通過波高(ゲート模型設置位置のゲートがない状態の波高)を変化させ、不規則波を用いて行った。越波流量や水位変化(波高)の測定は約200波について実施した。越波流量は、越波した水を導水路によって集水ますに導き、集水ますに流入した水量を計測時間で割って求めた。水位変化は容量式波高計を

用いて、波周期の約20分割の時間間隔で測定した。計測は造波開始後に水路内の反射波が定常状態になるのを待って行った。計測待ち時間はおよそ水路長を波速で除した6倍とし、模型時間では数分である。反射率の解析にはフラップゲート模型の約1波長沖側に設置した2台の容量式波高計のデータを用いて、合田ら<sup>11)</sup>の方法で反射率を解析した。ただし越波時の流速や高さは計測していない。越波流量は無次元化してデータ整理を行った。無次元化は $(2gH)^{0.5}$ で越波流量 $Q$ を除してあり、ここに $H$ は通過波としての有義波高である。

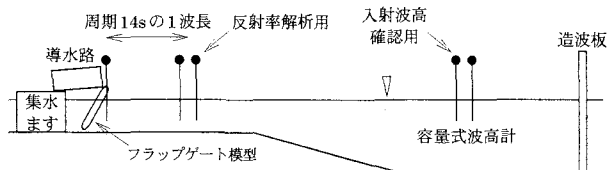


図-3 越波・反射実験の計測方法

## (2) 実験結果

図-4に示すように波高が大きくなれば越波量は増加する。同一の波高に対するフラップ角度が大きくなるほど越波量が増加する傾向がみられるが、75度と90度では越波量にさほど差はない。45度と60度では越波量がかなり減少する。この現象はワイングラス効果と言われ、従来から指摘されている。

図-5に天端高との関係を示すが、天端高が低いと越波量が多くなり、波高が小さい条件で天端高の違いによる越波流量の差が大きい。

図-6と図-7に反射率の状況を示す。図-6は波周期10秒、静水面からの扉体天端高 $hc=5m$ 、フラップ角度が $90^\circ$ 、 $75^\circ$ 、 $60^\circ$ 、 $45^\circ$ について通過波高を変化させた場合の反射率で、図-7は波周期10秒、フラップ角度 $75^\circ$ で静水面からの扉体天端高さ $4m$ 、 $5m$ 、 $6m$ について通過波高を変化させた場合計測結果である。越波量は井上ら<sup>6)</sup>の理論式で示されるように入射波高、波の周期、波形勾配、天端高さで反射率に依存する。フラップ角度は反射率に関連するので、反射率の把握が重要となる。

図-6と図-7より以下のことが分かる。同一のフラップ角度では、通過波高が大きく天端高が低いほど反射率が小さく、越波流量が多い。すなわち、これらの条件で反射率が小さくなるのは越波流量の増加によって反射波のエネルギーが小さくなるためである。次にフラップ起立角度の違いに着目すると、フラップが直立に近いほど反射率が大きく、越波流量も多くなる。これは前述の越波量と反射率の関係と矛盾するが、角度が小さくなると返し波が砕波状態となりエネルギー損失が大きくなることによる。

以上の結果から、フラップゲートは扉体を波の来襲方向に対して前傾させると越波量と反射率は減少し良い水理特性となるが、同一天端高を確保するためには前傾度合いが大きいほどフラップの長さ(高さ)が必要となる。

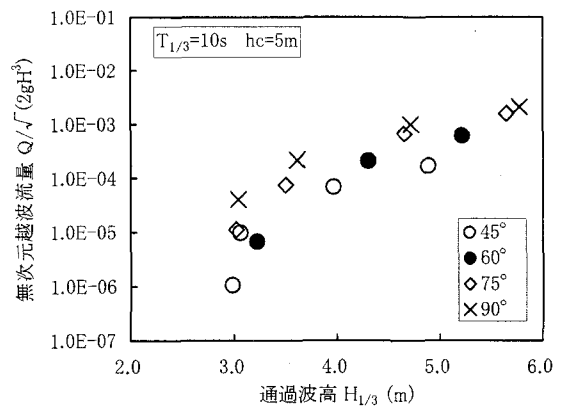


図-4 無次元越波流量と角度の関係

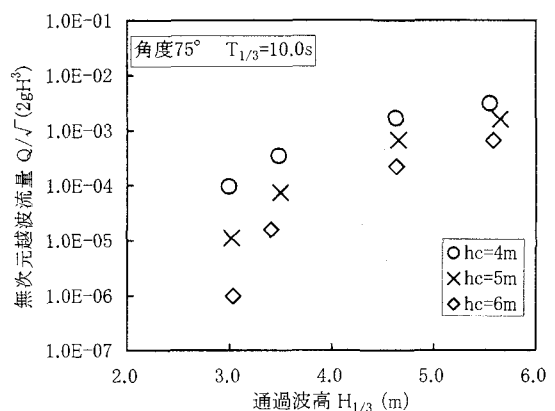


図-5 無次元越波流量と天端高 $hc$ の関係

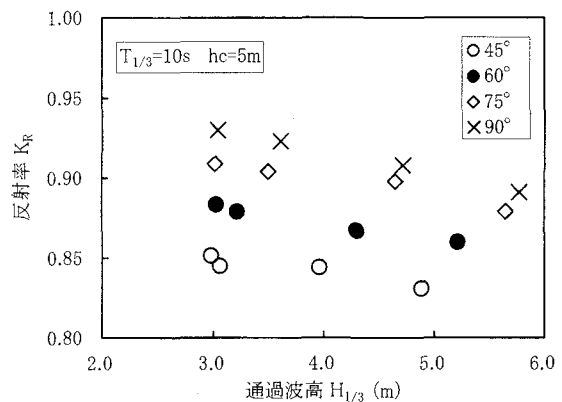


図-6 反射率とフラップ角度の関係

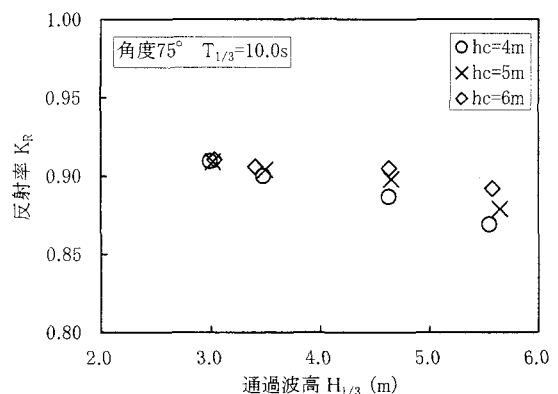


図-7 反射率と天端高 $hc$ の関係

## 5. 波圧実験

### (1) 実験方法およびデータ処理方法

フラップゲートの起立角度を変化させ、規則波を作用させて波圧と水位変化（波高）を計測した。波圧実験では衝撃的な波圧を取得できるように1000Hzの高速サンプリングを行い、造波板からの再反射の影響が現れない有効波5波を解析対象とした。水位変化測定には容量式波高計を使用した。水位測定位置は前掲図-3と同じである。波圧測定には小型波圧計を使用し、図-8に○印で示すように10～11点で測定した。図-8では一番上の波圧計の位置でフラップゲートの天端が途切れているが、実際には越波を生じない程度に天端を高くしてあり、非越波の条件で実験を行った。

波圧実験結果の解析では、まず各波圧計の受け持ち幅の比率に応じた重み付けを行って合成波形を作成した。次に、フラップゲート模型直前に設置した容量式波高計のデータをゼロアップクロス解析して1波ごとの位相を特定し、1波ごとに波圧及び合成波形（波圧合力）のピーク値解析を行った。有効波が5波なのでピーク値が5個得られるが、5個中の大きいほうから3番目の値を中間値として採用した。中間値を採用したのは、極端に大きな波圧や小さな波圧の影響を除去するためである。

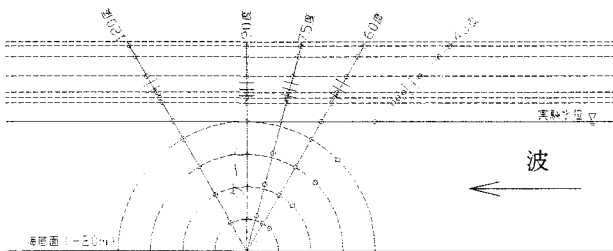


図-8 波圧測定位置

### (2) 実験結果

#### a) ピーク波圧値について

図-9は周期10秒、波高6.2mの条件で計測した各点の波圧のピーク値を用いて、鉛直方向分布の一例を示したものである。図には合田式により算定した直立壁に対する波圧分布も示した。起立角度が60°、75°および90°では波圧分布の形状はほぼ同じであるが、静止水面より下では起立角度が大きいと波圧強度がやや小さく、静止水面より上では角度が大きいと波圧強度がやや大きい。起伏角度が120°の場合は海底面付近で波圧が小さくなり、斜板の上方向まで波圧が発生し波が遡上している。これらの角度では静水面での波圧強度はほぼ同程度であるが、起伏角度が45°では波圧分布の形状が他の起伏角度とは大きく異なっている。すなわち静水面付近で波圧の形状が乱れかつ波圧強度が大きくなっている。これは起伏強度が45°では静水面付近で碎波を生じて波圧強度が増加するとともに、波圧分布も乱れるためである。合田波圧を破線で図中に示しているが、起伏角度が

45°と120°以外は合田波圧とほぼ同様な波圧分布である。ただし起立角度45°の場合を除き、合田式による算定値より波圧は小さな値となっている。

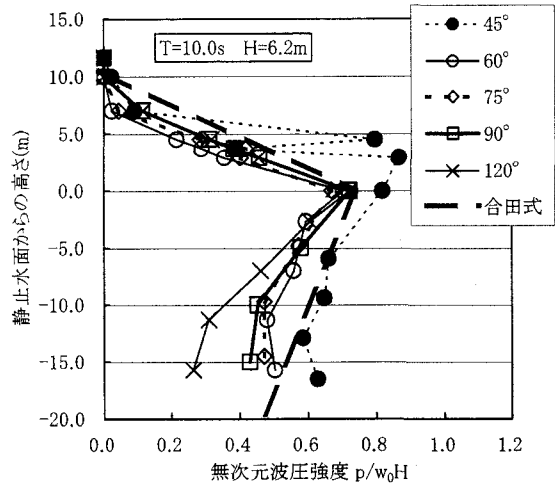


図-9 ピーク波圧の鉛直方向分布

#### b) 波圧の合成について

フラップゲートの起立角度が全体波力特性に与える影響を検討するため、計測した波圧に受圧面積を乗じて足し合わせて、模型の法線単位長さあたりに作用する波荷重を波周期毎に算定した。これを合成波力とし合田波力で除して無次元化した。この合成波力は同時刻の波圧の合力であるので、各波圧計それぞれの最大値の合計とは異なる。合成波力はフラップを固定する構造を設定する際に必要となる。

図-10に示すように起立角度が小さくなる、また波周期が長くなると、合成波力は増大する傾向にある。合成波力は起伏角度が45°のときに、全周期帯で他の起伏角度より大きくなっている。また波の周期が12秒のとき最大となり、波の周期が14秒とさらに長くなると合成波力は低下する。これは周期が14秒になると、碎波後の波が作用するために波力が低下したものである。

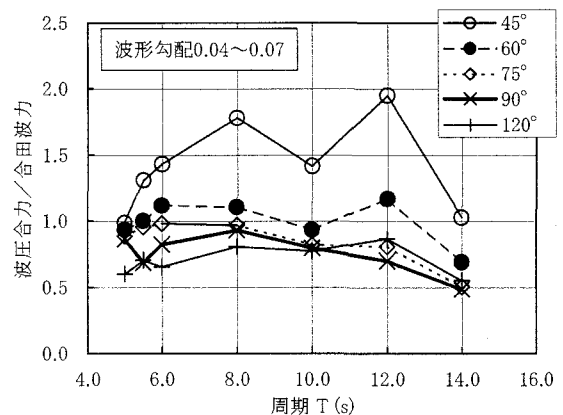


図-10 波力の波周期依存性

c) 同時波圧分布について

合成波力が最大となる同時刻の波圧分布を検討した。

図-11はフラップの起立角度が45度の場合の計測結果であり、縦軸には水深方向の高さ、横軸には波圧強度を示し、図中には波周期をパラメーターとして示す。水面位置ではなく、水面より少し高い位置に最大の波圧が生じている。また、波周期が長い場合、全体として合成波力が増大し、水深方向に波圧強度の差が小さい結果となっている。同時波圧では斜板の形状により各地点の波圧に時間的なずれや位相差が生じる。波周期が短い場合は静水面付近で最大値となり、上方では波圧がゼロで下方では波圧が小さくなっている。波周期が長くなると最大値発生位置は静水面上方に、同じく斜板形状の要因により移動する。

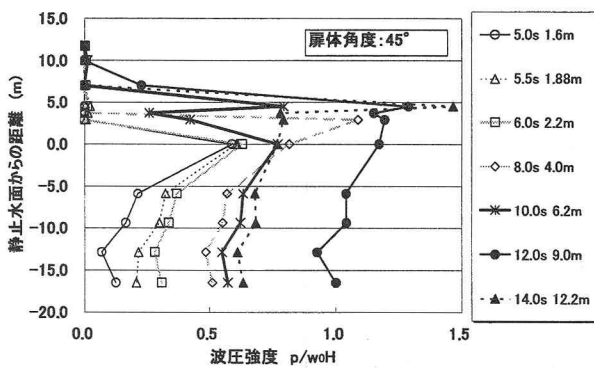


図-11 同時波圧の鉛直方向分布（起立角度45°）

図-12はフラップの起立角度が120度の場合の計測結果である。いずれの周期と波高で水面付近に波圧強度のピークがあり、海底方向に向かって減少する傾向がある。静水面以上では周期が長くなると、波が遡上して波圧が上方にも生じる。

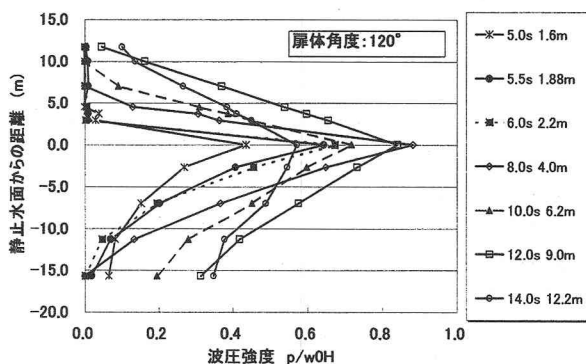


図-12 同時波圧の鉛直方向分布（起立角度120°）

6. 遡上実験

(1) 遡上実験の方法

波圧実験と同時に、フラップゲートの表面を遡上する高さをも、図-13に示すようにフラップゲート模型の表面

に沿って設置した容量式波高計で測定した。

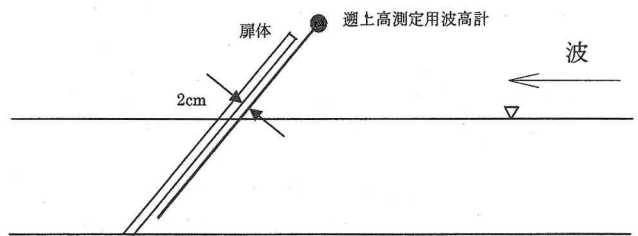


図-13 遡上高の測定方法

(2) 遡上実験結果

遡上波形の一例として、起立角60度、周期12s、波高9mの条件を写真-1に示す。この条件の場合には、波面がゲート表面を遡上した後に、静水面よりかなり高い位置でゲート表面から離れ、沖側に向かって巻き波砕波のような状態で打ち込む様子がわかる。

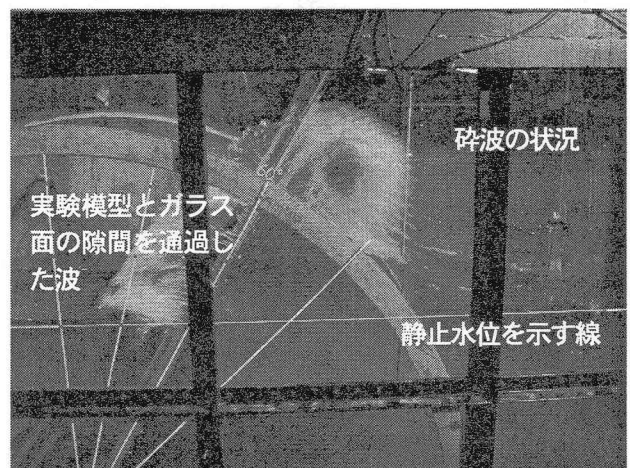


写真-1 遡上波の状況（起立角60度、T=12s、H=9m）

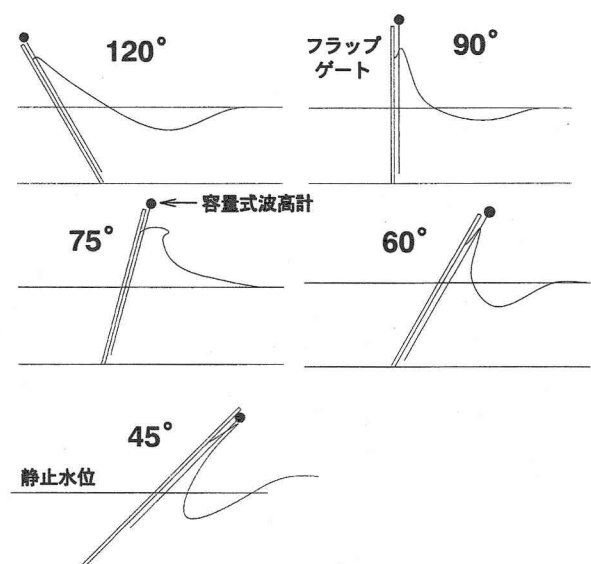


図-14 遡上波形の観察図

各フラップ角度での遡上波形の状態を図-14に示す。

この図より、起立角90度では重複波的な上下方向の水面変動を生じ、フラップゲートを波の来襲方向に傾けると、傾き角に応じて遡上波形が鋭角になる様子がわかる。

フラップゲートの表面に沿って設置した容量式波高計で計測した水面変動を、鉛直方向の高さに換算し、通過波高で除して無次元化した遡上高を、起立角度によって比較すると図-15のとおりである。どの起立角度においても、波形勾配が大きいほど遡上高が高い。起立角度による遡上高の差は明確ではないが、波形勾配が小さい(概ね0.06以下)条件では120度の遡上高がやや大きく、波形勾配0.1未満では75度より90度の遡上高がやや大きいことが分かる。

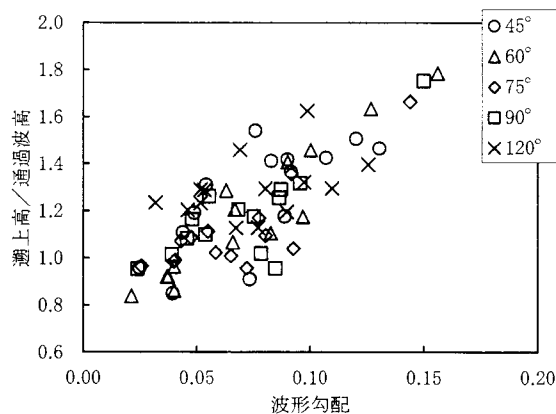


図-15 遡上実験結果

## 7. 結論

フラップ式水門の現地適用に向けて、越波特性、反射特性及びフラップ式水門に作用する波圧・波力の特性について、水理模型実験によって検討した。この実験によって得られた成果は以下のとおりである。

- (1) フラップの起立角度が大きいほど反射率が大きく、越波流量も多い。
- (2) フラップの起立角度が大きい場合には水面付近に波圧のピーク値を生じ、水面下の波圧強度は小さくなる傾向がある。合田式による波圧算定値は概して安全側の結果を与える。一方、フラップの起立角度を小さくすると、波周期が長い場合には水面より少し上方でピークが生じ、水面下での波圧強度は深さ方向に減少しなくなり、起立角度が45度の場合には波力が合田波圧よりかなり大きくなる。
- (3) 起立角度の小さいほうが反射率や越波流量は小さい

が、起立角度が小さすぎると波圧強度が大きくなるので、起立角度の設定には注意を要する。

- (4) どの起立角度においても、波形勾配が大きいほど遡上高が高いが、起立角度による遡上高の差は特に明確ではない。

今後は数値波動水路による計算結果との比較を行い、適切な構造諸元を選定する予定である。また津波への影響、フラップの浮上と沈降時の波浪動揺についても検討したい。なお本研究は独立行政法人港湾空港技術研究所と大型防潮フラップゲート研究グループ(構成:早稲田大学, 石川島播磨重工業株式会社, 川崎重工業株式会社, 新日本製鐵株式会社, JFEエンジニアリング株式会社, 日立造船株式会社, 三井造船株式会社, 及び三菱重工業株式会社)の共同研究として行った。

## 参考文献

- 1) O. Kiyomiya, K. Inoue: A plan of large-scale Storm Surge Barriers to Protect Urban Areas from Storm Surge Disaster, Techno-Ocean, 2002, Nov.
- 2) ベネチアの水門のホームページ: Safeguarding of Venice, <http://www.salve.it/uk/index.html>
- 3) Isaacson, E.: Waves against an overhanging cliff, Comm. Pure and Appl. Math., Vol. 1, pp. 201-209, 1948.
- 4) 岩垣雄一, 井上雅夫, 吉川昌宏: 逆勾配のり面の波の遡上, 反射および波圧について, 昭和40年度土木学会関西支部学術講演会講演概要, pp. 103-104, 1965.
- 5) 井上雅夫: 逆勾配のり面の水理特性について, 第21回海岸工学講演会論文集, pp. 417-421, 1974.
- 6) 井上雅夫, 海津憲一, 灰谷繁: 逆勾配のり面の水理特性について(2)越波特性, 第22回海岸工学講演会論文集, pp. 387-390, 1975.
- 7) 片岡保人, 他6名: 越波低減型防波護岸の天端高さとして作用波圧, 第14回海洋開発シンポジウム, pp. 405-409, 1998.
- 8) G. Vittori: Oscillating tidal barriers and random waves, Journal of Hydraulic Eng., pp. 406-412, April, 1998.
- 9) 富田孝史, 下迫健一郎他: 大規模可動式高潮防潮堤に関する基礎的研究—フラップゲートの水理特性と試設計, 港湾空港技術研究所資料, No. 1060, 31p, 2003.
- 10) 沿岸開発技術研究センター: 数値波動水路の研究・開発, 沿岸開発技術ライブラリーNo. 12, 2001.
- 11) 合田良實, 鈴木康正, 岸良安治, 菊池 治: 不規則波実験における入・反射波の分離推定法, 港湾技研資料, No. 248, 1976.