

# フラップ式可動ゲートの津波低減性能 に関する模型実験

EXPERIMENTAL STUDY OF THE FLAP TYPE GATE  
AS A TSUNAMI COUNTERMEASURE

白井 秀治<sup>1</sup>・藤田孝<sup>2</sup>・木村雄一郎<sup>3</sup>・山口映二<sup>4</sup>・仲保 京一<sup>5</sup>

Shuji SHIRAI, Takashi FUJITA, Yuichiro KIMURA, Eiji Yamaguchi and Kyouichi NAKAYASHU

<sup>1</sup>正会員 工修 日立造船株式会社 技術研究所 (〒551-0022 大阪市大正区船町2-2-11)

<sup>2</sup>正会員 工修 日立造船株式会社 企画・開発部 (〒551-0022 大阪市大正区船町2-2-11)

<sup>3</sup>工修 日立造船株式会社 技術研究所 (〒551-0022 大阪市大正区船町2-2-11)

<sup>4</sup>正会員 日立造船株式会社 技術研究所 (〒551-0022 大阪市大正区船町2-2-11)

<sup>5</sup>正会員 日立造船鉄構株式会社 水門企画グループ (〒592-8331 大阪府堺市西区築港新町1-5-1)

The flap type gate has been developing as storm surge and tsunami countermeasure. Because the flap type gate closes a harbor quickly, it is thought to be effective as a tsunami countermeasure. However, there are some uncertainties in the hydraulic and hydrodynamic characteristics against tsunami. In this paper, two-dimensional hydraulic tests were carried out on the model of scale 1/60 in the water channel with wave maker, and wave pressure and gate behavior of the flap type gate were investigated. As a result, it confirmed that a modified flap type gate was effective as a tsunami countermeasure.

*Key Words : gate, flap, tsunami, storm surge, hydraulic test, disaster mitigation*

## 1. はじめに

南海, 東海, 東南海地震の地震津波が危惧されるなか, 東南アジア, インド等に甚大な被害をもたらした2004年のインド洋大津波の発生以降, 日本でも全国規模で本格的かつ精力的な防災対策が実施されつつある。津波の被害抑止策としては, GPS (Global Positioning System) を用いた津波計による津波予知や港口を封鎖する可動式津波水門などが新技術として検討されている。このような可動式津波水門としては, ゲート底部に設けた回転軸周りにゲートを回転可能な構造として, 通常時は水中に倒伏し, 高潮・津波来襲時に扉体の浮力により起立浮上して港口を閉鎖するフラップ式可動ゲート (以下フラップゲート) が有望視されており, 国内の各所で実用化へ向けて研究が進められている<sup>1)2)3)</sup>。フラップゲートは, 扉体の傾斜方向 (順フラップ: 港内側に傾斜, 逆フラップ: 港外側に傾斜) や浮力の与え方, 水圧荷重の支持方法, 扉体の係留方法などによって幾つかに分類されているが, 共通の特徴として以下のものが挙げられる。①平常時は水底に格納するため船舶に対する高さ制限がなく, 従来の防潮水門に

比較して大がかりな門柱や広大な格納用地が不要なため, 環境・景観への負荷が少ない。②水路の閉鎖・開放時間が短く, 船舶の運航を阻害する時間が最小限で済むため, 我が国の港湾の入口への設置に適している。③ゲートの開閉に浮力を利用することにより駆動装置をシンプルかつコンパクトにでき, 建設費用並びに維持管理費用の大幅な縮減が期待できる。

筆者らは, 津波や波浪による水圧荷重を, シンプルな構造で効率よく支持する事が可能な, 図-1に示すウエイト付きテンションロッド係留によるフラップゲートの開発を進めている<sup>4)</sup>。テンションロッドは, 支持荷重をできるだけ小さくするために, ゲート回転軸から最も離れたゲート頂部付近で扉体を支持し, ロッド定着部に取付けられた回転式のウエイトは, 動水圧作用時の衝撃荷重を緩和するダンパーの役割を果たす。本形式のフラップゲートに関するこれまでの研究<sup>4)</sup>から, 閉鎖時間が津波防災設備としての所要時間を満足しうること, 波浪による荷重の支持方法として本係留に問題がないことが確認されている。しかしながら, 津波作用時の波圧や係留系への載荷重, 支持点での荷重反力など設計に必要な水理特性や力学特性, 越波量など

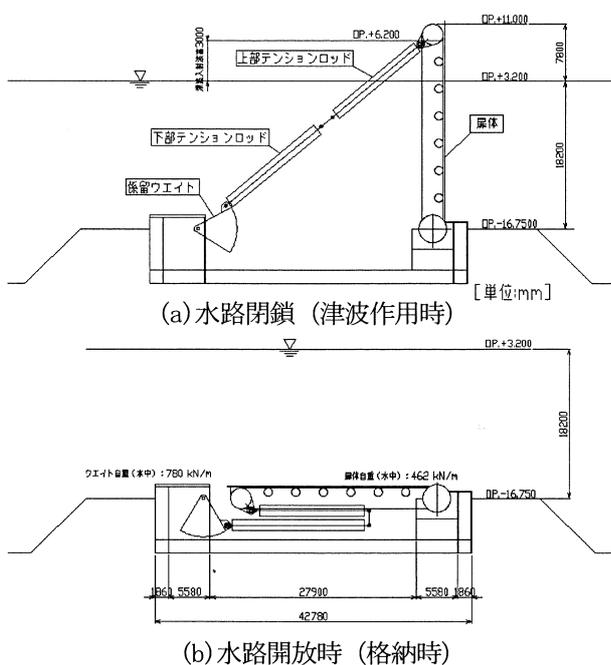


図-1 フラップゲート従来構造<sup>4)</sup>

の防災計画に必要な機能・性能が十分に把握されていないのが現状である。また、動揺式フラップゲートでは、津波作用時、波圧による衝撃荷重に加えて、ゲート運動に伴う慣性力も加わるため、従来の津波に対する設計法をそのまま適用することは危険である。そのため、津波衝突時に発生する衝撃荷重を把握するとともに、津波作用時の衝撃緩和対策の開発が課題となっている。

そこで、本研究では、二次元造波水槽にて模擬津波を発生させ、フラップ式可動ゲートに作用する波圧やロッド軸力、ゲート挙動や越流量などを計測し、防災設備としての有効性を確認すると共に、段波作用時の衝撃緩和策の検討を行った。

## 2. フラップゲート構造

本研究では、動揺式フラップゲートの基本型とその改良型、さらに動揺式との比較のための固定型の合計3種類のモデルに対して検討を行った。

### (1) 基本型 (従来構造<sup>4)</sup>)

フラップゲートの基本型は、図-1に示した従来タイプ

のもので、係留ウエイト付きテンションロッドによって支持する構造である。ロッド端部に取付けた係留ウエイトは、函体部との定着点で回転する構造であり、ゲートの起立に伴ってロッドにより持ち上げられ係留力が增加する。これにより、ゲートの起立速度を緩やかにし、ゲートが締め切られる瞬間にロッドに作用する衝撃的な荷重を緩和するものである。

### (2) 改良型 (起立運動安定化)

改良型は、基本型の下部テンションロッドに不透過のプレート水流に抗する方向に付加した構造で、プレートに作用する波圧を利用して、段波状津波が作用した際の急激な起立運動を抑制してロッドに作用する衝撃荷重の軽減を期待するものである。すなわち、プレートが受ける波圧はロッドの関節部を折りたたむ方向に作用し、フラップゲートはロッドによって引き寄せられる。これはフラップゲート本体が受ける波圧によって生じる力の向きと逆方向なり、ゲートの起立運動が緩やかになり安定化される。

### (3) 固定型

固定型は、固定式フラップゲートを想定したもので、動揺式 (基本型・改良型) との比較のために実験を行う。固定型は、係留部材を持たず、底部や側部に設けた支持部で港外と港内の両方向からの荷重に対してゲートを完全固定する構造である。従って、ゲート動揺による伝達波の発生が無いため港内静穏化に有効であり、動揺式に比べて構造が単純化できる特徴がある。一方で、巨大な水圧荷重に対抗するために強固な構造が必要となり、建設コストが高いことが問題となっている。実験でのゲート角度は、固定式に対する既往の研究で検討がされている75° (港外方向へ傾斜で水面とゲートのなす角) とした。

## 3. 水理模型実験

### (1) 実験方法と供試模型

実験は、長さ50m、幅1m、高さ1.2mの二次元造波水槽を用いて、模型縮尺  $S = 1/60$ で行った。実験装置全体の概略を図-2に示す。造波装置から模型設置地点までの海底勾配は、 $i = 1/20$ と $i = 1/150$ とした。模型は、造波板から約30mの位置に設置し、3種類の水深 (模型位置水深: 10cm, 20cm, 30cm) に対して実験を行った。津波実験としては、長手方向の距離が十分ではないため、

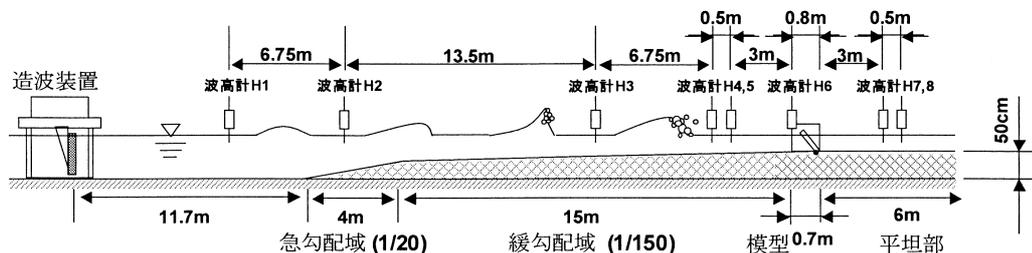


図-2 実験装置全体の概略

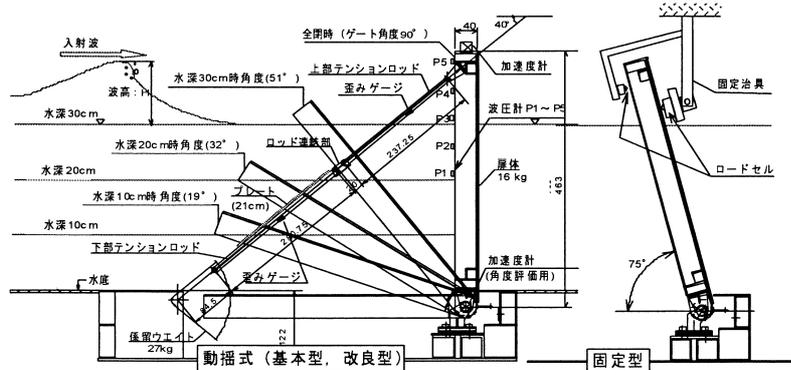


図-3 ゲート模型概略図

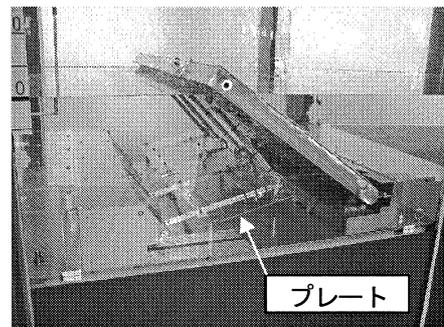


図-4 実験供試体 (水深20cm)

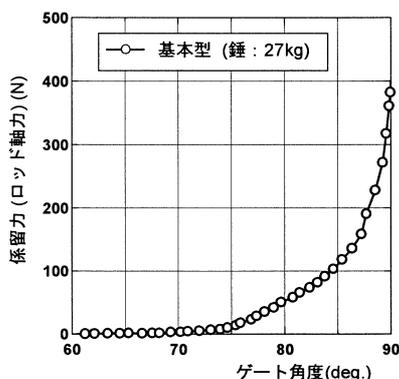


図-5 基本型および改良型の係留特性

表-1 模型構造特性の所要値に対する偏差

	実機	模型 (S=1/60)		
		所要値	実際	偏差
扉体重量	kN 25,694	N 142.74	159.15	+12%
極慣性モーメント ※1	kgm <sup>2</sup> 4.08×10 <sup>6</sup>	kgm <sup>2</sup> 0.0063		
重心位置 ※2	m 10.302	m 0.17	0.19	+10%
転倒モーメント ※3	kNm 265,112	Nm 24.55	28.48	+16%
浮力	kN 27,673	N 153.74	184.44	+20%
浮心位置 ※4	m 14.513	m 0.24		
浮上モーメント	kNm 401,631	Nm 37.19	44.51	+20%
扉体水中重量	kN -1,979	N -10.99		
起立モーメント	kNm 136,519	Nm 12.64	16.04	+27%
総慣性モーメント	kgm <sup>2</sup> 4.54×10 <sup>6</sup>	kgm <sup>2</sup> 0.70	1.09	+55%

※1 回転軸周りの極慣性モーメント

※4 回転軸中心から扉体浮心までの距離

※2 回転軸中心から扉体重心までの距離

※5 実機:1ブロック50m幅当り, 模型:1m幅当り

※3 転倒モーメントは反時計回りを正, 浮上・起立モーメントは反時計回りを正

長手方向に大きくひずんだ実験となるが、津波の先頭部がゲートに作用した時の挙動に着目して評価をするため、大きな問題はないものとする。

模型概略を図-3に、実験供試体を図-4に示す。模型化においては、ゲートの代表寸法（扉高、厚み）、重量、浮力および慣性モーメントを相似した箱形形状とした。また、津波による衝撃荷重に対する強度を考えて、フレームは鋼製とし、アクリルとウレタンフォームで形状を形成した。表-1に模型の構造特性を示す。模型重量は所要値に比べて1割超過、慣性モーメントは、6割超過、転倒モーメントと浮上モーメントは、それぞれ、1.6割、2割超過となっている。扉体重量16kgに対して係留ウエイト重量は、最大27kg(可変)であり、図-5に示すような係留特性をもっている。ゲート角度70°付近から、係留力が作用し始めて、90°付近では、400Nほどの力が必要になる。実験では、容量式波高計を用いて8箇所の水位を、小型防水加速度計によりゲート頂部の加速度を、扉体前面の5カ所に取付けた波圧計により波圧を、また、テンション材にとりつけた8カ所の歪みゲージによりロッド軸力を、同時に計測した。また、固定型に対する実験では、ロッド軸力の代わりに、ゲート固定治具とゲートの間に取り付けたロードセルを用いてゲートに作用する荷重を計測した。計測は、サンプリング時間1ms(1kHz)で、120秒間行った。

## (2) 実験条件

疑似津波は、可動幅1400mmのピストン型造波装置を

用いて生成し、造波板を一度だけ押し出して生成する押し波初動型を用いた。造波板の押し出しによって生成される孤立波は、ストロークと造波板の移動速度によって波高と波長が変化する。実験では、造波板ストローク60, 80, 100, 120cmの4種類に対して、造波板を押し出す時間を、5.0, 3.0, 1.5秒の3種類に変化させて、合計12ケースの孤立波を作成した。

## (3) 津波作成予備実験

模型の無い状態での、波の波高、変形特性を知るために、模型を設置しない状態での予備実験を実施した。図-6に予備実験結果および福井らの波速-波高の関係式<sup>5)</sup>を示す。福井らの算定式は、式(1)で示され、段波の波速を算定できるが、算定値は、本実験結果とよく一致する。粗度係数 $\eta$ は0.9を用いた。また、波速は、波高計H4とH5を通過する波の峰の時間差から算出した。

$$c = \sqrt{\frac{g(H+h)(H+2h)}{2(H+h-\eta H)}} \quad (1)$$

ここで、 $g$ : 重力加速度、 $h$ : 水深、 $H$ : 入射波高、 $\eta$ : 粗度係数である。

次に、波の変形状態を見る。図-7に、水深30cm、造波板ストローク120cm、造波板移動速度80cm/秒のケースにおける造波板変位と各波高計の水位の時刻歴を示す。深水域で生成された孤立波は、1/20海底勾配部を通過して深水域から浅水域へ進む過程で、波高が増幅され、1/150の緩斜面を遡上する段階でさらに波高は増

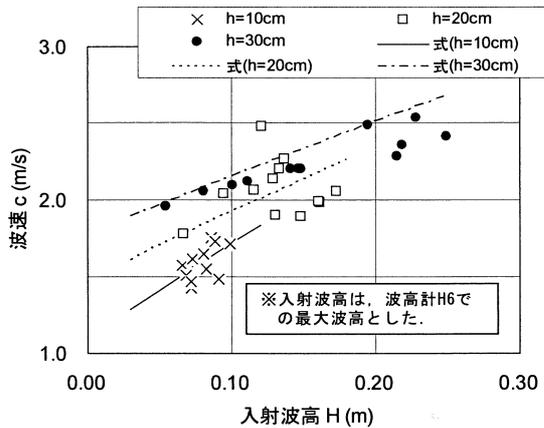


図-6 入射波高と波速の関係 (予備実験)

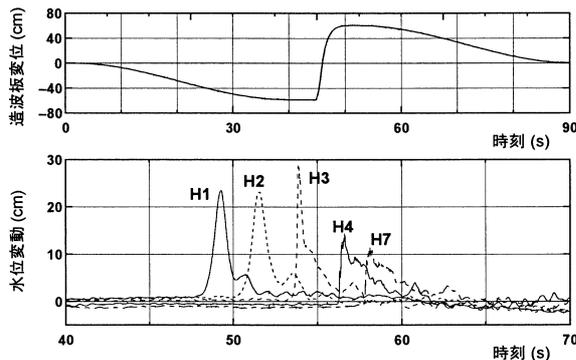


図-7 造波板変位と水位変化時刻歴

加し続け、碎波限界水深に達したところで碎波する。既往の研究では、一様水深における孤立波の最高波高(極限条件)は $H/h=0.827$ とある<sup>6)</sup>。今回の実験においても、同程度 $H/h=0.8$ の結果が観測された。また、段波形状は、碎波段波、波状段波およびゲート直前で碎波する段波の3種類に大別され、水深20cmでは碎波段波のケースが多く、水深30cmの実験では波状段波のケースが多くなった。

## 4. 実験結果および考察

### (1) 波圧特性

#### (a) 波圧の時間変化

図-8に、水深20cm、波条件(ストローク:120cm、移動速度:80cm/s、入射波高:19.5cm、碎波段波)における、最大動波圧を計測した波圧計の波圧時刻歴の比較を示す。基本型と改良型には、ゲート傾斜の概略評価のために取付けたゲート回転軸位置の加速度計から算出したゲート角度と波高計H6の水位を、固定型には、ゲート前面(扉体から1cm)に沿わせて配置した波高計から読み取った水位と波高計H6の水位も併せて示す。この結果から、基本型、改良型と固定式で最大動波圧が発生するタイミングが異なることがわかる。まず動揺式には、段波の到達時(水位の上昇開始時)、係留ウエイトの荷重が作用し始める時、ゲートが締め切られ

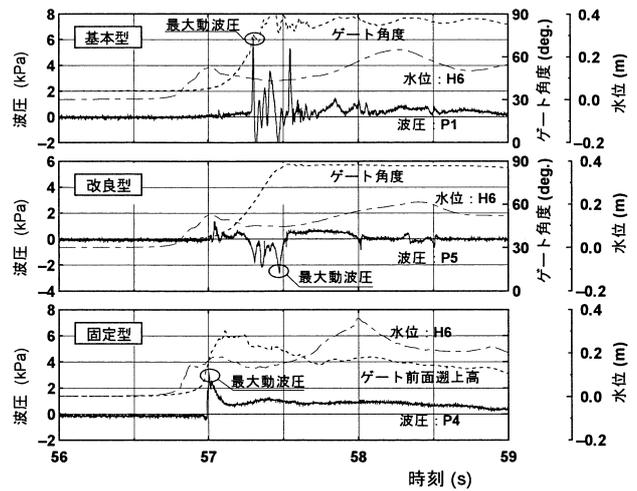


図-8 波圧の時間変化

る瞬間の3カ所に動波圧の大きな山が存在し、係留ウエイトが効き始めてから締め切られるまでの間は波圧が激しく振動する。基本型では、係留ウエイトの効き始めに最大動波圧が発生し、改良型では、ゲート締め切り時に最大動波圧が発生している。一方、固定型には、段波到達時のみに動波圧の山が存在し、そこで最大動波圧が発生する。また、ゲートの起立運動についてみると、改良型は、不透過プレートが期待通りに機能して、基本型に比べて、角度 $80^\circ$ 付近から滑らかに且つ安定して締め切る事ができている。ゲート前面の水位変化を見ると、動揺式は固定式に比べて重複波高が小さくなる傾向があり、改良型は基本型に比べてさらに重複率が小さくなる。

#### (b) 最大動波圧

福井ら<sup>7)</sup>は、最大動波圧の算定式として次式を提案している。

$$p_{dm} = K w c^4 / g^2 H \quad (2)$$

ここに、 $c$ : 段波速度、 $p_{dm}$ : 最大動波圧、 $H$ : 入射波高、 $K$ : 動波圧係数( $K=0.33\sim 0.51$ )、 $w$ : 水の単位重量、 $g$ : 重力加速度である。

図-9に、水深30cmと20cmにおける本実験結果と動波圧係数を $K=0.51$ (福井らの直立壁での実験値)として算出した値も併記する。図中データは、異なる段波形状(波状、碎波、直前碎波)のものが混在しているため、ばらつきが大きい。動波圧が波速の4乗に比例する傾向は見られる。また、計測された最大動波圧の大きさは、福井ら<sup>7)</sup>の実験結果に比べると大きめの値を示しており、基本型で、水深20cmの時に最大11倍、改良型と固定型では、水深20cmの時に最大3.9倍となった。動揺式では、係留ウエイトが効き始める瞬間またはゲートが閉め切られる瞬間に、ゲートの起立運動に制動をかけるように水流とは逆向きの加速度がゲートに作用するため、最大動波圧を増加させていると考える。また、実験結果が算定式よりも大きめの値となったのは、天端高さやゲート角度(固定)の違いも影響していると考えられる。水深30cmと20cmの比較から天端高の

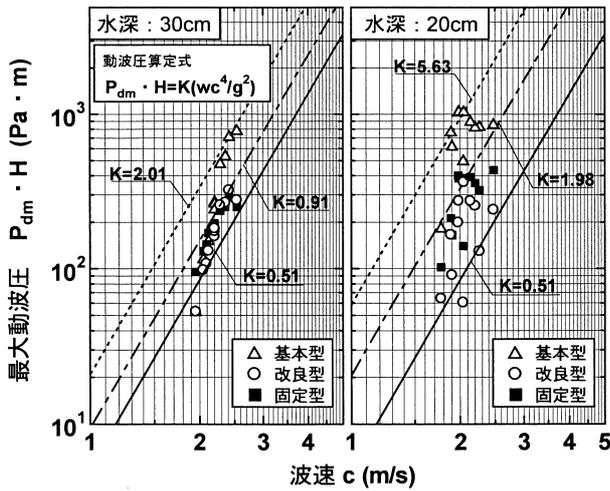


図-9 最大動波圧

違いによる影響を見ることができ、相対天端高さの高い水深20cmの方が、水深30cmに比べて最大動波圧が、2~2.8倍程度大きくなる傾向にある。天端高さは、越流量と大きく関係するため、無意味に天端高を低くすることはできないが、越流量を許容値に満たす範囲で、天端高さを低くできれば、最大動波圧を軽減する事も可能と考える。

(c) 動波圧の鉛直分布

段波波圧の鉛直分布の算定式としては、谷本ら<sup>8)</sup>や池野ら<sup>9)</sup>などがあり、次式で表される。

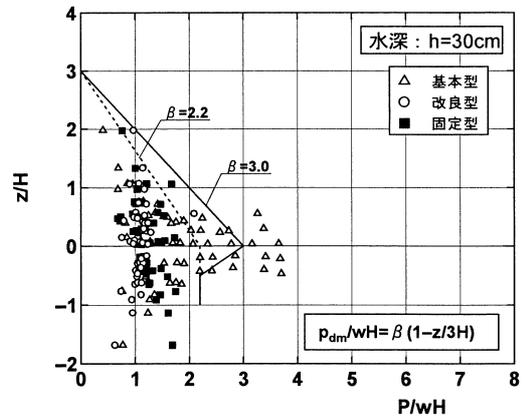
$$p_{dm} / \rho g H = 2.2(1 - z/3H)\alpha \quad (0 \leq z/H \leq 3) \quad (3)$$

ここで、 $z$  : 静水面からの鉛直距離、 $\alpha$  : 碎波による割り増し係数 (谷本:  $\alpha=1.0$ , 池野:  $\alpha=1.36$ )

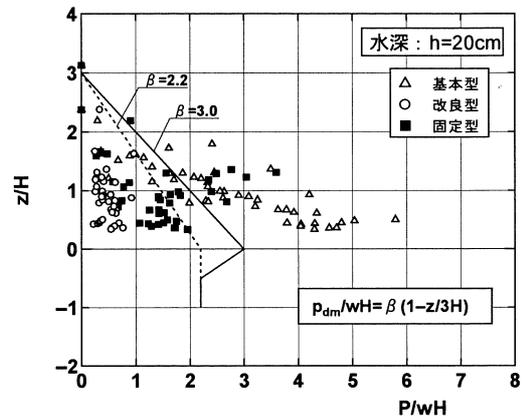
図-10に、水深30cmと20cmにおける本実験結果と谷本<sup>8)</sup>、池野<sup>9)</sup>による算定式から計算した直線も併記する。基本型では、池野ら<sup>9)</sup>の算定式よりも大きな値を示し、水深30cmでは1.2倍、水深20cmでは1.9倍にもなった。最大動波圧の発生位置は、水深30cmでは、静水面付近、水深20cmでは、静水面よりもやや上方となった。固定型では、水深20cmの最大値こそ池野ら<sup>9)</sup>の算定式の1.2倍と、大きな値となったものの、その他の場所では、谷本ら<sup>8)</sup>の算定式に近い結果となった。最大動波圧の発生位置は、水深30cmでは、静水面付近、水深20cmでは、ゲート最上部であった。改良型では、最大動波圧は、谷本ら<sup>8)</sup>の算定式に近い値を示すが、その他の場所での波圧は、谷本ら<sup>8)</sup>の算定式の半分程度であった。また最大動波圧の発生位置は、いずれの水深においても、ゲート最上部であった。

(d) 波力によるゲートの回転モーメント

図-11(a)(b)は、水深30cmと20cmの実験においてゲートに作用した回転軸周りのモーメントを示している。回転モーメントは、テンションロッドの軸力と回転軸から荷重作用点までの幾何距離から算出した。基本型では、津波到達直後のゲートを閉め切る運動に伴う慣性力が加わって、固定型に比べて2倍以上の大きな衝



(a) 水深30cm



(b) 水深20cm

図-10 動波圧の鉛直分布

撃荷重が作用しているが、テンションロッドにプレートを取付けた改良型では、水深30cmの時には固定型と同程度、水深20cmの時には固定型よりも若干小さくなっている。このことから、プレートを付加した改良型がゲートの構造強度に対して有利となる事が確認された。各タイプの回転モーメントの大小関係は、動波圧特性の結果と整合する。すなわち最大動波圧が最も大きかった基本型が、回転モーメントも最も大きく、水深20cmで改良型が固定型よりも動波圧が小さくなる傾向が回転モーメントにおいても確認されている。

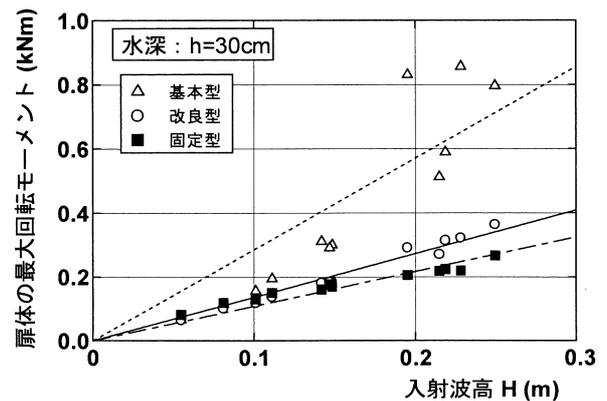


図-11(a) 波力によるモーメント (水深30cm)

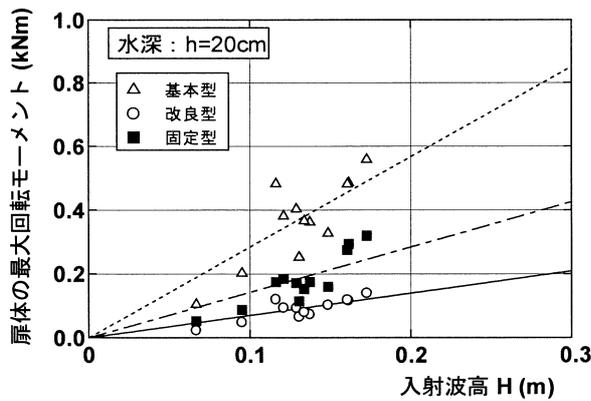
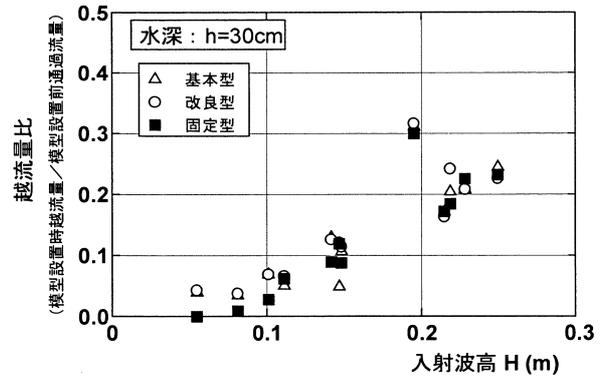
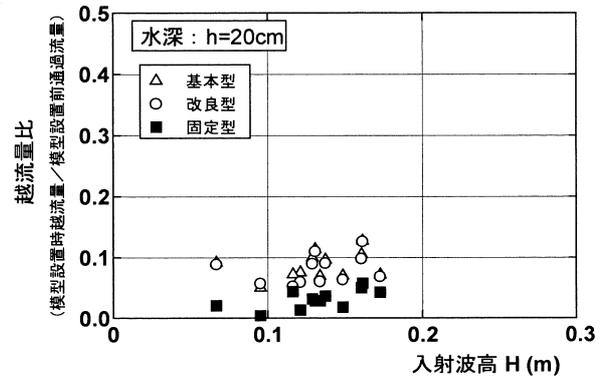


図-11(b) 波力によるモーメント (水深20cm)



(a) 水深30cm



(b) 水深20cm

図-12 越流量比

## (2) 越波特性

図-12(a)(b)に水深30cmと20cmの実験における越流量比の比較を示す。越流量比(図の縦軸)は、模型設置時の越流量を模型設置前の通過流量で除した比であり、越流量は模型より岸側に設置した波高計から得られる水位変動を一定時間で積分して求めている。動揺式と固定式は同程度の越流量比であり、相対天端高さの低い水深30cmケースにおいても越波して進入する津波流量は3割程度以下となっている。動揺式では、浮力による全閉までの閉動作の応答性が悪い場合、津波の先頭部分がある程度通過させてしまう危険性が指摘されていたが、ゲートの釣合い角度の小さい水深20cmケースにおいても固定式との差は僅かであり、津波の遮断性能としては十分であることが確認された。

## 5. まとめ

二次元造波水槽にて模擬津波を発生させ、フラップゲートに作用する波圧やロッド軸力、越流量などを計測し、防災設備としての有効性を検討した結果、以下の事項が明らかになった。

- ① 浮力のみで起立するフラップゲートは、津波に追従して十分な速度で起立し、港口を締め切ることが可能である。越流量比(模型設置時越流量/模型非設置時通過流量)は、3割以下となり、津波対策ゲートとしても十分活用可能と考える。
- ② 動揺式(基本型)では、固定式に比べて津波から受ける動波圧や回転モーメントが大きくなる傾向があるが、テンションロッドに不透過のプレートを取付ける改良により固定式と同程度以下に動波圧や回転モーメントを低減できる。
- ③ 不透過のプレートを取付けた改良型では、最大動波圧や動波圧の鉛直分布が、直立壁を対象とした既往の算定式<sup>7)8)9)</sup>と同程度以下であるため、それらの実験式を設計に適用可能である。

改良型を実際に設計する上では、プレートに働く断面力を把握することが必要となる。今後は、プレートに作用する波圧特性を明らかにしていく予定である。

## 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) 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.
- 3) 清宮理, 下迫健一郎他: 高潮・地震津波用フラップ式水門の越波及び波浪特性について, 海洋開発論文集, 第21巻, pp.103-108, 2005.
- 4) 白井秀治, 永田修一他: 高潮・津波対策用のフラップ式可動ゲートの開発, 海洋開発論文集, 第21巻, pp.109-114, 2005.
- 5) 福井芳朗, 白石英彦, 中村充, 佐々木泰雄: 津波の研究(I)—一段波津波の波速について—, 第9回海岸工学講演会講演集, pp.44-49, 1962a.
- 6) 岩垣雄一, 榎木亨: 海岸工学, 共立出版, 1979.
- 7) 福井芳朗・白石英彦・中村充・佐々木泰雄: 津波の研究(II)—一段波津波の堤防に及ぼす影響—, 第9回海岸工学講演会講演集, pp.50-54, 1962b.
- 8) 谷本勝利, 鶴谷広一, 中野晋: 1983年日本海中部地震津波における津波力と埋立護岸の被災原因の検討, 第31回海岸工学講演会論文集, pp.257-261, 1984.
- 9) 池野正明, 森信人, 田中寛好: 砕波段波津波による波力と漂流物の挙動・衝突力に関する実験的研究, 海岸工学講演会論文集, 第48巻, pp.846-850, 2001.