

高潮・津波対策用フラップ式可動ゲートの 伝達波低減機構の開発

DEVELOPMENT OF A FLAP TYPE GATE REDUCING
TRANSMISSION WAVES INTO A HARBOR

白井秀治¹・木村雄一郎²・藤田孝³・山口映二⁴・仲保京一⁵

Syuji SHIRAI, Yuichiro KIMURA, Takashi FUJITA, Eiji YAMAGUCHI and Kyoichi NAKAYASU

¹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)

²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)

³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)

⁴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)

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

The flap type gate against storm surge and tsunami has many superior points in comparing with existing coastal structures for prevention of disasters. However, the flap gate has the problem that the gate itself sways because of waves from the open sea and generates waves into a harbor. In this study, a new flap type gate was designed, and the wave transmission characteristics on a new gate were investigated through a two-dimensional hydraulic experiment with the model of scale 1/35. The obtained results indicated that the transmission waves due to sway of the gate were reduced.

Key Words : *flap gate, storm surge, tsunami, experiment, transmission wave, sway of gate, disaster prevention*

1. はじめに

常時は海底に倒伏し、津波や高潮・高波来襲時に起立するフラップ式の港口・河口ゲートの研究開発と実機適用の検討が進められている^{1),2),3)}。フラップ式可動ゲートは、数メートル幅のユニット構造体で、海底に数基から数十基設置される。異常海象時には、浮力によってゲートを起立させ、すべての隣接ゲートが一体の連続壁となって港口や河口を遮蔽する。したがって、津波や高潮による港湾および河川の急速な水位上昇を抑制し、陸域への浸水を回避もしくは軽減することができる。フラップ式可動ゲートは、平常時に海底に倒伏しているため、港湾等の海水交換を阻害せず、船舶航行や漁業活動など港湾本来の利便性を損なうこともない。また、港湾や河口の視界を遮ることがなく、近年のウォーターフロントに求められる景観にも配慮した構造物である。さらに、工場で作成したユニットを該当海域に設置することが可能なため、大がかりな工事を必要とせず、従来のゲート構造物と比較して全体コストを低く抑えることができる。

このように、フラップ式可動ゲートは多くの利点をもつが、海底倒伏状態から浮力で起立させる構造であるため、ゲート本体の重量が軽く、短周期の波浪に応じて動揺する問題が生じる。このゲート本体の動揺は、沖から進行してきた風波やうねりを港内などへ伝達させてしまうために、台風などの高潮・高波発生時には好ましくない。そのため、ヨットハーバーや漁港など係留船舶の多い港湾や海岸線に居住空間が隣接している地域に設置されるフラップ式可動ゲートには、ゲート本体の動揺を抑制し、さらに港湾内や河川に伝達する波を低減できる機能の付加が望まれる。

著者らのこれまでの研究⁴⁾において、可動ゲートを介して伝達する波高は、沖からの入射波高の8割程度であることがわかっている。そこで、本研究では、フラップ式可動ゲートが本来もつ津波・高潮時の防災・減災機能を損なうことなく、可動ゲートの動揺抑制と港内への伝達波を低減させる新型構造の開発を実施し、水理模型実験によってその性能を確認した。以下には、動揺抑制および伝達波低減の新型構造の概略と、性能確認実験の内容および結果を報告する。

2. 伝達波低減構造

(1) 基本型（従来の構造⁴⁾）

基本型となる従来のフラップ式可動ゲートは、図-1に示すように可動ゲートに作用する波力と水位上昇による水圧荷重をテンションロッド係留によって支持する構造である。なお、基本型には水平フィンとプレートは付いていない。また、ロッド定着部に取り付けた回転式の係留ウエイトによりテンションロッドに作用する衝撃力を緩和している。

(2) 改良Ⅰ型（動揺抑制）

基本型の下部テンションロッドに不透過のプレートを付加した構造を改良Ⅰ型とする。この改良は、可動ゲート本体とプレートに作用する波圧によって、可動ゲートの動揺を抑制する効果を期待したものである。すなわち、図-1に示すように、プレートが受ける波圧はロッドの関節部を折りたむ方向に作用し、可動ゲートはロッドによって引き寄せられる。これは可動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となり、可動ゲートの動揺が抑制される。

(3) 改良Ⅱ型（伝達波の消波）

基本型可動ゲートの岸側（港湾内）壁面に水平フィンを付加したタイプを改良Ⅱ型と称する。この改良では、動揺を抑制することは難しく、主として可動ゲート近傍の水面で、伝達波そのものが消波されることを期待したものである。フラップ式可動ゲートでは、造波装置と同じように、可動ゲート本体の動揺によって岸側に波が発生し、この波が伝搬していく。図-1に示すように、水平フィンは可動ゲート壁面および近傍で、水面を乱し、動揺によって生じた波のエネルギーを散逸させる。この効果によって、フラップ式可動ゲートからの伝達波を低減するというものである。

(4) 改良Ⅲ型（複合タイプ）

基本型に改良Ⅰ型と改良Ⅱ型の変更を同時に施した複合タイプであり、これを改良Ⅲ型とする。改良Ⅰ型の動揺抑制効果と改良Ⅱ型の消波効果は、それぞれのメカニズムが異なり、改良による個々の効果を相殺することなく、相乗効果によってさらに効果的に伝達波が低減されることを期待したものである。

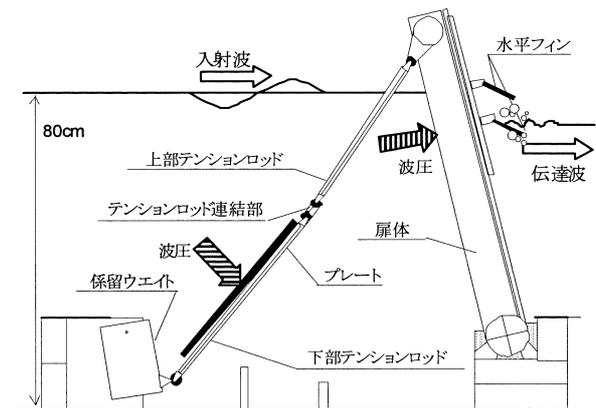
3. 水理模型実験

(1) 実験方法

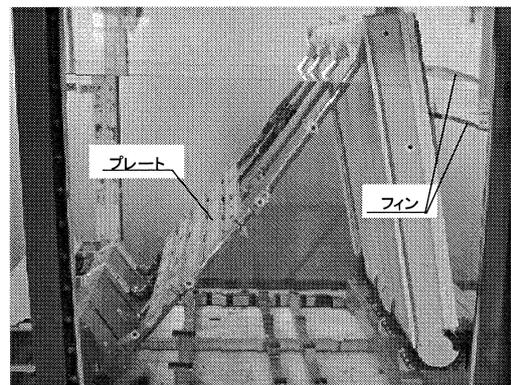
実験は2次元造波水槽（長さ 50m, 幅 1.0m, 高さ 1.2m）を用いて縮尺 1/35 で実施した。可動ゲートの回転加速度はゲート頂部に取り付けた加速度計を用いて計測し、可動ゲートの変位はビデオカメラ映像から画像式運動演算ソフトを用いて算出した。入射波と伝達波の波高は、フラップ式可動ゲートの沖・岸側に設置したそれぞれ2本の波高計より水位変動を計測し、反射波の影響を除去してもとめた。実験水槽および模型と波高計の設置位置を図-2に示す。

(2) 実験条件

実験は、フラップ式可動ゲートを挟んで、高潮などの水位差を考慮した場合と考慮しない場合を実施した。



(a) 構造の概略



(b) 実験供試体

図-1 フラップ式可動ゲート

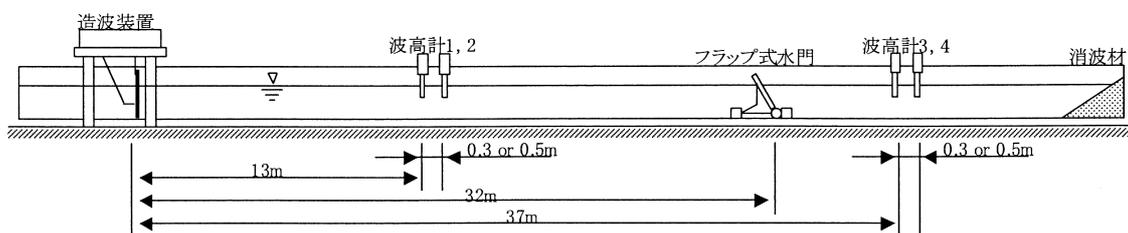


図-2 実験水槽と模型の配置

基本となる港内（フラップ式可動ゲートの岸側）の水深を 74cm（実機換算：26m）とし、水位差を設ける場合は可動ゲートを隔てた沖側の水深を 80cm（実機換算：28m）とした。したがって、実験における岸側水深は一定であるが、沖側水深は水位差のある場合とない場合の 2 種類となる。フラップ式可動ゲートでは、水位差によって可動ゲートの起立角度（静止中立状態で海底面とゲートがなす角度）が変化するが、水位差のない場合の起立角度は 55 度、水位差のある場合の起立角度は 81 度となり、沖側水深の違いによってゲート起立角度に 26 度の差が生じる。なお、実験で与えた水位差は、実機換算で約 2m であり、台風が停滞し、高潮などによる水位上昇が大きい場合を想定している。

入射波は、実機周期 4.0s~16.0s の範囲の規則波とした。波高は、入射波の波形勾配が $H/L=0.02$ および $H/L=0.04$ となるように設定した。これら波浪条件を表-1 に示す。なお、実機周期 14s と 16s の波形勾配 $H/L=0.04$ については、実験設備の制約があり実施していない。以下、本稿では高波時を想定した波形勾配 $H/L=0.04$ のケースについて報告する。

4. 実験結果

(1) 改良 I 型（動揺抑制の効果）

下部テンションロッドに不透過プレートを取り付けた改良 I 型の実験結果を記す。実験では、テンションロッドの軸方向に沿った長さが異なる 3 種類のプレート（250mm, 350mm, 450mm）を用い、それぞれの性能を比較した。なお、プレートモデルはアクリル製で完全な剛体とした。

a) 可動ゲートの動揺

可動ゲートの回転動揺量を図-3、図-4 に示す。図の縦軸は回転動揺の振幅、横軸は周期としている。図-3 は水位差のあるケース、図-4 は水位差のないケースである。両図より、プレートを取り付けた改良 I 型の動

揺振幅は基本型よりも小さくなっており、テンションロッドに取り付けたプレートの動揺抑制効果が確認できる。この動揺抑制効果は、水位差の影響を受けず、長周期帯での効果がより高くなっている。また、プレートが最も長い場合（450mm）の効果が大きく、水位差に拘わらず基本型と比べて動揺振幅が約 3 割低減されている。

b) 伝達波高

伝達波の特性は、可動ゲートから岸側に進行する伝達波と沖から進行してくる入射波の波高比（波高伝達率）を用いて評価する。水位差がある場合とない場合の波高伝達率を図-5、図-6 に示す。縦軸は波高伝達率、横軸は周期である。改良 I 型による波高伝達率は、水位差に拘わらず、基本型に比べて小さくなっており、低減効果はプレートの長い方が高い。これらの傾向は、可動ゲートの動揺に関する結果と類似しており、改良 I 型では、プレートの付加によって可動ゲートの動揺が抑制され、その結果として岸側への伝達波が低減されたと考えられる。

水位差のあるプレート長 350mm, 450mm の実験周期 1.52s（図-5）と、水位差のないプレート長 250mm の実験周期 1.69s（図-6）で、波高伝達率に若干の低下が認められる。これは、下部テンションロッドの不透過プレートと可動ゲートによって構成される空間と沖側水深、入射波の波長などによって決まる周期特性

表-1 波浪条件

実機換算	波周期(s)	実験波高(cm)			
		沖水深:74cm		沖水深:80cm	
		H/L=0.02	H/L=0.04	H/L=0.02	H/L=0.04
4.0	0.68	1.4	2.9	1.4	2.9
6.0	1.01	3.2	6.4	3.2	6.4
8.0	1.35	5.4	10.7	5.4	10.9
9.0	1.52	6.5	12.9	6.6	13.2
10.0	1.69	7.5	15.1	7.7	15.4
12.0	2.03	9.6	19.2	9.9	19.8
14.0	2.37	11.6		12.0	
16.0	2.70	13.6		14.0	

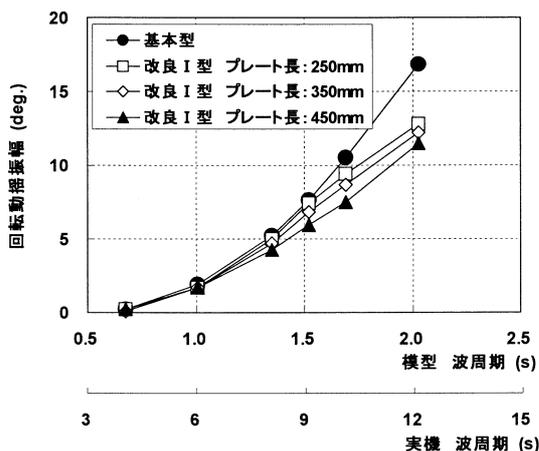


図-3 改良 I 型の回転動揺振幅（水位差あり）

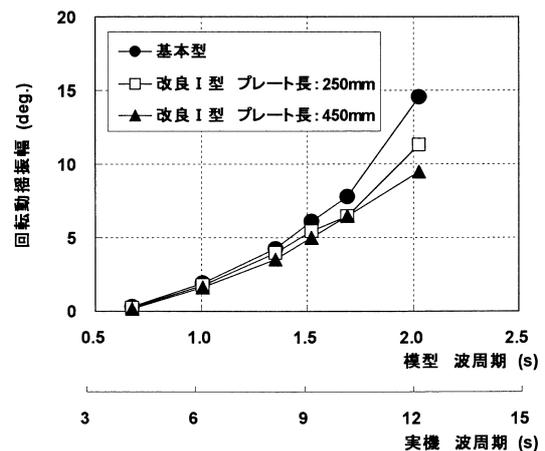


図-4 改良 I 型の回転動揺振幅（水位差なし）

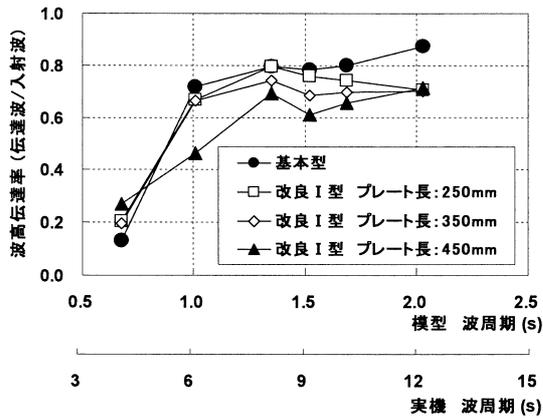


図-5 改良Ⅰ型の波高伝達率（水位差あり）

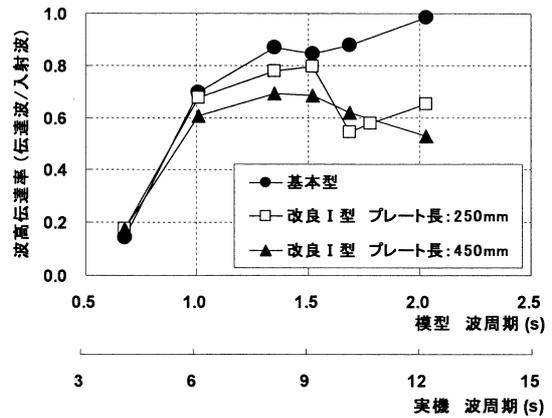


図-6 改良Ⅰ型の波高伝達率（水位差なし）

と考えられる。なお、図-6でプレート長 250mm に対する実験周期 1.74s のケースは確認のために実施した結果である。

以上より、下部テンションロッドに不透過プレートを取り付けた改良Ⅰ型は、可動ゲートの動揺抑制と伝達波低減の機能をもち、プレートは下部テンションロッドのほぼ全面を覆うサイズが適していることが確認できた。

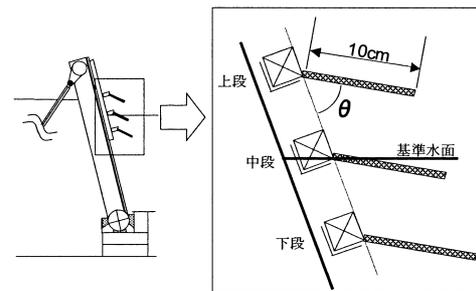


図-7 水平フィンの取付角度と取付位置

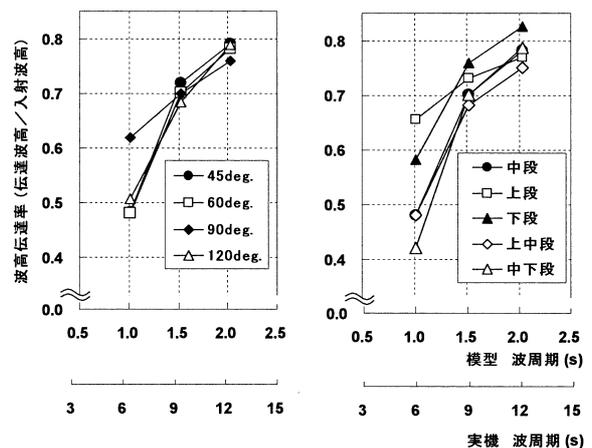
(2) 改良Ⅱ型（伝達波の消波効果）

可動ゲート壁面に水平フィンを取り付けた改良Ⅱ型の実験では、フィンの取付角度や位置などの構造条件を定めなければならない。しかし、複数のフィンの組合せも考えると構造条件は無数にあり、これらの条件を決定するための予備実験を先に実施した。予備実験では、高潮を想定した水位差のある場合のみとし、波浪条件を3種類（実験周期：1.01s, 1.52s, 2.03s）に限定した。フィンの長さは、同様の予備実験結果と実機設計の観点から、100mm（実機換算：3.5m）としている。また、フィン模型の材質はアクリルで、完全な剛体平板とした。

a) 予備実験

フィンの取付位置を図-7に示す可動ゲートの中段とし、フィンの取付角度（ θ ）を可動ゲートに対して45度、60度、90度、120度とした4ケースの実験を行った。図-8(a)は、波高伝達率を比較した結果であるが、フィンの取付角度が伝達波低減に与える影響はほとんど認められなかった。そこで、実機施工の容易性を考慮し、フィンの取付角度は60度とした。

取付位置の検討には、図-7に示す上段、中段、下段にそれぞれ1つのフィンを取り付けた場合と、2つのフィンを用いて上段+中段、中段+下段に取り付けた場合の合計5ケースの実験を実施した。波高伝達率を図-8(b)に示すが、予想されるように2つのフィンを用いた上段+中段、中段+下段のケースが良好な結果を示している。そこで、波高伝達率の高い長周期帯で性



(a) 取付角度の影響 (b) 取付位置の影響
図-8 水平フィン取付方法による波高伝達率の変化

能が良好な上段+中段へのフィン取付を採用した。

以上の水位差を与えた予備実験より、本実験に用いる改良Ⅱ型は、2つの水平フィンを基本型可動ゲートの上段と中段それぞれに、壁面に対して60度で取り付けた構造とした。

b) 可動ゲートの動揺

基本型と改良Ⅱ型（標準構造）の回転動揺振幅を図-9、図-10に示す。水位差がある場合（図-9）には、基本型と改良Ⅱ型の動揺振幅は同程度の値を示しており差はほとんど認められない。しかし、水位差のない

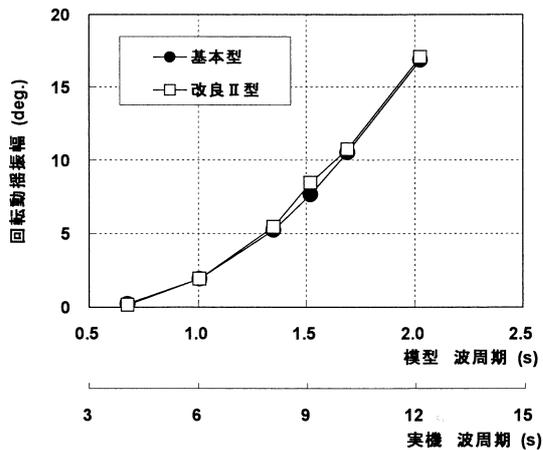


図-9 改良Ⅱ型の回転動揺振幅（水位差あり）

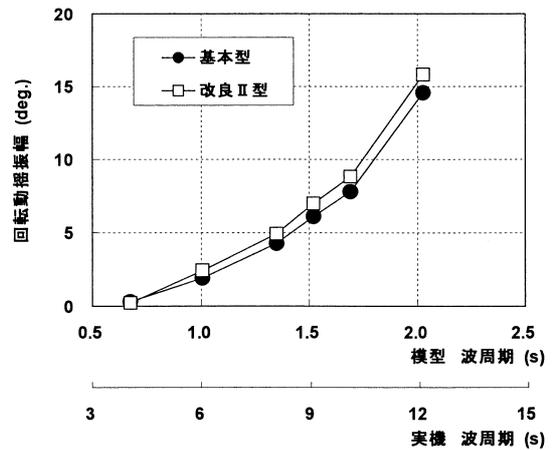


図-10 改良Ⅱ型の回転動揺振幅（水位差なし）

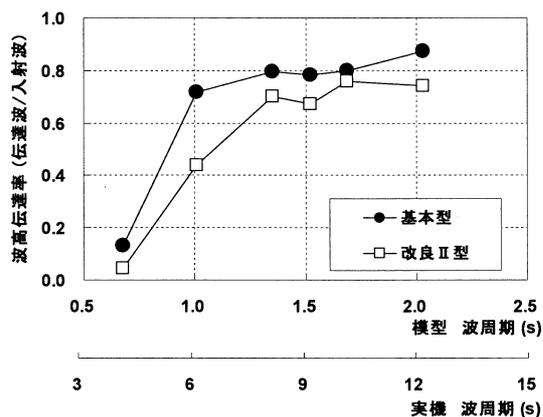


図-11 改良Ⅱ型の波高伝達率（水位差あり）

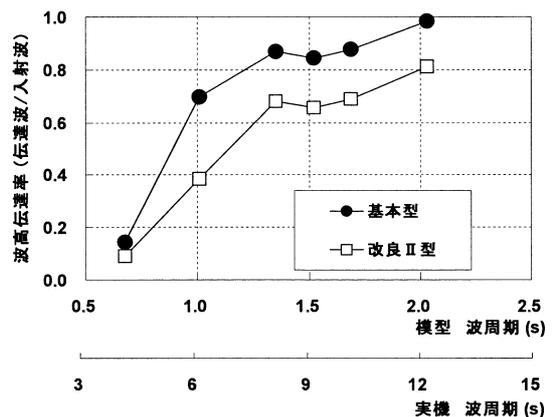


図-12 改良Ⅱ型の波高伝達率（水位差なし）

場合（図-10）には、改良Ⅱ型の動揺振幅の方が基本型よりも大きめの値を示している。これは、水位差のない状態では、可動ゲートの水平フィンによる消波効果が高く、動揺の障害となる岸側壁面の流体力が小さくなったためと考えられる。

c) 伝達波高

基本型と改良Ⅱ型の波高伝達率を図-11、図-12に示す。図より、改良Ⅱ型の波高伝達率は基本型の伝達率よりも小さくなっており、水位差のない場合（図-12）の方が低減効果は高いことが分かる。また、いずれの場合も、低減効果は長周期帯に限定されることなく、広い周期帯に対して有効である。

なお、水位差なしの場合には、可動ゲートの動揺振幅が基本型より大きいにも拘わらず、波高伝達率は低い値を示している。これは上記で述べたように、この場合のフィンによる消波効果が水位差ありの場合よりも高いことを示している。消波効果が高い理由は、水位差がない場合の可動ゲート起立角度は55度であり、水位差ありの場合よりも水面に対して平行に近い状態となっているため、上段フィンと中段フィンの鉛直距離は短く、逆に水平距離は長くなり、その結果、2つのフィンが効率的に伝達波を消波したと考えられる。

(3) 改良Ⅲ型（プレートとフィンの相乗効果）

改良Ⅰ型のプレートと改良Ⅱ型の水平フィンを取り付けた改良Ⅲ型の実験結果を以下に示す。プレートの長さは450mm、水平フィンは長さ100mmで取付角度60度、取付位置を上段+中段の2カ所とした。

a) 可動ゲートの動揺量

基本型とすべての改良型の回転動揺振幅について、水位差がある場合の結果を図-13、水位差のない場合を図-14に示す。改良Ⅲ型の動揺振幅は、基本型よりも小さくなっているが、水位差のある場合（図-13）には、改良Ⅰ型よりも若干大きめの値を示している。しかし、その差は僅かであり、改良Ⅲ型では、可動ゲートの動揺を抑制する不透過プレートの効果が十分機能していると考えられる。

b) 伝達波高

すべてのタイプの波高伝達率を図-15、図-16に示す。改良Ⅲ型の波高伝達率は、水位差のある・なしに関係なく、いずれのタイプよりも小さい値を示している。これは、プレートと水平フィンによる伝達波低減のメカニズムが異なり、両者を併用しても互いが機能し、効果が相乗されるという当初の推察と一致している。

したがって、プレートと水平フィンを併用した改良

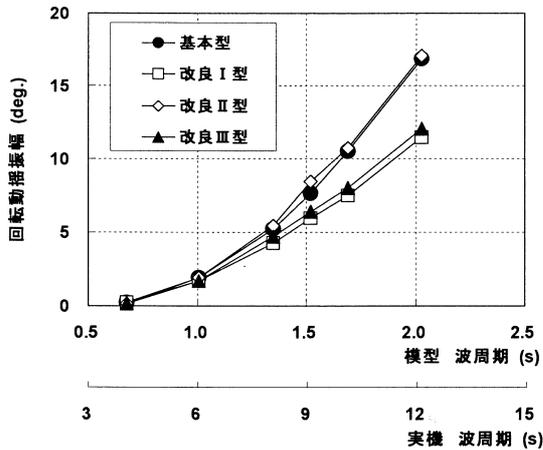


図-13 基本型と改良型の回転動揺振幅（水位差あり）

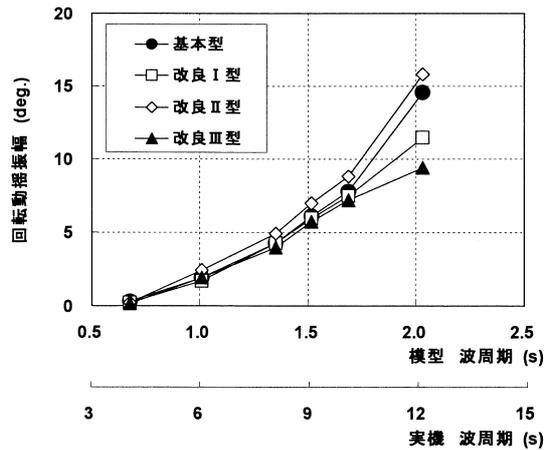


図-14 基本型と改良型の回転動揺振幅（水位差なし）

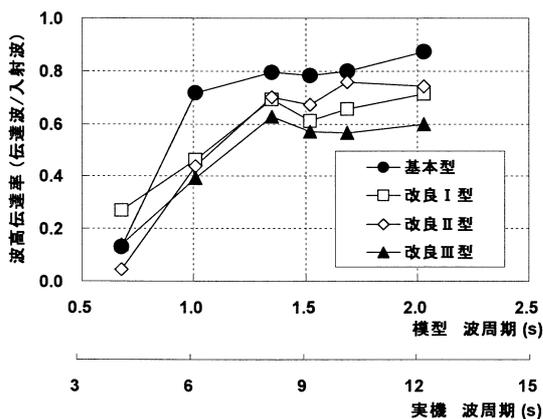


図-15 基本型と改良型の波高伝達率（水位差あり）

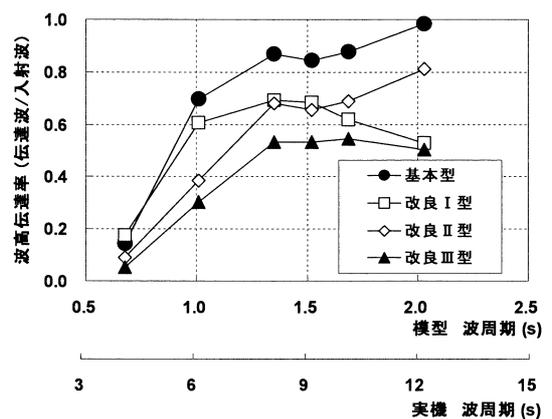


図-16 基本型と改良型の波高伝達率（水位差なし）

III型のフラップ式可動ゲートでは、高潮・高波等発生時に港湾や河川へ伝達する波を、実機周期12sという比較的長い周期の入射波に対しても、5～6割程度まで低減できることが確認できた。

5. まとめ

フラップ式可動ゲートを介して港内に伝わる伝達波を低減するため、3種類の新型構造を考案し、それぞれの場合のゲート動揺特性および伝達波低減効果を水理実験によって明らかにした。これにより得られた結果をまとめると次のとおりである。

- ① フラップ式可動ゲートの下部テンションロッドに不透波プレートを取り付けることで、ゲートの動揺と伝達波の低減が可能である。
- ② プレートによる低減効果は、長周期帯の波に対して高い。
- ③ 可動ゲート壁面の水平フィンは、水面に乱れを与えてエネルギーを散逸させ、伝達波を低減する効果がある。
- ④ 水平フィンによる伝達波低減効果は、広い周期帯の波に有効である。

- ⑤ プレートと水平フィンによる伝達波低減効果は同時に機能し、両方の改良を施した新型構造では、波高伝達率を5～6割に低減することができる。なお、実験では確認していないが、テンションロッドに設置したプレートは、水中において土砂流入防止壁としても機能し、ゲート内部への土砂の流入を防ぐ効果も期待される。今後は、プレートを付加した場合のテンションロッド軸力やプレート作用波圧を明らかにしていく予定である。

参考文献

- 1) Kiyomiya, O., K.Inoue : A plan of large-scale Storm Surge Barriers to Protect Urban Areas from Storm Surge Disaster, Techno-Ocean, 2002.
- 2) 富田孝史, 下迫健一郎, 山田昌郎, 横田弘 : 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, p.31, 2003.
- 3) 清宮理, 下迫健一郎, 仲保京一, 大久保寛, 長谷川巖 : 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, 海洋開発論文集, 第21巻, pp.103-108, 2005.
- 4) 白井秀治, 永田修一, 藤田孝, 新里英幸, 仲保京一, 高橋和夫 : 津波・高潮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.