

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(その2) — 起立安定化プレートの力学特性の把握 —

EXPERIMENTAL STUDY OF THE FLAP TYPE GATE
AS A TSUNAMI COUNTERMEASURE (No.2)
-EXAMINATION OF DYNAMIC CHARACTERISTICS OF THE STABILIZER PLATE-

木村雄一郎¹・仲保 京一²・伊墻 昭一郎³・柳 浩敏⁴
Yuichiro KIMURA, Kyouichi NAKAYASU, Syoichiro IGAKI and Hirotoshi YANAGI

¹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正会員 日立造船鉄構株式会社 鉄構設計部 (〒592-8331 大阪府堺市西区築港新町1-5-1)

³日立造船鉄構株式会社 技術企画部 (〒592-8331 大阪府堺市西区築港新町1-5-1)

⁴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)

The flap type gate is expected as one of new structures against tsunami, and we have kept developing it. In the past study, we have proposed a new mechanism of flap gate with the sway control plate, and confirmed that the modified flap gate worked enough for structures of disaster reduction. However, there are some uncertainties about both the dynamic characteristics of the flap gate with the plate and the hydraulic conditions accompanying the characteristics. In this study, two-dimensional hydraulic tests were carried out in a water channel with a wave generator, and the behavior of the flap gate was confirmed by measuring pressure and gate acceleration under several conditions. As a result, it is clarified that the modified flap type gate works effectively under some conditions.

Key Words : Gate, flap, tsunami, storm surge, hydraulic test, disaster reduction

1. 序論

南海トラフを震源とする巨大地震が、今後40年以内に高い確率で発生すると予想されており、被害が想定される各自治体では、巨大津波に備えた防潮堤や避難施設などを整備する動きが活発である。津波被害の軽減には、ソフトとハードの両面からの防災対策が必要である。そのため、それらの自治体は、ハザードマップ等を用いた住民への啓蒙活動を進めるとともに、津波被害を低減する新技術の開発を望む声も高めている。有望視されている新技術の一つとして、フラップ式可動ゲート(以下フラップゲート)がある。フラップゲートは、平常時は海底に倒伏し、高潮・津波来襲時に扉体の浮力を利用して起立し、短時間で港口を閉鎖できる防潮水門である。フラップゲートは、扉体の起立方向や水圧荷重の支持方法などによって分類されるが、共通した特徴としては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の航行を妨げず、環境・景観への負荷が少ない。②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削減が期待できる。

筆者らが従来から開発してきたフラップゲートの構造を図-1に示す。本フラップゲートは、津波や波浪による水圧荷重を、扉体頂部付近より係留するテンションロッドを用いて支持する構造である。また、回転式ウェイトをテンションロッド定着部へ設置し、ロッドに起立安定化プレートを設けること(図-2)で、津波作用時の衝撃荷重を軽減できる特徴を備えている^{1,2)}。これらの付加的な装置を備えたフラップゲートは、既存の沿岸防災設備に比較して、優れた機能を有していることがわかっている。しかしながら、本フラップゲートの特徴である係留ウェイトおよびプレートが、衝撃力の低減に寄与する過程や、効率的に機能する海象条件について明確な結論を得ていない。多様な海浜

地形を有する我が国において、港湾の水深や対象とする津波の規模を想定し、信頼性が高く、かつ経済的な構造を選定する基準を設けることは不可欠である。

本研究では、津波等の波力作用時、フラップゲートに発生する衝撃力の低減機構に関する知見を得ることを目的とし、以下の模型実験を行った。

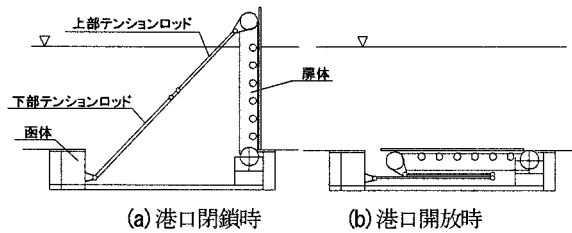


図-1 フラップゲート構造

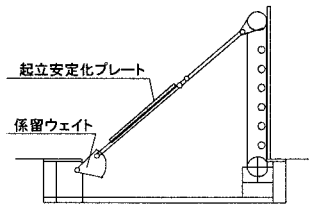


図-2 改良型フラップゲート (Ⅲ型)

2. 水理実験

(1) フラップゲート模型

本実験は、二次元造波水槽にて模擬的な津波を発生させ、起立安定化プレートに作用する波圧を測定し、その時間変化と従来のデータを総合することで、ウェイトおよびプレートの衝撃力低減機構を明確にすることを目的としている。実験は表-1に示す4種の模型を用いて行った。

表-1 実験模型

	起立角度	ウェイト	プレート
基本型	73度	固定	無
改良Ⅰ型	90度	有	無
改良Ⅱ型	73度	固定	有
改良Ⅲ型	90度	有	有

a) 基本型

係留ウェイトおよび起立安定化プレートによる衝撃力低減機能を与えない模型を基本型とした。本研究で用いたフラップゲート模型は、係留ウェイトを設置した状態 (図-2) で、扉体の最大起立角度が90度となる

ように作成しているため、係留ウェイトを固定した基本型模型では、扉体の可動範囲が小さくなっている。このときの扉体の最大起立角度は73度である。

b) 係留ウェイト設置型 (改良Ⅰ型)

基本型模型に、係留ウェイトによる衝撃低減機能を与えた (ウェイトの回転を許した) 実験模型を改良Ⅰ型とした。改良Ⅰ型は、これまでの研究²⁾で既の実験を行っており、それらの計測結果を本研究でも利用した。

係留ウェイトは、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テンションロッドにより持ち上げられ係留力が増大する。これにより、ゲートの起立速度を緩やかにし、上部および下部ロッドが伸びきった際に作用する衝撃的な荷重を緩和する。このときの扉体の最大起立角度は90度である。

c) 起立安定化プレート設置型 (改良Ⅱ型)

基本型模型の下部テンションロッドに、起立安定化を目的としたプレートを、ゲート幅方向に一樣に設置した模型を改良Ⅱ型とした。起立安定化プレートは、津波がフラップゲートに到達した際、扉体と同様に波圧を受けながら、扉体とは逆方向の回転運動を行う。これにより、扉体の急激な起立運動を抑制し、ロッドへの衝撃荷重を緩和する。改良Ⅱ型は、基本型と同様にウェイトの回転を固定しているため、扉体の最大起立角度は73度である。

d) 併用型 (改良Ⅲ型)

基本型模型に、改良Ⅰ型およびⅡ型で示した両方の装置を設置した模型を改良Ⅲ型とした。このときの扉体の最大起立角度は90度である。

(2) 模型寸法および計測機器

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1/60で行った。実験装置全体の概略を図-3に示す。造波装置から模型設置地点までの海底勾配は、1/20および1/150とした。模型は、造波板から約30mの位置に設置し、2種類の水深 (模型位置水深: 20cm, 30cm) に対して実験を行った。津波実験としては、長手方向の距離が不足しているが、津波の先端部がゲートに作用した際の挙動に着目して評価するため、大きな問題はないものとした。

模型概略を図-4に示す。模型化においては、扉体の代表寸法 (扉高、厚み) および重量を相似し、慣性モーメントを調整した箱形形状とした。また、孤立波による衝撃荷重に対する強度を考慮し、扉体の外枠はSUS製とし、他の部分はアクリルとウレタンフォームで

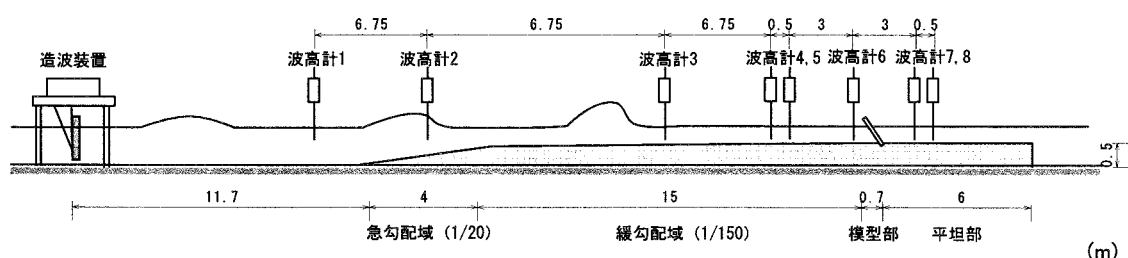


図-3 実験装置全体概略図

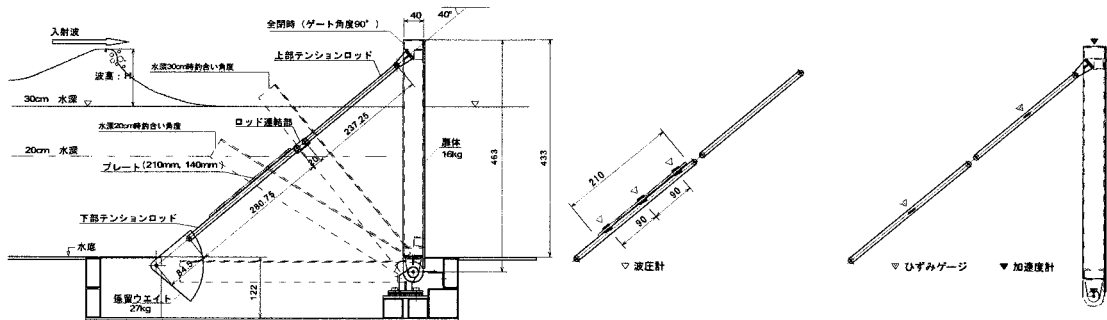


図-4 模型概略図および計測機器設置位置

(mm)

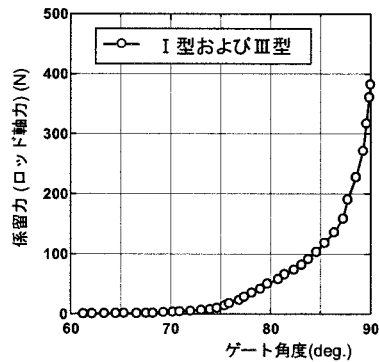


図-5 ウェイトの係留特性

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 ²	4.08×10 ⁶	kgm ²	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%
浮上位置 ※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 ²	4.54×10 ⁸	kgm ²	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

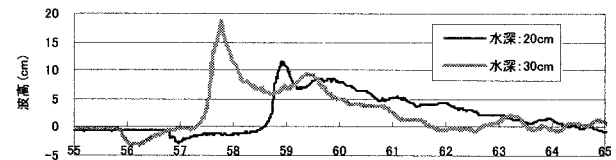


図-6 波高計6で計測した水位の時間変化

構成した。表-2に模型の構造特性を示す。模型作成に用いた材料の制約により、重量および慣性モーメントに関して若干の偏差が生じたため、実装置を設計する際は、それらを十分考慮する必要がある。扉体重量159Nに対して、係留ウエイト重量は264Nであり、図-5に示すような係留特性を有する。扉体角度73度から、係留力が作用し始めて、90度では、400Nほどの力が必要となる。実験では、容量式波高計を用いて8カ所の水位を、小型加速度計により扉体頂部と回転軸部の加速度を、波圧計により起立安定化プレートに作用する6カ所の波圧を、また、テンションロッドにとりつけた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。計測は、サンプリング時間1ms(1kHz)で120秒間行った。

砕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。

図-6に造波板ストローク1200mm、造波板押し出し時間1.5秒の条件で生成した波の水位変化を波高計6にて計測した結果を示す。横軸は造波後の経過時間である。

3. 実験結果および考察

(3) 波条件

模擬津波の生成には、可動幅1400mmのピストン式造波装置を用いた。波の形状は、造波板を一度だけ押し出して生成する押し波初動型とした。造波板の押し出しによって生成される孤立波は、造波板の移動速度とそのストローク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600, 800, 1000, 1200mmの4種類に対して、造波板押し出す時間を、5.0, 3.0, 1.5秒の3種類に変化させ、合計12ケースの孤立波を生成した。

これまでの筆者らの研究において、上記の条件で水理模型実験を行い、模擬津波の波速および波高を計測した結果、福井ら³⁾の提案する算定式とよく一致した²⁾。また、最高波高(極限条件)は $H/h \approx 0.8$ であり、これは既往の研究⁴⁾における極限条件 $H/h=0.827$ とも良く一致した²⁾。波形状は、砕波段波、波状段波およびゲート直前で砕波する段波の3種類に大別され、水深20cmでは

(1) 起立モーメントの比較

図-7に、横軸を孤立波の段波波高として、扉体に作用する最大起立モーメントを示す。起立モーメントは、ロッド軸力の扉体直角方向成分に、回転軸からロッド係留点までの距離を乗じることで算出した。また、図-7には、比較のために固定式のゲートに作用する最大転倒モーメント²⁾も併記する。

両実験水深において、扉体に作用する最大起立モーメントを比較すると、到達する孤立波の規模が小さいにもかかわらず、水深20cmの条件下で作用するモーメントのほうが大きくなる傾向がある。これは、起立停止直前の扉体回転速度の差によるものと考えられる。水深20cmの静水状態での扉体の釣り合い角度は32度、水深30cmの条件下でのそれは51度であり、起立完了までの動作角度は水深の浅いケースほど大きくなる。こ

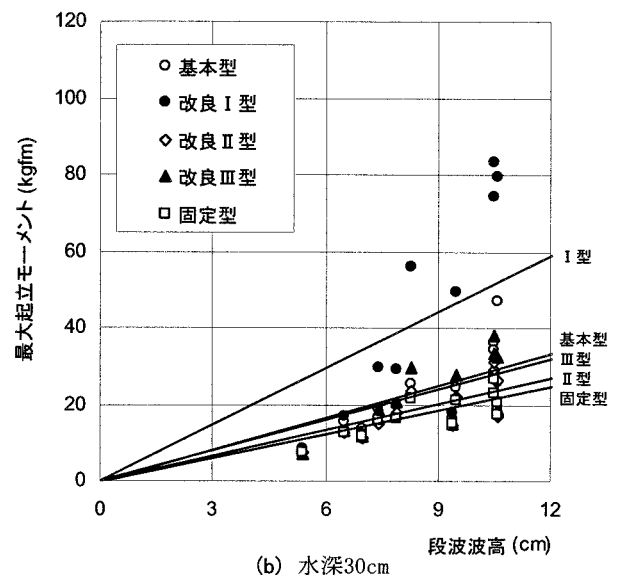
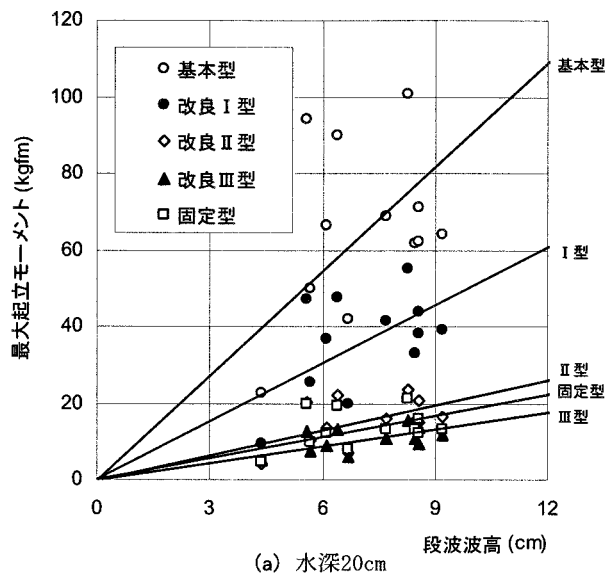


図-7 最大起立モーメント

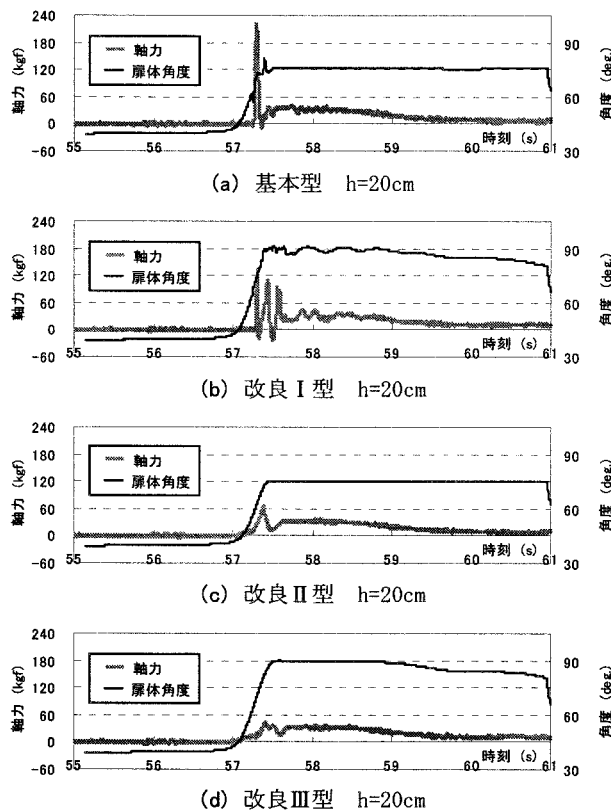


図-8 ロッド軸力の時間変化

のため起立動作が完了するまでの間に、孤立波から波力を受ける時間が長くなり、起立停止直前の扉体回転速度が大きくなる。

次に、水深30cmの下での実験結果(図-7(b))より、水深20cmにおける結果と比較して改良Ⅰ型およびⅢ型の衝撃軽減効果が小さいことがわかる。これは、基本型および改良Ⅱ型の起立最大角度が73度であるのに対し、改良Ⅰ型およびⅢ型のそれが90度であり、これも波力を受ける時間の差に起因するものと考えられる。以上より、扉体に作用する最大モーメント、すなわち、

ロッドに作用する最大軸力を低減するためには、起立停止直前の扉体回転速度を小さくすることが効果的であることがわかる。扉体回転速度を小さくする方法としては、加速時間すなわち動作角度を小さくする方法と、加速度そのものを小さくする方法があるが、常時設置水深が浅い条件下で動作角度を小さくするには、扉体に非常に大きな浮力を与える必要があり、物理的・経済的に困難な場合が多い。一方、筆者らは、加速度そのものを小さくする方法として、係留ウェイトおよび起立安定化プレートを提案しており、本実験により以下に示す効果が確認できた。

図-7(a)より扉体に生じる最大起立モーメントは、扉体の可動範囲の大きい水深20cmの下では、基本型と比較して、ウェイトを設置した改良Ⅰ型では約55%に、プレートを設置した改良Ⅱ型では約24%に、それらを併用した改良Ⅲ型では約16%に、それぞれ低減できている。尚、改良Ⅱ型およびⅢ型の値は、予め扉体を90度に固定した場合(固定型)とほぼ同程度であり衝撃力を十分に軽減する効果が認められた。

(2) ロッド軸力の時間変化

図-8に、造波板ストローク1200mm、造波板押し出し時間1.5秒、水深20cmのときのテンションロッドに作用する軸力と扉体の角度の時間変化を示す。尚、このときの波形は図-6に示したものであり、図中の時刻は造波開始後の経過時間を示す。図-8より、軸力のピークは扉体起立完了とほぼ同時刻で生じ、改良Ⅰ型では軸力が波状に振れていることがわかる。改良Ⅲ型では軸力変動が非常に小さくなっており、起立安定化プレートは軸力ピークを低減するだけでなく、ウェイトによる軸力変動についても抑制する効果が認められた。

(3) 加速度の時間変化

図-8と同条件のときの、孤立波が模型に達する時刻前後における、扉体加速度の時間変化を図-9に示す。

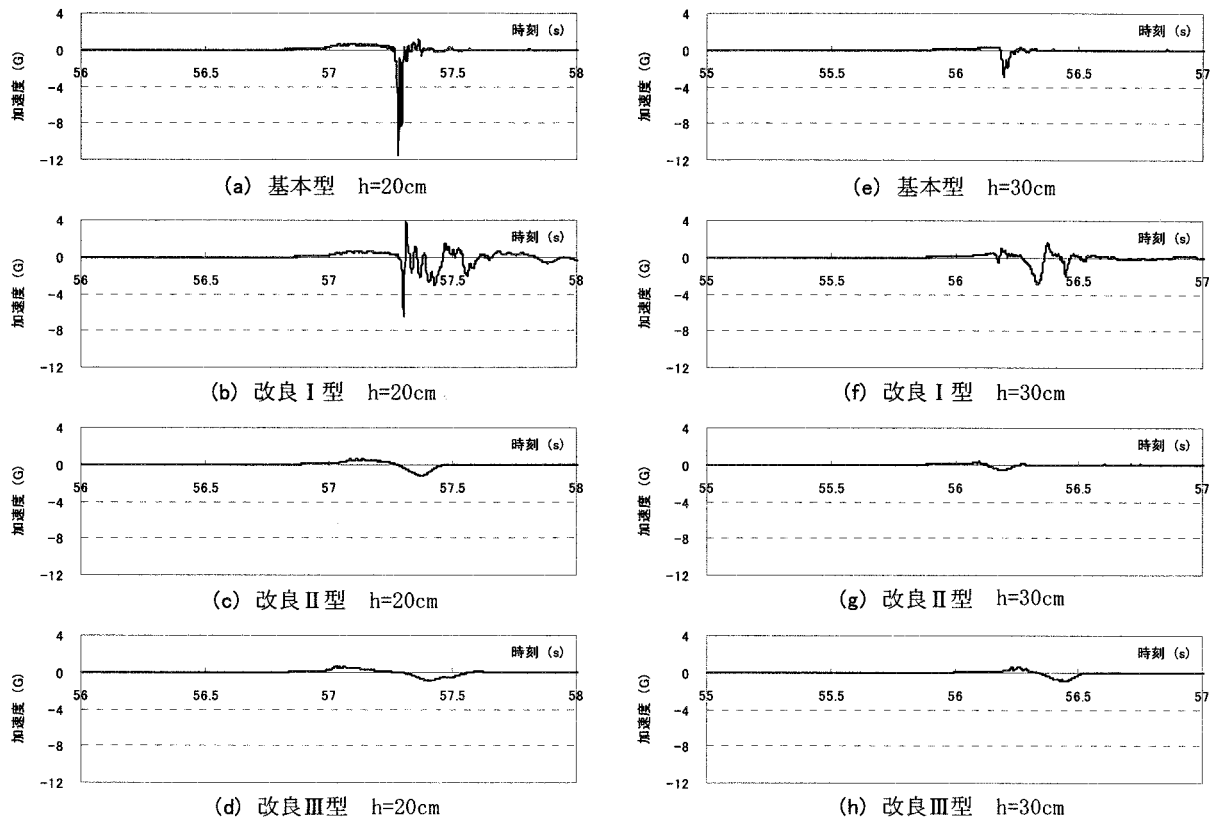


図-9 扉体加速度の時間変化

図-9より、孤立波の接近に伴い扉体に正方向の加速度を生じて起立を始め、扉体が急停止する際に負方向の加速度が生じるのがわかる。また、両水深において扉体に生じる負の加速度を比較すると、水深30cmの下で生じる加速度の方が小さく、動作角度の差から生じる加速時間の違いが顕著に現れているといえる。水深20cmの条件下における各モデルの加速度のピーク値は、基本型で約-11G、改良Ⅰ型で約-6G、改良Ⅱ型で約-1.5G、改良Ⅲ型で約-1Gとなった。

ここで、水深20cmの下での加速度の時間変化を示した模式図(図-10)を用いて、係留ウェイトおよび起立安定化プレートの加速度抑制機構を示す。図中の正の加速度の積分値(図-10①④⑦⑩)と負の加速度の積分値(同図②⑤⑧⑪)の絶対値は、扉体に生じる最大速度を示している。基本型は、扉体角度が73度に達した時点で急停止し、ウェイトを機能させた改良Ⅰ型は、扉体角度が73度を越えた近辺からウェイトによる減衰力が徐々に作用し始める。また、プレートを設置した改良Ⅱ型およびⅢ型では、扉体起立動作を始めた時点から、扉体に生じる加速度を抑制する抗力が作用し正の加速度が抑制され、その結果として負の加速度も抑制される。ウェイトを設置した改良Ⅰ型およびⅢ型において、扉体に生じる加速度が正から負に変化する点(図-10⑥⑫)は、津波による波力とウェイトによる係留力が均衡する点であり、ウェイトの重量が軽くなれば均衡点は右側に移動し、ウェイトによる減衰力は徐々に小さくなる。

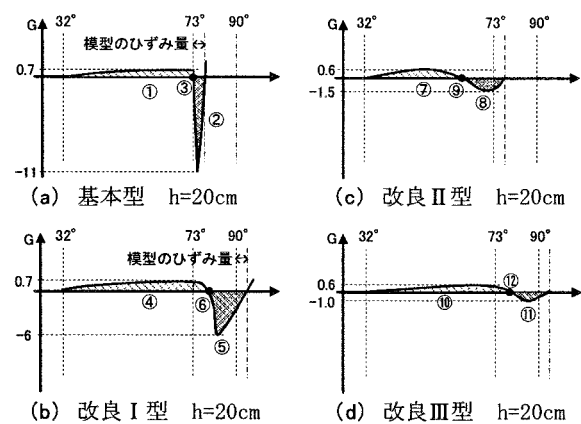


図-10 加速度時間変化模式図

(4) 扉体およびプレートに作用する波圧

ここでは、津波作用時に扉体および起立安定化プレートに作用する波圧について評価を行う。図-11は、改良Ⅲ型の模型に、造波板ストローク1200mm、造波板押し出し時間1.5秒の条件で生成した波を作用させた際に、扉体および起立安定化プレートに生じる圧力の時間変化を示したものである。ここで、プレートに作用する圧力は、プレート表面・裏面の差圧の最大値であり、扉体に作用する圧力は、昨年度までに計測したデータのうち、最大波圧が確認された扉体上端から70mm下方で計測した波圧変化を示す。図-12は、すべての波条件の下で、改良Ⅲ型の扉体およびプレートと、固定型のゲートに生じる最大波圧を示す。

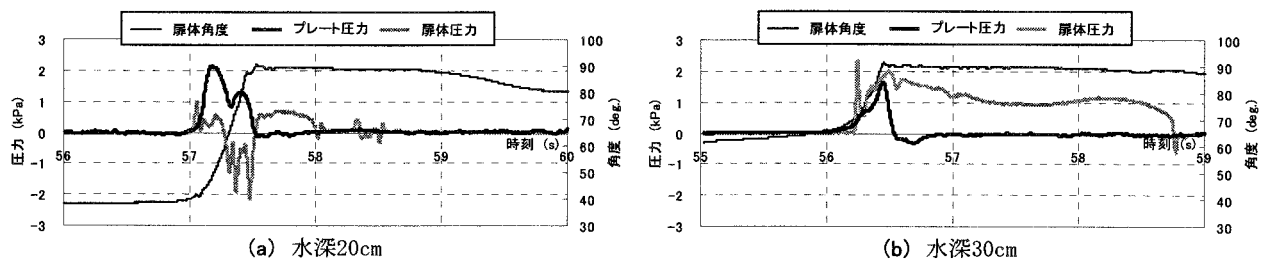


図-11 扉体およびプレートに作用する圧力の時間変化

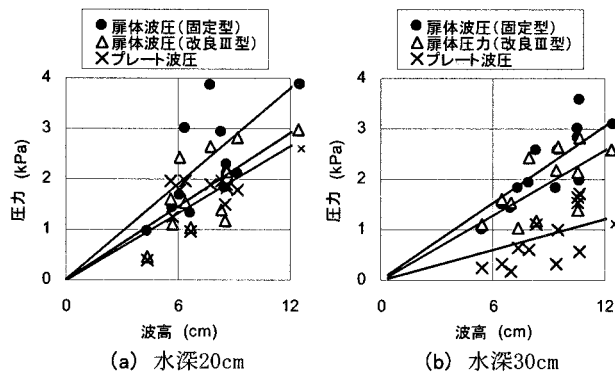


図-12 扉体およびプレートに作用する最大波圧

図-11より、水深20cmのケースでは、扉体とプレートに生じる圧力の傾向に時間的な差異が見られるが、水深30cmのケースではそれぞれの圧力変化は比較的類似した傾向となる。水深20cmの下では、静水時のプレート角度は流れの向きに対して概ね平行であり、プレートは初期段階で波力を大きく受けず、扉体の起立に伴って受ける波力が徐々に増大する。プレートにピーク圧が生じる時刻は、プレートの運動速度が最大となった時刻と予想される。水深30cmの下では、静水時においてプレートは流れに対して抗した角度となっており、扉体とプレートは、孤立波が到達した段階で同時に波力を受ける結果となる。図-12より、改良Ⅲ型の扉体に作用する最大波圧は、固定型の扉体に作用するそれと比較して、水深20cmの下で74%、水深30cmの下で86%となった。また、改良Ⅲ型のプレートに生じる最大波圧は、同様に固定型の扉体波圧と比較して、水深20cmの下で70%、水深30cmの下で40%となった。釣り合い角度の大きい水深30cmのケース（釣り合い角度51度）は、釣り合い角度の小さい水深20cmのケース（釣り合い角度32度）と比較して、作用する最大波圧が大きくなっており、固定型の扉体（起立角度90度）に作用する最大波圧との中間の値をとっている。これより、孤立波がフラップゲートに到達した際の扉体角度が小さいケースほど、扉体を受ける最大波圧も小さくなる傾向があるといえる。また、プレートに生じる最大波圧は、水深20cmのケースの方が大きくなっている。これは、釣り合い角度の小さいケースほど、扉体およびプレートの動作範囲が広く、それらが得る運動速度も大きくなり、プレートに作用する水圧荷重が大きくなるためと考えられる。

4. 結論

二次元造波水槽におい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、扉体加速度などを計測した。ここで得られた計測結果より、係留ウェイトおよび起立安定化プレートの軸力の低減機構を検討した結果、以下の事項が明らかになった。

- ①係留ウェイトは、扉体加速度が正から負に変化する付近において正の加速度を低減させ、かつ負の加速度が作用する時間を伸ばすことで負のピーク加速度を低減させる効果がある。ただし、ウェイトの重量は想定される津波の規模に応じて検討することが必要である。
- ②起立安定化プレートは、扉体とは逆方向の回転運動を行うことにより、扉体に生じる加速度を低減させる効果がある。また、これにより係留ウェイトを設置したときに生じるロッドの軸力変動も低減させることができる。
- ③起立安定化プレートが受ける最大波圧は、固定型ゲートの扉体に作用する最大波圧と比較して、水深20cmのケースで70%、水深30cmのケースで40%と小さく、さらに、プレートの設置により扉体に作用する最大波圧も低減する効果が認められる。
- ④係留ウェイトと起立安定化プレートは、扉体に生じる加速度を低減する機構が異なるため、両者を併用することで、ロッド軸力の低減効果をより高めることが可能である。

本研究を含めこれまでの研究により、フラップゲートをより合理的に設計するために必要な諸データを計測できた。今後、これまでに計測したデータをより厳密に分類し、最適設計が可能となるよう努めたい。

参考文献

- 1) 白井秀治ほか：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。
- 2) 白井秀治ほか：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，海洋開発論文集，第22巻，pp. 577-582，2006。
- 3) 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一，第9回海岸工学講演会講演集，pp. 50-54，1962b。
- 4) 岩垣雄一，榎木亨：海岸工学，共立出版，1979。