

フラップ式水門に作用する段波津波の特性

CHARACTERISTICS OF THE EDGE OF TSUNAMI ACTING ON THE FLAP TYPE GATE

清宮理¹・下迫健一郎²・仲保京一³・高木芳朗⁴・木村秀雄⁵・岡田晃佳⁶

Osamu KIYOMIYA, Ken-ichirou SIMOSAKO, Kyouichi NAKAYASU, Yoshiaki TAKAGI,
Hideo KIMURA and Akiyoshi OKADA

¹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)

²正会員 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)

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

⁴正会員 三井造船株式会社 (〒104-8439 東京都中央区築地 5-6-4)

⁵正会員 新日本製鐵株式会社 (〒100-8071 東京都千代田区大手町 2-6-3)

⁶非会員 JFEエンジニアリング株式会社 (〒230-8611 神奈川県横浜市鶴見区末広町 2-1)

We have proposed the flap type gate for protection against storm surge and tsunami, and the studies for its hydraulic and hydrodynamic characteristics and design method of it are in progress. In this paper, two-dimensional hydraulic model tests on the scale of 1:50 were carried out in the flowing water tank with the bore generator, and wave pressure and gate behavior required for designing of the flap type gate were revealed. Besides, function and performance of the flap type gate were examined in terms of disaster prevention against hydraulic bore by tsunami.

Key Words : gate , flap , storm surge , tsunami , hydraulic bore , hydraulic model test

1. はじめに

高潮、津波に対する防災設備としてフラップ式水門を提案^{1) 2) 3)}し、その水理特性・力学特性の把握および設計施工法の研究を進めている。

フラップ式水門は、平常時水底に伏せた状態で設置され、高潮や津波が予測されたときに扉体を急速に浮上できる構造となっている。フラップ式水門の水底側は回転構造となっており、表-1に示すように扉体傾斜の向きによって順フラップと逆フラップに分類され、水圧荷重の支持方法の違いにより固定式と動揺式に分類される。順フラップは、扉体浮上後、水位差の発生に伴う水圧荷重とバランスするまで扉体が沈みこむが、逆フラップは水圧荷重を扉体浮力とは別に支持するため、水圧荷重によってさらに立ち上がる。この違いにより、扉体に必要な浮力に大きな差が生まれ、短時間で水路を閉鎖する場合や、水圧荷重が大きい場合には、順フラップよりも逆フラップが有利となる。固定式は、水位や水面の変動があった場合でも扉体が動かないよう両方向の荷重に対して支持を行うため、内水静穏化等には非常に有効となるが、建設コストが高いことが問題となる。

動揺式は、建設コストの低減は可能であるが、一方向のみの荷重支持となるため、水面の変動に伴う扉体の動揺に留意する必要がある。

表-1 フラップ式水門の分類

	順フラップ	逆フラップ
固定式	・水位の低い側に傾斜 ・水位変化・波浪に対し変動しない ・事例：河川ゲートに多数あり	・水位の高い側に傾斜 ・水位変化・波浪に対し変動しない ・事例：なし
動揺式	・水位の低い側に傾斜 ・水位変化・波浪に対し変動する ・事例：モーゼ計画 (ベネチア)	・水位の高い側に傾斜 ・水位変化・波浪に対し変動する ・事例：なし

フラップ式水門を津波防災設備として設置する場合には、津波作用時の波圧や扉体の挙動、越波量などを正しく推定し、設計時に構造強度や機能・性能を十分検討する必要があるが、これまでに逆勾配の傾斜板や動揺式に作用する津波に関する研究はほと

んど行われていない。本研究では、段波津波に関して、固定式と動揺式の2種類の二次元模型実験を実施し、フラップ式水門の設計に必要な作用波圧や扉体挙動などを明らかにすると共に、フラップ式水門の機能および性能の検討を行った。

2. 研究の内容

(1) フラップ式水門模型

フラップ式水門は、水圧荷重の支持方法により固定式と動揺式に分類され、これら2種類について実験を行った。供試模型の縮尺は $S=1/50$ とし、その諸元を図-1に示す。固定式模型は扉体角度を 75° と 90° に設定できるようになっており、前面に波圧計、扉体頂部背面にロードセルを取付けている。動揺式模型は、扉体が 90° となるときにテンションロッドが水平面から 39° の角度で一直線状となるように設定されており、テンションロッドには歪ゲージが貼付けられている。

(2) 実験装置および実験条件

実験は図-2に示す長さ25mのゲート引上式段波発生装置付き流水水槽において実施した。主要な実験ケースを表-2に示す。

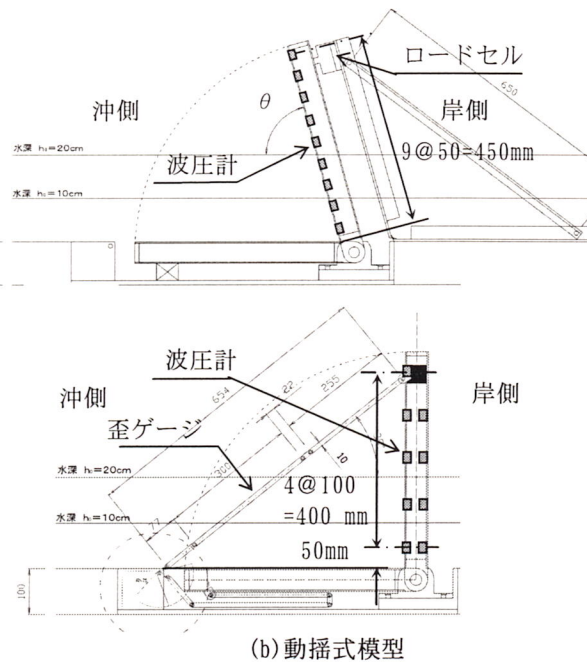


図-1 扉体模型図

(3) 扉体挙動および津波変形の観察

フラップ式水門は扉体の浮力により浮上する設備であるため、動揺式では設置場所の水深により津波作用前の姿勢が異なることから、扉体挙動に与える水深の影響を把握することが重要である。動揺式扉体の挙動および津波の変形状況を観察するため、扉体模型側面にデジタルビデオカメラを設置して撮影を行った。

(4) 段波の水位および流速の測定

段波の水位および流速の測定は、固定式では段波発生ゲートから岸側に1mの位置に1台（波高計①）、扉体前面に1台（波高計⑤）、扉体前面から沖側に0.6m（波高計④）、2m（波高計③）、2.5m（波高計②）の位置に各1台、扉体前面から岸側に1m（波高計⑥）の位置に1台の計6台の容量式波高計を設置して行い、動揺式では、扉体前面への波高計設置が困難であるため、扉体前面を除く5台の容量式波高計により測定を行った。サンプリング周波数は1000Hzとして行った。

水位測定は波高計①の水位が初期水位から0.2cm上昇した点から100データ（0.1s）前を時系列変化の零点とし、反射波が段波発生ゲートに戻るまでの間の計測を行った。

段波波高は、波高計③において水位が上昇し安定し始めた時間から2.0秒間の平均値として定義した。

流速の測定は、波高計③と波高計④の水位が一定のしきい値を超える時間差を計測し、波高計③と波高計④の距離をその時間差で除して算出した。

表-2 実験ケース

タイプ	ケース	扉体角度 θ ($^\circ$)	扉体位置 水深 h (cm)	段波発生槽 水位差 Δh (cm)
固定式	Case01	90	0	10, 30, 50,
	Case02		10	70の
	Case03		20	4ケース
	Case04	75	0	10, 30, 50,
	Case05		10	70の
	Case06		20	4ケース
動揺式	Case07	4	0	10, 30, 50,
	Case08	15	10	70の
	Case09	26	20	4ケース

動揺式の扉体角度は初期角度である。



図-2 実験装置全体図

(5) 波圧の測定

固定式実験は、扉体前面の底部から5cmから45cmまで5cmピッチで計9点に波圧計を配置し、波圧計測を実施した。動揺式実験は、扉体前面の底部から5cm、15cm、25cm、35cm、45cmの5点と扉体後面の底部から5cm、15cm、25cm、35cmの4点に波圧計を配置し、波圧計測を実施した。

(6) 扉体に作用する回転モーメントの測定

固定式実験では、扉体の回転中心から450mmの位置に扉体に対して直角にロードセルを取り付け、扉体に作用する回転モーメントを測定した。動揺式実験では、扉体の回転中心から450mmの位置に歪ゲージを貼り付けた折りたたみ式ロッドを取り付け、ロッド張力を測定し、その水平分力から回転モーメントの算出を行った。

3. 実験結果と考察

(1) 段波波高および波速の測定

各実験ケースの段波波高および波速測定結果を表-3に示す。段波の波速としては、福井ら⁴⁾の実験により以下の算定式が提案されている。

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

ここに、 g ：重力加速度、 H ：全水深（ $h+\alpha$ ）、 h ：水深、 α ：抵抗係数、 ζ ：段波波高である。

表-3 段波波高および波速測定結果

水深 h (cm)	水位差 Δh (cm)	段波 波高 ζ (cm)	波速測定 結果 (m/s)	算定式に よる波速 c (m/s)
0	10	4.5	0.5	1.1
	30	8.3	1.3	1.5
	50	14.5	1.5	2.0
	70	19.7	2.3	2.4
10	10	4.4	0.9	1.3
	30	12.3	1.7	1.9
	50	19.4	2.2	2.4
	70	25.3	2.5	2.8
20	10	4.8	1.7	1.7
	30	13.3	2.1	2.1
	50	20.7	2.3	2.5
	70	27.5	3.2	2.9

今回の実験結果は全体的に福井らの算定式によく合っている。水深が小さく段波発生槽水位差も小さい場合には算定式より小さな値となったが、これは底面摩擦の影響が出ているものと考えられる。

(2) 津波変形および扉体挙動

動揺式実験は、いずれの実験ケースの水深においても良好な動作が確認された。

段波衝突時の津波変形は、波高が大きく扉体を越波する条件においては、扉体角度や支持方式による大きな差は認められないが、越波しない条件では顕著な違いが確認された。一例として、 $h=10\text{cm}$ 、 $\Delta h=30\text{cm}$ のときの津波の変形状況を写真-1に示す。固定式・扉体角度 90° では段波衝突後、鉛直上方に水塊が放出され、固定式・扉体角度 75° では扉体角度に沿って沖側上方に水塊が放出される。動揺式では固定式に比較して水面の変形が穏やかであることが確認された。これは、動揺式では底部回転軸を中心に扉体が岸側に回転移動するため、扉体に対する段波の相対波速が小さくなるためであると考えられる。

(3) 水位の変化

段波津波作用時の沖側水位（波高計③の位置）と岸側水位（波高計⑥の位置）の変化の一例として、 $h=10\text{cm}$ 、 $\Delta h=50\text{cm}$ のときの計測結果を図-3に示す。

実験結果より、越波による岸側の水位上昇は固定式で扉体角度による差は認められないが、動揺式ではやや遅れる傾向が見られ、越波による水位上昇の前に、扉体の起立に伴う波の発生が確認された。

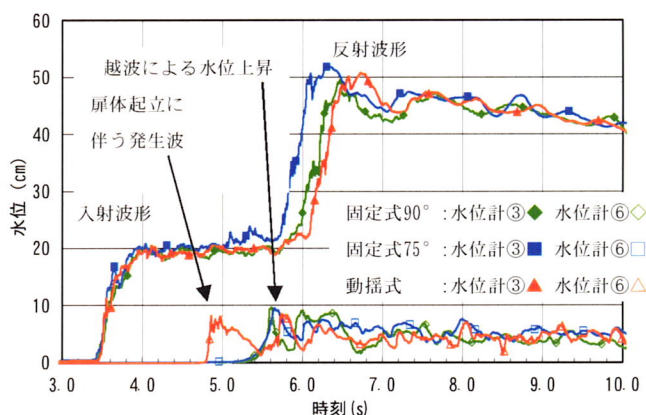
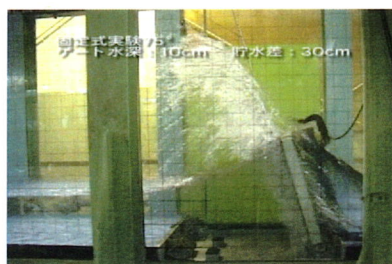


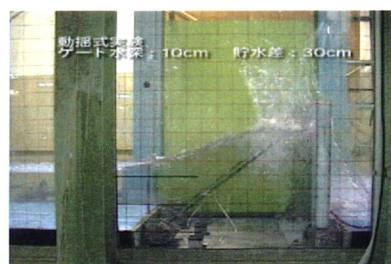
図-3 水位の変化



固定式： 90°



固定式： 75°



動揺式

写真-1 津波の変形状況

(4) 波圧特性

既往の研究⁵⁾⁶⁾により、直立壁に段波が作用する場合の波圧の時系列変化は、段波が扉体に作用することによって生じる衝撃的な波圧ピークと扉体前面の水位上昇によって生じる持続的な波圧ピークが存在することが報告されている。本研究では、前者を衝撃波圧、後者を持続波圧と区分して整理を行う。

a) 衝撃波圧と持続波圧の発生時刻

波圧の時刻暦の一例として、 $h=10\text{cm}$ 、 $\Delta h=50\text{cm}$ のときの固定式の計測結果を図-4に、動揺式の計測結果を図-5に示し、動揺式の衝撃波圧発生時の扉体の状況を写真-2に示す。

実験結果より、固定式では衝撃波圧、持続波圧ともに扉体角度による差は認められない。固定式と動揺式を比較すると、衝撃波圧、持続波圧ともに動揺式の方がやや遅れて発生する結果となった。これは、動揺式では段波が扉体に衝突するときに衝撃波圧が発生するのではなく、段波の扉体衝突後、扉体が生じた瞬間（厳密には衝撃力により伸びたロッドが縮み扉体が沖側にわずかに動く瞬間）に衝撃波圧が発生するためである。ただし、持続波圧については、扉体角度や支持方式の違いによる差は認められなかった。

b) 最大衝撃波圧

最大衝撃波圧について、福井ら⁵⁾は次式を提案している。

$$P_{dm} \cdot \zeta = K \frac{w \cdot c^4}{g^2} \quad (2)$$

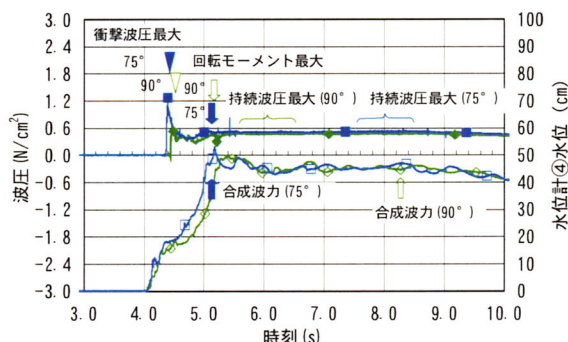


図-4 波圧と沖側水位の時系列変化（固定式）

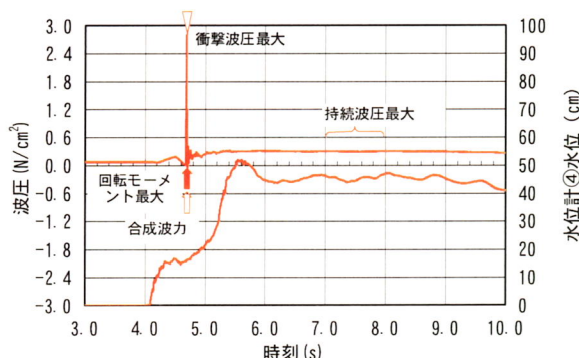


図-5 波圧と沖側水位の時系列変化（動揺式）

ここに、 P_{dm} ：最大衝撃波圧、 $\square$ ：段波波高、 K ：波圧係数、 w ：水の単位重量、 c ：波速、 g ：重力加速度である。

本実験の結果を図-6に示す。実験結果から、波圧係数 K は扉体角度 90° のとき0.43、扉体角度 75° のとき0.89、動揺式では1.23であった。福井らは直立壁に対する波圧係数として0.51を採用しており、本実験の扉体角度 90° の方がやや小さな値を示しているが、これは本実験では扉体沖側に扉体格納用の掘り込みを設けている影響によるものと考えられる。

c) 衝撃波圧の鉛直分布

砕波段波波圧の鉛直分布について、池野ら⁶⁾は次式を提案している。

$$P/(\rho \cdot g \cdot a_H) = 2.2(1 - z/3a_H) \cdot \alpha \quad (0 \leq z/a_H \leq 3) \quad (3a)$$

$$P/(\rho \cdot g \cdot a_H) = 2.2\alpha \quad (z/a_H \leq 0) \quad (3b)$$

ここに、 P ：最大波圧、 z ：静水面上向き正の座標、 a_H ：進行段波振幅、 ρ ：流体の密度、 g ：重力加速度、 α ：砕波による波圧の割増係数で次の値としている。

$$\alpha = 1.36 \quad (0 \leq z/a_H \leq 3) \quad (4a)$$

$$\alpha = 1.36(1 + 0.52z/a_H) \quad (-0.5 \leq z/a_H \leq 0) \quad (4b)$$

$$\alpha = 1.0 \quad (z/a_H \leq -0.5) \quad (4c)$$

実験結果の一例として $h=10\text{cm}$ 、 $\Delta h=50\text{cm}$ のときの各計測点における衝撃波圧の計測結果を図-7に示す。

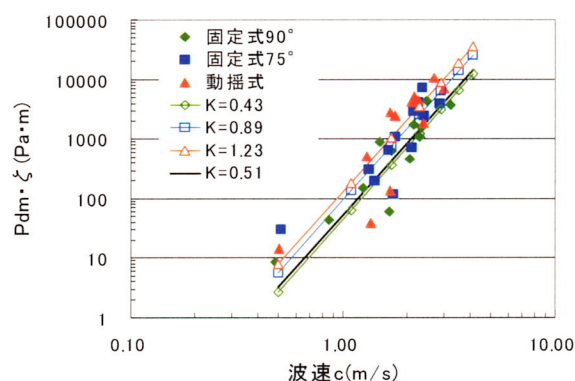


図-6 最大衝撃波圧

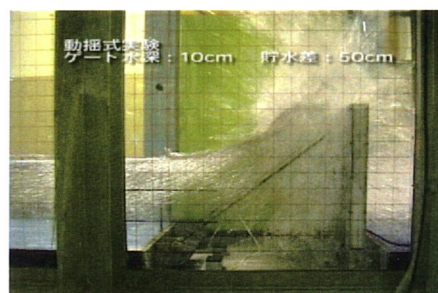


写真-2 動揺式最大衝撃波圧時刻の扉体状態

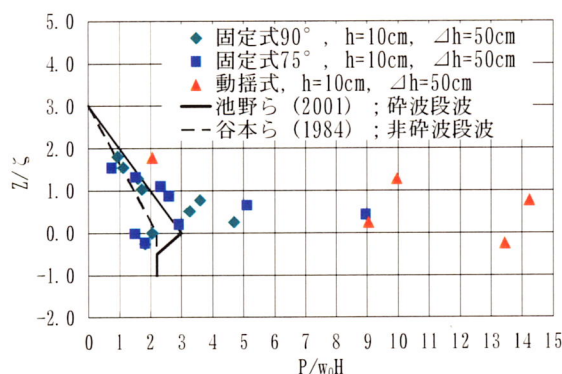


図-7 衝撃波圧の鉛直分布

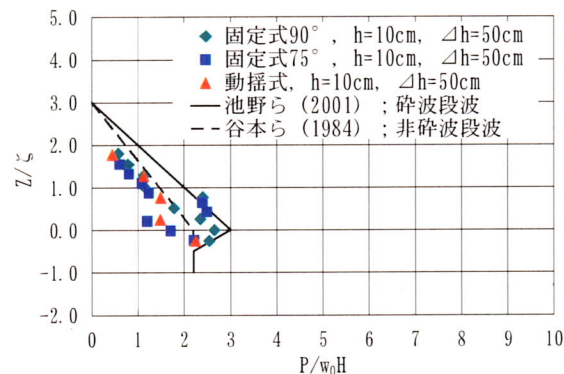


図-8 持続波圧の鉛直分布

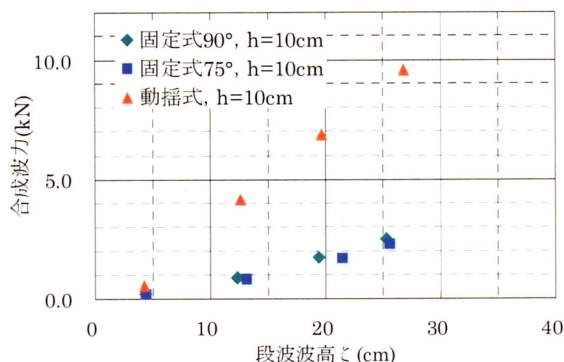


図-9 段波波高と合成波力

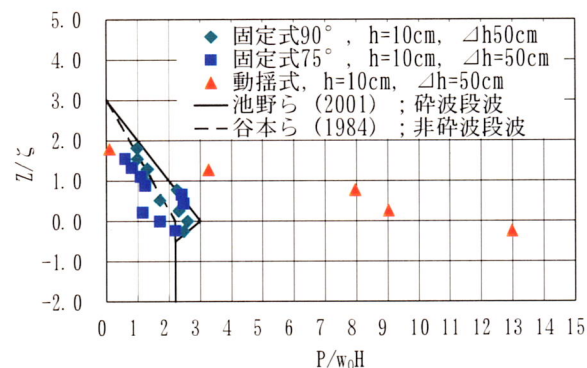


図-10 合成波力の鉛直分布

縦軸は段波波高で無次元化した距離，横軸は段波波高と単位体積重量で無次元化した波圧強度とした。

衝撃波圧については，すべての場合で池野ら，谷本ら⁷⁾の提案した波圧分布より大きな値となり，扉体角度で比較すると75°の方が90°より大きく，支持方式では固定式より動揺式の方が大きな値を示す結果となった。特に固定式と動揺式で大きな差が見られるが，これは衝撃波圧の発生原因が，固定式では段波の衝突によるものであるが，動揺式では扉体の運動停止に起因するものと考えられる。

d) 持続波圧の鉛直分布

持続波圧の鉛直分布の一例として， $h=10\text{cm}$ ， $\Delta h=50\text{cm}$ のときの測定結果について図-8に示す。持続波圧については，扉体角度や支持方式によらず，池野らの式よりやや小さな値を示し，平均的には谷本らの式とよく一致する結果となった。

e) 合成波力

各時系列の中で扉体に作用する最大波力を算出するため，扉体前面の波圧計の時系列データを全て合成して1本のデータを作成し，その最大値を求めて合成波力とした。 $h=10\text{cm}$ のときの合成波力を図-9に示し，その鉛直分布の一例として， $h=10\text{cm}$ ， $\Delta h=50\text{cm}$ のときの測定結果を図-10に示す。また合成波力が最大となる時刻を図-4，図-5に示す。

実験結果から，固定式では持続波圧発生時に合成波力が最大となり，動揺式では衝撃波圧発生時に合成波力も最大となっている。固定式では90°と75°に差は見られないが，固定式と動揺式では動揺式の

方が大きな値を示す。ただし，動揺式における合成波力は瞬間的なものであり，持続的に作用するものではない。これは前述のとおり，波圧の発生原因が固定式と動揺式で異なることに起因するものと考えられる。

(5) 扉体の回転モーメント

固定式の扉体に作用する回転モーメントについて，扉体上部ロードセルの測定値から算出した値を縦軸に，合成波力から算出した値を横軸にとり整理したものを図-11に示す。動揺式の扉体に作用する回転モーメントについて，ロード張力の測定値から算出した値を縦軸に，合成波力から算出した値を横軸にとり整理したものを図-12に示す。

固定式では，ロードセルの荷重から算出した値と合成波圧から算出した値はほぼ1:1で対応しており，測定値は信頼できるものと判断できる。動揺式では瞬間的に固定式の4～10倍の回転モーメントが発生しており，ロード張力から算出した値と合成波圧から算出した値も1:1対応とはなっていない。これは動揺式におけるロードには，段波波圧の他に扉体の慣性力が付加されるためであると考えられる。

4. まとめ

本研究結果により以下のことがわかった。

①動揺式の扉体は，いずれの水深においても良好な動作を示し，越波しない条件においては，固定式と比較して段波衝突時の水面変形が穏やかであるが，

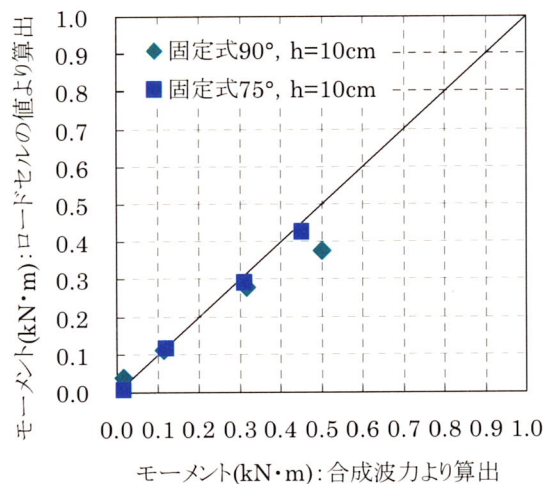


図-11 扉体の回転モーメント（固定式）

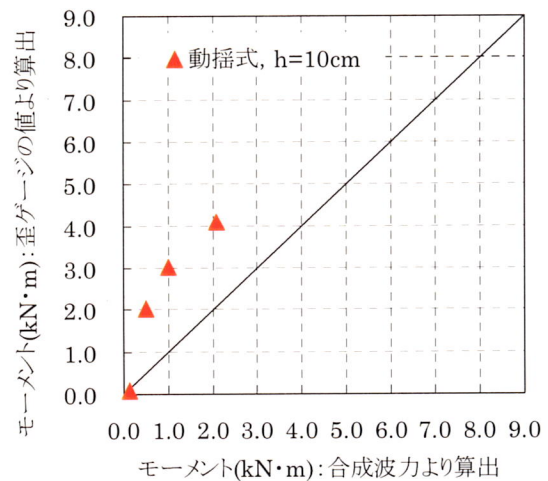


図-12 扉体の回転モーメント（動揺式）

起立完了の瞬間に衝撃力が作用する。

②固定式では段波の扉体衝突時に衝撃波圧が発生し、動揺式では段波衝突後の扉体起立完了時に衝撃波圧が発生する。

③衝撃波圧の比は、固定式90°：固定式75°：動揺式で1：2：3程度である。

④衝撃波圧の鉛直分布は、固定式90°の場合は池野らの提案した波圧分布に近い値を示すが、75°の場合や動揺式の場合には、池野らの提案した波圧分布より大きな値を示す。

⑤持続波圧の鉛直分布は、扉体角度や支持方法による差は見られず、池野らの式よりやや小さな値を示し、平均的には谷本らの式とよく一致する。

⑥合成波力が最大となるのは、固定式では持続波圧時であるが、動揺式では衝撃波圧時であり、瞬間的ではあるが固定式よりかなり大きな波圧が作用する。

⑦扉体に作用する回転モーメントは、固定式では合成波力から算出した値とほぼ1：1で対応するが、動揺式では扉体の慣性力により合成波力から算出した値以上の回転モーメントが作用する。

この結果、扉体を固定式とする場合には、扉体角度90°に比較して75°の方が衝撃波圧が大きくなるため、扉体角度の決定には注意が必要である。動揺式とする場合は、設置場所の水深による制限は受けないが、衝撃波圧に対する十分な検討が必要である。

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）の共同研究成果の一部として行った。また、実験は東京海洋大学の施設で行った。実験に際し岡安教授より御指導を頂いたことに感謝します。

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
- 2) 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浪特性について，海洋開発論文集，第21巻，2005，pp. 103-108
- 3) 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. 1060，2003，31p
- 4) 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，1962a，pp. 44-49
- 5) 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およぼす影響—，第9回海岸工学講演会講演集，1962b，pp. 44-49
- 6) 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，2001，pp. 846-850
- 7) 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，1984，pp. 257-261