流起式可動防波堤の小型模型による性能評価水理実験

Performance Evaluation of Hydroplane Tsunami Barrier by Means of Small Hydraulic Model Experiments

東 良慶¹・伊藤忠男²・半田英明³・山敷 亮⁴・平石哲也⁵・菅野高弘⁶

Ryoukei AZUMA, Tadao ITO, Hideaki HANDA, Ryo YAMASHIKI
Tetsuya HIRAISHI and Takahiro SUGANO

This study aim to evaluate the fundamental performance of the Hydroplane Tsunami Barrier by using the 1/200 scale hydraulic model. The Hydroplane Tsunami Barrier is a kind of movable breakwater. The main body is fixed to the pedestal by the special rubber belt, and it rises by hydraulic force due to tsunami and storm surge. The effectiveness of this breakwater for tsunami countermeasures is indicated through experiments of response characteristics for hydraulic force, wave force acting on the main body and the damping effect for wave height. As a result, it is revealed that water pressure acting by the maximum wave height is larger than the impact force due to the rotation of the main body. It was confirmed that the damping effect increases with the height of the tsunami.

1. 序論

2011年3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震津波では、関東、東北地方の太平洋沿岸域において甚大な被害が生じた。このような広域沿岸災害の初期対応、復旧活動を考える上で、港湾施設を利用した船舶（海上輸送）の重要性は、阪神大震災や中越沖地震等の事例も含めて再認識されている（国土交通省，2014）。

重要港湾施設の湾口部には沖合防波堤が設置されていることが多く、釜石港では沖合防波堤による津波の低減効果が確認されている（有川ら，2012）。しかし、通常は船舶等の日常の航路を確保するため防波堤には開口部が設けられている。そのため、この開口部から津波が侵入し、港内においても被害が生じており（平石ら，2011），津波対策が必要な港湾施設の課題となっている。一方で、沿岸域に設置された水門等の海岸構造物は現場での操作が必要なものが多く、構造物が機能しなかった事例（水産庁，2013）や操作していた作業員が被災した事例が報告されている（消防庁，2012）。

上述のような津波および高潮対策として、現場での操作を必要としない直立浮上式防波堤（有川ら，2007）やフラップゲート式防波堤（木村ら，2009）等の可動防波堤が提案され、実海域での試験施工が実施されている。そこで本研究では、堤体（扉体）が作動する際に、人的な操作を必要とせず、津波の流体力のみで自立する流起

式可動防波堤を提案し、その小型模型を用いた水理実験により、津波対策としての適用性およびその基本的な性能を評価することを目的とする。

2. 流起式防波堤の概要

流起式可動防波堤は、港湾施設の湾口部に設置された

図-1 流起式可動防波堤の設置想定図；(A) 通常時，(B) 押し波来襲時，(C) 引き波発生時

1 正会員 博(工) 京都大学助教 防災研究所
2 丸島アクアシステム(株)理事(技術担当)
3 丸島アクアシステム(株)技術本部理事
4 京都大学学生 工学部
5 正会員 博(工) 京都大学教授 防災研究所
6 正会員 工博 (独)港湾空港技術研究所 特別研究官

図-2 流起式可動防波堤の詳細断面図

既存の防波堤の開口部に設置を想定している（図-1）。この防波堤は上面が平板、下面が円弧の形状をした扉体（堤体）をメインとし、その扉体の上下に固定ベルトがクロスして連結されている。通常時は、下部基礎部に設置された上に凸の円弧状台座に水平に静置されている。設定した速度以上の津波や潮流が発生した場合、扉体が基礎台上で回転し、起立する機構となっている（図-2）。流れの方向に依存しないため、津波発生時の押し波、引き波いずれの場合でも起立する。また、固定ベルトの長さを調整することにより、引き波時に起立しないようにも調整することが可能である。

この防波堤の実大スケールは高さ：20m、1ユニットの幅：60m、厚さ（高さ）：2.4mを想定しており、本研究で用いた小型模型はアルミ製で実大の1/200（高さ：10cm、幅：30cm、厚さ：1.2cm、重量：0.29N）のモデルを作成した。

3. 水流に対する応答評価実験

流起式防波堤は水流に应答して動作するため、実際に海底に設置する場合には、通常時の潮流によって動作することなく、高潮や津波などによる設定速度以上の水流に対して動作するように制御する必要がある。そこで、上記小型模型の水流に対する応答実験を実施した。通常の循環式水路あるいは造波水路において、水流を低速（数cm/s）で制御することは困難である。本研究では、模型を台車に載せ、水中を移動させることにより、相対的な水流が扉体に対して生じる実験水槽を作成した（図-3）。台車は最大12cm/sまで一定速度で移動させることができる。また、扉体内部に重りを追加することにより、重心位置を変えずに扉体の重量を任意に変化させることがで

図-3 水流に対する応答特性評価実験装置

図-4 水流に対する応答特性実験結果

きる。

水流に対する応答特性評価実験の結果を（図-4）に示す。動作状況判断する条件として、水流に対して少しでも動いたケースを応答開始とし、扉体が完全に起立する最低流速を評価した。その結果、扉体重量が0.29N（おもりなし）の場合、流速が2.5cm/s（実スケールの流速で0.4m/s）の水流に対して応答を開始し、扉体重量の増加に伴い、応答を開始する水流速度が増加していることがわかる。完全に起立する際の最低流速に関しても、扉体重量の増加に伴い、流速が増加していることがわかる。これらの結果から、扉体（堤体）の重量を調節すること

図-5 固定ベルトに張力測定のためのひずみゲージを取り付けた扉体（堤体）

図-6 ひずみゲージの校正結果(測定値と負荷(N)の関係)

図-7 造波(津波)水路の詳細：(A)平面図，(B)断面図

により、応答する流速を設定できることがわかる。よって、津波や高潮などの任意の水流のみに動作するように、調整（制御）することが可能である。

4. 扉体の流起時に作用する波力の測定

本防波堤の機構は扉体に作用する水流により持ち上げられ、基礎台上で回転・起立するため（図-2），起立した際に固定ベルトに衝撃力が加わる。また、起立状態における波の作用力も固定ベルトに作用することになる。そこで本研究では、固定ベルトに作用する水流の力（張力＝波力）を測定する。なお、本実験に用いた固定ベルトは防災テント用膜材であり、弾性係数は 0.4 kN/mm^2 である。実大スケールで想定している固定ベルトの弾性係数は 1.0 kN/mm^2 である。よって、相似則を考えると模型の固定ベルトの弾性係数は $1.0 \times 1/200 = 0.005\text{ kN/mm}^2$ となるが、このような剛性が小さい素材は適用できないため、本実験では相似則にもとづく弾性係数よりも剛性の大きい固定ベルトを用いた。

(1) ひずみゲージの取り付けとその校正

扉体が流起、起立する際に固定ベルトに作用する張力を測定するために本研究ではひずみゲージを用いた。具体的には、4本の固定ベルト（上下、左右）のそれぞれ

に接着剤でひずみゲージを取り付けた（図-5）。

ひずみゲージの校正結果を図-6に示す。その結果、測定範囲内の張力に対して、ひずみゲージの測定値はすべてのチャンネルで直線比例の関係にあることがわかる。図中に併示した回帰直線の相関係数 R は $0.985 \sim 0.993$ であり、良好な相関関係にある。よって、それぞれのひずみゲージで求められた相関係数 k を測定値に乗算し、固定ベルトに作用した張力を測定した。なお、測定間隔は 50 Hz に設定した。

(2) 扉体に作用する波力の測定

京都大学防災研究所宇治川オープンラボラトリーの直線造波水路（幅： 1 m ，深さ： 1.5 m ，長さ： 50 m ）において、孤立波（周期＝約 6 s ）を発生させ、流起式可動防波堤に作用する波力（固定ベルトに作用する張力）に関する実験を行った。校正を行ったひずみゲージを取り付けた小型模型（図-5）は、幅が 30 cm であるので水路幅（ 1 m ）を減幅（ 0.32 m ）させた区間のマウンド上に設置した（図-7）。マウンド天端を基準高（底面）とし、水深は 7.5 cm とした。また、防波堤の前面を港外側、背面を港内側とし、両側に容量式波高計を設置した。入射津波高（孤立波）が $0.625, 1.25, 2.5, 3.75, 5.0\text{ cm}$ の5ケースについて実験を実施した。

入射津波高が 3.75 cm のケースにおける波高および固定ベルトに作用した張力の時系列データを図-8に示す。水位変化に注目すると、港外側の最大波高は 6 cm を超えており、防波堤が起立し、波を止めたことにより堰上げが生じたことが推察される。港内側については最大波高が 2 cm 程度であるので、入射津波高 3.75 cm が減衰されていることがわかる。一方、ベルトに作用した張力に注目す

図-8 扉体に作用する波力(固定ベルトに作用する張力)の実験結果：水深 7.5 cm ，入射津波高 3.75 cm ，(A)水位変化，(B)固定ベルトに作用した張力

図-9 ベルトに作用する張力(波力)の時系列データ(4つのひずみゲージの測定値を合算)

図-10 無次元波圧と防波堤高に対する波頂の相対水深の関係

ると、入射波の波頂が到達する前に、急激な張力の上昇が確認できるが、これは波頂によって防波堤が流起し、完全に起立した際に生じた衝撃力によるものと考えられる。

防波堤の流起時に着目し、各ケースにおける張力の時系列データを図-9に示す。なお、この張力については4つのひずみゲージで測定された張力(N)を合算したものである。同図では、張力が最大値となる、すなわち、波頂が到達する前に、明瞭なピークが存在することが特徴的である。これは、上述したように防波堤の流起時に、固定ベルトに生じた衝撃力によるものである。入射津波高が小さいケースではこのピークが見られない。

ここで、扉体に生じた波力を静水圧分布型と仮定すると、最大水平波力は次式で表すことができる。

$$F_m = \alpha \rho g h_m^2 B \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここに、 F_m は最大水平波力、 ρ は水の密度、 g は重力加速度、 h_m は最大波高、 B は作用する構造物の幅である。この時、防波堤前面(港外側)に作用する波圧は静水圧と等しく、防波堤前面(港外側)と背面(港内側)の水位差がないと仮定する。

本実験結果では、固定ベルトに作用した張力を扉体に作用した波力とし、その最大張力(=最大波力)を式(1)に適用し、無次元化(α を算定)する。その結果を図-10にまとめて示す。同図には谷本ら(1984)が提案した防波堤に対する最大波圧分布にもとづき、算定した係

数 $\alpha=3.3$ を併示した。入射津波高が2.5cm以上(越流)のケースの場合 α は1~2となっており、谷本ら(1984)よりも安全側(波圧が小さい)で評価されていることがわかる。一方で、越流しない入射津波高が1.25cm以下のケースでは、谷本ら(1984)よりも大きい値となっている。これは、作用する波圧が小さく、測定誤差が大きくなっていると考えられる。

以上の結果を総合的に考察すると、防波堤の起立直後に作用する衝撃力よりも、後続の波高のピーク時に働く流体力の方が大きいことがわかる。このことから、通常の直立防波堤に作用する津波の波力に対する強度が確保できていれば、固定ベルトに生じる衝撃力に耐えうることがわかった。なお、この衝撃力は固定ベルトの弾性係数によって変化することが考えられるが、相似則にもとづく弾性係数よりも本実験では剛性が80倍大きい素材を用いており、実大スケールの場合においても、起立直後の衝撃力は固定ベルトに作用する最大負荷にはならないと推察できる。

5. 波の減衰効果

前章の波力の測定と同様に直線造波水路において(図-7)、防波堤の前後(港外側および港内側)で波高を測定し、波の減衰効果を検討した。実験条件を表-1にまとめて示す。港外側で計測された最大波高と実効減衰率の関係を図-11に示す。ここに、実効減衰率は次式で定義する。

$$\begin{aligned} \text{実効減衰率} &= \frac{\text{防波堤を設置した際の減衰率}}{\text{防波堤がないマウンド(原地形)の減衰率}} \quad \dots (2) \end{aligned}$$

同図から、水深5cm、7.5cm(実スケールでそれぞれ10m、15m)どちらのシリーズにおいても、最大波高に反比例して、実効減衰率が減少していることがわかる。これは、防波堤による波の減衰効果が増大していることを意味している。この要因としては、波高が小さいケースの場合は流体力が小さく、扉体が流起する速度が遅く、

表-1 波の減衰効果の実験条件

	水深 (cm) (実物水深, m)	入射津波高 (cm) (実物大波高, m)
1	5.0 (10)	1.0 (2)
2		1.5 (3)
3		2.0 (4)
4		2.5 (5)
5		3.0 (6)
6	7.5 (15)	1.0 (2)
7		1.5 (3)
8		2.0 (4)
9		2.5 (5)
10		3.0 (6)

図-11 流起式可動防波堤の波に対する実効減衰率

波高のピーク（波頂）の通過後に遅れて起立する。その結果、波を減衰させる効果が小さくなったと考えられる。一方で、波高が大きい場合は先行してくる波頭の流れで扉体が流起し、波頂が通過する際に、防波堤が完全に起立しているため、波の減衰効果が大きくなったと考えられる。

6. 結論

本研究は港湾施設等に設置されている沖合防波堤の開閉口から津波が侵入する対策として、可動型防波堤の新たな形式である流起式可動防波堤を提案した。この防波堤の基本的な性能を評価する目的で、水流に対する応答特性、流起時に扉体に作用する波圧および固定ベルトに作用する張力の評価、波の減衰効果に関する小型模型による水理実験を実施した。得られた主な結論は以下の通りである。

- 1) 扉体（堤体）の重量を調整することにより、任意の流れ（波）に対して動作させることができることを確認した。つまり、通常の潮流などでは動作（流起、起立）しないように制御することが可能である。
- 2) 流起式防波堤は扉体と基礎部を固定ベルトで連結しているため、このベルトに作用する最大張力が設計する際に重要となる。中でも、起立直後に発生する衝撃が懸念される。本研究の入射津波の条件（孤立波）においては、起立する際に生じるベルトへの衝撃力は後続の最大波高（波頂）時の波力よりも小さく、通常の防波堤に作用する波力を最大波力として扱えることが

わかった。

- 3) 波の減衰効果については、上限はあるが、入射する津波高に比例して、減衰効果が大きくなることを確認した。波高が小さい波の場合、波頂（最高波高）が流起前に通過するために減衰効果が小さくなり、波高が大きい波の場合、波頂が到達する前に波頭的水流で流起し、波頂が到達した際には堤体が起立し、減衰効果を発揮するためと考えられる。

本研究結果から流起式可動防波堤は津波や高潮等の自然の水の流れにより作動し、人的な操作を必要としない、津波対策として有効であることを示した。しかしながら、模型のスケールが1/200と小さく、防波堤の特性について定性的な考察にとどまっている。より実大スケールに近い実験を実施し、定量的に性能を評価することが望まれる。

参考文献

- 有川太郎・坂口 章・小林 真・虎石龍彦・櫻井良宏・木原一禎（2008）：直立浮上式防波堤の実海域実証試験，海洋開発論文集，第24巻，pp. 93-98。
- 有川太郎・佐藤昌治・下迫健一郎・富田孝史・辰巳大介・廉慶善・高橋研也（2012）：釜石湾口防波堤の津波による被災メカニズムの検討－水理特性を中心とした第一報－，港湾空港技術研究所資料，No.1251，55p。
- 木村雄一郎・新里英幸・仲安京一・安田誠宏・間瀬 肇（2009）：フラップゲート式可動防波堤の波圧応答特性に関する実験的研究，海岸工学論文集，第56巻，pp. 806-810。
- 国土交通省海事局内航課（2014）：大規模災害時の船舶の活用等に関する調査検討会最終報告，45p.，<https://www.mlit.go.jp/common/001030664.pdf>（参照 2014-05-19）。
- 消防庁国民保護・防災部防災課（2012）：東日本大震災を踏まえた大規模災害時における消防団活動のあり方等に関する検討会報告書，181p.，http://www.fdma.go.jp/neuter/topics/houdou/h24/2408/240830_1houdou/01_houkokusyo.pdf（参照 2014-06-30）。
- 水産庁 水門・陸開等の効果的な管理運用検討委員会（2013）：東日本大震災時における消防団の水門・陸開操作実態調査から，第1回会議 資料-5，10p.，http://www.jfa.maff.go.jp/j/gyoko_gyozyo/g_zigyo/kaigan/pdf/000234991.pdf（参照 2014-06-30）。
- 谷本勝利・鶴谷広一・中野 晋（1984）：1983年日本海中部地震津波における津波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。
- 平石哲也・米山望・馬場康之・東良慶（2011）：宮城県沿岸における2011年東日本大地震による津波被災について，土木学会論文集B2（海岸工学），Vol. 67，No. 2，pp. 1306-1310。