流起式可動防波堤の津波減勢効果 に関する評価実験

東 良慶¹・伊藤忠男²・半田英明³・平石哲也⁴・菅野高弘⁵

¹正会員 京都大学助教 防災研究所 (〒612-8235 京都市伏見区横大路下三栖東ノ口)
E-mail:azuma.ryoukei.6v@kyoto-u.ac.jp

²非会員 丸島アクアシステム(株) 理事(技術担当) (〒540-0012 大阪市中央区谷町5丁目3-17)

³非会員 丸島アクアシステム(株) 技術本部理事 (〒639-1122 奈良県大和郡山市丹後庄町300)

⁴正会員 京都大学教授 防災研究所 (〒612-8235 京都市伏見区横大路下三栖東ノ口)

⁵正会員 (独)港湾空港技術研究所 特別研究官 (〒239-0826 神奈川県横須賀市長瀬3-1-1)

本研究は湾口部や河口部等の津波対策として、電気動力および人的操作、判断を必要としない流起式可動防波堤の波の減勢効果を評価したものである。実大スケール(高さ20m, 幅60m)の1/50模型を用いた水理実験により、波高の減衰率、流速の減勢率、堤体の固定ベルトへの作用張力(波力)の測定を行った。

その結果、波高の減衰効果は波高が大きいほど、効果的であることを確認した。また、長周期波に対する減衰効果の方が短周期波よりも効果的であることがわかった。流速の減勢については波高の減衰よりも効果的であり、津波の流動による港内での被害の軽減が期待される。一方、本防波堤の機構の要である固定ベルトに作用する張力については、短周期波による最大張力が比較的大きい値となったが、通常の直立防波堤に作用する波力を設計値として、引張強度を設計、製作することで対応できることを示した。

Key Words : Hydroplane Tsunami Barrier, Wave reduction effect, Hydraulic experiments

1. 序論

沿岸域の湾口部や河口部においては、津波が流入および遡上することにより生じる被害は小さくない¹⁾。重要な港湾施設では、港内の資産、機能を守るために、沖合防波堤が設置される場合がある。この沖合防波堤の津波に対する一定の低減効果は確認されているが²⁾、開口部からの津波の流入によりその効果が低減することが推察される。しかし、通常時の船舶の航行や河川水の疎通等を考慮すると、固定式(開口部のない)防波堤を設置することは不可能である。

そこで、通常時は海底面に静置されており、津波来襲時には防波堤として効果を発揮する可動防波堤がこれまでに開発、提案されてきた。可動防波堤の例としては、直立浮上式防波堤³⁾やフラップゲート式防波堤⁴⁾等が挙げられる。これらの防波堤は遠隔操作が可能で、現地での作業が必要なく、管理者や作業者の被災リスクが小さいことから、津波対策として有効であると考えられている。また、これらの可動防波堤は現在実海域での試験施工が実施されている状況にある。

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

東ら⁵⁾は電氣的動力や人的操作(判断)を必要とせず、津波の流体力のみで起立する新たな可動防波堤である流起式可動防波堤を提案した。また、防波堤の1/200模型

図-2 流起式可動防波堤の設置断面図；(A) 通常時の海底への静置状態、(B) 津波来襲時の動作状態

を用いて、定性的な性能評価を行い、津波対策として有効であることを指摘した。

本研究では、流起式可動防波堤の1/50模型を用い、周期の異なる波に対する減勢効果と応答性能を評価する。また、東ら⁹⁾の1/200模型の実験結果と比較、考察することにより、防波堤のスケールの違いによる効果および性能への影響を考察する。これにより実スケールでの適用性の検討を行う。

2. 流起式可動防波堤の概要

流起式可動防波堤は、港湾施設の湾口部に設置された既存の沖合防波堤の開口部等への設置を想定している（図-1(A)）。通常時は海底面に静置されており、津波等の設定値以上の水流が生じた際、回転・起立し、防波堤としての効果を発揮する（図-1(B)）。具体的な防波堤の断面図および機構を図-2に示す。堤体（扉体）は上面が平板、下面が円弧の形状であり、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。また、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（図-2(A)）。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。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、引き波時に起立角度（起立しない（0°）ように設定できる）を調整することが可能である（図-2(B)）。

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、本研究で用いた模型はフルードの相似則に従い、実大スケールの約1/50（高さ43cm、幅129cm、厚さ4.8cm、重量21.3kg（水中比重1.03））で作成し用いた。また、構造物の剛

図-3 津波再現装置の説明図および防波堤模型設置位置図；(A) 断面図、(B) 平面図

性、固定ベルトの重量、剛性に関してもフルード則に整合するよう作製した。

3. 実験方法および実験条件

(1) 実験装置および方法

本研究は京都大学防災研究所宇治川オープンラボラトリーの津波再現装置（幅4.0m、長さ44.0m、深さ2.0m）を用いて実施した。この装置（水槽）はピストン式造波装置、ポンプ式造波装置および水塊落下式造波装置を併設している。これらを連動制御することで、より現実に近い複雑な波を再現することができる。装置の特性については平石ら⁹⁾を参照願いたい。

本研究の実施時には、ピストン式造波装置から11.7m地点に1/10斜路が設定されており、平坦部との境界に防波堤の取り付けマウンド（コンクリート製）を設置した（図-3(A)）。防波堤模型はこの取り付けマウンド中央部に固定した。一方、水深については、防波堤が流起した状態の時に堤体の1/4（10.5cm）が水面上に突出するように、47.5cm（マウンド天端から32.5cm）に設定した。また、防波堤の前面（港外側）および背面（港内側）にそれぞれ電磁流速計および波高計を設置し（図-3(B)）、本防波堤の波の減勢効果を測定した。

(2) 実験および造波条件

本研究では波の周期の違いによる防波堤の効果を明らかにするために、ピストン式造波装置による短周期波（孤立波）シリーズSWとポンプ式造波装置による長周期波（流れ波）シリーズFLを実施した。それぞれのシリーズにおける実験条件をまとめて表-1に示す。

表-1 実験および造波条件
(A) 短周期波(孤立波) シリーズ SW

ケース名	入射波高 (cm)	実大波高 (m)	最大水位変化 (cm)		最大流速 (cm/s)		最大張力 (N)	堤体の起立
			港外側	港内側	港外側	港内側		
SW005	1.1	0.5	1.0	0.9	4.6	4.3	—	×
SW010	2.2	1.0	2.3	2.3	11.1	9.9	—	×
SW025	5.4	2.5	6.0	5.7	23.7	23.1	—	×
SW050	10.8	5.0	11.7	11.0	42.8	41.8	636	○
SW075	16.1	7.5	16.4	15.6	58.5	53.0	2261	○
SW100	21.5	10.0	21.8	19.4	76.1	63.9	3013	○

(B) 長周期波(流れ波) シリーズ FL

ケース名	ポンプ流量 (m ³ /s)	周期 (s)	最大水位変化 (cm) (波到達後 15s まで)		最大流速 (cm/s) (波到達後 15s まで)		最大張力 (N)	堤体の起立
			港外側	港内側	港外側	港内側		
FL005	0.05	60	0.5	0.4	5.0	2.5	—	×
FL010	0.1		1.3	1.3	5.0	2.9	—	×
FL030	0.3		7.9	4.3	16.3	14.5	177	○
FL050	0.5		14.2	5.2	27.2	21.5	360	○
FL070	0.7		20.0	7.2	37.7	27.5	683	○

図-4 短周期波(孤立波) ケース SW075 (波高 16.1cm, 周期 2s) の時系列データ ; (A) 水位変化, (B) 流速, (C) 固定ベルトに作用する張力

図-5 長周期波(流れ波) ケース FL070 (最大波高 20.0cm (実験開始から 15s まで), 周期 60s) の時系列データ ; (A) 水位変化, (B) 流速, (C) 固定ベルトに作用する張力

4. 実験結果および考察

(1) 水位と流速の時系列データ

a) 短周期波(孤立波) シリーズ SW

短周期波のケース例として, ケース SW075 (入射波高 16.1cm, 周期 2s) における水位変化, 流速の時系列データを図-4(A), (B) に示す. 孤立波の周期は第1波の水位上昇開始から水位が低下し, 水位が 0cm となるまでの時間と定義する.

水位変化に関しては, 入射波高 16.1cm であるのに対し, 港外側で最大水位が 16.4cm となっており (表-1(A)), 防波堤が起立することにより, 防波堤の前面で堰上げが生じたことが確認できる. また, 港内側の最大水位は 15.6cm であることから, 若干ではあるが波高に対する減

衰効果があることがわかる (図-4(A)). しかし, 防波堤が流起しないケース SW005, 010, 025 でも波高の減衰が生じており (表-1(A)), 防波堤基礎部 (取り付けマウンド) の減衰効果も考慮する必要がある. よって次節では, 基礎部の減衰効果を除いた防波堤の実効減衰率について考察する.

流速に関しては, 港外側 (58.5cm/s) と港内側 (53.0cm/s) を比較して最大値が減速していることがわかる (図-4(B)). この流速の減速は短周期波シリーズ SW のすべてのケースで確認できる (表-1(A)).

b) 長周期波(流れ波) シリーズ FL

次に, 長周期波 (流れ波) ケースの例として, ケース FL070 (最大波高 20.0cm, 周期 60s) における水位変化,

図-6 流起式可動防波堤による波高（水位変化）および流速に対する実効減衰効果

流速および張力の時系列データを図-5に示す。流起後の水位変化、流速に関しては港内側の容積等によって特性が変化する（普遍性がない）ことに留意願いたい。

水位変化のデータ（図-5(A)）に関しては、周期の前半30秒間（押し波）は流量 $0.7\text{m}^3/\text{s}$ で水槽内に水を連続して供給するため、水位が継続的に上昇している。実験開始から12秒で堤体が流起し、その後、防波堤の効果により、港外側と港内側に水位差が生じていることがわかる（実験開始から12～32秒程度まで）。

流速のデータ（図-5(B)）に関しては、防波堤が流起（12s）することにより効果が発揮され、港外側の最大流速が 37.7cm/s であるのに対し、港内側は 27.5cm/s と低減していることがわかる。堤体の流起後は港内側および港外側の流速がほとんどなくなり、防波堤が港内への波の流入を防いでいることがわかる。

(2) 防波堤による波の実効減衰効果

水位変化（波高）および流速の減衰効果については、防波堤基礎部（取り付けマウンド）等の原地形による減衰効果が含まれている。そこで、防波堤による実効減衰効果を評価するために、実効減衰率を次式で定義する。

$$\text{実効減衰率} = \frac{\text{防波堤が作動した状態での減衰率}}{\text{防波堤が作動しない状態（原地形）での減衰率}} \quad (1)$$

入射波高と波高（水位変化）および流速の実効減衰率の関係を図-6に示す。短周期波（孤立波）シリーズに関しては、ケースSW050（入射波高 4.5cm ）から堤体が流起し、波高が大きいケースの方が、減衰効果が增大していることがわかる。この波高の減衰効果が入射波高とともに増大することは東ら⁵⁾も同様に指摘している。若干ではあるが波高よりも流速の方が減勢効果があることも確認できる。

図-7 張力（波力）測定のためのひずみゲージを固定ベルトに取り付けた様子

次に、長周期波（流れ波）シリーズに関しては、入射波高と減衰率の間に定性的な変化は見られない。長周期波の場合、開口部からの流入量や越流量と港内側の容積の関係により、水位変化の特性は変化すると考えられ、定量的な特性を明らかにすることは難しい。しかしながら、波高および流速どちらに関しても短周期波ケースよりも減衰効果が大きいことがわかる。特に流速に関しては減勢効果が大きく、たとえ津波が防波堤を越流し港内が水位上昇しても、流入速度を減勢し、被害の軽減が期待できる。

(3) 固定ベルトに作用する張力（波力）

本防波堤の可動機構は、水流により堤体が持ち上げられ、基礎台上で回転するため、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。そのため、本防波堤の耐波強度を評価するためには、固定ベルトに作用する力の測定が重要となる。そこで、あらかじめ張力に関して校正を行ったひずみゲージを固定ベルト（1ユニットにつき8本）に取り付け（図-7）、作用した張力（衝撃力および波力）を測定した。

短周期波（孤立波）シリーズのケースSW075における張力の時系列データを図-4(C)に示す。この張力の値は堤体を固定している8本のベルトに作用した張力を合算したものである。実験開始から約7s後に、堤体が回転、流起した際に生じる衝撃力のピークが測定され、その最大値は 2.26kN であった。張力が発生している時間は孤立波の周期と同じ約3秒程度である。東ら⁵⁾は周期が6sの孤立波のケースにおいて、堤体が回転、流起する際に生じる衝撃力と波本体からの水圧（波力）が分かれて固定ベルトに作用することを指摘した。本実験の孤立波の波長 2.5m であり、東ら⁵⁾の実験の波長とほぼ同じ長さである。しかし、模型のスケールが4倍大きいため、相対的に1/4倍の波長となる。その結果、流起時の回転による衝撃力

図-8 波の周期による固定ベルトに生じる張力の違い；東ら⁵⁾の1/200模型実験との比較

は最大波高（波のピーク）に近接し、固定ベルトに作用する波力は波高の高い状態で衝撃力が重ね合わされるため、一つの大きいピーク値として測定されたと考えられる（図-8）。

長周期波（流れ波）シリーズのケースFL070における張力の時系列データを図-5(C)に示す。堤体が回転，流起した際に生じる衝撃力のピークが実験開始から約10s後に測定され，その最大値は0.68kNであった。また，港外側と港内側の水位差による静水圧および波の動水圧が実験開始35秒あたりまで継続的に生じていることがわかる。前述した短周期波ケースSW075と異なり，流起時の衝撃力は波頂の到達前に作用し，波高の低い状態で重ね合わされるため，最大波力が分かれ，最大張力が小さくなったと考えられる。

(4) 耐波性能に関する検討

前節では固定ベルトに作用する張力について考察した。本節では固定ベルトの耐波性能を評価するために，通常の直立防波堤（護岸）に作用する波力との比較を行う。波高が10.8cm（実スケールに換算すると5.0m）以下では越流が生じないので，谷本式にもとづき防波堤模型1ユニットに作用する波力を算定した（図-9(A)）。津波が防波堤を越流する（波高10.8cm以上）条件においては，港外側と港内側の静水圧差から波力を算定した⁸⁾。

本研究の短周期波および長周期波シリーズで得られた張力データを上述の直立防波堤に作用する算定波力曲線と併せて図-10に示す。なお，短周期波シリーズでは堤体が起立する際に生じる回転力（衝撃力）と波の流体力（波力）を同時に発生し，区別できないため合算した張力である。一方，長周期波シリーズでは回転力と流体力のピーク値は明瞭で判別できるため，区別して示す。

同図から，長周期波シリーズに関しては，回転，流起時の衝撃力と波の流体力が別れて生じたため，それぞれのピークの最大張力は通常の直立防波堤に作用する波力

図-9 津波波力の算定説明図；(A) 津波が防波堤を越流しない場合，(B) 越流する場合

図-10 流起式可動防波堤の固定ベルトに作用した張力と直立防波堤（護岸）に作用する津波波力の比較

よりも小さいことがわかる。これは，実際の津波のような長周期波に対する固定ベルトの引張強度は直立防波堤に作用する波力から算定できることを意味する。一方で，短周期波シリーズに関しては，回転，流起時の衝撃力と波の流体力が同時に生じるため，直立防波堤に作用する波力よりも若干大きい値となった。しかしながら，直立防波堤に対しても生じ得る，波状段波による衝撃波力⁹⁾を考慮すると，通常の防波堤の耐波設計値から固定ベルトの強度を設計することが可能であると考えられる。

5. 結論

本研究は，電気的動力や人的操作（判断）を必要とせず，津波の流体力のみで起立する流起式可動防波堤の

1/50模型を用いて、周期の異なる波に対する減勢効果と応答特性を評価した。また、実スケールへの適用、設計を考慮する際に重要である堤体を固定するベルトに作用する張力についての測定を実施した。得られた主要な結論は以下の通りである。

- 1) 設定速度以上の波に応答し、流起することにより、波高を減衰することを示した。長周期波に対する波高減衰効果が短周期波よりも大きいことを示した。長周期波の場合、波の先頭部で流起するため、波の本体に対して、防波堤の減衰効果が発揮されるためである。
- 2) 波の流速に対する減勢効果が波高の減衰効果よりも大きいことがわかった。これは、防波堤を越流するような大きい津波が来襲した際にも、港内に流入する波の流速を大幅に減勢し、被害を軽減することが期待される。
- 3) 現場への適用を考慮する際に重要な、堤体を固定するベルトの引張強度に関して、従来の直立防波堤に作用する波力と同等の力を設計値にできることを示した。短周期波による作用張力は長周期波よりも大きく、直立防波堤に対する波状段波を考慮しない波力よりも若干大きい設計値にする必要があるが、これら是对応可能な値であった。

本研究結果から流起式可動防波堤の津波対策としての有効性を示した。また、固定ベルトの耐波強度を確保できることも併せて示した。実大スケールの設置には現場の流況等、様々な条件を考慮する必要がある、今後は数値計算手法による検討¹⁰⁾と協働する必要がある。

参考文献

- 1) 平石哲也, 米山望, 馬場康之, 東良慶: 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, 2011.
- 2) 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: 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, 2012.
- 3) 有川太郎, 坂口 章, 小林 真, 虎石龍彦, 櫻井良宏, 木原一禎: 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, 2008.
- 4) 木村雄一郎, 新里英幸, 仲安京一, 安田誠宏, 間瀬肇: 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, 2009.
- 5) 東良慶, 伊藤忠男, 半田英明, 山敷亮, 平石哲也, 菅野高弘: 流起式可動防波堤の小型模型による性能評価水理実験, 土木学会論文集 B2(海岸工学), Vol. 70, No.2, pp.951-955, 2014.
- 6) 平石哲也, 森信人, 安田誠宏, 東良慶, 間瀬肇, アディ プラスティコ, 大倉翔太: 複数の造波手法を有する津波再現装置で造波された津波の特性, 土木学会論文集 B2(海岸工学), Vol. 71, No.2 (掲載予定) .
- 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.
- 8) 国土交通省港湾局, 防波堤の対津波設計ガイドライン, pp. 24-25, <http://www.mlit.go.jp/common/001012142.pdf>, 2013 (参照 2015-05-15) .
- 9) 安田誠宏, 高山知司, 山本博紀: ソリトン分裂津波の変形波力特性に関する実験的研究, 海岸工学論文集, 第 53 巻, pp. 256-260, 2006.
- 10) 後藤仁志, 五十里洋行, 殿最浩司, 菅野高弘, 東良慶, 伊藤忠男, 菅原康之: 高精度粒子法による流起式防波堤の数値解析, 土木学会論文集 B2(海岸工学), Vol.71, No.2 (掲載予定) .

(2015.3.18 受付)

WAVE REDUCTION EFFECT OF HYDROPLANE TSUNAMI BARRIER IN TERMS OF HYDRAULIC MODEL EXPERIMENTS

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

This study aims to evaluate the wave reduction effect of the Hydroplane Tsunami Barrier which does not need electric power and human operation, and judgment as countermeasure against tsunami. It assumes that this breakwater is installed on a bottom of entrance of bay and a river mouth and so on. The reduction effect of wave height, velocity and tension which acts on the fixing belts were measured by hydraulics experiments using 1/50 model of the real scale (20m in height, and 60m in width).

As a result, the reduction effect of wave height was increased with incident wave height. This reduction effect for the long-period wave is more effective than a short-period wave. Since the reduction of flow velocity was more effective than that of wave height, it suggested that mitigation of the damage caused by a Tsunami flow in a port was expected. Moreover, about the tension acting on the fixing belt which is an important point of the mechanism of this barrier, the maximum tension by a short-period wave became a comparatively large value. Although, it is shown that the maximum tension is equivalent to the wave force which acts on the usual breakwater, and a real scale design and field instration are possible.