

流起式可動防波堤の起立特性に関する研究

西園勝秀¹⁾・脇平興一²⁾・高山知司³⁾・菅野高弘⁴⁾・平石哲也⁵⁾・東良慶⁶⁾・米山望⁷⁾
 二瓶泰範⁸⁾・長坂陽介⁹⁾・千田優¹⁰⁾・殿最浩司¹¹⁾・曾根照人¹²⁾・平井俊之¹³⁾
 上出耕三¹⁴⁾・伊藤忠男¹⁵⁾・半田英明¹⁶⁾・小西武¹⁷⁾・田中良典¹⁸⁾・吉田充伸¹⁹⁾・山本隆信²⁰⁾

1)前 沿岸技術研究センター研究主幹 2)沿岸技術研究センター主任研究員 3)京都大学名誉教授
 4)関東学院大学教授 5)京都大学防災研究所教授 6)大阪工業大学工学部准教授
 7)京都大学防災研究所准教授 8)大阪府立大学准教授
 9)港湾空港技術研究所地震防災研究領域地震動研究グループ主任研究官
 10)港湾空港技術研究所海洋水理研究領域津波高潮研究グループ研究官
 11)(株)ニュージェック国内技術本部長代理 12)(株)ニュージェック港湾・海岸 G マネジャ
 13)(株)ニュージェック港湾・海岸 G 沿岸防災チームマネジャー 14)(株)丸島アクアシステム技術本部長
 15)(株)丸島アクアシステム技術担当理事 16)(株)丸島アクアシステム開発担当理事
 17)みらい建設工業(株)代表取締役社長 18)みらい建設工業(株)技術本部副本部長
 19)みらい建設工業(株)技術部部長 20)みらい建設工業(株)技術部課長

近い将来発生するとされる南海トラフを震源とする巨大地震への対応として、国土強靱化を目指した防災・減災対策が進められている。流起式可動防波堤は、押し寄せる津波の流体力で自動起立し、津波被害を低減させる設備として開発・実用化に向けて研究を行ってきた。本論文では、流起式可動防波堤の自動起立メカニズムに着目し、各種模型実験によって作用流体力と流起応答特性との関連性を明らかにし、実用化への方向性を示している。

キーワード：流起式、可動防波堤、津波、遡上津波、減災

1. はじめに

港湾における津波あるいは高潮の減災対策として、発災時に防波堤の開口部を閉鎖することができる直立浮上式防波堤やフラップゲート式防波堤等の可動防波堤が開発されているが、いずれも、作動時、動力を必要とし、人が介在しなければならない。また、津波対策の防波堤や水門などは、人的操作が必要なものが多く、構造物が機能しなかった事例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。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、1/200模型及び1/50模型を用い、京都大学津波水槽での実験及び大阪府立大学回流水槽での実験にて性能評価を行った。その結果、津波の威力を軽減、津波による被害の低減に効果的であることや津波に十分耐えられる形状であり、実用化に支障ないことを定性的かつ定量的に明らかにした。

それを受け、より実物に近い実大スケール(1/10)による模型実験を(国研)港湾空港技術研究所が所有する大規模波動地盤総合水路で行い相似則の妥当性及び性能の再現性を確認した。現場環境に適した設計条件等の決定に有効であることを示し、扉体の流起応答特性を評価した。

さらに、本研究では、流起式防波堤に適用可能なシミュレーションモデルを開発し、水理実験結果と比較することによって、モデルの有効性を確認した。また、設計津

波を超えるレベルの津波に対する取扱い、とりわけ粘り強い構造が要求される最大津波相当の津波に対する設計手法等を検討し、それらの成果を加えて、「技術・設計マニュアル(案)」を提案している。

ここでは、紙面の関係上、流起式可動防波堤の流起メカニズムに関連する、作用流体力とその応答性能の研究に焦点をあて、報告することにする。

2. 流起式可動防波堤の概要と流起メカニズム

2.1 概要

流起式可動防波堤は、港湾の外郭施設である防波堤の開口部等に設置し、津波の港内侵入を阻止することを想定している。通常時は海底面に静置されており(図-1(A))、津波等によって設定値以上の水流が生じた際に回転・起立し、防波堤としての効果を発揮するものである(図-1(B))。扉体は静置状態では上面が平板、下面が円弧の形状であり、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、扉体は、平常時は凸の円弧状台座上に水平に静置されている。

津波や潮流等によって設定以上の流速が生じた場合、扉体が基礎台座上を回転し、流れの方向に関係なく、起立するが、河口部に設置する場合などでは、固定ベルトに工夫を施し、上流からの流れに対しては起立させないことも可能な機構になっている。

起立した扉体は津波の港内侵入を阻止し、また、引き波

時には港内水位の異常低下を防ぎ、係留船舶の座礁を防護する。また、財産の外洋流出を防ぐ効果がある。

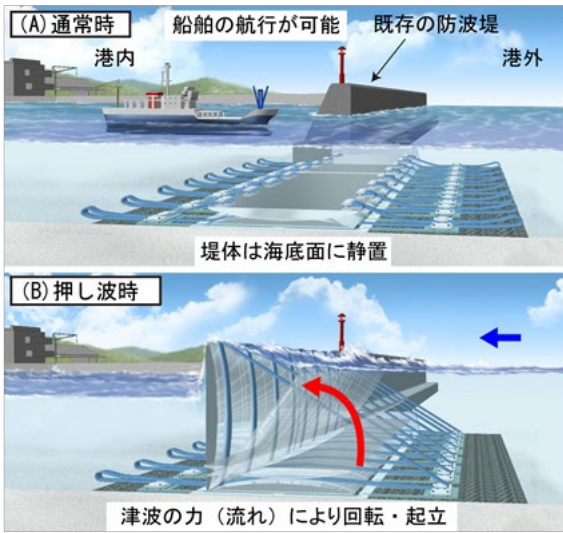


図-1 流起式可動防波堤の設置想定図；(A) 通常時、(B) 押し波来襲時

2.2 起立メカニズム

扉体の起立は流れに伴う流体力によっている。図-2 に流体力と扉体起立との関連のイメージを示す。

流起式可動防波堤に生じる流体力(F) はその鉛直成分を「揚力」および流れ方向成分を「抗力」と呼び、その概要について、翼理論¹⁾で説明できる。

「揚力」

$$F_L = F \cdot \cos \theta = C_1 \frac{1}{2} \rho_w v_1^2 S_U \quad \dots (1)$$

ここで、 C_1 、 ρ_w 、 v_1 、 S_U 、 θ はそれぞれ、比例係数、流体の密度、扉体上面での流体流速、受圧面積（代表面積）および流体力の作用方向と扉体とのなす角（扉体の傾斜角に近似）である。 v_1 は入射流速 v_0 に比例することから、 $v_1 = k_1 v_0$ とし、式 (1) に代入すると、揚力は以下の式で表すことができる。

「揚力」

$$F_L = C_1 \frac{1}{2} \rho_w (k_1 v_0)^2 S_U = C_L \frac{1}{2} \rho_w v_0^2 S_U \quad \dots (2)$$

ここに、 C_L は「揚力係数」である。抗力も同様に、

「抗力」

$$F_D = F \cdot \sin \theta = C_D \frac{1}{2} \rho_w v_0^2 S_P \quad \dots (3)$$

と表される。この C_D は一般的に「抗力係数」と呼ばれる。

なお、受圧面積（代表面積 S_U 、 S_P ）は「揚力」、「抗力」とも変わらず扉体の水平面積（扉高×扉幅） S とする。また、流起式可動防波堤において、扉体に作用する「揚力」「抗力」はともに扉体を起立させる力であり、その合力が扉体の起立力を生む。そこでその合力（流体力） F から C_F を次で定義し「流起係数」とした。

$$C_F = \sqrt{\frac{C_L^2 + C_D^2}{(\cos^2 \theta + \sin^2 \theta)}} \\ = \sqrt{C_L^2 + C_D^2} = \sqrt{(F_L^2 + F_D^2) / (\rho_w v_0^2 S / 2)} \quad \dots (4)$$

本防波堤の静的起立条件は扉体と回転レールの接触点を中心とした力の静的釣り合いから（図-2を参照）、次式 (5) のように表される。

「起立条件」

$$F_L \times r_x + F_D \times r_z > W_w \times r_w \quad \dots (5)$$

ここに、 W_w は扉体の水中重量、 r_x 、 r_z 、 r_w はそれぞれ、流体力の作用中心点 (Q) から扉体と回転台との接地位置 (O) までの水平距離と垂直距離および水中における扉体の重心位置 (G) と扉体と回転台との接地位置までの水平距離で、図-2に示す。なお、流体力の作用方向と扉体とのなす角 θ と扉体の傾斜角 α は極めて近い値となる。

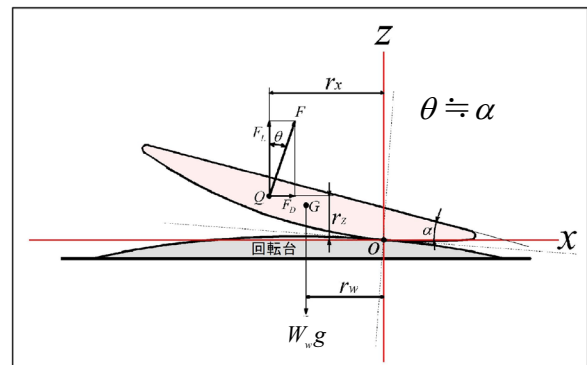


図-2 起立条件検討図

3. 中規模模型による応答性能および作用流体力の測定^{2,3)}

本実験では実大スケールの約1/50 (高さ43cm, 幅129cm, 厚さ4.8cm, 重量21.3kg (水中比重1.03)), 鋼製で製作した模型を用いた。

3.1 実験装置および方法

本実験では防波堤に作用する流体力を高精度に制御するために、大阪府立大学所有の回流水槽を用いて実験を行った(図-3)。

通常、回流水槽は船舶の航行抵抗等の測定に用いられるため、流速の高精度な制御が可能となっている。水槽内に設置したプロペラの回転数を調整することにより、水平方向循環流の速度を制御することができる(図-3(A))。防波堤模型は開水路となっている観測部のほぼ中央に設置した。水路底部には防波堤模型の台座を設置し、この台座の高さを調整することによって防波堤を設置する水深を設定した。また、防波堤の前後に電磁流速計を設置し、作用する流速を計測した(図-3(B))。

なお、防波堤模型と側壁との間には隙間を設け、台座の下部も通水していることから、防波堤が起立した状態でも防波堤の前後で水位差(静水圧)が生じないようにした。

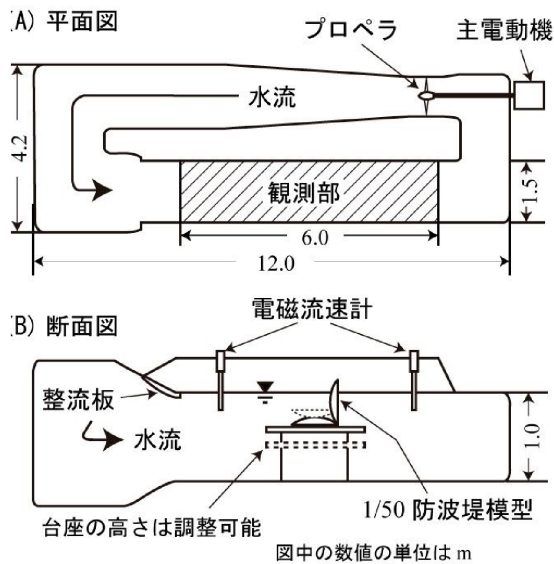


図-3 応答特性評価実験に用いた回流水槽(大阪府立大学所有)および防波堤模型設置位置図; (A) 平面図, (B) 断面図

3.2 応答流速と流起角度に関する評価実験

(1) 実験条件

応答流速および流起角度を評価する実験での設定条件を表-1に示す。設置水深による応答特性および流起角度

の変化を明らかにするために、設置水深が異なる3シリーズ(防波堤高の50%(21.5cm), 75%(32.5cm), 100%(43.0cm))を実施した。各シリーズにおいて、扉体の比重を調整し(1.008~1.226g/cm³), 6ケース実施した。また各ケースでは流速を最小 2.9cm/s から最大 80.0cm/s まで設定し、各流速における扉体の応答状況を調べた。

表-1 応答流速および流起角度評価に関する実験条件

設置水深 (cm)	扉体の比重 (-)	流速 (cm/s)
21.5 (防波堤高の50%)	1.008	2.9
32.5 (防波堤高の75%)	1.031	
43.0 (防波堤高の100%)	1.052	~
	1.095	
	1.139	80.0
	1.226	

(2) 実験結果

扉体の比重が 1.052g/cm³ に設定した際の扉体の流起安定角度と流速の関係を図-4 に示す。

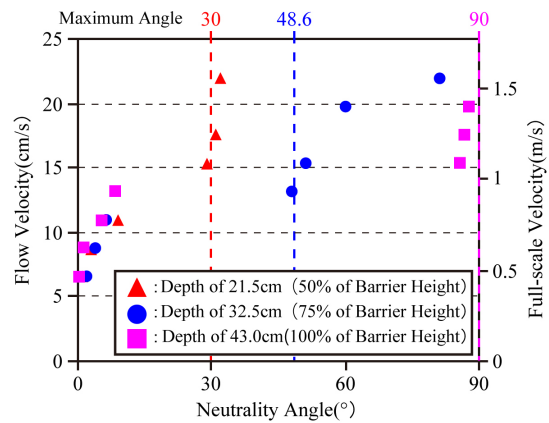


図-4 扉体の流起安定角度と流速の関係(扉体の比重が 1.052 g/cm³ のシリーズ)

すべての水深において、8.8cm/s 程度から扉体は流体運動に反応し、若干ではあるが持ち上がっていることがわかる。流速が 13cm/s を超えると、どの水深においても扉体の端部が水面まで起き上がっていることが確認できた。また、扉体と底面の角度(流起角度)が 15° 以上になると、扉体は途中で停止せず水面まで起き上がっていた。このことから、扉体の比重が 1.052g/cm³ の場合、流体速度が 13cm/s (実スケールで 0.9m/s) 以上になると、流体力によって扉体が流起することがわかった。また、水面までの扉体の応答特性に関しては、設置水深の影響はほとんどないと言える。

次に、扉体の水中比重と応答開始速度の関係を図-5に示す。

図-5の左側縦軸はフルード数 $Fr = v/\sqrt{gh}$ を示している。ここに、 v は流速、 h は扉体の設置水深である。

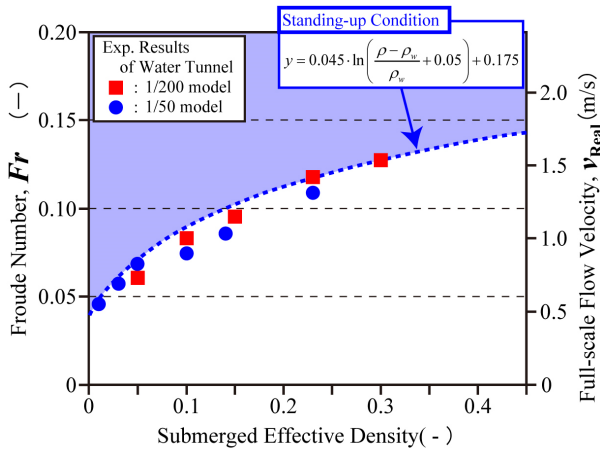


図-5 扉体の水中比重と防波堤の応答性との関係
扉体の設置水深は32.5cm, 1/200 模型
実験結果を併示)

扉体の比重の増加とともに、流起のために大きな流体力が必要となり、応答開始の流体速度が増大することを示している。これは、扉体の比重を調整することにより、流起を開始する流速を任意に設定することが可能であることを示している。これらの特性は1/200模型の実験結果と定性的に整合する結果であった(図-5)。

その結果、扉体が起立を開始する流速の条件式として次式を提案する。

$$Fr > 0.045 \cdot \ln \left(\frac{\rho - \rho_w}{\rho_w} + 0.05 \right) + 0.175 \quad \dots (6)$$

ここに、 ρ は扉体の密度、 ρ_w は水の密度、 $(\rho - \rho_w) / \rho_w$ は扉体の水中比重である。防波堤の設置位置で生じる津波による流速 v および設置位置の水深 h からフルード数 Fr を算定し、式 (6) の条件式から、扉体の設計比重を求めることができる。

さらに、本実験においては、次のことを確認している³⁾。

- (1) 扉体の比重が1.052 g/cm³の場合、流速が8.8cm/s程度(実スケールで0.6m/sに相当)から扉体は流体運動に応答を開始し、13cm/s(実スケールで0.9m/sに相当)以上になると水面まで流起した。すべてのケースにおいて、流起角度が10°~15°を超えると途中で静止することなく、水面まで流起することが明らかとなった。また、扉体の応答性に関して設置水深はほとんど影響していなかった。
- (2) 扉体の比重が最も小さい1.003g/cm³のケースでは流速4.4cm/s(実スケールで0.3m/s)で応答(動くもの、流起はしない)を開始し、8.8cm/s(実スケールで0.6m/s)で水面まで流起していることも確認している。この結果は1/200模型実験結果とも整合している。

3.3 扉体に作用する流体力の測定

(1) 実験条件

本実験では扉体に作用する流体力を分力計によって測定した。具体的には、固定ベルトを装着していない扉体の両側面にアームを取り付け、それらのアームは分力計の測定部と接合されている(図-6)。

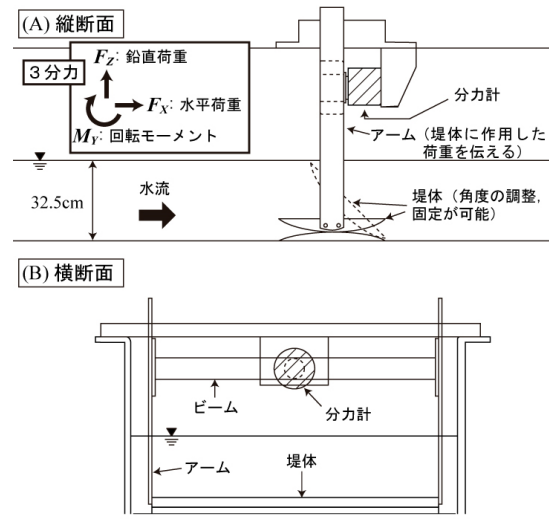


図-6 扉体に作用する流体力を測定するための3分力計の設置図；(A)縦断面、(B)横断面

これによって扉体に作用する流体力の測定が可能となる。用いた分力計は3分力計(東京計測(株)製)で、定格容量は水平方向荷重 F_D と鉛直方向荷重 F_L については500N、回転モーメント M については250N・mである。測定される回転モーメントは扉体中心周りのモーメントであり、起立角度 0° の場合を除いて扉体を起立させようとする実効起立モーメントではない。

(2) 扉体に作用する流体力の測定結果

扉体の流起角度はアームへの固定位置を調整することによって0°(水平)から90°(直立)まで設定できる。扉体の流起角度を0°から90°まで8ケースで固定し、その際に扉体に作用した流体力と流速の関係を図-7に示す。

a) 水平方向荷重 F_D

図-7の水平方向荷重 F_D と流速の関係から、流起角度が小さいケースでは、水平方向荷重が作用する投影面積(扉体幅×扉体天端高)が小さくなるため、作用する水平方向荷重 F_D が小さい。流起角度が大きくなると、投影面積が大きくなるため(48.6°以上の場合は扉体上部が水面上に出るので、扉体幅×水深)、水平方向荷重 F_D も増加する。また、流速の増大とともに、水平方向荷重 F_D も流速の2乗に比例して増加している。

b) 鉛直方向荷重 F_L

図-7における鉛直方向荷重 F_L は、水平方向荷重 F_D と同様に流起角度が大きくなるにつれて増大しているが、流起角度が30°以下では鉛直方向荷重が水平方向荷重よ

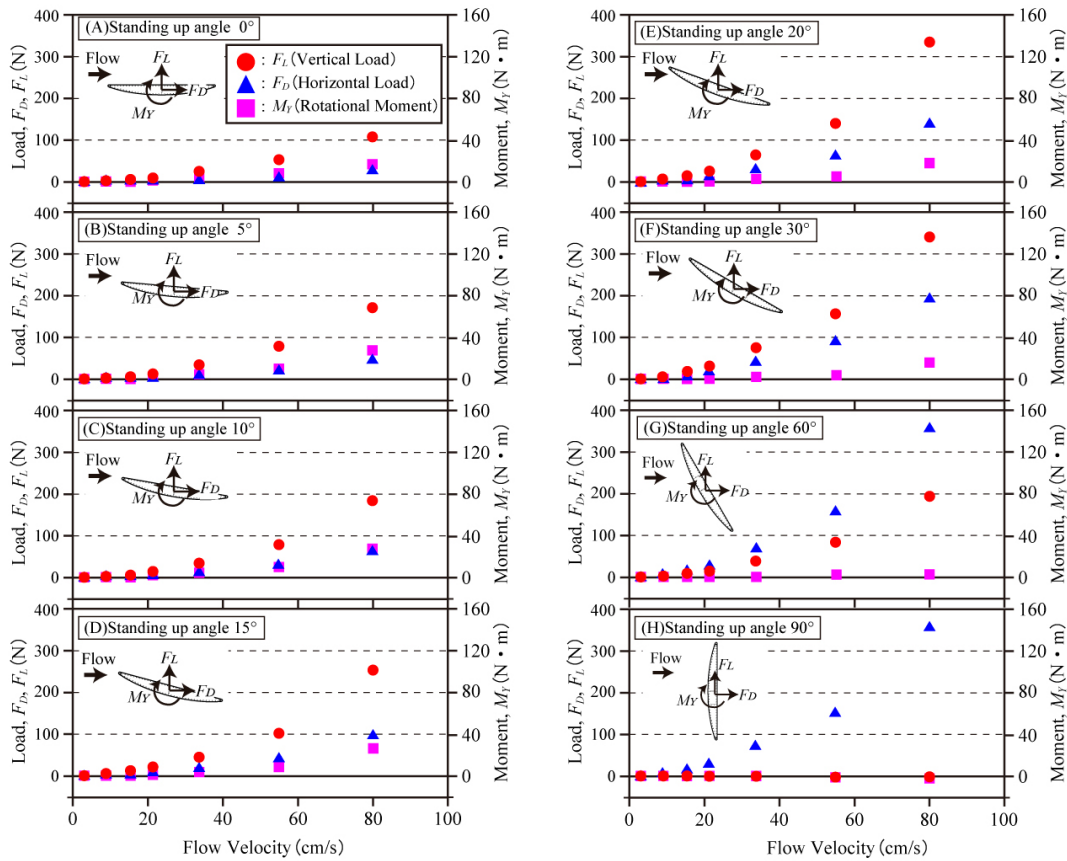


図-7 3 分力計による測定にもとづく扉体に作用する流体力（水平方向荷重 F_D 、鉛直方向荷重 F_L 、回転モーメント M_Y ）と流速の関係；流起固定角度(A) 0° 、(B) 5° 、(C) 10° 、(D) 15° 、(E) 20° 、(F) 30° 、(G) 60° 、(H) 90°

り大きく、扉体の応答初期の段階では鉛直方向荷重が主要な要素になっている。また、流起角度が 45° を超える、 60° (図-7(G))、 90° (図-7(H)) のケースでは鉛直方向荷重 F_L が全体的に減少しており、これは扉体に対し主に水平方向に働く流体力が主要になって、鉛直方向には作用しなくなるためである。

ここで、流速 10cm/s 以下と 10cm/s 以上の鉛直荷重 F_L に注目すると、流速 10cm/s 以下の場合、鉛直方向荷重 F_L はほぼ0であるのに対し、流速 10cm/s 以上の場合、鉛直方向荷重 F_L が作用していることがわかる。この結果は図-5に示した最低流起速度に関する結果と整合する。なお、図-5において流速 10cm/s はフルード数0.05に相当する。

c) 回転モーメント M_Y

図-7の回転モーメント M_Y において、流起角度が 0° でも、時計回り（起立側）のモーメントが作用し、その値は流速が増すにつれ大きくなっている。これは、扉体には流速が小さくても起立モーメントが作用していることを示している。起立角度が増しても、 M_Y は余り大きくならないが、この原因は、流体力作用点が扉体中心に近づくためである。

図-7にて得られた流体力から実効起立モーメント（扉

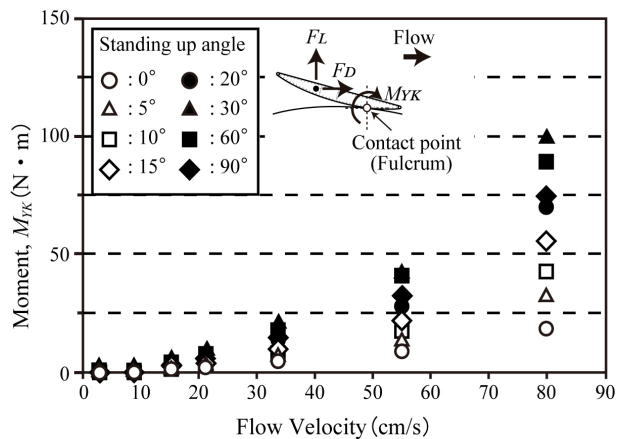


図-8 実効（換算）起立モーメントと流速

体と回転台接触点を基点とするモーメント)に換算し、その結果を図-8に示す。図-8に示すように、流起角度が $10^\circ \sim 15^\circ$ を超えた後、起立モーメントが急激に増加する。これは、図-4に示した流起安定角度と流速の関係とも整合する結果である。

(3) レイノズル数の影響

式(2)、(3)および(4)にて定義した流体力における係数に対するレイノズル数の影響を評価した。本実験においては、3分力計測定結果の水平方向荷重は抗力 F_D 、鉛直方

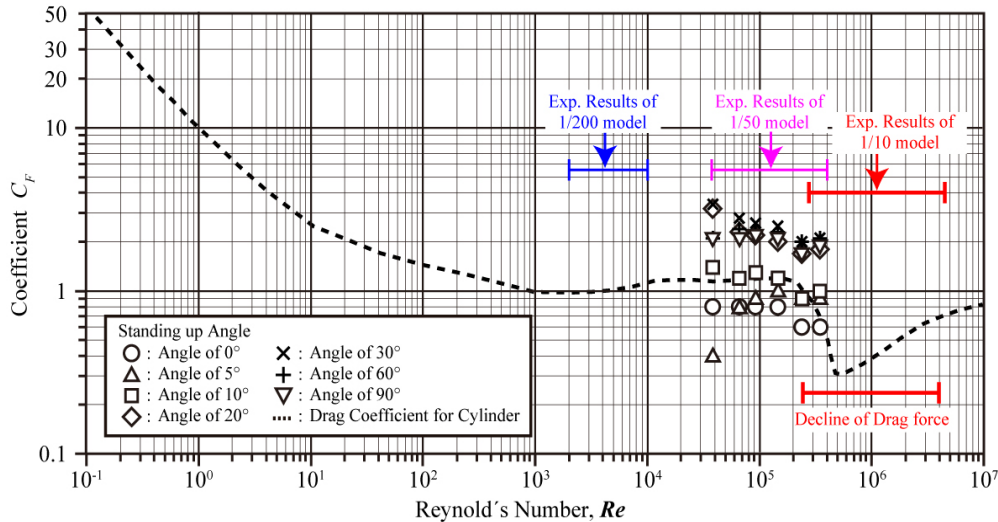


図-9 扉体に作用する流体力の流起係数 C_F とレイノルズ数との関係 (円柱に対する抗力係数の曲線を併示)

向荷重は揚力 F_L と同義であると仮定し、式(4)によって各ケースにおける流起係数 C_F を求めた。レイノルズ数との関係を図-9にまとめて示す。本実験の水理条件ではレイノルズ数が 4×10^4 から 4×10^5 までの範囲であった。

レイノルズ数が最も小さいケース ($Re = 4 \times 10^4$) では、作用した流体の流速が小さいため (2.9cm/s)、分力計によって荷重およびモーメントが正確に測れなかった。そのため、誤差が大きくなったと考えられる。他のケースではレイノルズ数が増加しても、流起角度が同じであれば、流起係数 C_F はほぼ一定の値 (0.8 ~ 2.0) となっている。

レイノルズ数が増加しても流起係数 C_F が一定であることは、扉体に作用する力、すなわち、流体が扉体を回転、流起させる力が流れの乱れに影響を受けないことを示唆している。つまり、本防波堤の応答特性に対し、津波の乱流の影響はほとんどなく、フルードの相似則にもとづく性能評価、設計が妥当であることを示している。

4. 動作メカニズムに関する可視化実験⁴⁾

以上の研究から、流起式可動防波堤の応答特性について調査成果が得られた。しかし、流起機構の根本である動作開始メカニズムに関しては明らかではない。本実験では、流起式可動防波堤の周辺流体運動を粒子画像による流速測定 (PIV : Particle Image Velocimetry) を実施し、流起機構と流体運動の関係を明らかにすることを目的とした。

4.1 実験方法および実験条件

津波を模擬した 1 方向流を再現するため、循環式直線開水路において定常流を作成した (図-10、表-2)。水路上流端から 9m の位置に計測区間を設定した。また、計測区間の下部から鉛直上方にレーザーライトシート (LLS) を照射し、水路側方から高速ビデオカメラで撮影した (20

秒間、100 枚/秒)。本実験で用いた模型はアクリル板によって作製しており、可視化光源を透過する。流体挙動を代表するナイロン粒子 (粒径 $80 \mu\text{m}$ 、比重 1.02) を撮影した画像を図-11 に示す。

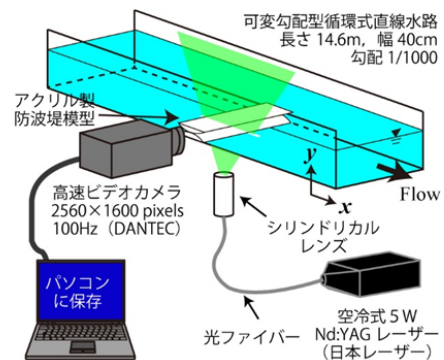


図-10 計測システム図

表-2 水理条件

シリーズ	B (cm)	Q (ℓ/s)	h (cm)	U_m (cm/s)	Fr	Re
LOW		1.2		2.0	0.02	3000
MID	40.0	3.1	15.0	5.1	0.04	7700
HIGH		6.1		10.2	0.08	15000

ここに、 B は水路幅、 Q は流量、 h は水深、 U_m は断面平均流速、 Fr はフルード数、 Re はレイノルズ数である。

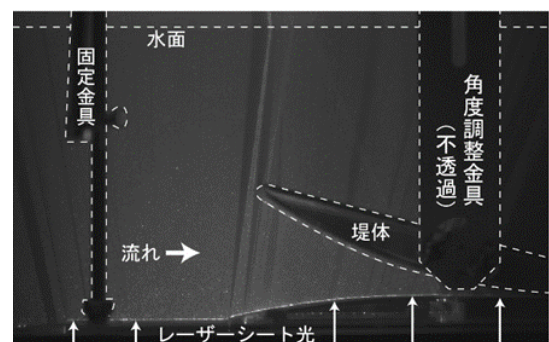


図-11 高速ビデオカメラで撮影された瞬間画像 (流起角度 15° で固定したケース)

表-3 模型の流起条件 (固定角度)

ケース名	0	10	15
流起角度 (堤体を固定した角度)			
ケース名	30	49	90
流起角度 (堤体を固定した角度)			

水理条件および模型の流起条件 (固定角度) をそれぞれ表-2 および表-3 に示す。また、使用した扉体模型の寸法は高さ 20cm, 幅 40cm, 厚さ 1.2cm である。

4.2 実験結果と考察

(1) 平均流速分布

PIV 解析によって得られた瞬間ベクトル値を時間平均し、平均流速分布を算定した。扉体周辺における鉛直方向速度の空間分布を図-12 に示す。

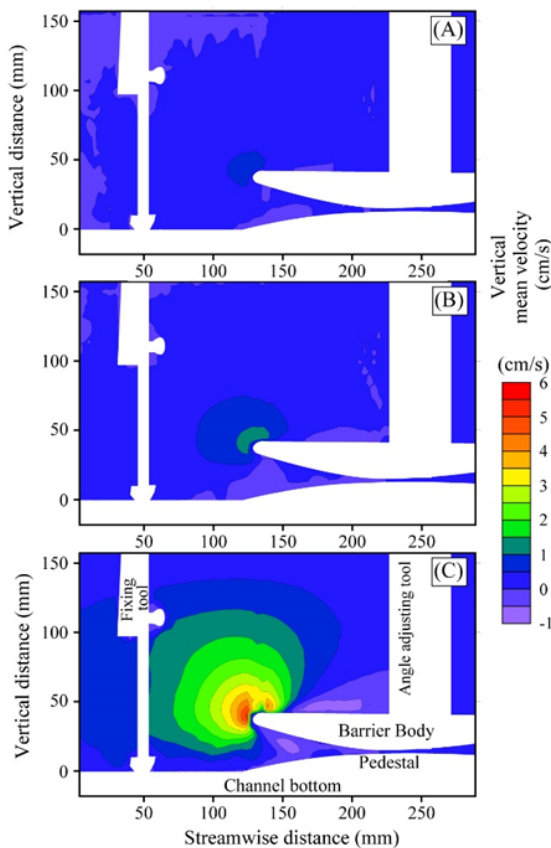


図-12 流速による鉛直方向速度の空間分布の違い

流速の違いシリーズ LOW (図-12 (A)) では、扉体の上流下部の止水域が見られるが、定常的な渦の発生は見られない。一方で、流速の速いシリーズ HIGH (図-12 (C)) では、扉体の上流下部で定常的な渦構造が形成された。また、流下方向速度の空間分布において、天端部上流側にせ

ん断層が形成され、剥離渦が間欠的に発生していることが確認できた。その他のシリーズ HIGH の各流起角度ケース (流起角度が 30° まで) においても同様に、天端部上流側に渦の発生域の形成およびせん断層の発生が確認された。

(2) レイノルズ応力分布

東ら¹⁷⁾は流起式防波堤の 1/50 模型を用いた実験において、扉体が流起角度 15°に到達すると、その後は途中で停止せず、水面まで到達することを明らかにした (図-4)。また、扉体に作用する流体力を 3 分力計によって計測した結果、扉体中心の回転モーメントが流起角度 15°~20°において最大値となり、扉体に作用する流体力が大きくなることを示している (図-7)。

本実験では扉体周辺のレイノルズ応力を算定した。実流速で 1.0m/s 以上に相当する ($U_m=10.2\text{cm/s}$ の $100^{1/2}$ 倍) シリーズ HIGH における扉体周辺のレイノルズ応力の空間分布を図-13 に示す。

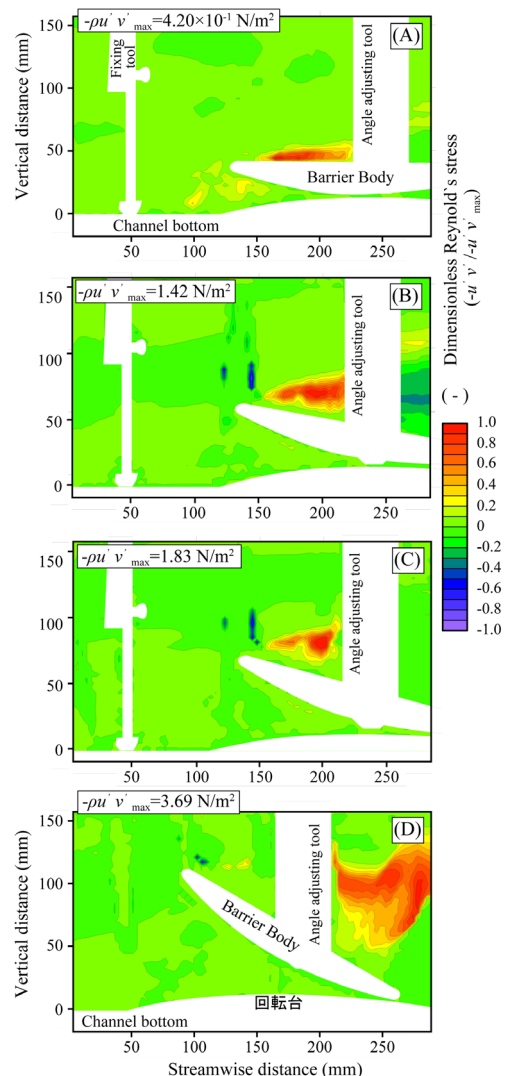


図-13 扉体周辺におけるレイノルズ応力の空間分布；シリーズ HIGH, (A)流起角度 0°, (B)10°, (C)15°, (D)30°

平均流速の空間分布で確認された天端部上流側のせん断層が形成される領域で、レイノルズ応力が大きくなっていることが確認できる(図-13(A), (B)および(C)). 流起角度が15°を超えると、扉体上流端のせん断層が解消されていることがわかる(図-13(D)). これは、流起角度が15°を超えると、扉体を流起させる力が扉体上部で発生する渦(負圧)から、扉体下部に作用する流体力へと変化していることを示している。この結果は、扉体が流起角度15°に到達すると、その後は途中で停止せず、水面まで到達することと物理的に整合する。

4.3 可視化実験による結論

可視化実験から次の結論が得られた。

- 1) 応答開始速度(図-5)よりも速い流れが扉体周辺で生じた場合、扉体上流側天端部でせん断層が発生し(レイノルズ応力が発生)、定常的な組織構造が形成されていることが明らかになった(図-13(A))。
- 2) 流起角度が15度以下においては、この扉体天端上流部で生じる負圧が流起機構の主動力となっていることが明らかになった。この結果は参考文献⁵⁾の結果とも整合するものであった。
- 3) 流起角度が15度以上になると、扉体の后背域および下部域に逆流域が形成され(図-13(A)および(C))、この動水圧により流起していることが明らかとなった。
- 4) これらのことは、15度以上流起すると、静置状態に戻ることなく水面にまで到達するという図-4に関して考察したことを物理的に明瞭に説明している。すなわち、流起角度が15度を境界として、流起機構の主動力が扉体天端の負圧から流体の動水圧に切り替わることを示している。可視化実験の結果は、流起式可動防波堤の動作機構を物理的に説明するものであり、これまでの物理実験および数値解析結果にもとづく流起式可動防波堤の設計の信頼性を担保している。

5. 実大規模模型による実用化検証実験⁶⁾

5.1 実験模型の概要

本実験で用いた模型は、実機スケールの約1/10とし、フルードの相似則に従って、最大スケールの約1/10、高さ2.2m、幅3.3m、厚さ0.25m、重量 1.28×10^3 kg(水中比重1.01)とした(図-14)。

また、構造物の剛性や固定ベルトの重量、剛性についてもフルード則に従い製作した。

5.2 実験方法および実験条件

(1) 実験装置および方法

扉高が2.2mの模型を流起させるために、実物大に近

い津波が発生できる、(国研)海上・港湾・航空技術研究所の大規模波動地盤総合水路(長さ184m、幅3.5m、深さ12m)を使用した。

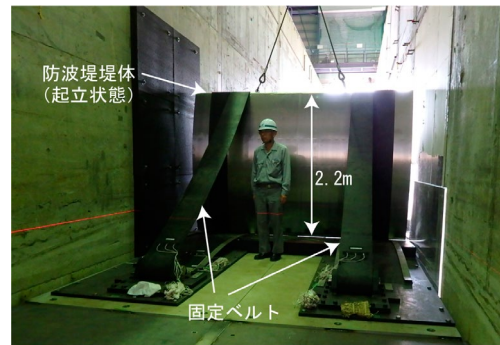


図-14 実大規模模型の設置状況

上記水路の造波装置から約100m地点の平坦路床上に鋼鉄板製の取り付けマウンドを設置した(図-15)。

防波堤模型はこの取り付けマウンドの中央部に固定した。その防波堤模型の前面と後面に2ヶ所ずつ計4ヶ所に波高計(WG1~WG4)を設置し、流速計を前後(EMC1, EMC2)に設置した(図-15)。

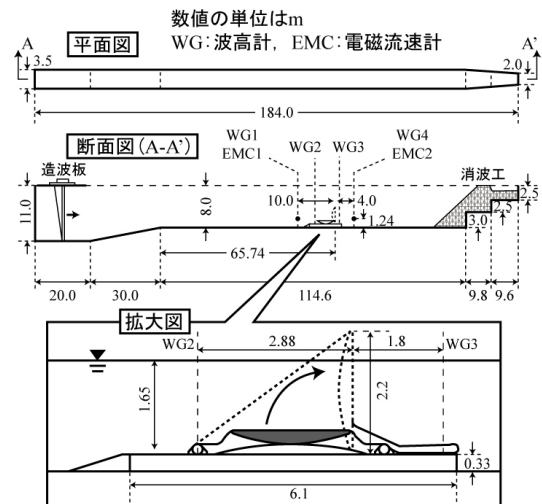


図-15 (国研)海上・港湾・航空技術研究所所有の大規模波動地盤総合水路における流起式防波堤の設置位置図

これらの波高、流速データを比較することにより、津波に対する流起式防波堤の減衰・減勢効果を評価した。

(2) 実験および造波条件

東ら³⁾は流起式防波堤が津波の流れによって流起する条件は扉体の水中比重を調整することにより設定できることを報告している。本実験においても扉体内部にウエイトを積載することにより扉体比重を調整し、津波の流速に対する応答性を評価した。調整した扉体の諸量を表-4にまとめて示す。

また、水中比重を調整した扉体に対して表-5に示す孤

立波を入射させた。本実験において、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 0m となるまでの時間と定義する。また、表中の実大波高は扉体幅が 20m と仮定した場合の波高である。

表-4 扉体内にウエイトを積載することにより扉体の重量(比重)を調整した各シリーズの条件

シリーズ名	W0	W1	W2	W3	W4	W5
扉体重量 (kg)	1279	1306	1333	1386	1440	1520
浮力 (kg)	1266					
水中重量 (kg)	13	40	67	120	174	254
比重 (-)	1.010	1.032	1.053	1.095	1.137	1.201

表-5 可動防波堤に入射する津波の条件

ケース名	SW1	SW2	SW3	SW4	SW5	SW6	SW7
入射波高 (m)	0.055	0.11	0.193	0.275	0.55	0.825	1.1
周期 (s)	7	10	12	13	13	13	14
実大波高 (m)	0.495	0.99	1.74	2.475	4.95	7.425	9.9

5.3 実験結果および考察

(1) 水位と流速の時系列データ

実物の構造物と重心が変わらないように 54kg のウエイトを積載した状態である比重 1.053 のシリーズ W2 において、波高 1.1m のケース SW7 における水位変化の時系列データを図-16 に示す。

この結果から扉体が津波によって流起し、それに伴って一部の波が反射し、港外側に戻る様子を水位変化は示している。ケース SW7 の入射波の周期が 14s (表-5) に対し、測定点 WG2 における水位上昇継続時間が 20s になっている。また、入射波の周期が約 14 秒に対して、港内に流入した水位の上昇継続時間が 5 秒程度になっている (図-16)。

これは波の力によって流起した防波堤が後続の津波を堰止めたため、水位上昇が止まり、継続時間が短くなったことによる。一方で、扉体が流起するまでに通過した波が 5 秒程度港内に流入したことがわかる (図-16)。

流起式防波堤の場合、扉体が水面に流起するまでは津波は侵入し続けるが、侵入した津波が背後地に浸水被害を起こさなければ、流起式防波堤はその効果を示したことになる。扉体の流起によってどの程度津波が低減できるかが重要となる。なお、造波した孤立波は第 1 波のみであり、水位変化の時系列データにおいて、60s 以降に観

測される水位変化は水槽中に残存した反射波である。

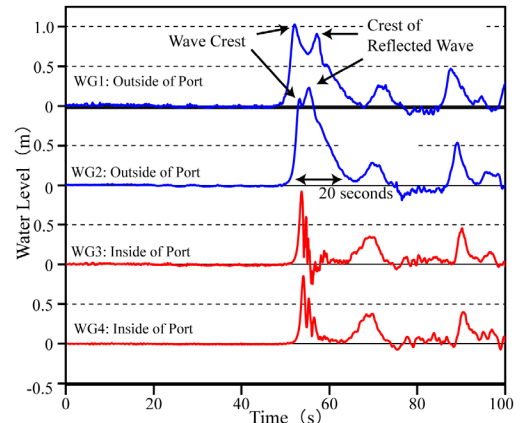


図-16 シリーズ W2, ケース SW7 における水位変化の時系列データ

次に、図-16 と同じ実験条件における流速の水平方向成分の時系列データも、水位と同じ傾向を示していて、後続の津波の本体の流速は流起式防波堤によって、防ぐことができると考えられる⁶⁾。

(2) 波および流れの低減効果

水位変化および流速の減衰効果については、港外側および港内側の測定値を比較すれば良いが、この減衰率には、防波堤基礎部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。

$$\text{実効減衰率} = \frac{\text{防波堤が作動した状態での減衰率}}{\text{防波堤が作動しない状態 (原地形) での減衰率}} \dots (7)$$

扉体の比重が 1.053 であるシリーズ W2 における波高(水位変化)および流速の実効減衰率の関係を図-17 に示す。同図には、実大波高を扉体の想定最大スケール 20m

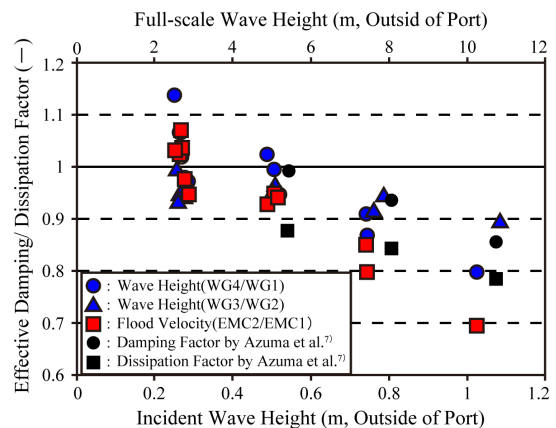


図-17 シリーズ W2 における波高(水位変化)および流速の実効低減効果

に対する波高とし、東ら^{2,3)}の 1/50 模型による実験結果も併示した。この結果から、入射波高が 0.275m を超える場

合、扉体が波の力によって流起し、防波堤としての効果を発揮することがわかる。一方、入射波高が0.275m以下の場合、扉体は揺動するが、起立状態までには至らなかった。入射波高に対する系統的な変化に着目すると、波高の増加に伴い、波高および流速に対する低減効果も増大していることがわかる。この波高および流速の低減効果が入射波高の増加に伴い増大することは東ら^{2,3)}も同様な結果を得ている(図-17)。この理由としては、図-16に示したように、防波堤が起立するまでに波の先端部は港内に流入するが、入射波高が大きくなると、流速が速くなり、より短時間で扉体は起立するようになり、防波堤としてより大きな後続の波を遮蔽するようになるためである。

(3) 扉体の応答開始流速

扉体の比重と応答開始流速の関係を図-18に示す。同図縦軸の左軸の流速は本実験結果を表示しており、右軸の実大流速は扉体の想定最大スケール20mに対する流速であり、本実験結果および東ら^{1,2)}の実験結果を実大流速に換算し、併示した。

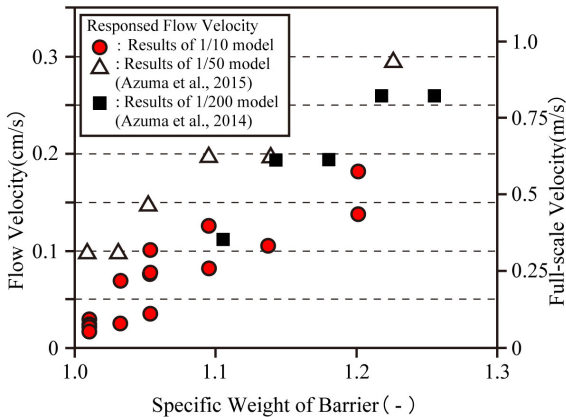


図-18 扉体の比重と防波堤の応答性との関係

応答開始流速は扉体が少しでも動く流速と定義して、判定した。扉体の比重が最も小さい1.010では流速0.17m/s以上で応答を開始することを確認した。この場合、扉体は緩やかに揺れるだけであり流起しない。扉体の比重の増加にともない、応答開始流速も増大することがわかる。

この傾向は1/200模型実験結果および東らによる1/50模型実験結果³⁾と整合していることがわかる。本実験結果の応答開始流速と東ら³⁾による1/50模型実験結果を比較して、若干の差異が生じている理由としては、扉体自体の重量の他に、固定ベルトの重量も応答性に影響していることが考えられる。1/50模型実験では左右8本のベルトで扉体を固定しているのに対し、本実験では左右4本のベルトで固定しているため、構造物としての相対的な重量が若干小さく、応答感度が若干高くなったためと推察される。

(4) 実機設計に向けての流体力に関する一考察

円柱に作用する流体力に関してはレイノルズ数(Re)が

10⁶付近で流水抵抗が落ちることが確認されている(図-9参照)。

流起式可動防波堤の流起においては、波による流体力が重要であり、円柱のような急激な流体力の低下が生じると、流起しない可能性がある。したがって、このような抗力低下の発生の有無を確認しておく必要がある。本実験におけるレイノルズ数は次式で定義する。

$$Re = d \cdot u / \nu \quad \dots (8)$$

ここに、 d は防波堤(扉体)の厚さ、 u は波の流速、 ν は動粘性係数である。式(8)から各実験条件におけるレイノルズ数を算定すると、本実験は $Re=2.6 \times 10^5 \sim 4.4 \times 10^6$ 、1/50模型実験¹⁰⁾は $Re=4.0 \times 10^4 \sim 4.0 \times 10^5$ 、1/200模型実験は $Re=2.0 \times 10^3 \sim 1.0 \times 10^4$ となる。このことから、本実験の水力条件が円柱に対する流水抵抗の低下が生じる範囲に該当することがわかる。

しかしながら、本実験の応答性に関する結果は、1/50模型実験^{1,2)}および1/200模型実験と整合しており、流起式防波堤の流起過程においては、上記のような流水抵抗の低下は生じないと考えられる。このことから、1/50模型程度の模型による実験結果にもとづいて、実大規模の防波堤を設計することが可能であることが明らかになった。

6. 研究成果と今後の課題

本研究にて、流起式可動防波堤の起立特性を明らかにするとともに、自然の力が作用する条件にあっても、扉体の起立がその水中比重で制御できることを明らかにした。また、相似則の妥当性を検証したうえで、設計指標を提案した。

これにより、流起式可動防波堤は当初の目的どおり津波の流体力により自動的に流起し、津波の「減災」に有効な施設であることを立証した。

本研究以外にも、必要な各種研究を行い、定性的、定量的指標を得て、実用化に支障ないことを確認するとともに、一連の研究により、実用化における具体的な設計条件の設定等が可能になった。ただし、本研究が実大規模に近いレベルの模型実験で実証しているとはいえ、現地に設置した際に生じる課題を全て想定しているとは言えない。

今後の課題として、早期に事業化に貢献することにより、研究成果の効果確認を行い、そこで得られる実践的課題に対応することが求められている。

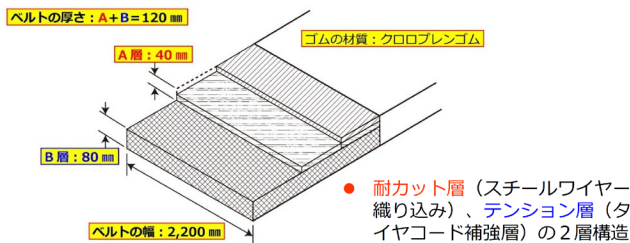
また、本研究課題は極めてユニークな発想から生まれた新しい技術であることから有識者や専門家および実務者からの技術的助言などにより、さらに充実させていく必要がある。

7. おわりに

本研究は「津波・高潮対策 流起式(可動)防波構造に関する共同研究会(港湾空港技術研究所, 京都大学防災研究所, 大阪工業大学, 関東学院大学, 沿岸技術研究センター, ニュージェック, 丸島アクアシステム, みらい建設工業)」にて流起式可動防波堤の開発に取り組み, 各種の模型実験による機能・性能確認を実施し, 実用化レベルに達したものである. 本報告はそれら一連の研究成果の一部である.

研究会では, 本報告に加え, 扉体, 引き留めベルトに作用する波力に関する実験的研究, 一連の実験結果に対応する数値シミュレーション解析手法⁵⁾, 土砂堆積と起立の研究から得た維持管理指標, 点検頻度や耐久性基準などを含む維持管理及び施工方法等に関する研究, 粘り強い強度が要求される「設計津波を超える規模の強さを有する津波」での非線形強度解析手法⁷⁾等がある. それらの成果に基づき, 港湾関連施設の実務に携わる技術者や管理者向けに「技術・設計マニュアル(案)」⁸⁾を提案した. その一部を紹介すると, 引き留めベルトは強度層と表面保護層とで構成され(図-19), 設計条件として, 100年経過後の強度劣化を考慮し設計することになっている. また「設計津波を越える規模の強さを有する津波」に対しても破損しないことを設計条件にしている, その強度計算式が示されている.

固定ベルトの断面構造図
(扉高20mでの参考図)



A層:耐カット層【スチールコード(8mmφ)補強層(ヒアス構造2層)】

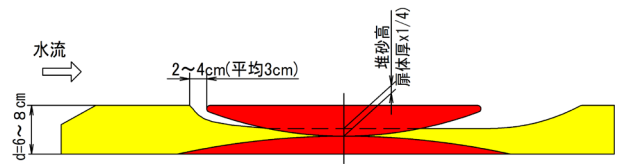
B層:テンション層【ナイロン製タイヤコード補強層(スタレ構造16層)】

図-19 引き留めベルトの構成

また「起立性能確保可能な許容土砂堆積」を実験により求め, 維持管理指標として図-20を提案している.

その他, 参考に防食適用事例や水中点検ロボットによる維持管理の紹介に加えて, 設計計算例も示している,

こうした性能研究および一連の実用化研究の成果により, 港湾関連施設の実務に携わる技術者や管理者が, 流起式可動防波堤の構造の特徴を容易に理解でき設計, 施工, 据付および維持管理等に活用できる技術として確立した. 本技術に基づく施設が早期に社会実装され, 近い将来発生が予想されている巨大地震津波から多くの尊い命を守り, 沿岸施設や沿岸域を超える広範囲な被害を減らす等, 幅広く社会に貢献できることを切に望むものである.



注: 堆積土砂の寸法は1/50模型(扉高430mm)における値を示す



図-20 扉体の起立に支障のない土砂・へドロ堆積図と実験風景(下)

於: 京都大学防災研究所多目的造波水槽

参考文献

- 1) 河内啓二: 揚力と抗力 (Lift and Drag), 日本流体力学会誌 ながれ 21, pp. 323-329, 2002年8月
- 2) 東良慶, 伊藤忠男, 半田英明, 平石哲也, 菅野高弘: 流起式可動防波堤の津波減勢効果に関する評価実験, 土木学会論文集 B2(海岸工学), Vol. 71, No.2, pp.1081-1086, 2015.
- 3) 東良慶, 伊藤忠男, 半田英明, 平石哲也, 菅野高弘, 二瓶泰範: 流起式可動防波堤の津波に対する応答特性評価実験, 土木学会論文集 B2(海岸工学), Vol. 71, No.2, pp.1087-1092, 2015.
- 4) Azuma, R., Ito, T., Handa, H., Hiraishi, T. and Sugano, T.: Standing-up mechanism of Hydroplane Tsunami Barrier by using PIV analysis, E-proceedings of the 38th IAHR World Congress, pp. 4291-4299, 2019.
- 5) 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, pp.1051-1056, 2015.
- 6) 東良慶, 伊藤忠男, 半田英明, 植木利洗, 平石哲也, 関谷千尋, 菅野高弘: 流起式可動防波堤の実大規模実験による応答特性評価, 土木学会論文集 B2(海岸工学), Vol. 72, No. 2, pp. 1099-1104, 2016.
- 7) 司宮智洋, 辰巳晃, 飯島一博, 東良慶, 菅野高弘, 伊藤忠男: 流起式可動防波堤の最終強度の解析と簡易推定法の開発, 土木学会論文集 B2(海岸工学), Vol. 75, No. 2, 2019.
- 8) 菅野高弘, 高山知司, 平石哲也他: 流起式可動防波堤の性能評価および実用化研究(付録: 技術・設計マニュアル(案)), 港湾空港技術研究所資料, NO.1384, 2021.3.