

## 1.5 河川津波に対する河川堤防等の被災軽減に関する研究

研究予算：運営費交付金（一般勘定）  
 研究期間：平 24～平 27  
 担当チーム：水工研究グループ（水理）  
 研究担当者：箱石憲昭、石神孝之、坂野章

### 【要旨】

東日本大震災においては、海岸部の被害だけでなく、河川を遡上・流下した津波（河川津波）によって、河川堤防等及び沿川流域で甚大な被害が生じ、今後の河川管理においては、洪水や高潮だけでなく津波を計画的防御の対象として位置づける必要性が指摘された。本研究は、河川津波を設計外力とした場合の河川堤防等の効果的・効率的な対応策について水理的に検討することを目的とし平成 24 年度から開始された。

その結果、堰や水門のゲートを開けることによってゲートに作用する波圧や河道全体の波高を低減させる効果を有すること、河川護岸ブロックの端部被災の原因はブロックにかかる揚力が支配的であること等がわかった。

キーワード：津波、河川遡上、河川堤防、ゲート、河川護岸、被害、設計外力、対策、水理実験

### 1. はじめに

先の東日本大震災では、海岸部の被害だけでなく、河川を遡上・流下した津波（河川津波）によって、河川堤防等及び沿川流域で甚大な被害が生じた。河川津波は、高流速・高水位で短時間に急変する特性を有し、河道内では「押し波流れ」だけでなく「引き波流れ」等が生じる。この流れによって漂流物等が河川構造物等に集積して、水位せきあげが増大し氾濫被害を助長したと考えられる。これらに鑑み、今後の河川管理においては、洪水や高潮だけでなく津波を計画的防御の対象として位置づける必要性が指摘されるとともに<sup>1)</sup>、津波に対応した堰・水門等の設計や操作のあり方等についての基本的な考え方<sup>2)</sup>が示された。これを受け、河川法施行規則及び河川管理施設等構造令施行規則が一部改正され、「津波」や「計画津波水位」の新設等について明確化された（H25. 7. 5 施行）。

本研究は、河川津波を設計外力とした場合の河川堤防等の河川構造物の効果的・効率的な対応策について水理的に検討することを目的とする。

### 2. 検討方法

検討を進めるにあたり、先ず平成 24 年度に実験方法等がチューニングされた河川津波用の二次元実験水路の中に、堰および水門のゲートモデルを設置し、これに河川津波外力を与えた場合の荷重のかかり方等について種々の実験条件下で検討することとした。

次に、以下の 2 つのことから、護岸ブロック等の河川津波に対する水理的安全度の検討を行った。①東日本大震災では、河川津波による水門周辺や湾曲部等の護岸被災が河道直線部より顕著であった。②護岸ブロックの水理的安全度に関しては、河川流のみを想定した定常流の条件下における水理特性値が把握されている。しかし、河川津波のように時空間的な外力変動が大きい場合の適用性についてはまだ不明な点が多い。

### 2.1 堰や水門のゲートにかかる河川津波の荷重

#### 2.1.1 津波荷重算定式の比較検討

今後、堰や水門等についての設計外力として河川津波を想定する必要がある。そこで、これまでに河川下流部の防潮水門等の設計に適用した事例（表 1）を収集の上、ゲートにかかる津波荷重についての代表的な算定式を選定し、種々の条件下で算定した結果を比較検討した。

表 1 津波を考慮した堰・水門ゲートの設計事例

事例No.	河川名	ゲート形式	ゲート高	ゲート幅	設計年	津波荷重	静水圧 算定	動水圧(波圧)算定			
			(m)	(m)				アルミ水門式	合田式	サンフルと広井の式	谷本式
①		シムル構造スライドゲート	10.1	20.2	—	静水圧のみ	津波到達時の最大水深	—	—	—	—
②	小堀川	鋼製シムル構造ローゲート	3.5	25.8	2003			—	—	—	—
③		シムル構造ローゲート	3.4	15.2	—			○			
④		鋼製シムル構造サートゲート	5.1	24.8	—			○			
⑤	萩間川	鋼製シムル構造ローゲート	5.1	18.6	1992		津波到達時の最大水深	○			
⑥	旗待川	鋼製シムル構造ローゲート	3.2	15.2	1998			○			
⑦		鋼製プレートゲート構造ローゲート	2.7	10.3	1999			○			
⑧		鋼製シムル構造スライドゲート	2.8	14.8	2006		静水圧+動水圧(波圧)	○			
⑨		ゲート構造ローゲート	4.2	—	2006				○		
⑩	市堀川	鋼製ローゲート	6.0	—	1987		津波到達前の静水深			○	
⑪		鋼製シムル構造ローゲート	7.1	52.1	2001						○

### 2.1.2 水理実験による基本特性の把握

堰や水門のゲートにかかる津波荷重については、砕波等の津波条件やゲートの開度等によって大きく異なると考えられることから、これらと津波荷重の関係について水理実験により検討した。また、東日本大震災において北上大堰や阿武隈大堰のようなシェルタイプの制水ゲートが津波による揚力によって浮き上がった被災事例を考慮し<sup>2)</sup>、シェルタイプのゲート模型を作製し、津波条件及びゲート開度と揚力等の関係について水理実験により検討した(表2の検討ケース参照)。

表2 堰・水門ゲートへの荷重検討ケース

実験№	静水深 (最深部)	水位差 (砕波発生 水相部と河 道部のΔ h)	入射方向	水門幅	設置箇所			開度(a/h)					ゲート形式			
					砕波点 前	砕波点 直後	砕波点 後	0	0.2	0.4	0.8	1.0	プレート ゲート	シェル		
実験1	-1	0.4m	正面 (θ:90°)	水路全幅	○			○	○	○	○	○	○	○		
	-2					○			○	○	○	○	○			
	-3						○			○	○	○	○	○		
	-4						○			○	○	○	○	○		○
	-5						一部幅	○			○	○	○	○	○	
実験2	-1	0.15m	斜め (θ:45°)	水路全幅	○			○	○	○	○	○	○	○		
	-2					○			○	○	○	○	○			
	-3						○			○	○	○	○	○		
	-4						○			○	○	○	○	○		
	-5						一部幅	○			○	○	○	○	○	

### 2.2 護岸ブロックの水理的安全性の検討

東日本大震災における護岸被災のうち、高水護岸の被災形態については水門に接続する護岸ブロックのめくれ上がり・流失が卓越した。これは構造や材質の違いにより水門等と堤防との接合部が相対的に弱点箇所になりやすいことを示す。また、木戸川(福島県)河口部では、遡上した河川津波が急激に波高増加と堤防前面での高流速が発生し堤防や護岸等の被災が発生した。これは、河道の平面形や河床高の影響によって波が片側に反射して収斂した結果と考えられる。

以上のことから、河川津波を外力とした場合の河川護岸ブロック等の水理的安全性について検討した。

護岸ブロック等の水理的安全性に関しては、「護岸ブロックの水理特性試験法マニュアル(第2版)、平成15年7月、土木研究センター」に基づいて、ブロックにかかる抗力や揚力等が求められる。これは定常流を外力とした場合の値であり、河川の洪水流に対しては妥当と考えられる。一方、津波が河川に遡上した場合には、水位の時空間的变化は急激なため、定常流によって得られた値を適用するには不適切な点が多いと考えられる。

以上のことから、河川護岸ブロックの抗力や揚力等について、定常流と非定常流(河川津波)

の外力条件による相違を検討した。

実験に用いた水路は、幅1m、長さ30m、深さ1.5m、給水能力0.3m<sup>3</sup>/sの2次元水路(写真1)で、この中に護岸ブロック模型(写真2)を「平面1層の群体」で設置した。群体の中央付近及び先端部のそれぞれ1個の測定用護岸ブロック模型に四分力計をセットしてブロックにかかる荷重を計測した。模型縮尺は約1/12とし、定常流のケースでは流量と水深の組合せで3種類、非定常のケースでは波高と水深の組合せで3種類の条件をそれぞれ与えた(表3参照)。

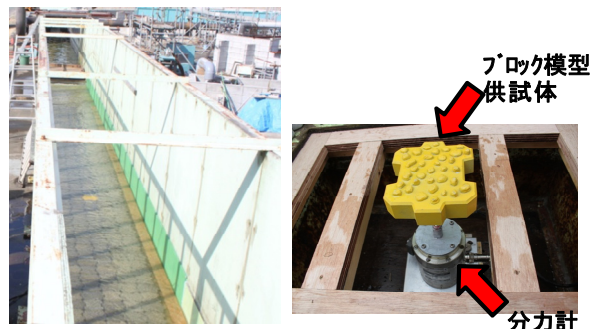


写真1 実験水路

写真2 ブロック模型

表3 護岸ブロックへの荷重検討ケース

実験種類	外力形態	ブロック敷設 条件	実験条件		測定項目	分析項目	
			水深 (cm)	水位差 Δh(cm)		係数 (抗力、揚力)	回転半径
予備実験1			試行錯誤的に判断		流況		
本実験1	定常流	群体中央	15	75	水位、流速、分力、流況	○	○
			22.5			○	○
			30			○	○
		群体上流端	15			○	○
			22.5			○	○
予備実験2			試行錯誤的に判断		流況		
本実験2	非定常流	群体中央	15	75	水位、流速、分力、流況	○	○
			22.5			○	○
			30			○	○
		群体上流端	15			○	○
			22.5			○	○
	30	○	○				

### 3. 検討結果

#### 3.1 堰や水門のゲートにかかる河川津波の荷重

##### 3.1.1 津波荷重算定式の比較検討

表1に示す全体で11の設計例を入手し(ダム・堰施設技術協会より情報入手)、整理すると以下のような特徴が見られる。

- ・静水圧のみを考慮したものが2例あり(事例①、②)、静水圧は河川津波来襲時の施設地点の最大水深にもとづき算出されている。
- ・静水圧+動水圧(波圧)が9例である。この

うち、アルミ水門式（アルミニウム合金製水門設計製作指針案）が6例、合田式が1例、サンプル・広井式が1例、谷本・鶴谷・中野の式が1例である。

- ・事例③～⑧は、アルミ水門式を用いており、静水圧は事例①、②と同様に河川津波来襲時の施設地点の最大水深を用いて算出される。
- ・一方、事例⑨～⑪の静水圧は、河川津波来襲前の施設地点の静水深を用いて算出される。

これらの算定式の妥当性を検討するために、①アルミ合金製水門設計製作指針案の式、②サンプル・広井式、③合田式、④修正谷本式 の4つの式を用いて、種々の条件（静水深、波高、砕波、堤防越波）でゲートにかかる荷重を算出した。具体的には、表1に示す各算定式の支配的要素を比較検討する（波高 or 静水深等の何れによって敏感に変化するのか？）には式形が算定式によって違うため、津波やゲートの条件を想定して試算する必要がある。

まず、津波やゲートの条件を表す記号を図1のように統一し、先の各算定式を表現すると以下ようになる。

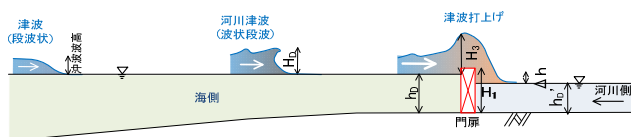


図1 計算で統一した記号等

1) アルミ水門式

- ・波圧作用高  $H_2 = H_0$
- ・底部静水圧（海側）  $p_b = w_0 \cdot (h_D + H_0)$
- ・底部静水圧（川側）  $p_b' = w_0' \cdot h_D'$
- ・動水圧  $p_2 = 0.1 \cdot w_0 \cdot v^2 = 0.98 \cdot w_0 \cdot h_D$
- ・扉体の単位面積荷重

$$p = \frac{\left( \frac{w_0 \cdot h_D}{2} - \frac{w_0' \cdot h_D'}{2} + p_1 \cdot \left( 1 - \frac{H_1 - h_D}{H_2 + h_D} \right) \cdot (H_1 - h_D) + \frac{w_0 + w_0'}{2} \cdot h_D + p_2 \cdot H_1 \right)}{H_1}$$

2) サンプルと広井の式

- ・波圧作用高（サンプル）  $H_2 = H_0 + \frac{\pi H_0^2}{L_D} \cdot \coth \frac{2 \cdot \pi H_0}{L_D}$
- ・底部静水圧（海側）  $p_b = w_0 \cdot h_D$
- ・底部静水圧（川側）  $p_b' = w_0' \cdot h_D'$

- ・水面動水圧強度（サンプル）

$$p_1 = (p_2 + w_0 \cdot h_D) \cdot \left( \frac{H_2}{L_D + H_2} \right)$$

- ・底面動水圧強度（サンプル）  $p_2 = \frac{w_0 \cdot H_0}{\cosh \frac{2 \cdot \pi H_0}{L_D}}$

- ・砕波波圧強度（広井）

$$p_W = 1.5 \cdot w_0 \cdot H_D (\cos \beta)^2 = 1.5 \cdot w_0 \cdot H_D$$

- ・扉体の単位面積荷重

$$p = \frac{\frac{w_0 \cdot h_D}{2} - \frac{w_0' \cdot h_D'}{2} + p_1 \cdot \left( 1 - \frac{H_1 - h_D}{H_2 + h_D} \right) \cdot (H_1 - h_D) + \frac{w_0 + w_0'}{2} \cdot h_D + p_W \cdot \left[ \frac{H_0}{2} + m \ln \left( \frac{H_0}{2} \cdot (H_1 - h_D) \right) \right]}{H_1}$$

3) 合田式

- ・波圧作用高

$$H_2 = 0.75 \cdot (1 + \cos \beta) \cdot H_D = 1.5 H_D$$

- ・底部静水圧（海側）  $p_b = w_0 \cdot h_D$

- ・底部静水圧（川側）  $p_b' = w_0' \cdot h_D'$

- ・水面波圧強度

$$p_1 = \frac{1}{2} \cdot (1 + \cos \beta) \cdot \{ \alpha_1 + \alpha_2 (\cos \beta)^2 \} \cdot w_0 \cdot H_D$$

$$p_1 = \alpha_1 \cdot w_0 \cdot H_D \quad (\alpha_2: \text{ゲート上水深}=0 \text{ の場合})$$

$$\alpha_1 = 0.6 + \frac{1}{2} \cdot \left\{ \frac{4 \cdot \pi \cdot h_D / L_D}{\sinh(4 \cdot \pi \cdot h_D / L_D)} \right\}^2$$

- ・底面波圧強度  $p_2 = \frac{p_1}{\cosh(2 \cdot \pi \cdot h_D / L_D)}$

- ・扉体の単位面積荷重

$$p = \frac{\frac{w_0 \cdot h_D}{2} - \frac{w_0' \cdot h_D'}{2} + p_1 \cdot \left( 1 - \frac{H_1 - h_D}{H_2} \right) \cdot (H_1 - h_D) + \frac{w_0 + w_0'}{2} \cdot h_D}{H_1}$$

なお  $L_D = \tanh \left( \frac{2 \cdot \pi \cdot h_D}{L_D} \right) L_D$

4) 修正谷本式（分裂有 国土交通省港湾局）

- ・波圧作用高  $H_2 = 3 \cdot \left( \frac{H_D}{2} \right)$

- ・底部静水圧（海側）  $p_b = w_0 \cdot h_D$

- ・底部静水圧（川側）  $p_b' = w_0' \cdot h_D'$

- ・水面波圧強度（静水面以下）

$$p_1 = w_0 \cdot H_2 = 3.0 \cdot w_0 \cdot \left( \frac{H_D}{2} \right)$$

- ・ゲート上端波圧強度（静水面以上）

$$p_1' = p_1 \cdot \frac{H_2 - (H_1 - h_D)}{H_2} = 3.0 \cdot w_0 \cdot \left( \frac{H_D}{2} \right) \cdot \frac{3 \cdot (H_D/2) - (H_1 - h_D)}{3 \cdot (H_D/2)}$$

- ・扉体の単位面積荷重

$$p = \frac{\frac{w_0 \cdot h_D}{2} - \frac{w_0' \cdot h_D'}{2} + p_1 \cdot h_D + \frac{p_1 + p_1'}{2} \cdot (H_1 - h_D)}{H_1}$$

これらの4つの算定式を対象に、大別するに

## 1.5 河川津波に対する河川堤防等の被災軽減に関する研究

下の5つの計算条件で試算比較した。

計算条件1：ゲートを越波しない高さにした場合（津波全体の力をゲートで受け止めた場合）の津波荷重（最大値）

計算条件2：計算条件1に加えて、河川津波が砕波することを考慮した場合の津波荷重（※水深 $h_b$ /波高 $H_D$   $\leq 1.37$ で砕波すると判断）

計算条件3：ゲートを越波する高さとし、かつ、河川津波が砕波することを考慮した場合の津波荷重

計算条件4：計算条件3に加えて、河川堤防越波（堤防高は11mの一定）も考慮した場合の津波荷重

計算条件5：ゲートを一定高（5m）として、砕波と堤防越波を考慮した場合の津波荷重

以下に各条件での計算結果を示す。

1) 計算条件1（最大外力条件時）

図2に計算結果を示す。アルミ水門式は、①河床～津波作用高に渡って均一に波圧が作用するものと仮定し、また、②静水圧（海側）は、津波来襲時の高さ（静水深+津波の作用高）を用いている。さらに、③波圧算定の際に用いる流速に波速を代入して計算している（波速の方が大きい）。一方他の算定式では、波圧は静水位以下と以上を別々とし、静水圧は津波来襲前の高さ（静水深）を用いてそれぞれ算出している。

これらより、アルミ水門式は、海側静水深の違いによる津波荷重の変化が大きい（荷重の変化率が大きい）特徴がある。つまり、静水深の大きな箇所ほど（河口部に近い箇所等）他の算定式より過大評価になる傾向がある。

2) 計算条件2（砕波考慮、

ゲート越波無、堤防越波無条件時）

図3が計算結果である。砕波することを考慮すると、波高8m（中央図）と波高10m（右図）で同一の荷重となっており、これは砕波波高は水深によって規定されることを前提としたため、一定以上の波高にならないことが要因（波高6mで海側静水深10mの場合のみ砕波しない）である。いずれにしても、アルミ水門式による算出値は他の式より過大である。

3) 計算条件3（砕波考慮、ゲート越波有、堤防越波無の条件）

図4が計算結果であり、いずれの算定式も、門扉の越波を許容すると（津波来襲直前の海側静水深と同じ門扉高にする 静水深に応じて門扉高変動）、波高 $H_D=6m$ で海側静水深10mの場合のみ砕波しないので津波来襲時の荷重は他の条件より小さくなるが、各式の算定値の大小関係に変化はない。

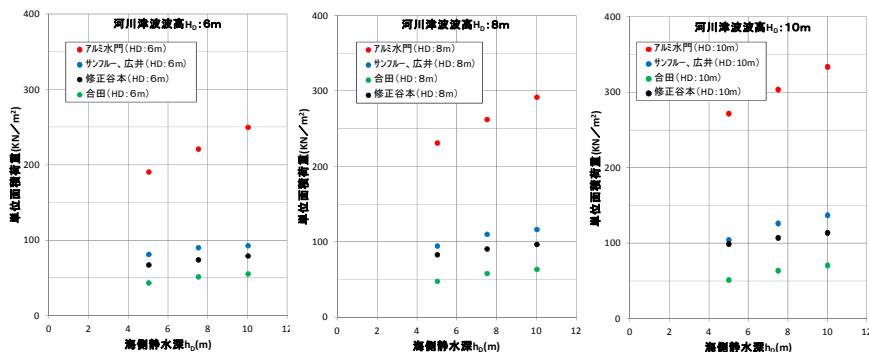


図2 計算条件1の結果

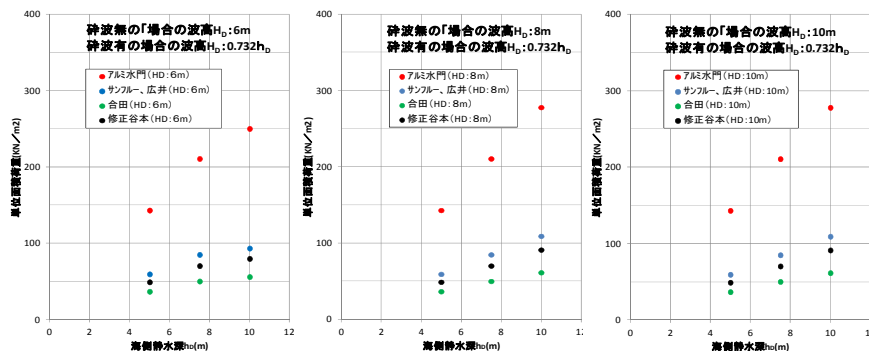


図3 計算条件2の結果

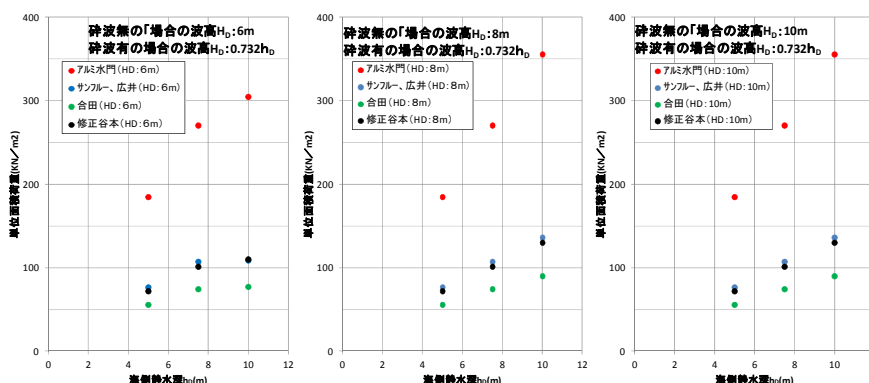


図4 計算条件3の結果

4) 計算条件 4 (砕波考慮、ゲート越波有、堤防越波考慮の条件時)

図 5 は、砕波もゲート越波も堤防越波も静水深で規定された条件での結果ある。静水深約 6.5m 以下ではいずれの津波高 (HD) でも砕波するため HD' は砕波限界波高である。静水深 6.5m 以上では砕波しないので (静水面~HWL までの高さを波高 (HD') とすると、静水深の増大にともなって徐々に波高が低下するため)、静水深と荷重の関係は負の相関となる。

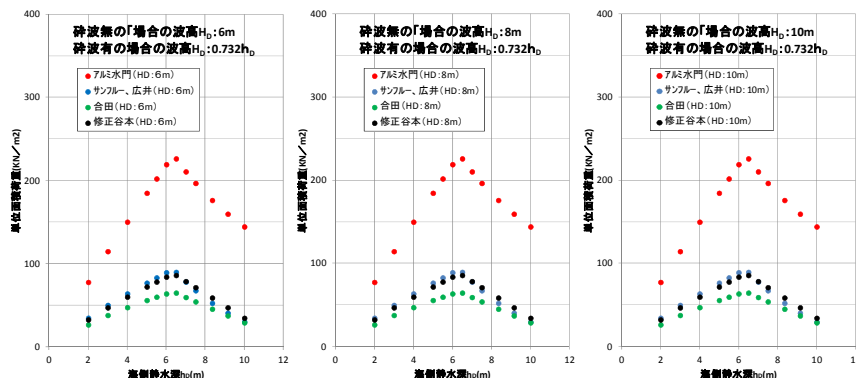


図 5 計算条件 4 の結果

5) 計算条件 5 (砕波考慮、ゲート越波考慮、堤防越波考慮、ゲート高一定 (越波有 or 無) の条件時)

図 6 が計算結果である。門扉高一定の場合、アルミ水門式以外の算定式では、門扉高が静水深に応じて変動する場合と比べ次の現象が顕著となる。

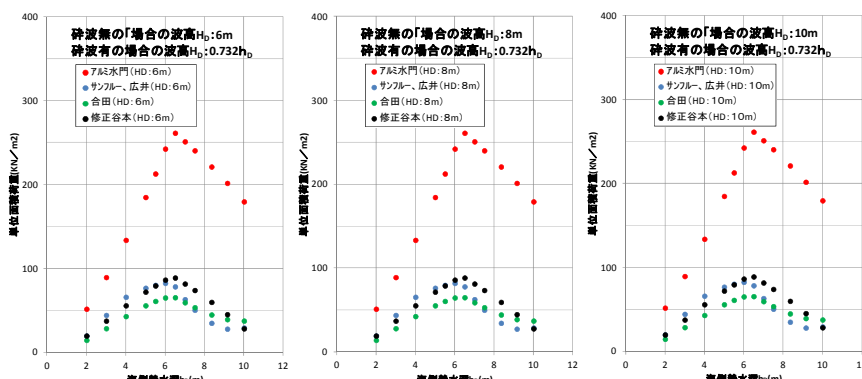


図 6 計算条件 5 の結果

津波高が高くなると津波が門扉に来るまでに砕波、または波高が H.W.L. を越えるようになるので、実質的に静水面上の波高は小さくなる (推定)。アルミ水門式以外の算定式による荷重は、この波高に応じて支配的に変動するとしていることが理由と考えられる。

また、波高 HD が 6m で海側静水深 8.35m、9.15m、10.0m の場合は、砕波しないが HD よりも堤防高 (H.W.L.) と海側静水深との差の方が小さく、後者の方を入力波高とした。結果として図 5 と同様に図 6 の 3 枚は同一値である。

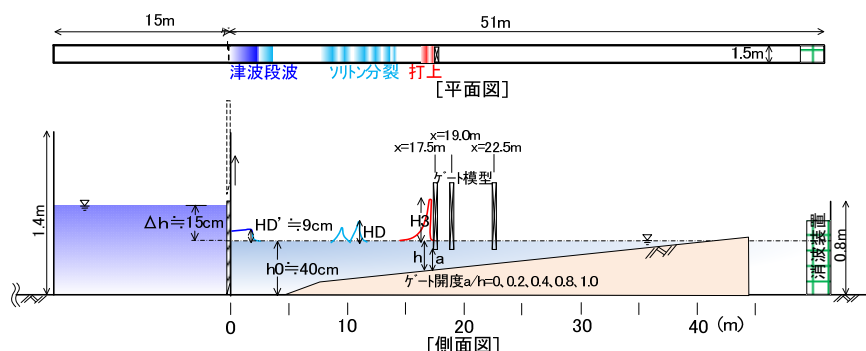


図 7 ゲートにかかる津波荷重実験施設

分裂して波状段波となり波高が高まる。さらに河川に遡上して波状段波が発達し砕波すると衝撃的に大きな砕波圧が発生すると言われる<sup>3)</sup>。そこで、段波~波状段波~砕波の一連の現象を再現するように、「ダムブレイク方式」による段波を与えて、水深や地形等の条件を試行錯誤的に設定した。

検討に用いた水路は、図 7 に示すように、幅 1.5m、長さ 51m の二次元水路部分とゲートによって仕切られた貯水槽部分 (幅 1.5m、長さ 15m) からなるコンクリート製である。仕切りゲートはコンプレッサーによって上げられる方式とし、縦段勾配は 1/100 とした。この水路に貯水槽水深  $h_1 \approx 55\text{cm}$  で水路下流端水深  $h_0 \approx 40\text{cm}$  に湛水後、仕切りゲートの急開 (上げ速度  $\approx$

3.1.2 水理実験による基本特性の把握

孤立波である津波の波形は、普通重力波とは異なり段波的である。その津波が河川を遡上すると、より一層段波状となり、条件によっては

0.35m/s)によって段波を発生させ実験を開始した。

鉛直壁ゲートの木製模型を3地点(砕波点近傍の17.5m(静水深 $h=17.5\text{cm}$ )、19.0m( $h=16.0\text{cm}$ )、22.5m( $h=12.5\text{cm}$ ))に越波しない高さに設置した基本ケースの他に、前述の表2に示す、ゲート開度、波向き、ゲートタイプ(シェルタイプ)等を変えた実験によって、波高、波圧等への影響を把握した。

●波高について

図8は、波高について時空間の変化について、鉛直壁ゲート有(ゲートは直角方向で全閉)と無しの影響を比較したものである。このうち左図はゲート無の結果であり、「7.5m地点のソリトン分裂による波高増加(最大約3cm)、17.5m地点の砕波直前の波高増加(最大約8cm)、22.5m地点の砕波後の波高減少」が確認される。一方、右図は、ゲート有の一例として、19.0m地点ゲート(全閉、越波無)で同一入射条件での結果であり、ソリトン分裂による波高増加は17.5m地点で最大約2cmと僅かである(一方、ゲート前面の18.9m地点では河川津波の衝突で最大約13cmの波高増加)。このように、ゲート有の場合にはゲート無に比較して、ソリトン分裂や砕波が発生しにくくなり、ゲート前面の波高を除き河川津波遡上に伴う最大波高が低下する。

図9は、最大波高の水路縦断分布について、直角方向の鉛直壁ゲートの位置および開度の影響を比較し、ゲート無のデータも併せて示したものである。これより、19.0mと22.5mのゲート位置ではゲート前面を除きゲート有の方が低いが、17.5mのゲート位置ではゲート前面においてもゲート有の方が低い場合がある(開度が0.8より大きい場合)。また17.5mのゲート位置では、ソリトン分裂が殆ど発達しておらず(ソリトン分裂による波高増加分や砕波直前の波高

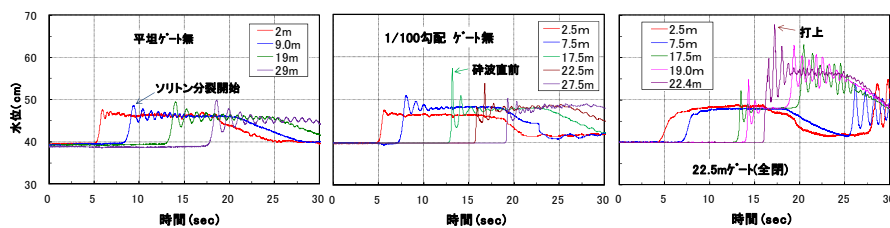


図8 最大波高の時空間分布(河床勾配、ゲート有無別)

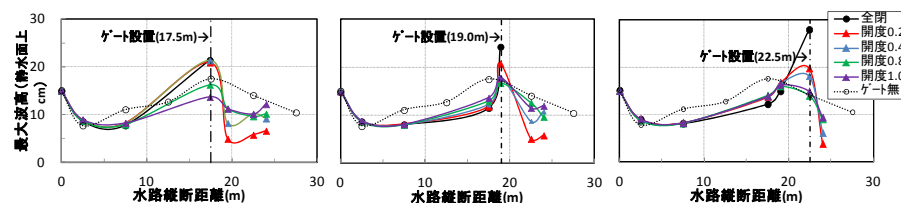


図9 最大波高縦断分布(ゲート位置・ゲート開度別)

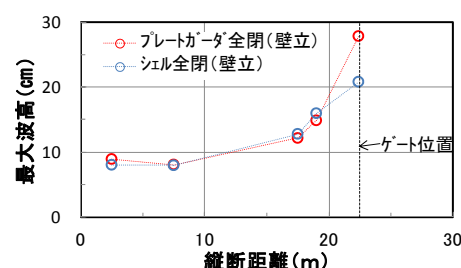


図10 最大波高縦断分布

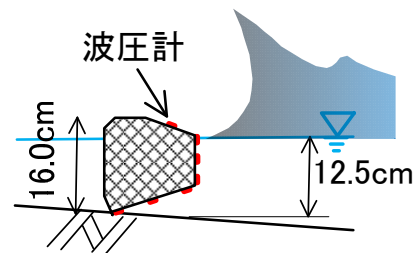


図11 シェルタイプゲート概要

増加分が減少)、ゲート前面の最大波高は主に衝突時の反射が支配的と考えられる。

図10は、シェルゲート(図11参照 22.5m地点設置)における最大波高の縦断分布について鉛直壁ゲート(プレートゲータゲート)と比較したものである。両タイプともに、ゲート全閉で、かつ津波が越波しないように壁を立てた構造とした。これより、両者の相違は、ゲート直前(ゲートから10cm海側)においてのみ約7cmシェルタイプの方が低く、他の地点ではほぼ同値であることが確認できる。

また、図12は、鉛直壁ゲートについての最大波高の縦断分布について、ゲート開度別(全閉、開度0.4、開度1.0)に示したものである(ゲート天端高は図示するようにゲート開度によって異なる)。これより、ゲート付近の最大波高は、ゲートを開けた場合の方が全閉より低下傾向にあることが確認され(ゲート地点ではゲート開度1.0が顕著)、鉛直壁ゲートと同一傾向である(図11参照)ことが確認できる。これは、ゲートを開けてゲート下の空間を通過する流量が増大したことにより、ゲートでの波の反射の影響が低減したことが原因と考えられる。

●波圧について

1.5 河川津波に対する河川堤防等の被災軽減に関する研究

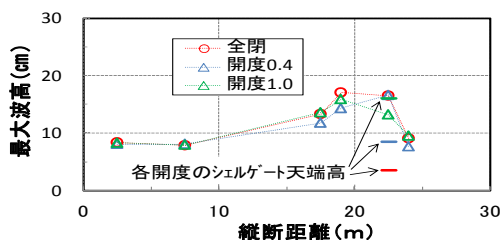


図 12 最大波高縦断分布

図 13 は、ゲートにかかる各地点の波圧（動水圧）の最大値を包絡した鉛直分布として、直角方向で 19.0m 地点に設置した鉛直壁ゲートの開度の影響を示したものである。これより、概ねいずれのゲート開度でも静水面付近を最大としてゲート 10cm 前面の打上高位置でゼロになるような静水圧分布に近い形状を有することがわかる。静水面以下は、ゲート全閉の場合では静水面付近で最大波圧が発生し、「防波堤の設計がトライク<sup>4)</sup>」と同様であるが、ゲートを開けるとゲート下端付近では静水面付近より波圧が小さくなる傾向を示す。

図 14 は、最大波圧の一般化のために、図 13 に示すデータ（ゲートは直角方向）の他に 17.5m と 22.5m の地点にゲート設置したデータも加えて無次元化し、ゲート開度との関係をゲート位置別に比較したものである。なお、無次元化の際に用いた波高は、ソリトン分裂前の 2.5m 地点の波高 (HD<sup>1)</sup>) とし、同図の白抜き丸印は、各ゲート開度毎の鉛直分布の平均値で、最大値と最小値の範囲も併せて示した。これより、波圧鉛直分布の幅は、ゲート開度や位置にあまり係らず大きいことが確認できる。また、波圧の平均値は、ゲートを開けることによって小さくなる傾向があることから、ゲートを開けた場合には、波圧の作用面積が狭く静水圧も小さくなるため（ゲート前後の水位差が小さくなる）、ゲートにかかる総波圧はさらに低減されることが考えられる。

図 15 は、シェルタイプゲートでの最大波圧

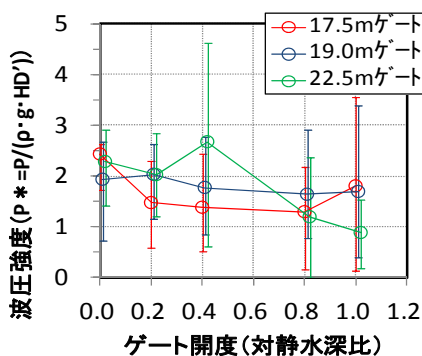


図 14 最大波圧無次元表示

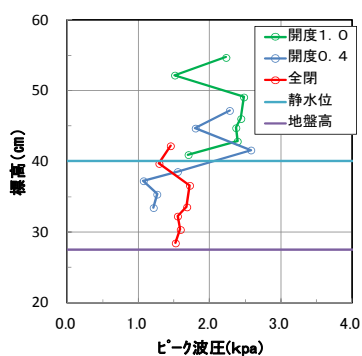


図 15 最大波圧鉛直分布

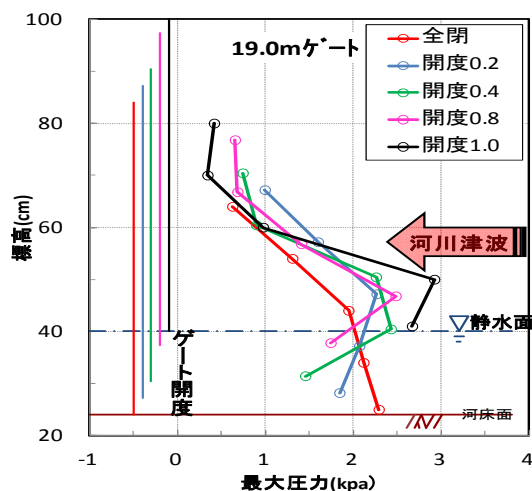


図 13 最大波圧鉛直分布

の鉛直分布をゲート開度別に示したものである。これより、ゲート全閉の場合、鉛直面の水平圧力に対する揚圧力（標高の低いゲート下端から 3 箇所データの鉛直方向力）が卓越しており、これが先の東日本大震災でのゲート浮上り被災の主要因とともに、ゲート操作（開ける）によって浮上り防止の可能性が高いことを示すと考えられる。

図 16 は、斜めにゲートを設置（ゲート位置：22.5m、全閉 津波方向投影面幅：0.8m）した場合の最大波圧の鉛直分布を示したものである。これより、斜めゲート（設置角度  $\alpha$ ）の場合、正面ゲートの場合に比較して波圧が低減し、その値は、正面の値に  $\sin \alpha$  を乗ずることにより近似できることを確認した。実際に、湾曲部等の外岸部の堤防やそこに設置された樋門ゲート等においては、斜め入射になる可能性が高いが、対岸からの反射波等の影響で波が収斂して、局部的に波高が高くなる場合もある。つまり、単位面積にかかる波圧は小さくても、受圧面積が広がってゲート等にかかる全体荷重が大きくなることも考えられる。これに関しては今後の課題と考えられる。

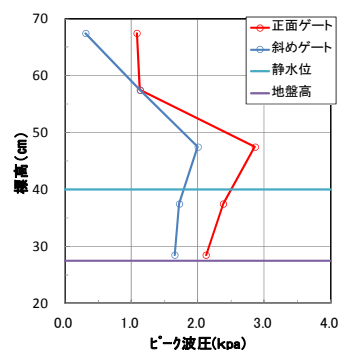


図 16 最大波圧鉛直分布

### 3.2 護岸ブロックの水理的安全性の検討

写真3は津波（定常流 水深 34cm、 $\Delta h 75\text{cm}$  ブロック群の上流端で荷重測定）をブロックに作用させた状況であり、入射する津波砕波状態となり、群体に設置された護岸ブロックの上流端（先頭）の水路中央のブロック供試体に作用する力を測定した。

群体上流端ブロックに作用する抗力と揚力結果の一例を図17に示す。同図は流速と抗力・揚力の関係を、定常流と津波（非定常流）に分けて示したものである。津波の流速については、津波作用時間内の最大値（静水位の6割水深流速）を採用した。同図より、津波作用時には、定常流と比較して特に揚力が卓越することが確認できる（非定常流と定常流で流速が異なるため単純比較はできないが、抗力・揚力ともに流速 $v$ の二乗に比例すると仮定すると、津波作用時の揚力は、その仮定値（水色一点鎖線）より大きい）。このことは、東日本大震災の現地において、堤防本体には被害が少なく堤防表面の護岸端部のブロックの捲れ等が卓越したことと関係が深いと言える。したがって、護岸の端部処理として、耐揚力の高いブロックの形状や重量の選定、工法の工夫等によって被害軽減効果が発揮されるものと考えられる。

### 4. まとめ

本検討結果を達成目標の一つである「河川津波発生時の河川堤防等の被災機構の解明」に関して纏めると次の通りである。

- ・文献や現地データの収集及び分析、さらに水路実験により、河川津波の構造物にかかる力学的な基本的特性（ソリトン分裂による波高増大や波の屈折による局所流に起因する護岸被災、津波による堰ゲートの揚力増加 波圧算定式検討の必要性 等々）を明らかにし、被害軽減策の検討の方向性を明らかにした。

また、「河川津波による河川堤防等の被害軽減対策の提案」の達成目標に関して纏めると次の通りである。

- ・水理実験を進めて、構造物にかかる荷重を計測し、ゲート操作による作用波圧減勢等の対策の有効性を見出した。引き続き水理実験等によって、護岸や堰ゲート等の被害軽減策についてより具体的・詳細的な検討を進める予定である。

### 5. おわりに

“河川津波”という新たな研究分野であるが、線形的な現象という前提で駆け足で検討を進め、



写真3 護岸ブロックへの津波作用実験

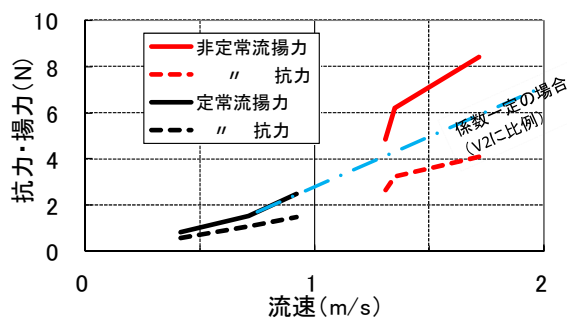


図17 抗力と揚力(上流端ブロック設置)

全体像は見えてきた。今後、詳細なメカニズム解明を図りながら対策をメインとして検討（構造物や河川形状の工夫、危険箇所選定）する予定である。

### 参考文献

- 1) 河川津波対策検討会：河川への遡上津波対策に関する緊急提言(案)、2011.8.
- 2) 東北地方太平洋沖地震を踏まえた河口堰・水門等技術検討委員会：東日本大震災を踏まえた堰・水門等の設計、操作のあり方について、2011.9.
- 3) 安田ら：ソリトン分裂津波の変形と波力特性に関する実験的検討、海岸工学論文集、第53巻、pp. 256-260、2006.
- 4) 国土交通省港湾局：防波堤の耐津波設計ガイドライン、pp. 19-25、2013.9.



## STUDY ON DISASTER MITIGATION SUCH AS LEVEE AGAINST THE RIVER TUNAMI

**Budget** : Grants for operating expenses

General account

**Research Period** : FY2012-2015

**Research Team** : River and Dam Hydraulic  
Engineering Research Team

**Author** : HAKOISHI Noriaki

ISHIGAMI Takayuki

SAKANO Akira

**Abstract** : In response to the previous East-Japan large earthquake disaster, the necessity of positioning a flood or not only the storm surge but tsunami as an object of planned countermeasure was pointed out in future river management. This study is intended to examine the effective damage control such as river structures at having assumed a river tsunami design external force. In case we advanced this research, we performed first collection and analysis of the information about the river damage in an East-Japan large earthquake disaster. Moreover, the reserve experiment was performed in response to these results. The reappearance of an actual phenomenon in hydraulic experiment of river tsunami was examined by these. It was made such, disaster mechanisms, such as the river levee at the time of river tsunami generating, were solved. And examination start was carried out about the measures against damage mitigation, such as the river levee by river tsunami. In this year, we performed experimental examination to the gate of a floodgate and river revetment block about hydraulic safeties, at the time of river tsunami generating.

**Key words** : tsunami, river going up, levee, damage, design external force, countermeasure, hydraulic experiment