

河川への遡上津波の河川構造物に与える影響

坂野 章・箱石憲昭・石神孝之

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・流下した津波によって、河川堤防等及び沿川流域でも甚大な被害が生じた。これらを踏まえ、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¹⁾とともに、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基本的な考え方²⁾が示された。基本的考え方を受け、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」の規定等が明確化された（H25.7.5施行）。

本報告は、前述の新しい規定を踏まえて河川へ遡上する津波を設計外力とした場合の河川構造物等への力学的な影響とその対策について、水理実験を主体として検討したものである。これより、堰・水門のゲート面に作用する津波荷重の算定およびゲート開度による津波荷重低減の可能性を指摘するとともに、河川護岸の端部における揚力が卓越すること等を確認した。

2. 検討方法

本研究の検討項目は、以下の2つである。

①二次元実験
水路に堰および水門のゲート模型を設置し、それに作用する津波荷重（動圧）等について検討する。

②護岸ブロッ

クの水理的安全度に関しては、河川流（定常流）を想定した条件での水理特性値は把握されている³⁾が、津波への適用性についてはまだ不明な点が多い。このことから、護岸ブロック等の津波に対する水理的安定性について検討する。

以下に各項目の検討方法を示す。

2.1 ゲートに作用する津波荷重の検討方法

堰や水門のゲートに作用する津波荷重については、津波外力やゲートの開度等との条件によって大きく異なると考えられることから、両者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の波力によって浮き上がった被災事例を考慮し²⁾、プレートガーダの他にシェルタイプのゲートも検討対象とした。

表-1 堰・水門のゲートへの荷重検討実験ケース

実験№	静水深 (最深部)	水位差 (段波発生 水槽部と河 道部の Δh)	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 ガーダ	シェル	
実験1	0.4m	0.15m	正面 ($\theta=90^\circ$)	水路全幅 (1.5m)	○			○	○	○	○	○	○		
						○		○	○	○	○	○	○		
							○	○	○	○	○	○	○		
					○			○	○	○	○	○		○	

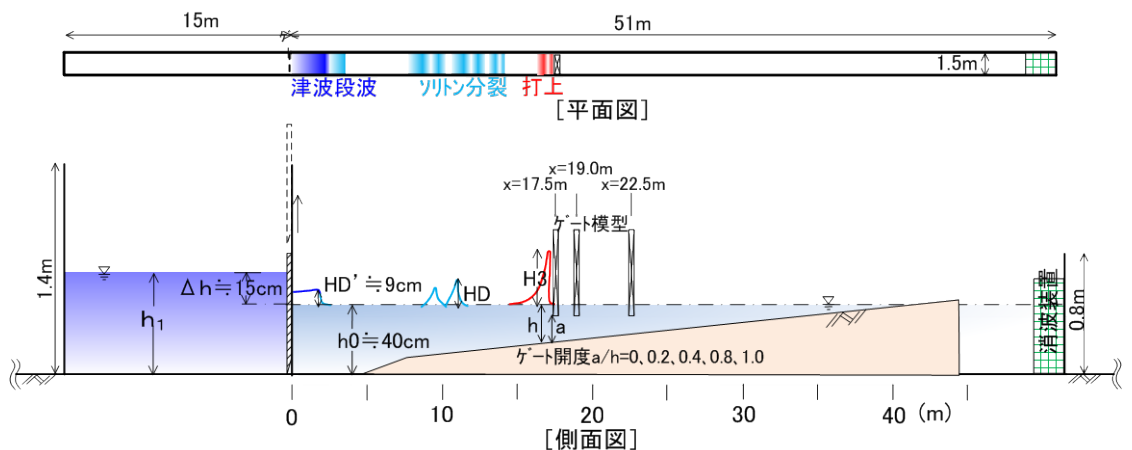


図-1 ゲートに作用する津波荷重の実験施設



写真-1 実験水路



写真-2 ブロック模型

検討に用いた水路は、図-1に示すように、幅1.5m、長さ51mの二次元水路部分とゲートで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とした。仕切りゲートはコンプレッサーによって引上げる方式とし、二次元水路部分の縦断勾配は1/100とした。この水路の貯水槽部分に水深 $h_1 (h_0 + \Delta h) \approx 55\text{cm}$ で水路下流端（海側）静水深 $h_0 \approx 40\text{cm}$ に湛水後、仕切りゲートの急開（引上げ速度 $\approx 0.3\text{m/s}$ ）によって段波が発生し、仕切りゲートから数m遡上すると分裂（ソリトン分裂^{*}）する状況を再現することができる。

実験においては、木製のゲート模型を3地点（碎波点前の17.5m（静水深 $h=17.5\text{cm}$ ）、碎波点直後の19.0m（ $h=16.0\text{cm}$ ）、碎波点後の22.5m（ $h=12.5\text{cm}$ ））に設置し、ゲート位置別に前述の表-1に示すような、ゲート開度、ゲートタイプ等について実験した。実験中の主な測定項目は、容量式波高計での波高及び波圧計でのゲート面に作用する波圧とし、両者を同期させて100Hzのサンプリングタイムでデータ収録した。

2.2 護岸ブロックの水理的安全性の検討方法

東日本大震災における津波による河川護岸被災のうち、水門に接続する河川護岸のめくれ上がり・流失が卓越した。また、河川の洪水流に対する護岸ブロックの水理的安全性の指標として定常流の条件

での抗力や揚力の係数が求められているが、河川に津波が遡上した場合は水位の急激な時空間的变化が生じるため、定常流によって得られた値をそのまま適用することは不十分と考えられる。

以上のことから、河川護岸ブロックに作用する抗力や揚力等について、定常流と非定常流（津波）の外力条件による相違を検討した。

検討に用いた実験水路は、幅1m、長さ30m、深さ1.5m、給水能力0.3m³/sの二次元水路（写真-1）である。津波実験の場合には、仕切りゲート（フラップ）で水路を仕切り湛水深の異なる2つの貯水槽とした。その仕切りゲートを急開することで段波が再現できる。この水路床に護岸ブロックの模型を1層で敷き並べた（群体ブロック）。その先端部（群体先端ブロック）と中央部（群体中央ブロック、群体先端から14.0m下流）のそれぞれ1個を測定用護岸ブロック（写真-2）とし、それに四分力計を取付けてブロックに作用する荷重を計測した（50Hzのサンプリングタイムで収録）。模型縮尺は約1/12とし、定常流のケースでは、水深3条件（約15、22、30cm）に対応する等流となる流量を与え、津波のケースでは、定常流と同じ3条件の水深（静水深）に対し1種類の津波（波高約25cmの段波状津波）を与えた。

3. 検討結果

3.1 ゲートに作用する津波荷重の検討結果

(1) 波高について

図-2は、最大波高の水路縦断分布について、ゲート（プレートガーダー）の位置および開度の影響を比較したものである。これより、いずれのゲート位置においても、ゲート前面での波高はゲートを開ける程低く、ゲート通過後には逆に高くなる傾向が確認できる。一方、ゲートを19.0mに設置したケース

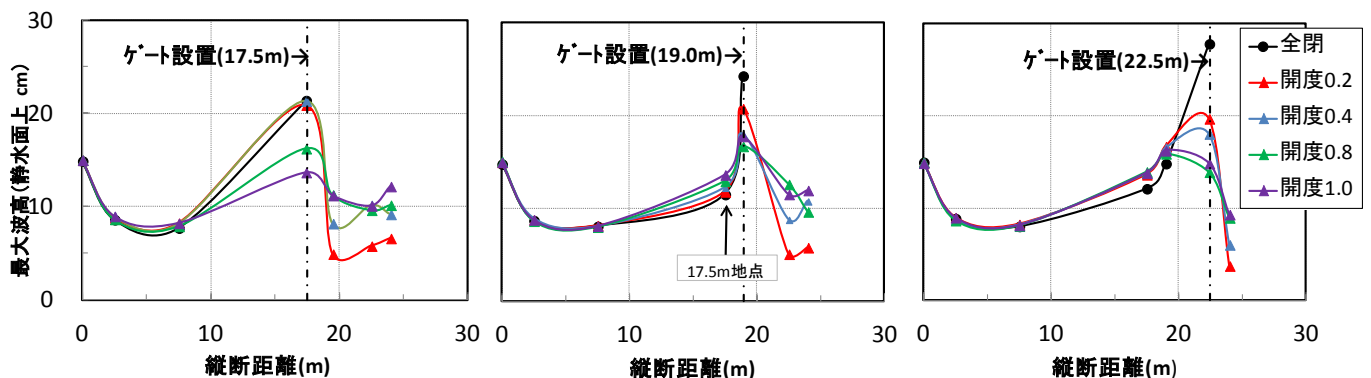


図-2 最大波高縦断分布（ゲート位置・ゲート開度別）

^{*}土木用語解説：ソリトン分裂

の17.5m地点では、反対にゲートを開ける程波高が若干高くなる傾向がある。これは、ゲート前面での津波流れがゲートによって阻害されソリトン分裂の発達による波高増大を抑制させたことが一因と考えられるが、詳細については今後の重要課題である。いずれにしても、ゲートの開度や位置を考慮することにより流域全体の減災に役立つと考えられる。

図-3は、シェルゲート（図-4参照 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高さに壁を立てた構造とした。これより、両者の相違は、ゲート前面（ゲートから10cm海側）においてのみ約7cmシェルゲートの方が低い。他の地点ではほぼ同値であることが確認できる。

(2) 波圧について

図-5は、ゲート前面に作用する各地点の波圧の最大値について、19.0m地点にゲートを設置したケースを対象にゲート開度別に示したものである。これより、波圧は、静水面以上の箇所では、概ねいずれのゲート開度でも、「静水面付近で最大でゲート前面打上高付近でゼロ」になるような静水圧分布に近い形状を示す。一方、静水面以下ではゲート開度によって状況が異なる。全閉状態では、静水面付近で最大波圧が発生し静水面以下はほぼ一定値であることは、「防波堤の設計ガイドライン⁴⁾の修正谷本式」と同一傾向であるが、ゲートを少しでも開けると、ゲート下端付近で静水面付近よりも波圧が小さくなる傾向があることがわかる。

図-6は、最大波圧について一般化表示するために、図-5に示すデータに17.5mと22.5mにゲートを設置した場合のデータを加えて無次元化し、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 (H_D) 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、最大値と最小値も併せて示した。これより、波圧の最大値と最小値の差は、ゲートの開度や位置にあまり係らず大きい。ゲートを開けると、同図より波圧の平均値は小さくなる傾向が確認できる。実際にゲートを開けると、波圧の作用面積が狭くなり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）、ゲートに作用する総波圧はさらに低減されることが考えられる。

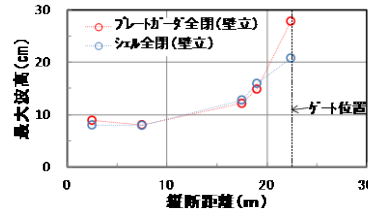


図-3 最大波高縦断分布

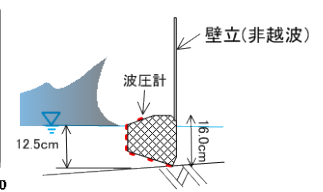


図-4 シェルゲート概要

図-7は、シェルタイプゲートでの最大波圧をゲート開度別に示したものである。なお、模型は壁立を外して越波を許容した条件とした。これよりゲート全閉の場合は、他のゲート開度に比べて、底面の波圧（図-7の赤線の下端付近の3箇所）が鉛直面や上面に対して卓越していることが確認できる。これは先の東日本大震災でのゲート浮上り被災の主要因を裏付けるとともに、ゲート操作（開ける）によってこれを防止できる可能性が高いことを意味すると考えられる。

3.2 護岸ブロックの水理的安全性の検討結果

写真-3は、津波をブロックに作用させた実験の一例（静水深約30cm、津波波高約25cm）であり、群

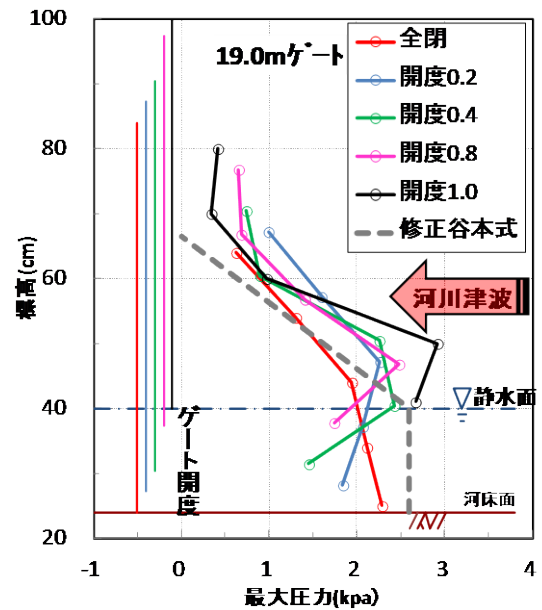


図-5 最大波圧鉛直分布

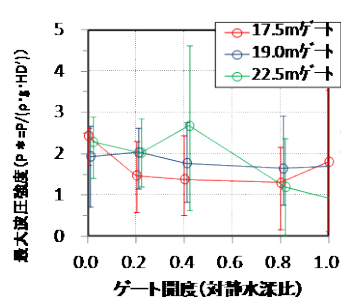


図-6 無次元最大波圧

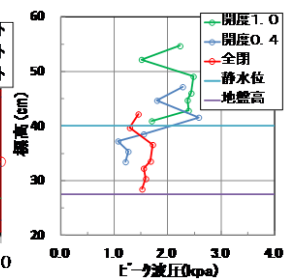


図-7 最大波圧鉛直分布 (対象：シェルゲート)

体の先端中央の測定用護岸ブロック（群体先端ブロック）実験状況である。代表流速については、群体先端ブロックの実験では測定用護岸ブロックから0.42m上流（ブロック高の約10倍上流）地点、群体中央ブロックの実験では測定用護岸ブロック地点で、それぞれ6割静水深での値を電磁流速計で把握した（定常流では、マニュアル³⁾に基づき、測定用護岸ブロック断面中央で鉛直方向に数点測定し、その平均値を代表流速とした）。



写真-3 護岸ブロックへの津波作用実験

群体先端ブロック及び中央ブロックに作用する抗力と揚力の結果を図-8に示す。同図は、代表流速の2乗平均と抗力・揚力の力積の関係を、定常流と津波（非定常流）に分けて示したものである。物体に作用する力は一般に流速の2乗に比例することから、非定常流である津波実験での50Hzで採取した作用時間内の各流速値を2乗して算術平均した値を横軸にし、それに対応した揚力と抗力の力積値（力×作用時間）を縦軸として整理した（定常流実験での作用時間は、津波作用時間と同一として試算）。

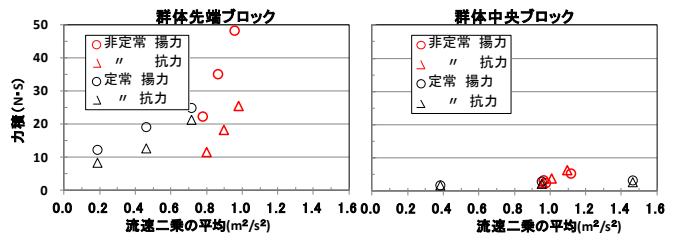


図-8 抗力と揚力（位置別 定常・非定常）比較

同図より、群体先端ブロックでは群体中央ブロックに比較して、津波作用時（非定常流）には、定常流と比較して特に揚力が卓越するとともに、流速に対する変化が著しいことが確認できる。

以上のことは、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、耐揚力の高い形状や重量を有するブロックの選定、工法の工夫等によって被害軽減効果が発揮される可能性が高いと考えられる。

4. まとめ

本検討により、津波の構造物に作用する力学的

な基本的特性（津波の水門ゲートや護岸ブロックに作用する荷重等）を把握し、効率的な被害軽減対策の方向性を見出すことができた。今後、詳細なメカニズム解明を図りながら対策（構造物や河道形状の工夫、危険箇所選定など）をメインとして検討する予定である。

参考文献

- 1) 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) (財) 土木研究センター：護岸ブロックの水理特性試験法マニュアル（第2版）、2003.7
- 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

坂野 章



(独)土木研究所つくば中央研究所
 水工研究グループ水理チーム
 総括主任研究員
 Akira SAKANO

箱石憲昭



(独)土木研究所つくば中央研究所
 水工研究グループ水理チーム
 上席研究員
 Noriaki HAKOISHI

石神孝之



(独)土木研究所つくば中央研究所
 水工研究グループ 特命事項担当
 上席研究員
 Takayuki ISHIGAMI