

津波漂流物の影響を考慮した治水施設操作法の 確立に関する実験的検討

EXPERIMENTAL INVESTIGATION ON THE ESTABLISHMENT OF RIVER
CONTROL FACILITY OPERATION AGAINST THE EFFECTS OF
TSUNAMI DRIFT

阿部孝章¹・鳥谷部寿人²・船木淳悟³・吉川泰弘⁴
Takaaki ABE, Toshihito TOYABE, Jungo FUNAKI and Yasuhiro YOSHIKAWA

¹正会員 工博 寒地土木研究所 寒地水圏研究グループ (〒062-8602 札幌市豊平区平岸1条3-1-34)

²正会員 寒地土木研究所 道東支所 (〒085-0014 釧路市末広町10-1-6)

³正会員 寒地土木研究所 寒地水圏研究グループ (〒062-8602 札幌市豊平区平岸1条3-1-34)

⁴正会員 工博 北見工業大学 社会環境工学科 (〒095-0015 北見市公園町165)

This report presents an investigation for the establishment of river control facility operation against tsunami run-up in rivers. The tsunami generated by the 2011 Tohoku Pacific-Coast Earthquake devastated coastal areas in Japan and was characterized by the generation of tremendous number of tsunami debris and drifts. In addition, in Hokkaido where ice formed in rivers, broken ice pieces were found in the field survey. The main aim of this report is to propose an optimum sluice operation in the event of tsunami considering the existence of ice floes. An experimental model of a sluice gate is developed with ice floe models on the water surface and two types of tsunami waveform are generated in the flume. The result showed that the gate openness can partially attenuate the wave impact load. However, it is confirmed that the presence of ice floes can cause an accidental jamming and an increase in the wave force, which can result in the functional failure of the sluice gate.

Key Words: *Tsunami in rivers, tsunami drifts, tsunami wave force, sluice operation, hydraulic experiment*

1. はじめに

河川を遡上する津波が発生した場合の治水施設の操作法が未だ十分に確立されていないことが河川管理上の課題である。2011年東北地方太平洋沖地震津波の発生時には、水門などの操作に従事すべく現地に向かった消防職員や消防団員に、多数の犠牲者や行方不明者が報告されている¹⁾。また、この津波の一つの特徴として、樹木由来、あるいは周辺の建築物等由来の多数の津波漂流物が発生し、水門等の治水施設を埋塞したことが報告されており、こうした漂流物が本来の治水施設動作を阻害する危険性を高める可能性もある。

さて、北海道では長期間にわたり河川域で結氷が生じているのであるが、河川結氷と津波遡上が重畳した場合の現象については未解明な点が多い。これは、河川結氷

の発生と河川津波の発生という二重の条件が重なれば起こらないという現象の希少性も一部に起因していると思われる。写真-1に示したのは、2011年東北地方太平洋沖地震津波発生後、北海道東部に位置する新釧路川の樋門吐口水路で実際に確認された、漂流物化したと推定される氷板群である。仮にこうした漂流物が津波に輸送され河川構造物に高速で衝突した場合には、水のみの場合と異なる外力作用が発生すると考えられる。著者らの研究グループでは、こうした氷を伴う河川津波外力の変化に特に着目し、検討を進めてきたところである²⁾。河道内の津波挙動に関する検討事例としては、古くから既往研究が存在し、最近の高精度汎濫モデルを用いた流況把握手法の確立³⁾を例としてかなりの程度まで予測可能となってきた状況である。しかし、氷を伴う津波の検討事例は吉川ら⁴⁾の例などが一部存在するものの、あまり多くはない。また、非結氷期で氷が水面に無い状態、い

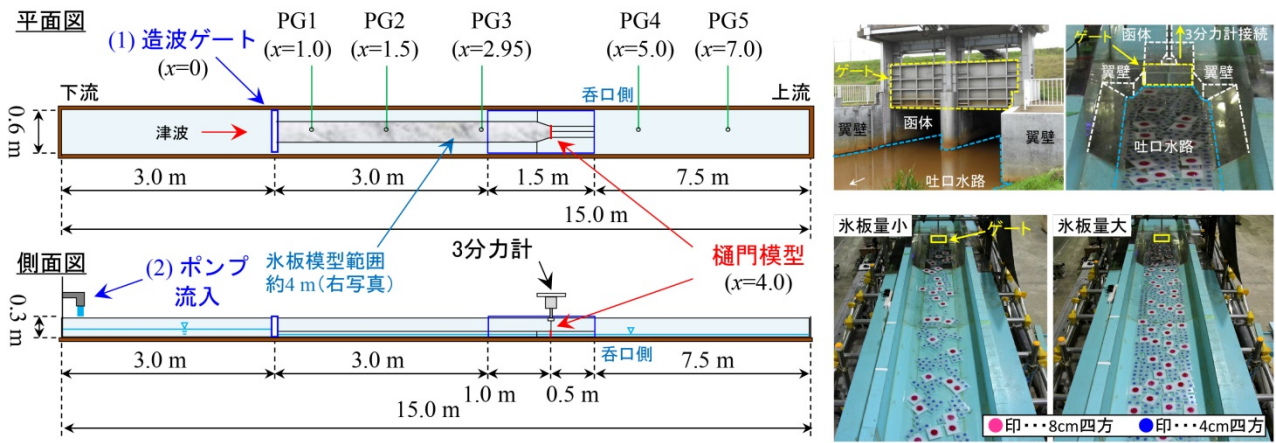


図-1 使用した実験水路の模式図，現地状況との比較，及び氷板模型の設置状況



写真-1 津波発生後樋門吐口水路内に残された滞留氷板

わゆる開水時の検討についても，樋門操作など現場での河川管理に活用するまでの研究としての例は少ないのが現状で，結氷時かつ津波発生時の樋門操作に関する検討事例はほとんど存在しない。

こうした現状を踏まえ，本研究では，津波漂流物の代表例として北海道における氷板漂流物を対象とし，氷板等が樋門周辺での津波挙動をどの程度変化させるか，そして樋門ゲートに対する外力をどの程度変化させるかに特に着目し，これを実験的に解明することを目的とした手法として，実際の樋門形状を模擬した水路を作製し，時系列的な水位や波力の変動を把握し，冬期の河川津波発生時に最適な，樋門操作法を検討することとした。

2. 実験手法

(1) 実験水路

まず実験水路及び使用した模型について述べる。実験には図-1左部に示した全長15 m，幅0.6 mの水路を用い，ほぼ中央部に樋門模型を設置した。詳細な寸法は図中に示す通りであり，図-1右上部の現地写真と模型の比較に示すように，実物の樋門に近い構造を模してアクリル材で製作した。吐口水路から翼壁形状，函体内部及びゲート部を模擬したものである。模型縮尺は1/30程度としており，ゲート模型函体部分は高さ8 cm，幅12 cmの2連構造である。

下流端から3 m上流の箇所にはダムブレイクによる造波

が可能な可動式ゲートを設置しており，以下この造波ゲート部を $x = 0$ mと標記し上流向きを x の正方向とする。造波ゲートを用いない造波法も用いたがこれは次節にて述べる。造波ゲート地点から模型樋門ゲートまでの吐口水路を模した区間に，滞留氷板を模擬するため図-1内灰色部分に氷板群模型をばらつくように滞留させた。氷板群有りのケースについて，図-1右下部写真のように水面面積に対して氷板面積が占める割合を35%，70%に設定しそれぞれ氷板量小，氷板量大の条件と表記することとする。氷板模型サイズは現地調査からの知見⁹⁾に基づき，大きいものは8 cm四方，小さいものは4 cm四方で，厚さ6 mm正方形のポリプロピレン板を一定比率で混合し重なり合わないよう滞留させた。

本研究では，樋門操作による，津波の流況や波力変化を主な検討対象としている。これは三浦ら⁹⁾が指摘するように，河川管理現場での問題として特に遠地津波発生時に問題となるのであるが，津波警報の発表に合わせてゲートの全閉操作を行った場合，警報解除まで約1日と長期間に及ぶことも考えられ，その場合には内水氾濫を発生させる危険性を内包することとなる。その一つの解決策として，ゲートの一部開放・あるいは半開操作が考えられるが，ゲート開放した場合津波来襲時の流況がどのような影響があるかが未解明であるのが問題となっている。そこで，実験では樋門操作によるゲート開度の変化を模擬するため，ゲートの水路床からの高さを変化させられる構造とし，全閉，函体高さ8 cmに対し開度10% (0.8 cm) 開放，50% (4 cm) 開放の3通りを想定した。

水路内の縦断的な水深と時間変化を計測するため堤外・吐口側で3箇所 (PG1～3)，堤内・呑口側で2箇所 (PG4, 5) において圧力センサ (STS Sensors, ATM.1ST) を接続し水位計測を行った。そしてゲートに3分力計 (日章電気株式会社, LMC-3502A-100N) を接続して津波衝突時の時系列的な波力計測を行った (図-1右上部)。水位及び波力はサンプリング間隔0.001 sで計測を行い，

0.1 s間の移動平均を取りその変動傾向について検討を行った。流況確認のため模型の側方及び上方にハイスピードカメラ (CASIO, EX-FC500S) を1台ずつ設置し、これにより120 FPS (120フレーム毎秒) で撮影を行った。

(2) 吐口水路での造波方法

次に実験において、外力として与えた津波条件の設定方法について述べる。沿岸域、または河川域のような、海域に比較して水深の浅い領域では、遡上に伴い津波波形は短時間で大きく変化することが知られている。著者らの既報⁷⁾において、実際に新釧路川で発生した河川津波が、上流へ遡上するに伴い波形が急峻化し、段波状となったことを示した。具体的には、河口から1.1 kmの水位観測所では12分間で1.14 mの上昇、河口から7.4 kmの観測所では僅か40秒で0.4 mの急激な上昇が観測された⁷⁾。

一方で、安田ら⁸⁾やWatanabeら⁹⁾が指摘するように、北海道周辺で観測される津波は、海底地形により生起されるエッジ波と呼ばれる波が沿岸線に沿って進行し、河口域の水面が上下するような津波であることが多い。彼らが2003年十勝沖地震や2011年東北地方太平洋沖地震津波の例から指摘するように、エッジ波の周期は北海道沿岸でおよそ30分から1時間程度で変動を繰り返すもので、港湾等において肉眼でその水面勾配を把握することは困難である。しかし、河川を遡上するにつれ水面勾配は徐々に前傾化して段波を形成し、構造物への衝突を起こすことが想定される。

本研究では特にこの津波波形による外力の違いに着目した。ほぼ河口に近い位置に設置された樋門であれば、緩やかな水位変動による津波来襲を受けると考えられるが、ある程度河口から離れた位置に設置された樋門であれば、段波状となる可能性がある。そこで図-2の概念図に示したように、急激に水位上昇を起こす段波タイプの津波 (段波タイプと表記・図-1 (1)造波ゲート使用) と、緩やかな水位上昇による津波 (水位上昇タイプと表記・図-1 (2)ポンプ給水を使用) の2種類のタイプを想定することとした。時間的な比較を図-2に示しているが、段波タイプでは水位上昇タイプに比較して、非常に短い時間内に目標波高に到達する。尚、実験において段波タイプと水位上昇タイプの目標とする波高 ΔH は共通とした。以上の条件で、津波の流れにより輸送される氷板群の挙動について検討を行うこととした。

3. 結果及び考察

(1) 氷板群が存在する場合の樋門周辺流況

まず、氷板群を伴う場合の、流況の変化について上方及び側方カメラからの撮影動画を元に考察を行う。図-3に示したのは、吐口の初期水深 $h_0 = 2$ cm, 目標波高 $\Delta H = 4$ cm, 氷板量大の場合で、樋門開度を(a)全閉, (b) 10%

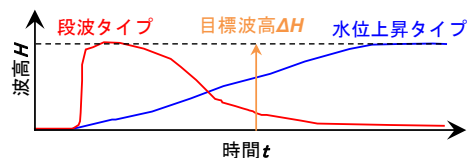


図-2 実験で与えた2通りの造波方法

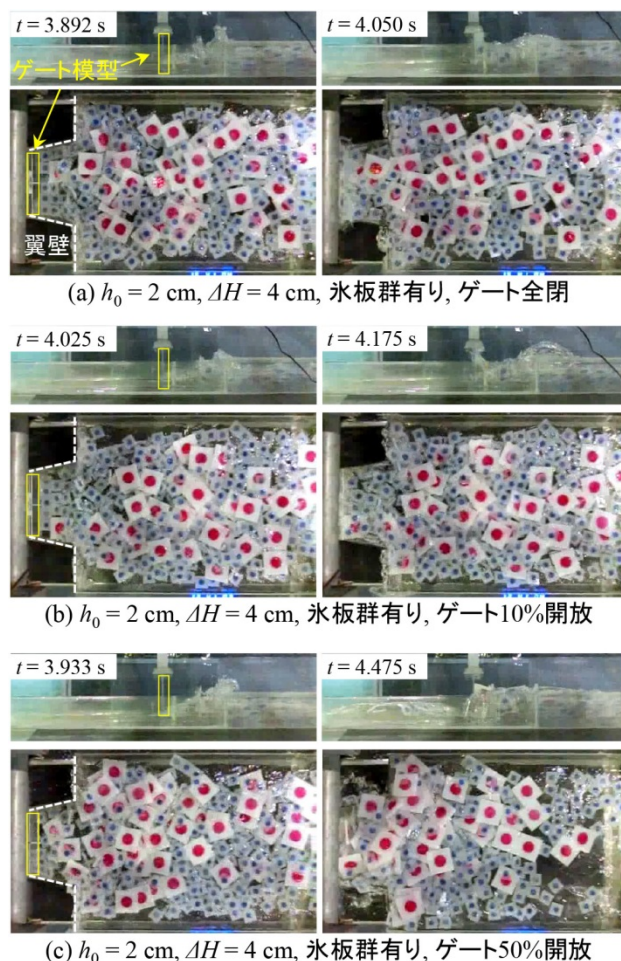


図-3 氷板群を伴う段波タイプの河川津波の衝突状況とゲート開度による違い

開放, (c) 50%開放とした場合で、段波タイプの場合の流況変化である。図-3左段の写真は津波のフロントがゲート部に接触を開始した時刻、右段の写真は分力計の計測結果でx方向 (遡上方向) の波力が最大値となった時刻の様子である。(a)について、初期水深の2倍程度の波高の段波が遡上してきたため、はじめ互いに重ならず滞留していた氷板は回転を伴いながらゲート方向に遡上している ($t = 3.892$ s)。上段の側方撮影結果より、ゲートへの接触前に翼壁部への衝突が発生し、上向きへの巻き上がりが発生している。 $t = 4.050$ sにおける様子からも見られるように氷板群は何層にも重なり合いながらゲートへと流れていき、水流による波力とともに氷板群の接触による波力の変化が生じていることが想定される。次に(b) 10%開放の場合であるが、接触開始時刻と波

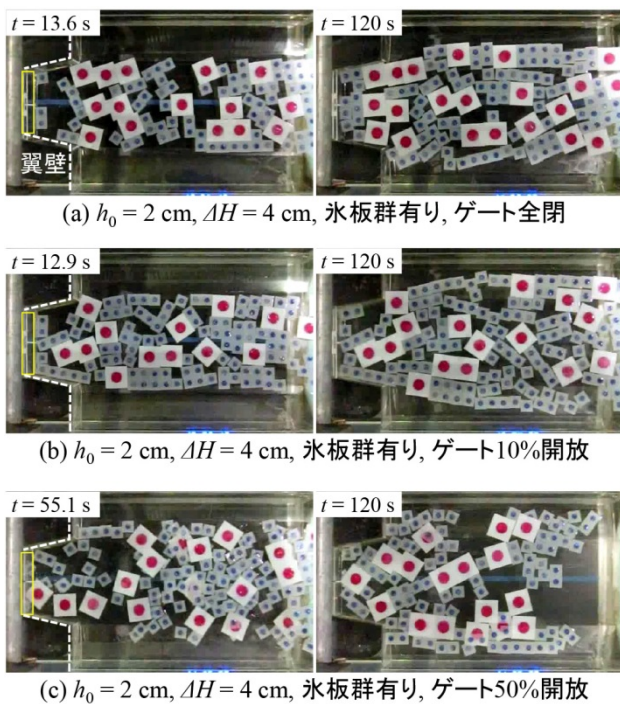


図-4 氷板群を伴う水位上昇タイプの河川津波の衝突状況とゲート開度による違い

力最大時刻に関し、概略的な傾向としては(a)の場合と大きな変化は無い。氷板の回転を伴う段波の接近と、翼壁部分での巻き上がりなどの現象も共通している。一方で、ゲートを50%開放した場合についてであるが、ゲート接触までの現象は(a)及び(b)のケースと大きな違いはないものの、最大波力発生時には、氷板群のゲート前面への集積が顕著に発生している。これは、段波の流れの一部が、函体内部へ容易に侵入できるために、水流が函体内部へ侵入し同時に氷板群も函体内部へ侵入していることが側方映像から把握できる。函体への侵入は(b) 10%開放の場合には見られなかった。つまり、ゲート半開操作時に多量の氷板群を伴う津波が発生した場合には、堤内側への漂流物の侵入を許すことが分かる。

図-4に示したのは、上述と同じ初期水深 $h_0 = 2$ cm、目標波高 $\Delta H = 4$ cm、氷板量大の場合で、樋門開度を(a)全閉、(b) 10%開放、(c) 50%開放とした場合の、水位上昇タイプの造波を行った場合の氷板輸送の程度の比較である。側方映像はほとんど一定速度で水位が上昇するのみであったのでここには示していない。図-4左段は津波がゲート部に到達し x 方向計測波力が上昇を開始したとみなせた時刻、図-4右段は分力計の計測結果で、 x 方向波力が最大値となった時刻の様子である。本図では右段は全て実験の終了時刻で、水位が最大となった時刻である。

上段(a)の全閉のケースから分かるように、ゲートへ津波が到達を開始した時刻においても、氷板群の水平位置は初期配置からほとんど変化がなかった。その後時間をかけて徐々にゲート方向に氷板が輸送され、最終時刻では氷板群がゲートに近接しているが、図-3のように、氷

板群の回転や重なり合いなどは確認されなかった。

(b)の一部開放時では $t = 12.9$ s段階で氷板の接近が既に開始している。これは、ゲートが一部開放されていることにより堤内側へ向かう流速と流入が発生し、その表面流速に追従して氷板が輸送されるものと推定された。そのため、最終時刻においても氷板群の量は(a)の場合より多く確認された。つまり僅かでも流入が発生する場合、氷板群のゲートへの接近を誘発することが想定される。

次にゲートを半開した場合であるが、この時水位上昇に伴い、ゲート部に津波が接触するまでに時間を要したため、波力作用開始時刻は $t = 55.1$ sとなっている。この時点までにも既に氷板群の堤内への侵入が発生していた。最終時刻 $t = 120$ sに見られた様子として、ゲート下面より水位が上昇し、氷板が函体内部へ侵入することが難しい状況となってから、ゲート部へ接近の様子が見られた。この場合においても、氷板の回転や重なり合いなどの現象は見られなかった。

以上の結果より、段波タイプや水位上昇タイプの津波作用によって、氷板群はゲートへの接近や衝突を起こすことが確かめられた。更にゲート半開時においては、函体内部への流入が明瞭に確認された。従って、もし樋門操作として半開操作とした場合には、津波の侵入のみならず、津波漂流物である氷板の侵入をも許すこととなることが明らかとなった。

(2) 氷板群の有無による水位変化

次に、各ゲート操作を行った場合における、水位時系列の変化を図-5に示した。初期水深 $h_0 = 2$ cm、目標波高 $\Delta H = 4$ cmにおいて、(a1)-(a3)が開水時の段波タイプ、(b1)-(b3)が氷板量大の段波タイプ、(c1)-(c3)は氷板量大の水位上昇タイプを示している。

図-5の1,2段目の段波タイプの概略を見ると、PG1地点から順に段波が伝播し、ほぼ同じ波高でPG3に到達していることが分かる。その後反射波が発生し、PG3から逆順に伝播していることが分かる。また、図-5の1段目の開水時と2段目の氷板量大の場合を比較すると、氷板群の有無によらず、ゲートを開放するほど、波高の大きい波が堤内側へ遡上していることが分かる。(a2)と(a3)の比較から、堤内側へ遡上する段波の波高は開度10%の時1 cm程度、開度50%の時に2 cm程度である。また細かな部分であるが(a3)と(b3)の比較より、PG3で概ね $t = 5$ s以降捕捉される反射波の波高が、開水時に低く氷板量大の時に大きい。これは開水時の場合は段波流れが一部堤内側へ流入したために反射波が低減されたこと、氷板量大の場合は、氷板が回転や重畳しながらゲートに衝突し、堤内へ流入する段波が抑制されたものと推定された。

一方で、図-5の3段目に示すように水位上昇タイプの場合は水位波形は大きく異なる。尚、本稿では紙面の制約上省略するが、開水時の水位上昇タイプの波形はこの3段目の場合と大きな違いが無かったことを付記してお

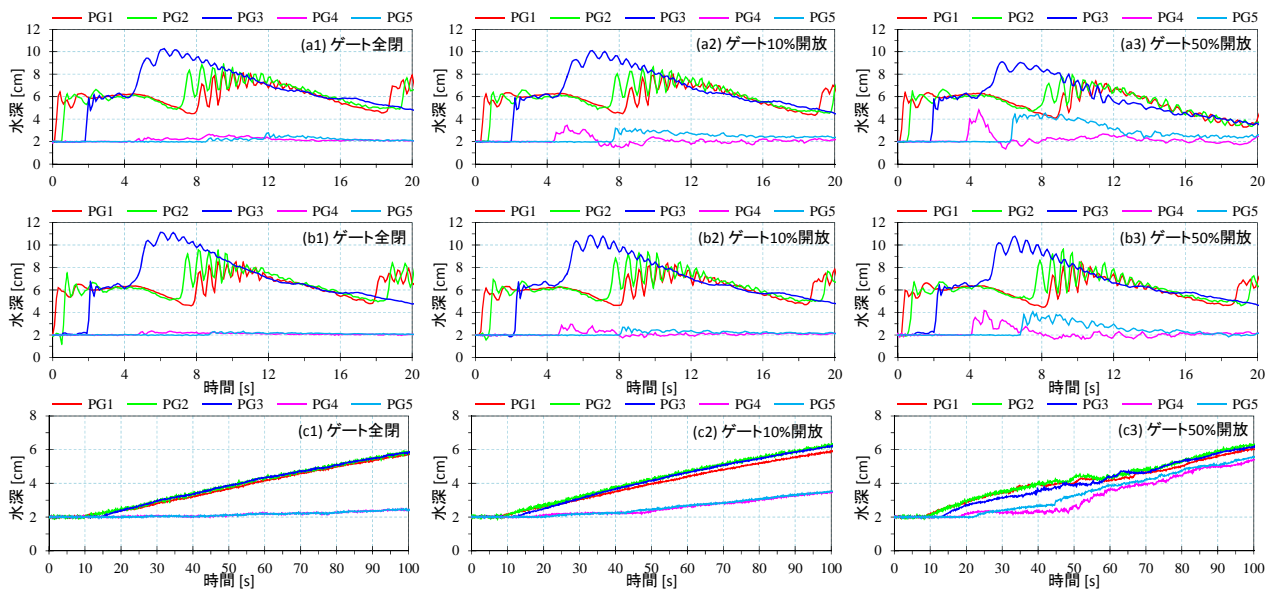


図-5 ゲート開度の変化による5地点の時系列水位の比較（上段；開水時・段波タイプ，中段；氷板量大・段波タイプ，下段；氷板量大・水位上昇タイプ）

く。このケースでは図-1左段のように水路の下流端からの給水により水位を漸増させているが、(c1)の全閉時のケースより、吐口側の3地点はほぼ同時に水位が上昇している。呑口側の2地点もわずかに上昇を見せているが、これは全閉時においてもゲートに作用する波力を評価するために、ゲート下部に若干のクリアランスを設けたため、そこからわずかな流入があったためである。(c2)の10%開放時においても、PG1～PG3地点はほぼ同じ速度で水位が上昇し、それに遅れる形でPG4、PG5でも概ね $t = 50$ s以降、水位上昇を起こしている。この時、氷板群は水面付近に滞留しておりゲート付近で閉塞を起こす様子は見られなかった。(c3)で波形に乱れが存在するのは、50%開放時に水路全体の水位を上昇させるため、給水ポンプの出力を高く設定したために、給水量にやや乱れが生じたことが原因である。但し概略的な傾向としては、PG1～PG3いずれの地点でも目標波高の $\Delta H = 4$ cmまで上昇し、尚かつ、堤内側の2地点でも、吐口の水位上昇の影響を受け、水位上昇が発生している。このケースについては一部の氷板が堤内側へも侵入していることが確かめられた。

概して、開水時と氷板群が存在する場合とで、波形に大きな違いはもたらされなかった。この理由は、水の量に対して氷板の量が小さかったため、そのような場合は漂流物の挙動は波形に追従して変化することが考えられた。既往研究¹⁰⁾においても、同様のことが確かめられている。但し、水量に比して氷板の量が多い場合に波形そのものを変化させる事例⁹⁾も観測されているので、留意すべき事項の一つと思われる。

(3) 氷板群が存在する場合の波力

次に、設計上直接的に重要となる津波波力について述

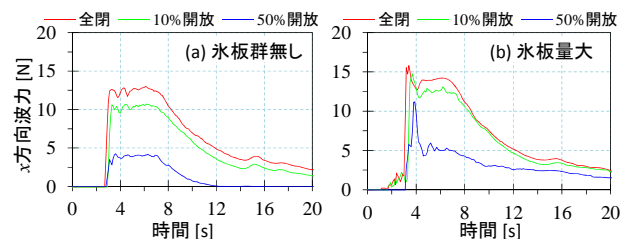


図-6 氷板群の有無とゲート開度を変化させた場合の時系列波力の変化（段波タイプ）

べる。図-6に示したのは、ゲート全閉、10%開放、50%開放時におけるx方向（遡上方向）波力の時系列変化で、(a)が氷板群無し、すなわち開水時、(b)が氷板量大の場合を示している。(a)から、氷板群が存在しない場合、段波波形と類似の波力変動傾向が見られた。衝突直後から急激に上昇し、概ね7 s後まで継続波力が続いた後、水位低下に伴い波力も減少している。ゲートを開放した場合、10%開放時は僅かに波力を低減できており、50%開放時は大幅に波力を低減することができている。全閉時13 N程だった最大波力は10%開放で11 N程、50%開放時は5 N程度まで減少している。これは、著者ら¹¹⁾が既報で示した数値解析結果とも傾向が合致するものである。段波の運動エネルギーが一部堤内側に向かうため、結果としてゲート自体が受ける力は低減するものと考えられた。

ところが、(b)に示した氷板量大のケースにおいては、全閉時と10%開放時において、波力の変動傾向が開水時のものから僅かに変化した。フロント部分でやや大きい波力となった後に $t = 4$ s付近で一度減少し、継続波力の作用後、時系列的に減衰するようになる。しかし、50%開放時は波力の時系列が大きく変化しており、ピーク値が切り立った形状となっている。全閉時と10%開放時に

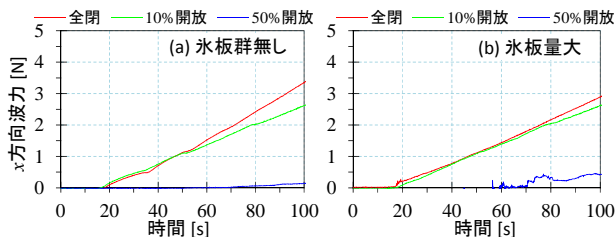


図7 氷板群の有無とゲート開度を変化させた場合の時系列波力の変化（水位上昇タイプ）

において15 N程だった波力は、50 %開放時でも11 N程となった。これは図-3で一部見られたように、折り重なった氷板が津波フロント部に集積することで、水流の波力のみならず固体衝突の力が重なったためピークが切り立ったものと考えられた。

一方、図-7に示した、水位上昇タイプの波力作用について見ると、氷板群無しの場合は全閉、10 %開放時ともほぼ線形に波力増大し、50 %開放時は僅かに水面がゲートに触れて以降のごく小さな波力作用となった。また、(b)の氷板量大の時は上と同様に全閉、10 %開放時の時はほぼ線形に波力増大し、50 %開放時は、氷板の接触や衝突に伴ってやや乱れを伴う波力作用となった。図のいずれのグラフにおいても、全閉時の波力作用が最も大きかった。この時、最終時刻の水深から静水圧を推定したところ本図の波力作用とほぼ一致していたことから、現地スケールにおいても、水位上昇時に発生する波力は静水圧に近い値となることが類推される。通常樋門ゲート等治水施設の設計は計画高水流量時の静水圧作用に耐えうる構造となっており、このように河口域での津波の水位上昇によって作用する波力については、津波による水位上昇の度合いが設計水位未満である限り、既往の設計法により津波に対して防御可能であることが推察される。

4. まとめと今後の課題

本稿では、津波漂流物の存在を考慮した上で、津波発生時の最適な治水施設操作法の検討を行った。第3章において、氷板の有無による流況の変化、水位変化、波力変化に詳細な検討を加えた。その結果、堤内側の人命や資産、そして施設の動作を阻害しないためにも可能な限りにおいて全閉操作とすべきという結論に至った。但し第3章(3)節で指摘したように、全閉時には氷を伴う津波の外力が増加しうることを留意すべきであろう。また、矢野ら¹²⁾の取り組みで示されたように、河川結氷時は積雪やゲート下部の凍結により、施設が可動できない可能性もある。津波による動的な要因のみならず、こうした気象環境的な要因も踏まえた施設操作法や設計のあり方を模索することが望ましいと考えられる。

これまでは津波発生時における治水施設操作法は議論

の途上である上、漂流物の影響は未解明な点も多く、河川管理者にとっては施設操作の判断が困難であった。本報告はある一つの樋門を対象とした、限定された条件下での実験結果ではあるが、本稿の知見により来襲する津波波形や漂流物をも考慮した場合の外力変化が明確化され、安全な治水施設操作法として提案することに成功した。今後の施設操作法として運用されることで、河川周辺における津波防御対策に寄与することが期待される。

謝辞：北海道開発局釧路開発建設部には既存の樋門諸元に関するデータを提供頂きました。また本稿の取りまとめにあたり北海道開発局釧路開発建設部による助言を参考としました。記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 消防庁: 東日本大震災記録集, 総務省消防庁, p.153, 2013.
- 2) 佐藤好茂, 阿部孝章, 吉川泰弘, 伊藤丹: 氷板混合津波が橋桁に及ぼす波力特性に関する実験的研究, 土木学会論文集B2(海岸工学), Vol.70 (2), pp.I_851-I_855, 2014.
- 3) 松井大生, 内田龍彦, 中村賢人, 服部敦, 福岡捷二: 非静水圧準三次元解析法による北上川の津波河川遡上・氾濫流の一体解析, 土木学会論文B2(海岸工学), Vol.71(2), pp.I_181-I_186, 2015.
- 4) 吉川泰弘, 阿部孝章, 平井康幸: 河川津波に伴い発生した北海道鶴川のアイスジャム再現計算, 土木学会論文集B2(海岸工学), Vol.68(2), pp.I_416-I_420, 2012.
- 5) 阿部孝章, 吉川泰弘, 佐藤好茂, 伊藤丹: 寒冷地河口域の津波発生時における氷板サイズ分布の推定に関する研究, 土木学会論文集B2(海岸工学), Vol.70 (2), pp.I_1471-I_1475, 2014.
- 6) 三浦敦禎, 西藤浩二, 春木勝敏: 河川津波遡上時の樋門操作について, 北海道開発局技術研究発表会論文集, 安28, 2015.
- 7) 阿部孝章, 吉川泰弘, 平井康幸: 東北地方太平洋沖地震発生時の水位・潮位記録に基づく河川津波の考察, 土木学会北海道支部論文報告集, 第67号, 2012.
- 8) 安田浩保, 渡邊康玄, 藤間功司: 2003年9月の十勝沖地震に伴い発生した津波の河川溯上, No.768/II-68, pp.209-218, 2004.
- 9) Watanabe, Y., Mitobe, Y., Saruwatari, A., Yamada, T. and Niida, Y.: Evolution of the 2011 Tohoku Earthquake tsunami on the Pacific Coast of Hokkaido, Coastal Engineering Journal, Vol.54, No.1, 1250002, 2012.
- 10) 木岡信治, 森昌也, 遠藤強, 竹内貴弘, 渡部靖憲: 海氷群を伴った津波の市街地氾濫に関する一考察, 土木学会論文集B3(海洋開発), Vol. 69 (2), pp. I_509-I_514, 2013.
- 11) 阿部孝章, 佐藤好茂, 伊藤丹: 樋門ゲートに対する河川津波波力低減手法に関する研究北海道開発局技術研究発表会論文集, 安34, 2014.
- 12) 矢野雅昭, 吉川泰弘, 石谷隆始, 高橋一浩: 2010年2月28日に発生したチリ沖地震津波の結氷河川における河川遡上に関する現地観測, 寒地土木研究所月報, No.693, pp.14-26, 2011.

(2016. 4. 4受付)