

1.1 結氷河川における津波災害の防止・軽減技術に関する研究

研究予算：運営費交付金（一般勘定）

研究期間：平 26～平 28

担当チーム：寒地水圏研究グループ（寒地河川）

研究担当者：船木淳悟、前田俊一、黒田保孝
阿部孝章、鳥谷部寿人

【要旨】

本稿は、河川を遡上する津波に対して、治水施設の操作法を確立するための実験的な検討を行ったことを報告するものである。2011年東北地方太平洋沖地震津波によって、国内の沿岸域においては深刻な被害がもたらされた。一方で北海道では、河川を遡上した津波が結氷を破壊し大量の氷板となったことが現地調査から確認された。本稿では、氷板漂流物を考慮した上での、河川津波発生時に最適な樋門操作法を提案することを最終的な目的とし、治水施設周辺における氷板を伴う津波実験を実施した。その結果、氷板群が存在することで偶発的な波力作用が生じ、治水施設の機能不全をもたらす可能性のあることが分かった。

1. はじめに

河川津波発生時の樋門操作法が十分に確立されていないことが河川管理上の課題となっている。その上、北海道では長期間にわたり河川で結氷が生じるが、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く残されている。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、北海道太平洋岸に位置する河川で発見された津波漂流物の痕跡である（道東支所撮影）。左段の十勝川では氷板漂流物が樋門下部に侵入している様子が確認できる。右段の新釧路川では、亀裂の入った氷板が樋門前面に滞留している。

仮に氷板が高速で構造物に衝突する場合や、大量の氷板群が構造物内部に入り込み閉塞を起こす現象が発生すれば、冬期の河川津波特有の被害が発生する可能性がある。しかし発生条件が河川結氷期であること、かつ河川津波発生時であることという特殊性から、こうした河川構造物周辺の氷板漂流物の被害や防災対策に関する研究は余り進んでいない。

河川津波の基本的なメカニズムそのものについては古

くから検討事例があり、これを再現する計算モデルも整備されてきている。1次元的な簡易モデルを用いた評価から¹⁾、最近では高精度氾濫モデルを用いた精緻な流況把握の手法まで、様々に提案されてきている²⁾。

しかしながら、これらを樋門操作などの実際の河川管理に活用するまでの検討はほとんどなされていないのが現状である。その理由には、本川における津波流況と樋門等構造物周辺の流況が異なることも考えられる。著者らの研究グループではこれまで構造物周辺の流況をも踏まえた検討を行ってきたが³⁾、冬期に発生する氷板等の漂流物群を考慮した検討までは行われていなかった。

そこで本研究では、氷板等の漂流物が樋門周辺の流況や波力をどのように変化させるかに特に焦点を当て、これを実験的に解明することを目的とした。実際の樋門形状を模擬した水理実験によって時系列的な水位や波力の変動を把握した上で、冬期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

2.1 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。水理実験は寒地土木研究所の可傾斜水路を用いて実施した。水路の詳細な寸法などを図-1 に示した。全長15 m、幅0.6 m の水路であり、ほぼ中央部に樋門模型を設置している。写真-2 現地写真（左）と模型（右）に示すように、新釧路川昭和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



写真-1 冬期河川津波発生後の樋門周辺状況の例

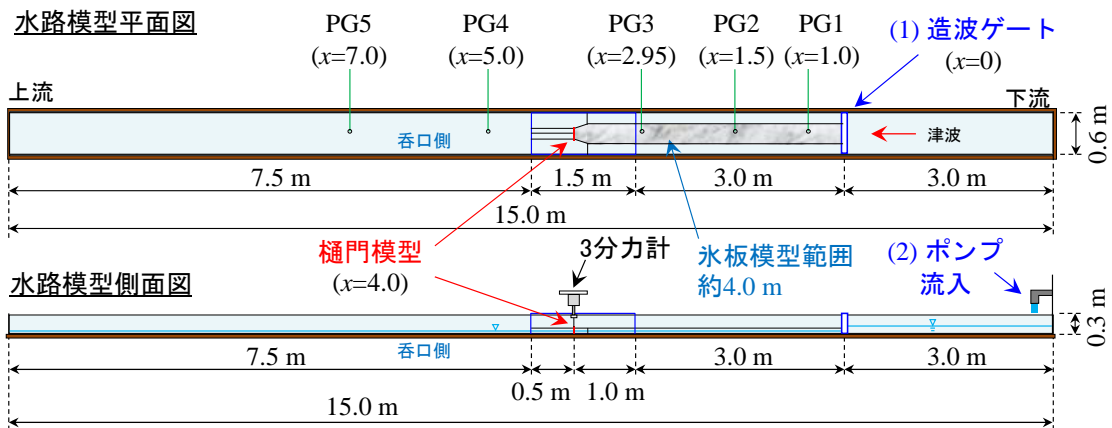


図-1 使用した実験水路の諸元、模型配置、及び水深測定位置

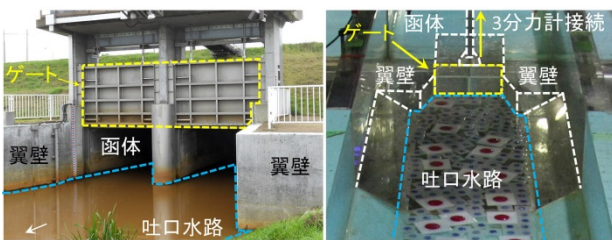


写真-2 昭和樋門概況(2013年8月撮影)と模型樋門

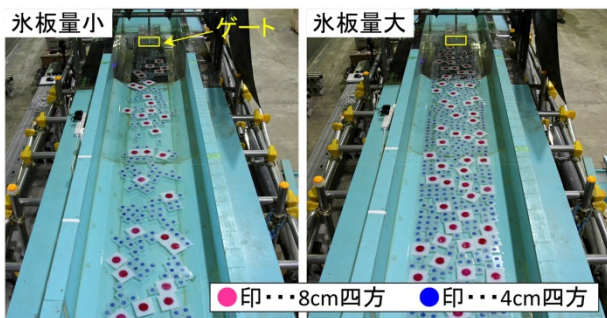


写真-3 氷板量小、氷板量大のケースの配置例

模擬したものである。実験の縮尺は1/30程度としており、模型函体部分は高さ8cm、幅12cmの2連である。尚、本研究では津波と構造物、氷板群模型の相互作用を明らかにすることが第一の目的であるため、現地形状を厳密には再現していない。

下流端から3mの箇所に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の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では写真-3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⁴⁾に基づき、大きいものは8cm四方、小さいものは4cm四方で、厚さ6mm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。

水路内の縦断的な水深を計測するため吐口側で3箇所 (PG1~3)、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。樋門操作によるゲート開度の変化を模擬するため、ゲートの河床からの高さを変化できる構造とし、全閉、函体高さ8cmに対し開度10% (0.8cm) 開放、50% (4cm) 開放の3通りを想定した。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 (写真-2右)。水位及び波力はサンプリング間隔0.001sで計測を行い、0.1s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120FPS (120フレーム毎秒) で撮影を行った。

2.2 吐口水路での造波方法

次に実験で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。図-2に示したのは、2011年東北地方太平洋沖地震発生後、新釧路川の鳥取水位観測所 (KP1.05)、広里水位観測所 (KP.7.4) で観測された津波第1波の波形である。これを見ると釧路港に近い鳥取水位観測所では山なりの水位変化となっているが、広里ではある時刻で急激に水位上昇が発生している。鳥取では12分間で1.14mの上昇、広里では僅か40秒間で0.4mの上昇となっている。

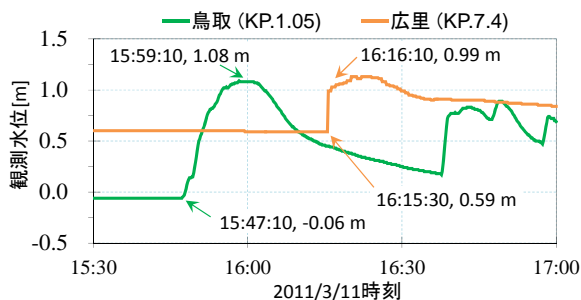


図-2 新釧路川における 2011 年東北地方太平洋沖地震津波第 1 波の観測水位

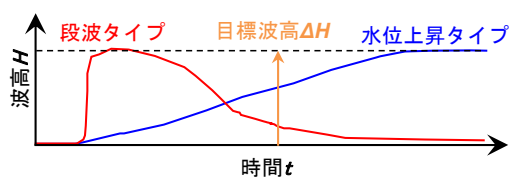


図-3 津波衝突形態別の時系列波形概念図

安田ら⁹⁾や Watanabe ら¹⁰⁾が指摘するように、北海道周辺で観測される津波は、海底地形により生じら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、図-2 のように明瞭な段波を形成し、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する。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-3 の概念図に示したように、急激に水位上昇を起こす段波状の津波（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 種類を想定することとした。時間的な比較を図-3 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非常に短い時間内に目標波高に到達する。図-2 広里での波高が鳥取地点よりも減衰しているように、上流へ遡上するほど波高は減衰を起こすことが多いが、実験において目標とする波高 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する。

3. 結果及び考察

3.1 氷板群が存在する場合の樋門周辺流況

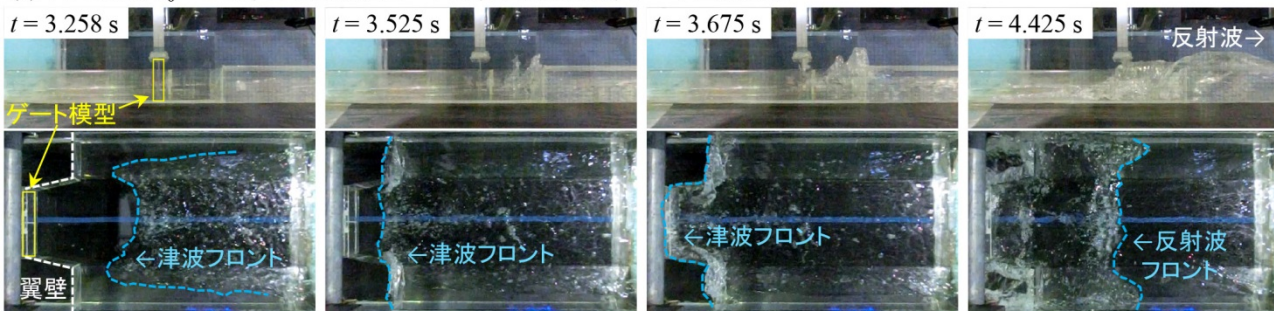
まず、図-4 に示したのは、側方及び上方からの撮影流況のスナップショットで上段から順に氷板群無し、氷板量小、氷板量大としている。ここでは基本的な条件として、樋門は津波来襲前に全閉した想定とし、目標波高 ΔH は L1 クラス未満として模型樋門ゲート前面において 4 cm、現地換算で約 1.2 m とした場合の結果を示している。(a)~(c)それぞれで津波フロントが翼壁に到達する直前、翼壁衝突直後、樋門ゲート衝突直後、ゲート衝突後の反射波の発生時までを順に示した。津波フロントは青色破線で示している。

図-4 (a)では、凹型形状となった津波フロントが翼壁に衝突してその後樋門ゲートに衝突し、反射波が発生する過程が確認された。一方で氷板群の滞留がある条件で氷板量小とした図-4 (b)においては、フロント形状の推移としては(a)の場合に類似している。しかし多量の氷板輸送が発生しており、 $t = 3.300$ s ではフロント周辺で回転を伴いながら氷板が輸送されている。 $t = 3.617$ s では翼壁部への衝突と氷板群の上方への巻き上がりが発生しているが、フロント部に含まれる氷板群はまだ多くはない。その後 $t = 3.842$ s で氷板群を混合しつつ樋門ゲートへの衝突が起こっている。氷板量小の場合、先に津波の水流による衝突が発生し、氷板群は後から追従する形で衝突するという形態の発生が推察された。

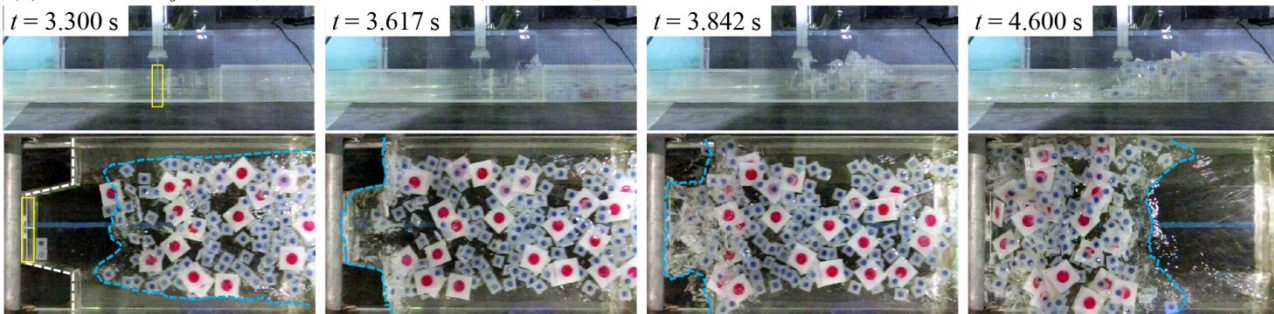
氷板量大の場合はその様相が少し異なり、図-4 (c)に見られるように、フロント衝突前に氷板群が下流から上流へ押し出され、はじめの $t = 3.758$ s の段階でゲート前面に氷板群が密集している。津波フロント内部にも多量の氷板が混合している。その状態で津波と氷板群がほぼ同時に衝突している様子が確認できた ($t = 4.283 \sim 4.892$ s)。氷板群が多い場合の押し出される氷板については、河川横断構造物を対象とした佐藤ら⁷⁾の既報でも確認されており、氷板の量で輸送形態が大きく変化することも留意すべき事柄であろう。同様に氷板により流況が大きく変化する場合には、樋門の設計荷重で想定されていない外力が発生することも考えられる。主な受圧部分である扉体に対し、こうした漂流物の影響を考慮するかどうか、あるいはどの程度まで明確化・定量化するかについて、今後の議論が望まれる。

次に、より河口に近い位置での津波来襲を想定した水位上昇タイプの流況について検討を行う。縮尺の条件か

(a) 吐口水深 $h_0 = 2$ cm, 目標波高 $\Delta H = 4$ cm, 氷板群無し, ゲート全閉条件



(b) 吐口水深 $h_0 = 2$ cm, 目標波高 $\Delta H = 4$ cm, 氷板量小, ゲート全閉条件



(c) 吐口水深 $h_0 = 2$ cm, 目標波高 $\Delta H = 4$ cm, 氷板量大, ゲート全閉条件

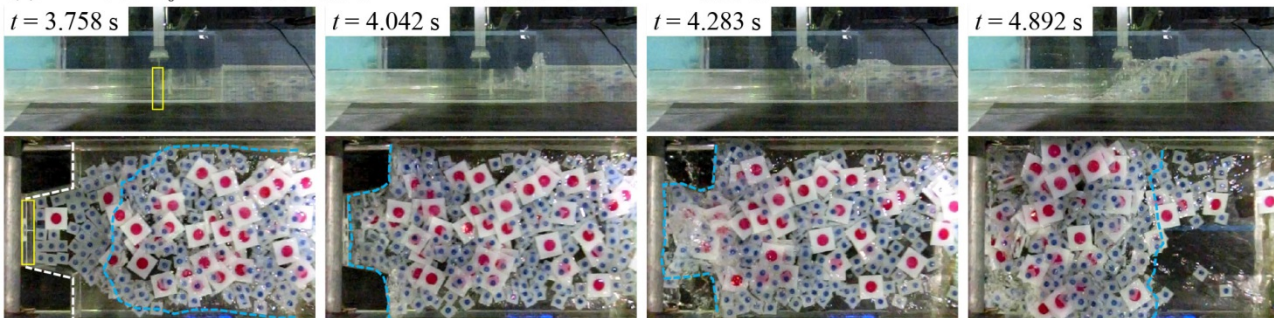


図4 氷板群を伴う河川津波のゲートへの接近状況(段波タイプ; 側方及び上方から撮影された流況) 及び開水時との比較

吐口水深 $h_0 = 2$ cm, 目標波高 $\Delta H = 4$ cm, 氷板量大, ゲート全閉条件

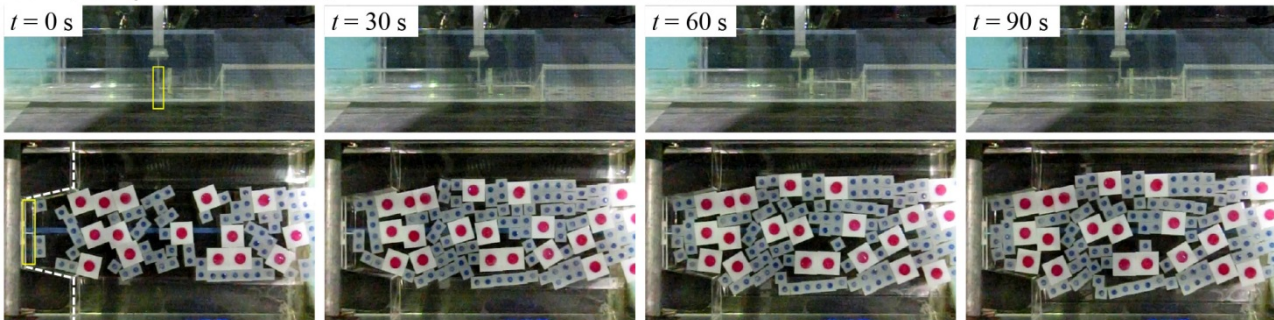


図5 氷板群を伴う河川津波のゲートへの接近状況(水位上昇タイプ; 側方及び上方から撮影された流況)

ら概ね実験開始 100 s 後に目標波高の 4 cm となるように水路へ給水を行っている。1 点注意すべき事項として、本稿の実験は縮尺模型実験であるため現地での時間スケールとの相似は厳密には取れていない。そのためあく

までも水位変動が早い段波タイプと緩やかな水位上昇タイプの相対的な比較に留めておくべきと考えられる。

図-5 は代表的な水位上昇タイプの流況のスナップショットであるが、初期の $t = 0$ s ではまばらに滞留して

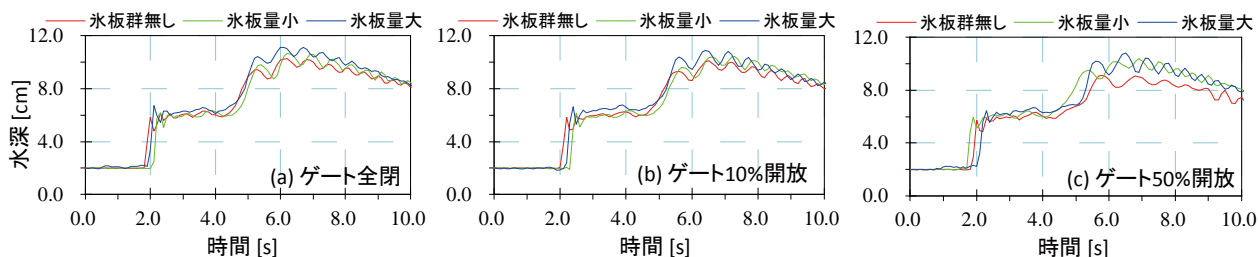


図-6 氷板群の有無と量による時系列水位の変化（段波タイプ；PG3 地点）

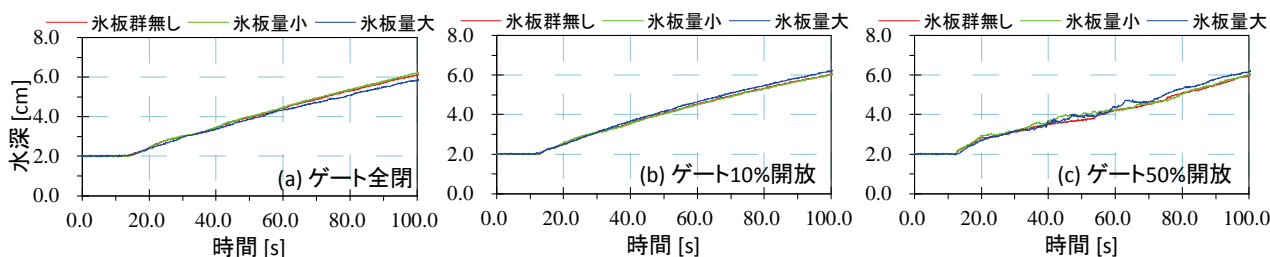


図-7 氷板群の有無と量による時系列水位の変化（水位上昇タイプ；PG3 地点）

いた氷板が、30 s 後は徐々にゲート周辺に輸送されている。これは、下流端で給水されることでゲート付近と水面勾配が発生し、上流向きの流速が発生したためと考えられた。しかし、 $t = 60, 90$ s と比較しても氷板群の配置に大きな変化は見られず、水位のみが上昇する結果となった。津波の流速が比較的小さい場合は、氷板群は慣性の影響で大きくは輸送されないものと考えられた。そのため、ゲートに作用する波力としては、静水圧に近い、準静的な力となることが推定される。

3.2 氷板群の有無による水位変化

以下では圧力センサと3分力計の計測結果から、津波と氷板群、構造物の相互作用について定量的な検討を行う。本節ではゲート開度を変化させ、全閉の条件だけでなく10%開放、50%開放した場合の影響についても考察を行うこととした。

図-6 に示したのはゲート全閉、10%開放、50%開放した場合で段波タイプの津波を衝突させた際の、PG3 地点 ($x = 2.95$ m) の時系列水位変化である。それぞれで氷板群無し、氷板量小・大のケースを示した。いずれのグラフにおいてもまず $t = 2$ s 付近で段波状の津波が通過し、目標波高 $\Delta H = 4$ cm 程度分だけ急激に上昇している。図-4 に示したようにゲートに衝突した津波は反射波となって PG3 地点に戻り流れとして到達する。いずれのグラフにおいても $t = 5.0$ s 以後目標波高よりさらに大きな波高の波が通過している。これは反射波とダムブレイクによる後続流が重なり合って波高が大きくなったものと考えられた。しかし概して、時系列的な変動傾向は氷板の有無によらずどのケースも類似している。

一方、図-7 に示した水位上昇タイプの津波では、いずれのケースもほぼ線形に水位が上昇している。(a)~(c) とも下流端部での給水開始後、概ね 15 秒後 PG3 地点に津波が到達し、水位上昇が開始している。図-6 のグラフでは段波や反射波の波形に振幅 1~2 cm 程度の細かな変動も見られたが、緩やかな水位上昇ではほとんど見られない。図-7 (c) のゲート開度 50% 開放時ではわずかな変動が見られるが、これはポンプによる給水が一部安定しない時間帯が存在したためである。

以上示された結果から、本稿の実験条件では、段波・水位上昇タイプいずれでも、氷板が存在しても波形を大きくは変えなかったものと考えられる。一定の条件下ではあるが、こうした現象は他の実験的研究でも指摘されている⁸⁾。これは例えば水の量に比較して氷の量が小さい場合や、波形のスケールに比較して氷が小さく、流れに追従しやすい条件の場合である。ところが、アイスジャムやパイルアップが顕著に発生する場合には波形・波力を大きく変化させる場合があること⁷⁾も指摘しておく。川崎ら⁹⁾が指摘するように、氷の影響が支配的となる水理条件等について、発生確率の観点からの検討も含め、今後議論を深めていくことが望ましい。

図-8 に示したのは、図-4 に相当する条件（吐口初期水深 $h_0 = 2$ cm、 $\Delta H = 4$ cm）で、尚かつゲート開度を変化させた場合の、津波衝突方向に対する波力の時系列変化を示したものである。左段(a)は氷板群無し、(b)は氷板量小、(c)は氷板量大の場合を示している。(a)~(c)を概括すると、全閉時が最も大きい波力で推移しており、ゲートを 10% 開放とすると 1 割程度、波力が小さくなる結

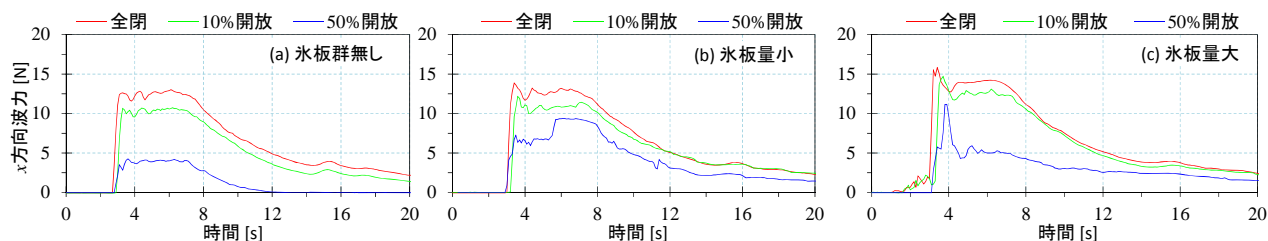


図-8 氷板群の有無とゲート開度を変化させた場合の波力の時系列変化 (段波タイプ)

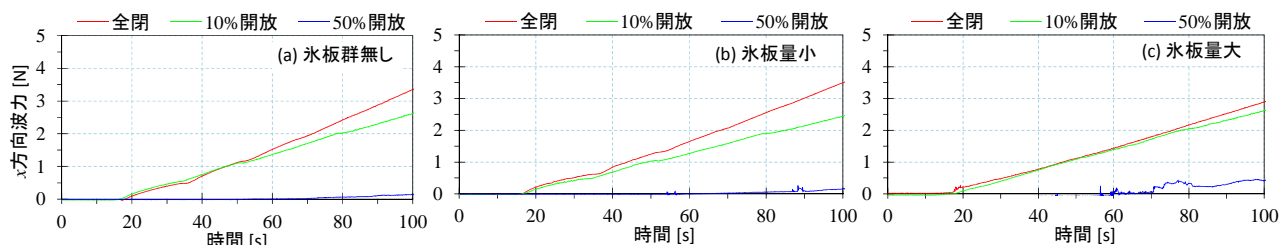


図-9 氷板群の有無とゲート開度を変化させた場合の波力の時系列変化 (水位上昇タイプ)

果となった。一方で、50%開放(半開)までとすると大きく波力は低減していることが確認できる。(a)氷板群無しの場合では全閉時最大13N程度であった波力は50%の開放時4N程度まで低減している。その一方で(b)と(c)のケースでは、波力低減効果は得られるものの、(b)氷板量小では全閉時14Nが半開時9Nへ、(c)全閉時15Nが半開時11Nである。

このようになる原因が2点考えられる。1つには、特にフロント部において、氷板群が混合した場合には流体力と固体衝突力が重畳し、トータル波力を増大させた影響が存在し得ることである。もう1点としては、特に(b)と(c)のケースの50%開放時において不規則な波力変動となっている様子から類推できるように、ゲート下部に氷板群が潜り込み、津波の流れの阻害が発生し、結果として波力が増大するということである。このような作用力は他の津波漂流物に関する実験的検討でも数多く示されている^{7,8,9}。所謂アイスジャミングによる効果である。興味深いことに、本節の前半では氷板群量の大小に関わらず津波波形としては大きな変化はもたらされないことを指摘しておいたが、波力という観点からすると無視できない程波力の変化が現れている。冬期の河川津波対策を講ずるにあたって、仮に漂流物の影響を設計に考慮するとすれば、この点を加味した上で議論を進めていくことが望ましいと考えられる。

次に、水位上昇タイプの時系列的な波力変動を図-9に示した。結果として波力は図-7と同様の傾向でほぼ単調に増加する場合がほとんどで、ゲートが10%開放された場合は堤内への流入が発生する分、図中緑線のように全閉時より作用波力が小さく推移する。50%開放時には波

力はほとんど作用しないが、氷板量大で50%開放時のみ、氷板との干渉によりわずかな波力が作用した。但し全閉時の静水圧に比較しても小さい波力である。以上の時系列変化は、前述の通り準静的な、静水圧に近い波力作用がもたらされたことを意味すると考えられる。

以上の結果をまとめると、まず河川津波と河川結氷の滞留が重畳した場合、氷板群の大量の輸送が生じる。その結果、開水時の場合に比較して津波の流況に若干の変化が見られたが波形そのものを大きくは変化させない。但し、氷板の閉塞現象などにより、波力を変化させる要因にはなり得ることが分かった。

更に本稿では段波タイプと水位上昇タイプの2通りの造波を行ったが、これらはそれぞれ河口より上流へ遡上した津波と、河口にごく近い箇所でも来襲する津波に相当する。水位上昇タイプの津波では、氷板群の存在があった場合でも静水圧に近い波力となり、既存の設計法で対応できる可能性がある。しかし段波タイプの津波では固体衝突の影響、閉塞発生と流れの阻害の影響により、波力を増大させる可能性のあることが確認された。

既報⁴では、数値解析的検討により、開水時にゲート開度を変化させることでゲートに作用する津波波力を低減させる効果が得られる可能性を示した。しかし本稿の実験的検討により、氷板群が存在する津波衝突の場合では低減効果が抑えられ、危険側に作用することが確認できた。これも積雪寒冷地特有の留意事項と考えられる。

4. まとめ

本研究では、未だ議論の途上である、冬期河川津波発生時の樋門操作方法について実験的な検討を行った。結

氷の量や樋門の開度、そして津波波形を変化させた上で波力の変動の程度を明らかにした。その結果と前章の考察結果より、やはり冬期の樋門操作としては、閉扉操作を基本として堤内側を保護することを優先することが望ましい。これはただ津波逆流を防止するだけでなく、氷板の侵入による思わぬ津波外力の作用を未然に防ぐことも視野に入れてのことである。

但し今後の課題としては、遠地津波発生時に全閉とすると内水氾濫の危険性が高まることとなるため、一部開放が可能かどうか、本稿の結果も含めて検討を行うこと、仮に一部開放した状態のゲートが津波衝突を受けた場合に、構造上耐えうるかの検討が必要になってくると思われる。また、大規模地震の発生後は樋門ゲート構造、その周辺地盤に被災が生じる可能性があり、堤内構造物全体としての保有耐力をも考慮した検討が必要となるであろう。いずれにせよ河川域の津波防災対策は議論の途上段階であり、防災・減災のための基礎検討や要素技術開発を継続していくことが肝要であると考えられる。

謝辞： 国土交通省北海道開発局釧路開発建設部には2011年東北地方太平洋沖地震津波発生時の水位データ、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、釧路開発建設部治水課、釧路河川事務所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) 伊藤丹, 阿部孝章, 鳥谷部寿人, 吉川泰弘, 1次元河川流計算ソフトウェアCERI 1Dの公開について, 寒地土木研究所月報, Vol.720, pp. 21-27, 2013.
- 2) 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.
- 3) 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, 平成25年度北海道開発技術研究発表会, 安 34, 2014.
- 4) 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.
- 5) 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.
- 6) 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.
- 7) 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.
- 8) 木岡信治, 森昌也, 遠藤強, 竹内貴弘, 渡部靖憲, 海水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.
- 9) 川崎佑磨, 伊津野和行, 生島直輝, 山中拓也, 四井早紀, 津波による流体力軽減に有効な整流板形状に関する実験的研究, 土木学会論文 A1(構造・地震工学), Vol.70(1), pp.129-136, 2014.

PREVENTIVE AND MITIGATIVE MEASURES AGAINST TSUNAMI HAZARDS IN ICE-COVERED RIVERS

Budgeted : Grants for operating expenses

General account

Research Period : FY2014-2016

Research Team : River Engineering Research Team

Author : FUNAKI Jungo, MAEDA Shun-ichi

KURODA Yasutaka, ABE Takaaki

TOYABE Toshihito

Abstract : This report presents an experimental investigation for the establishment of river control facility operation against tsunami run-up in rivers. The main aim of this report is to propose an optimum sluice operation in the event of tsunami considering the existence of ice floes. 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 : Ice-covered river, River tsunami, Hydraulic experiment, River sluice operation