

1.3 発展途上国における持続的な津波対策に関する研究 (3)

研究予算：運営費交付金（一般勘定）

研究期間：平 18～平 22

担当チーム：寒地河川チーム、寒地技術推進室

研究担当者：吉川泰弘、平井康幸、矢野雅昭、石谷隆始

【要旨】

河道内に侵入した津波は波状段波を形成して波頭部で急激な水位上昇を生じる。この現象は、水理的には波状性長波が不等流場を遡上する現象と見なすことができる。しかし、静水中における波状段波に関する研究は多数行われてきているものの、河川のような不等流場における知見は非常に乏しい。一方、北海道の河川は冬期間の気温低下に伴って河道内に河氷が形成される。河川結氷時に津波が河川を遡上する場合においては、津波による河氷の河川遡上、それに伴う河氷の河川構造物への影響が懸念される。本研究では、複断面水路の不等流場を遡上する波状段波の水理実験の数値シミュレーション、河氷が水面上に存在する場合の津波実験、現地においては、河川構造物の対象を樋門として、冬期間の凍結状況について調査を実施した。本研究の結果として、低水路から高水敷の溢水氾濫が生じるにもかかわらず分散波列の形成が最大水位の決定に支配的であることを明らかにした。また、津波の入射波を固定して初期水深のみ変化させた津波実験において、水深が浅い方が、深い方よりも、河氷の河川遡上距離が長くなるという定性的知見を得た。また、冬期間の樋門の開閉動作を実施した結果、一部でゲート下部が河氷に拘束される事例があったが、今回対象とした多くは樋門においては、健全に開閉が実施できることを示した。

キーワード：津波、河川、波状段波、結氷河川、水理実験、樋門、現地調査

1. はじめに

2003年9月に発生した十勝沖地震を契機として、河川を遡上する津波に対する危険性が強く認識されるようになった¹⁾。この地震に伴い発生した津波は、河川に侵入して波状段波を形成して遡上していく様子が自衛隊により撮影された。波状段波が形成されると入射時の段波波高に比べて2倍程度までこれが増幅することが既往の研究により明らかにされている。このため、河川を遡上する津波を取り扱う場合、波状段波についての知見が不可欠である。しかしながら、一般に波動理論は静水中の水平床上における議論であることがほとんどであるため、河川のような不等流を遡上する波状段波に対してこれらの知見をすぐさま適用することは難しい。この問題に対し、安田²⁾や中村ら³⁾は、波状段波が単断面水路を遡上する水理実験を実施して、最大で2.5倍程度にまで水位が上昇することを示している。

実際の河川は複断面形状のものが多いため単純矩形断面の議論からさらに一步踏み込み、複断面河道を遡上する津波の特性を把握する事は不可欠であると言えよう。それにもかかわらず、波状段波が複断面河道を遡上する場合については未だに研究が進んでいない

のが実情である。最近になり、廣瀬ら⁴⁾により、複断面の河道を伝播する波状性段波に関する水理実験が行われ、複断面の形状が伝播する入射波に対して及ぼす影響について明らかにされつつある。

実河道における河道内に侵入した津波の影響度の評価のためには、数値シミュレーションが不可欠の技術と言え、低Fr数領域の単断面水路を遡上する波は、鉛直方向加速度を考慮した非線形分散波理論を適用することで実現象および室内実験を10%内外の高精度で再現できることが明らかになっている。現状では複断面河道における波状性長波の数値シミュレーションに関する報告は過去にはなく、このような知見の蓄積が求められている。

この問題に対して本報告では、洪水流や浅海域での津波のシミュレーションに広く用いられる浅水理論に基づく数値計算モデルにより、複断面水路を遡上する波状性長波の室内水理実験の再現計算を実施し、その再現特性などについて議論した。なお、本報告における数値計算用の計算格子の生成および計算結果の可視化には財団法人北海道河川防災研究センターにより開発されたRic-Naysを用いた。数値計算の演算について

はRic-Naysに付属する浅水理論を支配方程式とするソルバを用いた。

一方、北海道の河川は冬期間の気温低下に伴って河道内に河氷が形成される。河川結氷時に津波が河川を遡上する場合には、津波が河氷の上を流れるのか、津波が河氷を壊し上流へと押し上げながら流れるかなど、開水時と異なる現象が予測される。また、津波の河川遡上による防災上の問題として、津波が河川を遡上することにより外水位を上昇させ、樋門などから堤内地に水が逆流して、内水氾濫を及ぼすことが想定される。このため、冬期間の樋門の適切な管理が求められており、その基礎資料としての冬期間の樋門の現状に関する知見が望まれている。

本報告では、河氷が河川水面上に存在している場合の津波実験を実施し、入射波を固定して初期水深の違いによる河氷の河川遡上距離で整理した。冬期間における樋門ゲートの結氷状況や開閉機能については、平常時において現地調査が実施し、その現状の把握を試みた。

2. 複断面水路の津波遡上

2.1 数値計算モデルの概要

(1) 支配方程式

本報告において行われた数値計算の支配方程式は浅水理論式である。平面2次元に拡張された浅水理論式は、 x 、 y 方向それぞれの運動の式が、

$$\frac{\partial M}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{M^2}{D} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{MN}{D} \right) + gD \frac{\partial \eta}{\partial x} + \frac{gn^2 M}{D^3} \sqrt{M^2 + N^2} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{MN}{D} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{N^2}{D} \right) + gD \frac{\partial \eta}{\partial y} + \frac{gn^2 N}{D^3} \sqrt{M^2 + N^2} = 0 \quad (2)$$

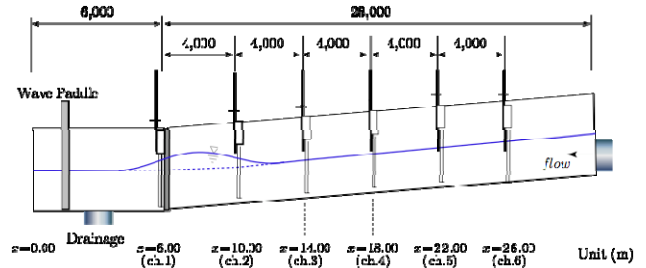
である。また、連続の式については、

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial M}{\partial x} + \frac{\partial N}{\partial y} = 0 \quad (3)$$

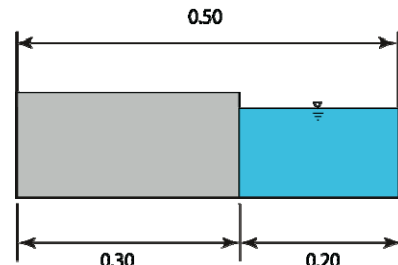
である。ここに、 M 、 N は x 、 y 方向の流量フラックス、 D は水深、 g は重力加速度、 η は水位、河床のせん断力の表現にはManningの粗度係数を導入して n は粗度係数である。

(2) 実施した数値計算の初期条件、境界条件

再現計算の対象となる室内実験は、図-1の a)に示したとおりの全長34m、幅0.5mで、水路勾配が1/250の矩形断面を有する水路を用いて行われた。また、同図b)のように低水路からの高さ0.15m、幅0.3mの高水敷を左岸側に設置して複断面型の水路としている。この実験では、4m間隔で容量式波高計を6本設置して低水路内の長波の遡上に伴う水位変動を計測した。入



a) 実験装置の縦断面図と波高計の設置



b) 複断面化された横断形状

図-1 実験装置の概要

射波の遡上に伴い発生した溢水については直接的には計測されていないものの、前述の低水路内の水位計測によりある程度の把握が可能となっている。

今回の再現計算では、水位計測地点の最下流位置である $x = 6.0\text{m}$ 地点のch1から水路の最上流地点までの範囲を計算領域とし、この領域全体を $5\text{cm} \times 5\text{cm}$ 間隔のstaggered格子で表現した。これらの計算格子の生成にはNays-Preを使用した。計算時間間隔は0.002秒とした。

この数値計算における初期条件は不等流計算により求められた縦断水位分布とした。この不等流計算の境界条件には $x = 6.0\text{m}$ 地点のch1における観測水位とそのときの流量を与えた。

境界条件については、下流端の水位条件として前述のch1地点において観測された水位変動を与え、上流端の流量条件として実験値と同じく一定流量を与えた。計算結果の出力間隔は、0.2秒刻みである。

2.2 計算結果

昨年度実施された水理実験は、河川流量、入射波の波高、および入射波の周期をそれぞれ変化させて行われている。この報告では、河川流量を 6L/s と入射波の周期を9秒に固定し、入射波の波高のみを変化させる再現計算を行い、これらの条件に一致する実験値との比較を行った。

(1) 時間波形

図-2、3に河川流量を 6L/s 、入射波の周期を9秒、入射波の波高 3.5cm とした場合における $x = 10 \sim 26\text{m}$ 地

点の水理実験および数値計算により得られた水位の時間変化を示した。黒線が実験値、青線が計算値、赤線が複断面の標高をそれぞれ表している。

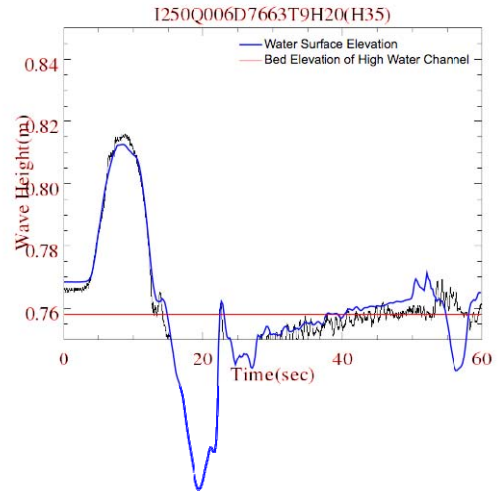
これらの図面から明らかなように、 $x=10$ から18m地点までの区間においては分散波列の形成を伴うことのない入射波の侵入に伴う水位上昇、およびこれがもたらす高水敷への乗り上げ（溢水氾濫）が生じていることが分かる。その後、水理実験では $x=22, 26$ m地点において明瞭な分散波列が形成されている事が確認できる。少なくとも $x=22$ 付近においても引き続き溢水氾濫が生じており、その主因は分散波列の形成に伴う水位上昇が担っている事が分かる。

実施された再現計算では、これら一連の現象のうち、 $x=10$ から18m地点までの区間付近において見られた入射波の前傾化やそれに伴う高水敷への溢水氾濫を良好に再現している事が分かる。その後、分散波列の形成が次第に顕著となってくる $x=18$ m地点よりも上流側では、再現計算では分散波列が形成されないために実験値を大幅に過小評価することになる。ここで、注目すべき事は、水理実験では $x=22$ m地点付近において非常に明瞭な分散波列の形成が入射波の周期に匹敵する10秒ものあいだほど見られてこれに伴う溢水氾濫が生じていた一方、再現計算では分散波列が形成されずに水位の過小評価ばかりか高水敷の氾濫域についても過小評価している点である。

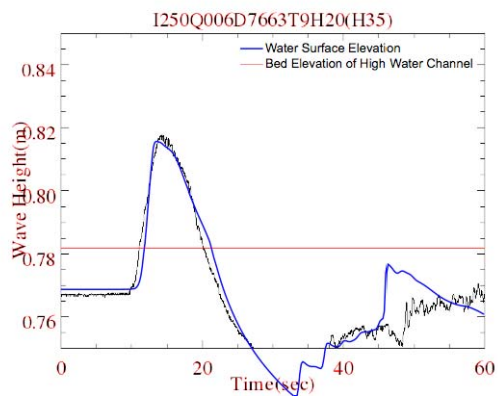
実験値では上流へ遡上するに従って波頭部における分散波列の形成が顕著になっていく様子が見られるが、再現計算の結果では波頭において分散波列を確認することはできない。分散波列の形成は、水面曲率の増大に伴って発生する鉛直方向加速度による重力加速度の補正効果にある。しかし、浅水理論ではその導出過程において水粒子の鉛直方向加速度が重力加速度に比べて微小で無視できると仮定しているため、浅水理論に基づく再現計算では分散波列が形成されないものと考えられる。これらのことから、複断面河道における津波の遡上を取扱う場合には、縦断的な水位分布の再現のみならず、溢水氾濫の評価においても鉛直方向加速度の補正項を導入した支配方程式に基づく数値計算モデルが導入される事が望ましいと言える。

(2) 波高

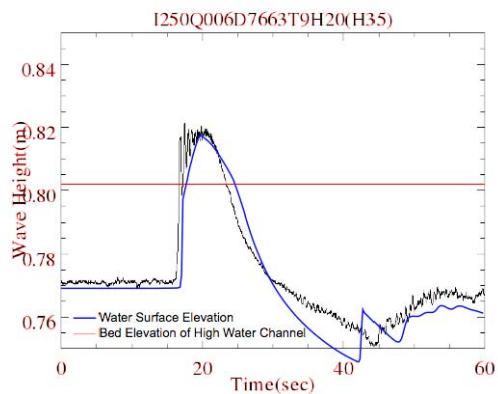
図-4 a)は、河川流量と入射波の周期を固定して入射波の波高のみを変化させた場合、図-5 a)は、入射波の周期と波高を固定して河川流量を変化させた場合における各水位観測地点における最大波高の実験値と計算値の比較を示した。ただし、ここでの波高とは各



a) ch1地点、 $x = 10.0$ m



b) ch3地点、 $x = 14.0$ m

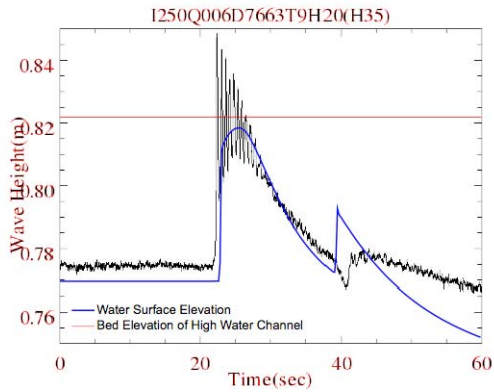


c) ch4地点、 $x = 18.0$ m

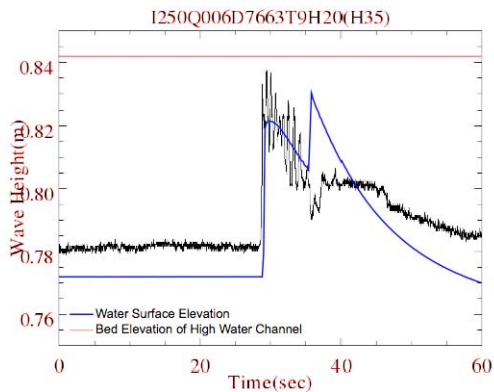
図-2 実験値と計算値の一例
(ch1~3地点の水位の時間変化)

観測地点における入射前における定常水位から入射波の到達に伴う最大水位との差とし、定常水位時における各地点の水深でそれぞれ無次元化している。横軸が実験値、縦軸が計算値を表している。

このグラフから、浅水理論では分散現象が生じる以



d) ch5地点、 $x = 22.0\text{m}$



e) ch6地点、 $x = 26.0\text{m}$

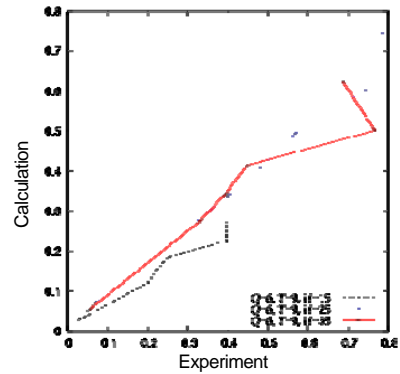
図-3 実験値と計算値の一例
(ch5、6地点の水位の時間変化)

前の下流部においては比較的良好な再現が可能なものの、特に上流部における分散波列の形成が顕著となる区間では計算結果が実験値に比べて過小評価となる。浅水理論による計算結果は、いずれの区間においても最大波高を実験値よりも50%程度もの過小評価となり、実験値と計算値の差異が最も著しい場合では65%程度まで過小評価する計算結果を得た。

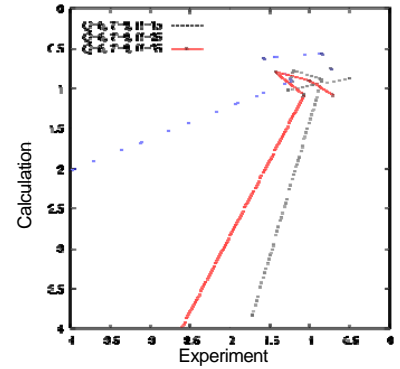
入射波は前傾化、その後分散波列の形成という変形過程を辿るが、前項で示したように上流区間では溢水状態においても明瞭な分散波列の形成を継続してこれが水位上昇の要因となっている。この現象はいずれの入射条件においても同様に発生しており、複断面河道における津波の遡上では高水敷への溢水を生じるにもかかわらず分散波列の形成は無視し得ない規模で生じ、しかもそれが最大水位の決定に対して大きな影響を与えていると言える。

(3) 波速

図-4 b)は、河川流量と入射波の周期を固定して入射波の波高のみを変化させた場合、図-5 b)は、入射波の周期と波高を固定して河川流量を変化させた場合に

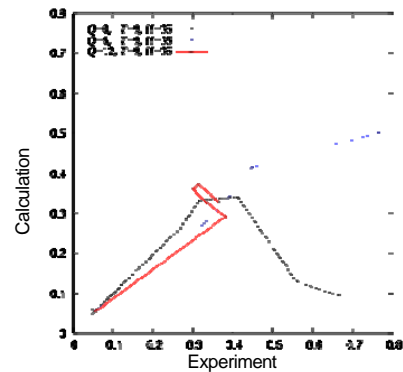


a) 最大波高

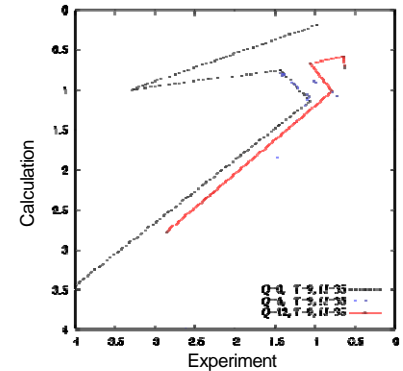


b) 波峰移動速度

図-4 波高のみを変化させた場合の実験値と計算値の比較 ($Q = 6, T = 9$)



a) 最大波高



b) 波峰移動速度

図-5 流量のみを変化させた場合の実験値と計算値の比較 ($T = 9, H = 35$)

における各水位観測地点における波峰移動速度の実験値と計算値の比較を示した。これらの波峰移動速度は、各水位観測点の最大波高の通過時刻を基に算出した。ただし、前述の方法で波速を算出しているため、波形の違いが若干の誤差を生んでいる可能性がある。

浅水理論に基づき得られた計算値は実験値の波速を過大評価する傾向が全体的にみられる。図-2,3に示した時間波形を見れば分かるとおり、実験値では多くの水位観測地点において分散波列の形成が確認されており、このような波形においては浅水理論では無視されている鉛直加速度項（分散項）が移流項と同程度の規模で作用するようになってくる事が知られている。物理的には波形の前傾化を招き波速を加速させる移流項と、波形の後傾に寄与する分散項の拮抗により結果的に波速が低下することから説明される。

2.3 まとめ

本報告では、津波に見立てた長波が複断面水路を遡上する水理現象を浅水理論に基づく数値モデルによりシミュレーションを行い、現象の水理的な特性や計算結果の再現性などについて議論した。得られた結果は以下のように要約される。

浅水理論では、複断面河川を遡上する津波でさえ分散波列の形成を伴うためにその水位上昇量や溢水氾濫を実用上求められる精度の範囲でさえ再現が困難であることが示された。特に、分散波列が形成される区間では最大水位を60%以上も過小評価してしまうことがあり得る。また、このような分散波列は高水敷への溢水氾濫を生じていながらも、波列形成は入射波周期と同程度の時間スケールで継続されて最大水位の決定要因となり続ける。そのため、複断面の実河川を津波が遡上する数値シミュレーションを行う場合は、単断面における同現象の取扱いと同様に鉛直方向加速度の補正項を有する非線形分散波理論式を支配方程式としなければならない、最大水位のみならず低水路からの溢水量や溢水域を大幅に過小評価する可能性が大きいことが示唆された。

3. 河水を有する津波実験

北海道の河川は冬期間の気温低下に伴って河道内に河氷が形成される。河川結氷時に津波が河川を遡上する場合には、津波が河氷の上を流れるのか、津波が河氷を壊し上流へと押し上げながら流れるかなど、開水時と異なる現象が予見される。河川結氷時の津波の事例として、釧路市に位置する春採川において、1952年3月の十勝沖地震に伴う津波が来襲し、結氷してい

る春採川の河水を壊し、流水とともに家屋が浸水被害を受けた事例がある。

本報告では、定性的な知見を得るために、河氷が河川水面上に存在している場合を想定した津波実験を実施し、入射波を固定して初期水深の違いによる河水の河川遡上距離、および、初期河氷位置の違いによる河水の河川遡上距離について検討した。



写真-1 1952年3月4日十勝沖地震の津波による春採川の浸水状況（写真提供：菅野純一氏）

3.1 実験条件

実験水路は、全長34m、水路幅0.5m、水路勾配1/250の矩形断面を有する図-7の水路を用いた。実験条件は、上流からの流量ゼロ、水路勾配1/250、水面勾配LEVEL、入射波の周期9秒、波高0.035mとした。また、造波板前水深が80.0cmの条件（水深が深い）と72.5cmの条件（水深が浅い）の2パターンの実験を行った。

実河川における河氷は、大別すると硬い氷板とその下に存在する軟らかい晶氷に分けられる。本報告では、直接の被害につながる可能性が高いと想定される硬い氷板に着目した。実験に用いた氷板1枚は、ポリプロピレン製、厚さ5mm±0.5mm、縦横30mm×30mm、比重0.9程度とした。なお、本実験は、定性的な知見を得るためのものであるため、特定の河川を対象とはしていない。このため、氷板の大きさは任意に決定した。

氷板をピンク、緑、白、オレンジ、黄色に着色し、図-8に示すように縦15列、横15列の計225個の氷板を配置して、これらを氷板群（45cm×45cm）として考え、図-7の水路下流端2mから21.5mまでの区間内において、この氷板群の初期設置位置を50cm毎に変えて計40ケースの実験を行った。測定は、入射波により氷板

群内の氷板が到達した最大の位置を目測し、最大到達位置から初期配置位置を引いた遡上距離を算出した。造波板前水深が80.0cmの条件を1ケース2回の計80回、72.5cmの条件を1ケース1回の計40回の実験を実施した。なお、80.0cmの条件の測定結果は2回の平均値とした。

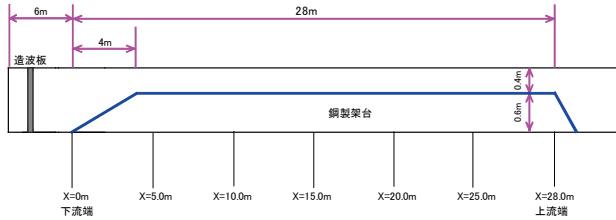


図-7 実験装置の概要

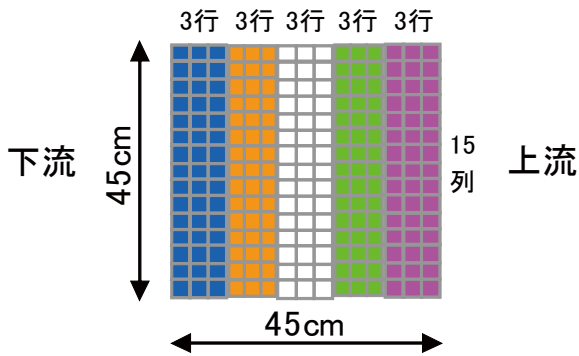
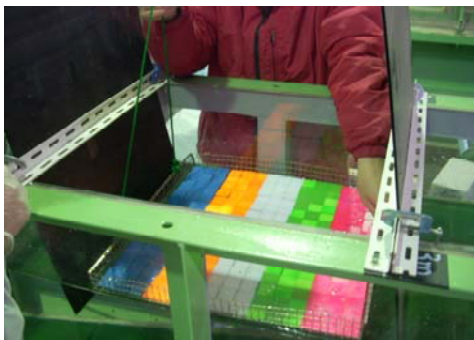


図-8 氷板模型の概要と氷板群の設置状況

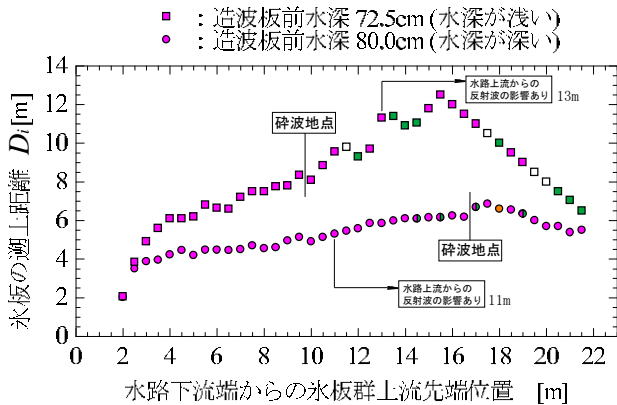


図-9 初期水深の違いおよび氷板群の設置位置の違いによる氷板の遡上距離

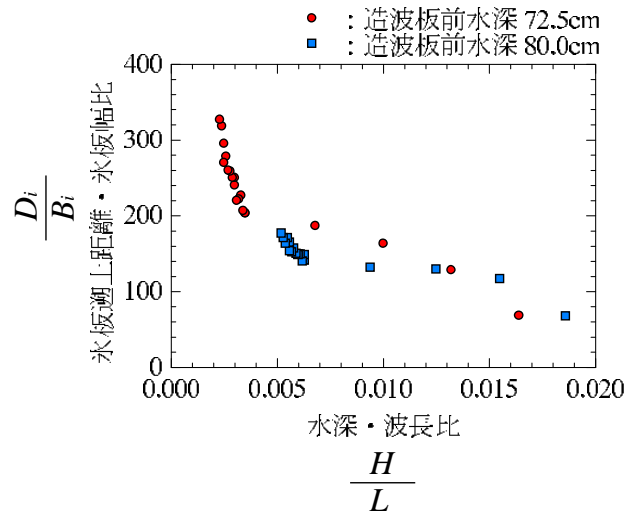


図-10 水深・波長比と氷板遡上距離・氷板幅比

3.2 実験結果

氷板群が河口域に存在するか河川上流域に存在するかの初期位置の違いによる氷板の河川遡上距離の違い、および、津波遡上前の水深が深い浅いかの初期水深の違いによる氷板の河川遡上距離の違いに着目し、実験結果を整理した。

氷板群の上流側先端の初期位置を横軸に取り、縦軸に氷板の遡上距離を取り、図-9に示す。なお、図には入射波の砕波地点、入射波が水路上流端に到達し反射した波が氷板群に影響を与え始める地点を示した。ドット色は、氷板の着色と同色である。図-9より、氷板群が上流に位置するほど、氷板の遡上距離は長くなり、水深が浅いほど遡上距離は長くなる。また、最大到達距離を記録した氷板の殆どは、上流側に配置したピンクであるが、砕波後には、緑、白、オレンジと逆転しているケースがみられた。

水深と氷板の遡上距離の関係について、反射波の影響を受けていないデータを用いて、横軸に水深・波長比、縦軸に氷板遡上距離・氷板幅比を取り図-10に示す。なお、 H [m]は各地点の水深とし、 L [m]は波長で式(4)から求めた。

$$L = CT \quad (4)$$

$$C = \sqrt{gH} \quad (5)$$

ここで、 C [m/s]:波速、 T [s]:周期で9、 g [m/s²]:重力加速度で9.8である。また、 D_i [m]を氷板の遡上距離とし、 B_i [m]を実験で用いた氷板の幅として0.03mを与えた。

図-10より、水深・波長比が小さいほど、氷板遡上距離・氷板幅比は大きい。上流からの流れがない静水面

条件における本実験において、水深が浅い地点に津波が来襲した場合、その地点にある氷板は、水深が深い地点に比べて、上流へと遡上される可能性が高いことを示唆している。しかし、河水の大きさ、津波の最大遡上距離、上流からの流れ、砕波が氷板へ与える影響などにより、この現象は異なることが推察されるが、上流からの流れがない静水面という条件においては、定性的な知見が得られた。

3.3 まとめ

氷板が水面上に存在している場合の津波実験を実施し、入射波を固定して初期水深の違いによる氷板の水路遡上距離、および初期氷板群位置の違いによる氷板の水路遡上距離に着目した実験を実施した。本実験の条件における実験結果は、水深・波長比が小さいほど、氷板遡上距離・氷板幅比は大きい。言い換えると、水深が浅い地点に津波が来襲した場合、その地点にある氷板は、水深が深い地点に比べて、氷板が河川上流へと遡上される可能性が高いという定性的知見を示している。

4. 冬期間の河川における樋門の凍結状況

北海道は北米プレートに位置しており、北米プレートと太平洋プレートが衝突し沈み込むプレートの境界においては、日本海溝及び千島海溝を形成している。

日本海溝及び千島海溝周辺では、これまでにマグニチュード7、8クラスの大規模地震が多数発生を受けて、平成16年4月には「日本海溝・千島海溝周辺海溝型地震に係わる地震防災対策の推進に関する特別措置法」が制定された。平成18年2月には、地震が発生した場合に著しい被害が生じる恐れがある地域を「日本海溝・千島海溝周辺海溝型地震防災対策推進地域」として指定している。

北海道においては、平成18年9月に「日本海溝・千島海溝周辺海溝型地震防災対策推進計画」を定め、平成18年12月には「地震津波アクションプラン」を策定している。このアクションプランにおいて、津波ハザードマップの作成支援、地震津波情報の提供などのソフト対策と、河川における樋門・水門の自動化・遠隔操作化などのハード対策が示されている。

北海道の多くの河川は、気温の低下により結氷するため、これに伴い樋門・水門のゲート（以下、ゲート）の凍結が予見される。しかし、冬期間におけるゲート凍結の有無については、十分には把握されていない。ゲートが凍結して閉まらない状況下で、津波が発生し、河川水位が上昇した場合には、流水が堤内へと流れ、

内水氾濫となることが想定される。地震は通年発生することから、冬期間のゲートの凍結状況及び開閉機能を把握することは、河川防災及び河川管理を考える上で重要である。

本報告は、冬期間のゲートの凍結の現状を明らかにするため、吐き口水路の結氷状況調査及び実際に冬期にゲート操作を行うことによる、ゲートの開閉機能調査を実施した。そして、ゲート種類の違いによるゲート凍結状況の違いについての検討を行った。



図-11 調査実施河川

4.1 現地調査

(1) 調査地点と調査期間

調査対象河川は、図-11に示す太平洋側の鶴川、沙流川、十勝川、利別川、浦幌十勝川、釧路川とし、ゲート種類に着目して、河口付近の9樋門、河口から離れた6樋門を選定し、計15樋門（ゲートの開閉機能調査は10樋門のみ）の調査を実施した。調査期間は平成21年1月～3月とした。

(2) 調査年度の気象条件

調査を実施した平成20年度の気象条件を把握するために、平成11年度から20年度までの気象庁が観測した気象データを用いて算出した積算寒度、積算暖度を図-12、13に、最大積雪深を図-14に示す。

図-12、13より、平成20年度の気温について見てみると、積算寒度が過去10ヶ年平均値と比べて小さく、また、積算暖度が大きいことから、暖かい年度であったと推察できる。また、図-14より、平成20年度の最大積雪深について見てみると、過去10ヶ年平均値と比べて、穂別は小さく、浦幌は大きく、釧路は同程度であったことが分かる。ここで、年度とは4月1日から翌年3月31日までの期間である。また、積算寒度、積算暖度とは、計算開始日からそれぞれマイナス、プラスの気温を積算した絶対値である。なお、積算寒度と

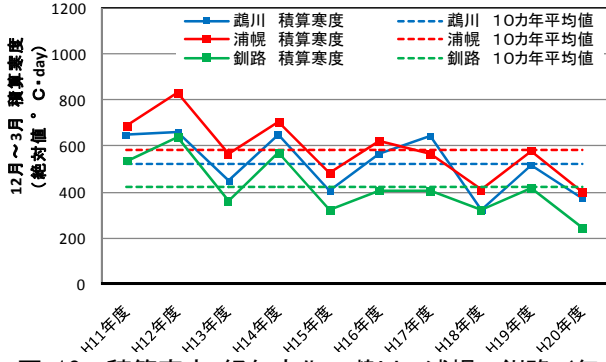


図-12 積算寒度 経年変化：鶴川、浦幌、釧路（気象庁）

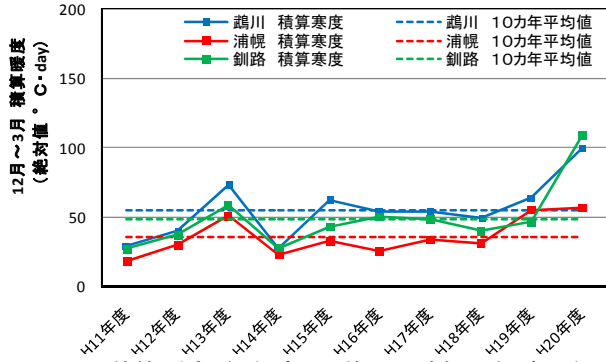


図-13 積算暖度 経年変化：鶴川、浦幌、釧路（気象庁）

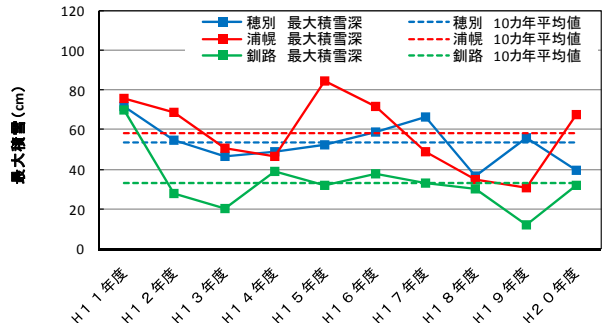


図-14 最大積雪深 経年変化：穂別、浦幌、釧路（気象庁）

積算暖度の計算期間は、12月1日から3月31日までとした。

(3) 調査項目

ゲートの凍結状況を把握するため、吐き口水路のゲート付近において、気温、水温、氷板厚、有効水深、積雪深の調査を実施した。水温、氷板厚、有効水深は氷板上に1つ孔を空け測定し、積雪深は氷板上の任意の1点で計測した。河氷は硬い氷板と、柔らかい晶氷に大別できるが、本調査はゲートの開閉に直接影響を与えると想定される硬い氷板に着目して調査を実施した。また、冬期間のゲートの開閉機能を調べるため、北海道開発局室蘭開発建設部、帯広開発建設部、釧路

表-1 調査結果一覧

河川名・樋門名	管路断面形状	調査結果					
		調査日 (2009)	気温 (°C)	水温 (°C)	氷板厚 (cm)	有効水深 (cm)	積雪深 (cm)
鶴川 鶴川A樋門	1.5m ×1.5m ローラー	2/5	2.0	2.5	0.0	—	0
		2/27	3.5	5.0	0.0	—	0
		3/10	5.2	8.0	0.0	—	0
鶴川 鶴川B樋門	2.0m ×2.0m	2/27	—	—	3.5	3.0	0
		—	—	—	—	—	—
鶴川 鶴川C樋門	1.2m ×1.5m	2/5	-3.0	0.5	16.0	70.0	2
		2/27	3.0	0.0	17.3	52.7	2
鶴川 鶴川D樋門	φ1.80m ×1.連	2/5	-0.3	0.0	5.3	4.7	4
		2/27	-4.0	0.0	6.3	1.7	6
沙流川 沙流川A樋門	2.0m ×2.0m	2/5	2.0	4.0	0.0	—	0
		2/27	7.0	13.0	0.0	—	0
沙流川 沙流川B樋門	1.2m ×1.5m	2/5	0.0	0.0	4.3	10.7	4
		2/27	3.0	0.5	5.5	8.0	2
十勝川 十勝C樋門	1.5m ×2.0m	1/21	-0.4	-0.1	38.0	6.0	11
		2/6	-2.0	-1.0	45.0	12.0	5
十勝川 十勝B樋門	2.0m ×2.0m	2/23	-2.0	-0.3	46.0	12.0	45
		3/9	3.0	0.0	60.0	16.0	34
利別川 利別C樋門	2.0m ×2.0m	1/21	-2.0	0.0	25.0	11.0	12
		2/6	-0.9	-1.0	25.0	23.0	25
利別川 利別D樋門	2.8m ×2.8m	2/23	-4.6	-1.0	33.0	15.0	80
		3/9	3.0	1.5	23.0	26.0	28
浦幌十勝川 浦幌十勝F樋門	1.5m ×2.0m	1/20	-0.3	0.0	8.0	7.0	23
		2/7	-3.0	-0.9	6.0	28.0	14
浦幌十勝川 浦幌十勝G樋門	1.5m ×2.0m	2/24	-10.0	0.5	11.0	18.0	0
		3/10	1.0	2.0	0.0	—	0
浦幌十勝川 浦幌十勝E樋門	4.0m ×3.0m	1/20	1.0	-0.1	24.0	0.5	19
		2/7	-2.0	-0.9	41.0	2.0	6
浦幌十勝川 浦幌十勝D樋門	2.8m ×2.8m	2/24	-8.0	-2.0	41.0	0.0	54
		3/10	0.0	0.0	37.0	0.0	16
浦幌十勝川 浦幌十勝H樋門	1.5m ×2.0m	1/20	-0.2	0.0	7.0	30.0	24
		2/7	-0.5	-0.8	39.0	4.0	5
浦幌十勝川 浦幌十勝I樋門	2.0m ×2.0m	2/24	-10.0	-1.0	11.0	9.0	13
		3/10	1.0	0.0	41.0	5.0	20
浦幌十勝川 浦幌十勝J樋門	1.5m ×2.0m	1/21	-0.4	-0.1	32.5	17.0	20
		2/6	-1.0	-1.0	53.0	10.0	32
浦幌十勝川 浦幌十勝K樋門	1.5m ×2.0m	2/23	1.0	0.0	69.0	11.0	22
		3/9	3.8	3.0	40.0	34.0	20
浦幌十勝川 浦幌十勝L樋門	1.5m ×2.0m	1/21	-0.4	-0.1	23.0	50.0	0
		2/6	1.8	-0.5	45.0	30.0	0
浦幌十勝川 浦幌十勝M樋門	2.0m ×2.0m	2/23	0.0	0.0	51.0	13.0	8
		3/9	5.8	2.5	42.0	35.0	0
釧路川 釧路A樋門	2.5m ×3.5m	2/9	-2.0	-0.4	15.8	27.2	0
		2/20	-5.0	0.0	7.0	26.0	0
釧路川 釧路B樋門	2.0m ×2.0m	3/10	4.6	2.0	0.0	—	0
		2/9	-1.0	0.0	36.8	97.7	4
釧路川 釧路C樋門	2.0m ×2.0m	2/20	-5.0	0.0	44.3	80.7	0
		3/10	4.0	0.2	40.0	92.0	0

※網掛けは、氷板が観測された時の状況

開発建設部の協力を得て、実際にゲートを稼働させることにより、冬期間でのゲートの開閉操作の可否、ゲート降下時間、開口高、開口面積等の調査を実施した。

4.2 吐き口水路の結氷状況調査結果

(1) 各河川の結氷状況

吐き口水路のゲート付近における、気温、水温、氷板厚、有効水深、積雪深の調査結果を表-1に示す。また、氷板厚が最大となる2月の調査データについて、各河川毎に下記に記述する。

a) 鶴川、沙流川

鶴川、沙流川の調査樋門では、鶴川A樋門、沙流川A樋門では結氷は見られず、その他の樋門では結氷が見られ、氷板厚は3.5~17.3cm、積雪深は0~6cmであった。

b) 十勝川、利別川、浦幌十勝川

十勝川、利別川、浦幌十勝川では、全ての調査樋門で結氷が見られ、氷板厚は6.0~69.0cm、積雪深は0~

80cmであった。

c) 釧路川

釧路川では、全ての調査樋門で結氷が見られ、氷板厚は7.0~44.3cm、積雪深は0~4cmであった。

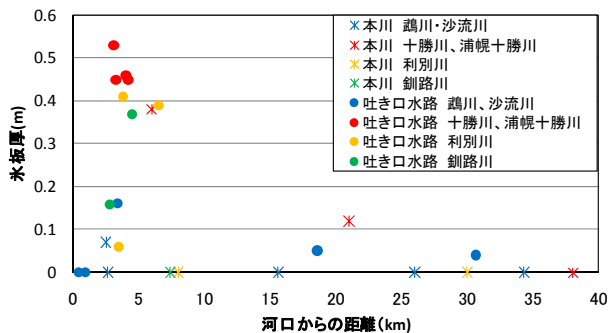


図-15 本川と吐き口水路の氷板厚 (2月上旬)

(2) 本川と吐き口水路の氷板厚

2月上旬における各河川の本川の氷板厚と、吐き口水路の氷板厚を図-15に示す。この図での本川の氷板厚は川幅平均氷板厚を使用し、吐き口水路は1点での氷板厚を使用した。この結果、本川よりも吐き口水路の氷板が厚く、また、本川に結氷が見られなくても、吐き口水路で結氷している状況が見られる。よって、吐き口水路は、本川に比べ結氷しやすい箇所であると考えられる。

4.3 冬期間のゲートの開閉機能調査結果

冬期間のゲートの開閉機能を確認するために、ゲートの開閉操作を行った。引上げ式ローラーゲート及び門柱レス油圧引上げ式ゲートは、機側操作または遠方操作により開閉機能の確認を行った。また、自動開閉ゲートは直接ゲートを手押しすることにより開閉機能の確認を行い、一部においては機側操作による確認を行った。調査結果を表-2に示し、各河川、各ゲート種類別に、調査結果を以下に記述する。

(1) 鶴川、沙流川

a) 引上げ式ローラーゲート

- ①調査樋門名： 鶴川B樋門 ゲート2門
- ②調査月日： 平成21年2月27日
- ③開閉操作方式： 遠方操作、閉操作は動力降下
- ④吐口水路の結氷状況：

上流側ゲートの一部分を除いて結氷しており、氷板厚は3.5cm、積雪は無かった。

⑤調査結果：

遠方操作開始時に流れるはずの吹鳴等が鳴らなかったが、それ以外はゲートの開閉機能に問題は無かった。閉操作完了後の状況として、下流側のゲートは、水路底部の均一な氷板の上にゲートが接地したため開口部

表-2 冬期におけるゲート開閉機能の調査結果

河川名・樋門名	管路断面形状	門位置	調査日(2009)	ゲート閉操作方式	開閉操作可否※1	ゲート降下に要する時間	ゲート開口部高さ※2	ゲート開口部面積(m ²)	開口部割合(%)※3
鶴川・鶴川B樋門	2.0m × 2.0m × 2連	上流	2/27	動力降下	△	6分29秒	底板より3cm	0.02	1
		下流			△	6分34秒	氷板より0cm	0.00	0
鶴川・鶴川C樋門	1.2m × 1.5m × 1連	-	2/5	手押し	○	-	-	0.00	0
			2/27	手押し	○	-	-	0.00	0
			3/10	手押し	○	-	-	0.00	0
鶴川・鶴川D樋門	φ 1.80m × 1連	-	2/5	手押し	○	-	-	0.00	0
			2/27	手押し	○	-	-	0.41	26
			3/10	手押し	○	-	-	0.00	0
沙流川・沙流川A樋門	2.0m × 2.0m × 1連	-	2/27	動力降下	△	6分40秒	底板より0cm	0.00	0
					×	-	-	-	-
十勝川・十勝B樋門	1.5m × 2.0m × 1連	-	2/23	動力降下	○	3分55秒	-	0.59	28
					×	-	-	-	-
十勝川・十勝C樋門	2.0m × 2.0m × 2連	上流	2/23	自重降下	○	20秒	氷板より24cm	0.16	6
		下流			×	-	-	-	-
浦幌十勝川・十勝F樋門	1.5m × 2.0m × 1連	-	2/23	自重降下	○	20秒	氷板より0cm	0.00	0
					×	-	-	-	-
浦幌十勝川・十勝G樋門	1.5m × 2.0m × 1連	-	1/21	手押し	○	-	-	0.00	0
			2/6	手押し	×	-	-	1.31	64
			2/23	動力降下	×	-	-	1.31	64
自動開閉	-	-	3/9	手押し	×	-	-	1.31	64
			×	-	-	-	-		
釧路川・釧路B樋門	2.5m × 3.5m × 2連	上流	2/20	自重降下	○	55秒	底板より15cm	0.07	1
		下流			○	1分3秒	底板より0cm	0.00	0
釧路川・釧路C樋門	2.0m × 2.0m × 2連	-	2/9	-	○	-	-	-	-
			2/20	-	○	-	-	-	-
			3/10	-	○	-	-	-	-

※網掛けは、ゲートを全閉できなかった時の状況

※1 記号はそれぞれ下記の状況を示す

- ：正常に開閉操作を行えた
- △：開閉操作を行えたが、課題があった
- ×

※2 引き上げ式ローラーゲートについてのみ計測

※3 開口部面積÷氷板より上の管渠断面面積(%)



閉操作前(11:21) 閉操作後(11:27)
写真-2 鶴川B樋門：引上げ式ローラーゲート(H21.2.27)
※赤枠：不均一な結氷により生じた開口部



※不均一な結氷により生じた開口

写真-3 鶴川B樋門 開口部拡大写真(H21.2.27)

は生じなかった。しかし、吐き口水路の一部のみが結氷している上流側のゲートにおいては、水路底部の不均一な氷板の上にゲートが接地されたため、ゲート下部に 0.02m^2 、氷板面より上の管渠開口面積に対して1%の開口部が生じた。この時の状況を写真-1, 2に示す。

- ①調査樋門名： 沙流川A樋門 ゲート1門
- ②調査月日： 平成21年2月27日
- ③開閉操作方式： 遠方操作、閉操作は動力降下

④吐口水路の結氷状況：

氷板、積雪ともに無かった。

⑤調査結果：

ゲート操作開始直前に、機械系統の不具合によりゲートが稼働せず、専門業者により復旧することとなった。その後、ゲート操作を行うことができ、開閉機能に問題はなかった。

閉操作完了後の状況として、吐き口水路に氷板、積雪などが無く、ゲート下部に開口部は生じなかった。この時の状況を写真-3に示す。

b) 自動開閉ゲート

- ①調査樋門名： 鶴川C樋門, 鶴川D樋門 ゲート1門
- ②調査月日： 平成21年2月5日、2月27日、3月10日
- ③開閉操作方式： 手押しによる開閉機能の確認

④吐口水路の結氷状況：

鶴川C樋門では、2月5日は氷板厚16cm、積雪深2cm、2月27日は氷板厚17.3cm、積雪深2cm、3月10日は氷板、積雪は無かった。鶴川D樋門では、2月5日は氷板厚5.3cm、積雪深4cm、2月27日は氷板厚6.3cm、積雪深6cm、3月10日は氷板、積雪は無かった。

⑤調査結果：

鶴川C樋門と鶴川D樋門ともに3回の調査全てにおいて、ゲートが稼働することを確認できた。これは両樋門ともゲートが常に水面より高い位置にあるため、吐き口水路の氷板によりゲートが拘束されないことによる。しかし、鶴川D樋門のゲート下部の戸当りには、流水により生じた氷塊があり、これがゲートの全閉、水密性を損なう状態であることが確認された。これにより、側面部と上面部に合わせて 0.41m^2 、管渠開口面積に対して26%の開口部が生じると想定される。この時の状況を写真-4, 5に示す。

(2) 十勝川、利別川、浦幌十勝川

a) 引上げ式ローラーゲート

- ①調査樋門名： 十勝B樋門 ゲート2門
- ②調査月日： 平成21年2月23日

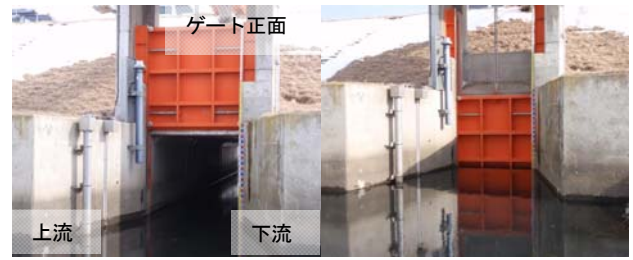


写真-4 沙流川 A 樋門：引上げ式ローラーゲート



写真-5 鶴川 C 樋門：自動開閉ゲート (H21. 2. 27)

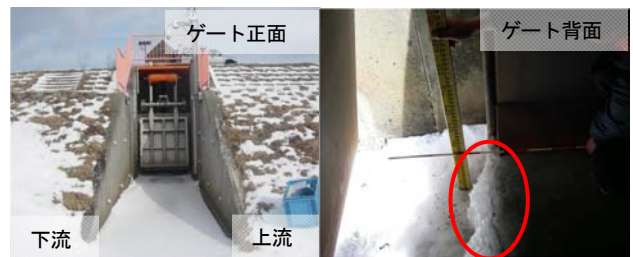


写真-6 鶴川 D 樋門：自動開閉ゲート (H21. 2. 27)
※赤丸：底部の戸当りに流水により生じた氷塊



写真-7 十勝 B 樋門：引上げ式ローラーゲート (H21. 2. 23)



写真-8 十勝 B 樋門 開口部拡大写真 (H21. 2. 23)
※積雪により生じた開口部

③開閉操作方式： 機側操作、閉操作は自重降下

④吐口水路の結氷状況

全面結氷しており、氷板厚33.0cm、積雪は不均一であり、上流ゲート付近で80cmであった。

⑤調査結果

下流側のゲートはエンジンの不具合により稼働できなかったが、上流側のゲートは稼働でき、開閉機能に問題は無かった。

閉操作完了後の状況として、ゲートは吐き口水路の氷板上の不均一な積雪の上に接地されたため、ゲート下部に 0.16m^2 、氷板面より上の管渠開口面積に対して6%の開口部が生じた。この時の状況を写真-6, 7に示す。

- ①調査樋門名： 十勝F樋門 ゲート1門
- ②調査月日： 平成21年2月23日
- ③開閉操作方式： 機側操作、閉操作は自重降下
- ④吐口水路の結氷状況：

全面結氷しており、氷板厚 69.0cm 、積雪は不均一にあり、ゲート付近で 22cm であった。

- ⑤調査結果

ゲートの開閉機能に問題は無かった。

閉操作完了後の状況として、ゲートは吐き口水路の不均一な積雪の上に接地したが、開口部は生じなかった。この時の状況を写真-8に示す。

b) 自動開閉ゲート

- ①調査樋門名： 十勝G樋門 ゲート1門
- ②調査月日： 平成21年1月21日、2月6日、2月23日、3月9日
- ③開閉操作方式： 手押しによる開閉機能の確認、機側操作による確認
- ④吐口水路の結氷状況：

全面結氷となっており、1月21日は氷板厚 23cm 、積雪無し、2月6日は氷板厚 45.0cm 、積雪無し、2月23日は氷板厚 51cm 、積雪深 8cm 、3月9日は氷板厚 42cm 、積雪は無かった。

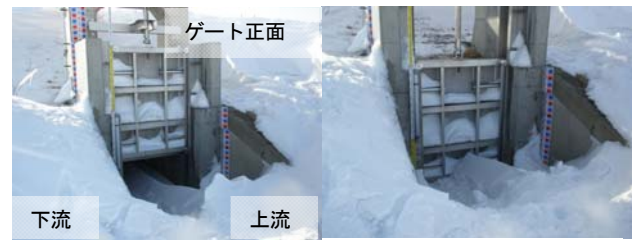
- ⑤調査結果

手押しによるゲートの開閉機能の確認により、1月21日の調査ではゲートは稼働したが、2月6日の調査から吐き口水路の氷板にゲート下部が拘束され稼働できなかった。2月23日には機側操作による動作確認も実施したが、同様に稼働できなかった。これにより、側面部と上面部に合わせて 1.31m^2 、氷板面より上の管渠開口面積に対して64%の開口部が生じた。この時の状況を写真-9に示す。

c) 門柱レス油圧引上げ式ゲート

- ①調査樋門名： 十勝A樋門 ゲート1門
- ②調査月日： 平成21年2月23日
- ③開閉操作方式： 機側操作、閉操作は動力降下
- ④吐口水路の結氷状況

全面結氷しており、氷板厚 46.0cm 、積雪深は不均



閉操作前(14:45) 閉操作後(14:46)
写真-9 十勝F樋門：引上げ式ローゲート(H21. 2. 23)

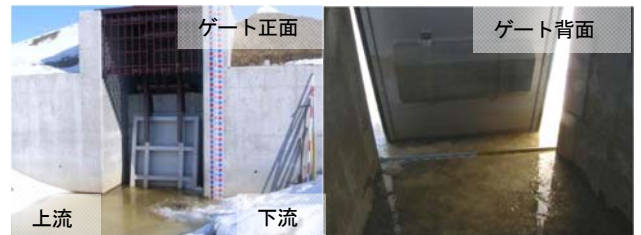


写真-10 十勝G樋門：自動開閉ゲート(H21. 2. 6)



閉操作前(13:44) 閉操作後(13:48)
写真-11 十勝A樋門：
門柱レス油圧引上げ式ゲート

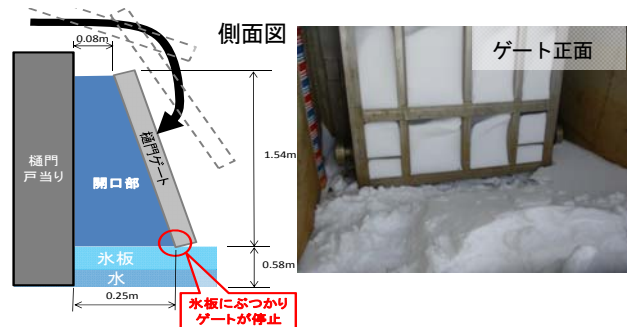


写真-12 十勝A樋門 閉操作後の概略図及び写真

一にあり、上流側のゲート付近で 45cm であった。

- ⑤調査結果

ゲートは管渠の上部から弧を描いて降りてきたが、ゲートが地面に対して垂直になる前に吐き口水路の氷板にぶつかり停止し、全閉できなかった。

閉操作完了後の状況として、ゲートが全閉できなかったことにより、ゲート側面部と上面部に開口部が生じ、その開口面積は 0.59m^2 、氷板面より上の管渠開口面積に対して28%であった。この時の状況を写真-10, 11に示す。

(3) 釧路川**a) 引上げ式ローラーゲート**

- ①調査樋門名： 釧路A樋門 ゲート2門
- ②調査月日： 平成21年2月20日
- ③開閉操作方式： 遠方操作、閉操作は自重降下
- ④吐口水路の結氷状況：

本川上流側が一部結氷しており、氷板厚7cm、積雪は無かった。

⑤調査結果

開閉機能に問題は無かった。

閉操作完了後の状況として、吐き口水路に氷板が無い下流側のゲートにおいては、開口部は生じなかった。しかし、吐き口水路の一部が結氷している上流側のゲートにおいては、水路底部の不均一な氷板の上にゲートが接地されたため、ゲート下部に0.07m²、氷板面より上の管渠開口面積に対して1%の開口部が生じた。この時の状況を写真-12に示す。

b) 自動開閉ゲート

釧路B樋門では、吐き口水路に40cm前後の厚い氷が確認されたが、ゲート前面のみが結氷しておらず、水深も深くゲートに近づくことが危険であったため、目視による調査のみを実施した。



閉操作前(13:46) 閉操作後(13:47)
写真-13 釧路A樋門：引上げ式ローラーゲート(H21. 2. 20)



H21. 2. 9 H21. 2. 20
写真-14 釧路B樋門：自動開閉ゲート
※水位に応じてゲートが開閉している状況

- ①調査樋門名： 釧路B樋門 ゲート2門
- ②調査月日： 平成21年2月9日、2月20日、3月10日
- ③開閉操作方式： 目視による調査

④吐口水路の結氷状況：

ゲートの前面以外は結氷しており、2月9日は氷板厚36.8cm、積雪深4cm、2月20日は氷板厚44.3cm、積雪無し、3月10日は氷板厚40.0cm、積雪は無い状況であった。

⑤調査結果：

目視調査の結果では、平成21年2月9日と2月20日のゲート状態から、内外水位差に追従してゲートが稼働していると考えられ、開閉機能に問題無い状況と考えられる。3月10日は、ゲート全面の氷板がさらに減少し、調査時にゲートが開閉動作している状況を目視で確認でき、開閉機能に問題ない状況であった。平成21年2月9日と2月20日の状況を写真-13に示す。

4.4 まとめ

①引上げ式ローラーゲートや門柱レス油圧引上げゲートは冬期でも開閉操作が可能であったが、氷板及び積雪の影響により全閉できなかつたものもあった。しかし、開口部は僅かであることから、津波による堤内地への流水の逆流量は少ないと推察される。

②自動開閉ゲートについては、吐き口水路の水面（氷板面）高さや、地域の気象条件によって、ゲート下部が氷板に拘束される場合があることが分かった。この場合、10～15度程度の開状態でゲートが固定されることから、その状態での内水氾濫の検証が必要と考えられる。

③今回の調査で、多くの樋門で開閉動作が健全に実施できたが、一部に機器の不具合により稼働できなかつた樋門や、不具合からの復旧に数時間を要する樋門が見られた。これらの原因は冬期間に起因するものかは明らかではないが、冬期間の機器点検の実施により、解決できる不具合もあると考えられる。

5. 結論

本報告では、複断面水路の不等流場を遡上する波状段波の水理実験の数値シミュレーション、河水が水面上に存在する場合の津波実験、現地においては、河川構造物の対象を樋門として、冬期間の凍結状況について調査を実施した。得られた知見は以下の3点である。

- 1) 浅水理論では、複断面河川を遡上する津波でさえ分散波列の形成を伴うためにその水位上昇量や溢水氾濫を実用上求められる精度の範囲でさえ再現が困難であることが示された。特に、分散波列が形成される区間では最大水位を60%以上も過小評価してしまうことがあり得る。

また、このような分散波列は高水敷への溢水氾

濫を生じていながらも、波列形成は入射波周期と同程度の時間スケールで継続されて最大水位の決定要因となり続ける。そのため、複断面の実河川を津波が遡上する数値シミュレーションを行う場合は、単断面における同現象の取扱いと同様に鉛直方向加速度の補正項を有する非線形分散波理論式を支配方程式としなければならない、最大水位のみならず低水路からの溢水量や溢水域を大幅に過小評価する可能性が大きいことが示唆された。

- 2) 氷板が水面上に存在している場合の津波実験を実施し、入射波を固定して初期水深の違いによる氷板の水路遡上距離、および初期氷板群位置の違いによる氷板の水路遡上距離に着目した実験を実施した。

本実験条件において、水深・波長比が小さいほど、氷板遡上距離・氷板幅比は大きい。言い換えると、水深が浅い地点に津波が来襲した場合、その地点にある氷板は、水深が深い地点に比べて、氷板が河川上流へと遡上される可能性が高いという定性的知見を示している。引上げ式ローラーゲートや門柱レス油圧引上げ式ゲートは冬期でも開閉操作が可能であったが、氷板及び積雪の影響により全閉できなかったものもあった。しかし、開口部は僅かであることから、津波による堤内地への流水の逆流量は少ないと推察される。自動開閉ゲートについては、吐き口水路の水面（氷板面）高さや、地域の気象条件によって、ゲート下部が氷板に拘束される場合があることが分かった。こ

の場合、10～15度程度の開状態でゲートが固定されることから、その状態での内水氾濫の検証が必要と考えられる。

今回の調査で、多くの樋門で開閉動作が健全に実施できたが、一部に機器の不具合により稼働できなかった樋門や、不具合からの復旧に数時間を要する樋門が見られた。これらの原因は冬期間に起因するものかは明らかではないが、冬期間の機器点検の実施により、解決できる不具合もあると考えられる。

参考文献

- 1) 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, 土木学会論文集, No.768/II-68, pp.209-218, 2004.
- 2) 安田浩保: 不等流を遡上する波状性段波の水理実験とその数値計算, 土木学会応用力学論文集, 第10巻, 2007.
- 3) 中村祐介, 安田浩保, 清水康行: 流れの遡上に伴う波高減衰に着目した波状性段波の実験的研究, 土木学会地震工学論文集, 第28巻, 2007.
- 4) 廣瀬秀樹, 安田浩保, 清水康行: 複断面河道を遡上する津波に関する水理実験, 土木学会第48回北海道支部技術研究発表会報告, 2007.
- 5) 矢野雅昭, 吉川泰弘, 石谷隆始: 冬期間の河川における樋門の凍結状況について, 国土交通省, 北海道開発局技術研究発表会, 第53回, 2010.

1.3 A STUDY ON SUSTAINABLE TSUNAMI COUNTERMEASURES FOR DEVELOPING COUNTRIES (3)

Abstract : When a tsunami enters a river channel, it creates undular bore propagation and causes a sudden rise in the water level at the crests of waves. From a hydrological perspective, this can be seen as a phenomenon in which undular long waves surge up an unsteady flow field. However, while many studies have been conducted on undular bore propagation in still water, knowledge of such propagation in unsteady flow fields such as rivers remains very limited. In Hokkaido, river ice forms in river channels with lower winter temperatures, and a tsunami surging up a frozen river may cause river ice to move up the channel and subsequently affect river structures. This study involved numerical simulation of a hydraulic experiment with undular bore propagation surging up the unsteady flow field of a compound channel, a tsunami experiment in a case where river ice was present on the water surface and a field survey on the freezing conditions of river structures (sluice gates) in winter. The following three findings were obtained:

- 1) The tsunami experiment and numerical simulation revealed that determination of the maximum water level depends on the formation of a dispersive wave train, despite the occurrence of overflow from the low-water channel to the flood channel.
- 2) A tsunami experiment in which the incident wave was fixed and only the initial depth was changed provided qualitative evidence that the distance over which river ice moves up the channel is greater when the water is shallower.
- 3) The results of a field survey on the opening/closing action of sluice gates in winter indicated that many of the gate structures monitored in this study could be opened and closed properly, although the bottom parts of some of them were restrained by river ice.

Keywords: tsunami, river, undular bore propagation, frozen river, hydraulic experiment, sluice gate, field survey