

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：寒地河川チーム

研究担当者：船木淳悟、柿沼孝治、黒田保孝、
阿部孝章、佐藤好茂、渡邊尚宏
鳥谷部寿人

【要旨】

積雪寒冷地域である北海道では、冬期間に河川で結氷が生じる。そのような状態の河川に津波遡上が発生した場合、結氷が破壊され大量の氷板漂流物が発生する可能性がある。氷板漂流物の漂流や散乱により河川構造物等の損傷等被災が懸念されるが、そのような被災のメカニズムや発生条件等は十分に解明されておらず、有効な対策を施すことができないのが現状である。本報告では、氷板漂流物の漂流により、河川津波の外力がどのように変化するか水理実験により解明することとした。更に、氷板漂流物の挙動を追跡可能な数値解析モデルの開発検討を行い実スケールの現象に適用することで、開水時と結氷時での津波挙動の変化について検討を行った。

キーワード：結氷河川、河川津波、水理実験、数値解析

1. はじめに

積雪寒冷地においては、直轄河川においても冬期間は結氷で覆われることとなる。そのような状態の河川に津波が来襲した場合、津波は結氷を破壊するため大量の氷板漂流物が発生する。過去、実際に 2011 年東北地方太平洋沖地震津波発生時には、写真-1 のような大量の氷板漂流物が河道内で確認された。氷板群を伴う河川津波の挙動については未だ未解明な点が多く、構造物に対する衝撃力をどのように評価すべきか考え方が十分に確立されていないのが現状である。

そこで本研究では、積雪寒冷地における河川構造物の津波に対する防護手法を確立することを最終的な目



写真-1 新釧路川で撮影された滞留氷板の様子（河口から 4.5km 付近、2011/3/13 16:45 頃）

的として、河川構造物への影響評価に着眼した実験及び数値解析手法の検討を行った。本稿は平成 26 年度において、大規模河川津波による河川構造物に対する氷板漂流物の影響に関する水理実験、数値解析手法による実スケール樋門構造物への津波影響評価を行ったものを報告するものである。

2. 氷板混合津波が河川構造物に及ぼす波力特性に関する実験的検討

2011 年東北地方太平洋沖地震津波により、結氷期に最大クラスの津波が発生した際には、氷板漂流物と共に河川遡上することで橋梁等の損傷が予想され、漂流物が混合した流れを考慮する必要性が再認識されたところである。津波漂流物対策として、宇野ら¹⁾の水理実験では津波バリアを用いたコンテナ漂流物の捕捉効果や、木岡ら²⁾の水理実験により建物間のアイスジャム形成に関する知見が得られている。また、橋梁と津波の相互作用に関する研究も進められており、江面ら³⁾の数値解析による津波衝突時に落橋した橋桁へ作用した水平及び鉛直波圧の推定や、中村ら⁴⁾は津波力が桁の移動に与える影響を 3 次元数値計算モデルで解析している。氷が影響する流れとしては、河合ら⁵⁾による定着氷盤の氷縁部を変化させた際に氷盤の運動形態が変化することや、水理実験による浮氷に対する安定性の解析⁶⁾、押し波と引き波を再現可能な水理実験に

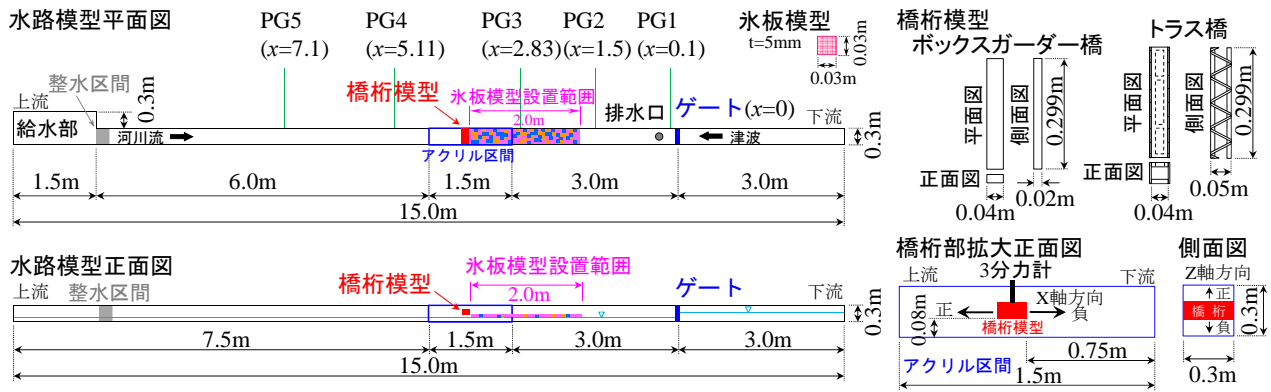


図-1 模型水路の諸元及び計測機器の設置状況

よりアイスジャム発生時の平面的挙動について検討した知見が存在する⁷⁾。

しかし、既往研究では流体力のみを考慮した津波対策や、結氷河川に関する個々の現象を対象にしたものが多いのが現状である。河川構造物周辺における津波遡上の検討としては、阿部ら⁸⁾の数値解析により樋門ゲート前面で氷板群を伴う津波の場合には波高や伝播速度の変化が確認されてはいるものの、結氷期の河川津波襲来時における漂流物としての氷板を考慮した流れ、すなわち氷板と津波が混合した波力が橋桁に与える影響の検討はなされていない。また、橋梁は災害時の重要な避難経路に指定されているケースもあり⁹⁾、冬期間における大規模津波の発生時に、橋梁や道路等のインフラが健全な状態で保たれていることは、避難経路の確保は元より、その後の復旧活動や生活基盤を確保する上でも重要である。

このため本研究では、津波遡上時における漂流氷板の縦断的並びに鉛直方向の挙動を再現可能な水理実験を行い、固体と液体が混合している流れを対象に、氷板混合津波が橋桁に及ぼす波力変化の特性を明らかにすることとした。

2.1 研究手法

図-1 に示した水路模型について、寒地土木研究所が所有する単管製簡易可傾斜水路を用いた。模型の諸元は、北海道の1級河川新釧路川等の河口から0.8km～1.5kmとなる河口域を想定し、模型縮尺は1/100～1/50程度とした。水路延長15.0m、水路幅0.3mの中央にアクリル部を設け、その中心には3分力計 LMC-3502A (日章電気(株))に接続した橋桁模型を設置した。この機器の設置については、ゲート開放時のノイズを検出しないよう実験水路から独立させた構造とした。なお、橋桁模型の両端は固定されておらず、3分力計で吊さ

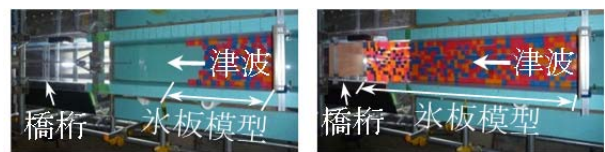


図-2 結氷カバー率(左:20%, 右:80%)

表-1 実験条件 (ボックスガーダー橋, トラス橋共に, 氷無し, 結氷カバー率 20%, 結氷カバー率 80%で実施)

河川流量 初期水深 貯水池高			河川流量 初期水深 貯水池高		
Q [L/s]	h [cm]	H [cm]	Q [L/s]	h [cm]	H [cm]
0.1	3	17	0.2	3	17
		21			21
	25	25			
	17	17			
6	6	21	6	6	21
		25			25
		25			25

れた状態となっている。

アクリル部では、図-1 に示したゲートを $x=0$ と表すと、 $x=3.75$ の位置となる橋桁部を中心に動画撮影を行い、津波遡上時の氷板混合状況や橋桁に与えるインパクト、氷板衝突時の局所的な流況変化を視覚的に捉えることとした。撮影に用いたカメラは、デジタル一眼レフカメラ(Canon 5D Mark2, 24mm 単焦点レンズ)である。河川流量は、給水部に設置したポンプにより与えており、給水時の水面振動を抑制するため、ヘチマロン(新光ナイロン(株))を用いた整水区間を設けている。氷板模型の材質は、河水の比重(0.91～0.92)に近いポリプロピレンを用いており、寸法については阿部ら(2012)の測定結果を参考に、辺長 $L=0.03\text{m}$ 、氷板厚 $t=5\text{mm}$ とした。図-2 に示した結氷カバー率は、氷板模型設置範囲 $A=2.0\text{m} \times 0.3\text{m}$ 内における氷板模型 $A_i=0.03\text{m} \times 0.03\text{m}$ が占める面積の割合を示し、20%は氷板模型を134枚、80%は氷板模型を534枚使用して、氷板模型が重ならないよう水面に浮かべて設置してい

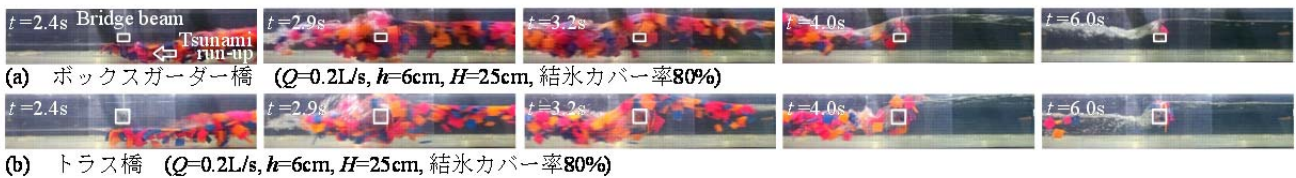


図-3 実験状況. 左から順に津波フロント(t=2.4s), 橋桁衝突から0.3s後(t=2.9s), 橋桁衝突から0.6s後(t=3.2s), 橋桁衝突後(t=4.0s, t=6.0s)の変化. (写真左上の数値はゲート開放時を0sとした時の経過を示す)

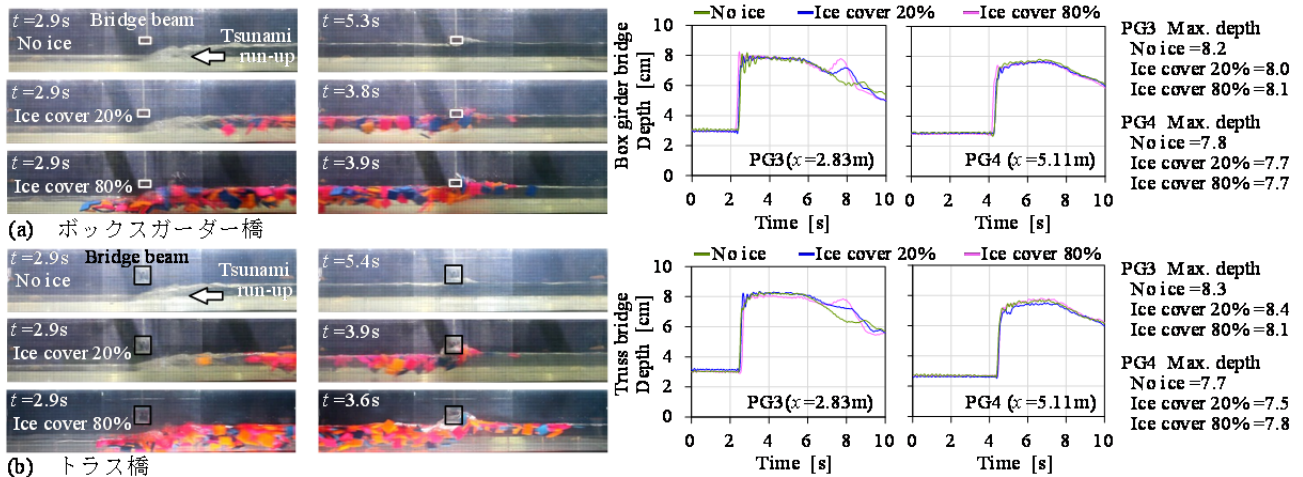


図-4 実験状況 (Q=0.1L/s, h=3cm, H=17cm, (a),(b)共に写真左は橋桁位置への津波フロント到達時,写真右は橋桁部の最大水位発生状況,写真左上の数値はゲート開放時を0sとした時の経過を示す. グラフの横軸はゲート開放時を0sとした時の経過を示す)

る。氷板模型の色は、津波フロント到達時や氷板と津波が混合した際、個々の氷板挙動を判別しやすいよう、ピンク、オレンジ、ブルーの3色をランダムに配置している。

津波の発生方法は、ダムブレイクによる造波とした。ゲートの設置については、開放時の震動が水路へ伝わらないようにするため、実験水路とは別に設けたゲート専用の独立した支柱へ設置することとした。水位計測は、図-1に示したPG1~PG5の地点で水路底面のピエゾに接続されている導水管に設置した圧力センサATM.1ST(スイス、STS社)を用いて、縦断的な計測を行った。

実験ケースについて、図-2に示した結氷カバー率20%、80%に加え、これらの評価基準となる氷無しの場合3ケースを、ボックスガダー橋並びにトラス橋毎に、河川流量や初期水深、貯水池高を変化させた表-1の実験条件で実施した。つまり、結氷3ケース×橋桁2ケース×河川流量2ケース×初期水深2ケース×津波3ケース=合計72ケースの実験を実施することで、津波遡上時の水深変化や異なる流況により発生する詳細な変化を網羅できるようにした。

氷板混合流が橋桁に及ぼす影響を把握するため、ピ

エゾ設置箇所には現れない橋桁模型位置での水位変化を確認できるように、アクリル部には橋桁の下流面(x=3.75)を中心とした1cm格子の目盛りを設置し、目視による水位の読み取りを可能とした。次に、図-1に示した橋桁へ接続した3分力計の値を用いて、津波遡上時の波力をボックスガダー橋とトラス橋で比較し、橋桁構造の違いによる波力分布特性を確認することとした。これらの結果を基に、実験映像から確認した局所的な水位変化とピエゾ設置箇所の水深、3分力計の値とを合わせて考察することを試みた。

2.2 結果及び考察

2.2.1 流況観察結果

発実験結果については、特徴的なケースのみに焦点を絞って述べることにする。図-3に示した実験時の状況について、ゲート開放後t=2.4sの状況は、津波により動き出した氷板が水中で回転するUnder turningや、先端の氷板に潜り込むHalf turning及びSliding⁵⁾が発生し、津波フロントに氷板が集中した楔形の侵入形態となっていた。その後、津波は橋桁へ衝突し(t=2.6s)、衝突から0.3s後となるt=2.9sでは氷板は橋桁の上下を遡上していたが、衝突から0.6s後のt=3.2sでは氷板は橋桁上

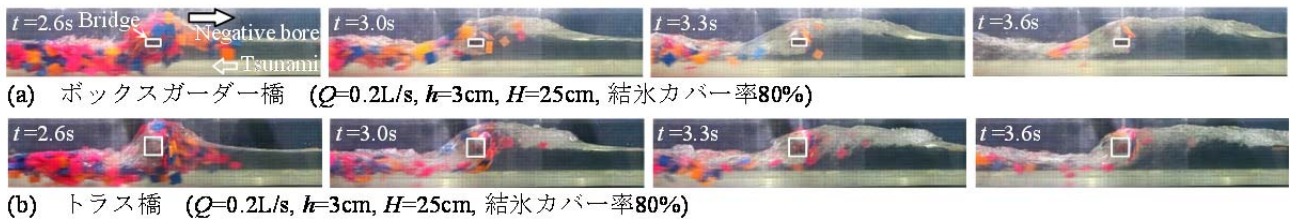


図-5 負の段波発生状況（写真左上の数値は、ゲート開放時を0sとした時の経過を示す）

部を遡上するものが大半を占めていた。t=4.0sには殆どの氷板が津波と共に遡上したが、t=6.0s経過後も橋桁に捕捉された氷板が確認された。この映像の内、t=3.2s, 4.0s, 6.0sの3時刻における(a),(b)の比較より、衝突直後からボックスガーダー橋に比ベトラス橋では水位が上昇している様子が確認できる。他のケースでは津波遡上時の状況として、初期水深 $h=6\text{cm}$ は Under turning の発生が確認されていたが、初期水深 $h=3\text{cm}$ は Half turning や Sliding が大半を占めていた。これは、氷板模型寸法が $L=3\text{cm}$ のため、初期水深 $h=3\text{cm}$ のケースでは水中での鉛直方向の挙動が制約されたことが影響し、差異が生じたと考えられた。

図-4は橋桁毎に結氷カバー率が変化した際の流況を示している。図-4右の水深には、ダムブレイクや排水口による水面変化の影響が少なく橋桁模型上下流部となる PG3 と PG4 の値を用いた。

津波の遡上形態について、図-4(a),(b)共に写真左は結氷カバー率20%に比べ80%は津波フロントに氷板が集中し、氷板と津波が混合した遡上形態となっていた。図-4(a),(b)共に写真右に示した橋桁への津波衝突時には、重畳した氷板の影響による局所的な水位上昇が発生し、結氷カバー率20%に比べ80%では、より顕著な影響が現れていた。特にトラス橋は、結氷カバー率20%の橋桁模型位置での水深約10cmに対し、結氷カバー率80%は約11cmとなっており、約1cmの水位差が生じていた。これは、結氷カバー率が高くなることにより捕捉される氷板枚数が増加し、滞留後にも後続から遡上してくる氷板が詰まり易くなり、流れを阻害することが影響したと考えられた。また、トラス橋では流下方向に対する断面が三角形を基本とした骨組み状の構造となっており、漂流物を捕捉し易いことが起因したと推測された。図-4右に示した橋桁上下流の水深は、橋桁構造の違いによる水深差が0.1~0.4cmであり、先程の橋桁部での値と比べると差は小さい。本ケースは遡上した津波が橋桁へ接触した際、局所的な水位上昇が生じたが、その後の滞留時間や水位上昇量は小さく、上下流に及ぼす影響が少ないためと考えられた。

以上の結果より、ピエゾ設置箇所の数と比べ橋桁部

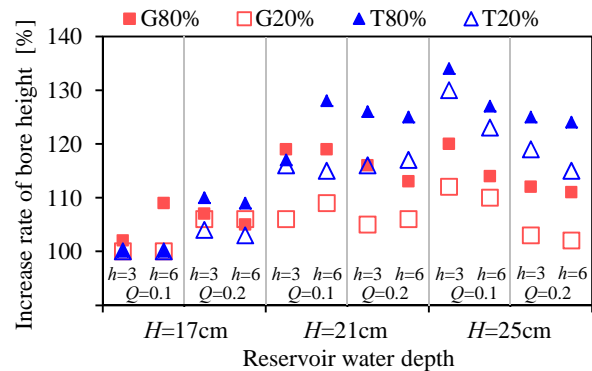


図-6 PG3における津波遡上時の最大波高に対する負の段波高上昇率（凡例のGはボックスガーダー橋、Tはトラス橋、%は結氷カバー率を示す）

での水位差は大きく、実スケールに換算すると0.5~1.0m程度であった。河口域での変化としては僅かなものかもしれないが、避難時等の橋梁通行中に橋桁を越流した津波により、生命の危険に晒される可能性は十分に存在する。

2.2.2 氷板混合津波による負の段波

図-5は津波が橋桁に衝突した反作用で河川流下方向へ逆流する波、すなわち負の段波が発生した状況を示している。水理条件は図-5(a),(b)共に同様ではあるが、ボックスガーダー橋と比較しトラス橋では波高が上昇しており、t=3.3s~3.6sでは伝播速度が速い状況が窺える。この要因として、津波衝突後の状況をみると、ボックスガーダー橋はt=2.6sの津波衝突後には一時的に氷板が重畳しているが、その後は比較的スムーズに遡上している様子が確認できる(t=3.0s~3.6s)。一方、トラス橋では、津波衝突後t=3.0sから氷板は滞留気味となっており、除々に氷板の遡上が確認されてはいるものの、t=3.6sでも氷板が複数捕捉されており、氷板による閉塞現象により流れの阻害が長期化したことが影響したと考えられた。

橋桁直下流部における負の段波は、橋桁へ衝突前の津波高と比較しボックスガーダー橋で約1.5倍の5cm、トラス橋では約1.6倍の6cm波高が上昇している。さらに負の段波は、前節の堰上げによる局所的な水位上昇

とは異なり、下流部の水深計測地点のPG3に達している。PG3の水深について、図-7(a)は初期水深 $h=3\text{cm}$ 、図-8(a)は初期水深 $h=6\text{cm}$ の状況を示している。図-7(a)の水深は、津波到達後となる約5.0s以降に負の段波による水位上昇が発生し、津波遡上時の最大水深との差は、ボックスガダー橋は結氷カバー率20%が1.1cm、80%が1.4cm、図-6に示した上昇率では20%、80%共に約1.1倍となっていた。トラス橋では結氷カバー率20%が2.5cm、80%が2.9cm上昇しており、上昇率では20%が約1.2倍、80%が約1.3倍となっていた。図-8(a)では、ボックスガダー橋は20%が0.2cm、80%が1.5cm、図-6に示した上昇率では20%が約1.0倍、80%が1.1倍となっていた。トラス橋では結氷カバー率20%が2.0cm、80%が3.3cmとなり、上昇率では20%、80%共に約1.2倍であった。結氷カバー率が増す程、波高が上昇する傾向にあり、これは前節の局所的な現象と同様に、橋桁部の閉塞が影響したと考えられた。他ケースの状況は、図-6に示した $h=3\text{cm}$ 、 $H=17\text{cm}$ は氷板が橋桁の下部を通過し、 $h=6\text{cm}$ 、 $H=25\text{cm}$ のボックスガダー橋では氷板が橋桁上部を通過し捕捉される枚数は少なく、水位差が僅かにしか現れないケースも確認された。

これらのことから、初期水深は低く波高が上昇する程、負の段波の上昇割合は高くなる傾向を確認することができた。津波侵入時よりも負の段波は波高が上昇することで、この影響が下流広域に伝播し、堤防越流等の被害範囲が拡大する恐れがある。

2.2.3 氷板混合波力の評価

3分力計の計測値について、図-7(b)に示したX軸の最大値は、ボックスガダー橋と比較しトラス橋の波力は、結氷カバー率20%は約0.8倍、結氷カバー率80%では約0.9倍となっていた。図-8(b)に示したG(80%)の8.5s付近に波力変化が生じているのは、橋桁上部に捕捉されていた氷板が、橋桁下流側面へ衝突しながら遡上したためである。X軸の最大値では、結氷カバー率20%、80%共にボックスガダー橋に比ベトラス橋の波力は最大値で約1.2倍となっていた。前節までの津波遡上時における橋桁部での氷板捕捉状況や側面形状等を加味すると、ボックスガダー橋に比ベトラス橋では河道断面の阻害となる受圧面積は広く氷板捕捉枚数が増加し、作用波力が大きくなると予想された。しかし、図-7(b)に示したトラス橋の最大値はボックスガダー橋を下回っていた。この要因として、今回使用した模型重量はボックスガダー橋が162.2g、トラス橋は644.3gと異なることが挙げられた。庄司ら(2006)は、津波作用が同程度であれば桁重量が大きい程、桁移動の被害は少ないことを示しており、氷板衝突時の作用波力に対

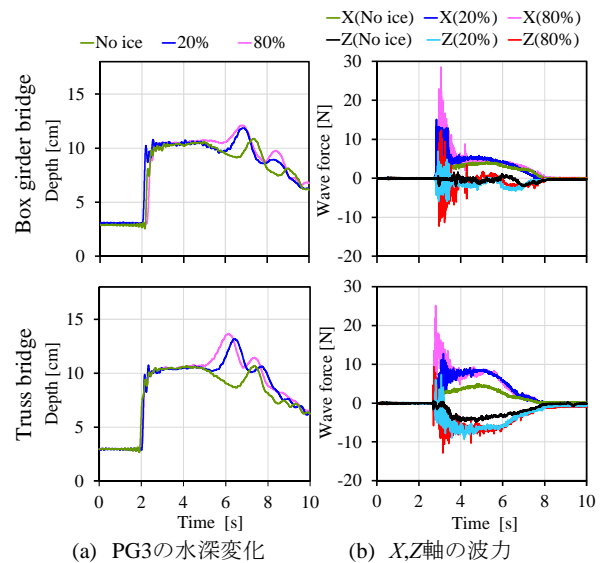


図-7 $Q=0.2\text{L/s}$, $h=3\text{cm}$, $H=25\text{cm}$ の計測結果(凡例の%は結氷カバー率を示す)

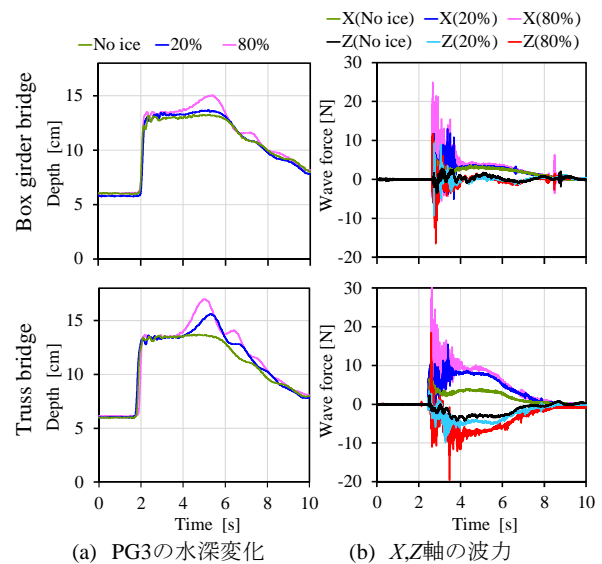


図-8 $Q=0.2\text{L/s}$, $h=6\text{cm}$, $H=25\text{cm}$ の計測結果(凡例の%は結氷カバー率を示す)

してトラス橋では重量が大きいことにより、変位が少なくなったと推測された。また、初期水深 $h=6\text{cm}$ に比べ $h=3\text{cm}$ の氷板輸送過程は、橋桁下部を遡上する氷板枚数が多くなっており、これらの影響は、水深により変化する可能性があるとして示唆された。

図-7(b)及び図-8(b)のX軸は、ゲート開放後 $t=3.0\text{s}$ から波力の収束となる $t=8.0\text{s}$ まで、ボックスガダー橋に比ベトラス橋は高い波力が継続しており、 $t=5.0\text{s}$ 付近の値と比較すると、図-7(b)は結氷カバー率20%、80%共に約1.6倍、図-8(b)は20%が約2.5倍、80%が約2.4倍となっていた。氷無しとの比較では、ボックスガダー橋は1.0~1.4倍、トラス橋は1.8~2.5倍であった。Z軸

の変化は、津波衝突直後に振幅が正負両方向に発生したが、その後はボックスガーター橋の値に大きな変化は無く、氷無しの場合と比較すると、トラス橋で図-7(b)は1.9~2.0倍、図-8(b)は約1.5~2.3倍の高い波力が継続していた。

流体力のみの場合と比べ氷板混合波力の影響は、特にトラス橋で顕著に現れており、高い波力の継続が長期化することで、累積波力が増加し滑動や落橋、損傷等が生じる危険性が示唆された。

2.3 まとめ

結氷期における津波遡上を再現するため、氷板が混合した流れを考慮した水理模型実験を行い、橋桁に及ぼす影響について得られた知見を以下に示す。

- 結氷カバー率が増すことで津波フロントに氷板が集中し、混合した遡上形態となることで、橋桁部では氷板の重畳による局所的な水位上昇が確認され、結氷カバー率が増すほど顕著に影響する。
- 氷板混合津波の衝突後、負の段波が確認され、本稿の条件においては津波遡上時の波高と比較し、橋桁直下流部で最大1.6倍の上昇が確認された。
- トラス橋は氷板混合流の影響として、氷板捕捉時の受圧面積は広く閉塞現象により流れの阻害が長期化し、最大波力及び累積波力の増加が懸念される。

本研究は、十分に解明されていなかった氷と水の混合流を再現したものであり、今後、津波遡上区間の橋梁設計に活用されることが期待できる。また、今回のような水位計測地点に現れない局所的な現象を解明することで、例えば水位観測所とは別の場所に存在する橋梁で起こりうる現象が把握可能となり、より現実に即した避難経路選定等の防災対策に繋がることを期待される。

3. 河川管理施設周辺における津波漂流物群の数値解析手法の検討

冬期の津波来襲を想定した場合に、河川管理施設の操作等を決定するには、氷板漂流物が引き起こす施設への衝突やジャミング、水位変動等の様々なシナリオを想定することが求められている¹⁰⁾。しかし、樋門水路のような局所的な領域に來襲する多数の漂流物群の挙動についてはほとんど明らかになっていない。そのため結氷時の河川津波来襲時の施設操作を考える上でどのような想定を備えるべきかについて考え方が十分に整理されていないのが現状である。

そこで本研究では、河川管理施設周辺において、氷

板を代表とする漂流物群がどのような挙動を示すかと、それに伴う水位変動に関する検討を行うこととした。それにあたり、激しい自由水面変形を伴う津波衝突のような現象を柔軟に取り扱うことが可能な数値解析手法に着目し、これを基本的な解析手法として実スケールを想定した漂流物群を伴う津波衝突の数値解析を実施した。特に津波の衝突形態や非結氷期との違いに注目して議論を進めることとした。

3.1 数値解析手法

まず、本研究で用いている数値解析手法について述べる。本研究で採用しているのは、はじめ Koshizuka ら¹¹⁾により提唱され、水工学や海岸工学分野で比較的適用実績の多い MPS (Moving Particle Semi-implicitあるいはSimulation)法である。一般的な MPS 法の解法については越塚による参考書¹²⁾が詳しいのでここでは割愛するが、支配方程式は非圧縮粘性流体の流れを記述する次の連続の式及び Navier-Stokes の運動方程式である。

$$\frac{D\rho}{Dt} = 0, \quad \frac{D\mathbf{u}}{Dt} = -\frac{1}{\rho}\nabla p + \nu\nabla^2\mathbf{u} + \mathbf{g} \quad (1)$$

ただし、 ρ は流体密度、 \mathbf{u} は速度、 p は圧力、 ν は動粘性係数、 \mathbf{g} は重力加速度である。粒子法は計算メッシュを用いずに流れの解析を行う方法である。河川工学的な諸問題の解析にあたっては(1)式を水深積分したいわゆる浅水流方程式を用い、格子法(粒子法との対概念と考えた場合の、メッシュに基づく流れの解析法)により1次元あるいは2次元の解析を行うことがほとんど一般的である。しかし、格子法によって例えば河川を遡上する段波が水面上の構造物と相互干渉する場合や、漂流物を伴う津波現象などに適用するためには、特段の工夫や処理を要することから解析には困難が伴う。本研究の主な対象である氷板群の解析も自由水面変動と漂流物の複雑挙動が伴うことが想定されるため、そうした解析対象への適用性及び柔軟性から、粒子法を採用することとした。標準の MPS 法においては、基礎式において微分演算子を含む圧力項・粘性項がそれぞれ次のように離散化される。

$$\langle \nabla p \rangle_i = \frac{D_s}{n_0} \sum_{j \neq i} \frac{p_j - \hat{p}_i}{r_{ij}^2} \mathbf{r}_{ij} w(r_{ij}) \quad (2)$$

$$\langle \nabla^2 \mathbf{u} \rangle_i = \frac{2D_s}{n_0 \lambda} \sum_{j \neq i} (\mathbf{u}_j - \mathbf{u}_i) w(r_{ij}) \quad (3)$$

ただし、 p_i は粒子 i の圧力、 \hat{p}_i は相互作用を計算する粒子が持つ圧力の最小値、 D_s は空間の次元数 (=2)、 n_0 は基準粒子数密度、 \mathbf{r}_{ij} は粒子 j の粒子 i に対する相対位置ベクトル (大きさは $r_{ij} = r$)、 $w(r)$ は重み関数、 λ は

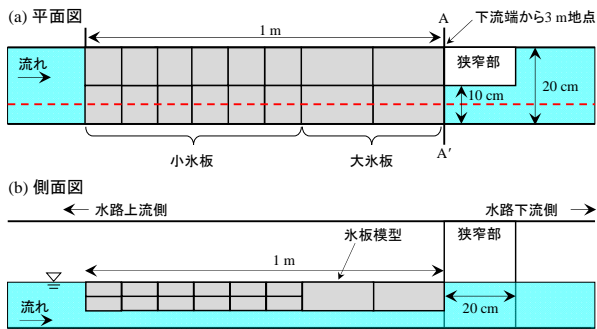


図-9 アイスジャム水理実験における狭窄部・氷板模型の位置関係の模式図

MPS 法のモデルパラメータであり、括弧 $(\cdot)_i$ は MPS 法の粒子間相互作用モデルで離散化することを示している。

さて、Koshizuka ら¹¹⁾による標準型の MPS 法は水工学の諸問題において複雑界面を伴う現象について多数適用されてきているが、内部圧力場の数値解に非物理的な振動を伴うという問題が指摘されてきた。こうした問題に対して、近年 MPS 法の解を安定化させるスキームに関する研究が盛んに行われるようになり、そうした圧力攪乱はかなりの程度まで抑制可能であることが示されてきた。本研究では、そうした安定化された MPS 法の一つである CMPS-HS-HL-ECS 法¹³⁾を基本的な解析手法として採用した。

3.2 結果と考察

3.2.1 アイスジャムに関する水理実験とその数値シミュレーション

吉川ら¹⁴⁾は春先の解氷期などに河道狭窄部で発生するアイスジャムに関する水理実験を実施した。アクリル製で延長 9 m、幅 0.2 m、勾配 1/500 の水路に、図-9のように下流端から 3 m の位置から 0.2 m 区間に幅 0.1 m の狭窄部を設置し、始め狭窄部上流に大小 2 種類の氷板群を設置した。氷は比重 0.9、寸法は大きいものが長さ 20 cm、幅 10 cm、厚さ 3 cm、小さいものが長さ 10 cm、幅 10 cm、厚さ 1.5 cm である。狭窄部上流端 (図-9 (a)の A-A' 断面) から上流 1 m 地点、下流 1 m 地点の 2 箇所まで水位計測を行った。実験開始後、上流流量を徐々に増加させると氷が流下しアイスジャムが発生することとなる。

本稿では、粒子法モデルによるこの実験の数値シミュレーションを実施した。解析にあたり可能な限り水理量は実験と同一とし、計算粒子径 $d_0 = 0.005 \text{ m}$ とした。図-9 (a) A-A' 断面の上流側 1.5 m 地点から下流

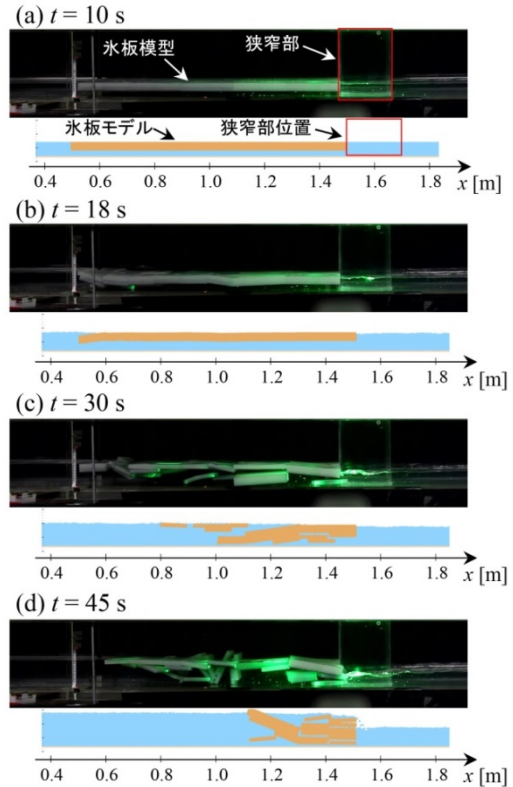


図-10 アイスジャム水理実験の様子 (各時刻上段) 及び解析結果との比較 (同下段)

側 1.5 m 地点までの計 3.0 m を解析対象とし、領域左端を $x = 0 \text{ m}$ 地点とした。鉛直 2 次元モデルで狭窄部の再現は困難であるため、図-9 (a)の赤破線の断面について解析を行うこととし、氷板下端が狭窄部に差し掛かった際に流下方向速度を 0 とし、狭窄部より下流に流下しないようにした。

図-10 に示したのは、アイスジャム水理実験の様子と解析結果との比較である。図-10 (a)は通水開始 10 秒後の様子で、氷板は整然と並んでいるが、(b)の時刻になると水理実験では氷板群の上流側で攪乱が生じ、上流側の氷板の一部が滞留氷板の下部に潜り込んでいる様子が確認された。解析結果においても、氷板群全体の配置は異なるものの、上流側氷板の流れによる攪乱が再現された。(c)の $t = 30 \text{ s}$ においては、水理実験では氷板群の配置は大きく乱れており流下が始まっているが、下段の解析結果でも氷板群は流下しながら狭窄部箇所で滞留が始まっている。(d) $t = 45 \text{ s}$ では狭窄部付近で氷板同士が折り重なりジャミングが生じる結果となった。解析結果においても狭窄部直上流で閉塞が発生した。すなわち、実験においてもシミュレーション結果においても狭窄部上流で水位上昇が生じており、これは狭窄部によるアイスジャムに起因するもの

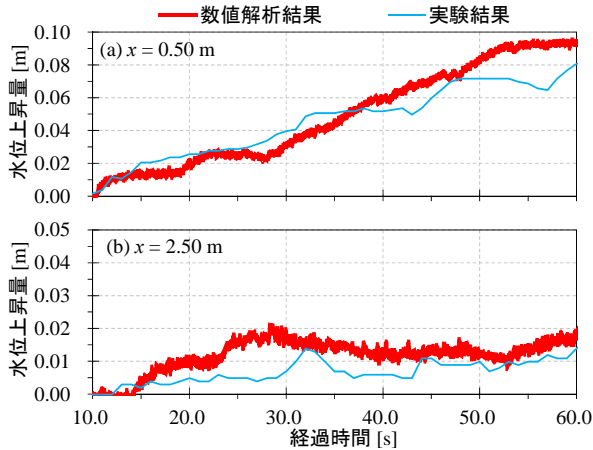


図-11 水位計測点における時系列の水位変動量

と考えられた。

図-11 に示したのは、水理実験による2箇所の水位変動の計測結果と解析上得られた水位変動量との比較を示したものである。図中の x は解析領域左端からの距離[m]に合わせて示している。上流側(a)について、実験値は上昇と下降を繰り返して全体として上昇する傾向であるが解析結果では上下変動はさほど明瞭でなかった。下流側(b)について、傾向は合致せずとも緩やかな変動傾向は概ね類似している。両地点とも解析を行った時間帯での上昇傾向及び上昇量は概ね類似しており、解析結果はある程度の妥当性を有していると考えられた。各氷板の挙動について、シミュレーションは完全に再現できていないわけではないが、再現性の向上のためには河床部との摩擦の考慮、氷板同士の摩擦を適切にモデル化することが必須であるものと考えられる。

3.2.2 樋門ゲート前面部での氷板群挙動の解析

前項までの検討において、安定化 MPS 法を用いた場合には、浮体群の挙動や水位変動傾向についてある程度妥当な結果が確認された。本項では、実際の治水施設の形状に基づく解析領域を作成し、氷板群を伴う河川津波の構造物周辺の挙動に関する解析を実施した。

写真-2に本稿の検討で想定に用いた河川管理施設である樋門の概況を示した。この樋門に関し、河床部、ゲート部、樋門操作台部の形状について再現を行った。なお、この樋門は形状の参考とするにとどめ、ここでは異なる寸法で数値解析用のモデル形状を作成し、検討を実施した。樋門形状に基づく解析領域を図-12 に示した。右側が河川管理施設を模した境界形状であり、施設操作台とゲート形状を再現した。左側に水深 H_0 の領域を設定してダムブレイクにより造波し、波と漂



写真-2 対象樋門の概況

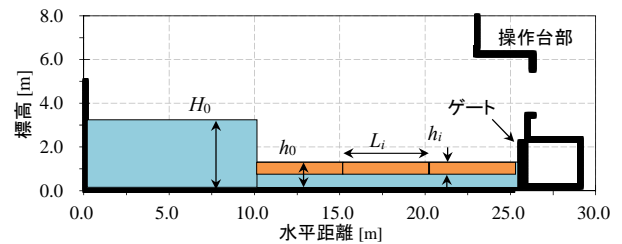


図-12 河川管理施設付近の2次元数値解析領域の概念図

流物群をゲート全閉状態の施設に衝突させた。ダム側の初期水深 $H_0 = 2, 3$ m、吐口水路初期水深 $h_0 = 0.3, 1$ m、氷板厚 $h_i = 0.1, 0.3$ m、水平方向の氷板延長 $L_i = 1, 3, 5$ m と変化させた数値実験を行い、氷板のサイズにより施設に接近する津波の伝播形態と氷板群の漂流過程の変化について検討を行った。氷板比重は前項同様 0.9 とした。

図-13 に一例として示したのは、 $H_0 = 3$ m、 $h_0 = 1$ m、 $h_i = 0.3$ m の場合に(a)氷板群の無い開水時の波の伝播の様子と、(b), (c), (d)は氷板の長さを変更した場合の氷板の漂流過程と戻り流れとなるまでの様子である。図中の黒い部分が構造物の一部、水色の部分が水粒子、茶色が氷板を構成する粒子群を表し、 t はダムブレイク後の経過時間を表す。(a)より氷板が存在しない場合は巻き波型の碎波がゲートに接近したが、(b)~(d)はいずれも波の形状は不明瞭となり、なおかつ氷板は群体としてゲート部に接近する結果となった。また(b)~(d)の比較から相対的に長い氷板ほど水平位置の移動が少なかった。これは氷板の自重による慣性の影響と考えられたが、言い換えれば小さい氷板ほど漂流物として波への追従性が良く、施設へ衝突する場合に大きな衝突速度が発生すると考えられた。

次に、氷板厚が薄い場合の挙動について検討を行うため、 $H_0 = 2$ m、 $h_0 = 0.3$ m、 $h_i = 0.1$ m の場合の結果を図-14 に示した。(b)の氷板長 $L_i = 1$ m のケースにおいて、段波形状に従って氷板群は巻き込まれながら施設に衝突す

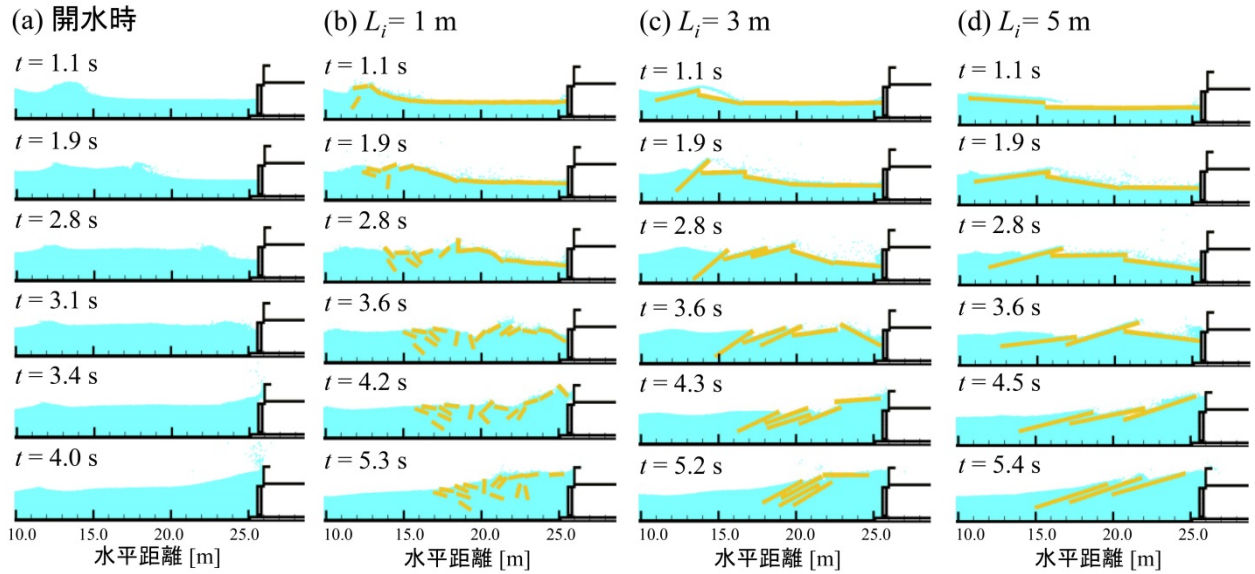


図-13 河川管理施設周辺における氷板漂流物群の解析結果のスナップショット ($H_0 = 3 \text{ m}$, $h_0 = 1 \text{ m}$, $h_i = 0.3 \text{ m}$)

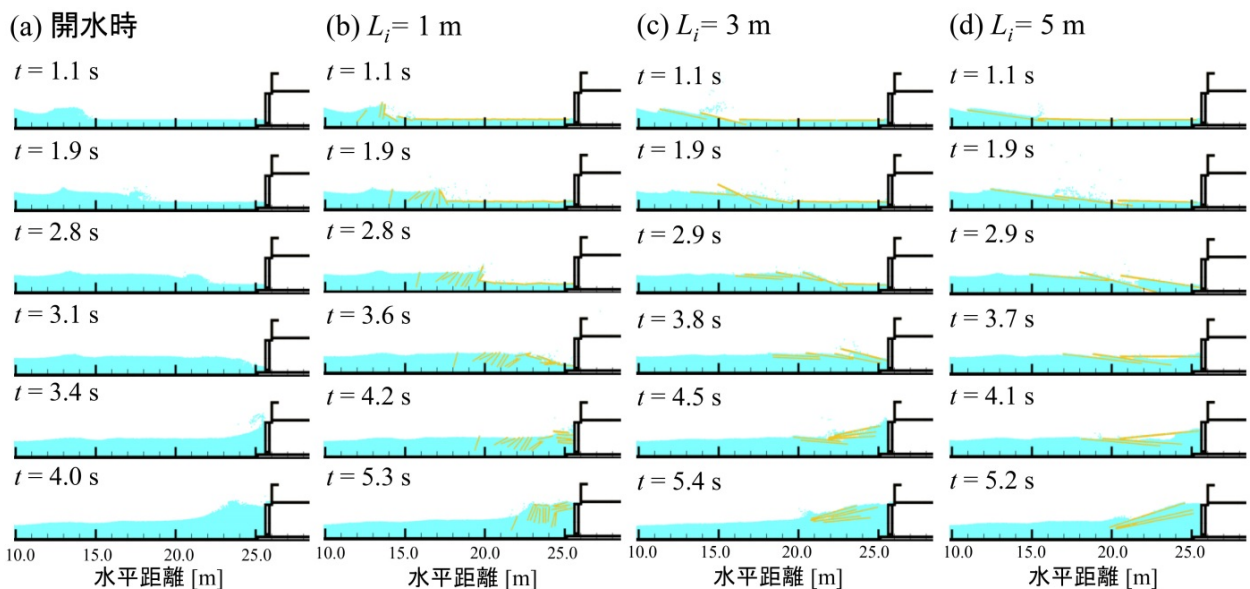


図-14 河川管理施設周辺における氷板漂流物群の解析結果のスナップショット ($H_0 = 2 \text{ m}$, $h_0 = 0.3 \text{ m}$, $h_i = 0.1 \text{ m}$)

る結果となった。また、氷板群は先頭部に集中しており、このような面的に衝突が発生する場合には施設への外力が増大する懸念がある。(b) $L_i = 1$ 、(c) $L_i = 3$ 、(d) $L_i = 5$ の場合に注目すると、いずれも薄い氷板群は折り重なった状態で施設に接近している。なお、本稿では紙面の都合上割愛するが、別途実施した解析により図-13と同様に $H_0 = 3 \text{ m}$, $h_0 = 1 \text{ m}$ とした条件でも、類似の現象が確認された。別報⁸⁾では、津波規模が小さい場合には氷板の横方向の変位が小さく、その場で上下運動を生じ津波が氷板の下部を伝播した数値解析結果を示した。そのような現象は写真-1の痕跡のように、折り重ならず、

その場に滞留するような氷板輸送を説明するものと考えられる。

一方で、薄く小さい氷板が多数折り重なるような図14 (b) $L_i = 1$ の場合は、波の衝突後引き波で水位が低下した結果、鶴川で確認されたような痕跡¹⁵⁾に繋がるものと推測された。なお、2011年の東北地方太平洋沖地震津波では河川に何度も津波遡上が発生したと推測されている。そのため、氷板の初期条件は本稿の解析のように整然と並んだものではなく、分散していた可能性があることを付記しておく。

図-13 ($H_0 = 3 \text{ m}$, $h_0 = 1 \text{ m}$, $h_i = 0.3 \text{ m}$) の条件におい

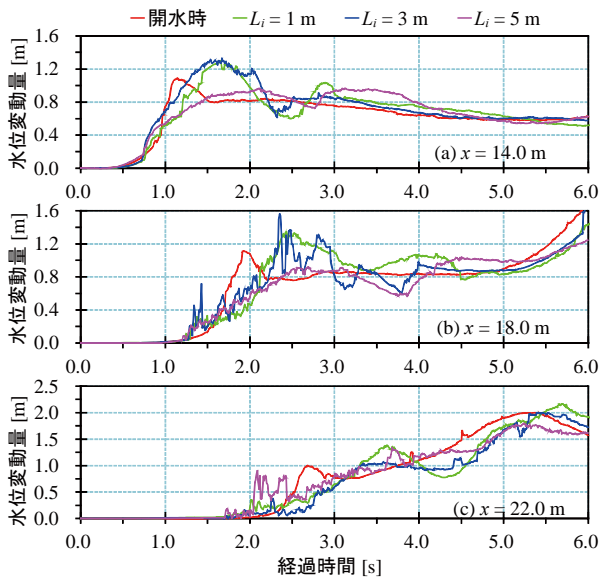


図-15 3地点における水位変動量の時系列変化

て、氷板の有無による伝播状況の違いを検討するために図-15に示したのは水平距離 $x = 14, 18, 22$ m 地点で算出された時系列の水位変動である。図-15(a)より氷板の無い場合は段波状の波形が確認できるが、 $L_i = 1, 3$ m の場合には約 0.2 m 高い波高となって接近している。これは前述の指摘の通り氷板の波への追従性が良いために図-13 (b)のような津波フロント内部での氷板の回転や重畳が発生し水位をやや上昇させたものと考えられた。 $L_i = 5$ m の場合は氷板の存在によりフロント波面勾配が他ケースに比較して緩やかになる効果が生じている。更に波高を低下させる効果も見られた。

図-15 (b)は 18 m 地点のものである。氷板サイズ 3 m のケースにおいて振動が見られるのは図-13のように水面から飛び出した氷板で水位を検出したためと考えられた。それを除けば概略的な傾向として開水時に比較するとフロントの波面勾配は小さくなっているが、本体部分 ($t = 2 \sim 3$ s) はやや波高が上がっている。

図-15 (c)は 22 m 地点の水位変動であるが、若干の波形変化を生じているものの概略的な傾向について見れば大きな変化は見られない。しかし、 $L_i = 1, 3$ m で二山型の波形となっているのは、図-13 (b) $t = 4.2$ s、図-13 (c) $t = 4.3$ s のように水面近傍の氷板の影響によるものと考えられた。このように浮遊する氷板群は遡上する津波波形・波高を変化させるだけでなく、津波侵入を受けると同時にフロント付近に集積し、特に強い相互作用を生じることがわかった。

3.3 まとめ

本研究では、2011 年東北地方太平洋沖地震津波発生時の北海道太平洋岸地域で痕跡として残された河道内氷板を元に、それらが治水施設に対してどのように接近するかについて数値解析的な検討を行った。モデル精度については事前に単純な数値実験及び水理実験のシミュレーションを通じて確認をした上で、より実地的な検討として、現地スケールを想定した樋門形状を再現し、氷板の諸元を変更した分析を行った。その結果、本稿で与えた津波条件と漂流氷板が厚い場合には、サイズ (L_i) の小さい氷板の時は津波に追従して施設に接近し、サイズが大きい時は追従性が低い予測結果が得られた。しかし、漂流氷板の厚さ (h_i) が小さい時はサイズによらず群体として施設に接近するという予測結果が得られた。

これらの類推から、結氷厚が小さい時、すなわち冬期の中でも結氷開始時期や解氷期においては、津波に追従して漂流氷板の接近が発生しやすくなると考えられる。しかし、現地調査結果¹⁵⁾から氷は実際にはサイズに分布を持つことが想定され、今後、サイズ分布をも考慮した水理実験や解析を実施し、治水施設等の設計や操作上で考慮すべき事項の整理を行うことが望ましいと考えられる。

4. まとめ

本報告では、結氷期の河川域で発生する可能性のある氷板群を伴う津波現象について、河川横断構造物との相互干渉に関する水理実験や数値解析手法の検討を行った。実験の結果、横断構造物周辺でアイスジャム現象が発生して水位の堰上げ効果が発生するだけでなく、津波波力そのものをも増大させる効果があることが推定された。また、氷板漂流物を伴う津波現象を再現可能な数値解析モデルを構築し、実際の直轄河川をフィールドとしてモデルの適用を行いその有効性を確認することができた。

今後は、本研究で得られた知見を元に実地的な構造物等に対する影響評価を進めていくと共に、津波外力を効果的に減勢する工法や構造物の保護方法の提案を行っていく予定である。

参考文献

- 1) 阿部孝章・吉川泰弘・平井康幸 (2012) : 北海道太平洋岸地域で発生した河川津波に伴う漂流氷板の寸法計測, 土木学会論文集, B2(海岸工学), Vol.68, No.2, pp. I_1436 - I_1440.
- 2) 阿部孝章・吉川泰弘・佐藤好茂・伊藤丹 (2014) : 氷板群を伴う河川津波が治水施設に及ぼす影響に関する研

- 究, 土木学会北海道支部論文報告集, 第 70 号, B-32.
- 3) 宇野勝哉・有川太郎 (2013): 津波バリアを用いたコンテナ漂流物捕捉効果に関する実験的研究, 土木学会論文集 B2(海岸工学), Vol.69, No.2, pp. I_921 - I_925.
 - 4) 江面嘉之・庄司学・平木雄 (2012): 2011 年東北地方太平洋沖地震津波で落橋した橋桁に対する津波波圧の推定, 土木学会論文集 B2(海岸工学), Vol.68, No.2, pp. I_411 - I_415.
 - 5) 河合孝治・原文宏・蒔田俊輔・正木智・佐伯浩 (1997): アイスジャムの発生条件に関する実験的研究, 第 13 回寒地技術シンポジウム, pp. 386 - 391.
 - 6) (独法)寒地土木研究所 (2011): 平成 23 年東北地方太平洋沖地震による北海道沿岸の港湾・漁港等被害調査速報, pp. 16 - 23.
 - 7) 木岡信治・森昌也・遠藤強・竹内貴弘・渡部靖憲 (2013): 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, No.2, pp. I_509 - I_514.
 - 8) 釧路市(2013): 釧路市津波避難計画, 平成 25 年 8 月 7 日, pp. 15-17.
 - 9) 国土技術政策総合研究所・(独法)土木研究所 (2011): 東北地方太平洋沖地震による橋梁の被害調査概要報告, 35p.
 - 10) 佐藤好茂・阿部孝章・吉川泰弘・伊藤丹 (2014): 河川津波による漂流氷板の閉塞現象に関する水理実験, 土木学会論文集 B1(水工学), Vol.70, No.4, pp. I_733 - I_738.
 - 11) 庄司学・森洋一郎 (2006): 桁橋の津波被害再現実験, 海岸工学論文集, 第 53 巻, pp. 801 - 805.
 - 12) 中村友昭・水谷法美・Xingyue REN (2013): 橋桁へ作用する津波力と桁の移動に与える津波力の影響に関する数値解析, 土木学会論文集 A1(構造・地震工学), Vol.69, No.4, pp. I_20 - I_30.
 - 13) Ambtman, D.K., P.Steffler and F.Hicks (2011): Analysis of the Stability of Floating Ice Blocks, Journal of Hydraulic Engineering, Vol.137, No.4, pp. 412 - 422.
 - 14) 北海道大学十勝沖地震調査委員会, 十勝沖地震調査報告 1952 年 3 月 4 日, 1954.
 - 15) 佐伯浩, 高橋良正, 三谷朋行, 津波による海水盤の陸上への遡上機構に関する実験的研究, 海岸工学論文集, 第 41 巻, pp.796-800, 1994.
 - 16) 高橋良平, 片山晃, 花田真州, 佐伯浩, 山下俊彦, 氷盤群の津波による陸上への遡上機構に関する実験的研究, 海岸工学論文集, 第 41 巻, pp.1236-1240, 1994.
 - 17) 木岡信治, 竹内貴弘, 蟹江俊仁, 海水の杭構造物への衝突破壊特性に関する実験的及び数値的検討, 土木学会論文集 A2(応用力学), Vol.69(2), pp.I_333-I_340, 2013.
 - 18) 木岡信治, 森昌也, 遠藤強, 竹内貴弘, 渡部靖憲, 海水群を伴った市街地への津波遡上特性に関する検討, 土木学会論文集 B2(海岸工学), Vol.70, No.2, pp. I_821-I_825, 2014.
 - 19) 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, Vol.693, pp.14-16, 2011
 - 20) 阿部孝章, 吉川泰弘, 矢野雅昭, 永多朋紀, 稲垣達弘, 桃枝英幸, 村上泰啓, 平井康幸, 2011 年東北地方太平洋沖地震により発生した津波の結氷河川における遡上状況及び氷板痕跡調査, 寒地土木研究所月報, Vol.705, pp.20-30, 2012.
 - 21) 吉川泰弘, 渡邊康玄, 阿部孝章, 大久保敦, 河川結氷時における河川津波の圧力伝搬速度と圧力減衰特性, 河川技術論文集, Vol.19, pp.375-380, 2013.
 - 22) 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, No.2, pp.I_851 -I_855, 2014.
 - 23) 国土交通省 北海道開発局, 雪氷期の津波沿岸防災対策の検討報告書, 37 p., 2013.
 - 24) Koshizuka, S. and Oka, Y., Moving-particle semi-implicit method for fragmentation of incompressible fluid, Nuclear Science and Engineering, Vol.123, No.3, pp.421-434, 1996.
 - 25) Gingold, R. A. and Monaghan, J. J., Smoothed particle hydrodynamics: theory and application to non-spherical stars, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, vol.181, pp.375-389, 1977.
 - 26) 越塚誠一, 粒子法, 計算力学レクチャーシリーズ 5, 丸善, 144 p., 2005.
 - 27) Khayyer, A. and Gotoh, H., Enhancement of stability and accuracy of the moving particle semi-implicit method, Journal of Computational Physics, Vol.230, No.8, pp. 3093-3118, 2011.
 - 28) Gotoh, H. and Sakai, T., Key issues in the particle method for computation of wave breaking, Coastal Engineering, Vol.53, pp.171-179, 2006.
 - 29) 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, No.2, pp.I_416- I_420, 2012.
 - 30) 阿部孝章, 吉川泰弘, 佐藤好茂, 伊藤丹, 氷板群を伴う河川津波が治水施設に及ぼす影響に関する研究, 土木学会北海道支部年次技術研究発表会論文報告集, B-32, 2014.
 - 31) 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, No.2, pp.I_1471-I_1475, 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, KAKINUMA Takaharu

KURODA Yasutaka, ABE Takaaki, SATO Yoshishige

WATANABE Masahiro, TOYABE Toshihito

Abstract: This report presents the progress of the research project for preventive and mitigative measures against tsunami hazards in ice-covered rivers. First, characteristics of tsunami wave force containing ice floes and the impact of it against bridge girders are investigated through hydraulic model tests reproducing behaviors of ice carried by tsunami run-up. Then a practical model for simulating interactions of tsunami with ice floes is developed and applied to the real-scale simulation of tsunami wave intrusion into a frozen sluice-ways.

Keywords: Ice-covered river, River tsunami, Hydraulic experiment, Numerical Analysis