

氷板群を伴う大規模河川津波により橋桁で発生する アイスジャミングに関する水理実験

阿部孝章¹・佐藤好茂²・吉川泰弘³・船木淳悟⁴

¹正会員 博(工) 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 北海道開発局 帯広河川事務所 (〒089-0536 北海道中川郡幕別町札内西町73-6)

³正会員 博(工) 北見工業大学 社会環境工学科 (〒090-8507 北見市公園町165)

⁴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)

1. はじめに

2004年スマトラ島沖地震及び2011年東北地方太平洋沖地震により発生した大規模な津波は、沿岸域において重大な被害をもたらした。一方で、これらの津波は河口域に設置された橋梁に対しても甚大な被害をもたらした。2011年東北地方太平洋沖地震津波によって、多数の橋梁流出や、漂流物の影響と考えられる橋梁の損傷が確認されている¹⁾。一方で、この地震津波は積雪寒冷地域である北海道沿岸域にも到達し²⁾、結氷で覆われていた河川を遡上して大量の氷板漂流物を発生させた³⁾。写真-1に示したのは北海道鵲川（むかわ）河口から2.6 km地点の鵲川大橋から下流を撮影した写真（2011年3月13日16時頃撮影）であり、大量の氷板漂流物が滞留ないし砂州上に堆積している。

河川津波による氷板漂流物の大量輸送はこれらの事例を通じて2011年以降新しく認識されたものであ

り、河川管理上あるいは河川内の構造物設計にあたり、津波外力増大等の懸念事項となっている。仮に、河川結氷期に最大クラス津波が来襲した場合には、橋梁等の損傷が予想されるため、橋梁等に対する津波外力評価にあたっては氷板漂流物を考慮する必要があることが認識されたところである。

津波漂流物に関する検討は海岸工学分野において多くの既往研究が存在し、漂流物の挙動から構造物の防護対策等に関して幅広い知見の蓄積がなされている。宇野ら⁴⁾は水理実験により津波バリアを用いたコンテナ漂流物の捕捉効果について検討行っている。橋梁と津波との相互作用に関する研究も数多く存在し、江面ら⁵⁾による落橋した橋桁に作用した水平及び鉛直波圧の数値解析的な推定や、中村ら⁶⁾による津波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た例、川崎ら⁷⁾による津波波力減勢工の効果評価例、田邊ら⁸⁾によるSPH法を用いた桁流出の3次元解析等の例が存在する。

河道域において漂流する氷板挙動の検討としては河合ら⁹⁾による定着氷盤の氷縁部を変化させた際に、流れに追従する氷盤の運動形態が変化することや、Ambtman *et al.*¹⁰⁾による浮遊氷板に対する安定性の解析等が存在する。近年の検討としては、木岡ら¹¹⁾は沿岸域における津波による流氷の遡上を対象とし、建物間で発生するアイスジャムとその堰上げ効果の分析を行っており、佐藤ら¹²⁾は押し波と引き波を連続的に再現可能な実験水路を用い、氷板群の平面的挙動について検討を行った。

上記の既往研究の多くにおいては、津波の流体力を評価ないし軽減する手法を検討しており、積雪寒冷地の検討においても、氷板群のもたらす現象面に



写真-1 河川津波により発生した多量の氷板漂流物

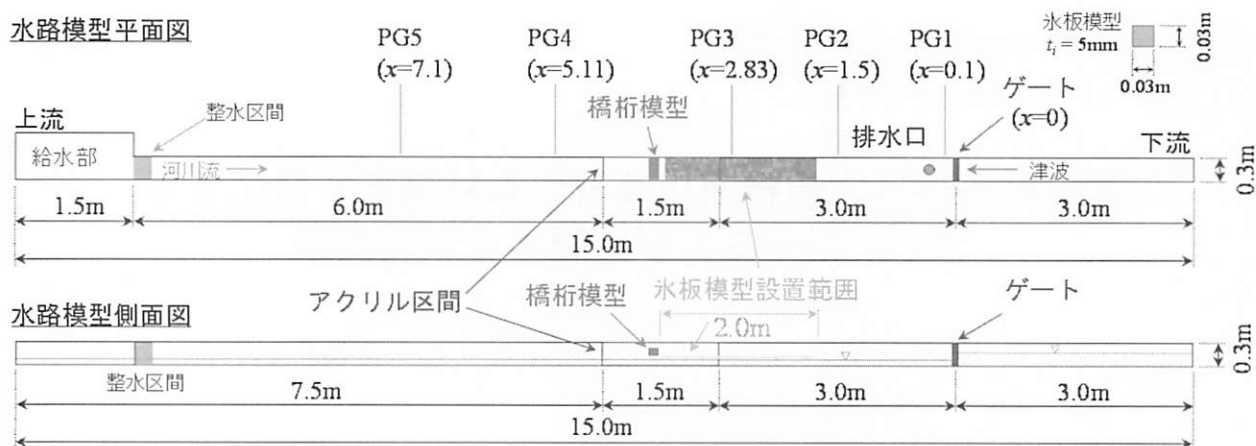


図-1 模型水路の諸元及び水位計測点との位置関係

着目した検討が多く、河川横断構造物である橋梁と氷の相互作用に関する視点はあまり無いのが現状である。北海道においても橋梁が災害時の重要な避難経路に指定されているケースがあり¹³⁾、冬期間における大規模津波の発生時に、橋梁や道路等の社会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。

そのため本研究では、結氷期の河川津波遡上により橋梁が氷板漂流物から受ける影響評価の考え方を確立することを目的とし、漂流氷板の遡上方向及び鉛直方向の挙動を分析するための水理実験を行った。氷板漂流物が重畳した場合の津波挙動、特に堰上げの効果や、橋桁部に及ぼす波力の変化について注目して議論を進めることとした。

2. 検討手法

(1) 実験水路と模型の概要

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0.8 km～1.5 km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15.0 m、水路幅0.3 mの中央にアクリル部を設け、その中心には図-2のように3分力計LMC-3502A-100N(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、橋桁模型の両端は側壁に固定されておらず、3分力計で吊された状態となっている。

図-1に示したゲート設置部を $x = 0$ と表すと、アクリル区間内で $x = 3.75$ 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

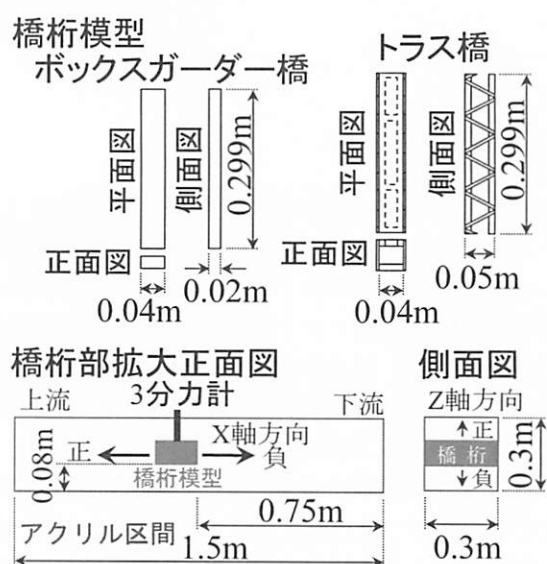


図-2 橋梁模型の諸元及び3分力計との接続方法

に与える波力、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 EOS 5D Mark-II, 24 mm単焦点レンズ使用)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置した。

津波の発生方法は、貯水池部からのダンプレックによる造波とした。ゲートの設置にあたっては、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(米国、STS Sensors社)を用いて縦断的に計測を行った。

氷板模型の材料は、河氷の比重(0.91～0.92)¹⁴⁾に近いポリプロピレンを用いた。模型寸法については著

結氷カバー率20%のケース



結氷カバー率80%のケース

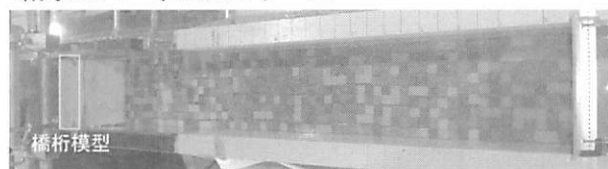


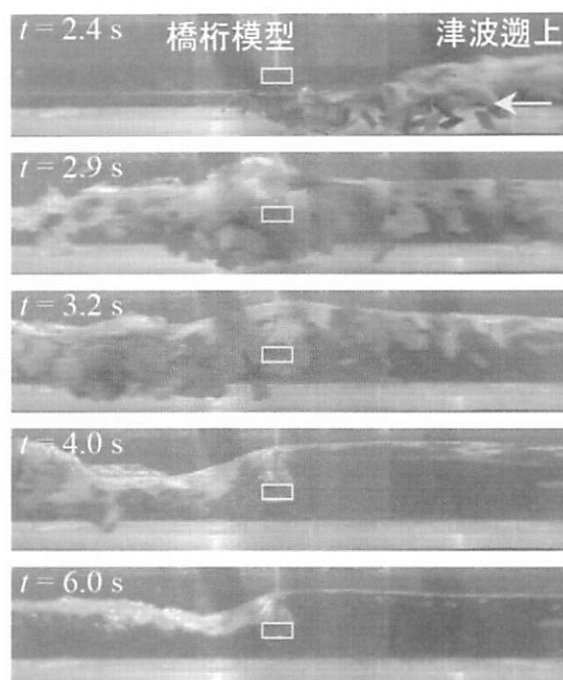
図-3 結氷カバー率別の氷板模型設置状況

者ら³⁾の測定結果を参考に、図-1右上に示すように辺長 $L = 0.03$ m, 氷板厚 $t_i = 5$ mmとした。氷板群の量による津波挙動の変化を検討するため、氷板模型設置範囲 $A = 2.0$ m $\times$ 0.3 m内における氷板模型 $A_i = 0.03$ m $\times$ 0.03 mが占める面積割合（以下、結氷カバー率と表記）を20%（氷板模型134枚設置）、80%（氷板模型534枚設置）に設定し、図-3の状況のように模型どうしが重ならないよう水面に浮かべて設置した。氷板模型は、津波フロント内部や津波が氷板を巻き込んだ際に個々の挙動を判別しやすいようにピンク、オレンジ、ブルーの3色に着色し、図-3のようにランダムに配置した。

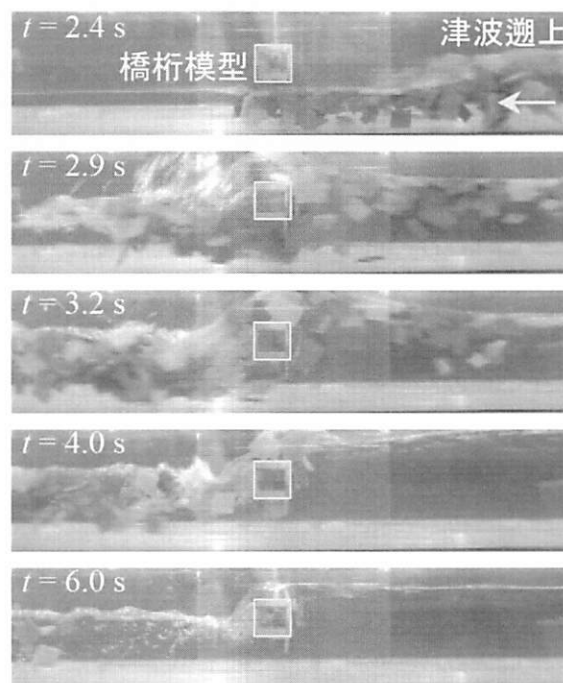
(2) 実験条件の設定

実験の水理条件については、水路上流からの給水量 Q を0.1 L/s, 0.2 L/s, 河道部の初期水深 h を3 cm, 6 cm, ダム部初期水深 H を17 cm, 25 cmとした。橋梁模型に関しては、ボックスガダー橋並びにトラス橋の2種類を設置し、橋桁のタイプが津波に及ぼす影響とその変化を検討することとした。氷板模型に関しては、図-3に示すように結氷量が大きく小に相当する結氷カバー率80%, 20%とした。更に氷板模型の有無による効果を検討するため、基準となる氷無しのケースの実験を行った。氷板群を伴う河川津波が橋桁に及ぼす影響を把握するため、橋桁に接続した3分力計の値を用いて、津波遡上時の波力をケース毎に比較し、橋桁構造の違いによる時間的な波力の作用状況を検討することとした。

なお、水位計及び3分力計の計測間隔は1/1000 sとしたが、これらの計測値には高周波のノイズが含まれていたため、検討にあたっては前後の0.05 s間（合計0.1 s）にわたる移動平均を取って分析に用いることとした。



(a) ボックスガダー橋



(b) トラス橋

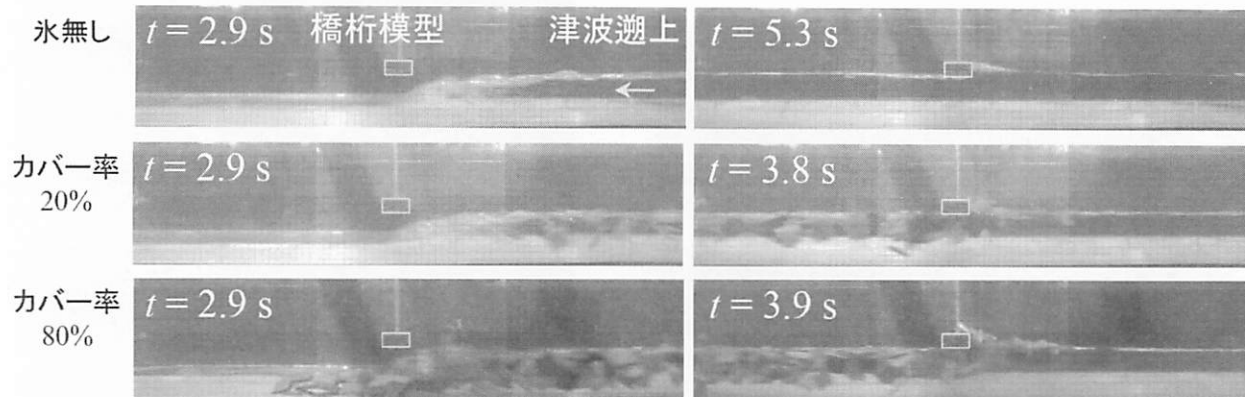
図-4 氷板群模型を伴う津波の流況の例；ボックスガダー橋とトラス橋との比較（ $Q = 0.2$ L/s, $h = 6$ cm, $H = 25$ cm）

3. 結果及び考察

(1) 氷板群を伴う津波衝突時の流況

実験結果については、特徴的なケースのみに焦点を絞り述べることとする。図-4は、大規模河川津波発生時を想定した $Q = 0.2$ L/s, $h = 6$ cm, $H = 25$ cmの

(a) ボックスガーダー橋 ($Q = 0.1 \text{ L/s}$, $h = 3 \text{ cm}$, $H = 17 \text{ cm}$)



(b) トラス橋 ($Q = 0.1 \text{ L/s}$, $h = 3 \text{ cm}$, $H = 17 \text{ cm}$)

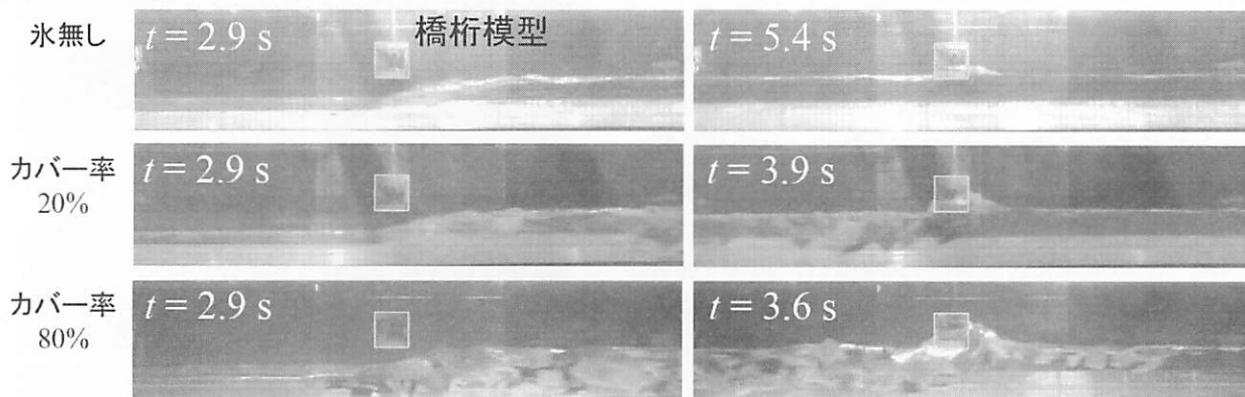


図-5 $Q = 0.1 \text{ L/s}$, $h = 3 \text{ cm}$, $H = 17 \text{ cm}$ のケースにおける橋桁模型・結氷カバー率毎の流況変化

場合で、ボックスガーダー橋とトラス橋の場合の流況を示したものである。ゲート開放時刻を $t = 0 \text{ s}$ とすると、 $t = 2.4 \text{ s}$ では、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 Sliding⁹⁾ が発生した。(a), (b) のいずれにおいても、津波フロント到達前 $t = 2.4 \text{ s}$ の段階で既に、橋桁模型下部において氷板の回転や移動が開始している。これは、氷板量が多いために、下流側の氷板から次々に上流側へ押し出される形で最上流部の氷板も動き始める様子が確認された。他の水理条件においても、氷板量が多い場合にこのような挙動が確認された。

この時の津波形状を見ると、フロント内部に氷板模型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、衝突後の $t = 2.9 \text{ s}$ では氷板は橋桁の上部と下部に分かれて遡上していたが、充分水位が上昇した後の $t = 3.2 \text{ s}$ では氷板群は橋桁上部を乗り越えて遡上するものが大半を占めていた。 $t = 4.0 \text{ s}$ には殆どの氷板が津波と共に遡上したが、 $t = 6.0 \text{ s}$ の時点でも後続流の作用を受けながら橋桁模型に付着する氷板が確認された。

この図の内、 $t = 3.2 \text{ s}$, 4.0 s , 6.0 s 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べトラス橋では下流側で水位が上昇している様子が確認できた。すなわち、同一の水理条件であっても、氷板群の衝突を受ける橋桁形状によっては、下流側での水位の堰上げ効果が変化する可能性があることが示唆された。

次に、橋桁が津波衝突を受ける中でも津波波高がやや小さい $H = 17 \text{ cm}$ のケースを対象として、氷板群模型のカバー率及び氷の無い開水時との比較を行った。図-5は橋桁タイプ毎に結氷カバー率を変化させた際の、衝突前後の流況を示している。津波の遡上形態について、図-5 (a), (b) 共に図左段は結氷カバー率20%に比べ80%は津波フロントに氷板が集中し、氷板と津波がより混合された遡上形態となっていた。図-5 (a), (b) 共に写真右に示した橋桁への津波衝突後では、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、より顕著な堰上げの影響が現れていた。特にトラス橋は、結氷カバー率20%の橋桁模型位置での、スナップショットから読み取られた水深約10cmに対し、結氷カ

バー率80%の場合は約11 cmとなっており、約1 cm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構造となっていることが原因になっていると推察された。

結氷河川の分野においてはこれまで様々なタイプのアイスジャム現象が分析・検討されてきたが、本研究の流況観察結果で確認された、上記のような津波による氷板の閉塞現象と水位の堰上げ現象は、積雪寒冷地かつ津波常襲地域である北海道において想定される新しいタイプのアイスジャムと言える。冬期における大規模河川津波の生起確立は決して高くはないと考えられるが、2011年東北地方太平洋沖地震津波で河道内漂流物が多く被害をもたらしたことを鑑みれば、今後留意すべき事項の一つと考えられる。

また、本稿では紙面の都合上割愛したが、他に実施されたケースからも、津波遡上時の状況として、初期水深 $h = 6$ cmの場合はUnder turningの発生が多く確認された。一方で初期水深 $h = 3$ cmではHalf turningやSlidingが大半を占めていた。これは、氷板模型寸法 $L = 3$ cmであるため、初期水深 $h = 3$ 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、このような差異が生じたと考えられた。

(2) 水深及び波力計測結果

次に、前節で示した氷板群の存在に伴う流況変化により、橋桁に対してどのような影響が定量的に現れるか検討を行った。

図-6に示したのは、 $Q = 0.2$ L/s, $h = 3$ cm, $H = 25$ cmのケースにおける水深及び波力の時系列変化である。薄いグレーの太線が氷無し（開水時）、濃いグレーの太線が結氷カバー率20%、黒実線が80%のケースにおける計測値を表す。(a)がPG3 ($x = 2.83$ m)地点の水深、(b), (c)はそれぞれ x , z 方向波力である（図-7, 8も同様）。PG3地点と橋桁模型の下流側面は0.92 m離れており、(b), (c)では(a)にやや遅れて波力作用が発生することとなる。水深の変化を見ると、はじめPG3地点に到達する津波フロントの波高は、氷板模型の存在率を変更した3条件において大きな差は見られない。言い換えれば、氷板群の存在は波形をほとんど変化させていない。これは、水路初期水深と氷板群の量に比較して、貯水池部から放出さ

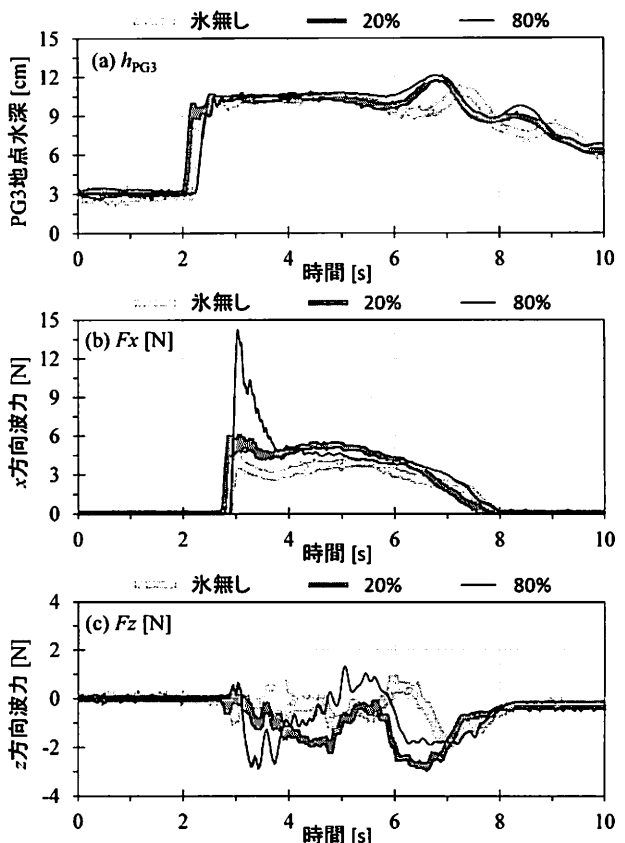


図-6 ボックスガーダー橋模型, $Q = 0.2$ L/s, $h = 3$ cm, $H = 25$ cmのケースにおける水深及び x , z 方向波力の計測結果

れる津波の体積の方が大きく、本ケースでは段波の流れはほとんど貯水池部の初期水深により決まっているためと考えられた。

次に3分力計の計測値について、図-6 (b)では氷板群模型の存在が波力に及ぼす影響が、特に80%のケースで明瞭に生じている。津波衝突後各ケース x 方向波力が立ち上がりを見せるが、氷無しと20%のケースでは3~6 N程度の緩やかな継続波力が生じているのに対し、80%のケースでは一時的に15 N近くの大きな波力が生じていることが分かる。これは、別途行った流況観察から、氷板模型が次々と橋桁模型に衝突し、波力と氷板模型の衝突力が継続して作用したためと考えられた。

一方で、(c)に示された z 方向波力は、氷無し、20%、80%のケースいずれも1~3 Nほどの増減を伴いながら推移する結果となった。波高が大きいため津波の流況としては大部分が橋桁模型の上部を通過していた。そのため波力の作用中は下向きの力が支配的であったが、氷無しと80%のケースでは1 sほど上向きの力（揚力）が発現している時間帯も見られたのが特徴的である。流れと氷板模型の状況によっては、必ずしも下向きの力のみが作用するわけで

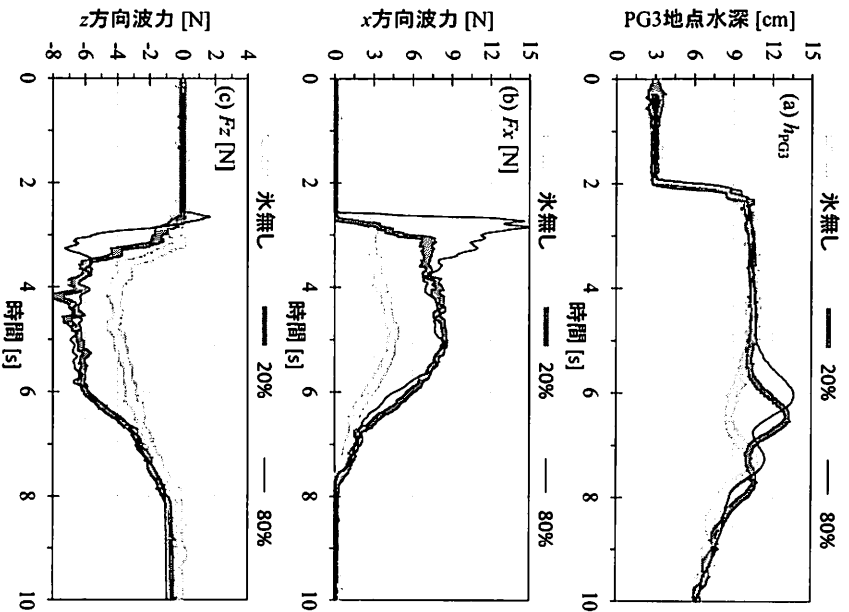


図-7 トラス橋模型, $Q = 0.2 \text{ L/s}$, $h = 3 \text{ cm}$, $H = 25 \text{ cm}$ のケースにおける水深及び v_x , z 方向波力の計測結果

はないということが分かる。

次に, 同じ水理条件でトラス橋模型を用いたケースの結果を示したのが図-7である。水深の変化(a)より段波のフロント波高は氷板模型の条件によって差はほとんど見られない。しかし, フロントの衝突後図-4で見られたように下流側で堰上げが発生し, それが下流へ反射波として伝播した結果, $t = 5 \text{ s}$ 以後で2~4 cmほどの水位上昇が発生する結果となった。反射波による水位上昇は, 氷無しより氷有りのケースで大きく, 氷の多い80%のケースでより顕著であった。(b)の F_x のグラフでは, 波力の立ち上がり時刻はほぼ同時であるものの, カバー率80%のケースでは氷無しのケースに比較して, ピーク波力が5倍ほどまで上昇し, 継続波力においても2倍ほどの波力となった。(c)の F_z のグラフからは, 橋桁模型が下向きの作用力を受けたことを読み取ることができる。下向きの力は氷無しのケースでも発生するが, 氷板模型が伴うことにより, より大きな下向きの力を受けることが分かった。図-6のボックスカーダークのケースに比較すると F_z の作用状況は大きく異なり, 作用開始直後から津波の通過後まで, ほぼ一貫して下向きの作用力となっている。但し, カバー

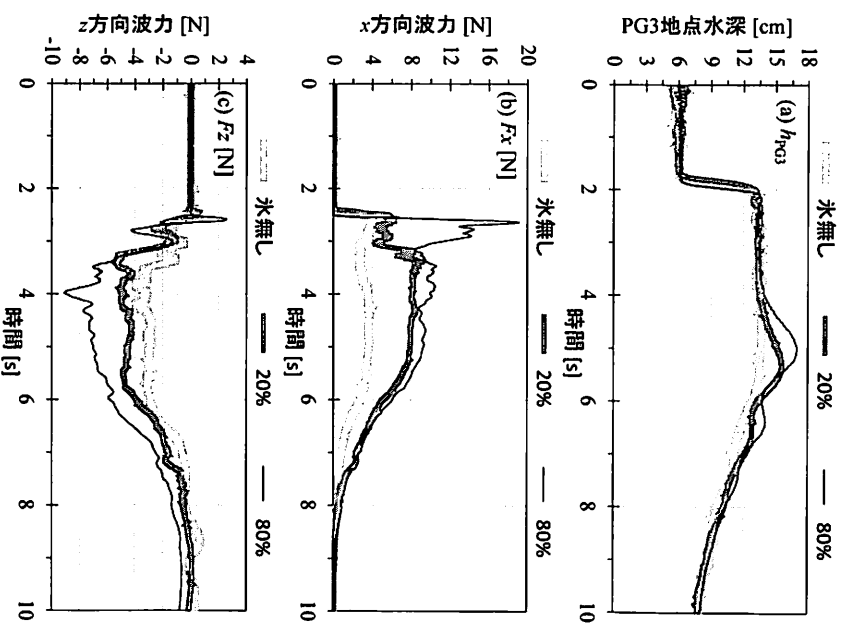


図-8 トラス橋模型, $Q = 0.2 \text{ L/s}$, $h = 6 \text{ cm}$, $H = 25 \text{ cm}$ のケースにおける水深及び v_x , z 方向波力の計測結果

率80%のケースにおいて, $t = 2.7 \text{ s}$ 付近で上向きの作用力が発生していた。しかしこれは僅かな時間帯のみで, カバー率20%以下のケースと同様に, 津波作用中は下向きの波力が支配的であった。

次に図-7のトラス橋を用いた条件に対して, 水路内初期水深が $h = 6 \text{ cm}$ と大きい場合の結果を図-8に示した。(a)の水深変化を見るとPG3地点への到達時刻や到達波高に大きな違いは見られない。氷板模型が存在するケースにおいて, アイスジャミングの影響により橋桁部で反射波が発生し, 下流側PG3地点の水深を上昇させる点では図-7と共通していた。しかし, 氷無しのケースでは, 図-7の場合と異なり反射波による水位上昇が明瞭ではなく, 緩やかに水深は低下した。

(b)の F_x のグラフでは, 図-7の場合と傾向は類似しており, 氷板模型の存在により継続波力の上昇効果が確認され, 氷板量が多い場合は衝突直後のピーク波力の増大が見られた。(c)の F_z のグラフを見ると, 氷板模型が存在することにより, 下向きの作用力が増加することが確認された。また, $h = 3 \text{ cm}$ のケースではカバー率が変化しても F_z の値は同程度で推移したが, $h = 6 \text{ cm}$ のケースでは80%の方が下向きの

作用力が大きい結果となった。

以上の結果のうち、橋梁の設計法に関わる部分をまとめると、概ね以下のような傾向が確認できたと言える。一つ目には、氷板群模型が存在する場合、津波衝突後のアイスジャミングによって橋桁部で発生する反射波が顕著となり、開水時に比較して水位を上昇させる効果が増す。二つ目には、氷板群模型が多いケースでは、津波フロント衝突時の水平方向波力が顕著に増大し、累積波力の影響により滑動や落橋等を誘発する可能性が懸念される。三つ目には、氷板群模型の存在や水理条件によっては、橋桁に揚力が作用する場合があるという点である。勿論、上記の傾向は本研究で行った限られた水路条件及び設定において確認できたものであり、今後、河道条件や2011年東北地方太平洋沖地震津波等の実現象との比較を通じて検証を重ねていくべきであるのは言うまでもない。

4. まとめ及び今後の課題

本研究では、2011年東北地方太平洋沖地震津波発生時に東北地方で発生した漂流物による落橋の事案を受け、寒冷地で発生しうる氷板漂流物の大量輸送とそれが橋桁に及ぼす影響について実験的な検討を行った。河川結氷時の津波遡上を模擬するため、氷板模型を用いた水理模型実験を行い、代表的なボックスガダー橋とトラス橋模型を用いて流況観察からアイスジャミングの様子や波力特性の変化について検討を行った。

その結果、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、橋桁部では氷板の付着と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その影響は顕著に現れることが分かった。ボックスガダー橋に比較すると、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が大きくなる。そのためアイスジャミング現象による流れの障害が長期化し、最大波力及び累積波力の増加が懸念される。

但し、本稿では十分に議論することができなかったが、氷板は本来、脆性破壊を伴う物体であり⁽¹⁾、より実現象に即した影響評価のためには氷板の破壊挙動がアイスジャミングに与える影響を考慮することが望ましい。また、実験条件において氷板サイズを1通りの3 cm四方としたが、氷のサイズは分布を呈することが複数研究で明らかにされている^{3), 11)}。サイズ分布はアイスジャミングの過程を大きく変化させる可能性があるため、氷板サイズに分布を持た

せた追加実験を行うことが望ましい。

今後こうした氷、津波、横断構造物の相互作用に関する知見が蓄積されていけば、津波遡上区間に設置された橋梁の設計に活用されるだけでなく、水位上昇に伴う堤防越流範囲の推定や、寒冷地域の実態に即した避難経路選定等の自治体等の防災対策に繋がることことが期待できる。

謝辞：本研究における水路実験の条件設定にあたり、北海道大学渡部靖憲准教授にご助言を頂いた。また本研究の実施にあたり一部JSPS科研費 24360197、26870023の助成を受けた。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 阿国土技術政策総合研究所，独立行政法人土木研究所：東北地方太平洋沖地震による橋梁の被災調査概要報告，35 p.，URL: <http://www.nilim.go.jp/lab/bbg/saiga/i/h23tohoku/110312kyouryou.pdf>，2011（参照日2015年6月22日）。
- 2) 寒地土木研究所 寒冷沿岸域チーム，水産土木チーム，道南・道央・道東支所：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，24 p.，URL: <http://cecore.ceri.go.jp/pdf/H23higaityousa01.pdf>，2011（参照日2015年6月22日）。
- 3) 阿部孝章，吉川泰弘，平井康幸：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_1440，2012。
- 4) 宇野勝哉，有川太郎：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_925，2013。
- 5) 江面嘉之，庄司学，平木雄：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_415，2012。
- 6) 中村友昭，水谷法美，Ren, X.，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_30，2013。
- 7) 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，土木学会論文集A1(構造・地震工学)，Vol.70，No.1，129-136，2014。
- 8) 田邊将一，浅井光輝，宮川欣也，一色正晴：SPH法による流体剛体連成解析とその橋梁流失被害予測への応用，土木学会論文集A2(応用力学)，Vol.70，No.2，I_329-I_338，2014。

- 9) 河合孝治, 原文宏, 蒔田俊輔, 正木智, 佐伯浩: アイスジャムの発生条件に関する実験的研究, 寒地技術シンポジウム論文集, Vol.13, pp. 386 - 391, 1997.
- 10) Ambtman, K. D., Steffler, P. M. and Hicks, F. E.: Analysis of the Stability of Floating Ice Blocks, Journal of Hydraulic Engineering, Vol.137, No.4, pp.412-422, 2011.
- 11) 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, No.2, pp.I_509-I_514, 2013.
- 12) 佐藤好茂, 阿部孝章, 吉川泰弘, 伊藤丹: 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, 2014.
- 13) 釧路市: 釧路市津波避難計画 平成25年8月7日, 30 p., URL: <http://www.city.kushiro.lg.jp/common/000047142.pdf>, 2013 (参照日2015年6月22日).
- 14) 吉川泰弘, 渡邊康玄, 早川博, 平井康幸: 結氷河川における解氷現象と実用的な氷板厚計算式の開発, 土木学会論文集B1(水工学), Vol.68, No.1, pp.21-34, 2014.