

# 氷板群を伴う大規模河川津波が橋桁に及ぼす 波力の変動特性に関する実験的検討

阿部 孝章<sup>1</sup>・佐藤 好茂<sup>2</sup>・吉川 泰弘<sup>3</sup>・伊津野 和行<sup>4</sup>・船木 淳悟<sup>5</sup>

<sup>1</sup>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丁目)  
E-mail: abe-t@ceri.go.jp

<sup>2</sup>正会員 国土交通省 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)

<sup>3</sup>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)

<sup>4</sup>フェロー会員 博(工) 立命館大学理工学部 都市システム工学科 (〒525-8577 滋賀県草津市野路東1-1-1)

<sup>5</sup>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丁目)

積雪寒冷地域の河口域において、大規模津波の発生時は河川結氷の破壊、氷板の大量輸送と、これらに付随する河川構造物との衝突が発生する場合がある。本研究では、水理実験により氷板群の輸送を伴う大規模津波を再現し、氷板群が橋桁に及ぼす波力の特性を明らかにした。その結果、河川結氷の存在しない開水時と比較すると、氷板群が存在することで橋桁周辺で閉塞現象が発生し津波の堰上げが発生することが分かり、津波が減衰するまで大きな波力が発生することが確認された。また、波力の時間変動は氷板の量に依存し、氷板量が多い時には急激で、少ない時には緩やかな波力の増加が見られた。氷板の存在により抗力係数は1.5~2倍程度まで増加し、橋桁の支承は波力の増加分に耐え得る設計とする必要性が示唆された。

**Key Words:** river tsunami, ice floe, bridge girder, wave force, drag coefficient

## 1. はじめに

2011年の東北地方太平洋沖地震津波を契機として、河川域においても構造物の設計指針に津波外力を考慮することが明記されるなど、各構造物が所望の性能を發揮できるように、次なる津波災害への防御対策が全国的に進められてきている。そのような中、2011年東北地方太平洋沖地震津波がもたらした様々な被災事象のうち、大規模な河川津波に伴う橋梁等の流出について、将来的にどのような対策を施すべきかの議論が活発に交わされている。

2004年スマトラ島沖地震等過去の津波災害においても、社会・交通インフラの重要な要素をなす橋梁構造物に甚大な被害がもたらされた。そのため、かねてから津波による橋梁流出に関する検討がなされてきたが<sup>1)2)</sup>、2011年3月に国内で発生した多数の落橋・流出を受け、より詳細に、被災要因に基づいた検討がなされてきている。最近の研究事例としては、橋梁に接触する津波の波形形状に基づく波力の検討<sup>3)</sup>、橋桁に作用する継続波力の検討<sup>4)5)</sup>、津波作用下の波力に関する解析的検討<sup>6)</sup>等が存在する。これらの報告の一部においては、落橋に対して津波に輸送される漂流物の衝突が大きな影響を及ぼすことが着目されている。

一方で、北海道のような積雪寒冷地域においては、冬期間(概ね12~4月)に水面は結氷で覆われ、これが

津波漂流物の発生源となり得る。このような河川に津波が遡上すると写真-1のように結氷の破壊と大量の氷板輸送が生じる可能性があり、漂流物となった氷が横断構造物付近で閉塞を起こす所謂アイスジャム現象が発生し、落橋を助長する懸念がある。

しかしながら河川津波と漂流氷板群、あるいは氷板群と横断構造物の相互作用は未解明な点が多いのが現状である。一般の漂流物形状の衝突力を推定する手法の提案のために体系的な考察を加えた例<sup>7)</sup>が存在するが、これは単一漂流物を対象としたものであり、大量発生する氷板群に適用することは難しい。漂流物の一つとして海水(流水)が構造物へ及ぼす衝撃力<sup>8)</sup>や、海水が



写真-1 津波遡上後に北海道鶴川(むかわ)河口から2.2 km 付近で撮影された氷板痕跡。2011/3/13, 16:00頃撮影。

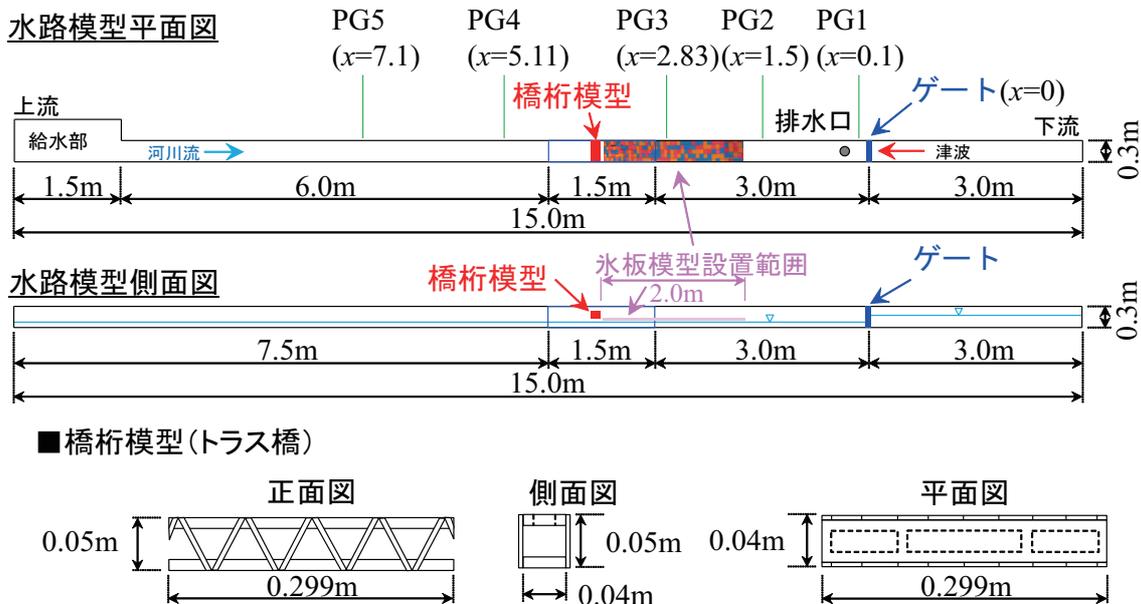


図-1 使用した水路諸元と水位計測位置，及び使用した橋桁模型の正面図・側面図・平面図

市街地に押し寄せる場合の知見<sup>9)</sup>，河道内上下流に揺動する氷板群によるアイスジャムの検討<sup>10)</sup>等，既往知見が幾らか存在するものの，河道内の氷板漂流物が津波でどのように輸送され，構造物と衝突を起こすかについては未だ十分に明らかにされていない．そこで本研究では，河道内の漂流氷板群が起こすアイスジャム現象に焦点を当て，橋桁と氷板模型を用いた水理実験によりその作用力特性，特に時間的な変動特性を解明することを目的とした．

## 2. 検討手法

水理実験には寒地土木研究所が所有する図-1に示される単管製簡易可傾斜水路を使用した．延長 15 m，水路幅 30 cm であり，上流の給水部に整水機構，下部部にダムブレイク型の造波装置，排水口を設置しており，不等流場を遡上する河川津波を模擬することが可能である．模型縮尺としては，北海道の 1 級河川である新釧路川の河口域で河口から概ね 1.5 km までを想定し，約 1/100 とした．河道部の初期水深  $h_0$  を 3 cm，6 cm，ダム部の初期水深  $H_0$  を 17 cm，21 cm，25 cm とし，上流からの流量は北海道内の冬期河川流量を参考に 0.2 L/s とした．給水部を除く水路の中央部に延長 1.5 m のアクリル区間を設け，側方から動画撮影を行えるようにした．この中央部には，河床部から高さ 8 cm の位置にトラスの橋桁模型を設置した．水路は勾配約 1/2000 であり，ダムブレイクによる造波前に橋桁模型設置点の中央部において目標水深  $h_0$  となるように排水口からの流出量の調整を行った．

河道内の滞留氷板を模擬するため，橋梁模型の直下

### 氷板量小のケース



### 氷板量大のケース



図-2 水路内における氷板模型の設置状況

流部 2 m 区間に氷板群模型を設置した．氷板模型は縦横 3 cm の正方形，厚さ 5 mm である．氷板群模型については河川結氷の比重を想定するために， $-10^{\circ}\text{C}$  における氷の密度 0.917<sup>11)</sup> を考慮することとし，比重約 0.9 のポリプロピレン板から製作した．尚，木岡<sup>9)</sup>が指摘するように，ポリプロピレン板の物性値として密度及び摩擦係数は氷と同程度であるが厳密には破壊強度や弾性率が相似ではないため，この点に留意しつつ衝撃力を評価する必要がある．また実際の氷では付着力が発生することが想定され松山下<sup>12)</sup>により現地氷の付着力が計測されているが，ポリプロピレン製の模型ではそのような再現が困難であるため，流れと板状模型の相互作用によるジャミングの現象に注目して議論を進めることとした．

氷板群模型の設置にあたっては，図-2のように設置区間 2 m の領域に対して氷板群面積が概ね 20%，80% を占めるようにそれぞれ 134 枚，534 枚設置した．本稿



図-3 ダム部初期水深  $H_0 = 25$  cm, 河道部初期水深  $h_0 = 6$  cm のケースで側方で撮影した実験の様子 (左から順に津波衝突直前, 衝突直後, 遡上津波が橋桁模型に作用している様子, その状態における橋梁周辺の氷板群付着状況)。

では順に「氷板量小」, 「氷板量大」と表記することとする。比較のため, 氷板群無しの実験も実施しており, これは「開水時」と表記することとする。上記の氷板設置方法は, 松川ら<sup>13)</sup>による北海道浦幌十勝(うらほるとかち)川の津波観測結果において, 水面を覆うように氷板が滞留し, 複数回の河川津波遡上中に遡上・流下を繰り返した状況を参考としている。

水路内の縦断的な水位変化を計測するため図-1の5地点にピエゾを設置し(PG1~PG5), 圧力センサATM.1ST(米国, STS Sensors社)に接続し水位計測を行った。また橋桁模型に3分力計LMC-3502A(日章電気(株))を接続して津波衝突時の衝突力を計測した。尚, 水位計及び分力計の計測間隔は1/1000sであり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0.05s間にわたる移動平均を取って用いることとした。側方からの動画撮影にはデジタル一眼レフカメラEOS 5D Mark-II(Canon)を用いた。

氷板群を伴う津波波力の作用下における抵抗特性を把握するため, 津波遡上方向を $x$ 軸に取り,  $x$ 軸方向の抗力 $F_x$ から抗力係数;

$$C_D = \frac{2F_x}{\rho_w v^2 A} \quad (1)$$

を算定し, その時系列変化を求めた。 $\rho_w = 1000 \text{ kg/m}^3$ は水の密度である。流速 $v$ は橋梁を挟むPG3, PG4間の平均遡上速度を水位上昇時刻から算定した。具体的には, PG3, PG4の2地点において初期水深 $h_0 = 3$  cmのケースでは水深が4 cmに,  $h_0 = 6$  cmのケースでは水深が8 cmに上昇した時刻を求め, 地点間の距離をこの時刻差で除した値を平均遡上速度とした。投影面積 $A$ は, 側方からの撮影映像から氷板によるトラス閉塞状況を読み取り, 図-1の橋桁模型正面図に対して何%が閉塞を受けたかに応じて算出した。

前報<sup>14)</sup>においては, 水位や分力計の計測結果に現れた波力の変動特性に着目した検討を行ったが, 流況及

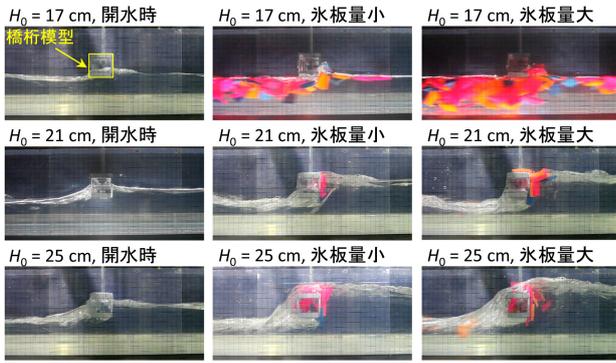
び氷板漂流物の閉塞状況に関する考察は十分にできていなかった。本稿では, 氷板漂流物の側面付着状況に着目し, その時間的な変動特性を明らかにしつつ議論を進めることとした。尚, 前報<sup>14)</sup>ではボックスガード橋模型も用いて, トラス橋模型との流況変化について考察を加えたが, 本稿では氷板閉塞に伴う, 受圧面積の変化が顕著なトラス橋模型に絞って議論を行った。

### 3. 結果及び考察

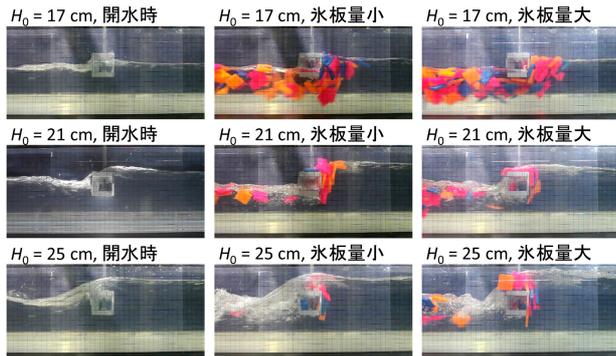
#### (1) 流況及び氷板群による橋桁閉塞状況

図-3には, 波高及び河道部初期水深が最も大きな,  $H_0 = 25$  cm,  $h_0 = 6$  cmのケースで側方から撮影した様子を示した。(a)の開水時のスナップショットによると, 段波はくさび形状となりながら橋桁に衝突し, 飛沫を上げて遡上し, その後橋桁は水没した状態となる。一方, (b), (c)の氷板群が存在する場合, 流況の観察結果より, 段波の形状は開水時のケースに近くくさび状である。しかし, 氷板群がトラス前面に接触した後は氷板が何層か重なるように張り付き, 開水時より受圧面積が大きくなる様子が確認された。最右段の拡大図より, 氷板量小の場合には上下流方向に1, 2層の付着, 氷板量大の場合には3~5層程度の氷板が付着した。このように氷板群を伴う場合, 大規模な津波衝突後はトラス前面が完全に閉塞され投影面積 $A$ が大きくなることが分かった。

氷板の付着状況を水理条件の変化から検討するため, 図-4に示したのは $H_0$ と氷板量を変化させた時の, 津波衝突後, 氷板が付着して定常に近い流れが形成した時の状況である。(a)が $h_0 = 3$  cm, (b)が $h_0 = 6$  cmの場合である。まず(a)上段より,  $H_0 = 17$  cmの場合には, 遡上波が橋桁下部にわずかに接触している状態であり, 氷板群模型による若干の堰上げが観察された。中段 $H_0 = 21$  cmの場合から, 開水時はトラス模型の半分程



(a) 河道部初期水深  $h_0 = 3$  cm



(b) 河道部初期水深  $h_0 = 6$  cm

図-4 氷板閉塞状況の側面スナップショット

度まで津波に水没しているが、氷板群が存在する場合には下流側面に氷板の付着が発生し、トラスの上部程度まで水位の堰上げが発生している。下段の  $H_0 = 25$  cm の場合も同様に、開水時では模型の水没が発生する一方で、氷板群が存在する場合には下流側面を閉塞するアイスジャムが発生し、トラス上面と下面に分岐する流れが生じている。

次に (b)  $h_0 = 6$  cm の場合であるが、初期水深が大きいため上段  $H_0 = 17$  cm の場合で開水時は半分程度、氷板有りの場合はトラス上面近くまで堰上げが発生し、氷板群による閉塞が生じている。中段の  $H_0 = 21$  cm の場合もほぼ同様であり、氷板が存在する場合の閉塞の作用により、下流側の堰上げが発生している。初期水深が大きいため、下段はいずれのケースも橋桁模型が水没しており、氷板が存在する場合は閉塞と共に下流側で顕著な堰上げが生じている。

以上から、初期水深小 ( $h_0 = 3$  cm) かつ  $H_0 = 17$  cm のケースを除いては、氷板群が存在する場合、橋桁模型の下流側に氷板の付着が発生し、これが発端となって下流側の堰上げが発生することが確認された。これに関して、前報<sup>14)</sup>では下流側に向かう反射波が発生し、下流側水位計測点で反射波による水位上昇が発生したことを報告している。そのほか、氷板群が何層にも重なっているにも関わらず、氷板同士の間隙を津波が透

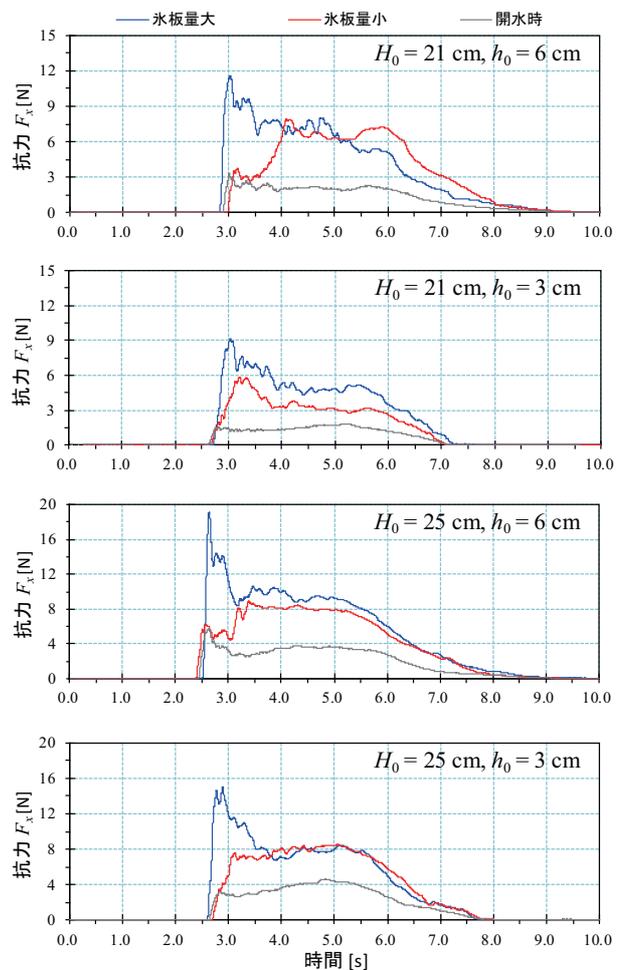


図-5 水平方向波力  $F_x$  の時系列変化

過し、橋桁模型内部に水が侵入する様子も観察された。また、氷板群は進行波に押される形で下流側面に付着し続け、水位が充分低下してからようやく氷板が剥がれ落ち、橋桁下部を通過して上流へ輸送される様子が確認された。

しかし、氷板が下流面に付着したのち後続の氷板群が次々に接触して段波の流れに押さえられる状況となっていたのはほぼ全てのケースで共通していた。そのため段波の作用力が継続している間は、橋桁模型部の受圧面積はほとんど変化していないことが推察された。

## (2) 波力の時間的な変動特性

次に、上述のような氷板群の有無による流況の変化が波力に及ぼす影響を検討するために、図-5には各ケースの時系列的な  $F_x$  の変化を示した。  $t = 0$  s はダムブレイク用のゲートを開放した時刻である。1, 2 段目の  $H_0 = 21$  cm のケースでは、津波衝突後の波力の立ち上がり速度が類似しているが、氷板の有無及び量によりその後の変動過程が異なる。青線で示される氷板量大の場合には、衝突後 0.2~0.4 s 後に最大値を取り、その後緩やかに減少している。赤線の氷板量小の場合には、

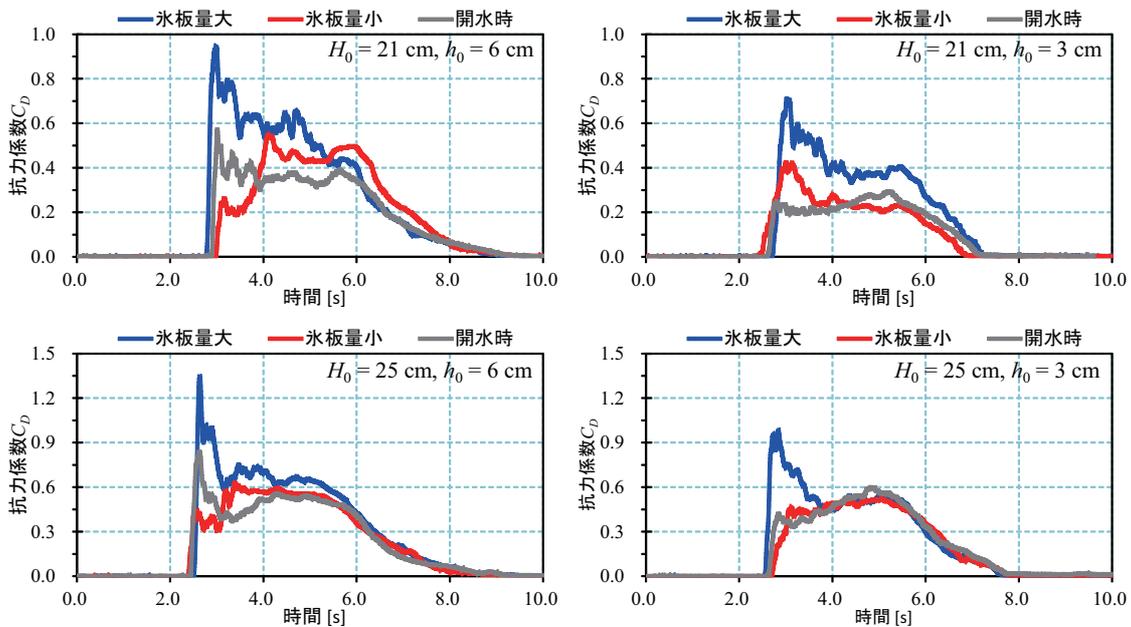


図-6 波高，初期水深を変化させた場合の抗力係数  $C_D$  の時系列変化

衝突後概ね 1 s 後に最大値を取り，減少しつつもやや波力が定常となる時間帯があって，その後消失している．開水時に比較すると， $H_0 = 21$  cm,  $h_0 = 6$  cm では氷板量大の時 4 倍程度，小の時でも 2.5 倍程度の波力となっており，漂流物の存在により，衝突力が大きく増加することが想定される．

図-5, 3, 4 段目  $H_0 = 25$  cm のケースを見ると，21 cm のケースより全体として大きな波力となっており，初期水深の大きい  $h_0 = 6$  cm のケースでは氷板量大，小，無し時のピーク波力がそれぞれ約 19, 8, 5 N,  $h_0 = 3$  のケースでは約 15, 8, 4 N となった．興味深いのは氷板量大及び小のケースにおいて， $t = 4$  s 以降波力の絶対値とその変動傾向が類似していることである．つまり，氷板群の存在がフロント部分の波力を増大しているものと推察されるが，一度氷板群が橋桁に付着した後，後続流に押されて作用する波力は水流による作用であって，氷板群の効果は閉塞による下流側の堰上げ効果が支配的であると考えられた．

次に，前節の流況観察の結果に基づき，側方撮影から読み取ることのできる受圧面積  $A$  は， $H_0 = 21, 25$  cm の場合衝突後一定値と仮定して評価することとし，抗力係数の時間変化を示したのが図-6 である．図中示された 12 ケースにおいて，氷板量大の時には  $C_D$  が急激に上昇し，0.7~1.3 程度のピーク値を持った．各グラフの傾向としては，まず抗力係数の立ち上がりが見られ ( $t = 3$  s 前後)，緩やかな山なり形状あるいは一定値に近い値を取る準定常的部分と， $F_x$  の低下と連動して 0 に減少していく領域と大まかに 3 つの領域に分けられることが確認された．

ここで，氷板量大のケースに着目してみると， $H_0 = 21$

cm, 25 cm いずれの場合でも段波の衝突と同時に抗力係数が上昇し，1 秒程度  $C_D$  の大きい状態が継続した後他ケースの  $C_D$  に近い値に変化している．本稿の実験では氷とは物性の異なるポリプロピレン板を使用している．また，前述した通り氷板模型の密度は実際の氷と同程度ではあるものの破壊強度や弾性率は相似ではないため，氷が構造物へ衝突した瞬間に作用するような瞬間的な作用力を模型上で再現することは難しいと思われる．

しかし  $C_D$  の大きい継続時間が明確に存在することから，氷板模型が重畳して橋桁全体に作用しているために，開水時とは異なる変動特性となったと考えられた．氷板模型が群体となった時にもたらずこのような作用力の変化は，沿岸市街地を対象とした木岡ら<sup>9)</sup>による既往の模型実験でも報告されており，実際の河道内でも同様の現象が想定されうる．

$H_0 = 21$  cm,  $h_0 = 6$  cm のケースを除き  $C_D$  の絶対値や時間的な変動傾向は類似しており，氷板量によらず開水時と比較して 1.5 倍から 2 倍程度まで上昇する可能性のあることが分かった．すなわち，アイスジャムの効果による抗力係数の上昇が，橋桁や支承の設計にあたり危険側に作用することが推定された．

#### 4. まとめと今後の課題

本稿では，氷板群を伴う河川津波の模型実験を実施し，実験における氷板群挙動の観察に基づき，氷板群の遡上と橋梁閉塞が同時発生した場合の状況を把握した．氷板群が存在することで橋桁が受ける力が一定程度増加する現象が確認され，これを抗力係数の変化と

捉えて検討を行った。その結果、開水時と比較すると、抗力係数は氷板量が多い場合、顕著にピーク値を持つことが確かめられ、その値は1.5倍から2倍程度まで上昇することが分かった。但し、この上昇量は実験設定によっては更に異なってくる可能性があり、氷板群の漂流量や河道条件を変更した実験により、追加的な検討を行うことが望ましいと考えられる。また多くの既往研究において、氷板群はサイズが一定ではなく、分布が存在することが指摘されており<sup>9)13)15)</sup>、こうしたサイズ分布が閉塞状況にもたらす影響について詳細に検討を加えることが望ましい。

氷を代表とする津波漂流物が河道で橋梁等に及ぼす外力の考え方は依然としてあまり確立されていない。しかし本稿で見出された知見を基にすることで、寒冷地の漂流氷板のみならず流木等他の漂流物に関しても、橋梁の閉塞効果を踏まえた津波防災対策の立案に資することが期待される。

謝辞：本稿の検討における実験条件の設定にあたっては、北海道大学渡部靖憲准教授にご助言を頂いた。また、本研究の一部は、JSPS 科研費（課題番号 26289148）の補助を受けた。ここに記して謝意を表する。

#### 参考文献

- 1) 庄司学, 平木雄, 藤間功司, 嶋原良典: 橋桁に作用する碎波段波の流体力に関する実験的検討, 土木学会論文集 B2(海岸工学), Vol.66, No.1, pp.801-805, 2010.
- 2) 中尾尚史, 野阪克義, 伊津野和行, 小林紘士: 津波到達水位と橋梁に生じる津波外力との関係に関する研究, 応用力学論文集, Vol.13, pp.789-796, 2010.
- 3) 四條利久磨, 青木圭一, 広瀬泰之, 鈴木俊光, 横山薫, 越村俊一: 津波入射波の形状が橋梁上部構造への作用津波力に及ぼす影響, 土木学会論文集 B2(海岸工学), Vol.70, No.2, pp.I.871-I.875, 2014.
- 4) 佐藤崇, 幸左賢二, 佐々木達生, 付李: 橋桁に作用する準定常的な持続波力の実験的検討, 土木学会論文集 B2(海岸工学), Vol.70, No.2, pp.I.876-I.880, 2014.
- 5) 渡辺健, 河村佳英, 大野又稔, 織田幸伸: 一様流作用下におけるコンクリート鉄道橋りょうに働く流体力に関する研究, 土木学会論文集 B2(海岸工学), Vol.70, No.2, pp.I.856-I.860, 2014.
- 6) 監物希美, 丸山久一, 田中泰司, 工藤進平: 橋梁に作用する津波流体力の解析的検討, 土木学会論文集 B2(海岸工学), Vol.70, No.2, pp.I.846-I.850, 2014.
- 7) 池野正明, 木原直人, 高島大輔: 津波漂流物の簡易移動判定と実用的な衝突力推定法, 土木学会論文集 B2(海岸工学), Vol.69, No.2, pp.I.861-I.865, 2013.
- 8) 木岡信治, 竹内貴弘, 蟹江俊仁: 海氷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, No.2, pp.I.333-I.340, 2013.
- 9) 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.
- 10) 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.
- 11) (社)日本雪氷学会: 雪と氷の事典, 朝倉書店, 760 p., 2015.
- 12) 松下久雄, 高脇透, 竹内貴弘, 酒井雅史, 寺島貴志, 本田秀樹, 正木孝治, 西畑昭史, 花田真州, 佐伯浩: 海氷の剪断強度及び付着力に関する研究, 海洋開発論文集, Vol.13, pp.765-770, 1997.
- 13) 松川優一, 荒繁彦, 加藤三明, 油川曜佑, 渡邊幸一, 長岡宏樹, 山口甲: 2011 年東北地方太平洋沖地震に伴い発生した北海道十勝川河川津波の観測, 土木学会論文集 B1(水工学), Vol.68, No.4, pp.I.1513-I.1518, 2012.
- 14) 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.
- 15) 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.

(2015.3.18 受付)

## EXPERIMENTAL INVESTIGATION ON THE VARIATION CHARACTERISTICS OF WAVE FORCE ON BRIDGE GIRDER BY MASSIVE RIVER TSUNAMI WITH ICE FLOES

Takaaki ABE, Yoshishige SATO, Yasuhiro YOSHIKAWA, Kazuyuki IZUNO  
and Jungo FUNAKI

In cold-region estuaries a massive tsunami can cause the break-up of river-ice cover, the transport of ice floes and consequent collisions between them and riverine structures. This study conducted a series of laboratory experiments on large tsunami with ice floes to clarify the characteristics of wave force with ice floes on a bridge girder. The results showed that the presence of ice floes can cause water level rise higher due to the blockage of the bridge compared with the case without ice cover. In addition, when the ice was present, a larger wave force was generated and continued until the wave dissipated. Temporal variations in the wave force were affected by the amount of ice; a large amount of ice caused an abrupt increase in the wave force, while a small amount of ice caused the wave force to increase more slowly. The drag coefficients were increased 1.5- to 2-fold because of the ice floe, which indicates that the bearing shoes of the bridges need to be strong enough to withstand the extra pressure.