

結氷期河川津波による氷板の遡上及び流下特性に関する実験的研究

An experimental study on run-up and flowing-down characteristics of ice floes due to tsunami propagation into ice covered rivers

(独)土木研究所 寒地土木研究所 ○正会員 佐藤 好茂 (Yoshishige Satou)
 (独)土木研究所 寒地土木研究所 正会員 阿部 孝章 (Takaaki Abe)
 北見工業大学 社会環境工学科 正会員 吉川 泰弘 (Yasuhiro Yoshikawa)
 (独)土木研究所 寒地土木研究所 正会員 伊藤 丹 (Akashi Itou)

1. はじめに

2011年3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震は、太平洋沿岸地域を中心に甚大な被害をもたらした。このような巨大地震が発生した場合、地震動による直接的な被害に加え、津波に伴うことにより被害が拡大する傾向にある。今次津波においても、東北地方を中心とした太平洋沿岸地域では、津波による公共施設の損壊や家屋の流失、漂流物による港湾被害等が発生している¹⁾。さらにこの津波は北海道にも到達し、複数の1級河川で遡上が確認され²⁾、鵲川においては河川津波により河氷が破壊され漂流し、写真-1示すアイスジャムによる河道閉塞が発生、河川水位の上昇が観測されている²⁾。結氷期の津波災害として、1952年十勝沖地震時には北海道釧路市においても、発生した津波が春採川を遡上して氷板と共に越流し、家屋損壊等の被害が発生した³⁾。寒冷地域特有の現象として、漂流氷板による被害が生じており、このような現象は河道内に存在する構造物にも影響することが予想される。

津波発生時の漂流物被害について、海岸部では、海氷群を伴った市街地への津波遡上が引き起こすリスクの指摘⁴⁾や、港湾域での津波バリアによるコンテナ漂流物の捕捉効果を検討⁵⁾した事例がある。



写真-1 アイスジャムの発生状況

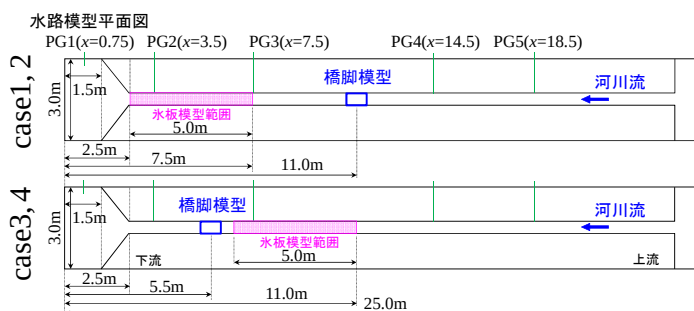


図-1 水路模型概要

河川域についても、漂流氷板が橋脚で堆積することによるアーチ形成や⁶⁾、津波に起因した漂流氷板による構造物への衝突力評価⁷⁾、先に述べた鵲川でのアシスジャム発生時における水位変動の再現計算⁸⁾、河川津波の波力を低減させる手法⁹⁾等の研究が進められている。しかし、河川津波による氷板輸送に関する現象には不明な点が多く、津波発生時の漂流氷板の挙動を把握することは、氷板衝突による被害の軽減を図る上で重要な知見となる。

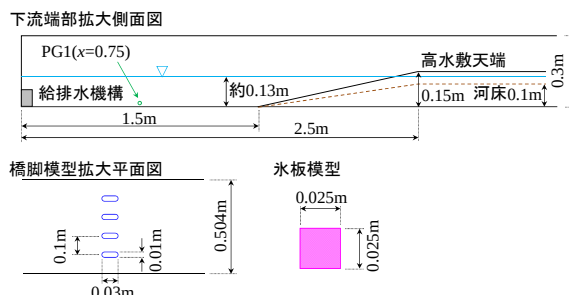
本研究は、結氷期の河川津波発生時における氷板の流下特性の把握を目的として、河川津波遡上時の構造物付近での挙動を水理実験で再現することとした。

2. 研究手法

2.1 水理模型実験の概要

河川津波発生時における氷板輸送を再現するにあたり、用いた水路は寒地土木研究所が所有する可傾斜台である。図-1に示した水路模型について、北海道の1級河川新釧路川と鵲川を参考とし、ここに模型縮尺 $s=1/100$ 、河床勾配 $i=1/1000$ 、延長 $l=25\text{m}$ 、模型幅 $b=3\text{m}$ 内に、低水路幅 $b_m=0.5\text{m}$ を中心とした左右対称の形状としている。河口部は図-1右上の形状により、海域から河川域へと不等流場を遡上する津波を再現することとした。河川流量は、2011年3月11日鵲川の流量を参考として $Q=0.4\text{L/s}$ を用いている。

水路模型の下流部には、給排水機構として給水ポンプ並びに排水ポンプを設けた。下流端部で津波を発生させる方法として、このポンプを用いて流量をバルブの開度操作により調整し、押し波と引き波の造波、すなわち津波波形1周期をサイン波で再現することとした。津波高については、中小規模の津波を想定し、 1cm と 2cm の2パターンとした。津波の周期は、東北地方太平洋沖地震時に観測された、新釧路川河口部でのエッジ波の周期を参考に、下流端部の水位変動周期 $T=300\text{s}$ に設定した。



氷板を現した模型の形状は正方形であり、材質は河川氷板の比重 (0.91~0.92) に近いポリプロピレンを使用した。寸法については 2011 年 3 月 11 日東北地方太平洋沖地震後におこなわれた、現地調査¹⁰⁾で明らかとなった、鶴川でのアイスジャム直上流地点における氷板痕跡の面積測定結果を参考に、辺長 $L_i = 2.5\text{cm}$ 、厚さ $h_i = 0.2\text{cm}$ とした。

水位の計測には、図-1 に示す位置 PG1~PG5 の合計 5 箇所にピエゾを設置した。こ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を使用して、水位の縦断的な計測をおこない、時系列変化を把握することとした。

表-1 は各実験ケースの内容を示しており、橋脚位置並びに氷板範囲は水路下流端 $x=0$ からの距離である。氷板の挙動を評価するにあたり、基準となる橋脚模型を設置しないケースを実施しており、津波高 1cm を case0_1、津波高 2cm を case0_2 とした。

図-1 左上に示した橋脚下流部に氷板群を設置したケースとして、津波高 1cm を case1、津波高 2cm を case2 とした。図-1 左下に示した橋脚上流部に氷板群を設置したケースは、津波高 1cm を case3、津波高 2cm を case4 とした。各ケース使用した氷板模型は 3200 枚であり、橋脚下流に氷が存在する case1, case2 は、押し波の発生と共に遡上する氷板の速度を橋脚下流、上流へ輸送された氷板が引き波と共に流下する速度を橋脚上流で計測した。橋脚上流に氷が存在する case3, case4 では、氷板群が押し波により上流へと移動した後、引き波により流下する速度を橋脚上流で計測した。これらの結果を比較することで、津波発生時に氷板群が存在する位置の違いによる輸送過程の変化を把握することとした。

2.2 画像解析手法

氷板模型の平面的挙動を把握する手法として、実験水路の上部にデジタルカメラを設置し、動画撮影をおこなった。ここに撮影画素数は $1920 \times 1080\text{pixel}$ 、フレームレートは 30FPS、撮影範囲は橋脚模型地点と氷板の挙動を把握できるように、橋脚模型を中心に約 6m とした。図-1 左に示した水路下流端を $x=0\text{m}$ と表すと、橋脚模型 case1, case2 は $x=11\text{m}$ 、case3, case4 は $x=5.5\text{m}$ の位置にある。氷板の輸送速度については、撮影した連続画像を PTV 解析により求めることとした。なお、画像解析に用いたソフトウェアは Dipp-Flow Ver.2.00 である。同ソフトウェアを用いてレンズ歪み補正及び時空間補正をおこなった。

3. 結果と考察

3.1 水理模型実験による津波の再現

図-2 は実験時における各水深計測地点の状況を示している。津波波形について、下流端部近傍となる図-2 上に示した PG1 では水位上昇及び下降、周期を再現している。一方で、引き波時の水位低下に若干の遅れや、引き波発生後の立ち上がりには波形の変動も確認されている。今後、更なる精度向上のためには下流部での水面振動の抑制等により、この課題を解決する必要性が考えられる。

表-1 実験条件一覧

case	橋脚位置(m)	氷板範囲(m)	津波高(cm)	氷の速度計測位置
0_1	-	-	1	-
0_2	-	-	2	-
1	11.0	2.5~7.5	1	上下流
2	11.0	2.5~7.5	2	上下流
3	5.5	6.0~11.0	1	上流
4	5.5	6.0~11.0	2	上流

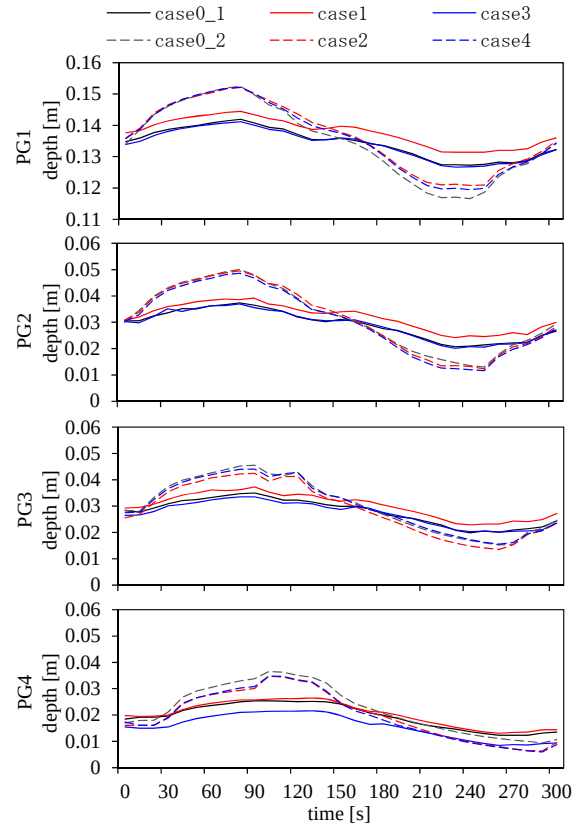


図-2 水深計測状況

3.2 津波高 1cm の状況

氷板輸送状況について、縦軸を津波発生後の時間経過とし、図-3、図-4 に示す。氷の速度評価範囲を図-5、氷板輸送速度 U_i を図-6 に示す。なお、氷の速度 U_i は PTV 解析により抽出することができた氷板について示しており、橋脚上流は case_upper、橋脚下流を case_down としている。

図-3 に示した case1 の状況について、津波発生後、押し波により氷はゆっくりと上流へと移動し(60s)、75s 後には橋脚直下流へ到達した。その後、橋脚が障害となり氷板は詰まり気味となるが上流へ輸送され(87s)、押し波と引き波の間点となる約 111s では、氷板全体の約 1 割が橋脚上流へと移動していた。135s 以降、引き波と共に上流へと移動していた氷板は、押し波時と同様に橋脚が障害となりつつも流下した。実験終了時の 300s には、すべての氷板が下流へと輸送されていた。

図-4 に示した case3 の状況について、津波発生時 0s から押し波により氷が徐々に上流へと移動していく。その後、142s 頃には氷板が上流から引き波と共に流下し、橋脚へ衝突した。さらに氷板は橋脚に衝突を繰り返し、177s 頃から詰まり気味ではあるが流下を続け、実験終了時の 300s でも橋脚上流には氷板が滞留していた。

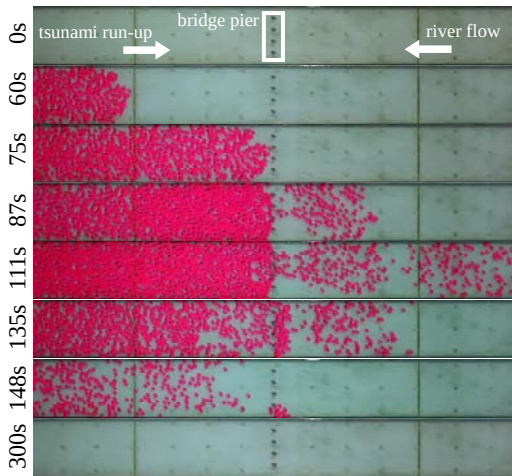


図-3 氷板輸送状況(case1 津波高 1cm)

氷板輸送状況について、図-6 に示した氷の速度を平均値と比較すると、橋脚上流 case1_upper の $U_i = 0.076\text{m/s}$ に対し橋脚下流 case1_down は $U_i = 0.143\text{m/s}$ となっており、引き波時の氷板移動速度は押し波の約半分であった。押し波・引き波時共に橋脚付近で氷板の滞留は確認されていたが、このような現象の違いが生じる要因としては、橋脚上流への氷板輸送距離が短く、引き波発生後まもなく流下したことが影響したと考えられた。

図-6 に示した case1 と橋脚上流から引き波時の氷板輸送となる case3 を平均値と比較すると、case1_upper の $U_i = 0.076\text{m/s}$ に対し case3_upper は $U_i = 0.119\text{m/s}$ となり、約 1.6 倍の速度で橋脚への衝突が生じていた。これについては、引き波時の氷板輸送現象が発現した時間帯や、橋脚設置位置の違いにより異なる水位変化が影響したと考えられた。そのため水深計測位置で比較すると、図-4 より、氷板衝突が確認された 142s~152s と同時刻の図-2 に示す case3 の橋脚上下流に位置する PG2,PG3 の値に比べ、図-3 の 133s~143s と同時刻の図-2 に示す case1 の橋脚上下流 PG3,PG4 の値は、水深の変動量が少なく水面勾配が緩やかとなり、このような差の開きが生じたことが示唆された。

3.3 津波高 2cm の状況

氷板輸送状況を図-7、図-8、氷板輸送速度 U_i を図-9 に示す。図-7 に示した case2 の状況について、津波発生後、押し波により氷が上流へと移動し(33s), 39s には氷板が橋脚下流に到達した。その後 47s では橋脚が障害となり、氷板は詰まり気味となるが上流への移動は続いた。押し波と引き波の間点となる約 100s には、およそ半数の氷板が橋脚より上流へと移動していた。引き波時となる 137s では氷板が橋脚に衝突を繰り返しながら流下を続け、実験終了時の 300s には橋脚上流部に接触する氷板が数枚存在していた。

図-8 に示した case4 の状況について、津波発生時 0s から押し波により氷が上流へと移動していく(40s)。その後、160s 頃に氷板が上流から引き波と共に流下し、橋脚へ衝突した。さらに氷板は橋脚に衝突を繰り返し、184s 頃からは橋脚が障害となりつつも流下を続け、殆どの氷板が流下した後も、215s では橋脚上流部に接触

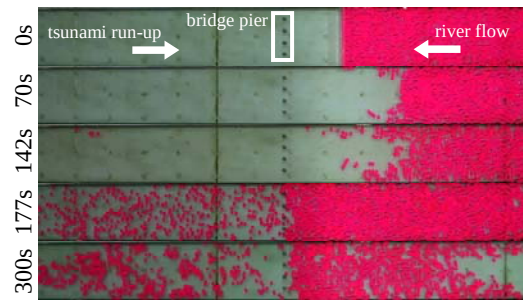


図-4 氷板輸送状況(case3 津波高 1cm)

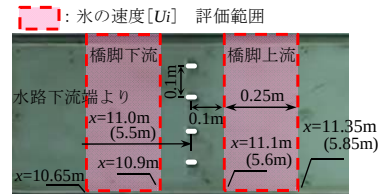


図-5 氷板輸送速度評価範囲

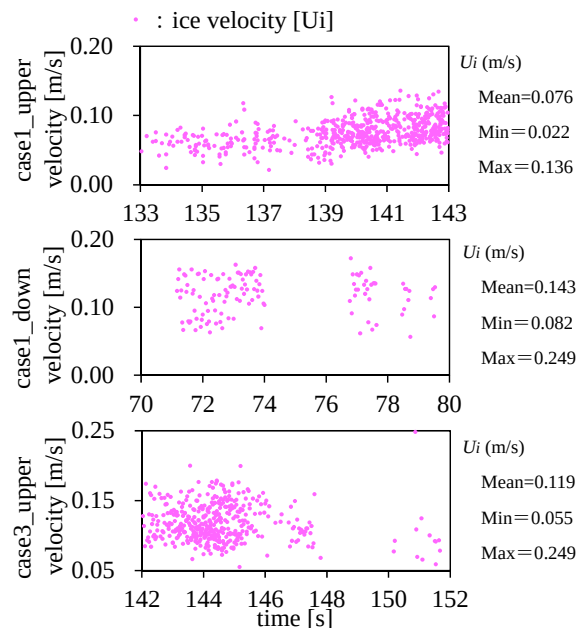


図-6 氷板輸送速度(津波高 1cm)

する氷板が数枚存在していた。

図-9 に示した case2 における氷の速度を平均値と比較すると、橋脚上流 case2_upper の $U_i = 0.231\text{m/s}$ に対し橋脚下流 case2_down は $U_i = 0.211\text{m/s}$ となっており、引き波時の氷板移動速度は押し波の約 1.1 倍であった。津波高 1cm の結果と比較し、その差が小さいのは、図-7、図-8 を見ると、本ケースでは波高の上昇と共に、押し波時の氷板移動量が増加したことが考えられた。

図-9 に示した case2 と case4 を平均値と比較すると、case2_upper の $U_i = 0.231\text{m/s}$ に対し case4_upper は $U_i = 0.289\text{m/s}$ となり、約 1.3 倍の差が生じていたが、津波高 1cm の結果と比べ、その差は縮まっていた。前節同様に水深計測位置で比較すると、図-7 より、氷板衝突が確認された 153s~163s と同時刻の図-2 に示す case4 橋脚上下流 PG2,PG3 の値と、図-8 の 137s~147s と同時刻の図-2 に示す case2 の橋脚上下流 PG3,PG4 の値は、僅かではあるが水深変動量の差も縮まっており、このことが影響したと考えられた。

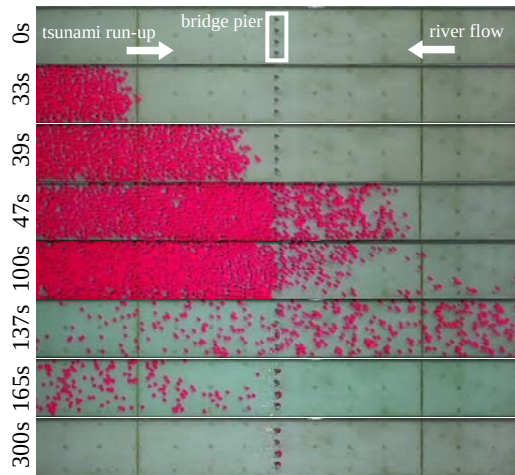


図-7 氷板輸送状況 (case2 津波高 2cm)

また、本ケースの氷板は、押し波時には群を成して遡上していたが、引き波時には疎らに流下しており、氷板輸送時の形態が速度に影響したことも示唆された。

図-6、図-9 共に中央より、橋脚下流での平均値を比較すると、津波高 1cm の case1_upper $U_i=0.143\text{m/s}$ に対し津波高 2cm の case2_upper $U_i=0.211\text{m/s}$ となり、約 1.5 倍の差が生じた。図-2 を見ると、波高の上昇により水位変化も大きくなることから、押し波時にも速度差が発生したと考えられる。また、津波高 1cm, 2cm 共に橋脚が障害となり氷板の滞留現象が生じていたが、図-2 に示した水深変化の状況には、この影響は現れていない。

これらのことから、氷板の滞留が発生しても河道閉塞に至らない場合、波高の上昇と共に漂流氷板の輸送速度が増すことが確認された。

4. まとめ

本研究では、河川津波により発生する漂流氷板の遡上並びに流下特性を把握するための検討を実施し、以下の知見が得られた。

津波遡上の影響により、氷板群の形態が変化し、氷が疎らとなり輸送される場合、特に引き波時の速度が速まる傾向となる。

氷板の滞留が生じて河道閉塞に至らない場合、波高の上昇により押し波並びに引き波時の氷板輸送速度は速くなる。

これらの結果から、冬期間河川津波発生時における橋脚付近での氷板輸送特性を示すことができた。本実験は、第 1 波のみではあるが津波発生から収束まで一連の過程を再現することに成功している。今後は、氷板輸送により生じるアイスジャム現象の解明も実施する予定である。

参考文献

- 1) 土木学会 東日本大震災被害調査団: 地震被害調査報告書, 地震工学委員会 地震防災技術普及小委員会, p.6-31, 2011 年 8 月。
- 2) 阿部孝章, 吉川泰弘, 安田浩保, 平井康幸: 2011 年東北地方太平洋沖地震に伴い発生した津波の北海道内における河川遡上, 土木学会論文集, B1(水工学), Vol.68(4), pp.I_1525 - I_1530, 2012。

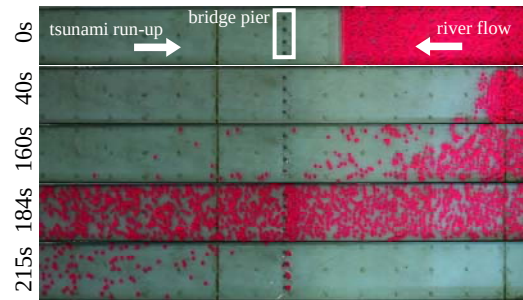


図-8 氷板輸送状況 (case4 津波高 2cm)

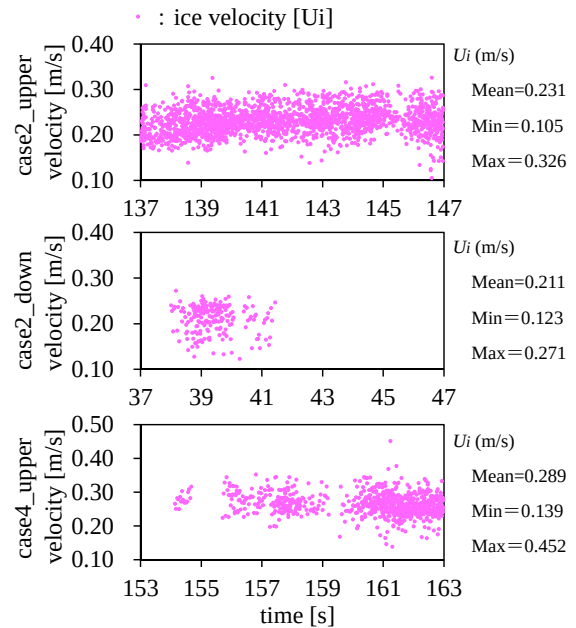


図-9 氷板輸送速度 (津波高 2cm)

- 3) 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。
- 4) 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。
- 5) 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(2), pp.I_921-I_925, 2013。
- 6) 榎国夫, 國松靖, 佐伯浩: 橋脚による氷盤の arch 形成条件に関する実験的研究, 水工学論文集, 第 36 巻, pp.299-304, 1992。
- 7) 阿部孝章, 吉川泰弘, 平井康幸: 結氷時河川津波による漂流氷板の衝突力評価に関する研究, 河川技術論文集, 第 18 巻, pp.411-416, 2012。
- 8) 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(2), pp.I_416 - I_420, 2012。
- 9) 阿部孝章, 吉川泰弘, 佐藤好茂, 伊藤丹: 樋門ゲートに対する河川津波波力減勢工の提案とその効果について, 河川技術論文集, 第 19 巻, pp.381-386, 2013。
- 10) 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(2), pp.I_1436 - I_1440, 2012。