結氷河川における津波伝播機構に関する水理実験

Hydraulic Experiment of Tsunami in Ice-Covered River

(Atsushi Okubo)	大久保敦	○学生員	北見工業大学社会環境工学科
(Yasuhiro Yoshikawa)	吉川泰弘	正会員	北見工業大学社会環境工学科
(Yasuharu Watanabe)	渡邊康玄	正会員	北見工業大学社会環境工学科
(Takaaki Abe)	阿部孝章	正会員	独立行政法人寒地土木研究所

1. はじめに

2011年3月11日に東北地方太平洋沖地震が発生した。 1 年半が経過した現在も、地震や津波の災害によって日 本全土に大きな影響をもたらしている。北海道において も地震による影響が報告されている。その一つとして、 北海道内の複数の河川への津波遡上が挙げられる¹⁾。 今回の地震が生起した時期は北海道では、河川の結氷期 間であり結氷した河川への津波遡上により、結氷の破壊 飛散が観測されている。写真-1 と写真-2 は尾幌川(厚岸 町)における津波遡上の痕跡の写真である。これらの破 壊や飛散の被害として、樋門下の氷板の堆積や河川構造 物への氷の衝突、氷板が堆積することによって起こるア イスジャム現象などの被害も考えられる。1952年3月4 日に発生した十勝沖地震では結氷した春採川(釧路市)を 津波が遡上し、氷の飛散により家屋等が被災している。 世界的に見ても人の住んでいる地域で河川結氷が生じ、 且つ地震が頻発する地域の河川は限られている。そのた め、これらの研究はほとんど行われてきておらず、早急 な現象の解明とその対策が望まれている。

本研究では結氷している河川へ津波が遡上した場合の、 津波遡上の伝播特性を把握することを目的としている。 特に河川表面が氷板で覆われていることから、圧力の伝 播に着目して実験を行った。なお、阿部ら²⁾の研究にお いて津波遡上の氷板(合板に防水加工を施した物)の状態 (完全結氷,滞留,開水路)や波高の違いによる圧力の伝 播機構が異なることを指摘している。伝播速度が完全結 氷の場合では開水時と比較して 3.7~6.5 倍、滞留の場合 と比較して 3.2~5.9 倍速いことを明らかにした。このこ とから、本研究では氷板状態と波高を変化させるととも に氷板模型のサイズも変化させ実験を行うこととした。

2. 河川津波の水理実験

実験水路は、寒地土木研究所が所有する全長 34m・ 水路幅 0.5m の図-1 に示す矩形断面水路を用いた。水路 には上流端に給水機構、下流側にコンピューター制御の パドル型造波機が設置されており、上流から水を流し下 流から津波を流れに対して遡上させることが可能である。 この水路の側壁に水路底面から 1.5cm の位置に 2m 間隔 で 8 台 ($\mathbf{x} = 4.15$, 6.15, 8.15, 10.15, 12.15, 14.15, 16.15, 18.15m)の圧力センサーを設置し、氷板下の圧 力変化を計測した。実験の対象河川は、実際に津波遡上 によって、結氷が確認された尾幌川とした。水路模型の 縮尺は、設備に合わせ 1/20 とした。なお、水路の性能 を超えないよう、水路の構造上造波板前水深は $D_{M}=0.7$ mとした。尾幌川の河口水深が 2m であることから実験



写真-1 尾幌川における結氷破壊



写真-2 尾幌川支川合流部の圧力解放



図-1 実験水路の諸元と圧力センサー設置位置

水路の河口水深を 10cm、水路勾配を i_b=1/1000 と設定した。また流量としては、地震発生時の現地流量は観測水 位から H-Q より 30m³/s と算出されている。実験水路で の流量はフルードの相似則より 16.8L/s となる。しかし ながら、縮尺 1/20 では必要水路幅が 1.5m となる。実験 水路の幅が 0.5m であること、津波の遡上が尾幌川程度 の川幅(30m 程度)で且つ直線河道の場合は横断方向にほ ぼ変化が無いものと考え、川幅の割合で流量を減少させ 5.6L/s とした。なお、尾幌川の諸量は渡邊ら⁴⁾の現地調 査結果を基にしている。

平成24年度 土木学会北海道支部 論文報告集 第69号



写真-3 氷板模型の設置(固定)



写真-4 氷板模型の設置(非固定)



写真-5 実験水路側壁

河口域の河川結氷は、完全結氷して河岸に接岸して水 位変動に追随しない状態、もしくは潮汐作用等によって 河岸からは剥離しているが河川表面は氷板で覆われてい る場合の2つの状態が考えられる。このことから、実験 の条件として氷板模型を写真-3の様に完全に固定した ケース(氷固定)、写真-4の様に水面に浮かべただけのケ ース(氷固定)、更に比較のために氷板なしの開水路の 状態の計3ケースを設置した。氷板模型には実際の氷板 と比重値が同じポリプロピレンを使用している。写真-5 は水路の側壁の写真である。サイズは幅 0.5m、厚さ

表-1 氷板状態と氷板サイズ 全18 ケース

	a-開水路	b-固定(2m)	c-非固定(2m)
3cm	case3-a	case3-b	case3-c
2cm	case2-a	case2-b	case2-c
1cm	case1-a	case1-b	case1-c
	d-非固定(1m)	f-非固定(0.5m)	g-非固定(0.25m)
3cm	case3-d	case3-f	case3-g
2cm	case2-d	case2-f	case2-g
1cm	case1-d	case1-f	case1-g



図-3 津波到達前の圧力波形振動

15mm であり、氷非固定のケースのみ氷の長さを 2m、 1m、0.5m、0.25m と変化させて実験を行った。氷の状 態と氷板模型の長さを整理したものを表-1 にまとめて 示す。なお、氷固定の実験は、氷板の長さを変えても基 本的に現象は同一であることから氷板模型の長さが 2m の条件のみ行っている。津波の条件としては、周期を 10秒に固定し、波高 H を 1cm、2cm、3cm の 3 ケース に設定した。波高が 3cm である条件は、今回の水路の 津波遡上時の砕波しない限界の波高である。以上、全 18 ケースの実験を行った。

3. 圧力伝播速度と最大圧力の減衰

図-2 には、各地点の波高 3cm の開水路、固定、非固定 の実験における圧力の時間変化を示したものであり、全 18 ケースの内、波形の振動が最も顕著に現れたものを 抽出して記している。波高 3cm の氷非固定、氷板サイ ズ 2mの X=10.15~18.15 における t=25~40の圧力変化 をみると、津波到達前に波形が振動していることがわか る。これは図-3に示すように、津波により下流の氷板 が傾いて、同時に上流側に影響及ぼし圧力変化を生じさ せているものと想定される。そのため、この氷板を伝わ る速度が津波の伝播速度より速いため、本来の津波の伝 播とは異なるメカニズムによりこのような波形が観測さ れたものと考えられる。津波の遡上による圧力伝播速度 は、造波開始時刻を t =0 とし、圧力の計測値を p、津 波侵入前の圧力を po、最大値を pmax として、式(1)で表 される判断基準値 K[無次元]が 0.5 となる時刻に津波が 通過したと見なした。しかし、基準値 0.5 ではソリトン 分裂や波高の著しい減衰のため、最大値を正確に計測で きていない場合には基準値を 0.2 とした。



 $K = (p-p_0)/(p_{max}-p_0)$ (1)

(1)各波高、各氷板模型サイズによる伝播速度の比較

津波の伝播速度を把握するため、式(1)より求めた値 により圧力伝播速度 Cp を算出した。図-4 は、各氷板サ イズにおける波高 3cm, 2cm, 1cm の各圧力センサーで 測定した圧力伝播速度 Cp を各ケースにおける平均値の 変化を示したものである。波高 1cm の伝播速度が他の 波高の場合に比べて、多少遅いものの特異性は見られな い。一方、氷板サイズによる比較では、波高 3cm にお ける開水路の場合と各氷板サイズの非固定の場合では 1.05~1.12 倍とあまり大きな違いは見られない。一方、 氷板を固定した場合では他のケースに比べて 1.77~2.01 倍と大きい伝播速度になっていることがわかる。開水路 と各非固定の場合と比較して、波高 3cm の場合で 1.7~ 2.0 倍、波高 2cm の場合で 2 倍、波高 1cm の場合で 2.1~2.4 倍の伝播速度となった。また非固定のみを比較 した場合、どの波高においても氷板サイズが大きくなる につれて伝播速度も速くなる傾向を示している。

(2)最大波高の減衰比の比較

図-5 は、波高 3cm、2cm、1cm の津波が下流端から上 流に遡上する際の最大圧力の減衰比 G[無次元]の変化を 表したものである。各圧力センサーの最大値を $p_{i,}$ 下流 端の圧力センサーの最大値を p_{max} として、式(2)から求 めている。

```
G=(p_i-p_{max})/p_{max} \qquad (2)
```

G がプラスであれば圧力は増幅しており、マイナスであ れば減衰していることを示す。一般には、遡上に伴って 圧力が減衰していく傾向を示すため、各グラフは右下が りになる傾向を示す。しかしながら波高 3cm のグラフ では、開水路と非固定 0.25m のケースで X=6~8m にか けて最大圧力が減衰ではなく増幅していることが読み取 れる。これはソリトン分裂が生じているためである。他 のケースでは多少増幅しているものの顕著には見られな い。波高 2 c m、1cm のグラフでは、大きく増幅してい るケースもなく、どのケースにも顕著な違いは見られな い。しかしながら、3 つのグラフを比較すると氷板サイ ズが大きいほど減衰比 G が小さくなり、圧力は上流に 行くに従い減少することが読み取れる。

4. まとめ

結氷時の河川津波において氷板下の圧力の伝播速度と 最大圧力の減衰について、水理実験を実施し検討を行っ た。その結果、完全結氷時の河川津波は開水時と比較し て速い速度で遡上することが明らかになった。さらに氷 板滞留時では氷板サイズが大きくなると伝播速度は速く なる結果を得ている。一方で、圧力の減衰も氷板滞留時 では氷板サイズが大きいと減衰比も大きくなった。今回 の実験で、高速カメラを水路の横に下流側 X=6m と X=10m の位置に設置し、上流側から粒子を流すことに よって津波が遡上してきた時の流況を撮影した。今後は これらの画像を用いて、より詳細な伝播機構を把握し、 PIV 解析手法などで流れの状況等について解析を実施し ていく。

謝辞

本研究を行うにあたり、科研費基盤研究(B)24360197 及 び河川整備基金 24-1114-001 の助成を受けて行われた。 また、寒地土木研究所,水工リサーチの関係各位に実験 の補助をしていただいた。記して謝意を表します。

参考文献

1) 宮本修司,阿部孝章,佐藤博知,角張章,佐藤好 茂:北海道東部太平洋沿岸の氷結河川における津波の痕 跡調査,日本雪氷学会北海道支部,No.31, pp167-170, 2012.

 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における河川 遡上,土木学会論文集,vol.68,No.4,pp.1525-1530, 2011.

渡邊康玄,西田正実,木村祐輔,小松佑輔:釧路管内2級河川津波遡上調查,URL:http://rde.nhdr.niigata-u.ac.jp/jsce/(参照日2012/12/12).

4)高橋麻子,渡邊康玄,吉川泰弘:結氷時の尾幌川にお ける河川津波の数値計算,年次技術研究発表会論報告集, 第 68 号, s-6, 2012.



図-4 波高及び氷板サイズと Cp の関係



図-5 氷板サイズによる最大圧力の減衰