第66回(2022年度) 北海道開発技術研究発表会論文

コンクリート護岸部に対する河道内氷板の 衝突挙動に関する基礎検討 —新たな現地観測手法の適用事例—

国立研究開発法人土木研究所寒地土木研究所 寒地河川チーム ○阿部 孝章 国立研究開発法人土木研究所寒地土木研究所 寒地河川チーム 大串 弘哉 国立研究開発法人土木研究所寒地土木研究所 水環境保全チーム 横山 洋

寒冷地河川では河道内を流れる氷板が構造物に損傷等をもたらすことが確認されている。護 岸や保護工の合理的な設計に向けて、本稿では高精度な現地観測手法を用い、氷板衝突が発生 する護岸部周辺の詳細な現地観測を実施した。河床部に設置したADCPのボトムトラッキング 機能を用いた河氷厚の連続観測と、ビデオカメラによる河氷の平面的な挙動の観測により、日 中・夜間を通じて氷板衝突の挙動を明確に捕捉することに成功した。

キーワード:コンクリート護岸、現地観測、劣化予測

1. はじめに

北海道のような積雪寒冷地においては、12月から4月 の期間にかけ気温の低下に伴い多くの河川で結氷を生じ る。河口域に設置された護岸等のコンクリート構造物に おいては凍害や塩害などによりコンクリートの材料劣化 が生じることに加え、河川結氷の付着、再結氷、剥離、 漂流物化した氷の遡上あるいは流下中に衝突が生じるこ とがある。結果として**写真-1**のようにコンクリート護岸 部の損傷や摩耗が発生することが指摘されている^{1,2}。

コンクリートをはじめとした構造物の氷の物理的作用 による劣化については、氷海工学や材料力学分野で多く の既往検討が存在する。ところが、河川域における護岸 等の劣化については、一部の既往検討³⁾が存在するもの のその数は多くはない。こうした状況を踏まえ、著者ら が所属する寒地土木研究所の研究グループでは、河口域 に設置されたコンクリート護岸部周辺の氷の衝突力評価 や簡易モデルによる数値解析的な検討を行ってきた。こ れにより氷の諸元やコンクリート構造物に対する衝突力 の程度が少しずつではあるが明らかとなってきた。しか しながら、氷板のコンクリート護岸部への衝突現象、水





ABE Takaaki, OGUSHI Hiroya, YOKOYAMA Hiroshi

面上に浮遊する氷板が衝突し離脱するという現象を充分 には把握できていなかった。

そこで本稿では、氷の形状等諸元、物性、時期等様々 な条件に対応した護岸の設計法の確立に向け、氷板挙動 を正確に把握することが可能な観測手法を確立するため の現地実験及び観測を行った。その上で、各計測機器の 計測精度の評価や適用性の検討を行ったことを報告する。

2. 現地観測手法

調査対象は図-1に示した網走川の河口から3.1 km地点 とした。網走川の感潮区間であり、漂流氷板の遡上及び 流下が確認されている地点である。本研究の全ての実験 及び観測は2018年から2019年にかけての冬期間に実施し た。図-2(a)は右岸から左岸方向に向けて撮影した観測機 器類の位置関係、(b)は下流から上流方向に向けて撮影 した写真で、超音波多層式流速計(ドップラー流速計、 1,200 kHz Work Horse ADCP、Teledyne RD Instruments社製、 米国。以降、ADCPと表記する)と音響測深器(以降、 測深器と表記する)の位置関係を示す。(c)はADCPの設



図-1 調査対象箇所図(地理院地図を元に作成)



図-2 現地における観測機器の設置状況

置状況であり、4方向のビーム照射方向を表示している。 図-3 (a)はカメラ、ADCP、測深器の水面と護岸部との位 置関係を示した平面図、同図(b)は着目する断面で護岸 部、水面、カメラ、氷板、測深器の位置関係を示した横 断図である。カメラは夜間でも氷板の挙動を観測できる ようにLED照明を設置した。同時に、自記式水位計S & DL mini(応用地質株式会社製)による観測も実施した。 ビデオカメラ(WV-SPW631LJ、Panasonic社製)はネット ワーク接続により機器収納箱内のノートPCに接続し映 像の記録を行った。

コンクリート護岸部周辺を漂流する河氷の衝突力の評価のためには、氷の質量の情報が重要となる。ビデオカメラ等の平面的な観測のみではこの情報が得られないため、ADCP及び水位計の測定値を用いて河氷厚の推定を行った。まず、ADCPの本体は河床に鉛直上向きに設置されているが、ADCPのボトムトラッキング機能により、河氷の底面高を推定する。水位計による時系列の水位計測結果から、図4の模式図に従い次式を用いて算定することとした。

$$d_{est} = H_w - z_a - h_{est} \tag{1}$$

ABE Takaaki, OGUSHI Hiroya, YOKOYAMA Hiroshi



図-5 模型氷の作製状況及び実験状況の写真・概念図

ここでd_{est}:推定された氷板の喫水深、H_w: ADCP設置箇 所の水位、z_a: ADCPビーム発射部分の標高、h_{est}: ADCP のビーム発射部から河氷底面までの距離である。ビーム は4方向に発射されそれぞれの位置関係は図-2の通りで ある。この算定方法は横山ら¹による推定方法を参考と した。ADCPにより河川結氷下の観測を行おうとする試 みは国内では山本ら⁴、橋場ら³によるものなどいくつか 存在するが、依然として河川域での適用事例は数が少な く、今後事例の蓄積が望まれる。

以上の観測機器を用い、ADCPによる河氷厚の測定精度の検証のため模型氷による流下の模擬実験を実施した。 模型氷の平面形状は95 cm×90 cm、厚さは25,20,15 cmの3 種類のものを用意した。実験に使用した氷板の密度は平 均で0.9 tm³程度、表面温度はサーモグラフィーカメラに よる計測から平均-9℃程度であった。図-5に示したのは、 (a)模型氷作製用に加工した木枠による模型氷の作製状況、 (b)模型氷を水面上で牽引しADCP及び測深器の上方を通



図-6 撮影画像による氷板衝突現象の計測例

過させている状況、(c)が現地実験の概要図である。手順 としては、上流側に模型氷を静かに浮かべて設置し、下 流の測深器地点まで移動させた上で1分間静止させ、続 いて下流のADCP地点まで移動させて1分間停止させ、1 度カメラ下部付近まで流下させた後、再び上流へ向けて 静かに移動させ、各機器の上方を通過させた。模型氷は 静止させている時はADCPと測深器の同時計測を行った。

実験の実施日については、水位変動による計測機器の 精度変化の有無を確認するため朝と夕方で潮位差の大き い2019年3月15日とした。実験の実施時間帯は、下流に ある網走港の潮位がEL+3.0m程度からEL-3.0m程度まで 低下に向かう時間帯とした。様々な水位条件で検証実験 ができるようこの時間帯を選択したものである。

対象期間を通じた観測における氷板挙動に関する定量 的な評価のため、図-6のようにビデオカメラによる撮影 画像から、護岸部への接近速度、離脱速度、入射角度及 び離脱角を算出した。衝突した河氷の流下方向、横断方 向のサイズについても同画像から算出した。ここで、ビ デオカメラでは広角レンズを使用しているためレンズ歪 みが伴う。そのため、ビデオカメラに付属の専用ソフト ウェアによりレンズ歪みを補正し、先述の計測を行った。 図-6のように歪みを補正した画像に基準線を重ね合わせ、 基準線との位置関係から氷板の諸元を読み取った。氷の コンクリート矢板護岸への衝突前後の速度の計測につい ては、撮影画像を切り出す前の画像をフレーム別に抽出 し、図中で縦の赤線を水平方向距離x=0の基準線とした 上で時系列的な位置の変化と速度を算出した。

3. 結果及び考察

はじめに検証用の模型氷による現地実験時の水位・氷 板下の水深より求めた推定河氷厚の算出結果について述 べる。図-7(a)に示したのは氷厚25 cmの場合の模型実験 時の推定河氷厚である。最上段がADCPによる計測結果、 その下にbeam1~beam4についてグラフ毎に色分けして時 系列的に推定河氷厚を示した。この実験の際には静止計 測の後に移動計測を行っており、それぞれの計測時間帯 をグラフ中の両矢印で示している。また、各計測時間帯

ABE Takaaki, OGUSHI Hiroya, YOKOYAMA Hiroshi







中の平均推定河氷厚を赤破線で河氷厚の数値とともに、 実測の河氷厚は黒破線で図中に示している。氷厚25 cm では概ね11:07:15~11:09:40が静止計測、11:11:00~11:12:00 が移動計測実施時間帯である。静止計測の時間帯では beam1がやや過大評価であったが、beam2~beam4は概ね 良好に河氷厚を推定できた。移動計測の時間帯では、 beam1で過小評価、beam2及びbeam4で良好に推定できて おり、beam3は模型氷の厚さの2倍程度で過大評価であっ た。一方同図(b)に氷厚20 cmの結果を示しているが、静 止計測時、beam1ではやや過大評価、beam2及びbeam3で は不検出、beam4では良好に推定された。移動計測時は いずれのビームも概ね良好に氷厚が推定された。(c)の15 cmのケースでは、静止計測のうちbeam1,3が過大、beam2 が検出不可、beam4は概ね良好である。移動計測では beam1,2,3,4いずれも概ね良好な計測結果であった。

氷厚25 cmの場合は流心寄りのbeaml及びbeam3で誤差 が大きく、護岸寄りのbeam2及びbeam4で概ね精度良く氷 厚を推定できた。一方で氷厚20 cmの場合はこの傾向は 見られなかった。また、3通りの氷厚に対し、ビーム照 射方向として下流向きのbeam1及びbeam4で見逃し無く氷 厚を推定及び検出できているのに対し、上流向きの beam2及びbeam3では見逃しがあり、かつ氷厚25,15 cmの 場合で計測時間帯後も河氷厚が推定されるなど、ビーム 照射方向により検出精度や誤検出の有無に影響が生じる ことが確認された。従って単一のビームで氷板の滞留や 移動を確実に検出するのは難しいようである。寧ろ4つ のビームの照射方向と漂流氷板の移動方向を考慮し、相 補的に漂流氷板の検出や氷厚推定に用いるべきであろう。 この点については今後も事例の蓄積や異なる条件での精 度検証などが望まれる。

以上から河氷厚が変化するような状況下においても、 ADCPによる河氷厚の推定結果は一定の精度で氷板の出 現タイミングや河氷厚を推定できる可能性が示された。 一定の誤差は含まれる可能性があるものの、複数方向の ビームの出力結果を比較することで誤検知の防止や見逃 しの低減を図ることができる可能性がある。尚、将来的 な通年観測や他河川での適用を想定した場合、模型氷の ような直方体形状ではなく実氷のように底面形状や氷板 の平面形状が不規則である可能性があり、誤差を拡大し うる要因が見込まれる。形状を変化させたり、氷板の面 積が実験より更に大きい場合の観測事例を追加し、継続 的に設置方法の工夫や推定方法の改良が必要であると考 えられる。

続いて、測深器による検証結果を示す。図-8(a)~(c)は 試験日の午前中に25,20,15 cmの模型氷を使用した実験、 図-9(a)~(c)は同日の午後に実験の再現性確認のため、2 回目の実験を行ったものである。図-8より、測深器によ る計測結果は(a) 25 cm、(b) 20 cmの場合にやや過大評価で あることが読み取れる。(c)の15 cmのケースでは静止計 測時の氷板の出現タイミングは捕捉できているが移動計

ABE Takaaki, OGUSHI Hiroya, YOKOYAMA Hiroshi



図-10 氷厚の実測値とADCPによる推定値との関係

測時は計測誤差に埋もれる形で、氷厚の推定としては過 小評価となっている。同日の2回目の実験では、静止計 測のみを実施しているが、このときはいずれのケースに おいても概ね良好に河氷厚を推定できている。

これらの測深器の計測にもADCPによる観測と同様に 一定の誤差は含まれていたものの、出現時刻と概ねの氷 板厚の推定のためには有効な手段であることが確認でき た。特に静止状態では推定精度が高く、緩やかな流況で 氷板の移動速度が小さい場合には精度の良い計測が期待 できる。

次に、ADCPによる河氷厚推定の誤差を評価するため、 現地実験で確認された実測河氷厚と推定河氷厚の相関図 を図-10に示した。図からは、静止計測も移動計測も同 程度の誤差が発生していることが確認できる。その傾向



は氷厚が変化しても顕著な差は見られない。また、ビームの角度別に見ると静止計測のbeam2及びbeam3 において推定河氷厚が0となるプロットが見られるが、先述の考察の通り氷板の接近方向とビームの発射角度の関係から不検知となったものと推察された。

水位及び河氷厚とADCPによる計測誤差との相関関係 を図-11に示す。左側の水位と計測誤差との相関図から は、水位の変化による明瞭な誤差の違いは見られず、一 定の誤差が概ね-0.2~0.2 mの間に分布していた。次に氷 厚と計測誤差の相関図を同図右側に示した。この図から も、計測対象の氷厚の違いによる誤差傾向の明確な違い は確認できなかった。これらの結果から、ADCPによる 誤差の発生要因は水位や氷厚等による物理条件や計測対 象に由来するというよりは、計測そのものに内在しうる 誤差であるものと考えられる。先述の測深器による計測 では推定河氷厚と実測河氷厚では良好な相関が別途確認 ⁹されており、こうした検証用の機器を補足的に、例え ば通年の観測期間中に一部の期間で設置することができ れば、補足資料として有用なものになると考えられる。

続いて、冬期から解氷期にかけた観測期間中の氷板の 平面的挙動を追跡するために実施した画像判読による結 果を示す。表-1に示したのは、日中及び夜間それぞれに おいて、漂流氷板がコンクリート構造物に衝突した様子 がビデオカメラ映像で比較的鮮明に取得された場合を20 ケース抽出し、その事象の発生日時と共に衝突前後の接 近速度、離脱速度、入射角、離脱角、画像内の河氷の流 下方向及び横断方向の寸法を一覧にまとめたものである。 表中の氷板の護岸部への接近速度については、0.06 m/s から最大で0.55 m/sの範囲に分布している。これは既報¹⁾ で示した範囲よりやや小さい値を含むが、概ね同程度の 計測結果である。また、既報いにより漂流氷板の駆動力 となる考えられる河道内の平均流速が0.3 m/sから0.5 m/s であることを推定しているが、この範囲とも概ね整合が 取れており、対象である網走川での漂流氷板の移動速度 は最大でも概ね0.6 m/sを見込めば良いことが分かる。一 方で同表に示した離脱速度であるが、0.02 m/sから0.41 m/sまで分布しており、接近速度よりやや小さい傾向が 見られた。これは氷板が護岸部に衝突する際は衝撃によ り氷の局部的な破壊や一部回転運動を伴う反発であった ことに起因すると考えられる。

また、接近及び離脱の際の入射角及び離脱角であるが、 入射角は3度から17度に分布していた。入射角は氷板が

表-1 抽出された氷板の諸元と接近・離脱速度

	X	• 111111	1 - 4 07 - 2	101000010			111/1/U/U/X	-
	日付	who had	接近速度	離脱速度	入射角	離脱角	河氷のフ	大きさ[m]
No.	(2019年)	時刻	[m/s]	[m/s]	[deg]	[deg]	流下方向	横断方向
1	1/27	9:04:42	0.31	0.27	5	14	5.50	3.50
2	1/29	15:31:50	0.23	0.13	10	0	3.00	3.25
3	1/31	16:33:53	0.31	0.25	9	0	4.00	3.25
4	1/31	16:37:27	0.25	0.24	7	0	2.90	2.70
5	1/31	16:39:13	0.22	0.13	17	0	1.00	1.00
6	2/3	18:34:56	0.55	0.35	13	0	2.50	2.50
7	2/4	19:50:24	0.34	0.29	6	0	1.20	1.00
8	2/4	19:58:40	0.28	0.24	4	6	2.50	2.20
9	2/4	20:56:56	0.44	0.40	10	10	3.20	3.00
10	2/5	1:23:48	0.23	0.15	5	16	2.50	2.35
11	2/5	1:24:57	0.21	0.13	9	0	2.30	3.00
12	2/12	21:29:36	0.21	0.23	3	0	3.80	3.00
13	2/12	21:34:05	0.28	0.23	7	3	4.20	3.20
14	2/12	21:35:20	0.22	0.19	9	5	4.40	2.57
15	2/16	3:54:35	0.15	0.13	9	8	4.60	2.30
16	2/24	14:56:43	0.06	0.02	6	38	1.10	1.50
17	2/25	21:05:35	0.14	0.13	10	3	1.30	1.60
18	3/10	7:20:53	0.28	0.02	14	67	1.10	1.15
19	3/11	8:17:10	0.38	0.33	5	7	1.90	2.20
20	3/12	12:19:35	0.35	0.41	5	6	1.60	2.25
0	(a) No	.4衝突時		-Beam1	—Bea	m2 —	Beam3 -	-Beam4
- 0.	-							
E 0.	4 -							
ž	-Muk							
展 0.	2 -							
推	-							
0.	0		- -			.		
	16:25	16:3	0 .	16:35 2010年1日3 [.]	16:40 1日の時刻	1	16:45	16:50
	(b) No 15衝空時			2019年1月51日の時刻 — Baam1 — Baam2 —			Beam3	Beam/
0.	.6			Dealin	Dea	1112	Beams	Deality
[m] 一 一 一 一 一 一 一 一 一 一 一 一 一 一 一	-							
	.4 +							
	1			11 1				
一世 0.	2	Marin Marine	h de Marenne	i i kilka tettak		1 Million	hillion all all a	ير الأليان جليل
fh	_ 1 <mark>1 🚺</mark>	The second second					Aller	י אקאיירי וריי
0.	3:40	3.45		3:50	3:55		4:00	4:05
2019年2月16日の時刻								

図-12 ADCPによる衝突前後の河氷厚推定結果

有する運動量、即ち衝突力の評価にあたって重要な指標 である。本研究で実施した詳細な観測に基づけば数度か ら最大でも20度程度を見込めば良いことが分かる。一方 で離脱角は特徴的な結果が得られており、衝突後流下方 向に水平に流下する場合が多く見られその場合は離脱角 を0度と見なした。一部入射角より大きい角度で離脱す る場合があったが、これは護岸表面の凹凸に接触したこ とや氷板の駆動力となる主流方向の表面流速が小さかっ たことが原因と考えられた。同様の手法で取得画像から 読み取られた河氷の大きさであるが流下方向のサイズは 1.0 mから5.5 m程度、横断方向では1.0 mから3.5 mの範囲 で分布していた。各衝突日時を見ると多くの場合で流下 方向に沿う辺が氷板の長辺となっていることが定量的に 確認された。

以上によりADCPによる河氷厚推定への適用性がある 程度確認できたこと、及び護岸部に漂流氷板が衝突する 日時が詳細に把握できたことから、表-1で実際に衝突が 発生したイベント前後において取得された、代表的な推 定河氷厚の結果を示したのが図-12である。合わせてそ の時に抽出された氷板衝突時の画像を図-13に示した。



図-13 No.4,15の氷板衝突時の様子と寸法計測

表-2	各ビーム	で平均化され	た推定河氷厚
-----	------	--------	--------

No.	河氷厚推定值算出時間帯	beaml	beam2	beam3	beam4
4	2019/1/31 16:37:07~16:37:37	0.36	0.37	0.29	0.37
15	2019/2/16 03:54:20~03:54:50	0.13	0.16	0.15	0.14

図-12では図-7と横軸のスケールが異なることに留意さ れたい。図-12では不検出(河氷厚が0)や過大な値とな る時間帯が見られるもののいずれの場合でも各ビームで 概ね一定の河氷厚を検出及び推定できる結果となった。 推定河氷厚は(a) No.4で0.3~0.4 m程度、(b) No.15では0.1~ 0.2 m程度であった。そのため両ケースを踏まえれば河 氷厚が2倍程度となってもADCPによる推定河氷厚は概 ね安定した数値が得られるものと推察される。表-2は衝 突が確認された時間帯において各ビームで平均化された 河氷厚の推定値を示している。No.4では0.29~0.37 m程度、 No.15では0.13~0.16 m程度の河氷厚が推定されており、 図-12に見られた値の範囲と概ね整合するものである。 先述の通りビーム照射方向による不検出や精度低下の懸 念は残されるものの、両ケースである程度安定した推定 河氷厚が得られていることから、表-1と表-2の情報を組 み合わせることで衝突する河氷の質量を踏まえた衝突現 象の把握ができる可能性がある。ここで示した推定結果 は実測値ではないため直ちに運動量の評価に援用できる 訳ではないが、衝突力の評価に際し極めて重要な情報を 与えていると言ってよいであろう。

以上の結果及び考察でADCPによる河氷厚推定への適 用可能性や画像判読による氷板の衝突挙動の定量的把握 の有効性がある程度明らかにできたと考えるが、更なる 実現象への適用を想定した場合には、コンクリート護岸 表面部に凹凸が存在することに加え、護岸との接触箇所 を起点に回転運動が生じる可能性を考慮する必要がある。 即ち衝突力評価にあたっては、単純な固体どうしの衝突 と反発現象として捉えるのではなく、回転を伴うなどし て氷板がコンクリート護岸表面に接触している作用時間 の評価が困難になる場合があることに留意しなければな らない。また、河合ら⁷が指摘するように群体として構 造物に接触する場合があり得ることにも留意する必要が ある。この点については、撮影画像と合わせて既報りで 報告している通り時系列的な衝突力計測結果と比較検討 を行うことなどにより、引き続き考察を深める必要があ ると考えられる。

4. まとめ及び今後の課題

本研究では、実際の観測事例が少なく、未解明な点の 多い結氷河川におけるコンクリート構造物周辺の氷板の 挙動に関する詳細な現地観測と、画像解析の併用、及び その適用性について検証を行った。その結果、ADCPと 測深器による河氷厚の検証結果から河氷厚の計測に一定 の有効性があることが確認された。

また、画像解析により、河氷の具体的な挙動として護 岸部への接近速度、離脱速度とサイズを算出することが 可能となった。ADCPの氷厚推定値と密度の情報を組み 合わせることで運動量の変化を定量的に評価できる可能 性がある。このように、氷板の衝突力の評価のための基 礎情報を得ることが可能な現地観測手法として確立でき たことは一つの成果であると考えられる。

今後の課題としては、河氷の挙動から衝突外力の推定 に繋げる手法を確立すること、そして衝突外力の推定か ら護岸の損傷プロセスを明確にし、モニタリングの留意 事項として取りまとめることが挙げられる。

なお、氷板の衝突力の評価については、これまでにも 既報^{1,2}の通り津波漂流物の衝突力算定式を援用するこ とで網走川等の現地での氷板衝突力の評価を試みた結果 があり、関連分野での知見も活用しながら、精度の高い 氷の衝突力評価に繋げていくこととしたい。

謝辞:本研究の実施に当たり、国土交通省北海道開発局 網走開発建設部から現地資料の提供など協力を頂いた。 ここに記して謝意を表する。

参考文献

- 1) 横山洋,伊波友生,内藤勲,前田俊一,矢部浩規,吉川泰弘:複合 劣化が生じた河川コンクリート構造物に対する河氷衝突外 力の計測,河川技術論文集,Vol.25,pp.175-180,2019.
- 2) 横山洋,吉川泰弘,上野順基,山田嵩,伊波友生,矢部浩規:結氷 河川感潮域における河氷衝突現象を踏まえた河川構造物の 外力評価手法の検討,河川技術論文集,Vol.26,pp.545-550,2020.
- 3) 滝口真澄,大田見定,澤田公男:網走川下流部特殊堤に生じた 変状の要因分析と対策について,第56回(平成26年度)北海 道開発技術研究発表会,安-37,2015.
- 4) 山本泰司,木岡信治,本間大輔,先川光弘,堺茂樹:北海道オホ ーツク海沿岸部における海氷の底面形状とその分析,海洋 開発論文集, Vol.19, pp.803-808, 2003.
- 5) 橋場雅弘,吉川泰弘:超音波測定機器を用いた河川結氷時の 河氷底面形状の現地調査,河川技術論文集, Vol.18, pp.149-154, 2012.
- 6) 阿部孝章,横山洋,大串弘哉:凍害劣化を受けた河川コンクリート構造物周辺の河氷の挙動特性について,寒地土木研究所月報,第834号,pp.19-27,2022.
- 河合孝治,牧田佳巳,木岡信治,寺島貴志,竹内貴弘:鋼矢板護 岸に作用する流氷の接触圧力に関する現地計測,海洋開発 論文集,Vol.26,pp.909-914,2010.

ABE Takaaki, OGUSHI Hiroya, YOKOYAMA Hiroshi