

元稲府漁港取水施設の流氷による破損について

網走開発建設部 紋別港湾事務所 工務課 ○秋田谷 肇
西多 道祐
北日本港湾コンサルタント株式会社 野村 明弘

令和2年4月、元稲府漁港の取水施設の内、港外海底に設置されている取水口の破損が確認された。本報では、取水口の破損に至った経緯を調査し、流氷からの作用が直接の被災要因として想定されたため、これへの対策を検討した。併せて数値シミュレーションによる流氷衝突の再現実験を行い、対策方法とした取水口の防護柵の有効性を検証し、現地の取水口の復旧までの一連について報告するものである。

キーワード：流氷観測、シミュレーション

1. はじめに

北海道のオホーツク海沿岸では、流氷の来襲により港湾・漁港施設に被害が生じる事例が報告されている。

元稲府漁港では、サケ・ホタテの衛生管理を目的とし、港外から清浄な海水を取り入れるために取水施設を整備し、平成26年3月に完成した。しかし、令和2年4月に海水が供給されないといった取水障害が発生し、調査の結果、流氷が要因とされる、取水口の破損が確認された。

このような背景を踏まえ、流氷が来襲する海域における施設を整備する際には、流氷による影響を考慮する必要がある。

本稿は、元稲府漁港の取水施設の破損事例を対象に、破損状況の詳細調査、流氷による外力作用メカニズムの解明、数値シミュレーションによる再現計算、および現地観測による検証を通じて、取水口の破損原因を解明し、効果的な対策工法を提案するものである。



図-1 取水施設位置

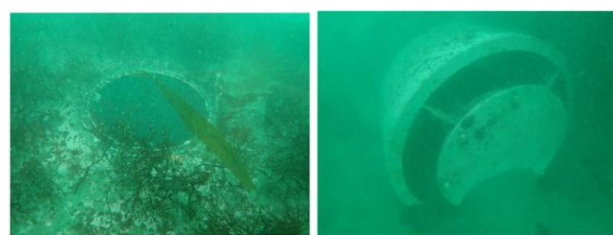


写真-1 取水口破損状況

2. 破損の要因

(1) 破損原因の推定

破損のあった取水口位置を図-1に、取水口の破損状況を写真-1に示す。破損状況は図-2に示すとおり、取水管立ち上り部が破断され、取水口が港外側に落下していた。取水口の落下位置から、南から北向きの外力により破損したと推測される。破損原因としては、波の作用により取水管立ち上り部が破断したと想定した場合、南側に落下する可能性が高く、波の作用が直接の原因ではないと推測される。

地元自治体および地元漁協へヒアリングした結果、漁船アンカー衝突等の外的要因も考え難いこと踏まえ、流氷による外力が要因と想定された。

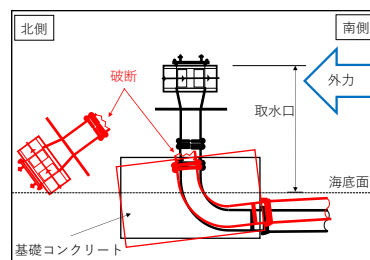


図-2 取水口破損状況イメージ図

(2) 破損時期の推定

前述のとおり、取水障害は令和2年4月に発生したが、令和元年5月27日の深浅測量（マルチビーム測深）の結果を確認したところ、図-3に示すとおり取水口の落下が確認でき、破損時期は平成31年（2019年）の流氷襲来時と想定した。なお、破損から取水障害が発生するまでの間、取水管立ち上がり部が破断した状態で取水が行われていたことになるが、当該期間において利用上の問題は発生していなかった。

気象庁の流氷密集度および波浪状況データによると、取水施設建設以降（平成26年冬以降）、毎年流氷が接岸しているが、特に平成31年（2019年）が直近20年で流氷の勢力が最も強かった。

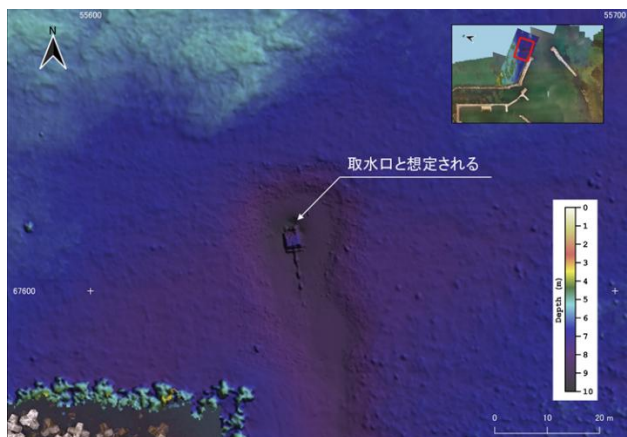


図-3 深浅測量(マルチビーム測深)結果

(3) 破損メカニズムの推定

取水口の破損メカニズムとして、流氷の衝突（CASE1）（図-4）と流氷の準静的荷重（CASE2）（図-5）が考えられる。

CASE1は流氷離岸時の氷塊衝突を想定したものであるが、取水口カバー等を含む全体の損傷には至っていない現状と整合しておらずこのケースは可能性が低いと想定される。

CASE2は流氷のパイルアップ（流氷が構造物の前で堆積する現象）による繰り返し荷重を想定したものである。既往研究から流氷が水面に見えるセイル（Sail height）：流氷が水中に沈んでいるキール（Keel depth）の比を1:1.6（図-6）¹⁾とすると、防波堤の天端高程度までパイルアップした際に取水口下端まで着底する。取水口の設置位置は防波堤に近接していることから、パイルアップした流氷が取水口に接触し、繰り返し水平力が作用することで破損に至ったと想定される。

破断面が引きちぎられた形状であること、取水口カバーや基礎コンクリートに大きな変状が確認されないこと、有識者ヒアリングにより設置水深からの流氷衝突は考えにくくパイルアップによる影響の可能性が示唆されたことから、流氷による準静的荷重（CASE2）が繰り返し作

用し、管の疲労により破断に至ったものと推測される。

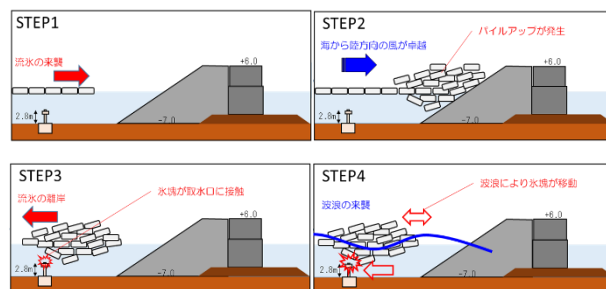


図-4 外力作用メカニズム模式図 (CASE1)

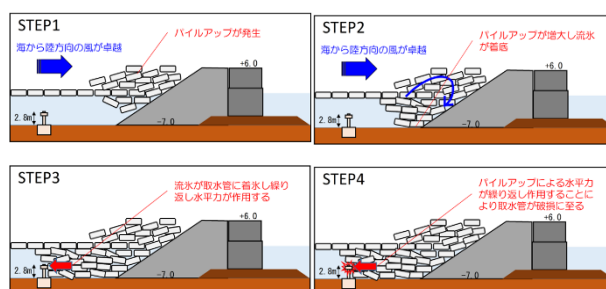


図-5 外力作用メカニズム模式図 (CASE2)

また、セイルとキールの比から、流氷が着底する場合のセイルの高さは、取水口設置水深=-7.0m、H.W.L.=+1.40m、L.W.L.=±0.00mであることを踏まえ、

H.W.L.時：8.4/1.6=5.25m

L.W.L.時：7.0/1.6=4.38m であり、概ね防波堤の天端高と同程度まで流氷がパイルアップした時に取水口設置水深まで着底することになる。（図-7）

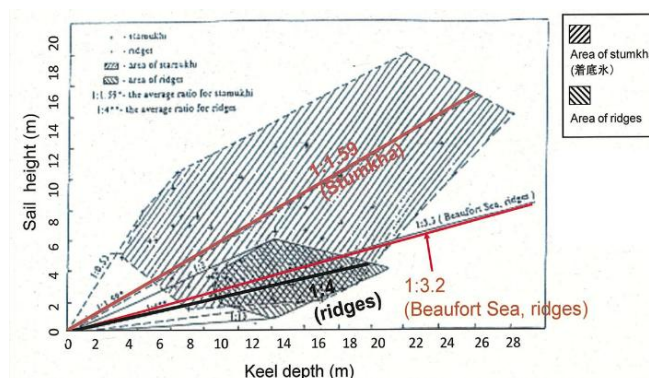


図-6 サハリン沿岸域における変形氷の規模

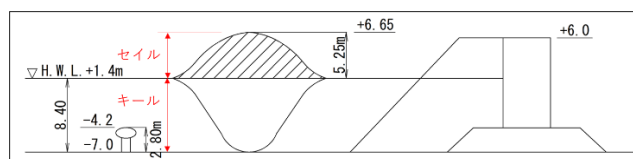


図-7 パイルアップ高さ

また、写真-23のような流氷のパイルアップについて、今回の取水口の設置位置が防波堤に比較的近接した位置にあり、流氷が防波堤にせき止められやすい条件であることから、せき止められた流氷がパイルアップし拡大することで、最終的に取水口に接触したことが想定される。



写真-2 流氷の水面からの突出
(提供：雄武漁協 撮影位置：雄武漁港沖0.4km地点
(2018.冬))

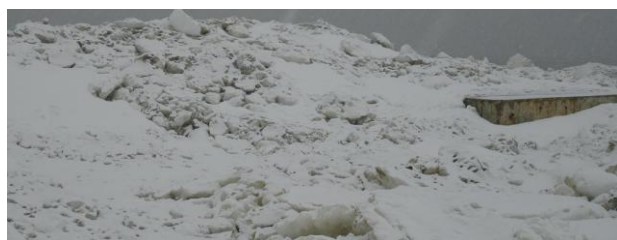


写真-3 パイルアップ事例（斜里漁港）

推定した外力に対する既設取水管立ち上り部（ポリエチレン管）の応力照査²³⁾⁴⁵⁾の結果を表-1に示す。CASE1では曲げ強度が大きく許容値を超えているが、現場状況から流氷が衝突するような状況は考えづらく、許容値を超えるようなことはなかったと推察される。一方、CASE2では曲げ強度とせん断強度が許容値内であるものの、現地がパイルアップしやすい状況であり、流氷による準静的荷重（CASE2）が繰り返し作用したと考えられることから、管が疲労により破断に至ったものと推測される。

表-1 既設取水管（ポリエチレン管）の応力照査

外力ケース	降伏曲げ強度(N/mm2)			降伏せん断強度(N/mm2)				
CASE1：流氷の衝突外力に対する評価	188	>	25.5	OUT	8.74	<	14.7	OK
CASE2：流氷の静的荷重に対する評価	21.6	<	25.5	OK	1.01	<	14.7	OK

3. 取水施設の対策

取水口破損状況および原因の推定を踏まえ、破損した取水口の改良方針を検討した。

(1) 取水管破断部の改良および防護柵の設置

取水管破断部は、繰り返し荷重の作用による疲労破断と推定されたことから、立ち上り部の強化を目的にポリエチレン管（PE管）をステンレス管に変更した。

既設のPE管は可とう性を有し、取水口が外力を受けた際にたわみが発生するため、繰り返し荷重や経年により劣化しやすく、立ち上り部が破断しやすい。（図-8左）

一方で、ステンレス管に改良することにより剛性が高くなり、外力作用時において荷重が直接基礎コンクリートに伝達し、取水管立ち上り部周辺のコンクリートのひび割れ発生や、立ち上り部の剛性が高くなる。（図-8右）

また、強度を有さない取水口カバー等の破損が懸念されるため、取水口に流氷による外力が作用しない対策として防護柵を設置することとした。

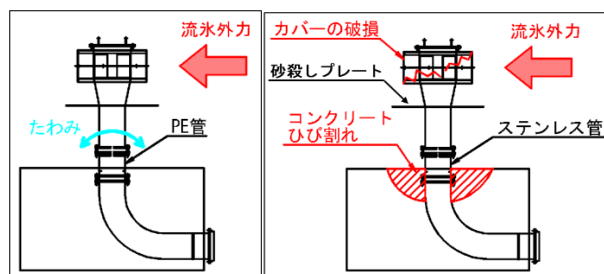


図-8 取水口に外力が作用した際のイメージ図

ステンレス管への改良後の応力照査結果を表-2に示す。表-2のとおりどちらのケースにおいても応力の許容値であり、安定性が確保される。

表-2 取水管（ステンレス管）の応力照査

外力ケース	降伏曲げ強度(N/mm2)				降伏せん断強度(N/mm2)			
CASE1：流氷の衝突外力に対する評価	188	<	205	OK	8.74	<	118	OK
CASE2：流氷の静的荷重に対する評価	21.6	<	205	OK	1.01	<	118	OK

(2) 既設取水口の流用および部材の交換

既設取水口は立ち上り高さ3m程度で、付帯構造として土砂の巻き上がり対策の砂殺しプレートφ=2000mmが設置されている。漁協へのヒアリングの結果、供用時には水質・水量に問題はなく、巻き上げ土砂が取水口に混入する問題も生じていなかったことから、管内の埋塞対策として高い効果を発揮していたことが確認できた。このため、基本形状を維持し取水口を流用した。ただし、既設基礎コンクリートは、コンクリート内部に埋め込まれている破損したポリエチレン管を取り外す際に取り壊す必要があることから、新設することとした。

(3) 取水管防護柵構造

防護柵は、既設砂殺しプレート（φ=2000mm）を格納可能な支柱芯間隔2.5mとし、支柱は角形鋼管（350mm）、ビームはH形鋼（250mm）とした。

材質は、流氷による摩耗やサンドエロージョンの影響が少ない「鉄材+溶融亜鉛めっき」と「ステンレス鋼材」を比較検討し、経済性から「鉄材+溶融亜鉛めっき」案を採用することとした。

防護柵上部蓋については、流氷がパイルアップした際に防護柵に鉛直方向の荷重がかかることが想定されることから、取水口に直接荷重が作用することを防ぐ目的で、防護柵上部に蓋（H形鋼フレーム）を設置することとし

た。H形鋼フレームの間隔は、パイルアップ荷重に対応するため0.3m間隔とした。



写真4 既設取水管（引き上げ時）の様子

(4) 維持管理

目視確認等の通常点検は取水口防護柵の開口部より行い、取水口に異物等が流入した場合は、上部蓋（H形鋼フレーム）を取外してメンテナンスを行う。また、取水管全体の修理等が必要な場合は、防護柵の上部蓋を取り外して行うことを想定した。

(5) 洗掘対策

取水口周辺において、1.5m～2.0m程度の洗掘が発生していたため、基礎コンクリートに直接的に流氷外力や波力が作用することを防ぐことを目的に、石かご10t型（被覆鉄線）を設置した。



写真5 防護柵設置後の取水口

4. 流氷観測

取水管の破損メカニズムの妥当性を検証するとともに、対策工として整備された防護柵の有効性を確認するため、現地観測を行った。

(1) 令和5年度調査

令和5年12月～令和6年3月まで陸上および水中カメラ等による観測を実施した。

流氷の接岸を確認できたのは1月25日～27日および2月27日～3月1日のみであり、いずれも流氷の密度が低くパイルアップは確認されなかった。水中カメラおよび潜水士による目視観察の結果、防護柵への流氷の接触痕跡は認められなかった。

(2) 令和6年度調査

令和6年12月～令和7年3月まで陸上カメラによる観測を行った。また、防護柵側面にテストピース（コンパネ）も設置したが、流氷の擦過痕は確認されなかった。

流氷接岸時（令和7年2月13日、2月20日）には、ドローン撮影も実施した。ドローン映像から作成したオルソ画像では、流氷高は概ね0.8m～1.3m（最大2.0m）あり、最大喫水は-1.84mと推定された。これは取水施設防護柵の天端水深4.0mに接触する懸念がなかったことを示している。

5. 数値シミュレーションによる取水口への影響の評価

(1) 検討概要

前述の観測では、流氷厚さの推定や流氷来襲状況の検討結果より、取水口に達するようなパイルアップの発生は確認できなかった。また、取水口への流氷接触状況の各検討結果より、取水口への流氷の接触も発生していなかったことが確認できた。

図-9に令和6年と令和7年の海氷面積の年別経過図を示す。令和6年の海氷面積は、ピーク時に平年値を超える状況であったものの、パイルアップや取水口への流氷の接触が確認されていない。このため、流氷が取水口に接触する現象は、異常気象に伴う現象であると考えられる。

ここでは、異常気象に伴う現象を解明する上で一般的に用いられる数値シミュレーションにより、再現実験を行った。なお、再現実験は、「パイルアップによる取水口への接触」によるものとした。

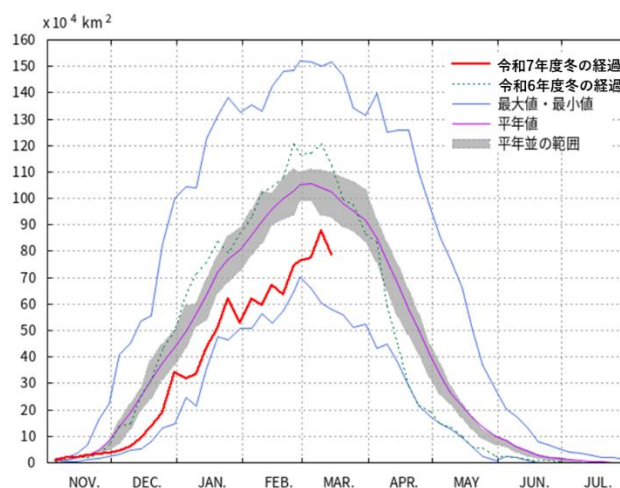


図-9 海氷面積の年別経過図

(2) 解析手法

解析手法は、流氷と海水を粒子としてモデル化し、パイルアップによる流氷の重なりと深度を再現可能なSPH(Smoothed Particle Hydrodynamics)法を用いたオープンソ

ース解析ソフトウェア(DualSPHysics)を用いた。

(3) 計算結果

2ケースの計算結果を図-10及び図-11に示す。

CASE1：移動速度0.2m/s

CASE2：移動速度0.3m/s

両ケースともにパイルアップの発生は確認されたが、沖合へ流出するため、取水施設への接触が生じるまでの状況とはならなかった。なお、流水が密な状態を初期条件としているが、取水施設上の水面まで達する継続時間はCASE1で700s、CASE2で500s程度であり、継続時間としては短いものであった。また、パイルアップ高は、CASE2でやや大きい、両ケースともに取水施設の天端水深まで達している氷塊がみられ、数十年に一度発生するような強風の条件でなくても、流水量や流水の形状等によっては接触に至る可能性があると考えられる。

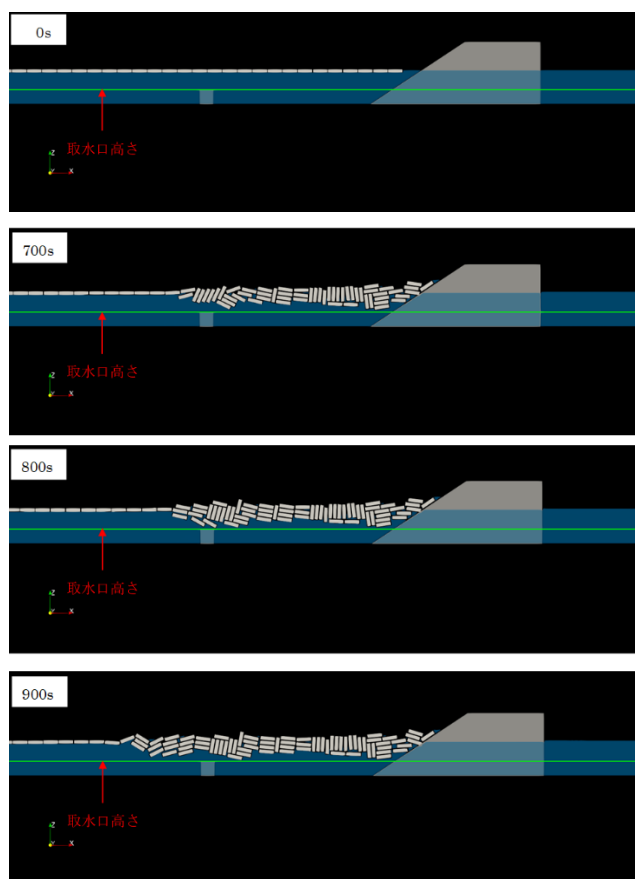


図-10 計算結果（パイルアップ・CASE1）

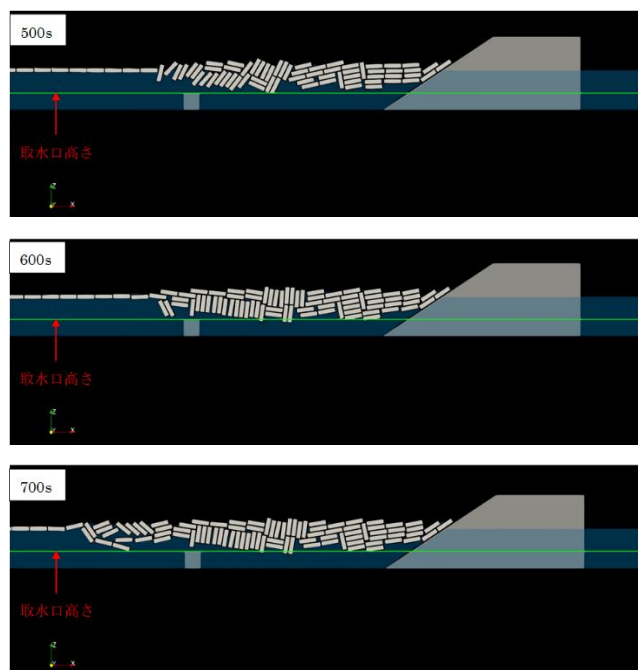
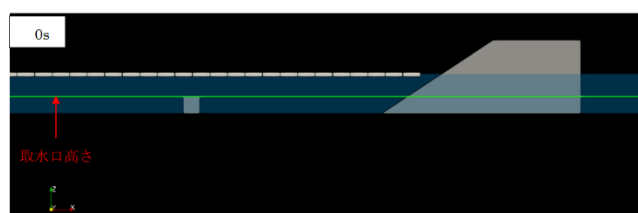


図-11 計算結果（パイルアップ・CASE2）

(4) 防護柵の有効性の検討

シミュレーション結果をもとに、防護柵の有効性について検討した。

各検討ケースおよびその結果について表-3に示す。パイルアップについては、取水口への接触は発生していないが、取水口の天端水深まで潜り込んでいる氷塊が接触した場合の圧力とした。検討の結果、パイルアップ時の流氷水平力に対して、防護柵の安定性が確保されていることを確認できた。

表-3 安定照査結果

	滑動	転倒
パイルアップ時	$5.648 \geq 1.20 \dots$ OK	$3.565 \geq 1.20 \dots$ OK

6. おわりに

本稿では、元稲府漁港の取水施設で生じた破損の原因を調査し、流氷による外力作用メカニズムを解明した。さらに、数値シミュレーションと現地観測により、流氷による影響及び対策工法の有効性を検証した。

流氷が来襲する海域における施設整備では、流氷による影響を考慮した検討が不可欠である。今後は、流氷勢力が大きい年に追加調査を行い、当該施設での対策の妥当性をさらに検証していきたいと考えている。

謝辞： 本件に係る各検討にあたり、寒地土木研究所寒地水圏研究グループ寒冷沿岸域チーム木岡総括主任研究員に多くのご指導・ご助言をいただいた。ここに記して謝意を表する。

参考文献

- 1) surkov : 1995_POCA95_V2_all, P.142
- 2) 木岡信治, 遠藤強, 竹内貴弘, 渡部靖憲 : 中規模衝突実験及び数値実験に基づく海氷等脆性体の衝突力特性と簡易式の提案, 土木学会文集 B2(海岸工学), Vol.73, 2017
- 3) 國松靖, 原文宏, 高橋良正, 佐伯浩, 榎国夫, 今泉章 : オホーツク沿岸部の流水盤の大きさに関する研究, 海洋開発論文集 Vol.9, 1993.6
- 4) 先川光弘, 山本泰司, 本間大輔 : オホーツク海における流水来襲状況の現地観測, 第 45 回北海道開発局技術研究発表会, 2002
- 5) 木岡信治, 竹内貴弘, 渡部靖憲 : 海氷群を伴う津波氾濫流の建築物近傍での水深変化と津波荷重の簡易推定法, 土木学会文集 B2(海岸工学), Vol.75, 2019