

凍害劣化したコンクリート護岸の劣化プロセスに関する実験及び数値解析的検討

—3次元数値解析モデルを用いた劣化予測ツールの開発—

(国研)土木研究所 寒地土木研究所 寒地河川チーム ○阿部 孝章
横山 洋
大串 弘哉

積雪寒冷地においては厳寒環境下におけるコンクリート護岸の老朽化、漂流する河水等の衝突による損傷や摩耗が河川における維持管理上の課題となっている。本論文では、凍害劣化を受けたコンクリート護岸を模した供試体に重錘を衝突させ、損傷や衝突力を計測する室内実験を行い、これを再現可能な数値解析モデルを構築した。数値解析結果と実験の計測結果や破壊性状に関する比較検討を行い、その妥当性について検討を行った。

キーワード：コンクリート護岸、室内実験、数値解析、劣化予測

1. はじめに

近年の頻発する大規模な水災害を受け、流域内のあらゆる関係者が共同で治水という目標に取り組む「流域治水」の考えに基づき、国土交通省でも様々な施策が展開されている。流域治水のメニューの中には従前の治水事業の延長としてのもも含まれるが、実際に災害をもたらす程の降雨事象があった際に河川管理者に最も求められるのは、各種施設の着実な機能の発揮である。その観点では、日頃の適切な維持管理により、各種河川構造物の機能を確保することが重要であると言える。

さて、北海道のような積雪寒冷地域においては、人々の日常生活に直結するインフラのみならず、河川構造物も冬期間の厳寒環境下に晒されることとなる。河川域では気温の低下により氷が発生し、構造物周辺に氷が付着し、春先には融解による剥離と、河道内で漂流氷板となった氷の移動が観測されることになる(写真-1)。護岸等構造物も同様に氷の付着や、先述の漂流氷板の衝突、あるいは護岸周辺部での揺動により損傷・摩耗すること

が確認されている¹⁾²⁾。

寒冷地において構造物に氷が及ぼすこうした悪影響は古くから知られ、沿岸域³⁾⁴⁾や海洋域⁵⁾においては氷の物性について、あるいは構造物への影響の度合いなどについて現在に至るまで研究が進められてきている。しかしながら、河川域における氷の挙動や構造物の影響については、海外の事例⁶⁾や、国内の一部の既往研究⁷⁾が存在するものの、明らかになっていない面が多い。そうした状況を踏まえ、著者らが所属する研究グループではコンクリート護岸周辺の氷の挙動について明らかにすべく、詳細な現地観測に基づく分析¹⁾²⁾を行ってきており、氷の諸元やコンクリート構造物に対する衝突力の観測値が少しずつではあるが明らかになってきた。

しかしながら、氷の形状や重量等種々の条件に対応した影響度合いの評価やそれらを考慮した設計法の確立までには至っていないのが現状である。本稿ではその第一歩として、観測データに基づき現地状況を模した室内実験を行い、コンクリートの損傷過程を検討するための数値解析ツールを確立することを目的とし、実験及び数値解析的手法による検討を行ったことを報告するものである。

2. 手法

(1) 室内衝突実験

本研究で実施されたコンクリートに対する衝突実験の概要について述べる。コンクリートの供試体としては、現地において凍害劣化の作用を受け、脆くなったコンクリートを模擬するため、一定の凍結融解のサイクルで水



写真-1 網走川における護岸周辺の漂流氷板



写真-2 コンクリート供試体の例

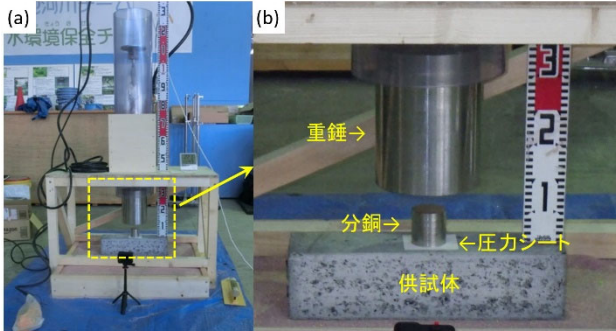


写真-3 実験装置の概要（写真左は装置の全体状況、写真右は重錘、分銅、供試体の位置関係）

中養生あるいは蒸気養生を施した供試体を作製した。寸法は断面が10 cm四方で高さ40 cmの角柱である。供試体の例として写真-2に示しているが、鉄筋ありの供試体で表面にはまばらな剥離箇所が見られる。

これらの供試体に対し、写真-3に示すような衝突実験装置を作製し、供試体側面に対して鉛直上方から約28 kgの重錘を落下させ、直径3 cmの分銅を介して供試体表面に衝突力が伝播するような構造とした。落下高さは現地観測結果⁷⁾で得られた衝突力が再現できるように設定した。分銅と供試体の間には圧力シートを設置して衝突力が計測できる構造とし、衝突力が面的に一様に供試体に加わるよう落下高さを微調整した。

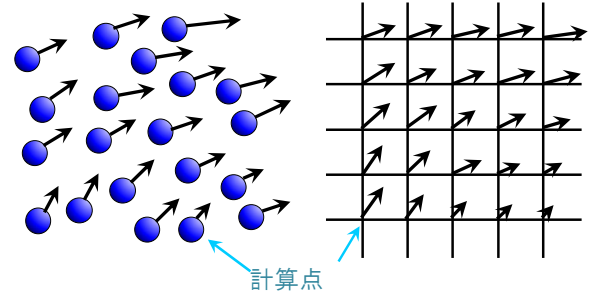
(2) 数値解析手法

本稿では河川分野では比較的馴染みの薄い粒子法という解析手法を基本的な解析手法として採用したため、その概要について述べる。粒子法とは、通常河川分野で河床変動計算や氾濫計算に用いられる格子法とは微分方程式の離散化に際して少し異なる定式化を行う。図-1に示したのは、粒子法と格子法の比較を概念的に表したものである。連続体（流体や構造物）挙動の計算を時々刻々進めるといふ点では共通なのであるが、粒子法では計算点が空間に固定されておらず、格子法では格子（グリッド、メッシュ、セルなどとも呼ばれる）上に固定される。

粒子法は連続体の分離・合体や大変形問題に適用しても安定的に計算でき、格子法と比較して精度が低下しづらい。そのため本稿で対象とするような物体同士の衝突問題で破壊や損傷を伴うものについては、粒子法の方が適用が容易であり、解析上の破綻が少ない。このような利点から本稿では粒子法を基本的な解析手法として採用した。

□粒子法(MPSなど)

□格子法(FEMなど)



- 計算時格子は用いず、時々刻々粒子は移動する
- 計算点は空間に固定されている

図-1 粒子法と格子法の概念の比較¹⁰⁾

連続体の解析手法としての粒子法には大きく SPH (Smoothed Particle Hydrodynamics)法⁸⁾と MPS (Moving Particle Simulation)法⁹⁾の2種類が有名である。本稿では国内の研究者により開発され信頼性の高い MPS 法を基本的な解析手法として採用した。粒子法に関する参考資料として、著者らの研究グループによる河川構造物に対する津波衝突時の波力推定¹⁰⁾、漂流物を伴う津波衝突の解析事例¹¹⁾が既報として存在する。

次に解析の基礎方程式と離散化について述べる。弾性体の支配方程式は

$$\rho \frac{Du_i}{Dt} = \frac{\partial}{\partial x_j} (\lambda \varepsilon_{kk} \delta_{ij} + 2\mu \varepsilon_{ij}) + \rho K_i \quad (1)$$

但し、 ρ は密度、 u_i は速度、 x_i は変位、 δ_{ij} はクロネッカーのデルタ、 K_i は重力などの外力、 λ 及び μ はラメの定数で、次式のように表される。

$$\lambda = \frac{Ev}{1-\nu^2}, \quad \mu = \frac{E}{2(1+\nu)} \quad (2)$$

ここで E はヤング率、 ν はポワソン比である。ここで圧力と応力を用いて式(1)を表すことにすると

$$\rho \frac{Du_i}{Dt} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_j} + \rho K_i \quad (3)$$

で圧力 $p = -\lambda \varepsilon_{kk}$ であり、

$$\sigma_{ij} = 2\mu \varepsilon_{ij}, \quad \varepsilon_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (4)$$

である。ある計算対象粒子 i の近傍に存在する（即ち、相互作用計算を行う）粒子 j について、初期の相対位置ベクトル \mathbf{r}_{ij}^0 、計算過程での相対位置ベクトル \mathbf{r}_{ij} 、そして歪みによる変位ベクトル \mathbf{u}_{ij} は

$$\mathbf{r}_{ij}^0 = \mathbf{r}_j^0 - \mathbf{r}_i^0, \quad \mathbf{r}_{ij} = \mathbf{r}_j - \mathbf{r}_i \quad (5)$$

$$\mathbf{u}_{ij} = \mathbf{r}_{ij} - R\mathbf{r}_{ij}^0 \quad (6)$$

と表される。但し式中の R は3次元の回転行列である。これを鉛直成分と剪断成分に分割すると各応力は

$$\sigma_{ij}^n = 2\mu \frac{u_{ij}^n}{r_{ij}^n}, \quad \sigma_{ij}^s = 2\mu \frac{u_{ij}^s}{r_{ij}^s} \quad (7)$$

となる。MPS法では運動方程式中の微分演算子を粒子間相互作用モデルと呼ばれる独自の離散化モデルを用いて離散化することとなる。宋ら¹²⁾のように圧力を粒子位置で計算する際にMPS法における発散モデル¹³⁾を用いると、

$$\begin{aligned} p_i &= -\lambda \varepsilon_{kk} = -\lambda \operatorname{div} \mathbf{u}_{ij} \\ &= \frac{D_s}{n_0} \sum_{j \neq i} \frac{\mathbf{u}_{ij}^n}{r_{ij}^n} \cdot \frac{\mathbf{r}_{ij}}{r_{ij}} w(r_{ij}^0) \end{aligned} \quad (8)$$

のように算定することができる。ここで、 D_s は空間の次元数(ここでは $D_s=3$)、 n_0 はMPS法における初期粒子数密度、 $w(r)$ はMPS法で標準の重み関数で、次式で表される。

$$w(r_{ij}) = \begin{cases} \frac{r_e}{r_{ij}} - 1 & (0 \leq r_{ij} \leq r_e) \\ 0 & (r_{ij} > r_e) \end{cases} \quad (9)$$

ここで、 r_e は計算粒子間の相互作用を制限する影響半径であり、計算粒子径 d_0 を用いて $r_e=2.1d_0$ とした。通常、MPS法の計算において影響範囲は d_0 の2~4倍とされることが多いが、 d_0 の2.1倍としたのは宋ら¹²⁾に従ったもので、計算コスト増大を防ぎつつ安定的に解析可能であることを確認したためである。

コンクリート供試体の衝突実験を再現するため、3次元粒子法の計算領域で衝突実験のモデル化を行った。計算粒子径(格子法で言うメッシュサイズに該当する)は $d_0=0.01$ m、総計算粒子数は約4,000個である。解析上の空間解像度をこれ以上細かくすることも考えられるが、最小限の計算負荷で実験で確認された破壊性状が得られる解像度として、この d_0 を設定した。

実験においてコンクリート構造物の下面は移動を抑制し落下の衝撃を緩和するため砂を敷いていたが、数値解析モデル上も供試体部分が極端に変位しないよう配慮した。コンクリート供試体の密度は $2,300 \text{ kg/m}^3$ 、ヤング率は 20 GPa 、ポワソン比は 0.2 とした。

なお、実時間 0.010 sのシミュレーション解析の実施に要した時間は、2022年現在事務用途として標準的なCPU

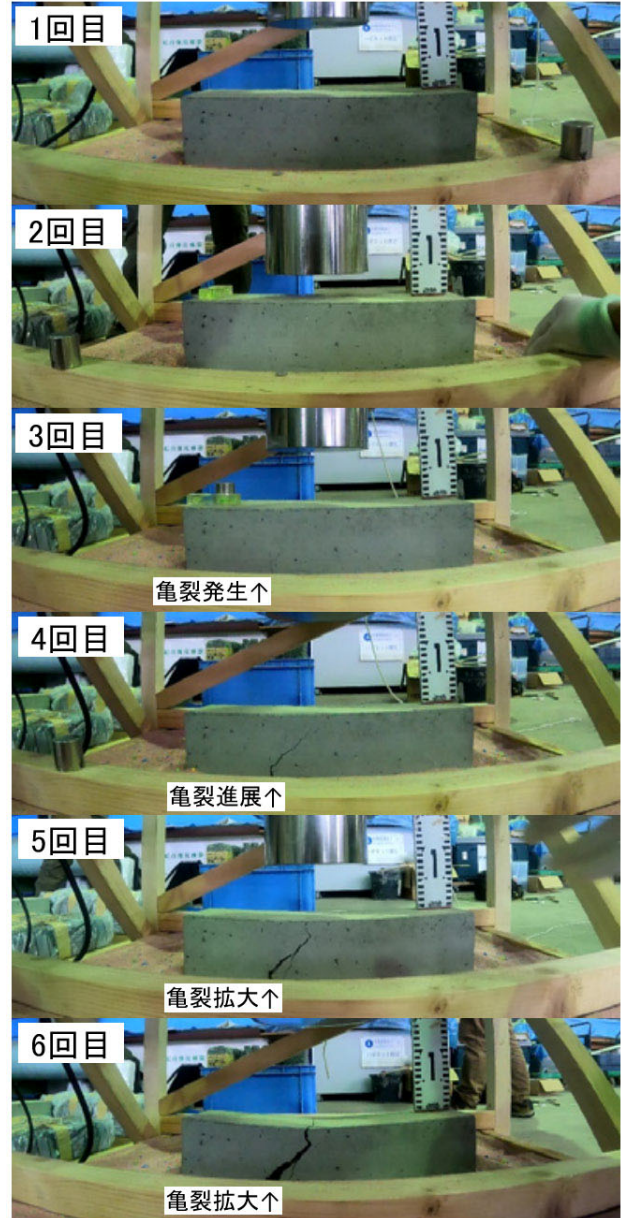


図-2 衝突実験中の供試体の破壊進行の様子

(4コア2.40 GHzプロセッサ)、メモリ16 GBを備えるノートPCで1ケース当たり約5分間程であった。粒子法はその特性から連続体の局所現象の解析に適用されることが多く、その分解像度も細かくなり、計算時間が長くなる場合が多いとされていたが、最近のPC性能の発達により、少しずつではあるが実務適用が可能なレベルになってきたと言える。

3. 結果及び考察

(1) 室内衝突実験結果

図-2に示したのは、水中養生、凍結融解300サイクル後、鉄筋無し条件の供試体に対して衝突実験を実施した場合の一連の側面写真である。衝突作用前から亀裂が発

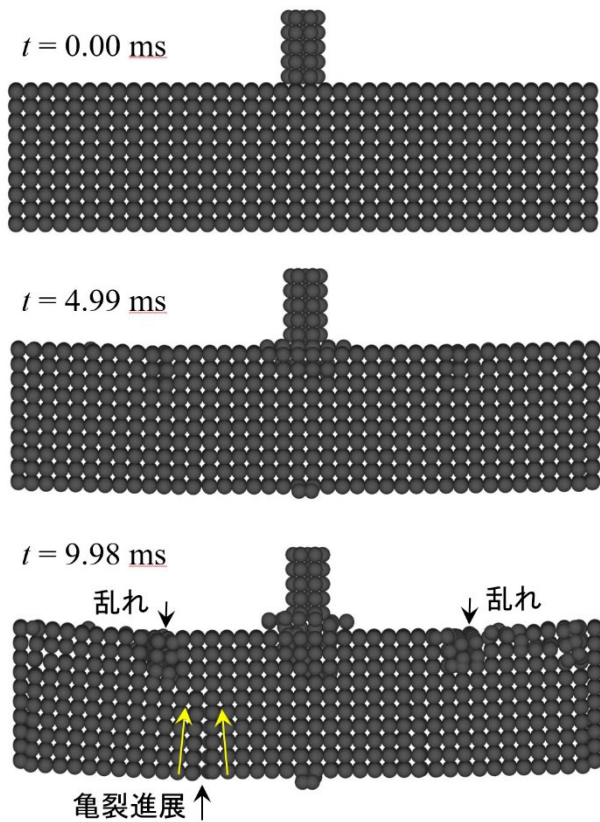


図-3 衝突実験の解析結果

達し上面まで到達するまでに6回の繰り返し衝突を行ったものである。1,2回目の衝突後にはコンクリート供試体に明瞭な破損は見られなかったが、3回目の衝突後に供試体の下面から微少な亀裂の発生が確認された。4回目の衝突後、亀裂はさらに供試体の上面中央部に向かって進展し、5回目の衝突で亀裂が供試体の上面にほぼ到達したことが確認された。6回目の衝突で亀裂はさらに拡大し、供試体の上面に到達した。ここで実験を終了とした。

(2) 数値解析結果

次に上記(1)で示した室内衝突実験の解析結果を示す。図-3は図-2の実験について、供試体の寸法、重錘の落下速度を与えて数値解析を行った結果を時系列に並べたものである。時間単位はms (1000分の1秒) として、初期条件、中間、最終状態の側面から見た状況を示したものである。グレーで着色した各粒子が一つ一つの計算点を表す。接触していれば連続体を構成する粒子群となる。破断すれば粒子間の相互作用計算が打ち切れ、解析上は分離したという取扱いとなる。

図中では接触の瞬間を0 msとしている。シミュレーションの前半では粒子の相互配置にほとんど変化が見られなかったが、 $t=4.99$ msの前後で供試体の中央部で分銅との接触面とその直下の下面部で複数粒子の浮き上がりが見られた。周辺粒子から離れているため連続体から分離しており、粒子間の相互作用計算は打ち切られている。

所謂破断が起きているのであるが、供試体全体で見れば局所的な部分であり、数値的な擾乱と捉えて問題無いであろう。その後数値解析の進展に伴い、中央よりやや左寄りの下面から亀裂が発生し、上面方向に進展が起こった。同時に、上面部も分銅との接触点を挟むように二箇所粒子配置の乱れが見られた。しかし亀裂が進展する様子は見られなかった。前節(1)において、供試体の下面から亀裂が発生し、上面の方向へ進展する様子を指摘したが、数値解析上もほぼ近い場所から亀裂の発生と進展が見られた。従って数値解析モデルが一定の妥当性を有していることが考えられる。

次に、本モデルが室内実験をある程度再現していることから、供試体内部の物理量に関して分析を行う。図-4に示したのは、計算領域内にある計算粒子が有する圧力分布である。内部圧力波の伝播の可視性のために $-100,000 \sim 100,000$ N/m²の範囲で描画しているが、実際に衝突面には更に大きな圧力が発生していることが別途確認されている。

図-4では接触直後に分銅部分と供試体の接触部分に高圧力領域が発生している ($t=0.04$ ms)。その後高圧力領域が供試体の両端部・側面まで圧力波として伝播し、上面と下面にそれぞれ赤色で示される高圧力領域が発生している ($t=0.24$ ms)。この時点で明らかなように、分銅の衝突部分から供試体の端部まで伝播する圧力波は3次元的な現象であり、3次元モデルを採用したことによって初めて視覚的に把握できたものである。本現象の数値シミュレーションに要する時間は数分程度のものであり、計算コストの観点からもこのような局所的な現象の再現に一定の有効性を持つことが示唆される。

次の $t=0.56$ msでは高圧力領域が供試体の上面端部と、下面の2箇所拡大しており、 $t=0.97$ ms時点では更に高圧力領域の拡大が進行している。その後一定の時間が経過すると、分銅との接触部以外での圧力分布はまばらになり ($t=1.50$ ms)、解析の後半では高圧力または低圧力領域は殆ど見られなくなった ($t=8.75 \sim 9.98$ ms)。これは、粒子間の結合力の破断または粒子位置の擾乱により相互作用計算が終了し圧力値としてはほぼ0 N/m²となる粒子が支配的になったためと考えられる。

図-3の下面からの亀裂進展は供試体の片側(左側)から発生した。これは図-2の室内実験で生じた現象と同様である。しかしながら図-4から明らかなように数値解析の条件としては完全に左右対称で与えており、圧力分布の時系列変化も、途中まではほぼ左右対称である。図-2で見られた実験における亀裂の左右非対称は供試体材料の不均質性や、実験条件の僅かなずれから説明が付くが、数値解析結果として得られたものが図-3のように片側からのみ見られるのは、ある種の数値誤差に起因するものと考えられる。著者らの研究グループによる別報¹⁴⁾にて、鋼製杭に衝突する氷の破壊シミュレーションを行っているが、その際には左右対称の計算条件においてほぼ

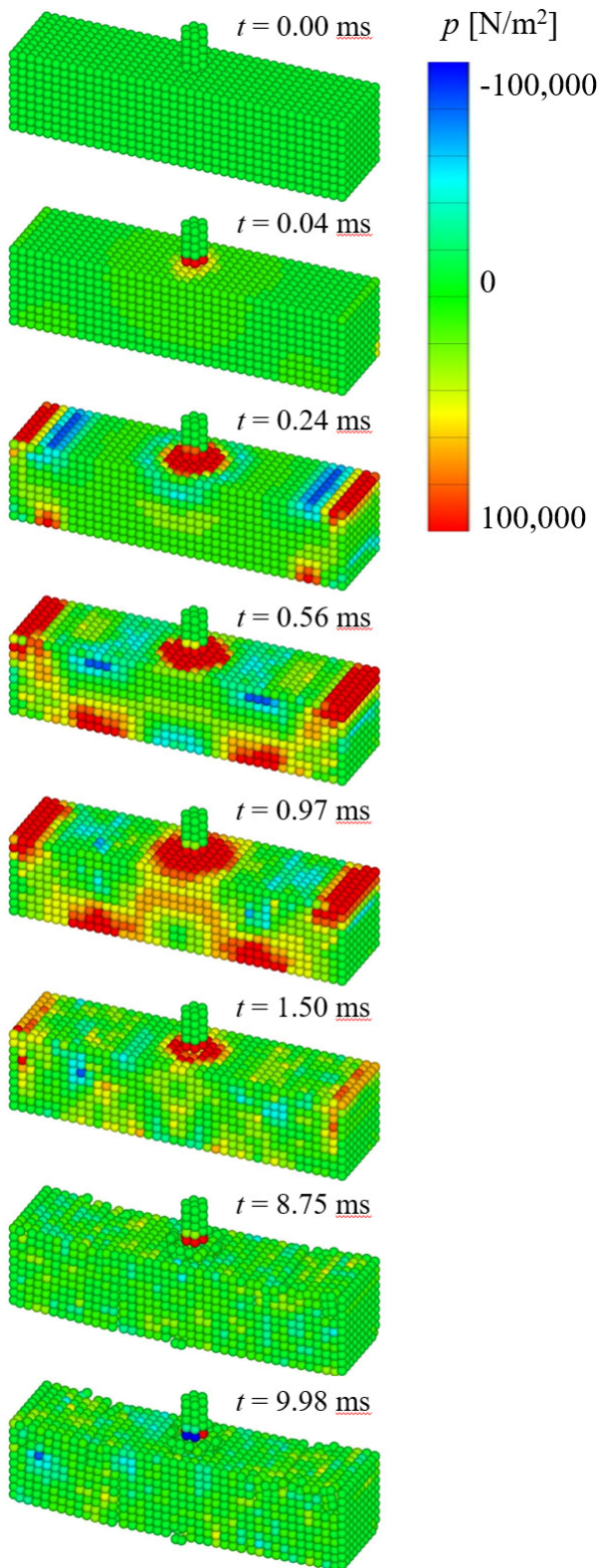


図4 数値解析結果における圧力分布

左右対称の解析結果が得られている。氷よりもコンクリートの方が破壊に至るまでの変位の条件が小さくて厳しく、数値誤差に過敏に反応したことも要因の一つと考えられる。

数値解析上の破断は粒子間相互位置のごく僅かな変位を元に判定を行っているが、圧縮破壊と引張破壊がそれ

ぞれ関連するためパラメータの設定が難しい。本稿では実験結果と大きな矛盾が無いように設定を行ったがこの点は継続的な改良が必要と考えられる。

4. まとめ及び今後の課題

本研究では、凍害劣化を受けたコンクリートに対する衝突作用による破壊プロセスを再現可能な数値解析モデルの構築を目的として、室内実験に基づく数値解析を行って基本的な性能の検証を行った。室内実験を再現するにあたり、大きな矛盾のない破壊性状が確認でき、同時に内部の物理量を3次的に時系列で可視化することに成功した。

今後は内部に鉄筋を配合したコンクリート供試体や、凍害劣化作用により表面が著しく劣化した供試体の破壊の再現計算を行っていきたいと考えている。また、室内実験の条件は、既往研究で行われた現地観測結果に基づき調整されているため、今後実スケールの数値解析への適用が望まれる。

謝辞：本研究では数値計算の際に戦略的基盤ソフトウェアの開発プロジェクト成果であるNEXST_MPS_Solid (Ver0.1b, (c) MooSeop Song & Seiichi Koshizuka) プログラムを利用した。コンクリート供試体の作製や実験条件設定に関しては、耐寒材料チームの関係各位より協力を頂いた。ここに記して謝意を表す。

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) 木岡信治, 竹内貴弘, 蟹江俊仁: 海氷塊の杭構造物への衝突に関する中規模実験とその数値計算法の基礎的検討, 土木学会論文集 A2(応用力学), Vol.68(2), I 423-I 432, 2012.
- 4) 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, Vol.73(2), pp.I 973-I 978, 2017.
- 5) 佐伯浩, 浅井有一郎, 泉洸, 竹内貴弘: 海氷によるコンクリートの摩耗に関する研究, 海洋開発シンポジウム論文集, Vol.10, pp.68-73, 1985.
- 6) Beltaos, S.: River ice jams, Water Resources Publications, LLC, 390 pp., 1995.
- 7) 吉川泰弘, 寺崎海斗, 横山洋: 寒冷地河川における水深上昇を考慮した解氷時期推定手法の開発, 河川技術論文集, Vol.27, pp.541-544, 2021.
- 8) Gingold, R. A. and Monaghan, J. J.: Smoothed particle hydrodynamics: theory and application to non-spherical stars, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, Vol.181, pp.375-389, 1977.
- 9) Koshizuka, S., Shibata, K., Kondo, M. and Matsunaga, T.: Moving Particle Semi-implicit Method, A Meshfree Particle Method for Fluid Dynamics,

Academic Press, 306 pp., 2018.

- 10) 阿部孝章, 佐藤好茂, 伊藤丹: 樋門ゲートに対する河川津波波力評価技術の開発, 第 56 回(平成 24 年度)北海道開発技術研究発表会, 安 43, 2013.
- 11) 阿部孝章, 吉川泰弘, 佐藤好茂, 船木淳悟: 河川管理施設周辺における津波漂流物群の数値シミュレーション, 寒地土木研究所月報, 2015 年 2 月号, Vol.741, pp.24-32, 2015.
- 12) 宋武燮, 越塚誠一, 岡芳明: MPS 法による弾性構造体の動的解析, 日本機械学会論文集 A 編, Vol.71(701), 16-22, 2005.
- 13) 越塚誠一: 粒子法, 計算力学レクチャーシリーズ 5, 丸善, 144 p., 2005.
- 14) 阿部孝章, 吉川泰弘, 木岡信治: 3 次元 MPS 法による氷板破壊過程に関する数値解析的検討, 土木学会論文集 B3(海洋開発), Vol.72(2), pp.I_598-I_603, 2016.