

3 次元粒子法モデルによる河川構造物に対する衝撃碎波圧推定

Estimation of breaking wave impact pressure on a river structure by the 3D particle method modeling

阿部孝章*, 吉川泰弘**, 佐藤好茂***, 船木淳悟****

Takaaki Abe, Yasuhiro Yoshikawa, Yoshishige Satoh and Jungo Funaki

* 寒地土木研究所, 寒地水圏研究グループ (〒062-8602 札幌市豊平区平岸 1 条 3 丁目)

** 博(工), 北見工業大学, 社会環境工学科 (〒090-8507 北見市公園町 165)

***寒地土木研究所, 寒地技術推進室道東支所 (〒085-0014 釧路市末広町 10 丁目)

****寒地土木研究所, 寒地水圏研究グループ (〒062-8602 札幌市豊平区平岸 1 条 3 丁目)

Key Words: Tsunami in rivers, River structure, Wave impact estimation, Numerical Analysis, Particle method

キーワード: 河川津波 河川構造物 波圧推定 数値解析 粒子法

1. はじめに

2011 年 3 月, 三陸沖を震源とした東北地方太平洋沖地震が発生し, 東北地方では沿岸域のみならず河川域においても多様かつ甚大な被害をもたらされた. この津波は北海道太平洋岸からオホーツク海, 日本海側にも到達して全道の直轄 10 河川で遡上し, 氷板漂流物の顕著な散乱等, 寒冷地特有の現象をも引き起こした^{1), 2)}. 北海道の 1 級河川である新釧路川においては, 津波遡上時に吐口水路から津波が侵入し, 樋門ゲートに激しく衝突する非常に貴重な映像が捉えられた. 東北地方において水門・樋門など河川構造物に顕著な被災が生じたことを鑑みれば, こうした構造物近傍の津波現象は重要度の高い検討項目であり, 河川管理の実務上もその外力評価と, それを低減する手法の開発が望まれている.

しかし, 堤内構造物などの河川構造物は複雑形状であることが多く, 津波波力評価のためには必然的に 3 次元の流れ場の評価が必要となり, 浅水流方程式に基づく多くの河川水理計算モデルの適用範囲外である. 近年, 碎波現象や水面の大変形を安定的に解析可能な粒子法という計算手法が注目を浴び, 海岸工学分野で流れ解析に積極的に活用されている. 例えば構造物周辺の局所流れ解析³⁾や, 漂流物を伴った水理解析⁴⁾等に用いられているが, 河川域での適用事例は依然として少ないのが現状である.

本報告では, 局所水理解析に高い適用性を有する粒子法を解析手法として導入し, 河川構造物周辺での適用性を検討することを目的とし, その上でモデルの応用方策として, 樋門ゲート前面に設置するタイプの津波減勢工の提案とその効果の評価を行うこととした.

2. 数値解析モデルの概要

本研究においては, 基本的な計算手法として Koshizuka ら⁵⁾により提案された粒子法の一つである MPS 法を採用した. MPS 法は土木工学分野において水理解析に適用された実績が比較的多いためである. 尚, 最近では水工学分野で例えば浅井ら⁶⁾, 田邊ら⁷⁾のように SPH 法の活用も急速に拡大してきていることをここに注記しておく.

MPS 法の基礎式は次に示す連続式・運動方程式である.

$$\frac{D\rho}{Dt} = 0, \quad \frac{D\mathbf{u}}{Dt} = -\frac{1}{\rho}\nabla p + \nu\nabla^2\mathbf{u} + \mathbf{K} \quad (1)$$

但し, ρ は流体密度[kg/m³], $\mathbf{u}$ は流速ベクトル[m/s], p は圧力[N/m²], ν は動粘性係数[m²/s], $\mathbf{K}$ は外力項で本稿では重力加速度を考慮した. 標準の 3 次元 MPS 法においては, 基礎式において微分演算子を含む圧力項・粘性項がそれぞれ次のように離散化される.

$$\langle \nabla p \rangle_i = \frac{D_s}{n_0} \sum_{j \neq i} \frac{p_j - \hat{p}_i}{r_{ij}^2} \mathbf{r}_{ij} w(r_{ij}) \quad (2)$$

$$\langle \nabla^2 \mathbf{u} \rangle_i = \frac{2D_s}{n_0 \lambda} \sum_{j \neq i} (\mathbf{u}_j - \mathbf{u}_i) w(r_{ij}) \quad (3)$$

但し, p_i は粒子 i の圧力, $\hat{p}_i$ は相互作用を計算する粒子が持つ圧力の最小値, D_s は空間の次元数で本稿の場合は 3, n_0 は基準粒子数密度, r_{ij} は粒子 j の粒子 i に対する相対位置ベクトル (大きさは $r_{ij} = r$), $w(r)$ は重み関数, λ は MPS 法のモデル定数であり, 括弧 $\langle \cdot \rangle_i$ は MPS 法の粒子間相互作用モデルで離散化することを示している.

本稿では, 河川津波の衝突が確認された新釧路川 A 樋門の形状データを元に 3 次元の解析領域を作成し, 河川津波に見立てた造波を起こした. これにより津波がどのようにゲートに衝突するのかと, 減勢工有り及び無し

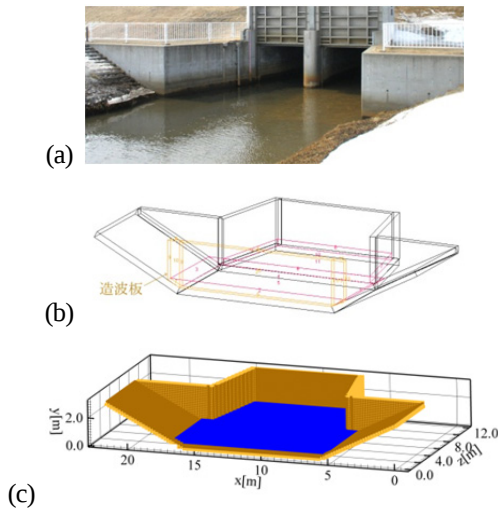


図-1 施工図に基づく A 樋門周辺の解析領域

場合について数値解析上推定された波圧の特性について検討を実施した。

3. 数値計算の結果及び考察

3.1 樋門ゲートへの砕波衝突再現計算

まず、実際に観測された樋門ゲート近傍の津波衝突解析に適用することとする。図-1 には、A 樋門の現況(a)，施工時図面より作成した樋門ゲート周辺の 3 次元形状(b)，図面から作成した初期粒子配置(c)を示した。図-1 (c) 中の青で着色したものが水を表す粒子であり、計算開始時には静水であるとした。吐口の最手前部分には造波板を設置し(図-1 (b))，これに波速を与えることで波を発生させゲートに衝突させた。ゲート前面には格子状の凹凸が存在するが、本稿の検討では解像度の制約から再現が困難であったので、ゲートは平板であるものとして以下の解析を実施した。本稿では計算粒子径は $d_0 = 0.1 \text{ m}$ とした。この時総粒子数は約 16 万個である。

さて、新釧路川 A 樋門吐口において捉えられた河川津波は、釧路港潮位観測所において観測された最大波が新釧路川に侵入し、本樋門吐口に到達したものと推定されている。映像記録は残されているものの、現地条件の手がかりとなる情報はほとんど残っておらず、解析の初期条件は仮定を含めつつ設定しなければならない。以下では本計算に用いた仮定について述べる。

まず、A 樋門吐口水路地点において、河川津波の映像が捉えられる直前の水位は、既往の津波再現計算結果を元に設定した。この再現計算は、この樋門を挟む 2 水位観測所の時系列水位を良好に再現していることが既に示されている¹⁾ので、本稿でもこの値を用いた。その水位から樋門ゲート全面部分の初期水深を求めた結果約 0.4 m であったので、初期粒子配置においても同水深を与えることとした。尚、津波衝突前は遠隔操作により樋門ゲートは閉められていたので、堤内側からの流入は考

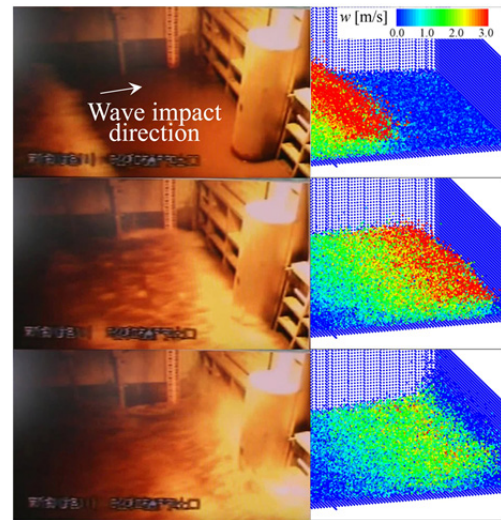


図-2 映像記録と解析結果との比較

慮していない。次に映像記録内の量水標から砕波の波高を 0.5 m 程度、波速を 2 m/s 程度と推定し、これとほぼ同条件となるように吐口の造波板を稼動させた。造波板の稼動開始時刻を $t = 0 \text{ s}$ とした。

図-2 に映像記録と解析結果のスナップショットを比較したものを示した。カラーコンターは吐口水路方向の流速を表している。図より、砕波段波状となりゲートに接近する河川津波と、ゲートへ衝突後運動エネルギーが鉛直上向き速度に変換され飛沫を上げながら激しく巻き上がる様子が比較的良好に再現された。3 段目の図でフロント粒子の色が青くなっていることから、ゲートへの衝突後反射して鉛直上向き流速に変換されたことが示唆される。実際の映像では、ゲートに対して何波もの段波が来襲したことが確認されている。また、砕波する条件での計算であるため、津波フロントの周辺で飛沫となっている水粒子が計算結果の中に数多く見受けられた。また、粒子の速度分布についても、ばらつきが多くなっている。これは、初期水深として存在していた水と段波の相互作用により飛沫を含む複雑な流れ場となったために、精度低下が起こったものと推察される。

図-3 に示したのは、樋門の解析対象領域からゲート表面部分の計算粒子のみ抽出し、平面 2 次元的に圧力値をプロットしたものである。ここでは前後 0.01 s 間の平均を圧力値とみなした。右側には対応するゲート前面への砕波衝突状況を示した。

砕波進行と共に飛沫の接触によって 10 kN/m^2 を超える圧力極大値が生じ始め ($t = 3.08 \text{ s}$)， $t = 3.16 \text{ s}$ において最大圧力を記録した。また、このときゲート前面で最も広範に圧力上昇が確認された。その後の $t = 3.28 \sim 3.44 \text{ s}$ にかけて、ゲート前面の流れ場は水平方向から鉛直上方を向くようになり、ゲート前面の圧力分布もまばらにかつ面積が拡大していることがわかる。

図-3 のように波圧分布がまばらとなるのは、ゲート前面の粒子について十分な近傍粒子数が得られず計算

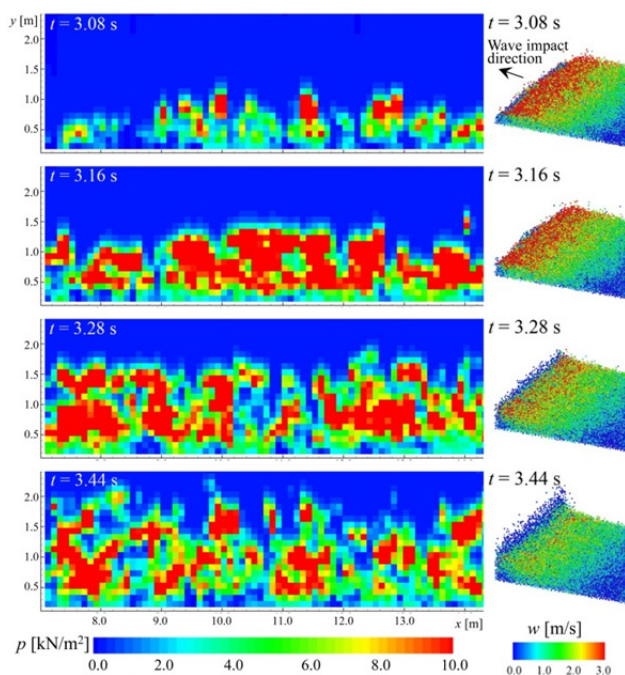


図-3 ゲート表面に作用する圧力分布とその時刻に対応する碎波衝突状況

精度が低下したこと、あるいは単一粒子の飛散と衝突により振動型の衝撃波圧が発生したことが原因として考えられる。このような現象は他の粒子法である SPH 法においても確認されており、今後粒子法系の計算手法を実務上の検討に活用する場合には充分考慮する必要があると考えられる。一方で、図-2 左上の写真に示すように実現現象として碎波フロント形状は凹凸を伴っており、衝撃碎波圧が時系列的にまばらに作用したことも考えられる。また、映像に捉えられたような段波現象は小さな気泡封入を伴い、かつ乱流場の現象である。従って適切な二相流モデルや乱流モデルの導入が将来的な精度向上に向けて必須となるものと考えられる。

3.2 河川津波波力減勢工の提案とその効果評価

以上で本モデルによる波圧評価や構造物周辺解析に対する適用性が確認できたことから、波力減勢工の具体的な提案に移る。樋門ゲートのような河川管理施設に対する河川津波波力の減勢工を設置するにあたっては、津波波力そのものの他にも河道内の漂流物やゴミ、更に新釧路川のような積雪寒冷地河川においては河道内の漂流氷板など、様々な要素を考慮して設計を行わなければならない。このような検討の第一段階として、本報告では漂流氷板の存在を考慮することとした。

東北地方太平洋沖地震津波の発生後、A 樋門と位置こそ異なるものの、新釧路川の樋門吐口で実際に観測された漂流氷板の諸元は、平均 4.4 m、最大で 9.0 m であったことが著者らにより確認されている²⁾。

また、等間隔の格子状構造物による石礫の捕捉に関する研究は砂防工学の分野で 1990 年代に行われており、

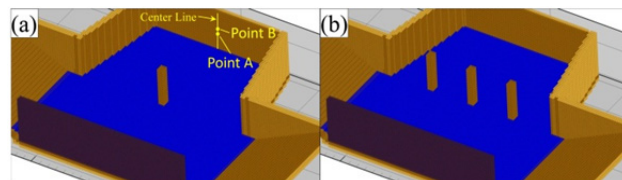


図-4 減勢工を設置した計算領域 (左が 1 本、右が 3 本)

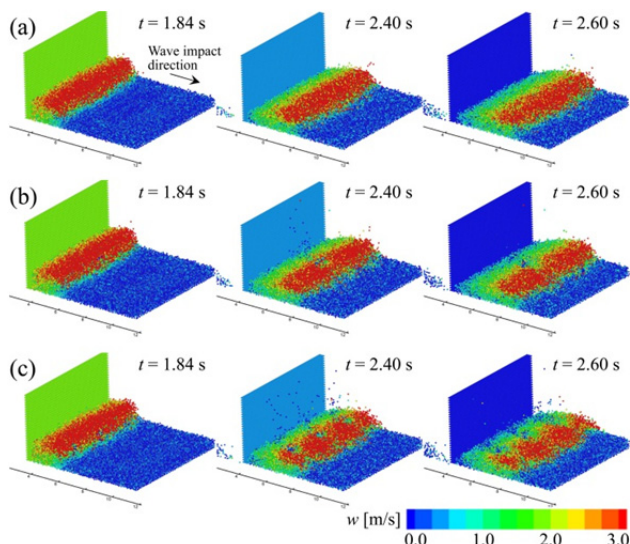


図-5 減勢工を配置した場合の段波と減勢工との相互作用状況と減勢工無しの場合との比較

概ね礫径の 2 倍程度の格子間隔であれば、礫と礫のアーチングが生じ、礫の捕捉が生じるとされている⁸⁾。この考え方を援用すれば、平均の大きさ程度の氷板を捕捉し、ゲートへの衝突を防止するためには約 9 m の設置間隔であればよいこととなる。しかし、実際には津波により輸送される河道内氷板のサイズは分布を持っている²⁾。そこで、ゲートの袖壁と合わせて、減勢工間間隔を約 5 m とした場合と約 2.5 m で設置した場合について、津波波力低減効果の検討を行った。尚、既に橋脚において氷板がアーチングを生じジャミングを起こすような実験的検討が覆ら⁹⁾によって行われているが、これは河道内を流下する氷板群を対象としており、段波により輸送される氷板に対してこうした知見が適用できるかどうかは未だ十分に検討がなされていない。本稿で提案する減勢工は、氷板のゲートへの物理的衝突を防ぎつつ、同時に河川津波波力の低減効果を意図して設置するものであることを強調しておく。

図-4 に示したのは減勢工を設置した場合の初期粒子配置である。1 本設置のケース(a)では袖壁間の中央部にあり空隙は幅 5 m、3 本設置のケース(b)ではゲート表面に対して並行に、杭の中心間隔が 2.5 m 間隔となるように配置した。

図-5 に示したのは、段波がゲート部に侵入する際の粒子の空間分布を示したもので、粒子色はゲート方向流速[m/s]を示す。図-5 (a)が減勢工無しのケース、(b), (c) は

それぞれ減勢工を1本、3本設置したケースである。尚、解析領域境界となる壁面粒子及び減勢工に相当する粒子は結果の中に表示していない。

図-5 (a)より減勢工を設置しないケースにおいて、段波はしぶきをあげながら侵入し、段波のフロントはゲートに接近するにつれて円弧状となっていることが確認できた。(b)の減勢工1本のケースでは、障害物に衝突した水粒子は上方へ跳ね上がり、それ以外の進行波は側方を通過した。フロント形状については、(a)の場合と大きな変化は確認できなかった。図-5 (c)より、3本設置のケースでは段波の進行が減勢工で顕著に阻害され、減勢工3箇所ですり抜けの跳ね上がりが確認された。また、(c)より、フロント平面形状は凹凸を伴いつつゲートに接近したことが確認された。図-6 (a), (b)に示したのは、それぞれゲート表面に設置した圧力計測点 A, B (位置は図-4 記載) で計測された圧力の時系列変化である。ここで、ゲート前面のある計算点を選び圧力値を示したのは、本研究で用いているコード(MPS-SW-MAIN)が、振動を伴いつつもピーク波圧の発現と波圧変動傾向を概ね再現可能であることが既往研究¹⁰⁾で既に示されているためである。

図-6 (a)より、減勢工無しの場合には最大で 45 kN/m^2 程度の圧力がゲート中央部に発生する結果となったが、減勢工1本設置時ではそれが 33 kN/m^2 、減勢工3本では 26 kN/m^2 まで抑制されたことが分かる。また、最大圧力の発現時刻もやや遅くなっている。尚、 45 kN/m^2 という数値は水深約 4.6 m で生じる最大の静水圧に相当する圧力である。図-6 (b)では、減勢工無しの場合で(a)と同程度の最大圧力、減勢工1本設置の場合の方が3本設置の場合より最大圧力が小さい結果となった。但し、いずれにおいても減勢工無しの場合に比較して約 40~50% の最大圧力の抑制効果が確認された。

4. まとめと今後の課題

本報告では、河川技術における新たな試みとして、粒子法の河川域における適用性検証を行うと共に、樋門ゲート近傍設置型の減勢工を提案し、その適切な配置方法について検討を実施した。本報告では波力と氷板寸法のみを検討の対象としたが、今後は水理実験等との比較を通じて精度向上を行うと共に、氷が構造物に衝突した場合の脆性破壊やそれに伴う衝撃力、そして出水時発生する漂流ゴミや減勢工の堰上げ効果等、実用化に必要な各種検討を進めていく予定である。

謝辞

北海道開発局釧路開発建設部には新釧路川に関する資料を、MPSCUG には計算用コード MPS-SW-MAIN をご提供頂いた。ここに記して感謝の意を表します。

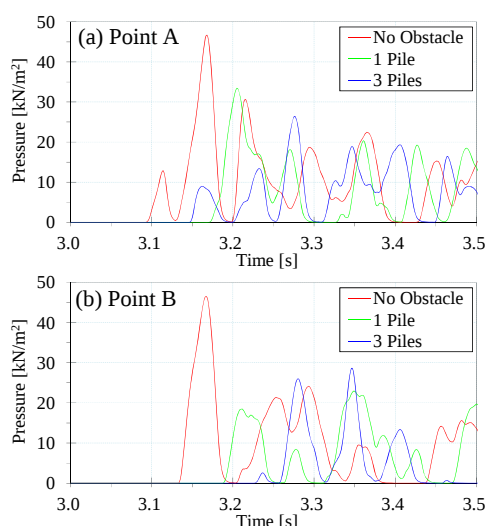


図-6 ゲート中央部分における圧力の時系列変化

参考文献

- 1) 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.
- 2) 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.
- 3) 渡邊忠尚, 入部綱清, 仲座栄三, Rahman, MD. Mostafizur: 複雑な 3 次元海岸構造物周りの水理現象の MPS 法による解析, 土木学会論文集 B2(海岸工学), Vol.67 (2), pp.I_721-I_725, 2011.
- 4) 五十里洋行, 後藤仁志: 津波氾濫による桁橋被災過程の数値シミュレーション, 海岸工学論文集, 第 54 巻, pp.211-215, 2007.
- 5) Koshizuka, S. and Oka, Y.: Moving Particle Semi-implicit method for fragmentation of incompressible fluid, Nuclear Science and Engineering, Vol.123, pp.421-434, 1996.
- 6) 浅井光輝, 別府万寿博, 石川信隆, 眞鍋慶生, 斉藤展, 丹羽一邦: 数値流体シミュレーションによる流体衝撃力評価に関する基礎的研究, 構造工学論文集, Vol.58A, pp.1021-1028, 2012.
- 7) 田邊将一, 浅井光輝, 中尾尚史, 伊津野和行, 3 次元粒子法による橋桁に作用する津波外力評価とその精度検証, 構造工学論文集, Vol.60A, pp.293-302, 2014.
- 8) 高橋保, 中川一, 里深好文, 王浩民: 格子型砂防ダムの閉塞モデル, 水工学論文集, 第 45, pp.703-708, 2001.
- 9) 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.
- 10) Shibata, K. and Koshizuka, S.: Numerical analysis of shipping water impact on a deck using a particle method, Ocean Engineering, Vol. 34(3-4), pp. 585-593, 2007.