樋門ゲートに対する河川津波波力減勢工の 提案とその効果について

A PROPOSAL OF RIVER-TSUNAMI ABSORBING PILE FOR SLUICE GATE AND ABOUT ITS EFFECTIVENESS

阿部 孝章¹・ 吉川 泰弘²・ 佐藤 好茂³・ 伊藤 丹⁴ Takaaki ABE, Yasuhiro YOSHIKAWA, Yoshishige SATOH and Akashi ITOH

¹正会員 独立行政法人 寒地土木研究所 寒地水圏研究グループ研究員 (〒 062-8602 札幌市豊平区平岸 1 条 3-1-34)
 ²正会員 博(工) 北見工業大学 社会環境工学科 (〒 090-8507 北見市公園町 165)
 ³正会員 独立行政法人 寒地土木研究所 寒地技術推進室研究員 (〒 085-0014 釧路市末広町 10-1-6)
 ⁴正会員 独立行政法人 寒地土木研究所 寒地水圏研究グループ上席研究員 (〒 062-8602 札幌市豊平区平岸 1 条 3-1-34)

This report presents a proposal of tsunami absorbing pile for a sluice gate. The tsunami generated by the 2011 Tohoku Pacific-Coast Earthquake intruded ten Class-1 Rivers in Hokkaido, Japan. Videotaped imagery showed the tsunami which propagated into Shin-Kushiro River struck a sluice gate with wave breaking. The main aim of this report is to develop a 3D particle based simulation model for analysis of interaction between river-tsunami and river facilities such as sluice gates. The model is applied to the estimation of wave impact on the sluice gate. Two cases of installation of tsunami absorbing piles are considered to confirm their effectiveness for attenuation of wave impact load on river structures.

Key Words : Tsunami in Rivers, Sluice Gate, River-Tsunami Absorbing Pile, Numerical Simulation, Particle Method

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 地震が発生した.発生した津波により東北地方では沿 岸域のみならず河川域においても多様かつ甚大な被害 がもたらされた.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⁾.本災害を受け,河川域での津波災 害対策技術の開発は様々な分野から取り組まれている.

河川域の津波災害は,河川工学と海岸工学の境界領 域にあり,両者の視点から現象解明及び対策技術開発 のアプローチが試みられている.近年,海岸工学分野 においては,例えば村嶋ら³⁾による実務への適用を念頭 に置いた高精度数値解析手法の開発などがあり,河川 工学分野においては,安田ら⁴⁾による河川流の影響が強 い場に適用可能な1次元数値解析モデルの開発や,吉 川ら⁵⁾による河川結氷の影響を考慮した数値解析モデル の開発などがある.

さて、北海道の1級河川である新釧路川において、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 次元的な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,砕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 流れ解析等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⁶⁾や,漂流物を伴った水理解析⁷⁾等 に用いられているが,河川域での適用事例はほとんど 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,そ の河川構造物周辺での適用性を検討すること,及び樋 門ゲート前面に設置するタイプの津波減勢工の提案と その効果の評価を目的とした.

2. 数値計算手法の概要

(1) 計算モデルの概要

本研究においては、基本的な計算手法として Koshizuka ら⁸⁾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 法は他の粒子法に比較し、土 木工学分野において水理解析に適用された実績が多い ためである.基礎式は次に示す連続式と運動方程式で、

$$\frac{D\rho}{Dt} = 0, \quad \frac{D\boldsymbol{u}}{Dt} = -\frac{1}{\rho}\nabla p + \nu\nabla^2 \boldsymbol{u} + \boldsymbol{g}. \tag{1}$$

但し, ρ: 流体密度 [kg/m³], **u**: 流速ベクトル [m/s], p: 圧力 [N/m²], ν: 動粘性係数 [m²/s], **g**: 重力加速度 [m/s²] である.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.

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

$$\langle \nabla^2 \boldsymbol{u} \rangle_i = \frac{2D_s}{n_0 \lambda} \sum_{j \neq i} (\boldsymbol{u}_j - \boldsymbol{u}_i) w(|\boldsymbol{r}_{ij}|)$$
 (3)

但し p_i :粒子 i の圧力, $\hat{p}_i = \min_{j \in J} (p_i, p_j), J = \{j : w \neq 0\}, D_s$:空間次元数, n_0 :基準粒子数密度, \mathbf{r}_{ij} :粒子 j の 粒子 i に対する相対位置ベクトル, w: 重み関数, MPS 法のモデル定数 $\lambda = \sum_{j \neq i} (w(|\mathbf{r}_{ij}|)|\mathbf{r}_{ij}|^2) / \sum_{j \neq i} |\mathbf{r}_{ij}|^2$ 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.

(2) 数値計算の実施概要

本稿では、まず本研究で用いる3次元コードの妥当 性を検証するために障害物に衝突するダム崩壊流れの 3次元計算を実施した.ダム崩壊流れにおいては比較対 象とする Kleefsman による実験の圧力計測結果⁹⁾と比 較し、精度検証を行った.次に、実際に河川津波の衝 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の場合について数値 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

(1) 3次元ダム崩壊流れ問題

本稿では、Khayyer ら¹⁰⁾と同様に、オランダ海洋 研究所(MAritime Research Institute Netherlands, MARIN)で実施されたダム崩壊流れの水理実験のシ ミュレーションを実施した.実験や格子法による本問 題のシミュレーションの詳細については Kleefsman の 報告⁹⁾を参照されたい.

図-1に示したのは、ダム崩壊流れ問題の計算領域で ある.実際には側壁も存在するが、可視性のため表示 していない.実験ではゲートの開放後水が流動を開始 し、水路中央に位置する障害物に衝突して更に反対側 の壁に衝突して戻り流れが発生する.計算上はt = 0 s において水粒子の拘束を解くことで同様の流れを再現 する.図-1内の圧力計測点は始めダムがある側に設置 されている.計算粒子径は $d_0 = 2$ cm,計算時間間隔 $\Delta t = 0.001$ s で、領域内の粒子数は約 22 万個である.

図-2 に流れの様子の時系列変化を,対応する水理 実験結果⁹⁾と比較しつつ示した.カラーコンターは鉛直



図-1 3次元ダム崩壊流れ問題の計算領域(左上には障害物の 諸元と圧力計測点を示した)



図-2 水理実験⁹⁾と MPS 法による計算結果との流況比較

方向流速を示す.ダム崩壊後,進行波は障害物に衝突 し,流れは障害物に衝突して激しく上方に巻き上がる 部分と,障害物側方の流路を通過する部分に分かれた (t = 0.56 s).巻き上がった流体と後続流が反対側の 水槽壁に衝突(t = 0.64 s)した後,空気を巻き込みな がら戻り流れとなって再び結合する様子が再現された (t = 2.00 s).但し,実験では多量の気泡を含んでいる 様子が確認できるが,本稿の計算においては解像度面 の制約により単一気泡スケールの界面変動までは再現 されていない.しかしながら,解析結果における概略 的な傾向は Kleefsman による報告⁹⁾と概ね一致したと 言える.

図-3に圧力の測定点 P_1 位置(図-1)における実測 値と計算値の比較を示した.別府ら¹¹⁾は MPS 法にお ける圧力波形の高周波振動を除去するために,計算時 間間隔 Δt の 10 倍程度の時間で圧力を平滑化を行うこ とで実験から得られた最大荷重を評価可能であること を示した.これに従い,計算結果においては前後 0.01



 図-3
 水理実験による波圧の計測値と MPS 法による計算結 果との比較



(b) 解析のための初期粒子配置(造波板非表示) 図-4 施工図に基づき作成した A 樋門の計算領域

s間の平均値を圧力値と見なすこととした. 図-3より, 流体が障害物に衝突直後の圧力値に関して,絶対値及 びその発現時刻を良好に再現していることが確認でき る.ところが計算結果においてはピーク圧力を記録し た後,2.0 s頃まで1000~3000 N/m² 程度の圧力振動 が確認された.しかしピーク圧力や,概略的な変動傾 向はある程度再現されたと言える.若干の圧力振動が 発現するこのような問題は,今後本コードに対する高 精度 MPS 法スキーム¹⁰⁾の適用や,計算領域の高解像 度化によって解決される可能性がある.また,初期粒 子の間隔,時間刻み等の制約もあるため,それらが解 析結果に与える影響を今後十分検討する必要がある.

(2) 樋門ゲートへの砕波衝突再現計算

以上で、本研究で使用しているコードが3次元領域 の激しい流れ場の解析、及び構造物への圧力推定に一 定程度の信頼性を有していることが確認できた.本節 ではその次段階として、実際に観測された樋門ゲート 近傍の津波作用計算に適用することとする.

図-4には、施工時図面より作成した樋門ゲート周辺 の3次元形状 (a)、図面から作成した初期粒子配置 (b) を示した.図-4 (b)の中で青で着色したのが水を表す 粒子であり、計算開始時静水であるとした.吐口の最手 前部分には造波版を設置し (図-4 (a))、これに波速を 与えることで波を発生させ、ゲートに衝突させること とした.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難しかったので、 ゲートは平板であるものとして以下の解析を実施した.



図-5 映像記録に捉えられた河川津波と MPS 法による計算 結果との比較

本稿では解像度の制約から計算粒子計は $d_0 = 0.1 \text{ m}$ とした.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.なお,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 s とした.

図-5 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



図-6 ゲート表面に作用する圧力分布と同時刻のゲート前面 の砕波流況

波もの段波が来襲したことが分かっている.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,図-2 に比較し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-6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, 2次元的に圧力値をプ ロットしたものである.ここでも(1)節の解析と同様に 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/m² を超 える圧力極大値が生じ始め (t = 3.08 s), t = 3.16 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 = 3.28~3.44 sにかけ,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-6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充分な近傍粒子数が得られず計算 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-5 左上の写真に示 すように実現象として砕波フロント形状は凹凸を伴っ ており、衝撃砕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





(b) 減勢工3本の場合の初期粒子配置

図-7 減勢工を設置した計算領域

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 将来的な発展に向けて必須となるものと考えられる.

(3) 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、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¹²⁾.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9m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5mとした場合と約2.5m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.この減勢工は、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-7 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5m,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2.5m間隔とな



図-8 減勢工を設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

るように配置した. 図-8 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, コ ンターはゲート方向流速 [m/s] を示した. 図-8(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, 上段が俯瞰図, 下段が平面図で ある. なお, 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-8(a)より減勢工を設置しないケースにおいて、段

波は水しぶきをあげながら侵入するが下段よりフロントの平面形状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、Kleefsmanによる実験結果(図-2)のように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.フロント平面形状については、(a)の場合と大きな変化は確認できなかった.

図-8(c) 上段より,3本設置のケースでは段波の進行







図-10 段波衝突を受ける直前の圧力計測点のスナップショット(減勢工無しのケース)

が杭で阻害され、3箇所で上方への跳ね上がりが確認さ れた. また, (c) 下段より, 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-9(a), (b) に示したのは、ゲート表面に設置した圧力計測点 A、 B(図-10)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13)や前々節で既に 示されているためである. (a) より, 減勢工無しの場合 は最大で 45 kN/m² 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33kN/m²、 減勢工3本では26kN/m²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. なお, 45 kN/m² 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-9(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%の最大圧力の抑制に成功 したことがわかった.

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津波映像と樋門 形状に関する資料を,粒子法コードユーザグループに は計算用コード MPS-SW-MAIN をご提供頂いた.ま た,本研究の一部は科研費 (No. 24360197)の補助を受 け行われた.ここに記して感謝の意を表します.

参考文献

- 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.
- 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.
- 村嶋陽一, 越村俊一, 岡秀行, 村田泰洋, 今村文彦: 非線形 分散波理論に基づく実用的な津波の河川遡上モデルの開 発, 土木学会論文集 B2(海岸工学), Vol.66 (1), pp.201-205, 2010.
- 安田浩保:不等流を遡上する波状性段波の水理実験とその数値計算,応用力学論文集,Vol.10, pp.555-562, 2007.
- 吉川泰弘, 阿部孝章, 平井康幸:河川津波に伴い発生した北海道鵡川のアイスジャム再現計算, 土木学会論文集B2(海岸工学), Vol.68 (2), pp.I_416-I_420, 2012.
- 渡邉忠尚,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.
- 7) 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.
- Koshizuka, S. & Oka, Y.: Moving particle semiimplicit method for fragmentation of incompressible fluid, *Nuclear Science and Engineering*, Vol.123, pp. 421-434, 1996.
- Kleefsman, K.M.T.: Water impact loading on offshore structures, a numerical study, Ph.D. Thesis, University of Groningen, The Netherlands, p.149, 2005.
- 10) Khayyer, A. & Gotoh, H.: A 3D higher order Laplacian model for enhancement and stabilization of pressure calculation in 3D MPS-based simulations, *Applied Ocean Research*, Vol.37, pp.120-126, 2012.
- 別府万寿博,井上隆太,石川信隆,長谷川祐治,水山高久: 修正 MPS 法による土石流段波モデルのシミュレーション解析,砂防学会誌, Vol.63 (6), pp. 32-42, 2011.
- 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,京都大学防災研究所年報,第43号 (B-2), pp.287-294, 2000.
- 13) Shibata, K. & 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.

(2013.4.4 受付)