高精度粒子法による流起式防波堤の数値解析

後藤 仁志¹・五十里 洋行²・殿最 浩司³
菅野 高弘⁴・東 良慶⁵・伊藤 忠男⁶・菅原 康之⁷

¹ 正会員 京都大学教授 工学研究科社会基盤工学専攻 (〒615-8540 京都市西京区京都大学桂 4)

E-mail: gotoh@particle.kuciv.kyoto-u.ac.jp

² 正会員 京都大学助教 工学研究科社会基盤工学専攻 (〒615-8540 京都市西京区京都大学桂 4)

E-mail: ikari@particle.kuciv.kyoto-u.ac.jp

³ 正会員 株式会社ニュージェック 港湾・海岸グループ (〒531-0074 大阪市北区本庄東 2-3-20)

E-mail: tonomokj@newjec.co.jp

⁴ 正会員 (独) 港湾空港技術研究所 (〒239-0826 横須賀市長瀬 3-1-1)

E-mail: sugano@pari.go.jp

⁵ 正会員 京都大学助教 防災研究所 (〒612-8235 京都市伏見区横大路下三栖東ノ口)

E-mail: azuma.ryoukei.6v@kyoto-u.ac.jp

⁶ 非会員 株式会社丸島アクアシステム (〒540-8577 大阪市中央区谷町 5-3-17)

E-mail: tadao_ito@marsima.co.jp

⁷ 学生会員 京都大学 工学研究科社会基盤工学専攻 (〒615-8540 京都市西京区京都大学桂 4)

E-mail: sugawara.yasuyuki.37s@st.kyoto-u.ac.jp

流起式防波堤は、津波波力自体を駆動力として扉体を起立させる新しい形式の可動防波堤であり、人為的な操作を不要とする利点を有している。しかし、現状ではその挙動を再現できる数値解析技術は開発されていない。そこで、本研究では、流起式防波堤に適用可能なシミュレーションモデルを開発し、水理実験結果と比較することによって、モデルの有効性を検討する。流体は、高精度粒子法を用いて解析し、防波堤扉体は剛体として扱う。また、扉体の運動を拘束するベルトは質点バネモデルで表現する。波高の異なる2種類の孤立波をそれぞれ造波し、防波堤周辺に設置された計測点における波高および流速を水理実験結果と比較したところ、両者ともに計算結果は実験結果と良好に一致し、本モデルの有効性が示された。

Key Words : hydroplane tsunami barrier, numerical simulation, particle method, solitary wave

1. はじめに

湾口部は、津波発生時には津波の侵入を許すために港湾内の被害を拡大させる弱点となるが、平常時においては船舶等の航路となるので、その航行を妨げないように、緊急時のみ防御機能を発動するような防波堤の設置が望ましい。また、必ずしも船舶の航路とならないような場所においても、景観保全の観点から言えば、これと同様に緊急時のみ水面上に出現するような防波堤が理想的である。このような要請から、これまでに直立浮上式防波堤¹⁾や、フラップゲート式可動防波堤²⁾などが開発されてきた。本研究で扱う流起式防波堤もその一種であり、津波波力自体を駆動力として半月型の扉体を起立させるという特徴を有している。言い換えればこれは、人為的

な操作が不要ということであり、作業員の避難開始時刻の早期化に大きな期待が持てる。しかし、流起式防波堤は他の可動式の防波堤より後発の形式であり、水理実験による検討³⁾が始まったばかりで、数値解析技術に関しては未だ有効例が示されていない。そこで、本研究では、粒子法をベースに流起式防波堤の扉体の挙動を再現できる構造・流体連成型の数値モデルを開発し、流起式防波堤に孤立波を作用させた場合の扉体の応答や波高等の時系列分布について水理実験結果と比較し、その適用性を検討する。

なお、本稿の数値シミュレーションは、後藤・五十里・殿最・菅原が実施し、菅野・東・伊藤は水理実験のみを担当した。

水理実験・防波堤模型

数値解析・防波堤モデル

図-1 流起式防波堤扉体模式図

2. 数値解析の概要

(1) 流体解析

流体解析には、MPS法⁴⁾を適用する。ただし、波浪変形や扉体に作用する流体力を精度良く評価するために、高精度化スキームを導入する。用いた高精度化スキームは、HS法⁵⁾、HL法⁵⁾、ECS法⁶⁾、GC法⁶⁾、DS法⁷⁾である。また、これらの高精度化スキームは、SPH法にも適用されている⁸⁾。

(2) 防波堤モデル

防波堤扉体は、図-1上図の模式図に濃灰色で示す通り半月型の形状をしており、底面と接する曲線部に沿って回転しながら起立する。ただし、扉体先端と底面上の固定点を繋ぐ4本のベルトでその運動は拘束されている。下部固定ベルトが扉体の流失を防止し、上部固定ベルトが90°以上の扉体の回転を抑止する。扉体は、岸沖方向長さ0.43m×水路幅方向長さ1.29mで、上記4本のベルトを1組として水路幅方向に等間隔に4組接合されている。なお、ベルトは岸沖方向に対称に接合されており、どちらの方向にも同様に起立する。

計算では、扉体は剛体連結モデル⁹⁾を用いて剛体として扱う。扉体構成粒子の比重はすべて均一とし、実験に合わせて1.034とした。扉体構成粒子は、粒子間相互作用モデルによって計算された流体力と壁面やベルトとの衝突力によって移動するが、扉体両端の粒子のみ、これらに加えてベルト張力が作用する。

下部固定ベルトは、複数のベルト代表点間をバネおよ

図-2 計算領域および計測点

びダッシュポットで結合した質点バネモデルで表現する(図-1下図参照)。質点(ベルト代表点)の運動方程式は、

$$M \frac{du}{dt} = F_n + F_c + Mg \quad (1)$$

$$F_n = \sum_{j=1}^N \left[\left\{ -k_n (l_0 - |r_{ij}|) + c_n v_{ij\xi} \right\} \frac{r_{ij}}{|r_{ij}|} \right] \quad (2)$$

である。ここで、 M :質点の質量、 u :質点の速度ベクトル、 F_n :質点間の軸方向力ベクトル、 g :重力加速度ベクトル、 k_n :バネ定数、 c_n :ダッシュポット定数、 N :接続質点数、 r_{ij} :質点間相対位置ベクトル、 l_0 :初期質点間距離、 $v_{ij\xi}$:2質点の相対速度の軸方向成分である。ベルトが扉体や底面内部に侵入しないように、質点と扉体構成粒子あるいは底面壁粒子間には個別要素法と同様の接触力 F_c が作用する。ただし、流体計算時においてベルトは無視されるものとする。したがって、扉体と底面が直接接触するように、1層目の底面壁粒子では質点との接触力を発生させない。なお、ベルトの両端は、底面固定壁粒子と扉体先端の扉体構成粒子に接続した。

上部固定ベルトについては、弛緩状態においては扉体の運動に影響を及ぼさないことから、下部固定ベルトのように質点をつないでベルトを形成するのではなく、起立時(90°回転時)の扉体先端とベルト固定点との距離を基準として、その2点間距離が基準値以上離れた場合のみ直線的にバネによる引張力が作用するものとした。

3. 孤立波来襲時における流起式防波堤の扉体起立過程

(1) 実験および計算条件

図-2に、計算領域および防波堤周辺の模式図を示す。防波堤は、マウンド部と扉体で構成される。計算は鉛直二次元場で行うが、実験水槽は水路幅4.0mで、扉体

図-3 孤立波来襲時の扉体起立過程 (case1, 左: シミュレーション, 右: 水理実験)

模型は水路幅方向に3基設置される(扉体間の間隙は2 cm)。マウンドは、高さ0.15 m×天端幅1.1 mで、水理実験、シミュレーションともに不透過である。防波堤岸側は勾配1/10の斜面であり、沖側は水平床である。造波は、防波堤中心から約11 m沖側で行う。水理実験では、ピストン型造波機で造波板を前後移動させることで孤立波を生成したが、計算では、粒子数の節約のために流入壁を設置し、以下の孤立波波形および水平方向速度

に従って水粒子を流入させた。

$$\eta = H \operatorname{sech}^2 \left(\sqrt{\frac{3H}{4h^3}} x_w \right) \quad (3)$$

$$u = H \sqrt{\frac{g}{h}} \operatorname{sech}^2 \left(\sqrt{\frac{3H}{4h^3}} x_w \right) \quad (4)$$

ここで、 H : 孤立波波高, u : 流入壁の水平方向移動速度, h : 水深, g : 重力加速度, x_w : 波高が最大となる地点か

図-4 各計測点での波高の比較 (case1)

図-5 各計測点での水平流速の比較 (case1)

らの水平距離である。

水深は 0.475 m で、扉体起立時に扉体長さの 1/4 が静水面上となるように設定した。模型縮尺は 1/46.5 である。入射波高は、case1 : 0.161 m (実スケールで 7.5 m) および case2 : 0.323 m (実スケールで 15.0 m) である。また、図-2 上図に示すように、防波堤周辺で波高および流速の計測を行う。波高は 5 地点 (WH2, WH5, WH6, WH7, WH8) で、流速は 2 地点 (EMV1, EMV2) の半水深位置で計測が行われた。

(2) case1: 波高 $H=0.161$ m

図-3 に、計算結果の瞬間像と水理実験の撮影映像から抽出した静止画像を比較して示す。図-3 左側の計算結果の瞬間像では、ベルトは代表点のみすべて同じ色で表示している。初期に倒伏状態にあった扉体が、孤立波の接近とともに扉体前面 (曲線部) に流体力を受け、徐々に起立し始める ($t=6.65$ s)。このとき、扉体の回転挙動は、下部固定ベルトに相当する質点バネモデルによって適切に制御されている。また、孤立波の通過とともに、扉体は底面に鉛直に起立し、防波堤としての機能が発揮される ($t=7.65$ s)。扉体は、上部固定ベルトに相当する引張力の作用によって、これ以上背面 (図面左側) に倒れることはない。また、水面形に関しては、 $t=6.95$ s や $t=7.25$ s において、水理実験では扉体前面において小さな凸部が見られるのに対し、計算結果ではそれが見られない。これは、3 基の扉体間の隙間からの流体の漏出や、各扉体の起立挙動のわずかなタイミングのずれ等で発生したものと思われる。扉体が完全に起立した時刻 ($t=7.65$

s) では、越波によって飛沫が発生し、一方で、扉体背後の水面形には凹みが生じる ($x=-0.4$ m)。これらについては、計算結果の実験結果との良好な対応が確認できる。

図-4 に、case1 における波高の計測結果を実験結果と併せて示す。まず、港外側の計測点 (WH2, WH5, WH6) と港内側の計測点 (WH7, WH8) の波高のピーク値を比較すると、防波堤の通過前後で波高が約 10% 減少している。次に、港外側の 3 計測点を見ると、最初のピークが過ぎた後、再度波高数 cm 程度のピーク値をとる。これは起立した防波堤からの反射波によるものであると考えられる。計算結果は、最初のピーク値に関しては、実験結果と良好に一致していることがわかる。反射波によるピークに関しては、実験結果よりもやや波高が大きい。これは、先述した隣接する扉体間の隙間からの漏出が、反射波に影響を及ぼしたものと思われる。

図-5 に、case1 における水平流速の計測結果を実験結果と比較して示す。港外側 (EMV1)、港内側 (EMV2) ともに孤立波の到達時に大きなピーク値をとり、その後、速度が逆方向に転じる。これは、港外側では防波堤から、港内側では斜面からの反射によるものと考えられる。計算結果もほぼ同様の傾向を示しており、ピーク値に関しても概ね良好に対応している。

(3) case2: 波高 $H=0.323$ m

図-6 に、case2 における計算結果の瞬間像と水理実験の抽出画像を示す。図-3 と同様に、計算結果の瞬間像では、ベルトは代表点のみを示している。本ケースでは、波高が約 25% 減少しており、case1 と比較して下げ幅が大きい。case2 でも case1 と同様に、シミュレーションの扉体の挙動は実験と良好に対応しているが、水面形に関しては、 $t=6.89$ s でシミュレーションでは扉体背後に大きな空隙が生じるのに対し、水理実験ではそれが不明瞭である。これは、本計算で負圧を考慮していないことが原因であると推察される。負圧は計算の不安定に繋がるので考慮するのは容易ではないが、適切に行えば、空隙を埋める方向に引張力が作用して、越流水脈がより扉体に近く着水するものと思われる。本研究では、負圧が扉体の挙動に大きく影響を及ぼすことはないので無視した。もし負圧計算が必要となれば、SPP (Space Potential Particles) ¹⁰⁾ の適用が計算安定性の向上に効果的である。

図-7 および図-8 に、case2 における波高および流速の計測結果を実験結果と併せて示す。どちらも case1 とほぼ同様の傾向を示しており、計算結果も特にピーク値については、実験結果と良好に一致していることが確認できる。

図-6 孤立波来襲時の扉体起立過程 (case2, 左：シミュレーション, 右：水理実験)

(4) 扉体の起立過程

図-9 に, 両ケースにおける扉体の傾斜角度を時系列で示す (t_0 : 扉体が 90° 起立した時刻). どちらのケースにおいても, 計算結果は実験結果と良好に対応しており, 波高の大きい case2 の方が扉体が急激に起立するという傾向を良好に再現している. これは, 扉体に作用する流体力の推定精度が良いことを示唆していると言える.

4. おわりに

本研究では, 高精度粒子法を用いて, 流起式防波堤の挙動を解析できる数値モデルの開発を行った. 波高の異なる 2 種類の孤立波に対する防波堤扉体の挙動や波高・流速を水理実験と比較した結果, 本数値モデルによる計算結果は実験結果を良好に再現できることが確認できた. 今後は, 扉体に作用する流体力の評価, ベルト部の

図-7 各計測点での波高の比較 (case2)

図-8 各計測点での水平流速の比較 (case2)

張力の評価など、設計上不可欠な物理量の推定についても詳細に検討を行いたい。

参考文献

- 1) 有川 太郎, 坂口 章, 小林 真, 虎石 龍彦, 櫻井良宏, 木原一禎: 直立浮上式防波堤の実海域実証試験, 海洋開発論文集, 第 24 巻, pp.93-98, 2008.
- 2) 木村雄一郎, 新里英幸, 仲安京一, 安田誠宏, 間瀬肇: フラップゲート式可動防波堤の波圧応答特性に関する実験的研究, 海岸工学論文集, 第 56 巻, pp.806-810, 2009.
- 3) 東良慶, 伊藤忠男, 半田英明, 山敷亮, 平石哲也, 菅野高弘: 流起式可動防波堤の小型模型による性能評価水理実験, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol.70, No.2, pp.951-955, 2014.
- 4) Koshizuka, S. and Oka, Y.: Moving particle semi-implicit method for fragmentation of incompressible fluid, *Nucl. Sci. Eng.*, Vol. 123, pp. 421-434, 1996.
- 5) Khayyer, A. and Gotoh, H.: A higher order Laplacian model for enhancement and stabilization of pressure calculation by the MPS method, *Appl. Ocean Res.*, Vol. 32, pp. 124-131, 2010.
- 6) Khayyer, A. and Gotoh, H.: Enhancement of stability and accuracy of the moving particle semi-implicit method, *J. Comput. Phys.*, Vol. 230, pp. 3093-3118, 2011.
- 7) Tsuruta, N., Khayyer, A. and Gotoh, H.: A short note on dynamic stabilization of moving particle semi-implicit method, *Comput. Fluids*, Vol. 82, pp. 158-164, 2013.
- 8) Gotoh, H., Khayyer, A., Ikari, H., Arikawa, T. and Shimosako, K.: On enhancement of Incompressible SPH method for simulation of violent sloshing flows, *Appl. Ocean Res.*, Vol. 46, pp. 104-115, 2014.
- 9) Koshizuka, S., Nobe, A. and Oka, Y.: Numerical Analysis of Breaking Waves Using the Moving Particle Semi-implicit Method, *Int. J. Numer. Meth. Fluids*, Vol. 26, pp. 751-769, 1998.
- 10) Tsuruta, N., Khayyer, A. and Gotoh, H.: Space potential particles to enhance the stability of projection-based particle methods, *Int. J. Comput. Fluid Dyn.*, Vol. 29(1), pp. 100-119, 2015.

(2015.3.18 受付)

NUMERICAL SIMULATION ON HYDROPLANE TSUNAMI BARRIER BY ACCURATE PARTICLE METHOD

Hitoshi GOTOH, Hiroyuki IKARI, Koji TONOMO,
Takahiro SUGANO, Ryoukei AZUMA, Tadao ITO and Yasuyuki SUGAWARA

The hydroplane tsunami barrier is a new type movable breakwater in which a flap gate stands up due to hydrodynamic force without any artificial manipulation. In this study, a numerical model based on an accurate particle method has been developed to simulate a behavior of hydroplane tsunami barrier. In the model, the equation of motion of fluid are discretized by applying accurate MPS method. A flap gate is treated as a rigid body connected with 4 belts to control the behavior of the gate. The belt is described by mass-spring system. The model was validated in a simulation of solitary waves. The behavior of flap gate, wave height and horizontal velocity were compared with the experimental ones, and are in good agreement with the experimental ones.