流起式防波堤のベルト張力推定に関する 高精度粒子法の適用性

後藤 仁志¹・五十里 洋行²・殿最 浩司³・伊藤 忠男⁴・菅原 康之⁵

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 非会員 丸島アクアシステム株式会社 (〒540-8577 大阪府中央区谷町 5-3-17)

E-mail: tadao_ito@marsima.co.jp

⁵ 正会員 電源開発株式会社 (〒104-8105 東京都中央区銀座6 丁目15-1)

E-mail: Yasuyuki_Sugawara@jpower.co.jp

流起式防波堤においては、防波堤扉体の運動の制御を担うベルトの引張強度に十分に注意して設計しなければならない。万一、津波来襲時にベルトの限界強度を超えた引張力が作用してベルトが切断されると、扉体はその起立姿勢を維持できず津波防護機能が著しく損なわれ、最悪の場合、扉体が漂流物となって海岸構造物に衝突し得る。したがって、津波来襲時のベルト張力の予測は非常に重要な課題である。本研究では、粒子法を用いた流起式防波堤のシミュレーションモデルのベルト張力推定に関する適用性について、水理実験結果との比較を通じて検討を行った。二種類の高精度粒子法の勾配モデル (CMPS 法および GC 法) を適用して計算結果を比較したところ、GC 法を適用した場合に明確な優位性が確認された。

Key Words : hydroplane tsunami barrier, numerical simulation, accurate particle method, tensile force

1. はじめに

流起式防波堤は、津波来襲時にのみ防護機能を発現することを目的として考案された可動防波堤の一種である。この種の防波堤としては、これまでも直立浮上式防波堤¹⁾やフラップゲート式防波堤²⁾などが考案されてきているが、流起式防波堤は人為的操作が不必要であるという利点を有しており、近年、後発ながら実機の設置に向けた検討が実験・解析の両面から行われている^{3),4),5),6)}。流起式防波堤の設計における留意事項の一つとして、防波堤扉体の運動を制御するベルトの張力が挙げられる。津波来襲時にベルトの限界強度を超えた引張力が作用してベルトが切断されると、扉体はその起立姿勢を維持できず、津波防護機能が著しく損なわれ、最悪の場合、扉体が漂流物となって海岸構造物に衝突することもあると考えられる。したがって、ベルト張力の予測は非常に重要な課題である。

昨年度、後藤ら⁹⁾によって、高精度粒子法を用いた流起式防波堤のシミュレーションモデルが提案された。津波を模擬した孤立波を作用させた場合の流起式防波堤の挙動についてモデルの再現性が検討され、防波堤前後の波高や扉体の起立挙動等について、別途実施された水理実験結果との良好な一致が確認されているが、ベルト張力については言及されていなかった。そこで、本研究では、本モデルのベルト張力の推定精度について注目し、モデルの適用性を検討する。

2. 数値解析の概要

(1) 粒子法の圧力勾配モデル

本数値モデルのベースとなる手法は、MPS 法⁷⁾である。ただし、昨年度同様、流体力を精度良く評価するために、高精度化スキーム (HS 法⁸⁾, HL 法⁹⁾, ECS 法¹⁰⁾, DS 法¹¹⁾) を導入する。また、圧力勾配項には以

下の二種類の高精度化スキームをそれぞれ適用する。

a) CMPS 法

CMPS (Corrected MPS) 法⁸⁾における圧力勾配モデルは、

$$\langle \nabla p \rangle_i = \frac{D_s}{n_0} \sum_{j \neq i} \frac{(p_i + p_j) - (\hat{p}_i + \hat{p}_j)}{|r_{ij}|^2} r_{ij} w(|r_{ij}|) \quad (1)$$

$$r_{ij} = r_j - r_i \quad (2)$$

$$\hat{p}_i = \min_{j \in J} (p_i, p_j) \quad ; \quad J = \{j : w(|r_{ij}|) \neq 0\} \quad (3)$$

と示される。ここで、 D_s :次元数、 n_0 :基準粒子数密度、 p :圧力、 r :位置ベクトル、 $w(r)$:重み関数である。これは、2粒子間に作用する圧力勾配力が逆向き等大となるように標準型圧力勾配モデル⁷⁾を修正したモデルであり、これによって運動量が保存される。なお、(1)式は、

$$\begin{aligned} \langle \nabla p \rangle_i &= \frac{D_s}{n_0} \sum_{j \neq i} \frac{(p_j - p_i)}{|r_{ij}|^2} r_{ij} w(|r_{ij}|) \\ &+ \frac{D_s}{n_0} \sum_{j \neq i} \frac{(p_i - \hat{p}_i) + (p_i - \hat{p}_j)}{|r_{ij}|^2} r_{ij} w(|r_{ij}|) \end{aligned} \quad (4)$$

と変形でき、右辺第2項の $(p_i - \hat{p}_i) + (p_i - \hat{p}_j)$ が必ず正になることから、通常のMPS法の離散化モデルを用いた圧力勾配項(右辺第1項)に、運動量保存を満足させるための人工斥力(右辺第2項)を加えたモデルであると言える¹¹⁾。

b) GC 法

GC (Gradient Correction) 法¹⁰⁾における圧力勾配モデルは以下のように書ける。

$$\langle \nabla p \rangle_i = C_i \frac{1}{n_0} \sum_{j \neq i} \frac{p_j - p_i}{|r_{ij}|^2} r_{ij} w(|r_{ij}|) \quad (5)$$

$$C_i = \left(\frac{1}{n_0} \sum_{j \neq i} \frac{r_{ij} \otimes r_{ij}}{|r_{ij}|^2} w(|r_{ij}|) \right)^{-1} \quad (6)$$

このモデルは、Taylor展開から導出された、1次精度を保証するモデルであり、近傍粒子の偏在化および不規則配置に対しても正確に勾配を算出できる。ただし、CMPS法とは異なり、運動量は保存されない。なお、2粒子間に作用する圧力勾配力は必ずしも斥力とはならないため、安定した計算を実施するためにはDS法¹¹⁾との併用が望ましい。

(2) 防波堤モデル

本研究で適用する防波堤モデルは、後藤ら⁶⁾と同様である。図-1に示す通り、防波堤扉体は半月型の形状をしており、底面に沿って回転しながら起立する。扉体の運動は、扉体先端と底面上の固定点を繋ぐベルトで拘束さ

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

れている。本数値モデルでは、扉体を剛体連結モデル¹²⁾を用いて剛体として扱う。扉体構成粒子の比重は均一($=1.034$)とした。

下部ベルトは、複数のベルト代表点間をバネおよ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、

$$M \frac{du}{dt} = F_n + F_c + F_b + Mg \quad (7)$$

$$F_n = \sum_{j=1}^N \left[\left\{ -k_n (l_0 - |r_{ij}|) + c_n v_{ij\zeta} \right\} \frac{r_{ij}}{|r_{ij}|} \right] \quad (8)$$

$$k_n = \frac{EA}{l_0} \quad ; \quad c_n = 2\sqrt{Mk_n} \quad (9)$$

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、 F_b :浮力ベクトル、 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、 l_0 :初期質点間距離、 $v_{ij\zeta}$:2質点の相対速度の軸方向成分、 E :ヤング率($=75$ MPa)、 A :ベルト断面積($=0.05 \times 0.003$ m²)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。

上部ベルトについては、緊張状態になって初めて扉体の運動に影響を及ぼすことから、下部ベルトのように質点バネモデルによってベルトを形成するのではなく、扉体が倒伏状態から90°以上回転した場合のみ扉体先端からベルト固定点に向かって直線的にバネおよびダッシュポットによる引張力が作用するものとした。

図-2 計算フロー

図-2 に、本数値モデルの計算フローを示す。まず、通常の MPS 法の計算アルゴリズムに従って、流体粒子の速度・位置更新を行う。ここで、扉体構成粒子も流体粒子と同様に一旦速度・位置更新を行い¹²⁾、扉体構成粒子に作用する速度増分（流体力）を記憶する。次に、扉体構成粒子の速度・位置をその計算ステップ開始時点の値に戻し、記憶しておいた流体力、質点バネモデルから算出される張力および壁面等との衝突力を与えて、改めて扉体構成粒子の速度・位置更新を行う。最後に、扉体構成粒子間の相対位置が変化しないように位置補正を行う。本モデルでは、扉体構成粒子の速度・位置再更新に関する一連の計算を、数値安定性の確保のために流体計算よりも小さい時間間隔 $\Delta t_{DEM}(=\Delta t_{MPS}/50)$ を適用した小ループ内で行った。なお、この再更新計算により、扉体構成粒子の位置は圧力勾配項による本来の修正位置とはずれることになるが、それに対する補正は何も行っていない。しかし、これが圧力場に与える影響は少ない。

3. 孤立波来襲時におけるベルト張力推定

(1) 計算条件

図-3 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。マウンドは、高さ $0.15 \text{ m} \times$ 天端幅 1.1 m で、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。造波壁の位置は、防波堤中心から約 11 m 沖側であり、後藤ら⁹⁾と同様、流入壁から水粒子を流入させることで孤立波を造波した。水深は 0.475 m である。入射波高は 0.161 m で、実スケールで 7.5 m の波高の波を想定

図-3 計算領域および計測点

図-4 ベルト張力（上：上部ベルト，下：下部ベルト）

している。また、図-3 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。

(2) 圧力勾配モデルの違いによる計算結果の比較

図-4 に、2 種類の勾配モデルを適用したケースのベルト張力の計算結果を実験結果と併せて示す。実験結果に示されるように、上部および下部ベルトともに孤立波の来襲によって 2 度のピークが発生する。GC 法の計算結果では、実験結果と同様に 2 度のピークが発生し、特に設計時に重要となる最大のピーク値は上部・下部ともに実験結果と良好に対応している。一方、CMPS 法では、最初のピーク値は実験結果を下回り、さらにピークの発生時刻が実験結果よりも遅い。

図-5 各計測点での波高

この原因の一つは、モデルのエネルギー保存性にある。図-5は、各計測点での波高を比較したものである。後藤ら¹³⁾が示した通り、MPS-HS-HL-ECS-GC-DS法ではエネルギー保存性が高く、波高のピーク値が非常に良好に再現されているのに対し、CMPS法を適用した場合は、WH5以降、波高が実験値やGC法のケースよりも小さくなる。これは、GC法に比べて、CMPS法のエネルギー保存性が劣ることを意味している。また、図-6に、各計測点での流速を比較して示す。こ

図-6 各計測点での水平流速

らも、CMPS法ではエネルギー保存性が低いために、EMV2でピーク値が実験値よりも過小評価されている。また、CMPS法では、高周波のノイズが見られる。図-7に、水平方向流速分布を示すが、GC法では滑らかに遷移する連続的な流速場が見られるのに対し、CMPS法では非物理的なノイズによる流速擾乱が顕著である。Tsurutaら¹¹⁾が指摘するように、CMPS法では圧力勾配計算において運動量保存を満足するために導入された人工斥力が支配的となり、圧力勾配力が過剰に評価される。結果として、それがノイズとして流速場に現れることになる。先述した通り、剛体構成粒子も流体粒子と同様のモデルで圧力勾配力が計算されるので、剛体連結モデルによりある程度平均化されるものの、剛体の挙動にこのノイズの影響は及ぶ。

図-8に、図-7と同時刻における圧力分布を示す。圧力分布においては、それほど顕著な非物理的なノイズは見られないが、例えば、沖側マウンド法肩近辺において、CMPS法では層状であるはずの圧力分布が崩れており、ノイズが確認できる($t=7.0$ s)。

図-9に、扉体の起立角度を示す(t_0 :扉体が最初に直立した時刻)。CMPS法では、起立挙動が緩慢であり、直立に至るまでの起立速度が遅い。図-7に示すように、同じ時刻($t=7.5$ s)で見れば、完全に起立していないことが確認できる。また、GC法では起立直後に扉体背後で空隙が見られるが、これはCMPS法でも同様に起立直後には空隙が発生する。実験でも類似した水面形の凹みは確認できた。

なお、本計算を高精度化スキームを全く適用しない標準型MPS法でも実施してみたが、計算開始後即座に計算が破綻した。したがって、流起式防波堤のシミュレーションには高精度粒子法の適用が必須であり、適切な圧力勾配モデルの選択が必要である。

図-7 水平方向流速分布（岸向きが正，左：CMPS 法，右：GC 法）

図-8 圧力分布（左：CMPS 法，右：GC 法）

4. おわりに

本研究では、高精度粒子法を用いた流起式防波堤のシミュレーションモデルのベルト張力推定に関する適用性を検討した。扉体に作用する流体力の推定に大きく関連する圧力勾配モデルにおいて、既存の二種類の高精度化スキームを適用し、ベルト張力に与える影響を比較・調査した。圧力勾配モデルとして CMPS 法を適用した場

合には、エネルギー保存性があまり良くないために孤立波が防波堤に到達する前に波高が下がり、さらに、過剰な人工斥力が原因で発生する流速場のノイズによって扉体の挙動の正確性が低下するので、ベルト張力のピーク値だけでなく、ピークの発生時刻も実験結果と異なる結果となった。一方で、GC 法は運動量が保存されないという短所はあるものの、その影響は小さく、波高を維持でき、かつ、ノイズの少ない圧力場および流速場が得ら

図-9 扉体の起立角度

れる。したがって、ベルト張力の正確な評価には、圧力勾配モデルとして GC 法を採用すべきである。

流起式防波堤の実機の設定にあたっては、他にも洗掘対策など数多くの技術的課題が残されている。それらについても本モデルを活用できるように、モデルの改良を加えていきたい。

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) 東良慶, 伊藤忠男, 半田英明, 平石哲也, 菅野高弘: 流起式可動防波堤の津波減勢効果に関する評価実験, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol.71, No.2, pp.1081-1086, 2015.
- 5) 東良慶, 伊藤忠男, 半田英明, 平石哲也, 菅野高弘, 二瓶泰範: 流起式可動防波堤の津波に対する応答特性評価実験, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol.71, No.2, pp.1087-1092, 2015.
- 6) 後藤仁志, 五十里洋行, 殿最浩司, 菅野高弘, 東良慶, 伊藤忠男, 菅原康之: 高精度粒子法による流起式防波堤の数値解析, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol.71, No.2, pp.1051-1056, 2015.
- 7) Koshizuka, S. and Oka, Y.: Moving particle semi-implicit method for fragmentation of incompressible fluid, *Nucl. Sci. Eng.*, Vol. 123, pp. 421-434, 1996.
- 8) Khayyer, A. and Gotoh, H.: Modified moving particle semi-implicit methods for the prediction of 2D wave impact pressure, *Coast. Eng.*, Vol.56(4), pp.4169-440, 2009.
- 9) 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.
- 10) 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.
- 11) 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.
- 12) 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.
- 13) 後藤仁志, KHAYYER Abbas, 五十里洋行, 清水裕真: エネルギー保存性の高い粒子法による水面波の伝播計算, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol.71, No.2, pp.25-30, 2015.

(2016.3.16 受付)

ON APPLICABILITY OF ACCURATE PARTICLE METHOD TO PREDICTION OF TENSILE FORCE ACTING ON CONTROL BELT OF HYDROPLANE TSUNAMI BARRIER

Hitoshi GOTOH, Hiroyuki IKARI, Koji TONOMO,
Tadao ITO and Yasuyuki SUGAWARA

In a design of a hydroplane tsunami barrier, it is required to pay attention sufficiently to the tensile strength of a belt to control the motion of a flap gate. If tsunami attacks cut the control belt by a tensile force exceeding its critical strength, a flap gate could not keep standing posture and the protection function of the barrier for a tsunami would be lost. In the worst case, a flap gate could drift and collide with neighboring coastal structures. Therefore, the prediction of tensile force acting on the belt is a significant issue in a design of a hydroplane tsunami barrier. This paper presents the investigation of the applicability of accurate particle methods to the prediction of the tensile force. The tensile forces for the cases of two types of pressure gradient models such as CMPS and GC methods are compared with an experimental result. The GC method shows superior performance to CMPS method in the prediction of tensile force acting on the belt.