体積力型Immersed Boundary法を導入した 3次元数値波動水槽CADMAS-SURF/3Dによる ゲート急開に伴う水塊流出解析

有光 剛¹・川崎 浩司²・渡辺 啓生³

¹ 正会員 関西電力(株) 電力技術研究所 (〒661-0974 兵庫県尼崎市若王寺 3-11-20)
E-mail: arimitsu.tsuyoshi@d3.kepco.co.jp

² 正会員 (株)ハイドロソフト技術研究所 執行役員兼研究開発センター長
(〒530-6126 大阪市北区中之島 3-3-23 中之島ダイビル 26F)
E-mail: kawasaki@hydro-soft.co.jp

³ 正会員 (株)ハイドロソフト技術研究所 (〒530-6126 大阪市北区中之島 3-3-23 中之島ダイビル 26F)
E-mail: watanabehk@hydro-soft.co.jp

本研究では、3次元浮遊砂移流拡散モデルの構築に先立ち、構造物の移動を精度良く考慮できるように、体積力型 Immersed Boundary 法を3次元数値波動水槽 CADMAS-SURF/3D に導入した数値モデルを構築した。さらに、ゲート急開による水塊流出の水理実験を行い、実験値と計算値を比較検討することにより、本モデルの妥当性・有用性を検証した。その結果、本研究で構築した体積力型 Immersed Boundary 法を導入した CADMAS-SURF/3D は、移動構造物の影響を適切に表現可能で、かつ水塊流出時の流動場を高精度に計算できることから、3次元浮遊砂移流拡散解析モデルへの展開に役立つといえる。

Key Words : CADMAS-SURF/3D, immersed boundary method, outflow induced by quick opening of gate, experiments

1. はじめに

原子力発電所では、津波来襲時も冷却水の取水を継続する必要がある。これに対して、津波によって大量に巻き上がった海底砂によるポンプ取水機能への支障や、輸送された土砂の堆積に伴うポンプの埋没などが生じる可能性があるため、ポンプ位置における浮遊砂濃度および堆積土砂量の正確な評価が必要である。

津波に伴う砂移動評価に関しては、広域を対象とした数値計算手法^{1), 2), 3)}が提案されている。これらの手法は、いずれも平面2次元津波伝播計算の結果に基づき、掃流砂量および浮遊砂量と、その収支で求まる地形変化量を算定するものであり、海域を対象として現地地形変化の再現性の検証も行われている^{1), 2), 4), 5)}。しかしながら、取り扱う流速や浮遊砂濃度は鉛直平均値であるため、取水トンネルやポンプ室のように構造物内部における複雑な流れに伴う砂移動や、浮遊砂濃度の空間分布を詳細に評価することは困難である。このように評価対象が複雑な場合には、3次元性を考慮した流動とそれに伴う砂移動の解析が必要となる。

海岸構造物の耐波設計においては、水理模型実験を補

う手段としてCADMAS-SURF^{6), 7)}や、3次元数値波動水槽 CADMAS-SURF/3D⁸⁾が実務に用いられつつある。これらのモデルは、風波のみならず津波の挙動や波力に関する検討^{9), 10)}にも用いられている。このように実務に広く用いられているCADMAS-SURFやCADMAS-SURF/3Dを用いて砂移動の計算を行うことができれば、モデルの汎用性がさらに高まることが期待できる。

本研究では、CADMAS-SURF/3Dに砂移動モデルを組み込むことで、津波に伴う海域の砂移動と、取水トンネルやポンプ室内の流動および砂移動の一体解析が可能なモデルを構築することを最終的な目標としている。しかし、CADMAS-SURF/3Dは、自由水面を有する波浪場には適用されているものの、内外の水位差による水塊の押し出しに関する適用性の検証事例はほとんどない。そのため、本検討では、砂移動モデルの組み込みに先立ち、水塊流出に対するCADMAS-SURF/3Dの適用性を検証することを目的とする。具体的には、まず、モデルの再現性を確認するために、水位差を有する2つの貯水槽の境界に設けたゲートの急開に伴う水塊挙動に関する水理模型実験を行った。ついで、上方へのゲート引き上げが水路内の流況場に影響を及ぼすために、実験条件との差異の低

減を目的として、体積力型Immersed Boundary法（体積力型IB法）をCADMAS-SURF/3Dに導入した。さらに、水理実験の再現計算を行うことにより、本モデルの妥当性・有用性を検証した。

2. ゲート急開による水塊流出実験

水理模型実験には、長さ 18 m、幅 0.5 m、高さ 0.5 m の矩形水路のうち下流端から長さ 6 m の区間を用いた（図-1）。仕切り板を用いて、長さ 2 m の貯水部と長さ 4 m の計測領域に分割した。仕切り板には高さ 0.1 m の開口部を設け、仕切り板と同サイズの板を合わせることで、ゲート開閉を可能とした。初期条件は、ゲートを閉めたうえで貯水部と計測領域に水位差を設けた状態とした。その後、ゲートを上方に急開することで開口部から計測領域内に水塊を流入させて、計測領域内に設けた 16 点（図-2）において、電磁流速計を用いた流速計測を行った。実験条件を表-1 に示す。計測領域の水深 h_1 は 0.2 m とし、貯水部の水深 h_2 を変化させた。下流端には高さ 0.2 m の堰を設け、それを越えた水塊は水路外へ流出させた。計測に先立ち、貯水部に砂を入れて攪拌したうえでゲートを開き、水塊とともに浮遊砂が流出する条件で予備実験を行った。その結果、ゲート開放の速度が小さい場合には、開度の増加による濁水の流出状況の変化が顕著であったため、ゲートを急開することで、開度の時間変化の影響の低減を図った。なお、本実験はゲート急開に伴う流動の把握を目的としており、砂を混入しない条件で実施した。

3. 体積力型 IB 法を導入した CADMAS-SURF/3D によるゲート急開に伴う水塊流出解析

(1) 体積力型 IB 法の導入方法

本研究では、菊ら⁹⁾が構築した計算手法を参考に、数値波動水槽 CADMAS-SURF/3D に体積力型 IB 法を導入した。簡単に説明すると、移動物体の表面で不透過条件が成立するように、運動方程式の右辺に相互作用力を付加して計算を行った。詳細は菊ら⁹⁾を参照されたい。

(2) 計算条件

計算領域は、実験水路の形状と同様に設定し、水路方向 310 メッシュ、水路幅方向 49 メッシュおよび水深方向 50 メッシュで分割した（図-3）。下流端には、水理模型実験と同様に、高さ 0.2 m の堰を設けた。体積力型 IB

(a)水路

(b)仕切り板

図-1 実験装置の概要

図-2 流速計測点

表-1 実験条件

計測領域水深 h_1 (m)	貯水部水深 h_2 (m)	開口部幅 B (m)
0.2	0.25	0.45
0.2	0.35	0.45
0.2	0.25	0.05
0.2	0.35	0.05

図-3 計算領域の概念図

法の効果を把握するために、ゲートを考慮・未考慮の 2 種類の計算を行った。なお、ゲート急開速度は、水理実験の撮影動画から、0.2 m/s と一定とした。なお、体積力型 IB 法の導入による計算負荷の増大は僅かである。

(a)測点 1

(c)測点 3

(b)測点 2

(d)測点 4

図-4 測線 3 における流速の時系列 (開口幅 0.45 m, 初期水位 0.25 m)

(a)測点 1

(c)測点 3

(b)測点 2

(d)測点 4

図-5 測線 3 における流速の時系列 (開口幅 0.45 m, 初期水位 0.35 m)

(3) 再現性の検証

図-4, 図-5 は, 開口幅 B が 0.45 m, 貯水部の初期水位 h_2 がそれぞれ 0.25 m, 0.35 m の場合で, 測線 3 における各測点の流速の時系列を示したものである. 図中の黒実線は実験結果, 赤実線, 青点線はそれぞれゲートの移動を考慮・未考慮の場合の計算結果である. 両図より, ゲートの挙動に関係なく, 計算結果は実験結果をある程度表現していることがわかる. しかし, 体積型 IB 法によるゲートの移動を考慮した方が, 流速の立ち上がり (時刻 1s 前後) の再現性がより向上している. 特に, 貯水部の初期水位が 0.35 m と大きい場合を示す図-5 からわかるように, ゲート付近の測点 1 と測点 2 では, 移動ゲート

の影響が顕著に認められる.

ついで, 体積型 IB 法の効果を確認するために, ゲート急開に伴う流況場の変化を図-6 に示す. (a), (b) はそれぞれゲートの移動を考慮・未考慮の場合である. 図-6(a)の茶色の移動物体がゲートを示す. 時刻 0.1 s の図面をみると, ゲートの移動を考慮していない場合, 計算直後に仕切り板の下で流速が発生するとともに, ゲート前後で水位差が認められる. 一方, ゲートの移動を考慮した場合, ゲートが少ししか空いていないため, ゲート周辺の流況に初期場から大きな変化は認められない. 時刻 0.2 s ~ 0.4 s においては, ゲートの挙動を考慮した場合は, 最大流速が底面付近で, 考慮していない場合は開口部全体で発生

図-6 仕切り版周辺での流況場 (開口幅 0.45 m, 初期水位 0.35 m)

しており、仕切り板周辺の流況場に大きな差異がある。

したがって、開口部におけるゲートの急開動作は、その周辺の水位変動と流速場に大きな影響を及ぼすことが判明するとともに、図-4～図-6 から、体積型 IB 法を導入した3次元数値波動水槽 CADMAS-SURF/3D の妥当性と有効性が検証される。

図-7、図-8 に、それぞれ貯水部の初期水位が 0.25 m, 0.35 m の場合の、開口幅 B が 0.05 m と狭い条件下における流速の時系列を図示する。黒・青実線は水路方向と水路幅方向の実験結果を、赤・緑実線は水路方向と水路幅方向のゲート移動を考慮した計算結果を示す。両図の計算結果は、開口幅 B が 0.45 m と広い場合である図-4、図-5 と比較すると、仕切り板から離れた地点で再現性が高

くないものの、実験結果の傾向を適切に捉えている。

図-9 に、開口幅 0.05 m, 初期水位 0.35 m の場合における仕切り板周辺の流況場を示す。(a), (b)は、それぞれ $y = 0.25$ m における鉛直断面、 $z = 0.055$ m における水平断面の流況場である。同図より、狭い開口部から非常に速い流速が発生し、仕切り板から流下方向 1 m 以降 ($x > 2.5$ m) でブルームのように流速の速い水塊が広がっている。開口幅が 0.45 m と広い場合を示す図-6 と比較すると、仕切り板周辺の水位変動に大きな違いが認められる。これは、開口部が狭い場合、1 m/s 以上の速い流速が発生しても、貯水部の水塊移動が開口部で抑制されていることを示している。また、開口部中心に対称な流動場 (図では上下対称) となっており、計算の安定性が確認できる。

(a)測線3 測点1

(c)測線4 測点1

(b)測線3 測点2

(d)測線4 測点2

図-7 測線3・4における流速の時系列 (開口幅 0.05 m, 初期水位 0.25 m)

(a)測線3 測点1

(c)測線4 測点1

(b)測線3 測点2

(d)測線4 測点2

図-8 測線3・4における流速の時系列 (開口幅 0.05 m, 初期水位 0.35 m)

4. まとめ

本研究では、構造物の移動を適切に考慮できるように、菊ら⁹⁾を参考に、体積力型 IB 法を 3 次元数値波動水槽 CADMAS-SURF/3D に導入した。そして、ゲート急開による水塊流出に関する水理模型実験との比較から、同モデルの妥当性・適用性を検証した。よって、本モデルは、構造物の動的挙動を良好に表現でき、水塊流出時の流況場を精度よく解析可能であることから、3 次元浮遊砂移流拡散解析モデルの開発・展開に役立つといえる。

謝辞：本研究を遂行するにあたり、計算結果のとりまとめ、図面の作成にご尽力いただいた(株)ハイドロソフト技術研究所・三島豊秋氏に感謝の意を表する。

参考文献

- 1) 藤井直樹, 大森政則, 高尾誠, 金山進, 大谷英夫: 津波による海底地形変化に関する研究, 海岸工学論文集, 第 45 巻, pp.376-380, 1998.
- 2) 高橋智幸, 首藤伸夫, 今村文彦, 浅井大輔: 掃流砂層・浮遊砂層間の交換砂量を考慮した津波移動床モデルの開発, 海岸工学論文集, 第 46 巻, pp.606-610, 1999.
- 3) 池野正明, 吉井匠, 松山昌史, 藤井直樹: 津波による砂移動量実験と浮遊砂巻上量式の提案, 電力中央研究所報告, V08064, 2009.
- 4) 藤田尚毅, 稲垣和男, 藤井直樹, 高尾誠, 金戸俊道: 津波による海底地形変化評価モデルの現地適用性に関する研究, 海洋開発論文集, 第 26 巻, pp.213-218, 2010.
- 5) 近藤武司, 森本徹, 藤本典子, 殿最浩司, 志方建仁: 港湾での津波による土砂移動計算の再現性評価, 土木

図-9 仕切り板周辺の流況場 (開口幅 0.05 m, 初期水位 0.35 m)

学会論文集 B2 (海岸工学), Vol.68, No.2, pp.I_396-I_400, 2012.

- 6) 財団法人沿岸開発技術研究センター：数値波動水路 (CADMAS-SURF)の研究・開発—数値波動水路の耐波設計への適用に関する研究会報告書—, 沿岸開発技術ライブラリーNo.12, 457p., 2001.
- 7) 財団法人沿岸開発技術研究センター：CADMAS-SURF 実務計算事例集—数値波動水路の耐波設計への適用に関する研究会中間報告書—, 沿岸技術ライブラリー

No.30, 368p., 2008.

- 8) 財団法人沿岸技術研究センター：CADMAS-SURF/3D 数値波動水槽の研究開発, 沿岸技術ライブラリー No.39, 235p., 2010.
- 9) 菊 雅美, 中村友昭, 川崎浩司, 水谷法美：3次元数値波動水槽 CADMAS-SURF/3D への移動物体計算手法の導入, 土木学会論文集 B3 (海洋開発), Vol.70, No.1, pp.33-43, 2014.

NUMERICAL ANALYSIS OF OUTFLOW INDUCED BY QUICK OPENING OF GATE USING THREE-DIMENSIONAL NUMERICAL TANK “CADMAS-SURF/3D” WITH BODY-FORCE-TYPE IMMERSED BOUNDARY METHOD

Tsuyoshi ARIMITSU, Koji KAWASAKI and Hiroki WATANABE

A three-dimensional numerical model, which combines CADMAS-SURF/3D with a body-force-type immersed boundary method was constructed in this study so as to take into account the movement of a structure, prior to the development of a three-dimensional advection and diffusion numerical model of suspended sediment. The validity and utility of the model were confirmed by comparing between the numerical and experimental results in terms of outflow caused by a quick opening of a gate which was located between two water tanks with different water depths. The model is, therefore, said to be useful in developing a three-dimensional suspended sediment numerical model.