

複雑な形状を有する流れの3次元数値解析手法に関する研究

研究予算：運営費交付金

研究期間：平成30～令2

担当チーム：水理チーム

研究担当者：石神孝之、中西哲、高田翔也

【要旨】

河川構造物周辺における複雑な3次元流れに伴う局所洗掘等は河川管理上の重要な課題であり、実用的な3次元解析手法が求められている。そこで本研究では、3次元流れの再現に着目し、ダムの水理模型実験を対象に粒子法を用いた数値シミュレーションによる再現計算を実施した。副ダムを有する減勢工の流れを対象とした計算結果より、流況および水量の概ねの再現が確認でき、ダムの水理設計への活用が期待される成果が得られた。さらに、3次元流れに伴う土砂移動について、個別要素法との連成解析による再現計算を実施し、同手法の適用に向けて課題整理を行った。

キーワード：3次元数値シミュレーション、粒子法、個別要素法、ダム水理模型実験、洪水吐き

1. はじめに

近年河川管理の現場において、管理上問題となる河道および河川構造物周辺の局所洗掘等が顕在化してきている。また、総合土砂管理等の施策によりダム下流への土砂還元が推進されているが、還元される土砂による瀬淵など河道内微地形に及ぼす影響は十分に明らかとなっていない。これらの課題に対する将来予測のアプローチとしては、水理模型実験と数値シミュレーションが考えられる。水理模型実験は、相似則に留意する必要があるものの現象の確認から対策の検討、事業実施に対する説明力の観点で有力なツールである。一方で、実験の実施には物的・人的・時間的コストは大きいと、実験ケースあるいは実験そのものを数値シミュレーションで代替できれば生産性の向上等の観点で有益であると思われる。

現在、河川管理の現場では、1次元、2次元の河床変動計算は多く用いられ、事業計画の立案等に大きく貢献している。しかし、今後さらなる河川管理の高度化や省力化に対応するためには、3次元の数値解析手法が実務レベルで求められる可能性がある。

また、ダム分野では、嵩上げ等による洪水調節能力向上を目的とした再開発事業において、新規建設と比較して制約のある条件下での水理設計が求められており、従来水理模型実験のみで検討してきた設計フローに対して、数値シミュレーションの導入が水理設計の最適化に資する可能性がある。土木研究所水工研究グループ水理チームは、これまで国土交通省所管のダム100基以上に対し、水理模型実験を通じて、流入部、導流部、減勢池部からなる洪水吐きの水理設計を実施

してきている。洪水吐きは、ダムによってせき上げられた膨大な位置エネルギーを持つ流れが一気に流下するため、ダム堤体および下流河道の安全確保の観点からも非常に重要な構成要素となっている。ダムの洪水吐きの流れは、高速流、跳水現象、階段状の流れ、空気混入などが生じる分合流を伴う3次元性が卓越した流れであり、そのためこれまで数値シミュレーションでの検討よりも水理模型実験による検討実績が積み上げられている。一方で、数値シミュレーション技術の発展やコンピュータ性能の向上により、国内外で数値シミュレーションによる実務面での水理設計事例も既に見られており、さらに、水理模型製作に携わる技術者の不足といった水理設計分野の背景も踏まえると、そのような数値シミュレーション技術の適用性検討は急務である。

本研究では、上記のような河川・ダム分野における現場のニーズに対し、構造物等の複雑な形状の境界条件を持ち自由水面を有する3次元流れおよび土砂動態を把握できるツールを活用していくことを目標としている。そこで第一に、ダムの減勢工における流れを対象とし、解析手法として近年計算機能力の向上に伴って注目されている粒子法を用い、過年度土木研究所において実施した水理模型実験の再現性の検討を行った。第二に、堰下流地形を模した移動床実験を行い、同実験に関する粒子法と個別要素法の連成解析による再現計算結果との比較により、同手法の適用性を検討した。

2. ダムの水理現象に対する粒子法の適用

2. 1 ダムの水理現象に対するアプローチの現状

ダムの水理現象において、机上検討が難しいものとしては、流入部から導流部・減勢池に至る際の自由水面の大きな変形を伴う3次元的な流れである。このような流れに対する数値シミュレーション技術としては、主に格子法と粒子法による手法がある。格子法では、自由水面の追跡にVOF法を用いることで流れに追従でき、これまでに多くの実績がある。一方の粒子法は、流れを点(粒子)で離散化シラグランジュ的な追跡を行うため、自由表面の大変形に強みがある。また、Andreiaら¹⁾は、粒子法は格子法に比較して、以下の利点を挙げている。

- 1) メッシュ作成が不要で複雑な形状を扱いやすい
- 2) 自由表面の追跡方法が不要
- 3) 移流項の取り扱いが不要(格子法の大きな課題)
- 4) 構造連成等、比較的容易に他モデルを導入可能

また、ダムの洪水吐きの水理設計において、実験時の確認項目である定性的な流況の把握、放流能力の検討、キャビテーション発生可否の判断および水面形状の把握等に粒子法を活用できるとしている。さらに、2009年～2019年に研究が行われた中国、インド、フランス、スペイン、ポルトガルの計算事例を整理し、現状の粒子法の適用範囲と課題を示しており、短時間で洪水吐き形状の選定に至った事例を紹介している。なお、粒子法の今後の課題としては、放流能力空気連行の考慮、壁の境界条件や粗度の設定、乱流モデルの取り扱い、膨大な計算コストなどを挙げているが、計算コストについてはGPUを画像処理以外の演算処理に用いるGPGPU(General-purpose computing on graphics processing units)による高速化が可能であり、粒子法は今後の発展が期待される手法であるとしている¹⁾。

国内では筆者らの知る限り水理設計の実務に粒子法を適用した事例はなく、格子法による設計検討事例がいくつかあるのみである。しかし、上記事例に示したとおり、自由表面の大変形を伴う流れを持つダムの水理現象に対し適用性が高いと思われること、さらに微小な改造が多い水理模型の複雑な形状のメッシュ作成が不要なことなど、設計過程等への導入・生産性向上の可能性が高いことが期待される。加えて、飛沫の再現など計算結果が視覚的に実現象に近くなり、一般の方への説明力が高くなると考えている。そこで、本研究では工業分野等でも近年用いられている粒子法によるソルバーが搭載されたソフトウェアを使用し、ダムの水理において代表的な現象である副ダムの跳水現

象を対象として、既往の水理模型実験の再現計算を行い、実験結果との比較からその適用性を検討した。

2. 2 粒子法を用いた減勢工水理実験の再現計算

粒子法による解析ソルバーとして、商用ソフトウェアであるParticleworks(プロメテック・ソフトウェア株式会社)を用いた。同ソフトは粒子法の中でもMPS(Moving Particle Simulation Method)法と呼ばれる自由表面・非圧縮性流れを対象とした手法がベースとなっている。

2. 2. 1 対象実験の概要

過年度土木研究所において実施された副ダムを有する減勢工の水理模型実験を再現計算の対象とする。実験模型の寸法を図1に示す。実験は、模型上流側に設けた水槽へ185L/sを流入させ続け、越流部が水位一定となる定常状態において、以下を計測・評価している。なお、計測位置を図2～4に示す。

- 1) 定常時の越流部の水位
- 2) 減勢池平均水位(図2)
- 3) 副ダム中央前面に作用する圧力(図3)
- 4) 減勢池の断面最大流速(図4)

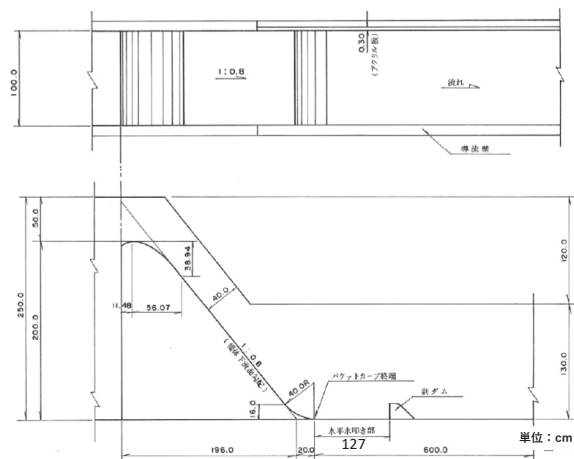


図1 実験模型の概要

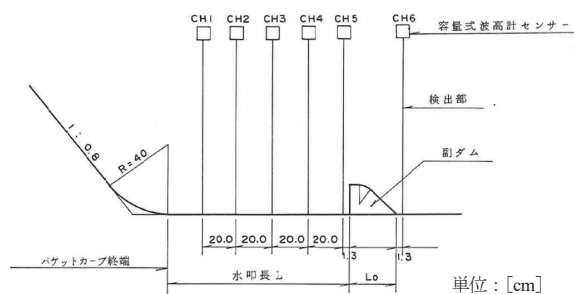


図2 減勢工水位計測位置

2. 2. 2 計算条件および方法

Particleworks に実験模型の形状データをインポートし、実験模型原寸を計算対象とした。計算領域のイメージを図5に示す。計算領域は、水槽部分から副ダム下流までとし、飛沫含め水流のある部分が領域として設定されている。境界条件は、水槽内の流況が越流流況に影響を及ぼさないように、幅1m、奥行き1m、水深0.8mの水槽底部に規定流量で流入し続ける速度境界を設定(今回は185L/sのため、流入速度は0.185m/s)し、下流端は自由境界となっている。また、計算解像度に相当する粒子径については、予備解析により解像度と計算時間のバランスを鑑みて10mmとしている。また、乱流モデル(LESモデル)を適用している。

2. 3 計算結果および実験結果との比較

図6～図11に計算結果および各実験計測項目との比較結果を示す。図6は全体的な流況を示しており、副ダムの堰上げによる減勢工内での跳水が発生し、概ね定性的な流れの様子を再現していることが確認できた。水理模型実験では、十分な減勢がなされているか、などの定性的な流況評価も大きな目的であるため、第一にその観点を満たしていることは重要である。図7に計算領域内の総粒子数の時間変化を示す。水理模型実験は定常条件で行われるため、その確認を行った。総粒子数は、計算開始から10秒程度でほぼ一定となっており、定常状態であることを確認した。また、図8は越流部の水位の時間変化を示しており、粒子数が定常

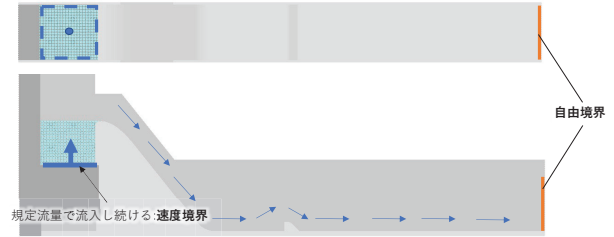
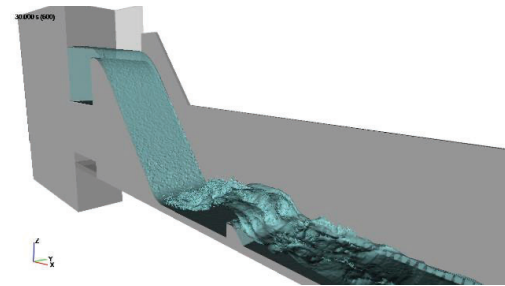
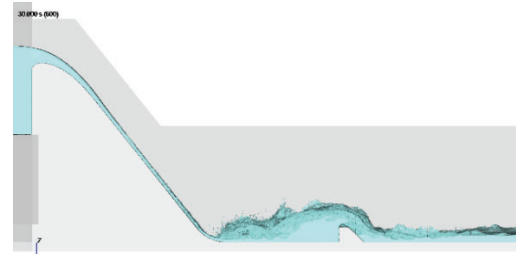


図5 計算領域のイメージ



(a) 全体図



(b) 縦断面図

図6 185 L/sにおける流体挙動

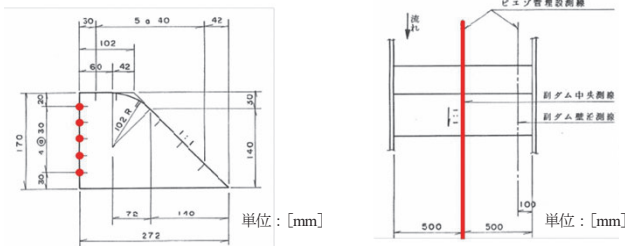


図3 副ダム圧力計測位置(左:断面図、右:平面図)

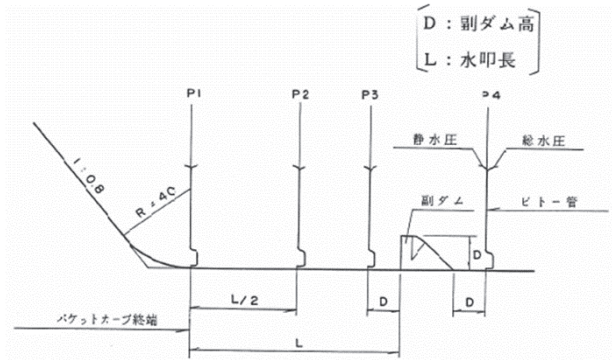


図4 断面最大流速計測位置

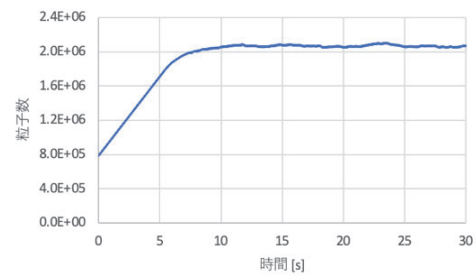


図7 総粒子数の時間変化

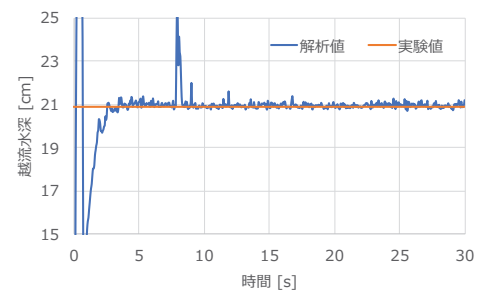


図8 越流水深の時間変化

表 1 越流水深の比較

計算値 (20s以降平均値) [cm]	実験値[cm]	相対誤差[%]
20.92	20.9	0.10

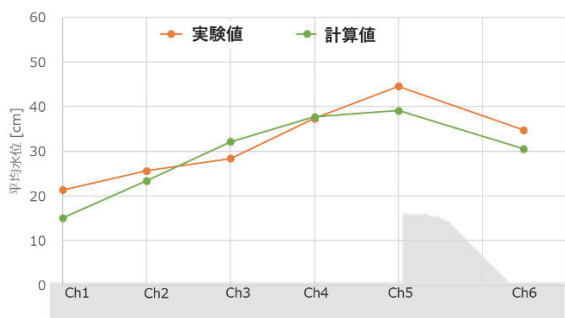


図 9 副ダム周辺の水面形

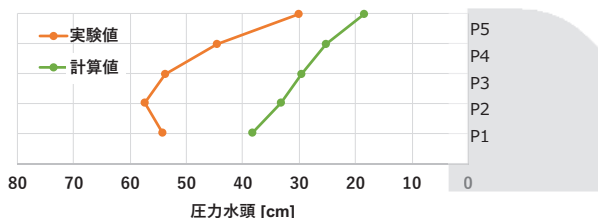


図 10 副ダム前面の作用圧力

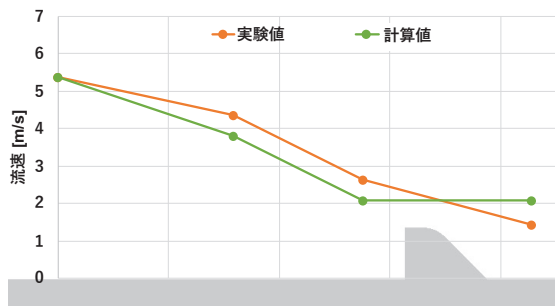


図 11 副ダム周辺の断面最大流速

となって以降、水位についても同じく定常であることが確認できる。越流部水位の実験結果との比較では、表 1 に示すとおり、相対誤差 0.1% となり高い再現性を有する結果となった。

図 9～図 11 に副ダム周辺の水面形、副ダム前面作用圧力、断面最大流速の比較結果を示す。これより、水面形および断面最大流速については、概ね高い再現性を示している。水面形では最大で 5cm 程度の誤差が見受けられるが、これは副ダム周辺の水面形を評価する際に飛沫等を排除するための閾値に任意性があることが一因として挙げられる。一方、圧力については誤差が大きく、また副ダム前面の最下段で圧力が低下する

傾向等も再現できておらず、今後の検討課題である。

なお、本解析は、CPU: Intel (R) Xeon (R) W-2123 × 1 コア、GPU: NVIDIA Quadro GV100 × 1 コアの計算環境において、粒子数 207 万、計算時間は 67 時間であった。

3. 土砂移動に対する粒子法および個別要素法の適用

3. 1 堰下流の移動床水理実験

3 次元流に伴う土砂移動現象を観察するため、図 12 に示すような堰下流を模した水路を用いた移動床実験を実施した。水路床の中央部の凹部に厚さ 5.5cm で 3 号珪砂を配置し、図 13 に示すような形状とした。流量は、1.7l/s とし、水路下流の水位と流速、珪砂の流出状況を観察した。

図 14 に実験時の流況、砂面の移動状況を示す。水面形については、上流側から下流側へ落ち込む箇所では跳水が生じ、砂面形状は水面形の変化に追従して二山形状となっている。

3. 2 個別要素法との連成解析による再現計算

3. 2. 1 計算方法および計算条件

水の流れについては MPS 粒子法ソフトウェアである Particleworks (プロメテック・ソフトウェア株式会社) と、土砂移動は個別要素法ソフトウェア Granuleworks (同上) を用いて、連成解析による移動床実験の再現計算を実施した。図 15 に本解析における計算領域と境界条件を示す。計算対象形状が十分に内包されるように解析領域を設定した。下流の調整板から溢れた水粒子は自由流出境界である計算領域の境界から流出し、計算点から除外される。また、上流側水槽底に速度境界の粒子流入口を設置し、規定流量が流入するように設定し、水路は底面・側面全てノースリップ境界としている。計算条件については、実験条件と同様とし、水の粒子径は 5mm とした。

3. 2. 2 計算結果および実験結果との比較

図 16 に水面形および砂面形状について実験結果と計算結果の比較を示す。水面形については概ね実験結果を再現しているが、砂面形状については、ほとんど再現できていない。これは、砂粒子が受ける抗力が過小となっていることが原因と考えられる。そのため、砂に関するパラメータ設定により計算結果の精度を高められる可能性はあるが、他の検討への適用を考えた際には、都度パラメータの検討が必要となる可能性がある。そのため、本検討で用いた手法による土砂移動問題への適用を検討する場合には、水の粒子径をより小さくした上で新たなモデルを検討していく必要がある。

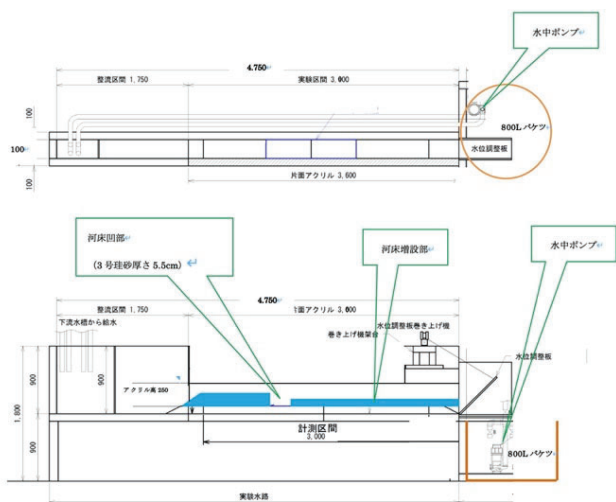


図 12 移動床実験水路の概要

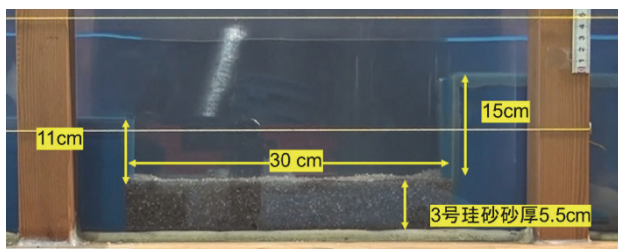


図 13 凹部の詳細形状



図 14 実験時の流況および砂面の状況

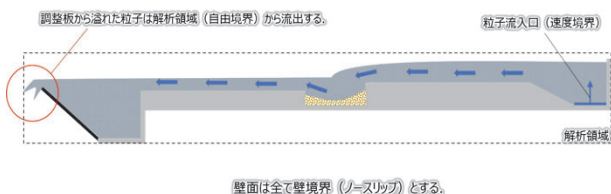


図 15 計算領域および境界条件

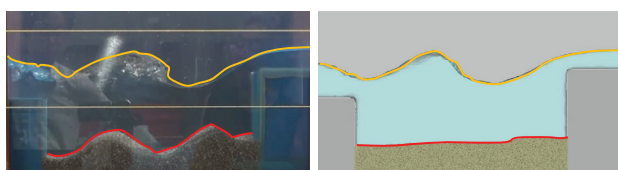


図 16 実験結果との比較（左：実験結果、右：計算結果）

4. まとめ

本研究では、ダムの水理設計および移動床問題への適用に向けた最初の取り組みとして、粒子法を用いた数値シミュレーションにより、過年度土木研究所において実施した副ダム式減勢工の模型実験の再現計算および移動床模型実験の再現計算を実施した。

ダムの減勢工の再現計算では、今回用いた計算資源での計算時間は67時間であり、圧力を除いて、流況、水面形、流速に関して高い再現性が確認できた。また、事前に適切な乱流モデルや各種パラメータ設定を検証し、近年整備されつつある3次元形状データを読み込むことで、格子生成に関する技術的な知見無しに、短い計算準備時間で結果が得られる等の実装にあたってのメリットが大きいことも確認された。今後の検討によっては、計算の併用による水理設計の最適化・省力化、あるいは比較的単純な形状であれば水理模型実験の代替が期待される。一方で、今後の課題として以下が挙げられる。

- ・ 計算結果における水面位置を判断する閾値の設定
- ・ 空気混入に伴う体積増加、水面変化への影響
- ・ 実スケールと実験模型スケールの縮尺変化の影響
- ・ 壁面作用圧力の再現性の向上
- ・ 堤趾導流壁の流れ等のより複雑な自由水面の変化を伴う流れへの適用性
- ・ 計算コストの短縮

一方、移動床水理実験の再現計算については、砂粒子が流れにより受ける抗力の影響を適切に評価することが課題であり、今後モデルの検討から実施していく必要があることが明らかとなった。引き続き移動床問題への適用を見越した検討を行っていきたい。

参考文献

- 1) Andreia Borges Moreira, Agnès Leroy, Damien Violeau and Francisco de Almeida Taveira-Pinto : Overview of Large-Scale Smoothed Particle Hydrodynamics Modeling of Dam Hydraulics, Journal of Hydraulic Engineering, volume146, Issue2, 2020

STUDY ON 3D NUMERICAL ANALYSIS METHOD FOR FLOW WITH COMPLEX GEOMETRY

Research Period : FY 2018 - 2020

Research Team : Hydraulic Engineering Research Group
(River and Dam Hydraulic Engineering
Research Team)

Author : ISHIGAMI Takayuki
NAKANISHI Satoshi
TAKATA Shoya

Abstract : Local scouring due to complex three-dimensional flows around river structures is an important issue in river management, therefore practical three-dimensional analysis methods are required. In this study, we focused on the 3D flow as the first step, and conducted numerical simulations using the particle method to reproduce the physical hydraulic model experiment of the dam conducted by our team. From the calculation results for the flow in the energy dissipator, it was confirmed that the flow and hydraulic quantities were generally reproduced. The results are expected to be useful for the hydraulic design of dams. In addition, a coupling analysis with the discrete element method was conducted to reproduce the sediment transport, and we clarified the next issue of this method.

Key words : 3D numerical simulation, MPS, DEM, dam physical hydraulic model experiment, spillway