

1.4 水理構造物設計における数値モデルの適用性に関する研究

研究年度：令和3年度

研究分野：ダム構造・設計及び施工に関する調査研究

調査研究名：水理構造物設計における水理模型実験と数値シミュレーションの併用に関する研究

研究者名：箱石憲昭、山口嘉一、長田仁、町屋政蔵、和泉征良

【要約】

ダムの洪水吐きをはじめとする水理構造物の設計において、流れの状態を予測するツールとして水理模型実験と数値シミュレーションがある。近年の計算技術の発展により、国際大ダム会議の報告書においても両者を併用し補完しあうことによって効率的に設計を行うことが推奨されている。本研究では、国際大ダム会議の報告書の内容を翻訳してまとめるとともに、フィルダム洪水吐き流入部の水理模型実験を数値シミュレーションによって再現し、再現性と計算時間のバランスの取れたモデル化条件の設定のための留意点について検討した。

【キーワード】

洪水吐き、水理構造物設計、水理模型実験、数値シミュレーション、複合モデリング

【背景・目的】

水理模型実験は長きにわたり用いられてきており、水理構造物における複雑な流れを再現できるが、模型製作・実験計測に手間がかかる。数値シミュレーションは、近年の計算技術の発展により、3次元的な流れの解析も可能となっているが、渦を伴う乱流など複雑な流れの再現には限界がある。国際大ダム会議の報告書においては、物理モデルと数値モデルを併用し補完しあうことによって、効率的に設計を行うことが推奨されており、その際、物理モデルによる計測結果によって数値モデルを検証・同定することの重要性が指摘されている。

そこで、本研究では、国際大ダム会議水理委員会の報告書の内容を翻訳してまとめるとともに、過去に行われたフィルダム洪水吐き流入部の水理模型実験結果を数値シミュレーションによって再現し、再現性と計算時間のバランスのとれたモデル化条件の設定のための留意点について検討した。

【令和3年度の研究成果】

(1) 国際大ダム会議の報告書の概要

国際大ダム会議 (ICOLD) が 2016 年 9 月に発行した報告書、TECHNICAL ADVANCEMENTS IN SPILLWAY DESIGN Progress and Innovations from 1985 to 2015 に、水理構造物設計のツールとしての physical modeling = 物理モデリング (水理模型実験) と numerical modeling = 数値モデリング (数値シミュレーション計算) およびこれらを両方用いる composite modeling = 複合モデルについて示されており、その内容を翻訳し以下にまとめた。以下においては、引用文献に基づき「物理モデリング」と記述するが、「物理モデリング」は水理模型実験、

「物理モデル」は水理模型と理解していただきたい。

① 水理構造物の複合モデリング

現在の水理構造物のモデル化の傾向は、数値モデルと物理モデルの両方を利用することである。(複合モデリングとも呼ばれる)。複合モデリングは、物理モデリングおよび数値モデリングの両方を効果的に利用するものであり、困難な水工学的課題を解決するために、前後してあるいは並行して互いに使用される。

物理モデリングは、水理構造物をモデリングするための実証済みの標準的手法であり、何十年も使用されているが、制限と制約がある。同様に、比較的新しい手法である数値モデリングには、多くの制限と制約があるが、物理モデリングにはない利点がある。これら2つのモデリング技術が水工学の研究の中で併行して使用される場合、一方の技術の限界の多くは他方によって補完される。したがって、研究者は、各モデリング技術の利点と限界を理解することによって、両方のモデリング技術を併用してモデリングプロセスの効率と有効性を高める複合モデリング手法を利用した研究計画を策定することができる。

例としては、まず数値モデルを使用して、設計原案が決定されるであろう。物理モデルは、設計原案で製作され、データは物理モデルから収集され、そのデータは、数値モデルの精度を確保するための同定に使用される。同定された数値モデルを使用すると、物理モデルが解体された後でも、数値モデルを長年利用して流れの状態や操作手順を確認することができる。このアプローチで覚えておかなければならない重要なことは、数値モデリングには、実際の

洪水時あるいは物理モデルでの検討に基づく実データを必要とすることである。物理モデルによる検討は、数値モデルの成功にとって非常に重要である。

② 物理モデリングの概要

水理構造物の物理モデルは、通常、重力に対する慣性力の比率に基づくフルードの相似則を使用してモデル化される。物理モデルは、粘性や表面張力などに起因する縮尺効果を最小限に抑えるために可能な限り大きく構築される。大きな物理モデルが構築されると、湾曲部の水位上昇、サージング、波動、跳水、渦、流れの分離、局所的な摩耗と侵食、空気混入、スタンディングウェーブ、複雑な複合粗度などの流れ現象を正確にモデル化することができる。

i 物理モデリングの利点

縮尺が適切に選択され、モデルが可能な限り大きく構築されていれば、物理モデリングは正確な結果を生み出す信頼できる方法である。木材、プラスチック、モルタル、土嚢などを使用して、物理モデルに小さな変更を簡単に加えることができるため、結果として生じる流れの状況の変化をすぐに確認できる。

物理モデルは「チーム」エンジニアリングを容易にする。地盤工学、構造、および水理のエンジニアは、物理モデルを流れる水の様子を見て、水理構造物の設計に貢献する提案を行うことができる。

ii 物理モデリングの制限

物理モデルは、必要な構造のコストとサイズ、およびデータの構築と取得に必要な時間によって制限される可能性がある。コストと時間は通常、必要な情報の量とデータの収集にかかる時間に比例する。物理モデルへの主要な変更は、多くの場合、時間と労力を要し、費用がかかる。

物理モデルにおける流量・流速・圧力といった計測値の精度は、計測方法による誤差を含んでいる。

物理モデルが適切な縮尺でない場合、収集されたデータまたはモデルのコストが影響を受ける。モデルの縮尺が大きすぎる場合（小さいサイズのモデル）、縮尺効果が結果の精度に影響を与える可能性がある。モデルの縮尺が小さすぎる場合（大型モデル）、モデルのコストが増加する。ただし、縮尺効果の問題を減らすために、可能な限り大きな物理モデルを構築することが非常に重要であることを強調しておく必要がある。物理モデルは、ある時点で解体する必要があり、その後、構造の将来の変更または他の制約に起因する設計変更に対して使用できない場合がある。

③ 数値モデルの概要

1D や 2D 法など、数値モデリングには複数のアプローチがあるが、一般に計算流体力学 (CFD) と呼ばれる完全な 3D 法がここで取り上げる数値モデリングのタイプである。最も一般的な CFD プログラムは、さまざまなアプローチによりレイノルズ平均ナビエ-ストークス (RANS) 方程式を解く。市場に出回っている主要な商用 CFD プログラムのほとんどは、水理構造物に関連する自由表面の流れを追跡する機能を備えており、自由表面界面を追跡するための最も一般的なアルゴリズムである流体体積率 (VOF) 法またはそのバリエーションを使用する。CFD コードは、計算領域に適用される有限体積法を使用して RANS 方程式を解く。計算領域は、関心領域をより小さなセルに離散化 (グリッド化) されたものとして定義される。

水理構造物の流れを数値的に解く際の難しさの 1 つは、自由表面の存在である。自由表面の位置は解の一部として解かなければならないが、時間的には一瞬であろう。これは、洪水吐きの越流頂を流れるときに流れが常流から射流に遷移する場合など、水面が大きな曲率で急速に変化する場合に特に困難である。

CFD モデリングで使用されるもう 1 つの一般的な手法は、曲面を直線で近似することである。より小さなグリッドを使用することで、曲面へのより良い近似が提供されることは容易に理解できる。予測精度向上のため、構造物の曲率が大きい領域の周辺や水面が急速に変化すると予想される場所でグリッドサイズを変えて、より小さなグリッドを使用することができる。小さいグリッドの欠点は、計算時間の増加である。

査読された複数の論文において、特に常流に対して、多くの異なるアプリケーションの自由表面を伴う流れをモデル化するための CFD の使用が検証されている。しかし、CFD モデリングは、すべてのタイプの流れについて検証されてはおらず、多くの数値解析手法と同様に、計算結果は、計算手法とその手法に基づくデータおよび仮定と同じ精度ではない。つまり値を近似としては受け入れることができるけれども、絶対的な真実として受け入れることはできない。

i 数値モデリングの利点

数値モデルは、地形の大きな変更や、制御構造物の位置の変更に適している。また、複数の形状を同時に複数のコンピュータを使用して検討することができる。数値モデリング結果から生成されたデータにより、速度、圧力、乱れのパラメータ、水面形を、各時間ステップおよび流れ領域内の任意の位置で特定できる。

数値モデリングは、研究者が「全体像」、つまり問題が生じている場所を見るのに役立つ。速度分布や渦などの流れのパターンは、ベクトル表示、流線およびフローリボンを使用して簡単にマッピングできる。

数値モデリングのコストは、多くの場合、物理モデルよりも少ない。数値モデルは、将来の使用や変更のために保存および維持することができる。

自由表面を伴う流れのアニメーションは、速度や圧力などの関心のある変数を使用して作成することができる。

ii 数値モデリングの制限

数値モデルは、実測データや物理モデリングデータがベースとして存在しない場合、入力パラメータと動作パラメータの選択に制限がある。また、適切なトレーニングを受けていない数値モデリング技術者や、特定のアプリケーションでの経験が豊富でない数値モデリング技術者は、データエラーを生じさせる可能性がある。

数値モデルは、幾何学的な粗度の適用と境界層における流速分布の発達（対数則）において、特に激しく乱れた射流において制限がある。数値モデルのグリッドサイズによっては、壁面近傍の近似はグリッドサイズやその他の要因に依存するため、真の壁面近傍の速度が正確でない場合がある。

数値モデリングは、多くの場合、空間領域や時間領域が大きいモデルのグリッド作成と計算時間によって制約される。

ハイドログラフに基づく運用を評価するためには、非常に時間がかかる。そのため、完全なハイドログラフに基づく運用をシミュレートするには、非現実的なシミュレーション時間が必要になる場合がある。

数値モデルは、流量制御構造物下流における不安定な流れの水利的安定性と影響を分析する能力に制限がある。跳水のような流れは、粗度の変化に非常に敏感であり、実測または物理モデルのデータが利用できない場合、理論の適用の結果には広い幅がある。

④ 複合モデリングの概要

適切に適用された複合モデリング手法は、物理モデリングと数値モデリングの両方を併用する利点に焦点を当てることで、流れのデータと計測の精度を向上させる。ただし、複合モデリングは、一方のモデリング手法を使用する場合よりも、全体的なコストを必ずしも削減するとは限らない。複合モデリングの価値は、通常、流れのデータの品質と提案された水利構造物設計の信頼性にあり、必ずしもコストではない。複合アプローチを使用すると、より多

くの設計オプションを評価できるため、設計を最適化することができる。

複合モデリングは、次の3つのコンポーネントに区分できる。

- 1) 物理モデルが構築され、テストされる前に実行される数値モデリング
- 2) 物理モデルと同時に実行される数値モデリング
- 3) 物理モデルスタディが完了した後に実行される数値モデリング

i 物理モデルの構築とテストの前に実行される数値モデリング

数値モデルは、事前に実行することで、必要な物理モデリングの数を減らすのに役立つ。

ii 物理モデルと並列に実行される数値モデリング

複合モデル化の最も大きな利点の1つは「モデルのモデル化」であり、これは物理モデルの正確な形状が1:1スケールで数値的にモデル化され、可能であれば数値モデリングの誤差を評価し修正することができることを意味する。この品質管理のための努力は、数値モデルの不確実性を低減または排除するのに有効である。

同定された数値モデルを使用すると、物理モデルに大きな変更を必要とする構造または幾何学的変化を数値モデルでシミュレートし、設計の許容性を評価することができる。これらの数値モデリングの実行結果を慎重に比較し、物理的にモデル化する必要がある形状を決定できる。

iii 物理モデルスタディの完了後に実行される数値モデリング

物理モデルが解体された後、数値モデルを無期限に使用でき、必要に応じて追加情報を収集できる。

幾何学的設計に対する軽微な修正は、結果が正確であることを確信して、同定された数値モデルに基づいて行うことができる。同定された数値モデルは、物理モデルが解体された後のトレーニングおよび運用上の決定に使用できる。

(2) 数値モデルによる水理模型実験の再現

図-1 に示すフィルダム洪水吐きの越流頂について、水理模型実験（縮尺 1/62.5）で求められた放流能力の再現性に着目し、数値モデルのグリッド間隔の影響について検討を行った。

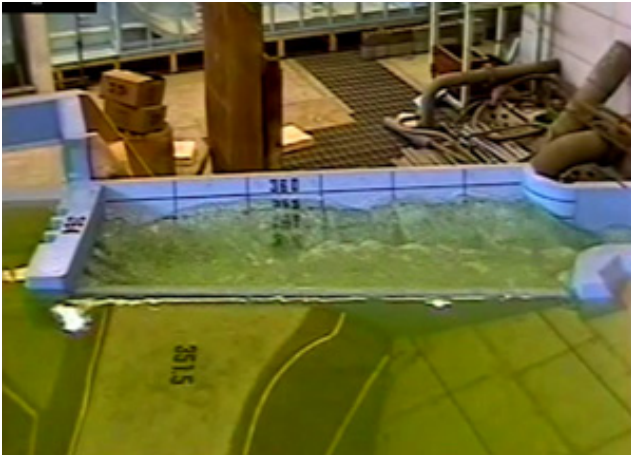


図-1 フィルダム洪水吐き流入部水理模型実験状況

⑤ 水理模型実験結果

越流頂の貯水位－放流量関係は水理模型実験結果から近似式として以下のとおり求められており、その誤差は最大でも 1.8%と報告されている。

$$Q_c = C_c B_c H_c^{3/2}$$

$$C_c = 1.8975 - 0.08759H_c + 0.05926H_c^2 - 0.006363H_c^3$$

ここで、 Q_c ：越流頂からの放流量(m^3/s)、 C_c ：越流頂流量係数、 B_c ：越流幅(117.0m)、 H_c ：貯水位－EL.356.500m(越流頂天端標高)である。

⑥ 数値モデルによる再現

i 使用したモデル

数値モデルは“FLOW-3D(米国Flow Science社)”を用いた。株式会社フローサイエンスジャパン HPによれば、その特徴は以下のとおりである。

- ・ FDM(Finite Difference Method：有限差分法)に基づいて非定常流れを解く汎用 3 次元 CFD ソフトウェア
- ・ 非圧縮性、擬似圧縮性、および圧縮性を考慮した 1 次元/2 次元 /3 次元の熱流体問題、相変化、様々な粘性現象、および流体-構造連成等々のマルチフィジックス問題を取り扱い可能
- ・ 大多数の市販 CFD コードが自由表面流れを取り扱えるようになってきたのが 1990 年代後半(実質 2000 年以降)からであるのに対して、FLOW-3D は 1985 年の初期リリース版の時点で既に 3 次元自由表面流れを精度良く取り扱える CFD コードとしてリリースされたもの

ii 格子間隔

図-2 に 0.5 m、1.0 m、2.0 m 間隔で越流頂形状を再現したイメージ図を示す。格子間隔を狭くするほど実物形状の再現精度が高まることイメージできる。

2.0m (青) の場合、支配断面となる越流頂天端が広くなり、流量係数の低下が予想される。1.0 m (赤) と 0.5 m (緑) ではその差は小さくなるが、1.0 m では越流頂天端位置がずれている。このずれを補正すれば、1.0 m と 0.5 m とでは大差ない精度になるものと思われた。このようなイメージをもとに 1.0 m を基本間隔とし、数値解析は 1.0 m メッシュ、0.5 m メッシュ、0.25 m メッシュの 3 ケースを対象に行った。計算時間を極力抑えるため、全体は 1.0m メッシュでモデル化し、放流能力の計算精度に影響すると考えられる範囲のみを 0.5 m メッシュ、0.25 m メッシュで細分化した。

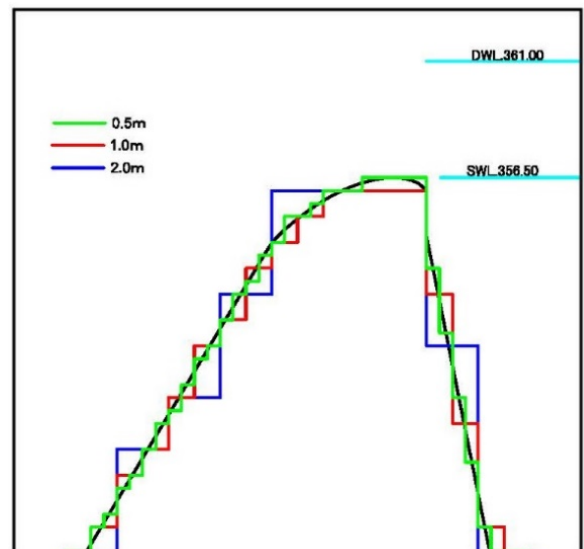


図-2 越流頂形状再現イメージ

iii 計算形状

FLOW-3D の解析に用いる越流頂等の構造物の形状は、3D-CAD 等で作成される STL (Stereolithography) データをメッシュサイズに応じてモデル化することで設定される。形状のモデル化に際しては、FAVORTM (Fractional Area Volume Obstacle Representation) 法が使用され、メッシュの属性が構造物(の中)と空間(構造物の外)の 2 つのみに分けられるのではなく、メッシュの隅が構造物内部にあるものとないものがある場合には、面のエッジを含む幾何形状の交点が計算されて構造物の面積率がメッシュに与えられることになる。ただし、面積率を持つためには構造物形状にメッシュの交点が含まれる必要がある (図-3 参照)。

以上の方法によって求められた計算形状 (1.0 m メッシュ) を図-4 に示す。

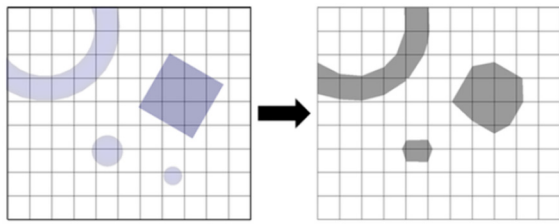


図-3 FAVOR 機能

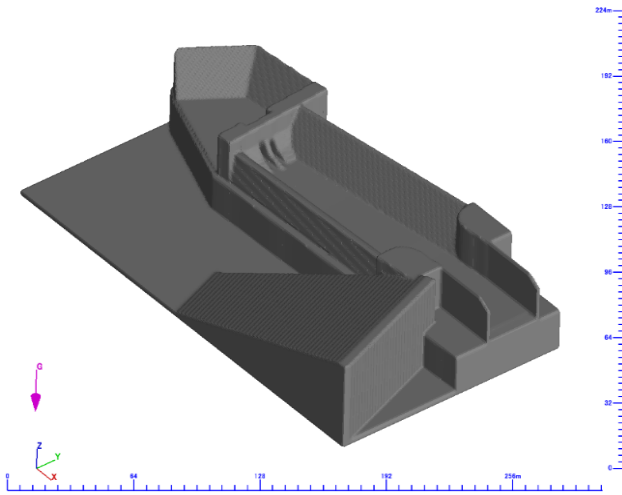


図-4 計算形状 (1m メッシュ)

iv 再現性確認方法

数値モデルの再現性を流量係数で検証することとし、上流端から一定流量を与え続け、貯水位が安定した状態を定常状態としてその時の貯水位を用いて流量係数を求めた。前述の方法によるモデル化の結果、数値解析モデルの越流頂天端標高は表-1 に示すようにメッシュサイズによって異なるため、これを反映させた越流水深を用いて整理を行った。また、計算時間短縮のため貯水池湛水範囲を極力減らしてモデル化したことから、流量条件を設定した境界面から越流部への接近流速が生じているため、解析の貯水位には、速度水頭を加味した値を用いた。

v 再現性確認結果

数値モデルによる解析結果を水理模型実験結果と合わせて表-1 に示す。実験結果は、水理模型実験で得られた流量係数の近似式に貯水位を代入して得られたものである。

解析メッシュサイズが細かい方が流量係数は大きくなる傾向がみられた。メッシュサイズが細かい方が越流頂の形状がより滑らかになり流れやすくなるためと考えられる。解析メッシュサイズが 1.0 m のケースは、実験式との差が 2% 内に含まれており、計算時間も 3 ケースの中で最も短いことから、本検討においては 1.0 m メッシュサイズを基本とすることが妥当と考えられる。

表-1 解析結果

	実験	解析 グリッド 1m	解析 グリッド 0.5m	解析 グリッド 0.25m
貯水位 [EL.m]	361.0	361.01	361.04	361.06
越流頂 標高 [EL.m]	356.50	356.389	356.478	356.494
流量 [m ³ /s]	2,371.7	2,470.8	2,463.7	2,497.7
流量係 数	2.124	2.123	2.156	2.186
メッシ ュ数(× 10 ⁶)	—	1.811	3.055	7.872
300s 再 現に要 する計 算時間	—	2h06m	16h36m	33h47m

【結果とりまとめ】

- ①ダムの洪水吐き等の水理構造物の設計にあたって、従来から用いられている物理モデリング（水理模型実験）と近年発展著しい数値モデリング（数値シミュレーション）を併用し、それぞれのメリットを生かしデメリットを補完する方法が推奨されるようになってきている。
- ②数値モデルはグリッド間隔を小さくすることで精度を高めることができるが、計算時間が長くなることから、グリッド間隔と検討対象となる現象の再現性および計算時間の関係を予備検討で確認し、バランスのとれた条件設定を行うことが重要である。

【謝辞】

数値モデルによる水理模型実験の再現については、国土交通省国土技術政策総合研究所河川研究部大規模河川構造物研究室からダム技術センター・建設技術研究所設計共同体が受託した業務において検討したものであり、記して謝意を表す。

【参考文献】

- (1) ICOLD : TECHNICAL ADVANCEMENTS IN SPILLWAY DESIGN Progress and Innovations from 1985 to 2015, (2016.09)