

3次元流体解析による斜め堰の 治水，利水機能評価に関する考察

ほさかこういち まましゅういち たけむらひとし まつうらゆうき こばやしゆういち
保坂幸一¹・眞間修一²・竹村仁志³・松浦祐樹³・小林優一¹

¹八千代エンジニアリング(株)事業統括本部国内事業部(〒111-8648 東京都台東区浅草橋5-20-8)

²八千代エンジニアリング(株)名古屋支店(〒460-0004 愛知県名古屋市中区新栄町2-9)

³八千代エンジニアリング(株)大阪支店(〒540-0001 大阪府大阪市中央区城見1-4-70)

兵庫県姫路市を流れる市川の砥堀工区には、江戸時代以前に築造された2つの斜め堰(花田井堰・飾磨井堰)がある。この二堰は他の施設(水制工，樋門等)との複合機能により、現在まで姫路市の治水・利水を支えてきたとされているが、その機能はこれまで定量的に評価されてこなかった。本検討は市川の治水安全度向上及び利水環境維持のため、斜め堰が有する治水，利水上の水利機能を3次元流体解析モデルによる数値解析等最新技術により明らかにした上で、その機能を考慮した合理的で持続可能な河川改修計画を立案した。

Key Words : 河道改修，斜め堰，水制工，流下能力，3次元流体解析，3次元測量データ

1. はじめに

河川における伝統技術は、洪水に対して一つの施設のみで防護するのではなく、システムとして被害を抑えるという特徴を持ち、長年に渡る試行錯誤を経て確立された個々の川の性格を巧みに生かした総合技術と言える。このような考え方は、近年の大規模水害への対応としてハード・ソフトが一体となった治水対策を推進する上でも参考とすべきであり、既存の効果的な技術及び施設を保全・管理し、将来へ引き継いでいく必要がある。このため、河川伝統技術の今日における活用・応用に際して、有効性，安全性について最新の知見や技術(測量技術・数値計算技術等)に基づき評価を行うことが重要である。

本論文では、兵庫県姫路市市川砥堀工区に残る伝統的河川施設のうち、斜め堰について最新技術により機能再評価を行い、河川改修計画に反映した事例について報告する。

2. 市川砥堀工区の概要

市川は、兵庫県姫路市街の東側を南へ流れ播磨灘に注ぐ506km²の流域を有する2級河川である。

平成22年3月に河川整備計画¹⁾(整備計画洪水流量2,400m³/s)が策定され、下流区間から順次改修が進められている。その後、平成23年台風12号出水(ピーク流量2,790m³/s)が既往最大規模を記録する

など、平成28年度から砥堀工区(図-1)の改修に着手するにあたり、具体的な改修計画の検討が必要であった。

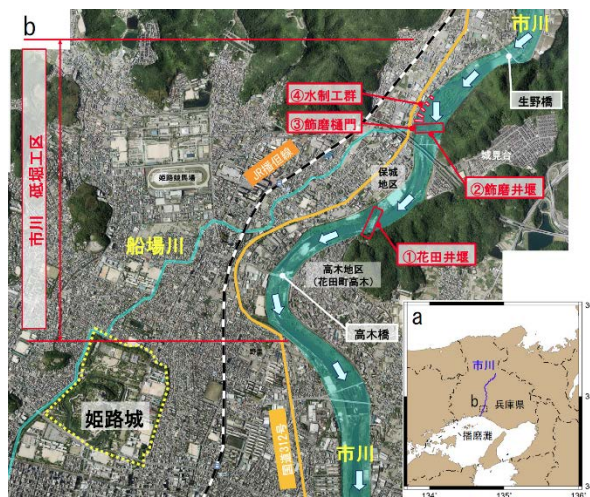


図-1 市川砥堀工区

砥堀工区には江戸時代以前に築造された2つの農業用水取水を目的とした斜め堰(花田井堰・飾磨井堰)があり、他の施設等(水制工群，樋門等)との複合機能により現在まで姫路市の治水・利水を支えてきた。しかし、これまで水利機能の定量評価は成されておらず、花田井堰～飾磨井堰間の流下能力ネック箇所の解消を図るため、現整備計画では河川構造

令に適合させた河道に直交する可動堰改築が予定されていた。しかし可動堰改築は管理手間が増えるため、高齢化が進む地元水利組合との調整も課題とされていた。

本検討は市川の治水安全度向上及び利水環境維持のため、その斜め堰が有する水理機能を最新解析技術により明らかにした上で、その機能を考慮した水理面、環境面、経済面、管理面においても合理的で持続可能な河川改修計画を策定することを目的とした。

3. 水理解析モデルの構築

市川の既往流下能力検討における斜め堰のせき上げ量は、堰を流向に対して直角投影した断面での不等流解析により評価されてきた。しかし、斜め堰と直交堰の水理特性は異なり、斜め堰周辺の流れは三次元的な特性を持つと考えられる。福岡ら(2001)²⁾は、直交堰または斜め堰が設置されている場合の単断面直線水路による水理実験を実施している。中須賀ら(2000)³⁾は、その実験に対して平面2次元モデルによる再現計算を行い、水路中心線上水位は実験と計算で結果がよく一致するが、堰天端上の流速・流向と越流後の流速が説明できないと報告している。

以上を踏まえ、本検討では平面2次元解析手法等と比べ、より実現象を再現可能な3次元流体解析手法を用いて斜め堰の流下能力を評価することとした。

(1) 三次元流体解析モデルOpenFOAM

本研究では、三次元流体解析ソフトとしてオープンソースであるOpenFOAM⁴⁾を用いた。OpenFOAMは多相流や燃焼、磁場などの用途に応じた各種ソルバを有しており、本解析ではそのうち、等温・非圧縮・不混和流体の2相流(水・空気)を扱うinterFoamを用いた。このinterFoamの基礎方程式は、連続式とNavier-Stokes方程式であり、離散化手法には有限体積法、自由表面の解析にはVOF法を用いている。

(2) 斜め堰周辺流れ再現性の検証

OpenFOAMの斜め堰を越流する流れの再現性については、福岡ら(2001)による単断面水路(水路長15m、水路幅0.8m、水路勾配1/600)による実験結果を再現することで確認した。

計算格子サイズは、水が存在する範囲は細かくし、上部は粗く設定している(図-2)。計算ケースは、福岡ら(2001)と同様に斜め堰(水路に対して45°)と直交堰の2ケースとした。境界条件は、水底及び堰はNoslip、領域側部はslip、上部は開放、上流端は実験同様に流量20ℓの水を一定流入、下流端は同流量を流出させ、かつ実験結果を参考に水深を5cmで固定とした。計算時間は流況がほぼ定常状態となる70秒間、計算時間間隔は自動制御(最大クラン数0.5)とした。乱流モデルは、複数モデルで検証し、再現性が良好であったLESの標準Smagorinskyモデルを採用した。

図-3 に水路中心線上の水位縦断面図を示す。図中プロットは福岡ら(2001)の実験結果であり、実験と計算の水位は良好な一致を示した。堰の上流側水位は斜め堰の方が直交堰に比べ低くなっている。図-4 にOpenFOAMによる流速分布を示す。堰を越流する流れは堰軸に直交する方向に傾いている。そのことから、堰上流側で斜め堰の方が水位が下がる理由は、福岡ら(2001)でも報告されているとおり、斜め堰の場合は堰の越流方向が堰軸直交側に傾くため越流幅が広がり、単位幅流量が小さくなることで堰上の限界水深が小さくなるためであると推定された。

なお、堰直下流において、水面付近の高流速と水底付近のやや遅い流れの流向が異なっている箇所が認められる。そのため、斜め堰周辺の詳細流速分布を把握するためには、流れの三次元性を考慮した数値解析が必要であることが推定された。

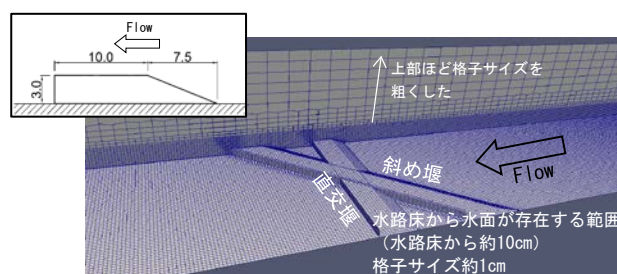


図-2 格子サイズの設定

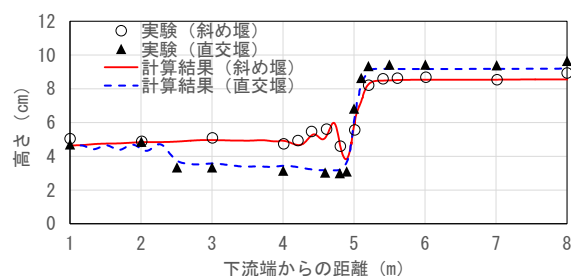


図-3 水路中心線上の水位縦断面図

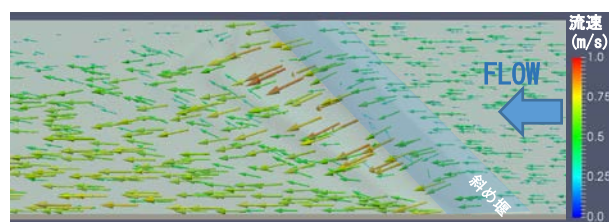


図-4 斜め堰ケースの堰周辺の流速ベクトル

(3) 実地形・実洪水に対する再現性の検証

実河川をモデル化した洪水流況計算を実施するにあたり、既往洪水の再現性を確認することで、解析モデルの実洪水への適用性を検証した。対象洪水は既往最大規模洪水である平成23年台風12号出水(ピーク流量2,790m³/s)とし、その痕跡水位と計算水位を比較した。

地形データは、UAVレーザー測量やラジコンボート深浅測量などを組み合わせた三次元測量により得られた点群データから作成した。各種測量の作業イ

メーは図-5 に示すとおりである。計算格子サイズは堰周辺以外の範囲の洪水時水深が6～8m程度、堰越流部の水深が3m程度であり、水深方向を5分割程度確保するため、一般河道部は水平方向2.5m、鉛直方向1.25m、堰周辺は水平方向1.25m、鉛直方向0.625mでモデル化し、水が存在しない上部は実験再現計算と同様に格子サイズを粗くした。上流端はピーク流量を一定流入、下流端は同流量の水を流出させ、かつ痕跡水位T.P.+21.8mで固定した。計算時間は流況がほぼ定常となる600秒間とした(他の条件は実験再現と同じ)。

痕跡水位と計算水位の関係を図-6 に示す。両者はほぼ1:1の関係があり、再現性が良好であると判断した。計算結果で得られる河道センターライン沿いの水位の縦断及び河道内の水位の分布を図-7 に示す。図にプロットされた痕跡水位と計算水位は整合的であった。

4. 斜め堰の現況機能の把握

(1) 治水機能

2つの堰について、河川整備計画の目標流量2,400m³/sを流下させた場合の斜め堰(現状)と直交堰における流況を解析した。直交堰ケースは、取水点位置を基点に堰を回転させた(図-8)。

図-9 に計算開始600秒後の水位差分図(直交堰-斜め堰)を示す。花田井堰では、斜め堰の方が直交堰に比べ、堰上流約200m区間に渡り水位低下(河道中心線上で概ね10～20cm、A-A'断面で平均11cm)が確認できた。飾磨井堰については、斜め堰の場合と直交堰の場合で水位差はほとんど認められなかった。

計画規模洪水条件においても、前述の単断面水路の場合と同様に、花田井堰を越流する流れに堰軸直交側への流向変化が認められた(図-10)ため、単断面水路の場合と同様に堰上流側の水位上昇量が低減されたと推察される。

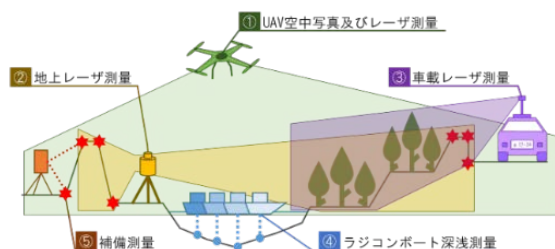


図-5 各測定の作業イメージ

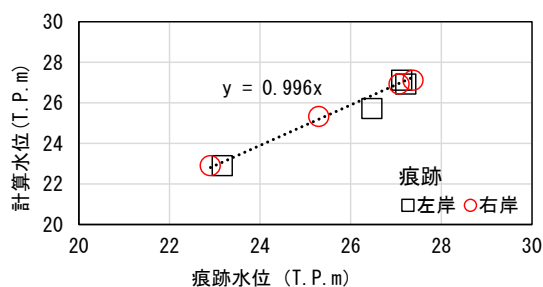


図-6 痕跡水位と計算水位の関係

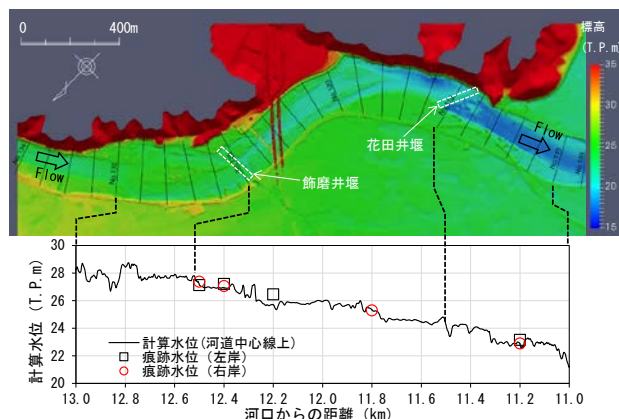


図-7 痕跡水位と計算水位の河道縦断面図

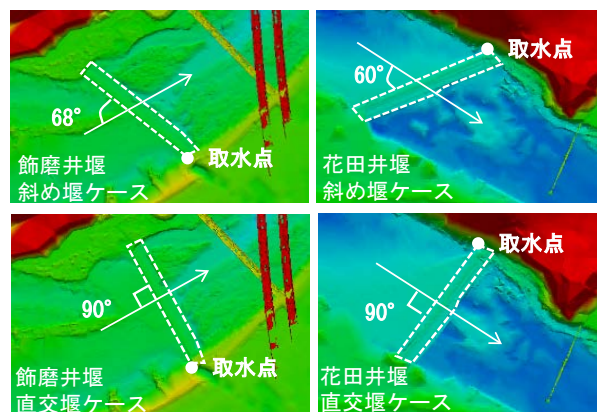


図-8 斜め堰と直交堰の地形モデル

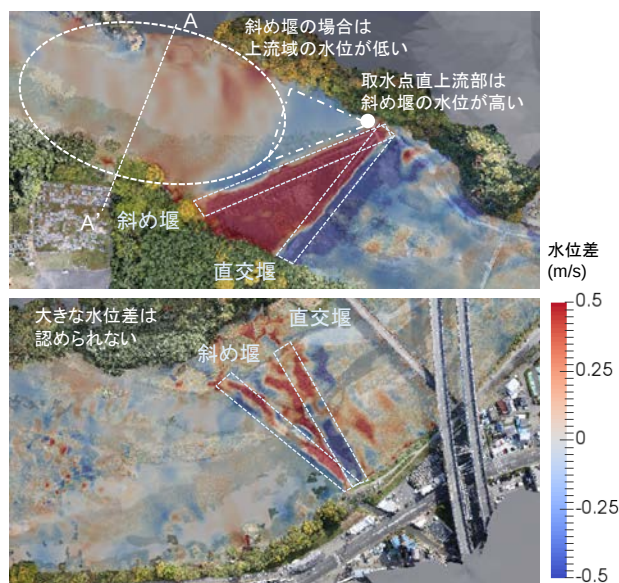


図-9 洪水時の堰周辺の水位差(斜め堰-直交堰)

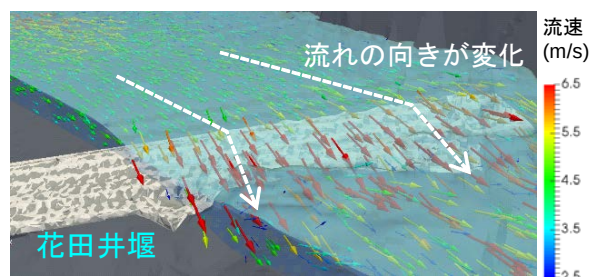


図-10 花田井堰流況詳細図

飾磨井堰は流向に対し約70°で花田井堰(60°)より直角に近いことや河道形状の影響により、直交堰とした場合の堰幅と大きな差がなく、水位低減効果が現れにくくなったと推察される。

一方、花田井堰で確認された斜め堰の水理特性(上流側での局所的な水位上昇、堰地点での流向変化)は越水や下流側局所洗掘等の悪影響を及ぼす場合もある³⁾が、上流左岸が山付であること、下流右岸には砂州が形成され侵食を緩和する河道特性を有していることから、特に問題とはならない状況であった。

(2) 利水機能

図-9 から確認できるとおり、花田井堰の左岸側取水点直上流では、斜め堰の水位が直交堰に比べて高くなっている。このことから斜め堰は取水点付近に水を集中させる効果があり、取水性を高めていると考えられる。

現況の斜め堰による取水効果を明らかにするため、堰軸方向と水路形状を組み合わせた3ケース(表-1)について取水量を解析により比較した。砥堀工区の河道特性を参考に川幅100m、河床勾配1/400のモデル水路とし、対象流量は市川の平水流量である10m³/sとした。なお、ここでの解析は流速が遅く、緩やかな常流状態であることから、平面2次元解析モデルにより実施した。各ケースでの取水量を比較すると、現状の花田井堰や飾磨井堰の状況に最も近い蛇行水路で斜め堰を設置した①の場合が他ケースと比較して約15%取水量が大きくなり、当時の利水者が河道形状と斜め堰を上手に組み合わせ、取水効率を高めようとした結果であると考えられる。

表-1 水路と堰の平面形状による取水量の比較

①蛇行水路×斜め堰 60°水路中心線 取水量:2.33m ³ /s	②蛇行水路×直交堰 90°水路中心線 取水量:2.02m ³ /s
③直線水路×斜め堰 100m 60°水路中心線 取水量:2.01m ³ /s	

5. 河道改修計画の立案

3次元流体解析モデルによる結果から、斜め堰の場合に堰を越流する際に流向は堰軸直交側に向くことが確認されたため、不等流解析において、堰部断面を河道に対して直交投影せず、実際の堰軸方向(河道中心線に対して斜め方向)として流下能力を評価した。その方法にて、平成23年台風12号出水の痕跡水位を再現することを確認した上で3次元流体解析モデルによる水位と比較した結果、堰上流部の水位は整合する結果となった。斜め堰周辺流速分布には三次元性が認められたものの、本検討の対象箇所及び流下能力評価では、その影響は局所的で大きな影響が生じず、簡易的な不等流計算手法の工夫によ

り、斜め堰の特性を考慮した流下能力評価が可能と判断した。

以上の流下能力の改善を図ることで、現整備計画の整備内容であった井堰全改築を行わず、流下能力のネックとなっていた花田井堰～飾磨井堰間の河床掘削、堤防嵩上げ、樹木伐採を行うことで流下能力が確保可能な河道改修計画を立案することができた。

6. まとめ及び課題

本検討では、既往水路実験流況及び実河川での既往最大洪水の痕跡水位再現により最新解析技術活用 の妥当性を検証し、伝統的施設である斜め堰の水理機能を評価した。その結果を活用し、流下能力を適切に再評価することと併せて、河川における伝統的施設を保存することの治水・利水面における重要性を明らかにした。この結果、現堰存置による河床安定性確保、河川整備・維持管理コストの縮減、水利組合の管理手間軽減となる河川改修計画策定を実現した。本技術及び検討プロセスは、水理実験の代替として複雑な流れが生じる河川構造物周辺流況の評価に広範に適用できる可能性がある。

斜め堰周辺の流れの三次元性は、堰直下流に現れる可能性がある。また、堰上流湾曲部等においては二次流の発生が考えられる。斜め堰の水理特性評価において、本検討箇所の主に流下能力検討上では、不等流計算手法の工夫により課題解決に至ったが、河床変動を含めた検討で上記のような流れの影響が問題となる場合がある。現時点の計算手法は水の流れのみしか扱えないため、三次元的な流れとそれに起因する河床変動を併せた河川構造物機能評価法の開発を今後の課題としている。

また、斜め堰存置の可能性は、前述の様に対象河川の山付、堤防や河岸までの位置関係などの河道特性を踏まえて、治水、利水、環境面で総合的に検討すべきである。

謝辞：本論文は、受託業務成果の一部を抜粋・追記して取りまとめたものであり、業務実施にあたり、兵庫県姫路土木事務所をはじめ、多大なるご指導を頂きました検討委員会(委員長：藤田神戸大学教授)をはじめ関係者の方々に深くお礼申し上げます。

参考文献

- 1) 兵庫県：市川水系河川整備計画，H.22.3.
- 2) 福岡捷二，三代俊一，荒谷昌志，中須賀敦，岡田将治，田中正敏：堰の位置及び構造の違いによる堰上流，下流の河道水理量の変化，水工学論文集，第45巻，pp.397-402，2001.
- 3) 中須賀敦，片山敏男，福岡捷二，三代俊一，荒谷昌志：堰を越える流れの実験と解析，土木学会中国支部第52回研究発表会，II-8，pp.125-126，2000.
- 4) OpenFOAM Foundation：http://www.openfoam.org/，参照2016-10.
- 5) 財団法人国土技術研究センター編：改訂解説・河川管理施設等構造令，平成14年9月10日改訂.

