三次元流体解析を用いた砂防堰堤の前庭保護工の機能検証事例について（2）

八千代エンジニヤリング株式会社　池田誠，矢野孝樹，保坂幸一，○小林泰士

1.　はじめに

堰堤高が15m未満の砂防堰堤は本副間距離・重複高は一般的に経験式より算定されるが，経験式は係数に幅が設けられており，係数の選定は技術者の経験や過去の事例によって決まる場合が多く，定量的な使い分けの基準はない．既往の三次元流体解析を用いた検討結果では，本堰堤の堰堤高を14.5mとした場合，現行基準の経験式[1]の後述の**係数小**を用いて前庭部保護工を計画すると，本堰堤の越流水深が3m以上になると，前庭部に水褥池が形成されず，十分に減勢されない可能性があることが確認されている[2]．本検討では，越流水深が3mの場合を対象とし，本堰堤の堰堤高及び経験式の係数による影響を明らかにするため，現行基準の経験式に準拠して計画した砂防堰堤について三次元流体解析を行い前庭保護工の流況と機能について検討した．

2.　水理解析モデル

2.1　検討ケース

本検討では，越流水深（3.0m），水通し幅（20m），袖小口勾配(1:0.5)に対して，本堰堤の堰堤高を14.5m，12.0m，10.0mと変化させ，本副間距離及び重複高を決定する係数を変化させて現行基準の経験式より算定し，本堰堤・前庭部・副堰堤が一体となった三次元モデルを作成した．以降，本副間距離と重複高の係数の組み合わせを**表１**に示す名称する．概略図を**図１**，検討ケースを**表２**に示す．

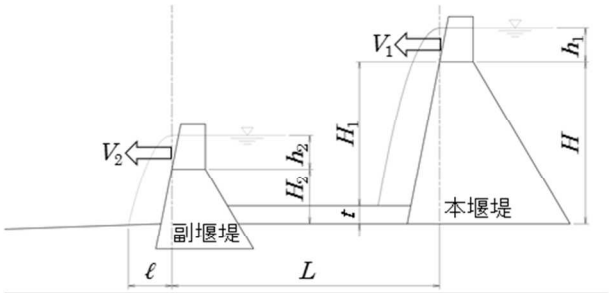
本副官距離：$L = (1.5\sim2.0) \times (H + h_1)$　(1)

重複高　　：$H_2 = (1/3\sim 1/4) \times H$　(2)

水叩き厚さ：$t = 0.1 \times (0.6H_1 + 3h_1 - 1.0)$　(3)

表１　係数の組み合わせと名称

名称	本副間距離	重複高
係数小	1.5	1/4
係数大	2.0	1/3



H: 本堰堤高，*L*: 本副間距離，H_1: 水叩き天端からの本堰堤の高さ，h_1: 本堰堤の越流水深，H_2: 重複高，*t*: 水叩き厚さ

図　１　概略図

表２　検討ケース

Case	*H*	係数	*L*	H_2	*t*
1	10.0m	係数小	18m	2.5m	1.4m
2		係数大	24m	3.4m	1.4m
3	12.0m	係数小	21m	3.0m	1.5m
4		係数大	27m	4.0m	1.5m
5※	14.5m	係数小	24m	3.7m	1.6m
6		係数大	32m	4.9m	1.6m

※Case5は既往の検討結果である[2]。

2.2　三次元流体解析手法

本検討で用いた三次元流体解析には等温・非圧縮・不混和流体の2相流（水・空気）モデルを用いた．このモデルの基礎方程式は，連続式とNavier-Stokes方程式であり，離散化手法には有限体積法，自由水面の解析にはVOF法を用いている．

2.3　解析モデル

計算格子サイズは，水が存在する範囲は細かくし（最小メッシュサイズ0.125m），上部は粗く設定している．境界条件は，堰堤部及び底面はNoslip，領域側部はslip，上部は開放，上流端は水を一定流入，下流端は自由流出させた．また，左右対称のモデルであるため，右岸半分を解析範囲とし，中央部での境界条件を対称面とした．計算時間は各ケースで流況が定常状態となる秒数，計算時間間隔は自動制御（最大クーラン数0.5）とした．乱流モデルは，LES(Large Eddy Simulation)の標準Smagorinskyモデルを採用した．

3.　三次元流体解析結果

実施した三次元流体解析結果の評価を行った．例としてCase5(*H*=14.5m，係数小）とした場合の三次元流体解析結果を**図２**に示す．

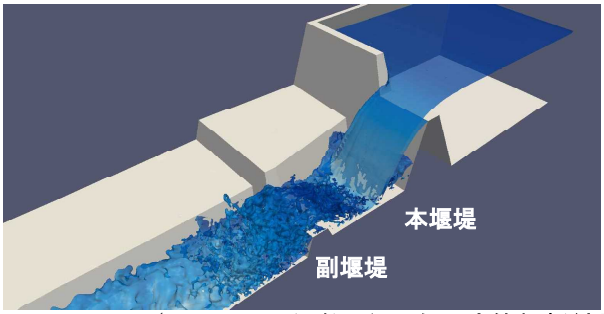


図　２　Case5(*H*=14.5m, 係数小）三次元流体解析結果

3.1　流況の評価

本堰堤の堰堤高及び経験式の係数の変化に伴う前庭保護工の流況の評価を行った．解析結果を図３に示す．各図には，水と空気の境界線及び流速コンター，流速ベクトルを表示した．

係数小の場合，本堰堤の堰堤高に関わらず，本堰堤から落水した鉛直下向きの流れは直接水叩きに衝突し，副堰堤の越流水深より水褥池水深が低い状態で水叩きを這うように高速流が発生し，副堰堤に衝突することで上向きの流向となり，大きく跳ね上がる流れを伴いながら副堰堤を越流している．

係数大の場合，本堰堤の堰堤高に関わらず，副堰堤の越流水深と同等程度の水褥池が形成され，本堰堤から落水した高速流は，副堰堤近づくにしたがって徐々に分散し，**係数小**の場合に発生している跳ね上がる流れは概ね解消している．

これらのことから，越流水深が3mの場合の前庭保護工の流況は本堰堤の堰堤高の変化による影響は小さく，経験式の係数の条件による影響が大きいことが確認された．

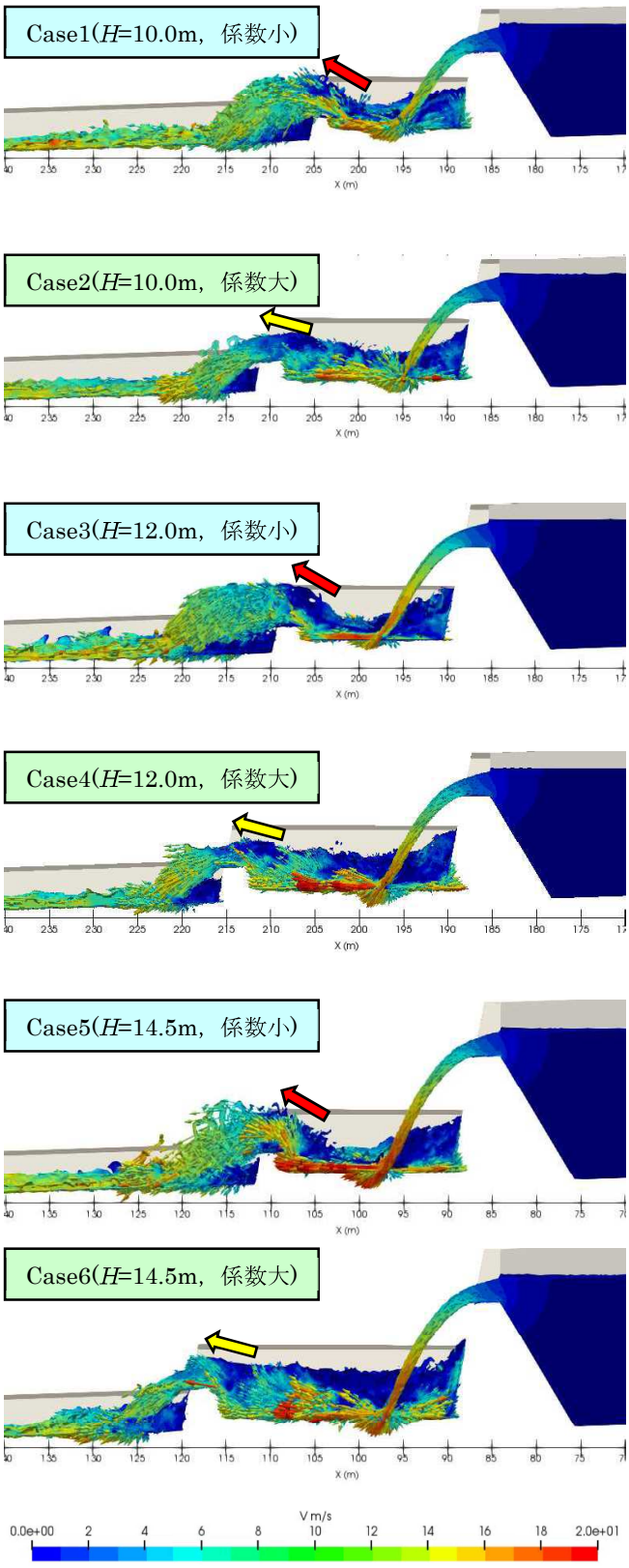


図　3　水褥池内の流況及び流速の解析結果

3.2　減勢機能の評価

（1）評価手法

本堰堤の堰堤高及び経験式の係数の変化に伴う前庭保護工の機能の評価を行った．既往の検討結果では十分に減勢された場合，副堰堤の越流水深及び越流部流速は本堰堤と同等程度となることが確認されている[2]．

副堰堤の越流水深 h_2 を本堰堤の越流水深 h_1 で除した無次元量 h_2/h_1 と，本堰堤の堰堤高 H の関係を図４に示す．副堰堤の越流部流速 V_2 を，本堰堤の越流部流速 V_1 で除した無次元量 V_2/V_1 と，本堰堤の堰堤高 H の関係を図５に示す．ここで，V_2，V_1 は x,y,z 方向の合成流速である．

（2）評価結果

係数小の場合には，h_2/h_1 は 1.5～1.8 程度，V_2/V_1 は 1.2～1.4 程度となり，副堰堤の越流水深及び越流部流速は本堰堤と比較して大きく，十分に減勢されていないと判断される．

係数大の場合には，h_2/h_1 は 0.9～1.1 程度，V_2/V_1 は 1.0～1.2 程度となり，副堰堤の越流水深及び越流部流速は本堰堤と同等程度となっていることから概ね減勢されていると判断される．

これらのことから、越流水深が 3m の場合の前庭保護工の機能は経験式の係数の条件による影響が大きく，経験式の小さい係数を用いると，越流水深・越流部流速ともに大きい状態で副堰堤を越流することが確認された．

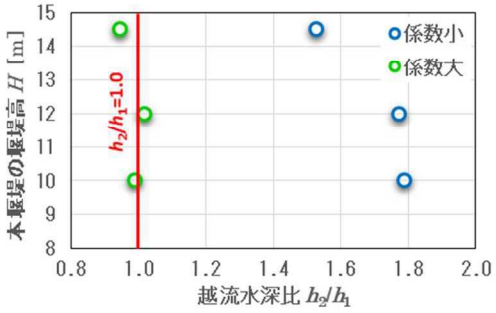


図　4　越流水深比に対する本堰堤の堰堤高

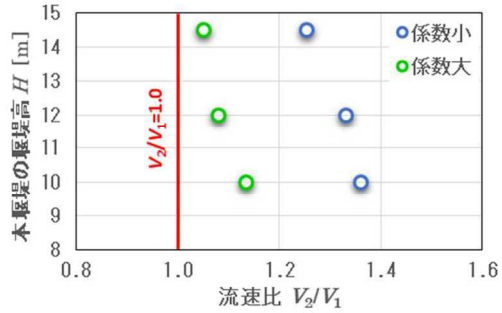


図　5　越流部流速比に対する本堰堤の堰堤高

4.　まとめ

現行基準の経験式を用いて，係数及び本堰堤の堰堤高を変化させて三次元流体解析を実施し，前庭保護工の流況及び機能について検討した．越流水深が3mの場合には本堰堤の堰堤高（10m≦H≦14.5m）に関わらず，経験式の係数の条件による影響が大きく，経験式の小さい係数を用いると十分に減勢されない可能性があることを確認した．今後は，越流水深・堰堤高・係数の3つの変数の組み合わせについて，三次元流体解析を実施し傾向を把握したい．

参考文献

1)建設省河川砂防技術基準（案）　同解説　設計編Ⅱ（1997）：建設省河川局監修

2)小林ら(2019)：　三次元流体解析を用いた砂防堰堤の前庭保護工の機能検証事例について，2019 年度砂防学会研究発表会概要集，p.339-340