

河川堤防の耐越水型強化技術評価のための粒子・流体連成解析開発

八千代エンジニアリング（株）正会員 石徹白 伸也 正会員 保坂 幸一 非会員 嶋田 嵩弘
正会員○菅木 渉馬 非会員 座波 健仁 正会員 原 昌成 正会員 秋山 和也
東京理科大学 正会員 二瓶 泰雄

1. はじめに

令和元年東日本台風による豪雨など、近年、河川堤防の施設能力を超える洪水災害が頻発している。同台風時の堤防決壊の主要因は越水が 8 割以上とされている¹⁾。それを踏まえ、国や研究所では、耐越水堤防の新技術導入に向けた検討必要性のとりまとめ¹⁾や、盛土強化工法研究²⁾が進められており、耐越水堤防に対するニーズが高まっている。耐越水堤防としての要求性能が確保されているか否かの検証を水理模型実験により行う必要があるが、手間がかかり、複雑な現地状況の反映に限界があることから、その代替えとして数値解析による性能評価が可能となれば、効率的・効果的な工法開発に繋がると考えられる。そこで、本研究では河川堤防の耐越水型強化技術評価のための数値解析手法について検討した。

2. 解析手法

解析プログラムはオープンソースの粒子(DEM)と流体(CFD)の連成解析プログラムである CFDEM® coupling³⁾を用いた。CFD は VOF 法による混相流解析ソルバをベースとした。基礎方程式として Navier-Stokes 方程式を解き、各計算格子における流体占有率の影響や粒子群から流体が受ける運動量が考慮される。DEM は、並進および回転の運動方程式を解き、粒子間接触力や粒子に作用する流体力が考慮される。流体力として抗力、圧力勾配力、粘性力を考慮した。

3. 解析モデル・解析条件

将来的にはコンクリート被覆工等の物体挙動も含めた解析手法を構築することを想定するが、まずは倉上ら⁴⁾による被覆工の無い土堤の水理模型実験結果を検証データとして、解析手法の検討を行った。解析モデルを図-1 に解析条件を表-1 に示す。水理模型実験と解析モデルの縮尺は 1/25 である。ただし、実験の水路幅は 0.20m であるが、解析では計算負荷軽減と断面二次元的な現象である

ことを考慮して、水路幅を 0.002m とした。実験の堤体材料は豊浦砂(平均粒径 $D_{50}=0.16\text{mm}$ 、最大乾燥密度 $\rho_{dmax}=1.55\text{g/cm}^3$) で、締固め度 D_c の堤防侵食に及ぼす影響を検討するため、 D_c が 4 ケース(75, 85, 90, 95%)設定されている。実験の堤防は全体が砂で作成されているが、解析では越水による天端から法尻周辺の侵食状況に着目し、堤防の一部を固定床とした。DEM 粒子の直径は実験の砂の平均粒径で一樣とし、堤防モデルは粒子を自由落下させた後に堤防部分以外の粒子を取り除くことで作成した。作成した堤防モデルの乾燥密度は 1.22g/cm^3 ($D_c=78\%$)となった。実験では越流水深が 6.0cm(実スケール 1.5m)となるよう流入量を設定している。解析では実験と単位幅あたりの流量が一致するよう流入量を設定した。流体格子サイズは 1cm を基本ケース(Case1)としたが、

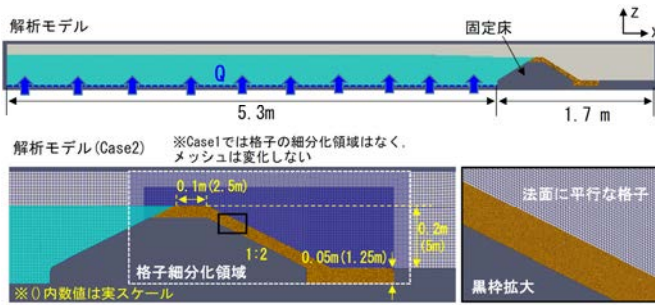


図-1 解析モデル

表-1 解析条件

項目		設定値
計算領域 (m)		x方向: 7.0, y方向: 0.002, z方向: 0.35
計算格子サイズ (m)		$\Delta x = \Delta z = 0.01$, $\Delta y = 0.0005$ (基本) Case2では天端から法尻周辺の Δx , Δz を $1/4$ とした
計算時間間隔 (s)		2.5×10^{-4}
離散化スキーム	時間発展	1次精度陰解法
	移流項	1次精度風上差分
CFD 乱流モデル		使用しない (層流)
境界条件		流入面: 流量固定, 流出面: 自由流出 底面: no-slip条件, 側面: slip条件, 上面: 大気開放
自由水面追跡法		VOF法 (気液二相流) (水面位置: VOF値=0.5)
密度 (kg/m^3)		空気: 1, 水: 1000
動粘性係数 (m^2/s)		空気: 1.48×10^{-5} , 水: 1.00×10^{-6}
表面張力 (N/m)		0.07
DEM 計算時間間隔 (s)		2.5×10^{-6}
粒径 (mm)		0.16
密度 (g/cm^3)		2.66
ヤング率 (N/m^2)		5.0×10^6
ポアソン比		0.3
反発係数		0.5
摩擦係数/回転摩擦係数		0.7/0.7

キーワード 河川堤防, 数値解析, 越水破堤, 洪水災害, CFD-DEM

連絡先 〒111-8648 東京都台東区浅草橋 5-20-8 八千代エンジニアリング(株) TEL 03-5822-6269

流体格子のサイズおよび配置方法の影響を検討するため、天端から裏法尻にかけて細分化した格子を裏法勾配と平行な配置になるように設定したケース(Case2)も実施した。CFD 計算の時間間隔はDEM 計算の100倍に設定し、DEM 計算の100ステップに1回流体場を更新した。粒子のパラメータは砂をDEMでモデル化した事例⁵⁾⁶⁾を参考に設定し、摩擦係数、回転摩擦係数は、図-2に示すように安息角が砂の内部摩擦角(30°程度)となるよう決定した。

4. 解析結果

実験および解析の越流開始から3秒後の堤防侵食状況を図-3に示す。実験では裏法が薄く侵食する程度であるが、Case1のみ裏法肩で局所的な侵食が生じており、固定床部分が露出してしまう結果となった。Case1では天端付近の水深が大きく、法肩部で重力の作用により粒子を下向きに押し込むような流れが作用している。Case2では天端上の水深が小さく、より実験に整合する結果となった。

実験の越流開始から8秒後、Case2の8秒、9秒後の堤防侵食状況と流速コンターを図-4に示す。解析の天端および裏法の侵食状況は、実験におけるDc=85%と比べると侵食が進んでおり、75%に近い傾向が見られた。堤防モデルのDcが75%に近いと考えられる。一方で、裏法尻の洗堀は実験では8秒以降に進行が見られるが、解析では裏法尻に天端、裏法範囲の粒子が堆積してしまい、洗堀が生じていない。その要因として、実験では裏法尻流速として2m/s程度が確認されているが、解析では流速がそれに比べ遅いことが考えられる(約1.5m/s)。流速が遅くなる要因は天端部と同様に、法尻部の格子サイズが粗い等で水深が深くなっており、さらには粒子から流体に作用する抗力も大きくなっている可能性が考えられる。

5. まとめ

粒子・流体連成解析を用いて耐越水堤防の技術的評価を検討した結果、天端および裏法の侵食状況が実験と整合したことから、本解析手法は耐越水型強化技術評価として活用可能性があることが示唆された。細分化した流体格子を天端・裏法面と平行に配置することで、実験に見られた水深の小さい堤防表面に沿った流れが再現できたため、堤防の侵食状況の再現性には水深と格子サイズの関係および格子の配置方法が影響すると推定された。

より高い締固め度の堤防モデルの構築方法や裏法尻部分の侵食状況の再現が課題であり、堤防作成方法、流体



図-2 摩擦係数・回転摩擦係数の検討

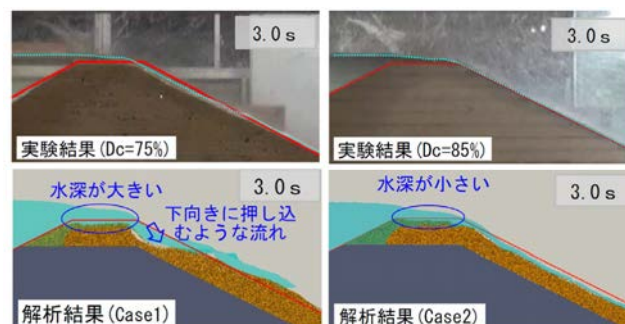


図-3 堤防侵食状況(越流開始から3秒後)

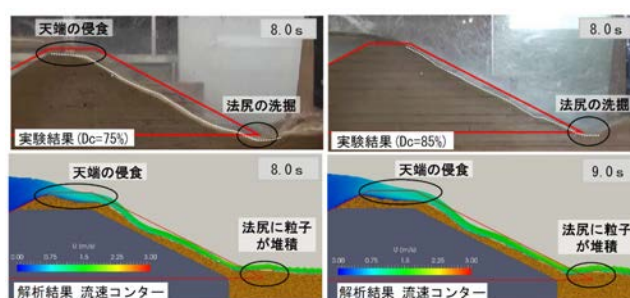


図-4 堤防侵食状況と流速コンター(Case2)

格子のサイズや配置に着目して、再現性向上に取り組んでいる。

参考文献

- 1) 国土交通省水管理・国土保全局治水課: 令和元年台風第19号の被災を踏まえた河川堤防に関する技術検討会資料, 2020.
- 2) 鳥居・常田: 新材料等を用いた越水に対する盛土強化工法研究会の設立と活動, 土木技術資料 64-1, pp.70-73, 2022.
- 3) Goniva et al.: Influence of rolling friction on single spout fluidized bed simulation, Particuology, 10(5), pp.582-591, 2012.
- 4) 倉上ら: 耐越流侵食性向上のための河川堤防補強技術の提案, 土木学会論文集 B1(水工学) Vol.69, No.4, I_1219-I_1224, 2013.
- 5) Roessler et al.: Development of a standard calibration procedure for the DEM parameters of cohesionless bulk materials – part I: Solving the problem of ambiguous parameter combinations, Powder Technology, Vol 343, pp.803-812, 2019.
- 6) Xiao・Wang.: CFD-DEM simulations of seepage-induced erosion. Water, 12.3: 678, 2020.