## 第111部門

洗堀·浸食(2)

2023年9月15日(金) 10:40 ~ 12:00 III-6 (広島大 東広島キャンパス総合科学部講義棟 K313)

# [III-417] 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

Development of particle-fluid coupled model for evaluation of reinforcing technology against overflow of river levee

石徹白 伸也<sup>1</sup>、保坂 幸一<sup>1</sup>、嶋田 嵩弘<sup>1</sup>、\*菅木 渉馬<sup>1</sup>、座波 健仁<sup>1</sup>、原 昌成<sup>1</sup>、秋山 和也<sup>1</sup>、二瓶 泰雄<sup>2</sup>(1. 八千代 エンジニヤリング株式会社、2. 東京理科大学)

Shinya Itoshiro<sup>1</sup>, Koichi Hosaka<sup>1</sup>, Takahiro Shimada<sup>1</sup>, \*Shoma Sugaki<sup>1</sup>, Takehito Zaha<sup>1</sup>, Masanari Hara<sup>1</sup>, Kazuya Akiyama<sup>1</sup>, Yasuo Nihei<sup>2</sup> (1. Yachiyo Engineering Co., Ltd., 2. Tokyo University of Science) キーワード:河川堤防、数値解析、越水破堤、洪水災害、CFD-DEM

River levee, Numerical simulation, Levee breach by overflow, Flood disaster, CFD-DEM

数値解析による河川堤防の耐越水型強化技術評価を可能とするため,粒子(DEM)と流体(CFD)の連成解析プログラム(CFDEM)を用いた堤防の越水による堤防決壊解析手法を検討した.土堤の水理模型実験を検証データとして再現計算を実施し,解析の天端から裏法面の侵食状況は実験と整合しており,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ことが推察された.裏法尻部分の侵食状況の再現性向上に課題が残るものの,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と考えられる.

## 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

八千代エンジニヤリング(株)正会員 石徹白 伸也 正会員 保坂 幸一 非会員 嶋田 嵩弘 正会員〇菅木 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<sup>1)</sup>. 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<sup>1)</sup>や,盛土強化工法 研究<sup>2)</sup>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<sup>®</sup> coupling<sup>3)</sup>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<sup>4)</sup> 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<sub>50</sub>=0.16mm,最大乾燥密度 ρ dmax=1.55g/cm<sup>3</sup>)で、締固め度 D<sub>c</sub>の堤防侵食に及ぼす影響 を検討するため、D<sub>c</sub>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様とし、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<sup>3</sup> (D<sub>c</sub>=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
CFD	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)		Δx=Δz=0.01, Δy=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 <sup>-4</sup>
	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
	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 <sup>3</sup> )		空気:1,水:1000
	動粘性係数(m <sup>2</sup> /s)		空気:1.48×10 <sup>-5</sup> ,水:1.00×10 <sup>-6</sup>
	表面張力(N/m)		0. 07
DEM	計算時間間隔(s)		2.5 × 10 <sup>-6</sup>
	粒径(mm)		0. 16
	密度(g/cm <sup>3</sup> )		2. 66
	ヤング率 (N/m <sup>2</sup> )		5. 0 × 10 <sup>6</sup>
	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 八千代エンジニヤリング(株) TEL03-5822-6269 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<sup>5).6)</sup>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,Casel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.Casel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%に近いためと考えられる.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

 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.