第II部門

2024年9月5日(木) 9:00 ~ 10:20 A205(川内北キャンパス講義棟A棟)

構造物周辺の流れ・洗掘

座長：佐藤 柳言（日本大学）

9:40 ~ 9:50

[II-62] 表面被覆型耐越水堤防の性能評価に対する粒子・流体連成解析手法の適用

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

キーワード：河川堤防、数値解析、越水破堤、洪水災害、被覆ブロック、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，表面被覆型堤防強化工法の耐越水性能評価への粒子(DEM)と流体(CFD)の連成解析プログラム(CFDEM)の適用方法を検討した．本手法で被覆ブロックによる法面等の侵食防止効果を評価する場合，被覆ブロックからの越流水の浸透抑止のためには，ブロック内の空隙を小さくすること，ブロック粒子径を小さくすることが有効であった．既往水理模型実験の再現解析の結果，法尻部の落堀に伴って被覆ブロックが流出し，堤体が侵食していく過程や法尻補強による耐越水性能効果が確認された．そのため，本手法は表面被覆型の耐越水堤防の性能評価に活用し得る可能性がある．

© 2024 Japan Society of Civil Engineers

表面被覆型耐越水堤防の性能評価に対する粒子・流体連成解析手法の適用

八千代エンジニヤリング（株）　正会員○座波　健仁　正会員　石徹白　伸也
正会員　保坂　幸一　正会員　菅木　渉馬　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]．そのため，国や研究所では，堤防強化工法の新技術導入に向けた取り組みが進められており [1),2)]，耐越水堤防に対するニーズが高まっている．著者らは数値解析による耐越水堤防性能評価手法の実用化を目指し，その手始めとして土堤の越水破堤を再現する数値解析手法を検討している [3]．本研究では次の段階として，表面被覆型の耐越水堤防に対する性能評価にあたっての解析手法を検討した．

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® coupling[4]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，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 粒子は，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（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

倉上ら [5]による水理模型実験結果を検証データに，解析手法の検討を行った．解析モデルを図-1，解析条件を表-1 に示す．実験の堤体材料は豊浦砂(平均粒径 D_{50}=0.16mm)，表面被覆ブロックはアルミニウム板(厚さ 0.5cm，密度はコンリートと同程度)が使用されている．堤防越流時の越流水深は 6.0cm(実スケール 1.5m)である．解析における堤体材料の粒径・密度，被覆ブロック密度，越流水深は実験と整合するよう設定した．なお実験の堤体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裏法面，法尻の侵食状況に着目し，一部を固定床とした．堤体は自然な空隙状態になるよう堤体範囲内に土粒子を自由落下させることで作成した．被覆ブロックは多数の粒子を剛体結合させることでモデル化した．ただし，ブロック内に空隙が生じることから被覆ブロックから堤体内に水の浸透が生じる．被覆ブロックは越流水による法面等の侵食を防ぐ目的があり，堤体内に浸透が生じた場合，十分な効果が発揮されないことが懸念される．そのため，ブロック内への浸透抑制に着目した検討も実施した．解析ケースは，堤体と同じ粒径の粒子をブロック配置範囲に充填したケース(ケース 1)，充填時のブロック粒子の摩擦を 0 とし空隙率を小さくしたケース(ケース 2)，ブロック粒子の粒径を 1/2 としたケース(ケース 3)とした．CFD 計算の時間間隔は DEM 計算の 100 倍とし，DEM 計算の 100 ステップに 1 回流体場を更新した．

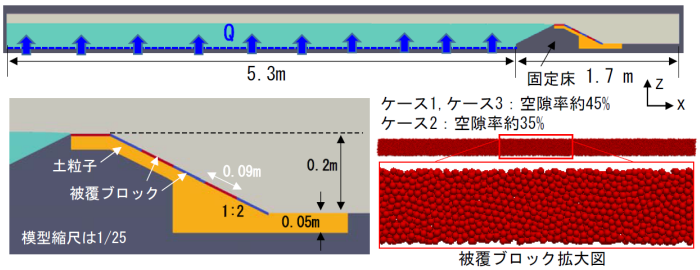

図-1　解析モデル

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※1，z方向:0.35
	計算格子サイズ(m)		Δx=Δz=0.01，Δy=0.0005（全体） 天端から法尻周辺はΔx，Δzを1/8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
	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)		土粒子：0.16，ブロック粒子（ケース1，ケース2）：0.16 ブロック粒子（ケース3）：0.08
	密度(g/cm^3)		土粒子：2.66，ブロック粒子：2.70
	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		土粒子-土粒子：0.7，土粒子-ブロック粒子：0.6 ブロック粒子-ブロック粒子：0.6※2
	回転摩擦係数		土粒子-土粒子：0.7，土粒子-ブロック粒子：0.6 ブロック粒子-ブロック粒子：0.6※2

※1 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，水路幅を 0.002m とした．
※2 ケース 2 のブロック作成時の値は 0.0

キーワード　河川堤防，数値解析，越水破堤，洪水災害，被覆ブロック，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)　ＴＥＬ03-5822-6760

© Japan Society of Civil Engineers

4．検討結果

越流開始から 3 秒後の被覆ブロック内の浸透状況を図-2 に示す．ケース 1 に比べ，ケース 2 および 3 は被覆ブロック内への浸透が抑制されている．そのため，被覆ブロックは，空隙を小さくすること，粒径の小さい粒子で作成することで，浸透を抑制できることが確認された．

ケース 2 の越流および被覆ブロック流失状況を図-3 に示す．まず法尻部で落掘が生じ始め越流開始後約 20 秒で最も堤内側のブロックが流失し，越流開始後約 42 秒で 2 枚目のブロックが流失した．水理模型実験では 1 枚目，2 枚目のブロックは 14s，21s に流失しており，解析は実験と比べブロック流失時刻が遅いものの，法尻部の落堀に起因して被覆ブロックが流失し，堤体が侵食していく過程を再現することができた．

次に，法尻補強の効果評価に対する解析手法の適用性検討のため，ケース 2 をもとに法尻部の補強として被覆ブロックを 2 枚配置したケースを検討した．図-4 に越流および被覆ブロック流失状況を示す．被覆ブロックを配置したことにより，補強を行わない場合に法尻で落堀が生じる時刻(越流開始後 10 秒)においても法尻部の被覆ブロックが流失せず，落堀が生じない結果となった．越流開始後約 18 秒に法尻のブロック，越流開始約 32 秒後に法面のブロックが流失し，堤体内が侵食し始めた．以上から，本解析手法は，法尻補強を行うことによる堤体に侵食が生じる時刻が遅延する効果を評価できることが確認された．

5．まとめ

本研究では，粒子・流体連成解析を用いた表面被覆型の耐越水堤防の性能評価手法を検討した．本手法で被覆ブロックによる法面等の侵食防止効果を再現するにあたり，被覆ブロックからの浸透を抑止するためには，ブロック内の空隙を小さくすること，粒子数の増加により計算負荷の増大が懸念されるものの，ブロック粒子径を小さくすることが有効であると考えられる．解析結果から，法尻部の落堀に伴って被覆ブロックが流失し，堤体が侵食していく過程や法尻補強による耐越水性能効果が確認された．そのため，本解析手法は表面被覆型の耐越水堤防の性能評価に活用し得る可能性がある．

実験と比べ被覆ブロックの流失時刻の再現性に課題があり，堤体材料と被覆ブロック間の摩擦パラメータや流体による抗力モデル等の結果へ与える影響に着目した検討を行い，再現性の向上を目指す．さらには本手法の実用化に向け，その他工法への適用を検討した上で，耐越水堤防性能評価手法の確立を目指す．

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) 石徹白ら: 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，令和 5 年度土木学会全国大会第 78 回年次学術講演会, III-417, 2023.

4) Goniva et al.: Influence of rolling friction on single spout fluidized bed simulation, Particuology, 10(5), pp.582–591,2012.

5) 倉上ら：ジオテキスタイル補強土を用いた耐越流侵食河川堤防の提案，ジオシンセティックス論文集，Vol.28, pp.265-272，2013.

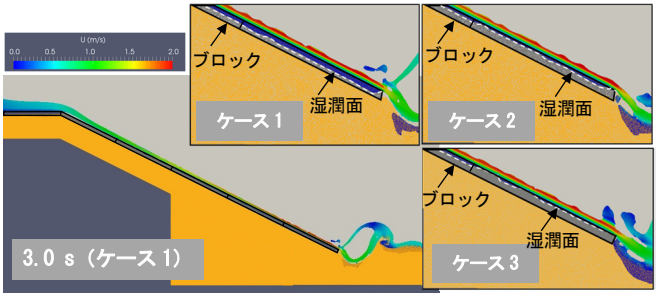

図-2　被覆ブロック内の浸透状況

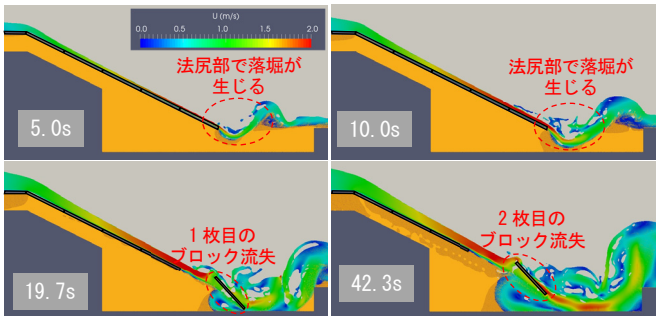

図-3　越流および被覆ブロック流失状況（ケース 2）

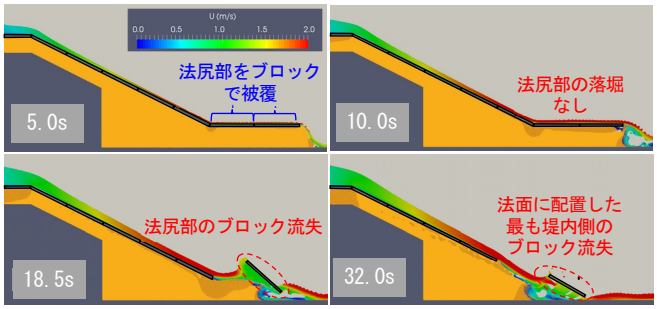

図-4　越流およびブロック流失状況（法尻補強）

© Japan Society of Civil Engineers