

粒子法に基づく流体-地盤-構造連成解析の浸食対策工への適用

九州大学 学生会員 ○佐伯 勇輔
 東北大学 正会員 辻 勲平
 九州大学 正会員 浅井 光輝

1. 緒言

近年、降雨の激甚化・集中化によって、日本各地で土構造物の崩壊や大規模な浸水被害が多発している。中でも河川堤防では、治水機能を大きく超えた越流による決壊が頻発している。そこで、越流が生じた場合でも決壊しにくく、また決壊までの時間を少しでも長くする減災効果を有した「粘り強い河川堤防」が求められている。国土交通省は「越水に対する河川堤防の強化構造の検討に資する評価技術の開発」を指定型課題に挙げており、越流浸食に対する対策工など技術開発が進められている¹⁾。例えば、持田らの研究²⁾では、堤体内に自立壁を構築する一部自立型構造が提案されており、水理実験などを通してその性能が示されてきた。

本研究では、剛性が大きく、耐久性に優れた PC 矢板を用いた強化構造の耐浸食性能を評価し得る 3 次元流体-地盤-構造連成解析ツールの開発を目的とする。なお本稿では、この連成解析ツールを用いて、PC 矢板の根入長あるいは形状による破壊性状の違いを定性的に確認することに注力した。

2. 連成解析手法

著者らの先行研究³⁾と同様に、流体解析では自由表面流れと浸透流を統一的に記述した Darcy-Brinkman 型方程式を採用し、安定化 ISPH (Incompressible Smoothed Particle Hydrodynamics) 法⁴⁾に従って解き、堤防を越流する流体運動を追跡する。

$$\frac{C_r(\varepsilon_f)}{\varepsilon_f} \frac{Dv_D}{Dt} = -\frac{1}{\rho_f} \nabla P + \mathbf{g} + v_E(\varepsilon_f) \nabla^2 \mathbf{v}_D + \mathbf{F}_r(\mathbf{v}_D, \varepsilon_f) \quad (1)$$

ここで P , $\mathbf{g}$, $\mathbf{v}_D$, ρ_f , ε_f , $\mathbf{F}_r$, C_r はそれぞれ、圧力、重力加速度、ダルシー流速、流体密度、間隙率、抵抗係数、有効粘性係数を表す。

また、堤防の変形解析と PC 矢板の挙動解析には個別要素法 DEM (Discrete Element Method) による粒状体解析あるいは複数の球形粒子を剛体結合したクラスター

DEM 解析を実施する。この時、土粒子同士あるいは土粒子-剛体、剛体-剛体間の接触には通常の DEM と同様にバネダッシュポットモデルに従う接触・摩擦計算を実施する。なお、流体と土粒子（球形 DEM）の相互作用力には相対速度に依存する抗力、流体と矢板（クラスター DEM）の相互作用力として剛体に作用する圧力を表面積分して得られる流体力を考慮する事で、河川水の越流と堤防の浸食、PC 矢板の挙動を表現する。

3. 浸食対策工の再現解析

図-1 には、PC 矢板で補強した河川堤防の解析モデルの概略図を示した。本研究では、堤内地側の法面は越流水によって浸食したことを仮定して取り去った状態を初期状態としている。流体（SPH 粒子）は、モデル左端の堤外地から一定流速 30 cm/s で流入させ、モデル右端の解析領域外に出た流体粒子は削除することによって、流体の流入・流出境界を表現した。また図-2 には数値実験を行う 4 種の PC 矢板を設置した解析モデル ((a) 根入長 $D=20$ cm の短矢板, (b) 根入長 $D=40$ cm の長矢板, (c) 二重長矢板, (d) コの字型矢板) の越流時における PC 矢板・地盤の変形状態の時系列変化を示した。

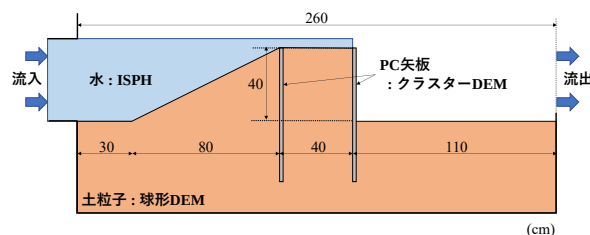


図-1. 解析モデルの概念図

(a) 根入長が短矢板の場合、越流開始前から矢板左面に作用する水圧および土圧によって右側へと傾斜し、最終的には堤体を維持できずに倒壊に至った。一方で (b) 根入が深い長矢板の場合も、水圧と土圧によって傾斜は生じるものの、粘り強く堤体の崩壊を防ぐ様子を確認できた。(a)と(b)の比較から、本解析手法によって

キーワード 河川堤防, 越流浸食, ISPH, DEM

連絡先 〒819-0395 福岡市西区元岡 744 W2-1102 構造解析学研究室 TEL 092-802-3370

根入長さによる破壊性状の効果を評価できることが確認した。なお、いずれのケースでも、提案する流体-地盤-構造連成ツールを用いることによって、越流に起因する離散的な洗掘破壊を表現できることも確認した。

また、(c)堤外地側にもう一本の PC 矢板を設置した二重矢板の場合、堤内地側と天端周辺の変形状態は(b)一本の長矢板の場合とはほとんど変わらず、堤外地側の変形が少し抑えられる程度の補強効果であった。天端部分も補強し矢板をつなげた(d)コの字型矢板の場合も、初期の水圧と土圧による若干の傾斜は生じている。ただし、堤体の変形は他の矢板形状よりも小さく、粘り強く地盤の変形を防ぐ減災効果を発揮することを確認した。

4. 結言

本研究では、河川堤防の浸食および崩壊を粘り強く防ぐ PC 矢板による補強工法の耐越流性能の評価に資する粒子法に基づく流体-地盤-構造連成解析ツールを開発した。本稿で掲載した河川堤防の越流を模擬した数値実験を通して、流体の激しい流れと地盤の離散的な破壊、そして各種矢板形状の耐越流性能を表現し得

るツールであることを確認することができた。

今後、持田らの実験²⁾のような室内実験との比較を通して、定量的な評価（矢板の変位、地盤の変形状態、洗掘深等）を実施し、より実用的な解析手法の開発を目指す。

参考文献

- 1) 国土交通省, ”河川砂防技術研究開発公募 河川技術部門”, <https://www.mlit.go.jp/river/gijutsu/kasenryuiki/index.html>, 2023 年 3 月 4 日閲覧。
- 2) 持田裕輔, 山崎弘芳, 妙中真治, 藤澤和謙, 高橋章浩, 越水による河川堤防の決壊に対する鋼矢板補強構造の抵抗機構に関する実験的研究その 2, 第 10 回河川堤防技術シンポジウム論文集, pp.33-36, 2022.
- 3) Tsuji, K., Asai, M., Kasama, K.: Seepage failure prediction of breakwater using an unresolved ISPH-DEM coupling method enriched with Terzaghi's critical hydraulic gradient, *Adv. Model. Simul. Eng. Sci.*, Vol.10, No.1, pp.1-27, 2023.
- 4) Asai, M., Aly, A.M., Sonoda, Y. and Sakai, Y. : A stabilized incompressible SPH method by relaxing the density invariance condition, *J. Appl. Math.*, Vol.2012, 2012.

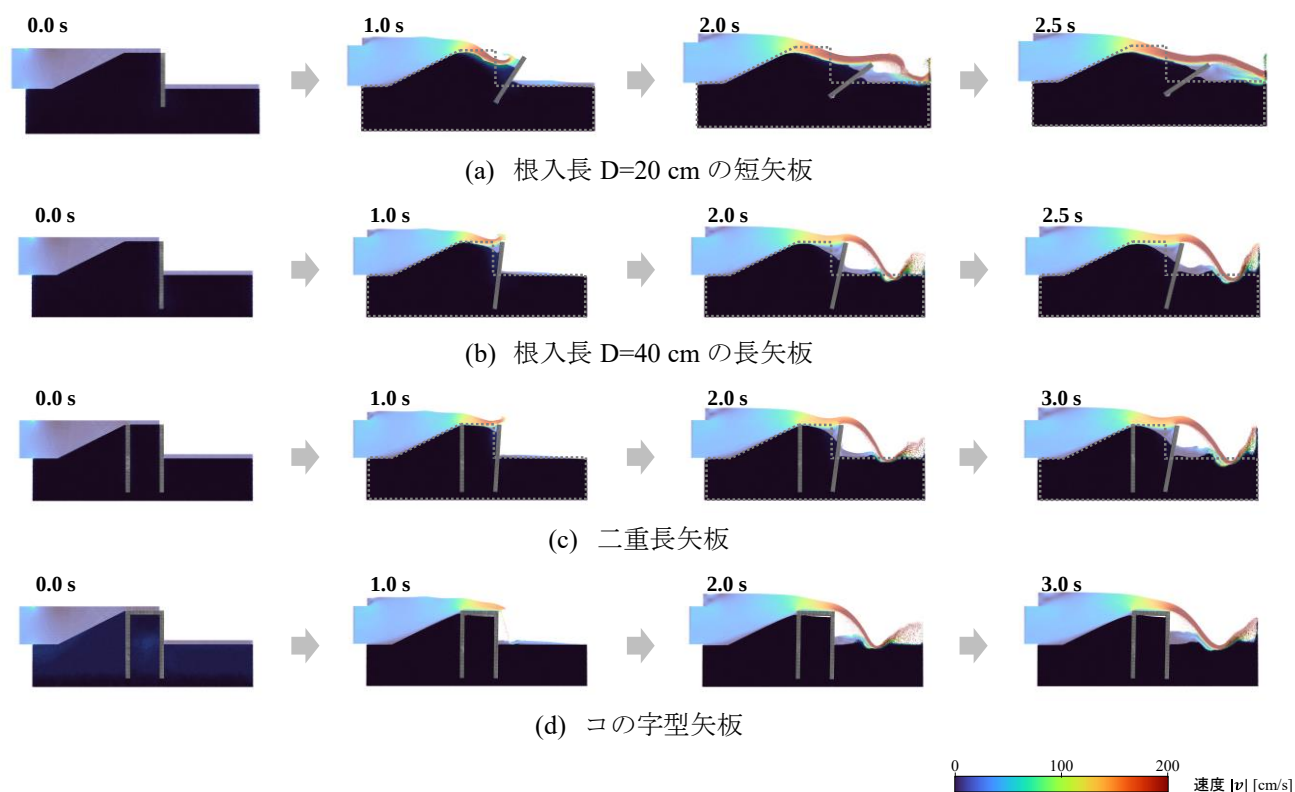


図-2. 各浸食対策工での解析結果