粒子法を用いたため池堤体の越流破壊の解析

京都大学　正会員　青山　咸康
京都大学　正会員　小林　晃
京都大学　非会員　藤澤　和謙
京都大学　学生会員　○中淵　大輔

１．目的

近年，台風などによる集中豪雨により，ため池や堤防などが越流を原因として破壊される事例が多い．しかし，現状では越流破壊のメカニズムについて詳しく解明されているわけではないので，有効な破壊基準もほとんどない．そこで，越流に対する有効な破壊基準を模索するために，破壊に至るまでの過程を表現できるモデルが必要である．本論では，粒子法を用いた解析により侵食に関する破壊基準を検討した．

２．粒子法の概要 [1)]

粒子法とは連続体を有限個の粒子で表し，圧力，速度といった変数を保持した粒子の運動を計算により求めることによって連続体の挙動を求める方法であり，これを用いることで，連続体の挙動の解析が可能とされている．本論では，越流（水粒子）の運動により土粒子が移動する現象（侵食）を本モデルで表現する． 粒子法においては,差分法や有限要素法で必要となる格子，要素，メッシュといったものは使わず，連続体の挙動は微分方程式によって記述されるので，どのように微分方程式を離散化するかが要点となる．粒子法の中でも離散化の方法はいくつかあるが，今回用いた MPS(Moving Particle Semi-implicit)法は勾配や発散といった微分演算子に対応する粒子間相互作用モデルを用意し，これらを連続体の支配方程式に含まれる微分方程式中の微分演算子に適用することによって支配方程式を離散化し，連続体の挙動を表現するものである．

３．解析概要

越塚 [1)]による粒子法のプログラムを使用したが，目的である越流破壊の破壊過程モデルの構築に必要不可欠な計算手法の開発のためにそのプログラムの修正，条件設定の変更を行った．その内容は粘性の導入，被侵食粒子の挙動の表現，越流の表現，土粒子の侵食破壊条件の設定,堤体モデルの形成である．堤体モデルの形成は，別途で行った室内実験 [2)]を再現するために，大きさは実際のため池堤体のおよそ10～15 分の 1，斜面は長さ 2：高さ 1 の割合と仮定し, 水粒子, 土粒子ともに直径を 8㎜ とした. また，土粒子の侵食破壊条件において，粘性応力に破壊基準を設けた場合は，水が堤体に浸透していくかのような破壊が見られた．水粒子と土粒子の相対速度に破壊基準を設けた場合は，破壊の様子は表現できたものの，非常に短時間で破壊が進んだ．ともに実験で観察されたような破壊過程を表現するには至らなかった．そこで，相対速度を用いた破壊基準の中に土粒子が水粒子から浸食を受けている時間とその間に生じる侵食量を考慮に入れるために,式(1)に表される堤体の地表面の高さの時間的変化を表す侵食速度 $E(u)$ を用いる.[3)]

$$E(u)=\alpha\left(\frac{u^2}{u_{th}^2}-1\right)^{\gamma} \quad (u>u_{th}) \quad (1)$$

ここで,u_{th} は侵食が発生する限界の相対速度, γ は無次元パラメーター，α は速度次元を持つパラメーターで，どちらも表面を構成する土壌の種類によって変化するが，今回は経験的に以下のようにする.[3)]

$$\gamma=1.0$$
$$\alpha=1.0\times10^{-6}(m/s) \quad (2)$$

ある土粒子 i について，時刻 k での侵食速度 E_i^k を式(1)より求め，時刻 k での時間刻み幅 Δt^k を用いて，土粒子 i の時刻 k における侵食量 $\Delta\eta_i^k$ を求める．

キーワード　粒子法，堤防，越流破壊，数値解析
連絡先　〒606-8502　京都府京都市左京区北白川追分町　京都大学 農学研究科　ＴＥＬ075-753-6152

この侵食量を時間の経過ごとに加えていき，式(3)に示す侵食量の和$\Delta\eta_i$が粒子間距離 8㎜，すなわち粒子１つ分の大きさより大きくなった時点で土粒子iが水粒子により侵食され，水粒子と共に流されるように設定した．

$$\Delta\eta_i = E_i^k \times \Delta t^k + E_i^{k+1} \times \Delta t^{k+1} + \cdots \quad (3)$$

このように設定して得られた破壊過程の様子を図 1～3（ケース 0）に示す．図に見られる様に実験では鉛直に切り立った面が下流から上流へと移動して破壊した．以上のことから，土粒子と水粒子との相対速度に浸食を受けている時間とその間に生じる侵食量を考慮することによって，越流による堤体の侵食破壊を表現できることが分かった．

４．パラメトリックスタディ

上述の結果を基準(図 1～3)として，流量や破壊基準を変化させ，解析結果の比較を行う．比較実験においては流量を 0.5 倍にし，上述と同じ破壊基準を用いたケース 1，侵食量の和$\Delta\eta_i$が粒子間距離 8㎜ を上回った時点で土粒子を侵食させるという破壊基準であったものを 2 倍の 16㎜ を上回った時点で土粒子を侵食させる破壊基準にし，ケース 0 と同じ流量で計算したケース 2 を検討して，ケース 1 の結果を図 4～6，ケース 2 の結果を図 7～9 に示す．ケース 0 の結果と比べると，同じような侵食状況になるまでに要する時間は流量を変化させた場合，破壊基準を変化させた場合どちらにおいてもおよそ 1.5 倍かかっている．またケース 1 では，鉛直に切り立った面の高さが始め低く、徐々に深くなった．この傾向は，越流流量を減少させた実験結果と調和している．

５．おわりに

粒子法を用いて解析を行った結果，越流による堤体の侵食破壊を概ね表現できることが分かった．今後は侵食される時間と侵食された土粒子の数と位置の関係などを明らかにし，侵食を軽減させる対策への一助としたい．

参考文献

1) 越塚誠一　計算力学レクチャーシリーズ 5 粒子法，丸善株式会社，pp.1-50，2005．
2) 桃木昌平，その他　ため池堤防越流破壊に関する実験的検討，第 41 回地盤工学研究発表会（投稿中）．
3) 泉典洋　水路群発生の線形安定論－斜面下流端からの発生理論－，土木学会論文集，No.614/II-46，pp.65-75，1999

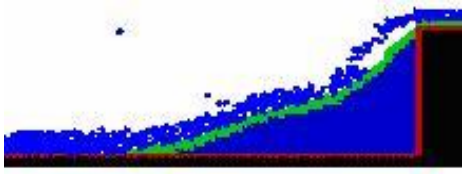

図 1　ケース 0　5.0 秒後

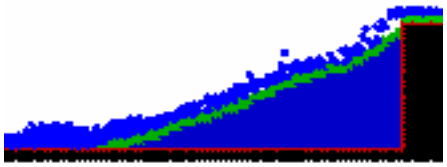

図 4　ケース 1　5.0 秒後

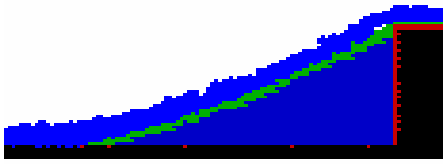

図 7　ケース 2　5.0 秒後

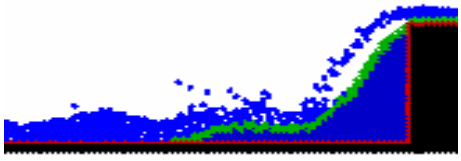

図 2　ケース 0　7.0 秒後

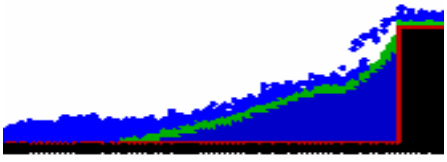

図 5　ケース 1　7.0 秒後

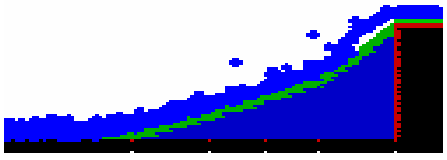

図 8　ケース 2　7.0 秒後

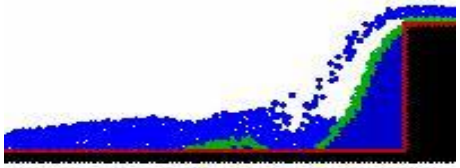

図 3　ケース 0　10.0 秒後

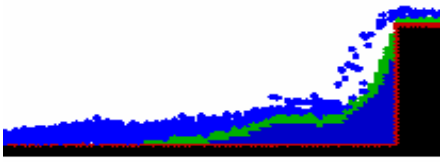

図 6　ケース 1　10.0 秒後

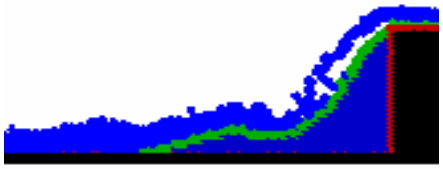

図 9　ケース 2　10.0 秒後