

京都大学工学部 学生員 ○反保 朋也
 京都大学工学研究科 正会員 五十里 洋行
 京都大学工学研究科 正会員 後藤 仁志

1. はじめに

水災害の最たる洪水への対策として、堤防の構築・強化は最も効果的な対策の一つといえ、また逆に、破壊は洪水において致命的な被害をもたらす。よって、堤体を経済的に構築・管理していく上で、堤体の破壊メカニズムの理解は極めて重要である。本研究では、MPS法の流体-地盤連成モデルを用いることで、浸透破壊模型実験¹⁾のシミュレーションを行い、モデルの妥当性を検討する。

2. 数値解析手法

(1) 流体-地盤連成モデル²⁾

流体・弾塑性体(地盤)の各運動方程式は、相互作用項を用いて表すと、以下ようになる。なお、添字 l , s はそれぞれ流体, 弾塑性体を表している。

$$\gamma \rho_l \frac{D\mathbf{u}_l}{Dt} = -\gamma \nabla p_l + \gamma \mu_l \nabla^2 \mathbf{u}_l + \gamma \rho_l \mathbf{F} - D_{ls}(\mathbf{u}_l - \mathbf{u}_s) \quad (1)$$

$$(1-\gamma) \rho_s \frac{D\mathbf{u}_s}{Dt} = -\nabla \sigma + (1-\gamma) \nabla p_l + (1-\gamma) \rho_s \mathbf{F} + D_{ls}(\mathbf{u}_l - \mathbf{u}_s) \quad (2)$$

$$\sigma = \lambda \text{tr}(\boldsymbol{\varepsilon} - \boldsymbol{\varepsilon}^p) + 2\mu(\boldsymbol{\varepsilon} - \boldsymbol{\varepsilon}^p) \quad (3)$$

ここに γ : 間隙率, $\mathbf{u}$: 流速ベクトル, p_l : 圧力, μ_l : 粘性係数, σ : 応力テンソル, λ, μ : ラメの定数, $\boldsymbol{\varepsilon}$: ひずみテンソル, $\boldsymbol{\varepsilon}^p$: 塑性ひずみテンソル, ρ_l, ρ_s : 密度であり, D_{ls} は透水係数 k , 重力加速度 $\mathbf{g}$ を用いて,

$$D_{ls} = \frac{\gamma^2 \rho_l \mathbf{g}}{k} \quad (4)$$

と定義する。式中の微分演算子はすべて MPS法の粒子間相互作用モデルを用いて離散化される。地盤粒子間の相互作用は、水粒子と異なり、初期に周囲に存在する近傍粒子との接続を保ったまま計算が行われる。ただし、塑性ひずみが大きくなった粒子については、

その粒子間接続を切断し、水粒子と同様に、その時々周囲の近傍粒子と相互作用計算を行う。

なお、弾塑性計算には陽解法が用いられるので、半陰解法が用いられる流体計算と比較して、より小さな計算時間間隔をとらなければならない。具体的には、 $10^{-1} \sim 10^{-2}$ 倍のオーダーの計算時間間隔を必要とする。すなわち、1回の流体計算に対して数十回の弾塑性計算を行う。

3. 堤体の浸透破壊過程のシミュレーション

(1) 実験・数値シミュレーション概要

本計算では、浸透破壊模型実験を参考に、堤体の崩壊直前の水面・湿潤面境界を初期条件として計算を開始する。また、堤体内の水粒子に関しては、水粒子と土粒子とをオーバーラップさせて計算を行っている。図-1に初期条件、表-1に土質パラメータを表す。

(2) 実験および計算結果

図-2に数値シミュレーション結果のスナップショットを示す。図-2から土塊が局所的に崩壊しながら滑っ

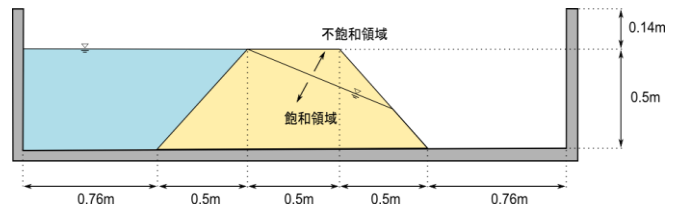


図-1 初期条件

弾性係数 $E(\text{kN/m}^2)$	2.5×10^3
粘着力 $c(\text{kN/m}^2)$	1.15
内部摩擦角 $\phi(\text{deg})$	15.0
密度 $\rho(\text{kg/m}^3)$	1.97×10^3
ポアソン比 ν	0.30
ダイレンタンシー角 $\psi(\text{deg})$	15.0
透水係数 $k(\text{cm/s})$	8.3×10^{-2}

表-1 土質パラメータ

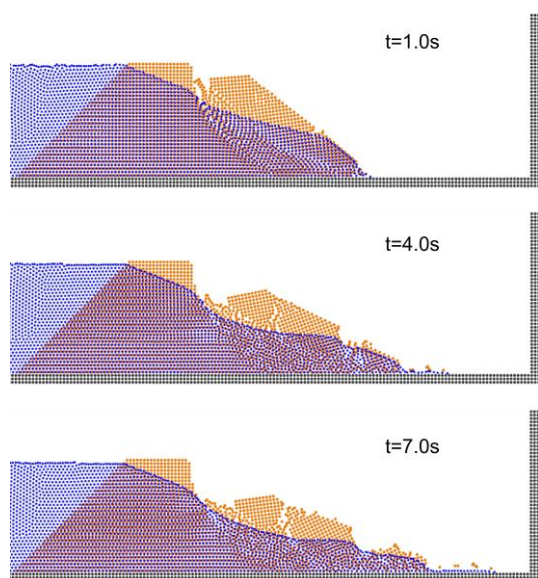


図-2 堤体の浸透破壊過程($t=1.0-7.0s$)

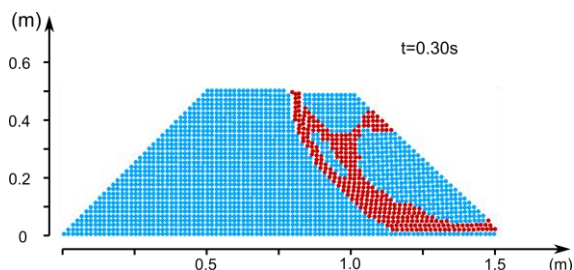


図-3 すべり面($t=0.30s$)

ていく様子が確認できる。土塊がすべり始めると、まず、堤体裏法尻付近において、局所的な破壊が発生して崩落土塊が分裂し($t=1.0s$)、その後、裏法面上部においても徐々に崩落土塊が分断される。

また、図-3 に $t=0.30s$ の粒子間接触の状態の分布を示す。図中の濃色で示された部分は、粒子間接触が切られた粒子であり、図から土塊の崩落が発生するまでに、主に2つのすべり面が堤体内において発生している様子が確認できる。このうち、堤体法肩近辺のすべり面について、各箇所破壊が始まる直前の $t=0.017s$ における水平応力とせん断応力の分布(図-4)を見てみると、堤体内部では引張応力が、堤体表面では負のせん断応力がそれぞれ大きくなっていることが確認できる(図中の点線円)。これは、この地点より右下側の土塊が上部の土塊に先んじて右側に反時計回りに動いた結果であると考えられる。

また、堤体裏法尻から天端にかけて発生したすべり面を、堤体の初期形状を基準として、実験結果と比較したものを図-5に示す。本計算で得られたすべり面は、

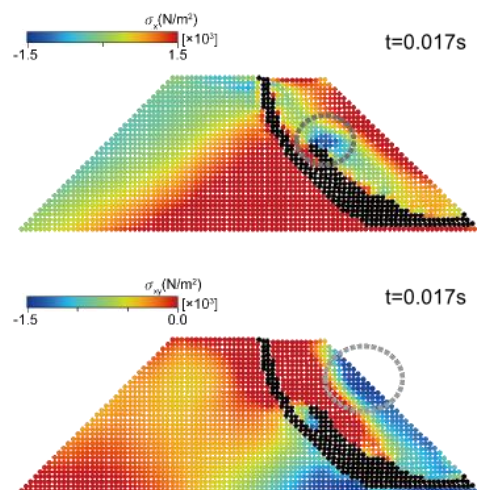


図-4 水平応力分布(上图)およびせん断応力分布(下图)

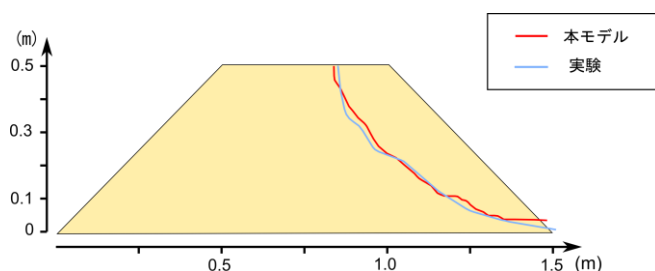


図-5 すべり面の形状に関する実験との比較

実験結果と良好に一致していることが確認できる。

4. おわりに

流体-弾塑性体連成解析モデルを用いて、堤体部の浸透流の影響を考慮することにより、堤体の浸透破壊現象の再現を試みた。浸透破壊の再現においては、浸透流による強度低下により、土塊の滑落、すべり面が発生することが確認でき、堤体内のすべり面や土塊の崩壊挙動についても、概ね良好な結果を得ることができた。今後は、激しい流れ場を解く必要がある越流破壊解析にも適用していきたい。

参考文献

- 1) 八木啓介, 中村孝博, 大塚悟, 磯部公一: 浸透破壊に対する河川堤防の安定性に関する模型実験と数値シミュレーション, 第27回土木学会関東支部新潟会研究調査発表会論文集, 1巻, 1号, pp.164-165, 2009
- 2) 五十里洋行, 後藤仁志, 吉年英文: ケーソン式混成堤の大変形解析のための改良型弾塑性 MPS 法の基礎的検討, 土木学会論文集 B2(海岸工学), Vol.67, No.2, pp.731-735, 2011.