

DOI: 10.11779/CJGE201802006

水土耦合 SPH 数值模型的正则化修正及其应用

张卫杰^{1, 2}, 高玉峰^{1, 2}, 黄雨³, 前田健一⁴

(1. 河海大学岩土力学与堤坝工程教育部重点实验室, 江苏 南京 210098; 2. 河海大学土木与交通学院岩土工程研究所, 江苏 南京 210098;
3. 同济大学地下建筑与工程系, 上海 200098; 4. 名古屋工业大学土木工程系, 名古屋 466-8555)

摘要: 传统光滑粒子流体动力学 (smoothed particle hydrodynamics, 简称 SPH) 方法的光滑粒子近似在粒子数量不足的区域可能导致场函数及其梯度的不合理评价, 从而引起物理量的非正常波动, 即张力不稳定问题 (tensile instability)。针对当前研究较少关注岩土工程 SPH 方法精度问题的现状, 提出了一种基于正则化修正的水土耦合 SPH 数值模型, 较好地避免了张力不稳定问题。在提出的模型中, 根据 Biot 固结原理将固相 (土骨架) 和液相 (孔隙水) 分配到不同的计算层, 同时通过状态方程计算液相的压力变化, 采用弹性模型描述土骨架的应力-应变关系。在三维水体溃坝模型的模拟、无地下水和有地下水的堤防自重应力分析中应用了提出的 SPH 模型, 并对比分析了有限元、未修正 SPH 和修正 SPH 计算结果, 表明基于正则化修正的 SPH 模型较未修正模型具有更好的精度, 为 SPH 方法在岩土体渐进式破坏问题上的应用提供了重要的参考意义。

关键词: 光滑粒子流体动力学; 张力不稳定; 水土耦合; 正则化修正

中图分类号: TU43

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2018)02-0262-08

作者简介: 张卫杰 (1986 -), 男, 讲师, 主要从事岩土工程数值模拟等方面的教学和科研。E-mail: zhangwj2016@hhu.edu.cn。

Normalized correction of soil-water-coupled SPH model and its application

ZHANG Wei-jie^{1, 2}, GAO Yu-feng^{1, 2}, HUANG Yu³, MAEDA Kenichi⁴

(1. MOE Key Laboratory of Geomechanics and Embankment Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. Geotechnical Research Institute, College of Civil and Transportation Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 3. Department of Geotechnical Engineering, Tongji University, Shanghai 200098, China; 4. Department of Civil Engineering, Nagoya Institute of Technology, Nagoya 466-8555, Japan)

Abstract: The smoothing approximation in the traditional smoothed particle hydrodynamics (SPH) method often leads to an unreasonable evaluation of field variables and their gradients in areas of boundary, free surface and interface of phases, called as the tensile instability that accounts for the fluctuations of pressure and stress. For the lack of researches on the accurate SPH model in geotechnical engineering, this research proposes a water-soil-coupled SPH model that is treated by the normalized correction and can avoid the tensile instability to some extent. In the proposed model, liquid phase (pore water) and solid phase (soil skeleton) are assigned to different layers according to the Biot's theory of consolidation, the pressure of the liquid phase is calculated based on the equation of state, and the elastic model is used to describe the mechanical behavior of soil skeleton. The proposed SPH model is applied to the analysis of 3D dam-break case, geostatic stress states of a dike model without or with groundwater. By comparing the results of the corrected SPH model, uncorrected SPH model and FEM analysis, it has been proved that the corrected SPH model with good agreement with the FEM simulation has a better performance than the uncorrected model, and this research can provide several insights for the application of SPH method in geotechnical engineering.

Key words: smoothed particle hydrodynamics; tensile instability; water-soil coupling; normalized correction

0 引言

近年来逐步发展起来的光滑粒子流体动力学方法 (smoothed particle hydrodynamics, 简称 SPH) 在模拟材料的大变形运动、自由界面以及变形边界等方面具有独特的优势, 因此在岩土工程领域得到了一定的

应用^[1]。

在边坡破坏研究方面, McDougall 等^[2]、Huang

基金项目: 国家自然科学基金重点项目 (41630638); 中央高校基本科研业务费专项资金项目 (2016B01314)

收稿日期: 2016-07-11

等^[3-5]、戴自立等^[6]、胡嫚等^[7]、Pastor 等^[8]将 SPH 方法与流体模型结合, 对流态性滑坡的大变形运动过程进行了数值模拟。在边坡稳定性分析方面, Bui 等^[9]、Nonoyama 等^[10]、Peng 等^[11]在 SPH 方法中引入弹塑性模型, 对边坡的稳定性进行了研究, 展示了 SPH 方法在边坡稳定性分析上的应用前景。Zhang 等^[12-13]提出了多相耦合 SPH 数值模型, 并将其应用在堤防渗流破坏研究上。Huang 等^[14-15]分别采用宾汉姆流体模型、水土两相 SPH 模型对液化后土体的大变形流动过程进行了数值分析, 揭示了大变形运动的动力学特征。在城市固体废弃物流滑灾害研究方面, Huang 等^[3]采用宾汉姆流体模型进行了研究, 得到了运动构型、运动距离等动力学特征。

可见, 越来越多的学者开始在 SPH 方法的框架中引入弹塑性模型, 建立水土两相耦合模型研究岩土工程中的复杂问题, 并取得了一些有价值的成果。但是, SPH 方法作为一种基于光滑粒子近似的无网格方法, 在边界面、自由面和各相交界面等粒子数量不足的区域可能导致场函数及其梯度的不合理评价, 从而引起物理量的非正常波动, 即张力不稳定问题^[16]。已有的研究很少关注 SPH 计算方法的精度问题, 因此需要对高精度 SPH 计算方法进行研究, 提高计算精度。本研究基于 Biot 固结原理提出了一种水土耦合 SPH 数值模型, 采用正则化修正在一定程度上解决了张力不稳定问题。提出的模型被应用于三维水体溃坝流动模拟、有无地下水的堤防自重应力分析中, 通过对比分析有限元、未修正 SPH 和修正 SPH 计算结果, 验证与确认了本文水土耦合 SPH 模型的精度。

1 水土耦合 SPH 数值模型

SPH 的基本思想是将空间连续的实体离散成一系列的质点, 实体运动、变形等所有信息由这些质点承载, 同时追踪每个质点的运动, 无网格及质点间相互作用的特点使其更易处理大变形问题, 从而消除了传统拉格朗日方法中的网格畸变和扭曲等问题^[17]。

SPH 方法的核心问题包括函数的光滑近似逼近(宏观变量函数用积分形式表示)和粒子近似逼近(参考粒子的运动信息由影响半径内粒子的信息加权平均近似)^[18], 如图 1 所示。函数及其导数的光滑粒子近似可以表示为

$$\langle f(x) \rangle = \sum_{j=1}^N m_j \frac{f_j(x_j)}{\rho_j} W(x - x_j, h), \quad (1)$$

$$\frac{\partial \langle f(x) \rangle}{\partial x_i} = \sum_{j=1}^N \frac{m_j}{\rho_j} f_j(x_j) \frac{\partial W(x - x_j, h)}{\partial x_i}. \quad (2)$$

式中, W 为光滑核函数, h 为光滑长度, m 为质量, ρ

为密度, x 为粒子的坐标信息, N 为影响范围内支撑粒子的个数。

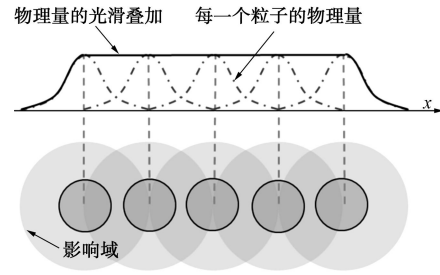


图 1 SPH 方法中的粒子近似

Fig. 1 Particle approximation in SPH method

在提出的水土耦合 SPH 数值模型中, 采用 Biot 固结理论^[18]将孔隙水与土骨架分配在不同的计算层上, 即液体计算层和固体计算层(如图 2 所示)。不同计算层上的物理量分配如下:

$$\begin{cases} \bar{\rho}^f = n\rho^f \\ \sigma_{mn}^f = np^f \delta_{mn} \end{cases} \quad (\text{孔隙水}), \quad (3)$$

$$\begin{cases} \bar{\rho}^s = (1-n)\rho^s \\ \sigma_{mn}^s = (1-n)p^f \delta_{mn} + \sigma'_{mn} \end{cases} \quad (\text{土骨架}), \quad (4)$$

$$\begin{cases} \rho = (1-n)\rho^s + n\rho^f \\ \sigma = p^f \delta_{mn} + \sigma'_{mn} \end{cases} \quad (\text{总体}). \quad (5)$$

式中 n 为孔隙率; p^f 为孔隙水压力; σ' 为有效应力, ρ^s 为土骨架密度; ρ^f 为水密度; δ_{mn} 为克罗内克函数。

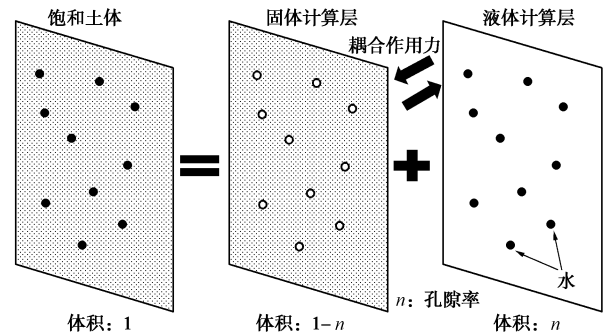


图 2 SPH 模型中的固体计算层和液体计算层

Fig. 2 Calculating layers of solid and liquid in SPH model

SPH 方法的基本控制方程包括连续方程、动量方程和能量方程。由于本研究算例都假设为等温条件, 所以在这里不考虑能量方程。针对液相(孔隙水)和固相(土骨架), 连续方程可以表示为

$$\frac{d\bar{\rho}_i}{dt} = \sum_{j=1}^N m_j (v_{im} - v_{jm}) \frac{\partial W_{ij}}{\partial x_{im}}, \quad (6)$$

式中, W_{ij} 为粒子 j 在粒子 i 处的光滑核函数, v 为速度, m 和 n 为坐标轴, i 和 j 为粒子指标。

动量方程由牛顿第二定律推导得出, 孔隙水的动量方程如下所示:

$$\frac{dv_{im}^f}{dt} = \sum_{j=1, j \in \text{water}}^N m_j \left(\frac{\sigma_{imn}^f}{(\bar{\rho}_i^f)^2} + \frac{\sigma_{jmn}^f}{(\bar{\rho}_j^f)^2} \right) \frac{\partial W_{ij}}{\partial x_{in}} + F_i + \frac{R_{im}^{sf}}{\bar{\rho}_i^f}, \quad (7)$$

式中, σ_{mn}^f 为孔隙水的应力张量, m 和 n 为坐标轴, i 和 j 为粒子指标, F_i 为外力, R^{sf} 为土骨架施加在孔隙水上的耦合作用力。

众所周知, 水是不可压缩的流体, 但是不可压缩流体的计算难度较大, 因此须引入“人工压缩率”将水视作一种假想的可压缩流体^[19], 建立状态方程为

$$p_d^f = p_0^f \left[\left(\frac{\bar{\rho}^f}{\bar{\rho}_0^f} \right)^{7.0} - 1 \right], \quad (8)$$

式中, p_0^f 为初始压力, p_d^f 为压力的变化量, $\bar{\rho}_0^f$ 为孔隙水的初始参考密度, $\bar{\rho}^f$ 为连续方程计算得到的密度。指数 7.0 可以较好地描述水的不可压缩性, 即较小的密度变化就能产生较大的压力变化。同时引入黏滞系数, 得到孔隙水应力张量的计算公式^[20]:

$$\sigma_{mn}^f = n[-(p_d^f + p_0^f)\delta_{mn} - \frac{2}{3}\nu\dot{\epsilon}_{il}\delta_{mn} + 2\nu\dot{\epsilon}_{mn}]. \quad (9)$$

式中 ν 为黏滞系数, $\dot{\epsilon}$ 为应变变化率, 可以由下式获得

$$\dot{\epsilon}_{imn} = \frac{1}{2} \sum_{j=1}^N \frac{m_j}{\bar{\rho}_j} \left[(v_{im} - v_{jm}) \frac{\partial W_{ij}}{\partial x_n} + (v_{in} - v_{jn}) \frac{\partial W_{ij}}{\partial x_m} \right]. \quad (10)$$

土骨架的动量方程可以表示为

$$\frac{dv_{im}^s}{dt} = \sum_{j=1, j \in \text{soil}}^N m_j \left(\frac{\sigma_{imn}^s}{\bar{\rho}_i^s} + \frac{\sigma_{jmn}^s}{\bar{\rho}_j^s} - \delta_{mn} \Pi_{ij} + f_{ijmn} \right) \frac{\partial W_{ij}}{\partial x_{in}} + F_i + \frac{R_{im}^{fs}}{\bar{\rho}_i^s}. \quad (11)$$

式中, σ_{mn}^s 为土骨架的总应力张量, m 和 n 为坐标轴, i 和 j 为粒子指标, F_i 为外力, R^{fs} 为孔隙水施加在土骨架上的耦合作用力。人工黏度项 Π_{ij} 被用来防止粒子的非物理穿透, 计算方法在文献[21]中列出。

为了便于计算和对比, 土骨架的力学行为采用弹性模型描述。弹性模型的应力应变关系可以表示为

$$\dot{\sigma}_{ij}^e = D_{ijkl}^e \cdot \dot{\epsilon}_{kl}^e. \quad (12)$$

对于平面应变问题,

$$D_{ijkl}^e = \begin{bmatrix} \lambda + 2\mu & \lambda & \lambda & 0 \\ \lambda & \lambda + 2\mu & \lambda & 0 \\ \lambda & \lambda & \lambda + 2\mu & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \mu \end{bmatrix}, \quad (13)$$

$$\lambda = \frac{\nu E}{(1+\nu)(1-2\nu)}, \quad (14)$$

$$\mu = \frac{E}{2(1+\nu)}, \quad (15)$$

式中, E 为弹性模量, ν 为泊松比。由弹性模型计算得到的有效应力代入式(4)中, 可以得到土骨架的总

应力张量。

水土之间的耦合作用力计算表达式为

$$R_{im}^{sf} = \sum_{j=1 \in \text{soil}}^N m_j \frac{R_{ijm}}{\rho_j} W_{ij}, R_{ijm} = n^2 \frac{\rho^w g}{k_j} (v_{jm}^s - v_{im}^f), \quad (16)$$

$$R_{im}^{fs} = \sum_{j=1 \in \text{water}}^N m_j \frac{R_{ijm}}{\rho_j} W_{ij}, R_{ijm} = n^2 \frac{\rho^w g}{k_i} (v_{jm}^f - v_{im}^s), \quad (17)$$

式中, n 为孔隙率, k 为渗透系数, g 为重力加速度。

本研究采用 3 次样条函数作为光滑核函数, 其表达式为

$$W(s, h) = \alpha_d \begin{cases} \frac{2}{3} - s^2 + \frac{1}{2}s^3 & (0 \leq s \leq 1) \\ \frac{1}{6}(2-s)^3 & (1 \leq s \leq 2) \\ 0 & (s \geq 2) \end{cases}. \quad (18)$$

式中, $s = |x - x_j|/h$, α_d 在二维条件下为 $15/(7\pi h^2)$, 在三维条件下为 $3/(2\pi h^3)$ 。

链表搜索方法因其较高的精度和效率被用作邻近支撑粒子的搜索方法, 时间积分方法采用二阶龙格库塔积分方法。另外, 本文模型采用 Takeda 等^[20]和 Morris 等^[22]的边界处理方法计算边界粒子对自由粒子的阻挡效应, 该方法假定边界粒子对自由粒子速度的影响与它们之间的速度差、相对距离相关。

2 张力不稳定及正则化修正

传统的 SPH 光滑近似(公式(1))和粒子近似(公式(2))在边界面、自由面和各相交界面等位置将会导致场函数的不合理评价, 从而引起物理量的非正常波动, 即张力不稳定, 表现为当粒子之间的应力为张力时, 粒子会相互吸引, 形成大量粒子的团聚^[21], 使得不同区域的应变计算出现波动, 呈现出不同大小应变和应力互层的现象。Swegle 等^[23]采用 Von Neumann 判据对张力不稳定进行了研究, 发现造成不稳定的根本原因是核插值改变了粒子之间的本构关系, 进而改变了原始偏微分方程的性质。Vignjevic 等^[16]、Johnson 等^[24]采用的正则化修正方法有效地保证了近似的线性一致性, 在一定程度上解决了张力不稳定问题。Chen 等^[25]在正则化修正的基础上提出了 CSPM (corrective smoothed particle method) 方法, 其在求解域内具有二阶精度, 在边界处具有一阶精度。这些研究多集中在力学、航空、航天等领域, 正则化修正在岩土工程中的研究却很少见。

根据 Vignjevic 等^[16]的研究, 宏观函数光滑近似的正则化修正可以表示为

$$f(x) = \frac{\int_A f(x)W(x-x_j, h)dx}{\int_A W(x-x_j, h)dx}, \quad (19)$$

式中, A 为影响域。

由此可以得到粒子近似的正则化修正表达式:

$$\langle f(x) \rangle = \frac{\sum_{j=1}^N m_j \frac{f_j(x_j)}{\rho_j} W(x-x_j, h)}{\sum_{j=1}^N \frac{m_j}{\rho_j} W(x-x_j, h)}, \quad (20)$$

其偏微分形式可以表示为

$$\frac{\partial \langle f(x) \rangle}{\partial x_i} = \frac{\sum_{j=1}^N \frac{m_j}{\rho_j} [f_j(x_j) - f_i(x_i)] \frac{\partial W_{ij}}{\partial x_i}}{\sum_{j=1}^N \frac{m_j}{\rho_j} (x_j - x_i) \frac{\partial W_{ij}}{\partial x_i}}. \quad (21)$$

使用式 (20)、(21) 可以完成对连续性方程和动量方程的正则化修正, 实现对粒子密度、应变、应力、加速度、速度等的合理加权平均, 避免对物理量的过大或过小评价, 同时结合式 (11) 中的人工黏度项和 CFL (Courant-Friedrichs-Lewy) 积分收敛条件, 能够在一定程度上避免压力、应力等的波动现象, 解决张力不稳定问题。

3 三维水体溃坝的 SPH 数值模拟

为了验证本文 SPH 数值模型在模拟水体流动上的精度, 本研究将其应用在三维水体溃坝的大变形流动模拟中。三维水体溃坝的离散模型如图 3 所示, 在初始状态, 水体静止不动, 计算开始后, 在重力作用下运动。边界粒子在整个模拟过程中始终保持静止。水粒子总数为 18081, 密度为 1000 kg/m^3 , 黏度为 $0.001 \text{ Pa}\cdot\text{s}$, 总步数为 3000 步, 单位时间步长为 0.0001 s 。

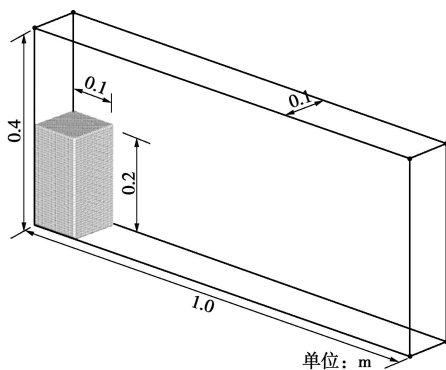


图 3 三维水体溃坝的 SPH 离散模型

Fig. 3 SPH discrete model of 3D water dam-break

图 4 是未修正 SPH 数值模型计算得到的水体在 2000 步和 3000 步的流动构型, 图 5 则是修正 SPH 数值模型计算得到的流动构型。可以看出, 未修正 SPH 得到的流动距离较修正 SPH 模型远, 而修正 SPH 模

型的粒子排列更加整齐。这是因为正则化修正使得压力、加速度、速度等物理量的评价更加平均, 导致粒子分布的整齐程度提高, 流动距离相应地减少。

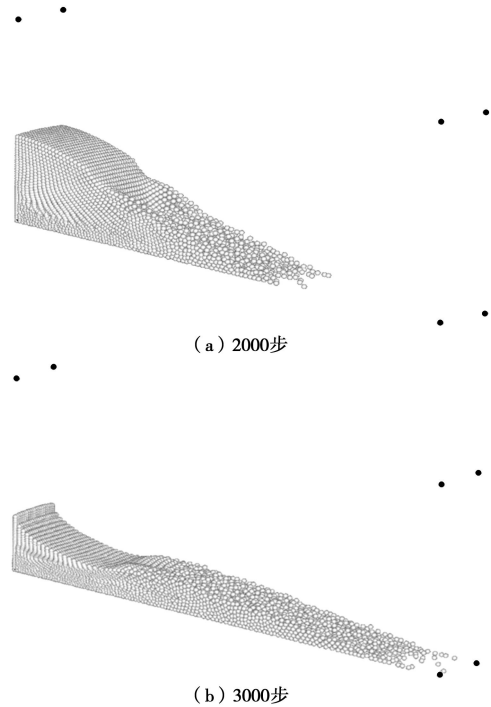


图 4 未修正 SPH 数值模型计算得到的流动构型

Fig. 4 Flowing configurations of uncorrected SPH model

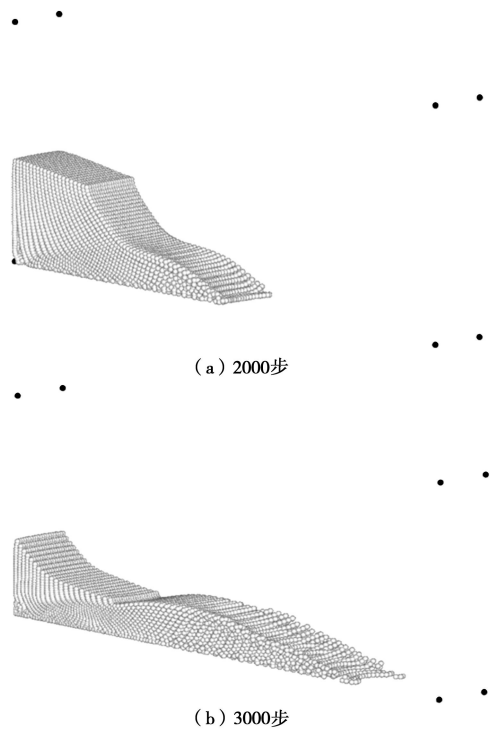


图 5 修正 SPH 数值模型计算得到的流动构型

Fig. 5 Flowing configurations of corrected SPH model

为了更好地说明修正 SPH 模型的准确度, 采用 Martin 等^[26]提供的经验公式和试验数据作为参照标

准, 将对比结果显示在图 6 中。图 6 中, $T=t(2g/L)^{-0.5}$ 是转换后的无量纲流动时间, $Z=X/L$ 为转换后的无量纲流动距离, X 为计算得到的流动距离, L 是水体的底部宽度 (0.1 m)。未修正 SPH 计算结果和修正 SPH 计算结果的运动距离在流动后期都比参考标准大, 但是修正 SPH 的计算结果更加接近经验公式的计算结果, 具有更好的精确性。

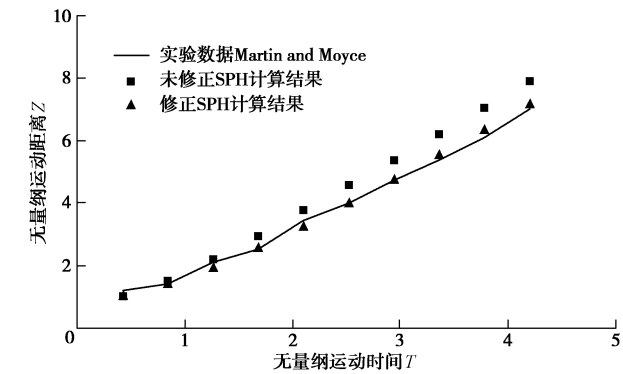


图 6 三维水体流动距离的对比
Fig. 6 Comparison of flowing distances of 3D dam-break

4 堤防自重应力的 SPH 数值分析

本文将提出的水土耦合 SPH 数值模型应用到了堤防渐进式破坏研究中的必要环节——自重应力分析上, 并使用 DBLeaves 有限元程序^[27]作为对照的标准。本节的数值模拟考虑了两种工况: 无地下水的工况和有地下水的工况。堤防模型的尺寸、SPH 离散后的粒子分布及有限单元网格显示在图 7 中。

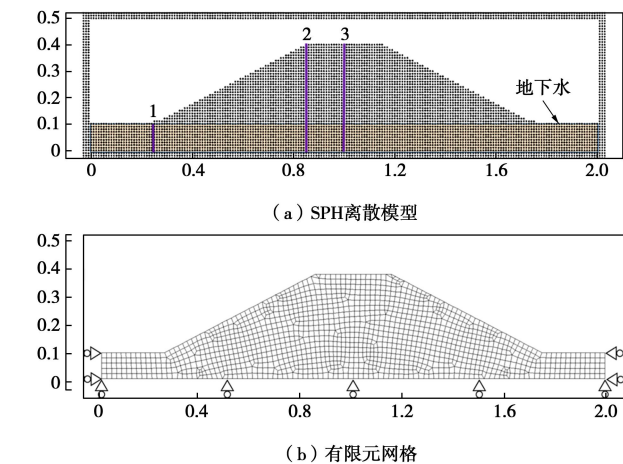


图 7 堤防算例的 SPH 离散模型和有限元网格
Fig. 7 SPH discrete model and FEM mesh of dike

SPH 离散模型有 1542 个边界粒子, 4885 个土粒子, 2211 个地下水粒子, 计算总步数为 30000 步, 单位时间步长为 2.0×10^{-5} s。FEM 离散模型中有 1418 个节点, 1303 个四节点单元, 9 个 3 节点单元。具体的计算参数见表 1。

表 1 计算参数

Table 1 Calculation parameters					
土颗粒密度 /(g·cm ⁻³)	弹性模量 /MPa	泊松比	孔隙比	水密度 /(g·cm ⁻³)	黏度 /(Pa·s)
2.644	0.1	0.25	0.727	1.0	0.001

图 8 为无地下水工况堤防在 30000 步的垂直应力分布云图 (单位: Pa), 分别显示了有限元、未修正 SPH 和修正 SPH 计算结果, 方框处的局部扩大图展示在图 9 中。可以看出, 未修正和修正 SPH 计算结果在总体上跟有限元计算结果比较吻合, 堤防的表面垂直应力较小, 堤防内部的垂直应力较大。但是, 从细节上, 未修正 SPH 数值模型的垂直应力在边界附近呈现出不同应力互层的现象, 即应力波动, 主要原因是边界处支撑粒子数量不足, 光滑粒子近似的精度不够, 使得物理量的光滑性和连续性得不到保证。与之相对的是, 修正 SPH 模型在很大程度上减少了不同应力互层的现象, 避免了应力波动问题。

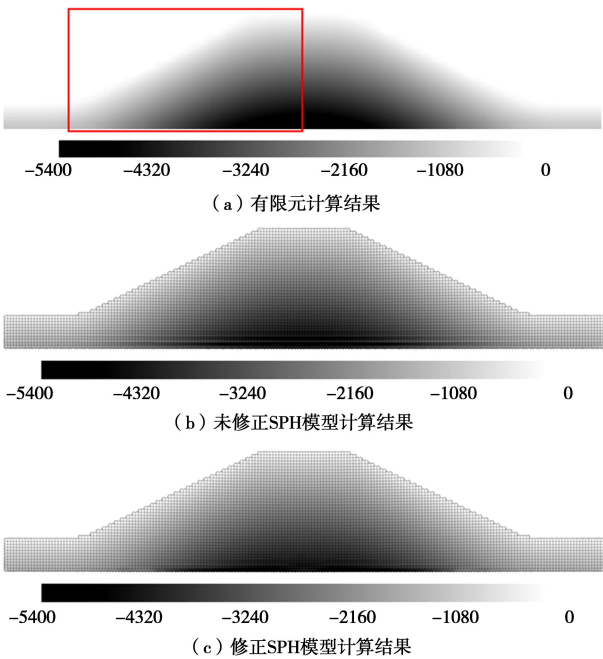


图 8 无地下水堤防的垂直应力分布图
Fig. 8 Distribution of vertical stress of dike without groundwater

图 10 为无地下水堤防在 30000 步的 3 个截面 (如图 7 所示) 垂直应力随深度的变化曲线, 分别显示了有限元、未修正 SPH 和修正 SPH 计算结果。垂直应力随着深度呈线性增加, 在堤防的顶部区域, SPH 计算结果与 FEM 计算结果较为相符, 但是随着深度增加出现了偏差。尽管如此, SPH 计算结果表现出来的垂直应力随着深度的变化规律和趋势与 FEM 计算结果一致。比较未修正 SPH 和修正 SPH 的计算结果, 可以看出未修正 SPH 得到的曲线在堤防底部边界区域出现了明显的波动现象, 并且随着深度增大, 波动

幅度也在增大, 这与图 8, 9 的现象一致。修正 SPH 模型的曲线波动幅度小得多, 说明了正则化修正 SPH 模型能够提高光滑近似在边界处的精度和效率, 在一定程度上避免张力不稳定带来的应力波动问题。

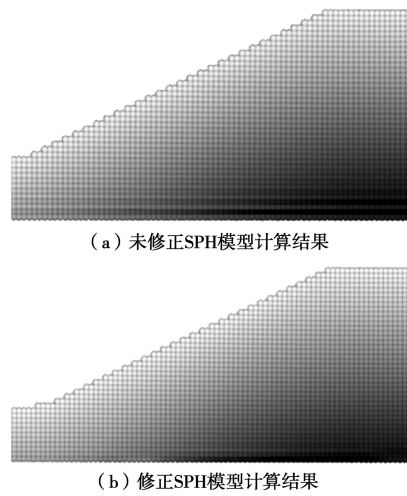


图 9 垂直应力分布图的局部放大

Fig. 9 Locally enlarged distribution of vertical stress

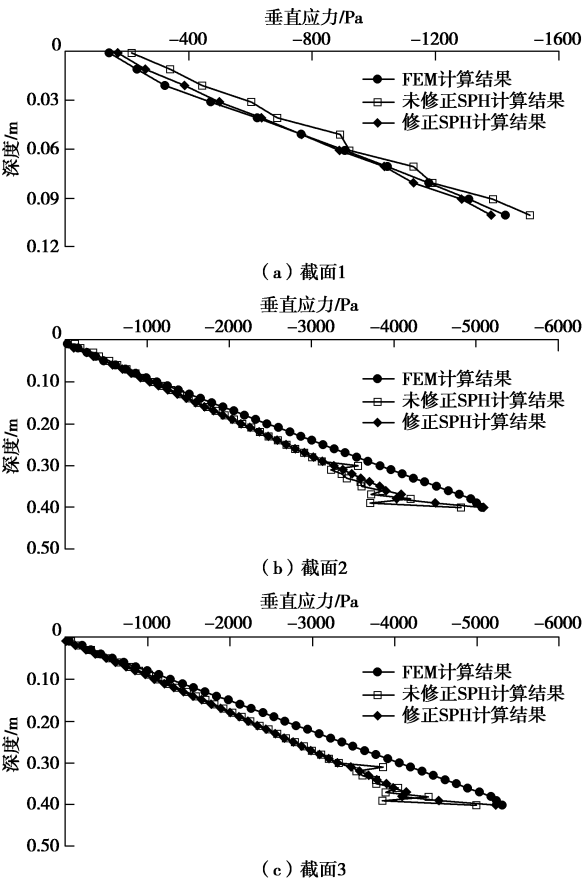


图 10 无地下水堤防垂直应力随深度的变化规律

Fig. 10 Relation between vertical stress and depth of dike without groundwater

无地下水堤防在 30000 步的水平应力分布云图显示在图 11 中 (单位: Pa)。其中, 水平应力在堤防坡

脚及两边的基底层附近达到较大值, 中间区域的水平应力最小。另外, 修正 SPH 模型比未修正模型更接近于有限元计算结果, 表明正则化修正 SPH 模型的精度较未修正模型有了一定的提高。

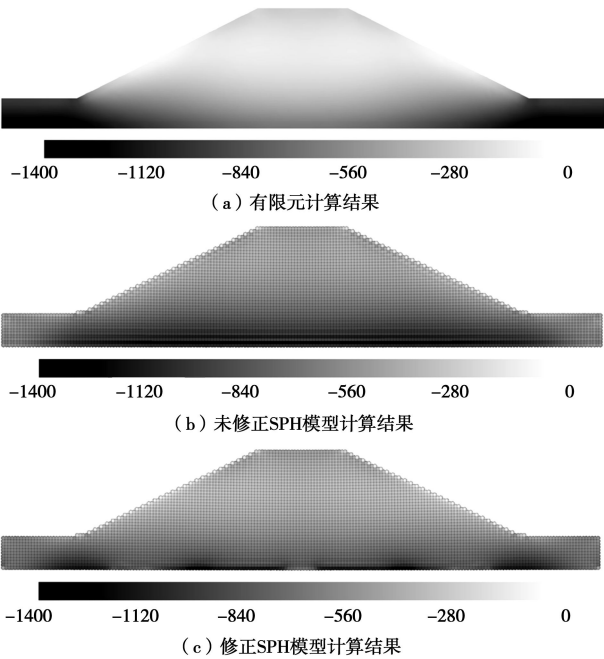


图 11 无地下水堤防的水平应力分布图

Fig. 11 Distribution of lateral stress of dike without groundwater

有地下水工况下未修正 SPH 模型和修正 SPH 模型在 30000 步的堤防垂直应力分布云图显示在图 12 中 (单位: Pa)。由于孔隙水压力的作用, 堤防的最大垂直应力较无地下水工况小。从细节上, 未修正 SPH 数值模型的垂直应力在底部边界附件呈现出应力波动现象, 而修正 SPH 模型在很大程度上避免了这种现象。

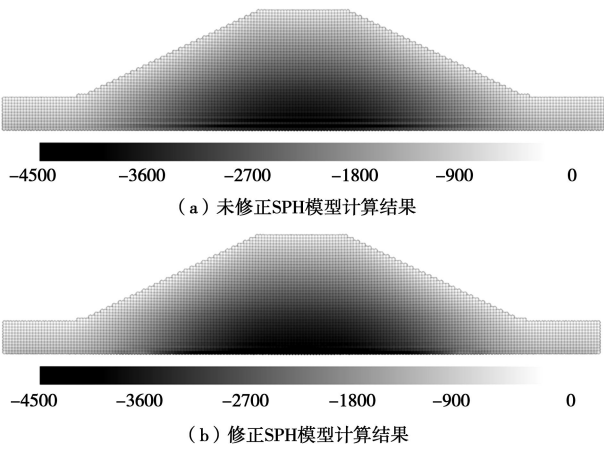


图 12 有地下水堤防的垂直应力分布图

Fig. 12 Distribution of vertical stress of dike with groundwater

图 13 是有地下水工况堤防截面 3 (如图 7 所示) 的垂直应力随深度的变化曲线 (30000 步)。可以看出,

垂直应力随着深度呈线性增加, 地下水位以下垂直应力与无地下水工况相比变小。在堤防的顶部区域, 未修正 SPH 模型和修正 SPH 模型的计算结果较为接近。而在地下水位以下, 未修正 SPH 模型计算得到的垂直应力与深度成波动关系, 并且越接近边界波动幅度越大。与之相对的是, 修正 SPH 计算结果中地下水位以下垂直应力与深度的线性关系依然很明显, 说明了正则化修正的水土耦合 SPH 数值模型能够提高 SPH 方法在边界处的精度和效率。

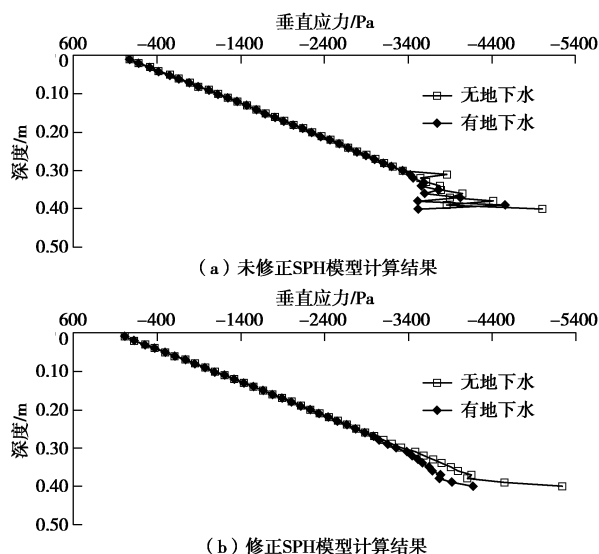


图 13 有地下水堤防垂直应力随深度的变化规律 (截面 3)
Fig. 13 Relation between vertical stress and depth of dike with groundwater (Cross-section 3)

5 结 论

针对传统 SPH 计算方法的张力不稳定问题, 本文提出了一种基于正则化修正的水土两相耦合 SPH 数值模型, 并将其应用于三维水体溃坝的大变形流动模拟、堤防自重应力分析中。得到以下 5 点结论。

(1) 基于 Biot 固结理论将孔隙水与土骨架分配在不同的计算层上, 孔隙水的压力变化由状态方程进行计算, 土骨架的力学行为则由弹性模型描述。

(2) 三维水体溃坝流动模拟中, 正则化修正使得水粒子物理量的评价更加平均, 粒子分布整齐程度提高, 相应地流动距离也更加接近已有文献中的数据。

(3) 无地下水工况和有地下水工况的堤防自重应力分析中, 提出的正则化修正水土耦合 SPH 数值模型提高了 SPH 方法在边界处的精度和效率, 很大程度地避免了张力不稳定问题带来的应力波动现象。

(4) 本研究初步探讨了 SPH 方法中的张力不稳定问题, 并采用正则化修正在一定程度上提高了计算

精度, 为 SPH 方法在岩土体渐进式破坏问题上的应用提供了重要的参考意义。

(5) 未来可以在本文 SPH 方法的基础上进行岩土体渐进式破坏问题的工程实例和防治措施研究, 进一步验证计算精度和揭示破坏机理, 并评判不同防治措施。

参考文献:

- [1] 黄 雨, 郝 亮, 野々山. SPH 方法在岩土工程中的应用进展[J]. 岩土工程学报, 2008, **30**(2): 256 - 262. (HUANG Yu, HAO Liang, NONOYAMA H. The state of the art of SPH method applied in geotechnical engineering[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2008, **30**(2): 256 - 262. (in Chinese))
- [2] MCDUGALL S, HUNGR O. A model for the analysis of rapid landslide motion across three-dimensional terrain[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2004, **41**(6): 1084 - 1096.
- [3] HUANG Y, DAI Z L, ZHANG W J, et al. SPH-based numerical simulations of flow slides in municipal solid waste landfills[J]. Waste Management & Research, 2013, **31**(3): 256 - 264.
- [4] HUANG Y, CHENG H L, DAI Z L, Et al. SPH-based numerical simulation of catastrophic debris flows after the 2008 Wenchuan earthquake[J]. Bulletin of Engineering Geology & the Environment, 2015, **74**(4): 1 - 15.
- [5] HUANG Y, DAI Z L. Large deformation and failure simulations for geo-disasters using smoothed particle hydrodynamics method[J]. Engineering Geology, 2014, **168**(1): 86 - 97.
- [6] DAI Z L, HUANG Y, CHENG H L, et al. 3D numerical modeling using smoothed particle hydrodynamics of flow-like landslide propagation triggered by the 2008 Wenchuan earthquake[J]. Engineering Geology, 2014, **180**: 21 - 33.
- [7] HU M, LIU M B, XIE M W, et al. Three-dimensional run-out analysis and prediction of flow-like landslides using smoothed particle hydrodynamics[J]. Environmental Earth Sciences, 2015, **73**(4): 1629 - 1640.
- [8] PASTOR M, STICKLE M M, DUTTO P, et al. A viscoplastic approach to the behavior of fluidized geomaterials with application to fast landslides[J]. Continuum Mechanics & Thermodynamics, 2013, **27**(1-2): 1 - 27.
- [9] BUI H H, FUKAGAWA R, SAKO K, et al. Lagrangian meshfree particles method (SPH) for large deformation and failure flows of geomaterial using elastic-plastic soil

- constitutive model[J]. International Journal for Numerical & Analytical Methods in Geomechanics, 2008, **32**(12): 1537 - 1570.
- [10] NONOYAMA H, MORIGUCHI S, SAWADA K, et al. Slope stability analysis using smoothed particle hydrodynamics (SPH) method[J]. Soils and Foundations, 2015, **55**(2): 458 - 470.
- [11] PENG C, WU W, YU H S, et al. A SPH approach for large deformation analysis with hypoplastic constitutive model[J]. Acta Geotechnica, 2015, **10**(6): 703 - 717.
- [12] ZHANG W J, MAEDA K. The model test and SPH simulations for slope and levee failure under heavy rainfall considering the coupling of soil, water and air[C]// Proceedings of the Conference of GeoShanghai 2014, Shanghai, 2014(236): 538 - 547.
- [13] ZHANG W, MAEDA K. Numerical simulations of slope and levee failure under heavy rainfall using the three-phase SPH model[J]. Journal of Applied Mechanics JSCE A2, 2014, **70**(2): 483 - 494.
- [14] HUANG Y, ZHANG W J, MAO W W, et al. Flow analysis of liquefied soils based on smoothed particle hydrodynamics[J]. Natural Hazards, 2011, **59**(3): 1547 - 1560.
- [15] HUANG Y, ZHANG W J, DAI Z L, et al. Numerical simulation of flow processes in liquefied soils using a soil-water-coupled smoothed particle hydrodynamics method[J]. Natural Hazards, 2013, **69**(1): 809 - 827.
- [16] VIGNJEVIC R, CAMPBELL J, LIBERSKY L. A treatment of zero-energy modes in the smoothed particle hydrodynamics method[J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 2000, **184**(1): 67 - 85.
- [17] HUANG Y, DAI Z, ZHANG W. Geo-disaster modeling and analysis: an SPH-based approach[M]. Berlin: Springer, 2014.
- [18] BIOT M A. General theory of three-dimensional consolidation[J]. Journal of Applied Physics, 1941, **12**(2): 155 - 164.
- [19] MONAGHAN J J. Simulating free surface flows with SPH[J]. Journal of Computational Physics, 1994, **110**(2): 399 - 406.
- [20] TAKEDA H, MIYAMA M, SEKIYA M. Numerical simulation of viscous flow by smoothed particles hydrodynamics[J]. Progress of Theoretical Physics, 1994, **92**(5): 939 - 960.
- [21] LIU G R, LIU M B. Smoothed particle hydro-dynamics: a mesh-free particle method[M]. Singapore: World Scientific Press, 2003.
- [22] MORRIS J P, FOX P J, ZHU Y. Modeling low Reynolds number incompressible flows using SPH[J]. Journal of Computational Physics, 1997, **136**(1): 214 - 226.
- [23] SWEGLE J W, HICKS D L, ATTAWAY S W. Smoothed Particle Hydrodynamics stability analysis[J]. Journal of Computational Physics, 1995, **116**(1): 123 - 134.
- [24] JOHNSON G R, STRYK R A, BEISSEL S R. SPH for high velocity impact computations[J]. Computer Methods in Applied Mechanics & Engineering, 1996, **139**(1/2/3/4): 347 - 373.
- [25] CHEN J K, BERAUN J E, CARNEY T C. A corrective smoothed particle method for boundary value problems in heat conduction[J]. International Journal for Numerical Methods in Engineering, 1999, **46**(2): 231 - 252.
- [26] MARTIN J C, MOYCE W J, PART I V. An experimental study of the collapse of liquid columns on a rigid horizontal plane[J]. Philosophical Transactions of the Royal Society (Mathematical Physical & Engineering Sciences), 1952, **244**(882): 312 - 324.
- [27] BAO Y F, YE G L, YE B, et al. Seismic evaluation of soil-foundation-superstructure system considering geometry and material nonlinearities of both soils and structures[J]. Soils and Foundations, 2012, **52**(2): 257 - 278.