

物质点强度折减法及其在边坡中的应用

王 双¹, 李小春¹, 石 露¹, 刘召胜²

(1. 中国科学院武汉岩土力学研究所 岩土力学与工程国家重点实验室, 湖北 武汉 430071; 2. 中冶北方工程技术有限公司, 辽宁 大连 116622)

摘 要: 物质点法适用于模拟连续介质大变形, 如边坡失稳全过程。在物质点法中应用强度折减法, 用于边坡稳定性评价。与极限平衡法相比, 二者安全系数计算值、滑动面位置结果基本一致; 与有限元强度折减法相比, 物质点法失稳评价标准的物理意义明确。利用物质点法大变形计算优势, 评价边坡失稳后的破坏后果, 通过算例说明其评价不同安全系数下的滑坡堆积形态及滑移距离的能力, 尤其是评价滑坡对临近建筑物的影响程度的能力。物质点强度折减法可用于边坡稳定性评价及边坡破坏后果评价。

关 键 词: 强度折减法; 物质点法; 边坡稳定性评价; 安全系数

中图分类号: TU 457

文献标识码: A

文章编号: 1000-7598(2016)09-2672-07

Material point strength reduction method and its application to slope engineering

WANG Shuang¹, LI Xiao-chun¹, SHI Lu¹, LIU Zhao-sheng²

(1. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan, Hubei 430071, China; 2. Northern Engineering & Technology Corporation, Metallurgical Corporation of China Ltd., Dalian, Liaoning 116622, China)

Abstract: The material point method (MPM) is applicable to simulate large deformation of continuous medium, such as slope failure process. The strength reduction method (RSM) is applied to material point method for evaluating slope stability. In a slope stability evaluation example, the safety factor and slip surface position are got respectively by limit equilibrium method (LEM), finite element strength reduction method (FEM-RSM) and material point strength reduction method (MPM-RSM). Compared with LEM, the calculated results of safety factor value and slip surface position by MPM-RSM are basically the same with LEM and FEM-RSM. Compared with FEM-RSM, the physical meaning of MPM-RSM's failure evaluation criterion is more clear. Taking advantage of its superiority in calculating large deformation, MPM-RSM can evaluate the consequences after slope failure. A case study shows its performance in evaluating debris shape and sliding distance for different safety factors, especially the advantage in estimating the impact degree of landslide on adjacent buildings. MPM can be used for the evaluation of slope stability and evaluation of slope failure consequence.

Keywords: strength reduction method; material point method; slope stability evaluation; safety factor

1 引 言

物质点法 (material point method, 简称 MPM) 是采用欧拉与拉格朗日双重描述的无网格粒子法。MPM 采用质点离散材料区域, 用背景网格计算空间导数和求解动量方程, 避免了网格畸变和对流项处理, 兼具拉格朗日和欧拉算法的优势, 且具有较高的计算效率, 适合模拟连续介质大变形问题。

基于质点网格法 (particle in cell, 简称 PIC)、隐式流体质点网格法 (fluid implicit PIC, FLIP) 等

粒子法, Sulsky 等^[1]首先提出 MPM 算法。之后, 许多研究者发展了此理论并将其应用于各个领域, 如冲击爆破、薄膜、裂纹扩展、纳米材料等各种大变形问题中。岩土工程涉及大量大变形问题, 人们开始有意识地将 MPM 应用于岩土工程中。早在 1999 年, Wieckowski 等^[2]就应用 MPM 模拟颗粒流动问题。Bardenhagen 等^[3]提出利用物质点法模拟颗粒材料, Cummins 等^[4]进一步提出了颗粒材料的隐式物质点法。这些研究使 MPM 可以应用于视为颗粒材料的土体。随后, 许多研究者将 MPM 应用

于岩土工程研究。Woo^[5]、Andersen 等^[6]、Ceccato 等^[7]应用物质点法分析了边坡失效、泥石流堆积等问题; Coetzee 等^[8]应用物质点法模拟锚杆拔出过程; Zhou 等^[9]应用物质点法分析了土工膜大变形过程。Mast^[10]以抗滑桩为例, 应用 MPM 研究了土体与结构的相互作用; Bandara^[11]研究了饱和土大变形问题; Beuth^[12]、Alkafaji^[13]应用 MPM 模拟了边坡破坏、挡土墙倾倒、抗滑桩、饱和土快速加载、干砂沉桩等各种岩土工程大变形现象, 大大推广了 MPM 在岩土工程中的应用。国内研究者们从 2005 年开始关注 MPM 在岩土中的应用, 王津龙等^[14]基于物质点法模拟了柱状堆石成型过程; 黄鹏^[15]对边坡失效、堆积物坍塌、岩土侵彻等问题进行了模拟分析; 廉艳平^[16]应用自适应物质点有限元法分析了边坡失效问题, 计算结果与试验结果吻合。张洪武等^[17-19]应用两相物质点法研究了土体中流-固耦合问题, 考虑了加载下孔隙水压力响应。总之, MPM 以其在颗粒材料及大变形上的优势, 广泛应用于各类岩土工程大变形问题中。

极限平衡法与有限元 (FEM) 强度折减法^[20-21]理论已经日趋成熟, 并应用于各类边坡工程。应用强度折减法, 在 MPM 中实现边坡稳定性评价, 有助于扩展 MPM 在岩土工程中的应用; 同时, 利用 MPM 处理大变形问题的优势, 可以评价滑坡破坏后果 (计算出形成某一形态的滑坡堆积体所对应的安全系数)。

2 MPM 法基本方程

在计算域 Ω 内, 物质点法的控制方程包括质量守恒与动量守恒两大方程:

$$d\rho/dt + \rho \nabla \cdot \mathbf{v} = 0 \quad (1)$$

$$\rho \ddot{\mathbf{u}} = \nabla \cdot \boldsymbol{\sigma} + \rho \mathbf{b} \quad (2)$$

式中: ρ 、 $\mathbf{v}$ 、 $\ddot{\mathbf{u}}$ 、 $\boldsymbol{\sigma}$ 、 $\mathbf{b}$ 分别为密度、速度、加速度、Cauchy 应力张量、单位体力。

在边界 Γ 上, 满足本质边界条件与自然边界条件:

$$\boldsymbol{\sigma} \cdot \mathbf{n} = \bar{\mathbf{t}} \quad (3)$$

$$\mathbf{v} = \bar{\mathbf{v}} \quad (4)$$

式中: $\mathbf{n}$ 、 $\bar{\mathbf{t}}$ 、 $\bar{\mathbf{v}}$ 分别为边界法线方向、边界域上外力、边界域速度。取虚速度 $\delta \mathbf{v}$ 作为权函数, 将式 (4) 代入式 (2) 中, 并考虑在速度边界处速度 $\mathbf{v}$ 给定, 其速度边界上变分为 0, 应用加权余量法, 可

得

$$\begin{aligned} & \int_{\Omega} \rho \ddot{\mathbf{u}} \cdot \delta \mathbf{v} d\Omega + \int_{\Omega} \boldsymbol{\sigma} : (\nabla \delta \mathbf{v}) d\Omega - \\ & \int_{\Gamma} \bar{\mathbf{t}} \cdot \delta \mathbf{v} d\Gamma - \int_{\Omega} \rho \mathbf{b} \cdot \delta \mathbf{v} d\Omega = 0 \end{aligned} \quad (5)$$

将计算域 Ω 离散为 N 个物质点, 并将连续体的质量集中于这 N 个物质点上。连续体的密度可近似为

$$\rho(\mathbf{x}) = \sum_{p=1}^N m_p \delta(\mathbf{x} - \mathbf{x}_p) \quad (6)$$

式中: N 、 m_p 、 δ 、 $\mathbf{x}_p$ 分别为物质点总数、物质点携带的质量、狄拉克 δ 函数、第 p 个物质点的位置。

一般情况下, 质点不会增加或减少, 自动满足质量守恒定律。为便于求解, 令 $\boldsymbol{\sigma}^s = \boldsymbol{\sigma} / \rho$, $\bar{\mathbf{t}}^s = \bar{\mathbf{t}} / \rho$, 与式 (6) 一起代入式 (5) 得物质点离散格式如下:

$$\begin{aligned} & \sum_{p=1}^N m_p \ddot{\mathbf{u}}(\mathbf{x}_p) \cdot \delta \mathbf{v}(\mathbf{x}_p) = \\ & - \sum_{p=1}^N m_p \boldsymbol{\sigma}^s(\mathbf{x}_p) : (\nabla \delta \mathbf{v})|_{\mathbf{x}=\mathbf{x}_p} + \\ & \sum_{p=1}^N m_p \bar{\mathbf{t}}^s(\mathbf{x}_p) \cdot \delta \mathbf{v}(\mathbf{x}_p) / h + \\ & \sum_{p=1}^N m_p \mathbf{b}(\mathbf{x}_p) \cdot \delta \mathbf{v}(\mathbf{x}_p) \end{aligned} \quad (7)$$

式中: h 是为了将左端最后一项边界积分转化为体积分而引入的假想边界层厚度。

考虑到 δ 函数的性质, 积分式 (5) 已经变成了物质点携带量求和的形式, 不需要进行数值积分。

对于任意场变量 Φ , 物质点与背景网格节点之间的插值关系如下:

$$\Phi = \sum_{i=1}^M N_i \Phi_i \quad \text{或} \quad \Phi = \sum_{p=1}^N N_i \Phi_p \quad (8)$$

式中: M 为物质点, N_i 为对节点 i 有贡献的物质点个数。将式 (8) 这一插值关系应用于式 (7), 化简可得如下空间离散格式:

$$m_i \dot{\mathbf{v}}_i = (\mathbf{f}_i^{\text{int}} + \mathbf{f}_i^{\text{ext}}) \Delta t \quad (9)$$

式中: $m_i = \sum_{j=1}^M m_{ij} = \sum_{p=1}^N m_p N_i(\mathbf{x}_p)$, 为集中质量阵, 其中 $m_{ij} = \sum_{p=1}^N m_p N_i(\mathbf{x}_p) N_j(\mathbf{x}_p)$, 为连续质量阵; $\mathbf{v}_i$ 为节点 i 的速度; Δt 为计算时间步长。

$$\mathbf{f}_i^{\text{int}} = - \sum_{p=1}^N m_p \boldsymbol{\sigma}^s(\mathbf{x}_p) : (\nabla N_i)|_{\mathbf{x}=\mathbf{x}_p} \quad (10)$$

$$\begin{aligned} \mathbf{f}_i^{\text{ext}} = & \sum_{p=1}^N m_p \bar{\mathbf{t}}^s(\mathbf{x}_p) \cdot N_i(\mathbf{x}_p) / h + \\ & \sum_{p=1}^N m_p \mathbf{b}(\mathbf{x}_p) \cdot N_i(\mathbf{x}_p) \end{aligned} \quad (11)$$

物质点 (拉格朗日粒子) 利用欧拉背景网格更新位置及其他物理量, 欧拉背景网格仅起辅助作

用, 时步完成后, 背景网格重置。信息在物质点与背景网格节点间相互映射, 避免了网格畸变和欧拉对流项处理。概念图见图 1, 更详细地推导过程见文献[1]和文献[22]。

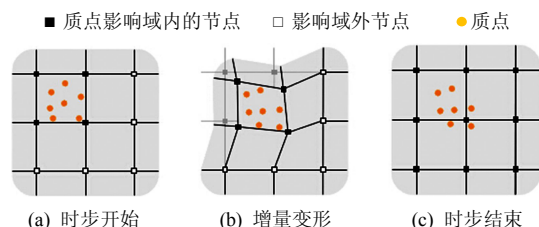


图1 MPM 概念图

Fig.1 Basic concept of MPM

Nairn^[23]认为, 时间步开始时进行应力更新的 USF (update stress first) 格式具有较好的能量守恒性, 因此, 以下计算采用 USF 格式。物质点法 USF 计算格式一般包括 7 个步骤:

(1) 利用式 (8), 将物质点质量和动量映射至背景网格节点, 获得节点速度 $\mathbf{v}_i^t$;

(2) 计算 $t+1$ 时刻物质点的应变增量 $\Delta\boldsymbol{\varepsilon}_p$ 与旋转增量 $\Delta\boldsymbol{\Omega}_p$:

$$\Delta\boldsymbol{\varepsilon}_p = \Delta t/2 \cdot \sum_{i=1}^M [\mathbf{G}_{ip}^t \mathbf{v}_i^t + (\mathbf{G}_{ip}^t \mathbf{v}_i^t)^T] \quad (12)$$

$$\Delta\boldsymbol{\Omega}_p = \Delta t/2 \cdot \sum_{i=1}^M [\mathbf{G}_{ip}^t \mathbf{v}_i^t - (\mathbf{G}_{ip}^t \mathbf{v}_i^t)^T] \quad (13)$$

形函数梯度 $\mathbf{G}_{ip}^t$ 为

$$\mathbf{G}_{ip}^t = \nabla N_i(\mathbf{x})|_{\mathbf{x}=\mathbf{x}_p^t} \quad (14)$$

(3) 应用本构更新物质点应力, 采用焦曼应力率, 消除大变形过程中刚体转动对柯西应力的影响:

$$\dot{\boldsymbol{\sigma}}_p = \mathbf{T} : \dot{\boldsymbol{\varepsilon}}_p \quad (15)$$

式中: $\mathbf{T}$ 为四阶张量。

(4) 按照式 (10)、(11) 计算背景网格节点 $t+1$ 时刻的内力 $\mathbf{f}_i^{\text{int}}$ 与外力 $\mathbf{f}_i^{\text{ext}}$;

(5) 结合式 (9), 求得 $t+1$ 时刻节点加速度 $\dot{\mathbf{v}}_i^{t+1}$, 则 $t+1$ 时刻节点速度为

$$\mathbf{v}_i^{t+1} = \mathbf{v}_i^t + \dot{\mathbf{v}}_i^{t+1} \Delta t \quad (16)$$

(6) 利用式 (8), 将节点信息映射至物质点, 获得物质点位置、速度和加速度;

(7) 将背景网格重置, 从步骤 (1) 开始新时间步的计算。

3 计算说明

强度折减法进行边坡稳定分析一般是指不断降

低岩土体强度, 使边坡达到极限破坏状态, 从而直接求出滑动面位置和安全系数。采用强度折减系数法求边坡的安全系数时, 首先选取初始折减系数 K_1 , 折减后的土体强度参数分别为

$$c_1 = c_0 / K_1 \quad (17)$$

$$\varphi_1 = \arctan(\tan \varphi_0 / K_1) \quad (18)$$

式中: c_0 、 φ_0 分别为初始黏聚力与内摩擦角; c_1 、 φ_1 为折减后黏聚力与内摩擦角。计算中不断增大 K_1 直至出现符合某一标准的极限状态, 此时的 K_1 即为边坡的安全系数。赵尚毅等^[24]提出, 根据下式, 可将 Drucker-Prager (D-P) 准则外接圆 (非关联流动法则) 下的安全系数 K_1 转换为平面应变非关联流动法则下 Mohr-Coulomb (M-C) 准则计算的安全系数 K_2 :

$$K_2 = \sqrt{\frac{[(3\sqrt{\cos^2 \varphi_0 k_1^2 + \sin^2 \varphi_0} - \sin \varphi_0)^2 - 12 \sin^2 \varphi_0]}{12 \cos^2 \varphi_0}} \quad (19)$$

采用张雄等^[25]研发的 MPM^{3D} 程序, 并在其基础上作出部分改进。应变增量 (包括塑性应变增量) 由 USF 计算步骤 (2), 即由节点速度的梯度求得; 在步骤 (3) 中, 利用应变增量, 应用 D-P 本构更新质点应力。本计算沿用其程序, 采用 D-P 外接圆准则, 其屈服函数为

$$f = \sqrt{J_2} + \alpha \sigma_m - k \quad (20)$$

式中: $\sqrt{J_2}$ 为等效剪应力; J_2 为偏应力张量的第 2 不变量; σ_m 为球应力; α 为摩擦系数; k 为纯剪状态时的屈服应力。

同一般有限元一致, 采用等效剪应力的弹性试探解, 当试探解满足屈服函数式 (20) 时, 土体进入塑性状态。在第 4 节中, 介绍了在 MPM 中应用 D-P 本构模拟砂土材料大变形的可行性。

材料数 α 、 k 与 c 、 φ 关系如下:

$$\alpha = 2 \sin \varphi / (\sqrt{3}(3 - \sin \varphi)) \quad (21)$$

$$k = 6c \cos \varphi / (\sqrt{3}(3 - \sin \varphi)) \quad (22)$$

按照式 (17)、(18) 将强度参数 c 、 φ 折减 K_1 倍, 按照式 (19) 换算得出 M-C 准则下的安全系数 K_2 , 最后按照式 (21)、(22) 获得由 c 、 φ 换算得到的 D-P 外接圆下的强度参数 α 、 k 。将 α 、 k 代入物质点程序中进行计算, 看是否达到边坡失稳标

准。如果达到，则此时的 K_2 即为边坡失稳的安全系数；否则，继续增大 K_1 ，重复以上步骤。

为减小应力波快速传递反射引起的数值振荡，重力场采用线性加载： $g = 2t/T$ ， g 为重力加速度， t 为当前累计计算时长， T 为总计算时长， $t \leq T/2$ 。插值函数采用 GIMP^[26]，其影响域包含邻近网格，可以有效地减小粒子跨越网格引起的数值振荡。

以下以土质边坡为例进行分析，计算模型见图 2。基本计算参数见表 1。

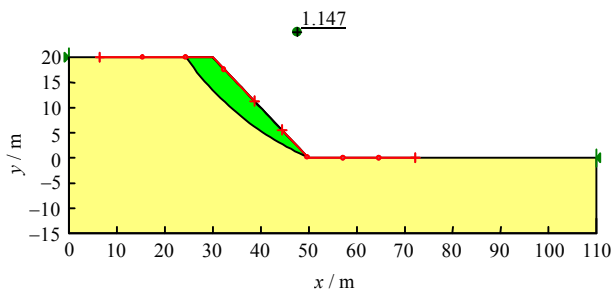


图 2 计算模型及其安全系数
Fig.2 Model and its safety factor

表 1 基本计算参数

Table 1 Fundamental calculation parameters

重度 / (kN/m^3)	黏聚力 / kPa	内摩擦 角/ $(^\circ)$	弹性模 量/ MPa	时间 步长/ s	最小 时步/ s	计算时 长/ s	计算耗 时/ min
21	10	350	20	4.4×10^{-6}	8.8×10^{-5}	15	30

在极限平衡法中，采用表 1 中的基本计算参数，以 Morgenstern-Price (M-P) 法为准，搜索包括圆弧在内的任意滑面，找出最危险滑动面，其安全系数为 1.147，计算结果见图 2。

在有限元强度折减法中，利用上述基本参数，以塑性应变即将产生突变为判据，计算得安全系数为 1.155，此结果（见图 3）与极限平衡结果十分接近，滑动带也与极限平衡法（图 2）基本一致。

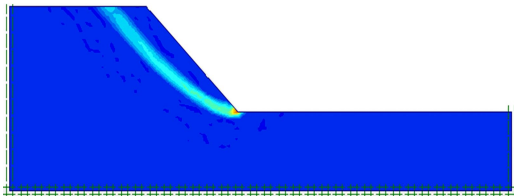


图 3 FEM 计算的等效塑性应变剪切带表示的滑动面
Fig.3 Failure surface using continuous contours of equivalent plastic strain by FEM calculation

4 MPM 强度折减法实例

Lian 等^[27]利用 D-P 本构的 MPM 法模拟了铝棒

堆积物坍塌的室内试验，计算结果与试验结果基本一致。Mast 等^[28]利用 Matsuoka-Nakai 本构的 MPM 法模拟了砂柱崩塌试验，发现模拟结果与试验结果十分吻合。因此，利用 MPM 模拟砂土材料的大变形是合适的。

采用上一节介绍的边坡模型、基本计算参数及其他细节，并进行安全系数转换，MPM 强度折法计算结果见图 4。

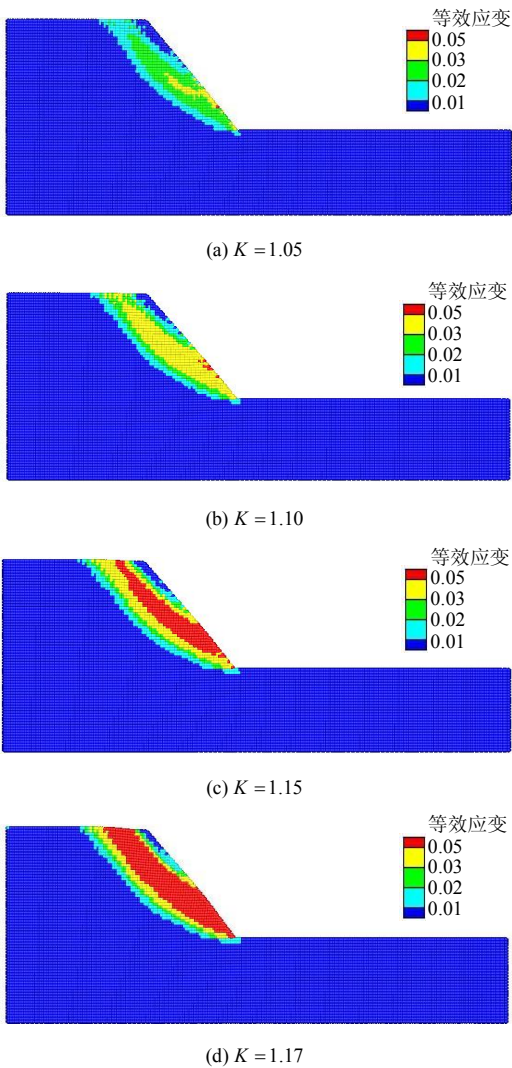


图 4 不同折减系数下的等效塑性应变云图
Fig.4 Nephograms of equivalent plastic strain for different reduction factors

比较图 4 中不同安全系数 K （折减系数）下的等效塑性应变云图，可以发现，等效塑性应变大小及影响范围随强度降低而增大，但在 $K = 1.15$ （以极限平衡结果为准）附近不存在明显的失稳判据。因此，同有限元强度折减法一样，MPM 强度折减法需要选择一个合理的失稳标准。

有限元一般不常用于大变形计算，变形较大时，

一般无法得到真实的塑性应变,故有限元强度折减法中一般以有限元数值计算不收敛或以塑性应变从坡脚到坡顶贯通作为边坡破坏的标志。由于 MPM 能计算出塑性应变大小,在 $K=1.05$ 、等效塑性应变为 0.02 时,塑性区即已贯通。因此,单以塑性区贯通作为边坡失稳判据有失严谨。根据赵尚毅等^[29]对有限元强度折减法判据的探讨,塑性区从坡脚到坡顶贯通并不一定意味着破坏,塑性区贯通是破坏的必要条件,但不是充分条件,还要看是否产生很大的且无限发展的塑性变形和位移。分析图 5,当 $K=1.15$ 时,MPM 所得结果与有限元强度折减法所得滑动面及塑性贯通区相比较,二者基本一致;与极限平衡(M-P 法)相比较,有限元及 MPM 得出滑点稍微远离坡脚(约 1 m, 5%的误差),三者在安全系数及最危险滑动面位置上十分接近。根据这一认识,考虑到 $K=1.15$ 时,MPM 法与极限平衡法及有限元强度折减法计算结果最为接近,取此时的等效塑性应变 0.05 作为 MPM 强度折减法的边坡失稳判据(这一值与土体的模量及强度相关,试算表明,其他土类可根据本文在此值附近适当浮动)。因此,建议取等效塑性应变为 0.05 的区域贯通坡顶时的折减系数作为 MPM 强度折减法安全系数。

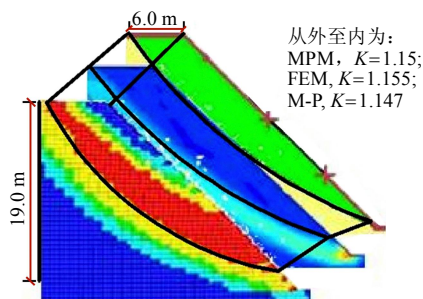


图 5 3 种方法得到的滑动面
Fig.5 Failure surfaces from three methods

当塑性应变较大时,由于有限元一般不能给出其大小,故以塑性区贯通作为失稳判据不够严格,且无法给出较大塑性应变大小,则以位移突变为判据同样不够严格。赵尚毅等^[29]还认为,边坡破坏在有限元计算中表现为塑性应变和位移产生突变,在突变前计算收敛;突变之后,计算不收敛,表征滑面上土体无限流动。因此,他认为以有限元计算是否收敛作为边坡破坏的依据是合理的,但有限元计算是否收敛同时还受其他因素影响,作为判据同样不够严格。尽管有限元强度折减法用于边坡稳定分析的经验很多,结果也与极限平衡法基本一致,但

其失稳判据未能足够严谨。其根本原因在于,有限元适合于小变形理论,边坡失稳是大变形过程,用小变形理论评价大变形过程具有一定模糊性。

MPM 法适用于小变形至大变形的整个发展过程,能模拟边坡破坏过程,计算出塑性应变大小。因此,与有限元强度折减法相比,采用 MPM 强度折减法,取一定大小的等效塑性应变区域贯通坡顶作为失稳判断,物理意义更为明确,在评估边坡稳定性时具有一定的相对优势。同时,由于 MPM 法可以模拟边坡破坏过程,MPM 强度折减法还可用于评价滑坡破坏后果。

滑坡一般通过掩埋、冲击临近设施、村庄、道路交通引发灾害,物质点强度折减法可用于评估滑坡规模及滑坡对临近建筑物、道路交通的影响。在实际工程中,经常会遇到估算滑坡体量、判断滑坡堆积形态及预判滑坡是否可能威胁临近建筑物的地灾处理案例,在边坡出现灾害之前准确预判灾害后果,有助于确定边坡处理方案。物质点强度折减法对于预判破坏后果,给出了定量的评价标准。分析图 6,给定一个安全系数,可以获得对应的滑坡堆积形态与滑移距离,此安全系数代表了形成这种破坏后果的安全储备程度,安全系数越高,形成这种破坏后果的可能性越低;反之,形成这种破坏后果的可能性越高。继续以图 6 计算结果为例(图中给出了图 4 模型在更大强度折减系数下的破坏后果,黑色矩形表示临近建筑物):随着安全系数(折减系数)的增大,边坡失稳后滑动规模及滑移距离增大,当 $K=2.5$ 时(图 6(c)),滑坡开始威胁临近建筑物。这表明临近建筑物受到滑坡破坏的安全系数为 2.5,安全储备程度较高。

凭借在计算大变形上的优势,物质点强度折减法将边坡稳定性评价由评价是否失稳延伸至评价失稳后的破坏后果,给边坡设计带来另一新思路:对于安全重要性低的边坡,不以失稳作为设计标准,而是以失稳后滑坡不威胁保护目标作为设计标准。这相当于放宽了设计标准,对于一些边坡距临近建筑物具有一定安全距离,且对人员伤害控制要求低或类似情况时,只需控制滑坡失稳后滑移距离(如对边坡做适当加固、在滑移距离内加筑挡土坑坝等),即可以较少的经济投入获得相应的防护效果。对于一些经济困难、人口密度低的滑坡灾害多发区,地区政府缺乏足够投入治理滑坡灾害,这一思路具有一定积极意义。

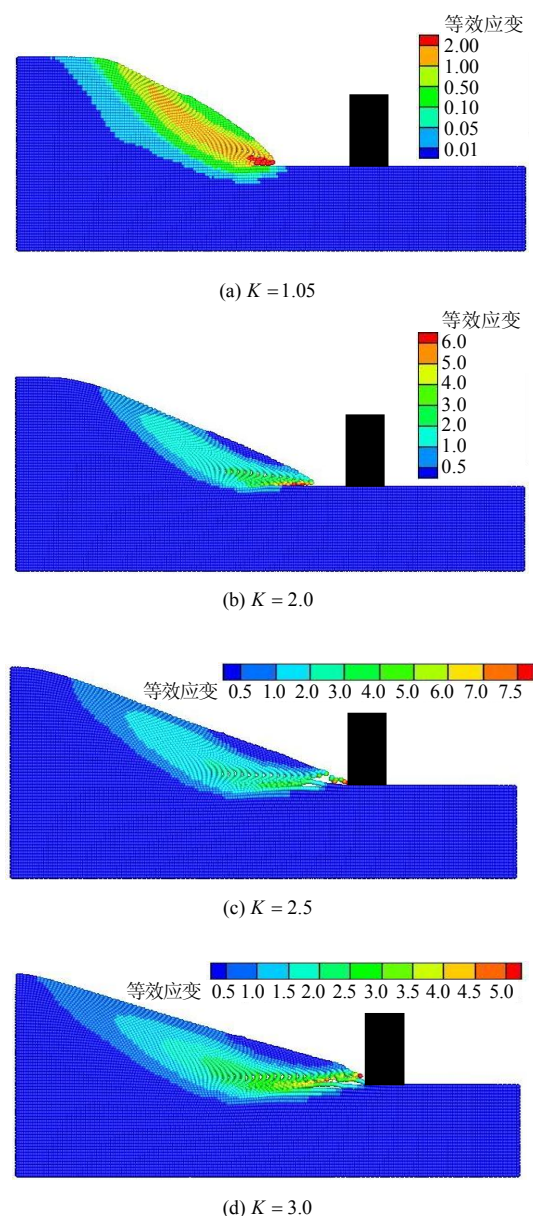


图6 失稳后不同折减系数下的等效塑性应变云图

Fig.6 Nephograms of equivalent plastic strain for different reduction factors after failure

5 结 论

本文介绍了物质点法的研究现状、基本概念,并首次将强度折减法应用于物质点法中,用于评价边坡稳定性,得到以下结论:

(1) 物质点强度折减法可以评价边坡稳定性,与有限元强度折减法相比,其失稳标准物理意义明确,安全系数计算值、滑动面位置与极限平衡法结果基本一致;建议取等效塑性应变为0.05的塑性区域贯通坡顶时的折减系数作为安全系数。

(2) 物质点法可以模拟边坡失稳破坏全过程。由此,物质点强度折减法可以评价边坡破坏后果,如不同安全系数下的滑坡堆积形态与滑移距离,尤

其是定量评价滑坡对临近设施的影响程度。

参 考 文 献

- [1] SULSKY D, ZHOU S J, SCHREYER H. Application of a particle-in-cell method to solid mechanics[J]. **Computer Physics Communications**, 1995, 87(1): 236—252.
- [2] WIECKOWSKI Z, YOUN S K, YEON J H. A particle-in-cell solution to the silo discharging problem[J]. **International Journal for Numerical Methods in Engineering**, 1999, 45(9): 1203—1225.
- [3] BARDENHAGEN S G, BRACKBILL J U, SULSKY D. The material point method for granular materials[J]. **Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering**, 2000, 187(3): 529—541.
- [4] CUMMINS S J, BRACKBILL J U. An implicit particle-in-cell method for granular materials[J]. **Journal of Computational Physics**, 2002, 180(2): 506—548.
- [5] WOO KUEN SHIN. Numerical simulation of landslides and debris flows using an enhanced material point method[D]. Washington D. C.: University of Washington, 2009.
- [6] ANDERSEN S, ANDERSEN L. Modelling of landslides with the material point method[J]. **Computational Geosciences**, 2009, 14(1): 137—147.
- [7] CECCATO F, ROHE A, SIMONINI P. Simulation of slope failure experiment with the material point method[C]//Annual meeting of Geotechnica Researchers. Chieti Pescara: [s. n.], 2014.
- [8] COETZEE C J, VERMEER P A, BASSON A H. The modelling of anchors using the material point method[J]. **International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics**, 2005, 29(9): 879—895.
- [9] ZHOU S J, STORMONT J, CHEN Z. Simulation of geomembrane response to settlement in landfills by using the material point method[J]. **International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics**, 1999, 23(15): 1977—1994.
- [10] MAST C M. Modeling landslide-induced flow interactions with structures using the material point method[D]. Seattle: University of Washington, 2013.
- [11] BANDARA S S. Material point method to simulate large deformation problems in fluid-saturated granular medium[D]. Cambridge: University of Cambridge, 2013.
- [12] BEUTH L. Formulation and application of a quasi-static material point method[D]. Stuttgart: Institute of Geotechnical Engineering, University of Stuttgart, 2012.

- [13] ALKAFAJI I K J. Formulation of a dynamic material point method(MPM) for geomechanical problems[D]. Stuttgart: Institute of Geotechnical Engineering, University of Stuttgart, 2013.
- [14] 王津龙, 刘天云, 张楚汉. 堆石体柱状试件成型过程的材料点法仿真[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2005, 45(12): 1604—1607.
WANG Jin-long, LIU Tian-yun, ZHANG Chu-han. Simulation of cylindrical stone pile based on the material point method[J]. **Journal of Tsinghua University (Science and Technology)**, 2005, 45(12): 1604—1607.
- [15] 黄鹏. 金属及岩土冲击动力学问题的物质点法研究[D]. 北京: 清华大学, 2010.
HUANG Peng. Material point method for metal and soil impact dynamics problems[D]. Beijing: Tsinghua University, 2010.
- [16] 廉艳平. 自适应物质点有限元法及其在冲击侵彻问题中的应用[D]. 北京: 清华大学, 2012.
LIAN Yan-ping. An adaptive material point-finite element method and its application to impact/penetration problems[D]. Beijing: Tsinghua University, 2012.
- [17] 张洪武, 王鲲鹏, 陈震. 基于物质点方法饱和和多孔介质动力学模拟(I): 耦合物质点方法[J]. 岩土工程学报, 2009, 31(10): 1505—1511.
ZHANG Hong-wu, WANG Kun-peng, CHEN Zhen. Material point method for dynamic analysis of saturated porous media(I): Coupling material point method[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2009, 31(10): 1505—1511.
- [18] 张洪武, 王鲲鹏, 陈震. 基于物质点方法饱和和多孔介质动力学模拟(II): 饱和多孔介质与固体间动力接触分析[J]. 岩土工程学报, 2009, 31(11): 1672—1679.
ZHANG Hong-wu, WANG Kun-peng, CHEN Zhen. Material point method for dynamic analysis of saturated porous media(II): Dynamic contact analysis between saturated porous media and solid bodies[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2009, 31(11): 1672—1679.
- [19] 张洪武, 王鲲鹏. 基于物质点方法饱和和多孔介质动力学模拟(III): 两相物质点方法[J]. 岩土工程学报, 2010, 32(4): 507—513.
ZHANG Hong-wu, WANG Kun-peng. Material point method for dynamic analysis of saturated porous media (III): Two-phase material point method[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2010, 32(4): 507—513.
- [20] 郑颖人, 赵尚毅, 李安洪, 等. 有限元极限分析法及其在边坡中的应用[M]. 北京: 人民交通出版社, 2011.
ZHENG Ying-ren, ZHAO Shang-yi, LI An-hong, et al. Finite element limit analysis and its application to slope[M]. Beijing: China Communications Press, 2011.
- [21] BAI B, YUAN W, LI X CH. A new double reduction method for slope stability analysis[J]. **Journal of Central South University**, 2014, 21: 1158—1164.
- [22] 张忠. 固体炸药冲击起爆的物质点法研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2010.
ZHANG Zhong. Study on material point method for shock initiation of solid explosive[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2010.
- [23] NAIRN J A. Material point method calculations with explicit cracks[J]. **Computer Modeling in Engineering Sciences**, 2003, 4(6): 649—663.
- [24] 赵尚毅, 郑颖人, 刘明维, 等. 基于 Drucker-Prager 准则的边坡安全系数定义及其转换[J]. 岩土力学与工程学报, 2006, 25(1): 2730—2734.
ZHAO Shang-yi, ZHENG Ying-ren, LIU Ming-wei, et al. Definition and transformation of slope safety factor based on Drucker-Prager criterion[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2006, 25(1): 2730—2734.
- [25] 张雄, 廉艳平, 刘岩, 等. 物质点法[M]. 北京: 清华大学出版社, 2013.
ZHANG Xiong, LIAN Yan-ping, LIU Yan, et al. Material point method[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2013.
- [26] BARDENHAGEN S, KOBER E. The generalized interpolation material point method[J]. **Computer Modeling in Engineering and Sciences**, 2004, 5(6): 477—495.
- [27] LIAN Y P, ZHANG X, LIU Y. An adaptive finite element material point method and its application to extreme deformation problems[J]. **Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering**, 2010, 241: 275—285.
- [28] MAST C, ARDUINO P, MACKENZIE HELNWEIN P, et al. Simulating granular column collapse using the material point method[J]. **Acta Geotechnica**, 2014.
- [29] 赵尚毅, 郑颖人, 张玉芳. 极限分析有限元法讲座 II: 有限元强度折减法中边坡失稳的判据探讨[J]. 岩土力学, 2005, 26(2): 332—336.
ZHAO Shang-yi, ZHENG Yin-ren, ZHANG Yu-fang. Study on slope failure criterion in strength reduction finite element method[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2005, 26(2): 332—336.