

煤矿排土场边坡变形失稳特征 FLAC^{3D} 模拟分析

黄 达^{1,2}, 何兴江², 裴向军², 黄润秋²

(1. 重庆大学土木工程学院, 重庆 400045;

2. 成都理工大学地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室, 成都 610059)

摘要: 煤矿排土场边坡是一类特殊的人工堆积边坡, 它的变形破坏具有自身的特点。由于其堆积材料的特征性, 使得煤矸石堆积体及其下部粘土层具有较强的应变软化特征。本文结合四川某煤矿排土场边坡, 运用 FLAC^{3D} 程序对该排土场边坡失稳变形特征进行三维数值模拟分析, 分析结果表明: ①通过参数软化重现该类边坡失稳变形过程是可行的; ②可以通过边坡位移特征寻找其滑面形态和失稳区域; ③最大不平衡力是否收敛可以判定边坡的稳定状态。④模拟结果与实际吻合。

关键词: 排土场; 变形; FLAC^{3D}; 应变软化; 稳定性

中图分类号: P642.11⁺6

文献标识码: A

文章编号: 1000-3665(2008)06-0061-05

1 引言

对于矿山开采, 煤矸石排土场是矿山组织生产不可缺少的一项永久性工程建筑。因此, 排土场在矿山整个生产时期及其以后相当长时期内能否长期保持安全运行是矿山管理者必须考虑的重大问题之一。排土场一旦失稳, 就会严重影响矿山生产, 甚至使矿山停产, 更严重的可能引起人员伤亡。

煤矿排土场与一般的崩塌堆积体相比具有以下特点: ①堆积时间较短, 堆积速度较快。在连续堆积加载的情况下, 容易出现一些局部或整体不稳定情况; ②排土场堆积体一般呈散体结构, 固结程度差; ③降水容易入渗, 矸石堆积体及其下粘土层的强度参数表现出明显的应变软化特征^[1-4]。一般来说, 排土场变形破坏类型按其发生的形态可分为以下几种^[5-7]:

(1) 滑动: 即滑坡, 是指有明显滑动面的排土场边坡变形破坏。按滑动面位置, 排土场滑坡又可分为: ①煤矸石内部滑动, 即滑动面全部产生在排弃的煤矸石中的滑动; ②沿堆积体和基底二者接触面的滑动; ③排土场基底滑动, 即滑动面通过基底内岩层中的软弱夹层滑动。一般情况下以①、②类滑坡常见。

(2) 流动, 即泥(矸)石流, 是指排弃物经暴雨冲刷浸透, 混合成粘稠流体, 迅速沿坡面向下的移动。

(3) 沉降, 是指新堆筑的松散排弃物在自重作用下压密下沉, 这种变形没有明显的滑动, 变形速度初期较大, 以后逐渐减小。

一般来说, 滑坡和泥(矸)石流的危害性较大, 而且有时滑坡可以转化为泥(矸)石流。

本文结合四川某煤矿排土场边坡, 运用 FLAC^{3D} 中的应变软化本构模型, 对其失稳变形过程进行了数值模拟分析, 其结果与实际情况吻合。

2 FLAC^{3D} 软化参数原理

2.1 参数软化

材料的软化程度与塑性应变变量直接相关, 因而若定义出一种可以计量塑性应变变量大小的参数, 就可以通过定义材料力学参数(内聚力、内摩擦角、剪胀角和抗拉强度等)为该参数的函数的方法来控制和模拟软化的过程。这就是 FLAC^{3D} 模拟材料软化的基本思路^[8]。FLAC^{3D} 中的应变软化(硬化)本构模型是基于 Mohr-Coulomb 本构模型建立的, 其区别在于: 应变软化(硬化)模型在塑性屈服开始后, 内聚力、内摩擦角、剪胀角和抗拉强度可能会发生变化。Mohr-Coulomb 屈服准则:

$$\begin{cases} f_s = \sigma_1 - \sigma_3 N_\varphi + 2C \sqrt{N_\varphi} \\ f_t = \sigma_3 - \sigma_1 \\ N_\varphi = (1 + \sin\varphi)/(1 - \sin\varphi) \end{cases} \quad (1)$$

式中: σ_1 、 σ_2 ——最大最小主应力;

收稿日期: 2008-03-03; 修订日期: 2008-04-28

基金项目: 重庆大学人才引进基金资助

作者简介: 黄达(1976-), 男, 博士, 讲师, 在站博士后, 从事岩土体稳定性评价及其灾害防治教学和科研工作。

E-mail: hdcqy@yahoo.com.cn; hdcqy@126.com

C, φ, σ_1 ——材料内聚力、内摩擦角和抗拉强度。

当 $f_s = 0$ 时,材料将发生剪切破坏;当 $f_t = 0$ 时,材料将发生拉伸破坏。

FLAC^{3D}通过增量的形式来定义各参数的软化,具体定义公式如下。

塑性剪应变增量(用来更新岩土体内聚力、内摩擦角和剪胀角):

$$\Delta\kappa^s = \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot \sqrt{(\Delta\epsilon_1^{Ps} - \Delta\epsilon_m^{Ps})^2 + (\Delta\epsilon_m^{Ps})^2 + (\Delta\epsilon_3^{Ps} - \Delta\epsilon_m^{Ps})^2} \quad (2)$$

$$\Delta\epsilon_m^{Ps} = \frac{1}{3}(\Delta\epsilon_1^{Ps} + \Delta\epsilon_3^{Ps}) \quad (3)$$

式中: $\Delta\epsilon_m^{Ps}$ ——体积塑性剪切应变增量。

塑性张拉应变增量(用来更新岩土体抗拉强度):

$$\Delta\kappa^t = |\Delta\epsilon_3^{Pt}| \quad (4)$$

式(2)、(3)中的 $\Delta\epsilon_1^{Ps}, \Delta\epsilon_3^{Ps}$ 为主应力方向塑性剪应变增量, $\Delta\epsilon_3^{Pt}$ 为主应力方向的张拉塑性应变增量,其表达式如下:

$$\begin{cases} \Delta\epsilon_1^{Ps} = \lambda^s \\ \Delta\epsilon_3^{Ps} = -\lambda^s N_\varphi \\ \Delta\epsilon_3^{Pt} = \lambda^t \end{cases} \quad (5)$$

上式中的 λ^s, λ^t 可通过下式求得:

$$\begin{cases} \lambda^s = \frac{f_s}{(\alpha_1 - \alpha_2 N_\varphi) - (\alpha_2 - \alpha_1 N_\varphi) N_\varphi} \\ \lambda^t = f_t / \alpha_1 \\ \alpha_1 = K + 4G/3 \\ \alpha_2 = K - 2G/3 \end{cases} \quad (6)$$

2.2 应变局部化剪切带模拟

应变局部化是指岩土体破坏时其应变(或变形)集中于某局部窄小区域的一种现象(或称为剪切带)。对于应变软化材料,当在某处产生应力不均或应力集中时就会在此处产生较大的应变,从而该处的材料开始软化,引起该处与相邻单元的应力不平衡,使得该处产生更大的应变并进一步软化。该处的应变引起整体的应力重分布从而使得更多地方产生软化和大的应变,最后扩展的软化区贯通,形成剪切带。

最大剪应变值介于纯剪应变与八面体剪应变之间,而后二者与偏应变第二不变量只相差一个常数,所以最大剪应变值可以与偏应变第二不变量一样代表剪应变的大小。具体到 FLAC^{3D} 数值计算时,可以通过剪应变增量来跟踪剪应变的大小。

3 四川某煤矿排土场边坡基本特征

四川省广安市某煤矿现核定生产能力为 90×10^4 t/a,是广安市煤炭骨干生产企业之一。2000年6月,其所在地连续下了20余场大雨或暴雨,由于降雨时间长,降雨量大,雨水逐渐渗透了该煤矿+790矸石山,致使+790矸石山在2000年7月10日晚10时20分突然发生约 11×10^4 m³ 矸石整体滑移事故。在这次事故中约 4.5×10^4 m³ 的矸石流冲垮栏杆坝,冲进该煤矿+660井口及前方的工业广场,冲毁并埋没了+660井口充电房(一名充电女工被埋身亡)、材料库房等工业厂房和+660井口前方的机车运输道路、设备、设施,导致+660生产水平被迫全面停产。该次灾害事故给当地人民的生命财产造成了巨大的损失,经济损失约551万元。

3.1 排土场基本形态特征

该排土场后部宽度270m,前部宽度110m,坡向延伸长度150m,坡体高度约65m(从EL:725m至EL:790m),坡体后部厚度大,最大厚度40m,由废渣堆积而成组成,矿渣径粒尺寸为2~500mm不等,以10~80mm为主,约占60%,矿渣自然休止角为37°,为该煤矿主要堆渣区。

3.2 地层岩性

该矿渣堆积体的下覆岩层为三叠系中统雷口坡组灰、深灰色白云岩、泥质白云岩,夹灰岩、泥质灰岩及膏盐层。斜坡上部有一层约0.5m厚的残坡积亚粘土,煤矸石排土场堆积在这层粘土之上。图1排土场典型工程地质剖面图。

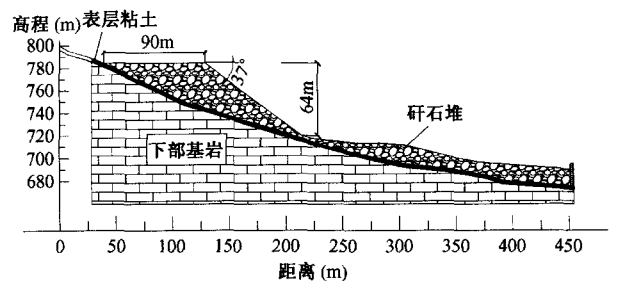


图1 排土场典型工程地质剖面图

Fig.1 Engineering geological profile of mine waste accumulation slope

4 排土场滑坡变形过程 FLAC^{3D} 分析

4.1 模型的建立

4.1.1 模型范围及边界条件

模型顺坡向水平长度取350m(Y坐标方向),宽度

400m(X 坐标方向),垂直高度从EL680m至地表(Z 坐标方向)。排土场基本位于模型的中央,边界条件均采用法向位移约束。几何模型及网格划分如图2所示。

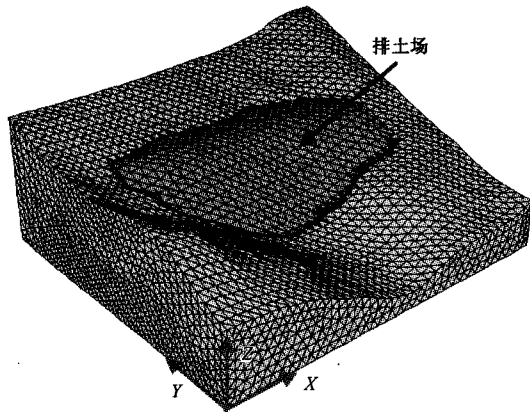


图2 模型及网格划分
Fig.2 Model and grid mesh

4.1.2 岩土体物理力学参数

煤矸石、粘土、基岩的剪切模量分别取 6.4GPa、6.25GPa、10.49GPa;体积模量分别取 3.1GPa、2.46GPa、8.90GPa;容重分别取 19 kN/m³、18 kN/m³、26.5 kN/m³。这些参数在材料剪应变软化过程中保持不变。

FLAC^{3D}中强度软化是按分段线性来定义的,即:定义多组变量(x 、 y), x 代表剪(拉)塑性应变增量值, y 代表强度参数值。每一组变量代表一个塑性应变-强度参数状态,每两组变量点之间按线性变化。本次计算取一组变量(0.02、残余强度),也就是说,当模型在某处产生塑性应变时,其塑性应变达到 0.02 之前,强度参数从峰值线性降到残余值,塑性应变 ≥ 0.02 时,强度参数为残余值。基岩部分不考虑应变软化。具体强度参数取值见表1。

表1 岩土体强度参数及其软化值

Table 1 Strength parameters and softening value of rockmass and soils

岩土材料	内摩擦角 (°)	内聚力 (kPa)	抗拉强度 (kPa)	剪胀角 (°)
煤矸石	峰值	26	0	10
	残余	20	0	5
粘土	峰值	18	16	35
	残余	10	0	5
基岩	峰值	56	1650	1100

4.2 模拟结果分析

4.2.1 滑坡的发育过程

图3为最大不平衡力曲线,可以看出最大不平衡

力并不收敛,表明该边坡不稳定。

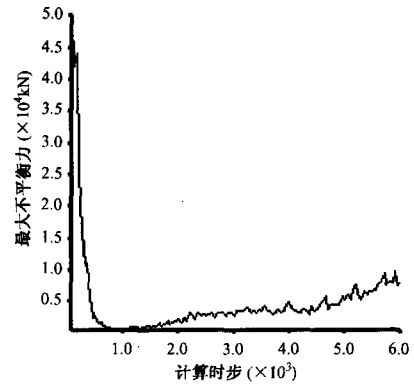


图3 最大不平衡力
Fig.3 The maximum unbalance force

为显示应变软化的过程,选取排土场下面的粘土层的大致中心位置(节点坐标(180,90,79))进行应力、应变、位移跟踪。图4为偏应力绝对值($|\sigma_1 - \sigma_3|$)与位移的对比变化图,从图中可以看出,随着位移的增大应力首先达到峰值,然后又跌到残余值,最后保持残余值基本不变,具有明显的变形软化特征。

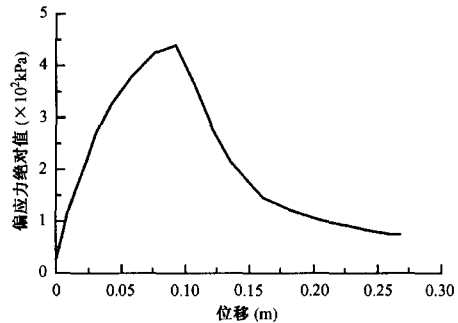


图4 位移与 $|\sigma_1 - \sigma_3|$ 关系曲线
Fig.4 Curve of displacement and $|\sigma_1 - \sigma_3|$

图5和图6分别为位移、剪应变增量随计算时步的动态变化曲线图,可以看出,在计算初始阶段(约

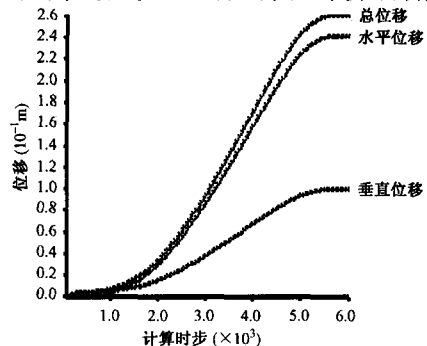


图5 位移动态变化曲线
Fig.5 Dynamic curve of displacement

1 200时步前)变形较小,之后进入应变软化阶段,变形显著增加,到约 5 000 时步后,变形基本不再变化,这是由于坡体自身的变形和应力调整,使得变形已经转移至矸石堆积体,导致排土场在这以后出现显著变形及应变软化特征。

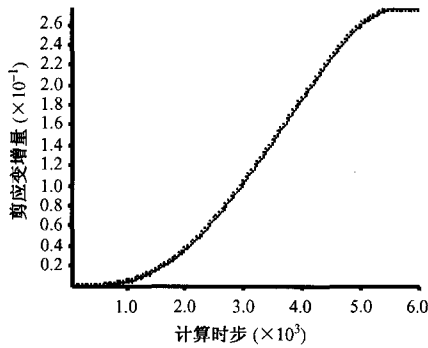


图 6 剪应变增量动态变化曲线

Fig.6 Dynamic curve of shear strain increment

图 7 为剪应变增量分布随计算过程的变化云图(坐标 X 值从 180 至 400 之间局部放大图),从图中可以看出,在 1 000 时步时,剪应变集中在粘土层的中下部;到 3 000 时步时,剪应变沿粘土层逐渐向两端扩展,量值逐渐增大;当计算到 6 000 时步时,剪应变明显向煤矸石堆积体内扩展,并在后缘原始坡角变缓处拉裂形成拉裂缝。单从剪应变增量的大小来说,也是随计算在逐渐加大的。

4.2.2 滑坡的变形特征

图 8 ~ 图 10 为计算 6000 时步时的位移图(图 8 和图 9 分别为 X = 180m 剖面的位移矢量与等值线云图,图 10 为三维位移等值线云图,单位为 m)。

从图 8 和图 9 可以看出,滑面为近圆弧形,位于排土场的中部,后缘拉裂,中部沿粘土层滑动,前缘在排土场坡角上方一定位置剪出。变形量大小从表面向滑面逐渐减小(成带分布),位移方向基本与坡面平行,在前缘剪出口发生偏转。

图 10 表明,滑坡首先出现的范围为图中变形较大的浅色区域,从正视方向看近似一大半圆形,这与实际滑坡区域及形状吻合。滑坡区域形状与堆积前沟谷及煤矸石堆积形态和相关岩土体的工程性质等有关。

5 结论

(1)介绍了 FLAC^{3D} 中应变软化原理,并通过定义软化参数对煤矿排土场边坡破坏过程的变形特征进行模拟分析。

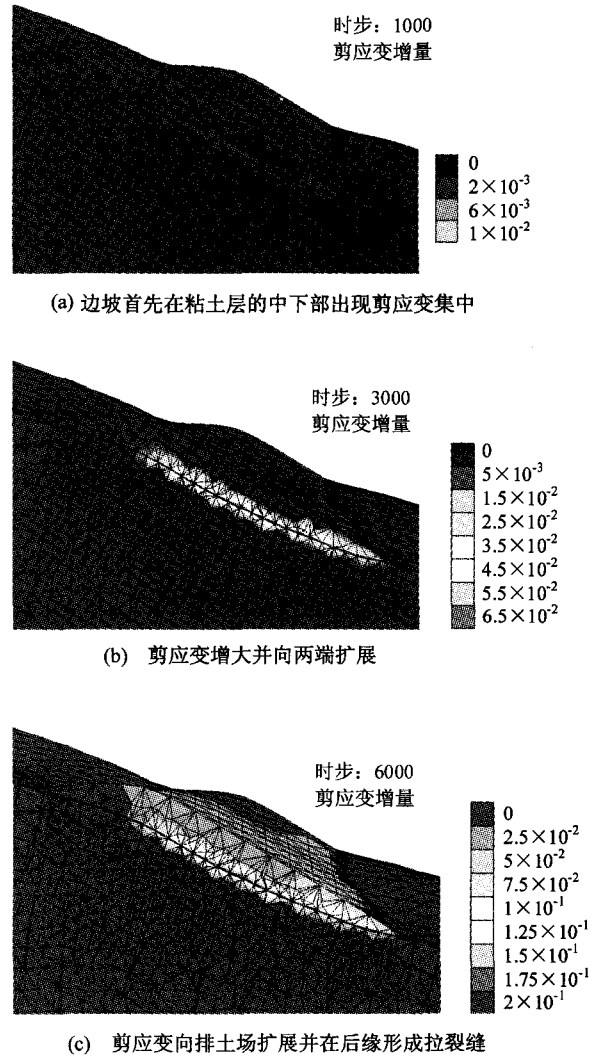


图 7 剪应变增量变化分布图

Fig.7 The distribution and variation graph of shear strain increment

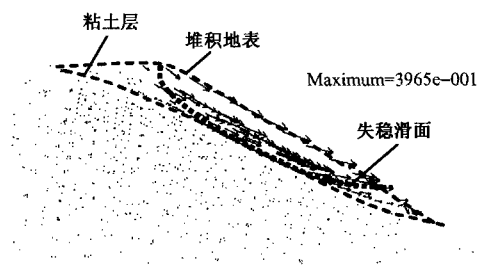


图 8 X = 180m 剖面位移矢量图

Fig.8 Vector map of displacement at X = 180m section

- (2)通过跟踪剪应变增量及位移变化,实现了排土场边坡变形破坏过程的再现。
- (3)通过边坡位移分布的特征,确定了排土场边坡的滑面及滑坡区域形态。

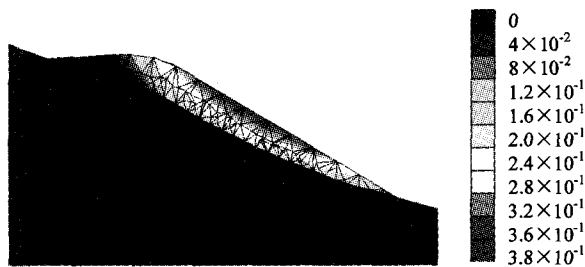


图9 X = 180m 剖面位移云图

Fig.9 Contour map of displacement at X = 180m section

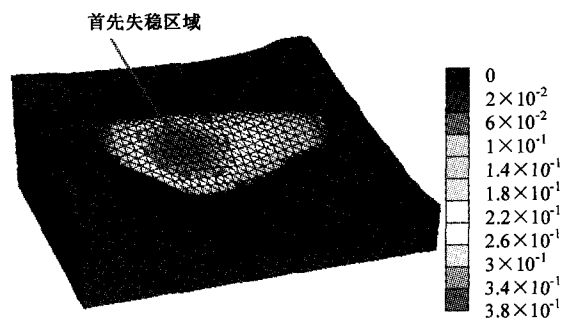


图10 位移三维云图

Fig.10 3D contour map of displacement

(4)通过对四川某煤矿排土场边坡失稳变形特征的分析,其结果与实际吻合,说明通过FLAC^{3D}中的应

变软化本构模型分析排土场边坡变形失稳特征是符合工程实际的。

参考文献:

- [1] 周玉新,周志芳. 矿山排土场非线性渗流数值计算[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(13): 2215 - 2219.
- [2] 谢学斌,潘长良. 排土场散体岩石粒度分布与剪切强度的分形特征[J]. 岩土力学, 2004, 25(2): 287 - 291.
- [3] 黄润秋,王士天,张倬元,等. 中国西南地壳浅表层动力学过程与工程环境效应研究[M]. 成都: 四川大学出版社, 2002.
- [4] 张倬元,王士天,王兰生. 工程地质分析原理[M]. 2版. 北京: 地质出版社, 1994.
- [5] 潘建平,黄润秋,许强. 攀枝花露天矿排土场边坡稳定性的三维数值模拟研究[J]. 成都理工学院学报, 2002, 29(3): 329 - 333.
- [6] 李林,童有全. 边坡滑体的位移反分析及变形破坏预测[J]. 中国矿业, 1999, 8(48): 16 - 21.
- [7] 黄广龙,周建,龚晓南. 矿山排土场散体岩土强度变形特征[J]. 浙江大学学报: 工学版, 2000, 34(1): 55 - 58.
- [8] Itasca. FLAC^{3D} version 2.0 user's manual [M]. Minneapolis: ICG, 2002.

FLAC^{3D} simulation for deformation failure characteristics of mine waste accumulation slope of a coalmine

HUANG Da^{1,2}, HE Xing-jiang², PEI Xiang-jun², HUANG Run-qiu²

(1. College of Civil Engineering, Chongqing University, Chongqing 400045, China;

2. State Key Laboratory of Geohazard Prevention and Geoenvironment Protection, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China)

Abstract: The mine waste accumulation slope of a coalmine is a kind of special manual accumulation body, its deformation - failure has certain characteristics. The mine wastes and clay layer under them bear much strong strain - softening characteristics. The paper makes 3D numerical simulation for deformation failure characteristics of mine waste accumulation slope of a coalmine in Sichuan Province using FLAC^{3D} software, the results show: ① Recurring the process of deformation failure of the slope is feasible by parameters softening; ② Searching the slope slide face and region of failure by its deformation characteristics; ③ Judging stability state of the slope by the maximum unbalance force is or not constringency; ④ The result of simulation agrees with the fact.

Key words: mine waste accumulation slope; deformation; FLAC; strain - softening; stability

责任编辑:张明霞