

某城市排土场边坡三维稳定性分析

金福喜, 钱毅, 袁权威

(中南大学 地球科学与信息物理学院 有色金属成矿预测与地质环境监测教育部重点实验室, 湖南 长沙 410083)

摘要: 针对湖南某城市排土场在强降雨作用下可能诱发地质灾害的问题, 设计了4种降雨类型, 利用ANSYS软件建模功能, 生成排土场稳定性计算模型。利用ABAQUS有限元分析软件进行了非饱和土流固耦合分析, 将4种类型的降雨分别施加在排土场上, 同时考虑土体的渗透系数受土的孔隙比和含水率的影响。通过监测有限元模型特征部位位移是否发生突增及塑形变形区是否贯通来判断排土场是否发生破坏, 以数值计算是否收敛求解排土场的稳定性系数。分析结果表明: 若当地降雨强度大于30.72 mm/h且持续时间超过30min时, 排土场就有发生滑坡危险的可能, 需要提前做好灾害评估和险情预防工作。

关键词: 排土场; 降雨; 流固耦合; ABAQUS软件; 边坡稳定性; 地质灾害

中图分类号: TU42; P642.22

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2017)02-0222-05

Three - dimensional stability analysis of city waste dump slope

JIN Fuxi, QIAN Yi, YUAN Quanwei

(Key Laboratory of Metallogenic Prediction of Nonferrous Metals and Geological Environmental Monitoring of the Ministry of Education, School of Geosciences and Info - Physics, Central South University, Changsha 410083, China)

Abstract: Considering the problems that it would induce disasters of the waste dump near a city under heavy rainfall, four kinds of heavy rainfalls were designed. Using modeling function of ANSYS software, a model for the waste dump stability was established. The ABAQUS finite element analysis software was utilized to analyze fluid - solid coupling of unsaturated soils. Four kinds of heavy rainfalls were imposed on the dump. also considering that the permeability coefficient of soil was influenced by soil porosity ratio and moisture content. By monitoring wheather there was an abrupt increase in displacement of characteristic places of finite element and whether plastic deformation area cuts through the dump, whether or not there was a failure of the risk was judged. Besides, whether the finite element numerical calculation was convergence was used to solve the factor of stability. The results showed that, the waste dump might slide in the case of rainfall intensity larger than 30.72 mm/h and its duration longer than 30 minutes, this reminded the relevant departments to prepare for disaster assessment and risk prevention.

Key words: waste dump; rainfall; fluid - solid coupling; ABAQUS software; slop stability; geological hazard

1 研究背景

排土场是矿产资源露天开采和城市工程建设中常见的人工堆积体, 受地震、降雨等因素作用, 容易发生滑坡、泥石流等地质灾害。在我国南方降雨入渗是诱发排土场地质灾害的主要因素。如2015年深圳市弃土场发生滑坡, 掩埋多栋厂房, 造成重大伤

亡。降雨入渗导致岩土体的抗剪强度降低, 地下水位上升, 孔隙水压力升高。长时间强降雨会使地下水位以上区域出现暂态饱和区。许多学者在此方面开展了工作, 利用不同的方法对降雨作用下的排土场稳定性进行研究, 林鸿州等^[1]、李焕强等^[2]、豆红强等^[3]用物理模型及人工模拟降雨实验方法进行研究; 张亚宾等^[4]基于Geo - studio软件中的不同算

收稿日期: 2016-12-17; 修回日期: 2017-01-17

作者简介: 金福喜(1965-), 男, 内蒙古赤峰人, 博士, 副教授, 研究生导师, 主要从事灾害地质及其防治方面的教学和科研工作。

通讯作者: 钱毅(1989-), 男, 湖南长沙人, 硕士研究生, 研究方向为边坡稳定性。

法,利用 SLOPE/W、SEEP/W 等多个模块研究降雨作用下排土场边坡的稳定性;郑开欢等^[5]、李超等^[6]、黄鑫等^[7]用基于极限平衡理论的条分法及其改进方法。但主要使用二维平面分析方法,很多学者利用商用平台实现排土场三维稳定性数值分析^[8-11]。在这些方法中,数值分析方法因计算效率高、成本低、容易实现三维仿真分析、结果直观等特点而得到广泛应用。到目前为止,关于露天矿排土场稳定性研究的较多,但有关城市排土场的研究还很少。

本文结合某城市工程建设中排土场的特殊情况,用 ABAQUS 分析几种强度降雨对排土场的影响,为险情预防城市排土场灾害评估和防治提供参考。

2 工程概况

南方某城市排土场(图1),场内填土以第四系黏土为主,夹杂少量块石、碎石,堆填时间8a,排土场土体最大厚度约50m,土方量约 $9.909 \times 10^5 \text{ m}^3$ 。排土场未分台阶堆土,坡面连续坡型起伏,坡角 $20^\circ \sim 40^\circ$,土体松散,自稳能力较差。由于缺少支护,排土场坡顶出现裂隙,斜坡存在局部滑塌迹象。排土形成松散坝体,导致沟谷溪流受阻,形成堰塞湖,湖水面积约 $1.069 \times 10^4 \text{ m}^2$,水深2~5m。由于未设排水设施,若水位不断上涨对排土边坡稳定性将产生不利影响,甚至有溃坝危险。

据现场调查,在无强降雨等因素影响时,排土场具有暂时整体自稳能力;但排土场处在南方多雨地区,雨季时雨量充足,短时间强降雨或持续性降雨可能诱发滑坡,甚至演化为泥石流。排土场西侧紧邻交通要道,下游为砂石场,排土场周边未设置拦泥坝等设施,一旦出现险情,直接危害下游居民区和采砂场工地的安全,后果不堪设想。因此,分析排土场在降雨作用下的稳定性具有理论和现实意义。

3 研究方法

边坡稳定性有限元分析的强度折减法一般采用如下3种失稳判据^[12-13]:(1)数值计算是否收敛;(2)特征部位位移是否突变;(3)塑性区是否贯通。这3种判据均能判断模型是否发生破坏,区别在于判断结果偏于安全的不同程度。本研究选用三种失稳判据,以数值计算是否收敛求解排土场的稳定性系数,在指定的收敛准则下算法不能收敛,即表示应力分布不能满足土体的破坏准则和总体平衡要求。以塑性变形区是否贯通及特征部位位移是否突增来

判断模型是否发生破坏。

在非饱和土流固耦合分析中,土体固结压缩后,孔隙比减小,水在土体中渗流的难度增加,即土体的渗透系数随孔隙比的减小而减小。土体的力学参数会随着含水率的变化而变化,这对稳定性分析结果产生根本影响。为此,非饱和土的渗透系数随饱和度变化的曲线是根据公式(1)和(2)计算得到的,吸湿曲线根据公式(2)计算。

土体的材料渗透系数随基质吸力变化的公式^[14]如下:

$$K_w = a_w K_{ws} / [a_w + (b_w(u_a - u_w))^{c_w}] \quad (1)$$

式中: K_w 为渗透系数,m/s; K_{ws} 为土体饱和时的渗透系数,m/s; u_a 为土体中的气压,kPa; u_w 为土体中的水压,kPa; a_w 、 b_w 、 c_w 均为材料系数。

土体饱和度随基质吸力的公式^[14]如下:

$$S_r = S_i + (S_n - S_i) a_s / [a_s + (b_s(u_a - u_w))^{c_s}] \quad (2)$$

式中: S_r 为饱和度; S_n 为最大饱和度,取1; S_i 为残余饱和度,取0.08; a_s 、 b_s 、 c_s 均为材料系数。

降雨强度指单位时段内的降雨量,入渗强度即单位时间入渗土体的深度。本文考虑的影响因素是土体孔隙比和孔压,边坡的几何形态。在非饱和入渗分析中,有多少降雨量进入土坡中,是直接影响边坡稳定性的重要因素。通常,渗流边界条件有两类:一是已知渗流势函数值的第一类边界条件;二是边界上流量已知的第二类边界条件^[15]。本文选用第二种边界条件,为满足数学上的正交通量原理,按坡面正交方向分解降雨强度以后再正交入渗,公式如下:

$$\beta = \gamma \times \cos \alpha \quad (3)$$

式中: β 为入渗边界条件强度,mm/h; γ 为降雨强度,mm/h; α 为平均坡度,rad; $\cos \alpha$ 为修正系数。

4 模拟软件 ABAQUS

排土场原地形为缓坡山谷地形,地形起伏较复杂,谷底有一溪流常年有流水;由于该城市排土场土体堆放无规律,边坡没有较为固定的走向和明显的倾向。因此,排土场主滑方向不明确,潜在滑动面也较难确定,二维极限平衡法计算结果难以反映堆土场整体稳定性。ABAQUS是一套功能强大的工程模拟的有限元软件,其解决问题的范围从相对简单的线性分析到许多复杂的非线性问题。该软件的流体渗透/应力耦合分析模块按照非饱和土力学理论,能够很好地分析岩土体的流固耦合问题。首先定义流

固耦合分析步,其次确定流固耦合分析接触区域,最后定义流固耦合区域需要交换的物理量。

4.1 建立分析模型及土样力学参数

ABAQUS 软件前处理模块不便建立较复杂几何模型,本研究选用 ANSYS 软件来建模,根据排土场地形图,将等高线中的拟合高程点数据提取出来,然后将离散的数据点均匀化,在 ANSYS 中利用 APDL



图1 某城市排土场

表 1 模型材料力学参数						
材料名称	密度 $\rho / (\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	黏聚力 c / kPa	内摩擦角 $\varphi / (^{\circ})$	泊松比 ν	弹性模量 E / MPa	土体饱和时的渗透系数 $K_{\text{es}} / (\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$
弃填土	1.91	27.54	16.35	0.45	5.21	5.32×10^{-6}
残坡积土	1.87	30.12	15.86	0.40	4.90	4.10×10^{-8}

注:两种土均为黏土,土体颗粒粒径基本上均小于 0.075 mm。

在现场勘查的基础上,只考虑土体自重时,排土场模型能够保持基本稳定,用强度折减法^[11]求其稳定性系数 F_s 为 1.122, F_s 与坡顶监测点(监测点为有限元模型单元节点 7149)水平位移关系见图 4。实际情况与该结果基本相符,表明由土工试验获得的参数比较符合实际,可用于进一步的分析计算。

4.2 降雨类型设计

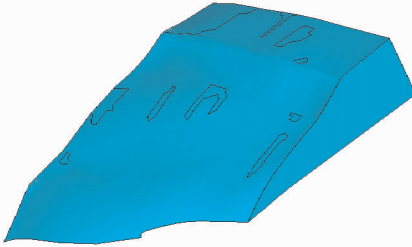
根据该排土场所在城市暴雨洪水查算手册,设计了 4 种降雨强度类型,如表 2 所示。

表 2 设计的 4 种强降雨类型		
降雨强度/ $(\text{mm} \cdot \text{h}^{-1})$	降雨历时/h	降雨总量/mm
154.800	1	154.800
107.075	6	642.450
70.300	24	1687.200
30.720	72	2211.840

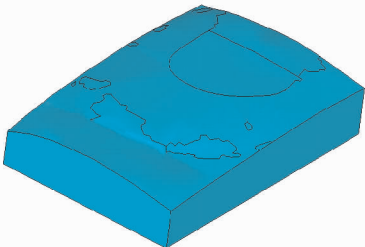
4.3 降雨前排土场的状态

根据表 1 以及饱和度与基质吸力关系曲线,饱和度和与渗透系数的关系曲线设置模型各位置的材料属性参数,建立 Geostatic 和 soils 类型的分析步,约束位移,设置孔压边界条件,进行渗流计算和力学计

语言编程连线,进而创建面及实体,分别形成原始地形和排土后的有限元模型,将其导入 ABAQUS 软件形成部件,通过 Boolean 运算形成排土场计算模型。覆盖土及原始地形 ANSYS 模型(见图 2),图 3 为 ABAQUS 网格化模型。计算模型长 140 m,宽 120 m,高 50.4 m,共包含 57758 个单元。表 1 为土工试验得出的现场土样力学性质参数。



(a)覆盖土ANSYS模型



(b)原始地形ANSYS模型

图2 排土场 ANSYS 模型

算至斜坡达到初始应力平衡状态,得到排土场降雨前的真实状态。

图 5 显示了按天然条件形成的饱和度云图,从图 5 中可以看出,排土场斜坡表面含水率约 11% ~ 27%,深度 27 m 左右,含水率约 40%,含水率随深度的增加而增加,深度约 45 m 左右,含水率接近饱和。现场取样时发现的结果与这个含水率分布较为接近,可认为降雨前的排土场初始有效应力状态和含水率分布。

4.4 降雨入渗计算

根据设计的 4 种降雨强度类型,建立 4 个计算模型。依次在 Step 模块中重新建立 Geostatic 和 soils 类型分析步,设置分析步的时长,即降雨历时时间。采用直接牛顿法求解联立方程组,非对称矩阵存储模式。在 Load 模块 Geostatic 分析步中施加重力荷载,约束模型底部水平和竖直方向的位移,两侧竖直方向的位移,前后水平方向的位移。在分析区域坡顶和坡面设置降雨入渗边界条件强度。保留该排土场降雨前的孔隙比和孔隙压力,然后在稳定性分析中通过编辑关键字读入排土场降雨前有效应力分布状态分别进行模型计算。

5 计算结果与稳定性分析

图 6 ~ 9 显示了分别将 4 种降雨强度类型施加在排土场后模型特征部位位移曲线及塑形变形区(特征部位为滑体表面中下部,排土场斜坡南端监测点为有限元模型单元节点 12 111)。

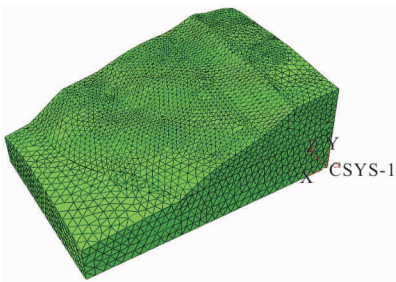


图 3 排土场 ABAQUS 模型

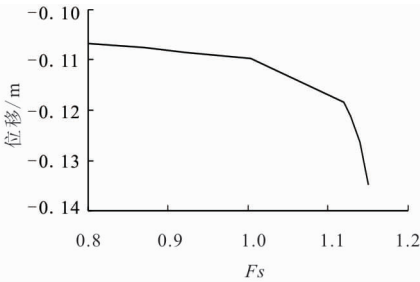


图 4 F_s 与水平位移的关系图

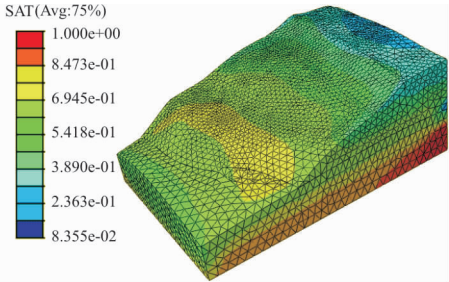
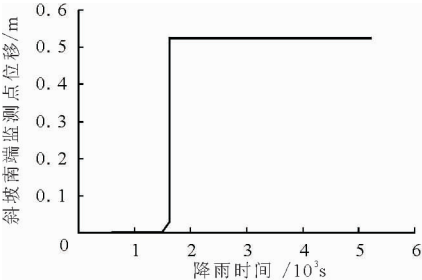
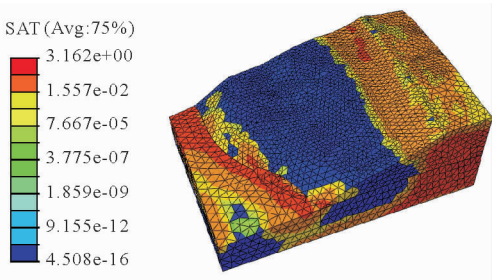


图 5 降雨前饱和度分布云图

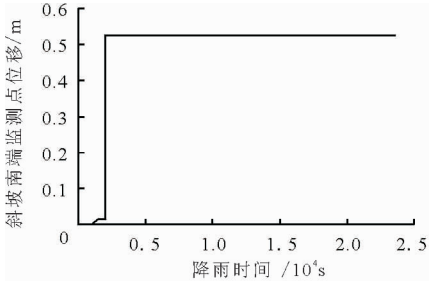


(a) 特征部位位移变形曲线

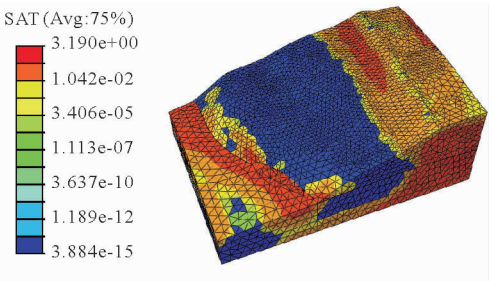


(b) 排土场塑性变形区

图 6 降雨强度 154.80 mm/h 历时 1 h 的排土场变形

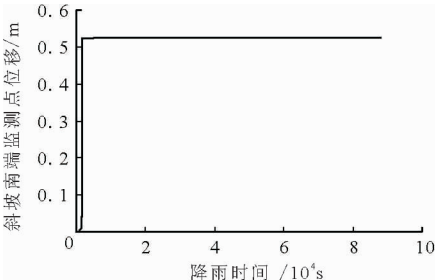


(a) 特征部位位移变形曲线

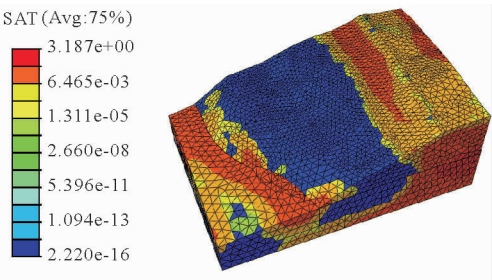


(b) 排土场塑性变形区

图 7 降雨强度 107.08 mm/h 历时 6 h 降雨结果

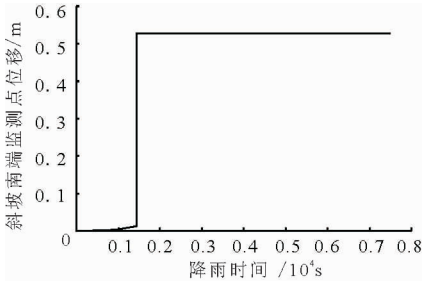


(a) 特征部位位移变形曲线

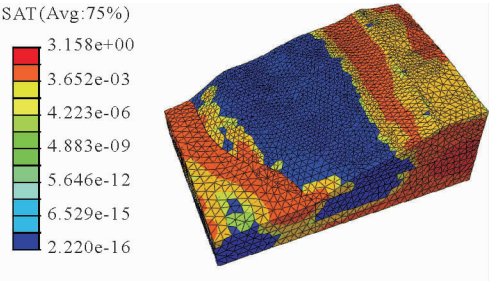


(b) 排土场塑性变形区

图 8 降雨强度 70.30 mm/h 历时 24 h 降雨结果



(a) 特征部位位移变形曲线



(b) 排土场塑性变形区

图 9 降雨强度 30.72 mm/h 历时 72 h 降雨结果

从图 6~9 中可以看出,4 个模拟结果的有限元模型部位位移曲线均在某个时间点发生了明显的突变,位移量均突然增约 0.53 m,依相关规范该位移已超出了排土场允许的极限变形值。此外,4 个模拟结果显示排土场的塑形变形区均贯穿了排土场土体,形成一个封闭的滑动区。坡脚浅层等效塑性区范围较广。随着降雨时间的推移,塑性区在坡面上部呈逐渐扩展趋势。由此说明,4 种降雨强度类型均使排土场发生了一定程度的破坏。根据特征部位位移曲线突变时对应的降雨时间,4 个突变时间点相差较小,均在降雨后 30 min 左右。可见,在降雨强度不大时,影响该排土场边坡稳定性的主要因素是降雨持续时间,而不是降雨强度;因为当降雨强度很大时,降雨强度大于土体的入渗容量,部分降雨并不入渗,此时坡面的土体基本处于饱和状态,雨水将形成地表径流。当地高强度降雨持续时间通常不会很长,所以一般的短时间暴雨不会使排土场发生滑坡,这与之前人工现场巡查结果吻合;相对地,假如降雨持续时间长且强度还未达到土壤的允许入渗容量,此时雨水入渗率高,排土场稳定性将持续降低,发生滑坡的可能性增大。

30.72 mm/h 是较小的降雨强度,可是当时间持续了 30 min 时仍使排土场出现了破坏。由此可推断,当降雨强度比较小时,只要降雨持续到一定时长便会导致该排土场滑坡,相关部门需要提前做好险情预防工作。

6 结 论

本文针对某城市排土场边坡,用 ABAQUS 分析 4 种强度的降雨对排土场的影响,同时考虑排土场土体的渗透系数受土的孔隙比和含水率的影响,采用塑性变形区是否贯通及特征部位位移是否突增来判断排土场是否发生破坏。

(1)从分析结果来看,若出现强度在 30.72 mm/h 以上的降雨,持续时间超过 30 min,排土场将有局部失稳甚至滑坡的危险。

(2)在降雨强度不大时,影响该排土场边坡稳定性的主要因素是降雨持续时间。

(3)排土场大多为新近填土,黏土含量高,固结程度低,且上游形成了堰塞湖,一旦失稳滑坡易转化为泥石流。

(4)应加强城市排土场稳定性评价和危险性评估,降低排土场总堆置高度,分台阶堆置,减小坡度,以增加排土场自身稳定性。为防止上游侧堰塞湖水位过高导致溃坝危险,应做好排水措施,并在下游侧排土场坡脚构筑拦挡坝。

参考文献:

- [1] 林鸿州,于玉贞,李广信,等.降雨特性对土质边坡失稳的影响[J].岩石力学与工程学报,2009,28(1):198-204.
- [2] 李焕强,孙红月,孙新民,等.降雨入渗对边坡形状影响的模型实验研究[J].岩土工程学报,2009,31(4):589-594.
- [3] 豆红强,韩同春,龚晓南,等.降雨条件下考虑饱和和渗透系数变异性的边坡可靠度分析[J].岩土力学,2016,37(4):1144-1152.
- [4] 张亚宾,陈超,甘德清.降雨对排土场边坡渗流及稳定性的影响[J].金属矿山,2016(5):173-177.
- [5] 郑开欢,罗周全,罗成彦,等.持续暴雨作用下排土场层状碎石土边坡稳定性[J].工程科学学报,2016,38(9):1204-1211.
- [6] 李超,马淑芝,贾洪彪,等.降雨入渗条件下粗粒排土场稳定性分析[J].金属矿山,2015(9):147-151.
- [7] 黄鑫,张晓辉,薛雷,等.陕西省金堆城露天矿排土场高边坡稳定性评价[J].中国地质灾害与防治学报,2010,21(2):40-43.
- [8] 吴长富,朱向荣,尹小涛,等.强降雨条件下土质边坡瞬态稳定性分析[J].岩土力学,2008,29(2):386-391.
- [9] 王协群,张有祥,邹维列,等.降雨入渗条件下非饱和路堤变形与边坡的稳定数值模拟[J].岩土力学,2010,31(11):3640-3644.
- [10] 付宏渊,曾铃,王桂尧,等.降雨入渗条件下软岩边坡稳定性分析[J].岩土力学,2012,33(8):2359-2365.
- [11] 刘新喜,夏元友,蔡俊杰,等.降雨入渗下强风化软岩高填方路基边坡稳定性研究[J].岩土力学,2007,28(8):1705-1709.
- [12] 马建勋,赖志生,蔡庆娥,等.基于强度折减法的边坡稳定性三维有限元分析[J].岩石力学与工程学报,2004,23(16):2690-2693.
- [13] 陈力华,靳晓光.有限元强度折减法中边坡三种失效判据的适用性研究[J].土木工程学报,2012,45(9):136-145.
- [14] 崔亮,崔可锐.基于 ABAQUS 对降雨条件下非饱和土坡稳定性的研究[J].合肥工业大学学报(自然科学版),2012,35(11):1560-1564.
- [15] 王成华,李腾年.非饱和土坡面降雨入渗边界条件的研究进展[J].工业建筑,2015,45(12):156-162.