

# 强降雨入渗下复杂地形排土场稳定性分析

黄刚海

(中国科学院武汉岩土力学研究所, 湖北 武汉 430071)

**摘要:** 针对某矿复杂地形排土场在降雨作用下可能诱发灾害的问题, 设计了4种百年一遇强降雨类型。借助ANSYS建模功能, 生成排土场复杂的计算模型; 利用FLAC<sup>3D</sup>流固耦合模块, 分别将4种强降雨类型施加在排土场上。以塑形变形区是否贯通以及特征部位位移是否发生突增来判断排土场是否发生破坏。结果表明, 若出现强度在5 mm/h以上且持续时间超过40 min的降雨, 排土场将有滑坡危险。分析结果为矿山做好险情预防工作提供理论和技术支持。

**关键词:** 露天采矿; 排土场; 稳定性分析; 降雨; FLAC<sup>3D</sup>

中图分类号: TU442 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2013)S2-0292-04

作者简介: 黄刚海(1986-), 男, 广西河池人, 博士研究生, 主要从事采矿与岩土工程数值方法方面研究工作。E-mail: huanganghai@163.com。

## Stability analysis of waste dump with complex terrain under heavy rainfall infiltration

HUANG Gang-hai

(Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China)

**Abstract:** In view of the problem that it will induce disasters if heavy rainfall influences the waste dump with complex terrain in a mine, four kinds of heavy rainfalls with return period of 100 years are designed. With the help of modeling function of ANSYS, a complex model for the dump is established. Utilizing the fluid-solid coupling module of FLAC<sup>3D</sup>, four kinds of heavy rainfalls are imposed on the dump, respectively. It uses two criteria, whether plastic deformation area cuts through the dump and whether displacement value of representative position uprushes, to judge whether or not failure of the dump occurs. The results show that, the waste dump will slide in the case of rainfall if its intensity is larger than 5 mm/h and its duration is longer than 40 minutes. This study may provide theoretical and technical support for the mine to prepare for risk prevention.

**Key words:** open pit mining; waste dump; stability analysis; rainfall; FLAC<sup>3D</sup>

## 0 引言

排土场是矿产资源露天开采中常见的地质体, 受地震、降雨等自然因素作用, 容易发生滑坡、泥石流等地质灾害。在中国, 大地震罕见, 降雨是诱发排土场地质灾害的主要因素, 分析排土场在降雨作用下的稳定性是预测和防治排土场地质灾害必不可少的环节。在此方面许多学者做了富有成效的研究工作<sup>[1-7]</sup>。

对排土场在降雨作用下的稳定性研究, 一些学者用基于极限平衡理论的条分法及其改进方法, 但主要局限于二维分析; 一些学者用模型实验进行研究<sup>[1-2]</sup>; 大部分学者利用商用软件实现排土场三维稳定性数值分析<sup>[3-7]</sup>。在这些方法中, 数值分析方法因成本低、容易实现三维分析、结果直观等特点而得到广泛应用。

本文针对某矿排土场的特殊情况, 用FLAC<sup>3D</sup>分析4种百年一遇强降雨对排土场的影响, 为险情预防方案设计提供技术支持。

## 1 工程概况

图1所示为南方某露天矿排土场。排土场土体最大厚度约61 m, 规模较大。排土场未分台阶堆土, 坡面连续, 最大坡角约36°, 坡面较陡, 自稳能力差。由于缺少维护, 且未设置必要排水设施, 以致排土场坡面上有多条冲沟(图1右下角), 坡顶出现许多大裂隙(图1左上角), 排土场存在滑坡迹象。

据现场调查, 在无降雨等因素影响时, 排土场具有一定自稳能力; 但排土场处在南方多雨地区, 雨季时雨量充足, 可能诱发滑坡或泥石流。排土场下游约200 m处为矿山尾矿库, 规模大; 排土场周边未设置拦泥坝等设施, 若出现险情, 将可能诱发尾矿库溃坝, 后果不堪设想。因此, 分析排土场在降雨作用下的稳

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973)项目(2011CB710602);

中国科学院重点部署项目(KZZD-EW-05-03)

收稿日期: 2013-06-07

表 1 模型材料力学参数

Table 1 Mechanical parameters of model materials

材料名称	密度 $\rho$ /(kg·m $^{-3}$ )	体积模量 $K$ /GPa	黏聚力 $c$ /MPa	内摩擦角 $\varphi$ /(°)	切变模量 $G$ /GPa	孔隙率 $e$	饱和度 $s$	渗透系数/(cm·s $^{-1}$ )
原始地形土壤	1900	0.003400	0.0375	18.4	0.001569	0.4737	0.8700	$6.75 \times 10^{-6}$
排土体土壤	1970	0.003722	0.0360	19.4	0.001241	0.3976	0.8291	$4.95 \times 10^{-4}$

注：两种土壤均为粉质黏土，土体颗粒粒径基本上均小于 0.075 mm；表中饱和度为各深度土样饱和度平均值。

定性具有重大意义。

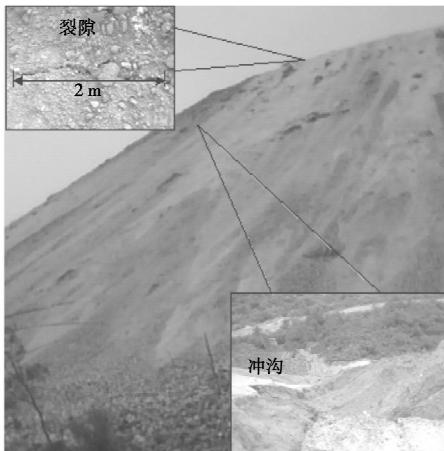


图 1 排土场照片

Fig. 1 Picture of waste dump

## 2 分析准备工作

排土场原地形为临谷缓坡山地，地形复杂；此外，由于排土无规律，以致排土场形状极不规则，边坡没有较为固定的倾向。因此，排土场潜在滑动面很难确定，滑坡方向也不明确，这决定了不能用二维分析来研究它的稳定性。FLAC<sup>3D</sup>有限差分程序自问世以来，已被许多学者成功地应用于岩土体的三维空间行为分析，该程序的流固耦合模块能够很好地分析岩土体的渗流问题。鉴于此，本研究选用 FLAC<sup>3D</sup> 来分析排土场在降雨作用下的稳定性。

### 2.1 建模及材料力学参数

由于 FLAC<sup>3D</sup> 难以建立复杂的排土场模型，本研究用 ANSYS 作为建模工具，根据等高线地形图，提取地表一系列的点，将点连成线，用蒙皮技术分别形成原始地形和排土后的地形，通过体积布尔运算形成排土场土体，最后将模型导入 FLAC<sup>3D</sup> 中形成计算模型。图 2 为原始地形及排土场土体 ANSYS 模型，图 3 为用于计算的 FLAC<sup>3D</sup> 模型。整个模型长 280 m，宽 240 m，高 64.4 m，共包含 105087 个单元。表 1 为通过现场取样和土工试验得出的材料力学参数。

据现场勘查，排土场虽能自稳，但富余空间不多。经试算，在只考虑土体自重时，排土场模型能够保持稳定，用强度折减法<sup>[8]</sup>求其稳定性安全系数，结果为

1.13。该结果与实际情况基本相符，表明由土工试验获得的参数比较符合实际，可用于进一步计算。

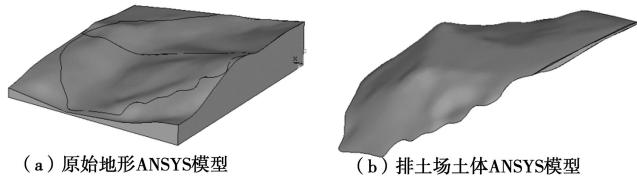
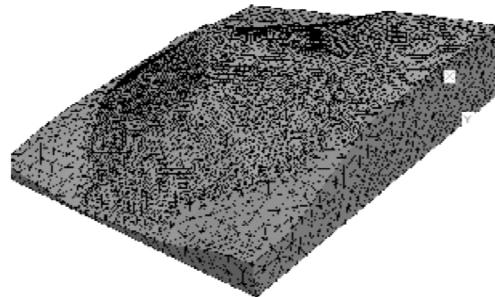


图 2 排土场 ANSYS 模型

Fig. 2 ANSYS model of waste dump

图 3 排土场 FLAC<sup>3D</sup> 模型Fig. 3 FLAC<sup>3D</sup> model of waste dump

### 2.2 降雨类型设计

依据排土场所在地暴雨洪水查算手册，设计了 4 种百年一遇的降雨类型，如表 2 所示。

表 2 设计的 4 种强降雨类型

Table 2 Four kinds of design heavy rainfalls

降雨强度/(mm·h $^{-1}$ )	降雨历时时间/h	降雨总量/mm
90.3000	1	90.300
27.7200	6	166.320
10.8945	24	261.468
5.0750	72	365.400

### 2.3 降雨前排土场的状态

在渗流分析中，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，如何使模型内部含水率分布符合实际至关重要。为此，首先将模型各位置的含水率设置为平均饱和度（表 1 数据），在关闭力学计算情况下进行渗流计算，经过一定时间，模型内部会得到按自然规律形成的含水率分布，这个状态便是排土场真实的含水率分布状态；然后，关闭渗流计算（使含水率分布不变），打开力学计

算至平衡, 得到的状态便是排土场降雨前的真实状态。图 4 显示了按自然规律形成的饱和度云图。从图中可看出, 排土场表面含水率约 20%~30%, 深度 5 m 左右时含水率约 60%~70%, 含水率随深度增大而增加, 深度约 40 m 时, 含水率接近饱和 (显示条未显示)。这个含水率分布和现场取样时发现的结果较为接近, 可认为这是降雨前排土场真实的含水率分布。以下所有降雨类型均在这个状态的基础上施加的。

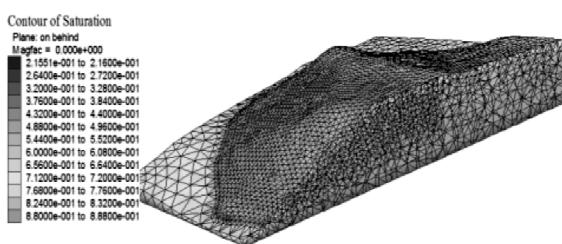


图 4 降雨前排土场含水率分布状态

Fig. 4 Distribution of moisture of dump before raining

### 3 稳定性分析

#### 3.1 失稳判据

综观国内外, 边坡稳定性数值分析一般采用如下 3 种失稳判据<sup>[8]</sup>: 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 种判据均能正确地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。本研究综合选用后两种失稳判据, 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。

#### 3.2 模拟结果分析

图 5~8 分别显示了 4 种降雨类型施加在排土场后模型的塑形变形区及特征部位位移曲线 (特征部位为滑动体表面中部, 为节省篇幅, 将模型图置于位移曲线图中)。

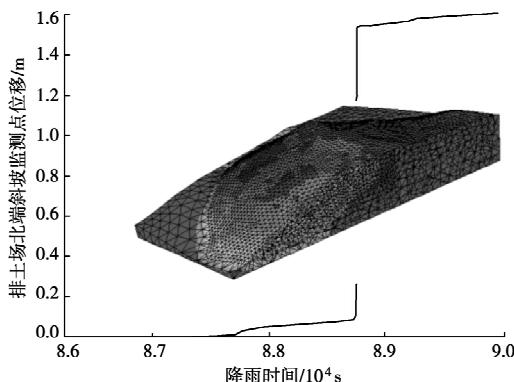


图 5 1 h 降雨结果

Fig. 5 Results of 1-hour rainfall

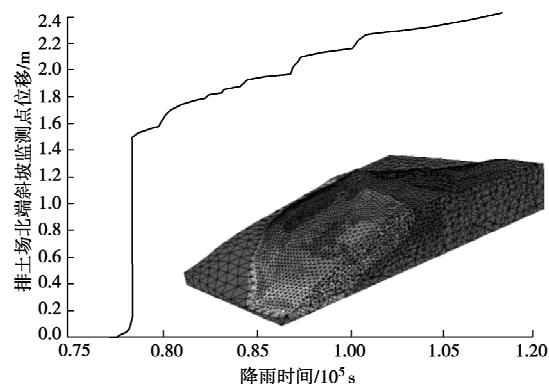


图 6 6 h 降雨结果

Fig. 6 Results of 6-hour rainfall

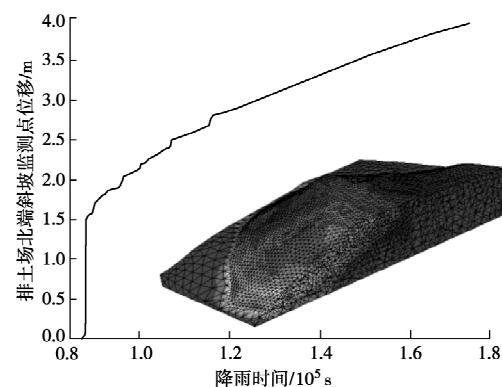


图 7 24 h 降雨结果

Fig. 7 Results of 24-hour rainfall

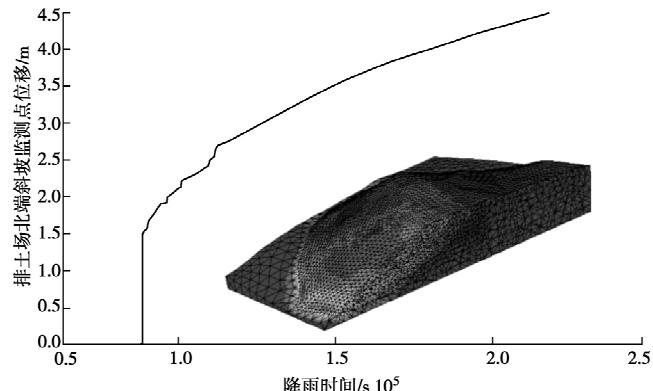


图 8 72 h 降雨结果

Fig. 8 Results of 72-hour rainfall

从图 5~8 可以看出, 4 个结果的特征部位位移曲线均发生了突变, 突变时位移量均突然增大约 1.5 m, 该位移量大大超出了岩土体允许的变形极限。此外, 4 个结果的塑形变形区均贯穿了排土场土体, 形成一个封闭的滑动体。由此说明, 4 种降雨类型均使排土场发生破坏。

读取位移曲线突变时对应的降雨时间, 发现 4 个突变时间相差不大, 均在降雨后 40 min 左右。由此可见, 在降雨强度不是很小时, 影响排土场稳定的主要

因素是降雨时间, 而不是降雨强度。原因在于, 当降雨强度非常大时, 由于雨量大大超过了土体的入渗能力, 降雨将形成径流直接从地表流走; 由于高强度降雨通常不会持续很长时间, 所以一般的短时间暴雨不会使排土场发生破坏(这与本排土场之前经历短时间暴雨而未发生滑坡相符); 相反, 如果降雨强度适中, 大约等于土体的入渗能力, 降雨持续时间长, 倒增大了排土场失稳的概率。

设计的第4种降雨类型,  $5 \text{ mm/h}$  算是很小的降雨强度, 但当降雨持续了40 min时仍可使排土场发生破坏。由此可推断, 当降雨强度不是非常小时, 只要降雨持续到一定时间(超过40 min)便可使排土场发生滑坡。

## 4 结 论

(1) 从分析结果来看, 若出现强度在 $5 \text{ mm/h}$ 以上的降雨, 持续时间超过40 min时, 排土场将有滑坡危险。为防止排土场滑坡诱发二次灾害, 应在排土场滑坡方向构筑拦泥坝。

(2) 为增加排土场自身稳定性, 应按设计要求降低排土场高度, 将土体分台阶堆置, 台阶高度及台阶间小平台宽度均应符合相关规定。此外, 后续排土过程应将土体分级排放, 尽量将块度较大的弃石垫于排土场底部, 防止孤石滚落撞损拦泥坝。

(3) 值得注意的是, 分析过程未考虑土体基质吸力影响, 略微降低了排土场的稳定性。同时, 由于视排土场为均质体, 未考虑裂隙等弱面的影响, 从一定程度上提高了排土场的稳定性。这两方面综合起来, 让稳定性分析结果与实际情况的出入得以降低。另外, 排土场是人工堆积体, 和自然形成的岩质边坡相比更能视为均质体。因此, 本文分析结果在一定程度上是可以接受的, 可为类似工程问题的分析提供借鉴。

## 参考文献:

- [1] 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. (LI Huan-qiang, SUN Hong-yue, SUN Xin-min, et al. Influence of rainfall infiltration on slopes by physical model test[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2009, 31(4): 589 - 594. (in Chinese))
- [2] 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. (LIN Hung-chou, YU Yu-zhen, LI Guang-xin, et al. Influence of rainfall characteristics on soil slope failure[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(1): 198 - 204. (in Chinese))
- [3] 徐 咏, 朱以文, 蔡元奇, 等. 降雨入渗条件下非饱和土边坡稳定性分析[J]. 岩土力学, 2005, 26(12): 1957 - 1962. (XU Han, ZHU Yi-wen, CAI Yuan-qi, et al. Stability analysis of unsaturated soil slopes under rainfall infiltration[J]. Rock and Soil Mechanics, 2005, 26(12): 1957 - 1962. (in Chinese))
- [4] 樊有维, 章 羽, 金雪莲, 等. 降雨对均质各向异性土质边坡稳定性的影响[J]. 岩土力学, 2006, 27(增刊): 1097 - 1102. (FAN You-wei, ZHANG Yu, JIN Xue-lian, et al. Effect of rainfall on stability of anisotropic soil slope[J]. Rock and Soil Mechanics, 2006, 27(S): 1097 - 1102. (in Chinese))
- [5] 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. (LIU Xin-xi, XIA Yuan-you, CAI Jun-jie, et al. Study on stability of high-filled embankment slope of highly weathered soft rock under rainfall infiltration[J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, 28(8): 1705 - 1709. (in Chinese))
- [6] 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. (WU Chang-fu, ZHU Xiang-rong, YIN Xiao-tao, et al. Analysis of soil slope's transient stability under intensive rainfall[J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, 29(2): 386 - 391. (in Chinese))
- [7] 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. (WANG Xie-qun, ZHANG You-xiang, ZOU Wei-lie, et al. Numerical simulation for unsaturated road-embankment deformation and slope stability under rainfall infiltration[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(11): 3640 - 3644. (in Chinese))
- [8] 陈育民, 徐鼎平. FLAC/FLAC<sup>3D</sup>基础与工程实例[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2008. (CHEN Yu-min, XU Ding-ping. FLAC/FLAC<sup>3D</sup> foundation and engineering examples[M]. Beijing: China Water Conservancy and Hydropower Press, 2008. (in Chinese))

(本文责编 胡海霞)