

岩土工程

重庆矿区矸石山滑坡成因分析

臧亚君¹, 刘东燕¹, 蒋克锋²

(1 重庆大学土木工程学院, 重庆 400045; 2 中国人民解放军后勤工程学院, 重庆 400016)

[摘 要] 重庆东林煤矿矸石山曾发生两次滑坡事故, 造成民房被毁和重大人员伤亡。本文在勘查该矸石山滑坡发育背景、分析灾害主要成因的基础上, 运用极限分析法和 FLAC 数值模拟对该矸石山进行了稳定性分析评价, 揭示了该滑坡产生的原因为: 矸石山堆积方式、堆积地点的地形地貌、排弃强度、矸石散体的物理力学性质是致灾潜在原因; 长期降雨是灾害的主要诱因; 煤矸石山的剧烈自燃爆炸应是灾害的主要外部激发因素。文章将定性分析与定量计算相结合, 并结合工程实际提出了矸石山滑坡灾害防治措施, 研究成果可为类似矸石山或排土场的滑坡灾害防治提供参考。

[关键词] 矸石山 滑坡灾害 成因分析 稳定性分析。

[中图分类号] P642 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 0495 - 5331(2008)02 - 0087 - 06

煤矸石是煤炭工业在采煤和洗选加工过程中产生的废弃物, 目前一部分矸石被用于井下充填, 而大部分矸石则被弃置于山沟、平川一带, 形成矸石山。如果矸石山堆积过高、坡度过大或受到外力作用时, 容易发生坍塌、滑坡、泥石流等重力灾害。

尤其在重庆这样一个山区, 煤矸石大多堆于沟谷中, 成为泥石流的固体物质来源, 如果矸石堆积区的河谷有一定的汇水面积和适宜的坡度, 在雨季, 一旦雨量达到 60mm/h, 即可爆发泥石流。2004 年 6 月 5 日重庆万盛南铜矿业公司东林煤矿矸石山垮塌引起滑坡, 造成民房被毁和重大人员伤亡, 此次灾害共涉及 14 户居民 56 人, 其中 17 人死亡。第二次滑坡事故是 2005 年 10 月 25 日早上 7 点, 连日阴雨大量的雨水渗入万盛区万东镇胡家沟煤矸石山, 使煤矸石山发生爆炸垮塌事故。约 300 000m³ 矸石向前推移了 400m, 形成长约 1000m、宽 150m、厚 5m 的灰黑色矸石堆积带, 覆盖在去年的塌方体上, 造成 1 名女孩失踪 (图 1)。灾害发生后, 引起广泛关注, 国内外不少学者针对灾害原因进行了分析, 均为定性分析及部分原因探讨, 未有定量计算分析及系统研究。

1 滑坡发育概况

1.1 地理位置及地形地貌

万盛区处于四川盆地与黔北山区过渡带上, 由



图 1 重庆万盛矸石山垮塌场景

西北到东南地形逐渐升高: 西北属川南低山丘陵区, 海拔 190 ~ 500m, 高差 300m 以下, 东南属黔北中高山区, 海拔 1200 ~ 1400m, 区内山脉大体呈南北向延伸, 与地质构造线一致。该区富含煤系地层, 万盛区因矿设区, 是重庆市 5 大矿区之一。滑坡发生在万盛区万东镇新华村胡家沟, 为低山丘陵区向中山过渡区, 海拔 500 ~ 1000m, 高差 300 ~ 500m。

1.2 气象水文

矿区气候温湿多雨, 属亚热带湿热气候, 四季分明, 夏季炎热, 冬季寒冷。枯雨季明显, 5 ~ 10 月为雨季, 其降雨量占全年的 80% 左右。据南桐气象站 1983 ~ 1991 年资料统计, 年降雨量在 1102.6 ~

[收稿日期] 2008 - 01 - 03; [修订日期] 2008 - 04 - 03。

[基金项目] 重庆国土资源和房屋管理局科研计划项目 (财建 [2003] 660 号资助)

[第一作者简介] 臧亚君 (1976 年 —), 女, 2004 年毕业于成都理工大学, 获硕士学位, 在读博士生, 现主要从事岩土稳定性方面的研究。

1560.4mm之间,年平均降雨量 1225.00mm,最大日降雨量 123.8mm(1983年 7月 14日)。最高气温 41.4,最低气温 -0.8,年平均气温 17.5,年平均相对湿度为 80%~83%;年平均蒸发量 1087.7~1328.7mm。区内多西北风,一般风力为 3~4级,多年平均风速 1.3m/s,最大瞬间风速 28m/s。

1.3 地质概况

万盛区境出露地层众多,但全为沉积岩系,除泥盆系、石炭系、白垩系、第三系缺失处,从寒武系至第四系均有不同程度的发育,共有 7个系 31个地层单位。自东向西,地层由老变新,古生界出露面积 344.84 km²,占区幅员面积的 60.95%,中生界出露面积 220.92km²,占 39.05%。区境地质结构为川东褶皱带与川鄂湘黔隆起褶皱带交接部,大致可以孝子河~青年~关坝连线,以东为川鄂湘黔隆起褶皱带西缘,构造相对复杂;以西以川东褶皱带东缘,构造比较简单。

1.4 水文地质条件

地下水按赋存条件及岩土体含水类型可划分为:孔隙水和岩溶裂隙水。孔隙水:主要赋存于矸石堆积层和地势低洼的土层中,主要补给源为大气降水,岩基不利水地下水赋存、运移,为隔水层,大气降雨补给后多顺矸石体与基岩界面流动,在矸石体前缘渗出,水量受降雨控制。矸石体呈松散-稍密状,为随机排弃,根据现场渗水试验,其渗透性好,储水性差,矸石山位于斜坡上,地形较陡,不易汇集地表水,地下水多经斜坡排向山体下方,部分渗入矸石体,故矸石山体内无统一地下水位。岩溶裂隙水:堆积区的自然斜坡地形,坡度约 18°~25°不等,大气降水多顺坡以坡面流形式径流,不利于地下水的入渗。基岩体中以溶孔及小的溶蚀裂隙出现,无溶洞、落水洞,地下水贫乏,水文地质条件简单。

2 滑坡成因机制分析

矸石堆积属于散粒体的一种类型,颗粒非均匀度较大,其临空面以边坡的形式出现。由于矸石散体颗粒具有部分流动性,所以仅能在一定范围内保持形状,新开采矸石堆积体在其自由斜面的角度不大于自然临界坡角(休止角)时,能保持本身的形态,处于平衡状态,具有自组织临界性。当临界状态受扰动时,即在自组织和外力干扰作用下,散粒体能量耗散,将发生局部坍塌、坡体失稳、坡面泥石流等现象。矸石山滑坡灾害的发生,是散粒体系统内各要素通过一系列非平衡不稳定产生空间、时间、功能和结构的自组织过程,导致开放系统远离平衡态的结果。

随着矸石山逐年堆积,不但矸石山的组构特征、规模发生改变,而且还会经历降雨、风化、物理化学变化、外部荷载作用等扰动,系统原有的平衡被打破,系统整体的鲁棒性丧失,原有的临界状态消失,发展过渡到另外一个自组织临界状态。然而,在不同情况的组构特征变化及扰动下程度下所发生“灾变”的机理及规模是各自不同的,因具体情况具体分析。重庆万盛煤矸石山爆裂解体,产生严重的滑坡、碎屑流灾害,灾害的发生与诸多因素有关,主要因素为地形、水的影响、矸石山自燃、排弃强度、堆积方式等。

2.1 地形因素

万盛区万东镇新华村胡家沟,为低山丘陵区向中山过渡区,海拔 500~1000m,高差 300~500m。矸石山最高海拔 540m,山坡坡度较陡,煤矸石崩滑而下,垂直落差 218m,势能条件十分优越,见图 2。

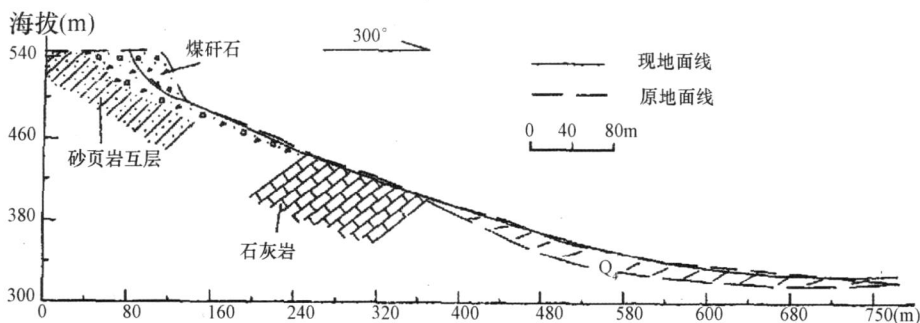


图 2 万盛煤矸石山滑坡 A-A 剖面图

在第一灾害发生时,由于当时降雨条件下,胡家沟矸石山堆积地点的地形促成了泥石流的产生和发展:一方面,地势条件为泥石流提供位能,赋予泥石

流一定的侵蚀、搬运和堆积能量;另一方面,在坡地或沟槽的一定演变阶段中,提供足够数量的水体和土石体。矸石松散碎屑堆积物是泥石流丰富的固体

碎屑物源,不可控的滑坡是形成泥石流的主导因素,矸石自燃后喷爆动力激发的矸石山体滑坡,快速转化成高速流动,形成泥石流。泥石流以滑坡和坡面冲刷形式出现,滑坡和泥石流相伴而生。第一灾害发生后,原有的地形坡度基本没有改变,为第二次灾害的发生提供了地形条件。

2.2 气候及降水

万盛地区年平均降雨量 1225mm,二次灾害发生的之前均经历了连日降雨。研究表明,边坡失稳与总降雨量的大小、日降雨强度以及降雨持续时间的长短等有着直接关系。统计结果表明,一次降雨总量在 150mm ~ 300mm 之间较容易诱发滑坡的发生。矸石山无论是整体失稳,还是矸石山坡体下滑,一般绝大多数都发生在雨季,即多发生在 5 ~ 10 月,降雨量的多少是矸石山是否稳定的重要条件。由 Fredlund 非饱和土抗剪强度公式可知:

$$\tau_f = c' + (\sigma' + u_a) \tan \varphi' + (u_a - u_w) \tan \varphi^b$$

式中: τ_f 为土的抗剪强度; c' 为有效粘聚力, σ' 为总应力; u_w 为孔隙水压力; u_a 为孔隙气压力; φ' 为与净法向应力状态变量 $(\sigma' - u_a)$ 有关的内摩擦角; φ^b 表示抗剪强度随基质吸力 $(u_a - u_w)$ 变化速率。

随着地表水渗入成孔隙水,孔隙水压力增加(基质吸力减小),松散物料抗剪强度降低,大气降水浸蚀危害矸石山稳定的表现在:

1) 大气降水及矸石散体的自身含水为矸石山体内水主要来源。大量的降雨水涌入矸石山,浸透矸石散体,一方面矸石散体质量密度会增加,自重加大,沉降速度相应会加快;另一方面水的渗入不仅产生动、静水压力。同时雨水入渗引起孔隙水压力上升,基质吸力丧失或减小,导致了非饱和矸石抗剪强度降低,影响着边坡稳定性,使其安全因数降低。饱水状态下散体剪切强度试验表明,物料的 φ 值可以减小 20% 以上。矸石堆积体在沉降过程中产生张裂隙,雨水进入张裂隙后迅速产生水压,一方面增加主动压力,减少滑面摩擦力;一方面与场内固有水分形成高含水层,产生一定浮托力,减少抗滑力,并构成了滑体的潜在滑面。

2) 大气降水汇集成的地表水深入矸石山底部进行浸润,使矸石堆积体与地基间形成连续的低抗剪强度带,是滑坡的内在基础,导致矸石山整体或大面积失稳;

3) 降水汇集后,地面积水浸泡、地面雨水迳流冲刷矸石堆积体坡面、坡脚,加剧矸石山沉陷产成裂隙,致使滑坡。

2.3 矸石山自燃、喷爆

滑坡区胡家沟位于重庆市万盛区,属南桐矿区。区内各煤层是变质程度中等的无烟煤。无机组分以硫铁矿和黏土为主,井田各煤层原煤全硫含量均属富硫和高硫煤,煤炭和煤矸石自燃现象非常严重,区内很多煤矸石山都存在自燃情况。硫铁矿和碳,在一定条件下极易氧化。氧化过程是一个放热反应,使环境升温,进而引发煤矸石山的自燃爆炸。硫铁矿氧化在释放大量的同时,生成大量二氧化硫(供氧不足则生成硫磺)。胡家沟煤矸石山滑坡前有明火存在,崩滑当时发出极强烈的二氧化硫刺激味,证实了存在爆炸。

矸石山的喷爆,是一种物理与化学并存的综合类型爆炸,危害较大。其形成机制是因为矸石山自燃所产生的热能与气体超负荷积累与突然释放:即自燃的煤矸石山,由于通风等燃烧条件的改善,使矸石山一定层位的矸石自燃加剧。当燃烧放热反应速度大于散热速度时,产生热积累,矸石山内部温度急速上升,又进一步使燃烧反应速度加快。其所生成的热能和气体在相对密封的矸石山内部急速聚集,使矸石产生爆燃,高压的气体携带炽热的矸石,突破矸石山表层的束缚,向自由空间喷泄出去。而万盛胡家沟矸石山煤层含硫量、堆积方式、粒径尺寸、矸石山排水状况、降雨情况及人类活动情况均易触发矸石山自燃、喷爆。

2.4 矸石山堆积方式

由于自然下落方式堆积而成的矸石山,其表层矸石颗粒周围具有临空面,处于相对简单的应力状态,在微小扰动下就容易失稳,此层称之为散粒层。但是其下部的众多矸石散体颗粒由于周围颗粒的围绕,颗粒的运动受到临近颗粒的制约,形成颗粒间应力传递的组织结构,处于复杂应力状态,此层称之为摩阻层。这种结构增加了颗粒抵抗扰动的能力,仅当扰动强度破坏这种组织结构时,才会发生深层剪切滑移。矸石山这种典型的二元结构:散粒层和摩阻层对矸石山临界状态下的动态特性具有重要影响。

另外,矸石山在堆砌过程中,临界角(休止角)由坡面最不稳定的颗粒所控制,因此,在这部分颗粒达到临界态时(此时该区域稳定性差),坡面整体结构的稳定性取决于未达到临界态的区域所占的比例,即局部稳定性的总和构成了总体稳定性。当矸石山堆砌于临界角时,若坡面各区域如果均达到或近似达到临界态,则其整体稳定程度较小,即抗扰储

备小,易于产生链式放大。由于局部不稳定区域的比例、空间分布、时间分布及下落矸石的空间运动路径都是随机的,因此可以发生任何规模的崩塌。由于矸石山这些本身的特点,所以胡家沟矸石山在降雨、自燃喷爆因素扰动下,扰动产生链式放大,发生崩塌滑坡。

2.5 矸石排弃强度

不同于其它边坡,矸石山的荷载是在排弃过程中,矸石不断堆积逐渐施加上去的,矸石排弃强度对矸石山变形破坏影响重大。新堆置矸石为松散岩土物料,其变形主要是在自重和外载荷作用下的逐渐压密沉降,矸石山沉降变形过程随时间及压力而变化,是压力 and 时间的函数,矸石山排弃初期沉降速度大,随压密和弹性变形,沉降逐渐变缓。一般第一年沉降变形占 50% ~ 70%,是产生滑坡事故的关键一年。在矸石山正常沉降过程中,虽然变形较大,但不会滑坡,只有当变形超过极限值时才导致滑坡,矸石山位移速度为 0 ~ 25cm/d 时,属压缩沉降过程,而超过 25 ~ 50cm/d 便可能出现滑坡^[6]。

首先,矸石排弃速度、数量的大小,影响排弃散体及其基底内压力增长速度,当应力增长速度超过一定数值,与排弃散体和基底土层性质不相适应时,就会破坏矸石山的应力平衡状态,导致滑坡。其次,矸石逐步堆积使矸石散体和地基土强度发生变化。其矸石排弃堆积速度快慢、数量的大小,影响矸石散体固结程度、矸石体所受围压大小、地基软岩的固结时间及孔隙水压的消散,从而影响矸石散体和地基土强度。胡家沟矸石山发生第一次滑坡滑塌后,周

围居民搬迁撤离,因矿山生产需求,矸石山持续堆排,矸石排弃量大,排弃间隔时间不等,排弃强度与矸石山稳定之间相矛盾,很难同时满足矸石沉降稳定后再排弃与排弃工作紧张的要求。另外,由于矸石山堆放方式(图 3),万盛胡家沟矸石山在原垮塌后矸石山上继续堆积,所以从矸石山表面到矸石山体内部都为新堆积矸石,排弃矸石的物理力学性质是决定边坡高度及总体边坡角的关键性因素。新堆积矸石未经充分沉压实,孔隙率较大,因而强度低、变形大、易发生滑坡。



图 3 矸石山持续堆积形式

由以上分析可知,矸石山堆积方式、堆积地点的地形地貌、排弃强度、矸石散体的物理力学性质是致灾潜在原因;长期降雨是灾害的主要诱因;煤矸石山的剧烈自燃爆炸应是灾害的主要外部激发因素。

3 稳定性分析及防治措施

3.1 稳定性分析评价

针对胡家沟矸石山滑坡 A - A 地质剖面分别采用极限分析法和 Flac 数值计算分析其稳定性。计算参数是根据现场试验,并参照《南通煤矿地勘报告》以及工程经验和工程地质手册等进行选取,如表 1。

表 1 计算模型的物理力学参数取值

岩土体	泊松比	剪切模量 /MPa	体积模量 /MPa	容重 /kN · m ⁻³	内摩擦角 / °	粘聚力 /MPa	抗拉强度 /MPa
矸石堆积体	0.30	76.92	166.67	21.0	33	0.020	0.0
强风化岩体	0.32	681.818	1666.667	24.0	40	0.700	0.0
弱风化岩体	0.27	1578.803	2898.551	25.50	44	1.000	1.00
微新 - 新鲜岩体	0.24	2822.581	4487.179	27.00	50	1.400	1.60

采用极限分析方法得出的天然状态下的安全系数为 1.23;根据南桐气象站 1983 ~ 1991 年统计资料,以最大日降雨量 123.8mm 为计算雨强,降雨持续时间为 1 天,得出的饱和状态下的安全系数为 1.17。

安全系数敏感性分析如图 4、图 5 所示,由图可知,安全系数相对于内摩擦角更为敏感,且矸石山安全储备低,随粘聚力、内摩擦角的降低,矸石山安全

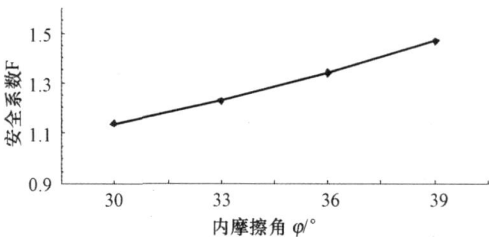


图 4 内摩擦角变化与安全系数对应关系

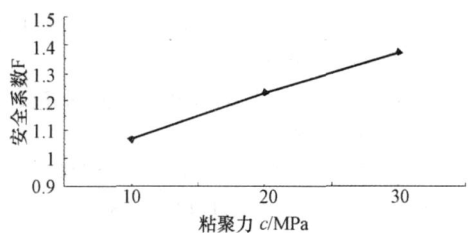


图 5 粘聚力变化与安全系数对应关系

系数将会很快降至 1 以下,说明,如果面临降雨、地下水的影响,此矸石山极易失稳。

Flac数值分析时,模型建立坐标系 x 方向指向坡面反向, y 方向竖直向上。数值模拟计算结果如图 6 所示。降雨后,矸石山坡体内剪应变集中带范围增大、更为密集;不但矸石山坡体内部剪切变形量增加,且堆积体下部与原地质界面出现剪切变形。

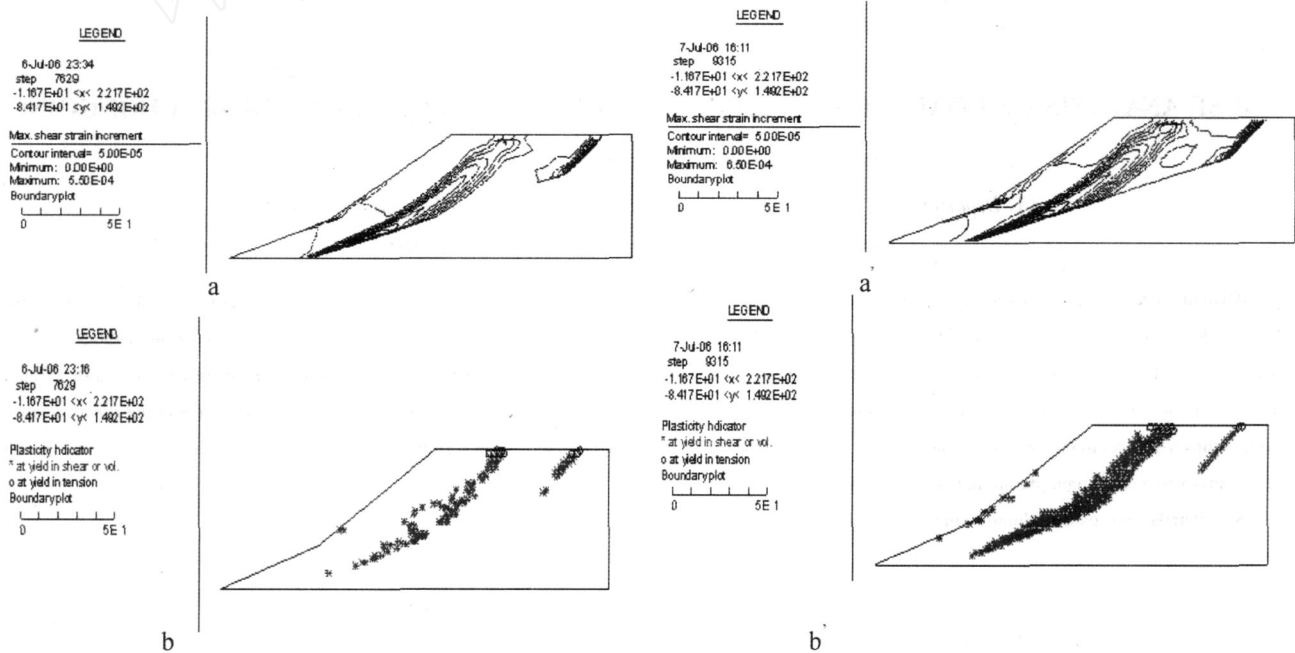


图 6 FLAC数值模拟计算结果图

2) 在堆放形式方面,具体措施如下:

在矸石堆放中应采取一定工程措施增加矸石山的固结速度与固结程度,如:分层堆放,严格控制每层高度,有条件的情况下分层碾压等。

对矸石山做好完善的浅、深层排水通道,有利于提高矸石山的整体稳定性。

合理选取矸石散体堆放的坡高、坡角控制比例;

3) 通过矸石山的变形监控达到以下目的:

通过沉降观测可确定其固结度,并进一步在此基础上分析稳定安全储备,控制下阶段的排弃强度。

降雨后矸石山体内塑性区较降雨前范围也大大增加,几乎贯穿矸石堆积体,且塑性区对应矸石山顶面及矸石山顶面堆积体与原天然地质界面交界处的张拉屈服程度增加。

3.2 矸石山滑坡灾害防治措施

本次灾害的发生有其偶然性也有必然性,万盛区包括整个南桐煤矿,乃至整个重庆地区还存在大量的煤矸石山,有的稳定性差,有的长期自燃污染环境,不排除仍有垮塌及爆炸产生灾害的可能,应该高度重视,切实采取防治措施。

3.2.1 堆放场地、堆放形式选取及变形监控

1) 堆放场地方面:提高地基的刚度,地基透水增强有利于矸石山稳定性的提高。在有条件的情况下,应选择沟谷型场地进行矸石山堆放;

通过控制点的水平和垂直位移趋势观测,通过其收敛特征,进行滑坡预报。

3.2.2 矸石山的整治措施

1) 在固结前即支护,支护体对矸石山散体起到了更好的变形约束作用,而且坡面主压力矢量也有一定程度降低;

2) 如果选择在坡中部设置支挡结构,首先保证基脚的稳定,保证基脚下部的矸石已完全固结,同时,还应分析新堆矸石对下部矸石引起的进一步的变形情况;

3) 对矸石山的整形卸载,应根据应力分布、位移分布、速度场的分布合理选择开挖卸载区域;

4) 在坡面进行植被恢复能大大降低降雨对矸石山稳定性的影响。

4 结语

万盛南铜矿区东林煤矿胡家沟矸石山的垮塌滑坡灾害,是由于多方因素造成,并非完全处于偶然,尤其是第一次灾害发生后,如果能及时对矸石山滑坡原因进行定性、定量分析,吸取第一灾害发生的经验教训,采取对应防治和整改措施,第二灾害是可以避免的。

重庆地区内不少矸石山,还存在类似潜在隐患,所以建议应根据矸石山安全影响程度,分轻重缓急,进行稳定分析,对于危害公共生命及财产安全的不稳定矸石山,应及时采取治理措施,排除灾害隐患。

[参考文献]

[1] 张凤辰. 煤矸石及其综合利用 [J], 中国环保产业, 2004, 10.

- [2] 江洪清. 煤矸石对环境的危害及其综合治理与利用 [J], 煤炭加工与综合利用, 2003, 3.
- [3] 邓丁海, 岑文龙. 煤矸石堆放区的环境效应研究 [J], 中国矿业, 1999, 8(6): 87 - 91.
- [4] 崔佳. 山崩发生在一瞬间——重庆“6·5”煤矿矸石山垮塌抢险纪实 [J], 时代潮, 2004, 11(12): 7 - 8.
- [5] 仲大维, 冯嘉谟. 抚顺矸石山粘土封闭灌浆工程实践 [J], 岩土工程界, 2002, 5(2).
- [6] 赵宇, 崔鹏, 王成华, 等. 重庆万盛煤矸石山自燃爆炸型滑坡碎屑流成因探讨 [J], 山地学报, 2005, 23(2): 169 - 173.
- [7] Green W. H and Ampt G A. Studies on soil physics, Flow of air and water through soil [J], Agri Sci 1992, (4), 1 - 24.
- [8] D. G Fredlund, H. Rahardja 陈仲颐等译. 非饱和土力学 [M], 北京: 中国建筑工业出版社, 1997.
- [9] 杨国清, 刘康怀. 固体废物处理工程 [M], 北京: 科技出版社, 2000, 1.
- [10] 张学言. 岩土塑性力学 [M], 北京: 人民交通出版社, 1992, 4.

CAUSE ANALYSIS OF COAL GANGUE LANDSLIDE IN THE DONGLIN COAL MINE, CHONGQING

ZANG Ya - jun¹, LIU Dong - yan¹, JIANG Ke - feng²

(1. Department of Civil Engineering, Chongqing University, Chongqing 400045;

2. Logistics Engineering University, Chongqing 400016)

Abstract: Coal gangue landslide took place two times in the Donglin coal mine, resulting building damage and severe casualties. Based on situation of landslide and cause of disaster, stability of the coal gangue dump is discussed using limiting analysis and FLAC numerical simulation methods. It is indicated that coal gangue dumping mode, dumping site landform, discarding intensity and physical mechanics character of gangues are main cause of landslide. Longtime rainfall is main incentive of landslide. Severe self - ignition and blasting are main exterior stimulating factor. Combining theory analysis and quantitative calculation, preventive measure for landslide disaster of coal gangue dump is put forward. The results can be a reference for similar landslides caused by coal gangue dump and soil discarding site.

Key words: coal gangue dump, landslide, cause analysis, stability