

肖玮, 田伟平. 基于物质点法和极限平衡法公路沿线弃渣场危险性评价[J]. 灾害学, 2021, 36(1): 37-41, 59. [XIAO Wei and TIAN Weiping. Risk Evaluation of Landfills along Highway Based on Material Point Method and Limit Equilibrium Method [J]. Journal of Catastrophology, 2021, 36(1): 37-41, 59. doi: 10.3969/j.issn.1000-811X.2021.01.008.]

# 基于物质点法和极限平衡法公路沿线 弃渣场危险性评价\*

肖 玮<sup>1,2</sup>, 田伟平<sup>1</sup>

(1. 长安大学 特殊地区公路工程教育部重点实验室, 陕西 西安 710064; 2. 长安大学 建筑工程学院, 陕西 西安 710064)

**摘 要:** 公路沿线弃渣场的失稳破坏, 不仅容易造成其下方道路和河流的堵塞, 而且严重威胁人民的生命和财产安全。快速、准确和批量地评价公路沿线弃渣场危险性就显得十分必要。通过对公路沿线弃渣场进行遥感图像识别、无人机拍摄、现场调查及试验, 确定了6个弃渣场危险性影响因子, 运用物质点法对实体弃渣场进行了多因素多水平的数值模拟, 得出各因子对弃渣场稳定性的影响程度; 然后基于极限平衡法, 提出一种弃渣场危险性系数的评价方法, 并在贵州道瓮高速沿线弃渣场进行应用和验证。结果表明: 弃渣场危险度系数的范围为安全区间(0, 1)、不稳定区间[1, 5)和极其不稳定区间[5, +∞); 贵州道瓮高速沿线弃渣场评价结果与现场实际情况符合较好, 验证了评价方法的有效性, 为我国已经修建的公路弃渣场的快速和批量评价提供参考依据。

**关键词:** 公路沿线; 弃渣场; 物质点法; 极限平衡法; 危险性评价

**中图分类号:** U417.9; P642.3; X43; X915.5 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-811X(2021)01-0037-06

doi: 10.3969/j.issn.1000-811X.2021.01.008

山区修建的公路, 弃渣方量大, 环境复杂。弃渣场的失稳破坏, 不仅容易造成其下方道路、河流的堵塞, 影响下游农田的生产和居民的生活, 严重时还可能威胁下游民众的生命财产安全<sup>[1-2]</sup>。弃渣处置已成为现阶段我国山区公路建设的突出问题和薄弱环节<sup>[3]</sup>。现存弃渣场数量巨大, 借助遥感卫星、无人机等设备对于已经修建的弃渣场进行区域危险性快速评价就显得非常必要。

目前对单个弃渣场稳定性的研究主要集中在运用极限平衡法结合数值模拟进行分析, 如有限元强度折减法<sup>[4]</sup>、有限差分法<sup>[4,7-8]</sup>、离散元法<sup>[6]</sup>结合刚体极限平衡法来分析有弱层<sup>[4]</sup>或降雨情况下<sup>[5,9]</sup>的弃渣场边坡稳定性<sup>[4-9]</sup>。对区域地质灾害的分析则主要运用3S技术<sup>[10,13]</sup>结合层次分析法<sup>[11,13-15]</sup>、随机子空间模糊规则<sup>[12]</sup>、遗传算法<sup>[14]</sup>、逆向云算法<sup>[15]</sup>等进行区域综合评价。本文以贵州道瓮高速公路某段沿线57个弃渣场为例进行了大量的现场调查、地质和设计资料收集、无人机影像及遥感图片收集, 运用物质点法数值模拟技术对所重点弃渣场数据进行综合分析, 基于分析结果和极限平衡法提出了一种快速评价弃渣场危险性系数的方法, 为公路沿线弃渣场的管理、维护和治理提供了依据, 确保山区弃渣场区域居

民和生态环境的安全。

## 1 弃渣场危险性影响因子

公路弃渣场是公路建设中伴随公路施工排出的物质, 是公路沿线附近的巨型人工松散堆积体。目前我国公路弃渣场可能存在的风险有以下几个方面。

(1) 选址风险。受到山区地理环境条件限制, 当整体区域内均无合适地点时, 则可能出现无法避免的选址风险。如所选地段处在断裂带、高陡边坡上等, 则易引发弃渣场失稳; 如所选区域距离居民、建筑物太近, 缺乏有效的缓冲地带, 则一旦险情发生, 将威胁到人民群众的生命财产安全。如占用河道、泄洪沟谷, 洪水季节容易冲刷弃渣, 造成河道堵塞、诱发其他灾害。

(2) 挡渣坝缺失。调查显示, 许多弃渣场存在挡渣坝部分缺失、甚至没有修建挡渣坝的现象。挡渣坝部分缺失的弃渣场, 一般由于两段挡渣坝衔接不良造成。

(3) 排水设施缺失。外部排水设施缺失通常发

\* 收稿日期: 2020-06-11 修回日期: 2020-08-07

基金项目: 国家自然科学基金项目(青年科学基金项目)(51708043); 陕西省自然科学基金(2019JQ-680); 中央高校基本科研基金(300102219106)

第一作者简介: 肖玮(1987-), 女, 汉族, 江西吉安人, 博士研究生, 主要从事公路地质灾害防治研究。

E-mail: dingxixiding@163.com

生在施工时临时增加或改建的弃渣场上；弃渣场内部排水设施则普遍存在缺失现象。

(4)底部边坡坡度较大。设计和施工在环境条件受限时均可能造成这一风险。

(5)盲目弃渣，超量弃渣或二次开挖。超量弃渣或二次开挖均可能破坏原设计弃渣场的稳定性，均有诱发弃渣边坡失稳的可能。

基于以上的各种风险和对大量弃渣场案例进行分析，选择对弃渣场稳定性影响较大、且易于从遥感和无人机图像中获取的弃渣场危险性影响因素如下：弃渣场的含石率、弃渣场的弃渣超量值、弃渣场挡渣坝的完整程度、弃渣场排水性能、弃渣底部斜坡坡度、弃渣场周边建构筑物或河流水库农田等易受损害体与弃渣场距离等6个因素。

## 2 物质点法弃渣场稳定性数值模拟

### 2.1 物质点法数值模拟

物质点法<sup>[16]</sup>采用拉格朗日质点和欧拉网格双重描述方法，适合分析大变形问题和接触问题。本文采用物质点法建立了数值模型，考虑弃渣场本身弃渣的含石率(表1)、弃渣超量值、挡渣坝的完整程度、排水性能(包含上水压400 kPa、下水压400 kPa、自重3种情况)、弃渣底面坡度(8°和23°两组)因素在多水平组合下的模拟方案，模拟计算结果采用边坡坡脚的移动距离作为弃渣边坡破坏情况的判断表征参数。数值模拟计算所需要的弃渣的抗剪强度参数如表1所示。表中数据来源包括：现场实测值，参考杨继红等<sup>[17]</sup>试验在不同含石率土样强度参数和殷跃平等<sup>[18]</sup>试验测定结果。

表1 数值模拟计算试验参数

土样代号	含石率/%	粘聚力/kPa	内摩擦角/(°)
S1	100	0.0	44.8
S2	75	2.0	40.3
S3	50	2.0	37.7
S4	25	2.0	32.1
S5	0	2.0	28.0
S6	0	2.5	23.8

### 2.2 物质点法数值模拟结果及分析

反映含石率、2.68倍弃渣和设计量对比、有无挡渣坝、排水情况这4组因素对弃渣场稳定性的影响的曲线如图1所示；反映弃渣量对弃渣场稳定性影响的曲线如图2所示，显示了不同超量倍数在有挡渣坝下水压时不同弃渣量弃渣边坡破坏情况；反映弃渣底面坡度影响的曲线如图3所示，将2.68倍超量组作为对照组，陡坡组与之对比。得到各因素对弃渣场稳定性影响情况如下：

#### (1)含石率对弃渣场稳定性影响

含石率用来表征弃渣的强度。图1中所有曲线明显呈现出增长的趋势，即弃渣强度随含石率增加而上升。含石率25%(S4土样)为一个较明显的转折点，该点起坡脚移动位移 $L > 2H$ ( $H$ 为

弃渣高度)。含石率0%的S5、S6纯土弃渣，考虑的是过饱和和情况下软化的土体，强度低，位移量大。

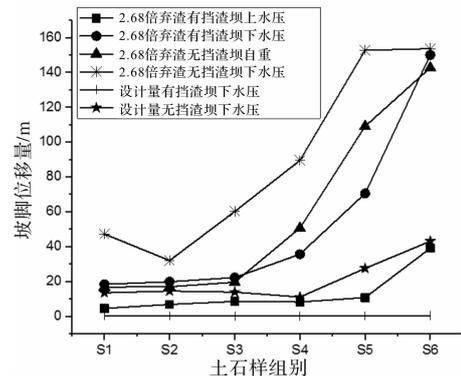


图1 不同情况下弃渣坡脚位移量与含石率关系

在弃渣量、不同挡渣坝情况和排水情况等各因素组合情况下，S6是S1位移的1.01~46.37倍。可见弃渣含石率对于弃渣场的稳定性情况有着非常重要的影响作用。为第一主要指标。

#### (2)弃渣超量情况对弃渣场稳定性影响

图1中可看出上部三条坡脚位移大的曲线均为2.68倍弃渣弃渣，分别是2.68倍弃渣无挡渣坝下水压、2.68倍弃渣无挡渣坝自重和2.68倍弃渣有挡渣坝下水压。设计渣量的弃渣场，有挡渣坝时，在底部水压400 kPa情况下，所有土样均未翻越挡渣坝；无挡渣坝时，强度最低的S6土样坡脚位移40.06 m，均有 $L < H$ 。可见2.68倍弃渣量时稳定性远低于设计渣量时。

选取S4土样(含石率25%)，分别模拟1.0倍弃渣量、1.71倍弃渣量、2.68倍弃渣量、3.5倍弃渣量、4.3倍弃渣量时弃渣场失稳状况。得到各弃渣模型坡脚位移如图2所示。结果表明：弃渣超量值越大，造成边坡破坏时坡脚位移量越大。弃渣量超值倍数与坡脚位移的函数关系为：

$$y = 25.8 - 34.65x + 16.16x^2 \quad (1)$$

式中： $x$ 为弃渣量超值倍数， $y$ 为坡脚位移。

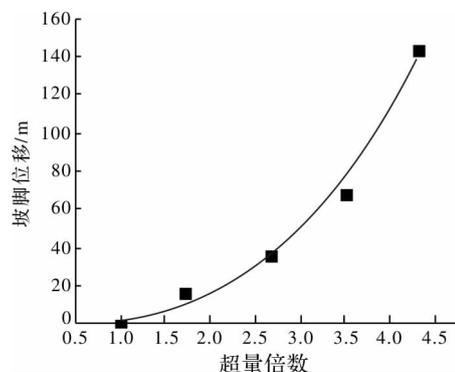


图2 S4( $c=0$  kPa,  $\varphi=32.18^\circ$ )不同弃渣量有挡渣坝下水压坡脚位移量

由此可得出弃渣超量对于弃渣场稳定性具有主要影响作用，弃渣场坡脚位移随着弃渣倍数的增加而增加。尤其多种不利因素叠加时，其影响作用明显。为第二主要指标。

表 2 不同渣量下有无挡渣坝弃渣坡脚位移差值/m

土样	S1	S2	S3	S4	S5	S6
2.68 倍弃渣有无挡渣坝下水压	28.89	12.17	37.93	53.91	82.18	3.60
设计量有无挡渣坝下水压	13.28	14.29	13.68	10.90	27.35	42.91

表 3 不同情况下排水状况差异引起的弃渣坡脚位移差值/m

土样	S1	S2	S3	S4	S5	S6
2.68 倍弃渣有挡渣坝上下水压位移差值	13.86	13.06	13.71	27.42	59.82	111.03
2.68 倍弃渣无挡渣坝下水压与自重位移差值	30.46	15.10	40.61	38.86	43.62	10.99

(3) 挡渣坝对弃渣场稳定性影响

不同渣量下, 有无挡渣坝弃渣坡脚位移差值见表 2。从表 2 和图 1 中可知: ①对于同一土样, 同样渣量的弃渣场, 无挡渣坝坡脚位移量要显著大于有挡渣坝坡脚位移量。②无挡渣坝与有挡渣坝在其他条件相同时造成的坡脚位移差值随着含石率和弃渣强度的下降而逐渐增加。在 2.68 倍弃渣情况下, 含石率 25% 的土样是转折点。S6 土样二者均到达最大位移处, 差值反而小。在设计渣量情况下, 含石率 0% 的两个土样差值增大情况比前四个土样明显。③设计渣量下, 有无挡渣坝造成的坡脚位移差值普遍均较小, 强度最低的 S6 土样最大差值为 42.91 m。在 2.68 倍弃渣弃渣情况下坡脚位移差值要大于设计渣量下的差值。综合分析认为有无挡渣坝这一因素主要还需要和其他因素共同存在时才对弃渣场稳定性有很大影响。这一因素对弃渣场稳定性的重要性要低于前两个因素, 为辅助性指标。

(4) 排水情况对弃渣场稳定性影响

以实际弃渣量和实际地形为基础情况, 对比有挡渣坝情况时上下水压造成的坡脚位移, 对比无挡渣坝时自重和下水压造成的弃渣坡脚位移(表 3)。下水压坡脚位移大于上水压和自重情况下坡脚位移。可以得出: ①在有挡渣坝情况下, 排水差异造成的边坡坡脚位移随含石率的下降而上升; ②在无挡渣坝情况下, 除了 S2 和 S6 土样外, 排水不良情况下造成的坡脚位移增量大致相近。推测其原因可能为 S2 土样在内摩擦角稍降的情况下, 增加了粘聚力, 这使得无挡渣坝下水压情况下的坡脚位移略有所下降。而 S6 土样则主要因为两种试验均接近最大位移, 因而差值较小; ③在设计渣量下且弃渣量较小时, 排水状况对弃渣稳定性影响较小。有挡渣坝下水压作用下, 所有强度弃渣均未翻越挡渣坝, 坡脚位移最大值为 0.15m。

综上所述, 弃渣场排水状态这一因素需和其他不利因素共同作用时, 才会对弃渣场失稳有较严重的影响, 为辅助性影响指标。

(5) 底部边坡对弃渣场稳定性影响

图 3 为不同底面坡度下(2.68 倍弃渣为底面坡度 10°, 陡坡为底面坡度 23°, 二者弃渣表面坡度一致)弃渣坡脚位移量与含石率关系。可得出①含石率 100% 的 S1 土样, 陡坡下弃渣表现更为稳定。其可能原因是在一定坡度范围内, 由于坡度升高使得弃渣量大幅下降, 而弃渣含石率高, 排水性能好, 坡度远小于渣体内摩擦角, 因此可以保持较高的稳定状态; ②含石率 75% 的 S2 土样, 有挡渣坝和无挡渣坝状态下, 两种坡度下位移量均相近; ③从含石率 50% 的 S3 土样开始, 无挡渣坝状

态下, 底面 23°的坡脚位移量均高于底面 10°坡脚位移。综合分析可以得出: 随着含石率的下降、弃渣土样强度的降低, 坡度增大对弃渣坡脚位移的影响也越来越明显。

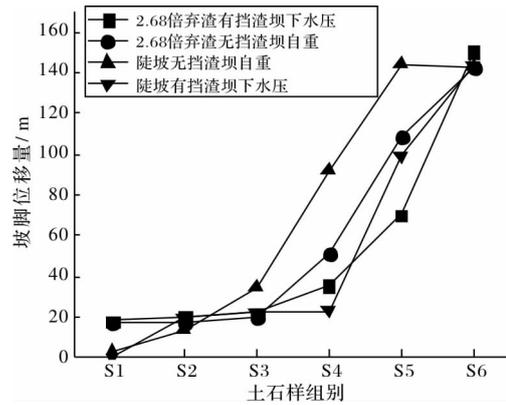


图 3 不同底面坡度下弃渣坡脚位移量与含石率关系

### 3 公路弃渣场危险性评价模型

#### 3.1 公路弃渣场危险性评价模型

假定弃渣场并未发生破坏, 保持极限平衡状, 分析弃渣边坡的稳定性系数。考虑可能滑动土体的平衡, 将滑块划分为  $n$  个垂直条块。图 4 为其中单个滑块的受力分析图。假定各块受到两侧剪力的合力大小、方向均一致, 则每个块体受到的抗力和下滑力可分别表示为<sup>[19]</sup>:

$$R_i(\cdot) = f_i [ G_i \cos \alpha_i - \Delta Q_i \sin(\beta_i - \alpha_i) - U_i + \Delta U_{Vi} \sin \alpha_i - \Delta H \sin \alpha_i ] + c_i A_i \quad (2)$$

$$S_i(\cdot) = G_i \sin \alpha_i + \Delta H \cos \alpha_i - \Delta Q_i \cos(\beta_i - \alpha_i) - \Delta U_{Vi} \cos \alpha_i \quad (3)$$

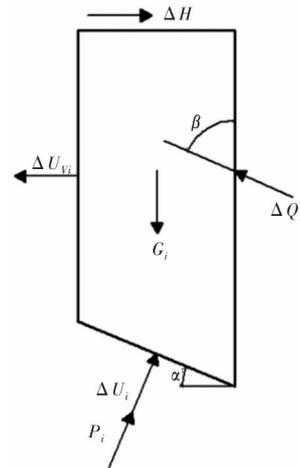


图 4 单个土条计算剖面示意图

式中： $f_i$  为该土条底面的摩擦因数， $c_i$  为该土条底部滑面土的黏聚力； $G_i$  为该土条的重力； $\alpha_i$  为土条底面与水平面夹角； $\Delta Q_i$  为位于该土条两侧的剪力合力； $\beta_i$  为  $\Delta Q_i$  与水平向夹角； $U_i$  为土条底面所受水压力， $U_{Vi}$  为侧面水压合力； $\Delta H$  为土条所受其他水平向荷载。

根据 Mohr-Coulumb 破坏准则可得，土条底面的剪切力为：

$$S_i = c'_i l_i + \frac{(P_i - U_i) \tan \phi'_i}{F_i} \quad (4)$$

式中： $c'_i$ 、 $\phi'_i$  为土体的有效抗剪强度参数； $P_i$  为作用在土条底面上的法向力。 $F_i$  为  $i$  土条底面积。

考虑  $f_i$  与  $c'_i$  之间的相关性， $\beta_i$  与  $\phi'_i$  之间的相关性。假定各土条的安全系数相等，具有唯一的安全系数  $K'$ ，则该弃渣场的安全系数为：

$$K'_i = \frac{R_i(f_k/\gamma_m, \alpha_k)}{\gamma_0 \gamma_d \psi S_i(\gamma_c G_k, \gamma_Q Q_k, \alpha_k)}; \quad (5)$$

$$K'_1 = K'_2 = K'_3 = KK'_n \quad (6)$$

式中： $\psi$ 、 $\gamma_c$ 、 $\gamma_Q$  为分项系数，计算过程中假定为定值，式(5)可表述为：

$$\frac{R_i(f_k/\gamma_m, \alpha_k)}{\psi S_i(\gamma_c G_k, \gamma_Q Q_k, \alpha_k)} = \dots = \frac{R_i(f_k/\gamma_m, \alpha_k)}{S_n(\gamma_c G_k, \gamma_Q Q_k, \alpha_k)} \quad (7)$$

由整个体系内力平衡条件可得：

$$\sum_{i=1}^n \Delta Q_i = 0 \quad (8)$$

即：

$$\sum_{i=1}^n \frac{[K'(\gamma_c G_k \sin \alpha_i + \gamma_H \Delta H \cos \alpha_i - \gamma_U \Delta U_{Vi} \cos \alpha_i) - f_i(\gamma_c G_i \cos \alpha_i - \gamma_U U_i + \gamma_U \Delta U_{Vi} \sin \alpha_i - \gamma_H \Delta H \sin \alpha_i)]}{\gamma_f} - c_i A_i / \gamma_c / [K' \cos(\beta_i - \alpha_i) - f_i \sin(\beta_i - \alpha_i) / \gamma_f] = 0 \quad (9)$$

从而可求解得安全系数  $K'$ 。

在对区域性弃渣场进行稳定性快速调查时，没有具体的土体、水文条件参数，但有各弃渣场稳定性影响因子的状态描述，可以参考式(5)，将各影响因素用系数表达，得到弃渣场危险系数  $P$ ：

表4 含石率取值表(参数  $A$ )

参数取值	1	3	5	7	9	11
含石率/%	0, 遇水软化严重的土体, 或软土	0	25	50	75	100

表5 排水状况取值表(参数  $\zeta_1$ )

参数取值	0.1	0.3	0.5	0.7	0.9
弃渣场排水状况	内外部设施全部缺失, 且地表渗水性差	内外部设施全部缺失, 地表渗透性较差。设计渣量且有挡渣坝时, 取 0.5	内外部设施有较大缺失, 地表渗透性中等	内外部设施有部分缺失, 地表渗透性中等	内外部排水设施齐全, 地表渗水

表6 挡渣坝及斜坡情况取值表(参数  $\eta_1$ 、 $\eta_2$ )

参数取值	1	2	3	4
$\eta_1$ 挡渣坝情况	完整	缺失	-	-
$\eta_2$ 斜坡情况	10°	10°~20°	20°~30°	>30°
$\eta_2$ 修正	当 $A \geq 9$ ; 或 $5 \leq A < 9$ , $\eta_1 = 1$ 时, $\eta_2$ 取 1		当 $A \geq 9$ , $\eta_1 = 1$ 时, $\eta_2$ 取 2	

表7 弃渣场安全重要性系数取值表(参数  $\gamma_0$ )

参数取值	1	1.1	1.2	1.3	1.4
$\gamma_0$ 建构筑物、河流与挡渣坝距离	>6H	4.5H~6H	2.5H~4.5H	H~2.5H	<H

注： $H$  为弃渣场高度。

$$P = \frac{\gamma_0 S_i(\eta_c G_k, \eta_Q Q_k, \alpha_k) R_i}{(f_k/\gamma_d, \alpha_k)} \quad (10)$$

式中： $f_k$  为土体的摩擦系数，在式(10)中用弃渣含石率  $A$  表征； $\gamma_d$  为土的强度影响系数，用弃渣场排水情况  $\zeta_1$  表征； $\eta_c G_k$  为计算边坡重力特征，用弃渣超量值  $B$  表征； $\eta_Q Q_k$  为边坡受到的水平力，用挡渣坝完整程度指标  $\eta_1$  表征； $\alpha_k$ ，在式(5)中为假定滑移面与水平面夹角，式(10)中用修正的底面边坡坡度指标  $\eta_2$  表征。 $\gamma_0$  为重要性系数，在式(10)中用建构筑物、河流水库等与弃渣场的距离表征。式(10)可重新表达为：

$$P = \gamma_0 \eta_1 \eta_2 B / \zeta_1 A \quad (11)$$

### 3.2 评价指标参数影响度确定

通过本文 2.2 节分析结果可知，弃渣含石率  $A$  为弃渣场稳定性最主要影响因素；弃渣超量值  $B$  是第二主要影响因素；这两个指标作为主要因素出现在公式中。弃渣场排水情况、挡渣坝完整程度、底面坡度均为辅助指标，需和主要指标不利情况共同作用时才可能引发较大破坏，因此将这 3 个指标作为辅助因素。

各参数取值、修正方式及其对应情况如下：

(1)  $A$  为弃渣含石率，取值见表 4。

(2)  $B$  为弃渣超量值，实际弃渣与设计弃渣值的断面面积比值。可通过弃渣高度、弃渣位置与原地形图结合对比设计图纸得到。当该参数不易获得时，可用实际弃渣量与设计弃渣量的比值替代。

(3)  $\zeta_1$  为弃渣场排水状况，详细取值见表 5。

(4)  $\eta_1$  为挡渣坝情况； $\eta_2$  为弃渣底部斜坡情况，详细取值见表 6。

(5)  $\gamma_0$  为弃渣场安全重要性系数，详细取值见表 7。

将上述参数代入式(11)中，可计算得到弃渣场危险系数  $P$ 。当  $P < 1$  时，弃渣场稳定，坡脚位移  $L < 0.5H$ ；当  $1 \leq P < 5$  时，弃渣场不稳定，且随着  $P$  值上升，危险程度上升；当  $P \geq 5$  时，弃渣场极为不稳定，可能形成溃散型破坏。

### 3.3 公路弃渣场危险性评价实例应用及验证

以贵州道翁高速公路 K1481+900 至 K1487+500 段沿线弃渣场为例, 收集弃渣场资料, 弃渣场编号为 1~9 号, 各弃渣场在道翁高速遥感图上的位置示意图 5。依据已收集资料, 利用危险系数公式(11), 对 1~9 号弃渣场进行危险系数评价计算。得到结果见表 8。由于处在同一区域, 弃渣性质基本一致, 除 5 号弃渣场为 100% 含石率的纯石质弃渣外, 其余弃渣均为含石率约 75% 的石质弃渣。各弃渣场排水状况、挡渣坝情况、超量情况有所差异。由表 8 可知, 3 号弃渣场危险性系数  $P=1.61 > 1$ , 较为不稳定。3 号弃渣场含石率 75% 左右, 没有设置挡渣坝和排水沟、部分超量、处于  $20^\circ \sim 30^\circ$  底部斜坡之上, 与河流距离  $< H$ , 因此总体较为不稳定。从遥感图片和无人机拍摄照片可以看出, 下方河流中有大量弃渣, 验证了这一计算结果。此外, 其他弃渣场均有  $P < 1$ , 相对稳定。除 3 号弃渣场以外  $P$  数值最大的为 7 号弃渣场,  $P=0.80$ , 与河流距离  $2.88H$  虽有挡渣坝, 但挡渣坝有缺失, 且无排水系统, 底部边坡  $20^\circ \sim 30^\circ$ 。从遥感图片和无人机拍摄照片可以看出, 下方河流在挡渣坝缺失处有部分弃渣堆积, 验证了这一计算结果。其余弃渣场危险系数在  $0.22 \sim 0.58$  之间, 相对较为稳定。评价结果与实际情况相符, 可以为下一步弃渣场的维护和治理提供依据。

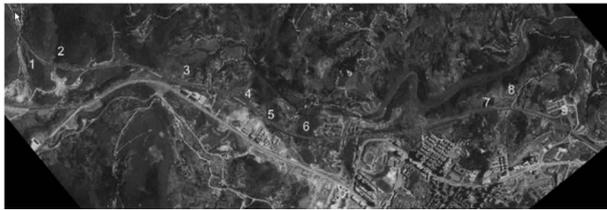


图 5 道翁高速 1~9 号弃渣场沿线位置示意图

表 8 道翁高速 1~9 号弃渣场危险系数计算表

弃渣场编号	A	$\gamma_1$	B	$\eta_1$	$\eta_2$	$\gamma_0$	P
1	9.0	0.7	1.0	1	2.0	1.0	0.32
2	9.0	0.7	1.0	1	2	1.0	0.32
3	9.0	0.5	1.3	2	2	1.4	1.61
4	9.0	0.5	1.0	1	1	1.1	0.24
5	11.0	0.5	1.0	2	1	1.2	0.44
6	9.0	0.5	1.0	1	2	1.3	0.58
7	9.0	0.5	1.0	1.5	2	1.2	0.80
8	9.0	0.5	1.0	1	1	1.3	0.29
9	9.0	0.5	1.0	1	1	1	0.22

## 4 结论

(1) 通过遥感图像、无人机照片、实地勘察和试验, 确定了公路弃渣场的含石率、弃渣超量值、挡渣坝的完整程度、排水性能、弃渣底部斜坡坡度、周边构筑物或河流水库农田等易受损害体与弃渣场距离 6 个危险性影响因子。

(2) 通过物质点法对实体弃渣场进行多因素多水平数值模拟计算, 得出各评价指标对弃渣场稳定的影响, 进而得出各指标参数取值。

(3) 基于极限平衡法提出了弃渣场危险系数的

表达式, 当  $P < 1$  时, 弃渣场稳定, 坡脚位移  $< 0.5H$ ; 当  $1 \leq P < 5$  时, 弃渣场不稳定, 且随着  $P$  值上升, 危险程度上升; 当  $P \geq 5$  时, 弃渣场极为不稳定, 可能形成溃散型破坏。

(4) 将危险系数评价方法应用于贵州道翁高速公路沿线弃渣场评价危险性, 评价结果与现场实际情况符合较好, 验证了评价方法的有效性。该评价方法可推广至全国, 为已经修建的公路弃渣场的快速评价提供参考依据。

## 参考文献:

- [1] 广西桂林市阳朔县人民政府门户网站. 阳朔县兴坪镇大源村委寺背岭村弃渣场塌方事故[EB/OL]. (2018-07-19)[2020-01-02]. <http://www.yangshuo.gov.cn/>.
- [2] 向秀亮召开怀化绕城高速 k11+240 左侧弃渣场安全事故隐患调度会[EB/OL]. (2017-06-07)[2020-01-02]. [https://m.sohu.com/a/146973721\\_822322](https://m.sohu.com/a/146973721_822322).
- [3] 张家铭, 任永强, 付克俭, 等. 遥感与 GIS 技术在大型排土场选址中的应用[J]. 金属矿山, 2012(9): 111-113.
- [4] 曹兰柱, 赵立春, 王东, 等. 含多弱层复合边坡滑坡治理三维数值分析[J]. 中国安全生产科学技术, 2015, 11(6): 102-107.
- [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]. 北京科技大学学报, 2016, 38(9): 1204-1211.
- [6] 周帅, 施富强, 马松, 等. 三维点云基础上排土场垮塌影响范围研究[J]. 中国安全生产科学技术, 2015, 11(6): 31-37.
- [7] 张其唯, 马淑芝, 贾洪彪. 矿山排土场稳定性评价的 FLAC~(3D)方法和刚体极限平衡法对比分析[J]. 矿业研究与开发, 2015, 35(6): 45-48.
- [8] 张晓龙, 胡军, 赵天毅. 考虑粒径分级的排土场稳定性分析[J]. 金属矿山, 2016, 45(10): 171-176.
- [9] 何玉红. 降雨情况下排土场边坡稳定性数值模拟研究[J]. 长江科学院院报, 2015, 32(2): 44-47.
- [10] 汤罗圣, 殷坤龙, 陈丽霞. 考虑位移监测的滑坡稳定性综合评价研究[J]. 灾害学, 2013, 28(1): 52-55.
- [11] ALTHUWAYNEE O F, PRADHAN B, LEE S A. novel integrated model for assessing landslide susceptibility mapping using CHAID and AHP pair-wise comparison[J]. International Journal of Remote Sensing, 2016, 37(5): 56-62.
- [12] PHAM B T, BUI D T, PHAM H V, et al. Landslide Hazard Assessment Using Random SubSpace Fuzzy Rules Based Classifier Ensemble and Probability Analysis of Rainfall Data: A Case Study at Mu Cang Chai District, Yen Bai Province (Viet Nam) [J]. Journal of the Indian Society of Remote Sensing, 2016; 1-11.
- [13] 李家春, 尹超, 田伟平, 等. 中国公路自然灾害易损性评价[J]. 北京工业大学学报, 2015, 41(7): 1067-1072.
- [14] 尹超, 王晓原, 张敬磊, 等. 基于遗传算法和云模型的公路沿线泥石流灾害危险性区划[J]. 岩石力学与工程学报, 2016, 35(11): 2266-2275.
- [15] XIAO W, TIAN W P. Hazard assessment and zoning of collapse along highways in China based on backward cloud algorithm[J]. Geomatics, Natural Hazards and Risk, 2019, 10(1): 1227-1241.
- [16] SULSKY D, ZHOU SJ, SCHREYER H L. Application of a particle-in-cell method to solid mechanics[J]. Comp. Phys. Comm, 1995, 87(2): 236-252.
- [17] 杨继红, 董金玉, 黄志全, 等. 不同含石率条件下堆积体抗剪强度特性的大型直剪试验研究[J]. 岩土工程学报, 2016, 38(22): 161-166.
- [18] 殷跃平, 李滨, 王文沛, 等. 深圳“12·20”渣土场灾难滑坡成灾机理与岩土工程风险控制研究[J]. Engineering, 2016(2): 176-216.
- [19] 常晓林, 蒋春艳, 周伟, 等. 岩质坝基稳定分析的等安全系数法及可靠度研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2007(8): 1594-1602.

(下转第 59 页)

## Research on Indoor Rate of The Earthquake Buried Personnel Based on Human Dynamics

XIAO Dongsheng<sup>1, 2, 3</sup> and ZHONG Zufeng<sup>1, 2</sup>

- (1. *School of Civil Engineering and Geomatics, Southwest Petroleum University, Chengdu 610500, China;*  
 2. *Disaster Prevention and Emergency Research Center of Geomatics and Remote Sensing Geographic Information, Southwest Petroleum University, Chengdu 610500, China;* 3. *Institute of Public Safety and Emergency, Sichuan Normal University, Chengdu 610068, China*)

**Abstract:** After the occurrence of destructive earthquake, the scientific and effective assessment of the buried rate of the earthquake buried personnel, is the basis of orderly emergency rescue work. As one of the main parameters of the buried rate prediction model, the indoor rate of personnel is mainly calculated based on the work and rest zones and based on the provincial or municipal basic unit, which is difficult to reflect the difference between the indoor rate of personnel in different cities or counties under the basic unit. In order to solve this problem, the maximum likelihood method is used to calculate the indoor rate of personnel based on the theory of human dynamics. Then, the buried rate prediction model of the earthquake buried personnel based on Human dynamics is developed. Finally, taking the schools affected by the M8.0 earthquake in Wenchuan, Sichuan province as an example, the actual evaluation of the burial rate and the model error analysis are carried out. The results show that the microscopic indoor rate of personnel proposed in this paper can reflect the situation of personnel indoor situation more accurately and has better applicability. And in the actual evaluation, the accuracy of the model reaches  $\pm 0.13$ , which indicates that the model can achieve better prediction effect and provide certain reference for the emergency rescue work after the earthquake.

**Key words:** earthquake; human dynamics; buried personnel; indoor rate; error analysis

(上接第 41 页)

## Risk Evaluation of Landfills along Highway Based on Material Point Method and Limit Equilibrium Method

XIAO Wei<sup>1, 2</sup> and TIAN Weiping<sup>1</sup>

- (1. *Key Laboratory for Special Area Highway Engineering of Ministry of Education, Chang'an University Xi'an 710064, China;* 2. *School of Civil Engineering, Chang'an University, Xi'an 710064, China*)

**Abstract:** The instability and damage of the landfill along highway will not only cause the blocking of the road and river under it, but also seriously threaten the safety of people's life and property. It is necessary to evaluate the risk of the landfill along highway rapidly, accurately and in batches. Six risk factors of the risk evaluation of landfill are determined based on the remote sensing image, UAV shooting, field investigation and test of the landfill along the highway. The multi-factor and multi-level numerical simulation of the landfill is carried out by using the material point method to obtain the influence degree of each factor on the stability of the landfill. Then, based on the limit equilibrium method, an evaluation method of the risk factor of the landfill is proposed. It is applied and verified in the landfill along the Dao-Weng highway in Guizhou Province. The results show that the three ranges of the risk evaluation coefficient of the landfill are safety interval  $(0, 1)$ , unstable interval  $[1, 5)$  and extremely unstable interval  $[5, +\infty)$ . The evaluation results of the landfill along the Dao-Weng highway in Guizhou are in good agreement with the actual situation, which verifies the effectiveness of the evaluation method. It provides reference for the rapid and batch evaluation of the landfill along the highway that has been built in China.

**Key words:** landfill; material point method; limit equilibrium method; risk evaluation