

基于多剖面法的“瓢形”沟谷渣堆稳定性分析

于妍妍, 赵毅, 方熠, 陆敏凤, 祝洁雯, 唐朝晖, 柴波

Stability analysis of slag heap in “scoop-shaped” valley area based on multi-profile residual thrust method

YU Yanyan, ZHAO Yi, FANG Yi, LU Minfeng, ZHU Jiewen, TANG Zhaohui, and CHAI Bo

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202312013>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于尖点突变理论的软岩弃渣路堤局部稳定性分析

An analysis of local stability of soft rock cinder embankment based on the cusp catastrophe theory

鞠兴华, 杨晓华, 张莎莎 水文地质工程地质. 2019, 46(6): 112-118

基于桩体抗剪强度的复合地基路堤稳定性分析方法

Stability analysis method for the composite foundation embankment based on pile shear strength

钟昌茂, 邱恩喜, 魏永幸, 王智猛, 刘菀茹, 万旭升, 李康乐 水文地质工程地质. 2020, 47(5): 100-107

基于无人机的滑坡地形快速重建与稳定性分析

Rapid remodeling of three-dimensional terrain and stability analyses of landslide based on UAV

张欢, 巨能攀, 陆渊, 万勋, 蹇志权 水文地质工程地质. 2021, 48(6): 171-179

国家天文台500米口径球面射电望远镜台址球冠型边坡稳定性分析

An analysis of the stability of the spherical-cap shaped slope at the Five-hundred-meter Aperture Spherical radio Telescope (FAST), China

陈德茂, 沈志平, 姜鹏, 付君宜, 刘慧 水文地质工程地质. 2021, 48(4): 116-123

基于区间非概率可靠性方法的岩溶区桩基下溶洞顶板稳定性评价

Stability evaluation of karst cave roof under pile in karst areas based on the interval non-probabilistic reliability method

秦溯, 李云安, 孙琳 水文地质工程地质. 2019, 46(5): 81-88

基于岩体损伤的大型高陡危岩稳定性评价方法

Stability assessment methods for huge high-steep unstable rock mass based on damage theory

贺凯, 高杨, 殷跃平, 李滨 水文地质工程地质. 2020, 47(4): 82-89



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

DOI: 10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202312013

于妍妍, 赵毅, 方熠, 等. 基于多剖面法的“瓢形”沟谷渣堆稳定性分析 [J]. 水文地质工程地质, 2025, 52(4): 192-201.

YU Yanyan, ZHAO Yi, FANG Yi, et al. Stability analysis of slag heap in “scoop-shaped” valley area based on multi-profile residual thrust method[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2025, 52(4): 192-201.

基于多剖面法的“瓢形”沟谷渣堆稳定性分析

于妍妍¹, 赵毅², 方熠³, 陆敏凤⁴, 祝洁雯⁵, 唐朝晖¹, 柴波^{6,7,8}

(1. 中国地质大学(武汉)工程学院, 湖北武汉 430074; 2. 中国能源建设集团安徽省电力设计院有限公司, 安徽合肥 230601; 3. 湖北省地质局第七地质大队, 湖北宜昌 443100; 4. 广州市交通规划研究院有限公司, 广东广州 510030; 5. 湖北华勤建设工程咨询有限公司, 湖北武汉 430019; 6. 中国地质大学(武汉)环境学院, 湖北武汉 430074; 7. 长江流域环境水科学湖北省重点实验室, 湖北武汉 430074; 8. 自然资源部地质环境修复技术创新中心, 湖北武汉 430074)

摘要: 由于三面环山的基础优势, 废弃矿渣大多选择堆积在周围高、中间低的“瓢形”场地。通过对“瓢形”沟谷区域地形及渣堆形态的分析认为, 渣堆前缘存在应力集中现象, 采用常规方法计算得到的渣堆稳定性可能存在稳定性系数偏高的问题, 因此有必要针对“瓢形”堆渣场地提出一种改进的稳定性计算方法。考虑到“瓢形”场地“大肚子, 小收口”的地形特点, 基于剩余推力法提出改进的多剖面剩余推力法, 并利用煤矸石材料进行不同长宽比和不同谷坡坡度的物理模型堆渣试验, 以验证计算方法的合理性。试验结果表明, 当沟谷长宽比在 1~2 之间且谷坡坡度大于材料的内摩擦角时, 渣堆前缘出现应力集中现象, 并且渣堆前缘的应力大小随谷坡坡度的增大而增大。分别采用传统剩余推力法(单剖面法)和多剖面法计算模型渣堆的稳定性系数, 多剖面法的计算结果要小于单剖面法的计算结果, 且多剖面法计算所得主剖面上剩余下滑力与监测数据基本一致, 误差在 5% 以内。因此, 多剖面剩余推力法在计算“瓢形”场地渣堆边坡稳定性时具有较高的可靠性, 能够为“瓢形”弃渣场的风险防控和防灾减灾工程设计提供一定的参考依据和方法支撑。

关键词: 散体介质颗粒; 沟谷区渣堆稳定性; 应力集中; 多剖面计算理论; 剩余推力法

中图分类号: P642.3

文献标志码: A

文章编号: 1000-3665(2025)04-0192-10

Stability analysis of slag heap in “scoop-shaped” valley area based on multi-profile residual thrust method

YU Yanyan¹, ZHAO Yi², FANG Yi³, LU Minfeng⁴, ZHU Jiewen⁵,
TANG Zhaohui¹, CHAI Bo^{6,7,8}

(1. Faculty of Engineering, China University of Geosciences (Wuhan), Wuhan, Hubei 430074, China;
2. Anhui Electric Power Design Institute Co. Ltd., China Energy Engineering Group, Hefei, Anhui 230601, China;
3. The Seventh Geological Brigade of Hubei Geological Bureau, Yichang, Hubei 443100, China;
4. Guangzhou Transport Planning Research Institute Co. Ltd., Guangzhou, Guangdong 510030, China;
5. Hubei Huaqin Construction Engineering Consulting Co. Ltd., Wuhan, Hubei 430019, China;
6. School of Environmental Studies, China University of Geosciences (Wuhan), Wuhan, Hubei 430074, China;
7. Hubei Key Laboratory of Yangtze Catchment Environmental Aquatic Science, Wuhan, Hubei 430074, China;

收稿日期: 2023-12-08; 修订日期: 2024-03-17

投稿网址: www.swdzcgdz.com

基金项目: 国家自然科学基金项目(4187071047)

第一作者: 于妍妍(1998—), 女, 硕士研究生, 主要从事工程地质研究. E-mail: 1502872631@qq.com

通讯作者: 柴波(1981—), 男, 博士, 教授, 主要从事环境地质和工程地质方面的科研与教学工作. E-mail: chaibo@cug.edu.cn

8. *Technology Innovation Center for Ecological Restoration in Mining Areas, Ministry of Natural Resources, Wuhan, Hubei 430074, China*)

Abstract: Due to the basic advantages of being surrounded by mountains on three sides, most of the waste slag is selected to accumulate in the “scoop-shaped” site with high surroundings and low middle. Through the analysis of the topography and slag heap morphology of the “scoop-shaped” valley area, it is considered that there is a stress concentration at the leading edge of the slag heap, and the stability coefficient of the slag heap calculated by conventional methods may be high. Thus, it is necessary to propose an improved stability calculation method for the “scoop-shaped” slag heap site. Considering the terrain characteristics of the “big belly and small closure” of the “scoop-shaped” site, an improved multi-profile residual thrust method was proposed in this study based on the residual thrust method. The physical model slag tests with different aspect ratios and different slope gradients were carried out by using coal gangue materials to verify the rationality of the calculation method. The test results show that when the aspect ratio of the valley is between 1–2 and the slope of the valley is greater than the internal friction angle of the material, the stress concentration occurs at the leading edge of the slag heap, and the stress at the leading edge of the slag heap increases with the increase of the slope of the valley. The stability coefficient of the model slag heap is calculated by the traditional residual thrust method (single-profile method) and the multi-profile method, respectively. The calculation results of the multi-profile method are smaller than those of the single-profile method, and the residual sliding force on the main profile calculated by the multi-profile method is basically consistent with the monitoring data, with the error of less than 5%. Therefore, the multi-profile residual thrust method has high reliability in calculating the stability of the slag heap slope in the “scoop-shaped” site. The method can provide a basis and method support for the risk prevention and control as well as disaster prevention and mitigation engineering design of the “scoop-shaped” slag dump.

Keywords: granular medium particles; stability of the slag heap in the valley area; stress concentration; multi-profile calculation theory; residual thrust method

在矿山开采和城市建设中,产生了大量的废弃矿渣、石料,不仅导致环境污染^[1],还易发生地质灾害进而带来巨大的人民生命和财产损失。作为不均匀的散体介质,弃渣堆积体结构松散、内部结构复杂,具有显著的流态化运动特征和时变特征^[2-4],失稳概率远高于普通边坡,排土场渣堆失稳引起的地质灾害时有发生。如:2008年9月山西临汾新塔矿业尾矿库溃坝造成276人死亡^[5];2013年3月甲玛铜矿区渣堆失稳引起滑坡致83名施工人员被掩埋;2015年12月深圳红坳排土场滑坡造成77人遇难,33栋建筑物受损^[6]。

对于排土场弃渣堆稳定性的研究起步较晚,自20世纪70年代开始,国际上开始展开对矿山排土工艺、排土场边坡稳定性及防治措施的试验研究^[7],到现在基本形成了一套适合于排土场稳定性研究的理论,主要包括采用试验和反分析方法获取岩石力学参数,通过极限平衡分析^[8-9]、数值模拟分析^[10]和模型试验^[11]确定其稳定性^[12]。通过对排土场渣堆边坡的研究发现,边坡内的应力随着边坡高度和角度的增大而增

大^[11],位移也随堆高的增加而增大,纵向的位移始终大于其他方向的位移,且排土场堆渣体潜在的破坏主要分布在坡脚附近^[12]。此外,国内外的众多学者认为,地表水入渗及固结渗流导致的液化效应是影响堆体边坡稳定性的重要因素^[13-14],水流入渗会减小堆体内摩擦角^[15],增大边坡的水平变形^[9],进而导致堆体边坡失稳。

通过对深圳红坳弃土场的失稳因素分析发现,除了多位学者认为的降水因素^[16-17],地形和堆体形态也会影响堆体的稳定性^[18-20]。从稳定性的角度来看,低高度的平堆是最理想的,但会占用大量土地资源^[21],而“瓢形”沟谷区域则提供了一个相对完美的堆渣场地。“瓢形”场地(有学者称其为圈椅状场地)指的是三面环山的沟谷状区域,包括天然沟谷和开挖矿坑等区域,场地中后部具有宽阔的堆积空间,渣堆以稳定的山体作为基础,前缘沟口处易于设置挡墙拦挡,即具有“大肚子,小收口”的特点。虽然“瓢形”场地优势突出,但其规模和坡度往往较大,且易在堆体前缘出

现应力集中现象,一旦失稳,造成的危害也更大。在考虑“瓢形”沟谷区域地形和渣堆形态的情况下,二维断面边坡稳定性分析难以反映三维地形对稳定性的影响,所以传统的二维边坡稳定性计算方法也不适用于计算“瓢形”沟谷区域的渣堆边坡的稳定性。

基于以上认识,提出基于剩余推力法的多剖面剩余推力法计算“瓢形”沟谷区渣堆边坡的稳定性,并通过概化的“瓢形”沟谷区渣场堆体模型对计算方法的合理性进行验证。研究成果对于发展散体介质颗粒力学分析理论具有积极作用,能够为“瓢形”区域排土场风险防控和防灾减灾工程设计提供参考依据。

1 沟谷区弃渣场地形及渣堆形态分析

“瓢形”沟谷区具有三面环山的牢固基础优势,图 1 为深圳红坳排土场失稳前照片^[13],地形上具有典型的“大肚子,小收口”的“瓢形”特点。另外,在湖北大冶的野外调查过程中,也发现了处于“瓢形”沟谷区内的寒山溪尾矿库(图 2),从图中可以看出尾矿库中后部空间宽阔,前缘小收口处建有坝体挡墙。在实际工程堆渣中,“瓢形”沟谷场地会被优先选作堆渣场地,具有显著的典型性。



图 1 深圳红坳排土场失稳前照片(据文献[13])
Fig. 1 Shenzhen Hongao dump before instability (adapted from Ref.[13])

沟谷区弃渣场一般具有如下工程特征:(1)弃渣不进行破碎或劈裂处理,工程建设中产生的弃渣直接运输至弃渣场,从而导致同一弃渣场弃渣粒径相差悬殊^[22];(2)弃渣不进行压实处理,坡顶及台阶平台由于车辆等活荷载因素压实度稍高,总体属于人工松散堆积体;(3)弃渣的自然极限排放,一般情况下通常自坡顶位置直接倾倒弃渣,弃渣通过势能与动能之间转化完成初步运动堆积^[23-24]。与普通边坡相比,弃渣堆具有坡面高陡、结构松散、堆置无序且分选性差等特



图 2 大冶寒山溪尾矿库
Fig. 2 Hanshanxi tailings pond in Daye

点,其下方往往有一定高度的拦挡工程。

沟谷区弃渣场三面有山体作为“基础”,整体空间形态呈“瓢形”,即中间沟谷堆积区较大,而堆积前缘较窄,这种地形在一定条件下有利于实现弃渣的沟谷满填,但经过分析认为,由于两侧谷坡使得较松散弃渣颗粒同时具有向中间、向下的运动趋势,两侧谷坡上的堆体会向渣堆中轴线部位的堆体传递剩余下滑力,最终会造成前缘挡墙处出现应力集中现象,存在失稳隐患。因此,在利用传统稳定性计算方法时,会导致计算得到的稳定性系数比实际情况偏大,需要结合沟谷区弃渣场的特点,对广泛应用的稳定性计算方法进行改进,以便在沟谷区弃渣场的稳定性计算中更具精确度和针对性。

2 多剖面剩余推力法

剩余推力法计算简单、适用范围较为广泛,作为工程应用中计算坡体稳定性的普遍使用方法,计算结果常用于指导工程实践^[25],但因立足于二维剖面进行计算,不适用于“瓢形”沟谷区渣堆稳定性的计算,因此提出多剖面剩余推力法。

2.1 基本理论

多剖面剩余推力法是对传统剩余推力法的一种改进方法,假定以前缘沟口挡墙处为原点,向坡面作射线,以射线垂直投影面为计算剖面,进行条分后计算各剖面的剩余下滑力,之后基于空间平行力系移动和叠加原理^[26],将各剖面的剩余下滑力投影在主剖面上对应的条块上,以计算堆积体整体的剩余下滑力。既可以考虑到堆体整体形态,还可以考虑到不同方向抗滑区及下滑区面积不一致的影响。

为了简化计算、方便应用,对计算方法做如下基本假定。

- (1)对滑面作以下假定^[27-28]:
 - ①将滑坡的稳定性问题视为平面应变问题;
 - ②将组成滑坡体的岩土体视为刚体;
 - ③作用于滑面上的力满足摩尔库伦屈服准则;
 - ④每条分析土块的滑面为一直线;
 - ⑤条块间的作用力平行于该条块的滑面。
- (2)对划分条块作以下假定:

①对于各条块力的投影,只考虑在主剖面上的投影,垂直于主剖面方向上的力默认在主剖面两边对称从而相互抵消。多剖面条件下在每一个条块曲面同一水平面上应力视为均匀分布的。

②条分的力学性质和原理与简布法的假设条件一致^[29],即假定整个滑裂面上的稳定安全系数相同。假定土条上所有垂直荷载的合力作用线和滑裂面的交点与支持合力的作用点为同一点。

③为了简化计算,假设第*i*土条的左右两侧的合力与第*i-1*土条和第*i+1*土条的合力大小相等、方向相反,作用线重合相互抵消,即作用于每一土条的力仅为条块重力、基底支持力和滑面摩擦力。

④假设土压力沿着高度服从三角形分布,渣堆表面土压力为0,平均压力为底部压力的一半。

2.2 多剖面剩余推力计算方法

假定坡体主剖面沿坡体向上在水平面上的投影方向为*Y*轴正方向,水平面上垂直于*Y*轴从左到右为*X*轴正方向,垂直*X*轴、*Y*轴向上为*Z*轴正方向。以原点为放射点将堆体划分为*n*个剖面,每个剖面以相同单位长度划分为若干块,堆体条块划分示意图见图3,条块受力示意图见图4。

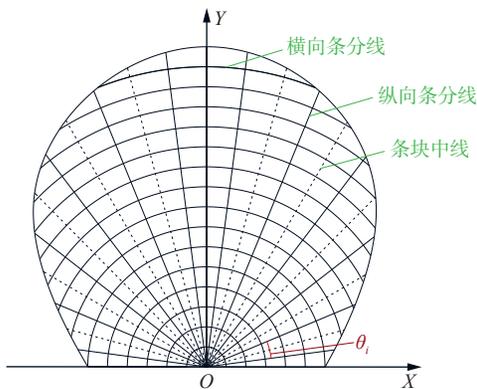


图3 堆体条块划分平面示意图

Fig. 3 Plane schematic diagram of pile block division

对于每一条块剩余下滑力计算如式(1)~(7)。

$$V_{ij} = \frac{\theta_i \pi (r_{i(j+1)}^2 - r_{ij}^2)}{360} \times H_{ij} \quad (1)$$

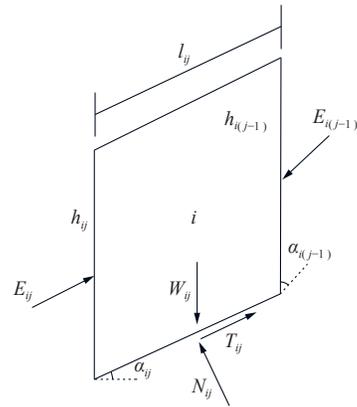


图4 条块受力示意图

Fig. 4 Schematic diagram of the block force

$$H_{ij} = \frac{(h_{ij} + h_{(i+1)j} + h_{i(j+1)} + h_{(i+1)(j+1)})}{4} \quad (2)$$

$$W_{ij} = \gamma \times V_{ij} \quad (3)$$

$$T_{ij} = W_{ij} \sin \alpha_{ij} \quad (4)$$

$$R_{ij} = W_{ij} \cos \alpha_{ij} \tan \varphi \quad (5)$$

$$k_{ij} = \cos(\alpha_{(i-1)j} - \alpha_{ij}) - \sin(\alpha_{(i-1)j} - \alpha_{ij}) \tan \varphi \quad (6)$$

$$E_{ij} = T_{ij} - R_{ij} + E_{i(j+1)} k_{(i+1)j} \quad (7)$$

式中: θ_i ——第*i*个剖面与相邻剖面之间的夹角/(°),由于一般按照等角度划分割面,故该值在计算中为划分割面的旋转角度;

V_{ij} ——第*i*个剖面上第*j*个条块的体积/ m^3 ;

l_{ij} ——第*i*个剖面上第*j*个条块距离原点的距离/ m ;

H_{ij} ——第*i*个剖面上第*j*个条块中心点的高度/ m ;

h_{ij} ——第*i*个剖面上第*j*个条块最靠近原点(*O*)的角点高度/ m ;

W_{ij} ——第*i*个剖面上第*j*个条块的重量/ kN ;

γ ——散体介质材料重度/($\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$);

T_{ij} ——第*i*个剖面上第*j*条块的下滑力/ kN ;

α_{ij} ——第*i*个剖面上第*j*条块的滑面倾角/(°);

R_{ij} ——第*i*个剖面上第*j*条块的滑面抗滑力/ kN ;

φ ——散体介质材料内摩擦角/(°);

k_{ij} ——第*i*个剖面上第*j*条块的推力传递系数;

E_{ij} ——第*i*个剖面上第*j*条块的剩余下滑力/ kN 。

设第*i*个剖面上第*j*条块的剩余下滑力 E_{ij} 的单位向量为 \mathbf{n}_{ij} , 则根据数学向量公式计算得:

$$\mathbf{n}_{ij} = (\cos \alpha_{ij} \sin \beta_i, \cos \alpha_{ij} \cos \beta_i, -\sin \alpha_{ij}) \quad (8)$$

式中: β_i ——第*i*个剖面与主剖面投影在水平面上的夹角/(°)。

设第 i 个剖面上第 j 条块的剩余下滑力 E_{ij} 与主剖面上对应条块的剩余下滑力之间的夹角 γ_{ij} 。

$$\cos\gamma_{ij} = \frac{\mathbf{n}_{ij}\mathbf{n}_{1j}}{|\mathbf{n}_{ij}||\mathbf{n}_{1j}|} \quad (9)$$

其中,

$$\mathbf{n}_{ij}\mathbf{n}_{1j} = \cos\alpha_{ij}\sin\beta\cos\alpha_{1j}\sin\beta_1 + \cos\alpha_{ij}\cos\beta\cos\alpha_{1j}\cos\beta_1 + \sin\alpha_{ij}\sin\alpha_{1j} \quad (10)$$

$$|\mathbf{n}_{ij}||\mathbf{n}_{1j}| = 1 \quad (11)$$

把所有条块产生的剩余下滑力投影到主剖面上, 第 i 剖面上第 j 条块的剩余下滑力在主剖面上的分力 E'_{ij} 为:

$$E'_{ij} = E_{ij}\cos\gamma_{ij} \quad (12)$$

将每个剖面上条块在第一剖面上相应的第 j 条块的分力求和, 即可求出整个堆体在前缘处的剩余下滑力 E 。

$$E = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^k E'_{ij} \quad (13)$$

3 沟谷区煤矸石堆渣模型试验

3.1 模型概化设计

模型试验相似关系中主要满足几何相似和渣体运动堆积相似, 基于大冶寒山溪尾矿库和深圳红坳排土场的地形特点和规模, 设计水平长度 40 m、宽度 30 m、高度 20 m 的模拟“瓢形”堆场原型, 选择 1 : 20 的相似比进行缩尺处理。弃渣堆积场地沟谷底部的原始斜坡角度范围为 $15^\circ \sim 20^\circ$, 地形凹凸不平。根据数次预试验发现凹凸不平的地形主要对沟谷区渣堆的初期影响较大, 当新的堆积体坡面形成时, 凹凸不平的坡面对弃渣倾倒时分选的影响可忽略, 因此将谷底原始斜坡简化为坡角为 18° 的平面。

试验模型参照典型沟谷区地形砌筑, 以 1 : 20 的相似比对模拟堆场原型进行缩尺, 经过计算和调整, 最终采用的模型外部尺寸为 $1\,920\text{ mm} \times 1\,980\text{ mm} \times 960\text{ mm}$ (长 \times 宽 \times 高), 前缘沟口呈梯形状, 最低处高度为 240 mm, 可作为坝体起到挡墙的作用。先用混凝土砌筑出沟底模型 (图 5), 坡度为 18° , 再砌筑 2 个坡面 (图 6), 中间预留沟底。模型长宽比 (2 : 1、1.5 : 1、1 : 1, 此处沟谷长是指从前缘沟口到谷坡后缘的距离, 沟谷宽是指谷坡最宽处的距离) 和山谷坡度 (19° 、 30° 、 43°) 将在每一组实验结束后进行砌筑调整, 沟底坡度始终保持 18° 不变。



图 5 沟谷模型沟底砌筑成型

Fig. 5 Ditch bottom of the valley model masonry molding



图 6 沟谷模型坡面砌筑成型

Fig. 6 Slope of the valley model masonry molding

3.2 试验方案及试验过程

3.2.1 试验材料

试验材料选择湖北大冶的煤矸石材料, 基于模型尺寸, 由于煤矸石粒径分布范围较广, 既有粒径小于 0.1 mm 的细颗粒, 也有粒径大于 60 mm 的巨粒^[30], 为消除尺寸效应产生的误差, 采用剔除法对所取的煤矸石材料进行处理^[31], 最终获得颗粒粒径在 0.1 ~ 20.0 mm 的煤矸石颗粒材料, 主要物理力学性质参数见表 1。

表 1 煤矸石主要物理力学性质参数

Table 1 Main physical and mechanical property parameters of coal gangue

参数	重度/($\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$)	休止角/($^\circ$)	黏聚力/kPa	内摩擦角/($^\circ$)
数值	17.47	32.56	0	28.88

3.2.2 监测装置布置

试验采用动静态电阻应变仪系统和微型土压力盒进行应力监测。设置 3 条监测剖面, 以沟口处为原点, 向沟底平面发散, 3 条剖面线夹角为 15° , 每条剖面放置 3 个土压力盒, 土压力盒方向垂直坡面向上, 另外在沟口处放置一土压力盒, 此处土压力盒平行墙体放置。测量装置连接计算机后, 将土压力传感器放置在模型 3 条剖面线上用于测量剩余下滑力, 监测装置布置如图 7 所示, 监测线上土压力盒距沟口的直线距离分别为 0, 0.15, 0.40, 0.75 m。

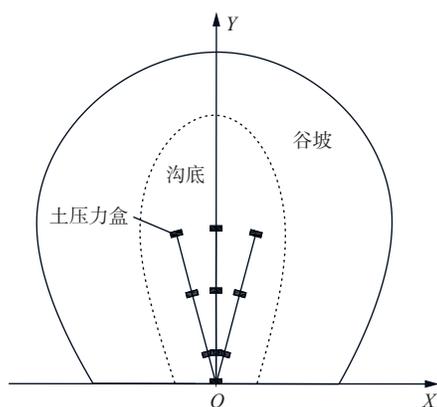


图 7 检测装置布置图

Fig. 7 Layout of the detection device

3.2.3 试验过程

传感器布置完成后从沟口处向上堆填煤矸石, 堆填开始的同时进行数据采集并录像, 堆填完毕的煤矸石堆见图 8, 试验结束后回收煤矸石材料。



图 8 堆填完毕的煤矸石堆

Fig. 8 Coal gangue pile after landfilling

完成一组试验后, 用混凝土对沟谷区域进行改砌, 改变沟谷区长宽比(2 : 1、1.5 : 1、1 : 1)及周围谷坡坡度(19°、30°、43°), 待混凝土硬化后以同样的堆渣方式进行煤矸石堆渣试验, 并在相同位置布设土压力盒进行监测。

3.3 试验结果

通过对试验监测数据进行处理后得到中间主剖面的应力监测曲线。以沟谷模型长宽比为 1.5 : 1(图 9)及谷坡坡度 30°(图 10)为例。

由图 9 可知, 谷坡坡度越大, 渣堆前缘(沟口处)的应力越大, 且坡度为 19°时渣堆前缘无应力集中出现, 分析认为, 当谷坡坡度大于煤矸石材料的内摩擦角时, 谷坡上的堆渣区才可成为下滑区, 两侧堆体会向中间传导剩余下滑力, 导致主剖面的剩余下滑力增大, 此时渣堆前缘才有应力集中出现。

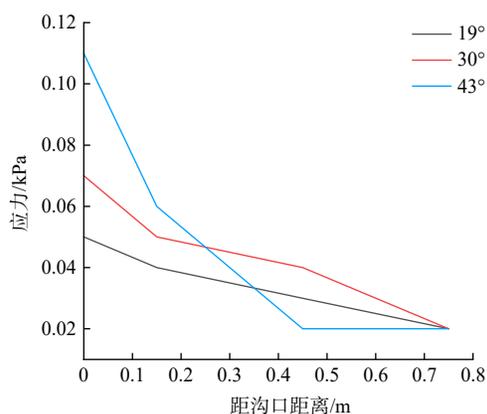


图 9 不同坡度渣堆中间主剖面监测结果(长宽比 1.5 : 1)

Fig. 9 Monitoring results of the middle main profile of the slag heap with different slopes (length-width ratio 1.5 : 1)

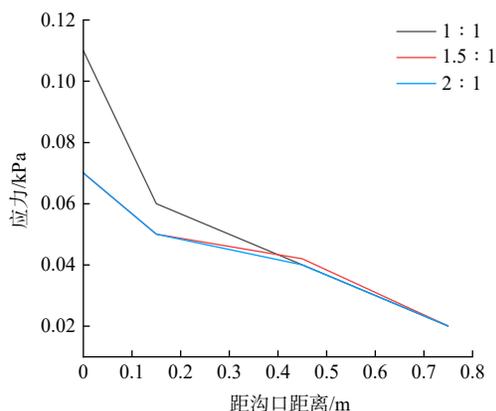


图 10 不同长宽比渣堆中间主剖面监测结果(坡度 30°)

Fig. 10 Monitoring results of the middle main profile of the slag heap with different length-width ratios (valley slope 30°)

由图 10 可知, 3 种长宽比的沟谷区渣堆前缘均出现应力集中, 而沟谷长宽比为 1 : 1 时渣堆前缘应力最大, 大于沟谷长宽比为 1.5 : 1 及 2 : 1 的工况, 后 2 种工况的前缘应力及内部应力分布则十分相近, 说明在长宽比为 1 ~ 2 的范围内, 长宽比越大, 应力反而越小, 应力集中现象越不明显。分析认为, 下滑区和抗滑区的面积比值越大, 会使渣堆前缘应力越大, 不同长宽比下滑区和抗滑区面积比例如图 11 所示。沟谷长宽比不同导致下滑区(谷坡)与抗滑区(谷底)面积比值不同会影响渣堆内部应力分布和传导。

4 讨论

4.1 剩余推力计算

选取 2 组模型试验数据作为算例, 以长宽比 1 : 1、谷坡坡度 30°为工况一, 长宽比 1 : 1.5、谷坡坡度 30°为工况二, 利用传统剩余推力法(单剖面法)和多剖面剩余推力法分别计算堆体的稳定性系数。通过 Meta

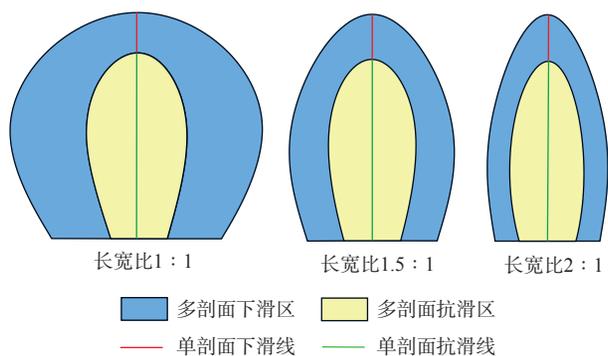


图 11 不同长宽比沟谷下滑区和抗滑区面积比例示意图

Fig. 11 Area ratio diagram of valley sliding area and anti-sliding area with different length-width ratios

shape 软件生成 2 种工况的渣堆三维模型, 再通过 Cloud Compare 软件对点云数据进行处理, 并切出剖面, 导入 Excel 表格中, 得到 2 种工况堆积体主剖面的表面、沟底形态及堆积厚度见图 12。

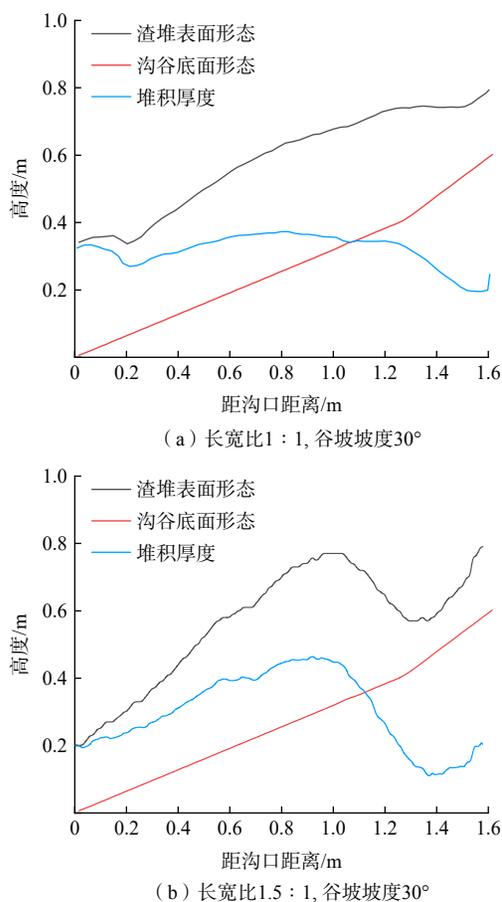


图 12 堆渣主剖面表面形态、沟底形态及高度差

Fig. 12 Surface morphology, ditch bottom morphology, and height difference of the main section of the slag heap

4.1.1 传统剩余推力法(主剖面)计算剩余推力

由于沟底与谷坡均为规则直线, 故以 0.1 m 为条

分长度。中间主剖面稳定性系数计算公式如下^[32]:

$$F_s = \frac{\sum_{i=2}^n \left(R_i \prod_{j=i}^{n-1} k_j \right) + R_1}{\sum_{i=2}^n \left(T_i \prod_{j=i}^{n-1} k_j \right) + T_1} \quad (14)$$

式中: F_s ——中间主剖面稳定性系数;

R_i ——第 i 条块滑面抗滑力/kN;

T_i ——第 i 条块下滑力/kN;

k_j ——推力传递系数。

通过计算得到工况一的稳定性系数 $F_{s1}=1.26$, 剩余下滑力 $E_1=44.33$ N, 渣堆处于稳定状态, 且稳定性系数较高; 工况二的稳定性系数 $F_{s2}=1.21$, 剩余下滑力 $E_2=32.96$ N, 渣堆处于稳定状态, 稳定性系数较工况一小。

4.1.2 三维-多剖面法计算剩余推力

对堆体按 15° 划分纵向剖面条块, 以 0.1 m 为条分长度再对纵向条块进行划分, 条块划分如图 3 ($\theta_i=15^\circ$) 所示, 图中一些边缘条块形状不规则, 由于 2 种工况的渣堆均未堆至不规则条块区域, 故可忽略未涉及条块。采用 Cloud Compare 软件以 15° 对模型进行剖面切割, 得到各剖面的表面形态及高度信息, 用于后续计算。

使用多剖面剩余推力法计算稳定性系数的公式如下:

$$F'_s = \frac{\sum_{j=2}^n \sum_{i=1}^n \left[\left(R_{ij} \prod_{m=j}^{n-1} k_{im} \right) \cos \gamma_{ij} \cos \theta_j \right] + \sum_{i=1}^n R_{i1} \cos \gamma_{i1} \cos \theta_1}{\sum_{j=2}^n \sum_{i=1}^n \left[\left(T_{ij} \prod_{m=j}^{n-1} k_{im} \right) \cos \gamma_{ij} \cos \theta_j \right] + \sum_{i=1}^n T_{i1} \cos \gamma_{i1} \cos \theta_1} \quad (15)$$

式中: F'_s ——多剖面法计算所得稳定性系数;

R_{ij} ——第 ij 条块滑面抗滑力/kN;

T_{ij} ——第 ij 条块下滑力/kN;

k_{im} ——推力传递系数;

γ_{ij} ——第 i 个剖面上第 j 条块的剩余下滑力 E_{ij} 与主剖面上对应条块的剩余下滑力之间的夹角/ $^\circ$;

θ_i ——第 i 个剖面与相邻剖面之间的夹角, 该值为 15° 。

通过多剖面剩余推力法计算得到工况一的稳定性系数 $F'_{s1}=1.01$, 剩余下滑力 $E'_1=66.203$ N; 工况二的稳定性系数 $F'_{s2}=0.94$, 剩余下滑力 $E'_2=78.58$ N, 按照稳定性系数的计算结果来看, 工况二的渣堆边坡已经失

稳, 由于沟口处设置有坝体挡墙拦挡, 所以未出现失稳现象。

经计算对比发现, 2 种工况中传统剩余推力法(单剖面法)计算的稳定性系数分别为 1.26 和 1.21, 剩余下滑力为 -44.33 N 和 -32.96 N , 多剖面剩余推力法计算的稳定性系数分别为 1.01 和 0.94, 剩余下滑力为 66.203 N 和 78.58 N , 利用多剖面剩余推力法计算的稳定性系数明显小于前者, 可见传统计算方法所得稳定性系数较大, 在实际情况中如按照传统计算方法结果进行支挡防护工程设计容易造成隐患。

4.2 多剖面法合理性分析

根据 4.1 节的计算结果绘制 2 种工况下单剖面法、多剖面法及监测数据在渣堆主剖面的剩余下滑力分布如图 13 所示, 对比 2 种计算方法所得结果与监测结果的吻合程度。

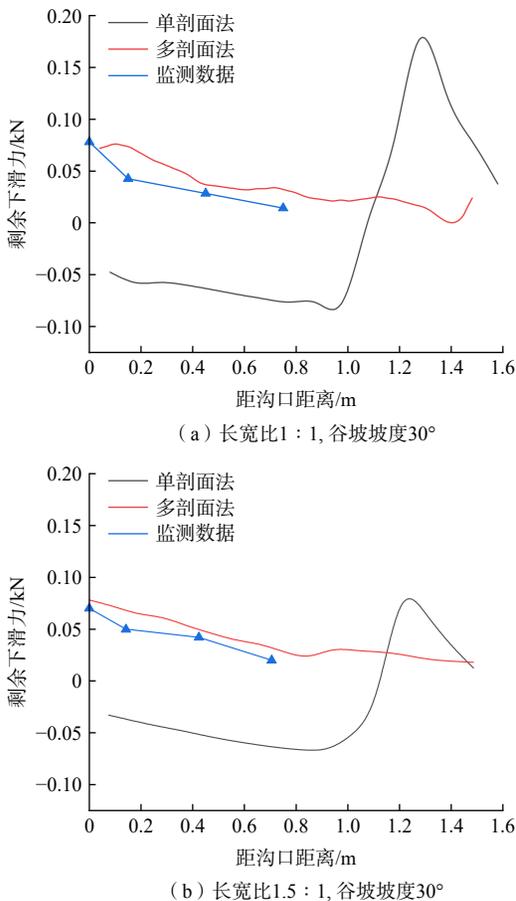


图 13 不同方式所得主剖面剩余下滑力分布曲线图

Fig. 13 Residual sliding force distribution of the main profile obtained by different methods

由图 13 可得, 2 种工况中, 多剖面法计算所得主剖面上剩余下滑力与监测数据更吻合, 误差在 5% 以内; 单剖面法计算所得剩余下滑力则在谷坡与谷底转

折处出现了正负变化, 是由于谷底坡度减小及堆体形态变化使得剩余下滑力计算结果减小, 从图中可以看出单剖面法计算结果与实际监测数据不符。从计算的有效面积分析, 单剖面法只考虑垂直于剖面单位宽度的范围, 在纵剖面上表现为抗滑区大于下滑区; 而多剖面法考虑了周围谷坡上的堆体, 计算的有效范围比单剖面法大, 计算涉及渣堆的下滑区变大, 更接近实际情况, 综合分析认为, 利用多剖面法计算“瓢形”沟谷区域的渣堆稳定性参数更加合理可靠。

4.3 多剖面剩余推力法的局限性

在试验和计算过程中发现, 谷坡坡度较小及沟谷长宽比过大或过小的情况不适用多剖面剩余推力法。当谷坡坡度小于渣堆材料内摩擦角时, 应在考虑降水的前提下再决定是否采用多剖面剩余推力法进行计算。当沟谷长宽比较小时, 可将渣堆视为单斜坡堆体进行相关计算。当沟谷长宽比较大时, 沟谷形状更接近沟渠状, 应主要考虑渣堆主剖面上的应力情况, 多剖面方法不再适用。未来的工作将围绕多剖面剩余推力法的适用范围展开研究。

5 结论

(1) 在沟谷长宽比相同的情况下, 当沟谷区谷坡坡度大于堆渣材料内摩擦角时, 渣堆前缘出现应力集中现象, 且渣堆前缘的应力随谷坡坡度的增大而增大。

(2) 在沟谷谷坡坡度相同、沟谷长宽比为 1~2 范围内的情况下, 长宽比越大, 前缘应力及内部应力越小, 应力集中现象越不明显。

(3) 相比于常规剩余推力法, 采用多剖面剩余推力法计算“瓢形”场地渣堆边坡的稳定性更具合理性, 多剖面法的计算结果与监测数据误差在 5% 以内, 在指导实际工程应用中可靠性高。

(4) 多剖面法只适用于“瓢形”渣堆稳定性的计算, 对沟谷长宽比和谷坡坡度的范围有一定限制, 未来的工作将围绕这一范围的取值展开。

参考文献 (References) :

- [1] 周辰昕, 李小倩, 周建伟. 广西合山煤矸石重金属的淋溶实验及环境效应 [J]. 水文地质工程地质, 2014, 41(3): 135 - 141. [ZHOU Chenxin, LI Xiaoqian, ZHOU Jianwei. Leaching experiment and environmental effect of heavy metals of coal gangue in Heshan mining area, Guangxi Province [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2014, 41(3): 135 - 141. (in Chinese with

- English abstract)]
- [2] 汪海滨, 李小春, 米子军, 等. 黄土地基排土场滑坡演化机制研究 [J]. *岩土力学*, 2011, 32(12): 3672 – 3678. [WANG Haibin, LI Xiaochun, MI Zijun, et al. Research on formation evolution mechanism of waste dumps landslides on loess foundation[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2011, 32(12): 3672 – 3678. (in Chinese with English abstract)]
- [3] 吴谦, 毛雪松, 刘龙旗, 等. 某弃渣场边坡稳定性的可靠度分析 [J]. *桂林理工大学学报*, 2017, 37(3): 475 – 480. [WU Qian, MAO Xuesong, LIU Longqi, et al. Stability reliability analysis of an abandoned dreg site slope[J]. *Journal of Guilin University of Technology*, 2017, 37(3): 475 – 480. (in Chinese with English abstract)]
- [4] 龙艳梅, 宋章, 王玉峰, 等. 基于物理模型试验的碎屑流流态化运动特征分析 [J]. *水文地质工程地质*, 2022, 49(1): 126 – 136. [LONG Yanmei, SONG Zhang, WANG Yufeng, et al. An analysis of flow-like motion of avalanches based on physical modeling experiments[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2022, 49(1): 126 – 136. (in Chinese with English abstract)]
- [5] 殷跃平. 山西襄汾县塔山矿区尾矿溃决泥石流灾难 [J]. *中国地质灾害与防治学报*, 2008, 19(4): 70. [YIN Yueping. Debris flow disaster caused by tailings bursting in Tashan mining area of Xiangfen County, Shanxi Province[J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2008, 19(4): 70. (in Chinese)]
- [6] 徐永强. 深圳光明新区“12·20”余泥渣土受纳场滑坡 [J]. *中国地质灾害与防治学报*, 2016, 27(1): 14. [XU Yongqiang. The “12·20” landslide of residual mud and muck receiving field in Guangming New District, Shenzhen[J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2016, 27(1): 14. (in Chinese)]
- [7] 王文喜. 黄土基底排土场边坡稳定性分析与评价 [D]. 阜新: 辽宁工程技术大学, 2007. [WANG Wenxi. Analysis and evaluation of slope stability in loess basement dumping site[D]. Fuxin: Liaoning Technical University, 2007. (in Chinese with English abstract)]
- [8] AHMAD AZIZI M, KARIM R, MARWANZA I, et al. Prediction of material volume of slope failure in nickel surface mine using limit equilibrium method 3D[J]. *Indonesian Mining Professionals Journal*, 2019, 1(1): 43 – 48.
- [9] CHO Y C, SONG Y S. Deformation measurements and stability analysis of the slope at a coal mine waste dump[J]. *Ecological Engineering*, 2014, 68: 189 – 199.
- [10] SHRUTHI B. Stability analysis of dump slope in open cast mines[J]. *HELIX*, 2019, 9(6): 5706 – 5710.
- [11] BARVOR Y J, BACHA S, CAI Qingxiang, et al. Surface mines composite slope deformation mechanisms and stress distribution[J]. *Mining of Mineral Deposits*, 2020, 14(4): 1 – 16.
- [12] ZOU Ping, ZHAO Ximo, MENG Zhonghua, et al. Sample rocks tests and slope stability analysis of a mine waste dump[J]. *Advances in Civil Engineering*, 2018, 2018: 6835709.
- [13] YIN Yueping, LI Bin, WANG Wenpei, et al. Mechanism of the December 2015 catastrophic landslide at the Shenzhen landfill and controlling geotechnical risks of urbanization[J]. *Engineering*, 2016, 2(2): 230 – 249.
- [14] RAY A, RAI R, VISHWAKARMA A, et al. Biological stabilization of mine waste dump[C]//International Conference on Opencast Mining Technology & Sustainability. 2021.
- [15] NAYAK P K, DASH A K, DEWANGAN P. Investigating the effects of rainfall and groundwater on coal mine waste dump stability: A case study[J]. *Journal of Mines, Metals and Fuels*, 2021, 69(7): 233 – 240.
- [16] 高杨. 人工堆填体滑坡远程滑动机理研究——以深圳光明新区滑坡为例 [D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2018. [GAO Yang. The study on long run-out mechanism of artificial landfill landslide[D]. Beijing: China University of Geosciences, 2018. (in Chinese with English abstract)]
- [17] 刘传正. 深圳红坳弃土场滑坡灾难成因分析 [J]. *中国地质灾害与防治学报*, 2016, 27(1): 1 – 5. [LIU Chuanzheng. Genetic mechanism of landslide tragedy happened in Hong'ao dumping place in Shenzhen, China[J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2016, 27(1): 1 – 5. (in Chinese with English abstract)]
- [18] 孙朝焱, 陈从新, 郑允, 等. 基于空间效应的弃渣场边坡稳定性方法探讨 [J]. *西南交通大学学报*, 2019, 54(1): 97 – 105. [SUN Chaoyi, CHEN Congxin, ZHENG Yun, et al. Discussion on slope stability analysis method of abandoned dreg site based on spatial effect[J]. *Journal of Southwest Jiaotong University*, 2019, 54(1): 97 – 105. (in Chinese with English abstract)]
- [19] 李跃, 杨永生, 毛权生, 等. 基于三维地质模型的排土场边坡整体稳定性探究 [J]. *岩土力学*, 2013, 34(增

- 刊 1): 533 - 539. [LI Yue, YANG Yongsheng, MAO Quansheng, et al. Researches on general stability for dump slope based on three-dimensional geologic model[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2013, 34(S1): 533 - 539. (in Chinese)]
- [20] 卢坤林,朱大勇. 坡面形态对边坡稳定性影响的理论与试验研究 [J]. *岩石力学与工程学报*, 2014, 33(1): 35 - 42. [LU Kunlin, ZHU Dayong. Theoretical and experimental study of effect of slope topography on its stability[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2014, 33(1): 35 - 42. (in Chinese with English abstract)]
- [21] DASH A K. Analysis of accidents due to slope failure in Indian opencast coal mines[J]. *Current Science*, 2019, 117(2): 304 - 308.
- [22] 罗浩,霍宇翔,巨能攀,等. 弃渣场边坡的粒径分布特征及其失稳机制研究 [J]. *水文地质工程地质*, 2020, 47(1): 69 - 79. [LUO Hao, HUO Yuxiang, JU Nengpan, et al. A study of the particle size distribution characteristics and instability mechanism of the slope of an abandoned slag yard[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2020, 47(1): 69 - 79. (in Chinese with English abstract)]
- [23] 王光进,杨春和,张超,等. 超高排土场的粒径分级及其边坡稳定性分析研究 [J]. *岩土力学*, 2011, 32(3): 905 - 913. [WANG Guangjin, YANG Chunhe, ZHANG Chao, et al. Research on particle size grading and slope stability analysis of super-high dumping site[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2011, 32(3): 905 - 913. (in Chinese with English abstract)]
- [24] 赖若帆. 弃渣场边坡的粒径分布特征及稳定性分析——以叙大铁路沿线弃渣场为例 [D]. 成都: 成都理工大学, 2019. [LAI Ruofan. The separating characteristics of particle diameter and its stability analysis of the slagdump slope[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2019. (in Chinese with English abstract)]
- [25] 何斌,汪洋. 滑坡稳定性计算中剩余推力法和简布法 [J]. *安全与环境工程*, 2004, 11(4): 60 - 62. [HE Bin, WANG Yang. Residual thrust method and janbu method used to calculate landslide stability[J]. *Safety and Environmental Engineering*, 2004, 11(4): 60 - 62. (in Chinese with English abstract)]
- [26] 张年学,李晓,盛祝平,等. 多剖面合力法分析滑坡稳定性 [J]. *工程地质学报*, 2017, 25(5): 1190 - 1204. [ZHANG Nianxue, LI Xiao, SHENG Zhuping, et al. Stability analysis of landslide using joint forces method on multiple profiles[J]. *Journal of Engineering Geology*, 2017, 25(5): 1190 - 1204. (in Chinese with English abstract)]
- [27] 郑颖人,陈祖煜,王恭先,等. 边坡与滑坡工程治理 [M]. 北京: 人民交通出版社, 2007. [ZHENG Yingren, CHEN Zuyu, WANG Gongxian, et al. Engineering treatment of slope & landslide[M]. Beijing: China Communications Press, 2007. (in Chinese)]
- [28] 杨海平. 基于改进的传递系数法滑坡稳定性分析 [J]. *水电能源科学*, 2013, 31(5): 138 - 139. [YANG Haiping. Landslide stability analysis based on improved transfer coefficient method[J]. *Water Resources and Power*, 2013, 31(5): 138 - 139. (in Chinese with English abstract)]
- [29] 习常志,朱蕾,卿菁,等. 不平衡推力法与简布法的比较分析 [J]. *湖北工业大学学报*, 2020, 35(1): 59 - 63. [XI Changzhi, ZHU Lei, QING Jing, et al. Comparative analysis of unbalanced thrust method and janbu method[J]. *Journal of Hubei University of Technology*, 2020, 35(1): 59 - 63. (in Chinese with English abstract)]
- [30] 刘松玉,童立元,邱钰,等. 煤矸石颗粒破碎及其对工程力学特性影响研究 [J]. *岩土工程学报*, 2005, 27(5): 505 - 510. [LIU Songyu, TONG Liyuan, QIU Yu, et al. Crushable effects on engineering mechanical properties of colliery wastes[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2005, 27(5): 505 - 510. (in Chinese)]
- [31] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 土工试验方法标准: GB/T 50123—2019[S]. 北京: 中国计划出版社, 2019. [Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Standard for geotechnical testing method: GB/T 50123—2019[S]. Beijing: China Planning Press, 2019. (in Chinese)]
- [32] 苏爱军. 滑坡稳定性评价原理与方法: 条分法的改进 [M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 2008. [SU Aijun. Principle and method of landslide stability evaluation: improvement of slice method[M]. Wuhan: China University of Geosciences Press, 2008. (in Chinese)]

编辑: 王支农