

文章编号:1673-9469(2020)01-0024-06

DOI: 10.3969/j.issn.1673-9469.2020.01.005

接触带土层软化对排土场边坡稳定性的影响分析

陈泰浩¹,刘顺青^{2*},徐一鸣¹,陈杰¹

(1.保利长大工程有限公司,广东 广州 510620;2.江苏科技大学 土木工程与建筑学院,江苏 镇江 212005)

摘要: 针对排土场上部渣土层和下部基岩面接触处的软化接触带对其稳定性的影响问题,采用有限元极限分析法构建了含软化接触带的排土场边坡的数值模型,系统分析了堆填角度、基岩倾角、软化接触带厚度及软化度对排土场边坡稳定性的影响规律,并通过具体的排土场边坡实例验证了该分析方法的可行性。研究表明,同等条件下,接触带软化和堆填角度对排土场边坡稳定性的影响很大,而基岩倾角和接触带厚度的影响相对较小;随着接触带软化度的增大,排土场边坡下、上限安全系数的绝对衰减率可达50%左右;随着接触带土层的不断软化,排土场边坡滑动面穿过软化接触带的长度逐渐变大,滑坡总体积不断增大;因软化接触带土层的存在,排土场边坡中下部土体推挤坡脚前缘及牵引后部坡体滑动,最终形成由软化接触带到坡顶的贯通滑裂面。

关键词: 排土场边坡;接触带;稳定性;软化;极限分析

中图分类号:X45;P64

文献标识码:A

Analysis on the Influence of Soil Softening in Contact Zone on Slope Stability of Soil Disposal Site

CHEN Taihao¹, LIU Shunqing^{2*}, XU Yiming¹, CHEN Jie¹

(1. Poly Changda Engineering Co., LTD. Guangzhou, Guangdong 510620, China; 2. School of Architecture and Civil Engineering, Jiangsu University of Science and Technology, Zhen Jiang, Jiangsu 212003, China)

Abstract: Aiming at the impact of softening contact zones between the upper waste and the lower bedrock on its stability, in this paper, the finite element limit analysis method was used to establish the numerical model of dump slopes with softening contact zones. And then the stability of dump slopes under different landfill angles, dip angles of bedrock, thicknesses of softening contact zones, softening degree was analyzed. At last the feasibility of this method was verified by a concrete dump slope. The results show that the softening of contact zones and the landfill angles have a great influence on the slope stability, while the dip angles of bedrock and the thicknesses of contact zones have a relatively small influence under the same conditions. With the increase of the softening degree of the contact zones, the absolute attenuation rate of the lower and upper limit safety factors of dump slopes can reach about 50%. With the continuous soil softening of contact zones, the length of sliding surface of the dump slope passing through the softening contact zones increases gradually, and the total volume of the sliding body increases continuously. Due to the existence of softening contact zones, the lower soil mass in the dump slopes pushes the front edge of the slope foot and pulls the back slope body to slide, and finally forms the through sliding surface from softening contact zones to the top of the slope.

Key words: dump slope; contact zone; stability; softening; limit analysis

收稿日期:2019-11-06

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51579119)

作者简介:陈泰浩(1972-),男,海南乐东人,硕士,高级工程师,主要从事道路桥梁及岩土方面的科研及实践研究。

* 通讯作者:刘顺青(1985-),男,江苏仪征人,博士,讲师,主要从事边坡稳定性方面的研究。

排土场边坡是一种由人类活动而形成的渣土混合体边坡^[1-2],随着我国城市建设进程的迅速发展,排土场边坡广泛分布于城镇、矿山、道路等人类活动区附近。排土场边坡失稳会对人民生命财产造成严重影响^[3]。因此,为保证排土场边坡的运营安全,防止引发滑坡等地质灾害,需要对排土场的边坡稳定性现状进行分析评价。排土场通常由上部渣土层和下部基底两部分构成。排土场的废弃物通常为渣土混合体,基底可为土或基岩^[4-5]。当排土场基底为基岩时,因上部的渣土混合体渗透系数较大,下部基岩渗透系数很小,常常会在基岩面处形成一滞水层。排土场上部渣土层和下部基岩面接触处的土体常常因滞水而形成一定厚度的软化接触带。近年来,很多国家的排土场因软化接触带的存在而发生滑坡^[6-9],国内外很多学者对含软弱基底排土场的滑坡机理进行了研究^[10-15],但目前已有的成果都未系统考虑接触带软化特性对排土场边坡稳定性的影响。

本文通过构建含软化接触带排土场边坡的数值分析模型,系统分析堆填角度、基岩倾角、软化接触带厚度以及接触带软化程度对排土场边坡稳定性的影响规律,并通过具体的排土场边坡实例验证本文分析方法的可行性。研究结果可为各类排土场边坡的设计及稳定性评价提供参考依据,具有实际工程意义。

1 含接触带排土场边坡数值模型的建立

本文采用有限元极限分析程序 OPTUM G2^[16] 建立含软化接触带排土场边坡的数值模型,计算分析模型如图 1 所示。

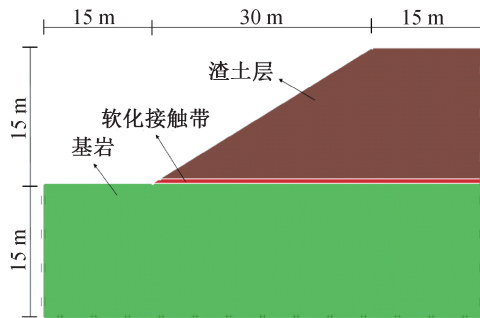


图 1 含软化接触带排土场边坡计算模型图
Fig.1 Calculation model diagram of dump slope containing soft contact zone

排土场边坡稳定性计算时“渣土”、“接触带”、“基岩”的本构模型均采用摩尔-库伦模型,具体的计算参数如表 1 所示。

表 1 排土场边坡计算参数

Tab.1 Calculation parameters of dump slopes

组成	重度 / (kN·m ⁻³)	弹性模量 / MPa	泊松比	黏聚力 / kPa	内摩擦角 / (°)
渣土	19.0	100	0.35	20	30
接触带土	19.3	50	0.35	10	15
基岩	23.0	5 000	0.3	1 000	50

有限元极限分析软件 OPTUM G2 在计算排土场边坡稳定性时,采用强度折减法,边坡的安全系数为:

$$F_s = \frac{\tan\varphi}{\tan\varphi_{cr}} = \frac{c}{c_{cr}} \quad (1)$$

式中, c_{cr} 和 φ_{cr} 为排土场边坡处于临界滑动状态时岩土体的黏聚力和内摩擦角, c 和 φ 为正常岩土体的黏聚力和内摩擦角。

图 2 中给出了采用有限元下限法计算排土场边坡安全系数的分析流程。安全系数上限法与此类似,上限解输出改为 F_{smax} 。TOL 为收敛精度,论文中取 0.001。

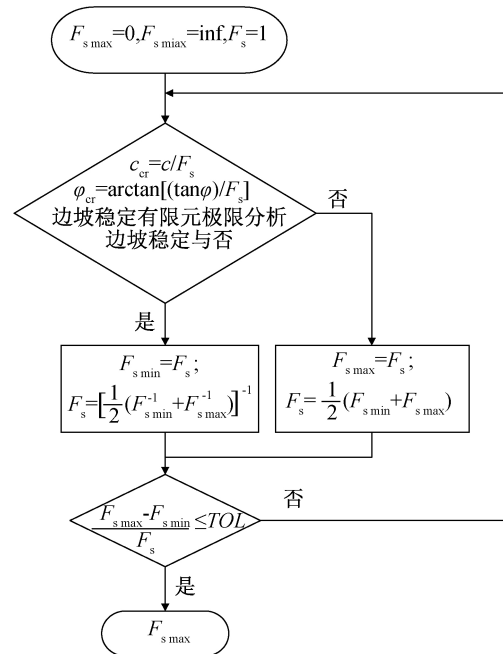


图 2 排土场边坡有限元下限安全系数的分析流程
Fig.2 Analysis flow of lower limit safety factor of dump slope

2 堆填角度对排土场边坡稳定性的影响

为分析堆填角度对排土场边坡稳定性的影响,选取软化接触带的厚度为 0.5 m,基岩倾角为 0°,堆填角度分别为 21.8°(坡比 1:2.5)、26.6°(坡比 1:2)、33.7°(坡比 1:1.5)、45°(坡比 1:1),对边坡稳定性进行分析,计算结果如图 3 所示。从图 3

中可以看出,当排土场渣土层的堆填角度在 21.8° ~ 45° 变化时,排土场边坡的下限安全系数从 1.787 降低到 1.143,上限安全系数从 1.842 降低到 1.185,减小幅度都约为 36%。可见,随着渣土层堆填角度的增大,排土场边坡逐渐由稳定状态向不稳定状态转变,安全系数变化幅度较大,因此在渣土层堆放时,应选择好合适的堆填角度。

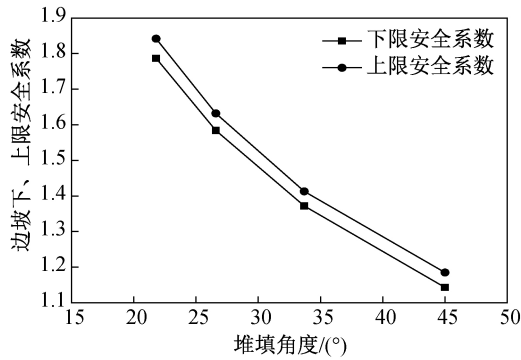


图3 不同堆填角度下排土场边坡下、上限安全系数
Fig.3 Lower and upper limit safety factor of dump slopes under different landfill angles

分别选取堆填角度为 21.8° 及 45° 时排土场边坡的下限剪切耗散(塑性变形指标)进行研究。从图4、图5中可以看出,含软化接触带的排土场边坡滑动时,滑动面都穿过软化接触带,并且随着堆填角度的增大,滑动圆弧穿过软化接触带的长度逐渐减小,其安全系数也逐渐减小。其他堆填角度下的下限剪切耗散图与此类似,不再列举。

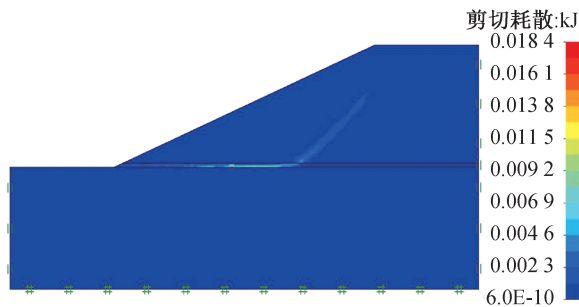


图4 堆填角度为 21.8° 时排土场边坡的下限剪切耗散图
Fig.4 Lower bound shear dissipation diagram of dump slope when landfill angle is 21.8°

3 基岩倾角对排土场边坡稳定性的影响

为分析基岩倾角对排土场边坡稳定性的影响,选取堆填坡比为 1 : 2,软化接触带的厚度为 0.5 m,基岩倾角分别为 0° 、 2° 、 4° 、 6° 、 8° 、 10° ,对边坡稳定性进行分析,计算结果如图6所示。

从图6中可以看出,当排土场的基岩在 0° ~

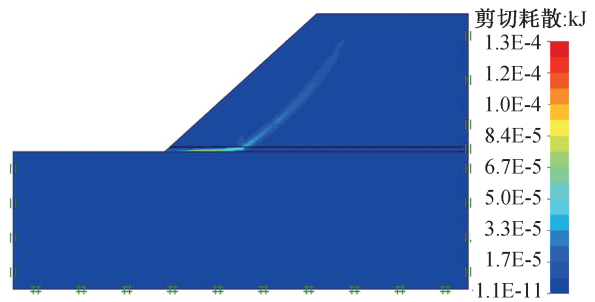


图5 堆填角度为 45° 时排土场边坡的下限剪切耗散图
Fig.5 Lower bound shear dissipation diagram of dump slope at landfill angle of 45°

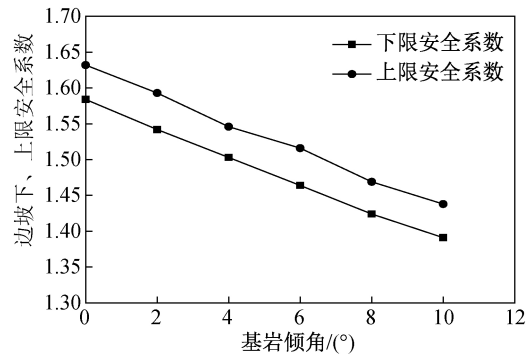


图6 不同基岩倾角下排土场边坡下、上限安全系数
Fig.6 Lower and upper limit safety factor of dump slopes under different dip angles of bedrock

10° 变化时,排土场边坡的下限安全系数从 1.584 降低到 1.391,上限安全系数从 1.632 降低到 1.438,减小幅度都约为 12%。

4 软化接触带厚度对边坡稳定性的影响

为分析软化接触带厚度对排土场边坡稳定性的影响,选取堆填坡比为 1 : 2,基岩倾角为 0° ,软化接触带厚度分别为 0.1、0.3、0.5、0.7、0.9 m 对边坡稳定性进行分析,计算结果如图7所示。从图7中可以看出,当排土场边坡软化接触带厚度在 0.1~0.9 m 变化时,边坡的下限安全系数从 1.619 降低到 1.540,上限安全系数从 1.666 降低到 1.597,减小幅度都约为 5%。可见,软化接触带厚度对排土场边坡稳定性的影响较小。

5 接触带软化程度对边坡稳定性的影响

为定量分析接触带软化程度对排土场边坡稳定性的影响,定义接触带土体的软化度 η :

$$\eta = \frac{f_{\text{软化土体}}}{f_{\text{土体}}} \quad (2)$$

式中, $f_{\text{软化土体}}$ 、 $f_{\text{土体}}$ 分别为接触带软化土层及未软

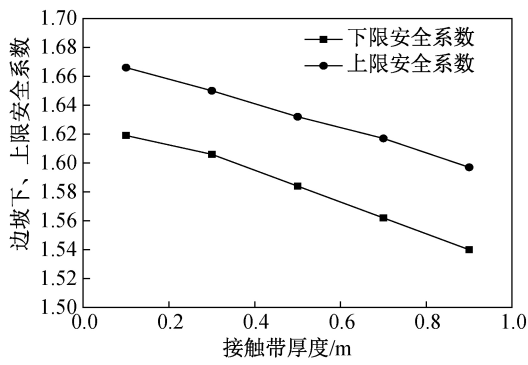


图 7 不同软化接触带厚度下二元结构边坡下、上限安全系数

Fig.7 Lower and upper limit safety factor of dump slopes under different thicknesses of softening contact zones

化土层的土体参数。

根据已有的研究^[17],对边坡稳定性影响较大的土体参数为黏聚力及内摩擦角,所以本文重点考虑黏聚力和内摩擦角的软化。为了便于分析,采用相同的软化度对黏聚力和内摩擦角进行折减。排土场边坡稳定性分析时,选取堆填坡比为 1:2,基岩倾角为 0°,软化土层厚度为 0.5 m,软化度 η 分别取 1.0、0.9、0.8、0.7、0.6、0.5、0.4、0.3、0.2,计算结果如图 8 所示。从图 8 中可以看出,当软化度在 1.0~0.2 变化时,排土场边坡的下限安全系数从 2.089 降低到 1.091;上限安全系数从 2.130 降低到 1.134。可见,接触带土体的软化对排土场边坡稳定性的影响很大。

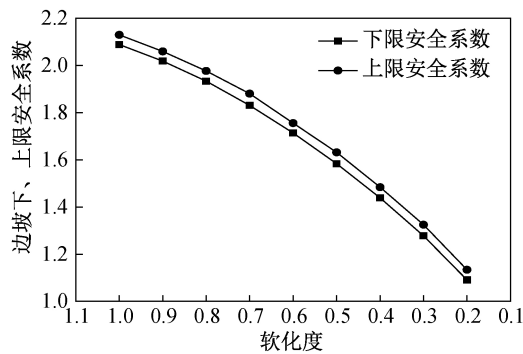


图 8 不同软化度下排土场边坡下、上限安全系数
Fig.8 Lower and upper limit safety factor of dump slopes under different softening degrees

分别选取软化度为 1.0、0.5 及 0.3 m 时排土场边坡的下限剪切耗散进行研究,如图 9—图 11 所示。从图中可以看出,相同的堆填角度、基岩倾角及软化接触带厚度下,随着软化度的不断减小,排土场边坡滑动面穿过软化土层的长度逐渐变大,滑体总体积不断增大。其他软化度下的下限剪切耗散图与此类似,不再列举。

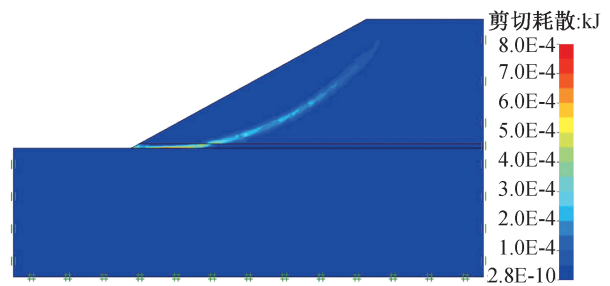


图 9 软化度为 1.0 时排土场边坡的下限剪切耗散图
Fig.9 Lower bound shear dissipation diagram of dump slope with softening degree of 1.0

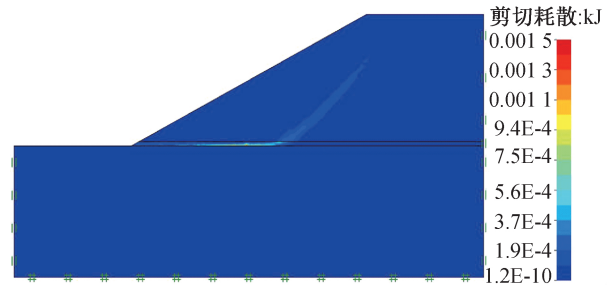


图 10 软化度为 0.5 时排土场边坡的下限剪切耗散图
Fig.10 Lower bound shear dissipation diagram of dump slope with softening degree of 0.5

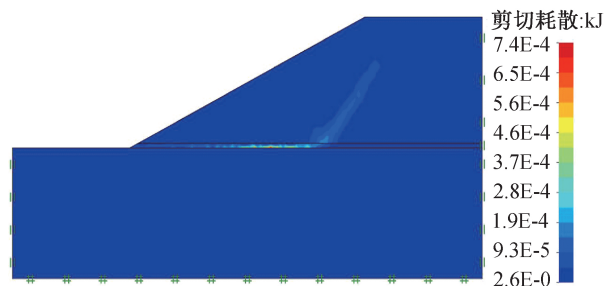


图 11 软化度为 0.2 时排土场边坡的下限剪切耗散图
Fig.11 Lower bound shear dissipation diagram of dump slope with softening degree of 0.2

为定量分析软化度对排土场边坡安全系数的影响,给出排土场边坡安全系数绝对衰减率 Δ_i 的定义:

$$\Delta_i = \frac{|F_i - F_0|}{F_0} \times 100\% \quad (3)$$

式中, F_i 、 F_0 分别为不同软化度与土层未软化(软化度为 1.0)时排土场边坡的安全系数。

为使问题更清晰,按式(3)分别计算了不同软化度下排土场边坡安全系数的绝对衰减率,计算结果如图 12 所示。从图 12 可以看出,当接触带土层的软化度在 1.0~0.2 变化时,排土场边坡下限安全系数的绝对衰减率在 0~47.8% 变化,上限安全系数的绝对衰减率在 0~46.6% 变化。可见,随

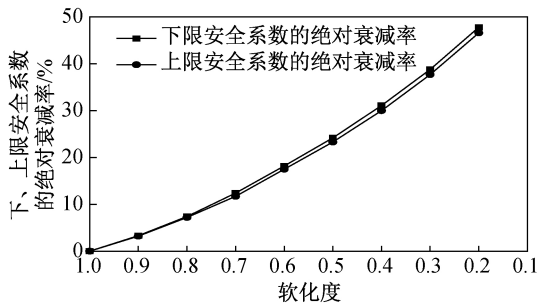


图 12 不同软化度下排土场边坡下、上限安全系数的绝对衰减率

Fig.12 Reduction ratio of lower and upper limit safety factor of dump slopes under different softening degree

随着接触带土层的不断软化,排土场边坡的稳定性逐渐降低,当达到某一临界值时,排土场边坡会发生失稳破坏。

6 排土场边坡实例验证

为验证本文分析方法的可行性,选择与某排土场边坡^[15,18]相同的几何模型及渣土层参数对本文的分析结果进行验证,计算模型如图 13 所示。排土场边坡稳定性计算时“渣土”、“接触带土层”、“基岩”的本构模型均采用摩尔-库伦模型,具体的计算参数如表 2 所示。

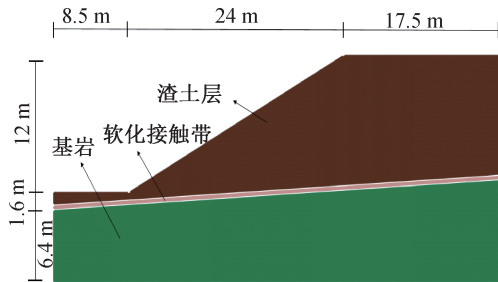


图 13 排土场边坡计算模型图

Fig.13 Calculation model diagram of dump slope

表 2 排土场边坡计算参数

Tab.2 Calculation parameters of dump slopes

组成	重度 /(kN·m ⁻³)	弹性模 量/MPa	泊松比	黏聚力 /kPa	内摩擦 角/(°)
渣土	18.9	150	0.35	29	20
接触带土 (软化度 0.5)	20.2	70	0.45	14.5	10
基岩	25.0	2 000	0.2	300	40

该排土场边坡在不同接触带软化度下的稳定性计算结果如表 3 所示,其安全系数的绝对衰减率如图 13 所示。从表 3 中可以看出,该排土场边坡不考虑接触带土层软化时,边坡下、上限安全系数

分别为 2.008 和 2.047,此时的边坡稳定性程度较高。随着接触带土体的不断软化,边坡的下、上限安全系数逐渐减小,当软化度达到 0.2 左右时,边坡接近临界滑动状态。从图 13 可以看出,当接触带土层的软化度在 1.0~0.1 变化时,排土场边坡下限安全系数的绝对衰减率在 0~56.0%变化,上限安全系数的绝对衰减率在 0~55.1%变化。因排土场模型边坡中倾斜软化接触带土层的存在,边坡中下部土体推挤坡脚前缘和牵引后部坡体滑动,最终在坡体内部形成由软化接触带到坡顶的贯通滑裂面,研究结果与文献^[15,18]中模型边坡的滑动趋势一致。可见,接触带软化对该排土场边坡的稳定性有着极其不利的影

表 3 排土场边坡稳定性分析结果

Tab.3 Stability analysis results of dump slopes

边坡类型	下限解	上限解
软化度 1.0	2.008	2.047
软化度 0.7	1.747	1.805
软化度 0.5	1.515	1.568
软化度 0.3	1.231	1.281
软化度 0.2	1.069	1.114
软化度 0.1	0.884	0.919

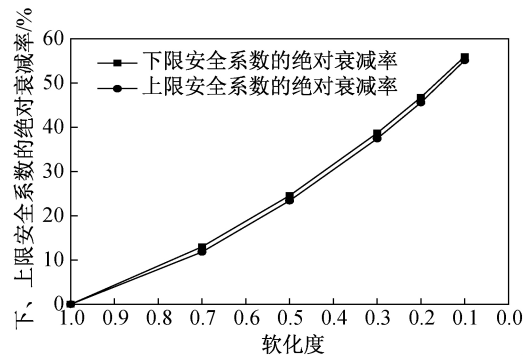


图 14 不同软化度下排土场边坡下、上限安全系数的绝对衰减率

Fig.14 Reduction ratio of lower and upper limit safety factor of dump slopes under different softening degree

7 结论

1) 相同的软化带厚度及基岩倾角下,随着堆填角度的增大,排土场边坡的下、上限安全系数影响很大。

2) 同等条件下,基岩倾角和软化接触带的厚度对排土场边坡的下、上限安全系数影响较小。

3) 相同的堆载角度、基岩倾角及软化土层厚度下,接触带的软化度对排土场边坡的影响极大,

排土场边坡的下、上限安全系数绝对衰减率可达50%左右。

4)随着接触带土层的不断软化,排土场边坡滑动面穿过软化接触带的长度逐渐变大,滑坡总体积不断增大。

5)因软化接触带土层的存在,排土场边坡中下部土体推挤坡脚前缘及牵引后部坡体滑动,最终形成由软化接触带到坡顶的贯通滑裂面。

参考文献:

- [1]吴志斌,熊爽,姚文敏,等.渣土受纳场边坡底面不同平台的优化设计研究[J].工程勘察,2018(6):7-12.
- [2]王家臣,孙书伟.露天矿边坡工程[M].北京:科学出版社,2016.
- [3]YIN Y P, LI B, WANG W P, et al. Mechanism of the December 2015 Catastrophic Landslide at the Shenzhen Landfill and Controlling Geotechnical Risks of Urbanization[J]. Engineering, 2016(2):230-249.
- [4]吴志斌,王陈琦,曾江波,等.不同降雨强度下渣土受纳场边坡地下水渗流和稳定性的数值模拟分析[J].安全与环境工程,2017,24(4):148-153.
- [5]邱宇,徐文彬,周玉新.我国冶金矿山排土场研究现状及展望[J].金属矿山,2016(9):15-22.
- [6]STELAKAKIS E, KAVOURIDIS K, MONOPOLIS D. Large Scale Failure of the External Waste Dump at the "South Field" Lignite Mine, Northern Greece [J]. Engineering Geology, 2009, 104(3):269-279.
- [7]KASMER O, ULUSAY R, GOKCEOGLU C. Spoil Pile Instabilities with Reference to a Strip Coal Mine in Turkey: Mechanisms and Assessment of Deformations[J]. Environmental Geology, 2006,49(4):570-585.
- [8]POULSEN B, KHANAL M, RAO A M, et al. Mine Overburden Dump Failure: A Case Study [J]. Geotechnical and Geological Engineering, 2014, 32(2):297-309.
- [9]CHO Y, SONG Y. Deformation Measurements and a Stability Analysis of the Slope at a Coal Mine Waste Dump [J]. Ecological Engineering, 2014, 68:189-199.
- [10]RICHARDS B G, COULTHARD M A. Analysis of Slope Stability at Goonyella Mine [J]. Canadian Geotechnical Journal, 1984, 18(1):179-194.
- [11]吴军,汪洪星,谈云志,等.软弱基底诱发湖区排土场失稳机理研究[J].武汉理工大学学报,2015,37(9):84-89.
- [12]高菲,曹兰柱,王东.基于SIGMA/W的露天矿软弱基底排土场安全距离研究[J].煤矿安全,2017,48(4):44-47.
- [13]曹兰柱,王珍,王东,等.软弱基底排土场堆载过程中稳定性数值模拟[J].防灾减灾工程学报,2017,37(5):776-781.
- [14]王家臣,陈冲.软弱基底排土场边坡稳定性三维反演分析[J].中国矿业大学学报,2017,46(3):474-479.
- [15]陈冲,吕华永,高海南,等.软弱基底排土场边坡破坏模式模型试验研究[J].岩石力学与工程学报,2018,37(9):2093-2109.
- [16]KRABBENHOFT K, LYAMIN A V. Strength Reduction Finite-Element Limit Analysis[J]. Geotechnique Letters, 2015, 5: 250-253.
- [17]刘顺青,洪宝宁,徐奋青强,等.高液限土边坡稳定性影响因素的敏感性研究[J].防灾减灾工程学报,2014,34(5):589-596.
- [18]陈冲.软弱基底排土场边坡破坏模式与稳定性分析[D].北京:中国矿业大学,2018.

(责任编辑 王利君)