

缪海滨,王建国,费晓欧,等.基于孔隙水压力消散的排土场边坡动态稳定性研究[J].煤炭学报,2017,42(9):2302-2306. doi:10.13225/j.cnki.jccs.2016.1797

MIAO Haibin, WANG Jianguo, FEI Xiaou, et al. Study on dynamic stability of dump slope based on the dissipation of pore pressure[J]. Journal of China Coal Society, 2017, 42(9): 2302-2306. doi:10.13225/j.cnki.jccs.2016.1797

基于孔隙水压力消散的排土场边坡动态稳定性研究

缪海滨^{1,2},王建国¹,费晓欧³,韩 猛²

(1. 辽宁工程技术大学 安全科学与工程学院, 辽宁 阜新 123000; 2. 煤科集团沈阳研究院有限公司 露天开采研究院, 辽宁 抚顺 113122; 3. 辽宁石油化工大学 矿业工程学院, 辽宁 抚顺 113001)

摘 要:为克服现有黄土基底排土场稳定性计算方法的局限性及控制技术针对性不强或量化困难的问题,通过基底黄土孔隙水压力消散试验,得到了孔隙水压力及消散度与消散时间之间影响规律;基于极限平衡法和孔隙水压力消散规律,提出了黄土基底排土场动态稳定系数计算方法;基于该算法,对原有静态的黄土基底排土场稳定控制措施进行优化,提出了“分段排土,控制强度,分区推进,调整程序,监测监控,增大容量”动态稳定控制措施。该成果已于同类型排土场中得到良好的应用与推广。

关键词:孔隙水压力;演化弱层;消散;动态稳定系数

中图分类号:TD824

文献标志码:A

文章编号:0253-9993(2017)09-2302-05

Study on dynamic stability of dump slope based on the dissipation of pore pressure

MIAO Haibin^{1,2}, WANG Jianguo¹, FEI Xiaou³, HAN Meng²

(1. College of Safety Science and Engineering, Liaoning Technical University, Fuxin 123000, China; 2. Institute of Opencast Mining Safety, CCTEG Shenyang Research Institute, Fushun 113122, China; 3. School of Mining Engineering, Liaoning Shihua University, Fushun 113001, China)

Abstract: In order to overcome the limitations of the stability calculation method and the problem that the stability control technology of loess basement dump is not sufficient enough or difficult to quantify, through the pore pressure dissipation test, the influence law between the pore pressure, the dissipation rate and the dissipation time is obtained. Moreover, a method based on the limit equilibrium method and dissipation law of pore pressure is proposed to calculate the dynamic stability coefficient of loess basement dump. Based on the algorithm proposed, the original static stability control measures of loess basement dump are optimized, and the dynamic stability control measures including “segmented dump, control strength, region marching, adjustment procedure, monitoring and control, increase dump capacity” are proposed. The results have been applied and popularized in the same type of dump field.

Key words: pore pressure; evolution soft layer; dissipation; dynamic stability coefficient

滑坡是露天矿安全生产所面临的重大灾害,尤其是大面积荷载下排土场边坡,一旦发生滑坡,其产生的危害将是十分巨大的,如1991年10月发生的平朔安太堡南排土场大型滑坡和2010年9月,2011年5月发生的内蒙古白音华二号露天矿南排土场复合边

坡大型滑坡,滑体量分别超过了1 000万m³和7 000 m³,这在当时都属极其罕见的,发生的滑坡灾害直接影响着露天矿安全与生产的正常运行。

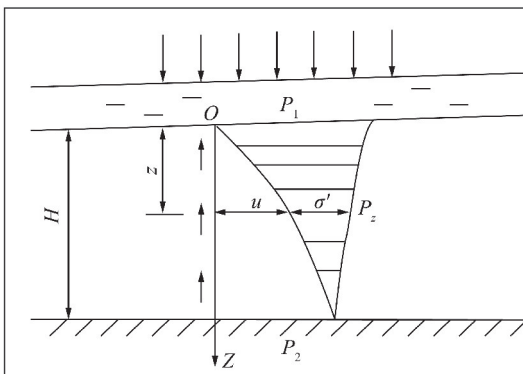
目前,已有许多学者对黄土基底排土场演化弱层^[1-4]的演变规律进行了研究,可知,这种弱层在排

土场未堆积排土之前尚不存在,极具隐蔽性。但在排土场设计和稳定性评价中,必须考虑在排土增至一定高度后弱层的形成对排土场稳定性的重要影响,应将弱层的力学参数与其他部位的正常黄土区分使用,否则必将存在重大滑坡隐患。当前对露天矿边坡稳定的计算方法多为极限平衡法、岩土数值极限分析方法等^[5-9],都只能获得静态、单一的稳定系数,在将其运用于动态加载及弱层动态演化的排土场边坡中存在一定的局限性。同时,国内外学者对基坑、地基及尾矿坝中黏性土、粉质黏土等进行过孔隙水压力消散规律研究,但鲜有对大面积载荷下排土场基底黄土进行孔隙压力消散规律研究^[10-13]。为了克服现有黄土基底排土场稳定性控制技术针对性不强或量化困难的问题,笔者在研究排土场基底黄土孔隙水压力消散的基础上,提出了排土场边坡动态稳定系数及稳定性控制措施,实现确保黄土基底排土场稳定性的同时确保排土容量及排土强度。

1 黄土基底排土场孔隙水压力消散规律

基底黄土孔隙水压力一般由水的自重产生的渗流场而产生或由作用在土体单元的总应力发生变化而产生,总应力发生变化的情况一般发生于压缩性大、渗透性小的土体中。

在排土场加载作用下,基底黄土所受的附加应力由有效正应力和孔隙水压力组成,如图1所示。孔隙水压力的边界条件为:①土层各单面排水;②起始孔隙水压力为线性分布,坐标原点取黏土层顶面O点。



H—土层厚度, m; z—孔隙水的最大渗径, m;
u—深度z处的孔隙水压力, kPa; σ' —有效应力, kPa;
 P_1 —土层排水面初始水压力, kPa; P_2 —不透水面初始水压力, kPa; P_z —深度z处初始水压力, kPa

图1 孔隙水压力边界条件

Fig.1 Boundary condition of pore pressure

设 α 为排水面与不透水面水压力比值,即

$$\alpha = P_1/P_2 \quad (1)$$

则有

$$P_z = P_2 + (P_1 - P_2) \frac{H - z}{H} = P_2 \left[1 + (\alpha - 1) \frac{H - z}{H} \right] \quad (2)$$

对式(2)求解微分方程,有

$$C_v \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} = \frac{\partial u}{\partial t} \quad (3)$$

式(3)求解的初始条件和边界条件为

$$\begin{cases} [t = 0, 0 \leq z \leq H, u = P_z \text{ 时} \\ \{ 0 < t \leq \infty, z = H, \frac{\partial u}{\partial z} = 0 \\ \{ 0 < t \leq \infty, z = 0, u = 0 \end{cases} \quad (4)$$

求解式(3)得到孔隙水压力 u 为

$$u = \frac{4P_z}{\pi^2} \sum_m \frac{1}{m^2} [m\pi\alpha + 2(-1)^{\frac{m-1}{2}}(1-\alpha)] \times e^{-\frac{m^2\pi^2}{4}T_v} \sin \frac{m\pi z}{2H} \quad (5)$$

式中, m 为奇正整数,一般取 $m = 1$; T_v 为时间因数, $T_v = C_v t/H^2$; C_v 为固结系数; t 为孔隙压力消散时间。

当初始水压力为三角分布时,有

$$u = \frac{8P_z}{\pi^2} \left(\sin \frac{\pi z}{2H} \right) e^{-\frac{\pi^2}{4}T_v} \quad (6)$$

由式(6)可知,基底黄土的孔隙水压力与其消散时间是相关的,为研究孔隙水压力的消散规律,对基底黄土试样进行了孔隙水压力消散试验^[14-15],其结果如图2所示。通过对消散度及消散时间进行拟合,得到消散度 D_c 及消散时间 t 的控制方程为

$$D_c = A \ln t + B, u = C e^{D t} \quad (7)$$

$$t = D_0 \ln u + C_0 \quad (8)$$

式中, A, B, C, D 为消散相关系数; $D_0 = 1/D$; $C_0 = \ln C/D$ 。

通过研究,可知因外部荷载产生的附加孔隙水压力场随着外部荷载强度(即排土场强度、排土场高度等)而变化,即孔隙水压力消散度随消散时间的增大而增大,孔隙压力则相反。而当外部荷载强度超过孔隙水压力的消散速度时,即孔隙水压力得不到及时消散时,将使得土体抗剪强度显著降低,形成演化弱层,从而影响到排土场边坡安全。

2 黄土基底排土场动态稳定系数

2.1 动态稳定系数的计算方法

在运用极限平衡法中的瑞典法、Bishop 法、Janbu 法及 Sarma 法等进行边坡稳定评价时,其计算所得是稳定系数是单一、静态的,在将其应用于黄土基底排土场进行稳定分析时,基本无法或未考虑孔隙水

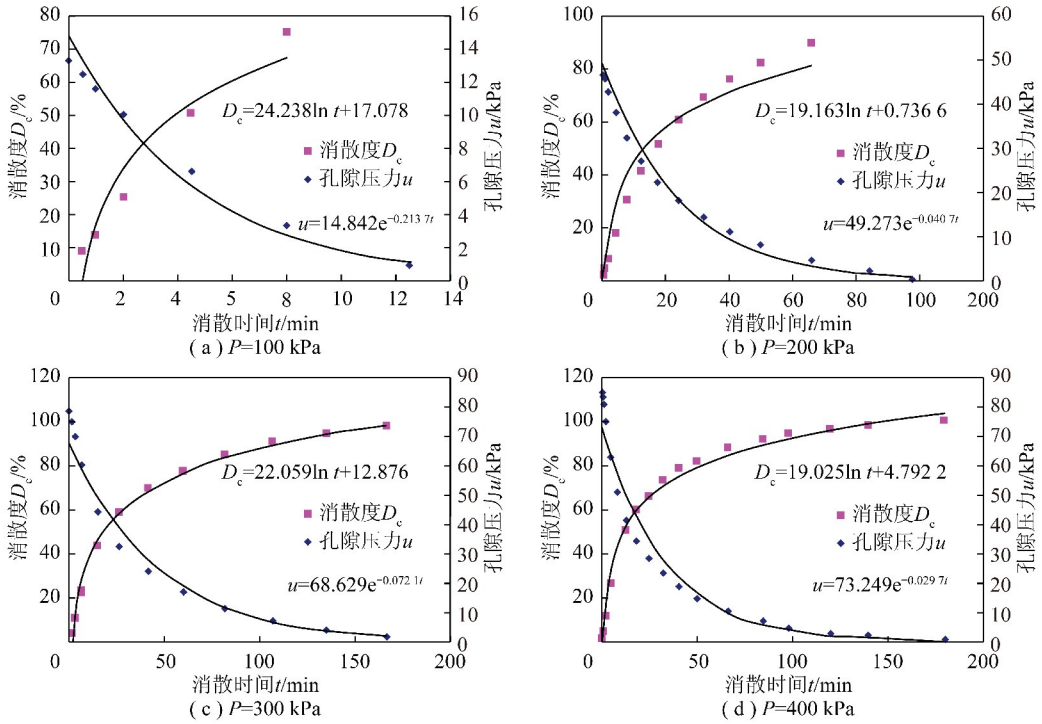


图 2 原状饱和黄土孔隙水压力的消散规律

Fig. 2 Pore pressure dissipation law of the undisturbed and saturated loess

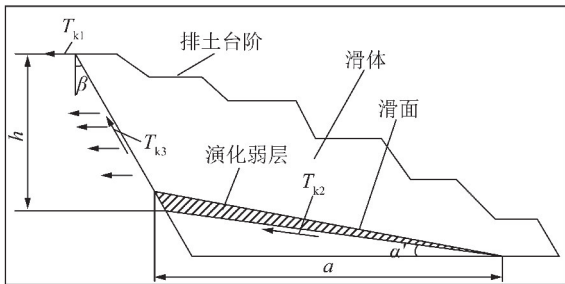
压力对排土场边坡的影响,由此提出了基于极限平衡法和孔隙水压力消散的黄土基底排土场动态稳定系数 K_d 计算方法。

根据图 3 所示黄土基底排土场滑坡机理,基于极限平衡原理,其动态稳定系数 K_d 为

$$K_d = \frac{T_k}{T_{xia}} = \frac{T_{k1} + T_{k2} + T_{k3}}{T_{xia}} \quad (9)$$

其中,

$$\begin{aligned} T_{k1} &= h[\sigma]_T / \cos \beta \\ T_{k2} &= a\tau \cos \alpha' \\ T_{k3} &= \tau_w h \sin \beta \\ T_{xia} &= W \cos \alpha' \end{aligned} \quad (10)$$



T_{k1} —抗拉破坏阻力, kN; T_{k2} —演化弱层抗滑阻力, kN;
 T_{k3} —拉断斜面摩擦阻力, kN; α' —演化弱层与水平面夹角, ($^\circ$);
 β —滑面与垂直方向夹角, ($^\circ$); a —演化弱层水平长度, m;
 h —排土场单位厚度的高度, m

图 3 黄土基底排土场滑坡机理

Fig. 3 Landslide mechanism of loess basement dump

将式(10)代入式(9),可得

$$K_d = \frac{h[\sigma]_T + a\tau \cos \alpha' \cos \beta + \tau_w h \tan \beta}{W \cos \alpha' \cos \beta} \quad (11)$$

其中, $\tau = \tau_0 D_c$, 结合式(7), 得到

$$K_d = \frac{h[\sigma]_T + a\tau_0(A \ln t + B) \cos \alpha' \cos \beta + \tau_w h \tan \beta}{W \cos \alpha' \cos \beta} \quad (12)$$

其中, $[\sigma]_T$ 为抗拉强度, kPa; τ_0 为演化弱层不含水时抗剪强度, kPa; W 为滑体重力, kN; τ_w 为排弃物料土体的抗剪强度, kPa。消散相关系数 A, B 通过试验拟合而得, 结果见表 1。

表 1 孔隙水压力消散相关系数

Table 1 Correlation coefficients of pore pressure dissipation

围压 P/kPa	相关系数		对应排土场高 度 h/m
	A	B	
100	24.238	17.088 0	45
200	19.163	0.736 6	90
300	22.059	12.867 0	135
400	19.025	4.792 2	180

2.2 基于动态稳定系数的排土场控制措施

在分析和研究露天煤矿排土场边坡防治措施的前提下^[16-18], 根据黄土基底排土场特性, 结合动态稳定系数提出了该类型排土场的几点控制措施:

(1) 当 $K_d > 1$ 时, 该剖面的所有排土台阶可继续排土。

(2) 当 $K_d > 1$ 时, K_d 越大, 排土强度越大或增加排土段高; K_d 较小, 排土强度相对较小或降低排土段高, 实现分段排土或排土强度控制。

(3) 当 $K_d \leq 1$ 时, 该剖面的排土台阶停止排土, 在不改变演化弱层的含水补给条件下, 停止排土等待演化弱层水压的自我消散。

(4) 当 $K_d \leq 1$ 时, 抽水或开槽排水控制性降低水压, 监测水压, 再计算 K_d , $K_d > 1$ 时, 排土台阶恢复排土工程, $K_d \leq 1$, 该剖面的排土台阶继续停止排土。

(5) 当 $K_d \leq 1$ 时, 监测边坡位移, 边坡位移加速度大于零时, 停止所有排土工程。

(6) 当 $K_d \leq 1$ 时, 其他剖面的 $K_d > 1$ 时, 其他剖面继续排土, 实现分区推进, 将排土工程持续地在 $K_d > 1$ 的剖面进行。

(7) 当 $K_d \leq 1$ 时, 在建设排土场初期在演化弱层中挖渗水沟并填入大块岩石, 将演化弱层中的含水随时通过渗水沟连通排土场外明沟排出, 在排土场建设之中在排土场上部设置排水明沟向排土场外排水, 降低孔隙水压力, 提高可能形成演化弱层的土体力学强度。

3 应用实例

某露天矿排土场排弃高度为 138 m, 通过现场勘探, 其演化弱层长度 $a = 240$ m, $\alpha' = 7^\circ$, $\beta = 34^\circ$, 基底黄土钻探所取样品进行试验后确定其消散度 $D_c = 97.73\%$, 抗拉强度 $[\sigma]_T = 153.764$ kPa, $\tau_w = 192.205$ kPa, $\tau_0 = 66.835$ kPa。

(1) 当 $W = 54\ 880$ kN 时, 运用式(12)计算可得 $K_d = 1.152$, $K_d > 1$, 且 K_d 较大, 该剖面所有排土台阶可继续排土, 排土强度可较大;

(2) 当 $W = 64\ 836.8$ kN 时, 相当增加了排土量, 运用式(12)计算可得 $K_d = 0.975$, $K_d < 1$, 则可采取以下控制措施:

① 该剖面的排土台阶停止排土;

② 该剖面的排土台阶停止排土, 进行抽水或开槽排水以降低水压并进行监测实时水压, 再计算 K_d , $K_d > 1$ 时, 排土台阶恢复排土工程, $K_d \leq 1$, 该剖面的排土台阶继续停止排土;

③ 该剖面的排土台阶停止排土, 采用 GPS 地表位移或地下测斜仪等方法监测边坡位移, 边坡位移加速度大于零时, 停止所有排土工程;

④ 该剖面的排土台阶停止排土, 其他剖面的 $K_d > 1$ 时, 其他剖面继续排土, 实现分区推进, 排土工程持

续在 $K_d > 1$ 的剖面进行;

⑤ 有滑坡危险, 在排土场设计时, 考虑在建设排土场初期于演化弱层中挖渗水沟并填入大块岩石, 将演化弱层中的水随时通过渗水沟连通排土场外明沟排出; 亦可在排土场建设之中在排土场上部设置排水明沟向排土场外排水, 降低孔隙水压力, 提高可能形成演化弱层的土体力学强度。确保黄土基底排土场的边坡稳定, 获得较大的排土强度及排土容量;

⑥ 可降低排土台阶高度, 再计算 K_d , 确定是否继续排土或采取防滑措施等。

4 结 论

(1) 黄土基底排土场演化弱层并非排土工程开始即出现, 而是当排土场排弃至一定高度时且基底黄土孔隙水压力无法及时消散出现的。

(2) 基底黄土孔隙水压力随外部荷载变化而呈现动态变化, 当外部荷载超过其孔隙水压力消散速度时, 基底黄土呈现为脆性破坏, 力学强度指标急剧降低, 演化为弱层。

(3) 提出基底黄土孔隙水压力消散规律, 并基于该规律结合极限平衡法, 提出黄土基底排土场的动态稳定系数 K_d 的算法。

(4) 提出“分段排土, 控制强度, 分区推进, 调整程序, 监测监控, 增大容量”的黄土基底排土场稳定控制措施。

该成果已应用于同类型的黄土基底型排土场中, 如平朔安太堡露天煤矿南排土场、准格尔黑岱沟露天矿阴湾排土场等, 在其边坡治理与预防中取得了良好的经济效益与社会效益。

参考文献 (References):

- [1] 陈敏. 安太堡露天煤矿排土场基底黄土的微结构演化与弱层的形成机理[J]. 地质论评, 1995, 41(6): 571-576.
CHEN Min. Microtexture evolution of the discharged-material stack field base loess of Antaibao opencut coal mine and the forming mechanism of the weak interbed in the loess[J]. Geological Review, 1995, 41(6): 571-576.
- [2] 祖国林, 王建国, 洪宇, 等. 黄土基底构筑物边坡稳定的研究方法[J]. 地质灾害与环境保护, 1998(4): 16-20.
- [3] 王建国. 荷载黄土体的工程性质与露天矿排土场稳定控制技术[J]. 煤矿安全, 2003, 34(B09): 116-121.
WANG Jianguo. Engineering quality of load loess and dump stability controlling technology in open-pit coal mines[J]. Safety in Coal Mines, 2003, 34(B09): 116-121.
- [4] 杨洪海. 黄土基底排土场演化弱层形成规律及变形强度特征[J]. 勘察科学技术, 2005(6): 32-33.
YANG Honghai. Growing regulation and deformation strength feature

- of evolution soft layer in loess basement dumping site[J]. Site Investigation Science and Technology, 2005(6):32-33.
- [5] 鲁敏亮,方振.不同计算方法对边坡稳定性计算影响的实例分析与研究[J].城市道桥与防洪,2014(3):133-138.
- [6] 陈国庆,黄润秋,石豫川,等.基于动态和整体强度折减法的边坡稳定性分析[J].岩石力学与工程学报,2014,33(2):243-256.
- CHEN Guoqing, HUANG Runqiu, SHI Yuchuan, et al. Stability analysis of slope based on dynamic and whole strength reduction methods[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, 33(2):243-256.
- [7] 倪卫达,刘晓,夏浩.基于水致弱化效应的库岸边坡动态稳定性研究[J].人民长江,2013,44(23):55-59.
- NI Weida, LIU Xiao, XIA Hao. Research on dynamic stability of reservoir slope based on water weakening effect[J]. Yangtze River, 2013, 44(23):55-59.
- [8] 杨天鸿,张锋春,于庆磊,等.露天矿高陡边坡稳定性研究现状及发展趋势[J].岩土力学,2011,32(5):1437-1451.
- YANG Tianhong, ZHANG Fengchun, YU Qinglei, et al. Research situation of open-pit mining high and steep slope stability and its developing trend[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(5):1437-1451.
- [9] 方建瑞,朱合华,蔡永昌.边坡稳定性研究方法与发展[J].地下空间与工程学报,2007,3(2):343-349.
- FANG Jianrui, ZHU Hehua, CAI Yongchang. Advancement and methods of the slope stability research[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2007, 3(2):343-349.
- [10] 田洪琴,张先伟,高书存,等.淤泥质土孔隙水压力消散规律[J].矿产勘察,2009,12(8):16-18.
- [11] 李学伟,宋小金,车法.粉质粘土地基超孔隙水压力消散规律研究[J].中外公路,2014,34(2):86-89.
- [12] LI Jianzhong, HAO Kangning. Study on dissipation of excess pore water pressure of clay[J]. Applied Mechanics and Materials, 2012, 1801(174):1981-1985.
- [13] PUZIRIN A M, RANDOLPH M F. Effects of pore water pressure dissipation on rate dependency of shear strength in localised failure of soils[J]. International Journal for Numerical & Analytical Methods in Geomechanics, 2015, 39(10):1045-1062.
- [14] JTG E41—2005,公路工程岩石试验规程[S].
- [15] 王建国,缪海滨,王来贵.安太堡露天煤矿排土场基底黄土力学特性试验研究[J].煤炭学报,2013,38(S1):59-63.
- WANG Jianguo, MIAO Haibin, WANG Laigui. Experimental study on the mechanical properties of the dump basement loess of Antaibao open-pit[J]. Journal of China Coal Society, 2013, 38(S1):59-63.
- [16] 王运敏,项宏海.排土场稳定性及灾害防治[M].北京:冶金工业出版社,2011:1-270.
- [17] 唐文亮,彭洪阁,马力,等.露天矿内排土场滑坡成因及治理措施研究[J].煤炭技术,2016,35(8):166-168.
- TANG Wenliang, PENG Hongge, MA Li, et al. Study on cause and control measures of internal waste dump landslide in open-pit[J]. Coal Technology, 2016, 35(8):166-168.
- [18] 张福宏,马海涛,刘勇锋.西石门铁矿排土场稳定性分析及治理措施研究[J].中国安全生产科学技术,2014(12):99-105.
- ZHANG Fuhong, MA Haitao, LIU Yongfeng. Research on stability analysis and treatment of waste dump in Xishimen iron mine[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2014(12):99-105.