

DOI:10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.2016.03.07

顺层岩质边坡静力开挖物理模拟试验研究

马洪生^{1,2}, 庄卫林², 刘 阳¹, 范 刚¹, 田 华³

(1. 西南交通大学土木工程学院, 四川 成都 610031; 2. 四川省交通运输厅公路规划勘察设计研究院, 四川 成都 610041; 3. 核工业西南勘察设计研究院有限公司, 四川 成都 610081)

摘要: 利用大型室内模型试验, 开展了含软弱夹层顺层岩质边坡的静力开挖试验, 试验结果表明: 随着开挖角度的增大, 边坡完成开挖卸荷松弛的时间大幅缩短。开挖角度为 47° 时, 边坡位移稳定时间为 214.56 h; 开挖角度为 60° 和 72° 时, 边坡位移稳定时间缩减为 107.28 h。随着开挖角度增大, 坡面位移稳定值逐渐增大, 且位移稳定值随着高程的增加而增大。通过布设于坡体内部的位移传感器可以获得边坡在开挖过程中坡内及坡面的位移场, 分析不同高程水平参考线处坡体位移分布曲线, 并结合位移限制值可以得到边坡开挖位移松弛区范围。通过试验研究发现, 含软弱夹层顺层岩质边坡开挖松弛区范围随着开挖角度的增大不断向坡脚和坡顶延伸, 开挖松弛区范围增大。

关键词: 软弱夹层; 静力开挖; 卸荷松弛; 位移松弛区

中图分类号: TU458⁺.4

文献标识码: A

文章编号: 1000-3665(2016)03-0037-07

Physical excavation test research on a bedding rock slope

MA Hongsheng^{1,2}, ZHUANG Weilin², LIU Yang¹, FAN Gang¹, TIAN Hua³

(1. School of Civil Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu, Sichuan 610031, China; 2. Sichuan Provincial Transport Department Highway Planning, Survey, Design and Research Institute, Chengdu, Sichuan 610041, China; 3. Southwest Geotechnical & Design Institute of China Nuclear Industry, Chengdu, Sichuan 610061, China)

Abstract: A bedding rock slope with weak intercalated layers is a common kind of engineering geologic body in the engineering field. A large scale model experiment was proceeded to simulate the excavation of the bedding rock slope with weak intercalated layers. The test results show that with the increasing excavation angle, the unloading relaxation time of excavated slope will significantly shorten. When the excavation angle is 47°, the needed time for the displacement stability is 214.56 h. When the excavation angle is 65° and 72°, the needed time for the displacement stability decreases to 107.28 h. The displacement stable values increases gradually, and the displacement stable values increase with the increasing height. The displacement field of the bedding rock slope under excavation can be obtained by the displacement sensors in the slope body, and the displacement distribution curves at different heights are analyzed and the displacement limit value are combined to obtain the displacement excavation relaxation zone. The displacement excavation relaxation zone of the bedding rock slope with weak intercalated layers extend towards the toe and top of slope with the increasing excavation angle, and the displacement excavation relaxation zone will be bigger and bigger.

Keywords: weak intercalated layer; static excavation; unloading relaxation; displacement relaxation zone

随着人类工程活动的发展, 工程建设中出现了越来越多的开挖边坡, 而顺层开挖边坡是其中最具

代表性的一类^[1~2]。近些年, 顺层岩质边坡的静力开挖以及开挖卸荷吸引了众多研究者的目光^[3~4]。

收稿日期: 2015-11-01; 修订日期: 2015-11-24

基金项目: 交通运输部建设科技项目资助(2013318800020)

第一作者: 马洪生(1974-), 男, 博士研究生, 高级工程师, 主要从事公路地质工程和岩土工程研究。E-mail: fg113112@126.com

曾坚等^[5]针对湖南某高速公路顺层岩质高边坡开展了室内开挖模型试验,探讨了边坡开挖过程中坡内位移和应力变化规律。曹卫文^[6]以典型顺层岩体边坡为研究对象,分阶段进行了开挖相似模型试验,测量了开挖过程中坡内位移、应力的变化规律。冯振^[7]建立了地质力学模型,利用 FLAC 软件对边坡的开挖过程进行了数值模拟和计算,分析了开挖过程中边坡的应力应变状态。赵晓彦等^[8]采用离心模型试验及快速拉格朗日元数值模拟方法对类土质高边坡的开挖效应进行了研究。冯君等^[9-10]用地质力学模型试验方法,对顺层岩质边坡进行了开挖破坏试验。值得注意的是,以上研究仅仅针对层状顺层边坡,并未考虑层间存在的软弱夹层对边坡静力开挖的影响。肖世国等^[11-12]根据应力分析结果,阐明了边坡开挖后应力与位移向坡体内部呈衰减变化的趋势,并给出了坡体开挖松弛区的概念。黄润秋等^[13]首先针对边坡开挖或河谷下切的卸荷过程,讨论了边坡应力场的分布,提出了边坡二次应力的“驼峰应力分布”规律。肖颖^[14]从理论上分析了卸荷作用的本质及松弛机理,并根据现场地质调查资料对开挖引起的卸荷深度进行了划分。

基于上述已有研究成果,本文以大型室内模型试验为研究方法,以开挖角度作为研究变量,对含软弱夹层顺层岩质边坡的静力开挖过程进行试验模拟,探究含软弱夹层顺层岩质边坡静力开挖过程中边坡位移的变化规律,并提出含软弱夹层顺层岩质边坡开挖松弛区的确定方法。

1 试验概况

1.1 相似关系设计

选取几何尺寸、土体重度为控制量进行相似关系设计。确定几何尺寸相似比(原型/模型)为 20,土体重度相似比为 1。根据相似准则推导得到其余各物理量的相似比分别为弹性模量 20、应力 20、作用力 8000、位移 20、内摩擦角 1^[15]。

1.2 试验模型以及传感器布置

试验模型制作采用分层砌筑的方法,以密度作为控制量,即在每一层砌筑高度一定的情况下,通过控制每一层模型材料的重量来保证试验模型密度满足设计要求。模型制作完成后对岩层和软弱夹层取样测定,物理力学参数如表 1 所示。试验模型制作完成后静置一段时间,直至边坡不再发生向临空方向的卸荷回弹。

表 1 材料参数

Table 1 Material parameters

岩层					
$\rho/(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	E/MPa	$\varphi/(\circ)$	c/MPa	μ	抗压强度/MPa
2.5	333	34	1.1	0.20	3.3
软弱夹层					
$\varphi/(\circ)$	c/kPa	$\omega/\%$			
11	0.77	9.2			

试验中利用高精度拉线式位移计对坡体内部的位移进行监测,试验模型中共设置 4 排位移测点,从下至上依次编号为 1#-26#(图 1),各测点与边坡后缘的水平距离如表 2 所示。

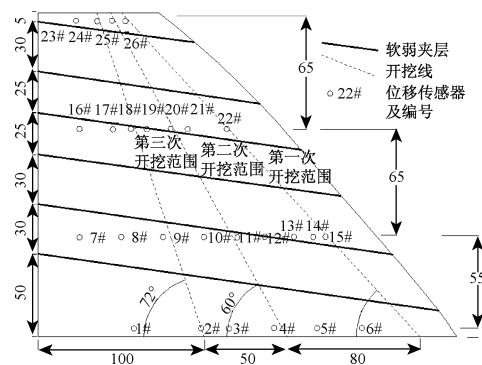


图 1 试验位移传感器布置图 (cm)

Fig. 1 Layout of displacement sensors in the test (cm)

表 2 各测点距离边坡后缘水平距离 (cm)

Table 2 Horizontal distance between the monitoring point and slope trailing edge (cm)

第一排 (高程 5cm)	1# 58	2# 98	3# 115	4# 142	5# 168	6# 195				
第二排 (高程 60cm)	7# 25	8# 50	9# 75	10# 100	11# 120	12# 137	13# 154	14# 166	15# 173	
第三排 (高程 125cm)	16# 25	17# 45	18# 57	19# 65	20# 80	21# 90	22# 114			
第四排 (高程 190cm)	23# 22	24# 35	25# 45	26# 53						

为了尽量降低模型试验边界效应对试验精度的影响,位移测点均布设在试验模型宽度方向的几何中心位置。为了研究不同开挖角度对坡体卸荷带内位移发展的影响规律,共进行 3 次开挖,坡体开挖过程中 3 次开挖的削坡角依次为 47°、60°和 72°,每次削坡完成后待坡体位移不发生变化后再进行下一个角度的开挖。为了与原型边坡开挖过程对应,每次开挖均采用 3 级削坡,每级削坡的高度为 65 cm,3 级削坡连续完成(图 2)。



图2 开挖过程中和开挖完成后

Fig. 2 Excavation process and the finished excavated model

2 试验结果分析

每一次开挖完成后定时对各测点位移值进行记

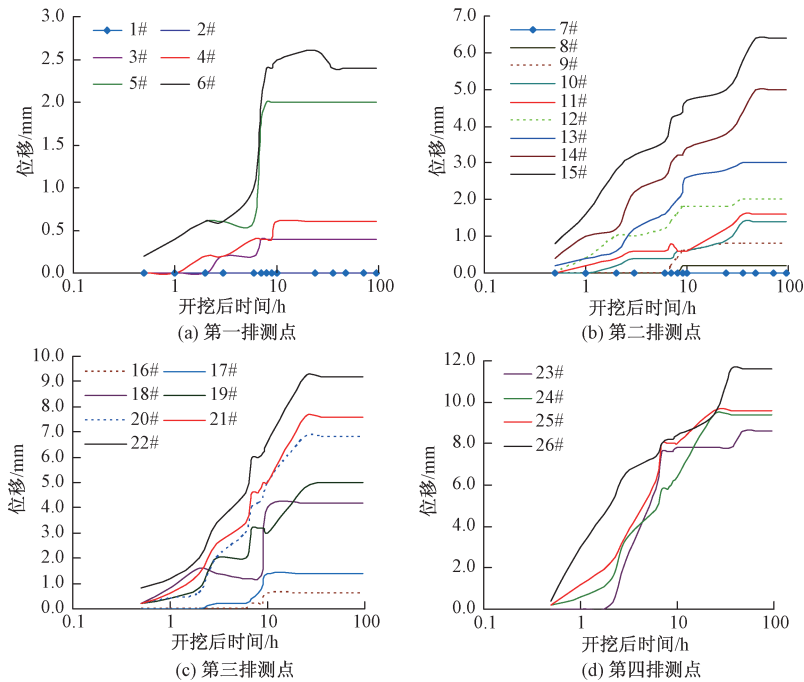


图3 第一次开挖(47°)完成后位移随时间的变化规律

Fig. 3 Displacement change rule with time after the first excavation (47°)

2.2 第二次开挖(60°)

第二次开挖过程中,第一排5#、6#测点,第二排13#、14#、15#测点,第三排21#、22#测点,第四排26#测点均位于边坡的开挖范围内,开挖完成后上述测点失效。第二次开挖完成后坡内位移随时间的变化规律如图4所示。图4表明,开挖角为60°与开挖角为47°时坡内位移随时间变化规律类似。边坡开挖完成10 h内边坡不同位置处各测点位移迅速增大,开挖完成后10~

录,直至位移值不再随时间变化,每一次开挖后位移监测时间为96 h(4 d)。需要注意的是,文中的时间描述均是试验中实测时间,根据相似理论,本文时间相似比为4.47,即实际边坡的变形时间是本文模型试验监测时间的4.47倍。

2.1 第一次开挖(47°)

开挖完成后各监测点位移随时间的变化规律如图3所示。从图3可看出,边坡开挖完成初期(10 h以内),随着时间的增长,坡体内各测点位移大幅度增大,且距离开挖坡面越近的测点处位移增大幅度越大。开挖后10~48 h内各测点位移进一步增大,但增幅较开挖后10 h内的小,开挖完成48 h之后(换算至原型边坡为214.56 h),坡体位移几乎不再随时间而变化,边坡位移趋于稳定,边坡不再发生向临空开挖面的变形。

24 h之间,坡内位移仍会出现小幅增长,在开挖完成24 h之后(换算至原型边坡为107.28 h),坡内位移趋于稳定,各测点位移不再随时间发生变化。另外,对比开挖角为47°和60°时的位移监测数据发现,开挖角60°时坡体位移稳定值较开挖角47°时略大,即开挖角增大,边坡具有更大的卸荷松弛响应。

2.3 第三次开挖(72°)

第三次开挖过程中,第一排3#、4#测点,第二排10

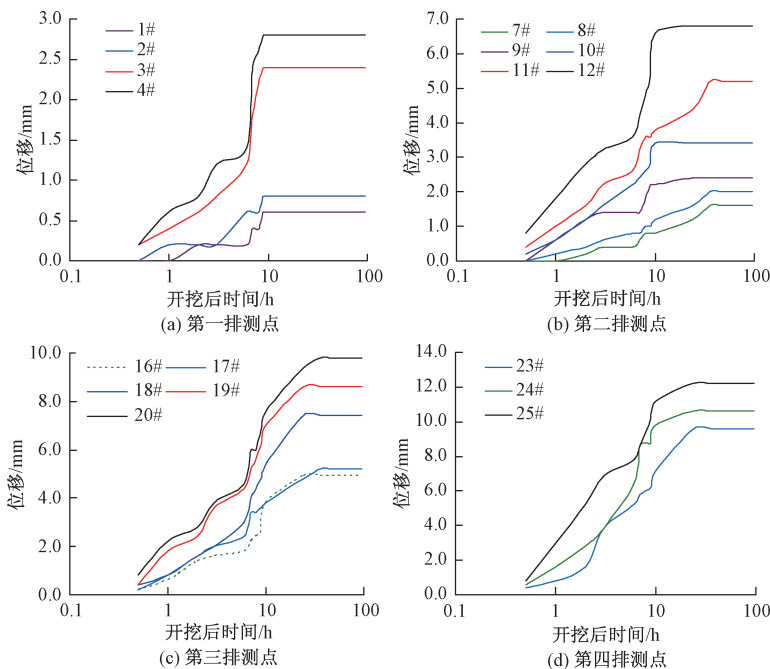


图4 第二次开挖(60°)完成后位移随时间的变化规律

Fig. 4 Displacement change rule with time after the second excavation (60°)

#、11#、12#测点,第三排 19#、20#测点,第四排 25#测点将会被挖出,开挖完成后上述测点失效。开挖完成后剩余各测点的位移监测值如图 5 所示。图 5 表明,与前两次开挖过程类似,第三次开挖完成后 10 h 内,边坡向开挖临空方向的位移增大速率较大,开挖完成 10 ~ 24 h 之后,位移仍出现小幅度的增长,开挖完成 24 h 之后(换算至原型边坡为 107.28 h),边坡不再向临空面方向发生位移,边坡卸荷松弛过程结束。

同时,对比 3 次开挖过程坡内位移稳定时间可以发现,开挖角度为 60°和 72°时,位移稳定时间较开挖角度为 45°时大幅缩减。因为开挖后坡体向临空面方向的位移主要由边坡卸荷回弹引起,所以可以得到这样的结论:开挖角度越大,边坡完成卸荷松弛的时间越短。

2.4 开挖坡角对位移稳定值的影响

每一次开挖完成一定时间后,坡体内的位移将趋于一个稳定值,而这一稳定值极具工程意义,其代表了边坡在开挖完成后坡体的变形量大小,是确定边坡开挖松弛区范围的定量指标。本文在试验设计时,每一次开挖时坡面附近均布置了位移计,可以将该点的位移值视为开挖坡面的水平向位移值。每一次开挖完成后第一排至第四排位移测点处坡面位移稳定值如图 6 所示。从图 6 可以看出,随着开挖角的增大,坡面附近的位移稳定值逐渐增大,且随开挖角呈近似的线性关系。另外,随着高程的增加,坡面附近的水平向位移稳

定值增大,且增大幅度较大,如图 7 所示。

3 边坡开挖松弛区确定

3.1 开挖松弛区确定方法

含软弱夹层顺层岩质边坡开挖后,坡体内必定形成水平向的松弛位移场。建立坡体内的坐标系 XOY,如图 8 所示。在 OX 方向,坡体内的水平位移 μ 分布曲线如图 8 所示,其中 A 点为位移分布曲线上位移限定值 α 对应的横坐标值,即 A 点水平位移为 α 。沿坡面平移坐标系 XOY 至 X'O'Y',此时水平位移 μ' 分布曲线上位移限定值 α 对应的横坐标为 A'。以此类推,得到位移限定值 α 对应的一系列横坐标值,依次连接各个横坐标值,得到边坡的开挖位移松弛区边界线,边界线与坡面的交点由连线平滑延伸确定,如图 8 中虚线所示。松弛区边界线与坡面线之间的区域即为边坡的开挖位移松弛区。在实际工程中,当边坡开挖完成后坡体内部某一点的位移值小于某一特定值时,可以认为该点以内的边坡是稳定的,因此,在边坡开挖位移松弛区边界线确定过程中需要根据边坡的实际情况和安全性要求综合确定这一特定值,即位移限定值 α 。

含软弱夹层顺层岩质边坡开挖后,根据各个测点的位移测试值,可以得到 4 排位移测试点的位移分布曲线,在此基础上,确定开挖松弛区判识的位移限制值,进而确定不同开挖角下含软弱夹层顺层岩质边坡

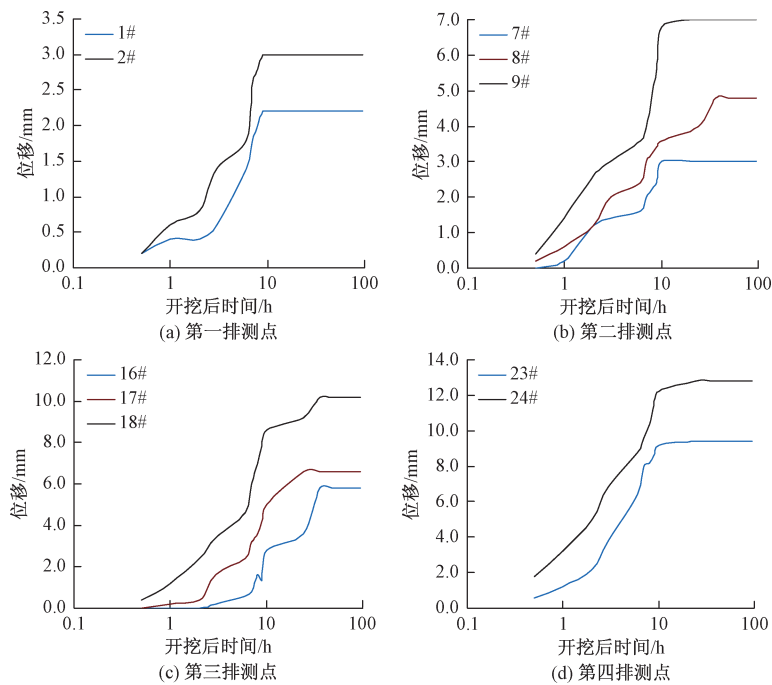


图 5 第三次开挖 (70°) 完成后位移随时间的变化规律
Fig. 5 Displacement change rule with time after the third excavation (70°)

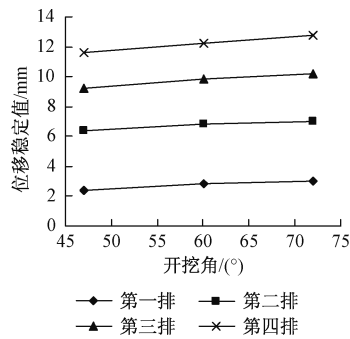


图 6 不同开挖角时边坡坡面水平位移稳定值
Fig. 6 Stable slope face displacement values with different excavation angles

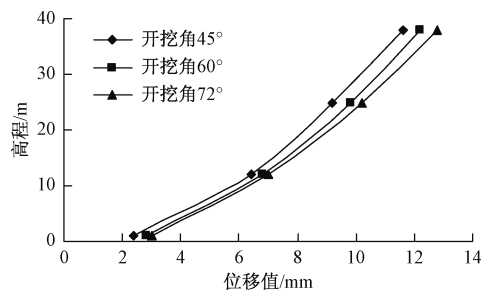


图 7 坡面位移稳定值随高程的变化规律
Fig. 7 Displacement change rule with height

的开挖松弛区范围。

3.2 位移限定值 α 的确定

目前,关于松弛区位移限定值的确定尚无明确的

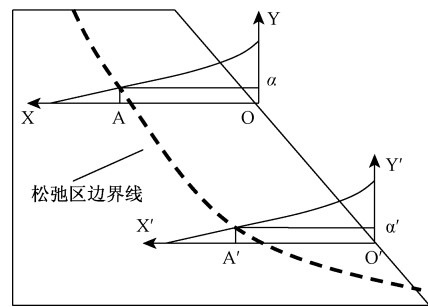


图 8 位移松弛区示意图
Fig. 8 Schematic diagram of the displacement relaxation zone

方法,我国相关规范也未对位移限定值提出确切的规定,已有研究中部分学者提及了位移限定值的取值问题,但给出的位移限定值仅为一个参考值。因此,开挖位移松弛区边界线确定过程中位移限定值 α 的选取应在结合具体工程实际情况和工程经验的基础上,进行适当的现场实测,以便更加准确地确定合理的位移松弛区范围。

位移限定值的确定有以下两种情况,第一,结合工程实际情况和工程经验,提出确切的位移限定值 α ;第二,对于在开挖过程中存在滑动可能性的边坡,其位移变化曲线上存在趋于平稳的拐点,亦可以利用这一拐点对应的位移值来确定限制值 α 。

本文在参照已有研究成果的基础上,选择 $\alpha = 5\text{mm}$ 作为示例进行分析,但是值得注意的是,本文中 α

=5mm 仅仅作作为示例,对于具体的工程对象位移限定值 α 的选择应做针对性的研究。

3.3 开挖松弛区确定

本文对 3 种不同开挖角下的开挖松弛区范围进行确定,位移限定值取 $\alpha = 5\text{mm}$ 。以 4 排位移测点所在高程位置作为参考线,根据 4 排位移测点的位移值,确定参考线上对应于位移限定值 $\alpha = 5\text{mm}$ 的点,并用光滑曲线依次连接参考线上各点,该连线即为含软弱夹层顺层岩质边坡开挖松弛区的坡内边界线,该边界线与坡面之间的区域即为边坡的开挖松弛区。因试验中测试原件布置个数有限,本试验在开挖松弛区部分边界控制点的确定采用连线顺延的方式。

基于试验中的实测数据,得到 3 种不同开挖角下

边坡开挖松弛区边界线,各边界线的控制点如表 3 所示。不同开挖角下含软弱夹层顺层岩质边坡开挖松弛区如图 9 和表 4 所示。为了结合实际原型边坡进行分析,表 4 及图 9 中的几何尺寸已经根据相似比换算至原型边坡尺寸。

表 3 不同开挖角下位移松弛区边界线控制点

Table 3 The border control points of the displacement relaxation zone with different excavation angles

开挖角	控制点距离坡面距离/m				控制点
	第一排	第二排	第三排	第四排	
47°	N	1.6	9.6	N	A、B、C、D
60°	N	3.8	10.3	N	E、F、G、H
72°	N	6	10.6	N	I、J、K、L

注:N 表示没有相关测试数据

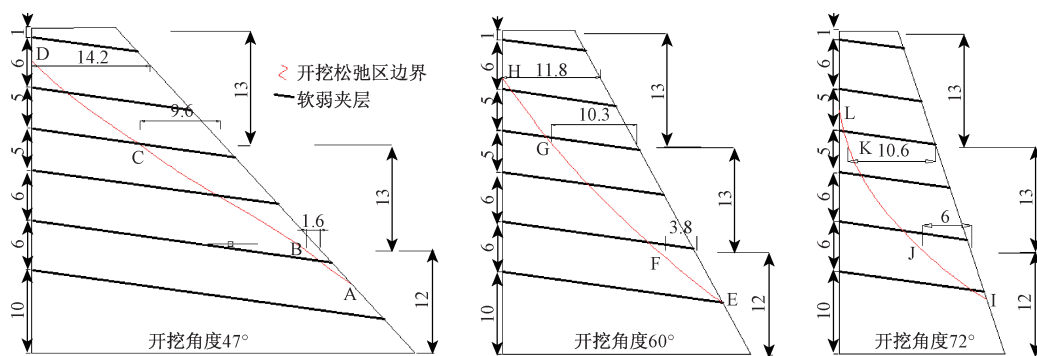


图 9 不同开挖角下的松弛区范围(m)

Fig. 9 Displacement relaxation zone with different excavation angle(m)

3.4 开挖角度对松弛区范围的影响

本文以 4 排位移测点所在高程平面为参考面,分析这 4 个参考面上位移松弛区的范围随开挖角度增大的变化规律。分析图 9 及表 4 可以发现:

(1) 位移松弛区边界线与坡脚的距离随开挖角度的增大而呈现减小的趋势,尤其是开挖角度由 47° 增大至 60° 时,松弛区边界线与坡脚之间的距离降低幅度为 25.6%。这表明开挖角度增大导致位移松弛区范围向坡脚方向发展。

(2) 在第二排测点所在参考面上,随着开挖角度的增大,位移松弛区边界线距离坡面的水平距离逐渐增大。开挖角度由 47° 增大至 60° 时,这一距离增大了 137.5%,开挖角度由 60° 增大至 72° 时,这一距离增大了 57.9%。

(3) 在第三排测点所在参考面上,随着开挖角度的增大,位移松弛区边界线距离坡面的水平距离逐渐增大,但是相对于第二排测点所在参考平面增大幅度较小。开挖角度由 47° 增大至 60° 时,这一距离增大了

7.3%,开挖角度由 60° 增大至 72° 时,这一距离增大了 2.9%。

表 4 开挖坡角对位移松弛区范围的影响

Table 4 Influence of the excavation angle on the displacement relaxation zone

参考面	绝对高度/m	相对高度	47°开挖	60°开挖	72°开挖
与坡脚距离/m	N	N	8.3	6.2	6.6
第一排测点/m	1.0	0.026	N	N	N
第二排测点/m	12	0.308	1.6	3.8	6.0
第三排测点/m	25	0.641	9.6	10.3	10.6
第四排测点/m	38	0.974	N	N	N
后缘与坡顶距离/m	N	N	4.0	5.6	9.5

注:N 表示没有相关测试数据

(4) 位移松弛区边界线后缘与坡顶的距离也随着开挖角度的增大而大幅度增大,开挖角度由 47° 增大至 60° 时,这一距离增大了 40.0%,开挖角度由 60° 增大至 72° 时,这一距离增大了 69.6%。

综合 4 个参考面上位移松弛区边界线的变化趋势可以发现,随着开挖角度的增大,含软弱夹层顺层岩质

边坡松弛区范围逐渐增大,且开挖位移松弛区范围增大主要体现为边坡中下部位移松弛区边界线向坡体内鼓出,同时,松弛区边界线向坡脚和坡顶不断延伸。

4 结论

(1)边坡完成开挖卸荷松弛的时间随着开挖角度的增大而大幅缩短。

(2)随着开挖角度的增大,坡面的位移稳定值逐渐增大,且位移稳定值随着高程的增加而逐渐增大。

(3)边坡在开挖作用下坡体内会形成一定范围的位移松弛区,获得边坡在开挖作用下坡内及坡面位移场后,通过分析不同高程水平参考线处坡体位移的变化曲线,并结合位移限制值可以得到边坡的开挖位移松弛区范围。

(4)含软弱夹层顺层岩质边坡开挖松弛区范围随着开挖角度的增大不断向坡脚和坡顶延伸,开挖松弛区范围增大。

参考文献:

- [1] 唐红梅,陈洪凯,曹卫文.顺层岩体边坡开挖过程模型试验[J].岩土力学,2011,32(2):435-440. [TANG H M, CHEN H K, CAO W W. Model experiment in excavation of rock bedding slope[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(2):435-440. (in Chinese)]
- [2] 卢海峰,陈从新,袁从华,等.巴东组红层软岩缓倾顺层边坡破坏机制分析[J].岩石力学与工程学报,2010,29(增刊2):3569-3577. [LU H F, CHEN C X, YUAN C H, et al. Analysis of Failure Mechanism of Badong Red Bed Soft Rock Gently Inclined Bedding Slope[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(Sup 2):3569-3577. (in Chinese)]
- [3] 余志华,桂跃,付坚,等.轴向卸荷条件下泥炭质土回弹变形试验研究[J].水文地质工程地质,2015,42(5):107-114. [YU Z H, GUI Y, FU J, et al. An experimental study of the rebound deformation characteristics and mechanism of peaty soil under unloading[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2015, 42(5):107-114. (in Chinese)]
- [4] 魏少伟,郑刚,刘畅,等.滨海新区浅层软土卸荷变形性状试验研究[J].水文地质工程地质,2010,37(5):77-82. [WEI S W, ZHENG G, LIU C, et al. Experimental studies on unloading deformation properties of soft clay in Binhai New Area[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2010, 37(5):77-82. (in Chinese)]
- [5] 曾坚,李振存,郭昕,等.山区高速公路顺层岩质边坡开挖过程模型试验[J].公路与汽运,2013(5):153-156. [ZENG J, LI Z C, GUO X, et al. The Model Excavation Test of Bedding Rock Slope of Highway in Mountain Area[J]. Highways and Automotive Applications, 2013(5):153-156. (in Chinese)]
- [6] 曹卫文.顺层岩体边坡开挖过程模型试验[D].重庆:重庆交通大学,2009. [CAO W W. Model Experiment of A Rock Bedding Slope During Excavation[D]. Chongqing: Chongqing University, 2009. (in Chinese)]
- [7] 冯振.顺层岩质边坡开挖过程模拟及稳定性分析[D].长沙:中南大学,2009. [FENG Z. Numerical Simulation for Excavating Process and Stability Analysis of Bedding Rock Slope[D]. Changsha: Central South University, 2009. (in Chinese)]
- [8] 赵晓彦,胡厚田,唐茂颖.类土质高边坡开挖效应的离心模型试验及数值模拟研究[J].岩石力学与工程学报,2006,25(增刊2):4046-4051. [ZHAO X Y, HU H T, TANG M Y. Study on Excavation Effect of High Soil-like Slope by Centrifugal Model Test and Numerical Simulation[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(Sup 2):4046-4051. (in Chinese)]
- [9] 冯君,周德培,李安洪.顺层岩质边坡开挖松弛区试验研究[J].岩石力学与工程学报,2005,24(5):840-845. [FENG J, ZHOU D P, LI A H. Physical Modeling Research on Relaxation Region of Consequent Rock Slope Induced by Road Cutting[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(5):840-845. (in Chinese)]
- [10] 冯君,周德培,李安洪.顺层岩质边坡开挖模型试验及稳定性影响因素分析[J].工程地质学报,2005,13(3):294-299. [FENG J, ZHOU D P, LI A H. Test and Numerical Modeling of the Stability of Rock bedded Slope[J]. Journal of Engineering Geology, 2005, 13(3):294-299. (in Chinese)]
- [11] 肖世国,周德培.开挖边坡松弛区的确定与数值分析方法[J].西南交通大学学报,2003,38(3):318-322. [XIAO S G, ZHOU D P. Determination and Numerical Analysis Method of Relaxation Region for Cutting Slope[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2003, 38(3):318-322. (in Chinese)]

- [J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(6): 1081 - 1106. [SUN J. Rock Rheological Mechanics and its advance in Engineering applications [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(6): 1081 - 1106. (in Chinese)]
- [5] 伍国军, 陈卫忠. 岩石锚固界面剪切流变试验及模型研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(3): 520 - 527. [WU G J, CHEN W Z. Shear creep experiments for anchore interface mechanics and nonlinear rheological model of rocks [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(3): 520 - 527. (in Chinese)]
- [6] 庞正江, 胡建敏. 结构面剪切流变及其长期强度试验研究[J]. 岩土力学, 2006, 27(增刊2): 1179 - 1182. [PANG Z J, HU J M. Shear creep and long-term strength test research on unconformity plane[J]. Rock and Soil Mechanics, 2006, 27(Sup 2): 1179 - 1182. (in Chinese)]
- [7] 徐景茂, 顾雷雨. 锚索内锚段注浆体与孔壁之间峰值抗剪强度试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(22): 3765 - 3769. [XU J M, GU L Y. Testing study on the peak shear strength between grout and bore wall in the interior bond section of prestressed anchorage cable[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(22): 3765 - 3769. (in Chinese)]
- [8] 朱焕春, 荣冠, 肖明, 等. 张拉荷载下全长粘结式锚杆工作机理试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(3): 379 - 384. [ZHU H C, RONG G, XIAO M, et al. Testing study on working mechanism of full grouting bolt under tensile load[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 21(3): 379 - 384. (in Chinese)]
- [9] 赵同彬, 尹延春, 谭云亮, 等. 锚杆界面力学试验及剪应力传递规律细观模拟分析[J]. 采矿与安全工程学报, 2011, 28(2): 220 - 224. [ZHAO T B, YIN Y CTAN Y L, et al. Mechanical test of bolt interface and microscopic simulation of transfer law for shear tress[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2011, 28(2): 220 - 224. (in Chinese)]
- [10] 刘正, 高文华. 深部围岩流变特性试验研究及其模型辨识[J]. 水文地质工程地质 2012, 39(4): 43 - 48. [LIU Z, GAO W H. An experimental study of the creep properties of deep surrounding rocks and creep model identification[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2012, 39(4): 43 - 48. (in Chinese)]

责任编辑: 张明霞

(上接第 43 页)

- [12] 肖世国. 岩石高边坡开挖松弛区及加固支护结构研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2003. [XIAO S G. Analysis on Relaxation Zone and Some Stabilizing Structures in High Rock Slope Projects [D]. Southwest Jiaotong University, 2003. (in Chinese)]
- [13] 黄润秋, 林峰, 陈德基, 等. 岩质高边坡卸荷带形成及其工程性状研究[J]. 工程地质学报, 2001, 9(3): 227 - 232. [HUANG R Q, LIN F, CHEN D J, et al. Formation Mechanism of Unloading Fracture Zone of High Slopes and Its Engineering Behaviors [J]. Journal of Engineering Geology, 2001, 9(3): 227 - 232. (in Chinese)]
- [14] 肖颖. 大渡河大岗山水电站左岸建基岩体开挖松弛深度综合分析[D]. 成都: 成都理工大学, 2011. [XIAO Y. Comprehensive Analysis on the Relaxation Depth of Foundation Left Bank Rock Excavation of Dagangshan Hydropower Station on Dadu River[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2011. (in Chinese)]
- [15] 袁文忠. 相似理论与静力学模型试验[M]. 成都: 西南交通大学出版社, 1998: 112 - 119. [YUAN W Z. Similarity Theory and the Statics Model Test [M]. Chengdu: Southwest Jiaotong University Press, 1998: 112 - 119. (in Chinese)]

责任编辑: 张明霞