

文章编号:1673-2049(2019)05-0089-08

路堑边坡扩建开挖过程中的变形分析

李杰¹, 陈龙龙², 王志丰²

(1. 陕西交通技术咨询有限公司, 陕西 西安 710068; 2. 长安大学 公路学院, 陕西 西安 710064)

摘要:为研究路堑边坡开挖过程中岩体边坡和变形稳定性,确保路堑边坡施工及运营期的安全,以路堑边坡扩建工程为依托,采用地表变形及岩体内部位移监测数据分析边坡开挖过程中的变形规律。边坡表面变形通过布设监测点进行监测,边坡深部位移通过钻孔安装多点变位计和测斜管进行监测,得到边坡开挖和变形关系。分析结果表明:在开挖前边坡整体较稳定,随着边坡开挖量的逐渐增多,边坡岩体位移量逐渐增大,边坡深层位移先增加后收敛,最后趋于稳定;边坡发育的断层、拉裂缝、开挖临空面等对边坡在施工期的稳定性产生较大影响;开挖结束后边坡各方向的位移均趋于收敛,地表监测点中水平最大累计位移量为12.30 mm,其方向平行道路走向,而垂直最大累计位移量为10.60 mm,发生在第三级台阶;边坡内部岩层最大水平位移为11.02 mm,主要发生在岩层分界处的断层软弱结构面位置;在边坡的软弱岩层开挖期间,边坡岩体易出现相对较大的位移变形,开挖结束后短期内边坡地表位移趋于收敛,深层岩体的位移基本稳定;在边坡开挖过程中,边坡地表位移及深层水平位移在第二级边坡开挖时均变化较大,第二级台阶岩体的合理开挖是控制整个边坡稳定的关键。

关键词:边坡工程;变形稳定性;现场监测;软弱结构面;深层水平位移

中图分类号:TU433 **文献标志码:**A

Deformation Analysis of Cutting Slope During Expansion Excavation

LI Jie¹, CHEN Long-long², WANG Zhi-feng²

(1. Shaanxi Communication Technology Consulting Co., Ltd., Xi'an 710068, Shaanxi, China;

2. School of Highway, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China)

Abstract: In order to study the deformation stability of rock slope during the excavation of cutting slope, and ensure the safety of cutting slope construction and operation period, based on the development of cutting slope, the deformation law of slope excavation was analyzed by surface deformation and internal displacement monitoring data of rock mass. The surface deformation of the slope was monitored by setting observation points, and the deep displacement of the slope was monitored by installing multi-point deflection gauges and inclinometer tubes. Therefore, the relationship between slope excavation and deformation was obtained. The analysis results show that the slope is stable before excavation, and the displacement along the slope is gradually increased with the increase of the slope excavation. After the excavation, the displacement of each slope tends to converge, and the maximum cumulative displacement in the surface monitoring point is 12.30 mm, which is along the parallel road direction, and the vertical maximum cumulative displacement is 10.60 mm, which occurs in the third step. The maximum

收稿日期:2019-03-11

基金项目:国家自然科学基金项目(41702287)

作者简介:李杰(1977-),男,山东济南人,高级工程师,工学博士,E-mail:22436440@qq.com。

horizontal displacement of the rock in the slope is 11.02 mm, which mainly occurs in the weak structural plane of the rock boundary. During the excavation of the weak rock slope, the slope rock mass is prone to relatively large displacement deformation. After the excavation, the slope surface displacement tends to converge in a short time, and the displacement of the deep rock mass is basically stable. In the process of slope excavation, the surface displacement and deep horizontal displacement of the slope vary greatly during the excavation of the second stage slope. The reasonable excavation of the rock mass of the second stage slope is the key to control the stability of the whole slope.

Key words: slope engineering; deformation stability; field monitoring; weak structural plane; deep horizontal displacement

0 引言

近年来随着公路交通运输业发展,交通流量越来越大,一些道路逐渐超出了原有道路通行能力,所以公路改扩建成为提高公路运输能力的一种方法^[1-3],但也随之带来对原有路堑高边坡的开挖问题。很多坡体岩质复杂,断层、破碎带及软弱结构面等穿插其中,为避免高边坡爆破施工对原坡体旁边高速公路通行产生不良影响^[4-7],采用了炮破锤冲击破碎岩体的方法进行坡体开挖。如果路堑高边坡因冲击开挖扰动和现场施工出现失稳破坏,会严重影响现有路线行车通畅安全,造成严重交通事故及经济损失。为确保边坡的安全开挖和运营期的稳定,需对边坡进行必要的监测分析。近些年,许多专家学者围绕该类问题进行了大量的研究^[6-13],取得了很大进展。宋修广等^[14]结合工程实际对某路堑边坡表面及地下变形监测数据进行了分析研究,得到了影响边坡稳定性的因素;张金龙等^[15]对某高速公路深挖路堑边坡工程开挖过程进行了监测并进行归纳,提出了包括勘察、防护设计、施工监测、归纳总结的系统公路深挖路堑边坡工程动态设计方法。王大伟等^[16]以柳南(柳州—南宁)高速公路改扩建工程高边坡工程为依托,采用 FLAC 3D 数值分析方法研究改扩建边坡开挖对边坡稳定性的影响。蔡唐涛^[17]通过有限元方法,建立应力-渗流耦合模型,研究了不同降雨条件下高边坡渗流场和应力场的变化规律。综上所述,相关学者通过数值计算和现场监测等手段在路堑高边坡稳定性方面做了较多研究,所得研究成果的普适性需要进一步探讨,也需要更多实测数据去支撑。

本文以浙江省甬台温高速公路复线温州南塘至黄华段某路堑高边坡工程为依托,采用现场监测的方法对该路堑边坡开挖过程进行稳定性监测,通过

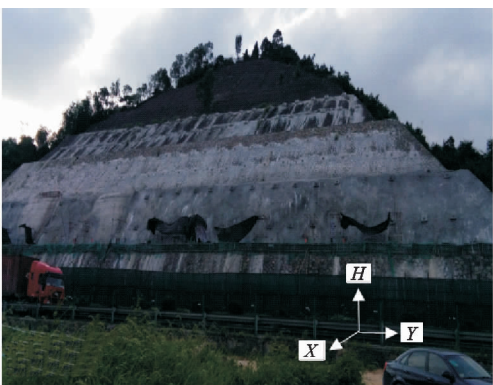
对大量监测数据的分析,评价了该边坡的安全性。本文得到的现场实测数据和分析结论可以为路堑高边坡稳定性研究提供有力的支撑。

1 工程概况

浙江省甬台温高速公路复线温州南塘至黄华段工程某路堑高边坡现场如图 1 所示,边坡位于甬台温高速公路复线南塘至黄华 K30+530~K30+680 段右侧,坡长 150 m,老路开挖最大深度 68 m,新路开挖下部 13 m。原有坡角为 45°左右。该地区主要为丘陵与海积平原相间分布地貌,丘陵主要东西走向,地表植被较发育。丘陵主要为火山碎屑岩丘陵,高程大多低于 100 m,山体一般较舒缓,山坡坡角一般在 30°左右,切割不深,没有较大的沟谷发育,以风化剥蚀作用为主,流水的侵蚀作用居次要地位。据建设单位提供的工程地质勘察资料,该边坡岩层主要有微风化岩、中风化岩、强风化岩、晶屑凝灰岩、含碎石黏土等。该边坡岩体较深区域裂隙较发育,有较多压扭性断层,破碎带内岩体挤压呈片状、透明状,局部有石英脉,岩石蚀变强烈,风化强烈但不均匀,断层的切割破坏了岩体的完整性,形成了地下水的储存运移通道,降低了边坡的稳定性。边坡的典型断面地质剖面如图 2 所示。通过分析研究可知,该边坡岩质一般。边坡共开挖 5 级,边坡主要的防护方案为:路堑第一级边坡由护面墙防护,第二至第四级边坡采用预应力锚索防护,第五级边坡采用锚喷防护。

2 监测设施布置

边坡岩体节理、裂隙较发育,内部破碎带局部风化强烈,在施工过程中,可能诱发坡体内部深层裂缝的发展。为及时了解施工过程中软弱结构面的变化情况,保证施工中边坡的变形稳定性,对边坡进行变



(a) 正视图



(b) 侧视图

图 1 边坡工程现场正视图和侧视图

Fig. 1 Front View and Side View of Slope Engineering

形监测。根据边坡特征对边坡进行地表变形监测和岩体深部位移监测^[18]。地表变形监测通过在边坡平台上布设地表变形监测点,用水准仪及全站仪进行监测。边坡内部岩体位移监测通过布设三点式变位计和测斜孔,采用便携式频率仪和测斜仪进行测量。规定 X 为垂直于边坡方向位移,正值为水平向路基移动方向,反之为负; Y 为平行于边坡走向移动,向大桩号方向移动为正,反之为负; H 为竖向沉降,下沉为正,反之为负,如图 1 标注所示。边坡具体监测设施布置如图 3 所示。

3 监测结果分析

3.1 地表变形监测

边坡共布设地表监测点 4 组。在高程 56.9 m 的第五级边坡平台上布设变形监测点 1 个,记为 E501;在高程 47.2 m 的第四级边坡平台上布设变形监测点 5 个,分别记为 E401,E402,E403,E404,E405;在高程 37.0 m 的第三级边坡平台上布设变形监测点 5 个,分别记为 E301,E302,E303,E304,E305;在高程为 27.5 m 的第二级边坡平台上布设

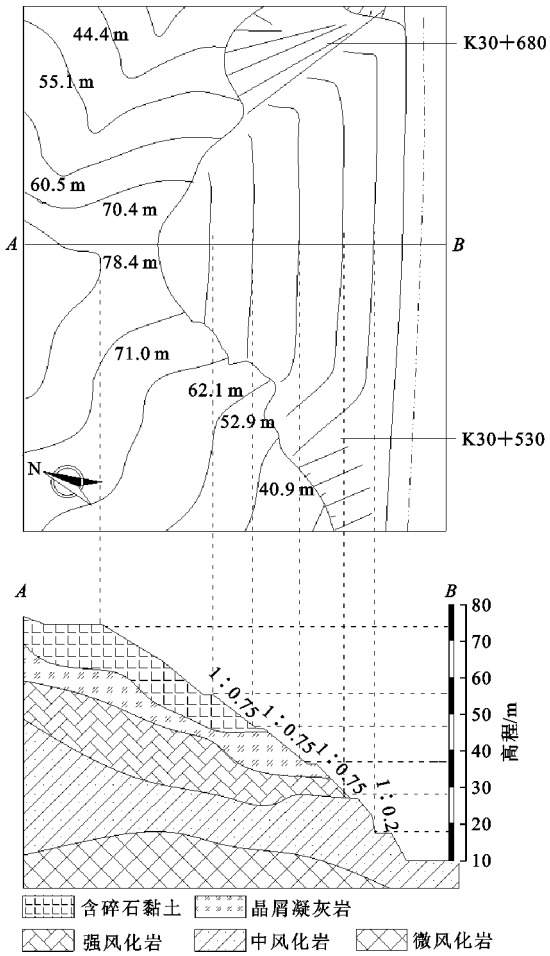


图 2 边坡典型断面

Fig. 2 Typical Section of Slope Profile

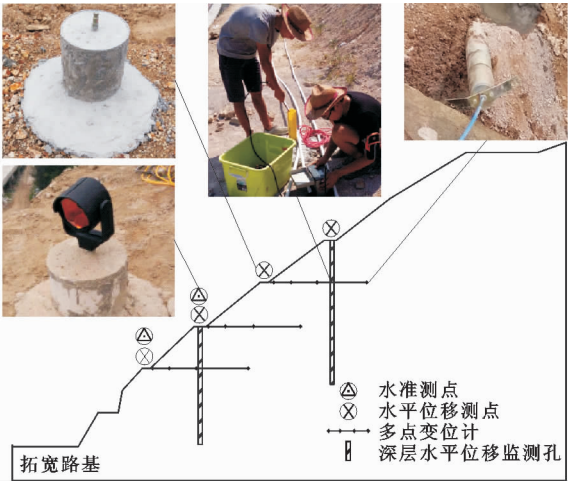


图 3 边坡现场监测点布置

Fig. 3 Site Monitoring Points Layout of Slope

变形监测点 5 个,分别记为 E201,E202,E203,E204,E205。地表监测点布设在距离边坡台阶外边缘 50 cm 处,采用不锈钢准心和混凝土埋设,深度大约 50 cm,保证监测点稳定牢固。水准监测点于 2016 年 11 月 20 日至 2017 年 9 月 28 日进行了正常

监测,得到各测点水平位移及竖向沉降值,测量的变形速率值均未超出警戒值($1\text{ mm}\cdot\text{d}^{-1}$),数据准确有效。地表累计变形位移数据见表 1。

表 1 地表累计位移监测数据

Tab. 1 Monitoring Data of Surface Accumulative Displacement

测点 编号	测点高 程/m	X 向水平位移 U_X/mm	Y 向水平位移 U_Y/mm	H 向垂直位移 U_H/mm
E501	57.1	6.47	11.50	7.98
E405	47.2	5.12	10.18	7.71
E404	47.1	5.14	11.42	10.50
E403	47.0	5.68	6.60	7.46
E402	47.2	4.27	7.55	7.15
E401	47.1	4.74	8.64	7.21
E305	37.1	4.53	10.71	7.90
E304	37.1	5.47	11.50	9.70
E303	37.2	5.30	8.46	10.60
E302	37.1	5.20	7.11	8.40
E301	36.9	4.62	7.21	7.10
E205	27.5	2.25	4.75	6.66
E204	27.4	2.04	4.52	6.04
E203	27.6	1.94	3.71	6.06
E202	27.7	2.16	4.00	4.72
E201	27.5	2.24	3.20	4.99

由表 1 的地表累计位移监测数据可知,边坡各监测点 X 方向累计位移量主要集中在 5~6 mm,X 方向累计位移最大点为位于第五级台阶上的 E501 测点。E501 测点高程为 57.1 m,该点的累计位移为 6.47 mm。由图 4 地表水平位移 U_X 时程变化图可知,测点 E501 的水平位移在第四级开挖之前位移变形不大,整体较稳定,但从第三级台阶开挖开始,位移曲线出现一个明显转折点,曲线的斜率骤增,曲线呈上凸状,即随时间的增加,位移明显增大。这表明第三级边坡的开挖扰动对坡体内部结构的稳定性产生了较大影响,边坡开挖对岩体产生的扰动是影响该边坡稳定性的一个主要因素。直到第三级开挖完成,位移曲线上又出现一个转折点,开始表现出位移变化速率减缓的特征。此后位移-时间曲线较缓慢地变化,位移增量很小,直到最后曲线基本收敛,位移不再变化。该边坡每个台阶 X 向位移受上一级开挖影响较小,而受再下一级影响较大,且位移变化主要发生在下一级台阶开挖时期。通过对位移曲线分析可知,边坡位移变形主要集中在开挖期,不同施工阶段对岩体稳定性影响不同,开挖结束后变形速率较开挖施工期间明显减小,边坡岩体基本不再变形,趋于稳定。

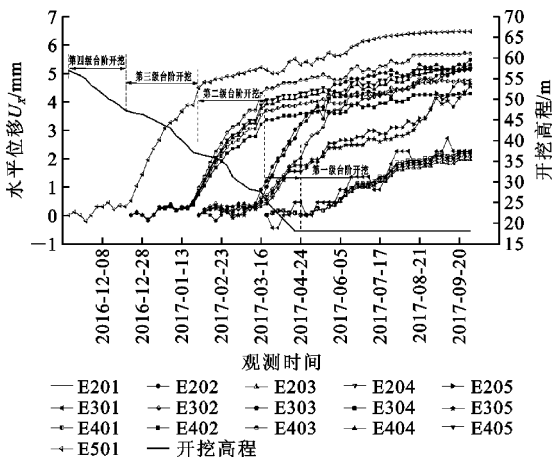


图 4 地表 X 向水平位移 U_X 时程变化
Fig. 4 Time History Change of Surface Horizontal Displacement U_X

通过分析地表累计位移监测数据(表 1)可知,边坡各地表监测点 Y 向累计位移最大的位置为 E304 和 E501 两个监测点,分别位于第三级台阶和第五级台阶上,累计位移大小均为 11.50 mm,方向为沿边坡走向的 Y 向的正向,两监测点的高程分别为 37.1 m 和 57.1 m。第三级台阶的 E304 和 E305 两个监测点位移相对同台阶的其他点较大。在图 5 所示的边坡水平位移时程变化曲线中可以看到:第二级台阶开挖前期和中期,边坡位移量相对较小,曲线基本呈水平线;在开挖末期 E304 和 E305 两点位移曲线出现明显转折点,位移变化曲线直线增长,在 8 d 时间内,位移量大约从 0.50 mm 增加到 4.50 mm,其曲线变化速率平均为 $0.5\text{ mm}\cdot\text{d}^{-1}$ 。在第二级边坡开挖结束后曲线又趋于平缓增长状态。当第一级边坡开挖结束一段时间后位移曲线又有一个突增转折点,位移变化速率增加,持续 20 d 左右又恢复位移缓慢变化状态,直到最后基本收敛。岩体稳定性受开挖的影响较大,开挖期的变形占了测量过程总变形量的 80% 以上,开挖结束后边坡变形持续增加,但变形速率明显降低,变形趋于收敛。

由图 6 所示的边坡地表沉降时程变化曲线可知,各测点的沉降量 U_H 都在 0~11 mm 之间,沉降位移最大位置在 E303 监测点处,沉降量为 10.60 mm,高程为 37.2 m,位于第三级台阶上。沉降位移超过 8 mm 的监测点共 4 个,其中 3 个监测点位于第三级台阶。在第三、四级边坡开挖时坡体位移变化量很小,监测得到的沉降量在 1 mm 以内,沉降量增长速率较缓慢;在第二级开挖后期,边坡各监测点的位移变化速率均突然增加,位移曲线均出现明显

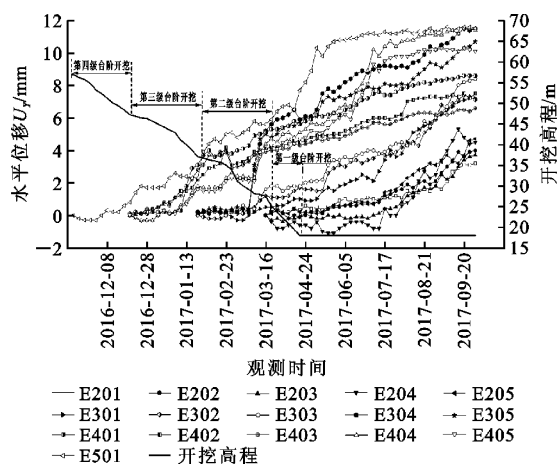


图 5 地表 Y 向水平位移 U_y 时程变化

Fig. 5 Time History Change of Surface Horizontal Displacement U_y

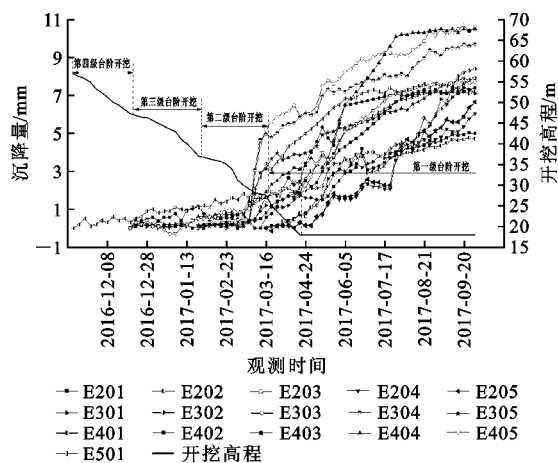


图 6 地表沉降 U_n 时程变化

Fig. 6 Time History Change of Surface Subsidence U_n

的转折点,曲线基本呈直线上升趋势。当第二级开挖完成后,位移曲线呈下凹状,位移变化速率有所减缓。同样在第一级边坡开挖也出现了相似的位移变化规律。沉降变形绝大部分发生在第一、二级边坡开挖期间,而开挖早期的沉降速率较小,这说明坡体受外界开挖扰动因素的影响在第一、二级台阶开挖时最大。该位置为中风化和强风化岩层的交界,结构面较发育,边坡的开挖扰动和卸荷作用会导致滑动面产生一定的错动变形。在开挖后期沉降速率降低,沉降量基本不再增加。自开挖结束后变形速率就基本趋于稳定,边坡沉降变形收敛。

3.2 岩体内部位移监测

3.2.1 水平深部位移分析

根据边坡结构和地质特征,在边坡上共布设 3 套三点变位计,用来监测由于卸荷作用引起的边坡内部岩体松动和断层变位。第 1 套位于高程 47.2

m 的第四级台阶上,编号记为 E-SPK01,先穿过强风化岩后穿入中风化岩;第 2 套位于高程为 37.0 m 的第三级台阶上,编号记为 E-SPK02,穿过晶屑凝灰岩和强风化岩;第 3 套位于高程 27.5 m 的第二级台阶上,编号记为 E-SPK03,穿过晶屑凝灰岩。三点变位计在钻孔安装并注浆后进行正常监测。

编号为 E-SPK01 的三点变位计布设于第四级台阶上,其监测的位移变化如图 7 所示,在三点变位计的 3 个测点所得的位移监测值中,位移最大值发生在孔深 20 m 处,位移量在 2017 年 8 月趋于稳定值,为 1.23 mm,位移最小值发生在孔深 7 m 处,最终位移量在 2017 年 8 月开挖结束后趋于稳定值 0.55 mm。整个监测过程中孔深 20 m 位置的坡体位移始终比其他点的位移值大。这表明该边坡开挖对坡体深部的影响较大,坡体深部岩体变形较浅层变形大。第二级台阶开挖时岩体位移增长速率较边坡的其他开挖时期大,水平深部 20 m 处大约位于边坡岩体的强风化岩层和晶屑凝灰岩岩层分界线附近,强风化岩体由于风化裂隙发育,岩体破碎,可推测该处较大岩体位移是由结构面受到开挖扰动而产生错动引起的。边坡其他台阶开挖对该监测范围的坡体变形影响相对较小,在开挖结束后各测点位移速率都收敛,岩体基本上不再有变形。

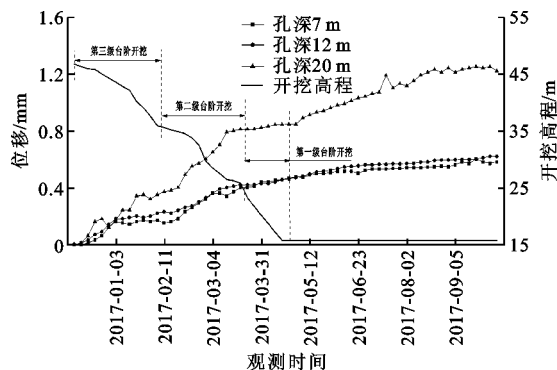


图 7 三点变位计 E-SPK01 位移过程线

Fig. 7 Displacement Process Curves by Three-point Displacement Gauge E-SPK01

编号为 E-SPK02 的三点变位计布设于第三级台阶上,其监测结果见图 8。在三点变位计的 3 个测点中,位移最大值仍发生在孔深 20 m 处,位移量在 2017 年 5 月开挖结束后较短时间内趋于稳定值 4.18 mm,位移最小值发生在孔深 7 m 处,位移量稳定在 2.36 mm。这表明边坡开挖对该边坡岩体变形在水平深部 20 m 处影响最大。边坡浅部岩体变形较小。第一、二级边坡开挖期间坡体位移均较大,开挖完成后坡体位移变化速率逐渐减缓。该位置水

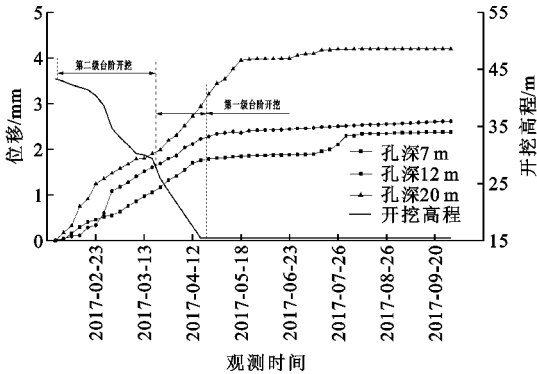


图 8 三点变位计 E-SPK02 位移过程线
Fig. 8 Displacement Process Curves by Three-point Displacement Gauge E-SPK02

平深部 20 m 处大约位于边坡岩体的晶屑凝灰岩层和强风化岩层的分界线附近。在开挖结束后各测点位移速率都收敛,岩体基本上不再有变形。

编号为 E-SPK03 的三点变位计位于第二级台阶的中部,其监测结果如图 9 所示。在三点变位计的 3 个测点中,位移最大值发生在水平孔深 20 m 处,位移量在 2017 年 8 月后趋于稳定值 4.11 mm;位移最小值发生在 7 m 处,位移量在 2017 年 5 月趋于稳定值 1.33 mm。这表明边坡开挖对岩体的变形影响在水平孔深 20 m 处相对较大,而边坡浅部岩体变形较小,受开挖扰动的影响小,这是由边坡自身结构特征决定的。由于这 3 个测点都位于晶屑凝灰岩中,凝灰岩中一般不会有斜层理的存在,岩石坚硬,很难有大的断层破碎带,所以边坡的岩体位移量也较小。在开挖结束后各测点都趋于收敛。

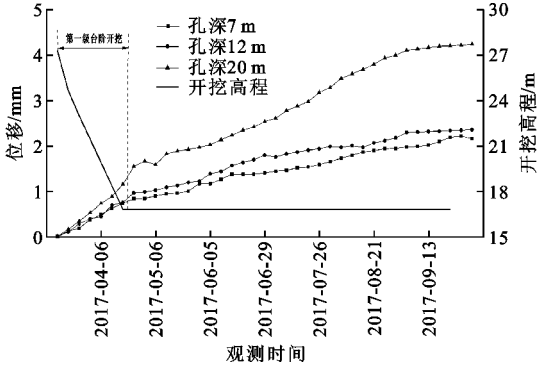


图 9 三点变位计 E-SPK03 位移过程线
Fig. 9 Displacement Process Curves by Three-point Displacement Gauge E-SPK03

3.2.2 垂直深部位移分析

垂直位移采用测斜仪进行监测,测斜管布设位置如图 3 所示,共布设 2 处测斜孔:布设于第五级台阶、孔顶口高程为 67.1 m 的测斜孔编号记为 A1,其

孔深为 22 m;布设于第三级台阶、孔顶口高程为 47.2 m 的测斜孔编号记为 B1,其孔深为 28.5 m。测斜孔用直径 110 mm 的钻孔机成孔,测斜管为高精度 ABS 材料测斜管。采用测斜仪按规范要求进行测量。在 2016 年 12 月 4 日~2017 年 6 月 17 日对 A1,B1 测斜孔进行了监测数据采集,坡体深层水平位移与孔深的关系如图 10,11 所示。

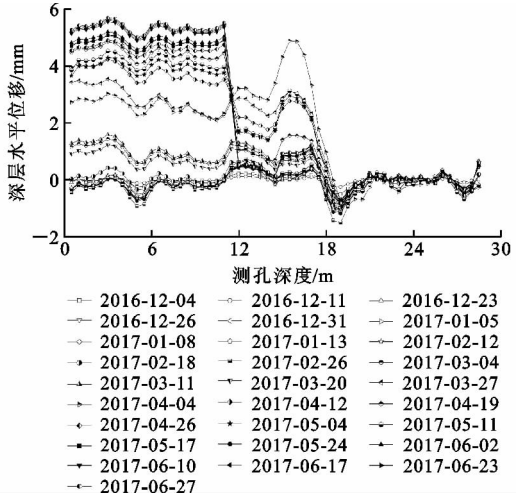


图 10 A1 孔孔深与位移关系
Fig. 10 Relationship Between Depth and Displacement of A1 Bore

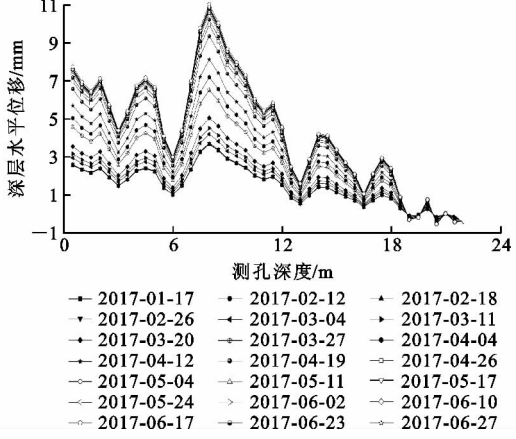


图 11 B1 孔孔深与位移关系
Fig. 11 Relationship Between Depth and Displacement of B1 Bore

从图 10 可知,A1 测斜孔在深度为 0~12 m 和 16 m 位置的位移较大,特别是在 0~12 m 内整体位移量都很大,位移量在 5.60 mm 左右。从地质断面图可知该段测斜管所在边坡岩层岩质属于含碎石黏土^[13],强度较弱,稳定性差,开挖扰动对该岩层的影响比较大,含碎石黏性土岩质容易发生滑坡灾害,为保证以后使用安全,可采取相应坡体加固措施。孔深 16 m 处位于坡体晶屑凝灰岩层和强风化岩层交

界处,该处的结构面受开挖影响也比较大,位移量最大达到 5.02 mm。

从图 11 可以看出,B1 测斜孔在孔深 8 m 处位移最大,最大值为 11.02 mm,位置高程大约 28 m。该位置在坡体的强风化岩层和中风化岩层交界面位置,结构面较发育,存在较大断层破碎带,受到开挖扰动和卸荷的影响较大,易出现岩石松动和结构面错位。孔顶位移在 8 mm 左右,位移变化速率大约为 $0.04 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$ 。

4 结 语

(1)从边坡开挖到结束,边坡深层位移先增加后收敛,最后趋于稳定。通过垂直深部位移监测数据可知,该边坡位于坡顶的含碎石黏土层存在沿该岩层下部软弱结构面整体滑动的安全隐患;边坡的开挖扰动对坡体内部岩层结构面影响较大,存在向坡体外部临空面移动的趋势。该现象表明滑坡通常以深层破坏形式出现,滑动面往往深入坡体内部,甚至延伸到坡脚以下。开挖期结束时位移达到 5.91 mm,开挖完成后位移趋于收敛,因此,边坡发育的断层、拉裂缝、开挖临空面等对边坡在施工期的稳定性产生较大影响。

(2)在边坡开挖过程中,边坡地表位移及深层水平位移在第二级边坡开挖时均变化较大,第二级台阶岩体的合理开挖是控制整个边坡稳定的关键。该处主要为强风化岩和中风化岩,由于该类岩体内部结构复杂,风化裂隙发育,岩体破碎,岩体极易发生岩性变化和破坏。因此,在边坡的开挖过程中要特别注意边坡开挖位置的岩性,若存在风化岩,开挖时要加强边坡变形监测,及时支护加固,防止出现崩塌、滑坡等地质灾害。

(3)由边坡开挖扰动对坡体表层的影响监测数据可知, X, Y, H 三个方向第五级台阶位移均较大,第五级台阶岩质为含碎石黏土,与其下部岩体相比结构完全不同,其力学性能和破坏模式也不同。该地处于东南沿海,降雨量较大,导致土层含水量增大,在雨季易诱发滑坡灾害,所以应该对含碎石黏土层采取有效加固措施。

参考文献:

References:

[1] 杜广印,吴春伟,张国柱,等.深厚海相软土临河公路扩建地基处理方法探讨[J].工程地质学报,2018,26(6):1681-1689.

DU Guang-yin, WU Chun-wei, ZHANG Guo-zhu, et al. Discussion on Deep Marine Clay Foundation Treatment Method of Riverbank Highway Extension [J]. Journal of Engineering Geology, 2018, 26(6): 1681-1689.

[2] 徐云涛,古海东,叶建龙,等.高速公路改扩建路堑高边坡支护方案优化设计[J].公路交通技术,2016,32(4):1-5.

XU Yun-tao, GU Hai-dong, YE Jian-long, et al. Optimized Design for High Slope Supporting/Protection During Highway Cutting Expanding [J]. Technology of Highway and Transport, 2016, 32(4): 1-5.

[3] 范光华.钢筋混凝土锚杆框架梁在紫坪铺公路改建工程高边坡中的应用[J].西北水电,2006(3):23-26.

FAN Guang-hua. The Frame Girder of Reinforced Concrete Anchor Bar in the High Slope of Access Road in the Application of [J]. Northwest Hydropower, 2006(3): 23-26.

[4] 朱彦鹏,蒋怀军,杨校辉,等.不同配比下机场高填方边坡重塑土变形特性研究[J].建筑科学与工程学报,2017,34(4):19-25.

ZHU Yan-peng, JIANG Huai-jun, YANG Xiao-hui, et al. Study of Deformation Characteristics of Remoulded Soil at Airport High Fill Slope Under Different Proportions [J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2017, 34(4): 19-25.

[5] 费鸿禄,苑俊华.基于爆破累积损伤的边坡稳定性变化研究[J].岩石力学与工程学报,2016,35(增2):3868-3877.

FEI Hong-lu, YUAN Jun-hua. Study of Slope Stability Based on Blasting Cumulative Damage [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2016, 35(S2): 3868-3877.

[6] 王志丰,王亚琼,谢永利.水泥搅拌桩施工引起深层土体水平位移分析[J].建筑科学与工程学报,2016,33(4):90-96.

WANG Zhi-feng, WANG Ya-qiong, XIE Yong-li. Investigation into Lateral Displacement of Subsoils Induced by Installing Soil-cement Columns [J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2016, 33(4): 90-96.

[7] 陈明,郭天阳,卢文波,等.爆破开挖对边坡岩体裂纹扩展的扰动机制[J].岩石力学与工程学报,2015,34(7):1307-1314.

CHEN Ming, GUO Tian-yang, LU Wen-bo, et al. Disturbance of Blasting Excavation on Crack Growth in Rock Slope [J]. Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, 34(7): 1307-1314.

- [8] CODEGLIA D, DIXON N, FOWMES G J, et al. Analysis of Acoustic Emission Patterns for Monitoring of Rock Slope Deformation Mechanisms[J]. Engineering Geology, 2017, 219: 21-31.
- [9] WANG Z F, CHENG W C, WANG Y Q. Investigation into Geohazards During Urbanization Process of Xi'an, China[J]. Natural Hazards, 2018, 92(3): 1937-1953.
- [10] UCHIMURA T, WANG L, YAMAGUCHI H, et al. Multi-point Monitoring of Unstable Slope with Low Cost Sensor Network[J]. Japanese Geotechnical Society Special Publication, 2015, 1(7): 29-33.
- [11] SALMI E F, HOSSEINZADEH S. Slope Stability Assessment Using Both Empirical and Numerical Methods: A Case Study[J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2015, 74(1): 13-25.
- [12] 王亚琼, 王开运, 赖金星, 等. 隧道洞口滑坡综合治理与监测分析[J]. 铁道工程学报, 2015, 32(10): 103-108.
- WANG Ya-qiong, WANG Kai-yun, LAI Jin-xing, et al. Analysis of Comprehensive Treatment and Monitoring of Landslide at Tunnel Face[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2015, 32(10): 103-108.
- [13] 陈强, 韩军, 艾凯. 某高速公路山体边坡变形监测与分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(2): 299-302.
- CHEN Qiang, HAN Jun, AI Kai. Monitoring and Analysis of Slope Deformation Along a Speedway[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(2): 299-302.
- [14] 宋修广, 张思峰, 李英勇. 路堑高边坡动态监测与分析[J]. 岩土力学, 2005, 26(7): 1153-1156.
- SONG Xiu-guang, ZHANG Si-feng, LI Ying-yong. In-situ Dynamic Monitoring and Analysis of High Slope Stability[J]. Rock and Soil Mechanics, 2005, 26(7): 1153-1156.
- [15] 张金龙, 徐卫亚, 金海元, 等. 大型复杂岩质高边坡安全监测与分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(9): 1819-1827.
- ZHANG Jin-long, XU Wei-ya, JIN Hai-yuan, et al. Safety Monitoring and Stability Analysis of Large-scale and Complicated Rock Slope[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(9): 1819-1827.
- [16] 王大伟, 沈鹏. 高速公路改扩建工程路堑高边坡支护机理与效果[J]. 长安大学学报: 自然科学版, 2017, 37(3): 39-46.
- WANG Da-wei, SHEN Peng. Support Mechanism and Effect of Cutting High Slope in Expressway Reconstruction and Expansion Projects[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2017, 37(3): 39-46.
- [17] 蔡唐涛. 降雨条件下路堑高边坡的渗流应力响应分析[J]. 筑路机械与施工机械化, 2018, 35(4): 54-58.
- CAI Tang-tao. Seepage Stress Response of High Cutting Slope Under Rainfall Condition[J]. Road Machinery & Construction Mechanization, 2018, 35(4): 54-58.
- [18] 宋胜武, 向柏宇, 杨静熙, 等. 锦屏一级水电站复杂地质条件下坝肩高陡边坡稳定性分析及其加固设计[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(3): 442-458.
- SONG Sheng-wu, XIANG Bai-yu, YANG Jing-xi, et al. Stability Analysis and Reinforcement Design of High and Steep Slopes with Complex Geology in Abutment of Jinping I Hydropower Station[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(3): 442-458.