

文章编号: 1000-7598-(2008) 06-1665-04

顺层高边坡开挖松动区研究

孙书伟^{1,2}, 马惠民², 张忠平²

(1. 铁道科学研究院, 北京 100081 2. 中铁西北科学研究院有限公司, 兰州 730000)

摘 要: 开挖顺层岩石高边坡, 往往需要进行预加固, 因而合理确定坡体开挖松动区范围便成为核心问题。根据坡体开挖后的应力和位移状态, 给出了开挖松动区的明确定义; 结合重庆万州—梁平高速公路沿线各顺层高边坡失稳实例, 对顺层高边坡开挖松动区进行了研究, 简述了松动区的特点, 分析了开挖松动区的影响因素。从岩体结构出发, 以开挖深度和岩层倾角为主控元素, 对顺层高边坡开挖松动区的长度进行了统计分析, 结果表明: 岩层倾角在 15°~30°的砂泥岩顺层高边坡最易产生开挖失稳, 且松动区长度与开挖深度有关, 二者比值较为集中地分布在 2~5 之间。

关 键 词: 顺层高边坡; 开挖深度; 松动区长度; 影响因素; 岩层倾角

中图分类号: U 213.13

文献标识码: A

Study on disturbed zone of cutting bedding high rock slope

SUN Shu-wei^{1,2}, MA Hui-min², ZHANG Zhong-ping²

(1. China Academy of Railway Sciences, Beijing 100081, China; 2. Northwest Research Institute Co., Ltd. of C R E C, Lanzhou 730000, China)

Abstract: To cut a bedding high rock slope, usually it is necessary to take some reinforced structures in advance. How to determine the range of disturbed zone properly is a core problem. According to the stress condition and displacement condition after cutting a slope, the disturbed zone can be defined. Taking the bedding high rock slopes of Wanzhou-Liangping Expressway for example, mechanical properties and influential factors of disturbed zone are introduced. In addition, the disturbed zone of bedding high rock slope is studied on the basis of rock mass structure. It is most unstable when the inclination of rock stratum is between 15°—30°; also there is a relation between length of disturbed zone and depth of cutting. The results show that the ratio of length of disturbed zone to depth of cutting is situated in between 2 and 5 to most sandstone and mudstone bedding high rock slopes.

Key words: bedding high rock slope; depth of cutting; length of disturbed zone; influential factors; inclination of rock stratum

1 引 言

自然高边坡通常由力学性质不同的岩土材料构成, 在漫长的地质构造作用下, 逐渐形成了复杂的坡体结构和岩体结构。于是, 自然的岩石高边坡经过人工的开挖, 常常会表现出十分复杂的力学特性。而对于高边坡的开挖, 人们所关注的核心问题便是高边坡开挖后所产生的松动范围, 只有确定了开挖的松动范围, 才能据此选择合理的工程措施。

关于边坡开挖松动区的研究, 国外的报道比较

少, 而研究报道较多见的一般是隧道工程中的开挖松动区问题^[1,2]。在国内, 文献[3]从岩土材料的强度准则出发, 给出了坡体稳定系数的一种表示方法, 提出了在应力分析的基础上, 利用坡体内从上而下不同参考线段的稳定系数变化曲线来分析坡体开挖松动区; 文献[4]介绍了使用 CSD-60 型滑动变形计在三峡工程永久船闸北坡进行了现场监测试验的有关成果, 指出边坡岩体的变形具有明显的分区性, 主要变形区被定义为边坡岩体松动区; 并根据对试验结果的分析得到了边坡岩体松动区的范围及变形

特征;文献[5]则根据试验观测资料,并结合适当的有限元计算分析,研讨了三峡船闸高边坡岩体因开挖卸载及应力调整而产生的松动区及其性状,进而为边坡的稳定性及加固方案的研究提供了重要依据;文献[6]阐述了在岩石边坡位移反分析中如何考虑岩体松动区,介绍了松动区的有关物理力学性质以及在计算模型中的考虑方法。

开挖松动区的长度是设计的依据。实际设计时,很多部门往往凭经验选取某一个长度来进行支挡结构设计,如铁路设计一般取 50 m,对各类高边坡均取一个数值,显然这种做法太粗糙。因此,本文根据坡体开挖后的应力和位移状态,给出了开挖松动区的明确定义,依托实际工点对其进行了研究。

2 开挖松动区的概念

自然斜坡在经过人类开挖作用后,原有的力学平衡状态被打破,而重新建构新的力学平衡体系,应力和位移就会发生调整。

假定岩土体为弹塑性材料,坡体失稳后,根据坡体内应力和位移的调整变化一般可将坡体分成 4 个区域,如图 1 所示:(1)原始应力区,即不受开挖影响的区域;(2)开挖影响区(或称松弛区),坡体的变形局限在弹性范围内。坡体的开挖终究会对边坡体的稳定性产生不利影响,笔者称因开挖引起的坡体内安全度减小的区域为开挖影响区;(3)开挖松动区,边坡体的变形已经超出了弹性变形的范围,出现了塑性破坏的区域;(4)开挖滑动区(也称滑动破坏区),坡体内出现了贯通的塑性流动区,位移也呈现明显的不连续面(即滑面),坡体内产生整体滑移的区域(即滑体)。显然,松动区和滑动区均位于影响区的内部,而滑动区则是在松动区范围内形成,本文在处理实际问题时,认为裂缝范围以内为松动区,而发生整体滑动破坏的区域为滑动破坏区,实际工程中二者的范围比较接近。

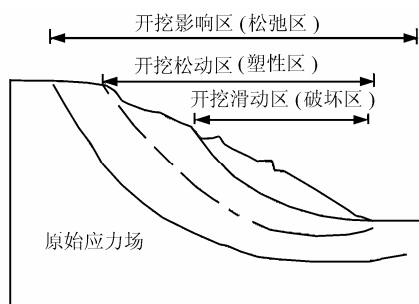


图 1 坡体应力和变形分区
Fig.1 Stress and deformation zoning map in a slope

3 地质特征及主要破坏类型

关于路堑高边坡的高度,在公路、铁路路基规范中并没有明确的规定,通常认为高度大于 30 m 的岩质边坡须做特殊设计。因此,在文中将路堑边坡高度大于 30 m 的列为高边坡。为安全稳妥起见,将部分高度低于 30 m,但地质条件较差的路堑边坡工点,也列入高边坡范畴。岩层走向和倾向与边坡走向和倾向一致的边坡称为顺层或顺倾边坡。实际工程中,常将走向与岩层走向夹角小于 20° 、倾向一致的边坡视为顺层边坡。

万州—梁平高速公路 k38~k50 为顺层高边坡路段,位于四川盆地东北边缘的中低山丘陵区,路线局部越过山重丘区,以风化剥蚀地貌为主,坡体多由砂、泥岩组成,发育在褶皱比较舒缓、断裂不十分强烈的地段,山体具有单斜构造特点,开挖坡体常常会切断一层或多层软弱层,故产生了多达 26 处的多层多级滑动顺层岩石滑坡,典型地质剖面见图 2,统计如表 1 所示。

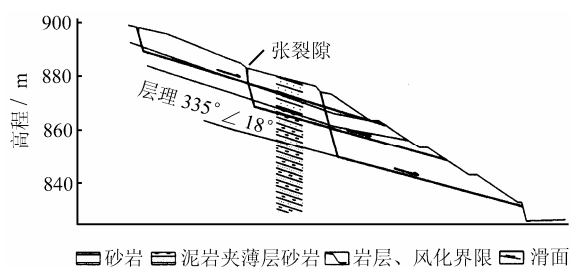


图 2 万州—梁平高速公路安龙滑坡地质剖面图
Fig.2 Geologic section of Anlong landslide

4 顺层高边坡开挖松动区研究

本节通过分析上述 26 处顺层高边坡破坏变形工点,对开挖松动区进行研究,在分析开挖松动区时,作了以下几点假定:

(1) 对于开挖完成后并未变形破坏的工点,由于没有及时支护,后期降雨诱发而引起松动破坏,本文仍认为松动破坏主要由开挖引起。

(2) 对于多级滑动工点,前级发生滑动破坏后,若后级滑坡的滑带系沿同一软弱带生成,且后缘裂缝已贯通并下错,开挖松动区统计至后级滑坡的后缘。

(3) 对于开挖后只是引起了边坡变形的工点,在地表上可以看到裂缝,松动区以最远的裂缝为界。

表 1 顺层高边坡工点统计表
Table 1 Statistics table of bedding high rock slopes

工点 编号	工点 里程	边坡开挖 深度/m	特征	
			地质特征	变形特征
1	k4+600~+700 左坡	10	出露基岩为泥岩夹砂岩，表层有 1~2 m 的残坡积层；岩层产状为 310°~320°∠8°~10°。	剪出口在路基面标高处，滑坡后界距路基中线约 47.4 m。
2	k 40+600~k41+050	10	页岩夹灰岩，上覆少量残坡积物；岩层产状为 320°∠16°。	边坡开挖后页岩产生顺层滑动，牵引左侧坡体 150 m 远。
3	k42+390~+630 (安龙滑坡)	15.5	粉砂岩、泥岩及砂岩；岩层产状为 337°∠17°~20°。	后缘最远 76 m 处可见拉张陷落带，逐渐向后方延伸。
4	k43+050~+300	30	粉砂岩、砂岩夹炭质页岩；岩层产状 20°∠17°。	前缘到后缘长约 86.6 m，宽约 250 m。
5	k44+500~+600	13.5	粉砂岩、砂岩、泥岩夹炭质页岩；岩层产状为 345°∠15°~17°。	沿边坡纵向滑动破坏长度 165 m。
6	k45+200~+300	11	泥岩夹炭质页岩、砂岩；岩层产状为 330°~345°∠15°~17°。	滑坡引起的地表裂缝距路基中线 57 m。
7	k45+860~+942 (吴家桥西滑坡)	29	泥岩、砂岩；岩层产状为 330°~345°∠19°。	牵引裂缝在边坡上最远距路基中线 103 m。
8	k45+942~k46+060	13	泥岩、砂岩互层结构夹炭质页岩；岩层产状为 345°~360°∠18°~21°。	牵引裂缝在边坡上最远距坡脚 161 m。
9	k45+020~+200	16	泥岩、砂岩、粉砂岩夹炭质页岩、砂岩；岩层产状为 330°~345°∠22°~23°。	边坡沿老滑带发生顺层滑动，变形范围约 190 m。
10	k46+675~+740 (大荒田东 II)	12	泥岩、炭质页岩、砂岩；岩层产状为 330°~360°∠20°~27°。	滑坡后缘距路基中线 57 m。
11	k46+730~+780 (大荒田东 I)	20	泥岩、砂岩；岩层产状为 320°~335°∠22°~25°。	滑坡后缘距路基中线 71 m。
12	k46+800~+900 (大荒田滑坡)	20	泥岩、薄层页岩、砂岩；岩层产状为 322°~337°∠26°~30°。	滑坡后缘至路基中线 123 m。
13	k47+00~+135	32	泥岩、砂岩；岩层产状为 320°~335°∠22°~25°。	后缘拉张裂缝距路基中线约 85 m 左右。
14	k47+670~+810	10	泥岩；岩层产状为 330°∠22°。	后缘拉张裂缝距路基中线约 67 m。
15	k47+985~k48+035	14	泥岩；岩层产状为 330°~340°∠23°~24°。	后缘拉张裂缝距路基中线约 52 m 处。
16	k48+350~+435	25	泥岩；岩层产状为 330°~340°∠23°~24°。	前缘到后缘长约 170 m，两侧宽 80~90 m。
17	k48+400~+500	25	泥岩、砂岩；岩层产状为 320°~326°∠26°~28°。	后缘拉张裂缝距路基中线约 55 m。
18	k48+705~+860	20	泥岩、砂岩；岩层产状为 335°∠27°~33°。	后缘拉张裂缝最远发展到施工主便道以上 70 m 处。
19	k48+850~+980	30	泥岩、砂岩；岩层产状为 340°∠25°~28°。	后缘裂缝距路基中线约 70.5 m。
20	k49+150~+300	20	泥岩、炭质页岩和砂岩；岩层产状为 320°~335°∠25°~30°。	后缘裂缝距路基中线 80 m。
21	k49+360~+465	13	砂岩、泥岩；岩层产状为 325°~335°∠25°~26°。	后缘裂缝距路基中线约 50 m。
22	k49+520~+680	38	砂岩、泥岩；岩层产状为 320°~326°∠26°~28°。	后缘拉张裂缝最远发展到距路基中线约 106 m。
23	k49+950~+k50+050	26	泥岩、灰黑色炭质页岩（呈泥状）和砂岩；岩层产状为 305°~320°∠28°~30°。	后缘距路基中线 70 m，滑坡宽度约 72 m。
24	k51+050~+100 (金竹林隧道出口)	18.5	泥岩、砂岩；岩层产状为 320°∠30°。	后缘大约距洞口 78 m，松动区宽度约为 70 m。
25	k53+070~+120	15	砂岩；岩层产状为 330°∠41°。	后缘距路基中线约 50 m。
26	k59+026~+100	25	泥岩、砂岩；产状为 340°∠35°~41°。	后缘距路基中线约 80 m。

4.1 顺层高边坡开挖松动区的特点

综合分析现场资料成果，顺层高边坡开挖松动区的特点可以归纳如下：

(1) 松动区表现为坡体沿层面的滑动和张性结构面的错动，岩体的完整性下降（岩体扩容）^[6]，在松动区形成过程中，岩块的强度和变形性质受影响很小。

(2) 坡体的变形主要由松动区的变形构成，而松动区的变形包括塑性剪切变形和结构面张开引起的位移。

(3) 松动区主要在开挖过程中形成，并受时效因素的影响。

4.2 顺层高边坡开挖松动区的影响因素

边坡的变形是各种因素综合作用的结果，任何一种因素对边坡变形的影响同时受到其他因素的制约。顺层岩石高边坡的变形模式及变形规模主要取决于边坡岩体结构、构造面与开挖临空面之间的组合关系，在由砂岩、泥岩相间组成的顺层边坡中，

开挖对边坡松动区的影响主要表现在两个方面：

(1) 开挖边坡本身会切断岩层间的层间错动带或软弱夹层。一般来讲，开挖边坡深度愈大，切断层间错动带的层数愈多，边坡的变形底界愈深，松动范围愈大。

(2) 从力学角度讲，边坡的开挖破坏了坡体原有的力学平衡条件，导致坡体应力重分布，边坡产生松动。开挖深度愈大，松动区的范围也就愈大。

影响边坡变形的因素较多，开挖松动区的范围一方面与软弱夹层的分布和强度有关；另一方面也与岩层的层厚、倾角、节理的发育情况等有关。除此之外，开挖方式、开挖坡角、降雨等气象条件对松动区都有较大的影响。本文以开挖深度和岩层倾角为主控元素，对顺层高边坡开挖松动区的长度进行了统计分析。

4.3 顺层高边坡开挖松动区的长度

4.3.1 开挖深度与松动区长度的关系

从图 3 可以看出，当边坡开挖深度 H 在 10 m

以下时, 边坡基本不会发生整体的松动破坏。在所统计的 26 个发生破坏变形的高边坡工点中, 松动区的长度 L 与 H 有一定关系, L/H 的值基本落在区间 $(2, 8)$ 内, 且有 19 个工点 $L/H \in (2, 5)$ 。此外, 需特别指出, 在确定开挖松动区的长度时, 首先应该区分是否有老坡体病害的存在, 无论边坡开挖深度多大, 均有可能引起老病害体的整体复活, 如 9[#] 工点, 虽然开挖深度仅为 16 m, 但由于引起了老滑坡的复活, 其松动区长度 L 达到了 190 m。

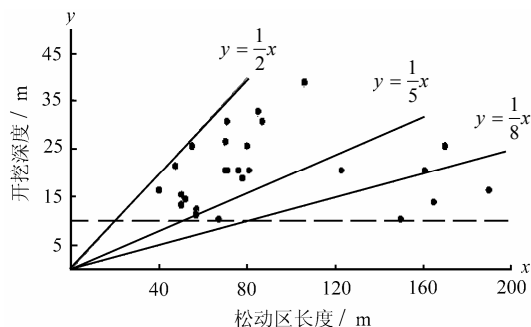


图3 开挖深度与松动区长度关系图

Fig.3 Graph of a relation between length of disturbed zone and depth of cutting

4.3.2 倾角与松动区长度的关系

从图 4 可以看出, 倾角在 15° 以下的顺层高边坡基本可以自稳, 这是由于岩层倾角小, 剩余下滑力较小而不足以切断软弱夹层所致; 当顺层高边坡倾角在 30° 以上时, 由于岩层倾角接近自然坡角, 且施工往往沿岩层面刷方, 从而不会剪断太多的岩层, 故这类高边坡的破坏也较少; 倾角在 $15^\circ \sim 30^\circ$ 之间稳定性最差, 往往会由于开挖而引起边坡的顺层滑动, 现场可以看到, 滑动依附面多为软岩的顶层。

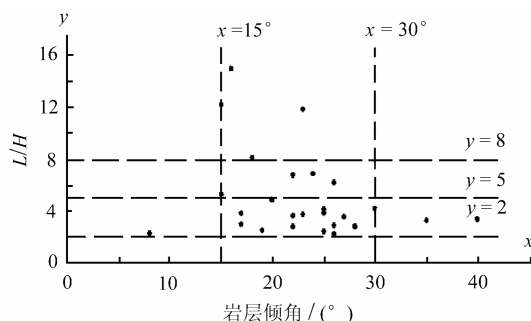


图4 岩层倾角与松动区关系图

Fig.4 Graph of a relation between length of disturbed zone and inclination of rock stratum

5 结 语

岩体开挖引起的松动现象早已为岩土工程界所

熟悉, 但是关于松动区的定义、范围和特性等问题直到近年来才逐步受到关注和重视。本文结合重庆万州—梁平高速公路沿线各实际破坏变形的顺层高边坡工点对顺层高边坡开挖松动区进行了研究, 简述了松动区的特点及影响因素, 同时也对顺层高边坡松动区的长度进行了统计分析, 并研究了岩层倾角对斜坡稳定性的影响, 可供今后类似工程参考、借鉴。

参 考 文 献

- [1] SHEN B, BARTON N. Disturbed zone around tunnels in jointed rock masse[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts*, 1997, 34 (1): 117—125.
- [2] STO T, KIKUCHI T, SUGIHARA K. In-situ experiments on an excavation disturbed zone induced by mechanical excavation in Neogene sediment-ary rock at Tono mine, central Japan [J]. *Engineering Geology*, 2000, 56(1): 97—108
- [3] 肖世国, 夏才初, 周德培. 开挖边坡松动区的一种定义及分析方法[J]. *同济大学学报*, 2005, 33(4): 451—455.
XIAO Shi-guo, XIA Cai-chu, ZHOU De-pei. A definition and analysis method of relaxation zone in cutting slope[J]. *Journal of Tongji University(Natural Science)*, 2005, 33(4): 451—455.
- [4] 邓建辉, 王浩, 姜清辉, 等. 利用滑动变形计监测岩石边坡松动区[J]. *岩石力学与工程学报*, 2002, 21(2): 180—184.
DENG Jian-hui, WANG Hao, JIANG Qing-hui, et al. Monitor of disturbed zone for rock slope by sliding deformer[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2001, 21 (2) : 180—184.
- [5] 夏熙伦, 周火明, 盛谦, 等. 三峡工程船闸高边坡岩体松动区及其性状 [J]. *长江科学院院报*, 1999, 16(4): 1—5.
XIA Xi-lun, ZHOU Huo-ming, SHENG Qian, et al. Excavation of loosened zone and mechanical behaviors of rock mass of lock's high slope of TGP[J]. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 1999, 16 (4): 1—5.
- [6] 邓建辉, 李焯芬, 葛修润. 岩石边坡松动区与位移反分析 [J]. *岩石力学与工程学报*, 2001, 20 (2): 171—174.
DENG Jian-hui, LEE C F, GE Xiu-run. Disturbed zones and displacement back analysis for rock slopes[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2001 20(2):171—174.