

鲤鱼塘水库溢洪道边坡稳定性的岩体结构分析*

宋玉环^{①②} 黄润秋^① 巨能攀^① 赵建军^① 许兵^②

(^①成都理工大学地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室 成都 610059)

(^②中国科学院地质与地球物理研究所 北京 100029)

摘要 由侏罗系千佛岩组砂岩、泥岩及炭质页岩组成的软硬相间的互层边坡,受不同岩层工程特性的影响,开挖引起不同部位岩体产生拉裂、松弛及沿软弱结构面的蠕滑等变形。为分析地层岩性对边坡稳定性的影响,对侏罗系千佛岩组地层进行工程地质岩组划分,分为薄层泥岩与中薄层砂岩互层岩组、巨厚层砂岩夹中厚层砂岩和薄层泥岩岩组。在此基础上,通过对边坡岩体结构的详细研究,确定了控制边坡稳定性的结构面为层间软弱夹层,进而对边坡表层碎裂岩体、结构面组合形成的块体稳定性进行分析,结果表明,边坡浅层岩体整体稳定性差,局部处于极限平衡状态,深部岩体稳定性相对较好,边坡稳定性的岩体结构分析结果与边坡变形状况吻合。

关键词 边坡 工程地质岩组 岩体结构 稳定性

中图分类号:P641 文献标识码:A

ROCK MASS STRUCTURE ANALYSIS OF SPILLWAY SLOPE STABILITY AT LIYUTANG RESERVOIR

SONG Yuhuan^{①②} HUANG Runqiu^① JU Nengpan^① ZHAO Jianjun^① XU Bing^②

(^①State Key Laboratory of Geo-hazard Prevention and Geo-Environment Protection, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059)

(^②Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029)

Abstract Slope interlayered by sand rock, mud rock and macker in Qianfuyan Formation In the Middle Jurassic generated deformation, such as cracks, relaxation, and creeping along soft discontinuities. Engineering geology groups of rock masses of Qianfuyan Formation in the Middle Jurassic was divided into group of thin layer mudstone and thin layer sandstone, group of thick-bedded sandstone with middle layer sandstone and thin layer mudstone interlayer. According to detailed study of rock mass structure, soft interlayer was confirmed as key discontinuity for slope stability, and then the stability of superficial slope in cataclastic texture rock mass and blocks combined by discontinuities were analyzed, which indicated that superficial slope stability was worse, and the stability of large scale block was better. The result accorded with the deformation of slope.

Key words Slope, Engineering geology groups of rock masses, Rock mass structure, Slope stability

* 收稿日期: 2009-09-10; 收到修改稿日期: 2010-03-09.

第一作者简介: 宋玉环, 水文地质工程地质专业. Email: gcdz@mail.igcas.ac.cn

1 引言

工程岩体稳定性的结构分析,是从宏观上把握工程岩体稳定程度和趋向,对岩质边坡稳定性分析具有重要意义。岩体中的结构面是岩体中力学强度相对薄弱的部位,它导致岩体力学性能的不连续性、不均一性和各向异性,在很大程度上决定了岩体的介质特征和力学属性,对岩体在一定荷载条件下的变形破坏方式起着重要的控制作用。因此查明工程岩体的结构性状,是岩质边坡稳定性评价的基础。靠近地表的岩体结构受外营力改造强烈,结构面既是风化和地下水活动的重要通道,又是外营力改造的对象。岩体中的软弱结构面,常成为决定岩体稳定性的控制性结构面^[1,5,6]。

鲤鱼塘水库位于长江北岸支流小江的二级支流桃溪河上,以灌溉、供水为主,兼顾防洪与发电,溢洪道是水库的关键工程之一,其稳定性状况直接关系到工程建设和运营。溢洪道边坡岩体以粉砂质泥岩、泥质粉砂岩及炭质页岩夹层为主,边坡岩体受风化作用强烈,最大风化深度 25m,炭质页岩破碎。

2 边坡工程地质岩组划分

工程地质岩组是按工程地质观点研究地层岩性的重要理念,主要展示工程区岩体介质的性状及其展布,为岩体结构分析提供重要的物质基础^[2]。从地层岩性转换成工程地质岩组就是基础工作之一,尤其是沉积岩、变质岩而言,更为重要。

侏罗系中统千佛岩组是一套陆相中湖沼相沉积物。沉积环境多变,岩性复杂,岩层变幅明显,且具有一定的沉积韵律,巨厚层长石石英砂岩的多次出现,就是明显的标志,构成较为复杂的陆相碎屑沉积建造。在进行岩组划分时,应充分考虑建造特性。工程地质岩组划分的依据主要有:(1)岩性,区分岩体坚硬程度,如砂岩中的炭质页岩、炭质泥岩为软弱岩带;(2)岩层的组合,岩性多种,如岩性组合,互层、夹层或均质,可形成各种特征岩性的组合;(3)岩层厚度,岩层的厚薄关系到岩体的完整性。

本文将研究区侏罗系中统千佛岩层(J2q)由上而下划分 7 个工程地质岩组(表 1)。

表 1 侏罗系中统千佛岩组工程地质岩组及其特征表

Table 1 Engineering geology groups of rock masses of Qianfuyan Formation In the Middle Jurassic

序号	岩组名称	厚度/m	基本特征	研究区相对应的岩性岩段
1	中薄层泥岩夹砂岩岩组	8~10	(1)层薄; (2)泥岩含砂质有变化; (3)砂岩粒度有变化	J2q9:灰色泥岩、粉砂质泥岩夹中薄层粉砂岩,厚 8.6~10.0m
2	厚层砂岩夹薄层泥岩岩组	55~70	(1)砂岩层厚,泥岩层薄; (2)砂岩有粉砂岩; (3)泥岩中有砂质泥岩	J2q8:灰色、灰绿色厚层砂岩、粉砂岩夹深灰色薄层粉砂质泥岩及泥岩,底部以浅灰绿色巨厚层中细粒长石石英砂岩为特征,厚 55.8~70.4m
3	薄层泥岩与中薄层砂岩互层岩组	70	(1)层薄; (2)泥岩与砂岩互层; (3)中部有少量中厚层长石石英砂岩	J2q7:以深灰色薄层粉砂质泥岩与灰色中薄层泥质粉砂岩及砂岩互层为特征,中部夹灰绿色中薄层条带状砂岩及少量浅灰绿色中厚层中细粒长石石英砂岩,顶部为深灰色泥岩,厚 70.6m
4	薄层泥岩夹砂岩岩组	60	(1)层次变化大; (2)岩性亦有所变化; (3)其中偶夹生物碎屑	J2q5:深灰色薄层粉砂质泥岩、泥岩夹灰色中厚层砂岩及中薄层粉砂岩,上部夹数层灰黑色炭质页岩,断续夹介壳砂岩及生物碎屑灰岩,厚约 60.2m
5	厚层砂岩夹中薄层杂色泥岩岩组	62	(1)砂岩层厚,泥质层薄; (2)顶部夹介壳灰岩; (3)底部夹数层介壳砂岩	J2q3:灰色厚层砂岩、粉砂岩夹杂色泥岩,近底部夹数层介壳砂岩,近顶部夹介壳灰岩,厚 62.1m
6	中薄层泥岩夹中厚层砂岩岩组	20	(1)层次较薄; (2)泥岩含砂质或蚀变瘤状物; (3)砂岩稳定	J2q2:灰色、灰绿色泥岩、粉砂质泥岩夹灰色中厚层砂岩,其中泥岩以含砂质或钙质瘤状物为特征,厚 20.5m
7	巨厚层砂岩夹中厚层砂岩,薄层泥岩岩组	60	(1)长石石英砂岩层厚 1m 以上;	J2q1:浅灰绿色巨厚层中细粒长石石英砂岩夹灰色中厚~厚层粉砂岩及少量深灰色薄层泥岩,厚 59.9m
		20	(2)4 段仅中部夹薄层泥岩;	J2q4:以浅灰绿色巨厚层中细粒长石石英砂岩为主,中部夹深灰色薄层粉砂质泥岩及泥质粉砂岩,厚 20.8m
		60	(3)6 段中部夹少量泥岩	J2q6:浅灰绿色厚层~巨厚层中细粒长石石英砂岩夹深灰色薄层粉砂质泥岩及泥质粉砂岩,中部夹少量泥岩,厚 59.9m

溢洪道边坡所在岩组为第三(J2q7)和第七岩组(J2q6),均为厚层砂岩夹薄层泥岩。岩性在剖面上变化较大,成层性较好,层厚变化突出。受构造作用影响,硬质岩层中的软岩夹层形成层间错动带、泥化夹层等软弱结构面,这些软弱结构面形成控制边坡整体稳定性的重要结构面^[8,9]。

3 边坡岩体结构基本特征

研究区地质构造背景为扬子断块区,按传统观念,它是活化的地台区,经受一定的构造作用,早白垩世末的燕山运动奠定了本区的基本构造格局,以褶皱为主,兼有一定断裂作用;梳状褶皱为褶皱的基本特征,褶皱形成过程中层间错动明显;断裂规模较小,延伸一般不长^[3]。

工程区的结构面总体上有3种主要类型:(1)原生结构面:层面、层间软弱夹层;(2)构造结构面:层间错动带、断层及节理;(3)次生结构面:风化裂隙和卸荷裂隙。

其中,原生结构面和层间错动带所占比例最大且贯通性好,与开挖面斜交倾向坡外,可形成岩体变形的底滑面,其他各类结构面规模较小,但组合可形成变形破坏的侧边界和后缘边界。可见,控制边坡稳定性的结构面为层面、软弱夹层和层间错动面(带),结合工程地质岩组分析,溢洪道边坡岩体为软弱结构面发育的软硬相间的互层状结构类型,它控制着边坡稳定程度和变形破坏方式。

4 边坡稳定性的岩体结构分析

4.1 主控结构面与边坡关系

溢洪道边坡按倾向将边坡分为I、II、III区,倾向分别为74°、39°、40°~80°(图2)。边坡主要发育3组优势结构面(表2),分别为^[3]:

(1)沿炭质页岩、泥岩及其与砂岩接触面发育的层间软弱夹层,厚度0.1~1m不等,产状N60°E/NW∠21°,可能形成块体的潜在滑动面;

(2)顺河向卸荷裂隙(LX1),走向与坡面近平行,倾向河谷,N20°W/NE∠86°可形成块体的后缘切割面;

(3)走向与坡面近垂直倾向下游节理(LX2),N58°E/SE∠56°,可形成块体侧裂面。

由图3可见,II区由层面和Lx1组合形成的块



图1 开挖面分区图

Fig. 1 Zone map of slope surface excavated

表2 优势结构面及坡面

Table 2 Dominate structural planes and slope surface

编号	产状	地质描述	备注
1	N60°E/NW∠21°	层面	可能形成块体的潜在滑动面
2	N20°W/NE∠86°	Lx1;走向与坡面近平行的光面	可形成块体的后缘切割面
3	N58°E/SE∠56°	Lx2;走向与坡面近垂直倾向下游的节理	可形成块体的侧裂面
4	N16°W/NE∠63°	I区坡面	
5	N51°W/NE∠63°	II区坡面	

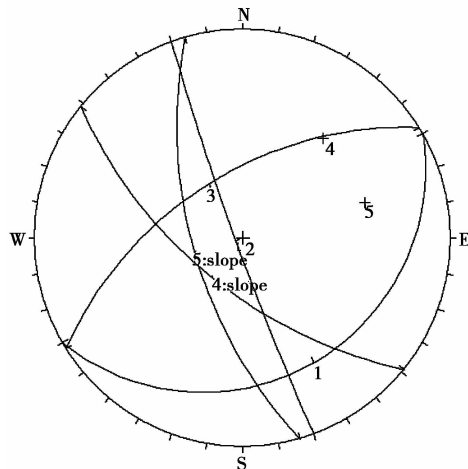


图2 优势结构面赤平投影图(上半球投影)

Fig. 2 Stereographic polar projection of dominate structural planes and slope surface

体存在向临空面和层面倾向方向滑动的可能性,Lx2与其余两组结构面单独组合不构成潜在滑动块体,它切割岩体形成块体的边界条件。

由上述分析可知,层面构成底滑面的可能性最大,而层间软弱夹层是岩体中最薄弱的部位,构成边坡失稳底滑面的结构面最可能是炭质页岩或砂岩间所夹的泥质砂岩条带。因此查明层间软弱夹层(炭

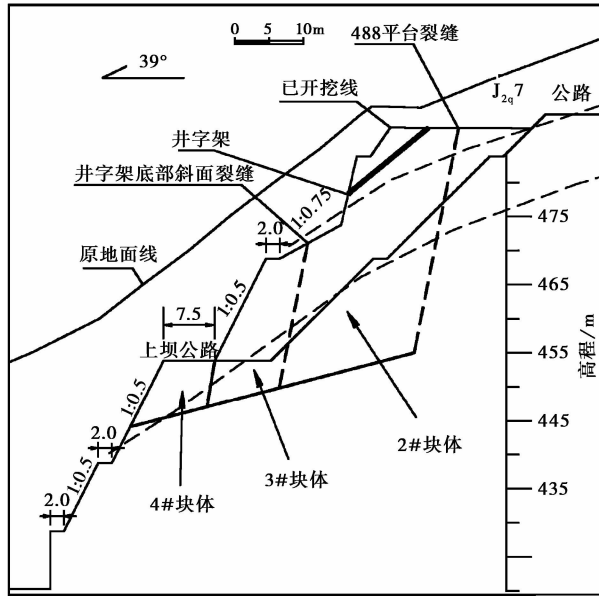


图3 I区典型工程地质剖面图

Fig. 3 Engineering geological profile of Section I

质页岩、粉砂质泥岩条带)的分布位置及其在坡体内部的延展情况对分析边坡变形破坏的边界条件具有重要意义。

4.2 组合块体的稳定性分析

坝址区岩性具有软硬相间的特征,在构造影响下形成了一系列层间错动带,研究区层间错动带沿炭质页岩和泥质粉砂岩夹层发育。

开挖边坡出露炭质页岩,厚度0.1~1m不等,炭质页岩内层间错动现象发育。泥质砂岩夹层发育,厚度10~50cm,层间错动现象明显,错动带内发育强风化砂岩片石夹泥和岩屑,间距30~100cm。边坡共发育10条软弱夹层,其中炭质页岩夹层6条,平均厚度10~30cm,最厚达1m,沿炭质页岩早期层间错动现象发育,边坡中部3条炭质页岩夹泥严重,表现为泥化夹层。其余4条为强风化炭质和砂质泥岩。它们与构造结构面组合形成大量块体。从宏观结构分析,这些组合块体(图4)稳定状态较差,开挖后边坡即产生了明显的变形现象,且这一结论得到计算结果的验证。

计算结果表明:(1)由494公路出露裂缝控制的大型块体(1#块体)和488平台裂缝控制的块体(2#块体)天然状态下稳定性较好,降雨条件下处于极限平衡状态,可能发生变形;(2)上坝公路马道下方由三组结构面和I区、II区临空面组合形成的块体(4#块体)、井字梁坡面块体(3#块体)的稳定性

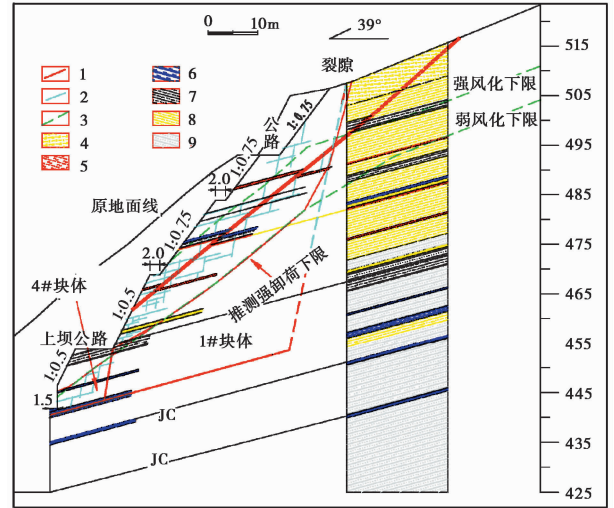


图4 II区典型工程地质剖面图

Fig. 4 Engineering geological profile of Section II

1. 断层带;2. 结构面;3. 风化界限;4. 块碎石土;5. 泥化夹层;
6. 炭质页岩;7. 灰黑色泥岩;8. 灰绿色泥岩;9. 砂岩夹泥岩条带

差,天然状态下处于极限平衡状态,降雨条件下,块体稳定性系数0.86,将沿滑面发生滑动。计算结果与边坡已有的变形特征相吻合。

4.3 边坡表层岩体稳定性分析

边坡为软弱夹层发育的软硬相间型斜向边坡,岩体卸荷水平深度为22m,强风化水平深度为10~25m,弱风化水平深度达33m。溢洪道边坡的坡体结构特征复杂,存在多条软弱夹层,开挖面附近岩体强风化强卸荷,呈碎块-碎裂结构。边坡浅表层的变形主要发生在I区强风化强卸荷带内,最深层破坏可能为破碎岩体沿强风化强卸荷带边界(图4)滑动。

根据极限平衡稳定性分析结果,稳定性系数最小的情况为坡体从上坝公路平台剪出,开挖后天然状态(无水)下坡体处于极限平衡状态,降雨条件下,坡体的稳定性系数为0.9~1.0之间。

根据计算结果分析,强风化强卸荷带破碎岩体边坡稳定性受开挖坡比控制作用明显,494公路以上开挖坡比为1:0.75,稳定性较好;以下开挖坡比为1:0.5,稳定性系数较差,产生变形破坏的可能性较大,边坡实际上也出现了明显的变形。

显然,浅层边坡稳定性经比深层边坡的稳定性更差,外动力地质作用及其演化(风化、卸荷)成为影响边坡稳定性的重要因素。

5 结 论

(1) 鲤鱼塘水库溢洪道边坡是由砂岩、泥质粉砂岩、炭质页岩及粉砂质泥岩等软硬相间岩层组成,边坡发育多条贯通坡体的层间软弱夹层,可分成7个工程地质岩组,每个岩组中均含有薄层的泥岩或中薄层泥岩,这些软弱结构面与卸荷裂隙组合形成大量潜在不稳定块体。

(2) 综合边坡的岩体结构特征、结构面组合形态等分析,边坡浅层岩体整体稳定性差,局部部位处于极限平衡状态,产生明显变形。

(3) 在边坡开挖的情况下,由于岩层的工程地质特性不同,岩体产生差异卸荷回弹,块体沿软弱夹层产生向倾向方向和坡外的蠕动变形,内部拉裂缝逐渐贯通至地表,在爆破、降雨等因素影响下,底滑面上的剪应力达到临界值,块体可能产生整体失稳。

致 谢 本文感谢中国科学院地质与地球物理研究所刘英高级实验师的支持与帮助。

参 考 文 献

- [1] 张倬元,王士天,王兰生. 工程地质分析原理[M]. 北京:地质出版社,1994.
Zhang Zhuoyuan, Wang Shitian, Wang Landsheng. Principles of Engineering Geology. Beijing:Geologic Publishing House, 1994.
- [2] 孙玉科. 工程地质学发展与创新思路探讨之四—工程地质岩组划分的学术思路[J]. 岩土工程界, 2002, 5(11): 15~16.
Sun Yuke. Methods on Engineering geology strata classification-Discussion on engineering geology development and innovation

- thoughts(4) Geotechnical domain, 2002, 5(11): 15~16.
- [3] 赵建军, 黄润秋, 巨能攀. 某水库溢洪道边坡变形破坏特征及治理对策研究[J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 2007, 34(2): 190~195.
Zhao Jianjun, Huang Runqiu, Ju Nengpan. Deformation character and the control method of spillway slope at some reservoir. Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition), 2007, 34(2): 190~195.
- [4] Huang Runqiu, et al. Deformation mechanism and stability of a rock slope[J]. Journal of China University of Geosciences, 2007, 18(1): 77~84.
- [5] 谷德振. 岩体工程地质力学基础[M]. 北京:科学出版社, 1979.
Gu Dezhen. Engineering geology and mechanics of rock mass. Beijing: Science Press, 1979.
- [6] 殷跃平. 三峡库区边坡结构及失稳模式研究[J]. 工程地质学报, 2005, 13(2): 145~154.
Yin Yueping. Human-cutting slope structure and failure pattern at the Three Gorges Reservoir. Journal of Engineering Geology, 2005, 13(2): 145~154.
- [7] 黄润秋, 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 Runqiu, Li Feng, Chen Deji, et al. Formation mechanism of unloading fracture zone of high slope and its engineering behaviors. Journal of Engineering Geology, 2001, 9(3): 227~232.
- [8] 赵晓, 等. 层间软弱夹层发育的切向边坡失稳模式及稳定性研究[J]. 地质灾害与环境保护, 2006, 17(3): 110~114.
Zhao Xiao, et al. Study on failure model and stability of one tangential slope. Journal of Geological Hazards and Environmental Prevention. 2006, 17(3): 110~114.
- [9] 伍法权. 岩质高陡边坡变形与稳定性评价工程地质工作方法[J]. 工程地质学报, 2004, 12(增1): 199~211.
Wu Faquan. Engineering geology assessment procedure for deformation and stability high steep rock slopes. Journal of Engineering Geology, 2004, 12(s1): 199~211.