

文章编号:1001-1986(2005)02-0049-03

# 松动岩体边坡稳定性研究

席先武<sup>1</sup>,邵铁全<sup>1</sup>,彭建兵<sup>1</sup>,雷小青<sup>2</sup>

(1. 长安大学地测学院,陕西 西安 710064;2. 西安石油仪器总厂塞舍尔公司,陕西 西安 710054)

**摘要:**黄河大柳树坝址两岸山体中广泛分布着断层、软弱岩层和松动架空的岩体,且该区地震强度高。本文采用数值模拟的方法,对松动岩体高边坡在天然条件下和地震动作用下的稳定性进行了分析研究。结果表明:在天然条件下,坡体基本稳定,但表层坡体存在岩体卸荷松动现象,沿断层有集中剪切现象;地震动作用下,因岩体强度软硬相间而进一步发生松动,导致边坡失稳。

**关键词:**松动岩体;边坡稳定性;数值模拟

**中图分类号:**TU457    **文献标识码:**A

## Relaxed Rock Mass Slope Stability Analysis

XI Xian-wu<sup>1</sup>, SHAO Tie-quan<sup>1</sup>, PENG Jian-bing<sup>1</sup>, LEI Xiao-qing<sup>2</sup>

(1. College of Geological Engineering and Geomatics, Chang'an University, Xi'an 710054, China;

2. CHINA-FRANCE Joint Venture Ltd., Xi'an Petroleum Exploration Instrument Co. Xi'an 710054, China)

**Abstract:** In both sides of Daliushu dam site, so much relaxed rock mass can be found. The earthquake intensity is also very high in this area. In this paper, the relaxed rock mass slope stability, under both natural state and seismic state, has been analyzed by using numerical method. The result shows that under natural state, the slope is stable, but plenty of relief relaxed rock mass can be found in the surface of the slope, and stress focus on the fault. Under seismic state, the slope becomes unstable because the soft-hard lithologic group makes rock mass become more relaxed than before.

**Key words:** relaxed rock mass; slope stability; numerical simulation

## 1 引言

黄河黑三峡大柳树坝址区位于青藏高原东北缘,北祁连主逆冲断裂带东段曲率最大的中卫—同心活动构造带内(胡海涛等,1993;韩文峰等,1993;彭建兵,2001;马润勇,2003),是黄河黑三峡地区活动性最强的现代活动断裂带。坝址附近的F201、F202、F203、F7(8)、F3、F2、F1等7条分支断层共同组成了中卫—同心逆冲推覆构造带前锋带的逆冲断层组,且在深部交汇在同一条断面上。其中F3和F7(8)两条断层间所夹坝址岩块是无根的。全新世以来,该带中的活动断层F201距拟定的坝址轴线仅1.5 km,倾向坝址,在坝基下3~4 km处通过,该区至少发生过3次7级以上的地震。地震危险性分析表明,坝址位于震级上限达8级的潜在震源区内,50 a超越概率为0.1时,地震基本烈度为Ⅷ度,基岩峰值加速度为0.24 g。经勘察发现,在黄河黑三峡河段的大柳树坝址分布着大范围的松动岩体。大范围松动岩体的存在并非偶然,是其内因—中寒武统香

山群软硬相间的层状岩体和外因—特殊的区域非稳定动力学背景共同作用的结果。松动岩体是一种不同于风化岩、断层岩的一类特殊软岩:其结构面张开、大范围波速低、低地应力和低密度、透水性强烈、地下水位低,遥感影像异常等。

边坡问题是大柳树高坝方案的重大工程地质问题之一。因坝肩山体中广泛分布着断层和软弱层带以及架空的松动岩体,而且本区所处地震高强度区,所以,在天然条件下以及在地震动条件下的坡体稳定性等问题特别突出。

## 2 松动岩体特征

### 2.1 岩体组合特征

大柳树坝址区松动岩体属寒武系中统香山群第四亚群,该群曾经受轻度变质并强烈褶皱作用。可以分为如下4种典型的工程地质岩组。

a. 变质长石石英砂岩岩组(占坝址岩体的60%~70%左右):由单一的浅变质长石石英砂岩、石英片岩、片理化变质粉细砂岩组成,中至厚层状。

收稿日期:2004-03-30

基金项目:国家自然科学基金资助项目(编号:4002007)

作者简介 席先武(1972 )男 湖南安乡人 长安大学博士研究生 主要从事地质工程数值方法的研究

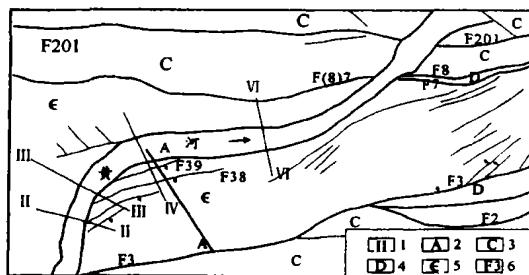


图 1 大柳树坝址区域主要断层构造简图

Fig. 1 Simple figure for main fault structure in Daliushu Dam Site

1—勘探剖面编号;2—模拟研究剖面;3—石炭系;  
4—泥盆系;5—寒武系;6—断层编号

除发育变余层面构造外,还受小断层和 7 组以上的节理切割成呈菱块状或楔形。

b. 变质长石石英砂岩夹千枚岩岩组(占坝址岩体 15%~20%):变质长石石英砂岩常呈薄至中、厚层状,千枚岩呈薄层状,常有部分板岩或粉砂质泥页岩;层面构造发育,砂岩被节理切割,千枚岩中发育劈理,多形成小至 0.4 cm×4 cm 的扁平斜方柱。

c. 千枚岩岩组:主要由单一的千枚岩组成,偶尔含板岩或变质长石石英砂岩透镜体,劈理很发育,约占坝址岩体的 2%。

d. 断层岩岩组:由各种断层岩组成,主要赋存在断层、挤压带内,产出状态复杂多变。在空间上呈网状产出,是坝区岩体中的软弱岩组,占坝体岩体的 5%~13%。

## 2.2 物理力学特征

据已有的研究结果,大柳树坝址右岸山体 1 265 m 高程以上、左岸 1 310 m 高程以上全部为低波速岩体,本质上反映了其岩体的松动范围。大柳树坝址松动岩体的纵波速低于 2 200~2 500 m/s 的占 60%,波速低于 3 000 m/s 的占 80%~90%。而小观音坝址岩体(岩性相同、相距仅 48 km)的波速低于 2 600 m/s 的岩体仅占 2.6% 以下,大于 3 500 m/s 的岩体占 85%~90%。

大柳树坝址松动岩体中的构造应力一般已释放殆尽。最大水平主应力值多在 3~6 MPa 之间,且以 3~4 MPa 为主,与长江三峡坝址区(10~20 MPa)、青

表 1 大柳树坝址岩体力学参数

Table 1 The mechanics parameter of rock mass Daliushu Dam Site

岩性	容重 $g \cdot cm^{-3}$	变形模量 $E_b/GPa$	动弹性模量 $E_d/GPa$	摩擦角 ( $^{\circ}$ )	内聚力 /MPa	泊松比
变质长石 石英砂岩	2.70	4.2~5.8	10~16	36.9	0.3	0.3~0.32
板岩	2.77	3.5~4.2	4.5~10	26.0	0.0	0.32~0.36
千枚岩	2.77	1.9~3.5	4.0~7.5	26.0	0.0	0.33~0.37

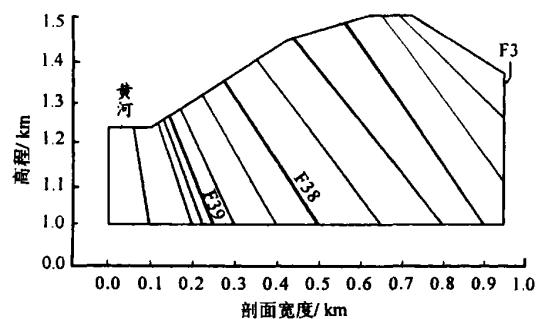


图 2 大柳树坝址右岸高边坡地质模型图

Fig. 2 Geological model for right bank of Daliushu Dam Site  
海拉西瓦地区(22 MPa)的最大主应力值相比要小得多,属于低地应力岩体。一般来说,在基岩峡谷区,由于区域构造应力与岸坡重分布应力的共同作用,实测应力值应大于自重应力值,但在大柳树坝址右岸坡脚处的最大水平主应力值仅为 4.07 MPa,与自重应力相当。

大柳树坝址松动岩体的变形模量为 1.9~5.8 GPa,而岩性相同的小观音坝址岩体变形模量为 12~20.0 GPa。本次数值模拟研究所采用的岩体力学参数如表 1。

## 3 边坡稳定性的数值模拟研究

### 3.1 模型建立

本次模拟采用显式有限差分软件—FLAC<sup>2d</sup>。假定岩体力学行为遵循摩尔—库仑准则。考虑到水电厂房、泄洪洞、引水发电洞、溢洪洞、排沙洞等大型隧洞都将布置在大柳坝址右岸,因此,本次研究剖面选定为:从黄河河床中心至 F3 断层(图 1 中的 A—A 剖面),穿过的主要断层有 F39 和 F38。其中, F3 断层产状:  $80^{\circ} \angle 85^{\circ}$ (在建模时为简化,取其倾角为  $90^{\circ}$ )、F39 和 F38 断层产状:  $60^{\circ} \angle 55^{\circ}$ 。剖面上岩性软硬相间。初始地质模型如图 2 所示,图中除断层 F39 和 F38 外,其余阴影部分均为软弱岩层。

### 3.2 天然高边坡稳定性

采用大变形模式,在重力作用下的计算得结果如图 3~图 6 所示。

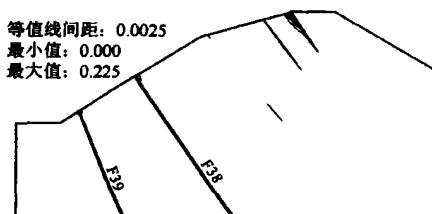


图 3 天然边坡剪应变增量等值线图

Fig. 3 Contour of shear strain increment for natural slope



图 4 天然边坡塑性状态

Fig. 4 Plastic state for natural slope

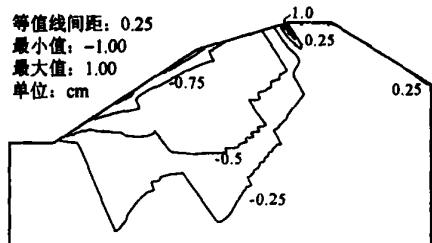


图 5 天然边坡 X 方向位移等值线图

Fig. 5 Contour of displacement in X-direction for natural slope

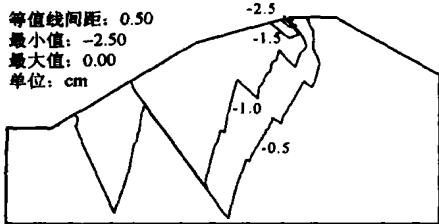


图 6 天然边坡 Y 方向位移等值线图

Fig. 6 Contour of displacement in Y-direction for natural slope

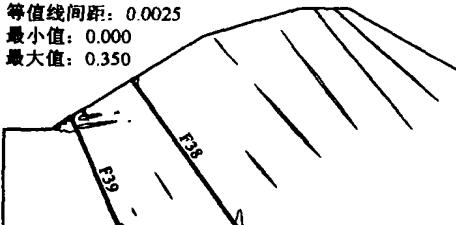


图 7 地震动下剪应变增量等值线图

Fig. 7 Contour of shear strain increment for slope under dynamical condition

在图 3 中可以看到,剪切应变主要集中在断层(F39 和 F38)附近及坡顶。在坡顶所形成的剪切变形亦表现出明显受软弱岩层的影响。因此,断层及软弱岩层对边坡的稳定性有一定程度的影响和控制作用。在修建大坝时应合理和及时地考虑对这些断层和软弱层的工程处理,如灌浆等。

仅在自重作用下,顺边坡表层岩体发生了卸荷屈服,达到了塑性状态,即岩体发生了松动变形(图 4),在边坡左侧波及规模为 30 m 左右(距边坡最大水平距离);在右侧波及范围更大。这是因为右侧坡比大且软弱层的倾向与坡形一致的缘故 模拟的结

果与现场实际勘测结果<sup>[3, 6]</sup>基本吻合。在山体深部也零星出现了部分岩体松动的现象,特别是在 F38 附近;其分布规律明显表现出与软弱层和断层分布一致的特征。由此也可以说明,松动岩体的形成与软硬相间的岩性组合有密切的关系。

在位移等值线图(图 5、图 6)中显示,最大位移主要发生在坡顶位置,方向为右下侧,与软弱层的倾向一致。边坡上也因岩体卸荷松动而产生了一定程度的顺坡体位移量。

由天然状态下边坡稳定性模拟分析可知,坡体基本稳定;边坡表层存在一定程度的卸荷松动作用;断层和软弱层对岩体的稳定和松动作用影响较大。

### 3.3 地震动作用下的高边坡稳定性

本次动力学模拟主要为了定性的研究边坡在地震动条件下的稳定性问题。本次在模型底边输入的是水平向正弦波,波幅为 0.24 g,频率为 10 Hz,持续时间为 4 s。结果如图 7~图 10 所示。

在地震波的作用下,山体中受剪切的部位基本



图 8 地震动下边坡塑性状态

Fig. 8 Plastic state for slope under dynamical condition

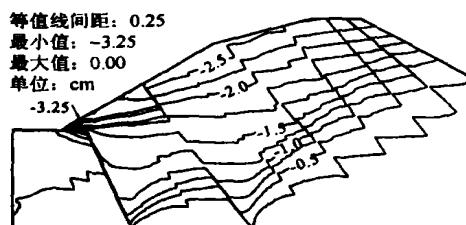


图 9 地震动下 X 方向位移等值线图

Fig. 9 Contour of displacement in X-direction for slope under dynamical condition

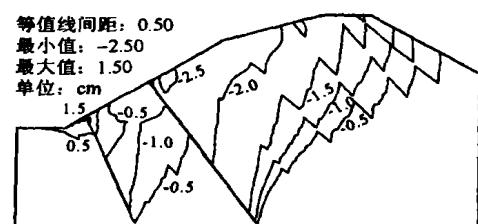


图 10 地震动下 Y 方向位移等值线图

Fig. 10 Contour of displacement in Y-direction for slope under dynamical condition

文章编号:1001-1986(2005)02-0052-03

# 土压力公式的统一解

范文<sup>1,2</sup>,白晓宇<sup>1</sup>,俞茂宏<sup>2</sup>,孙巧银<sup>1</sup>

(1. 长安大学地质工程与测绘工程学院, 陕西 西安 710054;  
2. 西安交通大学建筑工程与力学学院, 陕西 西安 710049)

**摘要:**传统的土压力公式不能反映土体材料强度的中间主应力效应,但中间主应力效应是存在的且不容忽视的。基于俞茂宏统一强度理论,考虑中间主应力效应,推导了土压力公式的统一解,给出了具有广泛意义的土压力公式,可以充分发挥材料的强度潜能,Rankine 土压力公式为其特例。根据不固结不排水强度指标与固结不排水强度指标,按有效应力法与总应力法对土压力的计算公式进行了推导和分析,得出了两种强度指标下的土压力公式。另外,通过已有文献的实例进行了对比分析。

**关键词:**强度理论;统一强度理论;土压力;应力

**中图分类号:**TU432    **文献标识码:**A

## Unified solution of formulae for earth pressure

FAN Wen<sup>1,2</sup>, Bai Xiao-yu<sup>1</sup>, YU Mao-hong<sup>2</sup>, Sun Qiao-yin<sup>1</sup>

(1. School of Geological Engineering and Surveying Engineering, Chang'an University, Xi'an 710054, China;  
2. School of Civil Engineering and Mechanics, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

**Abstract:** The effect of the intermediate principal stress was not considered in the traditional earth pressure theories, which did exist and should not be neglected. Based on the unified strength theory considering the effect of the intermediate principal stress proposed by Yu Maohong in 1991, this paper deduced the equations that can be widely applied. The solution of Rankine is a special case of this paper. According to the relations between the undrained strength parameter and concreted undrained strength parameter, the formulae for earth pressure are deduced and analyzed by using effective stress method and total stress method, and the relation of the earth pressures under the two cases are got. At last, the paper contrasts the results of the unified solution with other papers published.

**Key words:** strength theory; unified strength theory; earth pressure; stress

收稿日期:2003-03-29

基金项目:国家自然科学基金资助研究项目(59924033);国土资源部岩土工程开放研究实验室资助项目(KF011)

作者简介:范文(1967—),男,内蒙古呼和浩特人,长安大学博士,教授,从事地质工程和岩土力学方面的研究和教学工作。

上分布在软弱层和断层上(图7)。这是因为软弱层和断层均是岩体强度相对较弱的部位,应力首先在这些部位形成集中,岩体破坏也将首先在这些部位突破。

地震同时也使岩性软硬相间的山体发生了大规模的岩体松动作用(图8)。两侧边坡的稳定性因此而变得很差。松动岩体边坡在地震作用下的稳定性将对大坝的设计起着决定性作用。

在地震作用下,坡脚都将是变形较大的部位(图9、图10)。因此在坡脚需要进行加固处理。一方面,可以减少地震作用过程中的应力集中;另一方面,可阻止岩体的进一步松动而造成的边坡失稳。

## 4 结论

大柳树坝址松动岩体边坡,因坡比大、山体高、岩体强度低,在边坡表层存在一定程度的岩体卸荷松动 形成不稳定的坡体表层 在地震作用下 山

体中断层和软弱层对边坡稳定性起着关键性作用,其主要通过在这些相对软弱部位形成应力集中、剪切破坏,使岩体进一步发生松动破坏而造成坡体失稳。因此,在大坝设计与建设过程必须考虑对坡体表层卸荷岩体和断层、软弱岩层的加固处理。

## 参考文献

- [1] 席先武,邵铁全,彭建兵,王岳军,雷小青.柱体复合地基的拉格朗日法模拟[J].煤田地质与勘探,2004,31(5):46-48.
- [2] 彭建兵,毛彦龙,范文等.区域稳定性动力学研究[M].北京:科学出版社,2001.
- [3] 韩文峰等.黄河黑山峡大柳树松动岩体工程地质研究[M].兰州:甘肃科学出版社,1993.
- [4] 胡海涛,罗国煜,许兵等.黄河黑山峡河段大柳树坝址工程地质专题研究[M].北京:地震出版社,1993.
- [5] 国家地震局地质研究所.黄河黑山峡大柳树坝址地震基本烈度复核报告[R].北京:国家地震局地质研究所,1987.
- [6] 《黄河黑三峡谷河段开发重大工程地质问题研究》课题组.黄河黑三峡谷河段开发重大工程地质问题研究[R].2003,8.
- [7] 马润勇.青藏高原东北缘构造活动及其工程灾害效应[D].西安:长安大学,2003.