

锦屏一级水电站左岸抗力体基础处理洞室群围岩稳定性分析

王 胜¹, 黄润秋¹, 祝华平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, 四川 成都 610059; 2. 中国水电顾问集团成都勘测设计研究院, 四川 成都 610072)

摘 要:通过对锦屏一级水电站左岸抗力体五层洞室岩体结构特征详细调查, 采用水电围岩分类的方法对抗力体洞室进行围岩分类。分类结果表明: 抗力体洞室围岩以Ⅲ2类围岩居多, 占了50%左右, 其次为Ⅳ类, 占36%左右, Ⅲ1和Ⅴ类围岩所占比例较少。通过对洞室施工开挖失稳破坏现象的调查研究, 分析了洞室失稳破坏的机制及破坏形式, 认为围岩主要的破坏形式为弱面控制型的块体滑移塌落。对洞室监测资料的分析结果表明, 在目前的支护条件下, 总体监测未见异常, 整体上基础处理洞室监测状态稳定。但 F_3 、 F_{42-9} 断层及煌斑岩脉等软弱部位应力及变形缓慢增加, 需要加强监测。最后根据分析结果提出了建议。

关键词: 抗力体; 围岩分类; 破坏机制; 块体; 监测; 稳定性

中图分类号: TV731.5; TU457 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-7428(2009)09-0072-05

Analysis on Stability of Surrounding Rock of Underground Chamber Group on Left Bank Resisting Rock of Jinping - I Hydropower/WANG Sheng¹, HUANG Run-qiu¹, ZHU Hua-ping² (1. Chengdu University of Technology, Chengdu Sichuan 610059, China; 2. HydroChina Chengdu Engineering Corporation, Chengdu Sichuan 610072, China)

Abstract: By the detailed survey on the structure features of left bank resisting rock of Jinping - I hydropower, resisting rock chambers were classified with surrounding rock classification. 50% resisting rock chambers belong to Ⅲ2, about 36% belong to Ⅳ, and the rest belong to Ⅲ1 and Ⅴ. By the study on excavating destabilization, analysis was made on the stability-losing mechanism and the deformation pattern. Weak-plane-controlling block gliding and collapsing were thought to be the main deformation pattern. According to the analysis on the chamber monitoring data, no evidence showed any abnormal; but deformation of F_3 , F_{42-9} faults and lamprophyre dyke were slowly occurred. The paper put forward the construction proposal.

Key words: resisting rock; surrounding rock classification; destruction mechanism; block; monitoring; stability

0 引言

地下洞室开挖后, 在卸荷回弹、应力重分布及水分的重分布作用下, 围岩的性状会发生很大的变化, 如果围岩岩体承受不了回弹应力或重分布的应力的作用, 围岩将发生塑性变形或破坏^[1]。在国内由于地下洞室围岩失稳而造成的事故为数甚多。为了保证工程安全, 必须了解和掌握地下洞室围岩的应力状态, 变形破坏机制和分析评价围岩稳定性, 为正确解决地下建筑的设计和施工中的各类问题提供充分可靠的地质依据。

锦屏一级水电站左岸抗力体主要为建基面以里Ⅱ1~Ⅰ线之间一定深度范围内的岩体, 其工程地质条件复杂, 主要的软弱结构面有 F_3 、 F_8 、 F_{42-9} 断层、煌斑岩脉、深部裂缝及低速波岩带、层间挤压带等, 这些软弱结构面对坝体受力状态和变形稳定等均会产生较大影响。根据拱坝左岸工程地质条件, 采用混凝土垫座置换、软弱结构面混凝土置换网格、抗剪

传力洞及固结灌浆等对左岸抗力体进行基础处理。基础处理分1885、1829、1785、1730、1670 m高程五层布置, 每层布置有施工主通道、施工次通道、帷幕灌浆洞、坝基排水洞、固结灌浆洞、排水洞、抗剪传力洞(兼固结灌浆洞)以及 F_3 断层、煌斑岩脉的网格置换洞, 于是在抗力体部位形成了庞大的基础处理洞室群。施工期洞室群的围岩稳定性问题突出, 需要对其进行围岩稳定性分析。目前抗力体部位洞群开挖完成, 根据开挖洞室及部分洞室底板揭示的地质条件, 对左岸抗力体洞室群围岩稳定性进行分析。

1 抗力体工程地质条件

该水电站坝址位于普斯罗沟与手爬沟间1.5 km长的河段上, 河流流向约N25°E, 河道顺直而狭窄, 谷宽约410 m。坝区两岸山体雄厚, 谷坡陡峻, 基岩裸露, 相对高差千余米, 为典型的深切V形谷。岩层走向与河流流向基本一致, 左岸为反向坡、右岸

收稿日期: 2009-06-08; 改回日期: 2009-08-17

作者简介: 王胜(1982-), 男(土家族), 重庆黔江人, 成都理工大学在读博士, 地质工程专业, 主要从事岩土钻掘及工程地质方面的研究工作, 四川省成都市成都理工大学环境与土木工程学院博二, yongyuandewangsheng@sina.com。

为顺向坡。

左岸无大的深切冲沟,1820~1900 m 高程以下大理岩出露段,地形完整,坡度 55°~70°;以上砂板岩出露段坡度 35°~45°,地形完整性较差,呈山梁与浅沟相间的微地貌特征^[2]。

左岸抗力体范围内出露的基岩为:

(1)中上三叠统杂谷脑组第二段(T_{2-32}^{2})大理岩,总厚度约 600 m,分布于 1820 m 高程以下,按岩性细分为 8 层,左岸抗力体涉及第 4~8 层大理岩;

(2)中上三叠统杂谷脑组第三段(T_{2-32}^{3})砂板岩,出露于 1820~2300 m 高程间,厚度约 400 m,按岩性细分为 6 层,1、3、5 层为粉砂质板岩,薄层状,2、4、6 层为变质砂岩,厚~巨厚层状,左岸抗力体涉及 1、3 层粉砂质板岩和 2 层变质砂岩;

(3)煌斑岩脉(X),一般厚 2~3 m,局部达 7 m,产状 N50°~70°E,SE $\angle$ 60°~80°,分布于左岸坝基及抗力体内,在 1680 m 高程以上普遍弱~强风化,1680 m 高程以下多微风化~新鲜^[3]。

研究区地质构造复杂,受区域构造应力影响,抗力体内断层较发育。其中 NNE~NE 向最为发育,且断层规模较大,主要发育 F_5 、 F_8 、 F_2 断层。NEE~EW 向断层也有一定发育,主要有左岸坝头的 F_{42-9} 断层。

受构造作用影响,岩体中层间挤压带及裂隙发育,层间挤压在空间分布上受层位岩性控制明显,主要发育在第二段 $T_{2-32}^{2(6)}$ 层大理岩和第三段砂板岩中。裂隙主要发育 5 组优势裂隙,各高程裂隙发育情况有所差异。①N15°~80°E,NW $\angle$ 25°~45°,层面裂隙;②N50°~70°E,SE $\angle$ 50°~80°;③近 SN~N30°E,SE $\angle$ 60°~80°;④N60°W~EW,NE(SW)或 S(N) $\angle$ 60°~80°;⑤N30°~50°W,NE $\angle$ 60°~80°。

抗力体总体上具有卸荷深度大,卸荷裂隙张开宽,卸荷类型较复杂等特点。既有浅表常规卸荷,又有深部卸荷。表 1 为卸荷带深度表^[3]。

表 1 抗力体卸荷带深度表

岩性	强卸荷深度/m	弱卸荷深度/m	深卸荷深度/m
大理岩	10~20	50~70	150~200
砂板岩	70~90	150~200	200~340

左岸岩体内地下水位低平,与江水位基本一致。抗力体内地下水不发育,大多洞段干燥。局部沿 F_5 断层、煌斑岩脉及第④组裂隙渗水、滴水。

2 洞室群围岩分类

围岩分类是对地下工程的岩体质量进行定性

定量综合评价的方法,通过查明围岩的地层岩性、岩体强度特征、结构完整性、结构面的主要性状与方位、地下水状况、地应力水平等多个因素,从而对围岩的整体稳定性作出判别,进而为指导支护设计和施工开挖提供较为合理的地质依据。根据左岸抗力体洞室群岩体强度差异大、结构面较发育、地应力高、地下水局部较活跃的特点,选择《水利水电工程地质勘察规范》(DZ/T 0220-2006)建议的方法(简称为水电围岩分类法),对左岸抗力体洞室围岩进行工程地质分类。

2.1 分类指标及评分标准

水电围岩分类是以控制围岩稳定的岩石强度、岩体完整程度、结构面状态、地下水和主要结构面产状 5 项因素之和的总评分为基本判据,围岩强度应力比为限定判据而对地下洞室进行围岩分类的。

综合分析水电围岩分类的几个指标,影响围岩稳定的因素首推岩体的完整程度,国内外众多的围岩分类法,都十分强调结构面对岩体的分割和其性状对岩体质量的恶化。岩体完整性系数 K_v 是表征岩体完整程度的定量指标,准确描述岩体完整性对围岩分类具有重要意义。

该水电站左岸抗力体由于洞室埋深较大,声波纵波速级差不明显,用声波计算的 K_v 值不能准确反映岩体的完整性。另外抗力体范围内声波主要测试了单孔声波值,而对穿声波测试数据较少,无法达到对岩体完整性进行评价的数据统计要求^[2]。因此主要采用岩石质量指标(RQD)和岩体体积节理数(J_v),同时参考岩体块度指数(RBI)和岩体结构类型来综合确定岩体完整性系数 K_v 的大小,它们基本能够准确地反映岩体的完整程度。通过对抗力体洞室地质编录及底板精测资料的分析,得到了抗力体岩体完整性系数 K_v 取值表(见表 2)。 K_v 值确定后,综合其它 4 个指标便可方便的采用水电围岩分类的方法对各洞室进行围岩分类。

表 2 岩体完整性系数 K_v 取值表

岩体完整程度	岩体完整系数 K_v	RQD	RBI	J_v	岩体结构
完整	$K_v > 0.75$	100~85	>45	<8	整体状
较完整	$0.75 \geq K_v > 0.55$	65~85	30~45	8~15	块状~次块
完整性差	$0.55 \geq K_v > 0.35$	45~65	15~30	15~20	碎裂镶嵌
较破碎	$0.35 \geq K_v > 0.15$	25~45	<15	20~30	碎裂
破碎	$K_v < 0.15$	0~25	/	>30	散体

2.2 围岩分类结果及分析

采用水电围岩分类法,得到了抗力体五层开挖洞室围岩分类的结果。对其进行统计分析,得到了

五层洞室围岩分布统计图(图1)。

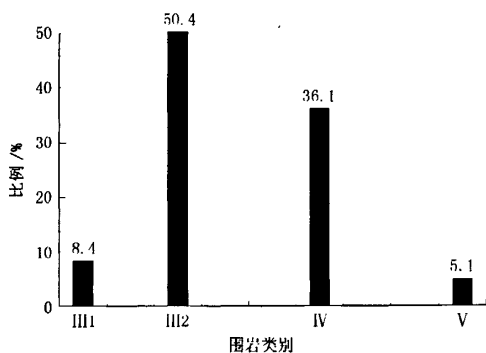


图1 抗力体五层洞室围岩分布统计

由图1可以看出:开挖的抗力体各洞室中,Ⅲ2类围岩居多,占了50.4%,其次为Ⅳ类,所占比例为36.1%,接下来是Ⅲ1类,所占比例为8.4%,Ⅴ类围岩最少,只占了5%左右。左岸抗力体所处地层条件复杂,断层及煌斑岩脉等构造带发育,加之五组裂隙相互切割,使左岸抗力体岩体质量差,并且由于风化卸荷及地下水的影响,以及主要的结构面与洞身的特定的组合关系,导致了抗力体洞室围岩稳定性差。围岩主要类型为Ⅲ2类,其次为Ⅳ类,少量Ⅲ1类及Ⅴ类。可见,近60%围岩稳定性差,另外40%左右围岩不稳定~极不稳定,Ⅳ类和Ⅴ类主要集中在 F_5 、 F_8 、 F_{42-9} 断层、煌斑岩脉、松弛岩带及深部裂缝等部位。需要及时采取喷锚支护等措施确保洞室围岩稳定。在这些软弱带中,尤以 F_5 断层和煌斑岩脉的岩体质量问题最为突出,因此在抗力体部位1670和1730 m高程布置了 F_5 断层置换洞,以及1730、1785和1829 m高程布置了煌斑岩脉置换洞。并且在置换洞之间布置了斜井。其目的是改善软弱部位的岩体质量,提高抗力体洞群围岩稳定性,满足拱坝对左岸抗力体的岩体质量要求。在置换洞的开挖过程中,由于本身岩体质量差,在施工爆破影响下,围岩稳定性问题突出,特别需要及时支护,并且做好监测工作。

3 块体稳定性分析

围岩岩体的变形和破坏的形式和特点,除与岩体内的初始应力状态和洞形有关外,主要取决于围岩的岩性和结构。围岩的稳定性问题主要是变形的问题,但在洞室开挖过程中,各种形式的局部破坏也经常发生,需要对其进行分析研究并及时处理,防止因局部的破坏导致洞室的整体失稳。围岩失稳破坏的机制可归纳为围岩强度-应力控制型、软弱结构

面控制型和混合控制型3种基本类型^[14]。具体每种类型包括多种破坏形式,不同的破坏形式对应于不同岩质、岩体结构及力学机制。

该水电站左岸抗力体岩性主要是砂板岩和大理岩以及局部的煌斑岩与绿片岩,在工程地质岩组一定时,岩体内结构面类型、发育程度、张开充填情况、岩块尺寸大小等岩体结构特征,就成了制约岩体力学特性和影响岩体质量的关键因素。左岸抗力体岩石建造类型复杂,层厚变化大;构造改造强烈,岩体内不同类型的构造结构面发育;谷坡形成后由于地应力释放,浅表一定范围内的岩体沿结构面松弛拉裂张开明显,进一步降低了岩体的完整性。根据开挖洞室揭示地质资料的调查分析,综合原岩建造及构造和浅表生改造结果,将抗力体岩体结构分为厚层~块状结构、中厚层~次块状结构、互层状结构、薄层状结构、块裂~镶嵌结构、块裂~碎裂结构、板裂~碎裂结构和散体结构8种类型。根据抗力体基础处理洞室群开挖过程中对大量围岩变形破坏及塌方实例的调查、分析研究,认为抗力体围岩主要的破坏形式为弱面控制型的块体滑移塌落,表现为围岩中局部特定块体的稳定性问题。围岩出现局部失稳的原因主要是由于岩体中的软弱结构面与洞室的临空面的不利组合所构成的不稳定性块体的掉落和塌落所致。目前在地下洞室设计、锚喷支护技术规范、水利水电工程地质勘察规范中,规定必须对围岩进行局部稳定性分析,当原设计不能满足稳定性要求时,必须对不稳定块体进行局部加固。

在左岸抗力体基础处理洞群的开挖过程中,局部洞段发生了掉块、滑塌等,如不及时采取措施,这些局部部位的变形破坏就会发展,从而有可能对洞室的整体稳定性产生较大的影响。在进行块体稳定性分析过程中,在施工开挖后对左岸抗力体各洞室进行详细施工地质编录的基础上,通过分析各结构面的发育情况及其与洞室的关系,以及地下水等的影响,初步确定了22个不稳定块体及其特征。概括而言,主要是由于5组裂隙的某几组相互切割,加之其它一些断层等结构面的影响,受施工开挖爆破影响,容易在洞室顶拱和边墙形成不稳定块体,易沿陡倾结构面产生滑塌、掉块等变形破坏。各种潜在的不稳定块体在各层洞室中都存在,相比顶拱而言,洞室边墙存在的不稳定块体更多。因此,为了保证工程安全,需要在对块体的边界条件的确定、可动块体的判别、块体几何参数的确定、块体的运动学分析的基础上,得出块体的稳定性系数及其破坏模式,确定

出相应的围岩压力,从而为这些不稳定块体的支护措施提出具体的方案。

4 监测分析

随着现代测试技术和手段的进步,岩体及围岩特性的监测已成为地下洞室围岩稳定性分析评价的重要方法。通过布置位移和应力监测系统,以此获得随洞室开挖及支护过程有关围岩稳定性及支护工作状态的真实信息,通过分析评价围岩稳定性和支护效果,为进一步有针对性的修改支护参数及后续的开挖提供依据。这个过程可随开挖及支护的每一循环,不断调整优化。这种动态的监控,既是对围岩稳定性及支护效果的直接监测,又是一种信息化反

馈设计的方法^[4]。

左岸抗力体存在 F_5 、 F_8 、 F_{42-9} 断层和煌斑岩脉等于洞室稳定不利的软弱结构面,洞室围岩稳定性问题突出,因此,在基础处理洞室监测方面作了比较全面的考虑,在软弱结构面或洞室交叉口等容易变形破坏的部位设计布置了各种监测设施,主要包括多点位移计、锚杆应力计、钢筋计、位错计等,形成了一套较为完整的监测系统。尤其注重对 F_5 置换洞、 F_{42-9} 抗剪洞及煌斑岩置换洞的监测,达到了基础处理洞室施工期监测的目的。图2为1670 m施工次通道下游边墙桩号K0+160布置的M⁴1多点位移计位移过程曲线,图3为对应的锚杆应力计应力变化过程线^[5],旨在对 F_5 断层进行监测。

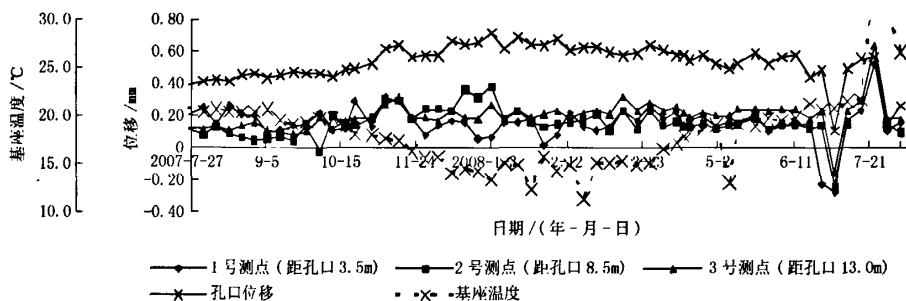


图2 1670 m施工次通道下游边墙K0+160布置的M⁴1多点位移计位移过程曲线

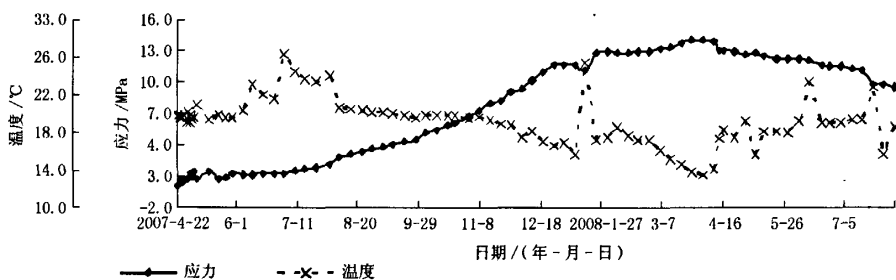


图3 1670 m施工次通道下游边墙K0+160布置的R¹1锚杆应力计应力变化过程曲线

通过对截止2008年8月1日抗力体洞室各类监测资料的综合分析^[5],初步得到以下几方面认识:

(1)1670 m高程:抗力体固结灌浆平洞各监测部位物理量累计量值较小,通过 F_5 断层部位的多点位移计M⁴1孔口位移呈波动变化,锚杆应力小幅调整。总体来看监测部位围岩状态基本稳定。

(2)1730 m高程:1730 m-1号固结灌浆洞K0+95多点位移计M⁴7及锚杆应力计通过 F_5 断层,旨在对 F_5 断层变形和位移进行监测,监测结果显示位移及变形都很小,孔口位移仅为0.21 mm;布置于下游边墙和顶拱的锚杆应力计R⁷和R⁸其应力值

分别为-2.2和-12.27 MPa。总体来看监测部位围岩状态基本稳定。

(3)1785 m高程:1785 m施工次通道外侧壁K0+130处的多点位移计M⁴3位移持续上升,目前孔口位移为15.19 mm,变化速率达到了0.042 mm/d,变形持续进行,暂时没有收敛迹象,同部位的锚杆应力计也表现为拉应力增加,目前应力值为127.68 MPa,位移与应力反映趋势基本一致,初步认为是与目前边坡正进行开挖导致的岩体卸荷回弹有关,需进一步加强监测。

(4)1829 m高程:1829 m施工次通道外侧壁K0+025处的M⁴11孔口累计位移为8.77 mm,从整个

变化趋势看,位移持续缓慢增加,目前未见收敛,同部位的R'11锚杆应力计截止2008年8月1日累计应力为132.43 MPa,应力变化速率为0.367 MPa/d,应力一直持续增加,R'11应力与M⁴11位移变化规律基本一致。该部位煌斑岩脉穿过,监测结果表明煌斑岩脉处于进一步变形过程中,需要进一步加强监测。

(5)1834 m高程:该高程的监测仪器主要针对F₄₂₋₉断层进行监测,监测结果表明,截止2008年7月17日,M³19号多点位移计3号测点位移值达到了15.17 mm,同部位的锚杆应力计R'19应力值为65.08 MPa,其余多点位移计各测点累计位移量比较小,总体表现为缓慢位移增加,变化速率都很小。锚杆应力计与位移计同断面布置,其中R³15锚杆应力计应力值较大,2号测点应力达到了54.69 MPa;R'20锚杆应力计应力值为-61.43 MPa,R'24锚杆应力计其应力值为83.08 MPa,其他锚杆应力计应力值都比较小,表现为缓慢的应力增加。表明1834 m高程F₄₂₋₉断层处于缓慢变形之中,需要进一步加强监测。

(6)监测结果表明,总体监测未见异常,物理量变化与开挖施工岩体卸荷回弹有关,整体上基础处理洞室监测状态稳定。

5 结论与建议

本文在大量现场调查和已有成果综合分析基础上^[6-8],结合锦屏一级水电站左岸抗力体基础处理洞室工程实际,通过系统的分析研究工作,初步得到以下几点认识。

(1)在详细的施工地质编录基础上,按照水电围岩分类的方法,对锦屏一级水电站左岸抗力体五层基础处理洞室群进行了围岩分类。分类结果表明:在开挖的抗力体各洞室中,Ⅲ2类围岩居多,占了50.4%,其次为Ⅳ类,所占比例为36.1%,Ⅲ1类围岩较少,所占比例为8.4%,Ⅴ类围岩最少,占了5.1%。总体来讲,自然条件下围岩稳定性差,部分洞室洞段围岩不稳定,比如F₅断层置换洞、煌斑岩脉(X)置换洞和F₄₂₋₉抗剪洞等,需及时跟进支护措施,确保施工期洞室围岩稳定。

(2)通过对施工开挖洞室失稳破坏现象的详细调查,分析了各种失稳破坏的机制及形式。认为抗力体围岩主要的破坏形式为弱面控制型的块体滑移

塌落。通过对洞室典型块体稳定性分析,认为主要是由于①、②、③、④裂隙的某几组相互切割,加之其它一些断层等结构面的影响,受施工开挖爆破影响,容易在洞室顶拱和边墙形成不稳定块体,易沿某些结构面产生滑塌、掉块等破坏。但块体分布有限、规模小,一般多小于10 m³,经处理后围岩稳定。

(3)对基础处理洞室监测资料进行了整理分析,监测结果表明,在目前的支护条件下,总体监测未见异常,整体上基础处理洞室监测状态稳定。但F₅、F₄₂₋₉断层及煌斑岩脉等软弱部位应力及变形缓慢增加,建议加强施工期的变形监测,及时修改和优化支护措施。

(4)综合分析认为,对抗力体围岩稳定起控制性作用的是F₅、F₈、F₄₂₋₉断层、煌斑岩脉、松弛岩带及深部裂缝等Ⅳ类和Ⅴ类围岩,块体稳定性问题是局部问题,经及时支护后对洞室整体稳定性影响不大。在软弱结构面特别是其交汇部位,容易产生应力集中,形成塑性区,其长期变形对抗力体围岩稳定不利,建议在此基础上进行数值模拟,根据围岩弹塑性应力应变分析,地质力学模型试验、施工开挖期围岩变形监测及弹性波速测试成果,结合洞室围岩地质条件和已实施的支护措施,进一步对洞群围岩稳定性及支护效果进行工程地质分析与预测,为支护设计的优化提出建议。

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.
- [2] 国家电力公司成都勘测设计研究院.雅砻江锦屏一级水电站可行性研究报告[R].2003.
- [3] 国家电力公司成都勘测设计研究院.左岸抗力体质量评价及固结灌浆研究[R].2008.
- [4] 陈祖安,彭士标,等.中国水力发电工程(工程地质卷)[M].北京:中国电力出版社,2000.
- [5] 何玲明,詹静生,等.雅砻江锦屏一级水电站工程安全监测资料分析年报[R].2008.
- [6] 黄润秋,许模,等.复杂岩体结构精细描述及其工程应用[M].北京:科学出版社,2004.
- [7] 黄润秋.岩石高边坡发育的动力过程及其稳定性控制[J].岩石力学与工程学报,2008,(8).
- [8] 卢书强,巨能攀,等.岩体质量对地下洞室围岩稳定性的影响[J].地球与环境,2005,(B10).

致谢:本文得到了成都理工大学“锦屏一级施工地质专题”项目组的大力支持,在此向项目组的各位老师和同学表示感谢。另外,感谢中国水电顾问集团成都勘测设计研究院对作者工作的支持!