

# 三峡工程坝址区主要工程地质问题研究

薛果夫, 陈又华

(长江水利委员会长江勘测规划设计研究院, 武汉 430010)

[摘要] 简要介绍了工程坝址区最为关键的坝基深层抗滑稳定、永久船闸高边坡稳定、地下电站主厂房围岩块体稳定、断裂构造等几个工程地质问题研究过程、方法、工作内容及基本结论,并结合工程施工、监测及运行有关情况对各专题进行全面总结与评价。

[关键词] 三峡坝区;工程地质问题;勘察研究;总结

[中图分类号] TV62;TV64 [文献标识码] A [文章编号] 1009-1742(2011)07-0051-10

## 1 前言

三峡工程坝址的工程地质勘察,自20世纪50年代后期开始,持续进行了大量的地面地质测绘、钻探、洞井探、工程物探、岩土力学试验及水文地质试验研究工作,并针对坝区及建筑物的主要工程地质、水文地质和岩石力学问题,有重点地进行了专题研究。

坝址位于扬子准地台基底——前震旦纪结晶岩体上,主要岩石为闪云斜长花岗岩。坝址处河谷开阔,两岸谷坡平缓,地形地质条件均甚优越,是一个兴建混凝土高坝的优良坝址,完全能够适应兴建175 m高混凝土重力坝的要求。但对三峡工程而言:  
a. 有些建筑物,如永久船闸深开挖边坡,升船机的特殊结构及其对地基的要求,二期围堰河床基岩深槽深厚覆盖层基础防渗,坝后式厂房深开挖基础,都具有世界一流水平的特点和难度;  
b. 尽管坝区总体地质条件较好,但这一古老的结晶岩体,仍存在许多局部地质缺陷,如局部地段缓倾角结构面比较发育带来的深层抗滑稳定问题,小断层和裂隙发育的不均一造成的局部岩体破碎,风化带顶底板的起伏变化和局部加深风化给勘探工作带来的困难和资料的不确定性,风化蚀余块球体对围堰基础防渗的影响

等;  
c. 三峡工程规模巨大,土石方开挖量达1.03亿 $m^3$ ,大坝及厂房建基岩面面积达40万 $m^2$ 。永久船闸、临时船闸和升船机开挖形成8个人工高边坡,总长近8000 m(不含上下游引航道)。因此,岩体力学参数、边坡开挖坡角和建基岩面高程的微小变化都会给工程量和造价带来很大的影响;  
d. 三峡工程建筑物类型多,如加上临时建筑物,大的建筑物类型多达10余种。不同建筑物对地质勘察研究的要求各有特点。水工及施工总体布置影响区面积达10余平方千米,勘察工作都要有所兼顾。鉴于以上特点,坝址区及建筑物的地质与岩石力学问题的勘察研究,在全面掌握基本地质条件的基础上,重点问题、重点地段和建筑物的重点部位,必须集中力量进行多学科的深入研究和超常规的地质勘察。

三峡工程坝址区主要的研究专题有:风化壳工程地质特性的研究、断裂构造研究、缓倾角结构面的工程地质研究、岩体卸荷带特征研究、坝基岩(土)体水文地质特性研究、大坝建基岩体结构及质量研究、深挖岩质高边坡稳定性研究、岩(土)体力学特性试验研究等。

1992年工程开工后,针对坝基深层抗滑稳定、船闸高边坡稳定、地下厂房稳定性等若干重大问题,又分阶段进行了多期深化研究和施工地质验证

[收稿日期] 2011-04-25

[作者简介] 薛果夫(1942—),男,湖南南县人,教授级高级工程师,长期从事水利水电工程地质生产管理与研究工作;

E-mail:shingtonxue@126.com

工作。

## 2 断裂构造研究

坝区前震旦纪岩体在漫长的地质历史过程中,经受了多期构造运动,留下了以断裂构造为主体的多种构造形迹。断裂构造是控制岩体工程地质条件最主要的因素,坝区的主要工程地质问题均与断裂构造有关。对断裂构造的分布、出露位置、规模、性状、工程特性及其对不同建筑物地基的影响的勘察研究始终是坝区工程地质工作的重点。

三峡工程断裂构造研究除了常规的勘察手段外,应重视采用多手段的专项研究。

1)应用地质力学、断裂力学、岩石力学及年代学等的理论与方法,结合区域构造的研究成果,对本区断裂构造的形成时代、形成环境、活动期次、构造应力场与构造形迹的对应关系等进行研究,从本质上把握坝区断裂构造形成机制、分布规律和工程性质。

2)系统地采取样品,应用多种分析手段研究构造岩的微观组织结构、矿物、化学及光学特性;对坝区结构岩进行系统分类和定名,并为判定断裂形成的物理场(温度、压力等)提供证据。

3)在现场和室内对构造岩和结构面进行分类试验和测试,以确定其物理力学指标及其工程地质特性。

4)对 F23、F7、F215 等坝区规模最大或性状最差的断层进行专门研究。除进行具体的空间定位、成因、性状的详尽勘察研究外,还正对其工程特性的现场快速测定及应采取的工程措施进行专题研究。

5)根据现场结构面实测资料,建立结构面的概率模型和网络模型(二维或三维),求得在不同方向条件下岩体内的结构面密度、长度、连通率等指标,为结构面的定量评价、岩体质量研究、岩体稳定性分析等提供依据。

这些研究使我们对坝区断裂构造的形成条件,发育和分布规律,相互的切割关系,不同方向断裂的地质力学特点,及由此而带来的工程-水文地质性质的差异有了充分的认识,并以此指导工程地质勘察和建筑物工程地质条件的评价。由于对岩体中断裂构造的位置、规模、产状和性质都把握得比较清楚、准确,因此对断裂构造工程地质条件预测和评价也就做得比较到位,没有给设计和施工带来不利影响。

### 2.1 断层空间展布

坝区 1:2000 地质测绘共发现断层 886 条,其中长度大于 400 m,宽度大于 2 m 的断层有 16 条,其他均为长度小于 300 m、宽度不足 1 m 的中小型断层。断层在平面上具有疏密相间分布的特点,F23 以东地段,以与 F23 平行的 NNW 向断层为主,F23 至中堡岛外侧漫滩,为与 F7 平行的 NNE 向断层集中分布区,中堡岛以西地段,以 NNW 向断层为主,规模较大。

坝区稍大断层均为陡、中倾角断层。按走向可分为 NNW、NNE、NE-NEE、NWW-近 EW 组 4 组,其中前两组断层最发育,数量较多,规模较大,构成坝区断裂构造的基本格架,主要为压性或压扭性;后两组断层规模较小,延伸长度较短,多显张性或张扭性特征。

NNE 及 NNW 向较大断层宏观上延伸较平直,NE~NEE,NWW 向断层一般呈弯曲和锯齿状。

### 2.2 断裂构造系统及活动期次

坝址区岩体经历了多次构造作用,不同时期形成的断裂构造显示出不同的特征,并彼此间构成相互切割或复合关系,为构造系统的研究和期次的划分提供了证据。

根据岩石同位素年龄测定结果,坝址区主要断裂的形成年龄为 7.81 亿~8.01 亿年,表明主要为晋宁运动晚期的产物,晋宁运动形成了本区断裂构造的基本格架。中生代末的燕山运动,周围的盖层发生强烈的褶皱与变形,而核部的结晶岩地块,由于受到周围几条较大断裂对区域应力的吸收和缓冲,其变形破坏程度远较周围盖层为轻,主要表现为对早期断裂的复合与改造。根据主要断裂的动力学、运动学特点,断裂的组合切割关系,以及与岩脉的交切关系分析,大体可以确定断裂活动主要有 5 次,前 3 次属晋宁运动,为断裂构造形成阶段,后 2 次属燕山运动,为断裂的复合与改造阶段。进入喜马拉雅期以来,坝区断裂活动比较微弱,未见明显宏观标志。多种手段的综合研究表明,坝区断裂均为不活动断裂。

### 2.3 断裂构造的工程地质特性

构造岩宏观特征及大量样品的光学显微镜、扫描电镜、透射电镜分析显示,坝区构造岩主要为角砾岩、碎裂岩、碎斑岩、碎粒岩、碎粉岩及少量初糜棱岩等,反映了断层从破裂、裂解至磨碎的脆性变形过程。不同方向构造岩由于形成的地质力学环境不

同,工程特性有明显差别。

在4组断层中,NNW、NNE组相对较发育,规模较大,但由于后期热液活动和重结晶作用,加之长期处于压性和压扭性环境中,构造岩胶结良好,强度高,饱和抗压强度50~70 MPa,呈镶嵌结构,抗风化能力较强,透水性较弱。所以该组断层尽管规模较大,但并未构成主要工程地质问题。如坝区最大的高家冲断层(F23),长16 km,构造岩带最宽达20余米,但构造岩胶结良好,性质较坏的软弱构造岩宽仅5~15 cm,虽然断层带穿越左岸升船机坝段及临时船闸闸室段,但并未对建筑物带来重大影响,仅需对软弱构造岩作浅抽槽和常规固结灌浆处理。

NE-NNE、NW-NW-近EW组断层,一般规模不大。但由于多属张性或张扭性结构面,构造岩比较破碎,大多胶结不良,伴有分化加剧时则为松散或泥软物,对边坡岩体和硐室围岩稳定不利,也不能满足建筑物基础的要求。坝区本组最大的F215宽1~6 m,弯曲延伸,构造岩为角砾岩、碎斑岩、碎裂闪云斜长花岗岩等,胶结差,风化较强,呈疏松一半疏松状,沿断层透水性较强。在升船机一带,F215、F548等出露,或与F23交汇时,形成一定规模的软弱岩带,分别进行了较大规模的抽槽、砼置换等综合处理,在左非坝段一带还进行了特殊化灌。

岩体深部可见断裂、裂隙加剧风化现象。主要见于NE-NNE、NW-NW两组张扭(张)性结构面,偶见于NNE张性复合面。NNE向断裂与NE-NNE组或NW-NW组断裂交切部位,亦控制着深风化槽的形成。

#### 2.4 河床断裂构造研究

三峡工程坝址区长江河床水域及中堡岛,后河累计宽达1 000余米,对这些覆盖地段断层的勘察与分析研究,成为三峡工程勘察工作最大的难点。由于三峡大坝轴线上下游河床中存在专山珠、牯牛石两个基岩深槽,更加重了关于三峡枯水河床是否存在顺河向大断裂的怀疑和争论。20世纪50年代,前专家提出开挖过江平硐,以查清有无顺河断层。中国专家虽持不同意见,但在前苏联专家坚持下,仍决定进行这一难度极大的勘探工程,并在中堡岛开挖深达90 m的竖井,再进入河下平硐。后因前苏联专家撤走,中止了平硐开挖。

长江以140°方向流经坝址区并逐步转向70°,形成一向南突出的大弧,两侧漫滩均有基岩出露,极有利于断层研究工作。多年地质研究表明,坝区极

少有较大规模的顺江方向(NW向)断层分布,在坝基枯水河床部位沿水流方向延伸至上下游的漫滩部位,亦未发现顺江大断层展布。而早在20世纪50年代,实施了国内最早的深水穿江斜孔(415孔、416孔从两岸相向施钻,重叠约10余米)等,也基本否定了顺河向长大断裂的存在。

但直到二期围堰截流前,有权威人士对此仍担心不止。因此,在二期工程开挖前,河床区又补充大量地质勘察工作,按钻孔平面位置、孔深及断层发育规律,该地段钻孔密度基本可控制倾角在70°以下的断层分布。根据钻孔所揭露的断层构造岩类型、性状、规模,结合本区一般规律及周围钻孔揭露断层的对比分析,分析确定断层在平面上的分布及延伸长度。

开挖结果验证了前期研究结论,枯水河床坝基不存在顺河(NW)向长大断裂,较大的NNE、NNW向断层多为前期漫滩或钻孔已确定的断层,其规模远小于坝区F23、F7等断裂。河床坝段断裂总体发育程度与漫滩坝段无明显差异,

河床深槽段岩石完好,主要是夹带砂砾的异重水流在岩体局部破碎的地段侵蚀淘深,沿水流向上方溯源侵蚀,向下方顺流冲蚀磨蚀,逐渐延伸而成。

### 3 坝基深层抗滑稳定

三峡工程坝基裂隙岩体中发育不同程度的缓倾角结构面(优势方向倾向下游),构成了对大坝抗滑稳定不利的地质条件。其中大坝左厂1号~5号机坝段是坝址区缓倾角结构面发育程度最高的地段。由于采取坝后式厂房布置方案,坝基下游形成坡度约54°,坡高67.8 m的临空面,因此,其坝基深层抗滑稳定问题十分突出,是三峡工程最为关键性的技术问题之一。

研究工作自1977年可行性论证阶段至1993年技术设计阶段,包括生产、三峡工程前期科研及国家“六五”、“七五”科技攻关科研,采用了当时国内外可以得到的各种方法和手段,取得了丰富的资料和成果。有关缓倾角结构面的大多数问题,包括其分布特征、优势产状、结构面形态及充填物特征、短小结构面的连通率、结构面的力学参数等已查清或基本查清,有了明确的结论。

这些研究成果,是施工期前进行抗滑稳定研究的主要依据。在各设计阶段也因此提出了与当时研究程度相适应的抗滑稳定概化模式,满足了相应设

计阶段的需要。

但是,这些工作所能得到的不确定性抗滑稳定模式,严格而言,对于工程设计是远远不够的,其中最关键也是最大的难点是确定控制性滑移面的确切位置、产状、展布范围与组合关系。

工程开工后,利用施工开挖的有利条件,左厂1号~5号机坝段进行了两期三次“特殊勘察”研究工作,解决了如何查明岩体内长大缓倾结构面的空间位置、产状、分布范围和组合方式这一世界性的技术难题,使抗滑稳定研究取得了由假定统计、概化模式至确定模式的突破性进展,明确提出了2号~5号机组坝段坝基单独抗滑稳定及3号机组坝段厂坝联合作用下抗滑稳定分析和计算的确定性概化模式,并根据特殊勘察成果及当时建基面地质编录资料提供了作为三维计算的基本几何与力学概化条件,为设计提供了可靠的地质依据。

随后,在4年多的施工地质工作中,针对全区全面开挖揭露的地质条件,进一步详细研究了缓倾结构面及其他边界切割面的性状特征、组合切错规律、连通率等,并在此基础上,对照原勘察成果进行了全面的分析对比验证。结果表明,坝基深层及浅层滑移路径的数量及结构面的连通率均未超越研究过程中地质所提出的概化模式。

关于抗滑稳定的基本结论是:

1)1号~5号机组坝段建基岩体新鲜完整,绝大部分属于优质岩体。构成坝基抗滑稳定控制性滑移面的优势方向缓倾角裂隙均为硬性结构面。

2)1号~5号机组坝段滑移模式为直线型或阶梯型,主要潜在滑移面位于坝基以下0~45 m。各坝段不存在统一的深层潜在滑移面。其滑移路径是由若干条产状具有一定差异,且被各向陡、中倾角结构面所切错的缓倾角裂隙组成,潜在滑移面在空间上呈高低错落、扭曲起伏、且与库水推力方向有一定交角,滑移路径按二维平面问题概化,结构面力学参数按平直稍粗面取值,均有一定的安全裕度(见图1)。

3)2号、4号、5号机组坝段坝基抗滑稳定分析地质模式最终实际连通率29.3%~43.5%。3号机组坝段坝基抗滑稳定分析剖面深层潜在滑移面的实际连通率一般为58.9%~78.8%,最高达82.9%(概化连通率83.1%);考虑厂坝联合作用,其连通率最大值为76.4%(见图2)。

4)稳定分析中,侧向切割最不利的假定条件是,一侧为 $f_{10}$ 断层贯通切割,侧向切割面的连通率100%,另一侧为裂隙切割,连通率为20%。

这些结论,为设计处理左厂1号~5号机组段的抗滑稳定问题,提供了最终的地质依据。在工程施工中,设计并实施了一系列提高坝基抗滑安全度的工程措施,如:降低建基面高程、坝前增设齿槽、厂坝联合抗滑、封闭抽排等,为大坝的稳定与安全提供了充足的保障。

大坝挡水运行7年来,左厂1号~5号机组坝段地基岩体水平位移量仅3 mm左右,坝顶向下游位移10 mm左右。主排水幕后的坝基渗压水位高程约在52 m以下,低于坝基滑移主要控制性缓倾角结构面的位置。目前1号和2号排水洞总渗漏约68 L/min,且总体呈下降趋势。坝后最大扬压力系数为0.11。这些数据均远低于设计所设定的标准,表明左厂1号~5号机组坝段运行状态十分良好。

三峡工程左厂1号~5号机组坝段抗滑稳定问题的工程地质研究,不仅有全区各勘察设计阶段的基础资料为支持,而且在工程施工的特殊时期,创造性地运用了新的技术思路 and 手段,通过特殊勘探取得了极为珍贵的勘察成果。该成果在随后的施工地质过程中经全面验证,结果吻合。可以认为,三峡工程左厂1号~5号机组坝段抗滑稳定问题的工程地质专项研究工作,不仅成功地解决了三峡工程左厂1号~5号机组坝段抗滑稳定问题,同时也为研究岩体中长大缓倾结构面的空间位置、产状、分布范围和组合方式这一关键性的、世界性的技术难题,提供了一套新的、完整的技术思路、手段和方法。

## 4 船闸高边坡稳定与变形

三峡永久船闸由南北高边坡及中隔墩南北坡四面坡组成,各长1 607 m,边坡最大高度达170 m,下部闸室墙为高40~68 m直立坡。

三峡船闸边坡是劈岭开挖而成W形双向四面,卸载约6 330万t,岩体在相当短的时间内经受了急剧的卸荷和应力调整;边坡下部直立坡是船闸结构的一部分;闸门安装后,要求边坡的变形量小于5 mm。

三峡永久船闸高边坡的这些特点,国内外尚无先例可循。

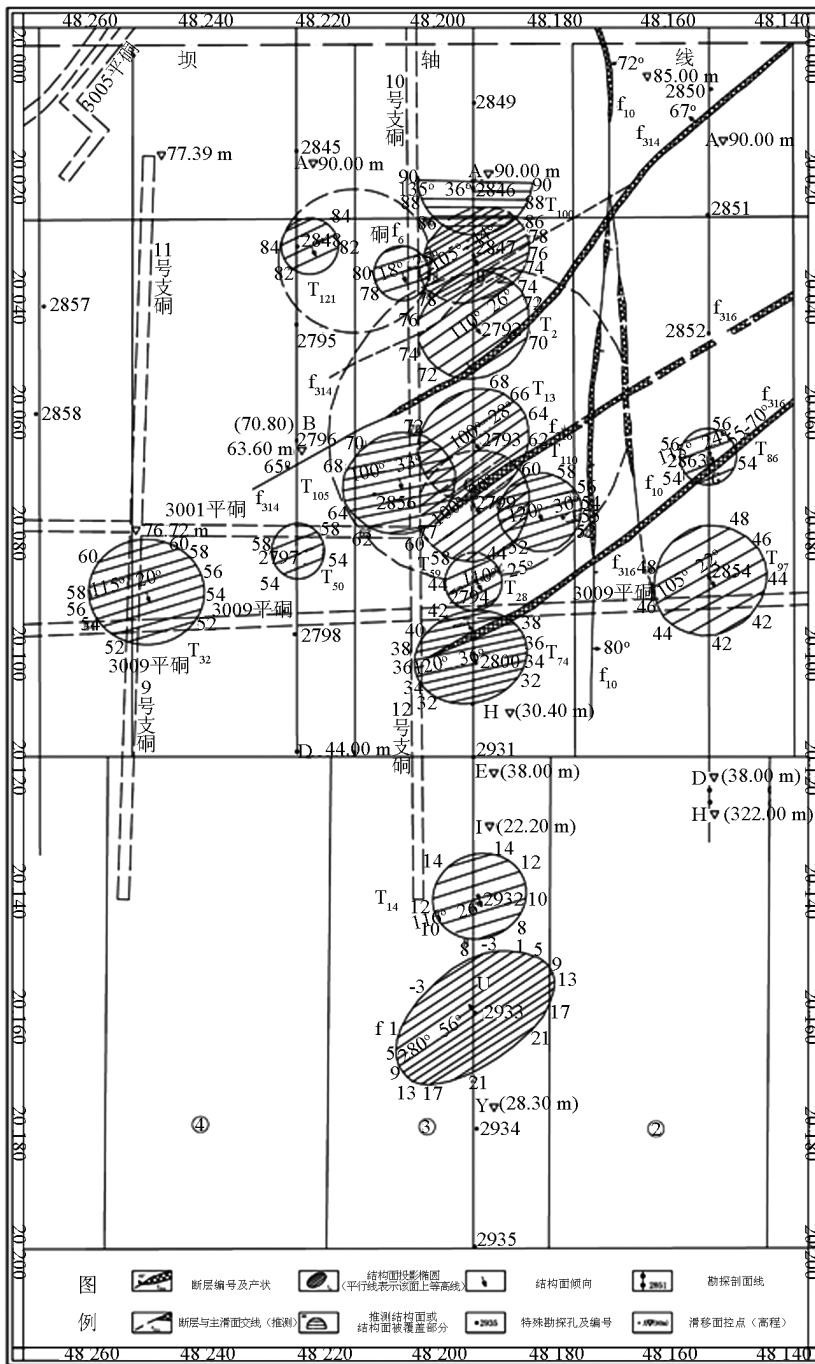


图1 左岸厂房2号~4号机组坝段主要控制性滑移面空间分布图  
 Fig.1 Spatial distribution of the major controlling slip planes of units 2~4 dam sections of left bank powerhouse

#### 4.1 边坡稳定问题研究

从“七五”重点科技攻关到技术设计,对船闸边坡的整体稳定性做了大量的研究,包括物理模拟试验,二维、三维有限元计算,极限平衡分析等。有限元计算表明,最大水平位移,直立坡顶为30 mm左右。南北坡斜坡段和中墩上部存在拉应力区,坡脚

为压应力集中和高剪应力区,个别断层出露部位出现剪切屈服。块体极限平衡分析结果表明,边坡出现整体失稳的概率很小,边坡整体稳定性好。

局部稳定是指其范围未达到整个边坡高度的岩体变形成破坏问题。船闸区最常见的边坡局部稳定性,是结构面组合形成的块体稳定。在施工期前,根



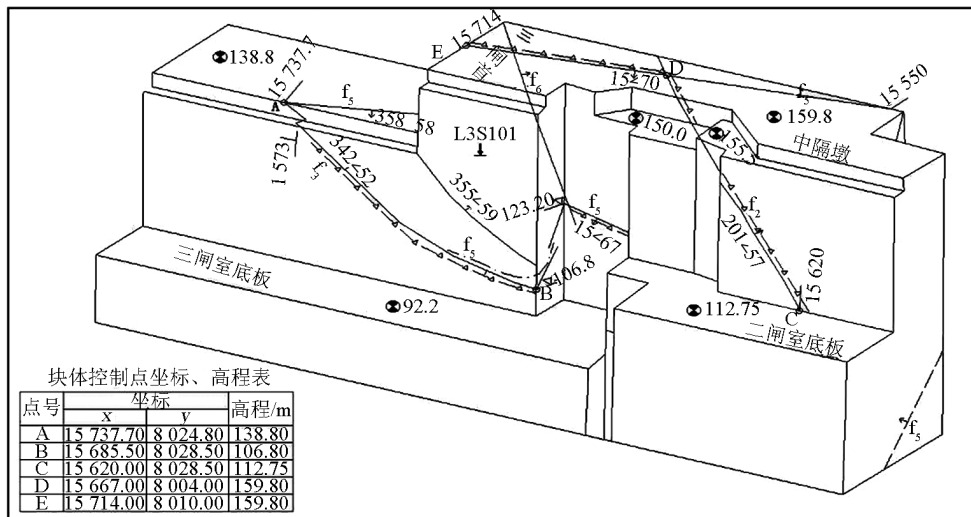


图3 三峡船闸三闸室中隔墩由  $f_5$  切割形成的 L3S101 块体立体示意图

Fig. 3 L3S101 block of middle division pier cut by  $f_5$  of the third lock chamber of Three Gorges ship - lock

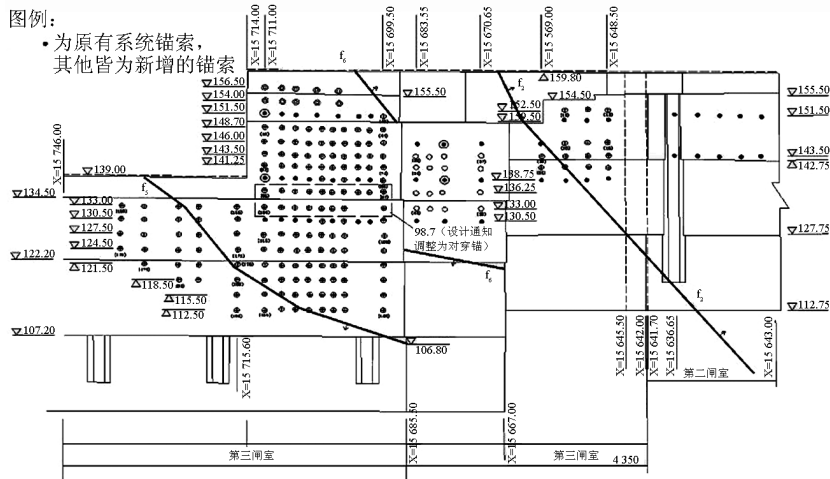


图4 三峡船闸由  $f_5$  切割形成的 L3S101 块体锚索加固等处理示意图

Fig. 4 Anchor cable reinforcement of L3S101 block cut by  $f_5$  of Three Gorges ship - lock

弱风化带及微、新岩体边坡松弛带划分为爆破-卸荷松动带和卸荷松弛带两个亚带。前者主要受爆破振动和表层强卸荷的双重影响,表现为岩体中产生的新的爆破裂隙,原生结构面大量张开位错,岩体松动,岩体强度有较大降低(主要是结构面强度的降低);在爆破控制较好的地段,该带的深度一般为3 m左右,损伤严重的地段,深度远大于此,主要表现为结构面的张开、位移。卸荷松弛带的深度在不同部位变化较大,且卸荷松弛深度坡顶比坡脚大。

三峡工程永久船闸高边坡开挖前,就在边坡岩体中埋设了多点位移计,钢筋丝伸缩仪,随着开挖高程的下降,连续进行监测,获得了边坡深部岩体变形的全过程,积累了宝贵的资料。对边坡岩体卸荷得出了以下几点基本认识。

1) 根据大量测试和监测资料分析归纳,可将边坡岩体从坡面向深部按开挖卸荷的影响程度划分为3个带:即强卸荷松弛带、弱卸荷变形带和卸荷应力调整带。并采用微应变( $\mu\epsilon$ ) ( $10^{-6}$ )作为划分3个带的标准,见表1。

表1 坡体开挖卸荷分带

Table 1 Unloading zones of slope excavation

卸荷分带	强卸荷松弛带	弱卸荷变形带	应力调整带
应变量 ( $\mu = 10^{-6}$ )	> 2 000	300 ~ 2 000	< 300
平均波速值/ ( $m \cdot s^{-1}$ )	3 000 ~ 4 000	4 000 ~ 5 000	> 5 000
裂隙张开 宽度/mm	> 3	1 ~ 3	< 1

强卸荷松弛带:边坡表部受多种因素严重扰动了的岩体,主要表现为岩体强烈卸荷松弛并受到施工爆破及反复震动损伤,弹性波波速有明显下降,声波纵波速度大体在 3 500 m/s,比完整岩体降低约 35 % 左右。

弱卸荷变形带:这一带的分布大体上和各种计算中的塑性区相适应。岩体纵波速度与完整岩石相比有所下降,在 4 000 ~ 5 000 m/s 之间,降低约 15 % 左右。

卸荷应力调整带:从理论上讲,岩体受深开挖卸荷影响的范围可能很大。设置于山体中的 8#平洞内的伸缩仪,7 个测点距开挖边坡的距离 48.4 ~ 258.4 m。根据 5 年(1995.9—1999.10)的监测成果,受开挖卸荷的影响,7 个测点的岩体仍有极微小的变形,但岩体的各种物理力学参数没有什么变化。因此卸荷应力调整带仅是理论意义上的分带,对岩体的性质和强度不具有任何实际意义的影响。

2) 监测过程表明,当边坡开挖至仪器同水平高程时,仪器尚无明显的反映。当开挖至仪埋高程下方 3 m 时岩体始有变形的迹象,开挖在仪埋高程以下 3 ~ 15 m 范围内进行时,强卸荷松弛带和弱卸荷变形带变形剧烈,并完成几乎全部的变形过程。而开挖继续向下进行时,强卸荷松弛带和弱卸荷变形带内的仪器已无明显的反映,而应力调整带内仍有微小量的变形进行。这一现象说明,岩体卸荷是一个随着开挖(河谷下切)不断逐步发生又不断完成的过程。

3) 在三峡工程坝区古老坚硬块状的花岗岩体中,岩体开挖卸荷大部分变形的完成是比较快的。开挖结束后,边坡直立墙顶部的变形量已占到总变形量的 85 % ~ 90 %,亦即绝大部分的卸荷回弹变形在开挖期都已发生,开挖结束后的期后变形只占到很小的一部分。

4) 观测还发现,距离边坡坡面愈近的测点,其

稳定时间愈早,而离边坡较远的测点,变形稳定的时间愈晚,表明边坡深部岩体比表层岩体有明显的滞后变形现象。这是由于边坡开挖后,其应力调整由边坡向山体内有一个逐步发展的过程,相应的岩体变形也有一个滞后的适应过程。

这些观测成果是人工开挖边坡卸荷变形的某些规律,无法与河谷下切的复杂自然过程相比,但所提供的现象仍对我们认识河谷卸荷带有所启发。

#### 4.2.2 边坡岩体变形特征

对于边坡岩体变形,采用了多种方法进行监测,但埋设最早,观测资料最完整的是外部变形监测成果。

从变形监测资料的分析中,可以得出以下几点主要认识:

1) 变形量大小与施工开挖强度之间有很好的对应关系,开挖量大变形量就大,开挖停止,变形量就迅速变小。

2) 全、强风化带岩体的变形量远大于弱风化及微、新岩体。当开挖进入微新岩体后其变形速率与微新岩体相当。

3) 中隔墩受闸槽开挖影响,向两侧变形,开挖量大变形量大,哪边开挖量大,中隔墩向哪边位移。

4) 根据多点位移计和伸缩仪的资料,表层爆破-卸荷松动带的变形量远大于其深部的卸荷带。因此外观所得的变形观测成果,系两种不同性质变形的总变形量。

5) 边坡变形还与原始地形、开挖形状、具体点的地质条件、锚固与否等有关系。

最终变形监测结果表明,边坡变形规律符合设计预期,变形量均在允许范围内。以南北坡直立墙及中隔墩顶部的 74 个监测点为例,从 1996、1997 年开始设点监测,至 2010 年 10 月有连续完整监测资料的 27 个点,累计总变形量多在 20 ~ 40 mm 间,到 2004 年变形均基本稳定。试验性蓄水期间,各闸首向闸室方向的位移 -0.25 ~ 5.27 mm(四闸首南边墙),各闸室段墙顶向闸室方向位移 -0.01 ~ 5.91 mm(南线五闸室),均属正常的周期性变化。

关于永久船闸高边坡变形是否收敛达到稳定,时效变形量有多大,持续时间有多长,是关系永久船闸能否长期安全运行的关键问题,一直为各方关注。

船闸闸室段(直立墙段)开挖期的边坡变形过程可分为过渡期、调整期和稳定期 3 个阶段(见图 5)。统计分析结果表明,开挖结束后,岩体变形即明显趋缓,其



变形量仅占全部变形总量的 10% ~ 15%。

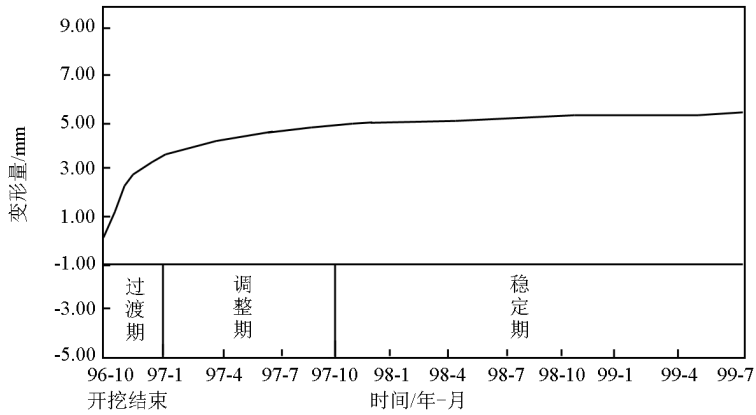


图 5 船闸闸室段开挖期边坡岩体变形阶段划分示意图(TP14GP04 点)

Fig. 5 Stage division of slope rock deformation during the period of ship-lock chamber excavation(TP14GP04)

## 5 地下电站主厂房围岩块体稳定问题研究

地下电站系统的勘察设计工作始于 1993 年,主要进行了可行性研究、3 次专题研究和招标设计等阶段的勘察设计工作。

三峡地下电站的勘察,从三峡工程的实际地质条件出发,厘定工程主要地质问题为由规模不等的结构面切割形成的块体稳定问题,尤其是大型控制性块体的稳定,对总体设计布置及支护等影响巨大。

大型块体的勘察,主要通过常规小口径钻孔及厂房边墙关键高程平硐及支硐,形成立体勘察网络(图 6 和图 7),并重点关注可能构成大型块体的地质边界,进行动态追踪勘察。勘察发现,原设计方案主厂房部位存在数个体积大于  $1 \text{万 m}^3$  大型潜在块体(总量达  $10 \text{万 m}^3$ ),且主要的 1 号块体(约  $5 \text{万 m}^3$ )稳定性差。为减少块体的数量和规模,增大块体底端的支撑力,经反复勘察比较,最终厂房轴线较前期布置方案下移了 20 m。

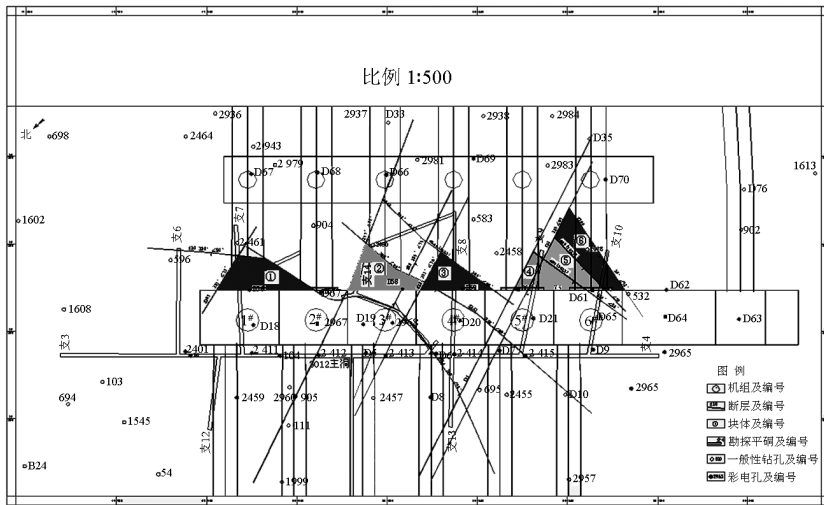


图 6 三峡地下电站 100 m 高程工程地质平切图

Fig. 6 Horizontal section of engineering geology of underground power station at El. 100 m

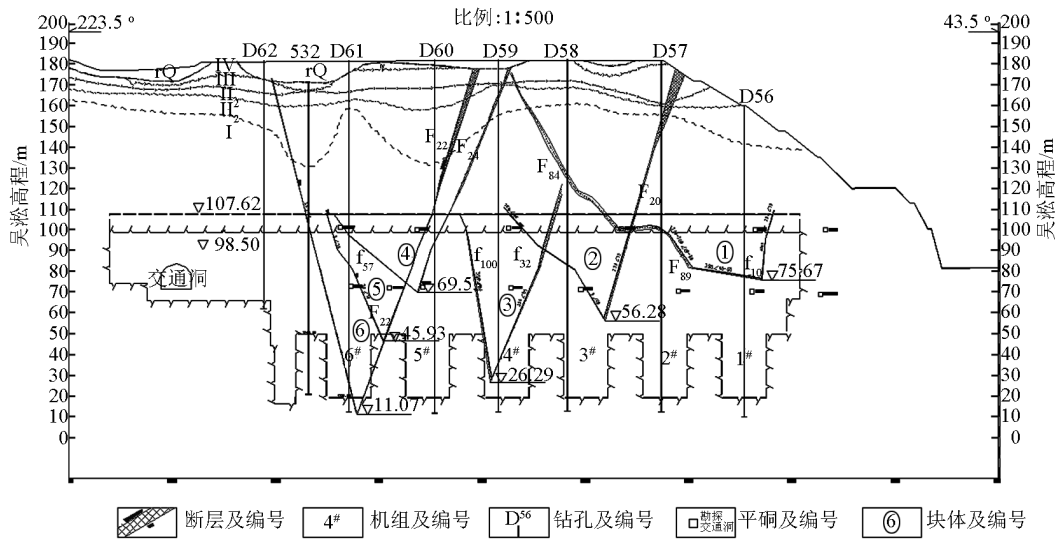


图7 三峡地下电站主厂房下游边墙工程地质剖面图

Fig.7 Engineering geology profile of the downstream side wall of main plant of underground power station

2005年主厂房顶拱开挖以来,地质人员结合三峡工程地下电站地质条件的特点,利用大型洞室观测成像可视化地质编录技术和地下洞室三维块体自动搜索计算软件系统,形成了一套合理、快速、高效的施工地质工作流程,在整个施工过程中,做到实时

跟踪、及时预报、定位定量累计预报了118个块体,总体积15万多 $m^3$ ,为地下厂房加固提供了翔实资料和可靠的地质依据。前期勘察预测的6个大型块体,其规模、类型和力学特征与施工揭露的结果基本一致,只是边界条件有局部变化。

## The research on main engineering geological problems in dam-site of Three Gorges Project

Xue Guofu, Chen Youhua

(Changjiang Institute of Survey, Planning, Design and Research, Changjiang Water Resources Commission, Wuhan 430010, China)

[Abstract] The site geological investigation and research work of the Three Gorges Project (TGP) has lasted for more than 50 years, which catches wide attention at home and abroad due to its depth and extent. The research processes, approaches, contents and basic conclusions for the key engineering geological problems of dam site are briefly introduced, including the deep anti-sliding stability of dam foundation, the high slope stability of permanent ship-lock, the surrounding rock mass stability of the main plant of underground powerhouse and the faulted structures. Finally, an overall summarization and evaluation of the research are presented based on the situations of project construction, monitoring and operation.

[Key words] dam area of TGP; engineering geological problems; investigation and research; summarization