

三峡永久船闸中隔墩岩石力学问题研究

戴会超

(中国长江三峡工程开发总公司 宜昌 443002)

摘要 永久船闸中隔墩找平混凝土面裂缝关系到边坡的稳定和运行安全,对永久船闸中隔墩裂缝的情况进行调查,结合地质条件、变形监测系统、裂缝理论分析和中隔墩三维有限元分析计算,分析了裂缝的成因,并提出了工程措施。

关键词 三峡,高边坡,中隔墩,裂缝

分类号 TV 698.1⁺1

文献标识码 A

文章编号 1000-6915(2001)05-0680-05

1 概况

永久船闸横贯枢纽左岸山体,上下游设引航道与长江主河道相连,全长为6 442 m,其中主体建筑物段长为1 607 m,是高边坡最集中的区域,最大边坡高度达170 m,边坡高度连续超过120 m的范围,长约460 m,土石方明挖为 $3\,715 \times 10^4 \text{ m}^3$,洞挖为 $98 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。

两线船闸中间留有54~57 m的岩石中间隔墩。因此,在主体建筑物段形成双陡槽式双侧边坡。为充分利用岩石的高强度和节省工程造价,在陡槽部位开挖成直立边坡,闸室的边墙为锚固在直立边坡上的混凝土薄衬砌,边坡的岩体亦构成船闸结构的一部分。

针对永久船闸高边坡的特殊性和重要性,采取了山体排水、地表堵水、截排和预应力锚索、高强锚杆、喷混凝土支护,施工中严格控制施工程序和整套控制爆破措施,以及加强原型监测和反馈分析,实行动态设计的综合治理措施。

永久船闸二闸室至三闸首中隔墩顶面找平混凝土于1997年9月~1998年5月浇筑完成。1999年4月,对二、三闸室中隔墩找平混凝土裂缝进行调查,二闸室中隔墩发现裂缝137条,总长为1 297.8 m,其中混凝土施工结构缝长为330.6 m,主要分布在中隔墩南侧,长度大于10 m的有34条,5~10 m的有64条,3~5 m的有25条,3 m以下的有14

条,缝宽为0.4~10 mm不等,少数缝宽为20 mm。裂缝走向以NW向为主,部分走向为EW向,其他裂缝无规律。三闸室中隔墩发现裂缝90条。1999年9月,南二闸室交通桥形成后,清理160平台石渣,发现21条裂缝,总长为153.5 m,主要分布在中隔墩北侧。2000年3月,再次对二、三闸室中墩混凝土裂缝进行调查,二闸室中墩发现裂缝78条,其中原混凝土裂缝处理后又裂开的有70条,新增裂缝8条。三闸室中墩发现裂缝14条。裂缝宽度为0.4~1.5 mm。裂缝出现后,引起了各方的关注。为了确保三峡工程2003年通航发电,全面综合地研究永久船闸中隔墩岩体变形规律及其发展趋势是十分必要的。因此本文主要针对二闸室至三闸首部分的中隔墩岩体进行分析。

2 变形监测系统

中隔墩岩体变形监测是永久船闸安全监测系统的重要组成部分,特别是本专题研究范围内即二闸室至三闸首为监测的重点部位,自1997年8月开始,在该段中隔墩顶面南、北两侧埋设了表层岩体位移监测点8个,主要分布于13-13($X=15\,494$),15-15($X=15\,570$),17-17($X=15\,675$)三个重点剖面上及三闸首尾部($X=15\,714$),见图1。图中,“TP”为中隔墩水平位移监测点,“BM”为垂直位移监测点,“GP01”代表北侧,“GP02”代表南侧,位移量符号规定为: X方向“+”表示下游位移; Y方向

2001年6月16日收到初稿,2001年6月30日收到修改稿。

作者 戴会超 简介:男,37岁,1994年毕业于河海大学水力发电工程系,现任高级工程师,主要从事三峡工程科技管理和三峡工程重大长远性课题方面的研究工作。

“+”表示北侧闸室位移，南侧向南闸室位移；垂直方向“+”表示下沉。分开位移量主要指中隔墩同一监测端面南北侧测点相对分开水平位移值大小，分开为正(+)，收缩为负(-)。在本文的分析中，即以该段的三个剖面(13-13, 15-15, 17-17)为研究对象来分析中隔墩的变形规律及其发展趋势。如图 1 所示。综合分析监测资料、施工情况及施工地质资料可以得出以下结论：

变形受闸室开挖影响最明显，开挖加深变形增大。开挖停止，变形趋缓。

中隔墩南北两侧对应测点存在相对变形。其中 13-13 断面最大。北侧点向北位移为 23.09 mm，南侧点向南位移为 5.94 mm，二者相对变形为 29.03 mm。两侧岩体的相对位移如不能在其区间中均化时，则出现直观可见的裂缝是必然的。对三峡船闸脆性岩体而言，这种裂缝将主要在岩体弱化区，如断裂构造、爆破松动区等部位出现。出现的具体位置、时间和程度则受不同部位地应力的差异、地质构造条件与几何约束条件的差别、加固时机及加固程度等控制。中隔墩顶部测点垂直位移普遍表现为向上回弹。位移集中在岩体上部；顶部加固对变形有约束；岩体上部有错动现象。裂缝开度随开挖下切明显增大，开挖停止则裂缝开度增加的速率减小；加锚后裂缝开度减小。

3 永久船闸中隔墩三维有限元分析

中隔墩变形是永久船闸安全稳定的关键问题，以往的科学研究表明，中隔墩存在较大面积的屈服区和拉应力区，施工过程中，对二、三闸室中隔墩找平混凝土裂缝进行调查，发现二闸室中隔墩有裂缝产生，所以中隔墩岩石力学问题得到国内外岩石力学专家的关注。有限单元法自 20 世纪 50 年代发展至今，已成为求解复杂的岩石力学及岩土工程问题的有力工具，并已成为越来越多的工程技术人员熟悉，它已成为在岩石力学领域中应用最广泛的数值分析手段。特别是近十余年来，有限单元法在工程应用方面已有了较大的进展，并引起广大工程技术人员兴趣。

有限元数值模拟方法在应用于分析和评价工程地质条件复杂与边界条件难以处理的岩土工程实际中，不仅能考虑岩体的不连续性、应力-应变关系非线性及力学性质各向异性等特征，而且能够全面反映岩体中的应力、应变状态，对岩体稳定性进行定量评价。而采用平面有限元计算模型往往不能充分反映工程实际情况，计算范围局限在某一剖面，未考虑岩体的整体影响，往往造成计算结果的失真。因此采用三维空间有限元模型对中隔墩岩体进行

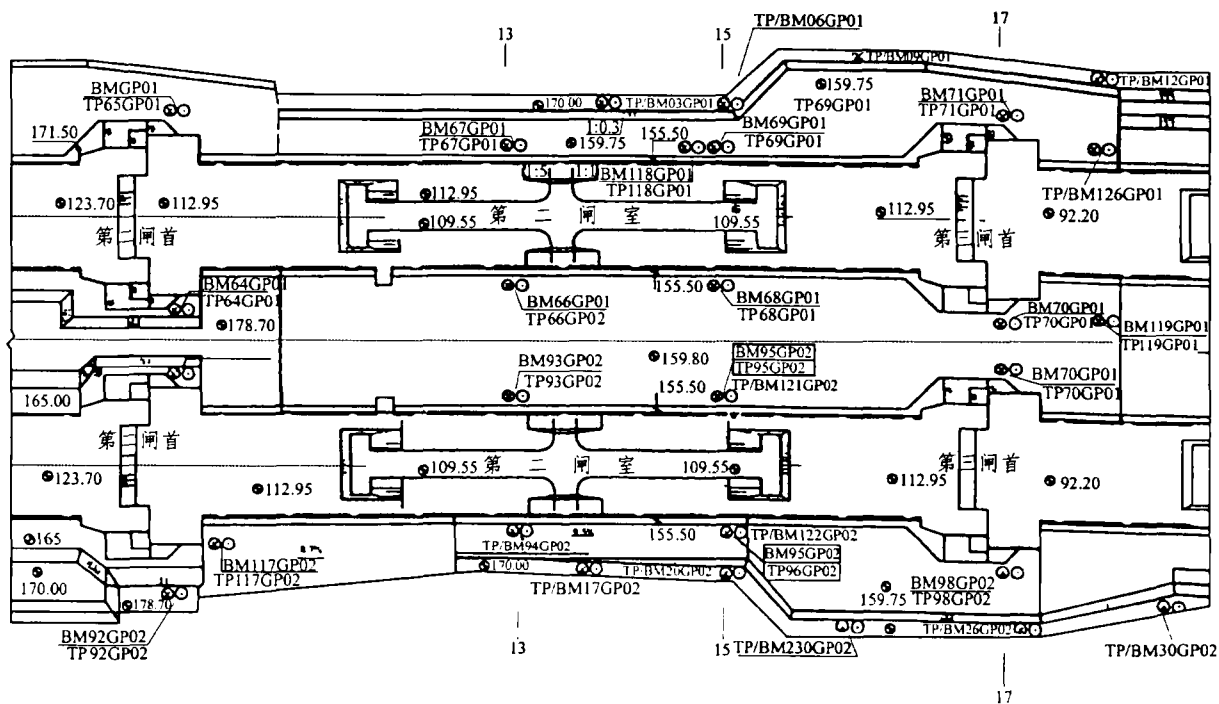


图 1 第二闸室至第三闸首中隔墩变形监测点平面布置图

Fig.1 Plan layout of survey points for the permanent shiplock's division pier from lock chamber 2 to lock chamber 3

稳定分析,更能满足工程的实际需要。

3.1 计算范围及计算边界条件

三峡永久船闸二闸室至三闸首段中隔墩长为307 m,南北宽约为57 m,节理、裂缝密集,计算时,计算模型东西向取二闸室至三闸首段共307 m,南北向取133 m,将需计算的中隔墩全部包括在内,计算区域共划分为3364个节点,2354个8节点空间单元。中隔墩周围约束的单元采用铰支连接,鉴于中隔墩岩体完整、坚硬,故在深部 X , Y , Z 方向均被约束,中隔墩顶面、侧面为自由。计算荷载考虑自重应力场及开挖释放荷载,开挖释放荷载的大小根据中隔墩地区的地应力资料确定。计算工况分为自然状态未充水情况、北闸室充水、南闸室充水和南北两闸室充水4种。

3.2 计算成果分析

中隔墩三维有限元计算结果表明:

(1) 闸室槽开挖后,中隔墩岩体三面临空,具备了一定的卸荷条件。边坡下切开挖至闸室槽底过程中,中隔墩上部约3/4范围由原双向压应力状态逐渐变至水平向为0或拉应力状态,拉应力值一般小于0.6 MPa。

(2) 中隔墩岩体裂缝双侧岩体开挖后,上部卸荷相对充分,下部卸荷不彻底,表现为上大下小的不均匀变形,岩体变形主要通过张拉开裂去适应,很小部分为岩块的膨胀与拉伸。岩体开裂优先在薄弱部位产生,即沿结构面或松动区内张开、扩展,并在裂缝延伸方向将岩体局部拉裂,使短小裂缝相连接或延伸。由于岩体自身具有一定的抗拉强度,且下部约束,卸荷不彻底,开裂主要集中在中隔墩顶浅表层的爆破松动带和卸荷影响区内。

(3) 通过对中隔墩裂缝模拟计算表明:卸荷过程中,中隔墩顶部水平位移量较大,其单侧水平位移量值达25 mm,说明中隔墩岩体变形后的拉裂主要受水平向卸荷作用的影响。由于中隔墩变形总体向坡外,因而墩顶裂缝走向的总趋势多近平行船闸的方向,部分受结构面控制而偏转成与船闸轴线斜交。

(4) 超载计算

所谓超载计算,即考虑当单侧闸室充水,另一侧放空的情况下中隔墩的整体稳定性,是对运行期船闸稳定性的模拟。计算考虑了3种情况:

- ① 北闸室充水,南闸室放空;
- ② 南闸室充水,北闸室放空;
- ③ 两侧闸室同时充水。

计算结果显示,在超载情况下,即船闸在运行期,中隔墩整体变形很小,最大变形量为 $3 \times 10^{-5} \sim 6 \times 10^{-5}$ m,对工程的运行不构成威胁,中隔墩整体来说是稳定的。

4 永久船闸中隔墩顶面混凝土裂缝分析^[1, 2]

中隔墩顶面找平混凝土裂缝问题引起众多的关注,以往的数值计算分析中隔墩有较大面积屈服区或拉应力区,在设计中布置了3排对穿预应力锚索和3排锁口锚杆,以防止中隔墩松弛。中隔墩顶面找平混凝土裂缝与地质条件和开挖卸荷、开挖爆破、锚固支护形式等密切相关,地质结构面和开挖卸荷是中隔墩岩体产生裂缝的主要内因,开挖爆破是主要外因,锚固支护形式起了辅助作用。

4.1 岩体存在地质缺陷是裂缝产生的内因

显然,没有地质结构面的存在,除中隔墩边缘受爆破影响严重的局部范围外,是不会出现岩体裂缝的。二闸室段中隔墩共出露断层32条,与船闸轴线呈大交角斜交的陡倾角断层为主,交角小于 30° 的断层共10条(占总数的31%)。与船闸全区相比,本区段与船闸轴线呈小交角的断层数量明显偏高(全区为14.19%);断层均属裂隙性小断层,占总数90.6%的29条断层均小于100 m。中隔墩顶面共测得裂隙1314条。80%以上的裂隙倾向北闸室,与船闸轴线交角小于 30° 的近EW向裂隙,较船闸区其他部位有所提高,占裂隙总数的27%;裂隙平均迹长为7.35 m,迹长小于5 m的占36.9%,大于10 m的占17%。这些断裂构造的存在,对中隔墩岩体变形起决定性的作用。已发现的长度、张开度、下切深度最大的几条裂缝均是沿着原结构面张开形成。

4.2 开挖卸荷引起的地应力变化是产生裂缝最主要的原因

开挖卸荷使中隔墩岩体由压应力状态逐步变化为拉应力状态,岩体中的实际响应主要是原有裂隙的张开及可能的扩展,其次是岩石自身的膨胀与拉伸,表现为断层逐步进入张开状态,裂隙密集部位,则可能拉裂岩桥而形成连续的裂缝。

4.3 加锚不及时导致裂缝宽度增大

断裂力学模拟分析成果表明:在中隔墩的临空面布置锚杆和锚索加固,能明显减小裂缝开裂和扩展的宽度;靠近顶面布置比中下部布置效果好;及

时施工系统锚杆时的裂缝宽度增加很小(不到总宽度的 1/10)。实际施工时,在开挖到底之前仅实施了锁口锚杆,锚杆和锚索加固均严重滞后于开挖,是导致在开挖达一半深度以后浇筑的墩顶找平混凝土大量出现裂缝且宽度明显增加的主要原因之一。

4.4 爆破是岩体开裂和扩展的因素之一

闸室入槽开挖后,爆破振动对岩体反复扰动,导致隐裂隙、裂隙扩张,岩体松弛进一步加剧。尽管对爆破进行了有效控制,采用了施工预裂和光面爆破技术,梯段爆破单响药量控制在 50 kg 以内,光面爆破单响药量控制在 10 kg 以内,由于开挖深度大,爆破时间长,振动次数多,中隔墩悬臂结构在爆破振动作用下顶部产生位移是必然的。二、三闸室 1997 年 3 月开始入槽开挖,1999 年 3 月爆破基本结束,闸室分 6 个梯段开挖,每隔一个梯段(7~10m)开挖时间约为 3 个月,底部保护层及分流槽开挖时间约为 4 个月,每个闸室爆破次数约为 800 次,4 个闸室共爆破约 3 200 块次。如此频繁的爆破振动对边坡岩体产生扰动,不稳定块体在外力作用下发生变形导致岩体裂隙张开,特别是爆破部位距边坡小于 10 m 范围内,爆破振动对边坡变形的影响更大。在锚固支护期间,由于爆破次数相对减少,边坡岩体变形量也相对减少,大量爆破振动监测数据已证实了这一规律。随着闸室开挖结束,爆破终止,锚固施工完成后,中隔墩岩体变形相对收敛而趋于稳定,岩体变形监测资料证明了岩体位移情况。

5 结 论

通过对永久船闸中隔墩裂缝的情况进行调查,结合地质条件、变形监测系统、裂缝理论分析和中隔墩三维有限元分析计算和裂缝的成因分析,得到如下研究结论:

(1) 引起中隔墩裂缝的主要因素是开挖卸荷及地质构造,其次是爆破振动及加锚不及时所产生的影响。但裂缝规模不大,不会直接影响工程安全。从各种分析看,目前中隔墩总体性状仍然较好,整体是稳定的,局部张开裂缝经适当加固处理后,能满足结构运行要求。加固支护实施进度不及时,对限制裂缝开展有不利影响。

(2) Y 方向的位移是研究的重点,其变化规律及发展关系到船闸的安全运行。根据多种方法的研究结果可以得出:在开挖完成后,该方向位移较大,

累计位移值最大达到 38.2 mm;在运行期当双闸室充水时,中隔墩北侧位移稍有减少,最大累计位移达到 25.8 mm(13-13 剖面),南侧位移表现为向北变形,特别是 15-15,17-17 剖面的位移已经不再向闸室方向发展,17-17 剖面的累计位移达到 9.47 mm。观测资料表明裂缝变形达到稳定后变形曲线开始有收敛的趋势,说明中隔墩裂缝的变形已经处于比较稳定状态。

(3) 通过对中隔墩裂缝进行三维有限元模拟表明:卸荷过程中,中隔墩顶部水平位移量较大,其单侧水平位移量值达 25 mm,说明中隔墩岩体变形后的拉裂主要受水平向卸荷作用的影响。由于中隔墩变形总体向坡外,因而墩顶裂缝走向的总趋势多近平行船闸的方向,部分受结构面控制而偏转成与船闸轴线斜交。在超载情况下,中隔墩整体变形很小,最大变形量为 $3 \times 10^{-5} \sim 6 \times 10^{-5}$ m,对工程的运行不构成威胁,中隔墩岩体处于基本稳定状态。

(4) 中隔墩混凝土裂缝处理措施^[1]。对裂缝密集且延伸长区即大型不稳定块体或断层、裂隙发育所在区,采用对穿锚索将不稳定块体加以锚固,限制岩体裂隙进一步扩展,改善岩体受力条件,使岩体处于受压状态,才能真正减少或避免混凝土产生裂缝。二闸室中隔墩在 15 418~15 580 m 处增加了 2 排对穿锚索,三闸室中隔墩在 15 690~15 710 m 处增加了 5 排对穿锚索,在 15 720~15 900 m 处增加了 3 至 4 排对穿锚索。对穿预应力锚索使岩体处于受压状态,岩体裂隙趋于闭合。混凝土裂缝延伸较短且少的区域也即小型不稳定块体所在区,采用端头锚索或随机锚杆将不稳定块体加以锚固。端头锚索内锚段穿过裂隙面处于整体结构岩体内即可达到锚固要求,锚杆同样也要穿过结构面一定深度才能发挥作用。为防止地表水沿混凝土裂缝渗入岩体裂隙内,阻止地下水压力对岩体结构面劈裂拉伸作用,对混凝土裂缝全部进行人工挖凿,凿出宽为 8~10 m、深为 5~8 m 的梯形槽,用高压风将槽内混凝土渣吹净,再用湿棉纱擦净槽内粉尘,槽底缝内嵌沥青麻丝,槽内浇灌厚为 3~5 m 的沥青玛蹄脂,上部再用预缩水泥砂浆封闭梯形槽,有效防止了地表水渗入基岩裂隙。

参 考 文 献

- 1 长江水利委员会. 长江三峡水利枢纽永久船闸中隔墩裂缝分析及处理专题报告[R]. 武汉: 长江水利委员会, 1999

- 2 长江水利委员会综合勘测局. 永久船闸二闸室中隔墩地质条件及其对岩体变形和裂缝形成的影响分析[R]. 武汉: 长江水利委员会综合勘测局, 1999
- 3 郭冬生. 永久船闸二、三闸室中隔墩顶混凝土裂缝成因分析与处理[J]. 中国三峡建设, 2001, (5): 14~15

RESEARCH ON ROCK MECHANICS PROBLEMS OF DIVISION PIER OF THE THREE GORGES PERMANENT SHIPLOCK

Dai Huichao

(China Yangtze Three Gorges Project Development Corporation, Yichang 443002 China)

Abstract The cracks on the concrete surface of the permanent shiplock's division pier are related to the slope stability and safety during running. The cracking condition of the permanent shiplock is investigated. The cracking origin is analyzed and the engineering measures are brought out based on the geological conditions, deformation monitoring system, crack theory analysis and 3D FEM analysis of the division pier.

Key words the Three Gorges Project, high slope, division pier, crack

龙滩水电站正式开工

“5, 4, 3, 2, 1!”今天 16 时 51 分在近万人的同声倒计时中, 15 t 炸药在龙滩水电站左岸坝肩的爆破声打破了红水河滩亘古的宁静, 举世瞩目的龙滩水电工程正式开工。

龙滩水电工程位于广西壮族自治区红水河的上游, 是目前仅次于三峡工程的我国第二大水电工程, 也是水电开发、防洪及航运规划中的重点工程。龙滩工程总投资为 243 亿元, 预计 2003 年 11 月实现截流, 2006 年 11 月下闸蓄水, 2007 年 7 月 1 日第一台机组发电, 2009 年 12 月工程全部完工。

龙滩水电站工程建成后, 五成以上的电力将送往广东省。在满足广东和广西电力增长的需要、优化华南地区电源和电力结构、促进全国电路联网方面将起到重大作用。

龙滩水电站位于红水河上游的天峨县境内, 距天峨县城 15 km。

据介绍, 龙滩水电站投资规模和装机容量仅次于长江三峡水电站, 近期装机 $420 \times 10^4 \text{ kW}$ 、安装 7 台 $60 \times 10^4 \text{ kW}$ 的水轮发电机组(远期总装机容量 $540 \times 10^4 \text{ kW}$, 将安装 9 台机组), 年均发电量 $156.7 \times 10^8 \text{ kW} \cdot \text{h}$ (远期 $187.1 \times 10^8 \text{ kW} \cdot \text{h}$), 总库容 $162.1 \times 10^8 \text{ m}^3$ (远期 $272.7 \times 10^8 \text{ m}^3$), 防洪库容 $50 \times 10^8 \text{ m}^3$ (远期 $70 \times 10^8 \text{ m}^3$)。

龙滩水电站的建成将刷新世界水电站建设史上的三项第一。

龙滩水电站将建 192 m(远期 216.5 m)的高坝, 将是世界上最高的碾压混凝土大坝, 比目前最高的日本 Uragawa 大坝(156 m)还高 36 m(远期 60.5 m)。

龙滩水电站的地下厂房长 388.5 m、宽 28.5 m、高 73.6 m, 是目前世界上规模最大的地下厂房。

龙滩水电站还将拥有世界上提升高度最大的升船机, 全长 1 700 多米, 二级最大提升高度达 155.5 m(远期 179 m)。

(摘自 2001.7.2 《长江日报》)