

三峡永久船闸高边坡工程稳定措施

吴海斌

(中国长江三峡工程开发总公司,湖北宜昌 443002)

摘要:介绍了三峡永久船闸高边坡的规模、特点以及保证边坡稳定的设计技术路线,论述了保证边坡稳定的跟踪反馈研究和反馈设计思想、实施措施,即高边坡防渗排水措施、边坡锚固支护措施、控制爆破措施。根据边坡目前状况和相应监测成果验证了这些措施对边坡整体稳定性的作用。

关键词:船闸,边坡,排水,锚固,爆破,稳定性

中图分类号: TU457 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1980(2000)01-0072-04

永久船闸是长江三峡通航的控制性工程,不仅要保证其高边坡施工期的临时稳定,更要确保其运行期的长期稳定。为解决永久船闸高边坡工程稳定(包括变形控制)技术问题,10 多年来,国内、外专家学者进行了全面深入的研究,在此基础上制定了严密的边坡设计、施工技术路线:

- a. 船闸岩质高边坡和中隔墩岩体应具备足够整体稳定性,长期变形应有严格控制,以保证闸门正常运行。
- b. 边坡加固应采用截、防、排水和岩锚支护的综合处理方案。
- c. 加强施工期和运行期监测,进行动态跟踪反馈设计和研究。
- d. 加强施工控制、特别是爆破控制和适时支护。

本文重点介绍了围绕上述技术路线实行的具体措施,并对其效果进行了初步评价。

1 工程概况

1.1 边坡工程地质条件

永久船闸高边坡所在区域出露的基岩为前震旦纪闪云斜长花岗岩,岩石坚硬,微风化和新鲜岩石弹性模量试验值在 60.0 GPa 以上。岩体内岩脉较发育,以细粒花岗岩脉和辉绿岩脉为主,岩脉内以及周边岩体中裂隙一般都很发育,且风化程度相对较高。

高边坡区域内地质构造相对简单,以断裂构造为主。断层按走向可分为四组,即 NE—NEE 组、NNW 组、NNE 组和 NW—NWW 组,发育程度依次减弱。断层倾角都较大,一般在 60°以上。节理按走向也可以分为四组,即 NEE、NNW—NW、NNE—NE 和 NWW 向,倾角一般在 70°以上。这四组节理中以 NEE 组节理最发育,以 NWW、NW 向节理与边坡走向交角最小。

岩体全、强、弱、微风化带完整,其中全强风化带厚 10 m 左右,弱风化带一般厚 10 m,局部达 20 余米。

地下水以潜水裂隙水为主,主要由大气降水入渗补给。

1.2 工程概况

三峡永久船闸为双线连续五级船闸,总长 1670 m,最大开挖高度 170 m,其中下部为 45~68 m 高的直立墙段。两线闸槽间保留宽 56 m、高 45~68 m 的直立岩质中隔墩。船闸结构所需的 3 条贯穿主体闸室(首)段的纵向输水隧洞和每个闸首两侧开挖的 36 个竖井布置在两侧边坡和中隔墩岩体内。直立闸槽边墙结构为厚度 1.5~2.4 m 的混凝土薄衬砌墙,它通过高强结构锚杆与岩体连接,共同组成闸室结构。

设计的边坡轮廓线为:闸槽以上斜坡段分级开挖,边坡坡比的设计原则为:全风化岩体 1:1~1:1.5,强风化 1:1,弱风化 1:0.5,微新岩体 1:0.3,闸槽段为直立坡。

闸槽以上的斜坡段每 15 m 高为一梯段,梯段间设马道,马道一般宽 5 m,弱风化顶部设宽 10 m 马道,闸槽顶设宽 15 m 平台或纵向斜坡道,闸首处加宽至 35 m 左右。边坡整体轮廓形态参见图 1。

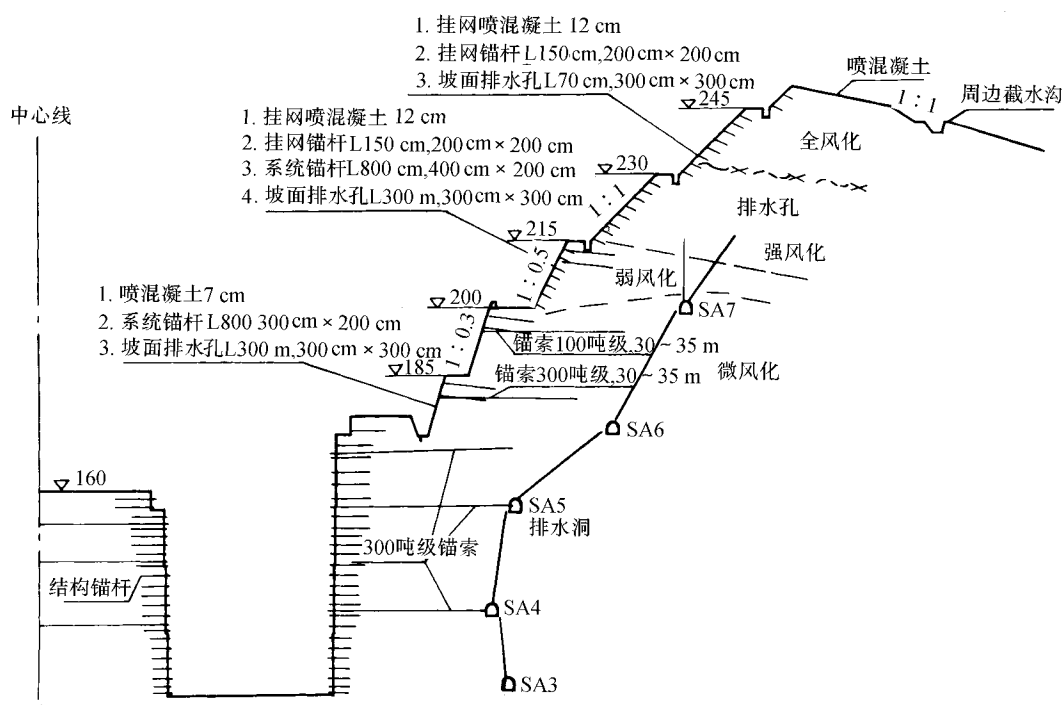


图 1 永久船闸高边坡截防排水、加固支护典型断面

Fig.1 Typical cross section of permanent shiplock high slope

边坡总体坡角较缓 约 $55^{\circ} \sim 60^{\circ}$. 但存在如下几个方面的不利因素：

a. 边坡横断面呈上缓下陡、中部凸出形状，体形不佳；

b. 由于结构上的要求，闸首底板较闸室向两侧坡内凹 9 m，同时要考虑闸首竖井的布置，形成多处临空。

c. 船闸闸槽除第 1、6 闸首闸槽边坡为陡倾斜坡（1:0.2）外，第 2、3 闸室（首）闸槽、第 1 闸室北线北坡均为微新花岗岩直立墙（坡），其中闸槽大部分为直立岩墙，直立岩墙长度总延米近 6 000 m，高度大于 40 m 者占 65%，直立墙最大高度 68 m，对岩体稳定不利。

2 高边坡防渗及排水措施

大量的研究和工程实例表明，地下水压力及地下水对岩体力学性状的恶化是造成边坡失稳的突出因素。船闸设计采用了充分利用岩体强度的混凝土薄衬砌墙方案，如何高效经济地进行排水设计成为难点之一。

船闸边坡防渗排水措施包括山体排水洞、排水孔、地表和边坡截排水措施及直立防渗排水系统（图 1）。

2.1 山体排水洞及其排水孔幕

在边坡两侧山体内各布置了 7 层排水洞，尺寸为 2.5 m × 3 m 和 3 m × 3.5 m（兼作锚固洞），高程分别为 200 m，170 ~ 175 m，152 ~ 177 m，130 ~ 152 m，110 ~ 125 m，89 ~ 94 m，70 ~ 72 m。排水洞内设置排水孔，以疏干边坡侧墙与排水洞 35 ~ 40 m 岩体范围的地下水。

排水孔上、下在排水洞处衔接，纵向形成平面“幕”，可重力排除上部渗水，也可拦截侧向补给，该措施可以有效地截、排渗向边坡岩体中的地下水。

2.2 地表和边坡排水措施

地表截、排水措施为在坡顶开口线以外设截水沟，开口线与截水沟之间喷 12 cm 厚混凝土封闭。

坡面截排水措施主要包括坡面喷混凝土封闭、坡面排水孔、坡面及马道纵横排水沟。

斜坡段坡面全强风化和弱风化坡段均采用镀锌铁丝网喷 12 cm 厚混凝土封闭，微新岩石则喷 7 cm 厚素混凝土封闭。坡面排水孔孔径均为 46 mm，孔排距 3 m × 3 m，在全强风化、弱风化和微新岩石坡段的孔深分别为 0.7 m，3.0 m 和 3.0 m，这一措施可以有效地防止坡面降水入渗和及时疏干坡面浅部地下水。

2.3 直立岩墙防渗和排水

由于直立岩墙不能随开挖及时封闭岩体，为确保岩体强度，在开挖揭露墙顶后应及时浇筑混凝土、封闭

直立墙顶面.直立墙形成过程中,适时地在上部10 m范围内喷10 cm素混凝土,全面封闭直立墙上部岩体.

后期进行的直立墙混凝土衬砌浇筑即可全面封闭岩体,但衬砌后直立岩面仍需排水减压.主要措施是在直立墙面上设置纵、横井式排水管网,纵、横间距 $4\text{ m}\times 6\text{ m}$.排水管为断面直径300 mm、横高200 mm的预制无砂混凝土管.墙后排水系统与后续的衬砌结构锚杆设计及受载大小密不可分.如何保证快速施工条件下安装排水系统,仍需进一步优化.

3 高边坡加固支护

船闸高边坡的加固与支护是在设计边坡整体稳定的前提下针对下述情况进行的:(a)边坡坡形设计和地质原因造成的随机不稳定块体;(b)较大规模的局部不稳定块体;(c)改善不利坡形的边坡应力状况,主要是边坡中部和直立墙上部;(d)直立岩墙与混凝土薄衬砌墙的共同作用.

实施过程中采用的加固支护措施主要有系统支护和随机支护.

3.1 系统支护

系统支护措施有喷混凝土防护、锚杆及锚索加固(图1).斜坡段系统砂浆锚杆布置在弱风化带及以下岩石坡段,主要用于加固各梯段坡上部台口岩体.其中弱风化坡段的锚杆参数为: $\varnothing 25\text{ mm}$ 、长8 m II级螺纹钢,孔排距 $4\text{ m}\times 2\text{ m}$,下倾 $5^\circ\sim 7^\circ$ 垂直坡面走向,分两排设在台口以下1.0 m和3.0 m,微风化岩体坡段则将孔排距调整为 $3\text{ m}\times 2\text{ m}$.

斜坡段系统预应力锚索布置在高边坡段(二闸首至三闸首)左右边坡宽马道以下,每个梯段布置一排,均为长30~35 m、孔距3 m的端头锚,较高的一排为1000 kN级、内锚段长5 m,其下为3000 kN级、内锚段长8 m.

根据前期研究成果,直立墙形成后上半部岩体多处于拉剪屈服状态,同时考虑到直立墙岩体与混凝土衬砌墙的连接,采用的系统锚固措施有系统锚索和系统锚杆.

预应力锚索在左右侧直立坡段布置两排,参数为3000 kN级、长度35~45 m、孔距3~4 m,上层锚索距墙顶8~10 m,第2层距墙顶20~25 m,均与山体内相应高程的排水(锚固)洞对穿,局部直立墙增高部位另布置了3排锚索.中隔墩岩体内预应力锚索的布置原则同上,采用3000 kN级的对穿锚.

直立墙系统锚杆的工作机理、设计要求、施工难度等都有其独特之处,经反复比较和修改,采用的措施为:直立墙第一梯段(顶部10 m范围)随开挖先及时实施系统锁口普通锚杆,其下部岩体则随开挖及时实施随机支护措施,同时按衬砌结构锚杆的施工要求适时施工结构锚杆,最后实施锁口部分的结构锚杆.

锁口锚杆分3~5排布置,长10~14 m,为 $\varnothing 32\text{ mm}$ 普通II级螺纹钢,孔距一般为2.5 m,排距1.5~2.5 m.

衬砌结构锚杆的主要作用是抵抗混凝土墙后的水压力使直立岩体、薄衬砌混凝土墙连成整体,共同组成结构系统.其设计涉及岩体强度、岩体变形、墙后排水、薄衬砌混凝土墙和杆体的内外部共同作用,同时需考虑它对墙体可能长期变形的适应性、长期有效性、温度荷载的影响.目前的基本方案为:采用 $\varnothing 32\text{ mm}$ V级高强精轧螺纹钢作为杆材,在直立墙上按水压力的分布,总体上是上疏下密、上长下短布置,锚杆长度8~13 m,排距1.35~2.00 m,孔距1.3 m~2.0 m.

3.2 随机支护

随机支护是对施工中动态反馈设计预报的或边坡开挖后已出露于台阶面或坡面上的潜在不稳定楔体进行的快速支护.实施中主要有以下几种支护类型:

- 100 m³以下的小型块体,以 $\varnothing 25\text{ mm}$ 或 $\varnothing 32\text{ mm}$ 普通锚杆加固为主.锚杆以穿过滑面一定深度为原则,长5~10 m;
- 100 m³以上的中、大型块体,以3000 kN锚索加固为主;
- 岩石破碎带,以锚杆结合钢筋网喷混凝土加固为主;
- 软弱断层地段,进行掏槽置换,规模较大影响结构时,增设锚杆或锚索.

4 施工程序与控制爆破

4.1 施工程序

为保证施工进度,同时尽量保护边坡岩体,采用的施工程序为:

- 地面开挖与地下开挖.同区段左、右闸槽应平行开挖,不能平行开挖时,高差不应大于一个梯段,排水

洞开挖应先于船闸明挖,以尽早疏干地下水,布置监测仪器,进行岩体锚索施工。输水隧洞及其施工支洞应先于同区段闸室明挖,要求隧洞开挖部位的相应闸室岩体至少保留自闸室底面以上 30 m,以保证洞室开挖基本不损伤边坡岩体,也有利于排水。原则上竖井至少先于槽挖一个梯段,但在实施过程中需视情况而定。

b. 开挖与支护。随机支护、斜坡段系统的喷锚支护、锁口支护均在满足爆破振动影响要求的前提下同梯段实施,避免岩体张拉离位。结构锚杆、锚索原则上要求隔一梯段施工,同时应满足爆破振动影响的要求。

4.2 爆破控制

招标文件推荐先锋槽+施工预裂+3 m 侧向光爆层的控制爆破方案。梯段开挖最大段药量不得大于 300 kg。光面爆破最大段药量不宜大于 50 kg。边坡和洞井壁的安全质点振速不得大于 10 cm/s。后经爆破试验、专家现场跟踪咨询和实施过程中的经验总结,实际采用的槽挖爆破施工程序为:先进行先锋槽深孔梯段微差爆破,然后再进行侧向预留保护层光面爆破。预留层宽度在第 1 梯段为 5~8 m,第 2 梯段 3~5 m,以下为 3 m。槽挖深孔梯段爆破时,钻爆孔分主爆孔、侧向一排缓冲孔和侧向施工预裂孔。

实际采用的爆破控制参数指标为:最大段药量,主爆孔 50 kg 以下,施工预裂、光爆孔 32 kg 以下,手风钻孔 15 kg 以下,质点振速,在距爆区边界 10 m 处, V_p 控制在 15 cm/s 以下,其中 58%控制在 10 cm/s 以下。据不完全统计,爆破塌落的块体占潜在不稳定块体总数的 8%,说明爆破控制良好。

5 边坡监控与稳定评价

为验证前期边坡研究和设计成果、动态反馈设计依据和监控边坡长期运行动态,在边坡岩体布置了变形、岩体应力、锚杆应力、边坡松弛范围、渗流、爆破振动等监测项目。至 1998 年 3 月,高程 245~230 m 全强风化岩体、高程 200 m 弱微新岩体、高程 170 m 微新岩体的月平均变形量分别为 0.677 mm、0.453 mm 和 0.717 mm。直立墙顶南北坡测点最大位移分别为 25.62 mm 和 17.32 mm(1997 年 10 月)。中隔墩位移形态与现场施工关系密切,累计位移较两侧小,最大 8.66 mm。目前,永久船闸高边坡施工开挖即将到位,边坡成型情况良好。各项监测结果也表明,边坡岩体目前处于良好的工作状态。

6 结 束 语

三峡永久船闸高边坡工程的规模、难度均是空前的。迄今为止,经过各方的共同努力,取得了较好的阶段性成果,同时也表明了如下几点:

a. 在边坡设计、确定工程措施和施工技术优化过程中自始至终所坚持的技术路线及“认识岩体、保护岩体、支护岩体和监测岩体”的岩体工程思想方法是正确的。

b. 迄今为止的监测成果和边坡状态证明了边坡坡形设计及边坡施工过程中的跟踪反馈研究和反馈设计是成功的,所采取的边坡防渗排水、锚固支护和控制爆破等工程措施保证了边坡的整体稳定性。

c. 目前对船闸高边坡工程的认识还是感性的,一些问题如长期变形问题、直立混凝土衬砌墙锚固方案的优化问题仍需做进一步的工作。更重要的是,对船闸高边坡工程的认识还需不断深化,实现从感性到理论的升华。

参考文献:

[1] 徐麟祥,杨启贵.三峡船闸高陡岩石开挖边坡设计研究[J].人民长江,1997(10):27~29.

Measures for Stability of Permanent Shiplock High Slope at Three Gorges Project

WU Hai-bin

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

Abstract: The scale and characteristics the high slope of the permanent shiplock at the three gorges project, and its design technical concept are introduced in the paper. The following feedback reseach and design, the measures adopted to keep the slope stability, such as seepage control and drainage, grouting and bolting support and blasting control, are also systmatincally recounted. The present state of the slope and the monitoring results have verified the importance and function of the adopted measures.

Key words: shiplock; slope; drainage; bolting support; blasting; stability