

53-5703

三峡船闸高边坡施工的技术难题及解决途径

刘炳荣

(长江水利委员会综合勘测局·武汉·430010)

U641.59



作者学术简历 男,1936年生。长江水利委员会综合勘测局副总工程师,教授级高工。主持完成国家重点项目有:南水北调中线工程勘探,长江三峡枢纽关键勘探与部分施工技术。发表论文20余篇。

摘要 三峡永久船闸是长江三峡水利枢纽工程三大主体工程之一,保证船闸高边坡施工和运行期的稳定,为该工程的技术问题,对此,提出一系列开挖施工方案及加固处理措施,并运用实践中。

关键词 永久船闸 高边坡 稳定 加固处理

刘炳荣

三峡永久船闸是长江三峡水利枢纽工程三大主体工程之一,也是当今世界上规模最大、水头最高、施工技术难度最大的多梯级通航建筑物。保证船闸高边坡施工和运行期的稳定,是三峡重大技术问题。人工开挖40~70m高直立边坡的精确成型及确保其基础稳定的施工方法,国内外工程界尚未突破。因此,寻求科学的爆破参数并适合三峡特点的最优施工方法具有重大意义。

1 三峡船闸高边坡的地质条件

永久船闸主体段穿过左岸山体。闸址基岩为闪云斜长花岗岩,全强风化带平均厚度为9~26m,闸首及闸室建筑物全部座落在坚硬的微新岩体上,地质条件较好。

主体段范围内断裂构造较为简单,据地表及平硐勘探所揭露的资料统计,断层的平均间距约8~10m,陡倾角断层占总数的82%,而断层长度大于100m的只有11条,断层面较粗糙,构造岩胶结良好,所发现的裂隙中有74%为陡倾角,长度在10m以内,裂隙面以平直稍粗糙为主,且大部分均有充填,断层与裂隙的走向与船闸轴线交角均在30°

以上。

经测试本区地应力最大为11MPa,一般为7MPa,其方向与闸室轴线有一小夹角。

水文条件为上部全强风化带,渗透性较强,到弱风化带地下水沿裂隙运行,渗透有明显的各向异性,下部微新岩体渗透性较弱,地下水疏干缓慢。

综上所述,永久船闸主体段高边坡内不存在整体滑动的地质结构面。断层与裂隙绝大部分为陡倾角,且走向与船闸轴线分别有10°与30°以上的交角,下部的微新岩体坚硬完整,强度高,这些条件有利于边坡的稳定。而由断层、裂隙互相切割形成的块体所造成的局部稳定是需要考虑的主要问题。本地区地应力值虽较低,但在深开挖后应力释放可能产生的变形(包括流变)是否会对船闸的施工和安全运行带来影响应该研究,此外针对全强风化带渗透性大,而微新岩体渗透性很小的特点,应研究如何降低岩体内的地下水位,以提高高边坡的稳定性。

2 三峡船闸岩石高边坡施工技术

岩石高边坡的快速开挖与支护是一项系

统工程,由于三峡永久船闸为连续五级双线船闸,布置在枢纽左岸紧靠坛子岭北坡,船闸轴线与坝轴线交角为 110.96° ,从第一闸首到第六闸首为主体段,总长 1607m ,全部是在山体中切岭深挖而成的岩质边坡。开挖最大深度为 170m ,形成的边坡最高达 160m ,其中在第三闸首附近有一段约 400m 长,高 $120\sim 160\text{m}$ 的边坡,其余坡高为 $50\sim 120\text{m}$ 。由于闸室结构衬砌墙的需要,边坡的下部为高 $40\sim 70\text{m}$ 的直立坡。双线船闸之间留有 $50\sim 60\text{m}$ 宽,高 $40\sim 50\text{m}$ 的岩体为中间隔墩,它是当今世界上最大的船闸系统。又因永久船闸是长江黄金水道的关键部位,必须确保其安全运行,设计上考虑高边坡的坡形及坡比要满足总体自稳。即:在全强风化带坡比为 $1:1\sim 1:1.5$;弱风化带坡比为 $1:0.5$;微新岩体段坡比为 $1:0.3$ (闸室衬砌段采用直立坡)。每一坡段高度为 15m ,顶部设置 5m 宽马道。现就施工中几个关键技术问题及解决办法归纳如下。

2.1 开挖边坡的应力与位移分析

岩体开挖之前存在着重力应力场和构造应力场(初始应力场),开挖过程中岩体应力释放导致应力场和位移场的变化,改变了原岩自稳状态,边坡开挖卸荷后,不仅产生竖向和水平位移,斜坡周围主应力迹线发生明显偏转,由于应力分异的结果,在临空面附近造成应力集中带,坡脚附近最大主应力(相当于临空面的切向应力)显著增高,这是坡体中应力差或最大剪应力的部位。坡缘附近在某些条件下,坡面径向应力和坡顶面切向应力可转为拉应力,形成张力带,产生与坡面近于平行的拉裂面。根据上述分析,在开挖边坡时,若存在潜在滑动体,施工中又首先要在附近开挖,则必然加大滑坡推力,潜在滑动体有可能变成进行性滑动体。此时,应调整开挖程序,即远离或在它的上方先行开挖,从而减少处理加固工程量。

开挖边坡产生的水平位移是由地应力释

放的“释放位移”和“牵速位移”所组成,前者在短时间内完成,后者为缓慢进行。施工中采用监测手段进行观测。

2.2 高边坡施工程序优化

三峡工程永久船闸二期工程设计开挖形状复杂,闸室深槽段直立边坡高达 60 余 m ,精确成型。在施工场地狭窄,开挖结构面复杂,岩体裂隙及结构面发育的条件下,施工程序、施工方法和施工进度等一系列技术问题尚无先例可循,故只能通过“爆破试钻”寻求在开挖卸荷造成的岩体应力应变降低到允许范围,控制施工力学效应不致造成边坡失稳的最佳方案。利用静力地质力学模型,进行分部逐层开挖试钻观测,调整开挖程序,达到优化目的。

开挖程序确定之后,必须选择合理梯段(坡段)开挖高度,因为岩石高边坡开挖是按一系列梯段进行的。足够精度钻爆的梯段高度为 $10\sim 15\text{m}$;三峡船闸梯段高度为 15m 。顶部设计 5m 宽。这两个参数的确定是根据岩石性质和所选择的爆破方法、钻孔设备、挖装机械、喷锚机械的工作高度而定。

梯段高度与岩石质量关系密切。勘探资料表明:由断层与裂隙交切组合的半定位块体共有 37 块,有 27 块不能满足稳定要求,但一般埋深在坡面 $1\sim 8\text{m}$ 之间,这些几何块体在开挖后采用锚固措施加固。裂隙与裂隙交切组合的随机块体,稳定性较差,裂隙长度为 $2\sim 10\text{m}$ 组成的块体较小,一般不超过 30m^3 ,埋深也较浅,对于设计 15m 的梯段高度,一部分块体可随边坡开挖时清除,其余部分采用锚固措施来满足设计标准。而主体段不存在整体滑动的地质结构面。

三峡船闸高边坡施工程序优化试验工作目前正紧张进行,其结果将直接用于该工程的施工。

2.3 高边坡的控制爆破技术和施工要求

考虑到有利于边坡的稳定和减少爆破对边坡的影响,要求排水洞施工应先于边坡明

挖,对周边坡面应采用控制爆破以减少因开挖爆破而对岩体的损伤,且边坡的喷锚加固应紧随开挖进行,以便减少变形并避免边坡中的随机块体滑坍。

由于爆破时应力波遇到临空面将形成反射拉力波,该波促成岩体的破碎与剥离。当临近炮孔有两个以上临空面时,拉力波互相迭加增强岩体破碎。根据这个效应,在施工中采用光面爆破、预裂爆破和多段孔间微差爆破技术。

预裂爆破对岩石起振裂作用。设计孔距较密,约60~80cm;孔径较小 $\leq 80\text{mm}$;装药量较少。目前正在三峡进行生产试钻,以确定其施工参数。

光面爆破与预裂爆破一样也是为了减少爆破振动对边坡的有震影响,保护边坡稳定。区别在于光爆孔是在主爆孔起爆后起爆,而预裂孔在主爆孔起爆前起爆,且光爆孔孔距较预裂孔孔距稍稀,线装药密度少,因而对边坡岩体的损害小。但光爆不能对主爆孔起减震作用,因此,在进行光面爆破的同时,需辅以缓冲爆破,对邻近边孔的三排缓冲孔的钻爆参数加以限制。

施工中还将采用多段孔间微差爆破技术。它适用于大规模梯段开挖和边坡开挖。根据摄影测试及经验公式,难以准确给出孔间微差时间。一般按每米抵抗线取3~16ms。三峡梯段爆破抵抗线3~4m,因此软岩取18~24ms,硬岩9~18ms,实际爆破中取100ms以下。

安排爆破试验内容为:火工材料性能检测、梯段爆破及起爆网络试验、闸室成型综合开挖爆破技术试验、基础保护层一次爆破试验、高精度钻孔(高垂直度、高平行度)试验、爆破地震效应及破坏范围试验。与此同时,我们还从福建引进“岩体无损火焰切割技术”在临时船闸下航道北边坡进行点火切割试验,切割出3.5m深、12m长、10cm宽的岩缝。此项技术明显优于预裂爆破方法,且在三峡工

程特殊施工面中显示出独特的优势(如闸室垂直边坡)。

试验期间完成了现场岩体声波对比试验,切割过程中的噪声、粉尘、温度等测试,并确定了切割时间、速度等参数。

3 高边坡加固措施

在高边坡开挖中采用控制爆破技术或是岩体无损火焰切割技术,可减轻爆破对边坡岩体的振动,但不能绝对避免,因此,必须对边坡进行加固处理,措施有3:①岩体开挖坡比;②截防排水系统;③喷锚支护加固系统。

3.1 高边坡山体排水系统

边坡开挖形成后,降低岩体内的地下水位是保证边坡安全的主要措施。

3.1.1 地表排水系统

在地表设计周边截水沟拦截地表水,防止进入边坡坡面,截水沟应预衬砌,坡面喷砼,防止地表水渗入坡体。坡面设排水孔,孔深300cm,300×300cm布置。沿坡面每隔100~150m设横向排水沟,集中将地表水顺马道排水沟引出闸室以外。坡面钻设水平排水孔的目的是使进入坡体内的渗水能迅速排出,而对排水沟范围内的坡面及坡顶均喷砼护面,这种砼护面是属于简易防渗板,可防暴雨时地表水向坡面下裂隙内下渗,从而抬高渗水压力,它是降低渗水压力的重要措施。

3.1.2 地下水排水系统(见图1)

对于浅层地下水,可用水平钻孔(孔径66mm,上仰7°)作排水孔,将水排入坡沟内。

为降低坡内岩体的地下水位,离坡面30~45m,每隔20~30m高差设一排水平洞,共7层,在洞内钻设排水孔,孔距2~2.5m,形成排水孔幕,以疏干坡面与排水洞之间的岩体积水,降低渗压力。它与坡面排水系统一起构成完整的排水系统。

山体排水系统一期工程从高程150m左右至200m左右。在南、北边坡的岩体中各布3层排水洞,各层排水洞轴线之间高差20~

30m,距闸室边坡开挖线 30~45m。5号洞内的锚索施工距边坡开挖线 20m 左右,各层排水洞的轴线在平面上相距不等,最大的 25m。排水洞纵坡坡比为 5‰,下游低,上游高。监测支洞垂直于排水洞轴线。各层排水洞之间采用联接平洞和竖井相接。洞室开挖断面为门拱型。排水主洞和支洞设计净断面尺寸为 2.5m×3m(宽×高)。施工中采用光面爆破,以获得规则断面形状并减少超、欠挖。特别防止对围岩体的振动破坏。光爆孔采用间隔装药,药包间距 0.5m,并采用“双向复式”导爆索准爆网络起爆。光面爆破层厚度 W 与眼距 E 对光爆效果有着极为重要的影响,三峡船闸花岗岩坚硬稳定性好,经反复试验 $E/W = 0.8 \sim 0.9$ 较好($E=0.5m, W=0.6m$)。

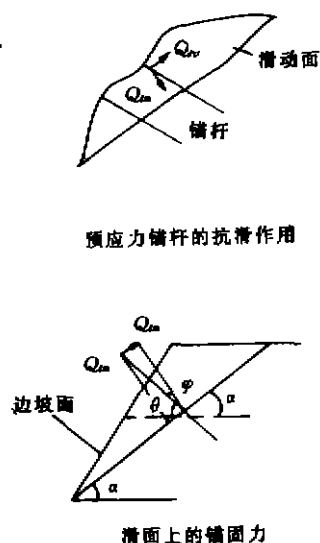


图1 地下水排水系统

排水孔(孔径 90mm)沿排水洞轴线每隔 2.5m 的断面上布置,钻孔均布置在洞顶且为仰孔,方向与水平面夹角 $50^\circ \sim 80^\circ$;在最上一层排水洞部分洞段,布置两排孔,直方向一排,斜向一排,钻孔要求进入强风化带 3~5m 钻孔深度一般 25~35m;顶层排水孔孔深 35m,最深 40m,整个排水孔与排水洞在船闸两侧的山体中形成一道排水幕。为了满足山体排水系统施工进度必须超前同闸室段的明

挖进度,保证排水系统提前投入运行。而排水孔工程量很大(一期工程达 39414m)总进尺 137310m;且为后序施工项目,工期短。为此我们选用空气潜孔锤,即 QZJ—100B 潜孔钻机与英格索兰 CIR90 潜孔锤,QT90B 钻头,XP750E 英格索兰空压机,应用效果证明,在三峡花岗岩中钻进速度平均 15~20m/台班。

另外,在有支护的排水洞段,打风钻排孔两排,孔距 4m,孔深 2m,孔径 46mm,排水出口利用交通支洞排至地表排水沟或坡面排水沟。洞顶排水孔设计有孔口保护排水装置。

3.2 预应力锚杆和锚索加固边坡(见图 2)

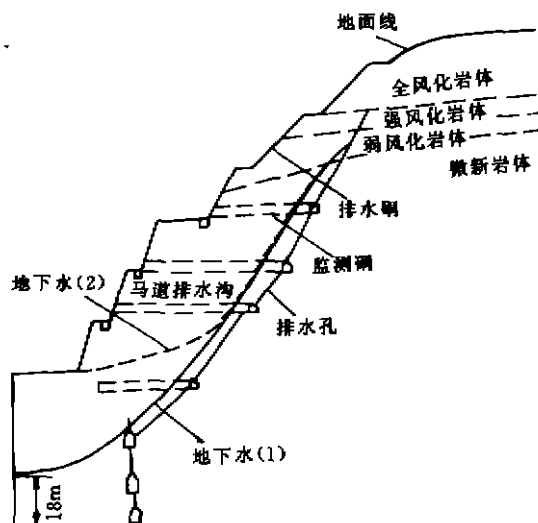


图2 预应力锚杆和锚索加固边坡

由图 2 可见,预应力锚杆的锚固力所增加的抗滑阻力增量 Q_{if} 为:

$$Q_{if} = Q_n \tan \varphi + Q_{ro} = Q_i [\sin(\alpha + \theta) \tan \varphi + \cos(\alpha + \theta)]$$

式中: Q_{if} —增加的抗滑阻力增量; Q_i —锚杆设计拉力值; Q_n —为 Q_i 沿滑面的法向分力; Q_{ro} — Q_i 沿滑面的分力; α —滑动倾角; φ —滑动面的内摩擦角。

从上式可知:预应力锚杆一方面直接在滑面上产生抗滑阻力 Q_n ,另一方面通过增大滑面上正应力来增大抗滑摩擦阻力。此外,在全风化带与弱风化带上部,采用坡面挂网

喷砼,其厚度为12~7cm,挂网锚杆长150cm,200、200cm网度布置。其余坡面喷素砼。与喷砼相结合对表层松动带及随机的不稳定楔形块体,用系统锚杆进行加固,锚杆长800~500cm,400、400cm及300、300cm布置。对于中等规模的不稳定块体,以及每级马道的坡顶,设计预应力锚杆,以改善边坡表面一定范围内的岩体应力状态,增加稳定性。对规模较大的不稳定块体以及直立墙坡段,采用1000~3000kN级的预应力锚索,以改善局部岩体的应力状态和增加边坡的稳定性。

三峡船闸二期工程设计锚杆根数为183547根,预应力锚索1858束,设计安全系数1.5~2.0。

上述工程量是根据现有勘探资料设计的,由于地质条件无法在勘探阶段全部查明,所以在施工过程中还要根据实际地质构造与相应的监测资料,对处理加固措施作出修改和调整,使高边坡加固处理既满足安全运行要求又达到经济合理的目的。

4 高边坡的安全监测

人工高边坡的安全监测,不但是保证建筑物安全施工、安全运行的重要措施,而且为边坡稳定研究提供了依据。监测的目的是对边坡稳定进行监控、反馈分析和安全预报,其次是验证边坡设计的合理性,以及改进边坡开挖的施工工艺。岩石力学参数、应力、应变、位移数值及其发展速度、裂隙开展的规律和速度、设计时所采用的数值均有相当的误差,必须通过施工期的观测来验证预测发展趋势和数值,并进行快速反馈分析,调整选用的参数,改进边坡设计和爆破开挖的施工工艺,决定锚杆锚索的布置,有些锚杆、锚索经运行若干年后,根据监测资料反馈分析才能确定是否需要增加锚固工程量及其布置,从而达到安全、经济的目的。

对边坡的稳定观测以变形为主,控制边

坡滑动。在整个边坡上部张拉区和下部剪切区为重点监控区。为了测得原位应力,早在三峡工程开工以前,与长江水电科学研究院在坝区完成了地应力原位测试工作。具体施工过程:

在需要获得地下某深度岩层地应力处先下 $\varnothing 75\text{mm}$ 金刚石钻头钻进至规定深度,并取出岩心,下磨孔器磨平残留岩心,再下 $\varnothing 46\text{mm}$ 金刚石钻头钻进0.5~0.6m深,取出岩心并磨平孔底,下入用电线连接好的不同应变片粘结在孔底,然后用带导向装置的 $\varnothing 75\text{mm}$ 金刚石钻头套着 $\varnothing 46\text{mm}$ 钻孔钻进0.5~0.6m(一定要保持同心度),卡断内部粘贴应变片的同心圆柱岩心并提至地表,完成地应力孔的测试。测得闸室底板与直立梯底部拐处应力集中,即最大应力为36MPa,在安全范围内。

边坡开挖前,为了测得原位应力,在排水廊道内钻孔埋设三向应力计、微压计,为边坡稳定有限元分析提供数据。高边坡开挖前、开挖过程中、开挖后的稳定监测,主要采用钻孔多点位移计、钻孔多点倾斜仪,并用钻孔多点引伸仪观测深层岩石变形情况。

为了让通航建筑物船闸高边坡得到监控,采用深埋三维倒垂来监测基础变形,倒垂线深入岩体的深度与岩石地应力大小有关,一般应设在地应力接近于零($\sigma=0$,变形量在1/1000mm内)的岩体内。在通向垂直孔中,设置有维持在恒定张力状态下的纲钢丝,以便使倒垂仪除了能测水平分量的位移X、Y外,还能测垂直方向的变形Z。而倒垂线埋设要求钻孔的垂直精度十分高,我们在承担三峡船闸深埋三维倒垂和造孔技术研究项目中,其精度要求是 $\varnothing 75\text{mm}$,深150m的钻孔,终孔中心偏斜不大于10mm;垂直精度高达万分之零点六。也就是说若采用 $\varnothing 75\text{mm}$ 金刚石钻进,下入壁厚为3.5mm、直径73mm的套管保证获得 $\varnothing 50\text{mm}$ 中空柱垂直圆筒,

(下转第63页)

(7)CBN 的推广应用是个系统工程问题,只有把搞 CBN 材料的、搞 CBN 制品的、搞 CBN 应用的以及搞专用设备的几股技术

力量联合起来,共同攻关,才有可能实现我国 CBN 快速、稳步、健康、持续的发展。

TECHNICAL ADVANCES ON THE APPLICATION AND MECHANICAL PROCESSING OF CUBIC BORAZON

Wang Guangzu

Abstract Cubic borazon has been developed as an ideal hard abrasive due to its high hardness, high thermal stability and high chemical inertia properties. Grinding tools and cutting tools of cubic borazon and some conditions about their popularization and application are presented.

Key words cubic borazon, grinding tool, cutting tool, popularization and application

(上接第 57 页)

使倒垂线从孔底引至孔口而不至接触套管内壁。施工正在进行,主要从 3 方面入手:①综合“保值”钻进技术措施;②研制新型纠斜工具与工艺;③提高测斜仪制造精度和测量精度,并研制新型高精度测斜仪。

局部不稳定块体,则采用倾斜仪、地音仪滑动定位器、地表位移计等综合手段对比观测;采用基岩变形计来监测基岩断层面的变位位错;并用岩石滑动定位仪监视岩石的滑动方位;在排水廊道(平洞)内顶部埋设多点钻孔挠度计或倾斜仪;通过测压管、渗压计测定地下水以验证边坡计算中的水压力。

为了解岩石预应力拉锚所引起的岩体变形以及锚索在岩体中的工作状态,在平衡于锚束的不同深度岩体钻孔中布置二向多点钻

孔位移计或三向应力计,并在预应力锚束上布置测力器。以测定锚索预应力沿程损失情况。

总之,通过埋设各类仪器监测取得的资料输入电子计算机控制系统、信息检证和数据处理,同时,发出警报分析,对于超界作出警报,促使对危险部位及时进行加固处理,以确保边坡施工。

由于工程正在施工,许多技术上的问题尚未完全暴露,各种大规模的试验工作正全面展开,上述开挖施工方案及加固处理措施可能会作出修改和调整,以达到动态优化设计目的,从而使高边坡的开挖和加固处理,既能满足安全运行的要求,又能达到经济合理的目的。

PROBLEMS ON THE CONSTRUCTION OF HIGH BENCH SLOPE OF SANXIA SHIP LOCK AND THEIR SOLUTION

Liu Zhenrong

Abstract Sanxia permanent ship lock is one of the three principal parts of Sanxia key water control project. To guarantee the construction and consolidation of the ship lock high bench slope is a vital technical problem of the project. A series of construction designs and consolidation treatment measures are presented.

Key words permanent ship lock, high bench slope, consolidation treatment