

岩体预应力锚索在三峡工程中的应用

李洪斌

(长江勘测规划设计研究院 武汉 430010)

摘要: 三峡工程应用有大量的岩体预应力锚索, 本文详细介绍了三峡锚索的选型、作用、应用中出现的问题及对策等, 并就岩锚的施工机具及新型防腐结构问题提出了作者的观点和建议。

关键词: 岩锚 三峡工程 应用

1. 概述

三峡水利枢纽工程位于湖北省宜昌市三斗坪, 是开发和治理长江的关键性工程, 具有防洪、发电、航运等综合效益。枢纽主要建筑物由大坝、电站厂房、船闸及升船机组成。大坝为混凝土重力坝, 轴线全长2309.5m, 坝顶高程185m, 最大坝高181m。泄洪坝段位于河床中部, 两侧为电站厂房及非溢流坝段。电站采用坝后式, 分设左岸右岸厂房。通航建筑物包括永久船闸和升船机, 均布置在左岸。永久船闸为双线五级连续船闸, 位于坝址左岸临江最高峰坛子岭的左侧, 系劈山深切开挖而成, 最大开挖坡高达170余m, 更有闸室部位40m~60m的直立开挖边坡。升船机为单线一级垂直提升式, 系紧邻岸坡单侧削挖而成, 亦形成有高达百米的边坡。工程施工期间, 在升船机右侧设单线一级临时船闸。

三峡建筑物建基岩体一般为微新闪云斜长花岗岩, 局部为弱风化下部岩体。微新花岗岩强度高, 湿抗压强度达100MPa以上。坝址断层不甚发育, 仅F215、f1050、f1096等少数大断层对建筑物有影响。

由于三峡工程的总体布置、结构形式及岩体特点, 在工程中布置有大量的岩体预应力锚索。截止目前为止, 三峡工程中应用的预应力锚索已达5000余束, 其中永久船闸达4200余束。三峡岩锚从选型试验到大规模应用, 正是我国岩体预应力锚固技术飞速发展的时期, 期间相关的技术标准规范先后出现。三峡岩锚紧跟时代的发展, 与时俱进, 不断完善与革新。

2. 三峡岩锚试验及选型

为选定三峡岩锚的结构形式、材料、施工工艺, 验证锚索设计参数及为大规模生产施工积累经验并培养施工队伍, 于1996年初, 结合永久船闸高边坡的锚固施工进行了现场锚索受力性能、承载能力及各项施工工艺的可行性试验, 同时还进行了与之配套的室内止浆环试验、浆材配比试验、外锚头混凝土配比试验、锚索防腐试验、材质检测试验。

现场试验结构有全长粘结预应力端头锚索、全长粘结预应力对穿锚索、双层防护无粘结预应力端头锚索三大部分。其中1000kN级有粘结端头锚索长度为30m, 2组的内锚固段长度分别为5m和6m。3000kN全长粘结端头锚索长度一般为35m, 3组的内锚段长度分别为7m、8m、9m。两个级别均安排了1组全长12m、内锚段1m的锚索进行了破坏性试验。无粘结端头锚索3组, 均为1000kN级, 按间距3m水平布置, 锚索长度30m。3组的内锚段长分别为3m, 5m和6m, 每束锚索上均安装测力计。对穿锚索包括1组无粘结锚索和2组全长粘结锚索, 均为3000kN级, 按水平间距3m布置。针对三峡工程将来可能在3x3.5m廊道甚至更小断面廊道内施工70m水平孔, 并在岩洞或廊道内进行锚索施工, 故特在2.5x3m的排水洞内进行了钻孔试验及两束对穿锚的编索和穿索试验。

所有试验锚索均采用江西新余新华金属制品有限公司按美国ASTMA416-87a标准生产的1860MPa级高强低松弛预应力钢绞线, 锚具除双层防腐无粘结端头锚采用B&S型外, 其余均采用OVM型锚具。试验采用了应变片、测力计、多点位移计及小应变计等多种测试手段进行监

测。共有24束锚索在其内锚段或自由段贴有应变片, 29束锚索装有测力计, 在9束端头锚索沿轴线附近布置了9组共18套多点位移计, 在4个端头锚混凝土垫座中埋设了7支小应变计。

试验结构显示: ①钻孔试验证明, 采用在钻杆上间隔一定距离加焊定中器的措施可以有效地控制钻孔精度, 在廊道内钻进70m深的水平孔是可行的。但由于三峡岩石坚硬, 定中器磨损严重, 钻1~2个孔后即需换一组定中器。②在2.5x3m排水洞内进行的3000kN级锚索编索和穿索试验获得成功, 证明在廊道和岩洞内施工是可行的。③为适应快速施工, 减少施工干扰, 经近百次室内试验及现场试验, 成功研制并应用了C35(d3)和C35(d7)早强水泥浆材, 效果良好。从尽可能加快工期, 缩短各项工艺流程所需的时间及现场配比控制的难易程度综合分析, 推荐采用C35(d7)早强水泥浆材。④1m内锚段锚索的破坏行试验显示, 1000kN级锚索在1620kN左右发生破坏, 3000kN级锚索在4310kN左右发生破坏。钢绞线的破坏位置均发生在工具锚夹片的咬合处内侧, 内锚段无滑动现象, 混凝土锚墩受力在弹性范围内, 证明锚索结构设计是安全合理的。预应力锚索内锚段的应力分布是水泥浆体、围岩与锚索相互作用、相互约束的综合反映。张拉荷载由钢绞线传至内锚段后, 立即向周围岩体转移, 内锚段的应力主要集中在前部, 并向锚根方向迅速递减, 随张拉力的增加逐渐向里扩展, 但不能无限制的发展, 主要还是分布在内锚段的前2.5m以内, 表明锚索内锚段不必过长。因此, 结合理论研究成果, 考虑必要的安全系数和具体的地质条件、施工水平, 推荐三峡工程岩锚内锚段长为: 1000kN级取3~4m, 3000kN级取6~8m。⑤对部分对穿锚索及无粘结端头锚索在一次张拉完成2周后进行二次张拉表明: 由于三峡岩体较好, 一次张拉锁定后的预应力值损失较小, 因此在短期内进行二次张拉的必要性不大。⑥锚索预应力沿程损失与钻孔偏斜率有关, 偏斜率大时沿程损失大, 反之则小; 对于对穿锚索, 在孔斜率相当的情况下,

双向张拉的沿程损失比单向张拉小。锚索张拉时各钢绞线间的受力不均匀性, 随着张拉荷载的加大而逐渐减小, 待张拉至设计荷载时, 各钢绞线受力基本均匀。⑦锚索对三峡围岩的影响半径, 1000kN级约为0.5~1.5m, 3000kN级约为1.5~2.5m。

根据试验成果、当时国内预应力的发展状况及技术经济等综合考虑, 三峡岩锚选定结构形式为: 全长粘结端头锚索、全长粘结对穿锚索及无粘结监测锚索, 后期在永久船闸闸首中少量使用了无粘结对穿锚索, 地下电站洞室加固中使用了多层保护无粘结锚索。锚索的详细结构型式在此不再赘述。

3. 岩锚在三峡工程中的作用

根据岩锚在三峡工程中的作用, 可分为以下几类:

3.1 改善边坡岩体的应力状态

永久船闸高边坡深切岩体开挖达170余m, 从上至下历经全分化、强风化、弱风化、微新四个风化带。在边坡开挖过程中, 局部坡段在一定深度范围内形成塑性区, 区内岩体受到损伤, 力学指标降低, 应力状态较开挖前变化较大。根据有限元分析, 塑性区主要出现在各梯级坡的坡肩部位, 以左右边坡直立段及中隔墩部位范围较大。升船机边坡有相似的情况。因此, 为改善边坡的应力状态, 在船闸高边坡及升船机高边坡中部的弱风化带部位系统布置1~3排1000kN或3000kN级全长粘结锚索; 在船闸左右直立坡及两线闸室间的岩体中隔墩中上部布置2~3排3000kN全长粘结端头锚索或对穿锚索。左右直立坡的对穿锚索由闸室直立坡与边坡岩体内的排水洞对穿, 中隔墩的对穿锚索由两线闸室间的直立坡对穿。上述部位均间插布置有少量无粘结监测锚索, 以监测类比锚索的受力状态及边坡的变形。根据监测锚索资料及其他监测资料分析, 这种布置对改善边坡应力状态起到了一定的作用。

3.2 限制岩体裂缝扩展

船闸边坡在经历开挖工程后, 在一定深度范围内形成卸荷带。依据多种监测成果、现场

测试及宏观岩体状态等综合分析,边坡的卸荷带可分为强卸荷变形带、弱卸荷变形带及卸荷应力调整带。对于强卸荷变形带,特别是船闸岩体中隔墩由于表层岩体应力释放充分,加上近距离的反复施工爆破震动损伤,其原有结构面一般会产生细微的张拉或错动变形,在宏观上即表现为顶面找平混凝土裂缝,这种裂缝一般随入槽开挖出现。为阻止裂缝的扩展,在闸室槽下挖期间,根据模拟分析成果,适时地增加布置了2排3000kN级对穿锚索。起到了良好的限裂效果。

3.3 边坡块体加固

在三峡工程的开挖过程中,特别是永久船闸闸室直立坡的开挖过程中,由岩体结构面及开挖坡面相互组合切割形成大量几何可移块体。这些块体多分布在闸室边坡的中上部,另在船闸引航道边坡、升船机边坡、右岸厂坝间边坡及地下电站引水口边坡、地下电站洞室墙直立岩面等也有出露。针对这些块体,设计根据规模大小、出露位置及其与整体结构的关系等分别采取挖除回填置换、喷锚支护、洞键、预应力加固等不同的处理措施。特别是对于规模较大的块体,由于挖除对原结构的影响较大,一般采用预应力锚索加固。永久船闸100m³以上的块体达317个,均采用了预应力锚索加固,锚索加固量近2000束。

对于锚索加固后的大型块体,通过锚索测力计及其他监测仪器进行综合监测,结果显示:块体与原岩接触稳定,变形协调一致,均无异常变形。

3.4 增加闸首结构稳定性

永久船闸闸首人字门安装在闸首两侧的混凝土支持体上,混凝土支持体与闸室等高,一般12m(宽)×18.7m(流向),三侧镶嵌于岩体凹槽内。根据计算分析,在运行过程中混凝土支持体需与支持体后的岩体联合受力。为增加二者间联合受力性能,除原有的高强锚杆外,施工中根据开挖后岩体的性状,在部分闸首的中隔墩侧支持体上布置了对穿锚索。

3.5 增加坝基深层抗滑稳定性

左厂1~5号坝段基岩中发育有走向10°~30°

倾向SE倾角20°~30°(倾向下游偏左岸)的缓倾角裂隙及少量倾向下游的中倾角裂隙。该坝段后布置有坝后式电站厂房,大坝建基面高程85~90m,厂房最低建基面高程为22.0m,致使坝后形成坡度约54°,临时坡高67.8m,永久坡高39m的高陡边坡。这就构成了左厂1~5号坝段深层沿缓(中)倾角裂隙(结构面)滑动的边界条件。

在对此问题大量研究的基础上,采用了厂坝联合受力抗滑、坝基封闭抽排降低坝基仰压力、上游增加齿槽及布置预应力端头锚索加固等综合处理措施。其中锚索布置在厂坝引水钢管槽坡面上,均斜倾上游,与缓倾角裂隙以近最优锚固角相交。根据计算分析,对提高坝基的深层抗滑稳定起到了良好的作用。

4. 岩锚应用中的问题及对策

三峡岩锚规模宏大,历时长久,在施工中出现了一些问题和难点,这些问题和难点经过施工、设计及监理等各方的攻关和革新,得到了较好的解决。

4.1 水平高精度造孔问题

三峡永久船闸及升船机边坡由于锚索布置型式及受力状态的需要,布设有大量长20~56m的水平锚索。对这些水平锚索,端头锚孔斜率要求≤2%,对穿锚孔斜率≤1%;终孔孔径1000kN为Φ110mm,3000kN为Φ165mm。如此高的造孔要求,在国内尚属首例,高于国家行业标准孔斜率3%的要求。

高质量的完成造孔涉及到钻具、施工队伍经验及素质、施工组织等多方面的因素。前期施工中,由于施工队伍繁多、经验不足等,钻孔偏斜率较大,废孔较多。随着工程的进展,造孔合格率逐步提高,主要措施有:①钻机是解决造孔的关键手段,为此施工单位专门委托研制了DKM-1型钻机和改造了宣化英格索兰的MZ160型钻机;②加固钻机平台,保证钻孔过程中钻机不摆动;③钻孔的前6~8m是后续孔深保证精度的关键,为此制订了精确定位,慢速开孔的原则。

4.2 船闸中隔墩直立坡顶岩体开裂与锚索防腐

永久船闸岩体中隔墩顶部岩体卸荷开裂后,增布了大量限裂的全长粘结对穿锚索,距离坡顶3~8m。这些锚索虽对限制裂缝扩展起到了良好的作用,但随着人们认识的加深,认为大气降水顺裂缝下渗,有可能对锚索造成腐蚀,影响锚索的耐久性。为此采取了以下对策:①对坡顶进行浅层充填灌浆,堵塞裂缝;②修补裂缝并待卸荷稳定后在中隔墩顶再浇筑一层结构混凝土;③积极研究锚索的防腐及无损检测技术,为岩锚加固储备技术方案。

4.3 部分全长粘结端头锚索自由段灌浆管堵塞问题

全长粘结端头锚索的自由段灌浆管(亦称二次灌浆管)是锚索在张拉锁定后,对锚索自由段(张拉段)进行灌浆的通道,通过灌注水泥浆液达到保护锚索钢绞线的目的。实际施工中,由于编索、穿索、张拉时钢绞线扭转挤压、钻孔孔径偏小等多种原因造成个别锚索自由段灌浆管堵塞。现场采用排气管灌浆或预设备用灌浆管灌浆,并加钻排气孔等措施予以处理。由于处理措施均改原设计的孔底进浆、孔口回浆工艺为孔口循环灌浆,为保证自由段的浆体密实度,将灌浆压力由0.3MPa提高到0.7MPa;并严格控制结束标准:①实际吸浆量大于或等于理论吸浆量;②回浆比重大于或等于进浆比重;③回浓浆后且孔内不再吸浆后,屏浆30min再闭浆结束。

为保证边坡及结构足够的安全裕度,对于重要部位如块体加固、闸首等部位凡自由段堵塞的锚索,除按上述措施严格处理外,均重新增补了替代锚索。

4.4 增加锚索结构安全裕度,降低钢绞线的强度利用系数问题

三峡锚索的施工期正是我国岩体预应力锚索飞速发展的时期,随着时代的发展,人们认识的也逐渐加深和提高。三峡早期的3000kN级锚索采用19根 $7\Phi 15.24\text{mm}$ 的1860MPa级钢绞线,设计锁定吨位为3000kN,钢绞线强度利用系数为0.61;施工后期,国际上为增加锚索结构本身

的安全裕度及提高锚索耐久性(高应力下易发生氢脆破坏),已趋于降低钢绞线的强度利用系数。设计就此采用了两种方案应对:一是将19根钢绞线的锚索张拉锁定吨位调低至2750kN,相应钢绞线的强度利用系数为0.56;或是保证3000kN的锁定吨位不变,将锚索钢绞线根数增加到21根,相应钢绞线的强度利用系数为0.55。

5. 总结及建议

目前,除右岸工程仍有少量岩锚在施工外,三峡大规模的锚索施工已经结束,回顾起来,有几点体会及建议:

5.1 针对三峡岩锚特点进行的钻孔机具研制及改造较好地解决了三峡岩锚高精度水平钻孔的要求,极大地促进了三峡岩锚按时保质竣工;而对于避免端头锚自由段灌浆堵塞提出的将灌浆管从锚具中引出的专门锚具设想未能很好实现,建议对此问题能继续进行研究,以推动岩锚工作的发展。

5.2 三峡的全粘结端头锚索及对穿锚索外包水泥浆体防护,虽水泥浆体是良好的防腐材料,但中隔墩顶卸荷裂缝的出现使得人们对锚索的耐久性极为关心;三峡的无粘结锚索主要用作关键部位的监测锚索及地下电站洞室围岩加固,无粘结锚索终身依靠锚具(锚板及夹片)工作持力,在船闸充泄水运行等反复荷载作用下,其耐久性也引起人们的关注,所以研制新型的既有多层防护,又避免锚具反复持力的锚索结构体系是未来岩锚的一个发展方向。

5.3 三峡监测锚索除墩头加安测力计外,采用和普通全粘结锚索相同的结构型式及施工工艺,但因为采用无粘结钢绞线,使得其后期的受力机理与普通全粘结锚索并不相同。这种监测锚索可以显示本身的预应力损失情况和相应部位的岩体变形情况,但不能反应全粘结锚索的预应力损失等情况,要了解全粘结锚索的受力情况另需监测仪器或手段。另,锚索测力计的耐久性亦需引起人们的重视。根据目前锚索测力计的使用情况,可以认为若干年后锚索测力计将不能真实反应锚索的受力状态。