

金康水电站高压引水隧洞衬砌设计和优化探讨

张 良, 蒋文胜

(1. 华能四川康定水电开发有限公司, 四川 成都 610041; 2. 中国水利水电第七工程局, 四川 郫县 611730)

摘要: 对于引水隧洞的衬砌设计, 采用不同的设计理论会得出不同的结果; 对于长引水隧洞, 若隧洞中不良地质段长, 在保证隧洞安全运行条件下, 尽可能减少衬砌工程量和造价是设计和业主必须考虑的问题。通过金康水电站高压长引水隧洞衬砌设计、优化及实测钢筋应力分析表明, 即使在地质条件差的隧洞, 围岩仍然是承担内水压力的主体。

关键词: 金康水电站; 引水隧洞; 衬砌设计; 优化

中图分类号: TV52; TV732; TV22

文献标识码: B

文章编号: 10012184(2007)06201723

1 工程概况

金康水电站位于四川省甘孜州康定县境内, 系大渡河一级支流金汤河梯级开发规划的最后—个梯级电站。电站为低闸引水式, 具日调节性能。电站由首部枢纽、引水系统和厂区枢纽三大部分组成, 电站设计装机容量 150 MW (2 × 75 MW), 设计最大水头 498 m, 最小水头 457.7 m, 设计引用流量 37.4 m³/s。闸首坝高 20 m, 厂房为地面厂房。调压室的设计是在利用挪威气垫调压室经验的基础上采用了钢罩气垫调压室。

2 引水隧洞布置

引水隧洞位于金汤河左岸, 全长(至调压室连接井中心线)16 489.686 m, 同时, 通过长 1 068 m 的引水副洞引用左岸支流拉脚沟流量。自拉脚沟起, 引水隧洞的压力水头都在 90 m 以上。隧洞开挖断面尺寸(宽 × 高)为: II、III、IV 类围岩段: 4.8 m × 5.2 m, V 类围岩段 5.2 m × 5.6 m。在 2 号、6 号支洞附近及压力钢管前端—共设置了三组集石坑, 压力钢管长 487 m。

根据引水隧洞沿线围岩地质条件和内水压力分布情况, 隧洞全线采用了混合衬砌的形式。II 类围岩边顶拱素喷混凝土衬砌, 厚 8 cm, 顶拱随机锚杆; III 类围岩边、顶拱喷混凝土衬砌及挂网 + 系统锚杆, 喷混凝土厚 15 cm, 边、顶拱系统锚杆; IV、V 类围岩段采用圆形钢筋混凝土衬砌, 衬砌厚度为 0.35 m 和 0.55 m。

3 引水隧洞工程地质情况

引水隧洞地质条件复杂, 地层及岩性多变, 地

质构造及断层带发育, 并有瓜达沟断裂带、昌昌断裂带出现, 围岩结构面发育, 地下水活跃。

金康电站引水隧洞在引 0 + 000 ~ 7 + 866 区间穿越了石灰岩、千枚岩、石膏岩、砂板岩, 其中引 5 + 400 以前主要以石灰岩为主, 引 7 + 866 以后为花岗岩和闪长岩。隧洞不良地质段主要集中在引 4 + 435 ~ 7 + 866 区间, 该区间隧洞穿越了瓜达沟断裂(引 5 + 072 ~ 5 + 324)和昌昌断裂(引 7 + 370 ~ 7 + 535)两条大断裂带, 并遭遇两处(引 5 + 529 ~ 5 + 615 及 5 + 976.5 ~ 6 + 086.5)大溶洞和 1 000 余 m 石膏岩, 岩石类别以 IV 类和 V 类为主。隧洞围岩类别长度统计见表 1。

4 特殊洞段隧洞衬砌设计

(1) 梆梆沟段衬砌设计。

隧洞穿越梆梆沟段, 沟两侧山体雄厚, 此处洞内静水压力 223 m, 沟底 15 m 范围岩体覆盖厚度不足, 但与按电力行业标准《水工隧洞设计规范》(DL/T51952004)计算结果差值仅 10 m, 最初考

表 1 隧洞岩体类别统计表

区 间	II~III类 /m	IV类 /m	V类 /m	岩 性
0+00~4+345	3 231	1 114	0	石灰岩、白云质灰岩
4+345~7+866	312.5	2 078.5	1 130	千枚岩、石膏岩、炭质千枚岩、板岩(石膏岩洞段长度 852 m)
7+866~气垫室	15 460.7	641	108	花岗岩、闪长岩

虑采用钢管衬砌。沟底下部隧洞岩体为 II ~ III 类围岩。按照规范(DL/T51952004)设计的钢管

长度是250 m。规范中“岩体覆盖厚度”是指隧洞轴线平行于山坡的情况,对于隧洞跨山沟的情况则不尽合理。为此,设计单位在参照水利行业标准《水工隧洞设计规范》(SL2792002)基础上,最终确定钢管衬砌长度为120 m。由于受洞内施工影响,没有在洞内作地应力测试,如果最小主应力大于内水压力,完全可以采用混凝土衬砌,也不排除采用喷锚支护的可能。

(2)石膏岩洞段衬砌设计。

两处大溶洞位于石膏岩区域,除两处大溶洞采用钢管衬砌外,需要衬砌的石膏岩洞段长852 m,石膏岩洞段内水压力为130~160 m。岩体完整致密,在单轴抗压情况下其弹模为10 GPa。如不考虑石膏遇水软化并溶解问题,无论按水电系统围岩类别划分标准,还是按巴顿Q系统分类方法,均达到III类围岩标准。最初考虑采用薄钢板衬砌,但成本太高;按照混凝土不开裂设计结果,钢筋用量很大。在业主建议下,经过研究,决定在岩体表面喷涂一层厚2.5 cm的高分子防水化学材料,衬砌按照限裂设计(图1)。采用防水材料隔绝了内水与岩体接触,防止了石膏岩体的溶蚀,

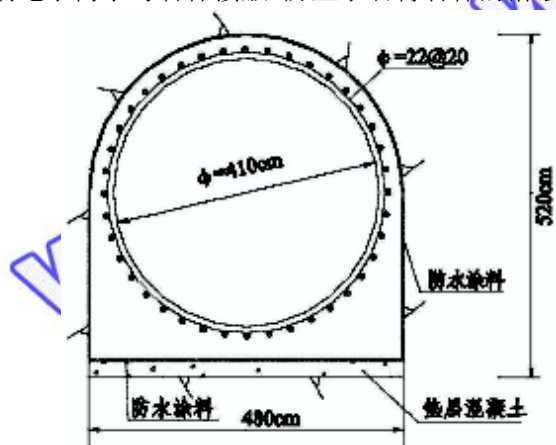


图1 石膏岩段衬砌设计示意图

节约投资约100万元以上,工期缩短1个月以上。

(3)断裂带衬砌设计。

瓜达沟断裂带和昌昌断裂带是隧洞穿越的两处最大的断层,宽度分别为252 m和165 m。瓜达沟断裂带呈碎裂结构,稳定性极差,其中在引5+132 m清晰可见主断带宽0.6 m,两侧影响带十分破碎并渗水,充填大量白色方解石条带,主断带擦痕清晰可见,为逆冲断层。昌昌断裂带岩性主要为碳质千枚岩夹石膏层,地下水埋藏较丰富,微

新岩体,岩体较破碎,挤压强烈,主要发育层面裂隙,层状、片状结构为主,滴水,局部渗水较大,断裂带主要由灰绿色片状岩、少量糜棱岩、断层泥及透镜状石英脉组成,带内物质性软,有地下水渗出,片理发育,局部见层内错动面。

在初步设计阶段,两处断裂带采用钢板衬护,钢衬两侧采用伸缩节和混凝土衬砌过渡。为了降低工程造价和缩短工期,委托国家地震局对断裂带进行了试验研究,瓜达沟断裂的龄期测试数据介于14.4~17.8万年,昌昌断裂龄期测试数据介于15~17.8万年,根据规范及专家意见按非活动断裂处理。在此基础上,最终决定两个断裂带按V类围岩进行钢筋混凝土衬砌,衬砌段之间设置双层铜片止水。

(4)千枚岩、泥质灰岩及板岩洞段衬砌设计。

千枚岩、泥质灰岩及板岩洞段(包括断裂带)稳定性差,特别是千枚岩段在开挖阶段采用了强支护,但很多地方仍发生了变形。千枚岩及泥质灰岩全部为V类,板岩为IV类,两类岩体段占隧洞衬砌的较大比例。围岩力学参数见表2。

隧洞按城门洞型开挖,设计单位按隧洞设计规范计算了城门洞型和圆型两种断面的配筋,代表性的部位配筋情况见表3。

由表3可知,采用城门洞型的钢筋用量太大,且钢筋太密无法布置,因此,决定采用圆型断面衬砌。为了节省钢筋,减少工程造价,业主和设计单位多次邀请专家对隧洞进行咨询,在咨询意见及业主的意见基础上,设计单位采用不限裂进行衬砌设计,代表性地段配筋计算结果见表4。另外,业主委托清华大学对IV类岩体衬砌作了有限元计算。由于混凝土浇筑前期针梁式钢模台车尚未准备好,在6+975~7+050段仍采用城门洞型。

5 隧洞运行阶段的监测与分析

施工时,在表4洞段内埋设了钢筋应力计,每个断面埋设4支钢筋应力计。另外,还埋设了3支渗压计。在隧洞充水和正常发电过程中,观测得到的数据见表5。

从检测数据得知,每根钢筋受到的拉力仅仅为钢筋强度设计值的5.3%~30.7%,围岩承担了绝大部分内水水头,IV类围岩处钢筋受到的拉力明显比V类围岩处钢筋受到的拉力小。隧洞放空后对7+370~7+535昌昌断裂带作了外水

表 2 不良地质段岩体力学试验参数表

围岩类别	岩性及地层代号	岩体稳定性	岩体结构类型	地下水活动状况	密度 g/cm^{-3}	变形模量 E_0/GPa	泊松比 μ	岩体抗剪断强度		岩石坚固系数 f_k	单位抗力系数 $K_0/MPa \cdot cm^{-1}$
								$tg\phi'$	C'/MPa		
IV	强卸荷花岗闪长岩、闪长岩(D_3)、裂隙发育带及断层影响带	稳定性差	镶嵌结构~块裂结构	中等~强	2.4	4~6	0.32	0.5~0.7	0.3~0.5	2~3	25~30
	中薄层状石灰岩、白云岩、泥质灰岩、生物灰岩(D_1^2)	稳定性差(可能产生变形破坏)	中薄层状千枚状	中等~强烈	2.3	3~4	0.35	0.4~0.5	0.2~0.3	2~3	20~25
	千枚岩,砂板岩(T_2, T_{3x})	稳定性差,围岩自稳时间短	中薄层状千枚状	中等~强烈	2.2	3~4	0.35	0.3~0.4	0.1~0.2	1~2	15~20
V	断层及构造破碎带不稳定(断层破碎带。围岩不能自稳,变形破坏严重)	破碎状散体状	中等~强烈	<2.1	<0.5	>0.35	<0.45	<0.1	≤ 1	≤ 5	

表 3 城门洞型配筋计算表

位置	岩性	衬砌厚度 /m	过水断面 /m	配筋 /根·m ⁻¹	
				内层	外层
瓜达沟断裂	断层及影响带	0.60	4×4.2	15 $\Phi 8$	15 $\Phi 8$
7+050~7+142	千枚岩、板岩夹薄层状石灰岩	0.60	4×4.2	18 $\Phi 8$	18 $\Phi 8$
昌昌断裂	碳质千枚岩夹少部分石膏层	0.60	4×4.2	20 $\Phi 8$	20 $\Phi 8$

表 4 圆型断面配筋计算表

位置	岩性及类别	断面型式	计算水头 /m	配筋 /根·m ⁻¹		有限元计算结果	备注
				内层	外层		
5+072~5+324	断层及影响带, V 类, 主断带渗水	圆型	115	8 $\Phi 25$	8 $\Phi 25$		瓜达沟断裂
6+975~7+050	灰黑色板岩, 层状结构, IV 类, 地下水状态	城门洞型	160	10 $\Phi 28$	10 $\Phi 28$		
7+050~7+142	碳质千枚岩夹薄层状石灰岩, V 类, 局部滴水	圆型	162	10 $\Phi 28$	10 $\Phi 28$		
7+142~7+211	薄层状板岩, 岩体破碎, IV 类	圆型	163	5 $\Phi 28$		4 $\Phi 20$	单层钢筋
7+281~7+370	厚层状石膏岩, 局部裂隙处滴水, IV 类	圆型	164	5 $\Phi 22$		4 $\Phi 20$	单层钢筋
7+370~7+535	断层及影响带, 地下水丰富, V 类	圆型	165	10 $\Phi 28$	10 $\Phi 28$		昌昌断裂

表 5 钢筋应力和渗压观测数据表

位置	钢筋应力计		渗压计	
	最大拉力 /kN	最小拉力 /kN	最大渗透压力 /MPa	最小渗透压力 /MPa
7+050	47.28	11.70	0.11	0.07
7+138	58.55	12.8		
7+195	22.52	10.2		
7+300	17.58	5.81	1.13	0.98
7+470	-12.39	-34.1	1.28	1.20

注: 钢筋拉力为每根钢筋受到的总拉力。

压力测试, 测得的外水压力达到 2.0 MPa 左右。由此可知, 7+470 处钢筋处于受压状态是由于外水压力大于内水压力所致, 该处没有发现明显的

混凝土裂纹。

从表 5 可知, 如果按照结构透水利理论计算, 隧洞衬砌用钢筋数量还可大大减少, 相应会极大地减少工程投资。

6 结 语

对于长引水隧洞, 衬砌和支护工程量通常都较大, 为缩短工期和减少工程投资, 作好优化工作非常重要。只要隧洞有足够的岩体覆盖厚度, 围岩是内水压力的承载主体, 即使是在软弱破碎围岩条件下也是如此。规范规定裂缝宽度只是象征

(下转第 50 页)

(4) 减水防裂剂可以改善水泥浆的稠度, 减少混凝土泌水, 减少沉缩变形。

(5) 提高水泥浆与骨料的粘结力, 可以提高混凝土的抗裂性能。

(6) 混凝土在收缩时受到约束产生拉应力, 当拉应力大于混凝土抗拉强度时裂缝就会产生。减水防裂剂可有效提高混凝土的抗拉强度, 大幅度提高混凝土的抗裂性能。

(7) 掺外加剂可使混凝土密实性好, 可有效地提高混凝土的抗碳化性, 减少碳化收缩。

(8) 掺减水防裂剂后混凝土缓凝时间适当, 在有效防止水泥迅速水化放热的基础上, 避免因水泥长期不凝而带来的塑性收缩增加。

(9) 掺外加剂的混凝土和易性好, 表面易抹平并形成微膜, 从而减少水分蒸发和干燥收缩。

许多外加剂都有缓凝、增加和易性、改善塑性的功能, 在工程实践中, 应多进行这方面的实验对比和研究, 这样做比单纯的靠改善外部条件可能会更加简捷、经济。

4 混凝土的早期养护

实践证明, 混凝土常见的裂缝大多数是不同深度的表面裂缝, 其主要原因是温度梯度造成寒冷地区的温度骤降。因此, 混凝土的保温对防止表面早期裂缝尤其重要。

从温度应力观点出发, 保温应达到下述要求:

(1) 防止混凝土内外温度差及混凝土表面梯度, 防止表面裂缝的产生。

(2) 防止混凝土超冷。应尽量使混凝土施工期的最低温度不低于混凝土使用期的稳定温度。

(3) 防止老混凝土过冷, 以减少新老混凝土

间的约束。

混凝土的早期养护, 主要目的在于保持适宜的温、湿条件, 以达到两个方面的效果: 一方面使混凝土免受不利温、湿度变形的侵袭, 防止有害的冷缩和干缩; 另一方面使水泥水化作用顺利进行, 以期达到设计的强度和抗裂能力。

适宜的温、湿度条件是相互关联的。混凝土的保温措施常常也有保湿的效果。

从理论上分析, 新浇混凝土中所含水分完全可以满足水泥水化的要求而有余。但由于蒸发等原因常引起水分损失, 从而推迟或妨碍水泥的水化, 表面混凝土最容易而且直接受到这种不利影响, 因此, 混凝土浇筑后的最初几天是养护的关键时期, 在施工中应切实加以重视。

5 结 语

以上所述为笔者对混凝土的施工温度与裂缝之间的关系进行的理论和实践上的初步探讨, 虽然学术界对于混凝土裂缝的成因和计算方法有不同的理论, 但对于具体的预防和改善措施意见还是比较统一的, 同时, 在实践中的应用效果也是较好的。在具体施工实践中, 要靠我们多观察、多比较, 出现问题后多分析、多总结, 结合多种预防处理措施, 混凝土的裂缝是完全可以避免的。

作者简介:

李安玉(19562), 四川巴中人, 工程师, 从事路桥施工技术与管理
工作;

徐建新(19812), 黑龙江齐齐哈尔人, 助理工程师, 从事路桥施工
技术与管理工作。

(责任编辑: 李燕)

(上接第 19 页)

性指标, 钢筋配置得多也不能阻止混凝土的开裂, 加固和保护围岩才是衬砌设计的关键。为保证围岩稳定, 作好岩体灌浆和保证施工质量是隧洞安全运行的前提。另外, 采用渗流体积力理论计算出的配筋数量应该会更少, 但目前研究和实践较

少, 也同样值得研究。

作者简介:

张 良(19682), 男, 四川西充人, 高级工程师, 从事水利水电工程
技术和管理工作;

蒋文胜(19692), 男, 四川广安人, 高级工程师, 从事水利水电工程
技术和管理工作。

(责任编辑: 李燕)

四川电力职业技术学院举行 90 周年校庆学术讲座

2007 年 11 月 16 日, 在喜迎四川电力职业技术学院 90 年校庆之际, 该校与省水电学会科普工委联合举办了“90 周年校庆学术讲座”, 特邀四川省电力调度中心主任张晓明以“国内外大电网事故及大电网建设简介”为题在该院做了深入浅出、十分精采的学术报告。该院教职工、领导及科普工委成员单位 200 余人赴会聆听讲话。张主任图文并茂, 详细介绍了有关大电网的情况, 使与会者受益匪浅, 了解了有关大电网最新的情况, 为今后的工作增添了新的知识。

在完成了预定的议程后, 讲座圆满结束。