

铜街子水电站工程概况及其主要技术问题

张纯昌 孙培烈

(水电部成都勘测设计院)

一、概 述

铜街子电站位于四川省乐山市附近,是继龚咀电站之后,在大渡河上兴建的又一座大型水电站(图1),为我国能源建设重点工程项目之一。电站装机容量60万千瓦,保证出力13万千瓦,平均年发电量32.1亿度,建成后与上游的龚咀电站联合运行,在四川电力系统中起骨干作用。铜街子水库总库容2亿米³,可以对龚咀水电站进行反调节,改善由于龚咀电站进行日调节所引起的下游河段不稳定流态对航运等的不利影响,使龚咀电站在系统中充分发挥其调峰调频作用,提高其工作容量。此外,大渡河上游森林资源丰富,每年需通过河道流送木材一百万米³,目前单漂流送。工程建成后,可以利用水库拦蓄木材,进行扎排作业,然后通过筏闸送往下游,起到改善木材流送条件的作用。

铜街子工程的勘测设计工作,我院早在1958年即已开始,其后曾一度开工。但由于工程地质条件复杂,坝址选择经历几次反复,1977年始最后选定坝址。1978年11月提交了初步设计。此后在施工队伍进场开始工程筹建的同时,设计单位对枢纽布置等又进行了大量的补充勘测、设计和研究工作,直至1982年初,有关各方才对调整后的水工布置方案取得了统一的认识。与此同时,初步设计遗留下来的其它问题,如漂木过坝建筑物型式选择以及征地移民补偿标准等,也都基本得到了解决。1982年9月,提交了补充初设报告,并经上级审查批准。

本工程由水电部七局施工。主体工程于1985年1月23日正式开工。目前一期导流工程的纵向围堰、左岸抗滑沉井、导流明渠和右岸筏闸等基础开挖正紧张施工,计划于1986年底明渠过水,河床截流,1991年第一台机组发电。

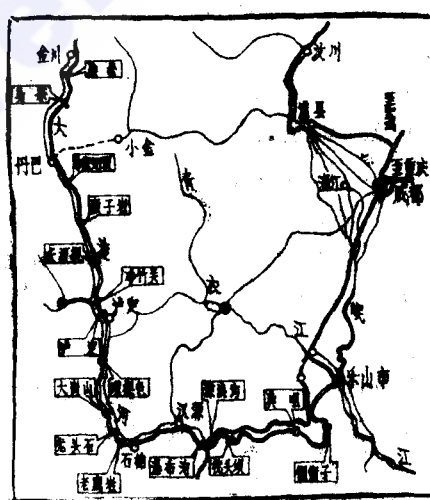


图1 大渡河梯级水电站位置图

二、自然条件

(一) 水文

大渡河迳流量大而平稳,坝址控制流域面积76400公里²(占全流域面积的98.7%),

多年平均流量 $1500\text{米}^3/\text{秒}$ ，相当年水量 473亿米^3 ，略大于黄河(陕县站)；且径流年际变化小，最丰、最枯水年与平均年水量之比为 1.32 和 0.75 ；历年实测最大流量 $10800\text{米}^3/\text{秒}$ ，最小 $342\text{米}^3/\text{秒}$ ，两者比值仅 32 倍。水文条件对水能开发非常有利。

洪水主要由暴雨形成。经多次历史洪水调查，最后订正的调查最大洪水，亦即为实测最大洪水，发生在1939年，流量 $10800\text{米}^3/\text{秒}$ ，重现期 75 年。

大渡河水文观测年限较长(自1937年至今)。工程设计中，永久泄洪建筑物按 500 年一遇洪水设计，万年一遇洪水校核，经频率分析洪峰流量分别为 13100 和 $16400\text{米}^3/\text{秒}$ 。

流域内植被较好，多年平均输沙量为 2360 万吨。

(二) 地形地貌

选定坝址位于青杠坪峡谷出口处的开阔河段，谷底宽 400 余米，正常高水位处谷宽近 1000 米。枯水河床偏右岸，宽约 100 米。经钻探揭示，河床砂砾石下基岩存在两条深切谷槽，其中右深槽在现河床位置，剖面呈缓 V 形，谷槽上宽约 80 米，槽深约 30 米；左深槽则靠近左岸岸边，窄而深，且上口有倒悬岩壁，谷槽上宽约 40 米，最大槽深达 70 米，但槽的上、下游进出口稍浅，略成潭状。两个深槽均被河床冲积层掩埋。

左右深槽间的河床复盖层较浅，坝轴线处基岩出露于河床，向下游复盖层逐渐变深。两岸有漫滩及Ⅰ级阶地。

坝址右岸岸坡多基岩裸露。左岸阶状基岩边坡以下至Ⅰ级阶地之间为宽 700 余米之缓坡堆积地形，缓坡表部为厚 $20\sim 50$ 米之碎石土，下部为平缓基岩面或被覆盖的Ⅰ、Ⅱ级阶地。

两岸冲沟发育，以左岸接头上游侧的牛石溪沟最大，玄武岩层被刻蚀成深狭沟谷。

(三) 地质条件

1. 区域地质简述

本工程所在地区，在大地构造上处于川滇南北构造带与盆地北东向构造带的交接部位，区内主要构造体系大体可分为南北向构造和北东向构造，强度自西向东有逐渐减弱的趋势。在构造形态上具有宽缓背斜、中高角度逆冲断层及较发育的高角度扭性断裂的特点。

经地震部门鉴定，枢纽地区地震基本烈度为 7 度。

库区出露地层主要为玄武岩、灰岩及砂岩。岸坡稳定性好，不存在浸没及渗漏问题。

2. 坝区工程地质问题

坝区出露地层为上二迭系峨眉山玄武岩和沙湾组砂页岩。玄武岩总厚度约 200 米，经五次喷溢轮回形成，可分为五大层。其中第二层较薄($2\sim 25$ 米)，其余各大层厚 $30\sim 60$ 米。各大层共同特点是：顶部为较软弱的凝灰岩，中等坚硬的凝灰玄武岩；中、底部为坚硬玄武岩。坝基座落在第五层玄武岩上。

坝基玄武岩强度指标高，不是本工程控制性的工程地质问题，几个关键性的工程地质问题是：

(1) 层间错动带C。

坝区第四、五层玄武岩间，即两次喷溢轮回间歇面上，堆积了一层火山碎屑堆积

物,受后期构造挤压破碎成为 C_5 层间错动带,遍布整个坝基,平均厚度为0.3~0.4米,其中断层泥、糜棱~断层泥一般厚1~5毫米,局部达5~20毫米,有的呈泥膜状。

C_5 在坝基范围内,因受后期断层切错,分布高程不一,其中右深槽 F_6 、 F_3 断层之间埋藏最浅,在坝轴线上距岩面仅7米左右(图3)。

经多次试验、鉴定, C_5 的力学指标定为: $f'=0.31$, $C'=0.15$ 公斤/厘米², $f=0.25$, $C=0$, $E_0=1000$ 公斤/厘米²。由于抗剪指标很低,且产状倾向下游,倾角 $6\sim 8^\circ$,故对大坝坝基深层抗滑稳定非常不利。此外, C_5 在上游出露于水库内,可能形成不利的渗流通道,这些均须采取一定的工程措施予以处理。

(2) 断层 F_3 、 F_6 等

根据钻探揭露,在右深槽谷底隐伏一组(F_3 、 F_6 等)中低倾角的逆断层,分别倾向左右岸,下卧于河床坝基之下。断层破碎带主要由糜棱、角砾岩组成,铅直厚度1~6米。由于断层交汇切割,破坏了右深槽等部位基岩的完整性,而且常与 C_5 组合形成不利的滑动面。断层带的力学指标,因无直接试验成果(未取得断层泥物质),采用经验数据: $f'=0.44$, $C'=0.1$ 公斤/厘米², $f=0.35$, $C=0$, $E=1400$ 公斤/厘米²。

(3) 左、右深槽

由于深槽的存在,使枢纽布置受到了很大的限制,并增大了工程量和工程难度。作为坝基的第五层玄武岩,在右深槽处被侵蚀后所余最小厚度仅7米左右,而在左深槽处全被侵蚀。右深槽底部基岩受 C_5 、 F_3 、 F_6 、 F_7 等交汇切割后,完整性很差,变形模量低至1万公斤/厘米²,对大坝变形和抗滑稳定都非常不利。而左深槽由于开挖困难,采用了复盖层上建坝的方案,工程措施比较复杂。

(4) 左岸岸坡稳定

坝址左岸地面坡度一般 10° 左右,分布有大面积碎石土层,厚度达20~50余米,可分为三层,其中第二层底板存在滑面,试验抗剪指标为 $\varphi=9^\circ$, $C=0.08$ 公斤/厘米²,计算表明自然边坡基本稳定,但在工程实施中,需尽量不破坏其自然稳定条件。

(5) 其它

玄武岩层内错动:第五层集中发育在顶、底部,延伸长度一般20~60米,产状基本与层面产状一致。

玄武岩含水和透水性主要受岩性和构造控制,无统一的相对隔水层。

右岸接头因受青杠坪等冲沟切割,地形不完整,并存在沙湾组砂岩、粘土岩,抗剪指标低,风化卸荷比较强烈。

以上情况在设计中必须考虑适当措施予以处理。

三、枢纽布置及导流规划

本工程枢纽布置除受工程地质条件制约外,还与施工导流方案密切相关。经过多年的反复比较、论证,最终采用的布置如图2、图3所示。左岸设置宽约60米的导流明渠,右岸设置过木筏闸。两者之间,右侧现河床部位布置五孔溢流坝段,除进出水流较为顺畅外,主要是它比厂房坝段更能适应右深槽不利的地质条件;其左侧布置厂房坝段,厂

房对外交通(公路)布置在左岸,运行方便,并减少了与右岸筏闸的运行干扰。为了避免水库淤沙对进水口的威胁,在厂房坝段左右侧各设一孔排沙底孔坝段。

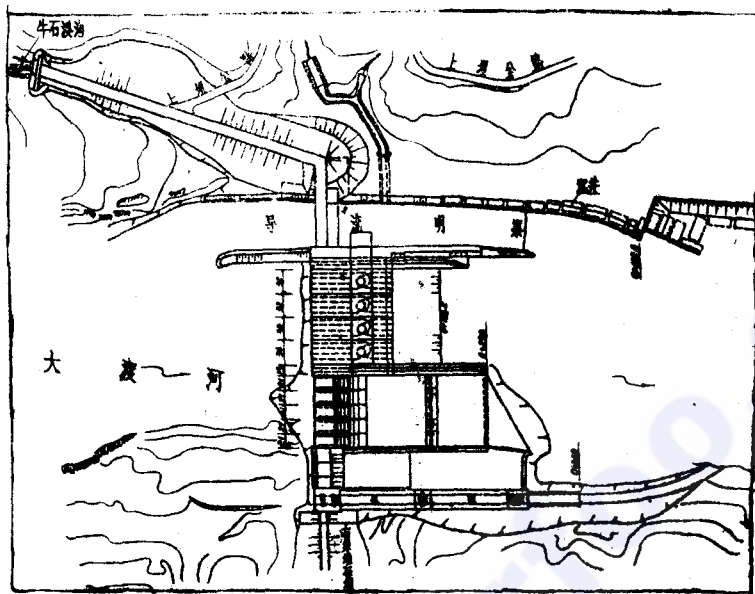


图2 枢纽布置平面图

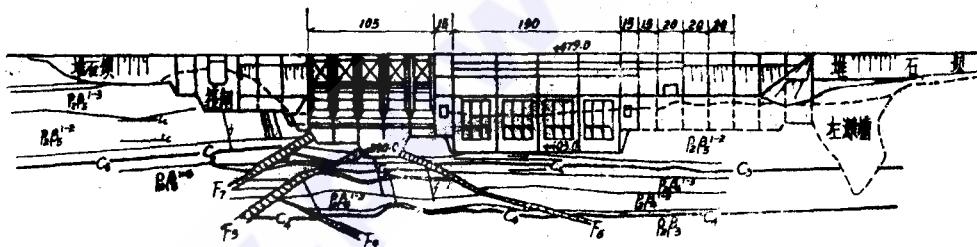


图3 下游立视图

至于两岸接头,均采用堆石坝坝型,以适应不利的地质条件。其中左岸在跨越左深槽处,采用复盖层上建沥青混凝土斜墙堆石坝,基础设置两道混凝土防渗墙。厂房坝段在左底孔和左岸堆石坝间布置了导流明渠。为了使左岸接头避开左岸碎石土层,并避免该土层处于水库中,坝轴线在导流明渠以左向上游转折 72° ,沿牛石溪沟裸露基岩接至稳定山体。

坝顶高程479.0米,坝顶总长1029米。有关建筑物的情况是:

1. 五孔溢流坝各坝段宽21米,溢流孔口为 14×17.5 米(宽 $\times$ 高)。由于深层抗滑稳定条件甚为不利,必须对坝后抗力体加以保护,因此采用底流消能型式,消力池长185米。宣泄设计洪水和校核洪水时,护坦上单宽流量分别为100.3和127.0米³/秒。

2. 厂房共四台机组,四个坝段,总长130米。采用“河床式”布置,厂、坝间不分缝。进水口底高程439.0米。

3. 排沙底孔坝段每个宽15米, 内设 5×6 米 (宽 $\times$ 高) 底孔, 孔底高程430米。采用短压力孔口形式, 后接明槽, 出口采用低鼻坎挑流消能。

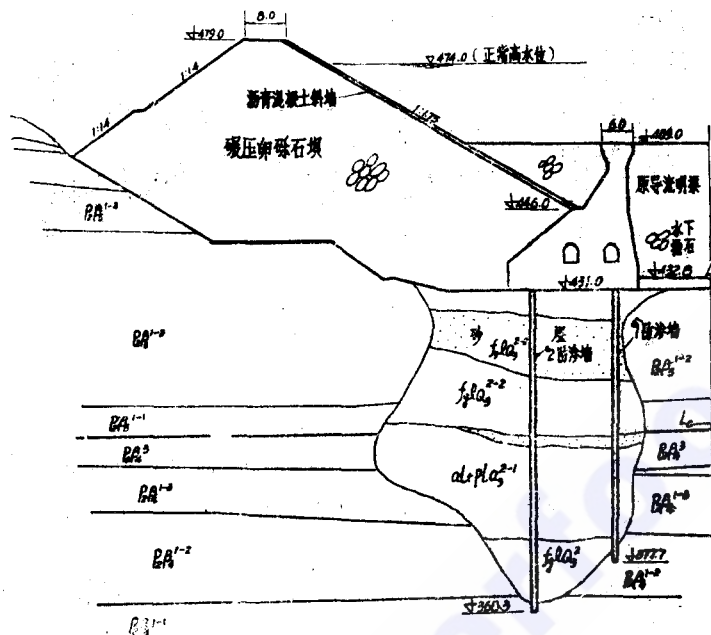


图4 左深槽及上部堆石坝剖面

4. 筏闸位于右岸山坡, 最大水头为41.0米, 分为两级, 分级水头20.5米。闸室长105米, 宽14米。上游设浮动引筏道, 下游设固定引筏道和引渠。木材在水库内编扎成 $33 \times 13 \times 1.5$ 米 (长 $\times$ 宽 $\times$ 厚) 木筏, 通过筏闸送往下游。计算年过坝量130万米³。

5. 导流明渠位于左深槽以右, 全长453米。渠宽由进口处的68米逐渐缩窄, 至坝轴线处宽60米, 出口处宽54米, 末端并弯向河床。为了保持左岸岸坡开挖过程中的稳定性和防止出口水流冲刷, 在明渠左边墙及其下游导墙设置抗滑、防冲沉井20个, 最大高度可达40米。

明渠边墙底宽15米, 它同时也是河床基坑施工时的纵向围堰。

导流明渠按20年一遇洪水流量9200米³/秒设计, 50年一遇洪水流量10300米³/秒校核。计划1986年底明渠形成后河床截流, 在上、下游围堰基坑内修建厂房、溢流坝和排沙底孔等坝段。1990年11月明渠下闸截流, 完建明渠挡水坝段, 1991年底第一台机组发电。

四、几个较重要的工程技术问题的处理方法

(一) 混凝土坝坝基深层抗滑稳定

河床分布着抗剪指标低且产状不利的C₀错动带, 以及缓倾角断层破碎带, 这些控制了部分厂房坝段和溢流坝段的深层抗滑稳定 (图5)。

对抗滑稳定的评价主要采用刚体极限平衡法, 要求达到的标准如下:

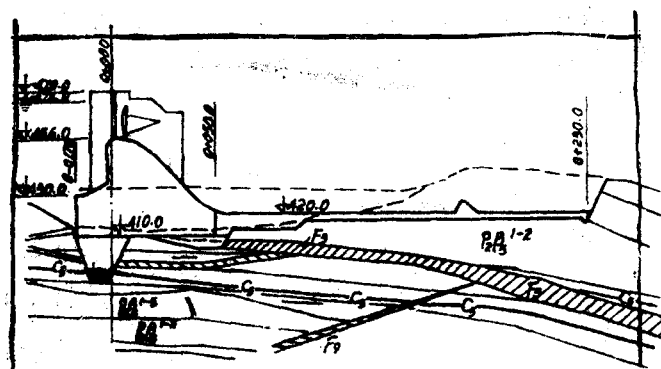


图5 溢流坝纵剖面

1. 当软弱结构面贯穿坝基及下游岩体时,按纯摩公式核算其稳定性,要求设计情况下安全系数不小于1.3,校核情况下不小于1.2~1.1,并须复核在计入一些有利因素后之实际安全度不小于2.0。

2. 再核算沿软弱结构面和其它切穿岩体的第二破裂面的组合面的滑动情况,用剪摩公式,软弱结构面和第二破裂面均采用抗剪断强度。要求设计情况下安全系数不小于3.0,校核情况下不小于2.5。

计算结果,在计入坝后抗力体抗力的情况下,第四孔溢流坝不能满足剪摩安全系数大于3.0的要求,厂房4号机所处坝段不能满足纯摩安全系数大于1.3的要求。其他坝段虽达到前述要求,但安全系数中坝下游岩石抗力体的稳定因素占了很大的比重。此外根据有限元计算及结构模型试验,沿坝基 C_5 上下盘的水平错距较大,坝踵水平位移及坝段间的变位差亦较大。

为了增大抗滑稳定性和减少坝体、地基的变位值,在设计中比较了多种处理方案,最后选定加设齿槽的方案。其中溢流坝采用前齿槽,厂房4号机所处坝段采用中齿槽,槽底均切穿 C_5 ,最大槽深达到20米。此外加强帷幕灌浆和固结灌浆,以改善基岩的防渗与其物理力学性质。

坝体加设齿槽后,增加了施工的困难,对工期有所影响;且根据有限元计算,槽底压应力集中,槽体存在有不利的拉应力,这些问题都有待下步工作中作深入的研究。

(二) 左深槽及其上部堆石坝

左深槽复盖深层达70米,其中还夹有20米厚的粉细沙层,变形模量很低。加以深槽形态不规则,剖面变化大,上部建坝后,坝体和地基的不均匀沉陷和水平位移差都比较大,还有防渗处理问题,使各个方向的接头和止水工作条件相当复杂,要求具有能适应较大变位的材料和结构型式。其次,坝体沥青混凝土斜墙系支撑于明渠左边墙上,而边墙的基础为深厚复盖层,主要依靠两道混凝土防渗墙起承重作用,将外荷载传递到槽底基岩,防渗墙的压应力初步计算,最大可达200公斤/厘米²以上,需要高标号的混凝土和较高的施工质量。关于防渗墙墙顶与明渠左边墙墙底间的接头处理,目前还在研究比较中,如果采用“硬接头”型式,必然增大防渗墙的压应力,并可能出现接头处被压碎破坏的情况;但如采用充填沥青胶泥之类材料的“软接头”,则沉陷量以及由此引起的大坝斜墙应力和变位均不易准确计算,且具体作法也不落实,这些都有待深入的研究。

(三) 左岸岸坡稳定问题

左岸岸坡在自然状态下是稳定的,在开挖导流明渠时出现临时边坡稳定问题。曾经研究过放缓边坡至1:3并设置井点及地面排水的方案,也曾研究过在岸坡上设置抗滑桩及阻滑沉井方案。由于对放缓边坡方案的可靠性存在顾虑,目前采用阻滑沉井方案,为此设置了20个沉井,其平面尺寸(长×宽)有25×10米、25×12米、30×16米和17.2×14米等多种,前沿总长达470米左右,单井最大下沉高度结合防冲要求达到40米(其中有15米在粘土岩中下沉),规模是相当大的。

五、几个技术问题的讨论

本工程勘测设计历时甚久,做了不少工作,有一些体会也有不少教训,现择其主要的加以讨论,供今后工作中借鉴。

(一) 关于坝基深层抗滑稳定:

国内不少工程坝基有缓倾角软弱夹层,存在深层抗滑稳定问题。但现行设计规范对某些稳定计算方法和评价标准未作出统一规定,设计标准不易确定。例如:是按纯摩还是剪摩公式进行计算?“安全系数”应达到什么标准(包括坝下游抗力体在稳定分析中的作用是否需加以限制)?地基各项抗剪指标如何选取?又如,地基的变位如何计算?需要对哪些部位的变位进行控制?允许的变位应是多少?这些标准都有待进一步拟定。这里就我们工作中的体会,提出几点看法。

关于深层抗滑稳定的计算方法:我们认为刚体极限平衡法仍然是个简单而有效的方法。至于纯摩和剪摩公式,虽然后者较为合理,但当软弱面贯穿整个滑动面时,由于软弱面上 C' 值很小,所以按剪摩公式计算的安全系数常远不能满足要求。例如铜街子工程 C_s 与 F_s 组合滑动面,由于 C' 值仅0.15和0.1公斤/厘米²,故剪摩安全系数仅达到要求值3.0的1/3~1/2。针对这种情况,我们认为其抗滑稳定性可与土坝类比,采用土坝坝坡稳定安全因数,并分析坝体稳定的实际安全度,适当留有余地。如达不到所要求的安全因数,则宜采取工程措施加固坝基,而不宜过多地增大坝体断面,因其获得的有效阻滑力很小,不够经济合理。

关于用刚体极限平衡法求安全系数的公式,目前已有多种。铜街子大坝主要采用“被动抗力法”计算,其成果与“等安全系数法”计算结果非常接近,且应用比较简便。

2. 关于大坝变形稳定的衡量标准,目前规范未作出规定,各工程采用的也很不一致,有的限制水平位移;有的控制帷幕的压缩变形,或是帷幕区软弱夹层的单位厚度水平错距;有的限制坝基角变位……。我们认为,主要应校核帷幕的水平剪切变形,并用软弱夹层的单位厚度水平错距加以控制,因为它能够反映夹层剪应力以及材料的剪切破坏强度;而且由于是相对值,可以减少因计算方法不准确所带来的差错。关于变位的计算,目前多采用有限元法或结构模型试验,由于计算程序、计算假定和试验方法不同,成果会有不小的出入,对此也需要作出统一的规定。

为了正确规定变形稳定的标准,需要开展大量调查研究和科学试验工作。

3. 关于软弱面抗剪指标的选取问题。正确选用抗剪指标是抗滑稳定计算的基础,

如果指标不符合实际,则再精确的计算方法和控制标准也是没有意义的。在目前实际工作中,这方面存在的问题和值得讨论改进的地方很多,后面将略作阐述。

(二) 关于采取先进的勘探手段, 进一步加强地勘工作

在坝基存在软弱夹层的情况下,采用钻孔手段是难以揭示地基特性的。如铜街子电站,坝基范围内钻孔超过万米。但除 C_8 外,其它软弱结构面如 F_8 、 F_3 、 F_7 等的物理力学性质,迄今未能确切掌握,也取不出原状土样,无法进行试验分析工作。因此除钻孔手段外,还必须下决心进行重型勘探工作,如竖井、平洞、斜井等。对软弱夹层 C_8 的了解,最终是借助于在深入地基下40余米的斜井中进行试验研究后得出的。

为了确定基岩和软弱夹层的力学参数,需要进行现场试验,但值得注意的问题之一是试验点的代表性问题。由于设计初期主导思想是力求地质指标“包得住”,故试验往往安排在地质条件偏坏的地点进行,所得力学参数偏低。例如铜街子工程玄武岩变形模量仅1~5万公斤/厘米²,小于其它同类地层数据数倍以至数十倍。其它指标的选用也有值得讨论的地方。如果选用的地质参数指标略为提高,则计算所得的坝基变位值即可减小,抗滑安全度亦可增大,上述的坝基特殊加固处理也就有可能不必要采用。

(三) 关于木材过坝设施

铜街子工程在审查布置方案过程中照顾了多方面意见,目前采用类似船闸的“筏闸”作为木材过坝设施,这在其它工程是不多见的。我们认为这种过坝方式没有普遍推广的价值,因为不仅投资和工程量大,而且运行中存在不少问题有待研究解决。初设审查时,筏闸为四级,现已改为二级,每级水头增加一倍。修改后闸门套数减少近一半,事故机率相应减少。但由于通过的木筏数量大,有些问题仍有待实践检验。此外,随着上游梯级电站的开发,如木材采用其它的方式运输,则本工程的筏闸有完全失去效用的可能。

如果本工程当时不采用筏闸而采用其它机械过木设施,将会简化枢纽布置和导流工程,对节约投资和缩短工期是很有利的。

(四) 关于左深槽堆石坝

本段坝高仅40米,但坝下深槽复盖层厚达70米,且槽壁形态特殊,加上坝上游的导流明渠左边墙亦置于其上,为了承重,墙底设置两道混凝土防渗墙。这种布置使这段堆石坝的设计施工都十分复杂。现在看来,当初如能将坝轴线略调整并采用沥青混凝土心墙堆石坝跨越深槽,对简化设计施工以及减少投资和缩短工期可能是有利的。

(五) 关于导流明渠左岸岸坡稳定性问题

为维持临时开挖边坡的稳定性,设置了规模很大的沉井群,价格昂贵且施工难度大。虽然目前已施工,但设置的必要性仍有争论。一种意见认为,左岸岸坡系碎石土组成,有别于不稳定的基岩边坡,它的失稳变形是比较缓慢的,或常以表层土滑形式出现。因此如果在开挖前作好排水系统,并采取适宜的开挖方法,是可以维持其稳定的,即使出现一些表层土滑,其危害亦不会很大。