



刘德禄 主编

天生桥一级水电站 工程建设

中国电力出版社

996000

天生桥一级水电站 工程建设

刘德禄 主编

中国电力出版社

内 容 提 要

本书出版在天生桥一级水电站首台机组即将投产发电之时。全书由近 30 篇记录工程建设有关技术问题的专题文章组成,从中可以看到天生桥一级水电站工程建设每一步的关键技术问题。本书既是对天生桥工程建设的一个阶段性总结,也是对面板堆石坝建设经验的归纳。

本书可供所有从事水电建设的工程技术人员和其他工作人员参考。

天生桥一级水电站工程建设

刘德禄 主编

中国电力出版社出版、发行

(北京三里河路 6 号 100044 [http://www. cepp. com. cn](http://www.cepp.com.cn))

实验小学印刷厂印刷

*

1999 年 1 月第一版 1999 年 1 月北京第一次印刷

787 毫米×1092 毫米 32 开本 8 印张 175 千字 1 插页

印数 0001—3200 册

*

书号 1580125·245 定价 18.00 元

版 权 专 有 翻 印 必 究

(本书如有印装质量问题,我社发行部负责退换)

《工程建设》编委会

主 任：袁懋振

副 主 任：张恒伟 吴世昌 叶彩鹏

编 委：赵 俊 魏善淇 刘德禄 时继元
朱柏林 蔡强珊 丁枢彬 张宗亮
李勋烈

主 编：刘德禄

副 主 编：李勋烈

责任编辑：王建川 李 弘

序

天生桥一级水电站是我国近期修建的一座具有高坝大库、装机容量在百万千瓦级以上的大型水电工程。它是红水河流域水力梯级开发中的龙头电站，是国家开发西南水力资源，实现西电东送的一个电源点。电站地处桂、黔、滇三省（区）交界的边远山区，由国家和广东、广西、贵州合资兴建。电站枢纽中的主体工程混凝土面板堆石坝，就高度、体积等规模而言，在目前世界上同类坝型中处于前列。电站建设利用部分外资（日本 OECF 贷款），对关键项目实行国际竞争性招标，旨在引进外国先进技术和设备，确保工程质量和安全。

电站建设是在我国水电建设体制正进行改革，市场经济不断发展和完善，人们的固有观念不断受到改革潮流荡涤的特定历史条件下进行的。

由于各种条件的复杂性，电站的建设经历了不少艰难险阻。但是，中国南方电力联营公司和参加电站建设的人们，在国家有关部委、国家电力公司、南方四省（区）政府的领导和支持下，以大无畏的精神，艰苦奋斗，努力拼搏，克服了重重困难，闯过了一道道难关，使电站建设取得了进展。天生桥一级水电站的建设，不仅为我国混凝土面板堆石坝的建设管理、设计和施工积累了丰富的经验，而且对我国混凝土面板堆石坝的发展和广泛应用将起到积极的推动作用。

现在，一座举世瞩目的高 178 米的混凝土面板堆石坝已经矗立在南盘江上，首台机组即将发电。承担建设管理的中国南方电力联营公司根据电站建设的历程，以面板堆石坝工程的建设管理及有关施工技术为重点编辑了这本书，它一方面总结该电站建设特别是面板堆石坝建设的经验体会，另一方面也反映了水电建设者们积极采用现代化科学技术工艺，努力促进水电建设的胆识。我们祝贺天生桥一级水电站面板堆石坝的建设成功。

汪恕诚

目 录

序

天生桥一级水电站混凝土面板堆

石坝的技术特点	1
天生桥一级水电站建设管理	10
电站工程建设的技术管理	21
天生桥一级水电站的设计工作	29
按市场规律发展西电东送事业	34
天生桥一级水电站枢纽布置及水工	
建筑物设计	44
八年奋战 今偿硕果	57
河道水流控制与面板堆石坝施工程序	64
电站工程地质勘察	73
专家咨询在电站建设中发挥重要作用	81
工程建设监理实践	88
从天生桥 TSQ-1/C3 标谈大型水电土	
建工程国际招标	97
大坝趾板、面板混凝土施工与管理实践	107
混凝土面板堆石坝趾板基础灌浆施工	119
面板堆石坝垫层料坡面施工	130
溢洪道开挖施工技术要点	135
溢洪道开挖工程管理实践	139

导流洞堵头施工	148
放空洞工程的施工和管理实践	154
放空洞工作闸门室的开挖和混凝土衬砌施工	164
放空洞金属结构制作安装的监理	171
引水隧洞群施工	181
电气主接线的简化	194
为电站建设服务的施工通信	198
面板堆石坝工程施工监理控制浅谈	202
面板混凝土质量控制	210
下闸蓄水前阶段验收简述	216
合理控制造价 促进水电建设	223
引水隧洞后张法预应力环锚工程造价简析	230
天生桥一级水电站基建资金管理与运用	236
天生桥一级水电站工程建设大事记	243

天生桥一级水电站混凝土面板堆石坝的技术特点

蒋国澄

(中国水利水电科学研究院, 北京)

天生桥一级水电站混凝土面板堆石坝, 高 178m, 坝顶长 1168m, 填筑量 1800 万 m^3 , 水库总库容 102.6 亿 m^3 , 装机容量 120 万 kW, 溢洪道泄量 $21750\text{m}^3/\text{s}$ 。混凝土面板总面积 18 万 m^2 。最高月填筑量 113 万 m^3 。工程于 1991 年开工, 1994 年截流, 预计 1998 年底第一台机组发电, 1999 年全部建成。从工程规模及技术水平衡量, 属国内第一, 在世界上也名列前茅。其坝高仅次于墨西哥的阿瓜密尔巴坝, 居世界第二(阿瓜密尔巴为面板砂砾石坝, 如以堆石坝计, 则为世界第一)。堆石填筑方量、水库库容、混凝土面板面积、导流流量等指标均为世界第一。最高月填筑强度 117 万 $\text{m}^3/\text{月}$, 在混凝土面板堆石坝中, 也是世界领先的。

在天生桥一级水电站勘测设计和施工过程中, 进行了大量科学试验和计算分析工作, 为采用新技术、新材料、新工艺提供了技术依据, 使大坝建设速度快、质量好、经济合理。

一、坝址选择

在规划阶段, 选择现大湾坝址下游 3km 处的坝盘作为坝址。坝盘坝址河谷较窄, 工程量相对较小, 但深入工作后, 发

现此坝址地质条件较差，有一大断层横穿坝基，河床砂砾层较厚，底部淤泥层情况也较为严重，右坝肩风化层深厚，下游即为天生桥灰岩峡谷，施工场地狭窄，施工布置较困难，枢纽布置也较困难。大湾坝址地形开阔，工程量较大，但枢纽布置和施工条件都较好，地质上也没有致命缺陷，因而选定了大湾坝址。工程建设实践证明这是一个正确的选择。

二、坝型选择

早期选择的土石坝型，是以土质心墙堆石坝型为代表，并对心墙防渗体材料做了大量工作。从红粘土到风化料都进行了研究，特别对林场风化料场，作了大量勘探和试验，包括现场碾压试验，肯定了这种风化料的力学性能及施工性能都很好，可以作为高坝心墙的良好材料。由于混凝土面板堆石坝始建于中国，积累了一定的经验。天生桥一级水电站决定采用面板坝方案，同时将一些关键技术问题列入国家重点科技攻关项目，组织国内有关单位进行科学研究。西北口水库混凝土面板堆石坝作为国家试点工程，得到的科研成果和实践经验也有借鉴的价值。最后设计上的两种比较方案表明，面板坝方案比心墙坝方案，要提前工期一年，节省投资 1.5 亿元，其施工条件也比心墙优越。当时世界上有巴西坝高 160m 的阿里亚坝的经验，国内有 95m 高的西北口水库经验，而天生桥一级在坝高和工程规模上都有所突破，因此有一定的疑虑。经过多方论证，最后还是作出了选定面板坝型的决策。施工实践表明，截流后 4 年发电，5 年建成这样一个大型工程，选用面板坝型起了重要作用。

三、枢纽布置

天生桥一级水电站枢纽建筑物包括大坝、溢洪道和泄洪洞、引水发电系统等三部分。泄水建筑物和引水发电系统分

列右岸和左岸。初选溢洪道位于右坝头岸边，工程量小，线路短，但右坝头为顺向坡，岩层倾向坡外，岩性为薄层灰岩、泥灰岩、极薄层泥岩等，对岸坡稳定极为不利。右岸离坝头较远处有一处灰岩溶槽，可以布置溢洪道，其引渠通过之处除进口段外主要系中厚层灰岩，材质宜于用作大坝堆石料，下游出口则位于远离坝脚的科风村附近。这一溢洪道位置线路长，开挖量大。由于引渠及其他部位的开挖料可以作为坝料使用，故总开挖量约 2000 万 m^3 中，用作坝料的达 1400 万 m^3 ，占总填筑量 1800 万 m^3 的 78%，其余在溢洪道右侧补充料场中开采，这将有很好的经济效益和社会效益。这一经验表明土石坝工程中可以用建筑物有效挖方作为筑坝材料，而不必考虑开挖量最小的原则。考虑挖填平衡的大开挖枢纽布置方案，只要地形地质条件合适，技术经济效益是明显的。

在枢纽布置中，右岸设一底板高程为 660m 的放空洞，不参与泄洪，但具有后期导流、蓄水期向下游供水及放空水库的多种功能，是十分必要的，与单独为放空水库而设置的隧洞是有所不同的。

四、软岩堆石料的应用

在坝体分区和料物配置中，根据溢洪道及其他建筑物开挖料中有许多薄层灰岩、泥灰岩、泥岩等软岩材料的情况，在坝轴线下游、下游尾水位以上设置了一个下游堆石区（即ⅢC区），填筑这种软岩堆石料。在下游堆石区至下游坡面间，设一ⅢD料区，既对下游软岩堆石区起保护作用，又可保持下游坡的较陡边坡。ⅢD区采用溢洪道开挖的灰岩料，最大粒径可到 1600mm。这样可充分利用各种有效挖方材料，达到经济合理的目的。

五、止水结构和材料

高坝周边缝止水是面板坝的关键技术之一。经试验研究，对传统的底部铜止水片、中部塑胶止水带及表面塑性封缝材料的三道止水型式作了改变。除底部铜止水不变外，中部塑胶止水常因不能承受 100m 水头以上的高压，因而在低高程处改为两道铜止水。表面塑性材料在高水头下也有冲切破坏的可能，故改用粉煤灰覆盖周边缝，在缝下设能起反滤作用的特殊垫层区，万一接缝张开并漏水时，粉煤灰可淤堵接缝。这种止水结构型式在国内还是首次采用。

六、施工分期和导流渡汛

天生桥一级水电站坝址河谷开阔，两岸岸坡较为平缓，河床冲积层最大厚度达 25.6m，截流后一个枯水期将坝体临时断面抢筑到渡汛高程，因开挖回填方量太大，是难以达到的，因此选择的施工分期和导流渡汛方案是河床一次断流，左岸两条隧洞导流，第一个汛期堆石体表面过水，上下游过水围堰挡枯季流量的方案。在汛期堆石体表面过水时，左右岸仍可继续进行坝体填筑。混凝土面板分三期浇筑，与坝体填筑分期相适应。建设过程大致如下：

1994 年底截流，由左岸导流隧洞过水，同时完成上下游过水围堰，导流标准为挡枯水期 20 年一遇流量 $1670\text{m}^3/\text{s}$ ，同时进行左右岸坝肩及趾板地基开挖，并利用枯水期抽水后尽量多开挖水面附近的覆盖层，以减少第二年下基坑后的工作量。1995 年汛期，由导流洞及原河床同时过水渡汛。

1995 年汛后基坑抽水后，开始河床部分的基坑开挖，1996 年 1 月开始坝体填筑。1996 年汛期按 30 年一遇洪水 $10800\text{m}^3/\text{s}$ 标准安排导流渡汛，采用导流洞与堆石体表面同时过水的方案。在河床部位坝体填筑至高程 642.0m 之后，预留底宽为 120m 的过水口门，两岸以 1:1.4 的坡度继续填筑

到 659.0m 高程，并完成坝面过水保护。汛期两岸可继续填筑，为第三个汛期坝体临时断面挡水渡汛创造有利条件。

1997 年汛期，即截流后第三个汛期，用坝体临时断面挡水，导流标准为 300 年一遇洪峰流量 $17400\text{cm}^3/\text{s}$ ，两条导流洞泄水，渡汛断面达到 725.0m 高程。此后即达到全年施工条件。在汛前，即 1997 年 3 月 21 日至 5 月 2 日，完成了高程 680.0m 以下的第一期混凝土面板浇筑。

1998 年汛期，导流标准为 500 年一遇洪水，洪峰流量 $18800\text{m}^3/\text{s}$ 。两条导流洞已在 1997 年 12 月下闸，枯水期流量由右岸泄水放空洞泄放，汛期洪水由放空洞及未完建的溢洪道同时泄放，坝体挡水前沿高程为 768.0m。汛前还须完成高程 680m 至 746m 之间的第二期混凝土面板的浇筑，以及高程 746m 与 768m 之间的上游坡面喷沥青乳剂保护层的施工。

1998 年汛后，利用放空洞闸门控制泄水，使水库水位蓄至发电死水位 731m 以上，准备年底第一台机组发电。坝体在 1998 年底达到坝顶高程，并于 1999 年汛前浇筑第三期面板。在 1999 年完成大坝工程。

这样的施工分期和相应渡汛安排是科学和合理的，充分利用了面板堆石坝可以在堆石体表面过水和上游垫层料喷护挡水的优越性，并达到提前蓄水受益的目标。一般在河谷不宽、覆盖层较浅、基坑工作量不大、第一个汛期挡水临时断面方量不大的情况下，截流后利用一个枯水期抢筑坝体临时断面挡水，无疑是最快速和经济的。但像天生桥一级那样的宽河谷，基坑开挖和抢拦洪断面工作量大，不是一个枯水期可以完成的，第一个汛期利用坝面过水也是合理的方案。实际上 1998 年汛以来水量不大，库水位未达溢洪道引渠底板高程 746.0m，未完建的溢洪道没有过水。

七、施工新技术和实践经验

在天生桥一级混凝土面板堆石坝施工中，采用了不少新技术，积累了不少新经验，对提高施工速度和质量大有裨益，对今后高面板堆石坝的施工足资借鉴。

(1) 引进了激光定位套筒式龙臂反铲进行上游坡削坡和平整作业。

(2) 引进了液压平板振动器，安装在液压反铲上，进行坡面及边角部位的填筑料压实，这对周边缝下特殊垫层区材料的压实特别有效。

(3) 专门设计制造了铜止水片现场挤压成型机械，可以用铜卷材加工成型为长条形止水片，减少焊缝和现场焊接工作量，对避免止水设施的薄弱环节，保证止水质量大有好处。

(4) 采用喷乳化沥青作为上游垫层坡面的施工期保护层，汛期挡水，防止雨水冲蚀，浇面板时防止人为破坏。天生桥一级采用的是三油三砂方案，效果很好。

(5) 垫层料制备，采用灰岩骨料，人工机械破碎，经试验调整破碎机参数，一次生产级配合格的垫层料。

(6) 滑模浇筑趾板混凝土。参考巴西经验，设计制造了趾板滑模装置，提高了浇筑速度。趾板浇筑长度大，不设伸缩缝，因此裂缝较多，经修补后不影响其防渗效果。

(7) 在分期浇筑混凝土面板时，第一期面板顶部和垫层坡面之间，将因后续坝体填筑时引起的沉降而使两者有脱开现象。天生桥一级坝也不例外。经多种材料的比较试验，采用收缩量很小的水泥粉煤灰浆自流灌注密实，清理后续浇第二期混凝土。

(8) 由于坝体采用前沿临时断面挡水渡汛，坝体下游部分高程滞后甚多，观测仪器埋设也是分期进行，坝下游坡的

永久观测房不能及时建立。为不影响施工期监测，在临时断面下游设立临时观测房，进行垂直和水平位移的观测，以取得较完整的资料，对评价坝体质量有积极意义。

(9) 每层铺料厚度都用仪器测量其填筑前后的高程进行严格控制，不合格的及时进行推薄、挖除等处理，对保证压实质量甚为重要。

八、质量保证体系和技术资料管理

天生桥一级水电站是按照业主负责制、工程监理制、招标投标承包制的新体制运行的。大坝建设中，承包商南水公司有一套完备的质量保证体系，有自己的技术管理部门和各种试验室，进行质量的自检。监理部由长江水利委员会派员组成，技术力量很强，也有自己的试验室。对重要部位和关键工序，都有人跟班进行旁站监理。对不合格的进行坚决处理或返工，包括挖除不合格料、处理超厚料层、处理超径石、大块石等。应该说监理部对施工质量进行了有效的监督，并严格执法，对保证施工质量起了应有的作用。

不论是施工单位，还是监理单位，对技术资料的管理都是很重视和卓有成效的。特别是施工期原型监测（仪器埋设、定期观测、资料整理）做得较好，按月发布观测月报，使有关方面都能了解坝体实态，有很大作用。各种资料，如试验数据、挖坑检测资料、单元和分项验收资料等都较齐全，整理和保管都较好，可供随时调阅，是难能可贵的。

九、混凝土面板堆石坝的蓄水安全鉴定结论

中国水科院受南电公司天生桥电站建设管理局委托，在水库正式蓄水前，对大坝、溢洪道、导流洞堵头等建筑物进行蓄水前安全鉴定。对混凝土面板堆石坝部分的结论意见如下：

(1) 大坝轮廓尺寸、坝料分区、填筑标准及细部设计符合 DL5016—93《混凝土面板堆石坝设计导则》的有关规定，坝坡稳定安全系数满足规范要求，设计预估变形量在合理范围以内，大坝设计达到安全运行要求。

(2) 坝基开挖揭露的地质条件与设计预测基本符合，没有重大地质缺陷。趾板绝大部分建基于弱风化基岩，仅左岸上部有一些在强风化岩基上，也是允许的。趾板范围内的断层、溶蚀裂隙、强风化夹层等都按设计要求进行了处理。

(3) 趾板地基的固结和帷幕灌浆达到设计要求，效果明显，幕后实测剩余水头一般在 10% 左右，仅个别点偏高。

(4) 坝体各分区筑坝材料品质符合要求，级配良好，但普遍比设计级配偏细，但不影响其力学性质。垫层料 (ⅡA) 级配平均曲线符合内部渗流稳定要求。ⅡA 与过渡层 (ⅢA) 之间层间系数满足太沙基反滤准则。按主堆石区统计，层厚平均 81.5cm，小于 90cm 的占 86.8%。干密度除主堆石 (ⅢB) 区外，都达到合格率 90% 的要求，ⅢB 区不合格部分主要发生在 1996 年 9 月以前，对应的填筑方量不大，而且都作了相应处理，其干密度的平均值为 $2.17\text{g}/\text{cm}^3$ ，离差系数 0.053。因此认为填筑质量总体上是合格的。

(5) 面板分块、分期、厚度、配筋及混凝土的各项设计指标等符合规范要求。混凝土原材料及配合比，除砂的细度模数和粗骨料超径需改进以外，都是合适的。混凝土坍落度、含气量、抗压强度等指标满足设计要求，匀质性指标一般。抗渗标号都大于 W12，但检测数量不够。面板混凝土裂缝不多，都作了处理，不影响蓄水安全。

(6) 趾板混凝土用滑模浇筑，长度较大，中间未设伸缩缝，裂缝较多，用粘贴 GB 板处理，并有铺盖覆盖。灌浆压力

抬动压裂处裂缝密集处，用外包钢筋混凝土层处理，不影响蓄水安全。

(7) 参照国外经验及试验室试验研究，将表层止水改用粉煤灰的三道止水方案是合适的。

(8) 大坝原型观测设备埋设和运行基本正常。施工期沉降量最大达 222.5cm，接近设计预估最大沉降 236cm。按实测沉降量估算主堆石（ⅡB）区坝料垂直压缩模量 41~70MPa，对宽河谷高坝尚属合理范围。左岸 0+918m 桩号 725.0m 高程以实测沉降估算的垂直模量偏低，系该断面上坝道路未压实所致，属局部问题。

(9) 在蓄水安全鉴定过程中，也提出了一些存在问题和不足之处，提出了相应的建议和意见，有待改进。