

超高堆石坝工程设计与技术创新

张宗亮^{1,2}

(1. 天津大学, 天津 370027; 2. 中国水电顾问集团昆明勘测设计研究院, 云南 昆明 650051)

摘要: 重点阐述了坝高 178 m 的天生桥一级面板堆石坝工程实践、坝高 261.5 m 的糯扎渡心墙堆石坝工程设计和坝高 310 m 古水堆石坝技术方案, 总结了天生桥一级面板堆石坝和糯扎渡心墙堆石坝工程设计特点与技术创新, 提出了古水面板堆石坝技术方案研究的内容和方向。

关键词: 技术创新; 工程设计; 超高堆石坝

中图分类号: TD853.34

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2007)08-1184-10

作者简介: 张宗亮(1963-), 男, 山东济南人, 教授级高级工程师, 总工程师, 从事水利水电工程设计、研究及技术管理工作。E-mail: Zhang_zl@khd.com。

Design and technical innovation of rockfill dam projects

ZHANG Zong-liang

(1. Tianjin University, Tianjin 370027, China; 2. Kunming Hydropower Investigation, Design and Research Institute, CHECC, Kunming 650051, China)

Abstract: The design practices and experience of Tianshengqiao-I Face Slab Rockfill Dam with a height of 178 m, Nuozhadu Core Wall Rockfill Dam with a height of 261.5 m and Gushui Rockfill Dam with a height of 310 m were presented. The design characteristics and technical innovation of Tianshengqiao-I Face Slab Rockfill Dam and Nuozhadu Core Wall Rockfill Dam were summarized, and the direction and scope of technical projects for Gushui Face Slab Rockfill Dam were studied.

Key words: technical innovation; project design; super-high rockfill dam

0 引言

自从 20 世纪中叶成功实践了当时国内同类坝型最高的毛家村水库心墙坝(最大坝高 82.5 m)起, 中国水电顾问集团昆明勘测设计研究院(以下简称昆明院)就与堆石坝工程结下了不解之缘。此后, 80 年代的鲁布革水电站心墙堆石坝(最大坝高 103.8 m)、90 年代的天生桥一级水电站混凝土面板堆石坝(最大坝高 178 m)、21 世纪初期糯扎渡水电站的心墙堆石坝(最大坝高 261.5 m)、古水水电站面板堆石坝(最大坝高 310 m)都代表了我国土石坝勘察设计科研的领先水平。一步一个脚印的确立昆明院在土石坝学科领域的优势地位。

“十五”期间, 昆明院承担了 30 多座堆石坝工程的设计研究工作, 其中 100 m 以上有 14 座, 见表 1。成功实践了 178 m 的天生桥一级水电站混凝土面板堆石坝; 完成了 261.5 m 的糯扎渡水电站心墙堆石坝可行性研究阶段和招标设计阶段勘察设计科研工作, 并开展施工详图阶段的工作。承担了 310 m 的澜沧江古水水电站堆石坝预可行性研究阶段的勘察设计科研工作。对堆石坝工程的试验手段、坝料特性、计算理论、

计算方法、本构模型、设计方法等进行了系统的研究, 同时结合所承担工程实际情况, 开展大量的工程科学研究工作, 取得了诸多有特色的创新性研究成果。

1 天生桥一级面板堆石坝

1.1 工程概况

天生桥一级水电站位于广西省隆林县和贵州省兴义市交界的南盘江上, 是红水河梯级开发的第一级梯级。采用堤坝式开发, 水库总库容为 $102.6 \times 10^8 \text{ m}^3$, 具有多年调节性能, 是梯级开发的龙头水库, 装机容量为 $120 \times 10^4 \text{ kW}$, 年发电量 $52.3 \times 10^8 \text{ kW} \cdot \text{h}$ 。

挡水建筑物为混凝土面板堆石坝, 最大坝高为 178 m; 泄水建筑物由右岸放空隧洞和右岸溢洪道组成, 最大泄流量分别为 $1766 \text{ m}^3/\text{s}$ 和 $21750 \text{ m}^3/\text{s}$, 均采用挑流消能加护岸工程方式; 引水发电建筑物由电站进水口、引水隧洞、压力钢管和地面厂房组成, 枢纽布置见图 1。

1991 年开工, 1994 年 12 月截流, 首台机组 1998

表 1 十五期间昆明院承担的主要土石坝工程项目简表

Table1 Rockfill dam projects mainly undertaken by KHIDI at “State’s Tenth Five-year Plan”							
序号	项目	坝型	坝高 /m	装机容量单 位/MW	库容 /(×10 ⁸ m ³)	设计阶段	备注
1	天生桥一级水电站	混凝土面板堆石坝	178	1200	102.6	施工详图设计	于 2002 年底竣工
2	糯扎渡水电站工程	心墙堆石坝	261.5	5850	237.03	招标设计 施工详图设计	2003 年 12 月可研报告通 过审查
3	古水电站	土石坝	305	2600	39.12	预可行性研究	
4	那兰水电工程	混凝土面板堆石坝	109	150	2.86	施工详图设计	2005 年 12 月底建成发电
5	崖羊山水电站工程	混凝土面板堆石坝	88	120	2.47	施工详图设计	
6	云鹏水电站工程	心墙石渣坝	96	210	3.80	施工详图设计	
7	泗南江水电站工程	混凝土面板堆石坝	115	201	2.64	施工详图设计	
8	威远江水电站工程	心墙堆石坝	93	72	2.7	施工详图设计	
9	马鹿塘二期水电站工程	混凝土面板堆石坝	154	300	5.36	施工详图设计	
10	龙马水电站工程	混凝土面板堆石坝	135	285	5.904	施工详图设计	
11	林口水库工程	混凝土面板堆石坝	79		0.1725	施工详图设计	
12	梨园水电站	混凝土面板堆石坝	145.8	2400	7.27	可行性研究	
13	泸水水电站工程	混凝土面板堆石坝	175	2600	14.11	可行性研究	
14	忠爱桥水电站工程	心墙土石坝	140	142	9.99	预可行性研究	
15	普西桥水电站工程	混凝土面板堆石坝	132	160	3.77	预可行性研究	
16	阿墨江三江口水电站工程	混凝土面板堆石坝	77	99	0.84	可行性研究	
17	三岔河水电站工程	混凝土面板堆石坝	74	42	0.95	可行性研究	
18	红河三江口水电站	混凝土面板堆石坝	110	16~20	10	可行性研究	
19	萨庞水电站	混凝土面板堆石坝	145	2100	87.06	预可行性研究	
20	苏家河口水电站工程	混凝土面板堆石坝	145	315	2.25	施工详图设计	

年 12 月投产发电，2000 年 12 月主体工程竣工。

至 2006 年 6 月底已经累计发电 310×10⁸ kW·h，源源不断送往两广，对用电一直比较紧的华南沿海地区的经济发展发挥了重大作用；该工程创多项国内外第一：电站混凝土面板堆石坝坝高是当时国内已建设同类坝型之最；坝顶长度，坝体填筑方量、面板面积居世界同类坝型之首；岸边式溢洪道、泄洪量 21750 m³/s，其泄量和规模为国内最大，水库为目前我国西

南的第一大库。

面板堆石坝最大坝高 178 m，坝顶长 1104 m，面板面积 17.27×10⁴ m²，填筑量约 1800×10⁴ m³；水库总库容达 102.6×10⁸ m³。坝高为同期同类坝型亚洲第一、世界第二，坝体体积、面板面积至今仍属世界之首,坝体剖面见图 2。因技术难度高，工程规模巨大而举世瞩目。

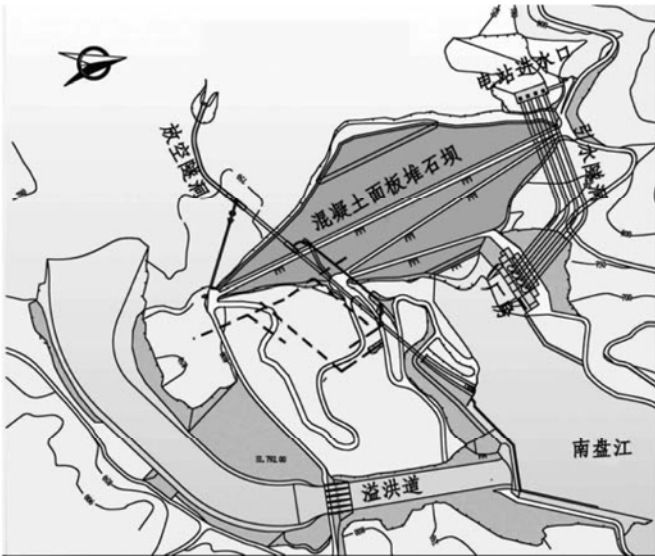


图 1 天生桥一级枢纽布置示意图

Fig. 1 Sketch map of hydro-structures complex layout for TSQ-1

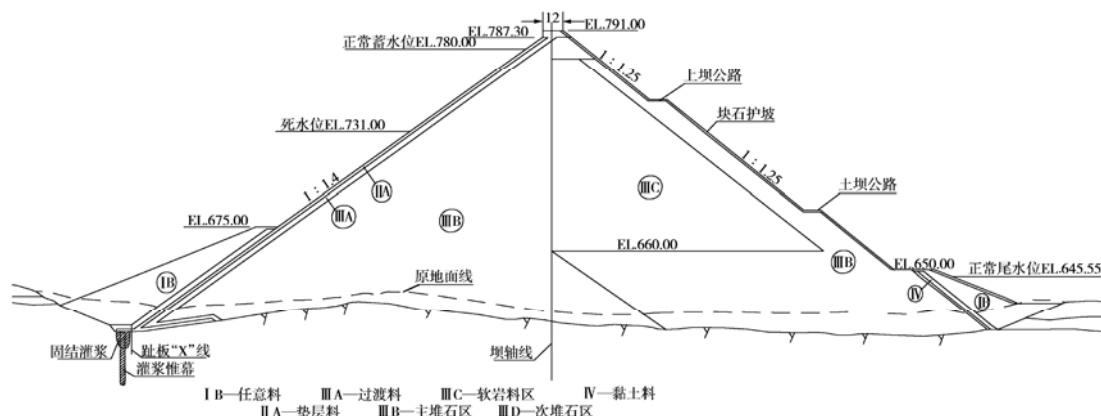


图2 天生桥一级混凝土面板堆石坝剖面示意图

Fig. 2 Section sketch map of TSQ-1 faced slab rockfill dam

1982 年底在率先提出采用混凝土面板堆石坝坝型, 与墨西哥阿瓜米尔帕坝同为当时世界最高的两座混凝土面板堆石坝。1986 年提出了《南盘江天生桥一级水电站坝型选择报告》, 选择采用了混凝土面板堆石坝。在现代混凝土面板堆石坝坝型在世界上出现不久、尚处在发展时期, 在国内尚处在引进学步的 80 年代初, 我国还没有建成一座面板堆石坝的情况下, 在如此重要的工程项目和如此巨大的工程规模上, 能够选择并成功的设计这种坝型, 无论是对设计者, 还是对咨询、评估、审查单位的专家领导都体现出敢为天下先的胆略和精神, 为该种坝型在我国推广应用起到积极作用, 为许多高面板堆石坝提供了技术佐证。此后, 结合国家“七五”、“八五”科技攻关, 在引进和消化超百米级堆石坝筑坝成套技术的基础上, 不断探索研究, 一步步把工程付诸实践。大坝于 1996 年 2 月开始填筑, 1999 年坝体填筑到顶, 2000 年大坝竣工。

1.2 主要设计特点和技术创新

(1) 坝型选择恰当

在 1984 年提出的可研报告中大坝是以心墙堆石坝为代表方案, 选用坝址附近的风化料作为心墙料, 其主要理由是高心墙堆石坝的建设在我们已有成熟的经验可以借鉴, 比较安全可靠。而国内面板堆石坝 (CFRD) 当时兴建尚少, 最高者为西北口的面板坝, 其面板又产生了裂缝, 就使得不少的人包括昆明勘测设计研究院的同志对该类坝型的选用都觉得把握不大。

1985 年在水电部领导的关心支持下, 昆明勘测设计研究院派员去巴西考察 CFRD, 在巴西我们考察了高 160 m 的阿利亚大坝, 是当时世界最高的混凝土面板堆石坝, 安全运行之后, 漏水量仅 140 L/s, 而且还有塞格雷多及辛戈等准备开工项目也将采用这样坝型, 与此同时我们详细了解了这种坝型的优点和设计、

施工的经验教训, 巴西专家解答了我们提出的问题, 一定程度上打消了我们的疑虑。其后, 巴西工程师咨询团又来我国对天生桥电站工地进行考察, 并对有关技术问题作进一步的讨论和研究, 认为天生桥电站采用混凝土面板坝是合适的, 可以达到安全可靠的目的。在初步设计中我们对坝型比较后, 表明面板坝比心墙坝工期可缩短一年, 投资节约 1.5 亿元, 并在设计中以阿利亚坝为鉴, 基本落实了主要的技术问题。最后通过审查, 决定采用混凝土面板堆石坝坝型, 经施工实践证明, 这种坝型就天生桥的地形地质条件而言, 是达到经济、安全、可靠的目的。

(2) 应用软岩填筑坝体

根据枢纽布置, 本工程建筑物开挖料总计 $2250 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。其中, 溢洪道可用开挖量为 $1352.33 \times 10^4 \text{ m}^3$, 大部分为厚层块状灰岩开挖料, 一部分为泥岩、灰岩互层开挖料; 左岸导流隧洞, 引水系统和厂房可用开挖量为 $157.74 \times 10^4 \text{ m}^3$, 主要为砂、泥岩互层开挖料; 右岸放空隧洞可用开挖量为 $25.23 \times 10^4 \text{ m}^3$, 为薄层灰岩、泥灰岩和泥岩开挖料; 坝基开挖料由于河床冲积层内有黏土和淤泥质黏土层, 不易被分选, 不作为坝料使用。可利用的岩石超过 $1500 \times 10^4 \text{ m}^3$, 其中硬岩料 (灰岩) 有 $1000 \times 10^4 \text{ m}^3$, 而坝体粗堆石料共需 $1595 \times 10^4 \text{ m}^3$, 如果大坝填筑只用硬岩, 则尚需开采 $500 \times 10^4 \text{ m}^3$ 的石料, 这是不经济的, 故最终决定将微风化及新鲜的软岩料填筑于坝轴线下游的干燥区, 既不影响大坝的安全, 又节约了投资, 共使用软岩约 $480 \times 10^4 \text{ m}^3$, 约占坝体总填筑量 1/4。

本工程大量使用软岩料筑坝充分体现了当地材料坝就地取材、因材设计的设计准则, 为我国开挖料的利用, 降低当地材料坝造价, 创造和积累了宝贵经验。初步估算溢洪道开挖料的可用岩利用率近 90%, 在 $1800 \times 10^4 \text{ m}^3$ 坝体中近 90% 的坝料采用工程开挖料填

筑, 达到了很高的水平; 坝体利用软岩料填筑方量和占坝体总填筑量的比例为世界之最。

(3) 优良的垫层料级配

垫层料级配设计满足内部结构稳定, 最大粒径 80 mm, <5 mm 含量为 35%~55%, <0.1 mm 含量为 4%~8%, 级配为连续级配。实现了垫层料应具有半透水性、低压缩性和高抗剪强度的要求, 且施工中表现出良好的施工特性, 易加工获得、易压实、不易分离。试验表明, 其渗透系数为 $k=i \times 10^{-3}$ cm/s, 在有细堆石料保护的条件下, 垫层料的破坏渗透比降大于 170, 反滤试验表明, 本工程拟用的垫层料对黏土泥浆有反滤作用, 实现运行期面板裂缝或接缝局部破坏后不致产生大量渗漏的目的, 得到了国内外专家的肯定与好评。

(4) 采用有自愈功能的周边缝止水系统

接缝为防渗体系的薄弱环节, 昆明院对国内外大量工程进行调研, 并对不同止水材料进行多项科研试验, 查明止水机理, 根据各接缝部位的变形、受力特点, 结合止水材料的性能, 采用底部铜片、缝中部用铜片(680 m 以下)和橡胶止水带(680 m 以上)、缝顶设无黏性填料的周边缝自愈接缝止水系统, 达到了安全防渗、方便施工及节约投资的目的。

传统的周边缝止水结构是底部铜片、中部 PVC(橡胶)带、顶部柔性填料(IGAS、SR、GB 等), 尽管有三道止水, 但 100 m 以上高坝发生大的漏水实例约占总量的 20%, 为此, 昆明勘测设计研究院对不同止水材料进行多项科研试验。

a) PVC 止水带试验结果表明, PVC 和混凝土之间无化学作用, 由于两种材料的变形特性不同, 在高水压力作用下, PVC 变薄, 脱离混凝土, 会发生绕渗; 硫化柔性填料可能会因硫化工艺不好, 或柔性填料本身剪坏开裂而渗水; 施工质量好, 接缝不位移时, 能承受 1.3 MPa 的水压力。

b) 传统柔性填料拟靠库水压力将其压入缝内达到止水目的, 但试验表明, 柔性填料在流动过程中会出现陷孔, 若柔性填料封闭不完善(工程中常出现), 库水进入缝内, 柔性填料不能充填接缝, 无法止水。国外研究也表明, 缝顶马蹄脂等柔性填料本身由于内聚力较大, 一旦周边缝发生变位, 不易流动, 自愈能力较差, 造成周边缝第一道防线失效, 且马蹄脂发生老化后需要修补, 也很困难。昆明勘测设计研究院科研所用 GB 材料作缝顶填料进行仿真模型试验证明: 在水压力作用下, GB 材料流动性差, 嵌缝效果较差, 且其表面覆盖罩必须密不透水, 和混凝土相贴紧密, 不能渗水, 否则其填缝作用不能保证。

c) 铜止水片试验成果表明, 铜止水片的鼻子尺寸大(即活动部分), 承受切向位移的能力大, 铜止水片能承受 1.3 MPa 的水压力而不绕渗。

d) 缝顶用无黏性填料进行仿真模型试验证明: 粉细砂、粉煤灰等无黏性材料在周边缝变形时, 水流将带动这些材料将缝充填, 堵漏效果好, 这类材料又没有老化问题。粉砂试验表明, 止水破坏后, 粉砂被带入缝中, 经缝底沥青砂的堵塞, 达到止水的效果。

在以上实验研究的基础上, 提出接缝设计的三原则: 止水片和混凝土的黏结力应大于库水压力; 止水片的尺寸应适应接缝的位移; 高坝应有自愈系统, 即缝顶有无黏性材料, 缝底有反滤料, 无黏性材料的渗透系数应比反滤料的渗透系数小一个数量级, 该原则也被“混凝土面板堆石坝设计规范”采纳。

(5) 分期填筑、分期蓄水

坝体采用分期填筑(见图 3), 并在大坝尚未填筑完成即进行控制性分期蓄水, 满足了高坝度汛及提前发电的要求, 控制性分期蓄水对坝体有预压作用, 对控制坝体变形有利。工程于 1994 年 12 月 25 日截流, 1996 年 1 月开始坝体填筑, 1996 年汛前形成过水面貌, 1997 年和 1998 年汛前坝体临时断面顶部高程分别达到 725 m 和 768 m 高程, 混凝土面板分三期于 1997 年、1998 年和 1999 年汛前浇筑, 2000 年初进行防浪墙混凝土浇筑, 2000 年 7 月防浪墙后大坝高程 787.3 m 以上坝顶填筑完成; 2000 年底大坝竣工。1997 年 12 月 25 日导流洞下闸封堵, 1998 年 8 月开始控制性蓄水, 电站 4 台机组分别于 1998 年 12 月 28 日、1999 年 11 月 2 日、2000 年 9 月 10 日、2000 年 12 月 25 日发电并投入商业运行。工程首台机组发电工期 7.5 a, 竣工总工期 9.5 a。截流后 4 a 发电, 是我国当时兴建的一批百万千瓦装机电站中最快的。178 m 高的混凝土面板堆石坝由 1996 年 1 月开始填筑至 1999 年 5 月浇筑完面板, 实际工期 40 个月。电站 1998 年、1999 年、2000 年发电量分别为 0.25×10^8 , 7.98×10^8 , 36.45×10^8 kW·h, 取得了巨大的经济效益。

(6) 独特、系统的监测设计

天生桥一级面板堆石坝建成时为国内最高面板堆石坝, 其安全监测项目齐全, 布置独特, 为评估工程质量和监测工程安全运行提供了条件, 为我国和世界建造更高的混凝土面板堆石坝积累了宝贵的观测资料。其中多个观测项目所使用的仪器和观测方法均有所创新, 在面板堆石坝的原型观测中仪器埋设布点多, 成功率之高, 监测之全面, 观测成果之系统完整, 属国内外鲜见, 为坝体设计反馈分析提供了难得的原型观测资料。

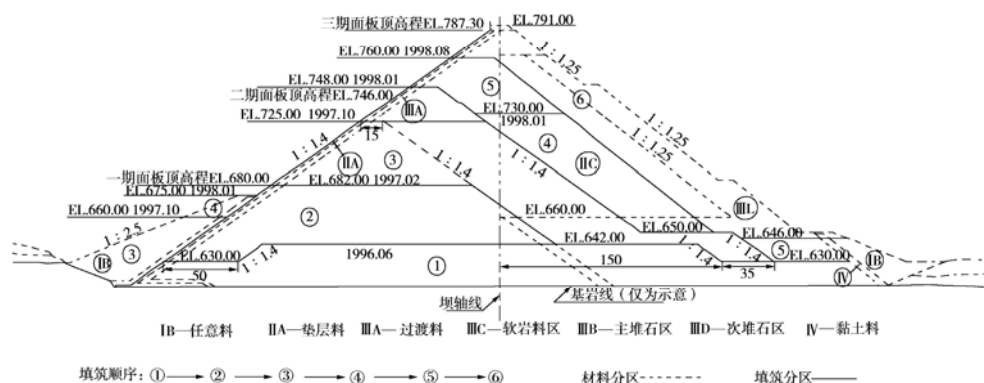


图3 天生桥一级面板堆石坝填筑分区图

Fig. 3 Placement zoning of TSQ-1 faced slab rockfill dam

初步设计前期,为了在天生桥一级大坝埋设测堆石体内部位移的世界最长管线的水平垂直位移计,1993年~1994年,昆明勘测设计研究院与南京水利科学研究所联合研制“400 m 超长水平垂直位移计”,试验取得成功并经过国内专家鉴定后正式用于天生桥一级面板堆石坝。大坝最底层仪器实际管线长 350 m,超过巴西 Segredo 坝同类型仪器 280 m 长的管线 70 m,成为世界上该类仪器的最长管线。仪器于 1997 年 2 月上旬成功的埋设并投入运行。

大坝填筑的中后期出现了高面板堆石坝所特有的变形和应力应变,根据现场实际状况,设计又增补了面板脱空观测,垫层料坡面裂缝观测,上下层钢筋应力计的面板弯矩观测等几个独创的观测项目。此类观测项目均为世界首创,观测仪器的选用和布置非常独特,仪器的现场埋设也取得成功,获得了满意的观测成果。如下 4 个观测项目是世界第一或第一次实施的,都取得了成功,获得满意成果。

a) 天生桥一级大坝有 8 套测堆石体沉降和水平位移的垂直水平位移计,最底层 665 m 高程的一套管线长 350 m,是当前世界上堆石坝同类型仪器的最长管线。这 8 套仪器获得了大坝施工填筑期和蓄水期的堆石体变形资料。

b) 第二期和第三期面板底部埋设的观测面板与垫层料坡面脱空的仪器具有独创性,是世界上第一次观测面板的脱空,取得成功并获得好的观测资料。

c) 第三期面板垫层料坡面裂缝观测仪器也是世界上第一次做该项观测,取得了成功,得到面板浇筑后垫层料坡面裂缝演变的资料。

d) 第三期面板混凝土内上下层钢筋应力计观测面板弯矩又是世界面板坝第一次做此项观测。获得的资料证实了面板受弯矩,对面板受力机理研究有突破性认识。

以下两项观测在国内是第一次取得了成功。

a) 测面板挠曲变形的电桥。布置在 3 个断面上的 64 支电桥测到了在大坝填筑和蓄水不同时期的面板挠度曲线。

b) 在一、二、三期面板顶的视准线,测量标点成对布置(一点在面板顶,另一点在垫层料上),用全站仪以极坐标方法测量,在天生桥一级面板坝做了成功的尝试,可在国内其他面板堆石坝工程推广。

天生桥一级大坝的安全监测系统建成至今运行正常。取得丰富的观测资料,起到了监测大坝工作状态,评价工程质量并保证大坝安全运行,反馈设计和科研成果,为今后高面板堆石坝的设计和施工累积经验和资料的作用。

(7) 坝基面设置 $0.3H$ 条带

按反滤保护的设计原则,在灌浆帷幕后将垫层料和过渡料向下游延伸 $0.3H$ (H 为水头) 的长度,在坝基面上形成 $0.3H$ 的条带,有效提高了地基抗渗透破坏能力,取得了良好的结果,极具推广应用价值。

1.3 工程运行实践

至 2006 年底,实测最大沉降 354 cm,位于最大断面附近,约在坝高 0.6 倍处坝轴线附近软岩料区内,95% 的沉降量发生在 2000 年以前,其沉降过程见图 4。实测面板挠度的极值出现在分区浇筑的面板顶部,最大断面面板板挠度的峰值点测值分别为 40.7 cm(一期面板顶)、39.9 cm(二期面板顶)、53.9 cm(三期面板顶);周边缝实测最大沉降量为 28.48 mm,剪切量为 20.81 mm,张开量为 20.92 mm;大坝渗流量最大测值为 165 L/s(2000 年 10 月 3 日,坝区暴雨),至 2006 年正常蓄水位高程附近时渗流量为 70~80 L/s,有逐年减小的趋势,实测渗流量变化过程见图。总体来看,天生桥大坝变形在已建工程经验范围内,渗流量较小,大坝运行正常。

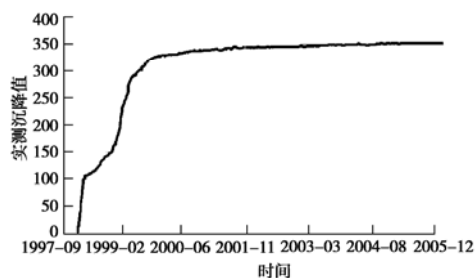


图4 最大沉降点的沉降过程线

Fig. 4 Settling process line for max. settling point

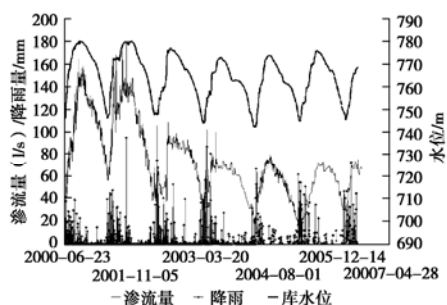


图5 大坝渗流量与库水位、降雨量关系

Fig. 5 Relationship of Dam seepage, reservoir level and rainfall

天生桥一级工程于 1982 年底在国内率先提出采用混凝土面板堆石坝坝型, 与墨西哥阿瓜米尔帕坝同为当时世界最高的两座混凝土面板堆石坝, 大坝坝体体积 $1800 \times 10^4 \text{ m}^3$, 面板 $17.4 \times 10^4 \text{ m}^2$, 至今仍属世界之首。大坝设计创新显著: 坝体分区设计先进, 充分利用建筑物开挖料, 合理利用砂泥岩当地软岩料, 为 200 m 级高混凝土面板堆石坝坝体分区设计, 做到挖填平衡, 节省工程投资提供了成功经验; 大坝渗流控制设计先进, 通过大型试验确定垫层料级配, 首次提出在趾板下游 $0.3H$ (H 为水头) 范围内铺设垫层料等渗流控制措施, 经长期高水位运行, 渗漏量逐年减小, 表明大坝渗流控制成功; 采用分期填筑、分期蓄水, 满足了工程度汛要求, 获得了提前发电的巨大经济效益, 又达到利用分期蓄水控制大坝变形的目的, 并为我国后建的高混凝土面板堆石坝采用变形控制 (预沉降周期、沉降速率和填筑坝体程序及面板顶部高差等) 措施, 提供了有益的借鉴; 高混凝土面板堆石坝接缝首次采用自愈性顶部止水, 长期高水位运行表明安全可靠; 安全监测项目齐全, 布置先进, 是国内外高混凝土面板堆石坝安全监测的成功范例。

2 糯扎渡心墙堆石坝

2.1 工程概况

糯扎渡水电站位于云南省思茅市翠云区和澜沧县交界的澜沧江上, 是澜沧江中下游河段梯级规划的第 五梯级。采用堤坝式开发, 水库总库容 237.03×10^8

m^3 , 具有多年调节性能, 是梯级开发中最大的水库, 装机容量 $585 \times 10^4 \text{ kW}$, 年发电量 $239.12 \times 10^8 \text{ kW} \cdot \text{h}$ 。

挡水建筑物为心墙堆石坝, 最大坝高 261.5 m; 泄水建筑物由左岸泄洪隧洞、右岸泄洪隧洞及左岸式溢洪道组成, 最大泄流量分别为 3191, 3023, 31318 m^3/s , 采用挑流消能加消力塘及护岸工程; 引水发电建筑物由电站进水口、引水隧洞、压力钢管、地下厂房、尾水调压室、尾水隧洞组成, 枢纽布置见图 6。

2006 年开工, 计划 2007 年 11 月截流, 首台机组 2012 年 7 月投产发电。

心墙堆石坝最大坝高 261.5 m, 属同类坝型世界第三、中国第一; 溢洪道最大泄流量 31318 m^3 , 属世界岸边式溢洪道之首。

糯扎渡水电站心墙堆石坝最大坝高 261.5 m, 基本剖面为中央直立心墙形式, 即中央为砾质土直心墙, 心墙两侧为反滤层, 反滤层以外为堆石体坝壳。坝顶高程 821.50 m, 宽度为 18 m, 心墙基础最低建基面高程为 560.0 m, 最大坝高为 261.5 m, 比国内已建成最高的小浪底水电站大坝 (154 m) 高约 100 m。上游坝坡坡度为 1:1.9, 下游坝坡坡度为 1:1.8。心墙顶部高程为 820.5 m, 心墙顶宽为 10 m, 上、下游坡度均为 1:0.2。心墙 720 m 高程以上采用混合土料, 以下采用掺加 35% 人工碎石后的砾质土料, 坝体剖面见图 7。

2002 年 3 月启动并组织了国家电力公司科技项目“糯扎渡水电站高心墙堆石坝关键技术研究”工作, 于 2006 年 5 月完成研究工作, 提交了课题报告和 5 个专题报告及 27 个子题报告。

开展研究的 5 个专题主要内容为: ①心墙堆石坝坝料试验及坝料特性研究; ②土石坝计算分析理论及抗裂措施研究; ③心墙堆石坝坝料分区及结构优化研究; ④心墙堆石坝动力反应分析计算理论及抗震措施研究; ⑤心墙堆石坝渗流分析及渗控措施研究。

通过该课题的研究, 使坝高 261.5 m 的糯扎渡心墙堆石坝的主要关键技术问题得以解决, 研究成果用于招标设计。坝坡坡度的优化及采用直心墙堆石坝坝型可使工程至少节省投资 3.3 亿元。

2.2 主要技术创新成果

(1) 最大坝高

最大坝高是大坝的一项重要技术指标, 它反应了大坝设计和建设的技术难度。糯扎渡心墙堆石坝最大坝高达 261.5 m, 在已建、在建的同类坝型中居世界第三, 仅次于塔吉克斯坦的努列克 (高 300 m) 和哥斯达黎加的博鲁卡 (高 267 m), 在国内相比目前最高的小浪底心墙堆石坝跨越了 100 m 的台阶。

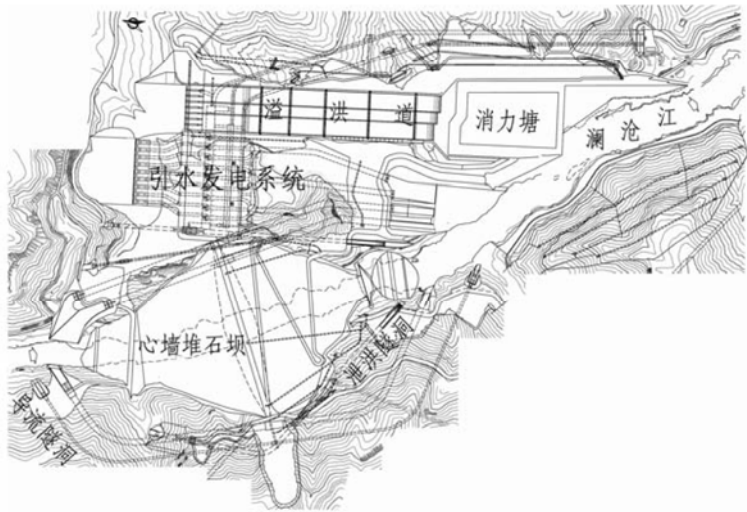


图 6 糯扎渡水电站枢纽布置示意图

Fig. 6 Sketch map of hydro-structures complex layout of Nuozhadu hydropower station

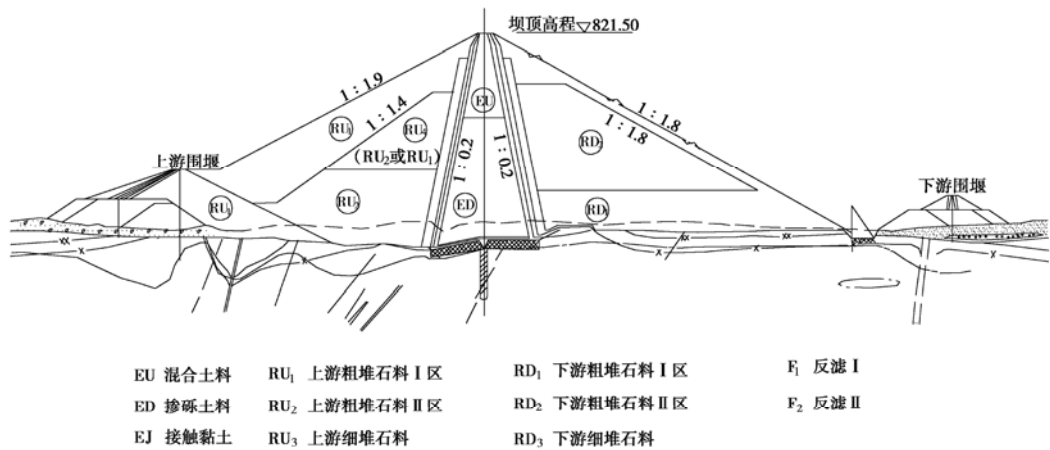


图 7 糯扎渡水电站心墙堆石坝剖面示意图

Fig. 7 Section sketch map of Nuozhadu core wall rockfill dam

(2) 防渗土料掺合

提出往土料中掺入人工碎石的方案, 解决了糯扎渡心墙堆石坝防渗土料的问题。

(3) 坝剖面优化

经大量计算分析及研究, 论证了坝体上游坝坡坡度 1:1.9、下游坝坡坡度 1:1.8 是可行的, 在国内、外同类坝型高坝中属先进水平 (目前国外已建 200 m 以上心墙堆石坝坝坡坡度一般上游为 1:2.2、下游为 1:2.0)。

(4) 坝料分区

以大量试验研究和计算分析为依据, 论证了上游坝壳内部适当范围采用含有部分软岩的堆石料是可行的。

(5) 静力本构模型

在对土石坝应力变形计算中各种常用模型进行对

比分析的基础上, 提出了堆石体修正 Rowe 剪胀方程, 改进了沈珠江双屈服面模型体积变形的表示方法; 提出了邓肯-张 E-B 模型参数的不唯一性和相关性, 为国际领先水平。

(6) 水力劈裂发生的物理机制

提出了在心墙中可能存在的渗水弱面以及在快速蓄水过程中所产生的渗透弱面“水压楔劈效应”为水力劈裂发生的重要条件的论点。将弥散裂缝理论引入水力劈裂问题的研究中, 与比奥固结理论相结合, 推导和建立了用于描述水力劈裂发生和扩展过程的有限元数值仿真模型和算法。在前人的研究基础上, 从试验、总应力法有限元分析、有效应力法有限元分析等多方面深入研究, 论证了糯扎渡直心墙堆石坝方案抗水力劈裂的安全性, 取得了显著的经济效益, 处于国

际先进水平。

(7) 接触面试验研究

开发了叠环式单剪试验系统,系统研究了两种散粒体材料间接触面的强度和变形特性。

(8) 坝边坡稳定分析方法

将可靠度分析理论引入土石坝稳定分析中,以可靠度指标来评价坝坡稳定的安全性处于国际先进水平。

(9) 动力本构模型

提出了量化记忆(SM)模型中参数随应变和围压变化的规律。提出了采用 Levenberg—Marquardt 非线性最小二乘法拟合动力三轴试验结果确定模型参数的方法。并将一维量化记忆模型中的记忆点对扩展为偏平面上的记忆面,构筑了多维量化记忆模型,为国际领先水平。

(10) 动态分布系数

采用反应谱法、考虑坝料非线性的简化方法、空间 V 形河谷振型反应谱法以及有限单元法,研究了土石坝的地震惯性力分布系数,得到了高土石坝加速度分布系数与低坝不同的结论,提出了坝高超过 150 m 土石坝的加速度动态分布系数。

(11) 渗流计算分析方法

提出了渗流干区虚拟流动不变网格有限元分析方法;提出了带密集排水孔渗控的优化理论及排水孔幕渗流准解析理论为国际先进水平。

2006 年 8 月 8 日在昆明通过了国家电网公司委托中国水力发电工程学会组织的验收。2007 年 4 月 9 日中国电机工程学会在北京组织召开了该项目的成果鉴定会,由潘家铮院士为首的专家委员会作出如下鉴定意见:“该研究成果总体上达到国际先进水平,其中软岩堆石料在上游坝壳的利用、土石料静动力本构模型、

心墙水力劈裂机制研究等方面达到了国际领先水平。”

通过本课题的研究,解决了 260 m 级高心墙堆石坝的许多关键技术问题,将我国高心墙堆石坝的筑坝技术水平提升到了 260 m 级的台阶。随着我国国民经济的发展,将修建一大批高土石坝,如澜沧江古水电站、金沙江日冕水电站、怒江马吉、松塔水电站、雅鲁江两河口水电站、大渡河双江口水电站等。本课题项目的研究成果可为其设计提供可资借鉴的宝贵经验。

3 古水堆石坝方案

3.1 工程概况

古水水电站位于云南省迪庆州德钦县佛山乡境内,是澜沧江上游规划河段推荐一库八级梯级开发方案的第一级,也是规划河段的龙头水库。采用堤坝式开发,装机容量 220×10^4 kW,年发电量 100.15×10^8 kW·h,水库总库容 39.12×10^8 m³,水库具有年调节能力。

挡水坝坝型初拟选用砾质土心墙堆石坝,最大坝高 305 m;泄水建筑物布置由 4 条溢洪隧洞、一条泄洪隧洞和一条导流兼放空隧洞组成,最大泄流量 15800 m³/s,采用挑流消能并设护岸保护;引水发电系统由进水口、引水隧洞、压力钢管及地下厂房等建筑物组成,枢纽布置见图 8。

3.2 心墙堆石坝方案

心墙堆石坝方案挡水坝坝型初拟选用冰积砾质土心墙堆石坝,最大坝高 305 m,坝顶高程 2355 m,长度 568 m,宽度 20 m,上游坝坡 1:2.1,下游坝坡 1:2.0。心墙顶部高程 2354 m,顶宽 10 m,上下游坡度均为 1:0.2。坝体剖面见图 9。

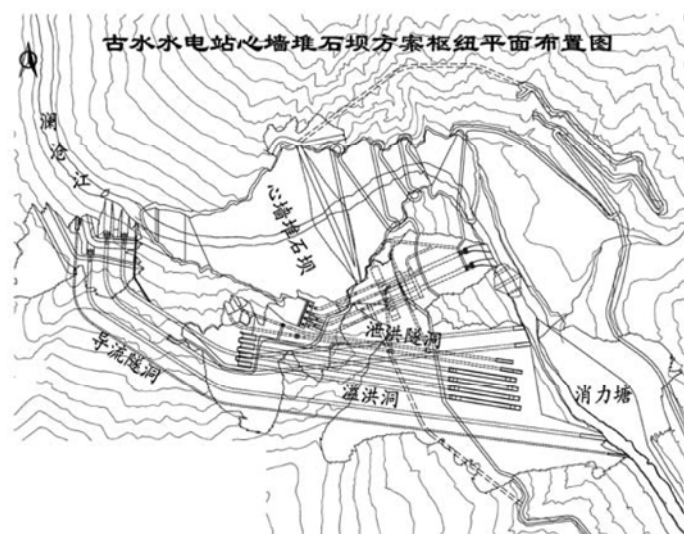


图 8 古水水电站心墙堆石坝枢纽方案布置示意图

Fig. 8 Sketch map of hydro-structures layout of Gushui core wall rockfill dam

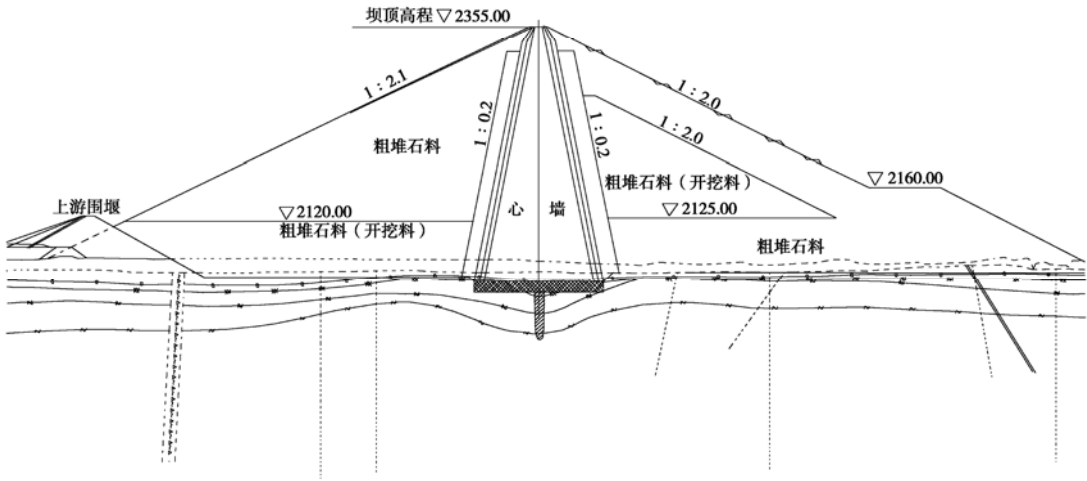


图 9 古水水电站心墙堆石坝剖面示意图

Fig. 9 Section sketch map of Gushui core wall rockfill dam

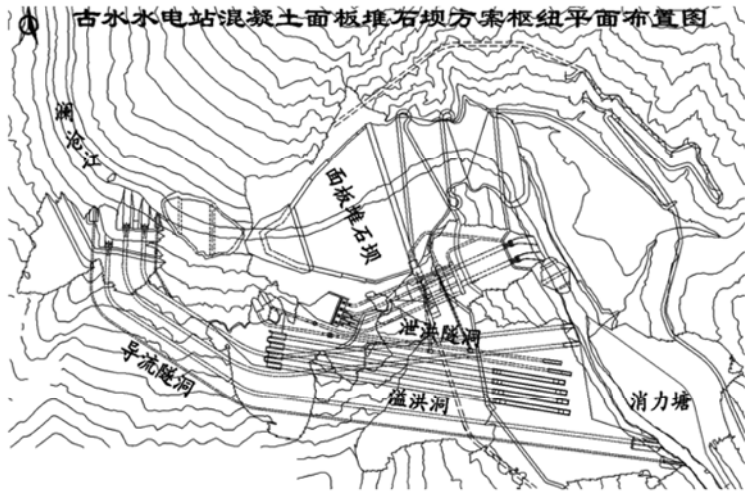


图 10 古水水电站面板堆石坝枢纽方案布置示意图

Fig. 10 Sketch map of hydro-structures complex layout of Gushui faced slab rockfill dam

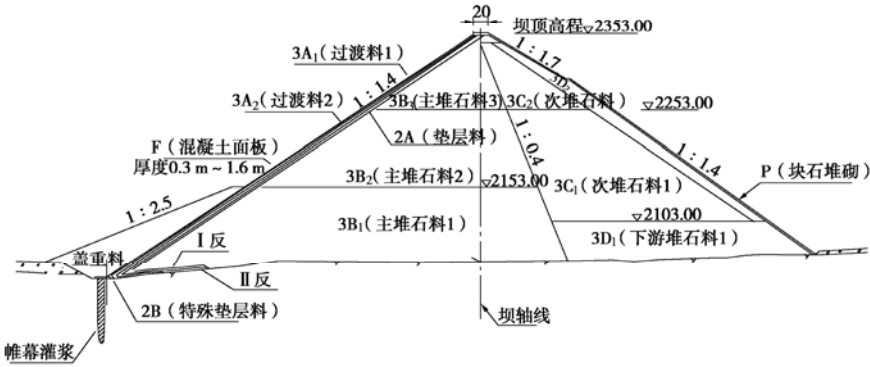


图 11 古水水电站面板堆石坝剖面示意图

Fig. 11 Section sketch map of Gushui faced slab rockfill dam

对冰积砾质土的工程特性进行初步试验研究,坝体进行了初步分区和计算分析,成果表明选用冰积砾质土心墙堆石坝技术基本可行。

3.3 面板堆石坝方案研究

古水面板堆石坝方案最大坝高 310 m,坝顶长度 539 m,坝体填筑量 $3124 \times 10^4 \text{ m}^3$,总填筑量比心墙堆石坝方案减少约 $1100 \times 10^4 \text{ m}^3$,节省投资 6 亿元;从工期来看,主体工程施工工期至少可缩短 1 a,发电工期提前 1 a,按一半机组提前 1 a 投产发电,多获得电量 $50 \times 10^8 \text{ kW} \cdot \text{h}$ (多年平均发电量的一半),按上网电价 0.2 元/ $\text{kW} \cdot \text{h}$ 计,可获效益 10 亿元。在其它方面,由于面板堆石坝坝坡可相对较陡,故坝基宽度比心墙堆石坝缩短约 300 m,使枢纽布置更具灵活性,减少施工干扰,进一步节约工程造价及加快施工进度。枢纽布置见图 10,坝体剖面见图 11。

即将完建的湖北清江水布垭坝,坝高 233 m,为目前世界第一高度,古水面板坝高出了 77 m,攻克 300 m 级面板坝的筑坝关键技术,成为了采用面板坝方案现实问题。

此外,我国目前正在进行预可研、可研的黄河上游班多、怒江马吉及松塔等水电站的龙头水库均拟采用 300m 级的混凝土面板堆石坝。上述巨型水电站特点是:①工程位于经济落后地区;②区域边远、交通运输条件差;③属于高寒山区和高纬度严寒地区;④坝址区工程地质条件复杂。根据工程自然条件,综合经济技术比较更适合于修建混凝土面板堆石坝,应用前景十分广阔。

以古水水电工程为依托,积极组织开展 300 m 级面板堆石坝筑坝关键技术的研究工作,主要的研究方向:①对国外已建的 200 m 级混凝土面板堆石坝进行系统调研分析;②对国内已建的 200 m 级混凝土面板堆石坝经验及教训进行系统总结,对运行的监测成果进行系统地反演分析;③筑坝材料工程特性与坝体分区深化研究;④高性能混凝土材料与面板混凝土结构设计理论和方法研究;⑤混凝土面板分缝新准则与高性能止水材料研究;⑥对于已建的混凝土面板裂缝发生的原因进行机理分析,研究防止混凝土面板产生裂缝的措施;⑦筑坝工序与坝体变形控制措施研究;⑧快速优质筑坝施工技术研究;⑨高面板堆石坝的地震反应及抗震措施研究;⑩安全监测设备研究;

目前已取得了一些初步的研究成果。

4 设计研究工作总结与展望

天生桥一级水电站是混凝土面板堆石坝工程建设的里程碑,所采用的一些新技术具有推广应用的价值。通过对天生桥坝运行的反馈分析,研究得出许多超高

坝的结构性裂缝是堆石徐变造成的对坝体的原则提出新的设计理念。得到了国际著名专家库克的充分肯定,并在洪家渡、三板溪、水布垭等工程得到应用,取得很好效果。

糯扎渡采用人工掺和砾质土料,是我国筑坝材料方面的又一次重大突破,进一步拓宽了防渗土料范围。人工掺和砾质土料提高了抗剪和变形能力,减少与坝壳的刚度差使坝体变形协调,减免拱作用和水力劈裂的可能性;人工掺和施工工艺经论证可行,重型机具能正常施工。

将以糯扎渡、古水等水电站的勘察设计科研工作为依托,开展超高心墙堆石坝、超高面板堆石坝的设计技术研究,主要包括:①筑坝材料工程特性研究;②动静力应力应变分析研究及计算软件包研制;③抗震结构分析与措施研究;④渗流控制工程及基础处理措施研究;⑤大坝健康诊断与工程修补加固技术研究。以经济、合理、高效为目标,进行超高心墙堆石坝、超高面板堆石坝的施工技术研究,包括:①施工机械设备配置研究;②施工道路布置研究;③筑坝材料调配研究;④施工工艺研究;⑤施工总进度研究;⑥施工安全措施及环保措施研究;⑦施工动态模拟计算及可视化技术软件包研制。进行深入整合集成研究,形成工程技术体系,指导工程建设实践。

参考文献:

- [1] 潘家铮,何 璟. 中国大坝 50 年[M]. 北京:中国水利水电出版社,2000. (PAN Jia-zheng, HE Jing. Large dams in China a fifty - year review[M]. Beijing: China Water Power Press, 2000. (in Chinese))
- [2] 张宗亮,袁友仁,冯业林. 糯扎渡水电站高心墙堆石坝关键技术研究[J]. 水力发电,2006(11). (ZHANG Zong-liang, YUAN You-shen, FENG Ye-lin. Study on key techniques of Nuozhadu's Earth Core Rockfill Dam[J]. Water Power, 2006(11). (in Chinese))
- [3] 张宗亮,赵亚明,刘 强,杨建敏. 堆石坝工程设计实践与技术创新[J]. 水力发电,2006, (11). (ZHANG Zong-liang, ZHAO Ya-ming, LIU Qiang, YANG Jian-min. Design practice and technic innovation of rockfill dam project[J]. Water Power, 2006 (11). (in Chinese))
- [4] 张宗亮,徐 永,刘兴宁,李 升,等. 天生桥一级水电站枢纽工程设计与实践[M]. 北京:中国电力出版社,2007. (ZHANG Zong-liang, XU Yong, LIU Xin-ning, LI Sheng, et al. Design of main complex area and practice in Tianshengqiao-1 Hydropower Station[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2007. (in Chinese))