

天生桥一级水电站设计丛书

天生桥一级水电站枢纽工程

勘察与实践

王自高 何 伟 李文纲

钱 康 张鉴光

编 著



中国电力出版社
www.cepp.com.cn

天生桥一级水电站设计丛书

天生桥一级水电站枢纽工程

勘察与实践

王自高 何 伟 李文纲
钱 康 张鉴光 编 著



中国电力出版社
www.cepp.com.cn

图书在版编目 (CIP) 数据

天生桥一级水电站枢纽工程勘察与实践/王自高等
编著. —北京: 中国电力出版社, 2008

天生桥一级水电站设计丛书

ISBN 978-7-5083-7030-9

I. 天… II. 王… III. 水力发电站-工程地质-地
质勘探-兴义市 IV. TV752.733

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2008) 第 054106 号

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>)

北京佳信达艺术印刷有限公司印刷

各地新华书店经售

*

2008 年 7 月第一版 2008 年 7 月北京第一次印刷

787 毫米×1092 毫米 16 开本 9.5 印张 225 千字 2 彩页

定价 68.00 元

敬告读者

本书封面贴有防伪标签, 加热后中心图案消失

本书如有印装质量问题, 我社发行部负责退换

版权专有 翻印必究

《天生桥一级水电站设计丛书》

编辑委员会

主 任：蔡绍宽

副主任：张宗亮 李 升 刘 毅

委 员：何 伟 冯峻林 杨光亮 杨世源 方大风 丁立新

徐 永 古瑞昌 王亦锥 刘兴宁 王远亮 张学中

武赛波 杨荣嵩 林德恩 毛正非 张鉴光 王自高

张 平 陈及新 傅树红 徐正镐

主 编：张宗亮

副主编：徐 永 刘兴宁 李 升 王远亮 武赛波 王自高

本书编著者：

王自高 何 伟 李文纲 钱 康 张鉴光 屈定伸

尹镇宏 杨海江

水电是绿色能源，是目前人类唯一能够大规模商业开发的可再生清洁能源。改革开放以来，我国经济得到飞速发展，一些地方，特别是东南沿海地区，在相当长的时间里，缺电严重，成为制约经济社会发展的瓶颈。大力开发水电，为经济社会发展提供能源支持，是我国能源发展的战略选择。

我国水能资源居世界第一，理论蕴藏量达 6.89 亿 kW，其中技术可开发装机容量 4.93 亿 kW，经济可开发装机容量 3.95 亿 kW。我国水能资源虽然丰富，但分布不均。在全国可开发水能资源中，80%分布在西部地区，其中，西南地区的云、贵、川三省约占 50%。为满足东部地区经济社会发展对能源的需求，促进全国联网，实现资源优化配置，根据全国电力发展规划，将在全国逐步建立南、中、北三条“西电东送”通道，其中西南地区的大型水电基地开发和骨干水电站建设成为重点。

红水河是我国西南地区一条蕴藏着丰富水能资源的河流，年平均来水量 1300 亿 m^3 。落差 760m，规划分天生桥一级、天生桥二级、平班、龙滩、岩滩、大化、百龙滩、乐滩、桥巩、大藤峡十级开发，是我国十三大水电基地之一。该水电基地以其优越的地理区位和良好的资源开发条件，被定为“西电东送”（南线）大通道的最先开发项目，同时也是云南电力东送华南的中转枢纽站之一。

红水河梯级电站建设始于大化、岩滩和 20 世纪 80 年代初开工建设的天生桥二级电站，这三个电站的合计装机容量达 2480MW，但因其调节性能差，合计保证出力仅为 535MW，因此期望处于龙头地位、具有多年调节性能的天生桥一级水电站能尽早兴建，充分发挥效益。

昆明院^①于 1982 年受命承担天生桥一级水电站的设计任务，这是昆明院继鲁布革、漫湾之后设计的第三座大型水电工程。面对坝高超过百米、水库库容超过百亿立方米、电站装机容量超过百万千瓦的“三百”工程，以及尖端的技术难题和复杂的建设条件，设计单位高度重视，科学组织，

① 本书中昆明院为中国水电顾问集团昆明勘测设计研究院的简称。

全力以赴，当年完成了选坝任务，并于1984年和1986年相继提出可行性研究报告和初步设计报告。

天生桥一级水电站枢纽工程由混凝土面板堆石坝、右岸溢洪道、放空隧洞和左岸引水发电建筑物组成。混凝土面板堆石坝坝高178m，建成时为当时世界上已建同类坝型的第二位，其填筑总量和面板面积居世界同类坝型的首位。在当时的世界坝工建设中，混凝土面板堆石坝坝型刚出现不久，尚处在发展时期，国内在如此重要的大型工程项目中选择并成功设计这种坝型，体现出了一种可贵的胆略和创新精神，也为该坝型在我国的发展积累了宝贵的经验。

天生桥一级水电站由广东、广西、贵州三省（区）和国家联合集资，采用业主责任制、招标承包制、建设监理制方式建设。由各集资方和主管上级组成理事会，并组建中国南方电力联营公司代行业主职能，负责工程建设。工程建设实行国际招标，由武警水电第一总队和巴西门德斯·丘利尔工程公司承建。工程于1991年开始施工准备，1994年截流，1998年首台机组发电，2000年工程竣工。迄今该电站已运行6年，库水位达到设计正常蓄水位，至2005年底累计发电量280亿kW·h，主要设备达到设计参数，经受了高水位、全出力、长时间的运行检验，证明工程是安全的，运行是正常的，设计是正确的，建设是成功的。

天生桥一级水电站的顺利建成，提供了一个可靠优质的电源点，强大的电力源源不断地送往华南地区，对供电一直比较紧张的华南地区经济发展提供了重要的能源支持。天生桥一级水电站水库以其优越的多年调节性能，使其下游已建的天生桥二级、岩滩、大化三个梯级电站合计增加保证出力829.1MW，累计增加年发电量41.83亿kW·h，充分发挥了龙头水库的补偿调节作用。天生桥一级水电站以其优越的地理区位，与同期建成的马窝直流换流站成为“西电东送”（南线）的中心枢纽站，形成和增强了“西电东送”（南线）的能源战略格局，开创了“云电送粤”先河，促进了云南电力和经济社会的发展，工程建设也给当地带来了现代文明，促进了当地经济的发展。设计者以敢为天下先的精神，开发和推广应用了许多新技术，特别是超高面板堆石坝的建设，丰富了我国水电建设经验宝库，培养和锻炼了一批优秀的青年专家。

在保护生态的基础上有序开发水电，是我国新时期重要的能源方针。设计好、建设好、管理运行好水利水电工程，做到促进经济建设和保护生

态环境并重，是水利水电工作者的重大历史使命。

《天生桥一级水电站设计丛书》全面系统地介绍了该工程的勘测设计成果，并进行了深刻的总结。编著者都是该工程的参与者，他们通过亲身经历以及实践后的审视、反思得到的启示，一定有助于进一步提高他们的勘测设计水平，同时，我相信会给读者一些借鉴和启发。

水利部部长

A handwritten signature in black ink, appearing to read '汪荣斌' (Wang Rongchun), written in a cursive style.

2007年1月31日

《天生桥一级水电站枢纽工程勘察与实践》一书的出版可喜可贺，本书全面、系统地总结了天生桥一级水电站工程地质勘察与评价的丰富经验，是全体参与这项大型水电工程地质勘察工作者二十余年来辛勤劳动的硕果、心血和智慧的结晶。我作为这个工程的参与者，对这个工程怀有不倦的情结和深厚的感情。我曾是一项工程的地质勘察技术负责人，亲身参加该工程的前期工作。这段经历在我从事水利水电工程地质勘察工作的一生中占有特殊的地位，它是我个人全面掌握大型水电工程勘察技术、提高分析和解决重大水电工程地质问题的能力、事业走向成功的里程碑。我调离昆明院后，在天生桥一级水电站与昆明院同事们共同奋战的情景还时时在我脑海中浮现。工程开工以后，又有幸受聘，多次去工地进行咨询，一直关注着天生桥一级水电站的建设。

天生桥一级水电站，是我国十三大水电建设基地之一的南盘江红水河梯级电站的第一个梯级，水库总库容 102.6 亿 m^3 ，电站装机容量 1200MW，建在红水河上游南盘江干流河道上，位于滇、黔、桂省（区）际边界。巨型的龙头水库、优良的多年调节性能、百万级电站装机、西电东送（南线）中转站的优越地理区位，使其在梯级电站运行和西电东送战略实施中，成为一个地位重要的大型水电工程，源源不断地为我国社会主义现代化建设提供环保、清洁、可再生能源。

枢纽工程由拦河坝、溢洪道、放空隧洞和引水发电系统组成，还为施工导流专设了两条大型导流隧洞。在 20 世纪 80 年代初，拦河坝采用混凝土面板堆石坝新坝型，并在国外经验还不多、国内刚起步的情况下，开创了高面板堆石坝设计先河。设计坝高 178m，当时位于世界第一，建成时为世界第二，坝体体积 1800 万 m^3 ，面板面积 17.3 万 m^2 ，迄今仍居世界首位，是我国混凝土面板堆石坝坝工建设的里程碑，为我国该坝型发展积累了宝贵的经验。溢洪道设于右岸垭口，巧妙利用垭口槽谷地形就势布置，泄洪量 21750 m^3/s ，引渠底宽 120m，复式矩形断面，全长 1700 余米，泄洪量和工程规模都是现今我国最大的岸边式溢洪道，开挖料作为坝体填筑主要料源，环境效益和经济效益显著。根据实际地质条件，溢洪道边坡分别采用喷锚、预应力锚索、钢筋混凝土和大范围的不衬砌等多种支护衬砌型式，有效节约了工程投资。导流、放空和引水 7 条大断面洞室群皆在地

质条件差的Ⅲ-V类围岩地层中开挖，采用新奥法设计施工，并在不良地质洞段和上覆岩体过薄洞段，采用了后张法有黏结预应力混凝土衬砌及钢板钢筋混凝土衬砌新型结构；导流洞堵头按瓶塞原理设计，采用三面楔形体体型，并在导流洞过水前形成，避免了二次开挖，堵头混凝土长度仅为倍半洞径，有效节约工程量，并简化了施工。厂区枢纽设于右岸10号和12号冲沟之间。优化布置了岸边式地面厂房，简化边坡处理和减小开挖量，按功能分块布置，利用少量外资采购关键高效率设备，配置完善，布置清晰、规范，方便运行。凡此种种，创新造就了天生桥一级水电站是一座结构新颖，极富特色的大型水电工程。

众所周知，面对复杂的地质条件，地质勘察这一基础性工作具有实践和探索两个鲜明的特性，尤其对水电工程的地质勘察，更需要地质工作者去勤于实践、勇于探索，攻克一个个技术难关，解决一道道技术难题，为水电站的顺利建设和成功运行奠定坚实的基础。针对天生桥一级水电站复杂的地质条件和工程的实际需要，开展了大量的岩土工程特性研究和工程地质专题研究工作，涵盖了区域构造稳定与水库诱发地震研究、水库岩溶渗漏与库岸稳定性研究、泥岩风化崩解与软弱夹层泥化特性研究、工程岩体分区分类、右岸山坡稳定性研究、断层及软弱夹层渗透稳定性研究、洞室围岩稳定性研究、工程高边坡稳定性研究及建筑物开挖料的利用研究等，开创了软岩风化土料研究的先河，开挖料的勘察及利用在国内同类坝型中达到最高水平。上述丰硕的研究成果均包括在本书中。

本书除系统、全面的介绍区域、水库、枢纽工程勘察和专题研究成果外，还对面板堆石坝的勘察、坝体变形与坝基渗流问题从工程地质角度进行分析探讨，带有诸多总结、反思及感受的内涵。

本书成书于工程竣工发电六年之后，水库工程、枢纽工程各建筑物均已通过了高水位、长时间的运行检验，已证明工程安全、运行可靠，工程勘察是成功的。2002年天生桥一级水电站获国家级工程勘察最高奖——全国优秀工程勘察金奖。

因此，本书的出版，不仅能进一步提高编著者工程地质勘察水平，同时也能给读者以帮助。

中国工程勘察大师



2007年12月25日

天生桥一级水电站是我国十二大水电建设基地之一的南盘江红水河梯级电站的第一级，为龙头水电站，坝高库大，又处于滇、黔、桂三省（区）边界，是西电东送工程重要的电源点，在梯级电站运行和西电东送（南）战略实施中具有十分重要的地位，是国家“八五”重点建设项目之一。

天生桥一级水电站位于红水河上游南盘江干流河段上，工程区跨越扬子地台及华南地台，岩性岩相变化大，各时代地层超覆—缺失现象比较明显，坝址岩性软弱、构造发育，地基强度低，围岩稳定性差，工程地质和水文地质条件复杂，工程地质问题较为突出，是一个勘测设计难度很大的水电工程项目。

昆明院于 1982 年初受命承担天生桥一级水电站的勘测设计任务，地质勘测工作历经 25 个年头，大体可分为四阶段。1982~1986 年为前期工作阶段，接受任务后，昆明院立即组织地质、勘探及测量工作进点，勘测、科研、设计通力协作，于 1982 年当年提出选坝报告，之后又于 1984 年、1986 年相继完成可行性研究（相当于现在的预可行性研究）报告和初步设计（相当于现在的可行性研究）报告。在这个阶段，地质勘察抓住主要工程地质问题，综合利用各种勘测手段，严格按照勘察大纲和有关规程规范要求，进行了大量科学研究，查明了工程区及各建筑物的工程地质条件，配合设计选定了坝址，确定了工程规模和枢纽布置方案。1987~1990 年为第二阶段，进行招标设计阶段地质专题研究工作，包括厂房方案的优化与布置、引水隧洞浅埋地下洞室群围岩稳定性研究、放空隧洞取消进口闸门的优化布置研究、溢洪道轴线优化布置与高边坡稳定性分析及建筑物开挖料的利用研究等。密切配合设计深化优化，进行了大量的分析评价工作，为工程顺利开工做了充分的技术准备。1991~2000 年为施工详图设计阶段，地质技术人员进行了大量的施工地质编录、地质预测、预报，及时收集并反馈地质信息，积极参与工程的基础、边坡及阶段竣工验收，提出合理化建议，为进一步完善和优化设计，确保工程质量与安全创造了条件。同时对水库蓄水后库岸稳定性进行了复查，对 780~850m 高程范围内的 300 多个移（居）民点及大片耕（园）地等的稳定进行了全面的地质调查，重点地段开展了地质勘探和试验工作。2000 年工程竣工完建至今为第四阶段，处理尾工，进行技术总结，参与配合工程安全鉴定和竣工验收工作，编制了各单项工程竣工地质报告及技施设计地质技术总结。同时对水库诱发地震震灾进行了地质调查。2006 年 11 月 17 日，天生桥一级水电站枢纽工程通过专项竣工验收。

工程勘测各个阶段，先后有国内专家及美国哈扎公司、巴西咨询工程师团、挪威咨询组等对工程进行了评估和咨询。施工期间先后又有日本电源开发株式会社（EPDC）及日本工营株式会社（NK）进行了技术咨询。

水电工程是一个庞大的系统工程，天生桥一级水电站的工程地质勘察工作，仅院内就有勘测各专业（包括地质、勘探、测量、物探、水文、试验等）数百人参与，还得到了院内相关专业（包括水工、施工、科研实验、水库、规划等）的大力支持以及国、内外专家的咨询和帮助，时间跨度 20 余年，工作成果是两代人在历届院领导的精心组织下辛勤劳动的结晶，

饱含着每一位参与者的智慧和心血。因此，对这样一项地质条件复杂、工程地质问题突出、工程设计富有特色、代表我国高面板堆石坝建设标志之一工程的成功勘察，是所有关心、帮助、参与该工程勘察设计的领导、专家和同仁的共同的成果，成书之际，谨向他们表示崇高的敬意和衷心的感谢。本书的编写，旨在全面系统地介绍天生桥一级水电站枢纽工程的勘察成果，认真总结工程勘察经验，借以进一步提高我们的勘察水平。

本书由昆明院策划和组织，由直接参加工作的地质人员编写。全书分为九个部分：第一部分重点介绍工程勘察过程、国际咨询及勘察成果的验证情况；第二部分介绍区域地质及水库诱发地震情况；第三部分介绍水库岩溶渗漏及库岸稳定工程勘察情况；第四部分介绍坝址及枢纽布置方案选择的地质勘察情况；第五部分介绍枢纽区岩土工程特性研究情况；第六部分介绍枢纽区主要工程地质问题勘察与评价情况；第七部分重点介绍天然建筑材料（特别是软岩风化石料、软岩堆石料及开挖料利用）的勘察研究情况；第八部分对若干已建的面板堆石坝地质勘察（特别是坝基及建筑材料的勘察）工作经验进行总结，希望对更多面板堆石坝勘测设计提供可资借鉴的地质勘察与基础处理经验；最后一部分对天生桥一级水电站枢纽工程勘察进行评价和总结。编写大量利用了以往勘察、设计及科研工作成果，全书由王自高、钱康、李文纲、张鉴光编写，王自高统稿，最后由何伟及李文纲审查定稿。尽管编写工作力求全面客观反映工程勘察实际，并努力发掘，但限于编写者的水平和经验，书中难免有欠妥甚至错误之处，恳请读者批评指正。

编 者

二〇〇七年十二月

序一
序二
前言

1 绪论	1
1.1 工程概况	1
1.2 勘察过程	1
1.3 国际咨询情况	4
1.4 基本地质条件	12
1.5 开挖前后地质条件对比复核	16
1.6 工程回访情况	16
1.7 工程勘察获奖情况	20
2 区域构造稳定与水库诱发地震研究	21
2.1 区域构造稳定性评价	21
2.2 水库诱发地震研究	23
2.3 蓄水后水库地震影响及处理	27
3 水库岩溶渗漏与库岸稳定性研究	30
3.1 水库岩溶渗漏分析	30
3.2 库岸稳定性评价及库岸再造分析	31
3.3 移民新址工程地质勘察	38
4 坝址与枢纽布置方案选择的地质评价	41
4.1 坝址选择过程概述	41
4.2 坝址选择地质评价	41
4.3 枢纽布置方案选择地质评价	42
5 枢纽区岩土工程特性研究	44
5.1 河床冲积层工程特性	44
5.2 岩石及岩体物理力学性质	45
5.3 泥岩工程地质特性	49
5.4 软弱夹层工程地质特性	52
5.5 工程岩体分区及分类	54

6	枢纽区主要工程地质问题勘察与评价	59
6.1	右岸山坡稳定性勘察与评价	59
6.2	断层及软弱夹层渗透稳定性研究	64
6.3	坝基工程地质评价与处理	66
6.4	地下洞室围岩稳定评价与处理	70
6.5	厂房高边坡稳定性评价与处理	75
6.6	溢洪道工程地质评价与处理	82
7	天然建筑材料勘察与研究	88
7.1	软岩风化土料勘察与研究	88
7.2	软岩堆石料利用研究	91
7.3	开挖料利用研究	94
8	面板堆石坝工程地质勘察与实践	97
8.1	面板堆石坝的主要工程地质问题	97
8.2	面板堆石坝坝基工程地质勘察	98
8.3	面板堆石坝地基工程处理	100
8.4	面板堆石坝的天然建筑材料勘察	107
8.5	面板堆石坝变形与渗流问题分析	116
9	结论	132
9.1	总体评价	132
9.2	经验总结	133
	参考文献	135

1

绪 论

1.1 工程概况

天生桥一级水电站位于红水河上游南盘江干流上,是红水河 10 个梯级电站开发中的第 1 级,工程范围跨滇、黔、桂三省区六个县(市),左岸是贵州省安龙县,右岸是广西壮族自治区隆林县,上游 62km 是鲁布革水电站厂房,下游约 7km 是天生桥二级水电站的首部枢纽。该电站以发电为主,水库正常蓄水位 780m,死水位 731m,库容 102.57 亿 m^3 ,为目前西南地区第一大库;面板堆石坝最大坝高 178m;四台机组装机容量 $120 \times 10^4 \text{kW}$,保证出力 $40.52 \times 10^4 \text{kW}$,年发电量 $52.26 \times 10^8 \text{kW} \cdot \text{h}$;本电站建成后除本身向系统提供强大电力外,还增加下游已建天生桥二级、岩滩、大化三个电站保证出力 $88.39 \times 10^4 \text{kW}$,增加年发电量 $40.77 \times 10^8 \text{kW} \cdot \text{h}$ 。经济效益显著,是西电东送工程重要的电源点,是国家“八五”重点项目之一。

枢纽工程由混凝土面板堆石坝、开敞式岸边溢洪道、放空隧洞、引水系统和地面厂房等主要建筑物组成。导流建筑物由两条导流洞和上、下游围堰组成,放空隧洞参加后期导流。该电站 1991 年开工兴建,1994 年截流,1998 年下闸蓄水发电,于 2000 年底四台机组全部建成投产,2006 年枢纽工程通过专项验收。

1.2 勘察过程

昆明院在 1954~1956 年参与了南盘江流域的水力资源普查,分别于 1954 年 9 月和 1955 年 5 月提出踏勘报告和复勘工作报告。1956 年广东省水利厅查勘了南盘江,于同年 5 月提出《南盘江流域查勘报告书》。1958 年昆明院又对南盘江中下游河段进行了普查,同年 4 月提出了《南盘江水利资源普查报告(铺龙—纳贡段)》。1958~1966 年,昆明院、长沙院(现中国水电顾问集团中南勘测设计研究院)、广西电力设计院又先后在天生桥河段进行了规划选点工作。1958 年长沙院在坝汪、巴结、坝盘、坝索及尼拉等坝段,进行了规划选点与部分初步设计工作,于 1965 年 9 月提出《南盘江天生桥水电站开发报告》,1966 年 6 月提出《南盘江天生桥水电站初步设计报告》。

1973 年原水电九局设计院(现中国水电顾问集团贵阳勘测设计研究院)进点天生桥梯级,1976 年开展高坝勘测设计工作,于 1979 年 11 月提出《南盘江天生桥水电站高坝规划选点工程地质报告》,同年 12 月提出《南盘江黄泥河至北盘江口干流河段规划选点报告》。经水电总局审查,确定了开发方案,并选择坝盘、大湾两个坝址作为高坝坝址进行比较。此后进行了大量的勘测设计工作,于 1981 年 12 月提出《南盘江天生桥水电站高坝初设第一期

工程地质中间报告》。

为了加快天生桥高、低坝的勘测设计工作,水电总局于1982年6月,下发了(82)水建设字12号文,主要内容:为了加速开发南盘江——红水河的丰富水力资源,加快天生桥(低坝)的建设,经研究决定,将原由水电九局设计院承担的天生桥(高坝)水电站的勘测设计任务由昆明院承担,要求1982年底组织选坝,1983年10月提出可行性研究报告。

昆明院第一批地质人员于1982年6月进点现场开展勘测工作,并于1982年12月提出《南盘江天生桥一级水电站选坝报告》,推荐大湾坝址。水电总局于1983年1月24日~2月4日组织有关专家,在昆明召开了技术讨论会。通过现场调查,讨论研究,会议同意选定大湾坝址,并按当地材料坝进一步开展勘测设计工作。于1984年5月提出《南盘江天生桥一级水电站可行性研究报告》。水电部水利水电规划设计院于1984年12月3~10日在北京召开了天生桥一级水电站可行性研究报告审查会,会议认为“昆明勘测设计院自1982年以来,在贵阳勘测设计院工作的基础上,对天生桥一级水电站工程进行了大量的勘测设计工作,中间曾提出了选坝报告并经审查,最近编制的可行性研究报告,其内容和深度达到了基本要求,技术、经济上都是可行的。天生桥一级水电站不仅本身经济效益大,而且对提高下游已建梯级的效益也较显著,国家已列入“七五”兴建计划。但该工程坝高库大,地质条件也比较复杂,昆明院要再接再厉,精益求精;根据审查意见,抓紧进行下一阶段勘测设计工作,并编报设计任务书,为加快工程兴建创造条件”。

可行性研究阶段,曾对黏土心墙堆石坝和混凝土面板堆石坝进行过比较。通过初步设计阶段的进一步论证,认为坝址地形地质条件均能满足两个方案坝型的要求。但从经济上和工期考虑,认为面板堆石坝坝体较小,且防渗帷幕和趾板、面板的施工与坝体填筑互不干扰,导流隧洞相对较短,并能节约投资,缩短工期。

为能在初步设计阶段集中做选定方案的设计工作,昆明院于1986年1月提出了《南盘江天生桥一级水电站坝型选择报告》,同年5月水电部水利水电建设总局以(86)水建字第21号文批复了该报告,同意选用混凝土面板堆石坝进行初步设计。1986年9月昆明院提出《南盘江天生桥一级水电站初步设计报告》。水电部水利水电规划总院会同国家计委重点一局,于1987年2月18~26日在天生桥工地共同主持召开审查会议。同年5月水电部对《南盘江天生桥一级水电站初步审查意见》作了批复。对地质部分的评语是:因地制宜利用综合勘测手段、勘测资料搜集齐全,成果准确可靠,库区和坝区主要工程地质问题已查明,满足初设深度和质量要求。至工程开工前(包括技施),地勘工作共完成钻孔214个,总计进尺21421.62m,平硐57个,累计总深6847.8m。

工程勘测各个阶段,先后有国内专家及美国哈扎公司、巴西咨询工程师团、挪威咨询组等对工程进行了评估和咨询。地质成果受到国内外专家的好评和称赞。

根据初步设计审查意见和施工中出现的问题,招标与技施设计阶段开展了一系列补充勘察、专题研究及大量优化设计配合工作,提出了各单项工程地质专题报告及招标地质说明书(其中大坝工程为国际招标),开展了施工地质工作,编制了各单项工程竣工地质报告及技施设计地质技术总结。

(1) 1987~1988年,在溢洪道冲刷坑、溢洪道引渠及右坝头等部位,补充钻孔14个,总进尺1174.91m,并进行了相应的地质测绘工作,于1990年8月提出《南盘江天生桥一级水电站溢洪道工程地质报告》,对溢洪道引渠高边坡稳定,岩溶渗漏及对右岸山坡稳定的影

响进行了分析论证,同时还对挑流鼻坎及冲刷坑工程地质条件进行了专门评价。

(2) 1988~1990年,配合厂房优化设计,对厂区地质条件作进一步论证,补充钻孔7个,总进尺441.14m,平硐两个,深211.2m。进行了多个方案的边坡稳定分析、评价与比较,最终优化确定了厂轴方案。

(3) 初步设计阶段,曾勘察了白崖和科风两个石料场和大湾土料场。技施设计阶段于1990年3月对白崖和科风石料场又进行了复查工作。由于大湾土料场储量不能满足需要,1990年3月增加了科风土料场的详查工作。白崖石料场是混凝土骨料的主要料源,料场有零星的燧石分布,因此对燧石含量进行了评估,并取样进行碱活性试验,于1995年3月提出了《天生桥一级水电站白崖石料场燧石含量评估报告》。据试验成果及燧石含量分析,该料场为非活性骨料。

(4) 1998年5月3日,由于暴雨,溢洪道右侧边坡,桩号STA(A)0+456~0+520m段边坡上覆岩体沿层间错动面(f_{cl})滑移,使得高程797m约20m长挡墙基础悬空。根据前期勘测成果和施工现场收集的地质资料,进一步分析了引渠两侧边坡岩体结构类型及变形破坏机制。对引渠边坡,特别是右侧STA(A)0+300~0+700m段进行稳定复核,并提出支护措施,同时也对引渠其他地段边坡提出处理建议。于1998年6月,提出《天生桥一级水电站溢洪道引渠边坡工程稳定分析专题报告》。

(5) 4条引水隧洞通过10号冲沟地段,上覆岩体厚度较薄,沟底部位仅18~27m,上覆岩体变形模量是否满足设计结构的要求,以及环锚加固可靠性等,需要进行专门论证。为此在10号冲沟地段布置勘探孔8个,进尺231.70m,进一步查明1~4号洞上覆岩体的地质条件和岩体结构,并测试不同深度岩体的声波值,结合工程区静载试验测定的岩体变形模量及四条引水隧洞施工开挖揭露的地质情况,对10号冲地段岩体变形模量进行了论证,于1999年1月提出《南盘江天生桥一级水电站引水隧洞环锚结构复核专题报告》。

(6) 根据电力工业部水规[1997]529号文的批示和南方电力联营公司天生桥一级水电站建设管理局天建管征字[1997]第39号文“关于对天生桥一级水电站水库淹没区进行滑坡坍岸勘察的委托函”的委托,对水库库岸稳定性进行了复查,对780~850m高程范围内的300多个移(居)民点及大片耕(园)地等的稳定进行了全面的地质普查及重点调查,并进行了地质勘探和试验工作。地质工作于1997年11月开展,外业工作于1999年4月结束。外业工作进行了比例尺1:5万的库区地质测绘1200km²,钻探1590.31m,坑槽探约9000m³及土壤试验103组。基本查明了水库蓄水后可能产生库岸变形失稳库段的分布位置、规模及库岸再造影响范围,并对移(居)民点所在地及大片耕(园)地等经济对象的影响进行了评价。于2000年5月提出《南盘江天生桥一级水电站水库库区环境工程地质勘察报告》。

(7) 2000年8月13日,当库水位达772.78m时,在近坝库岸灰岩分布地段的贵州安龙县万峰湖镇、兴义巴结镇及广西隆林的天生桥镇一带发生了水库蓄水后历次诱发地震中震级最大的一次地震(4级),导致库岸发生多处失稳险情,对当地居民生产及生活产生影响。受天生桥一级水电站建设管理公司委托,2000年9~10月对涉及贵州省两县(市)七个乡镇的30个村民小组开展了地震灾害调查及处理工作,提交了“南盘江天生桥一级水电站左岸支流马别河流域水库诱发地震震灾地质调查报告”。

2001年5月10~22日,天生桥一级水电站建设管理公司组织专家对天生桥一级水电站

库区滑坡塌岸调查及处理措施规划设计工作进行现场查勘和专家咨询。咨询认为：“昆明院近三年来对水库区进行了多次库岸滑坡塌岸的专项勘察工作，取得了丰富的第一手资料，为水库滑坡塌岸的处理提供了依据；昆明院地质专业确定的库区可能失稳点及圈定的可能失稳范围是基本符合实际的。”

1.3 国际咨询情况

1.3.1 前期技术咨询

工程勘测期间，先后有美国哈扎公司、巴西咨询工程师团、挪威咨询组、中国国际工程咨询公司、天生桥一级水电站工程特别咨询团等对工程进行了评估和咨询，地质勘察成果受到了专家的好评和称赞，同时，专家也提出了有益的意见及建议。

(1) 1983年，美国哈扎工程公司对选坝阶段的工作成果进行了咨询，认为选定大湾坝址是为了最大程度地减小水库渗漏的可能性。坝址枢纽总布置很好地适应了地形及地质条件，是经济的。工程的可行性已具备，进一步的研究可以对布置作些改进，对工程造价的影响不大。咨询组对地质勘测工作表示赞赏。具体咨询意见如下：

1) 关于坝基处理。坝基岩石可满足堆石坝对坝基的研究，两岸均是稳定的。心墙堆石坝坝坡预定为 $1:1.8$ ，建议上游坡放缓为 $1:2$ 。心墙及反滤层的基础置于新鲜或可灌的岩石之上，开挖后的坝基强度将超过堆石体，坝基压缩特性也将优于堆石体。心墙基础的处理方法有：第一，平整岩面。用开挖或填补混凝土的方法，消除悬壁及陡坎。第二，加深开挖断层及节理密集带，回填混凝土。第三，开挖后立即喷混凝土，防止泥岩风化崩解和软弱夹层泥化。第四，填心墙料时，在基础岩面上铺浓水泥砂浆，不需设置混凝土垫层。第五，浅孔固结灌浆，最大限度地把心墙与其下的地下水活动隔离，以防止冲蚀。第六，帷幕灌浆在心墙槽底进行，不需设置灌浆廊道。帷幕设计深度大致为作用水头的 0.7 倍。建议采用单排孔，并用“劈裂法”(split-spacing)施工——先按间距 20m 、 0.7 倍作用水头的孔深完成第一序，在根据进浆情况，决定第二序、第三序灌浆孔的深度。此外，从坝顶向两岸坝肩需进行扇形灌浆。坝壳基础处理有两点要求：第一，下游坝壳的上一半范围内不允许存在悬壁，其余部位允许存在；第二，心墙到下游堆石坝壳底宽的 $1/3$ 范围，需用反滤料覆盖，以防止基础冲蚀。建议在两岸利用现有平硐设置有排水孔的排水廊道，以便消除帷幕后的空隙水压力。排水廊道应置于堆石体下游的岩石边坡上，且高于尾水位（下游二级电站库水位）。面板堆石坝坝坡坡度预定 $1:1.4$ 是合适的，趾板区的基础处理应与心墙相同或更好。

2) 右岸软弱夹层及 F_8 断层渗变稳定问题。从探硐观察，岩石是紧密的，有糜棱岩及硬黏土充填物的剪切带（软弱夹层）都是薄且偶尔才见得到的。它们不是后期充填黏土那样的管涌材料，基岩是相对不透水的，岩基可能是好的。但为了防止可能发生的冲蚀，仍需对坝基进行前述的细致处理（面板趾板或心墙基础的固结灌浆、帷幕灌浆及下游的排水与反滤保护）。 F_8 断层是一个特殊的问题，虽然在探硐中该断层是由致密和部分胶结的材料组成，但如果假定在更深处也如此可能是错误的，需要进行补充勘探来查明断层深部的渗漏及管涌性质，以便决定是否需要进行诸如缝合灌浆、黏土铺盖等补救措施。

3) 关于溢洪道。溢洪道引渠及闸门将有大量开挖和较高的边坡。目前设计的 $1:0.5$ 坡度是合适的。在局部不稳定处需要加锚杆。引水渠将从有溶蚀的灰岩中开挖，应估计到岩溶渗漏的可能性。雨季地下水高于库水位。枯季地下水位还须进一步查明。因此，在开挖边坡