

白鹤滩水电站 巨型地下洞室群围岩稳定 分析与设计方法

中国电建集团华东勘测设计研究院有限公司 著
张春生 侯靖 徐建荣 陈建林 等



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

白鹤滩水电站 巨型地下洞室群围岩稳定 分析与设计方法

中国电建集团华东勘测设计研究院有限公司 著
张春生 侯靖 徐建荣 陈建林 等



中国水利水电出版社

www.waterpub.com.cn

·北京·

内 容 提 要

本书围绕巨型地下洞室群围岩稳定分析和支护设计问题,以世界规模最大的白鹤滩水电站巨型地下洞室群为工程依托,对大型地下洞室群建设过程中出现的关键技术难题和研究方法进行了系统总结。全书共8章,包括绪论、工程区域地应力、岩体主要力学特性与数值描述、巨型地下洞室群布置研究、巨型地下洞室群支护设计、围岩变形机制与破坏特征、巨型地下洞室群监测设计、巨型地下洞室群动态反馈分析等。

本书可供从事大型地下洞室群研究、设计和施工的相关技术人员借鉴,也可供高等院校水电、水利、地质、土木工程等相关专业师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

白鹤滩水电站巨型地下洞室群围岩稳定分析与设计方法 / 张春生等著. — 北京:中国水利水电出版社, 2019.12

ISBN 978-7-5170-7927-9

I. ①白... II. ①张... III. ①水电站厂房—地下洞室—围岩稳定性—研究 IV. ①TV731.6

中国版本图书馆CIP数据核字(2019)第185596号

书 名	白鹤滩水电站巨型地下洞室群围岩稳定分析与设计方法 BAIHETAN SHUIDIANZHAN JUXING DIXIA DONGSHI QUN WEIYAN WENDING FENXI YU SHEJI FANGFA
作 者	中国电建集团华东勘测设计研究院有限公司 著 张春生 侯靖 徐建荣 陈建林 等
出版发行	中国水利水电出版社 (北京市海淀区玉渊潭南路1号D座 100038) 网址: www.waterpub.com.cn E-mail: sales@waterpub.com.cn 电话: (010) 68367658 (营销中心)
经 售	北京科水图书销售中心(零售) 电话: (010) 88383994、63202643、68545874 全国各地新华书店和相关出版物销售网点
排 版	中国水利水电出版社微机排版中心
印 刷	北京印匠彩色印刷有限公司
规 格	184mm×260mm 16开本 34.75印张 846千字
版 次	2019年12月第1版 2019年12月第1次印刷
印 数	0001—1000册
定 价	288.00元

凡购买我社图书,如有缺页、倒页、脱页的,本社营销中心负责调换

版权所有·侵权必究

前言

进入 21 世纪以来，随着西部大开发的深入开展，一大批巨型水电站开工建设。这些电站单机容量大、洞室跨度大、开挖规模大，与地质环境互馈作用机制复杂，围岩稳定控制难度高，建设难度超越以往同类工程，已有工程实践及相关理论、方法、技术、标准等难以满足如此复杂地质环境下巨型地下洞室的建设需求，亟待从实践到理论、从经验估计到定量分析、从摸索试探到标准规范等方面的创新和发展。

西部地区复杂的地质环境，使得水电工程地下洞室群的建设、规模及难度也越来越大，呈现出“单机大容量、洞室大跨度、施工高风险、技术高难度”等突出特点，白鹤滩水电站工程是突出体现以上特点的典型代表性工程。白鹤滩水电站装机容量 16000MW，是仅次于三峡的世界第二大水电站，最大单机容量达到 1000MW，采用左右岸地下式引水发电系统对称布置，地下厂房长度 438m，高度 88.7m，跨度 34m，左右岸各设 4 个圆筒型尾水调压室，直径 42~49m，地下厂房洞室群总长可达 210km，尾水调压井最大尺寸为 48m，总开挖量达 1500 万 m^3 ，地下洞室群规模、地下厂房跨度、调压室直径和数量均居世界水电工程之首。同时，白鹤滩地下洞室群地质条件复杂，最大实测主应力达到 33MPa，左岸最大主应力走向与洞轴线近乎垂直，建设过程中同时遭遇了软弱结构面控制型破坏、柱状节理岩体松弛、脆性玄武岩应力型破坏等问题，在地下洞室群建设领域极具代表性，工程建设难度世界罕见。

中国电建集团华东勘测设计研究院有限公司作为白鹤滩水电工程的设计单位，在工程建设预可行性研究阶段及可行性研究阶段，便投入了巨大的人力和物力，历经十余年的不懈努力，共完成地质勘探钻孔超过 10 万 m、地质探洞超过 5 万 m，以及大量的现场试验，开展了系统的专题科学研究和技术攻关。在工程施工阶段，工程现场面临了普遍揭露的脆性岩体的高应力破坏、软弱层间带导致的非连续变形、柱状节理玄武岩的破裂松弛三类典型岩石力学问题对巨型地下洞室群围岩稳定分析和设计工作带来的重大挑战。中国电建集团华东勘测设计研究院有限公司面对以上挑战，在充分吸收国内外类似

工程技术经验的基础上，围绕这一世界级工程开展了大量卓有成效的岩石力学科研工作，注重科研新成果、新技术的研发和应用，不仅在基本理论认识上取得了关键性的突破，而且形成了一整套行之有效的工作方法和馈控技术。这些认识和方法对支撑白鹤滩的工程实践发挥了重要的作用。

随着白鹤滩地下洞室群工程施工期的结束，全程参与工程建设的设计人员和科研人员对围岩稳定分析与设计方面的重要技术成果进行了系统总结归纳，将实践经验上升到理论认识层面，对其中的创新性研究成果进行提炼升华，形成了大型地下洞室群稳定分析与支护设计的方法及理论体系。作者将主要研究成果编写成书，希望能够对巨型地下洞室群工程建设技术发展尽绵薄之力。

本书第1章由张春生、侯靖、陈建林编写，第2章由徐建荣、陈建林、陈平志编写，第3章由侯靖、褚卫江、刘宁编写，第4章由张春生、侯靖、徐建荣编写，第5章由张春生、刘宁、陈平志编写，第6章由陈建林、孟国涛、吴家耀编写，第7章由侯靖、徐建荣、孟国涛编写，第8章由张春生、褚卫江、孟国涛编写，全书由张春生统稿。书中引用了大量的勘察、设计、科研等文献资料，在此表示感谢，同时向参与研究工作的相关单位、专家和学者表示衷心的感谢！

由于研究工作周期长，数据和资料众多，加之作者水平有限，书中难免有不妥之处，敬请读者斧正。

编者

2019年1月



目 录



前言

第 1 章	绪论	1
1.1	工程概况	1
1.2	白鹤滩巨型地下洞室群	3
1.3	地下洞室群建设现状	11
1.4	关键技术难题	23
1.5	主要研究路线及内容	28
第 2 章	工程区域地应力	32
2.1	概述	32
2.2	区域地应力场宏观分析	44
2.3	工程区地应力测量	51
2.4	工程区地应力场数值模拟	71
2.5	工程区地应力分布验证	81
2.6	工程区局部地应力场分布	87
2.7	本章小结	95
第 3 章	岩体主要力学特性与数值描述	96
3.1	硬脆性玄武岩	96
3.2	层间错动带	122
3.3	柱状节理玄武岩	166
3.4	本章小结	205
第 4 章	巨型地下洞室群布置研究	206
4.1	概述	206
4.2	左岸轴线布置选择	218
4.3	右岸轴线布置选择	226
4.4	主要洞室间距论证	233
4.5	尾水调压室体型选择	241

4.6	尾水调压室穹顶体型优化	252
4.7	推荐布置方案的围岩稳定分析	268
4.8	本章小结	276
第 5 章	巨型地下洞室群支护设计	278
5.1	概述	278
5.2	系统支护设计	279
5.3	特殊地质问题的处理与加强支护	284
5.4	支护参数的数值分析复核	313
5.5	渗控设计	330
5.6	本章小结	334
第 6 章	围岩变形机制与破坏特征	335
6.1	概述	335
6.2	左岸洞室群围岩破坏特征	343
6.3	右岸洞室群围岩破坏特征	354
6.4	左右岸洞室群喷层(衬砌)破坏	364
6.5	左右岸地下厂房围岩松弛特征	372
6.6	本章小结	381
第 7 章	巨型地下洞室群监测设计	383
7.1	监测设计的目的和原则	383
7.2	监测设计方案	384
7.3	监测成果分析	400
7.4	新型监测技术及应用	446
7.5	本章小结	456
第 8 章	巨型地下洞室群动态反馈分析	458
8.1	动态反馈分析方法	458
8.2	监测成果分析	468
8.3	左岸厂房上游拱肩监测反馈分析	473
8.4	左岸厂房高边墙 C ₂ 错动变形监测反馈分析	482
8.5	右岸厂房上游边墙 C ₃ 影响部位监测反馈分析	490
8.6	右岸厂房小桩号洞段大变形监测反馈分析	500
8.7	尾水调压室监测反馈分析	514
8.8	地下厂房洞室群稳定性评价	542
8.9	本章小结	545
	参考文献	546



第 1 章 绪论

1.1 工程概况

应对全球气候变化的《巴黎协定》于 2016 年 11 月 4 日正式生效。中国政府积极应对气候变化，印发《“十三五”控制温室气体排放工作方案》，清洁可再生水电资源对能源结构调整与节能减排作用巨大。水能资源是可再生能源中能形成供给规模、改善能源结构、保障能源安全、改善生态环境、实现可持续发展的优质能源，利用好丰富的水能资源是解决我国能源问题的有效措施，也是中国能源政策的必然选择。

金沙江水电基地是我国十三大水电基地中最大的一个。白鹤滩水电站为金沙江下游四个水电梯级——乌东德、白鹤滩、溪洛渡、向家坝中的第二个梯级，坝址位于四川省宁南县和云南省巧家县内。电站装机容量 16000MW，多年平均年发电量 625.21 亿 kW·h，每年可节约标准煤消耗量约 1968 万 t，环境效益显著，为仅次于三峡工程的世界第二大水电工程。由于白鹤滩水库具有巨大的调节作用，电站建成后可明显改善下游溪洛渡、向家坝、三峡、葛洲坝等梯级电站的供电质量，使下游各梯级电站保证出力增加 853MW，平均年发电量增加 24.3 亿 kW·h，枯水期电量增加 92.1 亿 kW·h。

白鹤滩水电站枢纽由混凝土双曲拱坝、泄洪消能建筑物、左右岸地下引水发电系统等建筑物组成，见图 1.1-1。工程规模、技术综合难度位居世界前列，主要工程特性如下：

(1) 装机规模：白鹤滩水电站总装机容量为 16000MW，总装机容量位列世界第二。电站多年平均年发电量 625.21 亿 kW·h，占 2013 年全社会用电量的 1.17%。电站两岸各布置了 8 台 1000MW 的立轴混流式水轮发电机组，为当前世界上最大单机功率的水轮发电机组。

(2) 水库库容：白鹤滩水库总库容 206.27 亿 m³，居我国高拱坝库容第一；防洪库容 75 亿 m³，仅次于三峡和丹江口工程，位列第三，防洪库容规模巨大。

(3) 拦河拱坝：白鹤滩坝址地形地质条件复杂，拱坝最大坝高 289m，仅次于 305m 高的锦屏一级拱坝和 292m 高的小湾拱坝，位列世界第三。总水推力仅次于小湾高拱坝。

(4) 泄洪消能：白鹤滩水电站最大泄洪量为 $42300\text{m}^3/\text{s}$ ，泄洪功率达 90000MW，位居中国第三，仅次于三峡工程的 $116110\text{m}^3/\text{s}$ 和溪洛渡水电站的 $50100\text{m}^3/\text{s}$ 。

(5) 地下洞室群：白鹤滩水电站地下洞室群规模、地下厂房的跨度、调压室数量和直径均居世界已建、在建水电工程之首。

(6) 建筑物抗震：白鹤滩水电站与溪洛渡水电站、小湾水电站、大岗山水电站同处高地震区，其工程挡水建筑物抗震设防类别为甲类，高拱坝设计抗震强度处于我国前五位。

(7) 地形地质条件：白鹤滩坝址区地震基本烈度为Ⅷ度，峡谷地形不对称，岩性复杂，地质构造发育，软弱结构面性状差，且坝基下发育密聚的柱状节理，岸坡发育深卸荷拉裂缝，地应力高。电站高地震烈度问题、高边坡稳定问题、拱坝坝肩稳定问题、坝基柱状节理玄武岩松弛和变形问题、大跨度地下洞室围岩稳定问题、滑坡及泥石流地质灾害问题等突出。

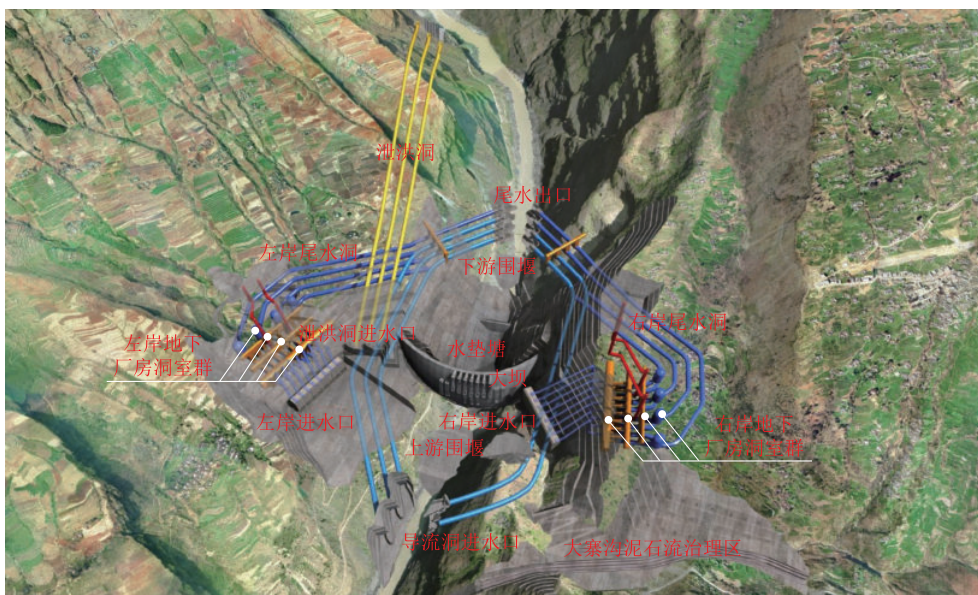


图 1.1-1 白鹤滩水电站枢纽布置图

白鹤滩水电站工程规模巨大，地质条件复杂，技术难度大。中国电建集团华东勘测设计研究院有限公司投入了巨大的人力和物力，组建了勤奋敬业、管理高效的勘测设计科研队伍，历经十余年的不懈努力，共完成地质勘探钻孔超过 10 万 m，地质探洞超过 5 万 m，以及大量的现场试验；联合国内外科研机构 and 高等院校 40 余家共开展了 150 余项专题科学研究和技术攻关，在充分吸收国内外类似工程技术经验的基础上，注重科研新成果、新技术的采用，努力实现“水平一流、技术创新”的目标，取得了丰硕的研究成果，为保证白鹤滩水电站的顺利完建奠定了坚实的技术基础。

在工程可研阶段和施工阶段，项目组围绕这一世界级的工程开展了大量卓有成效的岩石力学科研工作，不仅在基本理论认识层面取得了关键性突破，并且在一些技术环节形成了有效的工作方法，这些认识和方法对支撑白鹤滩的工程实践发挥了重要作用。项目组对其中的重要技术成果进行了总结归纳，将实践经验上升到理论认识层面，对其中的创新性研究成果进行提炼升华，形成了大型地下洞室群稳定性及支护设计的方法及理论体系，希望能够为后续类似工程建设提供经验借鉴和技术支撑。

1.2 白鹤滩巨型地下洞室群

1.2.1 地下洞室群布置

白鹤滩水电站左右岸地下洞室群主要包括引水系统、地下厂房系统、尾水系统、导流系统、泄洪系统、交通系统、通风系统、出线系统及防渗排水系统等，洞室数量多，平面空间交叉多，布置复杂，是国内外水电工程中最大的地下厂房洞室群，见图 1.2-1 和图 1.2-2。左右岸各 8 条输水发电系统呈基本对称布置，地下厂房采用首部开发。四大洞室主副厂房洞、主变洞、尾水管检修闸门室（尾闸室）、尾水调压室（尾调室）呈平行布置。白鹤滩水电站地下厂房长 438m，岩梁以上宽 34m，岩梁以下宽 31m，高 88.7m，为世界上已建水电工程中跨度最大的地下厂房；两岸各布置 4 个圆筒型阻抗式尾水调压室，直径为 43~48m，直墙高度为 57.93~93m，也为世界上已建水电工程中跨度最大的调压室。地下洞室总长 217km，洞室开挖量达 1500 万 m^3 。

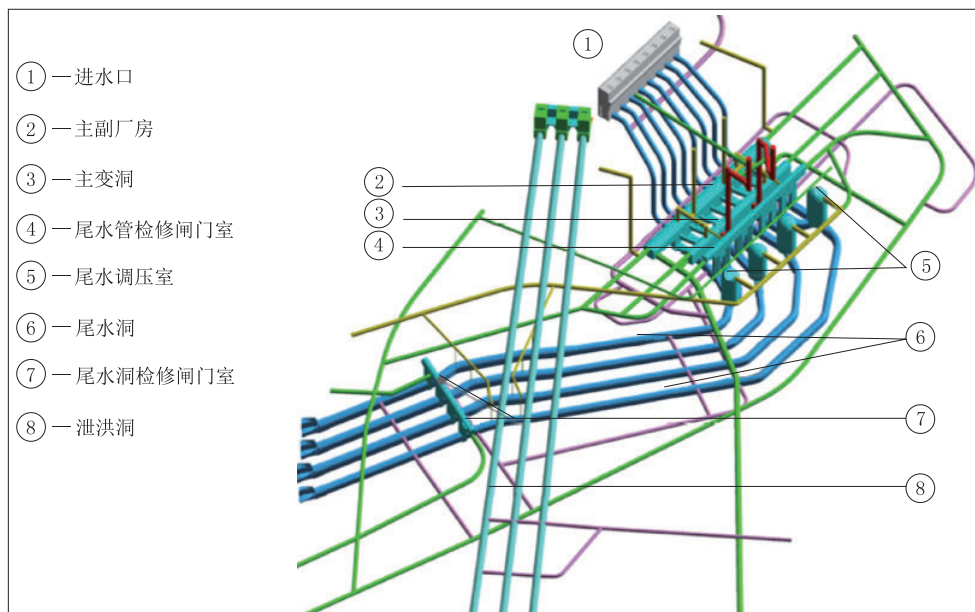


图 1.2-1 白鹤滩左岸地下洞室群

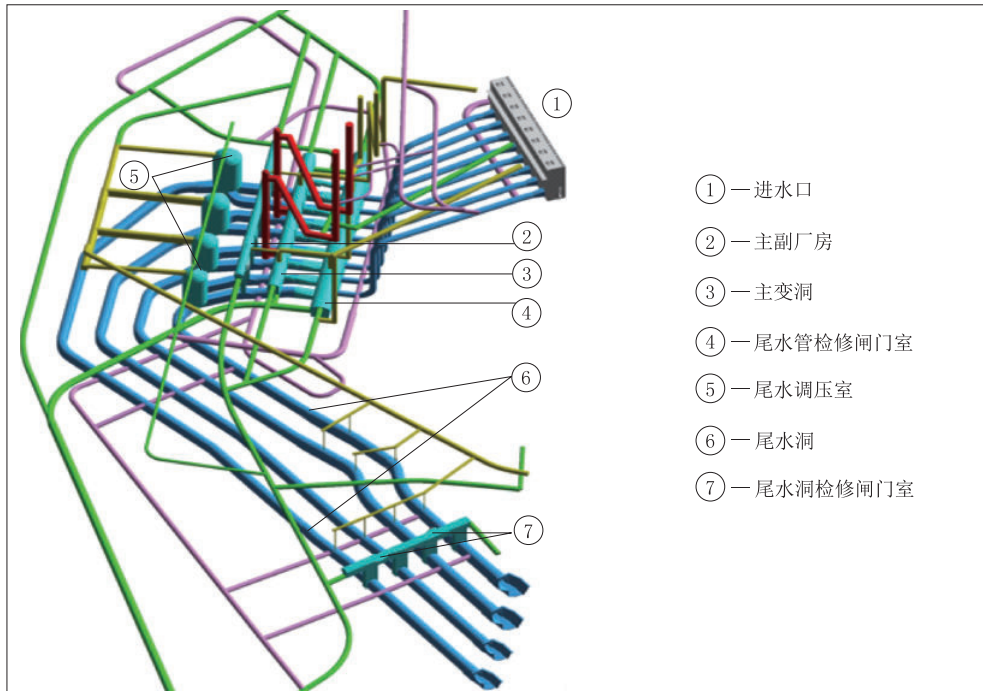


图 1.2-2 白鹤滩右岸地下洞室群

白鹤滩地下洞室群地形、地质条件复杂，具有地应力高、层间（内）错动带及柱状节理玄武岩发育的特点。出露于巨型穹顶（拱顶）、边墙的错动带易形成较大范围的坍塌，易卸荷松弛的柱状节理玄武岩影响高边墙围岩稳定，高应力区脆性岩石岩体易产生轻微或中等岩爆。在如此复杂的地质条件下建设巨型地下洞室群，其设计技术难度和实施的困难程度无疑均是世界级的。

1.2.2 基本地质条件

左岸地下厂房洞室的顶拱布置在层间错动带 C_2 上盘，地下厂房与进水口距离约 280m，垂直埋深 260~330m，左岸厂区以构造应力为主，水平应力大于垂直应力。第一和第二主应力基本水平，第三主应力大致垂直。第一主应力方向为 $N30^\circ \sim 50^\circ W$ ，近水平，量值为 19~23MPa；第二主应力方向为 $N30^\circ \sim 60^\circ E$ ，近水平，量值为 13~16MPa；第三主应力近垂直，量值相当于上覆岩体自重，一般为 8~12MPa。地下厂房部位为单斜岩层，岩层总体产状为 $N42^\circ \sim 45^\circ E$ ， $SE \angle 15^\circ \sim 20^\circ$ 。围岩岩性主要为 $P_2\beta_2^3$ 、 $P_2\beta_3^1$ 及 $P_2\beta_3^2$ 层隐晶质玄武岩、斑状玄武岩、杏仁状玄武岩及角砾熔岩等，岩体新鲜坚硬，完整性较好，多呈块状、次块状结构，少量的块裂结构，围岩以 III₁ 类、II 类围岩为主，局部分布少量 IV 类围岩，成洞条件较好，具备开挖大型地下洞室群的地质条件。左岸地下厂房纵轴线为 $N20^\circ E$ 方向，与厂区陡倾角优势节理夹角为 75° ，与小规模断层夹角为 80° ，与初始地应力第一主应力夹角 $50^\circ \sim 70^\circ$ ，见图 1.2-3 和图 1.2-4。

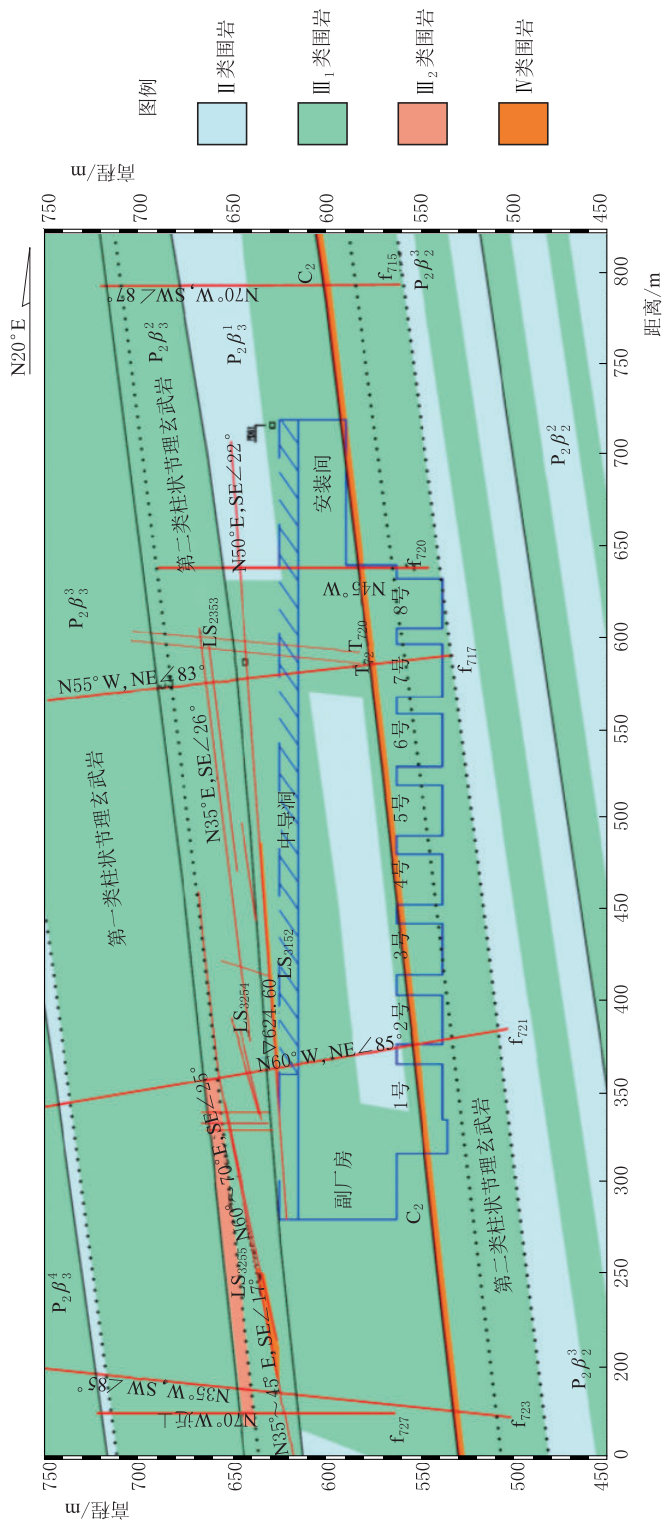


图 1.2-3 左岸主副厂房轴线工程地质剖面图

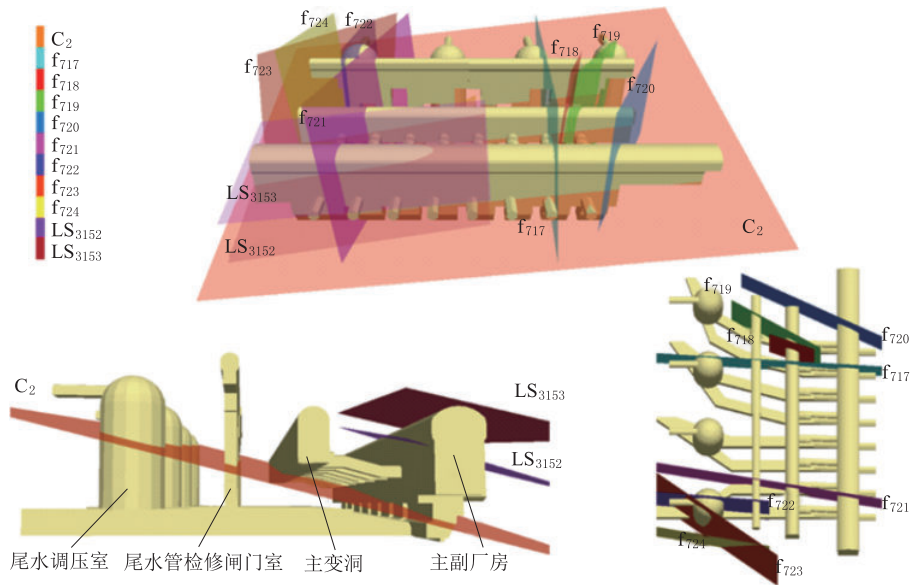


图 1.2-4 白鹤滩左岸地下洞室群主要构造展布特征

左岸尾水调压室岩层总体产状为 $N42^{\circ}\sim 45^{\circ}E$, $SE\angle 15^{\circ}\sim 20^{\circ}$, 为单斜岩层, 主要由 $P_2\beta_3^1$ 和 $P_2\beta_2^2$ 层新鲜的隐晶质玄武岩、斜斑玄武岩、杏仁状玄武岩、角砾熔岩等组成, 岩质坚硬。左岸尾水调压室埋深 $287\sim 337m$ 。围岩以 III₁ 类、II 类为主, 在 C_2 层间错动带发育部位为 IV 类围岩。左岸尾水调压室部位发育 6 条小断层, 以硬性结构面或岩块岩屑型充填为主; C_2 层间错动带斜穿洞室边墙, 沿 $P_2\beta_2^1$ 凝灰岩中部发育, 产状为 $N42^{\circ}\sim 45^{\circ}E$, $SE\angle 14^{\circ}\sim 17^{\circ}$, 错动带厚度 $10\sim 30cm$, 岩块岩屑型, 遇水易软化, 出露于尾水调压室的直立边墙。长大裂隙共揭露 8 条, 长度基本为 $30\sim 100m$, 层内错动带未见发育。此外, 厂区的优势节理为 NW—NWW 向, 倾角较陡。结构面空间展布见图 1.2-4 和图 1.2-5。

右岸地下厂房与进水口水平距离 $230\sim 450m$, 垂直埋深 $420\sim 520m$ 。右岸厂区以构造应力场为主, 水平应力明显大于垂直应力。第一和第二主应力基本水平, 第三主应力大致垂直。第一主应力方向为 $N0^{\circ}\sim 20^{\circ}E$, 接近水平, 量值 $22\sim 26MPa$; 第二主应力方向为 $N70^{\circ}\sim 90^{\circ}W$, 近水平, 量值 $14\sim 18MPa$; 第三主应力近垂直, 量值相当于上覆岩体自重, 一般为 $13\sim 16MPa$ 。地下厂房区为单斜岩层, 岩层总体产状为 $N48^{\circ}\sim 50^{\circ}E$, $SE\angle 15^{\circ}\sim 20^{\circ}$ 。围岩岩性主要为 $P_2\beta_3^3\sim P_2\beta_6^6$ 层隐晶质玄武岩、斑状玄武岩、杏仁状玄武岩、角砾熔岩及凝灰岩等, 岩体多为微风化或新鲜状态, 坚硬且完整性较好, 多呈块状、次块状结构, 围岩以 III₁ 类、II 类围岩为主, 局部分布少量 IV 类围岩, 成洞条件较好, 具备开挖大型地下洞室群的地质条件。右岸地下厂房纵轴线为 $N10^{\circ}W$ 方向, 与厂区陡倾角优势节理夹角为 43° , 与小规模断层夹角为 $40^{\circ}\sim 60^{\circ}$, 与初始地应力第一主应力夹角 $10^{\circ}\sim 30^{\circ}$, 层间错动带 C_3 斜切地下厂房下部边墙对厂房洞室围岩稳定的影响相对较小, 见图 1.2-6 和图 1.2-7。

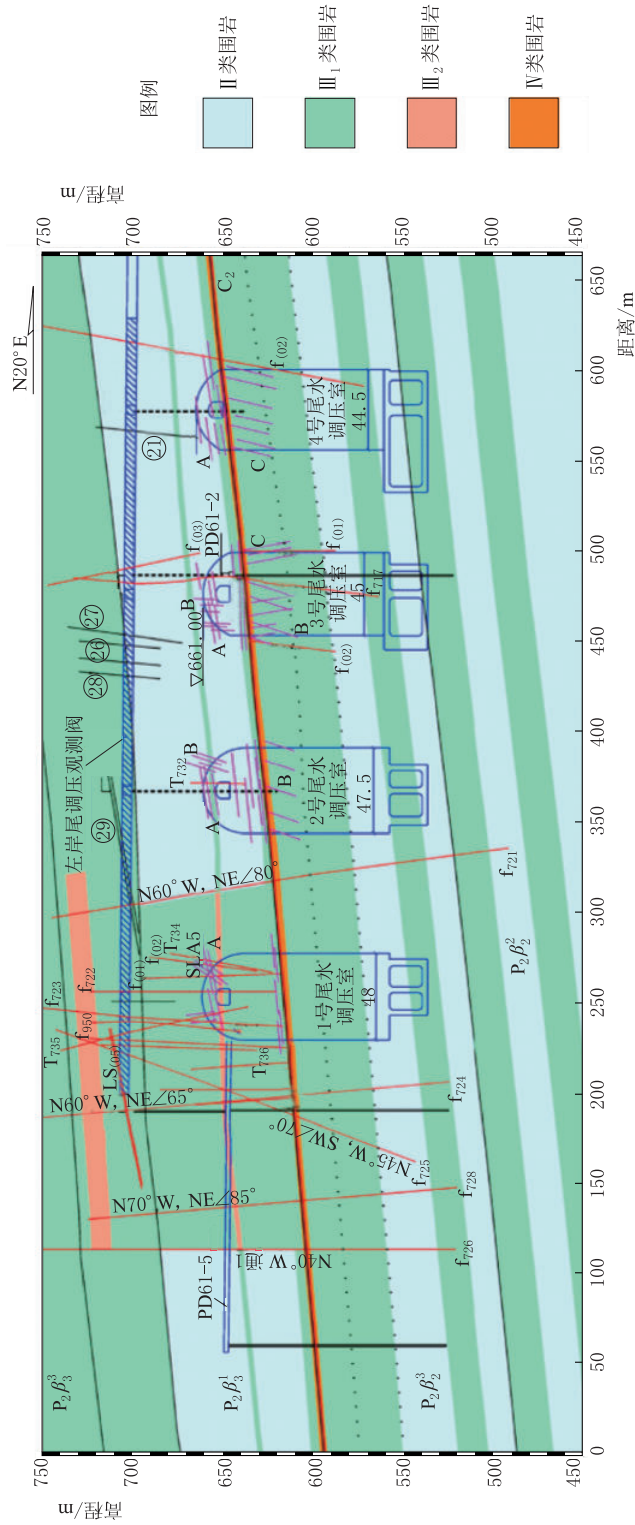


图 1.2-5 左岸尾水调压室工程地质剖面图

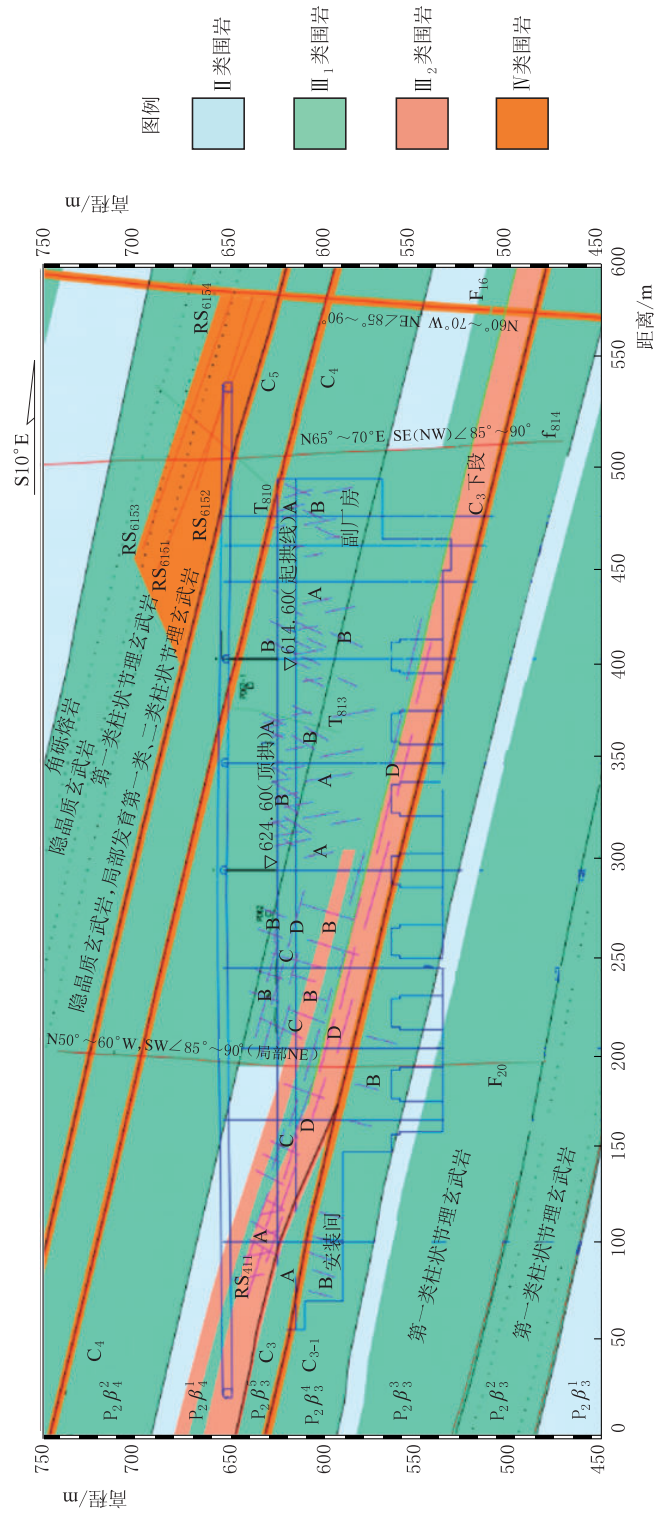


图 1.2-6 右岸地下厂房轴线工程地质剖面图

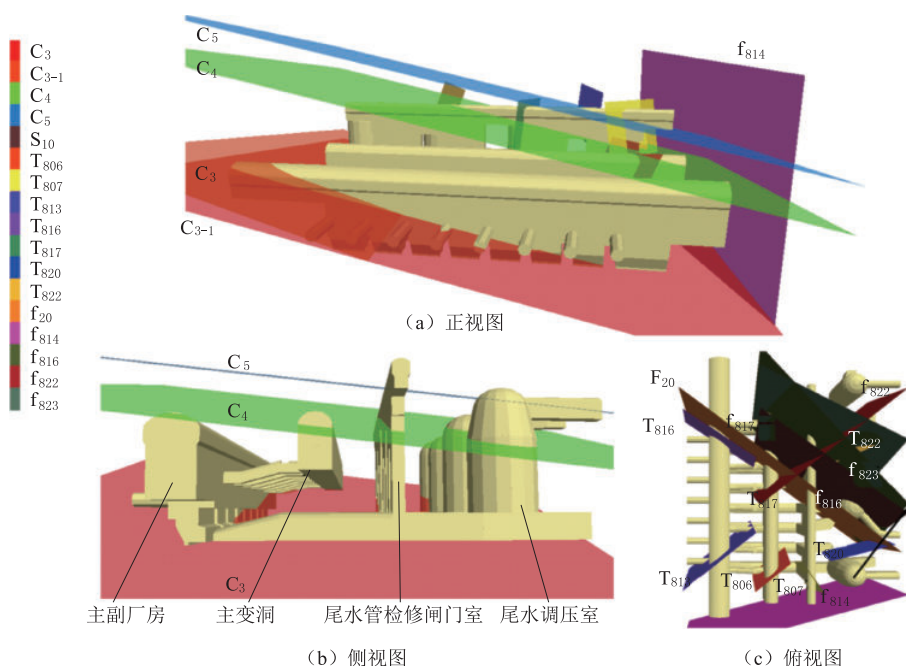


图 1.2-7 白鹤滩右岸地下洞室群主要构造展布特征

右岸尾水调压室岩层总体产状为 $N48^{\circ}\sim 50^{\circ}E$, $SE\angle 15^{\circ}\sim 20^{\circ}$, 为单斜岩层, 岩层走向与洞室轴线大角度相交, 交角 $60^{\circ}\sim 70^{\circ}$ 。该部位地层主要为 $P_2\beta_3^4$ 、 $P_2\beta_3^6$ 、 $P_2\beta_4^1$ 、 $P_2\beta_4^2$ 、 $P_2\beta_4^3$ 、 $P_2\beta_5^5$ 、 $P_2\beta_5^6$ 及 $P_2\beta_6^6$ 隐晶质玄武岩、斑状玄武岩、杏仁状玄武岩、角砾熔岩、凝灰岩等, 岩体为新鲜状态。 $P_2\beta_3^6$ 、 $P_2\beta_4^1$ 、 $P_2\beta_5^6$ 分布有 0.05~1.3m 厚的凝灰岩或凝灰质角砾熔岩, 岩质软弱, 遇水易软化, 多发育层间错动带, 岩体破碎, 性状较差。 $P_2\beta_4^1$ 层底部发育厚 15~28m 第三类柱状节理玄武岩, 岩体呈块状结构, 较完整。右岸尾水调压室埋深 438~508m。围岩以 III₁ 类为主, 占 70%; 少量 II 类, 占 10%; IV 类围岩以条带形式分布于层间错动带附近。右岸尾水调压室部位发育 7 条小断层, 其中 f_{813} 规模相对较大, 断层带内见 1~2cm 的断层泥; 长大裂隙及层内错动带未见揭露; 四条层间错动带 C_3 、 C_{3-1} 、 C_4 、 C_5 , 沿凝灰岩层发育, 交切四个调压室顶拱及边墙, 见图 1.2-7 和图 1.2-8。

白鹤滩水电站工程区地质条件十分复杂, 区围岩主要由隐晶质玄武岩、杏仁状玄武岩、角砾熔岩等组成, 岩体多为微风化或新鲜状态, 岩石强度极高且脆。其中地下厂房和主变室处于块状玄武岩地层, 调压室则主要位于柱状节理玄武岩地层中。由于岩体内发育大量不同尺度的裂隙、密集柱状节理、隐节理等不利构造, 导致岩体的强度和变形特性与岩块存在巨大差别, 岩体尺寸效应显著。在高应力开挖卸荷过程中, 揭露出了一系列严重影响工程安全性的岩体破坏现象, 诸如高应力下玄武岩的脆性破坏和时效破坏、卸荷作用下柱状节理岩体的破裂松弛现象、高密度洞室群开挖引起的围岩破裂空间效应等, 体现了极高岩石强度与现场岩体较低的损伤启裂强度之间的突出矛盾, 给工程设计与施工提出了巨大挑战。另外, 工程区岩体内发育有多条软弱层间(内)错动带、陡倾断层等大型结构

