

前 言

大古水电站是在我国西部高海拔地区雅鲁藏布江的中游峡谷段规划建设的第一级电站^[1]，是“十三五”期间重点建设的大型基础设施项目之一。作为目前世界海拔最高的碾压混凝土大坝，同时也是其建设期间同类项目中的坝体最高、发电水头和装机规模最大者，该工程的建成对于完善区域电力供应体系，满足社会经济发展需求，推动当地繁荣稳定与长治久安具有重要意义。

大古水电站地处地质构造复杂区域，工程区具备结构面发育、新构造活动显著、地下水埋深大、边坡危岩体广布、卸荷风化与浅表生改造作用突出等特征，给坝址坝型选择、边坡稳定、坝基抗渗抗滑及地下洞室安全带来巨大挑战。在本项目的预可研阶段中^[2-10]，中国电建集团华东勘测设计研究院有限公司及华东勘测设计院（福建）有限公司开展了大量勘探、试验及地质调查，查清区域地质背景与坝区工程地质条件，确定了岩土体的物理力学参数，论证了制约工程的关键地质问题，最终在复杂环境下选定较有利的坝址和坝型。施工期开挖及物探检测表明，实际地质条件与前期判断一致，各坝段岩体波速满足安全标准，部分建基面略有抬高，优化了工程进度与投资。本书通过联合国内高校及科研机构，科学评价了危岩体、泥石流、崩坡积物等不良地质体对工程的影响，解决了坝址边坡、库区岸坡、地下洞室及坝基稳定等关键地质问题，实现了产学研有效联合，以科技创新提升工程质量，为高寒、高海拔地区后续项目提供了可借鉴的成功经验。

大古水电站工程自规划阶段至首台机组发电^[1-22]，历时 16 年，这个过程是一段艰难发展的历史，也是进一步发扬中国人民勤劳、智慧的历史，创造了“缺氧不缺精神、艰苦不怕吃苦、海拔高境界更高”水电精神的历史。

本书总结了近 10 年来大古水电站的勘察、科研工作成果。全书共 11 章。第 1 章总体介绍了研究区的工程概况、地质概况及关键工程地质问题，由王敬勇撰写；第 2 章论述了区域地质构造背景、地震活动时空特征、地震活动趋势、地震动参数、区域构造稳定性、近场区地震构造等，由孙兴伟撰写；第 3 章论述了阶地、夷平面、第四系堆积物特征，库区和坝址区的地层岩性、地质构造特征，并论述了工程区的地下水类型和特征、岩土体透水性、水化学类型，由姜宏军、吉锋、周会信共同撰写；第 4 章论述了工程区岩体风化及卸荷、危岩稳定性及处理措施、冰水堆积体稳定性及处理措施、泥石流危险性及其防治措施、崩坡积体稳

定性及治理措施等, 由曾旭明撰写; 第 5 章论述了库区分段及基本地质条件、岸坡结构特征、岸坡稳定性类型划分、水库塌岸与水库浸没等工程地质问题, 由王敬勇撰写; 第 6 章论述了坝基岩体工程地质分类、坝基建基面地质选择研究、部分坝段工程地质条件及处理效果评价, 由孙兴伟撰写; 第 7 章论述了坝基地质条件及变形、浅层抗滑稳定性、深层抗滑稳定性等, 由姜宏军撰写; 第 8 章论述了坝址区边坡稳定性, 包括自然高边坡、坝肩工程边坡、缆机平台工程边坡、鱼道边坡等, 并简述了边坡支护措施及效果, 由吉锋撰写; 第 9 章论述了坝基渗漏、防渗处理及效果, 由周会信撰写; 第 10 章论述了导流隧洞进口稳定性、导流隧洞出口稳定性、围岩质量分级及洞身稳定性研究, 并对导流隧洞加固效果进行了评价, 由曾旭明撰写; 第 11 章为本书的结论。全书由王敬勇统稿。

中国电建集团华东勘测设计研究院有限公司、华东勘测设计院(福建)有限公司联合成都理工大学、浙江大学等高校, 围绕大古水电站关键工程地质问题开展了大量研究工作, 在工程各阶段得到了水电水利规划设计总院的技术指导, 在此表示诚挚感谢。

本书撰写得到了华东院领导、华东院东南区域总部等相关部门领导的大力支持, 在此表示诚挚感谢。

限于作者水平, 书中难免存在不足之处, 恳请读者批评指正。

作 者

2023 年 8 月

目 录

前言

第 1 章	绪论	1
1.1	工程概况	2
1.2	地质概况	3
1.3	关键工程地质问题	5
第 2 章	区域构造稳定性与地震研究	7
2.1	区域地质构造背景	7
2.2	地震活动特征	15
2.3	区域构造稳定性综合评价	22
2.4	小结	24
第 3 章	工程区基本地质条件	26
3.1	地貌及第四系研究	26
3.2	地层岩性与地质构造研究	28
3.3	工程区水文地质条件研究	35
第 4 章	工程区物理地质现象研究	40
4.1	岩体风化及卸荷	40
4.2	危岩稳定性研究	48
4.3	冰水堆积体稳定性研究	61
4.4	泥石流危险性评价	74
4.5	崩坡积体稳定性研究	90
4.6	小结	94
第 5 章	水库库岸稳定性研究	96
5.1	库区分段及基本地质条件	96
5.2	岸坡结构特征	98
5.3	岸坡稳定性类型划分	99
5.4	水库塌岸与水库浸没	102
5.5	小结	105
第 6 章	坝址岩体质量及建基面选择研究	106
6.1	坝基岩体工程地质分类	106

6.2	坝基建基面地质选择研究	132
6.3	坝段工程地质条件及处理效果评价	140
6.4	小结	146
第7章	坝基变形及坝基稳定性研究	148
7.1	坝基地质条件及变形评价	148
7.2	坝基抗滑稳定性评价	148
7.3	小结	157
第8章	坝址区边坡稳定性研究	158
8.1	边坡稳定性评价方法	158
8.2	坝址区边坡岩体失稳模式研究	164
8.3	自然高边坡稳定性评价	165
8.4	坝肩工程边坡稳定性	170
8.5	缆机平台工程边坡稳定性	176
8.6	鱼道边坡稳定性	177
8.7	小结	183
第9章	坝基渗漏问题研究	185
9.1	坝基地质条件	185
9.2	坝基渗漏分析	185
9.3	坝基防渗处理及效果评价	188
9.4	F ₃ 断层区有限元渗流数值模型	189
9.5	F ₃ 断层渗透破坏机理研究	202
9.6	F ₃ 断层防渗处理措施及效果评价	207
9.7	小结	213
第10章	导流隧洞稳定性研究	215
10.1	导流隧洞基本地质条件	215
10.2	导流隧洞进口稳定性评价	218
10.3	导流隧洞出口稳定性评价	219
10.4	围岩质量分级及洞身稳定性评价	221
10.5	地质缺陷处理	227
10.6	导流隧洞加固效果评价	227
10.7	小结	229
第11章	结论	231
	参考文献	235

第1章 绪 论

青藏高原被誉为“世界屋脊”和“亚洲水塔”，水电资源储量丰富。青藏高原年均水资源总量超过 4500 亿 m^3 ，水能资源理论蕴藏量高达 3.78 亿 kW，约占全国总量的 40%，堪称世界级的水电“富矿”。这一庞大的资源潜力不仅代表着清洁能源发展的战略希望，更对我国实现“双碳”目标、优化能源结构具有不可替代的战略价值。然而，新生代以来持续的板块碰撞和强烈的构造活动，使得这一地区的水电工程建设面临世界级的技术挑战。

在工程地质特征方面，青藏高原表现出显著的“三高一厚”特征：高地应力、高地震烈度、高边坡卸荷、深厚覆盖层。这些特征直接导致了以下四大核心地质工程问题。

（1）深大断裂与区域构造稳定性问题。

青藏高原内部发育有雅鲁藏布江缝合带、班公湖-怒江缝合带等区域性深大断裂，这些断裂带在全新世的活动速率普遍达到 $5\sim 10\text{mm/a}$ 。地质统计表明，青藏高原区内 ≥ 6 级的强震主要沿这些断裂带分布，地震基本烈度普遍达到Ⅷ度以上。例如，在藏木水电站建设中，工程区发育的断层带宽达 35m，其活动性直接影响到工程抗震设计参数的确定。

（2）高地应力与岩爆问题。

受印度板块和欧亚板块挤压作用的影响，西藏地区地应力高，在埋深 300~500m 的地下洞室中，最大主应力值普遍达到 $25\sim 40\text{MPa}$ ，部分工程中甚至超过 50MPa。在这种高地应力环境下，脆性岩体表现出强烈的储能特性。例如，在叶巴滩水电站地下厂房开挖过程中，监测到的最大岩爆烈度达到Ⅲ级，岩爆区段占开挖总长度的 25%以上，严重影响了施工进度和安全。

（3）高陡边坡卸荷与变形破坏问题。

雅鲁藏布江干流河谷下切深度普遍超过 1000m，岸坡坡度多大于 45° ，形成了众多高达数百米的高陡边坡。工程勘察显示，这些边坡弱卸荷带深度通常达到 30~80m，局部甚至超过 100m。

（4）深厚覆盖层与坝基渗漏问题。

高原河谷中普遍分布有厚度不等的河床覆盖层，在某些工程中覆盖层厚度达到 80~120m。这些覆盖层结构复杂，渗透系数差异显著，某水电站坝基覆盖层的渗透系数测试值可达 $1\times 10^{-4}\sim 1\times 10^{-2}\text{cm/s}$ ，给防渗处理带来极大困难。

位于雅鲁藏布江中游的大古水电站（简称为 DG 水电站），正是在这一复杂地质背景下建设的典型工程，建设过程中遭遇的地质问题集中体现了青藏高原水电工程的共性挑战。DG 水电站工程场址区的工程地质条件极为复杂，构成了一项典型的、多因素耦合的工程地质系统课题，其核心挑战首先体现在坝基建基面的选择与处理上，深厚覆盖层和不良的基岩面条件对坝基的承载能力、沉降变形及抗滑稳定性提出了严峻挑战。枢纽区边坡，特别是由冰水堆积物等构成的岸坡，其稳定性问题直接制约着工程布局，并与广泛存在的塌岸问题共同构成了对施工及运行安全的持续威胁。在库区，泥石流问题尤为突出，大量松散固体物源易形成大规模泥石流，不仅淤积库容、影响电站效益，还可能瞬间壅高水位。此外，场址内构造发育，尤以水电站左岸断层为代表，断层的存在不仅破坏了岩体的完整性，更构成了潜在的集中渗漏通道，对绕坝渗漏和水库长期运营构成了直接风险。综上所述，从坝基到库区，从岸坡稳定到渗漏控制，这些相互关联、相互制约的地质问题共同决定了工程建设的难度与成本，要求必须在勘察、设计与施工全过程中采取系统性的应对策略。

DG 水电站的建设过程，系统性地解决了复杂地质条件下坝基深层抗滑稳定性、高陡边坡卸荷的变形控制，以及断层防渗处理等关键技术难题。这些关键技术难题的成功解决，不仅确保了 DG 水电站工程本身的安全建设，更为未来在类似地质环境下开发水电资源积累了宝贵经验。本书将围绕 DG 水电站面临的具体地质问题及其工程处治措施，展开系统性的论述与分析。

1.1 工程概况

DG 水电站是该区域水电规划河段 8 级开发方案中的第 2 级^[1, 2]。坝址区左岸有 S508 省道通过，水电站对外交通较便利。

大古水电站设计正常蓄水位为 3447m，相应库容为 0.5528 亿 m³，挡水坝为碾压混凝土重力坝，最大坝高为 117m^[3, 5-7, 15]。水电站采用右岸坝后式地面厂房，装机容量为 660MW，多年平均发电量为 32.045 亿 kW·h。水电站大坝是目前世界海拔最高的碾压混凝土大坝，是该地区大坝中坝体最高、发电水头和装机规模最大的水电工程，2014 年 3 月“三通一平”施工准备工程开工，2016 年 12 月大江截流，主体工程开工建设，2021 年 1 月底 1[#]导流隧洞下闸，2021 年 4 月下旬 2[#]导流隧洞下闸，2021 年 5 月首台机组发电，2022 年全面竣工投产。建成后，该项目为加快当地电力基础设施建设、促进当地经济高质量发展和社会长治久安提供了重要动能。

1.2 地质概况

1.2.1 区域地质

大古水电站工程区海拔高^[3, 5], 区域平均海拔在 4500m 以上, 峰顶面海拔多在 5000m 以上, 最高峰海拔达 7347m, 最低处在河流谷地, 海拔约为 3400m, 相对高差约为 3947m。地貌总体表现为高山深谷, 局部发育裂谷盆地。山体、水系走向受断裂制约, 以近东西向为主, 局部为北东向、北西向或近南北向。区域内发育三级夷平面, 其中 I 级夷平面 (或称山顶面) 海拔为 5700~6000m, 于古新世—中新世形成; II 级夷平面 (或称山原面) 海拔为 5300~5400m, 于上新世形成; III 级夷平面 (或称盆地地面) 海拔为 4500~5000m, 于早—中更新世形成。其中, II 级夷平面分布广, 但由于流水下切作用强烈, 常被水系分割。区域上最大的河流以南和以北地区在地势上呈现南高北低、向北倾斜的特点。受活动断裂控制, 区内发育系列断块山、断陷盆地、断裂谷地和断陷湖盆的断裂构造地貌。大古水电站所处的峡谷段, 长约 49km, 自然落差达 282m, 河道比降约为 5.75‰, 谷宽为 40~200m, 谷底高程约为 3400m, 谷坡陡峻, 河谷深切, 为典型的高山深切峡谷地貌。两岸冲沟较发育, 阶地不发育。

大古水电站位于青藏高原最大河流的中游河段^[1], 近场区内沉积岩、岩浆岩、变质岩三大岩类均有出露, 其中, 岩浆岩、变质岩相对发育, 沉积岩相对较少, 地层岩性复杂。

大古水电站靠近缝合带, 区域内断裂发育, 断裂走向主要为近东西向和近南北向, 次为北东向、北西西—北西向, 断裂性质、规模、活动时间、活动强度等具有明显差异。近东西向断裂一般规模较大, 有些具有深断裂性质, 多为逆冲、逆冲走滑断层, 最新活动时期多在第四纪早期、中期。北东向、北西西—北西向及近南北向的单条断裂规模一般不大, 其中, 北西西—北西向、近南北向断裂常集中分布, 构成了近南北向或北西西向的剪切拉张断裂构造带。

1.2.2 库区地质

DG 水电站库区地处青藏高原东南部, 属于典型的高山深切峡谷地貌。区内山脉总体呈近东西向展布, 受区域构造控制明显。地势总体西北高、东南低, 雅鲁藏布江干流自西向东强烈下切, 形成谷坡陡峻、河道狭窄的“V”形峡谷。两岸山体雄厚, 山顶海拔一般为 5400~6000m, 谷底海拔为 3360~3445m, 相对高差巨大, 一般达 2000~2500m, 地形切割极为强烈。河谷两岸阶地不发育, 冲沟

较发育,但规模一般较小。

库区主要出露地层为燕山晚期—喜马拉雅期早期侵入岩、新生界第四系。主要岩性为黑云母角闪石英二长闪长岩、黑云母花岗闪长岩等。

1.2.3 坝址区工程地质条件

DG 水电站的坝址区处于高山峡谷地带,两岸山体海拔均超过 5400m,地形陡峻,基岩大面积出露,自然坡度一般为 $30^{\circ}\sim 50^{\circ}$,局部发育陡崖,沿坡麓及冲沟口散布有堆积台地^[6, 7]。左岸发育有达古村古泥石流堆积台地,地形相对平缓。整体上,河谷横剖面呈不对称的“V”形,左岸岸坡相对右岸略缓。右岸岸坡更陡,整体可划分为上、中、下三段,中段多为高陡基岩陡崖。

坝址区岩性为喜马拉雅期黑云母花岗闪长岩($E_2\gamma$),呈深灰-灰白色,为细-中粒花岗结构,块状构造(以斜长石、钾长石、石英、黑云母为主,含少量磁铁矿、锆石)。局部发育黑云母角闪石英闪长岩条带(产状:走向为 $N60^{\circ}\sim 70^{\circ}E$,倾向为 SE,倾角为 $25^{\circ}\sim 35^{\circ}$,厚度为 0.5~3.0m)。第四系堆积物包括崩坡积层、冰水堆积物、泥石流堆积物等。

上坝址(最终选用坝址)基岩以弱风化岩体为主(局部见蚀变强风化岩体,无全风化岩体),按结构面、矿物变化、锤击等指标可将其划分为弱风化(分上下段岩体)、微风化岩体、新鲜岩体,以声波纵波波速及波速比为定量指标。风化程度受构造、地下水影响(断裂面及裂隙发育处风化程度强,地下水位变动区风化程度更强),具体埋深如下。

上坝址左岸弱风化上段为 0~42.0m,下段为 19.0~130.0m,微风化段为 67.0~150.0m;河床弱风化下段为 10.0~60.0m,微风化段为 48.0~90.0m;上坝址右岸弱风化上段为 0~28.3m,下段为 10.0~52.0m,微风化段为 48.0~120.0m。

下坝址左岸弱风化上段为 4.0~38.0m,下段为 13.0~79.0m,微风化段为 80.0~178.0m;河床弱风化下段为 10.0~41.0m,微风化段为 69.0~89.0m;下坝址右岸弱风化上段为 0~32.0m,下段为 21.0~85.0m,微风化段为 80.0~150.0m。综上所述,上坝址左岸的风化程度大于右岸,下坝址两岸风化程度相当。

坝址区因地壳抬升、河流下切,两岸陡峻,顺河向发育 NNW、NNE 向构造裂隙,后期应力调整形成岩体卸荷及松弛现象。卸荷带沿顺河向的 NNW 向、NNE 向,或与谷坡呈小角度夹角的裂隙、断层发育,分为以下两类。

(1) 强卸荷带的松弛带宽较大,裂隙张开度为 1~2cm(局部可达 5~10cm),充填碎石块、岩屑、树根,卸荷带两侧无明显变位;纵波波速为 1100~2000m/s,完整性系数(K_v)为 0.04~0.12。

(2) 弱卸荷带充填岩屑夹泥膜或无充填,周围轻度松弛,裂隙张开度为 1~

5mm, 延伸短; 岩体呈镶嵌状、次块状结构(少量块状); 纵波波速为 1700~3520m/s, $K_v=0.09\sim0.37$ 。

卸荷带主要分布于弱风化带, 具体分布情况如下。

上坝址左岸强卸荷带水平深度为 0~46.0m、垂直深度为 0~31.0m; 弱卸荷带水平深度为 50.0~106.0m、垂直深度为 5.0~64.0m。上坝址右岸强卸荷带水平深度为 0~30.0m、垂直深度为 0~10.0m; 弱卸荷带水平深度为 10.0~58.0m、垂直深度为 6.0~38.0m。

下坝址左岸强卸荷带水平深度为 0~26.0m、垂直深度为 0~22.0m; 弱卸荷带水平深度为 21.0~106.0m、垂直深度为 10.0~47.0m。下坝址右岸强卸荷带水平深度为 0~35.0m、垂直深度为 0~27.0m; 弱卸荷带水平深度为 11.0~56.0m、垂直深度为 11.0~46.0m。综上所述, 上坝址左岸卸荷程度大于右岸, 下坝址两岸卸荷强度相当。

1.3 关键工程地质问题

DG 水电站工程地质问题复杂, 主要涉及构造稳定性与地震活动性、不良地质体发育及危害性、库岸稳定性、坝址岩体质量及建基面选择、坝基变形及稳定性、坝址边坡稳定性、坝基渗漏、隧洞稳定性等核心方面。

(1) 构造稳定性与地震活动性。

DG 水电站区域构造及地震地质背景复杂, 新构造运动强烈(大面积整体性、间歇性抬升), 断裂与断块具有继承性和新生性活动^[4, 8, 23-28]。需开展区域地震构造分析、近场区断裂活动性鉴定、场址构造稳定性评价、设计地震动参数确定等工作, 为工程建设提供基础依据。

(2) 不良地质体发育及危害性。

DG 水电站工程区为高山峡谷地貌, 坝址附近发育高位危岩体、冰水堆积体及 9 条泥石流沟谷^[10, 11-13, 28-34]。泥石流活动性威胁枢纽区建筑物, 并可能造成水库淤积, 需查明高位危岩体、泥石流、冰水堆积物等发育特征, 评价其对工程冲击、对水库的淤积, 以及对工程设施的综合危害程度, 提出综合治理措施以保障长期稳定性。

(3) 库岸稳定性。

DG 水电站库区两侧沿河流不连续分布崩坡积体, 需结合地形地貌、地层岩性等细化岸坡结构, 评价天然及蓄水条件下库岸稳定性, 计算坍塌、淤积、浸没等参数并提出防护措施, 支撑水库建设与长期安全运营^[2, 3, 5-7, 9-10]。

(4) 坝址岩体质量及建基面选择。

DG 水电站坝址出露喜马拉雅期黑云母花岗闪长岩(中细粒花岗结构、块状构造),局部夹黑云母角闪石英闪长岩条带(裂隙或熔融接触),岩体结构复杂。坝址区两岸节理裂隙发育,地下水位及相对隔水层埋深大(左岸的地下水位为 0~94.8m,右岸的地下水位为 0~103.0m)。需建立岩体质量分类标准,结合物理力学性质、风化卸荷特征等优化建基面选择,保障工程安全与经济性。

(5) 坝基变形及稳定性。

DG 水电站坝基的地质缺陷主要为断层破碎带、碎裂岩体、蚀变带及结构面组合不利块体^[6-8, 15-22]。需确定潜在滑移面组合,计算抗滑稳定性系数,分析天然地基与加固地基稳定性,评价加固措施效果,为设计与施工提供参考。

(6) 坝址边坡稳定性。

DG 水电站工程区为高山峡谷地貌(坡度为 40°~50°,局部为陡崖),Ⅱ级结构面 5 条(压性、压扭性,宽度为 1~1.5m,充填碎块岩等),Ⅲ级结构面 33 条(含中倾坡外结构面),断层与节理密集,边坡稳定性问题突出。需系统研究工程地质条件,分析潜在问题,为工程设计、施工提供地质依据^[20-22]。

(7) 坝基渗漏。

DG 水电站左岸的地下水位为 0~94.8m(相对隔水层埋深为 16.8~85.7m),右岸地下水位为 0~103.0m(相对隔水层埋深为 15.0~97.0m),河床相对隔水层埋深为 17.7~50.0m,均低于正常蓄水位。 F_3 断层沿雅鲁藏布江分布,存在坝基及绕坝渗漏问题,需通过渗透性试验、防渗措施研究及渗漏验算,确保坝基稳定与水库效益^[5, 15, 20-22]。

(8) 隧洞稳定性。

导流隧洞(两条,城门洞型,衬砌后洞径为 15.0m×17.0m)布置于水电站左岸,上覆岩体最大厚度为 183m,洞身段为弱风化下段—微风化段的黑云母花岗闪长岩。主要发育 3 条Ⅱ级结构面(断层与洞轴线夹角小),断层带充填碎块岩、碎裂岩等。 F_1 、 F_2 、 F_5 断层岩体破碎,易掉块垮塌,陡倾角断层与缓倾角节理组合形成楔形体,威胁洞室局部稳定,需评价稳定性并提出加固措施^[6, 7, 16]。

第 2 章 区域构造稳定性与地震研究

2.1 区域地质构造背景

2.1.1 区域地球物理场及地壳结构特征

DG 水电站工程区所属大区域在 $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ 布格重力异常图上呈纺锤状封闭负异常区，青藏高原周边为明显重力梯级带，内部为相对平缓的高负异常区（异常值多在 $-500\text{mGal}^{\text{①}}$ 以下）。异常呈条带状东西延伸，纵贯全区，形成南北分带、东西分块格局，总趋势为东南高、西北低（东南角异常值最高为 -280mGal ，西北角异常值最低， $< -540\text{mGal}$ ）。乌龙—乃巴一线西北侧异常变化明显（等值线弯曲、局部密集），地震多发生于异常密集、拐弯及交汇处；水电站工程场处于异常从密集向宽缓过渡的区域内。

工程区大区域为地球地壳最厚的区域（厚度为正常地壳的两倍），内部地壳厚度多为 $50 \sim 70\text{km}$ （变化平缓），周边地壳变薄且急剧变化（常形成莫霍面陡变带）。地壳厚度总体呈东南向西北变厚的趋势：东南部地壳厚度变化均匀且幅度较陡（从 46km 增厚至 70km ）；断裂带以北增厚幅度趋缓（地壳厚度均 $> 74\text{km}$ ），其中，羊八井至当雄一带的地壳厚度相对略薄（呈延伸 76km 的北东向上隆带），带内两侧地壳厚度均达 78km 。DG 水电站场地处于区域地壳厚度超 70km 区，壳内存在高导层结构。

2.1.2 区域内主要断裂及其活动性

DG 水电站区域内断裂发育，主要为近东西向和近南北向，其次为北东向、北西西—北西向，断裂性质、规模、活动时间、活动强度等具有明显差异。近东西向断裂一般规模较大，有些具有深断裂性质，多为逆冲、逆冲走滑断层，最新活动时期多在第四纪早期、中期。北东向、北西西—北西向及近南北向的单条断裂规模一般不大，其中，北西西—北西向、近南北向断裂常集中分布，构成近南北向或北西西向的剪切拉张断裂构造带。在研究区中南部，自东向西可划分出 7 条较明

^① $1\text{Gal}=1\text{cm/s}^2$ 。

显的近南北向活动构造带，大致呈 175~220km 等间距排列^[11]。这些南北向的活动构造带自全新世以来活动十分明显，活动强度总体呈现东强西弱，北强南弱的趋势。区内展布有当雄和桑日-错那两条南北向活动构造带，前者规模最大、活动最强，是本区域大震的发震构造带。区域主要活动断裂及特征列于表 2.1 中。

表 2.1 区域主要活动断裂及特征一览表

编号	断裂名称		区内长度/km	产状			断裂性质	区内最新活动时代	区内地震活动	距坝址距离/km
				走向	倾向	倾角/(°)				
F ₁	纳木错东南岸断裂		68	NE-NNE	NW	—	正断	Q ₄	—	217
F ₂	当雄断裂带	念青唐古拉山南东麓断裂	215	NE-近 SN	E	35~50	NE 向段：左旋正断；近 SN 向段：右旋正断	Q ₄	1411 年 8.0 级	180
F ₃		当雄-羊八井盆地东南缘断裂	175	NE-NNE	W	—	左旋正断（南段）	Q ₄ （南段）	1987 年 5.2 级	168
F ₄	九子拉-藏比断裂		65	近 EW	S	—	逆冲	Q ₄ （西段）	1952 年 7.5 级	162
F ₅	嘉黎断裂		83	NWW	SW	—	右旋走滑	Q ₄	—	167
F ₆	墨竹工卡断裂带	羊八井-直孔断裂	257	近 EW	N	—	逆冲	Q ₁₋₂	1951 年 5.8 级	75
F ₇		麦隆岗断裂	245	近 EW	N	—	逆冲	Q ₁₋₂	1968 年 5.2 级	58
F ₈		墨竹工卡断裂	180	近 EW	N	—	逆冲断层	Q ₁₋₂	—	57
F ₉	玉帮子-坝乡脆韧性断裂		138	近 EW	N	50	右旋走滑兼倾滑	前 Q	—	30
F ₁₀	沃卡韧性剪切带		280	近 EW	N	60~70	左旋走滑兼倾滑	前 Q	—	16
F ₁₁	雅鲁藏布江断裂带	达吉翁-彭错林-朗县断裂	375	近 EW	N（南支）；S（北支）	65~80	逆冲	Q ₃	—	8
F ₁₂		曲松-折木朗脆韧性剪切带	195	近 EW	S	33~55	逆冲	Q ₃	—	24
F ₁₃		扎达-拉孜-玛多江断裂	380	近 EW	N	70	逆冲	Q ₁₋₂	—	48
F ₁₄	张达-直武断裂		167	NW	NE	—	逆冲	Q ₁₋₂	—	—
F ₁₅	格加-松巴断裂		285	NW	NE	—	逆冲	Q ₁₋₂	—	—
F ₁₆	洛扎断裂		265	近 EW	N	—	逆冲	Q ₃	1806 年 7.5 级	118

续表

编号	断裂名称		区内长度/km	产状			断裂性质	区内最新活动时代	区内地震活动	距坝址距离/km
				走向	倾向	倾角/(°)				
F ₁₇	墨脱断裂		53	NEE	NW	—	逆冲	Q ₄	—	147
F ₁₈	定日-岗巴断裂		395	EW	N	30~50	逆冲	Q ₄	—	—
F ₁₉	桑日-错那断裂带	哲古错断裂	160	NNW	SE	—	正断	Q ₄	—	20
F ₂₀		沃卡-错那断裂	210	NNE	SE	—	正断	Q ₄	1915 年 7.0 级	13
F ₂₁		青山断裂	160	NNE	E	—	正断	Q ₄	—	—

1. 近东西向断裂

(1) 九子拉-藏比断裂 (F₄)。

该断裂西起拉曲附近，向东经九子拉、当雄盆地至雄曲一带，与嘉黎断裂相接，全长 135km，区域内长约 65km，为近东西向南倾逆断层。桑曲以西段第四纪活动明显，卫星影像清晰，断错地貌发育。朗果以西可见山脊与冲沟发育左旋位移，位移累积量为 30~50m。冲沟的形成时代约为 1 万年，推算左旋走滑速率约为 4mm/a。

(2) 墨竹工卡断裂带 (F₆~F₈)。

该断裂带西起羊八井，东至工布江达以西，走向为近东西—北西西向，全长约为 250km，由 3 条北倾逆断裂组成，宽度为 20~30km，属于块体内部断裂构造带。该断裂带形成于墨竹工卡复向斜挤压背景，断裂穿过河谷处未见阶地变形，指示第四纪晚期无近地表活动。历史地震的震级仅为 5 级左右，与构造活动关联较弱。

2. 北东向、近南北向断裂

(1) 纳木错东南岸断裂 (F₁)。

为纳木错断陷盆地东南岸的主边界断裂，全长约 160km，区域内长度为 68km 左右。总体走向为 N50°~55°E，向南偏转为 N30°E 左右，倾向为北西向。该断裂控制着纳木错断陷盆地和纳木错现代湖盆的形成和发育，在卫星影像上有清晰显示，断层地貌表现明显，多处冲沟、河流发生左旋扭曲^[25]，为一条全新世活动的左旋正断层。

(2) 当雄断裂带 (F_2 、 F_3)。

该断裂带全长约为 650km, 是区域中南部一条规模巨大、活动强烈的地质与地震构造带, 由多条断裂及其控制的第四纪断陷盆地组成。当雄断裂带中段还控制了区域内早期花岗岩分布和火山熔岩喷发, 地热活动强烈。

(3) 桑日-错那断裂带 ($F_{19} \sim F_{21}$)。

桑日-错那断裂带(或称沃卡-错那裂谷带)是区域内一系列近南北向裂谷带中最东侧的一条。该裂谷带是由 3 个相互独立、断续分布的近南北向半地堑式和地堑式断陷盆地构成, 从北到南分别是沃卡地堑、邛多江地堑和错那-拿日雍错地堑。上述地堑无一例外地横切了古近纪一新近纪和更老的近东西向构造带或逆冲断裂带, 并在盆地中堆积了厚度不等的第四纪松散堆积物, 这表明它们是区域上最新一期构造变形的遗迹。受研究条件限制, 仅对沃卡地堑两侧的控盆断裂有过调查与研究。

3. 北西向断裂——嘉黎断裂 (F_5)

嘉黎断裂位于 DG 水电站区域北部, 是喀喇昆仑-嘉黎剪切带最东端的断裂。卫星影像显示其沿易贡藏布和帕隆藏布河谷展布, 呈近东西向、向北凸出的弧形, 全长约为 500km, 具有强烈右旋走滑活动。该断裂控制着中生代地层与早期侵入岩的分布。

嘉黎断裂带由多条斜列次级断层组成, 西北起自那曲东南, 经桑德、阿扎等地延伸, 整体呈分段特征: 北西段走向为 $N30^\circ E$, 由 3 条右阶断层组成; 西段走向为 $N40^\circ E$; 中段走向约 $N30^\circ E$, 含两条近平行断层; 东段呈弧形。断裂右旋走滑形成断头沟和孤丘, 总错动量约为 5km。捉弄孔玛盆地中可见更新世砾石层, 与羌塘组对比^[27], 推算出更新世以来平均滑动速率约为 4mm/a。综上所述, 嘉黎断裂带第四纪活动较强, 错断了晚更新世晚期以来的阶地堆积和现代河床, 走滑活动速率可达 15mm/a。

2.1.3 近场区主要断裂及其活动性

近场区内以近东西向断裂为主, 并发育近南北走向的、第四纪活动明显的地堑式断陷盆地, 构造活动明显(表 2.2)。

(1) 玉帮子-坝乡脆韧性断裂 (F_9)。

该断裂分布于研究区北部, 近东西走向, 倾向为 N, 倾角为 50° 左右, 具有逆冲断层性质, 区内长度约 138km。断层沿线为一系列沟谷、垭口等地形。破碎带宽约 20m, 带内发育早期韧性片麻状构造岩, 常见愈合型断层角砾岩, 并发育