

青藏高原及其周边地区水电工程建设中的地质挑战^{*}

袁建新 易志坚 王寿宇

(水电水利规划设计总院 北京 100120)

摘要 青藏高原及其周边赋存着丰富的水力资源,尚存巨大的水电开发空间。青藏高原独特的地形、地质、地震、气候等特点,决定了在该地区进行水电工程建设将面临一系列工程地质挑战,只有创新勘探研究方法,超前研究相关重大工程地质问题,充分认识复杂的地质条件,采取积极、谨慎、踏实的工作态度,采用适度的工程规模、科学的规划选址、恰当的开发方式、适宜的坝型和枢纽布置、有效的风险管控等措施,可有效规避地质风险和地质灾害威胁,在地质条件极其复杂的区域安全地开发水电资源是可能的。

关键词 青藏高原 水力资源 水电工程 地质挑战

中图分类号:P642 文献标识码:A

GEOLOGICAL CHALLENGES IN CONSTRUCTION OF HYDROPOWER PROJECTS IN QINGHAI-TIBET PLATEAU AND ITS SURROUNDING AREAS

YUAN Jianxin YI Zhijian WANG Shouyu

(China Renewable Energy Engineering Institute, Beijing 100120)

Abstract Abundant water resources stores in the Qinghai-Tibet Plateau and its vicinity, which has huge hydropower development space. The unique topography, geological conditions, earthquake and climate of the Qinghai-Tibet Plateau decide that the hydropower project construction in this area will face a series of engineering geological challenges. So we have to innovate the exploration research methods, study the giant engineering geological problems in advance, fully understand the complex geological conditions, take a positive, prudent, practical work attitude, adopt appropriate engineering scale, scientific planning, appropriate exploit manner, proper dam type and pivot arrangement and effective risk control and other measures. We can effectively avoid the geological risk and hazard. It is possible to safely develop hydropower resources in the region with extremely complex geological conditions.

Key words Qinghai-Tibet Plateau, Waterpower resources, Hydropower project, Geological challenge

1 青藏高原及其周边的水电资源概况

青藏高原平均海拔 4000~5000m,有“世界屋

脊”和“第三极”之称。其西起帕米尔高原,东至横断山脉,横跨 31 个经度,东西长约 2945km;南自喜马拉雅山脉南缘,北起昆仑山-祁连山北侧,纵贯约 13 个纬度,南北宽达 1532km,总面积近 300 ×

* 收稿日期: 2016-08-17; 收到修改稿日期: 2016-08-22.

第一作者简介: 袁建新(1962-),男,硕士,教授级高级工程师,长期从事水电工程地质勘察与管理工作. Email: yjx@creei.cn

10^4km^2 , 中国境内面积 $257 \times 10^4\text{km}^2$ (张丁玲, 2013)。青藏高原在中国行政区划上, 涉及西藏、青海、云南、四川、甘肃和新疆等 6 省(区)。境外涉及缅甸、孟加拉国、印度、尼泊尔、不丹、巴基斯坦、阿富汗等国家。

青藏高原向北、东, 向南越过喜马拉雅山地势急剧下降, 成为亚洲众多大江大河的发源地, 如长江、黄河、澜沧江-湄公河、怒江-萨尔温江、雅鲁藏布江-布拉马普特拉河-恒河和森格藏布-印度河等。藏南、羌塘、柴达木盆地、祁连山和南疆等内陆水系也都发源于此(关志华等, 1984; 刘天仇等, 1999), 有“亚洲大陆的水塔”之称。巨大地势落差使丰富的水资源同时成为非常富集的水力资源。

1.1 中国水力资源概况

我国的水力资源丰富, 总量居世界第一。根据最新统计, 我国水力资源可开发装机容量约 6.6 亿千瓦, 年发电量约 3 万亿千瓦时, 按利用 100a 计算, 相当于 1000 亿吨标煤, 在能源资源剩余可开采总量中仅次于煤炭。截至 2015 年底, 全国水电开发程度按照装机容量计算约为 40%, 按照发电量计算约为 35%。

我国水电资源分布广泛, 按照国家可再生能源中长期发展规划, 水电装机规模到 2020 年达到 3 亿千瓦, 技术开发程度达到 56%(李菊根等, 2006; 樊启祥等, 2010)。水电开发程度在地区间差异也很大, 东部地区水电基本开发完毕, 中部地区开发程度达到 73%, 西南地区仅 17%, 可供开发的水能资源比较丰富。

我国的水力资源区域分布不均, 东部地区(13 个省、市)拥有的水电资源占全国总量的 8%, 中部地区(6 个省)占 11%, 而西部地区(12 个省、市、自治区)高达 81%, 并且主要富集在金沙江、澜沧江、雅鲁藏布江、大渡河、怒江、黄河、红水河、乌江以及西藏的雅鲁藏布江, 其可开发容量约 2.8 亿千瓦, 其总装机容量约占全国技术可开发量的 50%(钱正英等, 2001; 王民浩等, 2006; 钱钢粮等, 2008), 易于开发建设成大型水电能源基地。根据国家水电战略规划和全面实施西电东送规划, 当前开发重点集中在

青藏高原内的金沙江、雅鲁藏布江、大渡河、澜沧江、黄河上游等, 流域内工程地质条件复杂, 存在重大的工程地质问题, 水电开发技术要求高且施工难度大。

1.2 中国水力资源开发情况

截至 2015 年底, 全国水电总装机容量达到 31937 万千瓦, 其中大中型水电 22166 万千瓦, 小水电 7500 万千瓦, 抽水蓄能电站 2271 万千瓦, 水电装机占全国发电总装机容量的 21.2%。2015 年全国水电发电量约 1.1 万亿千瓦时, 占全国发电量的 19.9%, 在非化石能源中的比重达 73.9%。东部地区水电基本开发完毕, 中部地区开发程度达到 73%, 西南地区仅 17%, 主要集中在青藏高原及周边的大江大河上, 这是中国水电未来开发的主战场。

1.3 周边其他国家水力资源概况

在青藏高原及其周边, 不仅在中国境内待开发的水电资源极为富集, 且境外国家的水电资源也十分丰富。据我们不完全统计, 周边其他国家如印度、缅甸、巴基斯坦、尼泊尔及其他南亚国家技术可开发装机容量达 3.07 亿千瓦(表 1)。

从技术可开发容量角度分析, 在青藏高原及其周边, 中国尚有 3.41 亿千瓦, 其他国家 3.07 亿千瓦, 合计约有 6 亿千瓦以上的容量待开发, 开发的潜力仍然巨大。

2 地形地质及气候等自然地理特征

2.1 高原整体隆升, 平均海拔高

由于印度板块与欧亚板块持续相撞导致该地区在约 3Ma 内逐渐隆起, 形成了巨大的高原。自第三纪以来一直强烈隆升, 造就了世界上最高、最宏伟, 也是最年轻的隆起带。从上新世末至今, 其上升平均幅度为 3500 ~ 4000m。目前的平均海拔达到 4000 ~ 5000m。

2.2 山脉纵横, 地形差异大

李四光先生在讨论中国自然区划时将青藏高原概括为由昆仑山脉、横断山脉和喜马拉雅山脉所围

表 1 青藏高原周边其他南亚国家的水电技术可开发量汇总

Table 1 Summary of hydropower technology development in other South Asian countries around the Qinghai-Tibet Plateau

国别	印度	缅甸	巴基斯坦	尼泊尔	越南	老挝	泰国	柬埔寨	合计
技术可开发装机容量/ $\times 10^4\text{kW}$	8400	5400	5200	4300	2900	2700	900	900	30700

绕的梨形大高原(Garzanti, et al. 1987; 傅爱民等, 1989)。青藏高原总体地形为西北高、东南低。主要大山为东西或近东西走向,由北向南依次排列的阿尔金山脉、祁连山脉、昆仑山脉、喀喇昆仑山脉、唐古拉山、冈底斯山脉、念青唐古拉山脉、喜马拉雅山以及北西—南东或南北纵列走向的横断山脉。这些高大山脉构成了高原地形的骨架,高原地形结构的区域性差异明显,其腹地藏北地区为高原面保存较完整的典型高原,藏南雅鲁藏布江中游流域为山原宽谷地形,青海柴达木为盆地,川西滇北的横断山区则为强烈切割、高差悬殊的高山峡谷地形。

2.3 地震频发,活动断层发育

青藏高原由北向南主要分布 6 个构造带即祁连—柴达木、昆仑、巴颜喀拉、羌塘—昌都、冈底斯和喜马拉雅等。各构造带之间为蛇绿混杂岩所代表的缝合带隔开,5 条缝合带分别是印度河—雅鲁藏布江缝合带、班公错—怒江缝合带、西金乌兰湖—金沙江缝合带、昆仑南缘缝合带和西昆仑—阿尔金—祁连山缝合带。缝合带多为强烈变形带,带内分布多条大规模活动断裂。金沙江断裂、怒江断裂、雅鲁藏布江断裂和澜沧江断裂等沿江分布,具有不同程度的活动性,而鲜水河断裂、龙门山断裂带、小江断裂带、昆仑山断裂带和祁连山断裂带虽不沿河流分布,但活动性较强,规模较大。在喜马拉雅山南麓亦发育一系列逆冲断层,如主边界断裂、主中央断裂、前缘断裂等。这些大型的活动断裂成为该地区强烈地震重要的发震断裂(邓起东等, 2014)。

青藏高原处于喜马拉雅—地中海地震带上,具有震级大、频度高、分布广、震源浅等特点,是中国及世界主要的地震区之一。21 世纪以来的 2005 年巴控克什米尔 7.8 地震、2008 年汶川 8.0 级地震、2015 年尼泊尔 8.1 级地震均带来巨大的生命和财产损失。

2.4 河流密布,地形切割强烈

青藏高原南部及东部边缘地区河网密集,有属于印度洋水系的雅鲁藏布江、怒江、印度河、伊洛瓦底江及属于太平洋水系的长江、黄河与澜沧江等大江大河的上游段。高原内丰富的冰雪融水和高原周边河流巨大落差为河流溯源侵蚀、侧蚀提供了条件和能量,河流侵蚀切割强烈,河谷深邃险峻,多呈“V”型,两岸岸坡坡度一般大于 40°,自然边坡的高度一般大于 500m,有时高达上千米甚至千米以上。

高原内部河网稀疏,河谷宽缓,季节性河流居多。

2.5 地貌发育青壮年期,地质灾害频发

由于高原的快速隆升,使得该地区 5000m 以上的高山雪山连绵,冰川广布。高原高寒,冻土普遍,冰缘地貌发育,冻融作用显著。冰川、河流等外动力地质作用强烈,河谷的快速下切,致使滑坡、崩塌、泥石流在高原周边地区极其发育,成为大型、巨型地质灾害的频发地区,给人类生存和基础设施建设带来巨大威胁。

2.6 气候变化多端,高寒温湿交替

青藏高原主体的气候特征是大气干燥,太阳辐射强烈;平均气温低,日温差大,年变化小;空气含氧量低,降水稀少,动植物生存困难等。同时由于喜马拉雅山脉阻挡了南方温暖潮湿空气的北进,使喜马拉雅山南麓的南亚地区气候温润,降雨丰沛,多年平均降雨量可达 4000~5000mm,是造成南亚雨季的一个重要因素。气候条件的多样性和复杂性,给人类生存和工程建设带来巨大的困难。

3 水电工程建设面临的挑战与应对策略

青藏高原及其周边地域辽阔,河流水量丰沛、河段落差集中、水能资源蕴藏量大且可开发量大,地形地质条件适中、水库淹没损失小、移民少,社会效益和发电效益显著等优点,是全国水电开发条件优越的“富矿区”。但是,在这样一个地震地质背景极为复杂、新构造快速抬升、剥蚀运动剧烈的地区进行水电开发,面临一系列工程地质挑战。水电工程涉及的专业面广,技术含量高,投资巨大,涉及社会和公众安全利益大,特别是大型水库的电站,其影响范围较大,一旦出事后果不堪设想(潘家铮, 2010)。如何应对挑战,做到安全可靠、技术先进和经济合理,寻求有效的化解工程风险的途径一直是水电工程人需要思考的重要问题。在响应西部大开发、加快转变经济发展方式、调整能源结构和倡导低碳环保、绿色发展行动计划等国家宏观政策下,发展青藏高原水电迫在眉睫,也意义重大。

3.1 工程选址的挑战

坝址选择是涉及水电工程本质安全的重大课题之一,同时直接影响到工程开发难度和工程投资及效益。因此对坝址的研究是水电开发前期工作中最

重要、最慎重的工作。水电工程的工程选址通常遵循以下步骤:在河流规划阶段选择可开发的河段,在预可行性研究阶段选择代表性坝址,在可行性研究阶段最终确定坝址并进行枢纽建筑物设计。在这个选址过程中,工程地质主要从活动性断裂分布、强烈地震作用、地质灾害影响等3个方面进行研究,寻找减少风险的对策(袁建新等,2009)。

3.1.1 活动断裂对选址的影响

活动性断层的活动往往伴随着巨大的能量释放,导致地表产生破裂,而这种破裂产生的位移远远超过建筑物可承受的变形范围(表2),对于大型水电工程,特别对大坝等挡水建筑物是不可接受的。青藏高原区在特提斯阶段经历的几次构造运动及白垩纪-始新世陆陆碰撞、渐新世-中新世形成高原雏形和上新世以来高原快速隆升(张长华等,1990;朱弟成等,2002),青藏高原内区域性断裂、褶皱等构造发育,规模较大,活动性一般较强,地震地质背景复杂,且活动断层的分布往往对大型水电工程的选址有重大的制约作用(图1)。

因此水电水利工程坝址选择的一个重要原则,就是要避开活动断层的直接影响,甚至是区域性的断裂也应该尽量避开。2008年5·12汶川地震震后调查表明,在震灾区分布的大中型水电工程在选址过程中均避开了活动断层及与之有构造联系的分支断层,水电站坝(闸)址、厂址均未遭受到活动断

层同震位错而造成的直接破坏,即便场址距发震断层只有2km也是如此,上述选址原则在工程抗震安全中发挥了关键性作用。最新颁布的中华人民共和国能源行业标准《水电工程防震抗震设计规范》(NB36057-2015)作出了非常明确的规定“枢纽主要建筑物不应修建在活动断层或能动断层上”,提出了比之前更为严格的要求。

青藏高原构造带内区域性活断裂活动性强,规模大,地震烈度高,水电工程选址要对构造稳定性和断裂的活动性进行全面的分析和勘察,为坝址的选择提供坚实的地质依据。

引水发电建筑物的洞线,在遭遇活断层的影响时,一般不会产生重大次生灾害,仅影响到电站本身的运行,因此在进行可靠的论证和抗震设计后,可以部分穿越活动断层。

3.1.2 强烈地震动对选址的影响

强烈地震动不仅对建筑物的安全构成直接威胁,且可能对工程造价带来重要的影响。每次强烈地震后,我们所能看到的多是房倒屋塌、桥梁断裂、交通中断等惨烈场面,听到的是灾后重建加固建筑物的呼声。强烈地震动对水电工程枢纽建筑物的影响一直是国内外地震地质学者、大坝工程师们非常关注并重点研究的问题。因为强烈地震毕竟是罕有的概率事件,重大水电工程接受地震、特别是强烈地震考验的机会很少,这方面积累的经验在全球范围

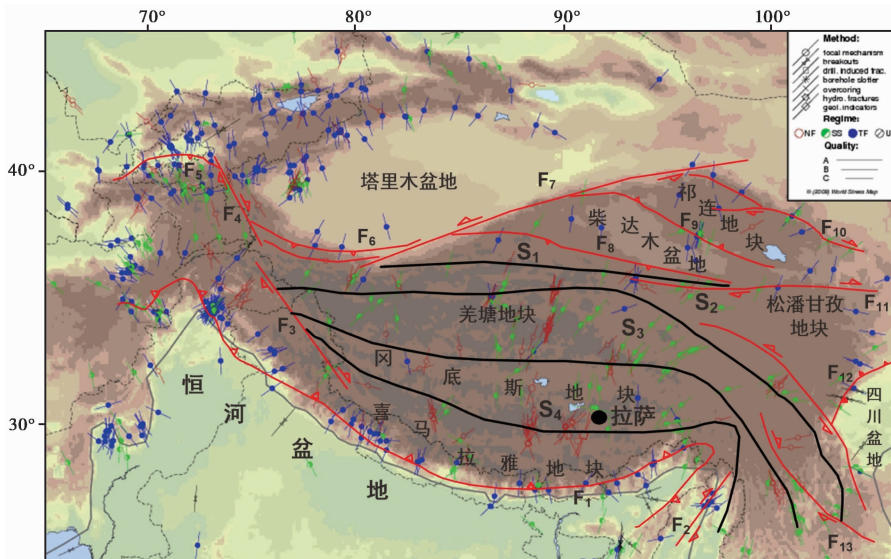


图1 青藏高原中国境内主要区域性断裂分布图

Fig. 1 The distribution map of the major regional faults in the Chinese Qinghai-Tibet Plateau

- F₁. 主边缘逆冲断层; F₂. Sagaing-Mingun 走滑断层; F₃. 喀喇昆仑走滑断层; F₄. 西昆仑走滑断层; F₅. 帕米尔逆冲断层;
 F₆. 西昆仑北缘逆冲断层; F₇. 阿尔金山走滑断层; F₈. 柴南缘逆冲断层; F₉. 柴北缘逆冲断层; F₁₀. 祁连山逆冲断层;
 F₁₁. 东昆仑走滑断层; F₁₂. 龙门山逆冲断层; F₁₃. 鲜水河-红河走滑断层

表 2 几个典型地震造成的地表破裂量值

Table 2 Ground surface rupture value caused by several typical earthquakes

时间	事件	地震断层破裂长度/km	水平位移/m	垂直位移/m	备注
1920年12月16日	海原8.5级地震	230	5	1	
1975年2月4日	海城7.3级地震	5.5			可识别的破裂长度,无位移资料
1976年7月28日	唐山7.8级地震	8	1.53	0.7	可识别的破裂长度
2001年11月14日	昆仑山8.1级地震	426	6.4(平均2.7)		
2005年10月8日	巴控克什米尔7.6级地震	大于100	20~50	小于10(3.3)	资料来源不同
2008年5月12日	汶川8.0级地震	220	10	6	
2010年4月14日	玉树7.1级地震	31	1.8		走滑位移量

内都不多。汶川地震对人类而言是一场巨大的灾难,但对水电工程建筑物而言却是一次难得的检验建筑物安全的机遇。地震灾区4座典型的坝高超过100m的高坝工程在地震中实际影响烈度超过原设计烈度I~II度,经受了超强地震的考验(表3)。这4座工程的大坝均没有形成灾难性破坏和次生灾害,局部破损在震后很快修复并在抗震救灾中发挥了巨大作用。这充分说明水电站大坝这种以抵御水平荷载为主的建筑物,有着超强的抵御强地震动的能力,具有足够的安全可靠性和良好的抗震性能。因此合理选址避开活断层的直接影响,通过加强抗震设计,强震区可以建设高坝大库工程,强烈地震问题不应成为西南地区高坝建设的制约因素。

3.1.3 地质灾害对选址的影响

青藏高原及其周边地区河流深切,两岸边坡高陡,地质构造复杂,岩体风化卸荷强烈,滑坡、崩塌、泥石流等现存和潜在的地质灾害体规模巨大,分布普遍,稍有不慎,将会给工程带来重大安全威胁和巨大的经济损失。

坝址区地质灾害的发育程度、发育规模和稳定性直接影响工程的安全和坝址的成立。意大利著名的瓦伊昂拱坝坝高262m,建成蓄水后坝前岸坡整体失稳引起库水翻坝,漫顶浪高150m,库水下泄造成近2000人死亡,大坝完好无恙,而水库工程报废。这是一个未考虑地质灾害影响,选址错误而工程失

败的典型案列。

近年来在我国西南河流的工程选址中,地质灾害影响坝址选择的工程日益增加。如雅砻江中游的卡拉水电站、楞古水电站的选址都遭遇到地质灾害潜在威胁的困扰。卡拉电站所在的约30km选坝河段内,发育了一系列大型、特大型甚至巨型滑坡体、崩塌堆积体,其稳定程度成为工程选址的控制性因素。经过慎重的勘探研究并进行了风险评估,为安全考虑,最终选择了最上游的坝址,将多数可能带来潜在危险的地质灾害点置于大坝的下游,该河段也放弃了20多米水头没有加以利用。楞古电站所在的河段是历史上著名的唐古栋滑坡所在的区域,从力丘河口—蒙古山河段全长13.5km的河段内物理地质作用强烈,岸坡稳定问题十分突出,河段左、右岸发育一系列堆积体、滑坡体、变形体、崩塌体,体积高达数亿立方米。这些潜在不稳定岸坡对该河段坝址选择、枢纽建筑物布置、工程施工以及雅砻江中、下游工程安全均具有重大影响。经过综合权衡利弊,最终还是放弃了坝址岩性单一、覆盖层薄、大坝虽高但引水线路短、潜在风险比较大的相对比较经济的下坝址方案,而选择了岩性复杂、覆盖层较深、坝高较低但引水线路较长、潜在风险相对较小的上坝址方案。

汶川地震后的震损调查表明,滑坡、崩塌、泥石流等地震次生地质灾害对水电工程的破坏远大于地

表 3 “5·12”汶川地震灾区4座典型高坝设计烈度与实际影响烈度对比

Table 3 Contrast on design seismic intensity and actual influence seismic intensity caused by “5·12” Wenchuan earthquake about 4 typical high dams

工程名称	坝型	坝高/m	原设计烈度	震中距/km	断层距/km	实际影响烈度
紫坪铺	钢筋混凝土面板堆石坝	156	8	17	5-8	IX~X
沙牌	碾压混凝土拱坝	130	7	36	29	VIII
碧口	黏土心墙堆石坝	101.8	7.5	260	16	IX
宝珠寺	混凝土重力坝	132	7	269	22	VIII

根据汶川地震后水电工程震损调查有关资料整理

震动的破坏作用,是水电工程建筑物、设施设备损坏的主要原因。因此在水电工程选址时,对地质灾害要坚持“选址避让,加强治理,应急管理”的原则,即选址中避开潜在的巨型、大型地质灾害体的直接影响;避不开的中、小型地质灾害体,要进行彻底的治理;考虑到地质灾害的不确定因素多,还要对枢纽区外围自然边坡采取必要的防护措施和采取应急预案等“软措施”进行灾害管理,方可将地质灾害对工程的不利影响降到最低(彭土标,2011)。

3.2 建筑物选型中的地质考虑

3.2.1 坝型选择中的地质考虑

坝型选择是水电枢纽工程设计的重要决策项目,不同的坝型对地质条件的适应性不同。坝型选择是否恰当对工程的安全、经济及施工、运行等均有很大的影响。虽然坝型选择需要考虑许多影响因素,但坝址区地形地质条件、天然建筑材料等仍是坝型选择中最重要因素。

混凝土坝的优点是结构受力明确,设计方法成熟,工程量小,便于将挡水和泄水建筑物集中布置,综合经济性较好。但其对地基要求高,需要选择承载能力高、均一性强、抗渗条件好的Ⅱ、Ⅲ类岩体作为坝基的主要持力层;坝基、坝肩不应存在大规模的缓倾的软弱结构面或结构面组合成的可能滑动的岩体,以避免深层滑动和坝肩滑动问题;混凝土坝一般采用坝身泄洪,下游消能雾化区的岩体抗冲能力要强,边坡稳定性要好;坝址经济运距内应有满足储量和质量要求的混凝土骨料料源等等。要同时满足上述要求,建造高混凝土坝才成为可能。尤其是混凝土拱坝,由于受力集中,对坝基、坝肩的要求更高。因此混凝土坝的地基勘探与试验研究工作量一般比较大,研究的问题多,需要更为精细的评价。

堆石坝主要是采用土、石等当地材料建造,坝体具有一定的柔性,适应变形的能力强,具有就地取材、对地基要求低、坝肩开挖少、适应性广等优点,但其最大的问题是填筑工程量大、坝身不能泄洪,需要较高的施工强度,并找到合适泄洪建筑物与之相匹配。从一般概念而言,青藏高原及其周边地区,地形陡峻,河流深切,交通运输困难,地质构造复杂,边坡高陡,岩体风化卸荷深度大、程度高,不良物理地质现象发育,有些河段河床发育深厚覆盖层,土石坝对复杂地质条件的适应性和经济性更好。

坝型选择必须统筹考虑工程区地形地质条件、水文泥沙、天然建筑材料、施工组织设计、运行管理

条件、抗震设防要求等各种影响因素和各种坝的适用特点以及整个枢纽布置相结合,在震烈度高的地区尽量选择像混凝土拱坝、混凝土重力坝;在覆盖层深厚、岩体风化卸荷强烈和边坡稳定较突出的河段选择当地材料坝和面板堆石坝有较好的适应性;在河道宽阔、低水头和径流量大河段布置闸坝能够较好的利用水能资源。总之,坝型选择必须因地制宜,要对地形地质条件等作出全面的分析和评价,权衡利弊,要选择与坝址地质条件适宜性最强、经济最合理、安全可靠的坝型。

3.2.2 厂房选择中的地质考虑

青藏高原及其周边地区拟建的电站坝址区大多数河谷狭窄、地震烈度高、地质灾害威胁大。为有效解决地形狭小布置困难,以及规避地震及地质灾害风险考虑,选用地下厂房布置是一种趋势,也是一种必然。国内近几年已建或在建的大型水电工程,如锦屏一级、锦屏二级、二滩、两河口、小湾、糯扎渡、溪洛渡、乌东德、白鹤滩、大岗山、瀑布沟、双江口、龙滩等水电站均采用地下厂房布置形式,即便像三峡、向家坝等水电站,在宽阔河谷地区布置也部分采用地下厂房的形式。选择地下厂房在防震抗震和抵御地质灾害风险方面有明显的优势,地下厂房直接避开了滑坡、崩塌等不良地质体的影响,在高地震烈度地质灾害发育区优势尤为明显。

据研究,地下工程的地震动反应只相当于地面工程的一半左右,在强烈地震区,地下工程有着更高的抗震安全性;地下洞室深埋于地下,只要做好洞口的防护,外部地质灾害难以对其构成威胁。当然,由于水电工程都是洞室群布置方式,洞室断面尺寸较大,对围岩稳定和施工期的安全要求高,做好地下洞室的基础地质工作,对勘探成果进行归纳分析,针对围岩类别选择相应的支护处理方式。

3.2.3 泄水建筑物选择的地质考虑

泄水建筑物是水电站枢纽工程保证安全运行的重要组成部分,对于混凝土坝而言,主要的泄水建筑物通常与挡水建筑物大坝结合布置,对于高水头、窄河谷、大流量的混凝土坝,一般可在坝身采用表孔、中孔或深孔联合泄流、消能。带来的问题是需要泄流冲刷区具有较强的抗冲能力和较高的边坡稳定条件,以消减消能和泄洪雾化对坝基、边坡造成的破坏,进而危及大坝安全。

而对于当地材料坝,泄洪建筑物必须与挡水建筑物分开布置。大江大河上的洪水均比较大,泄洪建筑物必须具有足够的泄流能力,才能确保大坝的

安全。对于洪水规模大的工程,通常选用超泄能力强的开敞式溢洪道。如果地形条件合适,即便布置规模巨大的溢洪道,也不会形成高陡的边坡。如澜沧江糯拉渡水电站的溢洪道布置,利用左岸与坝顶近高的宽缓平台,布置了总泄流能力达到 $30000\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ 的溢洪道,由沙泥岩构成的泄槽边坡高度仅在100多米,稳定问题易解决。溢洪道出口为了消能的需要开挖了比较深的消力塘,虽边坡较高,但恰恰位于岩性条件较好的花岗岩处,边坡稳定有保证,且开挖料可就近上坝填筑,一举两得,是合理利用地形地质条件布置大规模溢洪道的经典案例。

大多数情况下,青藏高原地区的河谷狭窄高陡,往往没有可资利用的平缓地形,如果仍然采用开敞式溢洪道的布置方式,可能带来巨大的开挖量和高陡的人工边坡,给稳定分析、支护处理及安全运行带来非常复杂的问题。为避免大量的边坡开挖和边坡加固处理风险,这时就需要研究采用洞式溢洪道的方式,这种溢洪道不需要大规模边坡开挖和支护,但需要比较大的洞径,仍具有开敞式溢洪道的超泄能力,工程地质研究的重点由边坡稳定问题转化为隧洞的围岩稳定问题、泄流冲刷问题,许多情况下这种方式更安全、更经济。

为了应对宣泄大流量洪水的需求,同时又避免高陡边坡和超大断面隧洞带来的复杂问题,目前开始采用分散布置的开敞式溢洪道、洞式溢洪道和压力泄洪隧洞等综合泄流设施共同承担泄流任务,分散集中布置的地质风险。

3.3 辅助设施场地选择中的地质考虑

除上述提到的水电工程的挡水建筑物、泄水建筑物、引水发电建筑物等三大主要建筑物外,水电工程建设还需要设置大规模的围堰工程、导流工程以及大量的施工营地、渣场、砂石加工系统和混凝土搅拌系统等辅助性建筑物,以保证枢纽工程顺利建设。这些建筑物的选址同样要求场址应具有较好的稳定性和适应性。但在地形狭小的河谷地区要找到理想的场地十分困难,处处面临环境地质问题的巨大挑战和地质灾害的威胁。在近年西部水电建设中,施工期滑坡、崩塌、泥石流等地质灾害已到了防不胜防的程度,给施工安全和人员生命财产构成了严重威胁。这些场地的选址需在地质勘察的基础上,必须秉承“选址避让、加强治理、应急管理”的原则,以规避地质灾害带来的风险。

4 水电工程需要研究的重大工程地质问题

4.1 超高边坡稳定条件的勘探与研究

边坡稳定问题是该地区水电工程开发首要研究的工程地质问题。在河谷相对高差上千米的深山峡谷中即便建设当今世界最高的大坝工程(如300m高),大坝在河谷中只占据了很小一部分。为了工程建设,人工开挖形成达数百米高的人工边坡已屡见不鲜,如小湾工程700m高边坡,锦屏一级工程500~600m高边坡等。开挖边坡以外尚有数百上千米的自然边坡,因此在水电工程规划选址之初就应该关注整个河谷岸坡的整体稳定状态。众多的工程实践表明,边坡变形模式之多样,成因机制之复杂,给边坡的勘探试验、稳定性分析和评价、加固处理设计带来非常困难的问题。目前,对于以滑动为破坏机制的边坡稳定分析、评价标准、加固处理设计已经相对比较明确、成熟,并在行业内广泛使用。但是在以倾倒变形为代表的一类边坡的稳定分析理论、控制标准和措施的针对性上尚未形成共识,因此未来以地质成因分析法判断边坡的稳定性仍是一个重要手段,以变形控制为理论基础的边坡评价和加固标准也亟待进一步完善,使其尽早实用化。另外边坡治理中的监测反馈控制技术也越来越重要,边坡治理中锚索的耐久性研究也提到议事日程。

4.2 超高坝岩石地基的适应性研究

高混凝土坝工程需要建造在坚硬完整的岩石地基上。对于一个特定的坝址而言,坝基岩体的固有力学属性是不变的,随着坝高的增加,对地基的要求越来越高。通过对岩体力学特性作出精准的勘察试验和评价,不断挖掘岩体固有力学特性,固然是高坝工程得以成立所必需的。但换一个角度看,对这种固有力学属性挖掘的越多,工程潜在的安全裕度就在减小,意味着高坝抵御意外不确定风险的能力在减少。因此高坝工程对这种固有特性挖掘利用到何种程度,值得我们深思,应引起高度重视。对于超高坝工程(坝高大于300m)需要采取慎之又慎的态度。何况近年来小湾、拉西瓦等工程存在的坝基岩体开挖卸荷回弹问题,虽经精细化的处理,满足高坝建设要求,但它毕竟是对坝基岩体固有力学特性的一种弱化,不能忽视。

4.3 超深厚覆盖层的适应性研究

我们通常将河床覆盖层厚度大于 40m 就称之为深厚覆盖层。越来越多的勘探表明,青藏高原及其周边的河谷覆盖层厚度已经远远超过我们的预想。如雅鲁藏布江米林、多雄坝址覆盖层厚度为 567m、426m; 其附近的尼洋河多布水电站河床覆盖层最深 359.3m,大渡河支流南桠河冶勒电站坝区覆盖层厚达 420m 等等(党林才等, 2011),对这些厚达数百米的超深覆盖层,如何进行勘探试验,如何评价其工程性质,怎样厘清其成因类型,如何看待河谷发育及沉积的历史,它对坝基渗漏及渗流变形、抗滑稳定的影响,地震作用下坝体与地基的相互如何作用等等都是摆在我们面前的重大挑战性的课题。

4.4 深埋地下洞室群稳定性研究

隧洞工程是铁路、公路、市政等许多基础设施领域都在使用的建筑物,但水电工程有别于一般交通工程的线性的、标准断面式的布置,通常都是以洞室群的方式集中布置。洞室密度大,如多条引水隧洞并列同行,主厂房、主变室、尾调室等近距离集中;洞室尺寸变化大,可以是正常的交通隧道,可以是依据引水流量要求设置的不同断面的引水洞,特别是主厂房的尺寸很大,如已建成的溪洛渡工程,在大坝两岸各开挖一座 430.3m 长、28.4m 宽、75.1m 高的巨大地下空间,共安装 18 台水轮发电机组。同时为了顺利施工,还需设置不同方向、大小、高程的交通洞、联络洞围绕着主洞室群,形成庞大而复杂的地下洞群体系(杨泽艳等, 2012)。在特定的山体下挖空率很高,带来一系列围岩稳定问题。如洞室群的相互作用和影响、高应力释放带来的软硬围岩变形控制、围岩时效变形与洞室永久稳定、突发涌水涌泥等地质灾害的预测预报、高低温及有毒有害气体的防范等都是重大研究课题(董家兴等, 2014)。

4.5 天然建筑材料勘探与研究

水电工程体量规模大,需要使用的各种天然建筑材料的种类多、数量巨大、质量要求高。大坝规模越大,对建材的质量要求就越高,建材可选择的余地就越小。没有合适的筑坝材料,严重影响到坝型选择和工程规模的确定,有时甚至可以制约工程的成立,天然建筑材料研究的重要性由此可见一斑。同时由于受青藏高原自然条件的限制、人文社会环境因素影响和自然环境保护的要求,筑坝材料需要开

辟新的来源,如天然崩塌碎石的利用研究;滑坡土、冰碛土、洪积土、风化土、古湖相沉积土的利用研究等。同时还要重视材料的高寒与高温差特性研究;抗盐渍侵蚀特性的研究;冻融和高地震条件下土体特性研究等(吴青柏等, 2000)。

5 结论与认识

(1)全球变暖的趋势呼吁减少碳排放,大力促进可再生能源的使用。青藏高原及其周边还蕴藏着非常丰富的水力资源,水力发电作为一种成熟的、可靠的、经济的可再生能源在应对气候变化中理应起到中坚作用,水电开发大有可为。

(2)充分认识青藏高原及其周边地区极其复杂的地形地质特点,在该地区进行水电开发蕴含着极大的地质风险。创新勘探研究手段,超前研究重大工程地质问题,对复杂的地质条件和地质问题有充分的认识,采取合理有效的防控措施,趋利避害、反复探索,迎接各种工程地质挑战,是水电工程地质工作者义不容辞的责任。

(3)在应对各种挑战的同时,我们有必要对青藏高原及其周边工程地质条件的复杂性心存敬畏,以科学的态度、严谨的作风踏实迈开每一步,不盲目追求坝高的突破,对工程的规模、开发的方式作出慎重抉择。地质风险与工程规模密切相关。规模越大,地质风险越大,坝高应该是有极限的(如低于 300m)。

(4)采用适度的工程规模、科学的规划选址、恰当的开发方式、适宜的坝型和枢纽布置、有效的风险管控等措施,可有效规避地质风险和地质灾害威胁,安全建设水电工程,高原地区水电开发是可以实现的。

(5)青藏高原区存在区域地质背景复杂、边坡稳定问题突出、河床深厚覆盖层、地下洞室围岩稳定和地质灾害体发育等工程地质问题,水电工程开发只有查清工程区基本地质条件和探明工程地质问题,才能为水电工程的坝址、坝型、枢纽布置格局和正常蓄水位选择等的合理设计提供依据。混凝土重力坝、混凝土拱坝、当地材料坝和闸坝各有各的优点,进行大坝设计时应充分考虑其对工程地质条件的适应程度和工程地质问题的风险,应趋利避害、反复探索,达到“经济合理、技术可行、安全可靠”的要求。

参 考 文 献

- Dang L C, Fang G D. 2011. Major technical problems of constructing dam on deep overburden[J]. *Water Power*, **37**(2): 24~45.
- Deng Q D, Chen S P, Ma J, et al. 2014. Seismic activities and earthquake potential in the Tibetan Plateau[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, **57**(7): 2025~2040.
- Dong J X, Xu G L, Li Z P, et al. 2014. Classification of failure modes and controlling measures for surrounding rock of large-scale caverns with high geostress[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, **33**(11): 2161~2170.
- Fan Q X, Lu Y M. 2010. Project management of hydropower resource development in western China: Case study on the lower reaches of the Jinsha River[J]. *Engineering Sciences*, **12**(8): 30~36.
- Fu A M, Liu W D. 1989. Lisiguang and the natural regionalization of China[J]. *Journal of Central China Normal University (Natural Sciences)*, **23**(3): 423~426.
- Garzanti E, Baud A, Mascle G. 1987. Sedimentary record of the northward flight of India and its collision with Eurasia (Ladakh Himalaya, India)[J]. *Geodinamica Acta(Paris)*, **1**(4/5): 297~312.
- Guan Z H, Chen C Y. 1984. Rivers and lakes in Tibet[M]. Beijing, Science Press.
- Li J G, Shi L S. 2006. Brief description of hydropower resources in China[J]. *Water Power*, **32**(1): 3~7.
- Liu T C, Qi M D J. 1999. Characteristics development and utilization prospects of water resources of the international river area in Qinghai-Tibet Plateau[J]. *Acta Geographica Sinica*, **54**(S): 11~19.
- Pan J Z. 2010. Hydropower and China[M]//100 Years of hydropower in China(1910~2010). Beijing: China Press.
- Peng T B. 2011. Hydropower engineering geology manual[M]. Beijing: China Waterpower Press.
- Qian G L, Yan B Z. 2008. China's hydropower resources and considerations for planning of major super-hydropower stations[J]. *Northwest Hydropower*, (3): 4~8.
- Qian Z Y, Zhang G D. 2001. Comprehensive report and special report on sustainable development of water resources strategy research in China[M]. Beijing: Publishing House of China Waterpower and Hydropower.
- Wang M H, Guo X F, Guo J X. 2006. Research on hydropower and economic development of the Tibet an autonomous region[J]. *Water Power*, **32**(12): 1~19.
- Wu Q B, Mi H Z. 2000. Changes and control suggestions on permafrost process of Qinghai-Tibet highway[J]. *Hydrogeology and Engineering Geology*, **27**(2): 14~17.
- Yang Z Y, Zhao Q S, Fang G D. 2012. Hydraulic technology development in China and its trend[J]. *Water Power*, **38**(10): 28~32.
- Yuan J X, Fan J X, Yang J. 2009. Consideration on the geological hazards in hydropower station site selection from the experiences of wenchuan earthquake[J]. *Water Power*, **35**(10): 67~69.
- Zhang C H, et al. 1990. Tectonic system characteristics and formation evolution of the Qinghai-Tibet Plateau[M]. Beijing: Geological Publishing House.
- Zhang D L. 2013. The temporal and spatial variations of water resources over the Tibetan Plateau[D]. Lanzhou University.
- Zhu D C, Duan L P, Pan G T, et al. 2002. Some tectonic motions and magmatic response events of important influence on Qinghai-Tibet[J]. *Journal of Chengdu University of Technology*, **29**(4): 405~409.
- 党林才, 方光达. 2011. 深厚覆盖层上建坝的主要技术问题[J]. *水力发电*, **37**(2): 24~28, 45.
- 邓起东, 程绍平, 马冀, 等. 2014. 青藏高原地震活动特征及当前地震活动形势[J]. *地球物理学报*, **57**(7): 2025~2042.
- 董家兴, 徐光黎, 李志鹏, 等. 2014. 高地应力条件下大型地下洞室群围岩失稳模式分类及调控对策[J]. *岩石力学与工程学报*, **33**(11): 2161~2170.
- 樊启祥, 陆佑楣. 2010. 西部水力资源开发的项目管理: 以金沙江下游河段为例[J]. *中国工程科学*, **12**(8): 30~36.
- 傅爱民, 刘卫东. 1989. 李四光与中国自然区划[J]. *华中师范大学学报(自然科学版)*, **23**(3): 423~426.
- 关志华, 陈传友. 1984. 西藏河流与湖泊[M]. 北京, 科学出版社.
- 李菊根, 史立山. 2006. 我国水力资源概况[J]. *水力发电*, **32**(1): 3~7.
- 刘天仇, 其美多吉. 1999. 青藏高原国际河流域水资源特征及开发利用前景[J]. *地理学报*, **54**(增刊): 11~19.
- 潘家铮. 2010. 水电与中国[M]//中国水电 100a(1910~2010). 北京: 中国电力出版社.
- 彭士标. 2011. 水力发电工程地质手册[M]. 北京: 中国水利水电出版社.
- 钱钢粮, 严秉忠. 2008. 中国水力资源及主要特大型水电站规划设想[J]. *西北水电*, (3): 4~8.
- 钱正英, 张光斗. 2001. 中国可持续发展水资源战略研究综合报告及各专题报告[M]. 北京: 中国水利水电出版社.
- 王民浩, 郭晓峰, 郭建欣. 2006. 西藏自治区水电与经济发展研究[J]. *水力发电*, **32**(12): 1~19.
- 吴青柏, 米海珍. 2000. 青藏公路多年冻土路段冻土过程的变化和控制建议[J]. *水文地质工程地质*, **27**(2): 14~17.
- 杨泽艳, 赵全胜, 方光达. 2012. 我国水工技术发展展望[J]. *水力发电*, **38**(10): 28~32.
- 袁建新, 范俊喜, 杨健. 2009. 从汶川地震特点谈水电站选址中地震地质灾害问题[J]. *水力发电*, **35**(10): 67~69.
- 张丁玲. 2013. 青藏高原水资源时空变化特征的研究[D]. 兰州大学.
- 张长华, 等. 1990. 青藏高原的构造体系特征与高原的形成演化[M]. 北京: 地质出版社.
- 朱弟成, 段丽萍, 潘桂棠, 等. 2002. 对青藏地区有重大影响的构造运动与岩浆响应事件[J]. *成都理工学院学报*, **29**(4): 405~409.