

高地应力对坝基岩体稳定的影响

袁志君

(国家电力公司成都院成都水利水电建设工程公司, 四川 成都 610072)

摘要: 地应力与坝基岩体稳定的关系是坝工建设中研究得较少的一个课题。笔者针对二滩电站坝区存在的高地应力现象, 从初始地应力场的建立、施工开挖的时空效应, 直到与拱推力等外荷载共同作用下对坝基岩体稳定的影响全过程进行了分析和计算。结果表明, 高地应力虽然对基坑开挖有不利影响, 但对坝基岩体的抗滑稳定是有利的。

关键词: 地应力; 初始地应力场; 时空效应; 抗滑稳定; 子结构凝聚法

中图分类号: TD 311; TV 223.3

文献标识码: B

文章编号: 1001-2184(1999)03-0025-03

1 概述

二滩水电站拱坝坝高 240 m, 装机容量 3300 MW。坝址区岩石主要为二迭系玄武岩和后期侵入的正长岩, 岩质坚硬。两岸谷坡陡峻, 临江坡高 300 ~ 400 m, 左缓右陡, 呈不对称的“V”型河谷。由于河谷切割较深, 使坝址区岩体地应力分布较为复杂, 两岸谷坡深部岩体地应力量级较高, 河床应力集中现象尤为明显。在二滩工程前期勘探阶段, 探洞中曾出现过轻微岩爆, 大剪试件加工过程中也发生过岩爆现象, 在枢纽区 203 个钻孔中, 84 个钻孔发现有饼状岩芯。所有这些现象均表明二滩坝区为一高地应力区。高地应力对坝基稳定有何影响? 是有利因素还是不利因素? 笔者根据各设计阶段对二滩坝区高地应力问题所做的大量工作, 总结得到了一些有意义的成果。高地应力对坝基岩体稳定的影响主要表现在三个方面:

(1) 影响岩体的物理力学特性。

一方面, 低围压状态下呈脆性破坏的岩石, 在高围压下可表现为塑性变形。另一方面, 岩体一般为不连续介质, 但在地应力形成的高围压作用下, 却可能转化为连续介质, 使岩体中应力传播具有连续介质的特点。此外, 随着围压的增加, 岩体的强度和刚度都会相应提高。因此, 岩体赋存的地应力条件不同, 表现出来的力学特性也是不一样的。

(2) 导致开挖过程中产生一系列与应力释放有关的变形和破坏。

从已有工程实践经验可知, 伴随地表开挖发生的变形和破坏主要有基坑底部爆裂、隆起, 边墙或边

坡向临空方向的水平位移和沿已有缓倾角结构面发生剪切错动以及边墙或边坡的葱皮、剥落、倾倒等。

(3) 作为荷载将对坝基岩体稳定构成有利因素。

假定拱座抗滑稳定分析的荷载是由地应力与拱推力、岩体自重、渗透压力等共同组成的, 这样分析计算的结果表明, 二滩坝基地应力对拱座抗滑稳定起着有利的作用。

二滩坝基岩体地应力的研究主要包括三大部分: 初始地应力场、基坑开挖后的二次应力场和由工程荷载引起的附加应力场。

2 初始地应力

二滩水电站的区域地质构造和枢纽区的地形地质条件, 预示着本区是一个高地应力区, 钻孔中的饼状岩芯和探洞开挖时出现的岩爆现象, 也说明岩体中积累了较高的应变能。根据区域地质力学分析和震源机制解及小震平均应力场分析, 本区自喜马拉雅运动以来构造应力场最大, 主应力方向为 NW ~ NWW 向。

为了定量地确定枢纽区的地应力量级和方向, 共进行现场地应力测试 25 组, 除 2 组河床深孔地应力测试外, 主要分布在不同高程和不同水平深度的探洞中。测试均采用钻孔应力测量法, 包括孔径法、压磁法和孔壁法。同时还分别采用三维地应力场回归分析和子结构法进行数值计算, 建立了坝区岩体的初始地应力场。通过对上述实测和计算成果的综合分析, 可以得到如下一些认识:

(1) 地应力量级由谷坡上部至河床, 由表至里逐渐增大, 宏观上可将应力场分为四个区: 应力释放区位于谷坡表层, 岩体大部分属弱风化上段 (E-3 级), 裂隙有不同程度的张开或泥质充填, 最大主应力 σ_1 量级一般小于 5 MPa; 应力过渡区位于河谷

周边浅层,岩体以D级为主,部分为C级, $\sigma_1 = 5 \sim 20 \text{ MPa}$; 应力平稳区位于谷坡较深部位,岩体主要为A~C级, $\sigma_1 = 20 \sim 40 \text{ MPa}$; 应力集中区位于河床高程980 m以下部位,是岩芯饼化最严重的地方,实测 $\sigma_1 = 40 \sim 80 \text{ MPa}$,计算显示最高达102 MPa。

(2) 三向主应力均为压应力,三向应力的平均比值大致为: $\sigma_2/\sigma_1 = 0.52 \sim 0.6$, $\sigma_3/\sigma_1 = 0.27 \sim 0.36$ 。

(3) 从地应力量级和方向看,最大主应力较稳定,中间主应力次之,最小主应力变化较大。

(4) 水平应力大于垂直应力,垂直应力大于上覆岩体自重。实测水平应力与垂直应力的比值一般为 $0.78 \sim 2.9$,其中大于1的测点占85%,而上覆岩体自重仅为实测垂直应力平均值的47%。

(5) 应力释放引起的岩体破损现象不仅与应力大小有关,同时与岩石性质密切相关。以应力平稳区的正长岩为例,最大主应力平均为25 MPa,相当于正长岩单轴抗压强度的 $1/5 \sim 1/7$,在此应力量级下,因应力释放而出现岩石破损微弱,当超过这一应力水平时,则显著增加。但对结晶程度甚差的高强度玄武岩,比值达 $1/3$ 时,也仅出现少量破裂现象。

(6) 河谷地应力的最大主应力方向为 $N 10^\circ \sim 30^\circ E$,平均 23° ;两岸相向倾向河床,倾角小于 30° ;平均为 22° ;基本与岸坡坡面平行,远远偏离本区现今构造主压应力方向 $NW \sim NWW$,说明深切河谷的地形地势对坝址区河谷浅部应力场的影响明显。

地应力不但是影响岩体力学作用的控制因素之一,而且是在岩体赋存环境条件发生改变时引起变形和破坏的力源之一。初始地应力场的建立为研究地应力对拱坝拱座抗滑稳定的作用,坝基开挖的时空效应,坝基总体应力场的建立和高坝建基面优选研究奠定了基础。

3 基坑开挖的时空效应

根据前述采用子结构法建立的初始地应力场,假定开挖本身无时间过程,对基坑开挖成型后的时空效应进行分析计算,其中河床建基面开挖高程为965 m。计算结果表明:

(1) 基坑开挖后岩体位移由瞬弹位移和蠕变位移两部分组成,瞬弹位移反映基坑开挖的空间效应,蠕变位移反映它的时间效应,两者分布规律基本一致,两岸谷坡均以水平位移为主,河床建基面则主要为竖向位移。右岸开挖边坡最大总位移为42 mm,右岸为18 mm,河床建基面为33 mm。从最终的瞬

变位移占总位移值的比重看,左岸为5%,右岸为15%~20%,河床建基面3%,说明基坑开挖以空间效应为主,时间效应为第二位。

(2) 瞬弹应力与蠕变应力的变化是反映基坑开挖时空效应的另一重要标志。两者分布规律与初始应力的分布规律基本一致。基坑开挖对瞬弹和蠕变应力都基本呈消减作用,但瞬弹应力的消减幅度(消减值与初始应力的比值)较大, σ_1 为4%~23.6%, σ_2 为83.1%~136.3%,蠕变应力的消减幅度(消减值与瞬弹应力的比值)较小, σ_1 最大的消减幅度左岸为0.9%,右岸为3.5%,最大的 σ_2 消减作用左岸为5.9%,右岸为19.5%。由此也同样说明了基坑开挖的空间效应是主要的,时间效应处于第二位。

(3) 河床应力集中区岩体,开挖后表层将出现较大的拉应力和向临空方向的位移,导致岩体片状破坏,初裂深度约为21 m,破坏深度6 m左右。

上述计算分析表明,基坑开挖后岩体变形以空间效应为主,符合二滩坝区岩体岩质坚硬、初始地应力较高的实际。同时,河床建基面岩体开挖后将出现片状破坏,且深度达6 m左右。但实际开挖仅在局部地带出现轻微的片状破坏现象,并未发现有严重的脆性断裂破坏情况。这可能与计算假定开挖本身无时间过程,而实际开挖历时较长(1992年12月~1994年12月)有关。

4 地应力对拱座抗滑稳定的影响

采用弹塑性三维有限元子结构凝聚法研究地应力对拱座抗滑稳定的影响,分析中假定岩体的破坏只在结构面上发生,岩体变形除结构面为弹塑性之外,其余部位均为弹性。具体选用左岸坝肩岩体潜在的可能滑移楔块作为算例,构成楔块边界的结构面主要为二滩坝基普遍存在的 NW (顺河)向(侧面 P_1)节理和缓倾角(底滑面 P_3)节理。计算域由三个子域组成,子域1是被结构面围限的可能滑移体,子域2为结构面,子域3为基座岩体,如图1所示。计算荷载由拱推力、岩体自重、渗透压力和地应力组成,其中地应力为前述基坑开挖后的二次应力场。分析中假定方案一计入地应力,方案二不计入地应力。加载过程共分十一级,从空库到正常蓄水位为一至六级,七至十一级为超载过程,强度浮值按4级考虑(1S、1/2S、1/3S、1/4S),分别与一至六级荷载组合计算。在大量计算和对比分析的基础上,可得到如下主要认识:

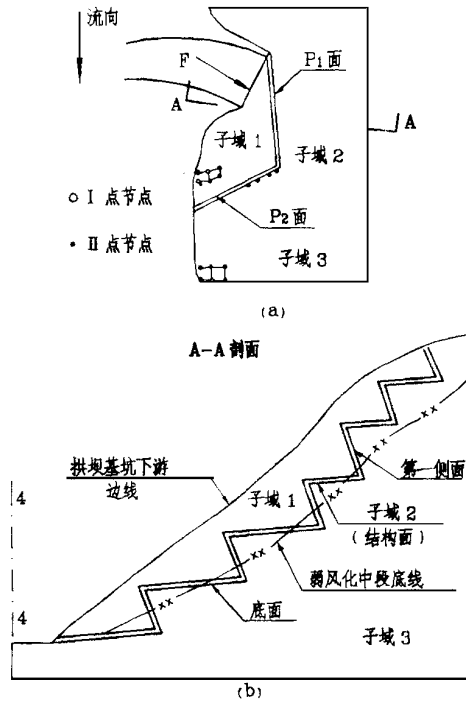


图1 凝聚法计算简图

(1) 通过对两方案的比较, 可以看到方案二的总破坏率都大于方案一(参见图2), 说明地应力对拱座抗滑稳定起着有利的作用。

(2) 蓄水过程中, 方案一的破坏率变化度(最大

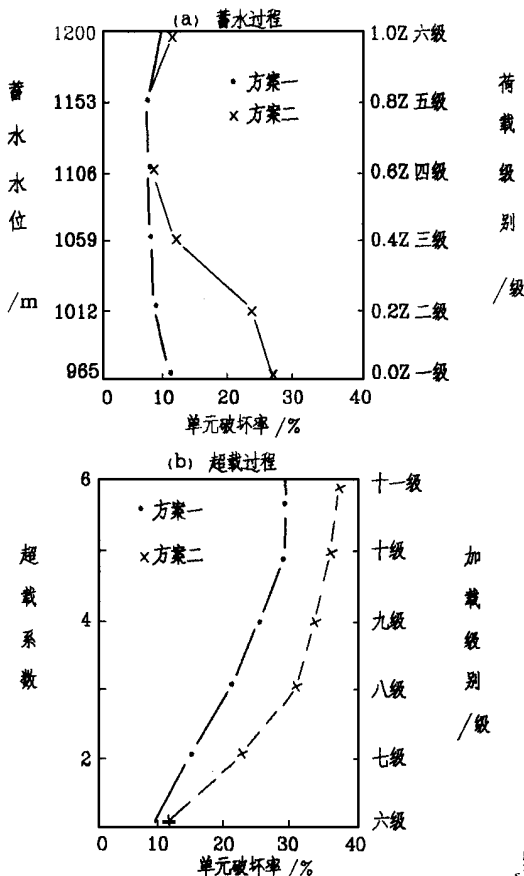


图2 破坏率过程线图

破坏率/最小破坏率) $n_1 = 1.6$, 方案二的破坏率变化度 $n_2 = 4$, n_2 是 n_1 的 2.5 倍, 说明在蓄水运行期内, 地应力仍起着重要作用。

(3) 随着水位逐级增加, 破坏率呈下降趋势。当水位超过 1153 m 时, 破坏率才开始回升, 但满库工况的稳定性仍优于空库工况(图2), 水压力的作用使 P_1 面从受拉状态转为受压状态。

(4) 超载过程的情况(图2)与蓄水过程类似, 也表明地应力的作用是有利的。同时, 在 $6 P_0$ 范围内, 坝基岩体内的结构面还处于应变强化阶段。

(5) 从图3所示蓄水期强度储备破坏率过程线可见, $K_s > 2$ 后破坏速度明显加快, 因此, 相应于 $K_s = 2$ 的岩体强度具有重要意义。

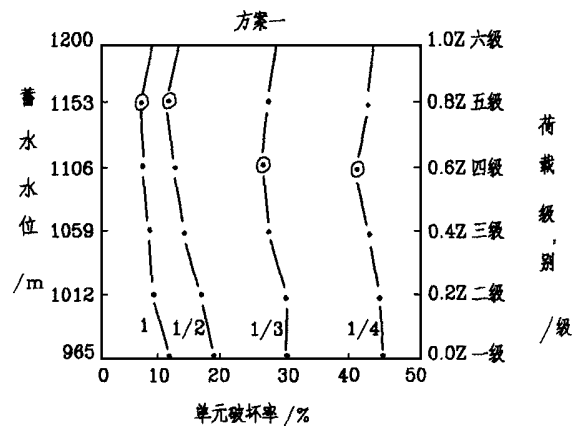


图3 蓄水期破坏率过程线图

(6) 左坝肩岩体的工作状态可能为: 天然情况下由于地应力作用, 结构面被压紧; 大坝浇筑期内由于坝的自重作用, 使 P_1 面少部分被拉裂; 蓄水期内因水推力作用, 结构面又逐渐被压紧; 当水位到达正常蓄水位时, 岩体处于弹性工作状态。

5 小结

二滩工程从初始地应力测试到应力场的建立和分区, 以及开挖二次应力场、工程荷载作用下的附加应力场等, 对高地应力问题进行了全过程的研究, 做了大量的基础工作和分析工作, 并取得了一些成果或经验。

(1) 二滩坝区为高地应力区, 应力平稳区最大主应力为 20~40 MPa, 河床部位是应力集中区, 最大主应力 40~80 MPa, 最高达 102 MPa。

(2) 高地应力不利于基坑开挖, 有可能随开挖产生应力释放, 形成片状的脆性断裂破坏。就二滩坝基的情况看, 计算分析的破坏程度与实际开挖之间存

(下转第 30 页)

3.2 闸址区工程地质评价

Odiangan 二、三级水电站闸址河床覆盖层厚 6.5~18 m, 下伏基岩分别为第四系火山碎屑岩和第三系砂岩。闸址区地形完整开阔, 无滑坡、泥石流等不良地质现象, 均具备建闸条件。

两闸址设计闸高 10~15 m, 基础直接置于河流冲积层上, 属软基建闸。闸基冲积层由结构单一的漂卵石组成, 漂卵石成份以坚硬的玄武岩、安山岩为主, 粒径一般 10~40 cm, 能满足承载及变形要求, 下伏基岩完整性较好, 透水性低, 压水试验成果表明透水率为 5~8 Lu, 可视为相对抗水层。

闸区主要工程地质问题是闸基漂卵石层透水性强, 渗透系数 $k = 3.55 \times 10^{-1} \sim 7.41 \times 10^{-2}$ cm/s, 建闸蓄水后易产生渗漏及管涌破坏, 需设置防渗工程措施。此外, 闸基覆盖层结构松散, 需采取相应的防冲工程措施。

3.3 引水隧洞工程地质评价

Odiangan 二级电站引水隧洞布置在右岸山体内, 洞长 4138 m; 三级电站引水隧洞布置在左岸山体内, 洞长 3300 m。设计均为圆形有压隧洞, 内径分别为 3.0 m、3.2 m。

二级电站隧洞围岩主要为第三系 Iponan 组巨厚层砂岩、含砾砂岩夹少量粉砂岩组成; 三级电站隧洞围岩为第四系 Mambuya 组火山碎屑岩夹少量凝灰岩组成。两电站引水隧洞布置区均未见大的断层通过, 岩体完整性较好, 透水性差, 地下水活动轻微。

3.3.1 砂岩、含砾砂岩遇水软化问题

(上接第 27 页)

在一定差异, 实际开挖时出现的破坏是轻微的。导致这种差异的原因可能与计算未考虑开挖的时间过程有极大关系。

(3) 高地应力对拱座抗滑稳定是有利的, 因此设计中如不计入地应力因素, 将可能导致偏于保守的结果。

(4) 根据计算分析得到二滩左岸坝肩岩体的工

二级电站隧洞围岩主要为第三系 Iponan 组巨厚层砂岩、含砾砂岩夹少量粉砂岩组成, 岩体多呈厚~巨厚层状, 节理裂隙不发育, 成洞条件较好。但是, 砂岩、含砾砂岩为泥质胶结, 干湿抗压强度差别大, 干抗压强度平均为 45.1 MPa, 湿抗压强度仅为 22.2 MPa, 表明岩石遇水易软化, 因此, 施工开挖后应尽快封闭开挖面, 以免岩石吸水强度降低, 影响围岩稳定。

3.3.2 火山碎屑岩及凝灰岩成洞问题

火山碎屑岩形成时代新, 岩石固结成岩差, 抗压强度低, 仅 4.6 MPa, 但是, 岩体受构造影响轻微, 完整性好, 而且隧洞埋深不大, 上覆自重应力较小, 经分析具备成洞条件。火山碎屑岩中的凝灰岩夹层胶结程度低, 多呈散体状, 施工开挖后应及时支护。

4 结束语

通过现场地质调查及勘探试验工作, 基本查明了建筑区工程地质条件及存在的主要工程地质问题, 为 Odiangan 水电站的可行性设计提供了可靠的地质依据。Odiangan 水电站的可行性勘察设计报告已提交菲律宾 Odiangan 电站董事会, 目前正在进行施工立项准备工作。

作者简介:

郑汉淮, 男, 国家电力公司成都院成都水利水电建设工程公司地质二处副处长, 高级工程师, 学士

作状态, 及时蓄水将有利于坝基岩体的稳定。

(5) 子结构凝聚法只对设计中需要的、至关重要的少量特殊部位进行非线性有限元分析, 即能节省工时和经费, 又能满足实际需要, 具有一定的推广应用价值。

作者简介:

袁志君, 男, 国家电力公司成都院成都水利水电建设工程公司项目总工程师, 高级工程师, 硕士

1999 年我国大中型水电机组投产将首次超过 500 万 kW

截止 1998 年底, 我国水电机组装机容量已突破 6400 万 kW。据 1999 年我国大中型水电机组投产规模初步确定, 计划为 24 台 531.4 万 kW。至 1999 年底, 将有二滩、李家峡、凌津滩、天荒坪、广蓄二期、天生桥一级、高坝洲、响洪甸、小浪

底、万家寨、大源渡、江垭等 12 座水电站的 24 台机组共计 531.4 万 kW 投产发电, 将首次实现大中型水电机组年投产超过 500 万 kW。

本刊记者 李燕辉

ABSTRACT

Engineering Geological Investigation on Complex Foundation at Tongjiezi Hydropower Station

GE Dong-hai

(Chengdu Water Resources and Hydroelectric Power Construction Engineering Company, CHDI of SPC, Chengdu, Sichuan, 610072, China)

Abstract: The Tongjiezi hydropower station is located on rock with complex geological conditions. During entire investigation period, the special geological problems are demonstrated by advanced means and methods both domestic and abroad and with thorough and detail comprehensive analysis. Conclusions which accords with objective reality are presented to solve actual engineering problems and greater contribution is made to academic research and technical means.

Key words: major engineering geological problem; buried fault; incised river bed; deep confined water; strain-slip zone in layers

Engineering Geological Problems in Underground Excavation and Treatment at Taipingyi Hydropower Station

CHEN Weidong

(Chengdu Water Resources and Hydroelectric Power Construction Engineering Company, CHDI of SPC, Chengdu, Sichuan, 610072, China)

Abstract: At the Taipingyi hydropower project, rock burst, collapse and major fault (shallow buried) were met in underground excavation, which are unfavorable to dam stability, safety and construction schedule. Prediction and treatment for such engineering geological conditions are studied by geologists, designers and contractors together. In the case of Taipingyi underground excavation and treatment, different engineering treatment measures were taken for different engineering geological problems by geologists, designers and contractors to construct an economically reasonable, safe and reliable project.

Key words: underground excavation; construction geology; treatment measures; rock burst; collapse

Construction Geology in International Competitive Bidding Hydropower Project

CHEN Changping

(Chengdu Water Resources and Hydroelectric Power Construction Engineering Company, CHDI of SPC, Chengdu, Sichuan, 610072, China)

Abstract: Taking the Ertan Hydropower Project as an example, the paper presents a brief introduction on construction geological work performed under the latest contract management and project supervision system of international competitive bidding, to improve the construction geological work in the future and provide references for the projects of similarities.

Key words: the Ertan Hydropower Project; international competitive bidding; construction geology

Study on Major Engineering Geological Problems for Long Intake Tunnel with Thick Overburden in Hydropower Project

PENG Shixiong

(Chengdu Water Resources and Hydroelectric Power Construction Engineering Company, CHDI of SPC, Chengdu, Sichuan, 610072, China)

Abstract: Taking the Qiaoqi Hydropower Project as an example, the major engineering geological problems for long intake tunnel with thick overburden in hydropower project is systematically analyzed and prediction is made to provide references for the other tunneling projects.

Key words: tunnel with thick overburden; study; prediction

Influence of High In-situ Stress on Stability of Dam Foundation Rock

YUAN Zhi-jun

(Chengdu Water Resources and Hydroelectric Power Construction Engineering Company, CHDI of SPC, Chengdu, Sichuan, 610072, China)

Abstract: The relationship between in-situ stress and stability of dam foundation rock is less considered in dam construction. For high in-situ stress occurred in Ertan dam area, combined action of initial in-situ stress field, time and space effect during excavation and external loads (arch thrust etc) on dam foundation stability are analyzed and calculated. The analysis results show that high in-situ stress is adverse to foundation pit excavation, but is favorable to dam foundation rock stability against sliding.

Key words: in-situ stress; initial in-situ stress field; time and space effect; stability against sliding; substructure coaction

Research and Application of Lithium-salt Slag Concrete

HU Ping¹ GAN Yan-hua²

(1. Sichuan Mingzhu Limited Liability Company, Shehong, Sichuan, 629200, China; 2. The 8th Construction Bureau of Water Conservancy and Hydropower Engineering of China, Guiyang, Guizhou, 550001, China)

Abstract: Lithium-salt slag is a kind of nice artificial pozzolana. When this material is added in concrete, not only properties of concrete is improved obviously and basically meet specifications for HPC (High Property Concrete), but also cement content and project cost are reduced. The lithium-salt slag is used in various specially mixed concrete as well as in conventional concrete and mass concrete. The lithium-salt slag is successfully used as admixture in concrete at the Jinhua hydropower project on the Fujiang River.

Key words: lithium-salt slag; properties of concrete; mix proportion; Jinhua hydropower project