

猫跳河梯级开发岩溶工程地质理论与实践

邹成杰

(能源部水利部贵阳勘测设计研究院)

提 要 猫跳河流域范围,碳酸盐岩分布面积达70%以上,岩溶强烈发育。从50年代至70年代,在全河进行了水利水电梯级开发,90年代初又增建了一座电站。七座电站总装机25.2万kW,是我国目前在岩溶发育区梯级开发最系统的一条河流。本文旨在对猫跳河梯级开发20余年的岩溶工程地质实践,作一概要回顾和总结。

关键词 岩溶工程地质;实践经验;猫跳河梯级开发。

猫跳河,位于贵州中部,系乌江右岸的一级支流。猫跳河的梯级开发(表1),为贵州的能源建设和经济发展起了重要作用。

值全河7座梯级电站全部胜利建成之际,再来回顾一下猫跳河梯级开发的历程,并对工程地质勘察工作,特别是对岩溶工程地质(包括水文地质)的实践作一总结,是很有必要和很有价值的。

1 猫跳河流域地质概况

猫跳河全长181km,流域面积3195km²,天然落差549m,平均水力比降3.04%。河流纵剖面呈“反均衡剖面”状态,颇似一条抛物线。上游(在一级电站以上)河谷开阔,比降平缓;下游(在李官电站以下)河谷狭窄,比降陡峻。中游,处于过渡状态(图1)。此种河流,从规划设计角度,在上游宜建堤坝和具有调节性能的大型水库;下游宜建引水式或混合式电站。

上游,处于加里东期的沉降区,地层出露较全,且厚度较大;在中下游处于加里东隆起区,地层缺失较多。总体视之,碳酸盐岩地层约占总厚度的60~70%,分布面积,占70%以上,其余均为非碳酸盐岩地区,以砂页岩为主。

地质构造比较复杂,由于上游与中下游的地质发展史不同,因而构造特点也不一致。上游区,以NE向构造为主,如平坝向斜。中下游区以近SN向构造为主,如修文背斜;后期又

作者简介:邹成杰,男,57岁,高级工程师。1957年毕业于北京地质学院水文地质工程地质专业,现任贵阳勘测设计研究院付总工程师。(550002) 贵阳市解放路78号。

表1 猫跳河梯级水电站主要技术指标表

Tab. 1 Main technical indices of water power stations of Maotiao River

级 别	电站名称	坝址控制 集水面积 (km ²)	正常蓄 水位 (m)	利用河 流落差 (m)	多年平均 流量 (m ³ /s)	总库容 (亿 m ³)	坝 型	坝 高 (m)	保证出力 $\Phi=95\%$ (万 kW)	年发电量 (亿 kW·h)	装 机 容 量 (万 kW)	坝 址 地质岩性	单 位 (kW)	发 电 日 期
一	红枫水电站	1551	1240	45	30.2	6.01	木板斜墙堆石 坝	52.5	0.49	0.689	2.0	下三叠统灰岩白 云质灰岩(T _{1a})	1515	60.5.29
二	百花水电站	1832	1195	43.5	38.0	1.82	砼斜墙堆石坝	48.7	0.558	0.804	2.2	下三叠统灰岩 (T _{1a})	1715	66.6.30
二 级 半	季官水电站	2030	1151.5	20.0	39.8	0.0235	浆砌石坝(位面 板防渗)	35	0.45	0.46	1.3	中上寒武统白 云岩(ϵ_{2+3})	1698	92.7
三	修文水电站	2084	1131	39.0	41.2	0.114	单拱坝	49	0.558	0.819	2.0	中上寒武统白 云岩(ϵ_{2+3})	838	61.6.8
四	窄巷子水电站	2362	1092	63.5	44.9	0.071	双拱坝	54.8	1.07	1.612	4.5	下二叠统灰 岩(P _{1a} , P _{1m})	781	70.9.30
五	红林水电站	2381	1028.5	144.5	44.9	0.0055	砼重力坝	27.6	2.57	3.83	10.2	中上寒武统白 云岩(ϵ_{2+3})	658	79.12
六	红岩水电站	2752	884	49	49.2	0.304	双曲拱坝	49	0.945	1.43	3.0	下三叠统白云 岩灰岩(T _{1m})	803	74.7.25
	合 计			404.5		8.359			6.64	9.64	25.2			

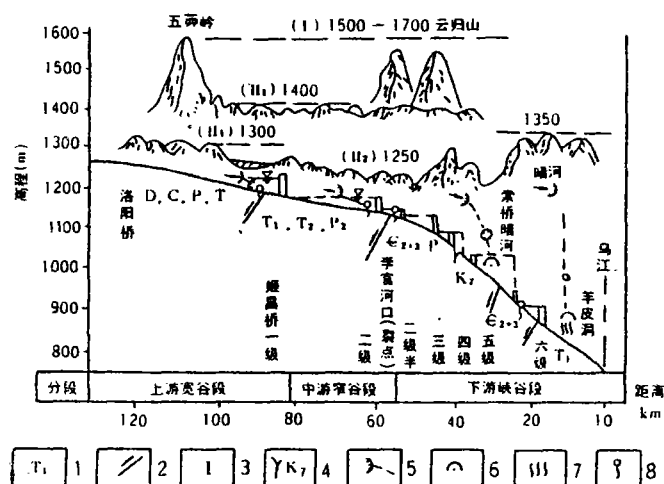


图1 猫跳河地质纵剖面梯级开发示意图

Fig. 1 Longitudinal geological profile and step development of Maotiao River

1. 地层代号; 2. 主要断层; 3. 剥夷面分期; 4. 河床落水洞;

5. 主要暗河进口; 6. 暗河出口; 7. 暗河出口形成瀑布; 8. 主要泉水。

发育 NEE 向构造, 如乌栗断层等(图 2)。

晚近期断裂构造发育不明显, 地壳以整体间歇性上升为特征。沿河发育 4 级以上的阶地和与之相对应的规模不等的溶洞层。

流域岩溶水文地质条件比较复杂, 在石灰岩、白云岩分布区, 以岩溶裂隙水、脉状水和管道水为主。岩溶管道水往往形成汇流中心。在非岩溶地区, 以裂隙水为主。

岩溶含水层与非岩溶含水层, 常呈条带状相互交替出现, 而以岩溶含水层为主导。岩溶发育的基本规律, 受岩性、构造及渗流场、化学场和温度场, 还有地下水排水基准面等因素所控制。

河谷地下水动力条件, 可分为补给型、排泄型、补排型和悬托型四种类型。其中以补给型为主, 一、二、三、五级和二级半坝址皆属此型, 其他 3 种类型, 仅分布于四级坝址及六级库首右岸地区。

2 岩溶工程地质勘察方法与分析研究方法

猫跳河是贵州水利水电开发最早的一条河流, 全河分六级开发, 这种一条龙式的开发方式, 为今后的河流梯级开发提供了一个范例。

2.1 岩溶工程地质勘察方法

在梯级开发过程中, 主要应用了以下工程地质勘察方法:

1. 岩溶水文地质条件调查。主要了解岩溶地区地表水与地下水的相互关系与转换, 洞穴系统与岩溶地下水的运动关系等, 它是在水库坝址地区综合地质测绘的基础上编制各种岩

3. 钻探及水文地质试验。它是查明地下岩溶及岩体水文地质条件的一种有效方法。岩体渗透性资料,主要靠压水试验和抽水试验的方法取得。

4. 洞探。主要用于查明岩体内部构造及岩溶洞穴,往往和灌浆廊道结合,以进行综合利用和跟踪验查。

5. 岩溶地下水长期观测。此工作是了解岩溶地下水动态规律的一种重要手段。通过不同类型的长期观测和同步加密观测,可以取得不少有价值的水文地质参数。

6. 试验。主要包括岩石物理力学试验、水化学分析、环境同位素分析及地下水连通试验等。

猫跳河各梯级工程的各项勘探工作量都不大。钻探总进尺约2万m,平均每个电站不到3000m,其中以四级电站勘探工作量较大。用这样少的工作量,基本查明了梯级开发中如此复杂的岩溶工程地质问题,是相当不容易的。

2.2 岩溶工程地质分析方法

在猫跳河梯级开发中应用的多种分析方法,主要始于七十年代后期。其中包括岩溶地下水“四场”分析法,即渗流场、温度场、化学场和同位素场分析法,和笔者新建立的压渗系数分析法、水库渗漏模型和数学模型分析法、地下水位动态分析法及岩溶管道水汇流理论分析法等;另外还有毛键全、任钟魁用以进行水库岩溶渗漏预测的“逻辑信息”分析法和光耀华最新的数量化理论分析法都在猫跳河得到了应用(见表2)。此外,还有岩溶地貌水文网分析法、电网络模拟分析法等。

上述方法中,有些还不够完善,包括为建立这些方法而提出的理论依据,尚需在实践中通过多次反复,进一步检验,从而形成一套综合的具有系统工程特性的分析研究方法。

3 猫跳河岩溶工程地质勘察基本经验与体会

(1)充分利用岩溶区的有利条件可成功地选择坝址

一是有效地利用隔水层或相对隔水层,使水库不漏水;二是有效地利用岩溶发育的不均一性,把坝址和地下工程选在岩溶发育微弱的地段,使地基和围岩达到稳固、安全、可靠。

为避开复杂的岩溶问题,往往将坝址尽量选在非岩溶地层上。如原二级小屯坡坝址,为避开岩溶渗漏问题,选在 ϵ_1 砂页岩地区。但由于砂页岩风化严重,边坡稳定有问题,在一定程度上比岩溶问题更复杂,以致在施工初期就出现了难以处理的工程地质问题,最后,还是决定放弃此坝址,而新选择的坝址,仍然落在岩溶地层上。

在7个坝址中,除去四级坝址以外,其他6个坝址均选在岩溶发育比较微弱的地段,即减少了工程造价,亦缩短了建设周期。可见,充分利用岩溶区的有利条件,是成功地进行选坝和工程建设的关键。

(2)岩溶渗漏是岩溶地区修建水利水电工程最突出的问题

岩溶地区的水库产生渗漏是不可避免的。一般认为,允许渗漏量小于河流平均流量5%,当控制在10%以内时,只能算是少量渗漏,如果当库水特别宝贵,上游又无调节水库时,则允许渗漏量应当更小一些。那种认为在岩溶区的水库也应“滴水不漏”的观点是不现实的,亦是不可能的。

表2 岩溶工程地质分析研究方法简表

Tab. 2 Summary of researching methods applied in karst engineering geological study

序号	分析研究方法名称	基本原理与模型	应用范围	应用情况
1	渗流场分析法	利用钻孔分层测压水位,编制流网图,建立渗流场模型。分析各种岩溶地下水动力条件	各种岩溶统一含水层和含水体	应用于三级、四级水库深岩溶研究和岩溶渗漏带划分
2	温度场分析法	利用钻孔分层测温资料,绘制等温曲线,建立温度场模型	各种岩溶含水层或含水体	应用于四级水库,寻找岩溶通道,分析地表水与地下水关系
3	化学场分析法	利用钻孔分层水化学分析资料,绘制等离子曲线,建立水化学模型	各种岩溶含水层或含水体	应用于四级水库,分析岩溶洞穴、管道位置及含水层之间关系
4	同位素场分析法	利用钻孔分层地下水同位素测量资料(氡、氡等)建立同位素场模型	各种具有一定同位素含量的含水层或含水体	应用于四级水库,解决渗漏带的划分及地下水年龄等问题
5	压渗系数(P_k)分析法	利用地表水与钻孔水位压传递等参数,建立压渗系数物理数学模型	各种岩溶统一含水层,与地表水有一定水力联系	应用于四级水库,解决岩溶化岩体渗透性问题,建立 P_k 与 K 的关系
6	水库岩溶渗漏地质、数学模型分析法	利用水库水头与渗漏量关系曲线,建立多种地质数学模型	水库产生岩溶渗漏,有系统的测流资料	主要应用于四级、六级水库,用渗漏曲线,反演岩溶渗漏条件,分析渗漏特征
7	地下水动态分析法	利用钻孔水位传播速度和水位变幅等,建立相关曲线模型	具有长期观测资料的岩溶含水层,与地表水有一定关系	应用于四级、六级等水库,通过动态分析,研究地表、地下水力联系等
8	岩溶管道水汇流理论分析法	利用地下水连通试验资料,建立岩溶管道水物理、数学模型	在岩溶强烈或中等发育区,具有较多的连通试验资料	应用于四级等水库,建立岩溶管道水汇流地质、数学模型
9	逻辑因果分析法(屠毛健全等)	利用已知的水库渗漏资料,通过逻辑分析计算,建立水库渗漏预测模型	各种水库岩溶渗漏,均可利用此方法进行预测	水库岩溶渗漏计算和观测。在多个水库渗漏预测中应用
10	数量化理论分析法(锯光耀华)	利用定性资料,通过数量化计算,建立水库渗漏和预测模型	同上	同上

岩溶渗漏问题是可以查明的。如二级水库,其右岸库首地区,主要分布 T_{11} 灰岩,岩溶强烈发育,查明在黄家山岩溶洼地至下游的 K_{58} 溶洞出口,由于其间存在单薄分水岭,水库蓄水后,将引起岩溶管道渗漏,漏水量为 $1\text{m}^3/\text{s}$ 左右。后在黄家山上游的地形垭口处修建一座长37.5m,高8~9m的浆砌石坝,使库水不再进入黄家山岩溶洼地,从而阻止了渗漏。又如四级水库,其库首及坝址,位于岩溶强烈发育的 $P_{14}+P_{1m}$ 阳新灰岩上。天然状态下,河水补给

地下水,两岸地下水位低于河水位 10~20m,系有天然绕坝渗漏问题,且坝址左岸的河弯地带,其间发育的 K_{18} 巨大溶洞,体积达 23 万 m^3 以上。后又应用深孔钻探和连通试验及“四场”分析方法等,查明了两岸深埋在河水位以下 150m~200m 的深部岩溶渗漏问题,并于 1980 年提交了详细的《岩溶渗漏及防渗处理地质报告》。

(3)新技术、新方法、新理论的研究与应用,是推动岩溶工程地质勘察和科技进步的有力手段

70 年代以后,一些新技术、新方法逐渐被引进和应用。如钻探方面,引进了小口径金刚石钻探和绳索取心技术;物探方面,引进了钻孔电磁波透视、钻孔彩色电视、综合测井;近年来还引进了微伽重力仪和地质雷达等,用以探测岩溶发育情况和溶洞位置。其它如应用同位素水文地质方法研究补给源和测量地下水年龄;红外遥感查明地下河出口;同位素、染色、石松孢子、萤光素等多种示踪试验;地球化学方法和水温测量寻找岩溶通道等等,形成了强有力的技术手段。使勘察工作逐步深入,精度不断得以提高,随之还发展和建立了十多种岩溶工程地质分析研究方法(见表 2);提出了一些有关理论。不仅使岩溶渗漏与岩溶发育规律之间关系的认识不断深化,而且对于确定强岩溶发育带和岩溶管道的空间分布,以及研究坝址防渗帷幕的深度和范围都起了一定的作用。通过建立地质数学模型,使有关岩溶工程地质评价由定性向半定量、定量过渡,促进了岩溶科技事业的发展。

(4)既查明岩溶渗漏,又善于进行防渗处理才能事半功倍

防渗处理问题关系到岩溶水库的成败和效益,亦是水利水电岩溶工程地质工作者,在认识自然、改造自然中一项不可少的重任。只有既查明岩溶渗漏问题,又善于进行防渗处理,才能达到预期的效果。

防渗处理已总结出“灌、铺、堵、截、围”五字方法,是对以往防渗处理经验的一次充实和发展。

对于岩溶地质条件极为复杂多变的猫跳河四级水库,虽经多年工作,查明了岩溶渗漏问题,并于 1980 年提交了详细的《岩溶渗漏及防渗处理地质报告》,明确地提出了防渗处理方案,是以防渗帷幕为主体,结合堵截漏水管,防渗帷幕的范围和深度,可通过以后密布的、众多的灌浆钻孔予以查明,且边查明,边处理(贵州乌江渡水库从发现深岩溶到处理好深岩溶就是这样作的)。但遗憾的是水库防渗处理时至今日始终未被列入重要议事日程。对于防渗处理,它的深远意义不仅在于提高经济和社会效益,而且还在于通过防渗处理,为今后我国类似这种复杂岩溶地区的防渗处理创造宝贵的经验,从而更加增强我国在岩溶地区修建水库和大坝的信心。

(5)认真总结经验,不断提高技术理论水平,以适应新形势发展的需要

猫跳河梯级电站的规模虽然比较小,但在各种不同的岩溶地貌形态类型地区,不同的岩溶水文工程地质条件下,建立起多式多样库坝的经验是很令人瞩目的。对于猫跳河 30 多年来的岩溶工程地质实践经验,贵阳勘测设计院曾组织有关人员先后编写了《岩溶渗漏和防渗处理》、《坝址岩溶地基稳定及工程治理》两份综合性专题总结,受到同行们的好评,亦为后在南盘江、乌江等大江河上进行更为复杂的水利资源开发提供了值得借鉴的范例。

主要参考文献

1. 邹成杰. 猫跳河流域喀斯特及其研究方法. 全国水利水电地质勘察丛书(之七), 水利电力出版社, 1959 年 6 月.
2. 邹成杰. 猫跳河流域喀斯特发育的基本规律. 全国喀斯特研究会议论文选集, 科学出版社, 1962 年.
3. 邹成杰. 猫跳河梯级电站岩溶渗漏及防渗处理. 水利水电工程地质勘察经验选编, 水利出版社, 1980 年.
4. 邹成杰, 谢树庸. 中国西南岩溶地区水电站库坝渗漏及防渗处理. 国际工程地质协会会刊(英文), No. 24, 1981 年.
5. 费英烈, 邹成杰. 贵州岩溶地区水库坝址渗漏问题的研究. 中国岩溶, 1984 年, 第 2 期.
6. 谢树庸. 猫跳河梯级电站坝基稳定及工程处理. 水文地质工程地质, 1982 年.
7. 邹成杰, 杨东蓉. 氟分析在猫跳河四级水电站深岩溶带渗漏勘测中的应用. 水利水电技术, 1985 年 第 11 期.
8. 邹成杰. 猫跳河四级水电站水库坝址岩溶渗漏及防渗处理的研究. 中国岩溶, 1986 年第 1 期.
9. 邹成杰. 国内外岩溶地区水库. 坝址防渗帷幕设计中工程地质问题的综述与分析. 水利水电技术, 1987 年第 1 期.
10. 邹成杰. 水库岩溶渗漏分级允许渗漏问题的探讨与分析. 工程地质, 1986 年, 第 1 期.
11. 邹成杰. 猫跳河水电站河谷边坡类型与工程滑坡的研究. 贵州勘察设计, 1988 年, 第 3 期.
12. 邹成杰. 岩溶地温场的研究与岩溶渗漏问题. 中国岩溶, 1989 年第 3 期.
13. 邹成杰. 岩溶地下水渗流场的初步研究. 贵州水力发电, 1988. 工程地质, 1990.
14. 邹成杰. 岩溶地下水渗漏地质模型和数学模型的初步研究. 中国岩溶, 1990 年第 3 期.
15. 邹成杰. 岩溶地下水观测及地下水动态分析. 贵阳工程勘察设计, 1992 年.
16. 邹成杰. 岩溶管道水汇流理论研究. 中国岩溶, 1992 年, 第 2 期.

THEORY AND PRACTICE ON KARST ENGINEERING GEOLOGY AFTER STEP DEVELOPMENT OF MAOTIAO RIVER

Zou Chengjie

(Investigation and Design Institute, Ministry of Energy and Ministry of Water Conservancy, Guiyang)

Abstract

About 70 percent of Maotiao River watershed is covered by carbonate rocks and karstification is extensively developed. From 1950's to 1970's, stepped water resource and hydroelectric power development were carried out along the whole river valley. Another water power station was built at the beginning of 1990's. Total installed capacity of 7 power stations is 252000 kW. At present, it is the most systemically step-developed river in

karst area of China. In this paper, the author has reviewed and summarized karst engineering geological practice of over 20 years along Maotiao River.

Key words: karst engineering geology, practice experience, step development of Maotiao River.

会议报导

岩溶工程地质国际讨论会在彼尔姆市召开

由俄罗斯科学院、乌克兰科学院下属有关部门及彼尔姆大学等单位组织,1992年7月在彼尔姆市召开了岩溶工程地质国际讨论会。出席会议的有俄罗斯、乌克兰、哈萨克斯坦、立陶宛等国的120余名代表,以及中国、德国和日本的4名学者。

会议有六个主要议题。

1. 工程岩溶学的一般问题 22篇论文

探讨了岩溶化岩石及上覆非可溶岩的物理、物理力学和化学性质的变化过程以及利用现代化手段和最新方法在微观层次上研究这些过程,阐述了在不同地质、水文地质条件和人类经济活动影响下塌陷形成原因和机制。提出用系统方法研究岩溶化岩体,建立岩体单元间相互作用的概念模型和岩溶强度和方向的预测模型。当前,对工程岩溶学理论和方法的研究尚较薄弱,缺乏统一的工程岩溶学名词术语和有关岩溶、岩溶潜蚀的规范性文献。

2. 区域岩溶 23篇论文

论文题目有岩溶发育的区域规律,岩溶和岩溶危害的区域预测与工程地质评价,深部岩溶发育特征,白垩岩溶发育规律等等。前苏联国土岩溶化岩石图(样本)引起了与会者极大兴趣。据统计,前苏联国土的67%,其岩石剖面有不同程度的岩溶化。提出要总结岩溶地区的制图经验,编写不同比例尺岩溶现象预测图编图指南,以适应不同阶段工程地质工作的需要。

3. 岩溶研究的地球物理方法 5篇论文

生物定位法已成功地应用在地质地理条件复杂和人类经济活动频繁环境下岩溶区和构造破碎带的制图工作中,地球物理方法在岩溶潜蚀预测中提供了有用信息。提出要进一步完善岩溶化岩石地球物理场数值模拟方法和岩石物理性质的室内和野外研究方法。

4. 岩溶水文和岩溶水文地质 6篇论文

论文内容涉及水交替滞缓带古生代沉积物岩溶形成的水动力条件,布拉茨水库迴水带水文地球化学演化及岩溶发育,矿山水排灌引起的岩溶地下水和地表水污染,用系统方法从水动力、热动力和物理化学角度研究《岩溶—淹没》的共生关系。

5. 岩溶灾害防治措施 8篇论文

就岩溶地区稳定性的工程地质评价,水工、道路、工业与民用建设中岩溶灾害的防治措施,岩溶灾害防治措施的有效性评价等问题进行了探讨。目前,这些措施需在实践中进一步论证和完善。

6. 岩溶区保护问题 5篇论文

岩溶区生态研究,岩溶区合理利用和保护是这一议题的主要内容。当前,在研究和解决岩溶区保护问题时,根据天然条件和人类经济活动影响下岩溶发育特征,广泛采用的工程措施。

会议出版了论文摘要汇编。会后组织了地质旅游。

同心摘译自(俄)《地质生态》,1993年3月