

# 水利水电地下工程技术现状、 发展方向及创新前沿研究

马洪琪

(华能澜沧江水电有限公司,昆明 650214)

[摘要] 介绍了我国地下工程技术取得的主要成就。面对城市化进程加快、资源短缺、环境恶化和土地衰退的严峻挑战,地下空间将成为新型国土资源加以开发利用,地下工程需求潜力巨大。提出了今后地下工程技术创新前沿研究的基础科学和关键技术问题。

[关键词] 地下工程技术;现状及发展方向;创新前沿研究

[中图分类号] TV554 [文献标识码] A [文章编号] 1009-1742(2011)12-0015-05

## 1 前言

新中国成立后,特别是改革开放以来,我国水利水电事业蓬勃发展,修建了一大批高坝大库、长距离输水隧洞和大型地下电站,为满足国民经济和社会发展需要发挥了重要作用。据统计,我国已建和在建的地下水电站约 120 座,水工隧洞累计长约 1 100 km。正在建设的金沙江溪洛渡水电站,左、右岸地下厂房开挖尺寸为 443.34 m × 31.9 m × 79.6 m(长 × 宽 × 高),各装 9 台 700 MW 水轮发电机组,装机规模达 12 600 MW,是世界上规模最大的地下水电站。正在建设的锦屏二级水电站,装机容量 4 800 MW,4 条引水隧洞单线长度约 16.7 km,开挖直径为 12.4 ~ 13.0 m,最大埋深约 2 525 m,具有埋深大、洞线长、洞径大的特点,地应力高,地下水十分丰富,技术难度极具挑战性。南水北调工程穿越黄河输水隧洞,长 2.6 km,地质条件复杂,采用盾构法施工和预应力环锚混凝土衬砌技术。这些工程的成功建设,极大地推动了地下工程技术的发展,标志着我国地下工程技术已处于世界先进水平。

## 2 地下工程技术发展现状

20 世纪 60 年代以前,我国地下工程施工以手风钻钻孔爆破开挖、人工出渣为主;围岩稳定性维护以架立支撑防止塌方的被动支护为主,施工速度慢,效率低,安全问题突出。伴随着改革开放,引进国外的先进技术、先进设备和管理经验,使我国地下工程技术产生了质的飞跃。从此以后,我国的工程技术人员在引进、消化、吸收的基础上再创新,拥有了一批具有自己特色的地下工程新技术。

### 2.1 大型地下厂房

我国地下厂房,无论规模多大,地质条件多复杂,基本摒弃了传统的混凝土衬护方法,依据新奥法理论,采用喷锚支护为永久支护,结合有限元分析成果和施工期安全监测,动态优化支护参数。用系统锚杆作浅层支护,用锚索作深层支护,维护围岩稳定。在喷混凝土中,普遍采用掺化学纤维或钢纤维,提高喷混凝土的整体性和抗裂能力。

在引进挪威岩壁吊车梁新型结构的基础上,我国采用双向爆破、锁角锚杆的岩台开挖技术,使岩台成型效果更好;在设计理念上,锚杆在松弛圈不受力,向深部传递吊车梁荷载,使岩壁吊车梁对地质条

[收稿日期] 2011-09-20

[作者简介] 马洪琪(1942—),男,上海市人,中国工程院院士,教授级高级工程师,华能澜沧江水电有限公司高级顾问,研究方向为水利水电工程施工;E-mail: mahq@lcjsd.cn

件的适应性更强<sup>[1,2]</sup>。

统筹规划引水系统、三大洞室和尾水系统的施工程序,对关键线路的主厂房总结形成了“平面多工序、立体多层次”的快速施工方法;提出了“先中后边、先软后硬”的主厂房顶拱开挖、支护原则;制定了高大洞室“施工分层、一次预裂、薄层开挖、随层支护”和“先洞后墙、逐层加固”的高边墙开挖稳定技术<sup>[3,4]</sup>。此外,较好地解决了复杂引水发电系统的施工期通风难题。上述技术的应用,提升了我国大型地下厂房的勘测、设计、科研和施工技术的综合水平。

## 2.2 大断面长隧洞

在大江大河上修建水电工程,施工期导流流量大,运行期泄洪流量大,需要修建大断面长隧洞,其开挖尺寸达 350 ~ 450 m<sup>2</sup>,围岩稳定问题突出。对于 II、III 类围岩,一般采用分层开挖、逐层支护的方法。对于 IV、V 类围岩则采用“超前勘探、预加固、分层分区开挖、短进尺、弱爆破、勤量测”等围岩稳定技术,形成了管棚双浆液预加固、中空自进式注浆锚杆预加固,格构梁或钢支撑与锚杆联合受力和分部开挖法、眼睛法、核心土法等成套技术。

锦屏二级水电站引水隧洞长 16.7 km,开挖直径 12.4 ~ 13.0 m,穿越地层的岩性主要为三叠系大理岩,岩溶发育,出水构造多,最大单点涌水量达 7.3 m<sup>3</sup>/s,地下水压力近 10 MPa。隧洞工程区轴线剖面上最大主应力( $\sigma_1$ )的最大值约 70.1 MPa, $\sigma_2$ 和  $\sigma_3$  最大值约 38 MPa 和 31 MPa,围岩强度应力比小于 2,岩体岩爆倾向性指数 1.32 ~ 5.8,具备发生高地应力破坏的强度条件。为深入了解隧洞沿线的工程地质和水文地质条件,主体工程开工前,先开挖了两条辅助洞,研究大涌水、强岩爆的治理对策。主体工程施工采用钻爆法和 TBM 法分别从两端掘进,大涌水量和高水压力及强烈岩爆时有发生,施工安全风险极为突出。为此,设计单位联合科研单位进行岩爆预测和防治研究,主要防治措施有:超前导洞应力解除法,修正掌子面形态法,纳米有机仿钢纤维喷混凝土封闭,水压锚杆快速加固等。对丰富的高压地下水,则以排水为主,辅以固结灌浆封堵。总体而言,钻爆法对于岩爆的适应性强于 TBM 法<sup>[5]</sup>。

隧洞混凝土衬砌的模板技术有:全断面针梁钢模台车、城门洞形钢模台车和顶拱 260°圆形钢模台车等,适应不同直径、不同断面形式的快速施工。

## 2.3 高压长斜(竖)井

抽水蓄能电站均会遇到高压长斜井或深竖井。

我国已建成的抽水蓄能电站 18 座,总装机容量 20 000 MW。广州抽水蓄能电站高压水道采用二级斜井布置,其中上斜井长 406.22 m,下斜井长 347.5 m,倾角 50°,开挖直径 9.7 m。天荒坪抽水蓄能电站则采用 700 多米长的一级斜井布置。

以往斜(竖)井开挖一般采用正、反井同时掘进,上口用下山法,手风钻开挖,人工装碴,卷扬机牵引斗车出碴;下口用阿力马克爬罐打反导井,自重溜碴,通风散烟困难,安全威胁大。20 世纪 90 年代中期,我国开发了反井钻机打导井,是斜(竖)井开挖技术的重大革新,由于其安全、快捷的优点,在水电系统中广泛采用,反井钻机的开挖深度,尚不能突破 300 m 的极限。

斜井混凝土施工的难点,是模板技术。我国自行研制的 XHM 型滑模,主要技术创新是:用前后液压千斤锁定在井壁上的中梁作为支承系统,由液压系统控制模板沿中梁滑升;由具有自锁功能的前后液压爬升器作为动力沿底部钢轨腹板带动滑模系统整体爬升。首次实现了斜井混凝土衬砌连续滑升技术,平均滑升速度 8 m/d,填补了我国此项技术的空白,且具有自主知识产权<sup>[6,7]</sup>。

目前,已形成了斜(竖)井导井开挖、扩大开挖与支护、混凝土衬砌、固结灌浆等成套技术。

## 2.4 无钢衬高压钢筋混凝土岔管<sup>[3]</sup>

随着抽水蓄能电站在我国兴建,大直径高压岔管的结构形式是一道难题。如我国第一座抽水蓄能电站——广州抽水蓄能电站,采用一洞四机的布置型式,主、支管分岔处内径由 8.0 m 变至 3.5 m,主管是大圆锥体,分岔支管是小圆锥体,大小圆锥体相贯。岔管承受最大静水头 610 m,最大动水头 725 m,P. D 值达 58 000 kN·M。如采用常规的钢岔管,需采用厚度 60 mm 左右的高强钢板,在洞外加工,则运输洞尺寸大,费用高,如在洞内瓦片拼装焊接,则施工条件差,质量难以保证,水压试验难度大。广州抽水蓄能电站与美国合作设计无钢衬高压钢筋混凝土岔管新技术,混凝土衬砌厚度 60 cm,28 d 抗压强度为 30 MPa,单层钢筋布置。

钢筋混凝土高压岔管的设计理念是:内水压力由混凝土传递到围岩的应力应小于该处地应力场的最小主应力,围岩承受绝大部分内水压力。钢筋混凝土衬砌主要起保护围岩、降低糙率和便于高压灌浆作业的作用。通过高压固结灌浆,提高围岩特别是地质缺陷的抗渗性及变形模量,并对混凝土衬砌

施加一定的预压应力。钢筋配置原则是根据有限元分析成果,限制混凝土裂缝开度。水道放空时,外水压力由混凝土衬砌及一倍厚的围岩联合承担,但要做好岔管顶部排水系统。

目前已形成了高压岔管设计理论、分析方法及开挖支护、混凝土衬砌和高压固结灌浆的技术标准和成套工法,在类似工程中广泛应用,取得了良好的经济效益。

### 3 国家需求及科技前沿问题

#### 3.1 国家需求

为应对气候变化,中国政府承诺,到2020年单位国内生产总值二氧化碳排放比2005年下降40%~50%,非化石能源占一次能源消费比重重要达到15%,据测算,常规水电占9%。

2010年8月,我国水电装机容量达2亿kW,稳居世界第一。但按国际惯例以发电量计算的开发程度仅为25%,而经济发达国家的开发程度在70%以上。因此,必须发挥水电在优化能源结构、减少二氧化碳排放中的主力作用。初步规划到2020年水电装机容量应达到3.8亿kW,其中抽水蓄能电站为5000万kW,常规水电3.3亿kW,新一轮水电开发高潮即将来临。

我国的水能资源主要集中在西部地区,这些地区的河流山高谷深、水面狭窄,地质条件复杂,地震烈度高。水电站厂房一般布置在地下;抽水蓄能电站除上下水库外,引水系统、发电厂房、尾水系统均深埋地下。

随着经济社会的进一步发展,城市化进程的加快,将面临资源短缺、环境恶化和土地衰退的严峻挑战。有识之士提出“Think Deep”的号召,把地下空间当成新型的国土资源加以开发利用,从地下油气库、地下变电站、地下仓库,发展到城市地下空间的开发与利用,地下工程需求潜力巨大。

#### 3.2 地下工程科技前沿问题

我国的地下工程技术虽然取得了长足的进步,但在基础理论研究、技术创新、新型材料研发等方面仍存在不少差距。

##### 3.2.1 基础理论

1)目前岩土工程科学中普遍采用的三维非线性有限元分析,预测大型地下厂房的塑性区、破损区,与实际开挖和运行过程的监测成果仍有较大差异。主要表现为对完整坚硬围岩、地应力中等的地

下厂房,塑性区的数值分析值远大于实际监测值;而对于锦屏一级水电站,围岩的强度与地应力比小于2的地下厂房,则厂房的塑性区、破损区及变形的实际监测值又远大于数值分析结果,而且,数值模型也很难概化复杂的地质构造,因此地下厂房的支护设计尚停留在经验阶段。应根据监测资料进行反演分析,修正计算假定和数学模型,提高数值分析的精度,以指导支护设计,促进岩土工程科学发展<sup>[3]</sup>。

2)岩爆机理试验研究<sup>[5]</sup>。岩爆机理研究工作以试验和监测为手段,主要包括室内岩石力学性质试验和现场微震、声发射和钻孔摄像等监测,从岩石力学性质、破坏细观或微观特征以及现场开挖过程中围岩破裂演化机制等来研究岩爆发生的内在机制和控制条件。但是限于试验手段、试验设备和理论模型的局限性,尚未取得满意的结果。

3)现有的水道设计理论和规范,尚停留在20年前的水平,未能充分利用围岩的承载能力,致使混凝土衬砌厚度和钢筋用量偏大,与实际受力状况差别大,急需加以改进和提高。

##### 3.2.2 技术创新

1)地应力测试技术。地应力对地下工程的洞室稳定影响很大。目前普遍采用水压致裂法,辅以经验法、孔壁法、室内AE法和收敛变形反分析法等,进行地应力测量和分析,但无论是量值还是方向,误差较大,相应制订的对策措施有一定的盲目性。

2)工程物探技术<sup>[8]</sup>。常规的地质勘探,主要采用钻孔、洞探和坑探等手段,获得有限点、线地质资料,据以推测和评价洞室的工程地质条件,工程物探技术作为传统地质勘探工作的重要补充手段,近年来发展很快。当前用地球物理方法对隧洞地质进行超前探测和预报仍是主流手段,如地震反射、声波反射、探地雷达、TSP203等,近年来又开展了“电场类方法”进行隧道地质超前探测,如激发极化法、瞬变电磁法、聚焦电流法、电磁波CT探测等,并建立相应的理论和分析方法。综合运用工程物探技术,开展相应的理论和分析方法研究,提高物探地质预报的准确性,对降低地质灾害风险、提高施工安全、加快施工进度,意义重大。

3)计算机仿真技术。采用仿真技术,依据地质勘探资料,构建三维地质模型及数字工程信息,可预测传统的地勘工作未发现的不良地质构造,提前研究相应的对策措施,以保证工程安全。

4)地质灾害防治技术。主要是指岩爆防治技术、大流量高水压突水防治技术及不良地质体塌方防治技术。如锦屏二级水电站引水隧洞,无论从理论上还是从实践上,都未找到满意的根治办法。不良地质体的塌方预警预报和治理技术也尚需提高。

5)工程安全监测技术。现行的地下工程安全监测,都是在开挖过程中埋设应力、变形、渗流、渗压等监测仪器,定期采集数据,提供相关信息,评价地下结构工作性态,或采取相应措施。2004年,葛修润院士倡导,在小湾水电站地下厂房开挖中,采用计算机信息技术和数码摄像监测技术,可动态演示地下厂房岩壁变形情况。虽然此项新技术尚存在缺陷,但应继续深化研究<sup>[3]</sup>。

### 3.2.3 新材料研发<sup>[4]</sup>

1)新型喷锚支护材料。新奥法理论的核心理念是开挖过程中应适时进行喷锚支护,控制围岩有害变形,充分发挥围岩承载力。但对于断层破碎带等V类围岩,自稳时间短,普通锚杆造孔难;对于一些涌水量大的围岩,现有的喷混凝土不能很快凝固封闭围岩。需研发新型喷混凝土材料和新型锚杆,以适应复杂的工程地质和水文地质条件。研究性能更好的化学纤维掺入喷混凝土中,替代挂网喷混凝土作永久支护。对于现在常用的预应力锚索,也应研究其使用寿命和防腐技术。

2)高性能爆破器材。作为炸药发明的国度,我国爆破器材的品种和性能已落后于发达国家。国外早就有预裂爆破和光面爆破的专用药卷,我国始终停留在把常规药卷绑扎在竹片上。国外的数码电子雷管,起爆精确、安全可靠,而我国与之差距较大。

## 4 结语

我国已建和在建的地下工程数量巨大,规模空前,经过60年的努力,对大型地下厂房洞室群,在勘测、设计、科研、施工等方面,取得了丰硕成果,位于不同地质条件的地下厂房,均安全运行。在长大隧洞的建设中,面对各种复杂的工程地质和水文地质

条件,采取针对性的处理措施,取得了丰富的工程经验。我国出现了一些新型的地下工程结构,如岩壁吊车梁、无钢衬高压钢筋混凝土岔管、双圈无粘结环锚预应力混凝土水工隧洞等,安全可靠、经济性好,应用前景广阔。

展望未来,我国将在西部地区建设一批大型地下电站和水工隧洞,地质、地震环境更为复杂。面对资源短缺、环境恶化和土地衰退的严峻挑战,把地下空间当成新型国土资源加以开发利用已是大势所趋,地下工程需求潜力巨大。

但是,我们也面临着众多挑战,特别是一些重大的基础科学研究跟不上实践的步伐。总体上技术创新能力不强,体制机制的制约,科研成果转化为生产力的环节薄弱,工程技术人员采用新技术的动力不足,新材料的研发能力薄弱,科技贡献率小。

随着技术创新体系的建设和完善,面对重大的国内需求和工程经验积累,我国地下工程技术的基础科学研究和关键技术攻关将取得新的突破。

## 参考文献

- [1] 王裕湘. 鲁布革水电站地下厂房岩壁吊车梁设计[J]. 水力发电,1988(12):54-56.
- [2] 马洪琪. 广蓄电站地下厂房开挖及岩锚吊车梁施工[J]. 水利水电施工,1993(4):58-62.
- [3] 马洪琪. 我国水电站地下工程施工技术的回顾与展望[J]. 水力发电,2006(2):55-58.
- [4] 马洪琪,周宇,和孙文. 中国水利水电地下工程施工[M]. 北京:中国水利电力出版社,2010.
- [5] 中国水电顾问集团华东勘测设计研究院. 雅砻江锦屏二级水电站引水隧洞围岩稳定性与支护衬砌结构设计研究综合报告[R]. 2010,10.
- [6] 关雷,夏松雨. 广蓄电站斜井混凝土衬砌滑模施工技术[J]. 水力发电,1993(7):54-57.
- [7] 熊训邦,孙殿国,原有全,等. XHM-7型斜井滑模系统的研制与应用[J]. 水力发电,1998(8):46-49.
- [8] 楼加丁. 聚焦电法(BEAM)在隧道超前预报中的研究初探[J]. 工程物探,2009(总第106期).

# **A study on the status quo, development trend and the innovation frontline of hydraulic and hydroelectric underground projects**

Ma Hongqi

(Huaneng Lancang River Hydropower Co. , Ltd, Kunming 650214, China)

[ **Abstract** ] This paper introduces the major domestic achievements on underground projects and technology. As cities are faced with a series of social and environmental problems, such as speeding up of urbanization, shortage of resources, worsening of environment and soil declination, underground space will soon be developed and utilized as a new form of national resources, and the demand for underground projects has a huge potential. The paper elaborates on the fundamental scientific and critical technological problems in the research of underground project technological innovations.

[ **Key words** ] underground project technology; status quo and development trend; study on the innovation frontline

---

(上接 8 页)

## **300 m grade concrete faced rockfill dam adaptability and countermeasures**

Ma Hongqi

(Huaneng Lancang River Hydropower Co. , Ltd, Kunming 650214, China)

[ **Abstract** ] This paper summed up the main experiences and lessons of 200 m grade rockfill dam construction, analyzed 4 typical projects of 300 m grade dam, put forward the scientific research and key technical problems of 300 m grade dam.

[ **Key words** ] concrete face rockfill dam; adaptability; countermeasure research