

# 水利水电工程地质勘测方法与技术应用综述

范中原 孙云志 魏岩峻 周乐群

(水利部长江勘测技术研究所,湖北武汉430011)

**摘要:**20世纪70年代以前,水利水电工程界普遍认为我国在水利水电行业中的勘测技术水平低、设备落后、周期长、勘测技术成果不能完全满足设计、施工的需要。根据研究资料,我国水利水电工程勘探指数在同类岩石地区至少高出国外33%~75%。例如,在石灰岩地区筑坝,国外勘探指数为0.074~0.22,国内为0.13~0.90;沉积岩地区,国外勘探指数为0.10~0.12,国内为0.14~0.36;变质岩地区,国外勘探指数为0.02~0.07,国内为0.03~0.13。建国以来,特别是改革开放以来,我国的各项工程建设快速发展,国内外科技发展日新月异,各项工程的勘察也获得了相应的进步,勘察技术水平迅速提高,勘察方法和勘察手段的创新和发展,为保证勘察成果质量、提高劳动生产率、缩短勘察周期都取得了卓有成效的业绩。综述了工程地质测绘与编录、工程钻探与山地勘探、遥感技术、工程物探等勘测方法和技术在我国水利水电中应用及其成果。

**关键词:**水利水电工程;地质勘测;勘测技术;遥感技术;工程物探

**中图分类号:** P624

**文献标识码:** A

## 1 工程地质测绘与编录

工程地质测绘与编录是一项基础工作,也是最重要、最基本的勘测方法。地质测绘和编录则可以通过大面积的地质调查获取丰富的资料,并在充分运用地质学、工程地质学和大量工程实践经验的基础上分析得出工程地段内的地质体和地质作用在时间和空间上的演变过程,判断出地下一定深度内的地质情况,指出可能存在的各种地质问题,调动一切可能的手段补充、深化认识、协调各个有关学科的数据资料,以求得地质问题的圆满解决。据不完全统计,从20世纪50年代以来的近80个大型水利水电工程中,采用1:20万区测资料进行编图和分析构造稳定性问题的,约占工程总数的15%,每个工程涉及的平均面积约为5 696 km<sup>2</sup>,12个(80×0.15)工程涉及1:20万的测绘面积约为68 000 km<sup>2</sup>;采用1:10万资料的约占26%,单位工程涉及的面积为1 914 km<sup>2</sup>,21个工程涉及的1:10万的测绘面积为40 000 km<sup>2</sup>,采用1:5万资料的约占47%,单位工程涉及的面积为864 km<sup>2</sup>,38个工程涉及的1:5万测绘面积为30 000 km<sup>2</sup>;采用1:2.5万资料的约占41%,单位工程涉及的面积250 km<sup>2</sup>,33个工程涉及的1:2.5万测绘面积为8 200 km<sup>2</sup>。实际上,三峡工程区域地壳稳定性和地震活动性的研究中的有关区域地层、岩性、地质史和大地构造环境的研究,除充分利用不同时期各地方部门的区测成果外,还专为三峡工程进行了数万平方公里,比例尺从1:500 000~1:25 000的地质测绘,其中包括1 026 km<sup>2</sup>的地质研究空白区。

此外,以各种比例尺(1:2.5万~1:100)的测绘与编录手段为基础,进行的各项专题研究也都取得了优异的成果,例如岩溶水文地质测绘的专题研究为彭水水利枢纽水库通过分水岭向邻谷渗漏问题和隔河岩水利枢纽水库通过分水岭向下游主河槽的

渗漏问题的评价都提供了有力的论据。三峡坝址区的断裂构造问题,从在三峡工程前期勘察中到施工阶段大部分的断裂构造都已被开挖的时期,都一直被列为专题,并且都以地质测绘和编录的资料为基础(依据),辅以先进的、行之有效的探测手段,结合有针对性的勘探钻孔等,最后以确定出其分布特征和结构特征为专题成果,成果具有鲜明的预见性,为工程的优化设计提供了可靠的依据。

## 2 工程钻探与山地勘探

不论国内或国外,当前钻探仍然是工程勘察中能直接获取地下信息的最重要的手段。一般大型水利水电工程勘探工作量虽然总平均数有明显的下降趋势,但当前的平均值仍处在1~1.5万m左右。

平硐和竖井(或大径钻井)勘探,是山地勘探工作中的重要组成部分。在我国大型水利水电工程勘察中,平硐与竖井勘探量与钻探工作量之比一般为0.1左右,跟国外特别是日本相比这个数字相差较大,据不完全统计在日本此数字大于0.2的工程约占统计工程数的73%。我国近年来也有此趋势,两者相比平硐和竖井工作量逐渐有所增加,目前此比值已渐接近于0.2。

多年来,钻探与重型勘探在工程勘察中发挥了重大作用,得到了广泛应用,并在不断开发与研究新技术、新方法的过程中,为提高劳动生产率、缩短勘察周期、保证勘察成果质量做出了很大的贡献。

(1) 金刚石钻进技术。在我国工程勘探中应用始于20世纪70年代,至80年代初达到普遍推广应用,这一应用彻底改变了有关勘探部门钢粒钻进和硬质合金钻进的技术落后状况。钻探效率成倍增长,岩心采取率普遍达到90%以上。钻探工艺的发展,又带动钻探设备、机具和仪器的发展,使钻探工作的质量、

效率显著提高。

(2) 砂卵石层钻进技术。砂卵石钻进和取样一直是水利水电工程钻探的一大技术难题,在“六五”科技攻关中,对深厚砂卵石层钻进和取样技术的研究,比较好地解决了这一难题。研究成功的SM植物胶和MY-1A植物胶冲洗液金刚石钻进砂卵石层取样新的技术,推广较好,已产生了明显的社会效益。

(3) 金刚石绳索取芯钻进技术。是一种先进的钻探工艺,其核心技术是在不提钻的情况下可以直接从专用钻杆内用绳索将装有岩芯的内管提到地面采取岩芯。20世纪80年代以来的实践证明,绳索取芯不但适合深孔,而且在浅孔中应用推广也有其明显的优越性。在水利水电工程勘察中的重点推广单位总结认为,在复杂地层中钻进,对防止孔壁坍塌、掉块、缩短回次进尺、减少岩芯对磨、提高取芯质量特别是软弱夹层取芯质量具有重要作用。

(4) 软弱夹层的钻进技术。普通金刚石钻进法对采取软弱夹层仅有不足50%左右的成功率,这主要是由岩芯对磨所致。为此而采取的一系列技术措施,如宜采用 $\varnothing 75$  mm以上,总长不超过2 m,有3层镀铬半合管、有悬挂装置、扶正装置、岩芯堵塞报警装置的绳索取芯钻具和其它一整套保护软弱夹层不受冲刷、不受挤压、减少振动等的措施构成的系统,即为软弱夹层的取芯技术。该项技术无论是研究过程中而采取的包括开挖钻孔的系列检查对比或是经多年应用而取得的显著社会效益都可以证明它是一个行之有效的技术方法,并且该项技术的全部内容已纳入有关的现行规范中。

(5) 套钻技术。套钻是在软弱层带中能够取出原状岩芯的一种特殊手段,能保证在破碎岩层或软弱夹层中取出高质量的岩芯。其操作是,首先在拟用套钻取芯的钻孔段的中心钻1个小直径(36~46 mm)钻孔,深约1~1.5 m进行插筋并灌注粘结剂。待凝后,再用110 mm孔径套取岩芯。由于粘结剂的作用,使含软弱夹层的岩芯与插入的细钢管凝结成一体,因而不仅软弱夹层能够被完整的取出,而且尚能基本保持原状结构。如果在套钻时能应用相应型号的随钻定向取芯钻具,还可获取软弱层带和其它构造形迹的产状要素。套钻技术在黄河小浪底、龙门工程的试验和应用中取得了相当满意的效果。

(6) 大口径钻探技术。在工程地质勘察中该项技术实际上是利用钻井法机械化开凿竖井,它较人工开挖竖井在减轻劳动强度、保证人身安全、提高工作效率以及消除爆破破坏岩体结构的影响等有明显的优越性。目前的大口径钻探设备一般可进行800~1 200 mm口径钻井开凿,可钻深度随钻进方法而异,取芯钻进孔径不大于1 200 mm,最大钻进深度可达50~60 m;全断面钻进孔径一般为800~1 200 mm,钻进深度可达100 m甚至更深。

大口径钻探,不仅可以通过岩芯和孔壁直接观察任何形式的软弱层(带)和其它地质现象(如岩层的岩性、透水性、出水点、断层和风化等);而且还可以通过孔壁的地质编录研究地基岩体结构和水文地质结构;利用钻孔岩芯及孔壁取样进行岩体物理力学性质试验;以及利用大口径占孔对出露的软弱层带直接进行观察,对其可能产生的垂直和水平位移在一定时期内进行定期监测等。

### 3 遥感技术应用

遥感技术按照遥感平台的高度不同,一般分为航天遥感、航空遥感和地面遥感共3大类。由遥感直接提供的卫星照片、航片以及陆地摄影照片,都是按一定比例尺缩小的自然景观综合

立体影像图,能真实、集中地反映大范围的地貌形态、地层岩性、地质构造和滑坡、崩塌、泥石流、岩溶等外动力地质现象。使用的专业、部门通过对其进行解译研究即可得到广泛应用。遥感技术由于视域广阔、信息丰富、具立体感、卫星影像成周期性重现以及获取资料快速等特点,被广泛应用于水利水电工程中有重大工程地质问题及相关的环境等问题的调查与研究。

(1) 区域构造稳定性研究。由于遥感图像能提供大量宏观的线性构造信息,较好地反映区域地质特征、水系分布特征和地貌形态,所以对研究区域构造格架,确定断裂体系及活动性以及评价工程及其周缘地区的构造稳定性有重大作用。因此遥感技术的应用也成为研究此问题必用的手段。

(2) 水库区崩塌、滑坡、泥石流调查。在大型水利水电工程库区岸坡的滑坡、崩塌、泥石流以及某些松散堆积体的调查中,有一些工程应用遥感技术利用航卫片或彩红外片进行地质解译,结合野外现场观察、复查和检查查明了许多久拖不决的影响库岸稳定性评价的大型或较大型、塌滑体的数量、分布及其稳定状态。

(3) 岩溶调查。利用遥感影像,特别是彩红外影像进行岩溶及岩溶水文地质调查有其特殊的优势,像片解译不仅能很好地判读各种岩溶地貌现象,而且还可以充分利用和其它介质红外光谱的差异,判断地下水的分布和泉水分布等。清江招来河、高坝洲、黄河万家寨等工程曾利用彩红外航片解译来研究岩溶及岩溶渗漏问题,都取得了良好的效果。

(4) 中小比例尺地质测绘填图。推广遥感技术,在保持必须的野外工作量和成图现场校核工作的前提下,中小比例尺地质图以遥感成图取代常规地质测绘;建筑物及其它重要地区大比例尺工程地质图优先考虑遥感成图。这是十年前在全国水利水电勘测工作会议上由水利水电规划总院提出的“勘测技术发展目标”文件所确定的。

(5) 岩土工程开挖面地质编录。为适应大型水利水电工程施工中进行反馈设计、安全预报和存档备查的需要,在人工开挖高边坡、大型地下建筑物和大坝基坑的开挖中采用地面遥感技术,进行地质编录,并为有关的稳定分析和现场预报提供翔实的地质资料和数据是很必要的。为此长江勘测技术研究所“七五”、“八五”和“九五”科技攻关中开发和完善了“高边坡快速地质编录系统”,并成功地应用于长江三峡永久船闸、澜沧江小湾、清江水布垭等工程的岩质高边坡开挖中的地质编录。该项技术采用的是数码像机摄影,微机现场采集及预处理,自主开发的软件处理可随时提供岩质高边坡的连续彩色影像图和地质所需的将边坡开挖面置于任意方位的线划图。

(6) 水土保持、防洪与移民安置容量研究。1994年,长江勘测技术研究所承担的长江上游水土保持重点治理区滑坡、泥石流发育程度与稳态区域研究项目,该项目在研究中利用TM卫片对陇南、金沙江下游、三峡库区3大片进行解译与发育程度的划分(滑坡分四级,泥石流分五级)作出了区划图,提出了防治意见和预警系统建立的基本设想。

长江防洪与河道整治,遥感资料以其具有多时段(洪水位、枯水位)的、具有一定透视性的信息和对水体反映极敏感等特性,奠定了它能为河道和防洪设施现状的研究提供出新的和有用的资料。1990年地矿部航空物探中心与长江委规划处、综勘局一道,开展长江中游干流防洪工程现状遥感调查,用TM卫片和1:3万~1:5万彩红外航片进行解译和编写报告,提交的成果获得了较好的成效。

移民安置容量研究,航卫片,尤其是彩红外航片,以其对土地利用类型的可判读性和现实性,为移民安置容量分析确定提供了新手段。

## 4 工程物探

在我国工程物探虽然起步较晚,但在水利水电工程勘测设计单位从 20 世纪 80 年代初至 90 年代初逐渐引进和装备了一些必要的仪器,如信号增强式地震仪、综合测井仪、电法仪、透视仪、声波仪、管线仪、地质雷达和钻孔彩色电视系统等,使物探仪器得到了全面的更新,其中有些是当时或至今都是世界水平的新仪器,大大地提高了数据采集精度和野外工作效率,促进了物探的发展。

(1) 钻孔彩色电视系统。研制始于 20 世纪 70 年代中期,Ø91 mm 钻孔彩色电视完成于 70 年代末,同时,一方面通过部级鉴定,一方面在葛洲坝工程的施工勘察中,为在钻孔内寻找和确定软弱夹层特别是泥化夹层的位置、尺寸和性状发挥着不可替代的作用。以后 Ø53 mm 的钻孔彩电是为适应水利水电工程勘察的大多数钻孔都是 Ø56 mm 的金刚石钻孔而设计制造的;50 mm 的钻孔彩色电视是在电子技术发展的基础上为适应水平风钻孔观察而设计制造的,并首次将 CCD 光电耦合器件应用于钻孔电视。该产品的特点是电路设计合理,集成度高,性能稳定,与传统的摄像管探头相比,具有彩色图像重现性好、几何失真小、寿命长、耐冲击、体积小、重量轻、功耗低等特点,是一个更新换代产品。

当前,随着数字技术的发展,钻孔彩电又在开发的图像处理系统基础上研制出多功能钻孔彩色电视系统,系统采用工控级主机,形成控制器、监视器、录相机三合一的一体化主机。主机可配接多种不同口径的钻孔电视探头,实现图像数字化实时采集压缩存储,成果可刻录成 VCD 光盘,还可进行后期图像处理及制作。

(2) 地球物理层析成像技术(CT)。CT 技术是利用已有的平洞或钻孔,通过对采用一定发射和一定接收方式产生的透射波的采集与处理,反演孔洞间岩体的波速值,并对区间岩体进行判断、评价的一种技术方法。当前在勘探孔、洞间了解岩体情况尚没有一个经济的、有效的技术措施做进一步工作的情况下,CT 技术不失为是一个查明孔洞间岩体总体完整性程度的好方法。做得好,不仅能节约一定的勘探工作量而且还会对岩体物理力学性的整体评价质量的提高有所促进。所以“七五”国家重点科技攻关以来,包括“八五”和“九五”攻关几个涉及水电建设的项目,涉及水利水电工程地质勘探的课题和专题中大多数都涉及 CT 技术攻关的内容,并获得许多很有成效的成果。

(3) 浅层地震反射法的应用。浅层地震反射法是 20 世纪 70 年代末,80 年代初发展起来的一种工程地震勘探的新方法。它首先由加拿大人使用信号增强式地震仪,采用“最佳窗口技术”进行试验获得成功。经过“七五”、“八五”国家科技攻关无论是浅层 P 波反射法或是浅层 SH 波反射法都有较大地发展;在浅层反射方法研究方面,对浅层反射震源、反射最佳窗口、水平多次迭加技术等野外工作方法技术进行了系统研究和试验,横波反射震源研制了钨钼震源垫板,明显增加了激发横波的能量,在激发与接收参数选择、多次覆盖观测系统及提高分辨率和信噪比的技术措施等方面也都积累了宝贵的经验;在浅层反射(包括 P 波和 SH 波)数据采集和处理方面研制出了完善的 ES 数据采集系统和适合多种情况的各有特色的几套浅层反射数据处理

软件,其中 ES 磁盘采集系统及 CSP 浅层反射处理软件实现了数据采集和数据处理一体化。

(4) 高密度电法勘探。高密度电法就其原理而言,它仍属电阻率法的范畴,它引进了地震勘探的数据采集办法,野外测量时可全部电极(几十根至上百根)置于测点上,然后利用程控电极转换开关和电测仪来实现数据的快速、自动采集,测量结果可实时处理并显示地电断面或剖面图。这是视电阻率法(包括电剖面法和电测深)应用现代电子技术和计算机技术,大幅度提高了地电信息的采集量,并从传统的一维勘探发展到二维勘探的技术上的一个极大的进步。

(5) 岩体弹性波测试技术。由于地基岩体的连续弹性波测试资料既能为工程岩体质量评价、划分风化带和卸荷范围的确定提供定量指标,又与岩体的物理力学性质有密切的关系,所以很多大型水利水电工程不论是勘察阶段或者是施工阶段都进行了大量的岩体弹性波波速的测试工作。目前该项技术除一般的地震勘探测试以外主要还有以下几种测试:① 声波测井技术:这是一种在工程勘察过程中最常用的一种测试技术,80 年代末至 90 年代初以来,在水利水电工程系统又逐渐发展起小口径全波列数字声波测井新技术,它既能直接测得井壁岩体的纵波(首波)波速又能通过计算机处理提取(获得)大于井壁波速的岩体中的横波传播波速,还能通过对全波列的频谱分析、能量衰减分析,来进一步判断地质界面和裂隙的发育程度。和这一新技术相配套的,有的单位在科技攻关中已研制成功小口径全波列数字声波测井仪,最近又推出了新型号的同类仪器。它除了仍然配备全套的数据处理软件外,突出的特点是,它的实测深度在应用中实际达到了 270 m 以上。一般情况下实测深度达到 250 m 应该没有问题。这一新技术已在三峡工程临时船闸中隔墩岩体卸荷带研究中得到初步应用。② 坝基岩体质量快速检测系统:该系统是在美国康泰公司生产的 Wave Book/516 基础上开发而成的工程物探虚拟仪器。仪器由声波发射系统、数据采集机信号处理系统与解释反演三部分组成。该仪器的关键技术是其声波发射系统,它由发射换能器和发射机组成。发射换能器采用了新型的超磁致伸缩材料,该材料的磁致伸缩效应最大应变可达到  $\epsilon = 1.0 \times 10^{-3}$  以上,无论是最大应变或是能量密度均较压电陶瓷的或是纯镍的都大的多,而材料的声速(仅为 1 700 m/s)却比压电陶瓷和纯镍的要小 3~4 倍。声波发射系统分为地面和井下两种系列,其中地面系列又分为 3 种,可分别用于土层勘探、岩土、混凝土及测桩和用于锚杆检测等;井下系列的两种:直径分别为 Ø52 mm 和 Ø73 mm、主频分别为 9 kHz 左右和 5 kHz 左右,前者为无指向性震源,后者为指向性震源,它在混凝土中穿透的距离分别为 28 m 左右和 45 m 左右。总之该岩土工程质量检测分析仪的声波发射系统具备小体积宽频带、短余振、大功率等特点,是理想的工程地球探测声波震源。③ 瞬态面波探测技术:瞬态面波勘探技术近 10 多年来在我国发展较快。理论与实践均表明面波在层状岩土(弹性)介质中传播时具有显著的频散现象。由此可对地层作近似划分,并可根据实测频散曲线用近似分层算法求出测点不同深度的  $V_R$  真值。由此可见,瞬态面波探测层状岩土层中的软弱土层或软弱夹层以及其它大致呈成层状的不良地质体的位置、分布及形态特征等是可行的,10 余年来瞬态面波探测在路桥基、机场跑道、城市建筑地基以及部分水利工程等的地基勘察和地基处理检测方面所发挥的作用也完全证明了它是岩土体弹性波测试中的一项有效的探测技术。

(编辑:刘毅)