

我国弹性波探查与检测技术的重大进展

□ 王振东

一、反射波法日臻完善

地震反射波法在 70 年代之前曾试用于工程勘察领域,由于浅层地质情况复杂和当时技术条件所限,未能取得令人满意的效果。

进入 80 年代,信号增强型浅层地震仪在我国面世,用于工程勘察的浅层地震反射波法(简称浅反)试验再次在世界和我国兴起,地矿、水电、铁道和中科院等部门,纷纷开展有关浅反的各种试验。如不同震源、不同观测系统试验,反射“窗口”选择或共偏移观测试验,垂直叠加和水平叠加,纵波和横波、陆上和水上试验等等。与此同时,浅震仪性能的不断改

进,更为此类试验创造了条件。地矿部门唐大荣等在武汉过江隧道、王庆海等在黄浦江过江隧道、张世洪等在元宝山露天煤矿等进行陆上浅反试验,均取得了较好的成果。吴达元等发表的《关于浅层反射波法若干技术问题的探讨》(1994),不仅是水利水电系统“七五”攻关以来浅反应用试验研究的经验总结,同时也代表了我国现阶段浅反试验研究水平,经过十多年的反复试验和不断总结,笔者主编的行业标准《浅层地震勘察技术规范》已通过终审,不久即将正

式颁布,浅层地震的反射波法在我国已日臻完善,达到了世界先进水平。

在“八五”期间小反射技术也得到进一步开发利用。铁道部钟世航等在隧道开挖工作面上,进行极小偏移距单点剖面测量,主频高达 400~800Hz。在云台山隧道,曾对 21 米外的破碎带和 36 米外的断层作出了准确预报。水利部刘云祯等将单点反射剖面测量方法加以改进,实现水上无气泡效应、宽频带连续数据采集,经福建平潭跨海特大桥基工程勘察实际应用,勘察效果优于常规水声勘探的浅层剖面测量;在陆地亦可取得形象直观的彩色高密度反射剖面(又称高密度地震影像剖面),用于探测岩溶塌陷和废坑砂巷效果良好,其勘探深度数倍于地质雷达,而分辨率仍可与其媲美。

二、层析技术进入实用

弹性波层析技术与电阻率层析技术是近十几年才发展起来的物探新技术,图像直观,有较高的分辨率,我国对于这项技术的研究开发已进入实用阶段。

成都理工学院研究开发的井间地震层析成像软件系统,包括观测数据的预处理、野外观测及实验数据形成、用作正反演计算的参数文件的组织、正演模拟、反演计算、成图成像及帮助提示部分等,在 486 以上的微机或工作站上运行。该项技术已先后在四川桐子林水电站坝基、龚咀水电站大坝、广东的深圳、广州、肇庆等多处进行了野外观测和数据处理,为水电站坝基、水库选址、工程建设等多种地质问题调查提供了可靠的依据。

地矿部物化探所采用跨孔层析成像技术,检测水下深埋管道破损。工区位于上海市外高桥长江入海口,合流污水工程管线外径 4.9 米,圆管每段长 1 米,由 5 片钢筋水泥结构的圆弧形瓦组接而成。水深 14~18 米,管线位于水底淤泥层下方 7~8 米深处,管线破损地段距江堤约 600 米。数据采集后,算法采用射线追踪法,成像采用杨文采等研制的图像重建系统,取得了比较理想的效果。

此外,水利水电系统成都勘测设计院、长委

会物探大队、黄委会物探大队,分别在桐子林电站、三峡坝址、黄河小浪底水利枢纽坝址进行过孔间地震层析工作,其中小浪底工区地下厂房两组深孔(孔深 153~184 米)大跨度(孔距 82 米)地层层析成像,圈出的两级低速区和破碎最严重岩段的分布范围,对工程施工具有指导意义。

三、面波勘探崭露头角

面波在常规地震勘探中又称地滚波,1960 年霍伊克罗姆和福斯特在路面上进行稳态面波勘探试验成功。1982 年,每熊和佐藤开发出 GR810 稳态面波测试系统,使稳态面波勘探得以实用化商品化。

中国的科技人员在 1990 年前后开始了面波勘探试验,由于数据采集一直沿用两个检波器接收的模式,数据的信噪比不高,探测的深度和精度有限,采用锤击振源,瞬态面波探测深度一直在 10 米左右徘徊。1993 年刘云祯等用自行设计研制的地震仪,在数据采集方面打破传统模式,采用展开排列多道接收;在数据处理方面,通过多道面波记录处理出面波速度变化曲线,再经正反演拟合计算进行速度分层解释并把锤击振源的面波探测深度由 10 米左右提高到 30 多米。1995 年 12 月,在日本与稳态面波勘探系统做了一次对比试验,使用 350kg 的稳态激振器,探测深度怎么也超不过 10 米,而我国研制的 SWS-1 多功能面波仪,只用 24 磅大锤就能探测到 30 多米,并且结构分层与钻孔分层对应良好。

近几年来,由于 SWS 面波测试系统研制开发成功,瞬态面波勘探已在几十个大中型工程应用中崭露头角。如果说是日本人首先使稳态面波勘探实用化商品化,那么,最先使瞬态面波勘探实用化商品化的则是中国人,这是中国物探界的光荣。

四、微动应用正在兴起

目前,对微动的应用研究大致已形成两大流派,一派主要研究周期较长的微动(又称长波微动、地脉动),周期范围约在 1 秒到 10 秒,甚至更长;另一派主要研究短周期微动(俗称常时

微动),其周期一般从 0.05 秒至 1 秒。

长波微动探测法主要是利用其稳定随机特性:依据稳定随机过程理论,由微动记录提取面波信息,计算基阶瑞雷波频散曲线,进而通过正反演拟合求取地下横波速度构造,其探测深度范围可从 100 米至 3000 米,大大超过敲板法的横波勘探深度。由于不用人工震源、数据采集和电算处理相对较为简单,勘查费用只及反射地震勘探费用的 1/50 到 1/100。这项技术,北京市地质勘察技术院已在北京几处地热探井主要地层层位预测中得到成功应用。最近,他们又将其中的空间自相关法推广到浅层(几米至 100~200 米)应用,已取得初步成功。

常时微动的测量方法和数据处理方法,目前已在我国较大范围内推广应用,主要用于评价建筑的抗震性能,包括评价建筑物的老朽程度和施工加固效果;为抗震设计提供科学依据,参与地震影响小区划分;结合少量钻孔资料,进行工程地质分区。在滑坡地质调查中用于划分稳定地块和活动地块,求滑动界面和研究滑坡地区的物性。

微动的上述应用,在我国已引起许多部门的重视,微动的应用正在能源、工程和灾害地质调查等领域兴起,它的兴起进一步显示我国的科技水平和管理水平正在上一个新的台阶。

五、隧道开挖超前预测预报

作为铁道部科技发展规划项目,经过众多科技人员近 5 年的辛勤劳动,对采用多种方法从理论、研究、仪器设备研制,到现场数据采集和资料处理解释,做了大量开创性的研究和探索。其中用“极小偏移距单点连续剖面法”(钟世航等)和“水平声波剖面法”(王石春等)在隧道中进行超前预测预报,在国内外均属首次。而用“负视速度法”(曾昭璜等)进行隧道开挖工作面前方不良地质预测预报研究,则与国外同期开发成功的“隧道 VSP 法”原理相同,在思路上不谋而合,但我国运用多波探测技术略胜一筹,综合利用 P 波、S 波、PP 波、PS 波、SP 波、SS 波、衍射波、多次波等进行预报,更提高了识别开挖前方的断层及不良地质界面的可靠性和精确

度。徐立成等研究开发的地震多波 CT 数学方法及软件亦颇有新意。上述方法在宝中线颍河隧道、老爷岭隧道、侯月线云台山隧道、南昆线康中隧道、朱花山隧道、羊寨隧道的实地预测预报,证明探测距离可以从几十米至 100 米,取得了较满意的预报效果。专家鉴定认为,这套隧道超前预报的弹性波探测方法是经济、高效的先进预报方法,与当前国际同类技术相比,达到了国际先进水平。

六、水底隧道工程质量无损检测

浙江省地震局在甬江水底隧道管段基础工程质量检测中,结合模型试验结果进行了多种方法综合多波测试,包括动态反射、首波测试、面波勘探、对穿测试、地震测井和 TVR 综合检测。检测中还使用了专门为该项目而设计的两分量超声换能器及其他超声换能器,以保证从多角度取得信息,成功地实现了工程多波地震勘探,获得了管底注浆和抛石层不均匀构造的具体形态和性质以及注浆的速度和强度结构,解决了一个工程检测难题。成为将工程多波地震勘探的理论、方法和技术成功应用于小尺度不均匀构造探测的典型实例。

另外地矿部物化探所采用跨孔层析技术,也成功地探测了上海市长江入海口处一段水下深埋管道的破损情况。

七、地基与基桩工程质量无损检测

天然地基往往不能满足上部建筑物的荷重及抗震的需要,须作适当的加固处理。经加固处理后的复合地基是否符合设计要求,传统的检测方法是进行静载荷试验,该方法虽能较准确地确定复合地基的承载力,但设备笨重,时间较长,费用较高,因此只能检测很小的比例,不能反映整个地基的状况。河北地勘局地球物理勘察院申秋学等运用动载荷试验实测动刚度,与同条件下的静载荷试验的静刚度及承载力对比,发现二者之间有很好的相关性,可以此动刚度来推算静刚度,进而推算地基的承载力。

大量动载荷试验测试表明,只要严格遵守同条件测试对比的原则,确定好静动对比系数,则动测地基承载力的相对误差可控制在允许的

范围之内。

黄委会物探大队李丕武提出的动测地基承载力的附加质量法,其基本原理仍依据“单自由度的质量—弹簧—阻尼模型”理论,创新点在于通过在地基土体系上附加一级或多级质量块,直接求出地基的参振质量及动刚度,从而摆脱了土动力学中求“参振土质量”的困扰。

近十几年来,随着桩基础的大量使用,基桩无损检测的方法也发展较快,较早投入测试的方法有频率法等多种方法,其中地矿系统研究开发的反射波法、交通冶金系统研究开发的机械阻抗法、湖南大学研究开发的动力参数法和同济大学研究开发的声波透射法已经编入 1995 年 12 月经建设部和地矿部发布的行业标准《基桩低应变动力检测规程》。在已有的低应变动测方法中只有机械阻抗法是既判断桩身成型质量又同时推算桩基承载力的综合检测方法。1992 年许昭永和段永康等又提出一种新的综合检测方法,叫做波列振幅衰减法。该方法综合利用了直达波、反射波、尾波及其运动学和动力学特征,同时判断桩身完整性和估算单桩承载力并给出相应的沉降量。采用这种双参数控制给出的承载力与静载荷试验对比,偏差小于 10% 的约占 75%。其适用范围,对桩径 30~210 厘米,容许承载力 200KN~12000KN 的混凝土灌注桩都可使用,对预制桩、深搅桩也有良好效果。

八、公路工程质量无损检测

反映公路工程质量的主要指标有路面厚度、路基压实度和回弹模量,对于刚性路面,还有抗压强度和抗折强度,对于柔性路面有弯沉值等质量评价验收指标。

河北地勘局物探大队杨成林等经过 3 年不懈努力,综合采用瑞雷波法、超声波法和音频共振法测试各种路面厚度和刚性路面的抗压、抗折强度,测定公路各结构层的厚度和回弹模量值并推算柔性路面的弯沉值,以及对公路边坡和挡土墙的稳定性的作出评价。

路面厚度用共振法测试,测试误差一般小于 5%。压实度、回弹模量、抗压强度、抗折强度

均可通过纵横波原位测试和一定数量对比试验,求出各经验公式的待定系数,再通过经验公式计算求出。弯沉值计算公式复杂一些,但在测得路面和基层的厚度与回弹模量值后亦可通过查表和公式计算求得。

瑞雷波法是评价边坡和挡土墙稳定性的主要方法,采用稳态激振实测瑞雷波的速度,然后换算成土工实验测试难以测准的路基和边坡土的粘结力与内摩擦角,再代入稳定系数计算公式。根据计算结果进行稳定性评价。为了评价挡土墙的稳定性,须将垂直激振的激振器改制成水平激振的激振器,改制后的激振器,以水平方向为 0° ,可在 $\pm 15^\circ$ 内调节,高度可在30厘米和60厘米之间调节,压力可在60kg至120kg之间调节,满足了检测的需要。

河南省公路研究所许人忠等应用全波震相分析原理及工程多波勘探方法,通过选择最佳测试位置,对已知试件和路面实测结果进行对比,建立了超声波特征参数与混凝土特征参数、

路面厚度及缺陷之间的相关函数关系,取名TVR超声综合检测方法。测试时一般采用环形测网,每个环形网的中心安放发射换能器,半径为1米或1.5米的圆周上安装接收换能器,每一测点都记录多个震极,运用预先建立的函数关系,对检测数据进行计算机综合处理后,可同时得到强度和厚度值,并能无损检测出孔洞、蜂窝、裂缝、不均匀等缺陷。

综上所述,我国弹性波探查与检测技术,在“八五”期间取得了许多重大进展,这些进展不仅表现在新方法新技术大量涌现,还突出表现在硬件的进步与软件的发展彼此相得益彰以及在工程检测中越来越多地采用综合方法。我国弹性波探查与检测技术的这些进展,是我国工程物探乃至整个物探技术进步的一个缩影。我国的物探技术及其应用已日趋成熟并正在走向世界。

(地矿部工勘办)

参考文献(略)



尾矿堆存造成 土地资源浪费

我国是人口众多而土地资源贫乏的国家,土地资源问题尤为迫切。由于长期的尾矿积累和现时尾矿利用程度仍不太高,无论是国内或国外,尾矿的堆存都已占有大量的土地面积,并且,随着矿业开发强度增大和矿石品位降低,尾矿堆存年占有土地面积还将继续增大。虽然多数被土地在目前情况下尚无现实耕种价值,但毕竟破坏了后备土地资源。据估计,我国固体矿山每年产生的尾矿量超过5亿吨,截止1993年底全国各类工业固体废料累计存量达59.7亿吨,占地达5万多公顷,而且占地面积在以每年 200km^2 至 300km^2 的速度增长,预计2000年后将达每年 340km^2 的速度。值得强调的是:不仅尾矿堆存本身需要占有大量土地,而且有时还会因尾矿库溃泄或排泄不当等原因破坏库外土地。例如,据冶金部9个重点选矿厂调查,其附近因尾矿泛滥导致3531亩农田绝产,部分不可复耕;大冶公司某矿因尾矿库垮溃,致使约一亩农田彻底毁坏;湖南邵东铅锌矿一次尾矿库垮塌,造成一亩多农田不可复耕。

联合国发表报告 地球环境全面恶化

联合国环境规划署最近发表报告指出,从饮用水、空气到海洋和森林,整个地球环境全面恶化,呼吁全人类共同采取行动,提高自己所在地区的环境质量。报告指出,南极臭氧空洞正以每年相当于一个美国陆地面积的速度增大,使地面紫外线辐射增强,皮肤癌发病率上升;空气质量严重下降,全球有1.25亿的人口生活在空气混浊的城市中;温室气体过度释放造成全球气候变暖,美国的温室气体排放量居世界之首;12%的哺乳动物和11%的鸟类濒临灭绝,每24小时有150种至200种生物物种从地球上消失;12亿人口生活在缺水的城市,14亿人口的生活环境中缺乏生活污水排放装置;每年全球地表土壤流失200亿吨,化学杀虫剂使用量超过270万吨;全球捕鱼量已大大超过一年1亿吨的上限,40多种鱼类因捕捞过度而濒临灭绝;全球森林以每年460万公顷的速度消失,其中亚洲、拉丁美洲和非洲森林遭破坏的程度最为严重。该报告呼吁各国政府和国际组织行动起来,控制工业污染、提倡洁净能源、植树造林保护土壤,并加大宣传力度,增强公民环境保护的意识。

《中国科学报》96.5.24