

工程物探论文集

Collection of Engineering Geophysical Exploration Papers

水利电力物探科技信息网 编

云南出版集团公司
云南科技出版社

工程物探论文集

水利电力物探科技信息网 编

云南出版集团公司
云南科技出版社

·昆明·

内容提要

本论文集收录了2003~2006年发表在《工程物探》(内部刊物)有关工程物探方面的论文51篇,内容包括各种物探方法在工程实践中的经验总结、物探方法试验研究以及工程质量检测等。

本论文集可供水利、电力、铁路、公路等相关部门从事工程物探与工程检测的科技人员及大专院校师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

工程物探论文集/水利电力物探科技信息网编. —昆明:
云南科技出版社, 2006. 8

ISBN 7-5416-2402-0

I. 工... II. 水... III. 地球物理勘探—文集
IV. P631-53

中国版本图书馆CIP数据核字(2006)第088374号

云南出版集团公司

云南科技出版社出版发行

(昆明市环城西路609号云南新闻出版大楼 邮政编码: 650034)

云南地质矿产局印刷厂印刷 全国新华书店经销

开本: 787mm×1092mm 1/16 印张: 20.25 字数: 480千字

2006年8月第1版 2006年8月第1次印刷

印数: 1~2000册 定价: 40.00元

编委会名单

主 编：曾宪强 沙 椿

副主编：王宗兰 高才坤 柯玉军 才致轩

编 委：才致轩 王宗兰 王俊业 邓希贵
田宗勇 刘康和 沙 椿 杨茂鑫
柯玉军 高才坤 耿瑜平 常 伟
黄衍农 曾宪强

前 言

本论文集收集的文章都是在2003~2006年《工程物探》(内部刊物)上发表过,经编委们精选出来的,代表了近几年以水利电力系统为主的工程物探的工作方向和最新的工作成果。2006年是水利电力物探科技信息网成立30周年,又逢第十届全网代表大会即将召开之际,第九届理事会研究决定编辑出版本论文集,以此庆祝水利电力物探信息网成立30周年,并献给多年来为工程物探的发展而努力工作的各界朋友们。

从“十五”规划开始以来的这5年,是我国基础设施建设高速发展的时期。基础设施,尤其是水电、公路、铁路和城镇建设的成就日新月异,水电建设更是碰上了千年难遇的大好机会。这些环境给我们工程物探工作者创造了充分发挥自己的聪明才智和大显身手的空间,同时也为更多、更新的科技成果应用于工程物探搭建了广阔的平台。有理由相信:随着“十一五”规划的实施,许多世界级的工程项目将陆续开展,许多世界级的技术难题也会陆续摆在我们工程物探工作者的面前。攻克这些难题,创建解决难题的新技术和新方法,是摆在我们工程物探工作者面前光荣而又艰巨的任务!也是我们生于这个伟大时代的自豪!

本论文集收录的51篇论文中,既包含了水利电力系统物探工作者的优秀物探成果,也有大专院校、科研单位、地矿、公路、铁路等系统的同行们的优秀技术成果;方法涵盖了大地电磁法、

探地雷达、面波、高密度电法、垂直地震反射等新技术的应用实例，也收录了传统物探方法的最新应用成果；涉及的工作内容除传统的工程物探领域外，还有工程检测和工程监测，如隧道掘进的超前地质预报、地下洞室的变形量测、大型桥梁的变形观测等。工程检测和工程监测已逐渐进入物探工作者的业务范畴，使地球物理勘探技术有了更广泛的应用空间。特别值得高兴的是，我们的许多兄弟单位已率先进入到环境地球物理勘探的领域，对环境污染、环境安全等开展物探调查工作。我们今后将会有这方面的文章奉献给各位朋友。

由于近几年整个国家的建设速度发展很快，我们许多在一线工作的技术骨干担子很重，工作非常繁忙，我们所知道的许多优秀的物探成果和经验，他们没有时间去总结成文，也给我们这本论文集的出版留下了不小的遗憾，漏掉了许多精彩的篇章！希望他们今后能多抽出点时间来总结提高自己的技术成果，共同装点我们工程物探这块美丽的家园。

我国人民正在按照科学的发展观，向全面建设小康社会的宏伟目标迈进。在这个过程中，工程物探无疑是一项最具发展潜力的勘探手段。坚定地走开拓创新之路，工程物探必将为国民经济的可持续发展，为“十一五”规划的早日实现，作出自己更精彩的贡献！

曾宪涛

2006年6月于昆明

目 录

面波勘探技术的新进展	王振东 (1)
工程岩体力学试验中的静动对比	沙 椿 宋正宗 (8)
水电工程环境天然辐射危害研究进展	钟诚昌 (13)
采用综合物探法进行大坝面板脱空无损探测	高才坤 陆 超 王宗兰 翟联超 (20)
大坝坝基渗流检测的新技术——伪随机流场法测井 ...	戴前伟 何 刚 何继善 (26)
大型基础设施光纤传感监测技术综述	张建清 (32)
地球物理探测技术与三峡工程建设	李张明 (37)
电磁法在深埋长隧洞勘查中的应用	毋光荣 郭玉松 张国选 (51)
高频人文大地电磁测深在堆积体探测中的应用研究	汤井田 高才坤 王 焯 杜华坤 肖 晓 王 武 张国选 (59)
高频大地电磁测深 (EH-4) 在基岩风化层探测上的应用效果	孙卫民 (65)
V6-A 电磁系统在山区地下水勘测中的应用	王俊业 张 杰 石 滨 (72)
EH-4 电磁测深在水电站岩溶探测方面的有效性研究	袁景花 肖海云 (76)
连续电导率剖面仪 (EH-4) 在探测堆积体中的应用效果	皮开荣 谭天元 文豪军 (82)
探地雷达在高速公路勘查岩溶中的应用与分析	杨 峰 朱自强 (86)
探地雷达在福堂水电站隧洞施工超前预报中的应用	巨 浪 沙 椿 (93)
隧道工程检测探地雷达数据的小波变换处理	李才明 张善法 (101)
基于小波分析的瑞雷波相速度求取及其应用	刘建华 唐 磊 何世聪 王时平 肖长安 (105)
实测面波频散曲线计算方法研究与应用实例	王运生 王家映 郭玉松 耿瑜平 (113)
不同物性条件下瞬态瑞雷波勘探的应用效果	李平宏 薛效斌 (119)
高密度电阻率法用于堤坝渗漏监测的数值模拟研究	杜华坤 汤井田 喻振华 (125)
高密度电法探测坝体裂缝实例分析	刘康和 赵 楠 郑 洪 (130)
高密度电法勘探装置的选择和资料解释	祁增云 任海翔 乔佃岳 (137)
TSP 的超前预报效果和存在的问题	曹哲明 (143)
隧道超前地质精确预报	周建胜 (147)
几种超前地质预报方法在关口垭隧道的综合应用	朱自强 李 华 李 健 何现启 (153)
隧道施工超前地质预报方法综述	李立功 (158)

堤防质量探测的几个问题思考和工程实践	王清玉	(163)
堤坝隐患探测技术综述与展望	邹声杰 汤井田	(169)
从堤防隐患探测到堤防隐患监测的思考	谢向文 郭玉松 马爱玉	(176)
堤坝渗漏隐患综合探测方法研究与应用	朱自强 戴亦军 邹声杰	(181)
USR 法锚杆检测的机理探讨及其应用	柯玉军 苗天德 薛有平	(186)
锚杆检测技术在小湾水电工程中的应用	王国滢	(194)
锚杆无损检测技术的应用	尹学林 许煜东	(200)
小湾水电站工程锚杆物探检测结果分析	罗毅	(207)
电反射系数 (K) 技术在某防渗墙质量检测中的应用	徐长顺 陈多芳 孙建军 吴彩虹	(216)
声波透射法在公路桥梁桩基质量检测中的应用	李柏明	(221)
物探检测在某水电站引水发电系统安检中的应用效果	袁景花 杜松 许煜东	(228)
流量测井在水文地质勘察中的应用	沈晓天	(235)
钻孔变形试验在水电工程中的应用	沙椿	(243)
钻孔电视的现状与思考	曾宪强	(251)
浅谈声波波列在声波测井解释中的作用	刘善军 常伟 艾宝利 王乃生	(255)
地震波层析成像技术在观音岩水电站坝址勘察中的应用	王时平 何世聪 余良学 戴国强	(260)
浅层地震反射波法在塌滑体勘探中应用	邓希贵	(264)
工程物探技术的综合应用	夏望麟	(269)
介绍两种实用的直流电法探测技术	刘康和	(275)
激电二次场法在水电工程地下水位探测中的应用	黄安松	(281)
洪积扇区地下水的电性特征及找水方向	王俊业	(286)
清江水布垭混凝土面板堆石坝坝料填筑最优碾压参数试验研究	宋先海 顾汉明	(290)
清江水布垭面板堆石坝堆石体密度附加质量法检测试验研究	宋先海 肖柏勋 张智 刘春生 熊永红	(296)
施工爆破影响及其控制研究	杨永强	(303)
南水北调中线天津干渠土壤腐蚀性测试与评价	刘康和 高燕和 郑洪	(310)

面波勘探技术的新进展

王振东

(中国地质调查局, 北京 100035)

摘要: 在简要回顾面波勘探发展历史的基础上, 着重介绍近 10 年来天然源面波勘探和人工源面波勘探的最新发展动态, 并对使用和发展这项技术提出应当注意和值得关注的问题。

关键词: 面波; 人工源; 天然源

早期的面波勘探是利用天然地震记录中面波群速度的频散曲线。在 20 世纪 50 年代, 普里斯 (Press) 首先在时间域成功地求得面波相速度和频散曲线, 并用此法调查南加州的地壳构造 (1956), 开创利用面波相速度频散曲线反演地壳构造的先河。20 世纪 60 年代, 美国人提出面波的半波长解释方法, 并将稳态面波法首先用于地基勘察, 勘察深度愈 10m, 由此揭开人工源面波勘探的序幕。

1985 年, 斯托克 (Stokoe) 和纳扎利安 (Nazarian) 采用锤击振源, 通过两个检波器之间波的互谱相位信息求面波的相速度获得成功。1988 年, 每熊 (Maikuma) 等验证了斯托克等人的方法, 并报告了几则实例。中国的科技人员是在 1990 年前后开始瞬态面波勘探试验的。初期由于数据采集一直沿用两个垂直分量检波器接收的模式, 数据处理方法简单, 探测的深度 (长期在 10m 左右徘徊) 和精度均受到一定限制。1993 年, 北京水电物探研究所用自行设计研制的地震仪, 采用展开排列多道接收的方式采集数据, 用于核工业北京研究院联合开发的面波处理软件, 处理多道 (12~24 道) 地震波记录, 求出面波速度变化曲线, 再经多次反演拟合, 进行 S 波速度分层解释, 把锤击振源的瞬态面波勘探深度由 10m 左右, 提高到 30 多米。

利用微动 (microtremor) 中的面波信息来推断地壳浅部构造的天然源面波勘探方法, 其基础研究分别是安艺 (Aki, 1957) 和卡朋 (Kapon, 1969) 奠定的。冈田 (Okada) 在此基础上经过 10 多年的研究与实践, 系统地提出了一种新的被动源物探方法——微动探查法。笔者于 1986 年在《物探与化探》上首次介绍了这种方法, 后来又于 1988 年在北京举办“微动应用讲习班”, 请冈田教授来华讲学。冈田先生的讲稿经笔者编译于 1990 年, 分 4 期刊登于《国外地质勘探技术》上。1992 年, 北京市地质勘察技术院首次在北京进行了一次目的层深度较大 (2 400m) 的微动探查试验获得成功,

作者简介: 王振东 (1941~), 男, 安徽无为, 教授级高级工程师, 从事应用地球物理新技术开发研究及煤田、非金属、水文工程环境物探技术管理工作。

推断的两个储热层的位置与钻探结果非常接近。

近 10 年来,天然源面波勘探和人工源面波勘探又有哪些进展?本文试作一介绍。

1 天然源面波勘探的新进展

1.1 概述

天然源面波勘探在日本叫做微动探查法,在我国最初介绍时曾称之为长波微动法,以区别于常时微动,最近也有人把它叫做大地面波测深。

众所周知,面波的频散特性与地下构造分层有关,欲获取某测点的地下构造,首先必须取得该测点的微动信息并能有效地从中提取面波,第二必须能求出该面波基阶波的频散曲线,第三通过反演拟合求取地下 S 波速度构造。

传统的空间自相关法 (SPAC 法) 是在一半径 r (大小视探测深度而定) 的圆形台阵上布设 4 台长周期拾震器,一台位于圆心,另三台均匀分布在圆周上,此观测系统称为规则台阵。将各道微动观测数据经窄带数字滤波处理,求出不同频率 (f_i) 的空间自相关系数 $\rho(r, f_i)$,并由 $\rho(r, f_i) = j_0(x_i)$ 求出零阶贝塞尔函数的宗量 x_i ,再由 $X_i = 2\pi f_i r / c(f_i)$ 求出相速度 $c(f_i)$ 。不同的 f_i 与不同的 $c(f_i)$ 相对应,据以画出相速度频散曲线。

传统的频率—波数法 (F-K 法) 是要求各拾震器在研究区内尽量呈平面展布,并使拾震器之间的距离不同,构成不规则观测台阵。为了在处理分析资料时也能使用空间自相关法,通常以中心点为中心,其他测点在周围形成若干个边长不等的正三角形,测点数越多精度越高,实测时一般布置 10 个测点即可。利用观测的微动数据,经计算机处理,求出各个频率的功率谱,由 $c(f_i) = 2\pi f_i / \sqrt{K_x^2 + K_y^2}$ 即可求出各频率的相速度,式中 $\sqrt{K_x^2 + K_y^2}$ 是 F-K 功率谱峰值处的波数矢量 K_i 的模。 K_x 、 K_y 是在直角坐标上的两个分量。有了不同频率的相速度,则相速度频散曲线不难画出。

1.2 空间自相关法的扩展

1.2.1 由单分量到多分量

传统的空间自相关法建立在单分量 (垂直分量) 微动数据之上,提取出来的面波为瑞雷波 (R 波)。为提取微动信息中的另一种面波——乐夫波 (L 波),拾震器需换成三分量拾震器获取微动的垂向、径向和切向 3 组数据。根据圆形台阵的三维数据计算出空间自相关系数。角频率为 ω 的三分量空间自相关系数 (ω, r) 的表达式为:

$$\rho_v(\omega, r) = J_0(rk^R) \tag{1}$$

$$\rho_r(\omega, r) = \frac{\{J_0(rk^R) - J_2(rk^R)\}h^R + \{J_0(rk^L) - J_2(rk^L)\}h^L}{h^R + h^L} \tag{2}$$

$$\rho_t(\omega, r) = \frac{\{J_0(rk^R) + J_2(rk^R)\}h^R + \{J_0(rk^L) - J_2(rk^L)\}h^L}{h^R + h^L} \tag{3}$$

式中, ρ_v 、 ρ_r 和 ρ_t 分别是微动的垂向、径向和切向的空间自相关系数,可由实测数据计算求出; k^R 、 k^L 分别是 R 波和 L 波的波数; h^R 、 h^L 分别是 R 波和 L 波的功率谱密度;

J_0 、 J_2 分别为零阶和二阶贝塞尔函数。

由上述算式可求出 R 波和 L 波各个频率的波数，并进而求出各频率的相速度。利用 L 波解释的好处是与 P 波速度无关，有利于解释精度的提高。

1.2.2 由规则台阵到不规则台阵

以往的空间自相关法一直采用规则台阵，但实际工作时不方便，后来冈田等进一步研究表明：将空间自相关系数作为全观测点两点间距离的函数，并用一条曲线表示，再对这条曲线作最佳拟合，求出贝塞尔函数，由此推出的相速度与 F-K 法比较，得到的结果相同。目前，采用非规则台阵的空间自相关法（SPAC 法）称为扩展的空间自相关法（ESAC 法）

1.3 F-K 法的数值模拟

对于 F-K 法，通过冈田和凌的数值模拟研究，得到了如下认识：

(1) 从波的分辨率来考察，用定向法（BFM）分辨率较低，用最大似然法（MLM）分辨率较高。

(2) 一个输入波，在波的传播方向精度较高。

(3) 当输入波为 2 个以上时，F-K 频谱峰值出现的个数随频率而变。在某一频率 f_c 以上时，能给出良好的结果，当 $f < f_c$ 时，两个波分不开，并且波的到来方向及相速度数值明显与模拟输入情况不同。这个 f_c 与台阵的尺度、形状及输入波到来方向有关。因此，当波场较为复杂时，F-K 法不一定能给出完全符合实际的相速度及波的到来方向。

1.4 关于观测台阵和探测深度的研究

北海道大学率先通过数值模拟考察（1996），对于可推定的相速度的最大波长 λ 和观测台阵半径 R ，给出的范围：SPAC 法， $2R_{\min} \leq \lambda \leq 10R$ ；F-K 法， $3R_{\min} \leq \lambda \leq 5R$ 。岩手大学则通过实测资料研究了最大波长与最大拾震器间隔二者关系（2000），他们在同一观测点，展开大小不同的多个台阵，由大的台阵求得的 R 波相速度作为真值，与由小的台阵求得的相速度进行比较，推定了 F-K 法和 SPAC 法可推定相速度波长范围的上限，F-K 法为最大拾震器间隔的 1.8 ~ 2.8 倍，SPAC 法为最大拾震器间隔的 4.4 ~ 8.2 倍。他们通过进一步研究，于 2002 年提出 F-K 法有效波长范围为台阵半径的 2.3 ~ 6.8 倍，SPAC 法有效波长范围为台阵半径的 3.2 ~ 17.2 倍。在 10 个观测台阵中，有效波长范围上限随地下构造的不同和台阵的大小而变化，但 SPAC 法的上限都比 F-K 法大。笔者认为，有效波长的上限（与探测深度密切相关）还应当与非特定振源的特性和观测装置的性能有关。

1.5 对 SPAC 法和 F-K 法认识的深化

根据 F-K 法的原理，该方法能够将微动中各种类型的波（多种振型的面波或功率很强的体波）分离开来，并能推断波的到来方向，但要求拾震器间隔要小于待分离的所有波的波长。F-K 法的另一个特点是台阵布置不受地形地物的限制。缺点是对于同样的勘探深度，台阵的覆盖面积或尺度要比 SPAC 法大得多，资料处理的时间也比 SPAC 法长。

根据 SPAC 法的原理，该方法不能将微动中各种类型的波分离开来，但台阵的尺度

相对较小,资料处理的时间相对较短是其优点。以往有布设台阵不如 F-K 法自由的缺点,但对扩展的空间自相关法(ESAC 法)而言,这个缺点已不复存在,加之在相同尺度台阵的条件下,空间自相关法有探测深度大的优点,采用空间自相关法的实例,近几年来日益增多。

1.6 资料处理的不断改进

空间自相关法老的数据处理方法是采用窄带数字滤波,目前已普遍采用 FFT 法计算空间自相关系数,不但速度快而且精度高。

1994 年,冈田与凌甦群在 F-K 法中引入自回归模型(AR 模型)算法推定相速度。从资料处理结果看,此法比富里叶变换提高了推定值的稳定性。

1996 年,山本英和提出用 AIC 标准的 AR 模型推定最佳互谱,进而算出空间自相关函数,结果好于 FFT 法。

1993 年,石耀霖、金文在中国地球物理学会年会上发表《面波频散反演地球内部构造的遗传算法》,介绍他们用遗传算法对青藏高原 L 波实际观测资料进行反演,对 7 层模型搜索各层速度和厚度,结果与多位学者过去的研究结果吻合。他们使用的实际资料是秦建业等用移动窗法求得的纯通过青藏高原的面波群速度和频散资料。

1997 年,长郁夫等人在日本物理探查学会秋季讲演会上报告他们将遗传算法引入微动探查的研究结果。通过简单速度构造和复杂速度构造的数值试验,简单遗传算法(SGA)和分叉遗传算法(FGA)都能很好地说明所有模拟观测数据,决定很多速度构造,并且 FGA 在区域搜索能力方面比 SGA 强。使用实测数据,FGA 亦能说明频散曲线,决定多种速度构造,证明使用 FGA 可以使微动探查法变得更为简便。

1.7 专用仪器的开发

20 世纪天然源面波勘探试验所用的仪器都不是商品化的产品,如北海道大学冈田科研小组所用的设备就是该校森谷副教授组装的。冈田等使用这一自制的设备,不断完善了空间自相关法和频率一波数法。

北京市地质勘察技术院冉伟彦科研小组初期所用的设备则是用常时微动仪(Mc-SEIS-1600)加国产拾震器组成的,他们用这套设备消化吸收了空间自相关法并成功地多口地热井定井设计提供了科学依据。2000 年,天然源面波勘探 F-K 法及其数据采集系统由北京市地质勘察技术院开发成功,2001 年,在杭嘉湖平原 35 个物理点上试用,效果良好。

2000 年,日本乔泰克公司在日本物理探查学会上报告了他们成功开发微动探查专用观测装置的主要指标。这台装置是通过 GPS 由内部同步时钟进行各测点间无连线独立观测,数据采集效率大为提高,它既可用于深部构造调查也可用于浅部构造调查。

1.8 日本在应用上的动向

1.8.1 由单点调查向区域调查发展

在事前没有预测的区域突然发生并产生巨大震灾的阪神地震之后,日本加强了深达地震基岩的场地特性的调查,着意获取深达千米以上的 S 波速度构造资料,天然源面波勘探也渐次由单点调查试验向区域调查发展。这些年来,已先后在石狩平原、十胜平原、关东平原、大阪—兵库地区、浓尾平原等地做过面积性工作。其中,以关东平原做

的工作最多。目标是建立深达地震基岩的三维 S 波速度构造模型数据库。

1.8.2 探查深度向更浅和更深开拓

1996 年, 松冈达郎等采用半径 3 ~ 30m 的圆形台阵并采用 FFT 法计算空间自相关系数, 精度较高地推定了从地表附近到工程地基 (50m 以浅) 的浅部 S 波速度构造。

1999 年, 野口龙也等采用半径 3 ~ 60m 的正三角形台阵观测, 现场用 SPAC 法处理, 获得频率为 0.6 ~ 10Hz, 波速为 100 ~ 1400m/s 的 R 波相速度, 推断了深度约 600m 以浅的 S 波速度构造。

1993 年, 石川显等曾在十胜平原布设最大边长达 1200m 的台阵, 但采用的是 F-K 法, 故探测深度不大。松冈达郎 1996 年曾报告他们在关东平原一地点, 采用空间自相关法, 台阵最大半径 600m, 提取到周期为 0.5 ~ 5s 的 R 波, 最大探测深度达 3500m。在 2000 年日本物理探查学会春季讲演会上, 北海道大学理学部报告他们在札幌市北部, 采用 SPAC 法, 台阵最大半径达 2000m, 得到 0.3 ~ 4s 以上的 R 波相速度, 在深度约 3000m 附近, S 波速度为 3km/s。

1.8.3 由台阵上观测到的天然地震推定地下 S 波速度构造

由于日本是多地震的国家, 因此也有人利用偶然的微动观测台阵上观测到的天然地震提取面波, 推定地下 S 波速度构造。调查深部构造并通过观测记录确认其对地震动的影响, 对震灾评价具有十分重要的意义。

1.9 研究方向

- (1) 用 ESAC 法推定 L 波相速度的方法技术;
- (2) 在微动能量小的频段推定面波相速度的方法技术;
- (3) 获取较长周期的微动资料, 推断更深 (大于 3500m) 的地下构造;
- (4) 探索研究高阶面波的发生规律、识别提取方法和对频散曲线形态的影响。

2 人工源面波勘探的新进展

(1) 自从 1993 年北京水电物探研究所与核工业北京地质研究院成功地开发多道瞬态面波数据采集处理系统以来, 人工源面波勘探在我国工程界迅速推广开来。最近他们又开发出根据面波速度划分地层界线、用等速度彩色剖面显示地层岩性的技术, 深受工程界的欢迎。

(2) 河北地球物理勘查院在 1987 年应用浅层地震仪配置国产电磁激震器开展稳态瑞雷波法试验研究并获得成功之后, 又于 1993 ~ 1995 年完成“高等级公路质量非破损检测应用研究”。于 1998 ~ 1999 年完成“SM98 瑞雷波仪的研制与应用研究”。SM98 既可以进行稳态激振测试, 又可以进行瞬态激振测试, 同时也可以用于多种方法的纵波、剪切波传播速度的测定。采用瞬态法只需 2 ~ 3 人, 稳态法只需 3 ~ 4 人, 采用收发拖车可在路面上行进式测量, 每天可测量 600 点以上。目前该单位正在研究采用大功率可控震源进行深达 500m 以上的面波勘探。

(3) 美国堪萨斯地质勘查的帕克和地球公司的米尤拉在日本物理探查学会 2002 年春季讲演会上提出多道面波探查时, 最佳测定参数的选择要作深入的考虑。如偏移距、

道间距,记录长度和适当的振源与检波器的选定,都要通过不同的现场试验来确定,建立一套简便的操作程序。

(4) 长江工程地球物理勘测研究院的肖柏勋和哈尔滨工业大学的凡友华、刘家琦于数年前在查阅了我国科技人员数 10 篇有关文章的基础上,对我国瑞利波勘探方法(主要为人工源面波勘探方法)研究现状进行了较全面深入的分析并指出当前亟待解决的一些问题。这些问题是:①震源问题。认为超磁致伸缩材料有可能满足新型震源体积小、重量轻、激发功率大、频率特性好等优点,应加紧开发研究。②频散曲线的提取问题。涉及到观测系统的布置和数字处理等多个方面,既要加紧研制性能优良的三分量面波接收传感器,又要开展稳态和瞬态两种方法的对比试验研究,或择取其一,或兼收并蓄。③频散曲线的反演解释问题。强调“之”字形面波频散曲线反演研究的重要性。④复杂边界条件下(如倾斜夹层、垂直裂缝和洞穴等)面波频散曲线的正反演问题。

3 双源面波勘探的设想已部分成为现实

受美国 EH-4 电导率剖面仪的启发,笔者在 1997 年中国地球物理学会年会上发表了《关于双源面波勘探系统的若干研究设想》。在双源面波勘探构想中,曾设想研制一种新型的面波仪。它既能采集处理人工源数据,又能采集处理天然源数据,融两种勘探方法的硬件性能和软件功能于一体,将其称之为双源面波勘探系统,对这一系统的硬件部分和软件部分均提出了具体的设计指标。

最近,在日本物理探查学会会刊 2002 年第 6 期上,笔者看到日本应用地质株式会社(OYO)的一则广告,广告称使用 M_0 SEIS-SXW 探查地基 S 波速度构造,在 20m 深度以内采用锤击振源、12 道排列接收,进行人工源面波勘探,在 20m 以下至 100m 左右,采用 10 个拾震器布置成 3 个不同半径的观测台阵,从微动中提取面波,进行天然源面波勘探。尽管 M_0 SEIS-SXW 系统在人工面波勘探深度和天然源面波勘探深度上尚不够大,由于观测台阵的尺度小(20~30m),也未利用 GPS 实现无线独立接收,但笔者的双源面波勘探的设想,毕竟是部分地实现了。

4 结束语

面波勘探近 20 年来有了很大的发展,已经从试验研究发展到实际应用。人工源的方法在由浅往深地发展,天然源的方法则在向浅和深两个方向延伸。双源面波勘探系统也已初步实现。面波勘探作为一项物探高新技术正在被越来越多的人所认可,同时在使用过程中也不断碰到新的问题。多数情况下,精度是可以的,但也有不少精度不高甚至失败的实例,后者更值得我们深入思考研究。

在使用面波勘探技术时,我们应当注意以下两点:①把握好每种方法的应用前提条件,扬长避短。目前正在使用的方法都有一个适用于“水平多层构造”的基本假设,不符合这个基本假设,精度自然不高。另外,要想测得深就需要台阵的半径大、道距大、排列长,当地下构造较为复杂、水平方向变化较大时,精度显然会降低。②作为一

种新方法，精度相对较高的人工源面波勘探目前在资料处理和解释精度方面还不及高分辨横波地震勘探，当地下构造复杂时，不妨放弃前者，采用后者。

在发展面波勘探方法时，以下几点值得我们关注：①数据采集采用三分量传感器和相应的处理解释软件应是一个方向。②深入研究不同条件下，不同面波的生成、分解和传播的规律，为探测复杂构造寻找新的方法。③在开发研究新方法的同时，也设法用先进的数据处理软件、先进的震源和数据采集器使老方法不断改善。

工程岩体力学试验中的静动对比

沙 椿 宋正宗

(中国水电顾问集团成都勘测设计研究院物探中心, 四川成都 610072)

摘 要: 工程岩体力学试验包括静力法的现场载荷变形试验和动力法的弹性波测试, 以两者原位测试资料为基础, 建立静动对比关系, 是连接静力法与动力法试验成果的桥梁。通过静动对比, 分别建立变形模量与声波和地震波速度的相关规律, 从而可将大量的弹性波测试成果转化为变形模量, 为坝基岩体质量分级、稳定性评价及变模分区、应力分析提供实用指标。

关键词: 岩体力学; 变形模量; 地震波速度; 声波速度; 动静对比; 相关分析

1 前 言

工程岩体是在长期地质作用下形成的具有复杂结构和特性的地质体。工程地质勘测任务就是通过对地层、岩性、构造、风化卸荷及水文地质条件等方面进行综合研究, 掌握其规律, 从而对岩体作出分类和评价, 同时结合室内和现场物理力学试验加以论证, 为工程设计和施工提供定量依据。

目前对大型水工建筑物基础不仅限于工程地质调查和现场载荷试验, 同时以研究岩体结构特征为主要手段的岩体力学得以发展, 运用地质和力学方法来研究岩体在外力作用下, 其变形与破坏机制, 并结合各种岩体力学试验方法, 其中包括地球物理测试技术, 加以综合研究, 对工程岩体进行质量分级及稳定性评价。为此物探配合地质、试验、设计等方面在二滩、溪洛渡、锦屏等大型水电工程开展了大量的地震波和声波测试工作, 同时选择不同地质类型和质量级别的岩体进行现场原位静动对比, 直接建立变形模量和弹性波速的相关规律, 通过对弹性波测试成果的综合分析、深入研究, 使之转化为工程岩体实用的物理力学指标。

作者简介: 沙 椿 (1963~), 男, 四川成都人, 教授级高级工程师, 硕士, 从事水利水电工程物探研究与应用工作。

2 岩体力学试验的基本方法

2.1 岩体静力学试验方法

2.1.1 承压板法现场载荷试验

根据工程岩体试验方法标准,通常在水电工程的勘探平硐和竖井中,利用刚性或柔性承压板法,进行垂直和水平方向载荷试验,并根据压力与变形的关系曲线和各自的计算公式,求出试点的变形模量。

2.1.2 压力膨胀计钻孔变形试验

在钻孔中选择具有代表性的岩性孔段,利用钻孔压力膨胀计向孔壁施加均匀的径向压力,同时测量孔壁的径向变形,按弹性力学平面应变的厚壁圆筒公式,计算岩体的变形模量。

2.2 岩体动力学试验方法

2.2.1 地震连续波速测试

在勘探平硐和地下硐室连续波速测试过程中,沿硐壁一侧轴线方向布置测线,采用锤击震源,多道地震仪排列接收,检波器用石膏与岩壁固结,进行相遇与追逐时距观测,定向激发与接收纵、横波。利用差异时距曲线计算测段内纵横波速度的变化规律,并可推算出泊松比和动弹性模量、动剪切模量。

2.2.2 地震穿透波速测试

利用水电工程勘测中所提供的施测条件,在孔间或硐间采用一发多收的扇形观测系统,在被测区域内形成致密交叉的射线网络,然后根据射线的疏密程度和成像精度进行单元划分,并建立射线方程组,再选用适当的弯线追踪和反演算法,经过多次迭代便可获得被测区域的波速图像。与常规的地震跨孔法相比,层析成像技术具有很高的分辨率,更有助于精细地划分岩体质量和圈定地质异常体。

2.2.3 平硐单孔与对穿声波测试

沿平硐一壁布设声波孔,孔距约1m,孔深约2m,孔向略微下倾,以便注水耦合。单孔声波采用一发双收,逐点观测,取得单孔径向声波速度曲线;对穿声波采用沿孔深水平同步观测,取得孔间轴向声波速度曲线。对声波孔各测试深度的单孔和对穿声波资料,结合地质情况整理分析,并分别绘制沿平硐轴向的单孔和对穿声波速度剖面。

2.2.4 钻孔声波速度测井

在钻孔基岩孔段,采用一发双收探头,沿孔深自下而上连续进行走时观测,并取得声波纵波速度测井曲线,也可利用全波列测井,同时获得纵横波速度曲线,并推算出其他岩体动力学参数。

3 岩体力学试验中的静动对比

3.1 现场载荷试验与声波原位测试

静动对比应建立在现场试验条件近于一致的情况下,采用声波测试与载荷试验成果