



我国工程多波地震勘探 研究与应用现状^{*}

吴小平¹⁾ 赵鸿儒²⁾

1) 中国昆明 650091 云南大学地球科学系

2) 中国北京 100871 北京大学地球物理系

摘要 从矿井和隧道超前探测、工程地质灾害勘探和工程抗震、工程质量无损检测以及岩石物性测定几个方面对工程多波地震勘探思想、理论和方法的研究和应用现状作了详细的综述和评价. 具体内容包括: 煤田陷落柱、地下巷道、地下空洞及隧道前方断层的探测; 地面岩溶塌陷、活动断裂的探测、地下生命线工程抗震; 桩基质量与承载力动态无损检测、混凝土道路路面强度、厚度、缺陷的无损检测、水底隧道工程质量无损检测 and 高温高压下岩石物性测定、异形标本物性测定, 并对目前存在的问题进行了讨论, 提出了今后发展的方向.

主题词 工程地震勘探 非均匀小尺度构造 多波震相

引言

近年来, 随着工程建设的发展, 工程地震勘探中常遇到的探测对象不再是简单的地层界面和基岩起伏的空间形态, 而是一些非均匀复杂形态的地质小构造(马在田, 1994), 如矿井陷落柱、地下巷道空洞、岩溶塌陷、活动断裂、桩体缺陷以及水底隧道基础等等(刘碧宇等, 1988; 王振东, 1988; 王庆海, 徐明才, 1991; 年宗元, 1994). 以往常用的基于几何地震学上的单一震相的反射法和折射法对这类复杂构造的勘探问题已不能完全适用. 为此, 国内提出了工程多波地震勘探的新思路及相应的理论和方法(赵鸿儒等, 1990).

工程多波地震勘探是以全弹性波动理论为基础. 赵鸿儒等(1986, 1990, 1991)以“全波震相分析”、“物理模型试验”、“岩石综合物性测定”中所提出的新的理论方法技术综合应用于工程地震勘探为指导思想, 利用来自同一波源的多分量多震相的地震波对地下复杂介质构造的形态和性质进行探测的方法. 它不同于现行的“联合多波勘探”, 更不同于以几何地震学为基础的地震勘探, 对解决非均匀复杂地质构造探测或工程质量检测中的难题, 其效果远优于以几何地震学为基础的地震勘探单分量单震相分析的结果.

^{*} 1995-07-09 收到初稿, 1995-10-24 收到修改稿并决定采用.

1 在矿井和隧道超前探测中的研究和应用

1.1 煤田陷落柱的探测

煤田陷落柱是一种多因素作用下形成的表生构造,长期以来由于不能很好地解决陷落柱的超前探测问题,使一些矿区蒙受大量的经济损失.因此,这个问题一直引起有关学者的关注.80年代以来,国内外纵横波、槽波专家先后进行过多次陷落柱的地震探测试验,但均未取得理想的效果.

董其成等(1993)、董其成和赵鸿儒(1994)对太原西山煤矿的陷落柱超前探测问题,根据工程多波地震勘探的思想,进行了大量的超声地震模型实验和数学模型计算,并结合矿井现场正演试验,从理论、方法和技术上突破了这一难题.陷落柱的地震波场实际上是一个层状介质中非均质体的衍射波场,用工程多波勘探方法来确定陷落柱的位置和形态,关键是了解陷落柱波场中多种震相的运动学和动力学特征.董其成和赵鸿儒(1994)研究和总结了超声地震模型实验、数学正演模型计算及矿井现场试验的结果,发现除了反射波、回折波、首波和槽波外,在具有圆形或弯曲界面的陷落柱波场中,还会出现对陷落柱探测更具实用价值的三类重要震相,即衍射波、衍射转换波和次生波.它们的特点是:衍射波在影区内衰减迅速;衍射转换波 PS 在影区边界两侧振幅最大,SP 在影区边界附近振幅较大;次生波是由陷落柱非均质体边界上的次生震源引起的,无论垂直或倾斜于非均质体入射,都会出现次生波.

1.2 地下巷道、空洞的探测

在煤矿开采中,还会遇到象地下巷道、空洞等非均匀小构造,对它们的超前探测要比地面探测难度大,问题在于没有成熟的理论方法技术和仪器可循(董其成等,1993;曾昭璜,1994).例如,东北煤炭公司所属 15 个矿务局,在实践中探索,以工程多波勘探思想为指导,作了大量的超前探测工作.实践证明,在探测构造界面时,只要界面的倾角大于 75° ,走向与测线夹角小于 45° ,且周围煤层结构简单的情况下探测效果好;如果探测前方存在两个以上界面时,对第一个界面的探测距离比较准确、是定量的,第二个界面的探测距离误差较大、是定性的.

最近陈钢(1996,1995)根据工程多波地震勘探思想,采用三分量检波器,一炮取得三分量地震记录,并首次把全波震相分析中三分量记录震波矢量图合成方法应用于地下空巷探测研究,成功地进行了等偏移三分量正演试验.从震波矢量图上可以清楚地看出圆形对称分布的高能量环区的衍射波场,这正是巷道的反映;同时发现由水平分量记录得到的空巷轮廓比垂直分量清晰,说明横波的分辨率高于纵波.

1.3 隧道超前探测与多波 CT

在进行隧道施工掌子面前方不良地质体超前探测时,采用传统的地面地震反射法会使波场变得复杂,造成探测困难.曾昭璜(1994)提出了一种利用多波进行反演的“负视速度法”,这种方法利用来自掌子面前方的纵波、横波、转换波的反射震相在隧道垂直地震剖面上所产生的负视速度同相轴来反演反射界面的空间位置与产状.该方法解决了前方反射波与全空间反射波之间的识别困难.由于多波的利用,使超前勘探信息更为丰富,提高了对比度和分辨力.该方法在颍河隧道、老爷岭隧道、云台山隧道等工区的超前探测应用中均取得了预期的效果.

陈立成等(1994)根据全波震相分析的理论方法和技术,研究了隧道施工掌子面前方界面地震反射多波层析成像的问题,主要针对隧道前方断层的超前探测建立了隧道超声模型,用多波分析方法识别震相,进行走时反演,成功地获得了“超前预报超声层析成像”图象中的三个断层界面;在此基础上又对云台山隧道地震记录进行了多波分析,得到了断层界面反射波和转换波:PP、SS、SP、PS,多波反演的界面与工程开挖后的实际情况基本一致。

2 在工程地质灾害勘探及工程抗震中的研究和应用

2.1 地面岩溶塌陷探测

地面岩溶塌陷,尤其是覆盖型地面岩溶塌陷具有突发性,给企业和城市建设造成威胁.在探测覆盖层岩溶塌陷的地质情况时,因为横波速度与覆盖层介质的固结程度、承载力、剪切模量密切相关,所以,利用横波或综合使用纵横波进行工程多波地震勘探,能更有效地反映覆盖层结构受到破坏的情况。

唐大荣(1994)在对唐山市多次岩溶塌陷的探测中,采用了SH波反射法和纵、横波反射法综合多波勘探,取得了满意的探测效果.通过模拟溶洞波场特征的二维超声模型实验研究,观测到了清晰的由溶洞界面产生的双曲线形状的衍射波.与水平界面反射波比较,溶洞衍射波具有震相多、延续时间长的特点。

江苏省地震局在对铜陵市长江路发生的严重岩溶塌陷的勘察中,通过反射波和折射波的多波勘探,成功地确定了岩溶塌陷灾害的范围、趋势及原因.反射波和折射波的传播特征明显受岩溶塌陷的控制,通过对比塌陷区反射波和折射波的运动学和动力学特征,可以圈定塌陷范围和危险程度。

2.2 活动断裂的探测

用反射波法探测活动断裂,要求反射界面具有高反射系数以形成较强的反射波,要求高信噪比和高分辨率的地震记录,以便对断裂两侧沉积分层产生的反射进行可靠的对比追踪.然而,目前浅层反射法的分辨率与对第四系沉积进行细分层的要求并不相适应(王庆海,徐明才,1991;马在田,1994)。

董其成和赵鸿儒(1994)用二维平板裂缝模拟断裂进行了超声模型研究.结果表明,当波入射到裂缝时,除在裂缝表面产生反射、折射外,还在裂缝顶端形成一个衍射点源向周围传播衍射波和转换波.在不同的接收点上衍射波和转换波的能量分配不同.由此可知,断裂的地震波场是复杂的,探测活动断裂应该从多波的角度出发,除反射波外,还要尽量利用其它的震相来进行探测,以便从中进行相互的比较、补充和印证。

赵鸿儒等(1994)在用超声模拟实验方法研究埋藏基岩断裂对地震全波波场的传播及分布的影响和基岩断裂倾向对地震动的影响时发现,断裂不仅造成震波到时滞后,而且使波场中的优势震相发生变化,由原来的直达波和基岩顶底面的反射波变为断裂界面上的各类反射波;震波经过断裂后,全波列持时及高频成分都明显减少;震波频率成分的变化与基岩断裂的倾向有关,可利用此特征确定断裂的存在及产状.上述对震波全波列的强度、波形、持时、频率等研究所揭示的一系列现象和规律,说明了超声模拟实验方法在工程多波地震勘探波场研究中所具有的独特作用。

2.3 地下生命线工程抗震

在较小的震中距范围内,地下生命线所在岩土体受地震波场传播的影响,使各种管线在某些方向上发生严重的变形,在工程抗震上不能忽略这种影响。

孙进忠等(1992)对地下生命线工程地震反应作了超声模拟实验研究,应用全波震相分析理论对多种震相:直达纵波横波、反射纵波横波、转换波、多次波、面波进行了分析,得到了不同场地条件下地震波场的分布规律.通过由多分量记录得到的质点振动矢量图,详细了解了波传播造成的地震地面运动的相位差异效应.结果表明,在软土覆盖层条件下,纵波主要引起铅垂向的土体变形,造成管线的径向弯曲变形;横波主要导致水平向的土体变形,引起管线轴向伸缩或派生纵弯作用;管线所在覆盖层岩土性质的横向突变可能造成地震地面运动强度十几至几十倍的变化.因此,不同岩土单元的接触部位及其附近是管线容易受破坏的部位,管线防震段至少应包含硬土中距突变界面一个波长的区段。

3 在工程质量无损检测中的研究和应用

3.1 桩基质量及承载力动态无损检测

随着灌注桩的大量使用,桩基动态无损检测方法发展较快.较早提出的方法有频率法、锤击贯入法、动力参数法、机械阻抗法、水电效应法以及共振法等(徐攸在,刘兴满,1989;刘金砺等,1993).这些方法检测桩基成形质量的原理基本上是单一震相的反射波法,其检测效果有一定的准确性,但在同时估算桩的承载力问题上存在着不足。

为了解决用低应变法既判断桩身成形质量又同时估算桩基承载力的综合检测问题,许昭永等(1992)提出了一种新的桩基无损检测方法——波列振幅衰减法.此方法根据工程多波地震勘探思想,综合利用直达波、反射波、尾波及其运动学和动力学特征,同时判断桩身成形质量、估算单桩承载力并给出相应的沉降量,这在目前国内外瞬态测桩法中是未能做到的.该方法具有以下特点:采用双参数(承载力和沉降量)控制、给出的承载力与静压对比,偏差小于10%的约占75%;避开了桩土体系的具体模型,不需知道土层的物理力学参数;比单用反射波判断桩身成形质量准确度要高;适用范围广,对桩径30~210 cm、容许承载力200 kN~12 000 kN的混凝土灌注桩都可使用,对预制桩深搅桩使用效果也良好.大量动静对比以及缺陷桩开挖验证的资料证明,波列振幅衰减法在判断桩身成形质量和单桩承载力方面都具有相当的精确度和可靠性.经鉴定,该方法达到了国际先进水平。

3.2 混凝土道路强度、厚度和缺陷的无损检测

高速公路、机场跑道等混凝土路面的弹性波无损检测,以往多采用反射波或透射波法,但效果不够理想.问题是被测对象属于非均匀介质体,仅用单一波型的运动学参数(波速)来测定其厚度、强度和缺陷往往不能胜任,特别是对300号以上的水泥效果更差。

徐人忠等(1992)在全波震相分析原理及工程多波地震勘探方法的基础上,提出了TVR超声综合测强测厚及缺陷判别的道路质量无损检测方法.该方法首先建立超声波特征参数与混凝土特征参数、路面板厚度及缺陷之间的一整套相关函数关系,然后采用环形测量网,其中心安放发射换能器,圆周安装接收换能器,每一测点都记录多个震相:直达纵波横波、反射波、转换波、多次波等,运用预先建立的一整套函数关系,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,并能检测出孔洞、蜂窝、裂缝、不均匀等缺陷,还可给出路面的有关弹性参数.经鉴定,TVR超声综合检测方法具有国际先进水平.它使

我国道路工程质量检测技术水平达到了一个新的高度。

3.3 水底隧道管段基础注浆质量无损检测

宁波甬江水底隧道管段基础注浆质量检测,属于多种不同介质组成的小尺度不均匀构造的探测问题。由于隧道渡越工程采用的是水下开槽、抛石、由预制沉管内向下注浆固定沉管的施工工艺,其水底基础注浆质量的检测尚属首次,无现成方法和资料可循,加上江水和淤泥的流动性使检测对象更加复杂。

针对这一复杂的工程难题,浙江省地震局采用了工程多波地震勘探的技术和方法。首先用现场实际材料建造了超声地震模型,将隧道的整个底部基础化为混凝土层、钢板、注浆层和抛石层的层状模型,用预留缺口模拟注浆与钢板间出现的孔隙以及孔隙中充满江水或淤泥的情况。模型实验中反复对比有无缺口两种情况的反射震相 P_{11} 、转换波震相 PS 的运动学和动力学特征,并利用首波速度的尺度效应来了解钢板下面层中的缺陷。在现场实测中,结合模型实验结果进行了多种方法的综合多波测试,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二分量超声换能器及其它超声换能器,以保证从多角度取得信息,最后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的满意结果,解决了一个国际上的难题。甬江水底隧道管段基础工程质量检测是一个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。

4 岩石物性测定中的应用

岩性探测和岩石物性测定是工程地震勘探内容的一个组成部分。目前在实验室中,基于全波震相分析基础上的测量岩石标本物性的多波方法,是实际工程问题中岩性探测方面应该予以发展的方法(赵鸿儒等,1991)。

谢鸿森等(1993)应用全波震相分析方法,对高温高压下岩石矿物标本中横波和其它类型波的初至进行识别,能一次实验同时获得纵波和横波两种速度,同时还得到了波速随压力和温度变化的特征,发现在所测样品熔点之前存在一个“软化点”。在该点上,纵波速度下降,波形振幅增大。实验中所达压力和温度的范围以及样品尺度之大,在高温高压测量方法中居世界领先地位。在高温高压下测量岩石矿物波速比常温常压下要复杂得多。由于发射和接收换能器分别粘接在高压腔体外的上、下压砧背面,发射换能器发出的超声波要经过上压砧、高压腔中的样品和下压砧才能到达接收换能器。所以,除直达透射 P 波和 S 波外,还有其它反射波、多次波、转换波,形成了复杂的波场。因此,为确认 S 波震相,须同时识别 S 波附近的其它震相,必须使用全波震相分析的方法。

王博文和赵鸿儒(1989)研究了异形岩石标本物性测定的问题,测定了 28 块南极异形岩石标本的密度、孔隙度以及在室温至 -20°C 干燥和饱和条件下的 P 波和 S 波速度,探讨了对异形标本所需考虑的特殊问题。异形标本形状的不规则给测定工作带来困难,例如,在用脉冲传播法测定横波速度时,侧边反射和多次反射 P 波以及侧边反射转换波之间的干涉,致使 S 波震相不易确认。测定中利用了多分量换能器加以确定,同时采用全波震相分析和物理模型实验中改变极化方向的方法,观察各震相的变化过程: S 波优势振幅随两个换能器的极化方向角改变而逐渐变化并产生初动突然反向,而直达和反射型 P 波震相与单

独改变 S 波振动方向无关.由此可见,全波震相分析方法是岩石物性测定中识别复杂波场、确认有用震相的有效手段.

5 问题及发展方向

从上述各方面的实例看到,工程多波地震勘探的应用在较短的时间里确实解决了一些国际、国内难题,尤其在非均匀复杂构造勘探问题上显示出其效果远优于传统的单分量、单震相的地震勘探结果.推广工程多波地震勘探的思想和方法,将对工程勘察等工作的发展有重要意义.目前,工程多波地震勘探存在的问题及应该发展的方向主要有两方面:

(1) 在利用不同传播路径的多波多震相进行工程地震勘探方面目前已取得了较大的进展,但是在利用波的多分量及其合成矢量了解地下介质特性方面却做得较少.实际上工程多波地震勘探的含义包括两方面:一方面是综合利用不同传播路径的各种震相所携带的不同信息来反演地下构造的位置和形态;另一方面则是利用波的三分量或多分量记录及其合成矢量来了解介质质点振动的特点以及波在传播过程中波形和震相变化特征的全貌,以此来获得地下介质结构及性质.今后应该注重将上述两方面结合起来进行多波地震勘探,这将有助于更全面地认识一些复杂的地震波场,解决更多的工程地震勘探难题(赵鸿儒等, 1990, 1991).

(2) 目前三分量或多分量的检波器还没有普遍使用起来,单分量检波器不利于多种震相尤其是横波震相的接收.实际勘探的经验表明,固定增益的地震仪不利于振幅相差较大的多种震相的识别.工程地震勘探一般是对浅层地质情况及不均匀小地质体的勘探,要求有比一般地震勘探更高的分辨率.因此,检波器的频带相应要高且宽.为提高分辨率,应使用高频换能器和高采样率的地震仪;对小尺度构造的勘探,动圈式换能器不如压电晶体换能器效果好,压电晶体换能器还可用于面波勘探(操柏, 赵鸿儒, 1994).目前,湘潭市无线电厂已研制出适合工程多波地震勘探的频带范围在 20 Hz~1 MHz 的三分量压电晶体换能器及两分量孔式换能器.综上所述,研制和使用三分量或多分量的高分辨率增益可调的地震仪,是进一步推动工程多波地震勘探向前发展和提高勘探水平的关键.此外,还应进一步完善适合于工程多波地震勘探资料处理软件的编写,以利于仪器实现从微机化、数字化向多功能、智能化的方向发展.

参 考 文 献

- 操柏, 赵鸿儒, 1994. 多波地震勘探及对采集系统的要求. 石油仪器, **8**(3): 125~127
- 陈钢, 梁京华, 孙千等, 1995. 采空超声波正演物理模拟. 煤田地质与勘探, **23**(4): 54~59
- 陈钢, 许维进, 梁京华等, 1996. 浅层地震采空区探测计算机仿真正演. 煤炭学报, **21**(1): 18~23
- 陈立成, 许帮保, 王大为等, 1994. 隧道施工掌子面前方层界面层析成像预报. 计算物理, **11**(1): 68~74
- 董其成, 高文泰, 宋书年等, 1993. 煤田陷落柱对地震波场影响的超声模拟. 煤炭学报, **18**(6): 72~81
- 董其成, 赵鸿儒, 1994. 非均质矿体地震模型的衍射、转换波及次生波研究. 地球物理学报, **37**(2): 228~237
- 刘碧宇, 许汉刚, 赵鸿儒, 1988. 断桩检测新方法的模型实验研究. 地震学报, **10**(3): 327~333
- 刘金砺, 李大展, 黄强(编), 1993. 桩基工程检测技术. 北京: 中国建材工业出版社. 326pp
- 马在田, 1994. 当前反射地震学研究中的问题浅析. 地球物理学进展, **9**(1): 84~89
- 年宗元, 1994. 我国勘查地球物理的若干进展: 1993 年. 物探与化探, **18**(6): 401~412
- 孙进忠, 彭一民, 赵鸿儒等, 1992. 地下生命线工程地震反应的超声模拟. 地震学报, **14**(1): 104~110
- 唐大荣, 1994. 地面岩溶塌陷的高分辨地震勘查. 物探与化探, **18**(1): 35~39

- 唐文榜, 1989. 全波震相在地震勘探中的应用前景. 地球物理学进展, **4**(1): 8~17
- 王博文, 赵鸿儒, 1989. 异形岩石标本物性测定的试验及其南极标本的测定结果, 八十年代中国地球物理学进展. 北京: 学术书刊出版社. 653~665
- 王庆海, 徐明才, 1991. 抗干扰高分辨率浅层地震勘探. 北京: 地质出版社. 426pp
- 王振东, 1988. 浅层地震勘探应用技术. 北京: 地质出版社. 296pp
- 万志清, 赵鸿儒, 彭一民等, 1993. 地下地质结构对地震波传播的影响. 地震学报, **15**(1): 46~52
- 谢鸿森, 张月明, 徐惠刚等, 1993. 高温高压下测量岩石矿物波速的新方法及其意义. 中国科学, B 辑, (8): 861~864
- 徐人忠, 王仲硕, 周燕, 1992. 超声水泥混凝土路面的强度和厚度. 河南交通科技, (3): 18~22
- 徐攸在, 刘兴满(主编), 1989. 桩的动测新技术. 北京: 中国建筑工业出版社. 341pp
- 许昭永, 段永康, 蔡静观等, 1992. 波列振幅衰减法: 一种新的桩基测试方法及其应用, 云南地球物理文集. 昆明: 云南大学出版社. 191~202
- 曾昭璜, 1994. 隧道地震反射法超前预报. 地球物理学报, **37**(2): 268~270
- 赵鸿儒, 唐文榜, 郭铁栓, 1986. 超声地震模型试验技术及其应用. 北京: 石油工业出版社. 372pp
- 赵鸿儒, 孙进忠, 唐文榜, 1990. 全波震相分析的应用. 地球物理学报, **33**(1): 54~62
- 赵鸿儒, 孙进忠, 唐文榜, 1991. 全波震相分析. 北京: 地震出版社. 226pp
- 赵鸿儒, 孙进忠, 彭一民, 1994. 埋藏基岩断裂对地震波动的超声模拟研究. 地球物理学报, **37**(3): 382~390

地 震 学 报
ACTA SEISMOLOGICA SINICA