

国家地震局杭州干部培训中心继续教育教材

工程多波地震勘探

赵鸿儒 郭铁栓 徐子君 唐文榜 孙进忠 著



地震出版社

176414-4-226

国家地震局杭州干部培训中心继续教育教材

工程多波地震勘探

赵鸿儒 郭铁栓 徐子君 著
唐文榜 孙进忠

地震出版社

1996

内 容 提 要

本书从几何地震学的基本概念入手,逐步引进非均匀介质条件下多波震相的识别、确认、分析和应用,以及岩石综合物性测定方法。书中还简要地介绍了必要的仪器、模型材料和模型建造,选录了一些利用工程多波地震勘探解决非均匀复杂地质问题和工程质量无损检测的成功实例。

本书可供从事工程地震勘探的工作人员以及有关专业高等院校师生参考。

工程多波地震勘探

赵鸿儒 郭铁栓 徐子君 著

唐文榜 孙进忠

责任编辑:姚家榴

责任校对:张晓波

石油工业出版社出版

北京民族学院南路9号

中国地质大学轻印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行

全国各地新华书店经售

787×1092 1/16 17.25 印张 442 千字

1996年11月第一版 1996年11月第一次印刷

印数 001—800

ISBN 7-5028-1350-0/P·843

(1777) 定价: 24.00 元

《工程多波地震勘探》

编 委 会

主 编：赵鸿儒

副主编：郭铁栓 徐子君 苏晓梅

委 员：(以姓氏笔划为序)

卢 桢 孙进忠 苏晓梅 赵鸿儒

郭铁栓 唐文榜 徐子君

作者的话

工程多波地震勘探,是北京大学地球物理系超声地震模型实验室及有关协作单位十多年来,在该室开展模型试验、岩石综合物性测定、全波震相分析等方面研究工作取得成果的基础上,在工程地震勘探解决非均匀地质问题的实践中,逐步形成、发展起来的。利用工程多波地震勘探解决非均匀复杂地质问题和工程质量无损检测时,首先从模型实验着手,以便对复杂的波场分布、可利用的波型和震相在理论和方法技术上作到心中有数;在现场施工中采用多波勘探思想,将检波点的震波视为同一震源条件下随空间变化的矢量进行研究,进行三分量或多分量的观测,以取得全波形;在资料处理解释中,既考虑单分量记录中的各类震相,更重视多分量合成记录中各类震相的分析和应用,同时综合考虑地球介质的有关物性参数和其他工程物探手段的应用,这样有助于克服单一震相和单一地震方法的多解性,以取得更为显著的成效。这些思路和技术方法,已在工程地震勘探的实践中得到证明。

工程多波地震勘探的主要内容赵鸿儒在1993年7月至1995年3月期间,先后在云南省地球物理学会(昆明)、国家地震局干部培训中心(杭州,先后两次)、西安石油仪器厂研究所、陕西省地震局、铁一院物探公司(兰州)等单位举办的工程多波地震勘探学习班上讲授现整理编写成书,作为国家地震局杭州干部培训中心继续教育教材。

全书共分六章。从工程地震勘探的发展逐步引入工程多波地震勘探的兴起;从几何地震学的基础概念逐步引入到非均匀介质条件下多波震相的识别、确认、分析和应用,以及岩石综合物性测定的研究。书中还简要地介绍了必要的仪器、模型材料和模型建造。最后,选录了一批多波地震勘探用于工程勘查的成功实例,供读者参考。书中避开了大量的理论分析和数学推导,以大量的图表和实验、实测的波形记录,展示多种多样条件下的复杂波场及其应用,希望对工程勘察中多波的应用给读者一直观的印象。参加编写工作的主要作者有:赵鸿儒、郭铁栓、徐子君、唐文榜和孙进忠。

本书可供从事工程地震勘查的同行及有关高等院校师生参考。书中选用的大量工程多波地震勘探研究成果,涉及许多同志的辛勤工作的结果,作者借此向他们深表谢意。

由于我们的理论水平和实际工作能力所限,书中错误和不足之处在所难免,衷心希望读者批评指正,以期共同发展工程多波地震勘探技术。

1995年11月16日

目 录

第 1 章 导论	(1)
1.1 工程地震勘探的发展概况	(1)
1.2 工程地震勘探的内容和现状	(3)
1.3 工程地震勘探的展望	(6)
1.4 工程多波地震勘探基础	(7)
1.4.1 超声地震模型试验	(7)
1.4.2 全波震相分析	(8)
1.4.3 岩石综合物性测定	(11)
第 2 章 地震波传播基本问题简介	(13)
2.1 均匀弹性介质中传播的地震波	(13)
2.1.1 无限均匀弹性介质中的地震波	(13)
2.1.2 均匀有限完全弹性固体介质中的地震波	(14)
2.1.3 惠更斯原理及费马原理	(16)
2.1.4 波传播的数学描述	(18)
2.1.5 均匀平面波和非均匀平面波	(19)
2.2 层状介质中波传播的特征	(20)
2.2.1 界面上波型的转换	(20)
2.2.2 斯奈尔 (Snell) 定律	(21)
2.2.3 反射系数和折射 (透射) 系数	(22)
2.2.4 首波的形成	(22)
2.2.5 瑞利面波	(26)
2.2.6 S^* 波与 S_0 波	(30)
2.3 非均匀介质中弹性波的传播	(32)
2.3.1 均匀各向同性介质中传播的波	(33)
2.3.2 分层均匀介质中传播的波	(33)
2.3.3 二维垂向不均匀介质中传播的波	(34)
2.3.4 三维横向各向同性介质中传播的波	(35)
2.3.5 各向异性介质中传播的波	(36)
2.3.6 双相介质中的第一类和第二类压缩波	(42)
2.4 弹性波的激发	(45)
2.4.1 胀缩源	(45)

2.4.2	集中力源	(46)
2.4.3	力偶源	(46)
2.4.4	一些实用的震源	(47)
2.5	有关地下构造探测的几个问题的讨论	(48)
2.5.1	地震波的时距曲线	(48)
2.5.2	关于分辨率问题的讨论	(50)
2.5.3	陡倾角界面的反射波时距曲线及探测	(53)
2.5.4	倾斜界面对水平叠加的影响	(55)
2.6	岩石和岩(土)体的物理-力学性质	(57)
2.6.1	弹性波传播速度与弹性模量	(58)
2.6.2	岩石和岩(土)体的状态函数、物性指标和地震参数的相互关系	(64)
2.7	岩石弹性指标的确定	(74)
2.7.1	弹性指标与应变指标的概念	(74)
2.7.2	弹性模量的确定	(75)
2.7.3	坚硬岩石应变指标的确定	(76)
2.7.4	松散土应变模量的确定	(78)
2.7.5	岩石抗压极限强度的估算	(80)
2.7.6	地基土动力参数和密度的确定	(81)
第3章	工程多波地震勘探及其模型试验用的仪器和设备	(86)
3.1	换能器	(86)
3.1.1	压电晶体换能器	(86)
3.1.2	其他类型换能器简介	(93)
3.1.3	多分量换能器	(98)
3.2	声波仪简介	(102)
3.2.1	SYC-2型和3型超声岩石参数测定仪	(102)
3.2.2	仪器操作注意事项	(103)
3.3	工程地震仪简介	(105)
3.3.1	仪器特点和测量中的基本问题	(105)
3.3.2	工程地震仪的类型	(106)
3.3.3	激震源简介	(114)
第4章	震相的识别与分析	(117)
4.1	震相及其意义	(117)
4.1.1	震相	(117)
4.1.2	震相在地震科学研究中的意义	(118)
4.1.3	震相在地球物理勘探中的意义	(118)

4.2	震相分析	(118)
4.2.1	射线和走时分析	(119)
4.2.2	质点振动方式和震相初动方向分析	(122)
4.2.3	振幅与波谱分析	(130)
4.3	震相识别	(143)
4.3.1	震相识别的基础	(143)
4.3.2	震相识别的方法	(148)
4.3.3	震相识别的示例	(149)
4.4	广义多波地震勘探	(153)
4.4.1	多波联合勘探	(153)
4.4.2	广义多波勘探	(153)
4.4.3	广义多波地震勘探实例	(154)
第5章	超声地震模型试验的几个技术问题	(163)
5.1	模型试验的相似性准则	(164)
5.1.1	均匀各向同性弹性介质情况下的相似性准则	(165)
5.1.2	非均匀介质情况下的相似性准则	(168)
5.2	模型材料	(173)
5.2.1	一般材料	(173)
5.2.2	复合材料	(174)
5.3	模型的建造	(188)
5.3.1	建造模型	(188)
5.3.2	模型设计与建造的实例	(189)
第6章	工程地震勘探实例简介	(193)
6.1	超前探测实例	(193)
6.1.1	隧道施工前方层界面层析成像预报	(193)
6.1.2	西山煤田陷落柱的地震波场研究	(196)
6.1.3	采空区地震探测研究	(203)
6.1.4	槽波勘探研究	(212)
6.2	动态无损桩基检测实例	(218)
6.2.1	动态桩基检测的模型研究	(220)
6.2.2	跨孔声波透视法在灌注桩质量检测中的应用	(224)
6.2.3	波列振幅衰减测桩法	(227)
6.3	其他地震波勘探方法实例	(230)
6.3.1	面波勘探	(230)
6.3.2	混凝土路面的 TVR 超声综合测强法	(234)

6.3.3	检层法钻孔波速测量中的震相分析	(235)
6.3.4	场地微振动的观测与应用	(238)
6.4	岩石综合物性测定实例	(240)
6.4.1	异形岩石标本的测定研究	(240)
6.4.2	高温高压下测量岩石矿物波速的新方法	(245)
6.5	多波地震勘探在隧道水底基础检测中的应用	(247)
6.5.1	技术思路和方案	(247)
6.5.2	TVR 综合测强测厚技术的应用	(248)
6.5.3	超声地震模型试验	(251)
6.5.4	现场多波测试与分析	(253)
6.5.5	多波地震勘探的结果	(258)
6.6	综合地球物理方法勘探实例	(259)
6.6.1	滑坡研究实例	(259)
6.6.2	层析技术在水电工程中的应用	(260)

第1章 导 论

工程地震勘探是一门正在发展的勘探地球物理的新学科。它利用地震学研究方法和成果,能有效地解决各种工程地质问题,已在工程地质填图、建筑、水利、电力、矿山、铁路、公路、桥梁及其他许多工程中发挥重要作用。尤其近十年来随着现代建设的高速发展,许多新的工程项目出现,如地下生命线工程的检测、地下隐蔽工程的无损探测和一些特殊工程的质量检测等等,对工程地震勘探提出了多种多样的更高的需求,地震工作者正不断努力开发新方法新技术。在完成各项工程勘测任务中,推动着地震勘探技术的发展。工程多波地震勘探就是在解决复杂的工程地质问题中开发出的一种新技术新方法。

我们可以把工程地震勘探看作是勘探地球物理的一门独立学科,它是专门使用地震学方法和超声波方法研究工程地质的一门学科。工程地震勘探的基本含意是根据人工激发的地震波或超声波(声波)在介质中传播的物理特性来研究工程地质等情况,即利用岩土体或地层的地震参数与工程地质指标之间的关系,由测得的地震参数对工程地质问题进行评价。因此工程地震勘探为工程地质方面的研究开辟了新的探索途径。

1.1 工程地震勘探的发展概况

工程地震勘探与地震学有着密切关系。我国是世界上地震学发展最早的国家。有关地震事件史不绝书,至今已近 4000 年历史。据《竹书纪年》记载:“夏帝发七年(公元前 1831 年)泰山震。”又《通鉴外纪》记载:“周文王立国八年(公元前 1177 年)岁六月,文王寝疾五日,而地动东西南北不出国郊”。我国在研制地震仪器方面也有悠久的历史。据《后汉书选》记载,河南南阳人张衡在“阳嘉元年(公元 132 年),复造候风地动仪…”。这是世界上第一台地震仪。当时在首都洛阳已经能记到甘肃的地震,同时对地震的传播性质和方向都有了一定了解。可惜祖先留下的这些技术早已失传。图 1.1 是地震学家李善邦于 1931 年请人绘制的张衡地震仪忆象,他特请了翁文灏先生题词句并置之鹫峰地震台,以激励后人。从悠久历史看,我国地震学在历史上是先于外国的,但到了近代,我国地震学、勘探地震学、工程地震勘探均落后于国外。

地震勘探技术,国外 20 世纪初已开始研究,1919 年德国人 L. 明特罗普(Mintrop)首先运用了折射法,1914 年德国人 R. A. 费森登(Fessenden)提出反射法,当时主要用于石油勘探。俄国 1926 年开始使用折射波法,1929 年在格鲁兹宁区地震勘探研究石油构造时被列入方法之一;1923 年起研究反射波法,1935 年用于工业生产。国内对这些方法的介绍从 30 年代初已陆续出现,1932 年《申报月刊》(二卷五号)发表了“人造地震测验地质”一文,介绍了“用地震波检测地质是 20 年前所发明,但至实用,还不过是最近数年来的事情。”并阐述了其原理、方法和优点。1939 年《新科学》(二卷一期)在“地震测检仪器的新用途”一文中报道,美国公路局旧金山分局的威廉(G. M. William)工程师利用地震仪探测路基下地层土质的坚硬程度,来选定路基地点,确定公路桥梁的基础位置,他说这种方法解决了过去因不知地下

張衡地震儀想像

地動龍西起
長安覺已先
微波一千里
消息一機發
科學開西哲
精思仰昔賢
空山研妙理
對此更欣然

忠漢張衡作地震儀開
科學之先河繪其圖三
諸君文頌先生茲以貴
三鵝峰以誌景仰

李易邦
民國二十九年九月



图 1.1 张衡地震仪

情况造成的路面修好后又有许多地方陷下去的难题。1942年《每月科学》(二卷十一期)以“人工地震和地质调查”一文,报道了日本人工地震权威、铁道省建设局的渡边贯博士来华,他对记者介绍说,日本人工地震(地震学方法)在丹那隧道和关门隧道开凿中贡献实属不小。他还预言:“今后人工地震探测地质(弹性波地下探测法)或能急速地展于世界。”

我国采用地球物理勘探方法的时间追溯到1939年。当时地球物理学家翁文波由美国留学归来在重庆中央大学任教,开设了地球物理勘探课程。他在1945年9月正式成立了玉门重磁队。我国第一个地震勘探队是1949年筹备,1951年在上海成立,后开赴陕北地区进行工作。1949年起先后开办了一些石油勘探方面的培训班,由老一代地球物理学家授课,培养了新中国的第一代地球物理勘探队伍。

工程地震勘探作为勘探地球物理的一门独立学科诞生于40年代末至50年代初,当时前苏联的水利设计院和水电设计院同时在工程地质勘探中系统使用了工程地震勘探。再往前追溯到1937年,前苏联的科学家们曾首先采用地震学方法进行浅部地层的试验研究;他们认为必须改进仪器,因为当时的低频(频率为20~70Hz)地震仪还不能满足时间读数要求。1946年П. А. 甘布尔采夫(Гамбургцев)用高频(几百Hz)地震仪勘探浅部地层成功,可以说从那时起工程地质逐步使用了工程地震勘探。

第二次世界大战后,随着建设工程项目的大量兴起,一些国家要求在建筑物场地勘探动力基础的设计、结构物的动力分析等工作中采用地震学方法测定地震波在地层介质中的传播速度,从而促使地震波在土木工程、矿山工程、交通工程以及其它工程地质中的应用与发展,为工程地震勘探的发展提供了条件。随着时间的推移,科学技术的进步,工程地震勘探的内容逐渐丰富。50年代初期,国外多采用纵波观测方法,50年代末开始使用纵横波研究粘土和天然产状条件下岩石的各种动力学参数。60年代后广泛使用地震学方法研究岩石产状和性质,特别是用于山地(30°~35°)地区亦取得好的效果。同时通过对坚硬基础上高坝各种断面的研究,在坑道中地震观测的研究,工程地震勘探很快成了重要的勘探手段,并且在研究岩体的岩性和状态中开始采用超声波方法。70年代初,对多年冻结条件下坚硬岩石和土体中弹性波速度变化特征进行了研究。70年代后期到80年代初期,水利工程建设、工业建设、道路建设和民用建设等有关部门都广泛应用了地震学和超声波方法。

我国的工程地震勘探起步较晚,基本上是从70年代中期逐步开展的,到80年代初期才较大规模地系统地开展起来。由于工程建设的需要,先后办过一些短训班,培养了工程地震勘探的技术人员,有些生产单位和科研单位研制生产出适合于工程地震勘探的专用仪器,如声波岩石参数测定仪、矿井地震仪等。从已掌握的系统资料看,1980年有《岩体超声技术应用》,1982年有《浅层地震勘探方法与技术》和《地震波在工程中的应用》等书出版。1981年前苏联莫斯科大学出版社出版了《工程地震勘探原理》,这是国外较早的一本专著。我国工程地震勘探起步虽晚,但发展速度并不慢,根据不完全统计我国目前已有100多支工程地震勘探基层队伍在从事工程勘探工作。

1.2 工程地震勘探的内容和现状

“工程地震勘探”这个术语概括得比较全面。从当代发展水平分析,工程地震勘探与石油地震勘探、地震探矿均有着区别。这一学科的内容除了简单地确定各种地质界面的空间形态

外，还应该解决非均匀复杂小构造地质体的形态、性质、结构和岩土体的物性等多方面的问题。有关内容可用图 1.2 简单说明。

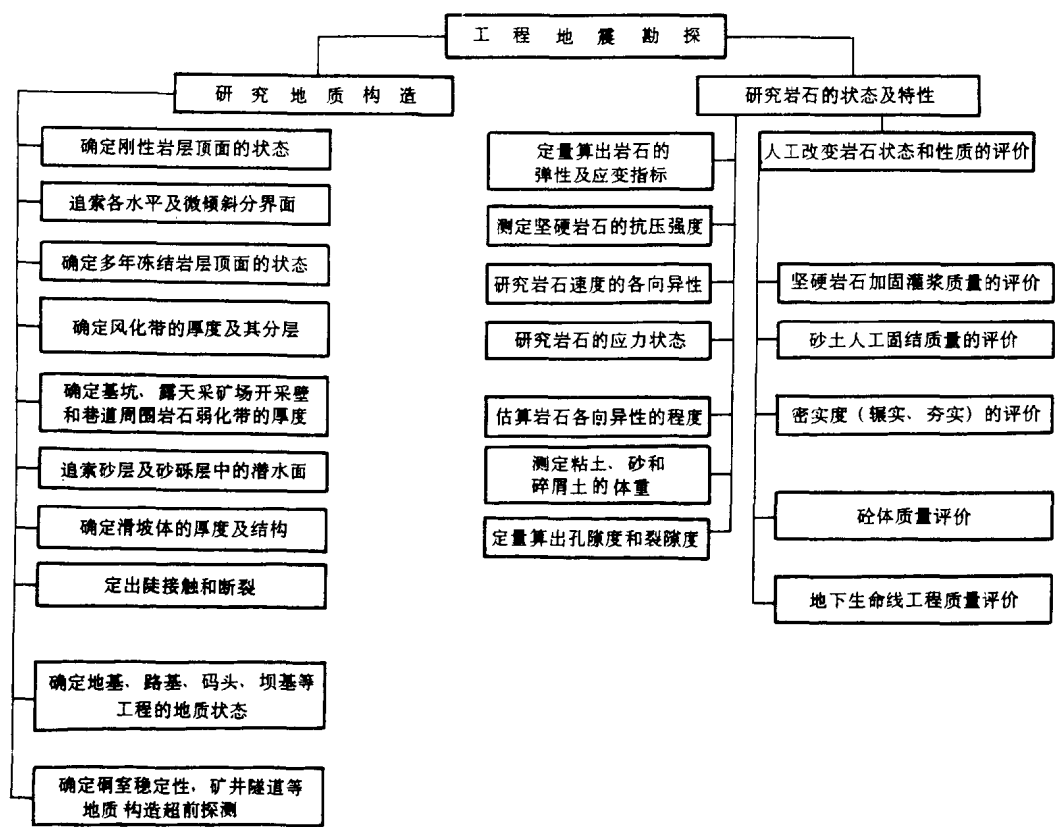


图 1.2 工程地震勘探内容

应该指明，这里所用“工程地震勘探”，在文献中还会遇到表示同样内容的术语，如“工程地震声波勘探”、“地震声波勘探”、“微观地震探测”、“应用地震学”、“浅层地震勘探”、“高频地震勘探”等等。这些术语虽有各自的某些特点，从工作内容看，均不如“工程地震勘探”确切。至于本书题目为“工程多波地震勘探”，是为了强调运用多波地震勘探的新思想来解决现行工程地震勘探中遇到的各种复杂地质难题，它是工程地震勘探的一种新技术方法，其具体内容的展示将在以下各章节逐步引入。

鉴于上述情况，我们将工程地质和建筑工程中研究岩土体与地层结构、性质、状态所采用的一整套地震学和超声研究方法，都理解为工程地震勘探所综合的内容，并归入到工程地震勘探中去。工程地震勘探与一般地震勘探有所不同，它还包括地面观测、探矿工程——浅井、平巷、竖井中的观测，地震测井和超声波测井，以及在试样和露头上进行超声波的观测。工程地震勘探各种方法的有效性，使得这种研究已成为工程地质工作必不可少的组成部分。在进行一些大型工程项目的方案设计时，许多国家都不可避免地要进行仔细的工程地震勘探。

岩土层的地震学指标与工程地质性质指标存在相关关系，可用地震波和超声波指标的值间接地确定工程地质性质的指标，这对解决工程地质问题具有重要意义，在工程地震勘探中

得到了优先发展。

地震学方法的优点显而易见，它不需要采样，不需要破坏岩体的连续性和土层的天然结构，就可确定岩土层的工程地质指标。这一优点在研究松散土层性质时尤为突出，因为要取得松散土层的完整试样十分复杂和困难。由于方法简便和可大量探测，运用地震学方法就可以把单独确定的某些工程地质指标推广到面上和深部，用来研究我们需要了解的任何范围内的岩土层性质，必要时甚至可用未来建筑场的规模来比拟该范围。

根据某种物理原理建立的超声波法和地震学方法，既可反映试样或小块岩体的特征，也可反映大块天然岩体的特性，从而对出现的差异用估算尺度效应和环境效应的办法进行定量评价。此外，对于工程地震勘探中遇到的某些难题，还可通过超声地震模型试验的手段，根据相似性原则建立模型，先在实验室进行有关理论方法的研究，取得结果后，再运用到实际被研究的对象（原型）中去解决问题，这是一种既省财力又能快速准确解决问题的方法。

80年代以来，工程地震勘探迈入了实用阶段，积极采用先进技术方法，取得了长足进展。工程地震勘探由于专业特点所限，比起石油煤田地震勘探在使用电子计算机处理资料方面，显得有些落后。但由于计算机软硬件的进步，工程地震勘探在采用带有微机的先进专用仪器和微机处理资料方面取得空前的进展，如过去手工解释难度很大的哈利斯法、时间场法现在都在微机上实现了自动处理成图。近几年我国又将地震波初至自动检测技术和射线法正反演技术成功地引入了工程地震勘探的领域，工作效率解释精度显著提高。

折射波法和反射波法是工程地震勘探的两个基本方法，在地质调查方面的应用还比不上石油地震勘探那样成熟，尚处于初级阶段。我们除了继续发展和完善这两种方法外，根据工程地震勘探的特点还应使用透射波法和波的动力学特征参数（如振幅法）。目前透射波法的层析技术已应用于工程地震勘探，但不普遍。振幅法主要研究弹性波在介质中的衰减特性，声波透视的交会法和Q测井也是透射波振幅法的一种。反射波振幅法由于使用具有瞬时浮点增益功能的地震仪，恢复地震波的真振幅已有可能。折射波振幅法用具有二进制增益系统数字工程地震仪，记录弹性波相对振幅（振幅比）是完全可能的。解释时利用粘弹理论可以计算出土、软岩石等粘滞系数。这种原位测定的粘滞系数是评价工程地质、特别是滑波地质的宝贵参数。

在弹性波测井方面，如PS波测井和Q测井技术均属于新方法。弹性波测桩技术，弹性波频率测深技术（面波测深技术），垂直地震剖面技术，高分辨率技术，超前探测技术，以及常时微动（脉动）的观测应用技术等等也是近年来逐步发展起来的新技术，都已不同程度地应用于工程地震勘探中。

仪器发展方面，在使用原有地震勘探仪器的基础上，很快就开始研制和生产出适合工程地震勘探使用的仪器。其发展过程大致经历了光点仪器、增强型仪器和数字化仪器三个主要阶段，由单道（1~3道）发展为多道（12~24道），由动态范围较小（80~100dB）的定点放大发展到动态范围较大的（100~120dB）浮点放大。尤其是进入80年代以来，国外各公司不断推出新的仪器品种，更新换代很快。我国除进口仪器外，也注意对引进的小型工程地震仪进行全面的技术改造，重新设计体积小、功能全、分辨率高且适于在强干扰下工作的工程地震仪。目前国内如重庆、长沙、湘潭、北京、武汉、南京、长春、扬州和厦门等地的工厂或高等院校科研单位都相继研制生产出不同类型的工程地震仪器。

1.3 工程地震勘探的展望

(1) 目前工程地震勘探常用的基本方法是折射波法、反射波法和透射波法,一般沿用石油或煤田地震勘探的基本方法。这些方法又多采用纵波、横波的单一直达波或一次反射波,它们多来源于把地球介质视为分层各向同性完全弹性的几何地震学方法,是一级近似的结果。而工程地震勘探的对象除了一般层状地质构造外,更多遇到的是非均匀复杂构造体,解决这类勘测问题,以往的几何地震学方法感到不能适应,无法很好地解决问题。因此在理论上应从非均匀地球介质的全弹性波动方面(即非线性问题)着手考虑,在方法上建议采用广义多波勘探思想,应用三分量或多分量检波器作全波列记录的勘探方法,利用多个震相的运动学和动力学特征参数和全波震相分析理论方法,来进行工程地质的解释。我们认为这将是解决非均匀复杂地质问题的有效途径之一。

(2) 对于一些非均匀复杂构造的震波波场,尤其是多震相的复杂波场,往往很难用数学计算的方法从理论上解决或者是无法解决。因为波场不能认识,更无法用来反演其地质结构。遇到这类难题,最好的办法是先采用超声地震模型试验方法,将原型按照相似性原则在实验室内建造模型进行理论、方法的研究,取得结果后,再应用到实际中(原型)去指导解决问题。这将是工程地震勘探应推广的重要方法之一。

(3) 工程地震勘探的任务是解决各类工程地质问题,或者说就是研究岩土体组成的非均匀复杂构造地质问题或土木建筑工程等问题,因此应加强对岩土、砂体的物性特征参数研究,甚至对其化学特征参数也要研究,以提高工程地震勘探工作的质量,保证对工程地质的解释更加准确。

(4) 由于工程地震勘探研究的对象多是非均匀复杂构造,因此应加强综合利用各种地球物理方法并和地质、岩石物性、化探等手段相互配合,进行综合勘探,才能更可靠地解决工程地质等方面的问题。

(5) 工程地震勘探不仅要选择合适而有效的技术方法,而且需要采用理想的仪器。因此在借鉴和引进国外先进技术设备的同时,应该对进口仪器进行全面技术改造,积极设计和开发出适合我国实际的高质量的仪器设备。所需要的仪器必须具有灵敏度高、动态范围大、分辨率高、稳定可靠、轻便易携的多功能智能化等优点;还需要加强新方法的计算机资料处理软件的研究。工程地震勘探数字化技术是发展方向。

(6) 在现行的工程地震勘探基础上,建议推广应用工程多波地震勘探,即把全波震相分析,岩石综合物性测定和地震模型试验的理论方法技术综合应用于工程地震勘探。这是近年来我们提出工程多波地震勘探的思想基础。经工程实践证明,该方法在解决工程地质等难题中,其效果比以往方法优越得多(见第六章)。

今后随着电子技术的发展,信号增强型数字地震仪的使用和微型计算机的普及,将加快工程地震勘探的发展。我们期望在逐步开展并推广上述六方面工作的同时,在现代科学技术的基础上,采用更多新的理论和方法,更快更好地改进和提高工程地震勘探技术,不断拓宽应用的新领域,以满足工程探测日益增长的需要。

1.4 工程多波地震勘探基础

工程多波地震勘探是地震学的一个分支学科,其基础是超声地震模型试验、全波震相分析、岩石综合物性测定。将这三种试验、分析、测定方法技术有机地结合在一起,系统地应用于现行的工程地震勘探中,解决工程地质中非均匀复杂构造等难题,逐步形成了工程多波地震勘探的基本理论和方法技术。经实践证明利用这一新思路解决工程地质问题成效显著。本节将简要介绍三者的基本概念。

1.4.1 超声地震模型试验

超声地震模型试验的研究是与地震勘探学密切相关的一个重要研究领域,是实验地震学的一个重要分支。在常规的地球物理模型试验基础上,当遇到难以解决的复杂问题时,则须采用按照一定的相似比,把某些地质构造或地球模拟化,用数学模拟计算和物理模拟试验相结合的办法,解释生产或科研中出现的实际问题 and 理论方法问题。这便构成了一门新学科——模型地震学,后称之为超声地震模型实验。它是以无量纲波动方程的不变性为基础,以几何尺度和物理参数的相似性为准则而进行的一种实验研究方法。

超声地震模型实验,主要研究模拟地震波在各种模型构造中传播的运动学和动力学特征。这些模型构造相当于地球的真实构造或设想的理想构造,换言之,即通过某种相似变换能将一种模型构造类比另一种模型构造或真实的地球构造。另一个研究方面是震源机制的模拟。在实验室中模拟各种震源机制以及不同震源引起的地震波在介质中的传播特征,对于探测地下爆破和地震预报以及工程地震等都十分重要。其他的研究方面还包括测定在常温常压或高温高压下岩石和矿物标本的波速、波谱、阻抗和衰减系数等物理参数的基础研究。通过对比野外测定的有关参数,可以提供确定地球内部介质性质的资料。

超声地震模型实验中最普遍使用的方法是超声波方法。

众所周知,声频范围一般在 $16 \sim 20000\text{Hz}$ 之间,低于 16Hz 称为次声波,高于 20000Hz 称为超声波。实用的超声波频率一般约在 $10^4 \sim 10^8\text{Hz}$ 量级,而近震的震波主频约在 $1 \sim 10\text{Hz}$ 量级,地震勘探用的地震波主频约在 $10 \sim 10^2\text{Hz}$ 量级。如果考虑超声波和地震波在固体介质中的传播速度是同一量级,则超声波波长远小于地震波波长,因而可用相当于真实地质构造尺度 $10^{-2} \sim 10^{-7}$ 倍的模型来模拟这些构造。让超声波在所建造的模型内传播,研究超声波在这些已知构造中传播的运动学和动力学特征,从而推测地震波在真实地质构造中的传播特征,这就是超声地震模型试验研究的基本思想和主要方法。

图 1.4.1 给出了这种研究方法的测试原理图。图中的时标发生器,分频器和电脉冲发生器主要用来产生需要的电信号,发射换能器把电信号转换成超声波,加载于模型上,超声波通过模型被接收换能器检拾起来,再转换成电信号,送至带有放大器的显示设备中,然后把波的信号记录到记录设备中。早期的换能器多采用石英、酒石酸钾钠、钛酸钡等晶体,现在大多采用发射功率大,接收灵敏度高的锆钛酸铅系列压电陶瓷晶体。至于发射、接收和记录显示,则由电子设备来完成,现在已逐步采用了磁带数字记录,或与微型计算机联机,数据直接存入微机中进行处理。

超声地震模型试验系统研究始于 50 年代。但最早的模型试验可以追溯到 20 年代。当时的英国地球物理学家布拉德 (E. C. Bullard) 曾提出用超声波模拟地震波,在小尺度的模型

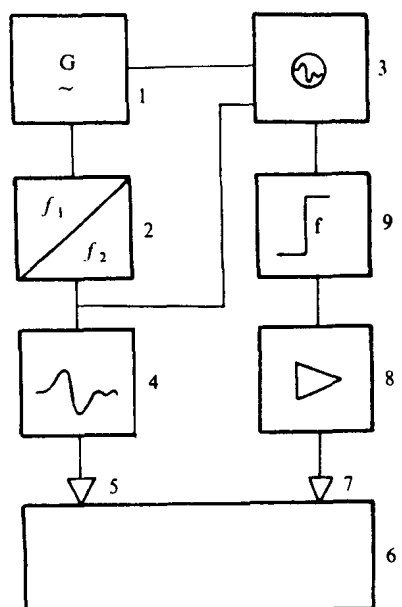


图 1.4.1 超声地震模型试验测量原理示意图（根据 J. 贝伦斯）

1. 时标发生器；2. 分频器；3. 示波器；
4. 脉冲发生器；5. 发射源；6. 地震模型；
7. 接收器；8. 放大器；9. 滤波器

裂隙介质中的波场进行了研究。美国近年来进行的横波模型研究也对野外的地震勘探起了重要作用；他们用超声模型试验方法模拟野外地下数千米压力岩石性质，做出一套 P 波速度与波速比曲线来对岩石性质做出某些估计。

我国早期的模型试验比较薄弱，起步较晚，始于 50 年代末 60 年代初。那时仅有少数自制仪器或引进的前苏联的仪器，进行初步模型实验工作。70 年代后期开始重建实验室，下大力开展超声地震模型实验仪器的研究、模型震相识别研究、模型材料和模型试验方法技术研究，以及某些实验理论研究等。一批高水准的实验室在国内相继建成。北京大学超声模型实验室在八十年代起接纳国内不同系统不同单位的很多科技人员开展模型实验工作，涉及理论地震学、地震测深、地震勘探、工程地震及声波测井等诸多领域，解决了科研和生产中众多问题。

超声地震模型实验是研究弹性波传播理论的有力工具。工程多波地震勘探中在解决各向异性、非均匀介质等复杂问题时就应首先采用模型试验手段。按照原型以相似性原则建造模型进行试验，可以较快地在理论、方法技术和波场认识诸方面取得好的结果，再将其用于实际指导解决生产或科研的难题，是一条省时间、省资金、效率高、成果好的途径。

1.4.2 全波震相分析

地球物理学中广为应用的工程地震勘探技术正面临新的挑战，工程技术的发展要求利用地震观测技术更加详细地研究地下结构和岩性变化，或者研究地下构造对地面地震波场的影响，这就给地震观测技术提出了更高要求。原有的常规方法因手段较简单、使用单一波型，而难以担负起详细探测岩性和结构构造的重任，需要利用多波和全波。因此如何充分利用全弹性波场所蕴含的地下信息，成为工程地震勘探的重要课题。

上研究地震学问题的设想。日本人寺田寅彦曾做了一个瑞利波的实验，这是最早的地震模型试验之一。但早期试验均因技术上原因，而未能得到较理想的结果。

50 年代前后，由于无线电和压电陶瓷器件的迅速发展，超声波技术也得到了很快的发展。美国、前苏联等国先后用超声波成功地做了一些地震模型实验。与此同时，仪器、模型材料和实验方法的研究也都取得了较大发展。

从 50 年代末到 70 年代初，超声地震模型试验研究取得了相当丰富的成果。其工作主要集中在地震波在各种地质构造中传播的运动学和动力学特征的研究上。

近一二十年以来，随着科学技术的迅速发展，在超声地震模型试验中采用了许多新技术，如声光观测方法（声全息）、在高温高压下声发射的利用，以及计算机的使用。特别是使用计算机，不仅为数学模拟计算与物理模型实验相结合提供了实用的可能，而且能够把物理模型中各种波的信息直接绘制成构造图，使结果一目了然。图 1.4.2 就是计算机绘制的来自一个推覆体模型上反射 P 波的处理结果，

图中的结果给我们的印象深刻。国外还用模型实验方法对塑性形变介质和裂隙介质中弹性波的传播，以及随机分布裂隙介质中的波场进行了研究。美国近年来进行的横波模型研究也对野外的地震勘探起了重要作用；他们用超声模型试验方法模拟野外地下数千米压力岩石性质，做出一套 P 波速度与波速比曲线来对岩石性质做出某些估计。