



公路施工技术丛书

地震勘探理论

在高速公路质量检测中的应用

DIZHEN KANTAN LILUN

DAIGAOXUE GONGJIE ZHICHAOSHIJIANSHIYONGDE YINGYONG

李修忠 张学强 秦建军 邵景干 编著

中国建筑工业出版社

公路施工技术丛书

地震勘探理论在高速 公路质量检测中的应用

李修忠 张学强 秦建军 邵景干 编著

中国建筑工业出版社

图书在版编目(CIP)数据

地震勘探理论在高速公路质量检测中的应用/李修忠等编著.
北京:中国建筑工业出版社, 2009

(公路施工技术丛书)

ISBN 978-7-112-11288-3

I. 地… II. 李… III. 地震勘探-应用-高速公路-道路工程-质量检验 IV. U412.36

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2009) 第 171481 号

公路施工技术丛书

地震勘探理论在高速公路质量检测中的应用

李修忠 张学强 秦建军 邵景干 编著

*

中国建筑工业出版社出版、发行(北京西郊百万庄)

各地新华书店、建筑书店经销

北京华艺制版公司制版

北京市彩桥印刷有限责任公司印刷

*

开本: 850×1168 毫米 1/32 印张: 5% 字数: 250 千字

2009 年 11 月第一版 2009 年 11 月第一次印刷

定价: 16.00 元

ISBN 978-7-112-11288-3

(18611)

版权所有 翻印必究

如有印装质量问题, 可寄本社退换

(邮政编码 100037)

本书是作者经过多年理论与实践相结合的研究，解决了复杂地表情况下地震反射波静校正量的计算精度问题、反射波动校正子波拉伸畸变问题，从而提高了地基洞穴、裂隙、断层的探测精度；实现了多道面波提取及相邻道频散曲线计算，从而提高了横向探测分辨能力；采用变频率间隔方法计算频散曲线提高了纵向探测分辨能力；实现了用小波变换阈值判断方法提取瑞雷波，提高了横向突变介质的探测精度。

* * *

责任编辑：张文胜 姚荣华 田启铭 王 磊

责任设计：张政纲

责任校对：赵 颖 陈晶晶

公路施工技术丛书编委会

顾 问：冯治安

主任委员：李修忠

副主任委员：邵景干 贾绍明 朱建斌

编 委：（按姓氏笔画排序）

王亚琼 王 航 王穗平 付立军

田国华 刘 江 许宏科 李 杰

李晓明 李 哲 张 弦 陈景星

邵 平 胡霞光 施笃箴 赵豫生

袁卓亚 唐 娴 黄振华 梁全富

彭余华 韩 熠 魏 进

秘 书：王国晓 张占锋

总 序

近年来,我国公路交通事业保持了持续快速健康发展的好势头,交通基础设施建设取得瞩目成就。截至2008年年底,我国公路网总里程已达373万km(包括农村公路172万km),其中高速公路通车里程为6.03万km。目前公路施工等领域的相关从业人员,包括施工、监理以及项目管理人员,亟需一套公路施工方面的工具书,来指导自己的工作,以保证工程质量、提高工作效率。

公路施工技术丛书基本涵盖了当今公路施工领域所涉及各个方面,它不仅包括道路、桥梁和隧道施工技术、施工监理,也包括道路、桥梁和隧道的检测、维护和运营管理等方面的内容。本套丛书的作者包括高等院校的老师、工程项目管理人员以及工程技术负责人,他们的共同特点就是拥有丰富的实践经验,具备扎实的理论功底,并且他们都十分了解行业的发展动态,从而保证了这套丛书的实用性和特色。

本套丛书可以作为公路工程的施工技术人员、监理人员以及项目管理人员的工具书,同时也可以作为大专院校相关专业学生的学习参考书。

前 言

地震勘探技术已广泛应用于水利水电、交通、建筑等领域的工程勘察以及工程施工质量的检测之中，主要采用反射波法、瑞雷波法勘探技术。应用于高速公路质量检测中主要是探测边坡的稳定性，地基的洞穴、软夹层及断层，路基的承载力、密实度，桩基的质量及完整性等方面。

作者经过多年理论与实践相结合的研究，解决了复杂地表情况下地震反射波静校正量的计算精度问题、反射波动校正子波拉伸畸变问题，从而提高了地基洞穴、裂隙、断层的探测精度；实现了多道面波提取及相邻道频散曲线计算，从而提高了横向探测分辨能力；采用变频率间隔方法计算频散曲线提高了纵向探测分辨能力；实现了用小波变换阈值判断方法提取瑞雷波，提高了横向突变介质的探测精度。

本书的主要内容有：第一章介绍了地震勘探的基本理论；第二章在阐述共中心点瞬间基准面反射波法原理的基础上，重点推导了复杂地表情况下地震反射波静校正量的计算公式；在介绍瑞雷波的提取、频散曲线计算及其正反演的基础上，建立了路基质量评价指标统计数学模型；第三章介绍了瞬时基准面、高保真动校正、垂直裂缝、瑞雷波提取及正反演、容重承载力等的数字和物理模拟计算结果；第四章的内容是实例试验与对比，在介绍面波数据野外采集工作方法和技术的基礎上，重点分析了两种方法在提取面波和计算容重承载力方面的对比精度；第五章介绍了高

等级公路路基补强效果检测、桩基质量检测、路基勘察的应用实例，检测项目包括压实度、复合承载力、地基承载力、粉喷桩质量、管桩质量、锚杆长度、洞穴、断层、裂缝、地基变形等内容。

本书的研究成果得到了河南省路通物探科技发展有限公司和京珠国道主干线郑州至漯河高速公路改扩建工程项目部的资助，在此表示衷心的感谢！

希望本书的出版能给从事地震勘探的地球物理工作者和高等公路建设者提供指导、帮助。

由于作者水平有限，书中难免有疏漏及错误之处，衷心地希望读者批评指正。

编 者

二〇〇九年八月

目 录

第一章 浅层地震勘探的理论基础.....	(1)
第一节 弹性理论概述	(1)
一、弹性介质与黏弹性介质	(1)
二、应力和应变	(3)
三、弹性模量	(5)
四、波动方程	(8)
第二节 地震波的基本类型	(10)
一、地震波动的形成	(10)
二、纵、横波的形成及其特点	(11)
三、面波	(13)
第三节 地震波场的基本知识	(14)
一、运动学的基本知识	(15)
二、动力学的基本知识	(19)
第四节 地震波的传播	(24)
一、地震波的反射和透射	(24)
二、折射波的形成	(26)
三、在弹性分界面上波的转换和能量分配	(28)
四、地震波的衰减	(34)
五、地震波的频谱	(39)
第五节 地震勘探的分辨率	(43)
一、纵向分辨率	(43)

二、横向分辨率	(47)
三、影响分辨率的主要因素	(48)
第二章 浅层地震方法技术	(51)
第一节 共中心点瞬间基准面反射波法	(51)
一、水平基准面数学模型	(52)
二、共中心点瞬间基准面数学模型	(53)
三、速度分析	(54)
四、高保真动校正	(54)
五、映像法中垂直裂缝数学模型	(55)
第二节 相邻道瞬态瑞雷波法	(57)
一、多层介质中的瑞雷波	(57)
二、瞬态瑞雷波的提取方法	(62)
三、瞬态瑞雷波频散曲线的计算方法	(82)
四、瑞雷波的正、反演计算	(86)
五、质量评价指标统计数学模型的建立方法	(88)
第三章 数字与物理模拟	(91)
第一节 瞬时基准面反射波法	(91)
一、模型速度谱计算与分析	(92)
二、模型动校正水平叠加计算与分析	(99)
三、高保真动校正数字模拟	(103)
第二节 映像法中的垂直裂缝	(105)
一、数字模拟	(105)
二、超声物理模拟	(107)
第三节 相邻道瞬态瑞雷波法	(107)
一、瑞雷面波提取方法模型研究	(108)
二、瑞雷面波正、反演研究	(113)
三、密度统计数学模型的待定系数	(119)
四、纵向高分辨频散曲线计算数字模拟	(130)

第四章 实例试验及对比	(133)
第一节 对比试验的野外工作方法和技术	(133)
第二节 常规 $f-k$ 法同 $\tau-p$ 法的结果及对比分析	(134)
一、 $f-k$ 法	(134)
二、 $\tau-p$ 法	(142)
第五章 应用实例	(150)
第一节 高等级公路路基补强效果检测	(150)
一、压实度检测	(150)
二、复合承载力检测	(152)
三、地基承载力检测	(154)
第二节 公路地基桩基质量检测	(155)
一、粉喷桩质量检测	(155)
二、管桩质量检测	(155)
三、锚杆长度检测	(160)
第三节 路基勘察	(162)
一、洞穴探测	(162)
二、断层、裂缝探测	(163)
三、地基变形探测	(164)
参考文献	(166)

第一章 浅层地震勘探的理论基础

浅层地震勘探是根据人工激发的地震波在岩土介质中的传播规律来研究浅部地质构造的物理方法。因此，应首先对有关地震波的基本理论有所了解。地震波的基本理论分为弹性理论、地震波的运动学和动力学以及地震勘探的分辨率四大部分，本章将分别对这些理论予以介绍。

第一节 弹性理论概述

一、弹性介质与黏弹性介质

1. 弹性介质

在外力作用下，物体（介质）的体积或形状会发生相应的变化，这种变化称为物体的形变，当外力去掉后，物体又恢复到原来的状态，这种特性称为弹性。具有这种特性的物体叫作完全弹性体或理想弹性体（介质），其形变称为弹性形变，如弹簧、橡皮筋等。反之，若外力去掉后，物体不能恢复原状，而是保持受外力作用时的状态，这种特性称为塑性，具有这种特性的物体称为塑性体，其形变称为塑性形变，如橡皮泥等。

在外力作用下，一个物体（某种介质）产生弹性形变还是塑性形变，取决于一定的条件，即是否在弹性限度之内。这同物体所受外力的大小、作用时间的长短及物体本身的性质有关。一

般来说,如果作用力不大,作用时间又很短暂,则大部分物体产生的是弹性形变;反之,若作用力很大,或作用时间很长,则大部分物体表现为塑性形变。

自然界中绝大部分物体在外力作用下既可以显示出弹性,也可以显示出塑性。在地震勘探中,人工激发的震源是脉冲式的,作用时间很短(持续十几到几十毫秒),接收点离开震源一般会有一定距离,该处的岩石、土层受到的作用力很小。因此,可以把岩、土介质看作弹性介质,用弹性波理论来研究地震波。

在研究弹性理论时,可将岩、土的性质分为各向同性和各向异性。凡弹性性质与空间方向无关的介质称为各向同性介质;反之,则称为各向异性介质。在地震勘探中,只要岩土性质差异不大,都可以将岩土作为各向同性介质来研究,这样可使很多弹性理论问题的讨论大为简化。

2. 黏弹性体(介质)

物体(介质)在小外力、长时间作用下会出现不能恢复原状的形变,这种外力撤销后形变仍然存在的性质与黏滞性的液体性质十分相似,称这种性质为黏滞性。运动(或者波动)在黏滞性的介质中传播时,介质中会产生一种阻碍这种运动的应力,这种力称为黏滞力或者内摩擦力。既有弹性又有黏滞性的性质称为黏弹性,称具有这种性质的物体为黏弹性体。

在实际的浅层地震勘探中,人们发现在地面接收到的地震波不同于激发时的信号,它的波形要变“胖”,振幅也变小,这是由于岩土地层对其中传播的地震波有吸收作用,吸收了激发信号中的某些高频成分,使其能量发生损耗,并使地震波形发生改变。显然,岩土层这种既有弹性又有黏滞性的性质就是黏弹性,岩土层就可以称为黏弹性体(介质)。

二、应力和应变

在地震勘探中，地震波所传播的实际岩层可以抽象地作为理想弹性介质来研究。因此，在震源（外力）作用下，弹性体就会发生形变，可以用应力和应变的概念来描述这种作用力和形变之间的关系。

1. 应力

设有一圆柱状直杆，长度为 l ，直径为 d ，横截面积为 S ，如图 1-1 所示。该直杆受到一个不大的外加拉力 F 时产生形变，长度变为 $l' = l + \Delta l$ ，直径变为 $d' = d - \Delta d$ 。同时，直杆内部质点之间会产生一个使物体恢复原状的内力。显然，该内力垂直于直杆的横截面，它的大小应与外力相等，但方向相反。

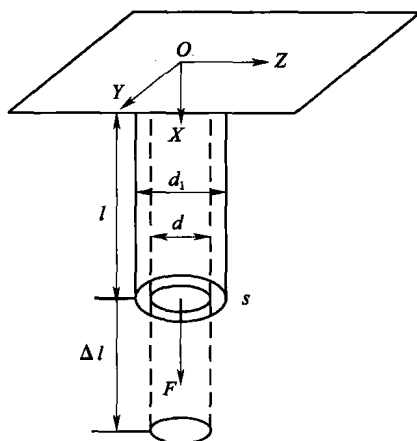


图 1-1 直杆拉伸试验中的应力与应变

在弹性理论中，将单位面积上所产生的内力称为（正）应力，用 T 表示；而把相切于单位面积上的内力叫做剪切应力，

一般用 τ 来表示,如图1-2(b)所示。

$$T = \frac{F}{S} \quad (1-1)$$

2. 应变

弹性介质在应力作用下产生的形状和体积的变化叫做应变。

弹性介质在正应力作用下,体积发生变化(膨胀或压缩),体积的相对变化就是体应变,通常用 θ 表示。如图1-2(a)所示。

$$\theta = \frac{\Delta V}{V} \quad (1-2)$$

体应变是由线应变组成的,线应变是单位长度的伸长(或缩短)量,一般用 e 来表示。

$$e = \frac{\Delta l}{l} \quad (1-3)$$

弹性介质在剪切应力作用下,形状发生变化,叫做剪切应变,一般用 e_τ 来表示,当切应力较小时,可用直角的改变量 Φ (也叫偏转角)来度量。

$$e_\tau = \Phi \quad (1-4)$$

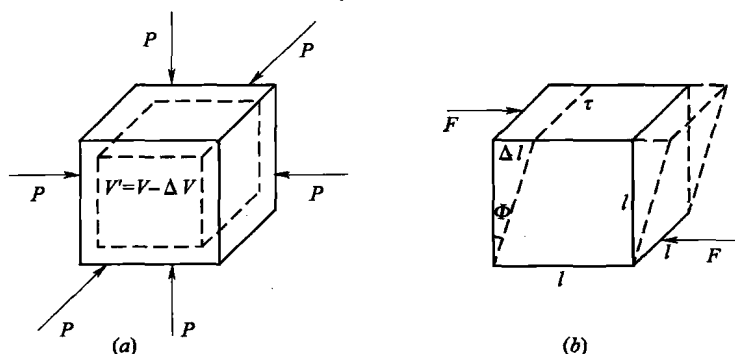


图1-2 立方体单元受力后的形变

(a) 体积压缩; (b) 剪切应变

三、弹性模量

1. 弹性模量的定义

弹性模量也叫弹性参数或弹性系数，它表示了弹性体应力与应变之间的关系，反映了弹性体的弹性性质。

(1) 杨氏模量 (E)

当弹性体在弹性限度内单向拉伸时，应力与应变的比值称为杨氏模量（拉伸模量）。

$$E = \frac{F/S}{\Delta L/L} = \frac{T}{e} \quad (1-5)$$

(2) 泊松比 (σ)

从图 1-1 可见，在拉伸形变中，直杆的横切面会减小。反之，在轴向挤压时，横截面将增大。也就是说，在拉伸或压缩形变中，纵向增量 Δl 和横向增量 Δd 的符号总是相反的。把介质的横向应变与纵向应变的比值称为泊松比。

$$\sigma = - \frac{\Delta d/d}{\Delta L/L} \quad (1-6)$$

式中负号是为了使 σ 成为正值。

(3) 体变模量 (K)

图 1-2 (a) 表示一个体积为 V 的立方体在流体静压力 P 的挤压下所发生的体积形变。即每个正截面的压应力为 P 时，体积缩小了 ΔV 。把所加压力 P 与体积相对变化之比叫体变模量（压缩模量）。

$$K = - \frac{P}{\theta} \quad (1-7)$$

(4) 切变模量 (μ)

图 1-2 (b) 表示底面积为 S 的立方体，由于受到平行于

上、下两底面的剪切力 F 的作用而发生形状形变（亦称剪切形变）。前后两侧面扭动了一个角度 Φ ，即切应变的数值为 Φ 。那么，切变模量（刚性模量）就表示了物体切应力与切应变之比。

$$\mu = \frac{\tau}{\Phi} \quad (1-8)$$

式 (1-8) 说明， μ 越大，切应变越小， μ 是阻止切应变的一个量度。对于液体 $\mu=0$ ，即不产生切应变，液体只有体积变化。

(5) 拉梅系数 (λ 、 μ)

在弹性力学中，通常将受力物体内任意点所受的力沿坐标轴分为三个分力，每个分力都会引起纵向和横向沿三个轴的应力与应变。按照广义虎克定律，应力与应变之间存在线性关系，于是应有 36 个弹性系数。但对于各向同性的均匀介质来说，这些系数大都相等，可归结为应力与应变方向一致和互相垂直的两个系数 λ 和 μ ，合称拉梅系数，其中的 μ 就是切变模量。

以上 5 个弹性参量，由弹性理论的研究证明，对于均匀的各向同性介质，其中任意一个参量，都可以用任意两个其他的参量表示出来，这样就会得到许多关系式，而且每一个关系式都附带着自己的适用条件，这里只写出其中一组：

$$\left. \begin{aligned} E &= \frac{\mu(3\lambda + 2\mu)}{\lambda + \mu} \\ \sigma &= \frac{\lambda}{2(\lambda + \mu)} \\ K &= \lambda + \frac{2}{3}\mu \end{aligned} \right\} \quad (1-9)$$

从以上讨论的各参数中可知，弹性参数是应力与应变的比例常数，表示介质抵抗形变的能力，其数值愈大，表示该介质愈难以产生形变。根据试验和理论推导， E 、 σ 、 μ 都大于零，泊松比 (σ) 在 0~0.5 之间变化。一般岩石的 σ 值在 0.25 左右，极