

公路设计与施工 新技术系列
GONGLU SHEJI YU SHIGONG XINJISHU XILIE

公路土石混填路基压实度 波动检测技术及应用

Gonglu Tushi Huntian Luji Yashidu
Bodong Jiance Jishu Ji Yingyong

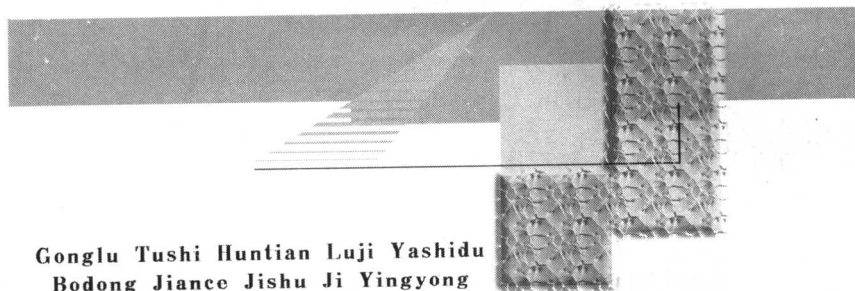
赵明阶 黄卫东 韦 刚 著



人民交通出版社

China Communications Press

公路土石混填路基压实度 波动检测技术及应用



Gonglu Tushi Huntian Luji Yashidu
Bodong Jiance Jishu Ji Yingyong

赵明阶 黄卫东 韦 刚 著



人民交通出版社

China Communications Press

内 容 提 要

本书详细介绍了公路土石混填路基压实度的波动检测技术的最新研究成果。内容包括连续介质弹性波理论、土石复合介质物理力学特性研究、多相土石复合介质的波动传播理论、土石混填路基压实度计算理论与模型试验、土石混填路基波动测试方法与数据处理、土石混填路基压实度波动检测技术的实施流程及工程应用效果的评价。

本书可作为道路工程、土木建筑、地质工程、地球物理勘探、水利水电等专业高年级学生的教学参考书,也可供公路、铁道、水利、市政、土建、地质等工程设计、施工、检测、监理及科技人员阅读与参考。

图书在版编目(CIP)数据

公路土石混填路基压实度波动检测技术及应用/赵明阶,黄卫东,韦刚著. —北京:人民交通出版社, 2006.7

ISBN 7-114-06041-6

I.公... II.①赵...②黄...③韦... III.公路路基-压实-检测 IV.U416.1

中国版本图书馆CIP数据核字(2006)第062720号

书 名:公路土石混填路基压实度波动检测技术及应用

著 作 者:赵明阶 黄卫东 韦 刚

责任编辑:刘永超

出版发行:人民交通出版社

地 址:(100011)北京市朝阳区安定门外外馆斜街3号

网 址: <http://www.ccpress.com.cn>

销售电话:(010)85285838,85285995

总 经 销:北京中交盛世书刊有限公司

经 销:各地新华书店

印 刷:北京凯通印刷厂

开 本:787×980 1/16

印 张:12

字 数:161千

版 次:2006年9月 第1版

印 次:2006年9月 第1次印刷

书 号:ISBN 7-114-06041-6

定 价:28.00元

(如有印刷、装订质量问题,由本社负责调换)

前言

PREFACE

近年来,随着高速公路在西部地区的快速发展,在山区及丘陵地区的高速公路建设中,会遇到大量的高填方路堤(占公路的总里程至少在30%以上),其压实质量直接影响到公路的修筑质量及其使用寿命。而压实质量好主要是通过压实度指标的检测来进行评价,因此压实度检测技术的准确性在填方路堤质量评定中具有重要意义。而目前我国公路路基压实度检测的传统方法有灌砂法、核子测定法、环刀法等,这些方法仅适用于填筑集料粒径小、厚度较薄的填土路基现场压实度检测。对于填方路基中80%以上是土石混填和填石的路堤,由于其填料的粒度变化大、含水量又很不均匀,从而使得现有的压实度测试方法受到相当的限制。因而如何有效评价公路土石混填路基的压实质量并适时修正压实方案已成为我国公路填方路基修筑技术中亟待解决的关键技术问题。

随着岩土动力学的不断深入,波动测试技术因具有测试距离大、操作简单、成本低廉、信息量丰富、可在施工中进行实时监测等特点而在岩土工程领域中得到广泛应用。从理论上讲,无论是路基还是路面均可运用波动测试技术测定它们的强度和压实度,波动速度越高、波能量越强,土层的强度和压实度越大;试验研究也表明,随着土体中的波速增大,土体的重度增大,含水量和孔隙比降低。但实际上要测定土体的物性参数远比测定强度的难度要大,其原因就是缺乏一个有效土体物性参数的波动反演模型。换句话说,就是对多相土石复合介质的波动传播特性的研究不够深入和全面,从而阻碍了波动测试技术在更广范围中的使用。

鉴于上述情况,2002年我们基于学科交叉应用提出了“公路土石混填路基压实度快速波动检测技术的研究”,其目的是通过研究多相土石复合介质的波动传播特性,建立土石复合介质物理力学参数与弹性波传播参数的相关关系,从而通过土石复合介质中的弹性波测试反演岩土复合介质参数,

在此基础上开发土石混填路基压实度波动检测实用技术。本课题被列为2002年重庆市交通重点项目。经过3年的理论、试验和工程应用研究,于2004年底提出了“公路厚层土石路基压实度的快速波动检测技术”,并通过了重庆市交通委员会组织的专家鉴定。2005年该项技术获得了中国公路学会科学技术三等奖,2006年获得了重庆市科技进步二等奖,目前正在重庆市部分高速公路建设中发挥着重要作用。为了进一步推动公路修筑技术的不断进步,不断提高土石混填路基的修筑质量,我们将该项目的主要研究成果整理成本书,供广大同行相互交流,共同促进公路科学技术的不断发展。

课题的研究分别得到重庆市交通委员会、重庆市教育委员会、重庆市公路工程监理咨询有限责任公司的联合资助,同时在课题的研究过程中得到了重庆交通大学道路工程实验室、水利水运工程重庆市重点实验室、重庆市武(胜)合(川)高速公路部分合同段施工单位的大力支持,特别是重庆交通大学土地地质实验室和水利水运工程重庆市重点实验室的部分试验人员为本项目的大量测试试验给予了大力协助。在此,著者对他们一并表示衷心的感谢和诚挚的谢意。

由于著者学识所限,不当和错误之处在所难免,恳请读者批评指正。

作者

2006年6月于重庆交通大学

目录

CONTENTS

第 1 章	绪论	1
1.1	路基压实度波动检测技术的提出	1
1.2	路基压实度检测方法概述	2
1.3	波动测试技术现状	6
1.4	多相介质弹性特征研究现状	9
1.5	多相介质弹性理论	14
1.6	路基压实度的波动检测技术研究思路	18
第 2 章	连续介质弹性波理论	21
2.1	引言	21
2.2	弹性波的波动方程	21
2.3	半无限弹性空间平面体波的传播特性	30
2.4	层状介质中面波的传播特性	39
2.5	本章小结	47
第 3 章	土石复合介质的物理力学特性研究	48
3.1	土石复合介质的分类和命名	48
3.2	连续级配介质的物理力学特性	49
3.3	间断级配介质的物理力学特性	55
3.4	本章小节	64
第 4 章	多相土石复合介质的波动传播特性	65
4.1	引言	65
4.2	土石复合介质的宏观等效模型	66
4.3	流固两相介质的等效弹性特征	67
4.4	流体相的等效弹性特征研究	70
4.5	固体相的等效弹性特征研究	74

4.6	土石固体颗粒的体积模量和剪切模量	79
4.7	多相土石复合介质的等效弹性特征	81
4.8	多相土石复合介质的波动特性分析	83
4.9	本章小结	97
第5章	土石混填路基压实度计算理论与模型试验	99
5.1	引言	99
5.2	土石复合介质压实度的波动计算理论	100
5.3	土石路基模型的波动测试试验	104
5.4	土石路基模型的波动传播特性分析	110
5.5	理论波速与测试波速的对比分析	113
5.6	土石路基模型压实度的测试结果分析	117
5.7	本章小结	122
第6章	土石混填路基波动测试方法与数据处理	123
6.1	引言	123
6.2	土石混填路基中的瑞利波传播理论	124
6.3	土石混填路基中的瑞利波测试技术	128
6.4	土石混填路基横波波速的反演模型	135
6.5	土石混填路基波动测试数据处理方法研究	139
6.6	本章小结	151
第7章	土石混填路基压实度波动检测技术与工程应用	153
7.1	引言	153
7.2	土石混填路基压实度的波动测试技术	153
7.3	工程应用实例	157
7.4	工程应用效果评价	170
7.5	本章小结	171
第8章	结论与建议	173
8.1	研究结论	173
8.2	进一步研究的建议	177
	主要参考文献	178

第1章

绪 论

1.1 路基压实度波动检测技术的提出

近年来,随着高速公路在西部的快速发展,在山区及丘陵地区的高速公路建设中,经常遇到大方量的土石混填路基填筑,这种土石混合填筑的压实质量的好坏将直接影响路基的沉降变形和稳定性,因此在施工过程中必须严格控制填筑路基的压实度。我国公路路基压实度检测的传统方法有灌砂法、核子测定法、环刀法等,这些方法仅适用于填筑集料粒径小、厚度较薄的土质路基现场压实度检测。对于土石混填路基,由于其填料的粒度变化大、含水量又很不均匀,从而使得采用现有的压实度测试方法受到相当的限制。因而如何有效检测土石混填路基的压实度并适时修正压实方案已成为目前厚层土石混填路基修筑技术中亟待解决的关键问题。

随着岩土动力学的不断深入,波动测试技术因具有测试距离大、操作简单、成本低廉、可在施工过程中进行实时监测等特点而在岩土工程领域中得到广泛应用。为此作者于2004年完成了重庆市重点交通课题《公路土石混填路基压实度快速波动检测技术研究》。在课题研究中,作者通过研究土石复合介质的波动传播特性,建立了岩土复合介质物理力学参数与弹性波传播参数的相关模型,从而通过岩土复合介质中的弹性波测试反演岩土复合介

质参数,在此基础上开发土石混填路基压实度波动检测实用技术。该技术不仅具有理论上的学术价值,而且对保证土石混填路基施工质量和提高施工速度具有重要的实际意义,目前已经在重庆市部分高速公路建设中发挥了重要作用。本书介绍的就是该研究成果的主要技术内容。

1.2 路基压实度检测方法概述

1.2.1 静力法

1) 密实度检测方法

多年来国内外一直沿用的检测路基质量的传统方法是密实度检测方法,该法以 Proctor 压实理论为基础,采用的压实质量检测指标为: $K = \gamma_d / \gamma_{dmax}$ 。该检测技术历经多年的使用,已经形成一套较为完善的方法和配套的室内外试验检测仪器和标准,是目前应用最为广泛的一种方法。现场测试 γ_d 的检测方法包括环刀法、灌砂(水)法及核子湿度密度仪等。

该检测方法有较大的局限性:环刀法仅适用于细粒土及无机结合料稳定细粒土的密度测定,并且无机结合料稳定细粒土的龄期不宜超过 2d;灌砂法适用于集料的最大粒径不超过 40mm、测定层厚度不超过 200mm 的压实度检测,不适用于填石路堤等有大孔洞或大孔隙材料的压实度检测;核子湿度密度仪检测速度快,需要人员也少,但测定的厚度不宜大于 20cm 且价格昂贵,使用须定期标定,且存在损害健康等不足。

上述方法对土石混合非均匀填料均不适用,无论采用上述哪种检测方法,所测得的结果只是实测干密度,而衡量的标准是最大干密度。最大干密度是通过标准击实试验而获得数据,按照规范试验方法规定,应根据所含粒料最大粒径来采用相应方法,重型击实仪的最大粒径不超过 40mm,而采用振动台法,其允许的最大颗粒粒径也不能超过 60mm。但施工中经常遇到超过 40mm、60mm 的碎石,虽然重型击实法采用修正公式对超粒径部分进行

处理,而振动台法采用相似级配法进行处理,但是试验的难度较大、精度较低。同时由于粗粒料的存在,刮平和含水量的测定很难做到准确无误,对土石混合料很难保证准确和及时提供压实度数据,因此采用密实度法检测评价土石混填路基的压实质量有较大局限性。

2) 基床系数检测方法

为适应工程建设的新标准和新要求,近年来在沿用传统的密实度指标的同时,又引进和推出了新的检测技术和标准。其代表性的检测方法为荷载板法,它以基床系数 k_{30} 为检测指标,其表达式为:

$$k_{30} = \frac{p_{0.125}}{S_{0.125}} \quad (1-1)$$

式中: $p_{0.125}$ ——荷载板沉降为 0.125cm 时所对应的静荷载值 (kPa);

$S_{0.125}$ ——荷载板沉降为 0.125cm 时的沉降量值 (m)。

k_{30} 试验与运行期间路基的受力条件相比,该检测指标仍属静力,但其作用的原理和应力状态等方面均比压实系数 K 更接近路基的实际工作状态。目前日本的铁路填土压实质量控制指标全部采用 k_{30} 值;我国的铁路部门也选择 k_{30} 作为铁路路基质量检测的主要技术标准,并以它作为我国第一条高标准高速铁路——秦沈客运专线的路基施工主体质量控制标准。

尽管 k_{30} 试验有其自身的优点和特点,但也有众多不足:需要大型设备及多名工作人员,且较小的施工场地会因缺乏安放全部安检设备的空间而无法进行检测;每一个点需检测时间 30~60min,该检测速度严重制约了路基的施工;现场检测结果表明,对于同一种非均匀填料,采用相同的碾压方法和碾压次数,不同部位的 k_{30} 值离散很大,且不具有重复性;同时对检测条件、试验人员的技术和试验场地的要求较高,如不满足相应条件,将得出不准确的检测结果。

3) 贯入阻力值法

将静力式贯入试验引入到压实质量检测中,同样是基于用检

测填土的力学性质参数(贯入阻力值)的直接法来代替多年沿用的间接法,并且它可以在现场直接测得土的贯入阻力指标,了解土体原始状态(避免了因土体被扰动和应力状态被改变所产生的影响)的有关物理、力学性质。该方法在饱和砂土、砂质粉土或竖向变化复杂的地基土中具有独特的优越性。

静力式贯入压实检测法适用于饱和砂土、砂质粉土或竖向变化复杂的地基土,对于含碎石、砾石的土层和很密实的砂层并不适用,同时资料的分析解释也必须依靠地区经验,因此该检测方法的应用范围受到一定程度的限制。

1.2.2 动力法

1) 动刚度系数(K_{FWD})法——FWD 法

近年来日本及德国等西欧国家开始将 FWD(即落锤式挠度检测系统)引入到填土压实质量检测中。该方法由于采用动态荷载的动刚度系数 K_{FWD} ,与静态荷载的 k_{30} 检测方法相比,其荷载作用原理更加接近列车行驶中作用在路基上的荷载形式,能真实地评价高速列车运行时冲击荷载作用下路基的动力特性,因此可更真实和更科学地进行填土的施工质量控制。动刚度系数 K_{FWD} 的表达式为:

$$K_{\text{FWD}} = \frac{p}{\gamma_{\text{max}}} \quad (1-2)$$

式中: p ——荷载板的冲击应力;

γ_{max} ——距荷载板不同距离的挠度传感器所检测到的土层表面的动态位移值(即瞬态弯沉值)。

目前以 FWD 法进行路基填土的施工质量控制,除了日本铁道综合技术研究所做过部分对比试验外,目前尚无更多经验可供借鉴。

2) 动刚度系数(K_{HFWD})法——HFWD

为了吸收 FWD 的优点,克服其不足,德国、日本等国家又先后研制出 HFWD(即轻型落锤式弯沉检测仪),它克服了 FWD 适应性差、价格昂贵的缺点,有较强的适应性。

日本铁道综合技术研究所用 HFWD 进行路基填土的压实施工质量的应用,得出 k_{30} 与压实系数 K 、动刚度系数 K_{HFWD} 这些技术指标间存在相关性的基本结论。铁道部立项研制的落锤式路基刚度仪,实际上就是 HFWD 法在中国的应用,它把 K_d 作为路基压实质量的控制指标,在大量对比试验的基础上得到 K_d 与 k_{30} 两者之间的统计关系,从而以 K_d 代替 k_{30} 的检测。

该方法存在的问题是:

(1)目前国内外将 HFWD 用于路基压实质量控制仅仅是近年才开始的,可借鉴的经验并不多;在我国秦沈客运专线路基工程中,落锤式路基刚度仪的应用工作已经展开,因此不管是从理论上还是实践上都需要进一步的分析和完善。

(2) k_{30} 试验本身存在许多不稳定因素,同时由于土体性质的千变万化,两者之间的统计关系也并不理想。

3)动态测试值(CMV)——FDVK 系统(大面积动态压实检测系统)

FDVK 系统工作原理是建立在振动辊加速性能和土壤硬度相互作用的基础上,由于土壤硬度在压实时会发生变化,通过对加速度测试结果的分析来评价土壤的压实状态。在实际施工中,把动态测试系统装在振动辊上,借助测试值显示器和脉冲记录器得到测试值曲线,该曲线表示了工作面的测试值分布,这样就可以直接评估路基的压实状态。目前已经成功地应用在德国维滕贝格附近的汉堡—柏林线(6.5km)和施腾达耳南部汉诺威新建的高速铁路上。

从 FDVK 系统应用上来看,该法适用于细粒土和粒径较小的集料,对于含有岩石和岩块的土层不适用;同时动态测试值与密度测试值之间,只有在极少数情况下才能找到相关性。在工程实践中发现较高的测试值和较大的压实度之间存在有相关性,但在 FDVK 系统试验中却未能发现这种相关性。

4) α -冲击信号值法——LY-1 型路基快速测定仪

α -冲击信号值法的提出是基于 S-G 水滞频段现象的发现:在路基冲击信号的整个频率范围内,一般含水量越小,响应值越大,

土体吸收的冲击能量越小;反之,含水量越大,响应值越小。但在 $S-G$ 频段内,冲击信号 a 值不受含水量的影响,即冲击响应值几乎一样,是压实系数的单一函数,与含水量无关,水分对冲击响应反应不敏感,具有水滞现象;通过对冲击信号 a 值的测定达到压实度检测的目的。表达式为:

$$K = e + fa + ga^2 \quad (1-3)$$

式中: K ——压实度;

a ——冲击响应值;

f, g, e ——系数。

尽管该检测方法有设备轻便、自动化高等特点,具有比较广泛的应用价值和前景,但仍存在许多需改进的地方:

(1)不同土类和土石复合介质的 $S-G$ 水滞频段范围、影响及变化规律。

(2) $S-G$ 水滞现象的理论分析及物理意义。

(3)冲击响应值 a 与填土物理力学性质指标间的相关关系。

1.3 波动测试技术现状

岩土弹性波测试技术是近 30 年来发展起来的一种新技术,目前主要通过测定弹性波穿透岩土体后的时-频域参数了解岩土体的物理力学特性及结构特征。与静力学方法相比,弹性波测试技术具有简便、快捷、可靠、经济及无破损、可在施工过程中进行实时监测等特点,因而这种测试技术已得到国内外岩土工程界的广泛重视,并在各个行业的岩土工程领域中得到了广泛的应用。

岩土弹性波测试技术的理论基础是弹性波在岩土介质中的传播理论研究。对于土介质中的弹性波研究,属于土动力学的范畴,自 1930 年土动力学在德国开始发展起来后,随着科学技术的进步,到 20 世纪 60 年代土动力学理论得到了长足的发展,并成为土力学的一个独立分支。早期的研究是将土体视为均匀各向同性的线弹性体,通过测定土体中的弹性波推求土体的动力学参

数,如波速、动弹性模量、动泊松比、动剪切模量等等。通过试验研究,人们发现土层中的弹性波不仅要受到土体力学特性的影响,还要受到土层本身的侧限压力、空隙比、含水量、饱和度、重度以及土粒大小、形状和类别等物性参数的影响。因此,人们对土体中的弹性波的研究开始由线弹性到非线性,由均匀到非均匀,由各向同性到各向异性,由单相到多相介质转化。

目前对土中弹性波理论的研究大体上可分为两个方面:一是土体中的体波传播理论研究,二是土体中的面波传播理论研究。对饱和土体中的体波理论研究始于20世纪50年代Biot(1956年,1962年)建立的流体饱和多孔介质波动传播理论,它成为以后有关饱和多孔介质波动理论各项研究的基础。Biot理论的成功之处就在于预言了流体饱和多孔介质中三种体波的存在,即 P_1 波、 P_2 波和S波,这种预言在20年后被Plona(1980年)的试验所证实。继Biot之后,国内外很多学者从不同的角度对该问题作过研究。Ishihara(1970年)、门福录(1981年,1984年)和陈龙珠(1987年)、吴世明(1997年)曾作过简化分析,并试图给出饱和多孔介质弹性波速的实用计算公式;Rice & Cleary(1976年)以及Kowalski(1983年)试图给出具有更确切含义的参数,以弥补Biot理论中参数物理意义不明确的缺陷。这些研究都在一定程度上证实了Biot理论的正确性,并促进了Biot理论的应用。对于非饱和土体中的体波仅有少量的试验结果,而无严格的理论模型。

在进行土体中体波研究的同时,土体中的面波传播特性的研究也在不断的深入。土体中存在的面波主要有Rayleigh波和Love波。通常波动的原位测试方法多采用体波作为试验信号,把面波作为干扰信号;而Miller(1955年)的研究表明,在半空间中Rayleigh波的能量占表面振源能量的主要部分,其在浅层所产生的位移远比体波的大,因而体波测试技术在浅土层测试中往往效果较差。为此人们对土层中的面波传播理论开展了深入细致的研究。如陈云敏(1989年)对成层土体中的Rayleigh波传播特性进行了详细的分析和研究,并由此开发出了面波频谱分析技术(SASW),1993年将这种技术运用到道路结构的质量检测,取得

了良好的效果;夏唐代(1992年)对 Love 波的传播特性进行了研究,运用 Love 波的弥散特性反演地基参数;吴世明(1997年)利用 Love 波成功地分析了土层厚度、质量密度以及剪切波速。这些研究为面波技术的应用奠定了坚实的理论基础。

从目前对土体中波动理论的研究现状来看,在理论上仍限于两相介质,这与实际上土体是一个由固相、液相和气相组成的三相复合介质体存在一定的差距;在应用上,仅采用体波时-频参数或面波时-频参数来反演土体的物性参数和力学参数难以达到令人满意的结果,如何建立综合运用体波和面波测试信息反演土体参数的理论模型或简化模型是指导当前应用的关键问题。另一方面,弹性波穿透岩土介质携带出丰富的信息,而这些信息是岩土介质物理力学参数的综合反映,如何运用先进的信息处理手段从波动测试信号中提取更多、更有效的波动参数,为土体参数的识别服务,也是当前弹性波测试技术中亟待解决的问题。

波动测试技术在路基工程中的应用目前处于研究阶段。从理论上讲,无论是路基还是路面均可运用波动测试技术测定它们的强度和压实度,波动速度越高、波能量越强,土层的强度和压实度越大。试验研究也表明,随着土体中的波速增大,土体的重度增大,含水量和孔隙比降低。但实际上测定土体的物性参数远比测定强度的难度要大,其原因就是缺乏一个有效土体物性参数的波动反演模型和波动信号的有效处理手段。目前在应用中只能通过室内土样试验作出标定曲线,然后对现场测定结果进行推断。由原西安公路交通大学研制的落锤-频率式路基压实度测定仪就是根据这一原理。该仪器必须在 S-G 频段下准确标定路基压实度曲线。这种方法要达到较高的精度,标定采用的土样必须与现场土体具有相同的物理力学性质,即要求土样为原状土,然而在实际应用中是难以达到这一要求的。特别是对于土石混填路基的压实度检测,这种方法更难以达到可靠的精度。这也是目前波动测试技术在土石路堤的压实度检测中应用难以达到效果的原因。

1.4 多相介质弹性特征研究现状

弹性应力-应变关系是弹性土动力学中的核心问题。只有在确定了应力-应变关系后,才能谈论波的传播问题。不同的学者从不同的研究角度出发,建立了多种理论体系,深入研究多相介质中弹性波的传播性质。除了著名的 Biot 理论以外,还有 Brandt 的颗粒模型、Kuster 的散射波分析和 Carroll-Katsube 的力学响应分析等。由于在小变形的弹性波动问题中,不涉及固体颗粒之间的滑动,所以多孔隙介质与颗粒介质之间的区别不十分明显,上述理论都可作为研究多相土石复合介质弹性应力-应变关系的典型理论。这些理论中的应力-应变关系都要用一些基本参数来建立;同样,波速或各种弹性模量的表达式也都要由这些基本弹性参数来表示。然而,由于不同理论的建立过程具有独立性,例如,Kuster 和 Toksoz(1974 年)以散射波理论为基础研究双相介质中的弹性问题,randt(1955 年)建立的球粒堆积体的弹性模型与 Biot-Geertsma 理论既无相似之处,也无互相的借用。因此,这些理论所采用的基本参数之间的一致性并不是直接可以得到的。如果证明了它们的一致性,就等于证明了它们的合理性和应用上的通用性。当我们深入研究多相介质的弹性性质时,发现大量的文献是以 Biot 理论为基础的。但是,以颗粒接触理论为基础的多相介质弹性理论也有 Biot 理论所不具备的优势,因为,它直接从微观的颗粒入手,清楚地定义了颗粒间作用力与宏观的表观应力的关系,清楚地推导出了围压对弹性模量的影响关系;另外,Kuster 散射波分析在研究低频弹性波在双相介质的传播与损耗的规律中,没有准静态的假设条件,并且,如果假设包裹体为球形或椭球形,双相介质的体积模量及剪切模量都有解析表达式。因此,将这些理论统一起来考虑,分析各自的区别和联系,必将为土石复合介质波动特征的研究打下良好的基础。

研究多相介质的线性响应有很长的历史,但最显著的时期是 20 世纪 50~60 年代,以 Biot 理论的诞生为代表。与 Biot 理论并

行的研究有 H. Brandt 提出的颗粒模型理论。

1.4.1 多相介质应力 应变关系理论

20 世纪 70~80 年代是 Biot 理论的发展时期,有不少的试验、理论研究证实 Biot 理论的合理性,并进行了许多实用化的研究。自 20 世纪 80 年代以后,孔隙介质的弹性动力学研究进入了一个新的发展时期,其突出特点是以介质的组成及微观结构分析为基础,并由此推测混合介质的宏观力学性质。而且,这些微观参数即使在小尺度的范围内也是用函数的形式来描述的,这无疑是对孔隙介质的更加深入的认识。但是,另一方面,微观的参数、微观的结构是很难直接被常规物理学或工程技术测试手段所描述和观测的;但我们可以从微观的理论出发,把实际工程结构微元化,从而可以建立数字模型并进行以微观分析为基础的数字模拟计算。

1951 年,Geertsma 作了初步的理论分析。他发现,充满流体的多孔隙介质的弹性模量取决于各相材料的弹性模量、无流体的骨架的弹性模量及孔隙中的流体;他还发现,在上覆介质的应力作用下,弹性模量并不是各向同性的,在垂直向上,波速要大于水平向的波速,并且它们都随围压与孔隙压的差值的增大而增大。在 1959 年,Vander Knapp 从理论和试验证明,多孔隙介质的压缩系数仅与围压和孔压之差(有效应力)有关。

Biot(1956 年)通过研究弹性多孔隙介质中充满可压缩的流体介质,将能量损耗的概念引入其中,建立了这种介质中弹性波的传播理论,这就是著名的 Biot 理论,在低频域[Biot(1956 年)],流体属于 Poiseuille 流体,他认为多孔介质的弹性波可由 4 个独立的参数和一个特征频率来描述。导出的结论是,低频域的弹性波存在两种压缩波和一种剪切波。可是,其中只有一种压缩波是有意义的,另一个压缩波类似于扩散的波,并迅速地衰减了。由于 Biot(1956 年)所提出的基本方程中一些参数的物理含义不明确,它们没有用明确的物理概念或土力学概念来描述,而需要由特定的试验来获得,这使 Biot 弹性理论具有唯象色彩。Biot