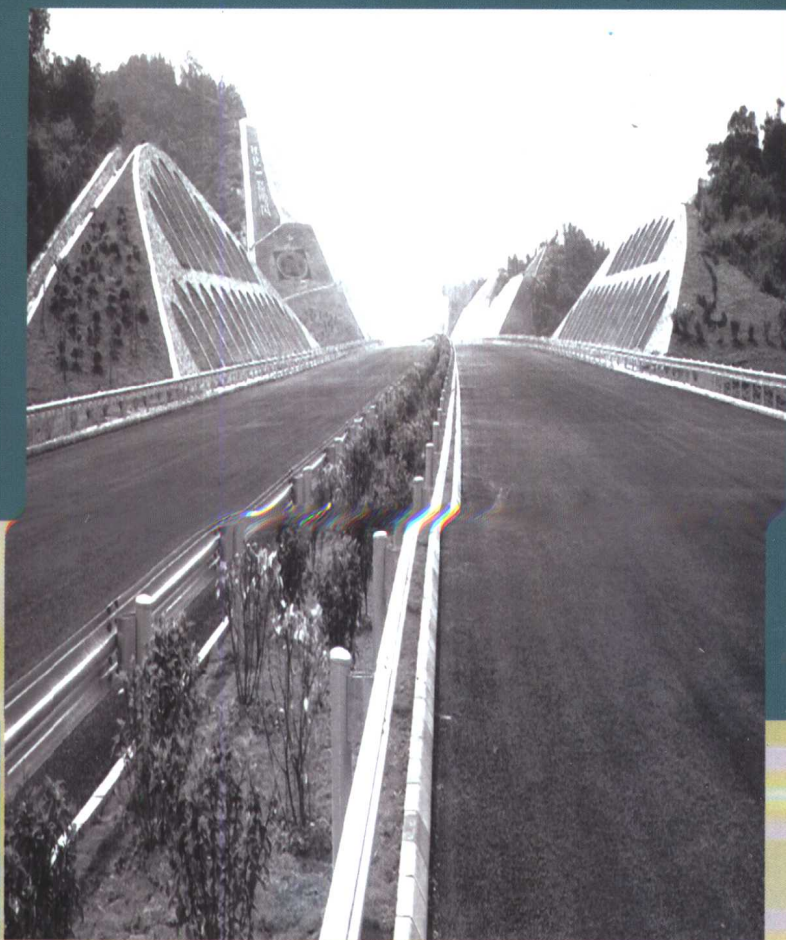


# 沥青路面材料

## 动力特性与动态参数

王旭东  
主编



LIQING LUMIAN CAILIAO  
DONGLI TEXING YU DONGTAI CANSHU

人民交通出版社

Liqing Lumian Cailiao Dongli Texing Yu Dongtai Canshu

# 沥青路面材料动力特性与动态参数

王旭东 主编

人民交通出版社

## 内 容 提 要

本书着重在四个方面进行了讨论、分析:即沥青路面材料室内动态模量试验方法的研究;沥青路面各个结构层常用材料的动态模量试验方法和动力特性的研究;路面结构动力响应特性的研究及动态模量反算方法的研究。

本书适用于公路工程方面的设计人员、工程技术人员及大专院校师生。

## 图书在版编目(CIP)数据

沥青路面材料动力特性与动态参数 / 王旭东主编.  
北京:人民交通出版社, 2001. 10  
ISBN 7-114-04095-4

I. 沥... II. 王... III. 沥青路面—材料—性能—  
测试 IV. U416. 217

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2001)第 073481 号

## 沥青路面材料动力特性与动态参数

王旭东 主编

正文设计:彭小秋 责任校对:张莹 责任印制:张凯

人民交通出版社出版发行

(100013 北京和平里东街 10 号 010 64216602)

各地新华书店经销

北京鑫正大印刷厂印刷

开本: 787×1092 1/16 印张: 13.25 字数: 328 千

2002 年 1 月 第 1 版

2002 年 1 月 第 1 版 第 1 次印刷

印数 0001—3000 册 定价: 26.00 元

ISBN 7-114-04095-4

U·02993

# 目 录

<b>第一章 概论</b> .....	1
第一节 引言.....	1
第二节 国内外研究概况.....	2
第三节 本书体系 .....	15
<b>第二章 路面材料室内动力试验原理</b> .....	17
第一节 概述 .....	17
第二节 重复加载法 .....	18
第三节 超声波法 .....	26
第四节 敲击振动法 .....	31
第五节 三种测试方法的对比分析 .....	39
第六节 小结 .....	40
<b>第三章 沥青混合料动态性能研究</b> .....	42
第一节 引言 .....	42
第二节 国内外研究现状 .....	42
第三节 材料特性 .....	44
第四节 试验方法的研究——从混合料静态力学性能入手 .....	45
第五节 沥青混合料动态力学性能分析 .....	55
第六节 小结 .....	70
<b>第四章 沥青混合料动态性能研究(劈裂法)</b> .....	72
第一节 概述 .....	72
第二节 材料特性 .....	73
第三节 试验方法 .....	73
第四节 试验设计 .....	76
第五节 试验结果 .....	77
第六节 小结 .....	81
<b>第五章 沥青混合料疲劳性能研究</b> .....	82
第一节 引言 .....	82
第二节 国内外研究概况 .....	82
第三节 材料特性 .....	84
第四节 试验方法的确定 .....	85
第五节 沥青混合料疲劳特性分析 .....	92
第六节 小结.....	106
<b>第六章 沥青混合料动态试验方法</b> .....	107
第一节 沥青混合料动态模量试验方法.....	107
第二节 沥青混合料抗压强度试验.....	110

第二节	沥青混合料劈裂回弹模量试验	112
第四节	沥青混合料劈裂强度试验	115
第五节	沥青混合料劈裂疲劳试验方法	117
第六节	沥青混合料弯拉疲劳试验方法	119
<b>第七章</b>	<b>半刚性材料动态模量试验研究</b>	<b>122</b>
第一节	引言	122
第二节	室内半刚性材料试验方法的研究	122
<b>第八章</b>	<b>半刚性基层材料动力特性</b>	<b>135</b>
第一节	基本动力特征	135
第二节	动态模量的应力依赖性	146
第三节	动静模量关系	148
第四节	小结	151
<b>第九章</b>	<b>路基土材料动态模量试验研究</b>	<b>152</b>
第一节	路基土动态模量试验方法研究	152
第二节	路基土动态特性研究	153
<b>第十章</b>	<b>路面结构动力试验方法与特性</b>	<b>158</b>
第一节	引言	158
第二节	路面结构动力响应	158
第三节	FWD 数据反算动态模量的研究	173
第四节	动态模量反算的一般规律和影响因素	184
第五节	小结	197
<b>第十一章</b>	<b>趋势与展望</b>	<b>199</b>
第一节	动态模量的应用	199
第二节	趋势与展望	203

# 第一章 概 论

## 第一节 引 言

众所周知,路面结构实际上受到来自车辆、气候、人文等因素的不断变化的作用。它的实际工作状态无论是力学模型、材料的性质都与现行的静态力学体系有着较大的差距。以汽车荷载为例,汽车在行驶过程中,对路面的作用有垂直方向连续不断的振动作用和瞬间的冲击作用,以及水平方向的推挤作用。对于路面结构材料本身来说,由于路面材料大多是粘弹塑性的组合体,对时间的影响因素十分敏感。对于同一种材料,荷载作用时间不同,所表现出的力学性质是完全不同的。因此研究动态荷载作用下路面结构的动力特性和动力参数是十分必要的。在此基础上,沥青路面设计体系由静态力学体系转向动态力学体系是路面设计理论的发展方向。

动态的弹性层状体系理论是一个十分复杂的数学和力学问题,目前国内外有不少专家学者对此进行了深入的研究。由于问题本身的复杂性,至今还没有应用到沥青路面结构的设计中。与此同时,路面结构的动力特性和动力参数的研究已取得不少成果。实质上它是设计体系由静态转向动态的前期工作,因此国外不少设计方法已采用动态设计参数。

采用动态设计参数和静态设计理论既是设计理论和方法发展的过渡阶段,又有它的合理性。首先由于路面材料的力学性质比较复杂,大多属于粘、弹、塑性的组合体,如采用静态试验方法测定材料的弹性参数往往会掺杂一些粘、塑性的变形因素。其次设计方法是以弹性理论为基础的,路面结构受到汽车瞬时荷载作用,其变形以瞬时恢复变形为主,这正好与动态试验方法测定的参数概念相一致。再者,对于静态弹性理论主要的设计参数即弹性模量比较单一,如采用动态设计理论,则涉及参数不仅仅是弹性模量,还有一些目前室内室外试验还难以测量、验证的参数如:阻尼、密度等。

路面材料设计模量的确定是路面设计研究中的基础问题。由于路面材料的多样性,材料力学性质的复杂性,准确确定路面材料的模量一直是困扰研究和设计人员的难点。我国目前设计模量采用室内相当于静态荷载条件下的模量试验方法确定,其中存在以下一些问题。

1) 试验条件与路面实际受力情况的差异。路面上的各个结构层材料不断受到汽车动态荷载的作用,由于路面材料存在较明显的应力依赖性,受力条件的不同,直接影响材料模量的取值。

2) 正因为受力条件不同,静态荷载条件下的模量与动态条件下的模量有明显不同。国外大多设计方法中采用动态试验模量,其数值远远大于我国现行规范中所采用的设计模量(如我国水泥土的设计模量为 600MPa,而在下表 1-1 中列出国外水泥土的代表模量值为近 7000MPa)。因此,我国路面设计厚度一般比较厚。

3) 静态模量试验方法中,材料变形的量测值常常含有非线性变形,对材料的模量有一定影响。

总之,从国际上路面结构设计的发展来看,路面结构的设计从静态方法到动态方法的转变是路面设计理论发展的必然趋势,路面材料用动态模量代替静态模量是其中的基础,也是第一步。我国在这方面的研究还比较落后。因此研究路面材料在动态荷载作用下的性质和变化规律,确定其试验方法并测定其模量值是十分必要的和有意义的。

## 第二节 国内外研究概况

### 一、路面结构动力特性与动力参数研究的现状

路面结构的动力特性是指路面结构和路面材料在动态荷载作用下的动态响应规律性;而动力参数则是衡量这些特性的数值。

动力特性包括野外路面结构在车辆荷载作用下的动态响应变化规律和室内动态试验中材料的动态响应的变化规律。路面结构设计中的参数很多,如:模量、强度、厚度、泊松比等。目前阶段,材料的动态模量是一个主要的动力参数。

一般来说,材料的模量是路面结构的一个主要的材料参数,准确确定材料的模量值,不仅对结构设计是必须的,而且对路面结构性能的研究也是十分重要的。路面材料的模量根据试验方法的不同分为静态模量和动态模量,根据试验场地的不同分为室内和室外模量。我国的设计方法中采用的是静态模量。所谓静态模量是在相当于静态条件下,加载速度比较慢(一般为  $1\text{mm}/\text{min}$ ),根据材料所受应力和产生的相应回弹应变计算的模量,即弹性力学中的杨氏弹性模量,相应的计算公式为:

$$E_s = \frac{\sigma}{\epsilon} \quad (1-1)$$

动态模量与静态模量不同,它模拟汽车动态荷载的作用条件,在加载速度比较快的情况下(相当于静态加载速度的几十倍~几百倍),测定的模量。它部分地反映材料的惯性和阻尼特性。此时,时间是一个不可忽略的影响因素,荷载应力和相应的变形(应变)都是时间的函数。由于动态模量试验施加的动态荷载是具有一定波形和频率的周期性荷载,借鉴振动学中阻抗(或导纳)的概念,美国 Seet 等人于 1962 年首先将动态模量的概念引入路面结构设计和研究中。他针对动态三轴试验,定义材料动态模量为动态偏应力与相应的动态荷载下的回弹(可恢复)应变  $\epsilon_r$  的比值。

$$E_d = \left| \frac{\sigma_d}{\epsilon_r} \right| \quad (1-2)$$

其中  $\sigma_d$ 、 $\epsilon_r$  分别为轴向应力的振幅和相应轴向应变的振幅。这个概念一提出就被广大公路界所接受。这是由于野外现场试验测定的是路面的回弹弯沉,与模量的概念相一致,且研究表明这种模量与回弹弯沉的关系比路面整体性变形的相关性好。

根据 Seet 的定义,动态模量的计算公式为:

$$E_d = \left| \frac{\sigma(t)}{\epsilon(t)} \right| = \frac{\sigma_0}{\epsilon_0} \quad (1-3)$$

式中:  $\sigma(t)$ 、 $\epsilon(t)$ ——分别为动应力和相应的动应变;

$\sigma_0$ 、 $\epsilon_0$ ——分别为动应力和相应的动应变的模。

#### 1. 路面材料动力特性研究概况

### 1) 动态试验方法的研究

路面材料的动态模量,可通过室内试验和室外试验两类方法测定。这两类方法从测定的手段、方法、模型都不完全一样,因此测定的结果也不一样。室内模量测定方法根据振动原理的不同,有三种主要形式:重复加载、共振柱、波传法等。国外一些著名的动态试验方法都采用这些形式。如:英国混凝土动态模量的试验方法国家标准采用波传法(BS:1881:1990, Part 209);日本混凝土动态模量试验国家标准采用共振柱方法(JIS A1127-76);美国材料与试验协会标准(ASTM)土动态模量采用共振柱方法;同时沥青混合料的动态抗压模量和劈裂模量采用重复加载的方法(ASTM-79和ASTM-82)。此外,美国SHRP计划中LTPP中有关路面基层、底基层材料和土基材料都采用重复加载的试验方法。由此可以看出:当材料强度较高,或测量变形较小时,采用波传法和共振柱方法比较合适;其他情况采用重复加载的方法为宜。重复加载是一种主要的动态模量测定方法,与其他两种方法相比,原理上有本质的不同,测量结果也不同。因为在动态试验过程中,波传法和共振柱方法被测试件基本不产生塑性变形或塑性变形较小,试件基本处在弹性变形中;而重复加载试验,试件将会产生比较明显的塑性变形,在整个试验过程中试件处于弹-塑变形中。因此,一般来说,重复加载试验测量的变形范围比较大,动态模量比较小。

重复加载方法是通过在试件顶端重复施加具有一定波形和频率的动态荷载,然后通过传感器测定试件产生的变形(或应变),计算材料的模量。根据加载形式的不同,可分为三种试验方法:单轴试验、三轴试验、劈裂试验(径向试验)。根据路面材料的力学性质和试验目的,采用不同的试验方法。一般对于土基和非结合性材料(如级配碎石)及沥青材料,采用三轴试验;对于半刚性材料和沥青混凝土采用单轴试验;当需测定材料的泊松比时可采用劈裂试验(径向试验)。目前国内著名的动态试验方法主要有:ASTM-79、ASTM-82、LTPP等。主要的试验方法介绍如下:

① ASTM-79为沥青混凝土动态抗压模量的试验方法:

试样尺寸:10cm×10cm

荷载频率:10Hz,无间歇重复加载。

测量方法:侧面法用应变片测量试件变形。

数据处理:荷载振幅与变形振幅的比计算动态模量。

② SHRP PROTOCOL:P46和AASHTO TP46-94为土基和级配碎石动态模量的试验方法。

该方法中规定:

动态荷载波形为Haversine;

荷载频率取10Hz;

荷载间歇时间为0.9s;

试样为圆柱形,尺寸分为两种:71mm(2.8-inch)和152mm(6.0-inch)两种直径,直径与高的比为1:2;

轴向高低应力比规定为0.1。

试验前采用最大的试验荷载级进行预压。对于路基土为围压41.4kPa,轴压27.6kPa;对于基层、底基层材料围压为103.4kPa,轴压为103.4kPa。预压次数为500~1000次。

试验采用有间歇重复逐级加载或卸载的方式,分为15级,对于基层、底基层材料围压分为:20.7、34.5、68.9、103.4、137.9kPa,轴压分为:20.7、41.4、62.1、34.5、68.9、103.4、137.9、206.8、275.8kPa;对于土基材料围压分为:41.4、27.6、13.8kPa,轴压分为:13.8、27.6、41.4、



55.2、68.9kPa。每级荷载分别作用 100 次,采集最后 5 个轴向荷载和轴向变形波形计算动态模量。

试验中试件变形测量采用 LVDT 型位移传感器。传感器量程范围分为  $\pm 0.05 - \text{inch}$ (约 1.2mm)和  $\pm 0.25 - \text{inch}$ (约 6.4mm)。传感器的技术要求为:线性度为满量程的  $\pm 25\%$ ,可重复性为满量程的  $\pm 1\%$ ,灵敏度为  $2\text{mV/V(AC)}$ 或  $5\text{mV/V(DC)}$ 。

此外,径向试验有代表性的方法有:美国 AASHTO TP31 - 94(同 ASTM - 82)为沥青混凝土动态劈裂模量的试验方法。该方法中规定:

试样尺寸:试件高 38 ~ 76mm,直径 97.8 ~ 105.4mm 的圆柱形。

荷载波形和频率:Haversine 波,10Hz,间歇时间 0.9s。

荷载级位:5%、15%、30% 的弯拉强度,最小荷载和最大荷载的比为 0.1,分为 5、25、40  $\pm 1^\circ\text{C}$  三个测试温度。

测量方法:采用 LVDT 测量水平方向和垂直方向的变形。

数据处理:通过测量水平、垂直方向的变形,计算试件瞬间弹性模量和总弹性模量。

从以上的动态模量试验方法看出,尽管试验的对象不尽相同,试验方法也不一样,但存在一些共同的特点:①荷载波形基本都是 Haversine 波;②荷载频率一般在 10Hz 左右;③数据处理方法基本相同。

## 2) 材料动态特性的分析研究

路面材料动态模量的试验研究,国外已有几十年了。由于路面材料比较复杂,不同材料的动态模量性质都不一样,即使材料相同,由于配比、土质等因素的变化也表现出不同动态性质。

国内外学者对材料的动态模量研究表明,动态模量与轴向应力之间存在一定的关系,一般可用折线模型、半对数模型、双曲模型和双对数模型四种模型进行回归分析。

折线模型和半对数模型最初是由美国伊利诺斯大学的学者们提出的(Thompson 1989; Thompson and Robnett 1979),其模型分别为:

折线模型:

$$E_d = K_2 + K_3(K_1 - \sigma_d) \quad \text{当 } K_1 \geq \sigma_d \quad (1-4a)$$

$$E_d = K_2 + K_4(\sigma_d - K_1) \quad \text{当 } K_1 < \sigma_d \quad (1-4b)$$

半对数模型:

$$\log E_d = C_1 - C_2 \sigma_d \quad (1-5)$$

美国田纳西大学的研究人员提出了双曲线模型(Boateng-Poku and Drumm 1989),公式为:

$$E_d = \frac{g_1 + g_2 \sigma_d}{\sigma_d} \quad (1-6)$$

美国 SHRP 计划推荐采用的是双对数模型,它是由 Witczak 等人提出的,具体的公式为:

$$E_d = K_1 \sigma_d^{K_2} \quad (1-7)$$

美国学者 Hsu, Shih-Ying 等人针对四种不同的路基土进行动态三轴和劈裂模量试验,结果表明不同土质、不同含水量的动态模量变化规律是不完全一样的。对三轴试验,一般情况下,随着围压(侧向压力)的增加,动态模量略微有所增加。若是动态模量增加得十分明显,说明材料具有应力依赖特性(stress dependent)。而对于劈裂试验测定的模量则不具有这种应力依赖特性。另外,研究表明在相同应力水平下,三轴测定的模量与劈裂测定的模量比较相近,最大的差别在  $\pm 80\%$  左右。

1979 年 Marshall R. Thompson 等人针对路基土进行动态三轴试验,研究表明随着轴向应力

的增大材料的动态模量逐渐减小,并且在动态模量与轴向压力的关系曲线上存在一个明显的拐点。在拐点以上动态模量的减小十分明显,在拐点以下动态模量的减小比较缓慢,因此可用两段直线分别回归分析拟合。另外他们还建立了动态模量与静态模量、动态模量与强度的关系如下:

$$E_d = 3.46 + 1.9E_s \quad R = 0.73, \quad S = 2.43 \quad (1-8)$$

$$E_d = 0.86 + 0.307q \quad R = 0.684 \quad S = 2.61 \quad (1-9)$$

式中:  $E_d$ ——动态模量, kips/inch<sup>2</sup><sup>①</sup>;

$E_s$ ——静态模量, kips/inch<sup>2</sup><sup>①</sup>;

$q$ ——无侧限抗压强度, 单位 pounds/inch<sup>2</sup>;

$R$ 、 $S$ ——分别为统计参数

1985年 Costa Filho 等人对三轴试验中轴向变形测量进行研究,采用了轴向变形,包括轴向全断面变形、顶端变形、中心变形、底端变形及外部变形的各种测量方法,对各种测量方法进行测量误差的分析,并对试验中产生测量误差的各种情况进行分析。文中认为:用传统的轴向变形测量方法会产生三方面的测量误差:①两端约束和试件应力、应变分布不均匀与圆柱体假设的不一致;②在试验过程中试验设备本身的压缩变形;③试样及与两端接触条件产生所谓“基底误差”,这种基底误差包括:试件两端表面不均匀、不平整光滑、试件两端不平行、顶面压块安装不正确等因素引起。文中通过理论计算表明这种方法测量的模量值比真实值略大 10% 左右

美国俄克拉荷马大学的研究人员用动态三轴的试验方法研究级配碎石的动态模量。研究表明,10.16cm 尺寸试样的动态模量比 15.24cm 尺寸的动态模量要大。在给定应力水平和级配模数的情况下,由于集料类型的变化导致动态模量的差异在 20% ~ 50% 之间。另外,研究人员用双对数模型回归分析了动态模量与轴向应力的关系参数  $K_1 = 1502 \sim 4727$ ,  $K_2 = 0.38084 \sim 0.563$ , 6 种材料  $K_1$  和  $K_2$  可统一合并为如下回归公式:

$$\log K_1 = 4.405 - 2.101 K_2 \quad R^2 = 0.8727 \quad (1-10)$$

并用线性模型建立动态模量与 CBR 之间的关系,公式如下:

$$E_d = B \cdot CBR \quad (1-11)$$

对于 6 种不同的集料,在不同的应力水平下,  $B$  值是不一样的。一般来说,应力水平越低,  $B$  越小。此外,研究人员用多项式建立了动态模量与集料的粘滞系数  $C$ 、内摩擦角  $\phi$  及应力水平的关系,公式为:

$$E_d = A_0 + A_1 C + A_2 \sigma_1 \tan \phi + A_3 \theta \quad (1-12)$$

式中:  $\theta = \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3$

研究表明用该公式建立的动态模量预测模型是比较准确且方便。

1997 年我国东南大学何兆益博士用双对数模型研究了石灰岩级配碎石的动态模量性质。 $K_1 = 13936 \sim 31925$ ,  $K_2 = 0.4 \sim 0.53$  ( $K_1$ 、 $K_2$  含义见公式 1-7),且随含水量的增加  $K_1$  减小  $K_2$  增加;随密实度增加  $K_1$  增大  $K_2$  减小。并与静态模量进行对比,建立动静模量  $K_1$ 、 $K_2$  的关系式:

$$K_{1d} = 2.735 K_{1s} + 6980 \quad R^2 = 0.96 \quad (1-13a)$$

$$K_{2d} = 0.847 K_{2s} - 0.00552 \quad R^2 = 0.95 \quad (1-13b)$$

① 1kPa = 145kips/inch<sup>2</sup>。

式中：脚标  $d$  代表动态模量的系数， $s$  代表静态模量的系数。

1984 年 Koliass, S. 等人用动态单轴试验方法研究水泥稳定材料的动态模量得到动态模量与强度、密度及最佳含水量的关系：

$$E_d = 40f_c^{0.5}(D/1000m)^{1.5} \quad (1-14)$$

式中： $f_c$ ——强度；

$D$ ——密度；

$m$ ——含水量。

然后，通过室内试验进行验证。文中引用了两个动静模量的关系式：

$$E_s = (6/7)E_d \quad (1-15)$$

$$\text{当静态模量值大于 } 15\text{GPa 时: } E_s = E_d - 5 \quad (1-16)$$

### 3) 材料动力参数的取值研究

Yang H. Huang 在其《路面分析与设计》(《Pavement Analysis and Design》)一书中；对级配材料、细粒土、沥青混合料等材料的动态模量进行综合分析，提出几种材料动态模量的变化范围，见表 1-1。

路面材料的动态模量值范围

表 1-1

材料种类	范围 (psi)	代表值(MPa)
水泥混凝土	$3 \times 10^6 \sim 6 \times 10^6$	27600
水泥处治基层材料	$1 \times 10^6 \sim 3 \times 10^6$	13800
水泥土材料	$5 \times 10^4 \sim 2 \times 10^6$	6900
石灰粉煤灰材料	$5 \times 10^5 \sim 2.5 \times 10^6$	6900
高粘土	7600 ~ 17000	82.8
中粘土	4700 ~ 12300	55.2
软粘土	1800 ~ 7700	34.5
更软粘土	1000 ~ 5700	20.7

注：1psi = 6.9kPa。

以上介绍了国内外路面材料室内动态模量的试验方法和试验分析情况。美国 LTPP 研究计划中认为试验方法的评价标准：一致性、有效性、操作简单和试验费用低。另一方面，室内试验中测试精度是一个值得重视的重要问题。美国 LTPP 研究中专门对如何保证动态模量试验精度提出要求。首先是测试仪器电力系统的认证，其次是要对测试系统进行标定，再者是要求有熟练、准确的操作程序。

## 2. 路面结构动力特性研究概况

### 1) 野外动态试验方法的研究

以上介绍了动态模量室内试验研究情况。一般来说室内试验能够模拟野外实际路面的各种条件，如：环境因素(温度、湿度)、应力水平、材料状态(含水量、压实度、密度等)等，也比较容易测量各种状态、各个方向的变形(应变)，因此是一种十分有用的试验研究手段。但是也存在一些问题：如试验设备比较昂贵、试验费用较高；制件过程中的不均匀性对试验结果影响较大等。同时，由于路面结构和材料的复杂性，室内试验模拟与野外实际路面状况存在一些差异，

因此国外一些国家采用野外动态试验方法分析计算材料的野外动态模量。

野外动态试验分析材料的动态模量方法主要有两大类：一是基于弯沉的反算方法，一是基于应力波的反算方法。前者能够模拟路面实际荷载的作用形式和大小，且以反映路面结构整体强度的弯沉作为路面结构的响应参数，易于理解和接受，因此是目前国内外使用最广的方法，其代表的试验仪器是落锤式弯沉仪(Falling Weight Deflectometer 简称 FWD)。后者是以波动理论为基础进行反算，其主要特点是事先不知道路面结构层的情况，而是通过反算确定不同结构层的模量值，因此比前者方便一些，其代表的试验方法是表面波速法，又称波传法(Spectral Analysis of Surface Waves 简称 SASW)。

弯沉法主要仪器设备有贝克曼梁(BB)、稳态弯沉仪(Dynaflect)、落锤式弯沉仪(FWD)、自动弯沉仪等。贝克曼梁是测量静态弯沉。自动弯沉仪由于测量速度较慢，其测量结果也可认为是静态弯沉。稳态和落锤式弯沉仪是测量动态弯沉。其中落锤式弯沉仪(FWD)是应用较广的动态弯沉测量设备，它模拟汽车荷载对路面施加瞬时冲击作用，得到路面的瞬时变形情况。一般可记录三方面数据：一是落锤点最大弯沉；二是以落锤点为中心的弯沉盆曲线；三是弯沉盆各点随时间变化的时程曲线。然后根据这些数据可进行静态或动态的模量反算，得到路面材料野外实际的模量值。

FWD 产生于 20 世纪 70 年代初。与传统的 BB 测量弯沉相比具有测量准确、信息量大、使用方便、快速、安全、节省人力的特点，因此尽管产生时间并不长，却被世界各国公路界广泛采用。当今世界上最大的跨国研究项目——路面长期使用性能研究(LTPP)中(有 60 多个国家参加)，已用 FWD 取代 BB，作为路面弯沉测量的仪器。我国 FWD 的应用研究是从 20 世纪 80 年代中后期开始的，目前北京、河南、黑龙江、新疆、陕西、上海、江苏等省市已拥有十台左右不同型号的 FWD。FWD 的应用和研究是当今公路界的一个热点。

FWD 根据落锤形式分为单锤和复锤两种。所谓单锤是落锤直接冲击路面，测定的荷载时程曲线为双峰曲线；复锤是落锤首先冲击一个橡胶垫，然后再作用于路面上，得到的荷载时程曲线是一条光滑的抛物线。在路面模量反算分析中可将双峰曲线根据能量等效的原理转化为光滑的抛物线。FWD 根据运载形式不同分为车载式和拖挂式两种。当今世界上主要的 FWD 型号有 DYNATEST、PHONIX、JILS-20C、KUAB 等。

FWD 是一种高精度的弯沉测量设备，我国在《公路路基路面现场测试规程》(JTJ 059—95)中规定了 FWD 用于整层测定时的测量方法；落锤加载质量一般为  $5 \pm 0.25t$ ，每一个测点锤击不少于 3 次，除去第一个测定值，取后几次的平均值作为计算依据。在《公路沥青路面设计规范》(JTJ 014—97)中提出当采用 FWD 进行路面弯沉测量评价时测点间距离为 5m。由此看出，FWD 测量弯沉在我国已得到承认和应用，制定了一些规程，但这些还远远不够，如：对于不同路面结构、不同层位落锤质量应该有明显差别；对于测量弯沉盆传感器的精度没有提出具体要求；对 FWD 仪器的可靠性也没有提出明确要求。这些对 FWD 使用和模量反算都有很大影响。

在国外如：美国、日本、丹麦等国家先后都进行过大规模 FWD 的对比、标定和研究，得出近乎一致的结论：对于同一点不同型号 FWD 测量的结果并不一样，有的差别比较大；同一点同一种仪器不同的锤击次数得到的结果也不完全一样。因此对 FWD 传感器提出了可重复性和可再现性的要求，并对各种型号的 FWD 进行优选。

FWD 在公路检测中的优越性，主要表现在两个方面：一是根据弯沉盆反算路面结构各层的模量，研究路面材料在使用过程中的性能变化，提供设计参数；二是以 FWD 的弯沉盆作为指标，评价路面整体强度，为养护管理提供依据。

## 2) 野外动态特性的研究

路面结构的动态特性的研究是结合不同的动态试验方法,采用不同的指标进行分析的。对于落锤式弯沉仪(FWD),根据实测弯沉(盆)的数据,分析评价路面结构强度的好坏。国外一般采用不同的指标如最大弯沉值,弯沉盆的面积,弯沉比,弯沉的形状系数及曲率系数评价弯沉盆,并用指数曲线拟合弯沉盆的曲线。这些都将在第三章中予以介绍。在我国 20 世纪 80 年代初,曾设想用弯沉盆的曲率半径评价路面结构强度。

最后介绍一下国外室内、外动态模量试验研究情况。国外一些学者一方面通过 FWD 反算模量,一方面通过室内动态试验研究分析路面材料室内外动态模量的关系,结果表明两者之间差别较大。1987 年美国 Ali 和 Khosla 在北卡罗来纳州选择三种路面结构进行室内外动模量的对比,发现土基室内外动态模量的比值变化范围较大,为:0.18~2.44。同年,Newcomb 在华盛顿州试验得到相似的结论,对于沥青混凝土室内外动模量比值为 0.3~0.4;土基为 0.8~1.3。1986 年 Bonaquist 用贝克曼梁、道路雷达、FWD 三种仪器进行野外测量与室内模量试验结果进行对比。其中一个主要结论为使用不同的弯沉测量设备都可以得到可靠的模量预测。1992 年 William N. Houston 等人发表文章认为:室内外动态模量的相关性较差,其相关系数一般只有 0.001~0.24。对于沥青混凝土室内试验模量值一般是反算值的 3 倍,对于路基土,反算值是室内试验值的 1.5 倍。

## 3) 模量反算方法的研究

FWD 弯沉盆的模量反算方法主要有两大类:一种是经验方法;一种是理论方法。经验方法代表性程序为 MODULUS 程序,理论方法根据力学模型的不同可分为 5 类:

- ① 静态、线弹性理论
- ② 静态、非线性理论
- ③ 动态线性的频域解
- ④ 动态线性的时域解
- ⑤ 动态非线性

静态线弹性模量反算(表 1-2)是一种比较简单的反算方法,至今仍是广泛应用的方法。它假定荷载为静态,材料为线弹性体。由于不同的反算程序采用的静态正算程序不相同,且迭代的收敛标准也不一样,结果不同的反算程序对相同的弯沉盆进行反算,却得到不同的反算结果。国外有学者研究表明:只要正算程序正确,收敛标准精度要求高,不同程序的反算结果是比较接近的(Lytton 1989)。

静态非线性的模量反算(表 1-2)需考虑每级荷载作用下路面弯沉峰值的变化情况,而线性模型仅需考虑一级荷载作用下的情况,这是线性与非线性的主要区别。因此非线性反算关键在于寻找路面材料对不同荷载的响应函数。值得指出的是,弹性非线性反算仍需假定材料为小变形。当材料变形较大(或荷载较大)时,如在薄面层、重轴载下,非线弹性理论已不再适用,而应采用非线性、弹-一塑性理论,但这样一来参数过多,反算非常复杂,难度较大。

动态线弹性理论反算(表 1-2)包括稳态振动荷载和冲击荷载两种情况的反算。对于前者,根据测定的不同荷载频率,可计算出每个频率和荷载级位下的路面动态响应,即材料的模量值。这个模量值与静态反算的模量不同,是一个复模量。有关的计算程序有 UTFNIBM(Roesset 1987)、SCALPOT(Magnuson 1988)。

对于冲击荷载可用时域解和频域解两种方法反算。频域解是将荷载和弯沉的时程曲线通过傅立叶变换转为频域函数,反算方法类似于稳态荷载的反算。复模量定义为在特定频率下

荷载复函数与弯沉复函数的比值。时域解(表 1-2)是通过直接积分、单元的频域响应及反变换技术对弯沉的时程曲线进行拟合,然后反算模量。尽管该方法比前一种方法的计算时间长,但仍不失为一种有效的方法。

FWD 模量反算的理论方法汇总

表 1-2

力学模型	已知条件	解	备注
静态 线性	荷载峰值: $I = \max P$ 表面弯沉峰值: $R = \max d_k$	$H_k(E)$ 满足: $\max d_k \approx H_k(E) \cdot \max P$	$K$ 为传感器个数
静态 非线性	荷载峰值: $I = \max P_j$ 表面弯沉峰值: $R = \max d_{kj}$	$H_k(E)$ 满足 $\max d_{kj} \approx H_k(F) \cdot \max P_j$	$K$ 为传感器个数 $J$ 为荷载级位数
动态线性 稳态振动	荷载函数: $I = P \exp(i\omega t)$ 弯沉函数: $R = d_k \exp(i\omega t + \phi_k)$	$H_k(E)$ 满足 $R \approx H_k(E^s) \cdot I$	$K$ 为传感器个数
冲击荷载、线弹性、频域解	荷载时程: $I = P(t)$ 表面弯沉时程: $R = d_k(t)$	$H_k(E)$ 满足: $d_k^p(\omega_j) \approx H_k(E^s) \cdot P^p(\omega_j)$	$K$ 为传感器个数 $P(t) \rightarrow  FFT  \rightarrow P(\omega_j)$ $d_k(t) \rightarrow  FFT  \rightarrow d_k(\omega_j)$ $d_k^p(\omega_j) = d_k(\omega_j)/P(\omega_j)$
冲击荷载、线弹性、时域解	荷载时程: $I = P(t)$ 表面弯沉时程: $R = d_k(t)$	$H_k(F^*)$ 满足: $H_k(E^s) \cdot I(\omega) \rightarrow  FFT  \rightarrow R^*(t)$ $R^*(t) \approx R$	$K$ 为传感器个数 $P(t) \rightarrow  FFT  \rightarrow P(\omega_j) = I(\omega)$

动态非线性反算就是将上述静态非线性模型和动态线性模型结合起来。由于材料的非线性,无法进行频域变换,只能通过直接积分的方法计算。由于这个问题十分复杂,预计近年内尚无法达到应用水平。

从表 1-3 中所列的反算程序看出:

①目前反算程序多以弹性层状体系理论为主,包括线性和非线性,特别对于土基材料应考虑其非线性,动力反算仍是需要继续研究的方向。

②除 MODULUS 程序外,均采用迭代方法反算,迭代仍是主要的反算计算方法。值得说明的是:尽管只是一种数据库反算方法,但根据美国 LTPP 计划中对反算程序的考察结果表明,MODULUS 程序反算的结果最稳定、精度最好,是 FWD 模量反算的首选程序。

国外几种主要反算程序汇总

表 1-3

程序名称	开发者	正算方法	正算程序	反算方法	非线性分析	层间分析	最大层数	随机模量	模量容许范围	收敛规则
BISDEF	USACE WES	多层弹性体系理论	BISAR	迭代	没有	变化	不超过弯沉数, 3层最佳	需要	需要	绝对误差平方和
BOUSDEF	Zhou, et al Oregon State Univ	Odemark - Boussinesq	Odemark - Boussinesq	迭代	有	固定连续	5层, 3层最佳	需要	需要	百分误差和
CHEVDEF	USACE WES	多层弹性体系理论	CHEVRON	迭代	没有	固定连续	不超过弯沉数, 3层最佳	需要	需要	绝对误差平方和
ELMOD/ ELCON	P Ullidtz Dynatest	Odemark - Boussinesq	Odemark - Boussinesq	迭代	仅十基	固定连续	可达4层, 不包括刚性层	不需要	没有	5个传感器的相对误差
ELSDEF	Texas A&M Univ, USACE WES	多层弹性体系理论	ELSYM5	迭代	没有	固定连续	不超过弯沉数, 3层最佳	需要	需要	绝对误差平方和
EMOD	PCS/LAW	多层弹性体系理论	CHEVRON	迭代	仅十基	固定连续	3层	需要	需要	相对均方差和
EVERCALC	J Mahoney, et al	多层弹性体系理论	CHEVRON	迭代	有	固定连续	3层, 不包括刚性层	需要	需要	绝对误差和
FREDDI	W Uddin	多层弹性体系理论	BASINPT	迭代	有	固定连续	未知	一般需要	未知	未知
ISSEM4	R Stubstad	多层弹性体系理论	ELSYM5	迭代	有	固定连续	4层	需要	需要	相对弯沉差

续上表

程序名称	开发者	正算方法	正算程序	反算方法	非线性分析	层间分析	最大层数	随机模量	模量容许范围	收敛规则
MODCO MP3	L Irwin, Szabenvi	多层弹性 体系理论	CHEVR ON	数据库	有	固定连续	2~15层, 最多5个 未知层	需要	需要	每个传感 器相对弯 沉差
MODUL US	Texas, Trans Institute	多层弹性 体系理论	WESLE A	迭代	没有	未知	可达4层	需要	需要	相对均 方差和
PADAL	S F Brow n et al	多层弹性 体系理论	Unknown	迭代	仅土基	未知	未知	需要	未知	相对均 方差和
WESDEF	USACE WES	多层弹性 体系理论	WESLE A	迭代	没有	变化	可达5层	需要	需要	绝对误差 平方和
MICHBA K	Michigan State	多层弹性 体系理论	CHEVR ON	迭代	没有	固定连续	可达4层	需要	可动	相对均方 差和

③反算层数以3层的精度最好,说明目前对于4层和4层以上的多层路面结构的反算尚无十分有效的方法,有待深入研究。

④反算程序中大多数采用层间连续的假设,反算一般需要假定随机模量初始值,并对各层模量的取值范围进行合理限定,保证反算结果的稳定、合理。

⑤反算的收敛标准采用绝对误差和相对误差两种。

图 1-1 为弯沉盆模量反算的一般程序。基本分为 5 步:

- ①假定初始的随机模量;
- ②用静态的弹性层状体系理论或弹性动力学理论计算路面结构的弯沉;
- ③将计算的弯沉值与实际弯沉值进行比较;
- ④若两者误差较大,则重新假定模量,重复以上三步;
- ⑤直到误差满足要求为止,则相应的模量即为反算所得模量值。

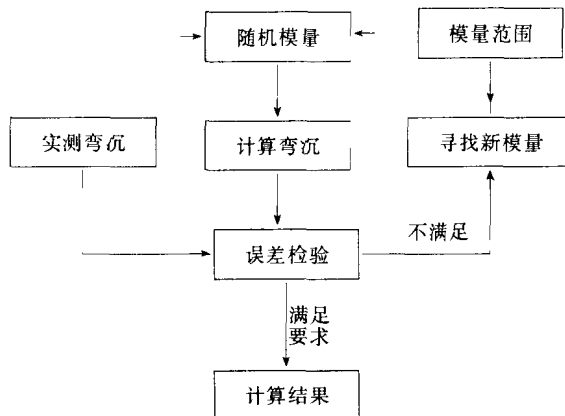


图 1-1 模量反算流程图



## 二、目前研究中存在的问题和争议

### 1. 对于室内试验研究

目前各国室内动态试验方法仅是一个相对合理的方法,如荷载频率 10Hz、间歇时间 0.9s,荷载波形为 Haversine 波都是对实际路面结构所受动态荷载的一种近似处理,其间许多参数还值得进一步推敲。在追求参数近似的同时,还要考虑试验的可操作性。

美国 LTPP 计划中制定了一系列动态试验方法,在应用了几年后发现有些试验方法,如级配碎石的动态模量试验方法等操作比较复杂、困难,目前已很少采用了。

对于动态试验的另一个关键性问题是试验的准确性。进行动态试验,对试验仪器的要求,对传感器精度的要求都远远高于静态试验,因此,动态试验的可靠性要求也比静态试验更迫切、重要。如为了保证试验结果的准确,LTPP 专门制定了相应的标准,如试验仪器的标定步骤、精度标准,试验结果重复性的要求等。我国的动态试验研究刚刚起步,很多方面还需要做很多踏踏实实的工作,就目前而言,可参照美国的一些试验标准进行研究。

在路面材料的动力特性分析中,国外大多采用建立应力水平与动态模量之间关系的方法,然后根据试验得到的回归方程,在路面结构设计中采用相应的设计模量。这与我国目前设计方法中仅仅推荐各种材料的设计模量值(或范围)不同。研究认为,尽管后者使用比较方便,但前者更加合理、准确。路面结构和材料动态研究表明,路面结构材料有较强的应力依赖性,不同的应力水平下材料的动力响应特性是不一样的,因此有必要根据实际路段的交通量情况分析实际荷载的大小和范围,然后采用不同的模量进行路面结构设计。

这样一来,设计方法中给定的不应是材料模量的某个范围,而应是一个应力水平和模量的关系式。

### 2. 对于野外现场测试

目前路面结构动力特性研究的野外试验手段主要有两大类:一是以落锤式弯沉仪为代表的动力冲击式试验设备,另一类是以面波仪为代表的波动试验设备。两种方法,各有特色、各有发展。相对来说,落锤式弯沉仪由于能模拟路面实际受力状态,而被广泛应用。目前世界上已有不少国家采用 FWD 测量路面结构的动力弯沉,从而取代传统的贝克曼梁测定弯沉。尽管 FWD 有这样或那样的优点,但其弱点也越来越明显的表现出来:

①FWD 的冲击荷载是否与路面实际荷载相一致?诚然 FWD 是目前模拟、产生路面实际荷载最接近的试验仪器,但国外有些专家经过仔细研究认为 FWD 产生的动态荷载与路面实际荷载仍有些不同。例如 FWD 动态荷载是垂直方向的,而路面所受的动力荷载不仅仅是垂直方向,还有水平方向;FWD 是单圆荷载模式,而路面上的荷载大多是双圆或多圆荷载模式;FWD 是通过刚性承载板对路面施加荷载,而汽车荷载是通过柔性的橡胶轮胎施加于路面上;等等。

②FWD 在进行动态试验、测量时需要不断停车,这样测量起来比较麻烦,也影响试验速度。因此研究不停车的动态试验设备是十分必要的。

鉴于以上两点,国际上又开始研制一种新型的路面结构动力测试设备。这种设备安装在汽车上,采用轮胎代替承载板,在整个试验过程中汽车保持正常的行驶速度不变,连续测定。如果这种试验设备研制成功将是路面结构动力试验方法的又一次飞跃。

当然,这种新的路面结构动力测试仪器目前正在试制阶段,若达到实用化还需要十几年的时间(如 FWD 从产生到被公路界认可、到普及经过了近 20 年的时间)。就这十几年来来说,路面结构的动力试验方法仍以 FWD 为主。