



Y1744976

Study on Structural Test of Semi-rigid Asphalt Pavement

A Dissertation Submitted for the Degree of Master

Candidate: Wang Chao

Supervisor: Sha Aimin

Chang'an University, Xi'an, China



论文独创性声明

本人声明：本人所呈交的学位论文是在导师的指导下，独立进行研究工作所取得的成果。除论文中已经注明引用的内容外，对论文的研究做出重要贡献的个人和集体，均已在文中以明确方式标明。本论文中不包含任何未加明确注明的其他个人或集体已经公开发表的成果。

本声明的法律责任由本人承担。

论文作者签名：

王超

2010 年 6 月 9 日

论文知识产权权属声明

本人在导师指导下所完成的论文及相关的职务作品，知识产权归属学校。学校享有以任何方式发表、复制、公开阅览、借阅以及申请专利等权利。本人离校后发表或使用学位论文或与该论文直接相关的学术论文或成果时，署名单位仍然为长安大学。

（保密的论文在解密后应遵守此规定）

论文作者签名：

王超

2010 年 6 月 9 日

导师签名：

王超

2010 年 6 月 9 日



摘要

以往对沥青路面结构层应力应变的研究多采用理论计算方法,由于力学模型以及参数取值的局限性,研究结果与实际往往存在一定的差距。计算机以及数据采集技术的发展,为路面结构试验提供了更多便利。模拟路面结构实际使用条件,并测试不同条件的路面结构内部应力应变对进一步研究路面结构整体性能有重要意义。

论文采用 LabVIEW 软件平台及 NI 数据采集硬件系统,编写了路面结构试验应变采集程序;提出了适用于室内路面结构试验的传感器制作、校检和防护方法。

对 4 种不同尺寸的传统半刚性基层沥青路面结构进行不同温度和荷载条件下的静载测试,试验结果表明:基层应变随温度和荷载增大而增大,随面层和基层厚度增大而减小;当基层厚度增大到一定程度后,其对层底拉应变改变所起的作用减小;路面荷载对基层应变的影响程度远大于其他因素。以上规律表明:适当增大各层厚度可以降低疲劳开裂的风险;基层厚度不易过厚,同等条件下增大面层厚度对改善内部应变状况更为有利;控制路面荷载对减少结构疲劳开裂尤为重要。

参照传统半刚性基层沥青路面、具有级配碎石过渡层的半刚性基层沥青路面、混合式(沥青碎石为上基层,半刚性材料为下基层)沥青路面三种路面结构,在室内制备了小型路面结构试件,并对试件层底拉应变进行了静载和动载测试,测试结果表明:加铺级配碎石或沥青碎石过渡层的半刚性基层路面结构,其基层应变反应优于传统半刚性基层沥青路面,疲劳性能最优的路面结构形式是混合式沥青路面。

关键词: 路面结构, 传感器, 半刚性基层, 级配碎石基层, 沥青稳定碎石基层, 沥青路面

Abstract

In the past on the asphalt pavement layer of stress and strain more than the theoretical calculation method, the mechanical model and parameters as the limitations, the results and the actual existence of a gap often. Computer and data acquisition technology, for the pavement test provides more convenience. Simulate actual conditions of the road structure and to test different conditions of stress and strain within the pavement structure to further the overall performance of pavement structures is important.

We used LabVIEW software platform and NI data acquisition system to writing the procedure to obtain the strain in the structure of the pavement test. We put forward suitable way to calibrate、bury and protect sensors in the the tests of indoor pavement structure.

Four different kinds of semi-rigid basement asphalt caused of thickness were test on static load test under different temperature and load conditions, discovering the change rule of internal force with structure parameter in semi-rigid basement asphalt pavement: basic strain increases with load and temperature, and decreases with the thickness of basement and surface. When the basement thickness increases to a certain, its effect for change the bottom strain decreases, the influence on basement strain of pavement load far outweigh other factors. The rules above shows: appropriate increase thickness can reduce fatigue cracking risk, basement thickness is not suitable to be too thick, improving the surface thickness is more beneficial for internal strain condition under the same conditions; controlling surface load is particularly important for structure fatigue cracking.

The 3 different semi-rigid basement pavement structure is measured on static and dynamic load tests under the conditions of different temperature and load. The results show that new semi-rigid pavement structure mechanics performance is superior to the traditional semi-rigid bituminous pavement, the fatigue performance of optimal pavement structure form is hybrid asphalt pavement. The results above provide factor reasons for make the traditional semi-rigid basement asphalt pavement perfect.

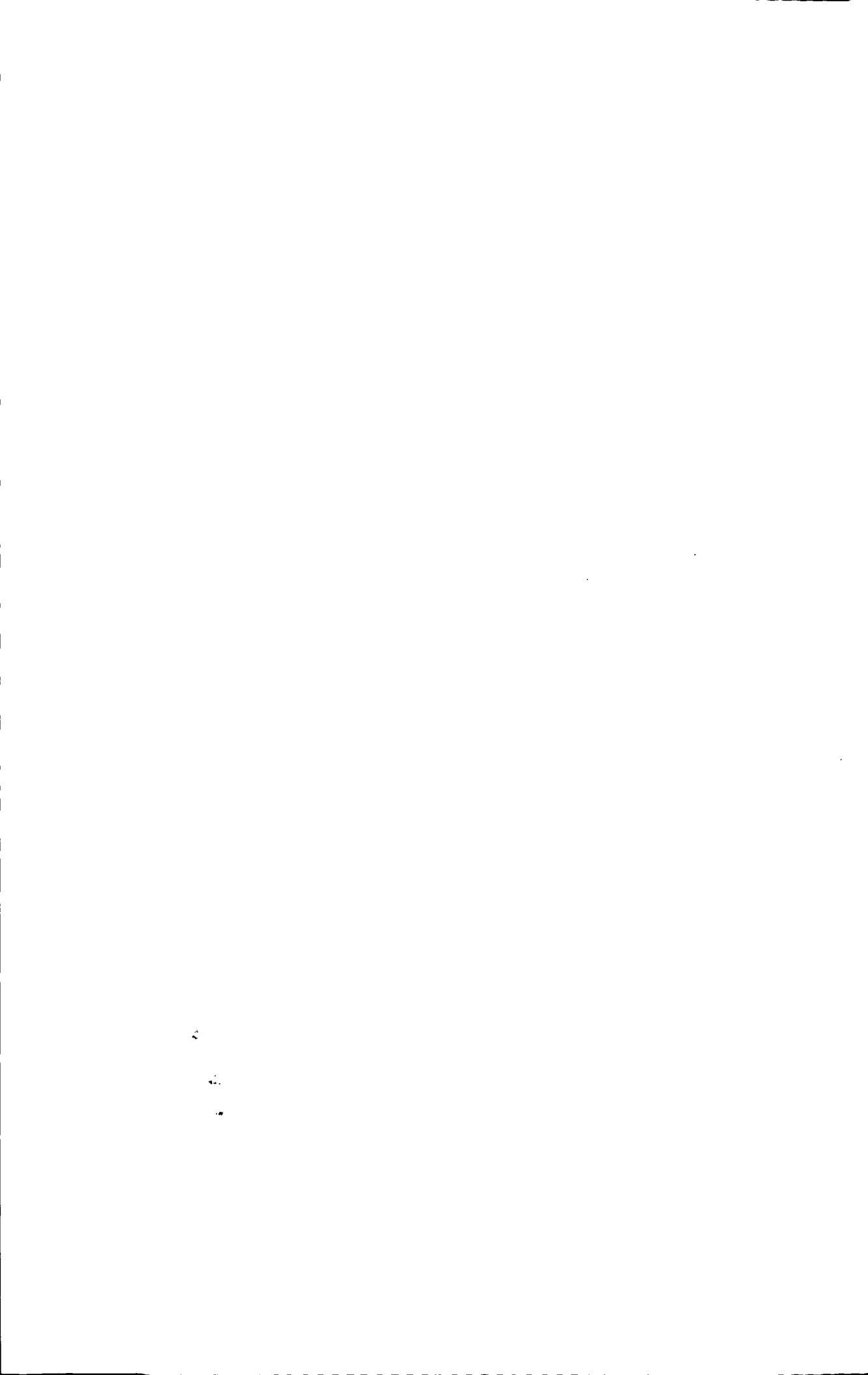
Key Words: pavement structure, sensor semi-rigid basement, graduation macadam basement , asphalt stabilized macadam basement , asphalt pavement

目 录

第一章 绪论	1
1.1 问题的提出及研究意义	1
1.2 国内外路面结构试验路发展状况	2
1.2.1 国外研究现状	2
1.2.2 国内研究现状	4
1.3 本研究的主要内容及技术路线	5
1.3.1 研究的主要内容	5
1.3.2 本研究的技术路线	6
第二章 数据采集设备	7
2.1 概述	7
2.2 应变传感器	7
2.2.1 传感器的基本要求及选用原则	7
2.2.2 电阻应变式传感器原理	9
2.2.3 应变传感器的制作及标定	12
2.3 数据采集系统	15
2.3.1 数据采集虚拟仪器系统设计	16
2.3.2 虚拟仪器系统硬件结构	16
2.3.3 虚拟仪器系统软件结构	17
2.3.4 路面结构试验应变及采集程序设计	19
2.4 本章小结	24
第三章 室内结构试件尺寸设计依据分析	25
3.1 概述	25
3.1.1 分析指标的选取	25
3.1.2 加载设备	26
3.2 传统半刚性基层结构设计依据分析	27
3.3 级配碎石基层结构设计依据分析	28
3.4 沥青稳定碎石基层结构设计依据分析	30
3.5 本章小结	32
第四章 半刚性基层沥青路面应变分析	34

4.1 试验准备	34
4.1.1 原材料性质	34
4.1.2 试件成型	35
4.1.3 应变片布设及防护	37
4.1.4 试验方案以及数据	39
4.2 相同荷载不同温度下应变分析	40
4.2.1 正常荷载下应变响应分析	40
4.2.2 重载条件下应变响应分析	41
4.3 相同温度不同荷载下应变分析	43
4.3.1 常温条件下应变响应分析	43
4.3.2 高温条件下应变响应分析	45
4.4 理论值与实测值对比分析	47
4.5 各结构对温度与荷载综合作用的响应	49
4.5.1 回归分析	49
4.5.2 半刚性基层沥青路面响应模型的构建	51
4.6 本章小结	52
第五章 三种路面结构应变对比分析	53
5.1 试验准备	53
5.1.1 结构参数	53
5.1.2 试件成型	54
5.1.3 传感器埋设	55
5.1.4 试验方案及部分数据结果	56
5.2 静载数据分析	58
5.2.1 相同荷载不同温度条件下应变分析	58
5.2.2 相同温度不同荷载下应变分析	60
5.2.3 三种结构温度与荷载综合分析	62
5.3 动载测试结果分析	64
5.4 本章小结	67
结论与展望	69
1、主要研究结论	69

2、进一步要研究的问题	70
参考文献	71
致 谢	74



第一章 绪论

1.1 问题的提出及研究意义

半刚性基层沥青路面所具有的强度高、板体性好的特点，使其成为我国高等级公路建设的首选路面结构形式。

随着我国经济社会的快速发展，对交通的需求也日益提高，公路交通压力日益增大，表现为交通运输量大，汽车轴数、轴重增加，车速加快。伴随着这些现象，一方面提高了运输效率、降低了运输成本，另一方面却加速了路面的破坏，大大地降低了路面的使用寿命^[7, 9, 10, 13, 15]。

过去对于半刚性基层沥青路面的研究多停留在材料试验的层面，而对其结构性能研究，特别是对于路面结构内部的力学理论研究不多，现有研究也只停留在理论分析层面，试验研究很少。

目前国际上众多对沥青路面性能测试中，加速加载试验(Accelerated Pavement Test 简称 APT)是一种最为有效地方法。众所周知，往复循环作用在沥青路面上的移动载荷是造成沥青路面破坏的主要原因，在车辆载荷的往复循环作用下，沥青路面会产生裂纹、网裂、坑槽、车辙等不同形式的破坏。加速加载试验就是通过改变作用在路面上移动载荷的速度与来大小测试路面的性能参数与抗破坏能力。目前国际上较为著名道路结构试验有美国的 WAHSO(Western Association of State Highway Officials)道路试验、AASHTO 试验路、明尼苏达试验路 (the Minnesota Road Research Project)、弗吉尼亚试验路 (the Virginia Smart Road) 以及 NCAT (National Center for Asphalt Technology)试验路^[5, 6, 8, 14, 16, 28]。然而，要想更好的了解路面结构在现实环境中的受力和使用情况，较好的方法还是通过在路面结构中埋设大量传感器来完成，但是这种方法耗资耗时较大，而且成本很高，容易受客观条件限制。

目前国内对依靠传感器的路面结构试验研究甚少，更没有大量开展使用传感器的路面结构试验，本文在前人研究的基础上进行室内小型道路结构试验，以小尺寸结构试件模拟实际路面结构，在结构内部埋设应变传感器，分析结构的力学性能，为路面结构设计理论的完善提供一个有力的工具。

1.2 国内外路面结构试验路发展状况

1.2.1 国外研究现状

(1) 试验路

最早的试验路可追溯到 1909 年的底特律试验^[1]，早期的路面结构试验设备极其短缺，使用较多的是模拟或实际的交通荷载，对环境的模拟也出于探索阶段。

1958~1960 年进行的 AASHO 道路试验是第一个现代意义上的大型道路试验^[2]。试验路铺设在芝加哥西南 128km 的伊利诺伊州附近的 80 号公路上，包括 4 个大环道(3~6 号)和 2 个小环道(1、2 号)。每个环道都按四车道设计，横断面建成平行路段或直线路段，两端由回车道连接。3~6 号环路的直线段长度为 2070m，2 号环路的直线长度为 1340m，1 号环路的直线长度为 610m。该试验研究确定荷载值与车轮分布不同的轴载重复作用次数与不同厚度的沥青路面和水泥混凝土路面工作状况之间的重要关系，全面提高了路面研究和实践的水平，在世界范围内产生了深远的影响。

美国从 1987 年开始开展“战略公路计划”(strategic Highway Research Program，简称 SHRP 计划)，项目投资 1.5 亿美元。该计划于 1992 年结束后，又追加投资 7 亿美元用于路面长期性能观测，其中相当大的部分用于路面的加速加载试，其目的是对目前的路面技术进行全面客观的了解和评价，提出能够解释路面使用性能变化过程的模型，弄清不同设计特点、不同材料、不同交通、不同环境、不同养护水平不和同施工质量对路面使用性能产生的影响^[3, 24~26]。

1995 年，美国联邦公路局在内达华州建立的 APT 试验设施，即 WesTrack 试验路，其椭圆形环道长 2.8km，由 26 个热拌沥青混合料试验段组成。路段布置成一条缓和曲线连接两条直线段，试验段位于直线段上。每个试验段长 70m。这条试验路的最初目的是用来评估沥青路面的使用性能，该路最早提供了按 SUPERPAVE 方法设计的沥青混合料在高速率施加的重载作用下的技术数据。1997 年，SUPERPAVE 试验段通车后迅速发生车辙，研究人员认识到当前路面设计和施工方法中，可能漏掉某些未知因素^[5]。

明尼苏达试验路计划始于 1993 年，该路位于 Mn-Road 的中间部分，如图 1.1 所示。试验路由两条道路组成，一条是用于研究大交通量的双车道，长 4.8km;一条是用于研究低交通量的双车道闭合环道，长 4km。试验道路包括 40 个 152.4m 的试验段，并在其中埋设了大量的综合检测设备，共有 17 个种类的 4572 个传感器。可以测试路基路面内的水平和垂直方向的应变量、含水量以及温度情况。大交通量道路通过转移交通量来进行

加载。低交通量环道的 17 个路段采用标准试验卡车来加载, 以使其成为可控的足尺加速路面试验。

从 1992 年开始, 美国明尼苏达试验路 (Mn/ROAD) 开始铺筑运行, 1997 年~2002 年, 在弗吉尼亚建设完成了 1.7 英里试验路, 5.7 英里 (9.5 公里) 项目预计于 2008 年完成。美国国家沥青技术中心 NCAT 在 2000 年开始实施 NCAT 试验路, 到 2008 年结束。

日本市政工程研究所的设备是同类设备中最先进的^[45]。试验路由两部分组成, 一段长 870m, 另一段长 628m, 共有 67 个试验段, 其中一些试验段长 15m, 宽 7m。较小的试验路主要由 19 个 25m 长、5m 宽的试验段组成。荷载由 3 辆时速 40km/h、后轴重 60~160kN 的无线遥控卡车来模拟。

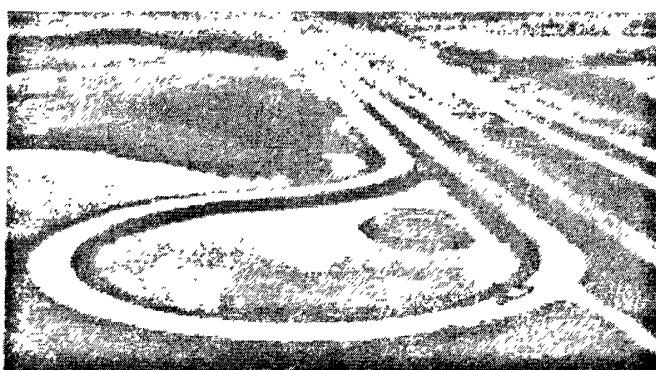


图 1.1 明尼苏达试验路

(2) 车道试验

大规模道路试验研究的代价十分昂贵, 为了节省研究资金, 车道试验 (Test Tracks) 技术应运而生。目前投入使用的车道试验主要有环形、直线形、无固定线性以及其他类型。

澳大利亚设计的 ALF 是直线形试验道的代表, 现在应用得也比较多, 如图 1.3 所示。1983 年澳大利亚交通研究中心进行了第一次试验。FHWA 于 1986 年购买了第一台这种设备, 安装在位于弗吉尼亚 Mclean 的 Tume- Fairbank 公路研究中心, 1995 年安装了第二台设备。1990 年交通部公路科研所也购买了一台 ALF 设备。1994 年, 路易斯安那交通研究中心道路试验设备(PRF-LA)开始使用。澳大利亚的设备自 1983 年来一直在持续运行, 完成了许多重大的路面试验。ALF 采用单向加载, 单轴双轮在 12m 长的试验段上运行, 加载速度为 20km/h, 荷载为 40~80 kN。它是一种专为公路或专门修建的试验路而设计的可移动试验设备^[27]。



图 1.2 大型加速加载 ALF

南非是第一个研发可移动直道设备—重车模拟器(HVS)的国家，它可以在现役路面上运行，如图 1.3。1968~1972 年最初研制的 4 台 HVS，自 1982 年以来一直用于试验研究。已在 500 多条试验路上模拟了 14 亿标准轴载作用次数。HVS 有一个带单胎或双胎试验轮的液压加载装置，可以 14km/h 的速度运行，荷载为 20~100kN，对机场跑道试验，轮载可增加至 200kN。最初，轮载是在 0.9m 宽的环道上均匀分布，但现在的模型多数都能将荷载分布在 1.5m 宽直至公称宽的区域内。

美国得克萨斯州最近开始使用 TxMLS，这是一台可移动的直道设备，可以用 6 个双轴单轮或双轴双轮加载，荷载最大为 190kN，运行速度 20km/h。试验段长 11m，可选择的横向加载宽度超过 0.6m。这套设备以下特点：

- (1) 采用常规的卡车悬挂装置来模拟短波长动载。
- (2) 全封闭，可以按要求来控制环境条件。
- (3) 全轴取代了通常的半轴。
- (4) 加载频率达 8800 次/h。

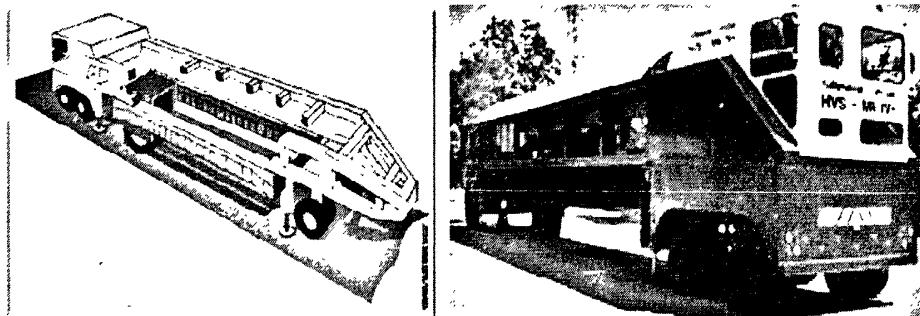


图 1.3 重载车辆模拟设备 HVS

1.2.2 国内研究现状

从 1963 年开始，同济大学也开始了路面结构的大型试验，并实施了温度全控制，

开创了中国大型路面结构试验的先河,随后北京重庆等地也开始了大型路面结构试验的研究。

ALF 试验仪诞生后,我国于 1990 年从澳大利亚引进了该设备,开展了一系列沥青路面性能的加速加载试验,如 1990 年河北正定试验、1991—1997 年河北涿州试验、1999—2000 年北京通州试验、2002—2003 年的西平遥试验、2004—2005 年浙江桐庐试验、2007—2008 甘肃武威试验,其中山西平遥试验结果已被我国的公路设计标准所采纳。通过对上述试验结果的分析,国内的研究人员开展了针对半刚性沥青路面结构的广泛研究。对沥青路面的各结构层的抗破坏能力和耐久性,孟书涛、徐全亮等人得出了很多具有指导意义的研究成果,同时国内的很多研究机构,如长安大学、中南大学、同济大学等高等院校也参与到对试验结果的研究,其研究成果为我国的公路,尤其是高速公路的建设做出了重要贡献。

1.3 本研究的主要内容及技术路线

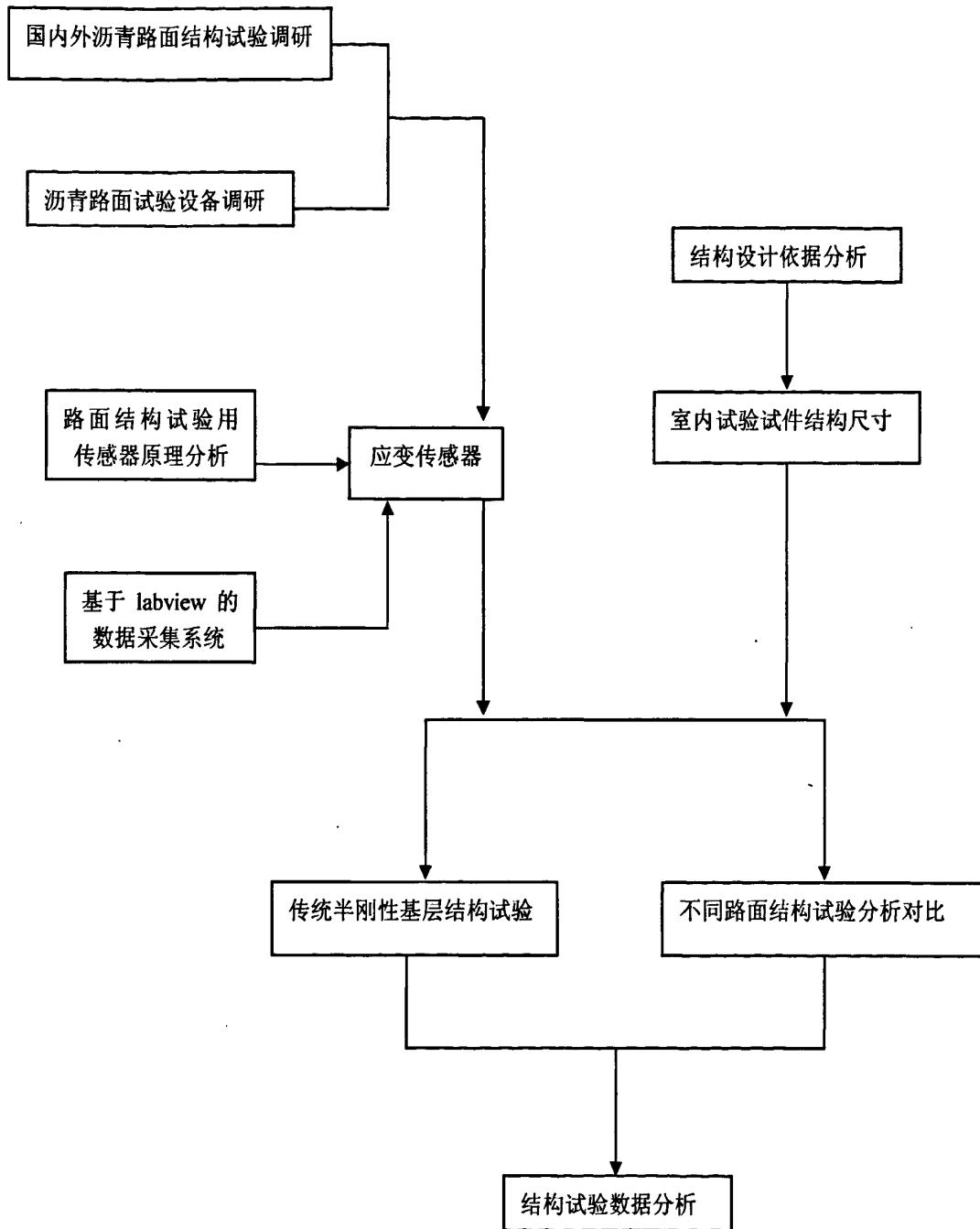
1.3.1 研究的主要内容

本研究依托于西部项目“半刚性基层损害机理与适应性研究”,开展半刚性基层沥青路面结构试验。在试验中,通过精密的 NI 数据采集设备、应变传感器结合自己通过 LabVIEW 编辑的数据采集程序准确地测量路面结构内部的应力应变,获得与理论分析相对比的实测应力应变数据。

本部分的研究内容为:

- (1) 研究室内结构试验方法,包括试件制备,传感器的埋设、调校,数据测试等;
- (2) 模拟传统半刚性基层沥青路面,成型小尺寸试件,测试其在不同温度与荷载下的力学响应,并适当变换结构尺寸,根据测试结果分析温度、荷载以及结构参数变换对力学响应的影响规律;
- (3) 提出新型半刚性基层沥青路面:具有级配碎石过渡层的半刚性基层沥青路面、混合式(沥青碎石为上基层,半刚性材料为下基层)沥青路面,成型小尺寸试件,测试其在不同温度与荷载下的力学响应,分析温度与荷载变换对其力学相应的影响规律;
- (4) 对上述各类结构的力学响应特征进行对比分析,找出不同结构类型对荷载和温度变化的反应规律并进行比较,以便为下一步研究提供评价依据。

1.3.2 本研究的技术路线



第二章 数据采集设备

2.1 概述

随着计算机科学技术的发展,试验仪器也有了质的飞跃,开始由传统的试验仪器向虚拟仪器发展,这也给我们路面结构试验带来新的试验方法和试验手段。虚拟仪器测试系统的组成,从硬件上看包括模拟和数字两部分。典型的测试系统硬件构成如图 2.1。

各部分的作用分别为:

- 1) 传感器单元: 将被测对象的非电量转换为电量信号, 并送给信号调理模块进行处理。
- 2) 信号调理模块: 对传感器输入的电信号进行放大、滤波等处理后转换成适合数据采集模块采集的信号, 送入数据采集模块。
- 3) 数据采集模块: 对输入的经过调理的信号进行模数转换, 并送入计算机系统进行处理。
- 4) 计算机处理系统: 管理应用程序与用户的交互, 对送入的数据进行分析、处理、显示、存储。

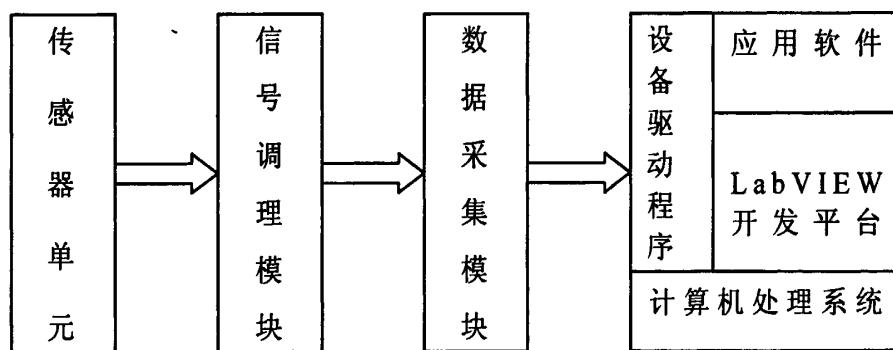


图 2.1 典型测试系统硬件构成

2.2 应变传感器

2.2.1 传感器的基本要求及选用原则

传感器作为检测系统的重要器件,其性能直接影响测量效果。故对传感器有如下基本要求:

- 1) 线性度要好。线性范围宽,工作量程大。

- 2) 灵敏度高。一般情况下,传感器的灵敏度越高越好,但传感器的灵敏度过高,与测量无关的噪声也容易混入,因此要求传感器的信噪比越大越好。
- 3) 测量范围大。在允许误差限内,希望传感器的测量范围越大越好。
- 4) 精度高、稳定性好。传感器精度高的同时,还要考虑其经济系及在使用环境下工作的稳定性
- 5) 结构简单,工作可靠。

现在的传感器种类繁多,在原理和结构上也千差万别,如何根据具体的情况选用合适的传感器,是进行测量时首先要解决的问题。传感器确定之后,与之相配套的测量方法和测量设备也就可以确定。因此,传感器的选用是否合理直接关系到测量的成败。充分了解传感器的选用原则,是正确选用传感器的关键。

1) 根据测量信号和测试环境确定传感器类型

进行一个具体的测量工作,要根据测量信号的类型和测试环境,确定传感器的类型。传感器种类繁多,即使测量同一物理量,也有多种原理的传感器供选择,哪一类型的传感器比较合适,要分析被测对象的特点及其工作环境,具体考虑如下问题:传感器的量程;对环境的抗干扰能力;检测范围;检测方式为接触式还是非接触式;被测对象对传感器体积的要求。

在考虑上述问题之后就鞚确定传感器的类型,然后再考虑传感器的具体性能指标。

2) 灵敏度选择

一般选用信噪比高的传感器,这样才能保证床阿奇的灵敏度在测量范围内保持不变。传感器的灵敏度具有方向性,当被测量是单向量是,就选择横向灵敏度小的传感器;弱被测量是多维的,则要求传感器的交叉灵敏度愈小愈好。

3) 频率响应特性的选择

传感器的频率响应特性决定了被测量的频率范围,因此频率响应特性必须覆盖北侧幸好的带宽,而且希望传感器响应的延迟时间越短越好。传感器的响应时间段,测量范围就宽,但部分传感器由于受结构特性影响,机械系统惯性大,自然频率低,测量范围也就窄。

4) 稳定性的选择

传感器在使用一段时间后,其性能不发生变化的性质称为稳定性。传感器的稳定时间越长,当然就越好。但影响传感器的稳定性除了传感器自身结构外,还有其使用环境。在选择传感器之前,要了解测试环境,根据具体的使用环境选择对此环境具有较强适应

能力的传感器。

传感器的稳定性有定量指标,超过试用期应及时进行标定,以确定其性能是否改变。

5) 精度的选择

传感器的精度是保证整个测试系统精度的必要条件。选择传感器的精度要与后续的测试环节相匹配,这样才能满足测试要求。若测试是做定性分析,应选用重复精度高的传感器,不宜选用绝对量值精度高的;若是为了定量分析,需要获得准确的测量值,就应选用精度等级高的传感器。

6) 线性范围的选择

传感器的线性范围指其输入与输出的成正比的范围。传感器的线性范围越宽,其量程越大,并且能保证一定的精度。实际中,任何传感器都不能保证绝对的线性,线性度也是相对的。当所要求测量精度较低时,在一定范围内可将非线性误差较小的传感器当作线性处理,这样会带来极大的方便。

2.2.2 电阻应变式传感器原理

电阻应变式传感器是利用电阻应变片将应变转换为电阻变化的传感器,路面结构试验用应变传感器是由在弹性元件上粘贴电阻应变敏感元件构成,如图 2.2 所示。当荷载作用在传感器上时,传感器的变形引起电阻应变片的电阻值变化,并通过测量电路将其转变成电信号输出,电信号变化的大小反映了被测物应力应变的大小。

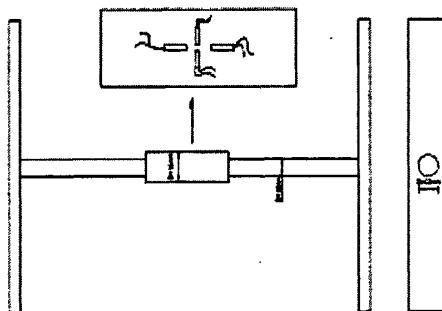


图 2.2 电阻应变式传感器

1) 应变片的基本原理

应变片的工作原理是基于金属丝的电阻应变效应,即金属丝电阻随机械变形而改变的物理现象。其在不同方向的外力作用下,所产生的变形量(ϵ)不同。设有一根长度为 L 的导线,横截面积为 A 、电阻率为 ρ 的金属丝,其初始电阻值为:

$$R = \rho \frac{L}{S} \quad (2.1)$$

对于大多数作为应变片的金属来说, 其电阻丝电阻变化率 $\Delta R/R$ 在弹性范围内存在以下关系:

$$\frac{\Delta R}{R} = k \frac{\Delta l}{l} \approx k \epsilon \quad (2.2)$$

式中: k 为常数, 称为灵敏系数; $\epsilon = \Delta l/l$ 为线应变。

可以看出只要测得 $\Delta R/R$ 的值, 我们就可以通过换算得到应变值 ϵ 。以上所述就是电阻应变片测量应变的基本理论。

2) 应变片的基本结构

在路面结构试验中多采用金属电阻应变片。金属电阻应变片是由敏感栅、基底、覆盖层及引出线组成(见图 2.3)。敏感栅是电阻应变量转化为电阻变化量的敏感部分; 基底和覆盖层具有定位和保护电阻丝与被测体绝缘的作用; 引线起着连接测量导线的作用。

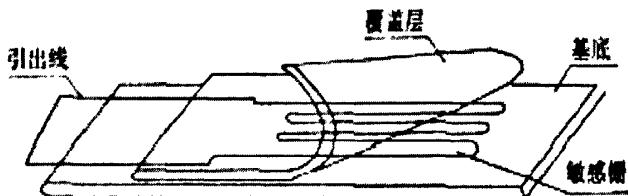


图 2.3 金属电阻应变片的结构

3) 应变片的桥路连接

电桥是应变传感器的重要组成部分。通过电桥可以将应变片转换来的电阻变化率 $\Delta R/R$ 再转换为电压变化, 然后再由电压变化输给放大器加以放大在应变测试中。在虚拟仪器系统中, 根据测量目的及布片方式的不同, 桥路可分为七种: 1/4 桥 I 型、1/4 桥 II 型、半桥 I 型、半桥 II 型、全桥 I 型、全桥 II 型、全桥 III 型^[8, 9, 14, 23, 32, 36]。具体布片方式如表 2.1

表 2.1 应变片的布方式与桥路

电 桥	布 片 方 式	备 注
1/4 桥 I 型	 R_4	无温度补偿

1/4 桥 II型		R3 作为温度补偿
半桥 I型		
半桥 II型		仅用于弯曲应变
全桥 I型		仅用于弯曲应变
全桥 II型		仅用于弯曲应变
全桥 III型		仅用于轴向拉压应变

1/4 桥 II 主要用于测量轴向拉压或弯曲应变, 如图 2.4 所示。图 2.5 为电路接线图。

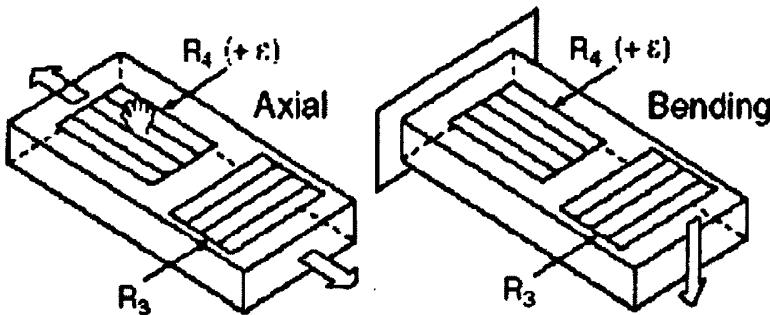


图 2.4 1/4 桥 II 测量轴向拉压或弯曲应变

1/4 桥 II 具有以下特点:

- (1) 只有一个应变片参与测量, 而另一个应变片只起到温度补偿作用。测量片粘贴于拉伸或弯曲应变的方向上, 补偿片贴于能同被测对象温度保持一致且与被测对象相同的介质上;
- (2) 该组桥方式与半桥 I 方式主要差别在于应变片 R_3 是否粘贴于被测对象上, 进行应变测量;
- (3) 可以进行温度补偿;
- (4) 桥臂系数为 1。

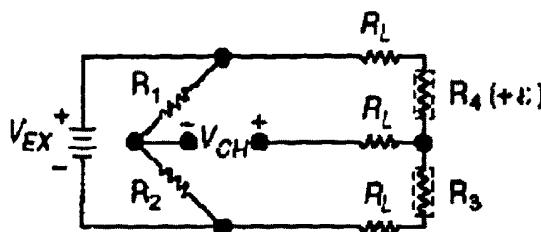


图 2.5 1/4 桥 II 电路接线图

电桥的测量电压与应变间的转换公式为：

$$\text{strain}(\varepsilon) = \frac{-4V_r}{GF(1+2V_r)} \times \left(1 + \frac{R_t}{R_g}\right) \quad (2.3)$$

本研究采用的应变片为中航工业电测仪器公司生产的，型号为 BQ120-80AA，其 BQ 系列是纸侵缩醛树脂基底，康铜箔制成，基底薄而柔软，使用、粘贴方便，是一般应力分析尤其是复合材料和混凝土结构的常用敏感元件。电阻值： $120.0 \pm 0.1 \Omega$ ；敏感系数： $2.0 \sim 2.2$ ；应变极限： 2.0% ；使用温度范围： $-30 \sim +80^\circ\text{C}$ ；敏感栅尺寸： $80 \times 2.5 (\text{mm})$ 。桥路连接采用 1/4 桥 II 型。

2.2.3 应变传感器的制作及标定

(1) 应变传感器的制作

综合分析半刚性基层的施工特点和动力响应特点，传感器满足以下基本要求：①不影响路面结构力学性能：传感器放入道路中 跟随道路结构一起变形，属于强制变形。半刚性材料刚度介于柔性材料和刚性材料之间。如果传感器的弹性元件或保护装置刚度太大，则会增加检测位的刚度，从而影响检测精度，失去试验的意义②结构尺寸小：试件尺寸比较小，传感器结构如过大会影响检测精度。因此传感器结构应该比较小，特别是在深度方向，其尺寸应小于 1cm。③抗剪切。道路结构施工时，在大吨位钢轮压路机的振动和胶轮压路机的搓揉作用下，带有一定棱角的石料对传感器及信号传输设备施加强大的剪切力。这是影响传感器成活率的主要因素。④灵敏度高：根据国外研究成果，半刚性基层底部的疲劳极限应变在 $60 \sim 100 \mu\epsilon$ ，而实际测量的结果应该会低于这个界限，因此要求传感器的精度达到 $1 \mu\epsilon$ 。

综合考虑以上约束条件，本研究自主研究开发了传感器，如图 2.6 所示。该应变传感器包括木质基底棒、木质端杆、螺钉、应变片、电缆等部件。传感器的弹性元件的选择，主要考虑其弹性模量，与半刚性基层材料弹性模量接近，本研究采用长方体木块作为弹性元件，其材质为横纹松木，抗压回弹模量 980MPa 左右。在木质基底棒底部中间粘贴

应变片，型号为 BA120-10AA 温度自补偿型，内部组成 1/4 桥 II 型连接。两端的木质端杆不仅能够保证弹性元件与半刚性材料同步变形，而且能防止碾压成型时传感器位置和方向发生改变，影响测精度。传感器总体尺寸设计为 100mm×100mm。实际使用时，把该传感器放到检测位，固结在基层混合料中。

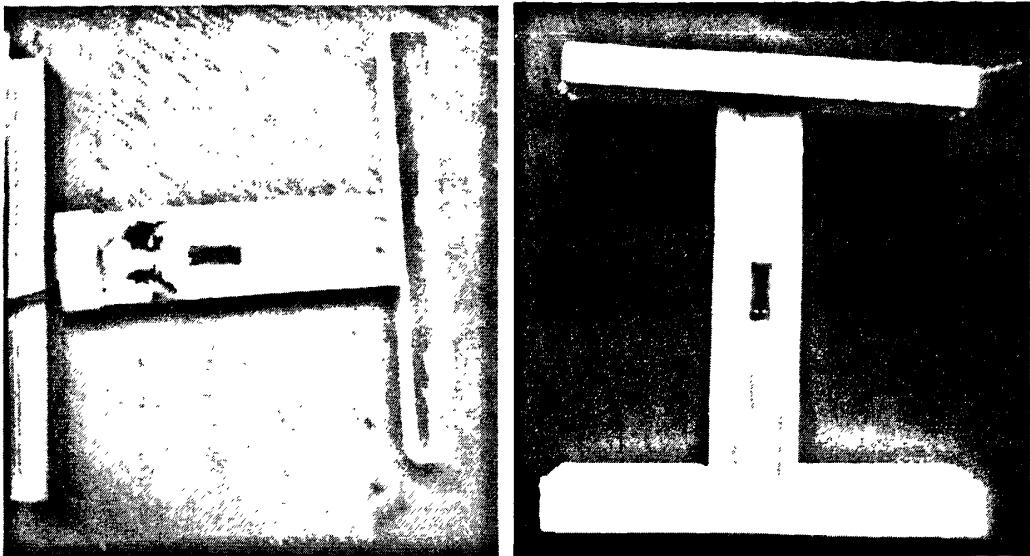


图 2.6 基层用传感器图

(2) 应变传感器的标定

因为不同生产商制造的传感器本身的材料参数和应变片的连接方式不同，如果不是在标准信号的情况下，在相同荷载作用下传感器的输出信号不同。还有传感器输出的信号也和所要测量的材料性质有关，而且由于是传感器自身材料和要测量的材料是两个不完全连续的体系，其间会有一个力和变形的传递，这个传递有一个延迟时间。提高传感器的灵敏度和频响能减少这种延迟，不过力和变形的传递不一定是等量的，要有一个关系式来表达其间的关系，所以要对在基层底面使用的传感器进行校检。

首先制作半刚性基层材料梁试件，梁的尺寸 100mm×100mm×400 mm，选择试验中使用的半刚性混合料，然后把传感器埋入混合料的中部，用振动压实成型的方法成型半刚性基层材料梁试件，根据规范进行合理养护，然后把梁在 MTS 材料试验机，试验时采用控制应变的方法，也就是控制梁中点的变形 δ ，梁的具体几何尺寸及传感器的埋设位置如图 2.7 和图 2.8。

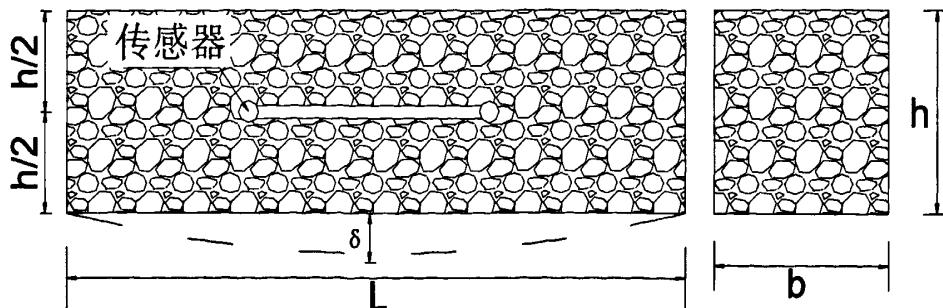


图2.7 半刚性材料梁试件示意图

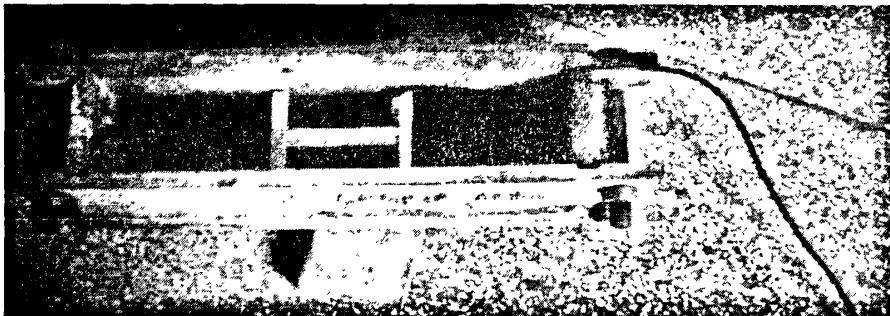


图2.8 半刚性材料梁试件照片

进行试验时记录挠度和挠度变化值，同时用应变仪采集应变传感器的应变值，梁试件中心点最大拉应变根据挠度和梁几何尺寸进行计算，计算公式见式（2.4），

$$\varepsilon_c = \frac{108}{23} \frac{h\delta}{L^2} \quad (2.4)$$

进行实测应变和计算应变的相关性分析。表2.2和图2.9是其中一种沥青混合料梁的试验分析结果，其得到的用应变传感器测量路面应变的转换关系式为式（2.5），

$$y = 0.8619 x - 213.59 \quad (2.5)$$

其中：x为传感器的读数值，y为路面的实际计算应变值。

表2.2 传感器实测和计算应变值

挠度/mm	挠度变化/mm	传感器实测应变/ $\mu\epsilon$	计算应变/ $\mu\epsilon$
0.12	-	-	-
0.25	0.13	543.24	366.26
0.3	0.18	767.68	507.13
0.35	0.23	912.96	648
0.4	0.28	1197.48	788.87
0.45	0.33	1426.68	929.74
0.5	0.38	1806.8	1,070.61
0.55	0.43	1875.76	1,211.48

0.6	0.48	2082.4	1,352.35
0.7	0.58	2123.52	1,634.09
0.8	0.68	2262.56	1,915.83
0.9	0.78	2371.28	2,197.57

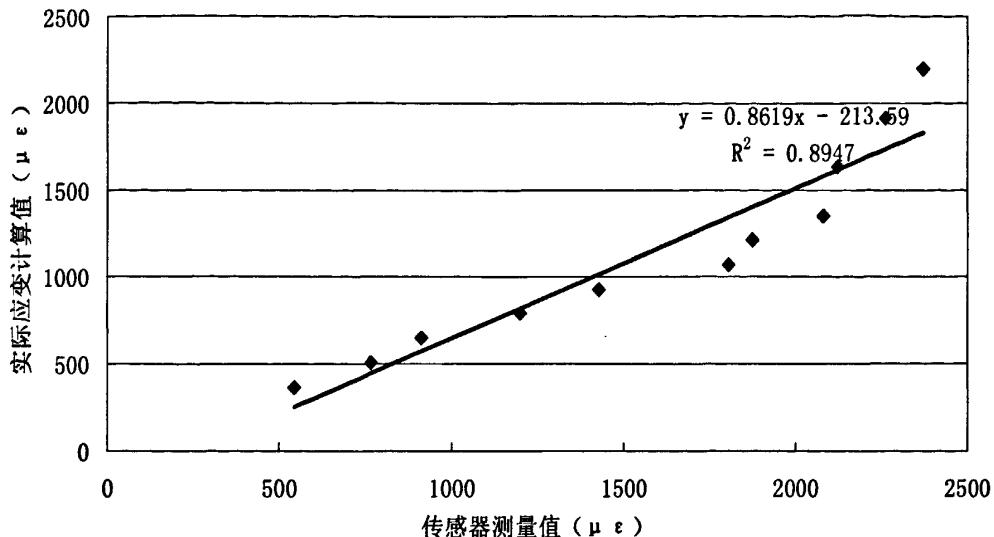


图2.9 实测和计算应变的相关性分析

2.3 数据采集系统

本部分主要研究路面结构试验用传感器的信号采集系统。数据采集虚拟仪器系统通过软件控制完成采集参数设置、数据采集、数据分析处理、数据存储和打印等功能，满足了实际动态测试分析的需要。

虚拟仪器（Virtual Instrument，简称 VI）是指具有虚拟仪器面板的个人计算机仪器，它充分利用最新的计算机技术来实现和扩展传统仪器的功能。它是计算机硬件资源、仪器测控硬件和用于数据分析、过程通讯及图形用户界面的软件之间的有效结合。它具有传统仪器所具备的信号采集、信号分析、信号输出的功能。其基本构成包括计算机、虚拟仪器软件、硬件接口和（或）测控仪器。所以学术界把它称之为虚拟仪器。图 2.10 是常见的虚拟仪器方案。

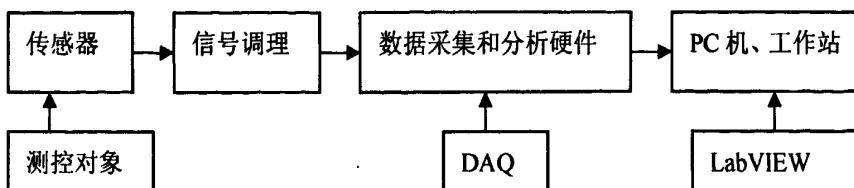


图 2.10 常见的虚拟仪器方案

2.3.1 数据采集虚拟仪器系统设计

虚拟仪器的组成包括硬件和软件两个基本要素。如图 2.11 所示虚拟仪器的组成基本框图。

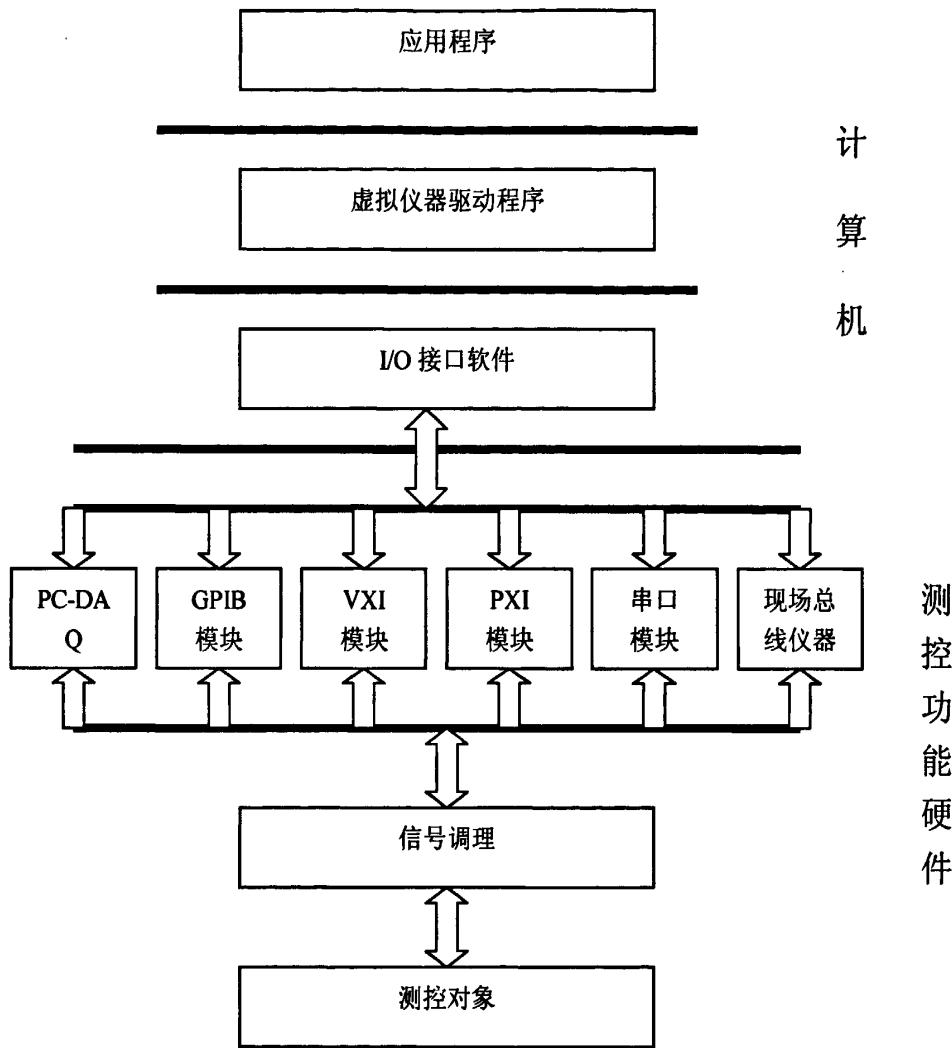


图 2.11 数据采集系统结构

2.3.2 虚拟仪器系统硬件结构

硬件是虚拟仪器的工作基础，主要完成被测信号的采集、传输、存储处理和输入输出等工作。它由计算机和测控功能硬件组成。：

1) 计算机：它一般为一台 PC 机或工作站，是硬件平台的核心，包括微处理器、存储器、输入/输出设备设备等。计算机管理着虚拟仪器的软硬件资源，是虚拟仪器的硬件基础，具有数据采集、数据存储、信号的分析与处理、结果的表示与输出及控制等功能。

能。

2) 测控功能硬件。测控功能硬件主要完成被测信号的采集、放大和模数转换。根据测控功能硬件接口总线的不同,虚拟仪器可分为PC总线式(PC-DAQ)、GPIB总线式、VXI总线式、PXI总线式、串口总线式和现场总线式等几种体系结构。

1) 基于数据采集卡 (PC-DAQ) 的虚拟仪器

这种主要用于以PC为基础的虚拟仪器中。其功能是能将现场数据采集到计算机中,或者将计算机中数据输出给受控对象。它充分利用微型计算机的软硬件资源,大幅度地降低仪器成本,具有研制周期短、更新改进方便的优点。

2) 基于GPIB总线方式的虚拟仪器

典型的基于GPIB总线方式的虚拟仪器系统由一台PC,一块GPIB接口卡和若干台GPIB形式的仪器通过GPIB电缆连接而成。通过GPIB技术可以实现计算机对仪器的操作和控制,来替代传统的人工操作方式,提高测试测量效率。

3) 基于VXI总线方式的虚拟仪器

VXI总线为虚拟仪器系统提供了一个更为广阔的发展空间。VXI总线是高速计算机总线VME总线在仪器领域的扩展。由于VXI总线具有标准开放、结构紧凑、数据吞吐能力强、传输速率高、定时和同步精确等有点,得到了广泛的应用。尤其是在组建中、大规模的自动测试系统中具有其它仪器无法比拟的优势。

4) 基于PXI总线方式的虚拟仪器

PXI总线是PCI总线面向仪器领域的扩展。PXI模块仪器系统具有良好的性价比,尤其适用于某些要求测试系统体积较小的场合。把台式PC的性价比和PCI总线面向仪器领域的扩展优势结合起来,将形成未来主流的虚拟仪器平台之一。

2.3.3 虚拟仪器系统软件结构

“软件即仪器”最本质的刻画出虚拟仪器的特征。在建立起虚拟仪器的硬件平台之后,要使虚拟仪器能按用户要求定义功能,就必须有功能强大的软件平台来支撑。软件是虚拟仪器的关键,通过运行计算机上的软件,一方面实现虚拟仪器图形化界面,给用户提供一个可操作和实现仪器功能的人机接口;另一方面是计算机直接参与测试信号的产生和分析,完成数据的输入、分析、存储和输出等功能。

虚拟仪器的软件框架采用层次化的结构,其优点是通用性、可维护性及可扩充性较好。从底层到高层,包括三个部分:输入/输出(I/O)接口软件、仪器驱动程序、应用软

件。

1) I/O 接口软件

I/O 接口软件存在于仪器与仪器驱动程序之间，是一个完成对仪器内部寄存器单元进行直接存取数据操作、为仪器驱动程序提供信息传递的底层软件，是实现开放的、统一的虚拟仪器的基础和核心。它主要有三个功能：实现速度匹配、信息格式的变换、提供主机和外设间数据所必需的状态和控制信息。I/O 接口软件的特点、组成、内部结构与实现规范在 VPP (VXI Plug&Play) 系统规范中都有明确规定，被定义为 VISA (Virtual Instrument Software Architecture)。

2) 仪器驱动程序

仪器驱动程序是为用户提供用于仪器操作的较抽象的操作函数集，是一种将硬件与操作系统相互连接的软件是连接顶层应用软件和底层 I/O 软件的纽带和桥梁。各模块都有各自的仪器驱动程序，通常仪器厂商会以源代码形式提供给用户。

3) 应用软件

顶层应用软件主要包括仪器面板控制软件和数据分析处理软件，它是建立在仪器驱动程序之上，直接面对操作用户。它利用计算机强大的图形功能实现虚拟仪器面板，给用户提供操作仪器、显示数据的人机接口，以及数据采集、分析处理、显示和存储等功能。

开发完善的应用软件十分重要。虚拟仪器的应用软件需要具集成的开发环境、与仪器硬件接口的驱动程序、虚拟仪器的用户界面等功能。虚拟仪器的应用软件由用户编制，可采用各种编程语言，目前比较流行的虚拟仪器软件开发环境有两类：一类是通用的文本时编程语言，有 VB、VC、C、C++、LabWindows/CVI 等；另一类是专用软件，专门面向用户的图形化编程语言，有 LabVIEW、Agilent、VEE 等。其中以 LabVIEW 在虚拟仪器软件开发中最流行。

LabVIEW 是由美国 NI 公司推出的虚拟仪器开发软件。主要包括数据采集、信号调理控制、数据分析、信号传输存储等功能。另外，LabVIEW 还集成了 GPIB、VXI、RS-232C、USB 的硬件和数据采集卡通信的全部功能，并且还内置了便于 TCP/IP、ActiveX 等软件标准的库函数。因此可以很方便利用 LabVIEW 组件自己的虚拟仪器。

利用 LabVIEW 进行虚拟仪器开发，简化了开发的过程，提高了编程效率，缩短了仪器开发和调试的周期，让用户从繁琐的计算机代码中解脱出来，把大部分经历投入仪器设计和分析中。

LabVIEW 软件提供了丰富的图形控制组件, 它们使数据采集系统的图形显示功能更加强大, 使虚拟仪器的前面板变得形象直观, 如图 2.12。本研究的虚拟仪器数据采集系统可以用曲线的形式显示被测试的数据, 可以直观地看出被测试对象的变化趋势。

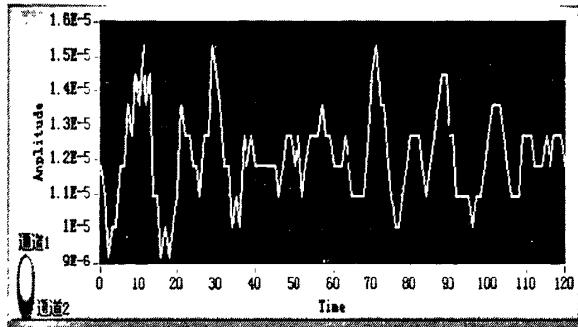


图 2.12 形象直观的前面板

数据采集结束, 形成波形图像后, 系统可以自动生成数据文件, 以便后续回顾试验过程和方便后续的数据处理及分析工作。

数据采集虚拟仪器, 即 VI, 用于数据采集的过程控制及传输、标度转换、数字滤波、动态显示和分析采集的数据, 并可对数据进行存储和打印处理。本研究以 NI 公司开发的 LabVIEW 软件为平台, 结合试验匹配的 NI PXI 数据采集卡, 自行编写试验所需的数据采集调用程序。本研究数据采集卡的调用程序具体分为: 路面结构试验应变采集程序, 路面结构试验压力采集程序, 路面结构试验温度的采集程序。

2.3.4 路面结构试验应变及采集程序设计

(1) 硬件组成

本路面结构试验应变采集设备主要有两部分: 计算机和测控功能硬件, 其中本研究采用的测控功能硬件是 PXI 模块化虚拟仪器及 SCXI 信号调理箱, 如图 2.13 所示。

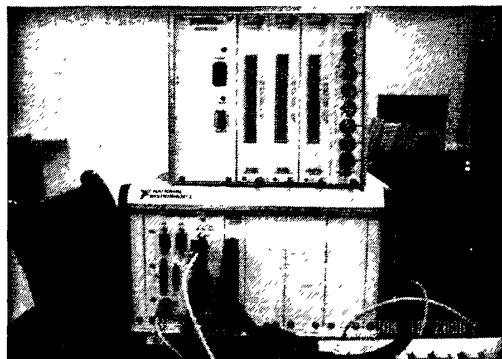


图 2.13 NI PXI-1042 机箱和 NI SCXI-1000 信号调理箱

NI PXI-8186 控制器可以提供高性能实时平台, 进行实时测试和控制应用程序如图

2.14 所示。NI PXI-8186 是通用性强，可用于所有 CompactPCI 或 PXI 系统，是一款一款高性能的 Pentium 4 嵌入式控制器，主频 2.2GHz，PXI-8186 嵌入式控制器位于 PXI 机箱中，与其他装置一起共同为数据采集的应用提供一个高性能的 PC 平台。

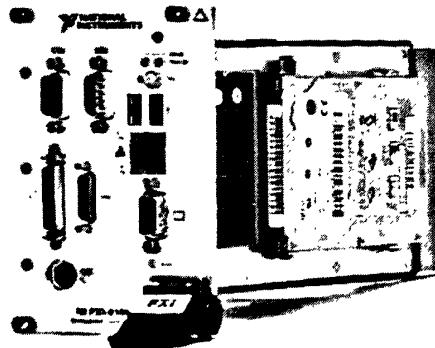


图 2.14 NI PXI-8186 控制器

本研究采用的是 PXI-6070E 多功能数据采集模块，PXI-6070E 为一个 12 位多功能数据采集卡，如图 2.15 所示：

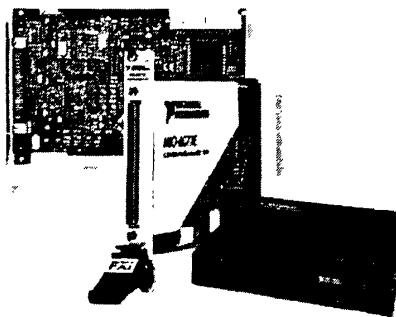


图 2.15 PXI-6070E 多功能数据采集模块

本研究所采用的是 NI 公司生产的 SCXI-1000 模块化信号调理箱，如图 2.16 所示。它带有四个插口槽：分别为一个振动测试调理模块 NI SCXI-1531，一个温度测试调理模块 NI SCXI-1102，两个应变测试调理模块 NI SCXI-1520；SCXI 机箱为负责 SCXI 系统和 DAQ 设备之间的信号连接，并为 SCXI 各模块提供电源。



图 2.16 NI 公司生产的 SCXI-1000 信号调理箱

本研究采用的是 SCXI-1520 应变仪输入模块和 PXI-6070E 多功能数据采集卡模

块, 可以同时采集对多个信号, 本研究采用多通道输入方法输入瞬态应变信号, 输入信号在 A/D 转换时其采样精度为 12 bit, 经过 A/D 转换的应变信号由数据采集卡 PXI-6070E 传给计算机的虚拟仪器工作环境, 由调用的采集程序进行下步处理。

(2) 编写应变采集程序

本研究用 LabVIEW7.5 编写应变采集程序, 用于室内小型路面结构试验中应变数据的采集和分析。图 2.17 是应变采集程序前面板图, 图 2.18 是应变采集程序后面板图, 使用时从后面板图可以设置并调整各项测试参数, 用于采集从传感器输出的应变信号。可用数据回放分析程序对试验中采集的数据进行回放和分析, 如图 2.19、2.20 和 2.21。

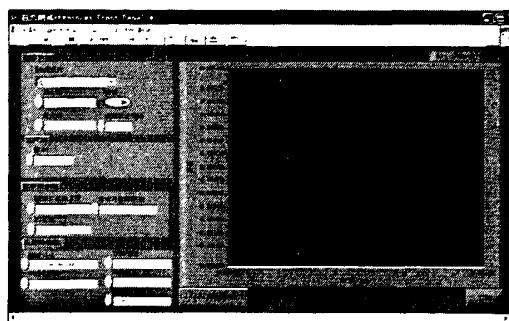


图 2.17 应变采集程序前面板图

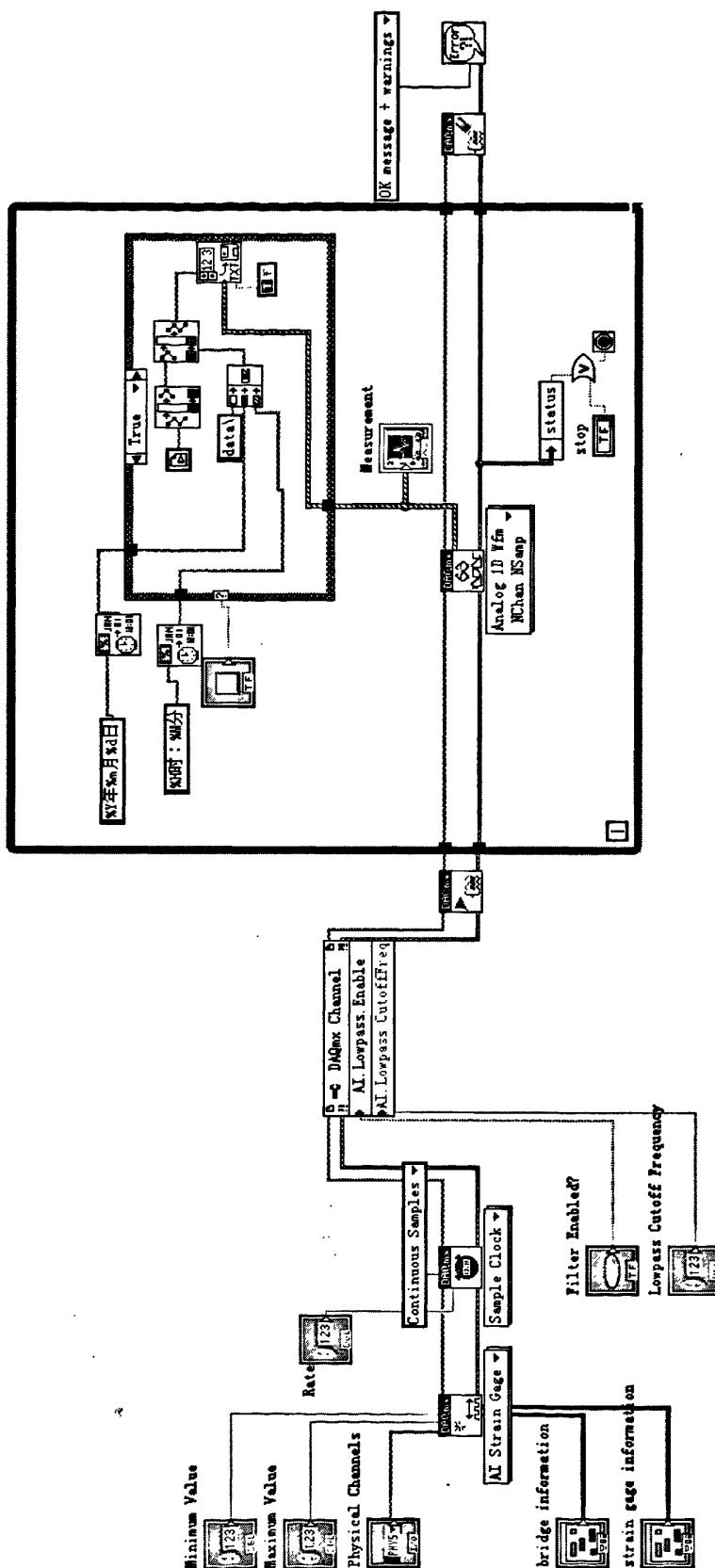


图 2.18 应变采集程序后面板图

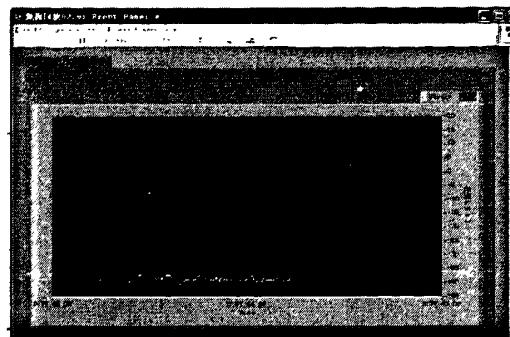


图 2.19 数据回放前面板

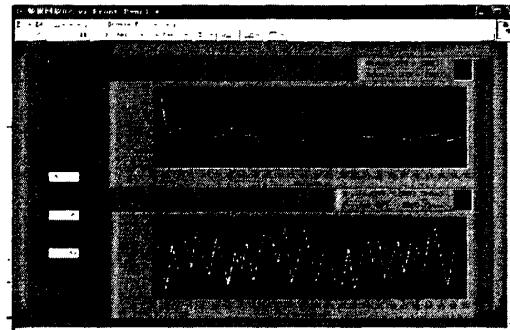


图 2.20 数据分析前面板

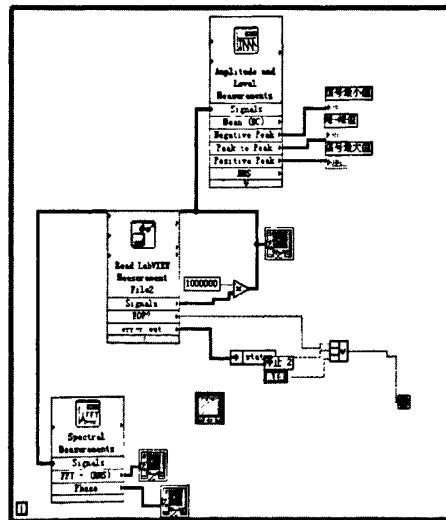


图 2.21 数据分析回放后面板

(3) 应变信号测量

电阻应变片阻值范围: $60\sim 1000\Omega$ ，应变信号测量范围: $1\sim \pm 10000\mu\epsilon$ 。应变信号经信号调理模块 SCXI-1520 调理后经过 SCXI 背板模拟总线送至数据采集模块 PXI-6070E 进行 A/D 转换，所得到的数据由主控机通过应力信号采集记录软件转换分析后，在显示器上实时显示出应变随时间的变化。结果实时存储到硬盘上，以备今后进行分析处理。

2.4 本章小结

本章分析了路面结构试验用应变传感器的基本原理、工作原理及分类特点，介绍了应变传感器的安装、保护、校核方法，为后面的试验奠定了基础。

为了完成路面结构试验的数据采集工作，本章开发了以 LabVIEW 为软件平台、以 NI 设备为硬件平台的路面结构试验数据采集虚拟仪器系统。自行编写了路面结构试验应变采集程序采集卡的调用程序。

第三章 室内结构试件尺寸设计依据分析

3.1 概述

路面结构试验具有普通材料试验所不具备的优势,但大型结构试验投资大,耗时长,而且需要占用很大场地,在某些需要大量实验的情况下,大型结构试验显然不合实际。为此,可将路面结构按一定比例缩小为小尺寸试件,模仿实际的加载、温度、湿度等条件,测试其力学响应,从而达到验证、比较的目的。

传统半刚性基层沥青路面在其使用过程中,容易出现早期损坏,如裂缝、坑槽等,大幅度降低路面使用性能,导致实际使用寿命低于甚至远低于设计年限要求。为弥补半刚性基层沥青路面的缺陷,有必要重新考虑半刚性基层沥青路面的合理层位和合理厚度,应当设置必要的结构层,同时确定合理的半刚性基层厚度。根据前人研究成果,选定三种具有半刚性基层的沥青路面进行设计参数性能分析,三种典型结构包括:加铺级配碎石过渡层的半刚性基层沥青路面、传统半刚性基层沥青路面、混合式(沥青碎石为上基层,半刚性材料为下基层)沥青路面^[47]。

对此,本文利用力学软件 BISAR3.0 进行分析,求得实际路面结构和模拟试件对加载的应力应变反应,通过对比得出二者的相关性。以求为接下来进行的室内结构试验试件缩小比例以及加载条件提供依据。

3.1.1 分析指标的选取

依据半刚性基层材料在使用过程中的疲劳损坏特性和半刚性基层沥青路面结构设计理论,在较薄沥青面层的情况下,半刚性基层沥青路面结构设计受控于基层底部的疲劳开裂。在以基层层底拉应力控制的路面结构设计方法下,基层材料发生的结构性破坏,最终也将导致包括沥青材料层在内的整个路面结构的破坏,因此,如何防止半刚性基层的疲劳破坏就成为课题研究的重要任务。

在路面结构的力学响应中,有很多指标,如弯沉、各层层底拉应力和拉应变、水平剪应力和剪应变、土基顶面压应变等。“国外研究认为,基层层底的拉应变控制着基层的疲劳寿命。而且认为,如果层底拉应变小于某一数值时,可能永不会出现疲劳破坏,及存在所谓的“疲劳极限(fatigue limit),该极限值约在 60~100 $\mu\epsilon$ 范围内^[48]”

3.1.2 加载设备

结构试验研究中,加载设备是一个重要环节,需要根据不同的需要调整荷载,同时根据不同的试验目的调整温度。本论文采用车辙试验仪作为试验的加载设备,车辙试验仪可以加静载、也可以加动载,可以通过添加或卸载其上的加载钢块来调整荷载,还能够通过控温装置调整试验温度,同时又可以进行浸水状态下的车辙试验,因此室内试验装置中,使用车辙仪作为加载设备是经济可行的。车辙仪加载装置如图 3.1 和图 3.2 所示。

本研究中,专门订制了 15cm 厚的车辙板试模作为试件的模具。

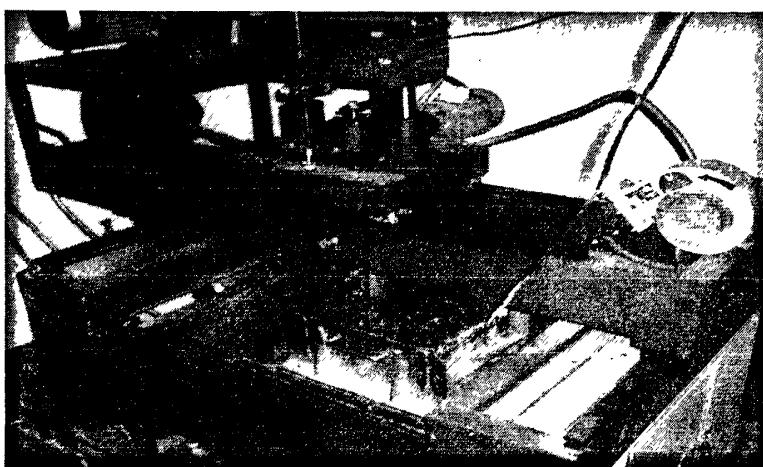


图 3.1 车辙仪加载图

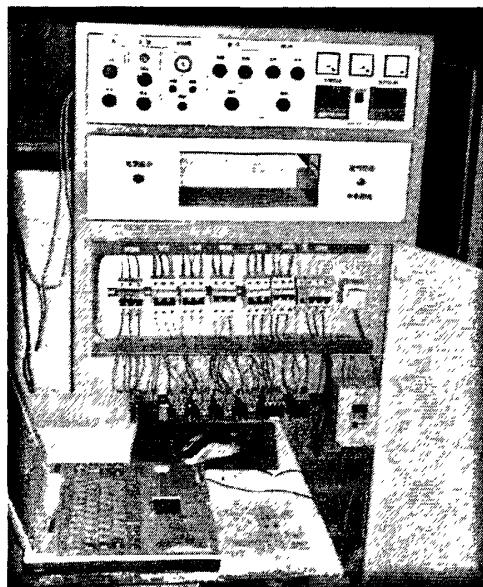


图 3.2 温度控制模块图

3.2 传统半刚性基层结构设计依据分析

由于课题研究测得是基层层底拉应变，因此分析思路如下：根据调研资料，拟定一种实际路面结构，同时选取试件结构参数中对试件基层层底拉应变影响最大的参数作为变量，变动参数值，利用 BISAR 3.0 计算得出其基层层底拉应变，最后选取与实际路面结构的应变值对比，选取接近值最为最佳试件结构。

拟定半刚性基层沥青路面实际尺寸如表 3.1。根据研究，对半刚性基层沥青路面结构基层层底拉应变影响最大的参数是底基层厚度，因此选定底基层厚度作为变量值^[47]。因为受试模厚度限制，试件总厚度不能大于 15cm，同时土基厚度不能过小，综合考虑，试件总厚度以 10cm 为宜，试件结构厚度与实际路面结构厚度之比为 1: 7.5，将其余各层都按 7.5: 1 按比例缩小，底基层厚度取值 3/4/5cm，拟定试件结构 1 各参数如表 3.2。

加载条件：（1）实际路面荷载：单轴载双轮组 100KN 为标准轴载；单轮传压面当量圆直径为 21.3 cm；两轮中心距为 1.5 倍当量圆直径，层间接触假定为多层弹性体系、层间完全连续接触条件。（2）试件加载：调整压强 0.7MPa，荷载为 780N 左右，车辙仪单胶轮，外径 200mm，宽为 50mm，其接地面积为 1100mm²。

表 3.1 结构 1 实际路面各层参数

路面结构层	E(MPa)	厚度 (cm)	泊松比
沥青面层	2000	15	0.25
半刚性基层	1500	37	0.25
半刚性底基层	700	23	0.25
土基	50		0.35

表 3.2 结构 1 试件各层参数

路面结构层	E(MPa)	厚度 (cm)	泊松比
沥青面层	2000	2	0.25
半刚性基层	1500	5	0.25
半刚性底基层	700	3/4/5	0.25
土基	50	5	0.35

表 3.3 结构 1 各层层底应变计算值

路面结构层	应变 ($\mu\epsilon$)			
	实际 1	试件 1	试件 2	试件 3
面层层地	3.85E+01	5.18E+01	5.02E+01	5.31E+01
基层层底	1.81E+01	3.25E+01	4.03E+01	2.89E+01
底基层层底	2.06E+01	4.22E+01	5.75E+01	3.22E+01

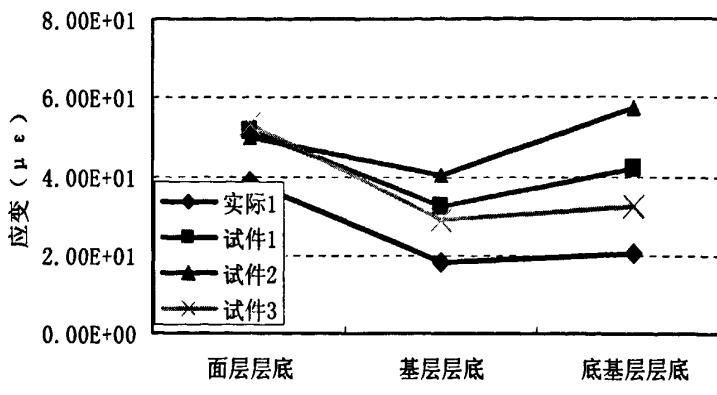


图 3.3 结构 1 层底应变对比图

由图 3.3 可以看出, 试件 3 各层层底应变值变化与实际路面结构 1 呈现出很好的相关性, 因此可选用试件 3 各部分尺寸做为室内实验用尺寸, 同时从图中看出, 试件 2 的应变值比实际路面结构大, 根据弹性层状体系理论, 各层层底应变值与荷载大小呈线性关系, 因此可以通过调整荷载大小来使试件各层应变值接近实际路面结构的应变。综合考虑三层层底拉应变比值, 将试验压强调整为 0.49MPa, 此时荷载为 540N, 可通过调整车辙仪钢块来达到这一荷载, 调整后的各层层底拉应变与实际路面拉应变对比如图 3.3。

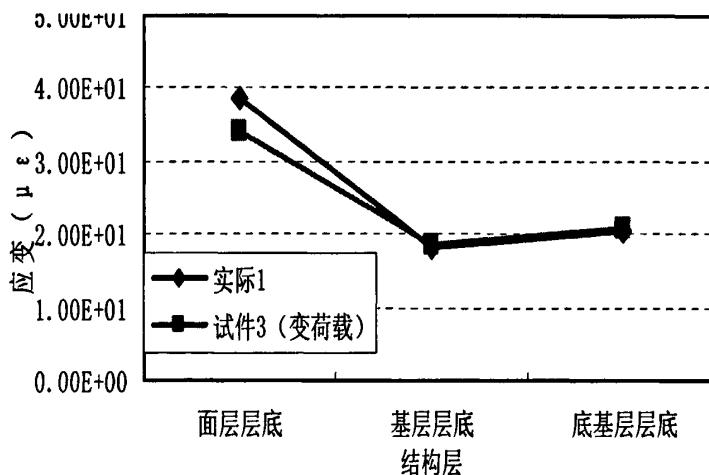


图 3.4 试件 3 调整荷载后各层层底应变值

由图 3.4 可以看出, 调整后的各层层底应变与实际路面结构各层层底应变相差无几。由此可以得出结论, 试件 3 在压强 0.49MPa 下可以很好模拟出实际路面结构 1 对标准荷载的应变反应。

3.3 级配碎石基层结构设计依据分析

拟定级配碎石基层沥青路面实际尺寸如表 3.4。根据研究, 对级配碎石基层沥青路

面结构基层层底拉应变影响最大的参数是底基层厚度,因此选定底基层厚度作为变量值^[47]。因为受试模厚度限制,试件总厚度不能大于15cm,同时土基厚度不能过小,综合考虑,试件总厚度以10cm左右为宜,试件结构厚度与实际路面结构厚度之比为1:7.5,将其余各层都按7.5:1按比例缩小,底基层厚度取值2/4/6cm,拟定试件结构1各参数如表3.5。

加载条件: (1) 实际路面荷载: 单轴载双轮组 100KN 为标准轴载; 单轮传压面当量圆直径为 21.3 cm; 两轮中心距为 1.5 倍当量圆直径, 层间接触假定为多层弹性体系、层间完全连续接触条件。(2) 试件加载: 调整压强 0.7MPa, 荷载为 780N 左右, 车辙仪单胶轮, 外径 200mm, 宽为 50mm, 其接地面积为 1100mm²。

本分析未考虑温度和湿度条件。

表 3.4 结构 2 实际路面各层参数

路面结构层	E(MPa)	厚度(cm)	泊松比
沥青面层	2000	15	0.25
级配碎石过渡层	500	15	0.25
半刚性基层	1500	30	0.25
半刚性底基层	700	15	0.25
土基	50		0.35

表 3.5 结构 2 试件各层参数

路面结构层	E(MPa)	厚度(cm)	泊松比
沥青面层	2000	2	0.25
级配碎石过渡层	500	2	0.25
半刚性基层	1500	4	0.25
半刚性底基层	700	2/4/6	0.25
土基	50	5	0.35

计算得出各种结构各层层底应变值表 3.6。

表 3.6 结构 2 各层层底应变计算值

结构层	应变(με)			
	实际 2	试件 1	试件 2	试件 3
面层层底	1.19E+02	1.47E+02	1.48E+02	1.49E+02
级配碎石层底	9.93E+00	1.41E+01	1.51E+01	1.60E+01
水稳层底	2.41E+01	4.15E+01	3.01E+01	2.53E+01
底基层层底	3.56E+01	6.15E+01	4.57E+01	3.47E+01

整理数据如图 3.5 所示:

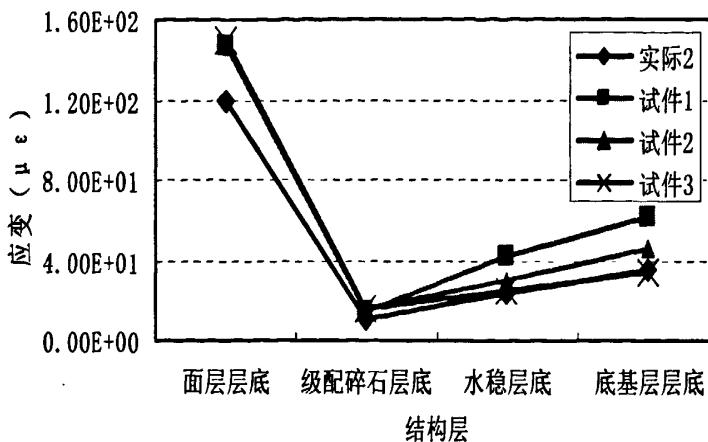


图 3.5 结构 2 层底应变对比图

由图 3.5 可以看出, 试件 2 各层层底应变值变化与实际路面结构 2 呈现出很好的相关性, 因此可选用试件 2 各部分尺寸做为室内实验用尺寸, 同时从图中看出, 试件 2 的应变值比实际路面结构大, 根据弹性层状体系理论, 各层层底应变值与荷载大小呈线性关系, 因此可以通过调整荷载大小来使试件各层应变值接近实际路面结构的应变。综合考虑三层层底拉应变比值, 将试验压强调整为 0.52MPa, 此时荷载为 570N, 调整后的各层层底拉应变与实际路面拉应变对比如图 3.6。

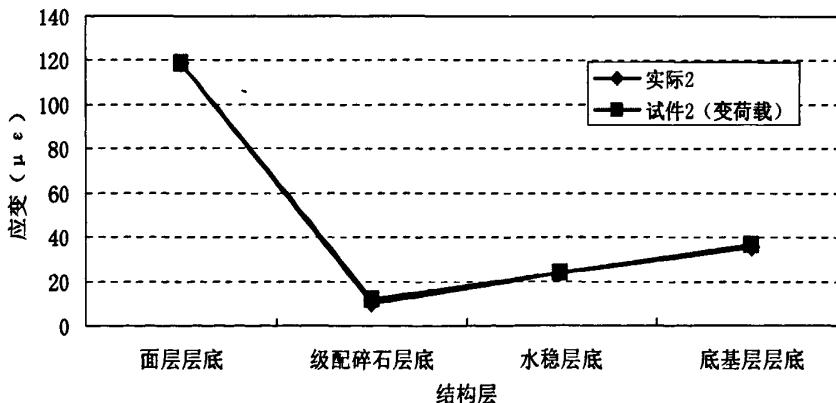


图 3.6 试件 2 调整荷载后各层层底应变值

由图 3.6 可以看出, 调整后的各层层底应变与实际路面结构各层层底应变相差无几, 即使相差最大的面层层底也仅差不到 $1\mu\epsilon$ 。由此可以得出结论, 试件 2 在压强 0.52MPa 下可以很好模拟出实际路面结构 2 对标准荷载的应变反应。

3.4 沥青稳定碎石基层结构设计依据分析

拟定沥青稳定碎石基层沥青路面实际尺寸如表 3.7。根据研究, 对半沥青稳定碎石基层沥青路面结构基层层底拉应变影响最大的参数是底基层厚度, 因此选定底基层厚度

作为变量值^[47]。因为受试模厚度限制, 试件总厚度不能大于 15cm, 同时土基厚度不能过小, 综合考虑, 试件总厚度以 10cm 左右为宜, 试件结构厚度与实际路面结构厚度之比为 1: 7.5, 将其余各层都按 7.5: 1 按比例缩小, 底基层厚度取值 2/4/6cm, 拟定试件结构 1 各参数如表 3.8.

加载条件: (1) 实际路面荷载: 单轴载双轮组 100KN 为标准轴载; 单轮传压面当量圆直径为 21.3 cm; 两轮中心距为 1.5 倍当量圆直径, 层间接触假定为多层弹性体系、层间完全连续接触条件。(2) 试件加载: 调整压强 0.7MPa, 荷载为 780N 左右, 车辙仪单胶轮, 外径 200mm, 宽为 50mm, 其接地面积为 1100mm²。

表 3.7 结构 3 实际路面各层参数

路面结构层	E(MPa)	厚度 (cm)	泊松比
沥青面层	2000	15	0.25
沥青碎石上基层	1400	15	0.25
半刚性基层	1500	30	0.25
半刚性底基层	700	15	0.25
土基	50		0.35

表 3.8 结构 3 试件各层参数

路面结构层	E(MPa)	厚度 (cm)	泊松比
沥青面层	2000	2	0.25
沥青碎石上基层	1400	2	0.25
半刚性基层	1500	4	0.25
半刚性底基层	700	2/4/6	0.25
土基	50	5	0.35

计算得出各种结构各层层地应变值如下表:

表 3.9 结构 3 各层层底应变计算值

结构层	应变 ($\mu\epsilon$)			
	实际 2	试件 1	试件 2	试件 3
面层层底	4.99E+01	5.49E+01	5.67E+01	5.80E+01
沥青碎石层底	1.98E+01	3.01E+01	2.92E+01	2.90E+01
水稳层底	2.29E+01	3.94E+01	2.94E+01	2.50E+01
底基层层底	3.19E+01	5.51E+01	4.13E+01	3.16E+01

整理数据如下图所示:

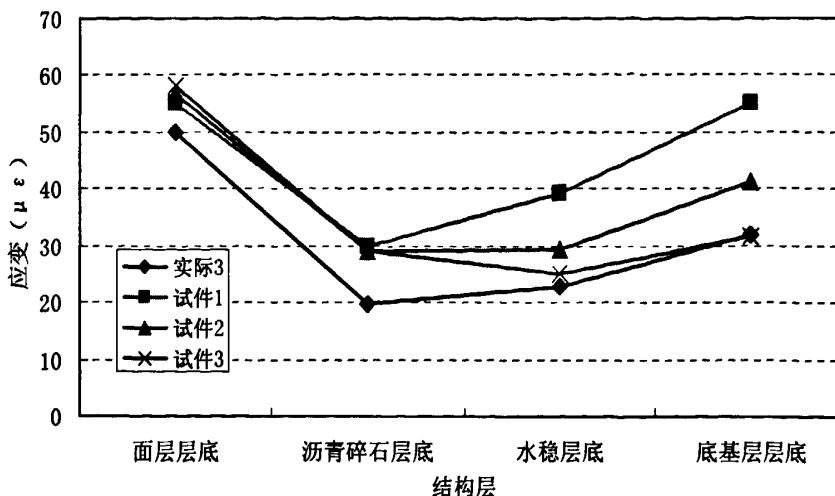


图 3.7 结构 3 层底应变对比图

由图 3.7 可以看出, 试件 2 各层层底应变值变化与实际路面结构 3 呈现出很好的相关性, 因此可选用试件 2 各部分尺寸做为室内实验用尺寸, 同时从图中看出, 试件 2 的应变值比实际路面结构大, 根据弹性层状体系理论, 各层层底应变值与荷载大小呈线性关系, 因此可以通过调整荷载大小来使试件各层应变值接近实际路面结构的应变。综合考虑三层层底拉应变比值, 将试验压强调整为 0.51MPa, 此时荷载为 560N, 调整后的各层层底拉应变与实际路面拉应变对比如图 3.8

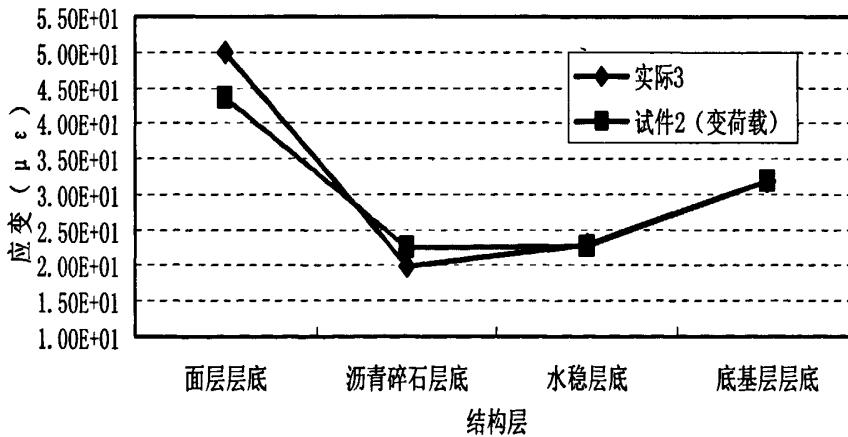


图 3.8 试件 2 调整荷载后各层层底应变值

由上图可以看出, 调整后的各层层底应变与实际路面结构各层层底应变相差无几, 即使相差最大的面层层底也仅差不到 $1 \mu\epsilon$ 。由此可以得出结论, 试件 2 在压强 0.51MPa 下可以很好模拟出实际路面结构 2 对标准荷载的应变反应。

3.5 本章小结

选定三种具有半刚性基层的沥青路面, 三种结构包括: 传统半刚性基层沥青路面、

具有级配碎石过渡层的半刚性基层沥青路面、混合式(沥青碎石为上基层,半刚性材料为下基层)沥青路面,利用力学软件BISAR 3.0进行分析,得出:表3.10所示各结构,在相应荷载作用下的应变分别能够代表各自实际路面结构对标准荷载的应变反应计算规律。

表3.10 三种结构尺寸参数

结构层	传统半刚性基层	级配碎石基层	沥青稳定碎石基层
面层	AC-13 2cm	AC-13 2cm	AC-13 2cm
上基层	水泥稳定碎石 5cm	级配碎石 2cm	沥青稳定碎石 2cm
下基层		水泥稳定碎石 4cm	水泥稳定碎石 4cm
底基层	水泥稳定碎石 5cm	水泥稳定碎石 4cm	水泥稳定碎石 4cm
压强	0.49MPa	0.52MPa	0.51MPa
荷载	540N	570N	560N

第四章 半刚性基层沥青路面应变分析

4.1 试验准备

以往对半刚性基层的室内实验，多停留在单一材料试验层面，通常局限于材料本身的各种强度及相关的路用性能，在试验中大多忽略了路面其他结构层与半刚性基层之间的相互影响，仅仅通过理论计算和计算机模拟来获得其间的相互作用关系，然而理论计算和计算机模拟和实际情况相差甚远。由于这些现实的需要，而去研究基于传感测量的沥青路面结构试验。

本章在前一章试验基础上，对半刚性基层沥青路面结构的各项数据，从温度荷载等方面展开分析，研究半刚性基层沥青路面的力学响应规律。

4.1.1 原材料性质

1、水泥

水泥采用的陕西耀县水泥厂生产的秦岭牌普通硅酸盐水泥，标号为 32.5，各项指标见表 4.1。

表 4.1 水泥性质试验结果

水泥品种	水泥密度	初凝时间	终凝时间	3d 抗压强度	3d 抗折强度
复合硅酸盐水泥 32.5	3085kg/m ³	1.54h	4.5h	27.2MPa	5.4 MPa

各项指标符合规范的要求。

2、石料

石料采用的是泾阳石料，岩性为石灰岩，密度试验结果如表 4.2 和表 4.3。

表 4.2 不同粒径粗集料的密度试验结果

筛孔 (mm)	26.5	19	16	13.2	9.5	4.75	0.053	0.038
密度 (g/cm ³)	2.815	2.835	2.830	2.827	2.823	2.835	2.830	2.827

表 4.3 不同粒径细集料的密度试验结果

筛孔 (mm)	4.75	2.36	1.18	0.6	0.3	0.15	0.075	<0.075
密度 (g/cm ³)	2.827	2.8130	2.813	2.818	2.809	2.807	2.798	2.691

3、土基

由于模具尺寸限制, 试验中土基厚度仅能达到 5cm 左右, 这样土基和模具结合起来的实测抗压回弹模量远大于实际路基值, 因此无法采用纯黄土路基本试验, 故而采用高弹橡胶垫来代替土基, 橡胶垫平面尺寸 30cm×30cm, 厚度 5cm, 放入钢试模后实测抗压回弹模量均值为 71.4 MPa。

4、沥青

沥青采用克拉玛依出产的 SBS 改性沥青, 各项性质如表 4.4。

表 4.4 SBS 改性沥青性质

检测项目	单位	规范值/规定值	测定值
针入度 25℃, 100g, 5s	0.1mm	60-80	77
针入度指数 PI		≥0.4	1.58
软化点 T _{R&B}	℃	≥55	61.8
运动粘度 135℃	P.a.s	≤3	2.4
延度 5℃,5cm/min	cm	≥30	44.5
弹性恢复 25℃	%	≥65	72
RTFOT 后 残留物	质量变化	%	≤1.0
	针入度比 25℃	%	≥60
	延度 (5℃)	cm	≥20
			0.099
			74.3
			20.1

4.1.2 试件成型

本研究主要考查温度和荷载变化对力学指标的影响, 设计指标选定为半刚性基层底层纵向拉应变, 各类半刚性基层结构如表 4.5

表 4.5 半刚性基层结构表

结构层	结构 1	结构 2	结构 3	结构 4
面层	3cmAC	3cmAC	3cmAC	5cmAC
基层	5cm 水稳	7cm 水稳	10cm 水稳	5cm 水稳
橡胶垫	5cm	5cm	5cm	5cm

(1) 水泥稳定碎石基层

由于尺寸限制, 水泥稳定碎石基层最大厚度不超过 10cm, 在这样小的厚度下, 继续采用规范中推荐级配中值是不合适的, 因此将规范级配适当调整, 限制材料最大粒径限制为 19mm, 碎石采用泾阳碎石, 半刚性基层材料的颗粒组成见表 4.6。

表 4.6 半刚性材料颗粒组成范围

筛孔尺寸	水泥稳定碎石	
	合成级配	规范要求
31.5	100	100
26.5	100	90~100
19	83.78	72~89
9.5	63.62	47~67
4.75	38.56	29~49
2.36	22.69	17~35
0.6	8.9	8~22
0.075	2.02	0~7

室内击实试验最佳含水量 5%，最大干密度 2.40g/cm^3 ；水泥稳定碎石 7d 无侧限抗压强度测试结果见表 4.7，根据课题的研究目的，并使试件的 7d 无侧限抗压强度符合《公路基层施工技术规范》(JTJ034—2000) 的要求，最终选定进行疲劳试验的各种半刚性基层材料的配合比为：水泥稳定碎石采用 5% 的水泥剂量。基层成型效果见图 4.1。

表 4.7 水泥稳定碎石 7 天无侧限抗压强度 (MPa)

4.6	4.1	4.8	4.3	5.0	4.7	4.2	4.2	4.0
-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----

$$R_{\text{average}}=4.4\text{MPa}, R_{\text{max}}=5.0\text{MPa}, R_{\text{min}}=4.0\text{MPa}, S=0.426, C_v=9.7\%, R_{C0.95}=3.7\text{MPa}$$

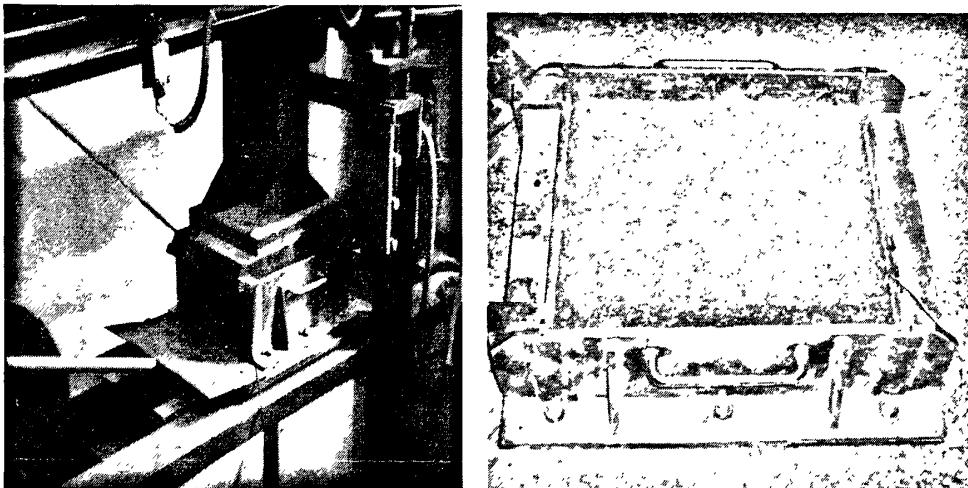


图 4.1 基层成型图

基层成型后放入养生室保湿养生 90 天，后在其上铺筑面层。

(2) 沥青面层

水稳基层养生期结束后，在基层上面刷粘层油，待粘层油充分渗透后铺筑沥青面层。面层采用 AC-13 型混合料，由于受尺寸限制，集料最大粒径控制在 9.5mm 左右为宜，矿料合成级配见表 4.8。按《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》(JTJ052-2000) 的

规定, 进行沥青混合料马歇尔试验, 确定出 AC-13 最佳油石比为 5.3 %, 马歇尔试验结果见表 4.9, 面层铺筑效果如图 4.2 所示。

表 4.8 矿料合成级配

筛孔 (mm)	16	13.2	9.5	4.75	2.36	1.18	0.6	0.3	0.15	0.075
通过率 (%)	99.73	97.36	72.15	39.15	25.69	20.99	15.10	11.09	8.74	5.60

表 4.9 AC-13 型沥青混合料马歇尔试验结果

试验指标	油石比 (%)	毛体积密度 (g/cm ³)	理论密度 (g/cm ³)	VV (%)	稳定度 (kN)	流值 (mm)	VMA (%)	VFA (%)
测试值	5.3	2.357	2.466	4.0	11.5	4.1	16.5	74.1
规范要求	—	—	—	3~5	≥5	2~4.5	≥14	65~75

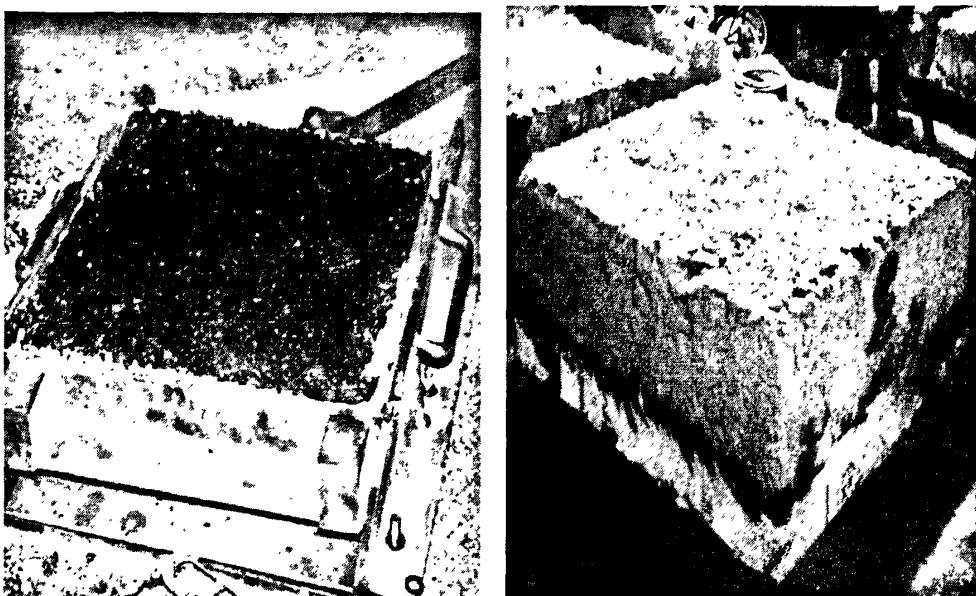


图 4.2 面层成型效果图

4.1.3 应变片布设及防护

路面结构试验有很多需要解决的问题。不同的研究项目有不同的研究目的, 路面结构组合以及传感器的埋设也都有不同的要求, 研究中要根据不同要求安装相应的传感器, 来研究荷载作用下路面响应随环境变化规律, 其核心是研究基层底在荷载及环境影响下的力学响应。在 3.1 中论述了要选取基层层底拉应变来作为测试指标, 层底拉应变又分为沿行车方向的纵向拉应变和垂直于行车方向的横向拉应变。有研究结果表明: 半刚性基层层底纵向拉应变要大于横向拉应变^[49, 50]。因此, 本试验中选取半刚性基层层底拉应变值作为测试指标。

为考查基层层底纵向拉应变, 在面层和基层成型完毕后, 将试件从试模中去处翻

转，在基层地面贴应变片，本研究采用的应变传感器为中航工业电测仪器公司生产的，型号为 BQ120-80AA，具体技术指标和组桥方式见 2.2.2，应变片布设位置和效果如图 4.3。

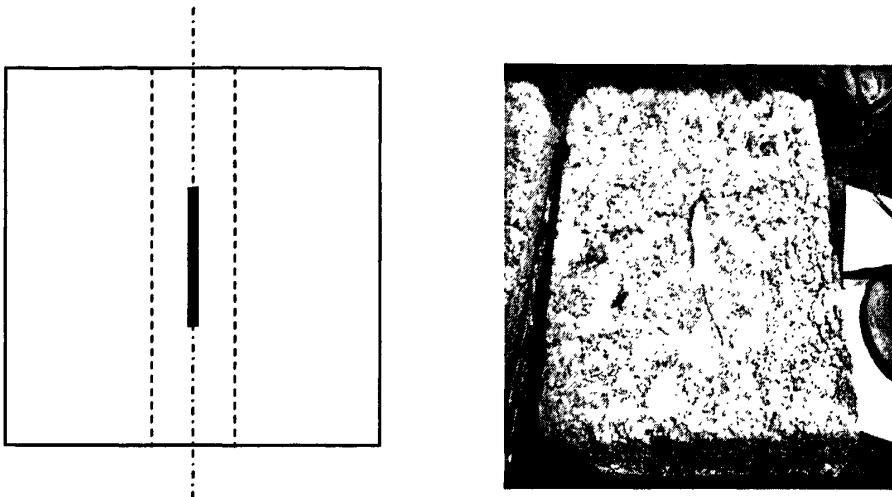


图 4.3 贴片位置示意图

对于水泥稳定碎石，由于试件表面比较粗糙使得应变片的粘贴相对困难一些，若不加处理直接在其上涂抹应变胶、粘贴应变片仍然会对测量结果有较大的影响。在制作水泥稳定碎(砾)石材料试件时，应该用与混合料中品种相同的水泥调配水泥浆，并用其仔细地涂抹在试件准备粘贴应变片的位置，水泥层的厚度应在保证局部消除麻面的前提下尽可能的薄一些，最为理想的状况是水泥仅仅用来填充表面的凹陷，而不单独形成一层。但在实际操作中想在涂水泥浆的时候就达到这种效果并不容易，可行的做法是先把水泥浆涂抹的稍微厚一些，当强度适当时再用细砂纸进行打磨。

应变计粘贴是整个贴片过程中最关键的步骤，对测试精度有绝对影响。粘贴前，对所需的工具、量具（如镊子、刀片、玻璃板）清洗干净，用细刷在试件表面贴片部位和应变计基底上分别涂刷粘结剂（哥俩好），稍稍晾干，待胶液略有发粘时，将应变计的中心线对准试件的定位线准确的贴上，沿应变计轴线方向用手指滚压 3~4 次，排净气泡并挤出多余胶液，按所用粘结剂的要求自然干燥。注意，带有引线的应变计要从无引线的一端开始揭起，用力方向尽量与粘贴表面平行，以防将应变计带起。

粘贴完毕后，要对应变计进行认真检查，发现基底有损坏，敏感栅有变形、断路、短路，贴片位置不正确，有气泡，局部没贴上，绝缘强度不够等问题，应及时排除，或铲除重贴。

对已安装好的应变计采取可靠实用的防护措施，是保证应变计正常工作，提高测

试精度的有效途径。应变计防护的根本途径，是利用一定的材料或介质将应变计连同其附件与恶劣环境隔开，所以首先在应变计安装和使用过程中，谨慎、细心地操作，保持不用手直接接触就是一种有效的防护措施；其次就是利用涂敷保护层来进行防护，应变计的防护一般可选用 AZ-709 胶，对裸露部分进行防护，要求涂刷均匀，然后覆盖南大 703 硅橡胶即可。

4.1.4 试验方案以及数据

为考查温度和荷载半刚性基层层底纵向拉应变的影响，对表 4.5 中 4 种结构进行加载试验，荷载和温度条件如表 4.10 所示。

表 4.10 试验温度与荷载列表

试验	温度 (℃)	荷载 (MPa)	试验	温度 (℃)	荷载 (MPa)	试验	温度 (℃)	荷载 (MPa)
试验 1	20	0.5	试验 9	40	0.5	试验 17	60	0.5
试验 2	20	0.7	试验 10	40	0.7	试验 18	60	0.7
试验 3	20	0.9	试验 11	40	0.9	试验 19	60	0.9
试验 4	20	1.1	试验 12	40	1.1	试验 20	60	1.1
试验 5	30	0.5	试验 13	50	0.5			
试验 6	30	0.7	试验 14	50	0.7			
试验 7	30	0.9	试验 15	50	0.9			
试验 8	30	1.1	试验 16	50	1.1			

试验过程中进行了 3 次重复试验，取 3 次试验所测数据的平均值作为要采用的数据，整理后的数据如表 4.11 所示。

表 4.11 各结构在不同温度和压强条件下的应变值

结构类型	压强 (Mpa)	应变 ($\mu\epsilon$)				
		20℃	30℃	40℃	50℃	60℃
结构 1	0.5	314.5	318.6	326.9	345.9	355
	0.7	413.7	418.4	423.9	433	446.1
	0.9	500	509	524	536	555
	1.1	688	701	721	751	798
结构 2	0.5	173	174	176.8	180.3	188.1
	0.7	216.1	217.9	223.7	230.3	238
	0.9	259.6	262.9	267.2	275.4	288.9
	1.1	361	371	386	396	413
结构 3	0.5	164	165.1	166.4	169.9	175.7
	0.7	194	194.7	196.7	200.6	207.3
	0.9	237.8	239.3	241.6	246.7	254
	1.1	304	310	316	321	330.5

结构 4	0.5	179.4	183.2	185.5	189.5	197.4
	0.7	205.8	208.4	212.9	220.3	257.6
	0.9	243.8	246.7	251.2	259.1	329.1
	1.1	301	317	334	376	436.9

4.2 相同荷载不同温度下应变分析

4.2.1 正常荷载下应变响应分析

为考查正常荷载下温度对各结构基层层底纵向应变的影响, 整理 0.5MPa 时各温度下的应变值如表 4.12 和图 4.4 所示:

表 4.12 各结构 0.5MPa 下应变值

结构	层位	应变 ($\mu\epsilon$)				
		20℃	30℃	40℃	50℃	60℃
结构 1	基层底面	314.5	318.6	326.9	345.9	355
结构 2	基层底面	173	174	176.8	180.3	188.1
结构 3	基层底面	164	165.1	166.4	169.9	175.7
结构 4	基层底面	179.4	183.2	185.5	189.5	197.4

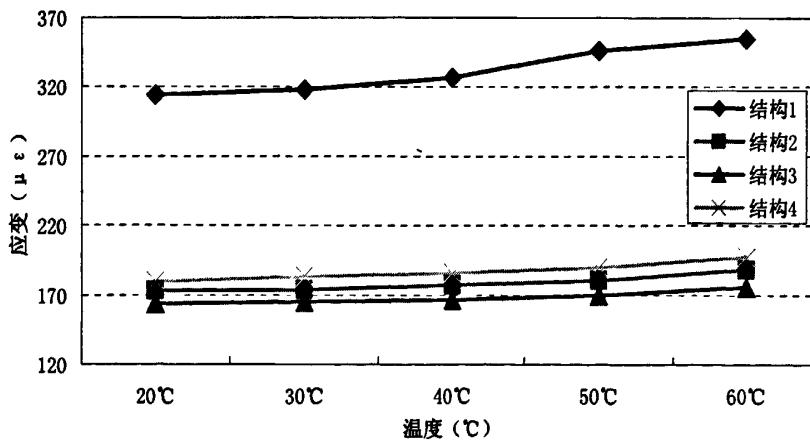


图 4.4 各结构应变随温度变化示意图

从图 4.4 可以看出:

(1) 当温度不变时, 随着半刚性基层厚度的增加, 基层层底拉应变逐渐减小, 但当结构层厚度增大到一定程度后, 其对层底拉应变所起的作用减小: 在 20℃、0.5MPa 条件下, 当基层厚度增大 40%, 层底拉应变减小 45%, 基层厚度增大一倍, 层底拉应变减小 48%; 在 40℃、0.5MPa 条件下、基层厚度增大 40%, 层底拉应变减小 46%, 基层厚度增大一倍, 层底拉应变减小 49%; 在 60℃、0.5MPa 条件下基层厚度增大 40%, 层底拉应变减小 47%, 基层厚度增大一倍, 层底拉应变减小 51%;

- (2) 在温度一定条件下, 随沥青面层厚度增加, 基层层底拉应变逐渐减小;
- (3) 随着温度升高, 半刚性基层沥青路面的层底拉应变逐渐增大, 当温度从 40℃ 升高到 60℃过程中, 层底拉应变增加幅度比从 20℃到 40℃时大, 这可能是因为温度越高, 各层模量降低越多所致;
- (4) 结构总体厚度一定条件下, 半刚性基层厚度适当增大, 可以减小层底拉应变: 结构 2 和结构 4, 厚度均为 10cm, 结构 2 的基层层底拉应变小于结构 4。
- 以各结构 20℃、0.5MPa 时的基层层底拉应变设为 1, 得出各结构基层层底拉应变随温度变化速率如图 4.5 所示。

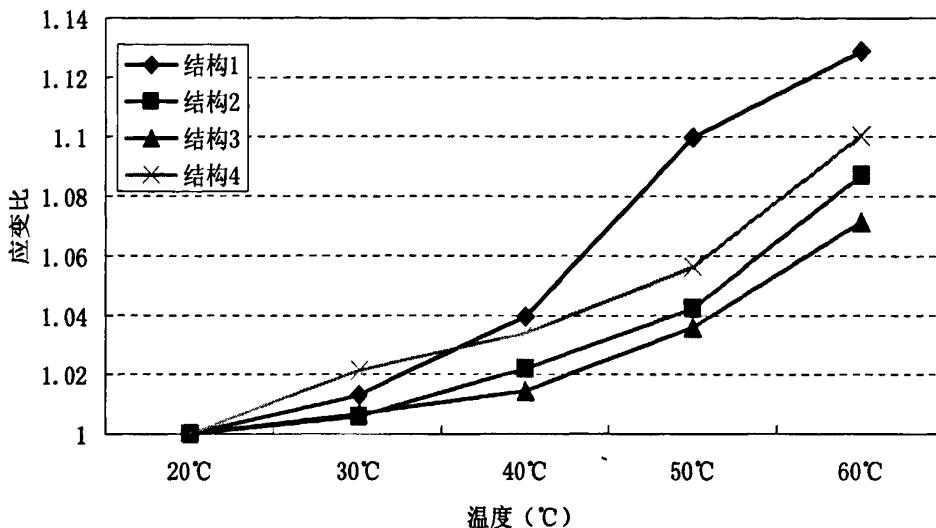


图 4.5 各结构基层层底拉应变随温度变化速率图

由图 4.5 可以看出, 各结构应变值虽然都随温度升高而增大, 但增大幅度并不相同。各结构对温度升高敏感性排序为: 结构 1>结构 4>结构 2>结构 3。因此可以得出结论: 随着基层厚度增大, 半刚性基层层底拉应变的温度敏感性减小; 随着面层厚度增大, 半刚性基层层底拉应变的温度敏感性逐渐减小; 在总厚度不变情况下, 基层比例越大, 温度敏感性越低。

4.2.2 重载条件下应变响应分析

为考查重载条件下温度对各结构基层层底纵向应变的影响, 整理 1.1MPa 时各温度下的应变值如表 4.13 和图 4.6 所示:

表 4.13 各结构 1.1MPa 下应变值

结构	层位	应变 ($\mu\epsilon$)				
		20°C	30°C	40°C	50°C	60°C
结构 1	基层底面	688	701	721	751	798
结构 2	基层底面	361	371	386	396	413
结构 3	基层底面	304	310	316	321	330.5
结构 4	基层底面	301	317	334	376	436.9

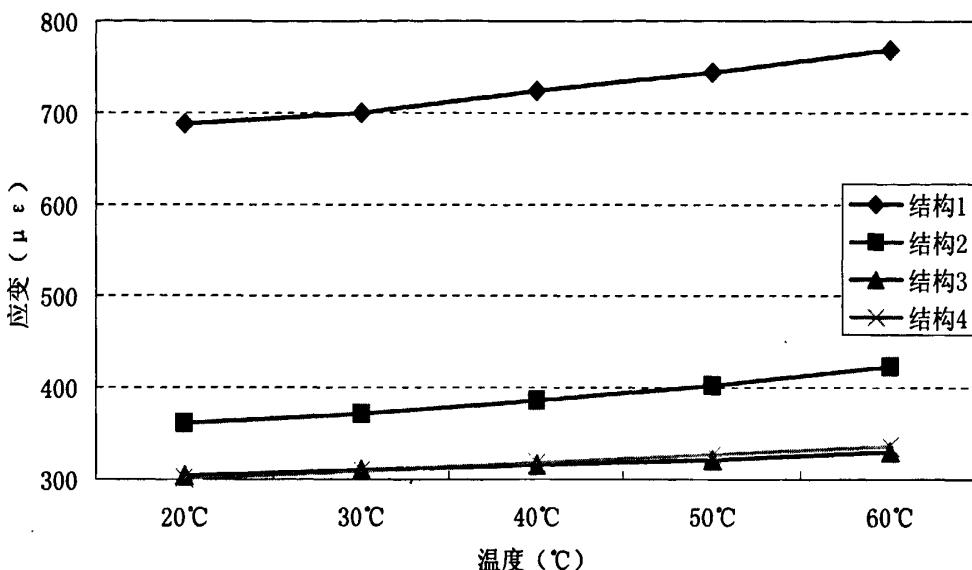


图 4.6 各结构应变随温度变化示意图

图 4.6 是 4 种结构在重载作用下, 不同温度条件时的静态应变。作用荷载为 1.1MPa, 路面结构温度为 20°C、30°C、40°C、50°C、60°C。由图中可以看出, 重载条件下基层层底拉应变随温度变化规律与正常荷载条件下相似, 不同点主要有:

- (1) 在重载条件下, 20°C 时, 各结构基层层底应变排序与正常荷载条件下不同, 为: 结构 1>结构 2>结构 3>结构 4, 主要是结构 4 的应变排序降低;
- (2) 在重载条件下, 60°C 高温时, 各结构底基层层底拉应变排序: 结构 1>结构 2>结构 4>结构 3。

以各结构 20°C、1.1MPa 时的基层层底拉应变为 1, 得出各结构基层层底拉应变随温度变化速率如图 4.7 所示。由图中可以看出: 各结构应变值虽然都随温度升高而增大, 但增大幅度并不相同。结构 4 增大幅度最大, 各结构对温度升高敏感性排序为: 结构 4>结构 1>结构 2>结构 3, 结构 4 的排位由正常荷载时的第二位升至第一, 说明在重载高温条件下, 面层厚度增大会导致基层层底应变的较大幅度增加。

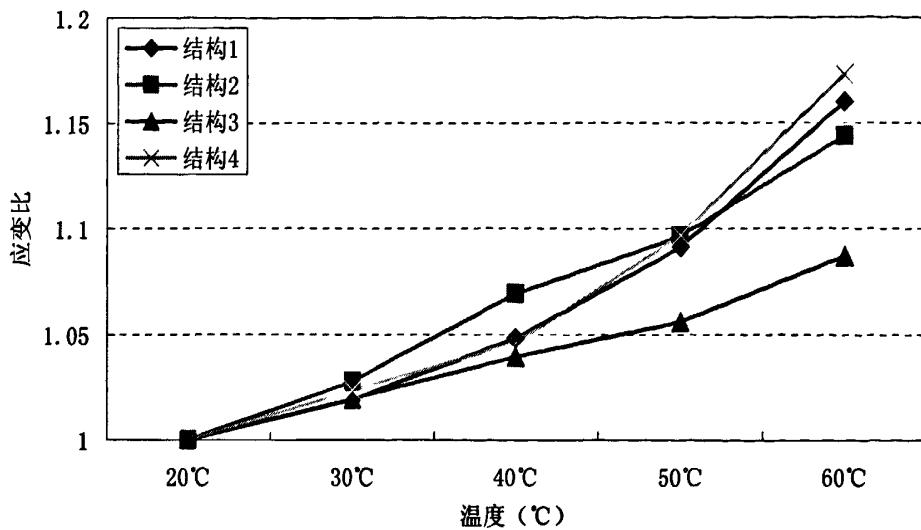


图 4.7 各结构基层层底拉应变随温度变化速率图

4.3 相同温度不同荷载下应变分析

4.3.1 常温条件下应变响应分析

为考查常温下荷载对各结构基层层底纵向应变的影响, 整理 20°C 时不同压强下应变值如表 4.14 和图 4.8 所示:

表 4.14 各结构 20°C 下应变值

结构	层位	压强 (MPa)			
		0.5	0.7	0.9	1.1
结构 1	基层底面	314.5	413.7	500	688
结构 2	基层底面	173	216.1	259.6	361
结构 3	基层底面	164	194	237.8	304
结构 4	基层底面	179.4	205.8	243.8	301

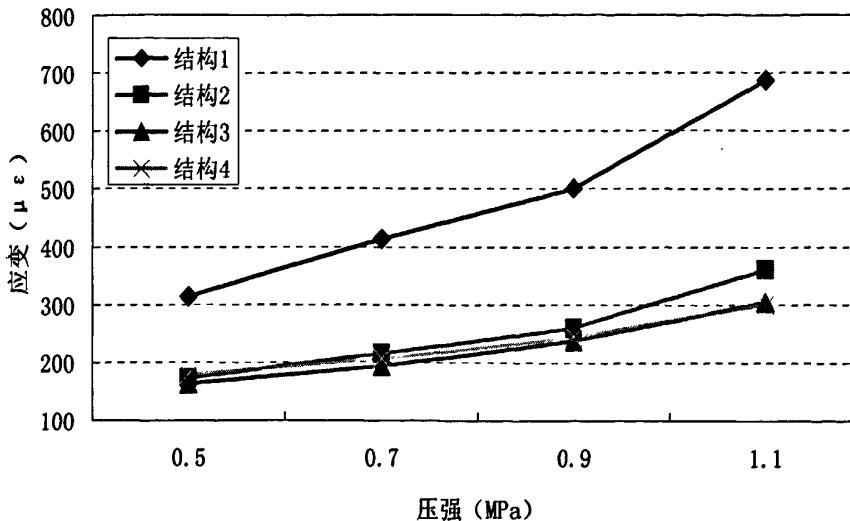


图 4.8 各结构应变随压强变化示意图

由图 4.8 可以看出：

(1) 当荷载不变时，随着半刚性基层厚度的增加，基层层底拉应变逐渐减小，但当结构层厚度增大到一定程度后，其对层底拉应变所起的作用减小：在 20℃、0.5MPa 条件下，当基层厚度增大 40%，层底拉应变减小 45%，基层厚度增大一倍，层底拉应变减小 48%；在 20℃、1.1MPa 条件下、基层厚度增大 40%，层底拉应变减小 48%，基层厚度增大一倍，层底拉应变减小 52.4%；在 20℃、1.3MPa 条件下基层厚度增大 40%，层底拉应变减小 47.5%，基层厚度增大一倍，层底拉应变减小 55.8%；

(2) 在荷载一定条件下，随沥青面层厚度增加，基层层底拉应变减小；

(3) 随着荷载增大，半刚性基层沥青路面的层底拉应变逐渐增大，拉应变的增大与荷载增大基本呈线性关系，其中结构 3 和结构 4 的线性更加明显，说明随着总体厚度的增加，其线性也增大；

(4) 在标准荷载条件下，总厚度一定时，适当增大基层厚度，可以减小基层层底拉应变；重载条件下，结构总体厚度一定时，沥青面层厚度适当增大，可以减小层底拉应变。当荷载为 0.5MPa 时，结构 3 和结构 4，厚度均为 10cm，结构 3 的基层层底拉应变小于结构 4；但当荷载为 1.1MPa 时，结构 4 的基层层底拉应变小于结构 3。

以各结构 20℃、0.5MPa 时的基层层底拉应变变为 1，得出各结构基层层底拉应变随荷载变化速率如图 4.9 所示。

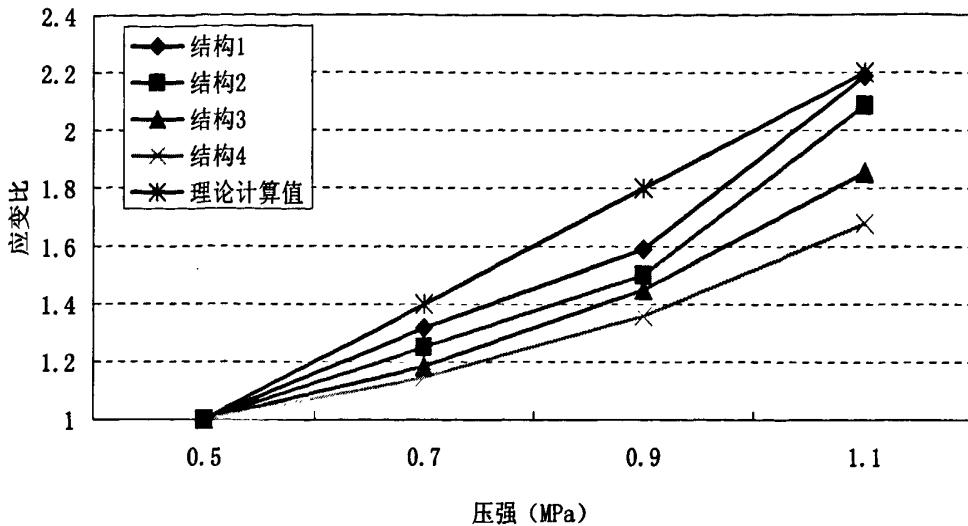


图 4.9 各结构层层底拉应变随荷载变化速率图

由图 4.9 可以看出：

(1) 各结构层底拉应变值虽然都随荷载增大而增大，但增大幅度并不相同。各结构对荷载变化敏感性排序为：结构 1>结构 2>结构 3>结构 4。因此可以得出结论：随着基层厚度增大，半刚性基层层底拉应变的荷载敏感性减小；随着面层厚度增大，半刚性基层层底拉应变的荷载敏感性逐渐减小；在总厚度不变情况下，面层厚度越大，荷载敏感性越低；

(2) 实测值的变化趋势与理论值并不一致：理论值随荷载增大而线性增加，而实测值的增大速度慢于理论计算值。

4.3.2 高温条件下应变响应分析

为考查高温条件下荷载对各结构基层层底纵向应变的影响，整理 60℃时不同压强下应变值如表 4.15 和图 4.10 所示。

以各结构 60℃、0.5MPa 时的基层层底拉应变为 1，得出各结构基层层底拉应变随温度变化速率如图 4.11 所示。

表 4.15 各结构 60℃下应变值

结构	层位	压强 (MPa)			
		0.5	0.7	0.9	1.1
结构 1	基层底面	355	446.1	555	798
结构 2	基层底面	188.1	238	288.9	413
结构 3	基层底面	175.7	207.3	254	330.5
结构 4	基层底面	197.4	257.6	329.1	436.9

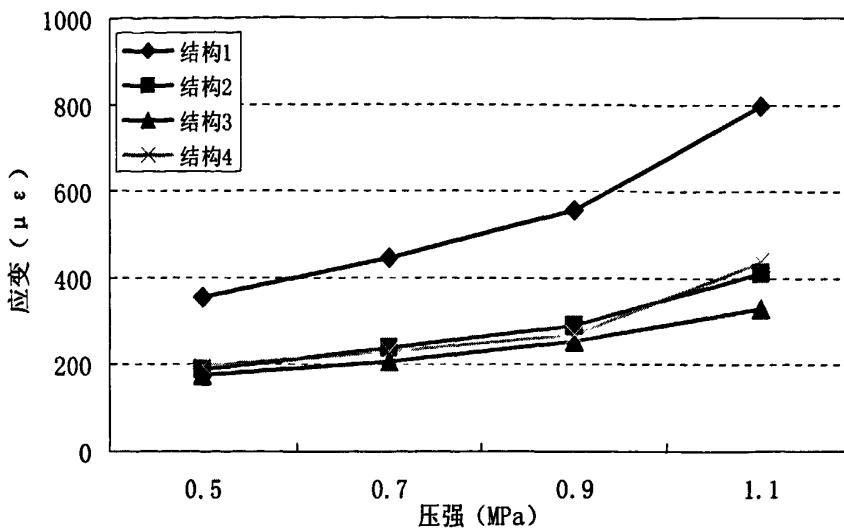


图 4.10 高温条件下各结构应变随压强变化示意图

由图 4.10 可以看出: 60℃时各结构层底应变随荷载变化规律与 20℃时相似, 但也略有不同: 结构 4 的应变值普遍大于结构 3, 说明在高温时路面总体厚度一定的条件下, 面层厚度增大会增大基层层底的应变反应, 因此沥青面层不宜过厚。

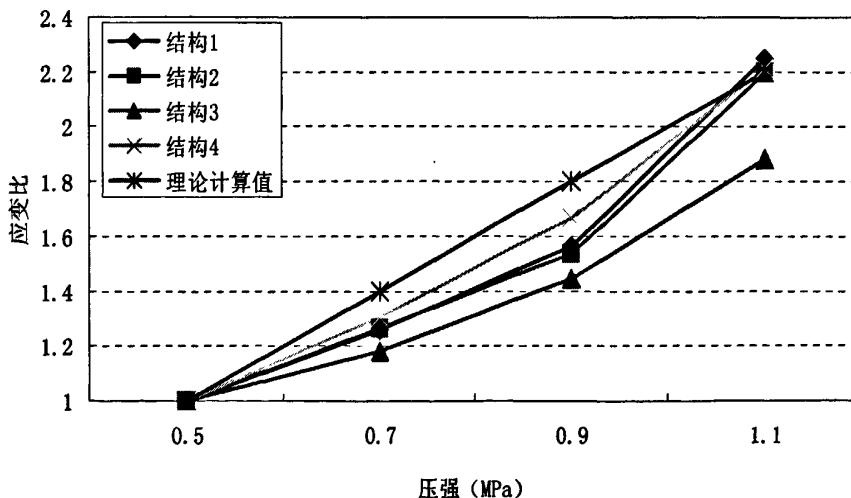


图 4.11 高温条件下各结构层层底拉应变随荷载变化速率图

由图 4.11 可以看出:

(1) 各结构层底拉应变值虽然都随荷载增大而增大, 但增大幅度并不相同。各结构对荷载变化敏感性排序为: 结构 1>结构 4>结构 2>结构 3。因此可以得出结论: 随着基层厚度增大, 半刚性基层层底拉应变的荷载敏感性减小; 随着面层厚度增大, 半刚性基层层底拉应变的荷载敏感性逐渐减小; 高温时, 在总厚度不变情况下, 面层厚度越大,

荷载敏感性越高；

(2) 实测值的变化趋势与理论值并不一致：理论值随荷载增大而线性增加，而实测值的增大速度慢于理论计算值。

4.4 理论值与实测值对比分析

为考查荷载对各结构基层层底纵向应变的影响，整理 20℃时不同荷载作用下应变值数据如表 4.16。

表 4.16 20℃时不同荷载作用下应变值数据

结构	层位	压强 (MPa)			
		0.5	0.7	0.9	1.1
结构 1	基层底面	314.5	413.7	500	688
结构 2	基层底面	173	216.1	259.6	361
结构 3	基层底面	164	194	237.8	304
结构 4	基层底面	179.4	205.8	243.8	301

运用力学计算软件 BISAR3.0 对各结构对荷载的力学响应进行计算，选取基层层底拉应变计算结果如表 4.17 所示。

表 4.17 基层层底拉应变计算值

结构	层位	压强 (MPa)			
		0.5	0.7	0.9	1.1
结构 1	基层底面	71.92	100.69	129.46	158.22
结构 2	基层底面	46.67	65.34	84.01	102.67
结构 3	基层底面	27.85	38.99	50.13	61.27
结构 4	基层底面	47.30	66.22	85.14	104.06

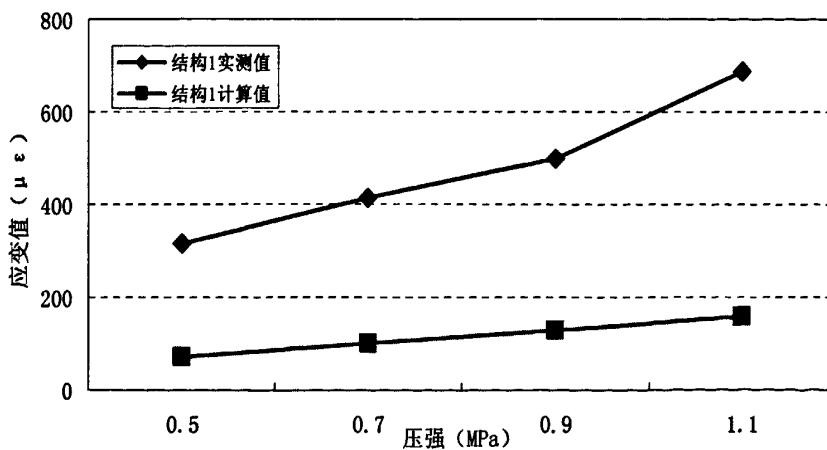


图 4.12 结构 1 基层层底拉应变

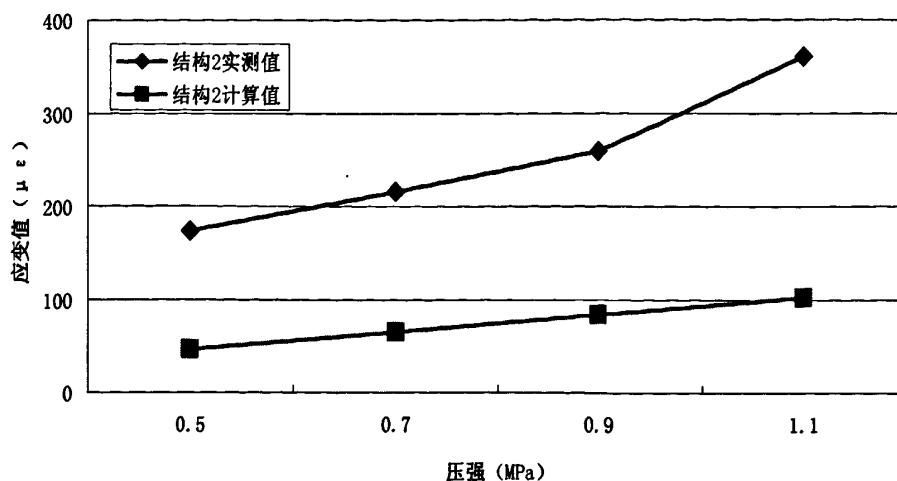


图 4.13 结构 2 基层层底拉应变

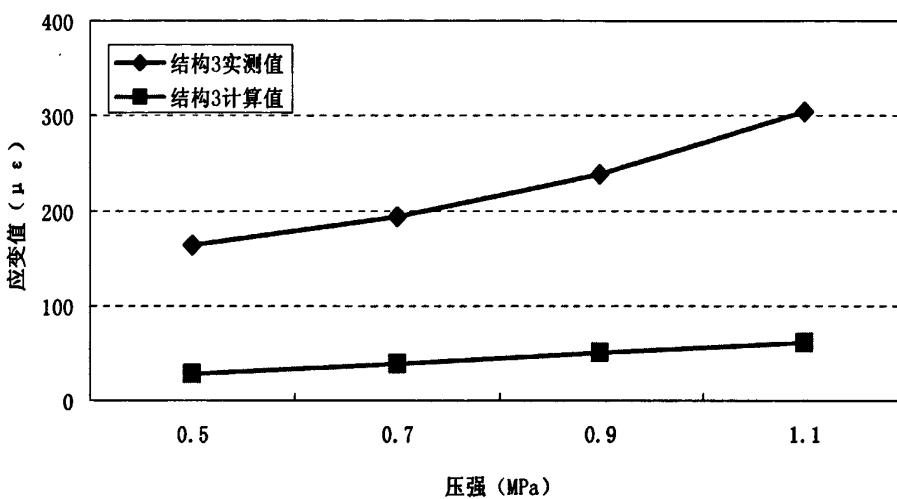


图 4.14 结构 3 基层层底拉应变

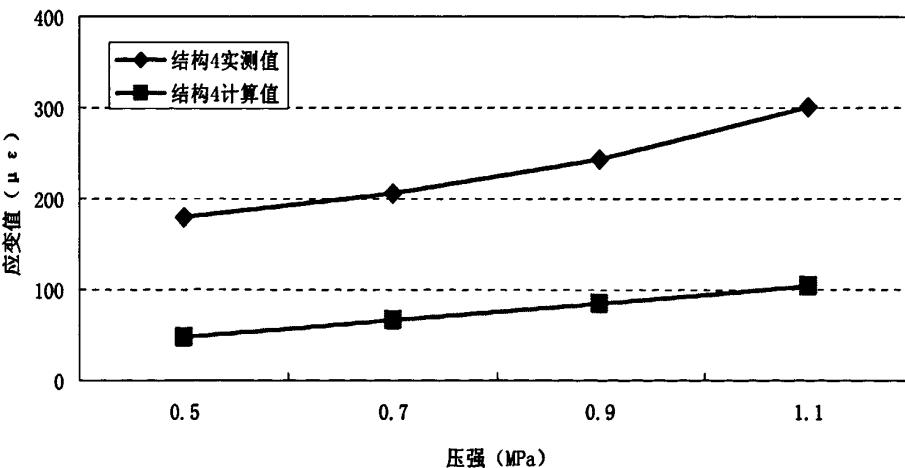


图 4.15 结构 4 基层层底拉应变

将各结构层底拉应变实测值与计算值对比如图 4.12、4.13、4.14、4.15。

由上图可以看出：（1）随着荷载逐渐增大，各结构层底拉应变也随之变大；（2）各结构层底拉应变实测值普遍大于理论值，各结构实测值与理论值之间的比值见表 4.18

表 4.18 各结构实测值与理论值比值

结构	层位	比值			
		0.5 MPa	0.7 MPa	0.9 MPa	1.1 MPa
结构 1	基层底面	4.37	4.11	3.86	4.35
结构 2	基层底面	3.71	3.31	3.09	3.52
结构 3	基层底面	5.89	4.98	4.74	4.96
结构 4	基层底面	3.79	3.11	2.86	2.89

出现这种情况的原因：①本课题中由于实验条件限制，只将基层和面层成型为一个整体，而土基采取高弹橡胶代替，因此土基与其上面的结构并未形成整体，基层底面应变缺少土基的约束，仅依靠试件周围的模具约束试件，无法将土基和其上结构很好的结合在一起，导致应变过大；②本研究按照一定比例将实际路面厚度缩小到一定尺寸来制备试件，但由于客观条件限制，无法将试件路面的平面形状（带状）很好的模拟出来，同时加载设备轮胎与试件之间的接触面积也无法做到按实际路面尺寸缩小；③由于软件计算使用的是种理想的数学模式，只能使用有限的参数，这与实际路面结构的力学模式有差异，且很多时候计算中使用的各参数并非实际路面结构的真实值，这些都给计算带来很多麻烦。同时层间连接状态也对计算结果带来很大的影响，而软件计算中所谓的连接状态仅仅是一种数学模式设定，而非实际的连接状态，因此会导致偏差。

4.5 各结构对温度与荷载综合作用的响应

4.5.1 回归分析

本章主要目的是考查温度和荷载对基层层底纵向拉应变的影响，为比较哪种因素对考察指标的影响更大，使用统计分析软件 spss 对各结构应变进行方差分析，分析结果如表

①结构 1

表 4.19 结构 1 应变值方差分析结果

Dependent Variable: 应变

Source	Type III Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Corrected Model	239148.304(a)	4	59787.076	558.752	0.000
Intercept	2513704.551	1	2513704.551	23492.322	0.000

温度	5247.869	2	2623.934	24.522	0.006
荷载	233900.436	2	116950.218	1092.981	0.000
Error	428.004	4	107.001		
Total	2753280.860	9			
Corrected Total	239576.309	8			

$R^2 = 0.998$ (Adjusted $R^2 = 0.996$)

表 4.19 的方差分析结果表明：结构 1 考查指标受荷载和温度的影响都比较显著，但受荷载大小的影响要明显大于温度，荷载增大时，应变值产生较大波动。

②结构2

表4. 20 结构2应变值方差分析结果

Dependent Variable:应变

Source	Type III Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Corrected Model	68866.407(a)	4	17216.602	118.284	0.000
Intercept	707617.440	1	707617.440	4861.568	0.000
温度	1949.547	2	974.773	6.697	0.053
荷载	66916.860	2	33458.430	229.871	0.000
Error	582.213	4	145.553		
Total	777066.060	9			
Corrected Total	69448.620	8			

$R^2 = 0.992$ (Adjusted $R^2 = 0.983$)

表 4.20 的方差分析结果表明：结构 2 考查指标受荷载大小影响大，荷载增大时，各指标产生较大波动。

③结构 3

表4. 21 结构3应变方差分析结果

Dependent Variable: 应变

Source	Type III Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Corrected Model	33432.233(a)	4	8358.058	549.270	0.000
Intercept	532900.000	1	532900.000	35020.811	0.000
温度	511.227	2	255.613	16.798	0.011
荷载	32921.007	2	16460.503	1081.742	0.000
Error	60.867	4	15.217		
Total	566393.100	9			
Corrected Total	33493.100	8			

$R^2 = 0.998$ (Adjusted $R^2 = 0.996$)

表 4.21 的方差分析结果表明：结构 3 考查指标受荷载和温度的影响都比较显著，

但受荷载大小的影响要明显大于温度, 荷载增大时, 应变值产生较大波动。

④结构 4

表4.22 结构4应变值方差分析结果

Dependent Variable: 应变

Source	Type III Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Corrected Model	26747.404(a)	4	6686.851	331.808	0.000
Intercept	578258.854	1	578258.854	28693.754	0.000
温度	1038.829	2	519.414	25.774	0.005
荷载	25708.576	2	12854.288	637.842	0.000
Error	80.611	4	20.153		
Total	605086.870	9			
Corrected Total	26828.016	8			

$R^2=0.997$ (Adjusted $R^2=0.994$)

表 4.22 的方差分析结果表明: 结构 4 考查指标受荷载和温度的影响都比较显著, 但受荷载大小的影响要明显大于温度, 荷载增大时, 应变值产生较大波动。

4.5.2 半刚性基层沥青路面响应模型的构建

影响路面应力应变响应指标的因素很多, 有外界因素, 如温度、荷载等; 也有内部, 即路面结构本身的结构参数, 如面层厚度和基层厚度等。因此, 在考察路面响应指标的时候要将这些因素都考虑在内, 进行全面分析。本研究中影响半刚性基层沥青路面各层层底纵向拉应变响应的主要有四个因素: 温度、路面压强、面层厚度和基层厚度。路面响应模型的构建, 就是以现有观测数据为基础, 综合考虑各种影响因素(变量), 形成路面响应指标的预估模型。

根据现场实测的应变数据, 构建半刚性基层沥青路面基层层底纵向拉应变预估模型。经过比较和分析, 得出以下模型:

$$\varepsilon_L = e^{(6.577 - 0.262 \cdot h_1 - 0.130 \cdot h_2 + 0.0038 \cdot t + 0.791 \cdot p)} \quad (4-1)$$

其中 $R^2=82.94\%$, Adjusted $R^2=84.24\%$, $F=43.14$

式中: ε_L —纵向应变, $\mu\epsilon$;

t —温度, $^{\circ}\text{C}$;

p —压强, MPa;

h_1 —面层厚度;

h_2 —基层厚度。

由公式 4-1 可以看出, 面层厚度和基层厚度的系数为负且面层系数大于基层系数, 说明基层层底拉应变与面层厚度和基层厚度呈负相关, 而且面层厚度对层底纵向拉应变的影响程度要大于基层厚度; 温度和压强的系数为正, 说明基层层底纵向拉应变与温度和压强大小呈正相关; 压强系数要大于其他参数的系数, 说明压强对层底纵向拉应变的影响要大于其他因素。

4.6 本章小结

通过对改变各结构厚度形成的 4 种不同类型的半刚性基层路面结构进行不同温度和荷载条件下的静载试验测量结果分析, 得出结论如下:

1、温度、荷载不变时, 基层层底拉应变随着半刚性基层和沥青面层厚度的增加而减小, 但当基层厚度增大到一定程度后, 其对层底拉应变所起的作用减小;

2、随着温度升高, 各结构层底拉应变逐渐增大, 而且温度越高, 应变增大的速度越快, 在总厚度不变情况下, 基层比例越大, 温度敏感性越低;

3、随着荷载增大, 半刚性基层沥青路面的层底拉应变逐渐增大; 半刚性基层层底拉应变的荷载敏感性随着基层厚度和面层厚度的增大而减小; 在总厚度不变情况下, 面层厚度越大, 荷载敏感性越低;

4、总体厚度一定时, 适当增大面层厚度, 可以减小基层层底拉应变; 但在高温重载条件下, 面层比例增加会带来基层层底拉应变的增大。

5、各结构层底拉应变实测值普遍大于理论值, 实测值普遍在理论值的 3~6 倍左右, 而且实测值与理论值的比值随结构厚度增大而减小, 原因可能是由于试验条件限制, 无法很好模拟出实际路面基层层底的受力状态; 实测值的变化趋势与理论值并不一致: 理论值随荷载增大而线性增加, 实测值并非线性增长, 而且增大幅度低于理论值。

6、各结构考查指标受荷载和温度的影响都比较显著, 但受荷载大小的影响要明显大于温度, 荷载增大时, 应变值产生较大波动。

综上所述, 适当增大半刚性基层厚度和沥青面层厚度, 可以有效改善基层层底受力状况, 但基层厚度增大到一定程度后, 改善效果减小; 同时总体厚度一定时, 面层厚度的增大也会带来温度敏感性增大的结果, 设计时应予考虑。

第五章 三种路面结构应变对比分析

由于半刚性基层材料不可避免的收缩开裂，交通量及车辆轴载的不断增加导致半刚性基层沥青路面常常达不到设计年限就出现了早期损坏，需要进行路面维修，早期损坏造成的路面维修不仅增加道路的建设和运营成本，而且造成交通的拥堵，产生不良的社会影响。从寿命周期费用分析的角度来看，由于早期损坏造成的路面维修是非常不经济的。

针对半刚性材料路面早期损坏严重的情况，国内外学者提出了很多解决办法。英国在 40-60 年代的观测发现，使用半刚性材料铺筑的路面，由于干缩的影响，使得路面的有效使用寿命降低，而采用沥青稳定基层的路面使用性能令人满意。面对我国半刚性基层路面出现的问题，考虑沥青稳定材料作基层具有现实意义。如北京首都机场高速公路(沥青层厚度 20cm)、京津塘高速公路(5cm+6cm 沥青面层+12cm 沥青碎石) 和广深高速公路(22cm 沥青混凝土+10cm 沥青碎石)。广深高速通过大交通量荷载使用后的检测结果表明，除使用功能有所衰减外，其整体使用性能较好，10 年后损坏基本限制在表面层，体现出了较大的经济、社会效益。虽然这些路面采用了较厚的沥青层，没有任何迹象表明这些高速公路结构强度不足；车辙并不大；主要裂缝表现为表面裂缝，深度平均为 4.8cm。虽已运行了 10-15 年，但以目前状态来看，使用 20-25 年基本无需结构性大修^[31]。

采用具有一定厚度和严格级配要求的优质级配碎石作为过渡层^[10]，既可充分发挥半刚性基层沥青路面高强度的优点，又在很大程度上克服了半刚性基层的反射裂缝。

针对以上两种改良半刚性基层沥青路面结构的思路，本章选定三种具有半刚性基层的沥青路面进行试验对比分析研究，三种典型结构包括：传统半刚性基层沥青路面、具有级配碎石过渡层的半刚性基层沥青路面、混合式(沥青碎石为上基层，半刚性材料为下基层) 沥青路面。

5.1 试验准备

5.1.1 结构参数

将实际路面各结构层按照 7.5: 1 等比例缩小为室内试验用试件，其参数如表 5.1~表 5.3 所示，层间接触条件设定为完全连续。

表 5.1 结构 1 结构参数

路面结构层	E(MPa)	厚度 (cm)	泊松比
沥青面层	1200	2	0.25
半刚性基层	1500	5	0.25
半刚性底基层	700	3	0.25
土基	50	5	0.35

表 5.2 结构 2 结构参数

路面结构层	E(MPa)	厚度 (cm)	泊松比
沥青面层	1200	2	0.25
级配碎石过渡层	500	2	0.25
半刚性基层	1500	4	0.25
半刚性底基层	700	4	0.25
土基	50	5	0.35

表 5.3 结构 3 结构参数

路面结构层	E(MPa)	厚度 (cm)	泊松比
沥青面层	1200	2	0.25
沥青碎石上基层	1000	2	0.25
半刚性基层	1500	4	0.25
半刚性底基层	700	4	0.25
土基	50	5	0.35

5.1.2 试件成型

本试验所用原材料与上一章试验相同，故原材料性质可见 4.1.2，在此不再赘述。

本试验需要成型 3 种结构：传统半刚性基层沥青路面、级配碎石基层沥青路面、沥青稳定碎石基层沥青路面。试件成型方法与前一章试验基本相同，都是分层碾压成型，然后将上层结构置于高碳橡胶垫之上形成整体结构。

半刚性基层沥青路面，半刚性材料底基层成型后，将应变传感器置于原定位置，做好防护，然后继续成型半刚性基层，基层碾压完毕后检测传感器是否存活，如果传感器失效则重新成型试件，如果传感器存活则放入养生室保湿养生 3 个月，养生期结束后重新检查传感器，如果存活就喷洒粘层油，粘层油充分渗透后铺筑沥青面层。

级配碎石基层沥青路面，半刚性材料底基层成型后，将应变传感器置于原定位置，做好防护，然后继续成型半刚性基层，基层碾压完毕后检测传感器是否存活，如果传感器失效则重新成型试件，如存活则放入养生室保湿养生 3 个月，养生期结束后重新检查传感器，如果存活就铺筑级配碎石过渡层，在过渡层碾压成型完毕以后喷洒粘层油，粘层油充分渗透后铺筑沥青面层。

沥青稳定碎石基层沥青路面，半刚性材料底基层成型后，将应变传感器置于原定位位置，做好防护，然后继续成型半刚性基层，基层碾压完毕后检测传感器是否存活，如果传感器失效则重新成型试件，如存活则放入养生室保湿养生 3 个月，养生期结束后重新检查传感器，如果存活就铺筑沥青稳定碎石过渡层，在过渡层碾压成型完毕以后喷洒粘层油，粘层油充分渗透后铺筑沥青面层。

5.1.3 传感器埋设

在 4.1.3 中，论述了为何要选取基层层底纵向拉应变作为测试指标。本章研究对象也属于半刚性基层结构，因此要选取基层层底纵向拉应变作为测试指标，所以需要在基层层底埋设应变计。

基层层底应变传感器的埋设于底基层碾压成型完毕以后进行，埋设与底基层顶面之上，位置如图 5.1 所示。埋设之前，先将欲埋位置的底基层刨出一个小坑，这样做的原因是应变片位于基底材料的下方，碾压基层材料时如果不做处理应变片会受到底基层材料的挤压而导致破坏，刨出的小坑不易过大，否则会影响结构的整体性，比应变片的实际尺寸稍大即可，深度 5mm 为宜。坑刨好后，将应变传感器置于预定位置，用热沥青将其固定，防止碾压过程中的移位导致破坏。传感器埋设固定效果如图 5.2 所示。

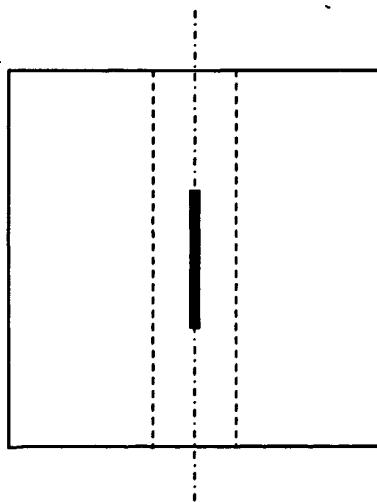


图 5.1 基层和底基层传感器安装平面位置示意图

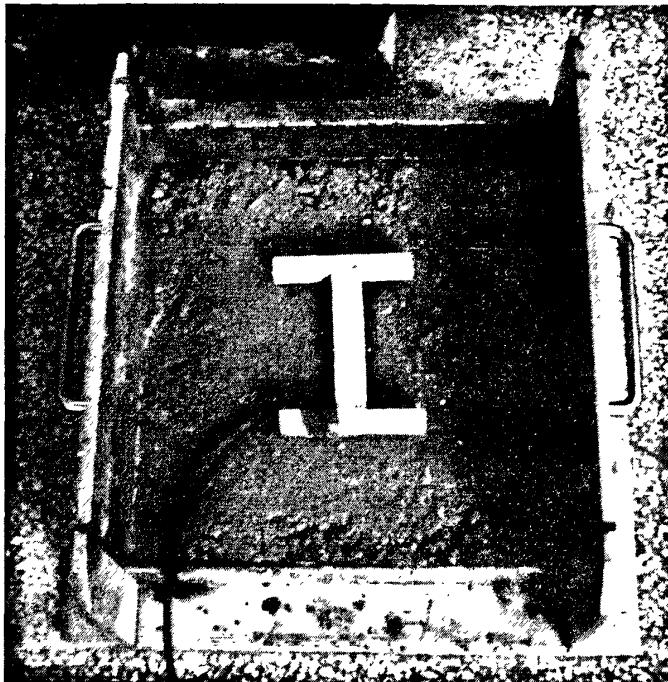


图 5.2 基层底面传感器安装固定视图

5.1.4 试验方案及部分数据结果

1、试验方案

拉应变采集分静态、动态两种不同方式。静态方式时，将车辙仪轮胎停在加载位置，车轮荷载可以当作静态荷载；动态方式时，车轮荷载以加速加载的速度行走，车轮荷载当作动态荷载。

(1) 静载测试：为考查各种结构对温度与荷载变化的反应，对其进行了不同温度、不同荷载条件下的加载试验，加载温度分别控制在 20°C 、 30°C 、 40°C 、 50°C 、 60°C ，根据第三章的分析，三种结构的试件分别在 0.49 MPa 、 0.52 MPa 和 0.51 MPa 下能够较好的模拟出实际路面结构在标准荷载下的应变反应，同时为了使三种试件的应变反应更具可比性，将三种结构的正常荷载确定为 0.5 MPa ，重载荷载采用 0.7 MPa 、 0.9 MPa 、 1.1 MPa ，车辙仪加载位置位于车辙板中心处，加载后测试基层底面和底基层底面的静应变，每种温度和荷载组合均进行了 3 次重复试验，取其平均值进行研究。

(2) 动载测试：为考查各结构应变随加载次数变化规律，对其进行了控温控压条件下的动载应变测试，对 3 种结构分别进行了 20°C 、 0.5 MPa ， 20°C 、 1.1 MPa ， 60°C 、 0.5 MPa 和 60°C 、 1.1 MPa 条件下的加载试验。车辙仪加载速度为每小时 2520 次，加载时间 8 小时，荷载作用次数为 20160 次左右，加载过程中，每隔一小时采集一次应变数

据, 每次 5 分钟左右, 采样频率 20 赫兹。

数据采集如图 5.3 所示。

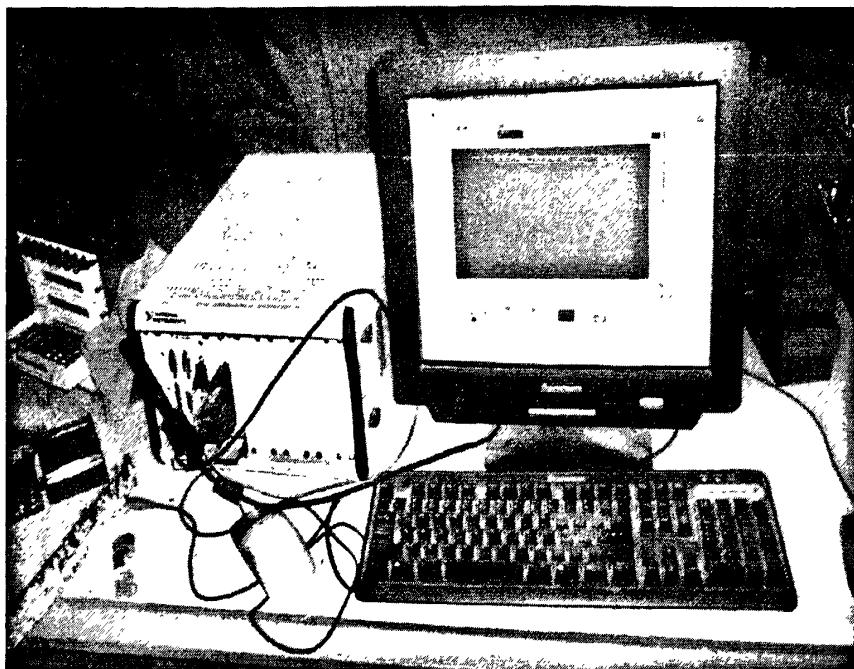


图 5.3 数据采集设备图

2、数据结果

加载测试后测得的静载数据结果如下

表 5.4 结构 1 静载测试应变数据

压强 (Mpa)	应变 ($\mu\epsilon$)				
	20°C	30°C	40°C	50°C	60°C
0.5	43.6	44.1	45.3	46.8	49.9
0.7	54.7	56.2	58.7	62.9	67
0.9	68.5	69.2	71.1	73.5	78.3
1.1	81.0	81.9	84.1	86.9	92.7

表 5.5 结构 2 静载测试应变数据

压强 (Mpa)	应变 ($\mu\epsilon$)				
	20°C	30°C	40°C	50°C	60°C
0.5	41.3	41.8	43.3	45.1	47.4
0.7	52.2	53.1	54.9	56.6	59.1
0.9	62.0	62.7	65.0	67.7	71.1
1.1	74.3	75.2	77.9	81.2	85.3

表 5.6 结构 3 静载测试应变数据

压强 (Mpa)	应变 ($\mu\epsilon$)				
	20℃	30℃	40℃	50℃	60℃
0.5	42.3	46.4	49.0	54.0	59.2
0.7	53.1	57.3	61.9	66.3	72.9
0.9	65.1	71.5	75.5	83.2	91.2
1.1	77.41	84.91	98.82	112.34	136.23

5.2 静载数据分析

5.2.1 相同荷载不同温度条件下应变分析

(1) 正常荷载条件下应变响应分析

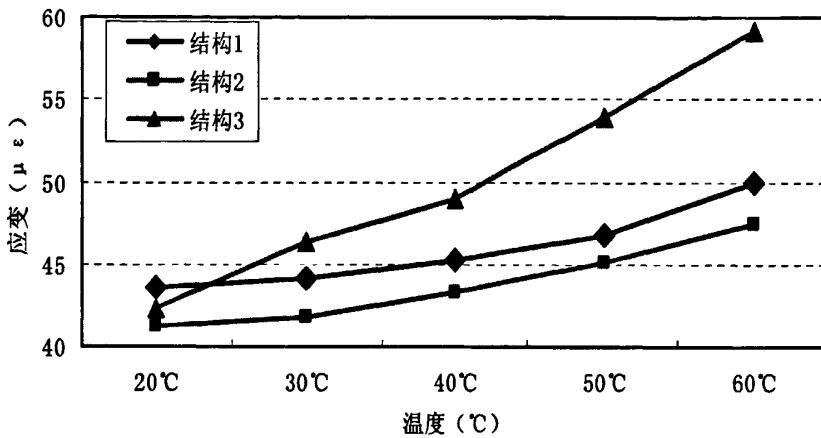


图 5.4a 荷载为 0.5MPa 时基层底面应变值变化图

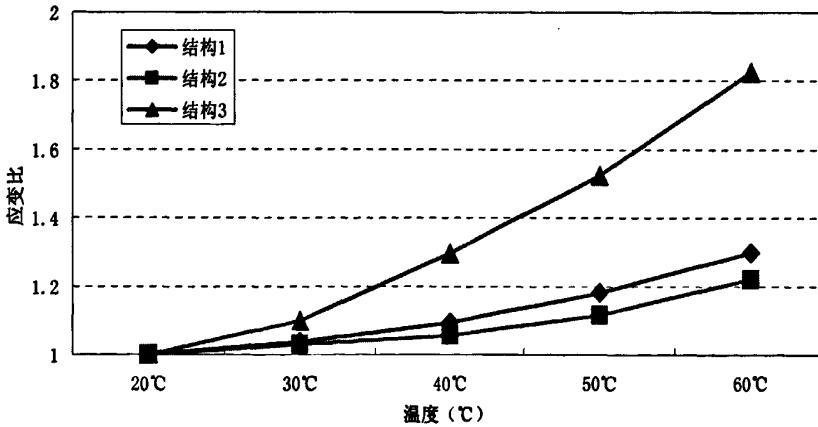


图 5.4b 荷载为 0.5MPa 时基层底面应变值增大速度图

图 5.4a 为 3 种结构在标准荷载作用下, 不同温度条件时的基层层底纵向应变值。

由图中看以看出:

- ① 在 20℃ 条件下, 各结构基层层底拉应变排序为: 结构 1>结构 3>结构 2;

② 随着温度升高, 各结构基层层底拉应变逐渐增大, 在 40℃之前, 各结构应变增大趋势较缓; 40℃之后, 应变增大明显加快。

③ 在 60℃高温条件下, 各结构底基层层底拉应变排序: 结构 3>结构 1>结构 2

图 5.4b 是 3 种结构在标准荷载作用下, 基层层底应变值随温度变化速度图, 由图中看以看出: 各结构应变值虽然都随温度升高而增大, 但增大速度并不相同。结构 3 增速最大, 结构 1 和结构 2 基本相同, 各结构对温度升高敏感性排序为: 结构 3>结构 1>结构 2。

(2) 重载条件下应变响应分析

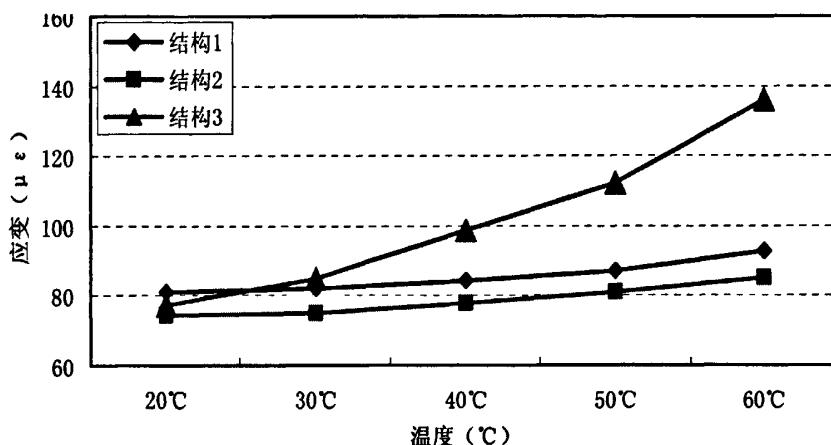


图 5.5a 荷载为 1.1MPa 时基层底面应变变化图

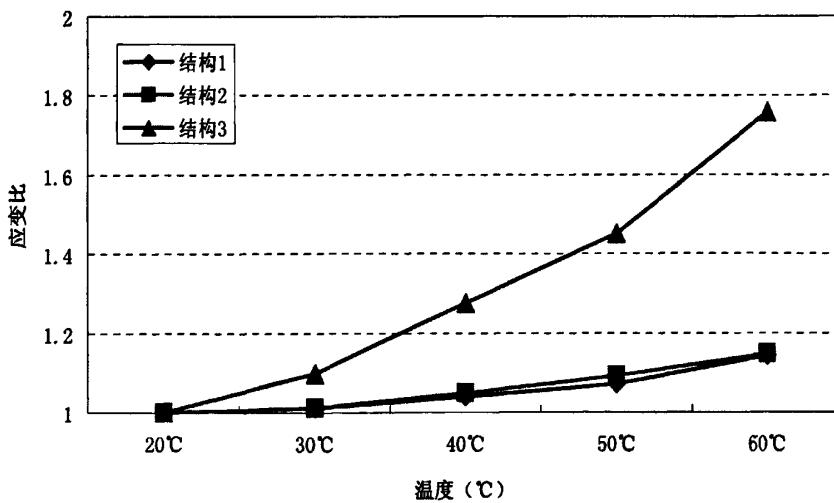


图 5.5b 荷载为 1.1MPa 时基层底面应变值增大速度图

图 5.5a 是 3 种结构在重载作用下, 不同温度条件时的静态应变。作用荷载为 1.1MPa, 路面结构温度为 20℃、30℃、40℃、50℃、60℃。

① 在 20℃条件下, 各结构基层层底拉应变排序为: 结构 1>结构 3>结构 2;

- ② 随着温度升高, 各结构基层层底拉应变逐渐增大, 在 40℃之前, 各结构应变增大趋势较缓; 40℃之后, 应变增大明显加快;
- ③ 在 60℃高温条件下, 各结构底基层层底拉应变排序: 结构 3>结构 1>结构 2。

图 5.5b 是 3 种结构在重载作用下, 基层层底应变值随温度变化速度图。由图中可以看出: 各结构应变值虽然都随温度升高而增大, 但增大幅度并不相同。结构 3 增大幅度最大, 结构 1 和结构 2 基本相同, 各结构对温度升高敏感性排序为: 结构 3>结构 2>结构 1;

5.2.2 相同温度不同荷载下应变分析

(1) 常温下应变响应分析

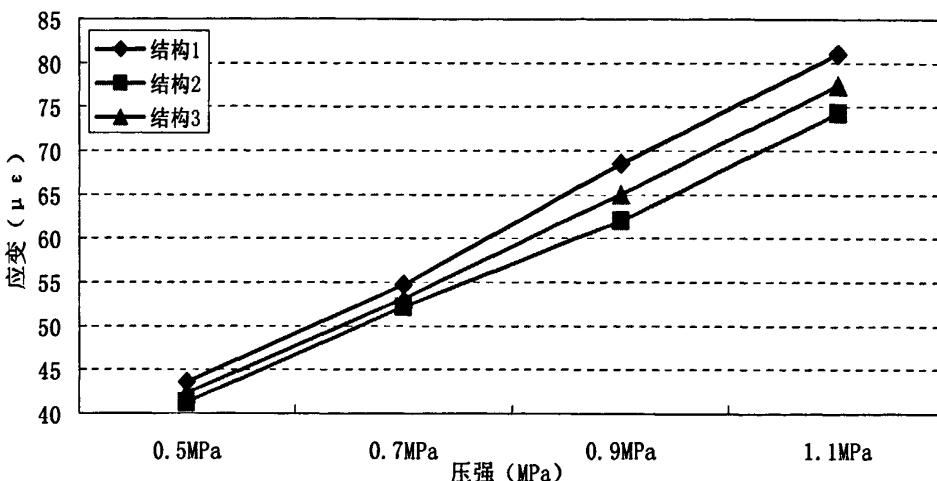


图 5.6a 温度为 20℃时基层底部应变

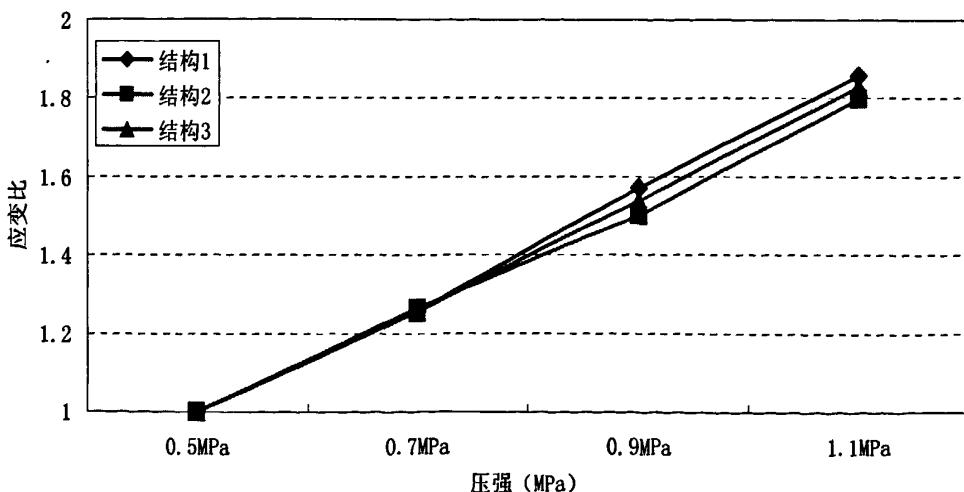


图 5.6b 20℃时底基层底部应变随荷载增大速度图

图 5.6a 为 3 种结构在正常温度下, 不同荷载条件时的静态应变。加载时环境温度控制为 20℃, 荷载为 0.5MPa、0.7MPa、0.9MPa、1.1MPa。由图中可以看出: 各结构层底拉应变随着荷载增大而增大, 应变与荷载变化基本呈线性关系; 结构 1 与结构 2 基层层底拉应变明显高于结构 3。

图 5.6b 反映出各结构底基层层底拉应变随荷载增大速度图, 从图中可以看出, 0.7MPa 之前, 各结构应变值随荷载变化速度相同, 在 0.7MPa 之后, 应变增大速度发生了分化: 结构 1>结构 3>结构 2, 这说明, 在 20℃下, 半刚性基层沥青路面结构对荷载变化的敏感性更高, 较小的荷载变化能够产生相对较大的基层层底拉应变, 级配碎石结构对荷载变化的敏感性最低。

(2) 高温下应变响应分析

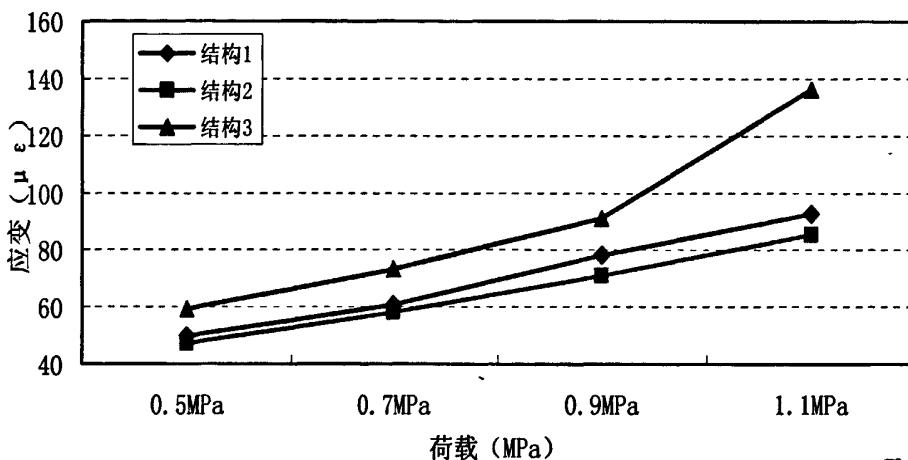


图 5.7a 60℃基层底部应变图

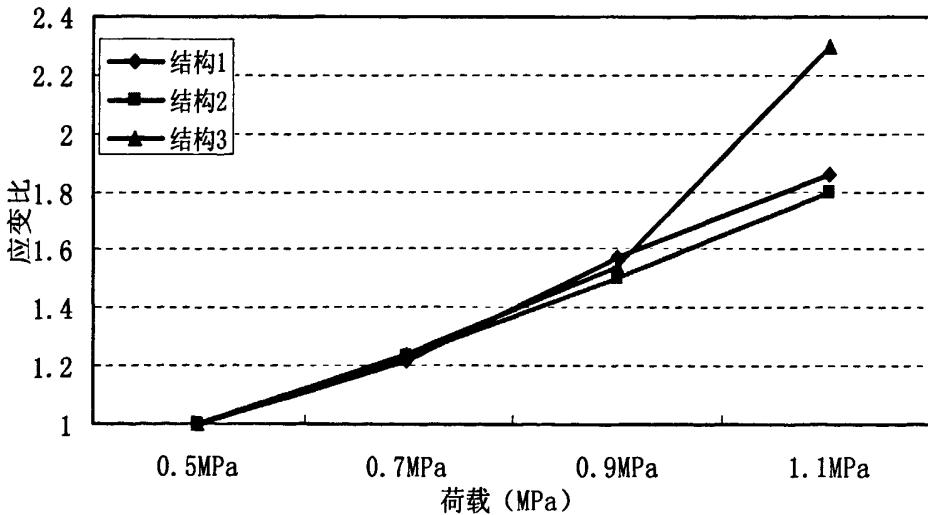


图 5.7b 60℃基层底部应变随荷载增大速度图

图 5.7a 是 3 种结构在高温下, 不同荷载条件时的静态应变。加载时环境温度控制为 60℃, 荷载为 0.5MPa、0.7MPa、0.9MPa、1.1MPa。由图中可以看出: 各结构层底拉应变随着荷载增大而增大, 应变与荷载变化基本呈线性关系; 结构 1 与结构 2 基层层底拉应变明显高于结构 3。

应变随着荷载增大而增大，应变与荷载变化基本呈线性关系；各结构层底拉应变大小排序与常温时有了不同，在不同的荷载水平下，层底拉应变大小排序为结构 3>结构 1>结构 2；基层层底拉应变与理论计算值接近。

图 5.7b 反映出各结构层底拉应变随荷载增大速度图，从图中可以看出：0.7MPa 之前，各结构应变值随荷载变化速度相同，在 0.7MPa 之后，应变增大速度发生了分化：结构 3>结构 1>结构 2，这说明，在高温下，沥青稳定碎石基层沥青路面结构对荷载变化的敏感性更高，较小的荷载变化能够产生相对较大的基层层底拉应变，级配碎石结构对荷载变化的敏感性最低。尤其值得注意的是，当荷载从 0.9MPa 增大到 1.1MPa 时，结构 3 的应变增大速度明显加快，这可能时因为高温时沥青稳定碎石的模量降低，在重载的作用下发生流动变形所致。

5.2.3 三种结构温度与荷载综合分析

(1) 方差分析

本章主要目的是考查温度和荷载对基层层底纵向拉应变的影响，为比较哪种因素对考察指标的影响更大，使用统计分析软件 spss 对各结构应变进行方差分析，分析结果如表 5.7、表 5.8 和表 5.9。

①结构 1

表5.7 结构1应变值方差分析结果

Dependent Variable:应变

Source	Type III Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Corrected Model	4184.837(a)	6	697.473	569.831	0.000
Intercept	68939.041	1	68939.041	56322.746	0.000
温度	167.476	4	41.869	34.207	0.000
荷载	4017.361	2	2008.681	1641.079	0.000
Error	9.792	8	1.224		
Total	73133.670	15			
Corrected Total	4194.629	14			

$R^2 = 0.998$ (Adjusted $R^2 = .996$)

方差分析结果表明：结构 1 考查指标受荷载和温度的影响都比较显著，但受荷载大小的影响要明显大于温度，荷载增大时，应变值产生较大波动。

②结构2

表5.8 结构2应变值方差分析结果

Dependent Variable: 应变

Source	Type III Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Corrected Model	3282.819(a)	6	547.136	526.177	0.000
Intercept	59069.713	1	59069.713	56806.904	0.000
温度	155.197	4	38.799	37.313	0.000
荷载	3127.621	2	1563.811	1503.905	0.000
Error	8.319	8	1.040		
Total	62360.850	15			
Corrected Total	3291.137	14			

 $R^2=0.997$ (Adjusted $R^2=0.996$)

方差分析结果表明：结构 2 考查指标受荷载和温度的影响都比较显著，但受荷载大小的影响要明显大于温度，荷载增大时，应变值产生较大波动。

③结构 3

表5.9 结构3应变值方差分析结果

Dependent Variable: 应变

Source	Type III Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Corrected Model	8840.552(a)	6	1473.425	18.547	0.000
Intercept	87721.031	1	87721.031	1104.195	0.000
温度	2138.192	4	534.548	6.729	0.011
荷载	6702.360	2	3351.180	42.183	0.000
Error	635.547	8	79.443		
Total	97197.131	15			
Corrected Total	9476.100	14			

 $R^2=0.933$ (Adjusted $R^2=0.883$)

方差分析结果表明：结构 3 考查指标受荷载和温度的影响都比较显著，但受荷载大小的影响要明显大于温度，荷载增大时，应变值产生较大波动。

(2) 力学响应模型的构建：

影响路面应力应变响应指标的因素很多,如温度、轴载、荷载位置、车速等，要全面分析和比较不同结构的路面响应特点，需要将各种主要影响因素考虑在内。本研究中主要考察温度和路面荷载对应变响应指标的影响，因此建模自变量以温度和荷载为主。路面响应模型的构建，就是以现有观测数据为基础，综合考虑各种影响因素（变量），形成路面响应指标的预估模型，最后再通过实际测量数据进一步验证。

根据现场实测应力应变数据，构建沥青层底纵向应变与温度和荷载的关系式。经过比

较和分析,采用以下模型进行数据拟合:

$$\varepsilon_L = e^{(a \cdot p + b \cdot t + c)} \quad (5-1)$$

式中: ε_L —纵向应变, $\mu\epsilon$;

t —温度, $^{\circ}\text{C}$;

p —压强, MPa;

a , b , c —常数。

经过对比分析,分别得到传统半刚性基层沥青路面结构基层层底纵向应变响应预估模型公式 5.2 所示:

$$\varepsilon_L = e^{(0.0775 \cdot p + 0.00376 \cdot t + 3.27)} \quad (5.2)$$

其中 $R^2=98.68\%$, $F=708$;

得到具有级配碎石过渡层的半刚性基层沥青路面基层层底纵向应变响应预估模型如公式 5.3 所示:

$$\varepsilon_L = e^{(0.0728 \cdot p + 0.00342 \cdot t + 3.26)} \quad (5.3)$$

其中 $R^2=98.28\%$, $F=542$;

得到混合式(沥青碎石为上基层, 半刚性材料为下基层) 沥青路面基层层底纵向应变响应预估模型如公式 5.4 所示:

$$\varepsilon_L = e^{(0.0849 \cdot p + 0.0096 \cdot t + 3.05)} \quad (5.4)$$

其中 $R^2=93.86\%$, $F=146$ 。

5.3 动载测试结果分析

动载测试过程中, 每小时测一次动态数据, 每次 5 分钟, 频率 20 Hz, 因此每次数据采集得到 6000 个数据, 从中选取最大值作为该次采集的应变峰值。对各次采集的应变峰值做出分析如下:

(1) 0.5Mpa, 20°C下应变分析

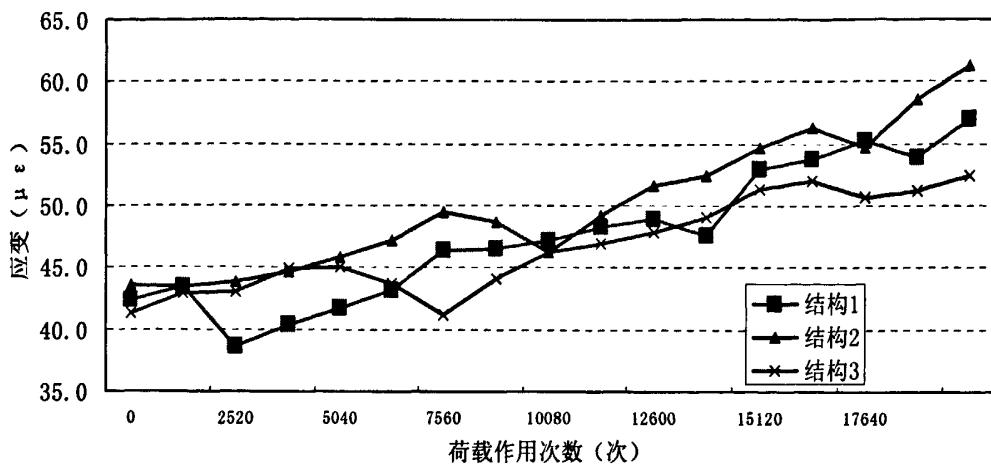


图 5.8 0.5MPa、20℃下基层拉应变

图 5.8 基层拉应变试验结果表明, 在荷载 0.5MPa, 温度 20℃条件下, 荷载作用次数从零次到 20000 次, 各结构基层层底纵向拉应变变化平稳, 仅从零次加载时的 $40\mu\epsilon$ 增大到 $50\sim60\mu\epsilon$, 说明在荷载 0.5MPa, 温度 20℃条件下加载两万次时, 各结构力学性能未发生明显改变。

各结构加载末应变与零次加载时应变比值分别为: 1.35、1.40、1.27, 说明在 0.5MPa、20℃条件下, 各结构对荷载作用次数反应的敏感程度为结构 2>结构 1>结构 3。

(2) 1.1MPa, 20℃下应变分析

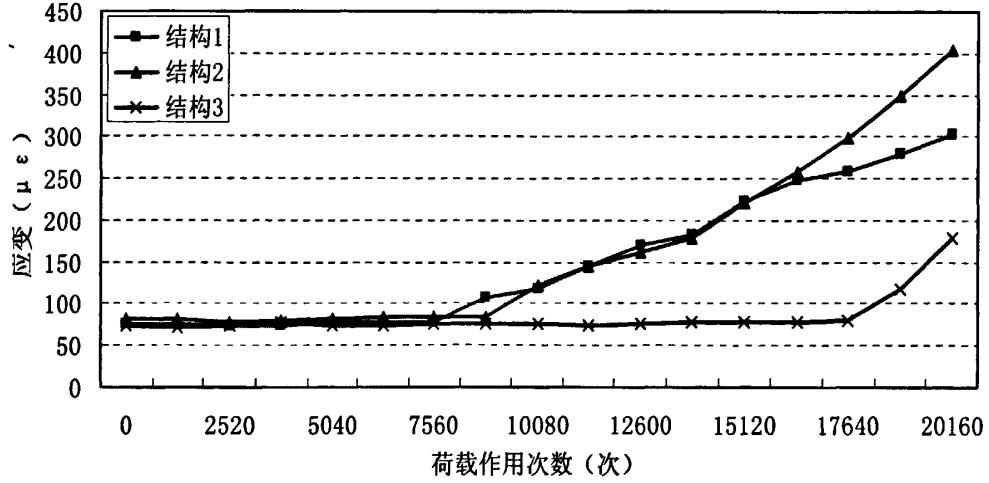


图 5.9 1.1MPa、20℃下基层拉应变

图 5.9 为荷载增大后基层的拉应变试验结果, 在荷载 1.1MPa, 温度 20℃条件下, 各结构基层层底纵向拉应变变化与 0.5MPa、20℃时并不相同: ①结构 1 从零次加载到 7560 次加载拉应变无较大变化, 但在 8800 次时拉应变发生较大变化从原来的 $78.2\mu\epsilon$ 增大到加载 20000 次时的 $302.4\mu\epsilon$, 观察发现路面表面出现微小裂缝; ②结构 2 从零次加载到 8700 次加载拉应变无较大变化, 但在 10000 次时拉应变发生较大变化从原来的

84.5 $\mu\epsilon$ 增大到加载 20000 次时的 402.7 $\mu\epsilon$ ，观察发现路面表面出现微小裂缝；③结构 3 从零次加载到 17640 次加载拉应变无较大变化，但在 18900 次时拉应变发生较大变化从原来的 79.9 $\mu\epsilon$ 增大到加载 20000 次时的 179.3 $\mu\epsilon$ 。这说明：①温度不变，荷载增大，各路面结构不仅瞬时应变增大，其疲劳性能也相应发生变化，由 0.5MPa、20℃时加载 20000 次外观无显著变化到 1.1MPa、20℃时加载 20000 次之前出现细小裂缝②在常温重载条件下，级配碎石基层路面结构疲劳性能略优于传统半刚性基层，沥青稳定碎石基层路面结构的疲劳性能要好于前两种结构

(3) 0.5MPa, 60℃下应变分析

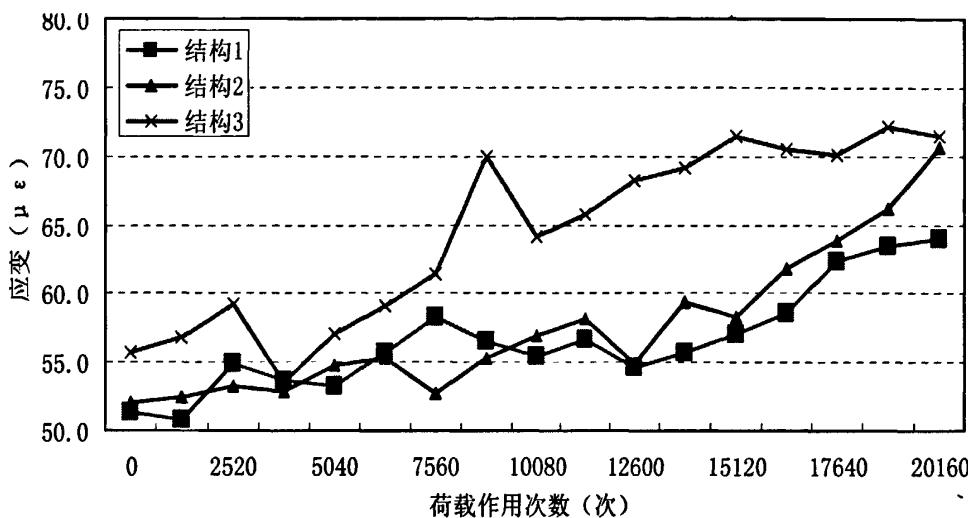


图 5.10 0.5MPa、60℃下基层拉应变

图 5.10 为荷载不变、温度升高后基层的拉应变试验结果，荷载 0.5MPa，温度 60℃条件下，各结构基层层底纵向拉应变变化趋势与 0.5MPa、20℃时基本相同。基层的拉应变试验结果表明，在荷载 0.5MPa，温度 60℃条件下，荷载作用次数从零次到 20000 次，各结构基层层底纵向拉应变变化平稳，仅从零次加载时的 50 $\mu\epsilon$ 增大到 60~70 $\mu\epsilon$ ，说明在荷载 0.5MPa，温度 60℃条件下加载两万次时，各结构力学性能未发生明显改变。

各结构加载末应变与零次加载时应变比值分别为：1.25、1.36、1.28，说明在 0.5MPa、60℃条件下，各结构对荷载作用次数反应的敏感程度为结构 2>结构 3>结构 1。

(4) 1.1MPa, 60℃下应变分析

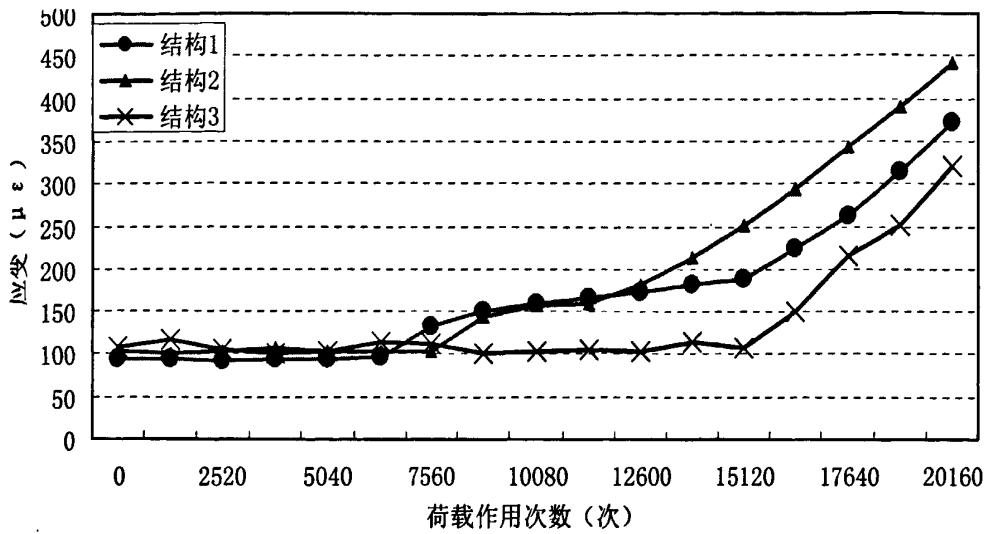


图 5.11 1.1MPa、60℃下基层拉应变

图 5.11 为高温重载下基层的拉应变试验结果，在荷载 1.1MPa，温度 60℃ 条件下，各结构基层层底纵向拉应变变化如下：①结构 1 从零次加载到 6300 次加载拉应变无较大变化，但在 7560 次时拉应变发生较大变化从原来的 $95.4\mu\epsilon$ 增大到加载 20000 次时的 $372.9\mu\epsilon$ ，观察发现面层表面出现微小裂缝；②结构 2 从零次加载到 7560 次加载拉应变无较大变化，但在 8820 次时拉应变发生较大变化从原来的 $74.4\mu\epsilon$ 增大到加载 20000 次时的 $442.6\mu\epsilon$ ，观察发现面层表面出现微小裂缝；③结构 3 从零次加载到 15120 次加载拉应变无较大变化，但在 16380 次时拉应变发生较大变化从原来的 $106.8\mu\epsilon$ 增大到加载 20000 次时的 $324.1\mu\epsilon$ ，观察发现面层表面出现微小裂缝。以上变化与 1.1MPa、20℃ 时大致相同，但有一点不同，随着温度从 20℃ 升高到 60℃，各路面结构应变突变的时间提前了，结构 1 是加载 7560 次，结构 2 是加载 8820 次，结构 1 是加载 16380 次。

这说明：①高温重载条件下，级配碎石基层路面结构疲劳性能略优于传统半刚性基层，沥青稳定碎石基层路面结构的疲劳性能要好于前两种结构②在高温条件下，增大路面荷载，各路面结构不仅瞬时应变增大，其疲劳性能也相应发生变化，由 0.5MPa、60℃ 时加载 20000 次外观无显著变化到 1.1MPa、60℃ 时加载 20000 次之前出现细小裂缝③在重载条件下，升高温度，会造成各结构疲劳性能的下降，其中以沥青稳定碎石路面性能下降最为显著

5.4 本章小结

本章选定三种具有半刚性基层的沥青路面进行试验对比分析研究，三种典型结构包括：传统半刚性基层沥青路面（结构 1）、具有级配碎石过渡层的半刚性基层沥青路

面（结构 2）、混合式沥青路面（结构 3）。

1、通过对三种结构进行不同温度和荷载条件下的静载试验测量结果分析，得出结论如下：

（1）荷载一定时，随着温度升高，各结构基层层底拉应变逐渐增大；在 20℃条件下，各结构基层层底拉应变排序为：结构 1>结构 3>结构 2；在 60℃高温条件下，各结构基层层底拉应变排序：结构 3>结构 1>结构 2。

（2）各结构对温度升高敏感性排序为：结构 3>结构 1>结构 2。

（3）温度一定时，各结构基层拉应变随着荷载增大而增大，应变与荷载变化基本呈线性关系；

（4）在常温条件下，结构 1 对荷载变化的敏感性更高，较小的荷载变化能够产生相对较大的基层层底拉应变，级配碎石结构对荷载变化的敏感性最低；在高温条件下，沥青稳定碎石基层沥青路面结构对荷载变化的敏感性更高，较小的荷载变化能够产生相对较大的基层层底拉应变，级配碎石结构对荷载变化的敏感性最低。

（5）各结构考查指标受荷载和温度的影响都比较显著，但受荷载影响的程度要大于受温度影响程度。

2、通过对三种不同类型的半刚性基层路面结构进行不同温度和荷载条件下的动载试验测量结果分析，得出结论如下：

（1）三种结构在各种温度和荷载条件下，疲劳性能优劣顺序为：结构 3>结构 2>结构 1，其中沥青稳定碎石基层路面结构的疲劳性能明显好于其余两种路面结构。

（2）各结构的疲劳性能随着加载温度升高而降低，随荷载增大而降低。

综合以上所述，将半刚性基层下放，加铺沥青稳定碎石基层，也就是采用前面提出的沥青稳定碎石基层路面结构具有现实意义。

结论与展望

1、主要研究结论

本文通过对传感器制作、校检技术的研究，提出了适用于半刚性基层沥青路面结构试验的传感器制作和校检方法；介绍了 NI 数据采集系统的原理、特点，开发了以计算机为硬件平台、以 LabVIEW 为软件平台的路面结构试验数据采集系统；选定三种具有半刚性基层的沥青路面，即传统半刚性基层沥青路面、具有级配碎石过渡层的半刚性基层沥青路面、混合式（沥青碎石为上基层，半刚性材料为下基层）沥青路面，以各层层底应变值为考查指标，利用力学软件 BISAR3.0 进行分析，为室内试验试件的参数设定提供理论依据；对改变各结构厚度形成的 4 种不同类型的半刚性基层路面结构进行不同温度和荷载条件下的静载试验测量，得到了基层层底应变反应随相关参数的变化规律；对三种具有半刚性基层的沥青路面结构进行了不同温度和荷载条件下的静载和动载测试结果分析对比。全文主要结论如下：

- 1、通过对有关路面结构试验及其数据采集进行系统的分析，认为以应变传感器作为室内路面结构试验的数据采集工具，能够真实地反映路面结构的实际受力情况。
- 2、通过力学软件的计算分析，得出结论：文中提出的 3 种室内试验结构在相应荷载作用下的应变分别能够代表各自实际路面结构对标准荷载的应变反应计算规律。
- 3、对改变各结构厚度形成的 4 种不同类型的半刚性基层路面结构进行不同温度和荷载条件下的静载试验测量结果分析，得到了以荷载、温度、面层厚度和基层厚度为自变量的基层层底纵向应变响应的预估模型，并得出结论：
 - (1) 温度、荷载不变时，基层层底拉应变随着半刚性基层厚度的增加而减小，但当基层厚度增大到一定程度后，其对层底拉应变所起的作用减小；基层层底拉应变随沥青面层厚度增加而减小；
 - (2) 随着温度升高，各结构层底拉应变逐渐增大，而且温度越高，应变增大的速度越快，在总厚度不变情况下，基层比例越大，温度敏感性越低；
 - (3) 随着荷载增大，半刚性基层沥青路面的层底拉应变逐渐增大，拉应变的增大与荷载增大基本呈线性关系；
 - (4) 各结构考查指标受荷载、温度的影响都比较显著，但受荷载大小的影响要明显大于温度，荷载增大时，应变值产生较大波动；

(5) 通过本文中试验方法所测得各结构基层底拉应变实测值普遍大于理论值, 实测值普遍在理论值的3~6倍。

4、对三种不同尺寸的半刚性基层路面结构进行不同温度和荷载条件下的静载和动载试验测量结果分析, 得到了三种结构基层层底纵向应变响应模型, 并得出以下结论:

(1) 荷载一定时, 各路面结构基层层底应变随温度升高而增大, 加铺级配碎石的路面结构对温度变化的敏感程度最低;

(2) 温度一定时, 各路面结构基层层底应变随荷载增大而增大, 新型路面结构对荷载增大的敏感程度低于传统半刚性基层路面结构;

(3) 各类结构层底应变值受荷载影响的程度要大于受温度影响程度;

(4) 动载测试结果显示: 各结构的疲劳性能随着加载温度升高而降低, 随荷载增大而降低;

(5) 加铺沥青稳定碎石层的路面结构, 其疲劳性能明显好于其余两种路面结构; 将半刚性基层下放, 加铺沥青稳定碎石基层, 也就是采用前面提出的沥青稳定碎石基层路面结构具有现实意义。

2、进一步要研究的问题

开展基于应变测量的沥青路面室内结构试验研究具有重要实用价值, 由于条件所限仍有一些问题需进一步研究, 概括起来主要有:

1、由于受试验条件限制, 试件的平面尺寸与厚度比值较小, 与实际路面结构平面尺寸和厚度的比值不能很好吻合, 可能导致结构受力状态与实际路面结构有差别, 同时, 试件厚度尺寸的限制也导致试件不能一次成型为一个整体, 这也是出现最下层结构层底拉应变远大于其他结构层层底应变的原因, 在今后的研究中, 有必要加大试件尺寸, 研究更好的试验方法。

2、传统的足尺试验用传感器尺寸较大, 不能用于本研究, 试验中所用传感器均为自制, 存在成活率低、可靠性差等缺点, 有必要在今后的研究中开发尺寸更小, 可靠性更高的微型结构试验用传感器, 并研究新的安装埋设防护方法。

3、本研究由于试验设备原因, 没有考虑湿度对结构受力的影响, 在今后的研究中应将湿度和温度综合起来考虑, 考查综合环境的影响。

参考文献

- [1] Metcalf J B Application of Full-Scale Accelerated Pavement Testing. Synthesis of Highway Practice 235, NCHRP Synthesis 235, TRB. Washington:D C: NATIONAL ACADEMY PRESS, 1996
- [2] Carey W N Pavement Performance studies in the United States. Final Report, FHWA/ RD86/078, Pavement Testing Conference. Washington:D C: Federal Highway Administration,1985
- [3] Carl L. Monismith. "Evolution of Long-Lasting Asphalt Pavement Design Methodology: A Perspective," presented at International Symposium on Design and Construction of Long Lasting Asphalt Pavements, June 7-9, 2004,Auburn University Alabama, USA
- [4] Safaai-Jazi, A., Ardekani, S.A., and Mehdikhani, M. A Low-Cost Fiber Optic Weigh-in-Motion Sensor. SHRP 90-002. Strategic Highway Research Program, Washington, DC, 1990.
- [5] Teng T P Performance of Coarse-Graded Mixes at WestTrack-premature Rutting. Analysis Conducted by An Independent Team. Final Report,,1998
- [6] David H. Timm Angela L. Priest Thomas V. McEwen Design and Instrumentation of the Structural Pavement Experiment at the NCAT Test Track . NCAT Report 04-01 April 2004
- [7] 沙庆林. 高速公路沥青路面早期破坏现象及预防[M]. 北京: 人民交通出版社, 2001
- [8] Walid M. Nassar .Utilization of Instrument Response of SuperPaveTM Mixes at the Virginia Smart Road to Calibrate Laboratory Developed Fatigue Equations .The Via Department of Civil and Environmental Engineering Virginia Polytechnic Institute and State University Blacksburg, VA 24060, 2001
- [9] 沙庆林. 高等级公路半刚性基层沥青路面. 北京: 人民交通出版社, 1998.9
- [10] 沈金安, 李福普, 陈景. 高速公路沥青路面早期损坏分析与防治对策[M]. 北京: 人民交通出版社, 2004
- [11] 孙运旺, 传感器技术与应用, 浙江大学出版社, 2006 年, 杭州
- [12] 刘红丽, 张菊秀, 徐沪萍等, 传感与检测技术, 国防工业出版社, 2007 年, 北京
- [13] 孙立军等. 沥青路面结构行为理论[M]. 上海:同济大学出版社, 2003.
- [14] Baker, H.B., Buth, M.R. and Van Deusen, D.A., "Minnesota Road Research Project Load Response Instrumentation Installation and Testing Procedures," Report No. MN/PR-94/01, Minnesota Department of Transportation, St. Paul, MN, 1994
- [15] 孟书涛, 半刚性基层沥青路面性能的加速加载试验研究. 公路交通科技. 1997年3月

- [16] Thomas R. Burnham, Ahmed Tewfik, Seshan Srirangarajan "Development of A Computer Program for Selecting Peak Dynamic Sensor Responses From Pavement Testing", Minnesota Department of Transportation Office of Investment Management Research Services Section , August 2007
- [17] Ray G K . History and Development of concrete Pavemnet Design. Journal of Highway Division, ASCE,HW1,3769,1964
- [18] 陈少幸等. 沥青混凝土路面光栅应变传感器的试验研究. 传感技术学报. 2006年4月
- [19] 吴赣昌. 半刚性路面温度应力分析[M]. 北京: 科学出版社, 1995.
- [20] 杨学良, 刘伯莹. 沥青路面温度场与结构耦合的有限元分析. 公路交通科技. 2006年11月
- [21] 赵延庆, 白琦峰, 宋宇. 柔性基层沥青路面温度场测量与分析. 中外公路. 2006年12月
- [22] 卢剑涛, 沥青路面应力计算与分析, 武汉大学硕士学位论文, 2004年5月
- [23] Bruce A Chadbourne, David E. Newcomb, and David H. Timm, MEASURED AND THEORETICAL COMPARISONS OF TRAFFIC LOADS AND PAVEMENT RESPONSE DISTRIBUTIONS, Eighth International Conference on Asphalt Pavements ,Volume I Proceedings,August 10-14, 1997
- [24] Metcalf, L., Romanschi J. B., and Rasoulian S. A. (1999) "Development of The Louisiana ALF Program, the First Experiment," Transportation Research Record, No. 1655, Transportation Research Board, Washington DC.
- [25] Djakfar, L., and Roberts, F. (2000) "Performance Prediction of Louisiana ALF Test Sections," Prepared for Presentation and Publication in the 79th Annual Meeting of The Transportation Research Board, Washington, DC.
- [26] Jae Seung Kim, Complex Modulus from Indirect Tension Testing, A Thesis Presented to The Graduate School of The University of Florida in Partial fulfillment of The Requirements for The Degree of Master of Engineering University of Florida, 2002
- [27] 孟书涛, 沥青路面合理结构的研究, 东南大学博士学位论文, 2005年12月
- [28] Dr. Wei Zhang and Robin A. Macdonald, The Danish Road Testing Machine 1995-2000, Danish Road Institute Technical note 13, January 2002
- [29] de Vries, M.J., Poland, S.H., Grace, J.L., Arya, V., Murphy, K.A., and Claus, R. Optical Fiber Sensors for Advanced Civil Structures. In Proceedings of the 11th ASCE Engineering Mechanics Conference. American Society of Civil Engineers, New York, 1996
- [30] Masri, S.F., Agbabian, M.S., Abdel-Ghaffar, A.M., Higazy, M., Claus, R.O., and de Vries, M.J. Experimental Study of Embedded Fiber-Optic Strain Gauges in Concrete Structures. *Journal of*

- Engineering Mechanics*, Vol. 120, No. 8, 1994, pp. 1696-1717.
- [31] 李福普, 陈景, 严二虎. 新型沥青路面结构在我国的应用研究[J]. 公路交通科技. 2006, 23(3) .
- [32] Mampe Arachchige Wasantha Kumara, ANALYSIS AND VERIFICATION OF STRESSES AND STRAINS AND THEIR RELATIONSHIP TO FAILURE IN CONCRETE PAVEMENTS UNDER HEAVY VEHICLE SIMULATOR LOADING, DOCTORAL THESIS OF UNIVERSITY OF FLORIDA, 200
- [34] Thomas Burnham, Concrete Pavement Performance and Research at the Minnesota Road Research Project – The First Ten Years, 8th International Conference on Concrete Pavements—Colorado Springs, CO, USA – August 14-18, 2005
- [35] Glasgow, D. M. “Load Testing of Instrumented Pavement Sections - Improved Techniques for Applying the Finite Element Method to Strain Prediction in PCC Pavement Structures.” Department of Civil Engineering, University of Minnesota, Minneapolis, MN. 2002.
- [36] 余成波 胡新宇 赵勇, 传感器与自动监测技术, 高等教育出版社, 2004年, 北京
- [37] Timm, D.H. and Newcomb, D.E., “Calibration of Flexible Pavement Performance Equations,” *Transportation Research Record*, *Transportation Research Board*, Accepted for Publication, 2003 (in press).
- [38] 沈金安主编, 沥青及沥青混合料路用性能. 北京: 人民交通出版社, 2001.
- [39] 杨乐平, 李海涛, 肖相生等. LabVIEW程序设计与应用 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2001. 7
- [40] Gary W, Johnson. LabVIEW图形编程[M]. 武嘉澎译. 北京: 北京大学出版社, 2004. 4
- [41] 陈敏, 汤晓安. 虚拟仪器开发环境LabVIEW及其数据采集[J]. 计算机工程与设计, 2001
- [42] 刘松强. 数据流编程的图形软件 LabVIEW 及其应用[J]. 小型微型计算机系统, 1994
- [43] 戴震, 沥青路面结构受力机理分析, 东南大学硕士学位论文, 2004年3月
- [44] 潘有强, 杨军. 国内外足尺加速路面试验研究概况. 中外公路, 2005年9月
- [45] 武金婷, 半刚性基层合理层位与合理厚度研究, 长安大学硕士论文, 2009年6月
- [46] 王锡通, 郑录华灯. 沥青稳定基层路面结构的研究[J]. 浙江水利水电专科学校学报, 2006, 18 (3): 45-48
- [47] 杨永顺, 沥青路面应力计算与分析, 长安大学硕士学位论文, 2007 年 5 月
- [48] 贾侃, 半刚性基层材料的疲劳特性研究, 长安大学博士论文, 2008 年

致 谢

转眼间，三年的研究生学习已接近尾声，从十七岁离家求学至今，已近七年。一路走来，接受了太多的教诲和帮助，感激之情无法用言语度量。在此，谨以最朴实的语言致以最崇高的敬意和谢意。

感谢我的导师沙爱民教授。沙老师学识渊博、治学严谨、诲人不倦，本论文能够顺利完成，离不开沙老师的悉心指导和严格要求，论文写作的每一个环节都凝聚着老师的付出和汗水。衷心感谢沙老师这些年来对我的教导、关心和鼓励！

感谢胡力群老师在课题研究和论文写作期间给予的指教和大力帮助，胡老师谦和的性格和广博的学识让我受益匪浅；感谢贾侃师兄对我的关心和照顾，随师兄在安徽调研的经历让我学到了很多专业知识和为人处事的方法；感谢课题组里马峰、郭德栋、周浩等各位师兄师姐对我的帮助。

感谢 2007 级的诸位同门，三年来我们互相帮助，互相交流，一起谈心、一起学习，一起娱乐，这份友谊我将永远怀念。感谢同宿舍的三位老兄，感谢给予我很多关心和帮助的同学们，三年学习生活使我们结下了深厚的友谊，这将是我最美好的回忆。还要特别感谢给予我极大帮助的程诚、李亚飞等师弟师妹，没有他们的无私奉献我的论文不会如此顺利的开展。

感谢我的女朋友邢傲雪，她的理解、支持和帮助使我研究生三年的生活更加美好。

感谢我的妈妈，是您给我了健康的身体，从小到大我每一次生病都让您揪心，我每一次远行都带着您的牵挂；感谢我的爸爸，是您给了我健全的性格，您屡经挫折却不屈不挠、为了改变命运而不断奋斗的顽强和执着是照亮儿子前进方向的灯塔。亲恩似海，无以为报，惟愿父母身体健康、天天快乐。

再次感谢所有的人！