

中交桥梁技术有限公司 2008 学术论文集

鲍卫刚 主 编



人民交通出版社
China Communications Press

Zhongjiao Qiaoliang Jishu Youxian Gongsi 2008 Xueshu Lunwenji

中交桥梁技术有限公司 2008 学术论文集

鲍卫刚 主编

人民交通出版社

内 容 提 要

本书为中交桥梁技术有限公司的学术论文集,论文内容全面反映了中交桥梁技术有限公司的最新技术成果。全部论文共计 64 篇,由五部分组成:第一部分道路工程 10 篇,第二部分桥隧工程 29 篇,第三部分试验、检测、监测、养护技术 16 篇,第四部分特种施工 6 篇,第五部分其他方面 3 篇。

本书可供道路与桥梁工程的技术人员使用,也可供有关大专院校师生学习参考。

图书在版编目(CIP)数据

中交桥梁技术有限公司2008学术论文集 / 鲍卫刚主编.
北京:人民交通出版社, 2008.12
ISBN 978-7-114-07482-0

I. 中... II. 鲍... III. ①道路工程—学术会议—文集
②桥梁工程—学术会议—文集 IV. U4-53

中国版本图书馆CIP数据核字(2008)第178841号

书 名: 中交桥梁技术有限公司2008学术论文集
著 作 者: 鲍卫刚
责任编辑: 郭思涛
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.ccpres.com.cn>
销售电话: (010) 59757969 59757973
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: 北京宝莲鸿图科技有限公司
开 本: 880×1230 1/16
印 张: 24.5
字 数: 723 千
版 次: 2008年12月第1版
印 次: 2008年12月第1次印刷
书 号: ISBN 978-7-114-07482-0
定 价: 68.00 元

(如有印刷、装订质量问题的图书由本社负责调换)

《中交桥梁技术有限公司 2008 学术论文集》

编制出版领导小组成员

组 长:刘伯莹
副 组 长:鲍卫刚
成 员:李毅谦 崔玉萍 杨书仁 王 蔚 王 刚
马德林

编辑委员会成员

主 任 委 员:鲍卫刚
编辑委员会成员:刘伯莹 李毅谦 崔玉萍 杨书仁 王 蔚
王 刚 马德林

序

中交桥梁技术有限公司成立于2003年1月,隶属中国交通建设股份有限公司,为北京市高新技术企业。公司主要从事交通基础设施的勘察、设计、咨询、检测与监测、项目交竣工验收、项目后评估、特种施工、养护管理、科研和标准规范编制修订、软件开发等业务。公司致力于提供交通基础设施建、管、养领域的一体化服务,目前已发展成为集科研、设计、咨询、检测养护、加固施工、系统开发及新技术、新工艺应用为一体的综合性公司。

6年来,在中国交通建设股份有限公司的直接领导和关心下,在社会各界的支持和帮助下,本着“开拓创新、求真务实”的精神,公司承担并完成了一大批勘察设计、检测、加固设计、特种施工、健康监测及国家和行业的科研项目和标准规范编制等工作,初步形成了企业的品牌和企业文化,在市场上占有相当的份额。本文集选录了公司员工们近两年来从事技术工作的一个方面的缩影,多是已公开发表或尚未公开发表的技术论文。一则向多年来关心、帮助公司发展的社会各界和同行们汇报公司在技术上的成长和进步;二是初步提炼公司的核心技术,在发展中求创新,以创新促发展。公司将始终秉承“诚信、优质、超越”的企业宗旨,努力为我国的交通建设和中交股份公司的可持续发展做出更大的贡献

刘伯莹

2008年11月18日

目次

一、道路工程

沥青路面新设计指标和参数体系研究	刘伯莹(1)
大广公路廊保界至保沧段高速公路路线设计	黄先刚 刘正祥(14)
安西至猩猩峡高速公路安西至柳园段路线方案研究	薛志明 马德林(18)
安西至猩猩峡高速公路安西至柳园段绿化及景观设计思路	程荣双 薛志明(26)
水泥混凝土路面损坏原因及预防措施	陆春雷(34)
高速公路沥青路面大修设计方案关键技术探讨	邢爱萍(39)
沙漠公路防沙体系机理研究及应用实例	姚晓阳 程荣双(45)
平面应变简化对边坡稳定分析的影响	张斌(49)
影响路基压实度因素探讨	董艳(54)
大面积混凝土结构裂缝控制研究	张玉梅 刘保东(58)

二、桥隧工程

损伤对悬臂梁振动特性的影响	李毅谦(62)
苏拉马都大桥主桥上部结构设计	郭彬立(71)
基于震害经验和性能的公路桥梁抗震规范制修订工作建议	鲍卫刚 苗家武(80)
支井河大桥总体设计	季文刚 李毅谦(88)
自锚式悬索桥空间缆索分析与计算	周泳涛 鲍卫刚 涂金平 贾界峰(94)
空间索面悬索桥主索鞍计算方法与实践	贾界峰 涂金平 周泳涛(101)
大跨度斜拉桥技术经济指标与合理跨径界限探讨	苗家武(108)
部分斜拉桥极限承载力理论与数值分析	张锐 杨圣超(116)
天津富民海河大桥景观设计	周泳涛 鲍卫刚 李毅谦(122)
单管混凝土拱结构体系研究	周泳涛(127)
重庆马桑溪长江大桥加固设计	周泳涛 翟辉 贾界峰 赵井卫(132)
桩端后压浆技术超长桩试验研究	丁啸宇(142)
修建沉管隧道若干技术问题	赵占厂(148)
黄土公路隧道结构设计与施工若干问题	赵占厂(153)
我国配筋混凝土梁式桥梁回顾与思考	鲍卫刚 周泳涛(158)
桥梁抗风规范斜拉桥基频近似公式改进	苗家武 鲍卫刚(163)
混凝土桥梁耐久性研究	贾界峰(167)
浅谈平原区高速公路桥型方案设计	王智峰 刘正祥(174)
窄翼缘 T 梁横向联系破坏分析	王超 杨晓军 李雁鸿(177)
钢-混凝土组合连续梁桥负弯矩区受力特性分析	张锐 何杰(190)
非对称桥型布置及不协调边中跨比在预应力混凝土连续刚构桥中应用	赵进锋(193)
低桩承台施工中强风化岩石渗水基坑处理	赵进锋(198)
整体现浇大跨度连续梁桥设计要点	凌广(201)
草原公路涵洞设置探讨	刘冰冰(204)

静态置换法更换支座在大跨径连续梁桥中应用	刘振献(206)
公路波纹管涵洞施工技术与适用条件分析	曹振民(210)
人行地道优缺点及设计对策	蒋 平 程荣双(219)
沪宁高速公路扩建工程锡澄运河大桥钢桁梁桥设计	郭彬立(222)
挡墙病害分析及加固方案分析比较	李 莉(231)

三、试验、检测、监测、养护技术

大型隧道健康监测系統概述	崔玉萍(234)
基于 GIS 的深圳市道路桥梁信息管理系统	崔玉萍 杨圣超 王世成(241)
桥梁健康管理及桥梁管理系统	李连友(247)
桥梁结构评判及表达方法新思路	杨书仁 周明琿 刘海龙(256)
公路桥梁养护管理和技术	李士兵 韩永平(261)
连续刚构桥加固施工过程空间实体有限元仿真模拟及实时监控	周明琿(269)
简支结构桥梁火灾后承载能力试验与分析	周明琿 崔玉萍(277)
基于 MISO 神经网络的结构损伤识别方法研究	杨圣超 冯瑞成(291)
首都机场高速公路养护质量检测与评价	侯鹏 王东林 严 宽 董 艳(294)
测量技术在清连(一级)公路高速化改造桥梁维修加固中应用	朱军红 张家振(304)
激光断面仪在路面平整度及车辙检测中应用	严 宽(310)
预应力钢绞线检测方法探讨	崔金江 王 超(314)
不锈钢绞线网渗透性聚合物砂浆加固技术	李 岩(317)
预应力混凝土空心板自爆破坏原因分析	张 锐 王 超 杨晓军 李雁鸿(320)
利用弯曲元测试水泥土强度方法研究	李晓博(324)
超声波检测桩基完整性分析	李 莉(329)

四、特种施工

千米级斜拉桥长索施工技术	邓惠斌 饶华容(333)
江阴长江公路大桥北引桥加固工程施工技术	盛海军 余升友(337)
32 点液压同步顶升系统在更换桥梁支座施工中的应用	吴俊明 赵东奎(345)
淇澳大桥换索施工技术	盛海军 李少芳 晏国泰(349)
淇澳大桥换索工程施工控制研究	郭 河 李毅谦 丁啸宇 霍 新(358)
平行钢丝拉索在杭申线七星大桥加固工程中的应用	叶建平(365)

五、其他

基于结构矩阵的设计项目进度计划方法	邓广繁(369)
公路工程项目风险管理与实践	曹振民(374)
论公路工程施工企业精细化管理	彭 斌(381)

沥青路面新设计指标和参数体系研究

刘伯莹

(中交桥梁技术有限公司)

现行沥青路面规范的结构设计方法,以路表回弹弯沉值、沥青面层和半刚性层的层底拉应力作为控制路面结构总体刚度(承载能力)以及沥青层和半刚性层疲劳开裂损坏的设计指标,采用静态测试方法确定路基土和路面材料的模量值,以劈裂试验方法确定路面材料的强度值,并且未考虑温度和湿度变化对参数值的影响,这样的设计指标和参数值,不能如实反映路面结构的损坏现象和机理,也不能正确反映土和材料的力学性状。为了改善现行沥青路面结构设计的指标和参数,2005年初,交通部立项开展研究,计划提出新的设计指标和相应的设计参数。

沥青路面新指标和参数体系,依据下述原则考虑:(1)仍遵循力学-经验法的基本思路;(2)针对层状复合结构和损坏类型多样化的特点,采用多设计指标体系,各指标分别控制对应的损坏类型;(3)设计基准期内路面的累计损伤仍采用当量损坏法分析;(4)对设计参数的采集要求分为三个层次,分别规定不同精度或准确程度的方法;(5)材料性质参数应能反映行车荷载和环境因素对其性状的影响,并采用科学的试验方法测定;(6)各种损坏模型的建立以室内试验为基础,室外验证和修正以路面加速加载试验(ALF)为主;(7)在现有国内外前沿水平的基础上建立设计指标和参数的基本框架体系。

1 结构层组合方案和损坏类型

沥青路面可以按基层材料类型的不同分为三大类结构层组合方案:

- (1)选用粒料做基层的粒料类基层沥青路面;
- (2)选用沥青结合料类材料做基层的沥青类基层沥青路面;
- (3)选用无机结合料类材料做基层的无机结合料类基层沥青路面。

各大类中,又可以按底基层材料的不同分为粒料类底基层、无机结合料类底基层和沥青结合料类底基层三类。各种路面结构层组合方案具有不同的结构特性及损坏机理和形态特征。

沥青路面的设计指标主要针对以下6类损坏:(1)沥青层的疲劳开裂;(2)无机结合料稳定层的疲劳开裂;(3)沥青面层的永久变形;(4)粒料层和路基的永久变形;(5)沥青面层的低温缩裂;(6)沥青面层的反射裂缝。各种沥青路面结构层组合方案在结构设计时所需考虑的损坏类型,汇总于表1。本项目研究前5项损坏,提出相应的设计指标和相关的设计参数。

表1 各种结构层组合方案需考虑的沥青路面损坏类型

路面类型	沥青类基层和粒料类基层			无机结合料类基层	
面层厚度	厚	中厚	薄	厚	中厚、薄
主要损坏类型	永久变形 (面层为主)	疲劳开裂	永久变形 (粒料层和路基)	永久变形 (面层)	反射裂缝 (面层)
次要损坏类型	疲劳开裂	永久变形	-	疲劳开裂	
冰冻地区	低温缩裂(面层)				

2 沥青层疲劳损坏

选用矩形小梁4点弯曲疲劳试验进行沥青混合料室内疲劳性能的研究,并制订了标准试验方法。采用常应变加载控制模式,在15°C和10Hz条件下对各种沥青混合料进行了108次疲劳试验。

在吸纳国外部分疲劳试验结果的基础上,对 618 组有效数据进行了回归分析,建立了常应变控制模式下的室内疲劳寿命预估模型。

通过各 4m 长的 3 个试验段(沥青层厚度为 5、10 和 15cm)的路面加速试验(ALF),对室内疲劳模型进行修正,引入了模式系数、轮载横向分布系数和轴载换算系数,并标定了室内模型的系数后,得到经过验证和修正后的沥青层疲劳寿命预估模型:

$$N_f = 5.314 \times 10^{17} (1 + e^{-5.790MF})^{-1} \varepsilon^{-3.973} E^{-1.579} VFA^{2.720} \quad (1)$$

选取了 54 个级配碎石基层沥青路面结构,对上述预估模型和美国力学-经验法的预估模型进行了疲劳寿命的对比分析。除了应变水平小于 $50\mu\varepsilon$ 的低应变路面结构外,其他路面的预估寿命基本接近,都在同一个数量级内。

3 无机结合料稳定层疲劳损坏

选用水泥稳定砂砾、水泥稳定碎石、水泥稳定土和水泥-石灰稳定碎石 4 类常用无机结合料稳定材料,进行了 147 次三分点加载梁试件弯曲疲劳试验。按照 Weibull 分布回归得到各种混合料的 7 个疲劳关系式。其中,水泥稳定碎石的疲劳寿命预估模型为

$$\lg N_f = 12.409 - 12.570 \frac{\sigma_t}{f_r} \quad (2)$$

在试件底面有支承和试件浸水的条件下分别进行了疲劳试验,与常规疲劳试验结果相比较,受支承时试件的疲劳寿命可以增加,浸水对水泥稳定土的疲劳寿命影响很大,但对水泥稳定碎石的影响则很小。

4 沥青面层低温缩裂损坏

影响沥青层低温开裂的最重要的因素是沥青在低温时的蠕变劲度(或稠度)及其感温性。选用在该地区最低路面温度下不会变脆的沥青结合料是预防沥青面层低温开裂的关键。

对 3 种基质沥青进行了各种性质指标的测定,将它们与临界开裂温度的关系进行关联分析的结果表明,我国规范采用的低温延度、低温针入度和当量脆点与临界开裂温度的关联度都很小,因而,这些评价指标无法很好地表征沥青的低温性能。

对吉林和黑龙江省 4 条公路的 12 个路段进行了裂缝调查,并对回收沥青进行了 BBR 试验和 DT 试验,计算了临界开裂温度。沥青性质与开裂程度相对应的验证结果表明,蠕变劲度 S 、劲度曲线斜率 m 和断裂应变,这 3 项沥青低温性能指标可以有效地判别沥青层抗低温性能的优劣,其标准值(当地路面最低温度加 10°C 时, $S < 300\text{MPa}$ 、 $m > 0.30$ 、破坏应变 $> 1\%$)与路面的实际开裂程度相吻合。因而,可以采纳作为评定沥青低温性能的指标和标准。

参照 Hass 和 Hajek 建立的模型提出了开裂量预估模型。对吉林和黑龙江省 4 条公路的 13 个路段进行了沥青层开裂状况调查,并对沥青的性质和路面结构进行了测试。依据所取得的数据,按预估模型计算了各个路段的开裂量。与实际开裂量的对比表明,各路段的预估值与观测值都比较接近,偏差在可接受的范围内。因此,预估模型可以暂时用做沥青面层低温抗裂设计时参考。

5 沥青层永久变形

控制沥青层永久变形的途径是:按照交通荷载、温度状况和路面结构层组合的要求,正确、合理地设计沥青混合料的组成。

选用轮辙仪试验和重复加载三轴蠕变试验作为研究对象,检验了它们判别沥青混合料抗永久变形性能优劣的可靠性,并分析了影响测试结果的各方面因素。在此基础上,制定出了标准试验方法。

以相对辙深和蠕变率作为应用轮辙仪试验评定沥青混合料抗永久变形性能的指标。选用 3 种密级配沥青混合料和 4 种 4% SBS 改性沥青混合料,在不同轮压和温度条件下进行轮辙试验。依据 551 个有效样本数据,进行多元回归分析后建立了相对辙深预估模型。

在各 4m 长的 3 个试验段(沥青层厚 8 cm)上通过 ALF 试验仪进行了车辙试验。利用车辙试验

结果,对轮辙仪试验的相对辙深预估模型进行了轮压和作用次数的修正,并分析了车速对辙深的影响。以此修正后的相对辙深预估模型为基础,按各气候区的代表地区的月平均气温资料、累计标准轴次和沥青层位深度的不同,分别计算累计车辙深度。取沥青层的容许车辙深度为 15mm,据此确定不同条件下轮辙试验的相对辙深容许值,并进而按相对辙深与蠕变率之间的关系转换为蠕变率容许值,如表 2 所列。

表 2 沥青混合料轮辙试验蠕变率(次/mm)的要求(不小于)

交通分级 ($\times 10^6$ 轴次数)	距路表深度(cm)	温 度 分 区			
		I-1、I-2、I-3、I-4	II-1	II-2、II-3、II-4	III-2
1	0~10	1 500(2 400)	600	800	600
	>10	600	600	600	600
3	0~10	3 200(4 500)	1 000	1 500	600
	>10	1 000(1 500)	600	600	600
12	0~10	5 500	3 200	4 500	1 500
	>10	2 500	1 000	1 500	600

以流动数作为应用重复加载三轴蠕变试验评定沥青混合料抗永久变形性能的指标。选用 4 种普通沥青混合料和 1 种改性沥青混合料,在 3 种轴向应力和 3 种温度条件下进行流动数测定。依据试验结果,建立了流动数与应力和温度之间的经验关系式,以及永久变形与应力和温度之间的经验关系式。利用 ALF 试验的 3 段车辙试验结果和沥青层中部(4cm 处)的竖向应力分析,对上述经验关系式进行了验证,得到了修正后的车辙预估模型。

6 路基和粒料层永久变形

利用室内动三轴试验系统对 3 种土和 4 种碎石粒料在不同含水率、压实度和偏应力级位条件下进行了永久变形试验,并以 Tseng 和 Lytton 模型为基础,分别建立了土和碎石的永久变形预估模型。应用此模型,按分层应变总和法计算分析了我国典型路面结构的路基和粒料层的永久变形量。

依据安定理论的概念,控制住传到路基顶面的应力水平,使它产生的永久变形累积可以最终达到平衡状态,使上面的路面结构不会产生由于路基的过量永久变形而引起的损坏。

利用处于临界损坏状况的路面结构资料和达到该临界损坏状况时的标准轴载作用次数(即寿命),便可以反算出处于临界损坏状况时的路基顶面竖向压应变,并建立起路基顶面容许竖向压应变同标准轴载作用次数间的关系式。

利用以往设计规范的容许弯沉公式,为不同标准轴次数反演出符合容许弯沉要求的路面结构,再针对这些路面结构反算出相应的路基顶面竖向压应变。由此得到容许压应变与标准轴次之间的关系式:

$$\varepsilon_x = 1.12 \times 10^{-2} N_e^{-0.2055} \quad (3)$$

选用了 AASHO 试验路的 195 种路面结构,计算处于临界损坏状况($PSI = 2.5$)时的路基顶面压应变和标准轴载(100kN)累计作用次数,以此对式(3)进行验证。二者相比较,共有 117 种 AASHO 路面结构在允许荷载作用次数下达到了临界损坏,采用式(3)进行设计的保证率为 60%。

此外,还同 Shell 方法的路基顶面容许压应变关系式进行了对比。式(3)的计算结果介于 Shell50% 保证率与 85% 保证率之间,表明所建立的路基顶面容许压应变公式是适用的。

7 路基和粒料层回弹模量

路基土和粒料是非线性弹塑性材料,其回弹模量值具有应力依赖性,并随其湿度和密实度状态变化。本研究选用由重复加载三轴压缩试验得到的回弹模量表征土和粒料的力学性状,通过比选和测试评价,制订出了重复加载三轴压缩试验的回弹模量标准试验方法。

选取了 12 种代表性土和 3 种碎石粒料进行了重复加载回弹模量试验,考察分析了相关因素对回弹模量值的影响。在此基础上,建立了土和粒料回弹模量的 3 参数本构模型,并通过与土和粒料物性参数的关联,建立了土和粒料物性参数与本构模型 3 参数之间的关系式。

三参数本构模型如下:

$$M_r = k_1 p_a \left(\frac{\theta}{p_a} \right)^{k_2} \left(\frac{\tau_{cot}}{p_a} + 1 \right)^{k_3} \quad (4)$$

式中: θ ——主应力之和(体应力);

τ_{cot} ——八面体剪应力;

p_a ——参照应力(100kPa);

k_1 、 k_2 和 k_3 ——与土和粒料的性质和状态有关的试验参数。

上述三轴试验数据按式(4)进行回归分析后得到,3 个试验参数与本构模型的相关性都达到极显著水平。 k_1 、 k_2 和 k_3 的数值,汇总列于表 3。

表 3 土和粒料回弹模量 3 参数模型中 3 个参数的中值和均值

参 数		材 料 分 组	
		级配碎石	路基土
k_1	中值	1.1681	1.5683
	均值	1.1560	1.5941
	标准偏差	0.1992	0.7690
k_2	中值	0.6814	0.4616
	均值	0.6836	0.4917
	标准偏差	0.0519	0.2507
k_3	中值	-0.1387	-1.6898
	均值	-0.1663	-1.5545
	标准偏差	0.0799	0.7413
试验次数		9	72

注:统计分析时, M_r 的单位为 MPa,应力的单位为 kPa。

土和粒料物性参数与本构模型 3 参数之间的关系式如下:

(1)级配碎石

$$\left. \begin{aligned} k_1 &= -0.1088w + 1.6710 & (R^2 = 0.886) \\ k_2 &= 0.6836 \\ k_3 &= 0.0416d_{60} - 0.0288P_s - 1.8353 & (R^2 = 0.0806) \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

(2)土

$$\left. \begin{aligned} k_1 &= -0.1428PI - 0.1540w + 0.0652CD + 0.0061P_{0.075} - 4.7674 & (R^2 = 0.726) \\ k_2 &= -0.0409PI + 0.0399w - 0.034P_{0.075} + 0.7506 & (R^2 = 0.659) \\ k_3 &= 0.1439PI + 0.1328w + 0.0460CD - 5.9509 & (R^2 = 0.576) \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

按弯沉等效原则,通过三维有限元非线性力学分析和弯沉迭代反演,确定不同交通等级的路基和粒料层内的当量回弹模量和当量应力水平。依据土和粒料回弹模量预估模型和当量应力水平,提出了不同交通等级的各类路基和粒料层在标准条件下的回弹模量参考值(表 4、表 5)。

表 4 路基回弹模量参考值 (MPa) 范围

材料分类	轻交通		中等交通		重/特重交通	
	取值范围	代表值	取值范围	代表值	取值范围	代表值
砾类土	110 ~ 125	110	105 ~ 130	115	110 ~ 135	120
土质砾	95 ~ 115	105	95 ~ 120	105	100 ~ 125	110
砂类土	90 ~ 110	100	95 ~ 115	105	100 ~ 120	105
土质砂	60 ~ 85	70	65 ~ 90	75	70 ~ 95	80
粉质土	50 ~ 75	65	55 ~ 80	70	60 ~ 85	75
黏质土	50 ~ 70	60	55 ~ 75	65	55 ~ 80	70

注:无塑性土,级配偏粗的取高值,级配偏细的取低值;带塑性土,塑性指数大的取高值,塑性指数小($2 < PI \leq 18$)的取低值。

表 5 粒料层回弹模量参考值 (MPa) 范围

材料分类	轻交通		中等交通		重交通		注释
	取值范围	代表值	取值范围	代表值	取值范围	代表值	
级配碎石	250 ~ 650	450	200 ~ 500	350	150 ~ 400 *	300 *	上基层
	250 ~ 550	400	200 ~ 400	300	—	—	基层
	180 ~ 300	220	180 ~ 250	215	180 ~ 250	210	底基层
级配砾石	200 ~ 400	300	150 ~ 300	250	—	—	基层
	150 ~ 250	195	150 ~ 220	190	150 ~ 200	180	底基层

注: * 当超载现象显著时,取值范围为 200 ~ 500,代表值为 350;级配偏粗的取高值,级配偏细的取低值。

8 无机结合料稳定材料弹性模量

对水泥稳定砂砾、水泥稳定碎石、水泥稳定土和石灰-粉煤灰稳定碎石 4 种混合料进行了静态弯拉回弹模量和压缩回弹模量的测试,并建立了模量转换经验关系式。

应用梁试件的疲劳试验和梁底拉应变的连续测定,对上述 4 种无机结合料稳定材料的动态弯拉模量衰变规律进行了试验研究。反复加载过程中,拉应变增长和动态模量衰变经历了下降较快、降速稳定和急剧下降三个阶段。各阶段所占疲劳寿命的比例分别为 20%、60% 和 20% (水泥稳定类材料)或 15%、75% 和 10% (二灰稳定类材料)。依据试验结果,提出了各种无机结合料稳定材料在不同模量衰变阶段的动态弯拉模量值(表 6)。

表 6 各种无机结合料稳定材料在不同模量衰变阶段的动态弯拉模量值

材料类型	水泥 稳定砂砾	水泥稳定碎石 (悬浮型)	水泥稳定碎石 (骨架型)	水泥 稳定土	二灰 稳定碎石
初始动态弯拉模量 (MPa)	28 000	25 000	28 000	4 700	45 000
应力比范围	0.55 ~ 0.70	0.60 ~ 0.70		0.65 ~ 0.85	0.65 ~ 0.75
寿命损耗 20%	模量比值	0.53 ~ 0.68	0.42 ~ 0.61	0.58 ~ 0.70	0.65 ~ 0.75
	模量值 (MPa)	14 840 ~ 19 040	10 500 ~ 15 250	16 240 ~ 19 600	3 055 ~ 3 525
寿命损耗 50%	模量比值	0.40 ~ 0.58	0.37 ~ 0.50	0.45 ~ 0.60	0.58 ~ 0.72
	模量值 (MPa)	11 200 ~ 16 240	9 250 ~ 12 500	12 600 ~ 16 800	2 726 ~ 3 384
寿命损耗 80%	模量比值	0.35 ~ 0.48	0.28 ~ 0.37	0.39 ~ 0.51	0.51 ~ 0.65
	模量值 (MPa)	9 800 ~ 13 440	7 000 ~ 9 250	10 920 ~ 14 280	2 397 ~ 3 055

无机结合料稳定类基层或底基层,由于湿度收缩和温度收缩作用,在开放交通之前或之初便会产生内应力,并由此而出现微裂隙。这些微裂隙的存在,使材料的有效模量值降低。参照南非的经验,提出了无机结合料稳定类材料在收缩开裂后的弹性(回弹)模量参考值(表7)。

表7 无机结合料稳定类材料弹性(回弹)模量参考值(MPa)

材料类型	7d 浸水抗压强度	试件模量	收缩开裂后模量	疲劳破坏后模量
水泥稳定类	3.0 ~ 6.0	3 000 ~ 14 000	2 000 ~ 2 500	300 ~ 500
	1.5 ~ 3.0	2 000 ~ 10 000	1 000 ~ 2 000	200 ~ 400
石灰-粉煤灰稳定类	≥ 0.8	3 000 ~ 14 000	2 000 ~ 2 500	300 ~ 500
	0.5 ~ 0.8	2 000 ~ 10 000	1 000 ~ 2 000	200 ~ 400
石灰稳定类	≥ 0.8	2 000 ~ 4 000	800 ~ 2 000	100 ~ 300
	0.5 ~ 0.8	1 000 ~ 2 000	400 ~ 1 000	50 ~ 200

9 沥青混合料动态模量

沥青混合料是弹黏性材料。沥青的劲度模量值具有温度和加载频率(时间)依赖性。本研究选用单轴压缩动态模量表征沥青混合料的力学性状。在分析比较国外各标准试验方法的差异性和优缺点的基础上,制订出了适合我国室内试验水平的沥青混合料单轴压缩动态模量试验标准和数据整理方法。

在考察分析诸多影响因素的基础上,选取了8个影响变量,进行了168次动态模量测试和188次验证试验。在此基础上,建立了6个取用不同影响变量的沥青混合料动态模量预估模型,其中,含有沥青含量和空隙率变量的3个多元非线性动态模量预估模型(表8)与试验实测数据的拟合效果最好。

表8 沥青混合料动态模量预估模型

编号	表 达 式	R^2
1	$\lg E^* = 5.2316 - 0.0320T - 0.0199f + 2.5758G^* - 0.1426v_{bg}$ $- 0.0412v_a - 0.0296VCA_{DRC} - 3.0604T^{(-0.0478 + 0.0334 \cdot \lg f)} G^* \cdot f^{-0.0627}$ $- 0.0325T^{(0.1536 + 0.1436 \cdot \lg f)} VCA_{DRC} \cdot f^{-0.2147} + 0.0031fv_{bg} + 0.00012Tv_a$	0.973
2	$\lg E^* = 4.9613 - 0.0229T - 0.0174f - 0.4265Pen - 0.1506v_{bg}$ $- 0.0367v_a + 0.0517VCA_{DRC} + 0.4457T^{(-0.0124 + 0.0114 \cdot \lg f)} Pen \cdot f^{-0.0191}$ $- 0.1941T^{(0.5795 + 0.0344 \cdot \lg f)} VCA_{DRC} \cdot f^{-0.1595} + 0.0035fv_{bg} + 4.519 \times 10^{-5}Tv_a$	0.972
3	$\lg E^* = 5.3341 - 0.0329T - 0.0193f - 2.4481\eta - 0.14421v_{bg} - 0.0390v_a$ $- 0.0302VCA_{DRC} + 2.4443T^{(0.00044 - 0.00034 \cdot \lg f)} \eta \cdot f^{0.00062}$ $+ 0.0261T^{(0.2084 + 0.1222 \cdot \lg f)} VCA_{DRC} \cdot f^{-0.1733} + 0.0030fv_{bg} + 9.197 \times 10^{-5}Tv_a$	0.973

注: $|E^*|$ —沥青混合料动态模量; T —试验温度(°F); f —试验频率(Hz); G^* —60°C、10rad/s下沥青动态剪切复数模量(kPa);
 Pen —25°C下沥青针入度(0.1mm); η —60°C下沥青表观黏度; v_{bg} —沥青质量含量(%); v_a —试验试件空隙率(%);
 VCA_{DRC} —粗集料骨架的松装间隙率(%)。

利用所建立的沥青混合料动态模量预估模型,给出了我国3种常用沥青混合料(AC、AK、SMA)在20°C和10 Hz标准条件下,采用不同沥青类型、沥青用量和空隙率的动态模量参考值(表9、表10、表11)。

表 9 AC 类沥青混合料在 20°C、10 Hz 条件下的单轴动态压缩模量参考值 (MPa)

混合料类型	空隙率	沥青种类及沥青用量								
		AH-70			AH-90			AH-110		
		4%	5%	6%	4%	5%	6%	4%	5%	6%
AC 10	3%	13 074 ~ 14 233	10 027 ~ 10 916	7 690 ~ 8 371	12 010 ~ 13 074	9 211 ~ 10 027	7 064 ~ 7 690	11 032 ~ 12 010	8 461 ~ 9 211	6 489 ~ 7 064
	4%	12 100 ~ 13 172	9 280 ~ 10 102	7 117 ~ 7 747	11 115 ~ 12 100	8 524 ~ 9 279	6 537 ~ 7 117	10 210 ~ 11 115	7 830 ~ 8 524	6 005 ~ 6 537
	5%	11 198 ~ 12 190	8 588 ~ 9 349	6 586 ~ 7 170	10 286 ~ 11 198	7 889 ~ 8 588	6 050 ~ 6 586	9 449 ~ 10 286	7 246 ~ 7 889	5 557 ~ 6 050
	6%	10 363 ~ 11 282	7 948 ~ 8 652	6 095 ~ 6 635	9 520 ~ 10 363	7 301 ~ 7 948	5 599 ~ 6 095	8 745 ~ 9 520	6 706 ~ 7 301	5 143 ~ 5 599
	7%	9 591 ~ 10 441	7 355 ~ 8 007	5 641 ~ 6 141	8 810 ~ 9 591	6 756 ~ 7 355	5 182 ~ 5 641	8 093 ~ 8 810	6 206 ~ 6 756	4 760 ~ 5 182
AC 16	3%	12 572 ~ 13 686	9 641 ~ 10 496	7 394 ~ 8 049	11 548 ~ 12 572	8 856 ~ 9 641	6 792 ~ 7 394	10 608 ~ 11 548	8 135 ~ 8 856	6 239 ~ 6 792
	4%	11 634 ~ 12 666	8 923 ~ 9 713	6 843 ~ 7 449	10 687 ~ 11 634	8 196 ~ 8 923	6 286 ~ 6 843	9 817 ~ 10 687	7 529 ~ 8 196	5 774 ~ 6 286
	5%	10 767 ~ 11 721	8 258 ~ 8 989	6 333 ~ 6 894	9 891 ~ 10 767	7 585 ~ 8 258	5 817 ~ 6 333	9 086 ~ 9 891	6 968 ~ 7 585	5 344 ~ 5 817
	6%	9 965 ~ 10 848	7 642 ~ 8 319	5 861 ~ 6 380	9 153 ~ 9 965	7 020 ~ 7 642	5 384 ~ 5 861	8 408 ~ 9 153	6 448 ~ 7 020	4 945 ~ 5 384
	7%	9 222 ~ 10 039	7 072 ~ 7 699	5 424 ~ 5 905	8 471 ~ 9 222	6 497 ~ 7 072	4 982 ~ 5 424	7 782 ~ 8 471	5 968 ~ 6 497	4 577 ~ 4 982
AC 25	3%	11 422 ~ 12 434	8 759 ~ 9 536	6 718 ~ 7 313	10 492 ~ 11 422	8 046 ~ 8 759	6 171 ~ 6 718	9 638 ~ 10 492	7 391 ~ 8 046	5 668 ~ 6 171
	4%	10 570 ~ 11 507	8 106 ~ 8 825	6 217 ~ 6 768	9 710 ~ 10 570	7 447 ~ 8 106	5 711 ~ 6 217	8 919 ~ 9 710	6 840 ~ 7 447	5 246 ~ 5 711
	5%	9 782 ~ 10 649	7 502 ~ 8 167	5 754 ~ 6 263	8 986 ~ 9 782	6 891 ~ 7 502	5 285 ~ 5 754	8 254 ~ 8 986	6 330 ~ 6 891	4 855 ~ 5 285
	6%	9 053 ~ 9 856	6 943 ~ 7 558	5 325 ~ 5 797	8 316 ~ 9 053	6 378 ~ 6 943	4 891 ~ 5 325	7 639 ~ 8 316	5 859 ~ 6 378	4 493 ~ 4 891
	7%	8 378 ~ 9 121	6 425 ~ 6 995	4 928 ~ 5 364	7 696 ~ 8 378	5 902 ~ 6 425	4 527 ~ 4 928	7 070 ~ 7 696	5 422 ~ 5 902	4 158 ~ 4 527

表 10 AK 类沥青混合料在 20°C、10 Hz 条件下的单轴动态压缩模量参考值 (MPa)

混合料类型	空隙率	沥青种类及沥青用量								
		AH-70			AH-90			AH-110		
		4%	5%	6%	4%	5%	6%	4%	5%	6%
AK 10	3%	13 576 ~ 14 779	10 412 ~ 11 334	7 985 ~ 8 692	12 471 ~ 13 576	9 564 ~ 10 412	7 335 ~ 7 985	11 456 ~ 12 471	8 785 ~ 9 564	6 738 ~ 7 335
	4%	12 564 ~ 13 677	9 635 ~ 10 489	7 390 ~ 8 044	11 541 ~ 12 564	8 851 ~ 9 635	6 788 ~ 7 390	10 602 ~ 11 541	8 131 ~ 8 851	6 235 ~ 6 788
	5%	11 628 ~ 12 658	8 917 ~ 9 708	6 839 ~ 7 445	10 681 ~ 11 628	8 191 ~ 8 917	6 282 ~ 6 839	9 811 ~ 10 681	7 524 ~ 8 191	5 771 ~ 6 282
	6%	10 761 ~ 11 714	8 253 ~ 8 984	6 329 ~ 6 890	9 885 ~ 10 761	7 581 ~ 8 253	5 814 ~ 6 329	9 080 ~ 9 885	6 964 ~ 7 581	5 340 ~ 5 814
	7%	9 959 ~ 10 841	7 637 ~ 8 314	5 857 ~ 6 376	9 148 ~ 9 959	7 016 ~ 7 637	5 380 ~ 5 857	8 403 ~ 9 148	6 445 ~ 7 016	4 942 ~ 5 380
AK 16	3%	11 216 ~ 12 210	8 602 ~ 9 364	6 597 ~ 7 181	10 303 ~ 11 216	7 902 ~ 8 602	6 060 ~ 6 597	9 464 ~ 10 303	7 258 ~ 7 902	5 567 ~ 6 060
	4%	10 380 ~ 11 300	7 961 ~ 8 666	6 105 ~ 6 646	9 535 ~ 10 380	7 313 ~ 7 961	5 608 ~ 6 105	8 759 ~ 9 535	6 717 ~ 7 313	5 152 ~ 5 608
	5%	9 606 ~ 10 458	7 367 ~ 8 020	5 650 ~ 6 151	8 824 ~ 9 606	6 768 ~ 7 367	5 190 ~ 5 650	8 106 ~ 8 824	6 217 ~ 6 768	4 768 ~ 5 190
	6%	8 890 ~ 9 678	6 818 ~ 7 422	5 229 ~ 5 692	8 167 ~ 8 890	6 263 ~ 6 818	4 803 ~ 5 229	7 502 ~ 8 167	5 753 ~ 6 263	4 412 ~ 4 803
	7%	8 228 ~ 8 957	6 310 ~ 6 869	4 839 ~ 5 268	7 558 ~ 8 228	5 796 ~ 6 310	4 445 ~ 4 839	6 943 ~ 7 558	5 324 ~ 5 796	4 083 ~ 4 445
AK 25	3%	9 855 ~ 10 728	7 558 ~ 8 228	5 796 ~ 6 310	9 053 ~ 9 855	6 943 ~ 7 558	5 324 ~ 5 796	8 316 ~ 9 053	6 377 ~ 6 943	4 891 ~ 5 324
	4%	9 120 ~ 9 929	6 994 ~ 7 614	5 364 ~ 5 839	8 378 ~ 9 120	6 425 ~ 6 994	4 927 ~ 5 364	7 696 ~ 8 378	5 902 ~ 6 425	4 526 ~ 4 927
	5%	8 440 ~ 9 188	6 473 ~ 7 047	4 964 ~ 5 404	7 753 ~ 8 440	5 946 ~ 6 473	4 560 ~ 4 964	7 122 ~ 7 753	5 462 ~ 5 946	4 189 ~ 4 560
	6%	7 811 ~ 8 504	5 991 ~ 6 521	4 594 ~ 5 001	7 175 ~ 7 811	5 503 ~ 5 991	4 220 ~ 4 594	6 591 ~ 7 175	5 055 ~ 5 503	3 877 ~ 4 220
	7%	7 229 ~ 7 870	5 544 ~ 6 035	4 252 ~ 4 629	6 641 ~ 7 229	5 093 ~ 5 544	3 906 ~ 4 252	6 100 ~ 6 641	4 678 ~ 5 093	3 588 ~ 3 906

表 11 SMA 类沥青混合料在 20°C、10 Hz 条件下的单轴动态压缩模量参考值 (MPa)

混合料类型	空隙率	沥青种类及沥青用量								
		AH~70			AH~90			AH~110		
		4%	5%	6%	4%	5%	6%	4%	5%	6%
SMA 10	3%	14 527~15 814	11 141~12 128	8 544~9 301	13 344~14 527	10 234~11 141	7 848~8544	12 258~13 344	9 401~10 234	7 209~7 848
	4%	13 444~14 635	10 310~11 224	7 907~8 608	12 349~13 444	9 471~10 310	7 263~7 907	11 344~12 349	8 700~9 471	6 672~7 263
	5%	12 442~13 544	9 542~10 387	7 318~7 966	11 429~12 442	8 765~9 542	6 722~7 318	10 498~11 429	8 051~8 765	6 175~6 722
	6%	11 514~12 535	8 830~9 613	6 772~7 372	10 577~11 514	8 112~88 30	6 221~6 772	9 716~1 0577	7 451~8 112	5 714~6 221
	7%	10 656~11 600	8 172~8 896	6 267~6 823	9 789~10 656	7 507~8 172	5 757~6 267	8 992~9 789	6 896~7 507	5 288~5 757
SMA 16	3%	11 604~12 632	8 899~9 688	6 825~7 430	10 659~11 604	8 175~8 899	6 269~6 825	9 791~10 659	7 509~8 175	5 759~6 269
	4%	10 739~11 691	8 236~8 966	6 316~6 876	9 865~10 739	7 565~8 236	5 802~6 316	9 062~9 865	6 949~7 565	5 330~5 802
	5%	9 938~10 819	7 622~8 297	5 845~6 363	9 129~9 938	7 001~7 622	5 369~5 845	8 386~9 129	6 431~7 001	4 932~5 369
	6%	9 198~10 013	7 054~7 679	5 410~5 889	8 449~9 198	6 479~7 054	4 969~5 410	7 761~8 449	5 952~6 479	4 565~4 969
	7%	8 512~9 266	6 528~7 106	5 006~5 450	7 819~8 512	5 997~6 528	4 599~5 006	7 183~7 819	5 508~5 997	4 224~4 599
SMA 25	3%	9 521~10 364	7 301~7 949	5 600~6 096	8 746~9 521	6 707~7 301	5 144~5 600	8 034~8 746	6 161~6 707	4 725~5 144
	4%	8 811~9 592	6 757~7 356	5 182~5 641	8 094~8 811	6 207~6 757	4 760~5 182	7 435~8 094	5 702~6 207	4 373~4 760
	5%	8 154~8 877	6 254~6 808	4 796~5 221	7 490~8 154	5 744~6 254	4 405~4 796	6 881~7 490	5 277~5 744	4 047~4 405
	6%	7 546~8 215	5 787~6 300	4 438~4 832	6 932~7 546	5 316~5 787	4 077~4 438	6 368~6 932	4 883~5 316	3 745~4 077
	7%	6 984~7 603	5 356~5 831	4 108~4 472	6 415~6 984	4 920~5 356	3 773~4 108	5 893~6 415	4 519~4 920	3 466~3 773

10 路基湿度状况

依据路基的湿度来源和变迁特点,将路基的湿度状况分为 3 类:①受地下水位影响的潮湿类路基;②受大气湿度影响的干燥类路基;③兼受地下水位和大气湿度影响的中湿类路基。

采用滤纸法试验标定了 12 种土的 Fredlund & Xing 土-水特性曲线模型参数,分别建立了路基土含水率和基质吸力关系模型:

$$\theta_w = c(h) \frac{\theta_s}{\left\{ \ln \left[\exp(1) + \left(\frac{h_s}{a} \right)^b \right] \right\}^c} \quad (7)$$

$$c(h) = 1 - \frac{\ln \left(1 + \frac{h_s}{h_r} \right)}{\ln \left(1 + \frac{10_6}{h_r} \right)}$$

式中: θ_w ——体积含水率;

θ_s ——饱和的体积含水率;

h_s ——基质吸力;

h_r ——与剩余含水率对应的基质吸力;

a 、 b 、 c ——参数(表 12)。

表 12 土-水特性曲线数据及其拟合参数

参 数	a (kPa)	b	c	h_r (kPa)	相关系数 R^2
京珠广韶 K275(砂性土)	7.32	0.75	0.69	617.48	0.971
京珠广韶 K190(黏性土)	83.54	0.89	0.48	300	0.975
京珠广韶 K162(黏性土)	219.00	1.07	0.66	6786.96	0.985

续上表

参 数	a (kPa)	b	c	h_r (kPa)	相关系数 R^2
祁临高速 K949 + 800 (粉质低液限黏土)	5.25	5.29	0.13	30.66	0.995
祁临高速 K963 + 600 (粉质低液限黏土)	5.64	3.45	0.14	49.65	0.996
石安高速 K292 + 800 (粉质低液限砂土)	10.08	20.00	0.075	22.96	0.982
商荷高速 K4 + 100 (粉质低液限黏土)	95.50	1.72	0.37	1133.84	0.997
重遂高速 K400 (低液限砂土)	7.74	1.93	0.29	139.02	0.998
重遂高速 K800 (低液限黏土)	9.70	3.18	0.20	59.38	0.991
沪宁高速 K106 + 800 (黏土)	161.84	4.59	0.11	694.35	0.993
沪宁高速 K168 + 500 (中液限黏土)	42.88	20.00	0.03	71.10	0.987
沪宁高速 K258 + 400 (高液限黏土)	35.88	1.73	0.025	30.00	0.987

干燥类路基土的基质吸力与大气湿度(以湿度指数 TMI 表征)和路基土性质(以塑性指数和细粒土含量表征)有关。在 12 个路段上采集了土样和湿度指数,测定了土的参数和基质吸力,并同 Perera 等的 44 个数据一起进行回归分析,建立了干燥类路基土的基质吸力预估模型。潮湿类路基土的基质吸力与距地下水位的距离成正比。

应用土-水特性曲线和基质吸力预估模型,预估了干燥类湿度状况路基在不同大气湿度指数时的平衡湿度推荐值(表 13),以及潮湿类路基的不同土组平衡湿度推荐值(表 14)。通过归并和插值,提出了中湿类路基在不同大气湿度指数时的不同土组平衡湿度推荐值(表 15)。

表 13 干燥类路基典型土组在不同 TMI 值时的湿度状况推荐值

TMI 值	湿度指标	砂	黏土质砂	粉土	黏土
-50	含水率 w (%)	11.80 ~ 13.04	6.68 ~ 7.39	6.78 ~ 12.79	6.87 ~ 11.74
	饱和度 S_r (%)	0.75 ~ 0.82	0.46 ~ 0.51	0.45 ~ 0.64	0.42 ~ 0.67
-30	含水率 w (%)	12.25 ~ 13.54	8.13 ~ 8.99	8.39 ~ 15.34	8.53 ~ 14.96
	饱和度 S_r (%)	0.78 ~ 0.86	0.57 ~ 0.62	0.56 ~ 0.76	0.52 ~ 0.86
-10	含水率 w (%)	12.50 ~ 13.82	9.29 ~ 10.27	9.63 ~ 17.01	9.73 ~ 17.04
	饱和度 S_r (%)	0.79 ~ 0.87	0.65 ~ 0.71	0.64 ~ 0.85	0.59 ~ 0.93
10	含水率 w (%)	12.63 ~ 13.96	10.26 ~ 11.34	10.68 ~ 18.21	10.61 ~ 18.73
	饱和度 S_r (%)	0.80 ~ 0.88	0.71 ~ 0.79	0.71 ~ 0.96	0.64 ~ 0.96
30	含水率 w (%)	12.69 ~ 14.02	11.01 ~ 12.17	11.61 ~ 18.68	11.25 ~ 19.39
	饱和度 S_r (%)	0.80 ~ 0.89	0.77 ~ 0.85	0.77 ~ 0.98	0.68 ~ 0.98
50	含水率 w (%)	12.71 ~ 14.05	11.54 ~ 12.76	12.40 ~ 18.96	11.75 ~ 19.66
	饱和度 S_r (%)	0.80 ~ 0.89	0.80 ~ 0.89	0.82 ~ 0.99	0.71 ~ 0.98
70	含水率 w (%)	12.73 ~ 14.07	11.90 ~ 13.16	13.00 ~ 19.16	12.14 ~ 19.78
	饱和度 S_r (%)	0.81 ~ 0.89	0.83 ~ 0.91	0.86 ~ 0.99	0.74 ~ 0.99

表 14 潮湿类路基典型土组的湿度状况推荐值

土组	毛细水上升最大高度 h_0 (m)	含水率 w (%)	饱和度 S_r (%)
砂	0.9	12.81 ~ 15.00	0.81 ~ 0.95
黏土质砂	0.9	12.99 ~ 14.35	0.90 ~ 1.00
粉土	3 ~ 3.36	11.17 ~ 18.92	0.74 ~ 0.99
黏土	6 ~ 8.26	10.18 ~ 18.68	0.62 ~ 0.95

表 15 中湿类路基典型土组的湿度状况推荐值

TMI 值	湿度指标	砂	黏土质砂	粉土	黏土
-50	含水率 w (%)	12.42 ~ 15.00	7.03 ~ 14.35	6.78 ~ 18.92	6.87 ~ 18.68
	饱和度 S_r (%)	0.79 ~ 0.95	0.49 ~ 1.00	0.45 ~ 1.00	0.42 ~ 0.95
-30	含水率 w (%)	12.81 ~ 15.00	8.56 ~ 14.35	8.39 ~ 18.92	8.53 ~ 18.68
	饱和度 S_r (%)	0.81 ~ 0.95	0.59 ~ 1.00	0.56 ~ 1.00	0.52 ~ 0.95
-10	含水率 w (%)	12.81 ~ 15.00	9.78 ~ 14.35	9.63 ~ 18.92	9.73 ~ 18.68
	饱和度 S_r (%)	0.81 ~ 0.95	0.68 ~ 1.00	0.64 ~ 1.00	0.59 ~ 0.95
10	含水率 w (%)	12.81 ~ 15.00	10.80 ~ 14.35	10.68 ~ 18.92	10.18 ~ 18.73
	饱和度 S_r (%)	0.81 ~ 0.95	0.75 ~ 1.00	0.71 ~ 1.00	0.62 ~ 0.96
30	含水率 w (%)	12.81 ~ 15.00	11.59 ~ 14.35	11.17 ~ 18.92	10.18 ~ 19.39
	饱和度 S_r (%)	0.81 ~ 0.95	0.81 ~ 1.00	0.77 ~ 1.00	0.62 ~ 0.98
50	含水率 w (%)	12.81 ~ 15.00	12.15 ~ 14.35	11.17 ~ 18.96	10.18 ~ 19.66
	饱和度 S_r (%)	0.81 ~ 0.95	0.84 ~ 1.00	0.74 ~ 1.00	0.62 ~ 0.98
70	含水率 w (%)	12.81 ~ 15.00	12.53 ~ 14.35	11.17 ~ 19.16	10.18 ~ 19.78
	饱和度 S_r (%)	0.81 ~ 0.95	0.87 ~ 1.00	0.74 ~ 1.00	0.62 ~ 0.99

对所选 12 个路段的土样进行不同含水率和压实度条件下的回弹模量测试。以最佳含水率时的回弹模量作为标准值,不同含水率时的回弹模量与标准值之比称为回弹模量湿度调整系数。利用这些数据建立了回弹模量湿度调整系数模型。并进而由 3 类路基的湿度预估值推演出相应的非冰冻地区回弹模量湿度调整系数(表 16、表 17、表 18)。

表 16 干燥类路基回弹模量湿度调整系数 F_s

TMI 值	砂	黏土质砂	粉土	黏土
-50	0.865 ~ 0.956	1.462 ~ 1.616	1.352 ~ 1.548	1.217 ~ 1.706
-30	0.788 ~ 0.871	1.281 ~ 1.416	1.005 ~ 1.230	0.730 ~ 1.604
-10	0.748 ~ 0.826	1.087 ~ 1.201	0.759 ~ 0.958	0.565 ~ 1.506
10	0.728 ~ 0.804	0.905 ~ 1.000	0.583 ~ 0.774	0.512 ~ 1.413
30	0.718 ~ 0.794	0.766 ~ 0.847	0.508 ~ 0.654	0.491 ~ 1.331
50	0.714 ~ 0.789	0.674 ~ 0.745	0.419 ~ 0.618	0.481 ~ 1.261
70	0.712 ~ 0.787	0.616 ~ 0.681	0.406 ~ 0.597	0.474 ~ 1.177

表 17 潮湿类路基回弹模量湿度调整系数 F_s

路基层位	砂	黏土质砂	粉土	黏土
路基顶面	0.802 ~ 0.887	0.553 ~ 0.611	0.408 ~ 0.695	0.543 ~ 1.461
路基工作区底面	0.506 ~ 0.559	0.409 ~ 0.452	0.399 ~ 0.622	0.531 ~ 1.447

表 18 中湿类路基回弹模量湿度调整系数 F_s

TMI 值	砂	黏土质砂	粉土	黏土
-50	0.533 ~ 0.909	0.431 ~ 1.539	0.399 ~ 1.548	0.531 ~ 1.706
-30	0.533 ~ 0.845	0.431 ~ 1.348	0.399 ~ 1.231	0.531 ~ 1.604
-10	0.531 ~ 0.845	0.431 ~ 1.143	0.399 ~ 0.958	0.531 ~ 1.506
10	0.529 ~ 0.845	0.431 ~ 0.952	0.399 ~ 0.775	0.513 ~ 1.461
30	0.528 ~ 0.845	0.431 ~ 0.808	0.399 ~ 0.653	0.492 ~ 1.461
50	0.526 ~ 0.845	0.431 ~ 0.711	0.399 ~ 0.695	0.481 ~ 1.461
70	0.524 ~ 0.845	0.431 ~ 0.649	0.399 ~ 0.695	0.476 ~ 1.461