

高等重交通半刚性基层典型沥青路面 结构优化与抗车辙力学特性研究

芮勇勤 邓国瑞 梅崇文 侯洁 史修银 编著



东北大学出版社
Northeastern University Press

高等重交通半刚性基层典型沥青路面结构优化 与抗车辙力学特性研究

芮勇勤 邓国瑞 梅崇文 侯洁 史修银 编著

东北大学出版社

• 沈阳 •

© 芮勇勤 邓国瑞 梅崇文 侯洁 史修银 2015

图书在版编目 (CIP) 数据

高等重交通半刚性基层典型沥青路面结构优化与抗车辙力学特性研究 / 芮勇勤等编著. — 沈阳: 东北大学出版社, 2015. 11
ISBN 978-7-5517-1145-6

I. ①高… II. ①芮… III. ①重交通道路沥青—半刚性基层—沥青路面—研究
IV. ①U416.217

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2015) 第 269312 号

内 容 提 要

本书以重载交通高速公路的典型沥青路面结构病害问题为研究对象, 以现场调研、检测、试验、计算和模拟等研究手段, 深入地研究了半刚性基层沥青路面病害发生、发展的机理, 建立半刚性基层典型沥青路面结构; 通过分析计算, 优化了混合料配合比, 充分发挥了半刚性基层沥青路面稳定性高、抗车辙性能好、造价低的特点, 适应中国公路建设的跨越式发展。半刚性基层沥青路面结构设计理论将长期发展、丰富完善, 特别是随着高性能材料的开发应用日新月异, 要以理论为指导, 建立半刚性基层沥青路面的新设计理念, 将合适的材料用在沥青路面的典型结构中及合适的层位上, 实现对重载交通半刚性基层沥青路面早期病害的控制。本书成果在工程中进行广泛应用, 还需深入研究; 同时开展的研究可供相关领域工程技术人员教学、研究学习参考。

出 版 者: 东北大学出版社

地址: 沈阳市和平区文化路3号巷11号 110004

电话: 024—83687331 (市场部) 83680267 (社务室)

传真: 024—83680180 (市场部) 83680265 (社务室)

E-mail: neuph@neupress.com Web: <http://www.neupress.com>

印 刷 者: 沈阳第二市政建设工程公司印刷厂

发 行 者: 东北大学出版社

幅面尺寸: 185mm × 260mm

印 张: 21.75

字 数: 556千字

出版时间: 2015年11月第1版

印刷时间: 2015年11月第1次印刷

责任编辑: 汪彤彤

责任校对: 叶 子

封面设计: 刘江旻

责任出版: 唐敏志

ISBN 978-7-5517-1145-6

定价: 79.00 元

前 言

目前,半刚性基层沥青路面已经成为中国沥青路面的典型结构,在这方面的研究处于世界领先地位。大规模、快速度的建设带来了一些质量问题,特别是重载交通半刚性基层沥青路面出现的早期病害问题比较严重。为此,本项目以重载交通高速公路的典型沥青路面结构病害问题为研究对象,以现场调研、检测、试验、计算和模拟等研究手段,深入地研究了半刚性基层沥青路面病害发生、发展的机理,建立半刚性基层典型沥青路面结构,通过分析计算优化了混合料配合比,充分发挥了半刚性基层沥青路面造价低的特点,实现其特有的稳定高、抗车辙等优点,适应了中国公路建设的跨越式发展。半刚性基层沥青路面结构设计理论将长期发展、丰富完善,特别是随着高性能材料的开发应用日新月异,如何有效地用好新材料,就是要以理论为指导,建立半刚性基层沥青路面的新设计理念,将合适的材料用在沥青路面的典型结构中合适的层位上,实现控制重载交通半刚性基层沥青路面出现早期病害问题的作用。将深入开展如下研究工作。

在对高速公路典型沥青路面早期损害调查检测的基础上,认识到半刚性基层沥青面层压实度及残留空隙率对其路用性能影响较大,压实度标准低、残留空隙率大,容易产生渗水或二次追密现象;揭示沥青混合料的级配、沥青用量对半刚性基层沥青路面路用性能的重要作用,即诱使产生失稳型车辙;检测半刚性基层沥青层间连续性,半刚性基层是路面结构中的主抗疲劳层,面层产生拉应力且层间滑动时,半刚性基层为主抗疲劳层;在层间滑动状态下,路面结构的主抗车辙变形功能层扩展至整个沥青面层;利用 LIPP 温度预估方法,准确预测出沥青路面结构内部温度梯度的分布状况,结合线收缩系数试验和低温拉伸蠕变试验,分析半刚性基层典型结构的面层低温温缩特性;进一步揭示半刚性基层典型沥青路面结构层内部靠近面层顶面的位置低温温缩应力最大,与结构层层间接触无关,半刚性基层厚度的增加极大地提高了沥青路面的疲劳寿命;认识到同级配半刚性基层材料最大干密度随水泥剂量的增加而提高,振动、重型击实混合料最大干密度比值在 $1.039 \sim 1.042\text{g/cm}^3$ 范围,不同成型方式振动成型试件的抗压强度是重型击实成型试件的 $1.26 \sim 2.18$ 倍、振动击实成型试件的劈裂强度是重型击实成型试件的 $1.68 \sim 1.96$ 倍;通过灰色关联决策法,在多指标评价中找出半刚性基层沥青路面综合路用性能最佳的级配,实现了级配优化,振动成型试件较重型击试件强度、收缩性能和抗冲刷性能方面明显提高。

通过室内试验得出了半刚性基层材料在不同水泥剂量、级配和成型方式下的疲劳方程,受力分析揭示水泥碎石做上基层、二灰碎石做下基层比较合理,水泥碎石的模量控制在 1250MPa ,厚度控制在 $25 \sim 30\text{cm}$ 范围内比较合适;GTM 以优化级配为标准提出各种参数,而优化级配均为 VMA 最小的级配,沥青混合料集料嵌挤状态对路用性能起到决定性的作用,路用性能变化可以归结为嵌挤状态的有效改变,用以评判抗高温车辙、抗水损能力;超载对于半刚性基层沥青路面危害很大,路面应力随超载率的增加不断上升,每超载 10% 应力增长 $9.2\% \sim 9.5\%$;路面等效寿命在超载 100% 的情况下,使用 1 个月便会发生破坏,带级配碎石过渡层的路面结构比半刚性基层的路面结构应力水平、路面等效寿命高,级配碎石过渡层有着良好承载作用和应力分散作用;弯沉疲劳寿命为半刚性基层沥青路面疲劳寿命的主控指标,带级配碎石的路面结构要比半刚性基层的路面结构疲劳寿命更大;采用带级配碎石过渡层的沥青路面结构对于增加道路使用寿命优于单纯增加半刚性厚度,采用振动成型方式优化级配碎石过渡层设计满足设计要求。

DG25 高速公路路面状况历年检测结果整体良好,橡胶沥青路段除局部路面破损、车辙深度和弯沉测值较大外,其他测试指标均表现为良好,泡沫沥青和乳化沥青冷再生路段整体状况保持良好;专项养护路段路面破损状况良好,个别路段存在横裂、纵裂,弯沉测值偏大,成为路面破损潜在的威胁,另外有个别路段平整度 *IRI* 和横向力 *SFC* 提高不显著,表明及时采取预防性养护措施对路面使用性能的保持非常重要;利用改进的 TOPSIS 法进行 DG25 高速公路路面的综合评价,从结果来看,改进的 TOPSIS 法采用的主客观相结合的赋权方法达到了良好的效果;路面使用性能评价有模糊数学方法、系统分析法、回归模型法和灰色理论法等, *PSI* 模型第一次引入专家评分技术,以使用者角度进行评分; *MCI* 模型虽然也是以专家评价技术为依托,但道路技术人员组成了 *MCI* 模型的专家评价组; *PCI* 评价克服了其缺陷,与 *MCI* 评价模型比较更加完整和严谨; *UCI* 模型比较简便易用,但准确性较差,在路面使用性能的综合评价上没有得到推广;本项目以改进 TOPSIS 法对沥青路面综合评价,发现用 TOPSIS 法使得评价更为严谨和科学;运用 Abaqus 有限元软件建立温度场模型,揭示沥青路面的中下面层温差较小,计算得出在标准荷载和重载条件下路面都能满足抗剪强度要求,以此验证了路面结构设计的准确性。

通过研究,对半刚性基层沥青路面结构、材料一体化研究,借鉴层位分工的理念,运用振动成型方式成型试件,更贴近真实施工状况。研究基于振动成型的半刚性材料配合比设计新方法,系统对比了振动成型方式及传统成型方式对路面结构混合料路用性能的影响,特别是对不同设计方法、不同胶结料剂量、不同级配的水泥稳定碎石进行了大规模的抗疲劳能力对比研究;提出了基于振动成型的级配碎石配合比设计新方法,分析比较了增加级配碎石过渡层对路面疲劳寿命的影响,推荐了带级配碎石过渡层的典型沥青路面结构;根据层位分工,以及不同的设计方法设计的材料性质各有优劣的特点,提出了不同配合比设计方法设计的材料根据其功能充分发挥其优点的想法,对比了材料抗高温车辙、抗低温开裂以及疲劳寿命等性能,提出了不同层位根据其分工采用不同配合比设计方法的思想。研究成果应用于多条高速公路的检测评价与施工设计中,取得了良好的经济效益和社会效益,积累了丰富的施工经验,可为相类似工程的设计、施工和研究提供借鉴与工程技术指导。

以豫北国道 EG107 为依托工程,通过项目现场调查和评价,在项目老路基路面使用现状分析的基础上,进行改扩建方案比选,提出了最佳设计方案。根据断裂力学的理论知识和应力强度因子的计算方法,将预知裂缝区域定义在下面层,并贯穿整个横断面,利用有限元软件,建立三维模型分析计算。新旧路面各结构层设置台阶拼接方式,比较车辆荷载作用不同位置时,对纵向和横向裂缝反射的影响,为减少裂缝的反射与扩展,对新老路面的拼接提出一些有效措施。在春夏高温季节,分别在标准轴载和重载(3 倍标准轴载)作用下,利用 Abaqus 有限元分析软件分析验证原有路面的两种处置方案对路面的抗车辙特性的影响。公路改扩建中最关键的问题就是如何降低新旧路基的不均匀沉降,保证路基的整体稳定性。文中对新老路基的衔接方案进行分析计算,确定设计方案安全、经济合理。通过对新老路基稳定性、新老路面衔接方案及原有路面处理方案的分析比较,认为依托工程的改扩建方案合理、有效。为今后的改扩建项目的设计施工提供依据。

“白加黑”路面改造工程在国内外还处于经验探索和试验路阶段,很多实验方法、设计理论和实用技术问题解决尚不完善。加铺层方案的选择多结合当地具体情况,提出适合改造工程地区地理环境、气候条件、交通状况的加铺层设计方案和路面结构型式。“白加黑”路面“反射裂缝”问题的存在,一直以来成为困扰改造工程维修养护、施工设计的一个难题。

沥青路面设计规范虽然对沥青加铺层设计做了有关的要求,但不尽完善,很多“白加黑”路面“反射裂缝”控制效果仍然不够理想。依托 FG324 厦门段交通、气候等特点,针对“白加黑”路面改造工程,在分析沥青加铺层表面层、中(下)面层沥青混合料高温性能和水稳性能的基础上,通过表面层沥青混合料性能试验、中(下)面层沥青混合料性能试验,揭示了 ARAC-13、SMA-13、AC-20、ATB-25 沥青混合料设计配合比下的力学性能,提出了针对性的“白加黑”路面结构设计方案;利用 Phase^{2D} 有限元技术;对“白加黑”路面在中轻交通、重交通、特重交通荷载工况作用下的力学特性进行了计算分析,推荐了“白加黑”路面结构设计方案,验算了路表总弯沉和层底弯拉应力的分布规律和特点,其结果满足设计施工规范要求。

在本书的编写过程中,借鉴了一些相关的技术设计、现场管理和软件应用,受益匪浅,在此深表感谢!

希望《高等重交通半刚性基层典型沥青路面结构优化与抗车辙力学特性研究》一书,在实际工程中的设计、分析和仿真等方面,能给予广大读者启迪和帮助。

由于编著者的水平有限,加之时间仓促,书中难免有疏漏和错误之处,恳请读者不吝赐教。

编著者于望湖苑

2015 年 8 月 18 日

Research on the Typical Asphalt Pavement Structure Optimization of the Semi – rigid Base and it's Anti – rut Mechanical Properties in the Advanced Heavy Traffic

PREFACE

At present, the semi-rigid base asphalt pavement has become the typical structure of asphalt surFAce, in which aspect China ranks in the front place in the world. Large-scale, fast speed of construction has brought some quality problem, especially some early damages is more serious in heavy traffic problems of semi-rigid base asphalt pavement. To this end, this thesis mainly studies on the typical structure of asphalt pavement damages in overloading traffic highway by site investigation, test, calculation and simulation research, in order 'to have a further understanding of semi-rigid base asphalt pavement disease occurrence and development mechanism. By setting up a typical semi-rigid base asphalt pavement structure, analyzing the calculation to optimize asphalt mixture design, and giving full play to the cost-low characteristic of semi-rigid base asphalt pavement, its unique advantages of high stability, resistance to rutting is achieved. Also, it adapts to the leap-forward development of China's highway construction. Theory of semi-rigid base asphalt pavement structure design will develop and perfect for the long term, especially with the rapid progress in the development and application of high-performance materials. How to use new materials effectively should be guided by the theory and establish a new design concept of the semi-rigid base asphalt using suitable material properly in the typical pavement structures of strata to control overloading traffic semi-rigid base asphalt pavement early disease problems. This paper will carry out a further research as the followings.

On the basis of investigation and detection of early damages in the typical highway asphalt pavement, the degree of compaction in semi-rigid base asphalt surFAce and residual porosity greatly influencing the performance of its road use, low degree of compaction standard and large residual porosity, water seepage tendency or secondary chase phenomenon is to be studied; the asphalt mixture gradation, the important role of asphalt content of half rigid road asphalt pavement, namely tempted to generate instability rutting is to be revealed; detection of semi-rigid base asphalt interlayer continuity, semi-rigid base being the primary fatigue resistance of the pavement structure layer is to be tested. When there is a tensile stress and inter-laminar sliding, the semi-rigid base is the mainly fatigue layer; in the interlayer sliding mode, main rut deformation resistance function of pavement structure layer extended to the whole asphalt layer; using LIPP temperature forecast methods, the internal temperature gradient distribution of the asphalt pavement structure is to be accurately forecasted, combining with the linear shrinkage coefficient test and low temperature tensile creep test, analysis of semi-rigid base surFAce low shrinkage characteristics of typical structure is to be analyzed; in the top position of typical semi-rigid base asphalt pavement structure layer inside near the surFAce, low shrinkage stress is the largest, which has nothing to do with structure contact between layers. The increases of the thickNess of semi-rigid base greatly improve the fatigue life of asphalt surFAce; semi-rigid base material maximum dry density increases with the increase of dosage of cement, vibration, maximum dry density of heavy compaction mixture ratio in the range of $1.039-1.042\text{g/cm}^3$. The compressive strength of different ways of forming the vibration molding specimens is 1.26-2.18

times of heavy compaction molding of the specimen's. The vibration compaction cleavage strength of specimen is 1.68-1.96 times of heavy compaction molding specimen's; by grey incidence decision, integrated ways with best performance grading of comprehensive road in multi-index evaluation of semi-rigid base asphalt pavement is to be found out to realize the significant improving in graded optimization, strength of vibration molding specimen compared to heavy blow specimen, shrinkage performance and anti-scouring performance.

The semi-rigid base material is obtained by indoor experiment in different cement dosage, grading and forming of the fatigue equation. The stress analysis indicates that using cement macadam for the upper base course and lime-fly-ash bound macadam for the under base is a reasonable. Gravel modulus of cement should be controlled to be about 1250 MPa, and the thickNess is suitable within the range from 25 to 30 cm; various parameters are put forward by GTM research, based on optimized grading which is the minimum VMA gradation. Asphalt mixture aggregate embedded squeezed state plays a decisive role. Changes of road performance can be concluded as the effective changes of embedded squeezed state to judge the ability to resist high temperature rut and water damage. Overload does great harm to the semi-rigid base asphalt pavement. The pavement stress rises with the increase of overloading rate. As the overloading increases by 10% each time, the pavement stress will increase by 9.2%-9.5%; on the condition of 100% overloading, road equivalent life will be short as one month to be damaged. The stress level of grading gravelly interlayer pavement structure is higher than semi-rigid base asphalt pavement structure and lasts longer in pavement equivalent. Grading macadam transition layer has a good bearing and stress dispersion effect; deflection fatigue life of semi-rigid base is the main controlling index of asphalt pavement fatigue life. The use of grading macadam pavement structure contributes to the longer service time of the road than simply increase the thickNess of semi-rigid base; the adoption of the vibration molding method to optimize the design of the grading macadam transition layer meets the design requirements.

DG25 highway pavement condition is overall good over the years. Except partial road damages, rutting depth and high measured value of deflection, the other test results of the rubber asphalt road do well, foamed bitumen and emulsified asphalt cold-regenerated section are in good condition; pavement damage condition of special maintenance sections is good although the individual sections of there are transverse cracks, longitudinal cracks and measured value of deflection is a bit high in some specific sections, which becomes a potential threat to the pavement damage. In addition, the increase of road roughness *IRI* and transverse force *SFC* is not significant, which shows that it is important to take preventive maintenance measures to maintain the good performance of the pavement. As for the use of improved TOPSIS method for DG25 highway pavement comprehensive evaluation, from the results, it is clear that the improved TOPSIS method by adopting the empowerment of a combination of subjective and objective has achieved good effect; pavement performance evaluation includes fuzzy mathematics method, system analysis method, regression model and gray theory method, etc. *PSI* model introduces expert evaluation technology for the first time and grades from the perspective of the users; although *MCI* model is based on expert evaluation technology, expert evaluation group of *MCI* model is formed by road technical personnel; *PCI* evaluation overcomes the defects and is more complete and rigorous compared with *MCI* evaluation model; *UCI* model is easy to use, however, the accuracy is poor and it did not get a promotion on the comprehensive evaluation of pavement performance; in this paper, to improve the comprehensive evaluation of asphalt pavement by the TOPSIS method, it is found that the TOPSIS method makes the evaluation more rigorous and scientific; with a temperature field model is established by using the Abaqus finite element

software, it is revealed that the temperature difference of the middle and lower surface is small, and under the condition of the standard load and overload, pavements can meet the requirements of shear strength, in order to verify the accuracy of the pavement structure.

Through this paper by the research of integration of semi-rigid base asphalt pavement structure, integration of material and the concept of division of strata, using the vibration molding specimens is more suitable for the real construction situation. Based on the vibration molding, a new method of semi-rigid material mixture ratio design, the system has compared performance impacts on the pavement mixture road between the vibration molding method and the traditional forming method, especially for a large-scale comparative study on the fatigue resistance with different design methods, different cement dosages, and different levels with the cement stabilized gravel; on account of vibration molding, a new method of grading macadam mixture ratio design has been proposed. It analyzes and compares the influence on the pavement fatigue life caused by increasing grading macadam transition layer, and recommends the typical asphalt pavement with graded gravel transition layer structure; according to the division of strata, and the material properties of different design methods of the characteristics of each owning advantages and disadvantages, it puts forward different mixture ratio design method to design the material according to the function in order to give full play to its advantages. The material resistance to high temperature rutting, low temperature cracking resistance and fatigue life is compared. It is also proposed that different layers according to the division of labor should employ different mixture ratio design methods. Research results have been applied to multiple test-evaluations and construction designs of the highway, obtained good economic and social benefits, and accumulated rich experience in construction and conclusions which provides guidance to similar engineering designs, constructions, research of references and engineering technology.

This paper that mainly studies the key technologies of the extension of the old road, National Road, provides the reference for the reconstruction project in the future. Through the investigation and evaluation of the project site, this paper based on the project of Henan North Road EG107, puts forward the optimal design scheme, by analysis of the current situation of the use of the old pavement project. According to the theory of fracture mechanics and the knowledge of the stress intensity factor calculation method, the crack area defined in the following layer would predict, analysis and calculate of 3D model establishment and throughout the transect and using finite element software. Comparison of the new and old pavement structure layer of each step in splicing mode, the vehicle load in different position have effect on the longitudinal and transverse crack reflection, so that it can reduce the reflection and extension of cracks and the mosaic of old pavement and puts forward some effective measures. By using the Abaqus finite element analysis software, it can analysis of spring and summer high temperature, respectively, under the standard axle load and heavy load (3 times the standard axle load) and under the action of impact, rutting characteristics of two kinds of solutions to verify pavement on pavement. The key problem of the road is how to reduce the uneven settlement of new and old roadbed, ensure the overall stability of the roadbed, calculation and analysis of subgrade connection scheme in this paper, design scheme of the security, economic and reasonable.

Based on the old and new embankment stability, connection scheme and original plan of pavement treatment, and thinking the extension scheme depends on the reasonable and effective engineering, it can provide a basis for future design and construction of the extension project.

The reconstruction project of white and black pavement is still in the phase of experience explore and experiment at home and abroad, experiment methods, design theories and practical technical problems solving are still not perfect. The choice of overlay project should combine

with local circumstances, the overlay design scheme and pavement structure should be suitable for the geographic environment, climate condition, traffic state of the project area. The reflection crack of white and black pavement has always been a different problem which perplexes the maintenance and construction design of reconstruction project. Although asphalt pavement design standard has made related requirements to the design of asphalt overlay, but it's not perfect, the control effect of most white and black pavement reflection cracks is still not ideal.

This paper based on the traffic and climate features of FG324 Xiamen segment, aiming at white and black pavement renovation project, on the basis of analyzing the temperature performance and water stability of surface layer, middle (below) layer asphalt mixture of asphalt overlay, through performance tests of surface layer and middle (below) layer asphalt mixture to reveal their mechanical properties with different design mix ratio (that is ARAC-13, SMA-13, AC-20 and ATB-25), the pertinent pavement design scheme of white and black pavement has been proposed. The mechanical properties of white and black pavement which under light traffic, heavy traffic and special heavy traffic respectively have been calculated and analyzed by means of Phase^{2D} finite element technique. The distribution and characteristics of total deflection (pavement surface) and flexural stress (layer bottom) have been checked, the results meet the code requirements.

目 录

第 1 章	高等重交通半刚性基层典型沥青路面研究评述	1
1.1	研究背景	1
1.2	研究目的及意义	2
1.3	国内外研究现状	3
1.4	研究目标与主要研究内容	8
1.5	研究技术路线	10
1.6	研究创新点	11
1.7	研究展望	12
第 2 章	高等重交通公路典型沥青路面早期损害调查评价	13
2.1	沥青路面病害调查工作的重要性	13
2.2	沥青路面病害调查内容、依据及检测方法	13
2.3	A 高速公路水损坏状态及原因分析	16
2.4	B 高速公路车辙破坏状态及原因分析	22
2.5	C 高速公路裂缝破坏状态及原因分析	29
2.6	本章小结	54
第 3 章	半刚性基层典型沥青路面结构疲劳寿命分析	55
3.1	半刚性基层典型沥青路面力学计算参数	55
3.2	半刚性基层典型沥青路面结构及计算方法	57
3.3	半刚性基层典型沥青路面结构水平应力分布规律	58
3.4	本章小结	63
第 4 章	半刚性基层典型沥青路面抗高温车辙变形分析	65
4.1	半刚性基层沥青路面车辙形成机理分析	65
4.2	半刚性基层沥青路面计算参数选择	67
4.3	半刚性基层沥青路面剪应力计算及其图示	69
4.4	半刚性基层典型沥青路面结构高温剪应力分布规律	70
4.5	本章小结	74
第 5 章	半刚性基层典型沥青路面抗低温开裂特性与层位分工分析	75
5.1	半刚性基层沥青路面温缩裂缝形成机理	75
5.2	半刚性基层沥青路面低温收缩应力分布规律	75
5.3	半刚性基层沥青路面结构主要低温抗裂功能层研究	81
5.4	半刚性基层典型沥青路面结构 A 层位分工	82
5.5	半刚性基层典型沥青路面结构 B 层位分工	82
5.6	本章小结	83

第 6 章	基于振动成型方式半刚性基层材料配合比与路用性能研究	85
6.1	半刚性基层结构及材料设计现状与不足	85
6.2	半刚性基层原材料实验分析	87
6.3	半刚性基层材料实验分析	87
6.4	水泥稳定碎石混合料抗裂特性评价方法	88
6.5	振动成型方式水泥稳定碎石配合比优化	89
6.6	振动成型方式水泥稳定碎石混合料设计及路用性能对比	96
6.7	本章小结	106
第 7 章	半刚性基层材料抗疲劳特性及其性能关联分析	107
7.1	半刚性基层材料疲劳分析基本理论	107
7.2	半刚性基层材料的疲劳试验	109
7.3	半刚性基层材料疲劳方程的建立与修正	114
7.4	半刚性基层材料疲劳特性对比分析	118
7.5	半刚性基层水泥稳定碎石抗疲劳性能关联分析	121
7.6	本章小结	122
第 8 章	基于散体强度理论的沥青路面混合料综合配合比设计方法	123
8.1	“骨架密实型混合料”的再认识	123
8.2	确定粗细集料尺寸	123
8.3	粗细集料选择密度的确定	125
8.4	控制级配走向的参数确定	126
8.5	沥青混合料的体积参数研究	127
8.6	沥青混合料配合比的设计计算方法	127
8.7	沥青混合料配合比设计计算实例	129
8.8	本章小结	130
第 9 章	基于级配碎石过渡层的沥青路面结构力学分析	131
9.1	选取级配碎石过渡层材料力学参数	131
9.2	选取级配碎石过渡层计算参数	132
9.3	级配碎石过渡层计算结果分析	133
9.4	典型级配碎石路面结构推荐	137
9.5	级配碎石配合比设计方法	139
9.6	试验路级配碎石混合料配合比设计	141
9.7	级配碎石混合基层路面结构与施工控制	143
9.8	本章小结	146
第 10 章	DG25 沥青路面性能检测评价与抗车辙力学特性分析	147
10.1	检测内容及方法	147
10.2	检测结果评价与分析	148
10.3	历年养护措施路段比对与分析	155
10.4	国外常用路面性能综合评价模型	165

10.5	路面使用性能综合评价模型	167
10.6	TOPSIS 法理论与分析方法	170
10.7	半刚性基层沥青路面抗车辙力学特性数值分析	183
10.8	桥面铺装沥青路面抗车辙力学特性数值分析	189
10.9	本章小结	192
第 11 章	EG107 旧路检测评价与改扩建路基拓宽路面拼接设计	193
11.1	沿线自然地理条件	193
11.2	旧路使用状况与评价	195
11.3	旧路面层弯沉值、平整度调查与评价	195
11.4	旧路病害调查与评价	196
11.5	旧路沥青面层芯样空隙率试验与评价	198
11.6	旧路基层抗压强度试验	198
11.7	新建路面 SBS 改性 AC-13 沥青级配组成	199
11.8	总体设计	199
11.9	技术标准及主要技术指标采用	200
11.10	路基、路面工程设计	201
11.11	本章小结	214
第 12 章	EG107 拓宽路基衔接路面拼接力学特性分析	217
12.1	新旧路基衔接处理方案及控制标准	217
12.2	数值模拟方法与新旧路基衔接模型建立	221
12.3	新旧路基衔接力学特性分析	223
12.4	新旧路面拼接方案	228
12.5	新旧路面拼接断离力学特征	228
12.6	新旧路面横向拼接荷载作用力学特性分析	233
12.7	新旧路面纵向拼接荷载作用力学特性分析	239
12.8	新旧路面高温环境抗车辙分析	244
12.9	新旧路面高温荷载环境抗车辙分析	246
12.10	本章小结	251
第 13 章	FG324 旧水泥混凝土路面检测及影响因素分析	253
13.1	水泥混凝土路面使用状况及主要病害类型	253
13.2	旧水泥混凝土路面加铺沥青路面主要病害类型	255
13.3	“白加黑”路面病害处治方法	256
13.4	“白加黑”路面反射裂缝控制技术	257
13.5	“白加黑”路面加铺层混合料试验方法与特性	259
13.6	“白加黑”路面主要结构形式	262
13.7	旧水泥混凝土路面病害调查与评价	262
13.8	路面状况自动化检测评价	276
13.9	本章小结	281

第 14 章	FG324 “白加黑” 沥青路面混合料性能试验研究	283
14.1	“白加黑”路面表面层结构类型	283
14.2	“白加黑”路面表面层原材料性能试验	285
14.3	沥青混合料级配	287
14.4	沥青混合料配合比设计	288
14.5	沥青混合料试验结果分析	292
14.6	“白加黑”沥青路面中（下）面层结构类型	293
14.7	“白加黑”路面中（下）层原材料性能试验	294
14.8	沥青混合料级配	295
14.9	沥青混合料配合比设计	296
14.10	沥青混合料试验结果分析	299
14.11	本章小结	300
第 15 章	FG324 “白加黑” 路面结构设计及其力学特性数值分析	301
15.1	“白加黑”路面结构施工图设计	301
15.2	“白加黑”路面结构设计方案	302
15.3	“白加黑”路面抗反射裂缝技术	305
15.4	路基路面综合排水方案	307
15.5	有限元数值分析方法	311
15.6	“白加黑”路面材料物理力学参数	311
15.7	路面结构工况分析	312
15.8	路面结构控制指标验算	312
15.9	路面结构数值模拟结果与分析	313
15.10	本章小结	323
第 16 章	研究结论、创新点与展望	325
16.1	研究结论	325
16.2	创新点	328
16.3	展 望	329
主要参考文献		330

第 1 章 高等重交通半刚性基层

典型沥青路面研究评述

1949 年,我国仅有公路 8.07 万 km,至 2010 年底,全国公路总里程达到 403 万 km,经过 60 多年的发展,公路里程增长了近 50 倍。随着里程的增长,道路质量的要求也随之提高。特别是随着沪嘉高速公路 1988 年通车,我国高速公路建设发展进入了跨越式阶段,带动了公路技术的发展,路面设计技术、材料技术及质量控制技术都得到了质的提升。

1.1 研究背景

1978 年底,我国一、二级公路总里程约为 2 万 km,其中一级公路仅 200km。在一、二级公路建设中,基层材料主要以石灰土、水泥土为主,面层材料以薄层沥青(3~5cm)为主;设计理论以满足三级公路表面处治的双层弹性体系理论为基础;基层及面层材料谈不上设计方法,基本上是按照经验进行材料生产。在当时修建一、二级公路的过程中,由于技术落后,沥青路面“当年修当年坏、一年修两年坏”,路面损害面积超过 20%,有的路面尚未交付使用就彻底返修。1980 年底,针对极早破坏问题,为提高路面质量,交通部公路科学研究所完成了“高等级公路路面修建技术的研究”工作,该研究成果为我国半刚性基层沥青路面结构的广泛应用奠定了基石,使得半刚性材料由“一个石灰剂量到处用”,进入了系统设计阶段。经过北京、广东、黑龙江及广西 4 条试验路验证,对半刚性材料的路用性能有了更加明确的认识。凭借“高等级公路半刚性基层沥青路面成套技术”(交通部公路科学研究所 1991 年完成,研究成果获国家科技进步二等奖)、1994 年完成的“半刚性基层沥青路面典型结构的研究”及 1991 年完成的“京津塘高速公路半刚性基层沥青路面的成功应用”,半刚性基层沥青路面设计已成为我国高等级公路主体路面结构形式,“强基薄面”的设计理念初步形成。在此基础上修订的《公路沥青路面设计规范》(JTJ 014—1997)基本上成为半刚性基层沥青路面设计规范。半刚性基层沥青路面的成功应用有效解决了当时的路面承载能力不足及水稳性和冰冻稳定性的问题,尤其是与柔性路面相比,节省了大量建设资金。同时,随着《公路沥青路面设计规范》(JTJ 014—1997)、《公路沥青路面施工技术规范》(JTJ 032—1994)、《公路路面基层施工技术规范》(JTJ 034—1993)以及《公路工程无机结合料稳定材料试验规程》(JTJ 057—1994)的颁布实施,柔性基层沥青路面除了在早期修建的几条高速公路得到应用外,以后修建的 95% 的高等级公路都采用了半刚性基层沥青路面结构。从 20 世纪 90 年代中期开始至今,我国高速公路建设速度一直保持高速增长,从半刚性基层沥青路面全面应用开始,1996 年高速公路里程 4771km,2010 年高速公路里程 7.1 万 km,并且位居世界第二。15 年左右的时间,我国已达到了美国 40 年的建设里程。在 15 年的建设过程中,我国经济一直保持高速增长,交通量的增加远远超过了预估水平,而且超载相当严重。15 年来一直用半刚性基层沥青路面,虽然我国对半刚性基层沥青路面的研究很深入,但对半刚性基层的某些特点并未全面认识,比如对半刚性基层沥青路面的裂缝问题,采取了回避态度,对半刚性基层沥青路面的寿命问题的认识更是少之又少。在 15 年之内想要有效解决这些问题非常困难,加上形成的惯性思维,使得半刚性基层的优点被过于放大而缺点却被隐藏起来,导致我国高速公路路面结构过于单一。到 1999 年后,以

半刚性基层沥青路面为代表的高速公路的路面早期破坏问题凸显,水损害、车辙和开裂等问题暴露出来;2003年后,以寿命短为代表的破坏问题更加明显。

1.2 研究目的及意义

本项目通过对半刚性基层沥青路面的研究,剖析了其特有的优势(强度高、稳定性好、造价低等优点),适应了中国公路建设的历史发展条件,充分发挥了其优势。15年左右的时间,超过95%的二级以上路面采用了半刚性基层沥青路面,共建设了约10万km高速公路及100万km以上的其他等级道路,半刚性基层沥青路面事实上已经成为中国沥青路面的典型结构。对这方面的研究,我国也一直处于世界前列。15年大规模的公路建设成就辉煌,仅用时15年的时间便完成了西方发达国家40年的公路建设目标。但大规模、快速度的建设特点带来了一系列的质量问题,其中之一就是重载交通下,半刚性基层沥青路面的耐久性问题,在重交通作用下的半刚性基层沥青路面疲劳开裂、高温车辙和低温开裂等问题表现严重。

1.2.1 研究目的

由于路面耐久性问题不会短期暴露,因此在公路建设跨越式发展的背景下,路面耐久性问题不可能像早期破坏一样被重点关注。但随着越来越多的半刚性基层沥青路面在实际交通荷载下被检验,路面的耐久性问题突显出来。设计年限15年的路面在交通荷载,特别是在重载交通作用下,普遍达不到设计使用寿命。“少则一两年,多则七八年便需开膛破肚式的大修”。究其原因,目前比较一致的观点是:从路面破坏机理来看,半刚性基层沥青路面对重载交通比较敏感,在重载交通作用下,它本身就不可能成为寿命比较长的路面。这就给我国的公路工作者提出了很严峻的现实问题:根据规划,我国高速公路总里程将突破18万km,用15年的时间修建了超过10万km的高速公路半刚性基层沥青路面,而实际检验效果却表明半刚性基层不耐久。那么待建的8万km高速公路是否维持半刚性基层沥青路面结构不变?这个问题是值得探讨的。材料科学发展潜力无穷,材料设计方法的优化及添加剂的研发将极大提高材料的路用性能,为半刚性基层沥青路面结构设计的完善及路面寿命的延长打下良好的基础。对材料性能的认识永远像盲人摸象一般,认识的只是局部。比如本项目研究的水泥稳定碎石,过去的认识是要达到5MPa的强度,必须用6%左右的水泥。但采用振动成型法设计后,原材料不变,发现了水泥碎石更优越的路用性能,即在3%的水泥剂量下,强度就能超过5MPa,而且能够在工程中实现。材料性能出现的质的飞跃为路面结构的优化和道路寿命的延长提供了极好的基础。如果将半刚性基层路面改为柔性路面,那么又会遇到与半刚性基层沥青路面一样的风险(前期研究→试验工程→规范发布→工程验证→暴露问题→推翻?),更重要的是半刚性基层沥青路面在我国使用多年,成果丰硕,一旦放弃,等于抛弃了十几年积累的全部成果,又要从零开始,不太现实。通过本项目研究,发现材料设计与结构设计脱节是导致目前路面耐久性不足的重要原因之一。因此在既有成果的基础上从结构设计、材料设计等方面进行深入研究,开发性能优越的半刚性材料,优化路面结构,提高半刚性基层沥青路面的耐久性,不失为解决问题的最佳途径。

1.2.2 研究意义

路面结构设计理论长期不会改变,半刚性基层沥青路面典型结构不会改变,高性能材料的开发日新月异,如何有效地用好新材料,绝不能一哄而上,到处都用,而是要以理论为指导,完善半刚性基层沥青路面的设计理念,将合适的材料用在合适的层位。材料与结

构一体化思想真正实现了材料路用性能与结构一体化思想建立,解决重载交通半刚性基层沥青路面耐久性问题,使得材料各尽所能,充分发挥各自优势,扬长避短。改进材料成型方式与提高压实度的思想的实现,深入揭示了材料密实度的提高对材料性能的影响规律:本项目研究的半刚性基层材料优化设计方法、振动成型设计方法、级配碎石设计方法等,都是以改变成型方式并大幅度提高材料密实度为基础进行研究的,而且事实证明,改变成型方式压实度提高后,材料路用性能有了质的飞跃,这为实现材料结构一体化的思想打下了坚实的基础。

1.3 国内外研究现状

以沪嘉、沈大和京津塘等高速公路建设为标志,我国高速公路的建设进入了黄金时期,以“强基薄面”为理念的半刚性基层沥青路面结构在经过充分研究及工程准备后,一枝独秀、占据高端,引领了近10万km高速公路路面结构的建设与研究。对于路面结构的基本要求有了共识,即路面必须有足够的强度、耐久性、平整性及抗滑性能。大体来说,我国高速公路质量控制理念经历了3个发展阶段,即以平整为主的理念、以抗滑为主的理念和以耐久为主的理念。

1.3.1 半刚性基层沥青路面材料与结构的发展

(1) 以平整度为主要控制指标的理念

1999年末,我国高速公路里程突破1万km,当时在对高速公路的建设、管理、破坏模式及破坏机理还不清楚甚至一无所知的情况下,高速公路建设飞速发展。对高速公路质量的认识基本限于平整度上,于是以平整度的控制为主要理念的路面质量控制成为主要指标,甚至有的高速公路建设提出的口号是“成也平整度、败也平整度”。以平整度为主要甚至唯一的质量控制指标的理念带来了路面质量的隐患。为了平整,减少压实、增加沥青用量、采用悬浮密实级配等直接为平整度服务的各种施工措施被广泛使用,但却带来了严重的车辙、泛油等病害。2002年,河北工业大学吴秋正“关于高等级公路路面平整度的研究”掀起了系统研究我国高速公路平整度的高潮,使得平整度的概念从朴素的工程经验走向理论指导。

(2) 以抗滑为主要控制指标的理念

随着高速公路通车里程的增加,交通量急剧上升,交通事故数量也大幅攀升。据统计,1999年我国交通事故死亡人数8.4万人,2000年死亡人数达9.2万人,2001年死亡人数攀升至10.4万人,均居世界首位。如此一来,遏制交通事故成为公路部门的重要任务。在这种大背景下,作为减少交通事故的重要方面,提高路面抗滑能力成为路面材料设计的主攻方向。以抗滑为主要目标的AK型沥青混合料设计写入《公路沥青路面设计规范》和《公路沥青路面施工技术规范》中。

但是,统计结果表明,AK型沥青混合料对减少交通事故作用微弱,却带来了另一类大规模的意想不到的破坏形式,即水破坏。对水破坏的描述是“一场大雨,道路千疮百孔,根本来不及修补”。以提高抗滑能力为主要控制理念的结果是:为了增加抗滑能力,与原有沥青混合料相比,AK型沥青混合料增加了大量的粗集料,导致沥青路面内部孔隙率过大,难以压实,水进入AK型沥青混合料后难以蒸发而滞留于路面中,被水破坏的沥青路面很快出现坑洞、松散、推移等水破坏现象。我国对水损害的研究工作从2003年长安大学李剑的“高速公路沥青路面早期水损害防治措施研究”开始,通过一系列的研究,使得高速公路