

INTERFACE PARAMETER AND  
STRUCTURE PERFORMANCE FOR  
CEMENT CONCRETE PAVEMENT UNDER HEAVY TRAFFIC LOADING

# 重载交通水泥混凝土路面 层间参数与结构性能

张艳聪 张 脩 / 著



人民交通出版社股份有限公司  
China Communications Press Co., Ltd.

Interface parameter and structure performance for  
concrete pavement under heavy loading

# 重载交通水泥混凝土路面 层间参数与结构性能

张艳聪 张 脩 著



人民交通出版社股份有限公司  
China Communications Press Co., Ltd.

## 内 容 提 要

本书共分9章,内容包括绪论、山西省气候环境与重载交通特性、水泥混凝土路面层间状况调研与使用性能分析、基一面层水平接触参数的实测与修正、基一面层竖向接触参数的实测与修正、层间接触状态对水泥混凝土路面力学特征的影响、典型工况下水泥混凝土路面结构参数优化、重载交通水泥混凝土路面典型结构、基于层间功能层的水泥路面试验段研究与经济效益分析。

本书可供从事道路工程科研、设计及施工技术人员阅读,也可供高等院校相关师生教学参考。

## SUMMARY

The book is divided into nine chapters, including the introduction, climate and heavy traffic characteristics of Shanxi province, interface condition survey and performance analysis for concrete pavement, interface contact parameter of horizontal and vertical between slab and base test and modify, the effect of interface contact state on mechanical characteristics of concrete pavement, structure parameters optimization of concrete pavement under typical working conditions and research and economic analysis on concrete pavement testing section based on the interface functional layer.

The book is available for the person that road engineering research, design and construction technical to read, but also for teachers and students in college to learn.

## 图书在版编目(CIP)数据

重载交通水泥混凝土路面层间参数与结构性能 / 张艳聪, 张脩著. ——北京:人民交通出版社股份有限公司, 2015. 10

ISBN 978-7-114-12537-9

I. ①重… II. ①张… ②张… III. ①水泥混凝土路面—研究 IV. ①U416.216

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 243294 号

书 名:重载交通水泥混凝土路面层间参数与结构性能

著 作 者:张艳聪 张 脩

责任编辑:周 宇 王景景

出版发行:人民交通出版社股份有限公司

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)59757973

总 经 销:人民交通出版社股份有限公司发行部

经 销:各地新华书店

印 刷:北京鑫正大印刷有限公司

开 本:787×1092 1/16

印 张:10.25

字 数:237千

版 次:2015年10月 第1版

印 次:2015年10月 第1次印刷

书 号:ISBN 978-7-114-12537-9

定 价:36.00元

(有印刷、装订质量问题的图书由本公司负责调换)

# 前 言

水泥混凝土路面作为一种高等级路面结构形式,具有使用寿命长、养护工作量小、能源消耗少、施工简便、对交通等级和环境适应性强等优点,在国内外得到广泛应用。但随着国民经济和公路交通运输事业的快速发展,重型货运车辆的比例不断增加,汽车的总载和轴载质量不断提高,水泥混凝土路面的诸多传统优势正逐渐减弱。研究发现:路面结构在使用过程中,其层间接触状态在不断变化,层间实际接触参数与设计参数的偏差不断增大是造成这一现状的重要原因之一,尤其是重载交通路面。

因此,为表征水泥混凝土路面的实际接触状态,并阐明其对路面结构性能的影响,山西省交通科学研究院、黄土地区公路建设与养护技术交通行业重点实验室和交通运输部公路科学研究院等单位联合开展了“水泥混凝土路面层间结构性能研究”等多项科研项目,从水泥混凝土路面的结构特点与损坏特征、基—面层层间接触状态的表征、层间接触参数的实测与修正、层间接触状态对路面结构的影响、路面结构参数优化和典型结构等方面深入探讨了重载交通水泥混凝土路面的层间参数与结构性能问题,以期为重载交通水泥混凝土路面的技术进步贡献一份力量。

全书共分为9章,第1章回顾了水泥混凝土路面设计理论、层间相互作用与处置技术,并指出了层间设计存在的问题。第2章介绍了山西省典型气候环境与重载交通特性,调研了水泥混凝土路面的层间性能,提出了半刚性基层路面层间接触状态的分类标准。第3章从基层角度阐述了半刚性基层路面的损坏机理。第4章采用可模拟竖向荷载的水平剪切试验仪测定了层间平均剪切刚度,基于简单迭代法对平均剪切刚度进行了压应力修正,并推荐了标准轴载作用于临界荷位时的当量水平剪切刚度。第5章采用模拟温度翘曲试验机测定了水泥混凝土板中板角翘曲差等竖向接触参数,并推荐了板下脱空时层间接触状态的评价方法。第6章计算了层间接触状态对水泥混凝土路面面层拉应力、面层翘曲、基层拉应力以及传力杆内力等结构性能的影响,并通过大比例尺试验予以验证。第7章在层间参数研究的基础上,计算了传力杆位置偏差、板下脱空等典型工况对水泥混凝土路面结构性能的影响;建立了传力杆位置偏差时水泥混凝土路面的接缝传荷能力预估模型,并推荐了模型的荷载修正系数及其取值范围。第8章以山西省为例,推荐了适宜于重载交通的路面设计参数和典型路面结构,并给出了面层、基层厚度的上、下限范围。第9章结合实体工程阐述了重载交通水泥混凝土路面层间参数与结构设计的工程应用,并进行了基于全生命周期成本的经济效益分析。

本书的研究工作主要由山西省交通科学研究院主持的国家自然科学基金(51308329)、山西省交通厅科技项目(2013-1-10、11-2-19)、山西省自然科学基金(2013011027-1、2014011033-3)和山西省青年科技研究基金(2013021028-2、2015021115)资助,同时,也得益于重交通公路养护材料交通运输行业协同创新平台、黄土地区公路建设与养护技术山西省

重点实验室、新型道路材料国家地方联合工程实验室、重交通道路结构与材料山西省科技创新重点团队的专项建设资金的资助,在此向国家自然科学基金委员会、交通运输部、山西省交通运输厅和山西省科学技术厅表示感谢。

在撰写本书的过程中,得到了山西省交通科学研究院赵队家教授级高工、刘少文教授级高工等领导的重视和关切,交通运输部公路科学研究院田波研究员在技术路线制订和室内试验开展方面给予了许多宝贵的建议,资料搜集、工程调研和试验验证工作还得到了山西交科公路勘察设计院的鼎力支持,作者在此一并表示感谢。另外,还要感谢黄土地区公路建设与养护技术交通行业重点实验室刘建伟、刘志胜、朱晓斌、王国忠、吴喜荣、王慧等同事付出的智慧和艰辛。

本书第1、4、6、7章由张艳聪撰写,第2、5、8章由张翀撰写,第3、9章由申俊敏撰写。限于作者的学识和水平,书中难免有疏漏和不足之处,敬请读者批评指正。

作 者  
2015 年 6 月

# 目 录

|                                     |    |
|-------------------------------------|----|
| 第1章 绪论 .....                        | 1  |
| 1.1 水泥混凝土路面的应用与发展概况 .....           | 1  |
| 1.2 水泥混凝土路面设计理论发展回顾 .....           | 3  |
| 1.3 重载交通水泥混凝土路面的特点与现状 .....         | 4  |
| 1.4 水泥混凝土路面层间相互作用与处置技术 .....        | 6  |
| 1.5 本章小结 .....                      | 11 |
| 第2章 山西省气候环境与重载交通特性 .....            | 12 |
| 2.1 山西省气候环境及公路自然区划 .....            | 12 |
| 2.2 车辆轴载限制标准与重载车辆分类 .....           | 15 |
| 2.3 典型的路段交通调查 .....                 | 16 |
| 2.4 各类轴型的设计轴载 .....                 | 21 |
| 2.5 标准轴载作用次数估算 .....                | 23 |
| 第3章 水泥混凝土路面层间状况调研与使用性能分析 .....      | 25 |
| 3.1 水泥混凝土路面层间状况调研 .....             | 25 |
| 3.2 半刚性基层水泥混凝土路面损坏机理分析 .....        | 36 |
| 3.3 水泥混凝土路面层间抗冲刷性能改善对策 .....        | 42 |
| 3.4 本章小结 .....                      | 43 |
| 第4章 基一面层水平接触参数的实测与修正 .....          | 45 |
| 4.1 层间水平接触参数试验 .....                | 46 |
| 4.2 基于简单迭代的水平剪切刚度的修正 .....          | 54 |
| 4.3 本章小结 .....                      | 57 |
| 第5章 基一面层竖向接触参数的实测与修正 .....          | 58 |
| 5.1 层间竖向接触参数试验 .....                | 58 |
| 5.2 模拟温度梯度试验结果与分析 .....             | 60 |
| 5.3 功能层沥青混合料竖向累积变形试验 .....          | 62 |
| 5.4 板下脱空时层间接触状态的评价 .....            | 64 |
| 5.5 本章小结 .....                      | 65 |
| 第6章 层间接触状态对水泥混凝土路面力学特征的影响 .....     | 67 |
| 6.1 层间接触状态在路面结构分析理论中的发展 .....       | 67 |
| 6.2 不同层间接触状态下水泥混凝土路面面层拉应力分布特征 ..... | 70 |
| 6.3 不同层间接触状态下水泥混凝土路面面层翘曲分布特征 .....  | 77 |
| 6.4 层间接触状态对水泥混凝土路面面层最大拉应力的影响 .....  | 80 |
| 6.5 基于大比例尺试验的水泥混凝土路面结构特征验证 .....    | 82 |

|                                           |            |
|-------------------------------------------|------------|
| 6.6 本章小结 .....                            | 85         |
| <b>第7章 典型工况下水泥混凝土路面结构参数优化 .....</b>       | <b>87</b>  |
| 7.1 传力杆位置偏差时接缝传荷能力的预估 .....               | 87         |
| 7.2 板下脱空对路面结构设计的影响 .....                  | 93         |
| 7.3 基一面层层间处置措施和基层参数的优化 .....              | 96         |
| 7.4 典型层间处置措施的排水能力 .....                   | 99         |
| 7.5 本章小结 .....                            | 100        |
| <b>第8章 重载交通水泥混凝土路面典型结构 .....</b>          | <b>102</b> |
| 8.1 重载交通普通混凝土路面设计参数的选择 .....              | 102        |
| 8.2 重载交通普通混凝土路面典型结构 .....                 | 103        |
| 8.3 重载交通普通混凝土路面典型结构的应力分析 .....            | 106        |
| 8.4 本章小结 .....                            | 123        |
| <b>第9章 基于层间功能层的水泥路面试验段研究与经济效益分析 .....</b> | <b>125</b> |
| 9.1 基于层间功能层的水泥混凝土路面试验工程 .....             | 125        |
| 9.2 路面使用状况调查与评价 .....                     | 129        |
| 9.3 基于全寿命周期成本的经济效益分析 .....                | 132        |
| 9.4 本章小结 .....                            | 135        |
| <b>附录 .....</b>                           | <b>137</b> |
| 附表1 四种层间接触状态下路面力学特征 .....                 | 137        |
| 附表2 考虑层间接触时传力杆不同设计参数下的应力特征 .....          | 139        |
| 附表3 考虑层间接触时不同基层参数下的路面力学特征 .....           | 141        |
| <b>参考文献 .....</b>                         | <b>153</b> |

# 第1章 ▶ 绪 论

水泥混凝土路面作为一种高等级路面结构形式,具有使用寿命长、养护工作量小、能源消耗少、施工简便、对交通等级和环境适应性强等优点,在国内外得到广泛应用。据交通运输部综合规划司的统计资料,截至2013年末,全国有铺装路面246.54万km,其中水泥路面177.73万km,约占72%。然而,近年来随着国民经济和公路交通运输事业的发展,运输车辆中重型货运车辆的比重不断增加,汽车的总载质量和轴载质量不断提高,越来越大型化,且更新换代速度很快。单轴超过10t,双轴超过18t,三轴超过22t的重载车辆已成为交通运输的重要组成部分。传统水泥混凝土路面的诸多优势正逐渐减弱,难以满足大型、重型运输车辆的需求,加之早期修建的水泥混凝土路面由于设计与施工不当而出现的早期损坏和行车舒适性问题,导致其近年来水泥混凝土路面的发展受到限制。

但随着汽车工业的持续发展和公路交通运输需求的不断增长,适宜于重载交通的水泥混凝土路面势必重新呈现出巨大生机。同时我们也应该看到,沥青路面同样存在各种形式的早期损坏,而且近来石油价格的持续攀升使得沥青路面的造价远远超过水泥路面。因此,在修建沥青路面的同时,也应看到水泥混凝土路面尤其是重载交通水泥混凝土路面的优势。加快水泥混凝土路面的发展和技术进步是我国公路建设的客观需求,也是促进我国能源发展、环境保护的战略举措。

## 1.1 水泥混凝土路面的应用与发展概况

水泥混凝土作为筑路材料最早是在英国用于铺筑路面。1828年在英国伦敦郊外,用水泥混凝土铺筑了道路基层,1912年在美国威斯康星州和加利福尼亚州,水泥混凝土用于铺筑标准的面层。直到1914年第一次世界大战后,水泥混凝土路面才得到广泛应用。20世纪30~40年代,由于水泥混凝土路面高强、耐久、行车性能好等一系列优点,其应用在欧美各国得到迅速发展。

第二次世界大战以后,全世界汽车工业迅猛发展,特别是货运车辆载重量和轴重迅速增加,在美国和欧洲普遍出现了大范围的水泥混凝土路面破损,主要表现为唧浆、沉陷和破碎。通过大量的调查和研究发现,在重载车辆作用下,混凝土板下的土基或基础失稳是造成破坏的主要原因。于是各国对土基和基层做出了严格的要求。近年来,美国高速公路网中,水泥混凝土路面占49%左右。在欧洲,比利时是使用水泥混凝土路面最多的国家,目前有50%的高速公路是水泥混凝土路面。近年,法国每年建成的高速公路约30%为水泥混凝土路面,连续配筋水泥混凝土路面已被广泛用于高速公路。德国是大量使用水泥混凝土路面最早的

国家,1960 年以前建成的高速公路几乎都是混凝土路面。英国自 1970 年以来修建的主要干道中约有 22% 为水泥混凝土路面。

此外,自 20 世纪 90 年代以来,美国和欧洲一些国家提出,对于交通特别繁忙的公路按照长寿命道路的概念设计路面,有的提出按 50 ~ 60 年的寿命设计路面结构,不少国家计划修建钢筋混凝土(包括连续配筋路面在内)特强基层,50 年不维修,必要时 5 ~ 8 年更换上面沥青混合料功能层,这样,水泥混凝土路面在可持续发展战略地位中表现出独到的优势。

我国水泥混凝土路面起步较晚。到 1970 年,全国公路水泥混凝土路面的里程仅为 200km,占高级和次高级路面总里程的 0.87%;到 1980 年,混凝土路面的里程为 1 600km,约占高级和次高级路面里程的 1.01%。随着高等级公路的发展,到 1990 年,水泥混凝土路面总里程增加到 11 773km,占高级和次高级路面里程的 4.37%;到 2000 年,水泥混凝土路面总里程增加到 111 574km,占高级和次高级路面里程的 64.9%。

近年来,随着公路建设的大发展,公路总里程和公路密度迅猛增加。如图 1-1 所示,截至 2013 年年底,全国公路总里程达 435.62 万 km,比 2012 年末增加 11.87 万 km。全国公路密度为 45.38km/100km<sup>2</sup>,比 2012 年末提高 1.24km/100km<sup>2</sup>。全国有铺装路面和简易铺装路面公路里程 295.75 万 km,比 2012 年末增加 34.18 万 km,占公路总里程的 67.89%,比 2012 年末提高 4.19%。各类型路面里程分别为:有铺装路面 246.54 万 km,其中沥青混凝土路面 68.81 万 km,水泥混凝土路面 177.73 万 km,如图 1-2 所示。

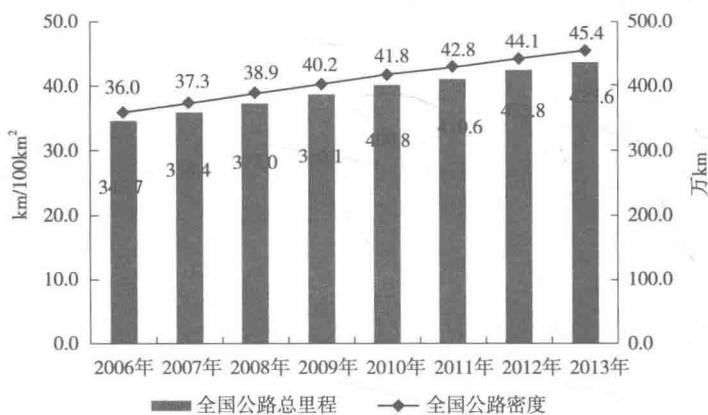


图 1-1 全国公路总里程及公路密度

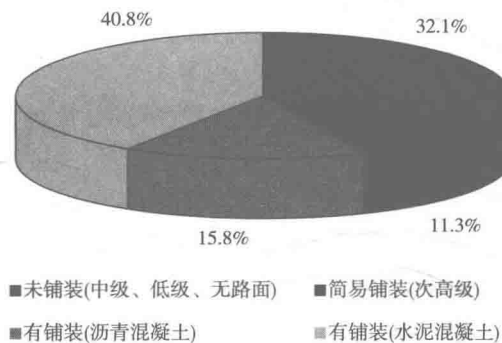


图 1-2 2013 年各路面类型里程构成

虽然水泥混凝土路面占有铺装路面里程的 72.10%, 远高于沥青混凝土路面, 但是在高等级公路路面中的比例比较小。究其原因, 主要是早期水泥混凝土路面设计与施工不当, 使其使用状况欠佳, 使用寿命低于设计使用年限, 尤其是一些重载交通干道, 早期损坏严重, 使得水泥混凝土路面不但没有体现出使用寿命长、养护费用低等优点, 反而维修困难的弱点进一步突显, 甚至造成一些地区限制水泥混凝土路面在干线公路中应用。而沥青路面凭借表面平整、无接缝、行车舒适、噪声低、施工期短、适于分期修建等优点得到广泛应用, 占据了路面结构的主流形式。

但随着水泥混凝土路面设计、施工水平的发展和公路交通运输需求的不断增长, 重载交通水泥混凝土路面势必凭借以下优势重新呈现出巨大生机:

- (1) 水泥混凝土具有较高的抗压强度、抗弯拉强度以及较强的抗磨耗能力;
- (2) 水泥混凝土路面具备良好的稳定性: 高温稳定性、低温稳定性和水稳定性均良好;
- (3) 水泥混凝土路面具有较好的耐久性, 材料不易老化衰变, 正确设计的的路面有优良的耐疲劳性能, 是长寿命路面的最佳选择;
- (4) 承载能力高, 非常适宜于重载交通: 工矿道路、停车场、机场跑道均宜优先选用水泥混凝土路面。

## 1.2 水泥混凝土路面设计理论发展回顾

水泥混凝土路面在车辆荷载作用下, 作为承重结构, 主要以其板体抗弯曲强度与刚度保持着路面的正常工作状态。因此, 长期以来水泥混凝土路面面板厚度设计一直以路面板的抗弯拉应力达到极限强度、路面板产生疲劳开裂作为设计的破坏标准。

最早的设计方法由 C. Older 和 A. T. Goldbeck 于 1920 年提出, 他们假设路面板底部局部脱空, 板体处于悬臂状态, 利用材料力学的方法得到板体的最大弯拉应力, 并以此作为板厚的设计依据。1925 年, H. M. Westergaard 采用了铁道工程设计中惯用的 Winkler 地基来假定刚性路面以下的地基支撑, 用弹性力学中的薄板假定来描述刚性面板, 并将车轮对面板的作用比拟为一个面积相当的圆形均布垂直荷载, 通过数学推导, 得到三个不同荷载位置下, 刚性面板在板中、板边、板角受荷时出现的最大弯拉应力。长期以来, 威氏公式被广泛应用并证明基本与实际相符。但是 Winkler 地基假定未能充分估计到地基各个方向上的相互约束, 计算结果略微偏高。当板角受荷时, 由于温度变形、板角微量脱空, 实测的应力大于计算结果。

威氏公式虽然为刚性路面厚度设计奠定了基础, 但地基描述忽略了自身的整体效应。1938 年, A. H. A. Hogg 等人提出了弹性半空间地基假定描述刚性路面板下的地基工作状态, 并以此改善威氏公式的不足。在理论上引用了布辛尼斯克的各向同性的半空间弹性地基假定, 取代 Winkler 假定, 路面板仍采用弹性薄板。在求解过程中, 引用了贝塞尔函数和积分变换, 最后形成的方法主要适合于半空间地基上无限大薄板的模式。

由于刚性路面面板的最不利荷位一般位于板角或板边, 新的地基假定推导的公式虽然可以计算无限大板的厚度, 但无法确定最不利荷载位置的弯拉应力。为此, 梅特尼科夫等人应用应力等效原则, 将两种地基假定下, 两个板中应力计算公式取相等, 导出了两种地基参数的等效换算公式, 得出了以弹性半空间地基假设的参数表达的、三个典型荷位的弯拉应力

计算公式。我国 1958 年、1966 年的刚性路面设计规范即以此为基础。

1943 年, D. M. Burmister 提出了双层弹性体系的解析解, 这样就可以摆脱弹性薄板假定和层间滑动的接触条件, 完全按照路面板的实际结构厚度和接触条件建立方程, 求得解析解。

除了荷载应力以外, 温度变化会引起刚性路面温度变形, 若温度变形受阻, 刚性面板还将产生与荷载应力无关的温度应力。H. M. Westergaard 提出了由于路面板上、下顶面温差引起面板发生翘曲变形, 当变形受到约束时, 将产生附加翘曲应力的概念, 并由布拉德伯利通过阿灵顿试验路和数值推理提出了刚性路面翘曲应力的计算式和计算曲线, 该方法一直沿用至今。

我国系统开展刚性路面结构理论与设计方法的研究起步较晚。20 世纪 70 年代中期, 东南大学和浙江省交通厅在浙江台州修筑试验路, 进行荷载应力、挠度测定和疲劳试验, 通过研究论证了设计理论的可行性, 提出了板下地基模量的非线性特性, 以及路面设计时确定地基模量的方法, 探讨了路面板在荷载反复作用下疲劳损伤的发展过程和估算方法。随后, 在 20 世纪 90 年代初, 我国在荷载应力和温度应力的计算分析、疲劳性能、轴载换算、结构评定、设计方法、地基强度及基层顶面模量的确定、可靠度理论与设计方法等方面取得了大量理论和实用性科研成果, 为推动我国水泥混凝土路面的发展、初步建立我国刚性路面设计理论体系奠定了坚实的基础。

水泥混凝土路面结构分析理论和设计方法的研究已有百余年的历史, 凝聚了世界各国道路科技工作者的辛勤劳动。设计理论和方法的发展紧密结合世界交通运输的发展, 不断顺应交通形势发展的需求。发展的过程不断引进相关学科的研究成果。展望未来, 新时期现代交通运输发展的新形势下, 水泥混凝土路面设计理论和方法势必面临新的问题和挑战, 为应对现代交通运输集约化、车辆多轴化、系统高效化的需求, 广大道路科研工作者应当在学习前人成果的基础上, 面对当前发展中遇到的问题, 迎难而上, 不断完善水泥混凝土路面结构分析和设计理论。

### 1.3 重载交通水泥混凝土路面的特点与现状

由于公路等级的提高和高额利润的驱动, 车辆超载现象在全国各地普遍出现。据调查, 连接贵州、广西、广东和福建的 324 国道由于超载受损严重, 标准轴载在 50kN 的东风载货汽车, 车主通过加钢板、加高车厢板、增加附加轮胎等手段, 使实际装载量高达 150kN 以上。云南省运煤、运矿石的车辆超载率在 80% 以上, 有的甚至超过标准载重吨位达 130%。河南、河北一些地区, 10t 以上的重型车辆的超载比例在 40% 以上, 某些路段更是达到 80%, 最大超载率高达 300%。

对于此, 各地也相继出台政策, 对超载超重现象进行治理。以山西省为例, 2004 年 6 月“治超”之前, 京大路运煤超载车辆很多, 4 轴车车货总重最大可达到 70 ~ 80t, 5 轴车车货总重最大可达到 140 ~ 150t, 6 轴车车货总重最大可达到 150 ~ 160t, 单轴—双轮组轴重可达到 20 ~ 25t, 最大达 30t, 已远远超过设计要求。2004 年 6 月“治超”以后, 该现象得到了较大缓解, 但为了获取超额运输利润, 加高车厢、采用高压轮胎进行超载运输的现象仍然不可忽视。据调查, 多数重载车辆轮胎充气压力为 1.4 ~ 1.5MPa, 推算轮胎接地压力为 1.3 ~ 1.4MPa。

为了适应重载交通运输的需要,国内外重载交通水泥混凝土路面设计方法的研究也不断推进。南非在20世纪70年代就开始采用动态称重系统进行公路轴载分布的研究,认为由于路面设计中对实际车辆轴重的预测并不准确,低估了超重的加速磨损,才导致路面设计厚度不足。20世纪90年代,南非在此基础上建立了可以用于超重荷载和多联轴形式的等效系数EDF的计算式。

美国新泽西州在20世纪80年代也做过公路的超载研究,它引用AASHTO的轴载换算标准,认为当量标准轴次(ESA)的增加会引起相同比例的路面使用寿命的减少。在对车辆超载规律的研究中它提出一种卸载概念,即将超载部分货物卸下后做另外多次运输,保证总的货运量一定。认为超载引起的路面使用寿命缩短的比例减去卸载后的缩短比例才是真正由超载引起的路面损耗。

加拿大安大略省在20世纪80年代对该省的车辆尺寸和荷载情况做了长期调查。结果表明:在允许一定程度的超载时测得的公路车辆荷载分布明显偏重,并且通过对车辆总重和轴荷载分布的数据分析提出了某种车型的总重与各组轴载分布的关系。对于超限部分的轴荷载,采用力学分析方法研究路面在重载作用下的力学反应变化,并以此作为衡量路面损坏的标准,建立力学模型以计算不同级别荷载产生的力学损耗。

全美运输研究协会(TRB)对所有联邦资助公路和州际公路进行全面的调查。它采用WIM系统和电子牌照板进行全天候自动识别并记录行驶中的车辆荷载,得到了比较准确的车辆荷载分布数据;并按照AASHTO方法将实际交通荷载换算为标准轴载,从而使不同轴载与路面损坏程度(使用期末的PSI值)之间建立相关模型。

美国联邦公路局Kellerhold与Loersno详细论述了重载交通下具有传力杆接缝的水泥混凝土路面的设计方法;美国各州公路工作者协会(AASHTO)提出了一个基于概率统计的可靠度设计方法;美国Illinois大学的Ballnab与Texas大学的Zgoerlin提出防止疲劳应力产生横向开裂的设计方法。

在国内,随着超载车对水泥混凝土路面破坏的日趋严重,不少机构和学者也对重载交通路面的各方面研究进行了探索。我国在20世纪80年代针对当时的重型汽车发展情况曾经研究过提高公路汽车轴重限值的可行性,梅今安等人提出如果按照规范方法把重型车辆的轴载折算成标准轴交通量则重车的影响是很大的。但是在路面厚度设计中对交通量的变化并不敏感,所以认为可以适当提高轴重。

我国在1984、1986年版的刚性和柔性路面设计规范中提出用综合系数 $K_k$ 来计入车辆的超载。但实际上 $K_k$ 只是一个经验系数,除超载外还包含对偏载和冲击荷载的考虑,并不是真正意义上的超载系数。

20世纪90年代初,同济大学和山西省交通厅对大同地区的车辆运行情况做了调查,发现不同车型的超载规律是不同的。额定吨位越小的车超载就越严重,吨位接近的车型超载情况差不多,但当时对荷载的判断主要是依据目测和静态称重,因而数据少且不够准确。后来河北省采用目测与仪器(HDS-1 涵式动态轴载称重仪)相结合的方式对省内一些干线道路进行调查,最终选取了几种代表车型并列出各自的轴载谱,这对于合理进行路面设计十分有利。但在调查过程中首先目测判断其满载后再用仪器测其轴重,这样的结果必然偏重,而不能体现真正的轴载分布规律。1995年东南大学根据一系列假设条件提出模拟不同轴载限值

下公路轴载谱的分布函数,但对轴载的统计过于粗略,而且假设条件较多。

同济大学的石小平等人针对重载车引起的混凝土面板脱空、唧泥、错台和断板等,提出了控制板角挠度的设计方法,该方法对于特重交通(板厚大于26cm)的水泥混凝土路面,比控制疲劳应力的方法更切合实际。长安大学公路学院王选仓教授对重载交通条件下的水泥混凝土路面设计中疲劳方程、轴载换算以及疲劳系数进行了详尽的研究,为重载交通条件下的水泥混凝土路面设计方法研究提供了理论依据。

交通运输部公路科学研究院的田波等人应用有限元法分析了特重车辆对水泥混凝土路面荷载应力的影响,并对计算结果进行回归分析,提出了新的板纵向边缘中部最大应力计算式。山西省交通科学研究院与同济大学联合主持的“山西省特重交通水泥混凝土路面合理结构的研究”项目依据运煤公路轴载谱和超重情况调查,采用涵盖超重车辆的荷载作用图式,分析归纳了纵边缘中部的荷载应力计算式,依据荷载和温度综合作用下的疲劳断裂准则,推荐了山西省特重交通水泥混凝土路面的合理结构。

## 1.4 水泥混凝土路面层间相互作用与处置技术

### 1.4.1 水泥混凝土路面结构层间的相互作用

吴国雄、易志坚等认为:由于基层表面凹凸不平 and 基层基体材料存在空隙,面层浇筑时水泥砂浆极易渗入基层,从而在基层与面层之间产生界面层。路面混凝土凝固初期,界面层将基层与面层紧紧结合在一起,几乎成为一体。随着时间的推移,基层和面层各自的弹性模量、泊松比和强度以各自不同的速度在增长,同时面层水泥混凝土逐渐凝结,混凝土将产生收缩变形和周期性的温度变形,在面层横缝切割后面层与基层之间存在不等量变形,将导致本来融为一体的基层、界面层和面层沿界面层开裂和破坏,造成面层与基层分离,且分离界面处于一种非光滑的凸凹不平状态。

蔡四维、徐光辉等从断裂力学、损伤力学和路面疲劳破坏的基本原理出发,得出了混凝土面层开裂破坏的三个阶段,分别为初始薄弱层(层间界面层)的形成和微裂缝的产生阶段;板中微裂纹的生成及其与板底微裂纹的连通阶段;最后疲劳荷载的作用,导致面层裂缝上下贯通,使路面产生断裂的破坏阶段。

按断裂力学原理,水泥混凝土路面的疲劳破坏过程分为两个阶段,即路面完好无损至板底表面形成明显的裂纹阶段和裂纹扩展至路面层完全断裂阶段,并且第一阶段通常占材料总寿命的80%,裂缝扩展至面层完全断裂所需的循环作用次数仅占材料总寿命的20%。然而,在确定混凝土路面的疲劳强度时,人们往往都是基于经典的应力—寿命法,却对萌生裂纹的循环作用次数和使这一裂纹扩展到突然破坏的疲劳次数不加区分。

易志坚等采用断裂力学有关原理,并进行相关室内试验,指出:半刚性基层水泥混凝土路面的层间接触形式并非规范中假定的光滑接触模型,而是层间具有巨大的抗剪切强度,该剪切应力极大地阻止了混凝土面层的自由收缩和温度变形。

肖益民等在室内二灰碎石基层和水泥稳定基层上成型了C35混凝土,测定了层间第一次断裂破坏和层间破坏后的水平推移应力和应变,结果表明:层间第一次断裂破坏需要克服相当大的阻力(黏结力),而在层间界面层破坏后,只需克服很小的阻力(滑动摩擦力)就能使面层移

动,且面层与基层接触界面破坏后,面层在半刚性基层上滑动时的摩擦系数大于6.0。

赵炜诚等认为混凝土面层与贫混凝土基层之间的结合面是这个路面体系中的一个薄弱环节,其界面剪切和黏结强度都低于两侧的混凝土强度,并从微观角度定性地分析界面作用的本质和影响因素。

#### 1.4.2 水泥混凝土路面基层减阻措施

为了消除层间界面层对路面使用性能的影响,符冠华、卢拥军等建议层间设置隔离层或隔离剂,以消除层间相互黏结,避免层间界面层断裂破坏而造成面层的损伤或开裂。国内湖南某高速公路,在半刚性基层与水泥面层之间增设透层沥青,基层与面层因憎水性沥青薄膜的存在,部分隔断基层与面层的连接,通车运营5年后未发现基层唧浆、板底脱空等现象,路面使用性能较好。傅智认为,基层与面层之间增设柔性夹层,不仅可以缓冲车辆冲击和振动,提高行车舒适性,而且可减少基层表面温度、湿度变化对面层的影响。

国外针对半刚性基层或刚性基层水泥混凝土路面的层间作用机理研究较少,他们主要通过工程实践,总结出层间应采取的结合形式。如德国的水泥混凝土路面,基层严格按照混凝土面层的横向和纵向缩缝锯切对应的缩缝,然后拉毛贫混凝土基层表面,随后铺筑水泥混凝土面层,旨在加铺后的水泥混凝土面层与贫混凝土基层完全连接为一个整体,采用该层间处理形式和路面结构的柏林至慕尼黑高速公路,通车运营了50余年后路况仍比较好。然而,美国部分州则采用基层与面层分离的界面形式,在贫混凝土基层强度达到设计要求后,若基层表面粗糙,则采用磨光机磨光基层表面,随后喷洒憎水性薄层乳化蜡,使基层与面层完全分离,路面使用寿命也较长。比利时在贫混凝土基层上直接加铺水泥混凝土面层,观测结果表明,面层开裂和基层冲刷较严重,而在贫混凝土基层与水泥混凝土面层之间增设6cm沥青混凝土层后,面层开裂明显减少,路面使用性能明显改善。

国内的研究现状表明,半刚性基层或刚性基层水泥混凝土路面层间存在界面层的观点是一致的,然而界面层的强度是否低于面层和刚性基层或半刚性基层,没有具体的试验数据,仅是理论推断;层间界面层的强度随着水泥龄期的增长是如何变化的,目前还处于探索阶段;层间界面层断裂破坏后,温度变化引起层间相互作用和层间接触形式又是如何,也是处于探索阶段。

国外的研究现状表明,贫混凝土基层水泥混凝土路面采用层间加固(如德国)或层间分离(如美国),水泥混凝土路面的使用寿命均较长,而介于层间加固与层间分离的路面结构(如比利时),路面破损较为严重,使用寿命较短,但在贫混凝土基层与水泥混凝土之间增设沥青混凝土柔性隔离后,路面使用寿命较长(如比利时)。

为了比较不同层间处理措施对路面受力的影响,需展开层间相互作用的力学特性研究。鉴于贫混凝土基层的刚度大、板体性好,在其上加铺水泥混凝土面层,路面结构可模型化为弹性地基上由基层和面层组成的双层板。

郑传超、王秉纲分析了双层板的层间结合形式,并给出了层间结合式、层间分离式和层间部分结合式模型的应力和位移公式。层间结合式双层板的荷载应力计算,将双层混凝土板换算为等刚度的单层板,然后计算下层板的荷载应力和温度应力;层间分离式双层板的荷载应力则分别计算上层板和下层板的荷载应力,但仅考虑上层板的温度应力,总应力值为荷

载应力和温度应力之和。然而分离式双层板在温度翘曲和轴载共同作用下,上层板的总应力并不是分别计算翘曲应力和荷载应力之后的简单叠加。周虎鑫、陈荣生等认为,面层翘曲时,水泥混凝土面层可能仅部分与基层完全接触,部分与基层分离,在路面行车荷载作用下,现场实测面层底面的拉应力远大于温度应力和荷载应力的简单叠加。

水泥混凝土面层在温度变化时产生胀缩变形,若贫混凝土基层限制了水泥混凝土面层的变形,则在基层与面层之间产生剪切应力,该剪切应力为一对大小相等、方向相反的作用力与反作用力。由于贫混凝土基层与水泥混凝土面层的强度差异及两者弹性模量的不同,故在相同的层间剪切应力作用下,层间的位移将不一致,贫混凝土基层直接铺筑在水泥混凝土面层上,层间接触形式为满足古德曼(Goodman)模型的部分结合式。

赵炜诚等人借鉴上述思路,提出了界面处的切向刚度,并通过计算得出切向刚度的计算方法。余定选提出了在上层和下层板之间设置 8 个节点 24 个自由度的夹层单元模型,考虑竖向刚度系数和切向刚度系数两个部分,前者为上下两层间产生单位竖向位移差的法向应力,后者为产生单位水平位移差的剪应力。这一模型可用于分析设置夹层对双层板挠度和应力的影响,但它没有考虑上层和下层的压缩作用。

采用弹簧模型虽然可以计算部分结合式双层板的荷载应力,但是由于弹簧模型的法向刚度和切向刚度测定较为麻烦,也只能作为一种理论方法,难以指导工程实际,兼之在贫混凝土基层与水泥混凝土面层之间存在界面层,该界面层厚度很薄,难以测得界面层的强度,进而给弹簧模型的计算结果带来较大的误差。

部分结合式双层板的温度应力计算模型,基本上均假定双层板紧密接触,面层的翘曲变形由板体自身重量和地基约束来平衡,如谈至明、姚祖康导出的不同层间结合状况下由层间变形协调条件引起的层间约束应力的计算通式,用以分析板间约束应变的特性,并给出其计算公式。然而混凝土板在温度梯度作用下产生的翘曲变形,首先可能损坏贫混凝土基层与面层之间的界面层,其次是面层与贫混凝土基层出现部分脱空。

#### 1.4.3 水泥混凝土路面层间结合状态表征与试验技术

对于层间结合状态的表征与模拟,许多分析中一般将其假定为完全连续或完全滑动两种状态。国际上使用比较普遍的是 Goodman(1968)提出的岩石裂隙接触模型,如式(1-1)所示。Uran(1976)首先采用 Goodman 模型来表征层间的接触效应,并针对不同的黏结沥青用量,采用试验确定了层间的抗剪模量。

$$\tau = K \times \Delta u \quad (1-1)$$

Shell(1967)在建立的弹性层状体系分析软件中,以 Goodman 的模型为基础,采用弹簧柔度来表征层间的接触效应,定义和计算公式见式(1-2)。

$$AK = \frac{\Delta u}{\tau} \quad (1-2)$$

Ngo 等(1967)在研究钢筋混凝土梁时,提出了混凝土与钢筋接触的双弹簧二维有限元接触模型,该模型后来被 Nilson 和 Franking(1970)进行了改进。Salam 和 Monismith 采用了改进模型,用于分析交通荷载下的铺面开裂机理。

顾强康、冷培义(1995)在分析旧刚性道面上的沥青加铺层反射裂缝产生机理研究时,采用了6节点的界面单元来模拟沥青层和旧板之间的夹层。黄晓明等(1996)采用基于 Goodman 模型的夹层单元建立了旧刚性道面加铺层有限元计算方法,如图 1-3 所示。

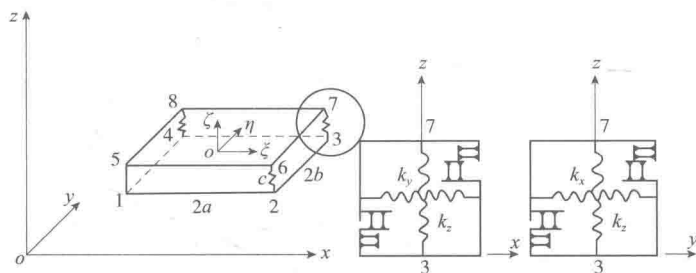


图 1-3 夹层单元

Crispino 等(1997)在采用动态试验后,对沥青混凝土层间的模型提出了黏弹性的 Kelvin 表征模型。

Romanoschi(1999)通过试验分析,提出了沥青和沥青层之间的双阶段表征模型。戴震、王旭东等(2005)分析了层间联结状态对薄面层沥青路面受力的影响,采用了二维的高阶单元来模拟层间的联结状态,该单元支持弹性库仑摩擦和滑动接触。

单景松(2007)、张久鹏(2013)、李星(2014)等采用两节点层间接触模型对沥青面层—半刚性基层的层间接触进行了模拟分析。

在 ABAQUS 有限元分析软件中,采用接触单元模拟接触问题。假设两个接触体满足以下基本假设:①接触体位移和变形都很小;②接触体表面连续;③接触体的摩擦力满足 Coulomb 定律,并且接触边界非常接近。

常用的层间剪切试验方法如图 1-4 所示,主要包括直剪、斜剪和扭剪等。

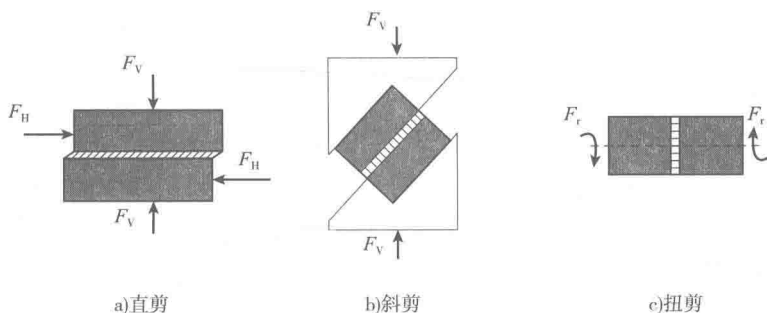


图 1-4 常用的层间剪切试验方法

Leutner(1979)提出了采用直接剪切仪器测量沥青面层之间的抗剪特性的思路。关昌余(1989)自行设计制作了剪切试验仪。

Woods(2004)研发了 TCED 和 LBISD,用于测试层间的黏结效应。

Canestrari 等(2005)采用了 ASTRA 和 LPDS,如图 1-5、图 1-6 所示,对层间的剪切效应进行了测试。

West、Zhang 等(2005)采用了 LPDS 等多种方法对沥青路面的层间接触进行了评价,并采用现场数据进行了验证。

胡力群等(2005)提出了采用压力机的沥青路面层间接触的测试方法。崔鹏等(2006)采用便携式剪切仪研究了超薄白色罩面的层间抗剪切性能。

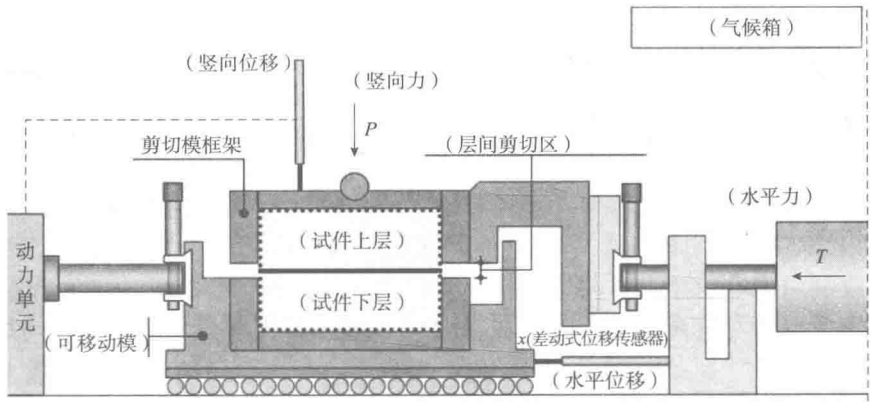


图 1-5 ASTRA

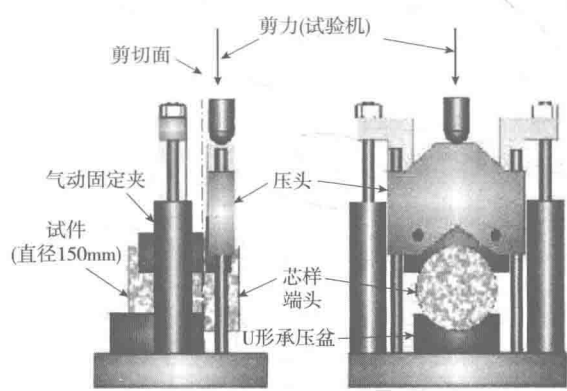


图 1-6 LPDS

Partl 等(2013)详细总结了沥青路面层间接触效应的力学试验方法。既有试验方法的原理一般如图 1-7 所示。现有的试验仪器可采用 Leutner 剪切仪、LPDS、剪切盒、ASTRA,以及无损检测技术进行测试。

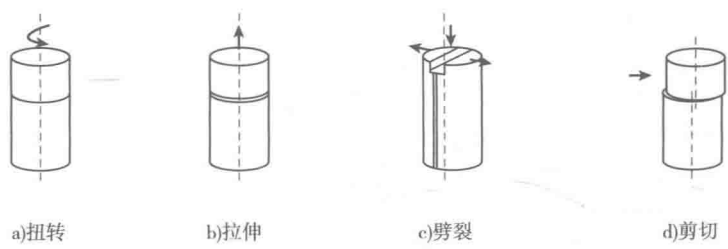


图 1-7 层间接触试验的原理