

水泥混凝土路面板 水分迁移理论及应用

张 脩 © 著



科学出版社

水泥混凝土路面板水分迁移 理论及应用

张 脩 著

科 学 出 版 社

北 京

内 容 简 介

本书针对目前国内外水泥混凝土路面设计理论体系缺失湿度翘曲和湿度应力分析的现状,从水泥混凝土路面水分迁移理论、湿度场表征模型及湿度应力计算展开研究。建立考虑养生效应的早龄期混凝土路面板和干湿循环下硬化后混凝土路面板的湿度场表征模型及其对应的数值和近似解析解法,并以室内试验数据进行模型验证;分析早龄期和硬化后水泥混凝土路面板在不同工况下的湿度分布规律,并对模型的参数进行敏感性分析;利用弯矩等效原理,推导得到均匀和非均匀无限混凝土板的等效温度梯度公式,构建水泥混凝土路面湿度应力分析的基本方法。

本书可供从事公路、城市道路和机场道面工程的科研、设计、施工和管理的相关人员参考使用。

图书在版编目(CIP)数据

水泥混凝土路面板水分迁移理论及应用 / 张隽著. —北京: 科学出版社, 2015

ISBN 978-7-03-044771-5

I. ①水… II. ①张… III. ①水泥混凝土路面-路面板-路基水分 IV. ①U416.216 ②U418.5

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2015) 第 123191 号

责任编辑: 张海娜 乔丽维 / 责任校对: 桂伟利

责任印制: 徐晓晨 / 封面设计: 迷底书装

科学出版社 出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码: 100717

<http://www.sciencep.com>

北京教图印刷有限公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2015 年 6 月第 一 版 开本: 720×1000 B5

2015 年 6 月第一次印刷 印张: 11 3/4

字数: 230 000

定价: 75.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

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。在水泥混凝土路面结构分析理论和设计方法中，路面板的应力分析和计算是一项十分重要的基础性研究工作。

由于水泥混凝土路面承受交通荷载作用，荷载应力是路面板应力的主要组成部分。水泥混凝土路面板除承受荷载应力以外，由于其长期暴露在自然条件中，还承受由环境引起的翘曲应力。水泥混凝土路面板翘曲可分为由温度梯度引起的温度翘曲和由湿度梯度引起的湿度翘曲。长期以来，人们对混凝土路面板温度翘曲的研究较多而且认识较为统一，形成了较为系统的温度场预估、翘曲变形和应力计算方法。对于湿度翘曲，虽然研究人员已经意识到它对路面板的变形及应力有较大影响，但源于湿度的影响因素多、边界条件复杂、研究手段有限，尚未对水泥混凝土路面板湿度梯度的形成机理、湿度场表征、湿度场预估等形成系统的理论与技术成果。

鉴于此，作者在总结归纳混凝土湿度相关研究成果的基础上，系统论述水泥混凝土路面板水分迁移机理、湿度场表征模型、不同工况下路面板湿度分布规律和湿度应力计算方法等内容，旨在为水泥混凝土路面设计理论的丰富和发展作出一点贡献。

本书的研究工作受到由山西省交通科学研究院承担的国家自然科学基金(51308329)的资助，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院长、刘少文副院长和同济大学凌建明教授、赵鸿铎教授的悉心指导和帮助，在此表示衷心的感谢。

由于作者知识及水平有限，书中难免存在不足之处，恳请广大读者不吝指正，不胜感谢。

作 者

2015年4月

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 水泥混凝土路面概况.....	1
1.1.1 国外水泥混凝土路面.....	1
1.1.2 我国水泥混凝土路面.....	4
1.2 水泥混凝土路面设计理论发展回顾.....	6
1.3 研究背景和意义.....	8
1.4 研究现状.....	9
1.4.1 混凝土水分迁移模型.....	10
1.4.2 水分迁移模型求解方法.....	12
1.4.3 湿度对混凝土的力学影响.....	12
1.4.4 研究现状评述.....	13
1.5 研究内容与技术路线.....	14
1.6 小结.....	15
第 2 章 水泥混凝土路面板的水分迁移试验与机理分析	17
2.1 早龄期水泥混凝土路面板水分迁移试验.....	17
2.1.1 材料及试验过程.....	17
2.1.2 试验结果.....	19
2.2 硬化后水泥混凝土路面板水分迁移试验.....	22
2.2.1 材料及试验过程.....	22
2.2.2 试验结果.....	24
2.3 水泥混凝土路面板水分迁移机理.....	26
2.4 小结.....	27
第 3 章 水泥混凝土路面板的湿度场表征模型	28
3.1 早龄期水泥混凝土路面板的湿度场表征模型.....	28
3.1.1 水分迁移控制方程.....	28
3.1.2 自干燥模型.....	29
3.1.3 定解条件.....	30
3.1.4 模型的数值解法.....	32

3.1.5	参数标定	33
3.1.6	基于 Adomian 分解法的近似解析解	34
3.1.7	基于 Boltzmann 变换的近似解析解	38
3.1.8	模型的验证	40
3.2	硬化后水泥混凝土路面板的湿度场表征模型	48
3.2.1	湿润过程模型	48
3.2.2	干湿循环过程模型	49
3.2.3	定解条件	49
3.2.4	模型的求解	49
3.2.5	模型的验证	50
3.3	小结	52
第 4 章	不同工况下水泥混凝土路面板的湿度分布规律	53
4.1	早龄期混凝土板湿度分布规律	53
4.1.1	工况设定	53
4.1.2	评价指标	54
4.1.3	计算结果	55
4.1.4	参数敏感性分析	59
4.2	硬化后水泥混凝土板单向湿润过程湿度分布规律	60
4.2.1	单向湿润过程的分布规律	60
4.2.2	参数敏感性分析	62
4.3	硬化后水泥混凝土板双向湿润过程湿度分布规律	63
4.3.1	双向湿润过程的分布规律	63
4.3.2	参数敏感性分析	65
4.4	硬化后水泥混凝土板干湿循环过程湿度分布规律	66
4.4.1	干燥过程空气湿度的影响	66
4.4.2	干湿时间比的影响	67
4.5	小结	68
第 5 章	水泥混凝土板湿度翘曲应力计算理论	69
5.1	湿度及湿度梯度对混凝土板的影响	69
5.2	均匀无限板湿度应力计算理论	70
5.2.1	均匀板湿度残余应力	70
5.2.2	均匀板等效温度梯度	72
5.3	非均匀无限板湿度应力计算理论	72
5.3.1	非均匀板湿度残余应力	72

5.3.2 非均匀板等效温度梯度	74
5.4 湿膨胀系数	74
5.5 等效温度梯度算例	75
5.5.1 均匀板湿度应力及等效温度梯度	75
5.5.2 非均匀板湿度应力及等效温度梯度	77
5.6 小结	79
第 6 章 连续配筋混凝土路面湿度应力分析	81
6.1 CRCP	81
6.2 二维 CRCP 有限元模型及参数	82
6.3 基层特性的力学影响	84
6.3.1 对板顶应力的影响	84
6.3.2 对钢筋应力的影响	85
6.3.3 对裂缝宽度的影响	86
6.4 小结	89
第 7 章 结论与展望	90
7.1 结论	90
7.2 创新点	92
7.3 展望	92
参考文献	94
附录 A Crank-Nicolson 有限差分法 MATLAB 代码	102
附录 B 遗传算法 MATLAB 代码	104
附录 C 求解线性扩散方程的特征展开法	109
附录 D Adomian 分解法求解非线性扩散方程 MAPLE 代码	111
附录 E 不同工况下早龄期混凝土湿度场分布规律	114
附录 F CRCP 湿度应力分析有限元脚本	155

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、工程造价低、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，早期在国内外得到广泛应用。然而，随着近年来国民经济和公路交通运输事业的大力发展，运输车辆中重型货运车辆的比例不断增加，汽车的总载重量和轴载重量不断提高，越来越大型化，且交通量逐年增加。传统水泥混凝土路面的诸多优势正逐渐减弱，难以满足现代交通运输的需求，导致水泥混凝土路面在高等级路面中所占的比例逐渐降低。从技术角度看，造成目前现状的原因主要是水泥混凝土路面设计与施工不当而引起的早期损坏和行车舒适性问题。

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，面向现代交通特点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混凝土路面。因此，在修建沥青路面的同时，也应看到水泥混凝土路面的优势。加快水泥混凝土路面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 水泥混凝土路面概况

1.1.1 国外水泥混凝土路面

水泥混凝土作为筑路材料用于铺筑路面最早出现在英国。1828年在伦敦郊外，英国用水泥混凝土铺筑了道路基层，1913年美国阿肯色州修筑了美国历史上第一条水泥路面，其尺寸为长 24mi (1mi = 1.609344km)、宽 9ft (1ft = 0.3048m)、厚 5in (1in = 2.54cm)，此后，威斯康星州和加利福尼亚州逐渐把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，水泥混凝土路面由于高强、耐久、行车性能好等一系列优点，在欧美各国迅速发展。

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，在重车作用下，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;法国最近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。

国外早期的混凝土路面的设计寿命基本为 20~25 年,进入 20 世纪 90 年代以来,美国和欧洲一些国家提出,对于交通量大和使用繁忙的城市走廊道路,按照长寿命道路的概念设计路面,即初始使用寿命大于 40 年。在美国,长寿命路面的使用已经被证明是一种降低寿命周期成本、降低用户出行延误的有效策略。有些国家提出按 50~60 年的寿命设计路面结构,不少国家构思修建钢筋混凝土(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特的优势。

美国联邦公路局在 2006~2007 年开展了一项名为“长寿命水泥混凝土路面扫描”的项目,专家技术组考察了加拿大、德国、奥地利、比利时、荷兰、英国等国家的水泥路面技术和使用状况,包括设计原理、材料要求、施工方法和养护策略(包括冬季养护)。经过总结提炼,项目推荐了以下水泥路面修筑技术。

(1) 双层摊铺技术。1891 年,美国在贝尔方丹修筑了世界上第一条双层摊铺水泥混凝土路面(two-lift pavement),如今已超过 100 年,仍在在使用。

此后,1976 年,艾奥瓦州在复合式路面改造时,铺筑了一段双层摊铺水泥混凝土路面,下层采用回收集料拌和的混凝土,上层采用耐磨集料混凝土,这条路至今性能良好。1978 年,佛罗里达州新建了一条双层摊铺水泥混凝土路面,下层采用低弯拉强度混凝土,上层采用高弯拉强度混凝土,该路至今仍在在使用中,状况良好。1993 年,密歇根州修筑了一条双层摊铺水泥混凝土路面,用以取代底特律市的一条干线高速公路,上层采用露石工艺,为行车提供耐磨、抗滑、低噪的行驶表面。

目前,双层摊铺水泥混凝土路面在加拿大、荷兰、奥地利、法国和德国等国家被大量采用,且美国联邦公路局在长寿命水泥路面专项调研报告中首先推荐采用双层摊铺技术。在我国,高等级公路普遍采用沥青路面,因此水泥混凝土高速公路较少,双层摊铺水泥混凝土路面尚未见公开报道。

(2) 目录设计法。路面目录设计已成功地在欧洲使用多年。在美国,混凝土路面的设计传统上一直以单个项目为基础。这种方法曾在美国路面工程中使用

好多年。然而,随着交通流量的增加、轴载的不同,单个项目的设计可能并不总是必需的。此外,随着材料的变化和新的发展,要求路面设计流程能灵活地考虑材料性能对路面结构的影响。这种需求已经体现在力学经验路面设计指南(MEPDG)中。

目录设计方法是一种用于选择初始路面结构的简单程序。调研的许多欧洲国家都经常使用目录设计法选择路面的厚度和其他一些路面的技术指标。使用设计目录的国家认识到,简单地采用内插或外延经验是不可靠的,往往导致过度的混凝土路面设计。目录中设计特点和厚度能反映当地的气候、材料和交通水平的长期经验,这些经验是经过专家团队分析验证的,专家小组采用实验室测试和实地观察来验证设计目录。这些设计目录大约每5年重新修订一次。

目录设计本身不是设计的程序,而是确定在路面分析中使用适当的路面设计特点的媒介。开发目录设计的最快的方式是简单地使用表现良好的标准设计。设计目录中的方案需要通过实验室和实地调查进行验证。

(3) 低噪声露石表面功能设计。水泥混凝土路面产生的噪声水平在75~85dBA,高于沥青路面的平均水平(72~76dBA)。为改善路面的安全性和排水能力,对新鲜的混凝土面层进行拉毛处理,一定程度上能降低噪声,其噪声水平在73~79dBA。但考虑到安全等因素,逐渐被等间距刻槽所代替。等间距刻槽方法增加了交通噪声,一般噪声水平在76~85dBA。为降低噪声,美国PCA协会、AASHTO和比利时道路研究中心研究认为,从降噪角度出发,采用纵向刻槽有利于降低噪声,但纵向刻槽不利于雨水的排走,同时会影响摩托车等车辆的操纵性,所以为兼顾抗滑要求,推荐采用变间距横向刻槽,间距在15~30mm随机变化。另外间距随机变化的斜向刻槽可降低噪声。根据美国Kuemmel等2000年发表的“水泥混凝土路面噪声与表面构造”研究报告,相对于传统的横向刻槽路面,随机变间距横向刻槽的噪声降低1~3dBA,随机斜向刻槽降低4dBA,纵向刻槽降低4~7dBA。

随后裸露集料低噪声水泥混凝土路面逐渐出现,最早的裸露集料混凝土路面是1970年在比利时修筑的,当时采用旋转的刷子直接在新混凝土表面工作,并用水冲走浮浆,实际上这种裸露集料法属于机械方法。在1971~1980年比利时共计 $7 \times 10^5 \text{m}^2$ 的路面使用这种方法。化学裸露集料方法最早于1976年在丹麦使用,并大面积在比利时推广使用。化学裸露集料方法需要高质量的缓凝剂,如柠檬酸或糖蜜,路面施工完毕后立即喷洒缓凝剂,为保水在混凝土表面覆盖养生薄膜,在随后的48~72h掀起薄膜,用旋转钢丝刷清除混凝土表面的砂浆。1991年PIARC表面功能委员会根据奥地利和挪威的试验路建议:为达到降噪的目的,裸露集料磨耗层的最大粒径为7~8mm,主要粒径为4~8mm。根据Monazewska和Kumar

的实测裸露集料水泥混凝土路面的噪声水平在 71 ~ 80dBA, 采用小粒径裸露集料水泥混凝土路面的噪声水平在 70 ~ 74.5dBA。根据奥地利的资料, 相对于旧水泥混凝土路面, 小粒径裸露集料水泥混凝土路面的最大降噪达 7dBA。

1.1.2 我国水泥混凝土路面

我国水泥混凝土路面起步较晚。至 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%; 至 1980 年, 混凝土路面的里程为 1600km, 约占高级和次高级路面总里程的 1.01%。随着高等级公路的发展, 至 1990 年, 水泥混凝土路面总里程增加到 11773km, 占高级和次高级路面总里程的 4.37%; 至 2000 年, 水泥混凝土路面总里程增加到 111574km, 占高级和次高级路面总里程的 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 435.6 万 km, 比上年末增加 11.8 万 km; 公路密度为 45.4km/100km², 提高 1.24km/100km²; 公路养护里程达 425.14 万 km, 占公路总里程的 97.6%, 提高 0.4%。全国等级公路里程达 375.56 万 km, 比上年末增加 14.60 万 km, 占公路总里程的 86.2%, 提高 1.0%。其中, 二级及以上公路里程达 52.44 万 km, 增加 2.25 万 km, 占公路总里程的 12.0%, 提高 0.2 个百分点。全国高速公路里程达 10.44 万 km, 比上年末增加 0.82 万 km。其中, 国家高速公路达 7.08 万 km, 增加 0.28 万 km。全国高速公路车道里程达 46.13 万 km, 增加 3.67 万 km。

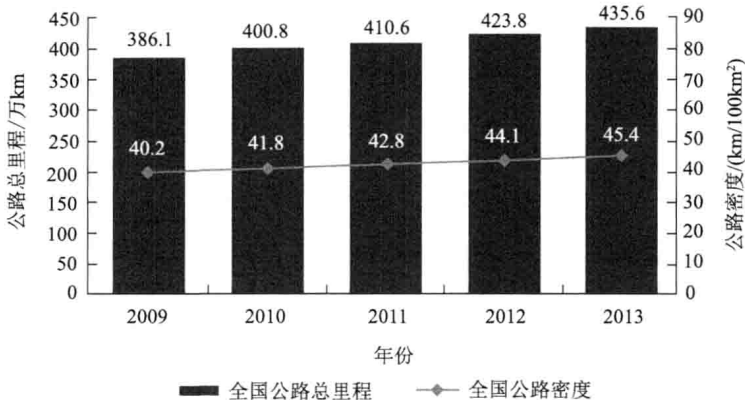


图 1.1 全国公路总里程及公路密度

各类型路面里程分别为: 有铺装路面 246.53 万 km, 其中沥青混凝土路面 68.81 万 km, 水泥混凝土路面 177.72 万 km, 各等级公路的里程和铺装情况详见表 1.1, 其构成比例如图 1.2 和图 1.3 所示。

表 1.1 2013 年年底我国公路里程情况统计 (单位: km)

项目	有铺装路面 (高级)			简易铺装路面 (次高级)	未铺装路面 (中级、低级、无路面)	总计
	合计	沥青混凝土	水泥混凝土			
国道	163 770.498	142 213.26	21 557.238	11 247.082	1 796.526	176 814.106
国家高速公路	70 797.178	67 344.396	3 452.782	0	0	70 797.178
省道	260 086.053	187 236.829	72 849.224	41 278.784	16 485.378	317 850.215
县道	341 384.327	153 021.82	188 362.507	128 824.248	76 609.826	546 818.401
乡道	640 850.011	102 458.767	538 391.244	127 896.383	321 775.639	1 090 522.033
专用公路	25 676.005	11 880.711	13 795.294	10 283.887	40 832.747	76 792.639
村道	1 033 587.611	91 280.485	942 307.126	172 658.9	941 174.53	2 147 421.041
合计	4 356 218.435	688 091.872	1 777 262.633	492 189.284	1 398 674.646	2 465 354.505

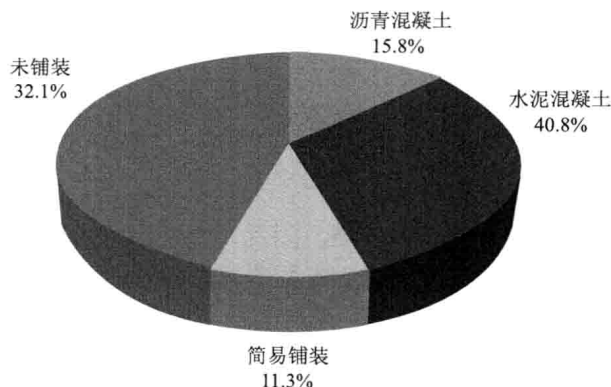


图 1.2 2013 年年底各路面铺装类型构成

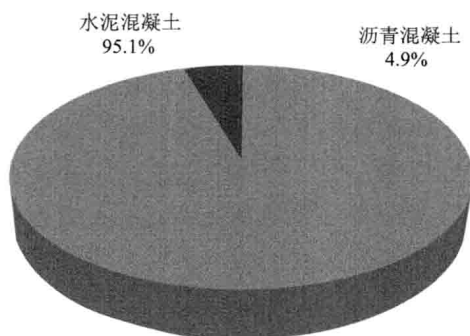


图 1.3 2013 年年底各国家高速公路路面铺装类型构成

可以看出,虽然水泥混凝土路面占全部路面里程的 40.8%,远高于沥青混凝土的比例 (15.8%),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,维修困难的弱点反而进一步突现,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,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水泥混凝土路面具有良好的稳定性,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轮荷载作用下,作为承重结构,主要以它的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 Older 和 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,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,并假定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,由于室外温度变形,板角出现微量脱空现象,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, Hogg 等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,并以此改善了威氏公式的不足。在理论上引用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载位置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,梅特尼科夫等应用应力等效原则,在两种地基假定下,将两个板中应力计算公式取为相等,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 年和 1966 年的刚性路面设计规范即以此为基础。

1943 年, *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,则刚性面板还将产生与荷载应力无关的温度应力。*Westergaard* 提出了由路面板上、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公式和计算曲线,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运输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,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 100 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,在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 研究背景和意义

从前述内容可知,在我国水泥混凝土路面设计方法中,路面板的厚度设计一直以其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^[1-5];在美国力学-经验法(MEPDG)水泥混凝土路面设计方法中,路面板的应力分析采用有限元工具ISLAB2000进行^[6];波特兰水泥路面协会(PCA)设计法采用有限元工具JSLAB进行路面板的应力分析^[7]。可以看出,在水泥混凝土路面结构分析理论和设计方法中,路面板的应力分析和计算是一项十分重要的基础性研究工作。

由于水泥混凝土路面承受交通荷载作用,荷载应力是路面板应力的主要组成部分。水泥混凝土路面板除承受荷载应力以外,由于其长期暴露在自然环境中,还承受由环境引起的翘曲应力。翘曲应力产生的机理是:当水泥混凝土路面板的上表面温度或湿度低于(或高于)下表面的温度或湿度时,由于混凝土材料的热胀冷缩机理,板会产生向上(或向下)的翘曲变形,在路面板和基层的摩阻作用下,板的变形受阻,进而会产生翘曲应力。路面板的翘曲会导致板与地基之间产生脱空现象。在车辆荷载作用下,板中上表面(或下表面)处产生拉应力集中,最终可导致板的横向断裂,影响板的使用性能、缩短路面结构寿命。在欧美一些国家,特别是美国,这种翘曲导致的路面板断裂较为普遍,在重载作用下,路面板通常在修筑完毕的3~5年后即产生断裂,而且断板率随时间呈直线上升趋势,相应的维修和重建造成严重交通堵塞和经济损失^[8]。因此,研究翘曲破坏及相应影响因素对准确设计水泥混凝土路面具有重要意义。

根据成因的不同,翘曲可分为由温度梯度引起的温度翘曲(curling)和由湿度梯度引起的湿度翘曲(warping)^[8]。一直以来,人们对混凝土路面板温度翘曲的研究较多而且认识较为统一,形成了系统、完整的温度场预估、翘曲变形和应力计算方法^[9-21],并将其应用到了实际设计中。

对于湿度翘曲,研究人员已经意识到路面板内湿度的变化对板的变形及应力有较大影响,但对水泥混凝土路面湿度梯度的形成机理的研究较少^[22-26],混凝土路面板湿度翘曲主要取决于当地的气候条件,不同地区的路面湿度翘曲应力差异很大,主要原因是水泥混凝土路面板湿度的影响因素和边界条件较多,如路面周围环境的相对湿度、降雨、混凝土中的自由水、底基层或路基水分含量、板的湿度扩散系数等。这种依赖关系决定了板的内部相对湿度变化主要处于板的顶部附近,而板的下部的湿度基本接近饱和水平,一般大于80%^[27]。同时,湿度翘曲的发展是相对复杂的,因为混凝土收缩不仅取决于板的相对湿度及其梯度,而且受混凝土龄期的影响。这种混凝土变形的时间依赖特性需在翘曲应力的计算过程中

加以考虑,因为相对湿度的变化速度比温度变化缓慢。

目前国内外没有一套适合设计用的描述水泥混凝土路面结构水分迁移 (moisture movement) 的数学模型,无法准确预测路面板的湿度场,进而无法计算路面板的湿度翘曲和相应应力。因此,现行国内外的水泥混凝土路面设计方法和分析理论中尚未考虑湿度梯度的作用,从而忽略了湿度梯度对路面板变形和应力的影响。这会导致对水泥混凝土路面内实际产生的翘曲及应力估计不足,使路面设计参数与实际服役情况有差别。

为正确分析和计算水泥混凝土路面湿度翘曲应力,需要回答以下三个问题。

(1) 掌握路面板水分迁移机理这一基本问题,包括早龄期混凝土和硬化后混凝土在外部干燥过程或者表面接触液态水的情况下的水分迁移机理和湿度场的表征模型。

(2) 为满足工程设计要求,需要结合当地气候条件确定混凝土板内的典型湿度场分布规律。

(3) 正确分析湿度及湿度场的存在对水泥混凝土路面板的力学影响。

本书将通过室内试验的方法,分析养生效应下早龄期水泥混凝土路面板和硬化后水泥混凝土路面板的水分迁移机理和规律,利用多孔介质传质理论建立湿度场的表征模型,并进行模型参数标定和模型正确性验证,在此基础上提出水泥混凝土路面板湿度应力计算方法,从而为水泥混凝土路面板湿度场预估和湿度翘曲应力计算提供理论基础。

研究的意义在于,在水泥混凝土路面结构分析和力学计算中能正确考虑湿度对翘曲变形和应力的影响,最大限度地准确确定路面设计参数,使路面设计参数与实际服役情况相符,完善水泥混凝土路面设计理论。

1.4 研究现状

水泥混凝土是一种复杂的三相多孔介质,其内部孔隙被流体(溶液和湿润空气)所填充。由于孔隙内流体及其组分在力学、热力学上的不平衡,混凝土内部或者在其边界处发生以下传质现象^[28]。

(1) 扩散(diffusion): 孔隙内空气的不同成分(粗略地分为水蒸气和干空气)以及孔隙溶液的各种溶质在浓度梯度的作用下由高浓度处向低浓度处运动。

(2) 渗透(permeation): 流体在压力梯度的驱动下由高压处向低压处运动。

(3) 吸水(absorption): 非饱和的混凝土接触液态水时,混凝土表面孔隙的毛细压力下降到几乎为零,进而造成由表及里的液体渗透。

在公路水泥混凝土路面中,由于不存在压力差,第二种现象可以忽略不计。

本节将对扩散和吸收机理及湿度对混凝土的力学影响进行全面的文献综述。

1.4.1 混凝土水分迁移模型

近三十年来,水泥混凝土内部湿度形成机理和水分迁移的研究逐渐得到国内外科研人员的重视,并取得了一些研究成果。从研究方法上区分,这些研究可以分为经验法和理论法。经验法试图建立水泥混凝土内部湿度与相关因素的经验关系表达式,而理论法是以多孔介质传质理论建立水泥混凝土路面板水分迁移的机理模型。

在经验法方面, Persson^[29]测定了暴露于空气中、水养护和密封试件的湿度变化,并建立了基于水胶比、水泥水化度或龄期的湿度计算公式。Parrott^[30,31]根据试验数据建立了基于水灰比、干燥时间和空气湿度的湿度预估公式。

在理论法方面, Bažant 和 Najjar^[32]首先建立了描述混凝土水分迁移机理的非线性扩散方程,模型采用等效厚度(0.75mm)的概念来描述空气养生的影响,其中扩散系数为混凝土含湿量的三参数方程。模型如下:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \text{div}(D \cdot \text{grad}(\theta)) \quad (1.1)$$

式中, θ 为混凝土内部相对湿度, $0 \leq \theta \leq 1$; t 为时间; D 为外部干燥时混凝土水分的扩散系数, m^2/s ; grad 为混凝土相对湿度的非线性函数。

随后, Akita 等^[33]利用不同混凝土配合比下的湿度试验数据验证了 Bažant 和 Najjar 模型的正确性,并给出了一个分析由外部干燥引起的混凝土水分迁移的流程。

Kim 和 Lee^[34]采用密封和干燥试件对不同水灰比混凝土的扩散引起的湿度变化和水泥水化引起的湿度变化进行了测量,研究了自干燥(self-desiccation)引起的早龄期混凝土湿度的降低。试验表明,高水灰比的低强度水泥的水分迁移主要由水分扩散控制,自干燥的影响不大;但对于低水灰比的高强度水泥,自干燥对湿度的发展有重要的影响。

Wong 等^[35]的研究结果表明,在水分扩散的过程中,低水灰比混凝土在低湿度和高湿度环境下能导致高孔隙湿度,水分扩散系数与孔隙湿度呈 S 形曲线。对于水的吸附特性,累积吸水率随着环境温度和灰水比的增大而增大,但与初始孔隙湿度成反比。水吸附系数也随初始孔隙湿度增加而增加,呈线性关系。

Neithalath^[36,37]的研究表明,不论混凝土的内部湿度水平如何,长期来看,混凝土的吸水机理 70%是吸收作用造成的,30%是扩散造成的。Neithalath 进行了吸水试验,利用吸附-扩散方程给出了特殊定解条件下的吸水量的解析解(以吸水时