

水泥混凝土 路面维修与改造

内容提要

本书在国内外相关研究成果与工程实践的基础上，系统阐述了水泥混凝土路面养护方面的相关理论与应用技术。书中内容集中体现了作者多年来在水泥混凝土路面使用状况调查与评价、典型病害成因分析、预防性养护与维修技术、旧水泥混凝土路面改造技术等方面的研究与工程实践成果。

王松根 陈拴发 编著



人民交通出版社
China Communications Press

Shuini Hunningtu Lumian Weixiu yu Gaizao

水泥混凝土路面维修与改造

王松根 陈拴发 编著

人民交通出版社

内 容 提 要

本书在国内外相关研究成果与工程实践的基础上,系统阐述了水泥混凝土路面养护方面的相关理论与应用技术。书中内容集中体现了作者 20 多年来在水泥混凝土路面使用状况调查与评价、典型病害成因分析、预防性养护与维修技术、旧水泥混凝土路面改造技术等方面的研究与工程实践成果。

本书可作为公路、机场道面行业从事水泥混凝土路面设计、施工、养护以及检测、管理、监理等人员的参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

水泥混凝土路面维修与改造/王松根,陈拴发编著.——
北京:人民交通出版社,2011.9

ISBN 978-7-114-09404-0

I. ①水… II. ①王… ②陈… III. ①水泥混凝土路面—维修 ②水泥混凝土路面—改建 IV. ①U416.216.0

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 191085 号

书 名: 水泥混凝土路面维修与改造

著 者: 王松根 陈拴发

责任编辑: 丁润铎

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: 人民交通出版社发行部

经 销: 各地新华书店

印 刷: 北京交通印务实业公司

开 本: 787×1092 1/16

印 张: 20.25

字 数: 484千

版 次: 2011年11月 第1版

印 次: 2011年11月 第1次印刷

书 号: ISBN 978-7-114-09404-0

定 价: 45.00元

(有印刷、装订质量问题的图书由本社负责调换)

《水泥混凝土路面维修与改造》

编写人员名单

主 编：王松根 陈拴发

副 主 编：马庆雷 葛 智

参编人员：张宏庆 丁润铎 毕玉峰

戈晓明 任振生 张凤亭

序

改革开放以来,水泥混凝土路面在我国得到了迅速发展,特别是在国家科委“七五”科技引导性 025 项目“我国水泥混凝土路面发展对策及修筑技术研究”之后,水泥混凝土路面的设计与施工技术得到了很大的发展,全国水泥混凝土路面通车总里程也由 1980 年的 1 600km,快速上升到 2010 年底的 137 万 km。但随着通车里程的快速增长,养护工作的任务越来越重、要求越来越高、压力也越来越大。

水泥混凝土路面养护的关键在于要大力推行科学养护和实现养护技术的现代化。目前,由于一部分公路管理和技术人员对水泥混凝土路面的养护尤其是预防性养护的重要性还缺乏足够认识,对水泥混凝土路面的养护技术也没有全面了解和掌握,致使我国水泥混凝土路面养护水平总体低于沥青路面。加上养护技术本身也在不断地发展,因此,要加强水泥混凝土路面养护的新技术、新工艺、新材料和新装备的研发和推广,以提高公路养护管理的整体技术水平。

本书作者针对水泥混凝土路面养护工作中出现的问题进行了大量的技术研究、开发工作,形成了一系列具有较强工程实用意义的养护新技术、新工艺。《水泥混凝土路面维修与改造》就是在总结他们长期以来工作、研究成果的基础上,结合国内外最新研究成果和先进经验而编写的一部内容丰富、技术先进、实用性强的专著。它也集中反映了我国目前水泥混凝土路面养护的技术水平。我相信,该书的出版将对我国水泥混凝土路面养护工作的科学开展与提高养护技术人员的技术水平都具有重要参考价值!

交通运输部公路局局长



2011 年 8 月

前 言

水泥混凝土路面在使用期间,不仅承受着数千万计的轮载作用,还经受着环境中温度、湿度等周期性变化因素的影响,最终导致各种损坏的出现。近年来,随着国民经济的迅速发展,交通荷载逐步向重型化发展,交通量也大幅增长,导致路面加速破坏的现象日益严重,极大影响了行车舒适性和安全性,也使得水泥混凝土路面的养护任务更加艰巨。因此,提高养护与维修技术,延长水泥混凝土路面的使用寿命,是公路交通部门目前面临的一项刻不容缓的任务。

在水泥混凝土路面发展中,只有建立良好的养护系统,才能使公路发挥最大效益,这也进一步表明养护工作至关重要。但由于过去我国公路等基础设施建设严重滞后于国民经济和社会发展的需要,导致在近一时期公路发展中,出现了重建轻养、忽视旧路改造的现象。特别是在新路里程不断增加的背景下,对公路养护提出了更为迫切的要求。但由于条件制约,我国公路养护水平还有待进一步提高,特别是原有设计理论的不完善、施工经验的不足及对养护的不重视,使许多水泥混凝土路面不仅存在功能性的缺陷,还出现了结构性的损坏;同时,养护中普遍存在的“效率低、质量差”现象,也是我国水泥混凝土路面养护工作中必须解决的问题。

本书内容涵盖了水泥混凝土路面使用状况调查与评价、典型病害成因分析、预防性养护与维修技术、旧水泥混凝土路面改造技术等内容,特别结合作者多年来在水泥混凝土路面养护工作中取得的大量研究成果,全面系统地介绍了水泥混凝土路面养护理论与实践,并以工程实例的方式重点介绍了旧水泥混凝土路面改造加铺技术的应用。

全书主要编写人员有交通运输部公路科学研究院王松根,长安大学陈拴发,山东公路技师学院马庆雷、山东大学葛智等,并由王松根、陈拴发定稿。同时,本书在编写过程中,得到了众多同行、朋友的支持与帮助,特别是有幸得到了交通运输部公路局李华局长的指导,提出了许多宝贵意见,并欣然为本书作序。在此,作者一并对所有支持、关心本书编写的同行、朋友表示衷心的感谢!

由于作者学识有限,书中难免有疏漏和不当之处,恳请各位读者批评指正。

编著者
2011年8月

目 录

第一章 概述	1
第一节 水泥混凝土路面简介.....	1
第二节 水泥混凝土路面的基本要求.....	4
第三节 水泥混凝土路面结构设计.....	5
第四节 水泥混凝土路面施工	10
第五节 水泥混凝土路面养护与管理	23
第二章 水泥混凝土路面使用状况调查与评价	32
第一节 路面破损状况	32
第二节 结构承载能力	39
第三节 行驶质量	44
第四节 抗滑能力	53
第五节 交通状况调查	59
第六节 路基和路面排水状况	64
第七节 路面结构参数调查与评定	68
第八节 水泥混凝土路面使用质量综合评价	75
第三章 水泥混凝土路面典型病害成因分析	77
第一节 水泥混凝土路面板断裂	78
第二节 水泥混凝土路面变形	90
第三节 水泥混凝土路面接缝.....	100
第四节 水泥混凝土路面表面病害.....	106
第四章 水泥混凝土路面预防性养护与维修技术	111
第一节 水泥混凝土路面预防性养护.....	111
第二节 路面裂缝预防与维修措施.....	112
第三节 板边、板角病害的预防与维修技术	121
第四节 路面板底脱空的预防与维修措施.....	125
第五节 水泥混凝土路面板错台防治.....	134
第六节 水泥混凝土路面沉陷处治.....	140
第七节 水泥混凝土路面坑洞修补技术.....	143
第八节 水泥混凝土路面接缝维修技术.....	145
第九节 水泥混凝土路面破碎板块快速更换技术.....	148
第十节 水泥混凝土路面表面功能恢复.....	158
第十一节 水泥混凝土路面路肩维修.....	172

第五章 水泥混凝土路面改造技术	174
第一节 水泥混凝土路面板块破裂稳固技术.....	174
第二节 水泥混凝土路面板块冲击压实技术.....	177
第三节 旧水泥混凝土路面板块碎石化技术.....	186
第四节 水泥混凝土路面直接加铺沥青层路面结构.....	196
第五节 旧水泥混凝土路面加铺水泥混凝土结构.....	219
第六节 旧水泥混凝土路面加铺连续配筋混凝土结构.....	239
第六章 水泥混凝土路面改造加铺技术应用及工程实例	255
第一节 旧水泥混凝土路面板块破裂稳固技术.....	255
第二节 旧水泥混凝土路面板块碎石化技术.....	269
第三节 旧水泥混凝土路面沥青加铺层改造技术.....	276
第四节 旧水泥混凝土路面水泥混凝土加铺层改造技术.....	295
第五节 旧水泥混凝土路面连续配筋混凝土加铺改造技术.....	303
参考文献	312

第一章 概 述

第一节 水泥混凝土路面简介

一、发展历史

水泥混凝土路面作为一种高级路面结构形式,其最早建造史,可追溯到大约公元前 1 世纪。当罗马人通过偶然机会了解到火山灰可作为胶凝材料用在建筑、水利、港口工程上时,就开始将其应用到重要的道路和广场工程上。

近现代意义上的水泥混凝土路面是在 1824 年 10 月 21 日由英国工匠 Leads 和 J. Aspdin 取得了波特兰水泥的发明专利后,从欧洲首先发展起来的。全世界第一条水泥混凝土路面是 1865 年在英国修筑的,至今已有 146 年的历史。我国第一条水泥混凝土路面是 1928 年在浙江奉化溪口镇修筑的,至今已有八十多年的历史。1936 年我国引进德国技术设备,在唐山建立了第一家生产和销售水泥的“启新洋灰公司”,开始在室内建造水泥混凝土地面和室外地坪,并在该工厂建造了一段水泥混凝土路面试验段。1940 年前后,天津和沈阳建造了少量水泥混凝土路面,板厚大约 20cm。

1. 国外水泥混凝土路面发展

国外水泥混凝土路面的发展经历了两大发展时期。

第一个时期是在 20 世纪 30~40 年代。随着汽车工业的发展,战争物资和军队的调运,客观上对路面的质量要求大大提高。这一时期,最明显的标志是德国建设的世界上第一条汽车专用高速公路,其使用的就是水泥混凝土路面结构形式。当时几乎所有的发达国家,如日本、美国、英国、法国、比利时都竞相发展水泥混凝土路面,有的将水泥混凝土路面技术扩展到其殖民地国家。这个时期水泥混凝土路面主要施工方式是小规模的人工加小型机具辅助。

第二个时期是在 20 世纪 70 年代。世界性的石油能源危机,使一些主要使用沥青建造高速公路的国家,如美国、法国、原联邦德国等,认识到必须尽量减少高速公路建设对石油沥青的依赖性,节约沥青资源和能源。他们在高速公路水泥混凝土路面技术上开始了新一轮的研究开发,从国家战略利益考虑,增加了对水泥混凝土路面的科技投入和建设规模。上述国家不仅对设计理论和计算方法进行了更新和提高,而且将主要的施工方式从人工施工向大规模机械化施工转变,建立了目前仍在采用的轨道链式机组和快速滑模摊铺机施工方式。在此期间,由于要求水泥混凝土路面要适应各种各样的地质地形条件,多种新型的水泥混凝土路面结构形式,如钢筋混凝土路面、预应力混凝土路面、镶嵌混凝土块式路面等应运而生。这一时期,美国从政策上扶持水泥混凝土路面的建设,水泥混凝土路面在公路网中的比例由原来的 20% 发展到 20 世纪 70 年代后期的 49% 左右。法国和原联邦德国也开始打破沥青路面占绝对主导的

格局,加快了水泥混凝土路面的发展。

各国在发展水泥混凝土路面技术上的一个重要特征是密切结合本国实际和资源约束条件,其直接影响因素是本国水泥和沥青资源供给和价格情况。近年来,国外水泥混凝土路面发展迅猛。据有关统计资料,各国在不同等级公路上修建水泥混凝土路面的比重大大增加。在美国,经历了交通量与轴重大幅度增加后,使用年限能够超出设计寿命(20年)的道路中,多数为水泥混凝土路面,美国的水泥混凝土路面占高级路面的48.5%。英国在新建干线道路上,水泥混凝土路面占55%,德国占39%以上,法国高速公路上有30%为水泥混凝土路面,比利时则规定新建公路全部采用水泥混凝土路面。在国外路面建设中,之所以水泥混凝土路面的比重不断增大,一方面是出于能源方面的考虑,另一方面其经济对比分析是建立在建设、维修、养护全部建设和运营总费用最低的价值工程基础上,强调在路面使用年限内,每平方米每年的费用最低,投资效益最高。这样水泥混凝土路面即使建设费用较高,但使用寿命长,全过程投入并不高。

2. 我国水泥混凝土路面发展

我国石灰石资源丰富,水泥产量很大,目前已居世界第一,而我国的沥青资源相对匮乏,因此水泥混凝土路面在我国的发展是具有一定优势的。从“六五”、“七五”开始,原交通部对水泥混凝土路面就予以高度重视和大力推广,在以后的时间内,先后组织多次联合科研攻关,解决水泥混凝土路面设计和施工中的有关技术问题,制订了水泥混凝土路面的发展对策,并先后出台了水泥混凝土路面设计、施工、养护等规范,为推动我国水泥混凝土路面的发展作出了积极的贡献。随着我国改革开放的不断深入,特别是20世纪90年代以后,我国水泥混凝土路面的发展异常迅猛,从表1-1中可清晰地看到我国水泥混凝土路面的发展历程。

我国水泥混凝土路面建设里程统计表

表 1-1

年份(年)	1960	1970	1980	1990	1996	1997	1998	2000	2001
里程(km)	60	200	1 600	11 373	56 625	68 740	83 652	118 576	140 745
年份(年)	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010
里程(km)	167 517	198 324	257 125	306 622	646 400	848 800	1 023 700	1 231 000	1 375 500

比较表1-1中2010年与1990年的20年间,水泥混凝土路面里程增加了136.4127万km,增加了119.9倍,平均年增长速率为27%。它比同期我国经济发展速度快1倍多。目前,我国已经建立了较为成熟的水泥混凝土路面设计理论体系,对普通混凝土路面以及钢筋混凝土、钢纤维混凝土、连续配筋混凝土、碾压混凝土等新型混凝土路面都建立了较为完善的设计方法。通过在高速公路和一级公路修筑水泥混凝土路面的实践经验积累,取得了水泥混凝土路面可靠度、路面结构排水等一大批科研成果,使水泥混凝土路面的技术水平达到了一个新的高度。同时,经过近20年技术引进及自主开发,在水泥混凝土路面施工技术上也有了巨大的进步,全面掌握了滑模、轨道、碾压、三辊轴、小型机具等施工工艺,在接缝施工、表面功能(抗滑构造)、桥面铺装等方面都具备了较高的技术水平,并建立了完善的水泥混凝土路面施工质量管理与检查体系。水泥混凝土路面因强度高、稳定性好、耐久性优良、日常养护工作量少、施工机械简单、抗水害能力强、水泥来源广以及便于夜间行车等原因,在全国范围内得到迅速发展。

沥青路面虽然有一系列优点,而且有些优势是水泥混凝土路面所不及的,例如行车舒适,养护、维修方便,若采用国产沥青,初期投资相对较低。但是我国沥青资源相对匮乏,特别是优质沥青供应严重不足,大多数高速公路沥青路面主要采用优质沥青,这时初期投资已与水泥混凝土路面持平。若对比建设和使用期总投资,水泥混凝土路面则表现出更大的经济优势。这些都为水泥混凝土路面在我国的进一步发展提供了有力的支持。

二、水泥混凝土路面特点

水泥混凝土路面之所以迅猛发展,一方面是国家宏观发展战略为水泥混凝土路面大发展提供了良好机遇,交通量的急剧增长对公路建设的需求量增加;另一方面是水泥路面投资相对较省,我国的资源约束条件更加适合水泥混凝土路面的发展;第三是因为水泥混凝土路面还有如下一系列技术优点。

(1)刚度大、承载能力强。表征混凝土路面板刚性的参数——弹性模量在 $(2\sim 4)\times 10^4$ MPa之间,板底分布荷载小,对基层的承载力要求相对较低。

(2)高温稳定性好、抗水损害能力强。与沥青路面相比,在持续高温作用下,不会产生过大的塑性变形,即车辙和拥包,影响路面平整度和行车安全,同时受水的影响相对较小。

(3)弯拉强度高、疲劳寿命长。用于高速公路的混凝土面板,在标准轴载应力强度之下,弯曲疲劳寿命可达500万~1000万次。

(4)耐候性、耐久性优良。无机材料风化较慢,其抗冻、抗滑及耐磨性都较沥青路面优良。

(5)材料资源丰富、有利于环保。水泥混凝土路面对粗集料的磨光值和磨耗值要求相对较低,因而可用的粗集料岩种广,而且地面水流经或渗透水泥混凝土路面时,对周围土壤和地下水无污染。

(6)油耗低、经济性好。水泥混凝土路面不会产生沥青路面那样的弯沉盆,使用期内车辆的燃油消耗比沥青路面节省15%~20%;在沥青价格持续上涨的情况下,水泥混凝土路面比沥青路面在造价上的优势越来越明显。

(7)使用寿命长。水泥混凝土路面设计基准期为30年,沥青路面为15年,虽然由于各种原因,两种路面的使用寿命达不到设计基准期,但水泥混凝土路面大修期限仍为沥青路面的2倍。

(8)色差小、隔热性好。

水泥混凝土路面具有一系列的优点,但也有缺点,主要是:

(1)行驶舒适性较差。由于路面模量高,反弹颠簸大,减振效果差,荷载、温度、干湿变形较大,路面设置接缝多,行车舒适性较差。

(2)水泥混凝土路面对基层的抗冲刷性要求高,易在接缝处产生唧泥、错台和啃边,造成路面行车颠簸。

(3)面板不适应大沉降差。由于混凝土刚性大,要求较高的、稳固的支撑条件,不能适应易产生大变形的基层、软基及高填方路基。

(4)面板对超载、脱空非常敏感,而且维修难度大。超载与脱空对刚性路面极易形成断板、断边、断角等结构性破坏。

(5)行驶时易眩光,使驾乘人员疲劳。

第二节 水泥混凝土路面的基本要求

路面是公路的重要组成部分。路面的好坏直接影响行车速度、运输成本、行车安全和舒适性。路面在公路造价中所占比重很大,一般高级路面修建投资约占总投资的 60%~70%,低级路面约占 20%~30%。所以,修好路面对发挥整个公路的运输经济效益具有十分重要的意义。通常,水泥混凝土路面必须具备下述各项基本要求。

1. 具有足够的强度和刚度

刚度是指路面结构整体或某一组成部分抵抗变形的能力。如刚度不足,即使强度足够,在车轮荷载作用下也会产生过量的变形而形成沉陷或板体破坏。

由于受到行驶的汽车荷载所产生的各种力的综合作用,路面将逐渐出现磨损、开裂等病害,这就会影响公路的使用质量,严重时还可能中断交通。因此,路面结构整体及各组成部分必须具备足够的强度和刚度,以抵抗行车荷载的作用,避免路面产生过大的变形与破坏。

2. 具有足够的稳定性

路面结构袒露于大气之中,经常受到温度和水分变化的影响,其力学性能随之不断发生变化,强度和刚度不稳定,路况时好时坏。水泥混凝土路面在高温时可能发生拱胀现象,温度急剧变化时会产生翘曲破坏,因此,要求路面结构在各种气候条件下应能够保持足够的稳定性。

3. 具有足够的平整度

路面的平整度(或不平整度)通常是以试验汽车每行驶 1km 距离,车身和后桥相对垂直位移的累计数(m)来表示的。不平整的路面表面会增大行车阻力,并使车辆产生附加的振动作用,造成行车颠簸,影响行车速度、行车安全和舒适性。振动作用还会对路面施加冲击力,从而加剧路面和汽车机件的损坏与轮胎的磨耗,并增大油料的消耗。不平整的路面还会积滞雨水,加速路面的破坏。

为了减小车辆对路面的冲击力,提高行车速度和增强行车舒适性、安全性,路面应保持一定的平整度。公路等级越高,设计行车速度越大,对路面平整度的要求也越高。

4. 具有足够的抗滑性能

汽车在光滑的路面上行驶时,车轮与路面之间缺乏足够的附着力(或摩擦阻力)。在雨天高速行驶,或紧急制动或突然启动,或爬坡或转弯时,车轮易产生空转或打滑,致使行车速度降低,油料消耗增多,甚至引起严重的交通事故。因此,路面表面应具有足够的抗滑性能,即具有足够的粗糙度。设计车速越大,对路面抗滑性能的要求也越高。

5. 具有足够的耐久性

路面结构承受行车荷载和冷热、干湿气候因素的多次重复作用,由此而逐渐产生疲劳破坏,这将缩短路面的使用年限,增加养护工作量。因此,路面结构必须具备足够的抗疲劳、抗老化和抗形变累积的能力,以保持或延长路面的使用寿命。

第三节 水泥混凝土路面结构设计

一、设计内容

水泥混凝土与其他筑路材料相比,铺成路面后具有较高的强度和刚度,并且具有板体性能,所以水泥混凝土路面又称为刚性路面。水泥混凝土路面设计的内容包括结构组合设计、面层接缝构造和配筋设计、路面排水设计、路肩铺面结构层组合设计、面层厚度设计、各结构层材料组成设计、路面表面特性设计等。

(1)路面结构组合设计。根据道路的交通繁重程度,结合当地环境条件和材料供应情况,选择混凝土路面的结构层次,包括路基、垫层、基层和面层的结构组合,及各层结构类型和厚度,以组合成能够提供均匀、稳定支撑,防止或减轻唧泥、错台病害,承受预期交通荷载作用,满足使用性能要求的路面结构。

(2)各结构层材料组成设计。针对各结构层在路面结构中所起的作用,依据当地材料供应情况,选择满足结构层性能要求的混合料,进行配合比设计。通过材料组成设计,使面层混凝土具有足够的抗弯拉强度及抗疲劳性能,基层具有良好的抗冲刷性能和一定的刚度,垫层达到要求的稳定性及刚度。

(3)面层接缝构造和配筋设计。根据混凝土面层内产生的荷载应力和温度应力进行面层的平面尺寸设计。依据接缝的作用,选择缩缝、胀缝或施工缝等类型,确定接缝的间距,布设接缝的位置,设计接缝的构造,包括传力杆、拉杆的布置及填缝材料,确定板内的配筋量和配筋布置。

(4)面层厚度设计。根据公路等级、材料类型和参数及当地的气候水文地质条件,确定满足设计使用期内使用要求所需的混凝土面层厚度。

(5)路面排水设计。根据路面排水要求及表面排水或内部排水设施的作用与设置条件,选择路面结构排水系统的布设方案,确定排水设施的构造尺寸和材料规格要求。

(6)路肩设计。确定路肩铺面的结构层次、各结构层的类型和厚度。

此外,面层还须具有抗滑、耐磨、平整及减轻车辆轮胎噪声等表面特性。

二、路面结构设计理论的发展

刚性路面在车轮荷载的作用下,作为承重结构主要以它的板体抗弯拉强度与刚度保持着路面正常工作状态。因此,长期以来刚性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、路面板产生开裂作为设计的破坏标准。最早的设计方法是欧尔德(C. Older)和哥尔德贝格(A. T. Goldbeck)于1920年提出的破坏标准。他们假设路面板底下局部发生脱空,板体处于悬臂状态,利用材料力学方法计算得到板体最大弯拉应力,以此作为板体厚度设计的依据。这是一种保守的观点和方法,在实际工程中,局部脱空是不允许出现的工作状态。

1925年,韦斯特卡德(H. W. Westergaard)采用铁道工程设计中惯用的温克勒地基假定来描述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路面板,并假定车轮对面

板的作用相当于一个面积相当的圆形均布垂直荷载,通过数学推导,得出了刚性路面板在板中受荷、板边受荷和板角受荷状态下出现的最大弯拉应力。很长时期以来,甚至当今,很多国家刚性路面的厚度设计仍然采用韦氏公式计算的弯拉应力作为控制的极限标准。为了证实韦氏公式的可靠性,1930年美国联邦公路局在阿灵顿进行了大规模的刚性路面足尺寸试验。通过长时间的量测与观测,证明了韦氏公式基本上符合实际的量测结果。但是,由于温克勒地基假定未能充分估计地基各个方向的相互约束,因此,实测的应力大于计算结果。根据阿灵顿试验的大量资料,由布拉德伯利(Bradbury)和斯潘格勒(Spanglar)对韦氏公式提出了局部修正,形成了阿灵顿修正公式。

韦氏公式虽然为刚性路面厚度设计方法奠定了基础,但是地基的描述采用温克勒假定过于保守,忽略了它的整体效应。1938年霍格(A. H. A. Hogg)、1939年舍赫捷尔提出了用弹性半空间地基假定描述刚性路面板下的地基工程状态,以此改善韦氏公式的不足。在理论上引用了布辛尼斯基的各向同性的半空间弹性地基假定取代温克勒假定,路面板仍采用弹性薄板假定。在求解数理方程时,引用了贝塞尔函数与积分变化法,最后形成的方法主要适用于半空间弹性地基上的无限大薄板的模式。

由于刚性路面板的最不利荷位一般情况位于板角或板边,新的地基假定推导的公式虽然可以计算无限大板的厚度,但是无法确定最不利荷载位置的弯拉应力。为此,梅特尼科夫等人运用应力等小法则,将两种地基假定下,两个板中应力计算公式取相等,导出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参数表达的、三个典型荷载位置的弯拉应力计算公式,尽管尚有诸多不合理之处,但是作为一种近似的方法也是可以的。俄罗斯早期的设计方法,以及我国1958年、1966年的刚性路面设计规范,均以梅特尼科夫公式为基础。

1943年波米斯特(D. M. Burmister)最先发表了双层弹性体系的解析解,柯岗等人于1953年将弹性层状体系理论用于刚性路面设计。这样人们完全可以摆脱弹性薄板的假定和层间滑动的接触条件,完全可以按照路面板的实际结构厚度及接触条件来建立方程式,求得解析解。

除了荷载应力之外,温度变化会引起刚性路面产生温度变形,若温度变形受阻,刚性路面还将发生与荷载无关的附加温度应力。韦斯特卡德提出了由于路面板上、下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。该计算方法一直沿用至今。

20世纪60年代以后,汽车工业和航空工业有了较快发展,重型载货汽车和大型越洋飞机在交通运输中大量应用,大型的多轮载荷的复杂性使得早期提出的韦氏公式为基础的设计方法已经无法适应,尽管许多学者提出了用当量单轮荷载取代多轮荷载,但是实际效果仍不够理想。道路科技工作者引用了最初在航天器结构分析中应用的有限元分析方法,试图以此来解决当时刚性路面无法解决的问题。1965年张佑启和森克维琦(D. C. Zienkiewica)最先应用有限元分析刚性路面应力。1970年以后,沙捷斯(M. Sargious)和张佑启、黄仰贤和王光俊等应用有限元方法对刚性路面开展了多方面的研究,他们不仅提出了温克勒和弹性半空间两种地基假定的有限元研究成果,而且在温度应力计算、板底脱空现象、对称性的利用、板与板之间接

缝的不同方式等相关的计算方法方面均取得了重要成果。

我国系统开展刚性路面结构理论与设计方法等相关的研究起步较晚。20世纪70年代中期,东南大学和浙江省交通厅在浙江台州地区修筑试验路,进行荷载应力与挠度测定和疲劳试验,通过研究论证了设计理论的可靠性,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发展过程和估算方法。随后,交通部组织了全国不同部门的许多科技工作者对刚性路面设计理论、方法和参数开展了长期、系统的研究工作。至20世纪90年代初,在荷载应力和温度应力的计算分析、疲劳性能和轴载换算、结构评定及设计方法、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的理论和实用性科研成果,初步建立了我国刚性路面设计理论体系,推动了我国水泥混凝土路面的发展。

路面板厚度的确定除了刚性路面的结构性能之外,还有许多重要内容在刚性路面设计中应考虑。功能要求就是厚度设计的另一项重要内容。美国州公路工作者协会(AASHTO)于20世纪50年代末在伊里诺州和沃太华州进行了规模庞大的试验路试验,其中主要成果就是发现路面的使用性能指标随着不同轴载通行次数的增加逐渐降低的规律,从而提出了不同轴载之间保持相同使用功能下降相当条件下的轴载次数换算关系和以功能指标为设计标准的路面厚度设计方法。虽然AASHTO设计方法因其以经验数据为基础而有一定的局限性,但是它能在反映刚性路面的结构强度要求外,同时保障使用功能不下降到容许限度以下。这显然是人们对设计概念的一种完善,因为路面结构对于使用者来说主要体现在使用品质的优势上。结构的损坏最终也是反映使用品质的下降。

基层结构的选择和厚度的确定也是刚性路面设计的重要内容。自从20世纪中叶,人们对刚性路面基层有了新的认识以后,各个国家对基层的设计充实了很多内容。首先在季节性冰冻地区的国家提出了防冻层的工作原理、材料要求和防冻厚度设计方法。我国道路工作者也通过大量实际工程的研究提出了防冻层设计的整套方法。对于基层防侵蚀和防水稳定性问题,许多国家作出了明确的规定,采用结合料稳定粒料修筑基层。对于路面板下基层顶面的地基承载能力,提出了最低要求,并且提出了多层地基顶面承载力参数的确定方法。早期,为了防止温度变化引起路面板不规则的裂缝和挤压破碎,将路面板用伸缩缝分隔。缩缝保证面板收缩时裂缝整齐规则,伸缩保证路面板升温时有伸长的空间。在实际工程中通常缩缝工作较为正常,而伸缩工作很容易失效而引起破坏,所以,许多国家都考虑取消伸缝的可能性,仅在结构物近处设置伸缝,其他路段不再设伸缝。在北方寒冷地区、温差较大的地区和国家,还是按照伸缩缝的设计要求进行分块处理。

20世纪20年代,土木工程领域开始研究可靠度理论在工程中的应用。长期以来,传统的结构设计均匀安全系数被用于控制结构的安全可靠性。实际上,工程结构从勘测设计、材料选择与试验,以及整个施工过程,各项参数、性能指标均为不确定的,这些数据的变异性与多种因素有关,因此偏离这些不确定因素,以定值为依据的设计方法,难以达到安全可靠的目的。结构可靠度是指结构完成预定功能或者不出现失效的概率。20世纪70年代,Darter等首先应用可靠度概念分析柔性路面设计方法,并提出了按目标可靠度设计路面的简单方法。1973年,Kher等将可靠度概念用于刚性路面设计,采用一次二阶矩法对路面结构可靠度作了分析,并纳入AASHTO路面设计方法(1986年)。1985年,Witczak等又提出了刚性机场道面的可

靠性设计方法。

我国对路面结构可靠度的研究于 20 世纪 80 年代中期开始。在交通部的统一规划和组织领导下,交通部公路科学研究所等单位开展了柔性路面结构可靠度研究,同济大学等单位开展了刚性路面结构可靠度研究,西安空军工程大学开展了空军机场道面结构可靠度研究。刚性路面可靠度研究工作中,开展了较大规模的调查和测试分析工作,以统计分析路面材料、结构参数及交通参数的变异性,并检验结构设计方法同实际相吻合的程度,为我国刚性路面结构设计从确定型向概率型转换作技术储备,并成为我国 2002 年新一轮水泥混凝土路面设计规范的基础。

三、路面结构设计方法

1. 按照力学分析与经验推断的主辅分类

按照力学分析与经验推断的主辅分类,路面结构设计方法可以大致分为经验—力学法和力学—经验法两类。

(1) 经验—力学法

经验—力学法通过修筑试验路,进行行车荷载试验和观测,采集路面结构、轴载和作用次数以及路面使用性能指标的数据,经统计分析整理,建立使用性能指标同路面结构和荷载参数间的经验关系式。同时,进行试验路面结构的力学分析,建立力学指标同路面结构和荷载参数间的经验关系式。组合这两方面关系式而建立的设计模型,可用以预估不同路面结构的使用性能指标随标准轴载作用次数的变化,从而按预定的使用性能要求预测路面的使用寿命,或者确定所需的路面结构尺寸。美国 AASHTO 的设计方法即是以 AASHO 试验路的试验结果为基础,以服务性能指数为设计指标,以板角应力与轴载累计作用次数的关系为纽带建立起来的。

(2) 力学—经验法

力学—经验法将路面结构模型化为理想的结构图式,采用弹性层状体系或弹性地基板等结构分析理论和解析法或有限元法等计算方法,建立荷载和环境作用与路面结构的应力和位移反应之间的计算模型和公式,作为分析各结构设计变量对使用性能指标相当规模影响程度的手段,检验是否达到或超过预定使用性能指标的工具。所选用的使用性能指标,往往是可以用力学指标表征的结构性能,如应力、应变、弯沉等。而设计标准和各项设计参数的确定,需要通过试验标定和使用经验的验证或修正。我国的水泥混凝土路面结构设计方法、美国波特兰水泥协会(PCA)的混凝土路面设计方法、美国陆军的机场刚性道面设计方法,都属于这类方法。

2. 按设计指标和参数分类

按设计指标和参数分类可分为确定型和概率型,相应的路面结构设计方法也可分为确定型设计法和概率型设计法。

(1) 确定型设计法

确定型设计法是水泥混凝土路面传统的设计方法,即输入定值的材料和结构参数、交通参

数及环境参数等,通过结构计算得到在设计使用期内满足设计指标要求所需的面层厚度。我国以往的水泥混凝土路面设计规范采用的设计方法即是一种确定型的设计方法。

(2) 概率型设计法

路面结构层由不同混合材料组成,且在现场进行施工修筑,因此路面结构的物理力学性质和使用性能具有不确定性。同时,路面结构所处的环境和所承受的交通荷载也随时随地发生变化,对它们在设计使用期内的影响和作用所作的预估,包含着更大的不确定性。此外,路面设计理论和计算公式同路面结构实际使用状况之间也存在着一定的差异。对于上述不确定性因素,确定型设计方法通过安全系数加以考虑,即对路面结构的抗力进行某种程度的缩小,而对其所承受的外部作用给予某种程度的放大,难以明确所设计路面应达到的可靠程度,以及该路面结构实际具有或可达到的可靠程度,使设计指标的可检验性下降,给施工控制和质量检验带来许多困难。

概率型设计方法引入可靠度的概念,将材料和结构参数的变异性及交通荷载参数的变异性引入结构设计中,可以估计设计方法的总方差及各项设计变量的不确定性在总方差中所占的比重,并使设计结果同施工质量管理与控制水平相关联,从而可以更确切地选定路面结构的相关参数,有针对性地提出改善主要设计参数变异性的设计或施工措施。我国2002年版设计规范即引入了结构可靠度的概念,改确定型设计方法为概率型设计方法,这对于提高设计和施工质量及管理平均有着积极的意义。

四、路面结构设计过程

路面结构设计的过程,可大致按下述步骤进行:

(1) 采集数据——包括交通(如交通量、轴载组成、年平均增长率等)、环境(道路气候区、月平均气温、最大温度梯度等)、材料(料场位置、材料品质、供应条件等)、地质和水文(岩质和土质、地下水位等)、经济(概预算定额、资金来源等)、当地技术和设备条件、路面使用经验等;进行路面改建设计时,还应调查和收集有关现有路面使用状况的数据。

(2) 初拟路面类型和结构层组合方案——包括行车道和路肩的面层类型、各结构层类型和组合、材料组成和结构层大致厚度;采用路面内部排水设施时,还包括排水系统的布设方案、各项排水设施的构造和大致尺寸;同时,结构方案还包括面层板的平面尺寸及接缝布置和构造。

(3) 各结构层混合料组成设计和相应的力学性质试验。

(4) 选择确定有关设计参数——如分析期,目标可靠度,荷载、环境和材料方面的有关参数。

(5) 进行结构分析——分析所拟路面结构方案在荷载和环境条件下的应力、应变或位移量,预估有关设计标准的损坏量或使用性能指标值。

(6) 进行各路面结构方案的寿命周期费用分析。

(7) 综合各方面的分析和考虑,选择最终设计方案。

水泥混凝土路面按上述步骤进行系统设计的过程,可归纳如图1-1所示。