

复合式路面 设计原理与施工技术

◆ 胡长顺 王秉纲 著



人民交通出版社

FuHeShi LuMian SheJi YuanLi Yu ShiGong JiShu
复合式路面设计原理与施工技术

胡长顺 王秉纲 著

人民交通出版社

内 容 提 要

本书是国内外第一部研究复合式路面设计原理与施工技术的专著。内容包括:水泥混凝土与沥青混凝土复合式路面结构计算理论;碾压混凝土与沥青混凝土复合式路面荷载应力与温度应力分析;水泥混凝土与沥青混凝土复合式路面设计;水泥混凝土复合式路面力学计算与结构设计;复合式路面施工技术等。

本书可供从事道路工程研究、设计、施工人员及相关专业高年级学生、研究生学习和参考。

图书在版编目(CIP)数据

复合式路面设计原理与施工技术/胡长顺,王秉纲著.
北京:人民交通出版社,1999.1
ISBN 7-114-03296-X

I. 复… II. ①胡… ②王… III. ①路面,复合式-设计
②路面,复合式-道路工程-工程施工 IV. U416.224

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (1999) 第 08522 号

复合式路面设计原理与施工技术

胡长顺 王秉纲 著

责任印制:孙树田

插图设计:李京辉 版式设计:周 园 责任校对:刘高彤

人民交通出版社出版发行

(100013 北京和平里东街 10 号)

各地新华书店经销

北京通州区京华印刷制版厂印刷

开本:787×1092 $\frac{1}{16}$ 印张:10.25 字数:300 千

1999 年 5 月 第 1 版

1999 年 5 月 第 1 版 第 1 次印刷

印数:0001—5000 册 定价:23.00 元

ISBN 7-114-03296-X

U · 02354

前 言

复合式路面结构是公路交通可持续发展的必然产物,已引起世界各国道路界的广泛关注,许多国家纷纷修筑试验路或实体工程,但因研究工作进行得很少,影响了这种新型路面结构的发展。随着高等级公路建设步伐的加快,我国有必要系统研究不同类型复合式路面结构设计原理与施工技术,以指导工程建设实践。

“七五”期间,本书作者承担了国家科技引导性项目(NO. 025)——《我国水泥混凝土路面发展对策及修筑技术研究》中水泥混凝土(双层板)复合式路面设计理论与方法的研究;“八五”期间,又承担了交通部科技项目《碾压混凝土与沥青混凝土复合式路面修筑技术研究》,其中的《碾压混凝土加铺沥青层复合式路面结构设计理论与方法研究》在1993年被列为国家自然科学基金资助项目(批准号:59378355),经专家鉴定认为,该项研究成果达到了国际先进水平,设计理论与方法研究填补了该领域的空白。近十几年来,笔者就复合式路面研究发表论文数十篇,多次参加国际会议交流。复合式路面结构研究进程中,西安公路交通大学先后与陕西、河南、安徽、江苏等省,全国水泥混凝土路面技术委员会、天津市政研究院等单位,山东济宁、河北唐山等地市携手合作,从理论和实践两方面成功地解决了各类复合式路面设计与施工中的关键技术,使复合式路面修筑走上了实用化道路。

本书正是作者近十几年来对复合式路面研究成果的汇集与升华。全书共分六章。第一章介绍了复合式路面诞生的背景、分类及国内外研究进展情况。第二章论述水泥混凝土与沥青混凝土复合式路面结构(RCC—AC、PCC—AC)计算理论,内容有:三维等参元法(各向同性与正交各向异性)、垂直与水平复合荷载作用下层状体系解、温度场及车辙计算理论,本章是水泥混凝土与沥青混凝土复合式路面力学计算的重要理论。第三章对碾压混凝土与沥青混凝土复合式路面板底最大荷载应力、层间剪应力、温度场及温度应力的一般规律进行了深入研究,为设计方法研究奠定了基础。第四章通过理论计算与分析,提出荷载应力与温度应力实用计算图表及公式,重点讨论碾压混凝土或普通水泥混凝土与沥青混凝土(RCC—AC、PCC—AC)设计方法与参数,并给出了设计示例。第五章阐述了水泥混凝土复合式路面(双层板)结构设计理论、设计方法及设计示例,并对国外有代表性的设计方法作了介绍。第六章介绍复合式路面施工技术,包括下层为碾压混凝土、普通水泥混凝土、经济混凝土、连续配筋混凝土等,上层为沥青混凝土、普通水泥混凝土(即RCC—AC、PCC—AC、EPCC—AC、CRC—AC、PCC—PCC、RCC—PCC)等复合式路面结构的施工技术,对原材料技术要求、混合料配合比设计、混合料拌和、摊铺、振捣或碾压及质量控制等关键技术进行讨论,并对复合式路面进行舒适性评价及经济性分析。

在我国高等级公路建设高潮迭起的时代,我们把《复合式路面设计原理与施工技术》一书奉献给道路界同行,以期起到抛砖引玉之作用。全书力求做到体系完整、重点突出、文字简练、深入浅出,以满足读者的要求。由于作者水平有限,书中不足之处在所难免,敬请读者批评指正。

著 者

1998. 12

目 录

第一章 绪论	1
第一节 复合式路面——可持续发展的必然产物	1
第二节 发展概况	2
第三节 设计理论与方法	4
一、水泥混凝土复合式路面	4
二、水泥混凝土与沥青混凝土复合式路面	4
第二章 水泥混凝土与沥青混凝土复合式路面结构计算理论	7
第一节 三维等参元法	7
一、三维 20 结点等参元法	7
二、层间接触单元	14
第二节 弹性层状体系解	17
一、轴对称弹性空间课题的一般解	17
二、圆形均布垂直荷载作用下的层状体系解	19
三、圆形均布单向水平荷载作用下的层状体系解	20
第三节 地基板与板上弹性层复合结构轴对称课题的一般分析	22
一、弹性地基薄板轴对称荷载作用下的解	23
二、复合结构体系解	25
第四节 复合式路面温度场计算理论	27
一、进入路表的热流分析	27
二、路面结构温度场研究的基本理论与方法	30
第五节 复合式路面车辙计算理论	35
一、计算模型与方法	35
二、计算参数	36
三、车辙预估	36
第三章 碾压混凝土与沥青混凝土复合式路面应力分析	38
第一节 荷载应力分析	38
一、计算模型	38
二、RCC 板荷载应力的三维有限元分析	39
三、AC 层对 RCC 板底荷载应力的影响分析	44
四、AC 与 RCC 层间剪应力分析	47
第二节 温度场分析	52
一、计算条件与参数	52
二、温度场分析	54
第三节 温度应力分析	56

一、温度应力计算方法的历史与现状·····	57
二、温度应力的三维等参元分析·····	59
第四章 水泥混凝土与沥青混凝土复合式路面结构设计 ·····	64
第一节 RCC—AC 复合式路面应力计算 ·····	64
一、荷载应力计算·····	64
二、温度应力计算·····	67
第二节 RCC—AC 复合式路面结构及其组合设计 ·····	70
一、结构层厚度·····	70
二、RCC 板的平面尺寸 ·····	72
三、接缝与反射裂缝·····	72
第三节 RCC—AC 复合式路面设计方法与参数 ·····	72
一、荷载疲劳应力计算·····	72
二、温度疲劳应力计算·····	73
三、RCC 板厚度设计 ·····	74
第四节 PCC—AC 复合式路面设计 ·····	74
一、设计参数·····	74
二、荷载疲劳应力计算·····	77
三、温度疲劳应力计算·····	78
第五节 沥青层稳定性设计原理 ·····	79
一、层间抗剪强度测试·····	80
二、车辙实验·····	80
三、稳定性设计方法·····	81
第六节 设计示例 ·····	82
示例一 RCC—AC 复合式路面设计 ·····	82
示例二 PCC—AC 复合式路面设计 ·····	83
第五章 水泥混凝土复合式路面设计理论与方法 ·····	85
第一节 荷载应力分析 ·····	85
一、弹性地基双层板的解析解·····	85
二、弹性地基双层板的有限层解法·····	91
第二节 温度应力分析 ·····	94
第三节 水泥混凝土复合式路面设计 ·····	97
一、荷载应力计算·····	97
二、温度应力计算·····	98
三、设计示例·····	99
第四节 国外复合式水泥混凝土路面设计理论与方法·····	101
一、设计中考虑的问题 ·····	102
二、复合式混凝土路面结构分析 ·····	102
三、设计应用和敏感性分析 ·····	108
四、层间剪应力分析 ·····	111
五、基本结论 ·····	113

第六章 复合式路面施工技术	114
第一节 RCC—AC 复合式路面原材料要求及配合比设计	114
一、RCC 强度特性	114
二、RCC 原材料要求	115
三、RCC 配合比设计方法	116
四、AC 原材料及配合比设计	126
第二节 RCC—AC 复合式路面施工关键技术	126
一、RCC 施工技术	126
二、RCC 与 AC 层间粘结技术	131
三、防止或减轻反射裂缝的技术措施	133
四、沥青混凝土铺筑	134
第三节 RCC—AC 复合式路面舒适性评价	134
一、汽车平顺性评价方法	134
二、车桥垂直振动加速度均方根法	135
三、降低舒适限法	135
四、位移功率谱评价法	136
第四节 RCC—AC 复合式路面工程经济分析	137
一、经济分析的一般原理	138
二、费用组成及其计算模型	138
三、示例分析	140
四、实体工程经济分析	142
第五节 其它类型复合式路面施工技术	144
一、普通混凝土上层经济混凝土下层复合结构	145
二、水泥混凝土下层沥青混凝土上层复合结构	148
主要参考文献	152

第一章 绪 论

路面通常由垫层、基层和面层三部分组成。面层为水泥混凝土复合板或水泥混凝土板(CC)及板上沥青混凝土层(AC)所组成的路面结构称为复合式路面。水泥混凝土包括:普通水泥混凝土(PCC)、碾压水泥混凝土(RCC)、钢筋混凝土(JRC)及连续配筋混凝土(CRC)等。

第一节 复合式路面——可持续发展的必然产物

走可持续发展的道路,这是世纪之交的重大命题。本世纪以来,社会生产力的极大提高和经济规模的空前扩大,创造了前所未有的物质财富,这一切极大地推动了人类文明的进程。然而,自然资源的过度开发与消耗、污染物的大量排放,导致了全球性的资源短缺、环境污染和生态破坏。联合国《21世纪行动议程》把走可持续发展的道路,作为各国未来长期共同的发展战略。我国提出了建立可持续发展的十大技术体系,并把资源节约化、能源清洁化、废物资源化、环境无害化列为十大技术体系之首;为了实施可持续发展战略,我国编制了《中国21世纪议程》。毫无疑问,公路交通的可持续发展是中国可持续发展事业的一个重要组成部分。

在我国,公路建设方兴未艾,然而发展却不平衡,由于路面材料明显不足,严重影响了许多地区的道路修建。能源紧张和随之而来的石油产品(包括沥青)价格上涨,加之沥青类路面养护费用高、使用年限较短,这一事实促使人们广泛修建经济效益较好的水泥混凝土路面。在这种情况下,道路工作者们就在既要充分利用当地资源,又能满足路面强度要求的前提下,研究出了一种新型的路面结构——复合式水泥混凝土(PCC—PCC)路面。这种路面结构的诞生是公路科技工作者朴素的可持续发展思想的体现。

所谓PCC—PCC复合式路面,系指上下两层(或两层以上)不同强度的混凝土复合而成的整体式结构。一般下层采用经济混凝土(Econocrete),即用不完全符合规范要求的地方材料铺筑;上层采用高强、耐磨、抗滑的规格混凝土,即用符合规范要求的材料铺筑。欧美把用贫混凝土作为基层的结构也称为PCC—PCC(或EPCC—PCC)复合式混凝土路面。

PCC—PCC复合式路面结构中,下层可充分利用当地自然资源或工业废料(如粉煤灰、炉渣等),但这种路面仍存在着施工麻烦、接缝多、行车舒适性差、维修难度大、汽车油耗、轮耗及货损较沥青路面要大、道路穿越或靠近人口居住区时噪声污染也较严重的问题。众所周知,沥青路面作为一种高级路面被广泛应用于公路与城市道路,但沥青价格的不断上涨,使沥青路面投资增加,直接影响了公路的可持续发展。因此,在水泥混凝土路面上加铺沥青层,即修筑水泥混凝土与沥青混凝土(PCC—AC)复合式路面结构,不仅可减少沥青用量(与柔性路面相比),又可弥补刚性路面的不足。这样刚柔相济,大大改善了路面的使用性能。

随着水泥混凝土路面施工工艺的不断发展,70年代中后期在美国、加拿大开始研究的碾压混凝土(RCC)路面,80年代初便在我国开始铺筑。我国是在公路上铺筑碾压混凝土较早的国家之一,这种路面节约水泥、施工速度快、开放交通早,比普通水泥混凝土路面节约投资约20%~30%。但RCC路面平整度差,难以形成粗糙面,在汽车高速行驶时抗滑性能下降较快。

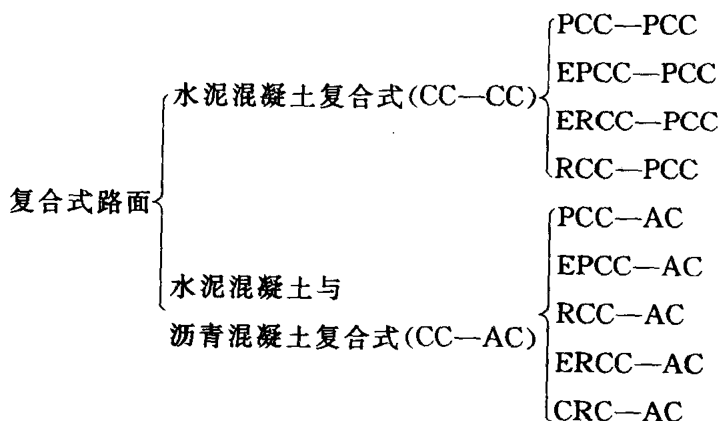
平整、抗滑、耐磨三方面的不足,使其难以在高等级公路上一展风采。为了保证路表平整、密实,RCC路面分上下两层采用不同的材料级配修筑(即RCC—RCC复合式路面),两次摊铺,一次碾压成型;也可采用下层为碾压混凝土,上层为普通水泥混凝土的结构形式(即RCC—PCC复合式),这种双层水泥混凝土复合式路面结构仅适用于一般等级的公路。随着路面结构研究的不断深入,修筑碾压水泥混凝土与沥青混凝土(RCC—AC)复合式路面,能有效地解决RCC抗滑、耐磨、平整的三大难题,从而使性质截然不同的两种类型(RCC与AC)路面以复合的形式达到了高度统一与和谐。

复合式路面家族中,RCC—AC路面结构独树一帜,倍受人们青睐。RCC—AC复合式路面结构层中,沥青混凝土层在一定厚度范围内可改善行车的舒适性。因此,随着沥青混凝土厚度的增加,下层RCC板的平整度可适当放宽,这样便于不同类型RCC路面的施工。不仅如此,这种新型路面结构对下层的RCC材料要求也可适当放宽,如可掺加适量粉煤灰或用低标号水泥、地方非规格集料等材料,并可不考虑抗滑、耐磨性能,使造价得以降低。

不论是机场水泥混凝土道面还是公路水泥混凝土路面,其表面功能的恢复仍是人们深感棘手的问题,目前还没有一套较为理想的措施来解决。然而PCC—AC或RCC—AC复合式路面对抗滑、耐磨、平整等性能的恢复较易实施,在结构性修复(表面结构性破坏后的大、中修)中也较易实现。

水泥混凝土(CC,包括PCC、RCC、EPCC、ERCC等)与沥青混凝土(AC)的复合式路面结构,刚中有柔,以刚为主,沥青层可大大缓和行车对路面板的冲击,因而在设计上可使板厚减薄,而且只要在结构设计上处理好接缝问题,则能减少以往路面板接缝处板下冲蚀、唧泥、脱空、断板、错台等病害。

综上所述,复合式路面结构随着公路交通科技的发展而趋于多样化,是路面结构可持续发展的必然结果。纵观复合式路面发展历程,其结构类型可归纳如下:



第二节 发展概况

PCC—PCC复合式混凝土路面的发展在国外已有相当长的历史。早在1893年,复合式混凝土路面就在美国诞生,该混凝土路面采用不同的集料,分上下两层铺筑,而且上层水泥用量较高。瑞士于1927年修建的PCC—PCC复合式路面,其上层混凝土抗压强度是下层的2.2倍,两层总厚度18cm。60年代初美国得克萨斯州某市城郊修建了上层为7.6cm轻型混凝土、下层为10.2cm贝壳集料混凝土的整体式复合路面。美国混凝土筑路协会材料与混合料设计

分会于1973年开始对PCC—PCC复合式路面结构的应用进行研究。前苏联将这种经济可靠的结构型式作为发展地方道路的重要途径。至于经济混凝土作为规格混凝土的基层,在应用上就更为广泛,它与严格意义上的PCC—PCC复合式路面有异曲同工之处。近年来,美国在20个州的50条新干线公路和机场跑道基层中使用了经济混凝土,从而达到了减薄规格混凝土面层的目的。

国内这方面也做了不少研究工作,“七五”期间,河南、山西等省成功地修筑了下层为碾压混凝土或经济混凝土、上层为规格混凝土的复合式路面(RCC—PCC或EPCC—PCC)。

水泥混凝土与沥青混凝土复合式路面(CC—AC),无论从经济、技术方面,还是使用性能方面都优于单一柔性或刚性路面结构,虽然其诞生时间较晚,但发展前景广阔。本世纪30年代,英国修筑了连续配筋混凝土(CRC)层上加铺沥青层的路面结构,40~50年代用于一些市区道路上,1957年在伦敦和丹地附近铺筑了试验路,1985年修筑了长达8km(双车道)的路面。

1986年,法国格勒诺布尔—尼斯之间的罗纳—阿尔卑斯地区,85号洲际公路修复坍方路段中,新路使用聚苯乙烯修建轻质路堤,其上配双层钢筋网浇筑加固混凝土板,长60m,每5m设一条承压缝,混凝土板宽8.4m,试验路段纵坡度9%。首先在板上喷洒沥青乳液,并铺土工织物,然后铺筑4cm~5cm厚的沥青磨耗层。由于织物与混凝土板很好地粘结在一起,尽管冬季严寒(-20℃),但未发现面层裂缝。美国近年来在高速公路的拓宽中,把新铺并拉纹的水泥混凝土路面作为承重层,其上铺筑沥青混凝土,收到了良好的使用效果。

RCC—AC复合式路面结构的修筑只是近年发展起来的。1985年,西班牙某高速公路拓宽车道的施工,在基层为15cm厚的水泥稳定层上铺筑23cm厚的RCC层,RCC板上加铺5cm厚的热拌沥青混合料。安达卢西亚高速公路上,设置20cm的水泥稳定层,其上铺设25cm厚的RCC,为了养生和兼作粘层油,洒布了沥青乳液,上层铺设了6cm沥青混合料联结层和4cm沥青混凝土。为防止反射裂缝的发生,在联结层和表层的沥青混凝土之间,使用了起加固作用的织物类材料。1984~1986年间,西班牙在高等级干线公路上,将RCC作为路面下层,上层铺筑沥青层,铺设面积已达 $3.0 \times 10^5 \text{m}^2$ 。1989~1991年,西班牙在马德里通往法国边界的某高速公路上,修筑RCC—AC复合式路面,双层式AC层厚达12cm。

1989年1月澳大利亚Penith市在水泥稳定基层上修筑了RCC—AC复合式路面,RCC厚10cm,抗压强度为30MPa,AC层厚17.5cm。1989年11月,Orange市直接在土基上修筑RCC路面厚20cm,在其上加铺沥青磨耗层。1991年11月,Lake Macquarie市在Medcalf街道修筑了长700m,宽12m的RCC—AC复合式路面,该街道路面因长期受潮和重交通的作用已严重破坏;新建的RCC—AC路面结构为20cm的水泥稳定粒料基层,20cmRCC层,4cmAC层,设计使用寿命为20年,1992年发现了几条反射裂缝,但其宽度小于1mm,并未对使用性能产生影响。巴西一些城市也在市区承受中等交通和重交通的道路上成功地修筑了这种类型的路面。

1988年日本在某停车场对RCC作为沥青混凝土下层的适应性进行了研究,并将这种路面结构型式写入1990年6月出版的《碾压混凝土路面技术指南(草案)》中。据日本《铺装》杂志1993年报导,在山阳高速公路河内至西条段修筑了9km的CC—AC复合式路面试验段,共11种结构类型,路面下层为不同厚度的RCC或CRC,上层为5cm沥青混凝土(单层式),或10cm沥青混凝土(双层式)。

“八五”期间,由西安公路交通大学承担,全国水泥混凝土路面技术委员会、河南省交通厅、

安徽省高速公路管理局、江苏省公路局及西安公路研究所等单位参加,对 RCC—AC 复合式路面从设计理论、设计方法与参数选用到施工技术进行了深入系统的研究,所得成果已编写成 RCC—AC 复合式路面设计施工须知,用于指导生产实践。

第三节 设计理论与方法

一、水泥混凝土复合式路面

对于混凝土复合式路面设计理论与方法的研究,国内外道路学者已作了一些卓有成效的工作。荷兰为解决 PCC—PCC 上下层间的结合问题,采用了在层间用销钉栓接的方法。欧洲许多国家对 PCC—PCC 复合式结构进行了受力分析,提出了板厚的设计方法。美国波特兰水泥协会 (PCA) 是按双层板的疲劳和冲刷安全系数与单层板等效原则进行 PCC—PCC 复合式路面的设计。在第二届国际混凝土路面会议上,水泥混凝土复合式路面设计是与会者颇感兴趣的问题,一种具有代表性的意见是按强度较低的下层混凝土求路面总厚度,而强度较高的上层混凝土取为总厚度的 0.2~0.4 倍。

国内这方面的研究也迈出了可喜的一步。“七五”期间,河南、宁夏、辽宁、山西、江苏等省充分利用立窑水泥和非规格集料,修筑了水泥混凝土复合式路面的试验路或实体工程。西安公路交通大学对水泥混凝土复合式路面的荷载应力和温度应力进行了理论分析和试验工作。应用薄板等刚度原则推出了相应计算公式并提出了设计方法,用来指导试验路的修筑和复合式混凝土路面的推广。为了考虑复合式混凝土路面厚度较大的情况,进一步应用有限层法分析这种路面的荷载应力和温度应力,从而在理论分析上更趋完善,西安空军工程学院引入夹层元对双层板层间不同结合状态进行计算分析与室内试验验证。

二、水泥混凝土与沥青混凝土复合式路面

国外一些国家的公路工作者对 PCC—AC 路面结构采用不同的理论和方法进行了初步的计算与分析。

英国 Gregory 曾建议将 CRC—AC 路面的 CRC 层厚与 CRC 路面板厚作相关计算,用弹性理论分析计算沥青表层复合结构的作用。日本将沥青层表面作用的荷载按 45°角扩散到混凝土板上,按阿灵顿半经验公式计算板底应力。前苏联则按应力扩散角考虑沥青层影响之后,用弹性地基无限大板计算板的荷载应力。

Luther 等人运用线弹性断裂理论对这一问题进行了计算、分析及室内试验验证,提出了反射裂缝增长速率的计算模型。Majizadth 等人应用二维有限元法对沥青面层内的应力进行了分析,并认为这种路面的裂缝主要是由于温度变化引起混凝土板水平位移和翘曲产生的,通过分析,提出了计算面层拉应力的方法。B. Franck 等人分析研究了因温度变化沥青层底部引起拉应变及车辆荷载通过接缝时,两块板产生不同挠度而引起沥青层内剪应变,提出了相应的控制指标。Nanjin Chen 等人应用三层弹性体系理论对此进行了求解,并考虑了应力消解层的效应。C. Clauwaert 利用有限差分法对沥青层进行了荷载与温度综合作用下的力学分析,提出了以沥青层底面的弯拉应变为控制的设计法。

近年来,力学计算又有了新的进展。1988 年 T. Krauthammer 等人利用二维有限元法计算了 PCC—AC 复合式路面结构接缝的传荷能力,分析了沥青层中垂直与水平的拉、压应力,最

大挠度及最大剪应力,接缝处引入了杆与梁单元。1990年 Mahmoud 等人对水泥混凝土基层上的沥青层利用八面体应力进行了研究,提出了沥青层的临界厚度,并建议对此种路面结构进行车辙研究。

国外虽对 PCC—AC 复合式路面结构进行了理论计算与分析,但缺少系统的设计方法。一些国家提出和应用了各自的简化方法。

英国关于 CRC—AC 的设计已载入《道路指示 29 号》,这是目前唯一由国家机构颁布关于此类路面的设计方法。《道路指示 29 号》指出,当应用最小的沥青面层厚度 9cm 时,等效于有缝混凝土板厚 2.5cm。Gregory 建议的相关推算法偏于保守,对于厚 10cm 的沥青面层,CRC 的板厚比 CRC 路面厚减少 1.7cm~2cm。英国道路学者认为,在结构上保持薄的面层更为有利,因为混凝土板的刚度远大于沥青层,而且承担较大比例的荷载;另一方面,他们认为应用厚度小于 10cm 的面层在实践上比较困难,因为此时要省去联结层或用较小的集料,这对层间结合是不利的。薄的面层减少了隔热作用,而当面层厚度小于 4cm 时,其隔热作用则可能完全没有。在 CRC—AC 结构中,较 CRC 路面可节省约 30% 的钢筋量,并减少板的温度位移,从而使板自由边位移量减小,不需要锚固。

日本《碾压混凝土路面技术指南(草案)》规定:在 C 级(单车道 1000~3000 次/日)、D 级(单车道 3000 次/日以上)交通量的公路上,RCC 作为下层时,其厚度(抗弯拉强度 4.5MPa)可取为 20cm~23cm,在其上铺 10cm 沥青混凝土;或 C 级交通公路上,25cm RCC 板上加铺 5cm 厚沥青混凝土。西班牙在修筑试验路的基础上,也提出了 RCC—AC 复合式路面的典型结构厚度。

其它一些国家,大多数在评价旧水泥混凝土路面的基础上,提出了沥青加铺层设计法,诸如 T_s 法、 S_n 法、弯沉法、最小厚度法、理论计算法等,美国陆军工程兵 Waterway 试验中心还提出了动力刚度法(DSM)。虽然这些罩面设计法不能用于 PCC—AC 复合式路面的设计,但对设计方法的研究有较大的参考价值。

在国内,西安公路交通大学、同济大学、空军工程学院等单位利用空间等参元、层状体系理论、断裂力学等对 PCC—AC 复合式路(道)面结构进行了初步分析,取得了一定成果。

对于 RCC—AC 复合式路面结构的研究,“八五”期间,西安公路交通大学承担了国家自然科学基金资助项目《碾压混凝土加铺沥青层复合式路面结构设计理论与方法研究》,所取得的主要成果有:

(1)采用空间等参元法及正交各向异性接触单元,对板与地基之间完全连续与绝对光滑两种接触条件下的有限尺寸板进行了荷载应力计算与分析。利用弹性层状体系理论对 RCC—AC 复合式路面荷载应力的一般规律进行研究,提出了沥青层厚度 h_a 对 RCC 板底应力影响系数的实用计算公式,并用三维等参元进行了验证,从而为 RCC—AC 复合式路面的实用设计方法研究奠定了理论基础。

(2)根据热传导基本理论,采用有限元法求解了 RCC—AC 复合式路面温度场,获得了全国各地最大温度梯度的推荐值。采用三维等参元法对 RCC—AC 复合式路面温度应力进行了分析,结果表明,基层作为热弹性材料时,RCC 与地基之间接触条件对板底温度应力影响很小,且滑动解略大于连续解,实际设计中,为方便计,采用连续接触条件的诺谟图计算。

(3)在对 RCC—AC 复合式路面结构的荷载应力与温度应力进行广泛计算分析的基础上,确定了临界荷位,即轴载作用于 RCC 板纵缝边缘中部,相应板纵缝边缘底部为最大应力计算点。在充分考察了各主要影响因素之后,研制出了荷载应力与温度应力计算诺谟图,可供生产设计使用。RCC—AC 复合式路面结构设计中仍以 RCC 板底最大弯拉应力作为板厚计算的控

制指标,RCC板与地基接触状况介于完全连续与绝对光滑之间,但较接近于完全连续,因此在设计中建议按完全连续接触处理。理论计算分析与工程实践相结合提出了板平面尺寸及有关设计参数的确定方法,所推荐的设计方法可用于工程设计。

(4)通过试验路研究与实体工程分析,提出了RCC—AC复合式路面施工技术。对于RCC配合比设计,提出了融理论、经验和试验为一体的设计方法。采用铺土工织物、防水毡、锯口封缝等技术措施对减轻或防止RCC—AC复合式路面的反射裂缝进行了初步研究。

(5)采用自行研制的路面层间剪切测试系统,对不同剪切速率及垂直荷载作用时,测试RCC与AC层间采用不同粘结措施的抗剪强度。就其抗剪强度的大小排序为:橡胶沥青、乳化沥青+石屑、热沥青+石屑、乳化沥青、乳化沥青+矿粉、热沥青、热沥青+矿粉。实际应用中,从技术和经济两方面综合考虑后选用,并通过试验确定其用量。

(6)运用车桥振动特性测定路面的动荷系数。采用车桥垂直振动加速度均方根值、降低舒适限法和位移功率谱评价法研究了RCC—AC路面的舒适性。研究表明:RCC—AC复合式路面的舒适性优于PCC、RCC路面,当AC层厚大于4cm时,其舒适性与沥青路面(AC层厚大于12cm)相当。

对于任何一种路面结构,从它的诞生、发展直至达到较为完美的阶段,无不倾注着一代乃至几代科技工作者的艰辛努力,复合式路面也不例外。本书对不同类型的复合式路面结构设计理论、设计方法与参数、施工技术等进行了论述,但还有一些问题需深入研究,如双层板及RCC的荷载与温度疲劳、CC与AC层间剪切疲劳及反射裂缝等问题。进一步解决这些问题,能使复合式路面的优秀品质在公路可持续发展中得以充分发挥。

第二章 水泥混凝土与沥青混凝土 复合式路面结构计算理论

水泥混凝土与沥青混凝土复合式路面为弹性地基上有限尺寸的结构,有限元法是进行力学计算分析的有效手段;弹性层状体系理论解析解是进行一般规律及实用简化计算方法研究的重要途径,路面温度场计算理论则是复合式路面结构温度场及温度应力研究中不可或缺的工作基础。

第一节 三维等参元法

采用有限元法求解三维问题,最简单的表达为四面体或六面体(8 结点或 20 结点)和线性位移模式。复合式路面结构力学分析中,为提高计算精度,采用 8 结点或 20 结点的三维等参元法,为模拟层间接触状况,引入各向正交异性单元。

一、三维 20 结点等参元法

三维 20 结点等参数单元(图 2-1)是由边长为 2 的立方体母单元通过坐标变换得到的,通常是一个曲面曲棱的六面体。

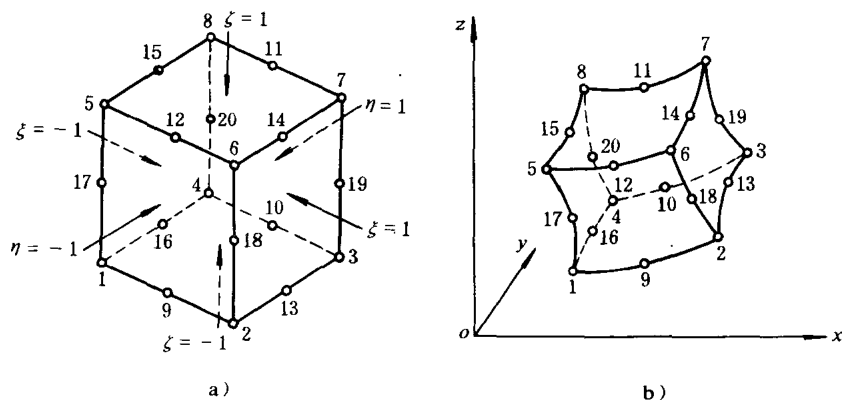


图 2-1 20 节点六面体等参元

1. 坐标变换

要建立等参元的坐标变换,就必须知道母单元的形函数。根据形函数的性质,可写出 20 结点相应的 20 个形函数,合并成一个统一表达式如下:

$$\begin{aligned}
 N_i = & (1+\xi_0)(1+\eta_0)(1+\zeta_0)(\xi_0+\eta_0-2)\xi_i^2\eta_i^2\zeta_i^2/8 \\
 & + (1-\xi^2)(1+\eta_0)(1+\zeta_0)(1-\xi_i^2)\eta_i^2\zeta_i^2/4 \\
 & + (1-\eta^2)(1+\zeta_0)(1+\xi_0)(1-\eta_i^2)\xi_i^2\zeta_i^2/4 \\
 & + (1-\zeta^2)(1+\xi_0)(1+\eta_0)(1-\zeta_i^2)\xi_i^2\eta_i^2/4
 \end{aligned} \tag{2-1}$$

式中: $\xi_0 = \xi_i \xi$ $\eta_0 = \eta_i \eta$ $\zeta_0 = \xi_i \zeta$

ξ_i, η_i, ζ_i 为结点的局部坐标。

利用形函数 N_i , 即可写出坐标变换式:

$$x = \sum_{i=1}^{20} N_i x_i \quad y = \sum_{i=1}^{20} N_i y_i \quad z = \sum_{i=1}^{20} N_i z_i \quad (2-2)$$

相应的位移函数为:

$$u = \sum_{i=1}^{20} N_i u_i \quad v = \sum_{i=1}^{20} N_i v_i \quad w = \sum_{i=1}^{20} N_i w_i \quad (2-3)$$

2. 应变矩阵

根据几何关系应变矩阵是:

$$\{\epsilon\} = \begin{Bmatrix} \frac{\partial u}{\partial x} \\ \frac{\partial v}{\partial y} \\ \frac{\partial w}{\partial z} \\ \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \\ \frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \\ \frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z} \end{Bmatrix} = [B] \{\delta\} = [B_1, B_2, \dots, B_{20}] \begin{Bmatrix} \delta_1 \\ \delta_2 \\ \vdots \\ \delta_{20} \end{Bmatrix} \quad (2-4)$$

其中:

$$[B_i] = \begin{Bmatrix} N_{i,x} & 0 & 0 \\ 0 & N_{i,y} & 0 \\ 0 & 0 & N_{i,z} \\ N_{i,y} & N_{i,x} & 0 \\ N_{i,z} & 0 & N_{i,x} \end{Bmatrix} \quad \{\delta_i\} = \begin{Bmatrix} u_i \\ v_i \\ w_i \end{Bmatrix} \quad (i=1, 2, \dots, 20) \quad (2-5)$$

符号 $N_{i,x}, N_{i,y}, N_{i,z}$ 分别表示 N_i 对 x, y 及 z 的偏导数。根据复合函数求导规则, 它们与 $N_{i,\xi}, N_{i,\eta}, N_{i,\zeta}$ 有如下关系:

$$\begin{Bmatrix} N_{i,\xi} \\ N_{i,\eta} \\ N_{i,\zeta} \end{Bmatrix} \begin{Bmatrix} x_{,\xi} & y_{,\xi} & z_{,\xi} \\ x_{,\eta} & y_{,\eta} & z_{,\eta} \\ x_{,\zeta} & y_{,\zeta} & z_{,\zeta} \end{Bmatrix} \begin{Bmatrix} N_{i,x} \\ N_{i,y} \\ N_{i,z} \end{Bmatrix} = [J] \begin{Bmatrix} N_{i,x} \\ N_{i,y} \\ N_{i,z} \end{Bmatrix} \quad (2-6)$$

式中: $x_{,\xi} = \sum_{i=1}^{20} N_{i,\xi} x_i, \dots, \quad z_{,\zeta} = \sum_{i=1}^{20} N_{i,\zeta} z_i$

而 $N_{i,\xi}$ 等由公式(2-1)求导得:

$$\left. \begin{aligned}
N_{i,\xi} &= \xi_i(1+\eta_0)(1+\zeta_0)(2\xi_0+\eta_0+\zeta_0-1)\xi_i^2\eta_i^2\zeta_i^2/8 \\
&\quad -\xi(1+\eta_0)(1+\zeta_0)(1-\xi_i^2)\eta_i^2\zeta_i^2/2 \\
&\quad +\xi_i(1-\eta^2)(1+\zeta_0)(1-\eta_i^2)\zeta_i^2\xi_i^2/4 \\
&\quad +\xi_i(1-\zeta^2)(1+\eta_0)(1-\zeta_i^2)\xi_i^2\eta_i^2/4 \\
N_{i,\eta} &= \eta_i(1+\zeta_0)(1+\xi_0)(\xi_0+2\eta_0+\zeta_0-1)\xi_i^2\eta_i^2\zeta_i^2/8 \\
&\quad -\eta(1+\zeta_0)(1+\xi_0)(1-\eta_i^2)\zeta_i^2\xi_i^2/2 \\
&\quad +\eta_i(1-\xi^2)(1+\zeta_0)(1-\xi_i^2)\eta_i^2\zeta_i^2/4 \\
&\quad +\eta_i(1-\zeta^2)(1+\xi_0)(1-\zeta_i^2)\xi_i^2\eta_i^2/4 \\
N_{i,\zeta} &= \zeta_i(1+\xi_0)(1+\eta_0)(\xi_0+\eta_0+2\zeta_0-1)\xi_i^2\eta_i^2\zeta_i^2/8 \\
&\quad -\zeta(1+\xi_0)(1+\eta_0)(1-\zeta_i^2)\xi_i^2\eta_i^2/2 \\
&\quad +\zeta_i(1-\xi^2)(1+\eta_0)(1-\xi_i^2)\eta_i^2\zeta_i^2/4 \\
&\quad +\zeta_i(1-\eta^2)(1+\xi_0)(1-\eta_i^2)\zeta_i^2\xi_i^2/4
\end{aligned} \right\} \quad (2-7)$$

由(2-6)式求得:

$$\begin{Bmatrix} N_{i,x} \\ N_{i,y} \\ N_{i,z} \end{Bmatrix} = [J]^{-1} \begin{Bmatrix} N_{i,\xi} \\ N_{i,\eta} \\ N_{i,\zeta} \end{Bmatrix}$$

3. 应力矩阵

$$\begin{aligned}
\{\sigma\} &= \{\sigma_x \quad \sigma_y \quad \sigma_z \quad \tau_{xy} \quad \tau_{yz} \quad \tau_{zx}\}^T \\
&= [D][B]\{\delta\}^e = [DB_1 \quad DB_2 \quad \cdots DB_{20}]\{\delta\}^e
\end{aligned} \quad (2-8)$$

式中:

$$D = \frac{E(1-\mu)}{(1+\mu)(1-2\mu)} \begin{bmatrix} 1 & & & & & \\ \frac{\mu}{1-\mu} & 1 & & & & \\ \frac{\mu}{1-\mu} & \frac{\mu}{1-\mu} & 1 & & & \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1-2\mu}{2(1-\mu)} & & \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1-2\mu}{2(1-\mu)} & \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1-2\mu}{2(1-\mu)} \end{bmatrix}$$

$$[D][B_i] = A_3 \begin{bmatrix} N_{i,x} & A_1 N_{i,y} & A_1 N_{i,z} \\ A_1 N_{i,x} & N_{i,y} & A_1 N_{i,z} \\ A_1 N_{i,x} & A_1 N_{i,y} & N_{i,z} \\ A_2 N_{i,y} & A_2 N_{i,x} & 0 \\ 0 & A_2 N_{i,x} & A_2 N_{i,y} \\ A_2 N_{i,x} & 0 & A_2 N_{i,y} \end{bmatrix} \quad (i=1,2,\dots,20)$$

$$A_1 = \frac{\mu}{1-\mu}, \quad A_2 = \frac{1-2\mu}{2(1-\mu)}, \quad A_3 = \frac{E(1-\mu)}{(1+\mu)(1-2\mu)}$$

4. 刚度矩阵

根据弹性体的虚位移原理,如果弹性体处于平衡状态,则外力在约束允许的微小虚位移上所作的功等于整个弹性体内的应力在虚应变上的功。路面力学计算中,体积力不计,故仅在表面力 $\{q\}$ 作用下处于平衡,在体内引起位移 $\{d\}$ 、应力 $\{\sigma\}$ 和应变 $\{\epsilon\}$ 。

单元 e 在等效结点力的作用下处于平衡,这种节点力可用列阵表示为:

$$\{R\}^e = \{R_1^T \ R_2^T \ \cdots R_{20}^T\}$$

20个结点的虚位移可表示为:

$$\{\delta^*\}^e = \{\delta_{u1} \ \delta_{v1} \ \delta_{w1} \cdots \delta_{u20} \ \delta_{v20} \ \delta_{w20}\}^T$$

设虚位移的模式为:

$$\{d^*\} = [N]\{\delta^*\} \quad (2-9)$$

而单元内的虚应变 $\{\epsilon^*\} = [B]\{\delta^*\}^e$,于是作用在弹性体上的外力在虚位移上所作的功为:

$$W_1 = (\{\delta^*\}^e)^T \{R\}^e$$

单元内的应力在虚应变上所作的功为:

$$W_2 = \iiint_V [\epsilon^*]^T \{\sigma\} dx dy dz$$

将式(2-4)、式(2-8)代入上式可得:

$$W_2 = (\{\delta^*\}^e)^T \iiint_V [B]^T [D] [B] \{\delta\}^e dx dy dz$$

根据虚位移原理有:

$$(\{\delta^*\}^e)^T \{R\}^e = (\{\delta^*\}^e)^T \iiint_V [B]^T [D] [B] \{\delta\}^e dx dy dz$$

又因虚位移是不为0的任意微小值,故:

$$\{R\}^e = \iiint_V [B]^T [D] [B] \{\delta\}^e dx dy dz$$

单元刚度矩阵具有以下形式:

$$[k] = \iiint_V [B]^T [D] [B] dx dy dz = \begin{bmatrix} k_{1,1} & k_{1,2} & \cdots & k_{1,20} \\ k_{2,1} & k_{2,2} & \cdots & k_{2,20} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ k_{20,1} & k_{20,2} & \cdots & k_{20,20} \end{bmatrix} \quad (2-10)$$

其中每一个子矩阵的计算公式是:

$$[k_{ij}] = \iiint_V [B_i]^T [D] [B_j] dx dy dz = \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 [B_i]^T [D] [B_j] |J| d\xi d\eta d\zeta$$

而 $[B_i]^T [D] [B_j]$

$$= A_3 \begin{bmatrix} N_{i,x}N_{j,x} + A_2(N_{i,y}N_{j,y} + N_{i,z}N_{j,z}) & A_1N_{i,x}N_{j,y} + A_2N_{i,y}N_{j,x} \\ A_1N_{i,y}N_{j,x} + A_2N_{i,x}N_{j,y} & N_{i,y}N_{j,y} + A_2(N_{i,z}N_{j,z} + N_{i,x}N_{j,x}) \\ A_1N_{i,z}N_{j,x} + A_2N_{i,x}N_{j,z} & A_1N_{i,z}N_{j,y} + A_2N_{i,y}N_{j,z} \\ A_1N_{i,x}N_{j,z} + A_2N_{i,z}N_{j,x} & A_1N_{i,y}N_{j,z} + A_2N_{i,z}N_{j,y} \\ N_{i,z}N_{j,z} + A_2(N_{i,x}N_{j,x} + N_{i,y}N_{j,y}) & \end{bmatrix} \quad (i=1,2,\cdots,20 \quad j=1,2,\cdots,20)$$