

交通部水泥混凝土路面推广组 编

水泥混凝土路面研究

出版社



水泥混凝土路面研究

SHUINI HUNNINGTU LUMIAN YANJIU

交通部水泥混凝土路面推广组 编

人民交通出版社

内 容 提 要

本书共分七个部分,分别为水泥混凝土路面研究成果及发展对策概述;设计理论与方法的研究;水泥混凝土路面设计参数研究;混合料及接缝材料的研究;水泥混凝土路面施工工艺及表面特性的研究;水泥混凝土路面维修与养护的研究;特殊混凝土路面研究。

本书可作为公路工程专业技术人员及相关专业的师生使用。

水泥混凝土路面研究

交通部水泥混凝土路面推广组 编

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

北京顺义牛栏山印刷厂印刷

开本: 787×1092 1/16 印张: 15.75 字数: 389千

1995年11月 第1版

1995年11月 第1版 第1次印刷

印数: 0001-3000册 定价: 20.00元

ISBN 7-114-02189-5

U·01501

前 言

我国水泥混凝土路面的系统研究始于 70 年代后期,虽起步较晚,但在交通部的领导下,经交通部公路规划设计院和全国交通、城建、民航、大专院校、部队、厂矿、科研等 50 多个单位、200 余人,历时近 15 年的艰苦努力、精心研究,取得了发展对策、设计理论与方法、设计参数、混合料设计及接缝材料、施工工艺及表面特性、维修与养护、特殊混凝土路面等多项成套实用技术和研究成果,达到了国内领先水平,其中多项成果达到了国际先进水平。设计理论、方法和参数,结构设计等还分别获得 1987 年交通部、1991 年国家科委科技进步奖。这些适合我国国情的多项成套实用技术,大部分已纳入公路、城市道路、厂矿道路、军用机场等设计规范,取得了显著的社会效益和经济效益。并在 1991 年我国部分省、市的特大洪涝灾害中,发挥了重要作用,中央领导及灾区党、政、军、民给予了很高的评价。

为了配合推广工作,我们将自 1978~1991 年的研究成果,按发展对策、设计理论与方法、设计参数、混合料及接缝材料、施工工艺及表面特性、维修与养护和特殊混凝土路面七个部分,选取精炼后的 24 篇论文汇总成集,以供广大道路和机场工程技术人员、教学、科研人员及大学生、研究生参考。

本书不仅对我国道路和机场工程技术人员有所裨益,并将对我国水泥混凝土路面的推广应用和国际间技术交流,加快我国水泥混凝土路面的发展,起到很大的推动作用。这就是我们组织编写出版本书的目的。

全书由姚祖康教授、李华工程师主编,王秉纲教授、程英华高级工程师主审。由于编写时间仓促和限于编写人员的水平,错误不当之处,敬请广大读者批评指正。

交通部水泥混凝土路面推广组

1992 年 11 月

序

新中国成立以来,我国公路通车里程由建国初期的 8 万公里上升到目前的 104 万公里,年平均增长 2 万公里,发展是比较快的。但公路的标准低、质量差,至今仍是公路运输事业发展中的一个突出问题。在全国 104 万公里的公路总里程中,二级以上的公路里程仅占 5%,铺有高级、次高级路面的公路也只有公路总里程的 1/4 左右,且大多是六、七十年代修筑的渣油或沥青表面处治路面,其技术状况日趋恶化,通行能力降低,已成为制约国民经济和公路运输事业发展的重要因素之一。因此,提高公路技术等级和改善公路路面技术状况,已是公路交通事业发展的当务之急。为此,交通部提出了“公路建设要实行普及与提高相结合,以提高公路技术等级与标准为主”的发展方针。高级路面的建设也由以发展沥青路面为主,转为“发展沥青路面与发展水泥混凝土路面并举”。

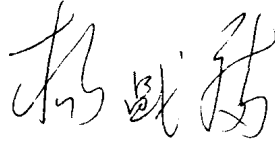
由于诸多原因,在公路建设中,水泥混凝土路面的发展起步较晚。据不完全统计,到 1970 年我国修有水泥混凝土路面的公路仅 200 公里。70 年代初,我国一些省(如浙江、广东、江苏等省)在沥青供应不足等条件下,先后开始在公路上铺筑水泥混凝土路面,至 1980 年我国公路水泥混凝土路面里程增至 1600 公里。1980 年以来,通过交通部立题对“水泥混凝土路面设计理论、方法与参数”进行的系统研究和各地工程实践的不断探索,使我国修筑水泥混凝土路面的技术逐步完善,质量不断提高,也为促进公路水泥混凝土路面的发展创造了有利条件。

特别是国家科委科技工作引导性项目“我国水泥混凝土路面发展对策及修筑技术研究”(No.025)取得的多项成套实用技术,自 1989 年在全国推广应用以来,大大推动了我国水泥混凝土路面的发展。到 1991 年底,使我国公路水泥混凝土路面的修筑里程由 1988 年前的 8264 公里,上升到 15234 公里,所占高级、次高级路面的比重也由 1988 年底的 3.6% 上升到 5.5%,而且修筑技术和质量有了很大的提高,*取得了显著的社会、经济效益。

“七五”期间,我国公路水泥混凝土路面的发展虽然有了一个好的开端,并为今后的大力发展奠定了基础。但其数量和质量还难以适应国民经济和交通运输发展的需要。在实现我国国民经济发展的第二步战略目标中,要求进一步加快我国公路建设特别是国道主干线建设的步伐,水泥混凝土路面的修筑,也必将以更快的速度发展。因此,“八五”期间,交通部将对国家科委科技工作引导性项目“我国水泥混凝土路面发展对策及修筑技术”(No.025)研究项目中的六个专项技术:①水泥混凝土路面小型机具配套施工工艺;②水泥混凝土路面轨道式摊铺机施工工艺;③碾压混凝土路面修筑技术;④路面水泥混凝土强度快速测定技术;⑤水泥混凝土路面快速修补技术;⑥接缝材料及施工工艺等,在全国进一步进行推广和应用,以使我国公路水泥混凝土路面,在“七五”发展的基础上再上一个新台阶。

本书既有理论研究、设计方法,又有材料施工工艺和维修养护技术等成果,是目前我国水泥混凝土路面研究学术水平实用价值较高的著作,可满足道路及机场工程的不同层次技术人员的需要,也可供有关专业的教学、科研人员及大学生、研究生参考。

我相信本书将对推动我国水泥混凝土路面的建设和发展有所裨益。同时,希望从事此项工作的各级领导、科技工作者和工程技术人员,注意积累和总结经验,不断完善和提高我国水泥混凝土路面的技术水平。

Handwritten signature in cursive script, likely reading '李乾' (Li Qian).

交通部公路管理司司长
交通部水泥混凝土路面推广组组长

1992年11月

目 录

第一部分 水泥混凝土路面研究成果及发展对策概述	1
I-1 水泥混凝土路面研究成果简介	1
I-2 我国水泥混凝土路面发展的对策和措施	18
第二部分 设计理论与方法的研究	26
II-1 水泥混凝土路面应力分析	26
II-2 水泥混凝土路面结构可靠性的研究	45
II-3 考虑荷载和温度综合疲劳作用的混凝土路面结构设计方法	56
第三部分 水泥混凝土路面设计参数研究	69
III-1 水泥混凝土路面的疲劳特性和车辆轴载换算	69
III-2 水泥混凝土抗折弹性模量的试验方法与数值分析	75
III-3 水泥混凝土路面的温度状况和最大温度梯度	82
III-4 水泥混凝土板下地基的刚度指标	90
III-5 水泥混凝土路面防冻层设计理论与计算方法	100
第四部分 混合料及接缝材料的研究	105
IV-1 路用水泥的使用性能、技术要求及使用条件	105
IV-2 以抗折强度为指标的水泥混凝土配合比设计(经验公式法)	109
IV-3 道面混凝土集料理想级配和道面混凝土配合比设计方法的研究	117
IV-4 路面混凝土配合比正交设计的试验研究	131
IV-5 水泥混凝土路面接缝材料类型、试验方法、技术要求和施工方法	142
第五部分 水泥混凝土路面施工工艺及表面特性的研究	153
V-1 水泥混凝土路面小型机具施工工艺的改进	153
V-2 轨道式摊铺机修筑水泥混凝土路面技术研究	160
V-3 水泥混凝土路面表面使用品质的研究与应用	172
V-4 水泥混凝土路面强度快速测定与现场检测	179
第六部分 水泥混凝土路面维修与养护的研究	190
VI-1 旧水泥混凝土路面强度评定与加厚层设计	190
VI-2 水泥混凝土路面的快速修补	195
VI-3 双层水泥混凝土路面的应力分析	202
第七部分 特殊混凝土路面研究	221
VII-1 碾压混凝土路面技术的研究	221
VII-2 钢纤维混凝土路面研究与应用	234

第一部分 水泥混凝土路面研究成果 及发展对策概述

I-1 水泥混凝土路面研究成果简介

顾敏浩 李华 执笔

一、概 况

我国水泥混凝土路面的系统研究,始于70年代后期,虽起步较晚,但在交通部组织领导下,经50余个单位、200余人,历时三个阶段10余年坚持不懈的精心研究,获得了丰硕的研究成果,其水平达到了国内领先,其中多项重要成果达到国际先进水平。特别是提出的一套先进的,适合我国国情的水泥混凝土路面设计和施工方法,大大提高了我国水泥混凝土路面设计、施工水平和路面使用质量,加速了水泥混凝土路面的发展,取得了显著的经济和社会效益。

交通部在1978~1985年交通科学技术发展规划中分二个阶段,安排了“水泥混凝土路面研究”课题,即在1978~1980年(第一阶段)着重研究设计理论、方法和参数,探讨某些施工养护问题,取得的主要研究成果有:应用有限元法分析面板的荷载和温度翘曲应力,并编绘了可供生产使用的荷载应力、温度应力计算图;我国若干典型地区温度梯度值;旧混凝土路面强度评定与加厚层设计方法;刚性路面下地基综合模量的取用;主要设计参数如混凝土强度参数、动荷系数、传荷系数和防冻层的设计等,以及调查总结了81个地、市混凝土路面的构造和使用情况,并提出了改进意见和建议。

第二阶段(1982~1985年)的研究,进一步完善了设计理论、方法和参数。这个阶段的主要研究成果有:温度翘曲应力计算与试验验证;考虑荷载应力和温度应力综合疲劳作用的结构设计方法;旧机场道面的评定,双层混凝土路面应力分析和加厚层设计;以及若干设计参数如混凝土板下地基的综合模量;全国范围内混凝土路面板的温度梯度值;轮迹横向分布系数等。

1987年国家科委为推动我国水泥混凝土路面的发展,针对修筑中存在的问题和新技术开发,制订发展对策,下达了科技工作引导性项目:“我国水泥混凝土路面发展对策及修筑技术研究”,使水泥混凝土路面的研究进入了第三个阶段(1988~1990年)。这个阶段取得的新的主要研究成果有:在发展对策研究方面,提出了供国家制订发展我国水泥混凝土路面的对策和措施;在重交通道路水泥混凝土路面设计方面,提出了考虑高低应力比的混凝土疲劳特性、控制挠度的结构设计方法和混凝土路面结构可靠性分析;在修筑技术方面,提出了普通混凝土、碾压混凝土和钢纤维混凝土的施工工艺和施工须知以及旧混凝土路面的监测评价和维修养护等多项成套的实用技术。在材料方面,提出了混凝土混合料设计、路面接缝材料的试验,包括检

测试标准、方法和仪器的开发研制等。

综合三个阶段的主要研究成果,本书精选出 24 篇论文汇总成集,并按研究内容分为 7 个方面。本文为各研究阶段总报告的简介,以将全书内容前后联系,便于应用和阅读。

二、水泥混凝土路面发展对策的研究

通过对我国公路工程建设的现状和发展、资源和技术条件、技术水平和其他因素的论证及经济分析,得出以下基本结论和主要发展对策。

(一) 基本结论

1. 发展水泥混凝土路面是解决我国路用沥青不足,增加公路路面铺装里程的重要途径,是提高路面等级及其承载力,适应重交通日益增长的有效措施,是我国公路建设事业发展的需要。

2. 我国水泥工业的发展以及在设计、施工、设备等方面取得的研究成果和积累的实践经验,为发展水泥混凝土路面创造了有利条件。

3. 水泥混凝土路面和沥青混凝土路面均属高级路面,在高等级公路上的应用应同时并举。当基年交通量大于 300 辆(黄河)/日时,水泥混凝土路面的使用期费用小于沥青混凝土路面,应优先发展。

4. 我国幅员辽阔,各地区自然条件差异悬殊,资源、技术力量和经济条件等各不相同,水泥混凝土路面的发展也应有所区别。

(1) 水泥资源丰富的地区,应充分发挥有利条件,加速发展;

(2) 东部沿海地区,应充分发挥经济和技术优势,在水泥供应允许的情况下大力发展;

(3) 修筑水泥混凝土路面较少或尚未修筑的地区,应积极创造条件,适当发展。

(二) 主要对策

1. 解决水泥统配指标,保障水泥供应

水泥是发展水泥混凝土路面的物质条件,为保证所需水泥的质量和数量,国家应将筑路所需的水泥纳入国家计划。

2. 加速发展施工机械和测试仪器设备,保证水泥混凝土路面的质量

机械化施工是提高水泥混凝土路面质量的重要环节。为提高施工机械化水平,除对小型施工机具加以完善配套外,对大型的轨道式摊铺机,在开发研制的基础上,应尽快定型、定点批量生产;对滑模摊铺机,应组织力量攻关,争取尽早投入使用。试验和检测仪器是保证路面质量的必要手段,也应组织力量开发、研制,并配套生产,以适应工程需要。

3. 增加科技投入,进一步提高水泥混凝土路面技术水平

水泥混凝土路面的发展,必须依靠科技进步。为充分发挥水泥混凝土路面的优点,提高其使用品质,降低工程造价,国家应增加科技投入,在设计理论、施工工艺、维修技术等方面进行深入研究,同时做好推广工作,使研究成果尽快转化为生产力。

4. 采取投资优惠政策,推动水泥混凝土路面的发展

水泥混凝土路面使用寿命长,初始投资一般较大,因而往往由于建设资金的限制,影响了它的发展。因此除各级公路部门多方筹集资金外,国家应对干线公路上水泥混凝土路面建设的投资有所补助,使其能得到更快的发展。

三、设计理论研究

(一) 水泥混凝土路面的应力分析

主要分析荷载和温度梯度在混凝土板内产生的应力,以了解应力的最大值及出现的位置。

1. 荷载应力分析

研究工作采用弹性薄板理论,鉴于我国已习惯应用以回弹模量表征的半无限地基,因此在对荷载应力分析上就采用了半无限地基假设。

(1) 有限元法的应用和精度分析

对有限元位移法、杂交法、样条有限元法和有限差分法所做的分析对比表明,各种方法在恰当划分单元的情况下,其解算精度是相近的,完全可以达到工程设计的要求。其中有限元位移法的收敛精度较高,使用也比较便利。

室内土基上的模型板和室内外足尺板的荷载试验结果(测定板中、板边缘中部和角隅三种荷载位置)呈现出良好的可重复性规律,荷载—挠度和荷载—应变均具有良好的线性关系,表明了板处于弹性工作阶段。试验结果还表明,荷载作用于板中和板边缘中部时,有限元分析结果同实测值相符,但地基回弹模量的取值必须比按刚性承载板实测的数值增大一定的倍数。荷载作用于板角隅处时,文克勒(Winkler)地基板的解比半无限地基板的解更符合实际。

(2) 应力状况分析和计算用图

应用半无限地基板的有限元程序,可对矩形板在不同加荷情况下的应力状况进行分析。为便于工程上的应用,根据路上常见车辆的各种参数变动范围,拟订了计算时用的参数值,选择了3种轴载作用位置(板中部、纵边中部和横边中部),计算分析了不同轴载和结构参数条件下的最大应力值,编绘了3种轴载位置的计算用图(见本书II-1水泥混凝土路面应力分析一文)。

同时对上述计算结果,应用回归分析技术进行统计分析,得到应力近似公式。

2. 温度翘曲应力分析

(1) 有限元分析翘曲应力

应用有限元位移法对半无限地基板,在不同平面尺寸、相对刚度半径和温度情况下的翘曲应力进行了广泛的计算,按勃拉特布雷(Bradbury)公式进行整理,得到了适用于不同地基类型、不同约束条件和板同地基完全接触或部分脱空条件下,以及计入内应力的混凝土路面板的温度翘曲应力。分析表明:

①在相对板长(或板宽)相同的情况下,半无限地基板的翘曲应力系数比文克勒地基板要大很多(见本书II-1水泥混凝土路面应力分析一文)。

②板自重对翘曲应力的影响,半无限地基比文克勒地基为大。

③文克勒地基上板在温度梯度作用下出现的板底脱空较半无限地基上板严重。考虑脱空影响后翘曲应力降低,半无限地基板由于脱空量大,板底脱空对翘曲应力的影响不大。

④对半无限地基板,在分析温度和荷载综合应力时,一般可不考虑板同地基部分脱空的影响,而直接将荷载和温度应力(不考虑脱空)分别计算的结果叠加而成。

⑤温度的非线性分布使板截面产生一定数量的内应力,此内应力可减小翘曲应力。考虑

到非线性分布条件下翘曲应力和内应力的非同步变化的特性,分析得出计入内应力的翘曲应力计算公式:

$$\text{板中} \quad \sigma_{\text{ix}} = \frac{E_c \alpha_c h T_g}{2(1 - \mu_c)} D_x \quad (1-1)$$

$$\text{板边缘中点} \quad \sigma_{\text{ix}} = \frac{E_c \alpha_c h T_g}{2} D_x \quad (1-2)$$

式中 h ——面板厚度 (cm);

E_c 、 μ_c 和 α_c ——混凝土的弹性模量 (MPa),泊桑比和线膨胀系数;

T_g ——板厚为 22cm 时的最大温度梯度 ($^{\circ}\text{C} / \text{cm}$);

D_x —— x 方向 (相应于板长或板宽方向) 计入内应力的温度翘曲应力系数

$$D_x = 2.08 C_x e^{-0.0448h} - 0.154(1 - C_x) \quad (1-3)$$

C_x ——未计入内应力的温度翘曲应力系数,计算板中点时 C_x 应以 $\frac{C_x + \mu_c C_y}{1 + \mu_c}$ 代替;

C_x 、 C_y —— x 和 y 方向 (相应于板长或板宽方向) 的温度翘曲应力系数 (见图 2-7)。

(2) 翘曲应力实验验证

对试验路段混凝土板温度翘曲应力实测值与理论计算值对比分析发现,当将板的相对刚度半径增大 1.42 倍,或地基回弹模量值采用实测值的 0.35 倍,则不同板长的应力系数计算值同实测值相符较好。

(二) 双层混凝土路面的应力分析

1. 荷载应力分析

由单、双层板的弯矩、挠度关系有限元法对比分析表明,双层板与单层板的弯矩计算不同之处,仅是弹性矩阵的不同,因此只需将单层板的弹性矩阵代之以分离式、结合式和直接式的弹性矩阵,推求出双层板的总抗弯刚度和分层抗弯刚度,按等刚度原则,求出各层应力计算公式。

2. 温度翘曲应力分析

与分析荷载应力一样,采用等刚度原则进行温度翘曲应力的分析,即将双层板换算为单层板后,按单层板的温度翘曲应力计算方法进行。但这是假定温度沿板厚为线性变化,而双层板厚度较大,实际温度沿板厚是曲线分布,应在温度沿板厚按直线变化所得应力上附加一内应力。

四、设计方法研究

水泥混凝土路面结构设计方法很多,大体可归于两类,一类为以半经验半理论关系为基础的经验法,另一类则以路面结构的应力分析为基础的解析法。由于断裂是混凝土路面的主要损坏型式,所以本方法以疲劳断裂作为临界损坏状态。而荷载和温度应力的共同反复作用,是混凝土路面板产生疲劳断裂的主要肇因。但混凝土路面板损坏不只是疲劳断裂,如在重交通作用下,往往会出现板底脱空和基层顶面受侵蚀而产生唧泥和错台,进一步发展而成断裂损

坏。因而本方法又研究了路面结构设计的挠度指标和可靠度设计方法。对冰冻地区尚须进行路面防冻层厚度的验算。

(一) 水泥混凝土的疲劳破坏

为研究混凝土的疲劳破坏规律,初期对两种不同地基支承的足尺混凝土板板角做了加载疲劳试验,建立了强度折减系数与作用次数之间的经验公式,它反映的是路面实际工作状态,尚不能说明混凝土材料自身的疲劳破坏特性。而后对混凝土梁式试件进行室内疲劳试验,并采用不同的高低应力水平以建立能考虑荷载和温度应力综合疲劳作用的疲劳方程。

通过对 75 根混凝土小梁试件进行不同高低应力比 R_s ($R_s = \sigma_{\min} / \sigma_{\max}$) 的疲劳试验,经统计分析可导出如下的混凝土疲劳方程:

$$\lg \frac{\sigma_p + \sigma_t}{\sigma_s} = \lg A - 0.0422 \left(1 - \frac{\sigma_t}{\sigma_p + \sigma_t} \right) \lg N_f \quad (1-4)$$

式中 σ_p, σ_t ——荷载应力和疲劳温度应力 (MPa);

σ_s ——混凝土抗折强度 (MPa);

N_f ——达到断裂时的重复作用次数;

A ——与可靠度水平 R 有关的回归系数,见表 1-1。

不同 R 时的 A 系数

表 1-1

R	0.95	0.90	0.85	0.80	0.75	0.70	0.65	0.60	0.55	0.50
A	0.961	0.984	0.996	1.007	1.013	1.019	1.024	1.029	1.033	1.038

(二) 考虑荷载应力和温度应力综合疲劳作用的结构设计方法

1. 设计标准

疲劳断裂是车辆荷载和温度翘曲应力的反复作用所引起的,其设计标准可写成

$$\sigma_{rp} + \sigma_{rt} \leq \sigma_s \quad (1-5)$$

式中 σ_{rp} ——考虑累计疲劳损耗的荷载应力;

σ_{rt} ——考虑累计疲劳损耗的温度翘曲应力。

2. 疲劳荷载应力

疲劳荷载应力为一当量应力,用计算式表示为:

$$\sigma_{rp} = k_c k_j k_f \sigma_p \quad (1-6)$$

式中 k_c ——考虑超载、动荷作用及其它安全因素的疲劳损耗影响的综合系数,见表 1-2;

k_j ——考虑接缝传荷能力的应力折减系数,纵缝为设拉杆的平缝,取 0.8~0.9;纵缝为设拉杆的企口缝,取 0.72~0.82;纵向自由边取 1.0;不设传力杆的横向缩缝,可近似地取 1.0(偏安全);

k_f ——考虑标准轴载在路面使用年限内累计作用次数的疲劳损耗系数, $k_f = N_c^{0.0516}$ (N_c 为标准轴载在使用年限内的累计作用次数);

σ_p ——标准轴载在临界荷位处产生的荷载应力。

综合系数 k_c 建议值

表 1-2

交通等级	特重	重	中	轻
标准轴载作用次数(次/日/车道)	>1500	201~1500	5~200	<5
k_c	1.45	1.35	1.20	1.05

3. 疲劳温度应力

疲劳温度应力也为一当量应力,它可由下式表示:

$$\sigma_{rt} = k_t \cdot \sigma_{tm} \quad (1-7)$$

式中 σ_{tm} ——最大温度梯度作用下的温度翘曲应力;

k_t ——考虑温度翘曲应力累计疲劳的作用系数,见表 1-3。

疲劳温度应力系数 k_t

表 1-3

自然区划	σ_{tm} / σ_c								
	0.20	0.25	0.30	0.35	0.40	0.45	0.50	0.55	0.60
II	0.350	0.427	0.485	0.533	0.574	0.609	0.641	0.669	0.695
III	0.358	0.439	0.502	0.554	0.598	0.637	0.672	0.703	0.732
IV	0.287	0.378	0.447	0.502	0.548	0.588	0.622	0.654	0.682
V	0.273	0.374	0.449	0.508	0.556	0.598	0.634	0.665	0.694
VI	0.338	0.415	0.476	0.527	0.570	0.608	0.643	0.674	0.704
VII	0.354	0.436	0.497	0.546	0.587	0.621	0.652	0.679	0.703

(三) 考虑可靠度和挠度的结构设计方法

1. 可靠度设计方法

混凝土路面结构的可靠度可定义为混凝土路面的疲劳寿命 N_f 超过设计年限内标准轴载作用次数 N_c 的概率。为使设计方法能考虑设计参数的变异水平和路面结构要求的可靠度水平,提出一种维持原结构设计方法的形式和设计过程,而仅引入一个可靠度系数的可靠度设计方法。可靠度系数 F_r 定义为由疲劳方程求得的允许最大应力同实际产生的最大应力之比 $\left(F_r = \frac{(\sigma_p + \sigma_t)}{(\sigma_p + \sigma_t)} \right)$,通过大量计算分析,编制了依据设计参数变异水平和要求的可靠度水平 F_r 的计算用图(见本书 II-2)。

设计时只需将混凝土极限抗折强度(均值 σ_s)除以 F_r 得到混凝土允许抗折强度,再应用不加保证率(正确地说有 50%可靠度)的疲劳方程即可。

2. 控制挠度的设计方法

从结构分析的角度,挠度是一个比应力更与之相关的力学反应量。然而挠度不是唯一的影响量,宜采用一个综合指标——地基损坏指数 D_f 来反映在其它因素作用下的挠度控制量。

$$D_f = w^2 / (h \cdot K^{-1.27}) \quad (1-8)$$

式中 w ——挠度(m);

h ——板厚(m);

K ——地基反应模量(MN/m³)。

如定义路面的临界损坏状态为路段内坏板率达30%，则 D_f 同达到损坏状态时的标准轴载作用次数 N 之间的回归关系为：

$$\left. \begin{aligned} \log N &= 0.5064 / D_f^{0.312} & (D_f > 1.862 \times 10^{-4}) \\ \log N &= 3.749 \times 10^{-22} / D_f^{5.96} & (D_f \leq 1.862 \times 10^{-4}) \end{aligned} \right\} \quad (1-9)$$

利用式(1-7)和(1-8)，就可依据使用年限内轴载作用次数和路面结构状况，确定挠度控制量。

通过计算比较，当为轻交通公路($h < 18\text{cm}$)时，路面厚度往往为疲劳应力所控制；特重交通公路($h > 26\text{cm}$)时，路面厚度由板角挠度所控制；若交通量不很大而轴载偏重和(或)温度梯度大、混凝土强度偏低时，则由疲劳应力所控制。

(四) 防冻层设计

在设计冰冻地区中湿及潮湿路段的水泥混凝土路面时，当土基允许冻深小于土基实际冻深，应设置防止路面冻胀破坏的防冻层。此时路面总厚度(即路面抗冻层厚度) H_D 为按强度要求计算出的结构厚度 H 加上防冻层厚度 H_F ，即， $H_D = H + H_F$ 。

经计算及在统计分析的基础上，根据大量的试验和调查，提出了水泥混凝土路面抗冻层厚度推荐值(表1-4)。

水泥混凝土路面最小抗冻层厚度 (cm)

表 1-4

干湿条件 土质	中湿路段		潮湿路段	
	粘性土 细亚砂土	粉性土	粘性土 细亚砂土	粉性土
冰冻深度(cm) 50~100	30~40	40~50	40~50	50~65
100~150	40~60	50~70	50~70	65~80
150~200	60~70	70~80	70~90	80~100
>200	70~95	80~110	90~120	100~130

注：①在冻深大或挖方及地下水位高的路段，应采用高限；

②对冻深小于50cm的地区，一般可不设防冻层，但对水文、地质条件恶劣的路段，其抗冻层厚度可等于当地最大冻深；

③表中防冻层部分所用材料以砂石为准，如果用保温材料，其防冻层厚度可约减小30%。

五、设计参数研究

(一) 动荷系数

动荷系数是反映轮载的动力作用给路面带来的附加影响。经在公路和城市道路上，按经常行驶的汽车荷载和速度，在有代表性基层、板厚和平整度的路段上，对板边动、静应变的大量测定，提出了动荷系数取值标准可在1.10~1.30范围内选用，对于车载较轻、路面平整度较差和柔性基层时，采用高限，反之则采用低限。

(二) 轮迹横向分布系数

路面单位宽度受到的作用次数同车道宽度范围内的车辆总作用次数的比值,称作轮迹横向分布频率;而轮迹宽度范围内(通常为 50cm 左右)的频率,称作轮迹横向分布系数。经实地量测和调查,整理得出表 1-5 建议值。

轮迹横向分布系数建议值

表 1-5

交 通 组 织	纵缝边缘处	横缝最大值
分车道行驶	0.18~0.23	0.4~0.55
不分车道行驶		
行车道宽度 < 7m	0.60~0.70	0.60~0.70
> 7m	0.40~0.50	0.5~0.60

(三) 地基回弹模量

混凝土路面下地基(包括土基和基层)的综合回弹模量,由于路面板下基础所受的荷载压力分布范围较广,单位压力较小,导致模量的增大。据实测反算,有一修正系数 n ,经回归统计,考虑误差因素和板的情况等,计算温度应力时 $n=0.35$;计算荷载应力时,提出如下经验公式:

$$n = 10^{-2.64} \left(\frac{hE_c}{E_t} \right)^{0.8} \quad (1-10)$$

式中 h ——混凝土板厚;

E_c ——混凝土抗弯拉弹性模量;

E_t ——基层顶面当量回弹模量。

经分析比较国内外的研究成果,提出了地基回弹模量设计指标的最低要求。

(四) 传荷系数

混凝土路面接缝具有一定的传荷能力,可用接缝两侧相邻板的挠度比(w_1/w_2)表征,称为传荷系数。接缝类型是影响传荷能力的决定因素。经在新、老路上选用了不同龄期的多种典型接缝构造的大量测定,提出了各类接缝传荷系数建议值,列于表 1-6。

各类接缝的传荷系数(%)

表 1-6

接 缝 类 型	胀 缝	不设传力杆		设传力杆	
		缩 缝	缩 缝	纵 缝	纵 缝
由实测值得到	38~48	38~60	74~82	—	54~60
由分析得到	>60	50~55	>75	35~65	77~82

(五) 混凝土弯拉强度与抗弯拉弹性模量

混凝土弯拉强度以 $15 \times 15 \times 55\text{cm}$ 小梁试件在三分点加荷为标准;抗弯拉弹性模量采用挠度法,取 4 级加荷中 $P_{0.5}$ 级时割线模量为标准,由实测决定;如无条件实测,可参照式 (1-11) 确定:

$$E_c = 1.44\sigma_s^{0.459} \quad (1-11)$$

式中 E_c ——混凝土抗弯拉弹性模量(MPa);

σ_s ——混凝土抗弯拉强度(MPa)。

(六) 温度梯度值

经对试验板、机场跑道和公路与城市道路上的 10 个温度观测点采集的数据,通过回归分析建立了最大温度梯度的经验预估关系式,与按均质半空间体假设,由路表热平衡和传热学原理推导出的路面最大温度梯度理论关系式具有很接近的预估结果,以此为基础,由全国各气象站的资料推演出全国各公路自然区划,2%频率的最大温度梯度推荐值如表 1-7。

各公路自然区划最大温度梯度推荐值

表 1-7

自然区划	II、V	III	IV、VI	VII
T_{gm} ($^{\circ}\text{C}/\text{cm}$)	0.83~0.88	0.90~0.95	0.86~0.92	0.93~0.98

六、材 料

路面混凝土的材料组成,应根据施工机具、气候条件、材料性质和应达到的强度、和易性、耐久性、经济性要求来确定。

(一) 路面用水泥的性能

由于水泥混凝土路面特殊的工作条件,路面混凝土原则上应采用强度高、干缩小、耐磨性和抗冻性好的水泥,优先采用 525 号或以上的高标号硅酸盐水泥或普通硅酸盐水泥。道路水泥主要品质的要求建议如下: $C_3A < 5\%$; $C_4AF \geq 17\%$, $f\text{-CaO} < 1.0\%$; 碱含量应符合 GB200-89 的规定;三氧化硫、氧化镁含量和安定性应符合 GB175-85 的规定;细度 0.08mm 方孔筛筛余 $> 10\%$;初凝 $< 1\text{h}30\text{min}$,终凝 $> 10\text{h}$; 525 号 28d 抗折与抗压强度分别不低于 7.8 和 51.5MPa。

(二) 路面混凝土混合料配合比设计

混合料配比设计是以弯拉强度为指标,采用石子用量法或砂率法,在水泥用量和用水量一定的条件下,按照施工和易性好,坍落度最大或工作度最小的要求进行砂石用量的优选,同时通过弯拉强度试验确定配合比。

1. 正交试验法

用“均衡分散”和“整齐可比”的正交表来安排混凝土配合比试验。它的优点是从多因素的全面试验中,以较少的试验次数优选出满足设计要求的水灰比、用水量和砂石用量,尤其对规模较大的路面工程更有实用价值。

2. 经验公式法

经研究总结提出了确定以弯拉强度为指标的配制强度与水灰比关系以及计算用水量的经验公式,然后根据密实体积原则计算砂石用量。最后根据和易性要求和实测的混合料单位重,对各组成材料的用量进行调整,以确定标准配合比。

(三) 快速测强技术

研究了混凝土 4h 压蒸养护和混凝土湿筛砂浆 1h 和 0.5h 促凝压蒸养护两种快速测强技术,并建立有与标准养护 28d 的强度关系式。

(四) 接缝材料

接缝材料按使用性能分为接缝板和填缝料两类。填缝料又分为加热施工式和常温施工式

二种。

不同材质接缝板,加热或常温施工式填缝料的路用技术要求,分别列于表 1-8、1-9、1-10。同时研究提出了接缝材料 14 个试验方法、接缝材料施工工艺及质量验收标准。

接缝板的技术要求

表 1-8

试验项目	木材类	塑料泡沫类	含成软木板	注
压缩应力 (MPa)	5.0~20.0	0.2~0.6	2.0~10.0	吸水后不应小于不吸水的 90%
复原率 (%)	55~70	90~100	65~80	
挤出量 (mm)	1.0~5.5	2.0~5.0	1.0~4.0	
弯曲荷载 (N)	100~400	0~50	5~40	

加热式填缝料的技术要求

表 1-9

试验项目	低弹性型	高弹性型
针入度 (锥针法)	< 5mm	< 9mm
弹性 (环球法)(-10℃)	贯入量 5mm 复原率 30%以上	贯入量 10mm 复原率 60%以上
流动度	< 5mm	< 2mm
拉伸量 (-10℃)	> 5mm	> 15mm

常温施工式填缝料的技术要求

表 1-10

试验项目	技术要求
灌入稠度	< 20s
失粘时间	> 6h; < 24h
弹性 (环球法)	贯入量 3~5mm 复原率 75%以上
流动度 (按加热式方法)	0mm
拉伸量	> 15mm

为方便施工,研制了强制式灌缝机和施工枪,经实际工程使用,效果良好。

七、水泥混凝土路面的表面功能

水泥混凝土路面的表面功能(包括抗滑能力、耐磨性和平整度),关系到行车的安全和舒

抗滑标准建议值

表 1-11

公路等级	一般路段				环境不良路段			
	构造深度 TD(mm)		摩擦系数 F	PSV	构造深度 TD(mm)		摩擦系数 F	PSV
	竣工验收值	使用最低值			竣工验收值	使用最低值		
高速公路	>0.8	>0.5	>45	>45	>1.0	>0.8	>50	>45
一、二级公路	>0.6	>0.4	>40	>40	>0.8	>0.5	>45	>40
三、四级公路	>0.4	>0.2	>35	>35	>0.6	>0.4	>40	>40