

斜向连续配筋预应力

水泥混凝土路面的应用技术研究

于 玲 闫晓慧 著



黄河水利出版社

斜向连续配筋预应力 水泥混凝土路面的 应用技术研究

于 玲 闫晓慧 著

黄河水利出版社

· 郑 州 ·

图书在版编目(CIP)数据

斜向连续配筋预应力水泥混凝土路面的应用技术研究/
于玲,闫晓慧著. —郑州:黄河水利出版社,2018.8
ISBN 978-7-5509-2075-0

I. ①斜… II. ①于…②闫… III. ①连续配筋-预
应力结构-水泥混凝土路面-道路施工-研究 IV.
①U416.216

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 157656 号

组稿编辑:贾会珍 电话:0371-66028027 E-mail:110885539@qq.com

出版社:黄河水利出版社

网址:www.yrcp.com

地址:河南省郑州市顺河路黄委会综合楼 14 层

邮政编码:450003

发行单位:黄河水利出版社

发行部电话:0371-66026940,66020550,66028024,66022620(传真)

E-mail:hhsclbs@126.com

承印单位:河南新华印刷集团有限公司

开本:890 mm × 1 240 mm 1/32

印张:5.25

字数:151 千字

印数:1—1 000

版次:2018 年 8 月第 1 版

印次:2018 年 8 月第 1 次印刷

定价:36.00 元

前 言

随着我国经济的快速发展,交通运输业突飞猛进,公路里程快速增长,其中水泥混凝土路面占多数比例。水泥混凝土路面有素混凝土、钢筋混凝土、连续配筋混凝土、预应力混凝土等各种路面。水泥混凝土路面是一种刚度较大、扩散荷载应力能力强、稳定性好和使用寿命长的路面结构,具有强度高、耐久性好、承载力高等优势。然而由于在长期行车荷载和自然环境的不断作用下,也暴露出自身的一些缺陷和损坏,主要为混凝土面板损坏和接缝处破坏,如错台、断裂、唧泥、拱起、剥落等病害,因此对道路路面的使用性能有了更高的要求。斜向连续配筋预应力水泥混凝土路面作为一种新型路面形式出现,其研究目前大多数处于试验阶段,本书对斜向连续配筋预应力水泥混凝土路面作了以下几方面研究:

第1章~第2章根据《预应力混凝土路面工程技术规范》(GB 50422—2017)进一步研究了斜向连续配筋预应力水泥混凝土路面的弹性设计准则,主要与荷载应力、温度应力及路基摩阻应力有关。因弹性设计准则要求混凝土板不产生任何裂缝过于保守,提出斜向配筋预应力路面疲劳设计准则,该设计准则的独特之处是考虑了预应力值的大小和车辆荷载反复循环作用的次数。

第3章~第5章利用ABAQUS有限元分析软件,分析斜向布筋横向预应力连续混凝土路面在有配筋与无配筋、配筋的不同位置、不同配筋率、预应力钢筋的位置和预应力大小等计算参数对路面受力性能的影响。此外针对因路面板热胀冷缩性质而设置的接缝,本书还分析了不同形式路面板的温度应力问题。

第6章对实体工程路面结构进行配筋和锚固区局部承压区验算,并提出了试验路原材料的要求、施工工艺流程和关键技术。

第7章采用寿命周期成本分析方法中年等额费用法对斜向预应力

水泥混凝土路面、钢纤维水泥混凝土路面和普通水泥混凝土路面的对比分析,可得出斜向预应力水泥混凝土路面虽然初建费用高,但其后期养护费用远远低于其他路面结构。

第8章对本书研究的内容进行了总结,并展望了进一步需解决的问题。

本书在研究过程中得到沈阳建筑大学张敏江教授、才华教授的大力支持,在此表示衷心的感谢!

对于本书的疏漏、错误和不完善之处,欢迎读者批评指正!

作 者

2018 年 6 月

目 录

前 言

第 1 章 绪 论	(1)
1.1 课题研究的目的和意义	(1)
1.2 国内外研究现状	(4)
1.3 课题研究方案	(7)
第 2 章 斜向预应力水泥混凝土路面的设计方法研究	(9)
2.1 斜向预应力水泥混凝土路面设计准则	(9)
2.2 斜向预应力水泥混凝土路面设计参数	(13)
2.3 斜向预应力水泥混凝土路面设计推荐程序	(20)
2.4 本章小结	(21)
第 3 章 斜向预应力水泥混凝土路面的有限元分析	(23)
3.1 ABAQUS 有限元的介绍	(23)
3.2 斜向预应力水泥混凝土路面预应力的损失分析	(25)
3.3 本章小结	(32)
第 4 章 斜向预应力水泥混凝土路面的荷载应力分析	(33)
4.1 模型建立及参数选取	(33)
4.2 荷载应力分析	(42)
4.3 本章小结	(59)
第 5 章 斜向布筋横向预应力水泥混凝土路面在温度梯度作用下 的受力分析	(61)
5.1 温度场及温度应力分析	(61)
5.2 温度翘曲应力分析	(67)
5.3 计算参数分析	(71)
5.4 温度伸缩应力分析	(102)
5.5 主要影响因素分析	(105)

5.6	本章小结	(130)
第6章	斜向预应力水泥混凝土实体工程的研究	(131)
6.1	实体工程试验路的概况	(131)
6.2	试验路的设计	(132)
6.3	试验路的设计计算	(134)
6.4	试验路所用材料及设备的要求	(137)
6.5	试验路施工工艺及关键技术要求	(143)
6.6	本章小结	(150)
第7章	斜向预应力水泥混凝土路面的经济效益分析	(151)
7.1	寿命周期成本分析方法	(151)
7.2	斜向预应力水泥混凝土路面与其他路面的对比分析	(153)
7.3	斜向预应力水泥混凝土路面的推广应用	(157)
7.4	本章小结	(157)
第8章	结论与展望	(158)
8.1	主要结论	(158)
8.2	进一步的研究建议	(159)
参考文献		(160)

第 1 章 绪 论

1.1 课题研究的目的是和意义

随着我国经济的快速发展,交通运输业突飞猛进,公路里程也快速增长。交通运输部发布的《2013 年交通运输行业发展统计公报》中显示,年末全国公路总里程达 435.62 万 km,其中占多数比例的是水泥混凝土路面(可简称为混凝土路面)。水泥混凝土路面有素混凝土、钢筋混凝土、连续配筋混凝土、预应力混凝土等各种路面。素混凝土路面广泛应用于公路、城市道路及机场道路中,这类路面除接缝区和局部范围外不配置钢筋;钢筋混凝土路面是指在混凝土路面板内沿纵横向配置钢筋网,配筋率一般为 $0.1\% \sim 0.2\%$;连续配筋混凝土路面是指在混凝土路面板内配置大量配筋,配筋率一般达 $0.6\% \sim 1.0\%$;预应力混凝土路面可分为有筋预应力混凝土路面、无筋预应力混凝土路面和自应力混凝土路面,路面板厚度可减至 $10 \sim 15 \text{ cm}$,缩缝间距可增至 $100 \sim 150 \text{ m}$ 。

水泥混凝土路面是一种扩散荷载应力强、刚度较大、稳定性好和使用寿命长的路面结构,具有耐久性好、强度高、承载力高等优势。但是在长期不利的自然环境和行车荷载不断作用下,也暴露出自身的一些损坏和缺陷,主要表现为混凝土面板损坏和接缝处破坏,如断裂、拱起、错台、唧泥、剥落等病害。解决路面接缝问题的两种方法是使用预应力混凝土路面和连续配筋混凝土路面,虽然两种路面各有一定的优势,但也存在一些不足:

(1)纵向预应力混凝土路面由于在路面板端部张拉,施工时要预

留后浇,带来满足钢绞线张拉所需的空間;

(2)为使预应力传递连续,铺筑 100 m 以上的路面板必须用连接器将预应力筋连接起来;

(3)虽然路面纵向承载能力大大提高,但对横向来说几乎没有影响,因此不适合路幅较宽的路面。

图 1-1 ~ 图 1-4 均为水泥混凝土路面破坏形式。随着交通量和重载交通比例的不断增加,对道路路面的使用性能有了更高的要求。为了使交通道路更好地发展,水泥混凝土路面不断发展为今天的斜向连续配筋预应力水泥混凝土路面。

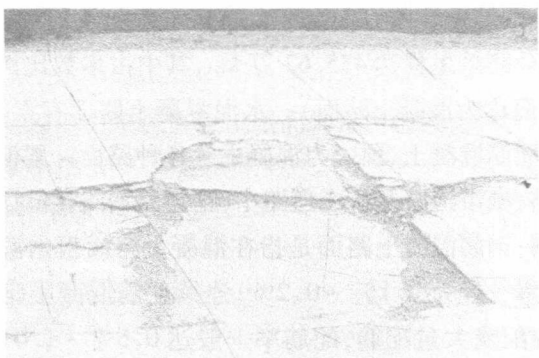


图 1-1 龟裂

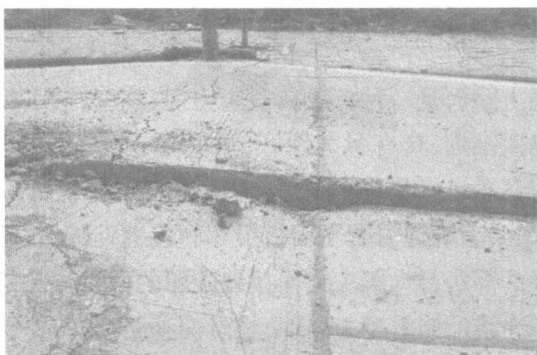


图 1-2 剥落

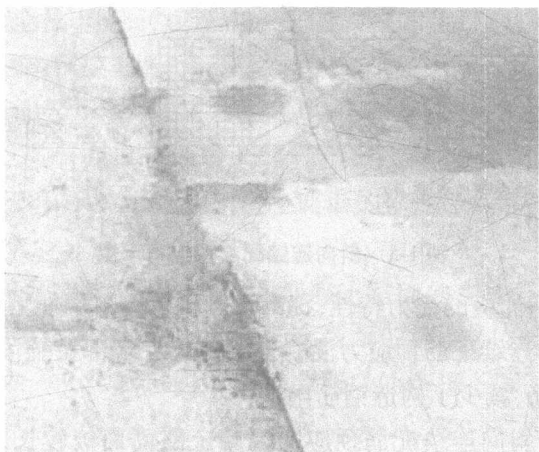


图 1-3 唧泥

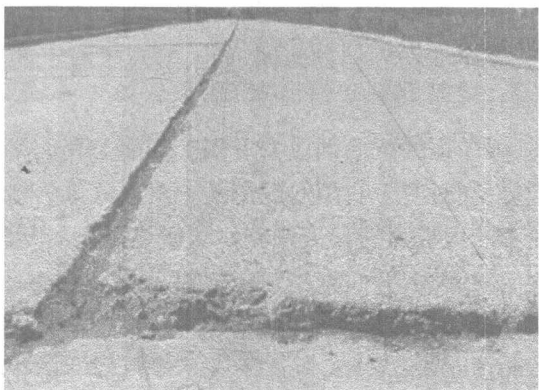


图 1-4 错台

斜向连续配筋预应力水泥混凝土路面是指将预应力筋沿路面纵向旋转一定的角度布置,使其在路面纵向和横向均产生预应力,在较长范围内不设置接缝,如图 1-5 所示。

与其他混凝土路面相比,斜向连续配筋预应力混凝土路面有以下几点优势:

(1) 由于施加了纵、横向预应力,对混凝土的双向变形进行约束,

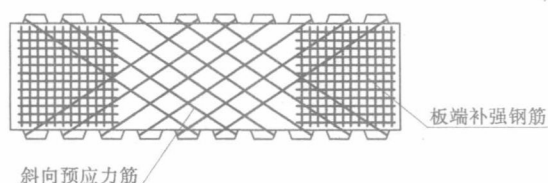


图 1-5 斜向连续配筋预应力示意

大大改善了路面板的受力特性,提高了其抗弯变形的能力;

(2)斜向连续配筋预应力混凝土路面仅在端部及锚固区布置少许横向构造钢筋,减少了构造钢筋用量;

(3)由于斜向连续配筋预应力混凝土路面面板较长,大大减少了接缝数量,改善了行车的平稳性,提高了行车的舒适性和路面使用质量;

(4)预应力筋的张拉在路面两侧进行,实现了施工的连续性,加快了施工进度。

综上所述,斜向连续配筋预应力混凝土路面与其他路面相比,有着不可比拟的优势,同时由于我国水泥混凝土路面数量的增加,对路面使用品质要求在不断地提高。深入研究斜向连续配筋预应力混凝土路面会极大改善路面的性能,并应用于实际工程,推动公路事业又快又好地发展。因此,对斜向连续配筋预应力混凝土路面的研究具有广泛的应用前景和重要的现实意义。

1.2 国内外研究现状

1.2.1 国内研究现状

我国于 20 世纪末引入预应力混凝土路面,对其研究尚处于起步阶段。最早的纵向预应力混凝土路面试验路是由江苏省交通规划设计院和东南大学联合设计的,该试验路位于南京市禄口机场高速互通式立

交的匝道上,全长 100 m,板厚 20 cm,宽 7.2 m,采取两端张拉。1999 年修建了第二条预应力混凝土路面试验路,位于 310 国道徐州市贾汪区汴塘段,全长 75 m,板厚 18 cm,宽 6 m,采取一端张拉。住房和城乡建设部根据这些研究成果颁布了《预应力混凝土路面工程技术规范》(GB 50422—2017),对预应力混凝土路面的设计参数和施工方法提出了要求。

西安公路研究院不断对预应力混凝土路面的相关技术进行研究,于 2008 年提出了斜向预应力混凝土路面的概念和设计方法,并于 2009 年在陕西省 210 国道南山岭隧道出口处修建了第一条斜向预应力混凝土路面的试验路。该试验路全长 100 m,宽 9 m,板厚 22 cm,采取两端张拉。经过两年的通车运行,发现路面无裂缝、平整且行车舒适,解决了水泥混凝土路面因横缝较多而引起的路面破坏等问题。

2010 年第二条斜向预应力混凝土路面修建成功,试验路位于陕西省省道 301 线府谷一级公路上,试验路分两段铺筑,其中一段长 158 m,另一段长 100 m,路面宽度均为 9 m,板厚均为 23 cm,滑动层厚 1 cm,采取一端张拉。

2011 年成功修建了位于神府高速公路石马川互通立交的预应力混凝土收费站广场,桩号为 AK1 + 220 ~ AK1 + 437.877,广场总面积 10 000 m²,其中斜向预应力混凝土路面面积为 5 500 m²,板长 30 ~ 80 m,板厚 26 cm,路面板宽度为 5.7 m 和 5.4 m 两种。

此后,我国又成功修建了许多试验路,如榆绥高速、耀旬二级路等。截至 2013 年,斜向预应力混凝土路面铺筑总面积已经达到 100 000 m²,形成了一套从理论、设计到施工的完善体系,使斜向预应力混凝土路面在工程实际中得到了极大的认可和应用,促进了预应力混凝土路面的进一步发展。

1.2.2 国外研究现状

预应力水泥混凝土路面距今已有 70 多年的历史,最早起源于法

国,后来英国、德国、美国、日本等国家也都先后修建了一定数量的预应力混凝土路面,将其用于道路和机场路面上,并都采用了纵向预应力布筋方式。最早的预应力混凝土路面修建在法国 Luzancy 一座桥梁的引路上,直到 1947 年,Orly 机场跑道为适应飞机较大的胎压建立了纵向预应力混凝土路面,标志着预应力混凝土路面的完全确立。该跑道由台座的三角形面板和带横向的钢丝索组成,全长 420 m,厚 18 cm,宽 60 cm。

1950 年,英国修建了 Crawley 预应力混凝土路面,并对其设计和建造进行了深入的研究,然后根据研究成果先后修建了伦敦机场的停机坪、Port Talbot 道路、Essex 道路、Catwick 停机坪等。英国的预应力混凝土路面纵向预应力一般公路为 1.575 MPa,机场为 3.15 MPa。

德国对预应力板的分析要比其他国家早些,但其理论分析仅限于桥面板等,而不是路面板。到 1953 年才开始在 Mergelstetten 修建了预应力混凝土路面,其后又修建了几条道路。

美国著名的 Patuxent River Navae Air Station 预应力混凝土路面是 1953~1954 年由 Bureau of Yards and Docks 修建的,纵向钢索的初始预应力为 4.9 MPa,其后又进行了很多试验路段的修建和研究:Purdue 大学 Martin J. Gutzwiller 和 Joseph L. Waling 在 1968 年对预应力混凝土路面进行了室内模拟试验的研究,分析了不同的竖向荷载和配筋率对路面板挠曲变形和钢筋应力变化的影响。1975 年,Texas 大学也在大量的试验和工程调查的基础上提出了敏感性分析的 CRCP-1 模型计算程序,主要分析预应力混凝土路面中配筋率和板厚对路面使用性能的影响。

美国 Dapeng Xin、Dan G. Zollinger 及 Ray W. James 于 1978 年提出了一维纵向分析模型,该模型假定基层在地基摩阻力作用下不产生弯曲变形;不考虑混凝土材料的干缩、蠕变和翘曲。通过分析温度变化所引起的连续配筋混凝土路面的纵向变形,建立微分方程,得出纵向变形的位移解。

1983年,法国已修建了约550 km的预应力混凝土路面,主要应用于高速公路和其他重载交通道路的新建和补强工程中。

1988年,泰国在南北高速公路上铺筑了长达150 km的预应力混凝土路面是采用了英国交通部的设计规范进行设计的。

1.2.3 发展趋势

综合国内外发展及研究现状,我们可以看出预应力混凝土路面已经从纵向预应力配筋发展为今天的斜向预应力配筋,这些研究成果具有广阔的应用前景和社会经济效益。目前,需将斜向预应力混凝土路面这一技术推广应用,这对水泥混凝土路面,特别是斜向混凝土路面在公路中的应用和发展具有重要的现实意义。

1.3 课题研究方案

1.3.1 主要研究内容及方案

本书基于营口市岫水县重载交通下经济适用路面的结构研究项目,充分吸收国外研究成果,结合我国国内研究状况,对斜向预应力混凝土路面进行研究,主要研究以下几方面内容。

1.3.1.1 斜向预应力混凝土路面的设计方法

根据我国预应力混凝土路面设计的基本原则,并结合目前国内研究的现状,总结推荐斜向预应力混凝土路面的设计方法。

1.3.1.2 斜向预应力混凝土路面的有限元分析

根据三维有限元法建立混凝土路面的力学模型,并对其进行数值模拟,预估预应力的损失;分析施加预应力后板底的应力分布情况以及进行路面板的屈曲分析,为今后斜向预应力混凝土路面的设计和施工提供基础。

1.3.1.3 斜向预应力混凝土路面实体工程的研究

对实体工程路面结构进行配筋和锚固区局部验算,提出试验路原

材料的技术要求、施工工艺流程和关键技术。

1.3.1.4 斜向预应力混凝土路面的经济效益分析

通过和其他混凝土路面进行对比,分析斜向预应力混凝土路面的经济性。

1.3.2 技术路线

本书通过理论与实体工程相结合的方法,针对以上几方面开展对斜向预应力混凝土路面的研究,其技术路线如图 1-6 所示。

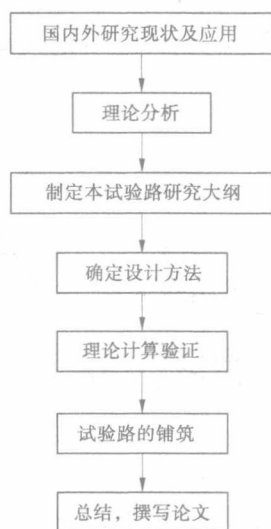


图 1-6 技术路线

第 2 章 斜向预应力水泥混凝土路面的设计方法研究

2.1 斜向预应力水泥混凝土路面设计准则

2.1.1 弹性设计准则

根据《预应力混凝土路面工程技术规范》(GB 50422—2017)中的要求,以路面在设计基准期内不产生疲劳断裂为标准。假定混凝土路面为弹性层状半空间体系,即按深度不同将混凝土路面划分为不同的层次,每层之间有相关的连续条件,且每层材料均视为连续的、弹性的。路面中施加的预应力值主要由路面荷载、温度及湿度引起的翘起约束和路面板底摩擦约束三个因素所决定,预应力混凝土路面板的厚度和预应力筋配置应满足式(2-1)的要求:

$$\gamma(\sigma_{L,r} + \sigma_{\Delta T_r}) + \sigma_F - \sigma_{py} \leq f_r \quad (2-1)$$

式中 γ ——可靠度系数,其值按表 2-1 ~ 表 2-3 确定;

$\sigma_{L,r}$ ——荷载疲劳应力,MPa;

$\sigma_{\Delta T_r}$ ——温度疲劳应力,MPa;

σ_F ——路基摩阻应力,MPa;

σ_{py} ——有效预应力引起的混凝土的平均纵向压应力,MPa;

f_r ——混凝土弯拉强度标准值,MPa。

表 2-1 可靠度设计标准

公路等级	高速公路	一级公路	二级公路	三、四级公路
安全等级	一级	二级	三级	四级
目标可靠度	95%	90%	85%	80%
目标可靠指标	1.64	1.28	1.04	0.84
变异水平等级	低	低、中	中	中、高

表 2-2 变异系数的变化范围

变异水平等级	低	中	高
混凝土弯拉强度及弹性模量	$c_v \leq 0.10$	$0.10 < c_v \leq 0.15$	$0.15 < c_v \leq 0.20$
基层顶面当量回弹模量	$c_v \leq 0.25$	$0.25 < c_v \leq 0.35$	$0.35 < c_v \leq 0.55$
路面层厚度	$c_v \leq 0.04$	$0.04 < c_v \leq 0.06$	$0.06 < c_v \leq 0.08$

表 2-3 可靠度系数

变异水平等级	目标可靠度			
	95%	90%	85%	80%
低	1.20 ~ 1.33	1.09 ~ 1.16	1.04 ~ 1.08	—
中	1.33 ~ 1.50	1.16 ~ 1.23	1.08 ~ 1.13	1.04 ~ 1.07
高	—	1.23 ~ 1.33	1.13 ~ 1.18	1.07 ~ 1.11

注:变异系数在变化范围下限,可靠度系数取低值;变异系数在变化范围上限,可靠度系数取高值。

2.1.2 疲劳设计准则

该设计准则主要是针对混凝土板的疲劳破坏,考虑了车辆荷载循环次数和应力大小对路面板损坏的影响,是建立在混凝土板在反复荷载作用下性能研究的基础上的。许多有关混凝土路面板的疲劳试验表明,路面板的使用性能与车辆反复作用和混凝土的抗弯强度比值有关,普通水泥混凝土路面设计中均考虑了此项因素,但对预应力混凝土路面板来说,数据还相对缺乏,因此本书采取波特兰水泥协会(Portland Cement Association,简称为PCA)的疲劳模型,如式(2-2)所示:

$$\rho_{\sigma} = 0.972 - 0.082 \lg N \quad (2-2)$$

式中 ρ_{σ} ——最大循环应力与抗弯强度应力的比值;

N ——疲劳破坏循环次数。

根据纵向预应力混凝土路面板中对 ρ_{σ} 的表达式,推出斜向预应力路面板中 ρ_{σ} 的表达式为: