

Continuously Reinforced
Concrete Pavements

张洪亮 左志武 编著
王秉纲 主审

连续配筋 混凝土路面



人民交通出版社
China Communications Press

Continuously Reinforced Concrete Pavements
连续配筋混凝土路面

张洪亮 左志武 编著
王秉纲 主审

人民交通出版社

内 容 提 要

本书基于已建成的连续配筋混凝土路面调查,确定了连续配筋混凝土路面设计指标;在考虑多个设计参数变异性的基础上,通过增量分析和蒙特卡罗方法,研究横向裂缝的出现过程,获得了横向裂缝间距和宽度的分布;研究了温度梯度、湿度梯度和车辆荷载综合作用下,连续配筋混凝土路面应力分析模型;建立了基于横向裂缝沿公路纵向不均匀分布的冲断预估方法和连续配筋混凝土配合比设计方法;对于连续配筋混凝土路面端部锚固结构进行了分析和设计;通过修筑试验路,研究了连续配筋混凝土路面的施工技术。最后,介绍了《公路水泥混凝土路面设计规范》(修订稿)中连续配筋混凝土路面配筋设计相关内容。

本书可供从事道路工程科研、教学和设计的专业人员参考使用,也可作为道路工程专业研究生教材或学习参考书。

图书在版编目(CIP)数据

连续配筋混凝土路面/张洪亮,左志武编著. —北京:
人民交通出版社,2011.2
ISBN 978-7-114-08679-3

I. 连… II. ①张… ②左… III. ①连续配筋混凝土路面—研究 IV. ①U416.216

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 178107 号

书 名: 连续配筋混凝土路面

著 作 者: 张洪亮 左志武

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.ccpress.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: 北京鑫正大印刷有限公司

开 本: 787×960 1/16

印 张: 13

字 数: 224 千

版 次: 2011 年 2 月 第 1 版

印 次: 2011 年 2 月 第 1 次印刷

书 号: ISBN 978-7-114-08679-3

印 数: 0001—2000 册

定 价: 35.00 元

(如有印刷、装订质量问题的图书由本社负责调换)

前 言

水泥混凝土路面作为一种高级路面结构形式,由于具有使用寿命长、养护工作量大、能源消耗少、施工简便、对交通等级和环境适应性强等优点,在国外得到广泛应用。我国优质的沥青资源比较匮乏,尤其近年来随着石油价格的上涨,沥青价格大幅度升高,发展沥青路面受到沥青材料和优质石料资源的严重制约,建设和养护成本大幅度增加。我国是水泥生产大国,水泥价格一直稳定在较低的水平,这种形势为我国发展水泥混凝土路面提供了有利条件和竞争优势。我国水泥混凝土路面总里程约占高级和次高级路面总里程的一半,但在高等级公路(尤其是高速公路)路面中所占比例较小,并且仍在下滑。究其原因,主要是普通水泥混凝土路面由于接缝的存在,易产生渗水、唧泥、错台、脱空等病害,严重影响水泥混凝土路面的行车舒适性和使用寿命,而且一旦损坏,修复比较困难。连续配筋混凝土路面(简称CRCP)指面层内配置纵向连续钢筋和横向钢筋,横向不设缩缝的水泥混凝土路面。CRCP行车平顺舒适,耐久性好,使用寿命长,对养护要求很低,是符合公路交通发展趋势的高性能路面结构形式之一,在国外已大量应用于干线公路和机场道路。随着汽车运输向大流量、大型化方向发展,可以预见CRCP将在我国高等级公路获得广泛的应用。

近几年,CRCP技术获得了长足的发展。在设计指标方面,在1993版的美国各州公路工作者协会(AASHTO)设计指南中采用了裂缝间距、裂缝宽度和裂缝处钢筋的应力,而现行的美国《力学-经验法公路设计指南》中采用了冲断和平整度。此外,国内外还针对CRCP的性能影响因素、环境荷载和汽车荷载作用下的力学响应、施工技术以及裂缝间距、裂缝宽度、冲断预估、端部锚固等进行了大量研究。但是,目前国外的CRCP研究也存在一些不足,如冲断基本发生在宽裂缝或密集裂缝处,与平均裂缝间距和平均裂缝宽度没有相关性,但美国《力学-经验法公路设计指南》仍根据平均裂缝间距和平均裂缝宽度来预估冲断;没有为连续配筋混凝土建立专门的配合比组成设计方法;对于CRCP设计参数的变异性研究得很少等。而国内的CRCP研究除存在以上不足外,相对于国外先进水平还存在较大差距,如对冲断的研究很少,目前的《公路水泥混凝土路面设计规范》(JTGD40—2002)没有采用冲断作为设计指标,没有对CRCP集料选择、裂缝主动控制等施工技术进行系统研究等。

依托国家自然科学基金项目《连续配筋混凝土路面设计理论与方法研究》、交通运输部《公路水泥混凝土路面设计规范》(修订稿)(其中的连续配筋混凝土路面设计方法)修订项目、山东省交通科技项目《水泥混凝土路面耐久性结构关键技术

研究》以及河南、陕西等省的交通科技项目,作者从1998年至今针对CRCP进行了长达12年的研究,在山东、河南和陕西等省修建了多条CRCP试验路。本书是作者12年来CRCP研究工作的总结。全书系统介绍了CRCP设计理论、设计与施工技术。第2章对CRCP进行病害调查,根据调查结果选择CRCP设计指标;第3章进行温降和干缩作用下CRCP力学分析;第4章考虑设计参数的变异性进行横向裂缝间距和宽度沿公路纵向分布预估;第5章进行车辆荷载、温度梯度和湿度梯度综合作用下CRCP应力分析;第6章基于横向裂缝纵向不均匀分布预估CRCP冲断;第7章建立连续配筋混凝土配合比设计方法;第8章进行CRCP端部锚固结构分析与设计;第9章介绍CRCP施工技术;第10章介绍CRCP试验路。在王秉纲教授的指导下,作者参加起草了《公路水泥混凝土路面设计规范》(修订稿)中CRCP配筋设计的内容,将这部分内容作为附录列在本书中。

张洪亮撰写了第3、4章、第6~9章、附录A以及第1、5章的部分内容,并负责书稿的修改和定稿;左志武撰写了第2章、第10章以及第1章和第5章的部分内容;张永平撰写了第5章部分内容。研究生王衍辉参加了第3、4、6、10章的研究;研究生宋柳参加了第5、6、10章的研究,研究生陈江参加了第7、9、10章的研究,研究生贾建峰参加了第10章的研究。

在CRCP研究过程中先后得到了我国著名公路专家胡长顺教授和王秉纲教授的指导;在起草《公路水泥混凝土路面设计规范》(修订稿)中CRCP配筋设计时得到了规范编写组各位专家的帮助和指正,在此深表感谢。另外,感谢国家自然科学基金委、山东省交通厅公路管理局、陕西省铜川市公路管理局、河南省许昌市公路管理局等单位对于研究工作的资助和支持。

因时间紧张,加之作者水平有限,书中的疏漏和不当之处在所难免,恳请各位专家、学者和读者不吝指正。

张洪亮
2010年7月
于长安大学

目 录

1 绪论	1
1.1 连续配筋混凝土路面国外研究现状	2
1.2 连续配筋混凝土路面国内研究现状	13
1.3 对国内外研究现状的评价	15
2 连续配筋混凝土路面病害调查和设计指标选择	18
2.1 连续配筋混凝土路面调查方案	18
2.2 连续配筋混凝土路面原始资料调查	20
2.3 连续配筋混凝土路面现状调查及分析	31
2.4 调研结论和连续配筋混凝土路面设计指标选择	37
3 温降和干缩作用下连续配筋混凝土路面力学分析和参数敏感性分析	38
3.1 温降和干缩作用下连续配筋混凝土路面应力和位移分析	38
3.2 温降和干缩作用下连续配筋混凝土路面参数敏感性分析	50
4 连续配筋混凝土路面横向裂缝间距和宽度沿公路纵向分布	61
4.1 Monte Carlo 方法	61
4.2 参数变异性	62
4.3 参数随时间的变化	63
4.4 连续配筋混凝土路面开裂预估	67
4.5 Weibull 分布	71
4.6 已建的连续配筋混凝土路面裂缝调查统计	73
4.7 连续配筋混凝土路面裂缝预估结果统计	73
4.8 裂缝分布参数敏感性分析	75
5 车辆荷载、温度梯度和湿度梯度综合作用下连续配筋混凝土路面应力分析	78
5.1 连续配筋混凝土路面温度梯度	78
5.2 连续配筋混凝土路面湿度梯度和湿度应力	80
5.3 连续配筋混凝土路面裂缝间传荷能力	81
5.4 连续配筋混凝土路面有限元模型关键技术	85
5.5 连续配筋混凝土路面有限元模型	90
5.6 参数敏感性分析	92
6 基于横向裂缝纵向不均匀分布的连续配筋混凝土路面冲断预估	95
6.1 车辆荷载和温度梯度作用下连续配筋混凝土路面应力诸漠图	95

6.2	车辆荷载和温度梯度作用下连续配筋混凝土路面应力分析示例	96
6.3	连续配筋混凝土路面冲断预估	97
7	连续配筋混凝土配合比设计方法	101
7.1	连续配筋混凝土路面路用性能参数敏感性分析	101
7.2	混凝土组成对混凝土性能的影响	106
7.3	连续配筋混凝土多指标配合比设计方法	125
8	连续配筋混凝土路面端部锚固结构分析与设计	130
8.1	连续配筋混凝土路面端部锚固力计算	132
8.2	凸形锚固地梁有限元分析	137
8.3	凸形锚固地梁设计	146
8.4	混凝土灌注桩锚固分析	150
9	连续配筋混凝土路面施工技术	154
9.1	连续配筋混凝土路面施工技术概述	154
9.2	连续配筋混凝土路面裂缝主动控制间距	157
10	连续配筋混凝土路面试验路	160
10.1	试验路修筑目的	160
10.2	试验路设计和测试方案	161
10.3	试验路施工	169
10.4	试验路使用效果评价	170
附录 A	连续配筋混凝土面层配筋设计规范修订	179
A.1	连续配筋混凝土面层配筋设计	179
A.2	连续配筋混凝土面层纵向配筋计算方法	181
A.3	连续配筋混凝土面层纵向配筋计算示例	184
附录 B	气象数据	187
参考文献		188

1 绪 论

普通水泥混凝土路面是高等级公路路面的主要形式之一,但由于存在接缝,易产生渗水、唧泥、错台、脱空等病害,成为混凝土路面断裂、破碎等严重病害的隐患。近年来,随着我国经济的迅猛发展,公路运输日益呈现车辆大型化、重型化及交通流量大的特点,从而对路面的承载能力提出了更高的要求,因此,尽快提出适应交通运输发展趋势的更高品质的路面,已成为公路科研工作者面临的重要问题。

连续配筋混凝土路面(Continuously Reinforced Concrete Pavement, CRCP)指面层内配置纵向连续钢筋和横向钢筋,横向不设缩缝的水泥混凝土路面,是符合公路交通发展趋势的高性能路面结构形式之一。CRCP 具有以下优点:

(1)消除了横向接缝,整体性和平整度好,行车平顺舒适。

(2)耐久性好,使用寿命长。如果设计、施工得当,养护费用很少,虽然初期投资较高,但全寿命效益是经济合理的。

(3)在路面内增设了纵向和横向钢筋,控制了裂缝宽度,使得裂缝紧密闭合,减少了裂缝处剥落,提高了裂缝处的传荷能力。

最早的 CRCP 于 1921 年出现在美国,当时美国公路局在华盛顿区修建了长 60m 的试验路,其中含有不同数量的纵向钢筋。随后在得克萨斯州、弗吉尼亚州、宾夕法尼亚州、马里兰州等开展了大规模的工程试验,得到了比较满意的结果。此外,CRCP 在加拿大、澳大利亚、日本、法国、比利时、荷兰、英国等国家也获得了广泛的使用。

我国 CRCP 研究及应用起步较晚。1989 年东南大学在江苏省盐城一级公路上修筑了第一条 CRCP 试验路段。1996 年,西安交通大学(后合并为长安大学)与铜川公路管理局在 210 国道上修建了一段长 335m 的 CRCP 试验工程。1997 年西安交通大学与河南许昌公路局在 107 国道上修筑了单幅总长 10km 的 CRCP。2001 年长沙交通学院与湖南省高速公路公司在京珠高速公路耒宜段修建了长 40.1km 的 CRCP。2001 年,长安大学与山东省公路局在山东济枣西线水泥混凝土路面改造中,铺筑了连续配筋混凝土加铺层。2003 年,长安大学与山东省公路局在济聊高速公路上修筑了连续配筋混凝土(CRC)基层沥青路面试验

段。2005年,交通部公路科研院在粤赣高速修建了长1.574km的CPCR试验段。2007年,原交通部公路科研院在山西省道孙吴公路修建了长900m的CRCP试验段。2008年,张石高速公路石家庄段建成了长41.961km的连续配筋混凝土(CRC)基层沥青路面。

尽管国外对于CRCP已经进行了大量的研究,但在横向裂缝的纵向分布以及基于该分布的冲断预估方面,尚存在一定缺陷,而我国的CRCP修筑水平与国际水平仍有很大差距。为了适应我国高等级公路和重交通道路发展的需要,使汽车运输向大吨位、大流量、大型化方向发展,对CRCP的横向裂缝分布和冲断预估进行研究,具有重大的工程意义和广阔的应用前景。

1.1 连续配筋混凝土路面国外研究现状

1.1.1 CRCP病害调查和影响因素分析

美国联邦公路局和得克萨斯州运输部门等对路面长期使用性能LTPP GPS-5 CRCP试验路进行了广泛的调查,包括裂缝调查(间距、宽度、形状等)、板边及裂缝处的弯沉调查、行驶质量调查等。Hawks等学者从调查中发现冲断、横向裂缝、纵向裂缝、疲劳裂缝、剥落、唧泥等病害,给出了调查和评价的方法,具体成果如下。

(1)边缘冲断

La Coureiere等学者提出CRCP的主要病害是边缘冲断,因此美国《力学-经验法公路设计指南》将冲断作为设计指标。冲断产生的机理如下:对新建的路面,由于加筋的作用,裂缝窄,传荷能力强。随后,由于重车的反复作用及温度和湿度波动导致裂缝宽度变化及局部边缘支撑丧失,部分横向裂缝出现剥落现象。裂缝变宽或者剥落以后,盐和水会进入板底。板底的水加剧基层侵蚀、钢筋腐蚀、唧泥,最终板底失去支撑。由于裂缝处剥落及板底的不均匀支撑,在重车作用下板顶产生较大的横向拉应力。Selezneva等学者指出当车辆荷载反复作用时,便累积疲劳,产生纵向裂缝,进而出现冲断。

(2)横向裂缝

尽管裂缝宽度是预估冲断的一个重要因素,但对其研究较少。部分学者(Burke和Dhamrait, Mc Cullough和Cawley)利用显微镜测试路表下一定深度处的裂缝宽度,部分学者(Kohler等)采用传感器等测试路表的裂缝宽度,或者在裂缝处钻取芯样测试裂缝宽度。Mc Cullough等学者发现早期产生的裂缝比后期产

生的裂缝要宽,增加了裂缝的变异性。Kohler 调查发现裂缝宽度服从 Weibull 分布,Zollinger 认为初始的横向裂缝由环境因素产生。Zollinger 还调查了 6 个州的 23 条 CRCP,并利用了 LTPP 中 83 条 CRCP 的调查数据,发现宽裂缝和冲断是 CRCP 的两大主要病害。同时 Zollinger 研究表明裂缝的变宽主要是由钢筋锈蚀后有效断面减小,钢筋中的应力达到屈服或断裂强度引起的。

(3) 纵向裂缝

伊利诺伊州运输部调查分析了纵向裂缝产生的原因。Roesler 等学者发现纵向裂缝通常伴随着嵌入的纵向钢筋,不是由于钢筋锈蚀、混凝土的蜕化或不适当的结构设计引起的,而是与施工时钢筋在混凝土内部下沉有关。

为分析病害产生的原因,部分学者(Nam 等)还用传感器在试验路测试与应力无关的应变及车辆荷载、温度变化、湿度变化等共同产生的总应变等。

影响 CRCP 开裂和冲断等的主要因素有以下 10 种。

(1) 板厚

La Coureiere 等学者研究认为随着板厚的增加,冲断减少,平整度提高。美国《力学-经验法公路设计指南》指出板厚是否合适依赖于施工条件和其他设计因素。

(2) 横向裂缝宽度和间距

美国《力学-经验法公路设计指南》研究表明裂缝宽度非常重要,它影响裂缝处的传荷能力,特别是在使用除冰盐的地区。将平均裂缝宽度(钢筋深度处)控制在 0.05cm 可以将裂缝间距控制在合理的水平。LTPP 试验路调查表明,冲断多发生在较窄的裂缝间距处,约 90% 的冲断发生在横向裂缝间距为 0.3~0.6m 时;Selezneva 认为平均裂缝间距和冲断之间没有相关性。此外,Selezneva 等学者研究指出冲断也容易在靠近宽裂缝处产生,Kohler 指出冲断与宽裂缝有关,与平均裂缝宽度无关。Colley 认为虽然大部分的路面病害发生在宽裂缝或密集横向裂缝处,但也发现部分路面尽管平均裂缝间距小于 0.6m,但是状况完好。

(3) 混凝土材料

混凝土强度越高对路面越有利,模量、干缩和线膨胀系数越小对路面越有利。强度的增大通常会伴随着高的模量、干缩和线膨胀系数,会抵消强度增加的有利影响。美国《力学-经验法公路设计指南》等研究表明线膨胀系数对路面性能影响最大,粗集料类型对线膨胀系数影响最大。得克萨斯大学运输研究中心的 Suh 等学者发现使用石灰岩做粗集料的 CRCP 具有较大的裂缝间距、较窄的裂缝宽度及更长的寿命,后来 Cho 等学者尝试对两种集料混合使用,但效果不理想。

(4) 纵向配筋率

La Coureiere 等学者的研究表明裂缝间距一般会随着钢筋用量的增加而降低。

美国《力学-经验法公路设计指南》认为在美国(主要是寒冷地区)0.6%~0.8%的配筋率会产生较好的裂缝开裂模式和性能。La Coureiere 等研究人员在野外调查表明,增加钢筋用量会减少冲断和提高平整度。美国《力学-经验法公路设计指南》研究表明,某纵向配筋率是否合适像板厚一样依赖于施工条件和其他设计因素。

(5)纵向钢筋的埋置深度

Gharaibeh 等学者研究表明,钢筋越靠近路表,裂缝宽度越小,冲断也越少,但是会造成施工困难。美国《力学-经验法公路设计指南》建议在离路表 8.8cm 到板中这段深度内放置钢筋。得克萨斯州施工指南中对厚度超过 330mm 的混凝土板建议采用双层配筋(Won 等)。

(6)裂缝传荷能力

美国《力学-经验法公路设计指南》研究表明,裂缝传荷能力对直接造成冲断的纵向裂缝非常重要,传荷系数应在 95% 以上。Jeong 指出,由混凝土路面性能表明,基层侵蚀、集料嵌挤的损失、钢筋的锈蚀、过宽的裂缝和其他类型的接缝损坏会减小裂缝剪切刚度。

(7)板宽

一般情况下,板宽与车道宽度相同。有少数工程也使用宽的路面板以提高路面性能。Tang 等学者的野外调查和研究表明,较宽的路面板使得车辆的轴载远离板的自由边,从而减少板边顶面的横向拉应力,因而减少边缘冲断的产生。

(8)横向加筋

横向加筋主要用于固定纵向钢筋。但部分研究表明,横向裂缝经常与横向钢筋的位置重合(源自美国《力学-经验法公路设计指南》)。

(9)纵向接缝处的传荷能力

Zollinger 等学者研究指出混凝土板与路肩之间的连接越强,板顶的拉应力越小,冲断越少。

(10)基层

混凝土板与基层之间的黏结影响裂缝的间距。放在沥青稳定基层上的 CRCP 的裂缝模式比较理想,而采用无结合料的碎石作为基层时裂缝间距较大。Zollinger 认为在水泥稳定基层上设一层薄的沥青混凝土层效果比较理想。如果连续配筋混凝土(Continuous Reinforced Concrete, CRC)直接修筑在水泥稳定碎石或贫混凝土上,基层和面层之间需要使用润滑剂,以减小层间黏结,防止反射裂缝的产生。Darter 研究指出基层模量和强度越高,冲断就越小。基层侵蚀造成的不均匀支撑对冲断也有很大影响。Heckel 认为在开级配排水层上的 CRCP 容易破坏。南达科他州修建的 CRCP 过早出现了严重的横向裂缝,Johnston 等将 LTPP

数据根据基层类型划分成几个子数据库,则该路的横向裂缝与粒料基层对应的回归方程比较吻合。综合以上情况,基层类型对 CRCP 的长期性能有较大的影响。

此外,底基层、路肩、地下排水系统和路基处治等也影响 CRCP 的性能。

1.1.2 规范中 CRCP 设计指标和设计方法

设接缝的普通水泥混凝土路面最主要的病害是板底的横向疲劳开裂,因此设计时主要控制车辆荷载和环境荷载作用下板底的纵向拉应力不超过混凝土的疲劳强度。而板底的横向疲劳开裂在 CRCP 中很少,CRCP 中影响行车的病害主要是冲断,故需根据 CRCP 的冲断等病害建立相应的设计指标和设计方法。

美国混凝土学会(American Concrete Institute, ACI)、波特兰水泥工作者协会(Portland Cement Association, PCA)和 1993 年版的 AASHTO(美国各州公路工作者协会)中 CRCP 板厚设计均采用接缝式水泥混凝土路面设计方法,只是作了若干修正。1993 年版的 AASHTO 规范中钢筋用量的确定依据静力平衡的关系,采用维托公式来计算最小配筋率。最小配筋率应满足下面两个条件:混凝土的最大拉应力不大于极限拉应力;裂缝处钢筋的最大拉应力不大于其屈服强度。得克萨斯州运输部提出以下钢筋用量设计标准(Cho 等):①平均裂缝间距为 0.9~2.4m;②裂缝宽度小于 0.64mm,以避免水进入路基;③钢筋应力小于钢筋的屈服强度。

美国《力学-经验法公路设计指南》中 CRCP 设计以冲断和平整度作为基本的指标,将裂缝宽度作为一个附加指标。在确定设计标准时,必须满足一定的可靠度的要求。冲断会严重影响路面的平整度,规定在 95%的可靠度水平下冲断数(10~20)/mile^①比较合适。平整度的容许值由用户确定。过宽的裂缝会降低裂缝处的传荷能力,会导致冲断的发生,规定最大裂缝不能宽于 0.02in^②,裂缝处的传荷能力不能低于 95%。

美国《力学-经验法公路设计指南》指出,冲断的产生起源于相邻横向裂缝之间的纵向裂缝的形成,纵向裂缝的发展与横向弯曲应力造成的累积疲劳损伤有关,因此,通过研究形成纵向裂缝的累积疲劳损伤来预测冲断的发展。

美国《力学-经验法公路设计指南》提出的冲断预估模型如下:

$$PO = \frac{A}{1 + \alpha \cdot FD^3} \quad (1.1)$$

式中:PO——预估的每英里的冲断数;

①1mile=1 609.344m。

②1in=0.025 4m。

FD——累积疲劳损伤；

A, α, β ——校正系数，分别为 105.26、4.0、-0.38。

需要指出，当横向接缝处的传荷能力较强，而且板底（尤其是纵向接缝处）支撑条件良好时，板顶的横向弯曲应力很小，疲劳损伤累积速度很慢，产生冲断所需的时间可能无限长。基于以上原因，美国《力学-经验法公路设计指南》把横向接缝处的传荷能力和板底支撑条件作为两个最重要的设计因素。

美国《力学-经验法公路设计指南》基于平均的横向裂缝间距和平均的横向裂缝宽度进行冲断预估，包括以下 11 个步骤。

①列表输入所有所需的数据。

②处理交通数据，计算等效轴载作用次数。

③处理路面温度数据，将不同小时沿板厚非线性变化的温度转化成等效的线性温度梯度。

④确定裂缝间距。准确地预测裂缝模式对于 CRCP 的设计是很重要的。裂缝模式包括裂缝间距、裂缝宽度。而大的裂缝间距会增加裂缝的宽度以及降低裂缝的传荷能力。如果对于 CRCP 进行预切缝，要么裂缝间距已知，反之，平均裂缝间距可以利用下式计算：

$$\bar{L} = \frac{\left[f_t - C\sigma_0 \left(1 - \frac{2\zeta}{H} \right) \right]}{\frac{f}{2} + \frac{U_m P_b}{c_1 d_b}} \quad (1.2)$$

式中： $\bar{L}$ ——平均裂缝间距(in)；

f_t ——混凝土抗拉强度(psi^①)；

f ——基层摩擦系数；

U_m ——黏结应力峰值(psi)；

P_b ——纵向钢筋含量(%)；

d_b ——纵向钢筋直径(in)；

c_1 ——第一黏结应力系数；

H ——板厚(in)；

ζ ——钢筋埋置深度(in)；

C ——Bradbury's 翘曲应力系数；

σ_0 ——Westergaard's 正应力系数。

①1psi=6 894.76Pa。

⑤计算每月内裂缝宽度和 LTE。纵向钢筋深度处的裂缝宽度计算公式如下:

$$cw = \max \left[L \cdot \left(\epsilon_{shr} + \alpha_{PCC} \Delta T_{\zeta} - \frac{c_2 f_{\sigma}}{E_{PCC}} \right) \cdot 1\,000 \cdot CC, 0.001 \right] \quad (1.3)$$

式中: cw ——纵向钢筋深度处的平均裂缝宽度;

L ——裂缝间距(in);

ϵ_{shr} ——无限制条件下混凝土的干缩应变(10^{-6});

α_{PCC} ——混凝土线膨胀系数($^{\circ}\text{F}^{-1}$);

ΔT_{ζ} ——每一季节在钢筋深度处,混凝土温度相对于混凝土硬化温度的下降值($^{\circ}\text{F}^{-1}$);

c_2 ——第二黏结力系数;

f_{σ} ——在钢筋深度处混凝土中的纵向最大拉应力(psi);

E_{PCC} ——混凝土弹性模量(psi);

CC ——当地校正系数。

裂缝处的荷载传递能力和刚度对于 CRCP 的性能是非常重要的。裂缝抗剪能力与裂缝宽度和季节有关,影响路面的裂缝传荷系数(记作 LTE)。完好接缝的初始抗剪切能力计算公式如下:

$$s_{oi} = 0.05 \cdot h_{PCC} \cdot e^{-0.032cw_i} \quad (1.4)$$

式中: s_{oi} ——对于时间增量 i 的裂缝初始抗剪切能力;

h_{PCC} ——板厚(in)。

同时,可以计算不同时间内的抗剪切能力损失,从而得到路面使用年限内任一时刻裂缝的抗剪切能力。

确定出裂缝的抗剪切能力以后,横向裂缝的刚度可以按照下式计算:

$$\lg J_c = a \cdot e^{-\left(\frac{J_s-b}{c}\right)} + d \cdot e^{-\left(\frac{t_f}{f}\right)} + g \cdot e^{-\left(\frac{J_s-b}{c}\right)} \cdot e^{-\left(\frac{t_f}{f}\right)} \quad (1.5)$$

式中: J_c ——横向裂缝处的刚度;

a, b, c, d, e, f, g ——系数;

s ——剪切能力;

J_s ——路面板与路肩之间的接缝的荷载传递。

在 LTE 能够被用于预测临界的疲劳应力前,必须考虑基层类型和纵向配筋对其影响,计算公式如下:

$$LTE_{TOT} = 100 \times \left\{ 1 - \left[\frac{1}{1 + \lg^{-1} \left[(0.214 - 0.183 \frac{a}{l} - \lg J_c - R) / 1.18 \right]} \right] \left(1 - \frac{LTE_{base}}{100} \right) \right\} \quad (1.6)$$

式中: LTE_{TOT} ——由于集料嵌锁、钢筋加固以及基层支撑所产生的裂缝总的 LTE;

l ——相对刚度半径;

a ——荷载作用半径(in);

R ——加固钢筋所提供的残余荷载传递能力;

LTE_{Base} ——基层对于裂缝 LTE 的贡献。

⑥计算混凝土板的纵向边缘支撑的损失。如果板边缘的支撑损失严重,将会造成临界应力的增加,进而会加速疲劳损伤的累积,促进冲断的发展。

⑦处理每月的相对湿度数据。湿度变化会产生湿度翘曲应力。以月为时间单位,将湿度的变化等效为温度的变化,规范中给出了换算公式。在应力计算时,将该等效温度变化加到等效线性温度变化中。

⑧计算临界应力。考虑不同的轴载类型、荷载水平、温度梯度和荷载横向位置等对于 CRCP 进行力学分析,计算板顶面的临界横向应力。

⑨确定横向裂缝刚度和 LTE 的衰减。车辆荷载的反复作用会导致裂缝抗剪能力的衰减,衰减公式如下:

$$\Delta s_i = \sum_j \left[\frac{0.005}{1 + \left(\frac{cw_i}{h_{PCC}} \right)^{-5.7}} \right] \left(\frac{n_{ji}}{10^6} \right) \left(\frac{\tau_{ij}}{\tau_{refi}} \right) ESR, \quad \frac{cw_i}{h_{PCC}} \leq 3.7 \quad (1.7)$$

$$\Delta s_i = \sum_j \left[\frac{0.068}{1 + 6 \cdot \left(\frac{cw_i}{h_{PCC}} - 3 \right)^{-1.98}} \right] \left(\frac{n_{ji}}{10^6} \right) \left(\frac{\tau_{ij}}{\tau_{refi}} \right) ESR, \quad \frac{cw_i}{h_{PCC}} > 3.7 \quad (1.8)$$

式中: Δs_i ——每种荷载水平 j 、每种荷载作用次数累积得到的裂缝抗剪能力损失;

cw_i ——时间增量 i 的裂缝宽度(in);

n_{ji} ——荷载水平 j 时的荷载作用次数;

τ_{ij} ——横向裂缝由于水平 j 的荷载所导致的剪应力;

τ_{refi} ——从混凝土板测试得到的参考剪应力(psi);

ESR——考虑荷载横向分布的等效剪切率。

若混凝土板承受更多的荷载作用次数,将每个时间增量下的抗剪切能力损失叠加可以得到某一时刻之前总的抗剪切能力损失。

⑩计算疲劳损伤。增量分析用于评价混凝土板由于横向弯拉造成的疲劳损伤。分析期被分为多个每月一次的时间增量,对每个时间增量进行单独分析。混凝土板的温度条件在一天内均持续在变化,对路面的结构响应有很大的影响,故温度梯度的影响要分小时进行考虑。

对所有时间增量的疲劳损伤累加得到总的疲劳损伤。对于不同的时间增量,

部分参数需要调整。

对于每个时间增量,计算第 j 个荷载水平的荷载作用次数 n_{ij} 。预估轴载谱,得到每个轴型的轴载分布,进而计算每个时间增量下的最大板顶横向拉应力。

利用最大弯拉应力(σ_{ij})和弯拉强度可以计算最大容许的荷载作用次数(N_{ij}),公式如下:

$$\lg N_{ij} = C_1 \cdot \left(\frac{MR_i}{\sigma_{ij}} \right)^{C_2} - 1 \quad (1.9)$$

式中: N_{ij} ——时间增量 i 内荷载水平 j 的容许作用荷载作用次数;

σ_{ij} ——时间增量 i 内荷载水平 j 所产生的应力;

MR_i ——在时间增量 i 时的混凝土模量(psi);

C_1, C_2 ——校正系数。

将各个时间增量、各个荷载水平下的疲劳损伤按照 Miner 原理累加可以得到总的疲劳损伤,公式如下:

$$FD = \sum \frac{n_{ij}}{N_{ij}} \quad (1.10)$$

式中:FD——在目前的裂缝间距条件下,设计期限内板临界位置处的累积疲劳损伤。

⑪确定冲断的数量

总的疲劳损伤确定以后,可以利用冲断预估模型计算得到每英里内的平均冲断数。

如果冲断数超出规范的要求,可以对设计参数进行以下更改:增加混凝土板厚、增加纵向配筋率、减小配筋的深度、增加混凝土的强度、减小混凝土线膨胀系数、增加最大集料尺寸、采用高强防侵蚀的基层等。然后按照上述 11 个步骤重新预估冲断数。

采用上述的冲断预估模型进行的 CRCP 设计有 50% 的可靠度。在有些情况下,需要提高可靠度水平。在不同可靠度水平下的平均冲断数可按下式计算:

$$PO_R = PO + Z_R S_P \quad (1.11)$$

式中: PO_R ——在可靠度水平 R 下的冲断数(个/mile);

PO ——在可靠度水平 50% 下的冲断数(个/mile);

Z_R ——在给定可靠度水平 R 下的标准正态偏差;

S_P ——在平均的冲断水平下 PO 的标准偏差(个/mile)。

CRCP 的平整度受初始平整度、冲断以及路基土通过 200 号筛孔的百分率和冰冻指数等环境因素的影响。美国《力学-经验法公路设计指南》提出的 CRCP 平

整度预测模型如下:

$$IRI_M = IRI_I + C_1 \cdot PO + C_2 \cdot SF \quad (1.12)$$

式中: IRI_I ——初始 IRI (in/m);

PO ——各种严重程度的冲断数(个/m);

SF ——环境因素, $SF = AGE \cdot (1 + 0.556FI) \cdot (1 + P_{200}) \times 10^{-6}$

AGE ——路龄(年);

FI ——冰冻指数;

P_{200} ——路基土通过 200 号筛孔的百分率(%);

C_1 ——3.15;

C_2 ——28.35。

上式预测得到的平整度具有 50% 的可靠度, 类似冲断同样可以得到不同可靠度水平下的 CRCP 平整度。

1.1.3 CRCP 结构分析与设计

(1) 力学分析

CRCP 的第一个程序称作 CRCP-1, 在国家公路合作研究计划(NCHRP)的资助下产生于 20 世纪 70 年代中期(Mc Cullough 等)。1991 年, Won 等学者对原有 CRCP 程序进行改进, 建立了 CRCP-5, 它可通过改变混凝土抗拉强度来反映材料的变化, 并且还包括疲劳预估模型。Dossey 和 Mc Cullough 等为具有不同粗集料的混凝土建立了归一化的养生曲线, 这些曲线及修正后的病害预估模型包含在 CRCP-7 中(Jimenez 等)。1995 年, 所有以前版本的 CRCP 程序被合成一个程序, 称作 CRCP-8, 它简化了使用者的输入过程(Won 等)。但由于该程序采用过于简化的一维分析, 其使用有一定的局限性。1996 年, 一项研究通过考虑温度和湿度沿板厚的非线性分布来扩展 CRCP-8 的适用性。作为该研究的成果之一, Kim 等建立了二维有限元模型。1998 年, 得克萨斯州运输部门扩展了该项研究, 建立了 CRCP-9(Kim 等)。为降低计算成本, CRCP-9 采用二维有限元模型。Kim 和 Won 为增加二维有限元模型的计算精度, 对三维有限元模型也作了计算, 并对两者之间的误差进行分析。直到 CRCP-9, 都采用 Westergard 方程进行静态单轴车辆荷载作用下应力分析。为了考虑运动的双轴荷载的影响, Kim 等研究人员提出了新的荷载应力分析程序, 并组合到 CRCP-10 中。计算机程序 CRCP-10 利用有限元、频域变换分析、可靠度等理论和方法对 CRCP 进行应力分析。它考虑了温度的变化和干缩沿板厚的非线性分布、翘曲的影响、混凝土蠕变的影响、钢筋与混凝土之间