

文章编号:1671-1637(2013)04-0001-07

连续配筋混凝土路面裂缝间距特性

张 脩^{1,2}, 胡圣能³, 赵鸿铎¹, 赵队家²

(1. 同济大学 道路与交通工程教育部重点实验室, 上海 201804; 2. 山西省交通科学研究院
黄土地区公路建设与养护技术交通行业重点实验室, 山西 太原 030006;
3. 华北水利水电大学 土木与交通学院, 河南 郑州 450011)

摘 要:分析了 AASHTO—1993 和《力学经验法路面设计指南》(MEPDG)中连续配筋混凝土路面(CRCP)平均裂缝间距模型特点,现场采集了 29 个 CRCP 试验段共计 1 171 条裂缝间距数据,对裂缝间距数据进行了归类、统计分析、分布拟合和方差分析。分别确定了 AASHTO—1993 和 MEPDG 模型参数,并利用采集到的裂缝间距数据对 2 类模型进行了有效性验证。分析结果表明:CRCP 裂缝形态可划分为 6 类;4 参数 Dagum 分布能更好地拟合 CRCP 裂缝间距分布;相同配筋率不同板厚的 CRCP 平均裂缝间距没有显著差异;AASHTO—1993 模型高估了平均裂缝间距,误差为 0.13 m;MEPDG 模型显著低估了平均裂缝间距,误差为 1.7 m。

关键词:路面工程;连续配筋混凝土路面;裂缝间距;配筋率;力学经验法路面设计指南

中图分类号:U416.216.2

文献标志码:A

Characteristic of crack spacing for continuously reinforced concrete pavement

ZHANG Xiao^{1,2}, HU Sheng-neng³, ZHAO Hong-duo¹, ZHAO Dui-jia²

(1. Key Laboratory of Road and Traffic Engineering of Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 201804, China; 2. Key Laboratory of Highway Construction and Maintenance Technology in Loess Region, Shanxi Transportation Research Institute, Taiyuan 030006, Shanxi, China;
3. School of Civil Engineering and Communications, North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou 450011, Henan, China)

Abstract: The characteristics of average crack spacing models for continuously reinforced concrete pavement (CRCP) in AASHTO—1993 and *Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide* (MEPDG) were analyzed. A total of 1 171 crack spacing data were collected from 29 CRCP experimental sections. Classifying, statistical analysis, distribution fitting and variance analysis were conducted by using the data. The parameters of AASHTO—1993 and MEPDG models were determined respectively, and two models were validated by using the data. Research result shows that cracks can be classified into six types according to the patterns, and CRCP crack spacing distribution is subject to four-parameter Dagum distribution. The differences of CRCP average crack spacings for different slab thicknesses at the same reinforcement ratio are not significant. AASHTO—1993 model overestimates average crack spacing with an error of 0.13 m, MEPDG model tremendously underestimates average crack spacing with an error of 1.7 m. 8 tabs, 4 figs,

收稿日期:2013-03-18

基金项目:山西省自然科学基金项目(2013011027-1);山西省青年科技研究基金项目(2013021028-2);山西省交通建设科技项目(2013-1-10, 2013-1-11)

作者简介:张 脩(1980-),男,山西神池人,山西省交通科学研究院工程师,同济大学工学博士研究生,从事道路工程研究。

导师简介:赵鸿铎(1976-),男,浙江宁海人,同济大学教授,工学博士。

15 refs.

Key words: pavement engineering; continuously reinforced concrete pavement; crack spacing; reinforcement ratio; mechanistic-empirical pavement design guide

Author resumes: ZHANG Xiao (1980-), male, engineer, doctoral student, +86-351-7635087, xiaozhang2008@gmail.com; ZHAO Hong-duo (1976-), male, professor, PhD, +86-21-69580415, hdzhao@tongji.edu.cn.

0 引 言

连续配筋混凝土路面(CRCP)是由一系列开裂的板块在钢筋和集料嵌锁的作用下连接而成的。众所周知,CRCP中混凝土的疲劳损伤过程是由裂缝间集料嵌锁机理(即裂缝间的传荷能力)的退化引起的,这又会导致路表面弯拉应力的增加,最终形成CRCP的典型破坏模式——冲断^[1]。影响冲断破坏的关键因素是CRCP横向裂缝的特征,这些特征包括裂缝宽度、平均裂缝间距和裂缝走向形式。调查表明,CRCP裂缝发展模式在经过1到2年后趋于稳定^[2],拥有良好的裂缝走向形态和均匀分布的窄裂缝的CRCP具有较好的长期路用性能^[3]。研究认为,CRCP早期的横向开裂程度一般是由混凝土特性、环境温湿度、纵向钢筋的数量和布置位置决定的^[4-6],决定CRCP裂缝分布形态和裂缝宽度的一个重要因素是纵向配置的钢筋的数量和位置,因此,CRCP设计体系和方法中的一个核心问题是配筋设计,而配筋设计的关键问题是研究裂缝分布模式与配筋率、环境因素、荷载、材料等参数的数学关系。Won等最早提出了CRCP的配筋设计原则,即裂缝的平均间距、裂缝宽度和纵向钢筋应力随配筋率的提高而降低,其基本原理是纵向钢筋数量的增加一般会导致混凝土面层受到更大约束,最终使得混凝土需要更多数量的裂缝分散约束应力;同时,纵向钢筋数量的增加会使路面面层中的钢筋应力降低,最终使得路面横向裂缝更窄^[7-8]。经验表明,阻止CRCP产生冲断破坏的合理纵向配筋率的选取准则为:其产生的横向裂缝平均间距在一定范围内,裂缝宽度尽可能小,钢筋应力不能超过其允许应力。

本文以CRCP平均裂缝间距为研究对象。国内外使用较为广泛的裂缝间距模型是AASHTO—1993版和《力学经验法路面设计指南》(MEPDG)CRCP设计指南中的平均裂缝间距模型。中国最新版《公路水泥混凝土路面设计规范》(JTG D40—2011)中CRCP设计方法也基本借鉴了美国MEPDG的方法,其中平均裂缝间距模型完全相同,仅对复杂

计算过程中的部分参数(湿度和温度)做了简化处理,目前,尚没有学者对新版规范中CRCP的设计方法是否适用于中国交通和环境特点进行研究。有部分学者针对中国铺筑的CRCP的裂缝数据进行了调查分析,取得了一定的成果:陈锋等对2条CRCP试验路的横向裂缝数据进行了统计,研究表明横向裂缝间距的概率分布模型符合对数正态分布^[9];查旭东对湖南耒宜高速公路CRCP试验路进行了长期跟踪调查与检测,研究结果表明CRCP横向开裂分为3个阶段,而且平均裂缝间距与龄期之间呈现幂函数关系^[10];张艳聪等对一条隧道CRCP的7d龄期的裂缝长度、宽度和间距进行调查,结果表明裂缝间距分布在0.5~5.0m之间^[11];张脩等进一步对该隧道CRCP的裂缝数据进行了统计,结果表明AASHTO—1993裂缝间距模型高估了实际平均裂缝间距^[12]。

由以上分析可以看出,由于CRCP不是中国路面的主要形式,因此,中国对CRCP裂缝数据的统计研究较少,特别是针对中国CRCP的裂缝分布模式(裂缝间距)是否符合上述AASHTO设计指南模型这一问题的研究工作更少,而这一问题是属于模型的有效性验证研究工作范畴,是正确理解现行CRCP设计方法适用性与正确性的一大重要问题,同时也是提升中国CRCP设计技术的一个关键问题。

本文采集了实体CRCP工程的大量裂缝数据,分析和总结了裂缝分布形态特征,并进行了数理统计分析;利用采集的实体工程数据分别验证了AASHTO—1993版路面设计指南和MEPDG中平均裂缝间距模型的正确性。研究结果有助于提升对CRCP的裂缝分布模式的正确理解,同时也能检验AASHTO CRCP设计方法在中国的适用性,最终为工程人员正确合理设计CRCP提供指导。

1 裂缝间距模型

1.1 AASHTO—1993 模型

AASHTO—1993版路面设计指南在CRCP配筋率设计中规定了3项设计准则^[7]:平均裂缝间距

范围在 1.1~2.4 m 之间,最小裂缝间距是为了降低潜在的冲断破坏,最大裂缝间距是为了防止裂缝处的剥落;裂缝宽度应小于 1.0 mm,其目的是防止渗水和剥落;钢筋应力应不大于其极限拉伸强度的 75%,其目的是使钢筋在其允许应力的工作范围内。

通过对美国早期修筑的大量 CRCP 试验路的调查、统计和理论分析,AASHTO—1993 版路面设计指南提出了 CRCP 配筋率设计的经验计算公式和诺谟图,其中,平均裂缝间距和配筋率的关系为

$$P = [1.062 (1 + f_t / 6894)^{1.457} (1 + 0.5\alpha_s / \alpha_c)^{0.25} \cdot (1 + 0.04\varphi)^{0.476}] / [(3.278\bar{X})^{0.217} \cdot (1 + \sigma_w / 6894)^{1.13} (1 + 1000Z)^{0.389}] - 1 \quad (1)$$

式中: P 为配筋率(%); \bar{X} 为 AASHTO—1993 中平均裂缝间距(m); f_t 为混凝土劈裂抗拉强度(kPa); α_s 、 α_c 分别为钢筋和混凝土的热膨胀系数; φ 为钢筋或钢丝直径(mm); σ_w 为 CRCP 早龄期施工车辆作用产生的荷载应力(kPa); Z 为混凝土 28 d 的干缩应变值。

可以看出,AASHTO—1993 版路面设计指南 CRCP 裂缝间距模型有以下特点:属于经验法路面设计方法范畴,设计准则中的裂缝间距及宽度要求均由 20 世纪中叶美国修筑的 CRCP 的现场调查数据归纳总结而来,公式参数较少,较容易获得,经验性较强,力学意义不明确;配筋率设计公式未考虑基层和面层的摩阻力对裂缝间距的影响,而目前的研究成果认为较小的层间摩阻力有利于形成合理的裂缝分布形态;忽略了环境(温度和湿度)和材料特性对裂缝间距的影响;设计准则未直接反映路面使用性能指标,如路面国际平整度指数和冲断破坏数量。

1.2 MEPDG 模型

美国 MEPDG 第 1 次以路面使用性能作为直接设计标准,建立了各类路用性能的预测模型。指南中 CRCP 设计有 2 个基本指标,即冲断和平整度,必要时还可以将裂缝宽度作为一个附加指标。在确定设计标准时,MEPDG 中 CRCP 设计指南规定:在 95% 的可靠度水平下每英里冲断数为 10~20 个比较合适;钢筋埋置深度处的最大裂缝不能宽于 0.02 in(0.5 mm);裂缝处的传荷能力不能低于 95%;平整度的容许值由用户确定。在指南提出的基于 11 个步骤的冲断预测模型中,裂缝间距计算模型是一个重要的步骤。如果对于 CRCP 进行预切缝处理,那么裂缝间距已知,反之,MEPDG 给出平均裂缝间距模型为^[1]

$$\bar{L} = \frac{f_{t28} - C\sigma_0(1 - 2\zeta/h_{PCC})}{f/2 + U_m P_b / c_1 d_b} \quad (2)$$

$$U_m = 0.002k_1 \quad (3)$$

$$k_1 = 117.2f'_{c28} \quad (4)$$

$$C = 1 - \{2\cos(144/l\sqrt{8})[\tan(144/l\sqrt{8}) + \tanh(144/l\sqrt{8})]\cosh(144/l\sqrt{8})\} / [\sin(288/l\sqrt{8}) + \sinh(288/l\sqrt{8})] \quad (5)$$

$$l = \left[\frac{E_{PCC} h_{PCC}^3}{12(1 - \mu_{PCC})k_s} \right]^{1/4} \quad (6)$$

$$\sigma_0 = \frac{E_{PCC}\epsilon_{tot-\Delta_{max}}}{2(1 - \mu_{PCC})} \quad (7)$$

$$\epsilon_{tot-\Delta_{max}} = \alpha_{PCC}\Delta t_{eqv} + \epsilon_{\infty}r_e \quad (8)$$

$$\Delta t_{eqv} = \frac{R_{om}}{2(1.000 + 0.1116h_{PCC}^{3/2} - 0.565h_{PCC} + 0.685h_{PCC}^{1/2})} \cdot \left[1 - \exp\left(-\frac{h_{PCC}}{12\sqrt{\gamma_{PCC}^2}}\right) \right] \quad (9)$$

$$c_1 = 0.577 - 9.5 \times 10^{-9} \frac{\ln(\epsilon_{tot-\zeta_{max}})}{\epsilon_{tot-\zeta_{max}}} + 0.00502\bar{L}\ln(\bar{L}) \quad (10)$$

$$\epsilon_{tot-\zeta_{max}} = \alpha_{PCC}\Delta t_{\zeta_{max}} + \epsilon_{shr} \quad (11)$$

$$\epsilon_{shr} = \epsilon_{\infty}R_{PCC} \quad (12)$$

式中: \bar{L} 为 MEPDG 中平均裂缝间距; f_{t28} 为混凝土 28 d 劈裂抗拉强度; f 为基层摩擦因数; U_m 为粘结应力峰值; P_b 为纵向钢筋配筋率; d_b 为纵向钢筋直径; c_1 为第一粘结应力系数,根据平均裂缝间距种子迭代计算得到; h_{PCC} 为混凝土板厚; ζ 为钢筋埋置深度; C 为 Bradbury 翘曲应力系数; σ_0 为 Westergaard 正应力系数; k_1 为粘结滑移系数; f'_{c28} 为混凝土 28 d 抗压强度; l 为相对刚度半径; E_{PCC} 为混凝土弹性模量; μ_{PCC} 为混凝土泊松比; k_s 为地基反应模量; $\epsilon_{tot-\Delta_{max}}$ 为无约束时混凝土面层顶面与底面间的最大当量应变差; α_{PCC} 为混凝土热膨胀系数; Δt_{eqv} 为等效温度; ϵ_{∞} 为无约束时混凝土的最大干缩应变; r_e 为路面面层顶面与底面间的相对当量湿度差系数,查表求得; R_{om} 为利用最小季度温度获得的有效范围,查表求得; γ_{PCC} 为混凝土热扩散系数,查表求得; $\epsilon_{tot-\zeta_{max}}$ 为钢筋埋置深度处的混凝土最大总应变; $\Delta t_{\zeta_{max}}$ 为钢筋埋置深度处混凝土温度与硬化时温度的最大温差; ϵ_{shr} 为无约束时钢筋埋置深度处混凝土的干缩应变; R_{PCC} 为混凝土相对湿度。

可以看出,MEPDG 的 CRCP 配筋设计是力学经验法路面设计方法的体现,设计标准中的裂缝间距模型由力学原理推算而来,只是使用性能冲断预测的中间变量,裂缝间距模型不作为设计控制标准,这是和 AASHTO—1993 标准及中国规范标准的一

大区别。

MEPDG 在其研究项目中采用 LTPP 数据中的 8 个 Vandalia US40 CRCP 路段对裂缝间距模型做了标定,该路段基层采用粒料基层,标定的主要参数为基层摩擦因数^[1]。可以看出,MEPDG CRCP 裂缝间距模型的标定工作十分有限,模型的可靠性有待进一步验证。最近,美国伊利诺斯大学的先进的交通工程实验室(ATREL)的 Kohler 和 Roesler 采用铺筑于 2001 年 12 月的 5 个 CRCP 试验路段对 MEPDG CRCP 裂缝间距模型进行了验证研究,该路段基层为粒料底基层和柔性基层^[13]。结果表明,MEPDG 模型预测值大于实际平均裂缝间距观测值,误差范围为 0.22~0.40 m。在裂缝间距分布模型方面,统计数据表明,伊利诺斯大学试验路^[13]和 LTPP 试验路^[14]的裂缝间距数据均服从 Weibull 分布。

可以看出,MEPDG 裂缝间距模型在其开发过程中没有经过大量试验路数据的标定,而且目前的标定和验证研究工作没有针对贫混凝土基层 CRCP,但是中国的 CRCP 基本采用贫混凝土基层,因此,有必要利用中国的实体工程数据对 MEPDG 裂缝间距模型进行验证,以确认其正确性。

2 实例分析

2.1 工程概况及计算参数

本研究以太古(太原—古交)高速公路为实体工程,进行了 29 个 CRCP 试验路段的铺筑。太原—古交高速公路是山西省高速公路网规划的太原区域环的重要组成部分,为山西省晋煤外运的重要通道。太古高速公路设计全长 23.497 km,其中主线长 20.497 km。CRCP 试验路段分左右两线,其中右线为重交通荷载,路面结构形式为 18 cm 贫混凝土基层、26 cm CRCP 面层;左线为极重交通荷载,路面结构形式为 18 cm 贫混凝土基层、28 cm CRCP 面层。左右线 CRCP 配筋率均为 0.7%,钢筋网片布置于距离路表面上 1/3 处。试验路段于 2011 年 7~9 月铺筑,图 1 为修筑的 CRCP 路面实体工程。

为了验证 AASHTO—1993 和 MEPDG 裂缝间距模型的正确性,需分别按照 AASHTO—1993、MEPDG 模型进行平均裂缝间距的计算,本文采用的计算参数见表 1、2。

2.2 裂缝分布描述

现场裂缝观测表明,CRCP 浇筑后的 3~4 d 内,裂缝开始出现,平均裂缝间距随龄期增长而迅速下



图 1 CRCP 实体工程

Fig. 1 Real project of CRCP

表 1 AASHTO—1993 平均裂缝间距计算参数

Tab. 1 Calculation parameters of average crack spacing for AASHTO—1993

指标	取值	备注
混凝土劈裂抗拉强度/MPa	4	实测
钢筋与混凝土热膨胀系数比	1.32	AASHTO—1993 推荐值
荷载应力/kPa	0	交通关闭
钢筋直径/mm	16	现场实测
配筋率/%	0.7	现场实测

表 2 MEPDG 平均裂缝间距计算参数

Tab. 2 Calculation parameters of average crack spacing for MEPDG

指标	取值	备注
混凝土 28 d 劈裂抗拉强度/MPa	4	实测
混凝土 28 d 抗压强度/MPa	45	实测
混凝土板厚/m	0.27	左右线板厚均值
混凝土弹性模量/MPa	3.3×10^4	$E_{PCC} = \frac{10^5}{2.2 + 34.7/f'_{c28}}$
基层摩擦因数	6.6	MEPDG 推荐值
纵向钢筋直径/mm	16	设计指标
纵向钢筋配筋率/%	0.7	设计指标
相对当量湿度差系数	0.28	MEPDG 公式
混凝土热膨胀系数/ $^{\circ}\text{C}^{-1}$	7×10^{-6}	JTG D40—2011 推荐值
混凝土最大干缩应变	0.004 8	MEPDG 公式
混凝土相对湿度/%	75	MEPDG 公式

降,在 7 d 后,平均裂缝间距几乎不再变化,裂缝分布达到稳定。调查发现,CRCP 裂缝的形态主要可分为 6 类:第 1 类是垂直裂缝,这种裂缝较为常规,走向基本垂直于路面行车道中线,是理论上的典型横向裂缝,这类裂缝占裂缝总数的 83.5%;第 2 类是 Y 形裂缝,这可能是由于局部区域混凝土浇注不够均匀,在较大的应力作用下出现了破裂,当夹杂有

斜向裂缝时,这种裂缝便会出现,这种裂缝出现的比例也较大;第3类是倾斜裂缝,包括垂直倾斜裂缝和弧形倾斜裂缝,这类裂缝走向不与路面行车道中线垂直;第4类是弓形裂缝,这类裂缝两头对齐,中部向前(后)突出,成弓形,调查还发现有2条弓形裂缝结合在一起而形成“枣核”形裂缝;第5类是折线裂缝,这类裂缝由2到3条直线裂缝连接而成,连接角度可为钝(锐)角或直角;第6类是间断裂缝,这类裂缝是正在形成的裂缝,没有贯穿路面,未来可能发展为上述裂缝中的一类,这类裂缝仅占裂缝总数的2.6%。第2~5类裂缝占裂缝总数的13.9%。图2是根据现场调查结果归类后绘制的6类裂缝,图中裂缝尺寸不反映现场实际情况,只描述裂缝的走向和形态。图3是部分根据现场实际裂缝形态绘制的裂缝,图中裂缝尺寸等比例反映现场实际情况。调查还发现裂缝有如下特征。

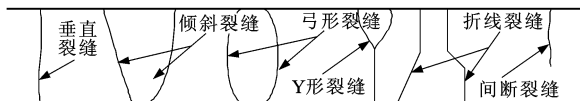


图2 CRCP裂缝类型概念

Fig. 2 Concepts of CRCP crack types

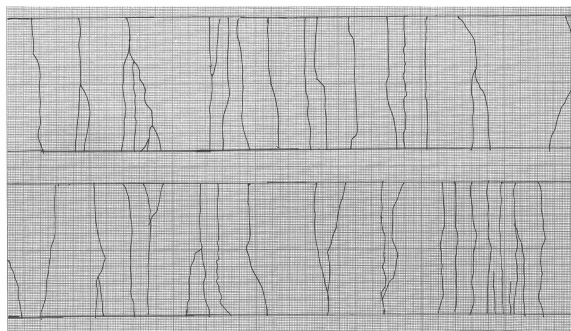


图3 实测CRCP裂缝模式

Fig. 3 Real CRCP crack pattern

(1)裂缝间距不均匀,长短不一,长的达22 m,短的仅5 cm。

(2)即使同一条裂缝,裂缝宽度也不完全一致。

(3)从板体侧面来看,裂缝也不完全呈竖直分布,有的与竖直方向偏斜较大,导致路表出现楔形的片状破坏。

(4)从裂缝的发展过程来看,裂缝并不是一次完全出现,而是逐渐发展,数量逐渐增加,趋向稳定;具体到某一条裂缝,也不完全是一次开裂贯通,而是在水平向、竖直向逐渐发展。

2.3 裂缝数理统计结果

本文调查统计了29个CRCP路段共计1 171条

裂缝,路段信息和平均裂缝间距统计结果见表3,不同板厚的平均裂缝间距统计数据见表4,可以看出,在配筋率相同的情况下(0.7%),不同板厚的平均裂缝间距几乎没有差别,而且方差分析(表5)也证实了左右线裂缝间距没有显著差异。为了拟合裂缝间距的分布函数,本文采用Kolmogorov-Smirnov检验对1 171条裂缝间距数据进行分布拟合,结果表明裂缝间距分布服从4参数Dagum分布,其分布函数 $f(x)$ 见式(13)。Kolmogorov-Smirnov检验结果见表6,Dagum分布曲线见图4,分布参数估计值见表7。

表3 CRCP路段信息和平均裂缝间距

Tab. 3 CRCP informations and average crack spacings

路段编号	板厚/ cm	路段长度/ m	路段宽度/ m	裂缝数量/ 条	平均间距/ m
1	26	100	4.25	40	2.50
2	26	100	6.25	21	4.76
3	26	135	4.25	43	3.14
4	26	135	6.25	18	7.50
5	26	135	4.25	56	2.41
6	26	135	6.25	12	11.25
7	26	241	4.25	71	3.39
8	26	241	6.25	65	3.71
9	26	109	4.25	35	3.11
10	26	109	6.25	30	3.63
11	26	110	4.25	43	2.56
12	26	110	6.25	40	2.75
13	26	80	4.25	28	2.86
14	26	80	6.25	20	4.00
15	28	215	6.25	35	6.14
16	28	215	4.25	41	5.24
17	28	215	6.25	50	4.30
18	28	215	4.25	65	3.31
19	28	241	6.25	98	2.46
20	28	241	4.25	90	2.68
21	28	109	6.25	45	2.42
22	28	109	4.25	26	4.19
23	28	110	6.25	36	3.06
24	28	110	4.25	33	3.33
25	28	80	6.25	26	3.08
26	28	80	4.25	19	4.21
27	26	120	2.50	26	4.62
28	26	120	3.75	21	5.71
29	26	120	4.60	38	3.16

$$f(x) = \frac{\alpha k [(x - \gamma) / \beta]^{ak-1}}{\beta \{1 + [(x - \gamma) / \beta]^\alpha\}^{k+1}} \quad (13)$$

式中: α 、 k 、 β 、 γ 为Dagum分布待估计参数; x 为裂缝

表 4 裂缝间距统计数据

Tab. 4 Statistical data of crack spacing

统计指标	CRCP 板厚/cm	
	26	28
样本总数	607	564
最小值/m	0.05	0.20
最大值/m	17.90	22.66
均值/m	2.71	2.73
标准差/m	2.21	2.59
偏度	2.67	3.52

表 5 不同板厚裂缝间距方差分析

Tab. 5 Variance analysis of crack spacing under different slab thicknesses

参数	平方和	自由度	均方	F 值	P 值
组间	0.226	10	0.22	0.039	0.843
组内	6 727.252	1 169	5.75		
总和	6 727.478	1 170			

表 6 K-S 检验结果

Tab. 6 K-S test result

样本大小	1 171				
统计值	0.030 66				
P 值	0.216 49				
置信度	0.20	0.10	0.05	0.02	0.01
临界值	0.031 36	0.035 74	0.039 68	0.044 36	0.047 60
是否拒绝?	否	否	否	否	否

表 7 Dagum 分布参数估计值

Tab. 7 Parameter estimated values of Dagum distribution

参数	k	α	β	γ
估计值	0.575 33	2.920 7	2.842 4	0.036 12

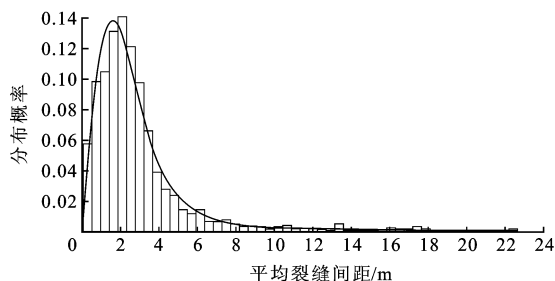


图 4 CRCP 裂缝间距 Dagum 分布

Fig. 4 Dagum distribution of CRCP crack spacing

间距。

2.4 计算与实测结果比较

为了验证 AASHTO—1993 和 MEPDG 中 CRCP 平均裂缝间距公式的正确性,将表 1、2 中的计算参数代入相应平均裂缝间距模型,并与 29 个 CRCP 实体路段的裂缝间距观察结果进行比较,结

果见表 8。

表 8 平均裂缝间距比较

Tab. 8 Comparison of average crack spacings

指标	计算结果		调查结果
	AASHTO—1993	MEPDG	
平均裂缝间距/m	2.85	1.02	2.72

对比 AASHTO—1993 和 MEPDG 计算结果与实测结果,可以得到如下结论。

(1)实际调查的平均裂缝间距范围在 1~3 m 之间,这符合具备良好路面使用性能的最优裂缝间距的设计目标^[15],说明实体工程裂缝模式分布良好,具有良好的路用性能。

(2)AASHTO—1993 模型高估了平均裂缝间距,这与文献[12]中采用另外一条 CRCP 进行验证的结论一致,模型结果误差较小,可满足工程要求。

(3)MEPDG 模型低估了平均裂缝间距,误差较大,这可能是由于模型中众多参数的取值不合理造成,也可能是由于模型本身存在缺陷,深层次的原因有待进一步研究。

3 结 语

(1)CRCP 裂缝的形态可分为 6 类:垂直裂缝、Y 形裂缝、倾斜裂缝、弓形裂缝、折线裂缝和间断裂缝。

(2)CRCP 试验路裂缝间距符合保持良好路面使用性能的范围(1~3 m),相同配筋率的不同板厚的 CRCP 裂缝间距没有显著差异。

(3)Dagum 分布比 Weibull 分布能更好地拟合 CRCP 裂缝间距分布。

(4)AASHTO—1993 模型高估了平均裂缝间距,但模型结果误差较小,满足工程要求;MEPDG 模型低估了平均裂缝间距,误差较大。

本文仅采用一条高速公路的数据对 AASHTO—1993 和 MEPDG 模型进行了验证,得到的结论有一定局限性。下一步的研究工作包括对试验路段裂缝特征进行长期观测,也有必要利用更多的裂缝数据来验证这些模型,并分析误差产生的原因,最终得到适合中国气候和交通环境特点的 CRCP 裂缝间距模型。

参考文献:

References:

- [1] ARA Inc. Guide for mechanistic-empirical design of new and rehabilitated pavement structures [R]. Washington DC: TRB, 2004.

- [2] ZOLLINGER D G. Investigation of punchout distress in continuously reinforced concrete pavement[D]. Urbana: University of Illinois at Urbana-Champaign, 1989.
- [3] ZOLLINGER D G, BUCH N, XIN D, et al. Performance of continuously reinforced concrete pavements, volume VI: CRC pavement design, construction, and performance [R]. Washington DC: FHWA, 1999.
- [4] WON M C, KIM S M, MERRITT D, et al. Horizontal cracking and pavement distress in Portland cement concrete pavement[C]// SPROULE W J, JANSEN S. Designing, Constructing, Maintaining and Financing Today's Airport Projects. Orlando: American Society of Civil Engineers, 2002: 1-10.
- [5] CHEN D H, LIN H H, SUN R. Field performance evaluations of partial-depth repairs[J]. Construction and Building Materials, 2011, 25(3): 1369-1378.
- [6] KIM S M, WON M C. Horizontal cracking in continuously reinforced concrete pavements[J]. ACI Structural Journal, 2004, 101(6): 784-791.
- [7] WON M C, HANKINS K, MCCULLOUGH B F. Mechanistic analysis of continuously reinforced concrete pavements considering material characteristics, variability, and fatigue[R]. Austin: University of Texas, 1991.
- [8] HUANG Y H. Pavement Analysis and Design[M]. 2nd Edition. Englewood Cliffs: Prentice Hall, 2004.
- [9] 陈锋锋,黄晓明,秦永春.连续配筋混凝土路面横向裂缝分布模型的研究[J].公路交通科技,2006,23(6):18-21.
CHEN Feng-feng, HUANG Xiao-ming, QIN Yong-chun. Study on the probability distribution model of continuously reinforced concrete pavement transverse cracks[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2006, 23(6): 18-21. (in Chinese)
- [10] 查旭东.连续配筋混凝土路面横向开裂发展规律[J].交通运输工程学报,2008,8(2):65-68.
- ZHA Xu-dong. Development laws of transverse cracking for continuously reinforced concrete pavement[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2008, 8(2): 65-68. (in Chinese)
- [11] 张艳聪,田 波,申俊敏,等.隧道内连续配筋混凝土路面早期裂缝发展研究[J].公路,2012(3):99-103.
ZHANG Yan-cong, TIAN Bo, SHEN Jun-min, et al. Development of early-age cracks of continuously reinforced concrete pavements in road tunnels[J]. Highway, 2012(3): 99-103. (in Chinese)
- [12] 张 脩,申俊敏,刘 海. AASHTO—1993 连续配筋混凝土路面配筋设计验证研究[J].中外公路,2012,32(4):72-75.
ZHANG Xiao, SHEN Jun-min, LIU Hai. Validation of AASHTO—1993 reinforcement design method for continuously reinforced concrete pavements[J]. Journal of China and Foreign Highway, 2012, 32(4): 72-75. (in Chinese)
- [13] KOHLER E, ROESLER J. Crack spacing and crack width investigation from experimental CRCP sections[J]. International Journal of Pavement Engineering, 2006, 7(4): 331-340.
- [14] SELEZNEVA O, DARTER M, ZOLLINGER D, et al. Characterization of transverse cracking spatial variability: use of long-term pavement performance data for continuously reinforced concrete pavement design [J]. Transportation Research Record, 2003(1849): 147-155.
- [15] TAYABJI S D, WU C L, PLEI M. Performance of continuously reinforced concrete pavements in the LTPP program[C]// International Society for Concrete Pavements. Proceedings of the 7th International Conference on Concrete Pavements; the Use of Concrete in Developing Long-Lasting Pavement Solutions for the 21st Century. Orlando: International Society for Concrete Pavements, 2001: 685-700.