

文章编号:1671-8879(2014)06-0001-06

基于参数变异性的连续配筋混凝土路面 横向裂缝分布预估方法

张洪亮¹,郝景贤²,王衍辉^{1,3},左志武^{1,4}

(1. 长安大学 公路学院,陕西 西安 710064; 2. 中交公路规划设计院有限公司,北京 100088; 3. 广东交通实业投资有限公司,广东 广州 510100; 4. 山东省交通运输厅公路管理局,山东 济南 250002)

摘 要:连续配筋混凝土路面(CRCP)的病害冲断主要发生在横向密集裂缝处,故裂缝的分布预估是准确预估冲断的基础。先进行环境荷载作用下 CRCP 应力和位移分析,然后考虑混凝土干缩、混凝土强度、混凝土线膨胀系数等参数沿路面纵向的变异性以及材料性能随时间的变化,采用增量分析方法和 Monte Carlo 方法对 CRCP 横向开裂进行了预估,最后对预估得到的裂缝间距进行了统计分析,并与 CRCP 的裂缝分布调查结果进行了对比。研究表明:由于采用了增量分析方法,可以考虑早期产生的裂缝对后期裂缝的影响;理论预估和实地调查得到的 CRCP 裂缝均服从 Weibull 分布,理论预估方法比较合理;混凝土强度、线膨胀系数、干缩以及基层与面板间摩阻系数的变异性还需实测确定。

关键词:道路工程;裂缝分布;Monte Carlo 方法;连续配筋混凝土路面;冲断;变异性;Weibull 分布
中图分类号:U416.217 **文献标志码:**A

Prediction method of the distribution of transverse cracks on continuously reinforced concrete pavement based on variability of parameters

ZHANG Hong-liang¹, HAO Jing-xian², WANG Yan-hui^{1,3}, ZUO Zhi-wu^{1,4}

(1. School of Highway, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China; 2. CCCC Highway Consultants Co Ltd, Beijing 100088, China; 3. Guangdong Communications Industrial Investment Co Ltd, Guangzhou 510100, Guangdong, China; 4. Highway Administration Bureau of Communications Department of Shandong Province, Jinan 250002, Shandong, China)

Abstract: The punchouts in continuously reinforced concrete pavement (CRCP) mostly develop on the CRCP panels where transverse cracks are spaced closely, so the accurate prediction of punchouts depends on the prediction of the transverse cracks distribution. In this paper, the stress and displacement of CRCP under environmental loads were analyzed. Then the distribution of transverse cracks was predicted by using incremental analysis method and Monte Carlo method, in which the variabilities of the parameters (concrete shrinkage, concrete strength, and concrete expansion coefficient) along the longitudinal direction were considered as well as the variation of material properties in time history. Finally, the statistics analysis was conducted to the predicted cracks and the results of cracks distribution were compared with the results obtained from field

收稿日期:2014-06-20

基金项目:《公路水泥混凝土路面设计规范》(JTG D40—2011)修订项目;中央高校基本科研业务费专项资金项目(CHD2011ZD010)

作者简介:张洪亮(1974-),男,山东枣庄人,教授,工学博士,E-mail:zhliang0105@163.com。

survey. Results show that the influence of the cracks occurring early on the development of the subsequent cracks can be considered by using the incremental analysis method. The distributions of the cracks both from theoretical analysis and from field survey obey Weibull's distribution, which indicates that the method to predict the distribution of transverse cracks proposed in this paper is reliable. The variabilities of concrete strength, concrete expansion coefficient, concrete shrinkage and bond-slip coefficient between concrete and base need to be tested in field in the future. 6 tabs, 1 fig, 17 refs.

Key words: road engineering; distribution of cracks; Monte Carlo method; CRCP; punchout; variability; Weibull's distribution

0 引言

连续配筋混凝土路面(CRCP)是指在路面结构内配置钢筋,并且不设接缝的路面结构,多用于高等级路面。冲断是 CRCP 的主要病害形式,多发生于密集裂缝处,是由 2 个间距很小(小于 0.6 m)的横向裂缝与路面边缘和纵向裂缝所围成的区域^[1]。冲断的产生会降低路面使用性能,严重影响车辆在道路行驶的安全性和舒适性。在美国《力学-经验法公路设计指南》中,平整度和冲断是 CRCP 的基本设计指标,该指南根据平均裂缝间距和平均裂缝宽度来预测冲断的发展^[2],但是美国长期性能试验路调查结果表明,绝大部分冲断出现在裂缝间距较小处以及裂缝宽度较大处^[2-4]。左志武等调查了中国耒宜(耒阳—宜章)高速公路、210 国道铜川段、山西省孙吴公路和粤赣高速公路中的 CRCP 的路况,也发现冲断是 CRCP 最主要的破坏形式,能占到影响行车病害的 90% 以上,而且大部分冲断发生在密集裂缝处^[5]。因此,美国《力学-经验法公路设计指南》中根据平均裂缝间距和平均裂缝宽度来预估冲断是不合理的,应该先研究裂缝间距和裂缝宽度的分布,然后根据密集裂缝或宽裂缝(主要是密集裂缝)的数量来预估冲断^[2]。

国内外学者对于 CRCP 裂缝分布进行了一定研究。Kohler 等认为可以用 Weibull 分布来描述裂缝宽度和裂缝间距的分布^[3-4];Jimenez 等发现粗集料类型、面层与基层之间的摩阻系数等影响裂缝宽度、裂缝间距,进而影响路面的寿命^[6-7];Johnston 等对环境因素和混合料设计对 CRCP 开裂的影响进行了研究^[8];Vetter 考虑温度下降、干缩等因素的影响,对裂缝间距在路面上的分布进行预估,建立了预估方程^[9];美国《力学-经验法公路设计指南》中的平均裂缝间距预估公式则由 Reis 等提出^[10];查旭东等现场调查得到了裂缝间距和裂缝宽度随时间的变化规律^[11-12];高英等调查发现裂缝间距服从正态

分布,采用可靠度理论研究了最佳的裂缝间距^[13-14]。

目前国内外对于 CRCP 裂缝间距的分布研究方法可以归纳为两类:第 1 种方法是试验路调查法;第 2 种方法是假设裂缝间距为混凝土抗拉强度、板厚、混凝土模量和干缩应变等参数的函数,各参数服从某种数学分布,那么经过直接积分或其他数值方法即可计算得到裂缝间距的数学分布。第 1 种方法获得的结果缺乏理论基础,很难在实际应用中推广;第 2 种方法假定在公路上一次产生所有的裂缝,根据公式计算裂缝间距,只是由于参数存在变异性,裂缝间距也存在变异性,并服从一定的数学分布。但实际上由于随路龄的增加导致的混凝土强度衰减以及环境应力反复作用导致的疲劳,裂缝是逐渐产生的。最关键的是,先期产生的裂缝间距影响后期的裂缝间距。

综上,裂缝分布研究是冲断预估的基础,应该先确定密集裂缝或宽裂缝的数量,然后再进行冲断预估。但目前没有从力学上分析横向裂缝前后出现的过程,不能从理论上得到不同时刻横向裂缝间距和宽度的分布。为此,本文先对 CRCP 进行环境荷载作用下应力和位移分析,然后考虑 CRCP 设计参数的变异性以及随时间的变化,通过增量分析和蒙特卡罗(Monte Carlo)方法研究横向裂缝出现的过程,得到不同时刻横向裂缝沿公路纵向的不均匀分布。

1 温降和干缩作用下 CRCP 位移和应力

CRCP 受到来自钢筋和地基的约束,假设混凝土应力沿截面服从均匀分布,从 CRCP 中取出长度为 dx 的板条微元体^[15],如下页图 1 所示。在微元体中,混凝土两端的应力分别为 σ_c 和 $\sigma_c + d\sigma_c$,并受到来自基层摩阻力 τ_c 和钢筋约束力 τ_s 的作用;在微元体中,钢筋两端的应力分别为 σ_s 和 $\sigma_s + d\sigma_s$,并受到来自混凝土约束力 τ_c 的作用。另外,设钢筋横截面积为 A_s ,直径为 d_s ,模量为 E_s ;混凝土模量为 E_c ,

面积为 A_c ;配筋率 $p=A_s/A_c$;混凝土与钢筋的位移分别为 u_c 和 u_s 。

根据图1由混凝土在 x 方向受力平衡 $\sum X=0$, 可得

$$\frac{d\sigma_c}{dx} - \frac{\pi d_s}{A_c} \tau_s - \frac{b}{A_c} \tau_c = 0 \quad (1)$$

由钢筋在在 x 方向的受力平衡 $\sum X=0$, 可得

$$\frac{d\sigma_s}{dx} + \frac{\pi d_s}{A_s} \tau_s = 0 \quad (2)$$

由混凝土和钢筋的本构关系可得

$$\sigma_c = E_c \epsilon = E_c \left(\frac{du_c}{dx} + \alpha_c \Delta T + \epsilon_{sh} \right)$$

$$\sigma_s = E_s \epsilon = E_s \left(\frac{du_s}{dx} + \alpha_c \Delta T \right)$$

式中: α_c 为混凝土线膨胀系数; ΔT 为混凝土温降; ϵ 为应变; ϵ_{sh} 为混凝土干缩应变。

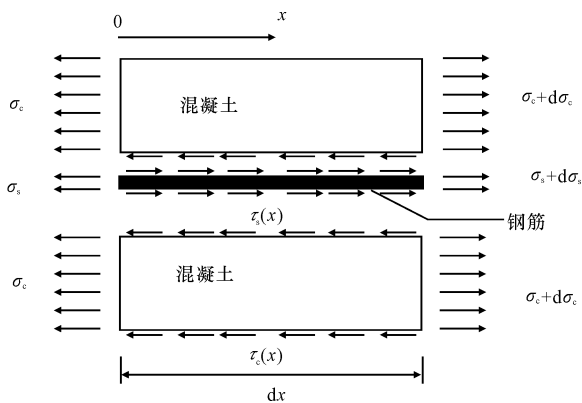


图1 考虑基层摩擦力的CRCP温度应力计算模型

Fig.1 Calculation model of CRCP temperature shrinkage stress when the base friction is considered

假设 $\tau_s = k_s s$, 其中 τ_s 为钢筋与混凝土间的粘结应力; s 为钢筋与混凝土间的相对滑移; k_s 为钢筋与混凝土间的粘结刚度系数。假设 $\tau_c = k_c u$, 其中 τ_c 为地基与路面板之间的摩阻力; u 为地基与路面板之间的相对水平位移; k_c 为地基与面板间的摩阻系数。

CRCP 边界条件 ($x=L$ 处为裂缝处截面)

$$u_c|_{x=0} = 0, \sigma_s|_{x=L} = 0$$

$$u_s|_{x=0} = 0, \sigma_c|_{x=L} = 0 \quad (3)$$

由式(1)和式(2)可得式(4)和式(5)^[16]

$$u_c = F_1 \sinh(r_1 x) + F_2 \sinh(r_3 x)$$

$$\sigma_c = E_c \left(\frac{du_c}{dx} + \alpha_c \Delta T + \epsilon_{sh} \right) = E_c [F_1 r_1 \cosh(r_1 x) + F_2 r_3 \cosh(r_3 x) + \alpha_c \Delta T + \epsilon_{sh}] \quad (4)$$

式中:

$$r_1 = \sqrt{\frac{1}{2} (a_1 + a_2 + a_3 + \sqrt{(a_1 + a_2 + a_3)^2 - 4a_2 a_3})};$$

$$r_3 = \sqrt{\frac{1}{2} (a_1 + a_2 + a_3 + \sqrt{(a_1 + a_2 + a_3)^2 - 4a_2 a_3})};$$

$$F_1 = \frac{(\alpha_c \Delta T + \epsilon_{sh}) b_2 \sinh(r_3 L)}{b_1 r_3 \sinh(r_1 L) \cosh(r_3 L) - b_2 r_1 \cosh(r_1 L) \sinh(r_3 L)};$$

$$F_2 = \frac{-(\alpha_c \Delta T + \epsilon_{sh}) b_1 \sinh(r_1 L)}{b_1 r_3 \sinh(r_1 L) \cosh(r_3 L) - b_2 r_1 \cosh(r_1 L) \sinh(r_3 L)};$$

$$a_1 = \frac{\pi d_s k_s}{A_c E_c}; a_2 = \frac{k_c b}{A_c E_c}; a_3 = \frac{\pi d_s k_s}{A_s E_s}。$$

对温度下降和干缩作用下 CRCP 收缩应力和位移进行了参数敏感性分析,结果表明,弹性模量对 CRCP 中应力和位移的影响很小;基层和面层间摩阻系数对混凝土应力有一定影响,不可忽略,其对混凝土位移和钢筋应力的影响较小,可以忽略;混凝土的线膨胀系数和干缩系数对混凝土位移、混凝土应力和钢筋应力均有较大影响;混凝土和钢筋之间的粘结滑移刚度对混凝土位移、混凝土应力和钢筋应力均有较大影响^[16](限于篇幅,参数敏感性分析的具体数据不再列出)。

根据以上分析结果发现,影响 CRCP 应力和位移的关键参数包括混凝土线膨胀系数、基层与面板间的摩阻系数和混凝土的干缩,在进行 CRCP 开裂预估时需要考虑它们的变异性。此外混凝土强度对 CRCP 开裂影响很大,其变异性也需考虑。

2 参数变异性

2.1 混凝土参数变异性

一般可认为混凝土的强度沿路面纵向服从正态分布,混凝土线膨胀系数和混凝土干缩的分布数据有限,本文也假设其沿路面纵向均服从正态分布^[17]。

2.2 面层与基层间摩阻系数变异性

基层对面板的摩阻作用主要取决于基层的类型和基层材料的表面特性,不同材料和类型的基层对 CRCP 摩阻作用不同。目前,在实体工程中缺少面层和基层之间摩阻系数的试验数据,本文假设面层与基层之间的摩阻系数沿道路纵向服从正态分布。

3 参数随时间的变化

3.1 混凝土强度和弹性模量随时间的变化

美国《力学-经验法公路设计指南》中提出的混凝土强度、模量与龄期的关系式为

$$H_{RATIO} = \alpha_1 + \alpha_2 \lg(N_{AGE}) + \alpha_3 [\lg(N_{AGE})]^2 \quad (6)$$

式中: H_{RATIO} 为给定龄期的混凝土相关性能(强度、

弹性模量等)与 28 d 混凝土性能(强度、弹性模量等)的比值; N_{AGE} 为样本龄期(年); α_1 、 α_2 、 α_3 均为回归系数。

为了预估混凝土强度和弹性模量的发展,测试了混凝土龄期分别为 7、14、28、90 d 的强度和弹性模量,测试结果见表 1。将其代入式(6)可以确定式(6)中的回归系数,进一步可以确定 H_{RATIO} 。直接抗拉强度可以通过其与抗弯拉强度和间接抗拉强度的关系式计算得到,混凝土直接抗拉强度分别为间接抗拉强度和抗弯拉强度的 0.9 倍和 0.67 倍^[2]。

表 1 不同龄期混凝土强度和弹性模量

Tab. 1 Strength and elasticity modulus of concretes in different ages

龄期/d	7	14	28	90
抗压弹性模量/GPa	22.6	29.2	36.1	37.8
抗弯拉弹性模量/GPa	29.57	32.06	34.23	38.06
抗弯拉强度/MPa	4.1	4.8	5.3	5.5
间接抗拉强度/MPa	1.6	2.4	3.1	3.6

3.2 混凝土干缩随时间的变化

混凝土最大收缩量计算式为

$$\epsilon_{\infty} = C_1 C_2 [0.019 \, 1w^{2.1} (f_c')^{-0.28} + 270] \times 10^{-6} \quad (7)$$

式中: w 为混凝土含水量(kg/m^3); f_c' 为 28 d 混凝土抗压强度(MPa); C_1 为水泥类型系数,I类取 1.0,II类取 0.85,III类取 1.1; ϵ_{∞} 为混凝土极限收缩应变(10^{-6}); C_2 为养护类型系数,蒸汽养护时取 0.75,水养护或 100%相对湿度养护时取 1.0,密封养护时取 1.2。

根据式(8)计算湿度对收缩量的影响

$$\epsilon_{sh} = \epsilon_{\infty} (1 - r_h^3) \quad (8)$$

式中: r_h 为环境湿度。

根据美国《力学-经验法公路设计指南》,在混凝土摊铺后的 35 d 内,混凝土收缩量随龄期线性变化,最大为 50%,且不受空气湿度的影响。考虑空气湿度逐月变化,混凝土摊铺 35 d 后的收缩量通过式(8)计算。

3.3 环境荷载随时间的变化

CRCP 横向开裂主要是环境荷载引起的,因而可从公路所在地的气象局收集得到环境荷载数据。

4 开裂预估

采用增量分析和 Monte Carlo 方法对 CRCP 开裂进行预估,具体步骤如下所述。

(1)参数输入:输入路面材料参数的变异规律参数和 CRCP 几何参数,材料变异规律指服从的分布

和变异系数;几何参数包括面板的尺寸、钢筋的直径和间距等。

(2)初始裂缝间距可确定为 100 m,令时刻 $t = 1 \text{ d}$ 。

(3)根据裂缝间距计算断面数。

(4)计算 t 时刻混凝土的弹性模量、强度和干缩。

(5)生成混凝土干缩随机数 ϵ_{shi} 、强度随机数 $[\sigma_i]$ 、基层与面板间摩阻系数随机数 k_{ci} 和混凝土线膨胀系数随机数 α_{ci} ,随机数的个数即为断面数。

(6)根据步骤(5)生成的随机数计算各断面处混凝土的应力值 σ_{ci} 。

(7)计算 $\sigma_{ci} - [\sigma_i]$,如果所有的 $\sigma_{ci} - [\sigma_i]$ 均小于 0,则 CRCP 不开裂,裂缝间距为原裂缝间距值;若存在 $\sigma_{ci} - [\sigma_i]$ 大于 0 的地方,找出最大的 $\sigma_{ci} - [\sigma_i]$,该断面处即为路面开裂处,计算开裂后的路面裂缝间距。

(8)令 $t = t + 1$,重复步骤(3)~(7),计算到 CRCP 设计年限末。

(9)对 CRCP 开裂后的裂缝间距进行统计。

(10)再重复步骤(3)~(9) $N - 1$ 次, N 为较大的自然数。

裂缝宽度可以通过裂缝两边混凝土位移的和得到,根据前面的分析可得到 t 时刻的裂缝间距分布,进而根据式(4)可得裂缝间距为 $2L$ 时 t 时刻裂缝宽度的分布。

5 裂缝分布统计

5.1 Weibull 分布

Weibull 分布记为 $W(m, \eta)$,其中 η 为尺度参数, m 为形状参数。如果随机变量 X 服从 $W(m, \eta)$,那么随机变量 $Y = X + \gamma$ 服从 $W(m, \eta, \gamma)$,其中 γ 称为门限参数。

Weibull 累计分布函数为

$$F(x) = 1 - e^{-\left(\frac{x-\gamma}{\eta}\right)^m} \quad (9)$$

Weibull 分布函数参数可通过最小二乘法确定。将式(9)进行两次对数变换得到式(10)。

$$\ln[\ln(\frac{1}{1-F(x)})] = m \ln(x - \gamma) - m \ln(\eta) \quad (10)$$

5.2 已建 CRCP 裂缝统计

对已建末宜高速公路(末阳—宜章)、粤赣高速公路(河源—赣州)、G210 铜川段和孙吴二级公路 CRCP 进行了裂缝间距调查。令 $Y = \ln[\ln \cdot$

$(\frac{1}{1-F(x)})]$, $X=m\ln(x)$, $a=m$, $b=-m\ln(\eta)$, 根据式(10)分别对各路段进行 Weibull 分布参数预估分析,结果见表 2。各式相关系数 R^2 均接近 1,证明裂缝间距服从 Weibull 分布,但参数不同。

表 2 调查得到的 Weibull 分布参数

路段	R^2	a	b	m	η
铜川段	0.981 4	1.725 9	-0.683 8	1.725 9	1.486 2
孙吴公路	0.984 4	1.536 8	-0.518 0	1.536 8	1.400 8
粤赣公路	0.908 4	1.641 0	-0.731 6	1.641 0	1.561 8
末宜公路	0.998 5	1.493 5	-0.652 9	1.493 5	1.548 3

5.3 预估裂缝统计

参考美国的经验,路面结构和材料参数取值如表 3、表 4 所示,环境参数采用济南市的环境荷载数据(限于篇幅,不给出详细数据)。混凝土的强度、线膨胀系数、干缩以及基层与面层之间的摩阻系数的变异系数分别记为 CV_1 、 CV_2 、 CV_3 和 CV_4 ,取值如表 5 所示。通过前面方法对 CRCP 开裂预估结果进行 Weibull 分布统计分析,不同变异系数组合情况下的结果如表 6 所示。结果表明,CRCP 裂缝间距在路面上的分布均服从 Weibull 分布,但是不同变异系数组合条件下的分布参数不同。

表 3 大小变化的参数取值

参 数	低	中	高	基本
混凝土特性				
路面厚度/mm	152.4	304.8	381.0	220.0
线膨胀系数/ $(10^{-6} \cdot ^\circ\text{C}^{-1})$	5.40	9.00	14.40	10.0
28 d 弹性模量/MPa	25 100	29 090	33 990	30 000
28 d 抗拉强度/MPa	2.96	3.65	4.48	3.65
256 d 干缩/ 10^{-6}	342	394	461	400
钢筋特性				
钢筋直径/mm	15.9	19.1	22.2	20.0
配筋率/%	0.40	0.60	0.80	0.79
粘结滑移关系				
基层摩阻系数/ $(\text{MPa} \cdot \text{mm}^{-1})$	0.02	0.04	4.18	0.04

表 4 大小不变的参数取值

钢筋线膨胀系数 $\alpha_s/^\circ\text{C}$	钢筋弹性模量 E_s/Pa	钢筋与混凝土间的粘结刚度系数 $k_s/(\text{Pa} \cdot \text{m}^{-1})$
9×10^{-6}	2×10^{11}	3×10^{10}

表 5 变异系数取值

组合	$CV_1/\%$	$CV_2/\%$	$CV_3/\%$	$CV_4/\%$
A	10	10	10	10
B	15	10	10	10
C	20	10	10	10

表 6 理论分析得到的 Weibull 分布参数

组合	R^2	a	b	m	η
A	0.955 6	2.662 7	-0.753 8	2.662 7	1.327 2
B	0.957 5	3.06 9	0.078 7	3.06 9	0.974 7
C	0.990 6	3.592 8	1.311 7	3.592 8	0.694 1

6 结 语

(1)由于分析 CRCP 裂缝分布采用的是增量分析方法,可以逐时间段研究裂缝间距的分布,故可以考虑先期产生的裂缝对于后期裂缝的影响,这与 CRCP 实际的开裂过程比较吻合。

(2)理论预估和实地调查得到的 CRCP 裂缝均服从 Weibull 分布,分布形式相同,说明本文提出的裂缝分布预估方法比较合理。

(3)影响 CRCP 裂缝间距分布的重要参数包括:混凝土强度、线膨胀系数、干缩以及基层与面板间的摩阻系数,这些参数受众多因素(包括材料性能、施工等)的影响。将来需对 CRCP 实体工程的裂缝分布和各种参数进行测试,检验和修正本文所提出的 CRCP 开裂预估方法。

参考文献:

References:

[1] American Association of State Highway and Transportation Officials. AASHTO guide for design of pavement structures; 1993[R]. Washington DC: American Association of State Highway and Transportation Officials, 1993.

[2] Transportation Research Board of the National Academies. Guide for mechanistic-empirical design of new and rehabilitated structures, NCHRP 1-37A [R]. Washington DC: Transportation Research Board of the National Academies, 2004.

[3] Kohler E, Roesler J R. Nondestructive testing for crack width and variability on continuously reinforced concrete pavements[J]. Transportation Research Re-

- cord, 2006(1974):89-96.
- [4] Selezneva O I, Darter M I, Zollinger D G, et al. Characterization of transverse cracking spatial variability; using of LTPP data for CRCP design[J]. Transportation Research Record, 2003(1849):147-155.
- [5] 左志武, 张洪亮, 陈江. 连续配筋混凝土路面性能参数影响的试验[J]. 长安大学学报: 自然科学版, 2010, 30(1):23-29.
- ZUO Zhi-wu, ZHANG Hong-liang, CHEN Jiang. Test of effects of parameters on continuously reinforced concrete pavement (CRCP) performance[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2010, 30(1):23-29. (in Chinese)
- [6] Jimenez M, McCullough B F, Hankins K. Monitoring of siliceous river gravel and limestone 2 years after placement, and development of a crack width model for the CRCP-7 model [R]. Austin: University of Texas, 1992.
- [7] Zollinger D G, Buch N, Xin D, et al. Performance of continuously reinforced concrete pavements; Volume VII; summary [R]. Washington DC: Federal Highway Administration, 1999.
- [8] Johnston D P, Surdahl R W. Influence of mixture design and environmental factors on continuously reinforced concrete pavement cracking[J]. Transportation Research Record, 2007(2020):83-88.
- [9] Vetter C P. Stresses in reinforced concrete due to volume changes[J]. Transactions of the American Society of Civil Engineers, 1933, 98(2):1039-1053.
- [10] Reis E E, Mozer A C, Bianchini A C, et al. Causes and control of cracking in concrete reinforced with high-strength steel bars - a review of research[R]. Illinois: University of Illinois, 2000.
- [11] 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)
- [12] 顾兴宇, 董乔, 倪富健. 连续配筋水泥混凝土路面裂缝发展规律研究[J]. 公路交通科技, 2007, 24(6):37-40, 45.
- GU Xing-yu, DONG Qiao, NI Fu-jian. Research on crack progression of continuously reinforced concrete pavement[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2007, 24(6):37-40, 45. (in Chinese)
- [13] 高英, 黄晓明, 陈锋锋. 基于可靠度的连续配筋混凝土路面配筋率设计方法[J]. 东南大学学报: 自然科学版, 2009, 39(4):835-839.
- GAO Ying, HUANG Xiao-ming, CHEN Feng-feng. Reinforcement ratio design of continuously reinforced concrete pavement based on reliability[J]. Journal of Southeast University: Natural Science Edition, 2009, 39(4):835-839. (in Chinese)
- [14] 曹东伟, 胡长顺. 连续配筋混凝土路面裂缝间距的可靠性分析[J]. 交通运输工程学报, 2001, 1(3):37-41.
- CAO Dong-wei, HU Chang-shun. Reliability analysis of the crack spacing for continuously reinforced concrete pavement (CRCP) [J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2001, 1(3):37-41. (in Chinese)
- [15] 曹东伟. 连续配筋混凝土路面结构研究[D]. 西安: 长安大学, 2001.
- CAO Dong-wei. Research on structure of continuously reinforced concrete pavement [D]. Xi'an: Chang'an University, 2001. (in Chinese)
- [16] 王衍辉. 连续配筋混凝土路面横向裂缝分布预估研究[D]. 西安: 长安大学, 2010.
- WANG Yan-hui. Study on predicting transverse cracks distribution of continuously reinforced concrete pavement [D]. Xi'an: Chang'an University, 2010. (in Chinese)
- [17] 申爱琴. 水泥与水泥混凝土[M]. 北京: 人民交通出版社, 2004.
- SHEN Ai-qin. Cement and cement concrete[M]. Beijing: China Communications Press, 2004. (in Chinese)