

# 典型气候与施工条件下连续配筋水泥 混凝土路面配筋率指标研究

陈亮亮<sup>1</sup>, 李思李<sup>2,3</sup>, 陈娟<sup>1</sup>, 周长俊<sup>4</sup>

(1.云南省交通规划设计研究院 陆地交通气象灾害防治技术国家工程实验室, 云南 昆明 650041;  
2.哈尔滨工业大学 交通科学与工程学院; 3.交通运输部公路科学研究院; 4.大连理工大学 交通运输学院)

**摘要:** 配筋率是连续配筋水泥混凝土路面(Continuously Reinforced Concrete Pavement, 简称 CRCP)重要指标之一。钢筋主要用于约束混凝土收缩变形, 保证在自然开裂条件下横向开裂的宽度在允许范围内。针对中国幅员辽阔、气候条件差异大的情况, 该文使用自行开发的 RP\_TMP 程序, 根据美国 AASHTO 2002 路面力学一经验设计方法, 分别计算了西安、漠河、沈阳、南京、拉萨、乌鲁木齐、昆明等 7 个代表性地区在高温和低温施工季节时, CRCP 的平均开裂间距和裂缝宽度。参考欧美等国家 CRCP 的开裂控制指标, 确定了保证裂缝宽度在最不利季节时小于 0.5 mm 的所需配筋率, 可供工程技术设计与研究人员参考。

**关键词:** 道路工程; 连续配筋水泥混凝土; 施工条件; 配筋率; 开裂间距; 裂缝宽度

连续配筋水泥混凝土路面由于不设置接缝, 使水泥混凝土路面的行车舒适性和耐久性大大提高。其主要特征是在水泥混凝土中设置纵向连续的钢筋, 并允许水泥混凝土在钢筋的约束作用下自由开裂, 当配筋量与水泥混凝土体积比在适当范围时, 水泥混凝土的开裂将比较均匀, 并且裂缝宽度不超过规定值。1921 年, 连续配筋水泥混凝土路面最早在美国开始试验研究, 至今已经有近百年历史, 而中国从 1989 年才开始连续配筋水泥混凝土路面的试验路工作, 截至目前, 已经投入使用的 CRCP 屈指可数。美国 AASHTO 2002 力学一经验设计指南认为, 配筋设计的目的仅是为了限制水泥混凝土材料在环境因素影响下的开裂特性, 而不考虑配筋可能带来的对水泥混凝土自身荷载与温度应力影响。Ha 等介绍了美国主要几个修建 CRCP 较多的州所采用的典型配筋量, 这些配筋量的确定是经过所在州多年实践经验检验之后确定的, 技术可靠, 经济性最优。

由于中国在 CRCP 技术方面缺乏相关经验, 国内的 CRCP 工程出现了一些失败的案例。主要表现为 CRCP 开裂间距不规则, 裂缝宽度过大, 而一旦裂缝宽度超过允许值, CRCP 板块之间的嵌挤作用将丧失,

相邻板块之间的传荷能力会大幅降低, 受车辆荷载作用时混凝土板内的荷载应力增加, 并且基层受到冲刷损伤的概率大大增加。根据文献[4], 特定的环境条件下 CRCP 的开裂间距和裂缝宽度会受到外界环境的影响, 然而中国幅员辽阔, 不同地区的气候差异十分明显。气候上的差异可能导致配筋率水平的显著差别。该文选取西安、漠河、沈阳、南京、拉萨、乌鲁木齐、昆明作为所在气候一级分区的代表地区, 将历史气象数据输入到 RP\_TMP 计算软件, 进而使用自行开发的“连续配筋水泥混凝土路面配筋设计软件 V1.1”分别计算开裂间距的分布和满足裂缝宽度指标的配筋率水平, 供中国不同地区的工程设计人员参考。

## 1 主要技术指标确定

美国得克萨斯农工大学 Zollinger 等根据 Reis 的研究成果, 对 M-E PDG 中推荐的公式进行了改进, 水泥混凝土的裂缝开裂宽度为:

$$cw = \bar{L} (\epsilon_{shr} + \alpha_{PCC} \Delta T_{gm}) - \bar{L} \frac{c_2}{E_{PCC}} \left[ \frac{\bar{L} U_m \rho_s}{c_1 k_i d_b} + C\sigma_0 \right]$$

收稿日期: 2018-10-12

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金资助项目(编号: 51608239); 云南省交通规划研究院科技项目(编号: ZL-2017-03); 云南省应用基础研究计划资助项目(编号: 2016FB099)

作者简介: 陈亮亮, 男, 博士, 高级工程师, E-mail: dongtianai@163.com

$$\left(1 - \frac{2\zeta}{h_{PCC}}\right) + \frac{\bar{L}}{2}f \quad (1)$$

式中:  $c\tau w$  为裂缝宽度;  $\bar{L}$  为 CRCP 的平均开裂间距;  $\epsilon_{shr}$  为无约束条件下, 水泥混凝土在钢筋位置的干缩应变;  $\alpha_{PCC}$  为混凝土的热膨胀系数;  $h_{PCC}$  为水泥混凝土板厚度;  $\Delta T_{\zeta m}$  为钢筋深度混凝土温度与混凝土硬化温度的差;  $\rho_s$  为配筋率(%);  $d_b$  为钢筋的直径;  $\zeta$  为钢筋到混凝土板顶的距离(m);  $E_{PCC}$  为混凝土的弹性模量;  $f$  为根据 AASHTO 推荐值确定的基层摩阻系数;  $C$  为 Bradbury 修正系数;  $c_1$  为第一黏结应力系数, 可由式(2)确定;  $c_2$  为第二黏结应力系数, 可由式(3)确定, 一般取值为 0.7~0.9。

$$c_1 = 0.577 - 9.499E - 9 \frac{\ln \epsilon_{tot-\zeta}}{\epsilon_{tot-\zeta}^2} + 0.005 \, 02L (\ln L) \quad (2)$$

$$c_2 = a + \frac{b}{k_1} + \frac{c}{L^2} \quad (3)$$

$$k_1 = 117.2 \times f_c \quad (4)$$

$$a = 0.760 \, 6 + 1 \, 772.5 \times \epsilon_{tot-\zeta} - 2 \times (\epsilon_{tot-\zeta})^2 \times 10^6 \quad (5)$$

$$b = 9 \times \epsilon_{tot-\zeta} \times 10^8 + 149 \, 486 \quad (6)$$

$$c = 3 \times (\epsilon_{tot-\zeta})^2 \times 10^9 - 5 \times \epsilon_{tot-\zeta} \times 10^6 + 2 \, 020.4 \quad (7)$$

其中:  $k_1$  为黏结系数;  $\epsilon_{tot-\zeta}$  为钢筋位置的总应变(一般为 150~600  $\mu\epsilon$ );  $f_c$  为水泥混凝土 28 d 抗压强度。

$U_m$  为黏结应力的峰值(MPa), 可由式(8)计算确定:

$$U_m = \frac{0.24k_1 E_{PCC} \epsilon_{tot-\zeta}}{1 + 3 \frac{d_b}{s_L}} \quad (8)$$

其中:  $s_L$  为配筋的间距;  $\sigma_0$  为 Westergaard 正温度应力系数, 可由式(9)确定:

$$\sigma_0 = \frac{E_{PCC} \epsilon_{tot-\Delta m}}{2(1 - \mu_{PCC})} \quad (9)$$

式中:  $\epsilon_{tot-\Delta m}$  为混凝土板顶和板底的等效应变差;  $\mu_{PCC}$  为水泥混凝土的泊松比。

使用单层钢筋时, AASHTO 建议的平均开裂间距的确定公式为:

$$\bar{L} = \frac{f_t - f_\sigma}{\frac{f}{2} + \frac{U_m \rho_s}{c_1 d_b}} = \frac{f_t - C \sigma_0 \left(1 - \frac{2\zeta}{h_{PCC}}\right)}{\frac{f}{2} + \frac{U_m \rho_s}{c_1 d_b}} \quad (10)$$

式中:  $f_t$  为混凝土的劈裂强度(MPa);  $f_\sigma$  为钢筋层位水泥混凝土的最大应力(MPa)。

需要指出: 用式(1)~(10)计算的裂缝宽度只是整个路面的长度方向上裂缝宽度分布(纵向和横向)的平均值, 由于受到温度变化的影响, 不同的季节, 甚至一天当中的不同时刻, 裂缝的宽度都会有所不同, 该文所计算也只是典型气候与施工条件下, 在最不利季节时 CRCP 开裂间距和裂缝宽度的平均值。

## 2 典型气候与施工条件

CRCP 保持良好的工作状态主要依靠自然开裂情况下, 裂缝的宽度不超过规定值, 该文选取裂缝宽度作为控制指标, 计算 CRCP 在不同地区不同施工条件下的裂缝宽度, 根据试算的结果确定不同地区所适用的最低配筋率。

从式(1)中可以看出, 影响裂缝宽度的主要因素包括混凝土板厚度、材料参数、配筋率和钢筋埋置深度处混凝土温度与混凝土硬化温度的差。为分析中国不同地区气候条件对 CRCP 开裂的影响, 假设 CRCP 采用相同的路面结构, 钢筋水泥等材料均按照相应国家标准生产不存在性质上的差异, 仅改变所在区域气象条件参数。

根据中国 JTJ 003—1986《公路自然区划标准》, 分别从公路自然区划 7 个一级区划选取一个代表地区, 并根据其历史气象资料计算开裂控制指标。使用 JTJ D50—2017《公路沥青路面设计规范》附录 G 中所提供的最冷月平均气温作为计算的气象条件输入, 计算钢筋埋置深度处混凝土温度与混凝土硬化温度的差  $\Delta T_{\zeta m}$ 。由于施工期间的气象条件对混凝土的硬化温度和开裂间距有显著影响, 为说明施工条件对以上两个指标的影响, 分别选取所在地区的最热月份和最冷允许施工月份。根据 JTJ/T F30—2014《公路水泥混凝土路面施工技术细则》: 当摊铺现场连续 5 昼夜的平均气温高于 5  $^{\circ}\text{C}$ , 夜间最低气温为 -3~5  $^{\circ}\text{C}$  时, 则属于低温施工, 并需采取相应措施; 当连续 5 昼夜平均气温低于 5  $^{\circ}\text{C}$ , 且夜间最低气温低于 -3  $^{\circ}\text{C}$  时, 就必须停工。根据施工细则和气象资料, 选择最冷月平均气温高于 5  $^{\circ}\text{C}$ , 且最低气温高于 -3  $^{\circ}\text{C}$  的条件作为最冷施工月。当遇到所在城市常年平均气温不低于 5  $^{\circ}\text{C}$ , 比如昆明, 则选择月平均气温为年度最低的月份作为最冷施工月。所选地区的气象数据信息, 如表 1 所示。水泥混凝土路面的硬化温度受到外界环境、水泥水化热、施工时机、路面结构层厚度及热物参数以及钢筋埋置深度等因素的共同影响。使用数值模拟方法可以充

分考虑环境、材料和结构参数共同作用对路面内温度场分布的影响。使用表 2 中所列路面结构参数,并将表 1 中的气象数据输入到 RP\_TMP 计算程序中,拟定最小配筋率水平为 0.50%,按照 0.05% 的步长,通过试算,当最不利季节的裂缝宽度小于 0.5 mm 时,确定所在地区的需用配筋率。

表 1 所选地区气象数据

一级自然区划	地名	最热月平均气温/℃	最热月平均最高气温/℃	最热月平均最低气温/℃	最冷施工月平均最高气温/℃	最冷施工月平均最低气温/℃	最冷月平均最高气温/℃	最冷月平均最低气温/℃
北部多年冻土区	漠河	18.6	25.8	11.7	16.4	1.4	-21.5	-36.2
东部湿润季冻区	沈阳	24.9	29.0	20.6	15.7	4.2	-4.9	-16.2
黄土高原干湿过渡区	西安	27.5	32.2	21.9	9.5	4.2	4.8	-3.8
东南湿热区	南京	28.1	31.9	24.5	15.9	6.1	7.0	-1.2
西南潮暖区	昆明	20.3	24.4	14.3	15.3	2.2	15.3	2.2
西北干旱区	乌鲁木齐	23.9	30.4	18.6	13.4	3.2	-7.6	-16.7
青藏高寒区	拉萨	16.2	23.2	9.7	12.7	-2.1	7.2	-9.1

表 2 路面结构厚度

结构层	材料	厚度/cm	配筋率/%
面层	连续配筋水泥混凝土	28	0.50(满足裂缝宽度指标)
基层	水泥稳定级配碎石	25	
底基层	级配碎石	20	
路基	土基	—	

表 3 高、低温施工季节水泥混凝土的硬化温度

地名	钢筋位置水泥混凝土硬化温度/℃		温度差 $\Delta T_s$ /℃
	高温季节	低温季节	
漠河	19.04	16.90	2.50
沈阳	25.34	10.56	14.78
西安	27.94	17.14	10.80
南京	28.54	16.35	12.19
昆明	20.74	15.75	4.99
乌鲁木齐	24.34	13.86	10.48
拉萨	16.67	13.16	3.51

3 计算结果

3.1 硬化温度

施工温度对水泥混凝土路面的开裂有显著影响。对于季节性气候变化明显的地区,选择不同时机进行混凝土的摊铺,对水泥路面的硬化温度场影响很大。面层厚度为 28 cm,设定钢筋埋置深度为距离板顶 12 cm。所选地区最热月、最冷月进行施工时,使用 RP\_TMP 软件,钢筋埋置深度处的混凝土硬化时的温度计算结果如表 3 所示。

其中,漠河由于夏季气温不高,而最冷施工月与最热施工月的温度差别不大,所以高低温施工季节的温度差  $\Delta T_s$  最小;昆明由于常年温度差较小,所以  $\Delta T_s$  也较小。对于季节分明的地区,高低温季节温差较大,如沈阳、西安、南京,则  $\Delta T_s$  超过 10℃。

3.2 平均开裂间距

根据施工条件和硬化温度,根据式(10)计算不同施工季节,对应不同配筋率的平均开裂间距,各地区平均开裂间距的计算结果如图 1~7 所示。

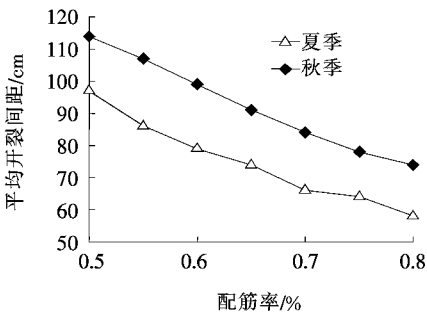


图 1 西安典型施工条件开裂间距确定

由图 1~7 可以看出:相同配筋率条件下,低温施工季节摊铺的 CRCP,其平均开裂间距要大于高温季节施工的间距。而不同季节的气象条件差异越大,则平均开裂间距的变化幅度越大。在漠河和拉萨,由于低温季节与高温季节温度变化幅度较小,所以开裂间距的变化幅度相对于其他地区较小。

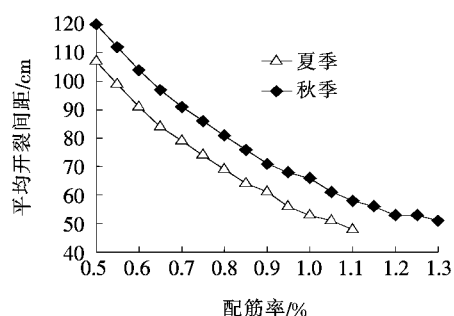


图 2 漠河典型施工条件开裂间距确定

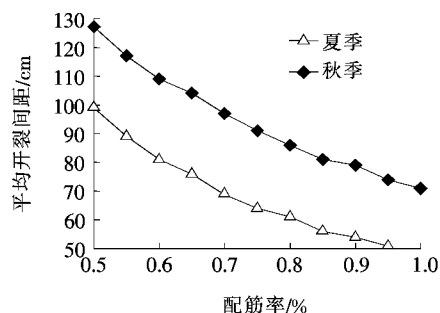


图 3 沈阳典型施工条件开裂间距确定

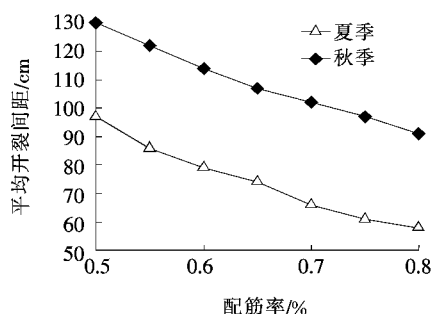


图 4 南京典型施工条件开裂间距确定

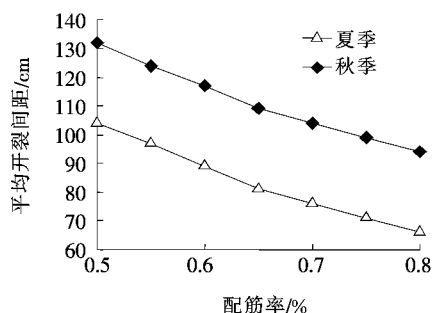


图 5 昆明典型施工条件开裂间距确定

### 3.3 最不利季节裂缝宽度

CRCP 最主要的两个开裂控制指标为开裂间距和横向裂缝宽度,其中裂缝宽度为强制性控制指标,而开裂间距则作为建议控制指标。然而在开裂控制上,各国所采用的指标并不一致:美国 AASHTO 86/93 设计标准所规定的最大开裂宽度为 1.0 mm;而 McCullough

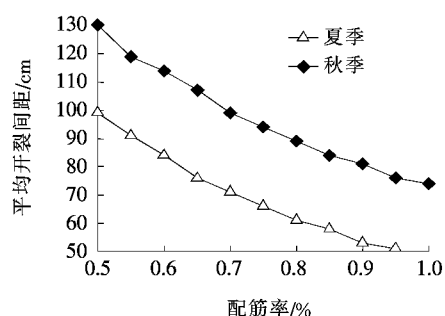


图 6 乌鲁木齐典型施工条件开裂间距确定

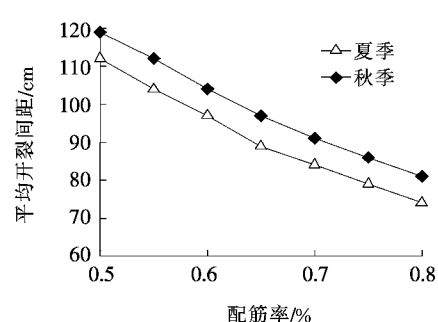


图 7 拉萨典型施工条件开裂间距确定

为了确定开裂宽度的控制指标,研究了裂缝宽度对钢筋锈蚀和基层冲刷损伤的影响,并建议最大的裂缝宽度控制为 0.58 mm;欧洲则要求最大开裂宽度不大于 0.4 mm;中国 JTG D40—2011《公路水泥混凝土路面设计规范》要求纵向钢筋埋置深度处的裂缝缝隙平均宽度不大于 0.5 mm。根据计算得到的对应配筋率的平均开裂间距和低温季节与水泥混凝土硬化温度的差值等参数,使用式(1)计算最不利季节的裂缝宽度,结果如图 8~14 所示。不同施工季节气象条件的差异对混凝土的平均开裂间距和裂缝宽度都有显著影响。根据前文的计算结果,由于夏季施工的 CRCP 平均开裂间距要小于低温季节施工的 CRCP,又根据式(1),平均开裂间距越大,则裂缝的宽度越大,尽管低温季节施工会降低混凝土的硬化温度,使钢筋深度处混凝土温度与混凝土硬化温度的差  $\Delta T_{\text{cm}}$  有所降低,但是在两

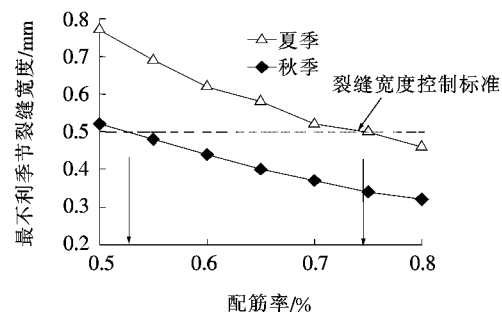


图 8 西安典型施工条件配筋率确定

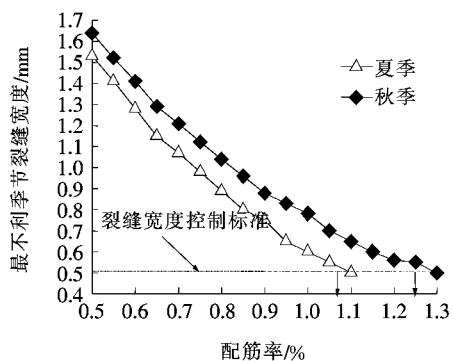


图9 漠河典型施工条件配筋率确定

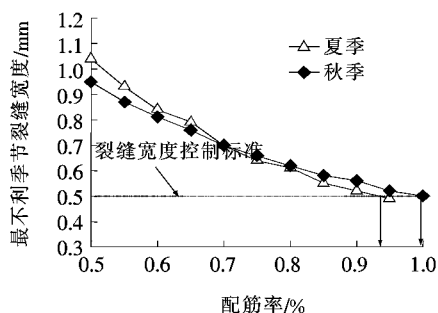


图10 沈阳典型施工条件配筋率确定

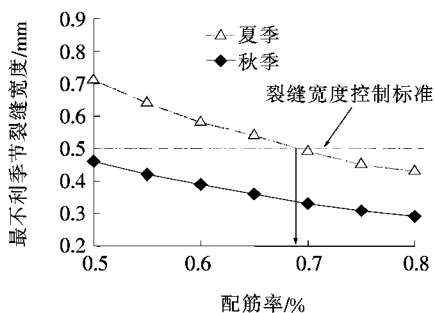


图11 南京典型施工条件配筋率确定

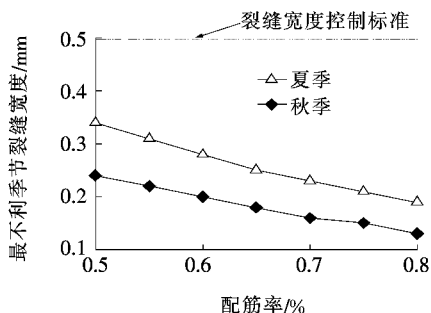


图12 昆明典型施工条件配筋率确定

者的交互作用下,低温施工季节摊铺的CRCP在最冷季节的裂缝宽度不一定小于夏季施工条件。

显然气候条件和施工条件对各地所应采用的配筋率水平影响显著,对于气候条件恶劣的中国东北地区、西北地区,配筋率甚至需要达到1.0%以上,才能保证

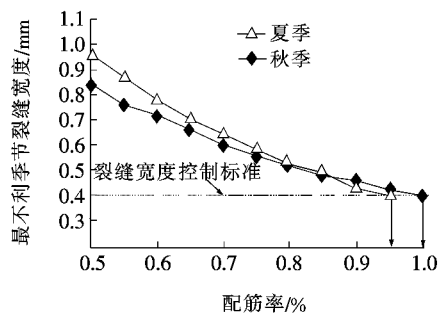


图13 乌鲁木齐典型施工条件配筋率确定

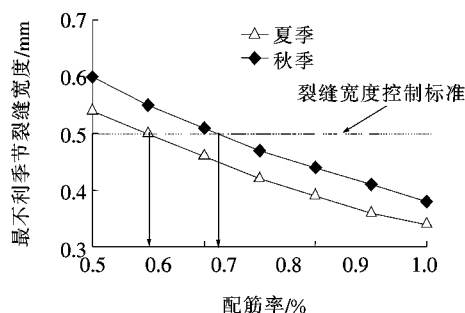


图14 拉萨典型施工条件配筋率确定

裂缝的宽度满足0.5 mm的控制标准,而在气候相对温和的昆明,即使使用0.5%的配筋率也能保证最不利季节的开裂宽度满足要求。一般情况,比如西安、南京在满足最不利季节裂缝宽度要求的条件下,低温季节施工时配筋率可以略有降低。但是对于漠河、拉萨、沈阳等地区,由于低温季节和高温季节的温差较小,加上高温季节施工时CRCP平均开裂间距减小,因此低温季节施工时,裂缝宽度会略有增加,使所需配筋率也会增加。

根据漠河地区开裂宽度的计算结果,若要在最不利季节的裂缝宽度满足使用要求,需要配筋率达到1.3%,若使用单层钢筋,钢筋间距可能无法满足2.5倍集料最大粒径的要求。

## 4 结论

(1) 中国幅员辽阔,各地气候条件差异较大。施工期气候条件与当地气候条件对CRCP的开裂行为影响显著,其中,施工期天气条件主要影响CRCP早期的开裂形成,影响指标主要为平均开裂间距。二者共同作用下,对CRCP的裂缝宽度产生重要影响,并最终影响CRCP的合理配筋率。

(2) 一般情况下,高温季节施工,由于白天施工的气温较高,水泥水化放热速度快,水泥混凝土板的温度

整体提高,混凝土钢筋位置处的硬化温度也会较高;若夜间温度下降幅度较大,那么混凝土的开裂自然增加,CRCP 的开裂间距会相对较短。

(3) 当高温与低温施工季节的气温差异较大时,进行低温季节施工可以明显降低所需配筋率;而当二者差异较小时,由于高温季节施工减小了横向裂缝的间距,那么也有可能低温季节施工时 CRCP 裂缝宽度较大,配筋率需有所提高。

(4) 由于影响因素交互作用,使用数值模拟分析的手段可以较好地辅助确定 CRCP 的配筋率。当前,由于中国 CRCP 实体工程数量较少,该文使用数值模拟分析方法所确定的不同地区的连续配筋水泥混凝土路面配筋率对指导实际工程具有较好的参考价值。

(5) 该文参考使用了欧美等国家的 CRCP 在最不利季节的开裂控制指标。通过计算分析,如果使用这一指标,对于高低温季节气候差异特别显著的东北或西北地区,需要较高的配筋率(超过 1.0%)才能满足开裂控制要求;而对于气候相对温和的西南或江南地区,则使用较低的配筋率(小于 0.5%)就能满足开裂控制的需要。结合欧美等国的经验,进一步说明气候条件是影响 CRCP 配筋率设计的关键因素。

#### 参考文献:

- [1] 陈亮亮.连续配筋水泥混凝土路面冲断破坏预估模型研究[D].哈尔滨工业大学博士学位论文,2014.
- [2] In. ARA, ERES Consultants Division. NCHRP Project 1-37A: Guide for Mechanistic-Empirical Design of New and Rehabilitation Pavement Structures[S]. Champaign, Illinois, USA: ARA, In., 2004.
- [3] Soojun Ha, Jungheum Yeon, Moon C. Won. CRCP ME Design Guide[S]. Lubbock, TX: Center for Multidisciplinary Research in Transportation, Texas Tech University, 2012.
- [4] 陈亮亮,权磊,许芸熙,等. CRC+AC 复合式路面配筋率设计指标研究[J]. 公路, 2017(1).
- [5] Lizhi Han, Liangliang Chen, Bo Tian. Influence of Paving Condition on Longitudinal Cracking of Portland Cement Concrete Pavement[C]. 3rd International Conference on Concrete Pavements Design, Construction and Rehabilitation, ICCPDCR 2013, Shanghai, China, 2014: 204-211.
- [6] L. L. Chen, D. C. Feng, L. Quan. Inclusion of Built-In Curling Temperature Profile in Curling-Stress Determination for Rigid Pavement[J]. Journal of Transportation Engineering, 2015, 141(4): 06014003.
- [7] Ronald J. Reis, Jr. John D. Mozer, Albert C. Bianchini, Clyde E. Kesler. Causes and Control of Cracking in Concrete Reinforced with High-Strength Steel Bars—A Review of Research[R]. Champaign, IL: Engineering Experiment Station, University of Illinois, 1965.
- [8] Ashraf R. Mohamed, Will Hansen. Prediction of Stresses in Concrete Pavements Subjected to Non-Linear Gradients[J]. Cem. Concr. Compos., 1996, 18(6): 381-387.
- [9] O. Selezneva, M. Darter, D. Zollinger, S. Shoukry. Characterization of Transverse Cracking Spatial Variability: Use of Long-Term Pavement Performance Data for Continuously Reinforced Concrete Pavement Design[J]. Journal of Transportation Record, 2003, 1849: 147-155.
- [10] Jagat S. Dhamrait, Richard K. Taylor. Behavior of Experimental CRC Pavements in Illinois[R]. Springfield, Illinois: Illinois Department of Transportation, Bureau of Materials and Physical Research, 1979.
- [11] Manuel Gutierrez De Velasco, B. Frank McCullough. Summary Report for 1978 CRCP Condition Survey in Texas[R]. Austin, TX, USA: Center for Transportation Research, The University of Texas at Austin, 1981.
- [12] Young-Chan Suh, Ken Hankins, B. F. McCullough. Early-Age Behavior of Continuously Reinforced Concrete Pavement and Calibration of the Failure Prediction Model in the CRCP-7 Program[R]. Center for Transportation Research, The University of Texas at Austin, 1992.
- [13] 陈亮亮,许芸熙,李思李,等.美国连续配筋水泥混凝土路面开裂行为控制指标与措施研究综述[J]. 中外公路, 2017(3).
- [14] B. F. McCullough, A. Abou-Ayyansh, W. R. Hudson, J. P. Randall. Design of Continuously Reinforced Concrete Pavement for Highways[R]. Center for Highway Research, University of Texas, 1975.
- [15] B. F. McCullough. Criteria for the Design, Construction and Maintenance of Continuously Reinforced Concrete Pavement[R]. Center for Transportation Research (CTR), 1983.
- [16] Dongya Ren. Optimisation of the Crack Pattern in Continuously Reinforced Concrete Pavement[D]. Delft, the Netherlands: Delft University of Technology Ph.D. Degree Thesis, 2015.
- [17] 陈亮亮,周长俊,权磊.美国水泥混凝土路面板硬化温度梯度研究进展综述[J]. 中外公路, 2016(4).