

连续配筋水泥混凝土路面的温度翘曲应力研究

黄晓明, 白 桃, 李 昶, 金 晶

(东南大学 交通学院, 江苏 南京 210096)

摘要: 通过素混凝土板温度翘曲应力的 Westergaard 理论解和有限元数值解的对比, 论证了素混凝土板计算模型的适用性, 得到了板体自重对板的温度翘曲应力不产生影响这一重要结论. 以三向弹簧模拟钢筋和混凝土之间的粘结, 对素混凝土板中加入钢筋前后板体特征点位的温度翘曲应力变化情况作了计算分析, 认为配筋层位、粘结刚度系数、温度梯度、板长、板厚及配筋率等参数对板中加入钢筋前后温度翘曲应力变化值的影响可以忽略. 结果表明, Winkler 地基模式下连续配筋路面单独板的温度翘曲应力可以沿用与其尺寸一致的普通水泥混凝土板的温度翘曲应力计算方法.

关键词: 连续配筋水泥混凝土路面; 有限元; 弹簧; 温度翘曲应力

中图分类号: U 416.216

文献标识码: A

Temperature Warping Stress Study on Continuously Reinforced Concrete Pavement

HUANG Xiaoming, BAI Tao, LI Chang, JIN Jing

(School of Transportation, Southeast University, Nanjing 210096, China)

Abstract: Temperature warping stress of plain concrete plate calculated by Westergaard formula and finite element method (FEM) was comparatively analyzed. It demonstrates the applicability of plain concrete plate model, and an important conclusion is drawn that body weight produces no effect on warping stress. Based on three-direction spring simulating the bond-slip relation between steel and concrete, warping stress alteration of feature points before and after reinforcement was calculated. Influence of the following parameters on the change of warping stress before and after reinforcement could be neglected, such as reinforced layer location, bond-slip stiffness coefficient, temperature gradient, plate length, plate thickness and reinforcement ratio. The results show that temperature warping stress calculation method of separate

plate of continuously reinforce concrete pavement (CRCP) under Winkler foundation is the same as its size of ordinary Portland cement concrete slab.

Key words: continuously reinforced concrete pavement (CRCP); finite element method (FEM); spring; temperature warping stress

连续配筋混凝土路面(CRCP)是高性能混凝土路面的重要类型之一, 其特点是纵向连续配置足够数量的钢筋, 施工时不设接缝. 普通混凝土路面板在降温 and 干缩作用下会产生许多横向随机裂缝, 置入钢筋可以控制裂缝的宽度, 确保荷载的传递. 但是, 钢筋改变了混凝土板的受力状态, CRCP 断裂后形成的单独板与同尺寸素混凝土板的温度翘曲应力计算公式是否一致有待商榷.

由于钢筋和混凝土界面以及边界条件的复杂性, 加入钢筋后混凝土板的温度翘曲应力理论解难以推导, 虽然目前已有部分关于 CRCP 单独板温度翘曲应力的理论研究, 但是这些理论一般建立在比较理想的假设前提下, 削弱了公式的适用性. 与普通水泥混凝土板相比, CRCP 断板翘曲应力状态改变的主要原因在于板中配置钢筋. 因此, 考察钢筋加入对素板的影响有助于 CRCP 单独板温度翘曲应力的求解. 本文结合既有的路面板翘曲应力理论解析解和 ABAQUS 有限元分析方法, 论述 Winkler 地基下 CRCP 板中钢筋对素混凝土板的温度翘曲应力影响.

1 素混凝土板的温度翘曲应力

1.1 Westergaard 公式

Westergaard 应力公式是用来计算 Winkler 地

收稿日期: 2010-04-21

基金项目: 交通部西部交通建设科技项目(6721001049)

第一作者: 黄晓明(1963—), 男, 教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为路面新结构与新材料. E-mail: huangxm@seu.edu.cn

通讯作者: 白 桃(1987—), 男, 博士生, 主要研究方向为路面新结构与新材料. E-mail: yixiaotian0113@126.com

基上的无限大无自重小挠度薄板的.有限尺寸混凝土路面温度翘曲应力的计算公式是利用 Westergaard 公式作近似计算得到的,其计算过程中假设矩形板四周的弯矩及横向剪应力为零,通过位移求解反算板中应力^[1].在车辆荷载作用下,路面的临界荷位一般处于顶面和底面的中心和板边中点,因此,温度翘曲应力计算也重点关注这些部位.图 1 所示为有限尺寸板,板中和板边的温度翘曲应力如下.

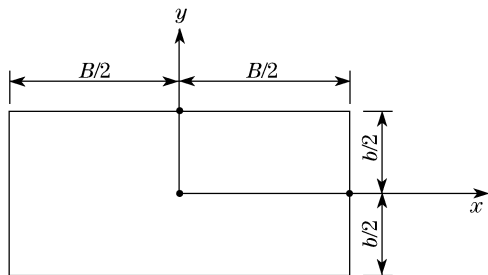


图 1 Westergaard 温度翘曲应力计算的有限尺寸板
Fig.1 Finite size plate for thermal stress calculation by Westergaard method

$$\begin{aligned} \text{板中: } \sigma_x &= \frac{E\alpha\Delta T}{2(1-\mu^2)}(C_x + \mu C_y), \\ \sigma_y &= \frac{E\alpha\Delta T}{2(1-\mu^2)}(C_y + \mu C_x). \\ \text{板边: } \sigma_x &= \frac{E\alpha\Delta T}{2}C_x, \sigma_y = \frac{E\alpha\Delta T}{2}C_y. \end{aligned}$$

其中: E, μ 分别为混凝土弹性模量和泊松比; α 为混凝土热膨胀系数; ΔT 为板上下表面温度差;

$$\begin{aligned} C_x &= 1 - \frac{2\cos \delta_B \operatorname{ch} \delta_B}{\sin 2\delta_B + \operatorname{sh} 2\delta_B}(\tan \delta_B + \tanh \delta_B); \\ C_y &= 1 - \frac{2\cos \delta_b \operatorname{ch} \delta_b}{\sin 2\delta_b + \operatorname{sh} 2\delta_b}(\tan \delta_b + \tanh \delta_b); \\ \delta_B &= \frac{B}{2\sqrt{2l}}; \delta_b = \frac{b}{2\sqrt{2l}}; \end{aligned}$$

刚度半径 $l = \sqrt[4]{\frac{Eh^3}{12(1-\mu^2)K}}$; K 为地基反应模量;
 h 为板厚.

1.2 素混凝土板温度翘曲应力的理论与数值解比较

ABAQUS 软件里面 Winkler 弹性地基可以使用接触分析里面的“elastic foundation”来实现^[2]. 钢筋和混凝土各自的材料参数见表 1^[3-4].

在混凝土板尺寸确定的情况下,温度梯度是计算面层板温度翘曲应力的主要参数.我国水泥混凝土面层的最大温度梯度^[5]根据所在地的公路自然区

划选用,见表 2.

表 1 钢筋和混凝土材料参数
Tab.1 Material parameters of steel and concrete

材料	E/Pa	μ	线膨胀系数 α
混凝土	3×10^{10}	0.167	1×10^{-5}
钢筋	2×10^{11}	0.300	9×10^{-6}

表 2 最大温度梯度推荐值
Tab.2 Recommended value of maximum temperature gradient

公路自然区划	Ⅱ, V	Ⅲ	Ⅳ, Ⅵ	Ⅶ
最大温度梯度/ ($^{\circ}\text{C} \cdot \text{m}^{-1}$)	88~83	90~95	86~92	93~98

如图 2 所示,素混凝土板长 3.00 m、宽 3.50 m、厚 0.26 m,取正温度梯度为 $90^{\circ}\text{C} \cdot \text{m}^{-1}$,地基反应模量 $K = 110 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{-1}$ ^[6]. 分别考虑板加自重和不加自重影响,计算板底中心 A 点和板底边中点 B, C 两点的拉应力. Westergaard 理论解和有限元数值解计算结果见表 3.

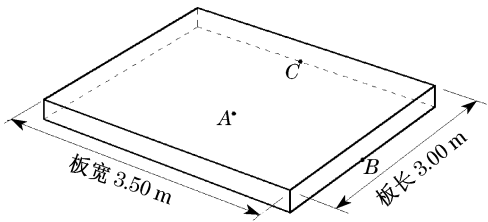


图 2 素板及特征点位
Fig.2 Plain concrete plate and feature points

表 3 Winkler 地基下理论与数值计算结果
Tab.3 Theoretical & numerical solutions under Winkler foundation

算法	拉应力/MPa			
	A 点		B 点	
	板长 方向	板宽 方向	板长 方向	板宽 方向
Westergaard 无自重素混凝土板	1.65	2.19	1.29	1.91
有限元计算无自重素混凝土板	1.53	2.12	1.21	1.90
有限元计算加自重素混凝土板	1.53	2.12	1.21	1.90

由于 Westergaard 公式是在假设板体长宽尺寸无限大的情况下推导出来的,因此在近似计算有限尺寸板的时候会与有限元计算的结果出现一定偏差.这可以解释表 3 中各点应力的理论解析解与数值解的差别^[7].

从表 3 可以得到两点结论:①有限元计算结果

与理论解析解基本相同,表明所选的 Winkler 地基板模型是适用的;②有限元计算结果表明混凝土自重对板的翘曲不产生影响。

2 板中配筋对断板温度翘曲应力的影响

曹东伟^[8]和胡长顺在计算连续配筋路面温度翘曲应力时,认为钢筋对板的抗弯刚度影响很小,温度梯度引起的板体弯曲应力与普通混凝土板相同,不同的是连续配筋路面中纵筋的拉伸会对板产生一个附加应力.由于板的变形相对于板的尺寸极小,因此在计算过程中假设裂缝处钢筋的应力保持为水平方向.他们借用 Ghosh 的板翘曲球面假设,得到板中面裂缝处的端部拉伸量,然后将它作为边界条件带入均匀温降解析解的通解方程,得到路面混凝土与钢筋的应力和位移解答.其计算结果表明钢筋变形引起的附加变形和应力很小,在 CRCP 配筋设计中可忽略不计。

在图 2 的素板中加入钢筋,并施以钢筋端部约束后,即形成连续配筋路面断裂之后的单独板模型.配筋方式为:钢筋置于板中,螺纹钢筋直径 18 mm,钢筋间距 15 cm,共 23 根,两边缘钢筋离板边缘距离 10 cm.如图 3 所示,施加正温度梯度 $90\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{m}^{-1}$ 的荷载,粘结刚度系数为 $34\text{ MPa}\cdot\text{mm}^{-1}$.

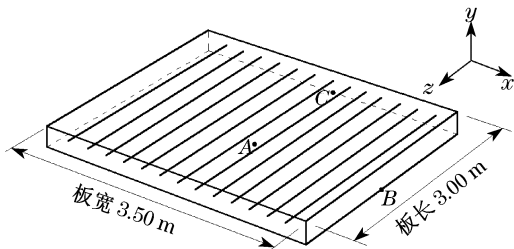


图 3 连续配筋单独板
Fig.3 Reinforced concrete plate

以三向弹簧^[9-11]模拟混凝土和钢筋的界面粘结,其中, X 和 Y 方向的弹簧刚度系数取值为 $1 \times 10^{15}\text{ N}\cdot\text{m}^{-1}$,用来模拟无穷大,以避免钢筋和混凝土的挤入变形, Z 方向的弹簧刚度系数通过粘结刚度系数进行转换

$$k = k_s \pi d_s \frac{L}{n} \quad (1)$$

式中: k 为弹簧刚度系数; k_s 为粘结刚度系数; d_s 为钢筋直径; L 为 CRCP 板长; n 为单根钢筋上弹簧布置个数。

根据式(1)计算得纵向弹簧的弹簧刚度系数为

$k = 9.6 \times 10^7\text{ N}\cdot\text{m}^{-1}$. 基于计算机性能的考虑,3 m 长的单根钢筋上纵向布置 61 个弹簧,全板纵向布置 $61 \times 23 = 1\,403$ 个弹簧,加上另外两个方向,总共布置 $1\,403 \times 3 = 4\,209$ 个弹簧.计算结果列于表 4。

表 4 Winkler 地基模式下特征点翘曲应力比较
Tab.4 Warping stress comparison of feature points under Winkler foundation

混凝土板类型	拉应力/MPa			
	A 点		B 点	
	板长方向	板宽方向	板长方向	板宽方向
素混凝土板	1.53	2.11	1.21	1.90
加筋混凝土板	1.58	2.12	1.25	1.85

从表 4 可以看出, Winkler 地基模式下,钢筋置于混凝土板中时,钢筋的加入对混凝土路面板的纵向翘曲应力影响在 0.04 MPa 左右,可以忽略.因此,可以认定, Winkler 地基模式下 CRCP 单独板的温度翘曲应力可以沿用与其尺寸一致的普通水泥混凝土板的温度翘曲应力计算方法。

3 加筋板温度翘曲应力的参数敏感性分析

连续配筋路面在板体裂缝基本稳定之后,各单独板除受钢筋和地基约束之外,还受到相邻板体的制约.在不考虑板底脱空的情况下,对于板间约束,荷载应力计算中主要考虑裂缝两边板体的竖向传荷问题,温度翘曲应力计算则因各板体温度变化的相似性而更多地考虑纵向传力问题.虽然裂缝处有时候会出现一些挤碎破坏,但是由于钢筋和地基约束的存在,现实中很少出现板体拱起现象.此外连续配筋路面裂缝本身也存在一定宽度,可相应释放部分变形应力.所以本文的温度翘曲应力分析中不考虑板体间的相互作用,只考虑裂缝处的钢筋约束作用,即对钢筋端部施加相应约束即可.加筋板温度翘曲应力的其他影响因素分析如下。

3.1 配筋层位

CRCP 配筋主要是为了限制裂缝宽度,一般情况下设置于混凝土板厚的上 1/3 到板中层位.按照板体受弯特性,在正温度梯度作用下板体中间拱起时,混凝土层位越靠上,其温度变化和位移变形越大.也就是说,当钢筋层位越靠上时,钢筋由于置身于混凝土中,它的温度变化和位移变形也会越大.钢筋在端

部严格受到约束的情况下,反过来施加于混凝土的作用可能越强.下文将就此猜测作出论证.

对图 3 中的钢筋层位置作调整,在板厚方向上分别取上 1/4,上 1/3,上 2/5 和板中位置,混凝土周围不设置约束,钢筋端部设置约束情况为:钢筋纵向位移完全约束,限制绕裂缝方向的旋转变形.

各计算点位的应力如表 5 所示.由表 5 可知,配筋层位对板的温度翘曲应力影响不大,钢筋的加入只是在较小程度上增加了混凝土板的截面模量,使得特征点上板长方向的应力稍有提升,在 0.05 MPa 左右,可以忽略.

表 5 不同配筋层位下各特征计算点位的应力
Tab.5 Stress of feature points when reinforce layer location changes

配筋层位	拉应力/MPa			
	A 点		B 点	C 点
	板长方向	板宽方向	板长方向	板宽方向
素板	1.53	2.11	1.21	1.90
上 1/4	1.57	2.12	1.25	1.89
上 1/3	1.58	2.12	1.26	1.87
上 2/5	1.58	2.12	1.26	1.88
板中	1.57	2.12	1.25	1.85

3.2 粘结刚度系数

将钢筋层置于混凝土厚度上 2/5 层位,其余参数不变.改变弹簧刚度系数,相当于改变钢筋和混凝土之间的粘结刚度系数.下面的计算直接考察 3 种钢筋纵向弹簧刚度系数($1 \times 10^0, 1 \times 10^5, 1 \times 10^{10} \text{ N} \cdot \text{m}^{-1}$)对 CRCP 板体的应力影响.计算结果见表 6.从表 6 可以看出,粘结刚度系数对板的温度翘曲应力毫无影响.

表 6 不同弹簧刚度系数下特征点的应力
Tab.6 Stress of feature points when spring stiffness varies

弹簧刚度系数/ ($\text{N} \cdot \text{m}^{-1}$)	拉应力/MPa			
	A 点		B 点	C 点
	板长方向	板宽方向	板长方向	板宽方向
1×10^0	1.58	2.12	1.26	1.88
1×10^5	1.58	2.12	1.26	1.88
1×10^{10}	1.58	2.12	1.26	1.88

3.3 温度梯度

钢筋层置于混凝土厚度的上 1/3 层位.使钢筋

和其同层位混凝土温度变化分别为 5,10,15,20,25 和 30°C ,对应的正温度梯度分别为 115.38,230.77,346.15,461.54,576.92 和 $692.31^\circ\text{C} \cdot \text{m}^{-1}$.计算结果见图 4.

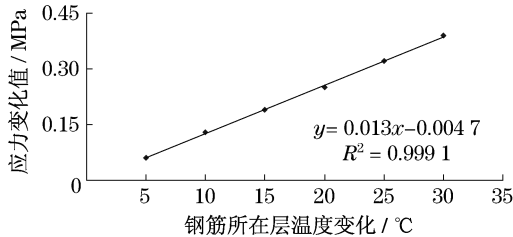


图 4 素板和 CRCP 对应特征点上应力差值与温度变化的关系

Fig. 4 Relationship between temperature change and feature points' stress difference of plain plate and CRCP

由图 4 可知,钢筋层位的温差变化越大,板底拉应力大小改变的越多,基本上呈线性相关.计算所显示的只是为了表明温度梯度对 CRCP 板温度翘曲应力的影响,事实上,现实中板的温度梯度不可能达到本节的假设值.在 $90^\circ\text{C} \cdot \text{m}^{-1}$ 的温度梯度下,加筋与素板在特征点上的应力差值在 0.05 MPa 左右,可以忽略.

3.4 板长

钢筋置于混凝土厚度的上 1/3 层位.保持弹簧布置密度不变,钢筋直径不改变的情况下,对应的钢筋纵向弹簧刚度系数 k 都为 $6.4 \times 10^7 \text{ N} \cdot \text{m}^{-1}$,计算所得不同板长下素板和 CRCP 板中位置 A 点处的板长方向应力如表 7 所示.由表 7 可知,虽然板长较小时加筋与否对板体应力的相对影响较大,但是由于此方向上的应力的绝对大小很小,不是应力计算中所应该考虑的.当板长较大时,加筋只对翘曲应力产生极小的影响.因此,板长对加筋前后板体翘曲应力改变的影响可以忽略.

表 7 不同板长下板体 A 点的翘曲应力
Tab.7 Warping stress of point A with the changes of the plate length

板长/m	板长方向拉应力/MPa		改变率/%
	素板	加筋	
1.0	0.07	0.12	71
1.5	0.21	0.26	24
2.0	0.48	0.52	10
2.5	0.92	0.97	5
3.0	1.58	1.62	3

3.5 板厚及配筋率

CRCP 一般应用于重载等特殊道路交通工况中,板体较厚.板厚越大,板体自身抗弯能力越强,钢筋的加入对翘曲应力的影响越小.本文选取的 26 cm 板厚,属于较薄一类,因此,在实际应用中,可以不计入钢筋对翘曲应力的影响.根据工程应用经验,要保证 CRCP 正常工作,其配筋率一般在 0.6%~0.8% 之间.在截面抗弯计算中,把这部分钢筋等效转化为混凝土,其截面对抗弯刚度的贡献也只在 4.0%~5.3% 之间,可以忽略.因此,也可以不考虑配筋率对温度翘曲应力的影响.

4 结论

利用素板加筋方式模拟 CRCP 断裂后形成的单独板,以三向弹簧单元模拟钢筋和混凝土之间的粘结,考察了加筋对素板温度翘曲应力的影响,并进行了参数敏感性分析,得到如下结论:

(1) Winkler 地基模式下自重对板的翘曲应力不产生影响.

(2) 参数敏感性分析表明,板中加筋与否对板的温度翘曲应力的影响可以忽略,在钢筋加入的情况下,配筋层位、粘结刚度系数、温度梯度、板长、板厚及配筋率等参数对板加筋前后的温度翘曲应力变化值的影响可以忽略.

(3) Winkler 地基模式下 CRCP 单独板的温度翘曲应力可以沿用与其尺寸一致的普通水泥混凝土板的翘曲应力计算方法.

当然,本文的分析计算均是建立在理论和数值分析基础上的,缺乏实验及测试数据的验证,因此结论尚待进一步的检验.

参考文献:

[1] 朱照宏,王秉纲,郭大智.路面力学计算[M].北京:人民交通

出版社,1985.

ZHU Zhaohong, WANG Binggang, GUO Dazhi. Pavement mechanics calculation [M]. Beijing: China Communications Press, 1985.

[2] 周正峰,凌建明.基于 ABAQUS 的机场刚性道面结构有限元模型[J].交通运输工程学报,2009,9(3):39.

ZHOU Zhengfeng, LING Jianming. Finite element model of airport rigid pavement structure based on ABAQUS[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2009, 9(3): 39.

[3] 邓学均,陈荣生.刚性路面设计[M].第2版.北京:人民交通出版社,2005.

DENG Xuejun, CHEN Rongsheng. Rigid pavement design [M]. 2nd ed. Beijing: China Communications Press, 2005.

[4] 卢杨.沥青混凝土+连续配筋水泥混凝土复合式路面结构的力学分析[D].南京:东南大学交通学院,2006.

LU Yang. Mechanical analysis of asphalt concrete + continuously reinforced concrete composite pavement [D]. Nanjing: Southeast University. School of Transportation, 2006.

[5] 中交公路规划设计院. JTG D40—2002 公路水泥混凝土路面设计规范[S].北京:人民交通出版社,2003.

Highway Planning and Design Institute of the Ministry of Communications. JTG D40—2002 Design specification of cement concrete pavement design for highway [S]. Beijing: China Communications Press, 2003.

[6] 邓学钧.路基路面工程[M].第2版.北京:人民交通出版社,2006.

DENG Xuejun. Subgrade and pavement engineering [M]. 2nd ed. Beijing: China Communications Press, 2006.

[7] 姚祖康.水泥混凝土路面设计理论和方法[M].北京:人民交通出版社,2003.

YAO Zukang. Design theory and procedure of cement concrete pavements [M]. Beijing: China Communications Press, 2003.

[8] 曹东伟.连续配筋混凝土路面结构研究[D].西安:长安大学公路学院,2001.

CAO Dongwei. Research on continuously reinforced concrete pavement structure [D]. Xi'an: Chang'an University. Highway School, 2001.

[9] Hibbitt, Karlsson & Sorensen Inc. Getting started with ABAQUS [M]. Providence: ABAQUS Inc, 2006.

[10] Hibbitt, Karlsson & Sorensen Inc. ABAQUS keywords reference manual [M]. Providence: ABAQUS Inc, 2006.

[11] Hibbitt, Karlsson & Sorensen Inc. ABAQUS analysis user's manual [M]. Providence: ABAQUS Inc, 2006.