

温度膨胀系数对刚性路面设计的影响分析

王 鹏<sup>1</sup>, 范 磊<sup>1,2</sup>, 崔 璨<sup>1</sup>

(1. 郑州大学 水利与环境学院,河南 郑州 450001;2. 河南省交通规划勘察设计院有限责任公司,河南 郑州 450002)

**摘 要:** 为了研究热膨胀系数对水泥混凝土路面结构设计的影响,根据我国规范分析了热膨胀系数对面层板温度应力的影响,同时采用美国力学经验设计法分析了热膨胀系数对水泥混凝土路面横缝错台量的影响.结果表明:热膨胀系数对接缝传荷能力以及板角翘曲变形的影响会直接改变水泥混凝土路面设计厚度.因此,在水泥混凝土路面设计中引入热膨胀系数参数意义重大.

**关键词:** 路面工程;路面设计;路面设计软件;热膨胀系数;接缝传荷能力;水泥混凝土路面

**中图分类号:** U416.222      **文献标志码:** A      doi:10.3969/j.issn.1671-6833.2014.02.002

0 引言

截止到 2012 年底,我国水泥混凝土路面公路里程约占公路总里程的 39%<sup>[1]</sup>.水泥混凝土具有强度高、稳定性好等优点,但面层板边缘过早破坏、面层开裂、横缝错台等病害一直困扰着道路工程界. Won 等人对德克萨斯州连续配筋式水泥混凝土路面产生水平裂缝的原因进行调查,发现水泥混凝土的热膨胀是影响路面水平裂缝以及其他病害发生的主要因素<sup>[2]</sup>. Mallela 等人通过破损调查和取芯试验发现水泥混凝土的热膨胀系数(CTE)越大,路面越容易出现开裂和疲劳破坏<sup>[3]</sup>. CTE 对于水泥混凝土路面结构设计有一定的影响.但是目前大多数研究主要是分析 CTE 值的影响因素,对 CTE 如何影响水泥混凝土路面结构设计的研究很少.笔者主要针对 CTE 对水泥混凝土路面结构设计的影响进行了分析探讨.

1 CTE 对水泥混凝土板设计厚度影响的分析

1.1 根据我国设计标准计算 CTE 对面层板厚度设计的影响

运用国内水泥混凝土路面设计软件对新建单层普通水泥混凝土路面进行设计,选定一定参数.改变其中两个参数:地区公路自然区划和混凝土热膨胀系数进行水泥混凝土面层板厚的设计,水

泥混凝土面层板厚度变化情况如表 1 所示(面层板厚度单位为 mm).

表 1 我国标准计算的板厚随 CTE 和自然区划变化情况  
Tab.1 The changes of slab thickness with the changes of CTE and natural division under the standard of China

地区公路 自然区划		CTE 值/(10 <sup>-6</sup> ·℃ <sup>-1</sup> )					
		7	8	9	10	11	12
Ⅱ	计算值	225	227	232	236	240	243
	设计值	240	240	240	250	250	250
Ⅲ	计算值	225	230	235	238	243	248
	设计值	240	240	250	250	250	260
Ⅳ	计算值	222	227	232	236	239	244
	设计值	230	240	240	250	250	250
Ⅴ	计算值	221	225	230	234	239	243
	设计值	230	240	240	240	250	250
Ⅵ	计算值	224	228	232	237	240	245
	设计值	230	240	240	250	250	260
Ⅶ	计算值	227	232	236	241	245	250
	设计值	240	240	250	250	260	260

1.2 根据美国设计标准计算 CTE 对面层板厚度设计的影响

运用美国通用设计软件进行普通水泥混凝土路面设计,选定一定参数.改变水泥混凝土热膨胀系数进行水泥混凝土面层板厚的设计,水泥混凝土面层板厚度变化情况如表 2 所示.

收稿日期:2013-10-01;修订日期:2013-12-10  
基金项目:国家留学基金管理委员会资助项目(2010841142)  
作者简介:王鹏(1973-),女,河南洛阳人,郑州大学副教授,博士,研究方向为路基路面结构与材料的分析与检测,  
E-mail:wangp@zzu.edu.cn.

表 2 美国标准计算的板厚随 CTE 改变而变化情况  
Tab.2 The changes of surface slab thickness with the changes of CTE under the standard of USA

CTE 值/(10 <sup>-6</sup> · °C <sup>-1</sup> )	7	8	9	10	11	12
面层板厚/mm	213	240	270	293	303	316

1.3 CTE 对水泥混凝土板设计厚度的影响分析

由表 1 可知,根据我国水泥混凝土路面设计方法<sup>[4]</sup>,运用相应路面设计软件进行水泥混凝土路面设计,当水泥混凝土的热膨胀系数增大 1 × 10<sup>-6</sup>/°C 时,水泥混凝土面层的设计厚度会增加 4 mm 左右,通过对设计层厚度取整以及设计人员对路面厚度进一步的修正(各种混凝土面层的设计厚度依据计算厚度加 6 mm 磨耗层后,按 10 mm 向上取整),最后得到的面层设计厚度至多增加 10 mm. 因此,运用这种方法进行设计,水泥混凝土的 CTE 值对水泥混凝土板的设计厚度影响不大. 这也是 CTE 的取值长期不被我国研究者和工程人员重视的原因.

由表 2 可知,根据美国力学经验(M-E)设计方法<sup>[5]</sup>,运用相应路面设计软件进行水泥混凝土路面设计,当水泥混凝土的热膨胀系数增大 1 × 10<sup>-6</sup>/°C 时,水泥混凝土面层的设计厚度至少需增加 10 mm,甚至需增加 30 mm. 由此可知,根据美国水泥混凝土路面 M-E 设计方法进行设计,水泥混凝土的 CTE 值对水泥混凝土板的设计厚度有很大的影响.

探讨其原因,这两种设计方法的设计标准不同. 我国水泥混凝土路面设计以设计基准期内的面层板,在行车荷载和温度梯度综合作用下,不产生疲劳断裂为设计标准;以最重轴载和最大温度梯度综合作用下,不产生极限断裂作为验算标准<sup>[4]</sup>. 美国 M-E 法设计指标是横向开裂率(包括自上而下开裂和自下而上开裂)、横缝错台量和国际平整度指数;设计标准是横向开裂率 10%~40%,横缝错台量 2.54~5.08 mm,国际平整度指数由使用期初期的 0.789~1.579 m/km 增长到 2.368~3.157 m/km,可以按公路的等级和要求的可靠度水平在上述范围内选定使用性能标准,各项使用性能标准可以分别选用不同的可靠度水平或使用性能标准<sup>[5]</sup>.

由于设计标准不同,从而导致板厚设计参数不同,CTE 所造成的影响也不同. 实质上,在我国水泥混凝土路面设计中,CTE 只对温度应力有影响<sup>[6]</sup>,而在美国 M-E 设计方法中,CTE 对横缝传

荷效率和板角因温度和湿度翘曲引起的最大月平均向上挠度均有显著影响<sup>[7]</sup>.

事实上,接缝传荷不足和板角翘曲病害在我国水泥混凝土路面病害中占有很大的比例,部分路段能高达 39.20%,情况非常严重<sup>[8-10]</sup>,长期以来一直困扰着道路工程界,因此在设计中引入对病害的考虑是很有意义的.

2 中美设计规范对比

2.1 我国水泥混凝土路面设计理论

(1) 依据我国水泥混凝土路面设计规范,简化 CTE 与最大温度应力的关系

$$\sigma_{t,max} = m\alpha_c. \tag{1}$$

假设按弹性地基单层板分析,相关参数按照

式(2)、(3)、(4)计算  $m = \frac{B_L E_c h_c T_g}{2}.$

$$B_L = 1.77e^{-4.48h_c} C_L - 0.131(1 - C_L), \tag{2}$$

$$C_L = 1 - \frac{\sinh t \cosh t + \cosh t \sinh t}{\cosh t \sinh t + \sinh t \cosh t}, \tag{3}$$

$$t = \frac{L}{3r}, \tag{4}$$

式中: $C_L$ 为混凝土面层板的温度翘曲应力系数,按式(3)计算; $L$ 为面层板的横缝间距,即板长, $m$ ; $r$ 为面层板的相对刚度半径, $m$ .

(2) 简化 CTE 与疲劳温度应力的函数关系

1) 用公式表示 CTE 与疲劳温度应力的函数关系

$$\sigma_{tr} = f_r^{1-b_t} a_t m^{b_t} \alpha_c^{b_t} - f_r c_t. \tag{5}$$

2) 用表格表示 CTE 与疲劳温度应力的关系:

分析 CTE 与疲劳温度应力之间的关系,令  $f_r = 4.5 \text{ MPa}$ ,  $m = 0.149 \times 10^6 \text{ MPa} \cdot \text{°C}$ ,  $a_t = 0.828$ ,  $b_t = 1.323$ ,  $c_t = 0.041$ ,且这些参数的取值与热膨胀系数无任何关系. 则用表格表示 CTE 与疲劳温度应力的关系如表 3 所示.

表 3 CTE 与疲劳温度应力的关系  
Tab.3 The relationship between CTE and the fatigue thermal stress

CTE/(10 <sup>-6</sup> · °C <sup>-1</sup> )	4.5	5.0	5.5	6.0	6.5
$\sigma_{tr}$ /MPa	0.115	0.160	0.207	0.254	0.303
CTE/(10 <sup>-6</sup> · °C <sup>-1</sup> )	7.0	7.5	8.0	8.5	9.0
$\sigma_{tr}$ /MPa	0.354	0.405	0.458	0.511	0.566
CTE/(10 <sup>-6</sup> · °C <sup>-1</sup> )	9.5	10.0	10.5	11.0	11.5
$\sigma_{tr}$ /MPa	0.622	0.678	0.736	0.794	0.853
CTE/(10 <sup>-6</sup> · °C <sup>-1</sup> )	12.0	12.5	13.0	13.5	14.0
$\sigma_{tr}$ /MPa	0.913	0.974	1.036	1.099	1.162

由表 3 可知,根据我国公路水泥混凝土路面设计规范计算水泥混凝土面层板的疲劳温度应力,CTE 值每增大  $1 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ ,疲劳温度应力的增长率都大于 10%,可见,CTE 对疲劳温度应力有一定的影响,在设计时是不可忽略的.但是我国水泥混凝土路面设计规范未考虑 CTE 对横缝错台量的影响.

## 2.2 CTE 对水泥混凝土路面横缝错台量的影响

根据美国力学经验法路面设计指南可知,水泥混凝土路面横缝错台量主要取决于第  $i$  月积累的差异变形能、板角因温度和湿度翘曲引起的最大月平均向上挠度等因素,可用以下公式表示(此部分参考国外规范,故各参数的单位采用英制单位)

$$Fault_m = \sum_{i=1}^m \Delta Fault_i, \quad (6)$$

$$\Delta Fault_i = C_{34} \times (FAULTMAX_{i-1} - Fault_{i-1})^2 \times DE_i \quad (7)$$

$$FAULTMAX_i = FAULTMAX_0 + C_7 \times \sum_{j=1}^m DE_j \times \text{Log}(1 + C_5 \times 5.0^{EROD})^{C_6} \quad (8)$$

$$FAULTMAX_0 = C_{12} \times \delta_{curling} \times \left[ \text{Log}(1 + C_5 \times 5.0^{EROD}) \times \text{Log}\left(\frac{P_{200} \times WetDays}{P_s}\right) \right]^{C_6} \quad (9)$$

式中: $Fault_m$ 为在  $m$  月月末的横缝平均错台量, in;  $\Delta Fault_i$ 为在  $i$  月期间横缝平均错台量的月增量变化, in;  $FAULTMAX_i$ 为横缝在  $i$  月的最大平均错台量, in;  $FAULTMAX_0$ 为横缝初始最大平均错台量, in;  $EROD$ 为基层/垫层的抗冲刷等级系数;  $DE_i$ 为在  $i$  月期间积累的差异变形能, lb/in;  $\delta_{curling}$ 为板角因温度和湿度翘曲引起的最大月平均向上挠度, in;  $P_s$ 为路基的上覆荷载, lb;  $P_{200}$ 为路基材料通过 0.075 mm 筛孔的百分率;  $WetDays$ 为雨量大于 0.1 in 的平均年雨天数量;  $C_1 = 1.29$ ;  $C_2 = 1.1$ ;  $C_3 = 0.001\ 725$ ;  $C_4 = 0.000\ 8$ ;  $C_5 = 250$ ;  $C_6 = 0.4$ ;  $C_7 = 1.2$ ;  $C_{12} = C_1 + C_2 \times FR^{0.25}$ ;  $C_{34} = C_3 + C_4 \times FR^{0.25}$ ;  $FR$ 为基层冰冻指数,即基层顶面的温度低于冰点的时间百分率.

在设计中,差异变形能取决于横缝一侧直接承受荷载板的挠度、横缝另一侧非直接承受荷载板的挠度以及嵌锁集料刚度因子,可以用公式(10)表示

$$DE = \frac{k}{2}(\delta_L^2 - \delta_U^2), \quad (10)$$

式中: $DE$ 为差异变形能, lb/in;  $\delta_L$ 为横缝一侧直接承受荷载板的挠度, in;  $\delta_U$ 为横缝另一侧非直接承受荷载板的挠度, in;  $K$ 为嵌锁集料刚度因子.

横缝一侧直接承受荷载板的挠度以及另一侧非直接承受荷载板的挠度取决于横缝荷载传递效率,横缝荷载传递效率由骨料的横缝传荷效率、连接杆的横缝传荷效率以及基层的横缝传荷效率决定<sup>[4]</sup>.其中骨料的横缝传荷效率主要取决于横缝宽度<sup>[4]</sup>

$$jw = \text{Max}(12\ 000 \times L \times \beta \times (\alpha_{PCC} \times (T_{constr} - T_{mean}) + \varepsilon_{sh,m}), 0), \quad (11)$$

式中: $jw$ 为接缝宽度, mils;  $L$ 为接缝间距, ft;  $\beta$ 为基层与面板间的摩擦系数;  $\alpha_{PCC}$ 为水泥混凝土板的热膨胀系数, in/in/ $^{\circ}\text{F}$ ;  $T_{mean}$ 为月平均夜间中间深度温度,  $^{\circ}\text{F}$ ;  $T_{constr}$ 为设定的水泥混凝土温度,  $^{\circ}\text{F}$ ;  $\varepsilon_{sh,m}$ 为混凝土板的平均收缩应变.

由此可知,CTE 对差异变形能有影响,同时 CTE 对板角因温度和湿度翘曲引起的最大月平均向上挠度也有影响,进而影响水泥混凝土路面横缝错台量.

运用美国水泥混凝土路面设计软件进行计算,改变水泥混凝土热膨胀系数,进行水泥混凝土路面设计,水泥混凝土板横缝错台量(Fault)、横缝传荷效率(LTE)、差异变形能(DE)的变化率如表 4 所示.

表 4 错台量、传荷效率、差异变形能的变化率

Tab. 4 The gradient of Fault, LTE and DE

CTE 值/ $(10^{-6} \cdot ^{\circ}\text{C}^{-1})$	7.0	8.0	9.0	10.0	11.0
Fault 变化率/%	39.39	32.61	25.41	20.92	17.84
LTE 变化率/%	2.34	2.25	2.15	1.88	1.76
DE 变化率/%	19.82	19.17	17.67	16.09	15.70

由表 4 可知,CTE 对水泥混凝土板横缝错台量的影响很大,CTE 值增加  $1 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$  时,水泥混凝土板横缝错台量最大可以增加 39.39%,横缝传荷效率最大可以减小 2.34%,差异变形能最大达到 19.82%.因此在水泥混凝土路面设计时,考虑 CTE 对横缝传荷效率以及板角翘曲挠度的影响,可以有效预防路面病害的发生.

## 3 结论

在水凝混凝土路面设计中,CTE 对疲劳温度应力有一定的影响,在进行水泥混凝土路面设计时不可忽略 CTE 对疲劳温度应力的影响.在我国,CTE 主要参照国外试验数据,并非由规定的

试验方法得到,其参考值有一定的误差,从而使计算不精确,可能会导致设计厚度不能满足实际需要,从而引起水泥混凝土路面出现角隅破坏、断板等病害。在我国,水泥混凝土路面错台、角隅破坏以及断板等现象已经严重影响行车的安全性和舒适性<sup>[8-10]</sup>。改进水泥混凝土路面设计理论,在设计中引入对错台量的考虑势在必行。

因此建议:(1)在我国水泥混凝土路面设计中,考虑CTE对横缝处传荷能力及板角因温度和湿度翘曲引起的挠度等因素的影响,建立水泥混凝土路面横缝错台量预估模型,把横缝错台量作为一项控制指标;(2)结合我国水泥混凝土路面材料特点以及AASHTO TP 60、AASHTO T 336-09等国外水泥混凝土CTE值试验方法,建立适合我国实际状况的公路水泥混凝土CTE值试验规范<sup>[11-12]</sup>。

## 参考文献:

- [1] 交通运输部综合规划司. 2012年公路水路交通运输行业发展统计公报[EB/OL]. [2013-04-25]. [http://www.mot.gov.cn/zizhan/siju/guihuasi/tongjixinxin/nianubaogao/201304/t20130425\\_1402417.html](http://www.mot.gov.cn/zizhan/siju/guihuasi/tongjixinxin/nianubaogao/201304/t20130425_1402417.html).
- [2] WON M C, KIM S M, MERRITT D, et al. Horizontal cracking and pavement distress in portland cement concrete pavement[C]//Proceedings of 27th International Air Transport Conference. Orlando: American Society of Civil Engineers, 2002: 1-10.
- [3] CHEN Da-hao, WON M C. Field investigations of cracking on concrete pavement[J]. Journal of Performance of Constructed Facilities. 2007, 21(6): 450-458.
- [4] 中交公路规划设计院有限公司. JTG D40—2011公路水泥混凝土路面设计规范[S]. 北京:人民交通出版社, 2011.
- [5] AASHTO. Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide[M]. Washington D. C: American Association of State Highway and Transportation Officials, 2008.
- [6] 邓学钧, 陈荣生. 刚性路面设计[M](第二版). 北京:人民交通出版社, 2005: 311-328.
- [7] 姚祖康. 公路设计手册路面[M](第三版). 北京:人民交通出版社, 2006: 208-211.
- [8] 王兴忠. 水泥混凝土路面破损评价[D]. 重庆:重庆交通大学土木建筑学院, 2006.
- [9] 郅彦龙. 水泥混凝土路面病害分析及防治研究[D]. 上海:同济大学交通运输工程学院, 2008.
- [10] 马国民. 水泥混凝土路面错台病害的评定方法及处治技术[D]. 重庆:重庆交通大学土木建筑学院, 2011.
- [11] Standard method of test for coefficient of thermal expansion of hydraulic cement concrete. AASHTO TP 60-00[S]. Washington D. C: American Association of State Highway and Transportation Officials, 2007.
- [12] Standard test method for the coefficient of thermal expansion of hydraulic cement concrete AASHTO T 336-09[S]. Washington D. C: American Association of State Highway and Transportation Officials, 2009.

## Effects analysis of CTE on the PCC Pavement Design

WANG Peng<sup>1</sup>, FAN Lei<sup>1,2</sup>, CUI Can<sup>1</sup>

(1. School of Water Conservancy and Environmental Engineering, Zhengzhou University, Henan Zhengzhou 450001, China; 2. Henan Provincial Communication Planning, Survey & Design Institute Co. Ltd, Henan Zhengzhou 450002, China)

**Abstract:** In order to research the effects of coefficient of thermal expansion (CTE) on the PCC pavement design, some efforts have been done. According to the PCC pavement design standard in our country, the influence of CTE on the temperature stress is analyzed, and the M-E design method is used to analyses the influence of CTE on transverse joint faulting. The conclusion is drawn that CTE has a great impact on the designing of pavement thickness especially on the joint load transfer and the warping of slab corner. So introducing the parameter of CTE to the PCC pavement design is of great significance.

**Key words:** pavement engineering, pavement design, pavement design software, coefficient of thermal expansion, joint load transfer, PCC pavement