

刚性路面中关于温度应力计算问题

蒋应军, 戴经梁

(长安大学特殊地区公路工程教育部重点实验室, 陕西 西安 710064)

摘要: 现有温度应力计算方法采用查诺谟图进行, 计算繁琐, 不便于程序设计。本文在大量计算基础上, 建立了温度应力经验计算公式, 与规范解相比, 该公式精度较高, 能满足工程需要。其次, 在温度应力计算中采用的基顶当量回弹模量, 是基于基顶弯沉等效为原则换算得到的, 这种换算原则并不能真实反映基层对路面板温度应力的影响。为此, 通过大量的计算分析, 本文建立了以温度应力等效为原则的基顶当量回弹模量换算方法。与有限元解比较, 结果表明该换算方法的精度完全能满足工程计算的需要。

关键词: 道路工程; 刚性路面 (或水泥混凝土路面); 温度应力; 温度应力等效; 基顶当量回弹模量

中图分类号: U416.216

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2007)06-0837-06

作者简介: 蒋应军 (1975-), 男, 浙江兰溪人, 博士后, 副教授, 主要从事路基路面工程教学与研究。E-mail: jyj@gl.ehd.edu.cn。

Computation of thermal stresses in rigid pavement

JIANG Ying-jun, DAI Jing-liang

(Key Laboratory for Special Area Highway Engineering of Ministry of Education, Chang'an University, Xi'an 710064, China)

Abstract: For the sake of convenient application and avoiding consulting a nomogram for the calculation of thermal stresses, an empirical formula, which has precision in use, for the coefficient of thermal stresses was presented through a great deal of calculation for different pavements. The calculation method of the equivalent modulus of elasticity of foundation based on the principles of displacement equivalence can't actually reflect the influence of semi-rigid base on the thermal stresses in cement concrete pavement. A calculation method of the equivalent modulus of elasticity of foundation based on the principles of thermal stress equivalence was established. The method could accurately reflect the influence of the modulus and thickness of semi-rigid type base on the cement concrete pavement thermal stresses. The computed results was consistent with those of 3D FEM, indicating that the calculation method was reliable.

Key words: road engineering; rigid pavement (cement concrete pavement); thermal stress; principle of thermal stress equivalence; equivalent modulus of elasticity of foundation

0 引言

中国现行温度应力计算方法还存在一些不足之处: 一是温度应力系数需查诺谟图得到, 带来诸多不便; 二是温度应力计算中采用的基顶当量回弹模量是建立在基顶弯沉等效原则基础上换算得到的, 这种换算方法不能真实地反映基层对板温度应力的影响。为此, 本文利用 3D 有限元法, 在大量计算基础上建立温度应力经验计算公式和以温度应力等效为原则的基顶当量回弹模量换算方法, 从而完善了刚性路面中温度应力计算方法。

1 翘曲应力 3D 有限元模型

1.1 几何模型

分弹性半空间地基上自由板、弹性双层和三层地

基上自由板建立三种模型。利用路面结构及温度的对称性, 几何模型取 1/4 路面结构尺寸, 见图 1。

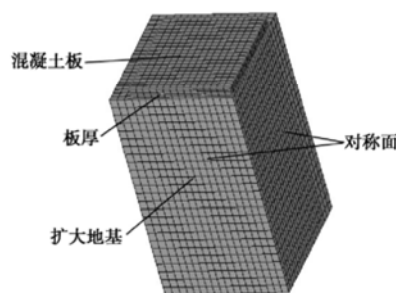


图 1 模型网格划分

Fig. 1 Finite element mesh

地基采用扩大尺寸,根据计算结果地基取 $5\text{ m} \times 5\text{ m} \times 5\text{ m}$,在计算过程中,地基的底面为固定面,与底面相垂直的四周面为自由面。

1.2 有限元模型可靠性分析

为验证有限元模型可靠性,取弹性半空间地基上矩形板,板宽 $B \times$ 板长 L 为 $3.5\text{ m} \times 6.0\text{ m}$,板厚 h_c 为 0.2 m ,板弹性模量 E_c 为 30000 MPa ,泊松比 μ_c 为 0.15 ,线胀系数 α_c 为 $1 \times 10^{-5}/^\circ\text{C}$;地基模量 E_0 为 50 MPa ,泊松比 μ_0 为 0.35 。温度梯度 T_g 为 $0.7^\circ\text{C}/\text{cm}$,不计自重。各种方法计算结果见表 1。采用温克勒地基上矩形板模型,板参数及温度梯度取值同上,地基反应模量 $50\text{ MPa}/\text{m}$,板宽 $B=3\sqrt{2}l$,不同长度矩形板承受温度梯度作用时的翘曲应力有限元解以及 Bradbury 公式计算结果见表 2。

表 1 不同计算方法所得板内最大翘曲应力值的比较

Table 1 Comparison of the maximum curling stresses

方法	有限层法 ^[1]		有限元法 ^[2]	有限棱柱法 ^[3]	CPSAP 法 ^[4]	3D 有限元法
	二层	三层				
σ_y/MPa	2.292	2.357	2.378	2.345	2.350	2.347

表 2 不同板长承受温度梯度作用时的翘曲应力计算结果

Table 2 Comparison of the maximum curling stresses

板长/m	板中应力/MPa				
	Bradbury 解 ^[5]	有限元 ^[5]		CPSAP 法 ^[5]	3D 有限元法
		宽 50 cm	宽 25 cm		
4.0	1.696	1.762	1.690	1.66	1.787
5.0	2.198	2.233	2.196	2.17	2.071
6.0	2.436	2.440	2.423	2.40	2.397
8.0	2.475	2.437	2.456	2.44	2.417
10.0	2.376	2.352	2.357	2.37	2.371

由表 1 和 2 可知,本文建立的 3D 有限元模型分析温度应力时结果是可靠的,它的精度完全可以满足工程的要求。

2 弹性半空间地基板温度应力计算

2.1 参数对温度翘曲应力的影响分析

分析表明,板自重、板宽对温度应力的影响很小,通常不到 0.5% ,可忽略不计。影响路面板温度翘曲应力的主要因素有 E_c , h_c , L , E_0 , T_g , α_c 等。其中 T_g 和 α_c 对应力的影响为线性关系。为方便计,在后续分析中取 $T_g=1^\circ\text{C}/\text{cm}$, $\alpha_c=1 \times 10^{-5}/^\circ\text{C}$, $\mu_c=0.15$, $\mu_0=0.30$ 。因此,主要分析 L , E_0 , E_c , h_c 对翘曲应力的影响。取 $E_0=100\text{ MPa}$, $E_c=30000\text{ MPa}$, $h_c=24\text{ cm}$, 28 cm ,板宽 3.75 m ,板长从 4.0 m 增至 6.0 m ,将板边中部温度翘曲应力变化情况绘于图 2。板厚从 0.16 m 变化到 0.36 m 时板边中部温度翘曲应力变化趋势见图 3。 E_c 从 28000 MPa 逐渐增至 38000 MPa ,板纵缝边缘中部温度翘曲应力变化情况见图 4。地基模量 E_0

变化对路面板内翘曲应力的影响见图 5。

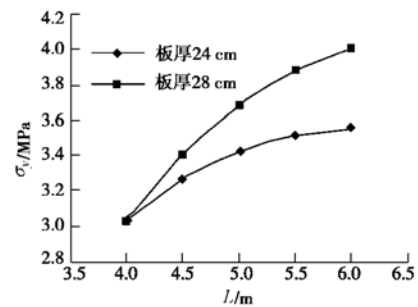


图 2 板长 L 对温度翘曲应力的影响

Fig. 2 Influence of length of slab on thermal stresses

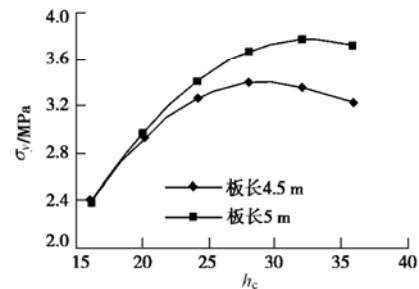


图 3 板厚 h_c 对温度翘曲应力的影响

Fig. 3 Influence of thickness of slab on curling stresses

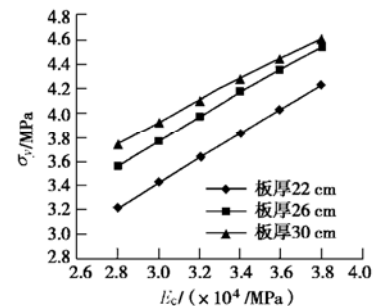


图 4 板模量 E_c 对温度应力的影响

Fig. 4 Influence of modulus of slab on curling stresses

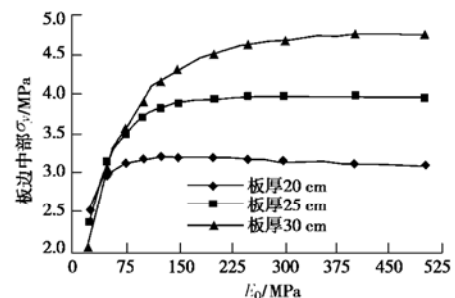


图 5 地基模量 E_0 对温度应力的影响

Fig. 5 Influence of modulus of subgrade on curling stresses

图 2 表明: σ_y 受板长影响较大,板长从 4.0 m 变化到 6.0 m ,板厚 24 cm 时 σ_y 增加 17.47% ,板厚 28 cm 时增加 32.52% 。由图 3 可以看出,板厚在 $0.16 \sim 0.30\text{ m}$, σ_y 受板厚影响较大,板长 4.5 m 和 5.0 m 时的 σ_y 分别增长约为 42% 和 55% 。当板厚大于 0.3 m 时, σ_y 随

板厚增加而减小, 减小幅度一般在 6% 以内。由图 4 可看出, σ_y 随 E_c 呈线性增长。由图 5 中的曲线变化趋势可看出, 在不同板厚情况下, 当 E_0 低于相应某一值时板内翘曲应力随着 E_0 的增大而增大, 当 E_0 超过该值时, 翘曲应力处于稳定值甚至有所下降, 但下降幅度不大。如板厚 20 cm, E_0 小于 150 MPa 时, 翘曲应力随着 E_0 的增加而增大; 当 E_0 超过 150 MPa 时, 翘曲应力不再增长反而有所下降。这是由于随着 E_0 的增大, 地基对板的约束作用逐渐增强, 板内翘曲应力也随之增大, 当 E_0 超过一定值时, 约束作用已经达到极限, 表现出翘曲应力不再增长, 反而因为过强的约束作用, 使得地基分担了部分温度应力, 从而出现当 E_0 超过一定值后温度应力反而有所下降。

2.2 四边自由矩形板温度翘曲应力的有限元解

根据上述参数影响分析, 翘曲应力受 E_c , E_0 , L 和 h_c 影响较大。根据目前常用路面结构, 板宽变化不大 (一般在 3.5~4.5 m), 且对板边中部温度翘曲应力影响甚微, 可不予考虑, 因此, 选择板宽 3.75 m。其它有关参数为: $E_c=28000\sim38000$ MPa, $h_c=16\sim36$ cm; $E_0=25\sim150$ MPa; $L=4.0\sim6.0$ m, 对板边中部温度翘曲应力进行计算, 取得了 2160 组温度翘曲应力值, 并按 Bradbury 公式整理出相应的翘曲应力系数 C_y , 结果见图 6。Bradbury 板边公式为

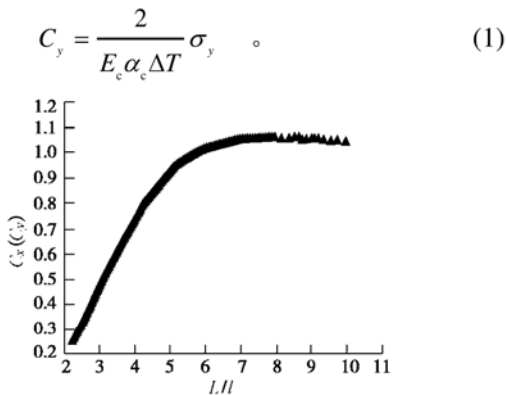


图 6 温度翘曲应力系数 C_x (C_y) 曲线

Fig. 6 Curves of the coefficient of curling stresses

由图 6 可看出, 温度翘曲应力系数与 L/h 之间的关系曲线与威氏解所得的对应曲线呈现的趋势完全一致。为便于使用, 避免查用应力诺谟图时出现偏差, 对上述有限元计算结果采用回归分析技术进行统计分析, 建立板边中部温度翘曲应力的回归公式:

$$\sigma_y = \frac{\alpha_c E_c h T_g}{2} C_y \quad (2)$$
$$C_y = 2.31 \frac{\left(\frac{L}{l}\right)^{2.75}}{\left(\frac{L}{l}\right)^{3.07} + 68.42} \quad (3)$$
$$R^2 = 0.99983 \quad .$$

式中 σ_y 为板边中部温度翘曲应力 (MPa); α_c 为混凝土路面板的温度收缩系数 ($1/^\circ\text{C}$); L 为混凝土路面板的长度 (m); l 为路面结构相对刚度半径 (m), 按 $l = 0.537 \times \frac{h_c}{100} \times \left(\frac{E_c}{E_0}\right)^{\frac{1}{3}}$ 计算。

为了验证式 (3) 的精度及可靠性, 表 3 列出了四组常见路面结构应用式 (3) 和有限元得到的温度翘曲应力值。

表 3 公式 (3) 与有限元解比较

			板长 5.0 m			板长 5.5 m		
E_c /MPa	E_s /MPa	板厚 /cm	公式 (3)	有限 元解	误差 /%	公式(3)	有限 元解	误差/%
30000	50	24	3.127	3.1371	-0.32	3.364	3.3695	-0.16
30000	100	30	3.936	3.9292	0.17	4.227	4.2158	0.27
33000	75	26	3.801	3.8063	-0.14	4.069	4.0693	-0.01
36000	125	28	4.694	4.6912	0.06	4.960	4.9515	0.17

从表 3 以看出, 上述回归式具有较好的精度, 可满足工程要求。

2.3 温度应力的修正

混凝土面板内温度沿深度的分布, 在大多数情况下呈非线性, 温度非线性分布产生的不均匀膨胀受到板平面变形约束而引起的板纵缝边缘中部板底最大温度内应力 σ_n 可表示为

$$\sigma_n = \frac{\alpha_c E_c h T_g \alpha_h}{2} \xi \quad (4)$$

式中 ξ 为温度内应力系数, $\xi = 1.007 h_c^{0.8163}$; α_h 为温度梯度板厚修正系数, $\alpha_h = 2.0435 e^{-3.2424 h_c}$ 。

温度内应力系数的物理含义为最大温度内应力与无限大板的最大翘曲应力之比。最大温度内应力与最大温度翘曲应力不是同时出现的, 前者比后者出现时刻早于 2 h。单层路面板的温度应力 σ_t 为温度翘曲应力 σ_y 和温度内应力 σ_n 之和。最大温度应力计算式仍采用式 (2) 的形式, 将温度翘曲应力系数、温度内应力系数和温度梯度板厚修正系数综合为温度应力系数 B_y , 即

$$\sigma_m = \frac{\alpha_c E_c h T_g}{2} B_y \quad (5)$$

式中, σ_m 为混凝土路面板的温度翘曲应力。

由于温度应力的加载速率较荷载应力的慢, 混凝土和地基的模量应考虑其徐变的影响。根据 ACI 的推荐参数^[6], 计算温度应力的混凝土徐变模量 (半天加载) 约为其弹性模量的 0.85 倍; 地基徐变模量取其弹性模量的 0.7 倍。为了便于使用, 在应用式 (5) 时, 混凝土和地基模量仍采用与荷载应力计算时相同的弹性模量, 将徐变影响归并到温度应力系数 B_y 中。温度应力系数 B_y 可表示为温度翘曲应力系数 C_y (或板长

与板相对刚度半径之比 L/l) 和板厚 h_c 的函数,即

$$B_y = 1.82 \cdot C_y^{1.12} \cdot e^{-0.0454 h_c} - 0.08(1 - C_y) \quad , \quad (6)$$

$$C_y = 1.93 \frac{\left(\frac{L}{l}\right)^{3.14}}{\left(\frac{L}{l}\right)^{3.393} + 86.43} \quad . \quad (7)$$

表 4 列出了十种常见路面结构按公式 (6), (7) 和现行规范方法计算温度应力值 (板长 5.0 m)。

表 4 回归公式与规范计算结果的比较

Table 4 Comparison of curling stresses							
E_c /MPa	h_c /cm	E_0 /MPa	l /m	L/l	B_x		偏差 /%
					规范法	本文	
28000	20	150	0.614	8.15	0.767	0.788	2.74
	24	100	0.843	5.93	0.590	0.628	2.95
30000	22	120	0.744	6.72	0.700	0.712	1.71
	26	80	1.007	4.97	0.510	0.513	0.59
32000	25	90	0.951	5.26	0.550	0.562	2.18
	28	70	1.158	4.32	0.400	0.401	0.25
34000	27	100	1.012	4.94	0.500	0.488	-1.81
	30	180	0.924	5.41	0.450	0.456	1.33
36000	29	140	0.990	5.05	0.490	0.454	-5.22
	32	75	1.345	3.72	0.240	0.256	4.07

由表 4 中数据可知,按公式 (6), (7) 计算所得结果基本上与现行规范中查图法相一致,误差一般不超过 5.0% (查图中过程本身含有较大的误差),这说明本文计算方法是可靠的,精度能满足工程要求,完全可以用于路面设计中温度应力计算。

3 基顶当量回弹模量换算方法

3.1 现行温度应力计算中当量回弹模量存在的问题

现行规范采用理论计算,建立了基于基层顶面弯沉等效的基顶当量回弹模量换算方法,并通过对当量模量适当修正后应用于温度应力计算。而温度应力和荷载应力受力模式及其对基层和土基组成的地基的影响显然是不同的,应用该方法换算得到的基顶当量模量用于计算温度应力必然存在较大的误差,结果导致不能正确反映基层模量对混凝土板翘曲应力的影响。为了进一步说明这问题,表 5 列出了三层体系路面结构分别按规范法转化成两层体系后采用有限元计算和直接对三层体系进行翘曲应力计算的结果。

表 5 不同计算方法间的温度翘曲应力计算结果的比较

Table 5 Comparison of curling stresses								
混凝土板		基层		地基	按规范法转化两层体系		按三层体系计	相对误差
E_c /MPa	h_c /cm	E_1 /MPa	h_1 /cm	E_0 /MPa	E_1 /MPa	σ_y /MPa	算	%
28000	26	1013	0.312	30	165	3.34	2.97	12.5
30000	24	1300	0.20	30	127	3.28	2.98	10.1
34000	25	800	0.20	40	128	3.75	3.46	8.4
34000	27	3000	0.20	40	204	4.18	3.63	15.2
36000	28	1600	0.20	50	190	4.45	3.93	13.2
31000	30	1000	0.20	60	179	4.03	3.69	9.2

如表 5 所示,对于同一种路面结构分别采用单层

地基 (按弯沉等效将基层和土基换算当量回弹模量) 和双层地基,结果按弯沉等效换算的单层地基的温度翘曲应力的结果明显偏高。这说明按现行规范中换算方法得到的当量回弹模量用于温度应力计算是欠妥的,力学概念上也是不一致的。因此,在计算温度应力时,只能采用基于板翘曲应力等效原则的基顶当量模量换算方法,从而明确力学概念,使温度应力计算结果更符合实际。

3.2 基层对翘曲应力的影响分析

图 7 所示为四组地基模量、基层模量及厚度和温度翘曲应力的有限元计算结果。

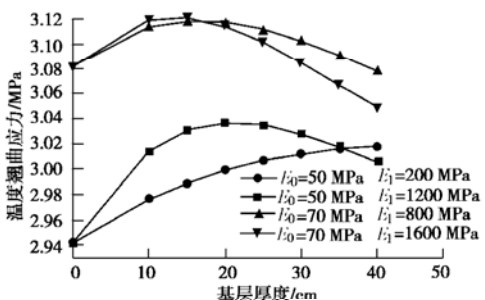


图 7 基层厚度对温度应力的影响

Fig. 7 Influence of thickness of base on curling stresses

由图 7 中曲线的变化趋势可以看出,当基层厚度低于 $h_{\sigma \max}$,随着基层厚度的增大,温度翘曲应力也增长。但当基层厚度超过 $h_{\sigma \max}$,温度翘曲应力随基层厚度增加而降低。上述峰值现象,对基层模量低于 500 MPa 时表现得不明显。

图 8 所示为不同基层厚度的两组基层模量和温度翘曲应力的有限元计算结果。

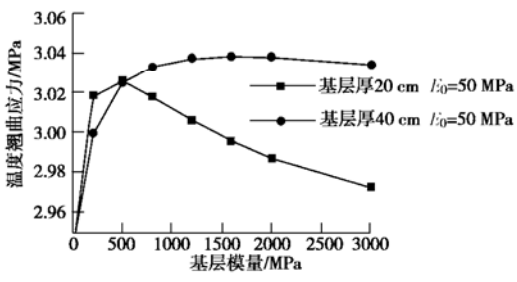


图 8 基层模量对温度应力的影响

Fig. 8 Influence of modulus of base on curling stresses

由图 8 曲线的变化趋势可以看出,当基层厚度较大 (40 cm) 时,基层模量在 500 MPa 时温度翘曲应力达到最大,随着基层模量继续增大,温度翘曲应力随之降低;当基层在常用厚度范围内时 (20 cm),基层模量在小于 1000 MPa 内,温度翘曲应力随基层模量增大而增加,并基本上达到峰值;当模量继续增大,温度翘曲应力有所下降,但是下降幅度不大。

按规范中方法计算,结果表明:随着半刚性基层

刚度和厚度增大, 混凝土板温度应力也相应增大。这显然与上述翘曲应力随基层变化规律不一致。这再次说明规范中的基顶模量换算方法在用于温度应力计算中是不合理的, 这种基于弯沉等效的换算原则忽略了基层与面层相互作用和基层对路面温度应力分担作用, 掩盖了半刚性基层的特性。

3.3 基于翘曲应力等效的基顶当量回弹模量换算方法

为了建立基于温度翘曲应力等效的基顶当量回弹模量的换算方法, 本文根据常见水泥混凝土路面结构层各种参数变化范围, 拟定了图 9 所示的结构形式及参数取值, 其中板尺寸 3.75 m×5.0 m。

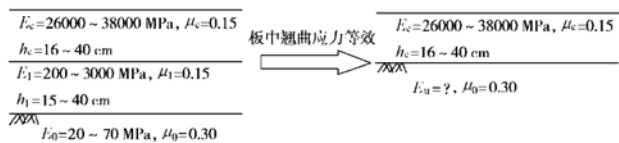


图 9 转化模型及计算参数取值
Fig. 9 Model and parameters

根据上述拟定的结构参数, 对混凝土板纵缝边缘中部温度翘曲应力进行了大量计算, 将 2800 组计算结果按下式回归:

$$E_u = ah_1^b E_0 \quad (8)$$

$$a = [0.000113E_0^{1.51} - 0.0027]E_1^{0.52} + 0.66 \quad (9)$$

$$b = 0.16E_0^{0.7} E_1^{0.4877-0.371\lg E_0} - 1 \quad (10)$$

式中 E_u 为温度翘曲应力为等效原则的基顶当量回弹模量 (MPa); h_1 为基层厚度 (cm); a, b 为回归系数; E_1, E_0 为分别为基层和地基模量 (MPa)。

为了验证式 (8) 可靠性及精度, 选取常见路面结构及参数按不同方法分别进行计算, 结果见表 6。

表 6 中, σ_{x1} 为按三层体系直接利用有限元计算得到温度翘曲应力值, σ_{x2} 和 σ_{x3} 分别为按规范法和本文换算法将基层和地基转化成当量模量 E_t 和 E_u 后利用公式 (2), (3) 计算得到温度翘曲应力值。从表中来看, σ_{x3} 非常接近于 σ_{x1} , 偏差一般在 5% 以内,

说明式 (8) 和式 (2) ~ (3) 具有足够的可靠性, 精度能满足工程计算的需要。而 σ_{x2} 偏离 σ_{x1} 较大, 偏差一般在 6% 以上, 甚至高达 40% 以上。原因在于规范中 E_t 的换算是基于基顶弯沉等效导出的, 这与温度作用下板内翘曲应力是两个不同的受力概念, 不能真实反映路面在温度梯度作用下的响应。

混凝土路面地基实际上是由基层、垫层和土基组成的多层体系, 在利用式 (2) 或 (5) 计算温度翘曲应力时, 需将基层、垫层和土基组成的多层体系按等效原则转化成当量的均质体系, 式 (8) 解决了将两层体系转化方法。对于三层体系的转化, 首先将基层和底基层 (或垫层) 两结构层按当量弯曲刚度换算成厚度为 h_x 模量为 E_x 的当量单层结构^[7]:

$$E_x = \frac{E_1 h_1^3 + E_2 h_2^3}{h_1^3 + h_2^3} \quad (11)$$

$$h_x = \left(\frac{12D_x}{E_x}\right)^{\frac{1}{3}} \quad (12)$$

$$D_x = \frac{E_1 h_1^3 + E_2 h_2^3}{12} + \frac{h_1 + h_2}{4} \left(\frac{1}{E_1 h_1} + \frac{1}{E_2 h_2}\right)^{-1} \quad (13)$$

式中, h_1, h_2 为基层和底基层 (或垫层) 的厚度, E_1, E_2 为基层和底基层 (或垫层) 的回弹模量。

然后, 按式 (8) 进行换算, 换算时将 E_x, h_x 代入 E_1, h_1 中即可得到 E_u , 即

$$E_u = ah_x^b E_0 \quad (14)$$

$$a = [0.000113E_0^{1.51} - 0.0027]E_x^{0.52} + 0.66 \quad (15)$$

$$b = 0.16E_0^{0.7} E_x^{0.4877-0.371\lg E_0} - 1 \quad (16)$$

同样, 为了验证三层弹性地基板温度应力计算方法的可靠性及精度问题, 选取了几组常见路面结构及参数进行计算, 结果见表 7。表 7 中 σ_{x1} 系按四层体系直接利用有限元计算的温度翘曲应力值, σ_{x2} 和 σ_{x3} 分别按规范法和式 (14) 换算得到基顶当量模量 E_t 和 E_u 后利用式 (2) 计算得到的温度翘曲应力值。

表 6 不同计算方法所得温度翘曲应力的比较

Table 6 Comparison of curling stresses											
混凝土板		基层		地基	有限元	规范换算方法			本文换算方法		
E_c /MPa	h_c /cm	E_1 /MPa	h_1 /cm	E_0 /MPa	σ_{x1} /MPa	E_t /MPa	σ_{x2} /MPa	偏差/%	E_u /MPa	σ_{x3} /MPa	偏差 /%
28000	22	500	20	50	3.05	119.5	3.24	6.29	90.1	3.17	4.09
28000	26	800	34	40	3.26	188.2	3.82	17.21	72.7	3.34	2.35
30000	27	1500	16	70	3.78	195.6	4.21	11.35	128.0	4.00	5.95
32000	24	2000	35	60	3.77	360.5	4.08	8.10	89.5	3.75	-0.42
32000	28	3000	20	50	3.87	236.4	4.66	20.46	86.9	3.92	1.29
34000	25	1600	38	40	3.87	276.8	4.52	16.69	69.7	3.78	-2.32
34000	30	2500	22	30	3.50	172.3	4.92	40.57	64.8	3.66	4.49

表 7 不同方法计算所得的温度翘曲应力比较结果
Table 7 Comparison of curling stresses

混凝土板		基层		底基层		地基	有限元	规范换算方法			本文换算方法		
E_c /MPa	h_c /cm	E_1 /MPa	h_1 /cm	E_2 /MPa	h_2 /cm	E_0 /MPa	σ_{x1} /MPa	E_t /MPa	σ_{x2} /MPa	偏差 /%	E_{tt} /MPa	σ_{x3} /MPa	偏差 /%
28000	22	500	20	200	16	30	2.94	111.7	3.23	13.7	66.3	3.06	4.1
28000	26	1000	18	500	18	50	3.36	208.9	3.84	14.3	85.2	3.46	3.0
30000	23	1500	18	500	17	30	3.14	171.5	3.66	16.6	64.2	3.29	4.8
30000	27	2000	16	800	16	40	3.49	219.5	4.24	21.5	70.3	3.50	0.3
32000	24	2000	20	800	20	60	3.75	329.2	4.08	8.8	90.4	3.76	0.3
32000	28	2000	16	1500	17	50	3.91	290.9	4.72	20.7	79.1	3.81	-2.6

由表 7 中数据可知, 式 (14) 的换算结果基本上接近于有限元结果, 误差一般不超过 5.0%, 精度能满足工程计算的需要, 这说明按当量弯曲刚度法转化为当量单层结构层后, 再按双层弹性地基的回归公式确定均质体的当量回弹模量用于计算温度翘曲应力是可行的。

4 结 论

(1) 为了便于应用及避免查用诺谟图时出现偏差, 本文针对通用的设计条件进行大量的有限元分析, 根据计算结果建立了温度翘曲应力系数和温度应力系数的经验公式。与规范解相比较, 本文方法具有较高精度的, 可供设计时应用。

(2) 现行规范中基顶当量回弹模量换算是建立在弯沉等效基础上的, 这种方法掩盖了半刚性基层尤其是重载交通水泥混凝土路面下的高模量基层特性, 使得温度应力计算值出现较大的偏差。本文在大量计算基础上, 建立了以温度翘曲应力为等效原则的基顶当量回弹模量换算方法, 该换算方法具有较高的精度和外延性, 更符合温度梯度作用下多层弹性地基对板产生温度应力的影响规律, 可供规范修订时参考。

参考文献:

[1] 王秉纲, 戴经梁, 王泽明. 弹性地基上混凝土矩形厚板、复合板温度翘曲应力分析[D]. 西安: 西安公路学院, 1988: 32 - 96. (WANG Bing-gang, DAI Jing-liang, WANG Ze-ming. Analysis of curling stress for block and composite block concrete pavement on elastic foundation[D]. Xi'an: Xi'an Highway university, 1988: 32 - 96. (in Chinese))

[2] 华永红, 黄 卫, 邓学钧. 弹性地基上厚板和空心厚板的温度翘曲应力分析[J]. 中国公路学报, 1991 (1): 33 - 37. (HUA Yong-hong, HUANG Wei, DENG Xue-jun. Analysis of curling stress for block and hollow block concrete pavement on elastic foundation[J]. China Journal of Highway and Transport, 1991(1): 33 - 37. (in Chinese))

[3] 黄 卫, 华永红. 弹性半空间地基上空心厚板的荷载应力分析[J]. 东南大学学报(自然科学版), 1990(4): 8 - 12. (HUANG Wei, HUA Yong-hong, Analysis of stress for hollow block concrete pavement on elastic foundation[J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 1991(1): 33 - 37. (in Chinese))

[4] 邓学钧, 黄 卫. 路面结构计算与设计电算方法[M]. 南京: 东南大学出版社, 1998: 40 - 100. (DENG Xue-jun, HUANG Wei. Method of calculatation and design of pavement structure[M]. Nanjing: Southeast University Press, 1998: 40 - 100. (in Chinese))

[5] 黄 卫, 钱振东. 高等水泥混凝土路面设计理论与方法[M]. 北京: 科学出版社, 2000: 129 - 133. (HUANG Wei, QIAN Zhen-dong. Theory and methodology high-class concrete pavement design[M]. Beijing: Science Press, 2002: 129 - 133. (in Chinese))

[6] SP-27 Designing for effects of creep, shrinkage, temperature effects in concrete structures[S]. Detroit: ACI, 1971: 51 - 93.

[7] 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, 2002: 39 - 43. (JTG D40—2002 Specifications of cement concrete pavement design for highway[S]. Beijing: China Communications Press, 2002: 39 - 43. (in Chinese))