

水泥砼路面的温度翘曲与翘曲复合应力*

李祖伟

(重庆北方高速公路有限公司, 重庆 401147)

摘要: 针对置于刚性地基上的砼梁, 讨论了温度翘曲与翘曲应力、温度翘曲与翘曲复合应力的关系, 分析了温度翘曲对水泥砼路面的影响, 分析表明: 翘曲应力和复合翘曲应力对水泥砼路面的影响十分显著, 它与翘曲变形有直接的因果关系, 必须予以考虑。

关键词: 水泥砼; 路面; 温度翘曲; 翘曲应力

中图分类号: U416 216 文献标识码: A 文章编号: 1001-716X(2002)04-0024-03

当砼板的温度沿板厚不均匀分布时, 砼板将产生温度翘曲变形。温度翘曲的影响大, 在路面设计计算时, 必须加以考虑^[1-4]。但是, 也有文献^[5] (目前在国内很有影响的著作) 对是否考虑翘曲应力存在一些含糊的认识或者值得商榷的观点。其原因是对翘曲变形、翘曲应力、翘曲复合应力 (荷载和温度共同作用下) 几者的关系没有完全理清。

置于刚性基层上的砼梁, 若梁与地基无约束, 则梁将产生自由翘曲变形, 而如果梁与地基完全约束, 则翘曲应力产生并为最大, 且置于刚性地基上的砼梁的翘曲脱空量易于解析分析, 因此, 笔者将针对置于刚性地基上的砼梁, 讨论温度翘曲与翘曲应力、温度翘曲与翘曲复合应力的关系, 说明翘曲

的显著影响。

1 温度翘曲与翘曲应力

当板顶温度高于板底温度时, 板顶的伸长变形大于板底的伸长变形, 板的中部将向上拱起, 反之, 板的周边将向上翘起, 这一现象就是温度翘曲 (图1)。若温度梯度呈线性分布, 不计板的自重且板与地基没有约束, 温度将使板产生翘曲变形, 但此时的翘曲变形为自由翘曲变形, 板不会产生翘曲应力。当板与地基连接而出现足够的约束时, 板的翘曲将会被阻止, 此时将产生翘曲应力, 所以, 翘曲应力只能在翘曲变形被阻止时发生。



图1 砼路面板的温度翘曲变形

温度翘曲应力最极端的情形是板被完全刚性约束时, 此时, 板底 ($T_1 > T_2$) 或板顶 ($T_2 > T_1$) 的翘曲拉应力为

$$\sigma = E\alpha_t \Delta T / 2(1 - \mu) \quad (1)$$

式中: E —砼面层的弹性模量; α_t —砼的热膨胀系数; ΔT —板顶面和底面的温度差; μ —砼的泊松比。

若被完全刚性约束的面层不是双向板而是单向梁, 则梁顶或梁底的温度翘曲拉应力为

$$\sigma = E\alpha_t \Delta T / 2 \quad (2)$$

若取 $E = 3 \times 10^4 \text{ MPa}$, $\alpha_t = 1 \times 10^{-5} / ^\circ\text{C}$, $\Delta T = 15^\circ\text{C}$, $\mu = 0.16$, 则对于砼板, $\sigma = 2.65 \text{ MPa}$, 对于砼梁, $\sigma = 2.30 \text{ MPa}$ 。

可见, 当温度翘曲变形被完全限制时, 翘曲应

* 收稿日期: 2002-05-13

作者简介: 李祖伟(1962—), 男, 重庆江津人, 高级工程师, 从事公路桥梁建设、管理工作。

力是很大的。

而通常的路面与地基并非完全的刚性约束，其翘曲应力将比以上理论计算值小。

2 温度翘曲与翘曲复合应力

尽管自由温度翘曲时没有翘曲应力产生，但翘曲将引起板脱空而使板的支承状况发生改变，在自重和外载的作用下，板将产生显著的应力，这种应力的产生与翘曲变形有直接关系，称为翘曲复合应力。

为了便于解析分析，我们考察一矩形截面的砼梁平放在完全刚性的地基上，当梁顶温度大于梁底温度时，梁的中部会因翘曲而上拱（图 1），此时若不计算梁的自重，则梁有翘曲变形而没有翘曲应力。设梁长为 L ，高为 H ，宽为单位 1，此时，梁的中性轴因翘曲而变为一圆弧，圆弧的半径为

$$R = H / \alpha_t \Delta T \quad (3)$$

由此可算得自由翘曲时梁的跨中离开刚性地基的距离（脱空量）为

$$\delta = R - \sqrt{R^2 - (L/2)^2} \quad (4)$$

由于梁因翘曲而中部离开地基，仅两端支承在地基上，可以认为梁为一长度为 L 的简支梁，如果将梁的自重视为一集度为 q 的均布载荷，则在 q 的作用下，梁跨中的挠度为

$$\delta_y = 5qL^4 / 384EI \quad (5)$$

其中（对单位宽度的梁）： $I = h^3 / 12$ ，令

$$\delta = \delta - \delta_y \quad (6)$$

当 $\delta = \delta - \delta_y > 0$ 时，自重作用下梁的跨中下挠量 δ_y 小于自由温度翘曲引起的脱空量 δ ，此时，尽管没有约束温度翘曲应力，但自重 q 将在梁底产生拉应力，此拉应力与温度自由翘曲引起的梁的脱空有因果关系，本文称其为自重产生的复合翘曲应力 σ_1 ，其计算公式很容易由材料力学得到，为

$$\sigma_1 = 3qL^2 / 4h^2 \quad (7)$$

由于此时自重仍未完全消除梁的脱空，梁与地基仍有剩余脱空量 $\delta = \delta - \delta_y > 0$ ，梁的支承状况仍可视作简支，当载荷作用在梁上时，梁将首先消除脱空然后再与地基接触，这里，我们定义一个临界载荷 P_c ，它作用在梁的中点， P_c 的作用刚好使梁的中点消除剩余脱空量 $\delta = \delta - \delta_y$ ，则

$$P_c = 48EI \delta L^3 \quad (8)$$

当 $P < P_c$ 时，可近似认为梁整体脱空， P 产生的应力可按简支梁计算，本文称其为集中载荷产生的复合翘曲应力 σ_2 ，其临界值 σ_{2c} 由 P_c 产生，为

$$\sigma_{2c} = 3PL / 2h^2 \quad (9)$$

当 $P > P_c$ 时，可认为梁与地基完全接触，其复合翘曲应力的计算比较复杂，难以解析求解，本文不作进一步分析。

当 $\delta = \delta - \delta_y \leq 0$ 时，自重作用下梁的跨中的下挠量 δ_y 大于自由温度翘曲引起的脱空量 δ ，此时 $\delta = \delta - \delta_y$ 取等式才有物理意义，即应取 $\delta = \delta - \delta_y = 0$ ，表示自重作用产生的下挠量完全抵消翘曲产生的脱空量，此时的复合翘曲应力的计算难以解析求解，本文不作讨论。

当板的底面温度大于顶面温度时，自重及外载产生的复合翘曲应力为压应力，使板偏于安全，本文不作分析。

联立求解（3）—（9）式可得出梁中部翘曲上拱时梁在不同长度时自由翘曲引起的梁中点脱空量 δ 、自重产生的梁中点下挠量 δ_y 、自重引起的复合翘曲应力 σ_1 、临界载荷 P_c 、临界复合翘曲应力 σ_{2c} 。表 1 为对 3m—10m 的梁的翘曲脱空量和复合翘曲应力的数值计算结果，取砼的弹模 $E = 3 \times 10^4 \text{MPa}$ ，热膨胀系数 $\alpha_t = 1 \times 10^{-5} / ^\circ\text{C}$ ，沿梁厚温度差 $\Delta T = 15^\circ\text{C}$ ，梁厚 $H = 0.2\text{m}$ ，自重取 $q = 4660\text{kN/m}$ 。

表 1 不同梁长时梁的翘曲脱空量和复合翘曲应力的数值计算结果

梁的长度 (m)	自由翘曲引起的梁中点脱空量 δ (mm)	自重引起的梁中点下挠量 δ_y (mm)	$\delta = \delta - \delta_y$ (mm)	自重引起的复合翘曲应力 σ_1 (MPa)	临界载荷 P_c (kN/m)	外载引起的临界复合翘曲应力 σ_{2c} (MPa)
3	0.84	0.24	0.60	0.79	21.37	2.40
3.5	1.15	0.44	0.71	1.07	15.82	2.07
4	1.45	0.77	0.68	1.40	9.58	1.43
4.5	1.89	1.23	0.67	1.77	7.06	1.19
5	2.34	1.87	0.47	2.18	3.63	0.68
6	3.38	3.88				
8	6.00	12.26				
10	9.38	29.94				

3 讨 论

从以上的分析可知, 温度翘曲变形、翘曲应力、复合翘曲应力三者之间是有差别, 有联系的, 温度翘曲的影响显著, 主要体现在:

1. 有翘曲变形不一定就有翘曲应力, 若不计板或梁的自重, 板或梁的自由温度翘曲产生的变形是明显的, 比如, 对本文计算的砼梁(表 1), 当梁高 0.2m、梁长从 3m 增加到 10m 时, 自由翘曲引起的梁长中点的脱空量从 0.84mm 变化到 9.38mm, 尽管如此, 此时没有翘曲应力。

2. 翘曲应力是当翘曲变形被约束或阻止时产生的, 若板或梁与地基完全刚性约束, 翘曲变形被完全阻止, 则对砼板, 翘曲应力为 2.65MPa, 对于砼梁, 翘曲应力为 2.30MPa。实际的板或梁与地基的约束为弹性约束, 其翘曲应力会比刚性约束时小。

3. 自由翘曲尽管不产生翘曲应力, 但翘曲将使板或梁出现脱空, 使板或梁的支承状况发生改变, 自重或外载的作用将使板或梁产生显著的复合翘曲应力。比如, 对本文计算的砼梁, 翘曲使弹性地基梁变为简支梁, 当梁长 3m 增加到 5m 时, 自重产生的复合翘曲由 0.79MPa 增加到 2.18MPa, 此时, 自重引起的梁的下挠量还不足以抵消梁的翘曲

脱空量, 翘曲脱空量与下挠量之差仍很显著, 在梁的中点还需作用 21.37kN 到 3.63kN 的集中载荷才能使这一剩余脱空量消失, 此时, 在自重引起的复合翘曲应力的基础上, 还需附加从 2.40MPa 到 0.68MPa 的由外载引起的复合翘曲应力。可见, 复合翘曲应力对水砼路面的影响十分显著, 它与翘曲变形有直接的因果关系, 必须加以考虑。

4. 当梁长超过 6m 后, 自重产生的下挠量超过了翘曲脱空量, 自重使梁与地基接触, 此时的复合翘曲应力仍很显著, 可以判断, 当梁与地基完全接触则自重产生的翘曲复合应力至少在 2.30MPa 以上(尽管表 1 未列出), 由于计算的复杂性, 本文未给出其具体值。

参考文献:

- [1] 姚祖康. 水泥混凝土路面设计 [M]. 合肥: 安徽科学技术出版社, 1999.
- [2] 姚祖康. 公路设计手册—路面(第二版) [M]. 北京: 人民交通出版社, 1999.
- [3] 中华人民共和国行业标准. 公路水泥混凝土路面设计规范 (JTJ012-94) [S]. 北京: 人民交通出版社, 1994.
- [4] 邓学钧. 路基路面工程 [M]. 北京: 人民交通出版社, 2000.
- [5] 黄仰贤(美)著; 余定选, 齐诚译. 路面分析与设计 [M]. 北京: 人民交通出版社, 1998.

Temperature warping and warping related stress of cement concrete pavement

LI Zu-wei

(Chongqing Nothem Expressway Co. Ltd. Chongqing 401147, China)

Abstract: The relationship among temperature warping deformation, temperature warping stress and warping related stress is analyzed for a cement concrete beam placed on rigid basement. It is shown that the influence of temperature warping is remarkable to cement concrete pavement.

Key words: cement concrete; pavement; temperature warping; warping stress

责任编辑: 袁本奎