

混凝土桥梁的温度分布

铁道科学研究院 刘兴法

近二十年来,混凝土桥梁结构工程的实践证明^{[1][2]},在设计中仅考虑年气温变化影响,是很不够的,为了确保桥梁结构的刚度与强度,还应考虑短时温度变化的影响。

关于预应力混凝土桥梁温度应力试验研究表明,太阳辐射(或寒流降温等)引起的桥梁结构的温度变化,所产生的危害作用,比年气温变化影响更大,已成为混凝土桥梁结构发生有害裂纹的主要原因^{[3][4]}。所以,在桥梁结构设计中,为了确保结构的刚度与强度,检算桥梁结构的温度应力,已是十分必要了。为此,首先要弄清温度荷载大小和分布规律。目前,国内外,有关温度荷载计算方法较多,有差分法、有限元法、近似解析法等。本文想从已有的文献资料和试验研究基础上,寻求一种适用于工程实践的计算方法,以求得简便地计算温度荷载的目的。

一、温度荷载形成、分类、特性

置于自然环境中的混凝土桥梁,经受各种气象条件的影响,因素颇多,错综复杂。显然,混凝土桥梁的表面(或内部)温度都在随时发生变化。它与所处的地理位置、地形地貌条件、桥梁结构方位、朝向、日照时间、季节、太阳辐射、寒流、气温变化、近桥梁结构的风速、风向以及云、雾、雨等有关。这些因素综合作用结果,在桥梁结构的内外表面边界处,不断地以对流、辐射和传导等方式与周围空气介质进行热交换。太阳辐射以电磁波方式将热能直接传至结构外表面,经混凝土表面吸收后,转化为热流;热空气(或冷空气)则通过与结构表面的对流方式直接换热,向结构表面传递热量,但综合效果是使结构表面迅速升温(或降温)。

对于混凝土桥梁来说,温度荷载一般可分为以下四种类型:日照温度变化、寒流降温、年气温变化以及水化热引起的结构温度变化。而且各具有明显的特点,如表一所列。

表 1

	主要因素	影响范围	时间性	分布状态	复杂性	对结构影响
日照温度变化	太阳辐射	局部区域	瞬变	不均匀	复杂	局部应力大
寒流降温	强冷空气	整体	短时	四周均匀	一般	外表面拉应力大
水化热温度变化	混凝土水化热	局部区域	短时	不均匀	较复杂	外表面发生拉应力
年温变化	气温变化	整体	长期	整体均匀	简单	整体位移大

日照温度变化:混凝土桥梁因日照温度变化引起的表面和内部温度变化,是一个随时间

而变化的复杂函数,具有明显的谐波曲线特性,且随壁板朝向而不同,又有太阳辐射引起的明显的局部性,混凝土导热性较差引起的沿板厚分布的非线性。似乎很难进行定量分析。但问题也并非如此,我们可以从大量的实测资料分析中,得出以下的结论:在桥梁结构的地理位置、桥位方向以及时间确定情况下,影响桥梁结构日照温度变化的主要因素是,太阳总辐射强度、寒流、气温变化、风等几个因素。如从工程应用角度考虑,为了寻求设计温度荷载,风速这个因素也可忽略。因为,当结构表面达到最高温度时,风速实际上是很小的,接近于零。这样,我们从设计的控制温度荷载考虑,影响混凝土桥梁结构表面温度因素,实际上只有太阳总辐射强度、寒流和气温变化等三个了。这三个因素,气象台(站)均有观测资料可供使用。因此,我们可以用实测资料的数理统计分析方法,求得的表面温度计算式和沿壁板厚度的温差曲线的计算式,来确定桥梁的温度荷载。

寒流降温:实际上就是一定强度的冷空气流的冷却作用。因此,混凝土桥梁结构的表面和内部温度变化比日照时的结构温度变化要简单一些。寒流降温的时间过程约为24小时左右,比日照升温(降温)作用时间要长得多。寒流降温速率,根据长沙地区实测到历年最大降温为 24.7°C ,历时为23小时,平均降温速率为 $1.07^{\circ}\text{C}/\text{小时}$,最大降温时段的速率为每小时 4°C ^[5]。比日照升温时速率 $8.0^{\circ}\text{C}/\text{小时}$ 左右要小得多^{[6][7]}。因此,寒流降温引起的沿壁板厚度方向的温度分布曲线较平坦。根据实测资料,对于长沙地区,壁厚为70厘米的空心墩结构,将需17小时才能达到最大温差,其负温差为 9.7°C ^[5]。

二、几种混凝土桥梁结构的温度分布

本文讨论的混凝土桥梁结构的温度分布,是对于设计来说,成为控制情况的几个特定时刻的温度分布状态,并非任意时刻的温度分布,现按混凝土桥梁结构的类型分述如下:

1. 实体矩形桥墩

实体矩形桥墩的温度分布,相对于其他结构来说,比较简单,现就接近东西朝向的实体矩形桥墩的温度分布状况简述如下,根据郭溪桥等现场实测资料和电算分析结果^{[8][9]},对于桥墩设计来说,日照温度场可归纳为四种典型分布状态:

(1) 凌晨日照降温温度场,如图1(a)所示。此时,桥墩外表面温度下降至最低点,墩身中心温度与墩壁表面温度之差,达到最大。温度分布曲线为向上弓起的二次抛物线。这种温度分布出现时刻,视地理环境、桥位和墩壁厚度而异,一般在午夜12点至凌晨2点左右。寒流作用下,也会出现这种温度分布。因此,这是一个典型的降温分布状态。其线型随着降温速度增大,而接近双指数曲线。

(2) 上午东壁面受日照作用,在无云条件下,受阳表面温度迅速上升,而背阳壁面温度仅回升到墩身中心温度附近,形成如图1(b)温度分布状态。成为一条自背阳面至向阳面单向递增的指数曲线。

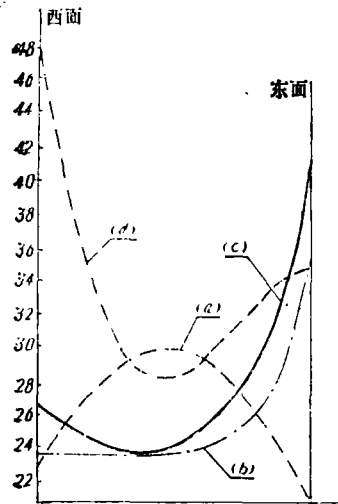


图 1

(3) 上午东壁面温度达到最高时, 此时, 西壁面温度亦略有上升, 形成如图 1 (c) 所示的温度分布曲线。可近似地用二条指数曲线迭加而成。

(4) 下午西壁面温度升至最高值, 此时东壁面温度已下降, 如图 1 (d) 所示。可近似地用一条三次抛物线表示。

上述四条沿桥墩厚度方向的温度分布曲线, 均在一般天气条件、不同时刻下测得的, 作为设计温度荷载来说, 在深秋、严冬的不利天气条件下, 当桥墩处于晴天无云的日照情况, 笔者认为: 温度分布曲线 (c) 将与 (b) 相接近。因为上午东壁面的表面温度达到最大值时, 背阳的西壁面仅只受到气温变化的影响, 当气温变化在上午处于相当稳定的情况下, 西壁面的表面温度, 也只能回升到桥墩中心的温度, 这种情况是有可能的。因此, 温度分布曲线 (c) 与 (b) 一致, 也成为一支单向指数曲线。同样, 第四种下午西壁面日照升温时温度分布曲线, 也可能出现这种状况, 成为一支自西向东递减的单向指数曲线。

综合上述, 实体矩形桥墩的控制温度分布曲线, 可概括为二种线型, 即一种为上午东壁面(或下午西壁面)日照升温时的单向指数曲线, 另一种是降温温度分布曲线, 可用二次抛物线或凸形双指数曲线来表示。根据资料〔8〕〔9〕分析, 对于墩壁厚度为 70 公分左右情况, 单向指数曲线 $y = T_0 e^{-ax}$, 其中 T_0 约为 16°C , 指数 a 近似地等于 10。

2. 箱形桥墩

预应力箱形桥墩, 国内首次建于成昆线的和平村大桥。设计中, 曾考虑了温度应力问题, 并因此增设大量预应力钢丝束。限于当时对温度荷载的认识水平, 又无试验依据。因此, 在 1966 年曾对该桥的 6 号墩进行了全面的温度场观测〔6〕。同年 5 月 13 日 16 点 44 分曾测得最大温差为 15.2°C 。此时, 背阳板的温差很小, 仅为向阳壁板的 9%。箱形墩沿横断面温差分布, 在忽略背阳板的很小温差部分后, 则可按单向温度分布曲线计算, 即 $T_x = T_0 e^{-ax}$, 其中指数 $a \approx 7.0$, 温差 $T_0 \approx 16^\circ\text{C}$ (在无实测资料时)。这种情况, 在不利气象条件下, 是有可能出现的。沿板厚的温差分布也可用指数曲线表示, 对于向阳壁板 $a' = 10$, $T_0' = 12^\circ\text{C}$ 。

当斜照时, 即二个壁板同时受日照, 则须分别按顺桥和横桥方向的温差分布计算, 然后再叠加而成。

3. 圆形空心桥墩

圆形空心桥墩的温度分布, 具有广泛的工程意义, 无论是大型钢筋混凝土电缆塔、电视塔或是大型筒仓、蓄水池等圆形空心钢筋混凝土结构都具有相同的温度分布特性。

圆形空心墩外表面, 其周边各点因其表面方位角的不同, 当日照时, 因太阳辐射引起的沿周边各点的表面温度也不相同。在圆形桥墩的周边上, 因太阳辐射和大气等影响, 当发生最大温差时, 表面温度如何分布, 这是圆形空心桥墩温度荷载的一个重要问题。笔者在资料〔10〕中, 根据国内外文献资料分析, 曾提出按 $T_\theta = T_0 \left(\frac{1 + \cos \theta}{2} \right)$ 分布式中 T_0 为墩壁内外表面温差。按比式计算与实测值相当接近。但在背阳端, 即 $\theta = \pi$ 点附近的很小范围内有些偏差。这一偏差是由于实测时并非处于冬季最不利气候条件所致。由资料〔11〕可见, 背阳壁面内外表面温差接近于零的情况, 是很有可能出现的。此时沿墩壁四周的温度分布将与上式计算值更接近了。

现来分析沿径向的温度梯度。这是一个热传导问题, 一般说来, 空心墩是一个三维热传

导问题。但因沿墩高方向的温度分布差别微小,可以认为沿墩高方向是均匀分布的。故只需考虑截面上的温度分布问题。但这里需要明确的是,究竟是二维热传导还是一维热传导?笔者根据资料[11]中的实测资料分析,认为基本上是一维热传导,仍可用一维热传导来处理。这一点也可由实测的圆弧形等温面明显可见,热量是沿着等温面的法线方向传播,因为这是热量传播的最短路径。因此,圆形空心墩的温度分布,可用近似的二维分布一维热传导的计算图式来分析。

在确定一维热传导的情况下,就可参照实体矩形墩的温差分布公式 $T_x = T_0 e^{-ax}$ 来计算沿径向的温差分布。这样,圆形空心墩沿截面温差分布,即可按下式计算:

$$T_{\rho, \theta} = T_0 \left(\frac{1 + \cos \theta}{2} \right) \cdot e^{-a(R-\rho)} \quad [10]$$

式中 T_0 沿径向壁厚温差根据实测分析,一般可取 20°C 。 θ 圆心角取计算向阳面法线为零度。 R 外圆半径, ρ 极坐标中径向坐标值。 a 指数,根据实测 $a \approx 10$ 。

寒流降温时,对于壁厚为70公分的空心墩,负温差 $T'_0 = -10^\circ\text{C}$,指数 $a \approx 5$ 。

4. 箱形梁

无碴无枕箱梁的温度分布,与上述桥墩温度分布不同,在箱梁中,顶板表面受日照时间很长,腹板受日照时间较短,因此形成沿梁高温差大,沿梁宽温差较小的温差分布状态。

一般情况下,箱梁处于两个方向同时受日照状态,即上午东腹板与顶板受日照作用;下午顶板与西腹板受日照作用。只在有碴箱梁中,才出现单向受日照状态,即上午东腹板受日照,下午西腹板受日照作用。箱梁的底板,终日不受日照,又处于高空中,通风冷却良好。因此,底板表面温度,有时比气温还低一些,是整个箱梁截面温度最低处。故沿梁高方向的温度分布,更接近于单向温度分布。

沿梁宽方向温度分布,在上午东腹板受日照作用下,当表面温度达到最高时,是一个典型的单向温度分布状态。下午西腹板受日照作用时,沿梁宽方向温度分布状态,呈二边翘起的温度分布状态,不过背阳板一边反翘较小。

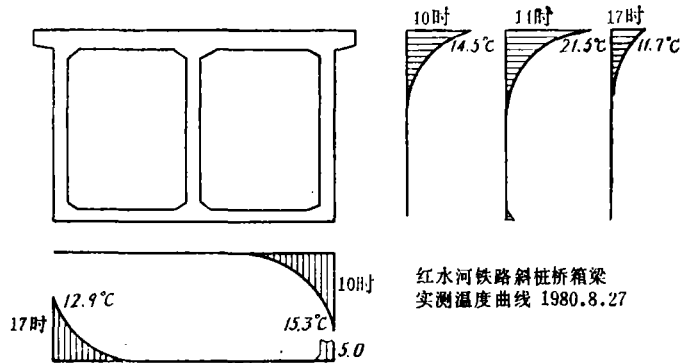


图 2 红水河斜拉桥实测温度曲线1980.8.27

有了沿梁高(宽)方向的温度分布,根据实测资料分析,即可确定箱梁的控制温度荷载。图2为红水河斜拉桥实测温差分布曲线,沿梁高(宽)方向均为指数曲线,根据回归分析,指数 $a = 5.0$ (梁高方向),而梁宽方向的指数为 7.0 [12]。

日照降温时,箱梁四周产生内高外低的负温差。由红水河斜拉桥等实测资料可知,对于薄壁箱梁(板厚小于30公分),日照降温时负温差相当小,顶板约为 5.0°C 左右,其他各板约为 2.0°C 左右。估计比寒流降温要小一些,这一点与厚壁箱梁不同。

关于温差 T_0 的确定,可按下式计算:

$$\text{日照时, 沿梁高 } T_0 = 0.023 S_0 + 0.25 W$$

沿梁宽 $T_0 = 0.026S_h$

式中 S_0 ——水平面上日最大日辐射强度, 大卡/米²·小时;

W ——日较差°C;

S_h ——腹板上日最大日辐射强度, 大卡/米²·小时。

寒流降温时, 各板的负温差 T'_0 , 可近似地按 $T'_0 = 9.0^\circ\text{C}$, $\alpha' = 8$ 考虑。

这里应指出, 没有考虑箱梁角隅区的影响, 因为这个区域中的热流与温度分布很复杂。但根据资料[13]分析, 就温度应力而言, 可以忽略这一角隅区的影响。

5. 混凝土水化热温度分布

混凝土桥梁结构的水化热温度分布, 是大型桥梁在施工期必须关注的问题。在混凝土灌注后, 梁体内各点温度有一个急剧上升, 达到峰值, 然后长时期下降直至平衡的变化过程[14][15], 分布较复杂。但可采用以下几种方法: 1. Schmidt法; 2. 差分法; 3. 有限元法等计算。用这些方法计算结果与实测都很接近。唯梁体表面与大气介质或与地基之间的热交换系数、导热系数等要取得合适, 在必要时须进行实测, 以控制梁体内外温差, 防止温度裂纹。

参 考 资 料

- | | | |
|---------------------------|-----------------|-----------|
| (1) 预应力混凝土桥由于温差引起的损坏 | } 混凝土与钢筋混凝土 (德) | 1965.7 |
| (2) 关于预应力混凝土桥损坏的结论 | | 1970.1 |
| (3) 混凝土桥开裂的原因与补救 | | 1979.2 |
| (4) 国外混凝土结构热应力问题专辑一、二 | 铁研院西南所 | 1978、1980 |
| (5) 空心高桥墩温度应力试验研究总结报告 | 铁四院科研所等 | 1981.7 |
| (6) 和平村大桥箱形墩温度应力观测报告 | 铁研院西南所 | 1966.8 |
| (7) 红水河铁路斜拉桥箱梁温度应力分析 | 铁研院西南所 | 1983.8 |
| (8) 罗依溪桥温度场测试及温度应力分析报告 | 铁四院桥隧处 | 1978.9 |
| (9) 柔性墩温度场及温度应力研究报告 | 上海铁道学院 | 1981.12 |
| (10) 圆形空心墩的日照温度应力与位移分析 | 《铁道标准设计通讯》 | 1981.3 |
| (11) 空心高桥墩温度应力科学试验阶段报告 | 铁四院科研所等 | 1978.8 |
| (12) 关于混凝土箱梁的温度分布 | 铁研院西南所 | 1982.11 |
| (13) 《太阳辐射对混凝土桥梁结构的影响》 | 中国铁道出版社 | 1981 |
| (14) 预应力混凝土箱梁制造阶段温度场试验 | 《桥梁建设》 | 1981.4 |
| (15) 红水河铁路斜拉桥 5*梁段水化热试验报告 | 铁研院西南所 | 1980.4 |