

国外砗结构热应力问题专辑

铁道部铁道科学研究院西南研究所

X6/17 U44/2

目 录

在桥梁中的热应力和位移	1
前言	1
气温	4
桥的温度	5
热应力和位移	10
现行规范	18
将来要求	20
摘要和结论	21
桥梁设计的热计算	23
温度分析	24
应力分析	33
结论	43
予应力砼箱形桥在热荷载作用下的模型试验	47
前言	47
理论	48
模型	49
热荷载	53

结果 54

讨论和结论 57

薄壳砼冷却塔的热荷载 59

前言 59

工作温度产生的轴对称荷载 61

非轴对称的太阳荷载 66

砼断面和热弯曲应力 68

结论 79

在桥梁中的热应力和位移

前言

在桥梁中热所引起的应力或位移或二者的大小和效应之难以确定是桥梁设计工程师较为关心的。桥梁中的热效应由短期日温变化和较长的季节变化二者产生。桥的纵向变形包含有许多因素，但在被考虑的主要因素中除结构早期的蠕变和收缩之外还有热引起的位移。由于有这些因素所以在设计过程中应考虑热应力和位移。然而由于缺乏合理的设计标准，一个设计工程师就不能确信他所设计的结构是最安全且最经济的。因此，许多不经济的结构不是由于设计过强初始费用较高，就是由于设计过弱养护费用较高。

为了确定设计人员在处理桥的热应力和位移时所碰到的问题，Ekberg和Emanuel曾作过调查。从40个州的公路部门及96个桥梁工程师的答复中可以看到，考虑钢桥的热效应比之考虑砼桥的热效应更为经常。设计工程师希望有一个合理的热效应设计方法。他们也对由于周围温度变化和持续所产生的各种桥的实际位移和实际温度分布的有关知识表示兴趣。

在现行设计中：一般都不考虑简支梁和连续梁的热效应，而假定在伸缩装置上的位移可以解除任何由此产生的应力。然而沿梁全高的不均匀温度^分布能产生数值相当大的局部应力。对于如何计算由非线性温度分佈所产生的热应力有许多不可靠因素。

对桥的热效应需作更多研究这一问题曾在1960年发表过讨论。特别强调了四个概念：(1)因在设计中忽略了热效应，以致许多结构遭到热应力的损害；(2)在设计中对热应变应有适当规定如对待载活载的规定一样；(3)安全应是第一位的考虑，但既经济而又能防止结构损害的好工程也应仔细考虑；(4)与其一定为温度改变产生的自由位移提供条件，不如设计能阻止热应力仍结构更为经济。

自1960年以来在有关桥的热应变问题范围内曾作过许多工作。Juk曾对7座桥进行观测。他研究了以一年为周期的各个周期。其目的是能规定出由一组已知条件即可预知温度分布的某些基础。他记录了每天每年的温度分布，并发现气温、风、湿度、太阳辐射强度和材料种类通通都影响温度分布。例如，在钢和砼的组合桥中，砼桥面被太阳辐射从桥顶向下加热，而同时桥面下的钢大部分白天都被荫蔽着，保持其温度约等于周围温度。于是就形成非线性温度分布，产生热应力、或应变，或同时产生二者。季温变化产生的热位移比日温变化产生的更

大。在热效应研究中的一个难题是既能产生应变也能产生应力或二者同时产生。若材料是自由膨胀的，就有热应变没有应力。若材料是完全受约束不能移动的，就有热应力没有应变。然而，常常是应变与应力组合在一起，因为材料绝不是完全自由移动的，也不是完全被约束住的。由蠕变、收缩、湿度、水浸泡与重变化等产生的应变使对热应变的研究复杂化。

不能如所希望那样起作用的伸缩装置（例如冻结的摇轴）是不经济的，并能对结构造成损害。对热位移和应力大小的认识使设计人员有可能对不同种类的支座、伸缩装置和封闭连结进行比较合理的选择。

减少结构的伸缩接缝的数目既可减少乘车人在这些接缝处感受到颠簸和不平，又能减少所需的接缝养扩量。数目较少的接缝尺寸必须稍大些，所以强调应知道所希望的位移量的重要性。

由于温度下降产生的砼收缩将使在滚轴支座上的砼连续桥面缩短。予应力连续梁由于再施应力产生的弹性压缩和塑性流也将缩短。因桥面通常由于两端向内移动而缩短，在桥面上的某个点将是不移动的。被认为是停滞点的这个点位于桥面支点的水平加劲的重心。停滞点的位置可由于采用支座种类不同而在一定范围内变动。为停滞点为已知，桥面其他部分的移动就是定了的，对于各种支座上所希望移动（热的或其他）就可以有一个比较清晰的概念，于是由于桥面移动而传递于桥墩台

上的水平力就能更接近真实地计算出来。

本文试图把桥的热作用情况和对所产生的热效应的研究告知读者。与桥的热效应有关的研究成果被修订分类。周围温度与桥的温度的关系，以及周围温度和桥的温度与热应力和位移的关系都被研究。美国(AASHTO-1969)和德国(DIN-1967)关于桥上热效应的现行规范要求亦被提及。

气温

气温记录对于设计工程师是重要而有用的工具，用以估算结构的温度效应。气温以及其他气候资料，诸如湿度，风和日光量差不多在世界所有地区都被正规地记录。翻译地方气候资料，在设计中就能作适当准备以阻止或容许由于温度改变引起的位移。

有两种基本的温度周期：日周期和年周期。日周期总是以太阳刚升起之前达到的低温开始。太阳露面后温度即稳定上升直至达到白天的峰值。此值通常在下午太阳落下之前不久小时达到，然后迅速下降，在次晨太阳升起前达到低值。云能够改变基本日温周期。它遮蔽地面或释放某种降雨，此两种情况都能使温度骤然下降。从较冷或较热地区流入当地的转输气流掩盖本来的日温周期。由地球与太阳关系位置 and 距离的变化形成了年温周期。对于设计工程师两种温度周期都是重要的。日周

期对全结构的不同部分提供快速的温度变化，而产生周期产生最大的全部位移。

为了努力定出温度范围和设计桥时应考虑的位移，Emerson 用了英国的绝对温度和平均最大最小温度的气象记录。她发现英国的标准未规定适应于英国任何地区的温度范围，而且记入表中的最小温度太高。其他英国研究人员亦曾用气象局的记录尽力定出环境变化在桥上的反应。Bewenger 用温里柏格国际航空港的记录帮助选择一座桥中的三种可能温度分布。

Steward 用位于桥址附近的政府气象站记录的温度来计算桥的热膨胀系数。

桥的温度

桥的底部构件通常有与空气相同的温度。上部构件与外部梁随吸收太阳辐射量、风、降雨形式和降雨量不同而温度有变化；当太阳光照射于暴露的桥面板时，板顶比桥底温度高。在降雨或暴风雪开始时，顶部比梁冷得快。在太阳刚升起之前因气温保持近于恒定几个小时，桥的温度即是均匀的。而沿桥的全高温度分布有可能是变化的。

研究者曾用过几种不同的温度分布。Bewenger 发现三种温度分布是有代表性的，最可能发生在有砟桥面和钢梁的结合梁中。桥面底部的温度假定与钢梁相同。第一种情形是整个

桥面板温度均匀。第二、第三种情形是桥面板有非线性的温度变化。一种是版顶底热，一种是版顶较冷。

Maier 在他对于应力砼连续箱形梁的研究中，假设箱形断面顶版的温度分布是线性的。这个假设是基于对Madway桥和西Avenue悬臂梁桥的实测，它指出在箱形断面的顶版中温度梯度近似于线性。箱形断面的两边和底部假设为恒定温度。

Juk 采用各种线性温度梯度并发展了弹性理论，用以确定在砼桥面和钢梁的结合梁中的应力和应变。后来他推广他的理论，可适用于结合梁的任何温度函数。

Liu 和 Juk 对四种予应力构件进行工作。(1)一根有直线筋的予应力梁；(2)一根有折线筋的予应力梁；(3)一根有直线筋并与砼版组合的予应力梁；(4)一根有折线筋并与砼版组合的梁。他们延伸 Juk 早期对结合梁的工作于这四种予应力构件，而且在他们所研究的问题中对于每种构件采用四种不同的温度分布。版与梁间交界面上的剪力矩以及钢筋中的力由解三个联立方程确定。

几个研究者不仅曾记录桥中各点的温度，也记录了平均温度。Menjue 测量了在大不列颠的 Meat street Fegauer 的平均温度。在砼版中垂直埋入一个管子，深5英尺(127毫米)，管的一部分充以水银，将温度计插入管中量取温度。他用下列程式表示气温与砼版一半深度处的温度的关系：

$$\frac{0.156 d \theta_c}{dt} + \theta_c = \theta_a \quad (1)$$

式中 t = 时间, 以小时计, θ_c = 砼温度, 以摄氏度数计;

θ_a = 气温, 以摄氏度数计。Woolh 在研究 2,043 英尺 (623 米) 的 Hammersmith Flyover 时用以加勃站中间室量得的温度作为砼温度的标准。Emerson 用了平均桥温和前散热器的气温。

他尽力使英国南部三座桥的温度和位相相互有关: Medway 桥 (70% 砼梁和板, 30% 变高度砼箱); Hammersmith Flyover (砼箱形肋梁); 以及 Beachley 谷架桥/Wye 桥 (钢箱)

Jick 研究了两座桥的温度和变形: 一座 66 英尺 (20 米) 砼桥面和钢纵梁的组合桥; 另一座 36 英尺 (11 米) 的钢箱桥。用一台 24 点的自动记录仪来记录每孔梁整平高度和宽度各点每小时的温度。在坝敷和板的正常温度条件下进行变形量测, 力图使热应变与由其他原因产生的应变分开。对 66 英尺 (20 米) 的组合桥记录了一年周期的温度。然后在桥的中部 20 英尺 (6 米) 用 1 英寸 (25 毫米) 喷泡沫尿烷的绝热覆盖层, 又记录温度一个月。可以看到两种情况的典型温度分布。研究了绝热效果。绝热的目的是减少桥面板所经历的温度周期数。热流从绝热的梁流入板把板加热使其温度稍高于没有绝热的板温度。一个要注意的问题是被绝热的梁保持湿度的可能性。张力裂缝会导致腐蚀。对于 36 英尺 (11 米) 的钢桥记录了一年周期的温度。提

出某些有代表性的数值，包括梁和板的等温线。为所预期，在暴露于太阳的边上的梁和荫蔽着的夹在中间的梁之间发现了引入注意的差异。

Barber 导出并实验一个使气候因素与车道最大温度发生关系的方程式。为了用此方程式于不同地区和不同车道可以改变系数。在应用 Barber 的方程式以计算两种情况的最大桥面温度时，Juk 使系数有所发展。在中美大西洋沿岸各州对于正常的砼桥面，以华氏度计的最大表面温度是

$$T_m = T_a + 0.18L + 0.667(0.50T_r + 0.054L) \dots\dots\dots (2)$$

式中 T_m = 最大表面温度，以华氏度计； T_a = 日平均温度，以华氏度计； T_r = 日气温范围，以华氏度计； L = 在水平表面上接受的太阳辐射，以每天每平方厘米克—卡计。

混青覆盖的桥面板最大表面温度是

$$T_m = T_a + 0.027L + 0.65(0.50T_r + 0.081L) \dots\dots\dots (3)$$

简尔方程式中的常数随地方条件而变化。太阳辐射强度可由美国气象局地图确定或用廉价的太阳热量计量得。

一个计算的和砼组份梁顶部和底部最大温度差的近似方程式由 Juk 导出：

$$\Delta T_m = T_m - T_a - \lambda T_r \dots\dots\dots (4)$$

式中 λ = 表示最大表面温度和最大周围温度之间相位差的因子。对中部太平洋沿岸各州，夏季滞后因子用 $\frac{1}{4}$ 是适当的，冬季用 $\frac{1}{8}$ 。

立。沿版全高的温度分布方程式并被提出。把由这些方程式算得的结果与在野外对66英尺(20米)未绝热的组合桥验的结果相比较。如所预期,在阳光多的夏季午后,沥青覆盖的桥面板的最大温度的比正常的灰白色砼桥面板高 15°F (8°C)。计算的和量得的温度以及桥的顶部和底部的湿度差都十分吻合。沿版厚配筋的温度变化与算得的值相比较也很一致。设计人员应注意在沥青覆盖的车道上量得的较高温度,因为许多砼桥面板最终都会转铺面,可能全铺沥青。不要希望沥青铺面后的可能绝热值会减轻应力。在英国南部,要求沥青铺面厚度为2英寸(51毫米)。美国的一个研究指出在7英寸(178毫米)车道版上的3英寸沥青铺面层曾使版的最大表面温度降低三分之一。

在英国 Emerson 发现平均桥温的最大范围等于砼桥消散温度的范围。钢箱形断面梁的温度范围是从低于最小消散温度~~到~~到 4°C (5°F 到 7°F)到大约15倍于最大温度,以摄氏度计。

当观测66英尺(20米)组合桥的1年周期时, Zuk 在砼版顶量得 123°F (51°C)高温,气温为 97°F (36°C)。在钢梁底量得~~-6 $^{\circ}\text{F}$~~ (-21°C)低温,气温与之相等。在66英尺(20米)未绝热的桥上夹在中间的梁的最大温差是 37°F (21°C)。在两边的梁有 42°F (23°C)的差。绝热的桥比在绝热之前温度差大25%。此增加是由于空气传热于绝热的比较慢。

在日本 *Nomura, et al.* 在冷床和热床的试验台上进行试验。板有柏油面厚在1英寸(25毫米)和2英寸(51毫米)之间变化。当炉之上的最高气温是 95°F (35°C) 时, 炉对炉料的最高表面温度是 122°F (50°C) 而炉之下是 36°F (3°C)。大约在2小时后(下午4点)砵版达到它最高温度, 顶部温度 103°F (42°C) , 底部为 91°F (33°C) 两个温度都较在版顶和板底的空气高。

对于简支结构, 当版顶比版底热时, 所产生应力与由活载恒载产生的方向相反。然而, 当版顶比版底冷时, 由温度差产生的应力应与由活载恒载产生的相加。

热应力和位移

在均质的各向同性材料中均匀温度变化产生轴向变形。沿梁高的不均匀温度分布产生弯曲变形。在组合梁中, 砵桥面由密切连接锚固于钢梁。理论上在钢梁与砵桥面的接触面上没有位移。于是钢与砵不同的热膨胀系数将产生附加应力, 因为两种材料的位移被次要尽量配合一致。

大的温度梯度平常影响内部热应力较多, 而在夏冬之间温度变化使梁全体发生胀缩其影响较小。

对于一个设计者在考虑温度梯度在梁上的效应时有两种可利用的选择。或者给与足够尺寸和数量的伸缩连接以适应热位

移，或者使结构设计既能抵抗由于材料受约束不能移动而产生的应力。对于简支梁桥，通常采用第一种方法，而对于连续梁桥则常采用第二种，但是每种方法对两类桥也都适用。无论如何，设计者都必须知道将发生的是热应力还是位移抑或二者。几种桥型曾被研究以确定在不同温度时发生的位移。

Idamersmith Flyover 是一座预制的予应力砼连续四车道谷架桥，在两桥台之间是 2,043 英尺 (623 米)，16 跨，其中最多的跨度是 140 英尺 (43 米)。主要结构组成部分是支承于中心柱上的 26 英尺 (8 米) 宽连续空心梁。每一柱支承于一对摇轴支座上，允许位移范围为 10 英寸 (254 毫米)。是桥上部结构的全部纵向伸缩位移发生在一个伸缩接缝处。设计人员为伸缩接缝提供的位移量是 14 英寸 (356 毫米) [温度和湿度位移 10.7 英寸 (272 毫米)，徐变和收缩 3.3 英寸 (84 毫米)]。设计时采用热膨胀系数 $6 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{F}$ ($10.8 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$)，桥的温度范围 60°F (33°C)。在这座桥上进行了广泛的量测以确定温度、湿度、剩余的徐变和收缩的实际影响。用箱形断面结构内部气温来指示砼的温度。在一根柱上量得的位移是紧接在温度变化之后，没有明显的时间滞后。向于这些位移与内部气温之间的线性关系示于以三天读数点出的图中。在结构中观察到的温度范围是 50°F (28°C)。热位移是 8.3 英寸 (208 毫米)，相应于热膨胀系数 $6.7 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{F}$ ($1.21 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$)。假设湿度影响忽略不计。

Beaok 和 Adame 观测了在艾不列颠的五座桥的位移量。每座桥有不同的式样和尺寸。在每种情况中，由最靠近的管理记录站记录的，五天平均桥温（由一个连接的位移和假定的热胀系数算得）和平均周围温度^相是表明问题的。于是可以出版的五天平均周围温度来计算五天平均位移的可能范围。这一研究的动力来源于要修建更多较大跨度桥 [100-200 英尺 (31-61 米)] 的趋势以及由此类桥的更大位移所引起的接缝和支座问题的增加。各种适应热位移的接缝和支座的效果被研究。然而，作者们没有在他们的调查阶段对在特定情况下最适当的接缝和支座作任何明确的推介。

Berke 发现在英国工艺的改良为在桥梁中更充分地利用材料创造了条件，结果跨度更大的结构重量较轻。跨度更大在伸缩接缝上的位移亦成比例地更大。热位移是要研究的主要问题。一年的位移范围对砼桥定为跨度的 $\frac{1}{2}$ 英寸 (13 毫米) / 100 英尺 (31 米)，对钢桥为 $\frac{3}{4}$ 英寸 (19 毫米)。

Jurk 发表了对钢和砼组合截面热应力的理论研究。发展了弹性理论用以确定由各种线性热梯度模式引起的应力和应变。在分析中，梁和版分开，分别确定其应力，然后按照在交界面上无滑动和两部分在交界面曲率相等的边界条件和相容条件重新结合。由砼版和钢梁组成的组合梁任何部分的应力（轴向和横向二者）可由下式确定

$$\text{板: } f_{xs}(y) = \frac{F}{2ap} + 3y_s \frac{(Fa - \theta)}{2a^3 p} \quad (5)$$

$$f_{js}(y) = mf_{xs}(y) - C_s E_s T(y) \quad (6)$$

式中 $2a$ = 板厚，以英吋计； C = 热膨胀系数，以每英吋每华氏度计； E = 弹性模量，以每平方英吋磅计； F = 交界面上应力，以磅计； f_{xs} = 纵向板应力，以每平方英吋磅计； m = 泊松比； p = 板宽，以英吋计； θ = 交界面力偶，以英吋磅计； T = 温度变化，以华氏度计； y_s = 从板厚的一半处量得的距离（+T），以英吋计。

$$\text{梁: } f_{xl}(y) = \frac{-F}{A} + y_b \frac{(-E\alpha_1 - \theta)}{I} \quad (7)$$

式中 A = 梁面积，以平方英吋计； α_1 = 从重心轴到梁顶交界面的距离，以英吋计； f_{xl} = 梁的纵向应力，以每平方英吋磅计； I = 绕梁重心轴的转动惯量，以英吋的四方计； y_b = 从板厚的一半处量得的距离（+T）以英吋计。由这些方程式算得的若干数值，例如梁中的纵向应力高达 24,000 磅每平方英吋（166,000 千牛顿/米²），超过标准规范的限值。自然，这些理论值应由在理论发展中被忽略了的蠕变，滑移，以及局部塑性屈服的作用稍加修正。

Lin 和 Juk 扩大 Juk 早期的工作于予应力砼断面的组合断面。采用为予应力构件四种不同情况所推导的比较复杂

方程式计算交界面的剪力和力矩。沿着予应力板和梁有 25°F (14°C) 温度差时, 算得剪力和力矩高达 30.434 磅 (135 千牛顿) 和 122.877 磅英尺 (13.885 千牛顿-毫米)。算得砼应力在允许范围之内, 然而, 在板中的应力, 从 1000 磅每平方英寸 (6900 千牛顿/ 米^2) 张应力变到 800 磅每平方英寸 (5500 千牛顿/ 米^2) 压应力。假如仅按 AASO 需要设置最小量钢筋, 它们将使板发生裂缝。

Bewenger 推导方程式, 较充分地考虑了影响砼板与钢梁的结合梁中热应力的因素。在计算所产生的热应力时, 他不仅计及梁全高的温度梯度和同于钢梁与砼板间的热膨胀系数之差, 而且还计及加钢筋与砼板不同的热膨胀系数。

Idouk 在小的素砼梁上进行试验以研究在大体积砼结构中在牢固约束的位置由热引起的体积变化的效应。量测了砼梁外侧纤维的拉伸和压缩应变, 他发现这些热的应力—应变值的大小在临近破坏试验时是很有意思的, 由温度变化发展的应变与梁在加载破坏时所量得者接近, 伸缩接缝如没有适应膨胀的足够空间, 就会因牢固约束的位置。

Steward 研究了全加州 80 座桥中 231 个伸缩接头在三年周期时间内的位移。用于桥台的伸缩接头对全桥的位移很重要。在桥台处有伸缩接头的结构每单位长所增加的位移由加州山谷地区的 31% 到沙漠地区的 58% (加州在设计公路桥热位移时用 14