

实用混凝土箱梁温度应力计算方法

葛俊颖¹, 赵国军²

(1. 石家庄铁道大学 土木工程学院, 河北 石家庄 050043; 2. 河北省第二测绘院, 河北 石家庄 050031)

摘要:骤然降温和日照温差在混凝土桥梁截面上产生非均匀的温度分布,从而产生温度应力,而各国规范给出的温度梯度模式又不能准确反应特定桥梁个体的实际情况。详细介绍了基于ANSYS的温度应力计算方法,可以考虑季节、桥梁地理位置、走向、材料特性、结构尺寸、翼缘板对腹板的遮阴作用等各种因素的影响,计算出一天任何时刻的温度分布,然后根据温度场计算结果用超静定单元计算温度应力,不仅速度快而且对变截面梁、曲线梁等复杂情况均可取得满意结果。

关键词:桥梁工程;预应力混凝土桥梁;温度效应;骤然降温;日照;实用计算;ANSYS

中图分类号:U441 **文献标识码:**A **文章编号:**2095-0373(2010)02-0117-06

0 引言

桥梁结构暴露在大气中,结构受力将受到温度影响。温度影响一般包括均匀温差和非均匀温差:均匀温差是指外界温度变化缓慢,结构各部温度均值变化的情况,比如年温差和昼夜温差(这里昼夜温差指不考虑日照和骤然降温的情况);非均匀温差一般指日照温差、骤然降温温差或混凝土水化热等的影响,这些因素都会在结构中产生非线性温度梯度^[1]。

均匀温差因为截面上温度在任何时刻均一致,温度场不需计算,温度应力用力学方法很容易求解;非均匀温差的情况非常复杂,截面上温度分布不均而且随时间变化,求解这类温度应力一般都用有限单元法^[2]。

混凝土水化热引起结构内的温度变化,问题虽然复杂但可在施工中用温度控制方法予以调节,目前各国规范中的桥梁温度应力计算一般不包括此项影响,在此不予讨论。

日照温差对结构的影响最复杂,要考虑桥位地理位置、季节、日照时间、桥梁方位、材料特性、结构尺寸、翼缘板对腹板的遮阴作用等各方面的影响,我国现有公路和铁路桥梁规范中的温度梯度模式没有准确考虑地域、时间和桥梁具体形式,而是笼统地给出了一个温度梯度模式,显然是准确性不够的。骤然降温仅考虑箱梁内外温差变化,相对简单些。骤然降温和日照温差产生的非线性温度梯度对桥梁的影响最显著,本文主要针对骤然降温和日照温差对预应力混凝土箱梁的影响展开研究,考虑地域、季节、时间和桥梁的具体形式,可以将骤然降温和日照效应的计算精确到个体的桥梁,并通过编程实现在PC机上的高效计算。

1 温度场计算

实测资料分析表明,温度沿桥梁长度方向的分布总是很接近的,工程上可以忽略温度沿桥长方向的微小变化^[3]。由于大跨桥梁一般都是变截面,而且梁高变化较大,所以选取沿梁长方向的尽可能多的截面做平面热分析,然后将这些截面的温度场转化为温度荷载施加到空间结构上,最大限度地考虑日照温差对桥梁结构的影响^[4]。

收稿日期:2010-03-04

作者简介:葛俊颖,男,1969年出生,副教授。研究方向为桥梁CAE,桥梁监控。

基金项目:国家自然科学基金资助项目(50878135)

1.1 日照温差

主要考虑太阳辐射、物体间的长波辐射、与空气间的对流换热和腹板的遮阳影响^[5],这些内容的计算属于热分析。

太阳辐射部分最复杂,这里是通过天文计算,得到作用于桥梁结构表面的热流密度。箱梁的顶板、腹板、底板受太阳辐射影响各不相同,对于顶板表面受到太阳直射、散射的影响,翼缘下缘受到地面反射的影响。腹板外表面受到太阳直射、散射、反射的多重影响,阴影处则要扣除太阳直射这一部分。底板外表面则受到地面反射作用。

任何温度高于绝对零度的物体都具有热辐射能力,长波辐射是混凝土表面以电磁波形式向外界发射辐射,同时吸收来自大气及周围环境发射的辐射。长波热辐射的大小主要取决于箱梁表面温度、空气温度、湿度等。箱梁表面温度越高,与大气之间的温差就越大,长波热辐射就越大。如果空气湿度越大,大气辐射就越强,长波热辐射就越小。夜晚,特别是凌晨,箱梁表面与空气温度都下降,并且两者之间温差减小,因而长波热辐射很小。

热对流是指固体的表面与它周围接触的流体之间,由于温差的存在引起的热量交换。对流换热热流主要与接触面的性质、大小、流体的速度、流动空间以及流体与接触面间的温差有关。

实际用 ANSYS 计算时,将太阳辐射(即短波辐射,包括太阳直接辐射、地面反射和散射)、对流、热辐射(长波辐射)统一转换为热流密度,其计算公式参见文献[5-7],此不赘述。

箱梁的悬臂部分对腹板有遮阳影响,如图 1 所示。在阴影范围内,不可能有直接辐射,因此在热分析中的边界条件上要扣除太阳直接辐射的影响。阴影长度 l_s 可以依据悬臂长度由几何关系来确定

$$l_s = l_c \tan h / [\sin(90 + \gamma - \gamma_z) \sin \beta - \cos \beta \tan h] \quad (1)$$

式中, l_c 为悬臂宽度; h 为太阳高度角; γ 为腹板外法线方位角; γ_z 为太阳方位角; β 为斜面与水平面的夹角。

1.2 骤然降温

对桥梁结构骤然降温发生在两种情况下:一是工程结构物在冷空气侵袭下,使结构外表面迅速降温,结构物中形成内高外低的温度分布状态。二是日照降温,由于日落等因素致使结构物外表面温度迅速下降,此时结构物内表面温度几乎没有什么变化,形成较大的内高外低的温差状态。这两种降温温度变化,一般只考虑气温变化和风速这两个因素,可以忽略太阳辐射影响。这种降温温度荷载其变化较日照温度荷载要缓慢一些。变化周期约为 20 h,比日照温度变化周期长些。在这两种降温温度荷载中,冷空气侵袭作用引起的结构物降温速度,南方地区平均降温速度为 1 °C/h,最大降温速度为 4 °C/h,比日照升温速度 10 °C/h 小得多。

在骤然降温过程中,由于底板始终不受日照,所以底板的温度比较低,底板内外表面的温度变化较小,可略去底板微小温度变化的影响。同时,不考虑箱梁内部的对流,仅仅考虑顶板、腹板及翼缘在外界气温变化下的对流荷载^[8]。以 4 °C/h 的线性降温速率进行模拟可以认为是降温的极限状态,再考虑一定的降温时间,分多个荷载步,即可对该箱梁进行骤然降温的仿真分析。在考虑骤然降温时,不考虑日照影响,仅仅考虑由于气温变化的对流面荷载作用,所以不采用综合对流换热系数。

1.3 热分析的 ANSYS 实现

由于温度场随时间变化,是进行瞬态分析,所以必须给出初始温度条件。ANSYS 有两种途径来定义初始条件:①如果初始温度场是不均匀的且又是未知的,就必须首先做稳态热分析来建立初始条件;②如果初始温度场是均匀的,采用 IC 命令来设置初始温度。通过实测证明,在早上日出前混凝土体内的温度

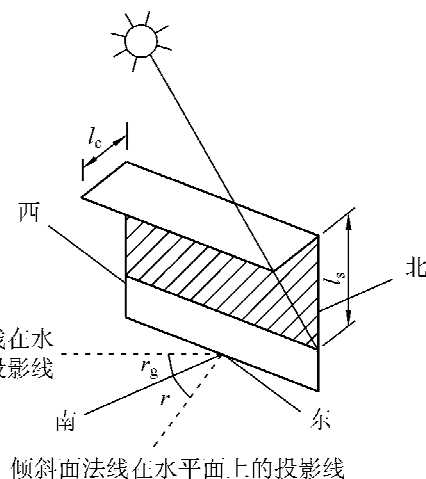


图 1 悬臂阴影示意图

与外界气温很接近,因此本文用第二种方法来给出初始温度。

在用 ANSYS 求解时,先用公式计算出太阳辐射、对流、热辐射(长波辐射)产生的热流密度,定义相应表数组,再动态施加到边界上。以顶板的边界条件为例(按二维温度场问题求解),气温、太阳辐射、风速等都是时间的已知函数,那么顶板上的热流密度总可以表示为时间和表面温度的函数。因此,可以先定义一个随表面温度和时间变化的热流密度数表,例如: * DIM, flux1, Table, ntime, ntemp, , Time, Temp。

然后给定 flux1 在不同时间和表面温度下的热流密度值,也就是设定一张完整的数表。注意求解过程的温度不要超过设定表格时的温度范围。然后用 SFE, SFL 等命令对顶板施加边界条件即可。因为定义 flux1 时已明确 flux1 是随时间 Time 和温度 Temp 这两个主变量(primary variable)变化的,所以,在瞬态求解过程中 ANSYS 就会根据时间和温度从 flux1 表格中获取热流密度的值,动态地施加在边界上。对腹板的边界条件也是类似,但腹板上要考虑悬臂板的遮阳影响,应该定义三维数表,需增加一个坐标变量 y, 例如: * DIM, flux2, Table, 101, 24, h_fu, Temp, Time, y。

此时共 101 个温度值(-40 ~ 60 ℃), 24 h(一昼夜)时间,竖向坐标 y 的取值为 0 ~ h_fu(腹板高)。

如前所述这里做平面热分析即可,单元选择为 Plane77,单元网格大小(esize)一般取 0.1 ~ 0.2 m,太大则温度分布太粗糙,温度应力计算结果误差太大。荷载步根据要求来定,若每隔一个小时计算一次,则一昼夜有 24 个荷载步。

2 应力场计算

单元可以选择三维实体单元和空间梁单元。前者思路简单,比如在热分析时采用热分析单元 Solid70,然后用序贯耦合法将单元从热分析单元转化为结构单元 Solid45,温度分布也直接转换过来成为温度荷载。但用三维实体单元计算全桥的规模庞大,混凝土的导热能力较差,因而单元划分要足够多,这样导致单元数量动辄几百万,不利于推广。用空间梁单元则很容易在 PC 机上实现复杂的温度应力计算,先进行平面热分析,然后将温度分布信息反应在梁截面上,最后进行结构分析。

用 ANSYS 软件计算桥梁结构的温度应力,选用的单元是 Beam189。Beam189 单元提供了一个很重要的特性,那就是在截面单元上可以定义不同的材料属性。材料属性中可定义参考温度,这样温度梯度荷载的截面加载问题获得解决。

2.1 已知温度分布

我国铁路桥梁和公路桥梁规范都给出了温度在截面上的分布函数,所以此时不必进行热应力分析,直接进行温度应力计算。在 ANSYS 中计算方法如下:

(1)按一定的温度间隔划分“等温”区域;

(2)在不同的“等温”区域按不同的材料号划分网格,材料号与“等温”区域一一对应,或直接等于该区域的温度值(取整);

(3)定义各材料的线膨胀系数和参考温度,参考温度根据下面公式计算

$$T_r = - (T - T_0) \quad (2)$$

式中, T_r 为参考温度; T 为实际温度,即对应“等温”区域的温度值; T_0 为结构的初始温度,可取早晨日出前的 6 点左右的气温。

(4)将划分好的网格用 SECWRITE 命令输出,得到 *.SECT 文件即为自定义截面文件;

(5)将自定义截面作为 Beam189 单元的截面,建立模型求解。

2.2 从平面热分析得到温度分布

仍然用超级梁单元 Beam189 单元计算温度应力,方法如下:

(1)ETCHG, tts 命令将单元类型从 Plane77 转换为 Plane183;

(2)LDREAD 命令将温度值按体荷载施加到节点上;

(3)遍历截面上的所有节点,用节点平均温度作为单元温度;

(4)用 Mpchg 命令将各个单元的材料号改变,这样单元温度与其材料号有一一对应关系,这种对应关

系记录在一个数组中或文件中;

(5)用 SECWRITE 命令得到 *.SECT 文件;

(6)读入自定义截面作为 Beam189 单元的截面,读取前面数组或文件中存储的单元温度与其材料号的对应关系,根据单元温度按公式(2)设定材料的参考温度,建立模型求解。

2.3 变截面、曲线梁及其它截面形状的考虑方法

对变截面的情况,由于梁高不同截面上的温度分布是不同的。策略是选取多个变高梁截面,多次进行平面应力分析,然后用不同的 SECT 文件定义多个 Beam189 截面。对曲线梁,各段梁的走向不同,受到的日照也不同。方法是采用以直代曲,小直线段采用相同的截面,这样也需要进行多次的平面热分析,每次热分析时腹板的方位角不同。以上的方法完全适用于其它截面形状,如 T 型截面等。

2.4 铺装层的影响

仅在热分析时将铺装层考虑进去,应力计算不考虑。方法是热分析时将铺装层和混凝土梁截面定义成不同的面,热分析时都划分网格,在热-结构序贯耦合后,选择铺装层的面对应的单元并将其删除,然后再执行 SECWRITE 命令。

3 ANSYS 实现

ANSYS 本身带 APDL 语言,具有编程功能同时可以在编写的程序中加入 ANSYS 命令。将上述方法编写成 APDL 程序流,即可实现温度效应的计算。UIDL 是 ANSYS 的图形界面开发语言。TCL/TK 是一套脚本语言,可以调用 ANSYS 数据库以实现与 ANSYS 的数据交换,可以利用 UIDL 和 TCL/TK 将 APDL 程序内嵌到 ANSYS 界面^[9],方便执行。图 2 为计算流程,据此可以编制 APDL 程序流,然后用 UIDL 和 TCL/TK 将其内嵌于 ANSYS 界面中。

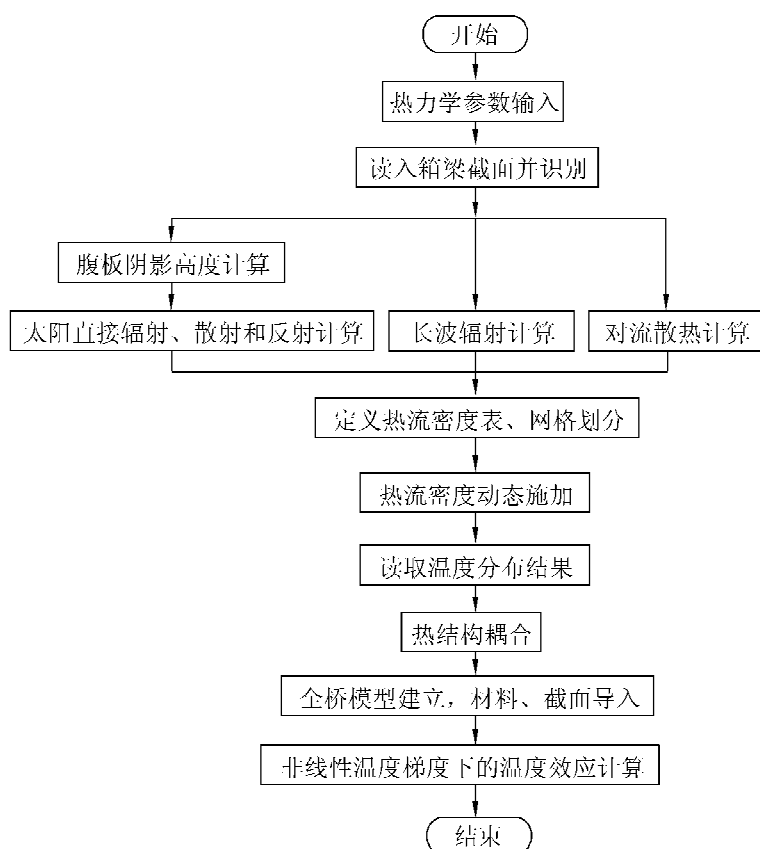


图 2 程序流程

4 算例分析

某预应力混凝土箱型截面矮塔斜拉桥,位于山西晋城。该桥处于施工当中时的温度效应计算采用了本方法。

在2号块的腹板、底板和顶板的内外侧都布置了温度传感器,实测和计算的结果见表1,从表1可以看出,二者较吻合,实测值偏小可能原因是风力较大。

表1 计算与实测温度场数据对比

测点位置	测点编号	实测值/℃	计算值/℃	节段号	测量时间
顶板左(东)侧	TDL001	23.9	24.19	2	8月8日8:00
顶板中间	TDM002	23.9	24.33	2	8月8日8:00
顶板右(东)侧	TDR003	24.0	24.72	2	8月8日8:00
东侧腹板上	TFEU004	19.6	21.03	2	8月8日8:00
东侧腹板中	TFEM005	28.1	28.27	2	8月8日8:00
东侧腹板下	TFEB006	27.8	28.26	2	8月8日8:00

该桥最大悬臂端的最大竖向变形(考虑时间因素)在2006年8月8日下午15时的计算值为7.5 cm;最大悬臂端实测15时与早上6点(认为早6点没有日照温差竖向变形)的竖向挠度差为7.1 cm,两者基本吻合,在测量的过程中结构没有荷载工况的变化。因为实际当中的结构应力包含其他如预应力、混凝土徐变等因素,所以已经不具可比性,计算的日照温度拉应力可达5 MPa以上,最大拉应力发生在板最厚处。

5 结语

(1)每座桥梁所处的气候条件、桥位地域、桥梁走向和具体截面形式等均不同,笼统用一种温度梯度模式计算误差会较大,本文开发的程序对这些因素都加以考虑,可以作为桥梁设计时温度荷载计算的补充;

(2)日照温差和骤然降温属于短期效应,没有考虑混凝土徐变对其温度应力的影响;

(3)基于ANSYS软件计算的温度效应速度快、可信度高,通过热结构耦合分析及改变材料实现温度荷载施加的方法计算日照温差对桥梁结构的影响方便可行;

(4)从施工过程到成桥运营各个阶段的温度效应(应力、变形等)都可计算,即可成功分离结构总应力中的温度应力部分,从而为研究箱梁其它因素(如混凝土的收缩、徐变等)的影响提供了便利。

(5)这里提供的方法实用性较强,可以在PC机上实现整座大跨度桥梁的复杂温度效应计算,但截面温度信息在转化到超级梁单元截面上的过程中存在少许的失真,同时还没法考虑山体、高建筑物等的遮阳影响。

参 考 文 献

- [1]范立础.桥梁工程[M].北京:人民交通出版社,2001.
- [2]郭棋武.混凝土斜拉桥的温度效应分析[J].中国公路学报,2002,15(2):48-51.
- [3]葛耀君.混凝土斜拉桥温度场的试验研究[J].中国公路学报,1996,9(2):76-83.
- [4]IMBSEN R A,VANDERSHAF E E,SCHAMBER R A. Thermal Effects in Concrete Bridge Super Structures[R]. Washington DC:AASHTO,1985.
- [5]张元海.桥梁结构日照温差二次力及温度应力计算方法研究[J].中国公路学报,2004,17(1):49-52.
- [6]凯尔别克.太阳辐射对桥梁结构的影响[M].刘兴法,译.北京:中国铁道出版社,1981.
- [7]彭友松.哑铃形钢管混凝土拱日照温度分布研究[J].中国铁道科学,2006,27(5):71-75.
- [8]刘兴法.混凝土结构的温度应力分析[M].北京:人民交通出版社,1991.
- [9]葛俊颖,王立友.基于ANSYS的桥梁结构分析[M].北京:中国铁道出版社,2007.

(下转第129页)

参 考 文 献

- [1] 中华人民共和国建设部. GB50017—2003 钢结构设计规范[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2003.
- [2] 刘人怀. 板壳力学[M]. 北京:机械工业出版社,1990.
- [3] 陈绍蕃. 钢结构设计原理[M]. 北京:科学出版社,1998.
- [4] 陈骥. 钢结构稳定理论与设计[M]. 北京:科学出版社,2001.
- [5] 中华人民共和国建设部. GB50205—2001 钢结构工程施工质量验收规范[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2001.

Analysis of Bearing Capacity of Large-diameter Steel Tube Under Axis Pressure

Wu Xiangong

(China Railway Construction Corporation Ltd., Beijing 100855, China)

Abstract: In view of the wide application of large sized steel tubes in various structures, the performance of steel tube under the axial force is analyzed by nonlinear finite element in this paper. The influence of several factors on carrying capacity is taken into account. The influenced direction of these factors on ultimate carrying capacity is acquired and the basis is provided for the future analysis by the selected example.

Key words: nonlinear finite element; carrying capacity; large-diameter steel tube; buckling analyses

~~~~~  
(上接第121页)

## Practical Calculation for Temperature Effect on PC Box Girder Bridge

Ge Junying<sup>1</sup>, Zhao Guojun<sup>2</sup>

(1. School of Civil Engineering, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 050043, China;

2. The 2nd Institute of Surveying and Mapping of Hebei Province, Shijiazhuang 050031, China)

**Abstract:** The effect of abrupt drop in temperature and thermal difference due to the sun light on box girder will cause uneven temperature differences to the section of bridges, and then temperature stresses arise. While the design codes of different country on thermal gradient model in concrete bridges cannot convey the actual situation of a special bridge accurately. This paper recounts in detail how to calculate the temperature stress based on ANSYS. The offered method can calculate the actual temperature of bridges accurately any time in a day, which takes into account the effects of the season, location, orientation, structural size, material properties and the sunshade effect on the web by the flange plate of the box girder bridge, etc. With the method of thermal-structural coupling analysis, using the super-beam-element, the temperature effect can be calculated quickly, and this method can be used for variable cross-section and curved bridges.

**Key words:** bridge engineering; PC box girder; temperature effect; abrupt drop in temperature; solar radiation; practical method; ANSYS