

非线性温差作用下混凝土结构的温度应力

王伟^{1,2}, 苏小卒¹, 赵勇¹

(1. 同济大学 建筑工程系, 上海 200092; 2. 浙江省建筑设计研究院, 浙江 杭州 310006)

摘要: 为探讨非线性温度梯度作用下混凝土结构温度应力问题, 基于松弛法并结合杆件截面分析的网格法, 借助 Ansys 软件二次开发的特性, 综合考虑截面配筋及开裂的影响, 介绍了空间结构的分析方法. 针对上海铁路南站温度应力, 现场量测了环形框架梁中的温度场分布, 根据实测结果, 提出温度梯度计算的简化公式, 并运用前述方法分析主站房的温度应力. 分析表明, 日照辐射温度对混凝土结构有显著影响.

关键词: 钢筋混凝土结构; 温度应力; 非线性温差; 开裂
中图分类号: TU 375 **文献标识码:** A

Thermal Stress of Concrete Structure Subjected to Non-linear Temperature Variation

WANG Wei^{1,2}, SU Xiaozu¹, ZHAO Yong¹

(1. Department of Building Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Zhejiang Provincial Institute of Architectural Design and Research, Hangzhou 310006, China)

Abstract: For investigating the thermal stresses in reinforced concrete structures under the non-linear temperature gradient, an analytical procedure of space structures was presented with the aid of the user-programmable features of ANSYS based on the relaxation-method and the gird-method in sectional analysis. Reinforcing and cracking were also taken into account. In order to study the thermal stresses of the Shanghai south railway station, the temperature variations in the annular girders were measured on site. A simplified formula was proposed to calculate the temperature gradient based on the surveyed data. The forementioned procedure was used to analyze the thermal effect of the main structure. The analytical results show that the temperature load due to solar radiation has a remarkable effect on the concrete structures.

Key words: reinforced concrete structure; thermal stress; non-linear temperature variation; cracking

置于自然环境中的混凝土结构, 长期经受自然界气温的变化和太阳辐射等剧烈作用. 由于混凝土的热传导性能较差, 当结构表面温度迅速上升或降低时, 其内部温度则变化甚微, 混凝土结构的各部分处于不同的温度状态, 形成了较大的温度梯度. 当结构的温度变形受到约束时, 就会产生明显的温度应力. 温度应力可能导致结构开裂, 甚至严重裂损.

混凝土结构内部温度分布的非线性已经得到广泛的认同^[1-5], 但是, 目前研究者对于结构(尤其是复杂结构)的温度应力分析, 大多只考虑均匀分布的温度作用, 即年温度变化. 然而, 许多工程实例说明, 太阳辐射引起的短时结构温度变化对结构的影响可能超过长期缓慢的年气温荷载的影响. 对于非线性温差应力的分析, 较为简化的方法是等效线性温差法^[6]. 利用该方法可得到外约束应力, 但是不能反映截面内的自约束应力, 当需要考虑截面配筋及开裂等因素的影响时, 该方法的分析精度也受到影响.

笔者基于松弛法并结合杆件截面分析的网格法, 借助 Ansys 软件二次开发的特性, 介绍了钢筋混凝土结构温度应力的分析方法. 分析不仅考虑了温度梯度的非线性分布, 还考虑了截面配筋和开裂的影响. 对上海铁路南站混凝土结构温度场分布进行了现场观测, 并对非线性温度梯度作用下该结构的温度应力进行了分析.

1 结构温差应力的分析方法

根据形成原因的不同, 混凝土结构中的温度应力可分为自约束应力和外约束应力. 静定结构中只出现自约束应力, 而超静定结构中温度应力则为自

收稿日期: 2009-04-13

作者简介: 王伟(1979—), 男, 工学博士, 主要研究方向为混凝土结构温度应力及长期性能. E-mail: wwcqu2000@yahoo.com.cn

苏小卒(1956—), 男, 教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为混凝土结构与工程抗震. E-mail: xiaozusu@tongji.edu.cn

约束应力与外约束应力之和.

1.1 静定结构温差应力分析

下面基于松弛法分析结构的温差应力^[7].如图1所示,混凝土梁受到非线性分布的温度荷载作用,假定各层纤维自由变形,则升温所引起的应变为

$$\varepsilon_f = \alpha_t t(z) \quad (1)$$

式中: α_t 为材料的线膨胀系数; $t(z)$ 为温度沿高度方向的分布函数; z 为计算点与上表面之间的距离(向下为正).若施加附加约束阻止各单元的温度变形,则附加约束应力可表示为

$$\sigma_{re} = -E\varepsilon_f \quad (2)$$

其中, E 为材料的弹性模量.沿截面高度积分可得到附加约束力 $\Delta F_f = \{\Delta N, \Delta M_y\}^T$

$$\left. \begin{aligned} \Delta N &= \int \sigma_{re} dA \\ \Delta M_y &= \int \sigma_{re} z dA \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

式中: ΔN 为附加约束轴力; ΔM_y 为绕 y 轴的附加约束弯矩.为使结构恢复到实际变形状态,需消除附加约束力.因此,反向施加 $-\Delta N, -\Delta M_y$,即可得到截面的实际变形

$$\begin{Bmatrix} \Delta\varepsilon_o \\ \Delta\varphi_y \end{Bmatrix} = \frac{1}{E(AI_y - B_y^2)} \begin{bmatrix} I_y & -B_y \\ -B_y & A \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} -\Delta N \\ -\Delta M_y \end{Bmatrix} \quad (4)$$

式中: $\Delta\varepsilon_o$ 为参考点 O 处的应变; $\Delta\varphi_y$ 为截面的曲率; $A = \int dA; B_y = \int z dA$.因此,温度梯度荷载产生的纵向自约束应力为

$$\sigma = -E\alpha_t t(z) + E(\Delta\varepsilon_o + \Delta\varphi_y z) \quad (5)$$

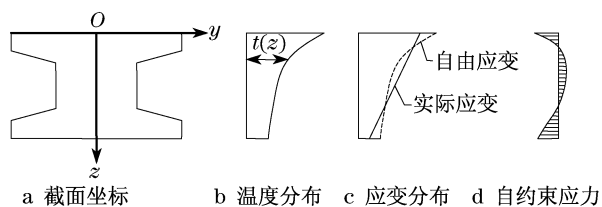


图1 温度应力分布

Fig.1 Temperature stresses over depth

通常情况下,混凝土开裂截面的温度应力将有所降低,但精确的计算是十分困难的,因此,适当的简化是必要的.对于混凝土开裂截面,假定温度对受压区混凝土的影响与未开裂截面相同.在该假定的前提下,静定结构中开裂截面的温度变形与未开裂截面的温度变形相差很小^[7].究其原因,是因为截面

开裂后,受拉区混凝土退出工作,施加附加约束阻止自由温度变形时,受拉区可以自由变形,故附加约束力也相应减小,但应变分布则基本不变.

1.2 超静定结构温差应力分析

采用松弛解法并结合迭代计算,编制考虑开裂及配筋影响的三维钢筋混凝土结构温度效应分析程序 Thermal_Struct.分析思路如下:

①施加附加约束阻止结构中各杆件由于温度作用产生的自由变形,并计算附加约束力 ΔF_f .

②释放附加约束,即反向施加附加约束力 $(-\Delta F_f)$,运用位移法对结构再次分析,得到节点位移 ΔD 和杆端力变化量 ΔF_{re} ,叠加 ΔF_f 和 ΔF_{re} ,得到外约束杆端力 ΔF_T .

③由式(5)计算自约束应力,调用截面分析程序,分析 ΔF_T 作用下结构的外约束应力,叠加自约束应力、外约束应力,得到结构的温度应力.

④计算各杆件单元等效刚度系数 K .

⑤根据新的 K ,再次约束结构由于温度作用产生的自由变形,重复①~⑤,直至计算得到的 ΔF_T 收敛为止.

为便于将上述分析方法运用于大型空间结构,并考虑到 Ansys 强大的前后处理和求解功能,将 Ansys 作为子程序调用.

分析中需要根据结构的受力状态不断调整结构杆件的刚度系数,以考虑截面配筋及开裂的影响,因此,采用网格法对杆件进行截面分析^[8-9],并在此基础上得到杆件的等效刚度系数.

2 上海铁路南站主站房温差应力

2.1 工程概况

上海铁路南站是一座现代化、多功能、综合性的大型交通枢纽,其主站房采用钢筋混凝土结构和钢结构屋盖体系.9.9 m 标高主站房平面呈圆环状,直径达 270 m,共设置五道环形曲线预应力混凝土工字形框架梁,最内一圈环梁半径为 76 m,最外一圈环梁半径为 123 m.环形框架梁最大跨度为 30.6 m,最小跨度为 8.6 m;径向布置次梁和部分框架梁,C4 环梁以外设置预应力梁,且由 C5 环梁向外悬挑 7.5 m.楼盖的混凝土强度等级为 C40,下部框架柱的混凝土强度等级为 C60,楼板厚度为 200 mm.环梁结构平面如图 2 所示,环梁编号和尺寸如表 1 所示.

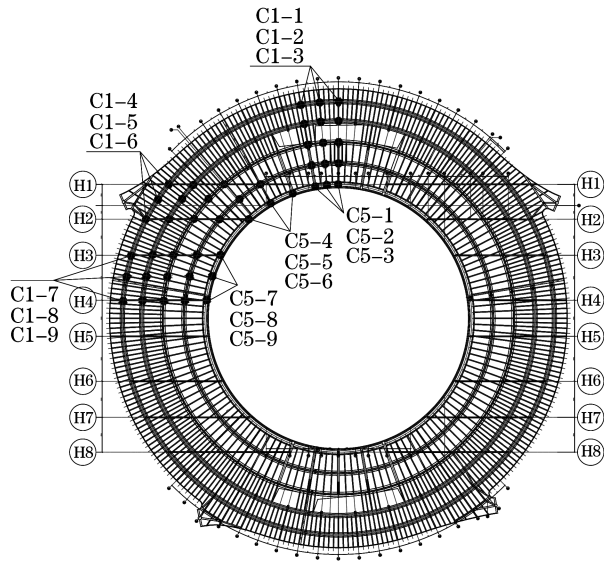


图2 上海南站结构平面图

Fig.2 Construction plan of Shanghai south railway station

注:环梁编号 C1~C5 顺序为由外至内,截面编号

1~9 顺序为逆时针方向.

表1 预应力环梁参数

Tab.1 Parameters of ring prestressed concrete beams

编号	截面尺寸($b_f \times h \times b_w$)/mm	梁截面示意(单位:mm)
C1	2 500 × 2 100 × 1 200	
C2	2 500 × 2 100 × 1 200	
C3	2 500 × 2 100 × 700	
C4	2 500 × 2 000 × 900	
C5	3 000 × 1 600 × 1 950	

2.2 温度场测试

上海南站主站房下部混凝土结构的体量非常大,施工从2004年3月持续至10月;而上部钢屋盖施工则持续至2005年3月,施工周期比较长.在施工期间,9.9 m 标高楼面长时间暴露于自然环境中,日照辐射引起的温度效应必须得到重视.施工期间对9.9 m 标高平台预应力混凝土结构的温度分布进行了现场实测.温度测点布置在 C1~C5 环梁断面中,重点量测了 C1~C2 梁,以研究大截面混凝土梁中温度场的分布.测点在混凝土浇筑前埋设,每隔 20 min 读取一次,并自动保存在计算机内.

从测试结果可以看到:①各测点温度随时间呈周期性变化,各测点温度出现最大值的时间不尽相同,靠近表面的测点由于受日照辐射作用,温度最大值出现在 15:30 左右,最小值则出现在 7:00 左右.②随着埋设深度的增加,测点温度出现峰值的时间有明显的滞后,最大值可能出现在 20:00 左右,而最小值则出现在 10:00 左右.③距离梁表面越近,温度

波动越显著,当测点埋置深度达到一定值时,测点温度基本恒定,表面测点在 7 月 20 日最高温度为 46.7 °C,最低为 34.5 °C,相差 12.2 °C,而梁高中部的温度则稳定在 34 °C 左右,梁底部温度波动也非常小,与日平均气温基本相同.④温度沿梁的横向变化不明显,因此可假定沿横向均匀分布.

图 3 绘出了 7 月 20 日 10:00 至 21 日 10:00 各时段 C1 环梁温度沿竖向的分布情况,图 3a 为结构受日照辐射时段的温度分布,温度沿高度分布呈现明显的非线性,越接近结构表面温度梯度越大,随着与表面距离增大,温度分布逐渐趋于稳定.图 3b 为无日照作用时段的温度分布,可以看出:结构表面温度随着环境温度的降低而快速降低,而截面内部温度下降缓慢,温度峰值出现在截面内部,19:00 以后表面温度开始低于构件内部温度,而且截面各部分温差相对日照情况下明显降低.

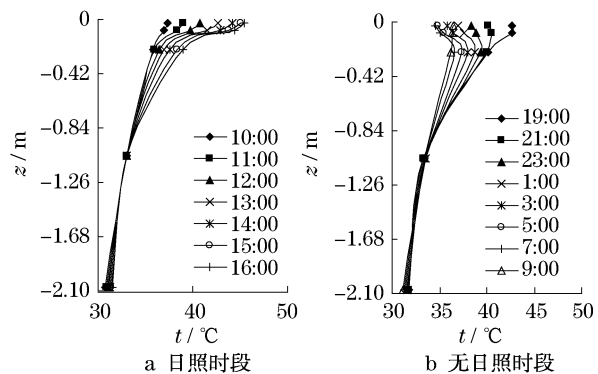


图3 竖向温度分布

Fig.3 Temperature rise over depth

实际工程中关心的是结构的最不利荷载情况,由量测数据可知,最不利温度荷载出现在 7 月 20 日 16:00 时,故选取此时的温度场分布计算截面的温度梯度分布.借鉴桥梁结构温度荷载规定,通过数值拟合,得到日照作用下混凝土截面竖向温度梯度简化公式为

$$t(z) = 16.5e^{-3.18z}$$

式中, z 为计算点至梁上表面的距离, m. 图 4 绘出了拟合公式、实测数据、《铁路桥涵钢筋混凝土和预应力混凝土结构设计规范》(TB 10002.3—2005)^[10] 给出的箱形梁竖向温差曲线对比.由图可见,规范给出的温差曲线的梯度更大,即相邻混凝土层的温度随高度的变化更快,由此引起的温度自约束应力也更大.规范规定的温差曲线与现场实测值差异较大,究其原因,可能是因为规范针对的是箱形截面梁,且多

面受到太阳照射,而南站工程的环向主梁为实腹梁,且只有上表面受到太阳照射.但可以看到,运用规范给出的温差曲线验算上海地区结构的温度应力是可行的,结果偏于安全.

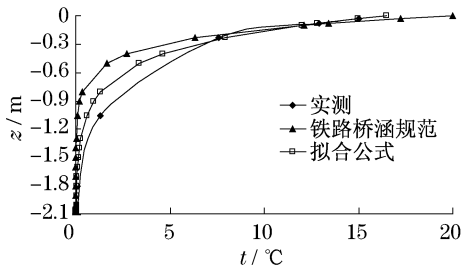


图 4 竖向温差分布对比

Fig.4 Comparison of variations of temperature rise over depth

2.3 有限元分析

运用本程序 Thermal_Struct,结合 2.2 节温度梯度简化公式,针对南站主站房在夏季非线性日照温差荷载作用下的结构反应进行分析.假定混凝土、钢筋均为线弹性材料,材料弹性模量按《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2002)^[11]取用,材料强度按标准值取用;并假定温度沿结构长度方向和横向均匀分布.应该注意到,日照辐射在楼板中产生的温差荷载亦不应忽略,但为了简化起见,假定楼板中温差荷载为线性分布,楼板上下表面的温度值取梁相应位置的温差值.

首先运用 Ansys 建立有限元模型,为减少计算量,利用结构的对称性,选取结构的一半进行计算.根据工程施工图,将梁、柱构件划分为 47 种类型,并编写截面信息数据文件(包含截面类型、尺寸、配筋信息).结构有限元模型如图 5 所示.

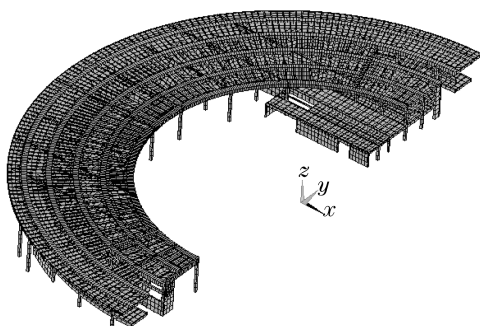


图 5 上海南站主站房有限元模型

Fig.5 Finite element model of Shanghai south railway station

2.4 结果分析

非线性温差作用下 9.9m 标高结构层的内力分

布及裂缝分布如图 6 所示.表 2 列出了环梁 C1~C5 部分截面(截面编号见图 2)分别在非线性温差作用下以及自重作用下的内力.由于受到楼板升温的作用,C1~C4 环梁主要承受拉力,C1 环梁中的拉力最大,最大可达 4355.6 kN,而内圈环梁的拉力逐渐减小;C5 环梁在 H2~H7 轴之间主要承受拉力,其余部位则承受压力,最大压力为 -4 358.8 kN;径向梁也普遍承受拉力,尤其是径向框架主梁中出现了较大的拉力,数值可达 4 060 kN,径向次梁的轴力在 500~600 kN 之间.

非线性温差作用下 9.9 m 标高结构层的弯矩分布如图 6b 所示.框架环梁中产生了分布均匀的弯矩,方向与自重作用下的跨中弯矩相同,最大弯矩为 4 450.1 kN·m,其中,C1~C4 环梁的弯矩较大.从表 2 可以看出,非线性温差作用下环梁的弯矩与自重作用下的弯矩基本属于同一数量级(1 000 kN·m),甚至大小相当;非线性温差作用将使支座的负弯矩降低,但对于跨中,两个弯矩将相互叠加,其总和已超出了截面的开裂弯矩.可以预见在,非线性温差和自重共同作用下,结构将大面积开裂.虽然开裂不一定影响结构的安全性,但出于耐久性及使用性能的需要,笔者建议对于超长结构的设计,对日照辐射的影响应该给予足够重视.

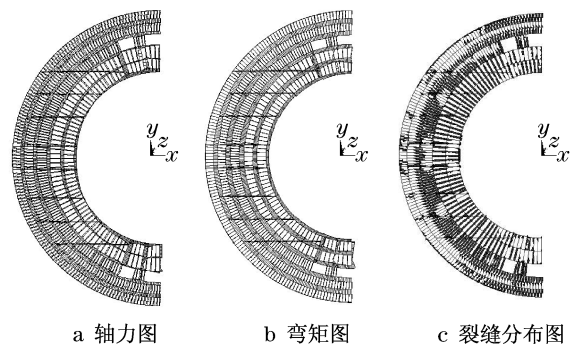


图 6 日照温差作用下的内力图及裂缝分布图

Fig.6 Internal force and crack distribution diagram under solar temperature

通过对日照辐射单独作用下开裂前的情况对比计算,得到环梁 C1~C5 部分截面的内力值(见表 2).可以看到,裂缝的开展引起了结构内力的重分布,但环向框架梁中内力重分布的幅度并不大.这是因为在日照辐射单独作用下,环向框架主梁中出现的裂缝较少,裂缝主要出现在径向梁中(图 6c).经对比发现,开裂前后径向梁中内力的差异在 15%左右.

表2 非线性温差、自重作用下结构的内力

Tab.2 Internal force in structure under nonlinear thermal gradient and self weight

截面 编号	开裂前		开裂后		$M_m/(kN \cdot m)$	N_{cr}/kN	$M_{cr}/(kN \cdot m)$
	N/kN	$M_y/(kN \cdot m)$	N/kN	$M_y/(kN \cdot m)$			
C1-4	3 551	3 468	3 766	3 467	-5 412	9 215	4 508
C1-5	3 148	3 648	3 360	3 604	4 736	9 215	4 508
C1-6	3 457	3 110	3 582	3 024	-9 065	9 215	4 508
C2-4	2 879	3 556	2 999	3 511	-8 093	9 215	4 508
C2-5	2 714	3 751	2 744	3 709	4 799	9 414	4 694
C2-6	2 160	5 387	1 760	4 230	-8 220	9 414	4 694
C3-4	1 770	3 184	1 855	3 258	-5 419	7 227	3 894
C3-5	1 693	3 816	1 780	3 774	5 467	7 752	4 385
C3-6	2 195	3 624	2 335	3 570	-8 573	7 661	4 300
C4-4	1 038	3 318	1 091	3 350	-10 611	7 814	3 832
C4-5	1 186	3 340	1 200	3 330	6 285	8 158	4 136
C4-6	1 547	3 160	1 595	3 121	-10 233	7 905	3 912
C5-4	-3 684	2 761	-3 763	2 795	-5 830	10 170	3 408
C5-5	-622	3 309	-726	3 282	4 997	10 170	3 408
C5-6	405	3 801	383	3 767	-10 149	10 170	3 408

注: M_m 为自重作用下的弯矩, N_{cr} 为开裂轴力, M_{cr} 为开裂弯矩。

3 结论

针对上海铁路南站工程, 现场量测了结构中温度场的分布, 结果表明: 结构温度随时间呈周期性变化, 受日照辐射的影响, 温度沿高度分布呈现明显的非线性; 对上海地区混凝土结构中温度梯度荷载的取值提出的建议公式是可行的。

应用本方法对南站下部混凝土结构的温度应力进行有限元分析, 结果表明: 由于楼板的升温作用, 可能在框架主梁中产生较大的拉力; 在日照辐射引起的非线性温度梯度作用下, 框架环梁中产生了分布均匀的弯矩, 方向与自重作用下的跨中弯矩相同, 该弯矩与自重作用下的弯矩基本在同一数量级上, 二者叠加后可能导致框架梁在跨中部位开裂, 因此设计中应予以重视; 在日照辐射单独作用下, 裂缝主要出现在径向梁中, 裂缝的开展导致了结构内力的重分布, 开裂前后环向主梁中内力的差异较小, 径向梁中内力的差异在 15% 左右。

参考文献:

- [1] Priestley M J N. Design of concrete bridges for temperature gradients[J]. ACI Journal Proceedings, 1978, 75(5): 209.
- [2] Thurston S J, Priestley M J N, Cooke N. Thermal analysis of thick concrete sections[J]. ACI Journal Proceedings, 1980, 77(5): 209.
- [3] Mamadouth M Elbadry, Amin Ghali. Temperature variations in concrete bridges[J]. ASCE Journal of Structural Engineering, 1983, 109(10): 2355.
- [4] Frank J Vecchio, James A Sato. Thermal gradient effects in reinforced concrete frame structures [J]. ACI Structural Journal, 1990, 87(3): 262.
- [5] 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.
LIU Xingfa. Thermal stress analysis of concrete structures [M]. Beijing: China's Communications Press, 1991.
- [6] Chang S P, Im C K. Thermal behaviour of composite box-girder bridges[J]. Structures and Buildings, 2000, 140(2): 117.
- [7] Amin Ghali. Concrete structures: stress and deformation[M]. London: Chapman and Hall, 2000.
- [8] Frank J Vecchio. Nonlinear analysis of reinforced concrete frames subjected to thermal and mechanical loads [J]. ACI Structural Journal, 1987, 84(6): 492.
- [9] 过镇海, 时旭东. 钢筋混凝土原理和分析[M]. 北京: 清华大学出版社, 2003.
GUO Zhenhai, SHI Xudong. Reinforced concrete theory and analysis[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2003.
- [10] 中华人民共和国铁道部. TB1002. 3—2005 铁路桥涵钢筋混凝土和预应力混凝土结构设计规范[S]. 北京: 中国铁道出版社, 2005.
Ministry of Railways of People's Republic of China. TB 10002. 3—2005 Code for design on reinforced and prestressed concrete structure of railway bridge and culvert[S]. Beijing: China Railway Press, 2005.
- [11] 中华人民共和国国家标准. GB 50010—2002 混凝土结构设计规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2002.
Ministry of Construction of People's Republic of China. GB 50010—2002 Code for design of concrete structures [S]. Beijing: China Architecture and Building Industry Press, 2002.