

# 超长钢筋混凝土框架结构硬化阶段温度应力分析

李 东, 陈华娟

(上海大学土木工程系, 上海 200072)

**摘 要:**采用有限元软件 ANSYS 对超长混凝土框架结构硬化阶段的温度应力以及温度作用效应进行非线性分析. 针对实际工程中超长钢筋混凝土框架结构建立三维实体模型, 对此进行热-结构直接耦合分析, 得到结构的温度场与应力的变化特征, 以此判断在硬化阶段混凝土结构的控制截面, 为超长钢筋混凝土结构采取施工措施和构造措施提供参考, 具有实际的指导意义.

**关键词:**超长结构; 硬化阶段; 温度应力; 热-结构耦合分析

**中图分类号:** TU 375.4

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1006-7930(2013)06-0853-05

《混凝土结构设计规范》(GB50010-2010)<sup>[1]</sup>规定:钢筋混凝土现浇框架结构伸缩缝的最大间距为 55 m. 结构设计中建筑物的长度超过此规范规定的温度伸缩缝或者防震缝的最大值, 并且不设置永久性缝时, 此结构即为超长结构.

随着我国经济建设的发展, 大型工业厂房、大型公共建筑等的设计不能设缝导致结构出现超长现象. 超长结构的混凝土在浇注施工过程中, 水泥水化作用产生大量的水化热, 从而出现非均匀温度场. 在变化温度的影响下, 结构发生温度变形, 此变形受到内部和外部的约束会产生约束应力. 当混凝土拉应力超过其抗拉强度时, 就会引起混凝土开裂. 相比非荷载作用下的变形, 收缩等变形随机性强, 研究较复杂<sup>[2]</sup>.

G. De Schutter 以水泥水化程度  $\gamma(t)$  作为参数对混凝土早期温度场进行瞬态分析, 综合考虑徐变等因素对其温度应力进行了计算<sup>[3]</sup>; 王铁梦等提出采用热弹理论的应力函数法和位移函数法等解析法求解温度应力<sup>[4]</sup>; 朱伯芳等提出在稳定温度场作用下混凝土弹性徐变温度应力有限元分析法, 将混凝土看成弹性徐变体<sup>[5]</sup>; 李东采用有限元分析程序 massive 及混凝土粘弹性本构模型对处于瞬态温度场作用下的结构做非线性分析<sup>[2]</sup>; 施卫星等采用有限元分析软件 ANSYS 程序, 通过增量-迭代法求解研究超长框-排架结构在长期温度载荷作用下的温度应力<sup>[6]</sup>. 目前我国的结构设计默认混凝土硬化阶段处于零应力状态, 李东等<sup>[2]</sup>提出混凝土在此阶段由于温度载荷的作用, 结构有残余应力存在.

本文考虑结构材料性质随时间发生变化及养护阶段混凝土与模板接触的状态下的非线性行为<sup>[8]</sup>, 对处于瞬态温度场的结构通过增量-迭代法进行有限元非线性分析.

## 1 工程概况及边界条件

本工程是位于上海市的某大型仓库, 仓库为五层钢筋混凝土框架结构. 结构平面尺寸为: 84 m×18 m, 柱网尺寸为 6 m×6 m, 屋面结构为井字梁形式, 楼板的厚度为 100 mm. 柱为竖向承重构件, 柱截面尺寸为 600 mm×600 mm, 框架梁截面尺寸为 300 mm×750 mm, 每层的层高为 3.9 m. 仓库平面如图 1 所示, 块 1 结构平面如图 2 所示.

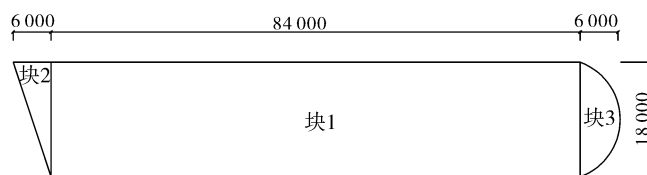


图 1 仓库平面图(单位:mm)

Fig. 1 Plane of warehouse(Unit:mm)

该工程于 5 月份施工,采用强度等级为 C30 的混凝土.混凝土在硬化阶段的弹性模量  $E(\tau) = E_0 \tau / (50T^{-1.10} + \tau)^{[5]}$ , 式中  $E_0$  为最终弹性模量,  $E_0 = 3 \times 10^7 \text{ N/m}^2$ ;  $T$  为养护温度;  $\tau$  为龄期,  $E(\tau) - \tau$  的关系如图 3 所示.假定应变达到  $2.0 \times 10^{-3}$  时混凝土完全丧失抗拉能力, C30 混凝土本构关系曲线见图 4<sup>[6]</sup>.

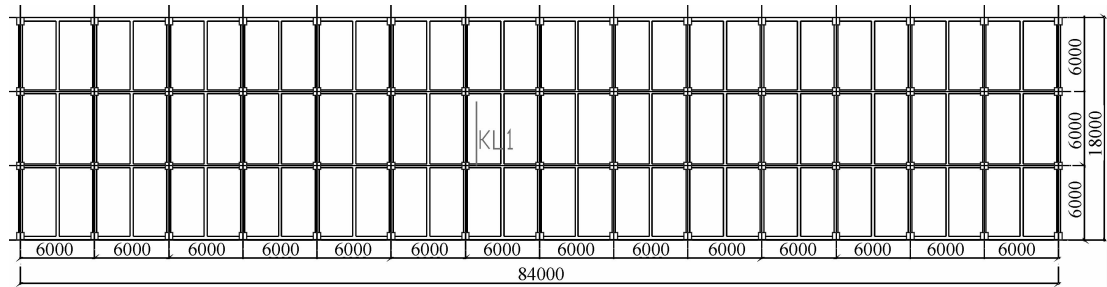


图 2 块 1 的结构平面图(单位:mm)

Fig. 2 The construction plane of block 1(Unit:mm)

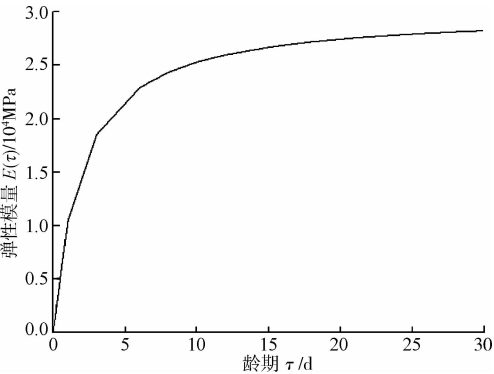


图 3  $E(\tau) - \tau$  的曲线关系

Fig. 3 The curvilinear relationship between  $E(\tau)$  and  $\tau$

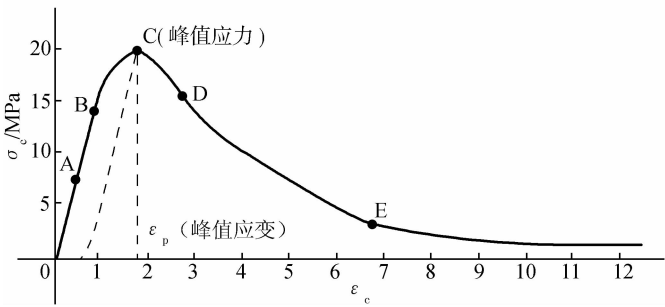


图 4 C30 混凝土本构关系曲线

Fig. 4 Constitutive relation curves of C30 concrete

温度场和温度应力计算的主要参数如表 1 所示<sup>[1,4,5]</sup>.

表 1 计算主要参数

Tab. 1 Principal parameter for calculation

温度计算参数		温度应力计算参数	
入模温度/℃	20	木模板与混凝土的接触摩擦系数	0.15
水泥水化龄期累计发热总量/kJ·kg <sup>-1</sup>	330	混凝土弹性模量	见图 3
水泥用量/kg·m <sup>-2</sup>	295	混凝土线膨胀系数(1/℃)	1×10 <sup>-5</sup>
水泥水化热速率(1/d)	0.362	初始温度/℃	20
外界环境温度/℃	20	混凝土泊松比	0.2
木模板放热系数(kJ/m <sup>2</sup> ·d·℃)	665.52		
塑料薄膜放热系数(kJ/m <sup>2</sup> ·d·℃)	405.6		
混凝土导热系数(kJ/m·d·℃)	254.4		

2 有限元数值模拟

结构温度应力分析有解析法与数值法:解析法适用于计算量较小的对称结构,数值法包括有限元法和差分法.有限元法适用于结构复杂和非常规荷载作用的分析.有限元建模精度可控制,且可以根据问题类型选择合适的求解器,所以有限元分析成为现代科学研究的重要手段之一.

结构的梁板柱构件均选用 8 节点的 Solid5 三维耦合场单元.多层框架结构温度应力的计算更为复

杂,考虑到温度应力,例如柱内剪力与柱高的三次方成反比,随着远离地基基础约束面,温度内力衰减,所以把多层建筑结构简化为两层<sup>[4]</sup>.用SAP2000有限元软件建立该工程五层的三维框架结构模型(图5),梁柱均采用杆单元,板采用薄壳单元.计算结果表明在均匀温差作用下,二层端部柱柱顶剪力为底层的25%左右,三层以上不足10%.故本文用ANSYS软件建立框架结构底层有限元模型(忽略次梁),见图6.

木模板与混凝土表面相互分离,相互碰撞并相切,采用柔体-柔体接触分析.接触是一种高度的状态非线性行为,接触摩擦是非保守系统,采用较小的荷载步和精确的加载历史,经多次试算, $\Delta t = 0.1d$ 较合理.为防止接触面相互渗透,采用罚函数

法强制接触协调.目标面采用TARGE170单元模拟,接触面采用CONTA174单元模拟<sup>[8]</sup>.通过目标单元和接触单元定义变形过程中可能发生接触的区域并跟踪变形过程,即接触单元对变形 $\epsilon_j$ 和混凝土变形 $\epsilon_c$ 一致( $\epsilon_j = \epsilon_c$ ).因接触摩擦力 $F$ 等于摩擦系数 $f$ 乘以压应力 $N$ ,即 $F = f \times N$ .由此假设TARGE170单元和CONTA174单元应力 $\sigma_j$ 应变 $\epsilon_j$ 关系根据图4混凝土的应力 $\sigma_c$ 应变 $\epsilon_c$ 可得到 $\sigma_j = f \times \sigma_c$ .

为了真实模拟混凝土浇注完毕后的养护过程,在本工程中同层柱、梁和板混凝土采用一次连续浇筑,未考虑跳仓法施工措施,混凝土养护时间起点相同.随着混凝土的强度逐渐提高,混凝土材料的弹性模量逐渐增大,分析中通过生死单元和重叠单元来实现.首先杀死所有构件单元,然后通过所有单元的激活来模拟荷载步内的混凝土材料属性变化过程,不断循环来实现整个混凝土硬化阶段的模拟,并且每次循环都要复制所有单元<sup>[8]</sup>.热-结构耦合分析中水泥的水化热生热、温度荷载、边界的对流放热及结构分析的自由度约束等将作为主要荷载施加在已激活的各个单元及节点上.然后确定荷载步选项:施工的养护周期为7d,设定模型计算时间为28d,每个荷载子步为0.1d.

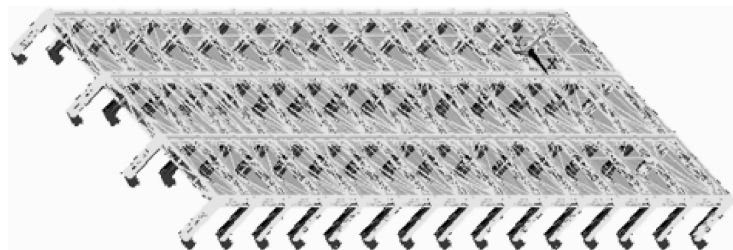


图6 框架结构底层有限元计算模型

Fig. 6 Finite element model of bottom of the frame structure

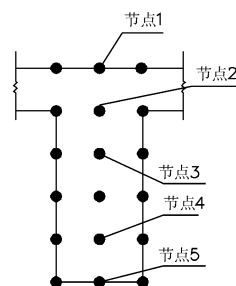


图7 KL1跨中截面节点分布

Fig. 7 Nodes distribution of mid-span section for KL1

本文采用热-结构直接分析即耦合场分析,使用时间积分进行完全瞬态分析.在变化的均匀温度作用下,框架最不利部位是变形不动点处的横梁,即对称框架,开裂是在框架的中部横梁<sup>[4]</sup>,故选取KL1作为研究对象,框架梁KL1跨中截面节点分布图见图7.

混凝土养护开始阶段,混凝土水化速度较快,生热的速度比放热的速度快,梁板柱的温度不断提高,随着时间的推移,混凝土的水化速度不断降低,并且混凝土构件表面向空气中散热及混凝土本身的热传导作用,混凝土温度成下降趋势<sup>[7]</sup>.图8为KL1跨中截面内外节点温度随时间变化过程,所有节点在1d左右均达到温度峰值,这说明在第1d左右时,结构内部化学反应和物理变化的综合作用最强烈,内部积蓄的热量最多.不同节点在3d左右出现了最大温差,其值达到 $3.7^{\circ}\text{C}$ .在整个硬化阶段,节点1的最大温差 $13.8^{\circ}\text{C}$ ,节点2的为 $15.7^{\circ}\text{C}$ ,节点3的为 $16.6^{\circ}\text{C}$ ,节点4的为 $15.8^{\circ}\text{C}$ ,节点5的为 $13.8^{\circ}\text{C}$ .混凝土在全约束下至

完全硬化承受的弹性应力超过混凝土的抗拉强度设计值。

图9为采用时变结构模型分析时混凝土板下表面纵向应力云图。板表面应力高达1.273 MPa,小于混凝土抗拉强度设计值 $f_t$  ( $f_t=1.43$  MPa),与实际情况相符,此阶段混凝土不会因温度应力开裂,但混凝土的可靠度较低,特别是对大型建筑来说,结构后期使用阶段的耐久性受到不利影响。

图10为梁内外表面应力随时间的变化过程,每个节点有多个受压突变点也有受拉突变点。梁截面的不同节点在5 d左右均达到应力峰值,延迟于不同节点出现最大温差时刻,应力滞后于温差变化,区别于弹性分析的温差与应力变化一致情况。

从图11可知:在所取对称结构的一半结构中:同为上表面位置处的节点最大受拉正应力的绝对值随所在位置的增大而不断增大;同为下表面位置处的节点最大受拉正应力的绝对值随所在位置的增大而不断增大;同为中间节点的最大受拉正应力的绝对值的变化并不是单一的递增的趋势,在所选取的分析对象中,边跨的变化明显,在中间跨的变化甚至有下降的趋势,即对柱子轴力影响在纵向结构长度方向端部几跨比较大,在中间几跨几乎没什么很大变化,结构纵向长度增大,梁板整体的轴力将增大比较明显。

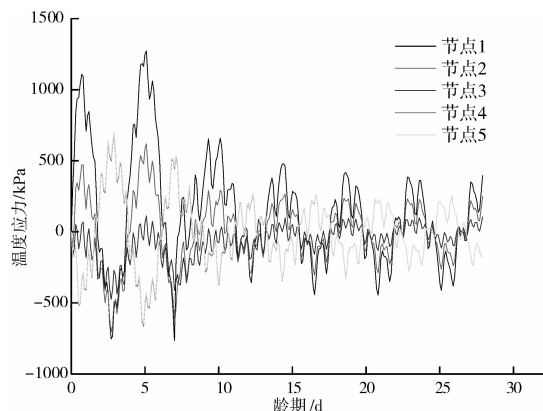


图10 梁截面节点温度应力随时间的变化曲线

Fig. 10 Temperature stress history nodes on mid-span section of KL1

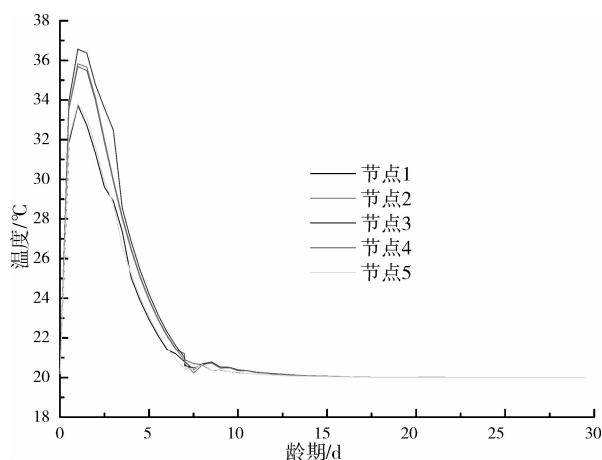


图8 KL1跨中截面节点温度随时间的变化曲线

Fig. 8 Temperature history of nodes on mid-span section of KL1

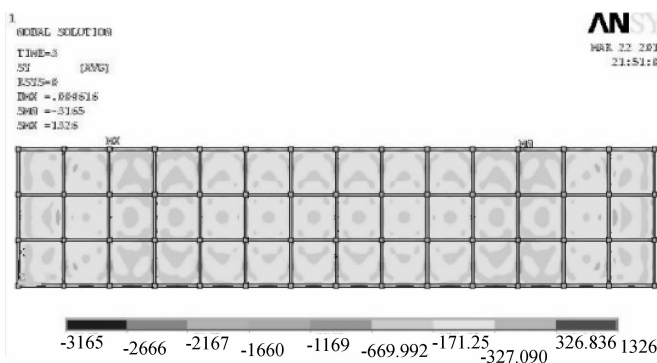


图9 3 d板下表面纵向应力云图

Fig. 9 Longitudinal stress nephogram for bottom side of the slab

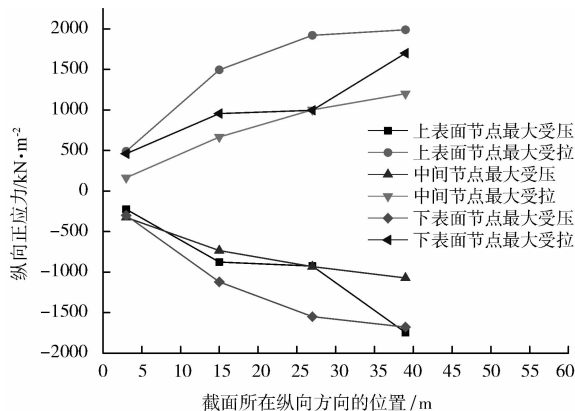


图11 KL1所在轴线不同位置截面正应力随该截面所在纵向方向位置的变化(未考虑徐变系数)

Fig. 11 Relation curves between longitudinal normal stress and location with KL1 longitudinal direction (not considering the creep coefficient)

### 3 结论

本文结合某仓库对超长框架结构混凝土硬化阶段进行非线性分析,根据计算结果得出以下结论:

(1) KL1 截面在 1 d 左右达到温度峰值,表最大温差在 3 d 左右达到峰值,温度应力在 5 d 左右达到应力峰值,里表最大温差变化滞后于温度场变化过程,在超长结构施工健康监测中,混凝土开裂监测和温控监测的时间点不同。(2)超长结构的框架梁,同一时刻其截面的温度场分布和受力状态不一致,即截面存在偏心受力的状态,同一截面不同时刻的温度场分布和受力状态也不同。因此在做混凝土结构设计时应考虑将硬化阶段的偏心作用力作为一种特有的温度荷载考虑,特别是在荷载组合时应计入此阶段的温度荷载。(3)在本文中为考虑钢筋及混凝土的抗拉强度随龄期变化等因素的影响,在本文考虑的因素的影响下硬化阶段的温度应力达到混凝土抗拉强度设计值的 80% 以上,故此阶段的温度应力不容忽视。

## 参考文献 References

- [1] GB50010-2010 混凝土结构设计规范[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2010.  
GB50010-2010 Code for design of concrete structures[S]. Beijing:China Architecture and Building Press,2010.
- [2] 李 东.考虑水化热粘弹性应力影响的超长结构设计计算与分析[J].工程力学,2007,24(8):105-110.  
LI Dong. Design calculation and analysis of long structure considering the effects of visco-elastic stresses of hydration heat. Engineering mechanics,2007,24(8):105-110.
- [3] SCHURTTTER G D. Finite element simulation of thermal cracking in massive hardening concrete elements using degree of hydration based material laws[J]. Computers and structures,2002,80(27):2035-2042.
- [4] 王铁梦. 工程结构裂缝控制[M]. 北京:中国建筑工业出版社,1997.  
WANG Tie-meng. Crack control of engineering structure[M]. Beijing: China Architecture and Building Press, 1997.
- [5] 朱伯芳. 大体积混凝土温度应力与温度控制[M]. 北京:中国电力出版社,1999.  
ZHU Bo-fang. Stress and temperature control of mass concrete [M]. Beijing: China Electric Power Press, 1999.
- [6] 施卫星,符佳勇,李振刚. 钢筋混凝土超长框、排架结构温度作用非线性研究[J]. 结构工程师,2007,23(3):14-17.  
SHI Wei-xing,Fu Jiayong,LI Zhengang. Nonlinear Analysis of Thermal Stress and Deformation for an Over-Long Reinforced Concrete Frame Structure. Structural Engineers, 2007, 23(3):14-17.
- [7] 王 晖,刘 超,史志利. 钢筋混凝土水池池壁施工温度场仿真分析[J]. 特种结构,2007,4(1):14-16.  
WANG Hui,LIU Chao,SHI Zhi-li. Simulated analysis of the temperature field of the large-scale reinforced concrete tank in construction period. Special Structures,2007,4(1):14-16.
- [8] 王新敏. ANSYS 工程结构数值分析[M]. 北京:人民交通出版社,2007.  
WANG Xin-min. Numerical analysis of ANSYS engineering structure[M]. Beijing: China Communications Press, 2007.

## Thermal stress analysis on over-long reinforced concrete frame structure at the hardening stage

LI Dong, CHEN Hua-juan

(Department of Civil Engineering, Shanghai University, Shanghai 200072, China)

**Abstract:** In this paper, nonlinear analysis was carried out for temperature stress and temperature effect of over-long concrete by the large finite element software ANSYS. Three-dimensional solid model was made for a super-long reinforced concrete frame structure in practical engineering, and direct thermal-structural coupling analysis was made. The variation feature of temperature field structure and stress was obtained to determine the control section in the hardening stage of concrete. The conclusion can provide reference for structural measures and construction measures of reinforced concrete structure, which has practical guiding significance.

**Key words:** analysis of super-long structure; hardening stage; temperature stress; thermal-structure coupling