

矩形钢管混凝土柱温度场及温度应力的有限元分析

孙粤琳¹, 张燎军¹, 冉懋鸽²

(1. 河海大学水利水电工程学院, 江苏 南京 210098; 2. 贵阳勘测设计研究院, 贵州 贵阳 550002)

摘要:基于大型通用有限元分析软件 ANSYS, 针对某水电站厂房钢-混凝土排架柱, 建立了矩形钢管混凝土柱三维温度场有限元计算模型, 研究矩形柱在外界温升和温降两种情况下的温度及应力变化规律, 探讨钢管混凝土柱在火灾下的温度场分布特征, 比较了两种不同边界条件对钢管混凝土柱温度应力的影响. 分析结果表明, 计算成果符合工程实际.

关键词:矩形钢管混凝土; 温度场; 温度应力; 耐火性能; ANSYS

中图分类号:TV315; O241.82

文献标识码:A

文章编号:1006-7647(2005)05-0033-04

Analysis of temperature field and thermal stress in concrete filled rectangular steel tube column with FEM// SUN Yue-lin¹, ZHANG Liao-jun¹, RAN Mao-ge² (1. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. Guiyang Investigation and Design Institute, Guiyang 550002, China)

Abstract: Based on ANSYS, a well known FEM software, a 3-D finite element calculation model for temperature field analysis in concrete filled rectangular steel tube column was built to simulate a steel-concrete bent column for the powerhouse of a hydropower station. With the present model, the regularities of temperature and stress variation in the rectangular column were analyzed under the conditions of temperature rise and temperature drop, the characteristics of temperature distribution in the concrete column in fire were discussed, and the effects of two different boundaries on the thermal stress in the concrete column were compared. Analysis shows that the calculated results accord with the reality of the project.

Key words: concrete filled rectangular steel tube; temperature field; thermal stress; resistance to fire; ANSYS

钢管混凝土是由混凝土填入薄壁钢管而形成的
一种组合材料^[1], 其与纯混凝土柱和纯钢管柱相比,
轴压、弯压和抗剪能力均大幅度提高, 而且具有良好的
抗震性能和耐火性能, 经济效益高. 其应用日益广
泛, 从最早的桥墩逐步涉及到单层和多层工业厂房、
高炉和锅炉构架、送变电构架及各种支架结构中^[2].
目前对钢管混凝土温度应力和耐火性能的研究相对
薄弱, 特别是对矩形钢管混凝土的研究更少. 本文结
合某大型水电站厂房钢管混凝土结构, 对其排架柱
的几种典型温度荷载进行深入计算分析, 旨在研究
矩形钢管混凝土柱随外界温度发生变化时温度场和
温度应力的变化规律和受火特性. 以通用有限元程
序 ANSYS 作为分析工具, 大大提高了计算和分析效
率, 所得结果符合实际情况.

1 ANSYS 热分析基本方程

ANSYS 热分析基本方程为

$$\rho c \left(\frac{\partial T}{\partial t} + V_x \frac{\partial T}{\partial x} + V_y \frac{\partial T}{\partial y} + V_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) =$$

$$q + \frac{\partial}{\partial x} \left(K_x \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) \quad (1)$$

式中: ρ 为密度; c 为比热容; T 为温度; t 为时间; V 为整体传热速率矢量, $V = \{V_x, V_y, V_z\}^T$; q 为单位体积的生热率; K_x, K_y, K_z 分别为单元在 x, y, z 方向的热传导率.

边界条件有 3 种, 假定作用范围为整个单元. 本文涉及到如下第一种和第三种边界条件.

a. 在面 S_1 上温度已知:

$$T = T^* \quad (2)$$

式中: T^* 为已知的温度.

b. 在面 S_3 上对流量已知(牛顿冷却法则):

$$q^T \eta = h_f (T_s - T_b) \quad (3)$$

式中: η 为单位外法线向量; h_f 为膜散热系数; T_b 为相邻流体的整体温度; T_s 为模型表面的温度.

2 有限元模型的建立

2.1 工程简介

某水电站厂房排架柱的主构架柱采用钢-混凝土

土组合矩形结构,柱内填混凝土 C40,有钢板覆顶,柱高 7 890 mm,钢材采用 Q345B,其截面形状如图 1 所示。

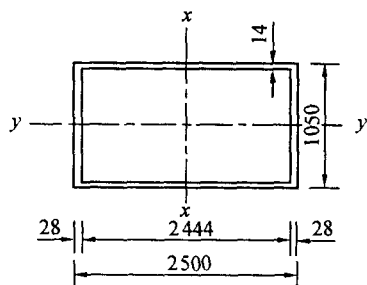


图 1 钢管混凝土柱截面形状(单位:mm)

2.2 基本假定

建立三维有限元模型时,重点研究外界环境温度变化对温度场及温度应力的影响.由于进行温度场计算的同时再考虑材料非线性的计算工作量很大,故将钢管和混凝土作为线弹性材料考虑,并且只考虑温度荷载.钢管和混凝土做直接黏结处理,不考虑二者因热膨胀不同而可能产生的脱离现象。

2.3 模型建立

2.3.1 单元类型

考虑到模型的性质及分析重点,钢管和混凝土均采用适用于三维实体模型同时具有热传导能力的空间 8 节点六面体单元——Solid70 单元;在进行温度应力计算时,再转成相应的结构分析单元,即 Solid45 单元。

2.3.2 材料特性

根据工程资料,混凝土弹性模量 $E_c = 32.5 \text{ GPa}$,密度 $\rho_c = 2.449 \text{ t/m}^3$,泊松比取为 0.167;钢管弹性模量 $E_s = 206 \text{ GPa}$,密度 $\rho_s = 8.010 \text{ t/m}^3$,泊松比取为 0.3。

钢材和混凝土的热性能参数主要包括导热系数、比热容和热膨胀系数,一般来说这些参数都会随着温度的变化而变化,本文中这些参数按文献[3]取值(温度在 0~1000 °C 范围内)。

2.4 网格划分和荷载施加

排架柱底部与厂房地面相连,为了考虑柱底约束对钢管混凝土柱温度场的影响,分别考虑了底部直接约束和柱底部以下再取部分地基两种方案.基础范围为: x 正负方向各延伸核心混凝土的一个宽度值 2444 mm,向 y 负方向延伸核心混凝土一半的高度值 3945 mm,向 z 正、负方向各延伸混凝土的一个厚度值 1022 mm.基础材料与柱内混凝土相同。

图 2 为考虑基础影响的三维有限元网格,网格节点数 4266 个.坐标系选择为: x 轴沿柱横截面的长边方向, y 轴沿柱高度方向, z 轴沿柱横截面的短边方向,原点位于柱底长边的中心处。

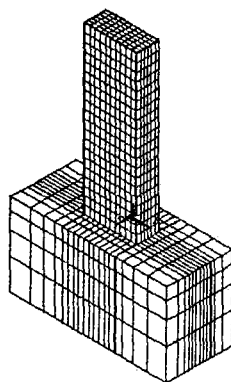


图 2 钢管混凝土柱三维有限元网格

柱体在外界温度变化前的温度作为初始条件施加于整个柱体的节点上,对应于第一类边界条件,本文统一初始温度为 20 °C.外界温度变化对柱体的影响通过热对流来实现,对应于第三类边界条件,程序中将对流边界条件作为面荷载施加于实体的外表面单元上,其中要定义对流系数和流体温度两个值,本文对应于温度为 60,400,600,700,900,1100 °C 时的对流换热系数取值分别为^[4] 41.868, 62.802, 125.604, 167.472, 239.076, 502.416 kJ/(m²·h·°C).当温度场计算结束转到温度应力计算部分时,要对模型添加位移边界条件,即在基础部分除去顶面的各面都施加法向链杆约束。

3 结果计算与分析

3.1 ANSYS 中温度场和温度应力计算方法

ANSYS 的热分析可分为稳态热分析和瞬态热分析两种类型.本文进行的温度场分析包含了上述两种分析方法,另外由于材料性能参数(导热系数和比热容)等都随温度变化,还属于非线性热分析,具体步骤是:首先设定只有一个子步的时间很小的荷载步 0.01 s,以初始温度 20 °C 为基准进行稳态热分析,随后进入瞬态分析,时间步长取温度变化过程的时间长.在温度场分析之后重新进入前处理,转到结构分析,将热单元(Solid70)转换为相应的结构单元(Solid45),再设置结构分析中的材料属性,并读入热分析的节点温度,然后进行热应力计算。

3.2 计算工况

工况 I:考虑柱底基础,温度由 20 °C 降至 5 °C,即温差为 -15 °C,历时 100 h;工况 II:考虑柱底基础,温度由 20 °C 升至 33 °C,即温差为 13 °C,历时 100 h;工况 III:考虑柱底基础,初始温度为 20 °C,受火 1 h;工况 IV:考虑柱底基础,初始温度为 20 °C,受火 3 h;工况 V:柱底直接施加固定约束时对应于工况 I 的情况;工况 VI:柱底直接施加固定约束时对应于工况 I 的情况.其中火灾情况下钢管混凝土周围

环境的升温过程采用国际标准化组织(ISO)推荐的标准温升曲线^[5](见图3),曲线方程为

$$T_B = 20 + 345 \lg \left(\frac{8t}{60} + 1 \right) \quad (4)$$

式中: T_B 为环境温度, $^{\circ}\text{C}$; t 为升温时间, s 。

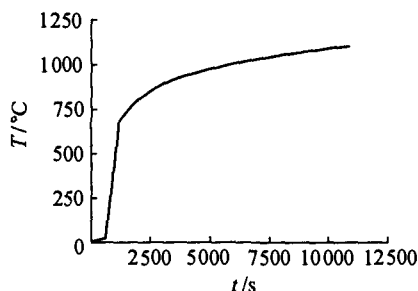
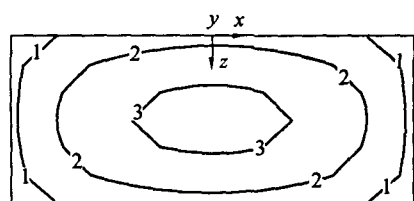


图3 标准温升曲线

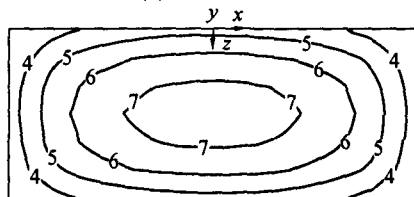
3.3 成果分析

3.3.1 温度场分析

对工况I和工况II下钢管混凝土柱顶部附近($y = 7500 \text{ mm}$)和底部($y = 0 \text{ mm}$)两个截面处的温度场等值线图(图4和图5)进行分析.从图中可以看出:工况I的柱底部截面混凝土中心温度比钢管表面温度高 2.5°C 左右,柱顶部附近截面相应的温差在 1.6°C 左右,而且柱底部截面温度普遍高出柱顶部附近截面相应位置 $4.1 \sim 5^{\circ}\text{C}$;工况II柱底部截面混凝土中心温度比钢管表面温度低 2.1°C 左右,柱顶部截面的相应温差在 1.4°C 左右,同时柱底部截面温度较柱顶部截面相应位置温度低 $3.6 \sim 4.3^{\circ}\text{C}$.计算分析表明,柱顶部与其他部位相比,整体上受外界环境温度变化的影响较大,核心混凝土与钢管的内外温差较小,这是因为柱顶部还有顶面跟外界进行热交换,而其余部分只有环向的4个面与外界有热对流。



(a)柱顶附近截面



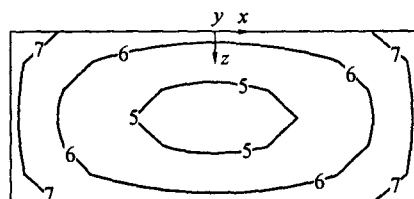
(b)柱底截面

1- 7.309°C ; 2- 8.133°C ; 3- 8.957°C ; 4- 11.430°C ;
5- 12.255°C ; 6- 13.079°C ; 7- 13.903°C

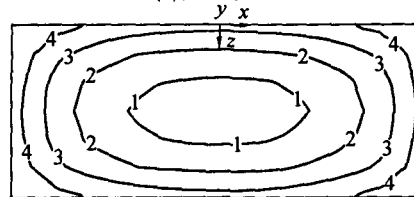
图4 工况I温度场

图6为工况III和工况IV钢管表面与混凝土中心在 $y = 4000 \text{ mm}$ 截面处的温度过程线.可以发现:
①在火灾刚开始的约13 min内,钢管和混凝土的温

升较快,之后两者温度缓慢增加,最后趋于稳定;
②由于钢管表面直接受火,而且混凝土的导热系数较钢材低,比热容较钢材高,混凝土的温升一直滞后于钢管,这样就增加了钢管混凝土柱的整体耐火时间,进而能减缓整体承载能力的下降;③钢管与混凝土两者的温差先增加、后减小,受火1 h后的温差还在 100°C 左右,到3 h后就趋于 0°C ,其中从第7 min到第13 min之间的温差最大,在 $200 \sim 300^{\circ}\text{C}$ 之间。



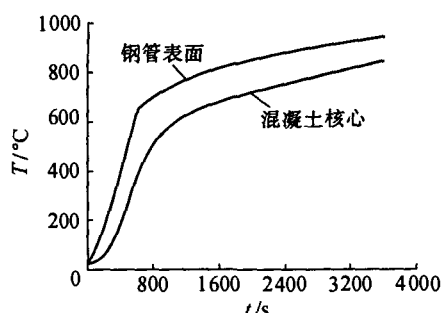
(a)柱顶附近截面



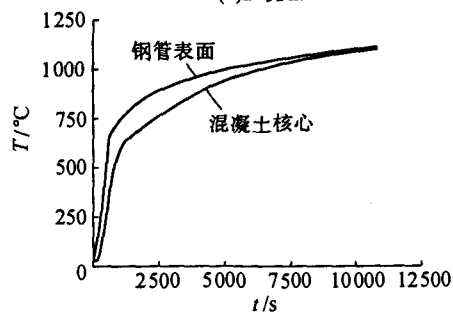
(b)柱底截面

1- 20.284°C ; 2- 25.998°C ; 3- 26.713°C ; 4- 27.427°C ;
5- 29.570°C ; 6- 30.285°C ; 7- 30.999°C

图5 工况II温度场



(a)工况III



(b)工况IV

图6 钢管混凝土柱受火的温度过程线

3.3.2 温度应力分析

在火灾情况下钢管和混凝土的力学特性和物理性质与正常温度下相比有很大改变,这里仅针对工况I和工况II进行温度应力计算分析.由于柱底受到厂房地面的约束,随温度变化产生的变形受到限制较大,因而应力也较大,同时鉴于钢管混凝土柱在长边 x 和短边 z 方向承受对称的温度荷载,得到的

温度应力在这两个方向也对称,故本文取柱底部($y=0$ mm)截面一侧钢管和混凝土分别在其接合面上的3个典型点——长边中点、角点和短边中点处的温度应力进行分析,结果见表1。

表1 柱底典型点温度应力

工况	点的位置	σ_x	σ_y	σ_z
I	钢管长边中点	21.71	4.31	9.32
	钢管角点	32.39	27.02	36.48
	钢管短边中点	11.80	9.22	25.28
	混凝土长边中点	2.50	-0.30	1.77
	混凝土角点	1.98	0.63	1.59
	混凝土短边中点	2.21	0.20	2.80
II	钢管长边中点	-18.81	-3.73	-8.08
	钢管角点	-28.07	-23.42	-31.61
	钢管短边中点	-10.22	-7.99	-21.91
	混凝土长边中点	-2.17	0.26	-1.53
	混凝土角点	-1.72	-0.54	-1.37
	混凝土短边中点	-1.91	-0.17	-2.43
V	钢管长边中点	39.99	11.55	39.64
	钢管角点	50.12	30.29	51.00
	钢管短边中点	46.58	21.17	47.49
	混凝土长边中点	3.66	-0.53	3.44
	混凝土角点	4.36	1.54	4.40
	混凝土短边中点	3.95	0.30	4.21
VI	钢管长边中点	-34.66	-10.01	-34.35
	钢管角点	-43.44	-26.25	-44.20
	钢管短边中点	-40.37	-18.35	-41.16
	混凝土长边中点	-3.18	0.46	-2.98
	混凝土角点	-3.78	-1.34	-3.81
	混凝土短边中点	-3.42	-0.26	-3.65

从表1可以看出,工况I和工况II的钢管和混凝土在温降时主要受拉应力,在温升时主要受压应力,这与实际情况相符,即受冷收缩,受热膨胀。在钢管的3个典型点中,角点处3个方向的应力都最大,这是因为角点同时位于两个面上,受到的以面荷载为作用形式的热对流更加强烈,因此产生的温度应力就更为突出;在混凝土的典型点中,长边中点在 x 方向的应力最大,短边中点在 z 方向的应力最大,这是因为长边方向与 x 方向一致,由温度变化造成的变形主要是 x 方向的,而最大的变形就发生在中点处,因此长边中点处产生的 x 方向的应力就较大;同理,短边由于与 z 方向一致,其中点处 z 方向的应力就较大。

同时,表1工况I和工况II中钢管的拉、压应力都在其允许值范围内,混凝土在温升的情况下也都满足强度要求,但是在温降的情况下,混凝土的3个典型点都有1个或2个方向的应力值超出了混凝土的抗拉强度。由此可知,在温升情况下,钢管混凝土柱不会受很大影响,但是在可能出现较大温降的情况下,钢管混凝土柱底部的混凝土很可能会出现温度裂缝,再联系前一段所述可推断裂缝的走向大致

呈水平状。

3.3.3 钢管混凝土柱底约束对温度应力的影响

处理钢管混凝土柱位移边界条件的一般方法是直接在柱底施加固定约束,本文为了更加符合实际情况,计算模型采用了在柱底添加部分基础,在基础四周面及底面加链杆约束的边界条件。为了说明钢管混凝土柱底部约束对其温度应力的影响,本文对工况V和工况VI的温度应力也进行了计算,结果见表1。从表1中可以看到,与考虑基础的情况相比,直接在柱底施加固定约束时钢管和混凝土的应力都明显较大,其中钢管最大应力的增幅达到39.8%,混凝土最大应力的增幅达到57.1%。由此可见,柱体与地面直接固定连接的情况产生了应力集中的现象,得到的应力值普遍偏大,建议设计施工中尽量避免这种连接方式。

4 结 论

a. 钢管混凝土柱顶部附近的截面与钢管混凝土柱其他部位截面相比,其整体受外界温度变化的影响较大,内部混凝土与外部钢管的温差较小。

b. 钢管混凝土柱在火灾发生后整体温度随时间的增加先快后慢,逐渐趋于稳定;混凝土的温升始终滞后于钢管,同时两者的温差随火灾发生时间的延长而先增加、后减小,最后趋于0℃,其中在第10 min前后几分钟的时间内温差最大。

c. 在可能的较大温升温降情况下,钢管在面面交界处应力较大;在温升情况下钢管和混凝土都满足强度要求,但是在可能出现的较大温降情况下,柱底混凝土的应力大都会超出强度要求。

d. 在可能的较大温降情况下,钢管混凝土柱底的混凝土会出现温度裂缝,裂缝大致呈水平走向。

e. 采用柱体底面与地基直接固定连接的情况将产生较大的应力集中,建议设计施工中尽量避免这种连接方式。

参考文献:

- [1] 曲卫波,侯朝胜.钢管混凝土的应用[J].福建建筑,2002,78(3):33—34.
- [2] 韩林海.我国钢管混凝土结构研究与应用的部分新进展[J].工业建筑,1995,25(1):3—6.
- [3] 韩林海.钢管混凝土在高温作用下温度场的非线性有限元分析[J].哈尔滨建筑大学学报,1997,30(4):15—22.
- [4] 徐蕾,韩林海.方形钢管混凝土温度场的非线性有限元分析[J].哈尔滨建筑大学学报,1999,32(5):34—38.
- [5] 李国强.钢梁抗火计算和设计的实用方法[J].工业建筑,1994,24(7):43—46.

(收稿日期:2004-07-19 编辑:高建群)