

文章编号:1673-9469(2012)04-0013-03

CFDST 组合截面结构柱的抗火设计分析

王美农,王囡囡,高丛超

(河北工程大学 土木工程学院,河北邯郸 056038)

摘要:基于钢管和混凝土的不同热工性能以及热传导的边界条件,采用有限单元法,建立 CFDST 柱截面二维计算模型,得出各节点在某一时刻的温度。根据高温下的钢材和混凝土本构关系,计算出不同温度下钢材和混凝土的应力,利用叠加原理求出 CFDST 组合结构柱的截面内力。结果表明 CFDST 组合结构柱外层钢管温度增长率高于混凝土和内层钢管的温度增长率;CFDST 组合结构具有良好的耐火性能,主要影响因素包括构件长细比、内外层钢管强度、混凝土强度等级及空心率。

关键词:热工性能;有限单元法;叠加原理;CFDST;耐火性能;影响因素

中图分类号:TU352.5

文献标识码:A

The analysis on fire - resistance design of concrete filled double skin steel tubes column section

WANG Xian - nong ,WANG Nan - nan ,GAO Cong - chao

(College of Engineering, Hebei University of Engineering, Hebei Handan 056038, China)

Abstract:Comprehensively considering boundary conditions of heat conduction and different thermal properties of steel and normal concrete, the two - dimensional analysis - calculation model of concrete filled double skin steel tubes column section is established with the finite element method and the temperature of different node every moment was obtained. The stress of steel and concrete in certain temperatures can be concluded by using constitutive relation between steel and concrete on high temperature and the internal forces of CFDST (concrete filled double skin steel tubes) combination structure column section can be concluded by using superposition principle. The results show that the fire resistance of components would be good by using this kind of steel. The concrete composite structure column section whose temperature of external steel tube is higher than concrete and internal steel tube and the primary influencing factors of fire resistance are slenderness ratio, strength of internal and external steel tubes and concrete and hollow ratio.

Key words:thermal property;the finite element method;superposition principle;concrete filled double skin steel tubes; fire - resistance performance;influencing factors;

钢结构的耐火性极差,一般情况下未作防护的钢构件只有 15~20 min 的内在耐火极限,在达到 450~600℃时,基本丧失全部强度和刚度^[1]。为了提高钢构件的耐火极限,需要采取一些措施来延迟钢中温度的上升,采用组合结构成为解决方法之一。当前以钢管混凝土为主,其中实心钢管混凝土柱的抗火性能已有了大量的试验、数值

和理论研究^[2-3],2011年,余敏、查晓雄对空心钢管混凝土的抗火性能进行了实验研究^[4]。

中空夹层钢管混凝土^[5](concrete filled double skin steel tubes - CFDST)是在实心钢管混凝土的基础上发展而来的一种新型组合结构形式。本文采用有限单元法,建立中空夹层钢管混凝土柱截面的二维计算模型,考虑材料在高温下的热工及

力学性能,利用叠加原理求解 CFDST 组合截面内力,分析其抗火性能。

1 CFDST 组合截面柱计算模型

1.1 基本假定与网格划分

基本假定:1)CFDST 外表面均匀受火,材质均匀;2)柱子截面在受火荷载过程中始终保持平面;3)不考虑因高温作用引起的构件间约束作用的变化。

考虑 CFDST 组合截面柱形状和边界条件的对称性,在 coordinate system 下,选取四分之一的截面进行网格划分。设下标 i, j 分别表示径向和周向,如图 1 所示。

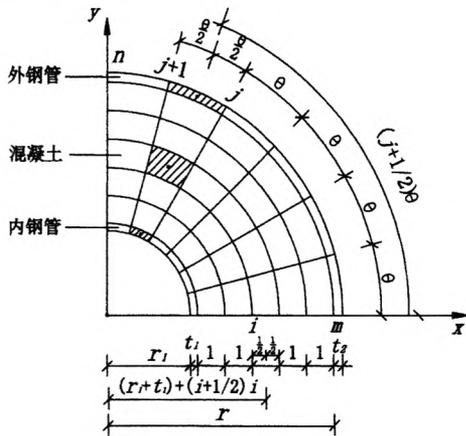


图1 截面单元划分

Fig.1 The diagram of section division

1.2 温度场和边界条件

火灾发生时,假定柱子外表面受火均匀,可列出热传导方程:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda_x \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) = \frac{\partial}{\partial t} (\rho C) \quad (1)$$

式中 λ_x, λ_y - 导热系数, $w/(m \cdot ^\circ C)$; C - 比热容, $J/(kg \cdot ^\circ C)$; ρ - 密度, kg/m^3 。

截面边界初始温度为第一类边界条件,钢管和混凝土自身内部的热量传递为第二类边界条件,钢管外表面与火的接触为第三类边界条件,将这些边界条件带入热传导方程可出物体内部各点的温度。

$$T|_s = T_s(x, y, t) \quad (2)$$

$$\left(\lambda_x \frac{\partial T}{\partial x} n_x + \lambda_y \frac{\partial T}{\partial y} n_y \right) |_s = q_s(x, y, t) \quad (3)$$

$$\left(\lambda_x \frac{\partial T}{\partial x} n_x + \lambda_y \frac{\partial T}{\partial y} n_y \right) |_s = h [T_f(t) - T_s(t)] \quad (4)$$

式中 T_s - 物体表面温度, $^\circ C$; T_f - 介质温度, $^\circ C$; q_s - 热量的输入或输出, J 。

2 数值模拟实例

2.1 数值分析模型

用 ANSYS 12.1 有限元分析软件对 CFDST 组合截面柱平截面进行模拟,初始温度 $10^\circ C$,火荷载 $800^\circ C$,传热系数为 $100w/(m^2 \cdot ^\circ C)$,其他参数如表 1 所示。

表 1 几何参数和材料属性

Tab.1 Material's geometric parameters and properties

参数	钢管	混凝土
内钢管厚度/m	0.003	-
内钢管内半径/ m	0.08	-
外钢管厚度/ m	0.005	-
外钢管内半径/ m	0.19	-
弹性模量 / $N \cdot m^{-2}$	2.06×10^{11}	3.25×10^{10}
泊松比	0.35	0.2
密度 / $kg \cdot m^{-3}$	7800	2 350
线膨胀系数 / $m \cdot (m \cdot ^\circ C)^{-1}$	$(0.004T + 12) \times 10^{-6}$	$(0.008T + 6) \times 10^{-6}$
导热系数 / $w \cdot (m \cdot ^\circ C)^{-1}$	48	2.0
比热容 / $J \cdot (kg \cdot ^\circ C)^{-1}$	480	1 046

数值模拟中,将 CFDST 截面径向划分 10 层,分别求解每层节点温度随时间的变化情况,如图 2 所示。

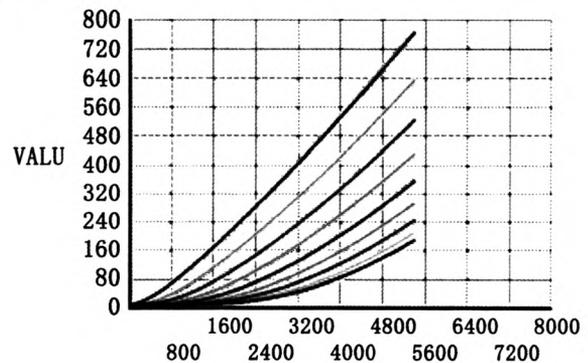


图2 节点温度随时间的变化图

Fig.2 The profile of node temperature with time

由图 2 可以看出 CFDST 截面的温度由外向内依次降低,最外层节点温度随时间增长最快,最内侧温度增长率最慢。

2.2 结果分析

欧洲钢结构规范(ECCS)给出了高温下的钢材强度关系式^[7]:

$$f_y(T) = \{1 + T/[767\ln(T/1750)]\} f_y, 0 \leq T < 600^\circ\text{C} \quad (5)$$

$$f_y(T) = 108f_y(1 - T/1000)/(T - 440) \quad 600 \leq T < 1000^\circ\text{C} \quad (6)$$

高温下的混凝土强度关系式:

$$f_{ck}(T) = f_{ck}/[1 + 1.986(T - 20)^{3.21} \times 10^{-9}] \quad T \geq 0 \quad (7)$$

式中 f_y - 常温下钢材的屈服强度值,MPa; f_{ck} - 常温下混凝土的抗压强度标准值,MPa。

由式(5)、(6)和式(7)可知,钢材和混凝土的强度随温度增加而降低。将图2的节点温度随时间的变化关系与高温下钢材和混凝土的强度关系式结合,可得出 CFDST 柱截面各部件的强度随时间变化的曲线,将 CFDST 的各部件的强度降低变化按百分比的曲线形式表现出来,就得到了 CFDST 的内、外钢管和混凝土的典型强度降低曲线,如图3所示。

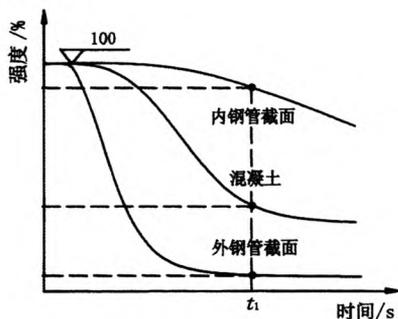


图3 CFDST柱截面各部件的典型强度降低曲线

Fig.3 The typically reduction of the strength curves from concrete filled double skin steel tubular column section

由图3典型强度降低曲线可知,在火荷载作用下,CFDST的外钢管将在短时间内强度明显下降,混凝土强度降低的程度要小得多,而内层的钢管的强度基本没有折减。发生火灾时,钢管虽然升温很快,强度明显降低,但是具有低导热性的混凝土部分和内层钢管升温滞后,强度降低较小,仍具有一定的承载力,使 CFDST 的耐火时间延长,因此中空夹层钢管混凝土具有良好的耐火能力。

由于外钢管强度的明显降低,则外钢管对混凝土的套箍作用也随之降低,使得 CFDST 截面所受的承载力将重新分配,而丧失强度较慢的混凝土和内层钢管则成为主要的持力部分。因此在进

行 CFDST 的抗火设计时应增加混凝土的强度等级和内层钢管的强度。

2.3 耐火时间影响因素

截面的承载力是每一个部件承载力之和,以 t_1 为例, t_1 时刻的截面承载力为 $R(t_1) = \sum r_j(t_1)$ 。考虑高温下钢材和混凝土的应力-应变关系^[3],可得内、外钢管和混凝土在 t_1 时刻的应力 σ_{1i}, σ_{2i} 和 σ_{ci} ,将小截面单元的内力叠加就可以得到整个截面的内力

$$N_n = 4 \left[\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n (\sigma_{cij} A_{cij}) + \sum_{j=1}^n (\sigma_{1j} A_{1j}) + \sum_{j=1}^n (\sigma_{2j} A_{2j}) \right] \quad (8)$$

$$N_k = \varphi A_{sc} f_{sc} / 1.3 \quad (9)$$

当高温下载面的内力 N_n 和柱子的抗火极限承载力 N_k 相等就可求出耐火时间 t_1 。

稳定系数随柱子长细比的增加和含钢率的增加而减小^[6-10],由式(9)知稳定系数与 CFDST 柱的抗火极限承载力成正比,柱子直径的增加可以减小长细比,空心率的增加会使混凝土受荷面积减少,使 CFDST 截面柱抗火极限承载力减小,因此 CFDST 柱的耐火时间与柱子的长细比、空心率、钢材和混凝土的强度有关,这些影响因素与耐火时间的关系如图4所示。

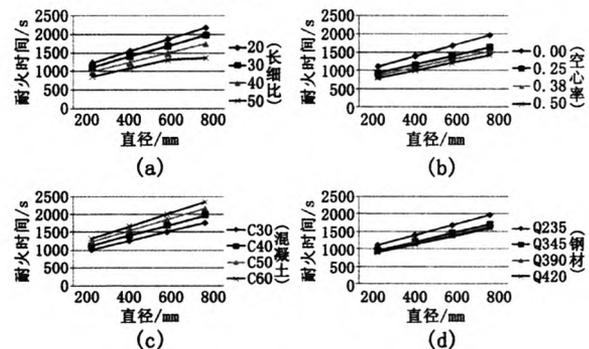


图4 CFDST在不同影响因素下耐火时间图

Fig.4 The chart of fire-resistant duration of CFDST with different factors

由图4可以看出,CFDST柱的耐火时间随柱子直径的增加而增加;随长细比的增加而下降;随空心率的增加而下降;随混凝土强度的提高而增加;随钢材强度的提高而下降。

结合图3和图4可知,外层钢管在火荷载作用下,短时间内强度明显降低,而内填混凝土和内层钢管短时间内强度降低不明显,即 CFDST 柱的耐火时间随外层钢管强度的提高而减少,随混凝土强度等级和内层钢管强度的提高而增加。因此在进行 CFDST 组合截面柱的抗火(下转第27页)

- 46.

- [4] 冯鹏,叶列平. FRP 材料及结构在桥梁工程中的新应用[A]. 第十五届全国桥梁学术会议论文集[C]. 上海:同济大学出版社,2002:555-560.
- [5] 朱虹,钱洋. 工程结构用 FRP 筋的力学性能[J]. 建筑科学与工程学报,2006,23(3):26-31.
- [6] 钱锐,茅卫兵. 国外对混凝土结构中新型材料 FRP 筋的研究应用[J]. 江苏建筑,2001(1):28-33.
- [7] 吕志涛. 高性能材料 FRP 应用与结构工程创新[J]. 建筑工程与工程学报,2005,22(1):1-5.
- [8] TAKETO UOMOTO, HIROSHI MUTSUYOSHI, FUTOSHI KATSUKI, et al. Use of Fiber reinforced polymer composites as reinforcing material for concrete[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2002: 193-209.
- [9] RENÉ CUSSON, YUN PING XI. The behavior of fiber reinforced polymer reinforcement in low temperature environmental climates[R]. Report No CDOT-DTD-R, University of Colorado Boulder, USA
- [10] KATO Y, YAMAGUCHI T, NISHIMURA T, et al. Computational Model for Deterioration of Aramid Fiber by Ultraviolet Rays[A]. Non-Metallic (FRP) Reinforcement for Concrete Structures; Proceedings of the Third International Symposium [C]. 1997(1): 163-170.
- [11] TOMOSAWA F, NKASTSUJI T. Evaluation of ACM Reinforcement Durability By Exposure Test[A]. Non-Metallic (FRP) Reinforcement for Concrete Structures; Proceedings of the Third International Symposium [C]., 1997(1): 139-146.
- [12] 周长东,吕西林,金叶. 火灾高温下玻璃纤维筋的力学性能研究[J]. 建筑科学与工程学报, 2006, 23(1): 23-28.

(责任编辑 刘存英)

(上接第 15 页)设计时应使用高强混凝土和较高强度的内层钢管及较低强度的外层钢管。

3 结论

1)中空夹层钢管混凝土形式可以有效提高构件的耐火极限,在火荷载下混凝土和内层钢管的温度增长率低于外层钢管。影响中空夹层钢管混凝土柱耐火时间的因素有 CFDST 构件的长细比、内外层钢管的强度和混凝土的强度等级以及空心率。

2)在进行中空夹层钢管混凝土组合截面柱的防火设计时应使用高强混凝土和较高强度的内层钢管及较低强度的外层钢管。

参考文献:

- [1] 李国强,韩林海. 钢结构及钢-混凝土组合结构防火设计[M]. 北京:中国建筑工业出版社,2006.
- [2] 韩金生. 钢管混凝土柱防火性能的试验研究[D]. 南京:东南大学,2006.
- [3] S. LAMONT, MCGILLIE, A. S. Usmani composite steel-framed structures in fire with protected and unprotected edge column [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2006(10): 1-13.
- [4] 余敏,查晓雄. 空心钢管混凝土的防火性能研究[J]. 工业建筑, 2011,41(6): 36-42
- [5] 孙丙楠,曾祺. 中空夹层钢管混凝土轴心受压的性能研究[D]. 浙江大学,2009.
- [6] KODUR V K R, LATOUR J C. Experimental studies on the fire resistance of hollow steel columns filled with high-strength concrete[R]. Fire research program institute for research in construction, Canada; National Research Council,2005.
- [7] EC4:94, Eurocode4: Design of composite steel concrete structures:94
- [8] 杨涛. 钢-混凝土组合梁疲劳性能研究进展[J]. 河北工程大学学报:自然科学版,2010,27(1):16-19
- [9] 查晓雄,钟善桐,徐国林. 空心钢管混凝土结构技术规范理解与应用[M]. 北京:中国建筑工业出版社,2010.
- [10] 李华,黎立云. 钢管混凝土的非线性有限元分析[J]. 河北工程大学学报:自然科学版,2010,27(1): 25-27

(责任编辑 刘存英)