

文章编号:1673-2049(2019)03-0066-08

内嵌十字型钢的方形劲性不锈钢管混凝土柱 耐火性能

刘艳芝¹, 邓集钱¹, 谭清华²

(1. 湖南大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410082; 2. 国防科技大学 空天科学学院, 湖南 长沙 410073)

摘要:通过在不锈钢管混凝土柱中内嵌型钢组成劲性不锈钢管混凝土柱,在降低不锈钢用量的同时使柱体具有更优的延性和耐火性能。采用有限元模拟的方法对内嵌十字型钢的方形劲性不锈钢管混凝土柱的耐火性能开展研究。首先建立火灾下方形劲性不锈钢管混凝土柱耐火性能分析的有限元模型,并采用相关试验的温度场及耐火性能数据对其进行充分验证;基于验证的有限元模型,对不同荷载比作用下一典型劲性不锈钢管混凝土柱的温度历史、轴向位移-时间关系、典型破坏模态和截面内力重分布等开展分析,明确其火灾下的工作机理;同时与等含钢率的不锈钢管混凝土柱开展对比分析。结果表明:内嵌型钢有助于提高高温下柱体的轴向、侧向刚度,劲性不锈钢管混凝土柱的破坏模态表现为轴向压缩破坏;在低火灾荷载比下,由于型钢分担部分从不锈钢转移的荷载,允许不锈钢发生更高的温度材性劣化,进而提高了柱体的耐火性能,火灾荷载比越小,该提升效果越显著。

关键词:劲性不锈钢管混凝土柱;耐火性能;温度场;数值分析

中图分类号: TU398.9

文献标志码: A

Fire Resistance of Square Steel Reinforced Concrete-filled Stainless Steel Tube Columns Embedded with Cross-section Steel

LIU Yan-zhi¹, DENG Ji-qian¹, TAN Qing-hua²

(1. College of Civil Engineering, Hunan University, Changsha 410082, Hunan, China;

2. College of Aerospace Science, National University of Defense Technology, Changsha 410073, Hunan, China)

Abstract: The steel reinforced concrete-filled stainless steel tube column was composed by embedding profile steel in the concrete-filled stainless steel tube column, which reduced the amount of stainless steel and made the column have better ductility and fire resistance. The fire resistance of square steel reinforced concrete-filled stainless steel tube column embedded with profile steel was studied by finite element simulation. Firstly, the finite element model of fire resistance performance of square steel reinforced concrete-filled stainless steel tube column under fire was established, and the temperature field and fire resistance data of relevant tests were used to fully verify the model. Based on the validated finite element model, the temperature history, axial deformation-time relationship, typical failure modes and section internal force redistribution of a typical steel reinforced concrete-filled stainless steel tube column under different load ratios

收稿日期:2018-10-07

基金项目:国家自然科学基金项目(51408212);湖南省自然科学基金青年基金项目(2018JJ3058)

作者简介:刘艳芝(1982-),女,湖南新化人,副教授,工学博士,E-mail:liuyan-zhi@hnu.edu.cn.

通信作者:邓集钱(1993-),男,湖南邵阳人,工学硕士研究生,E-mail:3242881926@qq.com.

were analyzed, and the working mechanism under fire was defined. At the same time, the comparative analysis with concrete-filled stainless steel tube columns with equal steel content was carried out. The results show that the embedded profile steel is helpful to improve the axial stiffness and lateral stiffness of columns at high temperature. The failure modes of steel reinforced concrete-filled stainless steel tubular columns are manifested as axial compression failure. Under low fire load ratio, because partial profile steel shares the load transferred from stainless steel, it allows stainless steel to deteriorate at higher temperatures, thereby improving its fire resistance. The lower the fire load ratio, the more remarkable the improvement effect is.

Key words: steel reinforced concrete-filled stainless steel tube column; fire resistance; temperature field; numerical analysis

0 引言

用不锈钢代替普通含碳钢组成的不锈钢管混凝土柱(Concrete-filled Stainless Steel Tube, CFSST)结合了普通钢管混凝土和不锈钢这2类结构的优点,具有更好的延性、抗震性能、耐腐蚀性和抗火性能^[1]。然而,等截面含钢率下不锈钢管混凝土造价远高于普通钢管混凝土,从而限制了其在实际工程的广泛应用^[2-3]。因此,在保持性能不降低的情况下如何降低不锈钢的用量是推广应用这类结构面临的问题之一。有效的解决方案之一是在不锈钢管混凝土中内嵌普通型钢组成劲性不锈钢管混凝土(Steel Reinforced Concrete-filled Stainless Steel Tube, SRCFSST)。这类结构在降低不锈钢用量的同时,结合了不锈钢管混凝土和型钢混凝土的优点,在工程中具有广阔的应用前景。在全寿命周期内,这类结构同样可能遭遇火灾,故研究其耐火性能具有重要的理论意义和工程应用价值^[4]。

目前还未见有关劲性不锈钢管混凝土耐火性能的相关报道,但对不锈钢管混凝土的耐火性能,国内外学者开展了一定的研究^[5-8]。Han等^[9]进行了轴向荷载和ISO 834-1标准火灾^[10]共同作用下的不锈钢管混凝土柱的耐火极限试验,考察了截面形式(方形和圆形)、截面尺寸和荷载比等参数的影响,并采用已通过试验数据验证的有限元模型对截面尺寸、荷载比、长细比、混凝土强度和含钢率等因素进行参数分析,结果表明截面尺寸及荷载比对其抗火性能影响最为明显。Tao等^[11]结合试验实测的温度数据建立有限元模型,模拟对比了火灾下不锈钢管和普通含碳钢管混凝土柱的温度场分布,结果表明不锈钢管混凝土柱截面温度升高速率低于普通钢管混凝土柱截面,不锈钢与混凝土热工性能参数及两者之间的界面热阻是影响截面温度场分布的主要因

素。Tao等^[12]进行了12根不锈钢管混凝土柱火灾下的耐火极限和火灾后力学性能试验,结果表明不锈钢管混凝土柱相比普通钢管混凝土柱具有更优的延性和耐火性能。另外,Han等^[13]对有关型钢混凝土的耐火性能试验进行了综述,并开展了2根内嵌H型钢和2根内嵌十字型钢的混凝土柱耐火极限试验,并用通过试验结果验证的有限元模型进行参数分析得到了其耐火极限的简化计算公式,研究结果表明,由于外围混凝土的保护作用,型钢在提高其耐火性能方面发挥了重要作用。因此,结合不锈钢管混凝土和型钢混凝土优点的劲性不锈钢管混凝土结构可望具有较好的延性和耐火性能。

基于此背景,本文拟对轴向荷载及ISO 834-1标准火灾共同作用下内嵌十字型钢的方形劲性不锈钢管混凝土柱的耐火性能开展研究。首先建立火灾下方形劲性不锈钢管混凝土柱耐火性能分析的有限元模型,并采用相关试验数据对其进行充分验证;接着基于验证的有限元模型,对一典型方形劲性不锈钢管混凝土柱在火灾下的温度历史、轴向变形-时间关系、典型破坏形态和截面内力重分布等开展分析,明确其火灾下的工作机理,同时与等含钢率的不锈钢管混凝土柱进行对比分析。

1 有限元模型

本文通过ABAQUS软件建立有限元模型,采用热-力相继耦合的方式进行劲性不锈钢管混凝土柱耐火性能模拟分析。

1.1 温度场分析

进行温度场分析时,需确定材料的密度、比热容和导热系数等热工参数。对混凝土、普通型钢和不锈钢分别采用欧洲规范EN 1992-1-2^[14]和EN 1993-1-2^[15]的相关参数及模型。另外,EN 1992-1-2^[14]建议通过修改100~115℃的混凝土比热容,近

似考虑高温下混凝土中水的汽化流动对混凝土截面温度传递的影响;本文通过参数敏感度分析,确定混凝土含水率按 5% 进行计算。

对于不锈钢材料表面的对流系数和热辐射系数,本文采用 Gardner 等^[16]的建议值,即不锈钢热对流系数 $h = 35 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$ 和热辐射系数 $\epsilon = 0.2$ 进行模拟分析。另外,由于不锈钢管内表面与混凝土外表面之间存在水和空气,同时由于不锈钢在火灾下率先升温膨胀使得两者间隙扩大,从而使两者界面处存在温度差,模型中通过设置截面热阻考虑上述因素的影响;截面热阻公式参照 Han 等^[9]的建议公式。型钢与混凝土采用 tie 连接。

1.2 结构分析模型

1.2.1 升温条件下材料应力-应变关系

升温条件下不锈钢与型钢的应力-应变关系、热膨胀系数及弹性模量分别采用 EN 1993-1-2^[15]的模型和参数。混凝土受压应力-应变关系采用 Song 等^[17]修正后的钢管混凝土中约束混凝土高温下的本构模型,但其中涉及不锈钢高温下的屈服强度采用 EN 1993-1-2^[15]的建议值。

1.2.2 界面模型

界面接触考虑切向和法向接触;不锈钢管与混凝土界面法向接触定义为硬接触,切向接触用库仑摩擦力定义,考虑到不锈钢管与混凝土界面较光滑,两者之间的摩擦因数取为 0.25^[9]。混凝土与端板界面切向定义为硬接触和无摩擦。内置型钢采用嵌入约束与混凝土连接。

1.2.3 网格与边界条件

劲性不锈钢管混凝土柱有限元模型的网格划分和边界条件如图 1 所示。上、下端板及混凝土采用 C3D8R 单元进行模拟,不锈钢管及内嵌型钢采用壳单元进行模拟,内嵌型钢与混凝土网格划分一致,力学分析模型网格和温度场分析模型网格保持一致,以保证温度场结果能顺利导入力学分析模型。在对网格尺寸进行灵敏度分析后,设置最大长度为 30 mm。为减小端板变形对构件的影响,上、下端板弹性模量均取 $1 \times 10^{15} \text{ MPa}$,泊松比均取 1×10^{-5} ,近似考虑为刚性板。同时,在加载板的中心处定义 2 个参考点,在加载板和相应参考点之间施加连续分布耦合约束。直接通过参考点设置平移和旋转约束,柱的最大初始缺陷采用 1 阶屈曲模态,其最大幅度是 $H/2\,000$ (H 为柱的高度)^[9]。

2 有限元模型验证

由于还未见劲性不锈钢管混凝土柱耐火试验的

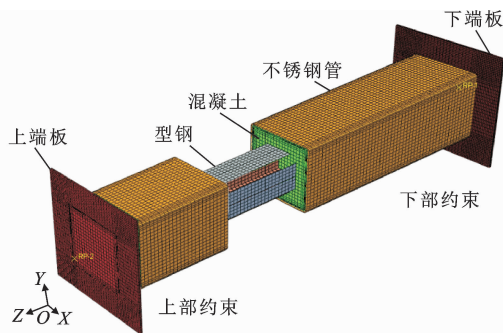


图 1 劲性不锈钢管混凝土柱网格划分及边界条件

Fig. 1 Mesh Generation and Boundary Conditions of SRCFSST Columns

相关报道,因此本文对 Han 等^[9]和 Tao 等^[12]分别进行的 5 根和 6 根不锈钢管混凝土柱的耐火性能试验,以及 Han 等^[13]开展的 4 根型钢混凝土柱耐火性能试验进行模拟验证。由于篇幅限制,本文仅给出文献[9]中试件 S300-0.3 及文献[12]中试件 ST01 的模拟与试验对比分析结果。S300-0.3 试件不锈钢的截面尺寸为 $315 \text{ mm} \times 315 \text{ mm} \times 5 \text{ mm}$,长度为 3 600 mm;不锈钢名义屈服强度和极限强度分别为 395 MPa 和 811.7 MPa;混凝土强度为 64.2 MPa^[9]。ST01 试件不锈钢的截面尺寸为 $200.4 \text{ mm} \times 200.4 \text{ mm} \times 4 \text{ mm}$,长度为 1 870 mm;不锈钢名义屈服强度和极限强度分别为 307.9 MPa 和 641.7 MPa;混凝土强度为 40.3 MPa^[12]。温度场分析时考虑环境初始温度为 20 °C,柱体四面均匀受火,按照试验设置柱体中部受火区高度。力学分析时边界条件参照试验与前述建模方法进行设置。

2.1 温度场验证

图 2 为试件 S300-0.3, ST01 温度场模拟结果与试验结果的对比,除图 2(a)中测点 2 试验温度数据不完整无法比较外,其余模拟测点温度与试验测点温度相近,相对误差在 $\pm 10\%$ 以内。

2.2 耐火性能验证

图 3 为试件 S300-0.3, ST01 轴向位移-时间曲线模拟结果与试验结果对比。由于模拟边界条件较实际情况偏理想化,两者曲线存在一定的差异,但是两者均经历膨胀、软化、陡降 3 个阶段,同时两者耐火极限数值相近。图 4 为试件破坏模态试验结果与模拟结果对比。由图 4(b)可知,试件 S300-0.3 破坏模态为整体侧向屈曲破坏,柱体整体向一侧弯曲倾斜,柱中部发生层间鼓曲,与试验破坏模态一致。由图 4(d)可知,试件 ST01 模拟破坏模态为轴向压缩破坏,在柱中部及靠近非受火段发生局部鼓曲,与

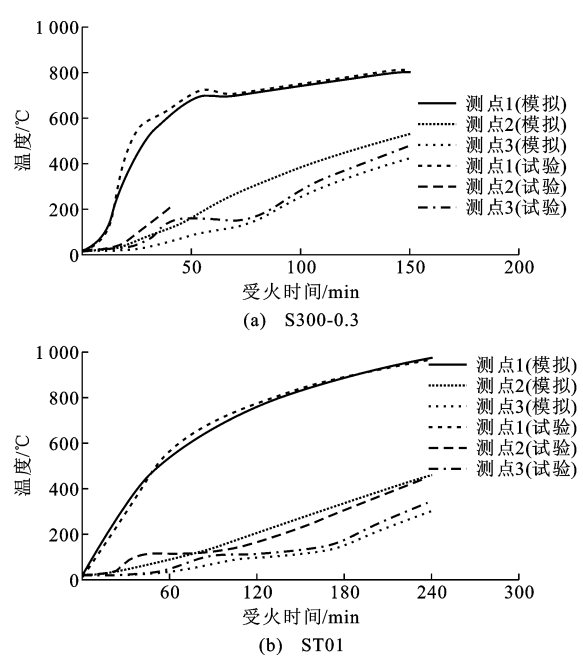


图 2 测点温度-受火时间关系模拟结果与试验结果对比
Fig. 2 Comparison of Temperature-fire Time Relations of Measuring Points Between Simulation Results and Test Results

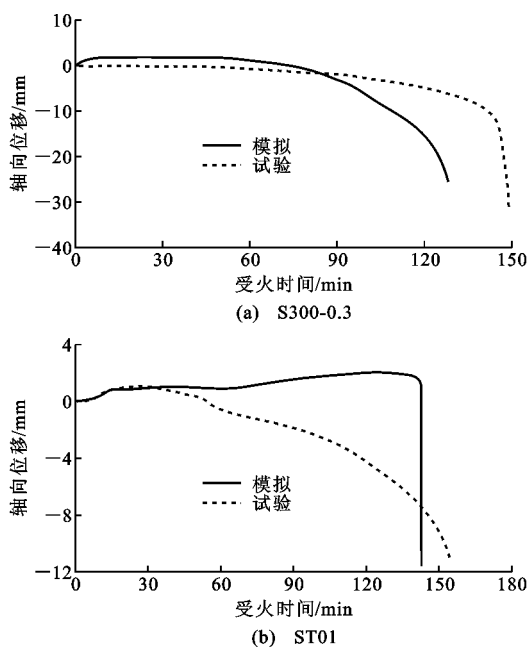


图 3 轴向位移-受火时间关系模拟结果与试验结果对比
Fig. 3 Comparison of Axial Displacement-fire Time Relations Between Simulation Results and Test Results

试验破坏模态相近。耐火极限模拟结果与试验结果的比较如图 5 所示。由图 5 可知,模拟结果和试验结果的相对误差为±15%。因此,本文建立的模型可有效地模拟不锈钢管混凝土柱及劲性不锈钢管混凝土柱的耐火性能。

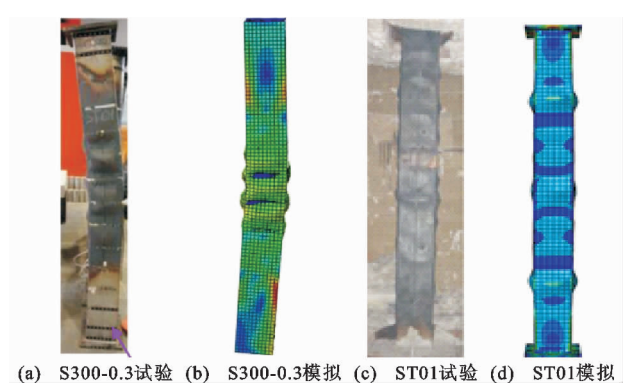


图 4 试件破坏模态模拟结果与试验结果对比
Fig. 4 Comparisons of Failure Modes of Specimens Between Simulation Results and Test Results

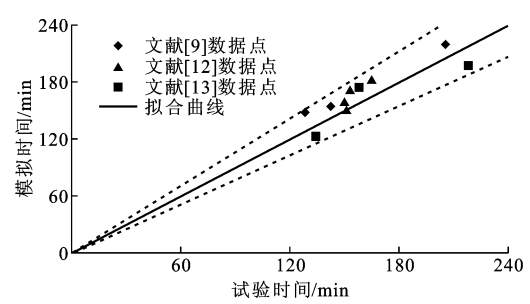


图 5 试件耐火极限模拟结果与试验结果对比
Fig. 5 Comparison of Fire Resistance of Specimens Between Simulation Results and Test Results

3 工作机理分析

采用上述有限元建模方法,参考实际工程瑞丰国际商务大厦柱体尺寸^[18],设计了一方形不锈钢管混凝土柱,不锈钢采用常用奥氏体 30408 不锈钢(名义屈服强度和极限强度分别为 205 MPa 和 515 MPa^[19]),混凝土等级采用 C60;不锈钢管截面尺寸为 600 mm×600 mm×24 mm,长 3 600 mm。计算的劲性不锈钢管混凝土柱与上述不锈钢管混凝土柱材料相同且等含钢率,其外部不锈钢管截面尺寸为 600 mm×600 mm×16 mm,内部十字型钢的截面尺寸为 236 mm×354 mm×12.5 mm×8.5 mm,内嵌型钢采用 Q345 普通钢。2 种柱的两端均采用铰接约束,端板厚度为 20 mm,考虑初始缺陷,不锈钢管混凝土与劲性不锈钢管混凝土常温承载力比值为 0.972。选择 3 种火灾荷载比 $n=0.25,0.35,0.45$,火灾采用 ISO 834-1 标准火灾升温曲线^[6],柱中部四面均匀受火。考虑初始缺陷,不锈钢管混凝土柱与劲性不锈钢管混凝土柱常温承载力比值为 97.26%。

3.1 温度-时间关系

图 6 提取了不锈钢管混凝土柱与劲性不锈钢管

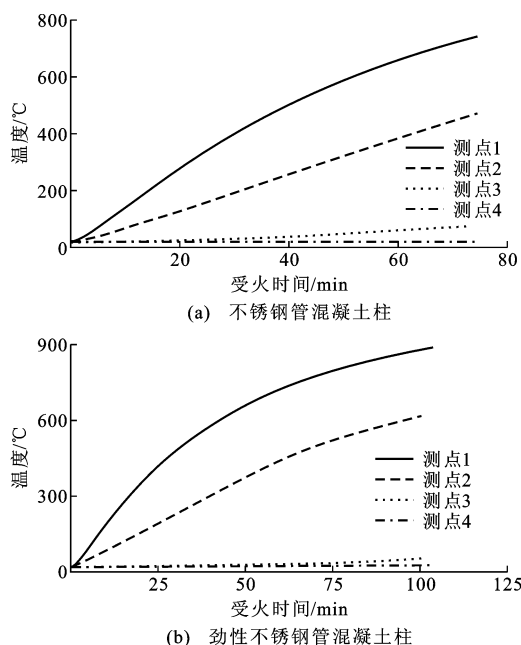


图6 测点温度-受火时间关系

Fig. 6 Temperature-fire Time Relationships of Measuring Points

混凝土柱跨中截面特征点的温度-时间关系。

对于不锈钢管混凝土柱,特征点包括界面位置(测点1和测点2分别在不锈钢管内表面和混凝土外表面)和混凝土中间点(测点3)及中心点(测点4),结果如图6(a)所示。对于劲性不锈钢管混凝土柱,特征点包括界面位置(测点1和测点2分别在不锈钢管内表面和混凝土外表面),翼缘边界点(测点3)和型钢中心点(腹板交接点测点4),结果如图6(b)所示。

由于考虑了不锈钢与混凝土界面的热阻,2种柱的界面上测点1与测点2存在温度差,对于不锈钢管混凝土柱,该温度差随时间增加而增大,在60 min左右达到最大值282.88℃,此后该温度逐渐减小,至74.46 min时为271.97℃。对劲性不锈钢管混凝土柱,该温度差在60 min左右达到最大值275.1℃,至103.73 min时为258.89℃。

不锈钢管混凝土柱中的不锈钢管厚度(24 mm)大于相应劲性不锈钢管混凝土柱的厚度(16 mm),对于同一位置测点(测点1,钢管内表面),前者温度小于后者,在27 min左右两者差值达到最大值108.43℃,此后两者差值不断减小,直至趋于一致,说明不锈钢管厚度主要影响火灾前中期不锈钢内表面的温度。

由于不锈钢及外围混凝土的保护作用,劲性不锈钢管混凝土柱在达到耐火极限时,测点3和测点

4的温度分别为54.35℃和29.33℃,说明在整个受火过程中,型钢的温度都较低,其力学性能几乎与常温下相同。

3.2 轴向位移-时间关系

图7(a)为 $n=0.25, 0.35, 0.45$ 三种火灾荷载比下不锈钢管混凝土柱与劲性不锈钢管混凝土柱轴向位移-时间关系曲线。当 $n=0.25, 0.35, 0.45$ 时对应的不锈钢管混凝土柱耐火极限分别为120.88, 74.44, 47.48 min,劲性不锈钢管混凝土柱的耐火极限分别为191.56, 89.79, 47.23 min。以上表明低荷载比($n < 0.25$)作用下,内嵌型钢对柱体耐火性能的提升效果显著,高荷载比($n > 0.35$)作用下时,内嵌型钢对柱体的提升效果不明显。图7(b)给出了火灾荷载比 $n=0.35$ 时劲性不锈钢管混凝土柱轴向位移-时间关系曲线。

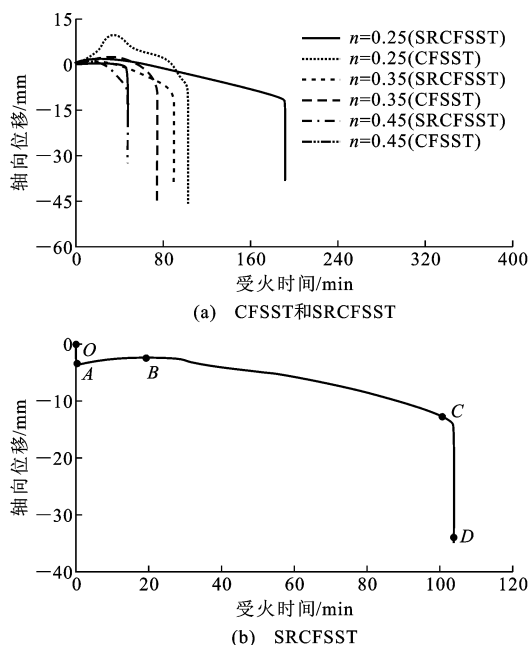


图7 轴向位移-受火时间关系

Fig. 7 Axial Deformation-fire Time Relationships

由图7(b)可知,柱顶轴向位移-时间关系曲线可划分为如下4个阶段:

(1)常温段OA。不锈钢管混凝土柱与劲性不锈钢管混凝土柱轴向位移随轴力增大而增大,两者近似呈线性关系。在等荷载比作用下,劲性不锈钢管混凝土柱由于内置型钢,轴向刚度大于不锈钢管混凝土柱,A点时前者轴向位移小于后者。

(2)膨胀段AB。受火初期,由于材料的膨胀变形大于由材料性能劣化产生的压缩变形,柱表现为膨胀变形,此阶段至B点结束,B点为升温膨胀伸长变形增量与荷载压缩变形增量平衡的时刻。

(3)软化段 BC 。 B 点后,随着温度升高,材料性能进一步劣化,荷载压缩变形增量大于升温膨胀变形增量,柱压缩变形近似保持线性增长至 C 点。

(4)加速破坏阶段 CD 。随着温度进一步增加,在此阶段由于轴向荷载和侧向挠度引起的二阶效应迅速增大,从而加速了柱的破坏,使得柱轴向压缩变形迅速增加;当柱的压缩变形或变形速率达到了 ISO 834-1^[10] 规定的量值时,即认为柱破坏并达到耐火极限^[20]。

3.3 破坏模式

在 $n=0.25, 0.35, 0.45$ 三种火灾荷载比下不锈钢管混凝土柱的破坏模式均表现为整体侧向屈曲破坏,劲性不锈钢管混凝土柱由于内嵌型钢,提高了其火灾下的轴向、侧向刚度,其破坏模式均表现为轴向压缩破坏。图 8 给出了 $n=0.35$ 时不锈钢管混凝土柱与劲性不锈钢管混凝土柱的破坏模式。

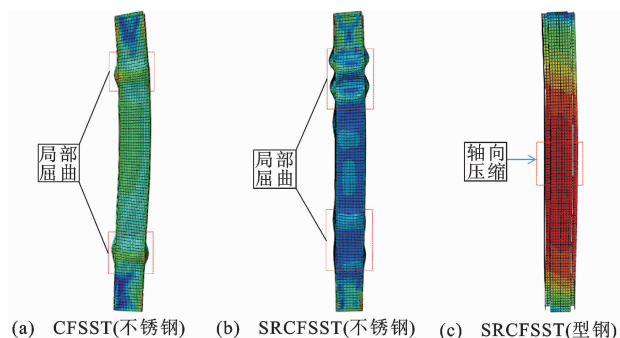


图 8 破坏模式的对比

Fig. 8 Comparison of Failure Modes

由图 8(a)可知,不锈钢管混凝土柱发生了整体弯曲破坏,并且在距离两端 300~550 mm 范围内不锈钢管发生了比较严重的局部屈曲。这主要是因为受火中期[图 7(b)曲线 B 点到 C 点]不锈钢受火膨胀量远大于内部混凝土,不锈钢距离两端 300 mm 处由于相邻非受火区存在刚度突变,故在该处发生局部屈曲以维持不锈钢与内部混凝土轴向位移相等。火灾后期,由于不锈钢管及外围混凝土发生严重的高温材性劣化,柱体侧向刚度大幅降低,同时由于不锈钢管混凝土柱长细比 $\lambda=20.6$,属于长柱,并且考虑了最大幅度为 $H/2\ 000$ 的初始缺陷,使得柱体在二阶效应作用下发生整体侧向屈曲。

由图 8(b)可知,劲性不锈钢管混凝土柱发生了轴向压缩破坏,且在距两端 300~1 200 mm 范围内不锈钢管内发生了比较严重的局部屈曲。这主要是因为受火中期[图 7(b)曲线 B 点到 C 点]不锈钢热膨胀量远高于内部混凝土,故在距两端 300~550

mm 范围内发生局部屈曲以维持两者轴向位移相等。在火灾后期,内部型钢由于不锈钢及外围混凝土保护,未发生明显高温材性劣化,能够为柱体提供一定的轴向、侧向刚度,不锈钢在距两端 300~1 200 mm 发生波浪形鼓曲,以维持不锈钢与混凝土轴向位移相等。由于劲性不锈钢管混凝土柱长细比 $\lambda=20.6$,属于长柱,并且考虑了最大幅度为 $H/2\ 000$ 的初始缺陷,在柱体达到耐火极限时存在轻微的侧向变形。内嵌型钢不仅提高了劲性不锈钢管混凝土柱的耐火性能,同时也对其破坏模式产生影响。

3.4 截面内力重分布

图 9 给出了 $n=0.25, 0.35, 0.45$ 三种火灾荷载比作用下,不锈钢管混凝土柱与劲性不锈钢管混凝土柱截面内部各部分材料承担的轴向荷载比例随受火时间变化的关系曲线。

结合图 7 和图 9 可知:

(1)常温段 OA :荷载和轴线位移近似呈线性增加,此阶段结束时(点 A),对于不锈钢管混凝土柱,不锈钢承担的轴向荷载比例分别为 52.66%, 52.93%, 52.56%,混凝土承担的轴向荷载比例分别为 47.34%, 47.07%, 47.44%;对于劲性不锈钢管混凝土柱,不锈钢管承担的轴向荷载比例分别为 34.94%, 35%, 33.71%,混凝土承担的轴向荷载比例分别为 47.17%, 46.34%, 46.36%,型钢承担的轴向荷载比例分别为 17.89%, 18.65%, 19.93%。

(2)膨胀段 AB :由于不锈钢升温速率远高于内部混凝土,且其热膨胀系数远大于混凝土,故其膨胀量迅速超过混凝土,与其相连的顶部端板与混凝土顶面分离,因此不锈钢管承担的轴向荷载比例随升温时间上升。在此阶段,对于不锈钢管混凝土柱, $n=0.25, 0.35, 0.25$ 时不锈钢承担的轴向荷载比例分别由 52.66%, 52.93%, 52.56% 上升至最大值 99.76%, 83.67%, 63.91%,相应混凝土承担的轴向荷载比例分别由 47.34%, 47.07%, 47.44% 下降至最小值 0.24%, 16.33%, 36.09%。对于劲性不锈钢管混凝土柱,不锈钢承担的轴向荷载比例分别由 34.94%, 35%, 33.71% 上升至 77.92%, 55.24%, 44.24%,相应混凝土承担的轴向荷载比例分别由 47.17%, 46.34%, 46.36% 下降至 18.65%, 32.76%, 38.86%,型钢承担的轴向荷载比例分别由 17.89%, 18.65%, 19.93% 下降至 3.43%, 12%, 16.9%。

(3)软化段 BC :这个阶段不锈钢材料与外围混凝土材料性能因高温而发生比较严重的劣化,承载力下降,其承担的部分荷载转移至内部的混凝土和

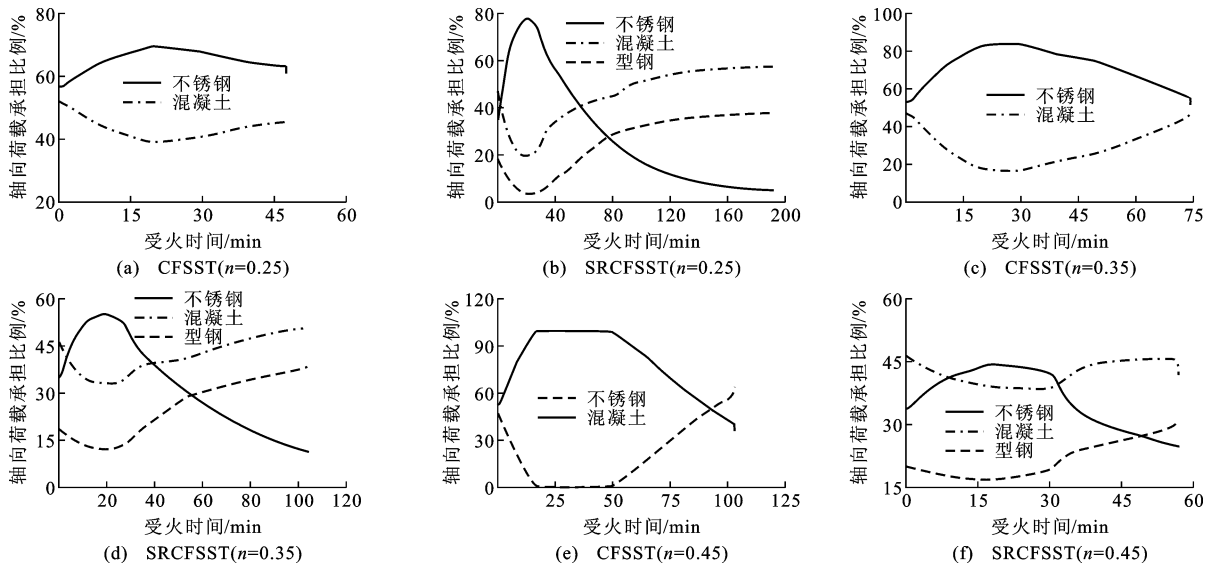


图9 轴向荷载承担比例-受火时间关系

Fig. 9 Axial Load Bearing Proportion-fire Time Relationships

型钢。在此阶段对于不锈钢管混凝土柱, $n=0.25, 0.35, 0.45$ 时不锈钢管承担的轴向荷载比例分别由 99.76%, 83.67%, 63.91% 下降至 42.81%, 55.28%, 29.64%。对于劲性不锈钢管混凝土柱, 不锈钢管承担的轴向荷载比例分别由 77.92%, 55.24%, 44.24% 下降至 8.75%, 11.65%, 24.75%, 型钢承担的轴向荷载比例分别由 3.43%, 12%, 16.9% 上升至 35.77%, 33.12%, 31.2%。

(4) 加速破坏阶段 CD: 随着温度进一步升高, 柱体承载力达到临界值, 轴向荷载及初始缺陷引起的二阶效应迅速扩大, 柱体轴向位移及其变化速率达到耐火极限判定标准。在此阶段, 对于不锈钢管混凝土柱, 不锈钢承担的轴向荷载比例进一步下降, $n=0.25, 0.35, 0.45$ 时分别由 42.81%, 55.28%, 29.64% 下降至 39.27%, 51.36%, 24.64%。对于劲性不锈钢管混凝土柱, 不锈钢管承担的轴向荷载比例分别由 8.75%, 11.65%, 24.75% 下降至 4.74%, 11.14%, 24.5%, 型钢承担的轴向荷载比例分别由 35.77%, 33.12%, 31.2% 上升至 37.91%, 38.49%, 33.8%。

当达到柱体耐火极限时, 不锈钢管混凝土柱中不锈钢承担的轴向荷载比例与劲性不锈钢混凝土柱中不锈钢承担的轴向荷载比例的比值分别为 8.05 ($n=0.25$), 4.48 ($n=0.35$), 大于两者截面面积比值 1.479, 说明在低火灾荷载比作用下 ($n < 0.35$), 由于嵌入型钢, 劲性不锈钢管混凝土柱允许其外部不锈钢发生更大的高温材性劣化, 从而提高了柱体的耐火性能。

4 结 语

(1) 通过文献试验验证, 本文建立的有限元模型能较好地模拟不锈钢管混凝土柱和劲性不锈钢管混凝土柱的耐火性能。

(2) 由于界面热阻引起的不锈钢外表面与混凝土内表面的温度差以及两者热膨胀系数差异, 使得火灾全过程段不锈钢热膨胀量远大于内部混凝土, 两者热膨胀量差异是引起柱体不锈钢在火灾中期局部鼓曲的主因。

(3) 不锈钢管混凝土柱高温下的破坏模态为整体侧向屈曲破坏, 内嵌型钢有助于提高高温下柱体的轴向、侧向刚度, 劲性不锈钢管混凝土柱高温下的破坏模态表现为轴向压缩破坏。

(4) 劲性不锈钢管混凝土柱中嵌入的型钢在柱体达到耐火极限时其内部温度仍远低于 400 °C, 其火灾全过程材料力学性能与常温状态相比无显著降低。当火灾荷载比较小时, 型钢的嵌入不仅增加高温下柱体轴向、侧向刚度, 减少其轴向位移, 而且能够与混凝土共同承担不锈钢与外围混凝土转移的荷载, 允许外围不锈钢产生更大的高温材性劣化, 从而提高了柱体的耐火性能, 火灾荷载比越小, 该提升效果越显著。

参考文献:

References:

- [1] 韩林海, 陶 忠, 王文达. 现代组合结构和混合结构: 试验、理论和方法[M]. 北京: 科学出版社, 2009.

- HAN Lin-hai, TAO Zhong, WANG Wen-da. Advanced Composite and Mixed Structures; Testing, Theory and Design Approach [M]. Beijing: Science Press, 2009.
- [2] GARDNER L. The Use of Stainless Steel in Structures[J]. Progress in Structural Engineering and Materials, 2005, 7(2): 45-55.
- [3] BADDOO N R. Stainless Steel in Construction; A Review of Research, Applications, Challenges and Opportunities [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2008, 64(11): 1199-1206.
- [4] 韩林海, 宋天诣. 钢-混凝土组合结构抗火设计原理 [M]. 北京: 科学出版社, 2012.
- HAN Lin-hai, SONG Tian-yi. Fire Safety Design Theory of Steel-concrete Composite Structures [M]. Beijing: Science Press, 2012.
- [5] GB/T 9978—1999, 建筑构件耐火试验方法[S].
- GB/T 9978—1999, Fire-resistance Tests — Elements of Building Construction[S].
- [6] PATEL V I, LIANG Q Q, HADI M N S. Nonlinear Analysis of Axially Loaded Circular Concrete-filled Stainless Steel Tubular Short Columns[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2014, 101: 9-18.
- [7] DABAON M A, EL-BOGHDADI M H, HASSANEIN M F. Experimental Investigation on Concrete-filled Stainless Steel Stiffened Tubular Stub Columns [J]. Engineering Structures, 2009, 31(2): 300-307.
- [8] UY B, TAO Z, HAN L H. Behaviour of Short and Slender Concrete-filled Stainless Steel Tubular Columns[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2011, 67(3): 360-378.
- [9] HAN L H, CHEN F, LIAO F Y, et al. Fire Performance of Concrete Filled Stainless Steel Tubular Columns[J]. Engineering Structures, 2013, 56: 165-181.
- [10] ISO 834-1:1991, Fire-resistance Tests — Elements of Building Construction — Part 1: General Requirements[S].
- [11] TAO Z, GHANNAM M. Heat Transfer in Concrete-filled Carbon and Stainless Steel Tubes Exposed to Fire[J]. Fire Safety Journal, 2013, 61: 1-11.
- [12] TAO Z, GHANNAM M, SONG T Y, et al. Experimental and Numerical Investigation of Concrete-filled Stainless Steel Columns Exposed to Fire[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2016, 118: 120-134.
- [13] HAN L H, TAN Q H, SONG T Y. Fire Performance of Steel Reinforced Concrete Columns[J]. Journal of Structural Engineering, 2015, 141(4): 04014128.
- [14] EN 1992-1-2: 2004, Eurocode 2: Design of Concrete Structures — Part 1-2: General Rules — Structural Fire Design[S].
- [15] EN 1993-1-2: 2005, Eurocode 3: Design of Steel Structures — Part 1-2: General Rules — Structural Fire Design[S].
- [16] GARDNER L, NG K T. Temperature Development in Structural Stainless Steel Sections Exposed to Fire [J]. Fire Safety Journal, 2006, 41(3): 185-203.
- [17] SONG T Y, HAN L H, YU H X. Concrete Filled Steel Tube Stub Columns Under Combined Temperature and Loading[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2010, 66(3): 369-384.
- [18] 韩林海. 钢管混凝土结构——理论与实践[M]. 3版. 北京: 科学出版社, 2016.
- HAN Lin-hai. Concrete Filled Steel Tubular Structures — Theory and Practice [M]. 3rd ed. Beijing: Science Press, 2016.
- [19] CECS 410: 2015, 不锈钢结构技术规程[S].
- CECS 410: 2015, Technical Specification for Stainless Steel Structures[S].
- [20] ROE W. Behavior and Design of Concrete Filled Stainless Steel Columns [D]. Wollongong: University of Wollongong, 2006.