

高温下圆钢管再生混凝土中长柱偏压力学性能研究

许峰¹, 翁瑞¹, 张婷², 许伟¹

(1. 沈阳建筑大学土木工程学院, 辽宁 沈阳 110168; 2. 天友建筑设计有限公司济南分公司, 山东 济南 250000)

摘要 目的 研究高温下圆钢管再生混凝土中长柱偏压力学性能。方法 在已有试验的基础上,通过 ABAQUS 有限元软件建立模型,对照分析常温与高温下圆钢管再生混凝土偏压柱的受力全过程,以及不同受火时间、再生混凝土取代率、长细比、偏心距、含钢率对高温下圆钢管再生混凝土柱力学性能的影响。结果 圆钢管再生混凝土偏压中长柱在高温下的承载能力大幅度降低,构件的弯曲部位较常温下降低约为1/6柱高;受火时间越长,构件的极限承载力越低;构件的极限承载力及初始刚度随着再生混凝土取代率、长细比和偏心距的增大而减小、随着含钢率的增大而增大。结论 在工程设计中,对重要的柱建议采用较小的再生混凝土取代率,并适当增大其含钢率;同时应控制柱的长细比和偏心距,防止柱跨中挠度过大。

关键词 钢管再生混凝土柱;高温;有限元分析;极限承载力;初始刚度

中图分类号 TU398.9

文献标志码 A

Study on Mechanical Properties of Recycled Concrete Filled Circular Steel Tubular Medium and Long Columns under Eccentric Compression at High Temperature

XU Feng¹, WENG Rui¹, ZHANG Ting², XU Wei¹

(1. School of Civil Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang, China, 110168; 2. Tianyou Architectural Design Co. Ltd., Ji'nan Branch, Ji'nan, China, 250000)

Abstract: In order to study the mechanical properties of recycled concrete-filled circular steel tubular medium and long columns under eccentric compression at high temperature, models are established through ABAQUS finite element software on the basis of existing experiments in this paper, and compares and analyzes the whole process of the force of circular steel tube recycled concrete columns at room temperature and high temperature under eccentric compression, and the effects of different fire time, recycled concrete replacement rate, slenderness ratio, eccentricity, steel content on the mechanical properties of circular steel tube recycled concrete columns under high

收稿日期:2021-08-14

基金项目:国家自然科学基金项目(51938009);科技部项目(2017YFC0703407-02)

作者简介:许峰(1975—),男,副教授,博士,主要从事装配式钢结构及组合结构等方面研究。

temperature are also discussed. The bearing capacity of recycled concrete filled circular steel tubular columns under eccentric compression at high temperature greatly reduced, and the bending point of the members is about $1/6$ of the column height lower than that at normal temperature, the ultimate bearing capacity decreases with the fire time increasing, the bearing capacity and the initial stiffness decreases with the recycled concrete replacement rate, the slenderness ratio and the eccentricity increasing, increases with the steel content increasing. In engineering designing, it is suggested that the recycled concrete replacement rate should be at a low level and the steel content should be at an appropriately high level for some important columns, at the same time, the slenderness ratio and eccentricity of the column should be controlled to prevent excessive deflection in the middle of the span.

Key words: recycled concrete filled steel tubular column; high temperature; finite element analysis; ultimate bearing capacity; initial stiffness

随着再生混凝土技术的推广,国内外众多学者对高温下及高温后钢管再生混凝土柱的力学性能展开了一系列研究。张磊^[1]对钢管再生混凝土柱的耐火性进行研究,结果表明,再生骨料取代率的增大会导致试件的耐火极限先增大后降低。王兵等^[2]对高温后方钢管再生混凝土偏心受压力学性能进行了研究,结果表明,随着再生混凝土取代率的升高,试件极限承载力缓慢降低,随着偏心距的增大,承载力逐渐减小,下降幅度明显。刘文超等^[3]对火灾后钢管再生混凝土柱的轴压性能展开了试验研究,结果表明,火灾后试件的破坏形态与未受火的普通混凝土柱相似,钢管再生混凝土柱的钢管壁厚对其承载力能力影响较大。何媛媛等^[4]对高温后中空夹层钢管再生混凝土短柱进行了研究,结果表明,柱的截面形式对其承载力的影响较为显著。Y. C. Wang^[5]针对火灾下无保护钢管混凝土柱的设计提出了设计建议。K. Chung等^[6]对偏心轴向荷载作用下方钢管混凝土柱的耐火性进行了研究,结果表明,随着偏心率的增加,耐火时间急剧减少,但是在偏心轴向载荷下柱达到最大膨胀位移的时间与载荷偏心率无关。G. Arundeb 等^[7]研究了高温下再生骨料混凝土的力学性能,发现养护 28 d 后的立方体和圆柱体试块暴露于高温下时,其抗压强度降低达 21% ~ 61%,弹性模量也随着温度的升高而明显降低。

目前已有研究主要集中在高温后方钢管混凝土及再生混凝土轴压柱的性能,对于高温下圆钢管再生混凝土偏压柱力学性能研究较少。从已有研究结果来看,方形截面在轴压力作用下截面四角应力相对较大,但截面中部对核心再生混凝土的约束能力相对较弱,而圆形截面能够提供更均匀的围压。基于此,笔者利用 ABAQUS 有限元软件对高温下圆钢管再生混凝土柱偏压力学性能进行分析,并与其在常温下的力学性能进行对比,研究其极限承载力及初始刚度随受火时间等因素的变化规律,以弥补高温下圆钢管再生混凝土中长柱偏压力学性能的研究空白。

1 圆钢管再生混凝土柱温度场模型

1.1 温度场模型建立

根据文献[8]中的试验数据建立圆钢管再生混凝土柱温度场模型,其中钢管、核心再生混凝土、端板均采用实体单元,钢管内表面与混凝土外表面采用“Tie”绑定。受火时,模型端板不受火,设置为绝热,热量通过热辐射、热对流传递到钢管外表面之后通过热传导向模型内部传递。各部件均采用八结点线性传热六面体单元(DC3D8)。网格划分及传递方式如图1所示。再生混凝土的热工参数采用文献[9-10]建议的本构计算公式,并参照文献[11-12]进行修正。钢材的热

工参数采用 T. T. Lie^[12] 建议的本构计算公式。

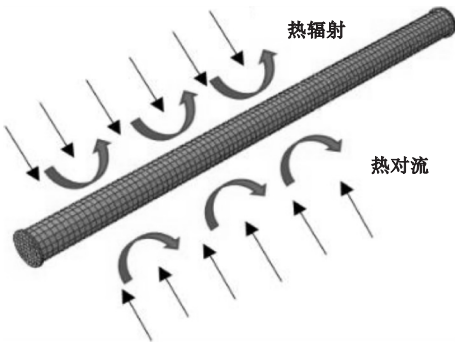


图1 整体模型的网格划分

Fig.1 Meshing of the overall model

模型初始温度为 20 ℃,选用文献[13]中标准升温曲线。在表面热交换条件中,定义为“内置系数”,散热系数为 25 W/(m·℃);在表面辐射中,综合辐射系数为 0.7。模型采用绝对零度 - 273 ℃,玻尔兹曼常数为 5.67 W/(m²·K⁴)^[6]。

1.2 模型有效性验证

再生混凝土柱截面设置 3 个测点,位置如图 2 所示。

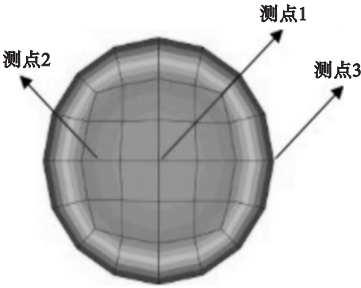
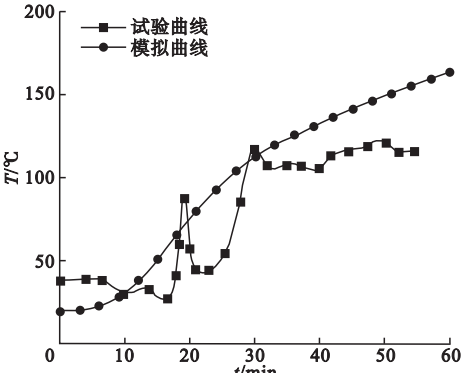


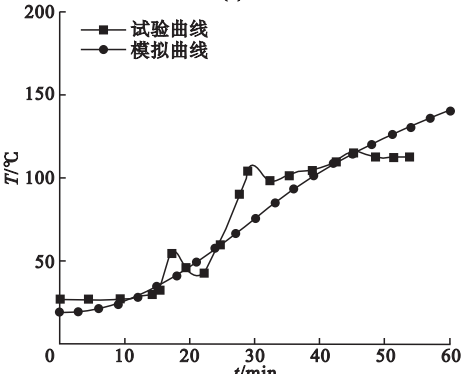
图2 各测点示意图

Fig.2 Schematic diagram of each measuring points

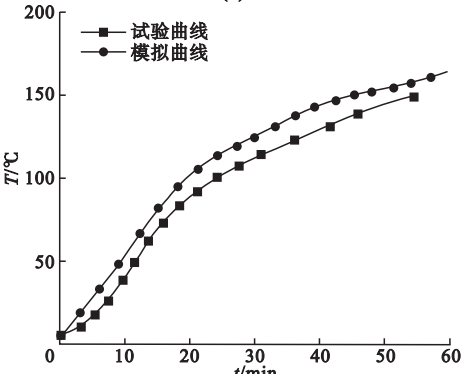
提取出测点 1、测点 2、测点 3 所对应的温度 - 时间曲线,与文献[8]中试验曲线进行对比,结果如图 3 所示。从图中可以看出,测点 1、测点 2、测点 3 的模拟曲线较光滑,但试验曲线有一定的波动,这是因为有限元模拟是在纯理想状态下进行计算,而试验中会产生一些不可避免的误差因素。测点 1、测点 2、测点 3 的温度变化情况与试验结果大致相同,验证了温度场模型的正确性。



(a)测点1



(b)测点2



(c)测点3

图3 各测点温度 - 时间曲线

Fig.3 Comparison of temperature-time curves of each measuring point

2 圆钢管再生混凝土柱力学场模型

2.1 力学场模型建立

在温度场模型的基础上,建立高温下圆钢管再生混凝土柱的力学场模型。其中钢管与核心再生混凝土之间采用 surface-surface 接触,相互接触作用分为切向和法向,切向方

向采用库伦摩擦模型中的“罚”函数,摩擦系数取值为 $0.2 \sim 0.6$ ^[14]。笔者经过多次拟合,最终确定摩擦系数为 0.3 ,法向方向采用硬接触。核心再生混凝土与两端端板之间采用“硬接触”;钢管与两端端板之间采用“Tie”绑定。同时在预定义场中将温度场的 ODB 文件导入,对于网格的划分,均与温度场一致。钢材本构采用 T. T. Lie^[12] 提出的本构计算公式,再生混凝土本构采用韩林海^[15] 提出的本构计算公式,并结合文献[16] 进行计算,其中钢材和再生混凝土本构关系如下所示。

钢材:

$$\sigma = \begin{cases} E_s \varepsilon_s, & \varepsilon_s \leq \varepsilon_e; \\ -A\varepsilon_s^2 + B\varepsilon_s + C, & \varepsilon_e < \varepsilon_s \leq \varepsilon_{el}; \\ f_y, & \varepsilon_{el} < \varepsilon_s \leq \varepsilon_{e2}; \\ f_y [1 + 0.6 \frac{\varepsilon_s - \varepsilon_{e2}}{\varepsilon_{e3} - \varepsilon_{e2}}], & \varepsilon_{e2} < \varepsilon_s \leq \varepsilon_{e3}; \\ 1.6f_y, & \varepsilon_s \geq \varepsilon_{el}. \end{cases} \quad (1)$$

其中, $\varepsilon_e = 0.8f_y/E_s$; $\varepsilon_{el} = 1.5\varepsilon_e$; $\varepsilon_{e2} = 10\varepsilon_{el}$; $\varepsilon_{e3} = 100\varepsilon_{el}$; $A = 0.2f_y(\varepsilon_{el} - \varepsilon_e)^2$; $B = 2A\varepsilon_{el}$; $C = 0.8f_y + A\varepsilon_{el}^2 - B\varepsilon_e$ 。
式中: E_s 为钢材的弹性模量; f_y 为钢材的屈服强度; ε_s 为钢材各阶段对应的应变变量。

再生混凝土受压:

$$y = \begin{cases} 2x - x^2, & x \leq 1; \\ 1 + q(x^{0.1\xi} - 1), & \xi > 1.12, \\ \frac{x}{\beta(x-1)^2 + x}, & \xi \leq 1.12; \end{cases} \quad (2)$$

其中, $x = \varepsilon/\varepsilon_0$; $y = \sigma/\sigma_0$; $\sigma_0 = [1 + (0.054\xi^2 + 0.48)(\frac{24}{f'_{c,R}})^{0.45}]f'_{c,R}$; $q = \xi^{0.745}/2 + \xi$; $f'_{c,R} = 0.8f_{cu,R}\xi = A_S f_y/A_C f_{c,R}$; $f_{c,R}/f_{cu,0} = 0.19R^2 - 0.249R + 0.789$; $\beta = (2.36 \times 10^{-5})^{[0.25 + (\xi - 0.5)^7]} f'_{c,R} \times 3.51 \times 10^{-4}$; $\xi_{cc} = 1300 + 12.5f'_{c,R} \times 10^{-6}$; $\varepsilon_0 = \xi_{cc} + [1400 + 800(\frac{f'_{c,R}}{24} - 1)]\xi^{0.2} \times 10^{-6}$ 。

式中: $f'_{c,R}$ 为不同取代率下的圆柱体轴心抗压强度,下标 R 表示取代率; $f_{cu,R}$ 为不同取代率下的立方体抗压强度; ξ 为套箍系数。

再生混凝土受拉:

$$y = \begin{cases} 1.2x - 0.2x^6, & \varepsilon \leq \varepsilon_p; \\ \frac{x}{[0.31\sigma_p^2(x-1)^{1.7} + x]}, & \varepsilon > \varepsilon_p. \end{cases} \quad (3)$$

式中: $x = \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_p}$; $y = \frac{\sigma_c}{\sigma_p}$; σ_p 为峰值拉应力, $\sigma_p = 0.26 \times (1.25f'_{c,R})^{2/3}$; ε_p 为峰值拉应变, $\varepsilon_p = 43.1 \times \sigma_p$ 。

高温下材料的本构关系只要将高温下材料峰值应力、应变分别代入式(1)、式(2)、式(3)即可。

2.2 模型有效性验证

将模拟后的圆钢管再生混凝土柱顶部的轴向位移-时间($\sigma-t$)曲线与试验曲线对比,结果见图4。由图可知,模拟曲线与试验曲线走势基本相似,均经历了三个阶段:上升阶段、下降阶段、破坏阶段。模拟曲线最大正向位移为 2.22 mm ,对应受火时间为 $1\,198.59\text{ s}$,试验曲线最大正向位移为 1.25 mm ,对应受火时间为 $1\,065.32\text{ s}$,均在 $3\,300\text{ s}$ 左右达到耐火极限而丧失承载能力,二者差值小,模型基本可以表达试件各个阶段的受力状态。因此,所建立的圆钢管再生混凝土柱力学场模型有效。

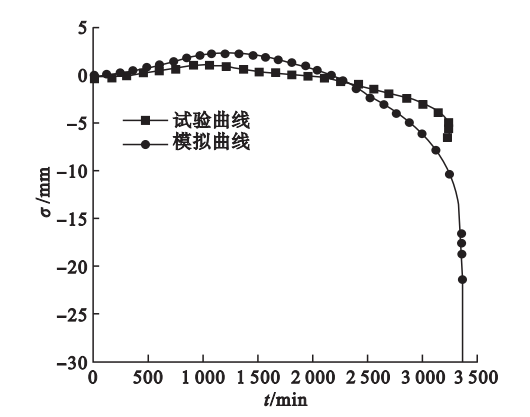


图4 顶部轴向位移-时间曲线
Fig. 4 Top axial displacement-time curves comparison

3 高温下圆钢管再生混凝土偏压柱受力性能分析

笔者建立圆钢管再生混凝土偏压柱构

件,试件参数见表 1。在此基础上对每个构件分别添加受火时间 t (0 min、20 min、40 min、60 min) 作为参数。

表 1 构件参数

Table 1 Parameters of the members

编号	L/mm	λ	$r/\%$	$\alpha/\%$	C/MPa	e/mm
D-1	600	10.96	50	6.71	60	20
D-2	600	10.96	50	6.71	60	40
D-3	1 000	18.26	50	6.71	60	20
D-4	1 000	18.26	50	6.71	60	40
D-5	1 500	27.40	50	6.71	60	20
D-6	1 500	27.40	50	6.71	60	40
D-7	2 000	36.53	50	6.71	60	20
D-8	2 000	36.53	50	6.71	60	40
D-9	600	10.96	20	6.71	60	20
D-10	600	10.96	80	6.71	60	20
D-11	600	10.96	100	6.71	60	20
D-12	600	10.96	50	6.71	60	10
D-13	600	10.96	50	6.71	60	30
D-14	600	10.96	50	5.71	60	20
D-15	600	10.96	50	7.73	60	20
D-16	600	10.96	50	9.80	60	20

注: L 为构件柱高; λ 为长细比; r 为再生骨料取代率; α 为含钢率; C 为再生混凝土强度; e 为偏心距。

参照文献[1]所定义的 ISO-834 标准火灾作用下钢管再生混凝土柱承载力系数 K_t 来研究不同参数对其极限承载力、初始刚度的影响,计算式如下:

$$K_t = N_u(t)/N_u.$$

(1)

式中: $N_u(t)$ 为火灾下钢管再生混凝土的极限承载力; N_u 为常温下钢管再生混凝土的极限承载力。

3.1 受力性能对比分析

以构件 D-6 在受火时间 $t = 60\text{ min}$ 时为例,分析常温和高温下圆钢管再生混凝土中长柱偏压受力性能。构件在高温下和常温下的最终应力云图见图 5。由图可知,高温下和常温下构件的破坏特征有明显区别,常温下构件的弯曲点(挠度最大点)大约发生在 2/3 柱高位置处,而高温下构件的弯曲点大约发生在 1/2 柱高位置处,由于高温的影响,构件弯曲点的位置降低约 1/6 柱高。分析原

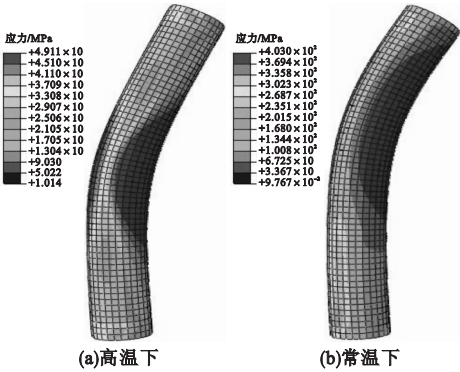


图 5 圆钢管再生混凝土偏压中长柱破坏形态

Fig. 5 Failure modes of recycled concrete filled circular steel tubular columns under eccentric compression

因是由于随着温度的升高,构件的承载力与截面抗弯模量之比逐渐增大,导致柱的弯曲点逐渐下移,有限元分析结果显示降低的幅度约为 1/6 柱高。高温下与常温下构件的鼓曲破坏程度没有明显区别。高温下构件的最

大应力为 49.11 MPa, 常温下构件的最大应力为 403 MPa, 高温下构件的最大应力较常温降低了 87.81%, 应力损失严重。

高温下与常温下构件荷载-跨中挠度曲线对比如图 6 所示。由图可知, 高温下和常温下的荷载-挠度曲线走势基本一致。在弹性阶段(OA、OA'段), 曲线均呈线性增长, 常温下构件达到线弹性极限 A'点时, 所对应的荷载值为 1 159.93 kN, 跨中挠度为 2.74 mm, 而高温下构件达到线弹性极限 A点时, 所对应的荷载值为 416.38 kN, 跨中挠度为 1.55 mm, 较常温下荷载降低了 64.10%, 跨中挠度降低了 43.43%。可以看出, 构件在高温下需较小的外荷载就能达到弹性极限值, 所对应的跨中挠度也较小。在弹塑性阶段(AB、A'B'段), 高温下构件迅速达到极限承载力(777.96 kN), 对应跨中挠度为 27.29 mm, 常温下构件极限承载力为 2 002.49 kN, 对应的跨中挠度为 24.15 mm, 较常温下, 高温下构件极限承载力下降了 61.15%, 跨中挠度提高了 13%。由此可见, 高温对构件的弹塑性阶段产生一定影响, 同时又受自身失稳作用的影响, 导致构件的跨中挠度增幅较大, 极限承载力大幅度下降。在下降阶段(BC、B'C'段), 常温和高温下的荷载-跨中挠度曲线均呈下降趋势, 主要由于构件内部再生混凝土发生破坏而引起承载能力下降。常温下由于钢管对再生混凝土的套箍作用, 使得构件产生小幅度承载力回升

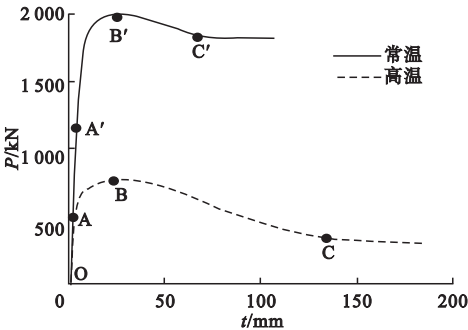


图 6 荷载-跨中挠度曲线

Fig. 6 Load-mid span deflection curves

现象, 而高温下构件的承载力继续下降并逐渐趋于平缓。可见, 高温对钢管的套箍性能产生了不利影响, 降低了钢管对再生混凝土的套箍作用。

3.2 再生混凝土取代率影响

笔者以构件 D-1、D-9、D-10、D-11 为例, 研究高温下不同再生混凝土取代率对圆钢管再生混凝土偏压柱力学性能的影响。图 7 为构件在不同取代率下承载力系数 K_t 随受火时间变化曲线。以再生混凝土取代率 $r = 20\%$ 构件为例, 受火时间 20 min、40 min、60 min 对应的承载力系数 K_t 分别为 0.73、0.59、0.52, 常温下构件极限承载力为 2 530 kN, 受火时间 20 min、40 min、60 min 时的极限承载力分别为 1 854 kN、1 491 kN、1 311 kN, 较常温下极限承载力分别降低了 26.72%、40.95%、48.18%。可见, 不同再生混凝土取代率下, 构件承载力系数 K_t 均随着受火时间的增大而减小, 受火时间越长, 构件极限承载力越低, 降低趋势越缓。当受火时间一定时, 再生混凝土取代率越大, 构件极限承载力越低。

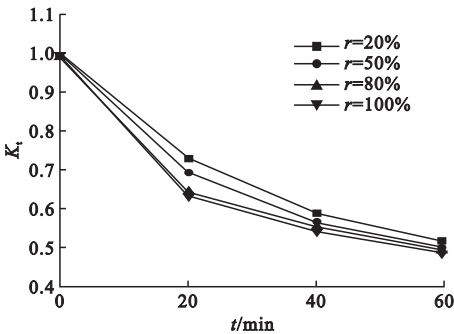


图 7 不同取代率下承载力系数随受火时间变化曲线
Fig. 7 Variation curves of bearing capacity coefficient with fire time

图 8 为构件在受火时间 60 min 时, 初始刚度随再生混凝土取代率变化曲线。由图可知, 再生混凝土取代率为 20%、50%、80%、100% 时, 对应的初始刚度分别为 3 818.98 kN/mm、3 711.73 kN/mm、3 104.18 kN/mm、2 939.69 kN/mm。可见, 构件的初始刚度随再生混凝土

土取代率的增大而减小,这是由于再生粗骨料内部存在较多微裂缝,随取代率的增大,有这种微裂缝的骨料含量增多。

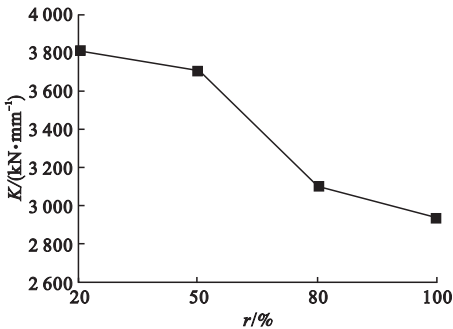


图8 初始刚度随再生混凝土取代率变化曲线
Fig. 8 Curve of initial stiffness varying with replacement rate of recycled concrete

3.3 长细比的影响

笔者以构件 D-1、D-3、D-5、D-7 为例,研究高温下不同长细比对圆钢管再生混凝土偏压柱力学性能的影响。图 9 为不同长细比下承载力系数 K_l 随受火时间变化曲线。以长细比 $\lambda = 10.96$ 构件为例,受火时间 20 min、40 min、60 min 对应的承载力系数 K_l 分别为 0.70、0.57、0.50,常温下构件极限承载力为 2 641 kN,受火时间 20 min、40 min、60 min 时的极限承载力分别为 1 837 kN、1 496 kN、1 323 kN,较常温下极限承载力分别降低了 30.44%、43.35%、49.91%。可见不同长细比下,构件承载力系数 K_l 均随着受火时间的增大而减小,受火时间越长,构件极限承载力越低,降低趋势越缓。当受火时间一定时,长细比越大,构件极限承载力越低。

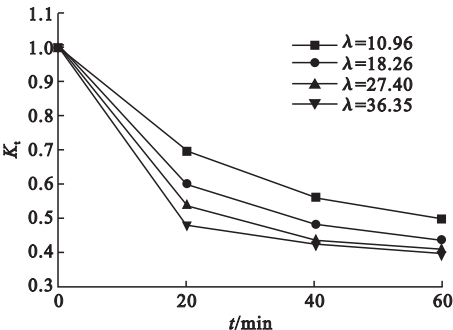


图9 不同长细比下承载力系数随受火时间变化曲线
Fig. 9 Variation curves of bearing capacity coefficient with fire time

图 10 为构件在受火 60 min 时,初始刚度随长细比变化曲线。由图可知,长细比为 10.96、18.26、27.40、36.53 时,对应的初始刚度分别为 3 711.73 kN/mm、1 754.02 kN/mm、891.28kN/mm、539.23kN/mm,可见构件的初始刚度随长细比的增大而减小。这是由于随长细比的增大,构件在偏心荷载作用下产生更大挠度。

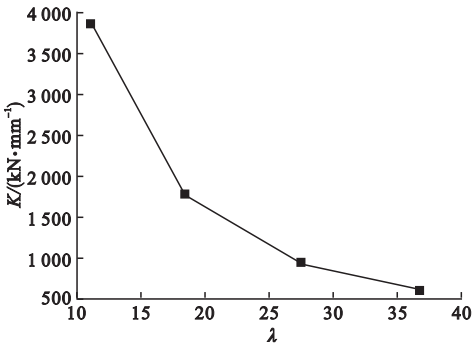


图10 初始刚度随长细比变化曲线
Fig. 10 Curve of initial stiffness versus slenderness ratio

3.4 偏心距的影响

笔者以构件 D-1、D-2、D-12、D-13 为例,研究高温下不同偏心距对圆钢管再生混凝土偏压柱力学性能的影响。图 11 为构件在不同偏心距下承载力系数 K_l 随受火时间变化的曲线。以偏心距 $e = 10$ mm 构件曲线为例,受火时间 20 min、40 min、60 min 对应

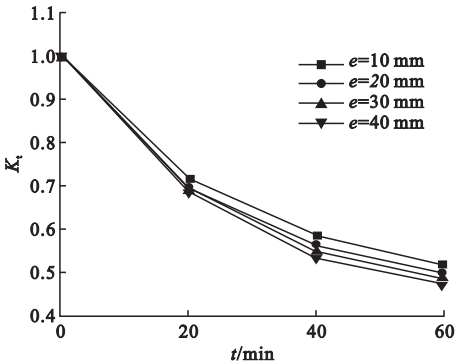


图11 不同偏心距下承载力系数随受火时间变化曲线

Fig. 11 Variation curves of bearing capacity coefficient with fire time

的承载力系数 K_l 分别为 0.72、0.59、0.52, 常温下构件极限承载力为 2 956 kN, 受火时间 20 min、40 min、60 min 时的极限承载力分别为 2 131 kN、1 741 kN、1 540 kN, 较常温下极限承载力分别降低了 27.91%、41.10%、47.90%。可见不同偏心距下, 构件承载力系数 K_l 均随受火时间的增大而减小, 受火时间越长, 构件极限承载力越低, 降低趋势越缓。偏心距越大, 构件在受火时承载力系数 K_l 越小, 极限承载力越低, 且降低明显。

图 12 为构件在受火 60 min 时, 初始刚度随偏心距变化曲线。由图可知, 偏心距为 10 mm、20 mm、30 mm、40 mm 时, 对应的初始刚度分别为 6 329.38 kN/mm、3 711.73 kN/mm、2 743.23 kN/mm、2 209.61 kN/mm。可见构件的初始刚度随偏心距的增大而减小。这是由于是因为随着偏心距增大, 轴力产生的初始弯矩增大, 产生更大的跨中挠度, 而增大的挠度使轴力在柱上产生更大的附加弯矩, 从而使跨中挠度进一步增大, 导致刚度降低。

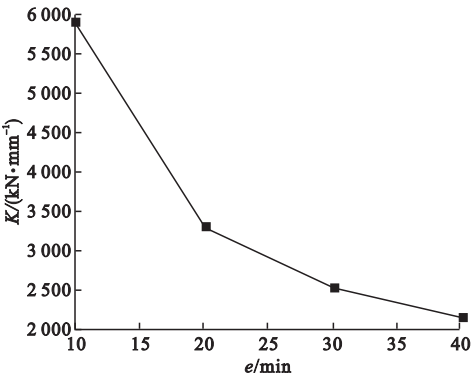


图 12 初始刚度随偏心距变化曲线

Fig. 12 Curve of initial stiffness varying with eccentricity

3.5 含钢率的影响

笔者以构件 D-1、D-14、D-15、D-16 为例, 研究高温下不同含钢率对圆钢管再生混凝土偏压柱力学性能的影响。图 13 为构件在不同含钢率下承载力系数 K_l 随受火时间变化曲线。以含钢率 $\alpha=5.71\%$ 构件曲线为例, 受火时间 20 min、40 min、60 min 对应的

承载力系数 K_l 分别为 0.73、0.57、0.51, 常温下构件极限承载力为 2 476 kN, 受火时间 20 min、40 min、60 min 时的极限承载力分别为 1 795 kN、1 408 kN、1 255 kN, 较常温下极限承载力分别降低了 27.50%、43.13%、49.31%。可见相同含钢率下, 构件承载力系数 K_l 均随着受火时间的增大而减小, 受火时间越长, 构件极限承载力越低, 降低趋势越缓。含钢率越大, 构件极限承载力系数 K_l 越小。

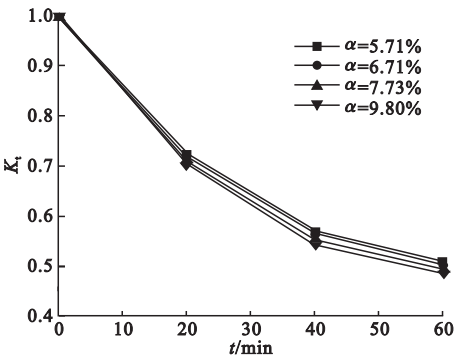


图 13 不同含钢率下承载力系数随受火时间变化曲线
Fig. 13 Variation curves of bearing capacity coefficient with fire time

图 14 为构件在受火时间 60 min 时, 初始刚度随含钢率变化曲线。由图可知, 含钢率为 5.71%、6.71%、7.73%、9.80% 时, 对应的初始刚度分别为 3 603.81 kN/mm、3 711.73 kN/mm、3 748.96 kN/mm、5 237.63 kN/mm, 可见构件的初始刚度随含钢率的增大而增大。这是由于钢材的强度和变形模量

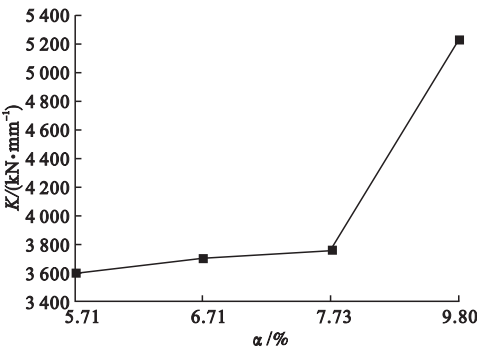


图 14 初始刚度随含钢率变化曲线

Fig. 14 Curve of initial stiffness varying with steel content

大于再生混凝土,而且钢材位于截面周边,进一步增大了截面的抗弯模量,使得构件挠度减小,刚度增大。

4 结 论

(1)由于高温影响,圆钢管再生混凝土偏压中长柱弯曲部位较常温下降低约1/6柱高。

(2)在其他条件一定时,受火时间越长,构件的极限承载能力越低;受火时间一定时,构件的极限承载力及初始刚度随着再生混凝土取代率、长细比和偏心距增大而减小,随着含钢率的增大而增大。

参考文献

- [1] 张磊. 钢管再生混凝土柱耐火性能研究[D]. 大连:大连理工大学,2015.
(ZHANG Lei. Study on fire performance of recycled aggregate concrete filled steel tubular columns [D]. Dalian: Dalian University of Technology,2015.)
- [2] 王兵,赵录,刘晓,等. 高温后方钢管再生混凝土偏压力学性能[J]. 沈阳工业大学学报,2015,37(3):342-346.
(WANG Bing, ZHAO Lu, LIU Xiao, et al. Eccentric compression mechanical properties of square steel tube filled with recycled concrete after high temperature [J]. Journal of Shenyang university of technology, 2015, 37(3):342-346.)
- [3] 刘文超,曹万林,张建伟,等. 火灾后钢管再生混凝土柱轴压性能试验研究[J]. 自然灾害学报,2017,26(5):45-50.
(LIU Wenchao, CAO Wanlin, ZHANG Jianwei, et al. Experimental study on axial compression behavior of recycled concrete filled steel tubular columns after fire exposure [J]. Journal of natural disasters,2017,26(5):45-50.)
- [4] 何媛媛,董江峰,王清远. 高温后中空夹层钢管再生混凝土短柱的加固性能研究与分析[J]. 建筑结构,2020,50(6):81-85.
(HE Yuanyuan, DONG Jiangfeng, WANG Qingyuan. Research and analysis on the reinforcement performance of recycled concrete filled hollow interlayer steel tubular short columns after high temperature [J]. Building structure,2020,50(6):81-85.)
- [5] WANG Y C. Some considerations in the design of unprotected concrete-filled steel tubular columns under fire conditions [J]. Journal of constructional steel research, 1997, 44(3):203-223.
- [6] CHUNG K, PARK S, CHOI S. Fire resistance of concrete filled square steel tube columns

- subjected to eccentric axial load [J]. International journal of steel structures,2009,9(1):69-76.
- [7] ARUNDEB G, SAROJ M, SOMNATH G. Recycled aggergate concrete exposed to elevated temperature [J]. ARPN journal of engineering and applied Sciences,2012,7(1):100-107.
- [8] 罗超宁,查晓雄. 钢管再生混凝土柱耐火性能研究[J]. 建筑结构学报,2015,36(增刊2):35-41.
(LUO Chaoning, ZHA Xiaoxiong. Research on fire resistance of recycled concrete filled steel tubular columns [J]. Journal of building structures,2015,36(S2):35-41.)
- [9] 黄运标. 再生混凝土高温性能研究[D]. 上海:同济大学,2006.
(HUANG Yunbiao. Research on high temperature performance of recycled concrete [D]. Shanghai: Tongji University,2006.)
- [10] 张枫. 混凝土热工参数实验研究[D]. 上海:同济大学,2009.
(ZHANG Feng. Experimental study on thermal parameters of concrete [D]. Shanghai: Tongji University,2009.)
- [11] European Committee for Standardization. Eurocode 4. Design of composite steel and concrete structures, Part 1-2: General rules-structural fire design; EN 1994-1-2:2005 [S]. Brussels: European Committee for Standardization,2005.
- [12] LIE T T. Fire resistance of circular steel columns filled with bar-reinforced concrete [J]. Journal of structural engineering ASCE, 1994,120(5):1489-1509.
- [13] International Organization for Standardization. ISO 834. Fire-resistance tests-elements of building construction-Part 1: General requirements; ISO 834-1 [S]. Geneva: International Organization for Standardization,1999.
- [14] 杨志坚,韩嘉明,杨军彩,等. 空心圆钢管混凝土轴压短柱有限元分析[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版),2020,36(3):429-438.
(YANG Zhijian, HAN Jiaming, YANG Juncai, et al. Finite element analysis of hollow circular concrete filled steel tubular short columns under axial compression [J]. Journal of Shenyang jianzhu university (natural science), 2020,36(3):429-438.)
- [15] 韩林海. 钢管混凝土结构-理论与实践[M]. 北京:科学出版社,2007.
(HAN Linhai. Concrete-filled steel tube structure-theory and practice [M]. Beijing: Science Press,2007.)
- [16] 侯睿. 恒高温后钢管再生混凝土轴压力学性能研究[D]. 大连:大连理工大学,2011.
(HOU Rui. Study on compressive behavior of recycled aggregate concrete filed steel tubes after exposed to high temperatures [D]. Dalian: Dalian University of Technology,2011.)
(责任编辑:杨永生 英文审校:刘永军)