

文章编号:1001-4888(2019)06-991-12

高温后钢管再生混凝土轴压 性能试验及承载力计算^{*}

陈宗平^{1,2}, 赵科军¹, 经承贵¹, 张超荣¹

(1. 广西大学 土木建筑工程学院, 南宁 530004; 2. 广西大学 工程防灾与结构安全教育部重点实验室, 南宁 530004)

摘要: 为了揭示高温后钢管再生混凝土的轴压性能,以再生粗骨料取代率、历经最高温度、高温时长和混凝土强度为变化参数,设计了 44 个钢管再生混凝土试件进行高温后的静力加载试验。观察了高温前后试件的物理及力学性能变化,得到了受力破坏过程及形态,获取了受力全过程的荷载—变形曲线及峰值荷载、峰值位移、初始刚度、延性系数、能量耗散等特征点参数,并分析了各变化参数对试件轴压性能的影响,最后探讨了高温后钢管再生混凝土轴压极限承载力的计算方法。研究表明:随着历经温度的升高,钢管再生混凝土试件外观颜色由浅褐色转变为灰白色,其质量烧失率逐渐增大,试件的承载力和刚度逐渐降低;再生粗骨料取代率和高温时长的变化对高温后钢管再生混凝土轴压短柱力学性能影响不大;混凝土强度等级越高的试件,其遭受高温后的承载力和刚度也越大。

关键词: 高温后; 钢管再生混凝土; 轴压性能; 承载力计算

中图分类号: TU528.59

文献标识码: A

DOI: 10.7520/1001-4888-18-100

0 引言

钢管再生混凝土组合结构既保留了钢管混凝土结构承载能力高、抗震性能好等显著优点,又能有效消纳建筑废弃物、节能环保,因此具有良好的推广应用前景。国内外学者对钢管再生混凝土的相关性能进行了大量试验和理论研究,并取得了系列重要研究成果,具有代表性的有,黄宏等^[1]、马辉等^[2]、Konno 等^[3]、Chen 等^[4]、陈宗平等^[5]、牛海成等^[6]、王玉银等^[7]、邱慈长等^[8]研究了钢管再生混凝土的轴压性能,结果表明钢管再生混凝土与钢管普通混凝土的轴压破坏形态类似;胡乃冬等^[9]研究了钢管再生混凝土的偏压性能,结果表明试件的承载力随着长细比和偏压距的增大而减小,而再生粗骨料取代率对其影响不大;张向冈等^[10]、刘峰等^[11]、黄一杰等^[12]研究了钢管再生混凝土的抗震性能,结果表明钢管再生混凝土试件破坏过程以及破坏形态均与普通钢管混凝土柱相似,而且钢管再生混凝土柱具有良好的抗震性能。上述研究结果均表明:经过科学设计的钢管再生混凝土结构具有良好的承载能力和抗震性能,可推广应用于工程结构中。

随着研究的深入和工程应用的现实需要,开展火灾(高温)后钢管再生混凝土结构的相关性能研究显得越来越必要,毕竟火灾是一种频发灾害。国内外学者对此也开展了相关研究,王兵等^[13]、杨有福等^[14]、Han 等^[15]研究了高温后钢管再生混凝土的轴压性能,结果表明随着经历温度的升高,钢管再生

^{*} 收稿日期: 2018-05-07; 修回日期: 2018-08-11

基金项目: 国家自然科学基金项目(51578163); 广西自然科学基金重点项目(2016GXNSFDA380032); 八桂学者专项经费资助项目([2019]79 号); 广西重点研发计划项目(桂科 AB17292083)

通讯作者: 陈宗平(1975—),男,教授,工学博士,博导。主要从事钢与混凝土组合结构、再生混凝土结构、异形柱结构等研究。

Email: zpch@gxu.edu.cn

混凝土承载力整体上呈下降趋势,温度在 500℃ 以上对承载力影响较大;从目前国内外文献看,关于火

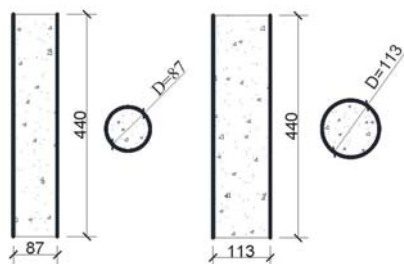


图 1 试件截面尺寸

Fig. 1 Cross-sectional dimension of specimens

灾(高温)后钢管再生混凝土的力学性能研究还很少,属于起步阶段,研究还不够深入系统,为此,本文以再生骨料取代率、历经最高温度、恒温时间和混凝土强度为变化参数,设计 44 个试件,进行高温后的力学性能试验,以便能为钢管再生混凝土结构的进一步科学研究和工程应用提供参考。

1 试验概况

1.1 试件设计及制作

试验中设计并制作了 44 个钢管再生混凝土轴压短柱试件,截面尺寸如图 1 所示。主要变化参数为再生粗骨料取代率 r (0%、30%、70%、100%)、历经最高温度 T (20℃、200℃、300℃、400℃、500℃、600℃)、混凝土强度(C30、C40)以及高温时长 t (10min、60min、180min),具体设计参数见表 1。

表 1 试件设计参数

Tab. 1 Design parameters of specimens

试件编号	D /mm	δ /mm	L /mm	r /%	T /℃	t /min	强度 等级	试件编号	D /mm	δ /mm	L /mm	r /%	T /℃	t /min	强度 等级
RCFST-1	87	2.5	440	0	20	60	C30	RCFST-23	87	2.5	440	100	300	60	C30
RCFST-2	87	2.5	440	0	200	60	C30	RCFST-24	87	2.5	440	100	400	60	C30
RCFST-3	87	2.5	440	0	300	60	C30	RCFST-25	87	2.5	440	100	500	60	C30
RCFST-4	87	2.5	440	0	400	60	C30	RCFST-26	87	2.5	440	100	600	60	C30
RCFST-5	87	2.5	440	0	500	60	C30	RCFST-27	87	2.5	440	100	600	10	C30
RCFST-6	87	2.5	440	0	600	60	C30	RCFST-28	87	2.5	440	100	600	180	C30
RCFST-7	87	2.5	440	0	600	10	C30	RCFST-29	87	2.5	440	0	20	60	C40
RCFST-8	87	2.5	440	0	600	180	C30	RCFST-30	87	2.5	440	0	300	60	C40
RCFST-9	87	2.5	440	30	20	60	C30	RCFST-31	87	2.5	440	0	400	60	C40
RCFST-10	87	2.5	440	30	200	60	C30	RCFST-32	87	2.5	440	0	500	60	C40
RCFST-11	87	2.5	440	30	300	60	C30	RCFST-33	87	2.5	440	0	600	60	C40
RCFST-12	87	2.5	440	30	400	60	C30	RCFST-34	87	2.5	440	100	20	60	C40
RCFST-13	87	2.5	440	30	500	60	C30	RCFST-35	87	2.5	440	100	300	60	C40
RCFST-14	87	2.5	440	30	600	60	C30	RCFST-36	87	2.5	440	100	400	60	C40
RCFST-15	87	2.5	440	70	20	60	C30	RCFST-37	87	2.5	440	100	500	60	C40
RCFST-16	87	2.5	440	70	200	60	C30	RCFST-38	87	2.5	440	100	600	60	C40
RCFST-17	87	2.5	440	70	300	60	C30	RCFST-39	113	3.0	440	0	20	60	C30
RCFST-18	87	2.5	440	70	400	60	C30	RCFST-40	113	3.0	440	0	300	60	C30
RCFST-19	87	2.5	440	70	500	60	C30	RCFST-41	113	3.0	440	0	600	60	C30
RCFST-20	87	2.5	440	70	600	60	C30	RCFST-42	113	3.0	440	100	20	60	C30
RCFST-21	87	2.5	440	100	20	60	C30	RCFST-43	113	3.0	440	100	300	60	C30
RCFST-22	87	2.5	440	100	200	60	C30	RCFST-44	113	3.0	440	100	600	60	C30

注: D 为试件的截面外直径; δ 为钢管壁厚; L 为试件长度; r 为再生粗骨料取代率; T 为历经最高温度; t 为高温时长。

1.2 试验材料

试验材料为 32.5R 普通硅酸盐水泥、普通天然河沙、普通自来水、天然粗骨料和再生粗骨料。天然

粗骨料为连续级配石灰石碎石,最大径粒为 20mm;再生粗骨料来源于实验室的废弃混凝土试件,经鄂式破碎机破碎后获得;天然粗骨料和再生粗骨料同条件筛分、清洗。混凝土配合比及强度见表 2。

表 2 混凝土配合比

Tab. 2 Mix proportion of concrete

强度等级	f_{cu}	r	材料用量/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)				
	/MPa	/%	m_C	m_W	m_S	m_{NAC}	m_{RAC}
C30	43.9	0	500	215	532	1129	0
	45.8	30	500	215	532	790	339
	44.1	70	500	215	532	339	790
	48.7	100	500	215	532	0	1129
C40	57.1	0	500	205	542	1153	0
	61.3	100	500	205	542	0	1153

注： m_C 、 m_W 、 m_S 、 m_{NAC} 和 m_{RAC} 分别为水泥、水、砂、天然粗骨料和再生粗骨料的用量。

1.3 升温及加载装备

采用箱式工业电阻炉对试件升温(炉膛内尺寸 1200mm×600mm×400mm,额定功率 45kW,最高温度 950℃)。试件四面受火,为探讨不同恒温时间对钢管再生混凝土轴压短柱受力性能的影响,结合建筑火灾消防现状,设计恒温时间 10min、60min 和 180min 进行对比研究。升温至设计温度后恒温保持,达到设计持续时间后关掉电源,打开炉门,炉内降温,待试件降至常温时拉出试件。升温曲线见图 2。

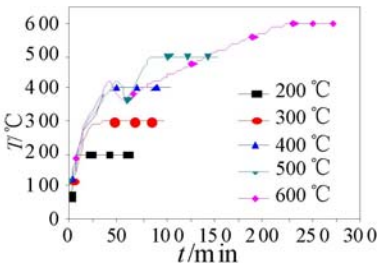


图 2 升温曲线
Fig. 2 Heating curves



图 3 试验加载装置
Fig. 3 Test setup

试件采用 RMT-201 力学试验机(图 3)进行轴心受压加载。为获取试件受力破坏全过程的荷载—位移曲线,采用位移控制的加载方式,加载速度为 0.02mm/s,当荷载下降至极限荷载的 70%时或荷载下降段不明显但压缩变量达到 2cm 时,停止加载。

2 试验结果及其分析

2.1 高温后试件外观变化

试件经历最高温度后的表面变化见图 4。常温试件表面呈浅褐色,试件经历 200℃和 300℃后表面无变化,当温度到达 400℃后,表面呈红色,表面有轻微的氧化现象,到达 600℃时,钢管表面氧化现象较为明显,表面呈砖红色。

2.2 烧失率

通过测量受火前后试件的质量,可得到其烧失率 β ,表达式为

$$\beta = \frac{W - W_f}{W} \tag{1}$$

式中, β 为试件烧失率; W 为受火前试件的质量; W_f 为受火后试件的质量。



图 4 试件的表面变化

Fig. 4 The appearance change of the specimen

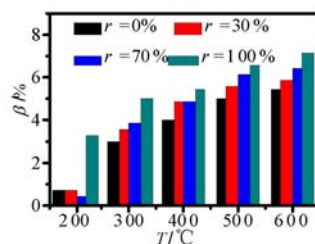


图 5 试件的烧失率

Fig. 5 Mass loss ratio of specimens

图 5 为不同温度下试件的烧失率,由图可知,试件烧失率在 $0.5\% \sim 7.1\%$ 之间,主要与取代率及最高温度有关。相同温度下,取代率越大,试件的烧失率越大;相同取代率下,温度越高,试件的烧失率也越大。

2.3 试件受力破坏过程及形态

高温后圆钢管再生混凝土轴压短柱试件的破坏过程及形态如下:

在较低的荷载阶段,试件外观没有明显的变化,处于弹性受力阶段,荷载—位移曲线为直线段。随着荷载的逐渐增大,到极限荷载的 $80\% \sim 90\%$ 时,钢管表面开始出现剪切滑移线(如图 6)并有铁锈皮剥落,钢管表面的氧化层随着剪切滑移线的出现而脱落,且温度越高,脱落现象越明显,剪切滑移线与试件轴线成 45° ,荷载—位移曲线偏离了初始直线。荷载达到极限荷载后,试件的承载力开始降低,当降低至极限荷载的 95% 左右时,钢管端部或中部开始局部鼓曲并在试件上端部出现弯曲变形,最后局部鼓曲连成环,形成明显的腰鼓破坏,如图 7。



图 6 滑移线

Fig. 6 Shear slip line



图 7 试件破坏形态

Fig. 7 Failure modes of specimens



图 8 混凝土破坏形态

Fig. 8 Failure modes of concrete

将试件的外钢管剥掉后,可观察到核心混凝土的破坏形态,如图 8 所示,高温作用后的试件与普通混凝土试件的破坏形态相似,高温对核心混凝土的破坏形态影响较小,试件钢管的鼓曲部位与核心混凝土发生剪切破坏的位置对应,鼓曲部位对应的核心混凝土均被压碎。

2.4 试件轴向荷载—位移曲线

试件荷载—位移全过程曲线,如图 9 所示。由图可知,不同取代率下试件轴压荷载—位移曲线形状大致相同。相同取代率下,试件轴压荷载—位移曲线受温度和混凝土强度的影响较大,温度越高,峰值荷载和曲线初始割线斜率越小,但峰值位移越大,并且峰值点过后的下降段趋于平缓;混凝土强度越高,峰值荷载越大。

2.5 特征点参数

表 3 给出了试件历经高温后的峰值荷载 N_u 、峰值荷载对应的位移 Δ_p (简称峰值位移)、初始刚度 EA 、位移延性系数 μ 和耗能量 E_h 等特征点参数。其中:初始轴向刚度 EA 取荷载—位移曲线上阶段 0.4 倍峰值荷载点的割线刚度;位移延性系数 $\mu = \Delta_u / \Delta_y$, Δ_u 取荷载下降到 85% 峰值荷载时对应的位移, Δ_y 为屈服位移值,其取值参照“通用屈服弯矩法”确定;耗能 E_h 为应力—应变曲线中应力下降至 0.9

峰值应力所对应的曲线段包围的面积。

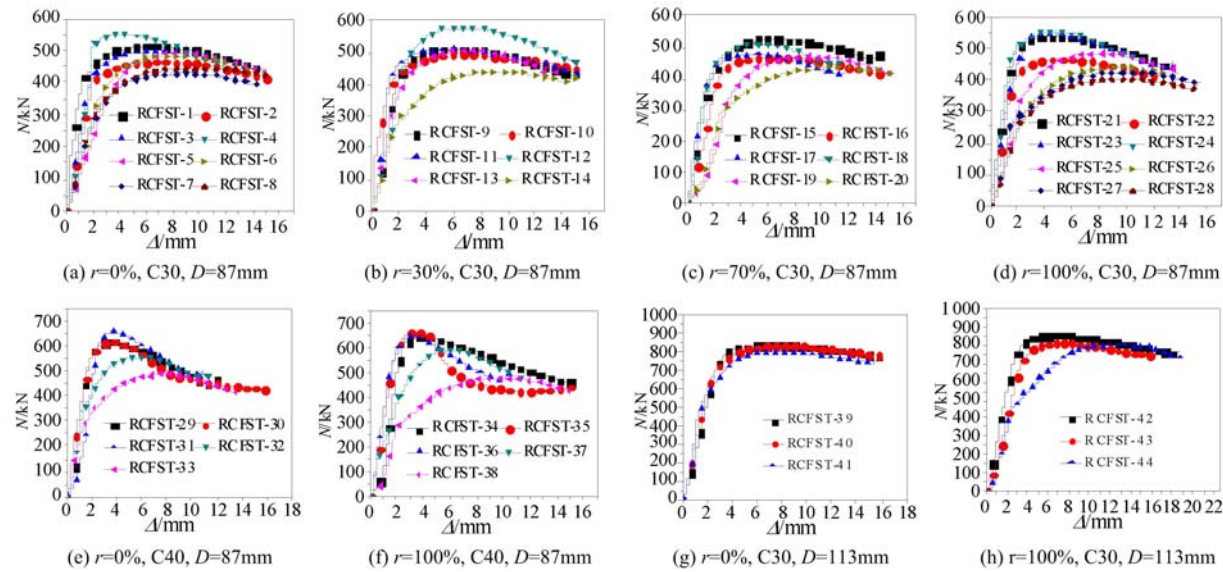


图 9 试件轴向荷载一位移曲线

Fig.9 Load-displacement curves of specimens

表 3 特征点参数

Tab.3 The parameters of the feature points

试件编号	N_u /kN	Δ_p /mm	EA /MN	μ	E_h /(kN·m)	试件编号	N_u /kN	Δ_p /mm	EA /MN	μ	E_h /(kN·m)
RCFST-1	514.3	6.23	151.52	1.96	2.3	RCFST-23	548.1	4.49	101.94	1.96	1.6
RCFST-2	466.6	7.84	75.9	1.76	2.3	RCFST-24	557.0	4.61	115.25	1.81	1.6
RCFST-3	497.7	6.87	83.9	1.81	2.1	RCFST-25	486.9	8.25	51.3	1.47	1.9
RCFST-4	550.9	4.26	69.9	2.01	1.5	RCFST-26	440.0	9.69	45.0	1.50	1.8
RCFST-5	490.3	8.53	43.4	1.55	2.1	RCFST-27	427.0	10.47	58.9	1.37	2.0
RCFST-6	483.2	8.95	52.0	1.52	2.2	RCFST-28	400.7	10.57	45.9	1.46	1.9
RCFST-7	444.5	9.66	53.9	1.74	2.1	RCFST-29	662.7	3.56	102.65	1.81	1.3
RCFST-8	430.4	8.75	50.8	1.66	1.9	RCFST-30	624.7	3.49	127.90	1.69	1.2
RCFST-9	513.1	6.17	73.3	1.89	2.0	RCFST-31	664.0	3.69	83.3	1.62	1.1
RCFST-10	499.3	7.12	59.32	1.98	2.5	RCFST-32	559.8	5.84	96.4	1.54	1.6
RCFST-11	511.5	5.85	100.52	2.07	2.2	RCFST-33	491.2	8.08	67.0	1.42	1.9
RCFST-12	580.4	6.36	65.9	1.79	2.2	RCFST-34	642.2	4.23	69.8	1.81	1.5
RCFST-13	508.0	7.24	74.3	1.54	1.9	RCFST-35	664.5	3.42	110.58	1.40	0.9
RCFST-14	441.5	9.61	57.7	1.52	2.0	RCFST-36	645.4	3.09	126.51	1.73	1.1
RCFST-15	526.7	6.20	84.9	1.96	2.2	RCFST-37	593.5	5.77	76.3	1.50	1.6
RCFST-16	468.8	6.77	58.7	1.87	2.0	RCFST-38	477.3	9.90	46.2	1.42	2.2
RCFST-17	479.3	4.91	114.98	1.94	1.6	RCFST-39	838.8	7.26	81.9	2.29	
RCFST-18	510.3	5.76	85.0	1.63	1.6	RCFST-40	846.9	8.21	67.2	1.96	
RCFST-19	471.6	9.59	32.5	1.44	2.0	RCFST-41	801.9	8.52	53.2	1.76	
RCFST-20	435.8	11.03	36.0	1.53	2.0	RCFST-42	853.1	6.72	60.2	2.35	
RCFST-21	538.5	4.36	126.10	2.25	1.8	RCFST-43	812.9	9.24	41.9	1.88	
RCFST-22	467.6	5.29	93.1	2.02	1.7	RCFST-44	804.2	12.41	37.6	1.45	

3 影响因素分析

3.1 历经最高温度

图 10(a)给出了不同取代率下试件的峰值荷载随历经最高温度变化曲线(图中纵坐标 $N_u/N_{u,20}$ 表示试件高温后与常温下峰值荷载之比),由图可见,不同取代率下的试件峰值荷载随温度的变化趋势相同,20~200℃时试件的峰值荷载随温度的升高而降低,试件的峰值荷载平均降低了 9%;200~400℃时试件的峰值荷载随温度的升高而升高,相比于 200℃的试件,300℃、400℃试件的峰值荷载平均升高了 7.1%、15.6%,这是由于在 200~400℃之间,试件内水泥凝胶体中的水开始脱落,增强了水泥水化作用^[17],使得试件的峰值荷载升高;400~600℃时试件的峰值荷载随温度的升高而降低,相比于 400℃的试件,500℃、600℃试件的峰值荷载平均降低了 10.6%、17.9%。

图 10(b)给出了不同再生粗骨料取代率下试件的峰值位移与历经最高温度的关系,由图可见,不同取代率下的试件峰值位移随温度的变化趋势相同,20~200℃时试件的峰值位移随温度的升高而升高,试件的峰值位移平均升高了 17.9%;200~300℃时试件的峰值位移随温度的升高而降低,试件的峰值位移平均降低了 18.1%;300~600℃试件的峰值位移随温度的升高而升高(取代率为 0%的试件除外),相比于 300℃的试件,400℃、500℃和 600℃试件的峰值位移平均升高了 9.6%、67.6%和 100%,这是由于在高温作用下,试件内部水分蒸发而变得疏松,以至于混凝土被不断压实。

图 10(c)给出了不同再生粗骨料取代率下试件的刚度与历经最高温度的变化曲线(图中纵坐标 EA/EA_{20} 表示试件历经高温后与常温下刚度的比值),由图可见,不同取代率下的试件刚度随温度的升高呈降低的趋势,试件的刚度小于 1(取代率为 30%、70%且经历 300℃的试件除外),这是由于高温作用削弱了试件的轴向刚度。相对于 20℃的试件,200℃、300℃、400℃、500℃和 600℃试件的刚度平均降低了 31.5%、31.9%、18.4%、48.4%和 52.2%。

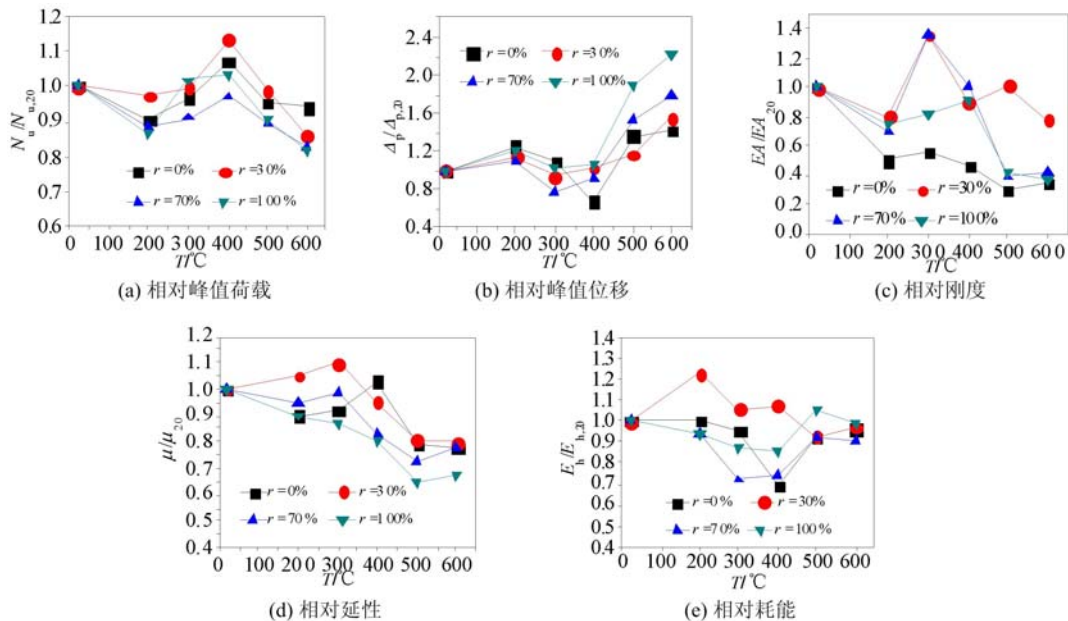


图 10 温度对试件力学性能的影响

Fig. 10 Influence of temperature on mechanical properties

图 10(d)给出了不同再生粗骨料取代率下试件的延性与历经最高温度的变化曲线(图中纵坐标 μ/μ_{20} 表示试件历经高温后与常温下延性之比),由图可见,不同取代率下试件的延性随温度的升高而降低。相对于 20℃的试件,200℃、300℃、400℃、500℃和 600℃试件的延性平均降低了 5%、3%、10%、25.5%和 24.3%。

图 10(e)给出了不同再生粗骨料取代率下试件的耗能与历经最高温度的变化曲线(图中纵坐标

$E_h/E_{h,20}$ 表示试件历经高温后与常温下耗能的比值),由图可见,试件的耗能随温度的升高呈减一增的变化趋势(取代率为30%的试件除外)。200℃、300℃、400℃、500℃、600℃试件的耗能(取代率为30%的试件除外)分别是20℃试件的0.96、0.85、0.76、0.96、0.95倍。试件在300℃、400℃下耗能最低,在20℃下耗能最高。这主要是由于常温试件承载力较大,其耗能也较高。

3.2 再生粗骨料取代率

图11(a)给出了不同温度下试件的峰值荷载与再生粗骨料取代率的变化曲线(图中纵坐标为各取代率与取代率为0%的峰值荷载之比),由图可见,整体上再生粗骨料取代率对不同温度下试件的峰值荷载影响不明显。20℃试件的峰值荷载随取代率的增加而增加,相比于取代率为0%的试件,取代率为30%、70%、100%的试件峰值荷载平均增加了2.3%;在200~500℃之间,试件的峰值荷载随取代率的增加呈增一减的趋势,试件的峰值荷载变化幅度为10.1%~−7.4%,但总体变化不大;在600℃下,试件的峰值荷载随取代率的增加而降低,试件的峰值荷载平均降低了9.1%。

图11(b)给出了不同温度试件峰值位移与再生粗骨料取代率的变化曲线,由图可见,20℃、200℃、300℃试件的峰值位移随取代率的增加变化不大;400℃、500℃和600℃试件的峰值位移随取代率的增大呈增大的趋势,取代率为30%、70%和100%试件的平均峰值位移分别为取代率为0%试件的0.96、1.17、1.02倍。总体上,再生粗骨料取代率对不同温度下试件的峰值位移的影响不大。

图11(c)给出了不同温度下试件的刚度与再生粗骨料取代率的变化曲线(图中纵坐标为各取代率与取代率为0%的刚度之比),由图可见,20℃、200℃、400℃试件的刚度随取代率的增加呈减一增的变化趋势;300℃、500℃、600℃试件的刚度随取代率的增加呈上下波动的变化趋势。总体上,再生粗骨料取代率对不同温度下试件的刚度的影响不大。

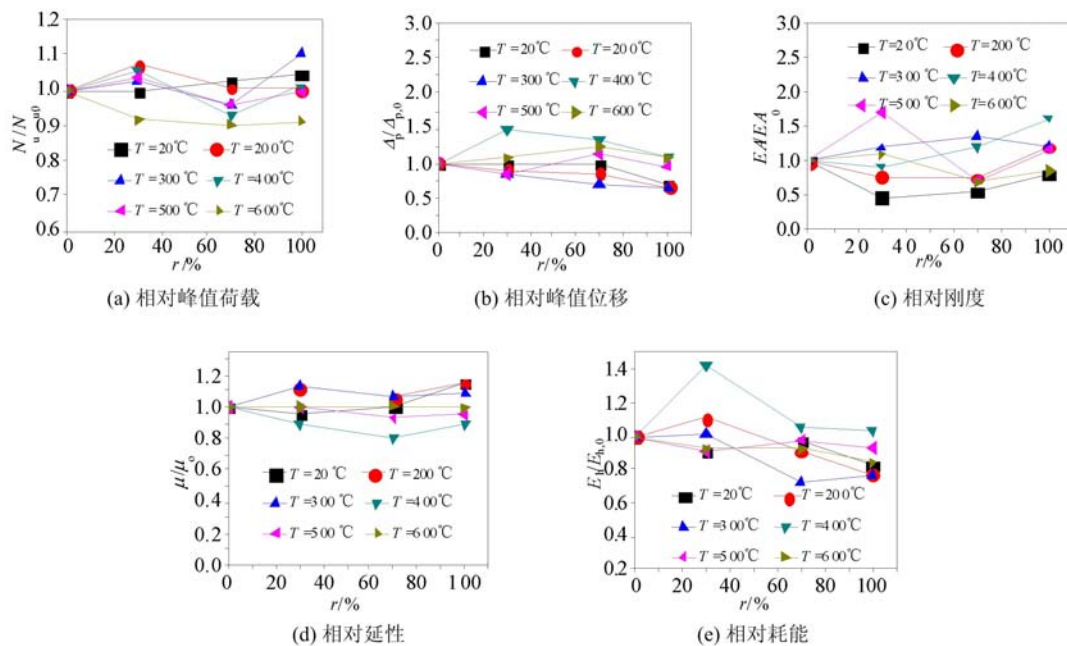


图11 再生粗骨料取代率对试件力学性能的影响

Fig. 11 Influence of replacement ratio on mechanical properties

图11(d)给出了不同温度下试件的延性与再生粗骨料取代率的变化曲线(图中纵坐标为各取代率与取代率为0%的延性之比),由图可见,再生粗骨料取代率整体上对试件的延性影响不大。20℃、400℃、500℃试件的延性随取代率的增加呈先减小后增大的变化趋势;200℃、300℃试件的延性随取代率的增加呈先增大后减小的变化趋势;600℃试件的延性随取代率的增加变化不大;取代率为70%试件的延性较差,取代率为30%试件的延性较好。

图11(e)给出了不同温度下试件的耗能与再生粗骨料取代率的变化曲线(图中纵坐标为各取代率与取代率为0%的耗能之比),由图可见,取代率的变化对20℃、500℃、600℃试件耗能的影响小,对

200℃、300℃、400℃试件耗能的影响大。总体上,试件的耗能随取代率的增加呈降低的变化趋势,相比于取代率为 0%的试件,取代率为 70%、100%试件的耗能平均降低了 8.7%、18.3%。

3.3 高温时长

图 12(a)给出了不同取代率下试件的峰值荷载与高温时长的变化曲线(图中纵坐标为 60min、180min 与 10min 下试件的峰值荷载之比),由图可见,取代率为 100%试件的峰值荷载变化规律与取代率为 0%试件相同,试件的峰值荷载随着高温时长的增加呈先增加后降低的趋势。相比于 10min, 60min 试件的峰值荷载平均提高 6%, 180min 试件的峰值荷载降低了 4.5%。

图 12(b)给出了不同取代率下试件的峰值位移与高温时长的变化曲线,由图可见,随着高温时长的增加,试件的荷载位移整体呈降低的趋势。相比于 10min, 60min 试件的峰值位移平均降低了 7%, 180min 试件的峰值位移降低了 4%。

图 12(c)给出了不同取代率在试件的刚度与高温时长的变化曲线(图中纵坐标为 60min、180min 与 10min 下试件的刚度之比),由图可见,取代率为 100%试件的刚度变化规律与取代率为 0%试件相同,试件的刚度随高温时长的增加而降低。相比于 10min, 60min 试件的刚度平均降低 13.5%, 180min 试件的刚度平均降低 14%。

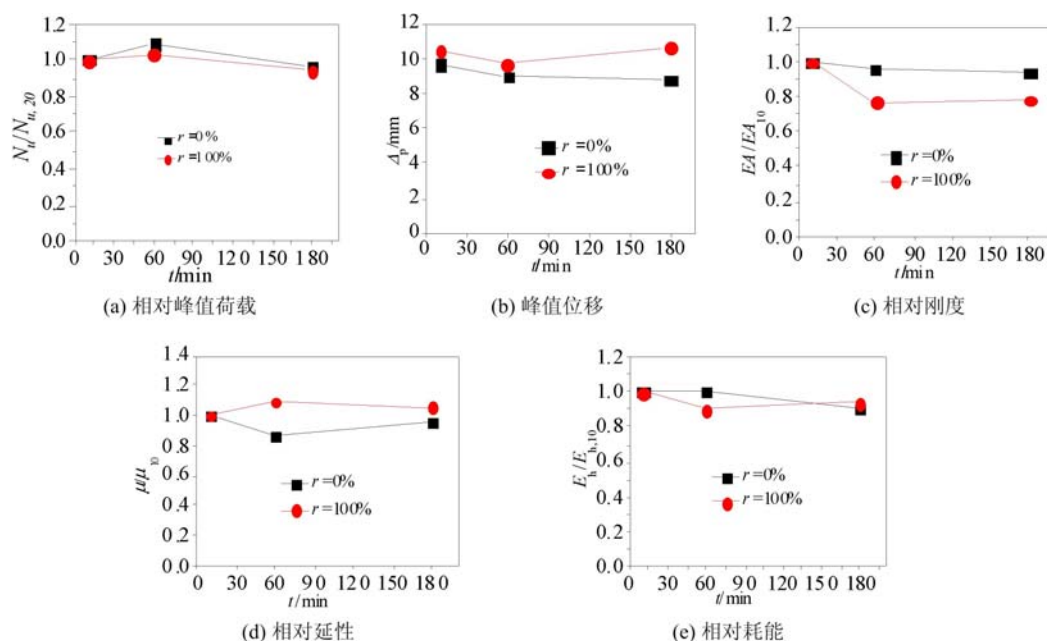


图 12 高温时长对试件力学性能的影响

Fig. 12 Constant temperature time effect on mechanical properties

图 12(d)给出了不同取代率下试件的延性与高温时长的变化曲线(图中纵坐标为 60min、180min 与 10min 下试件的延性之比),由图可见,取代率为 100%试件的延性变化规律刚好与取代率为 0%试件相反。取代率为 0%试件的延性随高温时长的增加呈减一增的变化趋势,取代率为 100%试件的延性随高温时长的增加呈增一减的变化趋势。

图 12(e)给出了不同取代率下试件的耗能与高温时长的变化曲线(图中纵坐标为 60min、180min 与 10min 下试件的耗能之比),由图可见,取代率为 100%试件的耗能变化规律刚好与取代率为 0%试件相反。取代率为 0%试件的耗能随高温时长的增加呈增一减的变化趋势,取代率为 100%试件的耗能随高温时长的增加呈减一增的变化趋势。

3.4 混凝土强度

图 13(a)给出了强度等级为 C30 和 C40 的取代率为 100%的再生混凝土试件的峰值荷载随温度变化的关系,由图可见,随着温度的升高,C40 试件的峰值荷载变化规律与 C30 试件相似,C40 试件的峰值荷载均大于 C30 试件,峰值荷载分别提高了 19.3%、21.2%、15.9%、21.9%、8.5%。

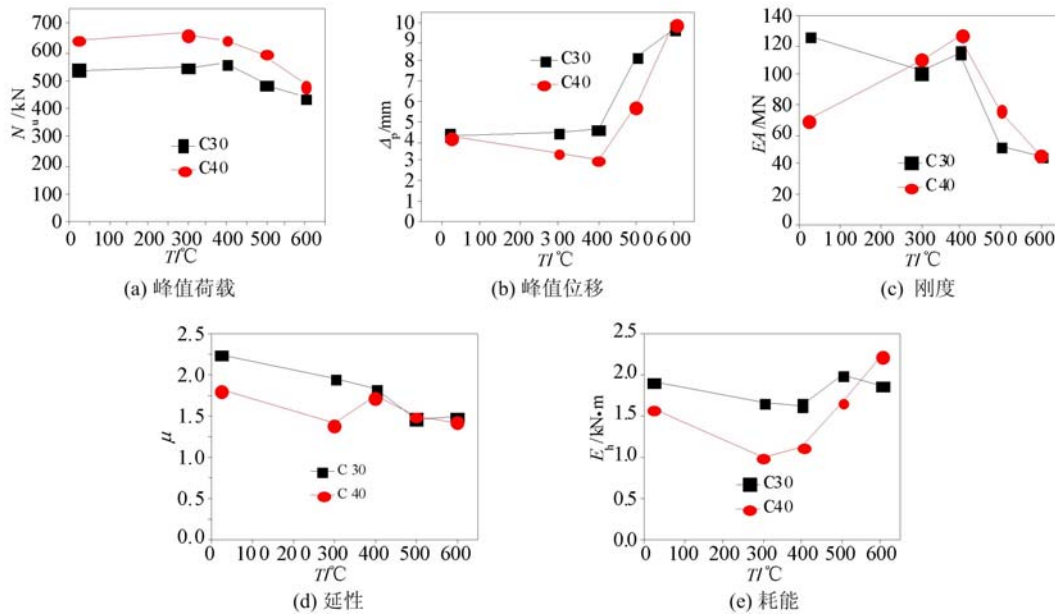


图13 核心混凝土强度对试件力学性能的影响

Fig. 13 Effect of core concrete strength on mechanical properties

图13(b)给出了强度等级为C30和C40的取代率为100%的再生混凝土试件的峰值位移随温度变化的关系,由图可见,C30试件的峰值位移大于C40试件(600℃的除外)。

图13(c)给出了强度等级为C30和C40的取代率为100%的再生混凝土试件的刚度随温度变化的关系,由图可见,试件的刚度随核心混凝土强度的增加而增加(常温下除外)。相比于C30的试件,C40的试件刚度分别提高7.8%、9.6%、49%、2.2%(常温下除外)。

图13(d)给出了强度等级为C30和C40的取代率为100%的再生混凝土试件的延性随温度变化的关系,由图可见,随着温度的升高,C40试件的延性变化规律与C30试件相似,C30试件在20℃、300℃、400℃、600℃下的延性均大于C40试件,延性平均提高了18.2%;在500℃下C30试件延性小于C40试件,延性降低了2%。

图13(e)给出了强度等级为C30和C40的取代率为100%的再生混凝土试件的耗能随温度变化的关系,由图可见,随着温度的升高,C40试件的耗能变化规律与C30试件相似;相比C30试件,C40试件耗能平均降低16.8%。

4 承载力计算

基于试验结果,利用多元线性回归分析方法,根据混凝土强度、再生骨料取代率、火灾(高温)温度对轴压试件峰值应力的影响关系,可以得出计算轴压试件强度的三元线性回归方程:

$$y = 0.7598f_{cu} + 3.9258r - 0.01764T + 57.256 \quad (2)$$

式中, y 表示轴压试件强度,MPa; f_{cu} 表示C30和C40立方体试块标准强度; r 表示再生混凝土取代率; T 表示火灾(高温)温度。

公式(2)中,同时考虑了混凝土强度、再生骨料取代率、火灾(高温)温度对轴压试件强度的影响,现在将这三个影响参数分开讨论分析,分别为混凝土强度、再生骨料取代率对轴压试件强度的影响和火灾(高温)温度对轴压试件强度的影响。

由混凝土强度和再生骨料取代率影响得到的二元线性回归方程为

$$y_1 = 0.7383f_{cu} + 3.8349r + 52.226 \quad (3)$$

由轴压试件强度与火灾(高温)关系曲线拟合出来的一元三次方程为

$$y_2 = -6.5 \times 10^{-7} T^3 + 5.3 \times 10^{-4} T^2 - 1.1 \times 10^{-3} T + 95.8157 \quad (4)$$

将公式(3)和(4)整合得到以下公式:

$$y = \sqrt{y_1 \times y_2} \quad (5)$$

由公式(2)和(5)计算轴压试件的强度值,如表 4 所示,并将计算值 σ_u^c 与测试值 σ_u^t 进行对比分析,其中测试值 σ_u^t 与计算值 σ_u^c 之比的平均值为 0.98,方差为 0.01,变异系数为 0.09,计算值与测试值吻合良好。

表 4 轴压试件试验结果与计算结果对比

Tab. 4 Contrast result between measured data and calculate data of axial compression specimens

试件编号	σ_u^t /MPa	公式(2)		公式(5)		试件编号	σ_u^t /MPa	公式(2)		公式(5)	
		σ_u^c /MPa	σ_u^t/σ_u^c	σ_u^c /MPa	σ_u^t/σ_u^c			σ_u^c /MPa	σ_u^t/σ_u^c	σ_u^c /MPa	σ_u^t/σ_u^c
RCFST-1	86.52	90.27	0.96	89.15	0.97	RCFST-20	73.31	82.89	0.88	84.56	0.87
RCFST-2	78.49	87.10	0.90	87.45	0.90	RCFST-21	90.58	85.61	1.06	86.74	1.04
RCFST-3	83.76	85.33	0.98	89.08	0.94	RCFST-22	78.66	82.43	0.95	85.09	0.92
RCFST-4	92.67	83.57	1.11	90.18	1.03	RCFST-23	92.2	80.67	1.14	86.68	1.06
RCFST-5	82.47	81.81	1.01	88.90	0.93	RCFST-24	93.69	78.90	1.19	87.74	1.07
RCFST-6	81.28	80.04	1.02	83.20	0.98	RCFST-25	81.9	77.14	1.06	86.50	0.95
RCFST-9	86.52	92.85	0.93	90.46	0.96	RCFST-26	74.02	75.38	0.98	80.95	0.91
RCFST-10	78.49	89.68	0.88	88.74	0.88	RCFST-29	104.76	100.25	1.04	94.11	1.11
RCFST-11	83.76	87.91	0.95	90.40	0.93	RCFST-30	105.08	95.32	1.10	94.05	1.12
RCFST-12	92.67	86.15	1.08	91.50	1.01	RCFST-31	111.7	93.55	1.19	95.20	1.17
RCFST-13	82.47	84.38	0.98	90.21	0.91	RCFST-32	94.17	91.79	1.03	93.86	1.00
RCFST-14	81.28	82.62	0.98	84.43	0.96	RCFST-33	82.63	90.02	0.92	87.84	0.94
RCFST-15	88.61	93.13	0.95	90.60	0.98	RCFST-34	108.02	107.44	1.01	97.54	1.11
RCFST-16	78.87	89.95	0.88	88.88	0.89	RCFST-35	111.78	102.50	1.09	97.47	1.15
RCFST-17	80.62	88.19	0.91	90.54	0.89	RCFST-36	108.56	100.73	1.08	98.67	1.10
RCFST-18	85.84	86.42	0.99	91.65	0.94	RCFST-37	99.84	98.97	1.01	97.28	1.03
RCFST-19	79.33	84.66	0.94	90.36	0.88	RCFST-38	80.29	97.20	0.83	91.04	0.88

注: σ_u^c 为试件轴压强度的计算值; σ_u^t 为试件轴压强度的测试值; σ_u^t/σ_u^c 为试件轴压强度的计算值与测试值之比。

5 结论

根据本试验的研究,在试验的参数范围内,得到以下主要结论:

(1) 高温作用后,钢管再生混凝土试件的力学性能、变形性能与钢管普通混凝土试件类似,都具有较高的后期承载力和良好的延性;钢管再生混凝土与钢管普通混凝土经过高温作用后在轴心压力下均为剪切型破坏。

(2) 钢管再生混凝土短柱试件经历常温变至 600℃ 过程中,其表面颜色由浅褐色向砖红色转变;随着温度的升高,试件质量烧失率逐渐增大。

(3) 再生粗骨料取代率和高温时长的变化对试件的力学性能影响不显著。

(4) 随着温度的升高,试件的峰值荷载、刚度和延性逐渐降低,但对试件的耗能影响不明显。

(5) 随着混凝土强度等级的升高,试件的峰值荷载和刚度逐渐增加,试件的延性和耗能逐渐降低。

(6) 基于试验结果,考虑再生骨料取代率、历经最高温度和混凝土强度的影响,提出了轴压试件强度计算公式,公式计算结果与试验结果吻合较好。

参考文献:

- [1] 黄宏,孙微,陈梦成,等. 方钢管再生混凝土轴压短柱力学性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2015, 36(增刊1): 215—221 (HUANG Hong, SUN Wei, CHEN Mengcheng, et al. Recycled concrete filled square steel tubes axial

- compression short column mechanical properties experimental study[J]. Journal of Building Structures, 2015, 4 (supplement 1):215—221 (in Chinese))
- [2] 马辉,孙书伟,刘云贺,等.圆钢管型钢再生混凝土短柱轴心受压试验及有限元分析[J].实验力学,2017,32(6):789—799 (MA Hui, SUN Shuwei, LIU Yunhe, et al. Experimental study and finite element analysis of axial compression behavior of circular tube steel reinforced recycled concrete short column[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2017, 32(6):789—799 (in Chinese))
- [3] Konno K, Sato Y, Kakuta Y, et al. The property of recycled concrete column encased by steel tube subjected to axial compression[J]. Transaction of the Japan Concrete Institute, 1997, 19(2):231—238.
- [4] Chen Z, Chen X, Ke X, et al. Research on the bearing capacity of recycled aggregate concrete-filled circle steel tube column under axial compression loading[C]. Proceedings of Mechanic Automation and Control Engineering (MACE), Wuhan, China, 2010.
- [5] 陈宗平,徐金俊,薛建阳.取代率对钢管再生混凝土短柱轴压性能退化的影响分析[J].实验力学,2014,29(2):207—214 (CHEN Zongping, XU Jinjun, XUE Jianyang. Influence of replacement ratio on axial compression performance degradation of recycled aggregate concrete-filled steel tube short column[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2014, 29(2):207—214 (in Chinese))
- [6] 牛海成,曹万林,董宏英,等.钢管高强再生混凝土柱轴压性能试验研究[J].建筑结构学报,2015,36(6):128—136 (NIU Haicheng, CAO Wanlin, DONG Hongying, et al. Experimental study on the axial compression performance of high-strength recycled concrete tubes[J]. Journal of Architectural Structure, 2015, 36(6):128—136 (in Chinese))
- [7] 王玉银,陈杰,纵斌,等.钢管再生混凝土与钢筋再生混凝土轴压短柱力学性能对比试验研究[J].建筑结构学报,2011,32(12):170—178 (WANG Yuyin, CHEN Jie, ZONG Bin, et al. Comparative experimental study on mechanical properties of reinforced concrete axial compression of reinforced concrete with steel tubular and reinforced concrete[J]. Journal of Architectural Structure, 2011, 32(12):170—178 (in Chinese))
- [8] 邱慈长,王清远,石霄爽,等.薄壁钢管再生混凝土轴压实验研究[J].实验力学,2011,26(1):8—15 (QIU Cichang, WANG Qingyuan, SHI Xiaoshuang, et al. Experimental investigation on the behavior of recycle concrete-filled thin-walled steel tube under axial compression[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2011, 26(1):8—15 (in Chinese))
- [9] 胡乃冬,杜喜凯,刘濮源,等.方钢管再生混凝土偏压长柱受力性能试验研究[J].建筑结构学报,2016,37(增刊2):36—42 (HU Naidong, DU Xikai, LIU Puyuan, et al. Experimental study on the stress performance of the long column of steel tube recycled concrete [J]. Journal of Architectural Structure, 2016, 37 (supplement 2) :36—42 (in Chinese))
- [10] 张向冈,陈宗平,薛建阳,等.钢管再生混凝土柱抗震性能试验研究[J].土木工程学报,2014,47(9):45—56 (ZHANG Xianggang, CHEN Zongping, XUE Jianyang, et al. Experimental study on seismic performance of steel-tube regenerated concrete column[J]. Journal of Civil Engineering, 2014, 47(9):45—56 (in Chinese))
- [11] 刘峰,余银银,李丽娟.钢管再生骨料混凝土柱抗震性能研究[J].土木工程学报,2013,46(增刊2):178—184 (LIU Feng, YU Yinyin, LI Lijuan. Research on seismic behavior of concrete column of recycled aggregate of steel tubes[J]. Journal of Civil Engineering, 2013, 46(supplement 2):178—184 (in Chinese))
- [12] 黄一杰,肖建庄.钢管再生混凝土柱抗震性能与损伤评估[J].同济大学学报(自然科学版),2013,41(3):330—335 (HUANG Yijie, XIAO Jianzhuang. Seismic performance and damage assessment of steel tubular reinforced concrete columns[J]. Journal of Tongji University (Natural Science Edition), 2013, 41(3):330—335 (in Chinese))
- [13] 王兵,刘晓,赵磊,等.高温后方钢管再生混凝土短柱轴压受力性能分析[J].工程力学,2015,32(增刊):153—158 (WANG Bing, LIU Xiao, ZHAO Lei, et al. Analysis on the stress performance of the axial compression of steel tube in the rear steel tube after high temperature[J]. Engineering Mechanics, 2015, 32 (supplement):153—158 (in Chinese))
- [14] 杨有福,张磊.高温后钢管再生混凝土轴压短柱有限元分析[J].防灾减灾工程学报,2015,35(1):17—22 (YANG Youfu, ZHANG Lei. Finite element analysis of axial compression of steel tube after high temperature[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2015, 35(1):17—22 (in Chinese))

- [15] Han L H, Huo J S, Wang Y C. Compressive and flexural behavior of concrete filled steel tubes after exposure to standard fire[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2005, 61(7):882—901.

Test of axial compression performance and bearing capacity of recycled concrete filled steel tube after exposed to high temperature

CHEN Zong-ping^{1,2}, ZHAO Ke-jun¹, JING Cheng-gui¹, ZHANG Chao-rong¹

(1. College of Civil Engineering and Architecture, Guangxi University, Nanning 530004, China;

2. Key Laboratory of Disaster Prevention and Structural Safety of Ministry of Education, Nanning 530004, China)

Abstract: In order to reveal the axial compression behavior of steel tube recycled concrete after high temperature, taking the replacement rate of recycled coarse aggregate, the highest temperature, the high temperature duration and the strength variation of concrete as variable parameters, static loading experiments of 44 steel tube recycled concrete specimens after high temperature were designed. The variation of physical and mechanical properties of specimens before and after high temperature was observed. The failure process and pattern were obtained. The load-deformation curve and characteristic parameters including peak load, peak displacement, initial stiffness, ductility coefficient and energy dissipation during whole loading process were obtained. Furthermore, the influence of various parameters on the axial compression performance of specimen was analyzed. Finally, the calculation method of ultimate bearing capacity of steel tube recycled concrete under axial compression was discussed. Results indicate that with the increase of temperature, the appearance color of steel tube recycled concrete changed from light brown to gray white, the mass loss rate increases gradually, and the bearing capacity and stiffness of specimen decrease gradually. The variation of replacement ratio of recycled coarse aggregate and high temperature duration has little effect on the mechanical properties of steel tube recycled concrete under axial compression, and the higher the strength grade of concrete is, the greater the bearing capacity and stiffness of specimen subjected to high temperature.

Keywords: after high temperature; steel tube recycled concrete; axial compression performance; calculation of bearing capacity