

文章编号: 1000-4750(2013)03-0331-10

钢管再生混凝土长柱偏压性能研究

张向冈¹, 陈宗平^{1,2}, 王讲美¹, 薛建阳², 郑述芳¹, 李启良¹, 苏益声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: 对10个圆钢管再生混凝土和10个方钢管再生混凝土长柱进行偏压静力单调加载试验, 考虑了再生粗骨料取代率、长细比、偏心距3个变化参数, 观察了试件受力的全过程和试件破坏形态, 绘制出荷载-变形、荷载-应变等一系列重要关系曲线, 给出了截面应变沿高度分布情况, 并分析了变化参数对试件极限承载力的影响规律, 采用国内外常用的8部相关规程计算两种截面形式试件的极限承载力。研究表明: 钢管再生混凝土偏压长柱受力过程均经历了弹性阶段、屈服阶段和破坏阶段, 破坏形态主要为弹塑性失稳破坏; 建议采用规程DL/T5085-1999和DBJ13-51-2003设计圆钢管再生混凝土偏压长柱试件的极限承载力, 采用规程CECS159:2004、DBJ13-51-2003设计方钢管再生混凝土偏压长柱试件的极限承载力。

关键词: 再生混凝土; 圆钢管; 方钢管; 偏压长柱; 极限承载力**中图分类号:** TU398 **文献标志码:** A **doi:** 10.6052/j.issn.1000-4750.2011.10.0679

STUDY ON ECCENTRIC COMPRESSION BEHAVIORS OF RECYCLED AGGREGATE CONCRETE FILLED STEEL TUBULAR LONG COLUMNS

ZHANG Xiang-gang¹, CHEN Zong-ping^{1,2}, WANG Jiang-mei¹, XUE Jian-yang²,
ZHEHN Shu-fang¹, LI Qi-liang¹, SU Yi-sheng¹

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

2. Key Laboratory of Disaster Prevention and Gtructural Safety of China Ministry of Guangxi University, Nanning 530004, China)

Abstract: Eccentric compression static monotonic loading test was carried out on 10 recycled aggregate concrete(RAC) filled cycled steel tubular long columns and 10 RAC filled square steel tubular long columns. The changing parameters including replacement rate of recycled coarse aggregate, slenderness ratio and eccentricity were considered. The whole force process and failure modes were observed, while important curves about load-deformation and load-strain were drawn, while strain distribution along cross section height was made. The influence of the changing parameters on the ultimate bearing capacity was analyzed, while the ultimate bearing capacity of two section types was calculated by 8 related procedures. It is shown that force process is made up of elastic stage, yield stage and destruction stage, while failure modes are mainly destruction of elastic-plastic instability. It is suggested that the ultimate bearing capacity of RAC filled cycled steel tubular long columns under eccentric compression can be designed using DL/T 5085-1999 and DBJ13-51-2003, while RAC filled square steel tubular can be designed using CECS159:2004 and DBJ13-51-2003.

收稿日期: 2011-10-16; 修改日期: 2012-01-01

基金项目: 国家自然科学基金项目(50908057); ‘八桂学者’建设工程专项经费项目; 广西自然科学基金项目(2012GXNSFAA053203); 广西科技攻关项目(桂科攻12118023-3); 广西重点实验室系统性研究项目(2012ZDX03)

通讯作者: 陈宗平(1975—), 男, 广西玉林人, 教授, 博士, 从事钢与混凝土组合结构、再生混凝土结构、异形柱结构研究
(E-mail: zpchen@gxu.edu.cn).

作者简介: 张向冈(1986—), 男, 河南夏邑人, 博士生, 从事钢与混凝土组合结构研究(E-mail: xgzhang1986@126.com);

王讲美(1982—), 男, 河南鲁山人, 硕士生, 从事钢与混凝土组合结构研究(E-mail: pds123@163.com);

薛建阳(1970—), 男, 河南洛阳人, 教授, 博士, 从事钢与混凝土组合结构研究(E-mail: jianyang_xue@163.com);

郑述芳(1986—), 女, 广西罗城人, 硕士生, 从事钢与混凝土组合结构研究(E-mail: zhengshufang-41@163.com);

李启良(1986—), 男, 广西桂林人, 硕士生, 从事钢与混凝土组合结构研究(E-mail: feel1986@126.com);

苏益声(1956—), 男, 湖南醴陵人, 教授, 硕士, 从事钢结构与组合结构研究(E-mail: suyisheng@sina.com).

Key words: recycled aggregate concrete; cycled steel tubular; square steel tubular; eccentric compression long column; ultimate bearing capacity

近年来,随着我国经济的快速发展,旧房拆迁、道路更新改造以及新建建筑等产生了大量的建筑垃圾。据统计,我国每年制造的废弃混凝土总量超过了 1360 万吨^[1]。如何科学合理地处理这些建筑垃圾,成为国内外混凝土研究领域中的一个热点问题^[2]。目前,逐渐兴起的再生混凝土技术成为最快最直接处理方式。所谓再生混凝土技术,它是指将废弃混凝土块进行回收利用,经破碎、清洗与分级后,按一定的比例与级配混合形成再生骨料,部分或全部代替砂石等天然骨料,再加入水泥、水或部分天然骨料配制成为新混凝土的一整套技术。再生混凝土技术既能解决废旧混凝土的处理问题,又能节省天然砂石,具有明显的社会效益、经济效益和环保效益,被认为是实现建筑资源环境可持续发展的绿色混凝土。大量研究表明^[3-4]再生混凝土基本能满足普通混凝土的性能要求,其应用于工程结构是可行的,但由于配置高强度的再生混凝土,难度较高,故再生混凝土一般只用于非承重结构中。

钢管再生混凝土(Recycled Aggregate Concrete Filled Steel Tubular, RACFST)的提出,在一定程度上改善了这种状况。钢管对核心再生混凝土的约束作用,使其处于三向受压状态,再生混凝土的抗压强度和变形能力得到提高;同时,核心再生混凝土的支撑作用,延缓或阻止了钢管的内凹屈曲,外部钢管的稳定性得到加强。国内华南理工大学^[5]研究了钢管再生混合短柱的轴压、剪切性能,比较了龄期分别为 7d 和 28d 的轴压强度、轴压刚度和延性,考察了废弃混凝土类型、废弃混凝土混合比等因素对极限抗剪承载力的影响趋势;同济大学^[6]完成了 15 个钢管约束再生混凝土圆柱试件的轴压试验,分析了试件的破坏特征、荷载-轴向应变关系以及试件的横向变形系数变化规律;福州大学^[7]研究了轴压短柱、纯弯构件的承载力以及变形性能,并采用有限元法和纤维模型法分析试件的破坏模态和试件

受力的荷载-变形全过程;四川大学^[8]通过对 9 个薄壁圆钢管再生混凝土短柱和 9 个薄壁方钢管再生混凝土短柱的轴压试验,比较了 3 种方法测定试件轴向变形的差异,分析了不同取代率和不同截面形式薄壁钢管再生混凝土的破坏变形特征。国外 Konno^[9]等研究了钢管约束再生混凝土构件的强度和变形能力,并与钢管约束普通混凝土构件进行了比较。本文设计了 10 个方钢管再生混凝土长柱和 10 个圆钢管再生混凝土长柱试件,研究其在不同骨料取代率、不同长细比、不同偏心距下的偏压承载性能和变形性能,并采用相关规程计算两种截面形式试件的极限承载力,通过试验值对比,建议给出适合不同截面形式的钢管再生混凝土偏压长柱的极限承载力的设计规程。

1 试验概况

1.1 试验材料

本试验所采用的材料为直焊缝焊接圆形、方形钢管,海螺牌 P.O 42.5R 级水泥,普通天然河砂,城市自来水以及天然粗骨料和再生粗骨料。天然粗骨料采用连续级配的碎石,再生粗骨料以服役 50 年后的 C30 混凝土电杆经过人工破碎而得。再生粗骨料和天然粗骨料采用同一筛网筛分,最大粒径为 30mm,均为连续级配。再生粗骨料的取代率以 0% 为基准、50%为级差,混凝土试配强度为 C40。对于不同骨料取代率的再生混凝土,保持水泥、自来水、砂完全相同,在粗骨料质量不变的前提下改变天然粗骨料与再生粗骨料的组成成分。混凝土的配合比及实测强度见表 1。依标准试验方法测得圆形钢管的屈服强度、极限抗拉强度分别为 345.9MPa、455.6MPa,弹性模量为 2.05×10^5 MPa,方形钢管的屈服强度、极限抗拉强度分别为 303.27MPa、394.09MPa,弹性模量为 2.06×10^5 MPa。

表 1 混凝土的配合比及实测强度
Table Mix proportion of concrete and measured strength

取代率/(%)	水灰比	砂率/(%)	水/kg	水泥/kg	砂/kg	天然粗骨料/kg	再生粗骨料/kg	$f_{cu,k}/(N/mm^2)$	
								圆形试件	方形试件
0	0.42	32	205	488	546	1161	0.0	46.04	45.5
50	0.42	32	205	488	546	580.5	580.5	48.07	42.5
100	0.42	32	205	488	546	0.0	1161	45.18	44.5

1.2 试件设计与制作

设计了 20 个试件, 其中圆钢管和方钢管再生混凝土偏压长柱试件各 10 个, 考虑了骨料取代率(γ)、长细比(λ)和偏心距(e)这 3 个变化参数。 γ 有 0%、50%、100%这 3 种情况; 圆钢管再生混凝土试件长细比分别取 31.3、38.3 和 52.2, 偏心距分别为 0mm、15mm、30mm; 方钢管再生混凝土试件长细比分别取 34.64、43.3 和 51.96, 偏心距分别为 0mm、20mm、40mm。圆钢管外径为 113.5mm, 管壁厚度为 3.0mm, 方钢管边长为 120mm, 管壁厚度为 2.45mm。钢管切割后, 首先在下端部焊接 8mm 厚钢板作为端板, 混凝土采用自搅拌立式浇筑的方式, 经过振捣密实, 养护一段时间后, 在上端部焊接 8mm 厚钢端板, 焊接前用水泥浆找平。试件设计参数见表 2。其中, L 为试件高度; 圆钢管试件长细比 $\lambda = 4L_0/D$, L_0 为计算高度; 方钢管试件长细比 $\lambda = 2\sqrt{3}L_0/B$, B 为方钢管边长; 套箍系数 $\theta = A_{sk}f_y/A_c f_{ck}$, A_s 、 A_c 分别为钢管、混凝土的截面面积, f_{yk} 、 f_{ck} 分别为实测的钢管屈服强度、混凝土轴心抗压强度; N_u 为试件的极限承载力。

表 2 试件设计参数及部分试验结果

Table 2 Design parameters of specimen and test results

序号	L/mm	取代率 $\gamma/(\%)$	长细比 λ	偏心距 e/mm	套箍系数 θ	N_u/kN
C-1	1100	0	38.26	15	1.935	656.0
C-2	1100	0	38.26	30	1.935	444.5
C-3	1100	50	38.26	15	1.853	650.6
C-4	1100	50	38.26	30	1.853	506.6
C-5	900	100	31.30	15	1.972	620.8
C-6	900	100	31.30	30	1.972	478.4
C-7	1100	100	38.26	15	1.972	590.0
C-8	1100	100	38.26	30	1.972	436.8
C-9	1500	100	52.17	15	1.972	556.8
C-10	1500	100	52.17	30	1.972	416.6
S-1	1200	0	34.64	20	0.87	642.9
S-2	1200	0	34.64	40	0.87	423.4
S-3	1200	50	34.64	20	0.93	612.5
S-4	1200	50	34.64	40	0.93	466.5
S-5	1200	100	34.64	20	0.89	615.4
S-6	1200	100	34.64	40	0.89	458.6
S-7	1500	100	43.30	20	0.89	617.4
S-8	1500	100	43.30	40	0.89	431.2
S-9	1800	100	51.96	20	0.89	566.4
S-10	1800	100	51.96	40	0.89	407.7

1.3 加载制度及量测方法

试验采用 10000kN 压力试验机加载。试件上、下端部均用圆形铰与压力机连接, 试件的应变由轴向和环向应变片测得, 试件的纵向变形由设置于上、下承压板的百分表测得, 侧向弯曲挠度由设在

同一弯曲平面内的百分表测得, 试验装置见图 1、图 2。采用荷载和位移混合控制的加载制度。在荷载达到预估极限荷载 P_u 以前, 以分级加载, 每级取预估极限荷载的 1/20, 并持荷 2min~3min; 试件接近预估极限破坏时则转为位移控制, 控制的位移级差为 1mm, 当承载能力开始下降时, 慢速加载, 直至试件的承载力下降至 70% P_u , 试验结束。

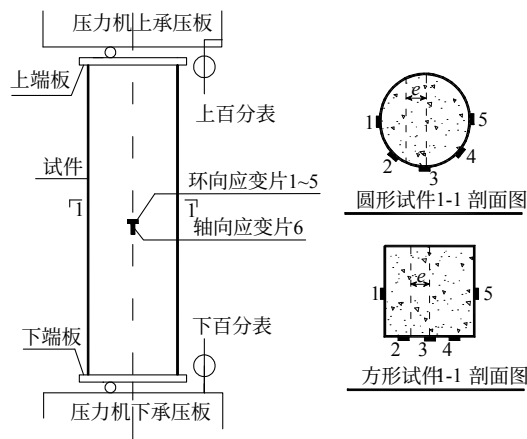


图 1 试验装置示意图

Fig.1 Test equipment diagram



图 2 试验装置实拍照片

Fig.2 Test equipment photo

2 试验结果及分析

2.1 破坏过程及破坏形态

试件的破坏过程均表现为弹性、弹塑性和破坏 3 个阶段。加载初期, 试件处于弹性阶段, 钢管应力较小; 当荷载增加到(60%~80%) P_u 时, 钢管端部表面上出现屈服线, 尤其是方钢管再生混凝土试件, 端部屈服线较为明显; 加载末期, 因圆钢管对核心混凝土的约束效应较强, 受长细比影响, 破坏发生在试件中部。破坏时试件整体屈曲失稳, 但钢管已达到屈服应变, 其破坏形态属于弹塑性失稳破坏; 而对于方钢管再生混凝土试件 S-1、试件 S-2、试件 S-3、试件 S-4、试件 S-5、试件 S-6, 因方钢

管对核心混凝土的约束效应较弱,且长细比较小,端部屈曲,但钢管亦达到屈服应变,出现弹塑性失稳破坏,而试件 S-8、试件 S-9、试件 S-10 因长细比较大,受二阶效应影响,端部屈曲较轻,试件主要因中部挠度过大而发生整体屈曲失稳破坏,试件 S-7 长细比虽大,但与试件 S-14 相比,偏心距较小,发生了局部屈曲失稳破坏。对于方钢管再生混凝土试件,不论是整体屈曲失稳破坏亦或是局部屈曲失稳破坏,钢管应变均达到了屈服应变,破坏形态属于弹塑性失稳破坏。各试件外部钢管的破坏形态见图 3,核心混凝土的破坏形态见图 4。

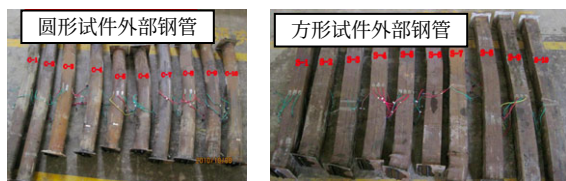


图 3 外部钢管破坏形态

Fig.3 Failure modes of external steel tubular

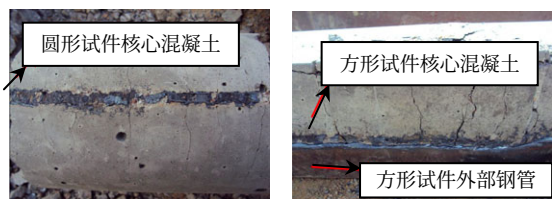
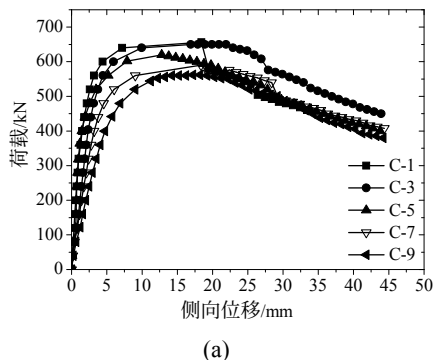


图 4 核心混凝土破坏形态

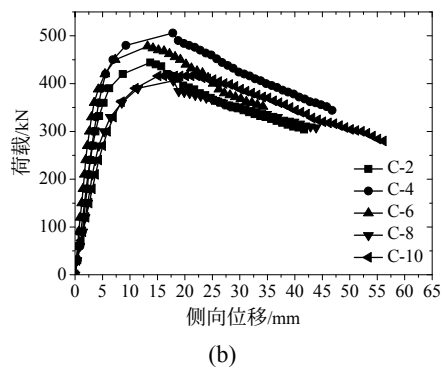
Fig.4 Failure modes of core concrete

2.2 荷载-位移关系曲线

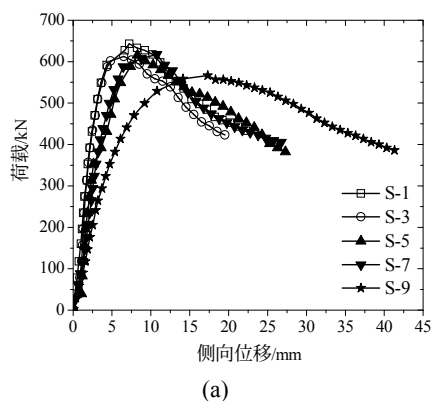
利用试件侧面位移计获取偏心受压试件的轴向荷载-跨中侧向位移($N-f$)曲线,如图 5、图 6 所示。可以看出,实测的试件荷载-跨中侧向位移曲线形状较为相似,随着荷载的增加,侧向挠度不断增大,达到极限荷载之后,荷载下降较为平缓,侧向挠度增大较快。从图 5、图 6 中还可以看出,圆钢管再生混凝土试件曲线图形较为饱满,而方钢管再生混凝土试件曲线图形大部分出现了尖点,延性弱于圆钢管再生混凝土试件。而且,同一截面形式、不同偏心距下,曲线图形的饱满程度亦不一样。对于圆



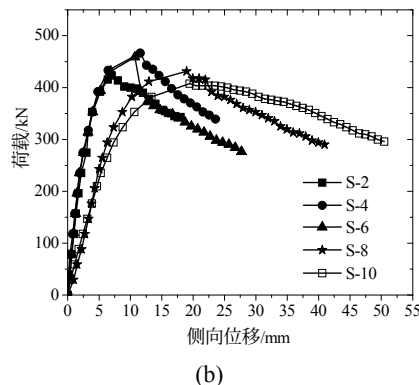
(a)



(b)

图 5 $e=15\text{mm}$ 、 $e=30\text{mm}$ 圆形试件 $N-f$ 曲线Fig.5 $N-f$ curves of cyclic specimens with $e=15\text{mm}$, $e=30\text{mm}$ 

(a)



(b)

图 6 $e=20\text{mm}$ 、 $e=40\text{mm}$ 方形试件 $N-f$ 曲线Fig.6 $N-f$ curves of square specimens with $e=20\text{mm}$, $e=40\text{mm}$

钢管再生混凝土试件,偏心距较大的试件延性小于偏心距较小的试件,对于方钢管再生混凝土试件,偏心距较大的试件延性大于偏心距较小的试件。

2.3 偏压试件的荷载-轴向应变关系曲线

通过试件中部粘贴的应变计可获取偏压试件加载过程中的轴向应变,实测荷载-轴向应变($N-\epsilon$)曲线如图 7~图 10 所示,其中,图中 1~5 表示钢管跨中竖向应变片读数,具体粘贴位置见图 1。可见:

1) 不论是圆形 RACFST 试件或是方形 RACFST 试件,偏压试件破坏时截面的应变部分受压、部分受拉,受压应变均达到了屈服应变,受拉应变计的数量与偏心矩有关。偏心距越大,处于受拉状态

的应变计数量越多, 并且破坏时的拉应变值也越高, 且圆形 RACFST 试件的拉应变基本上全部达到了屈服应变, 而方形 RACFST 试件的拉应变部分达到了屈服应变。

2) 对比两种截面形式的荷载-应变曲线, 不管是受压应变或者是受拉应变, 只有圆形试件出现了较长的流幅, 其原因是圆形钢管与核心混凝土协同工作性能好, 其对核心混凝土的约束效果较优, 外部钢管受力较为均匀, 钢材性能得到充分发挥。

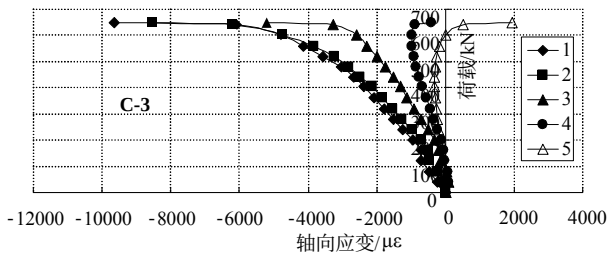


图7 $e=15\text{mm}$ 部分圆形试件 $N-\varepsilon$ 曲线

Fig.7 $N-\varepsilon$ curves of partial cyclic specimens with $e=15\text{mm}$

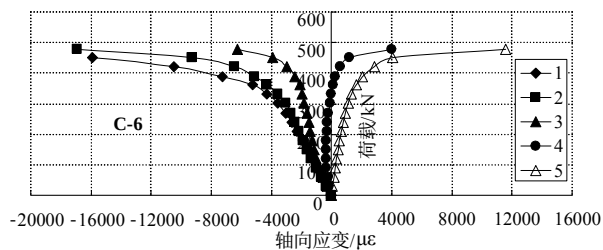


图8 $e=30\text{mm}$ 部分圆形试件 $N-\varepsilon$ 曲线

Fig.8 $N-\varepsilon$ curves of partial cyclic specimens with $e=30\text{mm}$

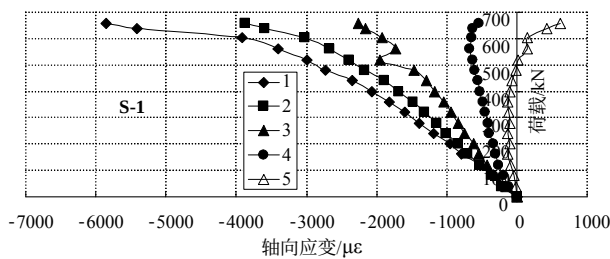


图9 $e=20\text{mm}$ 部分方形试件 $N-\varepsilon$ 曲线

Fig.9 $N-\varepsilon$ curves of partial square specimens with $e=20\text{mm}$

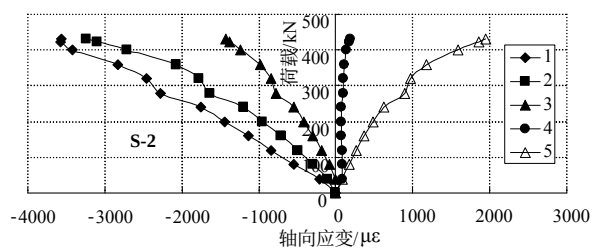
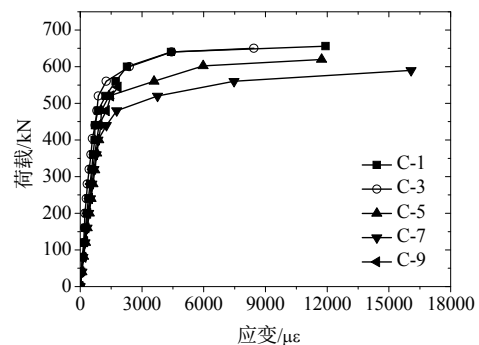


图10 $e=40\text{mm}$ 部分方形试件 $N-\varepsilon$ 曲线

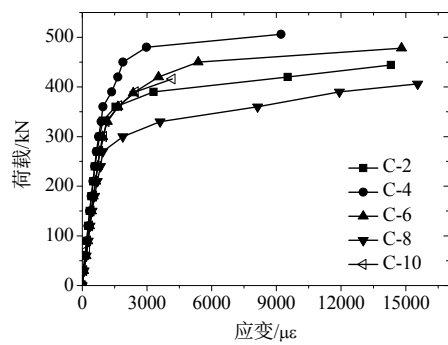
Fig.10 $N-\varepsilon$ curves of partial square specimens with $e=40\text{mm}$

2.4 偏压试件的荷载-环向应变关系曲线

通过在试件中部粘贴的环向应变片获取了偏压试件在受力过程中的圆形试件、方形试件的环向应变值, 试验实测的圆形试件荷载-环向应变曲线如图 11 所示。图 11 中, 荷载较小时, 荷载与钢管环向应变之间基本保持线性发展关系, 但当荷载接近 $(0.7\sim 0.8)P_u$ 时, 开始转变为非线性, 并且对应的临界值与试件的偏心距有关, 偏心距越大, 试件的临界转变荷载值小, 偏心距 $e=30\text{mm}$ 时, 临界转变荷载值约为 $0.7P_u$, 偏心距 $e=15\text{mm}$ 时, 临界转变荷载值约为 $0.8P_u$, 其主要原因是这可能与偏心矩较大时, 处于受压侧混凝土较早地被压碎有关。当试件达到 P_u 时, 偏压试件的钢管环向拉应变值均能达到屈服值。



(a)

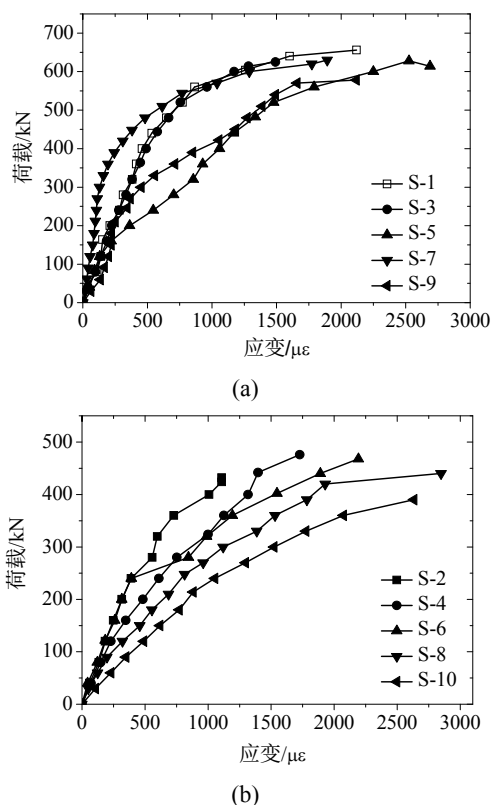


(b)

图11 $e=15\text{mm}$ 、 $e=30\text{mm}$ 圆形试件 $N-\varepsilon'$ 曲线

Fig.11 $N-\varepsilon'$ curves of $e=15\text{mm}$ and $e=30\text{mm}$

试验实测方形试件荷载-环向应变曲线如图 12 所示。图 12 中, 从加载开始到试件达到极限承载力, 荷载与钢管环向应变之间基本保持线性发展关系, 环向应变并没有经历塑性发展阶段, 其主要原因是方钢管对核心混凝土的约束作用较弱, 使外部钢管受到的切向拉应力不均匀, 方钢管材料性能发挥不充分, 但环向应变均达到了屈服应变。

图 12 $e=20\text{mm}$ 、 40mm 方形试件 $N-\varepsilon'$ 曲线Fig.12 $N-\varepsilon'$ curves of with $e=20$ and $e=40\text{mm}$

2.5 偏压试件截面应变沿高度分布

选取有代表性的试件 C-7、试件 C-8、试件 S-7、试件 S-8 分析应变沿截面高度分布情况, 如图 13

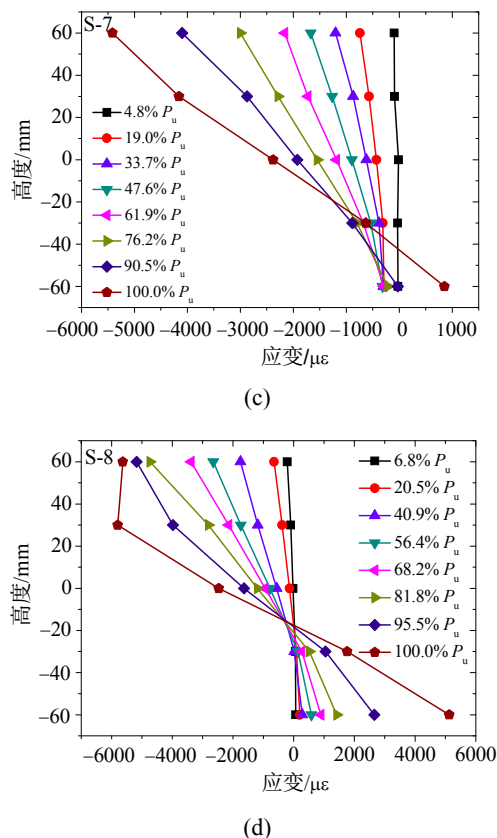
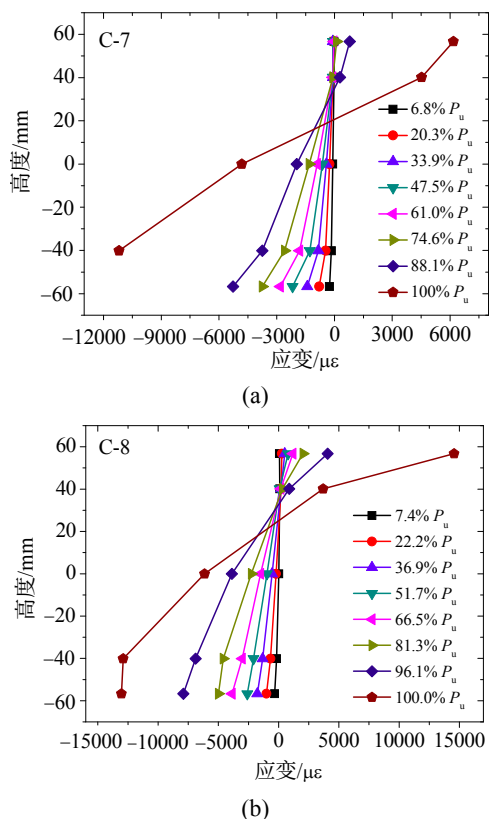


图 13 跨中截面纵向应变沿截面高度分布

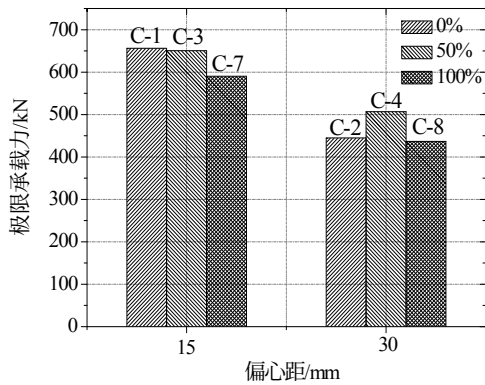
Fig.13 Section strain longitudinal distribution along height

所示。可以看出, 在加载过程中跨中截面平均应变基本符合平截面假定。加载初期, 平均应变的线性关系优于加载后期, 表明钢管与再生混凝土协同工作性能较好; 加载末期, 受破坏形态的影响, 应变沿截面高度分布呈现出非线性发展的趋势。

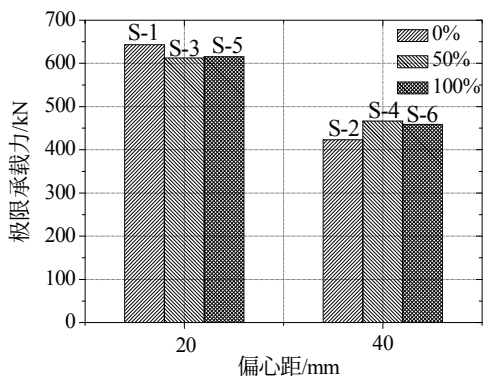
3 影响因素分析

3.1 再生粗骨料取代率的影响

图 14 分别给出了相同长细比、相同偏心距下, 圆形试件与方形试件极限承载力随取代率的变化情况。图 14(a)中, $e=15\text{mm}$ 时, 取代率分别为 0%、50%、100% 的试件的极限承载力变化幅度为 -0.8%、-9.3%, $e=30\text{mm}$ 时, 取代率分别为 0%、50%、100% 的试件的极限承载力变化幅度为 14.0%、-13.8%; 图 14(b)中, $e=20\text{mm}$ 时, 取代率分别为 0%、50%、100% 的试件的极限承载力变化幅度为 -4.7%、0.5%, $e=40\text{mm}$ 时, 取代率分别为 0%、50%、100% 的试件的极限承载力变化幅度为 10.2%、-1.7%。可见, 对于圆形 RACFST 试件和方形 RACFST 试件, 取代率对极限承载力有一定影响, 但并不显著, 没有明显的统一规律。



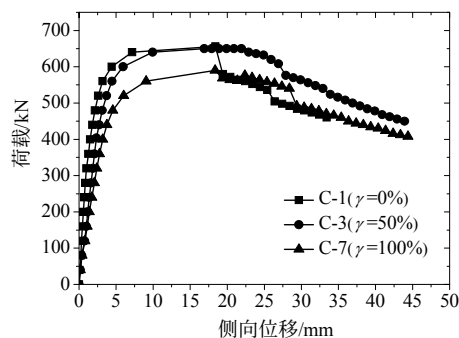
(a)



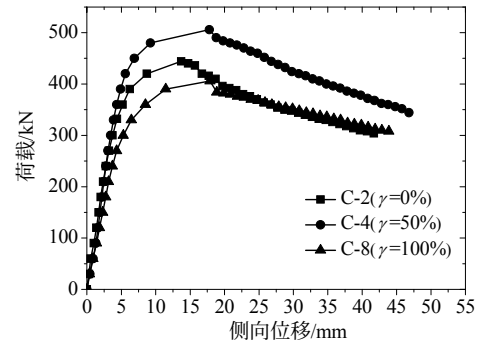
(b)

图 14 圆形、方形试件不同取代率极限承载力
Fig.14 Ultimate bearing capacity of replacement rates

图 15 分别给出了长细比 $\lambda=38.26$ 时, 相同偏心距不同取代率的圆钢管试件荷载与挠度曲线。图 16 分别为 $\lambda=34.64$ 时, 相同偏心距不同取代率的方钢管试件荷载与挠度曲线。可以看出, 偏心距和长细比相同, 不同取代率的钢管再生混凝土偏压柱的荷载与中部侧向挠度关系走势基本一致。当接近破坏时, 试件的侧向变形发展很快, 下降段曲线平缓, 延性较好。其中对于取代率为 100% 的试件, 较其他试件更为缓慢, 呈现随着取代率的提高, 再生混凝土的延性略有增强的现象, 这可能与再生粗骨料表面粘附着旧的水泥胶体具有更好的耗能能力有关。

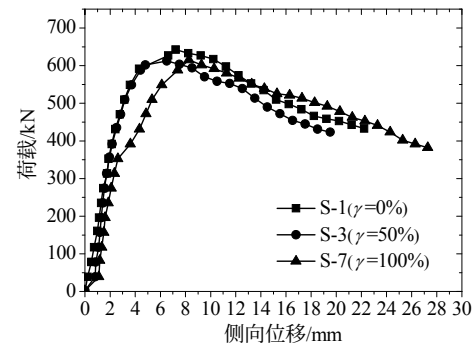


(a)

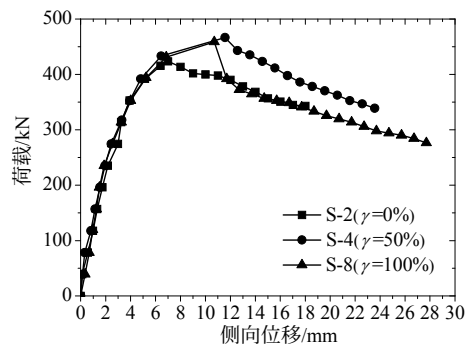


(b)

图 15 $e=15\text{mm}$ 、 $e=30\text{mm}$ 圆形试件的 $N-f$ 曲线
Fig.15 $N-f$ curves of $e=15\text{mm}$ and $e=30\text{mm}$



(a)



(b)

图 16 $e=20\text{mm}$ 、 $e=40\text{mm}$ 方形试件的 $N-f$ 曲线
Fig.16 $N-f$ curves of $e=20\text{mm}$ and $e=40\text{mm}$

3.2 长细比的影响

图 17 分别给出了所有取代率 100% 圆形、方形试件在不同偏心距、长细比下的极限承载力。图 17(a) 中, 试件 C-5、试件 C-7、试件 C-9 的极限承载力变化幅度为 -5.0%、-5.6%, 试件 C-6、试件 C-8、试件 C-10 的极限承载力变化幅度为 -8.7%、-4.6%; 图 17(b) 中, 试件 S-5、试件 S-7、试件 S-9 的极限承载力变化幅度为 0.3%、-8.3%, 试件 S-6、试件 S-8、试件 S-10 的极限承载力变化幅度为 -6.0%、-5.5%。可见, 在相同偏心距相同取代率下, 试件的极限承载力均随长细比增加而逐渐降低。

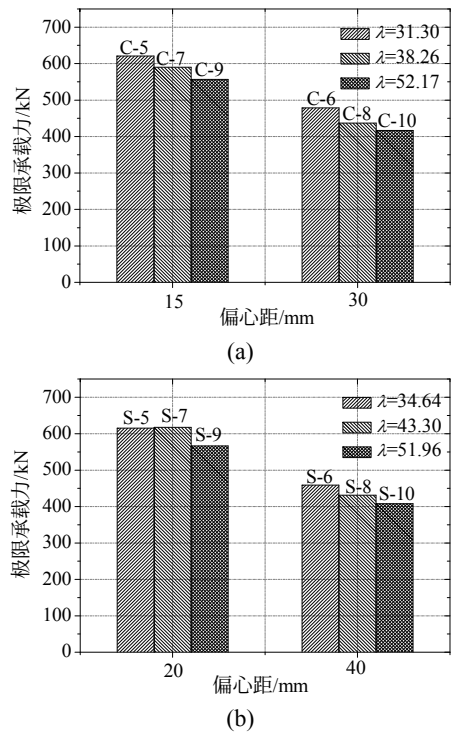


图 17 圆形、方形试件极限承载力
Fig.17 Ultimate bearing capacity of circular specimens and square specimens

3.3 偏心距的影响

图 17 分别为骨料取代率为 100%的不同长细比的圆形试件和方形试件在不同偏心距下的极限承载力对比图。图 17(a)中,对于 $\lambda=31.30$ 的试件,当偏心距由 15mm 增大到 30mm 时,极限承载力下降幅度约为 22.9%;对于 $\lambda=38.26$ 的试件,当偏心距由 15mm 增大到 30mm 时,极限承载力下降幅度约

为 25.9%;对于 $\lambda=52.17$ 的试件,当偏心距由 15mm 增大到 30mm 时,极限承载力下降幅度为 25.1%。图 17(b)中,对于 $\lambda=34.64$ 的试件,当偏心距由 20mm 增大到 40mm 时,极限承载力下降幅度约为 25.5%;对于 $\lambda=43.3$ 的试件,当偏心距由 20mm 增大到 40mm 时,极限承载力下降幅度约为 30.2%;对于 $\lambda=51.96$ 的试件,当偏心距由 20mm 增大到 40mm 时,极限承载力下降幅度约为 28%。由此可见,不论是圆形 RACFST 试件抑或是方形 RACFST 试件,在取代率和长细比相同的情况下,随着偏心距的增大,极限承载力下降。综合上述 3.2 节分析可知,在长细比和偏心距之间,极限承载力对偏心距更加敏感,即偏心距是影响极限承载力的主要因素。

4 承载力计算

目前,国内外对钢管再生混凝土进行了大量研究并取得了一定成果,各国均编写了相关规范,如我国关于圆钢管混凝土规程的 CECS28:99^[10], DBJ 13-51-2003^[11], DL/T 5085-1999^[12];方钢管混凝土规程 CECS159:2004^[13], DBJ 13-51-2003, GJB4 142-2000(2001)^[14];美国规范 AISC-LRFD(1999)^[15],英国规范 BS5400(2005)^[16]以及日本规范 AIJ1997^[17]等。本文基于试验实测数据,利用上述各规范或规程,计算试件的极限承载力,并将计算结果 N_u^c 与实测结果 N_u^t 进行对比分析,圆形试件对比结果及统计特征值见表 3、表 4,方形试件对比结果及统计特征值见表 5、表 6。

表 3 圆形试件实测数据与计算数据对比结果
Table 3 Contrast result between measured data and calculate data of cycled specimens

编号	N_u^t /kN	CECS28:90		DL/T 5085- 1999		DBJ13-51-2003		AISC-LRFD (1999)		BS5400 (2005)		AIJ1997	
		N_u^c /kN	N_u^t / N_u^c	N_u^c /kN	N_u^t / N_u^c	N_u^c /kN	N_u^t / N_u^c	N_u^c /kN	N_u^t / N_u^c	N_u^c /kN	N_u^t / N_u^c	N_u^c /kN	N_u^t / N_u^c
C-1	656.0	610.1	1.075	595.6	1.024	559.8	1.172	283.2	2.154	381.1	1.721	574.6	1.142
C-2	444.5	457.3	0.972	433.5	1.055	434.5	1.023	213.2	2.145	283.1	1.570	524.5	0.847
C-3	650.6	620.2	1.049	608.1	1.020	574.9	1.132	286.4	2.166	374.3	1.738	589.9	1.103
C-4	506.6	464.8	1.090	442.6	1.050	446.6	1.134	215.1	2.161	279.2	1.814	539.9	0.938
C-5	620.8	644.6	0.963	595.4	1.083	557.9	1.113	294.8	2.187	405.1	1.532	579.9	1.071
C-6	478.4	483.1	0.990	433.2	1.115	432.9	1.105	219.8	2.198	305.7	1.565	527.9	0.906
C-7	590.0	605.9	0.974	590.4	1.026	553.5	1.066	281.8	2.150	368.3	1.602	567.9	1.039
C-8	436.8	454.1	0.962	429.7	1.057	429.4	1.017	212.4	2.138	275.1	1.588	517.8	0.844
C-9	556.8	543.5	1.025	519.8	1.046	480.6	1.159	249.3	2.180	310.2	1.795	526.4	1.058
C-10	416.6	407.3	1.023	389.5	1.046	382.5	1.089	193.5	2.105	229.8	1.813	481.2	0.866

表 4 圆形试件对比结果的统计特征
Table 4 Contrast result demographic characteristics of cycled specimens

统计特征值(N_u/N_c)	CECS 28:90	DL/T5085-1999	DBJ13-51-2003	AISC-LRF D (1999)	BS5400 (2005)	AIJ1997
平均值(μ)	1.012	1.052	1.101	2.156	1.674	0.981
方差(D)	0.0022	0.0008	0.0028	0.0007	0.0128	0.0128
变异系数(C_r)	0.047	0.027	0.048	0.012	0.068	0.116

表5 方形试件试验数据与计算数据对比结果

Table 5 Contrast result between measured data and calculate data of square specimens

编号	N_u^t / kN	CECS159:2004		GJB4142-2000 (2001)		DBJ 13-51-2003		AISC-LRFD (1999)		BS5400 (2005)		AIJ1997	
		N_u^c / kN	N_u^t / N_u^c	N_u^c / kN	N_u^t / N_u^c	N_u^c / kN	N_u^t / N_u^c	N_u^c / kN	N_u^t / N_u^c	N_u^c / kN	N_u^t / N_u^c	N_u^c / kN	N_u^t / N_u^c
S-1	642.9	588.9	1.09	679.6	0.95	630.6	1.02	366.8	1.75	368.7	1.74	466.4	1.38
S-2	423.9	456.8	0.93	529.2	0.80	466.4	0.91	249.4	1.70	271.5	1.56	360.4	1.17
S-3	612.5	567.0	1.08	639.2	0.96	601.2	1.02	359.3	1.70	360.3	1.70	429.9	1.42
S-4	466.5	439.8	1.06	500.4	0.93	444.7	1.05	245.9	1.90	266.1	1.75	322.5	1.45
S-5	615.5	581.6	1.06	665.9	0.92	620.8	0.99	364.3	1.69	365.9	1.68	454.2	1.35
S-6	458.6	451.1	1.02	519.5	0.88	459.1	1.00	248.3	1.85	269.7	1.70	347.5	1.32
S-7	617.4	536.8	1.15	595.7	1.04	587.2	1.05	358.2	1.72	349.7	1.77	581.4	1.06
S-8	431.2	412.9	1.04	475.3	0.91	432.2	1.00	245.5	1.76	254.9	1.69	318.7	1.35
S-9	566.4	486.1	1.17	526.9	1.07	554.4	1.02	350.8	1.61	333.7	1.70	588.4	0.96
S-10	407.7	370.7	1.10	429.9	0.95	406.5	1.00	241.9	1.69	240.9	1.69	294.2	1.39

表6 方形试件对比结果的统计特征

Table 6 Contrast result demographic characteristics of square specimens

统计特征(N_u^t/N_u^c)	CECS159:2004	GJB4142-2000 (2001)	DBJ13-51-2003	AISC-LRFD (1999)	BS5400 (2005)	AIJ1997
平均值(μ)	1.07	0.941	1.006	1.737	1.698	1.285
方差(D)	0.0046	0.0058	0.0016	0.0071	0.0032	0.0272
变异系数(C_v)	0.063	0.081	0.039	0.048	0.034	0.128

由表3、表4可见, 规程 AISC-LRFD(1999)、BS 5400(2005)计算结果比试验实测结果小, 偏于保守。而由规程 CECS28:90、DL/T 5085-1999、DBJ13-51-2003 以及 AIJ 1997 计算得到的圆形 RACFST 试件的极限承载力与试验实测数据离散性不大, 吻合较好。但规程 CECS28:90、AIJ1997 计算结果出现试验值小于计算值情况, 容易引起安全隐患, 建议采用 DL/T5085-1999 和 DBJ13-51-2003 设计圆形 RACFST 偏压试件的极限承载力。

由表5、表6可见, 规程 AISC-LRFD(1999)、BS5400(2005)、AIJ1997 计算结果大幅度地小于试验结果, 设计偏于保守。而由规程 CECS159:2004、GJB4142-2000(2001)、DBJ13-51-2003 计算得到的方形 RACFST 试件极限承载力计算结果与试验结果吻合较好, 但规程 GJB4142-2000(2001)总体上试验值略小于计算值, 容易引起安全隐患, 本文建议采用规程 CECS159:2004、DBJ13-51-2003 设计方形 RACFST 偏压试件的极限承载力。

5 结论

通过 10 根圆钢管再生混凝土长柱和 10 根方钢管再生混凝土长柱的偏压性能试验研究, 并对两种截面形式的极限承载力计算分析, 主要得到以下结论:

(1) 圆形 RACFST 偏压长柱和方形 RACFST 偏压长柱受力过程相似, 均经历了弹性阶段、屈服阶段和破坏阶段, 破坏形态基本一致: 圆形 RACFST

偏压长柱主要为因整体屈曲而发生弹塑性失稳破坏, 方形 RACFST 偏压长柱破坏形态主要表现为弹塑性失稳破坏。

(2) 相同长细比、相同偏心距、不同取代率的试件的极限承载力参差不齐, 取代率对 RACFST 柱的极限承载力有一定影响, 但并非显著, 没有明显的统一规律。

(3) 在相同偏心距、相同取代率下, 试件的极限承载力均随长细比增加而逐渐降低。

(4) 不论是圆形 RACFST 试件抑或是方形 RACFST 试件, 在取代率和长细比相同的情况下, 随着偏心距的增大, 极限承载力下降。

(5) 在长细比和偏心距之间, 极限承载力对偏心距更加敏感, 即偏心距是影响极限承载力的主要因素。

(6) 基于理论分析结果, 本文建议采用规程 DL/T5085-1999 和 DBJ13-51-2003 设计圆形 RACFST 偏压试件的极限承载力, 采用规程 CECS 159:2004、DBJ13-51-2003 设计方形 RACFST 偏压试件的极限承载力。

参考文献:

- [1] 肖建庄. 再生混凝土[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2008: 1—9.
Xiao Jianzhuang. Recycled aggregate concrete [M]. Beijing: China Building Industry Press, 2008: 1—9. (in Chinese)
- [2] 肖建庄, 李佳彬, 兰阳. 再生混凝土技术最新研究进

- 展与评述[J]. 混凝土, 2003(10): 17—20.
- Xiao Jianzhuang, Li Jiabin, Lan Yang. The latest research progress and comment on the technology of recycled concrete [J]. Concrete, 2003(10): 17—20. (in Chinese)
- [3] 刘数华, 冷发光. 再生混凝土技术[M]. 北京: 中国建材工业出版社, 2007: 1—17.
- Liu Shuhua, Leng Faguang. Technology of recycled aggregate concrete [M]. Beijing: China Building Materials Industry Press, 2007: 1—17. (in Chinese)
- [4] Mandal S, Gupta A. Strength and durability of recycled aggregate concrete [C]. Melbourne, Australia: Melbourne University, 2002.
- [5] 吴波, 刘伟, 刘琼祥, 许喆. 薄壁钢管再生混合短柱轴压性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2010, 31(8): 22—28.
- Wu Bo, Liu Wei, Liu Qiongxiang, Xu Zhe. Axial behavior of thin-walled steel stub columns filled with demolished concrete segment/lump [J]. Journal of Building Structures, 2010, 31(8): 22—28. (in Chinese)
- [6] 肖建庄, 杨洁, 黄一杰, 王正平. 钢管约束再生混凝土轴压试验研究[J]. 建筑结构学报, 2011, 32(6): 92—98.
- Xiao Jianzhuang, Yang Jie, Huang Yijie, Wang Zhengping. Experimental study on recycled concrete confined by steel tube under axial compression [J]. Journal of Building Structures, 2011, 32(6): 92—98. (in Chinese)
- [7] 杨有福. 钢管再生混凝土构件力学性能和设计方法若干问题的探讨[J]. 工业建筑, 2006, 36(11): 1—5, 10.
- Yang Youfu. Discussion on several problems of mechanical behavior and design method of recycled concrete-filled steel tubular members [J]. Industrial Construction, 2006, 36(11): 1—5, 10. (in Chinese)
- [8] 邱慈长, 王清远, 石霄爽, 欧阳雯欣. 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, Ouyang Wenxin. 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] Konno K, Sato Y, Kakuta Y, et al. Property of recycled concrete column encased by steel tube subjected to axial compression [J]. Transactions of the Japan Concrete Institute, 1997, 19(2): 231—238.
- [10] CECS 28:90, 钢管混凝土结构设计与施工规程[S]. 北京: 中国计划出版社, 1992.
- CECS 28:90, Specification for design and construction of concrete-filled steel tubular structures [S]. Beijing: China Planning Press, 1992. (in Chinese)
- [11] DBJ 13-51-2003, 钢管混凝土结构技术规程[S]. 福州, 2003.
- DBJ 13-51-2003, Technical specification for concrete-filled steel tubular [S]. Fuzhou, 2003. (in Chinese)
- [12] DL/T 5085-1999, 钢-混凝土组合结构设计规程[S]. 北京: 中国电力出版社, 1999.
- DL/T 5085-1999, Code for design of steel-concrete composite structure [S]. Beijing: China Electric Power Press, 1999. (in Chinese)
- [13] CECS 159:2004, 矩形钢管混凝土结构技术规程[S]. 北京: 中国计划出版社, 2004.
- CECS 159:2004, Technical specification for structures with concrete filled rectangular steel tube members [S]. Beijing: China Planning Press, 2004. (in Chinese)
- [14] GJB 4142-2000, 战时军港抢修早强型组合结构技术规程[S]. 北京: 中国人民解放军总后勤部, 2001.
- GJB 4142-2000, Technical specifications for early-strength model composite structure used for naval port emergency repair in wartime [S]. Beijing: People's Liberation Army General Logistics Department, 2001. (in Chinese)
- [15] AISC-LRFD. Load and resistance factor design specification for structural steel buildings [S]. 2nd ed. Chicago, USA: American Institute of Steel Construction (AISC), 1999.
- [16] BS 5400, Steel, concrete and composite bridges, Part 5: Code of practice for design of composite bridges [S]. London, UK: Brltky Standards Institutions, 2005.
- [17] AIJ. Recommendations for design and construction of concrete filled steel tubular structures [S]. Tokyo, Japan: Architectural Institute of Japan, 1997.