

# 钢套管再生混凝土加固钢筋混凝土柱偏压性能\*

陈庆军<sup>1,2†</sup>,黎哲<sup>1</sup>,蒙何彬<sup>1</sup>,蔡健<sup>1,2</sup>,何岸<sup>1</sup>,左志亮<sup>1</sup>,潘忠尧<sup>1</sup>

(1. 华南理工大学 土木与交通学院,广东 广州 510641;2. 亚热带建筑科学国家重点实验室,广东 广州 510641)

**摘要:**为达到绿色建筑的目的,提出采用钢套管再生混凝土加固钢筋混凝土柱的思路,并完成1个未加固柱、3个加固柱的轴压试验以及8个加固柱的偏压试验.结果表明:采用钢套管再生混凝土加固后,试件偏压承载力及变形性能均有显著提高,各试件平均相对承载力提高倍数达1.12倍;再生粗骨料取代率对加固试件偏压承载力的影响不明显,而偏心较大时钢管中部截面应变随取代率的提高呈微弱增长;原柱初始应力的存在使得加固试件承载力峰值提前出现,且对其变形产生不利影响;偏心程度对加固试件的影响和普通钢管混凝土类似,随偏心距的增大,试件的承载力降低而钢管受压侧应变增大,且这种规律有随粗骨料取代率增加而增强的趋势.最后,通过对比国内外不同规范和学者提出的公式,采用EC4规范计算所得结果与钢套管再生混凝土加固柱偏压承载力试验结果吻合较好.

**关键词:**钢套管;再生混凝土;加固;偏压试验

**中图分类号:**TU398.9

**文献标志码:**A

## Behavior of Steel-jacket Retrofitted Column with Recycled Aggregate Concrete under Eccentric Loading

CHEN Qingjun<sup>1,2†</sup>, LI Zhe<sup>1</sup>, MENG Hebin<sup>1</sup>, CAI Jian<sup>1,2</sup>, HE An<sup>1</sup>, ZUO Zhiliang<sup>1</sup>, PAN Zhongyao<sup>1</sup>

(1. School of Civil Engineering and Transportation, South China University of Technology, Guangzhou 510641, China;

2. State Key Laboratory of Subtropical Building Science, Guangzhou 510641, China)

**Abstract:** In order to achieve the goal of green building, the idea of steel-jacket retrofitted RC columns with recycled aggregate concrete was proposed. Tests of 1 original column, 3 retrofitted columns under axial compressive loading and 8 retrofitted columns under eccentric loading were conducted. It is found that after retrofitted by steel-jacket and recycled aggregate concrete, the bearing capacity and deformation performance of the RC column are significantly improved, where the relative bearing capacity is increased by 1.12 times on the average. The effect of recycled coarse aggregate replacement ratio on eccentric bearing capacity is not obvious, while the mid-span strain of steel-jacket increases slightly when the replacement ratio grows under large eccentricity. The peak loads of the retrofitted column with preload appear earlier, which shows a negative effect on deformation performance. Besides, the influence of the eccentricity is similar to that of the concrete-filled steel tubular column: as the eccentricity increases, the bearing capacity

\* 收稿日期:2017-01-14

基金项目:国家自然科学基金青年科学基金资助项目(51408230), National Natural Science Foundation of China(51408230); 华南理工大学亚热带建筑科学国家重点实验室自主研究课题资助项目(2015ZC18), State Key Lab of Subtropical Building Science, South China University of Technology(2015ZC18)

作者简介:陈庆军(1975-),男,广东潮州人,华南理工大学副教授,博士

† 通讯联系人, E-mail: qjchen@scut.edu.cn

decreases and the compression-side strain of steel-jacket increases, and this trend becomes stronger when the replacement ratio increases. Finally, according to the comparison of design codes and the researches, eccentric bearing capacity calculated by EC4 is most consistent with the test results for this kind of retrofitted columns.

**Key words:** steel jacket; recycled aggregate concrete; strengthening; eccentric compression test

随着时代的变迁,许多早期的建筑结构由于老化和侵蚀而面临安全性能逐渐降低的问题。而框架柱是影响框架结构安全的关键因素,考虑到经济和使用问题,对其进行加固而非推倒重建是合理可行的。传统的混凝土柱加固法主要有增大截面加固法、外加预应力加固法、粘贴纤维复合材料加固法等<sup>[1]</sup>。近十几年来,钢套管加固钢筋混凝土柱的方法因其优越的性能受到广泛关注。钢套管加固的研究在国外起步较早,Tomii等<sup>[2]</sup>提出的钢套管加固构造中,钢管仅起套箍及抗剪作用。Chai等<sup>[3-4]</sup>对采用圆钢套管进行抗剪加固的钢筋混凝土圆柱进行低周反复试验。Priestley等<sup>[5]</sup>对椭圆套管加固柱进行研究,并将其应用于加利福尼亚州的桥梁加固工程中。Xiao等<sup>[6]</sup>采用局部加劲钢套管预防加固柱发生脆性剪切破坏。国内方面,蔡健等<sup>[7-10]</sup>对29个考虑初始应力的圆钢套管加固钢筋混凝土方柱进行轴压和偏压试验研究,并给出相关计算公式。卢亦焱等<sup>[11-15]</sup>使用高流态自密实混凝土改善浇筑质量,进行了一系列钢套管加固圆柱的轴压、偏压试验。以上研究均表明钢套管加固法能有效提高待加固柱的承载力、刚度和变形能力,尤其是对偏心等复杂受力的情况,其加固效果特别明显。

另一方面,据统计,我国每年因建筑物拆除而产生的建筑垃圾超过15亿吨,其中绝大部分为废弃混凝土。而再生混凝土的出现,为实现建筑可持续发展提供了一条有效途径。目前,国内外学者针对再生混凝土的材料性能及其力学改性进行了大量研究<sup>[16-17]</sup>,已有研究表明,钢管约束可较好地改善再生混凝土力学性能上的劣势<sup>[18]</sup>。Yang等<sup>[19-20]</sup>在对比试验中发现,钢管再生混凝土柱和普通钢管混凝土柱均由于整体屈曲而发生破坏,但前者的承载力稍小。陈宗平等<sup>[21]</sup>在偏压静力加载试验中发现钢管再生混凝土柱的受力过程及破坏形态均与普通钢管混凝土柱类似。吴波等<sup>[22-23]</sup>提出混凝土再生混合构件的概念,并对薄壁钢管再生混合柱进行了

一系列试验及理论研究。Xiao等<sup>[24]</sup>的试验表明再生混凝土的强度和变形性能在钢管约束下明显提升,而试件峰值承载力随再生粗骨料取代率的提高而降低。Wang等<sup>[25]</sup>对钢管再生混凝土柱的试验研究表明其峰值承载力比普通钢管混凝土柱的峰值承载力最多降低10%。以上研究表明在钢管的约束下,核心再生混凝土具有能与普通钢管混凝土相媲美的力学性能。然而,目前尚未见到将再生混凝土应用到结构加固领域的研究成果,而在加固柱子中考虑原柱轴力影响的研究也非常少见。

基于以上背景,课题组提出了钢套管再生混凝土加固柱的新概念,本文主要研究圆钢套管加固方形柱的情形。实际施工中,将两块半圆钢板于待加固柱处进行现场焊接或螺栓连接,形成套管,再生混凝土则通过设于套管上的浇捣口分批注入,并振捣密实。该方法以服役中的钢筋混凝土柱为对象,利用钢套管对核心混凝土的约束,有效克服再生混凝土强度较低、延性较差等缺陷,较大程度地改善待加固柱的强度及变形能力。既充分利用了废弃旧材料,又有效地实现了对既存建筑的再利用,减少重复建设,实现了“以废补旧”的绿色节能目标。

本文在前期圆钢套管再生混凝土加固方形钢筋混凝土柱轴压试验<sup>[26]</sup>的基础上,介绍12个圆钢套管再生混凝土加固方形钢筋混凝土柱的轴压及偏压试验(其中部分试件考虑原柱轴压力影响),讨论该新型加固柱的偏压力学性能,并采用国内外不同规范和学者提出的圆钢管混凝土柱承载力公式对加固试件的偏压承载力进行计算。

## 1 试验概况

### 1.1 试件设计

试件包括1个未加固的钢筋混凝土柱(B0)、3个钢套管加固钢筋混凝土轴压柱(A1~A3)以及8个钢套管加固钢筋混凝土偏压柱(B1~B8)。设计时考虑的主要参数包括:再生粗骨料取代率、偏心距及

原柱初始应力(轴压比). 钢管名义厚度为 4 mm, 实测值为 3.84 mm, 原柱截面尺寸为 200 mm × 200 mm. 试件大样见图 1, 试件的具体参数见表 1.

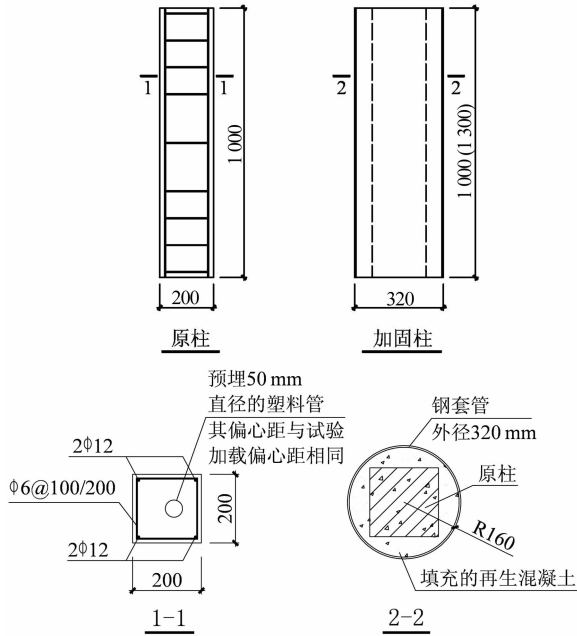


图 1 试件大样图

Fig. 1 The details of the specimen

试件的制作方法分 2 种:对于不考虑原柱初始应力的 A1~A3 及 B1~B6 试件,其做法为:在完成原柱混凝土的浇筑并养护 28 d 后,用高压水枪对原柱表面进行清洁,以保证新旧混凝土间的粘结<sup>[27]</sup>,再浇筑再生混凝土,再次养护 28 d 后完成试件制作.而对于试件 B7 和 B8,采用无粘结后张预应力法来实现初始应力的施加(如图 2 所示),具体做法为:①浇筑原柱混凝土时预留预应力孔道(图 2(a));②养护至原柱混凝土达设计强度后,采用精轧螺纹钢进行预应力张拉,并对实际的预压力值进行监控直至稳定(图 2(b));③对施加了预压力的原柱进行钢套管再生混凝土加固,并在加固柱的上下两端各设置一个短钢管以保护锚具(图 2(c)).

原柱混凝土采用 C30 商品混凝土,其立方体试块抗压强度实测值为  $f_{c1} = 34.2$  MPa. 再生混凝土采用 P.O42.5R 级水泥、普通天然河砂、自来水、天然粗骨料和再生粗骨料的配置,并现场搅拌.其中再生粗骨料来自广州某废弃混凝土回收厂,其粒径满足 5~20 mm 连续级配,表观密度为 2 656 kg/m<sup>3</sup>,实测吸水率为 9.37%. 加固混凝土的具体配合比参数见表 2,钢材的材料力学性能指标见表 3.

表 1 试件参数及试验结果

Tab. 1 Parameters and test results of the specimens

编号	$e$ /mm	$l$ /mm	$\eta$ /%	$n$	$f_{c2}$ /MPa	$E_c$ /MPa	$P_0$ /kN	组合套箍 系数 $\theta$	滑移线 或鼓曲	$P_s$ /kN 或 $P_b$ /kN	$P_u$ /kN	$P_s/P_0$ 或 $P_b/P_0$	$\epsilon_b$	$\epsilon_u$
B0	0	1 000	—	—	—	—	—	—	—	—	1 512	—	—	0.004 9
A1	0	1 000	0	0	29.8	29 029	4 127	0.81	较明显	4 855	4 941	0.98	0.020 0	0.007 6
A2	0	1 000	25	0	28.3	27 226	4 072	0.83	较明显	4 382	4 547	0.96	0.024 8	0.014 3
A3	0	1 000	50	0	27.0	26 605	4 024	0.84	较明显	4 527	4 538	1.00	0.020 2	0.007 9
B1	20	1 000	0	0	30.4	29 029	3 893	0.79	明显	3 600	4 444	0.81	0.003 9	0.011 4
B2	40	1 000	0	0	30.4	29 029	3 632	0.79	很明显	2 900	3 849	0.75	0.002 8	0.010 5
B3	20	1 000	25	0	28.3	27 226	3 816	0.82	很明显	3 600	4 562	0.79	0.003 5	0.022 6
B4	40	1 000	25	0	28.3	27 226	3 555	0.82	较明显	3 646	3 712	0.98	0.012 0	0.017 1
B5	20	1 000	50	0	28.2	26 605	3 812	0.82	很明显	4 372	4 478	0.98	0.004 9	0.005 6
B6	40	1 000	50	0	28.2	26 605	3 551	0.82	明显	3 000	3 948	0.76	0.003 1	0.016 1
B7	20	1 300	25	0.24	33.7	28 561	4 013	0.75	较明显	4 237	4 556	0.93	0.004 5	0.016 9
B8	40	1 300	25	0.10	33.7	28 561	3 752	0.75	较明显	3 804	3 813	1.00	0.005 0	0.005 5

注: $e$  为偏心距; $l$  为试件高度; $\eta$  为再生粗骨料取代率; $f_{c2}$  为加固混凝土立方体抗压强度; $E_c$  为加固混凝土弹性模量;组合套箍系数计算公式为: $\theta = f_s A_s / (0.76 f_{c1} A_{c1} + 0.76 f_{c2} A_{c2})$ ,其中, $f_s$  和  $A_s$  分别为钢管屈服强度与截面积, $f_{c1}$  为原柱混凝土立方体抗压强度,实测值 34.2 MPa, $A_{c1}$  为原柱混凝土截面积, $A_{c2}$  为加固混凝土截面积; $P_0$  为名义承载力,即原柱与加固材料截面承载力之和; $P_s$  为轴压试件钢管出现滑移线时的荷载值; $P_b$  为偏压试件钢管出现局部鼓曲时的荷载值; $P_u$  为峰值荷载; $\epsilon_b$  为钢管出现局部鼓曲时试件的平均纵向应变; $\epsilon_u$  为峰值荷载下试件的平均纵向应变;原柱轴压比  $n = P_{pre} / (0.76 f_{c1} A_{c1})$ , $P_{pre}$  为原柱初始轴压力.

表 2 加固混凝土配合比

Tab. 2 Mixing proportions of the retrofitted concrete

试件	设计强度	$\eta$ /%	水灰 质量比	砂率	水 /kg	水泥 /kg	砂 /kg	天然骨料 /kg	再生骨料 /kg
A1、B1、B2	C30	0	0.49	0.37	205	422	633	1 079	0
A2、B3、B4、B7、B8	C30	25	0.49	0.37	230	422	634	809	270
A3、B5、B6	C30	50	0.49	0.37	256	422	634	540	540

说明:由于搅拌机容量限制,不同批次搅拌的混凝土强度存在一定差异,各试件的加固混凝土强度实测值见表 1.

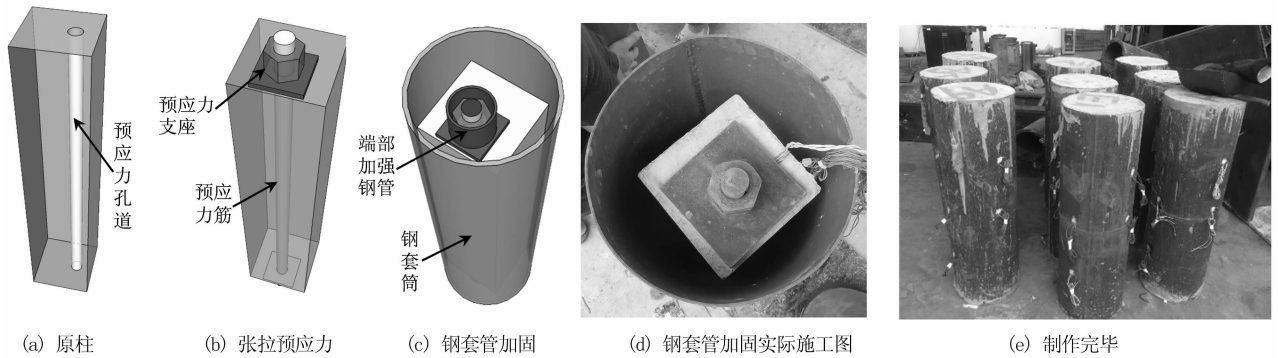


图2 带初始应力的试件施工图  
Fig. 2 Construction of the specimen with preload

表3 钢材力学性能指标  
Tab. 3 Material properties of the steel

钢材类型	屈服强度 $f_y$ /MPa	极限强度 $f_u$ /MPa
钢筋 $\phi 6$	375	593
钢筋 $\phi 12$	435	654
预应力钢筋 $\phi 32$	—	—
钢管 $t=3.84$ mm	400	550

1.2 加载及测量方法

试验加载及量测方案如图3所示。偏压试件的支座下部采用球铰，上部采用辊轴。位移计用于测量

试件的竖向位移及侧向挠度(图3(d))，应变片粘贴于钢筋笼上和钢套管中部截面外侧，分别用于测量钢筋应变及钢套管沿周长各测点应变(图3(e))。试验采用15 000 kN压力试验机施加轴力，试验初始阶段采用力控制加载，加载速率为4 kN/s；当监测到钢管屈服后，转为位移控制加载，加载速率为0.01 mm/s；当试件承载力下降到峰值承载力的85%，或竖向位移过大时，试验终止。加载过程中的荷载值由压力机计算机采集。

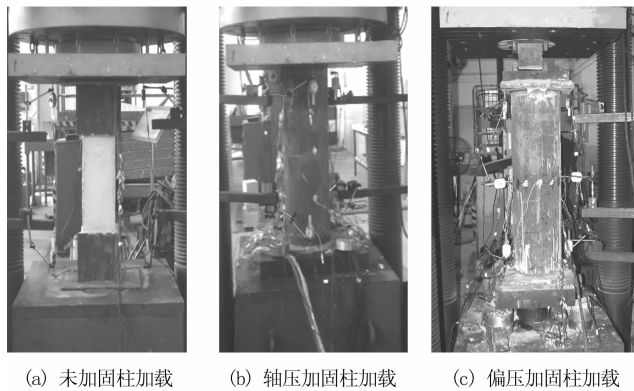


图3 加载及量测方案  
Fig. 3 Test set-up and measuring scheme

试件 B7 和 B8 在试验加载过程中，内部的预应力钢筋随着试件的竖向变形而缩短，逐渐由受拉状态变为受压状态，并产生对压力试验机的反力。因此，试验时在监测到预应力钢筋开始受压后，将压力机的实际读数减去同一时刻下预应力钢筋的压力值，作为加固柱的实际受荷值。

2 试验结果及分析

2.1 试验现象

各试件的破坏形态如图4所示，具体试验结果

见表1。对于未加固柱 B0，当荷载达到其峰值荷载(1 512 kN)附近时，试件表面粉刷层大量脱落、裂缝开始出现并迅速发展，峰值荷载后试件承载力迅速下降，试验停止，其破坏形态如图4(a)所示。需要说明的是，本试验的未加固柱 B0 为轴压加载，为更好地与偏压加固试件进行对比，依据 GB 50010—2010《混凝土结构设计规范》<sup>[28]</sup>，推算得出偏心距分别为20 mm和40 mm的未加固柱的竖向承载力分别为1 256 kN和995 kN，计算中不考虑附加偏心距的影响( $e_a=0$ )。除 B0 外，其余各钢套管加固试件的破坏形态如图4(b)~图4(l)所示。其中，轴压试件

A1~A3 主要因跨中附近出现的较大鼓曲而破坏,其上下端并无明显变形;偏压试件破坏时,B1~B6 跨中和端部均出现鼓曲,其中 B1 和 B2 端部鼓曲程度较大,而 B3~B6 跨中鼓曲程度较大,对跨长较长的 B7 和 B8 试件,其破坏时呈现整体弯曲的形态,

柱身的鼓曲相对其他偏压试件来说并不明显.试件 B4 由于在加载到峰值荷载附近时机器出现故障,因此未能获得下降段的荷载-位移曲线.由图 4 及表 1 可知,钢套管加固试件的破坏过程及其规律可总结如下.

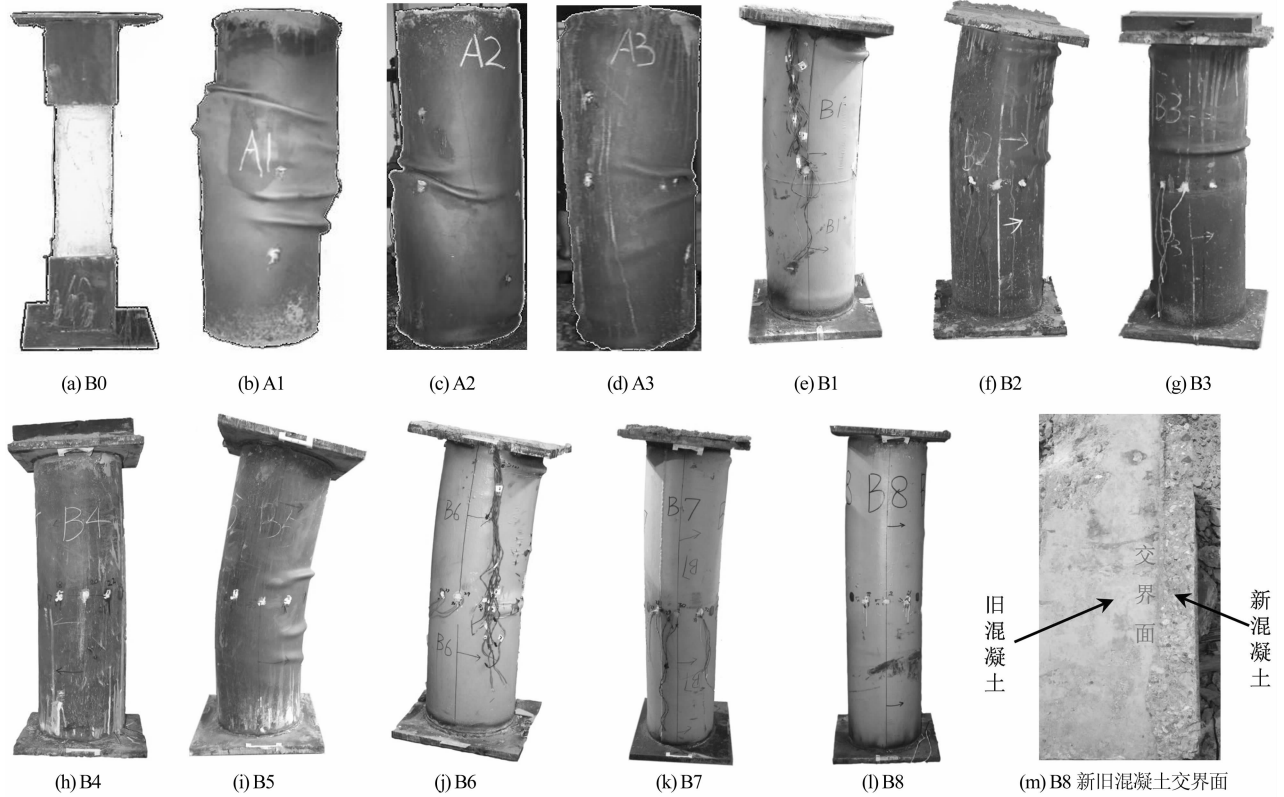


图 4 试件破坏形态

Fig. 4 Failure modes of specimens

考虑轴压破坏和偏压破坏的区别,分别取轴压试件( $e=0$ )钢管出现滑移线时的荷载值  $P_s$ 、偏压试件( $e \neq 0$ )钢管出现局部鼓曲时的荷载值  $P_b$  作为特征点,具体数据见表 1. 可见,对于轴压试件,当荷载达到其峰值荷载的 96%~100% 时,钢管表面出现明显的剪切滑移线,峰值荷载后钢管出现局部鼓曲,试件承载力不断下降.而对于偏压试件,当荷载达到其峰值荷载的 75%~100% 时,钢管表面出现较大的局部鼓曲,但存在原柱初始应力的试件钢管鼓曲程度相对较低,随着加载的继续,试件承载力达到峰值并开始下降.

表 1 中  $\epsilon_b$  和  $\epsilon_u$  分别为钢管出现局部鼓曲和峰值荷载时试件的平均纵向应变,可见轴压试件钢管的局部鼓曲出现在峰值荷载之后,而偏压试件则正好相反.且发生局部屈曲时,轴压试件钢管应变普遍达到 0.02 以上,而偏压试件钢管应变普遍为 0.002~0.012,说明偏压试件更容易发生钢管的局部屈曲.

试验结束后,将加固柱试件的钢管剖开,其内部原柱混凝土与再生混凝土的界面如图 4(m) 所示,可见界面粘结完好,说明两者能协同工作.

此外,偏压试件达到峰值荷载时钢管中部的侧向挠度如图 5 所示.由图 5 可知,随着偏心距的增大,试件的侧向挠度值均呈增大趋势;而偏心距相同的试件,其峰值荷载下对应的侧向挠度相差不大.以上也说明原柱初始应力的存在及再生粗骨料取代率的差异并未对加固试件的侧向变形能力造成明显影响.

## 2.2 荷载-纵向位移曲线

图 6 给出了不同加固试件相对承载力提高倍数的对比图,图中所示相对承载力提高倍数=加固试件承载力/名义承载力,其中名义承载力为原柱与加固材料截面承载力之和,加固材料包括后浇再生混凝土和钢套管.对轴压试件( $e=0$ ),原柱承载力取未加固试件 B0 承载力;对偏压试件( $e=20$  或 40

mm),原柱承载力取前文通过规范推算所得的未加固柱偏压承载力。

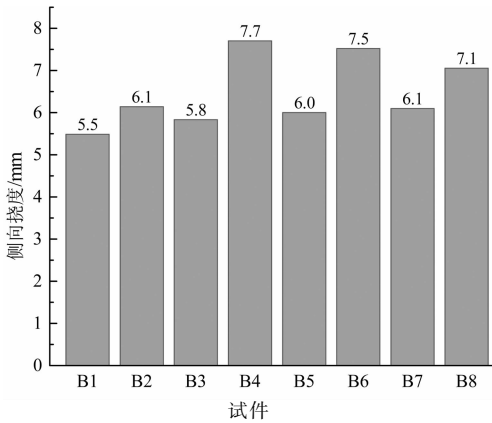


图5 偏压加固试件中部挠度值

Fig. 5 The deflection of the mid-span of the retrofitted specimens under eccentric loading

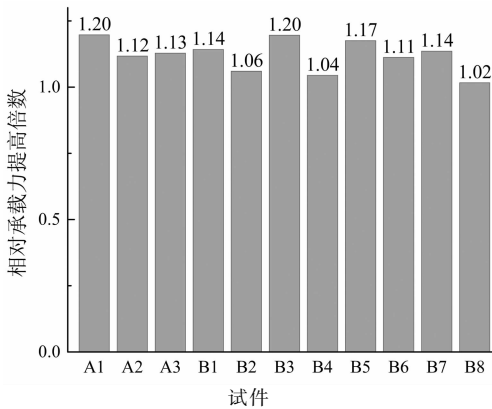


图6 加固试件相对承载力提高倍数

Fig. 6 Bearing capacity relative increasing ratios of the retrofitted specimens

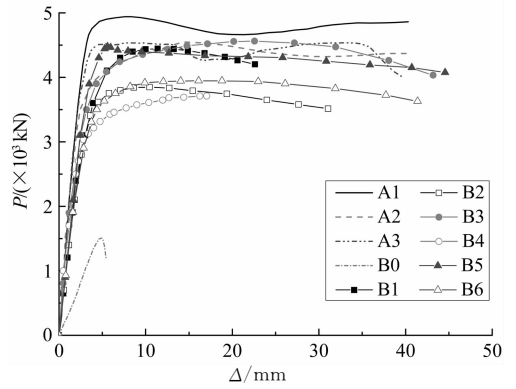
图7给出了试件的荷载-纵向位移曲线,由图7(a)可见,未加固钢筋混凝土柱(B0)的承载力在达到峰值后迅速下降,且延性较差;而经钢套管再生混凝土加固后,柱子的承载力、刚度和延性均显著提高.结合图6可知,各加固试件相对承载力提高倍数为1.02~1.20,平均相对提高倍数达1.12,说明钢套管再生混凝土加固法不仅可充分发挥钢管及后浇再生混凝土的强度,还可通过钢套管对原柱混凝土及后浇再生混凝土有效的约束作用进一步提高试件承载力.但随着偏心距的增大,钢套管的约束对承载力的提高作用减弱.

由荷载-位移曲线,各参数对加固试件承载力和延性的影响可总结如下:

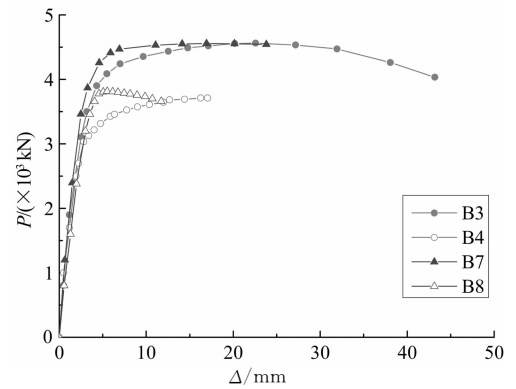
1)由图7(a)可见,再生粗骨料取代率的变化对钢套管再生混凝土加固柱偏压试件的承载力和延性的影响不明显(B1-B3-B5、B2-B4-B6),而轴压试件

的承载力则随着取代率的提高而有所降低(A1-A2-A3).此外,偏心距对加固试件承载力的影响较大,试件的承载力随偏心距的增大呈下降趋势(A1-B1-B2、A2-B3-B4、A3-B5-B6),且在偏心较大时( $e=40$  mm)下降显著.

2)由图7(b)可见,原柱初始应力对偏压试件承载力的影响不显著,但会使得承载力峰值提前出现.对不考虑初始应力的试件(B3和B4),其荷载峰值对应的位移分别为22.57 mm和17.06 mm,而对考虑初始应力的试件(B7和B8),其荷载峰值对应的位移分别为16.93 mm和5.51 mm.



(a) 再生粗骨料取代率及偏心距影响



(b) 轴压比影响

图7 荷载-位移曲线

Fig. 7 Load-displacement curves

### 2.3 钢筋和钢管应变分析

下面分轴压和偏压2种情况对钢管和钢筋的应变进行分析,为便于描述,下文提到的应变均指应变绝对值.

轴压情况以试件A3为例,其钢管中部截面纵向应变( $\epsilon_v$ )、钢管中部截面环向应变( $\epsilon_h$ )、原柱纵筋应变( $\epsilon_{纵筋}$ )和原柱箍筋应变( $\epsilon_{箍筋}$ )与荷载( $P$ )的关系曲线如图8所示.在加载初期,各钢构件的应变基本呈线性增长,钢管纵向应变和原柱纵筋应变基本一致,相同荷载下钢管纵向应变大于其环向应变;接近峰值荷载时,曲线进入弹塑性阶段,钢管环向应变的

增长速率明显增大,相同荷载下钢管环向应变大于其纵向应变,说明钢套管对核心混凝土的约束作用逐渐增强;达到峰值荷载时,钢套管和原柱钢筋均达到屈服,材料强度得到充分地发挥。

对于偏压试件,其钢管中部截面应变沿柱环向有所不同.图 9 和图 10 分别以试件 B4( $\eta=25\%$ )、B6( $\eta=50\%$ )为例,给出不同加载阶段其钢管中部截面应变分布,其中  $P_u$  表示试件峰值荷载;图 11 所示为各偏压试件峰值荷载对应的钢管中部截面应变.图 9~图 11 中  $270^\circ$  处对应试件的受压侧,  $90^\circ$  处对应试件的受拉侧,曲线越大表示钢管应变绝对值越大。

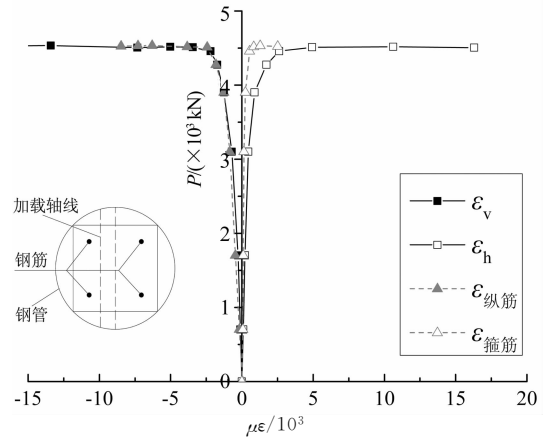


图 8 试件 A3 钢管和钢筋的荷载-应变曲线  
Fig. 8 Load-strain curves for steel tube and bars of A3

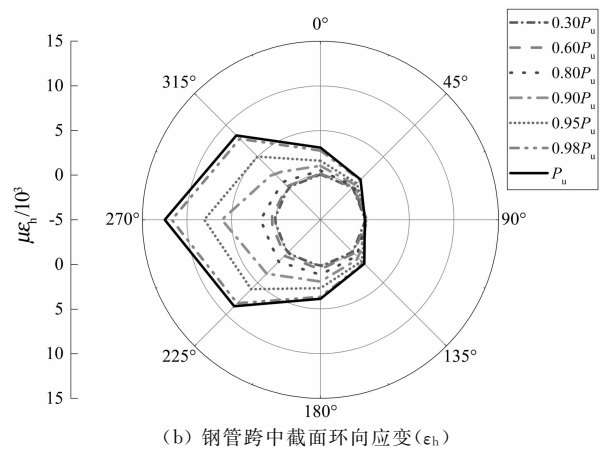
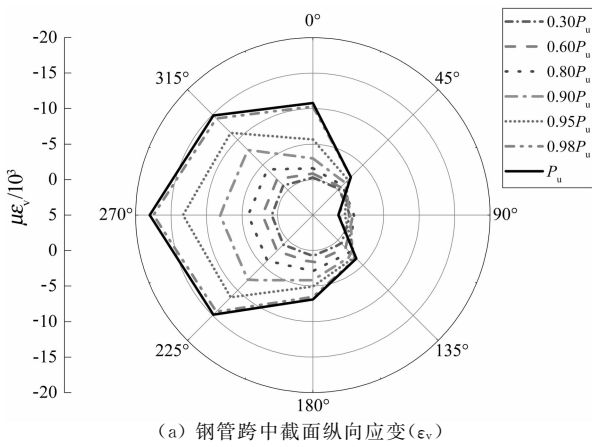


图 9 B4 试件钢管跨中截面应变  
Fig. 9 Cross section strain of steel tube of B4

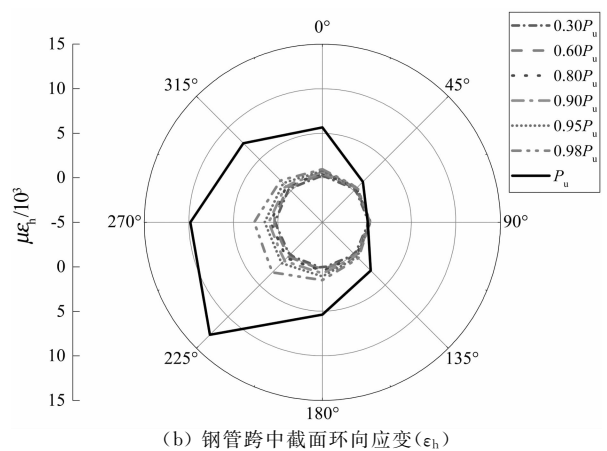
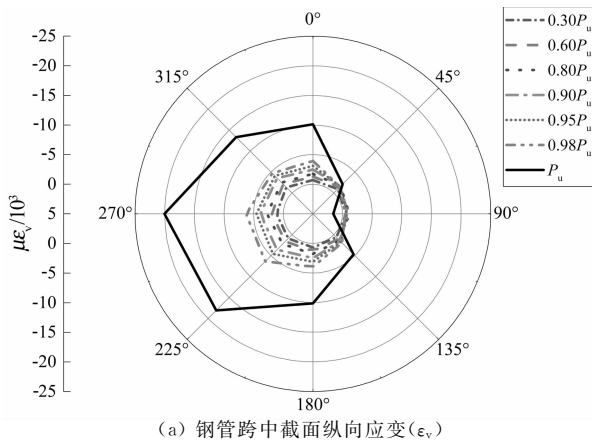


图 10 B6 试件钢管跨中截面应变  
Fig. 10 Cross section strain of steel tube of B6

由图 9 和图 10 可见,钢套管再生混凝土加固偏压试件的变形发展和普通偏压钢管混凝土柱比较相似.加载初期,钢管处于纵向受压、环向受拉状态,其中部

截面各点应变值较小,且变化基本一致,均随荷载增加而缓慢增大;当荷载达到  $0.80P_u$  时,受压侧应变增长速率明显增大,而受拉侧应变仍增长缓慢;接近极限荷载

时,  $P-\Delta$  效应的影响使得钢管受压侧应变迅速增大, 而受拉侧纵向应变则逐渐减小, 甚至由受压转为受拉, 呈现反向发展的趋势, 此现象在取代率更大的试件 B6 中

更为明显. 说明在极限荷载下, 试件中部截面钢管对混凝土的约束效应沿环向分布不均匀, 在受压侧约束较大, 而受拉侧约束较小.

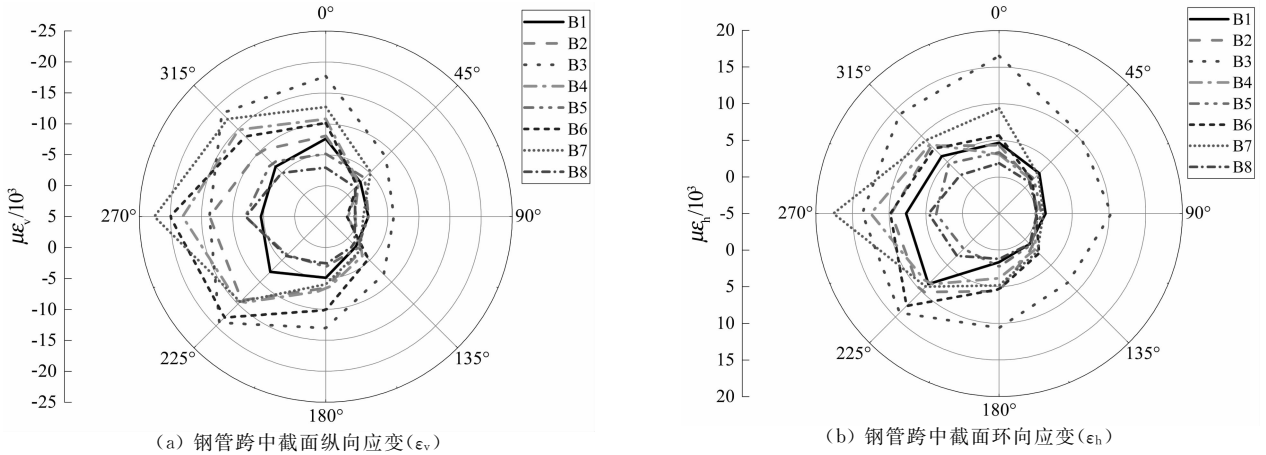


图 11 偏压试件在峰值荷载时钢管跨中截面应变

Fig. 11 Cross section strain of steel tube under peak load of retrofitted specimens under eccentric loading

此外, 由图 11 可知, 不同试件在峰值荷载下受压侧的应变相差较大, 而受拉侧的应变差异相对较小, 各参数对偏压试件的变形性能影响较大, 可总结如下:

1) 当偏心距较大时 ( $e=40$  mm), 再生粗骨料取代率对钢管应变的影响不明显, 随取代率的提高钢管应变呈微弱增长; 而当偏心距较小时 ( $e=20$  mm), 取代率为 25% 的情况下钢管中部截面应变最大.

2) 总体上, 偏压试件峰值荷载下的钢管应变随轴压比的增大而减小, 但在偏心距为 20 mm 时, 考虑初始应力的试件 B7 受压侧应变较不考虑初始应力的试件 B3 应变大, 而其余测点应变则较小. 说明原柱初始应力的存在会对偏压试件的变形产生不利影响.

3) 随着偏心距的增大, 偏压试件峰值荷载下的钢管应变增大, 尤其是受压侧, 其应变显著增加, 且这种规律有随粗骨料取代率增加而增强的趋势, 说明偏心程度对偏压加固试件的影响和普通钢管混凝土类似, 不同的是再生混凝土的存在对其变形能力产生了一定的影响.

### 3 承载力计算

由于目前并没有针对钢套管再生混凝土加固偏压柱承载力的相关规范或计算公式, 因此本文分别采用我国 JCJ 01-89《钢管混凝土结构设计与施工

规程》<sup>[29]</sup>、GB 50936-2014《钢管混凝土结构技术规范》<sup>[30]</sup>、欧洲 EC4《组合结构设计规范》<sup>[31]</sup>、日本 AIJ-CFT(1997)《钢管混凝土构造设计施行指针》<sup>[32]</sup>、美国 ANSI/AISC 360-16《钢结构设计规范》<sup>[33]</sup> 及文献[10]提出的圆钢管混凝土柱计算方法对本文的加固试件进行偏压承载力计算. 上述各规范公式均通过修正系数考虑钢管约束对核心混凝土强度的提高和荷载偏心对承载力的折减, 但其具体的计算方法不尽相同. JCJ 01-89、GB 50936-2014 和 AIJ-CFT(1997) 均采用与含钢量(或套箍系数)相关的混凝土强度提高系数, 而 EC4 和 ANSI/AISC 360-16 则引入与相对长细比有关的混凝土强度提高系数; 除 AIJ-CFT(1997) 采用受压区角度外, 其余公式均采用与偏心距直接相关的系数以考虑承载力的折减. 文献[10]公式则为在 GB 50936-2014 的基础上, 通过对加固试验结果的修正得到的. 本节计算条件如下: ①本节的最终计算结果是在各公式的基础上增加原柱纵筋承载力得出的; ②考虑到各规范并未涉及原柱初始应力的影响, 且本试验结果也表明初始应力对加固柱的偏压承载力影响不大, 故计算忽略初始轴压比的影响; ③B1~B8 试件采用经峰值荷载下侧向挠度修正的偏心距进行承载力的计算; ④利用日本 AIJ 规范计算时, 混凝土受压区高度取截面高度减去钢套管及偏压区域高度. 各规范公式的计算结果如表 4 所示, 由此可作出以下结论: ①由规范 EC4 公式计算所得承载力与试验承载力之比的均值与标准差分别为 0.91 和 0.059,



在各计算方法中与试验结果较为吻合,且离散性较小;②依据 GB 50936—2014 和文献[10]公式计算所得结果比试验值平均偏大 8%~13%,偏于不安全;而依据 JCJ 01—89、AIJ-CFT(1997)和 ANSI/

AISC 360—16 计算所得结果较试验值偏小,偏于保守,更为合理准确的钢套管再生混凝土加固柱偏压承载力计算方法有待进一步深入分析后确定。

表4 各国规范和学者公式承载力计算结果对比

Tab. 4 Comparisons of the results predicted by design codes and formulas proposed by researchers

试件 编号	JCJ 01—89			GB 50936—2014			EC4		AIJ-CFT(1997)		ANSI/AISC 360—16		文献[10]	
	$P_u$ /kN	$P_{cal}$ /kN	$P_{cal}/P_u$	$P_{cal}$ /kN	$P_{cal}/P_u$	$P_{cal}$ /kN	$P_{cal}/P_u$	$P_{cal}$ /kN	$P_{cal}/P_u$	$P_{cal}$ /kN	$P_{cal}/P_u$	$P_{cal}$ /kN	$P_{cal}/P_u$	$P_{cal}$ /kN
A1	4 941	4 874	0.99	5 992	1.21	4 326	0.88	3 794	0.77	3 396	0.69	6 055	1.23	
A2	4 547	4 833	1.06	5 949	1.31	4 280	0.94	3 758	0.83	3 356	0.74	6 001	1.32	
A3	4 538	4 796	1.06	5 878	1.30	4 243	0.94	3 726	0.82	3 321	0.73	5 953	1.31	
B1	4 444	3 527	0.79	4 573	1.03	3 815	0.86	3 168	0.71	3 413	0.77	4 825	1.09	
B2	3 849	3 047	0.79	3 851	1.00	3 681	0.96	2 848	0.74	3 413	0.89	4 136	1.07	
B3	4 562	3 477	0.76	4 524	0.99	3 748	0.82	3 113	0.68	3 356	0.74	4 752	1.04	
B4	3 712	2 976	0.80	3 774	1.02	3 620	0.98	2 777	0.75	3 356	0.90	4 039	1.09	
B5	4 478	3 469	0.77	4 509	1.01	3 740	0.84	3 108	0.69	3 354	0.75	4 742	1.06	
B6	3 948	2 978	0.75	3 774	0.96	3 617	0.92	2 777	0.70	3 354	0.85	4 042	1.02	
B7	4 556	3 577	0.79	4 619	1.01	3 896	0.86	3 236	0.71	3 505	0.77	4 897	1.07	
B8	3 813	3 082	0.81	3 882	1.02	3 776	0.99	2 906	0.76	3 505	0.92	4 189	1.10	
		平均值	0.85	平均值	1.08	平均值	0.91	平均值	0.74	平均值	0.79	平均值	1.13	
		标准差	0.120	标准差	0.129	标准差	0.059	标准差	0.049	标准差	0.080	标准差	0.106	

## 4 结 论

为帮助解决当前越来越突出的建筑拆除导致的废弃混凝土问题,达到建筑绿色环保的目的,本文对 12 个钢套管再生混凝土加固柱试件进行轴压和偏压试验,试验结果和分析可得到以下初步结论:

1) 试验表明,采用钢套管再生混凝土加固后,试件承载力、刚度和延性均显著提高。各试件平均相对承载力提高倍数达 1.12 倍,说明该加固方法不仅可充分发挥钢管及后浇再生混凝土的强度,还可通过钢套管对混凝土有效的约束作用进一步提高试件承载力,是行之有效的。

2) 再生粗骨料取代率对钢套管再生混凝土加固试件偏压承载力的影响不明显。偏心较大时钢管中部截面应变随取代率的提高呈微弱增长,偏心较小时在取代率为 25% 的情况下钢管中部截面应变最大;原柱初始应力的存在对承载力的影响不显著,但使得加固试件承载力峰值提前出现,且对其变形产生不利影响;偏心程度对加固试件的影响和普通钢管混凝土类似,随偏心距的增大,加固试件的承载力降低而钢管受压侧应变增大,且这种规律有随粗骨料取代率增加而增强的趋势。

3) 采用 EC4 的圆钢管混凝土柱承载力公式对本文钢套管再生混凝土加固柱偏压承载力进行计算,其结果与试验值吻合较好,且离散性较小;而依据 GB 50936—2014 和文献[10]计算所得结果平均

比试验值偏大 8%~13%,较为不安全;依据 JCJ 01—89、美国和日本规范计算所得结果则偏于保守。

## 参考文献

- [1] GB 50367—2013 混凝土结构加固设计规范[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2013:21—126.  
GB 50367—2013 Code for design of strengthening concrete structure [S]. Beijing:China Architecture & Building Press,2013:21—126. (In Chinese)
- [2] TOMII M, SAKINO K, XIAO Y. Ultimate moment of reinforced concrete short columns confined in steel tube[J]. Proceedings of Pacific Conference on Earthquake Engineering, 1987, 2: 11—22.
- [3] CHAI Y H, PRIESTLEY M J N, SEIBLE F. Seismic retrofit of circular bridge columns for enhanced flexural performance[J]. ACI Structural Journal, 1991, 88(5): 572—584.
- [4] CHAI Y H. An analysis of the seismic characteristics of steel-jacketed circular bridge columns[J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 1996, 25(2): 149—161.
- [5] PRIESTLEY M J N, SEIBLE F, XIAO Y, et al. Steel jacket retrofitting of reinforced concrete bridge columns for enhanced shear strength—Part 1: Theoretical considerations and test design[J]. Structural Journal, 1994, 91(4): 394—405.
- [6] XIAO Y, WU H. Retrofit of reinforced concrete columns using partially stiffened steel jackets[J]. Journal of Structural Engineering, 2003, 129(6): 725—732.
- [7] 蔡健,徐进. 圆形钢套管加固混凝土中长柱轴压承载力研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2005, 2(4): 62—67.  
CAI J, XU J. Research on bearing capacity of reinforced concrete column strengthened by circular steel jacketing subjected to axial loads [J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2005, 2(4): 62—67. (In Chinese)
- [8] 徐进,蔡健. 圆形钢套管加固方形混凝土柱轴心受压性能[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2006, 36(4): 580—584.  
XU J, CAI J. Behaviour of square reinforced concrete column strengthened by circular steel jacket under axial loading[J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 2006, 36(4): 580—

584. (In Chinese)
- [9] CAI J. Ultimate strength of reinforced concrete columns strengthened by circular steel jacketing[J]. Journal of South China University of Technology, 2007, 35(10): 78—83.
- [10] 徐进, 蔡健. 圆形钢管加固混凝土柱偏心受压性能研究[J]. 工业建筑, 2007, 37(8): 14—17.  
XU J, CAI J. Research on the behaviour of reinforced concrete column strengthened by circular steel jacketing subjected to eccentric loading[J]. Industrial Construction, 2007, 37(8): 14—17. (In Chinese)
- [11] 卢亦焱, 龚田牛, 张学朋, 等. 外套钢管自密实混凝土加固钢筋混凝土圆形截面短柱轴压性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2013, 34(6): 121—128.  
LU Y Y, GONG T N, ZHANG X P, *et al.* Experimental research on behavior of circular RC column strengthened with self-compacting concrete filled circular steel jacket under axial loading[J]. Journal of Building Structures, 2013, 34(6): 121—128. (In Chinese)
- [12] 卢亦焱, 薛继锋, 张学朋, 等. 外套钢管自密实混凝土加固钢筋混凝土中圆柱轴压性能试验研究[J]. 土木工程学报, 2013, 46(2): 100—107.  
LU Y Y, XUE J F, ZHANG X P, *et al.* Experimental study on the behavior of middle long RC column strengthened by self-compacting concrete and steel tube under the axial load[J]. China Civil Engineering Journal, 2013, 46(2): 100—107. (In Chinese)
- [13] 卢亦焱, 梁鸿骏, 李杉, 等. 方钢管自密实混凝土加固钢筋混凝土方形截面短柱轴压性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2015, 36(7): 43—50.  
LU Y Y, LIANG H J, LI S, *et al.* Experimental study on behavior of square RC columns strengthened with self-compacting concrete filled square steel tubes under axial load[J]. Journal of Building Structures, 2015, 36(7): 43—50. (In Chinese)
- [14] 卢亦焱, 徐贞珍, 梁鸿骏, 等. 外套圆钢管自密实混凝土加固 RC 方柱偏压性能试验研究及有限元分析[J]. 建筑结构学报, 2015, 36(S2): 42—49.  
LU Y Y, XU Z Z, LIANG H J, *et al.* Research on behavior of RC square column strengthened with self-compacting concrete filled circular steel jacket under eccentric loading[J]. Journal of Building Structures, 2015, 36(S2): 42—49. (In Chinese)
- [15] 李杉, 梁鸿骏, 卢亦焱, 等. 钢管混凝土加固钢筋混凝土方形截面偏压短柱受力性能分析[J]. 建筑结构学报, 2016, 37(12): 126—135.  
LI S, LIANG H J, LU Y Y, *et al.* Mechanical behavior of square RC columns strengthened with concrete filled steel tube under eccentric load[J]. Journal of Building Structures, 2016, 37(12): 126—135. (In Chinese)
- [16] 杨涛, 王社良, 刘伟. 性能增强再生混凝土框架中节点抗震性能试验[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2016, 43(11): 68—77.  
YANG T, WANG S L, LIU W. Experimental study on seismic behavior of interior joints in enhancements recycled aggregate concrete frame[J]. Journal of Hunan University(Natural Sciences), 2016, 43(11): 68—77. (In Chinese)
- [17] 李文贵, 肖建庄, 黄靓, 等. 再生混凝土界面过渡区纳观力学性能试验研究[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2014, 41(12): 31—39.  
LI W G, XIAO J Z, HUANG L, *et al.* Experimental study on mechanical properties of interfacial transition zones in recycled aggregate concrete[J]. Journal of Hunan University(Natural Sciences), 2014, 41(12): 31—39. (In Chinese)
- [18] AJDUKIEWICZ A, KLISZCZEWICZ A. Influence of recycled aggregates on mechanical properties of HS/HPC[J]. Cement & Concrete Composites, 2002, 24(2): 269—279.
- [19] YANG Y F, HAN L H. Experimental behaviour of recycled aggregate concrete filled steel tubular columns[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2006, 62(12): 1310—1324.
- [20] YANG Y F, MA G L. Experimental behaviour of recycled aggregate concrete filled stainless steel tube stub columns and beams[J]. Thin-Walled Structures, 2013, 66(3): 62—75.
- [21] 陈宗平, 李启良, 张向冈, 等. 钢管再生混凝土偏压柱受压性能及承载力计算[J]. 土木工程学报, 2012, 45(10): 72—80.  
CHEN Z P, LI Q L, ZHANG X G, *et al.* Mechanical behavior and bearing capacity calculation of recycled aggregate concrete-filled circular steel tube columns under eccentric loading[J]. China Civil Engineering Journal, 2012, 45(10): 72—80. (In Chinese)
- [22] 吴波, 刘伟, 刘琼祥, 等. 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 B, LIU W, LIU Q X, *et al.* 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)
- [23] 吴波, 赵新宇, 张金锁. 薄壁圆钢管再生混合中长柱的轴压与偏压试验研究[J]. 土木工程学报, 2012, 45(5): 65—77.  
WU B, ZHAO X Y, ZHANG J S. Tests on slender circular thin-walled steel tubular columns filled with demolished concrete lumps under concentrically/eccentrically compressive loadings[J]. China Civil Engineering Journal, 2012, 45(5): 65—77. (In Chinese)
- [24] XIAO J, HUANG Y, YANG J, *et al.* Mechanical properties of confined recycled aggregate concrete under axial compression[J]. Construction & Building Materials, 2012, 26(1): 591—603.
- [25] WANG Y, CHEN J, GENG Y. Testing and analysis of axially loaded normal-strength recycled aggregate concrete filled steel tubular stub columns[J]. Engineering Structures, 2015, 86: 192—212.
- [26] 薛华. 钢管再生混凝土加固柱轴压力学性能研究[D]. 广州: 华南理工大学土木与交通学院, 2016: 1—7.  
XUE H. Experimental research on behavior of RC column strengthened with recycled concrete filled steel jacket under axial loading[D]. Guangzhou: School of Civil Engineering and Transportation, South China University of Technology, 2016: 1—7. (In Chinese)
- [27] 徐进. 钢管加固混凝土柱的力学性能研究[D]. 广州: 华南理工大学建筑学院, 2007: 11.  
XU J. Research on the mechanical property of retrofitting reinforced concrete columns by steel jacketing[D]. Guangzhou: School of Architecture, South China University of Technology, 2007: 11. (In Chinese)
- [28] GB 50010—2010 混凝土结构设计规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010: 34—54.
- [29] GB 50010—2010 Code for design of concrete structures[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2010: 34—54. (In Chinese)
- [29] JCJ 01—89 钢管混凝土结构设计与施工规程[S]. 上海: 同济大学出版社, 1989: 10—23.  
JCJ 01—89 Regulations of design and construction for steel-pipe concrete structure[S]. Shanghai: Tongji University Press, 1989: 10—23. (In Chinese)
- [30] GB 50936—2014 钢管混凝土结构技术规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2014: 18—38.  
GB 50936—2014 Technical code for concrete filled steel tubular structures[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2014: 18—38. (In Chinese)
- [31] EN 1994-1-1 Eurocode 4: Design of composite steel and concrete structures—Part 1. 1: General rules and rules for buildings[S]. London: British Standards Institution, 2004: 63—77.
- [32] 马欣伯, 张素梅, 孙玉平. 日本 AIJ 关于圆钢管混凝土构件承载力设计方法介绍[J]. 工业建筑, 2004, 34(2): 69—74.  
MA X B, ZHANG S M, SUN Y P. Introduction to AIJ method of load-carrying capacity of concrete-filled circular steel tubes[J]. Industrial Construction, 2004, 34(2): 69—74. (In Chinese)
- [33] ANSI/AISC 360—16 Specification for structural steel buildings[S]. Chicago: American Institute of Steel Construction, 2016: 90—99.