文章编号：1001-4888(2020)04-0669-12

方钢管型钢再生混凝土组合柱轴压性能试验研究*

马辉，黄成，胡广宾，刘云贺，李哲
（西安理工大学 土木建筑工程学院，陕西西安 710048）

摘要： 为研究方钢管型钢再生混凝土组合柱轴压性能，设置了长细比、再生骨料取代率、再生混凝土强度、型钢配钢率和方钢管宽厚比等参数，对 13 个试件进行单调静力加载试验，观察试件破坏过程及破坏形态，获取试件荷载-位移和荷载-应变曲线，分析设计参数对组合柱轴压受力性能的影响。结果表明：试件的破坏顺序均为型钢首先被压屈，随后再生混凝土被压碎，最后的破坏是因为钢管外表面发生鼓屈而丧失轴压承载力；提高长细比、钢管宽厚比和再生粗骨料取代率，组合柱轴压承载力的最大降幅分别为 10.7%、24.8%和 9.9%；相反，提高再生混凝土强度和型钢配钢率，组合柱的轴压承载力最大提高幅度分别为 19.7%和 14.3%；总体上看，试件均表现出较高的承载力和良好的变形能力。在此基础上，参考国内外相关规程，采用叠加原理，建立了方钢管型钢再生混凝土组合柱的轴压承载力公式，并验证了计算公式的有效性。

关键词： 方钢管；再生粗骨料取代率；组合柱；型钢再生混凝土；轴压试验；轴压性能
中图分类号： TU398.9 **文献标识码：** A DOI：10.7520/1001-4888-18-204

0 引言

再生混凝土不仅可以有效处理建筑垃圾，同时也可保护天然砂石产地的生态环境，是一种绿色建材[1]。再生混凝土基本力学性能研究表明[2,3]：与普通混凝土相比，再生混凝土弹性模量和强度等基本力学性能均出现不同程度的降低，导致再生混凝土结构的受力性能降低，从而限制了再生混凝土在建筑中主要承重结构中的使用，通常在低层建筑的非承重部分使用。为了推广再生混凝土在实际工程的应用，有些研究者将其与钢材进行了组合，得到了钢管再生混凝土柱及型钢再生混凝土柱等结构，现有文献研究结果表明[4-8]：型钢再生混凝土柱具有较高承载能力及较好的抗震性能，但其梁柱节点连接复杂，施工较为困难；钢管再生混凝土柱具有承载力高、变形性能好和施工方便等优势，但在高轴压比和较大长细比的情况下很容易产生屈曲甚至是失稳破坏。另外，部分学者[9,10]提出了钢管型钢混凝土组合柱，该组合柱结合了钢管混凝土柱和型钢混凝土的各自优点，具有高承载力、高延性、抗震等优点，而且便于施工，具备广阔的应用前景。

本课题组将再生混凝土材料与上述组合构件相结合，提出方钢管型钢再生混凝土组合柱，该构件具有承载力高和变形性能好的特点；由于构件截面抗弯刚度大以及内配型钢，可有效避免钢管过早屈曲和失稳；此外，该组合柱具有构造简单且施工简便等优点。同时也可起到有效处理废弃混凝土的作用，符合低碳经济发展要求。然而，目前对方钢管型钢再生混凝土组合柱的力学性能研究鲜有，也缺少相关的

* **收稿日期：** 2018-09-06；**修回日期：** 2019-01-14
基金项目： 国家自然科学基金项目(51408485)，陕西省住房城乡建设科学技术计划项目(2015-K129)，陕西省自然科学基础研究计划项目(2019JM-193)
通讯作者： 马辉(1985－)，男，副教授，博士，硕导，主要从事钢与混凝土组合结构及再生混凝土结构研究。Email：mahuiwell@163.com

承载力计算方法。

因此,为深入了解 13 根方钢管型钢再生混凝土组合柱破坏机理和破坏模式,本文通过对其实施轴压试验,获得了其轴向荷载和轴向位移曲线、钢管及型钢应变规律等轴压性能指标;并对试验数据进行分析,得到了再生粗骨料取代率、宽厚比及长细比等设计变参数对试件轴压性能的影响规律。在试验研究的基础上,参考国内外相关规程,采用叠加法对组合柱进行轴压承载力计算,分析了各规范的适用性;并在 EC4-2004 规范的基础上,考虑了再生粗骨料取代率对轴压承载力的不利影响,建立了方钢管型钢再生混凝土组合柱轴压承载力公式。

1 试验简况

1.1 设计参数与试件制作

表 1 为试件的主要的设计参数,包括长细比、再生混凝土等级、再生粗骨料取代率、宽厚比和型钢配钢率等。为便于再生混凝土浇筑,内置型钢和外置钢管的底部均焊接钢板,试件截面尺寸及制作如图 1 所示。以废弃混凝土作为再生粗骨料的来源,其基本物理特性符合《混凝土用再生粗骨料》。方钢管和型钢均采用 Q235 钢材,钢材基本力学性能指标详见表 2。再生混凝土材料使用 42.5R 级硅酸盐水泥,配制 C50、C60 再生混凝土材料时掺入适量粉煤灰,天然粗骨料为连续级配的天然碎石,细骨料为普通中粗河砂。表 3 为再生混凝土的配合比及立方体抗压强度,其中水胶比为水与水泥和粉煤灰质量之和的比值。

表 1 试件设计参数

Tab. 1 Design parameters of specimens

试件编号	型钢配钢率 ρ	钢管截面边长 B/mm	柱高 L/mm	壁厚 t/mm	宽厚比 B/t	再生混凝土等级	长细比 λ	再生粗骨料取代率 r
SPSC1	5.55%	200	500	2.0	100.0	C40	8.67	0
SPSC2	5.55%	200	500	2.0	100.0	C40	8.67	30%
SPSC3	5.55%	200	500	2.0	100.0	C40	8.67	50%
SPSC4	5.55%	200	500	2.0	100.0	C40	8.67	70%
SPSC5	5.55%	200	500	2.0	100.0	C40	8.67	100%
SPSC6	5.55%	200	500	1.5	133.3	C40	8.67	100%
SPSC7	5.55%	200	500	3.0	66.7	C40	8.67	100%
SPSC8	4.45%	200	500	2.0	100.0	C40	8.67	100%
SPSC9	6.46%	200	500	2.0	100.0	C40	8.67	100%
SPSC10	5.55%	200	500	2.0	100.0	C50	8.67	100%
SPSC11	5.55%	200	500	2.0	100.0	C60	8.67	100%
SPSC12	5.55%	200	1200	2.0	100.0	C40	20.78	100%
SPSC13	5.55%	200	1800	2.0	100.0	C40	31.18	100%

注:r 为再生粗骨料取代率,表示再生粗骨料质量占全部粗骨料质量的百分比;ρ 为型钢配钢率,表示型钢截面面积与试件截面面积之比;长细比 $\lambda=l_0/i$,l_0 为试件的柱高;i 为截面回转半径。

表 2　材料力学性能

Tab. 2　Mechanical properties of materials

类别	极限强度 f_u/MPa	弹性模量 E_s/MPa	屈服强度 f_y/MPa
型钢　腹板	437	1.99×10^5	310
型钢　翼缘	420	2.05×10^5	315
方钢管	363	1.94×10^5	271



(a) 试件尺寸　(b) 试件截面　(c) 部分试件示意图　(d) 试件浇筑　(e) 试件成品

图 1　试件截面尺寸和制作

Fig. 1　Section sizes and making process of composite columns

表 3　再生混凝土材料力学性能和配合比

Tab. 3　Mix proportion and cubic compressive strength of recycled concrete

再生混凝土强度	弹性模量 E_{rc}/MPa	立方体抗压强度 f_{rc}/MPa	单位体积用量/(kg/m³)							再生粗骨料取代率 r	水胶比
			水	粉煤灰	天然粗骨料	再生粗骨料	水泥	砂	减水剂		
	2.750×10^4	43.6	195	0	1171	0	443	576	0	43.6	2.750×10^4
	2.731×10^4	43.1	195	0	819.5	351.3	443	576	0	43.1	2.731×10^4
C40	2.726×10^4	42.5	195	0	585.5	585.5	443	576	0	42.5	2.726×10^4
	2.706×10^4	41.5	195	0	351.3	819.7	443	576	0	41.5	2.706×10^4
	2.691×10^4	40.8	195	0	0	1171	443	576	0	40.8	2.691×10^4
C50	2.884×10^4	51.3	163	94	0	1138	358	649	3.5	51.3	2.884×10^4
C60	3.005×10^4	59.8	163	100	0	1135	380	592	4.0	59.8	3.005×10^4

1.2　试验量测方案和加载方案

试件试验量测方案包括：试件轴向荷载-位移曲线由加载系统自动采集；组合柱的侧向位移数据由沿着高度方向布置的 4 个位移计采集得到；在方钢管每个外表面的上部、中部与下部中点位置粘贴竖向和横向应变片，与此同时型钢腹板和翼缘上部、中部与下部相应位置也布置应变片，采集相应的应变数据，详见图 2。

试验在西安理工大学结构实验室进行，采用 500t 电液伺服压力机对方钢管型钢再生混凝土组合柱进行轴力受压试验，电液伺服压力机如图 3 所示。试验采用荷载和位移联合加载方式，为了减小误差，在正式试验前对组合柱进行预加载；在进行试验时，当压力机轴压荷载到达预估值为 $0.7P_{max}$ 之前，使用荷载加载方式，持续 1min，以每级 $P_{max}/15$ 的量递增；当试件轴压力接近预估荷载时，试验加载方式改为位移加载，加载速度 1.0mm/min；当轴压荷载下降到试件峰值荷载的 90% 左右或者轴向变形达到 25mm 左右时，结束试验。

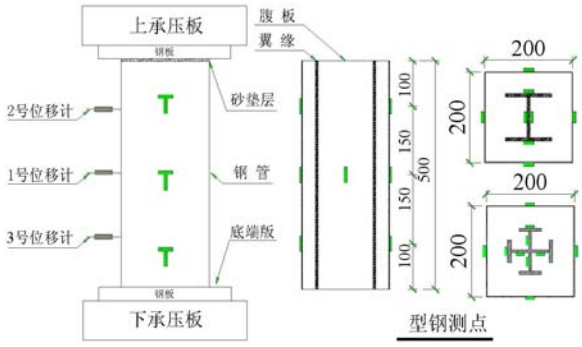


图 2 组合柱轴向变形与应变量测点设置

Fig. 2 Setting of measuring points for axial deformation and strain of composite columns



图 3 电液伺服压力机

Fig. 3 Electro-hydraulic servo press

2 试验结果分析

2.1 破坏形态及破坏特征

由图 4 可知,长细比对试件的轴压破坏过程及破形态影响较大,下面分别对不同长细比下组合柱的轴压破坏过程及破坏形态进行详细描述。



图 4 典型试件的破坏形态

Fig. 4 Failure modes of typical specimens

(1) 短柱:SPSC1-SPSC11 试件

短柱的破坏形态基本类似,本文通过试件 SPSC4 对短柱的破坏特征进行分析。试件在加载初期时处在弹性阶段,组合柱的轴向压缩变形并不明显,轴向压缩变形与轴向荷载之间为线性关系;当轴压荷载大约达到峰值荷载的 60%时,组合柱的轴向压缩变形较为显著;当轴向荷载增加至峰值荷载的 75%左右时,试件中上部钢管出现较小鼓曲,同时试件内部伴随着持续的再生混凝土劈裂声,组合柱进入弹

塑性阶段，轴向压缩变形量和轴向荷载的关系为非线性关系；当轴压荷载达到峰值荷载时，组合柱的轴压承载力开始下降，试件下部也出现鼓曲且中上部鼓曲更加明显。此时，外部方钢管对内部再生混凝土的约束加强；当组合柱的轴压承载力降至大约峰值荷载 90％时，组合柱表现为轴压承载力基本持续不变而轴向压缩变形持续增加，组合柱外部钢管的中部和上部区域明显鼓曲，导致组合柱丧失承载力，发生典型的压弯构件的破坏形态。在试验结束后，对组合柱的外部方钢管进行了切割，可知组合柱的核心再生混凝土被完全压碎，型钢被压屈，充分发挥了再生混凝土和型钢各自力学性能。

（2）中长柱：通过对比组合柱 SPSC12-SPSC13 可以发现，中长柱的破坏形态和破坏机理基本表现一致。当轴向荷载增加到峰值荷载的 40％左右时，组合柱的中部方钢管有轻微鼓起，且伴有较小的再生混凝土劈裂声；当轴向荷载加载至峰值荷载的 75％附近时，组合柱中上部钢管鼓曲明显，组合柱进入弹塑性阶段；轴压荷载增至大约峰值荷载的 90％时，在距离试件顶部约 1/4 处出现局部凸曲，且柱上端四周均出现明显的鼓曲，组合柱核心再生混凝土产生了明显的劈裂声，同时在距离试件 1/3 处试件的侧向挠度增加速度加快；当轴压荷载达到峰值荷载时，试件顶部附近局部凸曲进一步加剧，核心再生混凝土被压溃的声音持续产生；轴压荷载达到峰值荷载后，相应部位的侧向位移发展速率加快，组合柱产生了明显的侧向挠度。将方钢管剖开，可见中长柱的型钢中上部屈曲变形更为突出，且组合柱中上部再生混凝土被压碎，发生明显的压溃破坏。

2.2　轴向荷载-轴向位移曲线

图 5 为试件的轴向荷载-轴向位移曲线。总体上看，方钢管型钢再生混凝土组合柱具有较大的刚度和轴压承载力高的特点；峰值荷载过后，组合柱曲线下降段斜率较为平缓，表明试件变形能力较好，即组合柱轴向位移增长较快而轴向承载力降低相对缓慢。下面就试件的轴向荷载-轴向位移曲线进行分析：

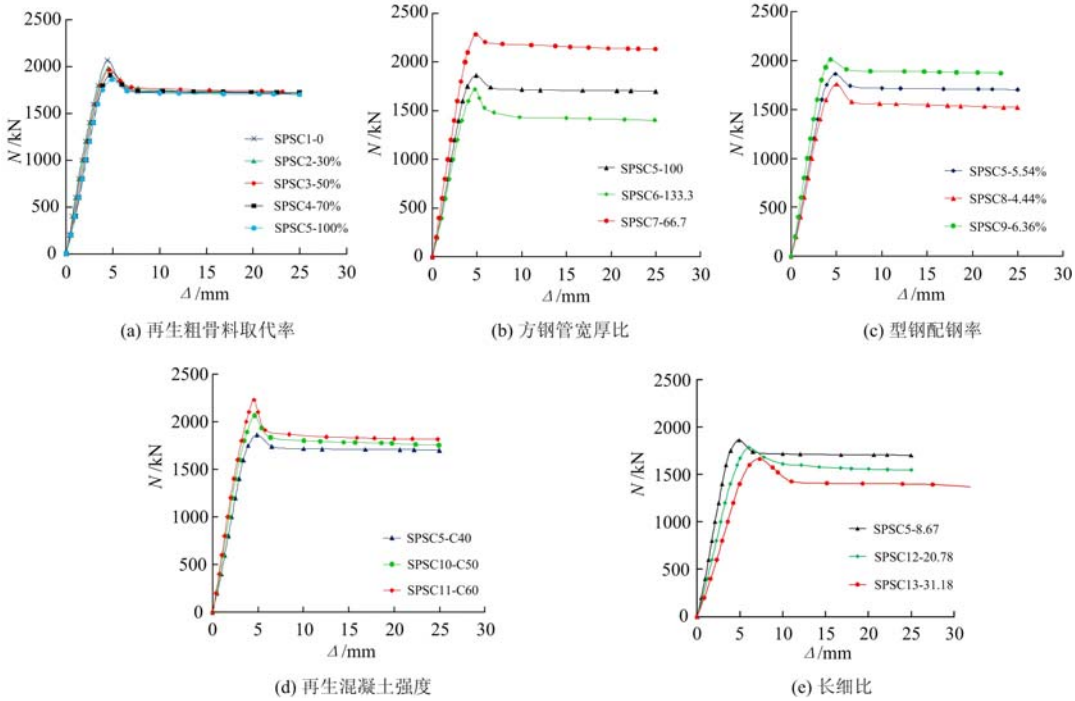


图 5　组合柱轴向荷载-轴向位移曲线

Fig. 5　Load-displacement curves of composite columns

（1）通过图 5(a)可知，不同再生粗骨料取代率下试件轴向荷载-轴向位移曲线基本类似，随着取代率的增加，试件峰值荷载和轴压刚度随之降低，峰值荷载的最大降幅为 9.9％。加载初期，荷载与位移基本呈线性变化，试件处于弹性阶段，说明试件方钢管对内部再生混凝土的约束并不明显，方钢管、内部再生混凝土和型钢处于各自的轴压状态；峰值荷载过后，各试件曲线下降段趋于水平，轴压承载力下降较为缓慢，这是由于方钢管和型钢对再生混凝土的双重约束，内部再生粗骨料的原始微裂缝及附着水泥基体被压紧致密，使得组合柱在加载后期仍具有较高的承载力，且表现出良好的延性；在加载后期，型钢

的轴向压缩变形量将会小于再生混凝土轴向压缩量,两者之间的粘结应力开始减小,试件轴向荷载重分配后,型钢的作用逐渐增大;上述分析表明,不同取代率对试件的变形能力影响相对较小,但对承载力的不利影响不可忽略;

(2) 通过图5(b)可知,试件宽厚比越小(即钢管壁厚增加),其轴压承载力和刚度则越大,峰值荷载最大提高幅度达32.9%,这是因为较小的宽厚比可以有效地防止管壁发生过早的局部屈曲,且能提高核心再生混凝土抗压强度,使得组合柱具有更高的轴压承载力,同时组合柱自身的轴压刚度也可大幅度提高。峰值荷载过后,随着宽厚比增加,试件轴向荷载-轴向位移曲线下降速率逐渐增大,表明试件变形能力减小。综上所述,宽厚比的大小对构件轴压性能具有重要影响;

(3) 通过图5(c)可知,在加载前期,随着配钢率的提高,曲线的斜率也越陡,这意味着组合柱的刚度也就越高;通过对比数据可发现随着配钢率的提高,峰值荷载最高增幅可达14.3%;在弹塑性阶段,曲线的下降段较为平缓,配钢率的提高有利于提高组合柱的延性;在加载后期,内部型钢和核心再生混凝土之间的粘结应力会逐渐降低,这是因为在加载后期,内部型钢的竖向的压缩变形量小于核心混凝土的压缩竖向变形量,应力重分配后,内部型钢的作用越来越大。综上所述,型钢的增加不仅可以提高轴压承载力还可增强延性;

(4) 由图5(d)和对比数据可知,随着再生混凝土强度的提高,轴压峰值荷载最大的提高幅度达19.7%;在加载前期,再生混凝土强度的提高有利于增强组合柱的刚度,但在下降段,轴压承载力降低的速率也越快,表明提高再生混凝土强度可提高轴压承载力,但组合柱也会表现出一定的脆性,同时也说明高强度的再生混凝土和普通的高强度混凝土一样,强度越高,延性越差;

(5) 由图5(e)可知,随着试件长细比增大,轴压承载力曲线上升段的斜率逐渐变小,说明试件刚度随长细比的增大而减小,同时峰值荷载最大降幅为10.7%;峰值荷载后,长细比大的试件轴压承载力下降速率明显快于长细比较小的试件;实际上,绝对的轴心受压是不存在的,试件存在一定偏心,侧向挠曲产生的二阶效应对长细比较大的试件影响更明显,因此需要设计合理长细比以尽量减少长细比对试件轴压性能不利的影响。

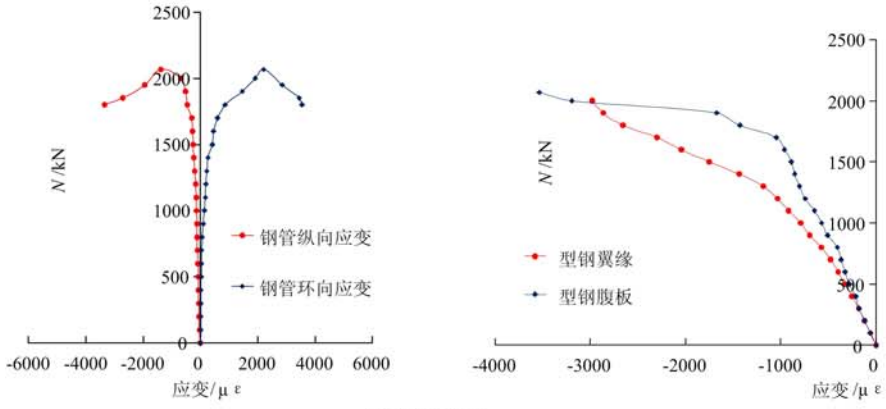
2.3 轴向荷载-轴向应变曲线

通过在方钢管和型钢相应部位粘贴应变片可获取其应变变化规律,图6为方钢管和型钢的轴向荷载-轴向应变曲线,由图可知,不同试件的方钢管和型钢的应变发展规律基本类似,可描述如下:

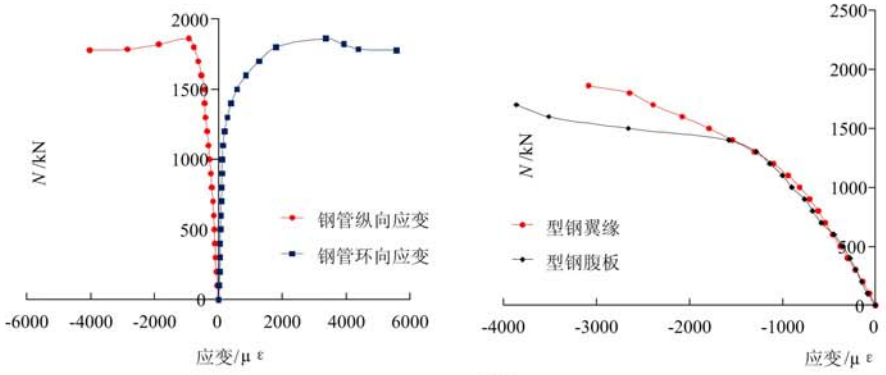
(1) 加载初期,方钢管纵向应变的增长速率快于环向应变,且通过图5可知,方钢管的轴向荷载-轴向应变曲线呈线性关系,该阶段方钢管变形不明显,此时方钢管处于弹性阶段,说明方钢管对内部再生混凝土约束并不明显;随着轴压荷载的逐步加大,再生混凝土的横向膨胀量大于方钢管的横向变形量,使得方钢管横向变形增大,因而内部再生混凝土受到了较强的套箍效果;当轴压荷载加至大约峰值荷载的90%时,曲线出现明显拐点,此时方钢管外鼓变形较为明显,说明内部再生混凝土开始逐渐丧失承载力,方钢管基本达到屈服状态;峰值荷载过后,试件轴压变形明显,方钢管应变增长速率加剧,内部再生混凝土被压溃,此后试件轴压承载力逐渐下降,但因内部再生混凝土受到了较强的套箍效果,使组合柱具有更高的承载力和良好的变形能力;

(2) 型钢应变曲线在加载初期基本处于线弹性阶段,当轴压荷载加至大约峰值荷载的80%时,曲线呈非线性变化,型钢应变增长速率逐渐变大,说明型钢和再生混凝土粘结力开始退化,型钢发挥明显作用。峰值荷载过后,试件轴压承载力逐渐降低,此时型钢应变增加迅速,型钢完全屈服,直至试件丧失承载力而终止加载;

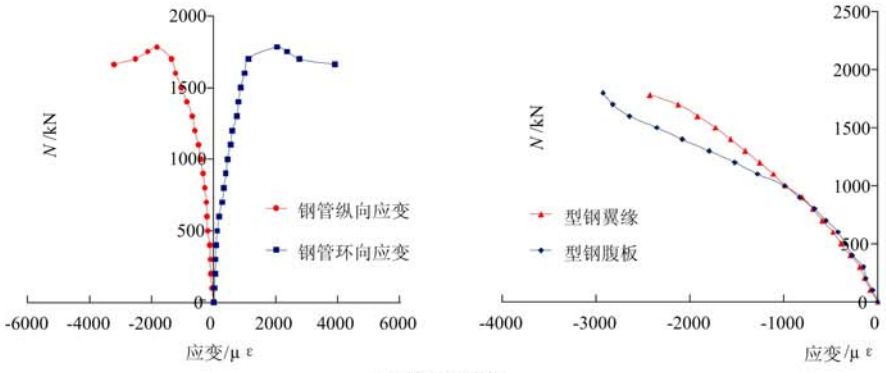
(3) 通过对比试件SPSC1、SPSC5、SPSC12和SPSC13的方钢管和型钢应变曲线可以发现,内部型钢的屈服点早于外部方钢管的屈服点,且方钢管的应变增长速度慢于内部型钢的应变增长速度,这也进一步揭示了组合柱的轴压破坏顺序,即首先是型钢屈服,核心再生混凝土被压溃,最终组合柱的破坏原因是方钢管发生了屈曲鼓起而导致承载力的丧失。



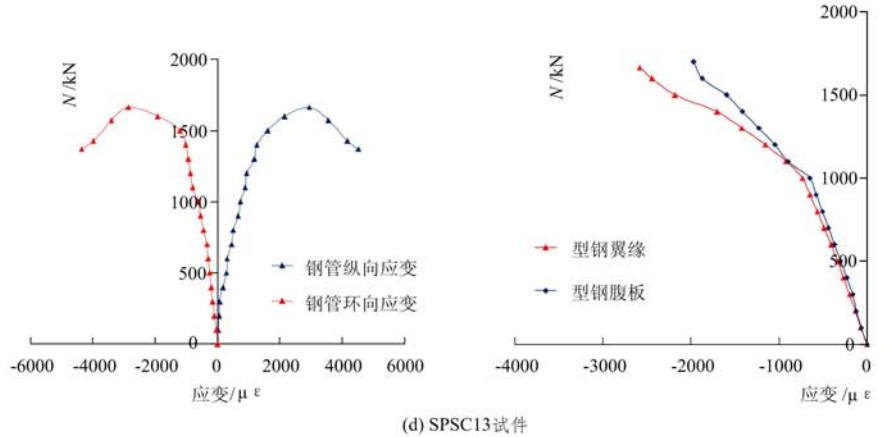
(a) SPSC1试件



(b) SPSC5试件



(c) SPSC12试件



(d) SPSC13试件

图 6　组合柱方钢管和型钢的轴向荷载-轴向应变曲线

Fig. 6　Load-strain curves of square steel tube and profile steel in typical specimens

3 轴压承载力及变形分析

首先对试验特征值进行说明,破坏位移是组合柱轴向荷载和轴向位移曲线下降至峰值荷载的90%时对应的位移,峰值应变是组合柱峰值荷载对应的轴向应变,屈服位移是内部型钢屈服时的位移,峰值位移是组合柱峰值荷载对应的位移。详见表4。

(1) 试件轴压承载力随着再生粗骨料取代率的提高而降低。取代率100%的再生混凝土试件SPSC5与普通混凝土试件SPSC1相比,试件SPSC5轴压承载力降幅约为9.9%;此外,随着再生粗骨料取代率的增加,试件屈服位移、峰值应变和破坏应变逐渐增加,因为再生粗骨料的生产过程中会出现由机械破碎而产生的机械损伤,同时其表面也会存在先天的水泥裂缝,这是再生粗骨料力学性能降低天然骨料的根本原因;在轴向荷载的作用下方钢管和型钢对内部再生混凝土共同提供约束,使得再生混凝土的微裂缝被压紧致密,在一定程度上提高了组合柱的变形能力。

(2) 试件轴压承载力随着宽厚比的增大而减小,试件SPSC5(宽厚比为100)的峰值荷载较试件SPSC6(宽厚比为133.3)的荷载峰值提高7.6%,较试件SPSC7(宽厚比为66.7)降低18.5%;因为较小的宽厚比可有效防止组合柱在轴压荷载下过早发生屈曲,充分发挥组合柱的材料力学性能,较小的宽厚比也可以提高组合柱的轴压刚度和轴压承载力。因此,方钢管增加壁厚可改善组合柱轴压性能。

(3) 随着型钢配钢率的提高,组合柱轴压承载力随之提高,相比于SPSC8(配钢率为4.44%),试件SPSC5(配钢率为5.54%)的轴压承载力提高5.9%,试件SPSC9(配钢率为6.46%)则提高14.3%;因为方钢管属于薄壁钢管,试件在加载前期,试件轴向荷载主要由再生混凝土和型钢共同承担;而在加载后期,型钢作用明显,再生混凝土和型钢的粘结应力将因再生混凝土轴向变形量大于型钢的轴向变形量而逐渐减小,导致组合柱的竖向应力重分布,因此型钢配钢率的提高对组合柱在弹塑性阶段的轴压性能是有利的;同时,这意味着配钢率的提高可以有效地延缓外部方钢的局部压屈。因此提高型钢配钢率不仅可提高试件轴压承载力,还可以提高试件的局部稳定性。

(4) 提高再生混凝土强度对试件轴压承载力是有利的,试件SPSC11较SPSC5的轴压承载力提高19.8%,相对于试件SPSC10提高8.1%;但再生混凝土强度越高,试件的峰值位移及破坏位移越小,即变形能力越差,脆性越大,表明提高再生混凝土强度对组合柱的延性变形是不利的。

表4 试件轴心受压试验主要特征值

Tab.4 Main test values of specimens under axial compression loads

试件编号	屈服荷载/kN	屈服位移/mm	峰值荷载/kN	峰值位移/mm	峰值应变 $\times10^{-3}/\varepsilon$	破坏位移/mm	破坏应变 $\times10^{-3}/\varepsilon$
SPSC1	1653.9	2.94	2067.4	4.41	8.82	10.01	20.02
SPSC2	1585.4	3.01	1981.8	4.53	9.06	10.64	21.28
SPSC3	1572.9	3.03	1966.2	4.62	9.24	11.24	22.48
SPSC4	1528.9	3.07	1911.1	4.70	9.40	11.37	22.74
SPSC5	1489.7	3.21	1862.1	4.89	9.78	11.54	23.08
SPSC6	1375.7	3.28	1719.6	4.76	9.52	10.71	21.42
SPSC7	1828.1	3.19	2285.1	4.84	9.68	14.54	29.08
SPSC8	1406.6	3.32	1758.3	5.01	10.02	11.40	22.8
SPSC9	1607.5	3.04	2009.4	4.34	8.68	14.47	28.94
SPSC10	1650.6	3.09	2063.3	4.62	9.24	11.25	22.5
SPSC11	1783.9	2.89	2229.9	4.55	9.10	10.98	21.96
SPSC12	1426.2	3.90	1782.7	6.05	5.04	16.62	13.85
SPSC13	1330.7	4.62	1663.4	7.31	4.06	17.44	9.69

(5) 试件轴压承载力随着长细比的增加而降低,但试件的峰值位移及破坏位移随着长细比的增加

而提高；试件承载力下降速率随长细比的增加而加快，这是因为试件不可避免地存在初始偏心距，使得长细比越大的试件产生的附加弯矩和相应的侧向挠度越大；且随长细比增大试件的峰值及破坏应变均呈下降趋势，故需要严格控制组合柱的长细比。构件的容许长细比可参考文献[11]给出，容许长细比[λ]=80。

4　组合柱轴压承载力计算

目前，国内外尚无方钢管型钢再生混凝土组合柱的相关计算规程，但对钢管混凝土等其他的组合结构进行了详细承载力机理研究，得到了许多具有应用价值的研究成果，推动了组合结构在实际工程中的应用，并制定了大量的有关规范[12-18]，例如我国 CECS28；日本 AIJ(1997)，英国 BS5400-5 及美国 ANSI/AISC360 等。本文在现有钢管混凝土柱承载力计算方法的基础上，将型钢轴压承载力进行叠加，尝试计算方钢管型钢再生混凝土组合柱的轴压承载力，见表 5。由表 5 可知，ACI318-08、BS5400-05、EC4-2004 及 AIJ-1997 规程的组合柱轴压承载力计算值小于试验值，且与试验值偏差及离散性较小，吻合程度较好；而利用规程 CECS159:2004 与 GJB4141-2000 计算出的轴压承载力大于试验实测值，偏于不安全；另外，采用 ANSI/AISC360-05 规范的计算结果小于试验值，且与试验实测值偏差较大，吻合程度较差，主要是由于 ANSI/AISC360-05 为了计算方便而不考虑钢管、型钢及再生混凝土之间的复杂力学关系，通过将三者的轴压承载力进行简单的叠加，即所说的叠加原理。从各个规范的试算结果看，规程 EC4-2004 的计算值与试验值离散性最小，更加适合于方钢管型钢再生混凝土组合柱的轴压承载力计算，因此本文在 EC4-2004 规程基础之上，采用叠加原理建立如下组合柱的轴压承载力计算公式：

$$N \leqslant k_1 N_u \tag{1}$$

$$N_u = \eta\left(\frac{f_y}{r_s}A_s + \frac{f'_{rc}}{r_c}A_c + \frac{f_a}{r_s}A_a\right) \tag{2}$$

$$\eta = 0.036r^2 - 0.1r + 1 \tag{3}$$

式中，k_1 为考虑长细比对组合柱的轴压承载力的折减系数，按如下公式取值：

$$k_1 = \begin{cases} 1 & (\lambda \leqslant 0.2) \\ \dfrac{1}{\phi + \sqrt{\phi^2 - \lambda^2}} & (\lambda > 0.2) \end{cases} \tag{4}$$

式中，λ 为构件相对长细比，$\lambda = \sqrt{N_k / N_E}$，$N_k$ 为承载力特征值，其计算公式如下：

$$N_k = f_y A_s + f'_{rc} A_{rc} + f_a A_a \tag{5}$$

N_E 为欧拉临界力，按下式计算：

$$N_E = \frac{\pi^2 E_e I_e}{L^2} \tag{6}$$

$E_e I_e$ 为组合柱截面有效刚度

$$E_e I_e = E_s I_s + 0.6(E_{rc} I_{rc} + E_a I_a) \tag{7}$$

$$N_E = \frac{\pi^2[E_s I_s + 0.6(E_{rc} I_{rc} + E_a I_a)]}{L^2} \tag{8}$$

ϕ 为计算参数，按下式计算：

$$\phi = 0.5 \times [1 + 0.21(\lambda - 0.2) + \lambda^2] \tag{9}$$

N 为试件轴压承载力设计值；N_u 为试件轴压强度承载力；η 为再生混凝土对试件轴压承载力影响系数，为使 η 的拟合结果更加准确且具有普遍性，在本文试验数据及文献[19,20]研究的基础上，考虑了再生骨料取代率对轴压承载力的影响；r 为再生粗骨料取代率；A_s、A_a 和 A_{rc} 分别是钢管、型钢及再生混凝土的截面面积；f_y、f_a 和 f'_{rc} 分别为钢管、型钢及再生混凝土圆柱体抗压强度；r_s 和 r_c 分别为钢材和再生混凝土的材料强度系数，取值分别为 $r_s=1$ 和 $r_s=1.18$；E_s、E_a 和 E_{rc} 分别为钢管、型钢和再生混凝土的弹性模量；I_s、I_a 和 I_{rc} 分别为钢管、型钢和再生混凝土的惯性矩；公式(7)中 0.6 为考虑再生混凝土开裂影响的修正系数；L 为构件计算长度。采用 EC4-2004 修正计算公式的组合柱轴压承载力计算结果见

表 5。

表 5 组合柱计算结果与试验结果的比较

Tab. 5 Comparison between calculation results and test results of composite columns

试件编号	计算轴压承载力/实测轴压承载力							
	CECS 159:2004	AIJ-1997	GJB 4141-2000	ACI 318-08	ANSI/AISC 360-05	BS 5400-05	EC4-2004	EC4-2004 (修正)
SPSC1	1.08	0.95	1.29	0.86	0.79	0.87	0.85	0.90
SPSC2	1.12	0.93	1.34	0.89	0.82	0.90	0.93	0.94
SPSC3	1.13	1.03	1.34	0.89	0.82	0.91	0.93	0.93
SPSC4	1.14	0.94	1.36	0.910	0.84	0.92	0.95	0.95
SPSC5	1.16	1.08	1.38	0.93	0.86	0.94	0.96	0.96
SPSC6	1.20	0.86	1.44	0.96	1.05	0.97	0.94	0.99
SPSC7	1.03	0.93	1.21	0.82	0.60	0.85	0.86	0.94
SPSC8	1.16	0.89	1.39	0.91	0.83	0.92	0.95	0.96
SPSC9	1.08	0.86	1.33	0.91	0.84	0.92	0.94	0.95
SPSC10	1.18	0.97	1.43	0.93	0.85	0.93	0.97	0.97
SPSC11	1.19	0.95	1.46	0.92	0.84	0.93	0.93	0.98
SPSC12	1.15	0.92	1.40	0.95	0.88	0.98	0.94	0.99
SPSC13	1.17	1.05	1.42	1.00	0.92	1.05	1.04	1.04
均值(μ)	1.138	0.951	1.368	0.914	0.842	0.930	0.938	0.962
标准差(σ)	0.0474	0.0652	0.0656	0.0432	0.0935	0.0482	0.0449	0.0330
变异系数(δ)	0.0417	0.0686	0.0479	0.0473	0.1111	0.0518	0.0479	0.0343

5 结论

(1) 在轴心受压荷载作用下,组合柱内部型钢首先达到屈服,随着核心再生混凝土被压碎,最终方钢管外鼓屈曲导致组合柱丧失承载力而发生破坏。

(2) 加载前期,方钢管纵向应变快于横向应变,这意味着在弹性阶段方钢管对核心再生混凝土的套箍效果较小,加载后期横向变形明显快于纵向应变,这说明在加载后期由于再生混凝土横向变形量大于方钢管横向变形量,而使得方钢管被动地对核心再生混凝土的约束能力增强;此外,型钢应变增长速率明显大于方钢管,说明型钢先于方钢管达到屈服。

(3) 试件的轴压承载力随着再生骨料取代率、钢管宽厚比和长细比的增大而降低,最大降幅分别为 9.9%、32.9%和 10.7%;而随着型钢配钢率和再生混凝土强度的增加而增大,最大增幅分别为 14.3%和 19.7%;合理设计方钢管宽厚比和型钢配钢率对构件的轴压承载力和延性变形能力是有利的。

(4) 提高再生混凝土强度可以明显提高试件的轴向承载力,但构件变形能力有所降低;试件轴压承载力随着长细比的增大而明显降低,对构件的轴压性能是不利的。

(5) 在 EC4-2004 规范基础之上,通过叠加法对方钢管型钢再生混凝土组合柱进行轴向承载力计算,考虑了再生粗骨料取代率对该组合柱轴压承载力的不利影响,试验值与计算值吻合较好。

(6) 总体而言,方钢管型钢再生混凝土组合柱具有较高的承载力和良好的变形能力,因此经过合理设计的方钢管型钢再生混凝土组合柱可应用于工程中。

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 (XIAO Jianzhuang. Recycled concrete[M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2008 (in Chinese))

[2] Tam V W Y, Tam C M, Le K N. Removal of cement mortar remains from recycled aggregate using pre-soaking

approaches，resources[J]. Conservation and Recycling，2007，50(1)：82－101.

[3] Ismail S，Kwan W H，Ramli M. Mechanical strength and durability properties of concrete containing treated recycled concrete aggregates under different curing conditions[J]. Construction and Building Materials，2017，155(11)：296－306.

[4] 薛建阳，马辉，陈宗平，等. 型钢再生混凝土组合柱轴压性能试验研究[J]. 建筑结构，2013，43(7)：75－76（XUE Jianyang，MA Hui，CHEN Zongping，et al. Experimental study on axial compressive behavior of steel reinforced recycled concrete composite columns[J]. Building Structure，2013，43(7)：75－76 (in Chinese))

[5] 马辉，孙书伟，毛肇玮，等. 型钢再生混凝土柱－钢梁组合框架节点恢复力模型试验研究[J]. 实验力学，2018，33(6)：938－948（MA Hui，SUN Shu Wei，MAO Zhaowei，et al. Study on restoring force model test of steel recycled concrete column-steel beam composite frame joints[J]. Journal of Experimental Mechanics，2018，33(6)：938－948 (in Chinese))

[6] 薛建阳，马辉，刘义. 反复荷载下型钢再生混凝土柱抗震性能试验研究[J]. 土木工程学报，2014，47(1)：36－45（XUE Jianyang，MA Hui，LIU Yi. Experimental study on seismic behavior of steel reinforced concrete columns under cyclic loading[J]. Journal of Civil Engineering，2014，47(1)：36－45 (in Chinese))

[7] 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 (in Chinese))

[8] 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)：129－135（NIU Haicheng，CAO Wanlin，DONG Hongying，et al. Experimental research on high strength recycled concrete-filled steel tube columns subjected to axial compression[J]. Journal of Building Structures，2015，36(6)：129－135 (in Chinese))

[9] 王连广，陈百玲. GFRP 管及钢管型钢混凝土结构[M]. 沈阳：辽宁科学技术出版社，2013（WANG Lianguang，CHEN Bailing. Steel reinforced concrete filled glass fiber reinforced polymer (GFRP) tube or steel tube structures[M]. Shenyang：Liaoning Science and Technology Publishing House，2013 (in Chinese))

[10] 陈兰响. 钢骨－钢管高强混凝土构件的力学特性研究[D]. 大连大学，2016（CHEN Lanxiang. Research on behavior of steel tube filled with steel-reinforced high-strength concrete[D]. Dalian University，2016 (in Chinese))

[11] 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（GB 50936-2014，Technical coal for concrete filled steel tubular structures[S]. Beijing：China Building Industry Press，2014 (in Chinese))

[12] 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（CECS159：2004，Technical specification for structures with concrete-filled rectangular steel tube members[S]. Beijing：China Planning Press，2004 (in Chinese))

[13] AIJ-1997 Recommendations for design and construction of concrete filled steel tubular structures[S]. Tokyo，Japan：Architectural Institute of Japan，1997.

[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，2000（GJB 4142-2000，Technical specifications for early-strength model composite structure used for navy port emergency repair in war time[S]. Beijing：The General Logistics Department of PLA，2000 (in Chinese))

[15] ACI 318-08，Building code requirements for structural concrete and commentary[S]. Detroit，USA：American Concrete Institute，2008.

[16] ANSI/AISC 360-05，Specification for structural steel buildings[S]. Chicago，USA：American Institute of Steel Construction，2005.

[17] BS 5400 Steel，Concrete and composite bridge：part5：code of practice for design composite bridges[S]. London，UK：British Standards Institution，2005.

[18] EC4：design of steel and concrete structures：part 1：general rules and rules for building[S]. Brussels，Belgium：European Committee for standardization，2004.

[19] 陈宗平，张士前，王妮，等. 钢管再生混凝土轴压短柱受力性能的试验与理论分析[J]. 工程力学，2013，30(4)：107－114（CHEN Zongping，ZHANG Shiqian，WANG Ni，et al. Experimental study and theoretical analysis on axial compress capacity of recycled aggregate concrete-filled circle steel tube short column[J]. Engineering Mechanics，2013，30(4)：107－114 (in Chinese))

[20] 柯晓军，陈宗平，薛建阳，等. 方钢管再生混凝土短柱轴压承载性能试验研究[J]. 工程力学，2013，30(8)：35－41 (KE Xiaojun，CHEN Zongping，XUE Jianyang，et al. Experimental study on the bearing capacity of recycled aggregate concrete-filled square steel tube short columns under axial compression[J]. Engineering Mechanics，2013，30(8)：35－41 (in Chinese))

Experimental investigation on axial compression performance of recycled aggregate concrete filled square steel tube-profile steel composite columns

MA Hui，HUANG Cheng，HU Guang-bin，LIU Yun-he，LI Zhe
(School of Civil Engineering and Architecture，Xi'an University of Technology，Shaanxi 710048，China)

Abstract：In order to study the axial compression performance of recycled concrete filled square steel tube-profile steel composite columns，13 specimens are tested under monotonic static loading. In the tests，the major variable parameters include the slenderness ratio，recycled coarse aggregate (RCA) replacement percentage，recycled concrete strength，steel reinforced ratio，and the width to thickness ratio of steel tube. The failure process and mode of all specimens are observed，and the load-displacement curves and the load-strain curves are also obtained. The influence of design parameters on the axial compressive behavior of the specimens is analyzed. The results indicate that the axial compressive process and failure mode of all specimens are similar. The internal profile steel yields before the external steel tube，then the core recycled concrete is crushed，and ultimately the square steel tube buckling leads to the loss of load-bearing capacity and failure of the specimens. With increasing the slenderness ratio，the width to thickness ratio and recycled coarse aggregate replacement percentage，the maximum decreasing values of axial bearing capacity of specimens are 10.7%，24.8% and 9.9%，respectively. With increasing the recycled concrete strength and steel ratio，the maximum increasing values of axial compressive capacity are 19.7% and 14.3%，respectively. On the whole，the specimens show high bearing capacity and favorable deformation ability. Moreover，by referring to the relevant domestic and international regulations，the calculation formula on the axial bearing capacity of square steel tube steel reinforced recycled concrete composite columns are established by the superposition principle. Meanwhile，the validity of the calculation formula is verified.

Keywords：square steel tube；RCA replacement percentage；composite column；recycled concrete；axial compression test；axial compression performance