

基于正交的圆钢管再生混凝土柱力学性能研究

闻 洋¹,姜雯丽霞¹,韩洪鹏¹,付立平²

(1. 内蒙古科技大学建筑与土木工程学院,内蒙古 包头 014010;2. 包头市公路工程质量监督站,内蒙古 包头 014000)

摘 要 目的 研究圆钢管再生混凝土柱力学性能的影响因素,推算出适用于此类组合柱的承载力计算公式. 方法 利用正交试验变化含钢率、取代率和长细比等参数变量对柱的荷载-应变、荷载-挠度等关系曲线进行分析. 结果 试验结果表明:组合柱弹塑性失稳破坏破坏特征显著,承载力影响因素的敏感程度依次为长细比、含钢率和取代率,其均值分别为196、147、113;当长细比为50、含钢率为11%、取代率为30%时,承载力最大为1 351 kN;模拟结果表明:组合柱中部应力最大,破坏程度最大. 结论 根据国内外的承载力规程进行计算,对比得出中国CECS28—2012规程最适合此类结构,推算出适用于此组合柱的承载力计算公式: $N = (-0.0168\lambda + 1.8093)(f_y A_s + K_1 f_c A_c)$.

关键词 正交试验;钢管再生混凝土组合柱;有限元模拟;承载力;力学性能;关系曲线

中图分类号 TU398.1

文献标志码 A

Study on Mechanics Properties of Recycled Concrete Filled Circular Steel Tube Columns Based on Orthogonal Design

WEN Yang¹, JIANG Wenlixia¹, HAN Hongpeng¹, FU Liping²

(1. School of Civil Engineering, Inner Mongolia University of Science and Technology, Baotou, China, 014010;

2. Baotou Highway Engineering Quality Supervision Station, Baotou, China, 014000)

Abstract: In order to study the sensitive factors to the mechanical properties of recycled concrete filled circular steel tubular columns and deduce the bearing capacity formula suitable for such composite columns, the load-strain and load-deflection curves of the columns are analyzed by orthogonal test with the parameters of steel content, substitution rate and slenderness ratio, and then simulated by finite element method. The test results show that the elastic-plastic failure characteristics of composite columns are remarkable, and the sensitivity of bearing capacity factors is slenderness ratio, steel content and substitution ratio in turn. The average values are 196, 147 and 113, respectively. When slenderness ratio is 50, steel content is 11% and substitution ratio is 30%, the maximum

收稿日期:2018-05-17

基金项目:国家自然科学基金项目(51768056)

作者简介:闻洋(1976—),男,教授,博士,主要从事组合结构方面研究.

bearing capacity is 1 351 kN. The simulation results show that the stress in the middle of the composite column is the largest and the damage degree is the greatest. According to the domestic and foreign rules of bearing capacity, it is concluded that the regulations of CECS28—2012 in China is most suitable for this kind of structure, Finally, obtains the calculating formula of bearing capacity from this composite column: $N = (-0.0168\lambda + 1.8093)(f_y A_s + K_1 f_c A_c)$.

Key words: orthogonal experiment; recycled concrete filled steel tubular composite columns; finite element simulation method; bearing capacity; mechanical property; relationship carves

建筑理念的不断发展,人们对建筑的要求不再仅满足于承载力要求,更是需要满足绿色、经济、舒适等要求,专家学者们提出了再生混凝土的概念^[1-4].随着钢管再生混凝土柱的出现,分析试验中的各个参数并探究它们对试件的影响规律,得出试件的优化组合,就成了研究组合柱的重中之重. M. V. Chitawadagi 等^[5]以钢管直径、厚度、混凝土强度及长细比为变量对钢管混凝土柱进行轴压强度试验,分析了钢管混凝土柱的轴压强度和轴向位移,通过 243 个试件的试验数据从 3 个因素和 3 个层次阐明模型分析的准确度;邱慈长等^[6]对薄壁钢管再生混凝土柱与普通钢管混凝土柱分别进行了轴心荷载试验,对比研究了轴压荷载下的力学性能,当核心混凝土轴压强度相同时,薄壁钢管混凝土的承载力更低,极限变形量更大;张向冈等^[7]通过 10 个圆钢管再生混凝土柱和 6 个方钢管再生混凝土柱研究了在不同取代率、长细比、轴压比和含钢率的参数变化下钢管再生混凝土柱的塑性较长度;向星赞等^[8]通过 15 根方钢管自密实再生混凝土短柱进行偏心受压试验,选取偏心距、含钢率、再生骨料替代率作为变量,对试件的破坏形态,荷载-挠度关系曲线、峰值挠度等问题进行研究,结果发现,偏心率和含钢率对钢管柱的承载力和峰值挠度的影响更显著.

国内外的建筑理念已由原来的单纯承载力的要求转变为通过研究参数变量得到更为经济、舒适、安全的建筑^[9-12].基于此,笔者通过研究长细比、取代率和含钢率来分析钢管再生混凝土组合柱的力学性能,分析组合

柱的破坏应力,通过正交试验得出组合柱的优化组合,最后通过采用国内外承载力计算规程对组合柱进行计算,得出适用于此类组合柱的承载力计算公式.

1 试验概况

1.1 试件的设计

本次试验采用三因素三水平的正交试验,共设计了 9 根钢管再生混凝土组合柱,试验开始前对组合柱进行简单模拟和理论计算^[13],最终确定混凝土等级为 C35,并选用屈服强度为 235 MPa,直径为 159 mm 的钢管.依据日本 AIJ 规程《钢管混凝土构造设计施工指针》(AIJ - CFT (1997)),对长柱的定义为长细比需大于 48,同时考虑到如果柱子的长度太大会影响内部混凝土的浇筑质量,因此选择其长细比为 50,55,60.通过对钢材标准拉伸试件进行材性试验,处理数据得到钢材的物理力学性能指标如表 1,组合柱的具体参数见表 2.

表 1 钢材的物理力学性能指标

Table 1 Physical and mechanical properties of steel

壁厚/mm	屈服强度/MPa	抗拉强度/MPa	弹性模量/ 10 ⁵ MPa
2	345.6	414.0	2.04
3	314.2	401.3	2.08
4	332.7	407.6	2.17

1.2 应变片布置

为了测得组合柱的应变和挠度变化,在组合柱的 1/4、1/2、3/4 处的四周均匀布置横纵应变片,并在组合柱上布置 4 个位移计,最终由数据采集仪得出试验数据,其布置如图 1 所示.

表2 组合柱参数表

Table 2 Parameters table of combination column specimen

序号	名称	柱长/ mm	壁厚/ mm	长细比	取代 率/%	含钢 率/%
1	C-1aA	2 000	2	50	0	5
2	C-1cB	2 000	4	50	30	11
3	C-1bC	2 000	3	50	60	8
4	C-2bA	2 200	3	55	0	8
5	C-2aB	2 200	2	55	30	5
6	C-2cC	2 200	4	55	60	11
7	C-3cA	2 400	4	60	0	11
8	C-3bB	2 400	3	60	30	8
9	C-3aC	2 400	2	60	60	5

注: C表示圆钢管再生混凝土组合柱; 1、2、3 分别表示长细比为 50、55、60; a、b、c 分别表示壁厚为 2 mm、3 mm、4 mm; A、B、C 分别表示取代率为 0、30%、60%。

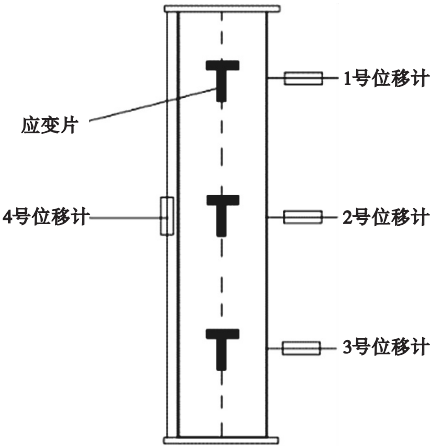


图1 应变片与位移计布置图

Fig. 1 Strain gauges and displacement gauge layout

1.3 加载装置与加载制度

将组合柱置于压力机的底座,让组合柱轴心与压力机底端中心重合,用千斤顶进行轴心受压,其装置图如图2所示.此次试验是静力轴心加载试验,试验分三个阶段进行:预加载、标准加载和破坏加载.预加载阶段,施加大约 $0.04 P_{max}$ (P_{max} 是组合柱的极限荷载),进行正式加载后改由千斤顶施加大约 $0.1 P_{max}$,加载到试件屈服后,将荷载改为 $0.05 P_{max}$,继续加载直到试件破坏.



图2 加载装置图

Fig. 2 Test setup

2 破坏过程

组合柱发生弹塑性失稳破坏,9根长柱的破坏过程大致相同,最终均为混凝土未被压坏,但钢管屈服导致试件破坏.在弹性阶段,荷载与应变呈线性增加,当荷载达到 $0.45 P_{max}$ 时,管内传出清脆响声,有轻量铁屑掉落;继续加载后,荷载与应变曲线斜率变小,组合柱产生微小变形;施加荷载达到 $0.7 P_{max}$ 左右时,进入弹塑性阶段,此时内部核心再生混凝土受到钢管的约束,处于三向受压的状态,应变增加速率变快,组合柱发生变形,向一边弯曲;荷载达到 $0.9 P_{max}$ 后,组合柱进入塑性阶段,钢管 1/4 和 3/4 处出现明显弯曲变形,铁屑严重脱落,管内传出清脆响声,荷载-应变曲线斜率继续变缓,加载到 P_{max} 后,组合柱被压坏,卸载后组合柱继续弯曲,最终组合柱呈“弓形”,中部挠度最大,严重弯曲,管壁与混凝土不再粘结,组合柱破坏.最终破坏形态如图3所示.



图3 试件破坏形态图

Fig. 3 Failure patterns

3 试验关系曲线分析

3.1 荷载-应变曲线分析

组合柱荷载-应变曲线如图4所示.由图4可看出,在弹性阶段,荷载与应变呈线性增加,当荷载达到 $0.75 P_{\max}$ 左右,荷载-应变曲线斜率变小,继续增加,曲线产生拐点,且横向应变与纵向应变的拐点同时产生,横向应变曲线产生拐点的原因是管内混凝土的横向变形系数超过钢管,混凝土受挤压向外

膨胀,使钢管横向变形增大,纵向应变曲线产生拐点的原因是管内混凝土产生微裂缝,并有扩大趋势,使得混凝土弹性模量减小,钢管和混凝土产生了应力重分布,继续施加荷载,钢管产生明显变形.荷载达到 P_{\max} 左右,组合柱的纵横向应变迅速增加,钢管变形加大,曲线又出现拐点,这是由于管壁达到屈服引起的.卸载后荷载迅速减小,应变迅速增加,组合柱被加压破坏.

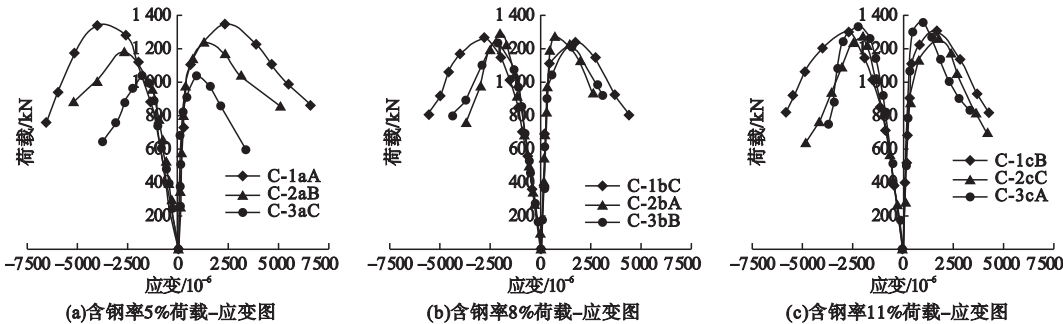


图4 组合柱荷载-应变曲线

Fig. 4 Load-strain curve of combination column

由图4可看出含钢率对组合柱的影响规律:含钢率越大的组合柱其荷载-应变曲线在弹性阶段曲率越大,说明组合柱的前期刚度越大.当荷载达到 P_{\max} 时,含钢率越大的组合柱峰值点明显更大;当含钢率相同,取代率在 $0 \sim 60\%$,长细比在 $50 \sim 60$,取代率和长细比对组合柱的影响不大,卸载后C-3aC、C-2bB、C-3cA的曲线斜率明显比其他组合柱的曲线斜率大,这说明取代率在 $0 \sim 60\%$,长细比越大,卸载后组合柱的荷载-应变曲线越缓,后期延性也越差.

组合柱荷载-挠度曲线如图5所示.在弹性阶段,荷载-挠度基本呈线性变化,荷载达到大约 $0.9 P_{\max}$ 后荷载-挠度曲线出现拐点说明此时管壁开始屈服,组合柱挠度增加,当荷载达到约 P_{\max} 后,曲线斜率变大,挠度激增,最终,组合柱中部挠度最大,组合柱呈弓形.含钢率相同时,对比C-1aA、C-2aB和C-3aC可看出,含钢率大的组合柱荷载-挠度曲线更缓,说明含钢率越大,其组合柱延性越好.且由图5可看出,在弹性阶段长细比和取代率的变化对组合柱的影响并不大.

3.2 荷载-挠度曲线分析

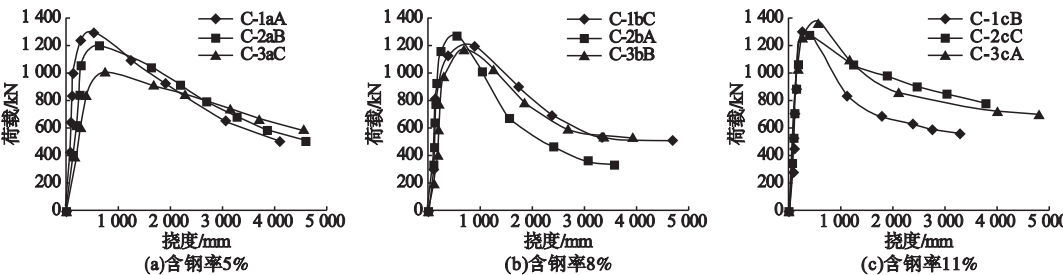


图5 组合柱荷载-挠度曲线

Fig. 5 Load-displacement curve of combination column

4 正交试验分析

以长细比、取代率和含钢率为变量对组合柱进行正交试验,其取值如表 3 所示. 表 4 和表 5 是组合柱的正交试验结果、极差分析.

表 3 组合柱影响因素及水平

Table 3 Influence factor and level of combination column

水平	长细比	取代率/%	含钢率/%
1	50	0	5
2	55	30	8
3	60	60	11

表 4 组合柱正交试验结果分析

Table 4 Orthogonal experimental result analysis of combination column

试验	水平 (长细比)	水平 (取代率/%)	水平 (含钢率/%)	承载力/ kN
1	1(50)	1(0)	1(5)	1 304
2	1(50)	2(30)	3(11)	1 351
3	1(50)	3(60)	2(8)	1 256
4	2(55)	1(0)	2(8)	1 320
5	2(55)	2(30)	1(5)	1 159
6	2(55)	3(60)	3(11)	1 269
7	3(60)	1(0)	3(11)	1 260
8	3(60)	2(30)	2(8)	1 089
9	3(60)	3(60)	1(5)	981

表 5 组合柱正交试验极差分析

Table 5 Orthogonal experimental range analysis of combination column

参数	极差		
	水平 1	水平 2	水平 3
K_1	3 955	3 911	3 498
K_2	3 809	3 645	3 701
K_3	3 367	3 573	3 940
$N_1(K_1/3)$	1 318	1 304	1 166
$N_2(K_2/3)$	1 270	1 215	1 234
$N_3(K_3/3)$	1 122	1 191	1 313
均值 R	196	113	147

由表 4、表 5 可看出:在取代率为 0 ~ 60%、含钢率在 5% ~ 11% 以及长细比在 50 ~ 60,组合柱的优化组合是取代率为 30%、长细比 50、含钢率 11%, P_{max} 为 1 351 kN. 且由均值可看出,组合柱承载力对参数变量的敏感程度

依次是长细比(均值为 196),含钢率(均值 147),取代率(均值 113).

对 3 个参数变量分别进行分析可得:①长细比对组合柱的影响最高,均值是 196,说明组合柱最终发生失稳破坏. 在弹塑性阶段时,组合柱从原有的平衡状态随着荷载的增加变成不平衡状态,随之出现了与原来平衡不同的新的平衡状态,可以说是由稳定平衡变成不稳定平衡状态,最终,继续施加荷载进入塑性阶段,这种平衡打破,导致失稳破坏;②含钢率对组合柱的影响低于长细比,其均值是 147. 含钢率决定试件的刚度,其刚度越大,试件在弹性阶段的荷载 - 应变曲线斜率越大,说明组合柱的初始应变越小,而后期曲线斜率越小,说明组合柱后期延性越好,变形能力越好;③取代率对组合柱的影响最小,其均值为 113. 无论是前期刚度还是极限承载力或后期延性,取代率对其影响都较小. 而取代率对组合柱影响较小的主要原因是内置大块体与新混凝土的粘结性较差,材料间有空隙,使得在加载时,块体和新混凝土并不能均匀受力,导致组合柱的承载力降低,但由于核心混凝土受管壁的环向应力,使其承载力提高,故取代率的变化对组合柱的承载力影响较小.

5 组合柱承载力推断与计算

5.1 钢管混凝土柱承载力计算

(1)日本 AIJ 规程:《钢管混凝土构造设计施工指针》(AIJ - CFT(1997))^[15]

钢管混凝土长柱轴压极限承载力公式^[16]为

$$N_{cr} = {}_sN_{cr} + {}_cN_{cr} \tag{1}$$

式中: ${}_sN_{cr}$ 为试件中钢管部分所能承担的极限承载力; ${}_cN_{cr}$ 为试件中混凝土部分所能承担的极限承载力.

(2)美国 AISC 规程:《荷载抗力系数设计法钢结构规程》(AISC - LRFD(99))^[17]

钢管混凝土长柱轴压极限承载力公式为

$$N_u = F_{cr} A_s, \lambda_c = \frac{KL}{r_m \pi \sqrt{\frac{F_{my}}{E_m}}}.$$

(2)

式中: λ_c 为试件相对长细比;
当 $\lambda_c < 1.5, F_{cr} = (0.658^{\lambda_c^2}) F_{my}$; 当 $\lambda_c > 1.5, F_{cr} = \left(\frac{0.877}{\lambda_c^2}\right) F_{my}$; E_m 为折算弹性模量,
 $E_m = E + 0.4 E_c \frac{A_c}{A_s}$; r_m 为回转半径; $K = 1$.

(3) 中国《钢-混凝土组合结构设计规程》(DL/T5085—1999)

钢管混凝土长柱轴压极限承载力公式为

$$N_u = \varphi f_{sc} A_{sc},$$

(3)

$$f_{sc} = (1.212 + \eta_s \xi_0 + \eta_c \xi_0^2) f_c,$$

(4)

$$\eta_s = \frac{0.175}{235} \frac{9f}{f_c} + 0.749,$$

(5)

$$\eta_c = -0.1038 f_c + 0.0309.$$

(6)

式中: ξ_0 为套箍系数设计值; η_s, η_c 为计算系数; φ 为轴心受压稳定系数; f_{sc} 为组合柱轴压强度设计值.

(4) 中国《钢管混凝土结构技术规程》(CECS28—2012)^[18]

轴压极限承载力公式为

$$N_c = \varphi_1 N_0.$$

(7)

式中: φ_1 为考虑长细比作用的承载力折减系数; N_0 为钢管混凝土短柱的轴心受压承载力.

当 $0.5 < \theta \leq [\theta]$ 时,

$$N_0 = 0.9 f_c A_c (1 + \alpha \theta);$$

(8)

$$[\theta] < \theta \leq 2.5 \text{ 时},$$

$$N_0 = 0.9 f_c A_c (1 + \theta + \sqrt{\theta}).$$

(9)

式中: θ 为钢管混凝土的套箍系数; $[\theta]$ 为套箍系数界限值;含钢率 α 和 $[\theta]$ 与混凝土等级有关,其取值如表 6 所示.

表 6 α 和 $[\theta]$ 的取值

Table 6 Value of α and $[\theta]$		
混凝土等级	α	$[\theta]$
$\leq C50$	2.00	1.00
C55 ~ C80	1.80	1.56

当长细比 $L_e/D > 4$, 考虑长细比的影响,
 φ_1 的计算过程为

$$\varphi_1 = 1 - 0.115 \sqrt{L_e/D - 4}.$$

(10)

运用以上 4 种规范来对组合柱进行计算,并将计算值与试验得出数值进行对比,其结果如表 7 所示.

表 7 试验极限承载力与计算极限承载力比值及其统计特征

Table 7 Ratio of ultimate bearing capacity and ultimate bearing capacity and statistic feature of the test				
编号	试验极限承载力/计算极限承载力			
	AIJ	AISC	DL/T5085—1999	CECS28—2012
C-1aA	1.011	1.098	1.121	0.976
C-1cB	0.942	1.125	0.876	1.102
C-1bC	0.960	1.064	0.956	1.006
C-2bA	1.021	1.209	1.105	0.978
C-2aB	1.004	1.145	0.996	0.943
C-2cC	1.100	1.557	1.153	1.097
C-3cA	0.909	1.427	0.972	0.964
C-3bB	1.207	1.502	0.943	0.945
C-3aC	1.064	1.466	0.989	1.062
平均值	1.029	1.266	1.015	1.008
方差	0.006	0.029	0.008	0.003
标准值	0.077	0.170	0.089	0.055

由表 7 可知,运用美国 AISC 规程得出的承载力比试验得出的承载力要低,大约偏低 20% 左右,由此说明美国 AISC 规程的算法有较大的保守性,有很大的安全储备;而由方差和标准差可看出,日本《钢管混凝土构造设计施工指针》(AIJ-CFT(1997))和中国《钢-混凝土组合结构设计规程》(DL/T5085—1999)的计算结果离散性太差,而中国《钢管混凝土结构技术规程》(CECS28—2012)相对于其他规程来说,离散性好、且最接近试验结果,故建议选用《钢管混凝土结构技术规程》(CECS28—2012)来对组合长柱进行计算.

5.2 组合柱承载力计算

由于传统钢管混凝土柱承载力计算规程并未考虑再生混凝土的影响,故其结果与实

际存在误差,故此在《钢管混凝土结构技术规程》(CECS28—2012)基础上引用华南理工大学吴波课题提出的考虑取代率和长细比条件下的组合柱的计算公式[19],其轴压极限承载力公式如下:

$$N=f_yA_s+K_1f_cA_c.$$
 (11)

K_1 为混凝土强度提高系数

$$K_1=1.08+0.15\xi,\xi=A_sf_y/A_cf_c.$$
 (12)

根据上述公式计算 9 个组合柱的承载力计算公式,其结果如表 8 所示.

表 8 承载力公式计算结果

Table 8 Formula calculation results of bearing capacity

编号	长细比	N_u/kN	N/kN	$\psi=N_u/N$
C-1aA	50	1 304	1 266	1.03
C-1cB	50	1 351	1 571	0.86
C-1bC	50	1 256	1 441	0.89
C-2bA	55	1 320	1 420	0.93
C-2aB	55	1 159	1 233	0.94
C-2cC	55	1 269	1 567	0.81
C-3cA	60	1 260	1 575	0.80
C-3bB	60	1 089	1 433	0.76
C-3aC	60	981	1 242	0.79

通过线性回归得出 ψ 与长细比 λ 的关系,其线性关系如图 6 所示.

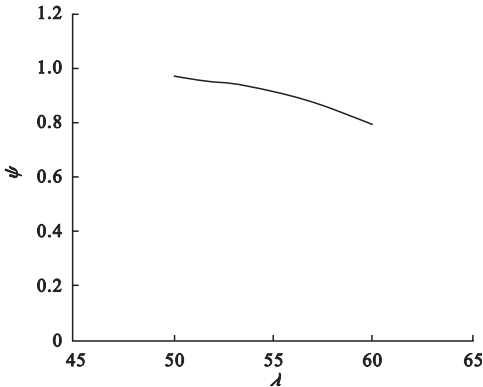


图 6 长细比 λ 与 ψ 关系

Fig. 6 Relationship between the slenderness ratio and ψ

拟合得到线性方程为

$$\psi=-0.016\ 8\lambda+1.809\ 3.$$
 (13)

最终得出再生混凝土组合柱的承载力计

算公式:

$$N=(-0.016\ 8\lambda+1.809\ 3)(f_yA_s+K_1f_cA_c).$$
 (14)

式中: λ 为长细比; K_1 为混凝土强度提高系数; A_s 为钢管截面面积; A_c 为混凝土截面面积; f_y 为钢管屈服强度; f_c 为混凝土抗压强度.

6 结 论

(1)在试验范围内,组合柱的弹塑性失稳破坏特征显著,中部破坏最大,最终试验呈“弓形”破坏.

(2)组合柱承载力对影响因素的敏感程度排序依次是:长细比、含钢率、取代率;优化组合是长细比 50、含钢率 11%、取代率 30%,最大极限承载力为 1 351 kN.

(3)采用各国规程进行承载力计算,最终得出中国《钢管混凝土结构技术规程》(CECS28—2012)最符合此类组合柱,并在原有规程的基础上,考虑吴波课题组提出的取代率和长细比情况下得出圆钢管再生混凝土柱的承载力公式: $N=(-0.016\ 8\lambda+1.809\ 3)(f_yA_s+K_1f_cA_c).$

参考文献

[1] 钟善桐,张文福,屠永清,等. 钢管混凝土结构抗震性能的研究[J]. 建筑钢结构进展,2002,4(2):3-15.
(ZHONG Shantong, ZHANG Wenfu, TU Yongqing, et al. The research of seismic behaviors for concrete-filled steel tubular (CFST) structures[J]. Progress in steel building structures, 2002, 4(2):3-15.)

[2] 周静海,何海进,孟宪宏,等. 再生混凝土基本力学性能试验[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版),2010,26(3):464-468.
(ZHOU Jinghai, HE Haijin, MENG Xianhong, et al. Basic mechanical properties of recycled concrete experimental study [J]. Journal of Shenyang jianzhu university (natural science), 2010, 26(3):464-468.)

[3] 周静海,边晨,王凤池,等. 再生骨料的分布对再生混凝土抗拉性能的影响[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版),2015,31(2):267-275.
(ZHOU Jinghai, BIAN Chen, WANG Fengchi, et al. The effect of recycled aggregate distribution

- uniformity on recycled concrete tensile properties [J]. Journal of Shenyang jianzhu university (natural science), 2015, 31(2): 267–275.)
- [4] 董素芹, 魏献忠, 高兵. 基于正交试验和有限元模拟的圆钢管再生混凝土柱力学性能敏感因素分析[J]. 建筑钢结构进展, 2018, 20(5): 52–58.
(DONG Suqin, WEI Xianzhong, GAO Bing. Sensitivity analysis on mechanical properties of recycled concrete filled circular steel tubular columns based on orthogonal test and numerical simulation [J]. Progress in steel building structures, 2018, 20(5): 52–58.)
- [5] CHITAWADAGI M V, NARASIMHAN M C, KULKARNI S M. Axial strength of circular concrete-filled steel tube columns-DOE approach [J]. Journal of constructional steel research, 2010, 66(10): 1248–1260.
- [6] 邱慈长, 王清远, 石宵爽, 等. 薄壁钢管再生混凝土轴压试验研究[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.)
- [7] 张向冈, 陈宗平, 薛建阳. 钢管再生混凝土柱塑性铰长度试验研究[J]. 建筑结构, 2015, 45(20): 52–56.
(ZHANG Xianggang, CHEN Zongping, XUE Jianyang. Test study on plastic hinge length of recycled aggregate concrete filled steel tube column [J]. Building structure, 2015, 45(20): 52–56.)
- [8] 向星赞, 赵人达, 贾毅, 等. 方钢管自密实再生混凝土偏压短柱的力学行为[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2017, 33(3): 420–428.
(XIANG Xingyun, ZHAO Renda, JIA Yi, et al. Mechanical behavior of the eccentric loaded square self-compacting recycled aggregate concrete filled steel tube stub columns [J]. Journal of Shenyang jianzhu university (natural science), 2017, 33(3): 420–428.)
- [9] GE H B, USAMI T. Strength analysis of concrete-filled thin-walled steel box columns [J]. Journal of constructional steel research, 1994, 30(3): 259–281.
- [10] CAO V V. Experimental behaviour of recycled aggregate concrete-filled steel tubes under axial loading [J]. International journal of civil engineering, 2019(1).
- [11] THOMAS C, SETIÉN J, POLANCO J A, et al. Durability of recycled aggregate concrete [J]. Construction and building materials, 2013, 40: 1054–1065.
- [12] CHEN Zongping, JING Chenggui, XU Jinjun, et al. Seismic performance of recycled concrete-filled square steel tube columns [J]. Earthquake engineering and engineering vibration, 2017(1): 122–133.
- [13] 张志权, 赵均海, 张玉芬, 等. 复合钢管混凝土柱轴压承载力计算[J]. 长安大学学报(自然科学版), 2010, 30(1): 67–71.
(ZHANG Zhiquan, ZHAO Junhai, ZHANG Yufen, et al. Axial bearing capacity of composite concrete-filled steel tubular columns [J]. Journal of Chang'an university (natural science edition), 2010, 30(1): 67–71.)
- [14] 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(5): 65–77.
(WU Bo, ZHAO Xinyu, ZHANG Jinsuo. Tests on slender circular thin-walled steel tubular columns filled with demolished concrete lumps under concentrically/eccentrically compressive loading [J]. China civil engineering journal, 2012(5): 65–77.)
- [15] Architectural Institute of Japan. Recommendations for design and construction of concrete filled steel tubular structures: AIJ-CFT(1997) [S]. Tokyo: Architectural Institute of Japan, 1997.
- [16] 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 Xinbo, ZHANG Sumei, SUN Yuping. Introduction to AIJ method of load-carrying capacity of concrete-filled circular steel tubes [J]. Industrial construction, 2004, 34(2): 69–74.)
- [17] American Institute of Steel Construction (AISC). Specification for structural steel buildings: AISC-LRFD (99) [S]. Chicago, USA: [s. n.], 2005.
- [18] 哈尔滨工业大学, 中国建筑科学研究院. 钢管混凝土结构技术规程: CECS 28: 2012 [S]. 北京: 中国计划出版社, 2012.
(Harbin Institute of Technology, China Academy of Building Research. Specification for design and construction of concrete-filled steel tubular structures: CECS 28: 2012 [S]. Beijing: China planning press, 2012.)
- [19] 吴波, 刘伟, 刘琼祥, 等. 钢管再生混合短柱的轴压性能试验[J]. 土木工程学报, 2010, 43(2): 32–38.
(WU Bo, LIU Wei, LIU Qiongxiang, et al. Experimental study on the behavior of recycled-concrete-segment/lump filled steel tubular stub columns subjected to concentrically axial load [J]. China civil engineering journal, 2010, 43(2): 32–38.)
- (责任编辑: 刘春光 英文审校: 范丽婷)