

# 薄壁钢管再生混凝土柱轴压敏感因素对比分析

闻 洋<sup>1</sup>,张迎春<sup>1</sup>,梁东旭<sup>2</sup>,王中政<sup>3</sup>

(1. 内蒙古科技大学建筑与土木工程学院,内蒙古 包头 014010;2. 通化师范学院基建处,吉林 通化 134000;  
3. 国际关系学院文化与传播系,北京 100091)

**摘 要** 目的 找出不同参数对薄壁钢管再生混凝土柱力学性能敏感程度的影响规律,在保证最优承载力和成本的同时,给出最佳参数组合. 方法 以长细比、核心混凝土强度、取代率、含钢率为变化参数,采用实验对照、正交试验法、SPSS 软件对薄壁钢管再生混凝土较长柱、中长柱、短柱的敏感因素及敏感程度进行分析. 结果 较长柱在长细比 50~60、含钢率 5%~11%、取代率 20%~60% 时,各因素对其承载力敏感程度从强到弱依次为长细比、含钢率、取代率;中长柱在长细比 25~35、含钢率 3.8%~7.9%、取代率 20%~60% 时,敏感程度从强到弱依次为含钢率、取代率、长细比;短柱在含钢率 3.8%~7.7%、混凝土强度 C35~C40、取代率 20%~35% 时,敏感程度从强到弱依次为含钢率、混凝土强度、取代率. 结论 SPSS 软件分析与正交试验所得结果基本一致,说明将回归分析运用到薄壁钢管再生混凝土柱敏感因素的对比中是可行的.

**关键词** 薄壁钢管再生混凝土柱;正交试验;敏感因素;回归分析

中图分类号 TU398

文献标志码 A

## Contrastive Analysis on the Axial Compression Sensitive Factors of Thin-walled Steel Tube Recycled Concrete Columns

WEN Yang<sup>1</sup>, ZHANG Yingchun<sup>1</sup>, LIANG Dongxu<sup>2</sup>, WANG Zhongzheng<sup>3</sup>

(1. School of Architecture & Civil Engineering, Inner Mongolia University of Science Technology, Baotou, China, 014010; 2. Capital Construction Department, Tonghua Normal University, Tonghua, China, 134000; 3. Department of Culture and Communication, University of International Relations, Beijing, China, 100091)

**Abstract:** The aim of this study is to find out the influence law of different parameters on the sensitivity to mechanical properties of thin-walled steel tube recycled concrete columns. While ensuring the optimal bearing capacity and cost, the optimal combination of parameters is obtained. Taking slenderness ratio, core concrete strength, substitution rate and steel content as variable parameters, the sensitivity factors and sensitivity of thin-walled steel tube recycled concrete mixed long, mixed medium long, and mixed short columns were analyzed by means of experimental control, or-

收稿日期:2017-11-28

基金项目:国家自然科学基金项目(51068021)

作者简介:闻洋(1976—),男,副教授,主要从事钢与混凝土组合结构等方面研究.

thogonal test and software SPSS. In the mixed long columns, when the slenderness ratio is 50 ~ 60, the steel content is 5% ~ 11% and the substitution rate is 20% ~ 60%, the sensitivity degree of each factor to its bearing capacity is slenderness ratio, steel content, substitution rate. In the mixed medium long column, when the slenderness ratio is 25 ~ 35, the ratio of steel to steel is 3.8% ~ 7.9%, and the substitution rate is 20% ~ 60%, the sensitivity degree is steel content, substitution rate, slenderness ratio. However, when the steel content of mixed short columns is 3.8% ~ 7.7%, the core concrete strength is C35 ~ C40, and the substitution rate is 20% ~ 35%, the sensitivity degree in short columns is steel content, concrete strength, substitution rate. The results obtained by SPSS software are basically consistent with those obtained by orthogonal test, which shows that it is feasible to apply regression analysis to the comparison of sensitive factors of thin-walled steel tube recycled concrete columns.

**Key words:** thin-walled steel tube recycled concrete columns; orthogonal test; sensitive factors; regression analysis

随着我国建筑业的蓬勃发展,钢管混凝土构件以其较好的性能在工程中得到大量应用,而利用再生混凝土技术,将废弃混凝土作为骨料运用到钢管混凝土构件中,对减少建筑垃圾排放、环境保护具有重要意义.国内外众多学者对其进行了广泛的研究,吴波等<sup>[1-3]</sup>研究了薄壁钢管再生混凝土构件的受力性能,得出了轴向受压性能相对钢管现浇混凝土柱的变化情况.孙辉<sup>[4]</sup>、吴仕成<sup>[5]</sup>对薄壁钢管再生混凝土构件进行了试验和有限元分析.已有研究多集中于对再生混凝土柱承受轴压或偏压时的力学性能分析<sup>[6-10]</sup>,缺乏对再生混凝土柱敏感因素的研究分析.而如何通过控制最优的参数即敏感因素来保证稳定性能的同时又保证其经济性就成了学者研究的重点.基于此,笔者对薄壁钢管再生混凝土较长柱、中长柱、短柱展开研究,通过改变长细比、核心混凝土强度、取代率、含钢率4个参数,借助试验对照和正交试验设计方法,对试件的破坏机理及敏感因素进行深入分析,掌握薄壁钢管再生混凝土柱的敏感性因素及敏感程度,进而为实践工程取得良好的经济效益和建筑效果提供理论基础.

## 1 试验

### 1.1 试件的设计与制作

为了研究各敏感因素对钢管再生混凝土

试件承载力的敏感影响程度,试验依据长细比划分柱子类型的方法,分别制作钢管再生混凝土较长柱、中长柱、短柱,每组12根.钢管采用Q235钢,再生混凝土的强度等级设计值根据实际试件试验值来进行修改.第一、二组试件为钢管再生混凝土较长柱、中长柱,核心混凝土等级为C40,主要依据长细比、取代率、含钢率为变化参量,具体参数见表1、表2.第三组试件为钢管再生混凝土短柱,考虑长细比对短柱性能影响较小,取长细比为12,取代率、含钢率、核心混凝土强度作为变化参量,具体参数见表3.表中, $L$ 表示薄壁钢管再生混凝土柱的高度, $D$ 表示薄壁钢管外圆的直径, $t$ 表示薄壁钢管的壁厚.

### 1.2 加载装置和加载制度

本次试验为静力荷载试验,首先将试件立于轴压试验台座上,中心与加载板的中心线重合,由千斤顶进行分级加载.试验初期,估算各组试件的理论极限荷载,然后进行分级加载.加载过程分为预加载、标准加载和破坏荷载.预加载阶段,施加荷载为理论极限荷载的1/20,预加载结束后进行标准加载,每级荷载为理论极限荷载的1/10,施加荷载至理论极限荷载的75%时,将每级荷载转变为理论极限荷载的1/20,持续时间为5 min,直至试件破坏<sup>[11-12]</sup>.

表 1 较长柱参数表

Table 1 Parameter table of mixed long column

序号	名称	L/mm	D/mm	t/mm	长细比	取代率/%	含钢率/%
1	L - Aa1	2 000	159	2	50	0	5
2	L - Aa2	2 000	159	2	50	20	5
3	L - Ac3	2 000	159	4	50	40	11
4	L - Ab4	2 000	159	3	50	60	8
5	L - Bb1	2 200	159	3	55	0	8
6	L - Bb3	2 200	159	3	55	20	8
7	L - Ba4	2 200	159	2	55	40	5
8	L - Bc2	2 200	159	4	55	60	11
9	L - Cc1	2 400	159	4	60	0	11
10	L - Cc4	2 400	159	4	60	20	11
11	L - Cb2	2 400	159	3	60	40	8
12	L - Ca3	2 400	159	2	60	60	5

注:L表示薄壁钢管再生混凝土较长柱;A、B、C分别表示柱长细比为50、55、60;a、b、c分别表示钢管的壁厚为2 mm、3 mm、4 mm;1、2、3、4分别表示再生块体的取代率为0、20%、40%、60%。

表 2 中长柱参数表

Table 2 Parameter table of mixed medium long column

序号	名称	L/mm	D/mm	t/mm	长细比	取代率/%	含钢率/%
1	M - Aa1	1 370	219	2	25	0	3.8
2	M - Aa2	1 370	219	2	25	20	3.8
3	M - Ac3	1 370	219	4	25	40	7.9
4	M - Ab4	1 370	219	3	25	60	5.8
5	M - Bb1	1 640	219	3	30	0	5.8
6	M - Bb2	1 640	219	3	30	20	5.8
7	M - Ba3	1 640	219	2	30	40	3.8
8	M - Bc4	1 640	219	4	30	60	7.9
9	M - Cc1	1 920	219	4	35	0	7.9
10	M - Cc2	1 920	219	4	35	20	7.9
11	M - Cb3	1 920	219	3	35	40	5.8
12	M - Ca4	1 920	219	2	35	60	3.8

注:M表示薄壁钢管再生混凝土中长柱;A、B、C分别表示柱长细比为25、30、35;a、b、c分别表示钢管的壁厚为2 mm、3 mm、4 mm;1、2、3、4分别表示再生块体的取代率为0、20%、40%、60%。

表 3 短柱参数表

Table 3 Parameter table of mixed short column

序号	名称	L/mm	D/mm	t/mm	长细比	取代率/%	含钢率/%
1	S - Bc1	660	219	4	C35	0	7.7
2	S - Ab1	660	219	3	C30	0	5.7
3	S - Ca1	660	219	2	C40	0	3.8
4	S - Bc2	660	219	4	C35	20	7.7
5	S - Ab2	660	219	3	C30	20	5.7
6	S - Ca2	660	219	2	C40	20	3.8
7	S - Cc3	660	219	4	C40	30	7.7
8	S - Bb3	660	219	3	C35	30	5.7
9	S - Aa3	660	219	2	C30	30	3.8
10	S - Ac4	660	219	4	C30	35	7.7
11	S - Cb4	660	219	3	C40	35	5.7
12	S - Ba4	660	219	2	C35	35	3.8

注:S表示薄壁钢管再生混凝土短柱;A、B、C分别表示柱核心混凝土等级为C30、C35、C40;a、b、c分别表示钢管的壁厚为2 mm、3 mm、4 mm;1、2、3、4分别表示再生块体的取代率为0、20%、30%、35%。

2 破坏特征

薄壁钢管再生混凝土较长柱和中长柱的破坏均为弹塑性失稳破坏,短柱的破坏为强度破坏. 较长柱、中长柱、短柱在加载初期,由于受力较小,试件没有变形,荷载与应变呈线性变化. 当施加荷载约为极限荷载的 50% 时,较长柱荷载-应变曲线出现偏差,但无明显变形;中长柱和短柱出现轻微的变形,但变形不明显. 当施加荷载约为极限荷载 70% ~ 80% 时,较长柱荷载-应变曲线出现明显变化,试件出现微变形,管壁有铁屑脱落;中长柱跨中挠度迅速增大,此时钢管对混凝土的约束作用使混凝土处于三向受压状态;短柱

的荷载-应变曲线斜率变小,管壁中部出现细微裂缝并凸起,继续施加荷载,凸起部位扩大,且裂缝向两侧开始延伸,钢管内部传出清脆响声. 当加载到极限承载力时,较长柱的弯曲急剧增大,承载力急剧降低,试件最终被压坏,弯曲呈弓形,中部变形最大,管壁与混凝土不再粘结;中长柱的薄壁钢管表面出现明显的鼓曲现象,伴随着混凝土的局部碎裂声,承载力大幅降低,试件的侧向挠度迅速增加,整体呈弯曲状,变形明显;短柱的管壁中部形成鼓曲面,破坏严重,裂纹延伸到两端,最宽达 3 mm,试件完全破坏. 试件最终破坏形态见图 1.



Fig. 2 Damage in the form of specimens

3 正交结果分析

3.1 较长柱正交试验分析

笔者采用正交试验法对试件的承载力影响因素进行分析<sup>[13]</sup>,参数变量为长细比、含钢率和取代率. 各因素不同水平的取值见表 4. 从表中可看出此正交试验各个因素的极值与均差. 构件各因素的最优组合水平为长细比 50、含钢率 11%、取代率 10%. 通过极差 R 可看出影响构件承载力敏感因素从大到小依次为长细比、含钢率、取代率.

较长柱敏感因素分析曲线如图 2 所示. 从图 2(a)可以看出,随着长细比的增加,薄壁钢管再生混凝土较长柱的承载力降低. 并

表 4 较长柱正交试验分析表

Table 4 Orthogonal test analysis table of mixed long column

试验号	因素			承载力/kN
	长细比	取代率/%	含钢率/%	
1	1(50)	1(20)	1(5)	1 320
2	1(50)	2(40)	3(11)	1 380
3	1(50)	3(60)	2(8)	1 287
4	2(55)	1(20)	2(8)	1 340
5	2(55)	2(40)	1(5)	1 194
6	2(55)	3(60)	3(11)	1 308
7	3(60)	1(20)	3(11)	1 287
8	3(60)	2(40)	2(8)	1 100
9	3(60)	3(60)	1(5)	1 009
K1	3 987	3 945	3 522	—
K2	3 840	3 672	3 726	—
K3	3 396	3 603	3 975	—
N1(K1/3)	1 329	1 315	1 174	—
N2(K2/3)	1 280	1 224	1 242	—
N3(K3/3)	1 132	1 201	1 325	—
R	197	114	151	—

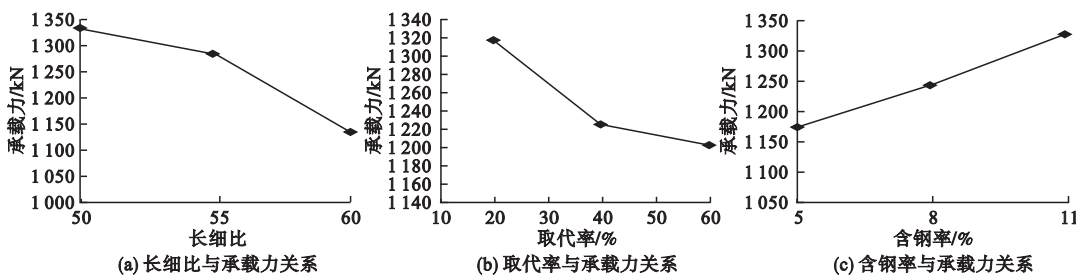


图2 较长柱敏感因素分析曲线

Fig. 2 The sensitive factors analysis chart of mixed long column

且长细比在 50 ~ 55 的曲线斜率比 55 ~ 60 的曲线斜率要小. 说明当含钢率在 5% ~ 11%、取代率在 20% ~ 60% 时,长细比在 50 ~ 55 对于较长柱的敏感程度要比在 55 ~ 60 时弱, 所以在此范围设计时,长细比在 50 ~ 55 可以适当增加长细比,这样在保证承载力的同时优化工程造价. 由图 2(b)可以看出,随着取代率的增加,较长柱的承载力降低,取代率在 20% ~ 40% 的曲线斜率大于取代率在 40% ~ 60% 的曲线斜率,说明当含钢率在 5% ~ 11%、长细比在 50 ~ 60 时,含钢率在 20% ~ 40% 时对较长柱的敏感程度比在 40% ~ 60% 更为敏感. 因此建议在此范围内可使承载力适量增加,最大可将取代率增至 60% 左右,这样在保证承载力的同时可将废弃混凝土充分利用,既实现经济价值又保证环境效益<sup>[14-15]</sup>. 由图 2(c)可以看出,随着含钢率的增加,较长柱的承载力增加,含钢率在 5% ~ 8% 的曲线斜率比在 8% ~ 11% 的曲线斜率小,但并不明显. 说明长细比在 50 ~ 60、取代率在 20% ~ 60% 时,含钢率对薄壁钢管再生混凝土较长柱的敏感程度基本保持稳定,且含钢率增加 3%,承载力增加大约 6%.

3.2 中长柱正交试验分析

采用正交试验法对中长柱试件的承载力影响因素进行分析,变量为长细比、含钢率和块体取代率. 各因素不同水平的取值见表 5. 从表中可看出此正交试验各个因素的极值与均差. 此构件各因素最优组合水平为长细比 30、含钢率 7.9%、取代率 20%. 通过极差 R

可以看出影响构件承载力最敏感的因素从大到小依次为含钢率、取代率、长细比.

表5 中长柱正交试验分析表

Table 5 Orthogonal test analysis table of mixed medium long column

试验号	因素			承载力/kN
	长细比	取代率/%	含钢率/%	
1	1(25)	1(20)	1(3.8)	2 096
2	1(25)	2(40)	3(7.9)	2 626
3	1(25)	3(60)	2(5.8)	2 332
4	2(30)	1(20)	2(5.8)	2 468
5	2(30)	2(40)	1(3.8)	2 032
6	2(30)	3(60)	3(7.9)	2 569
7	3(35)	1(20)	3(7.9)	2 713
8	3(35)	2(40)	2(5.8)	2 333
9	3(35)	3(60)	1(3.8)	1 863
K1	2 351	2 427	1 997	—
K2	2 356	2 330	2 378	—
K3	2 303	2 255	2 636	—
M1(K1/3)	784	809	666	—
N2(K2/3)	785	777	793	—
N3(K3/3)	768	752	879	—
R	48	172	213	—

中长柱敏感因素分析曲线如图 3 所示. 由图 3(a)可以看出,长细比在 25 ~ 30 的曲线斜率要比 30 ~ 35 的斜率小,说明取代率在 20% ~ 60%、含钢率在 3.8% ~ 7.9%、长细比在 30 ~ 35 对中长柱的敏感程度要比长细比在 25 ~ 30 更为敏感. 而且长细比在 25 ~ 30 时,承载力随长细比的增加而增加,在 30 ~ 35 时,承载力随长细比的增加而减小,故建议在设计中可适当增加承载力,这样可以在保证承载力的条件下,最大限度地增加长细比,实现经济价值和满足承载力的要求<sup>[16]</sup>. 由图 3(b)可以看出,随着取代率的增



加,中长柱承载力降低.而且取代率在20%~40%的曲线斜率比40%~60%的斜率要大.说明长细比在25~35、含钢率在3.8%~7.9%、取代率在20%~40%对中长柱的敏感程度要比在40%~60%时敏感,但总体差异不大.由图3(c)可以看出,随着含钢率的增加,中长柱承载力增加.含钢率在3.8%~

5.8%的曲线斜率要大于含钢率在5.8%~7.9%的斜率,但不明显.说明长细比在25~35、取代率在20%~60%时,含钢率对中长柱的敏感程度基本稳定.在此范围内,含钢率对薄壁钢管再生混凝土中长柱最为敏感,所以保证承载力时可优先提高含钢率.

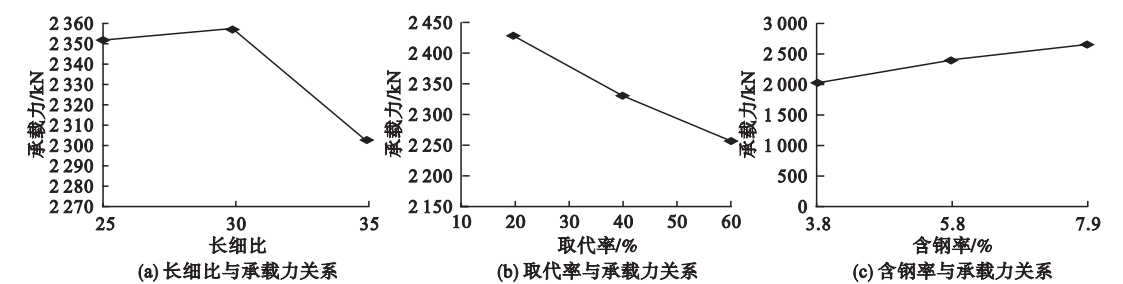


图3 中长柱敏感因素分析曲线

Fig. 3 The sensitive factors analysis chart of mixed medium long column

3.3 短柱正交试验分析

采用正交试验法对短柱承载力影响因素进行分析,参数变量为取代率、含钢率和核心混凝土强度等级.各因素水平取值见表6.

表6 短柱正交试验分析表

Table 6 Orthogonal test analysis table of mixed short column

试验号	因素			承载力/kN
	核心混凝土强度	取代率/%	含钢率/%	
1	1(C35)	1(20)	1(7.7)	2 756
2	1(C35)	2(30)	2(5.7)	2 417
3	1(C35)	3(35)	3(3.8)	2 627
4	2(C30)	2(30)	2(5.7)	2 103
5	2(C30)	3(35)	3(3.8)	2 331
6	2(C30)	1(20)	1(7.7)	2 449
7	3(C40)	1(20)	3(3.8)	2 624
8	3(C40)	2(30)	1(7.7)	2 866
9	3(C40)	3(35)	2(5.7)	2 415
K1	7 830	7 483	8 071	—
K2	6 883	7 614	6 935	—
K3	7 905	7 521	7 612	—
N1(K1/3)	2 610	2 294	2 690	—
N2(K2/3)	2 294	2 538	2 537	—
N3(K3/3)	2 695	2 507	2 312	—
R	341	44	379	—

从表中可以看出,对于极限承载力,最主要的影响因素是截面含钢率,其次是核心混

凝土强度,最后是再生块体取代率.本次试验承载力的最优组合是含钢率为7.7%,核心混凝土强度为C40,再生块体取代率为30%.随着再生块体取代率的增加,钢管内混凝土的裂缝加剧,而钢管对其产生约束能力增大,因此含钢率对试件的变形影响较大.

短柱敏感因素分析曲线如图4所示.从图4(a)可以看出,随着混凝土等级的增加,薄壁钢管再生混凝土短柱承载力增加.混凝土等级在C30~C35的曲线斜率大于混凝土等级在C35~C40的斜率.说明含钢率在3.8%~7.7%、取代率在20%~35%、混凝土等级在C30~C35时对短柱的敏感程度大于混凝土等级在C35~C40的敏感程度.因此建议混凝土等级在C35~C40时,在保证承载力的同时可适当降低混凝土等级.由图4(b)可以看出,取代率在20%~30%的曲线斜率小于取代率在30%~35%的斜率.说明在含钢率3.8%~7.7%、混凝土等级为C30~C40、取代率在30%~35%时对短柱的敏感程度要大于取代率在20%~30%的敏感程度.并且取代率在20%~30%时,承载力随取代率的增加而增加,在30%~35%

时,承载力随取代率的增加而减小,因此建议设计中可使承载力适当提高,这样既可保证承载力的同时又可使废弃混凝土块充分利用,满足承载力和成本的要求<sup>[17]</sup>. 由图 4(c) 可以看出,随着含钢率的增加,短柱承载力也随之增加. 含钢率在 3.8% ~ 5.7% 的曲线斜

率小于含钢率 5.7% ~ 7.7% 的斜率,但并不明显. 说明混凝土等级在 C30 ~ C40、取代率在 20% ~ 35%, 含钢率对薄壁钢管再生混凝土短柱的敏感程度基本保持稳定,且含钢率增加 2%,承载力增加大约 6%.

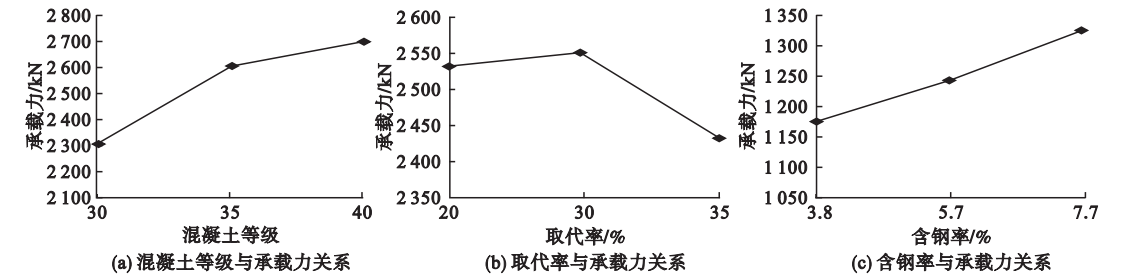


图 4 短柱敏感因素分析曲线

Fig. 4 The sensitive factors analysis chart of mixed short column

4 敏感因素 SPSS 分析

运用 SPSS 软件对薄壁钢管再生混凝土柱进行敏感因素分析,与试验和计算数据进行对比,可以弥补计算和试验中的缺陷. 笔者

在 SPSS 中建立薄壁钢管混凝土较长柱、中长柱、短柱的模型 1、2、3,在 SPSS 软件中输入试验数据,得出不同种类薄壁钢管混凝土柱的模型摘要表(见表 7).

表 7 不同薄壁钢管再生混凝土柱模型摘要表

Table 7 Model summary table of different kinds of mixed columns

模型	R	R <sup>2</sup>	调整后 R <sup>2</sup>	标准偏斜度错误	变更统计资料		
					R <sup>2</sup> 变更	F 值变更	d/f
1	0.966	0.934	0.909	0.302	0.934	37.620	3
2	0.989	0.978	0.969	0.175	0.978	117.462	3
3	0.680	0.463	0.262	0.859	0.463	2.300	3

表 7 中,R 表示样本的相关性,当 R 为正数时为正相关,反之为负相关;当 R > 0.8 时,变量具有较强的线性关系,当 R < 0.3 时,变量之间的线性关系较弱. 从表中可以看出,较长柱、中长柱、短柱的相关系数依次为 0.966、0.989、0.680,说明中长柱的相关性最好,较长柱次之,短柱的最弱. 中长柱和较长柱线性相关显著,短柱线性相关一般. 从表中数据可以得出薄壁钢管混凝土较长柱、中长柱变量之间存在线性相关关系,短柱变量之间存在一般线性相关关系.

运用 SPSS 软件对不同种类薄壁钢管混凝土柱中变量间的线性关系进行推导,其中

表 8 列出了每一步常数项和各个自变量对应的非标准化系数(包括常数项和变量系数的取值 B)及其标准误差、标准化系数 Beta、T 值和显著性水平.

对三类柱进行敏感性分析,并通过标准化处理得到相应回归方程.

较长柱多元回归方程式为

$$Y = 7.001 \times 10^{-16} - 0.516X_1 - 0.445X_2 + 0.482X_3.$$

(1)

根据各敏感因素的显著性指标,长细比、取代率、含钢率的显著性均在 0.05 以下,满足分析要求. 因为长细比在 50 ~ 60、含钢率在 5% ~ 11%、取代率在 20% ~ 60% 时,显著

性指标  $0.023 < 0.031 < 0.042$ ,敏感因素的显著性从大到小依次为长细比、含钢率、取代率.此时,较长柱最敏感因素为长细比.

中长柱多元回归方程式为

$$Y = -1.262 \times 10^{-15} + 0.02X_1 - 0.325X_2 - 0.939X_3.$$
(2)

根据各敏感因素的显著性指标,长细比、取代率、含钢率的显著性均在 0.05 以下,满

足分析要求.因为长细比在 25 ~ 35、含钢率在 3.8% ~ 7.9%、取代率在 20% ~ 60% 时,显著性指标  $0.002 < 0.035 < 0.049$ ,敏感因素的显著性从大到小依次为含钢率、取代率、长细比.此时,中长柱的最敏感因素为含钢率.

短柱多元回归方程式为

$$Y = 8.251 \times 10^{-16} + 0.374X_1 - 0.169X_2 + 0.629X_3.$$
(3)

表 8 不同种类薄壁钢管再生混凝土柱系数分析表

Table 8 Coefficient analysis table of different kinds of mixed columns

模型	参数	非标准化系数		标准化系数		显著性
		B	标准错误	Beta	T	
1	(常数)	$7.001 \times 10^{-16}$	0.087	—	0.000	1.000
	Zscore(长细比)	-0.516	0.094	-0.516	-7.944	0.023
	Zscore(取代率)	-0.445	0.091	-0.445	-5.556	0.042
	Zscore(含钢率)	0.482	0.094	0.482	6.195	0.031
2	(常数)	$-1.262 \times 10^{-15}$	0.050	—	0.000	1.000
	Zscore(长细比)	0.020	0.054	0.020	-0.370	0.049
	Zscore(取代率)	-0.325	0.053	-0.325	-6.171	0.035
	Zscore(含钢率)	-0.939	0.054	-0.939	17.255	0.002
3	(常数)	$8.251 \times 10^{-16}$	0.248	—	0.000	1.000
	Zscore(混凝土强度)	0.374	0.265	0.374	2.372	0.021
	Zscore(取代率)	-0.169	0.262	-0.169	-0.644	0.045
	Zscore(含钢率)	0.629	0.262	0.629	1.427	0.011

根据各敏感因素的显著性指标,混凝土强度、取代率、含钢率的显著性均在 0.05 以下,满足分析要求.因为含钢率在 3.8% ~ 7.7%、混凝土强度在 C35 ~ C40、取代率在 20% ~ 35% 时,显著性指标  $0.011 < 0.021 < 0.045$ ,敏感因素的显著性从大到小依次为含钢率、混凝土强度、取代率.此时,短柱的最敏感因素为含钢率.

在薄壁钢管再生混凝土中长柱和短柱中,含钢率都为最敏感的因素,并且敏感因素范围主要在 3.8% ~ 7.7%,在较长柱中敏感性也很强.

5 结 论

(1)通过试验对照,薄壁钢管再生混凝土较长柱和中长柱发生失稳破坏,短柱发生强度破坏.因此建议施工中,较长柱应重视长细比的影响,短柱着重控制含钢率,中长柱应

重视二者的共同影响.

(2)长细比对薄壁钢管再生混凝土较长柱承载力的敏感程度最强,含钢率次之,取代率最弱;最优组合水平是长细比 50,含钢率 11%,取代率 10%.含钢率对薄壁钢管再生混凝土中长柱承载力的敏感程度最强,取代率次之,长细比最弱;最优组合水平是长细比 30,含钢率 7.9%,取代率 20%.含钢率对薄壁钢管再生混凝土短柱承载力的敏感程度最强,混凝土强度次之,取代率最弱;最优组合水平是含钢率为 7.7%,混凝土强度为 C40,取代率为 30%.

(3)在不同区段各影响因素对薄壁钢管再生混凝土柱的敏感程度有所差异,因此建议施工中对于较长柱,可将取代率增至 60%、长细比增至 55 来降低成本;对于中长柱,可将取代率增至 60%、长细比增至 35 来降低成本;对于短柱,可将取代率增至 30%,



混凝土等级降至 C35 来降低成本。

(4)通过统计学软件 SPSS 对敏感因素进行深入分析,与正交试验所得结果基本一致,说明将回归分析运用到薄壁钢管再生混凝土柱敏感因素的对比中是可行的。

## 参考文献

- [1] 吴波,刘伟,刘琼祥.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. Experimental study on axial compression performance of thin-walled recycled hybrid short column [J]. Journal of building structures, 2010, 31(8):22-28.)
- [2] 吴波,张金锁,赵新宇.薄壁方钢管再生混合短柱轴压性能试验研究[J].建筑结构学报,2012,33(9):30-37.  
(WU Bo, ZHANG Jinsuo, ZHAO Xinyu. Experimental study on axial compression behavior of thin-walled square steel tubes recycled mixed columns [J]. Journal of building structures, 2012, 33(9):30-37.)
- [3] 吴波,赵新宇,张金锁.薄壁钢管再生再生混凝土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. Experimental study on axial compression and bias voltage for medium and long columns of recycled concrete with thin-walled steel tubes [J]. China civil engineering journal, 2012(5):65-77.)
- [4] 孙辉.薄壁方钢管再生混合混凝土轴压长柱承载性能研究[D].泉州:华侨大学,2014.  
(SUN Hui. Study on the bearing behavior of thin-walled square steel tubular remolded hybrid concrete columns with axial compression [D]. Quanzhou: Huaqiao University, 2014.)
- [5] 吴仕成.填充薄壁钢管柱用再生骨料及混凝土性能研究[D].泉州:华侨大学,2014.  
(WU Shicheng. Research on performance of recycled aggregate and concrete for filled thin-walled steel pipe columns [D]. Quanzhou: Huaqiao University, 2014.)
- [6] 邱慈长,王清远,石宵爽,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 study on axial compression of thin-walled steel pipe recycled concrete [J]. Experimental mechanics, 2011, 26(1):8-15.)
- [7] KIM J J, YOUM K S, REDATAHA M M. Extracting concrete thermal characteristics from temperature time history of RC column exposed to standard fire [J]. The scientific world journal, 2014(11):24-28.
- [8] GALVIN A P, AGRELA F, AYUSO J, et al. Leaching assessment of concrete made of recycled coarse aggregate: physical and environmental characterisation of aggregates and hardened concrete [J]. Waste manage, 2014, 34(9):1698-7004.
- [9] WANG Jingfeng, GUO Shuiping. Structural performance of blind bolted end plate joints to concrete-filled thin-walled steel tubular columns [J]. Thin-walled structures, 2012, 60(10):54-68.
- [10] LIANG Q Q. High strength circular concrete-filled steel tubular slender beam - columns, part II: fundamental behavior [J]. Steel construction, 2011, 67(2):172-180.
- [11] 张慧峰.内置大尺度块体薄壁钢管再生混凝土长柱轴压力学性能研究[D].包头:内蒙古科技大学,2015.  
(ZHANG Huifeng. Study on the pressure behavior of the long columns with large-scale block thin-walled steel pipe recycled concrete [D]. Baotou: Inner Mongolia University of Science and Technology, 2015.)
- [12] 郭红玲.内置大尺度块体薄壁圆钢管混凝土短柱轴压力学性能研究[D].包头:内蒙古科技大学,2015.  
(GUO Hongling. Study on the pressure behavior of large-scale, thin-walled, thin-walled, circular-steel-filled concrete-filled cylindrical columns [D]. Baotou: Inner Mongolia University of Science and Technology, 2015.)
- [13] 王卫华.基于正交试验的复合钢管混凝土轴压柱影响参数分析[J].青岛理工大学学报,2012,33(2):16-21.  
(WANG Weihua. Orthogonal test-based analysis of influence parameters of axially loaded composite concrete-filled steel tubular columns [J]. Journal of Qingdao technological university, 2012, 33(2):16-21.)
- [14] CHEN Ju, NI Yingying, JIN Weiliang. Column tests of dodecagonal section double skin concrete-filled steel tubes [J]. Thin-walled structures, 2015, 88:28-40.
- [15] PATEL V I, LIANG Q Q, HADI M N S. High strength thin-walled rectangular concrete-filled steel tubular slender beam-columns, part I: modeling [J]. Journal of constructional steel research, 2012, 70(2):368-376.
- [16] 闻洋,梁东旭,王锋.薄壁圆钢管再生混凝土混合中长柱轴压力学性能[J].沈阳建筑大学学报(自然科学版),2016,32(3):438-443.  
(WEN Yang, LIANG Dongxu, WANG Feng. Long-axis axial compression behavior of thin-walled round steel pipe mixed with recycled concrete [J]. Journal of Shenyang jianzhu university (natural science), 2016, 32(3):438-443.)
- [17] MARTIN N, MARKUS K, MARIO F. ISO standard fire tests of concrete-filled steel tube columns with solid steel core [J]. Journal of structural engineering, 2016, 143(4):40-48.