

钢管约束橡胶混凝土短柱轴心受压力学特性研究

闻 洋,于 蛟,付立平

(内蒙古科技大学建筑与土木工程学院,内蒙古 包头 014010)

摘 要 目的 研究钢管约束橡胶混凝土短柱轴心受压的力学性能. 方法 设计了16根圆柱体短柱,混凝土强度等级为C30与C40,以不同参数的橡胶粉和不同厚度钢管进行两组正交试验. 对试件荷载的横纵向变形曲线,应变曲线进行分析. 并通过正交分析的方法得到各个参量的最优水平组合. 结果 所有试件均为剪切破坏,随着橡胶掺量的增加,其刚度与极限承载力不断降低. 当橡胶混凝土强度等级和体积取代率一致时,随含钢率增大,极限承载力也随之增加. 由正交试验结果分析得出最优水平组合为橡胶体积取代率10%,橡胶粒径380 μm ,含钢率11.9%. 结论 利用笔者提出的承载力公式所得计算结果与试验值基本吻合,且理论值偏低,满足安全与使用要求.

关键词 钢管约束橡胶混凝土;力学性能;正交试验;含钢率

中图分类号 TU398⁺.9

文献标志码 A

Study on Mechanical Characteristics of Axial Compression of Short Column of Confined Rubber Concrete Filled Steel Tube

WEN Yang, YU Jiao, FU Liping

(School of Architecture and Civil Engineering, Inner Mongolia University of Science and Technology, Baotou, China, 014010)

Abstract: To study the mechanical properties of steel tube confined rubber concrete stub columns under axial compression. There are few domestic research cases on the mechanical properties of steel tube confined rubber concrete stub columns. This paper makes up for the blank of mechanical properties research. 16 cylinders were designed. Under the condition of concrete strength grade C30 and C40, two groups of rubber powder with different parameters and steel tubes with different thickness were used. Orthogonal test. The transverse and longitudinal deformation curves and strain curves of the specimens are analyzed. The broken rings of 16 specimens are shear failure. With the increase of rubber content, the stiffness and ultimate bearing capacity of the specimens decrease.

收稿日期:2019-03-12

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,主要从事钢与混凝土组合结构等方面研究.

When the strength grade and volume substitution ratio of rubber concrete are the same, the ultimate bearing capacity of the short columns with larger steel content will increase, and the ultimate bearing capacity will also increase with the increase of steel content. The results of orthogonal experiment show that the optimum level combination is rubber volume replacement rate 10%, rubber particle size 380 μm , steel content 11.9%. The design value is basically consistent with the experimental value by using the formula of axial compression bearing capacity proposed by the author, and the theoretical value is on the low side, which meets the requirements of safety and use.

Key words: steel tube confined rubber concrete; mechanical properties; orthogonal test; steel ratio

近年来随着我国汽车保有量的不断增长,每年废旧轮胎的产生越来越多,全世界每年废旧橡胶产量大约 2000 万 t,仅我国的废旧橡胶产量,每年也接近 150 万 t^[1]. 混凝土与钢管是建筑领域中最常用的两种建筑材料,若在混凝土中掺入细小橡胶粒,能够填充材料内部空隙,提高材料的韧性和延性,增加材料的抗冲击能力和抗疲劳能力^[2],将二者结合,一方面可以充分利用两种材料的优势,避免各自存在的缺陷,使两者性能最优化;另一方面可以有效减少废旧橡胶的数量,减轻环境与能源负担,降低材料成本,达到更好的经济效益和社会效益^[3-4].

20 世纪 80 年代,我国开始对橡胶混凝土进行原创性研究,对其力学性能等方面均做了研究,为后来学者的研究提供了基础. 2007 年胡鹏等^[6-7]在对橡胶细粒混凝土进行试验,对橡胶细粒混凝土的渗透性和掺量进行了分析研究. 2014 年朱涵等^[8-13]开展了废旧橡胶集料对水泥基材料抗开裂试验,分别用组合圆环法和单一圆环法对水泥基材料进行开裂试验,研究结果表明,随着橡胶集料掺量的增加,两种试验中圆环试件的开裂试件明显更长,说明橡胶集料不但会降低组合材料的弹性模量,还会增加其断裂时的耗能能力,因此使得橡胶集料的截面抗开裂性能能够提高.

目前国内对橡胶混凝土的研究主要集中在材料方面,将橡胶混凝土引入建筑结构尚不普遍. 基于此,笔者设计了 16 根橡胶混

凝土短柱,以不同混凝土强度、不同橡胶参数以及不同厚度钢管进行正交试验,通过试验得到试件破坏模式及荷载变形曲线,分析各因素对承载力的影响,并提出了圆钢管约束橡胶混凝土短柱轴压极限承载力计算公式,为进一步研究橡胶混凝土在建筑结构方向的应用提供了理论基础和试验依据.

1 试验

1.1 试件设计

基于含钢率、基准混凝土强度、橡胶体积取代率及橡胶粒径等因素^[14-15],本次试验利用正交试验法设计两组共 16 根直径 D 为 219 mm、高 L 为 660 mm 的圆柱体试件,长径比为 3. 以橡胶掺量、橡胶粒径、含钢率为参数对核心橡胶混凝土在圆钢管约束作用下进行两组水平不等的正交试验:一组基准混凝土强度等级为 C30;另一组基准混凝土强度等级为 C40. 橡胶选用 380 μm 和 180 μm 的橡胶粉;橡胶掺量为 10%、20%、30%;钢管厚度 t 分别为 3 mm 和 6 mm,其对应的含钢率分别为 5.4% 和 11.9%. 试件参数见表 1、表 2.

1.2 试验装置与加载方案

钢管柱试件在 5 000 kN 的压力试验机上进行,将短柱对准试验机平台上的标线,调整对中,使试件的截面与加载端的截面几何中心能够重合,尽可能使短柱处在轴压的受力状态^[16]. 在短柱的上部、中部、下部,间隔 90°的位置各贴纵、环向应变片,用来测量钢管的应变,对中后,将贴好的应变片连接到数

表 1 基准混凝土强度为 C30 的构件参数

Table 1 Structural parameter test table for benchmark concrete strength mark C30				
试件编号	钢管 $D\times t\times L/\text{mm}$	橡胶体积分数/%	橡胶粒径/ μm	含钢率/%
r40-1A	219×3×660	10	380	5.4
r80-1B	219×6×660	10	180	11.9
r40-2B	219×6×660	20	380	11.9
r80-2A	219×3×660	20	180	5.4
r40-3B	219×6×660	30	380	11.9
r40-3A	219×3×660	30	380	5.4
r80-3A	219×3×660	30	180	5.4
r80-3B	219×6×660	30	180	11.9

表 2 基准混凝土强度为 C40 的构件参数

Table 2 Structural parameter test table for benchmark concrete strength mark C40				
试件编号	钢管 $D\times t\times L/\text{mm}$	橡胶体积分数/%	橡胶粒径/ μm	含钢率/%
R40-1A	219×3×660	10	380	5.4
R80-1B	219×6×660	10	180	11.9
R40-2B	219×6×660	20	380	11.9
R80-2A	219×3×660	20	180	5.4
R40-3B	219×6×660	30	380	11.9
R40-3A	219×3×660	30	380	5.4
R80-3A	219×3×660	30	180	5.4
R80-3B	219×6×660	30	180	11.9

注:表中 r,R 分别表示基准混凝土 C30、C40 的钢管橡胶混凝土短柱;40、80 表示橡胶粒径;1、2、3 表示橡胶体积分数分别为 10%、20% 和 30%;A、B 表示含钢率分别为 5.4% 和 11.9%。

据采集仪,再在短柱对侧各放置一个位移计,用于测量位移的变化.试验加载方案为分级加载.先预加载,分三级,每级增加的加载量是极限荷载的 5%;进入正式加载后,每级的加载量是预计极限荷载的 10%,当发现钢管表面出现掉铁屑的情况,即荷载马上要达到钢材的屈服点,适时调整每级的加载量,改为计算极限荷载的 20%;快到达计算极限荷载时,调整加载量减弱为极限荷载的 5%,缓慢加载,直至试件变形变大,试验结束.所有的试验数据通过数据采集仪自动收.现场加载装置见图 1,应变片布置如图 2 所示.

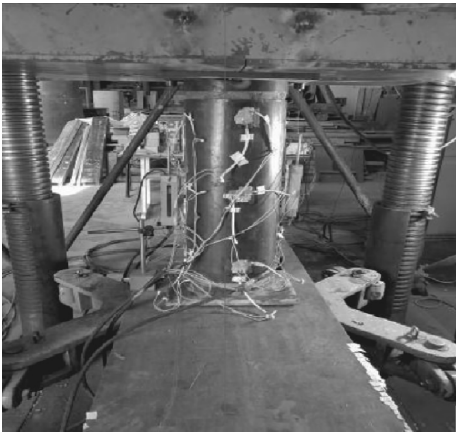


图 1 加载装置

Fig. 1 Field loading device

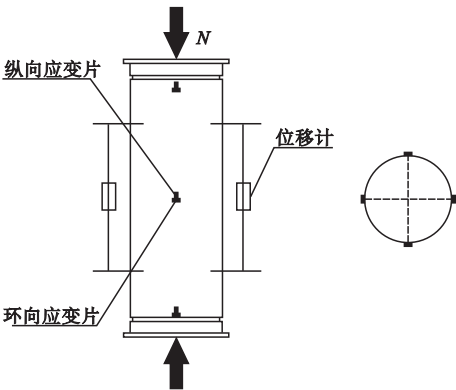


图2 应变片布置图
Fig. 2 Strain gauge layout

2 试验现象

根据试件破坏情况可知,所有试件均发生核心混凝土剪切破坏.部分试件破坏形式如图3所示.从图3可以看出,4个试件在加载初期,构件表面未发生明显变化,橡胶混凝土柱处于弹性工作阶段,当荷载加载到2 400 kN时,R80-3B试件上部开槽处裸露在外的橡胶混凝土开始剥离主体橡胶混凝土,逐渐脱落;加载至2 500 kN时,出现铁屑掉落的现象,此时,荷载逐渐接近极限荷载2 710 kN;达到峰值荷载以后,荷载下降,降至2 650 kN时,上部开槽钢管完全合并到一起,并有轻微鼓曲现象;继续降到2 400 kN时,下部开槽位置裸露在外,橡胶混凝土剥离,出现大块脱落,伴随着轻微鼓曲;直至降2 030 kN时,结束加载.

试件 r40-1A 的破坏过程:当荷载加载至2 100 kN时,上部开槽处裸露在外的橡胶混凝土被压碎,开始大块脱落;加载的荷载逐渐靠近极限荷载2 320 kN;峰值荷载后开始卸荷,荷载降至2 250 kN时,上部开槽处两部分钢管合并到一起,逐渐有鼓曲的趋势;继续卸荷直至卸荷至1 740 kN,钢管的上、中、下三部分鼓曲现象明显,结束加载.

试件 r80-1B 的破坏过程:加载至2 350 kN时,上部开槽处裸露的橡胶混凝土开始出现小裂缝;至3 000 kN时,上部开槽位置处的橡胶混凝土开始被剥离,并大块脱离主体;达到极限荷载3 120 kN后开始卸荷,继续卸荷,直至2 700 kN时,下部开槽位置处裸露在外的橡胶混凝土大面积脱落,钢管慢慢被挤压合并为一体,轻微鼓曲;最终卸荷到2 400 kN,钢管上、中、下三部分有明显的鼓曲现象,然后停止加载.

试件 R40-3A 的破坏过程:加载至1 280 kN时,钢管上部开槽位置处裸露的橡胶混凝土出现较为明显的裂缝;继续加至1 570 kN,钢管上部开槽位置裸露在外的橡胶混凝土被挤压剥离并大块脱落;加载至1 620 kN时,钢管表面浮现一层铁屑,随着加载逐渐掉落,钢管中部出现轻微鼓曲现象,加载的荷载大小慢慢靠近峰值荷载;钢管上、中、下三部分的鼓曲现象严重.此试件极限荷载为1 760 kN,为所有试件中极限承载力最小的一个.

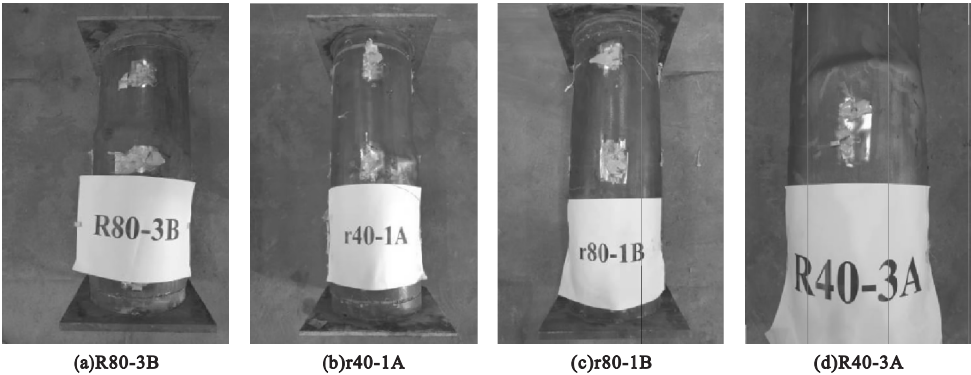


图3 典型试件破坏图
Fig. 3 Failure characteristic of the typical specimens

3 结果分析

3.1 竖向荷载—纵向变形关系

试件竖向荷载—纵向变形($P-\Delta$)曲线如图4所示。从图4可以看出:①试件的破坏经历了弹性、弹塑性、塑性阶段。试件开始处于弹性阶段,曲线逐渐上升;升至最高点时出现较明显的拐点,由于内部核心橡胶混凝土微裂缝出现,导致荷载增幅减弱,进而导致纵向变形开始增大;最后的曲线段趋于平缓的趋势,说明此种构件后期承载力和抵抗变形的能力较好。②在混凝土强度和含钢率相同

的条件下,掺量为10%和20%条件下的短柱在弹性阶段的曲线斜率较为相似,随着橡胶掺量由10%增至30%,钢管约束橡胶混凝土短柱的极限承载力不断降低,从图中可明显看出掺量从10%增加到20%时,极限承载力下降的幅度比掺量从20%增加到30%时更大。因此可以得出,橡胶掺量控制在10%以内对圆钢管约束橡胶混凝土短柱的极限承载力的影响较小。当内部核心橡胶混凝土强度等级和橡胶混凝土体积取代率一致时,含钢率越大,短柱的极限承载力就越高,且含钢率增长一倍,极限承载力几乎提高1 000 kN。

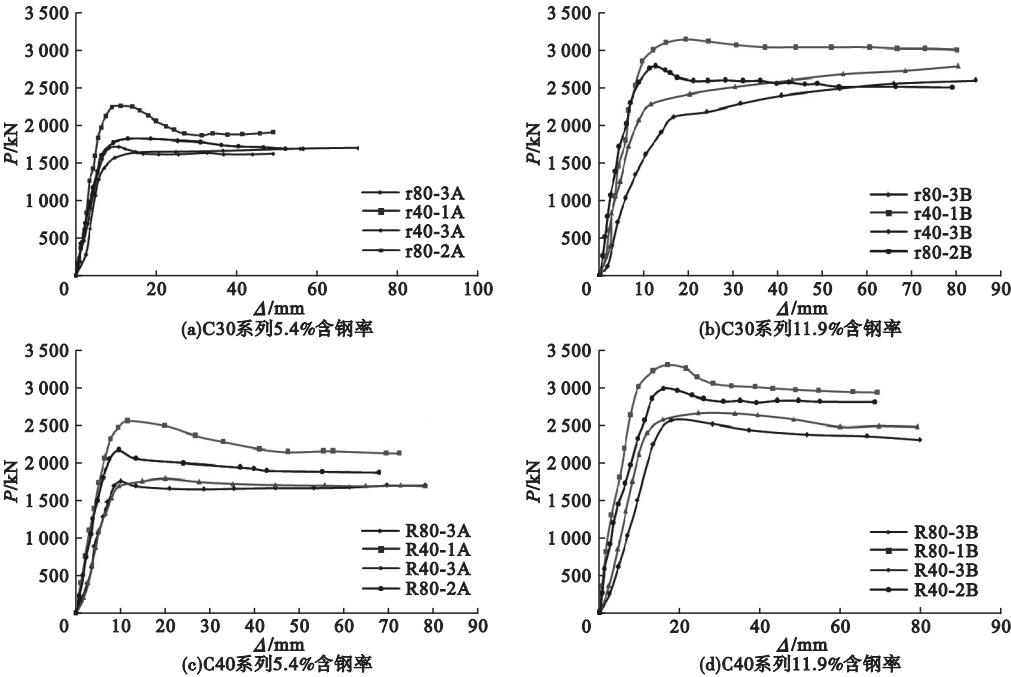


图4 试件竖向荷载—纵向变形曲线

Fig. 4 Specimen vertical load-longitudinal deformation curves

3.2 1/2处截面竖向荷载—应变关系

试件1/2处截面竖向荷载—应变曲线如图5所示。从图5可以看出:①加载到极限荷载的75%时,曲线逐渐弯曲,出现了拐点,表明在这一阶段钢管横向及纵向应变都增大。其中,钢管1/2处截面纵向应变增大是由于核心橡胶混凝土内的微裂缝不断发展,伴随着荷载不断加大,核心橡胶混凝土横向变形系数也随之不断增大,达到极限值后,橡胶混

凝土发生膨胀使得钢管发生鼓曲现象,产生大的变形,最终应变片崩坏。②内部核心橡胶混凝土基准强度等级和含钢率相同的条件下,随着橡胶体积取代率的增加,极限荷载逐渐降低,极限荷载对应的横向应变及纵向应变逐渐增大。③普钢管约束橡胶混凝土构件,几乎从弹性工作阶段,就表现了不同于钢材泊松比的数值,说明在加载初期,内部核心橡胶混凝土就已经存在了承受荷载的能力。

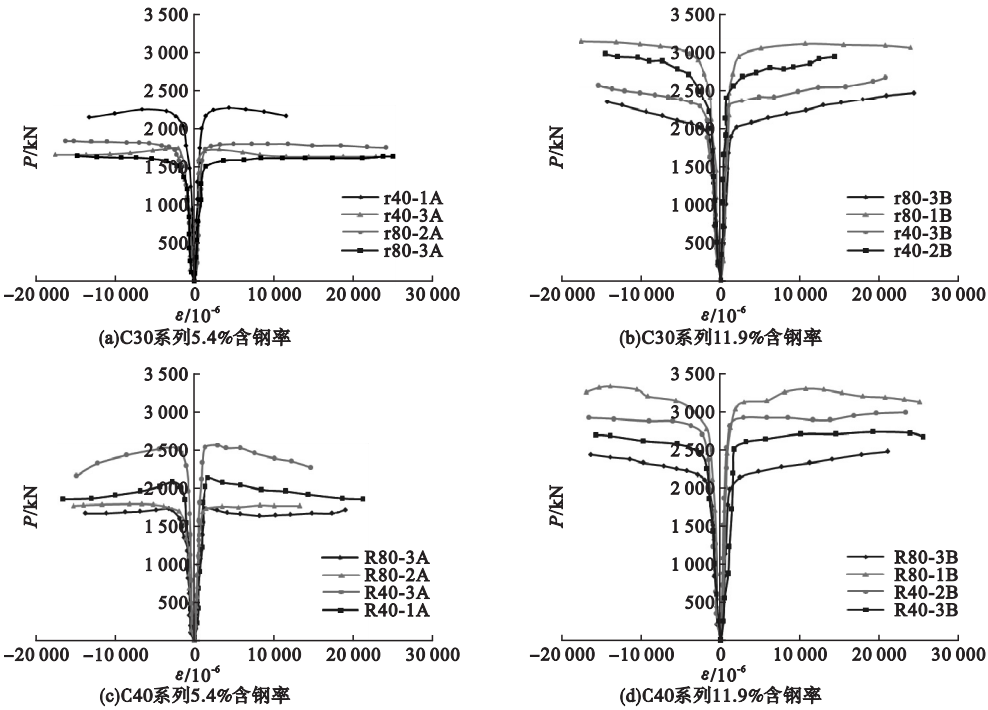


图5 试件1/2处截面竖向荷载-应变曲线

Fig. 5 The vertical load-strain curves of the specimen at 1/2 section

3.3 荷载—横向变形关系

试件竖向荷载-横向变形系数($P-U$)

曲线如图6所示.可以看出,加载初期,钢管中部横向应变与轴向应变的比值不断增加,

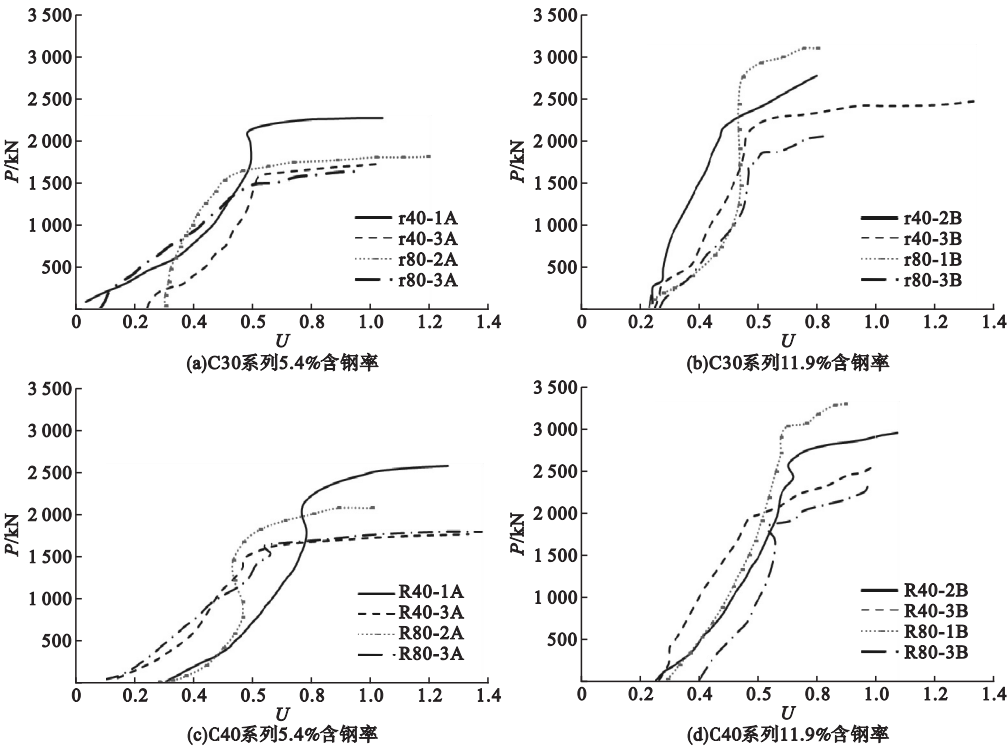


图6 试件竖向荷载-横向变形曲线

Fig. 6 Specimen vertical load-lateral deformation curves

即认为钢管对核心橡胶混凝土的约束作用在不断加强,在此过程中横向变形系数 $U < 1$,说明钢管中部的环向应力小于轴向应力;当 $U > 1$ 后,即环向应变高于轴向应变,此时钢管主要受环向应力,起约束作用. 在弹性阶段,每组曲线的斜率较大且 $U < 1$,说此时的横向变形系数增加的较为缓慢;进入弹塑性阶段后,各组曲线斜率开始逐渐减小,横向变形系数 U 增加的速度变快,试件的环向约束作用力也越来越大;比较 4 组荷载 - 横向变形系数曲线发现,随着橡胶粉体积取代率的增加,曲线在各个阶段的斜率基本呈现慢慢减小的趋势,说明钢管环向约束作用伴随着轴向荷载的增加慢慢发挥效应.

3.4 承载力分析

试验研究 C30、C40 两种不同基准混凝土强度下,橡胶粉粒径、橡胶掺量和含钢率对圆钢管约束橡胶混凝土短柱承载力的影响,采用 2 组 $L_8(3 \times 2^2)$ 正交试验表进行排列分析. 各影响因素与其对应的水平见表 3,正交试验分析表见表 4、表 5.

表 3 正交试验水平表

Table 3 Orthogonal experimental level table			
水平	橡胶体积取代率/%	橡胶粒径/ μm	含钢率/%
1	10	380	5.4
2	20	180	11.9
3	30	—	—

表 4 C30 系列正交试验分析表

Table 4 C30 series orthogonal experimental analysis tablets

编号	因素			
	橡胶体积取代率/%	橡胶粒径/ μm	含钢率/%	承载力/kN
r40-1A	0.10(水平1)	380(水平1)	0.054(水平1)	2 269
r80-1B	0.10(水平1)	180(水平2)	0.119(水平2)	3 104.5
r40-2B	0.20(水平2)	380(水平1)	0.119(水平2)	2 879
r80-2A	0.20(水平2)	180(水平2)	0.054(水平1)	1 818
r40-3B	0.30(水平3)	380(水平1)	0.119(水平2)	2 905
r40-3A	0.30(水平3)	380(水平1)	0.054(水平1)	1 934.5
r80-3A	0.30(水平3)	180(水平2)	0.054(水平1)	1 715
r80-3B	0.30(水平3)	180(水平2)	0.119(水平2)	2 667

表 5 C40 系列正交试验分析表

Table 5 C40 series orthogonal experimental analysis tablets

编号	因素			
	橡胶体积取代率/%	橡胶粒径/ μm	含钢率/%	承载力/kN
R40-1A	0.10(水平1)	380(水平1)	0.054(水平1)	2 534
R80-1B	0.10(水平1)	180(水平2)	0.119(水平2)	3 310
R40-2B	0.20(水平2)	380(水平1)	0.119(水平2)	2 973.5
R80-2A	0.20(水平2)	180(水平2)	0.054(水平1)	2 135
R40-3B	0.30(水平3)	380(水平1)	0.119(水平2)	2 784.5
R40-3A	0.30(水平3)	380(水平1)	0.054(水平1)	2 065
R80-3A	0.30(水平3)	180(水平2)	0.054(水平1)	1 813
R80-3B	0.30(水平3)	180(水平2)	0.119(水平2)	2 742

K_i 表示水平 i 的三次数据总和, $i=1,2,3$; $N_i=K_i/3$, 表示求取水平 i 三次数据平均值; R 为相应的极差, 计算公式为

$$R_j = \max_{1 \leq k \leq 3} \{N_i\} - \min_{1 \leq k \leq 3} \{N_i\}. \tag{1}$$

根据表 4 和表 5 求得, C30 试件橡胶体积取代率、橡胶粒径以及含钢率的极差 R 分别为 381.375、170.75、954.75, C40 试件极差 R 橡胶体积取代率、橡胶粒径以及含钢率分别为 570.875、156.25、815.75. 最终分析得到最优水平组合为橡胶体积取代率 10%、橡胶粒径 380 μm , 含钢率 11.9%. 由极差 R 可以得出三种参数对圆钢管约束橡胶混凝土短柱影响由高到低依次为含钢率、橡胶体积取代率、橡胶粒径.

4 承载力公式推导

承载力计算方法分为两种: 第一种为组

合材料抗压强度与其截面面积的乘积; 第二种为“叠加原理”, 即仍然将钢管与核心混凝土分为两种材料, 先得到每种材料各自的承载力, 再进行系数叠加^[17-23].

笔者根据韩林海^[18]提出的“统一理论”进行计算:

$$N = f_{\text{scy}} A_{\text{sc}}. \tag{2}$$

式中: $A_{\text{sc}} = A_{\text{s}} + A_{\text{c}}$, 表示整个钢管混凝土构件的截面面积, mm^2 ; f_{scy} 为钢管混凝土轴心受压的强度指标.

经简化计算, 得到 f_{scy} 的表达式为
$$f_{\text{scy}} = (1.14 + 1.02\xi)f_{\text{ck}}. \tag{3}$$

假设 $f_{\text{sc}}/f_{\text{c}}$ 与 ξ 呈线性关系, 则:
$$f_{\text{scy}}^R = (\alpha + \beta\xi)f_{\text{ck}}. \tag{4}$$

式中: f_{scy}^R 为短柱轴心抗压强度; α 、 β 分别为线性回归方程中的截距与斜率.

利用上述公式计算所得试件承载力结果

见表 6.

表 6 正交实验分析结果

Table 6 Orthogonal experimental analysis results

试件编号	f_{scy}^R	f_{cu}	f_{ck}	$f_{\text{sxy}}^R/f_{\text{ck}}$	套箍系数 ξ
r40-1A	60.26	35.64	33.067	1.822	0.37
r80-1B	82.46	34.04	31.067	2.654	0.83
r40-2B	79.13	30.81	26.202	3.020	0.98
r80-2A	48.29	28.39	24.104	2.003	0.51
r40-3B	77.15	26.28	23.156	3.332	1.11
r40-3A	53.14	26.28	23.156	2.295	0.53
r80-3A	45.55	22.42	17.926	2.541	0.69
r80-3B	70.84	22.42	17.926	3.952	1.43
R40-1A	67.31	41.21	36.000	1.870	0.34
R80-1B	87.92	39.79	34.933	2.517	0.73
R40-2B	78.98	34.62	30.607	2.581	0.84
R80-2A	56.70	32.67	29.822	1.901	0.41
R40-3B	73.96	28.7	26.677	2.772	0.96
R40-3A	48.15	28.7	26.677	1.805	0.46
R80-3A	46.86	25.2	22.682	2.066	0.54
R80-3B	72.83	25.2	22.682	3.211	1.13

根据表 6 得出 $f_{\text{scy}}^R/f_{\text{ck}}$ 与 ξ 关系曲线(见图 7), 对数值进行线性回归分析, 得到 $\alpha = 1.086, \beta = 1.937$.

因此, 钢管约束橡胶混凝土轴压短柱的

承载力计算公式为

$$f_{\text{scy}}^R = (\alpha + \beta\xi)f_{\text{ck}}, \tag{5}$$

$$N = f_{\text{scy}}^R A_{\text{sc}} = (1.086 + 1.937\xi)f_{\text{ck}} A_{\text{sc}}. \tag{6}$$

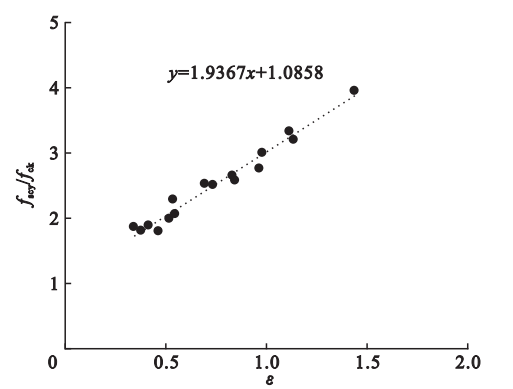


图7 f_{scy}^R/f_{ek} 与 ξ 关系曲线

Fig. 7 f_{scy}^R/f_{ek} Relation curve

圆钢管约束橡胶混凝土轴压短柱承载力试验值与计算值结果见表7。从表中可以看出,试验值与计算值的比值在1.021~1.152,说明试验值与计算值吻合较好。试验值高于计算值,可见计算值偏于保守,较为安全。

表7 承载力试验值与计算值对比

Table 7 Comparison of test value and calculated value of bearing capacity

试件编号	试验值/kN	计算值/kN	试验值/计算值
r40-1A	2 269	2 123. 685	1. 068
r80-1B	3 105	2 815. 842	1. 103
r40-2B	2 879	2 631. 054	1. 094
r80-2A	1 818	1 780. 926	1. 021
r40-3B	2 905	2 521. 393	1. 152
r40-3A	1 935	1 742. 843	1. 110
r80-3A	1 715	1 547. 137	1. 108
r80-3B	2 667	2 325. 787	1. 147
R40-1A	2 534	2 237. 522	1. 133
R80-1B	3 310	2 938. 566	1. 126
R40-2B	2 974	2 794. 098	1. 064
R80-2A	2 135	1 997. 599	1. 069
R40-3B	2 785	2 643. 976	1. 053
R40-3A	2 065	1 878. 983	1. 099
R80-3A	1 813	1 722. 820	1. 052
R80-3B	2 742	2 499. 347	1. 097

5 结 论

(1)钢管柱破坏形态均为剪切破坏,含

钢率越大,钢管内部核心橡胶混凝土的约束力越大。由横纵向变形曲线可知橡胶混凝土短柱具有良好的抵抗变形能力和较高的承载能力。

(2)正交试验得出对短柱承载力的敏感因素由高到低依次为含钢率、橡胶体积取代率、橡胶粒径。对于本次试验所选择的参数中,最优组合为含钢率11.9%,橡胶体积取代率10%,橡胶粒径380 μm。

(3)利用笔者推导出的承载力计算公式,验算后得出计算值与试验值比值在1.021~1.152,较好地验证了此公式对于此类短柱轴压极限承载力的适用性,可在实际工程中作为设计参考。

参考文献

[1] 徐自然,危大结. 浅谈橡胶混凝土的特点和应用[J]. 建筑与工程,2010(3):246-250.
(XU Ziran, WEI Dajie. On the characteristics and application of rubber concrete [J]. Construction and engineering, 2010 (3) : 246-250.)

[2] 郭红梅,朱涵. 钢筋橡胶集料混凝土梁的抗裂性能研究[J]. 混凝土,2014,278(12):6-8.
(GUO Hongmei, ZHU Han. Study on crack resistance of reinforced rubber aggregate concrete beams [J]. Concrete, 2014, 278 (12) : 6-8.)

[3] 李浩然,朱涵,朱学超. 横梁含橡胶集料对某框架-剪力墙结构抗震性能的影响[J]. 沈阳大学学报(自然科学版),2013,25(2):149-155.
(LI Haoran, ZHU Han, ZHU Xuechao. Influence of rubber aggregate in beams on the seismic performance of a frame-shear wall structure [J]. Journal of Shenyang university (natural science), 2013, 25 (2) : 149-155.)

[4] CLOTILDA P, HANIZAH A H, et al. Experimental behaviour of concrete filled thin walled steel tubes with tab stiffeners [J]. Journal of constructional steel research, 2010, 66(7):915-922.

[5] WANG Haichao, GE Yuezhen, LI Peikui. The study on ductility of thin-walled square concrete-filled steel tubular short columns configured with binding rebars [J]. Applied mechanics and materials, 2011, 94/95/96: 1601-1606.

[6] 胡鹏,朱涵. 掺橡胶细粒混凝土的渗透性与微观结构[J]. 混凝土与水泥制品,2007(2):4-6.
(HU Peng, ZHU Han. Permeability and microstructure of blended rubber fine concrete: [J]. Concrete and cement products, 2007 (2) :

- 4-6.)
- [7] 杨俊. 薄壁方钢管-再生混凝土短柱的轴压力学性能研究[D]. 厦门: 华侨大学, 2012. (YANG Jun. Study on the behavior of recycled aggregate concrete columns under static loading [D]. Xiamen: Huaqiao University, 2012.)
- [8] 朱涵, 郝迎军. 废旧橡胶集料对水泥基材料抗开裂性能的影响[J]. 混凝土, 2014, 302(12): 95-97. (ZHU Han, HAO Yingjun. Effect of waste rubber aggregate on cracking resistance of cement-based materials [J]. Concrete, 2014, 302(12): 95-97.)
- [9] ZHANG C W, GHOLIPOUR G, MOUSAVI A A. Nonlinear dynamic behavior of simply-supported RC beams subjected to combined impact-blast loading [J]. Engineering structures, 2019, 181: 124-14.
- [10] ZHANG Xuepeng. Stability bearing capacity of concrete filled thin-walled circular steel tubular column under axial compression[J]. Advanced materials research, 2013, 690/691/692/693: 720-723.
- [11] 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. Tests on axial behavior of stub square thin-walled steel tubular columns filled with demolished concrete blocks [J]. Journal of building structures, 2012, 33(9): 30-37.)
- [12] 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 loadings [J]. China civil engineering journal, 2012(5): 65-77.)
- [13] XU Jianfeng, WU Peng, ZHAO Junhai, et al. Unified solution of the ultimate bearing capacity for stiffened and thin-walled square CFST short columns under axial compression [J]. Advanced materials research, 2013, 690/691/692/693: 797-804.
- [14] GALVN 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.
- [15] 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): 437-443. (WEN Yang, LIANG Dongxu, WANG Feng. Mechanical performance of recycled concrete-filled circular steel tubular middle long columns under axial compression [J]. Journal of Shenyang jianzhu university (natural science), 2016, 32(3): 437-443.)
- [16] ZHAO Xinyu, WU Bo, WANG Long. Structural response of thin-walled circular steel tubular columns filled with demolished concrete lumps and fresh concrete [J]. Construction and building materials, 2016, 129: 216-242.
- [17] MAHGUB M, ASHOUR A, LAM D, et al. Tests of self-compacting concrete filled elliptical steel tube columns [J]. Thin-walled structures, 2017, 110(S): 27-34.
- [18] 韩林海, 陶忠, 王文达. 现代组合结构和混合结构: 试验、理论和方法[M]. 北京: 科学出版社, 2009. (HAN Linhai, TAO Zhong, WANG Wenda. Modern composite structures and hybrid structures-tests, theories and methods [M]. Beijing: Science Press, 2009.)
- [19] 薛凯, 朱涵, 李浩然, 等. 橡胶膨胀混凝土抗裂性能和力学性能研究[J]. 低温建筑技术, 2014, 186(12): 4-6. (XUE Kai, ZHU Han, LI Haoran, et al. Study on the crack resistance and mechanical properties of rubber expanded concrete [J]. Cryogenic construction technology, 2014, 186(12): 4-6.)
- [20] OSAMA Y, JULIE E, REZA H M. Assessment of the mechanical performance of crumb rubber concrete [J]. Construction and building materials, 2016(125): 175-183.
- [21] KHALOO A R, DEHESTANI M, RAHMATABADI P. Mechanical properties of concrete containing a high volume concrete particles [J]. Waste management, 2008, 28(12): 2472-2482.
- [22] SUN Li, CHEN Chen, SUN Qianqian. Experiment and finite element analyses on the corrosion of underground pipelines [J]. Science China, 2015, 58(6): 1015-1020.
- [23] ZHOU Jinghai, SUN Li, LI Hongnan. Study on dynamic response measurement of the submarine pipeline by full-term FBG sensors [J]. Scientific world journal, 2014, 26(5): 80-87.

(责任编辑: 杨永生 英文审校: 刘永军)