

文章编号:1001-4888(2019)03-0467-11

GFRP 管型钢再生混凝土组合柱 轴压性能及承载力计算^{*}

马辉, 张鹏, 厉嘉鑫, 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:通过对11根玻璃纤维(GFRP)管型钢再生混凝土组合柱的静力加载试验以研究其轴压性能,主要考虑再生粗骨料取代率、配钢率和长细比、再生混凝土强度等级等设计参数,重点分析试件破坏过程及形态、荷载一位移曲线、荷载一应变曲线和承载力等。结果表明:各试件试验过程及破坏形态相似,型钢先发生屈服,随后内部再生混凝土被压碎,最后外部GFRP管纤维撕裂破坏;试件轴压承载力随着取代率和长细比的增大而逐渐减小,其最大降幅分别为10.8%和9.5%;提高配钢率和再生混凝土强度对组合柱的轴压承载力是有利的,其最大增幅分别为14.1%和6.1%。在GFRP管的约束作用下,内部型钢再生混凝土处于三向受压状态,组合柱的承载力得到了显著提高。在此基础上,采用叠加原理并考虑再生粗骨料取代率及长细比的不利影响,提出GFRP管型钢再生混凝土组合柱的轴压承载力计算公式,计算值与试验吻合较好。

关键词:玻璃纤维增强塑料(GFRP)管;型钢再生混凝土;再生粗骨料取代率;轴压性能;承载力计算

中图分类号: TU398

文献标识码: A

DOI: 10.7520/1001-4888-17-270

0 引言

纤维增强复合材料(FRP)作为一种新型材料,以其轻质高强、耐高温、耐腐蚀、抗蠕变以及热膨胀系数与混凝土相近等特点而被应用于土木工程中,其中玻璃纤维增强复合材料(GFRP)约束混凝土构件是一种典型的应用^[1-3]。比如,部分学者提出了GFRP管约束再生混凝土柱^[4],该构件不但改善了再生混凝土的力学性能缺陷,而且符合绿色环保的发展理念。相关研究表明^[5,6],GFRP管约束再生混凝土柱具有承载力高、耐久性好等特点,但由于再生混凝土和GFRP管均为脆性材料,导致组合柱发生脆性破坏,不利于结构安全。另外,钢与混凝土组合结构形式,如型钢混凝土结构^[7-9],由于具有承载能力高、延性和抗震性能好的优势而被广泛应用,但由于其需要配置型钢、钢筋和支设模板而导致施工复杂且较为困难,不便于应用。因此,本文在GFRP管约束再生混凝土柱和型钢混凝土基础上,借鉴各自的优点,提出了一种组合构件——GFRP管型钢再生混凝土组合柱。

GFRP管型钢再生混凝土组合柱中GFRP管充当轻质量的模板,简化结构形式,便于施工;GFRP管约束内部再生混凝土,使核心再生混凝土处于三向受压状态,其横向变形受到限制,限制再生混凝土斜裂缝的开展;内配型钢有效地提高了构件的承载力和延性。GFRP管型钢再生混凝土组合柱具有耐

^{*} 收稿日期: 2017-12-18; 修回日期: 2018-03-31

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),西安理工大学青年科技新星项目,西安理工大学科学研究计划项目(2016CX028)

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、混合结构研究。Email: mahuiwell@163.com

腐蚀、绿色环保、承载力高和施工方便等优势,应用前景较为广阔,但目前对该新型组合柱的受力性能研究相对较少,因此有必要对该组合柱的力学性能展开相关研究。

本文对 11 根轴压力作用下的 GFRP 管型钢再生混凝土组合柱进行了试验研究,对其破坏形态特征、荷载一位移曲线、应变规律以及轴压破坏机理等展开了详细的分析。在此研究基础上,采用叠加原理提出 GFRP 管型钢再生混凝土组合柱轴压承载力计算方法,为该组合柱的轴压承载力设计计算提供参考。

1 GFRP 管型钢再生混凝土组合柱轴心受压试验研究

1.1 试件设计与制作

本文试验加工制作了 11 根组合柱试件,试验设计参数详见表 1。试验所用 GFRP 复合材料是由树脂和玻璃纤维组成,树脂基体将玻璃纤维连接成一个整体,使纤维受力均匀而共同承受荷载。GFRP 管直径为 200mm,壁厚 10mm,环向抗拉强度 350MPa,轴向抗压强度 68MPa,环向弹性模量 22GPa,纵向弹性模量 2.1GPa;内配型钢采用 Q235B 普通热轧工字型钢,表 2 为型钢的基本力学性能指标。试件截面设计尺寸见图 1。

表 1 试验试件的主要参数

Tab. 1 Main design parameters of test specimens

试件 编号	再生 混凝土 强度 等级	再生 粗骨料 取代率 $r/\%$	柱高 H/mm	长细比 λ	型钢 配钢率 $\rho/\%$
GSRC-1	C40	0	500	10	4.54
GSRC-2	C40	30	500	10	4.54
GSRC-3	C40	50	500	10	4.54
GSRC-4	C40	70	500	10	4.54
GSRC-5	C40	100	500	10	4.54
GSRC-6	C40	100	500	10	5.76
GSRC-7	C40	100	500	10	6.85
GSRC-8	C40	100	1200	24	4.54
GSRC-9	C40	100	1800	36	4.54
GSRC-10	C50	100	500	10	4.54
GSRC-11	C60	100	500	10	4.54

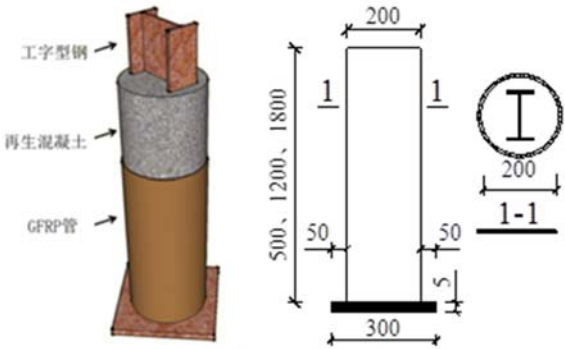


图 1 试件设计及几何尺寸

Fig. 1 Design and physical dimension of specimens

表 2 钢材的基本力学性能指标

Tab. 2 Basic mechanical performance of steel products

型钢类型	屈服强度 f_y/MPa	极限强度 f_u/MPa	弹性模量 E_s/MPa
翼缘	327.6	459.7	2.02×10^5
腹板	339.2	467.6	1.97×10^5

试件采用的天然粗骨料是经过破碎而成的碎石,如图 2 所示。为保证再生粗骨料的质量与来源,采用同一批实验室用废弃混凝土,粒径在 5~25mm 之间且具有较好的连续级配,其孔隙率、吸水率、密度等均满足《混凝土用再生粗骨料》(GB/T-25177)规定要求,如图 3 所示。再生混凝土的细骨料采用良好级配的河砂,采用强度等级为 R42.5 的普通硅酸盐水泥作为胶凝材料。表 3 为再生混凝土材料配合比及基本力学性能指标。

制作 GFRP 管型钢再生混凝土组合柱试件时,先将内置的型钢焊接在钢端板的中心位置,防止在浇筑再生混凝土时型钢发生移动,并将 GFRP 管用硅酮胶对中粘结固定在底端板上;采用盘式搅拌机制备再生混凝土材料,使用前先对搅拌机内壁及托盘洒水润湿,然后依据配合比用量加入各材料,配置不同强度等级再生混凝土。每浇筑一定量的再生混凝土材料后,对其进行均匀振捣。图 4 为组合柱的加工过程及部分浇筑完成的试件成品。



图 2 天然粗骨料

Fig. 2 Natural coarse aggregate



图 3 再生粗骨料

Fig. 3 Recycled coarse aggregate

表 3 再生混凝土材料的配合比和基本力学性能

Tab. 3 Mixture ratio and basic mechanical performance of recycled aggregate concretes

再生 混凝土 强度 等级	再生 粗骨料 取代率 $r/\%$	水胶比 W/B	单位体积用量/(kg/m^3)							立方体 抗压强度 f_{cu}/MPa	轴心 抗压强度 f_d/MPa	弹性 模量 E_c/MPa
			水泥	砂	天然 粗骨料	再生 粗骨料	水	粉煤灰	减水剂			
C40	0	0.44	443	576	1171	0	195	0	0	43.37	32.96	2.685×10^4
	30	0.45	443	576	819.5	351.3	198.5	0	0	43.26	32.88	2.683×10^4
	50	0.45	443	576	585.5	585.5	200.8	0	0	42.26	32.12	2.667×10^4
	70	0.46	443	576	351.3	819.7	203.2	0	0	41.38	31.45	2.653×10^4
	100	0.47	443	576	0	1171	206.7	0	0	40.01	30.41	2.630×10^4
C50	100	0.36	358	649	0	1138	163	94	3.5	51.61	39.22	2.796×10^4
C60	100	0.31	422	528	0	1072	164.5	105.36	6.3	61.58	46.80	2.898×10^4



(a) 部分GFRP管及型钢



(b) 试件浇筑



(c) 部分试件成品

图 4 部分 GFRP 管型钢再生混凝土组合柱试件

Fig. 4 Making process of some composite columns

1.2 试验加载装置及测试内容

试验采用最大量程为 5000kN 的电液伺服试验压力机施加轴向荷载,如图 5 所示。正式加载前先对试件进行预加载,使试件和端板之间的缝隙压实;随后将控制电脑的荷载归零开始正式加载,当施加轴压荷载小于 $0.6 P_{max}$ (P_{max} 为估算峰值荷载)之前采用荷载控制加载,每级荷载增量为 $P_{max}/12$;当荷载达到 $0.6 P_{max}$ 之后,采用位移控制加载,每分钟位移增量 1.5mm,当组合柱产生过大变形或者丧失承载力而发生破坏时,试验结束。

本试验同步施加荷载和采集数据,长柱试验机自动化系统自动获得试件轴向荷载一位移曲线。通过布置在 GFRP 管的上、下部相对两面,中部四面平均纵、横方向的应变片获取其在承受轴压力过程中

的应变变化规律,同样在型钢与 GFRP 管对应位置的翼缘及腹板粘贴纵、横方向应变片获取内部型钢的应变变化规律。在组合柱高度方向布置 5 个位移计量测试件侧向位移变化。试件应变片布置点和位移计位置如图 6 所示。

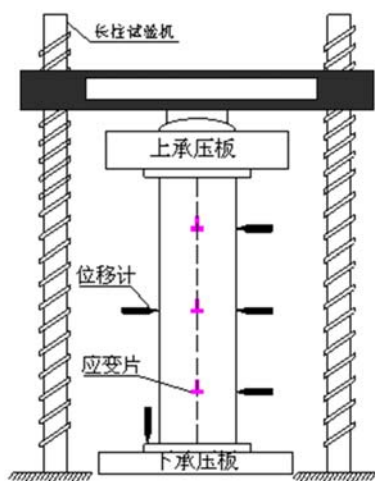


图 5 轴压试验加载装置

Fig. 5 Axial test setup

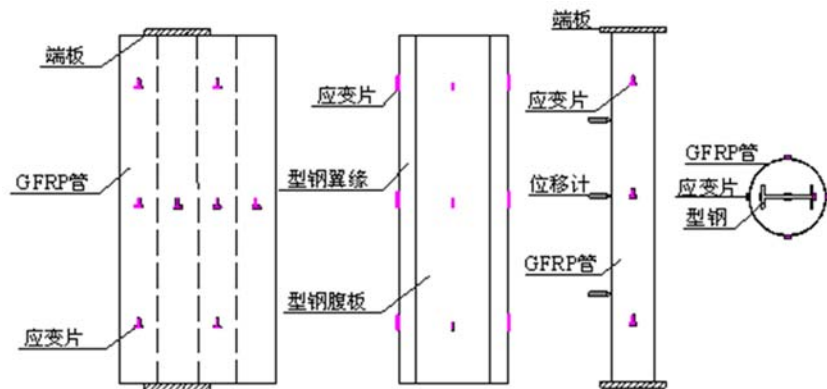


图 6 位移计与应变片位置

Fig. 6 Position of the displacement meter and strain gauges

2 试验结果及分析

2.1 破坏过程及特征

图 7 为部分典型 GFRP 管型钢再生混凝土组合柱破坏特征,其中短柱主要发生剪切破坏,中长柱还发生了弯曲破坏,差别相对较大,因此本文按照短柱和 中长柱两部分分别进行描述。

(1)短柱:GSRC-1~GSRC-7 和 GSRC-10~GSRC-11 试件

不同设计参数的组合短柱破坏模式基本相似,以 GSRC-5 试件为例对短柱试件的破坏过程进行分析。加载初期,短柱试件基本处于弹性状态,此时试件的位移和荷载基本呈正比关系,未出现明显的轴压变形,GFRP 管、型钢和再生混凝土三者基本处于独立工作状态;当荷载增至极限荷载的 60%左右时,试件开始出现轴压变形,内部再生混凝土膨胀,使得 GFRP 管产生环向拉应力,由于部分玻璃纤维撕裂,基体树脂受拉开始产生应力发白现象,GFRP 管中部表面局部不规则轻微泛白,并伴有轻微的响声;轴向荷载达到极限荷载 80%左右时,试件轴压变形增大,GFRP 管中部轻微外鼓并伴随陆续纤维断裂声音,同时试件内部再生混凝土出现劈裂声,试件刚度退化较为明显;当荷载增至接近极限荷载时,出现持续的纤维断裂声音,并且纤维断裂的声音和频率变大,基体树脂受拉产生明显的应力发白现象,GFRP 管斜纵向大面积变为白色;达到极限荷载后,随着荷载的继续增大,GFRP 管由于撕裂而产生较大的斜裂缝,试件丧失承载力而发生破坏。试验结束后,将组合柱外层 GFRP 管剥去,试件内部再生混凝土出现不规则的裂缝,凿去再生混凝土后发现型钢中上部压屈变形。

(2)中长柱:GSRC-8 和 GSRC-9 试件

中柱和长柱加载破坏过程及破坏现象较一致。加载初期,试验现象与轴压短柱相似,试件没有明显的变形特征;当荷载增至极限荷载的 50%左右时,试件轴压变形增大,少量玻璃纤维撕裂,GFRP 管中部表面轻微不规则的应力发白;当荷载增至极限荷载的 80%左右时,试件轴压变形增大,由于试件不可避免地存在初始偏心距,产生附加弯矩,试件中上部开始出现侧向挠曲变形,GFRP 管中部轻微外鼓并伴随纤维断裂声音,同时试件内部出现再生混凝土劈裂声,试件开始出现刚度退化现象;当荷载持续增大至接近极限荷载时,随着轴压变形的增大,试件侧向挠曲变形也增大,并出现高频率的纤维断裂声音,基体树脂受拉产生明显的应力发白现象,GFRP 管中部变为白色;随后荷载加载至极限荷载时,出现较大响声,试件发生破坏,试件 GSRC-8 的上部 GFRP 管出现较大的斜断裂裂缝,试件 GSRC-9 的中部

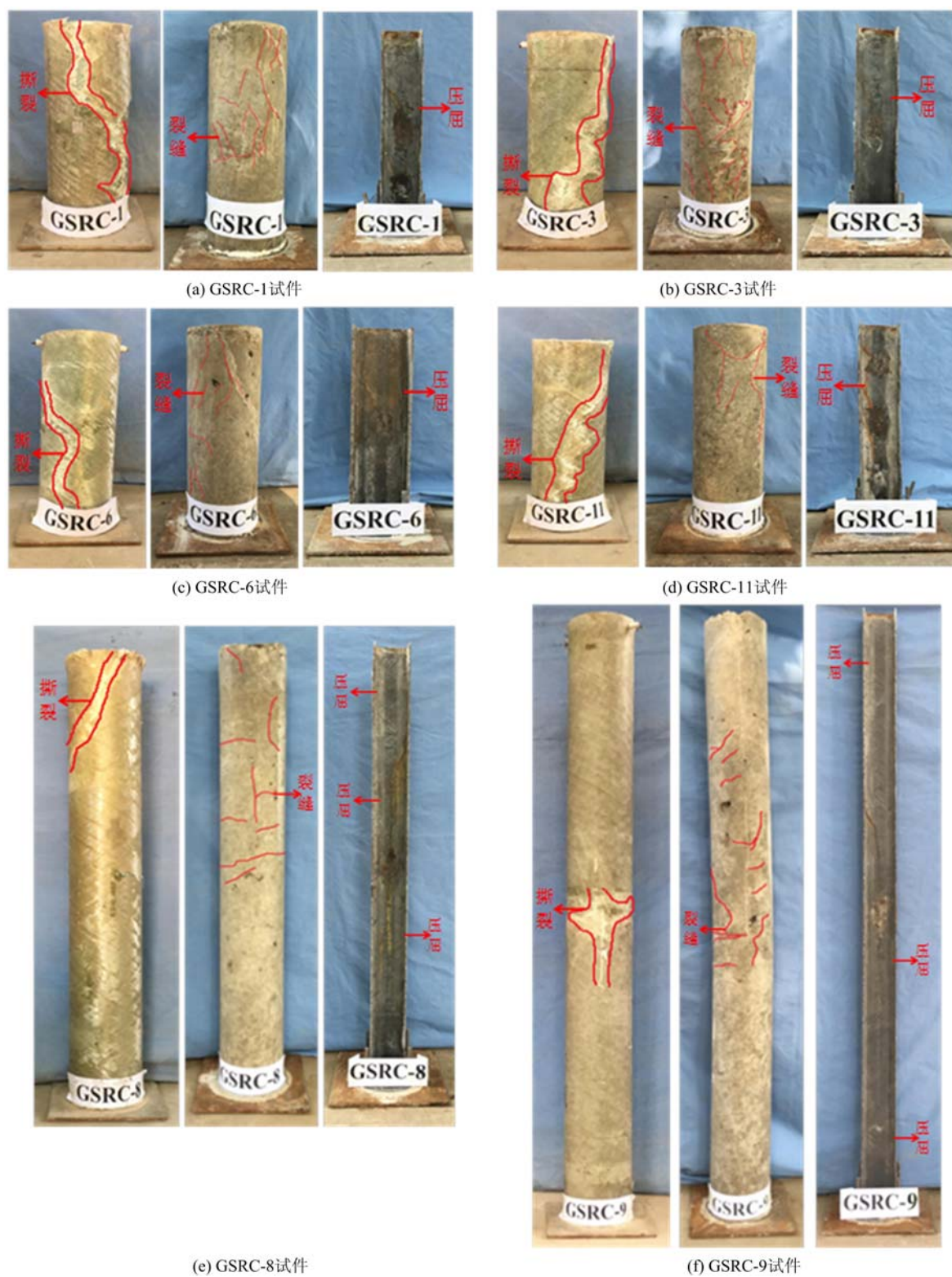


图7 部分柱试件的破坏形态

Fig. 7 Failure modes of part columns specimens

GFRP 管出现不规则撕裂。试验结束后,将试件沿着 GFRP 管纵向方向剖开,通过观察发现试件内部柱体出现挠曲变形,但仍保持较好的整体性,再生混凝土表面出现不规则的裂纹,型钢中上部发生压屈变形。

2.2 轴向荷载—位移曲线

图 8 给出了不同参数下组合柱试件的轴向荷载—位移曲线。从图 8 中可以看出,该组合柱具有刚度大和轴压承载力高的特点,主要设计参数对组合柱轴向荷载—位移曲线的影响规律如下:

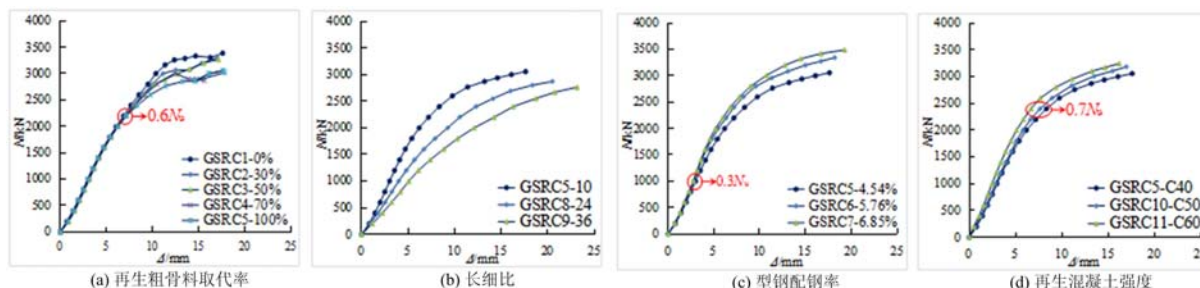


图 8 组合柱试件的轴向荷载—位移曲线

Fig. 8 Axial load-displacement curves of specimens

由图 8(a)可知,不同再生粗骨料取代率的组合柱荷载—位移曲线除 GSRC-4 外基本一致。加载前期阶段,试件处于弹性状态,位移随着荷载的增大线性增长,并且曲线基本重合,说明不同再生粗骨料取代率的组合柱初始刚度无明显差别;随着荷载增大至极限荷载的 60% 左右时,曲线斜率开始降低,随着取代率的增大,试件刚度呈降低趋势;在达到峰值荷载时,试件极限荷载随着取代率的增加呈减小趋势,这是由于再生骨料表面存在旧的水泥砂浆,使其力学性能劣于天然粗骨料所致。在加载后期,再生混凝土的微裂缝被压紧致密,组合柱极限位移基本相当。

由图 8(b)可知,不同长细比下组合柱的荷载—位移曲线差异较大。加载初期,试件初始轴压刚度和承载力均随着长细比的增大而降低,长细比大的试件轴压变形大,即中长柱的变形较短柱明显;加载后期,长细比小的试件曲线斜率小于长细比大的试件,曲线较为平缓,说明长细比小的试件延性要优于长细比大的试件。此外,侧向挠曲产生的二阶效应对长细比较大的试件影响明显,因此需要控制组合柱长细比以减小其不利影响。

由图 8(c)可知,型钢配钢率对试件的初始刚度影响不大,对轴压承载力影响较为明显。加载初期,曲线呈线性变化,不同配钢率试件的荷载—位移基本重合;随着荷载增大至极限荷载的 30% 左右时,型钢配钢率大的组合柱承载力降低较慢,达到峰值荷载后,型钢配钢率大的试件轴压承载力更高;在加载后期,型钢配钢率大的试件曲线更平滑,斜率相对较小,说明提高型钢配钢率可以改善试件的延性性能。因此合理增加型钢配钢率有利于试件的轴压承载力和延性性能。

由图 8(d)可知,对比不同再生混凝土强度等级的组合柱荷载—位移曲线,走势与变化规律基本一致。加载前期阶段,试件处于弹性状态,位移随着荷载呈线性增长;随着荷载加至峰值荷载的 70% 左右时,曲线斜率出现较大变化,不同再生混凝土强度等级的试件仍表现出较好的规律性;增大再生混凝土强度等级,虽然提高了试件的轴压刚度和承载力,但延性相对降低。在实际工程中,需要综合考虑组合柱的设计参数,选择合理的再生混凝土强度等级。

通过对组合柱的轴压性能进一步分析发现,再生粗骨料取代率为 100% 的组合柱试件比普通混凝土组合柱试件的轴压承载力降低 10.8% 左右;组合短柱比长柱具有更高的轴压承载力,最大增幅约为 9.5%;试件轴压承载力可以通过提高型钢配钢率得以改善,最大增幅约为 14.1%,同时延性性能也得以提高;提高再生混凝土强度等级,试件轴压承载力的最大增幅约为 6.1%,但延性有略微降低。

2.3 轴向荷载—应变曲线

通过粘贴在 GFRP 管和型钢上的应变片可测得各自的应变变化规律,图 9 为典型试件的 GFRP 管和型钢的荷载—应变曲线,其他试件的 GFRP 管和型钢的荷载—应变变化曲线基本类似。

(1) 在加载初期,GFRP 管荷载—轴向应变关系曲线与荷载与环向应变关系曲线基本对称,呈线性增长,曲线斜率均较大,GFRP 管的纵向和环向应变均较小,材料处于弹性受力状态,再生混凝土变形很小,此时 GFRP 管对内部再生混凝土的环向约束效应较小;当荷载增至峰值荷载的 50% 左右时,GFRP 管的纵向应变与环向应变的增长速度加快,GFRP 管对内部再生混凝土和型钢的约束效应增强;当荷载

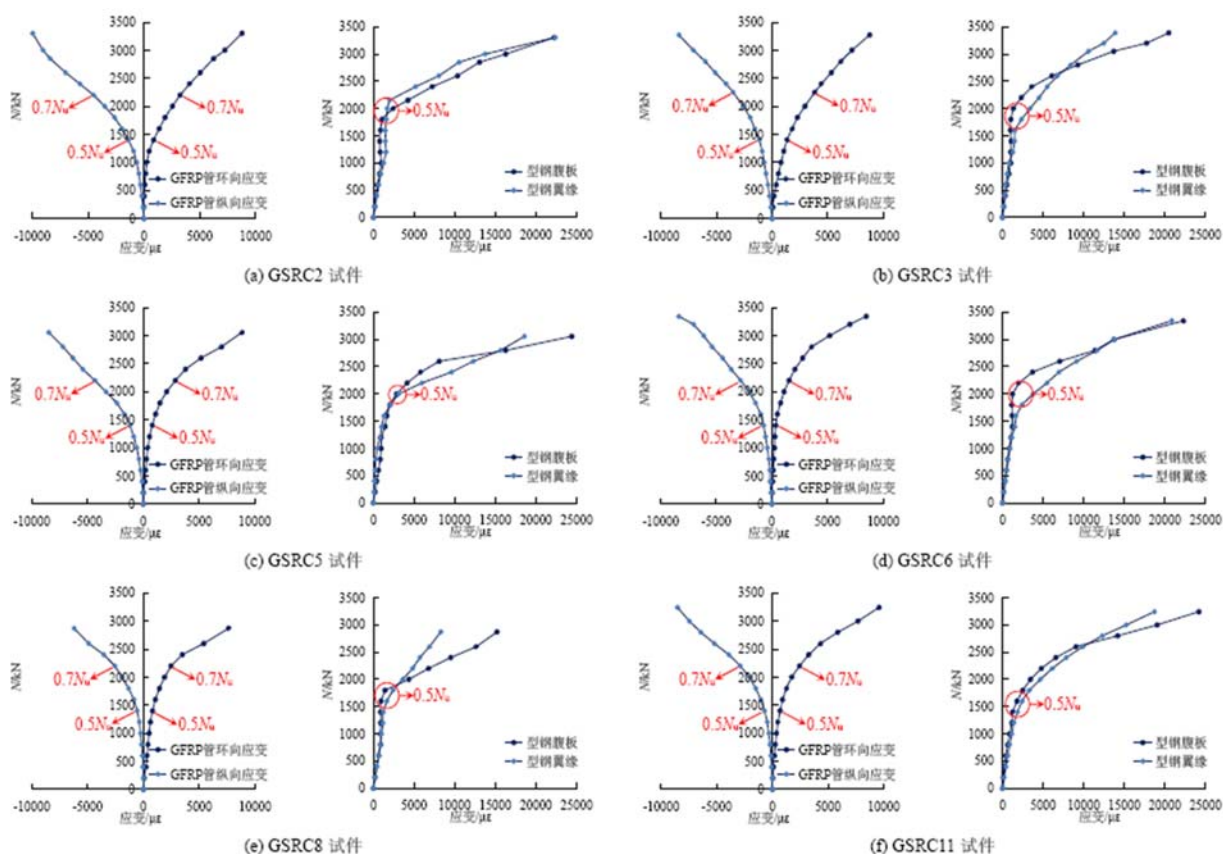


图9 部分试件 GFRP 管和型钢的荷载—应变曲线

Fig. 9 Load-strain curves of GFRP tube and profile steel in specimens

增至峰值荷载的 70% 左右时, GFRP 管纵向应变的增长速率快于环向应变, 说明 GFRP 管对内部再生混凝土的约束作用进一步加强, 试件轴压变形明显。

(2) 型钢应变曲线在加载初期基本呈线性关系增长; 当施加荷载持续增加至峰值荷载的 50% 左右时, 曲线开始呈非线性变化, 应变增长速率加快, 型钢基本达到屈服状态, 并具有明显的屈服点; 随着荷载的继续增大, 型钢应变急剧增大, 荷载—应变变化曲线逐渐接近水平方向, 型钢已经完全屈服。

(3) 比较 GFRP 管和型钢的荷载—应变曲线可知, 型钢应变增长速率明显比 GFRP 管快, 且型钢先发生屈服, 在此之前 GFRP 管对型钢的约束作用不大; 随着 GFRP 管应变的增大, 其套箍效应增强。组合柱在轴向荷载作用下, 内部型钢先发生屈服, 然后 GFRP 管发生撕裂。

3 轴压承载力计算

3.1 轴压受力分析

组合柱的轴向压力由 GFRP 管、型钢、核心再生混凝土共同承担。在轴压荷载作用下, GFRP 管约束再生混凝土, 再生混凝土包裹型钢, 使再生混凝土和型钢同时处于三向应力状态。由于 GFRP 管所受径向应力相对于轴向和环向应力很小, 为简化其轴压受力分析, 将其忽略不计, 即 $\sigma_r = 0$ 。试件的截面受力简图如图 10 所示。

3.2 再生混凝土受力分析

GFRP 管型钢再生混凝土组合柱中 GFRP 管对内部再生混凝土和型钢的约束力为 f_r , 根据力的平衡得^[10]

$$f_r = \frac{2f_t t}{d_0} \quad (1)$$

式中, f_f 为 GFRP 管的约束力; f_r 为 GFRP 管的环向抗拉强度; t 为 GFRP 管的壁厚; d_0 为 GFRP 管的

松比,则 GFRP 管的轴向极限压应变为^[12]

$$\epsilon_{xu} = \frac{\epsilon_{hu}}{\mu_f} \tag{10}$$

式中, ϵ_{hu} 为 GFRP 管的环向极限拉应变; ϵ_{xu} 为 GFRP 管的轴向极限压应变; μ_f 为 GFRP 管型钢再生混凝土强化阶段的轴压泊松比。

将式(10)代入式(6)中,计算得 GFRP 管的极限抗压强度为

$$f_{fy} = \frac{(1 + \mu_f \nu_{f\theta x}) E_f \epsilon_{hu}}{(1 - \nu_{f\theta x} \nu_{f,x\theta}) \mu_f} \tag{11}$$

式中, E_f 为 GFRP 管的轴压弹性模量。

3.5 GFRP 管型钢再生混凝土组合柱的轴压承载力计算

采用叠加法,GFRP 管型钢再生混凝土组合柱的轴压承载力由再生混凝土、型钢、GFRP 管三部分组成:

$$N_c = \eta \varphi (f_{fc} A_c + f_s A_s + f_{fy} A_f) \tag{12}$$

$$\eta = 1 - 0.052r - 0.0328r^2 \tag{13}$$

$$\varphi = 1.16 - 0.07 \ln \lambda \tag{14}$$

式中, η 和 φ 分别考虑了再生粗骨料取代率 r 和长细比 λ 对组合柱轴压承载力的不利影响,可以通过本文试验数据拟合得到其计算表达式,其中 r 为再生粗骨料取代率, λ 为组合柱长细比。

3.6 轴压承载力计算值与试验值比较

通过式(12)~(14)计算可得到组合柱的轴压承载力计算值,表 4 为组合柱轴压承载力计算值与试验值的比较。统计分析得到计算值 N_c 与试验结果 N_u 的比值平均值为 0.99,标准差为 0.016,表明本文推导的 GFRP 管型钢再生混凝土组合柱轴压承载力计算公式计算值与试验结果较为接近,误差满足工程设计要求。

表 4 组合柱试验结果与公式计算值的比较

Tab. 4 Comparison between experimental result and calculated values

编号	再生混凝土 等级	GFRP 管壁厚 t/mm	配钢率 $\xi/\%$	取代率 $r/\%$	长细比 λ	N_u/kN	N_c/kN	N_c/N_u
GSRC-1	C40	10	4.54	0	10	3387.75	3355.33	0.99
GSRC-2	C40	10	4.54	30%	10	3301.99	3245.78	0.98
GSRC-3	C40	10	4.54	50%	10	3270.54	3171.31	0.97
GSRC-4	C40	10	4.54	70%	10	3010.04	3007.74	1.00
GSRC-5	C40	10	4.54	100%	10	3056.58	3006.19	0.98
GSRC-6	C40	10	5.76	100%	10	3343.74	3391.56	1.01
GSRC-7	C40	10	6.85	100%	10	3489.74	3451.16	0.99
GSRC-8	C40	10	4.54	100%	24	2871.67	2831.35	0.99
GSRC-9	C40	10	4.54	100%	36	2764.80	2738.31	0.99
GSRC-10	C50	10	4.54	100%	10	3183.89	3103.38	0.97
GSRC-11	C60	10	4.54	100%	10	3242.19	3332.96	1.03

注: N_u 为承载力的试验实测值; N_c 为计算的承载力。

4 结论

本文进行了 GFRP 管型钢再生混凝土组合柱的轴压性能试验研究,并推导了该组合柱的轴压承载力计算公式,主要得到以下结论:

(1) 组合柱的轴压破坏分为三个阶段:首先型钢受压屈服,继而内部再生混凝土发生压碎破坏,最终 GFRP 管纤维发生斜向断裂破坏,导致构件丧失承载力;

(2) 试件轴压承载力随着再生骨料取代率、长细比增大而降低,最大降幅分别为 10.8%和 9.5%;轴压承载力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 14.1%和 6.1%,合理设计型钢配钢率和与之匹配的再生混凝土强度等级对构件的轴压承载力和延性变形能力是有利的;

(3) 加载初期,GFRP 管约束核心再生混凝土的能力较弱,随后 GFRP 管纵向应变和横向应变增长速度逐渐加快,GFRP 管约束效应增强;此外,型钢应变增大速率明显大于 GFRP 管,说明型钢先达到屈服,随后 GFRP 管撕裂破坏;

(4) 基于叠加原理,提出了组合柱的轴心受压承载力计算公式,轴压承载力计算值与试验值吻合较好。

参考文献:

- [1] 侯炜,张兴虎,冯海潮. GFRP 轴心受压构件的稳定性能[J]. 建筑材料学报, 2010, 13(4):441—445 (HOU Wei, ZHANG Xinghu, FENG Haichao. Stability of compression members of Glass Fiber-Reinforced Plastic (GFRP) [J]. Journal of Building Materials, 2010, 13(4):441—445 (in Chinese))
- [2] 王辉,李宏进,孙清,等. 轴压 GFRP 管件极限承载力试验与理论研究[J]. 建筑材料学报, 2016, 19(6):1033—1037 (WANG Hui, LI Hongjin, SUN Qing, et al. Experimental and theoretical study on ultimate bearing capacity of GFRP tubes under axial compression[J]. Journal of Building Materials, 2016, 19(6):1033—1037 (in Chinese))
- [3] 彭晖,高勇,谢超,等. FRP-混凝土界面粘结行为的参数影响研究[J]. 实验力学, 2014, 29(4):489—498 (PENG Hui, GAO Yong, XIE Chao, et al. Study on the effect of parameters on bond behavior of FRP-concrete interface[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2014, 29(4):489—498 (in Chinese))
- [4] McGinnis M J, Davis M, Rosa A D L, et al. Strength and stiffness of concrete with recycled concrete aggregates [J]. Construction and Building Materials, 2017, 154(11):258—269.
- [5] 肖建庄,黄一杰. GFRP 管约束再生混凝土柱抗震性能与损伤评价[J]. 土木工程学报, 2012, 45(11):112—119 (XIAO Jianzhuang, HUANG Yijie. On the seismic behavior and damage assessment of recycled aggregate concrete filled GFRP tube column[J]. China Civil Engineering Journal, 2012, 45(11):112—119 (in Chinese))
- [6] 肖建庄,杨洁. 玻璃纤维增强塑料约束再生混凝土轴压试验[J]. 同济大学学报:自然科学版, 2009, 37(12):1586—1591 (XIAO Jianzhuang, Yang Jie. On recycled concrete confined by GFRP tube under axial compression [J]. Journal of Tongji University: Natural Science Edition, 2009, 37(12):1586—1591 (in Chinese))
- [7] 马辉,薛建阳,刘云贺. 反复荷载下型钢再生混凝土组合柱粘结性能研究[J]. 实验力学, 2016, 31(5):625—634 (MA Hui, XUE Jianyang, LIU Yunhe. Study on bonding performance of steel reinforced recycled concrete composite column under low-cyclic reversed loading[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2016, 31(5):625—634 (in Chinese))
- [8] 王广勇,张超,李玉梅,等. 受火后型钢混凝土框架结构抗震性能[J]. 建筑结构学报, 2017, 38(12):78—87 (WANG Guangyong, ZHANG Chao, LI Yumei, et al. Post-fire seismic performance of steel reinforced concrete frame structures[J]. Journal of Building Structures, 2017, 38(12):78—87 (in Chinese))
- [9] 翁晓红,邵永健,劳裕华,等. 复合受扭型钢混凝土柱抗震性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2017, 38(11):23—33 (WENG Xiaohong, SHAO Yongjian, LAO Yuhua, et al. Post-fire seismic performance of steel reinforced concrete frame structures[J]. Journal of Building Structures, 2017, 38(11):23—33 (in Chinese))
- [10] 吴刚. 加固钢筋混凝土结构的试验研究与理论分析东南大学[D]. 东南大学, 2002 (WU Gang. Experimental study and theoretical analysis on strengthening concrete structures with FRP[D]. Southeast University, 2002 (in Chinese))
- [11] 吴刚,吕志涛. FRP 约束混凝土圆柱无软化段时的应力—应变关系研究[J]. 建筑结构学报, 2003, 24(5):1—9 (WU Gang, LV Zhitao. Study on the stress-strain relationship of FRP-confined concrete circular column without a strain-softening response[J]. Journal of Building Structures, 2003, 24(5):1—9 (in Chinese))
- [12] 刘文竞. 钢管—钢管混凝土柱分析方法研究[D]. 长沙:湖南大学, 2005 (LIU Wenjing. Research on steel tube

filled with steel-reinforced concrete column[D]. Changsha: Hunan University, 2005 (in Chinese))

- [13] 吴东辉, 杨松, 唐桂云, 等. FRP管增强混凝土结构的轴压极限强度[J]. 纤维复合材料, 2006(1):16—17 (WU Donghui, YANG Song, TANG Guiyun, et al. Axial ultimate compressive strength of FRP-tube reinforced concrete structure[J]. Fiber Composites, 2006(1):16—17 (in Chinese))

Axial compression performance and bearing capacity calculation of GFRP tube filled with steel-reinforced recycled concrete composite column

MA Hui, ZHANG Peng, LI Jia-xin, LIU Yun-he, LI Zhe

(School of Civil Engineering and Architecture, Xi'an University of Technology, Shaanxi 710048, China)

Abstract: Through the static loading test of 11 GFRP tube filled with steel reinforced recycled concrete composite columns to study their axial compression properties. Design parameters include recycled coarse aggregate replacement percentage, steel ratio, slenderness ratio and strength of recycled concrete. Failure process and mode of all specimens, the load-displacement curves and load-strain curves were mainly analyzed. The test results indicate that the axial compressive force process and failure mode of all specimens are similar, the profile steel yield firstly, then the internal recycled concrete crushing, and finally the external GFRP tube occurs buckling deformation. The axial bearing capacity of specimens decreased with the increase of the recycled coarse aggregate replacement percentage and slenderness ratio, the maximum decrease was 7.6% and 11.7%. Increasing the strength of recycled concrete and steel ratio is beneficial to the axial bearing capacity of columns, the maximum increase is 7.9% and 19.7%. Internal steel-reinforced recycled concrete is subjected to three-way pressure under constraints of GFRP tube, axial bearing capacity of composite columns has been significantly improved. On this basis, the calculation formula of axial bearing capacity for the composite columns is put forward, which adopted the principle of overlay and considered the adversely affect of recycled coarse aggregate replacement percentage and slenderness ratio. The calculated value is in good agreement with the actual bearing capacity of the test.

Keywords: Glass Fiber Reinforced Plastic (GFRP) tube; Steel reinforced recycled concrete; Recycled coarse aggregate replacement percentage; axial compression performance; axial bearing capacity