

文章编号:1007-9629(2021)03-0571-07

GFRP管-煤矸石混凝土-钢管空心柱轴压试验

张 霓¹, 郑晨阳¹, 赵中伟^{1,2}, 刘海卿¹, 美丽娜¹

(1. 辽宁工程技术大学 土木工程学院, 辽宁 阜新 123000; 2. 东南大学 土木工程学院, 江苏 南京 211189)

摘要:以煤矸石混凝土替代普通混凝土制备了GFRP管-煤矸石混凝土-钢管空心柱(GGCSC),并对GGCSC试件进行了轴心受压试验,通过研究GFRP管壁厚、空心率、钢管壁厚与混凝土类型对GGCSC试件轴心受压性能的影响,得出试件承载力、应变及位移等试验数据;对比了GGCSC与GFRP管-普通混凝土-钢管空心柱轴心受压性能的差异;通过受压过程中外部GFRP管与内部钢管的荷载-位移发展趋势,揭示了两者在GGCSC轴压过程中的力学性能,为GGCSC柱的推广应用提供试验基础。

关键词:GFRP管;煤矸石混凝土;钢管;空心柱;轴心受压;套箍效应

中图分类号:TU398

文献标志码:A

doi:10.3969/j.issn.1007-9629.2021.03.017

Experimental Investigations on Axial Compression Behavior of GFRP Tube-Coal Gangue Concrete-Steel Tube Hollow Columns

ZHANG Ni¹, ZHENG Chenyang¹, ZHAO Zhongwei^{1,2}, LIU Haiqing¹, XIAN Lina¹

(1. School of Civil Engineering, Liaoning Technical University, Fuxin 123000, China;

2. School of Civil Engineering, Southeast University, Nanjing 211189, China)

Abstract: The GFRP tube-coal gangue concrete-steel tube hollow column(GGCSC) was prepared by replacing ordinary concrete with coal gangue concrete, and the GGCSC specimens were tested under axial compression. The influences of GFRP tube wall thickness, hollow ratio, steel tube wall thickness and concrete type on the axial compression performance of GGCSC specimens were studied. The experimental data of bearing capacity, strain, and displacement of the specimens were obtained. The difference of axial compression performance between GGCSC and GFRP tube-ordinary concrete-steel tube hollow columns was compared. Through the load-displacement development trend of external GFRP tube and internal steel tube during compression, the mechanical properties of the two tubes during axial compression of GGCSC were determined. The study provides the test basis for the popularization and application of GGCSC columns.

Key words: GFRP tube; coal gangue concrete; steel tube; hollow column; axial compression; ferrule effect

煤矸石是煤炭开采和洗选过程中排出的固体废弃物,煤矸石堆放占用大量土地和农田,而且产生粉尘和有害气体,还可能发生爆炸、崩塌与滑坡,危害人们的生命、安全和健康,煤矸石的资源化利用迫在眉睫^[1].将煤矸石作为混凝土骨料既能解决环境污染,又可弥补天然砂石资源短缺的现状,符合绿色可

持续发展的战略需求^[2].随着高层建筑、大跨度桥梁、海洋工程及地下工程的发展,建筑物承重结构承担的荷载越来越大,这就要求在重载条件下,承重结构要有足够的承载能力、良好的抗震性能和抗腐蚀性能.纤维增强复合材料(FRP)因其具有轻质、高强及耐腐蚀等优点,被广泛应用于土木工程中^[3-6],以

收稿日期:2020-04-08; 修订日期:2020-08-16

基金项目:中国博士后科学基金面上资助项目(2017M621156);辽宁省教育厅育苗项目(LJ2020QNL006);辽宁工程技术大学学科创新团队资助项目(LNTU20TD-12)

第一作者:张 霓(1985—),女,山东威海人,辽宁工程技术大学讲师,博士. E-mail:ZhangNi815@yeah.net

通讯作者:赵中伟(1986—),男,河北邯郸人,辽宁工程技术大学副教授,硕士生导师,博士. E-mail:zhaozhongwei@lntu.edu.cn

FRP 约束混凝土构件为典型^[7-9]. FRP 约束内部混凝土,使核心混凝土处于三向受力状态,提高了混凝土的抗压承载力. Teng 等^[10]首次提出 FRP 管-混凝土-钢管空心柱结构,该结构能够充分发挥 3 种材料的特性,FRP 管对核心混凝土和钢管提供环向约束,钢管的弹塑性有利于提高结构的延性,核心混凝土在三向受力状态下承载力得到提高.

基于上述情况,本文将煤矸石混凝土与玻璃纤维增强复合材料(GFRP)管-混凝土-钢管空心柱相结合,制备了一种新型 GFRP 管-煤矸石混凝土-钢管空心柱(GGCSC)结构. 其中,GFRP 管的成本相比其他 FRP 材料低,使结构具有较高的经济效益,同时该新型结构因 GFRP 管的存在,能够保护内部钢管和煤矸石混凝土,具有良好的抗腐蚀性能,有效提高结构的耐久性;煤矸石混凝土的利用,不仅解决了固体废弃物煤矸石混凝土的利用问题,又节省了天然骨料资源,实现资源的可持续发展. 对 GGCSC 进行轴心受压试验,对其破坏模式、荷载-位移曲线、应变规律等开展分析.

1 试验

1.1 原材料

水泥(C)采用 42.5 级大鹰牌普通硅酸盐水泥;粉煤灰(FA)采用Ⅱ级粉煤灰;细骨料为天然河砂(S),细度模数 2.82;水(W)为普通自来水;减水剂为聚羧酸高效减水剂(PC),掺量¹⁾1.5%~2.5%,减水率 20%~30%.

煤矸石(CG)取自辽宁阜新海州矿区,经破碎、筛选、清洗、晒干处理,筛分得到 5~20 mm 连续级配的煤矸石粗骨料,其化学组成见表 1;普通混凝土粗骨料采用 5~20 mm 石灰岩碎石(LG). 煤矸石和石灰岩碎石的基本物理性能见表 2.

GFRP 管为沈阳天阳玻璃钢厂有限公司生产,缠绕角度 80°,内径 200 mm,长度 700 mm.

钢管采用 2 种:厚度为 4 mm 的钢管所用钢材的屈服强度和抗拉强度分别为 305、480 MPa;厚度

表 1 煤矸石的化学组成						
Table 1 Chemical composition of coal gangue						
w/%						
SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	Fe ₂ O ₃	K ₂ O	SO ₃
55.57	21.00	3.65	2.50	6.57	4.10	3.32

表 2 煤矸石和石灰岩碎石基本物理性能				
Table 2 Basic physical properties of coal gangue and limestone gravel				
Coarse aggregate	Apparent density/(kg·m ⁻³)	Bulk density/(kg·m ⁻³)	Water absorption ratio (by mass)/%	Crushing value/%
CG	2 606	1 235	7.40	17.1
LG	2 719	1 622	0.54	8.1

为 6 mm 的钢管所用钢材的屈服强度和抗拉强度分别为 305、485 MPa.

1.2 试件设计

煤矸石混凝土(GC)和普通混凝土(OC)配合比见表 3. 试验测得煤矸石混凝土和普通混凝土 28 d 立方体抗压强度分别为 35.8、36.9 MPa.

表 3 煤矸石混凝土与普通混凝土配合比							
Table 3 Mix proportions of gangue concrete and ordinary concrete							
kg/m ³							
Concrete	C	W	CG	LG	S	PC	FA
GC	320	175	820	0	924	6.6	80
OC	320	183	0	870	950	3.3	80

首先将 GFRP 管及钢管按设计尺寸制作好,为了得到钢管的应变,需在钢管外表面粘贴应变片,然后对应变片进行保护处理. 在应变片及端子表面涂抹环氧树脂,环氧树脂 A:B 胶(固化剂)按质量比 1:1 调配,主要用以减小混凝土浇筑时对应变片的撞击破坏. 将钢管和 GFRP 管用黑胶泥固定在木板上,保证两者同心且内钢管居中,然后在 GFRP 管和钢管之间浇筑混凝土,并振捣密实.

制作了 10 根轴心受压试件,其中 8 根 GGCSC 试件,1 根 GFRP 管-普通混凝土-钢管柱(GCSC)试件,1 根 GFRP 管实心煤矸石混凝土柱(GGCC)试件,试件截面示意图见图 1. 试件主要参数和极限荷

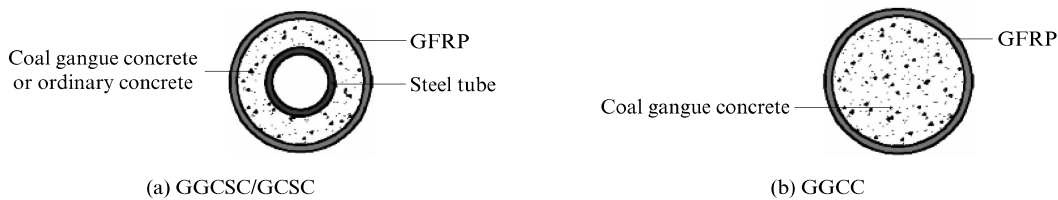


图 1 试件截面示意图
Fig. 1 Schematic diagrams of specimen section

1)文中涉及的掺量、减水率、比例等均为质量分数或质量比.

载 P_u 见表 4。表 4 中试件 GGCSC1、GGCSC9 和 GGCSC10 参数一致,其中 GGCSC1 正着放置,GGCSC9 倒置,GGCSC10 端部采用碳纤维增强复合材料(CFRP)加固,用以研究不同放置方式以及端部加固是否对承载力(以 P_u 表征)有影响。

表 4 试件主要参数与试验结果
Table 4 Chart of experimental parameters and results

Specimen	GFRP tube wall thickness/mm	Concrete	Steel tube		P_u /kN
			External diameter/mm	Wall thickness/mm	
GGCSC1	5	GC	89	4	2 021
GGCSC2	7	GC	89	4	2 390
GGCSC3	3	GC	89	4	1 430
GGCSC4	5	GC	89	6	2 111
GGCSC5	5	GC	108	4	1 818
GGCSC6	5	GC	60	4	2 297
GGCSC7	5	GC			2 817
GGCSC8	5	OC	89	4	2 213
GGCSC9	5	GC	89	4	1 917
GGCSC10	5	GC	89	4	2 064

1.3 测试方法

在 GFRP 管及钢管长度的 1/4、1/2 截面的 4 个象限点处分别粘贴纵向和环向应变片,用来测量 GFRP 管及钢管的纵向、环向应变;沿试件轴向布置电测位移计(LVDT),以测量试件的轴向位移。应变片和位移计的布置如图 2 所示。

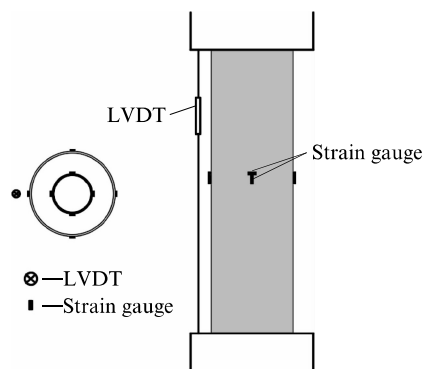


图 2 应变片和位移计的布置示意图

Fig. 2 Layout of strain gauge and LVDT

试验采用 GFRP 管及钢管、煤矸石混凝土共同受压方式,通过压力机上下承压板对试件进行加载。为了防止试件端部发生局部破坏,特制环形钢板夹具,试验加载前将钢板夹具固定在试件的端部。加载设备为 5 000 kN 压力机,加载方法为单调分级加载。具体步骤如下:(1)对试件进行几何对中;(2)预加载至 100 kN,使试件各部位的缝隙密实,查看各

测试仪器是否正常工作,然后卸载至零;(3)单调分级加载,每级荷载值为 50 kN,当荷载达到试件极限荷载 P_u 的 70% 左右时,放慢加载速度,每级荷载值改为 20 kN,接近破坏时缓慢连续加载,直至试件破坏;(4)在加载的同时,利用 ZI-120(160)型数显采集仪采集试验过程中应变片产生的数据,测量范围—15 625~15 625 $\mu\text{m/m}$,采样周期 1s;观察 GFRP 管纤维变化情况及试件变形情况。

2 结果与分析

2.1 试验现象及破坏模式

各试件的破坏形态均表现出大致相同的特点,本文以试件 GGCSC1 为例,说明 GFRP 管-煤矸石混凝土-钢管空心柱的轴心受压试验现象及破坏模式。在荷载作用初期,试件 GGCSC1 表面无明显变化,试件的位移和应变随着荷载的增加表现出线性增长的趋势;当荷载达到 70% P_u 左右时,GFRP 管表面开始出现白色条纹,说明玻璃纤维与树脂基底发生分离,并伴随有轻微的纤维断裂声,此时荷载-位移曲线不再呈线性变化,试件处于弹塑性状态;荷载继续增加,白色条纹逐渐增多,GFRP 管纤维层的颜色由均匀的淡绿色变成不规则的局部白色;随着荷载的增加,纤维断裂逐渐增多,白色条纹的范围不断扩大;当荷载接近 P_u 时,试件发出频繁的纤维断裂和树脂开裂的声音;当加载至极限荷载 P_u 时,在距离顶部 180~320 mm 处纤维发生断裂,伴随有较大的响声,并从断裂处沿纤维方向向两侧剥离,核心混凝土被压碎,骨料裸露,试件发生破坏,钢管基本完好,无明显屈曲现象,仅在局部略微向内突出。试件 GGSCC1 的破坏模式见图 3。

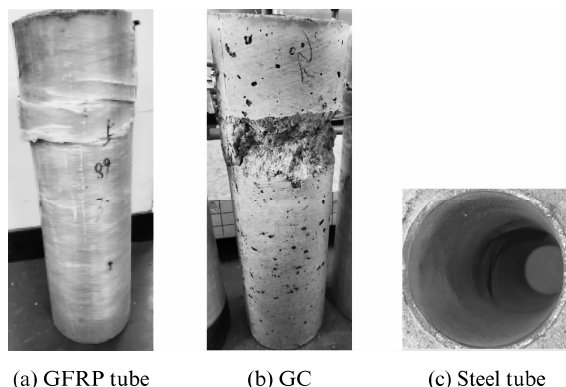


图 3 试件 GGSCC1 的破坏模式

Fig. 3 Failure mode of specimen GGSCC1

2.2 荷载-位移曲线

各试件的荷载-位移曲线见图 4。由图 4 可以

看出:在荷载作用初期,试件的位移基本呈线性增长(第1段);当荷载达到70% P_u 时,位移增长的速度明显大于荷载增长的速度,曲线斜率逐渐减小,试件进入弹塑性阶段(第2段);当荷载达到极限荷载后,试件不能承担继续增加的荷载,曲线表现为下降趋势,试件位移仍继续增长。因为轴压试

验前先将试件的两端垫砂子进行找平,虽然进行预加载使砂子压实,但是砂子之间还存在一定空隙,所以在加载初始段有一定位移,当砂子完全压实后,初始段呈直线。GGCSC1、GGCSC9及GGCSC10承载力相近,说明试件正置、倒置及端部加固对试件承载力影响不大。

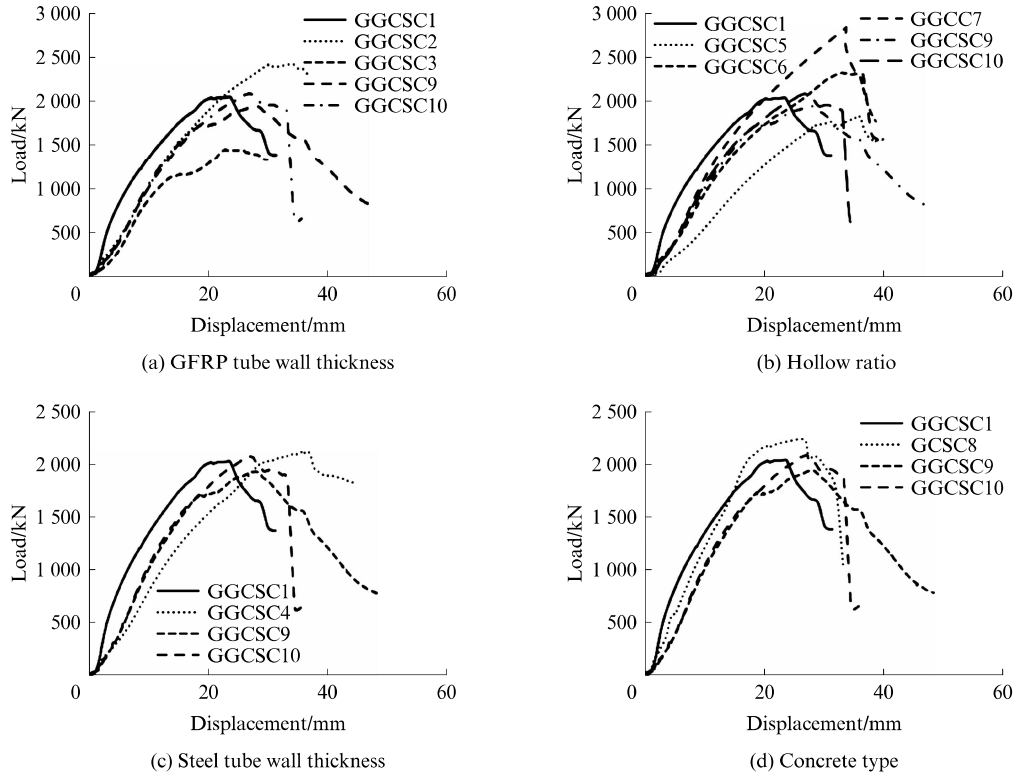


图4 各试件的荷载-位移曲线

Fig. 4 Load-displacement curves of specimens

2.2.1 GFRP管壁厚的影响

不同GFRP管壁厚的试件荷载-位移曲线见图4(a)。对比试件GGCSC1~GGCSC3可以看出,在煤矸石混凝土以及内部钢管相同的情况下,随着GFRP管壁厚的增加,试件的承载力明显增加,由1430 kN增加到2390 kN;试件GGCSC3的承载力要明显低于GGCSC1,这说明试件GGCSC3的破坏主要由GFRP管的破坏引起。

在加载初期,GGCSC2、GGCSC3、GGCSC9和GGCSC10曲线第1段基本重合,说明此时试件承载力的提高主要是煤矸石混凝土和钢管的作用。随着GFRP管壁厚的增加,曲线第2段的斜率增大,具有更强的增强段。为了揭示外部GFRP管和内部钢管对混凝土的套箍作用,引入承载力的提高率 λ ,其计算如下:

$$\lambda = \frac{N - f_c A_c - f_y A_s}{f_c A_c + f_y A_s} \quad (1)$$

式中: N 为GGCSC的承载力; f_c 为煤矸石混凝土轴心抗压强度; A_c 为核心煤矸石混凝土面积; f_y 为钢管的抗拉强度; A_s 为钢管的截面面积。

试件GGCSC1所用钢管单独的极限受压荷载为512 kN,煤矸石混凝土柱自身的受压屈服荷载为902 kN,而试件GGCSC1的承载力为2021 kN,比钢管和煤矸石混凝土柱单独承载力之和提高了607 kN,提高率为43%。由此可知,GFRP管的套箍作用大大提高了GGCSC的承载力。试件GGCSC2的承载力为2390 kN,比钢管和煤矸石混凝土单独承载力之和提高了976 kN,提高率为69%。试件GGCSC3的承载力为1430 kN,比钢管和煤矸石混凝土单独承载力之和提高了16 kN,提高率为1%。通过以上试验数据可知,GGCSC的承载力提高率与最外层GFRP管的壁厚直接相关,当GFRP管的壁厚为3 mm时,其对混凝土的套箍作用基本可以忽略。因此可以认为,试件GGCSC1~GGCSC3的

破坏是由 GFRP 管的破坏引起的。

试件 GGCSC1、GGCSC9 和 GGCSC10 的 GFRP 管壁厚相同,而三者的承载力也相近,从侧面也验证了 GGCSC 承载力的稳定性。另外,从这 3 个试件破坏时的位移可以看出,虽然三者几何尺寸一致,但是破坏阶段的力学特征相差较大:试件 GGCSC9 破坏时对应的位移为 48 mm,且荷载达到峰值后呈现缓慢的下降趋势,表现出了较好的延性;试件 GGCSC1 也有荷载下降阶段,但是破坏时的位移为 34 mm;试件 GGCSC10 的荷载下降段很小,破坏时对应的位移为 36 mm。当荷载降为极限荷载的 90% 时试件 GGCSC10 突然发生破坏,表现出显著的脆性破坏特征。由此可知,GFRP 管-煤矸石混凝土-钢管空心柱极限承载力稳定,但是延性浮动较大,这是由 GFRP 管的脆性特征引起的。

2.2.2 空心率的影响

不同空心率的试件荷载-位移曲线见图 4(b)。由图 4(b)可以看出,在 GFRP 管壁厚相同的情况下,随着空心率的减小,曲线第 1 段斜率增加,说明空心率的减小增大了试件的刚度;曲线第 2 段斜率也随着空心率的减小而增加。由于内钢管的存在,空心柱曲线下降段相比实心柱 GGCC7 明显变缓,说明加入内钢管有利于提高试件的延性。

试件 GGCC7 中,煤矸石混凝土单独的受压承载力为 1 124 kN,加上外部的 GFRP 管后,试件最终承载力为 2 817 kN,提高率为 151%。而前述与试件 GGCC7 的 GFRP 管壁厚相同的试件 GGCSC1 的承载力提高率为 43%,由此可知内部空心的增加降低了外部 GFRP 管套箍作用。此外,试件 GGCSC5 的承载力为 1 818 kN,比钢管和煤矸石混凝土单独承载力之和提高了 395 kN,提高率为 28%。试件 GGCSC6 的承载力为 2 297 kN,比钢管和煤矸石混凝土单独承载力之和提高了 937 kN,提高率为 69%。因此,GGCSC 柱的套箍作用随着空心率的增加而减弱。同时,从 GGCSC5、GGCSC6 的结果可以看出,当内部钢管壁厚不变,而外径增加时,钢管对混凝土的约束作用将减弱,从而导致受压刚度以及承载力的降低。

2.2.3 钢管壁厚的影响

不同钢管壁厚的试件荷载-位移曲线见图 4(c)。由图 4(c)可以看出,随着钢管壁厚的增加,钢管对混凝土的径向约束增加,进而提高了混凝土在三向应力状态下的强度。

2.2.4 混凝土类型的影响

不同混凝土类型的试件荷载-位移曲线见图

4(d)。从图 4(d)可以看出,GCSC8 中所用钢管单独的极限受压荷载为 512 kN,普通混凝土柱自身的受压屈服荷载为 929 kN,试件承载力为 2 213 kN,提高率为 54%。与试件 GGCSC1 的提高率(43%)对比可以看出,煤矸石混凝土的提高率比普通混凝土低。另外,煤矸石混凝土与普通混凝土相比,曲线第 1 段斜率减小,说明煤矸石混凝土的刚度比普通混凝土要小;但煤矸石混凝土曲线第 2 段斜率高于普通混凝土,而且具有更长的增强段。

2.3 荷载-GFRP 管应变曲线

各试件的荷载-GFRP 管应变曲线见图 5。图中,纵坐标为试件的荷载,横坐标正向为 GFRP 管的环向应变,横坐标负向为 GFRP 管的纵向应变。由图 5 可以看出,随着荷载的增加,GFRP 管的纵向和环向应变均呈现出三阶段的变化规律:初始的直线段、弹塑性微弯曲段和强化直线段。总体上看,GFRP 管的环向应变要比纵向应变增加缓慢,由于 GFRP 管内部的玻璃纤维缠绕方向与管轴线的角度为 80° ,因此 GFRP 管的轴向承载能力很弱,其横向应变对 GGCSC 柱的力学性能更有意义。

从图 5(a)可以看出,尽管试件 GGCSC3 的 GFRP 管壁厚较小,但其前期的荷载-GFRP 管应变曲线与 GFRP 管壁厚较大的试件 GGCSC1 基本相同。随着荷载的持续增加,较薄的 GFRP 管提前发生损坏。这说明外部 GFRP 管的应变发展趋势与壁厚无关。

不同空心率对试件荷载-GFRP 管应变曲线的影响见图 5(b)。由图 5(b)可见:荷载-GFRP 管应变曲线受空心率影响较大,空心率小的试件第 1 段斜率明显大于空心率大的试件,在相同荷载下,空心率小的试件应变值小于空心率大的试件;在相同应变值处,空心率小的试件荷载值大于空心率大的试件。

不同钢管壁厚对试件荷载-GFRP 管应变曲线的影响见图 5(c)。由图 5(c)可以看出,不同钢管壁厚的试件荷载-GFRP 管应变曲线基本一致,说明,钢管壁厚对 GFRP 管应变的影响比较小。

不同混凝土对试件荷载-GFRP 管应变曲线的影响见图 5(d)。由图 5(d)可见:GFRP-普通混凝土-钢管空心柱试件 GCSC8 的荷载-GFRP 管应变曲线第 1 段斜率大于 GFRP-煤矸石混凝土-钢管空心柱试件 GGCSC1,进入强化直线段后前者斜率小于后者。说明采用煤矸石混凝土时,GFRP 管的约束效果发挥提前,且发挥效果更为显著。

2.4 荷载-钢管应变曲线

各试件荷载-钢管应变曲线见图 6。图中,纵坐

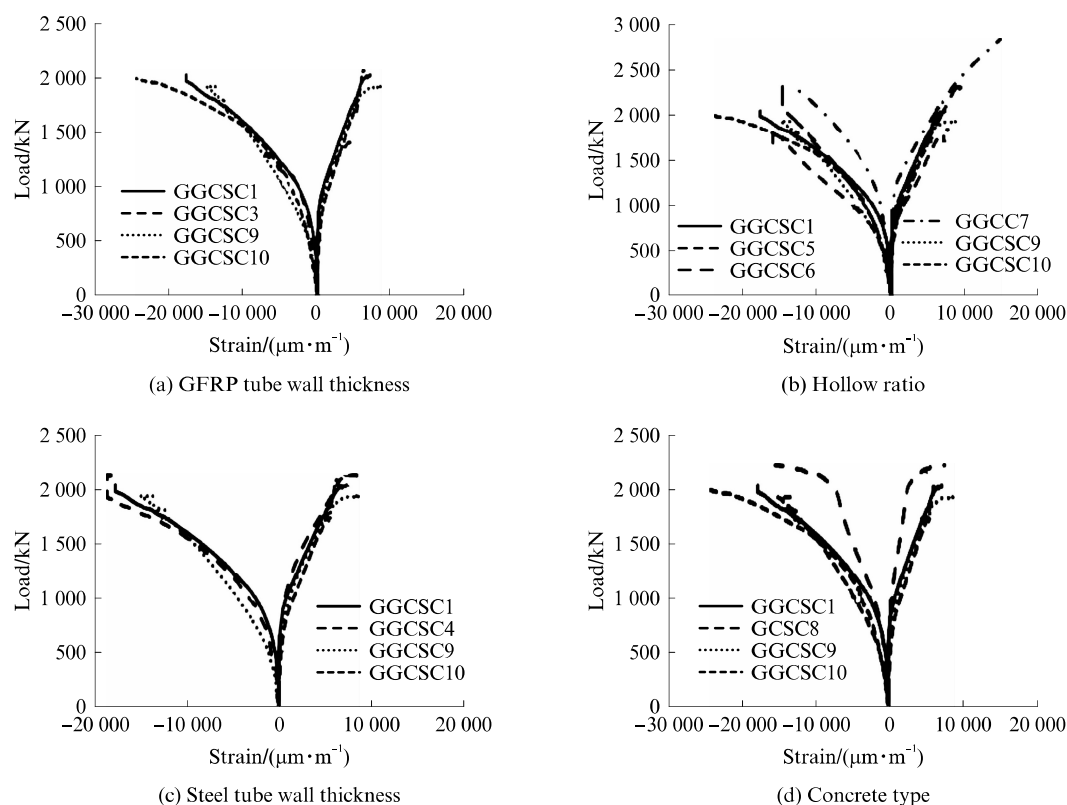


图5 各试件荷载-GFRP管应变曲线
Fig. 5 Load-GFRP tube strain curves of specimens

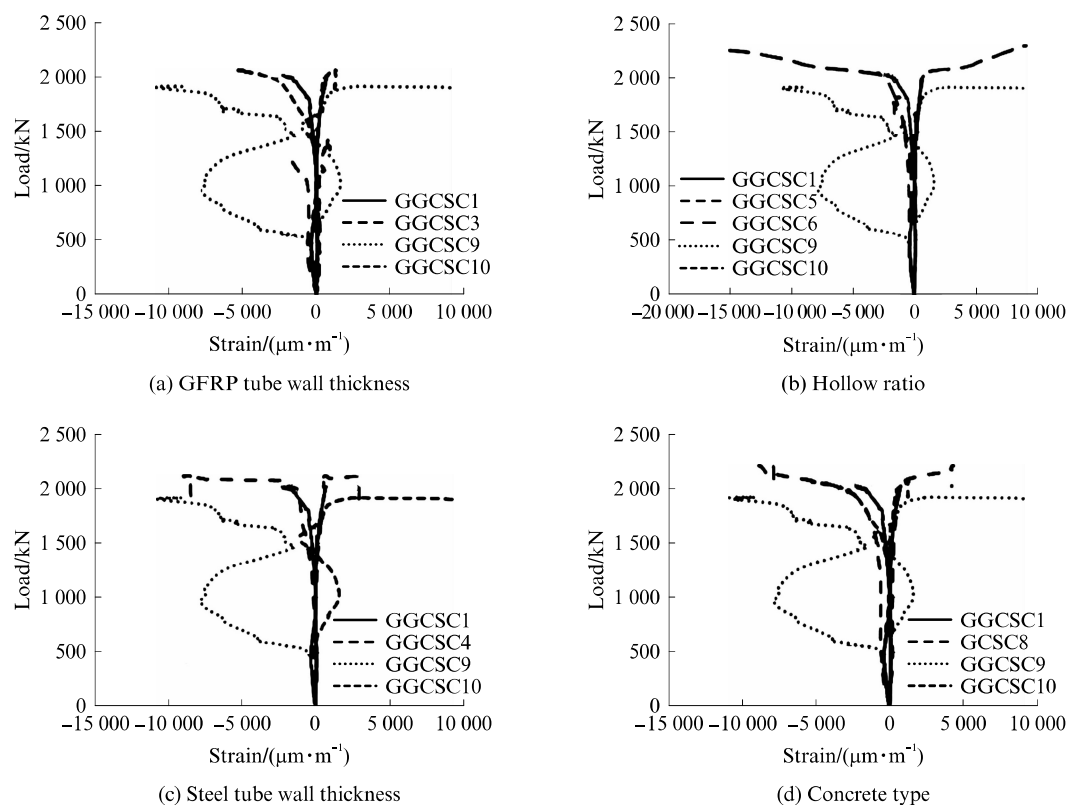


图6 各试件荷载-钢管应变曲线
Fig. 6 Load-steel tube strain curves of specimens

标为试件的荷载,横坐标正向为钢管的环向应变,横坐标负向为钢管的纵向应变.由图6可以看出,随着荷载的增加,钢管的纵向和环向应变也呈现出三阶段的变化规律:初始的直线段、弹塑性微弯曲段和强化直线段.

对比图5、6可以看出,内部钢管与外部GFRP管的应变增长趋势截然不同.外部GFRP管的应变增加是由于内部混凝土的受压膨胀,而内部钢管由于轴向刚度较大,因此直接承受轴压的作用.对比纵向和环向的应变发展趋势可以看出,钢管在2个方向上几乎同时屈服,试件GGCSC9的荷载-钢管应变曲线表明其内部钢管发生了局部屈曲.由于试件GGCSC3的GFRP管厚度较薄,因此当刚度还处于弹性阶段时,整个柱子便发生破坏.

图6总体表明,外部GFRP管的壁厚、混凝土类型、钢管壁厚和空心率对GGCSC内部钢管的应变发展趋势没有明显影响.由于钢管的良好塑性变形能力,钢管对混凝土的约束作用一直持续到试件破坏.GGCSC的破坏最终均由外部GFRP管中玻璃纤维的断裂引起.

3 结论

(1)由于内钢管的存在,GFRP-煤矸石混凝土-钢管空心柱荷载-位移曲线下降段相比实心柱明显变缓,说明加入内钢管有利于提高试件的延性.由于套箍作用,构件承载力的提高率随空心率的增加而降低.

(2)随着钢管壁厚的增加,钢管对混凝土的径向约束增加,进而提高了混凝土在三向应力状态下的强度.

(3)相同条件下,GFRP-普通混凝土-钢管空心柱承载力的提高率为54%,GFRP-煤矸石混凝土-钢管空心柱承载力的提高率为43%.这是由于套箍作用的影响.煤矸石混凝土与普通混凝土相比,荷载-位移曲线第1段斜率减小,说明煤矸石混凝土的试件初始刚度比普通混凝土小;但煤矸石混凝土荷载-位移曲线第2段斜率高于普通混凝土,而且具有更长的增强段.

(4)钢管由于直接承受轴压,因此很早就发生屈服.但是钢管对混凝土的约束作用一直持续到试件破坏.GGCSC柱的破坏最终均由外部GFRP管中玻璃纤维的断裂引起.

参考文献:

- [1] 孙春宝,董红娟,张金山,等.煤矸石资源化利用途径及进展[J].矿产综合利用,2016(6):1-7,12.
SUN Chunbao, DONG Hongjuan, ZHANG Jinshan, et al. Resource utilization ways of coal gangue and its development [J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2016(6): 1-7, 12. (in Chinese)
- [2] WU D, HOU Y B, DENG T F, et al. Thermal hydraulic and mechanical performances of cemented coal gangue-fly ash backfill[J]. International Journal of Mineral Processing, 2017, 162:12-18.
- [3] TENG J G, CHEN J F, SMITH S T, et al. FRP strengthened RC structures [M]. United Kingdom: John Wiley & Sons, Ltd, 2001:1-8.
- [4] BAKIS C E, BANK L C, BROWN V L, et al. Fiber-reinforced polymer composites for construction - State-of-the-art review [J]. Journal of Composites for Construction, 2002, 6(2): 73-87.
- [5] HOLLAWAY L C. A review of the present and future utilisation of FRP composites in the civil infrastructure with reference to their important in-service properties[J]. Construction and Building Materials, 2010, 24(12): 2419-2445.
- [6] ZENG Y H, CASPEELE R, MATTHYS S, et al. Compressive membrane action in FRP strengthened RC members[J]. Construction and Building Materials, 2016, 126:442-452.
- [7] MIRMIRAN A, ZAGERS K, YUAN W Q. Nonlinear finite element modeling of concrete confined by fiber composites [J]. Finite Elements in Analysis and Design, 2000, 35(1): 79-96.
- [8] REALFONSO R, NAPOLI A. Confining concrete members with FRP systems: Predictive vs design models[J]. Composite Structures, 2013:104:304-319.
- [9] LIM J C, OZBAKKALOGLU T. Unified stress-strain model for FRP and actively confined normal-strength and high-strength concrete[J]. Journal of Composites for Construction, 2014, 19(4): 04014072.
- [10] TENG J G, YU T, WONG Y L, et al. Hybrid FRP-concrete-steel tubular columns: Concept and behavior[J]. Construction and Building Materials, 2007, 21(4): 846-854.