DOI:10.11918/j.issn.0367-6234.201801162

FRP－钢夹层复合管混凝土桥墩轴压承载力试验

刘昌永[1,2],孙士鹏[1],胡 清[1],王玉银[1,2]

(1.哈尔滨工业大学 土木工程学院,哈尔滨 150090;2.结构工程灾变与控制教育部重点实验室(哈尔滨工业大学),哈尔滨 150090)

摘 要:为改善现有钢管混凝土不耐腐蚀以及FRP约束钢管混凝土施工复杂的缺点,提出一种新型组合构件:FRP－钢夹层复合管混凝土.为探究其受力性能,进行了FRP－钢夹层复合管混凝土柱式桥墩轴压试验研究,并与FRP约束钢管混凝土以及钢管混凝土进行对比,分析3种结构形式的受力性能和破坏模式.试验结果表明:钢管混凝土短柱因含钢率较低而发生剪切破坏,而FRP－钢夹层复合管混凝土短柱与FRP约束钢管混凝土短柱由于外部FRP的附加约束作用均产生腰鼓型破坏;FRP约束钢管混凝土短柱树脂基体被挤压破碎,而FRP－钢夹层复合管混凝土短柱由于夹层的存在未发生树脂基体的挤压破碎;与FRP约束钢管混凝土短柱相比,由于夹层灌浆料的作用,FRP－钢夹层复合管混凝土短柱承载力提高35.3%,极限变形提高22.5%.此外,在现有钢管混凝土和FRP约束混凝土承载力计算公式基础上得到了FRP－钢夹层复合管混凝土短柱的承载力计算公式,计算结果与试验值吻合良好.

关键词:FRP－钢夹层复合管约束混凝土;柱式桥墩;轴压性能;玻璃纤维;灌浆料

中图分类号:U443.22 **文献标志码**:A **文章编号**:0367－6234(2018)12－0031－07

FRP-interlayer-steel tube concrete column piers under axial compression

LIU Changyong[1,2], SUN Shipeng[1], HU Qing[1], WANG Yuyin[1,2]

(1. School of Civil Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150090, China; 2. Key Lab of Structures Dynamic Behaviour and Control (Harbin Institute of Technology), Ministry of Education, Harbin 150090, China)

Abstract: To improve the corrosion resistance of concrete-filled steel tubular column (CFST) and construction inconvenience of FRP-steel tube concrete column (FSCC), a novel composite member is proposed, namely, FRP-interlayer-steel tube concrete column (FIST). In this paper, axial compression tests on FIST, FSCC and CFST were conducted to investigate the failure modes and the loading process. The experimental results indicated that the failure mode of FIST and FSCC was waist drum failure owing to the confinement of FRP, which is different from the shear failure mode of CFST resulting from low steel ratio. Compared with FSCC, whose resin matrix was crushed, FIST avoided this due to the existence of the interlayer. The bearing capacity and ultimate deformation of FIST increased by 35.3% and 22.5% respectively, higher than that of FSCC also owing to the interlayer. The design equation of the bearing capacity of FIST was proposed from the equations of the bearing capacity of CFST and FSCC. Calculations and test results showed good agreement.

Keywords: FRP-interlayer-steel tube concrete column (FIST); column pier; axial compression; GFRP; grouting material

近些年来,钢管混凝土结构因抗压承载力高、施工方便、抗震性能好等优点在大跨桥梁、高层建筑、地下结构、改造加固[1]中广泛应用.然而,由于钢管混凝土中的外围钢管直接暴露于使用环境中,在海水、土壤以及湿气较重的大气等恶劣环境下容易锈蚀,钢管混凝土的应用受到了一定限制.针对该问题,有学者提出了一种在钢管混凝土表面缠绕FRP并通过树脂胶黏结的新型构件——FRP约束钢管混凝土[2].FRP钢管混凝土中的外围FRP能够有效地解决钢材腐蚀问题,同时还能进一步约束核心混凝土的侧向变形,提高构件的抗压承载力和极限变形[3].然而,相关研究结果显示,当FRP直接承担竖向荷载时,树脂基体容易先于纤维发生破坏,影响试件性能[4-5],另外,FRP的施工涂装费时费力,因此FRP约束钢管混凝土结构目前在工程中应用较少[6].

为解决上述问题,本文提出了一种新型组合构件——FRP－钢夹层复合管混凝土.本文详细介绍了FRP－钢夹层复合管混凝土的组合形式及优势,进行了FRP－钢夹层复合管混凝土轴压短柱试验研究,并与FRP约束钢管混凝土短柱以及钢管混凝土短柱进行对比,分析了3种结构形式的受力性能和破坏模式,证明了FRP－钢夹层复合管混凝土具有优异的力学性能和较好的应用前景.

收稿日期:2018－01－29
基金项目:"十三五"国家重点研发计划(2016YFC0701202)
作者简介:刘昌永(1982—),男,副教授,硕士生导师
通信作者:刘昌永,liuchangyong@hit.edu.cn

1 FRP – 钢夹层复合管混凝土

FRP – 钢夹层复合管混凝土(FRP-interlayer-steel tube concrete columns,简称 FIST)由外层 FRP 管、夹层材料、内部钢管和核心混凝土构成(图 1). 外层 FRP 管与内部钢管通过夹层材料组合成具有一定壁厚的复合管,即 FRP – 钢夹层复合管. 该复合管既可单独承担施工荷载,也可作为浇筑核心混凝土的模板,并且能够实现工厂化预制,简化现场施工步骤. 制作该结构时,首先在工厂通过夹层材料(如灌浆料等)将外部 FRP 管和内部钢管进行有效黏结,然后将制成的产品运输到施工现场进行拼装,最后在内部现浇混凝土形成结构构件. 在正常使用条件下,荷载直接作用于内部钢管混凝土,FRP 管在钢管混凝土产生径向变形时通过夹层材料对钢管混凝土产生约束作用,大大提高构件承载能力.

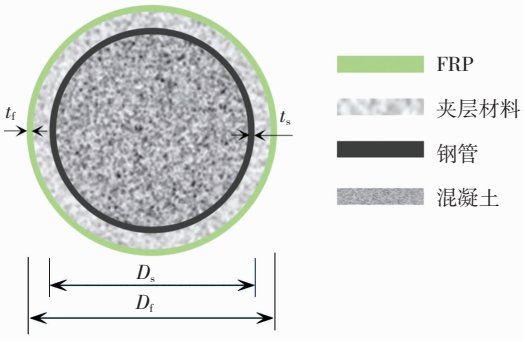


图 1 FIST 试件截面形式

Fig. 1 Cross section of FIST

FRP – 钢夹层复合管约束混凝土各部分都具有不同的作用. FRP 管可以增强对核心混凝土的约束作用,从而避免采用大直径、厚壁的钢管[7],同时也可以起到对夹层材料和钢管的防腐保护作用,提高构件的耐久性;夹层材料可以增强复合管的刚度和承载力,避免内部钢管发生屈曲,改善复合管约束混凝土的力学性能,同时也可以增强钢管混凝土的耐火极限、降低钢管锈蚀率;内部钢管能够对核心混凝土产生约束作用,增强构件的延性,同时便于节点连接;核心混凝土可以避免钢管向内屈曲[8],并且在 FRP 管和钢管的共同作用下具有很高的强度,是构件承载力的主要来源.

FRP – 钢夹层复合管混凝土具有较大的改进和发展潜力. 当需要减少横向荷载冲击作用时,夹层材料可采用弹性较好的材料,吸收部分冲击能量;当需要减少竖向变形时夹层材料可采用微膨胀的材料,从而使 FRP 管提前产生约束力,提高试件刚度. 另外,在 FRP 和钢管的共同作用下复合管可提供较大的套箍系数,此时核心混凝土可选用高强混凝土,提供更高的承载能力.

综上所述,FRP – 钢夹层复合管混凝土构件利用各部分组合的优势,可解决现有钢管混凝土类结构存在的部分缺点,具有承载力高、施工方便、耐火性好、耐腐蚀性好、可实现工厂化预制等优点. 作为重载结构和耐腐蚀结构,FRP – 钢夹层复合管混凝土构件将在未来桥梁结构、建筑结构、地下结构以及海洋平台中具有较好的应用前景.

2 试验概述

2.1 试件设计

本文共设计了 3 组短柱轴压试验,包括 FRP – 钢夹层复合管混凝土、FRP 约束钢管混凝土以及钢管混凝土,共计 8 个试件. FRP 管采用机器缠绕而成的 GFRP 管,夹层材料采用 HGM – 3 型灌浆料,钢管采用普通焊管,核心混凝土采用普通混凝土. 各试件高度均为 540 mm,其中钢管高度为 540 mm,FRP 管高度为 500 mm,试件夹层部分两端预留 20 mm 的间隙保证端部加载条件为核心钢管混凝土加载,其他参数见表 1 和图 2.

表 1 试件基本参数及试验结果

Tab. 1 Parameters and test results of specimens

试件编号	D_f/mm	t_f/mm	D_s/mm	t_s/mm	f_{cu}/MPa	$f_{cu,g}$/MPa	f_y/MPa	f_f/MPa	Δ_u/mm	N_u/kN	N_c/kN	$\frac{N_c}{N_u}$
FIST – I	207.90	3.00	165.10	3.54	55.8	68.8	367.76	1 230	28.52	5 408.40	5 312.62	0.982
FIST – II	207.90	3.00	165.10	3.54	55.8	68.8	367.76	1 230	28.37	5 363.00	5 312.62	0.991
FIST – III	207.90	3.00	165.10	3.54	55.8	68.8	367.76	1 230	28.24	5 343.40	5 312.62	0.994
FSCC – I	171.10	3.00	165.10	3.54	55.8		367.76	1 230	22.77	3 959.00	4 080.82	1.031
FSCC – II	171.10	3.00	165.10	3.54	55.8		367.76	1 230	23.07	4 001.00	4 080.82	1.020
FSCC – III	171.10	3.00	165.10	3.54	55.8		367.76	1 230	23.64	3 950.00	4 080.82	1.033
CFST – I			165.10	3.54	55.8		367.76		32.74	1 859.40	1 843.84	0.992
CFST – II			165.10	3.54	55.8		367.76		29.94	1 958.60	1 843.84	0.941

注:试件编号中 FIST 代表 FRP – 钢夹层复合管混凝土,FSCC 代表 FRP 约束钢管混凝土,CFST 代表钢管混凝土;D_f 和 t_f 分别代表 FRP 管的外直径和壁厚,D_s 和 t_s 分别代表钢管的外直径和壁厚;f_{cu} 代表混凝土立方体抗压强度,$f_{cu,g}$ 代表灌浆料立方体抗压强度,f_y 代表钢材屈服强度,f_f 代表 FRP 极限强度;Δ_u 代表极限轴向变形,N_u 代表极限承载力,N_c 代表承载力公式计算值.

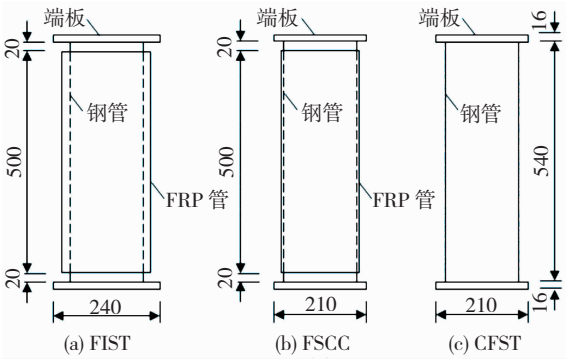


图 2　试件形状及尺寸(mm)

Fig. 2　Shape and size of specimens(mm)

2.2　试件制作

对于钢管混凝土试件,首先将钢管用带锯切割成所需长度,利用车床将两端车平,保证钢管端面与管壁的垂直度;然后将车好的钢管焊接在预制端板上,作为浇筑核心混凝土的模板;待混凝土到达养护期后,磨平顶端混凝土,采用高强石膏将核心混凝土补至与钢管端面齐平,并焊接顶部端板. 对于 FRP 约束钢管混凝土试件,首先将钢管应变片贴在钢管壁上,利用缠绕设备在钢管上进行 FRP 缠绕(图 3);待养护完成后,按照尺寸进行切割并将钢管焊接在端板上,然后进行核心混凝土浇筑以及后期处理. 对于 FRP－钢夹层复合管混凝土试件,首先加工钢管以及 FRP 管,制作完成后利用定位装置将两者固定,保证双管圆心同心,然后浇筑夹层灌浆料;在灌浆料养护完成后拆除定位装置,制成图 4 所示的 FRP－钢夹层复合管;最后以复合管为模板进行核心混凝土浇筑以及后期处理.

2.3　材料性能

GFRP 管缠绕角度为 89°,将采用相同缠绕角度缠绕成型的单向板裁剪出拉伸试件,按 GB/T 3354—2014《定向纤维增强聚合物基复合材料拉伸性能试验方法》[9] 进行拉伸试验,得到 GFRP 极限强度 f_f 为 1 230 MPa,弹性模量 E_f 为 4.82×10^4 MPa. 钢管按 GB/T 228.1—2010《金属材料拉伸试验第 1 部分:室温试验方法》[10] 进行拉伸试验,得到钢材的屈服强度 f_y 为 367.76 MPa,抗拉强度 f_u 为 470.88 MPa,弹性模量 E_s 为 2.06×10^5 MPa,泊松比为 0.273. 核心混凝土和夹层灌浆料采用与试件同批材料浇筑并且同条件养护成型的150 mm × 150 mm × 150 mm立方体试块和150 mm × 150 mm × 300 mm棱柱体试块按照 GB/T 50081—2002《普通混凝土力学性能试验方法标准》[11] 在试验当天进行试验,测得混凝土立方体抗压强度 f_{cu}为 55.8 MPa,弹性模量 E_c 为 3.72×10^4 MPa,灌浆料立方体抗压强度 $f_{cu,g}$为68.8 MPa,弹性模量 E_g 为 2.76×10^4 MPa.

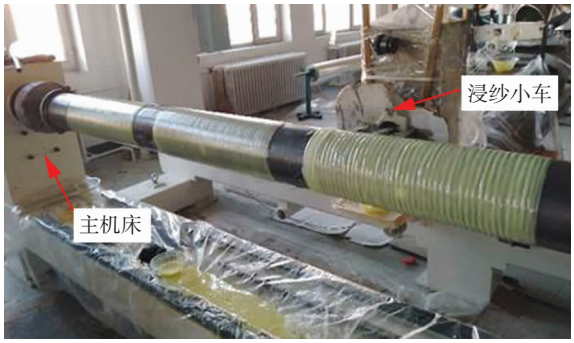


图 3　FRP 约束钢管混凝土 FRP 缠绕

Fig. 3　Twining of FRP on FSCC

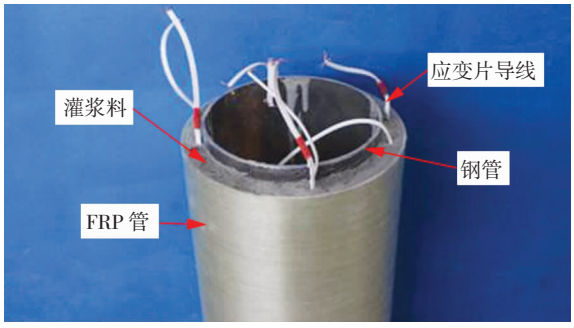


图 4　FRP－钢夹层复合管

Fig. 4　FRP-interlayer-steel tube

2.4 加载装置及测量装置

试验在10 000 kN压力机上进行,采用一次性压溃加载方式,加载装置见图 5. 在峰值荷载出现之前,加载以力控制,加载速度为 2 kN/s;当试件刚度明显降低后采用位移控制的加载方式,加载速率为 0.02 mm/s,并保持这个加载速率直到试件破坏. 钢管混凝土的破坏标志为荷载下降到峰值荷载的 85%,FRP 约束钢管混凝土的破坏标志为 FRP 大部分断裂直至荷载稳定,FRP－钢夹层复合管混凝土的破坏标志为 FRP 断裂、荷载急剧下降.

在各试件钢管中部和 FRP 管中部每隔 90°分别布置一组横向和纵向应变片,用于测量柱中截面的环向应变和纵向应变. 在试验机台座角点布置 4 个位移传感器(LVDT)用于测量试件的整体轴向变形.

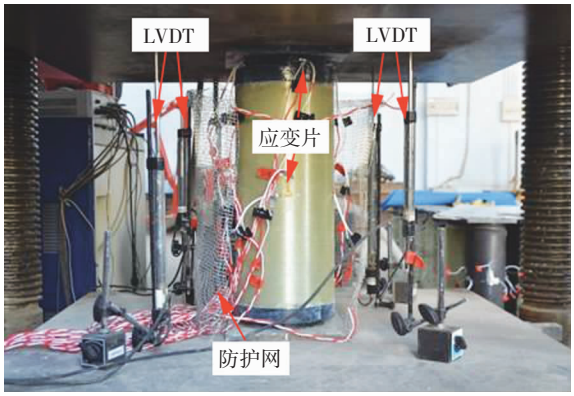


图 5　加载测量装置

Fig. 5　Test setup and instrumentation

3 结果及分析

3.1 试验现象

两个钢管混凝土的破坏过程和破坏现象十分相似,以试件 CFST－I 为例对试件破坏过程进行阐述. 在荷载达到极限荷载 N_u 之前,试件无明显变形;当荷载达到极限荷载 N_u 时,钢管顶端距端板 30 mm 处出现单侧局部鼓曲,见图 6 中 A 点;峰值点之后,随着荷载降低,顶部鼓曲加剧;当荷载下降到 $0.9N_u$ 时,试件中部出现鼓曲,见图 6 中 B 点;随后在很短的时间内,下部也出现鼓曲,见图 6 中 C 点,试件发生了明显的双剪破坏.

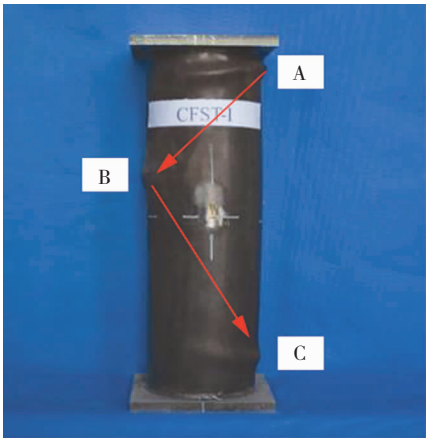
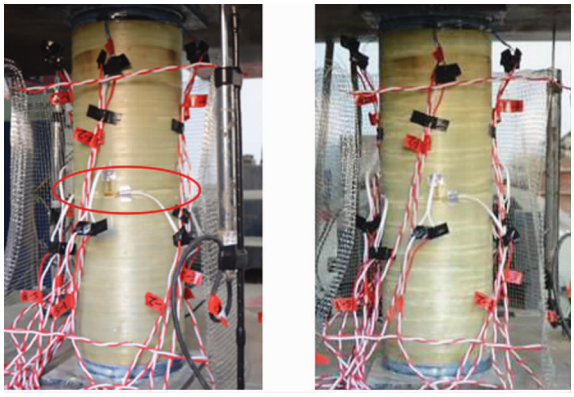


图 6 钢管混凝土短柱破坏形式

Fig. 6 Failure mode of CFST

FRP 约束钢管混凝土短柱各试件破坏过程和破坏现象相似,以 FSCC－I 为例对试件试验现象进行阐述. 在荷载 $0.5N_u$ 时,柱中部出现一条白色条纹,标志着树脂基体被压碎(图 7(a));随着荷载的增加,白色条纹逐渐增加,在荷载达到 $0.7N_u$ 时,柱高度范围内均匀出现大量条纹,间距 20 mm 左右(图 7(b));当试件下部四分点处 FRP 发生断裂时(FSCC－II 试件上部四分点先发生断裂),试件达到极限荷载 N_u,随后 FRP 其他部位逐渐断裂,位移显著增长,但荷载基本维持不变;直到 FRP 断裂区域达到一定范围时,荷载发生突降,试件达到破坏(图 8(a)). 将 FRP 剥开后,内部钢管变形见图 8(b),为腰鼓形破坏.

FRP－钢夹层复合管混凝土各试件破坏现象基本相同,试件在 GFRP 未断裂前均没有明显现象. 在加载过程中随着竖向变形的增加,夹缝处的碳纤维(端部加固用)被挤碎断裂,导致荷载略有波动. 当试件下部 GFRP 发生断裂时(图 9(a)),荷载骤降,此时试件发生最终破坏. 剥开 FRP 后,发现灌浆料有大量竖向裂纹以及一条环向压碎环(图 9(b)). 竖向裂纹是由钢管径向膨胀造成灌浆料受拉而产生的拉裂纹,环向压碎环是由此处 FRP 突然断裂造成的. 剥开灌浆料后,发现钢管在 FRP 断裂处有微小鼓曲,整体为腰鼓形破坏(图 9(c)).



(a) $0.5N_u$ (b) $0.7N_u$

图 7 FRP 约束钢管混凝土 FRP 环向裂纹

Fig. 7 Circumferential crush of FSCC

(a) FRP 破坏形式 (b) 钢管破坏形式

图 8 FRP 约束钢管混凝土破坏模式

Fig. 8 Failure mode of FSCC

(a) FRP 破坏形式 (b) 夹层灌浆料破坏形式

(c) 内部钢管变形

图 9 FRP－钢夹层复合管混凝土破坏模式

Fig. 9 Failure mode of FIST

由试验结果可知,钢管混凝土短柱因含钢率较低而发生剪切破坏,而 FRP－钢夹层复合管混凝土短柱与 FRP 约束钢管混凝土短柱由于外部 FRP 的

约束作用均产生腰鼓型破坏；由于夹层灌浆料的存在，FIST 试件中 FRP 管的受力发生改变，没有出现 FSCC 试件破坏时树脂基体被压碎的现象.

3.2　荷载－位移曲线

图 10 为各试件的荷载－位移曲线图，每种试件的曲线十分接近，不同类型试件的曲线差异明显. 3 种试件的曲线弹性段较为接近，但由于夹层灌浆料的存在，FRP－钢夹层复合管混凝土的初始刚度较其他两种试件稍高，如果不考虑夹层灌浆料的影响，FRP 约束钢管混凝土和 FRP－钢夹层复合管混凝土的内部钢管混凝土在弹性段的受力和钢管混凝土是相同的，即在弹性段钢管环向变形很小，FRP 没有起约束作用. 进入弹塑性段后，钢管横向变形加快，由于不同种类试件受力机理不同，FRP 的约束作用开始显现，曲线开始分开. 当进入塑性段后，FRP 的约束作用逐渐提升，因此后期 FSCC 试件与 FIST 试件的曲线继续上升，直到 FRP 达到自身的极限应变.

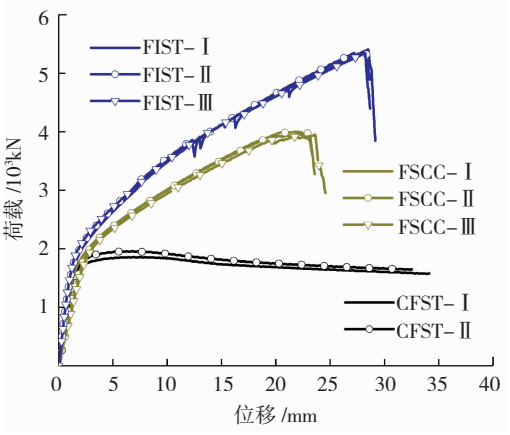


图 10　各试件荷载－位移曲线

Fig. 10　Load-deformation curves of specimens

对于 FSCC 试件，当 FRP 开始发生持续断裂时，荷载开始进入平稳阶段，位移持续增大. 直到 FRP 断裂区域达到一定范围后，荷载－位移曲线产生突变. 对于 FIST 试件，夹层灌浆料与端板是断开的，不直接承受竖向荷载，但当进入塑性段，FRP 的约束作用通过灌浆料传递给钢管后，灌浆料与钢管接触的正应力逐渐增加，摩擦力也逐渐增加，对试件竖向承载力的贡献逐渐增大，另外夹层灌浆料将钢管的变形扩散到 FRP 管，使 FRP 管对钢管的约束更加均匀，这就是 FIST 试件的承载能力和变形能力明显高于 FSCC 试件的原因. 为了防止两端断开处钢管发生鼓曲，试验前在夹层断开处的钢管缠绕了 5 层碳纤维布. 在加载过程中，碳纤维布因受到夹层灌浆料的挤压产生断裂，造成 FIST 试件荷载－位移曲线后期出现突变点，但并未影响试件的整体受力性能. 与 FSCC 试件 FRP 发生持续断裂不同，FIST 试件 FRP 的断裂是突然的、大范围的，导致荷载急剧下降.

各试件的最终轴向变形和峰值荷载见表 1，其中钢管混凝土取荷载下降到 $0.8N_u$ 的变形作为最终轴向变形，FSCC 试件和 FIST 试件取荷载突降点处的变形作为最终轴向变形. 从表中数据可以得出，相比钢管混凝土试件，由于外部 FRP 管的约束作用，FRP 约束钢管混凝土试件承载力提高 108%；相比 FRP 约束钢管混凝土，由于夹层灌浆料的存在，FRP－钢夹层复合管混凝土轴向变形提高 22.5%，承载力提高 35.3%. 由此可知 FRP－钢夹层复合管混凝土具有较好的变形能力和承载能力.

3.3　轴向－环向应变曲线

通过在各试件钢管和 FRP 管柱中截面布置的横纵向应变片，可得到轴向荷载作用下钢管和 FRP 管的环向应变和纵向应变. 由于 CFST 试件钢管局部鼓曲、FSCC 试件树脂基体破碎，纵向应变数据不能反映柱的真实纵向应变，所以采用轴向变形计算得出名义轴向应变，绘制出各构件钢管的轴向－环向应变曲线（图 11(a)），FRP 管的轴向－环向应变曲线（图 11(b)），其中，环向受拉应变为正值，轴向受压应变为负值（FSCC－Ⅲ 应变数据丢失）.

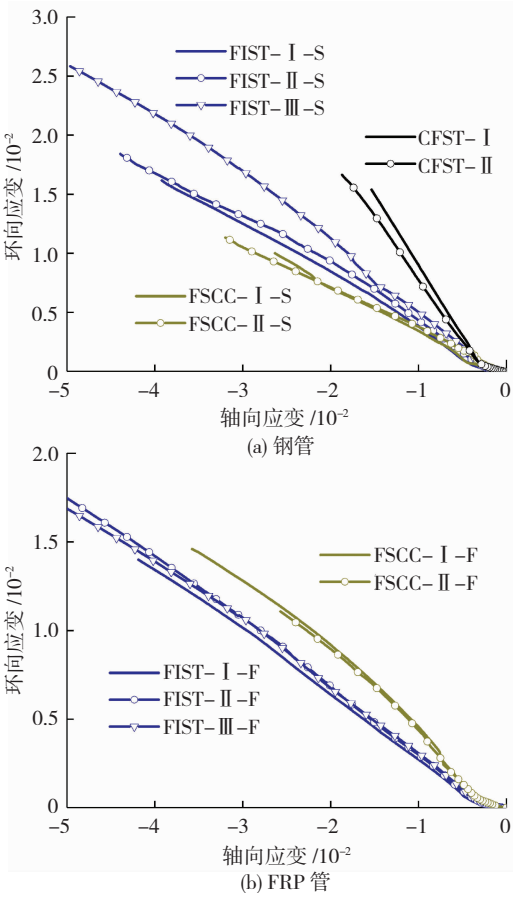


图 11　轴向－环向应变曲线

Fig. 11　Axial-hoop strain curves of specimens

由图 11 可知，3 种试件钢管的轴向－环向应变曲线在弹性段十分接近，再次说明了 FRP 在弹性段

没有发生明显的约束作用. 由图 11(a)可知,当进入塑性段后,由于 FIST 试件和 FSCC 试件的钢管的环向变形被外部 FRP 约束,钢管环向变形发展缓慢. FIST 试件由于夹层灌浆料受到 FRP 管和钢管的挤压产生径向压缩导致 FRP 的环向变形小于钢管的环向变形,所以在相同轴向应变时,FIST 试件 FRP 的环向变形小于 FSCC 试件(图 11(b)). 这说明在相同轴向应变时,FIST 试件的 FRP 对钢管的约束作用小于 FSCC 试件,导致 FIST 试件的钢管环向应变高于 FSCC 试件(图 11(a)).

4 轴压承载力分析

当不考虑夹层材料(灌浆料)的抗拉强度时,FIST 试件和 FSCC 试件外部 FRP 管对核心钢管混凝土的约束作用相同[12],所以如果不考虑夹层材料(灌浆料)对 FIST 试件承载力的贡献,两种试件的承载力应该相同,但由于夹层(灌浆料)与钢管壁的摩擦作用,FIST 试件的承载力高于 FSCC 试件(图 10). 在以上基础下,假设 FIST 试件短柱轴压承载力由两部分构成:受 FRP 约束的核心钢管混凝土的承载力和夹层灌浆料提供的承载力.

受 FRP 约束的核心钢管混凝土的承载力采用 GB 50936—2014《钢管混凝土结构技术规范》[13]中实心圆形钢管混凝土构件承载力设计公式进行计算,套箍系数采用文献[6]中的综合套箍系数,即:

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

$$\theta = \theta_f + \theta_s = \frac{A_f f_f}{A_c f_c} + \frac{A_s f_y}{A_c f_c} = \frac{4 t_f f_f}{d f_c} + \frac{4 t_s f_y}{d f_c}. \tag{2}$$

式中:N_0 为受 FRP 约束的钢管混凝土承载力,f_c 为混凝土轴心抗压强度,按照文献[14]进行计算,A_c 为混凝土的横截面面积,θ 为综合套箍系数,θ_f 为 FRP 套箍系数,θ_s 为钢管套箍系数,A_f 为 FRP 管的横截面面积(计算时 FRP 管直径采用钢管的外直径),A_s 为钢管的横截面面积,d 为核心混凝土直径.

夹层灌浆料与端板之间留有20 mm的孔隙,所以夹层灌浆料未直接承担荷载,其对承载力的贡献为夹层灌浆料与钢管的摩擦作用. 夹层受力存在两种可能的极限状态:其一,夹层与钢管的作用超过静摩擦作用,夹层与钢管产生滑动;其二,FRP 断裂,夹层材料被挤碎,发生类似 FRP 约束混凝土的破坏状态. 由 FIST 试验现象(图 9(b))知,将 FRP 剖开后,夹层在 FRP 首先断裂的部位发生挤压破碎,即发生了第二种破坏状态;另外,将夹层灌浆料剥开(图 9(c))后,未发现钢管表面存在混凝土摩擦的痕迹,所以未发生第一种破坏状态. 根据可能存在的破坏状态可知,夹层对承载力的贡献应为夹层灌浆料与钢管的摩擦作用和受约束灌浆料承载力两者之间的较小值. FRP 约束灌浆料承载力按文献[15]计算:

$$N_g = f_{cc,g} A_g, \tag{3}$$

$$\frac{f_{cc,g}}{f_{c,g}} = 1 + 2\frac{f_{1f,g}}{f_{c,g}}, \tag{4}$$

$$f_{1f,g} = \frac{2 f_f t_f}{(D_f - 2 t_f)}. \tag{5}$$

式中:N_g 为夹层灌浆料承载力,$f_{cc,g}$ 为约束灌浆料强度,A_g 为夹层灌浆料面积,$f_{c,g}$ 为灌浆料轴心抗压强度,按照文献[14]进行计算,$f_{1f,g}$ 为 FRP 对灌浆料的约束应力. 夹层灌浆料与钢管的摩擦作用为:

$$N_m = \mu f_{1f,s} A_{ss}, \tag{6}$$

$$A_{ss} = \beta h \pi D_s, \tag{7}$$

$$f_{1f,s} = \frac{2 f_f t_f}{D_s}. \tag{8}$$

式中:N_m 为灌浆料与钢管的摩擦力,μ 为截面摩擦系数,根据文献[16]取 $\mu = 0.6$,$f_{1f,s}$ 为 FRP 通过灌浆料对钢管的约束应力,A_{ss} 为钢管传递摩擦面积,β 为零摩擦力高度系数,h 为夹层灌浆料高度,根据试验结果可知 3 个试件的破坏均为四分点处,所以 β 取 0.25. 经计算 $N_g = 1\,231.8$ kN $< N_m = 1\,738.9$ kN,即从计算上层灌浆料应该发生第二种破坏状态:FRP 断裂、夹层被挤碎,这也与试验现象相同. 所以夹层灌浆料对承载力贡献按照受约束灌浆料承载力(式(3))计算.

综上所述,FIST 试件短柱轴压承载力为

$$N = 0.9 f_c A_c (1 + \sqrt{\theta} + \theta) + f_{cc,g} A_g. \tag{9}$$

对于 FIST 和 FSCC 试件计算时套箍系数取综合套箍系数,对于 CFST 试件套箍系数取钢管套箍系数,将式(1)和式(9)的计算结果与试验结果进行对比,结果见表 1,计算值与试验值比值的范围为 0.941 ~ 1.033,平均值为 0.998,方差为 0.000 91,两者吻合良好.

5 结 论

1)由于 FRP 对内部钢管的约束作用,FSCC 试件和 FIST 试件中钢管的屈曲明显受到抑制,显著提升了构件承载能力,并且改变了内部钢管混凝土的破坏状态,即从剪切破坏变成了腰鼓破坏.

2)与 FRP 约束钢管混凝土短柱相比,FRP – 钢夹层复合管混凝土短柱承载力提高 35.3%,极限变形提高 22.5%,由此说明夹层的存在提高了试件的变形能力;在加载过程中 FSCC 试件在 $0.5N_u$ 时树脂发生挤压破碎,而 FIST 在 FRP 断裂前未发生树脂破碎现象,由此说明夹层的存在避免了树脂挤压破碎,提高了 FIST 的可设计承载力.

3)对 FIST 试件进行了承载力分析,并在现有钢管混凝土和 FRP 约束混凝土承载力计算公式基础上得到了 FRP – 钢夹层复合管混凝土短柱的承载力计算公式,计算结果与试验值吻合良好.

参考文献

[1] 王琨, 袁沈峰, 曹大富, 等. 配置核心钢管的钢筋混凝土柱 – 钢骨混凝土梁组合框架抗震性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2013, 34(6): 103
WANG Kun, YUAN Shenfeng, CAO Dafu, et al. Test on seismic performance of frame structure of steel reinforced concrete beam and steel – tube encased concrete column [J]. Journal of Building Structures, 2013, 34(6): 103

[2] 王庆利, 赵颖华, 顾威. 圆截面 CFRP – 钢复合管混凝土结构的研究[J]. 沈阳建筑工程学院学报, 2003, 19(4): 272
WANG Qingli, ZHAO Yinghua, GU Wei. Presumption on the concrete filled circular CFRP-steel composite tube structures [J]. Journal of Shenyang Arch and Civ Eng Univ, 2003, 19(4): 272

[3] 顾威, 关崇伟, 赵颖华,等. 圆 CFRP 钢复合管混凝土轴压短柱试验研究[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2004, 20(2):118
GU Wei, GUAN Chongwei, ZHAO Yinghua, et al. Experimental study on concentrically-compressed circular concrete filled CFRP-steel composite tubular short columns [J]. Journal of Shenyang Arch and Civ Eng Univ, 2004, 20(2):118

[4] 冉江华. FRP – 钢复合管约束混凝土短柱轴压力学性能[D]. 大连: 大连理工大学, 2014
RAN Jianghua. Axial compression mechanical behavior of FRP-steel composite tube confined concrete stub columns [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2014

[5] 鲁国昌. FRP 管约束混凝土轴压性能研究[D]. 北京: 清华大学, 2005
LU Guochang. Study on behavior of concrete-filled FRP tubes under axial compression[D]. Beijing: Tsinghua University, 2005

[6] 翟存林, 魏洋, 李国芬, 等. FRP – 钢复合管混凝土桥墩设计与应用研究[J]. 公路, 2012(1):83
ZHAI Cunlin, WEI Yang, LI Guofen, et al. Design and application of FRP-steel composite tube concrete piers [J]. Highway, 2012(1): 83

[7] HU Y M, YU T, TENG J G. FRP-confined circular concrete-filled thin steel tubes under axial compression[J]. Journal of Composites for Construction, 2011, 15(5): 850

[8] YU T, ZHANG S, HUANG L, et al. Compressive behavior of hybrid double-skin tubular columns with a large rupture strain FRP tube[J]. Composite Structures, 2017, 171:10

[9] 定向纤维增强聚合物基复合材料拉伸性能试验方法: GB/T 3554—2014 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2014
Test method for tensile properties of orientation fiber reinforced polymer matrix composite materials: GB/T 3554—2014 [S]. Beijing: China Standard Press, 2014

[10] 金属材料拉伸试验第 1 部分: 室温试验方法: GB/T 228.1—2010 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2011
Metallic materials-tensile testing-Part 1: Method of test at room temperature: GB/T 228.1—2010 [S]. Beijing: China Standard Press, 2011

[11] 普通混凝土力学性能试验方法标准: GB/T 50081—2002 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2003
Standard for test method of mechanical properties on ordinary concrete: GB/T 50081—2002 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2002

[12] 刘玉雷. GFRP 管 – 混凝土 – 钢管混凝土组合柱轴压性能试验研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2014
LIU Yulei. The experimental study on GFRP-concrete-steel-concrete double-skin tubular hybrid columns under axial compression [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2014

[13] 钢管混凝土结构技术规范: GB 50936—2014 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2014
Technical code for concrete filled steel tubular structures: GB 50936—2014 [S]. Beijing: China Architecture & building Press, 2014

[14] 混凝土结构设计规范: GB/T 50010—2010 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011
Code for design of concrete structures: GB/T 50010—2010 [S]. Beijing: China Architecture & building Press, 2011

[15] LAM L, TENG J G. Design-oriented stress-strain model for FRP-confined concrete[J]. Construction and Building Materials, 2003, 17(6/7): 471

[16] 刘威. 钢管混凝土局部受压时的工作机理研究[D]. 福州: 福州大学, 2005
LIU Wei. Research on mechanism of concrete-filled steel tubes subjected to local compression [D]. Fuzhou: Fuzhou University, 2005

(**编辑**　赵丽莹)

封面图片说明

封面图片来自本期论文"一种自由曲面自适应网格生成方法",是浙江大学建筑工程学院空间结构研究中心高博青教授课题组提出的一种自由曲面网格划分方法原理图.该方法以网格的规整性和流畅性为目标,通过一系列几何操作,如曲线分段、分段点连接等,实现了三角形或四边形网格的快速生成,并且通过调整曲线的分段原则,实现了网格大小对曲面形态的自适应.具体步骤如图所示:先用 4 条边界线圈定自由曲面的网格划分区域,其中,对于环形曲面,需要连接两条边界线,并将得到的曲线看成两条重合的边界线(图中绿线);接着,将一对不相连的边界线各自分为 $n+1$ 段并连接相对的分段点,得到 n 条曲线;然后,将这 n 条曲线和同向的边界线分别划分为 $m+1$ 段,并以多段线连接同一相对位置上的分段点,得到另一个方向上的 m 条曲线.轮流对这 m 条曲线和 n 条曲线进行分段、连线等操作,迭代地调整各自形态,直到分段点位置基本不变;最后,将分段点按照一定规律连接成网格.该方法操作难度小、生成速度快、适用范围广,生成的网格线条流畅、形状规整、形式多样,能较好地满足建筑需求.

(图文提供:王奇胜,高博青,吴慧.浙江大学建筑工程学院)