

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2020.190



开放科学(资源服务)标识码(OSID):



# 采用 CFRP 增强的 GFRP 管混凝土短柱轴压性能试验研究

杨霞<sup>1,2</sup>, 杨文伟<sup>1,2</sup>, 李顺涛<sup>2,3</sup>

(1. 宁夏大学 土木与水利工程学院, 银川 750021; 2. 宁夏土木工程防震减灾工程技术研究中心, 银川 750021; 3. 湖南大学 土木工程学院, 长沙 410082)

**摘要:**通过碳纤维增强复合材料(CFRP)布对玻璃纤维增强复合材料(GFRP)管约束混凝土短柱进行不同方式的加强,制作了12个两两相同的GFRP管约束混凝土短柱试件,研究不同增强模式下GFRP管约束混凝土短柱在单调轴压及重复轴压下的力学性能。分析了试件的破坏模式、承载能力、变形能力、增强效果、应力-应变曲线、塑性残余应变与卸载应变的关系以及极限状态。结果表明:3种增强模式下试件的极限承载力均有很大提升;单轴受压试件的应力-应变曲线与其在反复受压时的应力-应变包络线基本一致;试件加强前后的塑性残余应变和卸载应变均存在线性关系,且在同种增强模式下,随着约束作用的加强,直线的斜率也随之增大。对Lam等提出的FRP约束混凝土加卸载模型进行修正,并对不同增强模式下GFRP管约束混凝土短柱在重复轴压下的卸载路径进行预测,通过与试验结果对比发现,修正后模型与试验结果吻合较好。

**关键词:**混凝土短柱;碳纤维增强复合材料;单轴受压;反复受压;应力-应变曲线

**中图分类号:** TU377.4 **文献标志码:** A **文章编号:** 2096-6717(2022)04-0124-09

## Experimental study on axial compression behavior of concrete-filled GFRP tube short columns strengthened with CFRP

YANG Xia<sup>1,2</sup>, YANG Wenwei<sup>1,2</sup>, LI Shuntao<sup>2,3</sup>

(1. College of Civil and Hydraulic Engineering, Ningxia University, Yinchuan 750021, P. R. China; 2. Ningxia Center for Research on Earthquake Protection and Disaster Mitigation in Civil Engineering, Yinchuan 750021, P. R. China; 3. College of Civil Engineering, Hunan University, Changsha 410082, P. R. China)

**Abstract:** In order to study the mechanical properties of concrete-filled glass fiber reinforced polymer (GFRP) tubular short columns under single axial compression and repeated axial compression under different reinforcement modes, twelve two-identical specimens of concrete-filled GFRP tubular short columns were produced. And the concrete-filled GFRP tubular short columns were reinforced by carbon fiber reinforced polymer (CFRP) cloth in different ways. Based on the test results, the failure mode, load

**收稿日期:** 2020-07-29

**基金项目:** 国家自然科学基金(51968044); 宁夏自然科学基金(2020AAC02007)

**作者简介:** 杨霞(1994-), 女, 主要从事新型组合结构力学性能及健康监测研究, E-mail: jggcyangxia@163.com。

杨文伟(通信作者), 男, 教授, 博士生导师, E-mail: nxyangww@163.com。

**Received:** 2020-07-29

**Foundation items:** National Natural Science Foundation of China (No. 51968044); Natural Science Foundation of Ningxia (No. 2020AAC02007)

**Author brief:** YANG Xia (1994-), main research interests: mechanical properties and health monitoring of new composite structures, E-mail: jggcyangxia@163.com.

YANG Wenwei (corresponding author), professor, doctoral supervisor, E-mail: nxyangww@163.com.

carrying capacity of columns, deformation capacity, reinforcement effect, stress-strain curve, relationship between plastic residual strain and unloading strain and limit state of specimens were analyzed. It shows that the ultimate strength of the specimens in three reinforcement modes is improved greatly; there is a linear relationship between the plastic residual strain and the unloading strain of the specimen before and after reinforcement, and the slope of the straight line increases with the strengthening of the restraint. Modifying the FRP-confined concrete loading and unloading model proposed by Lam et al. Predicting the unloading path of CFRP-reinforced GFRP pipe concrete composite short columns by the modified model under repeated axial compression in different reinforcement modes. After comparing, it shows that the test results agree well with the modified model.

**Keywords:** concrete short columns; carbon fiber reinforced polymer; uniaxial compression; cyclic axial pressure; stress-strain curve

采用纤维增强复合材料(Fiber Reinforced Polymer, FRP)对已有结构进行补强加固越来越流行,此外,由于其轻质高强、价格低廉、防腐性能优良等特点,也广泛用于新型组合结构的设计开发中<sup>[1-3]</sup>。近年来,已有许多学者对 FRP 约束混凝土组合构件的单轴受压性能进行了大量试验及理论研究,并提出了相应的受压本构模型<sup>[4-6]</sup>,为该类组合结构在实际工程中的设计及应用提供了较好的理论依据。

张霓等<sup>[7]</sup>对 4 个不同截面形式的 GFRP 高强砼组合短柱在轴压下的工作机理和破坏形态进行了研究,并基于统一理论法建立了该组合柱的轴压承载力计算公式。高丹盈等<sup>[8]</sup>对 21 根 FRP-混凝土-钢管组合方柱进行了轴压试验,基于试验结果,结合极限平衡理论提出了该类组合柱的轴压承载力计算模型。杨文伟等<sup>[9]</sup>通过对 7 个 GFRP 约束钢管混凝土短柱进行单调轴压试验,研究了混凝土等级、截面含钢率及组合形式对其破坏模式和力学性能的影响,并通过修正纤维模型法对其荷载-应变曲线进行了预测。Yu 等<sup>[10-12]</sup>对不同截面形式的 FRP-砼-钢管组合柱进行了轴心和偏心抗压试验,并采用基于平截面假定和纤维单元法的截面分析方法对偏心受压柱的应力-应变关系进行了预测。Zhang 等<sup>[13]</sup>、Teng 等<sup>[14]</sup>、Lam 等<sup>[15-17]</sup>对 FRP 约束混凝土柱进行了研究,通过对其进行循环和单调轴压试验,结合理论分析,建立了 FRP 约束混凝土柱的受压应力-应变关系模型;Wang 等<sup>[18]</sup>、王代玉等<sup>[19]</sup>对 CFRP 约束钢筋混凝土圆柱和方柱进行了单调和往复加载试验,得到了其在轴压作用下的破坏模式,并通过分析建立了 CFRP 约束钢筋混凝土圆柱和方柱在循环轴压下的应力-应变关系模型;在不同加卸载水平下,Shao 等<sup>[20]</sup>采用不同的 FRP 类型、包裹层数和加载方式对 24 个 FRP 约束素混凝土短柱进行了单轴压

缩试验,结果表明,残余应变与卸载应变之间存在良好的线性关系,通过分析建立了包括循环加卸载规则、塑性应变、刚度和强度退化的本构模型;潘毅等<sup>[21]</sup>基于 FRP 约束混凝土圆柱的静力平衡条件和应变协调条件,建立了长期荷载作用下考虑初始应力的 FRP 约束混凝土柱长期变形的分析计算模型。

目前,有关 FRP 材料在土建工程应用方面的研究主要集中在 FRP 约束素混凝土柱、FRP 加固钢筋混凝土梁柱或 FRP-钢-混凝土不同截面形式的组合柱,如 FRP-混凝土-钢双壁管柱、FRP 约束钢管混凝土柱以及 FRP 约束型钢混凝土柱等<sup>[22-23]</sup>。而对于采用 CFRP 布缠绕加强的方式提高 FRP 混凝土柱力学性能的研究还鲜有报道,且相较于钢材,CFRP 材料抗腐蚀性能好,沿纤维方向的抗拉性能优越,成本低廉,应用于实际工程中耐久性更好、更经济。笔者设计了 6 组共 12 个两两相同的 GFRP 管混凝土短柱试件,其中 5 组采用 CFRP 布进行加强,1 组未加强。对每组的两个试件分别进行单调和重复轴压试验,基于试验结果,对该组合短柱的承载能力、变形能力、破坏过程、应力-应变曲线进行分析。此外,结合文献<sup>[15]</sup>中的加卸载模型,对采用 CFRP 不同增强模式下的 GFRP 管混凝土组合短柱在往复荷载作用下的卸载路径进行预测。

## 1 试验概况

### 1.1 试件设计

从许多学者关于 GFRP/CFRP 加固钢筋混凝土梁的研究中可知:粘贴 CFRP 布可以显著提高被加固梁的极限强度<sup>[23-25]</sup>,而粘贴 GFRP 布可以提高被加固梁的延性<sup>[26]</sup>,为了寻找最佳的加强方式,有学者<sup>[14,27]</sup>提出采用混杂复合材料加强钢筋混凝土梁,试验结果表明,较采用单一复合材料,其加强效果有较大提升。基于此,试验中用于加强的外包布

采用与外部 GFRP 管材性差异很大的碳纤维增强复合材料布(CFRP)。

采用4种增强模式对6组共12个两两相同的CFRP加强GFRP管混凝土短柱进行研究,试件截面形式如图1所示。包括1组未加强试件,3组两端采用CFRP条带加强的试件,1组两端和中部均采用CFRP条带加强的试件和1组采用CFRP布进行整体增强的试件。试件均为柱高300 mm、直径150 mm的短柱,CFRP条带宽40 mm,试件的其他参数见表1。

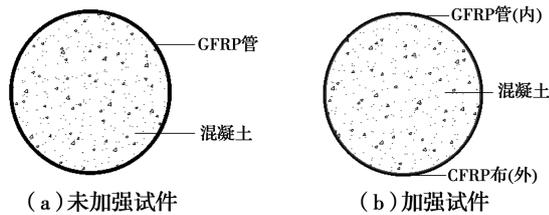


图1 试件截面形式

Fig. 1 Section form of specimens

表1 试件具体参数

Table 1 Specific parameters of specimens

组号	试件编号	加强模式	CFRP层数	加载类型
1	FG-0-0	未加强	0	重复加载
	DG-0-0		0	单调加载
2	FGC-2-1	两端加强	1层	重复加载
	DGC-2-1		1层	单调加载
3	FGC-2-2	两端加强	2层	重复加载
	DGC-2-2		2层	单调加载
4	FGC-2-3	两端和中部均加强	3层	重复加载
	DGC-2-3		3层	单调加载
5	FGC-3-2	两端和中部均加强	2层	重复加载
	DGC-3-2		2层	单调加载
6	FGC-1-2	整体加强	2层	重复加载
	DGC-1-2		2层	单调加载

试件编号中F代表重复加载;D代表单调加载;G代表GFRP管;C代表使用CFRP布;第1个数字代表加强方式,其中0表示未加强,1表示整体加强,2表示两端加强,3表示两端和中部均进行加强;第2个数字代表加强时采用CFRP布的层数。

## 1.2 试验材料

GFRP管采用工厂预制缠绕型GFRP管,根据生产厂家提供的信息可知,其弹性模量为 $E_g = 21.93 \text{ GPa}$ ,纤维缠绕方向为 $55^\circ$ ,极限应变 $\epsilon_{u,g} = 0.012$ ,名义厚度为4 mm,内径为150 mm;加强时,采用弹性模量为 $158.8 \text{ GPa}$ 、沿纤维方向的抗拉强

度为 $2859.3 \text{ MPa}$ 的CFRP布,其单层厚度为0.111 mm。浇筑混凝土的配合比如表2所示,配制混凝土的水泥为42.5R普通硅酸盐水泥,粗骨料选用粒径不大于20 mm的良好级配碎石,细骨料采用普通中沙。

表2 混凝土配合比设计

Table 2 Mix proportion design of concrete  $\text{kg/m}^3$

强度等级	水	水泥	砂子	石子
C30	175	461	512	1252

## 1.3 试件浇筑

首先对GFRP管进行处理,主要包括两部分:1)对管顶部及底部不平处进行找平处理,通过角磨机打磨不平处,使截面平整;2)采用高压水枪对GFRP管外壁以及内壁进行清洗,以便于浇筑混凝土和粘贴应变片。然后采用AB胶将打磨和清洗后的GFRP管的底部固定在准备好的木板上,如图2(a)所示,待AB胶完全凝固后,按照表2所示的配合比浇筑混凝土并振捣,试件浇筑的同时,采用同一批拌和的混凝土制作3个标准立方体试块( $150 \text{ mm} \times 150 \text{ mm} \times 150 \text{ mm}$ ),柱子浇筑完成后将表面抹平,24 h后脱模,然后将浇筑好的试件和立方体试块一起放在标准养护条件下养护28 d。28 d后测得本次拌和的C30混凝土立方体抗压强度的平均值为 $32.24 \text{ MPa}$ 。

试件养护完成后,开始粘贴用于加强的外层CFRP布,用环氧树脂胶进行湿法粘贴,粘贴的搭接长度为15 cm,粘贴顺序为先粘贴端部再粘贴柱中,如图2(b)所示。CFRP布粘贴完成后,将试件放在试验室中,让其在自然条件下风干,待环氧树脂胶完全风干后,就可以在柱中位置粘贴应变片,并开始加载前的一系列准备工作。



图2 试件制作

Fig. 2 Production of specimen

## 1.4 加载和测量方案

3000 kN MTS多功能电液伺服万能试验机为

试验的加载装置,加载时试件下端主动受力,如图3所示。为保证试件两端平行且受力均匀,正式加载前将试件的端部进行打磨,此外,采用预加载的方式来检查布置的各个测点、加载装置及采集装置能否正常工作,一切准备就绪后即可开始正式加载。正式加载采用力控方式,单调加载和往复加载速率均为3 000 N/s,往复加载时采用完全加载/卸载,每次加载至轴力达到预先设定的数值时(如500 kN、600 kN、700 kN……),荷载会自动卸载到0 kN,卸载速率为6 000 N/s,然后再次加载,重复以上过程,直至试件破坏,加载过程中实时观测试件的破坏情况并记录。

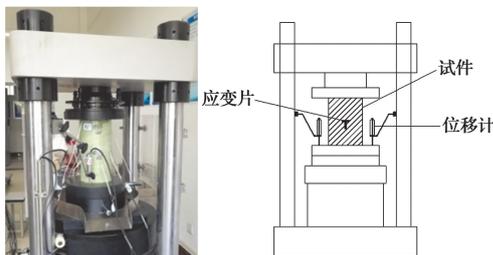


图3 加载装置图

Fig. 3 Loading device diagram

在试件外表面的柱中位置均匀布置4个测点,测点处均粘贴沿环向和轴向互相垂直的两个电阻应变片,用以测量加载过程中柱子中部截面的环向和轴向应变;短柱受压过程中的轴向位移通过柱子两侧对称布置两个位移计来测量。使用东华应变采集系统DH3816N采集加、卸载过程中试件的应变和位移数据,测点的具体布置见图4。

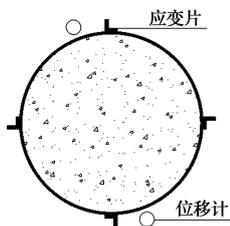


图4 应变测点布置图

Fig. 4 Arrangement diagram of strain measuring points

## 2 试验结果及分析

### 2.1 试件破坏过程及特征

在重复加载过程中,两端采用CFRP条带加强的试件FGC-2-1、FGC-2-2和FGC-2-3从开始加载至荷载到达倒数第2个卸载点之前,据肉眼观察,试件并没有明显变化;随着荷载的持续增大,柱中沿环

向开始出现白色条带,试件偶尔发出零星的爆裂声,由于试件两端均采用了CFRP布进行加强,因此,其最终破坏均是柱中附近区域的GFRP管由于径向应力集中沿纤维方向被拉断,同时,柱中混凝土被压碎,柱子的破坏形态如图5所示。在加载初期,两端和中部均采用CFRP条带加强的试件FGC-3-2以及采用CFRP进行整体增强的试件FGC-1-2由于GFRP、混凝土以及CFRP均处于弹性阶段,柱子无明显变化,随着往复加载次数的增加以及荷载的持续增大,可以观察到柱中的CFRP布沿纤维方向被明显拉长,条带变细,试件开始发出轻微爆裂声,之后,爆裂声越来越密集,随着嘣的一声巨响,柱中位置的CFRP布和GFRP管几乎同时沿纤维方向被拉断,柱中混凝土被压碎,柱子的承载能力急剧下降,试件被压坏,其破坏形态如图5所示。未采用CFRP加强的试件FG-0-0的破坏则表现出明显的脆性,在加载初期,试件变形很小,从外观上几乎看不出变化,随着加载的持续,在荷载达到极限荷载的80%左右时,GFRP管开始发出轻微的爆裂声,柱中位置外层纤维开始变白,爆裂声出现的频率开始增大,声音也逐渐加强,最后,随着一声巨响,柱中位置纤维被彻底拉断,并沿环向迅速向柱子两端延伸。最终,试件中部混凝土被压碎,柱子承载能力急剧下降,试件被压坏,试件破坏形态亦如图5所示。



图5 试件最终破坏形态

Fig. 5 The final failure form of specimens

主要研究采用CFRP布加强的GFRP管约束混凝土短柱在重复轴压下的破坏过程、破坏模式及力学性能,单调加载过程中试件破坏模式和破坏形态与重复加载类似,故不再赘述。

试验结束后,将上述6个试件的GFRP外壳剥去,如图6所示。这6个试件核心混凝土的破坏模式均为由柱中压应力和剪应力联合作用所致的45°斜向剪切破坏,这与混凝土短柱的典型破坏模式一致<sup>[6]</sup>;同时,由图6可以看出,CFRP布加强范围越大、加强作用越强,试件破坏后其核心混凝土越破碎,这是由于短柱在轴向受力时,沿柱子环向的外部约束越强,柱子沿径向的变形能力就越小,柱中核心

混凝土沿径向的应力集中效应就越强,导致在外部的 GFRP 管和 CFRP 布破裂时柱中应力在一瞬间释放,柱子沿径向急剧变形,随着轴力的增大,核心混凝土被迅速压碎,柱子因发生脆性破坏瞬间失效,如图 6 所示,约束作用最强的试件 FGC-1-2 的核心混凝土柱沿柱中斜 45°剪切面发生断裂。

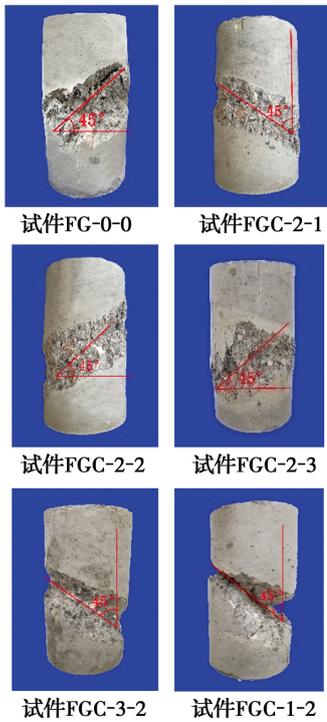


图 6 核心混凝土破坏特征

Fig. 6 Failure patterns of core concretes

### 2.2 应力-应变曲线及包络曲线

试验得到短柱沿轴向的应力-应变曲线如图 7

所示,图中应力取值为实测轴力除以试件截面面积,轴力通过与万能试验机连接的电脑采集获得,应变采用沿轴向 4 个应变片采集数据的平均值。从 6 组试件的应力-应变曲线可以看出,单轴受压试件的应力-应变曲线与其反复受压时的应力-应变包络线基本一致,因此,一般情况下,二者可以互相近似替代。对比 G 系列和 GC 系列试件可以看出,采用 CFRP 加强后,试件的极限应力明显大于未加强试件,但加强后柱子沿轴向的应变变化不大;对比 GC-2-1、GC-2-2、GC-2-3 系列试件的应力-应变曲线可以得到:加强方式相同,随着 CFRP 层数的增加,短柱的极限应力随之增大,同时,柱子沿轴向的应变也随之提高;对比 GC-2-2 和 GC-3-2 系列试件可以得到:CFRP 布层数相同,与只加强短柱两端相比,对短柱的两端和中部均进行加强会使得柱子极限应力和沿轴向的应变均有所提高,但提高的程度有限;对比 GC-1-2 和 GC-3-2 系列试件可以得到:CFRP 布层数相同,对短柱进行整体加强比只对短柱的两端和中部进行加强的柱子的极限应力显著提高,沿轴向的应变也有所提高,但提升不显著。

为进一步量化评价 CFRP 布对 GFRP 管约束混凝土柱的增强效果,将试验得到 6 组试件的极限位移和极限荷载列于表 3,其中,试件的极限变形和极限承载力均取单调加载和重复加载的平均值,并以未加强试件 G-0-0 系列为基准试件计算其他 5 组试件的变形增大倍数和承载力增大倍数。由表 3 可以看出:采用 CFRP 条带对试件两端进行加强后,

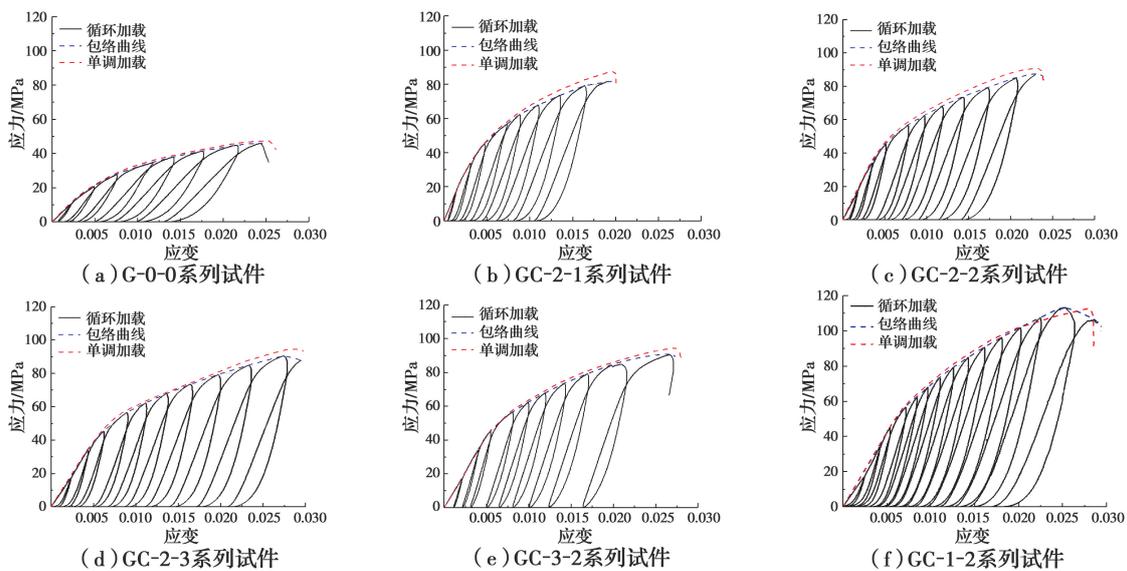


图 7 应力-应变曲线

Fig. 7 Stress-strain curves

试件的承载力提高了至少 81.2%,且随着 CFRP 层数的增多,试件的承载力也随之增大,当 CFRP 层数为 3 时,加强试件的承载力几乎是未加强试件的 2 倍,加强后试件沿轴向的变形能力也有所提升,且当 CFRP 层数小于 3 时,试件沿轴向的变形能力反而有所下降;较之两端加强的试件,两端和中部均加强的试件承载能力和沿轴向的变形能力均有所提升,但提升幅度很小;与其他加强方式相比,整体加强试件的承载力提升较大,是未加强试件的 2.4 倍,同时,其沿轴向的变形能力也提升至未加强试件的 1.15 倍,由此说明,采用 CFRP 进行整体加强是提升 GFRP 约束混凝土短柱承载力最好的加强方式。

表 3 试验结果参数表

Table 3 Table of test results parameters

试件编号	极限变形/mm	极限承载力/kN	变形增大倍数	承载力增大倍数
FG-0-0	7.721	825.744	1	1
DG-0-0				
FGC-2-1	5.888	1 496.342	0.763	1.812
DGC-2-1				
FGC-2-2	7.042	1 571.341	0.912	1.903
DGC-2-2				
FGC-2-3	9.011	1 643.82	1.167	1.991
DGC-2-3				
FGC-3-2	8.278	1 636.383	1.072	1.982
DGC-3-2				
FGC-1-2	8.894	1 994.941	1.152	2.416
DGC-1-2				

### 3 荷载-应变曲线预测

#### 3.1 约束混凝土的本构模型

采用 Lam 等<sup>[15]</sup>提出的 FRP 约束混凝土的应力-应变关系模型,如图 8 所示,该模型中的应力-应变曲线表现出双线性特征,包括抛物线段和直线段,其中,抛物线段的形状主要由包裹的 FRP 的约束程度决定,且抛物线段与直线段相交处点的斜率等于直线段斜率。

FRP 约束混凝土本构模型的表达式为

$$\begin{cases} \sigma_c = E_c \epsilon_c - \frac{(E_c - E_2)^2}{4f_{co}} \epsilon_c^2, & 0 \leq \epsilon_c \leq \epsilon_t; \\ \sigma_c = f_{co} + E_2 \epsilon_c, & \epsilon_t \leq \epsilon_c \leq \epsilon_{cu}; \end{cases} \quad (1)$$

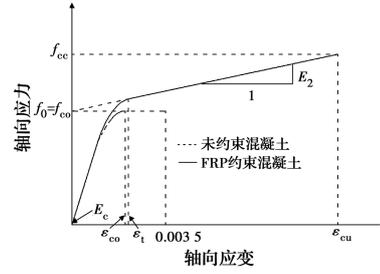


图 8 约束混凝土应力-应变关系曲线

Fig. 8 Stress-strain relation curve of confined concretes

$$\epsilon_t = \frac{2f_{co}}{E_c - E_2} \quad (2)$$

$$E_2 = \frac{f_{cc} - f_{co}}{\epsilon_{cu}} \quad (3)$$

当  $\sigma_{Ru}/f_{co} \geq 0.07$  时,  $f_{cc}/f_{co} = 1 + 3.3\sigma_{Ru}/f_{co}$ ; 当  $\sigma_{Ru}/f_{co} \leq 0.07$  时,  $f_{cc}/f_{co} = 1$ ;  $\sigma_{Ru} = (t_{frp} \times E_f / R) \epsilon_{h, rup}$ ;  $f_{cc}/f_{co} = 1.75 + 12(\sigma_{Ru}/f_{co})(\epsilon_{h, rup}/\epsilon_{co})^{0.45}$ 。其中,  $E_c$  为混凝土初始弹性模量;  $E_2$  为直线段斜率;  $E_f$ 、 $t_{frp}$  分别为 GFRP 管的环向弹性模量和计算厚度;  $\epsilon_t$  为抛物线与直线段交点处的应变;  $\epsilon_{h, rup}$  为 GFRP 材性试验的断裂应变;  $\sigma_{Ru}$  为 GFRP 管的环向极限应力;  $R$  为混凝土柱的半径;  $f_{cc}$ 、 $f_{co}$  分别为素混凝土柱与约束混凝土柱的峰值应力;  $\epsilon_{co}$ 、 $\epsilon_{cc}$  分别为素混凝土柱与约束混凝土柱的峰值应变。

#### 3.2 卸载曲线的预测

根据试验卸载曲线的形状特征, CFRP 加强 GFRP 管约束混凝土短柱的卸载曲线预测以 Lam 等在文献[16]中提出的卸载规则为基础, 并进行修正, 故采用 CFRP 加强的 GFRP 约束混凝土短柱的卸载曲线为

$$\sigma_c = a\epsilon_c^\eta + b\epsilon_c + c \quad (5)$$

$$a = \frac{\sigma_{un} - E_{un,0}(\epsilon_{un} - \epsilon_{pl})}{\epsilon_{un}^\eta - \epsilon_{pl}^\eta - \eta \epsilon_{pl}^{\eta-1}(\epsilon_{un} - \epsilon_{pl})} \quad (6)$$

$$b = E_{un,0} - \eta \epsilon_{pl}^{\eta-1} a \quad (7)$$

$$c = -a \epsilon_{pl}^\eta - b \epsilon_{pl} \quad (8)$$

$$\eta = \frac{35m(350\epsilon_{un} + 3)}{f'_{co}} \quad (9)$$

$$E_{un,0} = \min\left(\frac{0.5f'_{co}}{\epsilon_{un}}, \frac{\sigma_{un}}{\epsilon_{un} - \epsilon_{pl}}\right) \quad (10)$$

式中: 取  $f'_{co} = f_{co}$ ;  $\epsilon_{un}$  为卸载点的应变;  $\sigma_{un}$  为卸载点的应力;  $\epsilon_{pl}$  为残余应变;  $E_{un,0}$  为卸载曲线在应力为零处的斜率;  $m$  是与加强方式及 CFRP 层数有关的系数, 其计算方式为

$$m = \frac{\sigma_{Ru, cfrp} + \sigma_{cu}}{\sigma_{cu}} \quad (11)$$

$$\sigma_{Ru, cfrp} = \frac{\sigma_{cfrp} t_{cfrp} \beta}{R} \quad (12)$$

$$\beta = \frac{\text{柱子被 CFRP 包裹的面积}}{\text{柱子的侧面积}} \quad (13)$$

式中： $\sigma_{R_{u,cfpr}}$ 为 CRRP 沿环向的约束应力； $\sigma_{cu}$ 为混凝土立方体抗压强度，其值为 32.24 MPa； $\sigma_{cfpr}$ 为 CFRP 沿纤维方向的抗拉强度，其值为 2 859.3 MPa； $t_{cfpr}$ 为 CFRP 的缠绕厚度， $t_{cfpr}=0.111 \times \text{CFRP}$  层数； $\beta$ 为增强系数。该卸载曲线的形状主要与

$E_{un,0}$ 和  $\eta$  有关，同时， $E_{un,0}$ 和  $\eta$  都与卸载应变  $\epsilon_{un}$  有关，因此，卸载应变  $\epsilon_{un}$  是影响该卸载曲线形状的重要因素。笔者主要在 Lam 等的基础上修改了  $\eta$  的计算公式，增加考虑了混凝土强度及 CFRP 加强效应的影响。图 9 为修正后模型与试验结果的对比如，由图 9 可以看出，修正后卸载曲线与试验结果吻合较好。

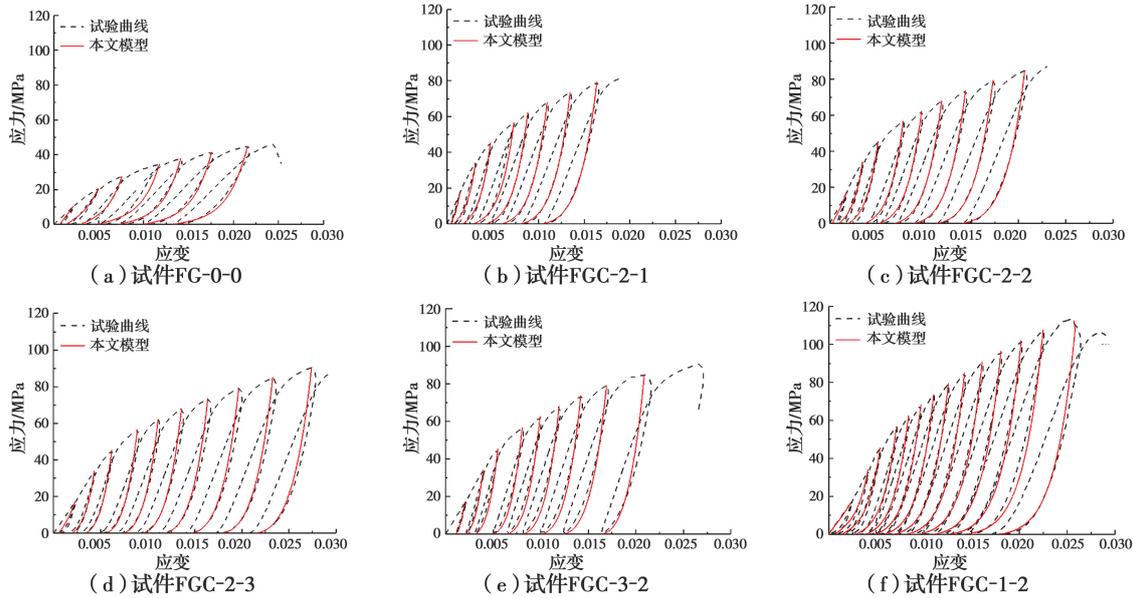


图 9 计算结果与试验结果对比

Fig. 9 Comparison between the calculated results and the experimental results

研究表明，FRP 约束混凝土柱在往复轴压下的残余应变与卸载应变之间存在线性关系<sup>[18-21]</sup>，该结论在试验中也同样成立，但采用 CFRP 进行加强后

对残余应变和卸载应变均有较大影响。如图 10 所示，在不同加强形式下，对柱子进行重复加载试验时，柱子的残余应变与卸载应变的线性相关系数有

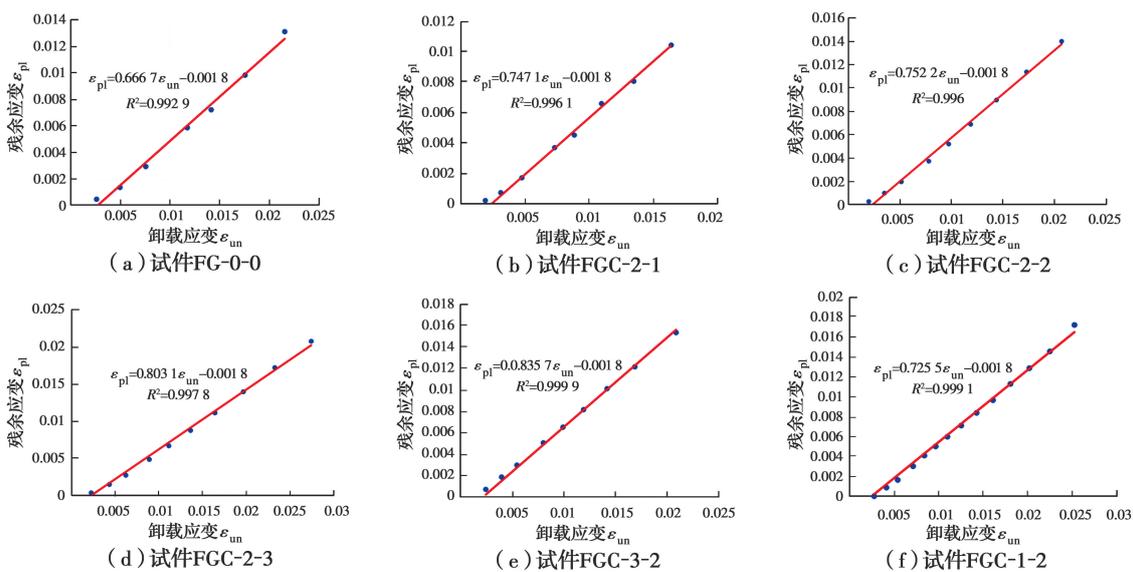


图 10 残余应变和卸载应变关系

Fig. 10 Relationship between residual strain and unloading strain

所不同,同种加强模式下,约束作用越强,二者的线性相关系数越大,回归分析得到不同加强方式下残余应变-卸载应变的关系式,已在图中标出。

## 4 结论

1)CFRP不同加强模式下的GFRP管约束混凝土短柱在轴向力作用下核心混凝土的破坏模式与传统混凝土短柱相同,均为由柱中压应力和剪应力联合作用所致的45°斜剪切破坏,且随着约束作用的增大,试件破坏后其核心混凝土破碎程度越高。

2)采用CFRP加强的GFRP管约束混凝土短柱在单调受压时的应力-应变曲线与其在反复受压时的应力-应变曲线的包络线基本一致,因此,在大多数情况下,二者可以近似替代。

3)3种加强方式均能较好地提升试件的承载能力,且加强后试件的承载能力基本能达到未加强试件的2倍;两端及中部均加强和整体加强的模式下,加强后试件沿轴向的变形能力也有所提升,但只对两端进行加强时,当CFRP层数小于3时,加强后试件的变形能力反而有所降低,因此,对于延性要求较高的结构,建议采用两端及中部均加强和整体加强的方式。

4)采用CFRP加强的GFRP管约束混凝土短柱在反复受压时的残余应变与卸载应变之间有较好的线性关系,且随着加强作用的增强,二者的线性相关性也逐渐增大。

5)增加考虑了混凝土强度及CFRP加强效应后的Teng卸载模型可以较好地预测CFRP加强的GFRP管约束混凝土短柱的反复受压卸载曲线,研究结果可为此类短柱在轴压下的非线性分析提供参考。

### 参考文献:

- [1] 史庆轩,戎翀,陈云泉. FRP-钢-混凝土组合柱的研究现状[J]. 建筑材料学报, 2019, 22(3): 431-439.  
SHI Q X, RONG C, CHEN Y X. Research status of FRP-steel-concrete composite columns [J]. Journal of Building Materials, 2019, 22 (3): 431-439. (in Chinese)
- [2] 翟科杰,方圣恩. 纤维布加固混凝土方柱的改进约束强度模型[J]. 土木与环境工程学报(中英文), 2019, 41(2): 79-85.  
ZHAI K J, FANG S E. Improved confinement strength

models of FRP-strengthened concrete square columns [J]. Journal of Civil and Environmental Engineering, 2019, 41(2): 79-85. (in Chinese)

- [3] PENG K. Compression tests on square hybrid FRP-concrete-steel tubular columns with a rib-stiffened steel inner tube [D]. Wollongong: University of Wollongong, 2017.
- [4] 钱稼茹,刘明学. FRP-混凝土-钢双壁空心管短柱轴心抗压试验研究[J]. 建筑结构学报, 2008, 29(2): 104-113.  
QIAN J R, LIU M X. Experimental investigation of FRP-concrete-steel double-skin tubular stubs under axial compressive loading [J]. Journal of Building Structures, 2008, 29(2): 104-113. (in Chinese)
- [5] LI P D, SUI L L, XING F, et al. Stress-strain relation of FRP-confined predamaged concrete prisms with square sections of different corner radii subjected to monotonic axial compression [J]. Journal of Composites for Construction, 2019, 23(2): 04019001.
- [6] TURGAY T, POLAT Z, KOKSAL H O, et al. Compressive behavior of large-scale square reinforced concrete columns confined with carbon fiber reinforced polymer jackets [J]. Materials & Design, 2010, 31 (1): 357-364.
- [7] 张霓,王连广,温建萍. GFRP管高强混凝土空心柱轴压试验研究[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2013, 34(7): 1049-1052.  
ZHANG N, WANG L G, WEN J P. Experiment research on high strength concrete-filled double skin hollow composite columns under axially loading [J]. Journal of Northeastern University (Natural Science), 2013, 34(7): 1049-1052. (in Chinese)
- [8] 高丹盈,王代. FRP-混凝土-钢管组合方柱轴压性能及承载力计算模型[J]. 中国公路学报, 2015, 28(2): 43-52.  
GAO D Y, WANG D. Behavior and bearing capacity computing model of FRP-concrete-steel tube composite square column under axial compression [J]. China Journal of Highway and Transport, 2015, 28(2): 43-52. (in Chinese)
- [9] 杨文伟,李顺涛,杨霞. GFRP管约束钢骨混凝土组合短柱轴压试验[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2020, 36(2): 229-238.  
YANG W W, LI S T, YANG X. Experimental study on axial compression of steel-encased concrete filled GFRP tubular short column [J]. Journal of Shenyang

- Jianzhu University (Natural Science), 2020, 36(2): 229-238. (in Chinese)
- [10] 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: 10-18.
- [11] YU T, CHAN C W, TEH L, et al. Hybrid FRP-concrete-steel multitube concrete columns: Concept and behavior [J]. *Journal of Composites for Construction*, 2017, 21(6): 04017044.
- [12] YU T, LIN G, ZHANG S S. Compressive behavior of FRP-confined concrete-encased steel columns [J]. *Composite Structures*, 2016, 154: 493-506.
- [13] ZHANG B, TENG J G, YU T. Experimental behavior of hybrid FRP-concrete-steel double-skin tubular columns under combined axial compression and cyclic lateral loading [J]. *Engineering Structures*, 2015, 99: 214-231.
- [14] 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.
- [15] LAM L, TENG J G. Design-oriented stress-strain model for FRP-confined concrete [J]. *Construction and Building Materials*, 2003, 17(6/7): 471-489.
- [16] LAM L, TENG J G. Stress-strain model for FRP-confined concrete under cyclic axial compression [J]. *Engineering Structures*, 2009, 31(2): 308-321.
- [17] LAM L, TENG J G, CHEUNG C H, et al. FRP-confined concrete under axial cyclic compression [J]. *Cement and Concrete Composites*, 2006, 28(10): 949-958.
- [18] WANG Z Y, WANG D Y, SMITH S T, et al. Experimental testing and analytical modeling of CFRP-confined large circular RC columns subjected to cyclic axial compression [J]. *Engineering Structures*, 2012, 40: 64-74.
- [19] 王代玉, 王震宇, 乔鑫. CFRP中等约束钢筋混凝土方柱反复受压本构模型[J]. *湖南大学学报(自然科学版)*, 2014, 41(4): 39-46.
- WANG D Y, WANG Z Y, QIAO X. Cyclic stress-strain model for CFRP moderately-confined reinforced concrete square columns [J]. *Journal of Hunan University (Natural Sciences)*, 2014, 41(4): 39-46. (in Chinese)
- [20] SHAO Y, ZHU Z, MIRMIRAN A. Cyclic modeling of FRP-confined concrete with improved ductility [J]. *Cement and Concrete Composites*, 2006, 28(10): 959-968.
- [21] 潘毅, 吴晓飞, 郭瑞, 等. 长期荷载作用下FRP约束混凝土应力-应变关系分析模型[J]. *建筑结构学报*, 2017, 38(10): 139-148.
- PAN Y, WU X F, GUO R, et al. Analysis-oriented stress-strain model of FRP-confined concrete under long-term sustained load [J]. *Journal of Building Structures*, 2017, 38(10): 139-148. (in Chinese)
- [22] ALAJARMEH O S, MANALO A C, BENMOKRANE B, et al. Hollow concrete columns: Review of structural behavior and new designs using GFRP reinforcement [J]. *Engineering Structures*, 2020, 203: 109829.
- [23] NASER M Z, HAWILEH R A, ABDALLA J A. Fiber-reinforced polymer composites in strengthening reinforced concrete structures: A critical review [J]. *Engineering Structures*, 2019, 198: 109542.
- [24] THAMRIN R, ZAIDIR, HARIS S. Shear capacity of reinforced concrete beams strengthened with web side bonded CFRP sheets [J]. *MATEC Web of Conferences*, 2019, 258: 04010.
- [25] ZHOU C Y, YU Y N, XIE E L. Strengthening RC beams using externally bonded CFRP sheets with end self-locking [J]. *Composite Structures*, 2020, 241: 112070.
- [26] RITCHIE P A, THOMAS D A, LU L W, et al. External reinforcement of concrete beams using fiber reinforced plastics [J]. *ACI Structural Journal*, 1991, 88(4): 490-500.
- [27] HAWILEH R A, RASHEED H A, ABDALLA J A, et al. Behavior of reinforced concrete beams strengthened with externally bonded hybrid fiber reinforced polymer systems [J]. *Materials & Design*, 2014, 53: 972-982.