

王坦,尹俊博,李立巍,等.GFRP混合配筋偏心受压柱正截面承载力计算方法[J].辽宁工程技术大学学报(自然科学版),2025,44(4):419-429.DOI:10.11956/j.issn.1008-0562.20240209

WANG Tan, YIN Junbo, LI Liwei, et al. Calculation method of normal section bearing capacity of GFRP hybrid reinforced eccentrically compressed columns[J].Journal of Liaoning Technical University(Natural Science),2025,44(4):419-429.DOI:10.11956/j.issn.1008-0562.20240209

GFRP混合配筋偏心受压柱正截面承载力计算方法

王 坦^{1,2}, 尹俊博¹, 李立巍¹, 周志杰¹, 杨 帆¹, 金 沐¹, 吴 宁³, 戴素亮⁴

(1. 长春工程学院 土木工程学院, 吉林 长春 130012; 2. 吉林省土木工程抗震减灾重点实验室, 吉林 长春 130012;
3. 中建三局城建有限公司, 吉林 长春 130012; 4. 五矿二十三冶建设集团有限公司, 湖南 长沙 410116)

摘 要: 为进一步探讨玻璃纤维增强复合材料(glass fiber reinforced polymer, GFRP)混合配筋偏心受压柱正截面承载力计算公式, 基于前期实验数据, 采用有限元软件进行参数化分析, 界定计算公式中的关键参数, 细化芯柱对承载力的作用。分别建立受压破坏、屈服-受压破坏, 以及屈服-受拉破坏模式下的正截面承载力计算公式和设计流程, 并对公式进行可行性分析, 公式计算值与实际值吻合较好。该公式适用于大偏心受压下各类纤维增强合金材料(FRP)混合配筋偏心受压柱, 为该类混合配筋柱的工程应用提供设计依据和理论参考。

关键词: 混合配筋; GFRP筋; 偏心受压柱; 有限元分析; 承载力计算; 受压破坏

中图分类号: TU375.3

文献标志码: A

文章编号: 1008-0562(2025)04-0419-11

Calculation method of normal section bearing capacity of GFRP hybrid reinforced eccentrically compressed columns

WANG Tan^{1,2}, YIN Junbo¹, LI Liwei¹, ZHOU Zhijie¹, YANG Fan¹, JIN Mu¹, WU Ning³, DAI Suliang⁴

(1. College of Civil Engineering, Changchun Institute of Technology, Changchun 130012, China;

2. Jilin Provincial Key Laboratory of Civil Engineering Earthquake Resistance and Disaster

Reduction, Changchun 130012, China; 3. China Construction Third Engineering Bureau Urban

Construction Company Limited, Changchun 130012, China; 4. The 23rd Metallurgical

Construction Group Company Limited of Minmetals, Changsha 410116, China)

Abstract: This study investigated the method for calculating the normal section bearing capacity of glass fiber reinforced polymer (GFRP) hybrid reinforced eccentric compression column. Based on the experiments research, the finite element software was used to carry out parametric analysis, defined the main parameters in the formula, and refined the role of the core column on the bearing capacity. The calculation formula and design process of normal section bearing capacity under three failure modes of compression failure, yield-compression failure and yield-tension failure were established. The calculated value of the formula was in good agreement with the actual value. The formula can be applied to the various kinds fiber reinforced polymer of FRP hybrid reinforced eccentric compression columns with large eccentricity, and provides design basis and theoretical reference for the engineering application of this kind of hybrid reinforced columns.

Key words: hybrid reinforced; glass fiber reinforced polymer bars; eccentrically compressed column; finite element analysis; calculation of bearing capacity; compressive failure

0 引言

钢筋混凝土结构具有结构性能好、成本低, 以及材料易取等优点, 在建筑行业中得到广泛应

用。然而当钢筋混凝土结构长期处于滨海以及盐渍土等腐蚀环境下, 结构受到氯离子和硫酸根离子等离子的侵蚀, 会引发钢筋锈蚀、混凝土劣化等问题, 导致钢筋混凝土结构耐久性退化, 严重

收稿日期: 2024-07-21 修回日期: 2024-09-06 接受日期: 2024-09-18 责任编辑: 焦丽

基金项目: 吉林省自然科学基金项目(YDZJ202401362ZYTS)

作者简介: 王 坦(1981-), 男, 吉林 长春人, 博士, 教授, 主要从事装配式建筑及结构防灾减灾方面的研究。E-mail: tm_wt@ccit.edu.cn

影响结构的使用功能和安全性^[1-2]。

纤维增强复合材料(fiber reinforced polymer, FRP)筋具有轻质高强、耐腐蚀性好,以及抗拉强度高优点^[3-4],常代替钢筋用于腐蚀环境中,改善钢筋锈蚀,从而提高结构在腐蚀环境下的耐久性能和抗震性能^[5-6]。FRP筋代替普通钢筋后虽能达到相近的承载能力,但FRP筋存在弹性模量相对较低^[7]、应力应变关系呈线弹性、破坏时没有明显屈服阶段等缺点,使其代替钢筋应用于混凝土结构中会出现较大扰度和裂缝跨度,发生脆性破坏,耗能能力明显低于相同数量的钢筋,制约其在混凝土结构领域的大规模应用。玻璃纤维增强复合材料(glass fiber reinforced polymer, GFRP)筋的抗压强度约为抗拉强度的1/2,压拉弹性模量比为0.8。在GFRP筋混凝土柱中,GFRP纵筋对柱总承载力的贡献低于同数量钢筋^[8],且低弹性模量导致受压过程中GFRP筋易发生侧向失稳,造成GFRP筋和混凝土协同工作失效^[9]。

针对上述问题,学者们提出在混凝土结构中采用FRP筋和钢筋混合配筋的形式,既能避免混凝土构件发生脆性破坏,又能提升混凝土结构在恶劣环境下的耐久性能。PANTELIDES等^[10]对钢筋和GFRP筋螺旋箍筋下纯GFRP筋以及混合配筋柱进行轴心受压试验,结果表明混合配筋柱和纯FRP筋混凝土柱的轴向承载力分别达到钢筋混凝土柱的87%和84%,其中,GFRP螺旋箍筋相较于钢筋螺旋箍筋对混凝土的约束能力更强。白馨宇^[11]对10根CFRP筋与钢筋混合配筋短柱的轴压性能开展研究,结果表明FRP筋增加率在23%以下时,构件承载力提高幅度约为14%~20%,继续增加FRP筋对柱极限承载力的提高幅度有限。WRIGHT等^[12]通过混合配筋柱在腐蚀环境下的轴心受压试验得出,混合配筋柱的轴压能力下降程度明显低于纯钢筋柱,极限承载能力表现较好。对于混合配筋偏心受压构件,学者们也进行了系统研究。邓宗才等^[13]对6根钢筋与GFRP筋混合配筋柱开展偏心受压试验,发现混合配筋柱在破坏前FRP筋保持完好,具有一定的侧向变形能力且裂缝分布较为均匀,通过合理的配筋方式,可以有效发挥混合配筋柱的延性以及受拉FRP纵筋的强度。毕傑俐^[14]设计了2组10根混合配筋大偏心受压柱试件,2种筋材的极限抗拉强度不同导致两种筋材的断裂次序不同,混合配筋柱中FRP筋率先断裂,构件

刚度发生转折,表现出“类延性”的特性;FRP筋断裂后试件仍可以继续承载,且混合配筋试件的残余变形较小,卸载后除混凝土剥落以外的裂缝基本闭合,在震后修复方面具有很大的应用价值。LIU等^[15]对10根不同配筋形式的细长柱进行偏心受压试验,结果表明由于纵向钢筋的减少,混合配筋柱需要更高的配筋率才能达到与钢-钢筋混凝土柱相当的承载能力和刚度;同时,配筋率的增加可提高混合钢筋混凝土柱BFRP纵筋在压缩中的轴力贡献。

目前,相关规范及研究主要针对全钢筋混凝土柱和全GFRP筋混凝土柱进行承载能力理论模型推演。关纪文等^[16]基于现行规范提出FRP筋混凝土构件轴心受压计算方法,其理论计算值与有限元计算结果吻合度较高,可为工程设计提供参考。彭飞等^[17]结合弯矩放大系数法和正截面承载力计算式,提出FRP筋混凝土偏压柱承载力计算方法,经43个FRP筋混凝土偏压柱试件验证,计算值与实测值吻合良好。对于混合配筋混凝土目前也有少量承载能力理论模型推演。张望喜等^[18]依据基本假定以及二阶效应的影响,推导了混合配筋混凝土偏压构件正截面承载力计算公式,计算准确度较高,可为工程应用提供一定的理论指导和设计借鉴。PANG等^[19]对10根大偏心下混合配筋柱进行偏心受压试验,提出2种区分破坏模式的边界状态和不同破坏模式下混合钢筋混凝土柱的极限承载力计算公式,计算结果与试验结果吻合较好。本文提出的GFRP混合配筋偏心受压柱则是在原有GFRP筋混凝土柱的基础上添加钢筋芯柱,现有混合配筋理论计算方法无法有效体现芯柱对承载能力的影响,需要对其正截面承载力计算公式和方法进一步研究。

本课题组提出的GFRP混合配筋偏心受压柱^[20],经实验验证,具有较高的承载力和较好的延性,可以有效提高腐蚀环境下混凝土结构受力性能。为深入研究其力学特性,通过有限元软件建立GFRP混合配筋偏心受压柱模型,开展不同参数下的有限元分析,探究芯柱纵筋配筋率、外置GFRP筋直径、芯柱螺旋箍筋配置、芯柱截面大小、混凝土强度等级以及偏心距对峰值载荷的影响。定义计算公式中主要参数,建立受压破坏、屈服-受压破坏以及屈服-受拉破坏3种破坏模式下偏心受压构件正截面承载力计算公式,得到各破

坏模式的界限配筋率范围,通过比较实际值和计算值,对正截面承载力计算公式进行评估。提出详细的GFRP混合配筋偏心受压柱正截面承载力设计流程。研究结果以期为规范修订、施工质量控制和安全评价提供有益参考。

1 有限元建模及参数化分析

1.1 混合配筋柱构造形式

以大偏心受压试验^[20]中使用的玻璃纤维增强复合材料(GFRP)混合配筋偏心受压柱为研究对象,其外侧配置GFRP纵筋和箍筋,内置由钢筋与螺旋箍筋组成的芯柱,形成配置GFRP筋与钢筋协同工作的混合配筋形式。这样既充分利用了GFRP筋良好的耐腐蚀性能,同时弥补了GFRP筋柱延性差以及脆性破坏的缺点。此外,将钢筋内置于混凝土核心区位置,有效约束核心区混凝土的同时增加了芯柱的混凝土保护层厚度,避免芯柱钢筋过早发生锈蚀。偏心受压柱混合配筋构造形式见图1。

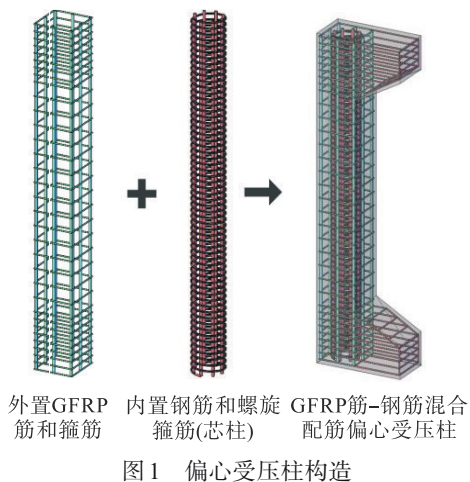


Fig.1 eccentric compression column construction

1.2 有限元模型建立

(1) 单元类型及相互作用

采用ABAQUS有限元软件建立GFRP混合配筋偏心受压柱模型。建立混凝土、钢筋以及加载端板等部件并装配。钢筋和箍筋材料采用桁架单元T3D2,混凝土和加载端板采用实体单元C3D8R,其中加载端板设置为钢体。混凝土本构采用塑性损伤模型,钢筋本构采用双折现模型,GFRP筋本构采用线弹性模型。考虑到模型的复杂性,有限元模型分析时未考虑GFRP筋和钢筋与混凝土之间的粘结滑移作用,默认其粘结牢固。将钢筋笼通过嵌入区域(embedded region)作用于混凝土内,加载端板与混凝土之间采用绑定(tie)约束。

(2) 边界条件及网格划分

本文前期试验在吉林省土木工程抗震减灾重点实验室室内开展,柱两端布置球铰,以确保载荷偏心的准确性,同时安装加载钢板,防止混凝土局部破坏,由2 000 kN液压千斤顶经球铰施加竖向载荷。有限元加载方式采用幅值设置的分级位移加载,直至试件承载能力下降至峰值载荷的80%。柱端采用铰接约束($U_1=U_2=0, U_{R1}=U_{R3}=0$,其中 $U_1、U_2$ 和 U_3 分别为 $X、Y、Z$ 方向的位移, U_{R1} 和 U_{R3} 为绕 X 和 Z 方向的转动自由度)。模拟柱端球形铰支座的作用,并在柱顶沿 Z 轴通过位移加载的方式施加载荷。为平衡计算精度与效率,对试件S-HC-14的有限元模型进行网格独立性验证,确定合适的单元网格尺寸。经过对比,网格尺寸在45~65 mm时极限承载力与偏心受压试验极限承载力相差较小,试验极限承载力与有限元模拟极限承载力之比仅为1.1。因此,对柱身分割后进行网格划分,混凝土、钢筋以及箍筋单元网格长度均取50 mm,保证模型的分析精度以及计算结果能够收敛,有限元模型建立与加载装置见图2。图2中, N 表示施加的载荷。

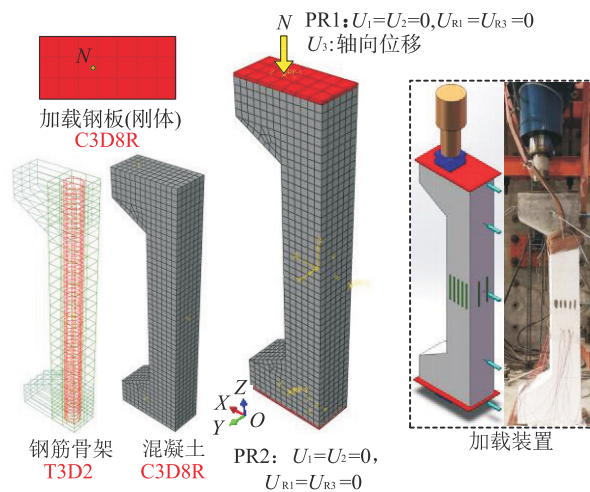


图2 有限元模型与加载装置

Fig.2 finite element model and loading device

1.3 有限元模型验证

基于有限元分析,选取试件S-HC-14的试验数据进行验证。图3、图4分别为试件S-HC-14有限元模拟与偏心受压试验受压、受拉的损伤云图。对比可见,试件承载力达到峰值载荷80%时,跨中区域混凝土达到极限压应变被压损,受压情况呈拱形分布;试件最终破坏时,受压区混凝土大面积脱落,受压情况呈梯形分布;在加载初期受拉区混凝土开裂,受拉区开始产生裂缝;随着载荷的增加,裂缝不断增多并开始在柱的3个侧面受压区延展,同时试件有限元模拟与偏心受压试验峰值载荷

下筋材的应力对比相差较小。

各试件有限元模拟和偏心受压试验的载荷-位移曲线对比见图5。有限元模拟与偏心受压试验载荷-位移曲线趋势基本相同,关键特征类似。有限

元模拟的峰值载荷略低于试验值,其原因可能是实际试验所用材料的真实属性与有限元模拟材料属性存在差异。综上,建立的有限元模型对于模拟GFRP混合配筋偏心受压柱具有较高的准确性。

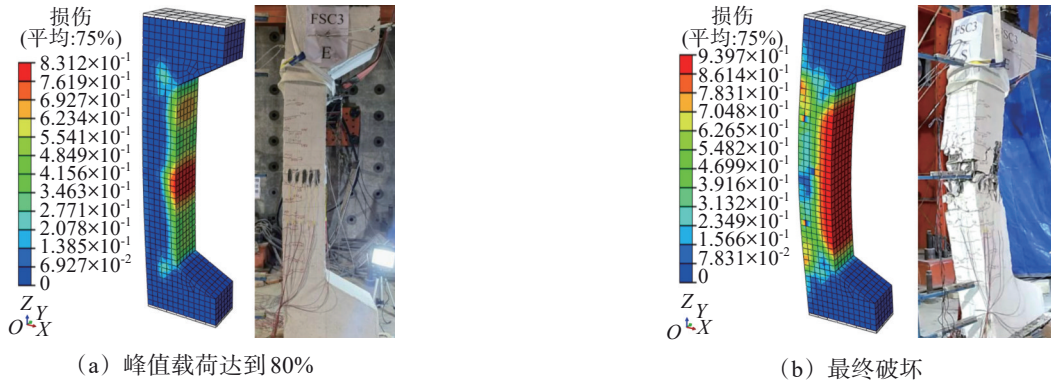


图3 试件S-HC-14受压损伤云图与试验对比

Fig.3 specimen S-HC-14 compression damage cloud diagram and test comparison

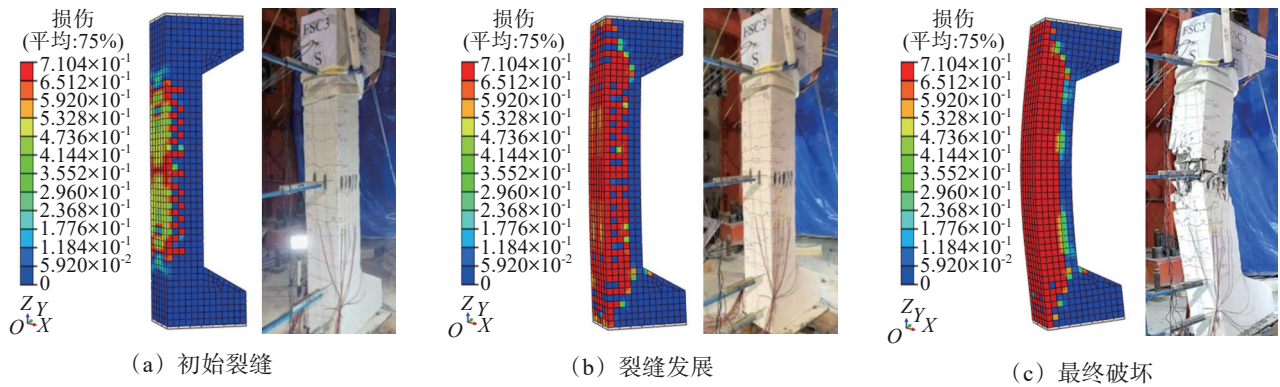


图4 试件S-HC-14受拉损伤云图与试验对比

Fig.4 specimen S-HC-14 tensile damage cloud diagram and test comparison

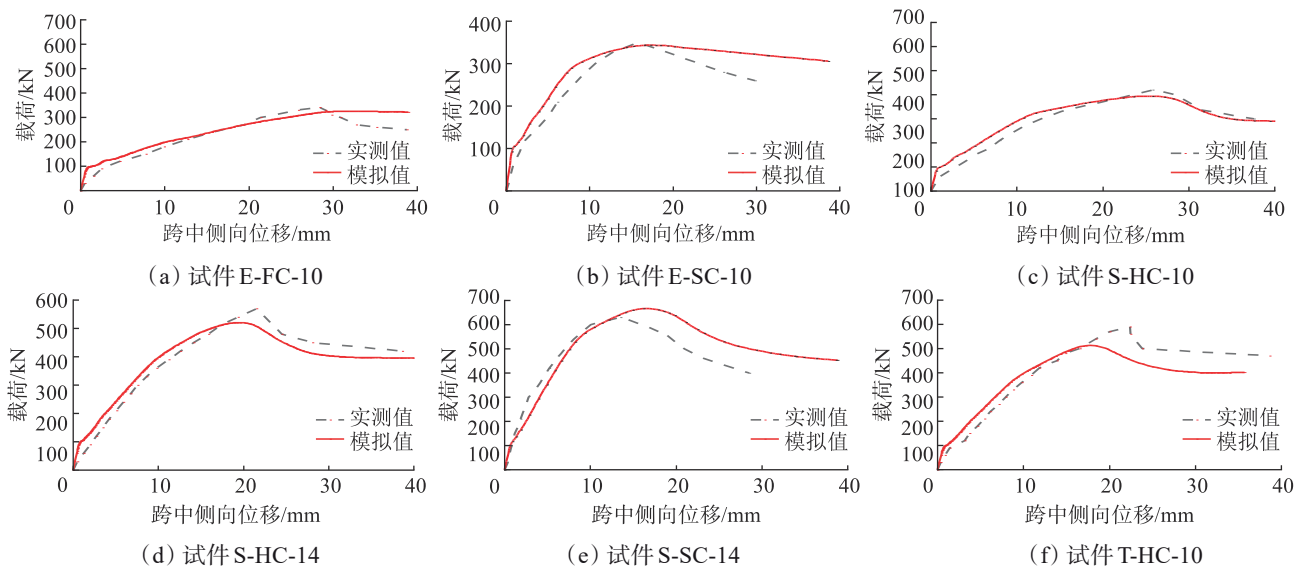


图5 载荷-跨中位移对比

Fig.5 comparison of load-min-span displacement

1.4 参数化分析

通过有限元模型验证,选取试件S-HC-14为基础模型,对GFRP混合配筋偏心受压柱进行参数化分析,研究芯柱纵筋配筋率、外置GFRP纵筋直径、芯柱螺旋箍筋配置、芯柱截面大小、混凝土强度等级,以及偏心距对其峰值载荷的影响,模型算例参数见表1。

表1 ABAQUS软件中参数设置

Tab.1 parameters setting in ABAQUS software	
参数	取值
芯柱纵筋直径 R/mm	8、10、12、14、16、18
芯柱纵筋配筋数 B	2、4、6、8、10、12
外置GFRP纵筋直径 G/mm	8、10、12、14、16、18
芯柱螺旋箍筋直径 S/mm	8、10、12、14
芯柱螺旋箍筋间距 T/mm	40、60、80、100
芯柱截面大小 D/mm	120、150、180、200
混凝土强度等级 C/MPa	40、45、50、55
偏心距 E/mm	120、180、250、300

(1) 芯柱纵筋配筋率的影响

不同芯柱纵筋直径和配筋数下GFRP混合配筋偏心受压柱载荷-跨中位移见图6。构件模型的命名方式为S-HC-纵筋直径-其他变量参数。芯柱纵筋直径从8 mm增加至18 mm时,试件峰值载荷提升27.24%;芯柱纵筋配筋数从2根增加到12根,试件峰值载荷提升25.19%。芯柱纵筋配筋率的增加可有效提升试件峰值载荷和残余承载能力,延缓混凝土破坏,提升构件初始刚度,芯柱纵筋配筋率对偏心受压柱峰值载荷的影响呈正相关。

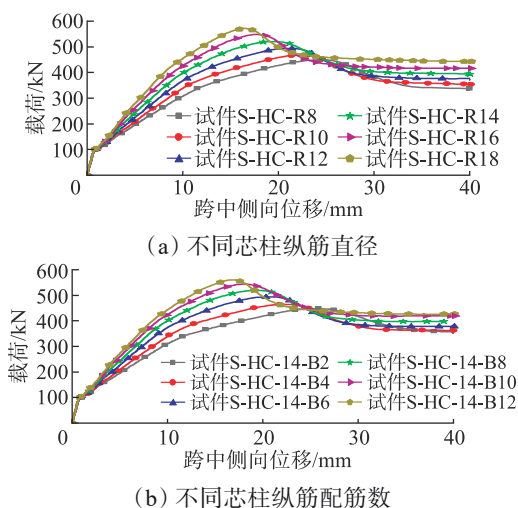


图6 不同芯柱纵筋配筋率下载荷-跨中侧向位移对比
Fig.6 comparison of load-mid-span lateral displacement with reinforcement ratios of longitudinal bars in core columns

(2) 外置GFRP纵筋直径的影响

不同外置GFRP纵筋直径下GFRP混合配筋偏心受压柱载荷-跨中位移见图7。外置GFRP纵筋直径从8 mm增加至18 mm时,试件峰值载荷提升35.98%。外置GFRP纵筋直径的增加有效提升试件峰值载荷和残余承载能力,但对试件的初始刚度影响较小,外置GFRP纵筋直径对偏心受压柱峰值载荷的影响呈正相关。

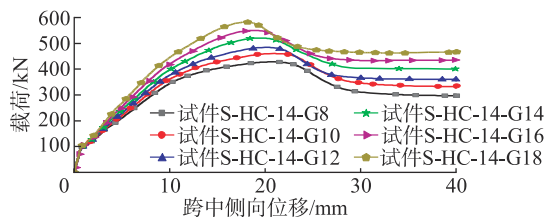


图7 外置GFRP纵筋直径载荷-跨中侧向位移对比
Fig.7 comparison of load-mid-span lateral displacement curves with external GFRP longitudinal bars

(3) 芯柱螺旋箍筋配置的影响

不同芯柱螺旋箍筋直径间距下GFRP混合配筋偏心受压柱载荷-跨中位移见图8。芯柱螺旋箍筋直径从8 mm增加至14 mm时,试件峰值载荷提升0.85%;芯柱螺旋箍筋间距从40 mm增加至100 mm,试件峰值载荷下降0.58%。各曲线基本重合,芯柱螺旋箍筋配置对偏心受压柱峰值载荷的影响较小。

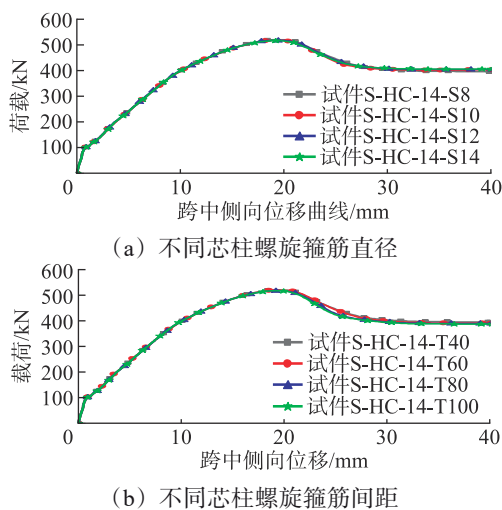


图8 不同芯柱螺旋箍筋配置下载荷-跨中侧向位移对比
Fig.8 comparison of load-mid-span lateral displacement curves under different spiral stirrup configuration in core columns

(4) 芯柱截面大小的影响

不同芯柱截面大小下GFRP混合配筋偏心受压柱载荷-跨中位移见图9。芯柱截面直径从120 mm增加至200 mm时,试件峰值载荷增加6.18%。芯柱截

面直径的增加可有效提升试件峰值载荷和残余承载能力,但对试件的初始刚度影响较小,芯柱截面大小对偏心受压柱峰值载荷的影响呈正相关。

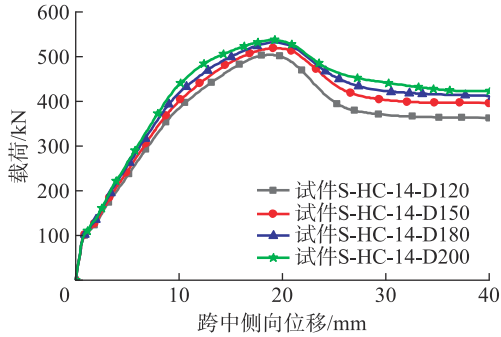


图9 不同外置GFRP纵筋直径下载荷-跨中侧向位移对比

Fig.9 comparison of load-mid-span lateral displacement curves under different diameters of external GFRP longitudinal bars

(5) 混凝土强度等级的影响

不同混凝土强度等级下 GFRP 混合配筋偏心受压柱载荷-跨中位移见图 10。混凝土强度从 C40 增加到 C55,试件峰值载荷提升 20.06%。混凝土强度等级的增加可有效提升试件峰值载荷和残余承载能力,混凝土强度等级对偏心受压柱峰值载荷的影响呈正相关。

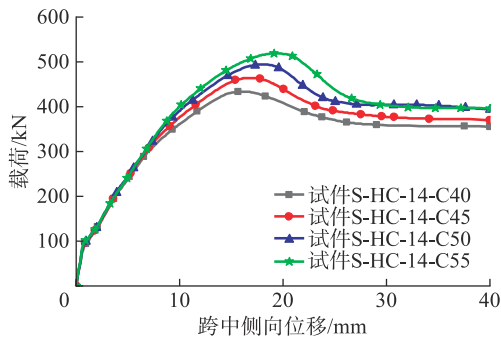


图 10 混凝土强度等级载荷-跨中侧向位移对比

Fig.10 comparison of load-mid-span lateral displacement curves with different concrete strength grades

(6) 偏心距的影响

不同偏心距下 GFRP 混合配筋偏心受压柱载荷-跨中位移见图 11。偏心距从 120 mm 增加至 300 mm 时,试件峰值载荷下降 63.55%。试件峰值载荷和残余承载能力随偏心距的增加而大幅减小,偏心距对偏心受压柱峰值载荷的影响呈负相关。

试件有限元参数化分析峰值载荷见表 2。由表 2 中各参数峰值载荷的增减幅度可以看出,芯柱纵筋配筋率、外置 GFRP 纵筋直径、芯柱直径、混凝土

强度等级,以及偏心距对偏心受压柱峰值载荷的影响较大,故将这些参数定义为 GFRP 混合配筋偏心受压柱正截面承载力计算公式中的主要参数。

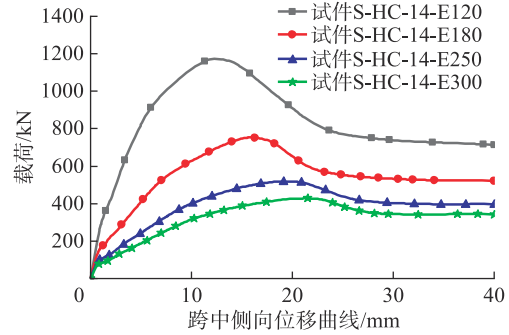


图 11 混凝土强度等级载荷-跨中侧向位移对比

Fig.11 comparison of load-mid-span lateral displacement specimens with different concrete strength grades

表 2 参数化分析峰值载荷

Tab.2 parameter analysis of peak load

试件编号	峰值载荷/kN	试件编号	峰值载荷/kN
S-HC-R8	449.30	S-HC-S10	517.83
S-HC-R10	467.32	S-HC-S12	517.79
S-HC-R12	493.61	S-HC-S14	516.84
S-HC-R14	520.61	S-HC-T40	520.61
S-HC-R16	547.65	S-HC-T60	520.17
S-HC-R18	571.67	S-HC-T80	518.16
S-HC-B2	447.70	S-HC-T100	517.61
S-HC-B4	464.14	S-HC-D120	503.96
S-HC-B6	494.09	S-HC-D150	520.61
S-HC-B8	520.61	S-HC-D180	531.62
S-HC-B10	543.40	S-HC-D200	537.31
S-HC-B12	560.46	S-HC-C40	433.62
S-HC-G8	428.10	S-HC-C45	464.36
S-HC-G10	460.39	S-HC-C50	494.28
S-HC-G12	484.27	S-HC-C55	520.61
S-HC-G14	520.61	S-HC-E120	1 173.89
S-HC-G16	549.79	S-HC-E180	753.24
S-HC-G18	582.14	S-HC-E250	520.61
S-HC-S8	520.61	S-HC-E300	427.91

2 正截面承载力计算方法

2.1 破坏模式

根据既有试验和基础研究,将 GFRP 混合配筋偏心受压柱破坏模式定义为受压破坏、屈服-受压

破坏,屈服-受拉破坏三类。通过峰值载荷下受压区边缘混凝土的压应变以及芯柱纵筋和外置GFRP纵筋的应变,可以判断偏心受压柱正截面的破坏模式。根据平截面假定,计算相对受压区高度 ξ 、受压破坏和屈服-受压破坏的相对界限受压区高度 ξ_{b1} ,以及屈服-受拉破坏和屈服-受压破坏的相对界限受压区高度 ξ_{b2} ,分别为

$$\xi = \frac{\beta_1 x}{h_0}, \quad (1)$$

$$\xi_{b1} = \frac{\beta_1 x_{b1}}{h_0} = \beta_1 \frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{cu} + \varepsilon_y}, \quad (2)$$

$$\xi_{b2} = \frac{\beta_1 x_{b2}}{h_0} = \beta_1 \frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{cu} + \varepsilon_{ft}}, \quad (3)$$

式(1)~式(3)中: β_1 为矩形应力图压缩区高度与中性轴高度之比; x_{b1} 和 x_{b2} 分别为受压破坏和屈服-受压破坏界限破坏的中和轴高度和屈服-受拉破坏和屈服-受压破坏的中和轴高度; h_0 为柱截面的计算高度; ε_{cu} 为峰值载荷作用下混凝土的极限压应变; ε_{ft} 为峰值载荷作用下GFRP纵筋的极限拉伸应变; ε_y 为峰值载荷作用下芯柱纵筋的极限拉伸应变。

(1) 受压破坏

当 $\xi > \xi_{b1}$ 时,受压区混凝土达到极限压应变,受拉侧GFRP筋未断裂,同时芯柱纵筋未屈服。这种破坏类似于“超筋破坏”,破坏发生时没有明显预兆,属于脆性破坏,且GFRP筋和钢筋均未被充分利用,设计时应避免该破坏类型。

(2) 屈服-受压破坏

当 $\xi_{b2} < \xi \leq \xi_{b1}$ 时,芯柱纵筋部分屈服,外置GFRP筋在受压区混凝土应变达到极限压应变之前未断裂。这种破坏会经历较大变形,试件在混凝土失效后仍能依靠GFRP筋提供足够的承载能力,同时芯柱纵筋屈服后对试件的贡献程度增加,试件的耗能能力明显提升,具有较好的延性破坏特征。

(3) 屈服-受拉破坏

当 $\xi \leq \xi_{b2}$ 时,芯柱纵筋部分屈服,靠近混凝土外侧GFRP筋随后发生断裂,最终受压区混凝土应变达到极限压应变。这种破坏从钢筋屈服到GFRP筋被拉断过程中会出现刚度转折的现象,具有“类延性”破坏的破坏特征。

2.2 基本假设

基于5个基本假设推导GFRP混合配筋偏心受压柱正截面承载力计算公式。5个基本假设为:①偏心受压柱沿正截面高度方向的平均混凝土应变

符合平截面假定;②混凝土与GFRP筋和钢筋的变形协调,黏结完整;③忽略偏心受压柱混凝土的抗拉强度;④混凝土、钢筋和GFRP筋的应力-应变曲线由有限元模型材料的本构关系给出;⑤在不超过GFRP筋的极限抗拉和抗压强度时,两者的应力由其应变和弹性模量相乘得出。

根据《纤维增强复合材料工程应用技术标准》(GB 50608—2020)^[21]计算GFRP筋的抗拉强度为

$$f_{fd} = \frac{f_{fk}}{\gamma_f \gamma_e}, \quad (4)$$

式中: f_{fd} 为FRP筋的抗拉强度设计值; f_{fk} 为FRP筋的抗拉强度标准值; γ_f 为纤维增强复合材料分项系数,对于FRP筋取1.25; γ_e 为纤维增强复合材料环境影响系数,室内环境取1.25,一般室外环境取1.40,海洋和侵蚀性环境取1.60,强碱性环境取2.00。

2.3 正截面承载力计算公式

由于FRP筋和钢筋的力学性能有较大的差异,采用GB 50608—2020^[21]和GB 50010—2010^[22]中纯钢筋和纯FRP筋的正截面承载力计算公式,计算GFRP混合配筋偏心受压柱的承载力时,与试验值相差较大。且在现有混合配筋偏心受压柱正截面承载力计算公式中无法体现芯柱纵筋对承载力的作用。因此,以平截面假定为前提,通过已开展试验和有限元分析结果确定试件的破坏模式,在已有混合配筋偏心受压柱正截面承载力计算的基础上,细化芯柱纵筋的受力情况,最终推算出三种破坏模式下正截面承载力计算方法。

(1) 受压破坏

发生受压破坏时,受拉区芯柱纵筋未屈服,受拉区GFRP筋未被拉断,受压区混凝土被压碎,如图12,这时GFRP混合配筋偏心受压柱正截面承载力计算式为

$$N = \alpha_1 f_c b h_0 \xi + \sigma_f' A_f' + \sum \sigma_{cn} A_{cn} - \sigma_f A_f - \sum \sigma_{tn} A_{tn}, \quad (5)$$

$$Ne = \alpha_1 f_c b h_0^2 \xi (1 - \xi/2) + \sigma_f' A_f' (h_0 - a_f') + \sum \sigma_{cn} A_{cn} d_{cn} - 0.5 \sigma_{tn} A_{tn} (h_0 - a_f') - \sum \sigma_{tn} A_{tn} d_{tn}. \quad (6)$$

式(5)、式(6)中: α_1 为受压区混凝土矩形应力图应力值与混凝土轴向抗压强度设计值之比; f_c 为混凝土抗压强度; b 为截面宽度; h_0 为有效截面高度; e 为轴向压力作用点到最外侧受拉区钢筋合力

点的距离; σ'_f 为受压区 GFRP 筋的应力; A'_f 为受压区 GFRP 筋的总面积; σ_f 为受拉区 GFRP 筋的应力; A_f 为受拉区 GFRP 筋的总面积; σ_{cn} 为受压区芯柱纵筋的应力; A_{cn} 为受压区芯柱纵筋的面积; d_n 为从相应受压区芯柱纵筋的合力点到受拉区 GFRP 筋合力点的距离; σ_m 为受拉区芯柱纵筋的应力; A_m 为受拉区芯柱纵筋的面积; d_m 为从相应受拉区芯柱纵筋的合力点到受拉区 GFRP 筋合力点的距离; σ_{fl} 为除受拉区端部以外的 GFRP 筋的应力; A_{fl} 为除受拉区端部以外的 GFRP 筋的总面积; a'_f 是从受压区 GFRP 筋合力点到最近截面边缘的垂直距离。

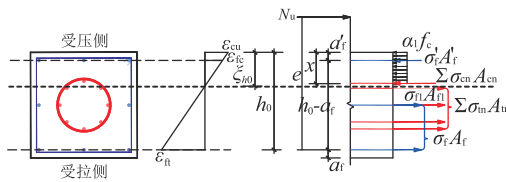


图 12 受压破坏正截面承载力计算示意

Fig.12 calculation of normal section bearing capacity in compression failure

(2) 屈服-受压破坏

发生屈服-受压破坏时, 受拉区芯柱纵筋首先屈服, 受拉区 GFRP 筋在受压区混凝土被压碎之前未被拉断, 如图 13, 这时 GFRP 混合配筋偏心受压柱正截面承载力为

$$N = \alpha_1 f_c b h_0 \xi + \sigma'_f A'_f + \sum (f'_y + \sigma_{cn}) A_{cn} - \sigma_f A_f - \sum (f_y + \sigma_m) A_m, \quad (7)$$

$$Ne = \alpha_1 f_c b h_0^2 \xi (1 - \xi/2) + \sigma'_f A'_f (h_0 - a'_f) + \sum (f'_y + \sigma_{cn}) A_{cn} d_{cn} - 0.5 \sigma_{fl} A_{fl} (h_0 - a'_f) - \sum (f_y + \sigma_m) A_m d_m, \quad (8)$$

式 (7)、式 (8) 中: f'_y 为受压区芯柱纵筋的屈服强度; f_y 为受拉区芯柱纵筋的屈服强度。

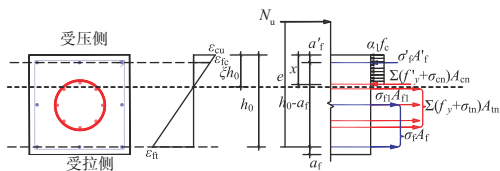


图 13 屈服-受压破坏正截面承载力计算示意

Fig.13 calculation of normal section bearing capacity in yield-compression failure

(3) 屈服-受拉破坏

发生受压破坏时, 受拉区芯柱纵筋首先屈服, 受拉区 GFRP 筋随后被拉断, 最终受压区混凝土被

压碎, 如图 14, 这时 GFRP 混合配筋偏心受压柱正截面承载力为

$$N = \alpha_1 f_c b h_0 \xi + (f'_f + \sigma'_f) A'_f + \sum (f'_y + \sigma_{cn}) A_{cn} - (f'_f + \sigma'_f) A_f - \sum (f_y + \sigma_m) A_m, \quad (9)$$

$$Ne = \alpha_1 f_c b h_0^2 \xi (1 - \xi/2) + (f'_f + \sigma'_f) A'_f (h_0 - a'_f) + \sum (f'_y + \sigma_{cn}) A_{cn} d_{cn} - 0.5 \sigma_{fl} A_{fl} (h_0 - a'_f) - \sum (f_y + \sigma_m) A_m d_m, \quad (10)$$

式 (9)、式 (10) 中: f'_f 为受压区 GFRP 筋断裂时的应力; f_f 为受拉区 GFRP 筋断裂时的应力。

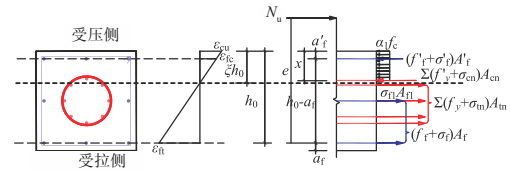


图 14 屈服-受拉破坏正截面承载力计算示意

Fig.14 calculation of normal section bearing capacity in yield-tension failure

2.4 界限破坏及界限偏心距

(1) 受压破坏和屈服-受压破坏界限偏心距

受压破坏与屈服-受压破坏的区别在于钢筋是否达到抗拉设计强度, 当发生受压破坏与屈服-受压破坏的界限破坏时, 相对界限受压区高度为 ξ_{bl} , 此时正截面承载力为

$$N = \alpha_1 f_c b h_0 \xi_{bl} + \sigma'_f A'_f + \sum (f'_y + \sigma_{cn}) A_{cn} - \sigma_f A_f - \sum (f_y + \sigma_m) A_m, \quad (11)$$

$$Ne = \alpha_1 f_c b h_0^2 \xi_{bl} (1 - \xi_{bl}/2) + \sigma'_f A'_f (h_0 - a'_f) + \sum (f'_y + \sigma_{cn}) A_{cn} d_{cn} - 0.5 \sigma_{fl} A_{fl} (h_0 - a'_f) - \sum (f_y + \sigma_m) A_m d_m. \quad (12)$$

定义 $e_{bl} = M/N$ 为界限偏心距, 可得

$$e_{bl} = \left[\alpha_1 f_c b h_0^2 \xi_{bl} (1 - \xi_{bl}/2) + \sigma'_f A'_f (h_0 - a'_f) + \sum (f'_y + \sigma_{cn}) A_{cn} d_{cn} - 0.5 \sigma_{fl} A_{fl} (h_0 - a'_f) - \sum (f_y + \sigma_m) A_m d_m \right] / \left[\alpha_1 f_c b h_0 \xi_{bl} + \sigma'_f A'_f + \sum (f'_y + \sigma_{cn}) A_{cn} - \sigma_f A_f - \sum (f_y + \sigma_m) A_m \right]. \quad (13)$$

(2) 屈服-受拉破坏和屈服-受压破坏界限偏心距

屈服-受拉破坏与屈服-受压破坏的区别在于 GFRP 筋是否被拉断, 同理可得屈服-受拉破坏和屈服-受压破坏的界限偏心距为

$$e_{b2} = \left[\alpha_1 f_c b h_0^2 \xi_{b2} (1 - \xi_{b2}/2) + \sigma'_f A'_f (h_0 - a'_f) + \sum (f'_y + \sigma_{cn}) A_{cn} d_{cn} - 0.5 \sigma_{fl} A_{fl} (h_0 - a'_f) - \sum (f_y + \sigma_m) A_m d_m \right] / \left[\alpha_1 f_c b h_0 \xi_{b2} + \sigma'_f A'_f + \sum (f'_y + \sigma_{cn}) A_{cn} - \sigma_f A_f - \sum (f_y + \sigma_m) A_m \right].$$

$$\begin{aligned} & \sum (f'_y + \sigma_{cn}) A_{cn} d_{cn} - 0.5 \sigma_{fl} A_{fl} (h_0 - a'_f) - \\ & \sum (f_y + \sigma_{tn}) A_{tn} d_{tn} \left[\alpha_1 f_c b h_0 \xi_{b2} + \right. \\ & \left. (f'_t + \sigma'_t) A'_t + \sum (f'_y + \sigma_{cn}) A_{cn} - \right. \\ & \left. (f_t + \sigma_t) A_t - \sum (f_y + \sigma_{tn}) A_{tn} \right] \circ \end{aligned} \quad (14)$$

3 配筋优化及公式可行性分析

3.1 混合配筋率

由于钢筋和GFRP筋的弹性模量和抗压强度差异较大,使用两种筋材配筋率相加的方法不能真实反映偏心受压柱中二者协同工作的能力,为此分别使用“按强度换算”和“按弹性模量换算”^[23]方法计算偏心受压柱的配筋率。

实际配筋率为

$$\rho = \rho_s + \rho_f, \quad (15)$$

式中: ρ_s 为钢筋配筋率; ρ_f 为GFRP筋配筋率。

$\rho_s = A_s / b h_0$, $\rho_f = A_f / b h_0$, 其中, A_s 为钢筋截面面积, b 为截面宽度, h_0 为有效截面高度, A_f 为GFRP筋截面面积。

按强度换算配筋率为

$$\rho_{sf,s} = \rho_s + \frac{f_{td} \rho_f}{f_y}, \quad (16)$$

式中: f_{td} 为GFRP筋抗拉强度; f_y 为芯柱纵筋抗拉强度。

按弹性模量换算配筋率为

$$\rho_{sf,E} = \rho_s + \frac{E_f \rho_f}{E_s}, \quad (17)$$

式中: E_f 为GFRP筋的弹性模量; E_s 为芯柱纵筋的弹性模量。

3.2 配筋优化

已有实验研究^[20]表明在试件破坏时,外置GFRP筋被充分利用,但芯柱纵筋屈服至试件破坏前均未到达极限抗拉强度,同时芯柱混凝土未脱落,芯柱纵筋对试件的贡献程度较小,试件耗能能力并未达到预计水平,表现出类似超筋破坏的破坏形式。

为此,通过调整芯柱纵筋直径和外置GFRP纵筋直径,对原有的配筋方法进行优化,确定GFRP混合配筋偏心受压柱最优配筋率和界限配筋率的筋材配置优化方案,提升构件的耗能能力和承载能力。模型算例参数及力学性能见表3,试件的混合配筋率按式(12)、式(13)进行计算,模型的

命名方式为“S-HC-芯柱纵筋直径-外置GFRP纵筋直径”。有限元分析结果表明: $\rho_{sf,s} > 8.85\%$ 或 $\rho_{sf,E} > 3.12\%$,试件的破坏模式为受压破坏; $1.20\% < \rho_{sf,s} \leq 8.85\%$ 或 $0.56\% < \rho_{sf,s} \leq 3.12\%$,试件的破坏模式为屈服-受压破坏; $\rho_{sf,s} \leq 1.20\%$ 或 $\rho_{sf,E} \leq 0.56\%$,试件的破坏模式为屈服-受拉破坏。

表3 优化配筋率试件的参数及破坏模式

Tab.3 optimize the specific parameters and failure modes of reinforcement ratio specimens

试件编号	配筋率/%		破坏模式	峰值载荷/ /kN
	$\rho_{sf,s}$	$\rho_{sf,E}$		
S-HC-18-18	8.85	3.12	受压破坏	614.47
S-HC-8-6	1.20	0.56	屈服-受拉破坏	268.84

3.3 公式可行性分析

选取偏心受压试验中各参数峰值载荷最值,以及优化配筋率的试件,通过峰值载荷下芯柱纵筋和外置GFRP纵筋的应变,判断偏心受压柱正截面的破坏模式。将参数代入式(5)~式(10)中并求解,再将实际值与计算值进行对比,结果见表4。

表4 试件峰值载荷实际值与计算值对比

Tab.4 comparison between the actual value and the calculated value of the specimens peak load

试件编号	实际值/kN	计算值/kN	破坏模式	实际值/ 计算值
S-HC-10(试验)	420.00	396.91	屈服-受压	1.06
S-HC-14(试验)	570.00	518.81	屈服-受压	1.10
S-HC-10	393.76	383.07	屈服-受压	1.03
S-HC-14	520.61	510.09	屈服-受压	1.02
S-HC-R8	449.31	449.30	屈服-受拉	1.00
S-HC-R18	571.67	547.36	屈服-受压	1.04
S-HC-14-B2	446.89	446.06	屈服-受拉	1.00
S-HC-14-B12	560.46	532.08	屈服-受压	1.05
S-HC-14-G8	428.10	410.01	屈服-受拉	1.04
S-HC-14-G18	582.14	562.60	屈服-受压	1.03
S-HC-14-D120	503.96	502.63	屈服-受压	1.00
S-HC-14-D200	544.61	507.18	屈服-受压	1.07
S-HC-14-E300	427.91	411.19	屈服-受压	1.04
S-HC-14-E120	1 116.51	1 168.28	屈服-受压	0.96
S-HC-18-18	614.47	637.78	受压	0.96
S-HC-8-6	268.84	243.42	屈服-受拉	1.15

理论计算不考虑二阶效应的影响,材料的强度作为实测值。有限元模拟的破坏模式与偏心受压试验的破坏模式相同,实际值与计算值的对比均值约为1.03,标准差为0.019,说明承载力计算方法具有较高的计算精度。但GFRP混合配筋柱目前仅完成单一剪跨比下大偏心受压试验,不同剪跨比以及小偏心受压构件的力学性能仍需进一步

研究,该计算公式现阶段可适用于大偏心受压下各种FRP混合配筋偏心受压柱设计计算。

4 正截面承载力设计流程

本文3种破坏模式中,受压破坏发生时没有明显预兆,类似于“超筋破坏”。屈服-受拉破坏在试件达到峰值载荷时,部分GFRP筋已经发生断裂,从钢筋屈服到GFRP筋被拉断过程中会出现刚度转折的现象,试件承载能力迅速下降。相较于前两种破坏模式,屈服-受压破坏在试件达到峰值载荷时GFRP筋未发生断裂,试件在混凝土失效后仍能依靠GFRP筋提供足够的承载能力,同时芯柱纵筋屈服后对试件的贡献程度增加,试件的耗能能力明显提升,具有较好的延性破坏特征。因此,对于GFRP混合配筋偏心受压柱,建议在设计试件时混合配筋率为 $1.20\% < \rho_{sf,s} \leq 8.85\%$ 或 $0.56\% < \rho_{sf,s} \leq 3.12\%$,将屈服-受压破坏作为期望的失效模式。

根据偏心受压试验研究和有限元模拟分析,对GFRP混合配筋偏心受压柱进行了多方面的分析研究,较清晰地揭示了主要设计参数对其自身力学性能的影响规律。最终基于前述所得结论为基础,提出GFRP混合配筋偏心受压柱的正截面承载力设计流程,设计流程见图15。

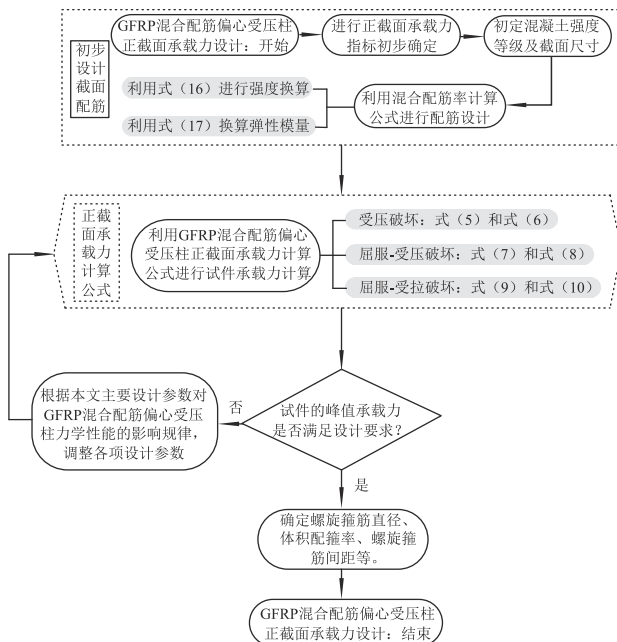


图15 正截面承载力设计流程

Fig.15 design process for the normal section bearing capacity

5 结论

为解决现有混合配筋理论计算方法无法体现

芯柱对混合配筋柱承载能力影响的问题,通过有限元参数化分析,定义计算公式中的主要参数,细化芯柱对承载力的作用,得到GFRP混合配筋偏心受压柱正截面承载力计算方法,研究结论如下。

(1) 建立的有限元模型具有较好的准确性,分析了不同参数下的偏心受压柱有限元模拟结果,定义芯柱纵筋配筋率、外置GFRP纵筋直径、芯柱直径、混凝土强度等级、偏心距等参数为偏心受压正截面承载力计算公式中的主要参数。

(2) GFRP混合配筋偏心受压柱有受压破坏、屈服-受压破坏和屈服-受拉破坏3种破坏模式,屈服-受压破坏下试件耗能能力明显提升且具有较好的延性破坏特征,建议将此破坏作为期望的失效模式。

(3) 通过调整芯柱纵筋直径和外置GFRP纵筋直径得到GFRP混合配筋偏心受压柱的界限配筋率以及筋材配置优化方案,该方案提升了芯柱纵筋对试件承载能力的贡献程度,增加了试件的耗能能力和承载能力。

(4) 3种破坏模式下正截面承载力计算公式进一步细化芯柱对承载力的作用,具有良好的准确性和适用性,适用于大偏心受压下各类FRP混合配筋偏心受压柱中,为该混合配筋柱的工程应用提供设计依据。

参考文献(References):

- [1] CHEN E, TANG S W, LEUNG C K Y. Corrosion-induced cracking in reinforced concrete due to chloride contamination and ingress[J]. ACI Materials Journal, 2019, 116(5): 99-111.
- [2] ZHANG C L, CHEN W K, MU S, et al. Numerical investigation of external sulfate attack and its effect on chloride binding and diffusion in concrete[J]. Construction and Building Materials, 2021, 285: 122806.
- [3] ATTIA K, ALNAHAL W, ELREFAI A, et al. Flexural behavior of basalt fiber-reinforced concrete slab strips reinforced with BFRP and GFRP bars[J]. Composite Structures, 2019, 211: 1-12.
- [4] ALAOUD L, AL-SALLOUM Y, ABBAS H. Experimental investigation for GFRP rebar couplers for reinforced concrete[J]. Journal of King Saud University-Engineering Sciences, 2021, 33(2): 104-110.
- [5] 彭飞, 薛伟辰. FRP筋混凝土T形和矩形截面梁抗弯承载力计算方法[J]. 工程力学, 2022, 39(2): 76-84, 122.
- [6] PENG Fei, XUE Weichen. Method of calculating the flexural strength of FRP reinforced concrete T-shaped and rectangular beams[J]. Engineering Mechanics, 2022, 39(2): 76-84, 122.
- [6] 金清平, 易建明, 高永红, 等. 自然环境温度下碱对玻璃纤维增强塑料筋力学性能的影响研究[J]. 中国塑料, 2022, 36(2): 89-95.

- JIN Qingping, YI Jianming, GAO Yonghong, et al. Effect on mechanical properties of glass-fiber-reinforcement polymer bars exposure to alkaline solution under natural ambient temperature[J]. China Plastics, 2022, 36(2): 89-95.
- [7] MALLICK P K. Fiber-Reinforced Composites: Materials, Manufacturing, and Design[M]. CRC Press, 2007:30-34.
- [8] 涂建维,付金海,高奎,等. 方形螺旋箍筋GFRP筋混凝土柱轴压性能研究[J]. 复合材料科学与工程,2020(8):5-11.
- TU Jianwei, FU Jinhai, GAO Kui, et al. Axial compressive properties of GFRP reinforced concrete columns with square spiral stirrups[J]. Composites Science and Engineering, 2020(8):5-11.
- [9] 张新越,欧进萍. FRP加筋混凝土短柱受压性能试验研究[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版),2006,38(4):467-472,485.
- ZHANG Xinyue, OU Jinping. Experimental research on compressive properties of concrete stub square column reinforced with FRP bars[J]. Journal of Xi'an University of Architecture & Technology (Natural Science Edition), 2006,38(4):467-472,485.
- [10] PANTELIDES C P, GIBBONS M E, REAVELEY L D. Axial load behavior of concrete columns confined with GFRP spirals[J]. Journal of Composites for Construction, 2013,17(3): 305-313.
- [11] 白馨宇. CFRP复材筋与钢筋混合配筋柱的轴压性能研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2016:67.
- [12] WRIGHT J W, PANTELIDES C P. Axial compression capacity of concrete columns reinforced with corrosion-resistant hybrid reinforcement[J]. Construction and Building Materials, 2021, 302: 124209.
- [13] 邓宗才,高伟男. 玻璃纤维筋与钢筋混杂配筋柱正截面承载力[J]. 哈尔滨工程大学学报,2019,40(9):1622-1628.
- DENG Zongcai, GAO Weinan. Cross-sectional bearing capacity of column with hybrid reinforcement of glass fiber-reinforced polymer bars and steel bars[J]. Journal of Harbin Engineering University, 2019,40(9):1622-1628.
- [14] 毕傑俐. 基于混合配筋的FRP筋混凝土偏心受压柱性能研究[D]. 重庆:重庆大学,2013:59.
- [15] LIU S, WANG X, ALI Y M S, et al. Experimental study on eccentric compression behavior of slender rectangular concrete columns reinforced with steel and BFRP bars[J]. Engineering Structures, 2023,293:116626.
- [16] 关纪文,杨汉宁,李真,等. FRP筋增强不同骨料混凝土轴压构件力学性能数值分析[J]. 建筑技术,2023,54(16):1951-1955.
- GUAN Jiwen, YANG Hanning, LI Zhen, et al. Numerical analysis of mechanical properties of axially loaded members with different aggregate concrete reinforced with FRP bar[J]. Architecture Technology, 2023,54(16): 1951-1955.
- [17] 彭飞,薛伟辰. FRP筋混凝土偏压柱承载力计算方法[J]. 建筑结构学报,2018,39(10):147-155.
- PENG Fei, XUE Weichen. Calculation approach of ultimate capacity of FRP reinforced concrete columns under eccentric compression[J]. Journal of Building Structures, 2018, 39(10): 147-155.
- [18] 张望喜,胡彬彬,易伟建. 混合配筋偏心受压构件正截面承载力计算理论和方法[J]. 湖南大学学报(自然科学版),2022,49(5): 130-138.
- ZHANG Wangxi, HU Binbin, YI Weijian. Calculation theory and method of normal section bearing capacity of eccentric compression member reinforced with steel bars and fiber reinforced polymer bars[J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2022,49(5):130-138.
- [19] PANG L, HAN Z B, XIAO J, et al. Bearing capacity of hybrid (steel and GFRP) reinforced columns under eccentric loading: theory and experiment[J]. Buildings, 2024,14(8): 2472.
- [20] 王坦,李立巍,周志杰,等. GFRP筋与钢筋混合配筋柱偏心受压性能试验研究[J]. 建筑结构学报,2023,44(增刊1):248-255.
- WANG Tan, LI Liwei, ZHOU Zhijie, et al. Experimental study on eccentric compression performance of column with hybrid of GFRP and steel bars[J]. Journal of Building Structures, 2023, 44 (Suppl.1): 248-255.
- [21] 纤维增强复合材料工程应用技术标准:GB 50608—2020[S]. 北京:中国计划出版社,2020:21.
- [22] 混凝土结构设计规范:GB 50010—2010[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2010:34-54.
- [23] LAU D, PAM H J. Experimental study of hybrid FRP reinforced concrete beams[J]. Engineering Structures, 2010,32(12):3857-3865.