

DOI:10.3969/j.issn.1003-5060.2025.12.018

# 635 MPa 级高强箍筋约束高强钢筋混凝土短柱 偏压性能试验研究

王静峰<sup>1,2</sup>, 王修帅<sup>1</sup>, 马兵辉<sup>3</sup>, 刘用<sup>1,2</sup>, 沈奇罕<sup>1,2</sup>

(1. 合肥工业大学 土木与水利工程学院, 安徽 合肥 230009; 2. 土木工程结构与材料安徽省重点实验室, 安徽 合肥 230009; 3. 安徽同济建设集团有限责任公司, 安徽 合肥 230022)

**摘要:**为研究高强箍筋的约束效应、高强钢筋与混凝土匹配性以及 635 MPa 级高强箍筋约束高强钢筋混凝土短柱的偏压性能,文章以偏心距、混凝土强度、箍筋强度及体积配箍率为参数,开展 13 根 635 MPa 级高强箍筋约束高强钢筋混凝土短柱偏压试验,分析试件破坏模式及各参数对荷载-应变的影响规律。研究表明:635 MPa 级高强箍筋约束高强钢筋混凝土偏压短柱的破坏模式与普通钢筋混凝土短柱类似;试件极限承载力随着偏心距的减小、混凝土强度及体积配箍率的增加而提高,增大箍筋强度对构件极限承载力影响不大;635 MPa 级高强钢筋与 C60 及以上等级的混凝土匹配性较好;635 MPa 级高强箍筋在峰值荷载时均未达到屈服应变,在荷载下降段都会屈服,能够提升受压区混凝土的峰值应变以及试件的延性。结合高强纵筋与混凝土强度匹配性以及高强箍筋对核心区混凝土约束效应,文章提出一种适用于高强箍筋约束高强钢筋混凝土偏压短柱的计算修正方法并验证了其准确性。该研究结果为建立高强钢筋混凝土计算理论提供试验依据,并促进 635 MPa 级高强度钢筋在工程领域的推广和使用。

**关键词:**635 MPa 级高强钢筋;箍筋约束效应;偏压试验;破坏形态;承载力计算方法

**中图分类号:**TU375.3

**文献标志码:**A

**文章编号:**1003-5060(2025)12-1705-08

## Experimental study of mechanical properties of high-strength reinforced concrete short columns confined by 635 MPa high-strength stirrups under eccentric compression

WANG Jingfeng<sup>1,2</sup>, WANG Xiushuai<sup>1</sup>, MA Binghui<sup>3</sup>, LIU Yong<sup>1,2</sup>, SHEN Qihan<sup>1,2</sup>

(1. School of Civil and Hydraulic Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China; 2. Anhui Key Laboratory of Civil Engineering Structures and Materials, Hefei 230009, China; 3. Anhui Tongji Construction Group Co., Ltd., Hefei 230022, China)

**Abstract:**In order to study the constraints of high-strength stirrups, the match between high-strength steel bars and concrete, and the mechanical properties of high-strength reinforced concrete short columns confined by 635 MPa high-strength stirrups under eccentric compression, the eccentric distance, concrete strength, stirrup strength, and volume stirrup ratio were used as parameters to conduct the eccentric compression tests of 13 high-strength reinforced concrete short columns confined by 635 MPa high-strength stirrups. The failure mode of the specimens and the influence of various parameters on load-strain were analyzed. The results show that the failure mode of the specimens is similar to that of ordinary reinforced concrete short columns. The ultimate load bearing capacity of the specimens increases with the decrease of the eccentric distance and the increase of the concrete strength and the volume stirrup ratio, but the increase of the stirrup strength has little effect on the ultimate load bearing capacity of the member. The 635 MPa high-strength steel bars should be applied with C60 or high-

**收稿日期:**2023-07-17; **修回日期:**2023-09-14

**基金项目:**国家自然科学基金资助项目(52108130);教育部新世纪优秀人才支持计划资助项目(NCET120838)

**作者简介:**王静峰(1976—),男,安徽合肥人,博士,合肥工业大学教授,博士生导师,通信作者,E-mail:jfwang008@163.com.

er-grade concrete. The 635 MPa high-strength stirrups do not yield when the peak load is reached, but they all yield in the post-peak stage, improving the peak strain in concrete in the compressed zone and the ductility of the specimens. Based on the strength matching of high-strength longitudinal bars with concrete and the constraints of high-strength stirrups on concrete in the core area, a calculation method applicable to the high-strength reinforced concrete short columns confined by 635 MPa high-strength stirrups under eccentric compression was proposed, and its accuracy was verified against the test results. The study provides a test basis for establishing the calculation theory of high-strength reinforced concrete, and enhances the promotion and use of 635 MPa high-strength steel bars in the engineering field.

**Key words:** 635 MPa high-strength steel bars; stirrup constraints; eccentric compression test; failure mode; load bearing capacity calculation method

## 0 引言

我国持续推动建筑业绿色低碳发展,助力“双碳”目标,推动 600 MPa 及以上高强钢筋的研发与应用。高强钢筋的应用可显著减小构件尺寸、降低材料消耗,对建筑行业绿色转型升级具有重要意义。

目前,针对 600 MPa 及以上高强钢筋已有一些研究。文献[1]分析高强钢筋直径、锚固长度、弯锚角度及混凝土强度等参数对锚固性能的影响;文献[2]研究不同强度混凝土、配筋率对高强钢筋混凝土柱轴压性能的影响,并提出 HRB600 钢筋抗压强度设计值;文献[3]研究箍筋强度、配箍率等参数对高强钢筋高强混凝土轴压柱承载性能的影响,并与中、美、日这 3 个国家规范进行对比验证;文献[4-6]探究不同配筋率、偏心距等参数对高强钢筋混凝土偏压柱的承载力和受力机理的影响。然而,高强钢筋混凝土偏压柱部分试件破坏时存在混凝土先受压破坏而受压侧高强纵筋尚未屈服的现象,为充分发挥高强钢筋和混凝土材料性能,本文采用高强箍筋提升核心区混凝土应变和高强钢筋搭配高强混凝土的综合应用方法,旨在提升高强钢筋混凝土柱的偏压承载力。

因此,本文开展 13 根 635 MPa 级高强箍筋约束高强钢筋混凝土短柱偏压试验,研究了偏心距、混凝土强度等级、箍筋强度以及体积配箍率对偏压性能的影响。在此基础上,对现有规范设计方法适用性进行了验证,提出了考虑 635 MPa 级高强钢筋与混凝土匹配性以及高强箍筋对混凝土约束效应的改进承载力计算方法,为建立高强钢筋混凝土计算理论提供试验依据,并促进 635MPa 高强钢筋在工程领域的推广和使用。

## 1 试验概况

### 1.1 试件设计

本文共设计 13 根缩尺比例为 1:2 的偏心受压短柱,研究偏心距、混凝土强度、箍筋强度以及体积配箍率 4 个变量对试件偏心受压性能的影响,各类参数详见表 1 所列,试件几何尺寸及配筋示意图如图 1 所示。

表 1 试件参数

试件 编号	偏心距/ mm	混凝土轴心 抗压强度/MPa	箍筋		
			牌号	间距/mm	体积配箍率/%
A01	0	49.30	HRB635	100	0.559
SE01	40	33.57	HRB635	100	0.559
LE11	80	49.30	HRB635	100	0.559
LE12	120	49.30	HRB635	100	0.559
LE13	160	49.30	HRB635	100	0.559
SE21	40	49.30	HRB635	100	0.559
SE22	40	23.20	HRB635	100	0.559
SE23	40	27.45	HRB635	100	0.559
SE24	40	33.57	HRB635	100	0.559
SE25	40	39.03	HRB635	100	0.559
SE31	40	57.31	HRB635	50	1.118
SE32	40	49.30	HRB635	150	0.373
SE41	40	49.30	HRB400	100	0.559

注:A 表示轴心受压;SE 表示小偏心受压;LE 表示大偏心受压。

试件总高 1 250 mm,跨中 600 mm 为偏心受压主试验段,其截面尺寸为 180 mm×240 mm,混凝土保护层厚度 25 mm,对称配筋,纵筋为公称直径 10 mm 的 HRB635 高强钢筋,箍筋公称直径 8 mm;试件两端各 325 mm 牛腿加固段,以便偏心加载,其顶端截面尺寸为 180 mm×390 mm。牛腿部分设箍筋加密区间距为 50 mm,其余非加密区箍筋间距为 100 mm。

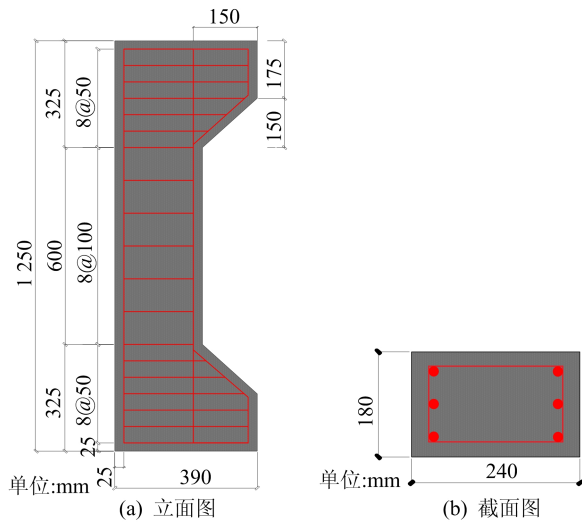


图 1 试件示意图

### 1.2 材料性能

为获取 635 MPa 高强钢筋的详细力学性能,按照《金属材料拉伸试验 第 1 部分:室温试验方法》(GB/T 228.1—2021)<sup>[7]</sup>规定对试验所用钢筋取样并进行了拉伸试验。测得的钢筋屈服强度、弹性模量见表 2 所列。

表 2 钢筋材料性能参数

用途	钢筋牌号	直径/mm	屈服强度/MPa	弹性模量/GPa
箍筋	HRB635	8	648	$2.0 \times 10^2$
箍筋	HRB400	8	469	$2.0 \times 10^2$
纵筋	HRB635	10	651	$2.0 \times 10^2$

本试验共设计 6 个强度等级的混凝土:C30、C40、C50、C60、C80 及 C100。每种强度混凝土预留 6 个 100 mm×100 mm×100 mm 的立方体试块,按照《混凝土物理力学性能试验方法标准》(GB/T 50081—2019)<sup>[8]</sup>所规定的方法进行试验,得到试块的抗压强度后经过计算得出混凝土轴心抗压强度,具体公式为:

$$f_{cm}^{100} = 0.88\alpha_{c1}\alpha_{c2}f_{cu,m}^{100} \quad (1)$$

$$f_{cm}^{150} = 0.95f_{cm}^{100} \quad (2)$$

其中: $f_{cu,m}$ 为立方体抗压强度实测值; $f_{cm}$ 为混凝土轴心抗压强度实测值; $\alpha_{c1}$ 为混凝土棱柱体抗压强度与立方体抗压强度的比值; $\alpha_{c2}$ 为脆性折减系数;0.88 为考虑实际构件与试件混凝土强度之间的差异而采取的折减系数;0.95 为折算系数。

混凝土具体材料性能参数见表 3 所列。

表 3 混凝土材料性能参数

混凝土强度等级	$f_{cu,m}^{100}$ /MPa	$f_{cm}^{150}$ /MPa	弹性模量/MPa
C30	36.52	23.20	$3.03 \times 10^4$
C40	43.21	27.45	$3.31 \times 10^4$
C50	54.61	33.57	$3.48 \times 10^4$
C60	64.02	39.03	$3.65 \times 10^4$
C80	82.67	49.30	$3.82 \times 10^4$
C100	96.09	57.31	$3.96 \times 10^4$

### 1.3 加载制度和测量方案

采用 YES-500 压力机进行加载,采取力-位移混合加载制度,包括预加载和正式加载 2 个阶段。试验前,根据《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2010)<sup>[9]</sup>得出试件峰值荷载计算值  $N_1$ ,确定加载级数以及加载速率(2.4 kN/s)。

试验前进行预加载,使刀铰端板与试件之间充分接触,使用采集仪采集数据,并且观察数据是否合理。在加载前期,荷载增量为  $0.10N_1$  并持荷 60 s;当荷载增加到  $0.50N_1$  后,荷载增量为  $0.05N_1$  并持荷 120 s,以保证试件充分变形并进行试验记录;当荷载增加到  $0.85N_1$  后,改为位移加载,每级位移加载 1~3 mm。当荷载下降至峰值荷载的 80% 或破坏现象已非常明显时,停止加载。

试验装置以及测点位置如图 2 所示。

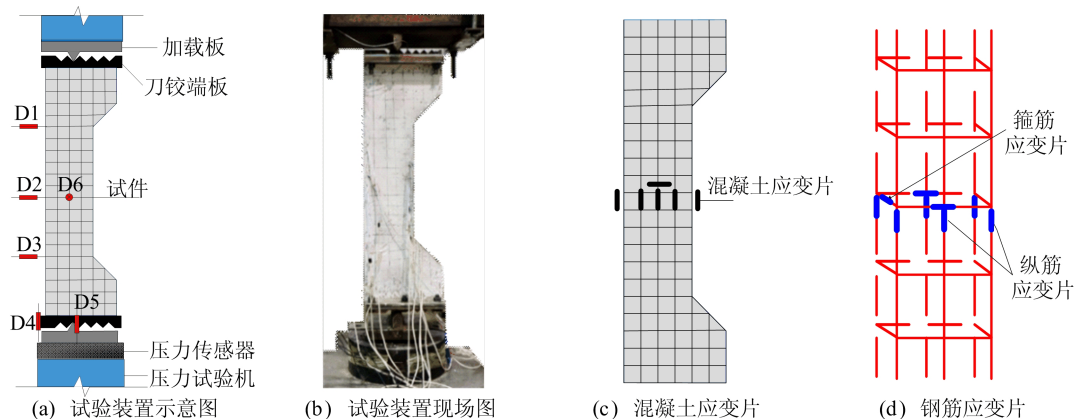


图 2 试验装置及应变片布置图

## 2 试验现象与分析

试件破坏模式与普通钢筋混凝土柱基本相同。其中试件 SE01、SE02、SE21、SE22、SE23、SE24、SE25、SE31、SE32 为小偏压破坏,试件 LE11、LE12、LE13 为大偏压破坏。以试件 SE01(小偏压)、LE12(大偏压)为例分析偏压试件的破坏过程,如图 3 所示。

对于试件 SE01,加载初期,钢筋和混凝土应变与荷载近似呈线性关系,混凝土与钢筋协同工作,试件表面无明显变化;当加载至 0.3 倍峰值荷载  $N_u$  左右时,受拉区中部开始出现数条微小裂缝;加载至 0.5 $N_u$  左右时,构件中部新增数条水平裂缝,并逐渐向着两端延伸,试件中部出现了水平贯穿裂缝;加载至峰值荷载的 0.8 $N_u$  时,受压侧混凝土开始出现竖直裂缝,破坏时,受压区中部混凝土达到极限抗压强度而压酥鼓起,混凝土保护层脱落,受压竖向裂缝变长变宽,形成三角形破坏区,同时受压钢筋屈服。试件破坏突然且离轴向力较远一侧的钢筋(简称远侧钢筋)尚未屈服,呈现出典型的脆性破坏特征。

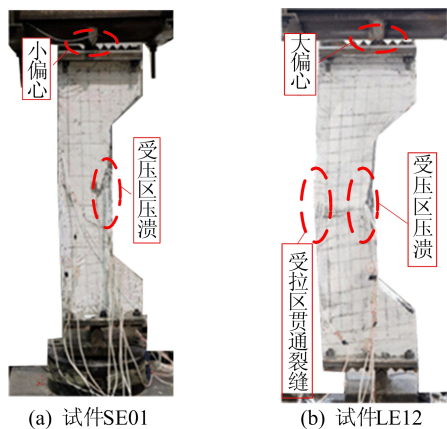


图 3 试件破坏现象

对于试件 LE12,加载初期,试件处于弹性阶段,与小偏压试件相一致;当加载至 0.2 $N_u$  左右时,受拉侧出现细小水平裂缝,随着荷载的增加,试件表面的裂缝数量逐渐增加并且原有的裂缝宽度逐渐扩大,形成数条水平主裂缝;加载至 0.5 $N_u$  左右时,水平裂缝继续发展,并向受压区方向延伸,柱中的侧向挠度快速增加;加载至 0.8 $N_u$  左右时,受压侧混凝土出现纵向裂缝,受拉侧横向裂缝基本贯通,远侧钢筋首先达到屈服强度,中和轴上移,破坏时,受压区混凝土达到极限压应变从而导致试件破坏,此时侧向挠度较大,呈现出典型的

延性破坏特征。

## 3 试验结果

### 3.1 柱高-侧向挠度曲线

选取 2 个构件绘制从开始加载到峰值荷载时的侧向挠度曲线如图 4 所示。试件侧向挠度曲线基本关于柱中截面对称,柱中截面挠度最大,极限荷载时试件的跨中挠度与偏心距正相关,荷载越接近峰值荷载时,构件的侧向挠度曲线与正弦曲线拟合结果越好。

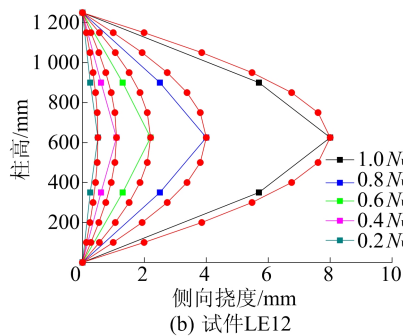
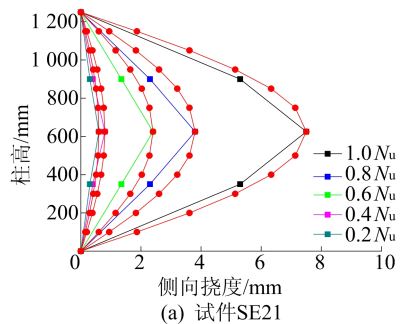


图 4 柱高-侧向挠度曲线

### 3.2 荷载-侧向挠度曲线

根据试件受拉侧跨中位移计测得试验数据,相关荷载-侧向挠度曲线如图 5 所示。

由图 5a 可知,加载初期,偏心距对试件侧向挠度增长速率影响较大,在相同荷载下,偏心距越大,试件侧向挠度越大。偏心距对试件峰值荷载的影响显著,偏心距增大,试件峰值荷载会明显减少,当偏心距由 40 mm 增长至 160 mm 时,LE11、LE12、LE13 的峰值荷载相比对照组试件 SE01 分别下降 40.51%、60.97%、76.07%,且其侧向挠度有所增大。试件荷载下降阶段,偏心距大的试件下降段曲线平缓,表明其延性相对较好。

由图 5b 可知,混凝土强度越高试件的极限承载力越强,当混凝土强度由 C30 提高至 C100 时,构件的承载能力分别提高了 7.55%、11.73%、28.47%、37.52%、56.92%。加载初期,在承受相

同竖向荷载时,配置高强度混凝土构件中部侧向挠度较小,主要原因在于高强度混凝土具有更高的弹性模量。由曲线下降段可看出,混凝土强度越高的试件脆性越大,与混凝土强度越高脆性越大的基本规律相符。

由图 5c 可知,箍筋强度的提升对加载初期的荷载-侧向挠度曲线基本没有影响,此时侧向挠度

与荷载的关系近似呈线性增长。箍筋强度的提高对试件的极限承载力影响不大,但能明显改善试件的延性。分析 SE01 和 SE31 曲线可知,体积配箍率由 0.559% 提升至 1.118% 时,试件的极限承载力有所提升,并对试件的延性提升效果显著,分析 SE01 和 SE32 曲线可知,在体积配箍率降为 0.373% 试件极限承载能力变化不大。

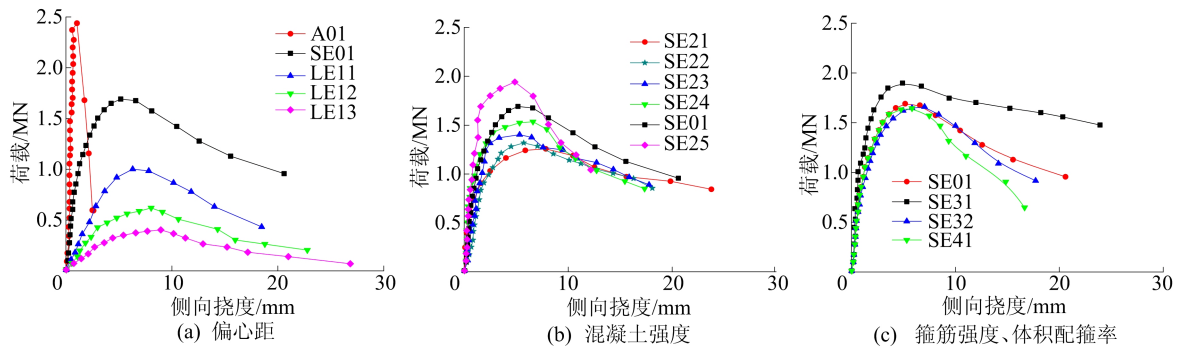


图 5 荷载-侧向挠度曲线

## 4 应变规律

### 4.1 荷载-混凝土应变曲线

对放置在试件中部受压区边缘的混凝土应变数据进行分析,所得相关荷载-混凝土应变曲线如图 6 所示。

由图 6a 可知,加载初期,混凝土应变与荷载

呈线性关系,加载到约 70% 峰值荷载时,混凝土出现明显塑性应变,混凝土应变增长速度变快,直至构件发生破坏。在承受相同荷载时,大偏压构件的混凝土应变远大于小偏压构件,表现出良好的延性。大偏压构件的峰值应变略大于小偏压构件,但相差不大,原因在于偏压构件最终破坏时都是受压区混凝土被压碎。

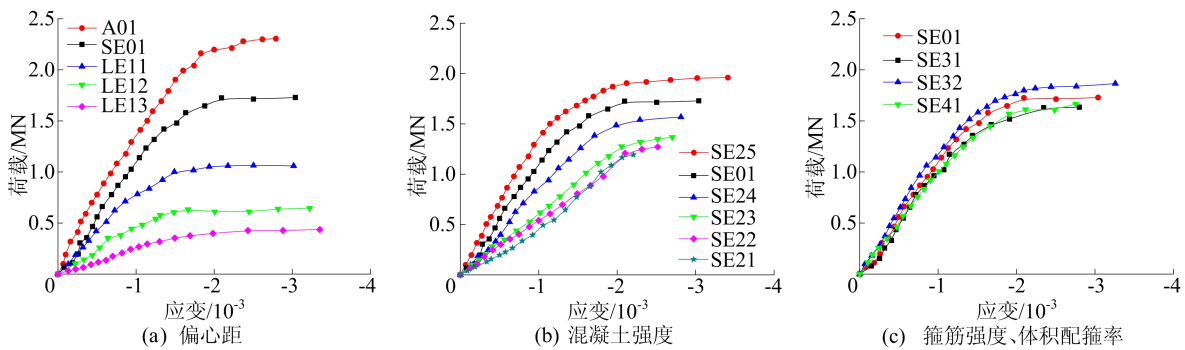


图 6 荷载-混凝土应变曲线

由图 6b 可知,构件受压区中部混凝土的峰值应变相差明显且随着混凝土强度增加而增加。加载初期在相同荷载下,混凝土强度较高试件对应的混凝土压应变越小,说明混凝土强度的提高可以提升试件刚度。

由图 6c 可知,SE01、SE41 这 2 条曲线发展趋势相同,在峰值荷载之前,配置高强箍筋对混凝土的应变影响较小。对比 SE01、SE31 和 SE32 可知,加载初期,体积配箍率的改变对曲线影响不

大,但体积配箍率的提高可以在一定程度上提高受压区混凝土的峰值应变以及试件的承载能力。主要是由于偏心受压柱截面混凝土为不均受压,箍筋对核心区混凝土的约束作用在加载初期较小,荷载-混凝土应变曲线在加载前期发展趋势相同,随着荷载的增大,箍筋开始显著发挥作用,高强箍筋对偏压柱中核心混凝土形成有效的约束作用,从而提高了受压区混凝土的峰值应变以及试件的承载能力。

#### 4.2 荷载-纵筋应变曲线

由于本试验试件采用对称配筋的方式,取受拉、受压两侧各 1 根纵筋应变进行分析,得到荷载-纵筋应变曲线如图 7 所示。

由图 7a 可知,偏心距越大,峰值荷载越小,且曲线下降段愈加平缓。在相同荷载作用下,偏心距越大两侧纵筋应变越大。大偏心受压破坏时,远侧钢筋的实测应变值都超过了屈服应变  $\epsilon_s = 3.3 \times 10^{-3}$  达到屈服,受压纵筋的实测应变值也接近屈服应变  $\epsilon_s = -3.3 \times 10^{-3}$ ,说明 635 MPa 级高强钢筋在大偏心受压柱中可充分发挥其强度;小偏心受压破坏时,与普通钢筋混凝土偏压柱破坏时情况相同,受压区钢筋应变均超过  $\epsilon_s = -0.0033$  达到屈服强度,而远侧钢筋的应变较小,尚未屈服。

由图 7b 可知,小偏压试件受力全过程中受拉侧纵筋的应变较小,远未达到屈服强度,说明混凝土强度变化对受拉侧纵筋应变影响较小。对于受压侧纵筋,随着混凝土强度的提高,纵筋的峰值应变也随之增加。在相同荷载下,试件混凝土强度越高,受压侧纵筋应变越小,并且荷载下降段越平缓,说明混凝土强度的提高可以提升试件刚度,但会降低试件延性性能,这与普通钢筋混凝土偏压柱破坏规律一致。

在峰值荷载时,配置 C50 及以下混凝土强度构件受压纵筋应变尚未达到屈服应变,试件破坏

的原因是受压区混凝土被压碎引起的,而采用 C60 及以上混凝土强度试件受压纵筋均能达到极限压应变而受压屈服,同时混凝土的极限压应变和试件的极限承载能力有大幅提升,说明 635 MPa 级高强钢筋与 C60 及以上等级的混凝土匹配性较好。

由图 7c 可知,对比 SE01、SE41 曲线,箍筋强度对小偏压试件受拉区纵筋性能影响较小。对于受压区纵筋,加载初期箍筋的强度对曲线无影响,构件接近破坏时,随着箍筋强度的提高,试件荷载曲线下降段越平缓,表现出良好的延性,在试件接近破坏时,箍筋开始起到明显作用,特别是高强箍筋在偏压柱核心混凝土破坏前形成了有效的约束作用。这种约束作用可以充分发挥高强钢筋的富余强度,使得钢筋和混凝土能够协同受力,提高了试件的延性性能。

分析 SE01、SE31 和 SE32 曲线可知,体积配箍率对受拉区纵筋性能影响较小。对于受压区纵筋,提高体积配箍率会使受压区纵筋极限应变显著增加,当体积配箍率由 0.373% 提升至 1.118% 时,受压纵筋极限压应变分别增大 31.09% 和 47.86%。当试件接近破坏时,箍筋强度越高,试件的曲线越平缓,且受压钢筋的极限压应变会增大,表现出良好的延性,原因在于增大体积配箍率能够有效约束纵向钢筋受压压曲。

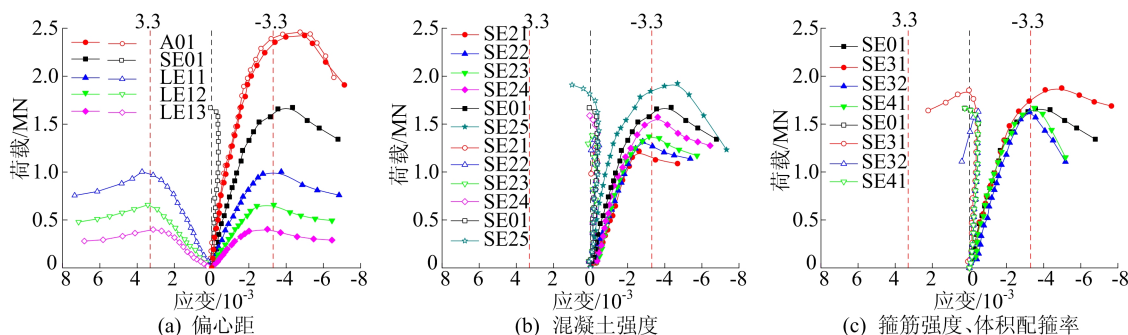


图 7 荷载-纵筋应变曲线

#### 4.3 荷载-箍筋应变曲线

取试件中截面沿偏心距方向箍筋应变进行分析,得到荷载-箍筋应变曲线如图 8 所示。

从图 8 可以看出,箍筋在峰值荷载时均未屈服,箍筋屈服发生在荷载下降段。随着偏心距增大或者混凝土强度的提高,试件箍筋的峰值应变降低,因为箍筋对核心区混凝土的约束属于被动约束,箍筋的变形与核心混凝土的变形基本保持一致,偏心距增大导致受压区高度减小,同时混凝土

强度的提高导致混凝土峰值压应变减小,所以箍筋应变也随之减小。

箍筋强度及体积配箍率对曲线的影响主要体现在塑性阶段和下降段,提高箍筋强度及体积配箍率对构件的峰值应变基本没有影响,由于峰值荷载时箍筋尚未屈服,但是提高箍筋强度及体积配箍率会提升箍筋的极限应变且使曲线下降段趋向平缓,充分发挥箍筋的剩余强度,改善试件延性。

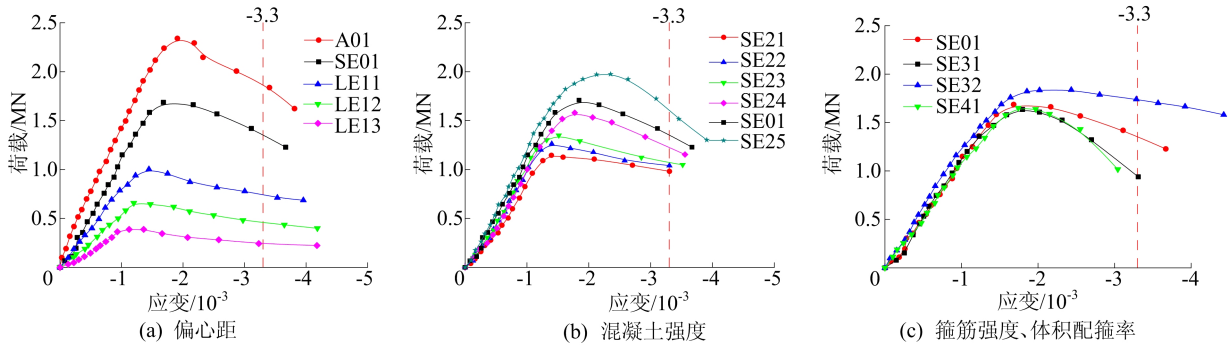


图 8 荷载-箍筋应变曲线

4.4 截面应变分布

试件 SE01(小偏压)与 LE12(大偏压)在各级荷载作用下,柱中截面沿截面高度测得的混凝土应变分布如图 9 所示。由图 9 可知,柱中截面在加载过程中基本保持为平面,平均应变呈线性分布,基本符合平截面假定。

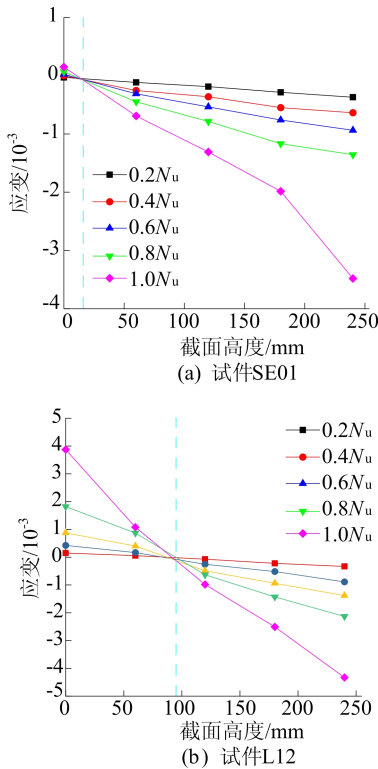


图 9 截面应变分布

载力。由表 4 可知,  $N_u/N_1$  在 1.16~1.44 之间, 平均值为 1.24, 标准差为 0.089, 表明采用现行规范对 635 MPa 级高强钢筋约束高强钢筋混凝土偏压短柱的极限承载力预测值偏于保守。

表 4 试验结果与计算结果比较

试件编号	$N_u$ /kN	$N_1$ /kN	$N_u/N_1$	$N_2$ /kN	$N_u/N_2$
SE01	1 686.22	1 440.33	1.17	1 784.72	0.94
LE11	1 003.15	866.31	1.16	1 109.48	0.90
LE12	658.18	532.61	1.24	687.45	0.96
LE13	403.52	343.23	1.18	438.73	0.92
SE21	1 226.13	849.25	1.44	1 136.49	1.08
SE22	1 318.73	961.64	1.37	1 253.12	1.05
SE23	1 369.99	1 119.57	1.22	1 426.36	0.96
SE24	1 575.20	1 238.30	1.27	1 557.20	1.01
SE25	1 924.10	1 625.46	1.18	2 002.12	0.96
SE31	1 884.60	1 440.33	1.31	2 090.53	0.90
SE32	1 666.74	1 440.33	1.16	1 682.78	0.99
SE41	1 680.15	1 440.33	1.17	1 700.24	0.99

引入体积配箍率特征值, 量化高强箍筋约束效应对核心区受压混凝土压应变的影响, 发现两者近似呈线性关系<sup>[10-11]</sup>; 由 4.2 节知, 635 MPa 级高强钢筋与不同强度等级混凝土存在协调变形问题, 即配置 C50 及以下强度混凝土试件破坏时, 受压纵筋尚未屈服, 而采用 C60 及以上强度混凝土, 受压纵筋均可屈服, 因此提出强度匹配系数, 拟合得到 635 MPa 级高强箍筋约束高强钢筋混凝土短柱的偏压承载力计算公式如下。

对于大偏心受压构件有:

$$N \leq \varphi_p \alpha_1 f_c b x + k f_y' A_s' - f_y A_s \quad (3)$$

$$N e \leq \varphi_p \alpha_1 f_c b x \left( h_0 - \frac{x}{2} \right) + k f_y' A_s' (h_0 - a_s') \quad (4)$$

$$e = e_i + \frac{h}{2} - a_s \quad (5)$$

$$e_i = e_0 + e_a \quad (6)$$

对于小偏心受压构件有:

$$N \leq \varphi_p \alpha_1 f_c b x + k f_y' A_s' - \sigma_s A_s \quad (7)$$

5 偏压承载力计算方法

因为 635 MPa 级高强箍筋约束高强钢筋混凝土偏压短柱破坏模式与普通钢筋混凝土柱基本相同, 所以可按照《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2010)<sup>[9]</sup> 计算其偏心受压承载力, 结果见表 4 所列。表 4 中:  $N_u$  为承载力试验值;  $N_1$  为采用材料强度实测值按现行规范计算得到的承

$$Ne \leq \varphi_p \alpha_1 f_c b x \left( h_0 - \frac{x}{2} \right) + k f_y' A_s' (h_0 - a_s') \quad (8)$$

$$\varphi_p = 1 + 3.35\gamma \quad (9)$$

$$\gamma = \rho_v f_{yv} / f_c \quad (10)$$

$$k = \begin{cases} 2.13 \left( \frac{\epsilon_s}{\epsilon_c} \right)^2 - 9.34 \left( \frac{\epsilon_s}{\epsilon_c} \right) + 10.97, & \frac{\epsilon_s}{\epsilon_c} \geq 1.83; \\ 1, & \frac{\epsilon_s}{\epsilon_c} < 1.83 \end{cases} \quad (11)$$

其中:  $\varphi_p$  为箍筋套箍系数;  $\gamma$  为配箍率特征值;  $k$  为强度匹配系数;  $\epsilon_s$  为高强纵向钢筋的屈服应变;  $\epsilon_c$  为与单轴抗压强度相应的混凝土峰值压应变, 取值参考《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2010)<sup>[9]</sup>;  $\rho_v$  为箍筋体积配箍率;  $f_{yv}$  为箍筋的屈服强度; 1.83 为 635 MPa 高强钢筋对应的  $\epsilon_s$  与 C60 混凝土对应的  $\epsilon_c$  的比值。

试验结果以及修正公式计算  $N_2$  结果见表 4 所列, 曲线如图 10 所示。试验结果与计算结果比值在 0.90~1.08 之间, 平均值为 0.97, 标准差为 0.053, 说明本文所建立偏压承载力计算公式准确性较高, 适用于 635 MPa 级高强箍筋约束高强钢筋混凝土短柱的偏压承载力计算。

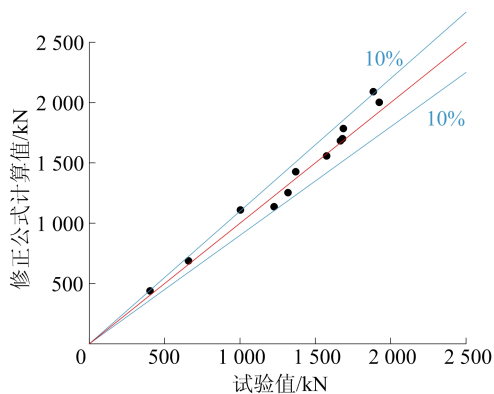


图 10 试验结果与修正公式计算值比较

## 6 结 论

1) 635 MPa 级高强箍筋约束高强钢筋混凝土偏压短柱破坏模式与普通钢筋混凝土柱基本相同。大偏心破坏时远侧钢筋达到屈服, 受压侧混凝土被压溃, 呈现典型的延性破坏特征; 在小偏心破坏时, 受压区混凝土被压碎, 而远侧钢筋可能受拉也可能受压, 尚未屈服, 呈现出典型的脆性破坏特征。随着偏心距的增大, 构件的极限承载力会随之降低。

2) 达到峰值荷载时, 采用 C60 及更高强度等

级混凝土试件的 635 MPa 级高强纵筋才能受压屈服, 同时试件的极限承载能力有大幅提升, 说明 635 MPa 级高强钢筋与 C60 及以上等级的混凝土匹配性较好。提高混凝土强度等级, 构件的极限承载力会随之提高。

3) 增大箍筋强度对构件峰值承载力影响不大, 但提高体积配箍率能明显提高试件的峰值承载力。箍筋在峰值荷载时均未达到屈服应变, 在荷载下降段都会屈服, 对核心区混凝土具有良好的约束作用, 提升了受压区混凝土的峰值应变以及试件的延性。

4) 《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2010) 计算偏压构件极限承载力结果偏于保守, 主要是现行规范未考虑箍筋对核心区混凝土约束效应。结合高强纵筋与混凝土强度匹配性以及高强箍筋对核心区混凝土约束效应, 提出 635 MPa 级高强箍筋约束高强钢筋混凝土短柱的偏压承载力修正公式, 经验证计算结果与试验结果相吻合。

## [参 考 文 献]

- [1] RASA R A. 600MPa 级高强钢筋连接锚固性能试验及计算方法研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2019.
- [2] 戎贤, 申成成, 张建新. HRB600 钢筋混凝土短柱轴压性能试验研究[J]. 混凝土, 2020(2): 28-32.
- [3] 张建伟, 夏冬瑞, 乔崎云, 等. HRB600 级钢筋高强混凝土柱的轴心受压性能[J]. 工业建筑, 2017, 47(11): 77-83.
- [4] 胡崎. 基于钢筋屈服的高强钢筋混凝土柱偏心受压性能研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2019.
- [5] 申成成. HRB600 钢筋混凝土轴压短柱及偏压柱试验研究[D]. 天津: 河北工业大学, 2018.
- [6] 崔玉博. 635MPa 级高强热轧钢筋约束高强混凝土短柱受压性能与承载力计算方法研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2021.
- [7] 中国钢铁工业协会. 金属材料 拉伸试验 第 1 部分: 室温试验方法: GB/T 228. 1—2021[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010: 1-48.
- [8] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 混凝土物理力学性能试验方法标准: GB/T 50081—2019[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2019: 1-71.
- [9] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 混凝土结构设计规范: GB 50010—2010[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011: 1-166.
- [10] 李明翰, 周威, 刘明建, 等. 复合螺旋箍筋约束混凝土柱偏压性能试验[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2019, 51(12): 113-120.
- [11] 韩超. 高强钢筋约束高强混凝土柱结构性能试验研究[D]. 天津: 天津大学, 2014.

(责任编辑 吴 亮)