

DOI: 10.7672/sjgs2025160146

# 630MPa 高强钢筋混凝土偏心受压构件 受力性能试验研究\*

常欢欢

(河南省建设集团有限公司,河南 郑州 450000)

[摘要] 为探讨 630MPa 级高强钢筋在混凝土偏心受压构件中的应用,设计并制作了 3 个混凝土柱试件,进行不同偏心距竖向荷载作用下的受力性能试验研究。通过分析构件的破坏模式、钢筋与混凝土的应变、承载力、侧向挠度及裂缝分布,评估了 630MPa 级高强钢筋在偏心受压条件下的力学性能。结果表明:与普通钢筋混凝土大偏心受压的典型破坏形态类似,630MPa 级高强钢筋混凝土柱均表现为受拉破坏特征;破坏时受拉、受压钢筋均能达到屈服,且受压区混凝土亦能达到 0.003 3 的极限压应变。试件截面变形符合平截面假定,可采用现行规范公式对其承载力进行计算。正常使用极限状态对应的裂缝宽度试验值大于规范公式计算值,且略高于规范限值要求;建议大偏压、受弯构件的受拉侧宜选择小直径钢筋或适当提高配筋率,以减小其裂缝宽度。

[关键词] 混凝土;钢筋;承载力;试验

[中图分类号] TU528

[文献标识码] A

[文章编号] 2097-0897(2025)16-0146-08

## Experimental Study on Mechanical Behavior of 630MPa High-strength Reinforced Concrete Eccentric Compression Members

CHANG Huanhuan

(Henan Construction Group Co., Ltd., Zhengzhou, Henan 450000, China)

**Abstract:** In order to explore the application of 630MPa high-strength steel bar in concrete eccentric compression members, three concrete column specimens were designed and fabricated, and the mechanical properties of different eccentricities under vertical load were studied. By analyzing the failure mode of the component, the strain, bearing capacity, lateral deflection and crack distribution of the steel bar and concrete, the mechanical properties of the 630MPa high-strength steel bar under eccentric compression were evaluated. The results show that: similar to the typical failure mode of ordinary reinforced concrete under large eccentric compression, the 630MPa high-strength reinforced concrete columns are characterized by tensile failure. When the failure occurs, the tensile and compressive steel bars can reach yield, and the concrete in the compression zone can also reach the ultimate compressive strain of 0.003 3. The section deformation of the specimen conforms to the plane section assumption, and the bearing capacity can be calculated by the current standard formula. The test value of crack width corresponding to the limit state of normal use is greater than the calculated value of the standard formula, and slightly higher than the limit value of the standard. It is suggested that small diameter steel bars should be selected on the tensile side of large eccentric compression and bending members or the reinforcement ratio should be appropriately increased to reduce the crack width.

**Keywords:** concrete; steel bar; bearing capacity; tests

### 0 引言

近年来,我国建筑行业迅速发展,随着大跨度、超高层及各类复杂结构形式的广泛应用,工程项目的结构体系愈加多样化与复杂化。在众多建筑结

\* 河南省住房和城乡建设科技计划项目(K-2323)

[作者简介] 常欢欢,高级工程师,E-mail:395979234@qq.com

[收稿日期] 2025-01-06

构体系中,钢筋混凝土结构仍为主流形式。随着钢筋强度的提升,结构所需的尺寸和体积显著减小,材料使用量也随之降低。因此,为了进一步优化材料使用,减轻结构自重,提升整体经济性,高强钢筋的需求变得尤为迫切<sup>[1-2]</sup>。与此同时,随着我国冶金技术的迅猛发展,多家国内钢铁企业通过采用微合金化、超细晶粒钢及热处理等先进技术和工艺,成功研发出适用于抗震设计的 600MPa 级高强钢筋<sup>[3]</sup>。600MPa 级钢筋是一种具有高强度和优良延性的带肋热轧钢筋,类似强度等级的钢筋在欧美、日本等发达国家已广泛应用,并已纳入相关技术标准<sup>[4-5]</sup>。国内学者在 600MPa 级钢筋应用方面也开展了一系列基础性研究。管俊峰等<sup>[6-7]</sup>通过试验研究了 600MPa 高强钢筋混凝土梁的弯曲性能,并对其裂缝宽度及挠度计算进行了深入分析。孙传智等<sup>[8]</sup>对 18 根 600MPa 高强混凝土梁进行了短期荷载下的受弯性能试验,结果与计算结果相比,试验最大裂缝宽度偏大,而平均裂缝间距偏小;结合试验分析,建议采用考虑裂缝宽度综合调整系数的修正公式。

当钢筋混凝土构件的受压区高度较小时,受压区纵向钢筋的强度贡献有限,这对高强钢筋混凝土构件的受力性能及其在工程设计中的应用带来了诸多制约<sup>[9]</sup>。因此,国内学者针对高强钢筋混凝土偏压柱的受力性能展开了深入研究。李义柱等<sup>[10]</sup>对 5 根配置 600MPa 高强钢筋的混凝土柱进行了低周往复荷载试验,结果表明,钢筋强度的提高显著增强了试件的承载力和能量耗散能力,但同时导致延性和耗能性能下降。张建伟等<sup>[11]</sup>对 9 根 HRB600MPa 级钢筋混凝土柱进行了大偏压试验研究,结果表明,随着混凝土强度、配箍率和箍筋强度的提升,柱的压弯承载力显著增强。戎贤等<sup>[12]</sup>开展了配置 HRB600E 级钢筋的混凝土偏压柱受力性能试验,结果表明,试件的破坏形态与普通钢筋混凝土柱相似,且 HRB600E 级钢筋在柱中的工作性能良好,强度利用率较高。尽管 600MPa 及以上强度等级的高强钢筋尚未纳入 GB/T 50010—2010《混凝土结构设计标准》(2015 年版),但已有相关地方标准<sup>[13-14]</sup>予以规范,并在工程实践中得到广泛应用。

630MPa 级热处理带肋高强钢筋相较于 600MPa 级高强钢筋,强度更高,延性更优。其优势在于能降低配筋密度,减少资源消耗,从而带来显著的环境和经济效益<sup>[9]</sup>。综上所述,为进一步了解 630MPa 级钢筋用于混凝土柱的偏压受力性能,推动此类钢筋的进一步应用,本研究通过对 3 根

630MPa 级钢筋混凝土柱进行偏压性能试验,分析不同偏心距下 630MPa 级钢筋混凝土柱的破坏形态、裂缝分布、承载性能及变形性能,并讨论现行规范对其相关计算方法的适用性。

## 1 试验方案设计

### 1.1 试件设计及制作

本次试验制作了 3 根混凝土偏压柱,偏心受压柱尺寸为 200mm×350mm×2 000mm,混凝土强度等级为 C50,试验用纵筋采用 HRB630 级钢筋(每边 2 $\phi$ 16 共 4 $\phi$ 16),箍筋采用 HRB400 级钢筋,间距 150mm,保护层厚度取 30mm。为便于偏心加载,试件两端设计了牛腿状柱头,并在牛腿区域增加了加密钢筋,箍筋间距为 100mm,以有效防止端部发生局部压溃破坏。偏心试验柱的相关参数如表 1 所示,试件具体尺寸如图 1 所示。

表 1 偏压柱设计参数

Table 1 Design parameters of bias column

编号	配筋率 $\rho$	偏心距/mm	纵筋	箍筋
Z1	0.66%	230	4 $\phi$ 16	$\Phi$ 10@150
Z2	0.66%	250	4 $\phi$ 16	$\Phi$ 10@150
Z3	0.66%	270	4 $\phi$ 16	$\Phi$ 10@150

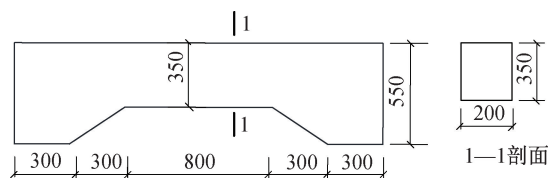


图 1 试件尺寸

Fig. 1 Specimen size

试件采用木模成型,混凝土通过搅拌机搅拌后进行卧式浇筑,采用插入式振捣棒进行振捣。浇筑完成后,试件在养护室中养护 7d,随后移至自然环境下继续养护。为得到钢筋的屈服强度和极限强度,每个直径的钢筋各留 3 根并进行材性试验。为得到混凝土力学性能,浇筑每批试件各留 3 个标准混凝土试块(150mm×150mm×150mm)进行试验,得到混凝土的立方体抗压强度。

### 1.2 试验量测及加载方案

利用钢筋应变片测量主筋应变,为测量纵向钢筋最大应变,绑扎钢筋骨架后在受力主筋的跨中位置贴钢筋应变片,每根钢筋的对应位置各贴 2 个应变片,分别取每根钢筋所对应位置应变片采集数据的平均值作为受拉、受压钢筋应变值。试验过程中用静态电阻应变仪自动记录测量。通过贴在混凝土表面的混凝土应变片来测量混凝土的受力应变,在混凝土柱侧面位置各贴 3 个应变片,柱的另外两

个面的中间部位各贴 1 个应变片,试验过程中同样用静态电阻应变仪自动记录测量。在距离加载远侧构件表面上、下共设 5 个位移计以测量在偏压作用下的混凝土偏压柱侧向变形。试件各测点位置及布置如图 2 所示。加载前,在位移计测点处贴上光滑的玻璃片用来消除位移计与混凝土表面接触的摩擦阻力。位移计与静态电阻应变仪连接,自动测量数据并保存于计算机中。为便于裂缝的观测和描绘,试验前,在构件表面刷一层白浆,并用铅笔画出  $100\text{mm}\times 100\text{mm}$  方格。采用裂缝观测仪和直尺测量加载过程中的裂缝开展情况,并在每一级加载结束后用铅笔在试件上描绘出裂缝的走势及标注荷载值。

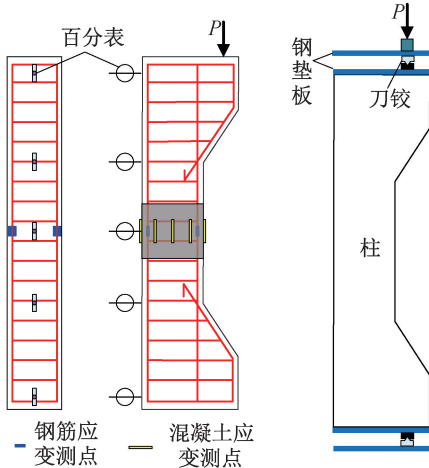


图 2 试验测点布置及加载装置

Fig. 2 Measurement points and loading devices

在试验中,通过荷载传感器全桥连接应变仪测量荷载,由百分表半桥连接应变仪采集位移。由应变片 1/4 桥连接应变仪测量钢筋和混凝土的应变。

将混凝土偏压柱进行几何对中放置,并预估偏压柱开裂荷载及破坏荷载。具体加载方案如下。

- 1) 预加载至开裂荷载的 10%。
- 2) 在加载至偏压柱开裂荷载的 80% 前,每级荷载按预估开裂荷载的 20% 逐级加载。
- 3) 加载至开裂荷载的 80% 后,每级按开裂荷载的 10% 加载,直至出现裂缝。
- 4) 开裂后在荷载小于破坏荷载的 80% 时,按破坏荷载的 20% 逐级加载。
- 5) 荷载达到破坏荷载的 80% 后,按破坏荷载的 10% 加载,直至偏压柱破坏。
- 6) 每级荷载加载后持载 3~5min,待数据稳定后进行采集,同时观察并记录裂缝的产生与发展过程。

### 1.3 材性试验

试验构件采用的钢筋及混凝土需进行材料性能试验。主筋采用  $\phi 16$  630MPa 级钢筋,并预留了 3 根 500mm 长的试样进行拉伸试验,试验结果如表 2 所示。浇筑试件的同时,每批次浇筑的混凝土均预留一组试块,每组不少于 3 块,所有试块在相同养护条件下进行养护。对试件进行试验前,首先对与该试件对应的预留混凝土试块进行抗压试验,测得每组试块的抗压强度如表 3 所示。

表 2 钢筋材料性能

Table 2 Properties of steel bar

编号	实测值/MPa		平均值/MPa	
	屈服值	极限值	屈服值	极限值
1	668	849		
2	699	870	677	852
3	663	838		

表 3 混凝土抗压强度

Table 3 Compressive strength of concrete

编号	实测值/MPa	平均值/MPa	抗压强度标准值/MPa
1	64.5		
2	66.7	66.7	
3	68.9		
1	68.3		
2	69.3	69.5	64.5
3	71.0		
1	68.3		
2	69.7	71.1	
3	75.2		

## 2 试验结果及分析

### 2.1 试验现象

试验加载初期,构件无明显现象。试件  $Z_1, Z_2, Z_3$  分别加载至 45, 50, 55kN 时,各试件出现第 1 条裂缝,宽约 0.02mm。继续增加荷载,新裂缝逐渐出现,并不断发展。其中 1~8 区裂缝向上逐渐发展,1~8 区外牛腿处裂缝斜向发展,如图 3 所示。当荷载加载至约计算极限荷载的 80% 时,新裂缝基本不再出现,裂缝长度发展缓慢,宽度随荷载的增加不断增大。随着荷载的持续增加,试件侧向位移逐渐增大,受压区开始出现裂缝。荷载保持不变时,受压区混凝土逐渐剥落并压碎,最终试件达到极限荷载。各试件的破坏情况如图 4 所示。

### 2.2 荷载-变形曲线

通过试验获得各试件在不同荷载级别下的位移数据,取试件跨中位移减去上下两测点位移的平均值,绘制荷载-挠度曲线,如图 5 所示。

由图 5 可知,整个曲线呈现明显的 2 个拐点、3 个阶段工作特性。第 1 阶段加载至构件开裂,构件

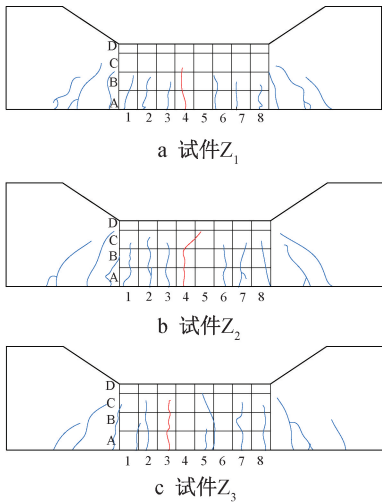


图3 各试件裂缝分布

Fig. 3 Crack distribution of the specimen

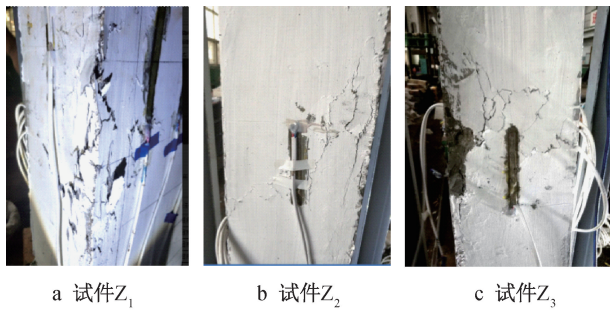


图4 各试件的破坏形态

Fig. 4 Failure mode of the specimen

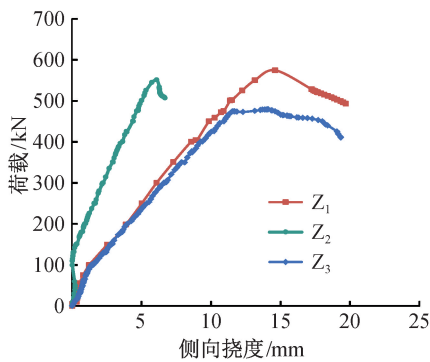
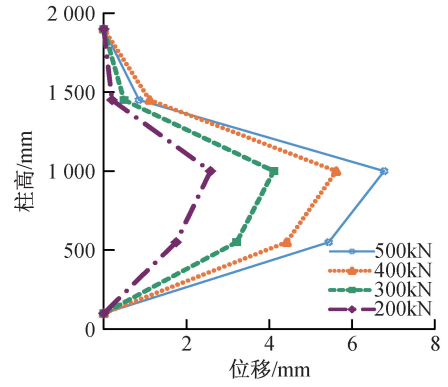


图5 荷载-侧向挠度曲线

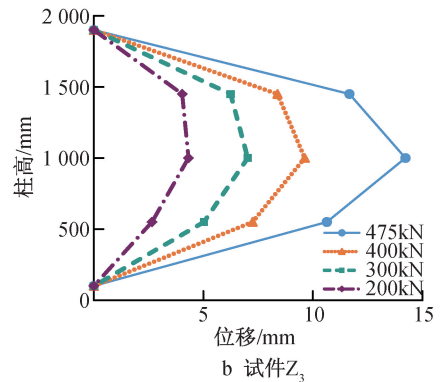
Fig. 5 Load-lateral deflection curves

处于全截面工作状态,荷载-侧向挠度曲线呈线性且斜率较大。第2阶段构件出现第1条裂缝至达到构件极限承载力,此时由于裂缝的出现,截面刚度削弱,构件变形随荷载的增大而增大,且荷载-侧向挠度曲线斜率减小;随着裂缝的增多,构件变形越来越大,该段曲线呈现出明显的非线性。第3阶段构件达到极限荷载至构件破坏,钢筋屈服后构件很快达到最大荷载值。之后荷载开始下降而挠度持续

增大,荷载-侧向挠度曲线有一个明显的转折点,挠度进一步增长后试件破坏。构件 $Z_2$ 整体变形较小,这是由于在试验过程中用于安全措施的钢丝绳未及时移除(图6中柱高1500mm处存在未移除安全绳,与其余构件侧向变形产生差异),导致构件受侧向约束,从而产生了一定程度的试验误差。



a 试件 $Z_2$



b 试件 $Z_3$

图6 试件侧向挠曲变形曲线

Fig. 6 Lateral deflection curve of the specimen

### 2.3 荷载-钢筋应变

根据各级荷载下钢筋各应变测点测得的应变值,绘制荷载-钢筋应变曲线如图7所示。

由图7可知,试件开裂前,两侧钢筋应变均呈现线性增长。开裂后,受拉侧钢筋应变增快,而受压侧钢筋应变基本保持线性。随着荷载的增加,构件逐渐达到极限承载力,受拉和受压侧钢筋应变均未达到屈服应变;之后由于构件挠曲变形过大而承载力开始下降,试件发生破坏时,受压和受拉钢筋均达到了屈服强度。

### 2.4 荷载-混凝土应变

由各级荷载值与混凝土测点所测得的数据,绘制各试件的荷载-混凝土应变曲线,如图8所示。由图8可知,随着荷载的增加,受压区混凝土应变不断增大,整体呈线性。当荷载增至极限荷载时,混凝土的最大压应变达到了极限压应变值。之后,荷载下降,曲线出现转折,混凝土应变继续增大。其中,

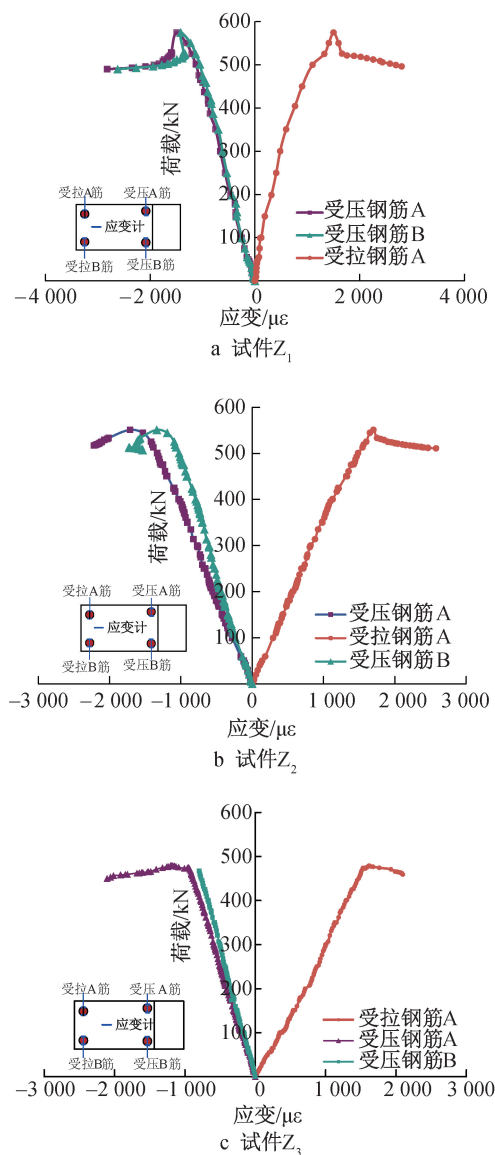


图 7 荷载-钢筋应变曲线

Fig. 7 Load-reinforcement strain curves

$Z_1$  构件截面中部(测点 10)混凝土应变曲线从加载开始一直处于受压状态,这表明偏压柱在较小偏心距作用下,中和轴基本在截面中心靠下部位。随着偏心距的增大,截面中部混凝土应变由受压变为受拉。

### 3 偏压柱受力性能分析

#### 3.1 承载性能分析

根据试验荷载与构件中部沿截面高度方向应变片测得的应变值,绘制出不同荷载下柱截面处的荷载-应变曲线,如图 9 所示。由图 9 可知,在各级荷载下,沿截面高度的各测点应变在加载前后基本保持线性变化,表明受力前后截面仍保持平截面假定。上述结果表明,钢筋混凝土构件正截面设计中的平截面假定,对于 630MPa 级钢筋混凝土构件正

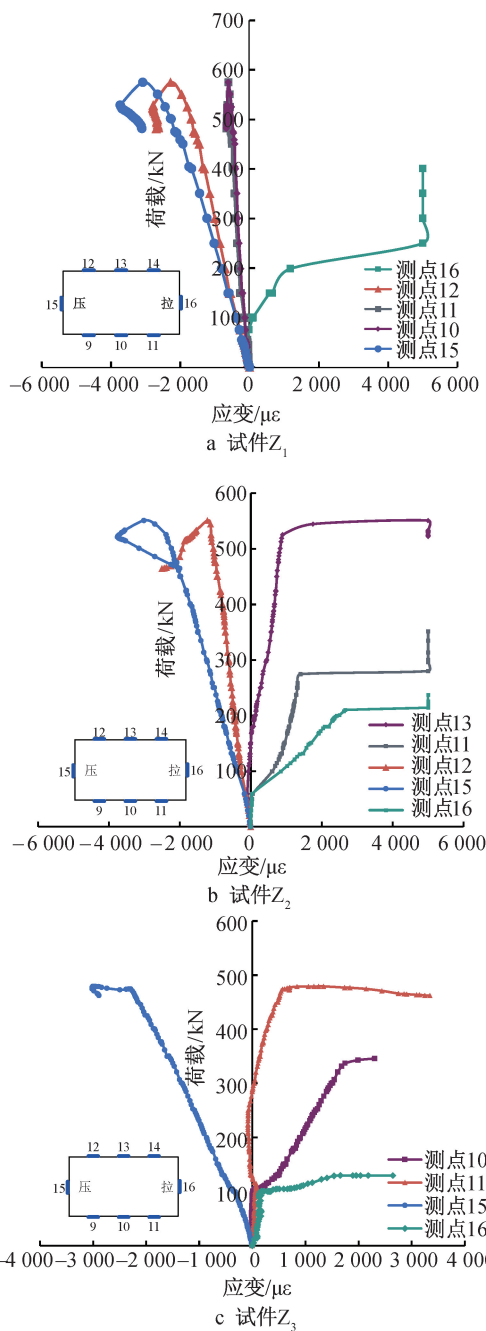


图 8 荷载-混凝土应变曲线

Fig. 8 Load-concrete strain curves

截面设计依然适用。

为验证《混凝土结构设计标准》(2015 年版)中关于 630MPa 级钢筋混凝土构件承载力计算的适用性,采用规范公式对各试验构件的承载力进行计算,并与实测承载力值进行对比分析。

大偏压构件:

$$N \leq \alpha_1 f_c b x + f_y' A_s' - f_y A_s \quad (1)$$

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

$$e = e_i + \frac{h}{2} - a_s \quad (3)$$

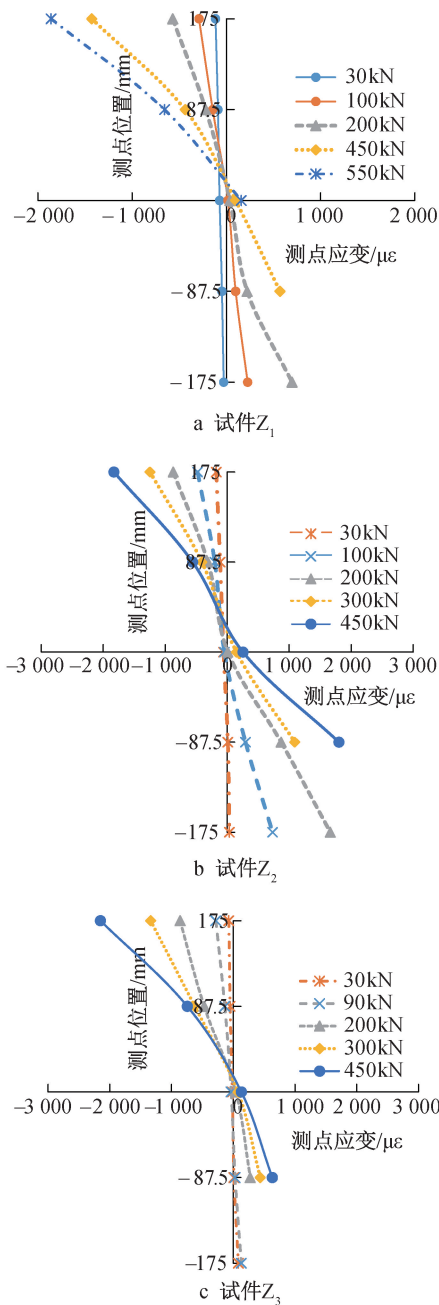


图9 沿截面高度构件的荷载-应变曲线

Fig. 9 Load-strain curves of the component along the cross-sectional height

式中: $b, h_0$  分别为截面宽度和截面有效高度; $f_c, f_y, f_y'$  分别为混凝土轴心抗压强度及钢筋抗拉、抗压强度设计值; $A_s, A_s'$  分别为受拉区、受压区纵向钢筋截面面积; $\alpha_1$  为系数,当混凝土强度等级不超过 C50 时,  $\alpha_1$  取值为 1.0,当混凝土强度等级为 C80 时,  $\alpha_1$  取为 0.94,其间的取值按线性内插法确定; $a_s$  为纵向受拉钢筋合力点至截面受拉边缘的距离; $a_s'$  为纵向受压钢筋合力点至截面受压边缘的距离; $e$  为轴向压力作用点至纵向受拉钢筋合力点的距离; $e_i$  为初始偏心距; $h$  为截面高度。

对于试验构件,仍需满足以下关于受压区高度的要求:

$$x \leq \xi_b h_0 \quad (4)$$

$$\xi_b = \frac{\beta_1}{1 + \frac{f_y}{\varepsilon_{cu} E_s}} \quad (5)$$

式中: $\xi_b$  为界限受压区高度; $\varepsilon_{cu}$  为非均匀受压时的混凝土极限压应变; $E_s$  为钢筋弹性模量; $\beta_1$  为系数,矩形应力图中的受压区高度  $x$ ,可取为按截面应变保持平面的假定所确定的中和轴高度乘以系数  $\beta_1$ ,当混凝土强度等级不超过 C50 时,  $\beta_1$  取 0.8;当混凝土强度等级为 C80 时,  $\beta_1$  取 0.74,其间的取值按线性插值法确定。

其中,试件尺寸按实测计算,钢筋屈服强度和混凝土抗压强度标准值如表 4 所示。按规范公式计算极限荷载  $N_1$ ,考虑钢筋屈服强度值分项系数  $\gamma_s = 1.2$  和混凝土强度值分项系数  $\gamma_c = 1.4$ ,求出钢筋抗拉强度设计值  $f_y$  和混凝土抗压强度设计值  $f_c$ ,按规范公式计算极限承载力  $N_2$ ,实测极限荷载  $N_0$ 。

表 4 各试件极限承载力计算结果及试验结果

Table 4 Calculated and test results of the ultimate bearing capacity of each specimen

试件编号	$N_0/\text{kN}$	$N_1/\text{kN}$	$N_2/\text{kN}$	$N_0/N_1$	$N_0/N_2$
Z <sub>1</sub>	575	693	557	0.83	1.03
Z <sub>2</sub>	525	607	492	0.86	1.07
Z <sub>3</sub>	475	536	438	0.89	1.08

由表 4 可知,  $N_0/N_1$  的平均值为 0.86,变异系数为 0.033 3。这表明,计算结果较试验值偏小,存在一定的不安全倾向。分析原因为:检查发现压力机及构件对中时存在无法避免的偏心问题,导致柱发生了略微的双向偏心受压,由试件破坏状态(见图 4)可知,试件受压破坏均发生于受压侧的角部。因此,造成按单向偏心受压承载力计算略有不足。 $N_0/N_2$  平均值为 1.06,变异系数 0.024 9。相比于承载力检验系数  $[\gamma_u]$  (大偏压取 1.2,小偏压取 1.5) 要求,试验结果不具备足够的安全储备。

### 3.2 正常使用极限状态下的裂缝分析

同受弯构件类似,偏心受压构件在裂缝计算时,其荷载组合采用准永久值组合。故计算构件正常使用状态下对应的荷载值  $N_q$  如表 5 所示。

表 5 准永久荷载计算值

项目	Z <sub>1</sub>	Z <sub>2</sub>	Z <sub>3</sub>
设计值	575	525	475
准永久值	333	304	275

偏心受压构件的平均裂缝间距及最大裂缝宽度  $w_{\max}$  计算如下:

$$l_{\text{cr}} = \beta \left( 1.9c_s + 0.08 \frac{d_{\text{eq}}}{\rho_{\text{te}}} \right) \quad (6)$$

$$w_{\max} = \alpha_{\text{cr}} \psi \frac{\sigma_{\text{sq}}}{E_s} \left( 1.9c_s + 0.08 \frac{d_{\text{eq}}}{\rho_{\text{te}}} \right) \quad (7)$$

式中:  $c_s$  为受力纵筋至混凝土外表面距离;  $d_{\text{eq}}$  为受拉钢筋等效直径;  $\rho_{\text{te}} = A_s / 0.5bh$ ;  $\sigma_{\text{sq}}$  为弯矩  $M_q$  作用下的纵筋应变;  $\alpha_{\text{cr}}$  为构件受力特征系数。

对正常使用状态下的构件采用式(6)、(7)计算各偏压柱在  $N_q$  作用下的平均裂缝间距  $l_{\text{cr}}$ 、最大裂缝宽度  $w_{\max}$ 。各试件的实测平均裂缝间距  $l_{\text{cr}}^0$ 、计算平均裂缝间距  $l_{\text{cr}}$  及两者的比值如表6所示。各试件的实测  $w_{\max}^0$ 、计算  $w_{\max}$  如表7所示。

表6 正常使用极限状态下平均裂缝间距

Table 6 Average crack spacing under normal usage limit conditions

试件编号	$N_q/\text{kN}$	$l_{\text{cr}}^0/\text{mm}$	$l_{\text{cr}}/\text{mm}$	$l_{\text{cr}}^0$
Z <sub>1</sub>	333	134	168	0.80
Z <sub>2</sub>	304	127	168	0.76
Z <sub>3</sub>	275	139	168	0.83

表7 正常使用状态下最大裂缝宽度

Table 7 The maximum crack width under normal usage conditions

试件编号	$\rho/\%$	$N_q/\text{kN}$	$w_{\max}^0/\text{mm}$	$w_{\max}/\text{mm}$	规范限值/ mm
Z <sub>1</sub>	0.66	333	0.33	0.22	
Z <sub>2</sub>	0.66	304	0.40	0.26	0.3
Z <sub>3</sub>	0.66	275	0.30	0.28	

由表6可知,在  $N_q$  作用下试验测得的平均裂缝间距  $l_{\text{cr}}^0$  均小于按规范公式计算的平均裂缝间距  $l_{\text{cr}}$ ;  $l_{\text{cr}}^0$  的平均值为0.797,变异系数为0.037。分析原因为:由于正常使用极限状态的荷载值  $N_q$  是依据承载能力极限状态反推得出。在后者实际值偏小的情况下(实际产生一定的双向偏心),其结果也相应偏心,因而计算的平均裂缝间距较实测值偏小。

由表7可知,试验测得的最大裂缝宽度大于按现行规范计算的最大裂缝宽度。分析原因为:配置630MPa级钢筋混凝土柱在获得高承载力的同时,正常使用极限状态下所对应的钢筋应力较大造成裂缝过宽;本次试验构件加载偏置,使受压柱产生了轻微的双向偏心受压,人为增大了正常使用极限状态的裂缝宽度。试验结果基本满足现行规范对裂缝宽度限值(0.3mm)的要求。

#### 4 结语

1)630MPa级钢筋混凝土偏压柱的破坏形态与

普通钢筋混凝土柱在典型大偏压条件下的受拉破坏形态基本相同,破坏时,拉压纵向钢筋均能够达到屈服强度。

2)630MPa级钢筋混凝土偏压柱截面变形符合平截面假定,且受压区混凝土应变能达到0.0033,可采用规范公式进行其承载力计算。

3)630MPa级钢筋混凝土构件在获得高承载力的同时,其对应的正常使用极限状态亦随之提高,导致构件的裂缝宽度较计算值偏大,且略高于规范限值。

4)建议大偏压、受弯构件采用630MPa级高强钢筋时,受拉侧钢筋在相同配筋率下选择较小直径钢筋,或适当提高配筋率,以减小其正常使用状态下的裂缝宽度。

后续研究将通过细化偏心距参数分布,系统分析其对构件性能的影响;同时结合有限元模拟与理论分析,提出适用于630MPa高强钢筋偏心受压构件设计方法,并推动研究成果在工程实践与标准规范中的应用。

#### 参考文献:

- [1] 范重,徐琳,冯远,等. 高强钢筋在工程中应用的探讨[J]. 结构工程师,2013,29(6):169-176.  
FAN Z, XU L, FENG Y, et al. Discussion on the application of high-strength reinforcement [J]. Structural engineers, 2013, 29(6):169-176.
- [2] 王新玲,白岩,朱俊涛. 正常使用状态下600MPa级钢筋混凝土梁受弯性能试验研究[J]. 工业建筑,2020,50(10):20-25.  
WANG X L, BAI Y, ZHU J T. Experimental study on flexural properties of reinforced concrete beams with rebar HRB600 under service conditions [J]. Industrial construction, 2020, 50(10):20-25.
- [3] 白力更,刘维亚. 超高强钢筋在混凝土结构中的研究与应用[J]. 建筑结构,2016,46(12):49-53.  
BAI L G, LIU W Y. Research and application of concrete structures with super-high strength steel bars [J]. Building structure, 2016, 46(12):49-53.
- [4] American Concrete Institute (ACI). Building code requirements for structural concrete and commentary: ACI 318-088 [S]. Farmington Hills, MI: ACI, 2008.
- [5] European Committee for Standardization (CEN). Eurocode 2: Design of concrete structures: Part 1-1: General rules and rules for buildings: BS EN 1992-1-1: 2004 [S]. Brussels: CEN, 2004.
- [6] 管俊峰,刘霖艾,张谦,等. 配置600MPa高强钢筋混凝土梁跨中挠度试验研究及计算方法[J]. 建筑结构学报,2021,42(8):59-72.  
GUAN J F, LIU L A, ZHANG Q, et al. Experimental study and calculation method of mid-span deformation of RC beams with 600MPa steel bars [J]. Journal of building structures, 2021, 42(8):59-72.

- [ 7 ] 姚贤华,管俊峰,刘霖艾,等. 配置 600MPa 高强钢筋的混凝土梁裂缝宽度试验研究[J]. 建筑结构学报, 2021, 42(6): 169-181.  
YAO X H, GUAN J F, LIU L A, et al. Experimental study on crack width of concrete beams with 600MPa high-strength steel bars[J]. Journal of building structures, 2021, 42(6): 169-181.
- [ 8 ] 孙传智,缪长青,李爱群,等. 短期荷载作用下 600MPa 级超高强钢筋混凝土梁裂缝宽度试验研究[J]. 土木工程学报, 2020, 53(1): 12-23.  
SUN C Z, MIAO C Q, LI A Q, et al. Experimental study on crack width of concrete beam with 600MPa ultra-high strength steel bars under short-term loading[J]. China civil engineering journal, 2020, 53(1): 12-23.
- [ 9 ] 王毅红,田桥罗,兰官奇,等. 630MPa 高强钢筋混凝土大偏心柱受力性能试验[J]. 吉林大学学报(工学版), 2022, 52(11): 2626-2635.  
WANG Y H, TIAN Q L, LAN G Q, et al. Experimental research on the mechanical properties of concrete column reinforced with 630MPa high-strength steel under large eccentric loading [J]. Journal of Jilin University (engineering and technology edition), 2022, 52(11): 2626-2635.
- [ 10 ] 李义柱,曹双寅,许鹏杰,等. 600MPa 级钢筋混凝土柱抗震性能试验研究[J]. 工程力学, 2018, 35(11): 181-189.  
LI Y Z, CAO S Y, XU P J, et al. Experimental study on aseismic behavior of reinforced concrete columns with grade 600MPa steel bars[J]. Engineering mechanics, 2018, 35(11): 181-189.
- [ 11 ] 张建伟,夏冬瑞,乔崎云,等. HRB600 级钢筋高强混凝土柱偏心受压性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2019, 40(4): 74-80.  
ZHANG J W, XIA D R, QIAO Q Y, et al. Experimental study on eccentric compression performance of high-strength concrete columns with HRB600 steel bars [J]. Journal of building structures, 2019, 40(4): 74-80.
- [ 12 ] 戎贤,杜虹茜,张健新. HRB600E 钢筋混凝土偏心受压柱受力性能试验研究[J]. 硅酸盐通报, 2019, 38(1): 60-64.  
RONG X, DU H Q, ZHANG J X. Experimental research on mechanical behavior of eccentrically loaded reinforced concrete column with 600MPa steel bars [J]. Bulletin of the Chinese ceramic society, 2019, 38(1): 60-64.
- [ 13 ] 江苏天舜金属材料集团有限公司, 长安大学. 新型热处理带肋高强钢筋混凝土结构技术规程: DBJ 61/T 157—2020 [S], 2020.  
Jiangsu Tianshun Metal Materials Group Co., Ltd., Chang' an University. Technical specification for new heat treatment ribbed high strength reinforced concrete structure: DBJ 61/T 157—2020 [S], 2020.
- [ 14 ] 江苏天舜金属材料集团有限公司, 东南大学土木工程学院. 热处理带肋高强钢筋混凝土结构技术规程: DGJ 32/TJ 202—2016 [S], 2016.  
Jiangsu Tianshun Metal Materials Group Co., Ltd., School of Civil Engineering, Southeast University. Technical specification for heat-treated ribbed high-strength reinforced concrete structures: DGJ 32/TJ 202—2016 [S], 2016.

## (上接第 145 页)

- [ 8 ] CHEN D K, QIN F W, GE R Q, et al. ID-UNet: a densely connected UNet architecture for infrared small target segmentation [J]. Alexandria engineering journal, 2025, 110: 234-244.
- [ 9 ] NISSAR I, ALAM S, MASOOD S, et al. MOB-CBAM: a dual-channel attention-based deep learning generalizable model for breast cancer molecular subtypes prediction using mammograms [J]. Computer methods and programs in biomedicine, 2024, 248: 108121.
- [ 10 ] CHEN Q P, WEN W S, QIN J H. GlobalSR: global context network for single image super-resolution via deformable convolution attention and fast Fourier convolution [J]. Neural networks, 2024, 180: 106686.
- [ 11 ] ZHOU W, WANG X R, YANG X K, et al. Skeleton-guided multi-scale dual-coordinate attention aggregation network for retinal blood vessel segmentation [J]. Computers in biology and medicine, 2024, 181: 109027.
- [ 12 ] WANG D L, DONG Z C, YANG G, et al. APNet-YOLOv8s: a real-time automatic aquatic plants recognition algorithm for complex environments [J]. Ecological indicators, 2024, 167: 112597.
- [ 13 ] WAJID M, IQBAL A, MALIK I, et al. A semi-supervised approach for breast tumor segmentation using sparse transformer attention UNet [J]. Pattern recognition letters, 2025, 187: 63-72.
- [ 14 ] SAHAYA PUSHPA SARMILA STAR C, INBAMALAR T M, MILTON A. Automatic semantic segmentation of breast cancer in DCE-MRI using DeepLabV3+ with modified ResNet50 [J]. Biomedical signal processing and control, 2025, 99: 106691.
- [ 15 ] ZHU J Y, QIN X B, ELSADDIK A. DC-Net: Divide-and-conquer for salient object detection [J]. Pattern recognition, 2025, 157: 110903.