

配置660 MPa级高强钢筋RC柱大偏心受压性能试验研究

土木2104班：李嘉豪 指导教师：兰官奇 论文类型：毕业论文

摘要：本文通过 17 组高强约束钢筋混凝土偏压柱的试验研究，系统分析了其力学性能与破坏机理。17 组试件截面尺寸均为 300 mm×300 mm，高度为 1300 mm，采用 630 MPa 高强纵筋及不同强度与间距的箍筋，并基于等量替换与等强度替换原则设计试验参数。研究结果表明：破坏的试件表现为在受压区混凝土被压溃前受拉区的钢筋先发生屈服，破坏特征总体上与普通强度钢筋混凝土大偏心受压的破坏特征相符，但因截面尺寸限制的原因，高强受压纵筋未能达到屈服应变，而试件的实际承载力仍高于设计值及通过规范计算的计算值；偏心受压柱的承载力试验值较理论计算值（ N_{u1} 、 N_{u2} ）分别提高了 41%和 47%，现有规范的计算方法基本可以安全地应用于高强度钢筋混凝土偏压柱的结构设计；试验中所有试件的受拉纵筋均达到屈服，而多数试件（14 个）受压纵筋在峰值荷载时未屈服，仅 3 个试件在即将达到峰值荷载时达到了屈服；截面尺寸为 300 mm×300 mm 的试件虽满足承载力要求，但受压高强纵筋强度未充分发挥，所以建议避免在大偏心距钢筋混凝土柱体结构设计中采用过小截面尺寸；在受压区混凝土性能方面，除个别试件外，多数试件的压应变值超出规范限值（ -3300×10^{-6} ），达到了 $-3440\times 10^{-6}\sim -4357\times 10^{-6}$ ，表明约束效应的作用能够明显提升混凝土的极限变形能力。进一步分析发现，随着配箍间距的减小，其对核心区混凝土的约束作用显著增强，从而更有效地提升了混凝土的变形能力。本研究通过系统的试验研究与理论分析，为高强箍筋约束钢筋混凝土偏心受压柱的设计与工程实践提供了可靠的试验数据支撑和理论依据。

关键词：高强箍筋；钢筋混凝土柱；偏心受压；力学性能；约束效应

*国家自然科学基金资助项目(52308204)

1 研究背景

钢筋混凝土结构凭借其优异的耐久性、延展性、适用性及相较于钢结构的经济性优势，已成为现代土木工程建设的核心结构形式。随着各国建筑朝着大跨度、超高层及重载方向的持续演进，不同的混凝土结构体系的创新发展导致对钢筋材料强度提出了更高要求。

工程技术的持续进步使得混凝土结构在配筋系统与材料运用领域获得了明显突破，多种新型结构形式由此产生。具体而言，可列举出超高性能混凝土(Ultra-High Performance Concrete, UHPC)结构、采用高强箍筋的约束混凝土结构以及钢材与混凝土组合而成的复合结构。近百年间，作为增强混凝土抗压性能并改善其脆性特征的有效技术手段，钢-混凝土组合结构与高强箍筋约束混凝土的相关研究工作一直在进行中。现有文献资料显示，普通箍筋约束钢筋混凝土受压构件的力学特性分析构

成了主要研究内容。针对高强箍筋约束钢筋混凝土轴心受压构件的承载特性，已有较为系统的研究成果得以呈现。而本研究将关注点集中于高强箍筋约束大偏心受压钢筋混凝土构件的力学响应规律。通过该研究，期望能够阐明此类构件特有的受力表现及其内部作用机制。

我们国家建筑结构领域是具有高消耗钢材的特征。相关的研究表明高强钢材的大规模应用可以产生十分明显的综合效益。材料层面能有效降低单位建筑面积的钢材使用量；经济层面可以明显减少工程建设的成本；可持续发展层面可以有效降低能源消耗与资源的需求。高强钢筋与普通热轧钢筋相比，高强钢筋具有非常明显的性能优势，可以体现在更高的抗拉强度、更优异的延性特性以及更持久的耐久性能。并且有关部门发布的指导文件明确提出了加快推广高性能建筑材料在工程中的应用的要求。国家发展改革委印发的《建筑节能降碳行动方案》明确提出了到 2025 年新建建筑全面执行节能标准。2022 年建筑全过程碳排放量在《中国建筑能耗研究报告》中显示为占全国总量的 47.9%，而这里面运行阶段排放占比就达到了 21.7%，建造过程占比 26.2%。这些数据能够充分表示在建筑领域实施节能降碳措施的紧迫性和必要性。所以在此背景下，高强钢筋凭借其超高的屈服强度，可以有效缓解钢筋密集配置的问题，降低施工的综合成本，而且也具有显著的经济效益与环境效益。该材料的推广应用非常契合我国绿色可持续发展战略，也为实现“双碳”目标及推动土木工程材料向高强、环保、高效施工方向转型提供技术支撑。

在欧美发达国家的建筑工程实践中，500 MPa 级高强钢筋已被普遍采用作为结构构件的主要受力配筋材料。相关工程规范和技术标准均已将该强度等级的钢筋纳入主体结构受力钢筋的选用范围，并确立了其在结构设计中的主导地位，在欧洲规范 EN 1992-1-1 和美国规范 ACI 318-25 中，纵向受力钢筋规定的最高屈服强度分别为 600 MPa 和 550 MPa，且美国规范中箍筋强度最高可达 690 MPa。我国现行《混凝土结构设计标准》（GB/T 50010-2010）中规定的钢筋强度设计值上限为 500 MPa。相较于国际同类标准，该规范对钢筋材料强度的限定值处于相对保守水平。尽管国内外现行规范（如 ACI 318-25、GB/T 50010-2010）已逐步纳入高强钢筋设计条款，但现阶段针对 630 MPa 级和 660 MPa 级钢筋在大偏心受压柱中的力学行为研究仍较为匮乏，系统性试验数据支撑不足。特别需要指出的是：在采用高强度箍筋约束的大偏心受压构件中，高强度纵向钢筋的抗压强度利用效率需要通过系统的试验研究与理论分析予以验证；高强箍筋对核心混凝土的约束机理尚需深入解析。既有研究多聚焦于 HRB500/600 级钢筋，对 630 MPa 纵筋与 660 MPa 箍筋协同工作机理的研究尚属空白；高强箍筋约束混凝土本构关系及大偏压状态下纵筋应变演化规律仍需理论突破。

本研究在前人工作基础上，突破性地采用了 630 MPa 级高强纵筋与三种不同类型高强箍筋（660 MPa 级异形截面、660 MPa 级光圆以及 630 MPa 级月牙肋）的组合配筋方案，设计并制备了多组适用于大偏心受压工况的高强箍筋约束钢筋混凝土柱

试件。通过对设计的 17 组足尺试件准静态加载试验，本文深入探究了高强钢筋复合配筋构件在偏心受压条件下的独特力学行为，包括其受力全过程表现、破坏特征演变规律等关键问题。试验结果不仅清晰地展现了高强材料在偏心受压状态下的实际工作性能，还对其与现行规范计算模型的匹配程度进行了验证。这项工作的理论价值在于推动了高强钢筋混凝土结构研究的深入，同时其工程意义体现在为规范更新和实际工程应用提供了可靠的技术支撑。

2 研究内容与方法

本文通过 17 组试件的试验分析，利用 500 吨长柱试验机进行单调偏心加载，采用力-位移混合控制模式分级施荷（0-80%预估峰值荷载阶段以 100 kN/级增量加载，80%后切换位移控制至破坏），同时布置位移计监测侧向挠度、在混凝土受压区及纵筋箍筋关键位置粘贴应变片采集应变数据，并预刷 50 mm×50 mm 网格线实时记录裂缝发展；通过钢筋材性试验（按 GB/T 228.1-2021 标定屈服强度与伸长率）和混凝土强度测试（按 GB/T 50081-2019 测定立方体抗压强度）验证材料性能，结合荷载-挠度曲线、荷载-应变曲线与破坏形态的多种数据交叉分析。内容如下：

（1）高强箍筋约束 RC 大偏心受压柱试验设计与性能表征。试验设计共计 17 组截面尺寸为 300 mm×300 mm 的钢筋混凝土试件，采用 630 MPa 纵筋与不同强度（630/660 MPa）、间距及形式（扁异型、光圆）的箍筋组合，基于等量替换与等强度替换原则对参数进行优化。通过单调偏心加载试验，完整记录了试件开裂荷载、纵筋屈服荷载及峰值荷载等关键力学指标，观测并分析了试件破坏形态、荷载-挠度曲线演化、纵筋应变发展及混凝土压应变分布规律，明确高强箍筋约束效应与普通箍筋的力学性能差异。

（2）偏心受压承载机理与规范适用性研究。定量分析试件承载力试验值（ N_s ）与规范计算值（ N_{u1} 、 N_{u2} ）的对比关系，发现 N_s/N_{u1} 与 N_s/N_{u2} 的均值分别为 1.41 和 1.47，验证现行规范公式可偏于安全地用于高强 RC 柱设计。通过荷载-应变梯度曲线验证平截面假定的适用性，揭示截面尺寸限制导致受压高强纵筋未屈服但承载力仍超设计值的内在机理。

（3）高强材料协同工作机制研究。揭示 630 MPa 纵筋与 660 MPa 箍筋的协同强化效应，受拉纵筋屈服荷载达峰值荷载的 70%-80%，而 87.5%试件的受压纵筋未屈服。提出截面尺寸的阈值，指出 300 mm×300 mm 截面导致受压纵筋强度利用率仅在 67%至 85%之间，所以建议大偏压柱设计应避免过小截面。研究成果完善了高强钢筋约束混凝土结构理论体系，为《混凝土结构设计规标准》中 600 MPa 级以上钢筋条款的补充提供重要依据。

（4）混凝土约束效应定量评价。基于 16 组试件的压应变数据（ -3440×10^{-6} ~ -4357×10^{-6} ），建立箍筋约束系数与混凝土应变增强率的量化关系。高强箍筋间距参

数对约束混凝土偏心受压柱的极限压应变呈现显著相关性。试验证实高强箍筋使混凝土变形能力提升 4.2%-32.0%，为修正混凝土本构模型提供试验依据。

3 研究结论

基于本次试验研究，得到以下结论：

（1）本试验所设计研究的 17 个高强箍筋约束 RC 大偏心受压柱试件，其典型破坏形态与普通强度钢筋混凝土大偏压柱的破坏形态基本相同，即受拉钢筋首先达到屈服，最后受压区混凝土压碎而导致构件破坏；最明显的区别则为：受小型构件截面尺寸较小的限制，试验中 630 MPa 级高强受压纵筋应变实测值未能达到屈服，但构件实际承载力仍高于设计值、规范承载力极限状态计算值，构件的承载力及安全性得到了试验验证。

（2）偏心受压柱承载力试验值与计算承载力 N_{u1} 、 N_{u2} 的比值分别为 1.41、1.47。对于配置 630 MPa 级高强钢筋的大偏心受压柱，其实际承载力测试结果始终高于理论的预测值。这一现象在两种不同计算模型下均得到验证，第一种模型假设受压和受拉钢筋均能达到屈服强度；第二种模型则依据平截面假定计算受压钢筋的实际应力水平。研究结果可以表明，现行普通钢筋混凝土偏压构件的计算方法应用于高强钢筋混凝土构件时，计算结果相对保守，具有合理的安全储备。

（3）纵向受拉钢筋在试验中均超过了其屈服强度；而 14 个试件的纵向受压钢筋应变在 N_u 时刻及之前均尚未超过其屈服压应变；仅 3 个试件在接近或达到 N_u 时刻纵向受压钢筋应变超过其屈服压应变。

（4）截面尺寸为 300×300 mm 高强箍筋约束 RC 大偏心受压柱构件不宜作为大偏心受压构件进行设计，尽管能够满足承载力要求，但钢筋应变实测值表示 630 MPa 级受压纵筋未能有效发挥其抗压强度；因此出于安全考虑，在大偏心受压柱构件设计时，应适当加以尺寸限制，不宜选用小型构件。

（5）除了 EC5-2 试件，其余的 16 个高强箍筋约束钢筋混凝土大偏心受压试件的受压区混凝土压应变均超过了规范规定的混凝土极限压应变值（ -3300×10^{-6} ），实测应变范围为 -3440×10^{-6} 至 -4357×10^{-6} 。这一现象验证了箍筋约束效应能够显著改善混凝土的极限变形性能。通过进一步分析可以发现随着配箍间距的减小，其对核心区混凝土的约束作用得到增强，从而能够更有效地提升混凝土的变形能力。