

doi: 10.11918/j.issn.0367-6234.2016.06.021

高强型钢混凝土组合柱小偏心受压力学性能

杨怡亭¹, 侯兆新², 李国强³, 龚超^{2,4}, 陈素文³, 邱林波^{2,4}(1.北京科技大学 土木与环境工程学院, 100083 北京; 2.中冶建筑研究总院有限公司, 100088 北京;
3.同济大学 土木工程学院, 200092 上海; 4.国家钢结构工程技术研究中心, 100088 北京)

摘要: 为研究圆截面 Q460 高强钢混凝土组合柱在小偏压作用下的受力性能, 进行了两根组合柱的工程性试验, 对其破坏过程及特征进行分析, 结果表明, 钢筋有效限制剪切斜裂缝的发展, 组合柱发生弯曲破坏, 表现出良好的延性; 采用有限元方法分析钢筋应力分布与变化规律, 结果表明, 混凝土压溃失效引起钢筋应力重分布, 加剧了钢筋部分承担轴力和弯矩; 对型钢屈服强度、含钢率进行有限元参数分析, 结果表明, 采用高强钢可有效提高承载力, 同时控制构件截面尺寸与自重; 对计算 SRC 柱压弯承载力的两种主要方法进行了比较分析, 提出等效矩形概念的简化计算, 为圆截面 SRC 柱设计提供依据。

关键词: 高强钢; 钢筋混凝土; 偏心受压; 有限元; 等效矩形

中图分类号: TU398

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2016)06-0132-06

Mechanical properties of high strength steel reinforced concrete columns under small eccentric load

YANG Yiting¹, HOU Zhaoxin², LI Guoqiang³, GONG Chao^{2,4}, CHEN Suwen³, QIU Linbo^{2,4}

(1. Civil and Environment Engineering Institute, University of Science and Technology Beijing, 100083 Beijing, China;

2. Central Research Institute of Building and Construction Co. Ltd., MCC, 100088 Beijing, China; 3. College of Civil Engineering, Tongji University, 200092 Shanghai, China; 4. National Engineering Research Center for Steel Construction, 100088 Beijing, China)

Abstract: Experimental study on the behavior of circular Q460 high strength steel reinforced concrete (SRC) columns under small eccentric compression was conducted, to investigate the failure mode and failure process. The SRC column presents typical flexural failure and shows good ductility. The development of the diagonal crack is effectively confined by the encased steel. The stress distribution and development of the steel reinforcement were studied using finite element method. It indicates that stress redistribution occurs due to the crushing of concrete, which results in the increase of the axial force and moment applied to the steel. The parameter effects were investigated. The compression-bending capacity of the SRC column increases approximately linearly with the increase in the steel reinforcement strength and steel ratio. The design theory of SRC column is enriched based on the comparison analysis on the flexural strengths of the SRC column calculated by the universal superposition method and the $N-M$ correlation curve.

Keywords: high strength steel; SRC; eccentric compression; finite element analysis; equivalent rectangular

型钢-混凝土组合柱 (SRC) 是指在钢筋混凝土柱 (RC) 内配置型钢, 通过型钢分担部分轴力提高极限承载力, 同时内置型钢限制剪切裂缝的发展, 改善

柱的延性, 有效提高其抗震性能^[1-2]. 日本、前苏联、美国、欧洲等对 SRC 柱的理论计算研究较为成熟^[3-6]. 中国《型钢混凝土结构设计规程》和《型钢混凝土组合结构技术规程》分别通过叠加原理和极限状态法建立了 SRC 柱承载力计算式^[7-8]. 随着高强钢 (屈服强度 ≥ 460 MPa) 生产工艺的提高, 将高强钢应用于 SRC 柱将大幅提高其极限承载力, 例如北京鸟巢采用 Q460 高强钢板进行设计^[9], 河南省某超高层项目使用 Q460 高强钢对结构进行优化设

收稿日期: 2015-09-23.

基金项目: 国家自然科学基金 (51408620);
国家科技支撑计划项目 (2012BAJ13B01).

作者简介: 杨怡亭 (1988—), 女, 博士研究生;
侯兆新 (1963—), 男, 教授级高工.

通信作者: 杨怡亭, 15117925700@163.com.

计^[10]。目前国内学者对高强钢结构的受力性能已有一定研究成果^[11-12], 而高强钢 SRC 柱的力学性能研究鲜见报道。

本文通过试验和有限元方法研究 Q460 高强钢 SRC 柱在小偏心作用下的承载力、破坏方式和破坏机理。通过有限元参数分析评价了屈服强度和含钢率对 SRC 柱承载力的影响。通过叠加法和 $N-M$ 相关曲线研究传统理论方法针对 SRC 柱偏压承载力计算的适用性。

1 SRC 柱偏心受压试验概述

1.1 试件设计和材料特性

试件截面尺寸参考上述“河南省某超高层项目”应用的第 53 层 SRC 柱设计, 采用相似比为 1:3 的缩尺模型。缩尺模型高 1 900 mm, 其含钢量、钢筋配筋率以及栓钉焊接方法见图 1。试件制作同时, 预留出用于材性试验的试件, 各材料的力学性能平均值见表 1。

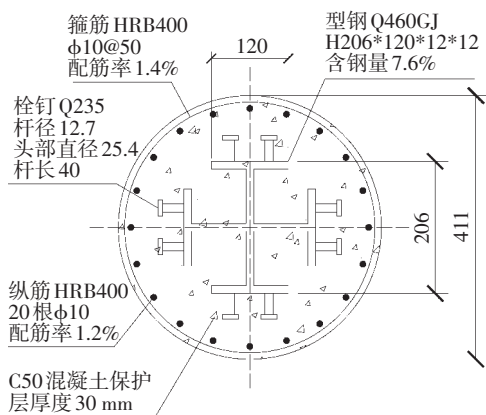


图 1 SRC 柱截面示意

表 1 材料力学性能

材料	屈服强度 f_y /MPa	极限强度 f_u /MPa	抗压强度 f_{cu} /MPa	伸长率 δ /%
Q460GJ 钢板	516.7	635.4	—	28.1
$\Phi 10$ 钢筋	426.0	605.5	—	—
混凝土	—	—	46.8	—

1.2 试验加载装置

试验在大型拟静力结构卧式试验机上进行。荷载通过小刚性垫块传递, 偏心距 120 mm。考虑实际工程中组合柱受到轴力、弯矩和剪力的共同作用, 试件底部采用高强螺栓与反力架底座连接, 实现刚接, 柱顶通过试件与垫块的摩擦力约束平动位移, 实现铰接。试验加载方式和位移计布置见图 2。试验得到 SRC 柱极限承载力分别为 7 574、7 318 kN。



图 2 加载方式及位移计布置示意

2 SRC 柱有限元模型建立与验证

采用 ABAQUS 有限元软件建立有限元模型。混凝土、型钢以及钢筋分别采用实体单元、曲壳单元以及桁架单元。横截面划分网格 25 mm 每单元, 柱高方向 55 mm 每单元。型钢及钢筋采用嵌入式与混凝土变形协调, 忽略相互间的滑移。

混凝土采用塑性损伤模型, 本构关系参考规范 GB 50010—2010^[13], 钢材采用理想弹塑性本构模型。荷载施加在传力钢垫板上以防止柱顶应力集中。柱底设置平动约束和转动约束, 柱顶设置平动约束。

有限元结果见图 3, 荷载-位移曲线与试验结果基本吻合。极限承载力为 7 372 kN, 与试验结果分别相差 2.7% 和 0.8%。如图 4 所示, SRC 柱破坏时, 有限元侧向位移云图表明柱体变形最大位移靠近加载端, 与试验的变形模态一致。

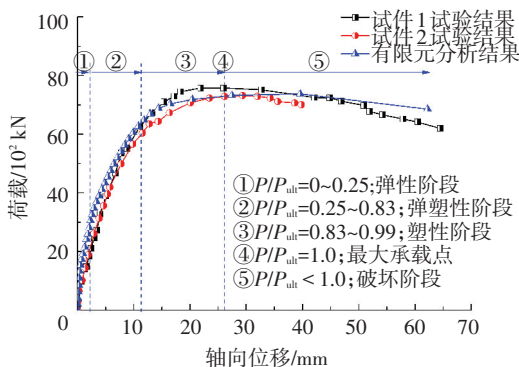


图 3 SRC 柱荷载-轴向位移曲线

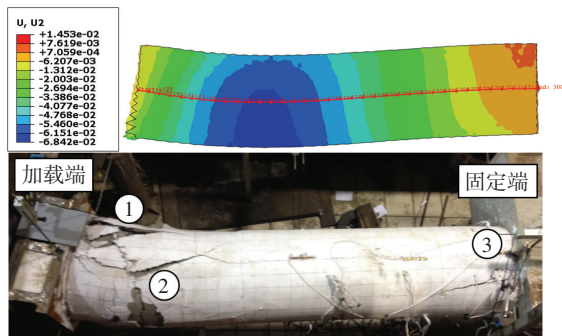


图 4 试验与有限元破坏示意

3 SRC 柱试验与有限元结果分析

3.1 试验结果分析

由图 3 所示的位移-荷载曲线, 破坏过程分 5

个阶段:(1)弹性阶段,曲线近似直线,柱体无开裂现象。(2)弹塑性阶段,荷载比达到约 0.25 后, SRC 柱刚度降低,加载端偏压侧出现微裂缝,裂缝宽度逐渐增大、数量增多,见图 5。(3)塑性阶段,荷载比达到约 0.83 后,曲线出现明显转折,压区混凝土不断压溃,柱体有明显侧向变形, SRC 柱带裂缝工作,反映出一定的塑性能。(4)曲线达到峰值, SRC 柱达到破坏,承载力下降,加载端混凝土压溃,出现斜裂缝和多条横向裂缝, SRC 柱发生纵向弯曲破坏,见图 6。(5)破坏阶段,组合柱仍具有一定的承载能力,表明高强钢骨提高了 SRC 柱的承载和变形能力。

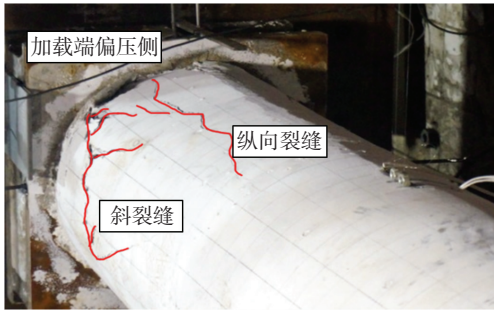


图 5 弹塑性阶段柱体裂缝

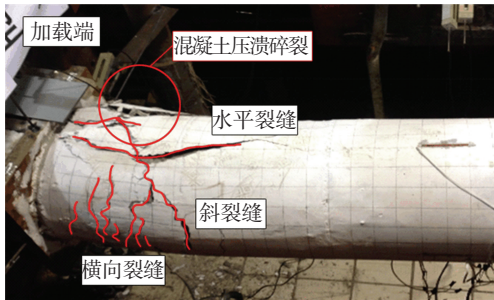


图 6 破坏阶段柱体裂缝

3.2 有限元结果分析

3.2.1 各阶段应力分布及发展

弹性阶段, RC 部分未达到抗压强度, 压应力较为集中分布于柱顶, 钢筋应力远小于屈服强度。弹塑性阶段, 由于加载端混凝土压溃失效, 承压区域转移, 压应力集中分布于柱体中部, 见图 7; 钢筋端部承担部分压力而应力集中, 且应力向柱底发展, 见图 8。塑性阶段至 SRC 柱破坏, 钢筋大部分截面屈服, 塑性变形不断发展, 直至构件破坏。

3.2.2 钢筋塑性发展分析

选取沿柱截面径向路径 s_1 , 见图 9, 分析加载过程中钢筋截面受拉受压侧应力变化规律。如图 10、11 所示, 随着荷载增加, 截面受拉区高度不断减小, 截面中和轴下移, 塑性阶段时 s_1 截面已全部受压, 钢筋端头局部压曲, 应力减小, 破坏后钢筋端部变形过大而失去承载能力, 应力为零。

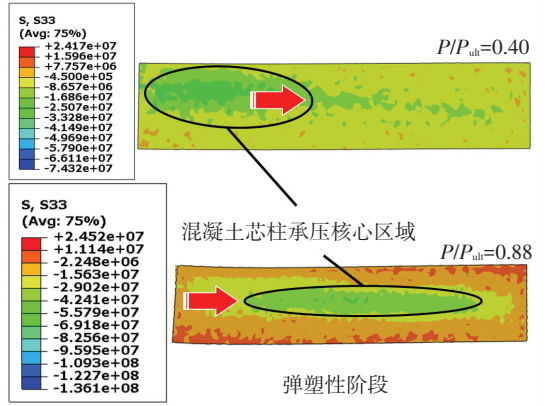


图 7 弹塑性阶段混凝土剖面应力分布云图

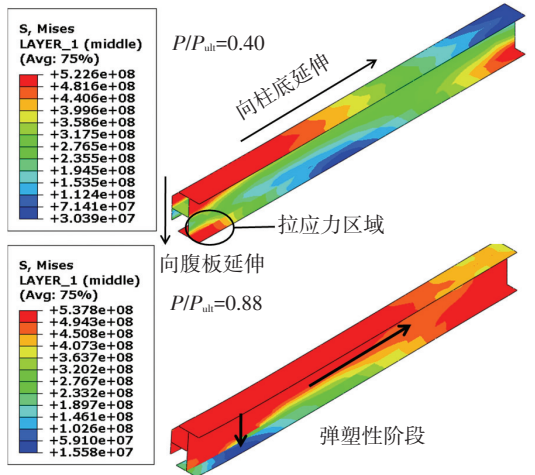


图 8 弹塑性阶段钢筋剖面应力分布云图

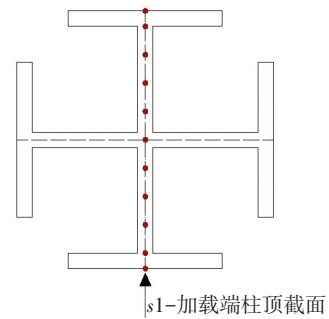


图 9 应力测点布置示意

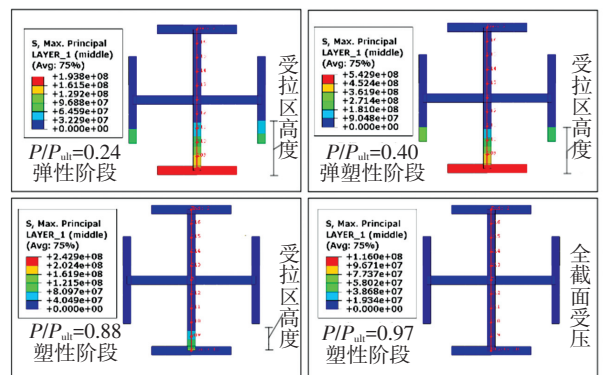


图 10 各阶段 s_1 截面的主拉应力分布

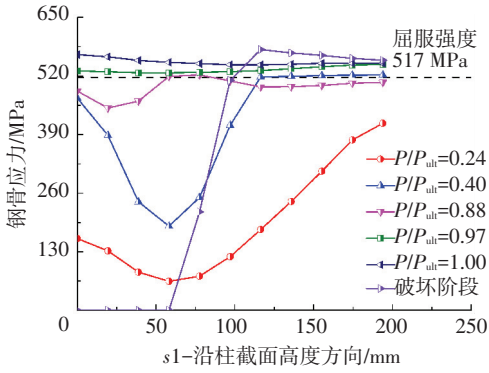


图 11 各阶段 s1 截面应力分布

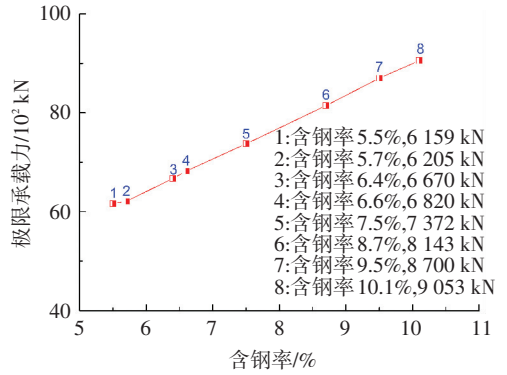


图 13 含钢率对 SRC 柱承载力的影响

4 SRC 柱有限元参数分析

本文结合工程实际重点研究型钢材屈服强度和含钢率(翼缘厚度、腹板厚度)对 SRC 柱小偏压承载力的影响.屈服强度分别取 235、345、390、460、550 和 690 MPa(及试验值 517 MPa). 钢骨翼缘、腹板厚度根据《钢结构设计规范》^[14]宽厚比、高厚比限值规定取值,见表 2.

表 2 含钢率(钢骨翼缘、腹板厚度)参数

翼缘厚度/ mm	含钢率/ %	宽厚比	腹板厚度/ mm	含钢率/ %	高厚比
6.0	5.5	9.0	5.0	5.7	36.4
8.5	6.4	6.4	8.4	6.6	21.7
12.0	7.5	4.5	16.5	8.7	11.0
20.0	10.1	2.7	20.0	9.5	9.1

注:翼缘(腹板)厚度变化时,腹板(翼缘)厚度均为 12 mm.

偏压承载力与屈服强度和含钢率基本呈线性关系,见图 12、13.采用 Q460 高强钢 SRC 柱相比 Q235 普通钢 SRC 柱承载力提高近 42%.采用大厚度钢板同样能提高承载力,但钢板较厚会降低混凝土的浇筑质量,因此通过采用高强钢既能保证 SRC 柱的承载能力又能有效控制截面尺寸,避免不利于抗震的短柱结构.

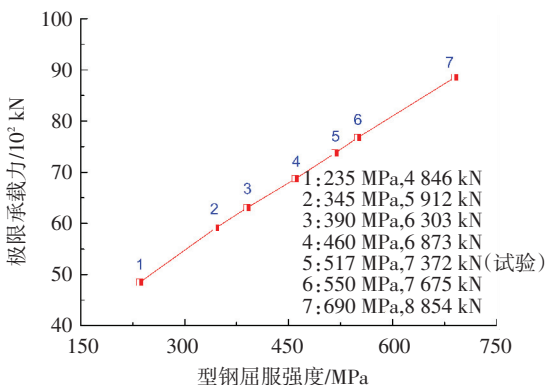


图 12 屈服强度对 SRC 柱承载力的影响

5 SRC 柱正截面压弯承载力理论计算

5.1 “叠加法的解析解”方法

日本学者若林实^[15]提出一般叠加法计算 SRC 柱正截面压弯承载力,将其表示为钢骨和 RC 部分的简单叠加,见式(1).该方法任意分配钢骨和 RC 部分的轴力,通过反复试算得到受弯承载力之和的最大值,过程较为复杂.

$$\begin{cases} N = N^{rc} + N^{ss}, \\ M = M^{rc} + M^{ss}. \end{cases} \quad (1)$$

式中: N 、 M 为 SRC 柱轴力和弯矩, N^{ss} 、 M^{ss} 为钢骨部分轴力和弯矩, N^{rc} 、 M^{rc} 为 RC 部分轴力和弯矩.

李少泉等^[16]给出一般叠加公式的解析解,有效简化计算过程.由 SRC 柱钢骨部分承担的 N^{ss} - M^{ss} 相关关系式(2)、(3),并按小偏压考虑,钢骨截面受压 ($N^{ss} \geq 0$) 见图 14,钢骨部分弯矩表示为式(4),RC 部分力和弯矩平衡方程为式(5)、(6).

$$\frac{M^{ss}}{M_{y0}^{ss}} + \frac{|N^{ss}|}{N_{y0}^{ss}} = 1 \Rightarrow M^{ss} = M_{y0}^{ss} - \frac{|N^{ss}|}{N_{y0}^{ss}} \times M_{y0}^{ss}, \quad (2)$$

$$N_{y0}^{ss} = A_{ss} f_{ss}; M_{y0}^{ss} = \gamma_s W_{ss} f_{ss}, \quad (3)$$

$$M^{ss} = \gamma_s W_{ss} f_{ss} - N \frac{\gamma_s W_{ss}}{A_{ss}} + N^{rc} \frac{\gamma_s W_{ss}}{A_{ss}}, \quad (4)$$

$$A_{s1} \sigma_s + N^{rc} = A_{s2} f_y + \xi h_0 b f_c, \quad (5)$$

$$M^{rc} = \xi h_0 b f_c (h_0 - \frac{1}{2} \xi h_0) + f_y A_{s2} (h_0 - a_2) - N^{rc} (\frac{h}{2} - a_1), \quad (6)$$

$$\sigma_s = \frac{\xi - 0.8}{\xi_b - 0.8} f_y. \quad (7)$$

式中: N_{y0}^{ss} 和 M_{y0}^{ss} 为钢骨截面轴压和纯弯承载力, A_{ss} 、 W_{ss} 和 f_{ss} 分别为钢骨截面面积、抗弯截面模量和屈服强度, γ_s 为钢骨截面塑性发展系数, A_{s1} 和 σ_s 为拉区纵筋面积和应力, A_{s2} 和 f_y 为压区纵筋面积和强度设计值, ξ 和 ξ_b 为相对受压区高度和界限相对受压区高度, a_1 和 a_2 为拉、压区纵筋合力点至压、拉区混凝土边缘的距离.

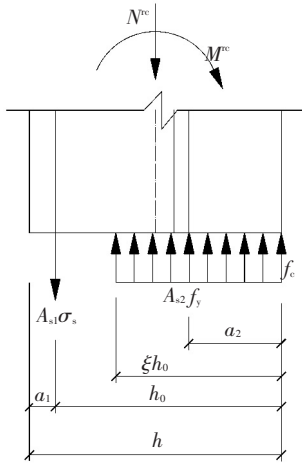


图 14 小偏压作用下 RC 部分正截面受力图

圆截面 SRC 柱按照等效矩形概念, 将 bh_0 等效为圆截面受压区面积 A_c , 如式(8). 代入式(5)、(6) 得到新的平衡方程式(9)、(10).

$$\xi bh_0 f_c = \xi A_c f_c, \quad (8)$$

$$A_{s1} \sigma_s + N^{rc} = A_{s2} f_y + \xi A_c f_c, \quad (9)$$

$$M^{rc} = f_c A_c h_0 \xi \left(1 - \frac{1}{2} \xi\right) + f_y A_{s2} (h_0 - a_2) - N^{rc} \left(\frac{h}{2} - a_1\right). \quad (10)$$

将式(9)、(10)代入叠加方程(1), 得到弯矩 M

为轴力 N^{rc} 的二次式. 令 $\frac{dM}{dN^{rc}} = 0$, 得到 SRC 柱弯矩最

大时的轴力 N^{rc} , 并由 $M = Ne$, 得到偏心距为 120 mm 时, SRC 柱截面小偏压极限承载力为 7 463 kN, 与试验结果分别相差 1.4% 和 1.9%.

5.2 $N-M$ 相关曲线计算方法

欧洲规范 EC4^[6] 基于相对长细比概念, 考虑材料弹塑性和几何非线性, 以组合柱同时承担轴力和弯矩的相关关系 ($N-M$ 曲线) 作为失效条件计算压弯承载力, 见图 15. 多边形 $ACDB$ 为近似 $N-M$ 曲线的简化, 点 D 为大、小偏心受压界限点.

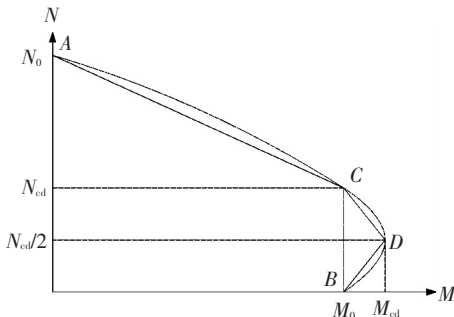


图 15 $N-M$ 相关曲线

各点含义见图 16, 其中, SRC 柱截面受弯区域高度假设为 $2h_n$, 且处于钢骨腹板位置. 根据平衡条件得到各点轴力和弯矩绘制 $N-M$ 曲线. 偏心距为 120 mm 的偏压承载力计算值 6 614 kN, 与试验结果分别相差 12.6% 和 9.6%.

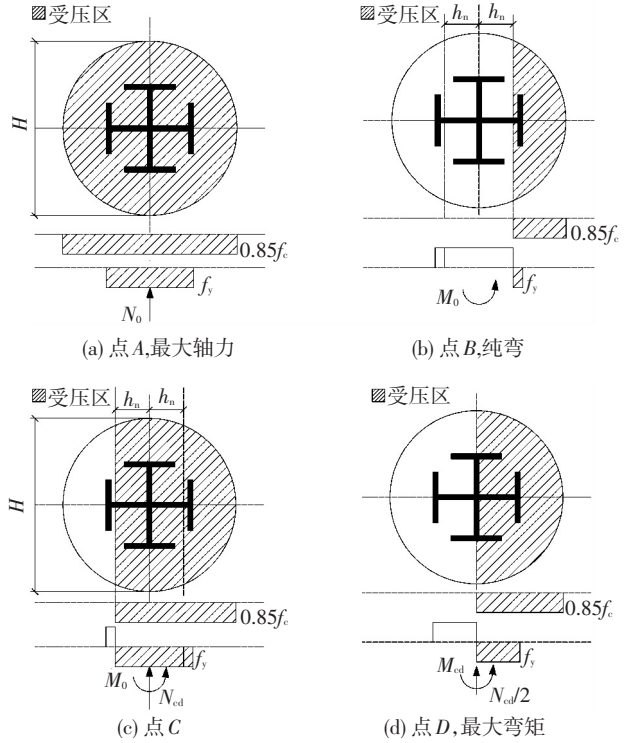


图 16 欧洲规范计算截面示意

5.3 理论计算结果分析

表 3、4 为参数范围内理论结果与有限元结果对比. “叠加法的解析解”的理论结果与有限元结果相比差值小于 5%, 计算精度高; “ $N-M$ 相关曲线方法”理论值偏小, 且随着屈服强度的提高, 理论结果差值越大, 达到 10%~20%, 结果过于保守.

表 3 屈服强度参数理论结果与有限元结果

型钢屈服	FEM	叠加法	差值	$N-M$ 曲线	差值
f_{ss}/Mpa	P_0/kN	P_1/kN	$\delta_1/\%$	P_2/kN	$\delta_2/\%$
235	4 846	4 561	-5.80	4 797	-1.00
345	5 912	5 703	-3.54	5 511	-6.78
390	6 303	6 166	-2.17	5 815	-7.74
460	6 873	6 884	0.16	6 218	-9.53
550	7 675	7 802	1.65	6 878	-10.38
690	8 854	9 225	4.19	7 756	-12.40

表 4 含钢率参数理论结果与有限元结果

含钢率/%	FEM	叠加法	差值	$N-M$ 曲线	差值
	P_0/kN	P_1/kN	$\delta_1/\%$	P_2/kN	$\delta_2/\%$
5.5	6 159	5 977	-2.96	5 300	-13.95
5.7	6 205	6 367	2.61	5 752	-7.30
6.4	6 670	6 576	-1.41	5 930	-11.09
6.6	6 820	6 894	1.09	6 276	-7.98
7.5	7 372	7 463	1.23	6 614	-10.28
8.7	8 143	8 178	0.43	6 944	-14.72
9.5	8 700	8 731	0.36	7 176	-17.52
10.1	9 053	9 439	4.26	8 222	-9.18

注: $\delta_n = (P_n - P_0) / P_0 \times 100\%$

6 结 论

1) 高强钢 SRC 柱在小偏压作用下发生纵向弯曲破坏. 受力过程中, 柱顶偏压侧混凝土压溃, 钢管承担更多轴力的同时限制剪切裂缝发展, 组合柱表现出良好的延性和变形能力.

2) 有限元分析得到组合柱钢管翼缘和腹板的应力分布和变化规律. 参数分析结果表明, 采用高强度结构钢更利于在提高 SRC 柱承载力的同时, 控制钢材用量和截面尺寸, 减轻结构自重.

3) 采用两种理论对 SRC 柱小偏压作用下极限承载力值进行计算. 结果表明, 叠加法计算较为复杂, 但结果较为准确; $N-M$ 相关曲线法概念简单, 但计算结果偏于保守.

参 考 文 献

- [1] SHERIF E, DEIERLEIN G G. Strength and ductility of concrete encased composite columns [J]. Journal of Structural Engineering, 1999, 125(9):1009-1019.
- [2] 叶列平, 方鄂华. 钢管混凝土构件的受力性能研究综述 [J]. 土木工程学报, 2000, 33(5):1-12.
- [3] 冯乃谦, 叶列平, 译. 钢管钢筋混凝土结构计算标准及解说 [M]. (日本建筑学会, 1987 年) 北京: 原子能出版社, 1998.
- [4] The Former Soviet Union Electronic Ministry of Construction. Design guide for reinforced concrete structure: CN3-78[S]. The Former Soviet Union: [s.n.], 1978.
- [5] American Institute of Steel Construction. Load and resistance factor design specification for structural steel buildings;

AISC-LRFD(99) [S]. New York: [s.n.], 1999.

- [6] European Committee for Standardization. Design of composite steel and concrete structures, part 1.1: general rules and rules for building: BS EN 1994-1-1; Eurocode 4 [S]. London: [s.n.], 2004.
- [7] 中国冶金工业部. 钢管混凝土结构设计规程: YB 9082—2006 [S]. 北京: 冶金工业出版社, 2007.
- [8] 中华人民共和国建设部. 型钢混凝土组合结构技术规范: JGJ 138—2001 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2002.
- [9] 范重, 刘先明, 范学伟, 等. 国家体育场大跨度钢结构设计与研究 [J]. 建筑结构学报, 2007, 28(2):1-16.
- [10] 逢靖华, 吴宏磊, 邱林波. 高强度钢材在郑州绿地中央广场中的应用分析 [J]. 工业建筑, 2014, 44(3):43-47.
- [11] 李国强, 王彦博, 陈素文, 等. Q460 高强钢焊接箱形柱轴心受压极限承载力参数分析 [J]. 建筑结构学报, 2011, 32(11):149-155.
- [12] 班慧勇, 施刚, 石永久, 等. 国产 Q460 高强度钢材焊接工字形截面残余应力试验及分布模型研究 [J]. 工程力学, 2014, 31(6):60-69, 100.
- [13] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 混凝土结构规范: GB 50010—2010 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.
- [14] 中华人民共和国建设部. 钢结构设计规范: GB 50017—2003 [S]. 北京: 中国计划出版社, 2004.
- [15] 若林实. 防灾シリーズ1, 耐震构造—建物の耐震性能 [M]. 东京: 森北出版株式会社, 1981.
- [16] 李少泉, 沙镇平. 钢管混凝土柱正截面承载力计算的叠加法 [J]. 建筑结构学报, 2002, 23(3):27-31.

(编辑 赵丽莹)