

马腾飞,高铨然,郝子琪,等.方钢管再生混凝土组合异形柱偏压力学性能及参数化分析[J].辽宁工程技术大学学报(自然科学版),2026,45(1):66-72.DOI:10.11956/j.issn.1008-0562.20250295

MA Tengfei,GAO Xuanran,HAO Ziqi,et al.Eccentric mechanical properties and parametric analysis of recycled concrete composite special-shaped columns made of square steel tubes[J].Journal of Liaoning Technical University(Natural Science),2026,45(1):66-72. DOI:10.11956/j.issn.1008-0562.20250295

方钢管再生混凝土组合异形柱偏压力学性能及参数化分析

马腾飞^{1,2,3,4},高铨然³,郝子琪³,马致丰³

(1.中冶建筑研究总院有限公司,北京 100088;2.清华大学 土木工程系,北京 100084;3.北华航天工业学院 建筑工程学院,河北 廊坊 065000;4.河北省建筑保温与结构一体化技术创新中心,河北 廊坊 065000)

摘要:针对再生粗骨料取代对方钢管再生混凝土组合异形柱偏压力学性能的影响,在既有试验结果的基础上,采用经过验证的有限元方法,对该类异形柱在偏压载荷作用下的力学性能进行分析。研究表明:方钢管再生混凝土组合异形柱的偏压承载力随粗骨料取代率的增加而逐渐降低;当粗骨料取代率超过40%时,承载力下降趋势更为显著;在相同粗骨料取代率条件下,提高钢材屈服强度或增加钢材厚度能够有效增强试件的整体稳定性,提高其偏压承载力;增大连接板宽度会削弱试件的稳定性,导致偏压承载力降低。

关键词:方钢管混凝土柱;“L”形柱;再生混凝土;偏压承载力;力学性能;粗骨料

中图分类号:TU528;U445

文献标志码:A

文章编号:1008-0562(2026)01-0066-07

Eccentric mechanical properties and parametric analysis of recycled concrete composite special-shaped columns made of square steel tubes

MA Tengfei^{1,2,3,4}, GAO Xuanran³, HAO Ziqi³, MA Zhifeng³

(1. Central Research Institute of Building and Construction Company Limited MCC Group, Beijing

100088, China; 2. Department of Civil Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China;

3. Department of Civil Engineering, North China Institute of Aerospace Engineering, Langfang 065000,

China; 4. Technical Innovation Center of Building Insulation and Structure Integration in Hebei Province,

Langfang 065000, China)

Abstract: Aiming at the influence of recycled coarse aggregate replacement rate on the mechanical properties of square steel tube recycled concrete composite special-shaped columns under eccentric compression, based on the existing test results, the verified finite element method was used to analyze the mechanical properties of this kind of special-shaped columns under eccentric compression load. The results show that the eccentric compression bearing capacity of square steel tube recycled concrete composite special-shaped columns decreases with the increase of coarse aggregate replacement rate. When the replacement rate of coarse aggregate exceeds 40%, the downward trend of bearing capacity is more significant. Under the condition of the same coarse aggregate replacement rate, increasing the yield strength of steel or increasing the thickness of steel can effectively enhance the overall stability of the specimen and improve its eccentric bearing capacity. Increasing the width of the connecting plate will weaken the stability of the specimen, resulting in a decrease in the bearing capacity.

Keywords: concrete-filled steel square tubular column; L-shaped column; recycled concrete; bias pressure bearing capacity; mechanical properties; coarse aggregate

收稿日期: 2025-07-04 修回日期: 2025-10-14 接受日期: 2025-10-31 责任编辑: 朱含露

基金项目: 河北省住房和城乡建设厅建设科技研究项目(2024年); 北华航天工业学院科研基金项目(ZD-2022-05)

作者简介: 马腾飞(1987-),女,河北廊坊人,博士,副教授,主要从事钢结构及组合结构理论方面的研究。E-mail: matf6699@126.com

0 引言

方钢管混凝土组合异形柱是由多个单肢方钢管混凝土柱通过加劲肋间隔焊接连接而成^[1],具体类型见图1。传统建筑中,室内存在凸角、墙面不平等问题,影响室内家具摆放及空间使用。方钢管混凝土组合异形柱则可根据不同使用部位采用相应形状的柱体,并将其埋入墙体内部,从而有效解决室内凸角问题。再生混凝土作为处理废弃混凝土的有效方式之一,其表观密度、抗压强度和抗冻性能等方面均较天然混凝土差^[2-6]。但将其填充至钢管内形成钢管再生混凝土柱,可显著提高再生混凝土的强度^[7-9]。

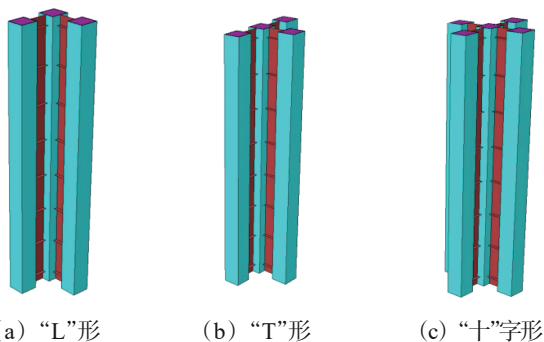


图1 方钢管混凝土组合异形柱

Fig.1 square concrete-filled steel tube composite special-shaped column

目前,关于方钢管异形柱的研究主要集中于方钢管普通混凝土柱在轴压、偏压及抗震等方面的力学性能分析。陈志华等^[10-11]对十字形方钢管再生混凝土组合异形柱的轴压与偏压力学性能的研究结果表明,理论计算、有限元模拟与轴压试验3种方法所得的破坏形态均为扭转屈曲,且屈服荷载较为吻合,构件抗震性能良好。王亚雯等^[12-13]、ZHOU^[14]、贾雨萌^[15]通过对方钢管混凝土组合异形柱-H型钢梁框架进行试验与有限元分析,发现该框架具有良好的耗能能力和延性,但在反复荷载作用下,轴压比增大会对框架的极限承载力和延性产生不利影响。陈志华等^[16]以轴压比为变量,对“L”形钢管混凝土组合异形柱-钢梁中节点进行了往复加载试验,结果表明,试件的主要破坏发生在扩翼缘式端板连接处以及钢梁翼缘连接板的圆弧过渡区域。周婷等^[17]对“L”形方钢管混凝土组合异形柱施加轴向荷载,研究发现试件的破坏由单柱局部屈曲引起,柱体整体均匀受压,各单柱之间协同工作性能良好。刘洁^[18]、熊清清等^[19-20]对

“L”形双钢板连接钢管混凝土组合异形柱的研究表明,该类试件整体性能良好,其承载力与抗震性能均优于单板连接组合异形柱。马腾飞等^[21-25]对“L”形方钢管再生混凝土组合异形柱的轴压与偏压力学性能的研究结果表明,当再生粗骨料取代率超过40%(质量分数)时,轴压荷载下试件的弹塑性阶段不明显,偏压荷载下试件的承载力、延性和刚度均有所下降并提出了相应的偏压承载力计算公式。然而现有研究多基于单一钢材参数展开,相关力学性能研究仍有待进一步系统化与参数拓展。

因此,在前期试验研究的基础上,以“L”形方钢管再生混凝土组合异形柱为研究对象,采用数值模拟方法,并对其进行参数化分析,重点研究其在偏压荷载作用下的力学性能。

1 有限元数值模型

1.1 建立有限元模型

有限元数值模型见图2。“L”形方钢管再生混凝土组合异形柱由混凝土、钢管、连接板及加劲肋组成。其中,钢管、加劲肋和连接板采用有限应变壳单元SHELL181进行模拟,混凝土则采用适用于钢筋混凝土的实体单元SOLID65进行模拟。钢管与混凝土之间的接触采用面-面接触形式^[1,26]。在数值模型中,将混凝土侧面视为刚性面,采用TARGE170单元模拟;方钢管侧面视为柔性面,采用CONTA173单元模拟。约束柱底节点在X、Y、Z方向的自由度,柱顶所有节点耦合至形心节点,约束该形心节点在X、Y方向的自由度,并在偏离形心轴80 mm的节点(P80)上施加偏压荷载(图3)。模拟所采用的边界条件与试验边界条件保持一致。

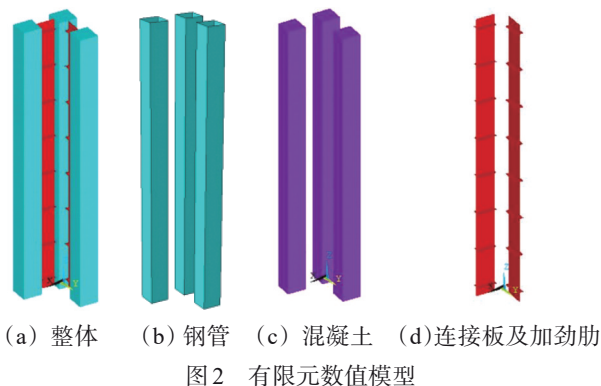


图2 有限元数值模型

Fig.2 finite element numerical model

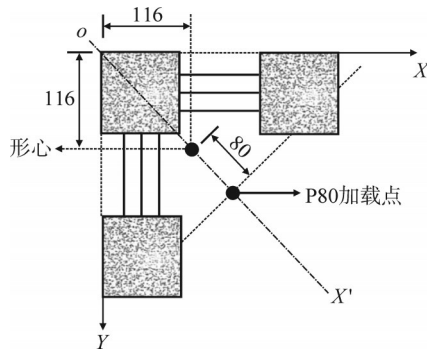


图3 P80加载点(单位:mm)

Fig.3 P80 loading point (unit: mm)

1.2 材料本构关系

采用李佳岐等^[27]提出的适用于钢管中再生混凝土的本构关系模型。该模型在既有钢管约束混凝土本构关系^[28-30]的基础上,引入了与再生混凝土取代率相关的系数 r 和与细骨料种类相关的系数 K ,并对混凝土的峰值应变与峰值应力进行了相应调整。其针对方钢管约束再生混凝土的具体计算公式为

$$y = \begin{cases} 2x - x^2 & x \leq 1 \\ \frac{x}{\beta(x-1)^n + x} & x > 1 \end{cases} \quad (1)$$

$$x = \varepsilon/\varepsilon_{c0}, \quad y = \sigma/\sigma_{c0}, \quad (2)$$

$$\sigma_{c0} = Kf_c, \quad (3)$$

$$\varepsilon_{c0} = (\varepsilon_{cc} + 800\xi^{0.2} \times 10^{-6}) \cdot (1 + r/\theta) \times 10^{-6}, \quad (4)$$

$$\varepsilon_{cc} = (1300 + 12.5f_c) \times 10^{-6}, \quad (5)$$

$$\theta = 65.715r^2 - 109.43r + 48.989, \quad (6)$$

$$\eta = 1.6 + \frac{1.5}{x}, \quad (7)$$

$$\beta = \frac{f_c^{0.1}}{1.2\sqrt{1+\xi}}, \quad (8)$$

$$\xi = \frac{A_s f_y}{A_c f_{ck}}, \quad (9)$$

式(1)~式(9)中: ε_{c0} 为混凝土抗压峰值应变;

表1 不同粗骨料取代率下两类承载力模拟值与试验值对比

Tab.1 comparison of simulated and experimental values of two types of bearing capacity under different coarse aggregate replacement rates

模型编号	屈服承载力/kN			峰值承载力/kN		
	模拟值	试验值 ^[22]	误差/%	模拟值	试验值 ^[22]	误差/%
P80-0	1 410	1 450	2.84	2 012	1 904	5.37
P80-20	1 419	1 248	12.05	1 912	1 820	4.81
P80-40	1 205	1 085	9.96	1 729	1 652	4.45
P80-60	1 181	1 038	12.11	1 691	1 580	6.56
P80-80	1 079	985	8.71	1 579	1 510	4.37
P80-100	1 017	909	10.64	1 513	1 449	4.23

σ_{c0} 为混凝土抗压峰值应力; f_c 为混凝土立方体抗压强度; K 为混凝土细骨料调整系数,取1; r 为再生混凝土粗骨料取代率,分别取0, 20%, 40%, 60%, 80%, 100%; β 为截面及材料综合影响系数; η 为截面影响系数; σ 混凝土应力; ε 为混凝土应变; ξ 为钢管对其内部再生混凝土的约束效应系数; θ 为再生混凝土中粗骨料取代率影响系数; ε_{cc} 为约束混凝土应变; A_s 为钢管横截面面积; A_c 为核心混凝土横截面面积; f_y 为钢材屈服强度; f_{ck} 为混凝土棱柱体抗压强度。

钢管、连接板及加劲肋等钢材采用理想弹塑性本构关系模型^[1],表达式为

$$\begin{cases} \sigma_s = E_s \varepsilon_s & 0 \leq \varepsilon_s \leq \varepsilon_{s0} \\ \sigma_s = \sigma_{s0} & \varepsilon_s > \varepsilon_{s0} \end{cases}, \quad (10)$$

式中: σ_s 为钢材强度; σ_{s0} 为钢材的屈服强度, $\sigma_{s0} = \varepsilon_{s0} E_s$, E_s 为混凝土弹性模量; ε_s 为钢材应变; E_s 为钢材弹性模量。

1.3 施加初始缺陷

由于试验试件在制作、运输、切割及焊接过程中,会不可避免地产生残余应力、初始弯曲等初始缺陷。为使有限元模拟结果能更真实地反映试验试件的实际受力状态,在非线形分析中,将最低阶屈曲模态位移幅值的1/1 000作为初始几何缺陷,施加于有限元模型。

2 数值模拟与试验结果对比

基于ANSYS软件建立“L”形方钢管再生混凝土组合异形柱有限元模型,研究粗骨料取代率对其偏压力学性能的影响。屈服承载力和峰值承载力的模拟值与文献[22]中试验结果的对比见表1,模型以P80- a 命名,其中P80表示偏心距为80 mm, a 表示粗骨料取代率为 $a\%$ 。

由表 1 可见, 随着粗骨料取代率的增大, 构件的峰值承载力和屈服承载力逐渐降低。与文献[22]相比, 屈服承载力和峰值承载力的模拟值与试验值之间的平均误差分别为 9.39% 和 4.97%, 均在允许范围内, 表明数值模拟结果较为准确。

在偏压载荷作用下, 模型数值模拟结果与文献[22]试验结果的载荷-竖向位移曲线对比见图 4。可见, 基于 ANSYS 软件建立的模型模拟结果与文献[22]的试验结果基本一致, 表明模型具有很高的精度, 可以有效模拟试件的受力性能。

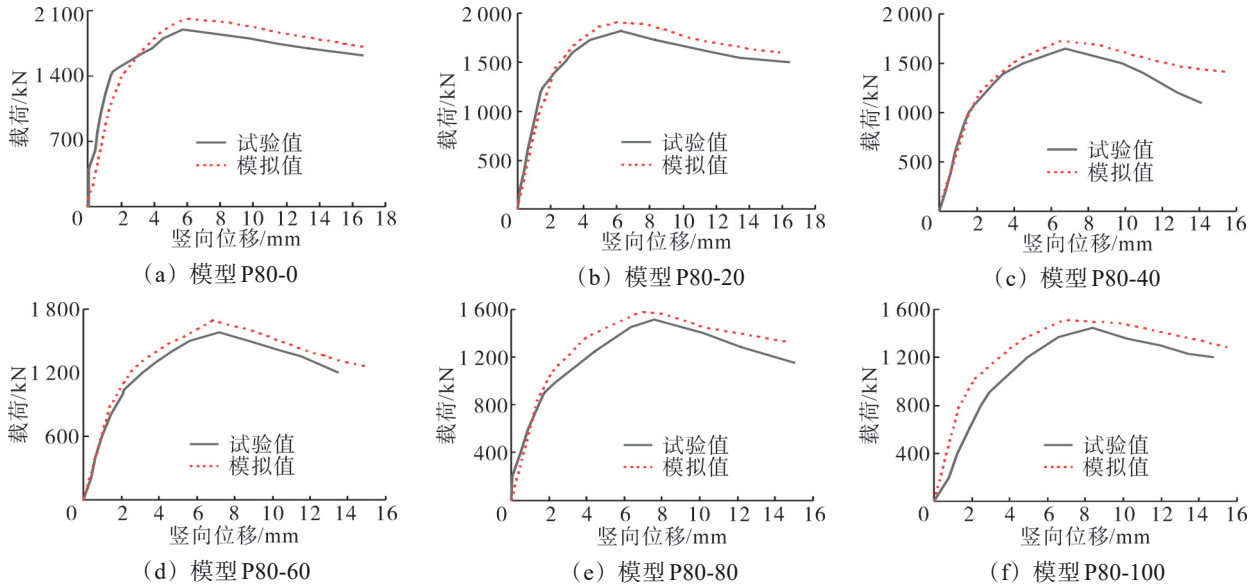


图 4 偏压载荷与竖向位移的关系

Fig.4 relationship between eccentric load and vertical displacement

3 参数化分析

3.1 钢材屈服强度的影响

为研究钢材强度对“L”形方钢管再生混凝土组合异形柱偏压力学性能的影响, 选取 Q235、Q345、Q390、Q420 及 Q460 钢材进行参数化分析 (其中钢管、连接板与加劲肋的强度均同步调整), 模拟结果见图 5。

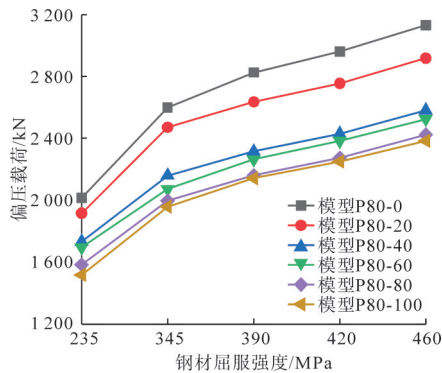


图 5 不同屈服强度钢材的偏压载荷

Fig.5 eccentric load of steel with different yield strength

随着钢材屈服强度的提高, 各模型的峰值承载力均有所增大。当钢材屈服强度从 235 MPa 提升至 345 MPa 时, 峰值承载力的增幅最大; 钢材屈服强度提高, 偏压载荷增幅大致相同。相同再生混

凝土粗骨料取代率下, 钢材屈服强度每提高一个等级, 模型的偏压承载力平均提升约 35%。在相同钢材屈服强度下, 随着粗骨料取代率的提高, 模型承载力逐渐降低, 且降幅基本一致。其中取代率从 20% 增至 40% 时, 承载力下降最为明显。这表明, 管内再生混凝土的屈服强度对试件峰值承载力具有显著影响。

综上, 在相同粗骨料取代率条件下, 提高钢材屈服强度是增强试件偏压承载力的有效途径之一。而在相同钢材屈服强度条件下, 提高再生粗骨料取代率则会导致试件偏压承载力降低。

3.2 钢材厚度的影响

选取 9 种不同的钢材厚度 (同步调整钢管壁厚、加劲肋厚度及连接板厚度) 进行偏压载荷作用下的承载力的数值模拟计算, 结果见图 6。由图 6 可见, 钢材厚度的增加对试件峰值承载力具有显著提升作用。这是因为钢材厚度增加后, 钢管对其内部再生混凝土的围压作用增强, 同时连接板与加劲肋对钢管混凝土的支撑作用也相应增大, 从而整体提高了试件的稳定性。当钢材厚度从 3.75 mm 逐步增至 19.75 mm 时, 6 种不同再生粗骨料取代率试件的峰值承载力均有不同程度提高, 增幅约为 220%~317%, 且随着取代率增大, 偏压

峰值承载力的增幅也相应增大。此外,在相同钢材厚度下,粗骨料取代率越高,试件的偏压峰值承载力越低,其中取代率从20%提高至40%时,承载力下降幅度最大。

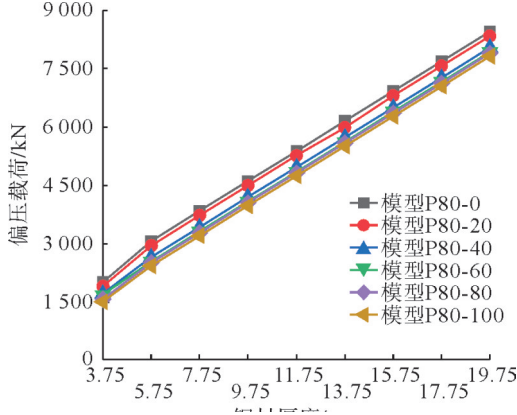


图6 不同厚度钢材的偏压荷载

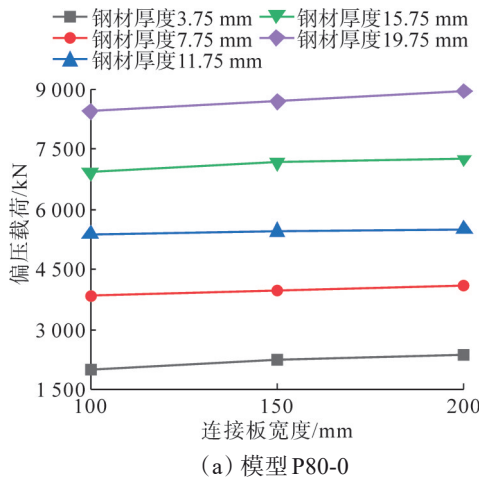
Fig.6 eccentric load of steel with different thickness

综上,在相同粗骨料取代率条件下,提高钢材厚度是有效提升试件偏压承载力的方法之一。而在相同钢材厚度条件下,提高再生粗骨料取代

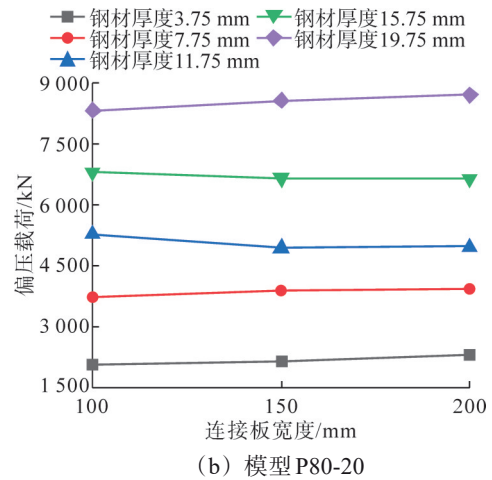
率则会导致试件偏压承载力降低。

3.3 连接板宽度的影响

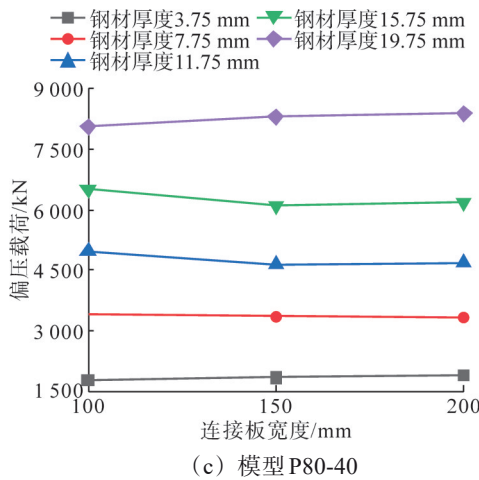
为研究连接板宽度对“L”形方钢管再生混凝土组合异形柱偏压力学性能的影响,基于数值模型分析5种钢材厚度与3种连接板宽度组合下构件的偏压承载力。偏压荷载-连接板宽度关系曲线见图7。可见,在偏压荷载作用下,当连接板宽度相同时,试件的峰值承载力随钢材厚度增加而逐渐提高。而在相同钢材厚度条件下,仅当钢材厚度为19.75 mm时,试件的峰值承载力随连接板宽度增大而逐渐上升,这可能是由于较大厚度下连接板自身稳定性增强,加强了对单肢方钢管的支撑作用。而当钢材厚度分别为3.75 mm、7.75 mm、11.75 mm和15.75 mm时,随着连接板宽度增加,各试件的峰值承载力基本呈下降或停滞趋势。这一现象可能原因为:连接板宽度增大导致其自身稳定性下降,削弱了对单肢钢管的支撑作用,进而引发连接板失稳,降低试件整体稳定性,最终限制承载力的提升。因此,增大连接板宽度对试件的偏压承载力的提升并无积极作用。



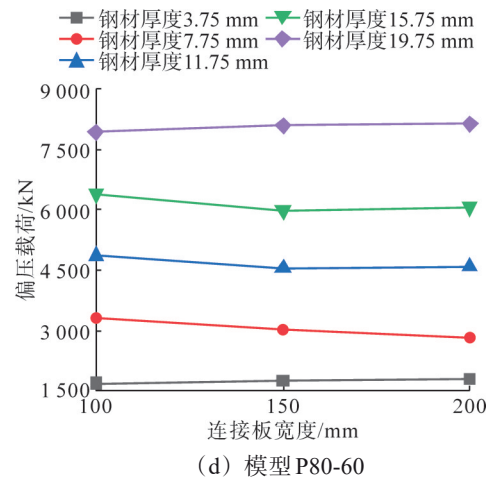
(a) 模型 P80-0



(b) 模型 P80-20



(c) 模型 P80-40



(d) 模型 P80-60

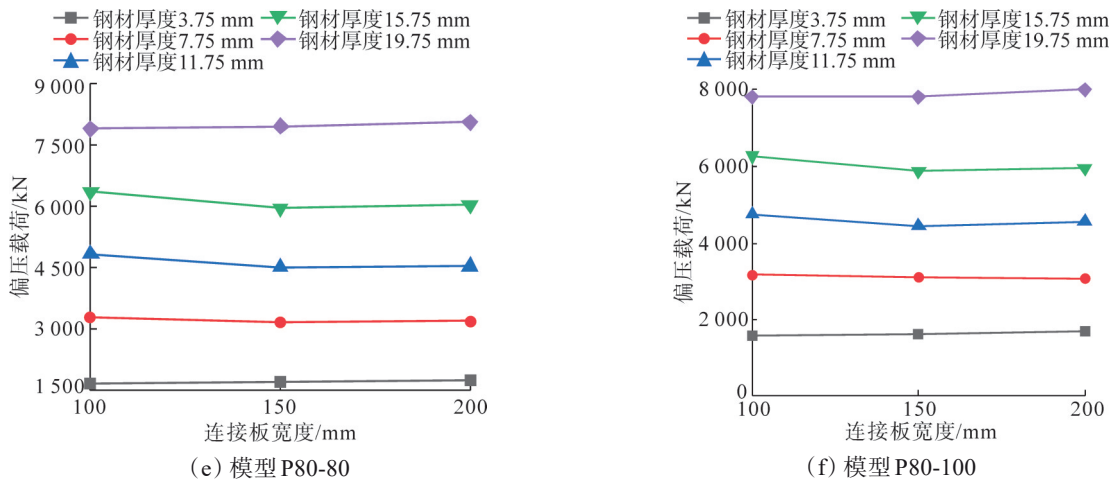


图7 不同宽度连接板的偏压载荷

Fig.7 eccentric load of different width connecting plate

4 结论

(1) 有限元模拟结果与试验结果吻合良好,表明有限元方法可用于方钢管再生混凝土组合异形柱偏压力学性能的数值模拟。

(2) 随着粗骨料取代率的增大,试件的峰值承载力呈逐渐降低趋势,且当粗骨料取代率大于40%时,试件的峰值承载力下降速率加快。

(3) 在工程设计中,当粗骨料取代率相同时,可以通过提高钢材屈服强度、增大钢材厚度等方法提高试件的偏压承载力。不建议采用增大连接板宽度的方法提高试件的偏压承载力。

参考文献(References):

- [1] 荣彬. 方钢管混凝土组合异形柱的理论分析与试验研究[D]. 天津: 天津大学, 2009:30-91.
- [2] 应敬伟, 蒙秋江, 肖建庄. 再生骨料CO₂强化及其对混凝土抗压强度的影响[J]. 建筑材料学报, 2017, 20(2): 277-282.
YING Jingwei, MENG Qiujiang, XIAO Jianzhuang. Effect of CO₂ modified recycled aggregate on compressive strength of concrete [J]. Journal of Building Materials, 2017, 20(2): 277-282.
- [3] 阎杰, 赖镇泉, 左军鹏, 等. 纳米偏高岭土对铁尾矿砂-再生混凝土抗压性能影响及微观结构分析[J]. 辽宁工程技术大学学报(自然科学版), 2024, 43(2): 163-170.
YAN Jie, LAI Zhenquan, ZUO Junpeng, et al. Influence of nano-metakaolin on the compressive strength of iron tailing sand-recycled concrete and microstructure analysis[J]. Journal of Liaoning Technical University(Natural Science), 2024, 43(2): 163-170.
- [4] POON C S, SHUI Z H, LAM L. Effect of microstructure of ITZ on compressive strength of concrete prepared with recycled aggregates [J]. Construction and Building Materials, 2004, 18(6): 461-468.
- [5] 董腾, 廖文激, 刘佳婕, 等. 玄武岩纤维对再生骨料混凝土力学性能的影响与数值模拟研究[J]. 混凝土, 2022(1): 92-96.

DONG Teng, LIAO Wenji, LIU Jiajie, et al. Effects and numerical simulation of basalt fibers on the mechanical properties of recycled aggregate concrete[J]. Concrete, 2022(1): 92-96.

- [6] 倪紫威, 路璐, 沈立. 再生混凝土的力学及抗冻性能研究[J]. 混凝土世界, 2021(12): 46-49.
NI Ziwei, LU Lu, SHEN Li. Study on the mechanics and frost resistance of recycled concrete[J]. China Concrete, 2021(12): 46-49.
- [7] 王刚. 钢管再生混凝土柱力学性能的影响因素[J]. 结构工程师, 2021, 37(2): 148-156.
WANG Gang. Influencing factors on mechanical properties of recycled concrete filled steel tubular columns[J]. Structural Engineers, 2021, 37(2): 148-156.
- [8] 陈宗平, 徐金俊, 李卫宁, 等. 再生粗骨料含量对钢管再生混凝土粘结强度及失效性态的影响研究[J]. 工程力学, 2014, 31(6): 70-78.
CHEN Zongping, XU Jinjun, LI Weining, et al. Influence of recycled coarse aggregate content on bond strength and invalidation mechanism between steel tube and recycled aggregate concrete[J]. Engineering Mechanics, 2014, 31(6): 70-78.
- [9] 张姣. 钢管再生混凝土静-动态轴压性能研究[D]. 广州: 广州大学, 2022:42-50.
- [10] 陈志华, 李振宇, 荣彬, 等. 十字形截面方钢管混凝土组合异形柱轴压承载力试验[J]. 天津大学学报, 2006, 39(11): 1275-1282.
CHEN Zhihua, LI Zhenyu, RONG Bin, et al. Experiment of axial compression bearing capacity for crisscross section special-shaped column composed of concrete-filled square steel tubes[J]. Journal of Tianjin University, 2006, 39(11): 1275-1282.
- [11] 陈志华, 赵炳震, 李斌, 等. 矩形钢管混凝土组合异形柱框架-支撑体系静力弹塑性分析[J]. 工业建筑, 2017, 47(6): 152-157.
CHEN Zhihua, ZHAO Bingzhen, LI Bin, et al. Push-over analysis of special-shaped concrete filled rectangular steel tubular frame-brace system[J]. Industrial Construction, 2017, 47(6): 152-157.
- [12] 王亚雯, 闫翔宇, 周婷. SCFT柱-H型钢梁平面框架抗震性能分析[J]. 天津大学学报(自然科学与工程技术版), 2015, 48(增刊1): 9-16.

- WANG Yawen, YAN Xiangyu, ZHOU Ting. Seismic behavior of SCFT column-H section steel beam plane frame[J]. Journal of Tianjin University (Science and Technology), 2015, 48(Suppl. 1): 9-16.
- [13] 王亚雯. 方钢管混凝土组合异形柱抗震性能研究[D]. 天津: 天津大学, 2014:42-52.
- [14] ZHOU T, JIA Y M, XU M Y, et al. Experimental study on the seismic performance of L-shaped column composed of concrete-filled steel tubes frame structures[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2015, 114:77-88.
- [15] 贾雨萌. 方钢管混凝土组合异形柱框架抗震性能试验与有限元研究[D]. 天津: 天津大学, 2014:40-45.
- [16] 陈志华, 张旺, 熊清清, 等. L-CFST柱-钢梁中节点抗震性能试验和有限元分析[J]. 天津大学学报(自然科学与工程技术版), 2018, 51(增刊1):10-19.
- CHEN Zhihua, ZHANG Wang, XIONG Qingqing, et al. Seismic performance test and finite element analysis of interior joint in L-CFST column and steel beam frames[J]. Journal of Tianjin University (Science and Technology), 2018, 51(Suppl.1): 10-19.
- [17] ZHOU T, XU M Y, WANG X D, et al. Experimental study and parameter analysis of L-shaped composite column under axial loading[J]. International Journal of Steel Structures, 2015, 15(4): 797-807.
- [18] 刘洁. 双板连接钢管混凝土组合异形柱压弯力学性能研究[D]. 天津: 天津大学, 2021:23-61.
- [19] XIONG Q Q, CHEN Z H, KANG J F, et al. Experimental and finite element study on seismic performance of the LCFST-D columns[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2017, 137: 119-134.
- [20] 熊清清. L形双板连接钢管混凝土组合异形柱力学性能研究[D]. 天津: 天津大学, 2017:21-99.
- [21] MA T F, CHEN Z H, KHAN K, et al. Experimental and numerical analysis of L-shaped column composed of recycled aggregate concrete-filled square steel tubes under eccentric compression [J]. Advanced Steel Construction, 2023, 19(2): 177-184.
- [22] MA T F, CHEN Z H, KHAN K, et al. Eccentric load-carrying capacity calculation of L-shaped columns with recycled aggregate concrete-filled tubes[J]. Structures, 2024, 59: 105606.
- [23] 马腾飞, 陈志华, 杜颜胜. L形方钢管再生混凝土组合异形柱轴压力学性能研究[J]. 工业建筑, 2023, 53(5): 1-6.
- MA Tengfei, CHEN Zhihua, DU Yansheng. Axial compression behaviour of L-shaped column composed of recycled aggregate concrete-filled square steel tubes[J]. Industrial Construction, 2023, 53(5): 1-6.
- [24] 马腾飞, 陈志华, 杜颜胜, 等. L形方钢管再生混凝土组合异形柱压弯扭力学性能有限元分析[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2023, 39(3): 437-445.
- MA Tengfei, CHEN Zhihua, DU Yansheng, et al. Finite element analysis of compress-flexure-torsion mechanical behavior of L-shaped column composed of recycled aggregate concrete-filled square steel tubes[J]. Journal of Shenyang Jianzhu University (Natural Science), 2023, 39(3): 437-445.
- [25] 马腾飞, 陈志华, 杜颜胜. L形方钢管再生混凝土组合异形柱偏压承载力计算方法[J]. 建筑科学与工程学报, 2025, 42(1): 82-89.
- MA Tengfei, CHEN Zhihua, DU Yansheng. Calculation method of eccentric load-bearing capacity of L-shaped column composed of recycled aggregate concrete-filled square steel tube[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2025, 42(1): 82-89.
- [26] 周婷. 方钢管混凝土组合异形柱结构力学性能与工程应用研究[D]. 天津: 天津大学, 2012:39-102.
- [27] 李佳岐, 陈志华, 杜颜胜, 等. 钢管机制砂再生混凝土柱核心混凝土受压本构模型研究[J]. 工业建筑, 2021, 51(5): 108-115, 15.
- LI Jiaqi, CHEN Zhihua, DU Yansheng, et al. Study on constitutive model of core concrete of recycled aggregate concrete filled steel tubular columns under compression[J]. Industrial Construction, 2021, 51(5): 108-115, 15.
- [28] YANG Y F, HAN L H. Compressive and flexural behaviour of recycled aggregate concrete filled steel tubes (RACFST) under short-term loadings[J]. Steel and Composite Structures, 2006, 6(3): 257-284.
- [29] 杨有福. 钢管再生混凝土构件荷载-变形关系的理论分析[J]. 工业建筑, 2007, 37(12): 1-6, 124.
- YANG Youfu. Theoretical research on load-deformation relations of recycled aggregate concrete-filled steel tubular members[J]. Industrial Construction, 2007, 37(12): 1-6, 124.
- [30] 肖建庄, 兰阳. 再生混凝土单轴受拉性能试验研究[J]. 建筑材料学报, 2006, 9(2): 154-158.
- XIAO Jianzhuang, LAN Yang. Investigation on the tensile behavior of recycled aggregate concrete[J]. Journal of Building Materials, 2006, 9(2): 154-158.