第 42 卷 第 1 期
2025 年 1 月

建筑科学与工程学报
Journal of Architecture and Civil Engineering

Vol. 42 No. 1
Jan. 2025

引文格式: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.

DOI:10.19815/j.jace.2022.07095

L 形方钢管再生混凝土组合异形柱偏压承载力计算方法

马腾飞[1,2,3],陈志华[1],杜颜胜[1]

(1. 天津大学 建筑工程学院,天津 300072;2. 北华航天工业学院 建筑工程学院,河北 廊坊 065000;
3. 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:基于叠加原理,在《矩形钢管混凝土组合异形柱技术规程》提供的理论计算公式基础上,研究了 L 形方钢管再生混凝土组合异形柱偏压承载力计算方法。在考虑再生混凝土有效约束面积影响的基础上,提出了 L 形方钢管再生混凝土组合异形柱偏压承载力计算公式,绘制出轴力-弯矩关系曲线。结果表明:通过引入钢管对内填再生混凝土的约束效应系数,考虑钢管对不同粗骨料取代率再生混凝土的有效约束作用,并根据约束强弱将钢管对内填再生混凝土的约束区域进行划分,可得到再生混凝土的有效约束面积;通过与试验及数值模拟结果对比,验证了 L 形方钢管再生混凝土组合异形柱偏压承载力计算公式的有效性,该公式可用于预测 L 形方钢管再生混凝土组合异形柱的偏压承载力,轴力-弯矩关系曲线可较为准确且安全地预测试件的承载力。

关键词:方钢管混凝土柱;L 形异形柱;再生混凝土;偏压承载力;计算方法

中图分类号:TU398 **文献标志码**:A **文章编号**:1673-2049(2025)01-0082-08

Calculation method of eccentric load-bearing capacity of L-shaped column composed of recycled aggregate concrete-filled square steel tube

MA Tengfei[1,2,3], CHEN Zhihua[1], DU Yansheng[1]

(1. School of Civil Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China; 2. Department of Civil Engineering, North China Institute of Aerospace Engineering, Langfang 065000, Hebei, China; 3. Technical Innovation Center of Building Insulation and Structure Integration in Hebei Province, Langfang 065000, Hebei, China)

Abstract: According to the superposition principle, the calculation method of eccentric compression bearing capacity of L-shaped column composed of recycled aggregate concrete-filled square steel tube(L-RACFST) was studied based on the theoretical calculation formula provided by the *Technical Specification for Special-shaped Column Structure Composed of Concrete-filled Rectangular Steel Tubes*. Considering the effect of recycled concrete effective restraint area, the calculation formula of eccentric bearing capacity of the L-RACFST was put forward, and the axial force-bending moment (*N*-*M*) relationship curve was drawn. The results show that

收稿日期:2023-07-05 **投稿网址**:http://jace.chd.edu.cn
基金项目:国家重点研发计划项目(2019YFD1101005);河北省高等学校科学技术研究项目(QN2021003);
北华航天工业学院科研基金项目(ZD-2022-05);中央引导地方科技发展资金项目(226Z1201G);
河北省高等学校科学技术研究项目青年拔尖人才项目(BJ2019059)
作者简介:马腾飞(1987-),女,工学博士研究生,讲师,E-mail:mtf@nciae.edu.cn。
通信作者:杜颜胜(1989-),男,工学博士,副研究员,E-mail:duys@tju.edu.cn。

by introducing the restraint influence coefficient of the steel tube on the recycled coarse aggregate (RCA), considering the effective restraint effect of the steel tube on the recycled concrete with different RCA replacement ratio, and dividing the restraint area of steel tube on RAC according to the constraint strength, the effective restraint area of recycled concrete can be obtained. By comparing with the experimental and numerical simulation results, the validity of the calculation formula of the eccentric compression bearing capacity of the L-RACFST is verified. The formula can be used to predict the eccentric compression bearing capacity of the L-RACFST, and the *N*-*M* relationship curve can predict the bearing capacity of the specimen more accurately and safely.

Key words: concrete-filled square steel tube column; L-shaped column; recycled concrete; eccentric compression bearing capacity; calculation method

Author resumes: MA Tengfei(1987-), female, doctoral student, assistant professor, E-mail: mtf@nciae.edu.cn; DU Yansheng(1989-), male, PhD, associate research fellow, E-mail: duys@tju.edu.cn.

0 引 言

2021 年 10 月，中共中央办公厅、国务院办公厅印发的《关于推动城乡建设绿色发展的意见》明确指出，大力发展装配式建筑，重点推动钢结构装配式住宅建设，不断提升构件标准化水平，推动形成完整产业链，推动智能建造与工业建筑化协同发展。2021 年 10 月，国务院印发《2030 年前碳达峰行动方案》，明确指出，推广绿色低碳建材和绿色建造方式，加快推进新型建筑工业化，大力发展装配式建筑，推广钢结构住宅，推动建材循环利用，加快绿色设计和绿色施工管理，加强县城绿色低碳建设。钢结构住宅以其质量轻、强度高、抗震性能好、工业化程度高、施工速度快等一系列优点，被认为是目前最具发展潜力的环保节能型住宅。

方钢管混凝土组合异形柱是由单肢方钢管混凝土柱通过单钢板间隔焊接加劲肋形式连接组合而成的结构形式，具有抗剪强度高、塑性和韧性好、耐火性好等优点，其截面布置灵活，避免了传统方形或矩形截面柱引起的房间内凸角问题，增加房间使用面积，常用的截面形式有 L 形（角柱）、T 形（边柱）和十字形（中柱），如图 1 所示。

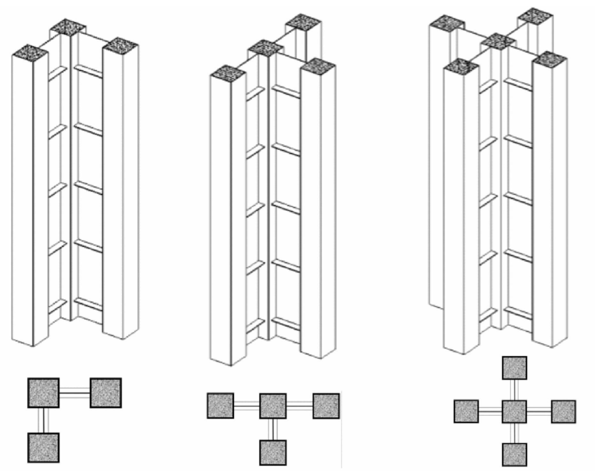

图 1　方钢管混凝土组合异形柱

Fig. 1　Special-shaped column composed of concrete-filled square steel tubes

每年因新建或拆除建筑物会产生大量建筑垃圾，无法及时处理的建筑垃圾会造成环境污染，对环境产生不利影响。再生混凝土是处理废弃混凝土的有效途径之一[1]。研究表明，掺入再生骨料后配置成的再生混凝土，其性能较普通混凝土有不同程度的降低[2-9]。将再生混凝土填充到钢管内，可形成钢管再生混凝土柱。柯晓军等[10]以再生粗骨料取代率、偏心距、长细比等为参数，研究了偏压荷载作用下的钢管再生混凝土组合柱的力学性能，建议在计算钢管再生混凝土组合柱的偏压承载力时，考虑钢管的作用及钢管对核心混凝土的约束作用。何振军等[11]通过试验及数值模拟研究了长细比对钢管再生混凝土组合柱力学性能的影响。大量的研究成果表明[12-19]，钢管再生混凝土柱不但能充分利用钢和混凝土各自优势，还可约束再生混凝土，克服其力学性能的弱点，提高再生混凝土结构的整体性能。

目前，对于方钢管混凝土组合异形柱的研究主要集中于方钢管普通混凝土组合异形柱的轴压、偏压力学性能及抗震性能[20-24]。鉴于该结构具有优良的力学性能和广阔的应用前景，且再生混凝土可实现资源循环利用，节约能源，因此有必要深入研究方钢管再生混凝土组合异形柱结构及其设计方法，为工程应用奠定基础。

本文在已有试验研究及数值模拟的基础上，依据叠加理论，充分考虑钢管对再生混凝土的约束作用，推导 L 形方钢管再生混凝土组合异形柱（L-RACFST）偏压承载力计算公式，为工程设计中预测 L 形方钢管再生混凝土组合异形柱的偏压承载力提供理论基础。

1 试验概况

在实际工程中，L 形异形柱一般作为处于双向偏压状态的角柱使用，荷载作用点在 OX' 轴上，使试件处于双向偏压状态。本次试验的加载点位于 OX' 轴上，分别距形心点 40、80 mm，即取 40 mm 和 80 mm 两种偏心距，对异形柱进行双向偏心受压状态下的试验研究[15]。本次试验共计 12 根异形柱试件，试件详细信息列于表 1，表中试件以“PX-Y”命名，其中 X 表示偏心距，Y 表示再生粗骨料取代率。本次试验的再生粗骨料取代率 R_a 分别为 0%、20%、40%、60%、80%和 100%。试件截面尺寸如图 2 所示，其中 t 为厚度。试件形心及加载点位置如图 3 所示。再生混凝土及钢管、加劲肋、连接板等材料性能参数参考文献[25]。试验在 500 t 电液伺服压力机上进行。试验过程中，在试件的各单肢柱外侧面的柱顶、柱中和柱底分别布置顶杆位移计，共计 12 个顶杆位移计，以测量试验过程中试件的顶部、中部和底部产生的水平位移值。同时，在各单肢柱的外侧面分别布置一个拉线位移计，共计 4 个拉线位移计，以测量试验过程中试件产生的竖向位移值。位移计的详细布置位置及试验加载制度参考文献[25]。试验测得的各试件轴力 $N_{\mathrm{p\text{-}Test}}$ 及弯矩 M_{Test} 信息如表 2 所示。

表 1 试验构件参数

Table 1 Parameters of test specimen

试件编号	钢管截面	连接板截面	加劲肋截面	R_a/%	偏心距/mm
P40-0	100 mm×100 mm×3.75 mm	1 500 mm×100 mm×3.75 mm	100 mm×20 mm×5.75 mm	0	40
P40-20	100 mm×100 mm×3.75 mm	1 500 mm×100 mm×3.75 mm	100 mm×20 mm×5.75 mm	20	40
P40-40	100 mm×100 mm×3.75 mm	1 500 mm×100 mm×3.75 mm	100 mm×20 mm×5.75 mm	40	40
P40-60	100 mm×100 mm×3.75 mm	1 500 mm×100 mm×3.75 mm	100 mm×20 mm×5.75 mm	60	40
P40-80	100 mm×100 mm×3.75 mm	1 500 mm×100 mm×3.75 mm	100 mm×20 mm×5.75 mm	80	40
P40-100	100 mm×100 mm×3.75 mm	1 500 mm×100 mm×3.75 mm	100 mm×20 mm×5.75 mm	100	40
P80-0	100 mm×100 mm×3.75 mm	1 500 mm×100 mm×3.75 mm	100 mm×20 mm×5.75 mm	0	80
P80-20	100 mm×100 mm×3.75 mm	1 500 mm×100 mm×3.75 mm	100 mm×20 mm×5.75 mm	20	80
P80-40	100 mm×100 mm×3.75 mm	1 500 mm×100 mm×3.75 mm	100 mm×20 mm×5.75 mm	40	80
P80-60	100 mm×100 mm×3.75 mm	1 500 mm×100 mm×3.75 mm	100 mm×20 mm×5.75 mm	60	80
P80-80	100 mm×100 mm×3.75 mm	1 500 mm×100 mm×3.75 mm	100 mm×20 mm×5.75 mm	80	80
P80-100	100 mm×100 mm×3.75 mm	1 500 mm×100 mm×3.75 mm	100 mm×20 mm×5.75 mm	100	80

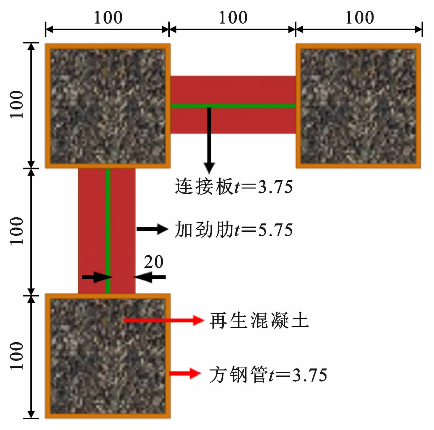

图 2 试件截面尺寸(单位:mm)

Fig. 2 Section size of specimen (unit:mm)

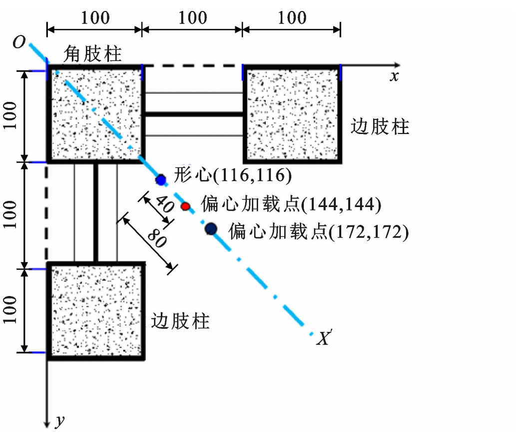

图 3 加载点位置(单位:mm)

Fig. 3 Position of load point (unit:mm)

2 数值模拟结果

采用有限元分析软件 ANSYS 对试验过程进行模拟[25]。为与试验边界条件保持一致，约束柱底所有节点的 X、Y、Z 向自由度，柱顶所有节点耦合到荷载施加位置，并约束 X 和 Y 向自由度。钢管与再

表 2　试验荷载信息

Table 2　Load information of test

试件编号	$N_{\text{p-Test}}$/kN	M_{Test}/(kN·m)
P40-0	2 196	93.68
P40-20	2 004	92.90
P40-40	1 851	85.68
P40-60	1 749	71.32
P40-80	1 605	75.70
P40-100	1 568	69.27
P80-0	1 904	156.49
P80-20	1 820	161.18
P80-40	1 652	140.37
P80-60	1 580	137.52
P80-80	1 510	123.50
P80-100	1 449	120.19

生混凝土之间采用面-面接触的方式模拟。钢管、连接板及加劲肋模型采用双线性随动强化 BKIN 模型,应用 Mises/Hill 屈服准则[26],其本构关系如式(1)所示。

$$\sigma=\begin{cases}E_s\varepsilon & \varepsilon\leqslant\varepsilon_y\\ f_y+(\varepsilon-\varepsilon_y)\alpha E_s & \varepsilon>\varepsilon_y\end{cases}\tag{1}$$

式中:σ 为应力;ε 为应变;E_s 为钢材的弹性模量,当进入强化阶段后,弹性模量为 αE_s,α 为取值 0.01 的系数;f_y 和 ε_y 分别为钢材的屈服应力和屈服应变。

再生混凝土采用考虑钢管约束的混凝土损伤塑性模型[27],其本构关系如式(2)~(7)所示。

$$y=\begin{cases}2x-x^2 & x\leqslant1\\ \dfrac{x}{\beta(x-1)^{1.6+1.5/x}+x} & x>1\end{cases}\tag{2}$$

$$x=\frac{\varepsilon}{\varepsilon_0},\ y=\frac{\sigma}{\sigma_0}\tag{3}$$

$$\sigma_0=[1+(-0.013\ 5\xi^2+0.1\xi)(\frac{24}{f_c})^{0.45}]f_c\tag{4}$$

$$\varepsilon_0=1\ 300+12.5f_c+[1\ 330+760(\frac{f_c}{24}-1)]\xi^{0.2}\tag{5}$$

$$\beta=\frac{f_c^{0.1}}{1.35\sqrt{1+\xi}(\xi-2)^2}\tag{6}$$

$$\xi=\frac{A_sf_y}{A_cf_c}\tag{7}$$

式中:σ_0 和 ε_0 为经过约束系数 ξ 调整后的峰值应力和应变;f_y 为钢管的屈服强度;A_s 为钢管的横截面面积;f_c 为再生混凝土的抗压强度;A_c 为再生混凝土的横截面面积。

数值模拟得到的各试件轴力 $N_{\text{p-FEM}}$ 及弯矩 M_{FEM} 信息如表 3 所示。

表 3　数值模拟荷载信息

Table 3　Load information of numerical simulation

试件编号	$N_{\text{p-FEM}}$/kN	M_{FEM}/(kN·m)
P40-0	2 251	90.21
P40-20	2 095	83.83
P40-40	1 896	75.87
P40-60	1 781	71.27
P40-80	1 659	65.38
P40-100	1 617	64.70
P80-0	2 012	161.15
P80-20	1 912	153.02
P80-40	1 729	137.35
P80-60	1 691	133.66
P80-80	1 579	124.83
P80-100	1 513	119.63

3　偏压承载力计算方法

异形柱中混凝土的约束状态如图 4 所示。从图 4 可以看出,方钢管容易发生屈曲,因此在方钢管混凝土组合异形柱外侧边部的混凝土得不到有效约束;与连接板焊接的钢管壁由于受到连接板的支撑作用,不容易发生屈曲,因此对混凝土约束效应较好;角部和截面中部对混凝土的约束效应也较强。基于 Mander 等[28]提出的约束混凝土受压本构关系,将钢管对内部再生混凝土的约束分为有效约束区域和非有效约束区域,两部分的边界以抛物线划分[29]。角肢柱及边肢柱中钢管对内部再生混凝土的约束区域划分如图 5 所示。再生混凝土有效约束区域面积采用公式(8)计算。

$$A_{cc}=\begin{cases}\dfrac{2(a-2t)^2}{3} & \text{角肢柱}\\ \dfrac{(a-2t)^2}{2} & \text{边肢柱}\end{cases}\tag{8}$$

式中:a 为方钢管宽度。

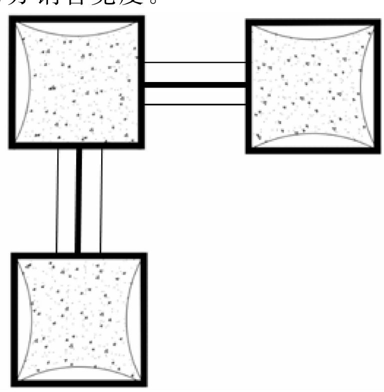

图 4　L-RACFST 中混凝土的约束状态

Fig. 4　Constraint state of concrete in L-RACFST

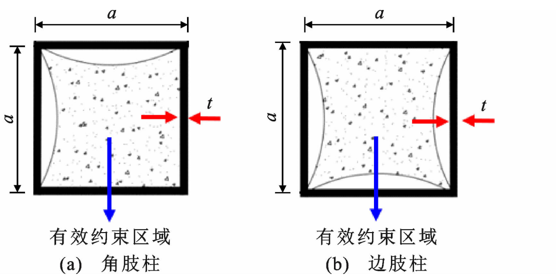

图 5 再生混凝土约束区域划分

Fig. 5 Division of recycled concrete restraint area

基于以上分析，在《矩形钢管混凝土组合异形柱技术规程》(T/CECS 825—2021)[30]提供的理论计算公式基础上，依据叠加原理，充分考虑钢管对再生混凝土的约束作用[29]，采用约束再生混凝土的抗压强度计算其偏压承载力。本文推导的 L 形方钢管再生混凝土组合异形柱偏压承载力的计算公式有以下基本假定：

(1)考虑钢管对再生混凝土的约束效应。

(2)采用全截面塑性准则，即假定构件达到极限状态时，所有钢材均达到了屈服强度，再生混凝土均达到了其抗压强度。

(3)L 形方钢管再生混凝土组合异形柱为理想弹塑性体，且满足平截面假定。

(4)不考虑混凝土的抗拉强度。

(5)试件的中性轴与 X 向坐标轴平行。

3.1 纯弯承载力计算方法

当构件的拉应力和压应力总和 N 为 0 时，试件处于纯弯状态，L-RACFST 纯弯状态下应力分布及计算简图如图 6 所示。纯弯状态下可通过式(9)～(11)计算试件的中性轴位置。

$$N=\sum A_{cc}f_c+\sum A_{sc}f_y+\sum A_{pc}f_{yp}-\sum A_{st}f_y-\sum A_{pt}f_{yp}=0 \tag{9}$$

$$M=K(\sum A_{cc}f_c d_{cc}+\sum A_{sc}f_y d_{sc}+\sum A_{pc}f_y d_{pc}-\sum A_{st}f_y d_{st}-\sum A_{pt}f_{yp}d_{pt}) \tag{10}$$

$$K=2+\frac{k}{4} \tag{11}$$

式中：A_{cc}为受压区混凝土有效约束面积；A_{sc}为受压区钢管面积；A_{pc}为受压区连接板面积；A_{st}为受拉区钢管面积；A_{pt}为受拉区连接板面积；f_{yp}为连接板屈服强度；d_{cc}为受压区再生混凝土合力作用点至中性轴的距离；d_{sc}为受压区钢管合力作用点至中性轴的距离；d_{pc}为受压区连接板合力作用点至中性轴的距离；d_{st}为受拉区钢管合力作用点至中性轴的距离；d_{pt}为受拉区连接板合力作用点至中性轴的距离；K

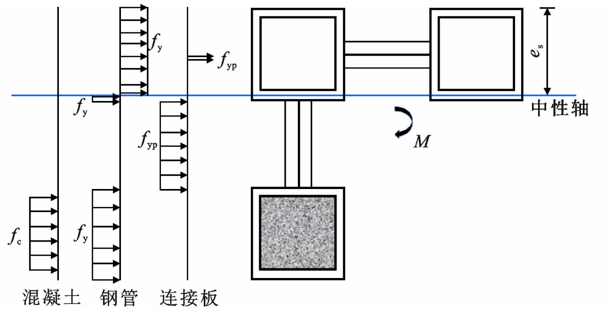

图 6 L-RACFST 纯弯状态下应力分布及计算简图

Fig. 6 Stress distribution and calculation diagram of L-RACFST under pure bending state

为钢管对再生混凝土的约束影响系数；k 为再生混凝土粗骨料取代率。

不同粗骨料取代率下各试件的中性轴位置均位于钢管壁内，且粗骨料取代率越大，其中性轴位置越靠近 X 轴方向，但差异很小。e_s 数据列于表 4 中。

表 4 L-RACFST 中性轴位置

Table 4 Neutral axis position of L-RACFST

粗骨料取代率/%	f_c/MPa	e_s/mm
0	33.36	98.16
20	29.00	97.93
40	17.57	97.32
60	13.30	97.10
80	11.94	97.02
100	8.99	96.87

依据中性轴位置，可由式(10)、(11)确定各试件纯弯状态下的弯矩值。

3.2 轴压承载力计算方法

当中性轴的位置与 X 轴重合时，试件处于轴压状态，弯矩为 0，L-RACFST 轴压状态下应力分布及计算简图如图 7 所示，其计算公式可简化为

$$N=\sum A_{cc}f_c+\sum A_{sc}f_y+\sum A_{pc}f_{yp} \tag{12}$$

$$N=3A_{cc}f_c+3A_{sc}f_y+2A_{pc}f_{yp} \tag{13}$$

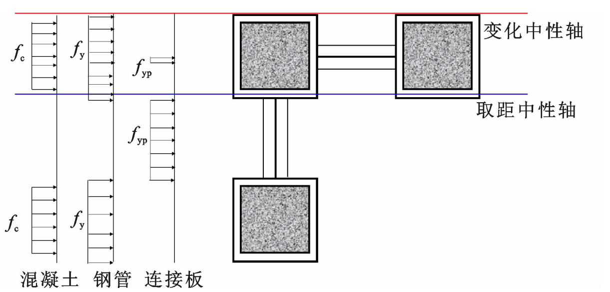

图 7 L-RACFST 轴压状态下应力分布及计算简图

Fig. 7 Stress distribution and calculation diagram of L-RACFST under axial compression state

3.3　压弯承载力计算方法

基于以上分析，在构件边缘（X 轴）与中性轴之间变化中性轴的位置，试件处于压弯状态，L-RACFST 压弯状态下应力分布及计算简图如图 8 所示。受压区钢管、连接板、再生混凝土对中性轴取距，受拉区钢管与连接板对中性轴取距，不考虑再生混凝土的受拉作用。因此，试件处于压弯状态时，其压力和弯矩计算公式为

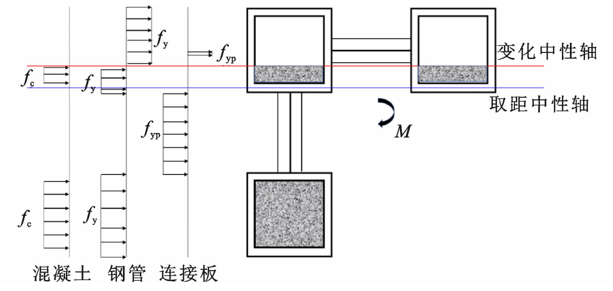

图 8　L-RACFST 压弯状态下应力分布及计算简图

Fig. 8　Stress distribution and calculation diagram of L-RACFST under compression bending state

$$N=\sum A_{cc}f_c+\sum A_{sc}f_y+\sum A_{pc}f_{yp}-\sum A_{st}f_y-\sum A_{pt}f_{yp} \tag{14}$$

$$M=K\left(\sum A_{cc}f_c d_{cc}+\sum A_{sc}f_y d_{sc}+\sum A_{pc}f_y d_{pc}-\sum A_{st}f_y d_{st}-\sum A_{pt}f_{yp}d_{pt}\right) \tag{15}$$

4　偏压承载力计算公式验证

将中性轴的位置由构件边缘（X 轴）逐渐变化到中性轴位置，可得各试件的轴力-弯矩（N-M）曲线。N-M 曲线与试验及有限元对比结果如图 9 所示。当 L 形方钢管再生混凝土组合异形柱的压力和弯矩组合值落在 N-M 曲线与 X 和 Y 轴组成的包络线以内时，可认为构件是安全的，反之，则认为构件是不安全的。对比可知，预测结果与试验和有限元数据误差较小，且预测结果相对安全。因此，可以利用上述公式预测 L 形方钢管再生混凝土组合异形柱的轴力和弯矩，也可以采用 N-M 曲线预测试件的安全性。

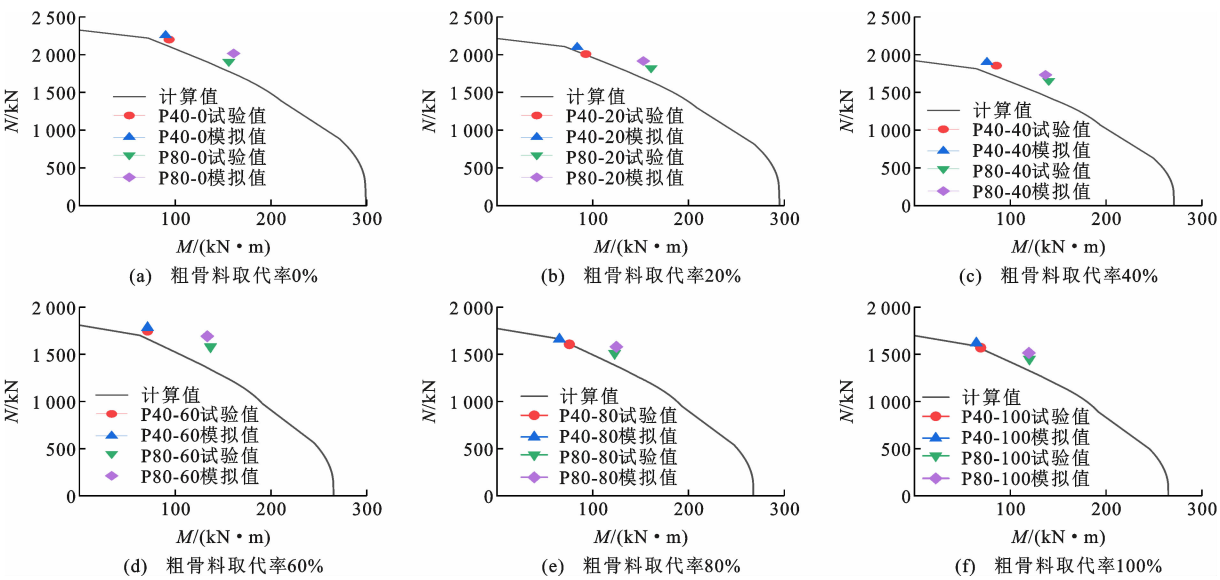

图 9　N-M 曲线

Fig. 9　N-M Curves

5　结　语

（1）依据叠加原理，在考虑钢管对再生混凝土约束作用的情况下，提出了钢管对再生混凝土的有效约束系数，推导了 L 形方钢管再生混凝土组合异形柱的偏压承载力计算公式，得到了 N-M 关系曲线。

（2）通过试验及数值模拟结果对比得出，本文推导出的公式可用于预测 L 形方钢管再生混凝土组合异形柱的偏压承载力，N-M 关系曲线可用于预测试件的安全性。

参考文献：

References：

［1］ 肖建庄. 再生混凝土[M]. 北京：中国建筑工业出版社，2008.

XIAO Jianzhuang. Recycled concrete[M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2008.

［2］ 张凯建，肖建庄，张青天. 海水海砂再生混凝土单轴受压应力-应变全曲线[J]. 同济大学学报（自然科学版），2021，49(12)：1738-1745.

ZHANG Kaijian, XIAO Jianzhuang, ZHANG Qingtian. Complete stress-strain curves of seawater sea sand recycled aggregate concrete under uniaxial compression [J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2021, 49(12): 1738-1745.

[3] 应敬伟,蒙秋江,肖建庄.再生骨料 CO_2 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 CO_2-modified recycled aggregate on compressive strength of concrete[J]. Journal of Building Materials, 2017, 20(2): 277-282.

[4] 王长青,肖建庄,孙振平.动态单调荷载下约束再生混凝土单轴受压应力-应变全曲线方程[J].土木工程学报,2017,50(8):1-9.

WANG Changqing, XIAO Jianzhuang, SUN Zhen-ping. Dynamic complete stress-strain curve equations of recycled aggregate concrete under monotonic uniaxial loading [J]. China Civil Engineering Journal, 2017, 50(8): 1-9.

[5] 肖建庄,张凯建,胡 博,等.基于可靠度分析的再生混凝土材料分项系数[J].工程力学,2017,34(6):82-91.

XIAO Jianzhuang, ZHANG Kaijian, HU Bo, et al. Reliability-based study on partial coefficient of recycled aggregate concrete[J]. Engineering Mechanics, 2017, 34 (6): 82-91.

[6] 董宏英,孙文娟,曹万林,等.钢筋-再生混凝土黏结滑移性能试验[J].哈尔滨工业大学学报,2017,49(12):82-90.

DONG Hongying, SUN Wenjuan, CAO Wanlin, et al. Experimental study on bond-slip behavior between steel bars and recycled concrete[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2017, 49(12): 82-90.

[7] 陈宗平,梁厚燃.高温喷水冷却后钢筋再生混凝土梁受力性能试验及承载力计算[J].土木工程学报,2019,52(12):22-35.

CHEN Zongping, LIANG Houran. Mechanical behavior test and bearing capacity calculation of reinforced recycled concrete beam subjected to high temperature and subsequent water cooling [J]. China Civil Engineering Journal, 2019, 52(12): 22-35.

[8] DU Y S, CHEN Z H, XIONG M X. Experimental behavior and design method of rectangular concrete-filled tubular columns using Q460 high-strength steel [J]. Construction and Building Materials, 2016, 125: 856-872.

[9] CHEN Z H, MA R, DU Y S, et al. Experimental and theoretical research on RCFT beam-columns fabricated with Q420b high-strength steel subjected to eccentric load[J]. Advanced Steel Construction, 2020, 16(4): 287-296.

[10] 柯晓军,杨春辉,苏益声,等.钢管再生混凝土组合柱偏心受压性能试验研究[J].应用基础与工程科学学报,2020,28(2):354-365.

KE Xiaojun, YANG Chunhui, SU Yisheng, et al. Experimental study on eccentric compressive performance of embedded steel tube confined reinforced recycle concrete composite columns[J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2020, 28(2): 354-365.

[11] 何振军,田亮亮,张晓洁,等.钢管再生混凝土柱轴压及其核心混凝土多轴力学性能研究[J].建筑结构,2018,48(增2):560-566.

HE Zhenjun, TIAN Liangliang, ZHANG Xiaojie, et al. Study on axial compression of recycled concrete filled steel tube columns and multi-axial mechanical properties of core concrete[J]. Building Structure, 2018, 48(S2): 560-566.

[12] 康希良,高 磊,陆松亭.荷载作用下钢管再生混凝土柱的受力分析及数值模拟研究[J].混凝土与水泥制品,2022(4):42-45,54.

KANG Xiliang, GAO Lei, LU Songting. Mechanical analysis and numerical simulation of recycled concrete filled steel tubular columns under load[J]. China Concrete and Cement Products, 2022(4): 42-45, 54.

[13] 杜颜胜,李佳岐,陈志华,等.矩形截面钢管尾矿砂再生混凝土柱抗震性能研究[J].建筑结构学报,2022,43(11):63-73.

DU Yansheng, LI Jiaqi, CHEN Zhihua, et al. Study on seismic performance of rectangular concrete-filled steel tube columns made with tailings and recycled aggregates [J]. Journal of Building Structures, 2022, 43(11): 63-73.

[14] 王成刚,张泽阳,梁恒斌,等.方、圆钢管再生混凝土长柱轴压性能试验对比分析[J].建筑结构,2020,50(增1):715-720.

WANG Chenggang, ZHANG Zeyang, LIANG Hengbin, et al. Comparative analysis of axial compression test of recycled aggregate concrete filled square and round steel tube long columns[J]. Building Structure, 2020, 50(S1): 715-720.

[15] 刘文超,曹万林,张建伟,等.火灾后钢管再生混凝土柱轴压性能试验研究[J].自然灾害学报,2017,26(5):45-50.

LIU Wenchao, CAO Wanlin, ZHANG Jianwei, et al. Experimental study on axial compression behavior of recycled concrete-filled steel tubular columns after fire exposure[J]. Journal of Natural Disasters, 2017, 26(5): 45-50.

[16] 张向冈，陈宗平，薛建阳. 钢管再生混凝土框架抗震强度与刚度试验研究[J]. 防灾减灾工程学报，2015，35(6)：799-806.
ZHANG Xianggang, CHEN Zongping, XUE Jianyang. Test study on seismic strength and rigidity of recycled aggregate concrete filled steel tube frame[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2015, 35(6): 799-806.

[17] 张继承，申兴月，王静峰，等. 方钢管再生混凝土短柱的轴压力学性能试验[J]. 广西大学学报(自然科学版)，2016，41(4)：1008-1015.
ZHANG Jicheng, SHEN Xingyue, WANG Jingfeng, et al. Experiment on mechanical behavior of recycled aggregate concrete-filled square steel tubular short columns under axial compression[J]. Journal of Guangxi University (Natural Science Edition), 2016, 41(4): 1008-1015.

[18] 陈宗平，张向冈，薛建阳，等. 圆钢管再生混凝土柱抗震性能与影响因素分析[J]. 工程力学，2016，33(6)：129-137.
CHEN Zongping, ZHANG Xianggang, XUE Jianyang, et al. Analysis on aseismic performance and influence factors of recycled concrete filled circular steel-tube columns[J]. Engineering Mechanics, 2016, 33(6): 129-137.

[19] 张玉琢，吕学涛，李晓婷. 中空夹层方钢管再生混凝土柱火灾后剩余承载力[J]. 建筑科学与工程学报，2019，36(1)：76-84.
ZHANG Yuzhuo, LU Xuetao, LI Xiaoting. Residual bearing capacity of hollow sandwich square steel tube recycled concrete column after fire[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2019, 36(1): 76-84.

[20] CHEN Z H, XU H, ZHAO Z W, et al. Investigations on the mechanical behavior of suspend-dome with semi-rigid joints[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2016, 122: 14-24.

[21] ZHAO B Z, ZHOU T, CHEN Z H, et al. Experimental seismic behavior of SCFRT column chevron concentrically braced frames[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2017, 133: 141-155.

[22] CHEN Z H, LIU J, ZHOU T, et al. Uniaxial eccentric-compression performance analysis for double-plate connected concrete-filled steel-tube composite columns[J]. Journal of Structural Engineering, 2020, 146(8): 04020161.

[23] CHEN X D, ZHOU T, CHEN Z H, et al. Mechanical properties of special-shaped concrete-filled steel tube columns under eccentric compression[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2020, 167: 105779.

[24] RONG B, CHEN Z H, ZHANG R Y, et al. Experimental and analytical investigation of the behavior of diaphragm-through joints of concrete-filled tubular columns[J]. Journal of Mechanics of Materials and Structures, 2012, 7(10): 909-929.

[25] MA T F, CHEN Z H, DU Y S, et al. Mechanical properties of L-shaped column composed of RAC-filled steel tubes under eccentric compression[J]. Metals, 2022, 12(6): 953.

[26] CHEN Z H, DONG S H, DU Y S. Experimental study and numerical analysis on seismic performance of FRP confined high-strength rectangular concrete-filled steel tube columns[J]. Thin-walled Structures, 2021, 162: 107560.

[27] 韩林海. 钢管混凝土结构：理论与实践[M]. 2 版. 北京：科学出版社，2007.
HAN Linhai. Concrete-filled steel tubular structure: theory and practice[M]. 2nd ed. Beijing: Science Press, 2007.

[28] MANDER J B, PRIESTLEY M J N, PARK R. Theoretical stress-strain model for confined concrete[J]. Journal of Structural Engineering, 1988, 114(8): 1804-1826.

[29] 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.
XIONG Qingqing. Mechanical behavior of L-shaped columns composed of concrete-filled steel tube mono-columns connected by double vertical steel plates[D]. Tianjin: Tianjin University, 2017.

[30] 矩形钢管混凝土组合异形柱结构技术规程：T/CECS 825—2021[S]. 北京：中国建筑工业出版社，2021.
Techinical specification for special-shaped column structure composed of concrete-filled rectangular steel tubes: T/CECS 825—2021[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2021.