

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

马腾飞^{1,2}, 陈志华¹, 杜颜胜¹, 张宇桐¹, 马斌³

(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. 廊坊市城市建设工程集团有限公司, 河北 廊坊 065000)

摘要 目的 研究不同粗骨料取代率下 L 形方钢管再生混凝土组合异形柱在压弯扭等复合受力下的力学性能。方法 采用 ABAQUS 软件建立 L 形方钢管再生混凝土组合异形柱有限元模型, 分析其在压弯扭等复合受力下的受力机理, 及常见参数对其力学性能的影响。结果 在压弯扭复合受力作用下, 不同粗骨料取代率下各试件的受力全过程均分为弹性阶段、弹塑性阶段和塑性阶段, 当试件承受的轴压力大于 $0.4 F_p$ 且弯矩值大于 $0.6 M_p$ 时, 试件抗扭承载力降低、延性较差。在相同的轴压力及弯矩作用下, 随着粗骨料取代率的增大, 试件的峰值扭矩和延性逐渐降低。结论 在工程设计中, 大轴压比试件应重点考虑扭矩对 L 形方钢管再生混凝土组合异形柱的影响。

关键词 L 形异形柱; 方钢管混凝土柱; 再生混凝土; 压弯扭复合受力; 力学性能

中图分类号 TU398.1

文献标志码 A

Finite Element Analysis of Compress-flexure-torsion Mechanical Behavior of L-shaped Column Composed of Recycled Aggregate Concrete-filled Square Steel Tubes

MA Tengfei^{1,2}, CHEN Zhihua¹, DU Yansheng¹, ZHANG Yutong¹, MA Bin³

(1. School of Civil Engineering, Tianjin University, Tianjin, China, 300072; 2. Department of Civil Engineering, North China Institute of Aerospace Engineering, Langfang, China, 065000; 3. Langfang Urban Construction Engineering Group Corporation, Langfang, China, 065000)

Abstract: This paper presents experimental studies on the compress-flexure-torsion mechanical behavior of the L-shaped column composed of recycled aggregate concrete-filled steel tubes (L-RACFST column). The replacement ratio of recycled concrete aggregate (RCA) was changed to

收稿日期: 2022-09-28

基金项目: 国家重点研发项目(2019YFD1101005); 中央引导地方科技发展资金项目(226Z1201G); 河北省自然科学基金面上项目(A2021409004); 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)

作者简介: 马腾飞(1987—), 女, 博士研究生, 主要从事钢结构及组合结构理论等方面研究。

explore the mechanical behavior of the columns. The FEM model of the L-RACFST column are established by ABAQUS, and its mechanical mechanism and the influence of common parameters on its mechanical are analyzed. The results show that the whole stress process of the L-RACFST column with different recycled coarse aggregate (RCA) replacement ratio can be divided into elastic stage, elastic-plastic stage and plastic stage under the compress-flexure-torsion combined action. When the axial compression of the L-RACFST column is greater than $0.4 F_p$ and the flexure is greater than $0.6 M_p$, the torsional bearing capacity decreases and ductility weakens of the L-RACFST column. Under the same axial compression and flexure, with the increase of RCA replacement ratio, the peak torque of the L-RACFST column decreases gradually, and the ductility decreases. In engineering design, the effect of the L-RACFST column should be considered with large axial compression ratio.

Key words: L-shaped column; concrete-filled square steel tube; recycled aggregate concrete; compress-flexure-torsion combined action; mechanical behavior

高层钢管混凝土框架结构住宅中,柱子会凸出墙体,占用室内空间,且家居布置不便。与传统的方形、矩形截面柱子相比,方钢管混凝土组合异形柱可埋置于墙体内部,达到不“凸梁露柱”的效果。每年因新建或拆除建筑物会产生大量废弃混凝土,得不到及时处理的废弃混凝土占用了大量土地资源,造成环境污染,而再生混凝土是处理废弃混凝土的有效途径之一^[1]。大量研究表明,与天然混凝土相比,再生骨料的加入对混凝土的力学性能会有不同程度的影响,而将再生混凝土填充到钢管内,可充分发挥钢管与再生混凝土二者的优势^[2-9]。

目前,对于方钢管混凝土组合异形柱的研究较多,但大多研究都集中于方钢管普通混凝土组合异形柱的力学性能方面^[10-17],少有对于方钢管再生混凝土组合异形柱的研究^[18]。而且已有成果多为轴压、偏压及抗震性能方面研究,鲜有对方钢管再生混凝土组合异形柱在压弯剪扭等复合受力下的力学性能研究。L形异形柱一般作为角柱使用,角柱在地震作用下,处于一种压弯剪扭等的复合受力状态,因此有必要研究L形方钢管再生混凝土组合异形柱在压弯剪扭等复合受力下的力学性能。

笔者以L形方钢管再生混凝土组合异形柱为研究对象,以粗骨料取代率为变量,研

究其在压弯、压弯扭等复合受力下的力学性能。结果表明,在相同的轴压力及弯矩作用下,随着粗骨料取代率的增大,试件的扭矩峰值和延性逐渐降低。研究成果可为L形方钢管再生混凝土组合异形柱的工程设计提供理论基础。

1 数值模型的建立及有效性验证

笔者利用ABAQUS有限元分析软件对L形方钢管再生混凝土组合异形柱进行数值模拟。钢管、连接板和加劲肋采用壳单元模拟,再生混凝土和垫板采用实体单元模拟。钢管与再生混凝土之间以法向“硬接触”连接,切向为罚函数,摩擦系数取 0.4 ^[19]。钢管、连接板与上下部垫板之间采用“Tie”命令约束。钢材采用双线性随动强化模型,屈服条件采用von-Mises屈服准则,再生混凝土本构模型采用杜颜胜等^[20]提出的本构模型。模型的边界条件采用两端铰接约束形式,即约束柱底所有节点的 X 向、 Y 向、 Z 向自由度,柱顶所有节点耦合到荷载施加位置(形心),并约束 X 向和 Y 向自由度。

为验证数值模型建立的有效性,笔者建立的有限元模型参数与文献[18]中试件参数一致,并将模拟结果与文献[18]中试验结果进行对比。以粗骨料取代率为40%的试

件为例,荷载-位移曲线对比如图 1 所示,破坏变形对比如图 2 所示。从图中可以看出,有限元数值模拟结果与试验结果吻合良好,表明笔者建立的有限元模型可以有效模拟试件的受力性能。

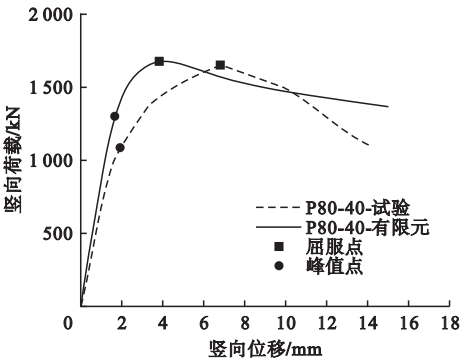


图 1 荷载-竖向位移曲线对比图

Fig. 1 Comparison diagram of load-vertical displacement

笔者建立的有限元模型中,轴压力、弯矩及扭矩的施加位置:轴压力 N 施加于截面形心,弯矩 M 绕 $X'-X'$ 轴施加,扭矩 T 施加在 $X-Y$ 平面内。模型及加载方式如图 3 所示。

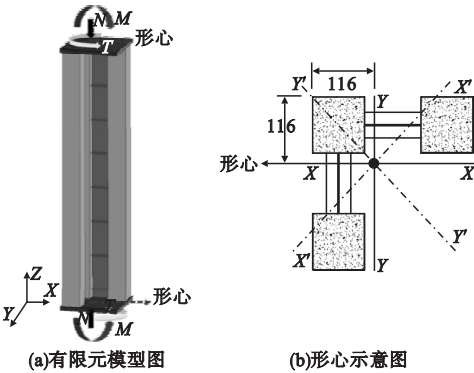


图 3 加载方式示意图

Fig. 3 Schematic diagram of loading mode

2 模拟结果分析

2.1 压扭作用结果分析

对试件进行压力和扭矩同时作用下的力学性能分析,荷载施加顺序为先将压力施加到设定的轴压比,再施加扭矩,以研究不同粗骨料取代率试件在不同轴压力作用下承担扭矩作用的能力。再生粗骨料取代率为 0、20%、40%、60%、80% 和 100% 的试件扭矩-扭转角曲线如图 4 所示。试件以“ZX-YF_p”命名表示,试件的粗骨料取代率为 X,试件的轴压力值为 YF_p,其中 F_p 为轴压加载时试件承受的轴压峰值荷载。

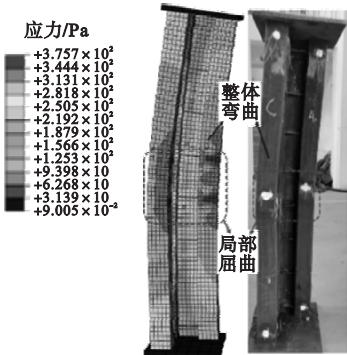
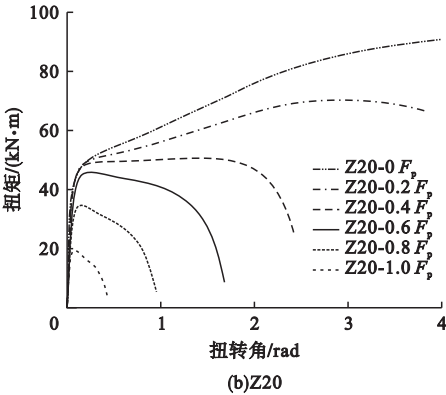
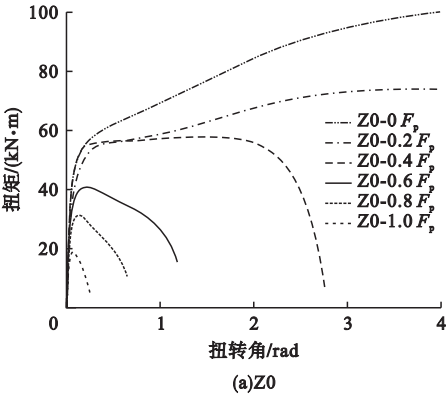


图 2 破坏变形对比图

Fig. 2 Comparison diagram of failure deformation



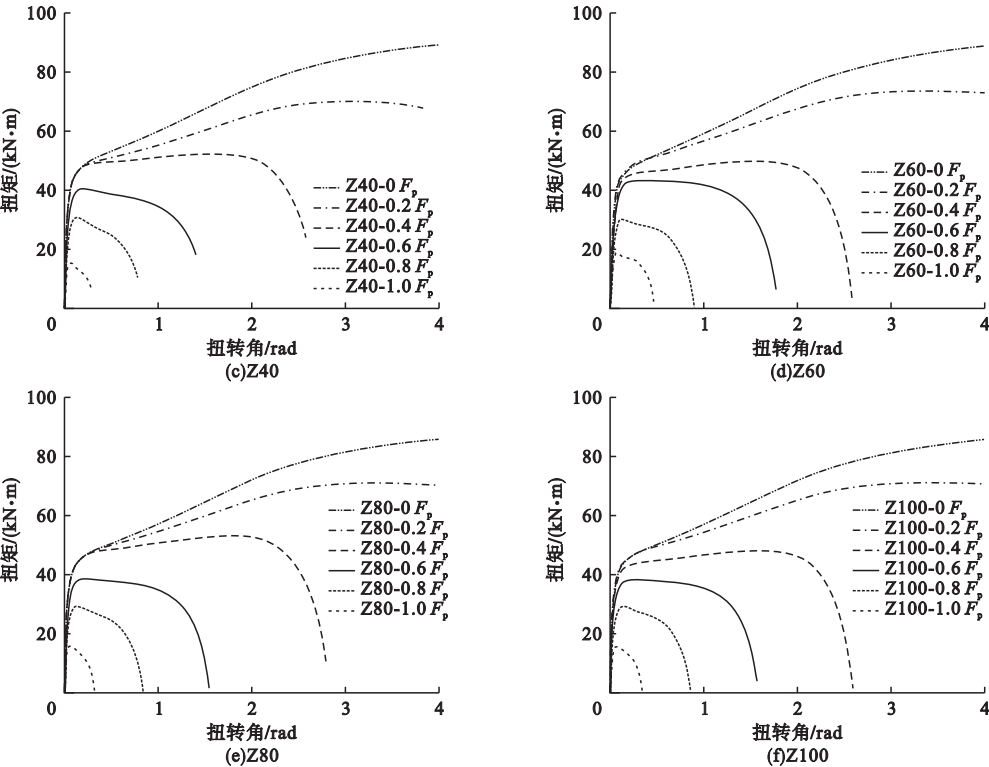


图 4 扭矩-扭转角曲线

Fig. 4 Torque -torsion angle curves

从图 4 可以看出,相同轴压力下,不同粗骨料取代率的试件扭矩-扭转角曲线变化规律大致相似。笔者以粗骨料取代率为 0% 的试件为例,对其不同轴压力作用下的扭矩-扭转角曲线进行分析,结果见图 5。

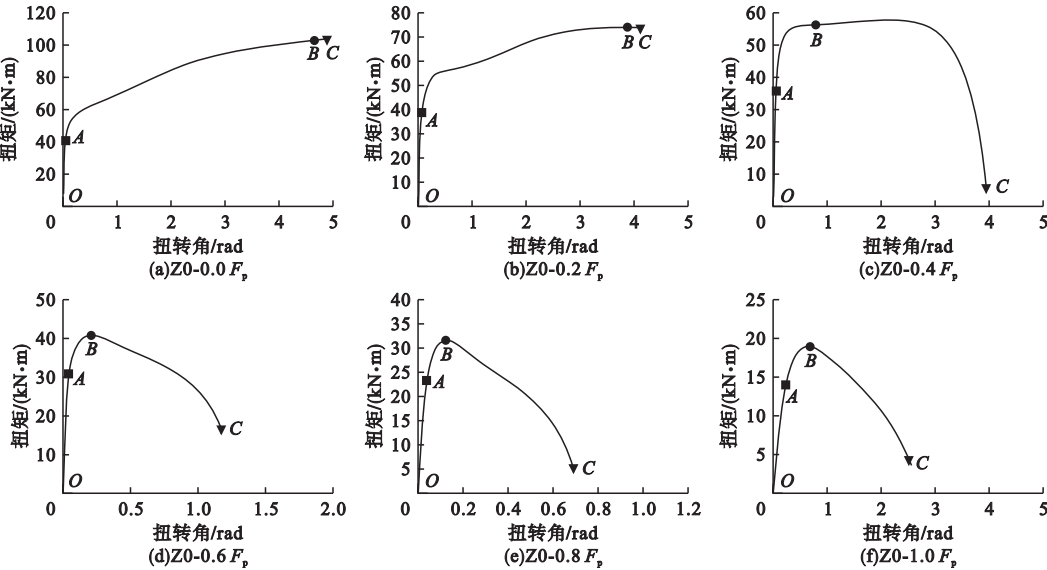


图 5 Z0 试件扭矩-扭转角关系曲线

Fig. 5 Torque -torsion angle curves of Z0

从图5可以看出,曲线均可分为弹性阶段、弹塑性阶段和塑性阶段。

(1)弹性阶段(*OA*段):曲线处于直线上升阶段,试件处于弹性工作阶段,*A*点为试件由弹性阶段进入到弹塑性阶段的分界点。处于弹性阶段的各试件,钢管与内部的再生混凝土不产生相互作用,钢管与其内部的再生混凝土单独承担扭矩。

(2)弹塑性阶段(*AB*段):随着荷载的继续增大,试件进入弹塑性阶段,曲线表现为扭矩值增幅不大,但扭转角有较大的增长,*B*点为试件的扭矩峰值点。处于弹塑性阶段的试件,外部钢管受扭破坏,但由于其内部存在再生混凝土,抑制了钢管发生向内的扭转凹陷现象,扭矩主要由再生混凝土承担,此阶段钢管与其内部的再生混凝土产生相互作用。在

轴压力小于 $0.4 F_p$ 时,试件承担的扭矩未发生急剧下降,表现出了良好的延性性能。试件总体变化趋势为轴压力逐渐增大,抵抗扭转变形的能力减弱,延性降低。

(3)塑性阶段(*BC*段):当荷载继续增加,试件进入塑性阶段。钢管内部的再生混凝土由于扭转变形过大而失稳,试件破坏。

数值模拟结果表明,各试件的变形过程大致相似,笔者以试件Z40为例,其弹性阶段、弹塑性阶段和塑性阶段的变形如图6所示,各试件的扭矩最大值列于表1。从表中可以看出,相同轴压力作用下,随着粗骨料取代率的增大,各试件的峰值扭矩值逐渐降低。在 $0.4 F_p$ 的轴压力作用下,粗骨料取代率由0提高到100%时,试件的极限扭矩值降低最多,降低幅度达22.21%。

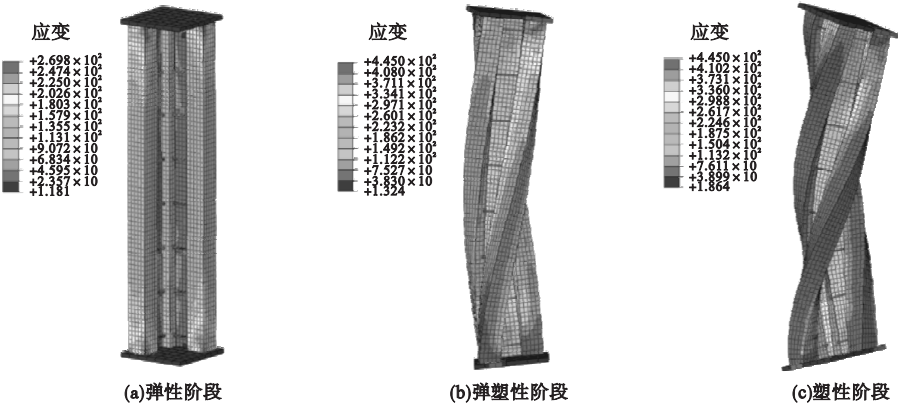


图6 试件Z40压扭作用下变形图

Fig. 6 Deformation diagram under compression and torsion of Z40

表1 各试件的扭矩最大值

Table 1 Peak torque of specimen

轴压力	扭矩最大值/(kN·m)					
	Z0	Z20	Z40	Z60	Z80	Z100
0	104.02	93.20	91.54	90.99	88.05	86.43
0.2 F_p	74.00	70.18	70.02	73.53	70.96	71.15
0.4 F_p	55.37	49.05	48.79	45.15	46.80	43.07
0.6 F_p	40.80	45.91	40.51	43.36	38.66	38.40
0.8 F_p	31.59	34.77	30.98	30.19	29.40	29.16
1.0 F_p	18.95	19.55	15.79	18.62	16.23	16.07

2.2 纯弯作用结果分析

为研究试件同时承受轴压力、弯矩和扭矩的共同作用下的力学性能,首先对试件进行纯弯状态下的受力分析,得出不同粗骨料取代下各试件的弯矩峰值。各试件纯弯状态下的弯矩-弯转角曲线如图 7 所示,弯矩峰值见表 2。从图 7 和表 2 可以得出,随着粗骨料取代率的提高,试件能承担的弯矩峰值逐渐降低,粗骨料取代率由 0 提高到 100% 时,其峰值弯矩值降低了 12.39%。

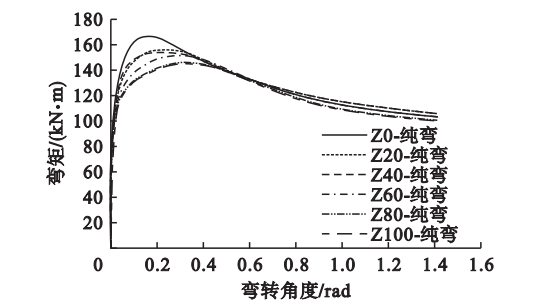


图 7 弯矩-弯转角曲线

Fig. 7 Flexure-flexure angle curves

表 2 各试件弯矩峰值

Table 2 Peak flexure of specimen

试件	弯矩峰值/(kN·m)	与 Z0 相比降低比例/%
Z0	166.44	—
Z20	155.93	6.31
Z40	153.79	7.60
Z60	150.45	9.61
Z80	145.97	12.30
Z100	145.81	12.39

2.3 压弯扭作用结果分析

模拟试件在压弯扭复合受力下的力学性能时,施加荷载的顺序:先施加轴向力,再施加弯矩,最后施加扭矩。模拟轴向力选取 $0.2 F_p$ 和 $0.4 F_p$, 弯矩选取 0 、 $0.2 M_p$ 、 $0.4 M_p$ 和 $0.6 M_p$, 其中 M_p 表示纯弯状态下的弯矩峰值。研究结果表明,粗骨料取代率对试件的扭矩-扭转角关系曲线影响不大。笔者以粗骨料取代率为 40% 的试件为研究对象,试件在不同轴压力、不同弯矩值作用下的

扭矩-扭转角关系曲线如图 8 所示。从图中可以看出,与压扭作用下各试件的扭矩-扭转角关系曲线类似,压弯扭作用下各试件的扭矩-扭转角关系曲线也分为弹性阶段、弹塑性阶段和塑性阶段。以粗骨料取代率为 40% 的试件为例,试件各阶段的变形如图 9 所示。

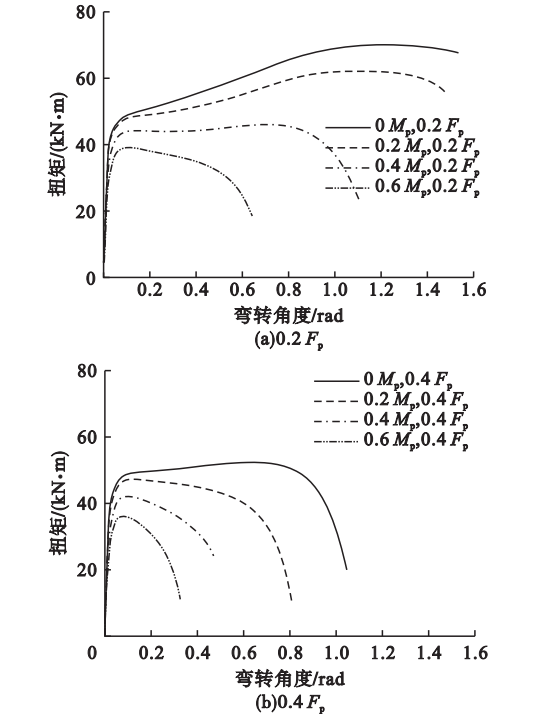


图 8 Z40 扭矩-扭转角曲线

Fig. 8 Torque-torsion angle curves of Z40

当轴压力分别取 $0.2 F_p$ 和 $0.4 F_p$ 时,不同粗骨料取代率下各试件随着弯矩值的增大,峰值扭矩逐渐减小,试件的延性逐渐减弱,而相同粗骨料取代率下各试件的抗扭刚度相似。当粗骨料取代率相同且在相同的弯矩值下, $0.2 F_p$ 工况下的试件与 $0.4 F_p$ 工况下的试件对比, $0.2 F_p$ 轴压力作用下各试件的峰值扭矩较大,试件抵抗扭转变形的能力较强。不同工况下的扭矩最大值见表 3。从表中可以看出,相同轴压力及弯矩条件下,随着粗骨料取代率的提高,试件的抗扭承载力逐渐降低。在 $0.2 F_p$ 轴压力作用下,随着弯矩值的增大,试件的极限扭矩降低比例逐渐增大,这表明在 $0.2 F_p$ 轴压力作用下,试件最终失稳破坏是由弯矩和扭矩导致的。在

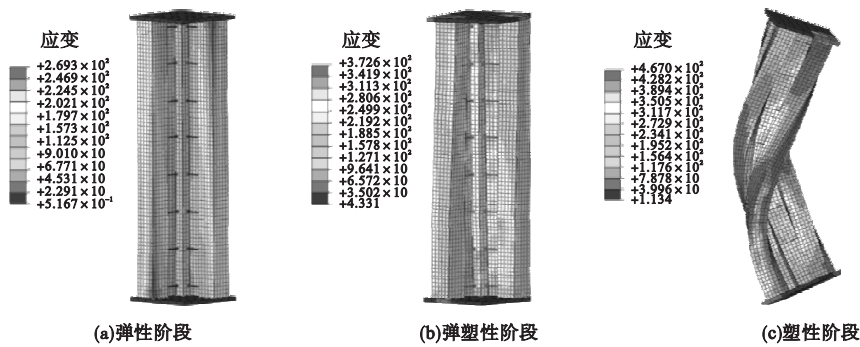


图9 试件 Z40 压弯扭作用下变形图

Fig. 9 Deformation diagram under compress flexure-torsion of Z40

0.4 F_p 的轴压力作用下,当弯矩作用值小于 0.4 M_p 时,试件的峰值扭矩降低比例逐渐增大;当弯矩值为 0.6 M_p 时,粗骨料取代率为 0% 和 100% 的试件的峰值扭矩值仅相差 8.39%,这表明在 0.4 F_p 的轴压力和 0.6 M_p 的弯矩同时作用下,试件的弹塑性阶段很短,有直接由弹性阶段进入塑性阶段的趋势,此时试件的破坏是由轴压力和弯矩的共同作用导致。

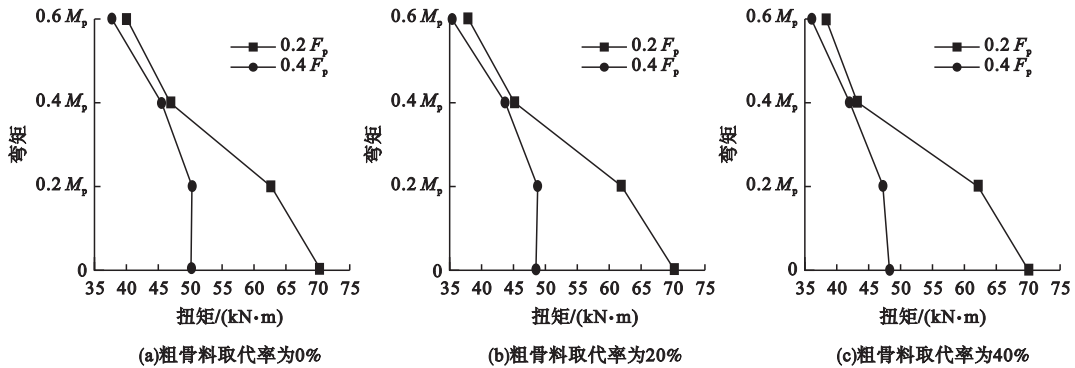
表3 压弯扭复合受力下各试件的扭矩最大值

Table 3 Peak torque of specimen under compress-flexure-torsion

试件	扭矩最大值/(kN·m)							
	0.2 F_p				0.4 F_p			
	0	0.2 M_p	0.4 M_p	0.6 M_p	0	0.2 M_p	0.4 M_p	0.6 M_p
Z0	74.01	68.07	51.38	47.94	54.51	54.31	51.32	36.34
Z20	70.18	61.90	45.11	37.88	48.49	48.74	43.65	35.39
Z40	70.03	62.13	43.28	38.38	48.28	47.28	42.09	36.13
Z60	73.53	63.16	42.95	37.75	44.64	45.86	41.90	36.14
Z80	70.96	61.10	39.77	35.71	46.53	44.14	39.91	33.73
Z100	71.16	61.52	39.80	35.43	42.50	43.85	39.57	33.29

以上分析表明,相同粗骨料取代率的试件,在相同弯矩值作用下,轴压力的增大会导致试件峰值扭矩降低,延性减弱;在相同的轴压力及弯矩作用下,随着粗骨料取代率的增大,试件的峰值扭矩逐渐降低。当试件承受

的轴压力值大于 0.4 F_p 且弯矩值大于 0.6 M_p 时,试件有直接进入破坏阶段的趋势。不同粗骨料取代率下,各试件的弯矩-扭矩关系曲线如图 10 所示。



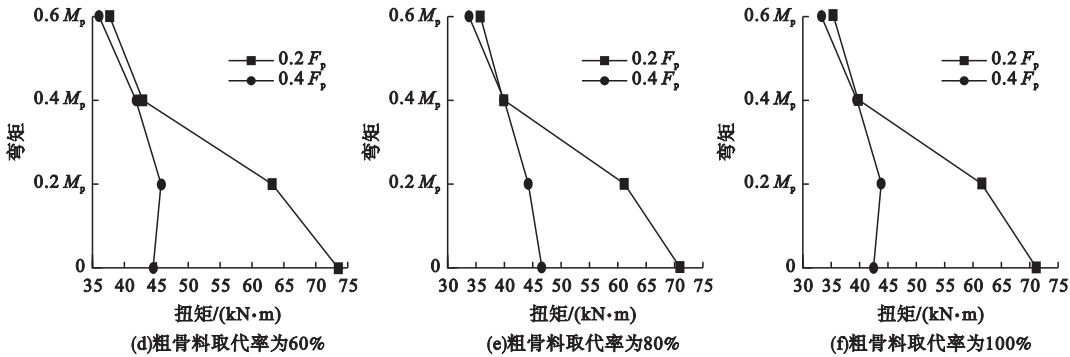


图 10 弯矩-扭矩关系曲线

Fig. 10 Moment -torque curves

由图 10 可见,在轴压力为 $0.2 F_p$ 时,随着弯矩的降低,试件承担的扭矩平稳下降;在轴压力为 $0.4 F_p$ 时,当弯矩值大于 $0.4 M_p$ 时,试件承担的扭矩值约为峰值扭矩值的 50% 左右,此后扭矩值急剧下降。以上分析表明,在工程设计中,大轴压比时应重点考虑扭矩对 L 形方钢管再生混凝土组合异形柱的不利影响。

3 结 论

(1)在轴压力和扭矩共同作用下,相同粗骨料取代率的试件,随着轴压力的增大,峰值扭矩逐渐降低,延性减弱。相同粗骨料取代率情况下,当轴压力值由 0 增大到 $1.0 F_p$ 时,试件的峰值扭矩降低了 63% 左右;在 $0.4 F_p$ 的轴压力作用下,粗骨料取代率由 0 提高到 100% 时,试件的峰值扭矩降低幅度达 22.21%。

(2)纯弯作用下,随着粗骨料取代率的提高,试件能承担的峰值弯矩值逐渐降低,粗骨料取代率由 0 提高到 100% 时,峰值弯矩值降低了 12.39%。

(3)压弯扭复合受力下,相同粗骨料取代率的试件在相同弯矩值作用下,轴压力的增大会导致试件峰值扭矩降低,延性减弱;在相同的轴压力及弯矩作用下,随着粗骨料取代率的增大,试件的峰值扭矩逐渐降低。

(4)当试件同时承受的轴压力值大于

$0.4 F_p$ 且弯矩值大于 $0.6 M_p$ 时,试件有直接进入破坏阶段的趋势,延性大幅降低。在工程设计中,当实际轴压比超过 0.4 时,应重点考虑扭矩对 L 形方钢管再生混凝土组合异形柱的影响。

参考文献

[1] 肖建庄. 再生混凝土[M]. 北京:中国建筑工程工业出版社,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 Qiujang, 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 Zhenping. 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] 李秋义,李倩倩,岳公冰,等.碳化作用对再生混凝土界面显微结构的影响[J].沈阳建筑大学学报(自然科学版),2017,33(4):629-636.
(LI Qiuyi,LI Qianqian,YUE Gongbing,et al. Effect of carbonation on the interfacial microstructure of recycled concrete [J]. Journal of Shenyang jianzhu university(natural science),2017,33(4):629-636.)
- [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 Yansheng, CHEN Zhihua, XIONG Mingxiang. 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 Zhihua,MA Rui,DU Yansheng,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] 熊清清,张旺,陈志华.L形钢管混凝土组合柱抗震性能分析及水平承载力设计方法[J].科学技术与工程,2020,20(23):9521-9531.
(XIONG Qingqing, ZHANG Wang, CHEN Zhihua. Seismic performance and bearing capacity calculation method of L-shaped columns composed of concrete-filled steel tube mono-columns connected by double vertical steel plates [J]. Science technology and engineering,2020,20(23):9521-9531.)
- [11] CHEN Zhihua, XU Hao, ZHAO Zhongwei, et al. Investigations on mechanical behavior of suspend-dome with semi-rigid joints [J]. Journal of constructional steel research, 2016, 22:14-24.
- [12] ZHAO Bingzhen,ZHOU Ting,CHEN Zhihua, et al. Experimental seismic behavior of SCFST column chevron concentrically braced frames [J]. Journal of constructional steel research, 2017,133:141-155.
- [13] CHEN Zhihua, XU Hao, ZHAO Zhongwei, et al. Investigations on mechanical behavior of suspend-dome with semi-rigid joints [J]. Journal of constructional steel research, 2016, 22:14-24.
- [14] XIONG Qingqing, CHEN Zhihua, ZHANG Wang,et al. Compressive behavior and design of L-shaped columns fabricated using concrete-filled steel tubes [J]. Engineering structures, 2017,152:758-770.
- [15] XIONG Qingqing, CHEN Zhihua, KANG Jingfu, 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.
- [16] LIU Jie, ZHOU Ting, LEI Zhiyong, et al. Eccentric compression performance of slender L-shaped column composed of concrete-filled steel tubes connected by steel linking plates [J]. Journal of constructional steel research, 2019,162:1-16.
- [17] CHEN Zhihua, LIU Jie, ZHOU Ting, 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.
- [18] MA Tengfei, CHEN Zhihua, DU Yansheng, et al. Mechanical properties of L-shaped column composed of RAC-filled steel tubes under eccentric compression [J]. Metals, 2022,12(6):953.
- [19] 石亦平,周玉蓉.ABAQUS有限元分析实例详解[M].北京:机械工业出版社,2006.
(SHI Yiping, ZHOU Yurong. Examples of ABAQUS finite element analysis [M]. Beijing:China Machine Press,2006.)
- [20] 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.
(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.)
(责任编辑:杨永生 英文审校:刘永军)