

低周反复荷载下异形钢管混凝土 柱力学性能有限元分析

张继承^{1,2}, 林振宇²

(1. 长江大学城市建设学院, 湖北 荆州 434023; 2. 同济大学土木工程学院, 上海 200092)

摘要:为了研究低周反复荷载下异形钢管混凝土柱的力学性能,以试验研究为基础,在参考常用的方钢管混凝土柱核心混凝土本构关系的基础上,提出了适用于 L 形钢管混凝土柱核心混凝土在低周反复荷载作用下的应力-应变关系,采用有限元程序 Opensees,模拟了低周反复荷载下 L 形钢管混凝土柱的荷载-水平位移($P-\Delta$)关系曲线;分析了 L 形钢管混凝土柱抗震性能的影响因素。结果表明:计算结果与试验结果吻合较好;轴压比是构件骨架曲线的主要影响因素,随着轴压比的增大,试件的刚度逐渐变小,水平极限承载力变小,曲线将会出现下降段,且下降幅度有增大的趋势;截面宽厚比 D/t 和截面长宽比 D/B 对构件骨架曲线的影响相似,总体上对荷载-位移骨架曲线的形状影响很小,主要表现在对水平承载力大小的影响。

关键词:L 形钢管混凝土柱;抗震性能;有限元分析;影响因素

中图分类号:TU470

文献标识码:A

doi:10.3969/j.issn.1674-2869.2010.05.017

0 引言

钢管混凝土是指在钢管中填充混凝土而形成的构件,它是在螺旋钢筋混凝土、劲型混凝土和钢管结构的研究基础上新发展起来的一种结构。由于钢管混凝土具有许多优越性能,如承载力高、塑性和韧性好、施工方便、耐火性能好、经济效益高^[1]等,钢管混凝土结构在当今世界各地都得到了广泛的应用。而异形钢管混凝土结构能有效避免房间出现棱角,有利于建筑布局 and 增加有效使用面积,是中、高层住宅建筑良好的结构体系,发展前景广阔,但异形钢管对内部混凝土的约束作用较弱,其内部约束机理比圆、方和矩形钢管混凝土柱要复杂得多,而且与矩形钢管混凝土截面柱相比,异形钢管混凝土截面柱的整体性能较差,其抗震性能成为该新型结构体系研究的重点。

国内外学者对矩形、方形和圆形钢管混凝土柱的力学性能研究较多,但至今为止,对异形钢管混凝土的研究还很少,国外尚未见到报道,国内仅华南理工大学和同济大学进行了一些异形钢管混凝土柱试验研究,主要有:黎志军等^[2]对 6 根 L 形及 6 根 T 形带约束拉杆钢管混凝土柱进行了轴压试验研究,得到了试件荷载-应变曲线,并对其进行全过程数值模拟,提出带约束拉杆异形钢管混凝土承载力计算公式。陈之毅^[3]对 6 根 L 形钢管

混凝土柱和 1 根 L 形空钢管短柱进行轴压试验研究,试验参数有宽厚比、有无加劲肋和肢长等,并提出其极限承载力的计算公式。周海军^[4]对 7 根 L 形钢管混凝土柱进行了试验研究,包括 2 根单向加载和 5 根反复加载,试验中考虑了轴压比、有无加劲和加载方向。王丹^[5]对 6 根 T 形、6 根 L 形钢管混凝土柱进行了低周反复荷载的试验研究,考察轴压比、钢管壁厚和内填混凝土强度对 T 形、L 形柱延性及承载力的影响。

为了研究 L 形钢管混凝土柱的抗震性能,课题组成员林振宇^[6]进行了 6 根 L 形钢管混凝土柱试件在低周反复荷载下的抗震性能试验,试验参数主要有轴压比、宽厚比和长宽比。笔者在此试验基础上,基于纤维梁柱单元模型,采用 Opensees 有限元分析程序对试件在低周反复荷载下的荷载-位移($P-\Delta$)滞回曲线和骨架曲线进行了模拟,并与试验结果进行了比较,并对试件的抗震性能影响因素进行了参数分析。

1 试件参数

试验原型为底层(架空层)框架 L 形钢管混凝土柱,其尺寸如下:底层(架空层)层高为 4 500 mm、截面肢长为 600 mm、截面肢宽为 300 和 200 mm。试件模型按 1:2 缩尺比例设计,则试件高度 L 为 1 125 mm、截面肢长 D 为 300 mm、截面肢宽 B

收稿日期:2010-03-17

作者简介:张继承(1976-),男,湖南平江人,讲师,博士研究生。研究方向:结构抗震。

为 150 和 100 mm. 试验主要考虑了不同轴压比 n 、宽厚比 D/t 和长宽比 D/B 对 L 形钢管混凝土柱的抗震性能的影响, 试件具体参数见表 1, 截面参数见图 1. 表中试件轴压比计算: $n = N / (f_c A_c + f_y A_s)$, 式中 N 为试验过程中施加在试件上的轴力; f_c 为混凝土轴心抗压强度, 取 $f_c = 0.76f_{cu}$, A_c 为核心混凝土全截面面积; f_y 为钢板实测抗拉强度平均值; A_s 为钢管面积. 钢材的强度由拉伸试验确定, 将钢

板做成标准试件, 每组 3 个, 按《金属材料室温拉伸试验方法》(GB/T 228—2002) 规定的方法进行试验, 可测得钢管的屈服强度、抗拉强度、弹性模量分别见表 2. 混凝土采用与试件中混凝土同条件养护的标准立方体混凝土试块, 依据《普通混凝土力学性能试验方法标准》(GB/T 50081—2002) 测得钢管柱内填混凝土平均立方体抗压强度分别为 39.5 N/mm^2 .

表 1 试件参数

Table 1 Specimens parameter

序号	柱子编号	肢长 $D/$ mm	肢宽 $B/$ mm	长度 $t/$ mm	厚度 $t/$ mm	混凝土 标号	钢材 等级	轴压比 n	荷载值 $N/$ kN
1	LRAZ-1	300	150	1125	5	C35	Q235	0.2	820
2	LRAZ-2	300	150	1125	5	C35	Q235	0.5	2055
3	LRBZ-1	300	150	1125	6	C35	Q235	0.2	850
4	LRBZ-2	300	150	1125	6	C35	Q235	0.5	2200
5	LR CZ-1	300	100	1125	6	C35	Q235	0.2	750
6	LR CZ-2	300	100	1125	6	C35	Q235	0.5	1920

注: R 代表钢板内有 L45 × 28 × 4 角钢加劲, 1 和 2 代表组数的标号.

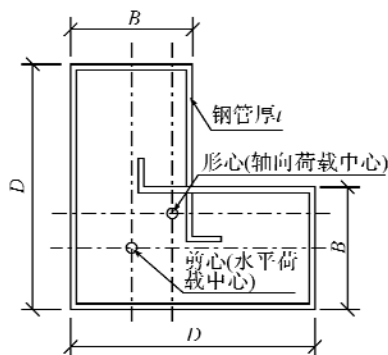


图 1 试件截面参数

Fig. 1 Section type of specimen

表 2 钢材力学性能指标

Table 2 Mechanics properties of steel specimens

厚度/ mm	屈服强度 $f_y/$ ($\text{N} \cdot \text{mm}^{-2}$)	极限强度 $f_u/$ ($\text{N} \cdot \text{mm}^{-2}$)	弹性模量 $E_s/$ ($\text{N} \cdot \text{mm}^{-2}$)	伸长率/ %
5	355	472	1.82×10^5	28.2
6	362	485	1.79×10^5	31.0

2 试件有限元模型

2.1 材料本构模型

按照试验试件尺寸, 在 Opensees 有限元软件中建立 L 形钢管混凝土柱有限元模型. Opensees 软件对钢材材料本构主要提供了两种模型, 分别为 Steel01 和 Steel02. Steel01 模型为双线性随动强化模型, 如图 2 所示, 其应力—应变关系曲线由两段组成, 即弹性段 (oa 段) 和强化段 (ab 段), 一般强化段的弹性模量取为 $0.01E_s$, E_s 为钢材的初始弹性模量, 加卸载时刚度取初始弹性模量 E_s , 没有考虑软化的作用. 而 steel02 模型与 steel01 模型基本相同, 它最初由 Menegotto 和 Pinto 所建议后经

Filippou 等人修正可以考虑等向应变硬化影响的本构模型. 该本构模型由于采用了应变的显函数表达形式因而在计算上非常有效率, 同时又保持了与钢筋反复加载试验结果的非常好的一致性, 通过设置材料参数来改变双线性模型中弹塑性段分支点附近的弧度变化, 可以反映 Bauschinger 效应, 如图 2 中虚线部分所示. 该模型的加载路径规则采用 Giuffre-Menegotto-Pinto 反复加载钢材模型^[7-8]. 通过对钢管混凝土试件性能的初步分析, 本文钢管本构模型选用 Opensees 平台中的 Steel02 本构模型, 该模型需要输入的参数有: 钢材的屈服强度 f_y , 初始弹性模量 E , 应变硬化率 b , 改变双线性模型中弹塑性段分支点附近的弧度变化的材料参数 R_0 , R_1 和 R_2 , 考虑等向硬化的参数 a_1 , a_2 , a_3 和 a_4 .

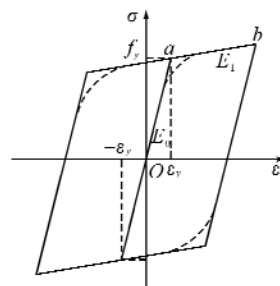


图 2 钢材应力—应变关系曲线

Fig. 2 Stress strain curve of steel

正确建立核心混凝土的本构关系模型是钢管混凝土结构数值计算的关键问题, 而正确建立核心混凝土本构关系模型的关键问题是如何正确反应钢管对核心混凝土的约束作用. 文献[1]和[9]提出了采用约束效应系数来考虑外包钢管对核心混凝土的

作用,建立了适用于方、矩形钢管混凝土的应力-应变关系模型。约束效应系数的概念非常清楚,可以方便地帮助有关人员从概念上理解钢管混凝土的工作机理和力学实质,进而进行合理设计。但是,当应用于不等边的异形钢管混凝土时,该混凝土应力-应变关系模型不能反映截面长宽比对核心混凝土受到钢管约束作用的影响。张正国^[10-11]通过分析方钢管混凝土短柱的力学性能,采用特征系数宽厚比 B/t (B -柱截面宽, t -钢管厚)来反映钢管对核心混凝土的约束作用,在参考 Kent-Park 箍筋约束混凝土应力-应变关系模型的基础上,建立了方钢管混凝土构件核心混凝土应力-应变关系模型。但该模型采用了宽厚比 B/t 来唯一地确定曲线上的特征点,并没有涉及到约束效应系数 $\xi = f_y A_s / f_c A_c$ 对混凝土本构关系曲线的影响。为了正确建立适用于 L 形钢管混凝土的应力-应变关系,作者参考李学平^[12-13]提出的等效约束效应系数 ξ_{BD} ,经过大量算例的试算分析,建立了适用于 L 形钢管混凝土有限元分析的核心混凝土本构模型如式(1)。

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

式(1)中: $x = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_o}$, $y = \frac{\sigma}{\sigma_o}$, $\sigma_o = f_c$, $\alpha = 1.6 + 1.5/x$,

$$\varepsilon_o = (1240 + 1000\xi_{DB}^{0.25} + 12.7f_c) \times 10^{-6},$$

$$\beta_o = \frac{f_c^{0.1}}{1.35\sqrt{1+\xi_{DB}}}, \quad \xi_D = \frac{f_y A_{s,D}}{f_c A_{c,D}}, \quad \xi_B = \frac{f_y A_{s,B}}{f_c A_{c,B}}$$

$$\xi_{DB} = \xi_D(1 - 1/\eta^2) + \xi_B/\eta^2, \quad (\eta = D/B).$$

其中, ξ_D 为等边长 D 钢管混凝土的约束效应系数, ξ_B 为的等边长 B 钢管混凝土的约束效应系数, ξ_{DB} 为不等边长 $D \times B$ 钢管混凝土的约束效应系数, η 为截面长宽比影响系数。

OpenSCCs 程序目前关于混凝土的应力-应变本构关系模型提供了 3 种,其单轴应力-应变关系表达式采用 Kent-Scott-Park 混凝土模型^[14-15]。Concrete01 模型为不考虑混凝土受拉作用时的应力-应变关系模型,Concrete02 模型为考虑混凝土受拉线性软化的应力-应变关系,Concrete03 模型为考虑混凝土受拉非线性软化的应力-应变关系。OpenSees 系统中提供的 3 种混凝土本构模型加卸载准则按照 Karsan-Jirsa 模型进行。经过对钢管混凝土构件力学性能的初步分析,综合考虑,本文选用程序中的 Concrete02 模型,其应力-应变关系如图 3 所示。在 OpenSees 程序中,Concrete02 模型需要输入的参数有:受压时混凝土峰值强度 f_c' (程序中的符号为 \$fpc, 下同);抗压强度峰值对应的应变 ε_o

(\$epsco);混凝土压碎破坏强度 f_{cu} (\$fpcu)及其对应的应变 ε_{cu} (\$epsu);混凝土抗拉强度 f_t (\$ft);受拉软化刚度,即受拉曲线中线性下降段的斜率 E_{cs} (\$Fts);卸载段斜率 E_u (程序中输入系数 \$lambda, $E_u = \$lambda * E_c$)。本文采用 Concrete02 模型来模拟异形钢管混凝土结构中核心混凝土,其单轴受压应力-应变曲线上的参数采用本文提出的核心混凝土本构关系模型,见式(1)。

而混凝土单轴受拉应力-应变关系曲线采用文献[16]中的表达式:

$$y = \begin{cases} 1.2x - 0.2x^6 & (x \leq 1) \\ \frac{x}{0.31\sigma_p^2(x-1)^{1.7} + x} & (x > 1) \end{cases} \quad (2)$$

式(2)中, $x = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_p}$; $y = \frac{\sigma}{\sigma_p}$, σ_p 为峰值拉应力, ε_p 为峰值拉应力所对应的应变,分别按式(3)(4)确定:

$$\sigma_p = 0.26(1.5f_{ck})^{2/3} \quad (3)$$

$$\varepsilon_p = 43.1\sigma_p \quad (4)$$

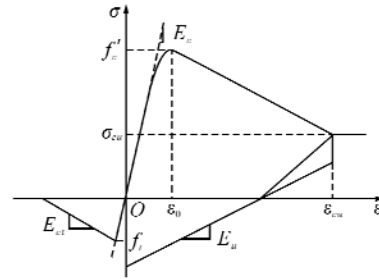


图3 核心混凝土应力-应变关系曲线

Fig.3 Stress strain curve of core concrete

2.2 有限元模型的建立

在 OpenSees 中建立有限元模型对象前,首先要建立相应的子对象,即材料对象、截面对象、节点对象、单元对象、荷载对象和约束对象等,由它们组合形成有限元模型对象。OpenSees 中有多种单元模型供使用者进行选择,可以根据使用者的研究对象和目的来灵活选择。按类型主要分为杆系模型和实体模型两大类。本文采用非线性纤维梁柱单元来模拟 L 形钢管混凝土柱,在 OpenSees 系统平台中则采用非线性梁柱单元 (nonlinear Beam Column) 进行处理。该单元属于采用插值函数的杆件有限单元模型范畴,允许沿杆长刚度变化,单元长度上可设置多个积分控制截面,在分别确定了控制截面各自的截面抗力和截面刚度矩阵以后,按照一定的数值积分方法沿杆长积分计算出整个单元的抗力和刚度矩阵的大小。单元类型选择后,就要确定单元积分点截面恢复力关系。OpenSCCs 程序提供的截面恢复力模型既包括常规模型,如弹性恢复力模型、理想弹塑性恢复力模型、两折线强化恢复力模型、滞回恢复力模型

等,还提供了更加细化的纤维模型.纤维模型的主要思路是将拟分析的截面离散化为若干个小单元(即纤维),同时忽略剪切变形和粘结滑移的影响,认为整个截面符合平截面假定,同时假定截面上每根纤维应变分布均匀、处于单轴应力应变状态,同时根据相应纤维材料的单轴应力应变关系来计算整个截面的力与变形的关系,这样就可以通过对单轴应力应变关系的适当修正来更好的考虑截面的实际受力情况(如钢管的约束作用等).本文分析所采用的截面恢复力模型就选择了这种细化的纤维模型.

3 有限元计算与试验结果比较

图4给出了各试件柱顶水平荷载-水平位移($P-\Delta$)滞回曲线和骨架曲线有限元计算值与试验滞回曲线的比较.从图4中可以看出,数值计算结果与试验结果模拟较好;说明利用本文的材料本构模型,采用 OpenSees 软件进行 L 钢管混凝土柱在低周反复荷载下的力学性能分析是可行的.

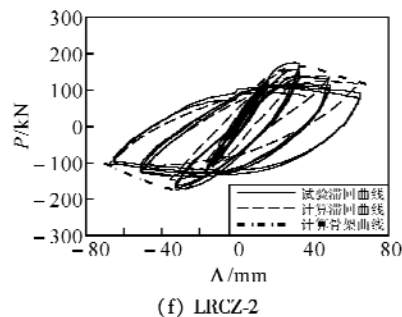
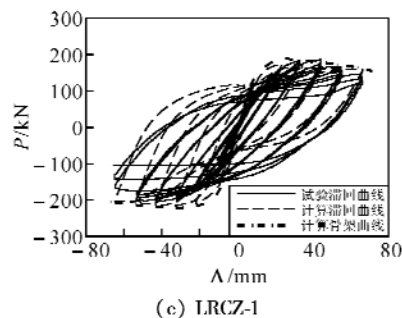
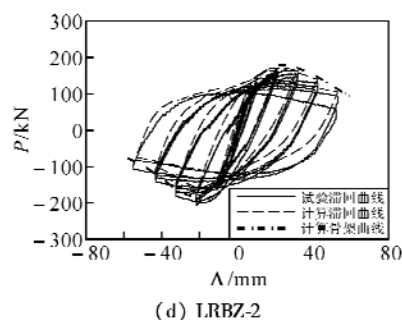
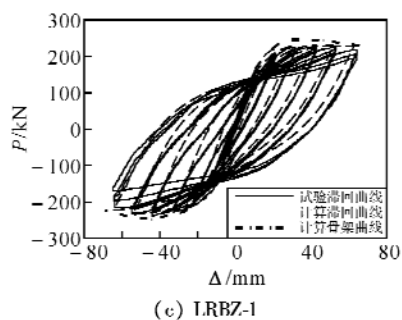
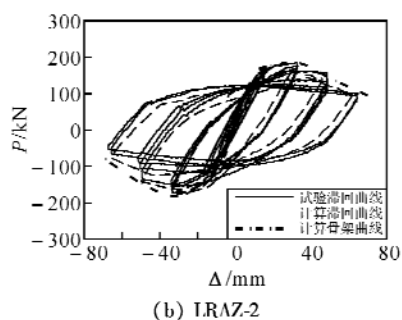
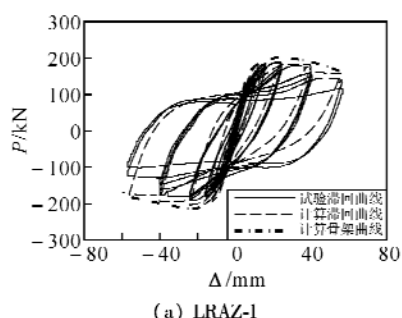


图4 $P-\Delta$ 曲线试验值与计算值比较

Fig. 4 Comparison of experimental results with calculation results of the $P-\Delta$ curve

非线性纤维梁柱单元理论,以柱轴压比 n 、截面宽厚比 D/t 和长宽比 D/B 为主要研究参数,通过 OpenSees 有限元程序研究了低周反复荷载作用下 L 形钢管混凝土柱水平荷载-水平位移($P-\Delta$)骨架曲线的变化规律,如图5所示.算例基本条件:肢长 $D=200$ mm,肢宽 $B=100$ mm,钢管厚 $t=4$ mm, $f_y=310$ MPa, $f_c=30$ MPa,轴压比 $n=0.2$,试件长 $L=750$ mm.从图中可以看出, $P-\Delta$ 骨架曲线计算值具有如下特点:

a. 在其他条件相同的情况下,随截面宽厚比的减小,构件骨架曲线弹性阶段的刚度和水平承载力都有所提高,截面宽厚比 D/t 总体上主要影响曲线的数值,对荷载-位移骨架曲线的形状影响很小.

b. 截面长宽比 D/B 与截面宽厚比 D/t 对构件骨架曲线的影响相似,在其他条件相同的情况下,随截面长宽比 D/B 的减小,骨架曲线弹性阶段的刚度和水平承载力都有所提高,截面长宽比 D/B 总体上对荷载-位移骨架曲线的形状影响很小,主要表现在对水平承载力大小的影响.

4 参数分析

从上面有限元计算与试验结果的比较可以看出,有限元计算值与试验值吻合良好.因此本文基于

c. 轴压比是构件骨架曲线的主要影响因素,随着轴压比增大,构件的水平极限承载力也逐渐减小.从骨架曲线总体上看,轴压比存在一个临界点的现象,轴压比在达到临界值前,水平极限承载力变化不大,甚至有所提高,当轴压比超过临界值后,随着轴压比的增大,水平极限承载力变小,并且曲线将会出现下降段,且下降段的下降幅度随轴压比的增加而增大,表明构件的位移延性也越来越差.

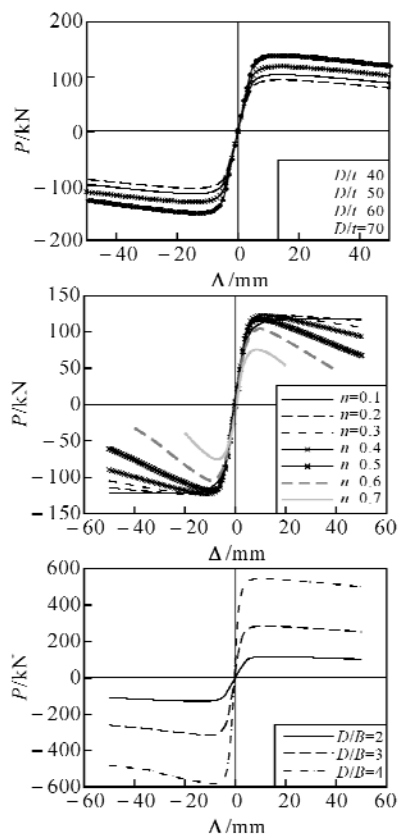


图5 不同参数对骨架曲线的影响

Fig.5 Influence on the envelope curve with different factors

5 结 语

a. 本文有限元计算结果与试验结果吻合较好,表明采用本文提出的核心混凝土本构模型,基于纤维模型理论,采用 Opensees 有限元程序进行低周反复荷载作用下 L 形钢管混凝土柱非线性有限元分析是可行的.

b. 截面宽厚比 D/t 和截面长宽比 D/B 对构件骨架曲线的影响相似,总体上对荷载-位移骨架曲线的形状影响很小,主要表现在对水平承载力大小的影响.

c. 轴压比是构件骨架曲线的主要影响因素,总体上轴压比对构件的弹性阶段刚度影响不大,但对弹塑性阶段刚度有明显的影响.从骨架曲线总体上看,轴压比存在一个临界点的现象,当轴压比小于临界值时,构件水平承载力变化不大,甚至随轴压比增

加,还会略微增大,加载进入弹塑性段后水平荷载下降较小,甚至不出现下降段.当轴压比大于临界值后,随着轴压比的增大,水平极限承载力变小,并且曲线将会出现下降段,且下降段的下降幅度随轴压比的增加而增大,表明构件的位移延性也越来越差.

参考文献:

- [1] 韩林海. 钢管混凝土结构[M]. 北京:科学出版社, 2000.
- [2] 黎志军,蔡健,谭哲东,等. 带约束拉杆异形钢管混凝土柱力学性能的试验研究[J]. 工程力学, 2001, 16 (A02): 124-129.
- [3] 陈之毅. 矩形钢管混凝土结构施工工艺及异形柱承载力的研究[D]. 上海:同济大学, 2003.
- [4] 周海军. 反复荷载作用下 L 形钢管混凝土柱力学性能研究[D]. 上海:同济大学, 2005.
- [5] 王丹. T 形、L 形钢管混凝土柱抗震性能研究[D]. 上海:同济大学, 2005.
- [6] 林振宇. L 形钢管混凝土力学性能若干问题研究[D]. 上海:同济大学, 2009.
- [7] Gomes A, Appleton J. Nonlinear cyclic stress-strain relationship of reinforcing bars including buckling[J]. Engineering Structures, 1997, 19(10): 822-826.
- [8] Dhakal R J, Maekawa K. Path-dependent cyclic stress-strain relationship of reinforcing bar including buckling[J]. Engineering Structures, 2002, 24(11): 1383-1396.
- [9] 刘威. 钢管混凝土局部受压时的工作机理研究[D]. 福州:福州大学, 2005.
- [10] 张正国. 方钢管砼偏压短柱基本性能研究[J]. 建筑结构学报, 1989(6): 10-20.
- [11] Zhang Zhengguo, Huo Da. The Research on the Basic Behaviour of Concrete under the Non-uniform Lateral Restraint [C]//International Symposium on Fundamental Theory of Reinforced and Prestressed Concrete, Vol. 2. Nanjing: Nanjing Institute of Technology, 1986: 30-36.
- [12] 李学平. 矩形钢管混凝土柱的力学性能及其节点的应用技术研究[D]. 上海:同济大学, 2004.
- [13] 李学平, 吕西林, 郭少春. 反复荷载下矩形钢管混凝土柱的抗震性能 II: 分析研究[J]. 地震工程与工程振动, 2005(5): 104-111.
- [14] Scott A, Park R, Priestley M J M. Stress-strain behavior of concrete confined by overlapping hoops at low and high strain rates, ACI Structural Journal, 1982, 79 (1): 13-27.
- [15] Silvia Mazzom, Frank McKenna, Michael H Scott, et al. OpenSees Users Manual PEER[M]. Berkeley: University of California, 2004.
- [16] 沈聚敏, 王传志, 江见鲸. 钢筋混凝土有限元与板壳极限分析[M]. 北京:清华大学出版社, 1993.

Finite element analysis on mechanical properties of special-shaped concrete-filled steel tubular column under low cyclic loading

ZHANG Ji-cheng^{1,2}, LIN Zhen-yu²

(1. School of Urban Construction, Yangtze University, Jingzhou 434023, China;

2. College Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: To study the mechanical properties of special-shaped concrete-filled steel tubular column under low cyclic loading, based on experimental study and stress-strain relationship of the core concrete in concrete-filled square steel tube columns subjected to low cyclic loading, those relations in concrete-filled L-section steel tubular columns are proposed and nonlinear finite element method analysis on L-shaped concrete-filled steel tubular column is carried out by Opensees software. The lateral load versus lateral displacement ($P-\Delta$) curves and its influencing factors are analyzed. The results show that the calculation results are in good agreement with experimental results. The axial compression ratio is the main factor affecting the envelope curve of the member. As the increase of the axial compression ratio, the stiffness of the specimen and the horizontal loading capacity decreases. Meanwhile, the curve becomes descendent and the descent amplitude will increase as the increase of the axial compression ratio, which indicates that the ductility of the member becomes worse. The influence of the width-thickness ratio D/t on the envelope curve is similar to that of the length-width ratio D/B , which has little effect on the shape of the envelope curve but will influence the lateral loading capacity.

Key words: L-shaped concrete-filled steel tubular column; seismic behavior; finite element method (FEM); influencing factors

本文编辑: 龚晓宁

☆

(上接第 59 页)

Comprehensive recovery of valuable metal from Lead-Zinc ore

YANG Wen

(National Committee of Manganese Industry Technology, Changsha 410006; China)

Abstract: The test of comprehensive recovery of valuable metal in polymetallic sulphide ore was carried out according to the properties of the ore. The results show that Zn can be recovered effectively, and Cu, Pb, Ag, S can also be comprehensively recovered by using part bulk-separation flotation flowsheet. A new depressant is used in the technique of mixed Cu-Pb flotation and Zn flotation, and this depressant can increase the grade of Cu concentrate and Zn concentrate. The result of the test shows that the Fs is one of high-effective depressant.

Key words: flotation; Lead-Zinc ore; comprehensive recovery

本文编辑: 龚晓宁