

钢筋混凝土异形柱非线性分析

曲福来^{1,2}, 黄承逵^{*1}, 赵欣³

(1. 大连理工大学 海岸和近海工程国家重点实验室, 辽宁 大连 116024;
2. 华北水利电力大学 土木与交通学院, 河南 郑州 450011;
3. 中油辽河工程有限公司, 辽宁 盘锦 124010)

摘要: 在13根钢筋混凝土异形柱低周反复荷载试验研究的基础上, 采用非线性分析方法对异形柱受力性能进行分析, 并编制了计算异形柱荷载-位移骨架曲线的程序, 计算结果与试验结果吻合较好, 为预测地震作用下的钢筋混凝土异形柱的非线性行为提供了一种便捷的方法. 此外, 根据程序的计算结果, 分析了轴压比、不同柱肢尺寸等因素对异形柱承载力和变形的影响. 结果表明: 轴压比的增大会提高异形柱的承载力, 但试件变形能力有所降低; 异形柱腹板尺寸增大时可以有效提高试件的水平极限承载力.

关键词: 异形柱; 非线性分析; 不等肢; 荷载-位移; 骨架曲线

中图分类号: TU375.4 **文献标志码:** A

0 引言

钢筋混凝土异形柱框架结构是近年来开始使用的一种新型结构体系, 它避免了柱角凸出墙面的缺点, 但与矩形柱或圆柱相比, 由于柱肢较薄, 其抗震性能一直被人们所关注. 目前, 对异形柱的试验和理论研究也取得了一些成果^[1~4]. 但由于影响异形柱受力性能的因素也较多, 例如轴压比、柱肢尺寸、混凝土强度、配箍率等, 要通过试验分析诸多因素对异形柱受力性能的影响, 工作量十分巨大. 因此, 本文在试验的基础上采用数值积分的方法^[5~7], 对截面为L、T形柱在低周反复荷载作用下的柱端荷载-位移骨架曲线进行模拟, 并通过计算分析得到轴压比、翼缘与腹板尺寸对异形柱承载力和变形性能的影响规律.

1 试验概况

本次异形柱正截面承载力抗震性能试验共有13个试件, 其中L形柱试件5个, T形柱试件8个, 试件按1:0.6缩尺, 柱肢厚度120 mm. 试件尺寸及截面配筋如图1所示. 为方便施加水平荷载及轴向力较均匀地传到柱截面的各部分, 柱的顶端200

mm范围内做成矩形端头. 为防止柱头局部破坏, 内布置3层钢筋网. 异形柱试件纵筋采用 $\phi 12$ 的HRB335级钢筋, 屈服强度为375 MPa; 箍筋采用 $\phi 6$ 的HPB235级钢筋, 屈服强度为354 MPa.

试验时首先对准柱的形心施加恒定的竖向荷载, 然后再施加水平方向的低周反复荷载.

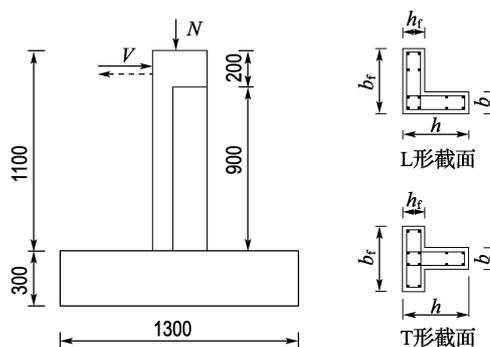


图1 试件尺寸及截面配筋图

Fig. 1 Dimensions and reinforcements of specimens

2 非线性分析中的基本假定

(1) 试件在整个受力过程中, 截面的平均应变符合平截面假定.

收稿日期: 2007-03-10; 修回日期: 2009-01-16.

作者简介: 曲福来(1977-), 男, 博士生; 黄承逵*(1941-), 男, 教授, 博士生导师.

(2) 压区混凝土的应力-应变关系选用 Hognestad 建议的模型^[8]；不考虑受拉区混凝土强度。

(3) 纵向钢筋的应力-应变关系采用斜直线加平直线的理想弹塑性模型。

(4) 不考虑试件剪切变形的影响及受压区混凝土收缩、徐变的影响。

3 截面弯矩-曲率关系计算

异形柱截面的弯矩-曲率关系采用数值积分法计算,将柱截面划分为有限多个混凝土方格单元和钢筋单元,其中每根钢筋作为一个钢筋单元.计算时,近似认为各单元上混凝土应力分布均匀,其合力位于方格形心位置,同样钢筋处的合力位于钢筋的形心.

3.1 坐标系的建立

为了方便建立应变方程及中和轴方程,本程序始终将柱截面放在坐标系第一象限,图 2 所示为 L、T 形截面柱的坐标系的建立.其中,中和轴到原点的距离为 R ,中和轴法线与 x 轴夹角为 θ ,截面中和轴一侧靠近原点部分定义为受压区.

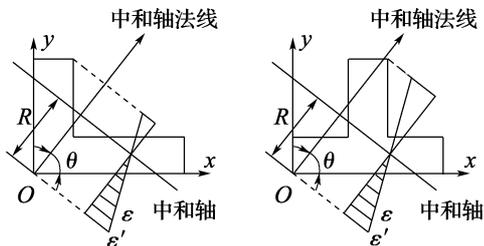


图 2 程序中采用的坐标系

Fig. 2 Coordinate used in the program

3.2 基本计算公式

在上述坐标系中,截面的中和轴方程可表示为

$$\frac{x}{R} \cos \theta + \frac{y}{R} \sin \theta = 1 \quad (1)$$

任一混凝土单元和钢筋单元应变可表示为

$$\epsilon = \epsilon' d / d_m \quad (2)$$

式中: d 为混凝土或钢筋单元形心到中和轴的距离, ϵ' 为距中和轴最远的混凝土受压区单元的应变, d_m 为混凝土受压区单元到中和轴最远的距离.

有了任一单元的应变,就可以根据钢筋及混

凝土的应力-应变关系求出各自的应力 σ_{sj} 、 σ_{ci} . 钢筋的应力以受压为正,受拉为负;混凝土的应力以受压为正,受拉为 0. 然后用下式求出截面的内力:

$$N = \sum_{i=1}^{n_c} A_{ci} \sigma_{ci} + \sum_{j=1}^{n_s} A_{sj} \sigma_{sj} \quad (3)$$

$$M_x = \sum_{i=1}^{n_c} A_{ci} \sigma_{ci} (y_{ci} - y_0) + \sum_{j=1}^{n_s} A_{sj} \sigma_{sj} (y_{sj} - y_0) \quad (4)$$

$$M_y = \sum_{i=1}^{n_c} A_{ci} \sigma_{ci} (x_{ci} - x_0) + \sum_{j=1}^{n_s} A_{sj} \sigma_{sj} (x_{sj} - x_0) \quad (5)$$

式中: M_x 、 M_y 分别为关于截面形心轴 x_0 、 y_0 的弯矩; N 为轴向力; n_c 为混凝土单元总数; n_s 为钢筋根数; σ_{ci} 、 A_{ci} 为第 i 个混凝土单元的应力和面积; σ_{sj} 、 A_{sj} 为第 j 个钢筋单元的应力和面积; x_0 、 y_0 为截面形心坐标; x_{ci} 、 y_{ci} 为第 i 个混凝土单元形心坐标; x_{sj} 、 y_{sj} 为第 j 个钢筋单元形心坐标. $\tan \alpha = M_x / M_y$, α 为荷载角.

3.3 弯矩-曲率($M-\varphi$)程序编制

采用逐级加曲率的方法求得钢筋混凝土异形柱截面在轴力 N 和荷载角 α 作用下的 $M-\varphi$ 曲线.

4 构件荷载-位移关系计算

4.1 悬臂杆分段及计算公式

以上得到的弯矩-曲率关系是对某一个截面的,计算构件的荷载-位移曲线时,需要将构件沿高度划分成 m 段,即有 $m+1$ 个节点.曲率 φ 、转角 θ 及位移 $f(x)$ 之间的关系为

$$\theta = df(x) / dx \quad (6)$$

$$\varphi = d\theta / dx = df^2(x) / dx^2 \quad (7)$$

程序中采用数值积分法计算曲率和位移之间的关系.

4.2 塑性铰区长度及曲率修正

在轴力和柱顶水平荷载作用下,钢筋混凝土构件达到屈服后会形成一个塑性铰区.在塑性铰区(l_p)内曲率的实际分布与理论计算值差异较大,在计算挠度时需要考虑其影响,对曲率分布进行修正,如图 3 所示.计算近似取 $l_p = 2(1-\eta)h_0$, η 与加载方向及截面配筋有关;假设塑性铰区内长度为 l_{p0} 范围内的曲率相等,即 $l_{p0} = h_0$.

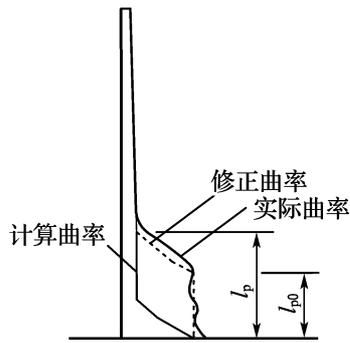


图 3 曲率修正

Fig. 3 Adjustment of curvature

4.3 荷载-位移骨架曲线程序编制

在轴向力作用下,构件的挠度要产生二次矩(或附加弯矩);反过来,二次矩又要影响挠度.因此,在压弯构件的全过程分析中,要不断反复运算而逐次逼近实际挠曲线.假定在节点之间的每一小段内各截面处的曲率是线性变化的,以悬臂杆支座截面 m 处的曲率作为控制值,逐级增加曲率,可以求出在轴力 N 下压弯构件的荷载-位移曲线.程序的编制过程如下:

- (1) 每次取曲率 $\varphi_m = \varphi_m + \Delta\varphi$;
- (2) 由 φ_m 查 $M-\varphi$ 关系确定支座弯矩 M_m ;
- (3) 假定挠曲线 $\delta_{s,i}$;
- (4) 由 M_m 、 N 、 $\delta_{s,i}$ 确定 P ;
- (5) 由 P 、 N 、 $\delta_{s,i}$ 计算各截面弯矩 M_i 、 φ_i ;
- (6) 由 φ_i 确定位移 $\delta_{i,1}$,并以此为基准;
- (7) 以 $\delta_{i,1}$ 作为新的假定值重复(4)~(6)求得 $\delta_{i,2}$.

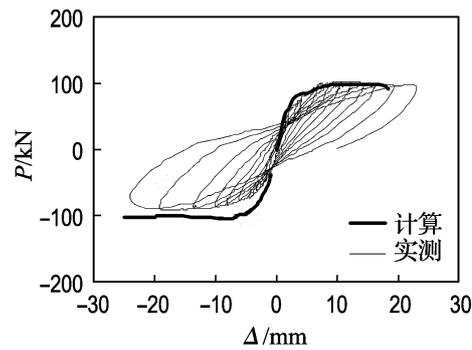
得 $\delta_{i,2}$.

检验所有截面 $\delta_{i,2}$ 是否接近 $\delta_{i,1}$,如小于允许误差则进行下一轮加曲率,否则重复(2)~(7)直到满足条件为止.

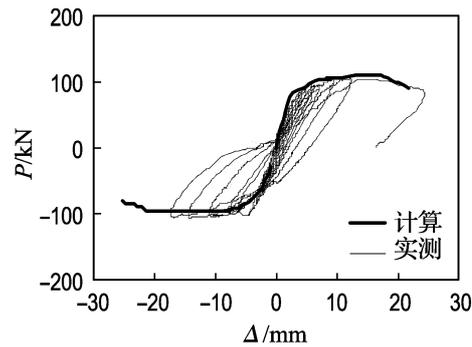
5 计算结果分析

5.1 计算结果与试验结果比较

按照以上分析,对本次试验的试件进行了数值模拟,图 4 所示为其中 2 个试件的计算结果与试验结果,通过比较可以看出,由于考虑了构件的实际曲率分布及塑性铰长度,本程序计算的异形柱荷载-位移骨架曲线与试验结果比较吻合.异形柱极限承载力计算值与试验值的误差平均值在 7% 左右,具有较好的精度,计算结果与试验结果如表 1 所示.



(a) 试件 HL04



(b) 试件 HT10

图 4 计算结果与试验结果比较

Fig. 4 Comparison between calculation and experimental results

5.2 各参数对异形柱受力性能的影响

按照上述方法对异形柱荷载-位移曲线进行计算,分析不同因素的影响.程序中异形柱肢厚均为 120 mm.

(1) 轴压比

其他条件不变的情况下,试件随着轴压比的增加水平极限承载力有所提高,但试件的变形能力降低.同时发现:曲线包围的面积减小,说明试件的耗能能力降低.不同轴压比下异形柱的荷载-位移曲线如图 5 所示.

(2) 柱肢尺寸

当异形柱翼缘尺寸保持不变(翼缘肢长 360 mm),腹板(受力方向的柱肢)尺寸增大时计算得到的荷载-位移曲线如图 6 所示.由图可见,当腹板尺寸增大时,试件的水平极限承载力明显提高,但异形柱的变形能力有所降低,即试件的延性性能有所下降.实际工程中,在水平荷载较大的方向上可以设置成长肢.

表 1 异形柱极限承载力实测值与计算值比较

Tab.1 Comparison of ultimate bearing capacity between experimental results and calculation results

试件编号	f_{cu}/MPa	轴压比	正向水平力/kN			反向水平力/kN		
			实测	计算	相对误差	实测	计算	相对误差
HL01	48.6	0.35	75.0	81.1	0.075	-153.8	-125.0	0.230
HL02	60.0	0.27	105.9	116.9	0.094	-117.9	-121.7	0.031
HL03	48.6	0.35	107.7	128.4	0.161	-142.5	-149.4	0.046
HL04	60.0	0.18	101.0	98.9	0.021	-91.2	-105.8	0.138
HL05	57.8	0.39	127.1	113.2	0.123	-111.1	-110.0	0.010
HT06	60.0	0.27	121.8	116.6	0.045	-117.5	-112.0	0.049
HT07	60.0	0.27	124.8	127.1	0.018	-111.0	-107.6	0.032
HT08	48.6	0.35	88.2	97.5	0.095	-111.7	-104.7	0.067
HT09	57.8	0.30	112.6	103.2	0.091	-110.6	-114.5	0.034
HT10	48.6	0.23	102.4	109.6	0.066	-104.1	-96.5	0.079
HT11	57.8	0.39	129.6	121.9	0.063	-129.5	-118.2	0.096
HT12	60.0	0.27	182.3	181.4	0.005	-159.6	-152.0	0.050
HT13	48.6	0.35	171.8	150.8	0.139	-139.5	-141.0	0.011

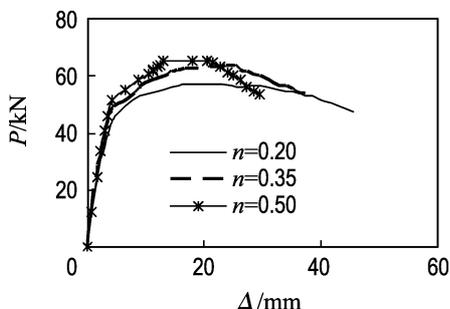


图 5 轴压比对骨架曲线的影响

Fig.5 Effect of axial compression ratio on skeleton curve

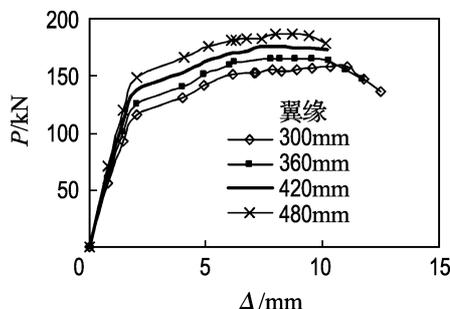


图 7 翼缘尺寸对骨架曲线的影响

Fig.7 Effect of flange length on skeleton curve

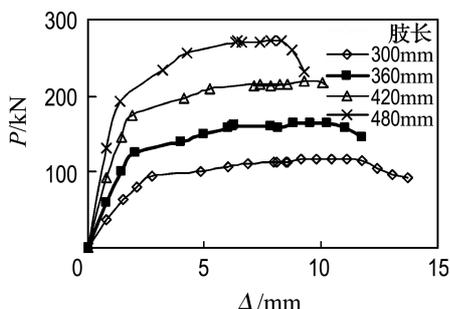


图 6 腹板尺寸对骨架曲线的影响

Fig.6 Effect of web length on skeleton curve

(3)翼缘尺寸

翼缘尺寸对异形柱荷载-位移曲线的影响如图 7 所示. 当异形柱腹板尺寸不变(肢长 360 mm),翼缘尺寸增大时,试件的水平极限承载力有所提高,但提高的幅度不大. 另外,计算得到的变形曲线形状基本相似,变形能力降低较少,相应的延性降低也较小.

6 结 论

(1)选用合理的钢筋和混凝土本构模型的基础上,考虑构件实际塑性铰长度及曲率分布后,利用数值方法对钢筋混凝土异形柱进行了非线性分析,得到了异形柱在周期反复荷载作用下荷载-位移骨架曲线. 通过与试验结果对比,验证了所编制程序的可靠性和实用性.

(2)运用编制的程序计算分析得到:轴压比的增大使得试件的水平承载力提高,但变形能力和延性降低;腹板尺寸的增大可以有效提高异形柱的水平承载力,而翼缘尺寸的影响相对较小. 因此,实际工程中要避免异形柱的轴压比过大. 另外,可以将异形柱做成不等肢形式,柱肢尺寸较大的方向用来承受较大的水平荷载作用.

参考文献:

- [1] 黄承逵,王丹,崔博. 钢筋混凝土异形柱轴压比限值研究[J]. 大连理工大学学报, 2002, **42**(2): 213-217
(HUANG Cheng-kui, WANG Dan, CUI Bo. Study of ultimate axial compression ratio for specially-shaped columns [J]. *Journal of Dalian University of Technology*, 2002, **42**(2):213-217)
- [2] 李晓莉,郭棣,吴敏哲. T形截面柱的非线性分析[J]. 世界地震工程, 2005, **21**(3):122-125
- [3] 管仲国,黄承逵,王丹,等. 钢筋混凝土异形柱双向偏向承载力高效算法与程序设计[J]. 工程力学, 2006, **23**(4):134-139
- [4] 黄承逵,曲福来,赵顺波. 钢筋混凝土不等肢异形柱抗剪性能试验研究[J]. 西南交通大学学报, 2008, **43**(3):325-329
- [5] 朱伯龙,董振祥. 钢筋混凝土非线性分析[M]. 上海:同济大学出版社, 1985
- [6] HSU Cheng-tzu T. T-shaped reinforced concrete members under biaxial bending and axial compression [J]. *ACI Structural Journal*, 1989, **86**(4):460-468
- [7] WANG Gang, HSU Cheng-tzu T. Complete biaxial load-deformation behavior of RC columns [J]. *Journal of Structural Engineering*, 1992, **118**(9): 2590-2609
- [8] HOGNESTAD E. A study of combined bending and axial load in reinforced concrete members [R] // University of Illinois Engineering Experimental Station, Bulletin Series. Illinois:Board of Trustees University of Illinois, 1951, **399**:128

Nonlinear analysis of specially-shaped RC columns

QU Fu-lai^{1,2}, HUANG Cheng-kui^{*1}, ZHAO Xin³

- (1. State Key Laboratory of Coastal and Offshore Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China;
2. School of Civil Engineering and Communication, North China University of Water Conservancy and Electric Power, Zhengzhou 450011, China;
3. China Petrol Liaohe Engineering Co. Ltd., Panjin 124010, China)

Abstract: Based on the experimental study of 13 specially-shaped RC (reinforced concrete) columns under low cyclic load, the method of nonlinear analysis of specially-shaped columns is put forward and the computer program is developed to deal with the load-displacement skeleton curve. The calculated results agree well with the tested data and the method is convenient for predicting the nonlinear behavior of specially-shaped RC columns in earthquake. Furthermore, the influences of design parameters such as axial compression ratio and different length of limbs on bearing capacity and displacement are analyzed. It is shown that the bearing capacity increases and the deformation capacity decreases with increasing of axial compression ratio. Also, the horizontal ultimate load-carrying capacity of specimen is improved greatly when the web length increases.

Key words: specially-shaped columns; nonlinear analysis; different lengths of limbs; load-displacement; skeleton curve