

doi:10.3969/j.issn.1673-9833.2013.03.005

# 基于 Sap2000 钢筋混凝土 异形柱框架结构 Pushover 分析

徐 云

(湖南科技大学 土木工程学院, 湖南 湘潭 411201)

**摘 要:** 运用 Sap2000 有限元软件对钢筋混凝土异形柱框架结构进行 Pushover 分析。通过主、副惯性矩等效的方法将异形柱简化成矩形柱, 建立钢筋混凝土异形柱框架结构, 定义塑性铰之后进行静力非线性计算。对分析结果分布的塑性铰、基地剪力-位移、性能点等方面进行定性与定量综合评价, 为异形柱在框架结构中基于性能的抗震设计提供参考。

**关键词:** 异形柱; 主、副惯性矩; 塑性铰; Pushover 分析

**中图分类号:** TU311.41

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1673-9833(2013)03-0022-05

## Pushover Analysis of Shaped Reinforced Concrete Columns Frame Structure Based on Sap2000

Xu Yun

(School of Civil Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan Hunan 411201, China)

**Abstract:** Makes a Pushover analysis on the structure of shaped column frame of reinforced concrete by using Sap2000 finite element software. Simplifies the shaped column into rectangular column by methods of lord and vice moment of inertia equivalent, sets up the structure of shaped column frame of reinforced concrete and conducts the static nonlinear calculation after defining plastic hinge. Makes a quantitative and qualitative research on the plastic hinge distribution of the results, the base reaction-displacement and the performance point in order to provide reference for the seismic design of shaped column frame structure.

**Keywords:** shaped column; lord, vice moment of inertia; plastic hinge; Pushover analysis

## 0 引言

异形柱是截面几何形状为 L 形、T 形和十字形, 且截面各肢的肢高肢厚比不大于 4 的柱。异形柱具有柱肢可与墙体等厚, 使平面布局更合理的特点, 因而越来越广泛地应用于多层住宅中。虽然异形柱可以解决矩形截面柱在房间内布置时棱角凸出的问题, 达到建筑平面布置规则美观的效果, 但是异形

柱截面的不规则性使它在受力后有可能带来不可预测的后果, 特别是在抗震性能方面。曲福来<sup>[1]</sup>运用有限元软件 ANSYS 对不等肢异形柱框架节点进行了非线性分析, 得到了轴压比、柱肢长度及柱截面形状对异形柱节点裂缝开展和应力分布的规律, 提出了异形柱节点抗裂承载力的计算公式, 且计算结果与试验结果吻合。刘德稳等人<sup>[2]</sup>运用 Sap2000 有限元软件对一幢五层异形柱框架结构进行了静力弹塑性分

收稿日期: 2013-04-08

作者简介: 徐 云 (1988-), 男, 江苏扬州人, 湖南科技大学硕士生, 主要研究方向为高性能混凝土,

E-mail: 237175747@qq.com

析,并对结构的抗震性能给出了评价,为异形柱框架结构基于性能的抗震设计提出了有效方法。

钢筋混凝土异形柱在框架结构中的使用还没有完善的理论,在 JGJ 149—2006《混凝土异形柱结构技术规程》<sup>[3]</sup>中关于其抗震的设计也不够详尽。本文通过对 L 形、T 形和十字形异形柱的 3 种钢筋混凝土框架结构分别进行 Pushover 分析,经数值计算后,得到 3 种结构分布的塑性铰、层间位移角、性能点等方面的结果。根据所得结果对钢筋混凝土异形柱框架结构进行定量与定性分析,并将所得层间位移角与 GB 50011—2010《建筑抗震设计规范》<sup>[4]</sup>中规定的层间位移角作比较,以此来检验所得结果的准确性。

### 1 钢筋混凝土异形柱框架结构模型

异形柱高 3 500 mm,柱肢厚度  $b$  和  $h_f$  均为 120 mm,3 种不同异形柱的截面如图 1 所示。框架为单跨,跨度 2 000 mm;框架梁高 300 mm,宽 200 mm。混凝土均采用 C30。异形柱的有关参数见表 1,框架柱、梁钢筋的力学性能参数见表 2。

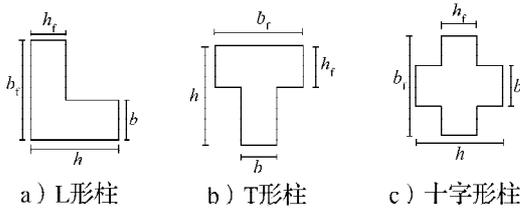


图 1 异形柱截面示意图

Fig. 1 Sketch map of shaped columns

表 1 异形柱参数

Table 1 Shaped column parameters

异形柱	翼缘 $b_f$ /mm	腹板 $h$ /mm	轴压比	混凝土抗压强度 $f_c$ /MPa
L 形	300	300	0.27	30
T 形	300	300	0.27	30
十字形	300	300	0.27	30

表 2 钢筋力学性能指标

Table 2 Reinforced mechanical performance

规格	弹性模量 $E$ /MPa	屈服强度 $f_y$ /MPa	线膨胀系数
箍筋 $\Phi 6$ (HPB235)	$2.1 \times 10^5$	210	$1.17 \times 10^{-5}$
纵筋 $\Phi 12$ (HRB335)	$2.0 \times 10^5$	300	$1.17 \times 10^{-5}$

### 2 主、副惯性矩等效

Sap2000 软件对异形截面柱框架不能进行 Pushover 分析,只有截面形状是矩形或圆形柱框架才能进行 Pushover 分析。异形柱简化成矩形柱的方法有:主轴惯性矩、截面高度等效法,截面面积、截面高度等效法,异形柱肢分离法,主、副惯性矩等效法。

由李晓莉<sup>[5]</sup>对短肢剪力墙(异形柱)结构的静力弹塑性分析结果可知:前 3 种截面等效的方法会使等效后的矩形柱框架结构 Pushover 分析不合理,而主、副惯性矩等效法修正后的矩形柱框架结构的动力学特性与原截面基本一致,因此异形柱采用主、副惯性矩等效成矩形柱的方法。

主、副惯性矩等效法是以主、副惯性矩等效的原则,将异形柱简化为矩形截面柱,然后利用 Sap2000 程序中提供的截面特性修正的功能,对等效截面的横截的(轴向)面积、方向 2 的抗剪面积、方向 3 的抗剪面积及扭转常数 4 个特性进行修正,使等效矩形截面与原异形截面特性接近。

L 形、T 形和十字形截面异形柱通过主、副惯性矩等效后,可将 3 个异形截面等效成 3 个矩形截面,等效后的矩形截面尺寸见表 3,其中  $b$  和  $h$  的单位均为 mm。

表 3 等效后的矩形截面尺寸

Table 3 Equivalent rectangular cross-sectional dimensions

异形柱截面	L 形	T 形	十字形
等效矩形截面 ( $b \times h$ )	254 × 254	235 × 274	296 × 296

根据 Sap2000 提供的截面特性修正功能,对等效后的矩形截面进行修正,使修正后矩形柱的动力学特性与异形柱基本一致。Sap2000 截面特性修正系数如图 2 所示。



图 2 Sap2000 截面特性修正系数

Fig. 2 Sap2000 correction factors for sectional properties

根据主、副惯性矩等效可知,围绕 2 轴、3 轴的惯性矩修正系数为 1;异形柱与矩形柱的质量、重量不变,因此质量与重量的修正系数为 1。根据 Midas 分析与设计原理的刚度数据公式,可以分别求出异形柱和矩形柱的方向 2 与方向 3 的有效抗剪截面和截面的抗扭刚度。截面特性修正系数等于异形柱截面特性与修正后的矩形柱截面特性的比值,因此可得方向 2 与方向 3 抗剪截面面积和扭力常数修正系数。而横截的(轴向)面积修正系数等于原异形柱截面面积与等效后矩形柱截面面积。综上所述:在框架属性/刚度修正参数中,围绕 2,3 轴的惯性矩为 1,质量、重量为 1,其他截面特性修正系数见表 4。

表4 截面特性修正系数

Table 4 The correction factors for sectional properties

异形柱截面	截面特性			
	横轴(轴向)面积	方向2的抗剪面积	方向3的抗剪面积	扭转常数
L形	0.892	0.517	0.517	0.431
T形	0.895	0.671	0.559	0.896
十字形	0.657	0.411	0.411	0.226

### 3 塑性铰及荷载工况

塑性铰是指在钢筋屈服截面上,从钢筋屈服到达极限承载力,截面受到外弯矩很小的情况下,就能产生较大转动,并能承受一定方向弯矩的特殊铰。在Sap2000中通过离散的塑性铰来考虑框架结构的非线性行为,Sap2000中提供了压力,扭转,主、弱轴方向剪力铰,主、弱轴方向的弯矩以及轴力弯矩7种塑性铰。铰属性有默认铰属性、用户指定铰属性、生成铰属性3种。本文的塑性铰采用默认铰属性,其只适用于框架截面。塑性铰的力与位移曲线见图3。

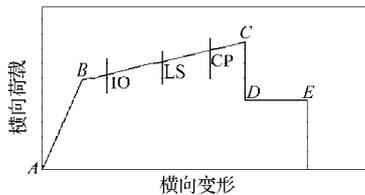


图3 塑性铰骨架曲线

Fig. 3 The plastic hinge skeleton curve

图中, A为起始点, B为屈服点, C为倒塌点, D为破坏点, E为卸载点。在点A和点B之间铰内没有变形发生,铰屈服前定义为刚性,所有弹性变形在框架单元内发生。状态IO为直接使用,LS为生命安全,CP为防止倒塌。对框架Pushover分析后,应该对框架结构位移到达性能点时查看预先设置的默认塑性铰的变形情况,以此来判断结构是否满足指定地震荷载下结构期望的能力目标。

框架梁、柱的箍筋与纵筋按结构处于7度(0.10g)地震地区考虑,设计地震分组为第一组,工程场地为3类。钢筋的滞回类型选择Kinematic,混凝土的滞回类型选择Takeda。由轴压比确定的竖向荷载作用作为Pushover分析的第一工况;此工况后,施加横向水平荷载作为Pushover分析的第二工况,此荷载采用位移控制,位移控制的监测点在顶部框架梁右节点处,最后进行静力非线性分析。

### 4 Pushover 结果分析

#### 4.1 异形柱框架结构的塑性铰发展情况

Pushover分析是在结构自重下和柱顶均匀施加

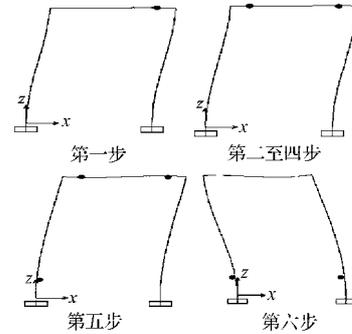
轴向压力后,单方向增大水平荷载过程中,结构产生的反应情况。

塑性铰发展各阶段如图4所示,3种不同异形柱框架塑性铰发展情况如图5所示。

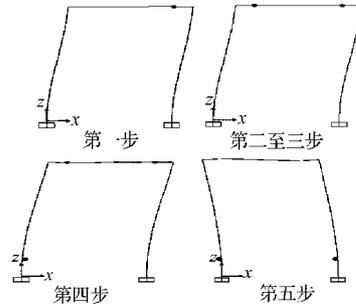


图4 塑性铰发展各阶段

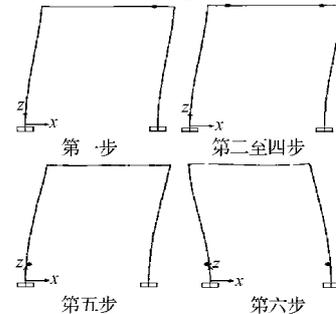
Fig. 4 Plastic hinge various stage



a) L形柱



b) T形柱



c) 十字形柱

图5 异形柱框架塑性铰发展情况

Fig. 5 The plastic hinge development of shaped column frame

从图5可知,最先屈服的都是右节点的塑性铰,这说明右节点在第0步时即轴压力施加完后,承受外荷载带来的效应较大,第一步结束时,其刚度退化较严重,以致出现屈服。第二步后,梁的左节点的塑性铰也发生屈服,右节点屈服状态没有改变,这说明在继续向结构施加水平荷载时,框架梁整体刚度进行了调整,外荷载带来的效应主要给了刚度较右节点大的左节点,从而达到了梁整体工作的良好状态。继续给结构施加水平荷载,梁并没有立刻失去工作能力,仍处于屈服状态,这说明梁的塑性铰屈服后还能抵抗外部荷载带来的效应,并且有一定

耗散外荷载能量的能力。当梁两端的塑性铰发展到一定的阶段后,柱端左节点的塑性铰开始屈服,这说明外荷载给结构带来的效应开始倾向于柱,刚度较梁大的柱子开始参与工作,柱下端左节点由外荷载带来的效应变大直至屈服。当柱下端左、右节点都屈服或右节点屈服,左节点达到立刻使用那一步时,梁的两端左、右节点塑性铰达到倒塌点,整个结构退出工作,这表明异形柱框架结构符合“强柱弱梁”的抗震设计原则。L形柱和十字形柱框架结构的柱下端左节点都达到立刻使用阶段,梁倒塌,而T形柱框架结构的柱下端两节点屈服,梁倒塌,这说明异形柱等效后的柱子截面尺寸规则程度对承受外荷载能力有一定影响。

### 4.2 异形柱框架结构基地剪力与位移

异形柱框架结构基地剪力与监测点位移曲线如图6所示。

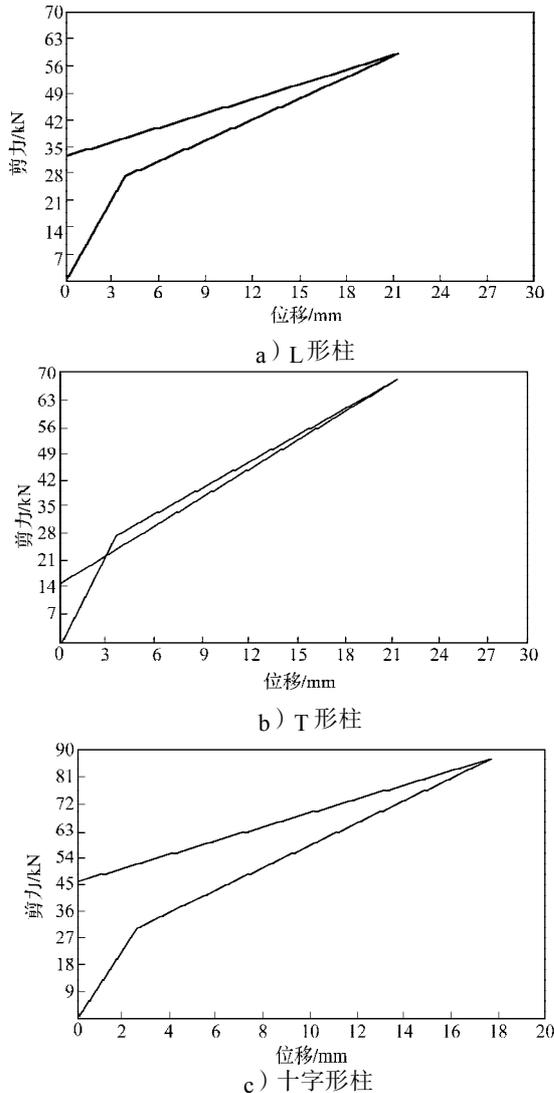


图6 异形柱框架结构基地剪力与监测点位移曲线  
Fig. 6 The curve of shaped column frame structure base reaction and displacement of monitoring point

由图可知,在给结构施加水平荷载的过程中,基地剪力与位移的变化可分为3个阶段:弹性阶段、弹塑性阶段、倒塌阶段。在弹性阶段和弹塑性阶段位移的方向和荷载施加的方向一致;而倒塌阶段位移突然朝荷载施加的相反方向迅速增大,这说明梁最终倒塌的方向与Pushover荷载施加的方向相反。3种异形柱框架结构,在弹性阶段和弹塑性阶段,基地剪力与位移曲线变化趋势一样;不同的是,在倒塌阶段,L形与十字形柱曲线在屈服阶段的曲线之上,而T形柱曲线却在屈服阶段的曲线之下且比较陡,这说明T形柱框架结构倒塌的速度较其他2种快且较严重。

异形柱框架结构基地剪力与监测点位移最大值见表5。

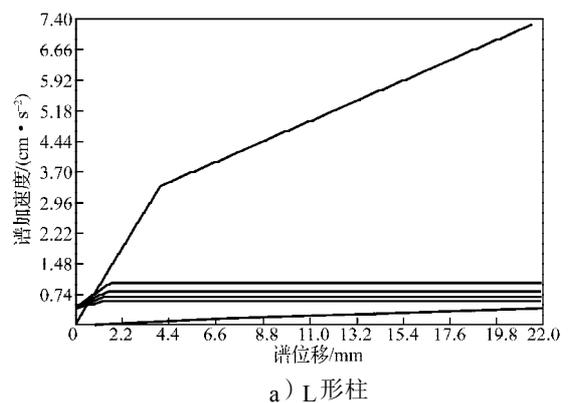
表5 异形柱框架结构基地剪力与位移最大值  
Table 5 Shaped column frame structure base reaction and maximum displacement

柱截面类型	基地剪力 /N	位移 /mm
L形	59 604.33	21.566 97
T形	68 248.67	21.692 14
十字形	87 357.38	17.708 52

由表5可知,在弹塑性阶段,3种异形柱框架结构产生最大位移分别为21.566 97, 21.692 14, 17.708 52 mm,而框架高都为3 500 mm,因此,三者的位移角分别为1/162, 1/161, 1/198。在异形柱设计规范中,弹塑性阶段的层间位移角限制为1/60,这说明上述结果符合规范要求。T形柱框架结构产生的位移最大,这说明其变形能力比其他异形柱框架结构强。截面等效后高与宽不相等的T形柱结构,和等效后高与宽相等及变形相差不大的L形柱结构比较,其承受的基地剪力较大,说明其耗能能力较强。在3种异形柱的截面特性修正系数中,T形的最大,这说明除了异形柱的等效截面尺寸对结构抵抗外荷载有影响之外,截面修正系数也有一定影响。

### 4.3 异形柱框架结构性能点

结构的能力谱与需求谱曲线如图7所示。



a) L形柱

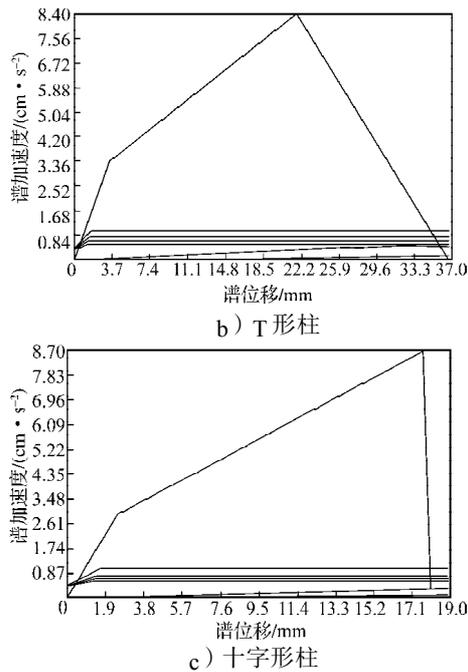


图7 能力谱与需求谱曲线

Fig. 7 The curve for capacity spectrum and demand spectrum

由图可知, L形、T形、十字形柱框架结构的性能点位移分别为: 1.051, 0.884, 0.706 mm, 3种异形柱框架结构的性能点都在弹性阶段出现。

多遇地震下, 各异形柱框架结构的性能点结果见表6。由表可知, 在弹性阶段, 3种异形柱框架结构到达性能点时的层间位移角均小于异形柱规范规定的弹性层间位移角 $1/600$ 。从整个过程来看, 结构在到达性能点时, 没有塑性铰出现, 这表明出现性能点之前结构一直处于弹性阶段。

表6 异形柱框架结构性能点结果

Table 6 The performance point results for shaped column frame structure

异形柱截面	监测位移/mm	性能点位移/mm	框架高/mm	层间位移角
L形	70	1.051	3 500	1/3 330
T形	100	0.884	3 500	1/3 959
十字形	70	0.706	3 500	1/4 958

## 5 结论

综上所述可得如下结论:

1) 由Pushover分析结果可知, 3种异形柱框架结构中, 都是框架梁先于框架柱失去工作能力, 这说明通过主、副惯性矩等效将异形柱转化为规则截面柱的方法, 可模拟异形柱框架结构的实际工作状态, 且该方法得到的Pushover结果符合抗震设计规定的“强柱弱梁”的要求。

2) 在进行Pushover分析过程前, 异形柱等效后

的截面尺寸及截面特性对结构抵抗外荷载的能力有一定影响, 合理的等效方法能够接近真实异形柱静力非线性分析的结果。在进行Pushover分析之后, 3种异形柱都经历了弹性阶段、弹塑性阶段、倒塌阶段。梁在倒塌阶段, 倒塌没有稳定的过程, 而是陡然性地失去承载能力, 实现局部破坏, 但柱没有倒塌, 因此未出现整体破坏。

3) 弹性阶段和弹塑性阶段, 将异形截面柱等效为规则截面柱的3种框架结构的层间位移角都满足规范的要求。利用主、副惯性矩等效进行Pushover分析的方法, 能对异形柱的薄弱部位作进一步估测, 这为异形柱框架结构基于性能的抗震设计提供了有效的方法。

## 参考文献:

- [1] 曲福来. 钢筋混凝土不等肢异形柱抗震性能试验研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2008.  
Qu Fulai. Experimental Study on Seismic Behavior of Specially Shaped RC Column with Different Limb Lengths [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2008.
- [2] 刘德稳, 陈功, 王经龙, 等. 用Sap2000对异形柱框架结构的静力弹塑性分析[J]. 四川建筑, 2009, 29(3): 138-139.  
Liu Dewen, Chen Gong, Wang Jinglong, et al. Shaped Column Frame Structure Pushover Analysis in Sap2000[J]. Sichuan Architecture, 2009, 29(3): 138-139.
- [3] 天津大学, 中国建筑科学研究院, 清华大学, 等. JGJ 149—2006 混凝土异形柱结构技术规程[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2006: 5-13.  
Tianjin University, Construction Science Research Institute of China, Tsinghua University, et al. JGJ 149—2006 Technical Specification for Concrete Structures with Specially Shaped Columns[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2006: 5-13.
- [4] 中华人民共和国住房和城乡建设部. GB 50011—2010 建筑抗震设计规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010: 44-47.  
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. GB 50011—2010 Code for Seismic Design of Building[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2010: 44-47.
- [5] 李晓莉. 短肢剪力墙结构的抗震性能及设计理论研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2007.  
Li Xiaoli. Research of Seismic Performance and Design Theory of the Short-Shear Wall Structure[D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2007.

(责任编辑: 邓光辉)