

钢筋混凝土异形柱平截面假定适用性初探*

胡晓斌, 黄宗明, 陈名弟

(重庆大学 土木工程学院, 重庆 400045)

摘要:采用通用有限元分析软件 ANSYS 的 SOLID65 和 LINK8 单元,对处于压、弯、剪、扭复杂受力状态下肢宽厚比为 4:1 的十形柱、L 形柱和 T 形柱进行了单调加载计算机模拟,同时采用基于有限单元柔度法的纤维模型梁柱单元进行对比分析,对平截面假定在异形柱非线性分析中的适用性进行了初步探讨。结果表明,对于肢宽厚比小于或等于 4:1 的异形柱,采用平截面假定进行分析基本可行。

关键词:钢筋混凝土异形柱;平截面假定;非线性分析

中图分类号:TU375.3;TU317 **文献标识码:**A **文章编号:**1006-7329(2004)03-0026-06

Primary Study of Applicability of Plane - section Assumption of Shaped RC Columns

HU Xiao - bin, HUANG Zong - ming, CHEN Min - di

(College of Civil Engineering, Chongqing University, Chongqing 400045, P. R. China)

Abstract: Adopting the element SOLID65 and LINK8 in the general finite element analysis software ANSYS and fiber model beam - column element based on finite element flexibility method respectively, the comparative analysis of the cross, L and T - shaped RC columns under compression, bending, shear and torsion with flange width - thickness ratio of 4:1 is carried out. The applicability of plane section assumption in the nonlinear analysis is discussed primarily, which shows that it is feasible on the whole for shaped RC columns with flange width - thickness ratio equal to or smaller than 4:1.

Keywords: shaped RC columns; plane - section assumption; nonlinear analysis

在钢筋混凝土异形柱结构体系中,柱截面常见的有十形、L形和T形。由于异形柱一般为开口薄壁杆件,在荷载作用下往往处于压、弯、剪、扭的复杂受力状态,可能会存在翘曲和明显的局部应力集中现象,当肢宽厚比较大或剪跨比较小时,剪切变形就不能忽略^[1],这些都给异形柱的非线性分析带来很大的困难。

已有的低周反复试验^[2-4]表明,对于肢宽厚比为 4:1 的异形柱,平截面假定仍然是适用的,表现出了与矩形柱相似的性能。如果平截面假定可行,这对异形柱结构的分析,尤其是非线性分析会带来很大的方便。但试验构件数量有限,所受扭矩较小,难以考察各种复杂因素对平截面假定适用性的影响。因此本文采用通用有限元软件 ANSYS 非线性数值模拟分析代替试验,进一步考察复杂受力状态下平截面假定在钢筋混凝土异形柱非线性分析中的适用性。

由于 ANSYS 非线性分析采用的是三维实体有限元模型,不作平截面假设,对钢筋混凝土结构而言,单元很多,迭代计算耗时很长,并且收敛性也不易控制,其计算效率工程界难以接受。因此只有采用适宜的空间杆系模型才是解决钢筋混凝土异形柱结构非线性分析问题的比较切实可行的出路。本课题组

* 收稿日期:2004-01-20

基金项目:国家自然科学基金资助项目(59978055)

作者简介:胡晓斌(1979-),男,湖北钟祥人,硕士生,主要从事建筑结构抗震研究。

采用平截面假定建立的基于柔度法的纤维模型梁柱单元,成功地解决了钢筋混凝土框架结构三维非线性分析问题,其分析效果和效率已在构件层次^[5]和结构层次^[6]上得到了很好的验证。本文将采用纤维模型梁柱单元与三维实体有限元进行对比分析,讨论平截面假定在异形柱非线性分析中的适用性。

1 分析构件及荷载工况

本文分析所用的构件尺寸及截面配筋如图 1 所示(参见文献[2]~[4]),图中尺寸单位为 mm。其中柱编号 ZXA-1 代表十形柱,ZLA-1 代表 L 形柱,ZTA-1 代表 T 形柱,肢宽厚比均为 4:1。截面图中粗些的纵筋表示 $\Phi 8$ 钢筋,取屈服强度为 377 MPa,弹性模量为 2.07×10^5 MPa,细些的纵筋表示 $\Phi 6.5$ 钢筋,取屈服强度为 391 MPa,弹性模量为 2.01×10^5 MPa。箍筋均为 8# 铁丝制成,取屈服强度为 309 MPa,平均间距取为 50 mm。混凝土抗压强度取为 29.6 MPa。

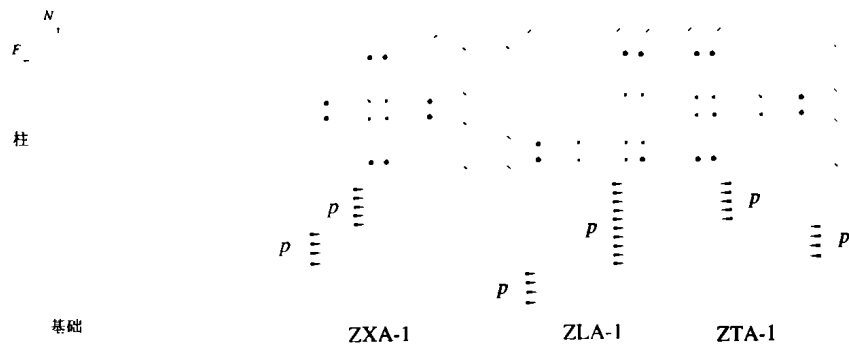


图 1 构件尺寸、截面配筋及水平荷载作用范围

柱的顶部 200 mm 范围内作为加载区,水平荷载作为面力均匀加在侧面上,其作用范围如图 1 所示,竖向荷载也作为面力均匀加在顶面上,不考虑试件的自重。这种加载模式不仅使试件处于压、弯、剪、扭的复杂受力状态,而且大量的试算也表明其在 ANSYS 分析时收敛性较好。分析时面荷载按比例施加,共分三级,每一级荷载工况如表 1。

表 1 荷载工况 (MPa)

级数	ZXA-1		ZLA-1		ZTA-1	
	水平面力	竖向面力	水平面力	竖向面力	水平面力	竖向面力
第一级	1.896	0.849	0.960	0.699	1.776	1.018
第二级	3.768	1.687	1.990	1.449	3.552	2.037
第三级	5.600	2.507	2.990	2.177	5.336	3.060

2 纤维模型梁柱单元分析模型

2.1 程序简介

该模型将梁柱单元杆件离散为若干纵向纤维,如图 2 所示,忽略剪切影响,认为每根纤维处于单向应力状态(可以在材料的单轴应力-应变关系中考虑箍筋横向约束影响)。假定梁(柱)的任一截面在整个单元变形期间仍保持为平面,在此基础上依据有限单元柔度法理论来建立梁柱单元刚度矩阵。采用纤维模型有效解决了梁柱单元空间分析中双向弯曲耦合以及轴向变形和弯曲变形的耦合问题,同时相对于 ANSYS 的实体有限元模型,极大地减少

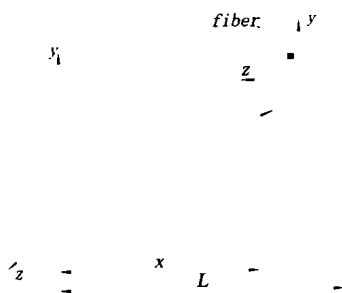


图 2 纤维模型梁柱单元

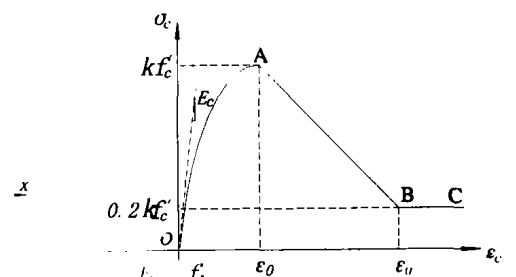


图 3 修正 Kent-Park 混凝土本构模型

了计算工作量,是简化与计算精度之间的一种较好的平衡。有关梁柱单元的形成、梁柱单元和截面状态的确定等,详见文献[7]。

纤维模型梁柱单元只需采用单轴受力下的材料本构模型,这类本构模型是目前研究得最为成熟和充分的一类。钢筋采用后面 ANSYS 分析时的本构模型,如图 7 所示。混凝土受压时的骨架曲线采用 Scott 等人扩展后的 Kent-Park 模型^[8],如图 3 所示。该模型考虑了箍筋对混凝土的约束作用,表现为混凝土强度和下降段延性的提高。其受压骨架曲线分以下三段来描述:

$$\text{OA 段}(0 \leq \epsilon_c \leq \epsilon_0): \quad \sigma_c = Kf_c' \left[2 \left(\frac{\epsilon_c}{\epsilon_0} \right) - \left(\frac{\epsilon_c}{\epsilon_0} \right)^2 \right]$$

AB 段($\epsilon_0 \leq \epsilon_c \leq \epsilon_u$):该段为直线,由应力峰值点 A 和极限压应变点 B 确定。

BC 段($\epsilon_u \leq \epsilon_c$): $\sigma_c = 0.2Kf_c'$,该段考虑混凝土达到极限压应变后还能承受一定的压力。

式中: $\epsilon_0 = 0.002k$, $k = 1 + \rho_s f_{yh} / f_c'$, $\epsilon_u = 0.004 + 0.9\rho_s f_{yh} / 300$, f_c' 是混凝土圆柱体抗压强度, ρ_s 是体积配箍率,计算时核心区混凝土取至箍筋外边缘, f_{yh} 是箍筋屈服强度, ϵ_0 是峰值应变, K 是考虑约束所引起的强度增加系数, ϵ_u 是混凝土极限压应变,该式由 Scott 建议,偏保守。

根据上述公式可以计算出混凝土本构模型中参数。由于混凝土棱柱体抗压强度 f_c 更接近构件的强度,且 f_c 和 f_c' 近似相等^[9],所以在输入混凝土材料的本构模型时用 f_c 来代替 f_c' ;在计算 ρ_s 时,由于对异形柱截面而言,箍筋的长宽比比一般的矩形箍要大,而且箍筋错开叠放,目前又缺乏对这类箍筋作用机制的研究,所以在计算时偏保守地按单肢矩形箍考虑^[10]。求得 f_c 和 ρ_s 后,就可以算出混凝土强度增加系数 K 、峰值应变 ϵ_0 及混凝土极限压应变 ϵ_u 。

本程序的特点在于输入简单,输出详细,计算效率高,基于柔度法编制,对于结构处于强非线性阶段,尤其是对于处理下降段(软化)问题,具有明显的优势^[5];其局限性在于不考虑纤维剪切变形和粘结滑移,采用平截面假定来使截面中的混凝土纤维和钢筋纤维共同工作,构件本身的扭转变形是按照弹性来考虑的。

2.2 计算模型及截面纤维划分

将每一级水平面荷载根据静力等效的原则合成集中力,其位置如图 4 所示,进一步等效可得计算模型如图 5 所示。考虑到构件混凝土保护层厚度较小,为方便截面网格划分,在不影响研究目的和不引起较大误差的前提下,将约束混凝土扩展至全截面。截面纤维划分如图 4 所示,图中未给出钢筋纤维的具体位置,分析时由构件中钢筋实际位置而定。

3 ANSYS 分析模型

采用 ANSYS 分析时,混凝土采用 SOLID65 三维实体单元(即 CONCRETE 单元),钢筋采用 LINK8 线单元。混凝土和钢筋分开建模,不考虑钢筋和混凝土之间的粘结滑移,划分单元后在节点处相联,从而保证单元在节点处位移协调。同纤维模型梁柱单元分析,将约束混凝土扩展至全截面。有限元空间网格划分如图 6 所示。

为了实现平截面假定纤维模型程序与 ANSYS 的对比分析,两程序在分析时采用相同的材料本构模型,其中钢筋采用双折线模型如图 7 所示,取 $E' = 0.01E$ 。

4 分析结果

4.1 截面应变分布

由于 ANSYS 分析不易收敛,三根构件水平荷载均加至临近屈服荷载。十形柱 ZXA-1 受拉钢筋应

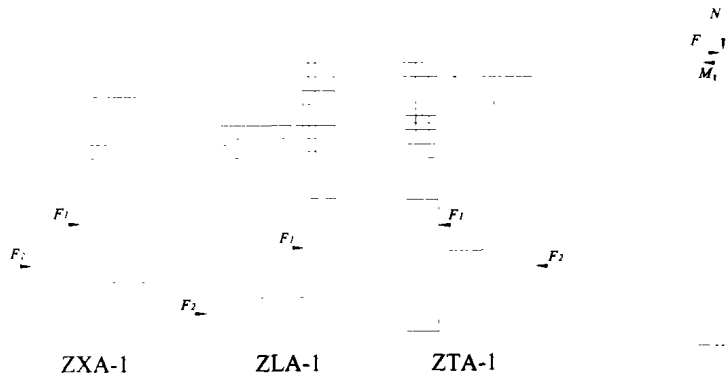


图 4 截面纤维划分及等效集中力

图 5 计算模型

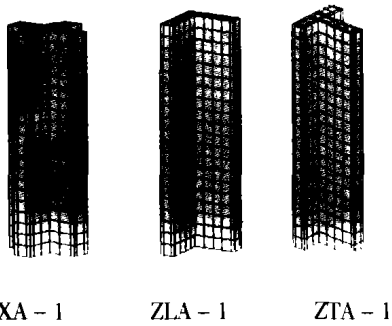


图6 有限元空间网格划分

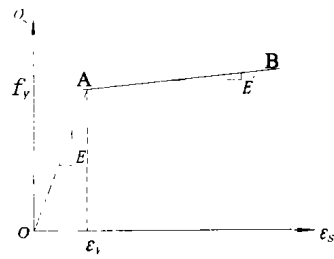


图7 钢筋本构模型

力算至 353 MPa, L形柱 ZLA-1 受拉钢筋应力算至 327 MPa, T形柱 ZTA-1 受拉钢筋应力算至 308 MPa, 均临近钢筋的屈服强度 377 MPa。为了考察平截面假定的适用性,图 8、9、10 给出了 ANSYS 分析所得在每一级荷载作用下三根构件底部和中部截面水平肢中心线上的应变分布。由图中可以看出,应变的实际分布情况与平截面假定比较接近,从而为采用纤维模型梁柱单元分析异形柱奠定了基础,下文将给出对比分析的结果,以进一步考察平截面假定的适用性。

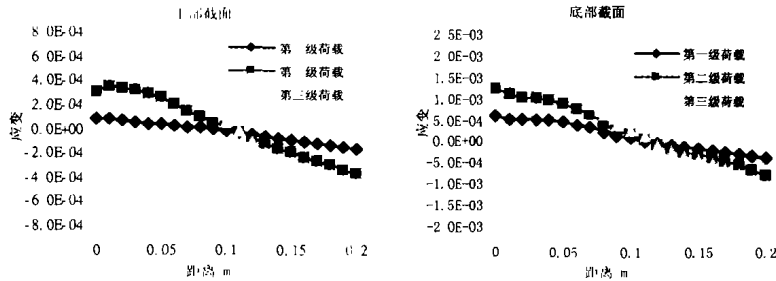


图8 ZXA-1中部和底部截面水平肢中心线应变分布

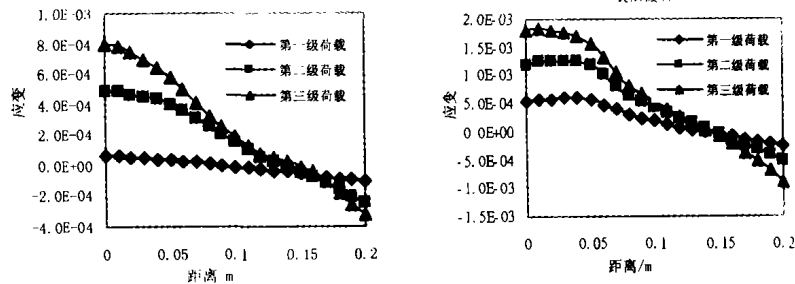


图9 ZLA-1中部和底部截面水平肢中心线应变分布

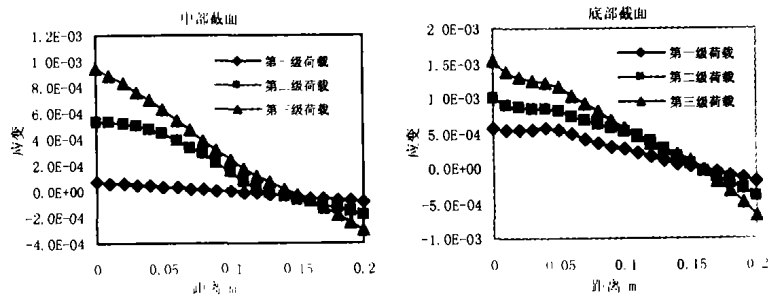


图10 ZTA-1中部和底部截面水平肢中心线应变分布

4.2 对比分析

4.2.1 应力对比

重点考察了三根构件底部截面水平肢中心线上的应力分布,各级荷载作用下对比结果分别如图 11、12、13 所示。当荷载较小时,受拉区应力分布差异较大,这可能和两种分析模型中混凝土本构模型受拉段的差异有关,因为 ANSYS 分析时不能直接输入混凝土本构模型的受拉段,当荷载增加时,应力分布

吻合程度更好。在理论上,由于纤维模型梁柱单元分析时没有考虑约束扭转引起的正应力,应力吻合的程度就取决于扭矩相对于轴力和弯矩的大小,扭矩相对越小,吻合越好。

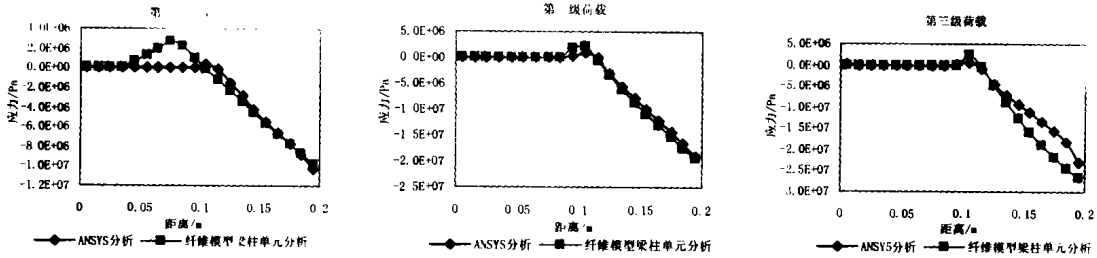


图 11 ZXA-1 底部截面水平肢中心线应力分布对比

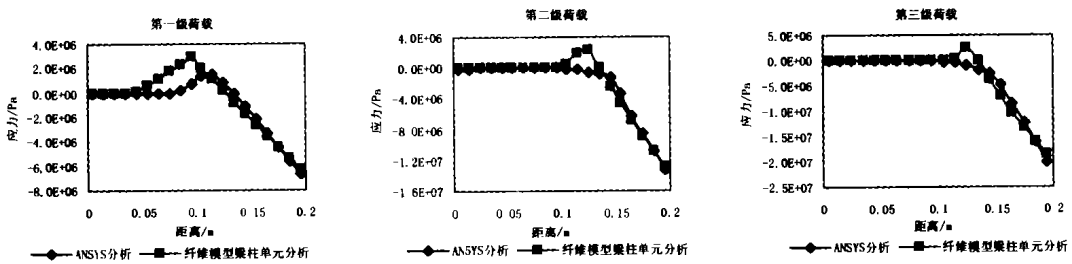


图 12 ZLA-1 底部截面水平肢中心线应力分布对比

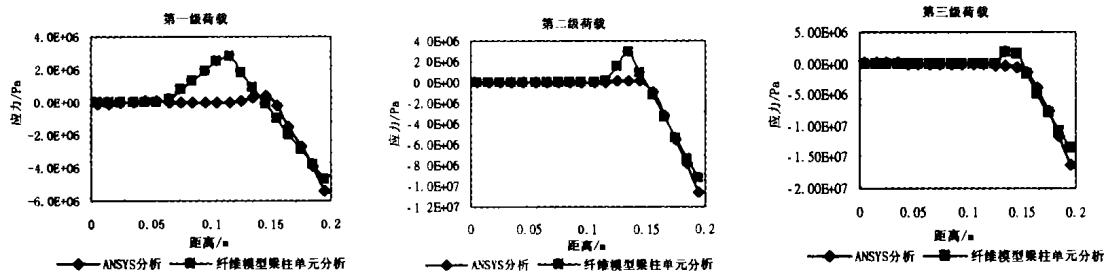


图 13 ZTA-1 底部截面水平肢中心线应力分布对比

4.2.2 顶点位移对比

在对比顶点位移时,ANSYS 分析时考察的部位是构件加载区中部截面形心,对应纤维模型梁柱单元分析模型的顶点,并且根据对比的需要将荷载进一步细分。各级荷载作用下位移对比结果如图 14 所示。由于纤维模型梁柱单元采用了平截面假定,没有考虑剪切变形的影响,构件自身的扭转变形也按弹性考虑,所以算出的顶点位移小于 ANSYS 分析所得位移,这种差异随着荷载的增加而增加。

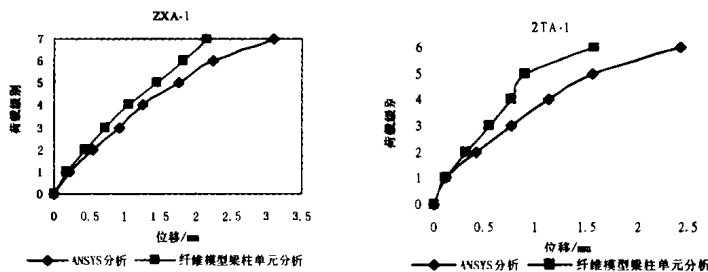


图 14 顶点位移对比

5 结语

根据本文的对比分析,总体上讲,采用平截面假定的纤维模型梁柱单元分析的结果和 ANSYS 分析

结果接近,截面应力或内力的分析效果好于柱端位移的分析效果,采用平截面假定对肢宽厚比小于或等于4的钢筋混凝土异形柱进行分析基本可行。

从理论上讲,对于处于复杂受力状态下的构件,平截面假定是否成立主要取决于构件的剪切变形和扭转变形相对于弯曲变形是否很小以至可以忽略,即取决于剪跨比与弯扭比的大小,除此之外,还与端部约束情况等因素有关。剪跨比和弯扭比越大,剪切变形和扭转变形相对于弯曲变形就越小,平截面假定就越能更好地满足。在本文所给定的荷载作用下,剪跨比近似为3.5,与实际工程中底层柱接近,弯扭比平均值对十形柱ZXA-1和T形柱ZTA-1为10左右,对L形柱ZLA-1为5左右,而在实际工程中由于扭矩相对很小,弯扭比要大得多,因此平截面假定可以更好地成立。通过改变剪跨比和调整侧面荷载从而改变弯扭比,就可以进一步考察剪跨比和弯扭比对平截面假定适用性的影响,更一般结论的取得还有待进一步研究。

参考文献:

- [1] 何广杰. 钢筋混凝土异形柱的受力特点及工程设计探讨[J]. 四川建筑, 1996, 16(2): 7-10.
- [2] 曹万林, 王光远, 欧进萍, 等. 周期反复荷载作用下钢筋混凝土十字形柱的性能[J]. 地震工程与工程振动, 1994, 14(3): 60-67.
- [3] 曹万林, 王光远, 吴建有, 等. 不同方向周期反复荷载作用下L形柱的性能[J]. 地震工程与工程振动, 1995, 15(1): 67-72.
- [4] 曹万林, 王光远, 魏文湘, 等. 不同方向周期反复荷载作用下T形柱的性能[J]. 地震工程与工程振动, 1995, 15(4): 76-84.
- [5] 黄宗明, 陈滔. 基于有限单元柔度法和刚度法的非线性梁柱单元比较研究[J]. 工程力学, 2003, 20(5): 24-31.
- [6] 陈滔. 基于有限单元柔度法的钢筋混凝土框架结构三维非弹性地震反应分析[D]. 重庆: 重庆大学, 2003.
- [7] Fabio F. Taucer, Enrico Spacone, Filip C. Filippou. A Fiber Beam - Column Element For Seismic Response Analysis of Reinforced Concrete Structures[R]. University of California, Berkeley, 1991.
- [8] B. D. Scott, R. Park, M. J. N. Priestley. Stress - strain Behavior of Concrete Confined by Overlapping Hoops at Low and High Strain Rates[J]. ACI Journal, 1982, 79: 13-27.
- [9] 叶列平. 混凝土结构(上册)[M]. 北京: 清华大学出版社, 1999.
- [10] R. 帕克, T. 波利著, 秦文钺等译. 钢筋混凝土结构[M]. 重庆: 重庆大学出版社, 1986.