

大跨度预应力结构体系等代框架计算模型研究*

黄宗明¹, 杨溥¹, 任伟², 陈名弟¹

(1. 重庆大学 土木工程学院, 重庆 400045; 2. 中国建筑设计研究院重庆建筑设计股份有限公司, 重庆 400013)

摘要:对等代异形柱框架模型分析大跨度预应力住宅结构体系的相关问题进行了研究。分别采用纤维模型梁柱单元和壳单元模型对大跨度预应力结构在竖向和水平作用下的受力性能进行了大量的对比分析,并同大型结构试验结果进行了对比,确定了等代框架模型的参数。结果表明,等代框架计算模型是可行的,尤其是对于非线性分析,具有较高的分析效率和精度。

关键词:大跨度; 预应力; 计算模型; 纤维模型

中图分类号:TU318 **文献标识码:**A **文章编号:**1006-7329(2005)04-0041-06

Study on Equivalent Frame Model for Large-span Prestressed Concrete Residential Structure System

HUANG Zong-ming¹, YANG Pu¹, REN Wei², CHEN Ming-di¹

(1. College of Civil Engineering, Chongqing University, Chongqing 400045, P. R. China; 2. Chongqing Architecture Design Ltd., China Architecture Design & Research Group, Chongqing 400013, P. R. China)

Abstract: In this paper, a study is carried out on large-span prestressed concrete structure system in residence analyzed by specially-shape column equivalent frame model. Applying fiber model column-beam element and shell element, a large amount of comparative analyses about large-span prestressed concrete structure under horizontal and vertical load is carried out. The parameter of the equivalent frame is confirmed based on comparison with the result of the man-sized structural experiment. It is proved that the equivalent frame model has high efficiency and precision especially for nonlinear analysis.

Keywords: large-span; prestress; calculation model; fiber model

大跨度预应力住宅结构体系是一种新型建筑结构体系,在建筑功能方面能满足消费者灵活、自由地划分空间的要求,并能有效增加房屋净高、充分利用建筑空间。图1为该结构体系的建筑平面示意图。

该体系结构受力特点主要表现在:在建筑周边或楼、电梯间采用剪力墙、短肢剪力墙或异形柱等结构构件作为竖向承重构件,在建筑中间由于未设置柱和梁承重构件,从而形成大跨度现浇板(一般在12~14 m左右),对现浇板中施加后张预应力,由此可见该结构体系受力特征为既不同于普通框架结构和剪力墙结构,也不同于异形柱框架结构体系的新型结构体系。对于该结构体系弹性阶段受力性能,可采用实体有限元模型分析;但对于弹塑性阶段的抗震性能评估,采用实体有限元模型,不但计算不收敛,而且无论从分析效率、分析结果的处理方面都难以令人满意。

本文以较为规则的结构体系为研究对象,参照普通板柱体系设计方法,建立等代框架模型,通过等代框架与原结构的弹性内力对比,确定等代梁的相关参数,并用试验结果加以验证。在与试验结果的对比分析中,本文采用纤维模型梁柱单元^[1,2]。该模型将梁柱单元杆件离散为若干纵向纤维,忽略剪切影响,认为每根纤维处于单向应力状态(可在材料的单轴应力-应变关系中考虑箍筋的横向约束效应),

* 收稿日期:2005-04-28

基金项目:国家十五科技攻关子课题(项目批准号:2002BA806 B05-2B)

作者简介:黄宗明(1957-),男,重庆人,教授,博士生导师,主要从事结构抗震研究。

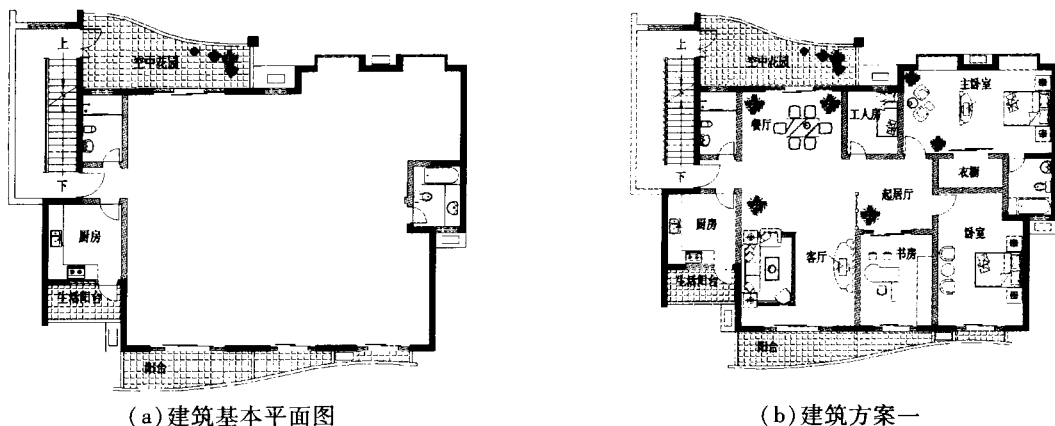


图1 结构体系的建筑平面示意图

采用平截面假定,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,而采用有限单元柔度法则保证了单元内力分布的准确性,同时避免了刚度法对单元位移形函数的假定。基于柔度法和纤维模型梁柱单元的基本原理,课题组已编制完成了针对普通矩形柱框架结构的三维非线性有限元分析程序,并且已在构件和结构层次上得到了验证^[3,4],而对于该结构体系中作为竖向承重构件的异形柱,平截面假定以及构件的模拟已经得到验证^[5-7]。

1 利用等代梁建立等效杆系模型

本文参照普通板柱结构体系设计方法(见图2a),拟采用等代梁模拟现浇预应力板,从而建立等效杆系模型(见图2b),并与壳模型(即梁、板和柱均采用Shell单元)的计算结果以及试验结果进行对比,确定等代梁的参数取值。

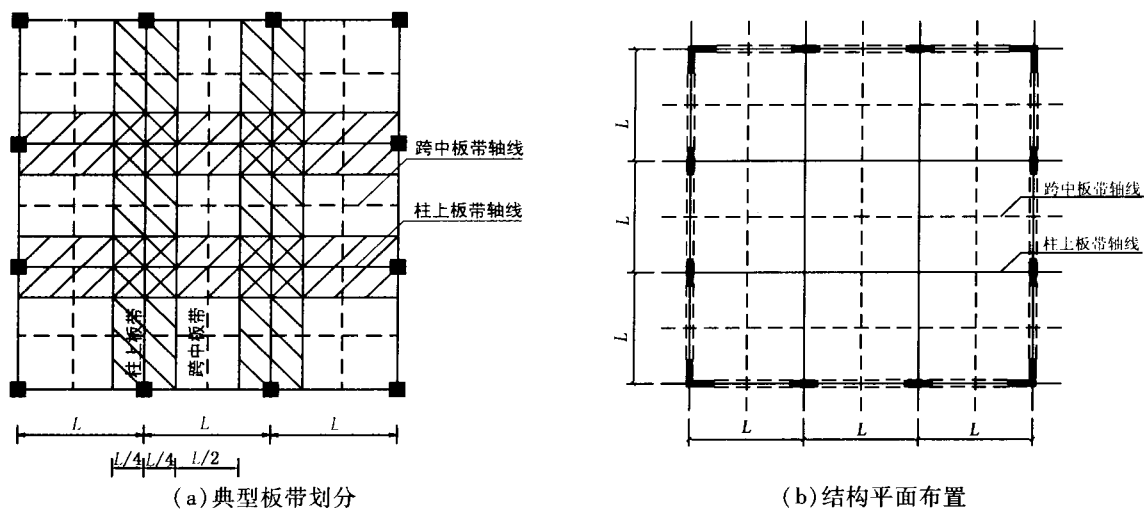


图2 典型板带划分及结构平面布置图

由于板梁等代中涉及到构件几何尺寸的调整和荷载的导算,等代梁杆系模型的建立相对较复杂。等代过程中,对柱截面尺寸取实际值,边梁翼缘、跨中板带及柱上板带厚度取实际板厚,通过调整柱上及跨中等代梁的宽度和边梁翼缘宽度这三个主要参数建立等效杆系模型。

以图1建筑的一个户型为研究对象,该建筑位于7度区,Ⅱ类场地,设计地震分组为第一组。结构平面布置见图2b,取跨度为12m(即 $3l=12\text{m}$),层数分别为1、5、8、10层,层高均为3.6m的模型,分别计算结构(构件)在竖向和水平荷载作用下的内力和变形。并以SAP2000中壳模型的弹性计算结果(主要考察了竖向荷载下柱的弯矩值和水平荷载下结构的位移)为目标,通过反复调整杆系模型中的等代

梁宽和边梁的翼缘宽度,使在杆系模型中得到的计算结果与之相近,从而建立等效杆系模型。

1.1 弹性楼层下等代梁模型研究

为了取得适宜的等代梁模型参数,本文对图 2b 的结构应用 SAP2000 分别建立了 1 层、5 层、8 层及 10 层的弹性壳单元,同时在 SAP2000 中对应建立了相同层数的等代梁模型,其中调整的参数为:边梁翼缘宽度分别取 $3h_f$ 、 $5h_f$ 、 $8h_f$ 和 $10h_f$ (h_f 为板厚)、板带宽度分别取 $0.4l$ 、 $0.5l$ 、 $0.75l$ 和 $1.0l$ (l 为边柱柱距,见图 2a)。在相同的条件下,对结构在竖向荷载及水平荷载作用进行了试算。

由于杆单元与壳单元本质的差异,苛求等代杆模型与壳单元模型的内力及位移十分接近是不现实的。本文等代的原则是:使杆系模型构件(主要是柱)在内力起控制作用的截面的响应与壳单元模型的响应之间的差别控制在一定范围以内。经计算调整(限于篇幅,计算结果未列出),确定等代梁模型参数为:边梁 $b_w = b + 10h_f$,等代梁 $b_f = l$ 。

1.2 刚性楼层假定的引入

如果按照在弹性阶段确定的几何参数直接建立非线性动力分析的梁柱单元模型,其过宽的等代梁取值将会造成以下几个问题:

由于等代梁的宽度取值较大,在楼层平面内即便是节点之间很小的扭转也会造成数值计算的发散;过宽的等代梁势必造成在截面上划分过多的纤维,浪费大量的计算机时;本文在结构非线性动力分析中,也要求限制模型在楼层平面内的自由度数目。为使等代梁模型能够更适用于地震作用下的非线性动力分析,在模型建立过程中,引入了楼板平面内的刚性平面假设。

所谓刚性楼板即假设楼板在自身平面内刚度无限大。在假定刚性楼板后,结构楼层整体在平面内仅有三个未知量:两个平动自由度和一个绕结构坐标系 Z 轴的转动自由度,楼层处与楼板相连的构件位移可提供这三个未知量的换算条件,这样可以大大减小结构体系的未知量个数。

为了验证在本结构体系中刚性楼层假定的适用性,在 SAP2000 中,建立了两个相对应的模型:一个应用弹性楼板,而另外一个则通过自由度的关联建立楼层平面内的刚性假定。通过分析计算,发现在两种不同的计算模型下,壳模型单元中楼层平面上各节点在弹性水平地震作用下最大位移及内力相对差别皆不到 1%,这是因为在本结构体系中,板的宽度及厚度均较大而使得板在其自身平面的刚度较大而造成的。因此,上述的结论证明在本结构体系中刚性楼板假定是适用的。

在弹性楼板的计算模型中引入刚性楼层假设后,对体系用 SAP2000 建立等代杆系模型,令各楼层平面内节点在两个平动自由度和绕 Z 轴的转动自由度建立关联,经过对弹性楼板所得等代梁参数的多次调整,重新建立了相应的等代梁模型:采用等代梁(包括柱上板带和跨中板带)考虑板的平面外刚度,板平面内刚度利用刚性楼层假定,边梁翼缘宽度由原弹性楼板下的 10 倍板厚减小至 3 倍板厚,柱上板带宽度及跨中板带宽度由 1 倍柱距减小至 0.5 倍柱距,等代梁高均取为原板厚。

1.3 等代梁模型与壳元模型的计算结果对比

表 1、2 为采用本文等代模型与壳单元模型的结构内力对比(限于篇幅,本文仅列出部分计算结果),从表可见,引入刚性楼板的等代框架模型,与壳单元所建立模型所计算的结构构件控制内力差别不大。

表 1 12 m 跨度 5 层结构底层与顶层柱内力(弯矩)比较/ $\text{kN} \cdot \text{m}$

	一层		顶层	
	壳元	杆系	壳元	杆系
边柱顶(受力方向)	62.315	71.78	29.118	18.63
边柱底(受力方向)	163.709	145.36	16.425	18.82
边柱顶(与受力正交方向)	50.238	61.38	16.916	16.55
边柱底(与受力正交方向)	149.940	123.52	16.624	16.17
中柱 1 顶(弱轴)	26.318	23.44	2.938	3.08
中柱 1 底(弱轴)	27.990	22.30	2.416	2.78
中柱 2 顶(强轴)	13.425	33.13	38.973	27.45
中柱 2 底(强轴)	118.397	92.12	14.799	12.19

表2 12 m 跨度8层结构底层与顶层柱内力(弯矩)比较/kN·m

	一层		顶层	
	壳元	杆系	壳元	杆系
边柱顶(受力方向)	68.673	76.48	16.560	14.21
边柱底(受力方向)	196.234	147.05	9.963	17.44
边柱顶(与受力正交方向)	45.913	74.16	9.394	13.41
边柱底(与受力正交方向)	123.281	140.79	7.254	16.80
中柱1顶(弱轴)	26.622	23.48	2.125	2.48
中柱1底(弱轴)	27.526	22.38	1.704	2.21
中柱2顶(强轴)	17.295	36.25	26.000	21.93
中柱2底(强轴)	122.119	93.19	9.289	7.45

图3、4为采用振型分解反应谱法(计算前9个振型),按两种模型(等代框架、壳元)计算的结构在多遇地震下的侧移对比结果。

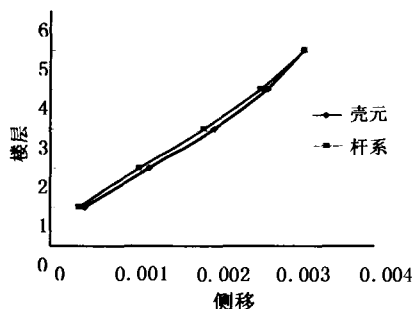


图3 5层结构在多遇地震作用下的侧移对比

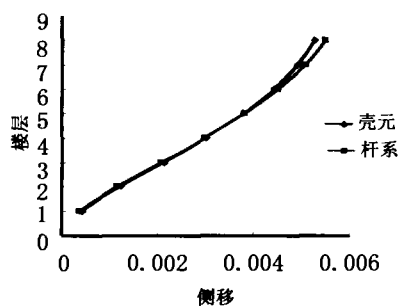


图4 8层结构在多遇地震作用下的侧移对比

通过对等代梁模型及对应壳单元的计算比较,得出了最终应用于非线性动力分析的等代梁模型参数为:边梁翼缘取板厚的3倍,等代梁宽度取0.5倍柱距,梁高均取为原板厚。可见,引入刚性楼板假定之后,由于对平面内各节点的约束增加,导致模型刚度增大,因而模型参数值比弹性楼板假定下要小。

2 预应力的施加对模型分析的影响

由于目前的有限元分析程序尚无法在板中直接考虑预应力作用,为模拟预应力对结构的作用,需计算出预应力钢筋的等效荷载并施加于结构上。单位宽度板带上沿长度方向的等效荷载如图5所示。

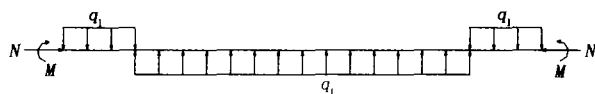


图5 预应力等效荷载示意图

在无粘结预应力板(模型中简化为等代预应力梁)的研究中,引入等效荷载的方式来模拟预应力对结构的影响。在结构的试验中,课题组发现,在实验结构低周加载的整个非线性过程中,无粘结预应力筋中的应力增量非常小,几乎为零,只是在结构即将失效,各类构件均进入强非线性阶段时,预应力钢筋中的应力与应变增量才有一定的增加。由于等效荷载的取值来自于无粘结钢筋的应力应变值,因此,在研究结构的地震响应过程中,认为预应力钢筋张拉所引起的等效荷载在加载周期中不发生变化的假设是可以成立的。

由于在模型中引入了楼层平面内的刚性假设,因此,预应力板的轴向等效荷载分量在计算分析中将无法引入。由于在本体系的板截面较大,因此,轴力对于结构的动力分析结果影响较小。为了验证这一结论,分别应用弹性楼层与刚性楼层建立了一个单层结构模型,在弹性楼层的模型中施加了轴向力的效应,而在刚性楼层中则取消轴向力。通过对滞回曲线的计算比较(滞回曲线对比见图6及图7),可以证明上述结论,即在本结构体系中,预应力轴向等效荷载对结构的极限承载力影响很小,在非线性动力分

析中,可以不考虑预应力等效荷载的轴向分量对结构的影响。等效荷载中的其余项,按等代梁所占预应力板比例平均分配到各等代梁上。

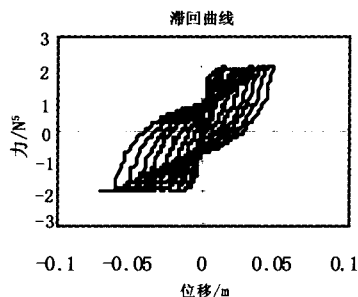


图 6 有轴向等效荷载作用

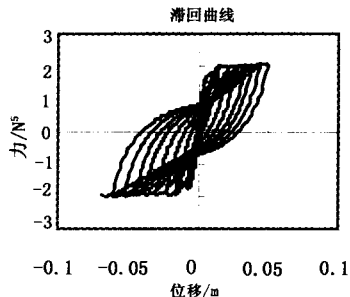


图 7 无轴向等效荷载作用

3 试验模拟分析

为了验证本文等代框架模型及结构非线性分析程序在结构整体非线性分析中的适用性,以课题组于 2003 年底至 2004 年初在重庆大学土木工程学院大型结构试验室完成的两次试验结果作为对照^[8],采用等代框架模型和纤维模型梁柱单元对试验进行模拟分析。

按考虑刚性楼板假定后等代杆系模型的参数:柱截面取实际大小,边梁腹板按实际大小取值,翼缘宽度等于 3 倍板厚,高度等于板厚。等代梁宽度取 0.5 倍柱距,高度等于板厚。等代梁内钢筋按梁宽占板宽比例分配。

梁柱保护层混凝土及等代梁混凝土均按照无约束混凝土考虑,梁柱核心区混凝土按照约束混凝土考虑。截面纤维划分如图 8,图中每个小矩形代表一条混凝土纤维,实心圆则表示钢筋纤维。钢筋仅为示意性布置,分析时由试件的实际配筋确定。

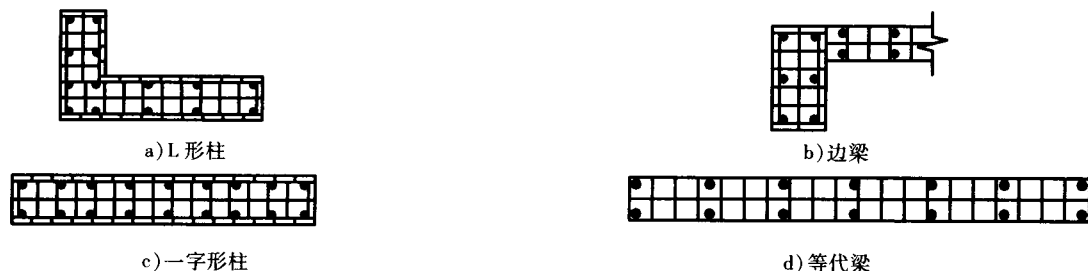


图 8 构件截面纤维划分

结构的正、负极限承载力结果对比如表 3 所示,滞回曲线如图 9、10 所示。

表 3 水平承载力计算值与实测值

试验	正向加载			负向加载		
	计算 F_u/kN	实测 F_u/kN	相对误差/%	计算 F_u/kN	实测 F_u/kN	相对误差/%
试验一	236	201.88	14.5	234	190	18.8
试验二	229	204.8	10.6	228	-	-

4 结论

根据大空间预应力住宅体系的受力特点,建立了弹性阶段和非线性阶段(考虑刚性楼板假定)的等代框架分析模型。并通过弹性和非线性阶段模型的分析结果进行对比,得出一些初步的结论:

1) 对于该结构体系,采用刚性楼板假定时,等代框架模型参数为:①等代梁(包括柱上板带和跨中板带)宽度取 0.5 倍柱距;②边梁翼缘宽度 $b_w = b + 3h_f$,其中 h_f 为翼缘的厚度(即板厚)。

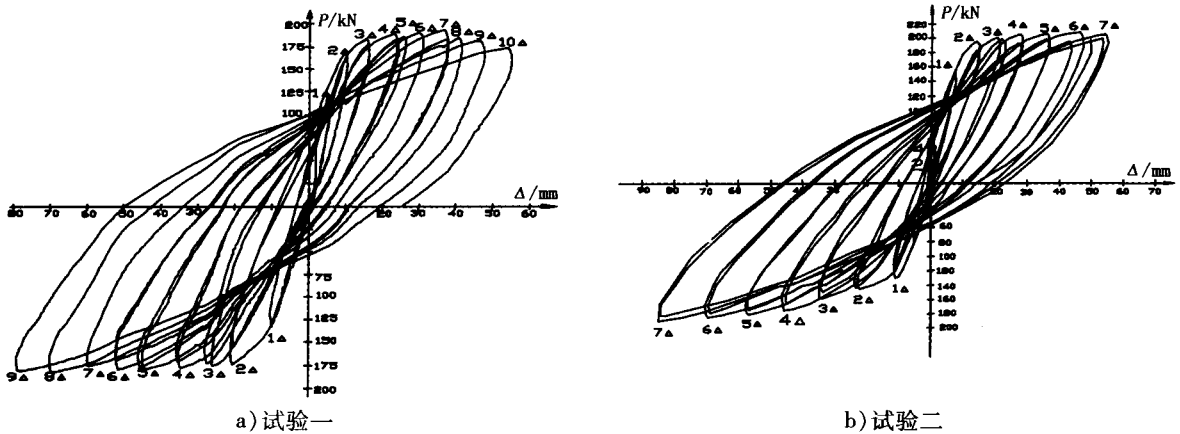


图9 试验滞回曲线

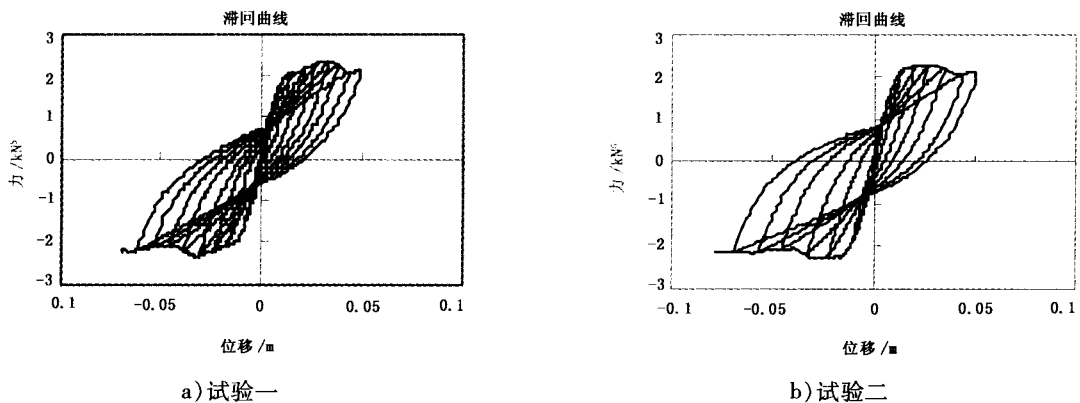


图10 计算模型模拟滞回曲线

2) 板的竖向荷载可按各等代梁宽度所占实际板宽的比例,将竖向荷载分配到各等代梁上。

3) 采用基于有限单元柔度法的纤维模型梁柱单元,对大空间预应力混凝土住宅结构进行非线性分析是可行的,具有较高的分析效率和分析精度。

另外,本文的结论是针对较为规则的结构体系,对于非规则结构体系,有待于进一步研究。

参考文献:

- [1] E. Spacone, F. C. Fillippou and F. Taucer. Fiber Beam - Column Model for Nonlinear Analysis of R/C Frames I. Formulation[R]. International Journal of Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 1996.
- [2] E. Spacone, F. C. Fillippou, F. Taucer. Fiber Beam - Column Model for Nonlinear Analysis of R/C Frames: II. Application [R]. International Journal of Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 1996.
- [3] 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.
- [4] 陈滔. 基于有限单元柔度法的框架结构三维非弹性地震反应分析[D]. 重庆:重庆大学, 2003.
- [5] 唐剑. 钢筋混凝土异形柱框架结构非线性地震反应分析研究[D]. 重庆:重庆大学, 2005.
- [6] 陈娟. 双向弯曲作用下钢筋混凝土L形柱的抗震性能研究[D]. 重庆:重庆大学, 2005.
- [7] 胡晓斌. 大空间预应力混凝土住宅结构非弹性地震反应分析[D]. 重庆:重庆大学, 2004.
- [8] 宋金祥. 预应力平板-异形柱(短肢剪力墙)在水平荷载作用下的受力分析[D]. 重庆:重庆大学, 2004.