

doi:10.11835/j.issn.1674-4764.2013.04.003

# 考虑非线性剪切效应的钢筋混凝土柱模型化方法及应用

雷拓<sup>1</sup>, 钱江<sup>2</sup>, 刘伯权<sup>1</sup>

(1. 长安大学建筑工程学院, 西安 710061;  
2. 同济大学土木工程防灾国家重点实验室, 上海 200092)

**摘要:**采用纤维模型梁柱单元和与之串联的零长度单元,模拟柱的弯曲机制和剪切机制。利用OpenSees提供的Limit State Material和Shear Limit Curve材料模型,定义钢筋混凝土柱的非线性剪切效应及其与弯曲效应的耦合。通过与不同学者的试验结果比较,验证了该方法的可靠性。最后,对笔者完成的原位推覆试验的一榀平面框架进行了Pushover分析。结果表明,考虑非线性剪切效应的模型化方法能较好地模拟钢筋混凝土柱抗剪承载力和刚度的退化现象,传统的纤维模型梁柱单元难以反映配箍不足的钢筋混凝土柱的弯-剪破坏机制。该方法可用于存在抗剪能力缺陷的框架结构的非线性分析。

**关键词:**钢筋混凝土;柱;非线性;弯-剪破坏

**中图分类号:**TU311.3 **文献标志码:**A **文章编号:**1674-4764(2013)04-0013-07

## Modeling and Its Application of Reinforced Concrete Columns Considering Nonlinear Shear Effects

Lei Tuo<sup>1</sup>, Qian Jiang<sup>2</sup>, Liu Boquan<sup>1</sup>

(1. School of Civil Engineering, Chang'an University, Xi'an 710061, P. R. China;  
2. State Key Laboratory of Disaster Reduction in Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, P. R. China)

**Abstract:** A fiber beam-column element in conjunction with zero-length elements attached to its ends was proposed to simulate the flexural and shear mechanism respectively. Based on the Limit State Material model and the Shear Limit Curve model provided by OpenSees, the nonlinear shear effect of reinforced concrete column and its coupling with the flexural effect were defined. The reliability of the proposed model was validated by means of comparisons with existing test results. Finally, a plane frame from in-situ pushover test was simulated. It is shown that the proposed method, by taking the nonlinear shear effect into account, produces satisfactory results for frame columns with shear strength and stiffness degradation, while the conventional fiber beam-column element can hardly simulate actual flexure-shear failure mechanism for columns characterized by insufficient transverse reinforcement. The proposed method is applicable for nonlinear analysis of reinforced concrete frame structures with shear deficiencies.

**Key words:** reinforced concrete; column; nonlinear; flexure-shear failure

收稿日期:2012-06-25

基金项目:国家自然科学基金(51078037);教育部高校博士点基金(20100205110010);中国博士后科学基金(2012M511957)

作者简介:雷拓(1973-),男,博士,主要从事工程结构抗震及数值计算研究,(E-mail) leituo616@163.com.

钢筋混凝土柱的破坏模式大体可分为 3 类: 弯曲破坏、弯-剪破坏和剪切破坏。目前, 关于弯曲破坏问题的研究已趋成熟。鉴于弯-剪破坏和剪切破坏问题的复杂性, 现行设计规范通过加强构造细节来保证钢筋混凝土柱仅发生延性弯曲破坏。而对于早期设计建造的混凝土框架结构, 研究表明, 柱配箍不足将造成柱变形能力不足和抗剪能力、竖向承载能力退化, 最终导致结构的严重破坏和倒塌<sup>[1]</sup>。这类结构的模型化方法, 成为准确评估其大震下极限承载能力、变形能力及倒塌机制的首要问题。

传统的纤维模型忽略了构件的剪切效应, 对于满足延性构造措施的新建混凝土框架结构而言, 是可以接受的。对于配箍不足的混凝土框架结构, 鉴于柱普遍发生的弯剪破坏和剪切破坏模式<sup>[2-3]</sup>, 纤维模型存在明显理论缺陷。基于梁柱单元, 实现钢筋混凝土柱弯-剪破坏的模型化方法可分 3 类: 1) 材料层次; 基于微平面模型<sup>[4]</sup>、修正压力场 (MCFT) 理论<sup>[5]</sup>、软化膜理论<sup>[6]</sup>、扰动压力场 (DSFM)<sup>[7]</sup> 等来考虑轴力、剪力、弯矩的耦合效应。但这些原理均较为复杂且计算工作量大, 不便于整体结构的分析。2) 截面层次, 如 Marini 等<sup>[8]</sup>、杨红等<sup>[9]</sup> 在截面刚度矩阵中叠加非线性剪切刚度。该方法未考虑剪力与弯矩、轴力的耦合效应。3) 单元层次, 将受剪反应 (剪

力-剪切变形) 从柱总反应 (剪力-水平总位移) 中分离出来, 采用剪切弹簧模拟柱的剪切机制。Elwood<sup>[10]</sup> 在纤维模型梁柱单元端部串联零长度单元, 并通过总位移经验公式实现弯曲效应和剪切效应的耦合。Zhang 等<sup>[11]</sup> 通过刚性杆单元端部串联的弯曲弹簧、剪切弹簧分别模拟柱的弯曲和剪切机制, 并实现了弯曲效应和剪切效应的耦合。蔡茂等<sup>[12]</sup> 在考虑弯曲变形的多弹簧模型基础上, 引入剪切弹簧, 提出了考虑剪切效应的钢筋混凝土柱地震反应分析方法。

## 1 柱弯-剪破坏位移模型

柱发生弯剪破坏时的位移构成如图 1 所示; 即将柱的总位移 (节点 1~3 间  $\Delta$ ) 分解为弯曲变形 (节点 1~2 间  $\Delta_f$ ) 和剪切变形 (节点 2~3 间  $\Delta_s$ ), 图中剪切弹簧用来模拟柱的剪切变形, 具体计算过程如下: 柱发生剪切破坏之前, 剪切弹簧保持弹性剪切刚度, 用于考虑柱的弹性剪切变形。剪切破坏的判断由 Elwood<sup>[10]</sup> 的剪切位移模型 (式 1) 确定, 即若柱的总侧向位移大于式 (1) 的计算位移, 则发生剪切破坏。之后, 剪切弹簧的刚度发生退化, 柱侧移刚度按 Elwood<sup>[10]</sup> 的轴力失效位移模型 (式 2) 确定。如此, 柱弯曲塑性的发展受到了抗剪能力的制约, 柱的破坏特征呈现弯-剪破坏模式。

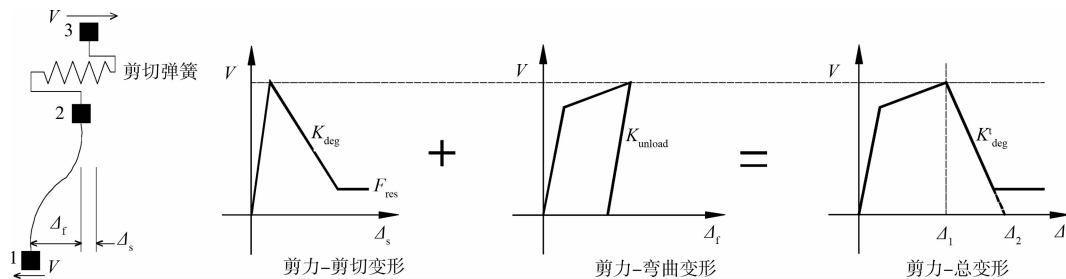


图 1 柱位移模型

$$\frac{\Delta_1}{L} = \frac{3}{100} + 4\rho'' - \frac{1}{40} \frac{v}{\sqrt{f'_c}} - \frac{1}{40} \frac{P}{A_g f'_c} \geq \frac{1}{100} \quad (1)$$

式中:  $\Delta_1$  为发生剪切破坏时柱的总位移;  $L$  为柱的净高度;  $\rho''$  为配箍率;  $v$  为截面最大剪应力;  $f'_c$  为混凝土圆柱体抗压强度;  $P$  为轴力;  $A_g$  为柱的毛截面面积。可见, 当柱的箍筋量较多、混凝土强度较高、且轴力较小时, 柱发生剪切破坏时的总位移较大, 即表示柱的延性较好。

$$\frac{\Delta_2}{L} = \frac{4}{100} \frac{1 + \tan^2 \theta}{\tan \theta + P \left( \frac{s}{A_{st} f_{yt} d_c \tan \theta} \right)} \quad (2)$$

式中:  $\Delta_2$  为柱轴力失效时刻的总位移;  $L$  为柱的净

高度;  $s$  为箍筋间距;  $A_{st}$  为抗剪箍筋面积;  $f_{yt}$  为箍筋屈服强度;  $d_c$  为柱核心区混凝土的高度, 即箍筋中心至中心间的距离;  $\theta$  为剪切斜裂缝与水平方向的夹角, 一般取  $65^\circ$ 。可见, 当柱的箍筋量较多、及承受的轴力较小时, 柱发生轴力失效时的总位移较大, 即表示柱有较好的竖向承载能力。

## 2 OpenSees 平台的实现

基于 OpenSees 平台, 实现图 1 柱位移模型的有限元模型如图 2, 同时考虑了柱端部纵筋粘结滑移效应。图中的柔度法纤维模型梁柱单元用于模拟柱的弯曲变形, 剪切变形则通过零长度单元<sup>[13]</sup> 来实现。零长度单元材料模型的定义可有以下几种方

式:1)只定义弯曲方向的材料(竖向、侧向水平方向上的材料定义为刚性)时,相当于转动弹簧,仅用于模拟柱端部纵筋的粘结滑移效应;2)只定义水平方向上的材料(竖向、弯曲方向上的材料定义为刚性)时,作用相当于剪切弹簧,仅用于模拟柱的剪切效应;3)当同时定义了弯曲方向的材料和水平方向上的材料(竖向材料定义为刚性)时,相当于转动弹簧和剪切弹簧的“串联”,用于模拟柱端纵筋的粘结滑移和柱的剪切效应。剪切弹簧选用 Shear Limit Curve 和 Limit State Material 材料模型定义,Shear Limit Curve 通过监控每个增量步下,顶部节点相对底部节点的总位移(与式 1 比较)调整剪切弹簧的刚度(按式 3 计算)来考虑剪切效应与弯曲效应的耦合。转动弹簧选用 Bond-SP01<sup>[13]</sup>材料模型定义。

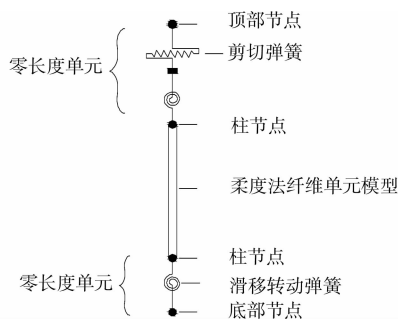


图2 有限元模型

### 2.1 Shear Limit Curve 定参

Shear Limit Curve 对象的详细参数说明见文献[13],用于剪切破坏判断及剪切破坏后剪切弹簧骨架曲线的确定。其中,比较难确定的2个参数(见图1)为:弹簧剪切退化刚度  $K_{deg}$ 、弹簧的残余剪切强度  $F_{res}$ 。本文  $K_{deg}$  按式(3)~(4)确定,  $K_{deg}^t$  由图1和式(2)确定,  $F_{res}$  由箍筋抗剪承载力贡献确定。

$$K_{deg} = \left( \frac{1}{K_{deg}^t} - \frac{1}{K_{unload}} \right)^{-1} \quad (3)$$

$$K_{unload} = \frac{12EI}{L^3} \quad (4)$$

### 2.2 Limit State Material 定参

Limit State Material 对象的详细参数说明见文献[13],它通过与 Shear Limit Curve 对象的关联来定义剪切弹簧的加卸载滞回规则。Limit State Material 定参的关键是要确定剪切弹簧骨架线控制参数、捏缩参数、卸载刚度退化参数、损伤参数等。

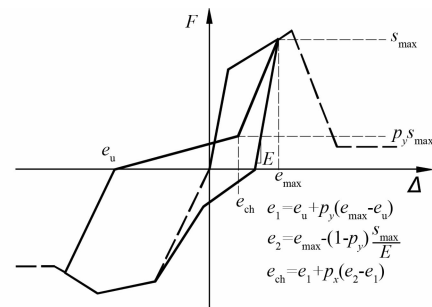
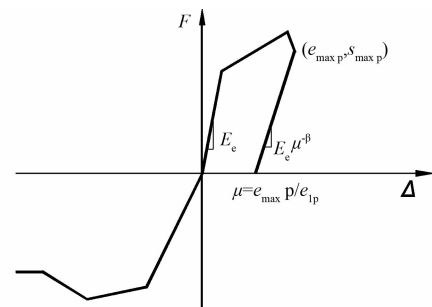
在恒定轴力作用下,剪切弹簧骨架线特征点可参考 Sezen<sup>[14]</sup>提出的柱剪力-剪切变形骨架曲线,并结合计算程序 Response 2000 确定。然而,在整体结构分析时,考虑到轴力的变化,特征点确定比较困

难。因此,认为剪切破坏发生之前,剪切刚度保持弹性,即骨架线特征点位于一条直线上。需要注意的是,特征点的取值要大于弯曲变形引起的最大剪力且依次递增。剪切破坏之后,骨架线的斜率由  $K_{deg}$ 、 $F_{res}$  确定。弹性剪切刚度按式(5)计算,式中:  $G$  为剪切模量;  $A_c$  为抗剪截面面积,取  $5/6$  的截面总面积;  $L$  为柱净高。

$$K_s = GA_c/L \quad (5)$$

捏缩参数示意如图3。图中  $p_x$  和  $p_y$  (即参数 PinchX 和 PinchY) 的取值范围为 0 到 1 的区间。参考文献<sup>[15]</sup>,取  $p_x = 0.5$ ;  $p_y = 0.4$ 。例如从图3中骨架线上重新加载点  $(e_u, 0)$  回到当初的卸载点  $(e_{max}, S_{max})$  时,须经  $(e_{ch}, p_y S_{max})$  点,再由  $(e_{ch}, p_y S_{max})$  点到  $(e_{max}, S_{max})$  的捏缩过程。计算卸载刚度退化参数(图4)  $\mu^{-\beta}$  时,  $\beta$  (即参数 beta) 取 0.4<sup>[15]</sup>。图中  $E_c$  为弹性剪切刚度,  $\mu$  为延性系数,从骨架线上点  $(e_{max,p}, S_{max,p})$  卸载至荷载为零点时,卸载刚度取  $E_c \mu^{-\beta}$ 。

本文计算中损伤参数 damage1、damage2 均取零<sup>[15]</sup>,即不考虑延性和能量的损伤。

图3 捏缩参数<sup>[16]</sup>图4 卸载刚度退化参数<sup>[16]</sup>

## 3 模型化方法验证

### 3.1 试验数据的选取

为了验证考虑剪切非线性建模方法及参数选取的可靠性,遴选美国太平洋地震工程研究中心 (PEER) 和日本 Kawashima 地震工程试验室数据库中的 4 个钢筋混凝土柱试验进行模拟。选取的试件

为钢筋混凝土矩形截面柱,箍筋明显不足且破坏模式为弯剪破坏。所选试件的详细信息见表 1。分析

模型见图 2,其中纤维模型的混凝土、钢筋材料模型分别选用 concrete02、steel02。

表 1 试件详细信息

试验者	试件	$b \times h / (\text{mm} \times \text{mm})$	$L / \text{mm}$	$\rho_l / \%$	$\rho_t / \%$	$f_{yl} / \text{MPa}$	$f_{yt} / \text{MPa}$	$f'_c / \text{MPa}$	$N / \text{kN}$
Ohue <sup>[17]</sup>	2D16RS	200×200	800	2.01	0.6	369	316	32	183
Lynn <sup>[18]</sup>	2CLH18	457.2×457.2	2 946.4	1.94	0.1	331	399.9	33.1	503
Sakai <sup>[19]</sup>	TP-031	400×400	1 350	1.58	0.79	374	363	22.9	470
	TP-032	400×400	1 350	1.58	0.79	374	363	23	-170

注:  $b$ 、 $h$  分别为柱截面的宽度和高度,  $L$  为柱的高度,  $\rho_l$ 、 $\rho_t$  分别为柱纵向钢筋、箍筋的配筋率,  $f_{yl}$  为纵向钢筋屈服强度,  $f_{yt}$  为箍筋屈服强度,  $f'_c$  为混凝土圆柱体单轴抗压强度,  $N$  为柱的轴向压力。

### 3.2 模拟结果

图 5~8 给出了不考虑剪切效应和考虑剪切效应后,计算得到的荷载-位移曲线和试验结果对比。

可见,考虑非线性剪切效应比不考虑剪切效应的模拟结果有明显的改善。以图 5 为例,由图 5(a)中可以看出纤维模型在模拟柱非线性发展阶段初期与试

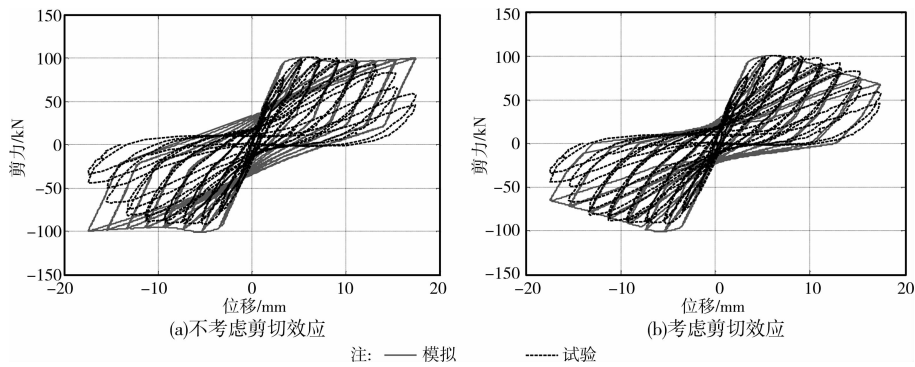


图 5 2D16RS 试件荷载-位移曲线

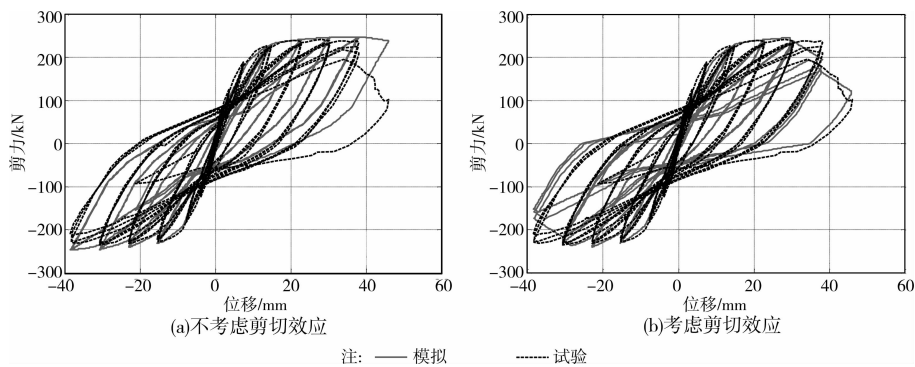


图 6 2CLH18 试件荷载-位移曲线

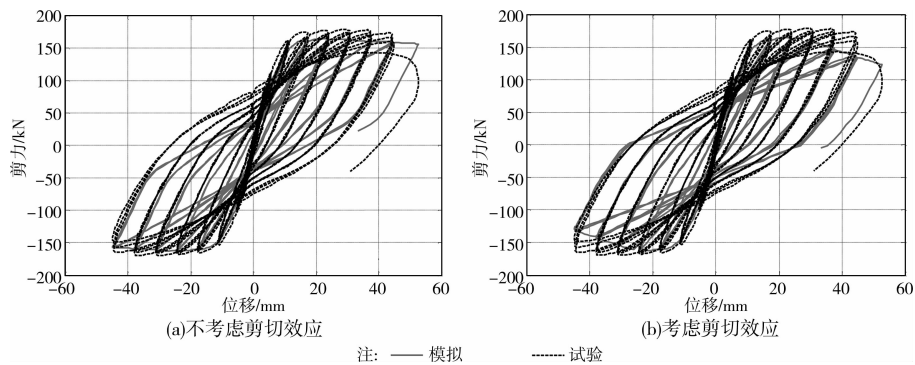


图 7 TP-031 试件荷载-位移曲线



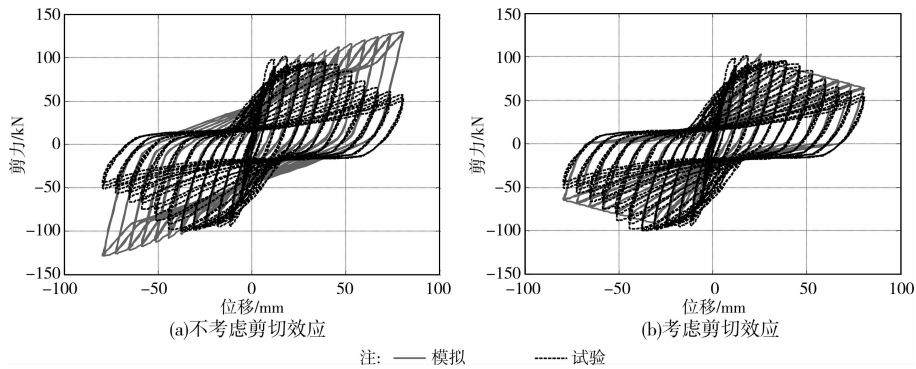


图8 TP-032 试件荷载-位移曲线

验结果吻合较好,但在非线性后期与试验结果相差较大。原因是纤维模型没有考虑柱截面抗剪能力随弯曲塑性发展的退化,只有当截面上混凝土和钢筋纤维进入软化段之后,才有可能出现荷载-位移曲线的下降段。而从图5(b)中可以看到,采用本文考虑剪切非线性的方法与试验结果吻合较好,原因是通过剪切弹簧考虑了截面抗剪强度、刚度随弯曲塑性发展的退化,从而实现了弯-剪破坏机制的模拟。

## 4 方法应用

### 4.1 结构概况

以下就笔者完成的框架结构原位推覆试验<sup>[3]</sup>的一榀平面框架进行模拟分析,目的在于研究其破坏机理。框架结构布置及配筋详图如图9~10所示。

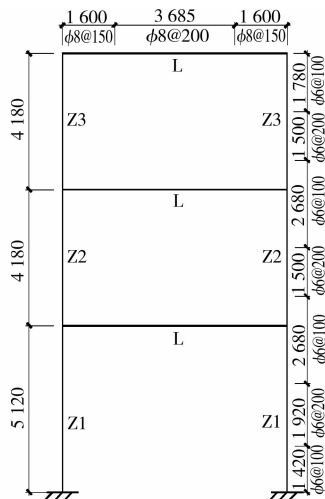


图9 框架结构布置图

该框架建于1983年,从梁、柱截面配筋看,以下与现行规范不符:1)混凝土强度等级偏低;2)梁柱截面箍筋不符合规范构造要求。建模时,梁采用柔度法纤维模型梁单元建模;柱分别建立了纤维模型的有限元模型和考虑非线性剪切效应的有限元模型。材料模型的定义同前。2、3层楼面活荷载取

4 kN/m<sup>2</sup>,活荷载参与系数取0.5。自左向右加载,侧向力加载模式从上到下按 $P_3 : P_2 : P_1 = 1 : 1.068 : 0.616$ 比例加载。顶点极限位移取为总高的3%。

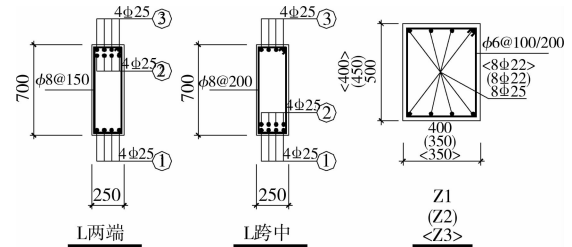


图10 截面及配筋

### 4.2 计算结果分析

图11所示为采用本文方法考虑柱非线性剪切效应后,框架结构的基底剪力-顶点位移比(顶点位移与建筑总高度之比)与传统纤维模型梁柱单元计算结果的对比情况。

1)采用传统纤维模型得到的结构基底剪力-顶点位移曲线的延性较好。在达到394 mm(结构总高的3%)时,结构抗侧刚度并无明显地退化现象。

2)考虑框架柱的非线性剪切刚度后,在结构塑性发展初期,结构的变形相差不大,但随着柱的塑性变形的增大,当顶点位移依次达到结构总高的0.81%(图中A点)、1%(图中B点)时,框架柱相继发生了剪切破坏,最终达到结构的残余抗剪承载能力(图中C点以后)。从而导致整个结构抗侧刚度的连续退化。

3)从以上两条曲线的对比看,对配箍不足的既有框架结构,是否考虑非线性剪切效应对结构的延性影响很大。采用传统纤维模型时,往往会高估结构的变形能力(延性)。在评价既有框架结构时,考虑结构的非线性剪切效应是十分有必要的。

图12~14为每层各柱端剪切弹簧的剪力-剪切变形曲线;比较可知,2、3层柱并未发生剪切破坏,

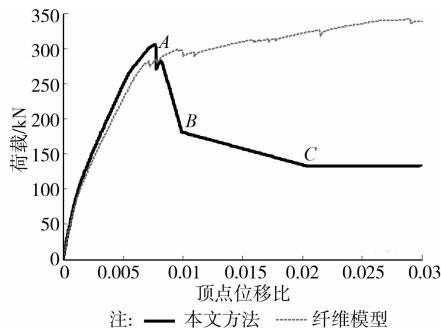


图 11 基底剪力-顶点位移曲线

且右柱的抗剪承载力均大于左柱,由于假定在发生剪切破坏前为弹性剪切刚度,故剪力-剪切变形呈线性关系。底层柱在较大的轴力、剪力、弯矩作用下,柱端部首先形成塑性铰,在塑性铰发展过程中,由于柱端部配箍不足,底层柱的抗剪能力最先发生退化并导致剪切破坏,使得底层柱形成明显的弯-剪破坏机制。

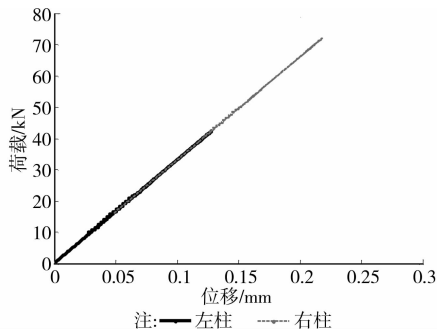


图 12 三层柱剪力-剪切变形曲线

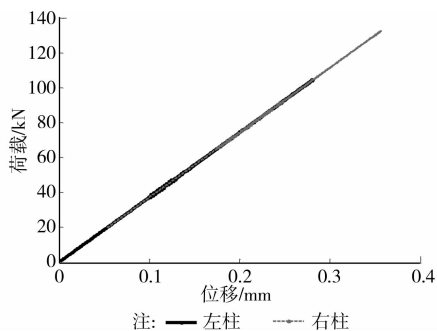


图 13 二层柱剪力-剪切变形曲线

比较图 14 底层左柱与右柱的剪力-剪切变形发现,自左向右单向推覆时,轴力的增加虽然使右柱较左柱的抗剪承载力提高了,但同时也降低了右柱的变形能力。由于右柱的变形能力较小,右柱的抗剪承载力较左柱退化严重,并先于左柱发生了剪切破坏。这一分析结果也解释了原位推覆试验时的一个重要现象<sup>[3]</sup>:即试验过程中,底层后排柱先于前排

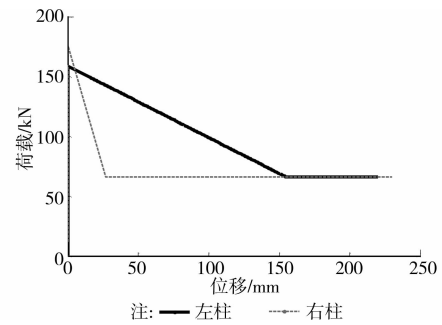


图 14 底层柱剪力-剪切变形曲线

柱发生剪切破坏。可见,基于力的抗震设计方法存在一定的局限性,应积极开展基于位移的抗震评估方法的研究。

## 5 结论

1) 采用纤维模型梁柱单元和与之串联的零长度单元,模拟柱的弯曲机制和剪切机制。利用 OpenSees 提供的 Limit State Material 和 Shear Limit Curve 材料模型,定义钢筋混凝土柱的非线性剪切效应及其与弯曲效应的耦合。通过与不同学者试验结果比较,验证了该方法的可靠性。

2) 通过对笔者完成的原位推覆试验的一榀平面框架的分析,表明考虑非线性剪切效应后,模拟结果与试验破坏现象相符。配箍不足的既有钢筋混凝土框架柱,由于缺乏有效抗震构造措施,往往与我们假定的弯曲破坏不一致,采用传统的纤维模型梁柱单元不能获得结构弯-剪破坏机制。

## 参考文献:

- [1] Lodhi M S, Sezen H. Estimation of monotonic behavior of reinforced concrete columns considering shear-flexure-axial load interaction [J/OL]. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 2012, <http://wileyonlinelibrary.com>. DOI: 10.1002/eqe.2180
- [2] 孙治国,王东升,李宏男,等.汶川地震钢筋混凝土框架震害及震后修复建议[J].自然灾害学报,2010,19(4): 114-123.  
Sun Z G, Wang D S, Li H N, et al. Damage investigation of RC frames in Wenchuan earthquake and suggestions for post-earthquake rehabilitation [J]. Journal of Natural Disasters, 2010, 19(4): 114-123.
- [3] 雷拓,吕西林,钱江,等.既有钢筋混凝土框架原位推覆试验研究[J].建筑结构学报,2009,30(5):23-30  
Lei T, Lu X L, Qian J, et al. In-situ pushover test of an existing reinforced concrete frame [J]. Journal of Building Structures, 2009, 30(5): 23-30.

- [4] Petrangeli M, Pinto P E, Ciampi V. Fiber element for cyclic bending and shear of rc structures. I: Theory [J]. Journal of Engineering Mechanics, 1999, 125(9): 994-1001.
- [5] Mostafaei H, Kabeyasawa T. Axial-shear-flexure interaction approach for reinforced concrete columns [J]. ACI Structural Journal, 2007, 104(2):218-226.
- [6] Mullapudi R T, Ayoub A S. Modeling of the seismic behavior of shear-critical reinforced concrete columns [J]. Engineering Structures, 2010, 32 (SP) : 3601-3615.
- [7] Guner S, Vecchio F J. Pushover analysis of shear-critical frames: Formulation [J]. ACI Structural Journal, 2010, 107 (1) : 63-71.
- [8] Marini A, Spacone E. Analysis of reinforced concrete elements including shear effects [J]. ACI Structural Journal, 2006, 103 (5) : 645-655.
- [9] 杨红, 张睿, 藏登科, 等. 纤维模型中非线性剪切效应的模拟方法及校核[J]. 四川大学学报:工程科学版, 2011, 43(1): 8-16.  
Yang H, Zhang R, Zang D K, et al. Fiber model based nonlinear shear effect modeling method and its calibration [J]. Journal of Sichuan University: Engineering Science Edition, 2011, 43(1): 8-16.
- [10] Elwood K J, Moehle J P. Dynamic collapse analysis for a reinforced concrete frame sustaining shear and axial failures [J]. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 2008, 37(7) :991-1012.
- [11] Xu S Y, Zhang J. Hystertic shear-flexure interaction model of reinforced concrete columns for seismic response assessment of bridges [J]. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 2011, 40 :315-337.
- [12] 蔡茂, 顾祥林, 华晶晶, 等. 考虑剪切作用的钢筋混凝土柱地震反应分析[J]. 建筑结构学报, 2011, 32(11): 97-108.
- Cai M, Gu X L, Hua J J, et al. Seismic response analysis of reinforced concrete columns considering shear effects [J]. Journal of Building Structures, 2011, 32(11): 97-108.
- [13] Mazzoni S, McKenna F, Scott M H, et al. OpenSees command language manual [M]. USA: Earthquake Engineering Research Center, Berkeley, University of California, 2007.
- [14] Sezen H. Shear deformation model for reinforced concrete columns [J]. Structural Engineering and Mechanics, 2008,28(1): 39-52.
- [15] Ghannoum W M. Experimental and analytical dynamic collapse study of a reinforced concrete frame with light transverse reinforcement [D]. Berkeley: University of California,2007.
- [16] Elwood K J, Moehle J P. Shake table tests and analytical studies on the gravity load collapse of reinforced concrete frames [R]. Berkeley: University of California,2003.
- [17] Ohue M, Morimoto H, Fujii S, et al. The behavior of RC short columns failing in splitting bond-shear under dynamic lateral loading [J]. Transactions of the Japan Concrete Institute, 1985, 7: 293-300.
- [18] Lynn A C. Seismic Evaluation of Existing Reinforced Concrete Building Cols [D]. Berkeley: University of California,1999.
- [19] Sakai J, Kawashima K. Effect of Varying Axial Loads Including a Constant Tension on Seismic Performance of Reinforced Concrete Bridge Columns [R]. Tokyo: Japan, Tokyo Institute of Technology, 2000.

(编辑 胡玲)