

# 楼板对钢筋砼异形柱框架破坏机制的影响分析

杨 溥<sup>1a,1b</sup>, 唐 静<sup>2</sup>

(1. 重庆大学 a. 土木工程学院; b. 山地城镇建设与新技术教育部重点实验室, 重庆 400045;

2. 重庆中煤国际工程集团 重庆设计研究院, 重庆 400016)

**摘要:**采用基于柔度法的纤维模型梁柱单元,对按现行混凝土异形柱结构技术规程设计的异形柱框架结构,分别按考虑和忽略现浇楼板及其钢筋对梁抗弯能力的增强作用 2 种情况,分别进行了单向水平罕遇地震输入下的空间结构弹塑性动力分析。对比分析结果表明,现浇楼板及其钢筋将提高框架梁的抗弯能力,从而改变罕遇地震作用下混凝土异形柱结构的破坏模式,对于高烈度区混凝土异形柱结构影响尤为明显,因此该类结构在抗震设计中必须考虑现浇楼板及其钢筋的影响。

**关键词:**异形柱结构;纤维模型;动力分析;抗震性能;破坏模式

中图分类号:TU375.4 文献标志码:A 文章编号:1674-4764(2011)04-0035-07

## Analysis of Failure Mechanism of RC Structures with Specially Shaped Columns Affected by the Diaphragm

YANG Pu<sup>1a,1b</sup>, TANG Jing<sup>2</sup>

(1a. College of Civil Engineering; 1b. Key Laboratory of New Technology for Construction of Cities in Mountain Area,

Ministry of Education, Chongqing University, Chongqing 400045, P. R. China; 2. Sino-coal International Engineering

Group Chongqing Design & Research Institute, Chongqing 400016, P. R. China)

**Abstract:** With the flexibility-based fiber model, the seismic behaviors of RC structures with specially shaped columns, designed according to the current code, are analyzed under unidirectional rare earthquakes using nonlinear dynamic analysis method. The beam strength is calculated with or without consideration of the diaphragm and its reinforcement. The results are compared and the conclusion has been drawn that the bending capacity of beams would be increased due to the effect of diaphragm and its reinforcement, and which would change the failure mechanism of RC frames under rare earthquake, especially in high intensity areas. Therefore the influence of the diaphragm should be considered during the seismic design of the type of structure.

**Key words:** structures with specially shaped columns; fiber model; dynamic analysis; seismic behavior; failure mechanism

“强柱弱梁”屈服破坏机制是钢筋混凝土框架结构抗震设计所希望的,然而在“5.12”汶川地震中框架结构却极少见到框架梁端出铰,而是大量出现柱端塑性铰,甚至有很多框架是严格按 2001 版抗震规范设计的,这一震害现象引起了抗震规范编制组和工程界的高度重视,纷纷对钢筋混凝土框架结构这种典型震害现象及其产生原因进行了总结与分析。

在对汶川地震震害调查和分析的基础上,叶列平等<sup>[1]</sup>重点针对本次地震中框架结构未出现抗震设计所预期的“强柱弱梁”屈服机制的现象,分析了出现这种震害现象的主要原因有:1)非结构构件的影响;2)楼板对框架梁的承载力和刚度增大的影响;3)框架梁跨度和荷载过大,使梁截面尺寸增大,梁端抗弯承载力增大;4)梁端超配筋和钢筋实际强度超强;

收稿日期:2011-01-18

基金项目:中央高校基本科研业务费(CDJZR10200002)资助

作者简介:杨溥(1969-),男,副教授,博士,主要从事结构防灾减灾工程研究,(E-mail) yangpu@cqu.edu.cn.

5) 柱轴压比限值规定偏高,柱截面尺寸偏小;6) 柱最小配筋率和最小配箍率偏小;7) 大震下结构受力状态与结构弹性受力状态存在差异;8) 梁柱可靠度的差异。并提出了有关建议,为今后框架结构设计实现“强柱弱梁”屈服机制和规范修订提供了参考。王亚勇<sup>[2]</sup>建议:设计时有必要加大柱子断面和配筋,把一定宽度楼板的配筋作为梁的配筋,从而适当减小梁的截面尺寸和配筋。霍林生<sup>[4]</sup>认为,楼板空间作用和楼板分布钢筋的作用,以及实际设计中梁配筋经常存在超配的情况,导致框架梁端截面的实际抗弯承载力大于不考虑楼板作用时的抗弯承载力。并建议进一步深入研究能够实现框架结构“强柱弱梁”机制的设计方法和构造措施,在实际工程抗震设计中应全面考虑这些影响因素,研究实现“强柱弱梁”的可行设计方法。总之,关于现浇楼板对“强柱弱梁”屈服机制的影响达成共识,即一致认为,造成这种破坏形式的一个主要原因在于结构抗震设计中忽略了框架梁端现浇楼板对其抗弯承载力的增强作用,现浇楼板及其钢筋的存在改变了梁柱刚度和强度比,即改变了梁柱达到屈服状态和先后顺序,从而消弱了抗震设计期望的“强柱弱梁”破坏模式的出现概率。对于楼板的有效宽度问题,郑士举<sup>[8]</sup>通过 10 个现浇混凝土框架节点的拟静力试验和有限元分析,认为现浇楼板可大幅提高梁端截面的抗弯承载力,对于弱节点尤为显著,影响梁端截面有效翼缘宽度的主要因素有层间位移角、节点形式、梁高、梁跨、板面钢筋材性等;并得到当层间位移角为 1/50 时,地震作用参与组合时的梁端截面有效翼缘宽度取值公式。吴勇等<sup>[10]</sup>按现行抗震设计规范设计的框架进行计算分析后认为,罕遇地震作用下框架最大层间位移角一般不大于 1.5%,同时借鉴其他已有研究结果,建议取梁每侧 6 倍板厚范围作为板的有效宽度。美国 ACI318 规范<sup>[17]</sup>明确指出,现浇楼板对梁的负弯矩承载力有较大提高,验算框架柱梁抗弯承载力比时,梁端承载力特别是负弯矩承载力须考虑有效翼缘宽度范围内的楼板与梁协同工作,并对各种节点中有效翼缘宽度作了细致规定(一般取梁每侧 6 倍板厚范围内的楼板)。

已有研究主要针对矩形柱钢筋混凝土框架结构,而钢筋混凝土异形柱框架结构由于强震区鲜有建造,因此其受力特性和破坏形态也未在大震中得到检验,且目前相关研究较少,其屈服机制到底如何、能否实现“强柱弱梁”的梁铰屈服机制,仍是困扰广大工程设计和科研工作者的难题之一。因此,有必要对钢筋混凝土异形柱框架结构中楼板作用对结构屈服机制的影响规律进行深入研究。该文采用基于有限单元柔度法的纤维模型梁柱单元,对严格按现行异形柱结构设计规程所设计的结构进行了单向水平地震作用下的三维非线性地震反应分析,对考虑楼板作用的异形柱框架结构和忽略楼板作用的异形柱框架结构在罕遇地震水准下的整体结构抗震性能和塑性铰机制的差异进行对比分析。

## 1 结构算例概况

依照《混凝土异形柱结构技术规程》(JGJ 149—2006)<sup>[11]</sup>设计了 2 栋拟建于 II 类建筑场地、设计地震分组为第一组的钢筋混凝土异形柱框架结构(结构平面布置见图 1),结构主要参数见表 1。混凝土等级为 C30,结构内力计算与结构配筋分别按 SATWE 和异形柱规程编制组开发的 CRSC 进行,并按规程的要求复核其最小配筋率、轴压比以及结构在多遇地震作用下的最大水平弹性层间位移角。结构楼板均采用 120 mm 厚现浇混凝土板,结构楼面板跨中配筋为双向  $\phi 10@180$ ,支座配筋为双向  $\phi 10@100$ ;屋面板跨中配筋为双向  $\phi 10@150$ ,支座配筋为双向  $\phi 10@100$ 。

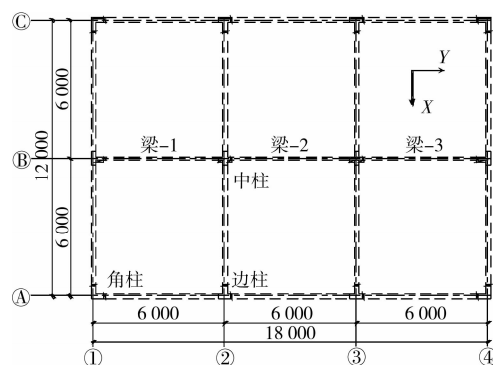


图 1 异形柱框架结构平面布置图

表 1 结构主要参数

结构编号	设防烈度	总高度/m	等肢异形柱截面尺寸/mm	梁截面尺寸/mm	抗震等级	基本周期/s
结构 a	7 度(0.15 g)	18(6 层)	200×600	200×500	三级	0.93
结构 b	8 度(0.20 g)	12(4 层)			二级	0.55

混凝土异形柱截面尺寸和配筋方式示意图见图 2、图 3,具体配筋见表 2,其中表中纵筋采用 HRB335,

“D”表示纵筋的直径,箍筋采用 HPB235,角柱和边柱箍筋为  $\phi 8@100$ ,而中柱为  $\phi 10@100$ 。

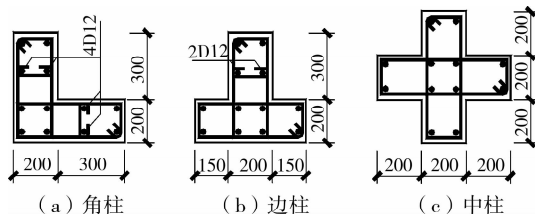


图 2 结构 a 异形柱截面尺寸和配筋方式示意图

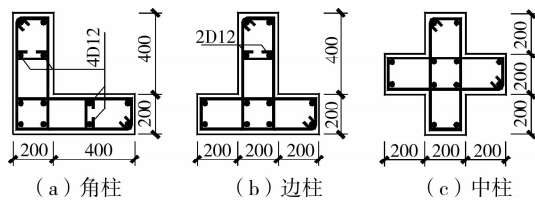


图 3 结构 b 异形柱截面尺寸和配筋方式示意图

表 2 异形柱的细部配筋

框架柱编号	楼层号	结构编号	
		结构 a	结构 b
角柱	1 层	8D16+4D12	8D22+4D12
	其余层	8D16+4D12	8D16+4D12
边柱	1 层	10D18+2D12	10D22+2D12
	其余层	10D16+2D12	10D16+2D12
中柱	所有层	12D16	12D16

## 2 非线性动力反应分析

该文采用基于有限单元柔度法的纤维模型的梁柱单元编制的非线性动力分析程序。其分析效率和分析精度已在异形柱构件层次和结构层次上得到了验证<sup>[12]</sup>。由于结构平面布置规则,质量和刚度分布均匀,因此在非线性动力分析时,仅沿 Y 轴方向输入水平地震动。在考虑现浇楼板对梁端抗弯承载力和刚度的贡献时,根据文献[8-10、17]的建议,边梁有效翼缘宽度取梁宽+6 倍板厚,中梁有效翼缘宽度取梁宽+12 倍板厚(如图 4 所示)。

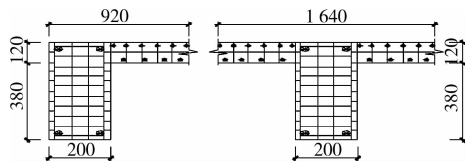


图 4 考虑楼板作用时梁截面图

### 2.1 地震动的选取与输入

按照设计反应谱平台段和结构基本周期双频段选波方法<sup>[13]</sup>,结构 a 选取了 3 条天然地震波分别为 USA02152、USA02545、USA02755,人造地震波为 ACC1;结构 b 选取了 3 条天然地震波分别为 USA00535、USA00707、USA02551,人造地震波为

表 3 结构 a 的最大层间位移角

输入地震波	USA02152	USA02545	USA02755	ACC1	平均值	最大值
考虑楼板	1/127 <sup>[2]</sup>	1/150 <sup>[2]</sup>	1/130 <sup>[2]</sup>	1/170 <sup>[2]</sup>	1/142	1/127
忽略楼板	1/110 <sup>[3]</sup>	1/136 <sup>[2]</sup>	1/113 <sup>[2]</sup>	1/101 <sup>[2]</sup>	1/113	1/101

注:[ ]表示最大层间位移角发生的楼层号。

ACC2。其中人造地震波采用 ARMA 方法生成,考虑了地震波频率非平稳特性,所选的地震波均能较好地拟合规范设计反应谱。采用 SAP2000 对结构进行了振型分解反应谱分析和小震下弹性动力时程分析。计算结果表明,选取的地震波能很好地满足抗震设计规范关于结构底部剪力的要求。

### 2.2 本构关系及屈服准则

钢筋本构模型采用最初由 Menegotto 和 Pinto 所建议后经 Filippou 等人修正以考虑等向应变硬化影响的本构模型,混凝土本构模型采用修正的 Kent-Park 模型<sup>[6]</sup>,该模型不考虑钢筋的粘结滑移,但考虑箍筋对核心区砼的横向约束作用。对于梁,根据梁内纵向受力钢筋是否屈服来对梁截面的屈服进行判断。对于异形柱,通常处在双向压弯的受力状态,其正截面屈服承载力一般需用一个三维( $N-M_x-M_y$ )的封闭曲面来表示,其中  $N$  为柱轴力, $M_x$  和  $M_y$  分别为 X 轴和 Y 轴方向的弯矩。通过对比在整个时程中柱最大、最小轴力出现的时刻以及在仅考虑竖向重力荷载作用下的柱截面  $M_x-M_y$  屈服承载力包络线,发现同层各截面形式柱的  $M_x-M_y$  图形状相似,且所包含的面积大致相当。这表明,若选取结构在仅考虑竖向重力荷载作用下的同层各截面类型的  $M_x-M_y$  屈服承载力包络线作为该层柱正截面承载力屈服判断的承载力包络线具有足够高的精度。图 5 为柱截面屈服线图(以在地震波 USA02755 输入下 7 度区结构底层柱为例)。

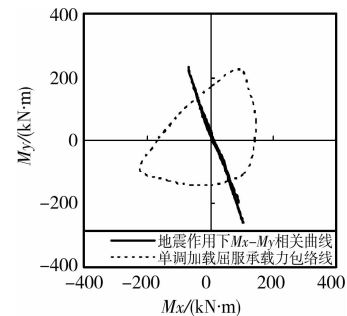


图 5 柱截面屈服判断示意图

### 2.3 结构 a 罕遇地震下非线性反应分析

在罕遇地震(峰值加速度为 310 cm/s<sup>2</sup>)输入下,异形柱框架结构 a 的最大层间位移角见表 3 和图 6。从图中可以看出,忽略楼板作用的异形柱框架结构和考虑这种作用的 2 种情况下,结构最大层间位移角均出现在第 2 层,说明结构第 2 层是结构的薄弱楼层;考虑楼板作用时,结构的最大层间位移角比忽略这种作用时的小。

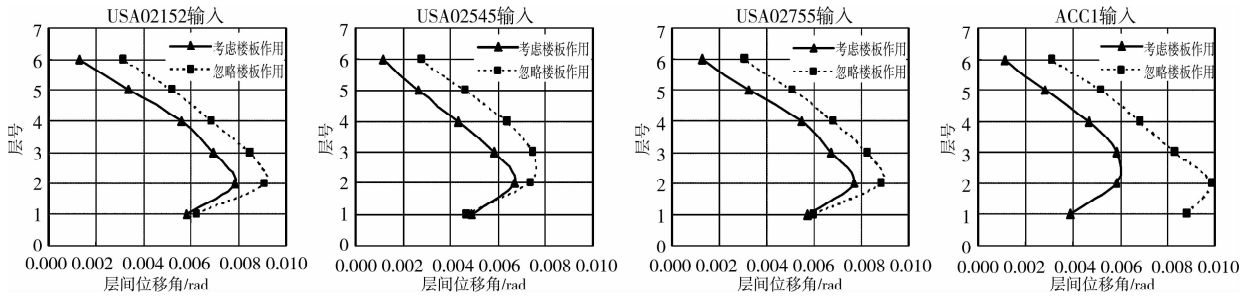


图 6 结构 a 最大层间位移角分布图

图 7 和图 8 分别给出了结构 a 在罕遇地震输入下轴线 A 和轴线 B 框架在整个时程中出现的塑性

铰分布和塑性转动角示意图(其中塑性转动角单位为弧度)。

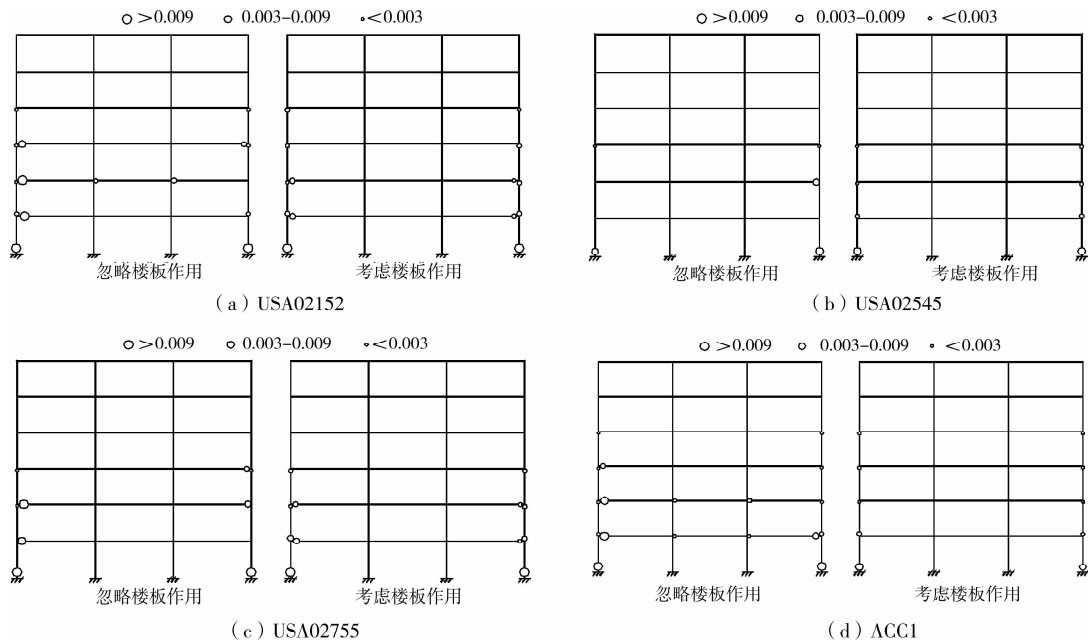


图 7 结构 a 大震作用下的塑性铰分布和塑性转动角示意图(轴线 A)

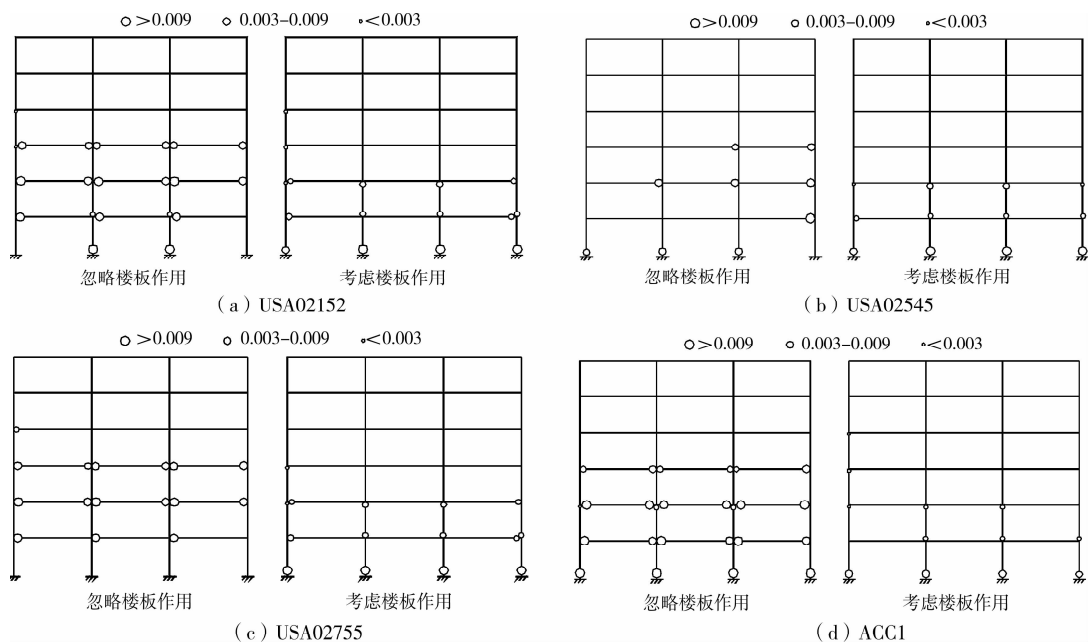


图 8 结构 a 大震作用下的塑性铰分布和塑性转动角示意图(轴线 B)



从图 7 和图 8 中可以看出,在罕遇地震作用下,对比结构 a 考虑楼板作用和忽略楼板作用 2 种情况下梁柱铰分布、数量、出铰部位等地震响应结果,可得到以下结论:

考虑楼板作用后,梁铰数量减少,而柱铰数量明显增加,梁的的塑性铰转角减小而柱的塑性铰转角相应增大,甚至出现少数柱上下端均出铰的情况,这对罕遇地震下的抗震设防目标的实现是十分不利的。究其原因,在于框架梁翼缘板内钢筋使框架梁的负弯矩承载力明显增大。

根据作者的验算结果,某些梁上部钢筋折算面积较不考虑楼板筋时增加一倍,于是出现了目前众多研究者尚未关注的现象,不考虑楼板作用时,框架梁出现的塑性铰均是由于梁端上部钢筋屈服引起,但是当考虑楼板的影响时,虽然框架梁出现了塑性铰,即使在在罕遇地震作用下梁端上部钢筋仍然没有屈服,而是梁端下部钢筋屈服产生塑性铰。表 4 给出了整个时程中梁截面上钢筋的最大受拉应变值(仅列出 USA02152 输入时 B 轴线梁钢筋应变值),考虑楼板作用后结构梁截面上部钢筋纤维受拉最大应变值离屈服应变值 0.001 94 仍有很大的距离。这也使得有板结构的梁截面相对无板结构更难屈服,从而异形柱会发生更大的变形,对异形柱截面的延性需求提高。

表 4 结构 a 框架梁截面受拉钢筋纤维最大应变

考察纤维位置		忽略楼板作用结构	考虑楼板作用结构
一层	梁-1	左端	0.002 209
		右端	0.001 583
	梁-2	左端	0.002 133
		右端	0.001 587
	梁-3	左端	0.002 142
		右端	0.001 595
二层	梁-1	左端	0.002 621
		右端	0.001 943
	梁-2	左端	0.002 415
		右端	0.001 955
	梁-3	左端	0.002 390
		右端	0.002 048

注:忽略楼板作用结构梁端截面最大应变均是出现在梁上部钢筋,考虑楼板作用结构梁端截面最大应变均是出现在梁下部钢筋。

另外,从塑性铰出现的部位变化来看,考虑楼板作用后边柱更易出铰,在该类柱抗震设计时应引起足够重视。在破坏机制上来看,7 度区忽略楼板作用的结构表现为梁铰为主,7 度区考虑楼板作用的结构则表现为柱铰为主。

2.4 结构 b 罕遇地震下非线性反应分析

在罕遇地震(峰值加速度为 400 cm/s<sup>2</sup>)输入下,异形柱框架结构 b 的最大层间位移角见表 5 和图 9。从图中可以看出,忽略楼板作用的异形柱框架结构和考虑这种作用的 2 种情况下,结构最大层间位移角均出现在第 2 层,说明结构第 2 层是结构的薄弱楼层;考虑楼板作用时,结构的最大层间位移角比忽略这种作用时的小。

表 5 结构 b 的最大层间位移角

输入地震波	USA00535	USA00707	USA02551	ACC2	平均值	最大值
考虑楼板	1/121 <sup>[2]</sup>	1/121 <sup>[2]</sup>	1/102 <sup>[2]</sup>	1/118 <sup>[2]</sup>	1/117	1/102
忽略楼板	1/90 <sup>[2]</sup>	1/100 <sup>[2]</sup>	1/80 <sup>[2]</sup>	1/101 <sup>[2]</sup>	1/92	1/80

注:[ ]表示最大层间位移角发生的楼层号。

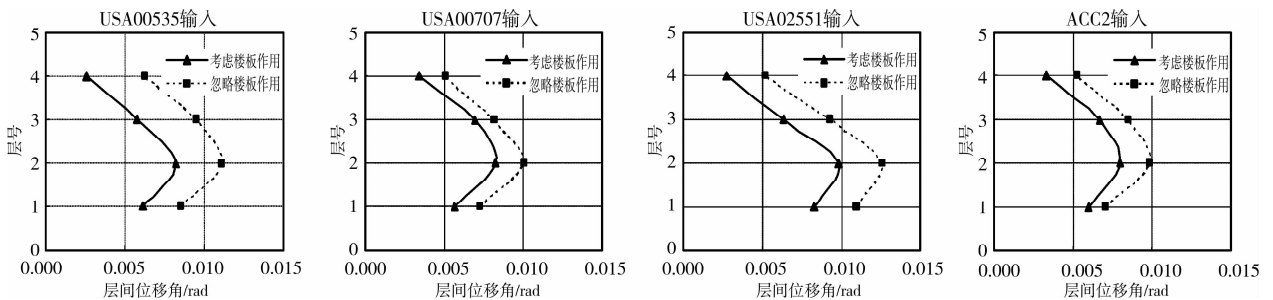


图 9 结构 b 最大层间位移角分布图

图 10 和图 11 分别给出了结构 b 在罕遇地震输

入下轴线 A 和轴线 B 框架在整个时程中出现的塑

性铰分布和塑性转动角示意图(其中塑性转动角单

位为弧度)。

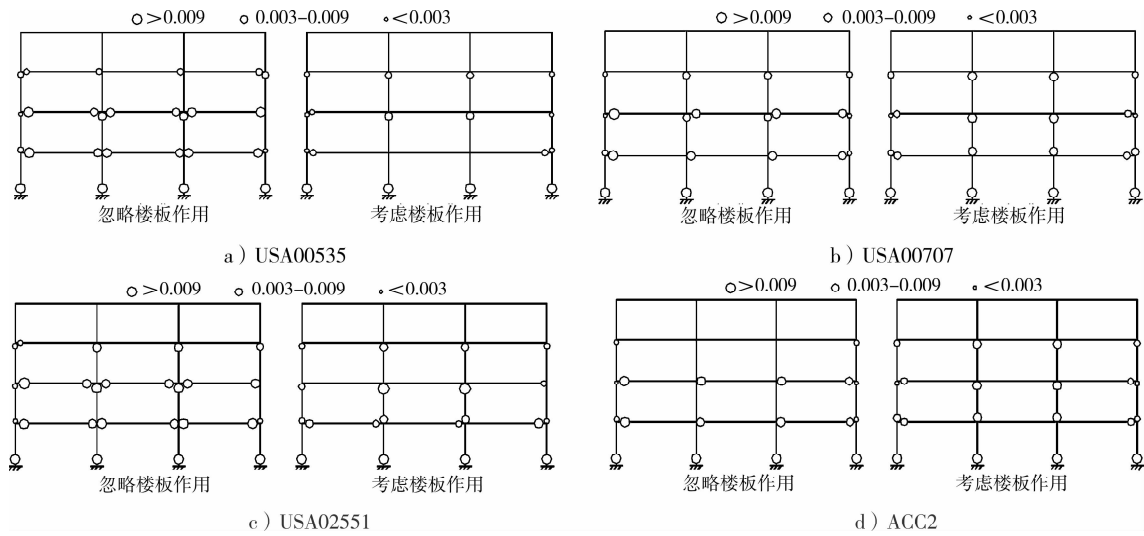


图 10 结构 b 大震作用下的塑性铰分布和塑性转动角示意图(轴线 A)

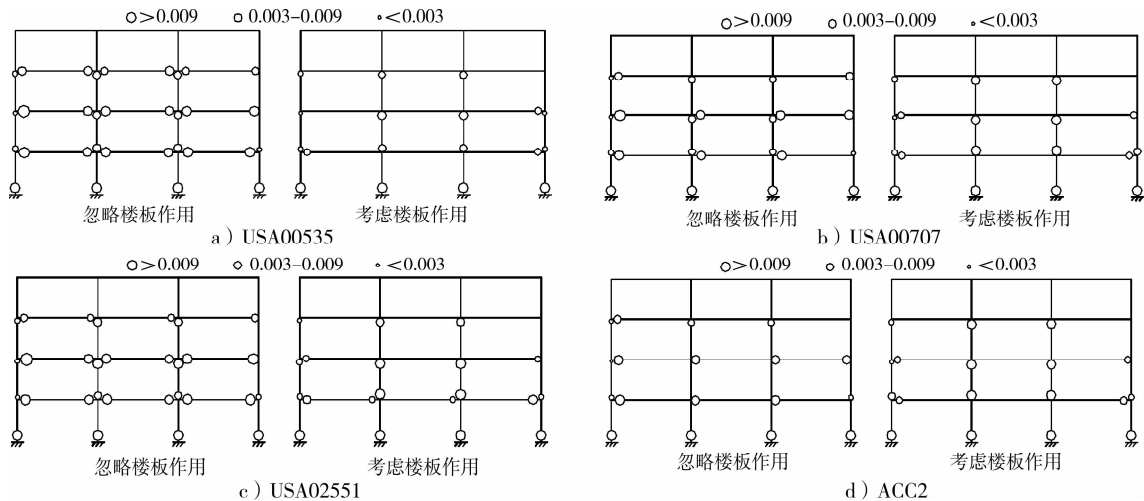


图 11 结构 b 大震作用下的塑性铰分布和塑性转动角示意图(轴线 B)

从图 10 和图 11 中可以看出,在罕遇地震作用下,对比结构 b 考虑楼板作用和忽略楼板作用 2 种情况下梁柱铰分布、数量、出铰部位等等地震响应结果,可得到以下结论:

考虑楼板作用后,梁铰数量减少,而柱铰数量明显增加,梁的塑性铰转角减小而柱的塑性铰转角相应增大,甚至出现结构第 2 层全部柱上下端均出铰的情况,这对罕遇地震下的抗震设防目标的实现是十分不利的。究其原因,在于框架梁翼缘板内钢筋使框架梁的负弯矩承载力明显增大。与结构 a 类似的现象是,不考虑楼板作用时,框架梁出现的塑性铰均是梁端上部钢筋屈服引起,但是当考虑楼板的影响时,虽然框架梁出现了塑性铰,即使在罕遇地震作用下梁端上部钢筋仍然没有屈服,而是梁端下部钢筋屈服产生塑性铰。

另外,从塑性铰出现的部位变化来看,不论考虑

楼板作用与否,均出现了较多的柱铰,原因在于 8 度区异形柱结构的柱配筋由地震作用组合的内力控制,而 7 度区异形柱结构的柱配筋由构造控制,且不同地震动输入下柱铰位置及数量有差异,在该类柱抗震设计时应引起足够重视。

在破坏机制上来看,8 度区忽略楼板作用的结构表现为梁铰为主,柱铰也大量出现,8 度区考虑楼板作用的结构则表现为柱铰为主。

### 3 结论

采用基于柔度法的纤维模型梁柱单元,对 2 栋钢筋混凝土异形柱框架结构,进行了单向水平罕遇地震输入下的空间结构弹塑性动力分析,得出了以下结论:

1) 现浇混凝土楼板及其钢筋显著提高了钢筋混凝土框架梁端支座的抗弯承载力,因此在罕遇地震

作用下框架梁塑性铰的出现在相对较弱的梁端下部的现象。

2)相对于不考虑楼板作用,考虑楼板作用的结构在罕遇地震作用下出现的梁铰减少,而柱铰却明显增多且塑性转角增大,甚至出现局部楼层所有柱上下端均出铰的抗震不利情况。这说明现浇楼板及其配筋对混凝土异形柱框架结构的破坏机制有显著的影响,在抗震设计内力调整时应足够重视楼板的影响,尤其对于高烈度区结构。

#### 参考文献:

- [1] 叶列平,曲哲,马千里,等.从汶川地震框架结构震害谈“强柱弱梁”屈服机制的实现[J].建筑结构,2008,38(11):52-59.  
YE LIE-PING,QU ZHE,MA QIAN-LI,et al. Study on ensuring the strong column-weak beam mechanism for RC frames based on the damage analysis in the Wenchuan earthquake[J]. Building Structure,2008,38(11):52-59.
- [2] 王亚勇.汶川地震建筑物震害启示——抗震概念设计[J].建筑结构学报,2008,29(4):20-22.  
WANG YA-YONG. Lessons learnt from building damages in the Wenchuan earthquake-seismic concept design of buildings[J]. Journal of Building Structures,2008,29(4):20-22.
- [3] 苏幼坡,张玉敏,王绍杰,等.从汶川地震看提高建筑结构抗倒塌能力的必要性和可行性[J].土木工程学报,2009,42(5):25-32.  
SU YOU-PO,ZHANG YU-MIN,WANG SHAO-JIE, et al. The necessary and feasibility of enhancing seismic design of structures based on the Wenchuan Earthquake [J]. China Civil Engineering Journal,2009,42(5):25-32.
- [4] 霍林生,李宏男,肖诗云,等.汶川地震钢筋混凝土框架结构震害调查与启示[J].大连理工大学学报,2009,49(5):718-723.  
HUO LIN-SHENG,LI HONG-NAN,XIAO SHI-YUN,et al. Earthquake damage investigation and analysis of reinforced concrete frame structures in Wenchuan earthquake [J]. Journal of Dalian University of Technology,2009,49(5):718-723.
- [5] FRENCH C W,MOEHLE J P. Effect of floor slab on behavior of slab-beam-column connections[J]. American Concrete Institute Special Publication,1991,123:225-258.
- [6] FILIPPOU F C,POPOV E P,BERTERO V V. Effects of bond deterioration on hysteretic behavior of reinforced concrete joints[R]. EERC report, University of California at Berkeley,1983.
- [7] LAU C Y,CHAN S L,SO A K W. Biaxial bending design of arbitrarily shaped reinforced concrete column [J]. ACI Structural Journal,1993,90(3):269-278.
- [8] 郑士举,蒋利学,张伟平,等.现浇混凝土框架梁端截面有效翼缘宽度的试验研究与分析[J].结构工程师,2009,25(2):134-140.  
ZHENG SHI-JU,JIANG LI-XUE,ZHANG WEI-PING. et al. Experimental research and analysis of effective flange width of beam end section in cast-situ concrete frames[J]. Structural Engineers,2009,25(2):134-140.
- [9] 王素裹,韩小雷,季静.现浇楼板对RC框架结构破坏形式的影响分析[J].土木建筑与环境工程,2009,31(1):66-70.  
WANG SU-GUO,HAN XIAO-LEI,JI JING. The effect slabs on the failure mode of reinforced concrete frame structures [J]. Journal of Civil, Architectural & Environmental Engineering,2009,31(1):66-70.
- [10] 吴勇,雷汲川,杨红,等.板筋参与梁端负弯矩承载力问题的探讨[J].重庆建筑大学学报,2002,24(3):33-37.  
WU YONG,LEI JI-CHUAN,YANG HONG, et al. Discussion on negative flexural strength of beam including slabs[J]. Journal of Chongqing Jianzhu University,2002,24(3):33-37.
- [11] JGJ149-2006 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.
- [12] 杨溥,唐剑,黄宗明.规则钢筋混凝土异形柱框架结构的抗震性能研究[J].地震工程与工程振动,2006,26(3):145-147.  
YANG PU,TANG JIAN,HUANG ZONG-MING. Study on seismic performance of regular RC frame with special - shaped columns [J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration,2006,26(3):145-147.
- [13] 杨溥,李英民,赖明.结构时程分析法输入地震波的选择控制指标[J].土木工程学报,2000,33(6):33-37.  
YANG PU,LI YING-MIN,LAI MING. A new method for selecting inputting waves for time-history analysis [J]. China Civil Engineering Journal,2000,33(6):33-37.
- [14] 管民生,杜宏彪.现浇楼板参与工作后框架结构的pushover分析研究[J].地震工程与工程振动,2005,25(5):117-123.  
GUAN MIN-SHENG,DU HONG-BIAO. Pushover analysis of effect of casting slab on RC frame structure [J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration,2005,25(5):117-123.
- [15] PANTAZOPOULOU S J,FRENCH C W. Slab participation in practical earthquake design of reinforced concrete frame [J]. ACI Structural Journal,2001,98(4):479-489.

- bridges[J]. Composite Structures, 2010, 92(10): 2582-2090.
- [5] XIN WANG, ZHISHEN WU. Integrated high-performance thousand-metre scale cable-stayed bridge with hybrid FRP cables[J]. Composites Part B-Engineering, 2010, 41(2): 166-175.
- [6] WU Z, WANG X. Investigation on a 1000-m scale cable-stayed bridge with fiber composite cables [C]//The Fourth international conference on FRP composites in civil engineering (CICE-4), Zurich, Switzerland, July 22-24, 2008.
- [7] 吴晓, 杨立军, 马建勋. 椭圆平面双曲抛物面碳纤维索网的非线性振动[J]. 北京工业大学学报, 2010, 36(1): 35-39.  
WU XIAO, YANG LI-JUN, MA JIAN-XUN. Nonlinear vibration of elliptic hyperbolic net using carbon fiber reinforced polymer[J]. Journal of Beijing University of Technology, 2010, 36(1): 35-39.
- [8] 刘少斌. 主体结构位移激励下碳纤维索网的振动[J]. 兰州理工大学学报, 2009, 35(6): 114-118.  
LIU SHAO-BIN. Vibration of cable net made of carbon fiber cables under excitation of main structure displacement [J]. Journal of Lanzhou Science and Engineering, 2009, 35(6): 114-118.
- [9] PENG FENG, LIE-PING YE, et al. Large-span woven web structure made of fiber-reinforced polymer [J]. Journal of Composites for Construction, 2007, 3, 11(2): 110-119.
- [10] 冯鹏, 叶列平, 包睿, 等. FRP 编织网结构体系的概念、形式及基本受力分析[J]. 建筑结构学报, 2007, 8, 28(4): 109-116.  
FENG PENG, YE LIE-PING, BAO RUI, et al. Concepts, forms and basic analysis of FRP woven web structure[J]. Journal of Building Structures, 2007, 8, 28(4): 109-116.
- [11] 梅葵花, 孙胜江. 斜拉索的静力设计计算[J]. 中外公路, 2007, 8, 27(4): 121-124.  
MEI KUI-HUA, SUN SHENG-JIANG. Static analysis of stay cable[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2007, 27(4): 121-124.
- [12] 张志国, 靳明君, 邹振祝. 自重荷载作用下悬索静力解析解[J]. 中国铁道科学, 2004, 25(3): 67-70.  
ZHANG ZHI-GUO, JIN MING-JUN, ZOU ZHEN-ZHU. Static solution of suspension cables under tare load[J]. China Railway Science, 2004, 25(3): 67-70.
- [13] 魏建东, 赵人达, 车惠民. 斜拉桥中拉索的静力设计[J]. 桥梁建设, 1999(2): 21-23.  
WEI JIAN-DONG, ZHAO REN-DA, CHE HUI-MIN. Static design of cable in cable-stayed bridge[J]. Bridge Construction, 1999(2): 21-23.
- [14] 沈世钊, 徐崇宝, 赵臣等. 悬索结构设计[M]. 2版. 北京: 中国建筑工业出版社, 2006.
- [15] 魏建东, 车惠民. 斜拉索静力解及其应用[J]. 西南交通大学学报, 1998, 33(5): 539-543.  
WEI JIAN-DONG, CHE HUI-MIN. Static solutions to stay cables and their applications [J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 1998, 33(5): 539-543.
- [16] 程伟, 易伟健, 刘光栋. 斜拉桥柔性索线形分析及快速迭代计算方法[J]. 公路, 1998(6): 8-11.  
CHENG WEI, YI WEI-JIAN, LIU GUANG-DONG. Line type analysis and fast iteration calculational method of flexible cables in cable-stayed bridge [J]. Highway, 1998(6): 8-11.
- [17] 李强兴. 斜拉索静力解[J]. 桥梁建设, 1996(3): 21-24.  
LI QIANG-XING. Static force solution to stayed cables [J]. Bridge Construction, 1996(3): 21-24.
- [18] 单圣涤, 李飞云, 陈洁余, 等. 悬索曲线理论及其应用[M]. 长沙: 湖南科学技术出版社, 1983.

(编辑 胡玲)

(上接第41页)

- [16] IBC2006 International Building Code[S]. Country Club Hills, Illinois, USA; International Code Council, INC., 2006.
- [17] ACI 318-08 Building code requirements for structural concrete and commentary [S]. Farmington Hills, Michigan, USA; American Concrete Institute, 2007.
- [18] LEE H S, WOO S W. Effect of masonry infill on seismic performance of a 3-storey RC frame with non-seismic detailing [J]. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 2002, 31(2): 353-378.
- [19] FREDERIC LEGERON, PATRICK PAULTRE. Behavior of high-strength concrete columns under cyclic flexure and constant axial load[J]. ACI Structural Journal, 2000, 97(4): 591-601.
- [20] CARDONE D. Nonlinear static methods vs. experimental shaking table test results [J]. Journal of Earthquake Engineering, 2007, 11(6): 847-875.

(编辑 胡英奎)