

# 带施工缝 RC 框架结构抗震性能分析及设计建议

于 婧<sup>1</sup>, 刘小军<sup>1</sup>, 赵玉慧<sup>2</sup>

(1. 西安建筑科技大学土木工程学院, 陕西 西安 710055; 2. 西安长庆科技工程有限责任公司 陕西 西安 710018)

**摘要:** 为研究带缝 RC 框架结构的抗震性能, 以抗震设防烈度 8 度区(加速度 0.2g)为例, 利用 OpenSees 程序对三种不同高宽比 RC 框架结构分别建立整浇模型和带缝模型进行了非线性动力反应分析. 结果表明, 施工缝对框架结构抗震性能的影响与结构或构件进入非线性的程度有关. 小震下, 结构处于弹性受力状态, 施工缝的影响可忽略; 中震和大震下, 结构进入非线性, 施工缝的影响开始凸显, 主要表现在使结构的顶点位移增大、层间位移角增大、层间位移角分布形式发生改变、关键构件的局部反应加重等. 而且, 结构进入非线性的程度越深, 施工缝的影响作用越明显. 有必要从抗震设计角度考虑施工缝的影响. 基于现有的两阶段设计方法, 从概念设计和计算分析两方面提出抗震设计建议.

**关键词:** 施工缝; RC 框架结构; 抗震性能; 设计建议; 数值分析

**中图分类号:** TU375

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1006-7930(2015)03-0364-07

## Seismic behavior analysis and design suggestion of RC frame with construction joint

YU Jing<sup>1</sup>, LIU Xiaojun<sup>1</sup>, ZHAO Yuhui<sup>2</sup>

(1. School of Civil Engineering, Xi'an University of Architecture & Technology, Xi'an 710055, China;

2. Xi'an Changqing Technology Engineering Co. Ltd, Xi'an 710018, China)

**Abstract:** Three different height-width ratio RC frame structures located in intensity region 8 (0.2g) were designed and analyzed using monolithic model and joint model by OpenSees program. The results show that the degree of influence of joint on seismic performance of frame structure and the structure of component into the nonlinear construction related. Under small earthquakes, the structure is in elastic state, and the influence of construction joints can be neglected. In the moderate and strong earthquakes, the structure is in a nonlinear stress state. Influence of construction joints began to highlight, and are mainly shown in the increase of top displacement structure, of inter story displacement angle and the changes of the interlayer displacement angle displacement distribution of bottom displacement form aggravation of and the key components local reactions aggravate. It is necessary to consider the influence of construction joints from the seismic design. Based on the existing two stage design method, seismic design recommendations were proposed from concept design and calculation method.

**Keywords:** construction joint; RC frame; seismic behavior; design suggestion; numerical analysis

对框架结构进行抗震设计的目标<sup>[1]</sup>是对构件进行承载力设计的基础上, 保证结构的整体承载力储备和变形能力, 增加结构的冗余度和整体性, 采取有效措施使结构形成合理的屈服机制, 利用设计尽量形成多道抗震防线, 提高框架结构抗倒塌能力.

对于框架结构, 目前一致认为“强柱弱梁”屈服机制是比较理想的破坏模式. 但是, 文献<sup>[1-4]</sup>指出, 地震中大量的框架结构均发生柱铰破坏机制, 所有倒塌的框架结构也基本是以层屈服机制形式出现的, 绝大部分框架结构未能实现“强柱弱梁”的破坏机制. 因此, 需要对规范在保证结构实现整体屈服机制方面的有关规定进一步完善研究.

汶川震害调查表明<sup>[1]</sup>漩口中学教学楼 B 和教学楼 E 框架柱底部施工缝连接构造存在问题, 框架柱

的承载能力未得到充分发挥, 加剧了层屈服机制发生的可能性, 因此, 比教学楼 A 和教学楼 C 倒塌得更彻底. 北川职教中心教学楼虽然仅为单跨结构, 冗余度不大, 但因实现“强柱弱梁”屈服机制, 再加上实心砖填充墙的贡献, 以及结构本身层数不多, 重量又比较轻, 避免了倒塌.

施工缝一般出现在框架结构的柱端, 是受力较大的部位, 且是关键构件之间连接的部位. 目前对施工缝的研究更多的集中在对其基本力学性能, 尤其是抗拉和抗剪等方面的试验研究. 结果表明施工缝处的抗拉和抗剪能力低于整浇混凝土. 关于施工缝对结构或构件抗震性能影响方面的研究文献不多. 陈远峰等<sup>[5]</sup>对两个单榀两层两跨框架进行了低周反复荷载下的拟静力试验, 两个框架为 1:3 缩尺

收稿日期: 2015-01-20 修改稿日期: 2015-06-16

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (51208407); 西安建筑科技大学人才科技基金项目 (RC1233).

作者简介: 于婧 (1982-), 女, 博士, 讲师, 主要从事混凝土结构抗震方向的研究. Email: yujing1506@163.com

模型，带缝框架的施工缝留设在顶梁的下端、一层梁的上下端及柱脚，另一个框架整浇。结果表明两个框架的力-位移滞回曲线形状相近；整浇框架的承载力比带缝框架高约 14 %，而带缝框架的延性稍好；施工缝明显降低了框架的变形恢复能力，降低了结构的初始刚度。

张卫东等<sup>[6]</sup>在上述试验的基础上，接着对施工缝留设位置不同的带缝框架用 ANSYS 软件进行了计算分析，文中说明施工缝用 Combin39 弹簧单元并组合进行模拟，但是没有给出选用这种单元的依据和单元参数的设置。结果表明作者改进后的施工缝留设方式，即同一层柱的施工缝位置不在一条水平线上，其延性、承载力与耗能能力均变好。

魏春明<sup>[7]</sup>同样对两个两层两跨的钢筋混凝土框架进行了拟静力试验，试验仍然是对带施工缝框架与整浇框架进行对比研究。带缝框架的施工缝留设在每根柱的底部与梁相交处。试验对比了两种框架的破坏形态，并对滞回曲线、承载力、变形能力和耗能能力等参数进行对比，分析施工缝造成的影响。最后给出了由试验中得到的带缝框架的整体恢复力模型，并用于时程分析得出一些结论。

课题组对带施工缝柱进行拟静力试验研究<sup>[8-10]</sup>，结果表明施工缝使构件的开裂荷载降低，接缝面处有明显的应力集中，沿缝发生的剪切错动会导致剪切变形分量增大，柱底的纵筋滑移量增大，最终表现为破坏区域集中，塑性铰长度减小。

可见，仅有的少量试验研究表明，施工缝对框架结构抗震性能确有影响，至于影响的程度和范围，限于试件数量和试验方法等问题，并没有得到较明确的结论。现有的研究成果中比较缺乏考虑施工缝影响的钢筋混凝土结构数值分析方面的研究，

无法系统地分析施工缝对框架结构抗震性能影响的一般性规律，更无法在设计中考虑施工缝影响。

应用课题组提出的施工缝模型<sup>[11]</sup>，主要对一般性带缝 RC 规则框架的抗震性能进行数值研究。在抗震设防烈度 8 度区设计 3 种不同高宽比的规则框架进行非线性数值分析，对带缝框架抗震性能的变化规律进行纵向对比研究，以期得到施工缝对 RC 规则框架结构抗震性能影响的一般性规律，并在此基础上提出相应的抗震设计建议。

1 数值模型的建立

按照现行抗震设计规范<sup>[12]</sup>在 8 度区分别设计了三种不同高宽比钢筋混凝土框架结构，分别为 0.58（2 层）、1.11（4 层）和 2.18（8 层）。框架结构纵向跨度 6 m×6 m×6 m，横向跨度 4.5 m×4.5 m×4.5 m，底层层高 4.2 m，其余各层 3.6 m。设计地震分组第 1 组，场地类别 II 类，特征周期 0.35，场地粗糙度类别 B，基本风压 0.35 kN/m<sup>2</sup>，雪压 0.25 kN/m<sup>2</sup>。屋面恒载和活载分别为 6.5 kN/m<sup>2</sup>，2.0 kN/m<sup>2</sup>；楼面恒载和活载分别为 5.0 kN/m<sup>2</sup>，2.0 kN/m<sup>2</sup>，恒载不包括构件自重。梁柱纵筋采用 HRB400，梁柱箍筋和板筋采用 HRB335，混凝土强度等级 C30，板厚 120 mm。

采用 PKPM 软件进行结构设计，设计时控制底层柱轴压比、层间位移角、构件配筋率、裂缝和挠度等不超过规范限制，小震下的层间位移角接近但不超过规范限值。选筋时除因设计习惯而导致的配筋增大外尽可能不再增大钢筋面积，各层柱配筋按上下端配筋较大值贯通布置，每层梁柱配筋不归并。可以认为这样设计出的框架满足规范的最小要求且处于偏不利的受力状态。各框架的梁柱截面尺寸及配筋见表 1 所示。

表 1 梁柱尺寸及配筋  
Tab. 1 Dimension and reinforcement of columns and beams

框 架	层 号	柱				梁			
		尺寸 /mm	配筋		尺寸 /mm	配筋			
			边柱	中柱		边梁		中梁	
						上	下	上	下
2 层	1 2	400×400	4Φ25+4Φ22		200×400	3Φ22+2Φ18	2Φ25	3Φ22+2Φ18	2Φ25
4 层	1	500×500	4Φ20+8Φ18		300×500	2Φ20+2Φ18	2Φ18+2Φ16	2Φ20+2Φ18	4Φ16
	2		12Φ18			2Φ20+2Φ18	2Φ18+2Φ16	2Φ20+2Φ18	4Φ16
	3		12Φ18			4Φ16	4Φ16	4Φ16	4Φ16
	4		12Φ18			4Φ16	4Φ16	4Φ16	4Φ16
8 层	1	650×650	8Φ25+4Φ22	8Φ25+4Φ22	300×500	2Φ25+2Φ22	3Φ25	2Φ25+2Φ22	3Φ25
	2		8Φ22+4Φ25	8Φ22+4Φ25		2Φ25+2Φ22	3Φ25	2Φ25+2Φ22	3Φ25
	3	8Φ22+4Φ25	8Φ22+4Φ25	2Φ25+2Φ22		3Φ25	2Φ25+2Φ22	3Φ25	
	4	500×500	4Φ22+8Φ18	4Φ22+8Φ20		2Φ20+2Φ18	3Φ22	2Φ25+2Φ22	3Φ22

5	4Φ22+8Φ18	4Φ22+8Φ20	2Φ25+2Φ22	3Φ22	2Φ25+2Φ22	3Φ22
6	4Φ18+8Φ16	4Φ22+8Φ20	2Φ25+1Φ22	3Φ22	2Φ25+1Φ22	3Φ22
7	4Φ18+8Φ16	4Φ18+8Φ16	2Φ25+1Φ22	3Φ22	2Φ25+1Φ22	3Φ22
8	4Φ18+8Φ16	4Φ18+8Φ16	2Φ25+1Φ22	3Φ22	2Φ25+1Φ22	3Φ22

对框架结构数值模型进行非线性动力时程分析,目的是考察施工缝对框架结构抗震性能的影响.因此,采取两种非线性模型进行对比分析,一种是考虑施工缝影响的框架结构模型,简称“带缝框架”,即在每层柱的底部(梁上顶面标高处)加入施工缝模型<sup>[11]</sup>;另外一种是不考虑施工缝影响的框架结构模型,简称“整浇框架”,是目前惯用的一种对框架结构进行建模的方法.“整浇框架”与“带缝框架”的梁柱构件均用非线性梁柱单元模拟,楼板采用刚性假定.计算在 OpenSees 软件平台上完成,参数选取及模型建立的内容见文献[11].

该施工缝模型是基于纤维截面(fiber section)提出的零长(指单位长度)截面单元,表示施工缝只是混凝土不连续浇筑而形成的一个接缝面,在轴向没有几何尺寸.另外该模型能同时考虑切向剪力性能和法向拉压力性能.法向受力性能由“界面拉压弹

簧”描述,切向受力性能由“界面剪切弹簧”描述.“界面拉压弹簧”的属性通过定义纤维截面模型实现,对混凝土纤维和钢筋纤维分别选择符合施工缝接缝混凝土力学特点和穿过缝面钢筋力学特点的材料本构.

应用该模型对课题组所做拟静力试验中的底部带施工缝悬臂柱进行数值计算<sup>[11]</sup>,结果显示无论最大荷载还是滞回曲线走势规律均与试验结果吻合良好,验证了该施工缝模型的有效性和合理性.

2 地震动输入的确定

地震波的选取对时程分析结果至关重要,计算中,对每种框架结构按照双频段选波法<sup>[13]</sup>选择 3 条实际地面运动记录和按照 ARMA 模型拟合的 2 条人工波.对各框架选取的地震波的弹性反应谱曲线如图 1 所示.

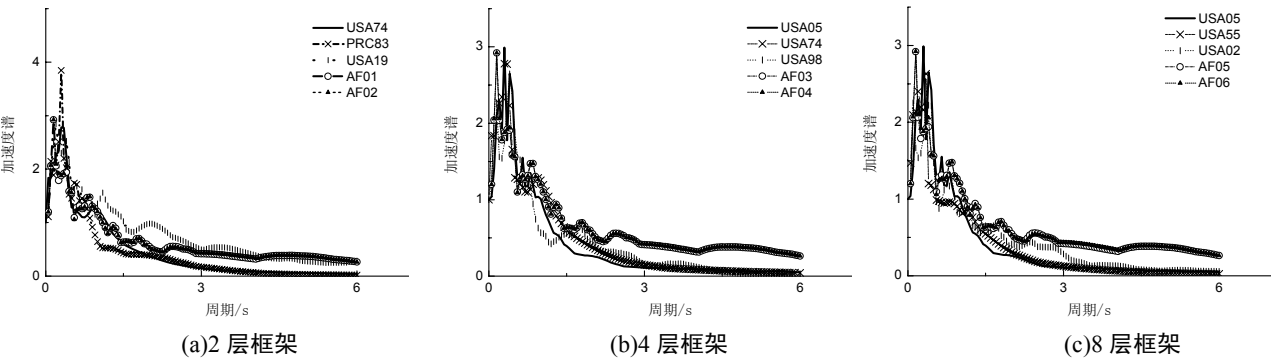


图 1 各框架所选地震波的弹性反应谱  
Fig. 1 Elastic response spectrums of waves adopted

3 计算结果及分析

对各烈度区框架结构分别建立“带缝框架”模型和“整浇框架”模型,输入选定的地震动记录,进行大震下的非线性时程分析.从结构顶点位移、层间位移角、关键构件的反应等方面进行对比分析,研究施工缝对框架结构抗震性能的影响程度与范围.

3.1 结构顶点水平位移

顶点位移的变化在一定程度上反映了结构在地震动输入下的综合动力特征.各框架结构顶点最大水平位移见表 2 所示.

表 2 不同框架结构顶点最大位移平均值  
Tab. 2 The maximum top displacement of frame

高宽比 /层数	地震动 强度	框架模型	顶点最大位移 平均值/m
0.58/2 层	小震	整浇	0.007
		带缝	0.007
	中震	整浇	0.026
		带缝	0.057
	大震	整浇	0.062
		带缝	0.095
1.11/4 层	小震	整浇	0.010
		带缝	0.009
	中震	整浇	0.039
		带缝	0.053
	大震	整浇	0.099
		带缝	0.103
2.18/8 层	小震	整浇	0.003
		带缝	0.003
	中震	整浇	0.016
		带缝	0.016
	大震	整浇	0.045
		带缝	0.048

可见, 在小震下, 带缝框架的顶点水平位移与整浇框架几乎相同, 时程曲线变化规律也相似; 在中震和大震下, 带缝框架的顶点水平位移比整浇框架略大, 但是对不同高宽比框架的影响程度不同. 对高宽比为 0.58 的 2 层框架影响最大, 高宽比为 1.11 的 4 层框架次之, 高宽比为 2.18 的 8 层框架最小. 这主要与各框架结构设计时的安全储备有关. 各烈度区框架的层间位移角分布也遵循此规律, 下面将给出具体的数据.

### 3.2 层间位移角平均值

层间位移角是判断结构抗震性能的一个重要指标, 从层间位移角在各层的分布可以看出结构的薄弱层所在位置, 当某一层的层间位移角超过一定限值时即认为该层结构发生倒塌, 整体结构失

效. 与前文相同, 选取每条地震波时程分析中层间位移角最大的两个时刻, 并求 5 条地震波计算的平均值. 两个时刻分别计为“时刻 1”和“时刻 2”, 对应顶点位移达到最大值时和最大层间位移角达最大值时. 顶点位移达到最大值的时刻往往与最大层间位移角达到最大的时刻并不相同.

3 种不同高宽比框架结构的两种计算模型在小震、中震和大震输入下, 各层层间位移角平均值如图 2 所示. 图中框架编号“kj-2z/f-时刻 1”指“2 层框架在时刻 1 的层间位移角平均值”, “2”指 2 层, “z”指整浇, “f”指带缝, 以下各编号意义均与此类似. 各框架的最大层间位移角及出现的楼层见表 3 所示.

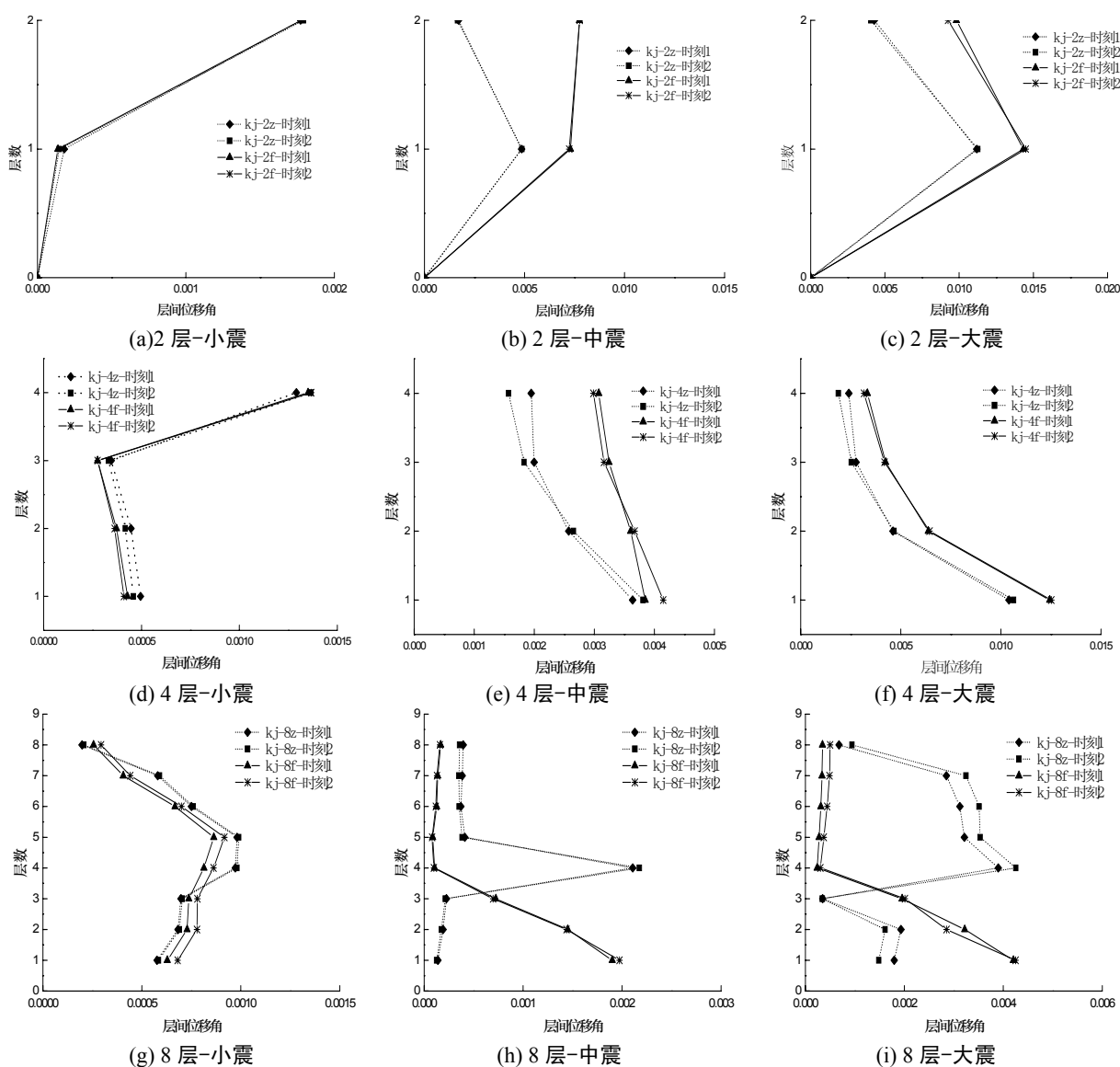


图 2 不同高宽比框架最大层间位移角平均值  
Fig. 2 The average of maximum interstory drifts of frames

表 3 各框架最大层间位移角  
Tab. 3 The maximum interstory drifts of frames

高宽比 /层数	地震动 强度	框架 模型	最大层 间位移 角	出现 楼层	是否 超限
0.58/2 层	小震	整浇	1/555	2	否
		带缝	1/555	2	否
	中震	整浇	1/204	1	否
		带缝	1/130	2	否
	大震	整浇	1/83	1	否
		带缝	1/71	1	否
1.11/4 层	小震	整浇	1/730	4	否
		带缝	1/730	4	否
	中震	整浇	1/262	1	否
		带缝	1/241	1	否
	大震	整浇	1/94	1	否
		带缝	1/80	1	否
2.18/8 层	小震	整浇	1/1000	5	否
		带缝	1/1000	5	否
	中震	整浇	1/455	4	否
		带缝	1/500	1	否
	大震	整浇	1/232	4	否
		带缝	1/232	1	否

可见,对于 2 层框架,在小震下,整浇与带缝框架的层间位移角分布一致,最大层间位移角出现在顶层,曲线几乎重合,施工缝没有造成影响;在中震下,两者的层间位移角分布略有差异,主要体现在顶层,带缝框架的层间位移角较大;在大震下,带缝框架的层间位移角仍然比整浇框架大,最大层间位移角均出现在底层,均满足规范限值要求。

对于 4 层框架,在 3 个不同的地震烈度水准下,整浇和带缝框架的层间位移角分布规律一致,最大层间位移角出现的楼层一样。小震下,施工缝几乎没有造成影响;中震和大震下,施工缝使结构的层间位移角增大,但最大值没超过规范限值。

对于 8 层框架,在小震下,整浇与带缝框架的层间位移角分布相差极小,可忽略不计;在中震和大震下,整浇与带缝框架的层间位移角分布不同,整浇框架的最大层间位移角出现在 4 层,而带缝框架的最大层间位移角出现在底层。除此之外,两者的最大层间位移角几乎相等,且值都非常小。

可见,施工缝对不同高宽比框架结构在 3 种不同地震烈度水准下的影响规律并不一致。总体来说,在小震下,施工缝对框架结构的层间位移角基本没有影响;在中震和大震下,施工缝会使框架结构的层间位移角增大,而且对于高宽比较大的结构,会改变其层间位移角分布。但是,最大层间位

移角均未超过规范限值。  
3.3 关键构件的反应

非线性分析中发现,底层柱下端是最容易出现塑性铰的部位。因此,底层柱作为结构的关键构件,其底部截面的弯矩-曲率关系可以衡量结构的局部反应。时程分析中记录下各框架底层边柱底部截面的弯矩-曲率滞回曲线,其中 4 层框架底层边柱底部截面的弯矩-曲率滞回曲线如图 3 所示,其余框架的规律与此类似,限于篇幅从略。

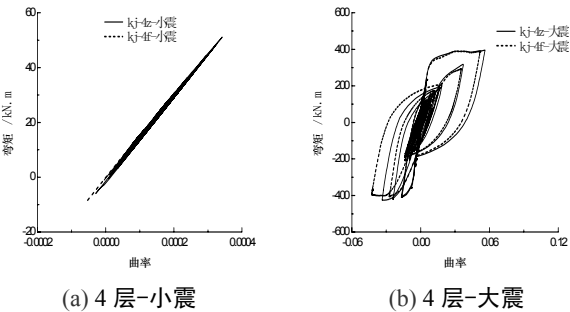


图 3 4 层框架底层柱底端截面弯矩-曲率关系  
Fig. 3 The moment-curvature curves of columns in ground floor

分析可知,对于 2 层和 4 层框架,在小震情况下,底层边柱的下端截面处于弹性状态,弯矩-曲率关系呈线性,此时施工缝几乎没有影响;在中震情况下,截面开始进入塑性阶段,弯矩-曲率关系出现非线性,施工缝的影响不显著;在大震下,截面进入较强的非线性阶段,弯矩-曲率关系呈滞回曲线状,向一个方向发生偏移,其中带缝框架的底层柱截面发生更明显的偏移,施工缝的影响明显。

对于 8 层框架,在小震与中震下,底层柱截面均基本处于弹性状态,弯矩-曲率关系呈线性,施工缝的影响几乎可以忽略不计;在大震下,截面开始进入塑性阶段,但是非线性的程度不高,且整浇与带缝框架均是一致的规律,此时施工缝的存在造成了一定的影响,但是并不显著。

可见,施工缝对不同高宽比框架的影响程度不同,对关键构件局部反应的影响规律与前述的顶点位移和层间位移角影响规律一致。造成这种差别的原因将在下一节给出分析说明。

3.4 计算结果分析

由上述结算结果对比可知,在小震下,施工缝对不同高宽比框架结构的抗震性能均几乎没有影响,可以对其不做考虑。在中震和大震下,施工缝对不同高宽比框架的影响规律不同。主要表现在,对 2 层框架的影响最明显,使顶点位移增大,使层间位移角增大,使关键构件的局部反应加重;对 4

层框架的影响比较明显,使顶点位移增大,层间位移角增大,关键构件的局部反应加重;对8层框架的影响甚微,虽然使层间位移角分布有所改变,但是最大层间位移角并没有增大,对顶点位移和关键构件的局部反应也基本没有影响。

究其原因,同为按照抗震规范设计的8度区的规则框架结构,按照规范规定,2层和4层框架的抗震等级为二级,8层框架由于高度超过24m,抗震等级为一级。因此,8层框架的抗震构造措施要严格的。另外,2层框架的基本自振周期约为0.47s,与Ⅱ类场地计算罕遇地震时的特征周期0.4s很接近,地震作用较大。在遭遇设防烈度地震时即开始进入塑性,在罕遇地震下,结构进入较强的非线性。而8层框架的基本自振周期约为1.04s,与场地特征周期相差甚远,地震作用较小。在罕遇地震下,2层框架结构的首层楼层的水平地震作用约为8层框架结构的首层楼层的水平地震作用的6倍。因此,8层框架在遭遇罕遇地震时,仍然有较高的安全储备,施工缝的影响甚微,几乎可以忽略不计。4层框架介于两者之间。

总结施工缝对RC规则框架结构抗震性能的影响规律,发现施工缝对框架结构抗震性能的影响主要与结构或构件进入非线性的程度有关。如果结构处于弹性受力阶段,施工缝基本没有影响;如果结构进入非线性受力阶段,则施工缝的影响开始凸显,主要会使结构的变形增大,位移分布形式发生改变等。而且,结构进入非线性的程度越深,施工缝的影响作用越明显。

#### 4 带缝 RC 规则框架抗震设计建议

总结施工缝对RC规则框架结构抗震性能的影响规律,发现在某些条件下,施工缝会对结构产生一定不利影响,因此,有必要从抗震设计角度给予考虑。

施工缝一般位于关键构件框架柱的端部,在此处与梁连接,在设计中属于重点加强的部位。应确保实现结构直至倒塌仍可保持整体受力,即保证所有连接的构件应发挥其预定的设计能力,不能提前丧失承载力。施工缝留设的位置由于受力较大,往往钢筋绑扎密集,使混凝土的浇筑和振捣变得困难,容易出现施工质量问题,这无疑会使施工缝的不利影响加剧。震害调查中也发现有部分施工缝震害主要是由于施工质量不合格造成的,如箍筋绑扎

严重偏移、混凝土浇筑不实等。这些又很难在设计中加以考虑。

对于无法保证通过在施工中提高新老混凝土结合性能来避免施工缝的不利影响的情况,需要将其作为一个受力薄弱面,在对结构进行抗震设计时加以考虑。根据上述计算分析研究,给出设计建议。

按照施工缝对框架结构抗震性能影响的研究,在小震下,施工缝并不会造成不利影响,因此,可以不作考虑。在中震和大震下,施工缝的影响与结构进入非线性的程度和结构的安全储备有关。结构进入非线性的程度越强,施工缝的影响就会越明显,而如果结构的抗震构造措施比较严格,与大震下的地震作用相比,具有足够的安全储备,此时施工缝的影响可以不作考虑。具体可归结为以下几条建议:

a.小震下,对结构进行弹性分析时,可不考虑施工缝的影响;

b.对于抗震等级为一级的RC框架结构,由于构造措施比较严格,结构具有较好的延性性能和安全储备,可不考虑施工缝的影响;

c.对于抗震等级为二级及以下的RC框架结构,在进行大震下的非线性分析时宜考虑施工缝的影响。如果结构的基本自振周期与场地特征周期一致或比较接近,地震作用较大,而结构的安全储备不高,此时应在对结构进行强非线性分析时考虑施工缝的影响。

目前我国抗震设计规范采用的是“两阶段三水准”的设计方法。计算分析的方法可按以下步骤进行:

a.第一阶段设计是基于弹性理论的承载力设计,此阶段可不考虑施工缝的影响。

b.第二阶段设计是基于弹塑性理论的变形验算,需要判断是否考虑施工缝的影响。如果在对结构进行大震下的变形验算时,结果显示结构的延性较好,安全储备高出20%以上,可以不再进行考虑施工缝影响的验算。如果结构的安全储备较低,即最大层间位移角大于 $1/60$ ,此时建议考虑施工缝的影响进一步进行大震下的变形验算。具体方法是在框架柱的端部加入施工缝模型,重新进行弹塑性分析,并将计算结果与规范的限值进行比较。也可以将计算的最大层间位移角直接增大20%来近似考虑施工缝的影响。

对于需要考虑施工缝不利影响的RC框架结



构,可以以薄弱层弹塑性最大层间位移角为控制指标进行大震下的计算分析.施工缝可能会使结构在大震下的最大层间位移角增大,其作用在于能进一步考虑地震中不利的因素,更加充分的估计结构进入强非线性后性能退化的风险.以最大层间位移角为控制指标,可以综合反映施工缝对框架结构抗震性能的不利影响.

## 5 结论

(1)在小震下,施工缝对RC规则框架结构的抗震性能均没有影响,可以不做考虑.在中震和大震下,施工缝对不同高宽比框架的影响规律不同.对2层框架的影响最明显,使顶点位移增大,使层间位移角增大,使关键构件的局部反应加重;对4层框架的影响次之;对8层框架的影响最小,使层间位移角分布略有改变,但是其它方面均未产生明显影响.

(2)总结施工缝对RC规则框架结构抗震性能的影响规律,给出应该在设计中考虑施工缝影响的范围.在小震下进行弹性分析时可以不考虑其影响.在大震下进行弹塑性分析时,对于抗震等级二级及以下,并且基本自振周期与场地特征周期接近的框架,如果安全储备较低,则需要考虑施工缝的不利影响.

(3)针对需要考虑施工缝不利影响的规则框架结构,提出相应的抗震设计建议.

## 参考文献 References

- [1] 叶列平, 陆新征, 赵世春, 等. 框架结构抗地震倒塌能力的研究[J]. 建筑结构学报, 2009, 30(6): 67-76.  
YE Lieping, LU Xinzhen, ZHAO Shichun. Seismic collapse resistance of RC frame structures [J]. Journal of Building Structure, 2009, 30(6): 67-76.
- [2] 陆新征, 叶列平. 基于IDA分析的结构抗地震倒塌能力研究[J]. 工程抗震与加固改造, 2010, 32(1): 13-18.  
LU Xinzhen, YE Lieping. Study on the seismic collapse resistance of structural system [J]. Earthquake Resistant Engineering and Retrofitting, 2010, 32(1): 13-18.
- [3] 李英民, 刘立平. 汶川地震建筑震害与思考[M]. 重庆: 重庆大学出版社, 2008.  
LI Yingmin, LIU Liping. Disaster investigation and study report of Sichuan Wenchuan Earthquake [M]. Chongqing: Chongqing University Press, 2008.
- [4] 中国赴日地震考察团. 日本阪神大地震考察[M]. 北京: 地震出版社, 1996.  
China to Japan earthquake investigation team. Investigation of the Kobe earthquake in Japan [M]. Beijing: Seismological Press, 1996.
- [5] 陈远峰, 王振波, 杨春和. 考虑施工缝影响的框架结构抗震性能试验研究[J]. 工业建筑, 2006, 36(2): 28-30.  
CHEN Yuanfeng, WANG Zhenbo, YANG Chunhe. Experimental study on seismic performance of concrete frame considering the effect of construction joints under low cycle reversed loading [J]. Industrial Construction, 2006, 36(2): 28-30.
- [6] 张卫东, 王振波, 朱方之. 施工缝位置对框架结构抗震性能的影响[J]. 低温建筑技术, 2007, (4): 46-48.  
ZHANG Weidong, WANG Zhenbo, ZHU Fangzhi. Influence of position of construction joint on seismic resistance behavior of reinforced concrete frame [J]. Low Temperature Architecture Technology, 2007, (4): 46-48.
- [7] 魏春明. 现浇钢筋混凝土框架结构施工缝抗震性能[D]. 大连: 大连理工大学, 2006.  
WEI Chunming. Seismic behavior of cast in-situ reinforced concrete frame structure with construction joints [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2006.
- [8] 李英民, 于婧, 夏洪流. 施工缝对框架柱抗震性能影响的试验研究[J]. 土木工程学报, 2011, 44(增I): 81-86.  
LI Yingmin, YU Jing, XIA Hongliu. Experimental research on seismic behavior of frame columns with construction joint [J]. China Civil Engineering Journal, 2011, 44(sup I): 81-86.
- [9] 于婧, 李英民, 夏洪流. 带施工缝钢筋混凝土柱剪切恢复力模型试验研究[J]. 建筑结构学报, 2011, 32(9): 84-91.  
YU Jing, LI Yingmin, XIA Hongliu. Hysteretic shear model for RC columns with construction joint [J]. Journal of Building Structure, 2011, 32(9): 84-91.
- [10] 李英民, 于婧, 夏洪流, 等. 施工缝力学特性及对RC柱抗震性能影响分析[J]. 建筑结构, 2013, 43(5): 65-70.  
LI Yingmin, YU Jing, XIA Hongliu, et al. Mechanical properties of construction joint and influence on seismic behavior of RC column [J]. Building Structure, 2013, 43(5): 65-70.
- [11] 李英民, 于婧, 韩军, 等. 施工缝模型及在钢筋混凝土柱非线性分析中的应用[J]. 土木建筑与环境工程, 2011, 33(5): 1-6.  
LI Yingmin, YU Jing, HAN Jun. Construction joint modeling and its application in nonlinear analysis of RC columns [J]. Journal of Civil, Architectural & Environmental Engineering, 2011, 33(5): 1-6.
- [12] GB 50011-2010 建筑抗震设计规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.  
GB 50011-2010 Code for seismic design of buildings [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2010.
- [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目标[J]. 土木建筑与环境工程, 2000, 33(6): 33-37.  
YANG Pu, LI Yingmin, LAI Ming. A new method for selecting inputting waves for time-history analysis [J]. Civil Engineering Journal, 2000, 33(6): 33-37.

(编辑 沈波)