

文章编号: 1000-4750(2015)08-0190-11

带施工缝 RC 框架结构抗震性能的数值研究

于 婧, 刘小军, 邓明科

(西安建筑科技大学土木工程学院, 陕西, 西安 710055)

摘 要: 对 7 度、8 度、9 度区的规则 RC 框架结构进行非线性动力分析, 数值模型分为在各层柱底加入施工缝模型的“带缝框架”和不考虑施工缝影响的“整浇框架”两种。通过对比结构的顶点最大位移、层间位移角、塑性铰分布规律和关键构件的反应等研究施工缝对框架结构抗震性能的影响程度。结果表明, 在多遇地震下, 结构仍处于弹性状态, 施工缝对结构的顶点位移及层间位移角等影响不大。在罕遇地震下, 随着地震动增大, 结构进入非线性, 施工缝的影响逐渐凸显, 会使顶点位移及层间位移角明显增大。施工缝使柱端更容易出现塑性铰, 更易形成“强梁弱柱”的柱铰破坏模式。在罕遇地震下对结构进行非线性数值分析时应重视施工缝的影响作用。

关键词: RC 框架结构; 抗震性能; 数值分析; 施工缝; OpenSees

中图分类号: TU375.4 文献标志码: A doi: 10.6052/j.issn.1000-4750.2014.07.0672

NUMERICAL STUDY OF ASEISMIC BEHAVIOR OF RC FRAME STRUCTURE WITH CONSTRUCTION JOINT

YU Jing, LIU Xiao-jun, DENG Ming-ke

(College of Civil Engineering, Xi'an University of Architecture & Technology, Xi'an, Shaanxi 710055, China)

Abstract: A dynamic nonlinear analysis was performed to study the influence of a construction joint on the aseismic behavior of a regular reinforced concrete (RC) frame structures in 7, 8 and 9 earthquake intensity regions separately. Two numerical models for the same frame structure were built, one included a construction joint and another excluded it. The factors such as the maximum vertex displacement, story drift angle, the distribution of plastic hinge, and the reaction of critical members were analyzed. The results show that a construction joint has little effect to a frame structure when it is elastic under a frequent earthquake. However, the effect becomes significant once the frame is in the plastic stage under a rare earthquake. The maximum lateral displacement and story drift angle increased, and plastic hinges turned to be diagonal at the end of columns. The influence of a construction joint on the seismic behavior of a RC frame structure should not be ignored under large earthquakes.

Key words: RC frame structure; seismic behavior; numerical analysis; construction joint; OpenSees

对框架结构进行抗震设计的目标^[1]是在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, 提高框架结构的抗倒塌能力。

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, 不少文献^[1-3]同时指出, 汶川地震中, 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

收稿日期: 2014-07-31; 修改日期: 2015-04-20

基金项目: 国家自然科学基金项目(51208407); 西安建筑科技大学创新团队资助计划项目; 西安建筑科技大学人才科技基金项目(RC1233)

通讯作者: 于 婧(1982-), 女, 河南人, 讲师, 博士, 主要从事混凝土结构抗震研究(E-mail: yujing1506@163.com).

作者简介: 刘小军(1983-), 男, 陕西人, 讲师, 博士, 主要从事地下结构抗震防灾研究(E-mail: liuyx8345@163.com);

邓明科(1979-), 男, 四川人, 副教授, 博士, 主要从事高层建筑结构及抗震研究(E-mail: dengmingke@126.com).

构实现整体屈服机制方面的有关规定进一步完善研究。

同时,震害调查表明^[1],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 倒塌的更彻底。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。

保证结构整体性的第一个方面即是构件之间的连接构造措施应确保实现结构直至倒塌破坏仍可保持整体受力。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。此处往往钢筋绑扎密集,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^[3]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。

目前对施工缝的研究更多的集中在对其抗拉和抗剪等基本力学性能方面的试验研究^[4-6],结果表明,施工缝的抗拉和抗剪性能均低于整浇混凝土。而关于施工缝对整体结构抗震性能的影响方面的研究文献不多。

陈远峰等^[7]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,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^[8]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,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。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。

魏春明^[9]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,试验对比了带缝和整浇两种

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,

上述有关施工缝对框架结构抗震性能的影响,仅有的少量试验研究表明其确有影响,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,其中一个主要的原因是没有合适的施工缝模型。

本文应用提出的施工缝模型^[10],对不同烈度区的规则 RC 框架结构进行非线性数值分析,通过顶点最大位移、层间位移角、塑性铰分布规律及关键构件的反应等参数的研究确定施工缝对框架结构的抗震性能的影响程度和范围。研究采用非线性动力时程分析方法,通过考虑施工缝影响的结构分析模型(简称带缝框架)与原有的不考虑施工缝影响的结构分析模型(简称整浇框架)的对比分析实现研究目的。

1 施工缝模型简介

本次数值计算的关键在于施工缝的模拟,应用的施工缝模型应能完整体现接缝处的主要力学性能,并能较好地模拟施工缝在地震中的反应。计算时应用本课题组依据试验结果结合理论分析提出的施工缝模型^[10]。

施工缝是不连续浇筑在新旧混凝土交接处形成的界面,严格按照规范要求施工形成的施工缝沿轴向没有长度,是存在于混凝土内部的一个受力相对薄弱面。由施工缝处的传力特点可知,接缝面处的受力是由接缝面混凝土和纵向钢筋两部分来承担,混凝土法向不能承受拉应力,只能传递压力和剪力;纵筋在此处连续,参与拉、压、剪应力的传递。轴力变化对施工缝力学性能的影响至关重要,在建立施工缝模型时必须能准确体现这一点。

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。对混凝土纤维按照核心区混凝土和保护层混凝土分别划分,核心混凝土的材料参数通过计算加强系数 K ,考虑箍筋的影响作用。“界面剪切弹簧”的属性由试验中得到的能反映施工缝周围区域平均剪切效应的基于截面的剪切本构^[11]模拟。

应用该模型对本课题组所做拟静力试验中的底部带施工缝的悬臂柱进行数值计算^[10],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 算例设计

本文按照现行抗震设计规范^[12]分别设计了 7 度~9 度区 3 个 3×3 跨的 4 层钢筋混凝土框架结构。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/m²,雪压 0.25 kN/m²。屋面恒载和活载分别为 6.5 kN/m²、2.0 kN/m²;楼面恒载和活载分别为 5.0 kN/m²、2.0 kN/m²,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。各烈度区框架的梁柱尺寸及配筋结果见图 1 所示。

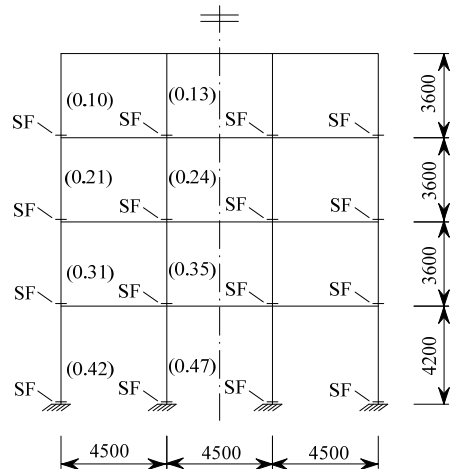
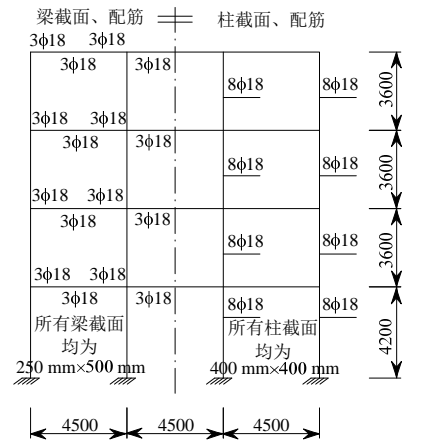
由试验和相应的数值分析均发现,施工缝对框架柱抗震性能的影响与轴压比有很大关系。另外,本文的施工缝模型参数计算也与柱的轴压比有关。因此,给出不同烈度区框架结构各层柱的轴压比见图 1 所示(图中所列“轴压比”为设计轴压比)。

3 框架结构非线性数值分析

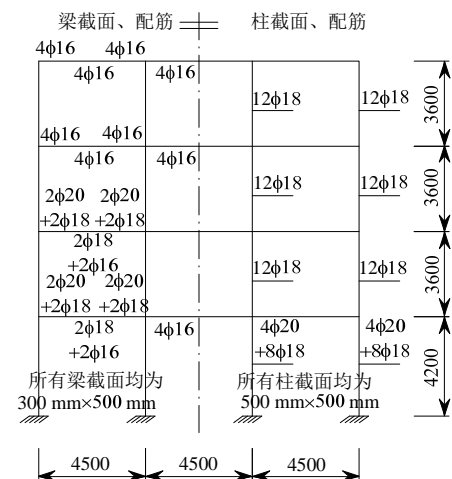
3.1 结构非线性数值模型

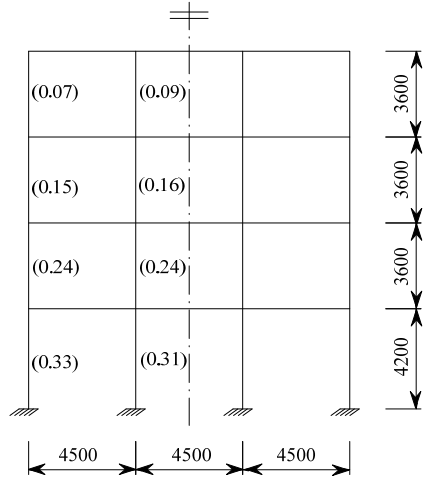
本文对框架结构数值模型进行非线性动力时程分析,目的是考察施工缝对框架结构抗震性能的

影响。因此,采取两种非线性分析模型,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,如图 1(a)所示,图中柱脚画短横线的地方表示留有施工缝,“SF”表示施工缝;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,如图 1(b)所示。“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。

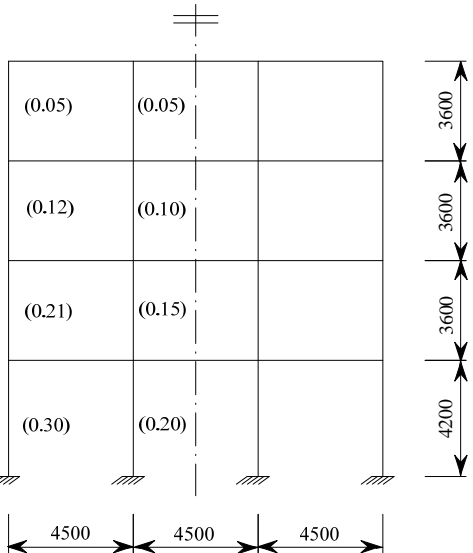
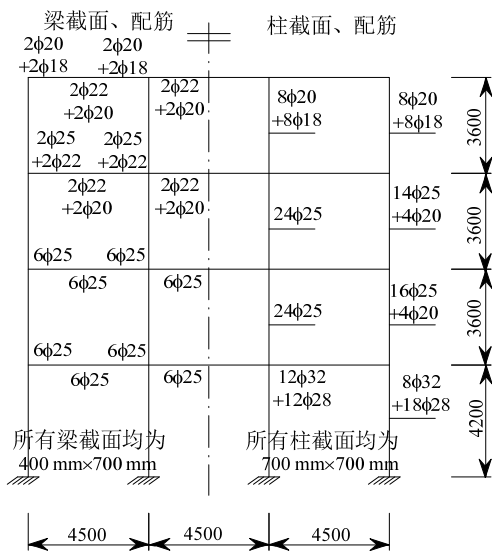


(a) 7 度区框架梁柱尺寸和配筋及柱轴压比





(b) 8 度区框架梁柱尺寸和配筋及柱轴压比



(c) 9 度区框架梁柱尺寸和配筋及柱轴压比

图 1 各烈度区框架梁柱尺寸、配筋及柱轴压比

Fig.1 Details of the frame members and the axial load ratio of columns

3.2 材料本构参数取值及纤维截面划分

本文所有的数值计算均在 OpenSees^[13](open system for earthquake engineering simulation)平台上完成。梁和柱选用基于柔度法的非线性梁柱单元^[14],能较好地模拟构件进入软化段后的强非线性问题。单元截面采用纤维截面。梁柱单元的材料对象分别采用单轴约束混凝土材料(concrete 02 material)和基于 Menegotto-Pinto 模型的钢筋材料(steel 02 material)。施工缝模型的纤维截面材料分别采用混凝土材料 concrete 01 material, 钢筋材料 uniaxialMaterial Bond_SP01 和剪切滞回材料 Hysteretic Material。

Concrete 01 和 concrete 02 这 2 种混凝土材料的本构关系均基于修正的 Kent-Park 模型^[15],不同之处在于,混凝土材料 concrete 02 考虑拉伸强化并受拉软化处理为线性,而 concrete 01 认为混凝土的抗拉强度为 0。其中 concrete 02 用于整浇部分构件纤维截面的混凝土材料,而 concrete 01 用于施工缝模型的纤维截面混凝土材料,为了体现施工缝处混凝土的抗拉强度较低至可以忽略不计的特点。

穿过缝面钢筋主要参与法向拉力的传递,可用钢筋滑移本构描述其性能。本文计算中选用 Bond-SP01 模型^[16]描述施工缝处的钢筋滑移特性。该钢筋滑移本构模型可用于模拟钢筋混凝土构件端部(如柱、剪力墙与基础相交的根部或构件之间的交界处)转动引起的纵筋滑移,是沿锚入相邻构件的纵筋的应变渗透作用。

施工缝处的剪力传递机制比较复杂,可以看做缝面混凝土的摩擦力和纵筋的销栓作用的集合,与轴向荷载、钢筋与混凝土强度、纵筋配筋率等均有很大关系。本课题组通过在试验中测量施工缝周围塑性铰区的剪力-剪切变形滞回曲线,给出带缝柱基于截面的剪切恢复力模型 Hysteretic Material^[11]可用于描述施工缝周围塑性铰区的综合剪切性能。

非线性分析中各材料参数均取平均值以反映结构真实的受力状态。截面纤维离散时采用较为均匀的划分方式,梁与柱截面均区分保护层混凝土与核心混凝土,对核心混凝土通过约束加强系数考虑箍筋的影响作用。截面纤维数目需达到一定数量才可认为数值积分结果的精度满足要求,本文分析中柱截面核心混凝土纤维划分为 10×10,梁截面核心混凝土纤维划分为 4(宽)×20(高)。这样即认为有足够的计算精度。柱和梁纤维截面的划分如图 2 所示,

其中施工缝模型的纤维截面划分与对应的柱截面一样。

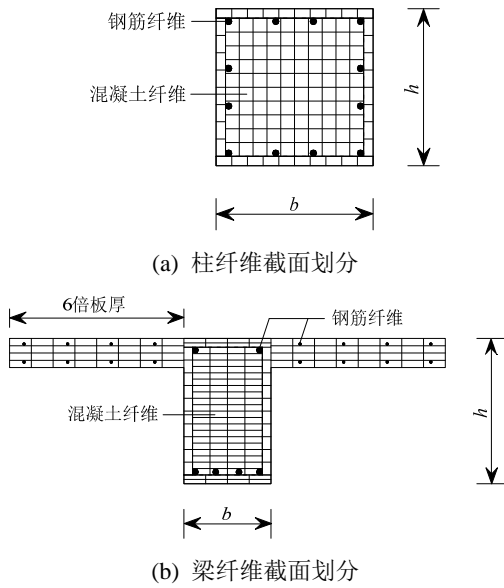
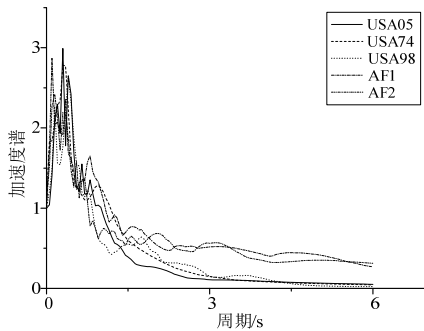


图2 柱和梁纤维截面划分

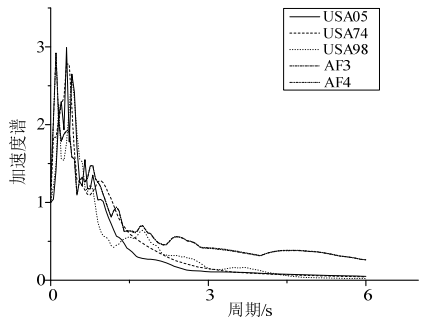
Fig.2 The fiber sections modelling of column and beam

3.3 地震波的选取

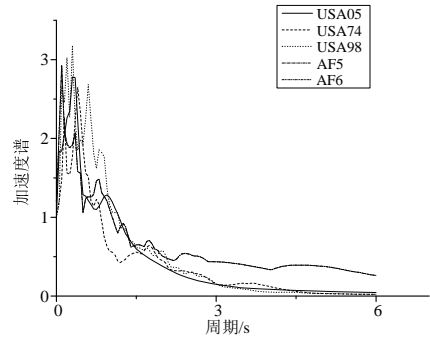
时程分析结果对所选用的地震波较为敏感性。抗震规范规定要选用统计意义与适用的反应谱一致的地震波。本文中时程分析对各烈度区框架结构分别选用5条地震波，其中包括按双频段选波法^[17]选择的3条实际地面运动记录和按照ARMA模型拟合的2条人工波。各烈度区地震波的弹性反应谱曲线如图3所示。



(a) 7度区



(b) 8度区



(c) 9度区

图3 各烈度区所选地震波的弹性反应谱

Fig.3 Elastic response spectrums of waves adopted

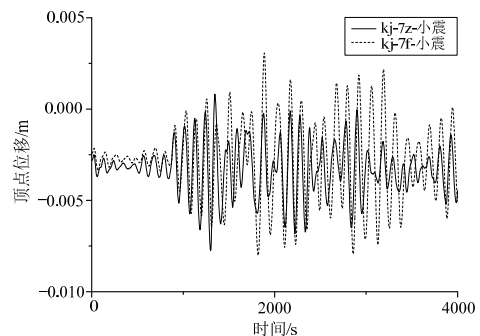
3.4 计算结果对比

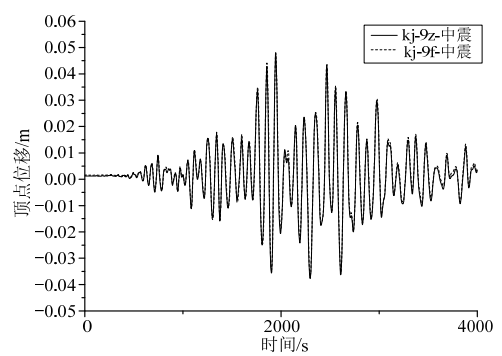
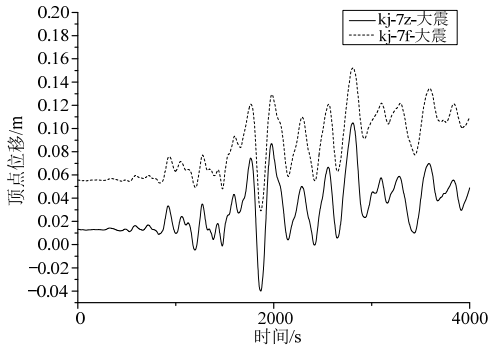
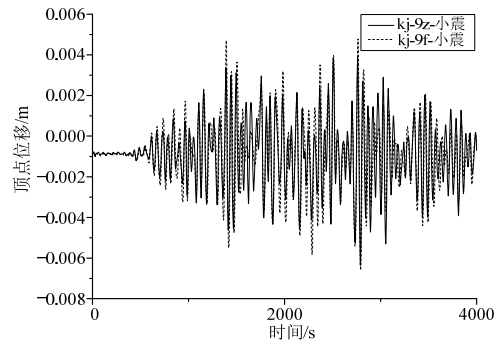
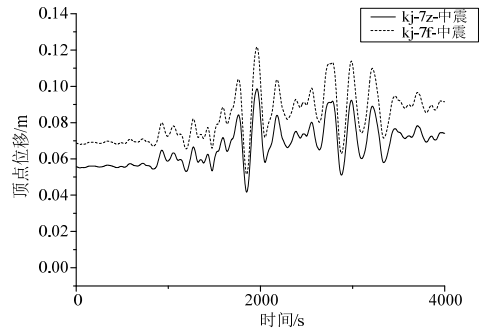
分别对7度、8度、9度区框架结构输入选取的3条实际强震记录和2条人造波，对每个烈度区框架结构分别建立“整浇框架”和“带缝框架”两种模型进行非线性时程分析。下面统计分析了两种计算模型的顶点位移、层间位移角平均值、塑性较分布、关键构件的弯矩-曲率关系等参数，说明在非线性数值分析中考虑施工缝的影响作用时，框架结构在地震中的反应发生了哪些变化。

3.4.1 顶点位移

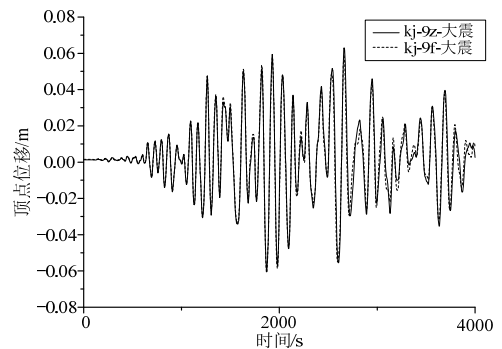
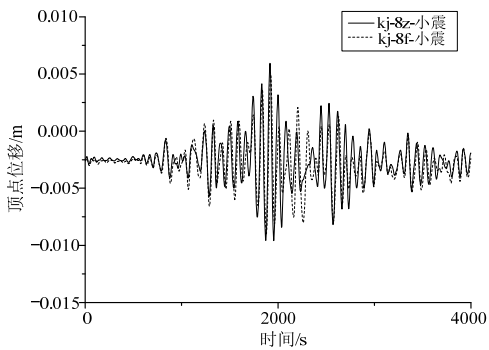
时程分析中，顶点位移的变化在一定程度上反映了结构在地震动输入下的综合动力特征。计算中控制输出结构顶点的水平位移，得到顶点水平位移时程曲线。各烈度区框架在人工波1小震、中震、大震输入下顶点的水平位移时程曲线见图4所示。图中“kj-7z-小震”指“7度区整浇框架在小震下”，“kj-7f-小震”指“7度区带缝框架在小震下”，以下编号意义均与此类似。各框架结构顶点最大水平位移见表1所示。

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，带缝框架的顶点位移比整浇框架略大，时程曲线变化规律相似。但是对7度、8度、9度区框架的影响程度不同，7度区稍大，8度区次之，





(a) 7 度区框架顶点水平位移时程曲线



(c) 9 度区框架顶点水平位移时程曲线

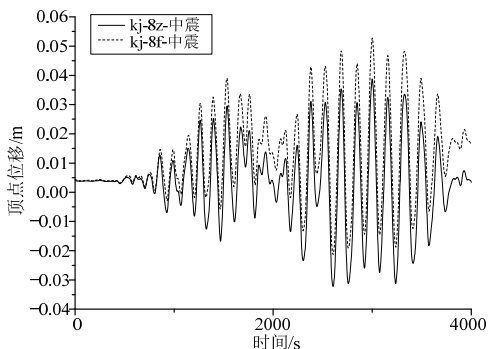
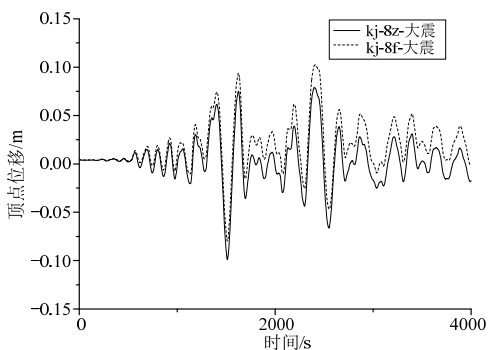


图 4 各框架顶点水平位移时程曲线

Fig.4 Time-history curves of the lateral displacement at the top of the frame



(b) 8 度区框架顶点水平位移时程曲线

表 1 框架顶点最大水平位移/m

Table 1 The maximum top displacements of frames

烈度	框架名称	顶点最大位移平均值/m
7 度区	小震 kj-7z	0.0078
	小震 kj-7f	0.0080
	大震 kj-7z	0.1048
	大震 kj-7f	0.1523
8 度区	小震 kj-8z	0.0096
	小震 kj-8f	0.0090
	大震 kj-8z	0.0989
9 度区	大震 kj-8f	0.1025
	小震 kj-9z	0.0064
	小震 kj-9f	0.0066
	大震 kj-9z	0.0603
	大震 kj-9f	0.0632

9 度区最小。这也与下面层间位移角分布的规律类似。带缝框架中的施工缝模型可以考虑剪切滑移，

会使结构在非线性阶段的变形增大。由于水平向顶点位移是结构整体水平位移的总和，所以，这种变形的增大效应在顶点位移上得到最大体现。

3.4.2 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。抗震规范对框架结构在小震和大震下的层间位移角均给出了限值，小震下不超过 $1/550$ ，大震下不超过 $1/50$ 。

各烈度区框架结构的两种计算模型在小震和大震输入下，各层层间位移角平均值如图 5 所示。选取每条地震波时程分析中两个时刻的各层层间位移角，并求 5 条地震波计算的平均值。顶点位移达到最大值时，计为“时刻 1”；最大层间位移角达最大值时，计为“时刻 2”。“时刻 1”和“时刻 2”均是取自时程中的一个特定的时间点，而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。图 5 中框架编号的意义与前文相同。

在 7 度区，小震时，由图 5(a)可以看出，整浇框架和带缝框架层间位移角分布规律相同，3 层的层间位移角最小，顶层和底层相对较大，从层间位移角大小看，整浇框架和带缝框架相差不大，均满足规范限值要求；中震时，由图 5(b)可以看出，整浇框架和带缝框架的层间位移角分布略有不同，整浇框架的最大层间位移角出现在底层，上部各层层间位移角较小，而带缝框架的各层间位移角相差不大，就最大层间位移角而言，整浇与带缝框架差别不大；大震时，由图 5(c)可以看出，整浇和带缝框架的层间位移角分布重新趋于一致，带缝框架的各层间位移角均比整浇框架略大，但是最大层间位移角均满足规范限值要求。

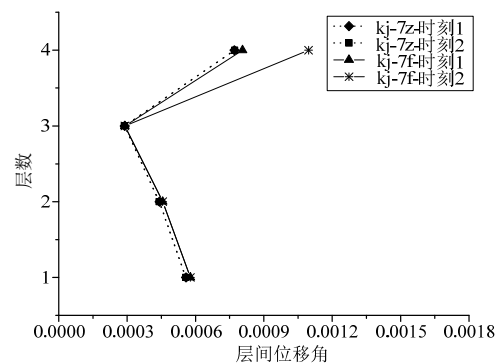
在 8 度区，小震、中震和大震输入下，如图 5(d)~图 5(f)所示，可见整浇框架与带缝框架各自的层间位移角分布规律均与 7 度区时相似。小震时，整浇和带缝框架的最大层间位移角分布几乎没有差别，最大层间位移角出现在顶层，且均满足规范限值；中震时，整浇和带缝框架的最大层间位移角出现在底层，2 层~4 层层间位移角略小，带缝框架的层间位移角比整浇框架稍大；大震时，整浇和带缝框架的最大层间位移角仍出现在底层，上部各层较小，

带缝框架的各层间位移角均比整浇框架略大，最大层间位移角满足规范限值要求。

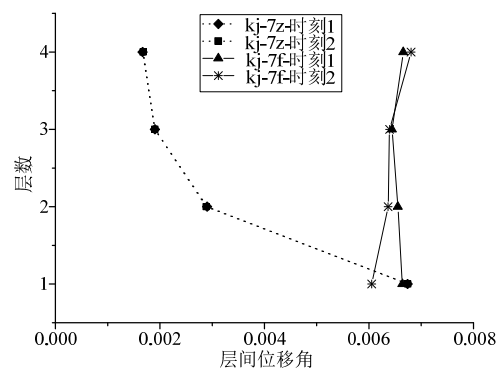
在 9 度区，如图 5(g)~图 5(i)所示，小震和中震下，整浇与带缝框架的层间位移角分布规律一致，各层层间位移角相差不大；大震下，两者的层间位移角分布略有不同，整浇框架的最大层间位移角出现在 2 层，而带缝框架出现在顶层。带缝框架的最大层间位移角略有增大，但幅度不大，能满足规范限值要求，且出现在顶层，造成的影响不大。

各烈度区框架的最大层间位移角及出现的楼层见表 2 所示。可见，在多遇地震下，整浇框架与带缝框架的最大层间位移角均相差不大。这是因为施工缝的影响一般出现在结构进入非线性以后，多遇地震下结构构件普遍处于弹性，层间位移角较小，此时施工缝尚未裂开造成影响。因此，在多遇地震下，施工缝对框架结构的抗震性能的影响甚微。

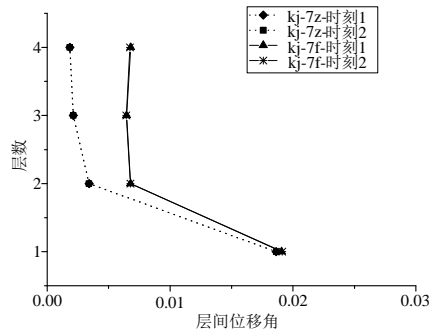
随着地震动输入增大，有少量构件进入非线性，甚至达到屈服，此时施工缝一般已经形成了开裂，对结构的抗震性能具有一定影响。比如，在 7 度、8 度区中震时，带缝框架的层间位移角分布发生变化，虽然最大层间位移角仍然与整浇框架相差无几，但是其余各层的层间位移角比整浇框架大。



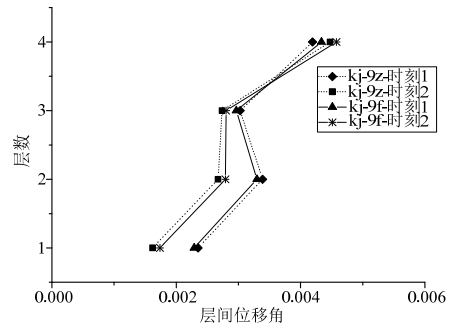
(a) 7 度小震



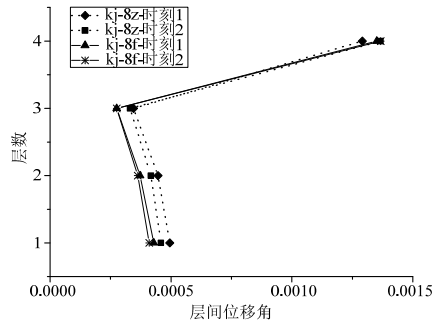
(b) 7 度中震



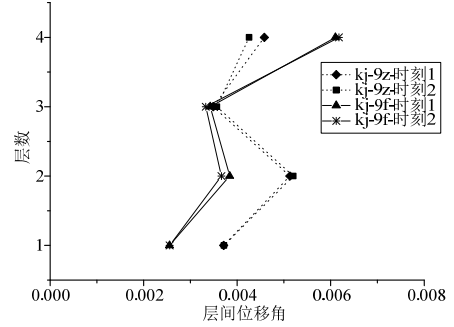
(c) 7度大震



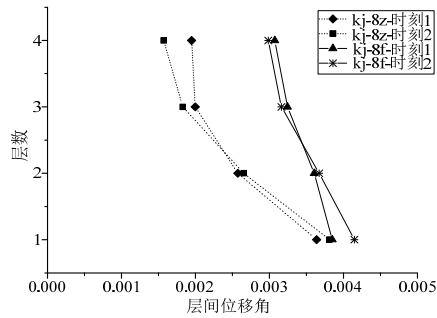
(h) 9度中震



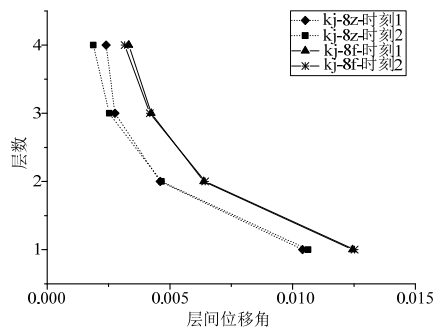
(d) 8度小震



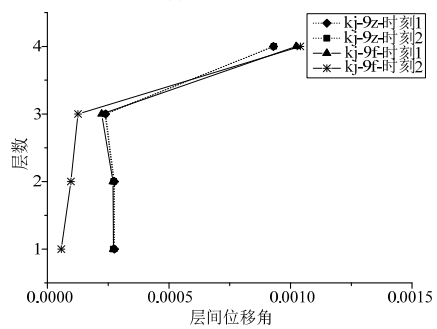
(i) 9度大震



(e) 8度中震



(f) 8度大震



(g) 9度小震

图5 各框架时程分析的层间位移角平均值

Fig.5 The interstory drifts of frames according to time history analysis

表2 各框架最大层间位移角

Table 2 The maximum interstory drifts of frames

地震烈度	框架	最大层间位移角	出现楼层/层	是否超限
7度多遇	kj-7z	1/1250	4	否
	kj-7f	1/1000	4	否
7度罕遇	kj-7z	1/54	1	否
	kj-7f	1/52	1	否
8度多遇	kj-8z	1/714	4	否
	kj-8f	1/714	4	否
8度罕遇	kj-8z	1/91	1	否
	kj-8f	1/80	1	否
9度多遇	kj-9z	1/1075	4	否
	kj-9f	1/1000	4	否
9度罕遇	kj-9z	1/192	2	否
	kj-9f	1/174	4	否

如果遭遇罕遇地震，多数构件达到屈服，结构进入强非线性状态，变形和层间位移角均比较大。此时，由于施工缝的剪切滑移会使结构的层间位移角增大，其对结构的抗震影响有一定不利影响。总体来说，整浇与带缝框架的层间位移角分布规律相似，但是带缝框架的各层层间位移角均比整浇框架稍大，其中最大层间位移角增大幅度不多，未超过规范规定的限值。有理由认为如果考虑施工缝的影响作用，在遭遇较大地震时，结构的安全储备比原先预期的有所降低。

3.4.3 塑性铰分布

结构在非线性时程分析中的塑性铰分布反映了结构的破坏模式,由各构件依次进入屈服的次序,可以看出结构在设计时的若干道抗震防线是否发生作用。

对于框架结构,同样的地震能量输入下梁铰机构更不容易达到塑性变形能力极限,因此,梁铰机构的倒塌风险最小。工程抗震界一致认为应该优先引导塑性铰在梁端形成,这也是为什么抗震规范中规定框架结构应该设计成“强柱弱梁”的原因。

但是,此次汶川地震中发现^[3],框架结构绝大部分都是柱端出现塑性铰的破坏模式,梁端出铰的情况几乎没有。这说明即使按照规范进行设计的框架结构,仍然不能保证其在地震中按“强柱弱梁”的模式破坏。究其原因,通常认为主要是梁端钢筋超配、楼板对梁抗弯能力的增强作用、柱轴压比限值太高、强柱弱梁系数较低等原因造成的^[17]。

除了上述原因之外,本文根据施工缝的抗拉和抗剪性能低于整浇混凝土这一线索,推断认为在地震作用下,柱端的施工缝有可能也对其塑性铰的出现有一定影响。在对各烈度区框架进行非线性时程分析时,控制输出控制截面上相应关键点处纤维材料的应力应变等数据,通过截面受力方向最外侧钢筋纤维是否达到屈服应变判断构件是否屈服。对框架中所有的梁柱单元根据达到屈服的顺序进行编号,即可给出结构的塑性铰分布。

图6是各烈度区整浇和带缝框架在人工波1(具有统计意义)大震输入下的塑性铰分布。图中圆圈代表杆端屈服,圆圈的大小代表塑性转动的相对大小。可见,在7度区,整浇框架与带缝框架均是底层柱全部出铰形成破坏机构,其中整浇框架的底层和顶层梁端出现个别塑性铰,而带缝框架梁端均未出铰;在8度区,整浇框架与带缝框架仍然形成底层柱铰破坏机构,整浇框架在1层、3层、4层均有梁铰出现,其中在1层梁端出铰较多,而带缝框架几乎不出现梁铰,是典型的柱铰破坏机制;在9度区,整浇框架的梁端与柱端均有塑性铰出现,底层柱未出铰,结构尚未完全形成破坏机构,而带缝框架只在第3层的中跨有梁铰出现,柱端出铰较多,其中底层柱下端,除左侧边柱外全部出铰,结构仍然未完全形成破坏机构。上面提到9度区带缝框架的最大层间位移角略有增大,由图6(f)可以看出,最大层间位移角出现在顶层,结构的塑性铰出现增

多,但是仍未完全形成层间侧移机构。

各框架在其他地震动输入下塑性铰的分布情况与上述人工波1有一定差别,但是总体规律类似。由对比可以看出,施工缝的存在使柱端更容易出铰,尤其是在高烈度区,更易形成“强梁弱柱”的柱铰破坏模式,这也与历次大震中发现的震害现象一致。

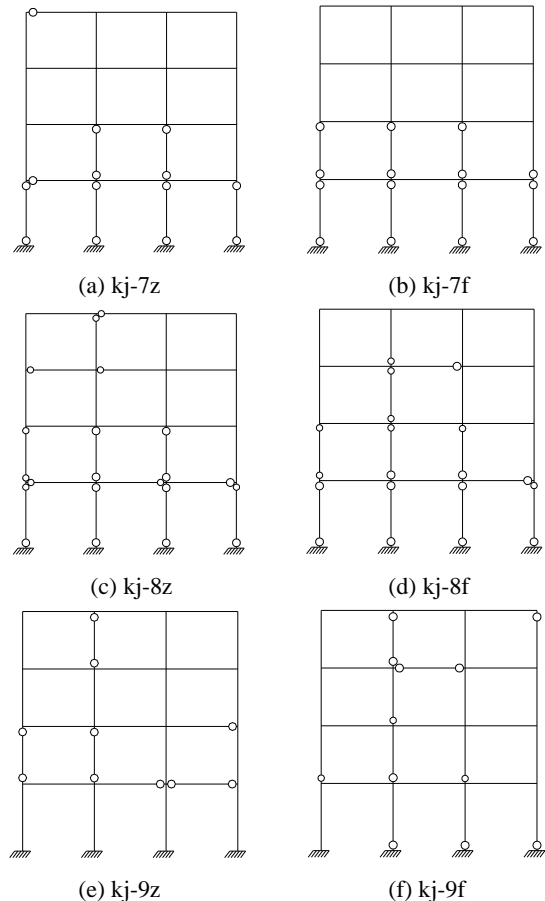


图6 人工波1大震输入下的塑性铰分布

Fig.6 The plastic hinges distributions of frames under artificial wave

3.4.4 关键构件的反应

结构在大震下的抗震性能,除了与上述整体指标相关以外,也与结构构件的局部反应密切相关。尤其重要的是底层柱底,由上面塑性铰分布可以看出,框架结构的底层柱底部是最容易出现塑性铰的部位。下面给出在人工波1(具有统计意义)输入下,底层边柱柱底截面的弯矩-曲率关系,如图7所示。

可以看出,在小震下,整浇和带缝框架的底层柱底的弯矩-曲率基本呈线性关系,这说明构件处于弹性阶段,此时施工缝的影响几乎没有体现。大震下,整浇框架和带缝框架的底层柱底均出现较大塑性变形,弯矩-曲率关系呈现滞回曲线的走势规律。

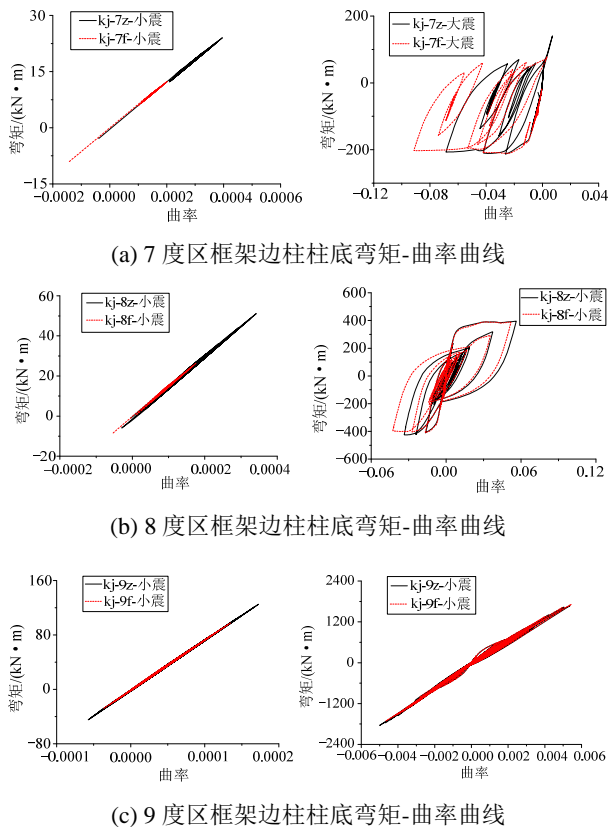


图7 各烈度区框架底层柱底端截面弯矩-曲率关系

Fig.7 The moment-curvature curves of columns in ground floor

从图7对比可以看出,在7度区大震下,整浇与带缝框架柱底的弯矩-曲率关系规律相似,均沿一个方向发生滑移,其中带缝柱的滑移较大;8度区大震下,整浇与带缝框架的底层柱底弯矩-曲率滞回曲线呈梭形,走势规律相似,但是从滞回环包括的面积看,整浇框架柱的耗能较好;9度区大震下,整浇与带缝框架柱底均出现了一定程度的塑性变形,但左侧边柱柱底未形成塑性铰,仍能保持良好的变形性能,未出现承载力明显降低,此时施工缝的影响不太大。

3.5 计算结果分析

由上述计算结果对比可以看出,总体来说,在小震下,构件处于弹性阶段,施工缝对框架结构的抗震性能几乎没有影响,此时,可以不考虑施工缝的作用;中震下,随着地震动输入增大,部分构件进入塑性阶段,甚至达到屈服,此时,施工缝的影响开始显现,使受力较大的柱端出现异于整浇混凝土的变形行为,对结构的整体影响表现为使顶点位移增大,层间位移角分布略有不同,虽然最大层间位移角相差不大,但是,此时的施工缝已经对结构造成些许影响;大震下,大量构件进入屈服阶段,

施工缝的影响进一步显现,使结构的顶点位移和层间位移角有不同程度的增大,应该考虑施工缝的作用。

但是,也应看到,除了上述共同规律之外,施工缝对各烈度区框架结构的影响并不完全相同。小震下,由于均处于弹性阶段,施工缝对各烈度区框架的影响规律一致,主要差别在中震和大震时。7度区框架在中震和大震下的顶点位移和最大层间位移角均比较大,8度区的框架略次之,而9度区的框架在大震下的反应较小。相应的,施工缝对7度区和8度区框架在中震和大震下的影响比较明显,对9度区框架的影响比较小。

这是因为,对于不同烈度区的结构,我国规范所采用的小震下的弹性设计承载力约是大震弹性地震力的 $1/5.7$,即采用统一的地震力折减系数 R 。而规范中对不同烈度区的框架结构规定了不同的构造措施,9度区最严,8度区次之,7度区较松。这与Newmark根据“等位移法则”和“等能量法则”研究的 $R-\mu-T$ 理论关系不符。即当 R 取值不变时,对结构延性能力的要求也应该是不变的,这与处在何种烈度区没有关系。

由于上述原因,同样是按照现行规范设计的型式相同的4层框架结构,由于各烈度区采用不同的抗震措施要求,导致结构在罕遇地震下的反应不同。7度区的框架安全储备最低,8度区次之,9度区最高。因此,在大震下的反应7度区框架最大,8度区次之,9度区最小。相应的,施工缝对于进入非线性程度最强的7度区框架的影响最明显,8度区次之,9度区最弱。另外,这也与柱的轴压比有关,同等条件下设计的各烈度区框架,7度区框架柱的轴压比最大,8度区次之,9度区最小,见图1所示。而轴压比较大时,施工缝对柱的抗震性能影响较明显。

4 结论

本文应用提出的施工缝模型,基于OpenSees平台对不同烈度区的RC规则框架结构建模进行非线性数值分析,并与传统的不考虑施工缝影响的框架结构模型分析结果进行对比。通过对比顶点最大位移、层间位移角、塑性铰分布规律及关键构件的反应等,确定施工缝对框架结构抗震性能的影响程度和范围。得出以下结论:

(1) 带缝框架的顶点位移比整浇框架略大。施

工缝使结构层间位移角增大,分布形式也可能发生改变。在多遇地震下,结构仍处于弹性状态,施工缝对结构的层间位移角及顶点位移等性能指标影响不大。随着地震动增大,结构进入非线性,施工缝的影响逐渐凸显,会使层间位移角及顶点位移明显增大。

(2) 考虑施工缝的影响使柱端更容易出铰,更易形成“强梁弱柱”的柱铰破坏模式,这也与历次大震中发现的震害现象一致。

(3) 应该在对现浇钢筋混凝土结构建模进行非线性数值分析时加入施工缝模型,以便考虑施工缝的影响作用。尤其是在大震时,这将使结构的数值分析模型更符合实际情况。

参考文献:

- [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 Xinzheng, Zhao Shichun, et al. Seismic collapse resistance of RC frame structures [J]. Journal of Building Structure, 2009, 30(6): 67—76. (in Chinese)
- [2] 马玉虎, 陆新征, 叶列平, 等. 漩口中学典型框架结构震害模拟与分析[J]. 工程力学, 2011, 28(5): 71—77.
Ma Yuhu, Lu Xinzheng, Ye Lieping, et al. Seismic damage simulation and analysis of typical RC frames of Xuankou School [J]. Engineering Mechanics, 2011, 28(5): 71—77. (in Chinese)
- [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: 84—91.
Li Yingmin, Liu Liping. Disaster investigation and study report of Sichuan Wenchuan Earthquake [M]. Chongqing: Chongqing University Press, 2008: 84—91. (in Chinese)
- [4] Waters T. A study of the tensile strength of concrete across construction joints [J]. Magazine of Concrete Research, 1954, 6(18): 151—153.
- [5] Isao Ujike, Noriyoshi Yoshida, Shigekazu Morishita. Evaluation of mechanical properties of construction joint between new and old concrete under combined tensile and shear stresses [J]. Journal of the Society of Materials Science, Japan, 1998, 47(1): 73—88.
- [6] Mattock, Alan H. Cyclic shear transfer and type of interface [J]. Journal of the Structural Division, ASCE, 1981, 107(10): 1945—1964.
- [7] 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. (in Chinese)
- [8] 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, 118(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, 118(4): 46—48. (in Chinese)
- [9] 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. (in Chinese)
- [10] 李英民, 于婧, 夏洪流. 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, Xia Hongliu. Construction joint modeling and its application in nonlinear analysis of RC columns [J]. Journal of Civil, Architectural & Environmental Engineering, 2011, 33(5): 1—6. (in Chinese)
- [11] 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. (in Chinese)
- [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. (in Chinese)
- [13] Mazzoni S, McKenna F, Scott M H, et al. OpenSees users manual [Z/CP]. PEER, University of California, Berkeley, 2004.
- [14] 解琳琳, 叶献国, 种迅, 等. OpenSEES 中混凝土框架结构节点模型关键问题的研究与验证[J]. 工程力学, 2014, 31(3): 116—121.
Xie Linlin, Ye Xianguo, Chong Xun, et al. Research and verification on joint model of RC frame structure in OpenSEES [J]. Engineering Mechanics, 2014, 31(3): 116—121. (in Chinese)
- [15] Scott D B, Park R, Priestley M J N. Stress-strain behavior of concrete confined by overlapping hoops at low and high strain rates [J]. ACI Journal, 1982, 79(1): 13—27.
- [16] Zhao J, Sritharan S F. Modeling of strain penetration effects in bar-based analysis of reinforced concrete structures [J]. ACI Structural Journal, 2007, 104(2): 133—141.
- [17] 韩军. 建筑结构扭转地震反应分析及抗扭设计方法研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2009.
Han Jun. Study on torsional response analysis and torsion resistance design method of building structures under earthquake action [D]. Chongqing: Chongqing University, 2009. (in Chinese)