

doi: 10.11835/j.issn.1000-582X.2023.10.006

基于多尺度模型的装配整体式混凝土框架结构 抗震性能分析

张望喜^{a,b}, 王冠杰^a, 庞博^a, 易伟建^{a,b}

(湖南大学 a. 土木工程学院; b. 工程结构损伤诊断湖南省重点实验室, 长沙 410082)

摘要: 装配工艺的要求和连接接缝的引用使装配式混凝土结构的数值模拟分析面临新的挑战, 计算效率与模拟精度之间的矛盾变得更加突出。基于通用有限元软件 ABAQUS, 采用多尺度建模, 模拟分析了装配整体式混凝土框架结构的抗震性能。首先, 基于装配整体式混凝土梁柱子结构的试验数据, 验证了多尺度单元界面连接方法的正确性。然后, 对装配整体式混凝土框架结构的多尺度模型进行了静力推覆分析和动力弹塑性时程分析, 并与现浇混凝土框架结构的地震响应和损伤情况进行比较。结果表明, 多尺度建模能有效提高计算精度并降低计算成本, 很好地模拟装配整体式混凝土框架结构的破坏特征和整体结构的抗震性能; 与现浇结构相比, 装配整体式框架结构在单向静力推覆作用下抗侧刚度更小、延性更好, 在 7 度罕遇地震作用下抗震性能相近, 顶层最大位移增大了 3.8%; 多尺度建模方法可用于装配式混凝土结构分析。

关键词: 装配整体式框架; 多尺度模型; 静力推覆分析; 时程分析; 抗震性能

中图分类号: TU352.1

文献标志码: A

文章编号: 1000-582X(2023)10-061-10

Seismic performance analysis of monolithic precast concrete frame structure based on multi-scale model

ZHANG Wangxi^{a,b}, WANG Guanjie^a, PANG Bo^a, YI Weijian^{a,b}

(a. College of Civil Engineering; b. Hunan Provincial Key Lab on Damage Diagnosis for Engineering Structures, Hunan University, Changsha 410082, P. R. China)

Abstract: Due to assembly technology requirements and the introduction of connection seams, the numerical simulation and analysis of prefabricated concrete structures face new challenges. The trade-off between computational efficiency and simulation accuracy becomes increasingly apparent. Based on the general finite element software ABAQUS, in this study a multi-scale modelling approach is used to simulate and analyse the seismic performance of monolithic precast concrete frame structures. Firstly, the correctness of the interface connection method for multi-scale units is validated using experimental data from monolithic precast concrete beam and column substructure. Then, static pushover analysis and dynamic elastic-plastic time-history analysis are performed on the multi-scale model featuring a monolithic precast concrete frame structure. Subsequently, the seismic response and damage of this model are compared with those of a cast-in-place concrete frame structure.

收稿日期: 2021-06-10

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52078201)。

Supported by National Natural Science Foundation of China (52078201).

作者简介: 张望喜(1971—), 男, 教授, 博士, 主要从事装配式混凝土结构理论及应用研究, (E-mail)wxizhang2000@hnu.edu.cn。

The results show that multi-scale modeling effectively improves calculation accuracy and reduces calculation costs. It aptly replicates the failure characteristics of monolithic precast concrete frame structure and overall seismic performance. Compared with the cast-in-place structure, the monolithic precast frame structure exhibits lower lateral stiffness and superior ductility under unidirectional static forces. When subjected to a rare 7-degree earthquake, their seismic performance remains comparable, with a modest 3.8% increase in maximum top-floor displacement. Furthermore, this study underscores the applicability of the multi-scale modelling method in the analysis of prefabricated concrete structures.

Keywords: assembled monolithic frame; multi-scale model; static pushover analysis; time-history analysis; seismic performance

装配式混凝土结构由于具有产品质量好、施工效率高、能源消耗小、耗费人工少等方面的优点,成为我国在新的工业时代重点发展的主要结构体系之一^[1]。节点的构造形式决定了装配式结构的抗震性能以及施工效率,根据装配工艺的不同可分为湿式连接节点和干式连接节点^[2]。

目前,对装配式混凝土结构的试验研究集中在构件层面,如节点、单独的梁柱构件等^[3-4]。然而,构件层面的试验难以准确确定其边界条件,特别是地震等复杂的自然灾害荷载作用下其边界约束条件比较复杂,得到的构件抗震试验结果不能完全等同于其在整个结构中的抗震性能^[5]。有限元理论方法的快速发展及其在现代计算机的应用,使利用有限元软件对大型混凝土结构进行辅助抗震分析成为了可能。国内外学者通常采用实体单元或杆系单元的建模方式对装配式混凝土结构进行数值模拟分析。Kaya等^[6]基于ANSYS软件进行了预应力连接装配式节点的抗震性能分析;Hawileh等^[7]采用ANSYS软件的接触单元来模拟结合面的接触行为,考察了装配式节点性能对框架整体性能的影响;张锐^[8]基于Marc软件,采用弹簧单元模拟混凝土界面连接行为和界面处的连接钢筋,分析了楼板对框架结构的影响;谭平等^[9]基于OpenSees软件中的宏观节点模型分析了装配式隔震节点的滞回性能;祝辉庆等^[10]使用SAP2000软件对采用双线性弹簧单元模拟节点连接的装配式混凝土框架进行弹性时程分析,验证了这种简化节点连接模型的计算精度能满足一般工程要求。

实体单元能精确、直观地反映结构失效的微观破坏过程,但建模过程复杂,计算成本较大,难以用于复杂结构的分析;杆系单元使用方便,运算速度快,但只能得到结构的宏观反应,不能直观反映结构关键区域的受力状态。多尺度建模方法是在模型的关键区域采用精细模型,在非关键区域设置宏观模型,通过在界面处耦合两部分来模拟受力复杂的构件或结构^[11]。装配整体式混凝土框架结构节点在地震中处于复杂受力状态,往往是结构破坏的薄弱位置,且存在预制混凝土与现浇混凝土之间接触摩擦等局部高度非线性失效行为^[12],而其他采用如钢板焊接、螺栓连接、预应力等装配工艺的装配式节点也存在节点区域受力复杂的问题。因此,多尺度建模的策略适合用来分析装配式混凝土结构在地震中的破坏模式。近年来,多尺度计算开始逐渐应用于钢筋混凝土结构^[13]、木结构^[14]、钢框架结构^[15]、大跨度悬索桥^[16-17]等的结构分析。

基于多尺度模型,本研究从装配整体式混凝土梁柱子结构算例出发,借助ABAQUS有限元软件,验证了模型的有效性和准确性,进而对装配整体式框架结构进行抗震分析,并与现浇框架结构进行对比。通过求2种结构在静力推覆作用和动力时程作用下的地震反应和损伤情况,量化了地震作用对装配整体式框架结构和现浇框架结构的影响。

1 多尺度建模

不同尺度单元界面的有效连接是结构整体协同工作的关键。常用的连接类别^[18]有:1)梁单元与壳单元;2)梁单元与实体单元;3)壳单元与实体单元。由于连接界面处宏观模型的节点少,而精细模型的节点多,连接的关键是通过寻找合适的方法耦合不同单元类型节点的自由度来实现多尺度模型间的变形协调和力的传递。以图1中实体单元和梁单元的连接为例,设 $A(i=1,2,3,\dots,n-1,n)$ 为实体单元在连接界面的任意节点, B 为梁单元在连接界面的节点。节点 A_i 的位移为

$$[\delta] = [u'_{A_i} \ v'_{A_i} \ w'_{A_i}]^T \tag{1}$$

式中: u'_{A_i} 、 v'_{A_i} 和 w'_{A_i} 分别为节点 A_i 沿其局部坐标系 X' 、 Y' 和 Z' 坐标轴方向的位移。梁单元节点 B 的位移为

$$[\delta] = [u'_B \ v'_B \ w'_B \ \theta'_{Bx} \ \theta'_{By} \ \theta'_{Bz}]^T \tag{2}$$

式中: θ'_{Bx} 、 θ'_{By} 和 θ'_{Bz} 分别为节点 B 沿其局部坐标系 X' 、 Y' 和 Z' 坐标轴方向的转角。

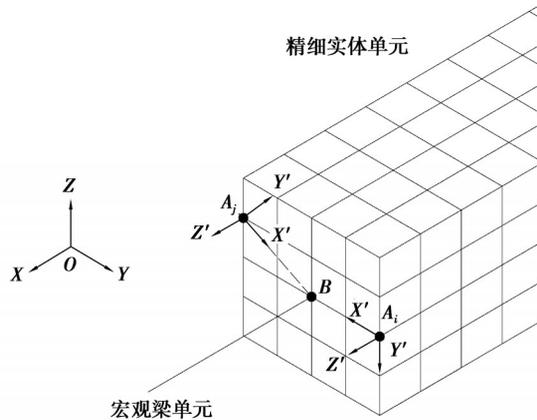


图 1 实体单元和梁单元界面节点关系

Fig. 1 Interface node relationship between solid element and beam element

可见,实体单元和梁单元在自由度上存在差异,梁单元节点 B 除了 3 个平动自由度外还存在 3 个方向的转动自由度。ABAQUS 软件中提供了一点控制多点的多点约束(MPC)方式,选择其中的梁单元类型约束,可以自动生成一个节点与多个节点之间的刚性梁,将第一个节点的位移和旋转约束作为其余多个节点的位移和旋转,同时耦合接触节点的自由度,从而实现不同尺度单元之间的变形协调,并确保轴力、弯矩和扭矩的正确传递^[9]。截面采用 MPC 梁单元类型约束的轴向变形和弯曲变形满足以下 n 个方程:

$$Z'_{A_i}(B) = 0 \quad (i = 1, 2, 3, \dots, n - 1, n) \tag{3}$$

式中, $Z'_{A_i}(B)$ 为 B 在 A_i 点局部坐标系下的 Z' 值。截面的扭转变形满足以下 n 个方程:

$$Y'_{A_i}(B) = 0 \quad (i = 1, 2, 3, \dots, n - 1, n) \tag{4}$$

式中, $Y'_{A_i}(B)$ 为 B 在 A_i 点局部坐标系下的 Y' 值。

2 多尺度模型验证

为验证装配式框架结构建模方法以及不同尺度单元连接方法的正确性,基于装配式梁柱子结构静力试验数据^[20]建立了有限元模型。该试验节点取自一栋 6 层框架结构,采用 2/3 的缩尺比例,对其中锚固方式为 90°弯钩的 PC-0-B 试件进行数值模拟分析。图 2 为 PC-0-B 试件的尺寸及配筋,梁和柱的混凝土强度等级为 C30;构件截面尺寸:柱 350 mm×350 mm,梁 200 mm×380 mm;纵筋为 HRB400,箍筋为 HPB300;具体材性见表 1。试验装置见图 3,在梁端分 2 个加载阶段进行单调加载:第 1 阶段为荷载控制加载,每级加载 5 kN 直至试件屈服;第 2 阶段为位移控制加载,每级加载 3 mm 直至试件破坏。

表 1 钢筋及混凝土材性特性

Table 1 Material properties of rebars and concrete

材料	E_s /GPa	f_y /MPa	f_u /MPa	ϵ_u	$f_{cu,m}$ /MPa
A8	210	390	561	0.083	
C18	200	503	622	0.059	
C20	200	482	625	0.070	
预制梁	32				37.4
现浇梁	32				34.2

注: E_s 为弹性模量, f_y 为钢筋屈服强度, f_u 为钢筋极限抗拉强度, ϵ_u 为钢筋极限应变, $f_{cu,m}$ 为混凝土抗压强度平均值。

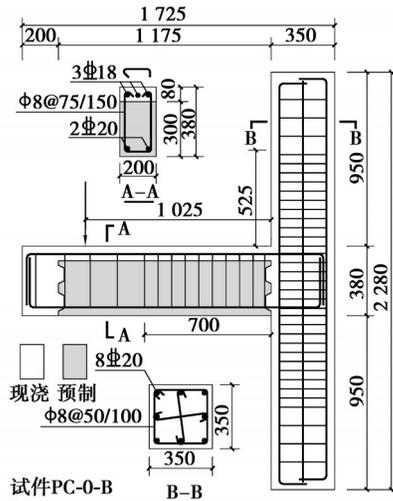


图2 试件PC-0-B尺寸及配筋(单位:mm)

Fig. 2 Size and reinforcement of PC-0-B specimen(unit:mm)

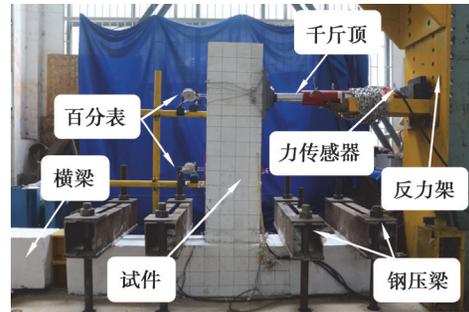


图3 试验加载装置

Fig. 3 Test setup

基于第1节的界面连接原理,在梁柱子结构破坏的关键节点区域用实体单元模拟,非关键区域的梁柱部分用梁单元模拟,通过 MPC 梁单元类型约束在连接界面处将梁单元的单一节点与实体单元的所有节点进行多点耦合。混凝土采用线性缩减积分单元 C3D8R 模拟,材料本构采用混凝土 CDP 模型,本构方程与损伤因子的计算采用《混凝土结构设计规范》(GB 50010-2010)^[21]附录 C 中的相关公式,泊松比取 0.2。钢筋采用桁架单元 T3D2 模拟,本构采用双折线模型,泊松比均取 0.3,通过 ABAQUS 提供的 Embedded 功能将钢筋嵌入到整个模型当中。预制梁端面和柱之间以及预制梁和现浇部分的叠合面之间采用接触对进行处理,在法线方向上采用硬接触,切线方向采用库伦摩擦模型。预制梁端面的摩擦系数取 1.4,预制梁-现浇层叠合面的摩擦系数取 1.0^[22]。宏观单元采用梁单元 B31 模拟,通过在 inp 文件中添加 *REBAR 语句在梁单元中插入钢筋,与混凝土形成统一截面。梁单元中混凝土和钢筋的本构模型通过调用 PQ-Fiber^[23]子程序,采用其中的 UConcrete02 和 USteel03 两组材料本构。

采用位移加载的方式对实体单元模型(entity unit model, EUM)和多尺度模型(multi-scale model, MSM)进行计算。文献[24]表明:在地震作用下,混凝土结构的梁、柱构件塑性铰长度约为 $0.4h \sim 1.4h$ (h 为构件截面高度)。因此,本文中建立了 4 个模型:EUM 和梁端计算破坏区 l_0 (连接界面到梁端距离)为 h 、 $1.5h$ 和 $2.0h$ 的 MSM-1、MSM-2 和 MSM-3,进行模拟计算,并与试验结果进行对比。装配整体式混凝土梁柱子结构的 EUM 和 MSM 有限元模型如图 4 所示,根据试验实际约束条件,缩短柱的长度以节省计算时间。

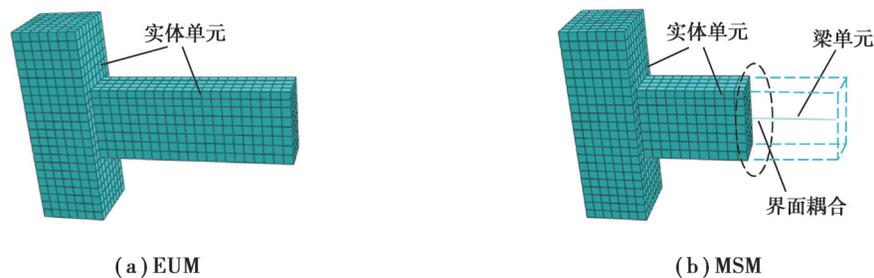


图4 有限元模型

Fig. 4 Finite element models

图 5 为模拟获得的荷载-位移曲线与试验的实测曲线对比。可见,EUM 的计算结果与试验结果吻合良好,屈服荷载稍大于试验值;MSM-1、MSM-2 和 MSM-3 三个模型的峰值荷载与 EUM 较接近,在弹性阶段,随着梁端计算破坏区减小,MSM 的刚度有逐渐增大的趋势。

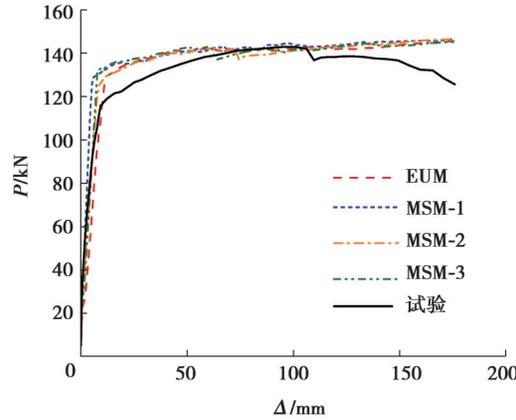


图 5 试件 PC-0-B 数值模拟与试验曲线对比

Fig. 5 Comparison of numerical simulation and experimental curves of PC-0-B specimen

表 2 为不同模型的计算结果及计算效率的对比分析。由表 2 可以看出,MSM 相对于 EUM 能够在保证足够的计算精度的前提下,尽可能地提高有限元分析的计算效率。MSM-2 花费时间较少,计算精度较高,这说明了当计算破坏区域合理时,多尺度模型可以在计算效率和计算精度之间取得平衡。由此可见,随着有限元计算模型增大,多尺度计算的优势越来越明显。

表 2 计算结果与计算效率对比

Table 2 Comparison of calculation results and calculation efficiency

类别	P_m /kN	误差/%	n	t /min
MSM-1	147.0	2.8	4 089	57
MSM-2	146.4	2.4	4 720	74
MSM-3	145.1	1.5	5 133	87
EUM	145.6	1.9	6 448	106
试验	142.9			

注: P_m 为峰值荷载,误差 = $\frac{\text{模拟值} - \text{试验值}}{\text{试验值}} \times 100\%$, n 为模型单元数量, t 为计算时间。

3 装配式混凝土框架结构多尺度模型

采用盈建科软件设计一栋简单规则的 6 层 4×2 跨装配整体式混凝土空间框架结构,取其中的一榀框架作为研究对象。框架按设防烈度 7 度(0.15g)、第一设计分组、II 类场地土、三级抗震等级进行设计。楼面恒荷载为 5.0 kN/m²,楼面活荷载为 2.0 kN/m²;屋面恒荷载为 7.0 kN/m²,活荷载 0.5 kN/m²;梁上线荷载取 16.0 kN/m。结构纵横向跨度为 5.4 m,首层层高 4.0 m,其余 5 层层高 3.6 m,建筑总高度 22.0 m;梁截面尺寸为 300 mm×500 mm,柱截面尺寸为 500 mm×500 mm,板厚为 150 mm。框架柱为现浇柱;框架梁为叠合构件,预制部分高 350 mm,后浇部分高 150 mm。第 1 层柱和第 2~6 层柱混凝土强度等级分别为 C40、C30;梁和板混凝土强度等级为 C30;梁、柱和板的纵筋为 HRB400,箍筋为 HPB300。该结构的平面布置如图 6 所示,取阴影区域的一榀框架进行计算。

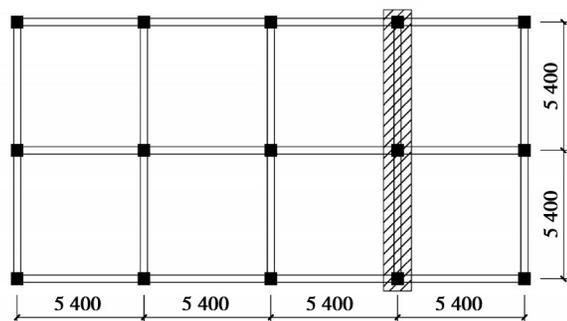


图 6 结构平面图(单位: mm)

Fig. 6 Structure layout plan(unit: mm)

使用第2节的建模方法分别建立了尺寸和配筋相同的装配式结构和现浇结构的多尺度模型,取框架梁、柱的实体单元计算范围为 $l_d=1.5h$,框架结构模型尺寸和配筋如图7。装配式框架结构模型中混凝土与钢筋本构、单元类型、相互作用等均与第2节所述相同;现浇混凝土结构的模拟方式与装配式框架结构的不同之处在于现浇混凝土不存在预制部分,没有预制部分和现浇部分之间的结合面,不需要设置接触行为。

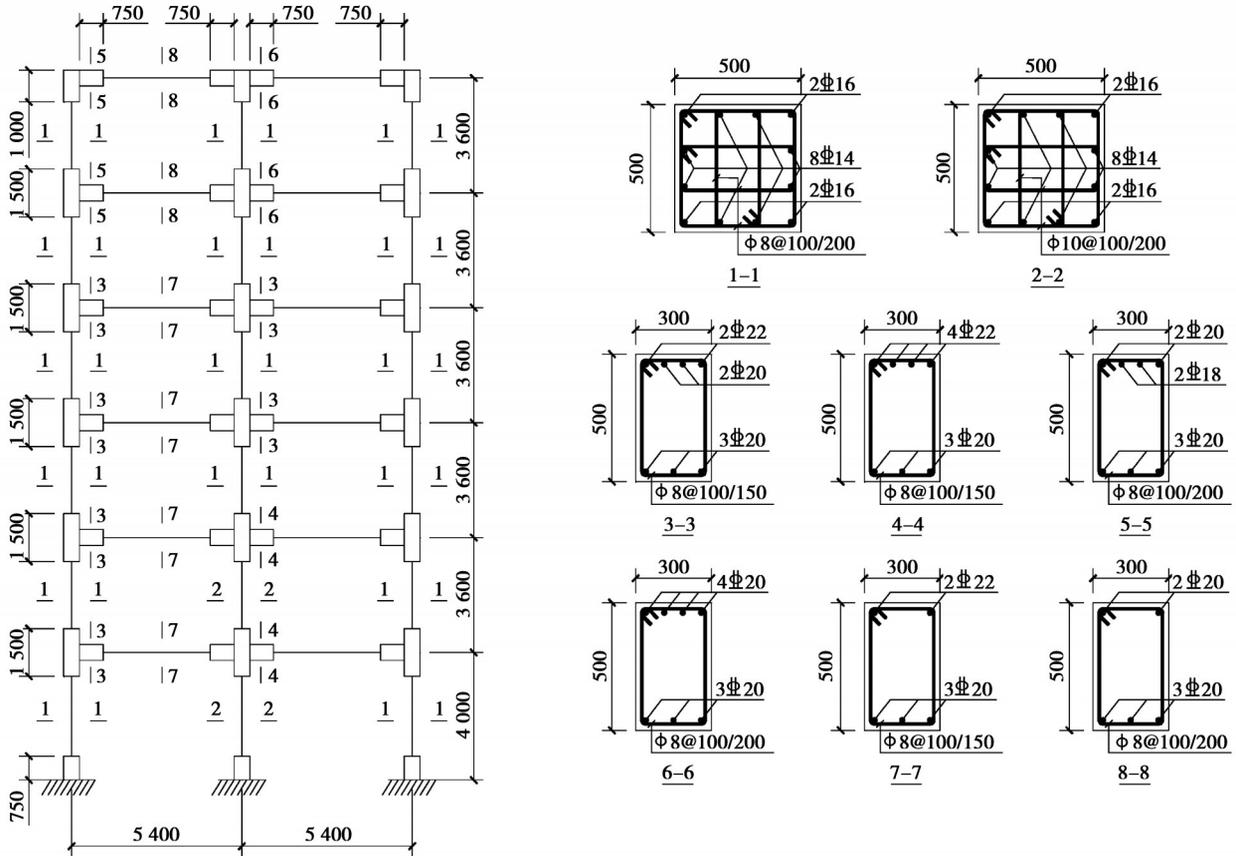


图7 装配整体式框架结构模型尺寸和配筋(单位: mm)

Fig. 7 Dimensions and reinforcement of monolithic precast reinforced concrete frame structure model(unit: mm)

4 主要计算结果及分析

4.1 模态分析

装配整体式混凝土框架结构和现浇混凝土框架结构的动力特性如表3所示,对2个模型的前6阶自振频率进行对比。从表3中可以看出,装配整体式混凝土框架结构和现浇混凝土框架结构的前6阶模态基本一致,频率相差最大值为3.7%,最小仅0.6%。装配式框架的自振频率略小于现浇框架,这是因为装配整体式节点存在新旧混凝土之间的连接接缝,导致结构的刚度偏小。

表3 框架结构自振频率对比

Table 3 Comparison of natural frequencies of frame structures

结构类型	f_1/Hz	f_2/Hz	f_3/Hz	f_4/Hz	f_5/Hz	f_6/Hz
装配式结构	0.728 1	2.302 7	4.218 3	6.514 9	9.039 6	9.231 1
现浇结构	0.755 7	2.379 2	4.333 2	6.652 4	9.190 5	9.286 7
相对差值	-3.7%	-3.2%	-2.7%	-2.1%	-1.6%	-0.6%

4.2 静力推覆分析

为了解结合面接缝对装配整体式框架抗侧刚度的影响,采用图8所示的倒三角形荷载分布模式和均匀荷载分布模式分别对装配整体式混凝土框架结构和现浇混凝土结构进行单向推覆分析。图9为分析得到的2种荷载分布形式下各模型的能力曲线。

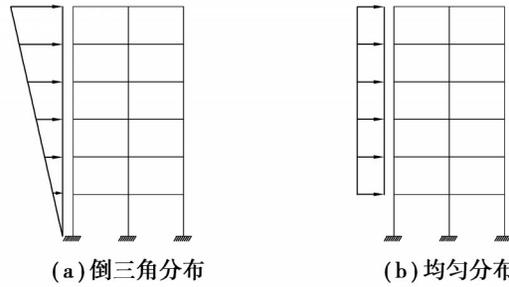


图 8 荷载分布模式

Fig. 8 Load distribution mode

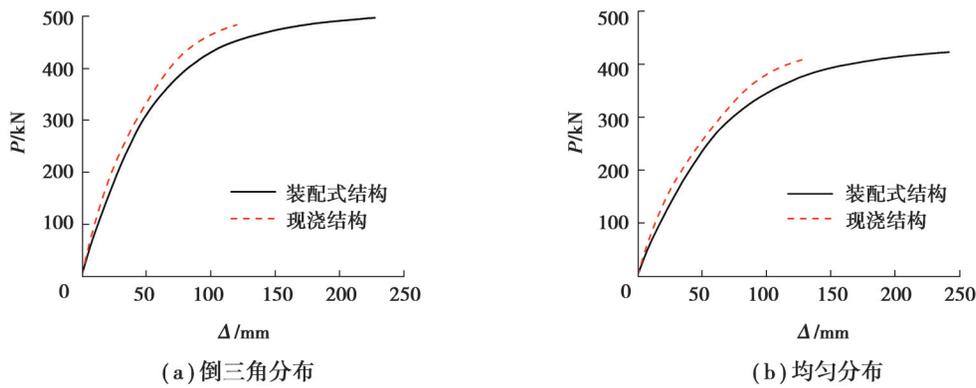


图 9 基底剪力-顶点位移曲线

Fig. 9 Curves of base shear force to top displacement

可见,荷载较小时,装配整体式混凝土框架结构和现浇混凝土框架结构的基底剪力与顶点位移呈线性关系;随着荷载增加,2种结构的静力抗侧刚度出现明显退化,装配整体式框架的静力抗侧刚度始终小于现浇框架。装配式框架在屈服点处的基底剪力更小,相应的顶点位移也更小。装配式结构和现浇结构在均匀荷载分布模式下的基底剪力最大值相较于倒三角分布模式降低了14.95%和15.57%。

4.3 结构动力时程分析

为进一步研究罕遇地震作用下2种框架结构的抗震性能,选取2条天然波(Chi-Chi地震波和Imperial Valley地震波)和1条人工波进行7度罕遇地震(310 gal)作用下的动力弹塑性时程分析,动力时程求解算法为Newmark-β法。各地震波的时程曲线均按照比例将峰值转换成310 cm/s²,结构阻尼比取0.05。提取各地震波输入20 s内2种框架模型顶层的位移,顶层位移时程曲线见图10,框架结构各层最大侧向位移见表4。

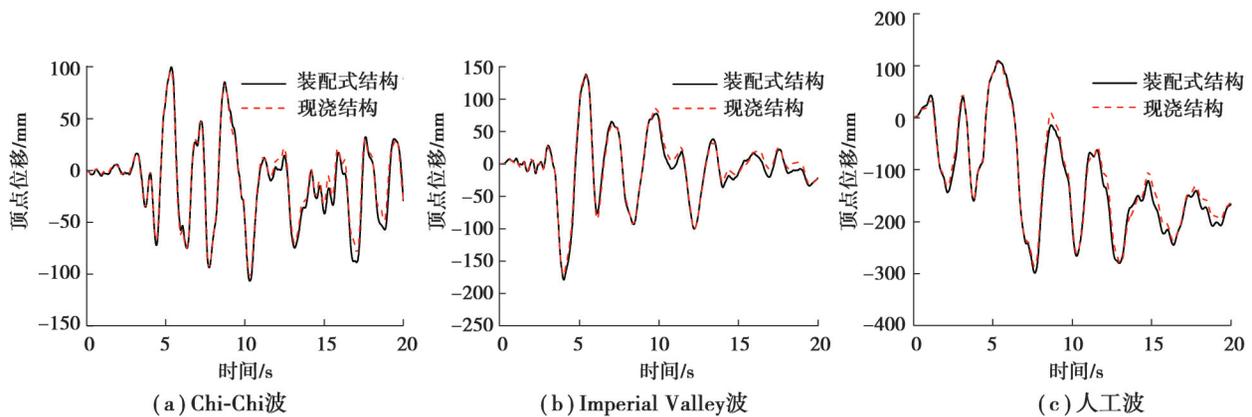


图 10 框架顶层位移时程对比

Fig. 10 Comparison of displacement time history of framework top floor

表4 框架结构各层最大侧向位移

Table 4 Maximum lateral displacement of each floor of frame structure		mm					
框架类型	地震波	第1层	第2层	第3层	第4层	第5层	第6层
装配式结构	Chi-Chi	25.42	49.39	69.47	84.77	99.16	106.43
	Imperial Valley	35.70	75.58	115.93	147.50	168.46	178.60
	人工波	88.37	163.28	227.14	267.52	290.35	298.47
现浇结构	Chi-Chi	22.30	43.42	67.49	82.48	94.87	102.75
	Imperial Valley	33.82	74.05	113.22	143.92	163.68	172.46
	人工波	87.31	158.82	217.17	257.03	278.95	286.25

可见,在地震输入的前8 s内,装配整体式框架的顶点位移与现浇结构的顶点位移基本一致,随着地震时长增加,装配整体式框架的顶点位移响应与现浇结构的顶点位移响应差距不断加大,这是因为在地震下装配整体式框架的损伤更大,其侧向刚度降低,变形增大。装配整体式框架结构相对于现浇结构,框架顶层最大位移平均值增大了3.8%。

各地震波作用下2个框架结构模型的各楼层最大层间位移角平均值的对比如图11所示。框架结构最大层间位移角平均值均出现在第2层,装配整体式结构的最大层间位移角平均值与现浇结构相比在第1、2、3层差距较大,在其他层数差距不太明显,最大层间位移角平均值在第1、2、3层相差达到了7.18%、3.80%、3.08%。

为进一步研究节点的破坏程度,选取装配整体式框架结构模型与现浇结构模型损伤明显的薄弱层节点(第2层中节点)进行分析。图12和图13分别为2种框架在Chi-Chi波作用20 s后的混凝土受拉损伤和受压损伤分布云图。可见,在相同地震荷载作用下不论是受拉还是受压,装配整体式节点的损伤程度均大于现浇节点,且节点破坏主要集中在梁端部,说明计算模型能够满足“强柱弱梁、强节点弱构件”的设计要求。现浇结构的混凝土损伤分布比较均匀,与之相比,装配整体式框架结构的混凝土损伤更多地集中在预制梁后浇部位。此外,从2种框架整体上看,1~3层节点的损伤程度大于4~5层节点,这说明需要特别重视1~3层节点的施工质量。

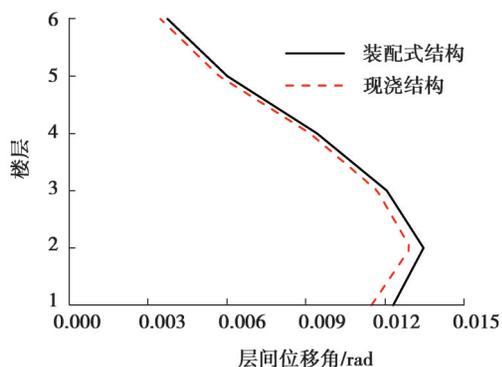


图11 最大层间位移角对比

Fig. 11 Comparison of maximum inter-story drift ratios

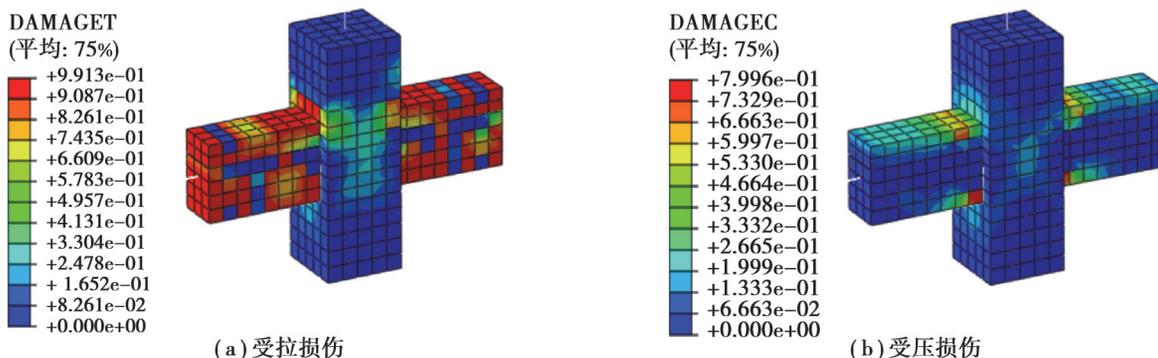


图12 装配式混凝土节点损伤云图

Fig. 12 Damage cloud of monolithic precast concrete joint

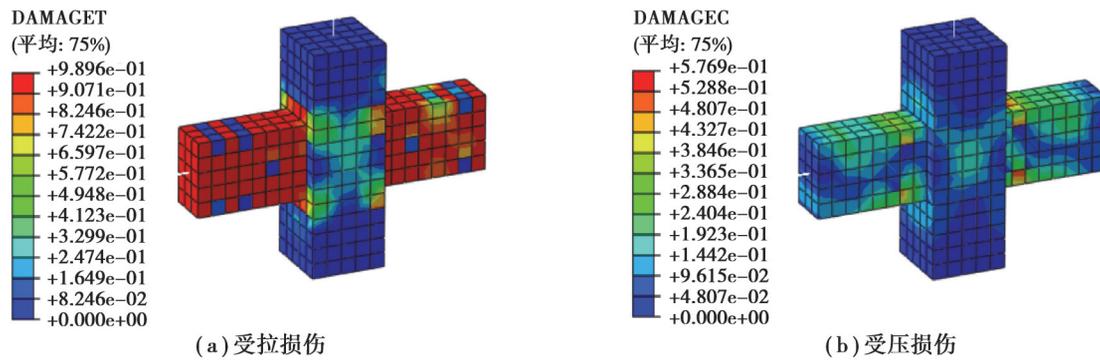


图 13 现浇混凝土节点损伤云图

Fig. 13 Damage cloud of cast-in-place concrete joint

随着装配式混凝土节点构造复杂性提高,形式越发多样,采用多尺度模型可以有效模拟不同节点形式的装配式混凝土结构整体抗震性能,同时可以直观反映装配式混凝土结构损伤演变、裂缝发展等过程,得到结构的薄弱部分以便于进一步改进设计方法。

5 结 论

基于多尺度建模对装配整体式混凝土节点和框架结构进行了数值模拟,分析了装配整体式框架结构和现浇混凝土框架结构在单向推覆作用和 7 度罕遇地震作用下的抗震性能,得出以下结论:

- 1) 通过算例验证可知多尺度建模方法可以正确模拟装配整体式混凝土结构的受力性能,能同时满足计算效率和计算精度的要求。
- 2) 静力弹塑性分析表明,装配整体式框架结构的静力抗侧刚度小于现浇结构;在不同荷载分布模式作用下,结构的基底剪力最大值差值为 15% 左右。
- 3) 动力弹塑性时程分析表明,在相同地震波作用下装配整体式框架结构的基本周期和动力特性与现浇结构相近,薄弱部位都位于第 2 层。装配整体式框架结构相对于现浇结构顶层最大位移增加了 3.8%,节点损伤更加严重。
- 4) 多尺度建模方法在装配式混凝土结构分析中具有较好的适用性。

参考文献

- [1] 王俊,赵基达,胡宗羽.我国建筑工业化发展现状与思考[J].土木工程学报,2016,49(5):1-8.
Wang J, Zhao J D, Hu Z Y. Review and thinking on development of building industrialization in China[J]. China Civil Engineering Journal, 2016, 49(5): 1-8. (in Chinese)
- [2] 吴刚,冯德成.装配式混凝土框架节点基本性能研究进展[J].建筑结构学报,2018,39(2):1-16.
Wu G, Feng D C. Research progress on fundamental performance of precast concrete frame beam-to-column connections[J]. Journal of Building Structures, 2018, 39(2): 1-16. (in Chinese)
- [3] Eom T S, Park H G, Hwang H J, et al. Plastic hinge relocation methods for emulative PC beam-column connections[J]. Journal of Structural Engineering, 2016, 142(2): 04015111.
- [4] Ghayeb H H, Razak H A, Sulong N H R. Development and testing of hybrid precast concrete beam-to-column connections under cyclic loading[J]. Construction and Building Materials, 2017, 151: 258-278.
- [5] 林旭川,陆新征,叶列平.钢-混凝土混合框架结构多尺度分析及其建模方法[J].计算力学学报,2010,27(3):469-475,495.
Lin X C, Lu X Z, Ye L P. Multi-scale finite element modeling and its application in the analysis of a steel-concrete hybrid frame [J]. Chinese Journal of Computational Mechanics, 2010, 27(3): 469-475,495. (in Chinese)
- [6] Kaya M, Arslan A S. Analytical modeling of post-tensioned precast beam-to-column connections[J]. Materials & Design, 2009, 30(9): 3802-3811.
- [7] Hawileh R A, Rahman A, Tabatabai H. Nonlinear finite element analysis and modeling of a precast hybrid beam - column connection subjected to cyclic loads[J]. Applied Mathematical Modelling, 2010, 34(9): 2562-2583.
- [8] 张锐.装配整体式混凝土框架结构受力性能试验与有限元分析[D].长沙:湖南大学,2015.

- Zhang R. Experimental and finite element analysis on the assembled monolithic reinforced concrete frame structure[D]. Changsha: Hunan University, 2015. (in Chinese)
- [9] 谭平,李洋,匡珍,等. 装配式隔震结构中隔震节点抗震性能研究[J]. 土木工程学报,2015,48(2):10-17.
Tan P, Li Y, Kuang Z, et al. Seismic behavior of isolation connection in assembled seismic isolation structure[J]. China Civil Engineering Journal, 2015, 48(2): 10-17. (in Chinese)
- [10] 祝辉庆,赵斌,吕西林. 装配式预制混凝土框架振动台试验数值模拟[J]. 武汉大学学报(工学版),2017,50(6):815-822.
Zhu H Q, Zhao B, Lv X L. Numerical simulation of shaking table test on a fabricated precast concrete frame structure[J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2017, 50(6): 815-822. (in Chinese)
- [11] 刘小娟,蒋欢军. 钢筋混凝土框架结构基于时变的抗震性能研究[J]. 建筑结构学报,2019,40(3):134-141.
Liu X J, Jiang H J. Study on time-dependent seismic performance of reinforced concrete moment-resisting frame structures[J]. Journal of Building Structures, 2019, 40(3): 134-141. (in Chinese)
- [12] 张望喜,邓俊杰,庞博,等. 现浇与装配整体式混凝土框架结构抗震屈服机制和影响因素分析[J]. 地震工程与工程振动, 2019,39(5):137-146.
Zhang W X, Deng J J, Pang B, et al. Analysis on yield mechanism and influence factors of cast-in-place and monolithic precast concrete frame substructure[J]. Earthquake Engineering and Engineering Dynamics, 2019, 39(5): 137-146. (in Chinese)
- [13] 巫文君,宋卫星,姜绍飞,等. 非延性框架结构多尺度建模与抗震性能分析[J]. 应用基础与工程科学学报,2018,26(6):1305-1315.
Wu W J, Song W X, Jiang S F, et al. Multi-scale modeling and seismic performance analysis on non-ductile frame structures[J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2018, 26(6): 1305-1315. (in Chinese)
- [14] 姜绍飞,吴铭昊,唐伟杰,等. 古建筑木结构多尺度建模方法及抗震性能分析[J]. 建筑结构学报,2016,37(10):44-53.
Jiang S F, Wu M H, Tang W J, et al. Multi-scale modeling method and seismic behavior analysis for ancient timber structures [J]. Journal of Building Structures, 2016, 37(10): 44-53. (in Chinese)
- [15] 石永久,王萌,王元清. 基于多尺度模型的钢框架抗震性能分析[J]. 工程力学,2011,28(12):20-26.
Shi Y J, Wang M, Wang Y Q. Seismic behavior analysis of steel frame by multi-scale calculation method[J]. Engineering Mechanics, 2011, 28(12): 20-26. (in Chinese)
- [16] Li Z X, Jiang F F, Tang Y Q. Multi-scale analyses on seismic damage and progressive failure of steel structures[J]. Finite Elements in Analysis and Design, 2012, 48(1): 1358-1369.
- [17] 聂建国,周萌,姬同庚,等. 基于多尺度模型的自锚式钢箱梁悬索桥主缆锚固区受力性能研究[J]. 土木工程学报,2014,47(6): 57-69.
Nie J G, Zhou M, Ji T G, et al. Study on behaviors of cable anchorage zone of self-anchored suspension bridges with steel box girders based on multi-scale modeling method[J]. China Civil Engineering Journal, 2014, 47(6): 57-69. (in Chinese)
- [18] 陆新征,蒋庆,缪志伟,等. 建筑抗震弹性分析[M]. 2版. 北京:中国建筑工业出版社,2015:73-77.
Lu X Z, Jiang Q, Miu Z W, et al. Elasto-plastic analysis of buildings against earthquake[M]. 2nd ed. Beijing: China Architecture & Building Press, 2015: 73-77. (in Chinese)
- [19] ABAQUS Inc. ABAQUS analysis user's manual[M]. American: ABAQUS Inc, 2008.
- [20] 张望喜,庞博,易伟建. 装配整体式混凝土梁-柱子结构角柱失效后承载能力试验研究[J]. 建筑结构学报,2020,41(11):68-78.
Zhang W X, Pang B, Yi W J. Experimental assessment on bearing capacity of monolithic precast concrete beam-column subassemblages under corner column removal scenarios[J]. Journal of Building Structures, 2020, 41(11): 68-78. (in Chinese)
- [21] 中华人民共和国住房和城乡建设部,国家质量监督检验检疫总局. 混凝土结构设计规范: GB/T 50010—2010[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2015.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China, General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. Code for design of concrete structures: GB/T 50010—2010 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2015. (in Chinese)
- [22] PCI Industry Handbook Committee. PCI design handbook[M]. 8th ed. Chicago: Precast/Prestressed Concrete Institute, 2017.
- [23] 曲哲,叶列平. 基于有效累积滞回耗能的钢筋混凝土构件承载力退化模型[J]. 工程力学,2011,28(6):45-51.
Qu Z, Ye L P. Strength deterioration model based on effective hysteretic energy dissipation for RC members under cyclic loading[J]. Engineering Mechanics, 2011, 28(6): 45-51. (in Chinese)
- [24] Bae S, Bavrak O. Plastic hinge length of reinforced concrete columns[J]. ACI Structural Journal, 2008, 105(3): 290.