

引文格式:陈浩,李宏男,付兴.装配式框架结构一致多尺度模拟方法与动力响应研究[J].建筑科学与工程学报,2024,41(6):49-60.
CHEN Hao, LI Hongnan, FU Xing. Study of concurrent multi-scale simulation method and dynamic response for precast concrete frame structure[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2024, 41(6): 49-60.

DOI:10.19815/j.jace.2023.02108

装配式框架结构一致多尺度模拟方法与动力响应研究

陈浩^{1,2}, 李宏男¹, 付兴¹

(1. 大连理工大学 建设工程学院, 辽宁 大连 116024; 2. 辽宁省建设科学研究院有限责任公司, 辽宁 沈阳 110052)

摘要:为了在有限算力下尽可能提高装配式框架结构的有限元分析精度,且对结构的局部损伤特性和整体结构响应开展并行分析,提出了一套应用于装配式混凝土框架结构的一致多尺度模拟方法。基于内聚力模型来考虑新旧混凝土的界面接触问题,采用组合多点约束法实现多尺度模型的界面连接;结合预制混凝土梁柱节点试验对该模拟方法的合理性进行了验证,并通过参数分析得出装配式混凝土框架结构节点区域细观尺度模型的合理取值范围;最后采用提出的一致多尺度模拟方法,分析了某装配式混凝土框架结构在地震作用下的动力响应。结果表明:不同尺度模型耦合界面宜取在新旧混凝土交界面之外,建议长度为 $h/3 \sim h$ (h 为梁高),距离灌浆套筒端部至少留出 $1/2$ 个套筒的长度;与宏观梁单元相比,采用一致多尺度模拟方法得到的结构整体响应更加精确且能够反映节点区域的真实塑性发展规律;提出的一致多尺度模拟方法可为复杂装配式混凝土结构的整体计算分析及关键节点的精细化仿真提供有效途径。

关键词:装配式混凝土结构;一致多尺度;内聚力模型;梁柱节点;动力响应

中图分类号: TU756

文献标志码: A

文章编号: 1673-2049(2024)06-0049-12

Study of concurrent multi-scale simulation method and dynamic response for precast concrete frame structure

CHEN Hao^{1,2}, LI Hongnan¹, FU Xing¹

(1. School of Infrastructure Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, Liaoning, China;

2. Liaoning Construction Science Research Institute Co., Ltd, Shenyang 110052, Liaoning, China)

Abstract: In order to maximize the accuracy of finite element analysis of precast concrete frame structures with limited computational resources as well as analyze the local damage characteristics and the overall structural response simultaneously, a concurrent multi-scale simulation method for precast concrete frame structures was proposed. The interface contact problem between new and old concrete was taken into account on the basis of the cohesive model and the interface connection of multi-scale model was realized by multi-point constraints method. The rationality of the simulation method was verified by comparing with the test of precast concrete beam-column joint. Besides, the reasonable value range of the fine-scale of precast concrete frame joint region was obtained by parameter analysis. Finally, the dynamic response of a precast concrete frame structure under seismic action was analyzed using the proposed concurrent multi-scale simulation

method. The results show that the coupling interface of different scale models should be taken outside the interface between new and old concrete, and it is recommended that the length should be $h/3-h$ (h is beam height), and at least $1/2$ of the grouting sleeve length should be left from the end of the grouting sleeve. The response of the structure obtained by the concurrent multi-scale simulation method shows advantages in simulation precision and can reflect true plastic development law of the joint compared with the macroscopic beam element. The proposed concurrent multi-scale simulation method can provide an effective approach for the overall analysis of complex precast concrete structures and the precise simulation of key joints.

Key words: precast concrete structure; concurrent multi-scale; cohesive model; beam-column joint; dynamic response

Author resume: FU Xing(1988-), male, PhD, associate professor, E-mail: fuxing@dlut.edu.cn.

0 引言

装配式建筑具有低碳节能、施工高效等优点^[1-2],近年来已经在很多国家得到推广与应用^[3-4]。目前中国装配式混凝土结构多采用“等同现浇”的设计理念,但与现浇结构相比^[5-6],其构件连接节点受力更为复杂,且连接节点的设计及评价方法暂未形成完整体系,故开展关于装配式结构节点区域的受力性能及破坏机理研究具有重要意义^[7-9]。

由于进行足尺结构抗震性能试验存在成本较高、不确定因素较多、受到场地及试验条件限制等客观情况,数值模拟方法逐渐成为本领域的重要研究手段^[10-11]。张微敬等^[12]采用实体单元对 2 个两层两跨装配式框架试件在低周往复荷载作用下的试验进行非线性数值模拟,所得结果与试验结果吻合较好,证实了有限元模拟方法的有效性,但对于大型复杂结构,在结构抗震计算中往往需要进行更复杂的动力分析^[13-14],采用实体单元进行精细化模拟会造成算力的浪费,导致计算效率低下。耿方方等^[15]采用纤维梁单元模型对 4 种节点域刚度下的装配整体式钢筋混凝土 5 层框架结构进行弹塑性时程分析,验证了在进行装配式混凝土框架结构抗震计算时考虑节点刚域的重要性,但是其纤维模型是基于节点连接区保持弹性变形的假定建立的,且要实现节点区域的塑性发展规律、破坏模式等精细化模拟也较为困难。马哲昊等^[16]提出了一种人工耗能塑性铰装配式混凝土框架节点,结果表明数值模拟可以准确反映节点的滞回曲线、塑性应变等抗震性能指标,但是未将其应用到整体结构实例中,没有还原节点在地震作用下的真实复杂受力状态。综合以上问题,在有限计算资源下,若要同时实现整体结构计算和关键节点区域精细化分析,可采用结构多尺度模

拟方法^[17-18]。

目前国内外众多学者已经针对结构多尺度模拟方法开展了一系列研究。李宏男等^[19]基于多尺度模拟方法对钢筋混凝土框架和剪力墙结构进行了弹塑性分析;李兆霞等^[20]基于 ABAQUS 有限元软件研究了大跨结构在多尺度模拟中的众多技术问题和关键理论;林旭川等^[21]提出不同尺度模型之间的界面连接方法,给出了轴向、横向和转角的约束方程并对其合理性进行了验证;刘超洋等^[22]对组合多点约束方法进行了优化,提出了基于位移和能量的组合多点约束法;Bin 等^[23]采用多尺度方法来模拟大型混凝土结构从局部损伤和失效到结构全局劣化的全过程。

结构多尺度模拟方法虽然已经有了一定的研究成果,在多个领域得到广泛应用,但目前在装配式建筑结构计算中的应用还较少^[24]。马青萍等^[25]结合试验建立了一榀装配整体式钢筋混凝土框架结构的多尺度有限元模型,验证了多尺度模型在装配式建筑应用中的有效性和可行性;陈吉光等^[26]对基于内聚力模型建立的预制钢筋混凝土柱多尺度模型进行了低周往复加载,证明了内聚力模型可以很好地应用于预制构件界面接触的模拟;周新粤^[27]通过对一榀预应力装配式框架进行有限元分析,证明了多尺度模型与三维实体有限元模型分析精度相近,但分析效率却提升了 40%。已有的研究大多为对平面装配式结构多尺度模型的高效性和合理性进行验证,尚未形成全面、系统的模拟方法来研究装配式框架节点区域细观尺度模型的合理取值范围、灌浆套筒对局部损伤的影响、多尺度模型在空间框架结构中的真实地震表现等,而这些因素对多尺度方法在装配式框架结构真实案例中的应用又是至关重要的。

综上,本文提出了一套应用于装配式混凝土框架结构的一致多尺度模拟方法,并围绕该方法开展了相关研究工作:基于预制装配式梁柱节点试验建立多尺度有限元模型,验证本文一致多尺度模拟方法的准确性;对多尺度模型关键节点区域的细观尺度范围进行参数分析并给出合理建议;以某 5 层装配式混凝土空间框架结构为例,分别采用宏观梁单元模型和多尺度模型对其进行动力时程分析,验证了多尺度模型在整体结构计算和局部精细分析中的优越性。

1 装配式框架结构一致多尺度模拟方法

1.1 一致多尺度模拟方法框架

结构多尺度模拟方法主要有信息传递多尺度和一致多尺度两种思路,其区别在于是串行计算还是并行计算。信息传递多尺度为串行计算,即将宏观尺度结构在截断界面的边界信息施加给细观尺度模

型进行二次分析;而一致多尺度则是对多个尺度模型进行并行计算,其信息传递是相互的。本文采用一致多尺度模拟方法,按照不同的研究需求将结构划分为不同的区域进行研究,将节点等需要重点分析的关键构件建立细观尺度模型,将其他区域建立宏观尺度模型,然后将不同尺度的模型进行界面连接,实现并行计算分析,以达到兼顾结构整体计算和关键构件精细化分析的目的。

本文提出的结构一致多尺度模拟方法全面考虑了装配式混凝土框架结构多尺度模拟方法的影响因素,包括细观尺度模型取值范围、新旧混凝土界面接触、钢筋混凝土黏结滑移以及多尺度模型的界面连接等,主要流程如图 1 所示。首先根据研究需求和本文建议的不同尺度模型耦合界面取值范围进行区域划分,建立不同尺度模型,其中宏观尺度模型采用纤维梁单元,细观尺度模型采用实体单元,然后通过组合多点约束(MPC)方法进行界面连接,从而实现整个多尺度模型的并行计算分析。

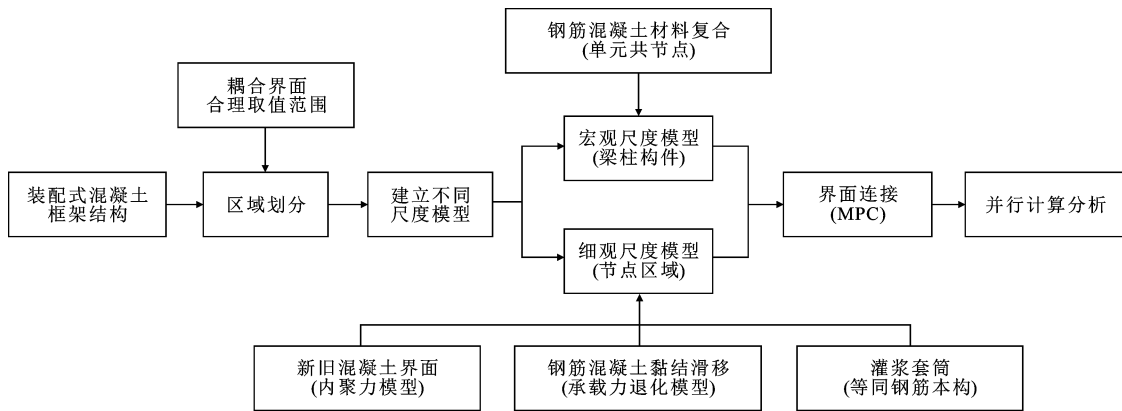


图 1 一致多尺度模拟方法

Fig. 1 Concurrent multi-scale simulation method

在装配式框架结构多尺度模型的计算分析中,界面处理方式对精度至关重要,其主要包括不同尺度模型的界面连接和新旧混凝土的界面接触,下文将对此进行详细阐述。

1.1.1 不同尺度模型的界面连接

目前多尺度界面连接方式采用较多的为基于位移协调或做功相等的多点约束法,本文采用的 MPC 多点约束方法为 ABAQUS 有限元软件内置的界面连接方法。其中常用的 MPC 多点约束方式有线性约束、二次型约束、梁约束等多种类型。线性约束中节点 p 的每个自由度由节点 a 和节点 b 处的相应自由度线性内插得到,二次型约束中节点 p (p_1 或 p_2) 的每个自由度由节点 a 与 b 或者节点 b 与 c 处的相应自由度二次插值得到,如图 2 所示。

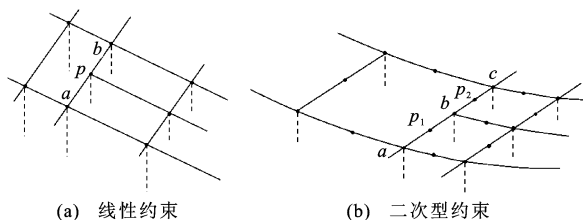


图 2 MPC 多点约束方式

Fig. 2 Multi point constraints of MPC

细观尺度和宏观尺度连接处采取的 MPC 多点约束示意图如图 3 所示,细观尺度模型中实体单元每个单元节点有 3 个自由度 $\{u_{1S}, u_{2S}, u_{3S}\}$,宏观尺度模型中梁单元每个节点包含 6 个自由度 $\{u_{1B}, u_{2B}, u_{3B}, u_{4B}, u_{5B}, u_{6B}\}$ 。在 2 种尺度模型界面连接处需要完成应力和位移的传递。其连接原理为通过宏观

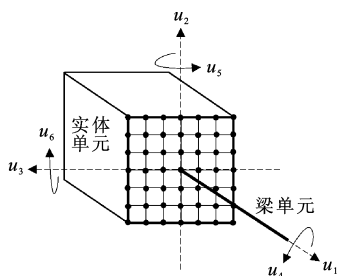


图3 实体单元与梁单元界面连接示意图

Fig. 3 Schematic diagram of interface connection between solid element and beam element

单元节点和精细单元节点在界面处的位移协调来建立多点约束方程,根据构件截面变形形式和截面尺寸自动确定具体系数和函数形式,通用形式为

$$c(u_s, u_B) = u_s - C u_B = 0 \quad (1)$$

式中: u_B 为宏观单元界面连接处的位移向量; u_s 为精细单元界面连接处的位移向量; C 为界面约束方程的系数矩阵。

在弯矩、剪力、轴力共同作用下,多尺度模型界面连接处将发生变形,将式(1)展开,根据具体协调关系可得具体约束方程,如式(2)所示。

$$\left. \begin{aligned} u_{1Si} - f_{1i}(u_{1B}, u_{5B}, u_{6B}, b_i, h_i \dots) &= 0 \\ u_{2Si} - f_{2i}(u_{2B}, u_{4B}, b_i, h_i \dots) &= 0 \\ u_{3Si} - f_{3i}(u_{3B}, u_{4B}, b_i, h_i \dots) &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

式中: b_i 、 h_i 分别为截面宽度和高度; f_{1i} 、 f_{2i} 、 f_{3i} 分别为第 i 节点处 3 个不同自由度方向的位移关系函数。

1.1.2 新旧混凝土界面接触

采用基于面的内聚力模型来考虑新旧混凝土连接界面的复杂受力性能,该模型可以通过定义界面切向及法向的接触应力-位移(τ - δ)本构来模拟混凝土界面的黏结性能,如图 4 所示。当接触面切向及法向的应力达到峰值应力 τ^0 ,相对界面位移达到 δ^0 时,黏结界面发生损伤,相应方向的刚度 K 开始退化, δ^f 为接触界面完全破坏时的相对位移,围成的面积 G 为界面破坏所需要的能量。

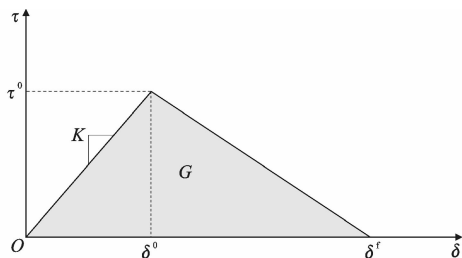


图4 内聚力模型

Fig. 4 Cohesive model

新旧混凝土接触面切向及法向本构采用不耦合的方式定义。对于切向,内聚力模型涉及到的峰值应力、弹性刚度、破坏准则等各项参数可根据试验曲线及界面强度计算公式确定;对于法向,黏结界面的应力-位移关系与混凝土轴拉应力-裂缝宽度关系类似,可参考混凝土断裂能计算公式确定相关参数^[28]。

1.2 有限元模型材料本构

实体单元混凝土本构选用混凝土塑性损伤模型,其在受压和受拉状态下的应力-应变关系曲线根据《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2010)^[29]进行计算,受压应力-应变取值取至极限应变附近。

钢筋本构模型选用考虑承载力退化的 Clough 模型^[30-31],该本构模型可通过定义强度退化模型来考虑累积损伤引起的钢筋混凝土构件的受弯承载力退化,从而反映钢筋和混凝土之间的黏结滑移以及混凝土的剥落等综合退化效果^[32]。

灌浆套筒在众多试验研究^[33]和实际工程中并未产生较大变形,且不是引起结构破坏的关键构件,故本构选用钢筋的双折线模型,而灌浆料选用混凝土塑性损伤模型。

纤维梁单元混凝土的本构选用考虑抗拉强度的混凝土模型^[31]。此外,为了实现纤维梁单元混凝土和钢筋 2 种材料的复合,将钢筋等效为相同面积的箱型截面,并采用单元共节点的方法来实现复合。

2 多尺度方法验证及参数分析

2.1 梁柱节点有限元模型

文献[34]开展了钢筋混凝土预制装配梁柱节点(PBCJ-1)的低周往复加载试验,试件几何尺寸和配筋如图 5 所示。预制构件混凝土设计强度为 C30,后浇区混凝土设计强度为 C40,梁柱纵向钢筋采用 HRB335,箍筋均采用 HPB300。加载方式采用梁端加载,由力和位移联合控制,先在柱端施加轴向荷载,轴压比为 0.3,然后在梁端施加竖向大小相等、方向相反的循环荷载。

采用第 1 节提出的结构一致多尺度模拟方法,基于 ABAQUS 有限元分析软件建立试件 PBCJ-1 的多尺度模型(图 6)和纤维梁单元模型。

2.2 结果分析

图 7 展示了 PBCJ-1 多尺度模型和梁单元模型数值模拟得到的滞回曲线与试验^[34]得到的滞回曲线,可以看出模拟结果与试验结果整体基本吻合。梁单元模型在加载后期承载力降低不明显,且刚度退化缓慢。原因可能为梁单元模型直接采用共节点

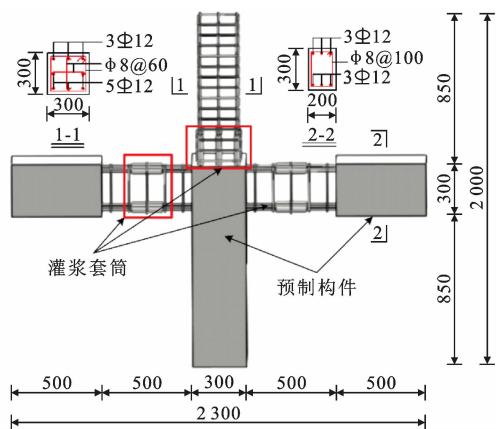


图 5 PBCJ-1 几何尺寸和配筋(单位:mm)

Fig. 5 Dimensions and reinforcement of PBCJ-1 (unit:mm)

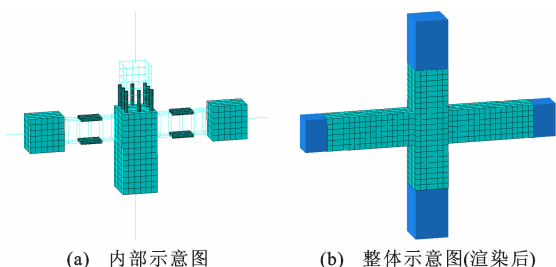


图 6 PBCJ-1 多尺度模型

Fig. 6 Multi-scale model of PBCJ-1

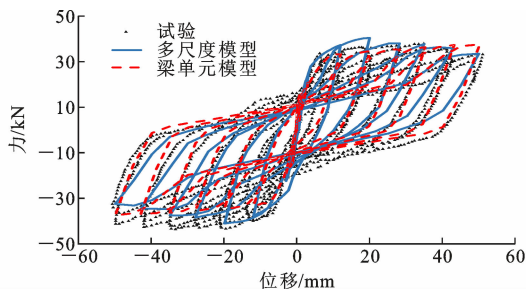


图 7 试验与模拟滞回曲线

Fig. 7 Hysteresis curves of experiment and simulation

的方式建模,为完全刚性节点,无法模拟节点核心区的损伤,导致损伤只能发生在梁或柱端,从而不能准确反映梁柱节点进入塑性后的力学性能。

在多尺度模型模拟过程中,灌浆套筒端部与梁柱交界面处首先出现竖向裂缝;继续加载,裂缝逐渐向梁中扩展,随后梁端裂缝贯通,核心区出现斜向裂缝;最终裂缝主要分布在梁柱相交界面、灌浆套筒两端和距柱端 500 mm 截面处,如图 8(a)所示;加载后期,梁端发生混凝土压溃破坏,如图 8(b)所示。由以上模拟结果可以得出,梁柱节点多尺度模型在模拟过程中的损伤演化过程与试验现象^[34]基本一致。梁单元模型的模拟结果不能合理反映试验现象,其

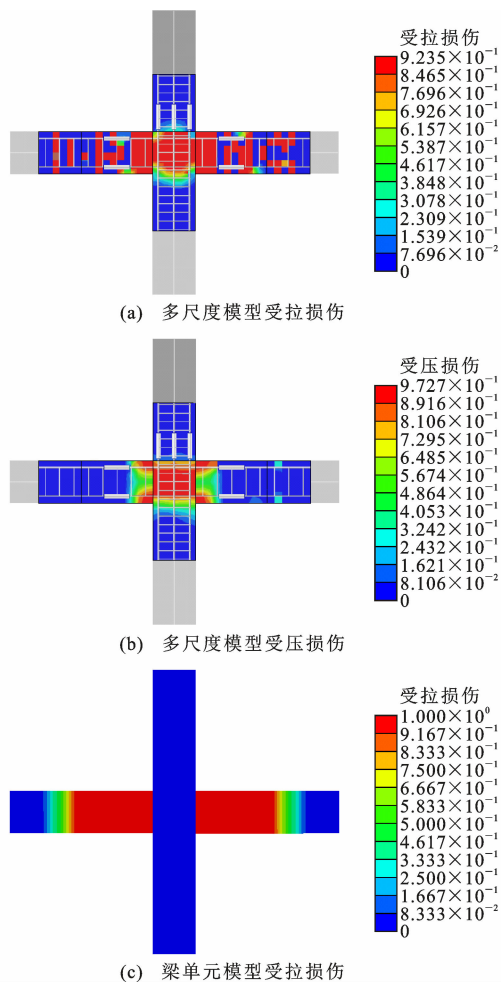


图 8 PBCJ-1 有限元模型损伤

Fig. 8 Damage in PBCJ-1 finite element model

损伤表现为从接近柱端向梁中部逐渐扩展,且难以模拟节点核心区的塑性发展,如图 8(c)所示。

综上,针对钢筋混凝土装配式框架结构,宏观梁单元模型虽然具有计算效率高、建模简单等优点,但却不能准确反映梁柱节点进入塑性后的力学性能、节点核心区的损伤及破坏机理、新旧混凝土交界处的接触等问题。多尺度模型可以准确反映预制装配梁柱节点的滞回性能,很好地模拟灌浆套筒造成的梁端刚度不均匀、新旧混凝土界面接触等问题,还原结构的细观破坏过程。因此对于大型复杂预制装配式结构,宜采用一致多尺度模拟方法,从而更加合理、高效地同时模拟装配式框架结构关键构件的局部破坏和整体行为。

2.3 参数取值范围讨论

目前关于装配式框架节点区域细观尺度的取值范围,都是根据经验划分,暂无具体的相关研究。本文结合试验^[34]中装配式梁柱节点的特性,对节点区域细观尺度的取值范围进行了参数分析,并给出合

理建议,为装配式框架结构的多尺度模拟提供参考。

由文献[34]中试验现象描述及本文数值模拟结果(图8)可知,影响装配式梁柱节点受力性能及损伤演化的原因主要是梁端刚度不均匀,具体为灌浆套筒的存在使相应截面位置刚度增大以及新旧混凝土的界面连接位置刚度稍弱。因此,多尺度模型中的精细化部分宜包含现浇区以及灌浆套筒所在区域。为此,本文建立了4个细观尺度模型取值范围不同的梁柱节点多尺度模型,其实体预制梁长度分别取100、200、300、400 mm;柱端因影响不大取固定值400 mm,剩余预制部分采用梁单元。

通过对上述4个梁柱节点多尺度模型进行模拟,得到滞回曲线和损伤,分别如图9、表1所示。对比可知,4个多尺度模型模拟结果并无太大差异,且均与试验[34]结果吻合较好。此外,由表1中多尺度模型实体单元部分的受拉损伤和梁单元部分的受

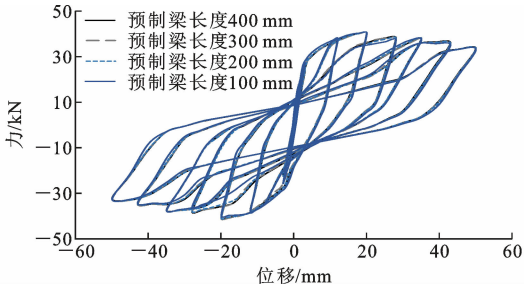


图9 4种多尺度模型滞回曲线

Fig. 9 Hysteresis curves of four multi-scale models

拉损伤系数可知,在梁端预制梁长度取400 mm和300 mm时,梁单元部分受拉损伤系数为0,对应实体单元区域也无受拉损伤;在预制梁长度取200 mm和100 mm时,梁单元部分存在受拉损伤系数不为0的区域,而对应实体单元区域也存在相应受拉损伤,说明梁单元模型和实体单元模型在合理模拟范围内可以达到相同的损伤模拟效果。

表1 多尺度模型损伤

Table 1 Damage clouds of multi-scale models

实体单元预制梁长度/mm	受拉损伤云图(7 s)	受拉损伤云图(20 s)	受拉损伤系数(20 s)	受压损伤云图(20 s)
400(4h/3)				
300(h)				
200(2h/3)				
100(h/3)				

注:h为预制梁的梁高。

通过对比表1中多尺度模型的损伤可知,只要宏观模型和细观模型耦合界面取在新旧混凝土接触面外(不含套筒端),则预制梁精细化模型的取值长度对多尺度模型模拟结果并无太大影响,长度取至 $h/3$ 时可以合理模拟节点区域的损伤,而长度

取至 h 时基本可以涵盖节点区域的所有塑性损伤。此外,灌浆套筒的位置会直接影响裂缝的分布,由损伤云图可知灌浆套筒的影响区域大约为其长度的一半。

综上,对于采取灌浆套筒进行湿连接的预制装

配式梁柱节点多尺度模型,建议宏观梁单元和实体单元耦合界面最好同时满足以下 2 个条件:①取在新旧混凝土交界处之外,建议取值为 $h/3 \sim h$;②距离灌浆套筒端部至少留出 $1/2$ 个套筒的长度。

3 地震作用下装配式框架动力响应分析

3.1 模型信息

以某 5 层预制装配式钢筋混凝土框架结构为例进行动力时程分析,具体建筑尺寸如图 10 所示。预制构件混凝土设计强度为 C30,后浇区混凝土设计强度为 C40,纵筋采用 HRB400 级钢筋,箍筋采用 HRB335 级钢筋,预制梁柱节点拆分方式同试验^[34]一致,预制构件通过灌浆套筒进行湿连接。

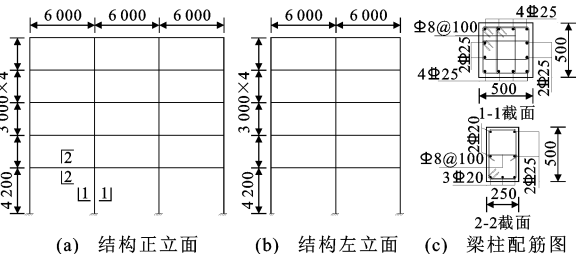


图 10 框架结构尺寸和配筋图(单位:mm)

Fig. 10 Dimensions and reinforcement of frame structure (unit:mm)

为了选取引起结构破坏的关键梁柱节点,建立了装配式混凝土框架结构的梁单元有限元模型,并对其进行动力时程分析。选取 Northridge 地震波,作用时长取前 20 s,时间间隔 0.02 s,按照 8 度设防下的罕遇地震进行计算,沿建筑长轴方向施加地震动,加速度峰值为 $400 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-2}$ 。

模拟结果如图 11 所示,其中红色区域为最先屈服的混凝土截面,故选取位于二层中部的 4 个梁柱节点作为关键构件,建立预制装配式框架结构多尺度模型,如图 12 所示。

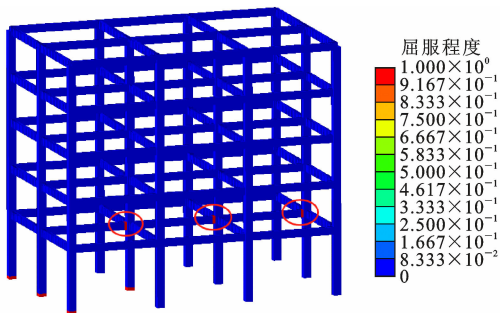


图 11 混凝土屈服截面(渲染剖面后)

Fig. 11 Yield section of concrete (after rendering section)

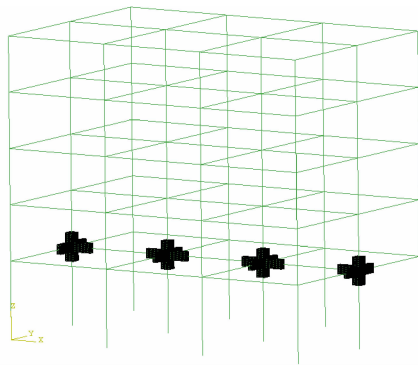


图 12 预制装配式框架结构多尺度模型

Fig. 12 Multi-scale model of precast concrete frame structure

3.2 结构振动特性

对装配式框架结构的宏观梁单元模型与多尺度模型进行结构振动模态及固有频率分析,得到前 3 阶振型,如图 13 所示,前 5 阶固有频率见表 2。由表 2 可知,2 种模型的自振频率值最大差异仅为 0.95%。结果表明,2 种模型振动频率和模态形状吻合良好。

3.3 动力响应分析

对梁单元模型和多尺度模型进行 8 度设防烈度下多遇地震和罕遇地震作用下的动力时程分析,加速度峰值分别设为 $70、400 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-2}$,地震波选取 Northridge 地震波,作用时长取前 20 s,如图 14 所示。为便于说明梁端的局部动力响应,本文给出了多尺度模型梁端截面示意图,如图 15 所示。

在多遇地震作用下,宏观梁单元模型和多尺度模型的顶层位移时程曲线如图 16 所示,通过对比可知,二者基本吻合。此外,2 种模型的梁端截面弯矩时程曲线也基本一致,本文以 C-C 截面弯矩时程曲线为例进行展示,如图 17 所示。对于 2 种模型时程曲线中地震响应峰值所对应时刻的细微差异,可能是由于 2 种模型自振频率的误差在地震作用后的累积导致,但对分析结果并无太大影响。通过分析模拟结果发现结构基本未进入塑性,说明结构未产生较大塑性变形时,2 种模型的整体地震响应无较大差异,再一次验证了本文一致多尺度模拟方法的准确性。

在罕遇地震作用下,2 种模型的顶层位移时程曲线如图 18 所示,梁端弯矩时程曲线如图 19 所示。通过对比可知,在经历过第一个较大的地震波峰(图 14 中 6.5 s)之前,二者时程曲线基本吻合,之后时程曲线虽然变化趋势整体一致,但数值上开始出现一定差异。分析原因可能是在经历较大地震作用之

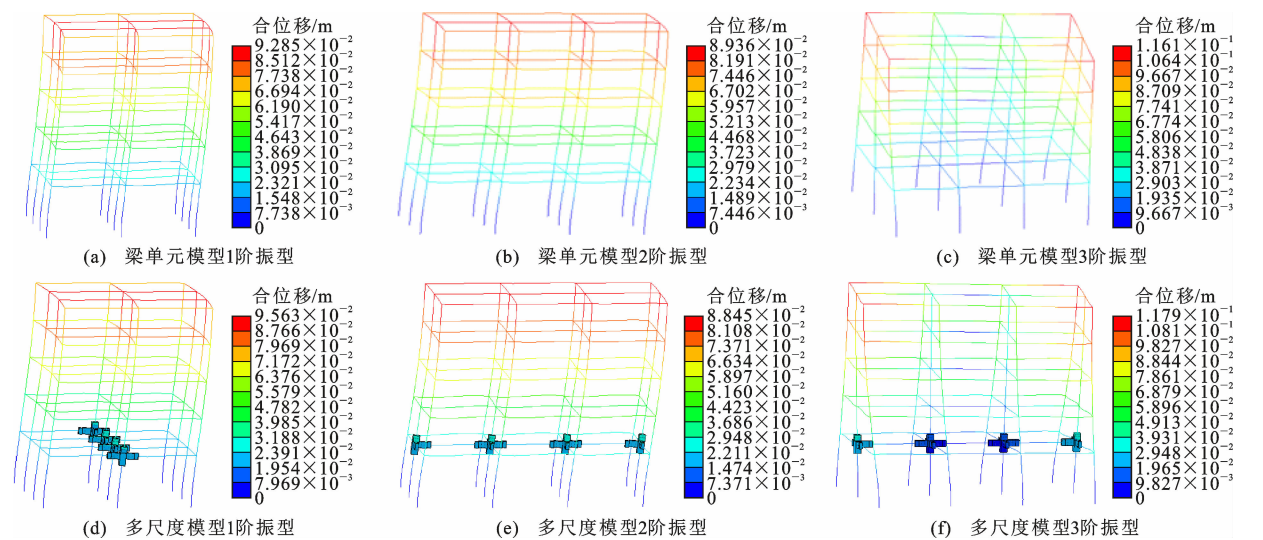


图 13 前 3 阶振动模式

Fig. 13 The first three vibration modes

表 2 有限元模型自振频率

Table 2 Natural frequency of finite element model

模型类别	1 阶频率/Hz	2 阶频率/Hz	3 阶频率/Hz	4 阶频率/Hz	5 阶频率/Hz
梁单元模型	2.423 1	2.525 2	2.730 3	3.589 4	4.119 6
多尺度模型	2.407 7	2.513 9	2.704 3	3.575 0	4.099 5

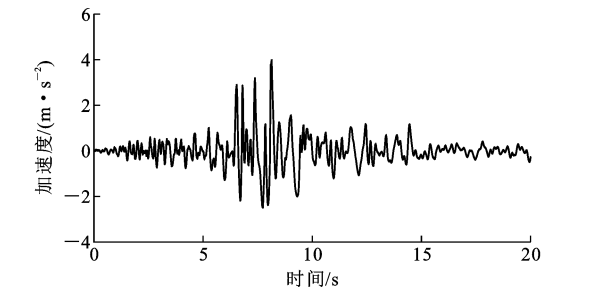


图 14 Northridge 地震波 (20 s)

Fig. 14 Northridge seismic wave (20 s)

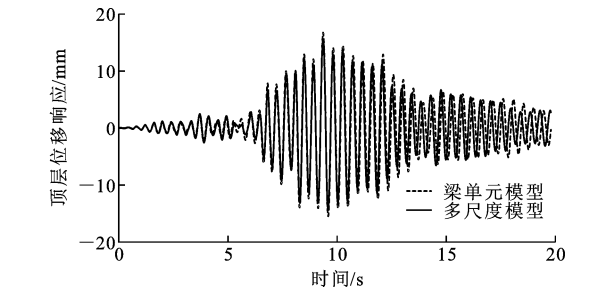


图 16 多遇地震下结构顶层位移时程曲线

Fig. 16 Time-history curves of top displacement under frequent earthquake

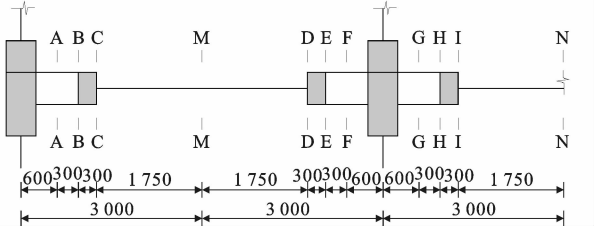


图 15 多尺度模型梁端截面示意图 (单位:mm)

Fig. 15 Schematic diagram of beam section of multi-scale model (unit:mm)

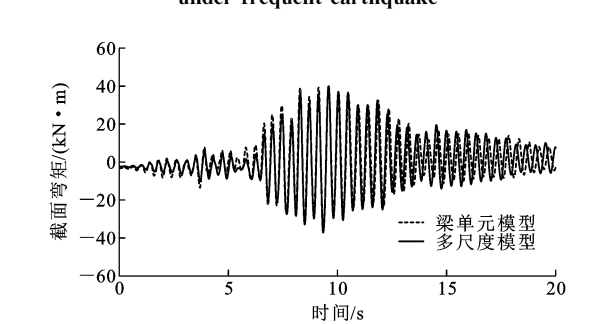


图 17 多遇地震下 C-C 截面弯矩时程曲线

Fig. 17 Time-history curves of C-C section moment under frequent earthquake

后,结构产生了一定塑性变形,而宏观梁单元模型假定梁柱节点为完全刚性,故在节点附近会产生模拟失真^[35],且无法反映节点核心区的塑性发展,因此其地震响应要与实际情况存在一定差异。由第 2.2 节可知,多尺度模型节点区域采用实体单元建模,能

够更加准确反映其塑形损伤和力学性能,因此关键节点区域采用实体单元模拟的装配式框架结构多尺度模型,要比梁单元模型所得到的地震响应更加

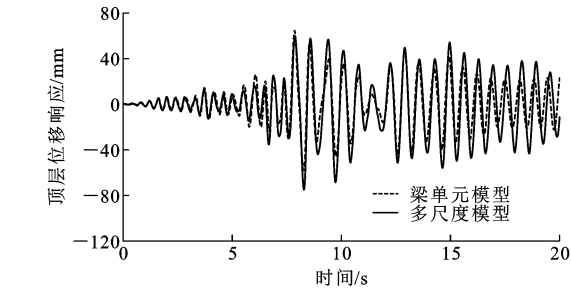


图 18 罕遇地震下结构顶层位移时程曲线
Fig. 18 Time-history curves of top displacement under rare earthquake

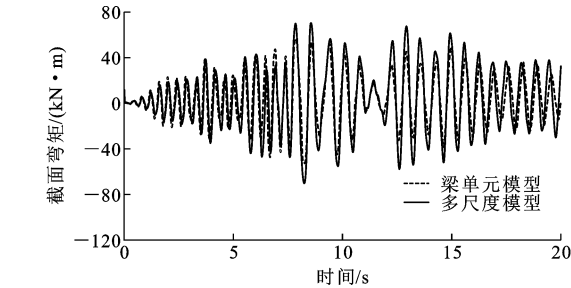


图 19 罕遇地震下 C-C 截面弯矩时程曲线
Fig. 19 Time-history curves of C-C section moment under rare earthquake

准确。

表 3 为具有代表性的梁截面峰值弯矩值。可以看出,梁单元模型靠近节点区域的梁端截面弯矩要小于多尺度模型相同截面位置的弯矩。以图 19 中的 C-C 截面弯矩时程曲线为例,其梁单元模型的梁端峰值弯矩为 56.77 kN·m,而多尺度模型的梁端峰值弯矩为 70.75 kN·m,是梁单元的 1.25 倍;2 种模型位于跨中的截面弯矩基本一致,如 M-M 截面和 N-N 截面。

造成梁单元模型与多尺度模型弯矩值出现差异的原因可能是梁单元模型进入塑性后,节点区域附

表 3 罕遇地震下 2 种模型梁端截面峰值弯矩
Table 3 Peak bending moment of beam section of two models under rare earthquake

截面名称	$M_b/(kN \cdot m)$	$M_m/(kN \cdot m)$	M_m/M_b
A-A	61.89	73.31	1.18
B-B	58.46	72.13	1.23
C-C	56.77	70.75	1.25
D-D	63.08	78.13	1.24
E-E	66.23	79.50	1.20
F-F	74.14	79.66	1.07
G-G	64.38	72.86	1.13
H-H	61.43	69.32	1.13
I-I	60.38	67.22	1.11
M-M	18.35	19.52	1.06
N-N	17.77	17.85	1.00

注: M_b 为梁单元模型梁端截面峰值弯矩; M_m 为多尺度模型梁端截面峰值弯矩。

近会出现一定程度的模拟失真^[35],故本文建议在采用梁单元模型进行装配式混凝土框架结构有限元计算时,若结构产生较大塑性应变,可对靠近节点区域的梁端弯矩值进行合理放大,放大倍数可取 1.25,从而保证结构设计分析的安全性和合理性。

3.4 节点损伤分析

本文建立的多尺度模型在进行装配式混凝土框架整体结构地震响应分析的同时,还能够实现关键节点区域的精细化仿真。

由表 4 中多尺度模型节点区域的拉压损伤可知,其损伤演化过程同试验^[34]和第 2.2 节中预制梁柱节点的一致。在地震作用初期(7 s),裂缝主要分布在灌浆套筒两端、梁柱交界面以及新旧混凝土交界处;在地震作用末期(20 s),节点主要破坏形态为梁端混凝土被压碎,且在套筒两端和新旧混凝土

表 4 节点区域混凝土损伤
Table 4 Concrete damage in joint area

模型类别	受拉损伤云图		受压损伤云图	
	地震初期(7 s)	地震末期(20 s)	地震初期(7 s)	地震末期(20 s)
多尺度模型				
梁单元模型				

交界面处出现受压损伤和集中裂缝,节点核心区出现交叉斜裂缝。由于梁单元模型无法模拟节点核心区的损伤,其节点区域的破坏模式是从梁柱交界面向梁端扩展,这与试验研究及实际工程中装配式结构的破坏现象存在一定差距。因此,多尺度模型可以更好地反映关键节点区域受力、变形和塑性发展规律,这是梁单元模型无法反映的。

4 结 语

(1)针对采取灌浆套筒进行湿连接的预制装配式混凝土框架多尺度模型,宏观梁单元和实体单元耦合界面建议同时满足以下 2 个条件:①取在新旧混凝土交界面之外,建议取值为 $h/3 \sim h$;②距离灌浆套筒端部至少留出 $1/2$ 个套筒的长度。

(2)当结构产生较大塑性应变时,梁单元模型在节点附近会产生一定的模拟失真,导致其节点区域梁端弯矩偏小。本文建议针对梁单元模型计算得到的节点区域梁端弯矩进行一定程度的放大,放大倍数可取 1.25 倍。

(3)与宏观梁单元模型相比,多尺度模型所得结构地震响应更加精确且能够反映节点的真实塑性发展规律及损伤特性,是进行复杂装配式结构整体计算分析和关键节点精细化仿真的有效手段。

参考文献:

References:

- [1] 李宏男,王黎明,马荣全,等. 预制保温带暗斜撑钢筋混凝土剪力墙抗震性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2018,39(9):38-44.
- LI Hongnan, WANG Liming, MA Rongquan, et al. Experimental study on seismic behavior of precast insulation shear walls with diagonal bracing[J]. Journal of Building Structures, 2018,39(9):38-44.
- [2] GUAN D Z, JIANG C, GUO Z X, et al. Development and seismic behavior of precast concrete beam-to-column connections[J]. Journal of Earthquake Engineering, 2018,22(2):234-256.
- [3] 张偲严,李宏男,李 超. 装配式剪力墙高效阻尼器耗能连接的简化模型研究与数值分析[J]. 建筑结构学报, 2019,40(10):61-68.
- ZHANG Caiyan, LI Hongnan, LI Chao. Simplified model development and numerical simulation of a high-efficiency energy-dissipating joint for prefabricated concrete shear walls[J]. Journal of Building Structures, 2019,40(10):61-68.
- [4] YAN Q S, CHEN T Y, XIE Z Y. Seismic experimen-

- tal study on a precast concrete beam-column connection with grout sleeves[J]. Engineering Structures, 2018,155:330-344.
- [5] 李宏男,霍林生. 混凝土结构多维地震动力效应[M]. 北京:科学出版社,2021.
- LI Hongnan, HUO Linsheng. Multi-dimensional seismic dynamic effect of concrete structure[M]. Beijing: Science Press, 2021.
- [6] 李宏男,李 钢,郑晓伟,等. 工程结构在多灾害耦合作用下的研究进展[J]. 土木工程学报, 2021,54(5):1-14.
- LI Hongnan, LI Gang, ZHENG Xiaowei, et al. Research progress in engineering structures subject to multiple hazards[J]. China Civil Engineering Journal, 2021,54(5):1-14.
- [7] ZHANG C Y, LI H N, GAO W H, et al. Experimental and analytical investigations on new viscoelastic damped joints for seismic mitigation of structures with precast shear walls[J]. Structural Control and Health Monitoring, 2020,27(2):e2485.
- [8] ZHANG C Y, LI H N, GAO W H. Development of a novel friction damped joint for damage-plasticity control of precast concrete walls[J]. Engineering Structures, 2020,219:110850.
- [9] 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 Gang, FENG Decheng. Research progress on fundamental performance of precast concrete frame beam-to-column connections[J]. Journal of Building Structures, 2018,39(2):1-16.
- [10] 付 兴,钟玺峰,李宏男,等. 一种组合式屈曲单元及其在输电塔结构倒塌仿真分析中的应用[J]. 工程力学, 2022,39(8):80-87,113.
- FU Xing, ZHONG Xifeng, LI Hongnan, et al. A combined buckling element and its application in the collapse simulation of transmission towers[J]. Engineering Mechanics, 2022,39(8):80-87,113.
- [11] FENG D C, WU G, LU Y. Finite element modelling approach for precast reinforced concrete beam-to-column connections under cyclic loading[J]. Engineering Structures, 2018,174:49-66.
- [12] 张微敬,王桂洁,张晨骋,等. 钢筋机械连接的装配式框架抗震性能试验研究与有限元分析[J]. 土木工程学报, 2019,52(5):47-58.
- ZHANG Weijing, WANG Guijie, ZHANG Chencheng, et al. Experimental study and finite element analysis on seismic behavior of assembled frames with rebars spliced by mechanical connection[J]. China Civil En-

- gineering Journal, 2019, 52(5): 47-58.
- [13] ZHANG J, LI H N, LI C. Seismic response of large-span spatial structures under multi-support and multi-dimensional excitations including rotational components[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2021, 20(1): 141-159.
- [14] NADER C, ROSSI P, TAILHAN J L. Multi-scale strategy for modeling macrocracks propagation in reinforced concrete structures[J]. Cement and Concrete Composites, 2019, 99: 262-274.
- [15] 耿方方, 李亚东, 赵昕, 等. 节点域刚度对装配整体式混凝土框架结构抗震性能的影响[J]. 科学技术与工程, 2018, 18(27): 187-192.
- GENG Fangfang, LI Yadong, ZHAO Xin, et al. Influence of connection's stiffness on seismic performance of assembled monolithic reinforced concrete frame structure[J]. Science Technology and Engineering, 2018, 18(27): 187-192.
- [16] 马哲昊, 张纪刚, 梁海志, 等. 装配式人工消能塑性铰节点低周往复试验数值模拟研究[J]. 土木工程学报, 2020, 53(增2): 162-168.
- MA Zhehao, ZHANG Jigang, LIANG Haizhi, et al. Numerical simulation study on low cycle reciprocating test of assembled artificial energy dissipation plastic hinge joints[J]. China Civil Engineering Journal, 2020, 53(S2): 162-168.
- [17] 刘传平, 吴邑涛, 杨兴据, 等. 基于多尺度建模的高铁站雨棚结构抗连续倒塌分析[J]. 建筑科学与工程学报, 2022, 39(3): 92-100.
- LIU Chuanping, WU Yitao, YANG Xingju, et al. Analysis on progressive collapse resistance of canopy structure of high-speed railway station based on multi-scale modeling[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2022, 39(3): 92-100.
- [18] 许斌, 王治原, 陈洪兵. 钢筋混凝土柱动力滞回性能两尺度数值模拟[J]. 建筑科学与工程学报, 2017, 34(3): 16-23.
- XU Bin, WANG Zhiyuan, CHEN Hongbing. Numerical simulation on dynamic hysteretic behavior of reinforced concrete columns with two-scale model[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2017, 34(3): 16-23.
- [19] 李宏男, 王大东. 钢筋混凝土结构多尺度建模与数值分析[J]. 建筑科学与工程学报, 2014, 31(2): 20-25.
- LI Hongnan, WANG Dadong. Multi-scale finite element modeling and numerical analysis of reinforced concrete structure[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2014, 31(2): 20-25.
- [20] 李兆霞, 孙正华, 郭力, 等. 结构损伤一致多尺度模拟和分析方法[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2007, 37(2): 251-260.
- LI Zhaoxia, SUN Zhenghua, GUO Li, et al. Concurrent multi-scale modeling of structures and damage analyses[J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 2007, 37(2): 251-260.
- [21] 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 Xuchuan, LU Xinzhen, YE Lieping. 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.
- [22] 刘超洋, 彭志涵, 何春凯, 等. 一致多尺度组合多点约束法优化研究[J]. 建筑科学, 2020, 36(7): 1-7.
- LIU Chaoyang, PENG Zhihan, HE Chunkai, et al. Research of combined multi-point constraint method for consistent multi-scale modeling[J]. Building Science, 2020, 36(7): 1-7.
- [23] BIN S, LI Z X. Multi-scale modeling and trans-level simulation from material meso-damage to structural failure of reinforced concrete frame structures under seismic loading[J]. Journal of Computational Science, 2016, 12: 38-50.
- [24] TONG T, BAZROUN M, CHO I H, et al. Multiscale investigations of RC shear wall buildings[J]. Journal of Earthquake Engineering, 2022, 26(10): 5032-5057.
- [25] 马青萍, 王辉明. 装配整体式框架结构多尺度分析和力学性能研究[J]. 工程抗震与加固改造, 2022, 44(1): 15-21, 143.
- MA Qingping, WANG Huiming. Research on multi-scale analysis and mechanical properties of precast concrete frame structure[J]. Earthquake Resistant Engineering and Retrofitting, 2022, 44(1): 15-21, 143.
- [26] 陈吉光, 戴君武, 杨永强. 基于内聚力模型的预制混凝土柱数值模拟研究[J]. 建筑结构, 2022, 52(增1): 1546-1550.
- CHEN Jiguang, DAI Junwu, YANG Yongqiang. Numerical simulation of precast concrete columns based on cohesion model[J]. Building Structure, 2022, 52(S1): 1546-1550.
- [27] 周新粤. 预应力装配式再生混凝土框架多尺度有限元分析[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2022.
- ZHOU Xinyue. Multi-scale finite element analysis of prestressed prefabricated recycled concrete frame[D].

Xuzhou;China University of Mining and Technology, 2022.

[28] 赵作周,周 剑,侯建群,等. 上下层插筋连接预制混凝土空心模剪力墙有限元分析[J]. 工程力学,2017,34(1):117-129.

ZHAO Zuozhou,ZHOU Jian,HOU Jianqun,et al. Finite element analysis of shear walls with precast concrete hollow moulds and splice rebar connection between the upper and lower floors[J]. Engineering Mechanics,2017,34(1):117-129.

[29] 混凝土结构设计规范:GB 50010—2010[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2010.

Code for design of concrete structures:GB 50010—2010 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press,2010.

[30] CLOUGH R W. Effect of stiffness degradation on earthquake ductility requirements[D]. Berkeley: University of California,1966.

[31] 曲 哲. PQ-Fiber 使用手册[EB/OL]. (2019-10-26) [2023-02-03]. <http://qu-zhe.net/pqfiber.htm>.

QU Zhe. PQ-Fiber manual[EB/OL]. (2019-10-26) [2023-02-03]. <http://qu-zhe.net/pqfiber.htm>.

[32] 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 Zhe, YE Lieping. Strength deterioration model based on effective hysteretic energy dissipation for RC members under cyclic loading [J]. Engineering Mechanics,2011,28(6):45-51.

[33] 李骥天. 装配式结构中半灌浆套筒钢筋连接的本构关系研究[D]. 重庆:重庆大学,2016.

LI Jitian. Constitutive relation of steel bar connected by half grouting sleeve applied for fabricated concrete structure [D]. Chongqing: Chongqing University, 2016.

[34] 刘洪涛,闫秋实,杜修力. 钢筋混凝土框架梁柱节点灌浆套筒连接抗震性能研究[J]. 建筑结构学报,2017,38(9):54-61.

LIU Hongtao, YAN Qiushi, DU Xiuli. Study of seismic performance of reinforced concrete frame beam-column joints connected with grouted sleeves [J]. Journal of Building Structures,2017,38(9):54-61.

[35] 朱 鸣,张玉峰. 框架节点刚域在常用结构软件中的实现与比较[J]. 建筑结构,2011,41(9):111-117.

ZHU Ming, ZHANG Yufeng. Realization and comparison of rigid zone of frame joints in common structural software[J]. Building Structure,2011,41(9): 111-117.