

DOI:10.3969/j.issn.1672-1144.2021.04.023

装配式浆锚连接有限元计算弹簧-梁模型提出

周文君¹, 于莹², 吴敏³, 王帅¹

(1. 吉林建筑科技学院, 吉林 长春 130114;

2. 延边泰德金豆欢乐园房地产开发有限公司, 吉林 长春 130061;

3. 中国市政工程东北设计研究总院有限公司, 吉林 长春 130021)

摘要: 为建立浆锚连接节点的标准化建模工艺, 保障浆锚连接装配式结构有限元计算结果的可信程度, 研究提出“弹簧-梁单元”模型模拟灌浆料的传力作用。首先, 经理论分析得出浆锚连接节点的内力状态, 据此抽象出严格合理的“弹簧-梁-块单元”模型。然后, 将模型弱化成方便建模, 适合有限元实践的“弹簧-梁单元”模型。最后, 应用该模型对一种浆锚连接装配式剪力墙试件进行建模计算, 并与试验结果对比。应用“弹簧-梁单元”模型计算得出的浆锚连接装配式剪力墙混凝土损伤状态、滞回曲线及等效刚度与试验结果接近。遵守一定的建模标准, 应用“弹簧-梁单元”模型模拟浆锚连接装配式结构传力, 其计算结果与实际情况相符。

关键词: 浆锚连接; 有限元; 弹簧-梁单元; 装配式

中图分类号: TU311.41

文献标识码: A

文章编号: 1672-1144(2021)04-0144-06

A Spring-beam Element Model for the Finite Element Calculation of Prefabricated Slurry Anchor Connection

ZHOU Wenjun¹, YU Ying², WU Min³, WANG Shuai¹

(1. Jilin University of Architecture and Technology, Changchun, Jilin 130114, China;

2. Yanbian Taide Jindou Happy Park Real Estate Development Co., Ltd., Changchun, Jilin 130061, China;

3. Northeast China Municipal Engineering Design and Research Institute Co., Ltd., Changchun, Jilin 130021, China)

Abstract: In order to ensure the reliability of a slurry anchor connection assembly structure on the finite element calculation, we need to establish a standardized modeling process. In this paper, a spring-beam model is proposed to simulate the force transfer of mortar. Firstly, through theoretical analysis, we get an internal forces distribution of a slurry anchor connection joint in working. Secondly, the force transfer structure that is composed of spring element and beam element is abstracted. The structure is reduced to a spring-beam element model which is suitable for finite element calculation. Finally, the model is used to calculate a specimen of slurry anchor connected shear wall. Those results are compared with those of previous experiments. The concrete damage state, hysteretic curve and equivalent stiffness of the prefabricated shear wall with mortar anchor connections are close to the experimental results that were calculated by “spring beam element” model. According to certain modeling standards, the spring-beam model is used to simulate the force transfer of slurry anchor connection prefabricated structure, and the calculated results are in agreement with the actual situation.

Keywords: slurry anchor connection; finite element; spring-beam; prefabricated structure

收稿日期: 2021-03-06

修稿日期: 2021-04-07

基金项目: 教育部产学合作协同育人项目(201902302044); 吉林建筑科技学院校级科研一般课题(校科字[2020]031)

作者简介: 周文君(1991—), 男, 硕士, 助教, 主要从事有限元与云计算方面的研究工作。E-mail: 1730219815@qq.com

近年来,装配式混凝土结构技术在国际建筑领域飞速发展,由于该技术具有高效推动建筑产业化、工业化发展,降低建筑全生命周期内能耗等优点,所以国内外土木科研工作者在装配式混凝土结构技术研究中投入大量精力。钢筋浆锚搭接是实现预制构件连接的主要手段之一,在装配式混凝土结构新技术研发中得到广泛应用。2013年陈云钢等^[1]完成装配式剪力墙水平拼缝钢筋浆锚搭接抗震试验研究;2015年韩明杰等^[2]完成预制装配式异形柱框架梁节点抗震性能试验研究。以上两项研究结果依靠物理试验手段获得,耗费大量财力、人力。2019年葛华等^[3]完成竖向钢筋套筒浆锚连接的预制剪力墙抗震性能研究,其研究通过有限元计算结果与物理试验结果对比,证明了通过有限元计算研究装配式结构受力的可靠性。但该文章没有给出浆锚连接节点有限元模型的建立标准,无法科学指导后续研究人员科研工作。

有限元计算是推动装配式混凝土结构技术进步的主要手段,例如,2019年杨洪渭等^[4]在进行装配式钢筋混凝土框架节点抗震性能试验研究中应用ABAQUS验证新型装配式混凝土框架节点比普通混凝土框架节点具有较好滞回性能,较高耗能能力的结论;2020年张晨堂基于ABAQUS完成了装配式钢结构梁柱灌浆锚固节点力学性能研究,得出了传统焊接与浆锚固接在静力荷载和低周往复荷载作用下受力性能基本一致的结论^[5]。国外学者 Abdallah M 等指出,在装配式结构体系中,尤其是装配式剪力墙结构主要以芯模管和波纹管两种成孔方式、竖向钢筋锚浆搭接^[6-10]。但是,通过查阅文献,科研工作者会发现,在应用有限元计算研究浆锚连接装配式混凝土结构技术的文章里,几乎没有作者去引用相关理论佐证,其浆锚连接节点处理的合理性。

基于此,笔者采用有限元计算与现有试验结果对比验证的手段,提出“弹簧-梁单元”模型模拟后注砂浆,并给出其标准的建模方法。

1 模型描述

1.1 浆锚连接

浆锚连接是将预制构件表面外伸一定长度的不连续钢筋插入所连接的预制构件对应位置的预留孔道内,钢筋与孔道内壁之间填充无收缩、高强度灌浆料,砂浆均是在钢筋搭接完成之后再灌注砂浆并养护硬化,如图1所示。

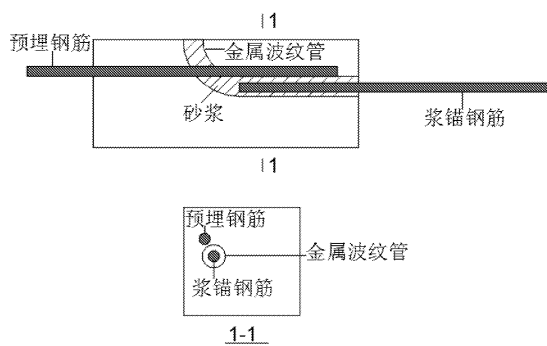


图1 浆锚连接构造

1.2 后注砂浆内力状态分析

将预制构件表面外伸一定长度的不连续钢筋插入所连接的预制构件对应位置的预留孔道内,钢筋与孔道内壁之间填充无收缩、高强度灌浆料,是钢筋的浆锚连接方法。梁预制构件连接节点处通常存在如图2的弯矩 M 、轴力 N 及剪力 V 作用下。

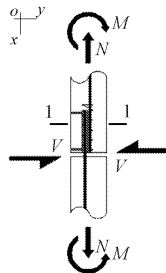


图2 浆锚连接垂直钢筋搭接方向的受力情况

用垂直于纸面内且平行于 OY 方向的面1截开浆锚连接节点,在轴力 N 与弯矩 M 作用下,砂浆在该截面出现正应力 σ_m ,经推导正应力:

$$\sigma_m = \frac{N}{\alpha_{E1}A_{s1} + \alpha_{E2}A_{s2} + A_m + \alpha_{E3}A_{c1}} \pm \frac{M}{I_{m0}} \cdot y_0 \quad (1)$$

式中: α_{E1} 为预制构件外伸钢筋弹性模量与砂浆弹性模量比值; A_{s1} 为预制构件外伸钢筋截面面积; α_{E2} 为所接构件纵筋弹性模量与砂浆弹性模量比值; A_{s2} 为所接构件纵筋截面面积; α_{E3} 为混凝土弹性模量与砂浆弹性模量比值; A_{c1} 为混凝土截面面积; A_m 为砂浆截面面积; I_{m0} 为参照砂浆弹性模量计算的换算截面惯性矩; y_0 为参照砂浆弹性模量计算的换算截面重心至砂浆位置距离; σ_m 足够大砂浆单元会被拉断。

在横向剪力 V 作用下,砂浆在该截面出现平行于 OX 轴向的剪切应力:

$$\tau_{m1} = \frac{vs_0}{bI_{m0}} \quad (2)$$

式中: s_0 为剪力计算点以上或以下部分对参照砂浆

弹性模量计算的换算截面型心轴净距; b 为剪应力计算点的截面宽度; I_{m0} 为参照砂浆弹性模量计算的换算截面惯性矩; τ_m 足够大砂浆单元会被剪碎。

主要在轴力 N 作用下, 预制构件外伸纵筋与后注砂浆产生相反运动趋势, 接触界面出现剪切应力 τ_{m2} , 如图 3 所示; 后注砂浆与混凝土接触面也产生相反运动趋势, 接触界面出现剪切应力 τ_{m3} , 见图 4。当 τ_{m2} 、 τ_{m3} 足够大, 后注砂浆边界将会在垂直于纸面, 且平行于 ox 轴方向形成剪切面, 导致砂浆粘结作用破坏, 砂浆与钢筋及混凝土表面脱离, 严重时, 外伸钢筋发生拔出破坏。

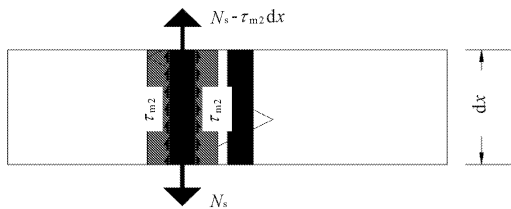


图 3 浆锚连接平行钢筋搭接方向的钢筋受力情况

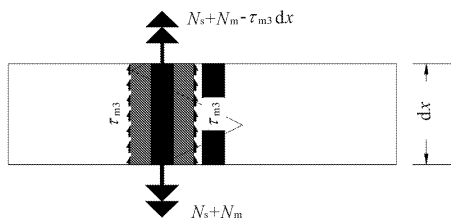


图 4 浆锚连接平行钢筋搭接方向的砂浆受力情况

1.3 弹簧-梁-块体单元模型

从上面的分析, 可以看出后注砂浆单元需要承受平行于 ox 方向的正应力, 此应力通过砂浆与混凝土及钢筋间的粘结作用传递应力; 承受平行于 oy 方向的剪切应力, 此应力通过砂浆与混凝土及钢筋间的挤压作用传递应力; 后注砂浆与混凝土及外伸钢筋接触面由于反向运动趋势存在, 会导致粘结力破坏。因此, 严谨的浆锚连接节点有限元模型由块体单元、梁单元及弹簧单元构成, 其中混凝土块体单元、钢筋块体单元与砂浆块体单元间通过梁单元传递平行于 oy 方向的剪切应力, 通过弹簧单元传递平行于 ox 方向的正应力。梁单元失效后, 模型依靠弹簧单元限制砂浆块体单元、混凝土块体单元土及外伸钢筋块体单元间的滑移运动, 模拟接触界面的摩擦阻碍作用, 模型如图 5 所示。

1.4 弹簧-梁单元模型

浆锚连接多数用在剪力墙-剪力墙、剪力墙-梁、柱-柱、柱-梁间连接中, 在研究装配式剪力墙

抗震问题方面, 剪力墙往往分为上下片, 如装配式剪力墙-连梁结构等, 这样的剪力墙体系进行有限元分析时, 由于求解器的单元质量标准限制导致浆锚连接模型采用“弹簧-梁-块体单元”模型建立很难实现。因此, 简化“弹簧-梁-块体单元”模型为“弹簧-梁单元”模型, 如图 6 所示。

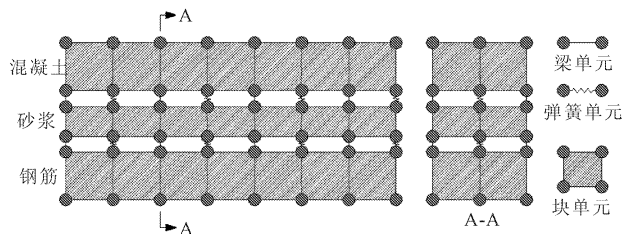


图 5 弹簧-梁-块体单元模型

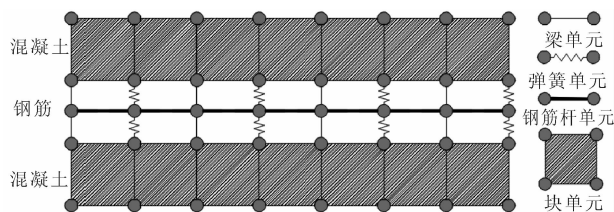


图 6 弹簧-梁模型

“弹簧-梁单元”模型忽略掉代表砂浆的块体单元, 砂浆力学影响由弹簧-梁单元形成“弹簧-梁单元体系”取代“弹簧-梁单元体系”的梁单元一方面实现垂直套筒方向剪力传递, 另一方面实现砂浆与钢筋及混凝土的粘结; “弹簧-梁单元体系”的弹簧单元在梁单元失效后限制砂浆与钢筋及混凝土的滑移运动, 有效地模拟了浆锚连接发生强度破坏后钢筋与混凝土的滑移脱离现象。

2 模型验证

2.1 计算模型

2.1.1 构造及材料

采用“弹簧-梁单元”模型对文献[1]提到的装配式浆锚外墙试件拟静力试验结果进行验算。试件分为上下两段墙体, 下段预制墙预留竖向插件, 待上下段墙体竖向插入拼装就位后, 在预留管道内注入高强无收缩灌浆料, 实现两段墙的浆锚连接, 模型几何尺寸及配筋, 见图 7 所示。

构件采用 HRB335 级钢筋直径 8 mm、10 mm、12 mm、14 mm, 参数见表 1。文献[1]并未介绍试验使用的混凝土类别, 但对比不同组别的该混凝土试件试算得到的滞回曲线不难发现, 试验应采用 C45 级混凝土参数^[11-13], 见表 2。

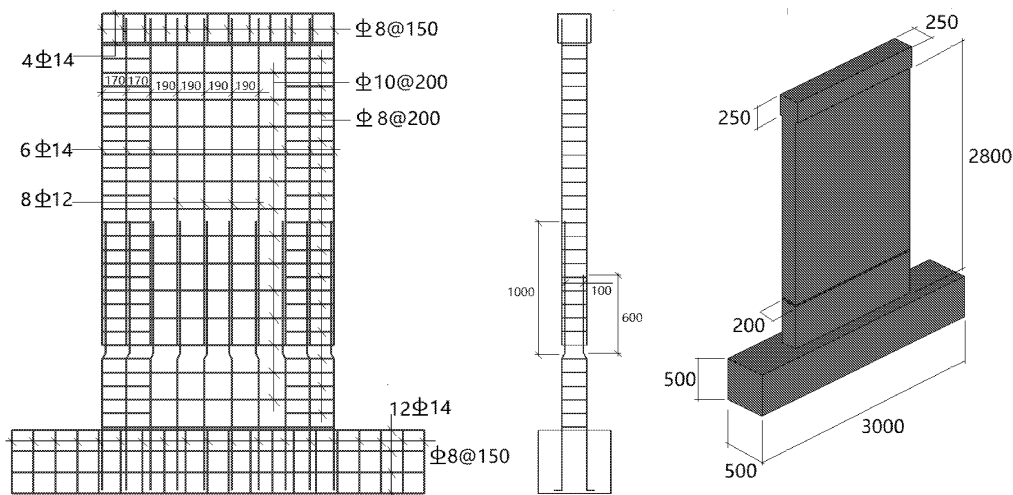


图 7 构造及尺寸(单位:mm)

表 1 钢筋材料参数

$E/10^5$ MPa	μ	$\rho/(kg \cdot m^{-3})$	f_y/MPa	f_u/MPa
2	0.2	7850	503.9	603.0

注: E 为弹性模量; μ 为泊松比; ρ 为密度; f_y 为屈服强度; f_u 为极限强度。

表 2 混凝土材料参数

$E/10^4$ MPa	μ	$\rho/(kg \cdot m^{-3})$	f_c/MPa	f_t/MPa
3.15	0.2	2500	29.6	2.5

注: E 为弹性模量; μ 为泊松比; ρ 为密度; f_c 为抗压强度; f_t 为抗拉强度。

拼接缝处采用“外高内低”的“Z”形拼缝,拼缝处填充弹性密封胶。密封胶材料模型选自文献[14]提到的 Reduced Polynomial 材料模型参数替代,见表 3。

表 3 弹性胶粘材料参数

材料类型	C10	C20	C30
Yeoh 模型参数	107.05	5.31	0.42

2.1.2 有限元模型处理

有限元模型混凝土网格应用 ABAQUS 隐式计算 C3D8R 单元,单元数量 26 182 个;模型钢筋网格应用 ABAQUS 隐式计算 T3D2 单元,单元数量 8 752 个;模型浆锚连梁单元应用 ABAQUS 隐式计算 B31 单元,单元数量 720 个;模型浆锚连接弹簧单元应用 ABAQUS 隐式计算 DASHPOTA 单元,单元数量 800 个。网格尺寸控制在 40 mm,浆锚连接有限元处理见图 8。

2.1.3 模型加载

初始分析步,约束地梁两端部,防止模型出现水平位移。一阶段分析步,在剪力墙顶梁几何中心位

置,沿竖直施加轴压力,轴压比控制为 0.10,同时约束住剪力墙平面外转动及平面外移动。二阶段分析步,水平荷载采用力和位移混合控制加载模型,其中力加载阶段参照对比文章将力值折算成位移,加载曲线见图 9。

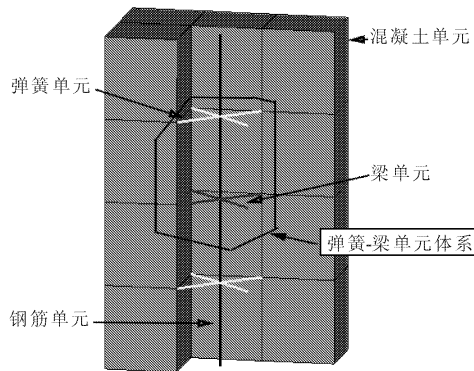


图 8 弹簧-梁单元体系

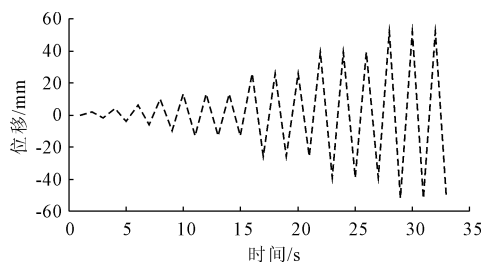


图 9 时间-位移加载曲线

加载初期试件处于弹性受力状态,加载与卸载位移曲线基本重合,荷载加载到 195 kN 拼缝处部分混凝土出现损伤,逐渐形成水平贯通;当荷载达到 348 kN 时,边缘构件拼缝处竖直分布钢筋屈服,试件进入屈服阶段,见图 10。

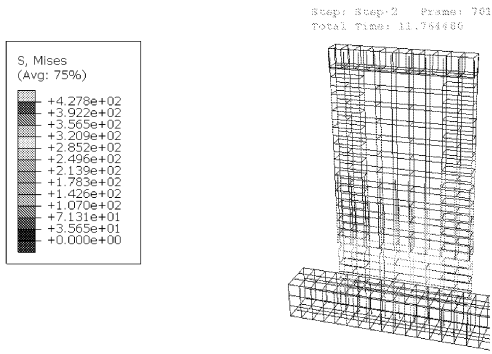


图 10 钢筋应力云图

加载进入水平控制阶段,水平位移增值四倍屈服位移 -52 mm 时,水平力达 555 kN ,对 52 mm 级水平位移施加第二次循环荷载,水平裂两段混凝土压溃,计算终止,计算结果与试验结果云图对比见图 11,试验图片引自文献[1]图 7(b)。从以上两阶段描述,我们对比文献的试验发现,试验与模拟各阶段受力情况基本吻合。

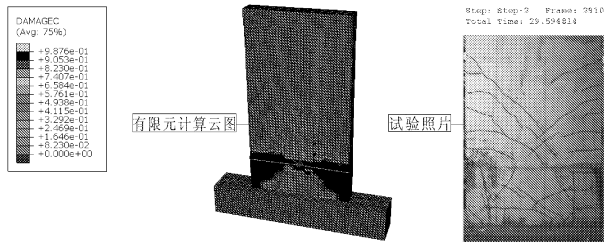


图 11 混凝土损伤云图

2.2 计算结果对比分析

2.2.1 滞回曲线与骨架曲线对比

模拟与试验的滞回曲线见图 12,对比滞回曲线与文献[1]图 8(b)发现,最大位移与峰值力几乎一致,滞回环相对饱满,但模拟中加载后期各阶段的峰值力略低,这点与试验结果不太一致。但这样的问题,其主要原因是试验中钢筋与混凝土间的粘结-滑移效应在模拟中采用加快钢筋材料本构里峰值应

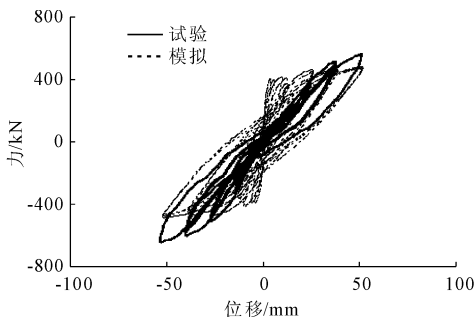


图 12 滞回曲线

力衰减速率来等效,这种等效一定程度上造成模拟得到的滞回曲线其后期峰值力低于试验值。

模拟与试验的骨架曲线见图 13,对比骨架曲线与文献[1]图 8(b)发现模拟与试验骨架曲线的走势基本一致。

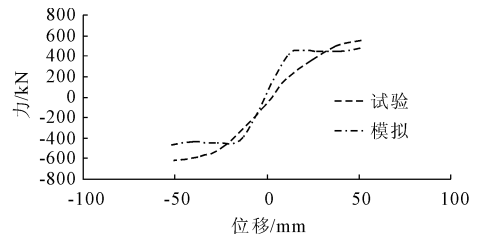


图 13 骨架曲线

2.2.2 承载力对比

对比模拟与试验的开裂水平力 F_{cr} 、屈服水平力 F_y 和峰值水平力 F_p ,见表 4 可以看出,模拟得到 F_{cr} 略高于试验结果, F_y 与试验结果接近, F_p 略低于试验结果。“弹簧-梁单元”模型在装配式浆锚连接结构承载力计算上精度很好,几乎与试验接近。

表 4 模拟与试验承载力对比

数据来源	F_{cr}/kN	F_y/kN	F_p/kN
试验	170	350	613
模拟	195	348	480

2.2.3 刚度对比

根据文献[15]的定义,将往复水平力作用下每次循环最大位移的割线刚度定义为等效刚度 K ,图 14 为模拟与试验等效刚度退化曲线。初始刚度数值有一定偏差,随着加载进行刚度逐步接近,加载结束时刚度一致,模拟与试验退化趋势大致相同^[15]。计算时适当降低“弹簧-梁单元”模型中弹簧单元刚度,削弱模拟与试验初始刚度上的差异。

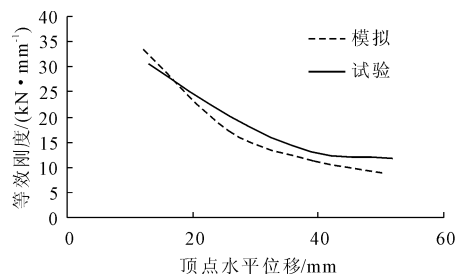


图 14 退化刚度曲线

3 结论

(1) 在应用“弹簧-梁单元”模型等效浆锚连接的有限元计算中,装配式剪力墙加载的各个阶段,

模型的屈服状态与破坏状态基本相同,证明“弹簧-梁单元”模型高质量完成类似浆锚连接的传力作用。

(2) 在应用“弹簧-梁单元”模型等效浆锚连接的有限元计算中,对比滞回曲线与陈云刚试验发现,最大位移与最大应力接近,滞回规律几乎一致,证明“弹簧-梁单元”模型高质量完成类似浆锚连接的传力作用。

(3) 在应用“弹簧-梁单元”模型等效浆锚连接的有限元计算中,得到的模拟与试验的开裂水平力、屈服水平力和峰值水平力的数值几乎相同,证明“弹簧-梁单元”模型在装配式浆锚连接结构承载力计算上精度很好。

(4) 在应用“弹簧-梁单元”模型等效浆锚连接的有限元计算中,对比模拟模型与试验试件在加载过程中的等效刚度,本模拟中使用的“弹簧-梁单元”模型弹簧刚度偏大,在以后的计算中需要适当降低刚度。

参考文献:

- [1] 陈云刚,刘家斌,郭正兴,等. 装配式剪力墙水平拼缝钢筋浆锚搭接抗震性能试验[J]. 哈尔滨工业大学学报,2013,45(6):83-89.
- [2] 韩明杰,王柄辉,兰春光,等. 浆锚连接预制装配式异性柱框架梁柱节点抗震性能试验研究[J]. 建筑技术,2015,46(9):778-781.
- [3] 葛华,黄浩,李付春. 竖向钢筋套筒浆锚连接的预制剪力墙抗震性能非线性有限元分析[J]. 混凝土,2019(1):86-89.
- [4] 杨洪渭,戎贤,张健新. 装配式钢筋混凝土框架节点抗震性能试验研究[J]. 世界地震工程,2019,35(4):68-73.
- [5] 张晨堂. 基于 ABAQUS 的装配式钢结构梁柱灌浆锚固节点力学性能研究[J]. 施工技术,2020,49(20):69-72.

- [6] Soliman A M, Ibrahim H H, Hodhod H A. Structural performance of grouted sleeve splice connectors with grooves under axial tensile load for precast concrete structure[J]. International Journal of Engineering and Advanced Technology,2020,9(4):564-571.
- [7] Ye M, Jiang J, Chen H M, et al. Seismic behavior of an innovative hybrid beam-column connection for pre-cast concrete structures[J]. Engineering Structures,2021,227(1):111436-111441.
- [8] Xiao J Z, Liu L L, Ding T, et al. Experimental study on mechanical behavior of thermally damaged grouted sleeve splice under cyclic loading[J]. Structural Concrete,2020,21(6):2494-2514.
- [9] Tzoura E, Triantafillou T C. Shear strength-ening of reinforced concrete T-beams under cyclic loading with TRM or FRP jackets[J]. Materials and Structures,2016,49(1):17-28.
- [10] 王乾隆,杨斌. 浆锚连接集束配筋装配式柱抗震性能数值模拟分析[J]. 水利与建筑工程学报,2019,17(3):66-71.
- [11] 周文君,李令令,聂红鑫. 有无预应力内置压型钢板装配式宽连梁抗爆性能研究[J]. 水利与建筑工程学报,2020,18(4):134-137.
- [12] 王凤,刘焕玉,王超杰. 龄期对钢筋套筒灌浆连接力学性能的影响[J]. 山东理工大学学报(自然科学版),2020,34(6):74-78.
- [13] 连星. 叠合板式剪力墙的抗震性能试验分析及理论研究[D]. 合肥:合肥工业大学,2010.
- [14] 雍占福,王瑞华,王文峰,等. 基于 ABAQUS 炭黑填充三元乙丙橡胶超弹性本构模型的分析与比较[J]. 青岛科技大学学报(自然科学版),2018,39(1):80-89.
- [15] 张兴虎,王建,潘树宾. 套筒浆锚连接柱的抗震性能试验研究[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版),2013,45(2):165-170.