

DOI:10.3969/j.issn.1672-1144.2019.03.011

# 浆锚连接集束配筋装配式柱抗震性能数值模拟分析

王乾隆, 杨 斌

(武汉大学 土木建筑工程学院, 湖北 武汉 430072)

**摘 要:** 通过有限元软件 ABAQUS 建立浆锚连接集束配筋装配式柱在循环荷载下的有限元计算模型, 并将模拟计算结果与试验进行对比分析, 研究装配式柱构件抗震性能, 分析了轴压比、搭接长度以及搭接间距等因素对柱构件承载性能和耗能性能的影响。模拟结果表明: 模拟所得滞回曲线与试验数据吻合较好, 且试件均为弯曲破坏模式; 随着轴压比的增加, 其水平承载能力增大, 但延性性能降低; 随着搭接长度的增大, 其承载性能和耗能性能先增加, 后缓慢提升, 表明适量增大搭接长度可提高构件抗震性能; 而随着搭接间距的变化, 各模型的承载能力变化不大, 说明此因素对滞回性能影响较小。通过数值模拟分析, 模拟结果可以对试验数据进行验证, 并进行拓展分析, 以便更全面地进行概括分析, 得出结论。

**关键词:** 集束配筋; 装配式柱; 循环加载; 抗震性能

**中图分类号:** TU375.2

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1672-1144(2019)03-0066-06

## Numerical Simulation Analysis on Seismic Behavior of Cluster Reinforced Precast Concrete Columns with Grouting - Anchor Connections

WANG Qianlong, YANG Bin

(School of Civil Engineering, Wuhan University, Wuhan, Hubei 430072, China)

**Abstract:** By using the finite element software ABAQUS, the finite element model of cluster reinforced precast columns with grouting-anchor under cyclic loading is established. The results of simulation and test are compared and analyzed to analyze the seismic performance of precast columns. The effects of axial compression ratio, lap length and lap space on the bearing capacity and energy dissipation performance of column members are analyzed. The simulation results show that the hysteresis curve obtained by the simulation agrees well with the experimental data, and the specimens are all in bending failure mode; as the axial compression ratio increases, its horizontal bearing capacity increases, but the ductility performance decreases; as the length of the lap increases, its bearing capacity increases first, and then slowly increases, indicating that an appropriate increase in the lap length can improve its seismic performance; however, with the change of lap spacing, the seismic performance of the models does not change much, indicating that this factor has little influences on the bearing capacity. Through this numerical simulation analysis, the test data can be verified, and the test can be extended and analyzed, and a more comprehensive summary analysis can be concluded.

**Keywords:** cluster reinforced column; precast concrete column; cyclic loading; seismic behavior

21 世纪以来, 装配式建筑以其设计标准化、生产工业化、现场施工装配化及建造过程信息化的特点逐渐被公众熟知, 现阶段主要的装配式结构形式主要有装配式框架结构和装配式剪力墙结构。

对于装配式框架结构, 设计关键是其梁柱的连接方式。从 19 世纪 90 年代至今, 有很多专家学者都对各种连接方式进行了研究。例如, 张海顺<sup>[1]</sup>、李世达<sup>[2]</sup>、王建<sup>[3]</sup>、Ousalem 等<sup>[4]</sup>、Ersoy 等<sup>[5]</sup>及 Vasconez

等<sup>[6]</sup>分别对浆锚连接、灌浆套筒连接、螺栓连接、焊接板连接及 HPFRC 连接等连接方式进行了探究,而近年来随着建筑高度的增高,干式连接形式逐渐不满足设计需求,并且由于复杂的钢筋配置,湿法连接形式在实际工程中装配难度较大、造价很高。

为解决此类问题,近年来有学者提出高效配筋理念,以简化柱的配筋形式,提高工作效率。近年来,殷小微等<sup>[7]</sup>、赵勇等<sup>[8]</sup>提出配置大间距、大直径的高强钢筋来替代普通配筋方式,且做了相关试验,试验表明:该类柱具有良好的延性和耗能性能。目前,裴梓洋<sup>[9]</sup>和梁伟怀<sup>[10]</sup>综合螺旋箍筋约束提高钢筋粘结性能以及浆锚连接,提出螺旋箍筋约束下的集束配筋形式,且进行了相关力学性能试验。而柱作为结构主要受力构件,是最重要的抗震防线之一,其抗震性能直接影响到整个结构的稳定性,所以研究集束配筋形势下柱的抗震性能就很有必要。

对于此种配筋形式的装配式柱,本课题组进行了抗震性能试验。在此试验的基础上,利用有限元软件 ABAQUS 对在各参数作用下的集束配筋装配式柱抗震性能进行数值模拟分析,通过对模拟试验结果与试验数据进行对比分析来验证模型建立的合理性,并进行因素拓展分析,综合分析得出集束配筋装配式柱抗震性能影响规律。

## 1 试验概况

根据此配筋形式及连接方式,本试验考虑了轴压比、搭接长度和钢筋间距三个影响因素,共设计了7个装配式试件以及3个现浇式足尺柱试件,分别编号 ZP-1—ZP-7 和 XJ-1—XJ-3。试件设计参数见表1。

表1 主要设计参数

编号	搭接长度 /mm	搭接间距 /mm	轴压比	试验轴力 /kN
ZP-1	420	20	0.4(0.31)	1200
ZP-2	420	20	0.6(0.46)	1800
ZP-3	420	20	0.8(0.62)	2400
ZP-4	250	20	0.6(0.46)	1800
ZP-5	560	20	0.6(0.46)	1800
ZP-6	420	30	0.6(0.46)	1800
ZP-7	420	10	0.6(0.46)	1800
XJ-1	—	—	0.4(0.31)	1200
XJ-2	—	—	0.6(0.46)	1800
XJ-3	—	—	0.8(0.62)	2400

注:前面的轴压比为设计轴压比,括号内为实际轴压比。

各试件均由底座、柱两部分组成,柱尺寸为 400 mm×400 mm×1 700 mm,底座尺寸为 1 400 mm×1 400 mm×600 mm,上部柱钢筋均采用集束配筋形式,装配式柱连接处采用浆锚链接形式。混凝土采用 C40 商品混凝土,柱纵筋、箍筋及底座配筋均采用 HRB400 钢筋,直径分别为 14 mm、8 mm 和 18 mm。试件尺寸、配筋及详细施工图见图 1。

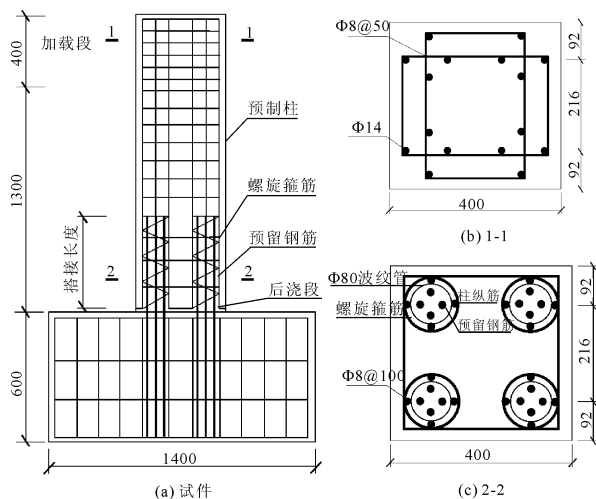


图1 装配式试件几何尺寸和配筋

## 2 基于 ABAQUS 的有限元分析模型

### 2.1 材料的本构模型

在模拟中,考虑混凝土和灌浆料的抗拉作用,混凝土和灌浆料本构关系采用《混凝土结构设计规范》<sup>[11]</sup>(GB 50010—2010)中的混凝土单轴受压和受拉应力-应变关系。钢筋本构关系采用线性强化弹塑性模型,公式如下,  $E_1$  为强化阶段直线斜率(见图2),取  $E_1 = 0.001E$ :

$$\sigma = \begin{cases} E\varepsilon & \varepsilon \leq \varepsilon_s \\ \sigma_s + E_1(\varepsilon - \varepsilon_s) & \varepsilon > \varepsilon_s \end{cases}$$

### 2.2 模型建立

由于在理论上,钢筋与混凝土之间的变形系数接近,且在试验结束后发现钢筋与混凝土之间没有相对滑移,因此钢筋单元不再考虑粘结滑移的影响。混凝土和灌浆料均选用 8 节点等参线性缩减积分实体单元 C3D8R,纵筋、箍筋及螺旋箍筋均采用三维桁架单元 T3D2。对部件进行组装时,钢筋与混凝土之间采用 Embedded 连接,其他 Part 之间接触均采用 Tie 进行绑定。为保证模拟与试验加载形式的一致性,在柱头建立一个刚性钢板,与柱头 Tie 连接;边界条件为柱底端固端约束,以防止加载过程中发生平面外转动。模型的网格划分对模拟分析精度具有

重要影响,经过不断尝试,本模型选用 50 mm 的映射网格(见图 3)。

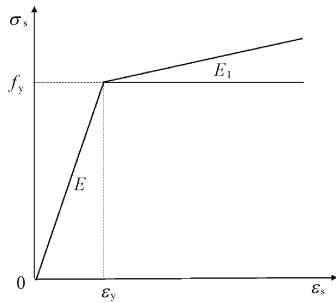


图 2 钢筋本构

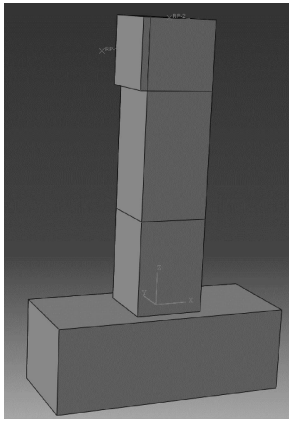
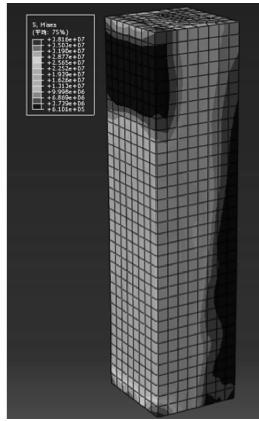
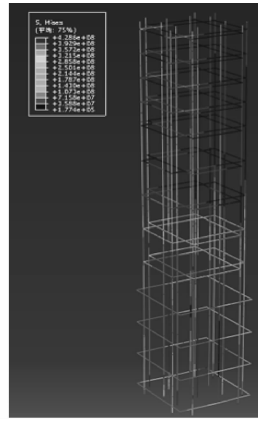


图 3 ABAQUS 模型



(a) 混凝土应力云图



(b) 钢筋应力云图

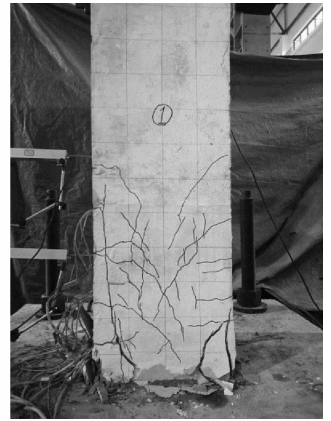


图 5 试验破坏形态

### 3 数值模拟与试验结果对比

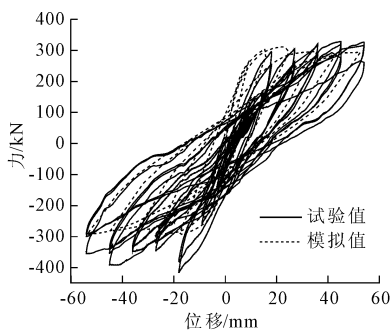
#### 3.1 应力云图与破坏形态

图 4 为搭接长度 560 mm、搭接间距 20 mm 的柱在轴压比 0.4 下的应力云图,图 5 为试件 ZP-5 的破坏形态。对比分析可以看出,模型是柱根部塑性铰区的混凝土累计塑性应变最大,与试验中试件混凝土根部混凝土破坏剥落现象一致;钢筋应力云图可以看出,下部塑性铰区的箍筋和纵筋应力值最大。云图显示出破坏形态与试验破坏的形态基本一致,说明采用 ABAQUS 可以比较正确地模拟试验过程中装配式试件的破坏过程。

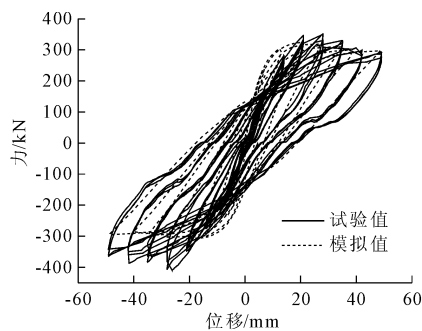
#### 3.2 滞回曲线和骨架曲线的对比

图 6 分别为试件的试验滞回曲线、骨架曲线和

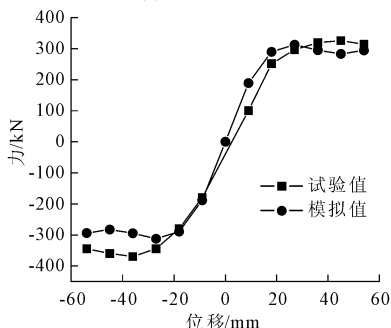
ABAQUS 模拟的滞回曲线、骨架曲线对比。



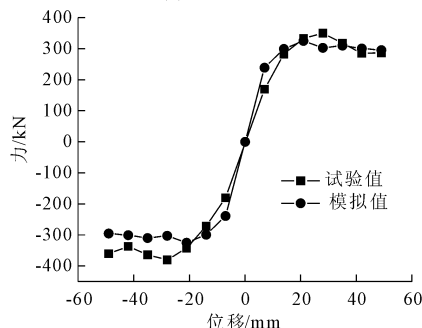
(a) ZP-1 滞回曲线



(b) ZP-5 滞回曲线



(c) ZP-1 骨架曲线



(d) ZP-5 骨架曲线

图 6 试验滞回曲线、骨架曲线与模拟对比图

对比分析可得,数值分析数据与试验数据具有较大的吻合度,但仍存在一些差异:

(1) 模拟滞回曲线与试验滞回曲线基本吻合,表现出明显的下降段和“捏缩”现象,且峰值荷载也较为接近。

(2) 模拟骨架曲线与试验骨架曲线吻合较好,刚度退化和强度退化趋势也基本相同。

(3) 数值模拟结果对称性较好,而试验值正向

加载与反向加载基本都存在偏差,主要是由于加载过程中的试验误差造成。

### 3.3 承载力和延性对比

根据骨架曲线,计算出各试件和数值模型在加载过程中的屈服位移  $\Delta_y$ 、屈服荷载  $P_y$ 、峰值位移  $\Delta_m$ 、峰值荷载  $P_m$ 、85%最大荷载处对应的极限位移  $\Delta_u$  和极限荷载  $P_u$ 。根据计算结果,试件及数值模型的位移延性系数见表 2。

表 2 实验结果与模拟结果对比

结果	试件编号	$\Delta_y/mm$	$P_y/kN$	$\Delta_m/mm$	$P_m/kN$	$\Delta_u/mm$	$P_u/kN$	$\mu$	
试验结果	ZP-1	20.41	193.0	45	325.6	78.51	279.0	3.85	
		-19.07	-284.0	-45	-370.0	-58.50	-314.8	3.07	
	ZP-5	16.57	302.0	28	350.0	53.21	287.0	3.21	
		-23.67	-350.7	-28	-380.0	-59.70	-356.8	2.52	
	模拟结果	ZP-1	18.34	289.8	27	312.5	59.29	265.6	3.23
			-18.34	-289.8	-27	-312.5	-59.29	-265.6	3.23
ZP-5		11.94	281.7	21	325.3	36.08	276.5	3.02	
		-11.94	-281.7	-21	325.3	-36.08	-276.5	3.02	

对比分析表 2 中试验数据和模拟数据,可得:

(1) 相对于试验数据,模拟数据更为对称,且各试件的试验屈服荷载、峰值荷载及极限荷载都较模拟数据值大,比例分别为 14.7%、10.1%、10.5%、13.7%、10.9%、14.1%,可以看出模拟数据与试验数据误差基本都在 15%之内,两者吻合较好。

(2) 试验数据骨架曲线延性系数与模拟数据骨架曲线延性系数差异分别为 6.6%及 5.5%,说明模拟数据与试验结果差异很小,说明 ABAQUS 模拟结果也可以很好的反映试件的承载力及延性。

通过对试件破坏形态、滞回曲线、骨架曲线、延性系数与模拟应力云图、滞回曲线、骨架曲线、延性系数的对比,可以看出模拟情况与试验结果基本相同,说明 ABAQUS 可以准确地模拟出浆锚连接集束

配筋装配式柱的抗震性能,故继续使用 ABAQUS 软件进行拓展分析,以弥补试验中试件数量的不足和缺陷。

### 3.4 模拟结果对比分析

本课题试验设计时,考虑三个因素三水平。由于试验的局限性,每个因素只做了一次对比分析,本节利用 ABAQUS 软件进行更多的因素对比,以更全面地研究轴压比、搭接长度、搭接间距对半灌浆集束配筋装配式柱承载性能、延性性能的影响。

#### 3.4.1 轴压比的影响

本节分别模拟了当搭接间距为 250 mm、搭接间距为 20 mm 时和搭接间距为 560 mm、搭接间距为 20 mm 时,不同轴压比下,柱在循环荷载作用下的滞回性能,其骨架曲线对比如图 7 所示。

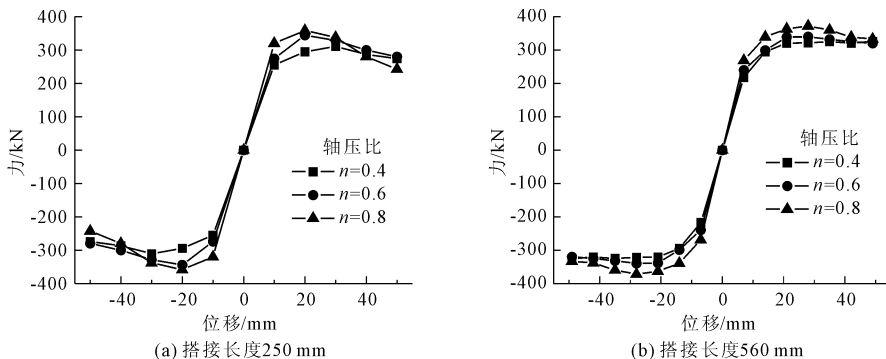
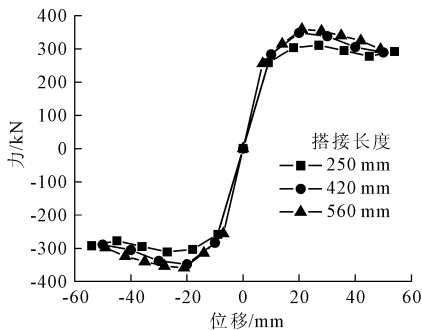
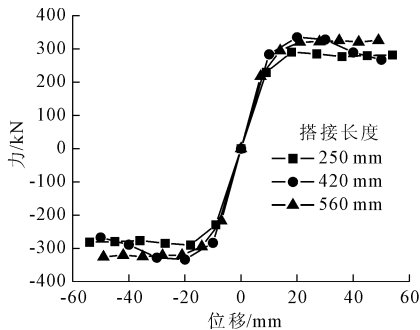


图 7 不同轴压比下骨架曲线对比

对比分析图 7 可以看出,在相同搭接长度和搭接间距情况下,随着轴压比的增大,柱的峰值荷载逐渐增加,而达到峰值荷载后,骨架曲线斜率逐渐加大,说明承载力的下降速度也逐渐加快,强度退化更加迅速。



(a) 搭接间距 10 mm



(b) 搭接间距 30 mm

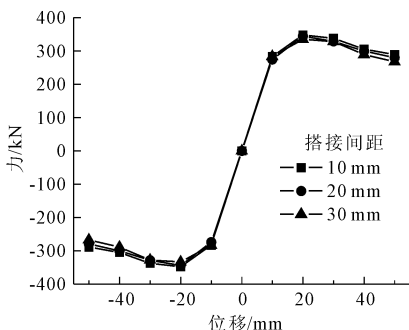
图 8 不同搭接长度下骨架曲线对比

对比分析图 8 可以看出,在同一轴压比下,在搭接间距 10 mm 和 30 mm 情况下,随着搭接长度的增加,装配式柱的滞回性能呈现相同的变化规律,即从 250 mm 增加至 420 mm 时,其峰值荷载增加 12.2%,而继续增加到 560 mm 时,峰值荷载仅增加 3.2%,说明适量的增加搭接长度可以提高装配式柱的水平承载力,而过度增加对其影响不大,而造成不必要的

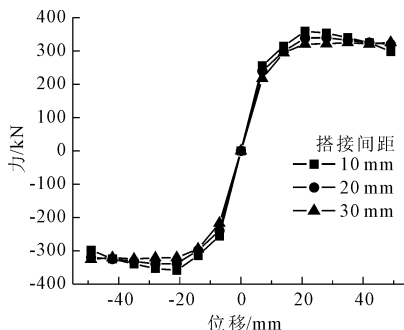
成本增加。

### 3.4.3 搭接间距的影响

本节分别模拟和对比了当搭接长度为 250 mm、轴压比为 0.6 时和当搭接长度为 560 mm、轴压比为 0.6 时,集束配筋柱在不同搭接间距下的滞回性能,其骨架曲线对比如图 9 所示。



(a) 搭接长度 250 mm



(b) 搭接长度 560 mm

图 9 不同搭接间距下骨架曲线对比

对比分析图 9 中数据,可以看出,在搭接长度 250 mm 及 560 mm 情况下,搭接间距对装配式柱骨架曲线的峰值荷载、刚度退化、强度退化等影响很小,说明此因素对装配式柱的滞回性能影响很小,在实际设计过程中可以不用考虑。

## 4 结论

通过对集束配筋装配式柱的数值模拟,根据模拟结果与试验结果以及模拟结果之间的对比,可以得到如下结论:

(1) 相对于试验,模拟结果可以很好地反映出

试验破坏现象以及柱的滞回性能,可以利用 ABAQUS 有限元软件进行拓展模拟分析。

(2) 随着轴压比的增大,装配式柱的峰值荷载增加,但其刚度退化及强度退化也相应加快,延性性能降低。

(3) 增大搭接长度可提高柱的抗震性能,但有一定限度。在较小搭接长度下,随着搭接长度的增大,装配式柱的抗震性能指标都有明显的增大,抗震性能提高;当增加到一定数值后,继续增加搭接长度,各指标增加不显著,抗震性能提升不大。

(4) 在装配过程中,不同搭接钢筋间距对各项

抗震性能指标影响不大,指标变化较小,表明钢筋间距对集束配筋装配式柱的抗震性能影响较小。

### 参考文献:

- [1] 张海顺. 预制混凝土结构插入式预留孔灌浆钢筋锚固搭接试验研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2009.
- [2] 李世达. 预制混凝土框架柱及节点抗震性能试验研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2013.
- [3] 王建. 套筒浆锚连接钢筋混凝土柱抗震性能试验研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2013.
- [4] Ousalem H, Ishikawa Y, Kimura H, et al. Seismic performance and flexural stiffness variation of assembled precast high-strength concrete beam jointed at mid-span using transverse bolts[J]. *Journal of Advanced Concrete Technology*, 2009, 7(2): 205-216.
- [5] Ersoy Ugur, Tugrul Tankut. Precast concrete members with welded plate connections under reversed cyclic loading[J]. *Pci Journal*, 1993, 38(4): 94-100.
- [6] Vasconez R M, Naaman A E, Wight J K. Behavior of HPFRC connections for precast concrete frames under reversed cyclic loading[J]. *Pci Journal*, 1998, 43(6): 58-71.
- [7] 殷小波, 黄小坤, 田春雨, 等. 配置大间距高强纵筋的钢筋混凝土柱抗震性能试验研究[J]. *建筑结构学报*, 2016, 37(8): 41-47.
- [8] 赵勇, 李锐, 王晓锋, 等. 大直径高强钢筋套筒灌浆连接预制柱抗震性能试验研究[J]. *土木工程学报*, 2017, 50(5): 27-35.
- [9] 裴梓洋. 集束配筋预制混凝土柱竖向连接方法分析与试验研究[D]. 沈阳: 沈阳建筑大学, 2018.
- [10] 梁伟怀. 集束配筋预制混凝土柱的受压性能试验研究[D]. 沈阳: 沈阳建筑大学, 2018.
- [11] 混凝土结构设计规范: GB 50010—2010(2016版)[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011.
- [12] 建筑抗震设计规范: GB 50011—2010(2016版)[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.
- [13] 装配式混凝土结构技术规程: GJ 1—2014[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2014.
- [14] 汪训流, 陆新征, 叶列平. 往复荷载下钢筋混凝土柱受力性能的数值模拟[J]. *工程力学*, 2007, 24(12): 76-81.
- [15] 崔明, 刘文林, 韩建平. PVA纤维增强混凝土框架柱抗震性能数值分析[J]. *低温建筑技术*, 2017, 39(10): 39-43.
- [16] 张军, 张辰. 装配式钢结构住宅半刚性节点抗震性能的试验研究[J]. *水利与建筑工程学报*, 2018, 16(6): 185-190.
- [17] 邢民, 王越. 碳纤维钢骨-钢管混凝土柱抗震性能研究[J]. *水利与建筑工程学报*, 2018, 16(2): 152-156.
- [18] 谢涛, 陈肇元. 高强混凝土柱抗震性能的试验研究[J]. *建筑结构*, 1998(12): 3-6.
- [19] 吕西林, 张国军, 陈绍林. 高轴压比高强混凝土足尺框架柱抗震性能研究[J]. *建筑结构学报*, 2009, 30(3): 20-26.
- [20] 范鹏. 钢筋混凝土十字形截面柱抗震性能试验研究[D]. 天津: 天津大学, 2012.
- [21] 赵斌, 吕西林, 刘海峰. 预制高强混凝土结构后浇整体式梁柱组合件抗震性能试验研究[J]. *建筑结构学报*, 2004, 25(6): 22-28.
- [22] 吴从晓, 张玉凤, 张超, 等. 装配式混凝土梁柱节点抗震性能研究[J]. *工程抗震与加固改造*, 2015, 37(1): 83-90.
- [23] 蒋勤俭. 国内外装配式混凝土建筑发展综述[J]. *建筑技术*, 2010, 41(12): 1074-1077.
- [24] 卢求. 德国装配式建筑发展历程与现状[J]. *住宅产业*, 2017, 25(2): 78-83.

(上接第47页)

- [19] 张翀, 舒赣平. 颗粒形状对颗粒流模拟双轴压缩试验的影响研究[J]. *岩土工程学报*, 2009, 31(8): 1281-1286.
- [20] 赵凯, 曾亚武, 曾超. 基于颗粒流法含软弱结构面岩质边坡稳定性分析[J]. *科学技术与工程*, 2018, 18(1): 97-102.
- [21] 曾超, 曾亚武, 赵凯. 节理接触面积和厚度对应力波传播特性影响的颗粒流数值模拟[J]. *水利与建筑工程学报*, 2018, 16(1): 134-139.
- [22] Frye K M, Marone C. The effect of particle dimensionality on granular friction in laboratory shear zones[J]. *Geophysical Research Letters*, 2002, 29(19): 22-1-22-4.
- [23] Knuth M, Marone C. Friction of sheared granular layers: Role of particle dimensionality, surface roughness, and material properties[J]. *Geochemistry Geophysics Geosystems*, 2007, 8(3).