

开洞填充墙对混凝土框架柱地震损伤影响分析*

张莹¹, 孙广俊^{1,2}, 李鸿晶¹

(1. 南京工业大学土木工程学院 南京, 211816) (2. 北京工业大学建筑工程学院 北京, 100022)

摘要 框架结构中的钢筋混凝土柱由于受到填充墙的影响, 在地震中会出现短柱效应从而产生严重的破坏。如何较真实地模拟填充墙影响下的框架柱的地震损伤是该类结构抗倒塌研究的重要内容之一。首先, 建立了一种考虑填充墙开洞影响的框架柱分段等效非线性弹簧简化模型, 并给出了简化模型中弹簧的恢复力取值; 其次, 基于该模型, 以某实际框架结构为工程背景, 对底层框架柱进行了地震损伤非线性数值模拟, 并将模拟结果与实际震害进行了比较, 验证了简化模型的有效性; 最后, 对底层框架柱的地震破坏演变机理进行了分析, 探讨了开洞填充墙对混凝土框架柱地震损伤的影响规律。研究表明, 文中的简化模型可以有效地模拟开洞填充墙对混凝土框架柱地震损伤的影响。填充墙开窗后容易造成框架柱的短柱效应, 框架柱沿窗高部分在地震中极易发生脆性剪切破坏, 其沿窗高区域的抗震设计应该重点考虑。

关键词 底部框架; 填充墙; 混凝土柱; 地震反应; 数值模拟; ABAQUS 有限元分析软件

中图分类号 TU375

引言

砌体填充墙框架结构是最为常见的建筑结构形式之一。在设计理念上填充墙不作为承力构件, 不易对框架结构体系安全性造成不利影响。但填充墙与框架结构不可避免地存在相互作用, 在地震中既有可能由于填充墙变形或破坏而消耗了部分能量, 从而保护框架结构的安全, 亦有可能由于填充墙的不适当约束而使得框架柱成为短柱, 反而导致框架结构产生不应有的脆性剪切破坏。由于填充墙上往往开设有门窗洞口, 其对框架结构的地震响应行为和破坏机理具有影响, 这在框架结构设计阶段是很少考虑的。在历次强地震中均发现此类结构震害的实例^[1]。因此, 有必要专门研究开洞填充墙对框架柱的地震损伤过程和破坏机理的影响。

国内外学者对于填充墙框架结构进行了研究^[2-11]。Fiorato 等^[6]通过填充墙框架试验指出, 填充墙框架中柱的塑性铰位置与填充墙的开洞情况有关。童岳生等^[7]提出了不同框架层数对应的不同抗侧刚度取值, 探讨了填充墙框架的刚度及强度退化的问题。在对填充墙框架结构分析研究上, 主要采

用试验研究和有限元数值模拟两种方法。在填充墙的数值模拟研究中, 提出了等效斜撑模型、等效平面框架模型等有限元模型^[8-11]。由于填充墙开洞后, 开洞区域的刚度与无洞区域的刚度明显不同, 当采用上述模型时, 如果仅用填充墙的整体刚度作为计算参数, 必然会忽略填充墙开窗区域对框架柱造成的影响, 从而对模拟结果产生一定的偏差。

笔者建立了一种可以考虑开洞填充墙影响的钢筋混凝土框架柱简化分析模型, 给出了模型中关键参数的取值依据。以在汶川地震中发生破坏的某实际底部框架结构为工程背景, 对该结构的底层钢筋混凝土框架柱进行了地震损伤非线性数值模拟, 验证了简化模型的有效性。通过分析不同时刻的损伤情况揭示了框架柱的地震损伤演化过程及破坏机理, 探讨了开洞填充墙对钢筋混凝土框架柱的影响。

1 考虑填充墙影响的框架柱模型

1.1 填充墙模型

框架结构多采用现浇楼盖体系, 填充墙对框架

* 江苏省高校自然科学研究重大资助项目(10KJA560012); 江苏省高校自然科学研究面上资助项目(13KJB560003); 中国博士后科学基金资助项目(2012M520133); 江苏省普通高校研究生科研创新计划资助项目(CXZZ13_0441)
收稿日期: 2013-09-27; 修回日期: 2013-12-05

结构的作用主要体现为水平方向的影响,故文中以分段等效非线性弹簧模拟填充墙对框架柱的作用。考虑到填充墙开洞区域的刚度与其他区域的刚度有着明显的差别,沿竖向按照孔洞区域大小将框架柱两侧的填充墙分段予以简化,使其侧向分布刚度与各区段填充墙刚度等效,如图 1 所示。

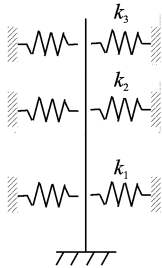


图 1 分段等效弹簧简化填充墙模型

Fig. 1 Segmentation equivalent spring simplified infill wall model

当填充墙由初始的弹性状态进入到开裂状态后,其刚度会急剧下降,但是由于框架结构对其有着较强的约束作用,填充墙的变形并不能任意扩展。因此,即使墙体已发生破坏,仍然具有一定的承载能力,直至框架结构完全破坏。此外,在实际工程中,由于填充墙一般为后砌,其与主体框架结构之间通常只存在压应力,没有拉应力。根据填充墙的这一受力破坏特性,等效弹簧单元采用考虑刚度退化的三线型恢复力模型^[7]来模拟填充墙与框架柱之间的受压作用,而当弹簧单元受拉时,其刚度取值为零,等效弹簧恢复力模型如图 2 所示。

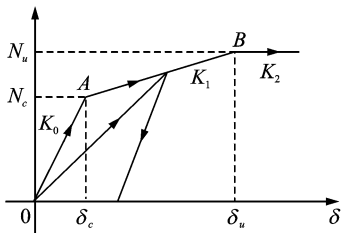


图 2 等效弹簧恢复力模型

Fig. 2 Hysteretic model of equivalent spring

图中: K_0 为受压开裂前的初始刚度; A 为开裂点,对应的开裂荷载为 N_c ,开裂位移为 X_c ; K_1 为开裂后的退化刚度; B 为极限破坏点,对应的极限荷载为 N_u ,极限位移为 X_u ; K_2 为完全破坏后的刚度,取值为 0。

填充墙通常具有竖向刚度和水平刚度,由于文中模型主要考虑填充墙的水平作用,因此只计算填充墙的水平线刚度和剪切刚度。

墙体水平线刚度为

$$k_{w1} = \frac{E_w A_1}{l} \quad (1)$$

墙体无洞段剪切刚度为

$$k_{w2} = \frac{G_w A_2}{1.2h} \quad (2)$$

墙体大开洞段剪切刚度为

$$k'_{w2} = \frac{G_w A_2 A_3}{1.2(A_3 h_2 + A_2 h_1)} \quad (3)$$

其中: E_w, G_w 分别为砌体的弹性模量和剪切模量,且 $G_w = 0.3E_w$; A_1 为墙体的竖直截面面积, A_2, A_3 分别为墙体的水平截面面积和除去开窗部位的水平截面面积,满足 $A_1 = h \cdot t, A_2 = l \cdot t, A_3 = l_1 \cdot t$; l, l_1 分别为墙体总宽度和开窗部位宽度; h 为墙体总高度, h_1 为开窗部位墙体高度, h_2 为除去开窗部位的墙体高度; t 为墙厚。

因此,沿着弹簧长度方向的填充墙的总线刚度为 $\lambda(k_{w1} + k_{w2})$ 或 $\lambda(k_{w1} + k'_{w2})$ 。其中, λ 为刚度退化系数,对于初始刚度 K_0, λ 取 1;对于图 2 中开裂点至屈服点之间的平均刚度 K_1, λ 取 $0.2^{[7]}$;对于屈服点之后的刚度 K_2, λ 取 0。由于填充墙中层为大开窗区域,计算得到的中间层刚度 k_2 远远小于上层刚度 k_3 和下层刚度 k_1 。

1.2 框架柱模型

框架柱采用 ABAQUS 进行实体建模,混凝土和钢筋采用分离式方法分别建模,如图 3 所示。其中,混凝土采用 C3D8R 单元,钢筋采用 T3D2 单元,运用 Embedded 技术进行钢筋与混凝土之间自由度的耦合,将建好的钢筋骨架嵌入混凝土模型当中,在模型上考虑箍筋的约束作用。

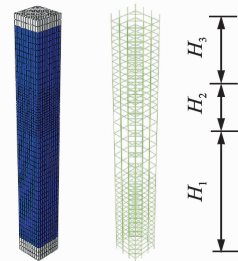


图 3 框架柱实体模型

Fig. 3 Solid model of frame column

图 3 中,混凝土本构采用 Lubliner^[12] 提出的损伤塑性模型,损伤因子为应力状态和单轴拉压损伤变量的函数。取混凝土受拉开裂时的割线模量作为混凝土的初始弹性模量;钢筋本构采用强化的二折

线模型,不考虑刚度的退化。折线第1上升段的斜率,为钢筋本身的弹性模量,第2上升段为钢筋强化段,此时的斜率取为第1段的 $1/100^{[13]}$ 。

框架柱顶与梁相接处及柱底与基础相接处均设为刚体,以此来模拟梁柱节点和基础。柱顶部采用滑动支座,柱底为固定支座,并将结构的上部楼层质量和荷载均匀分布到每一根框架柱上,施加在框架柱顶端。

根据框墙柱的开窗位置,将模型从下往上分成3段(H_1, H_2, H_3),中间段(H_2)即沿窗高部分。按照文中提出的分段等效弹簧模型,在框架柱与墙接触每个有限单元节点上设置等效弹簧,以此来模拟柱与填充墙的相互作用。由于框墙柱开设窗口,其每一段柱高的刚度均不同,上段柱 k_3 和下段柱 k_1 均明显大于中间段 k_2 。

2 框架柱地震损伤模拟分析

2.1 结构震害实例

江油市新华书店综合楼为底部框架结构。底部一层为钢筋混凝土框架,层高4.5 m,上部五层为砌体结构,层高3 m。结构底层平面布置如图4所示。框架部分采用C30混凝土浇筑,填充墙部分采用240 mm厚MU10标准砖,M7.5砂浆砌筑。

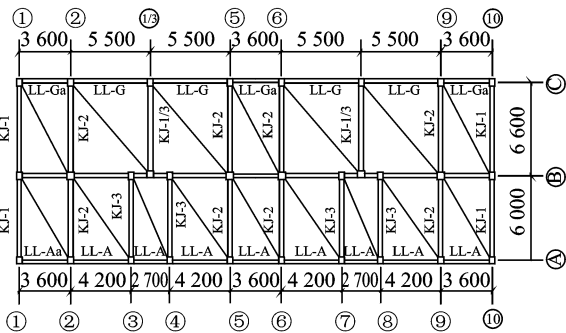


图4 底层平面结构布置(单位:mm)

Fig. 4 Structural arrangement in ground plan(unit:mm)

汶川地震中,该结构底层框架破坏严重,其震害主要集中在C轴框架柱上,C轴的框架柱除1,10轴两个边柱外,中间的框架柱均发生严重的破坏。框架柱沿窗部分混凝土严重碎裂,纵向钢筋和箍筋外露,框架梁柱节点处未发现明显破坏,实际震害如图5所示。由图5可以看出,C轴的底层框架柱的破坏模式均为脆性剪切破坏,框架梁柱节点处未发现破坏,底层窗下的填充墙主体轻微开裂。

引起C轴底层框架柱的破坏原因,直观的判断



(a) C轴框架柱总体震害

(a) Global seismic disasters of frame columns in C-axis



(b) C轴上1/3轴框架柱震害

(b) Seismic disasters of 1/3-axis column in C-axis

图5 框架柱震害

Fig. 5 Earthquake disasters of frame column

是由于底层框架柱间的填充墙和不合理的开窗影响造成的。由于相邻柱间开设通窗,填充墙对框架柱产生的约束作用,从一定程度上减小了框架柱的计算高度,降低了底层框架的延性,导致框架柱产生严重的短柱效应,发生脆性剪切破坏。

2.2 数值模拟分析

为了研究底层开洞填充墙对框架柱地震反应的影响,文中将遭受严重破坏的C轴与1/3轴线相交处的框架柱单独取出,基于文中提出的模型,采用ABAQUS有限元软件对其进行数值模拟。

该柱截面为500 mm×500 mm,各段墙体高度分别为 $H_1=2.4$ m, $H_2=0.9$ m, $H_3=1.2$ m。柱截面配筋如图6所示。混凝土损伤塑性模型参数如表1所示,地震动输入采用截取的峰值段江油地震波,如图7所示。结构的地震反应采用显式求解器ABAQUS/Explicit进行求解。

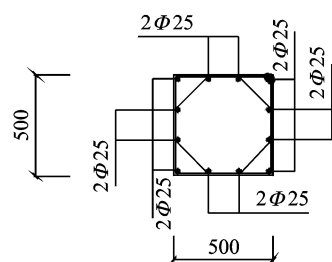


图6 框架柱配筋(单位:mm)

Fig. 6 Reinforcement of frame column(unit:mm)

表 1 混凝土塑性损伤模型参数取值

Tab. 1 Parameter values of concrete plastic-damage

材料	弹性模量 E/MPa	泊松比 γ	密度 $\rho/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	极限压应力 σ_{cu}/MPa	极限拉应力 σ_{tu}/MPa	剪胀角 $\varphi/(\text{°})$
C30	3.0×10^4	0.167	2 400	47.73	4.77	32.4

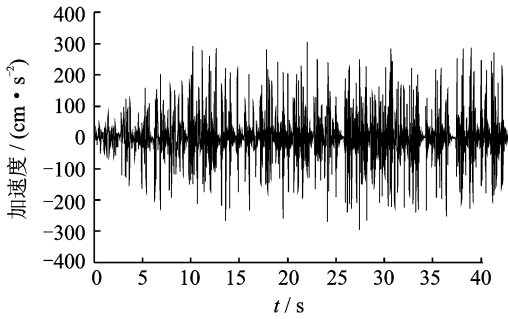


图 7 地震动加速度时程

Fig. 7 Acceleration time-history of earthquake ground motion

数值模拟分析得到的框架柱混凝土损伤演化模拟过程如图 8 所示,具体简述如下:

- 1) 如图 8(a)所示,在框架柱与窗洞口上下边缘交界部位的混凝土首先出现受拉和受压损伤。
- 2) 如图 8(b)所示,交界部位的混凝土损伤范

围逐渐扩大,从交界部位外侧沿 45°方向向内侧快速发展,呈现出明显的 X 型分布趋势。

3) 如图 8(c)所示,混凝土的损伤范围逐渐增大,损伤分布开始变得不均匀,沿窗高对角线方向的损伤单元逐渐贯通,导致该范围内框架柱的混凝土迅速破坏。

4) 框架柱混凝土的损伤程度和范围均继续增大,沿窗高位置的混凝土应力明显低于其他位置的混凝土应力,混凝土失去承载力;到地震作用后期,混凝土损伤范围基本保持不变,混凝土的应力值降低,损伤发展极其缓慢,几乎停止,最终如图 8(d)所示。

由上述分析结果可以看出,底层框架柱混凝土的损伤最终主要集中在沿窗高位置,其余部位的损伤较小,计算模型中框架柱出现明显的短柱效应破坏。

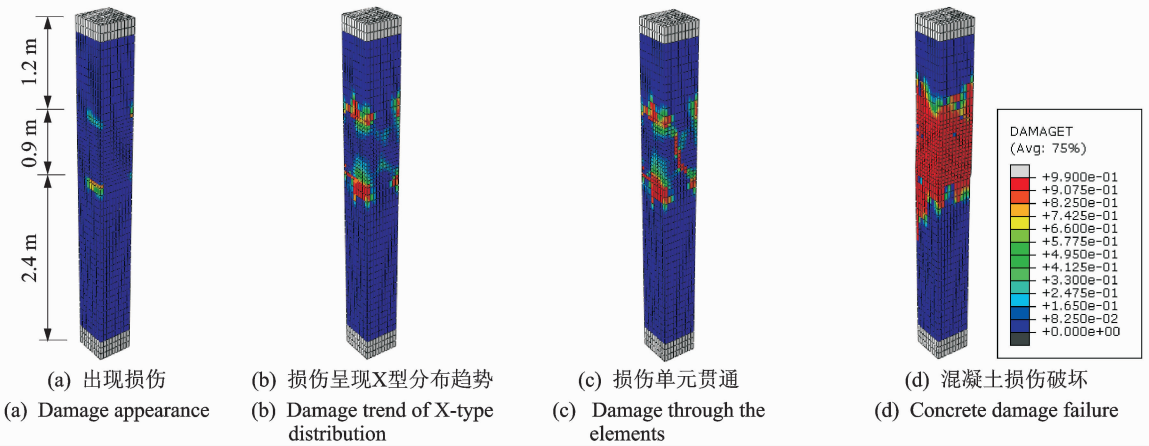


图 8 框架柱混凝土损伤演化过程

Fig. 8 Concrete damage evolution process of frame column

数值模拟分析得到的框架柱钢筋的最终应力和变形如图 9 所示。可以看出,钢筋的应力也主要集中在沿窗高位置,此处箍筋全部受拉,左侧纵向主筋受拉,右侧纵向主筋受压;左右两侧的纵向主筋均发生了弯曲变形。

由上述分析可以看出,文中的数值模拟结果与图 5 所描述的震害现象基本一致,说明笔者所建立的考虑开洞填充墙影响的混凝土框架柱分段等效弹

簧简化模型是合理的。

3 框架柱地震损伤机理分析

为了研究框架柱不同位置的损伤程度大小,沿柱高不同高度处分别选取 5 个测点,并给出这 5 个测点的压缩损伤时程曲线,损伤指数的取值定义在 0(无损伤)到 1(完全失去强度)范围内,分析结果如

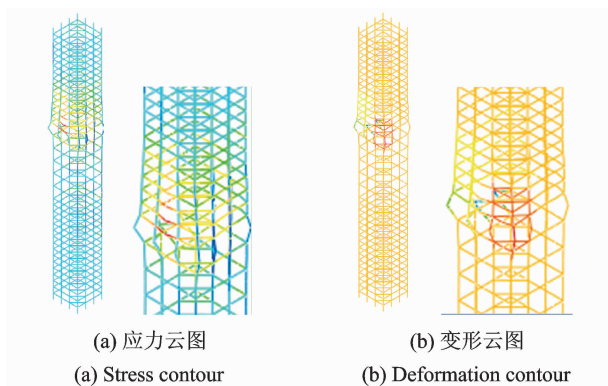


图9 框架柱钢筋应力和变形

Fig. 9 Stress and deformation of steel in frame column

图10所示。可以看出,位于窗高位置附近的2号测点最先出现损伤,损伤指数迅速增加,在20 s左右达到最大值,且损伤指数接近于1,此时可以认为2号测点的混凝土几乎完全失去承载力,发生脆性破坏。其余4个测点出现损伤的时间均晚于2号测点,且损伤程度明显较小,损伤指数基本位于0.1以下,可以认为,这些部位的混凝土损伤程度较轻。框架柱的最终压缩损伤指数沿柱高的分布情况如图11所示。

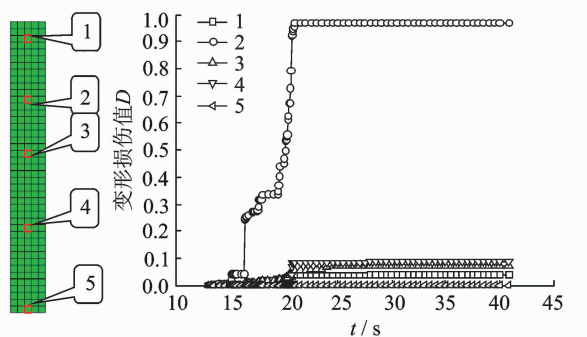


图10 不同柱高处混凝土压缩损伤时程

Fig. 10 Compressive damage index time-histories of concrete in different column heights

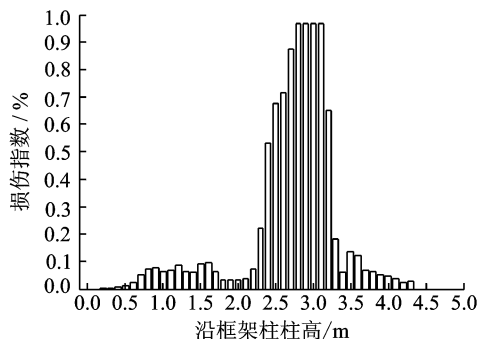


图11 柱压缩损伤指数分布图

Fig. 11 Compressive damage index with different column height

图12给出了框架柱上2号测点的混凝土等效应力时程曲线。由图12可以看出,大约10 s以后,混凝土的等效应力逐渐开始增大,在20 s左右到达峰值,这与图10的结果相一致。之后,混凝土的等效应力迅速下降,由此可以推断出2号测点的压缩损伤发展很快,其刚度也随之大幅度减小,其宏观表现为2号测点的混凝土出现裂缝失去承载能力。

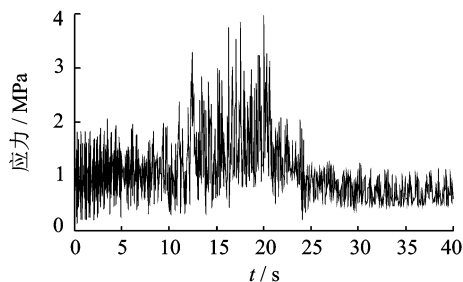


图12 2号测点混凝土等效应力时程

Fig. 12 Equivalent stress time-history of concrete in No. 2 point

根据震害表现和文中数值模拟分析结果,可以推测出框架柱的地震损伤原因和机理大致如下:由于填充墙沿墙高中段开窗,中段的刚度明显小于上段和下段刚度,从而导致地震作用下应力和变形的集中,构件产生薄弱部位破坏。水平地震作用初期,框架柱沿窗高部分的连结单元首先出现损伤,标志着墙柱接触面出现了界面裂缝。随着水平地震作用的增加,连结单元处于双向拉压状态,但仍然在弹性范围内。当应力达到框架柱单元的破坏准则时,单元即发生开裂破坏。开裂单元主要分布在柱沿窗高部分受压对角线方向的斜向区域,多数单元因为拉裂导致破坏。计算模型中框架柱裂缝首先出现在墙框窗顶和窗底的接触面,然后沿着窗高对角线方向延伸发展,最后形成的斜裂缝区域贯穿框架柱整个窗高部分。

因此,在进行框架填充墙开窗设计时,应重点考虑柱沿窗高位置的区域,尽量避免“短柱”效应,着重研究填充墙砌筑材料、厚度以及与框架之间的连接方式。

4 结论

1) 笔者建立了一种可以考虑开洞填充墙影响的混凝土框架柱简化模型。考虑到填充墙开洞区域的刚度与其他区域的刚度有着明显的差别,沿竖向按照孔洞区域大小将框架柱两侧的填充墙分段予以

简化,以分段等效非线性弹簧模拟填充墙对框架柱的作用。

2) 以汶川地震中发生破坏的某实际底部框架结构为案例,基于 ABAQUS 有限元分析软件对开窗填充墙的底框柱进行了地震损伤数值模拟,并与实际震害进行了对比,研究表明,文中的建模方法具有可行性。

3) 数值模拟结果表明,底层框架柱混凝土的地震损伤首先出现并主要集中在沿窗高位置,裂缝呈现明显的 X 型分布;沿窗高位置处的钢筋应力也明显增大,箍筋全部受拉,纵向主筋均发生了弯曲变形。

4) 填充墙开窗后容易造成框架柱的计算高度减小,从而形成短柱。当遭受地震作用时,框架柱沿窗高部分极易发生脆性的剪切破坏。因此,对于开窗填充墙的框架柱的抗震设计,应重点考虑柱沿窗高位置的区域。

参 考 文 献

- [1] 清华大学土木结构组,西南交通大学土木结构组,北京交通大学土木结构组. 汶川地震建筑震害分析[J]. 建筑结构学报, 2008, 29(4): 1-9.
Civil and Structural Groups of Tsinghua University, Xinan Jiaotong University, Beijing Jiaotong University. Analysis on seismic damage of buildings in the Wenchuan earthquake [J]. Journal of Building Structural, 2008, 29(4):1-9. (in Chinese)
- [2] Chiou Y J, Tzeng J C, Liou Y W. Experimental and analytical study of masonry infilled frames [J]. Journal of Structural Engineering, 1999, 125(10): 1109-1117.
- [3] Schneider S P, Zagers B R, Abrams D P. Lateral strength of steel frames with masonry infills having large openings [J]. Journal of Structural Engineering, 1998, 124(8): 896-904.
- [4] 孙广俊, 蒋雯, 李鸿晶. 循环荷载下钢筋混凝土柱滞回性能数值模拟[J]. 振动、测试与诊断, 2013, 33(2): 1-6.
Sun Guangjun, Jiang Wen, Li Hongjing. Numerical simulation on hysteretic response of reinforced concrete column under cyclic loads [J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2013, 33(2): 1-6. (in Chinese)
- [5] Mosalam K M, White R N, Ayala G. Response of infilled frames using pseudo-dynamic experimentation [J]. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 1998, 27(6): 589-608.
- [6] Fiorato A E, Sozen M A, Camble W L. An investigation of the interaction of reinforced concrete frames with masonry filler walls [R]. A Report to the Department of Defense, Urbana, Illinois: University of Illinois, 1970:495.
- [7] 童岳生, 钱国芳. 砖填充墙钢筋混凝土框架的变形性能及承载能力[J]. 西安冶金建筑学院学报, 1985, 42(2): 1-10.
Tong Yuesheng, Qian Guofang. Deformation performance and bearing capacity of RC frame with infilled brick walls [J]. Journal of Xi'an Institute of Metallurgy and Construction Engineering, 1985, 42(2): 1-10. (in Chinese)
- [8] El-Dakhkhni W W, Elgaaly M, Hamid A A. Three-strut model for concrete masonry-infilled steel frames [J]. Journal of Structural Engineering, 2003, 129(2): 177-185.
- [9] Thiruvengadam V. On the natural frequencies of infilled frames [J]. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 1985, 13(3): 401-419.
- [10] Armin B M, Benson S. Finite element modeling of masonry-infilled RC frames [J]. Journal of Structural Engineering, 1997, 123(5): 604-613.
- [11] 卓幸福, 蔡益燕. 用墙板单元分析框架剪力墙结构[J]. 建筑结构学报, 1992, 13(2): 29-38.
Zhuo Xingfu, Cai Yiyen. Analysis of frame structure with shear walls using wall panel elements [J]. Journal of Building Structural, 1992, 13(2): 29-38. (in Chinese)
- [12] Lubliner J, Oliver J, Oller S. A plastic-damage model for concrete [J]. International Journal of Solids and Structures, 1989, 25(3): 299-326.
- [13] 何政, 欧进萍. 钢筋混凝土结构非线性分析[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2006: 28-29.



第一作者简介:张莹,女,1988年10月生,博士研究生。主要研究方向为工程抗震。

E-mail: uio308@126.com

通信作者简介:孙广俊,男,1979年10月生,博士后、讲师。主要研究方向为工程抗震与减震。

E-mail: gjsun2004@163.com