

doi: 10.11918/j.issn.0367-6234.2016.12.005

钢筋混凝土框架柱端剪切破坏震害分析及对策

张昊宇, 陈洪富, 林旭川, 陈浩, 毛晨曦

(中国地震局地震工程与工程振动重点实验室(中国地震局工程力学研究所), 哈尔滨 150080)

摘要: 为避免钢筋混凝土框架柱在地震中因填充墙附加剪力导致剪切破坏, 本文总结了近年来国内外破坏性地震中出现的典型柱端剪切破坏震害, 采用 ABAQUS 对典型填充墙框架进行了水平推覆模拟, 据此分析了框架柱端剪切破坏的受力机理, 并以鲁甸地震中的一栋严重震损的实际结构为例, 采用 ABAQUS 对典型填充墙框架进行了水平推覆模拟和受剪承载力计算。分析表明, 填充墙附加剪力是造成框架柱端剪切破坏的主要原因。依据分析结果和已有试验成果给出了考虑填充墙附加剪力的柱端剪力荷载计算公式。震损结构案例分析表明, 忽略填充墙附加剪力可能导致结构的抗倒塌能力严重下降, 本文填充墙附加剪力公式计算结果与有限元分析结果及实际震害符合较好, 可供工程设计参考。

关键词: 震害调查; 钢筋混凝土框架; 框架柱; 剪切破坏; 填充墙

中图分类号: TU375.3

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2016)12-0043-08

Mechanism analysis and prevention of seismic shear failure of RC frame columns

ZHANG Haoyu, CHEN Hongfu, LIN Xuchuan, CHEN Hao, MAO Chenxi

(Key Laboratory of Earthquake Engineering and Engineering Vibration (Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration), Harbin 150080, China)

Abstract: To prevent reinforced concrete (RC) frame columns from seismic shear failure caused by additional shear force of the infill wall, severe shear failures of RC frame columns investigated in recent earthquakes were presented. Finite element modeling (FEM) pushover analysis with ABAQUS and mechanical characteristics analysis on 6 infilled RC frames were conducted. Then a RC frame structure subjected to LuDian Ms6.5 earthquake was analyzed by ABAQUS. The analysis indicates that the additional shear force of the infill wall results in the shear failure of the column. To ensure that a structure operates in a high-ductility mode, an estimation formula was developed for the additional shear force which could be used in structure design. The case study shows that without appropriate considerations about the additional shear force of the infill wall, anti-collapse capability of the structure will be threatened seriously. Analysis also demonstrates that the additional shear force estimation formula is in well accordance with the FEM analysis result and the seismic damage investigations, it can be a reference for engineering design.

Keywords: earthquake damage investigation; RC frame; frame column; shear failure; infill wall

强柱弱梁、强剪弱弯、强节点弱构件是钢筋混凝土(RC)框架结构的基本抗震设计原则, 可确保结构在强震中具有较好的延性和抗倒塌能力。但近年来国内外多次破坏性地震中很多 RC 框架结构出现了较为严重的薄弱层柱顶剪切破坏, 严重威胁结构的“大震不倒”能力。本文作者历经 2013 年芦山地震、2014 年鲁甸地震和 2015 年尼泊尔地震震后调查, 总结了这 3 次地震中的 RC 框架结构柱剪切破坏, 通过 ABAQUS 典型填充墙框架水平推覆分析, 对该

问题进行探讨并初步给出防治措施。通过对鲁甸地震中一栋震损结构的非线性分析, 对柱端剪切破坏危害和防治措施有效性进行讨论。

1 钢筋混凝土框架柱的典型震害

图 1 为 2013 年芦山 7.0 级地震^[1]及 2015 年尼泊尔 8.1 级地震中典型的 RC 框架柱剪切破坏; 图 2 为 2014 年云南鲁甸地震中龙头山镇典型 RC 框架的破坏^[2]。

上述 RC 框架结构震害呈现以下特点: 1) 绝大多数框架表现为强梁弱柱破坏; 2) 框架柱破坏模式与紧邻填充墙相关: 柱两侧无填充墙或毗邻填充墙有较大洞口时, 柱多为压弯破坏; 小开洞, 无开洞填充墙, 特别是较长的无洞口填充墙, 相邻框架柱多呈剪切破坏, 且破坏程度明显重于压弯破坏柱。需要注

收稿日期: 2015-11-29

基金项目: 地震行业科研专项经费项目(201308003); 国家自然科学基金青年基金(51108433, 51308511, 51408562)

作者简介: 张昊宇(1978—), 男, 博士, 副研究员

通信作者: 毛晨曦, maochenxi2006@163.com

意的是,与剪切破坏柱相邻的填充墙,既有粘土砖墙(图 1(a)、(c))也有空心砖墙(图 1(b))。

剪切破坏显著降低框架柱的延性,严重威胁结构的抗倒塌能力,应尽量避免。中国现行抗震规范^[3]并未针对填充墙给框架柱的剪力影响给出明确的计算方法。89 版抗震规范^[4]曾在附录三中提及填充墙附加剪力,但仅针对粘土砖填充墙框架,且计算方法

有待细化。国内外学者对填充墙 RC 框架开展了大量研究,但大部分侧重于填充墙等效支撑模拟^[5]、填充墙对整体结构或框架的影响^[6]、有限元模拟方法^[7-8]等。文献^[9]对填充墙导致框架柱的破坏进行了阐述,文献^[10]给出了填充墙框架整体的抗剪承载力计算方法,但如何从工程设计角度避免此类剪切破坏,仍有待讨论。本文对此开展了研究。



(a) 双石中学逸夫楼(芦山地震Ⅸ度区) (b) 上里中学底层边柱(芦山地震Ⅷ度区) (c) Charikot 自建 RC 框架(尼泊尔地震Ⅸ度区)

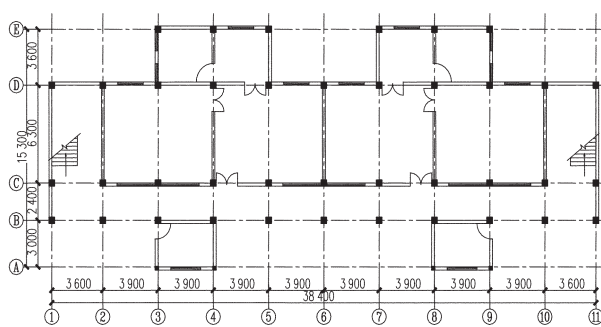
图 1 芦山地震及尼泊尔地震中典型的 RC 框架柱剪切破坏^[1]

Fig.1 Shear failure of the RC frame columns in Lushan Ms7.0 Earthquake & Nepal Ms8.1 earthquake^[1]

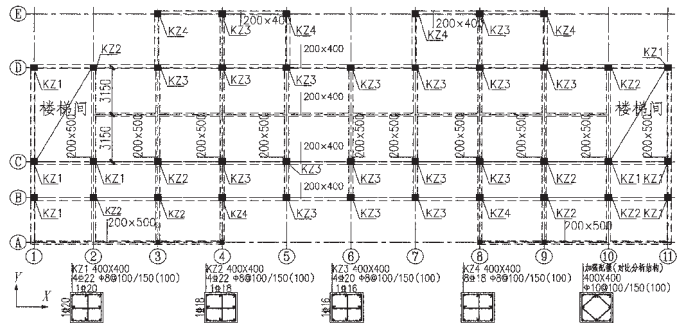


(a) 龙头山镇震后鸟瞰图

(b) 镇幼儿园外观



(c) 一层建筑平面(mm)



(d) 一层结构平面(mm)



(e) ⑥轴横墙框架柱剪切破坏



(f) E轴-⑦-⑨轴处框架

图 2 鲁甸地震中龙头山镇幼儿园震损

Fig.2 Damage of Longtoushan Kindergarten

2 框架柱剪切破坏机理分析

为探究柱端剪切破坏机理,对图 3 的 6 个钢筋

混凝土框架建立有限元模型并进行水平推覆分析。

2.1 模型验证及建模计算

图 3 框架的混凝土强度设计等级 C30,纵筋

HRB335, 箍筋 HPB235, 填充墙为 Mu10 实心砖, M5 砂浆砌筑, 厚度 200 mm. 材料强度均取用平均值. 采用 ABAQUS 建模分析, 混凝土及砌体均采用混凝土塑性损伤模型, 混凝土应力应变关系选取文献 [11] 偏压偏拉本构 (图 4(a)); 砌体抗压强度按文献 [12] 附录 D 计算, 采用文献 [13] 应力应变关系 (图 4(b)). 钢筋选取三折线模型 (图 4(c)), embed (嵌入) 到构件中. 采用无摩擦接触模拟填充墙与框架间的相互作用.

对文献 [7] 空框架、空心砖及实心砖填充墙框架试件 (图 5(a)) 进行水平推覆模拟 (空心砌块抗压强度按砌块横截面孔洞率进行折减). 由图 5(b) 可知, 尽管在力-位移曲线的下降段存在一定误差, 但模拟承载力与试验大体相符, 可用于填充墙框架承载力分析.

对 6 个框架分别进行水平推覆分析: 首先按设计轴压比 0.4 在柱顶施加竖向力, 之后在梁端施加水平位移, 直至框架层间侧移角达 1/50 或计算不再收敛.

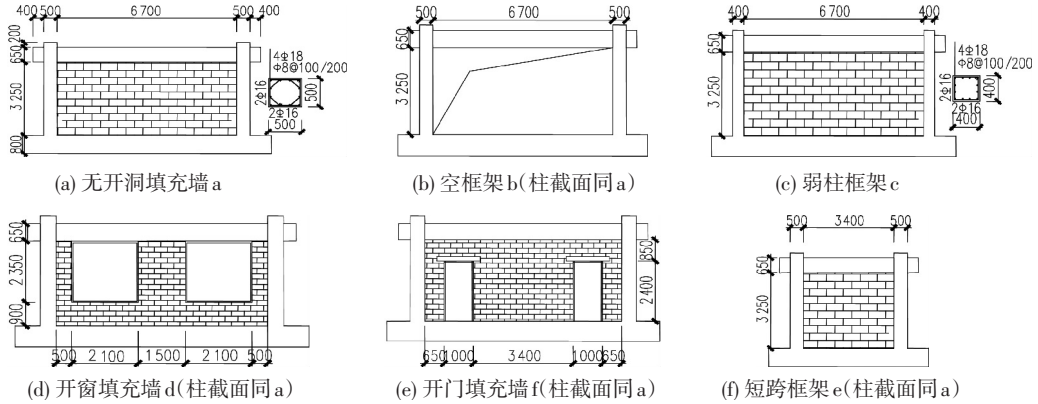


图 3 计算框架 (mm)

Fig.3 FEM Models (mm)

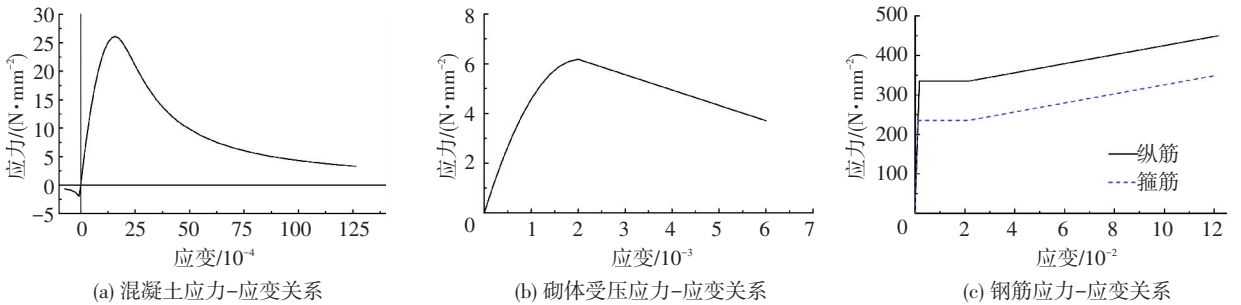
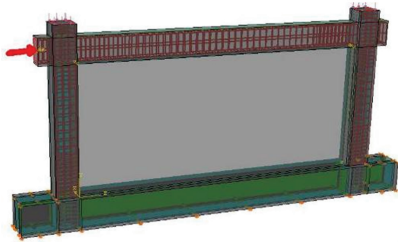
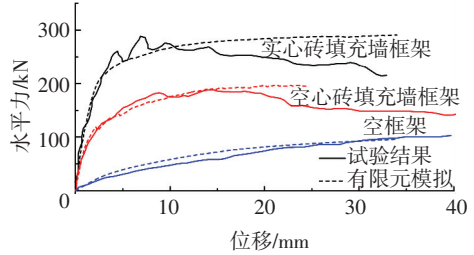


图 4 材料本构关系曲线

Fig.4 Strain-stress relationships of materials



(a) 有限元模型



(b) 有限元分析结果与文献[7]试验结果对比

图 5 对文献 [7] 试验的模拟验证

Fig.5 FEM analysis of the experiments in [7]

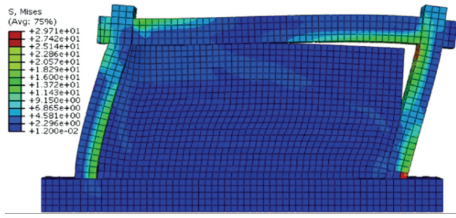
2.2 结果分析

图 3(a) 框架加载至极限位移时的 misses 云图如图 6(a): 填充墙所受剪力大部分传至左侧框架柱顶端, 此即为填充墙附加剪力. 图 6(b) 左侧柱顶箍筋的应变明显大于右侧, 且已接近屈服应变. 填充墙中剪力的传递路径如图 6(c): 其一由右下角至左上角, 其二由底部均匀传至左侧柱体中部. 当柱抗剪承载力较小时 (图 6(d)), 破坏模式变为墙体仅局部

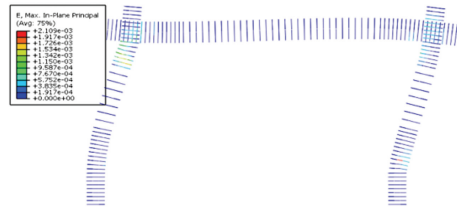
压陷, 柱顶剪切破坏. 这与图 1、图 2 震害现象吻合. 图 7 给出了框架 a、b、c 的总剪力及各框架柱剪力与层间位移的关系曲线. 可见填充墙框架承受的水平剪力大于空框架, 强柱框架 a 的层间剪力大于弱柱框架 c. 这是由于当柱有较大抗剪承载力时, 墙体发生剪切破坏, 其抗剪承载力充分发挥; 当柱的抗剪承载力较弱时, 墙体的抗剪承载力大于柱, 造成柱端剪切破坏, 墙体抗剪承载力未充分发挥.

图 8 为框架 a、b 在 1/120 层间侧移角时的柱剪力图:框架 a 左侧柱顶剪力约为空框架柱的 2.8 倍,可知在设计阶段不考虑填充墙附加剪力会明显低估框架柱的剪力荷载;图 9 为框架 a 不同侧移时填充墙作用于左柱的线荷载.最大荷载位置随侧移角的增大明

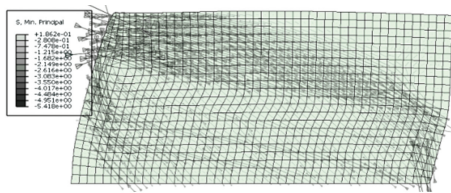
显下移,缘于墙角局部压碎,造成墙体对柱的水平力合力点下移,在框架柱端形成短柱;图 10 为不同层间侧移角时框架 a 的柱剪力分布,可见绝大部分填充墙附加剪力在结构弹性阶段(1/550)已施加,因此无论小震设计或大震验算都应考虑填充墙附加剪力.



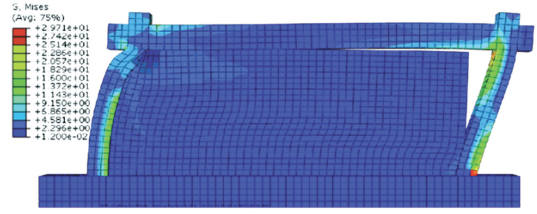
(a) 无开洞模型 a 混凝土及砖墙 misses 应力云图



(b) 无开洞模型 a 箍筋应变云图



(c) 无开洞模型 a 砖墙 misses 矢量应力云图



(d) 弱柱框架 c 模型混凝土及砖墙 misses 应力云图

图 6 框架 a、b、c 模拟结果分析

Fig.6 Stresses of frames a, b, and c

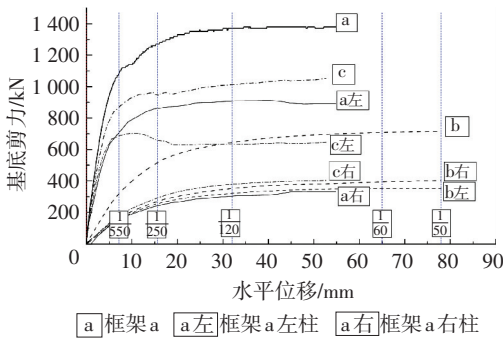


图 7 框架 a、b、c 加载点力-位移曲线

Fig.7 Shear force-story drift relationships of frames a, b, and c

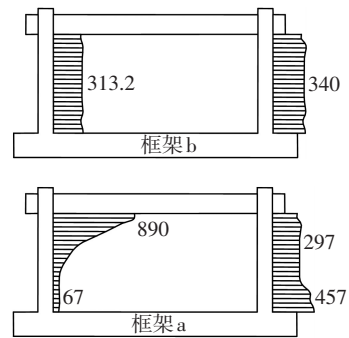


图 8 框架 a、b 层间侧移角 1/120 时柱剪力对比 (kN)

Fig.8 Column shear diagram at a story drift of 1/120 (kN)

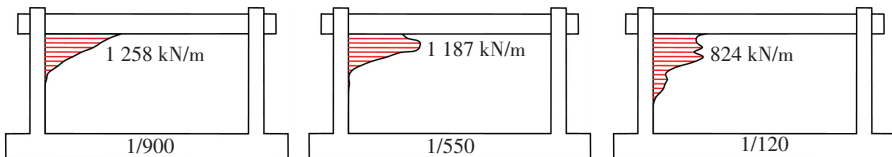


图 9 不同侧移角下填充墙作用于柱的线荷载 (框架 a)

Fig.9 Interaction load distributions of the infill wall and column of frame a

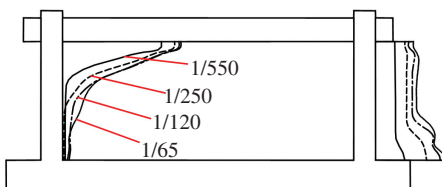


图 10 框架 a 柱剪力图 (kN)

Fig.10 Shear diagrams of frame a (kN)

对图 3(d)、(e)、(f) 模型进行水平推覆分析,可得图 11 结果.图 11(a)窗台上部左边墙体以受弯为主,提供的附加剪力较小;图 11(b)框架的附加剪力主要为门口之间墙体提供;图 11(c)填充墙破坏

模式与图 3 框架 a 类似.图 11(d)表明附加剪力大小受墙体“有效水平截面”面积的影响.

3 填充墙附加剪力的计算建议

框架柱和填充墙的破坏互相制约:当墙体抗剪承载力大于框架柱抗剪承载力时,框架柱首先破坏,之后丧失承载力并卸载,墙体破坏即被推迟(图 6(d));当墙体抗剪承载力小于框架柱时,柱子更可能发生压弯破坏,而墙体发生整体剪切破坏(图 6(a)).相比之下,后者实现了强剪弱弯,保证了框架柱的延性,确保填充墙作为第二道抗震防线,为主体结构提供支撑和

耗能,是希望出现的破坏模式.为实现该受力模式,宜在工程设计中定量考虑填充墙附加剪力.参考规范对底框结构嵌砌于框架之间的填充砖墙框架抗震受剪承载力验算公式(7.2.9-3)^[12],建议毗邻填充墙的框架柱按式(1)计算剪力:

$$V = V_c + V_f, \quad (1)$$

$$V_f = \sum f_{vE} A_{w0}. \quad (2)$$

式中: V_c 为框架柱自身受弯产生的剪力,可按抗震规

范^[4]6.2.5、6.2.6 条计算; V_f 为填充墙附加剪力; f_{vE} 为填充墙砌体沿阶梯形截面破坏的抗震抗剪强度设计值; A_{w0} 为填充墙有效附加剪力墙段水平截面计算面积,无洞口时取实际截面的 1.6 倍(文献[10]给出 A_{w0} 在无洞口时宜取 1.25 倍实际截面面积,但参考其他文献和本文分析结果,无洞口时取实际截面 1.6 倍更安全),有洞口时取截面净面积,但不计入宽度小于洞口高度 1/4 的墙肢截面面积.

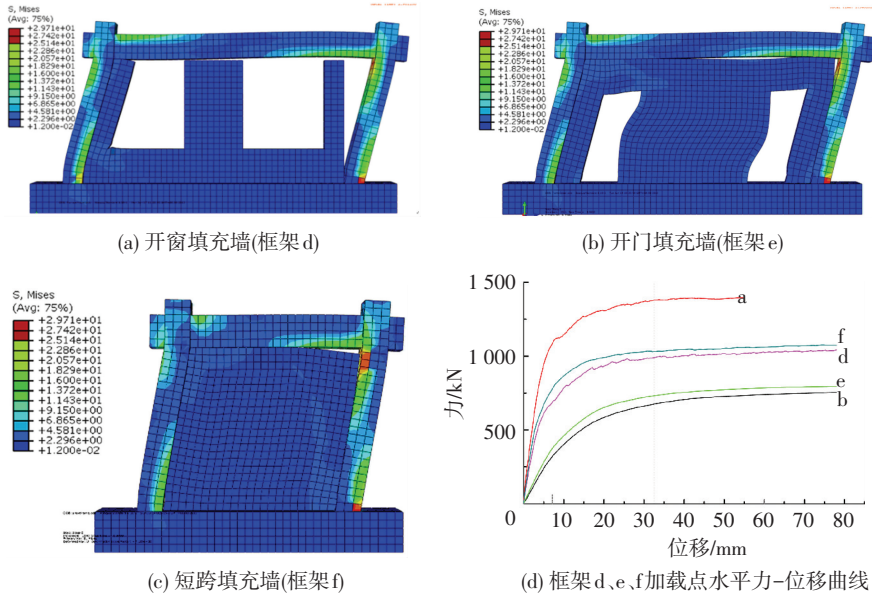


图 11 框架 d、e、f 内力分析

Fig.11 Analysis of frames d, e, and f

偏于保守地认为附加剪力完全传递至一个框架柱上.当一根柱两侧均有填充墙时,附加剪力可取柱两侧填充墙附加剪力中的较大值.建议柱顶及柱底均按照该剪力进行抗剪承载力验算.

为检验式(2),采用该公式计算了文献[7]、[9]、[14]试件及图 3 框架 a、d、e、f 的柱端剪力 V_f ,并将 V_f 与实际柱端剪力(试验结果或有限元分析结果)之比绘于图 12.比值越接近 1 说明式(2)越合理.可见式(2)计算值基本符合试验结果和分析结果,且大于大部分试验及分析结果,略偏于安全.

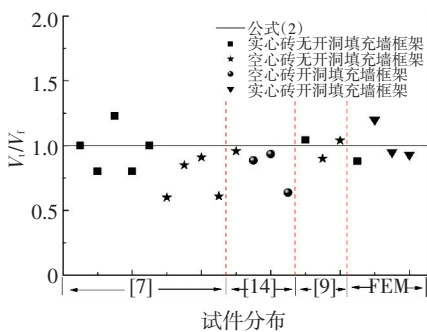


图 12 附加剪力试验值和有限元计算结果与式(2)计算值对比
Fig.12 Additional shear forces obtained by equation (2) vs. test & FEM analysis results

4 附加剪力计算公式的验证

为验证式(1)、(2)的有效性和填充墙附加剪力对整体结构抗震性能的影响,本节分别以图 3(a)、(c) 框架,以及图 2 龙头山幼儿园为例进行对比分析.

4.1 单榀框架

分别计算图 3(a)、(c) 框架单个柱子的抗剪承载力设计值(偏于保守地取剪跨比 $\lambda=1$ 计算抗剪承载力)和剪力荷载设计值(按式(1)计算,其中 V_c 按抗规^[3]式 6.2.5-2,一级框架计算),二者比值及填充墙附加剪力在总剪力荷载值中所占比重见表 1.

表 1 单榀框架抗剪承载力计算结果

Tab.1 Shear force & shear capacity of infilled frame kN

框架	柱抗剪承载力设计值	柱剪力荷载设计值	附加剪力在剪力荷载中占比/%	荷载/抗力
a	382	280	52.6	0.73
c	191	260	56.6	1.36

对比表 1 及图 6(a)、(d) 可知,填充墙附加剪力在柱端剪力荷载中占比较大(大于 50%).框架 a 的柱子通过了抗剪承载力验算,有限元模拟中实现了“强柱弱填充墙”破坏;框架 c 柱子抗剪承载力无法通过

验算,在模拟中则发生“弱柱强填充墙”破坏.因此公式(1)、(2)较好地预测了填充墙框架受力情况.

4.2 龙头山镇中心幼儿园

图 2 为一栋 2011 年建造的 3 层 RC 框架.混凝土强度设计等级 C25,填充墙为 180 mm 厚的粘土砖墙,在 2013 年鲁甸地震中遭遇强震,底层多个柱顶严重剪切破坏,震后结构底层明显侧移,震损程度达毁坏.距该结构不足 100 m 的龙头山强震台站(图 2(a))记录了地面加速度时程,东西向水平加速度峰值达 949 gal.选取该结构设置 3 个力学模型进行模拟分析:

- 1) 仅考虑填充墙重力荷载,不考虑填充墙和框架间相互作用的原型结构空框架;
- 2) 考虑填充墙与框架相互影响(即为原型结构);
- 3) 在 2 基础上,所有框架柱均采用图 2(d) 右下角加强型配箍(加强后框架柱均满足抗剪承载力要求).

采用 ABAQUS 进行分析.图 13 为原型结构有限元模型.框架梁柱及填充墙采用实体单元 C3D8R,楼板采用壳单元,框架柱及填充墙使用混凝土塑性损伤模型,楼盖无明显震损,近似采用弹性本构;框架柱的钢筋采用桁架单元,embed(嵌入)到柱中.材料强度依据规范^[12,15]取用平均值,材料应力应变关系与前述一致.按照图 14 步骤分别对 3 个模型进行分析.分析过程分为两个阶段:1)非线性时程分析(采用显式分析以获得较好的收敛性),得到结构各方向的位移反应;2)以得到的最大位移为条件,采用隐式算法对结

构一层进行静力推覆,得到较为精确的柱端箍筋应变(显式分析的钢筋应变结果精度较差).

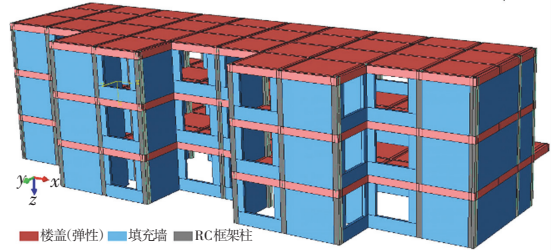


图 13 原型结构有限元分析模型

Fig.13 FEM of the structure

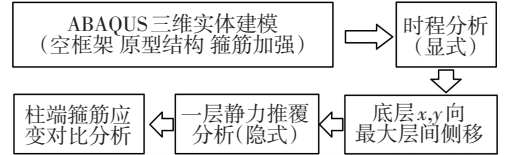


图 14 结构分析步骤示意

Fig.14 Analysis steps

先进行时程分析.加速度时程选取图 2 中龙头山台站的 3 向地震动记录(图 15),截取 0~10 s 加速度记录作为输入.图 16 为结构各楼层平均位移(同一层各点位移平均值)时程、最大层间侧移、最大层间侧移角及一层顶不同位置的层间位移时程.可知结构底层为薄弱层,最大层间侧移角为 x 向 $1/29$, y 向 $1/20$,且 x 、 y 向均出现明显残余变形(x 向平均 28 mm; y 向平均 39 mm),这与图 2 震害现象大体相符.

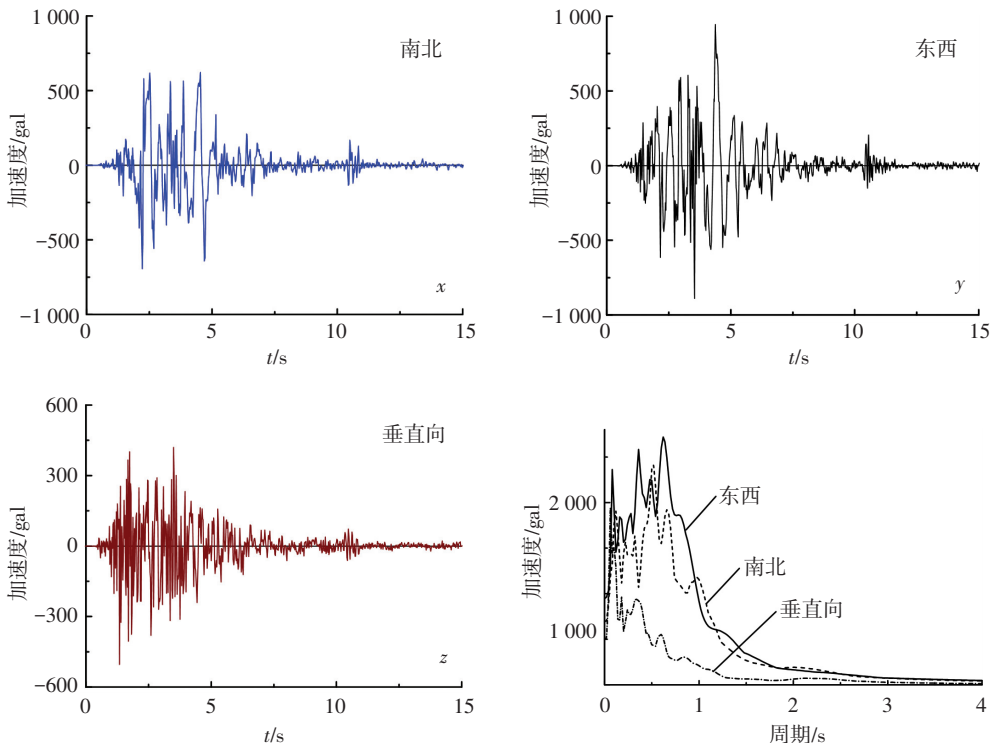


图 15 龙头山台站加速度时程记录及 5% 阻尼比反应谱

Fig.15 Components of the ground motion recorded at Longtoushan seismic station & acceleration spectra (damping ration=0.05)

之后采用隐式分析方法,按照最大位移(x 向 125 mm; y 向 180 mm)给一层结构分别加载(图 16d 曲线表明,结构在最大位移反应区段主要表现为 x 、 y 向平动,扭转分量较小,因此沿两个方向对结构进

行静力推覆,不考虑结构扭转是合理的),之后提取柱顶外围箍筋的最大应变平均值,绘成柱状图,见图 17(由于结构左右对称,故仅选取了左半部分结构)。

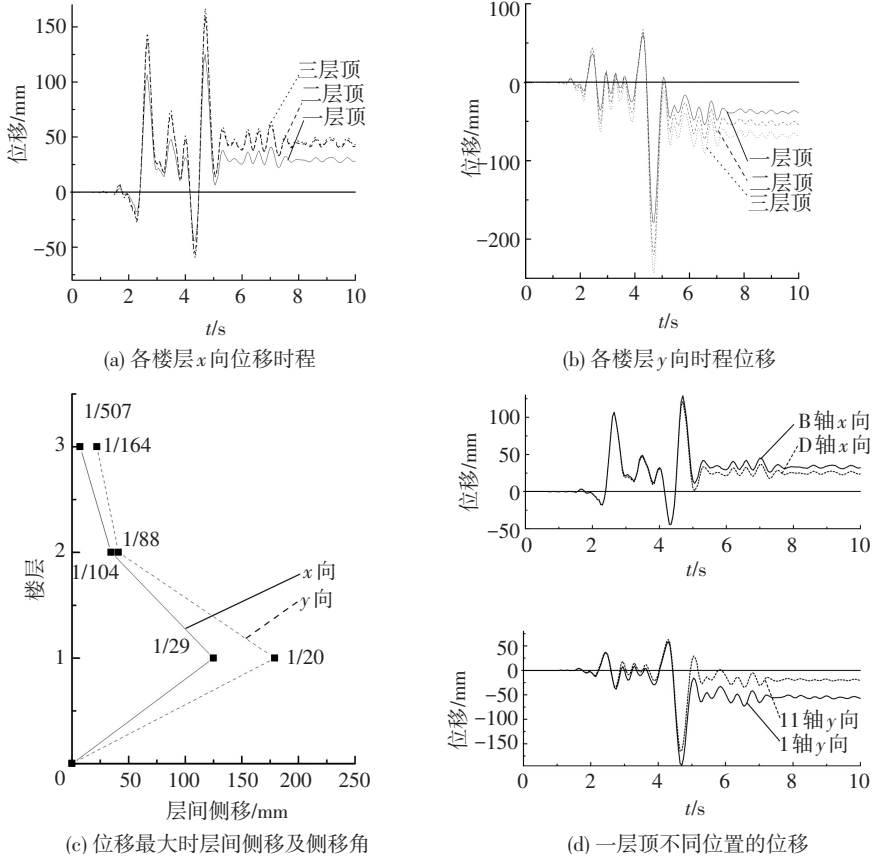


图 16 原型结构时程分析位移结果

Fig.16 Displacement of the time-history analysis of the RC frame

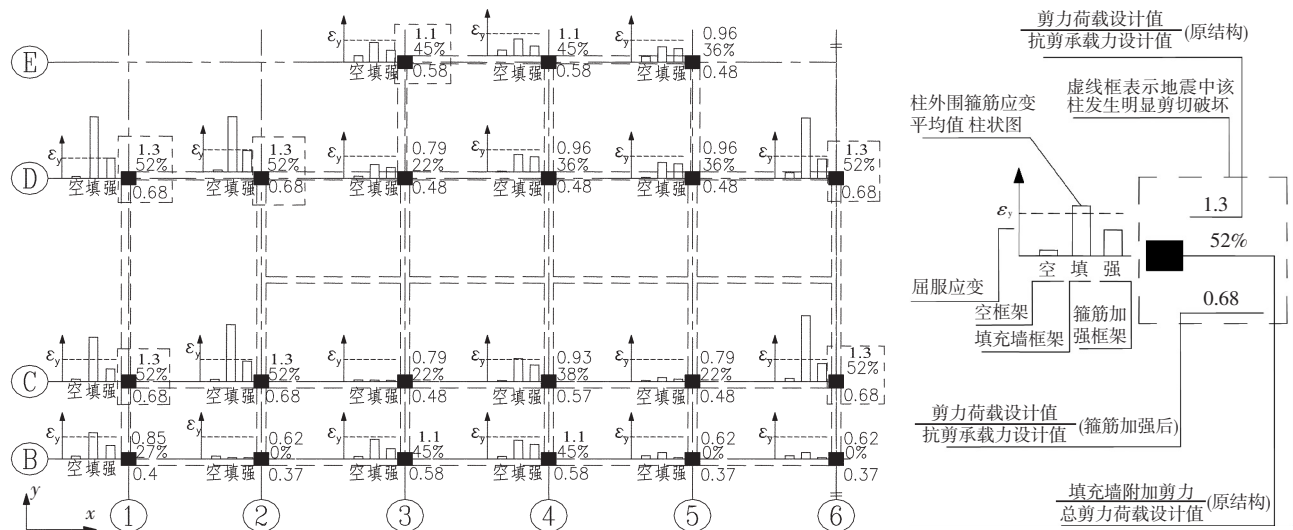


图 17 柱顶剪力荷载、抗剪承载力计算值及外围箍筋平均应变对比

Fig.17 The shear force, shear bearing capacity and the hoops' mean strain of the frame columns

按照 4.1 节方法计算每个柱的抗剪承载力设计值和剪力荷载设计值,将二者比值及填充墙附加剪力在总剪力荷载值中所占比重绘于图 17.由此可知:

柱,填充墙附加剪力在总剪力荷载中占比很大,最大可达 68%;图 17 的 21 根框架柱中,10 根柱不满足抗剪承载力要求,而实际震害中共有 6 根框架柱发生明显剪切破坏(图 17 中已用虚线框出),全部在这 10 根

1) 荷载及抗力计算表明,部分毗邻填充墙的框架

柱子范围内,表明本文剪力计算公式符合实际。

2) 静力推覆分析显示,不考虑填充墙的影响,柱端箍筋应变明显降低,柱端剪力荷载被显著低估;考虑填充墙影响后,柱端箍筋应变明显增大,部分应变接近或超过箍筋屈服应变,且与荷载及抗力计算结果基本一致,尤其①、②、⑥轴与 C、D 轴相交的 6 根柱子,其箍筋应变、荷载抗力分析与图 2 实际震害现象基本吻合;③轴与 E 轴相交处的柱顶实际发生了剪切破坏,而分析显示箍筋并未屈服,这可能是填充墙材料强度的离散性及有限元模型精度不足所致;加强配箍后,所有柱端箍筋应变均低于屈服应变,说明适当增加配箍是有效的防治措施。

3) 抗力验算及有限元分析表明,未考虑填充墙附加剪力,该结构 48% 的框架柱受剪切破坏的威胁;震害调查则显示,该结构 29% 的框架柱在地震中出现了明显剪切破坏。框架柱一旦发生严重剪切破坏,几乎完全丧失水平及竖向承载力,因此忽略填充墙附加剪力可能会明显降低 RC 框架的抗倒塌能力。

5 结 论

近年来多次地震震害调查显示,毗邻填充墙的 RC 框架柱剪切破坏是 RC 框架结构的一种典型震害,往往在结构薄弱层的小开洞、无开洞填充墙相邻的框架柱顶端出现,且破坏程度明显重于同层的压弯破坏柱。本文对这一破坏现象进行分析并提出了避免此类破坏的设计方法。主要结论如下:

1) 基于 ABAQUS 建模的典型填充墙框架水平推覆分析表明,框架发生水平位移时,填充墙的附加剪力几乎全部传递至框架一侧的柱顶端,该剪力在水平位移初期即达较大值,且合力作用点位于梁柱节点下方。基于这些分析,参考底框结构相关设计方法,给出了填充墙附加剪力估算公式,供工程设计参考。

2) 鲁甸地震中龙头山镇幼儿园 RC 框架有限元分析及荷载与抗力计算表明,该结构底层近半数框架柱可能发生剪切破坏,实际震害中 29% 的框架柱发生严重剪切破坏,严重威胁结构的抗倒塌能力;本文填充墙附加剪力公式的计算结果与有限元分析结果及实际震害均符合较好;该公式能够较为准确地估计框架柱端剪力,从而为调整柱端配箍,避免框架柱剪切破坏提供依据。

参 考 文 献

[1] 孙柏涛, 闫培雷, 王明振, 等. 四川省芦山“4·20”7.0 级强烈地震建筑物震害图集[M]. 北京: 地震出版社, 2014. SUN Baitao, YAN Peilei, WANG Mingzhen, et al. Atlas of Sichuan Province Lushan ‘4.20’ 7.0 violent earthquake damage [M]. Beijing: Seismological Press, 2014.

[2] LIN Xuchuan, ZHANG Haoyu, CHEN Hongfu, et al. Field investigation on severely damaged aseismic buildings in 2014 Ludian earthquake [J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2015, 14 (1): 169-176.

[3] 建筑抗震设计规范:GB50011—2010[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010. Code for seismic design of buildings: GB50011—2010[S]. Beijing: China building industry press, 2010.

[4] 建筑抗震设计规范:GBJ11—89[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1989. Code for seismic design of buildings: GBJ11—89 [S]. Beijing: China building industry press, 1989.

[5] ASTERIS P G. Lateral stiffness of brick masonry infilled plane frames [J]. Journal of structural Engineering, 2003, 129: 1071-1079.

[6] ANIL O, ALTIN S. An experimental study on reinforced concrete partially infilled frames [J]. Engineering Structures, 2007, 29: 449-460.

[7] MEHRABI A B, SHING P B. Finite Element modeling of masonry-infilled RC frames [J]. Journal of structural Engineering, 1997 (3): 604-613.

[8] 杨伟, 欧进萍. 抗震结构中填充墙倒塌数值模拟与分析[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2011, 43(6): 16-19. YANG Wei, OU Jinping. Collapse simulation and analysis of infill walls for earthquake-resistant structures [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2011, 43(6): 16-19.

[9] 黄群贤, 郭子雄, 朱雁茹, 等. 混凝土空心砌块填充墙 RC 框架抗震性能试验研究 [J]. 建筑结构学报, 2012, 33 (2): 110-118. HUANG Qunxian, GUO Zixiong, ZHU Yanru, et al. Experimental study on seismic behavior of RC frames infilled with concrete hollow blocks [J]. Journal of Building Structures, 2012, 33(2): 110-118.

[10] 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): 1-21. TONG Yuesheng, QIAN Guofang. Deformation and bearing capacity of reinforced concrete frame infilled with bricks [J]. Journal of Xi'an Institute of metallurgy and construction. 1985, 42(2): 1-21.

[11] 过镇海. 混凝土的强度和变形—试验基础和本构关系[M]. 北京: 清华大学出版社, 1997. GUO Zhenhai. Strength and deformation of concrete-experiment and constitutive relations [M]. Beijing: Tsinghai university press, 1997.

[12] 砌体结构设计规范: GB50003—2001[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2002. Code for seismic design of masonry structures: GB50003—2001 [S]. Beijing: China building industry press, 2002.

[13] 刘桂秋. 砌体结构基本受力性能的研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2005. LIU Guiqiu. The reseach on the basic mechanical behavior of masonry structure [D]. Changsha: Doctoral Dissertation of Hunan University, 2005 .

[14] DEMETRIOS J K, CHRISTOS G K. Experimental Investigation of Infilled Reinforced Concrete Frames with Openings [J]. ACI Structural Journal, 2009, 106(2): 132-141.

[15] 混凝土结构设计规范: GB50010—2010[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010. Code for design of concrete structures: GB50010—2010 [S]. Beijing: China building industry press, 2010.