

考虑填充墙影响的 RC 框架结构抗震性能评估

郑文婷¹, 刘景良², 吴兆旗³

(1. 福建工程学院 土木工程学院, 福建 福州 350118;
2. 福建农林大学 交通与土木工程学院, 福建 福州 350002; 3. 福州大学 土木工程学院, 福建 福州 350116)

摘要: 分析国内外 RC 框架试验数据, 提出不考虑填充墙影响和考虑填充墙影响的 RC 框架结构的量化性能水准。根据所提出的量化性能水准, 采用时程分析方法对一栋 RC 框架结构的抗震性能进行评估。分析结果表明, 填充墙在弹塑性阶段仍然能够充当支撑作用, 提高框架结构的整体刚度; 基于时程分析法的结构抗震性能评估方法是一种可行的全面反映结构抗震性能的详细评估方法, 在一定程度上弥补了现行抗震鉴定标准经验性评判的不足。

关键词: RC 框架; 填充墙; 抗震性能评估; 量化性能水准; 时程分析法

中图分类号: TU375.4

文献标志码: A

文章编号: 1672-4348(2015)03-0209-07

Seismic evaluation of existing reinforced concrete frame considering effect of infill walls

Zheng Wenting¹, Liu Jingliang², Wu Zhaoqi³

(1. College of Civil Engineering, Fujian University of Technology, Fuzhou 350118, China;
2. School of Transportation and Civil Engineering, Fujian Agricultural and Forestry University, Fuzhou 350002, China;
3. College of Civil Engineering, Fuzhou University, Fuzhou 350116, China)

Abstract: Quantified seismic performance levels of pure frame and frame with infill walls were presented based on test data of existing frames at home and abroad. The proposed performance levels were employed to evaluate seismic performance of an existing frame by conducting time history analysis. The results show that the infill walls act as diagonal trusses to enhance the stiffness of the frames even if they are in elastic-plastic state. It is confirmed that seismic performance evaluation based on time history analysis provides more detailed information than seismic appraisal of buildings, and is a more accurate and feasible method.

Keywords: reinforced concrete (RC) frame; infill wall; seismic performance evaluation; quantified seismic performance level; time history analysis method

RC 框架结构是由梁柱通过节点连接而成的承受竖向荷载和水平荷载的结构体系。在水平地震作用下, 填充墙和框架是共同工作的^[1-2]。虽然填充墙通过增加抗侧刚度提高了结构的整体变形能力; 但是填充墙的刚度效应也带来了薄弱层破坏、扭转破坏、短柱效应等不利影响^[3]。震害

调查发现: 框架结构的主体部分震害通常较轻, 主要破坏发生在填充墙及其围护构件中。作为非结构构件, 填充墙的破坏不会影响主体结构的安全, 但有可能造成局部人员伤亡和较大的经济损失^[4-5]。因此, 考虑填充墙对框架结构抗震性能的影响十分必要。

目前,针对含填充墙的框架结构的研究主要集中在填充墙本构模型构建和填充墙对结构侧移刚度的影响上。而基于性能的抗震设计理论不但注重结构的安全性,而且综合考虑场地特性、结构的重要性以及投资与效益等多种因素来确定结构的性能水准^[6]。现行建筑抗震设计规范^[7]明确规定:可根据实际需要分别选定针对整个结构、结构的局部部位或关键部位的性能目标。FE-MA273^[8]提出了 4 个水平的填充墙性能水准并通过限制填充墙的层间位移角来实现相应的性能水准。门进杰等^[9]建立了框架结构在地震作用下处于暂时使用和修复后使用性能水平的量化指标。但是,目前考虑填充墙影响的既有框架结构的量化性能水准研究仍然不多,本文在前人研究的基础上,通过对国内外 RC 框架试验数据进行统计分析,分别提出了不考虑填充墙影响和考虑填充墙影响的 RC 框架结构的量化性能指标,并对结构地震作用下的时程响应进行评估以确定其损伤状态,给出了比抗震鉴定更为详细的评价结果。

1 抗震性能水准的提出及量化

结构的抗震性能水准是针对某一级地震作用水平而期望达到的性能等级,它反映了结构在某一特定设防地震等级下预期破坏的最大程度。它的确定是基于性能的抗震设计理论首先需要解决的问题。结构抗震性能水准主要包含 3 个方面的内容:(1)地震作用水平的划分;(2)性能水准的确定;(3)性能指标的量化。随着基于性能的抗震设计理论的提出和发展,人们更加关心建筑物在不同地震作用水平下所具有的不同性能水准和性能目标以及用于抗震评估的量化性能指标等问题。但是截至目前,研究主要集中在前两个方面,对性能水准的量化则研究较少,量化的性能指标也主要是层间位移角和结构侧移角等。

1.1 地震作用水平的划分

分析我国现行建筑抗震设计规范中的地震作用水平可知,从多遇地震到罕遇地震,50 年超越概率从 63.2% 跌落到 2%^[8]。由于结构在不同地震作用下需要不同的抗震性能,现有的 3 个地震作用水平是不够的。因此本文采用文献^[9]提出的 4 个地震作用水平,即在现行建筑抗震设计规范的基础上,增加 50 年内超越概率为 40% 的地

震水平,如表 1 所示。

表 1 4 个地震作用水平
Tab. 1 Four earthquake hazard levels

| 地震水平 | 50 年超越概率/% | 重现期/a |
|------|------------|-------------|
| 小震 | 63.2 | 50 |
| 中小震 | 40 | 100 |
| 中震 | 10 | 475 |
| 大震 | 2~3 | 1 641~2 475 |

1.2 性能水准的确定

性能水准分为定性和定量两种表达形式。定性表达形式是关于结构破坏程度、运营情况等的描述;定量表达形式则采用层间位移、能量耗散、延性系数等具体性能指标对结构进行评价。

我国现行建筑抗震设计规范所采用的“3 水准”性能目标在实际工程中应用相当广泛,也取得较大成功,但是随着基于性能的抗震设计理论不断发展,许多研究人员对结构性能水准的划分进行了更为详细的研究。例如谢礼立^[10]在《建筑工程抗震性态设计通则》(试用)中建议采用充分运行、运行、基本运行、生命安全、接近倒塌 5 级性能水准,并给出了详细的建筑使用情况描述。

通过给出的多级性能水准,业主可以以规范给出的最低性能水平为底线,根据自身的经济实力和意愿自主选择更高或更为可靠的抗震性能目标。本文在现行建筑抗震设计规范的基础上,对应上文提出的 4 级地震作用水平并参考国内外的主要研究成果,从安全性、使用性、损伤状况、经济可修复性 4 个方面划分钢筋混凝土框架结构的性能水平。性能水平分为 5 级,如表 2 所示。

表 2 结构性能水准
Tab. 2 Structure performance levels

| 性能水平 | 总体描述 | 破坏与最低限描述 |
|------|------|---|
| 基本完好 | 功能完好 | 结构无破坏或基本无破坏,结构使用功能不受影响,居住人员安全。 |
| 轻微破坏 | 功能连续 | 结构破坏轻微,非重要设施经修理后仍可使用。结构使用功能基本连续,非必要功能一定程度上受到影响。 |

| 续上表 | | |
|------|-----------|---|
| 性能水平 | 总体描述 | 破坏与最低限描述 |
| 中等破坏 | 控制破坏与经济损失 | 非结构构件与结构内部设施为中等破坏,但未威胁到生命安全。虽然结构能够被修复,但需承担相当程度上的修复费用。 |
| | | 结构与非结构构件破坏严重,有可能危及生命安全,但竖向承重系统仍未倒塌,没有必要进行结构的修复。 |
| 严重破坏 | 保证安全 | 主体结构完全倒塌,伴随有人员的伤亡,没有修复的可能性。 |
| 倒塌 | 功能完全丧失 | |

1.3 性能指标的量化

抗震性能水准需要通过一个或多个物理量来定量描述,可选用的物理参数有力、变形、延性、应变、曲率、能量等。框架结构的组成构件主要有钢筋混凝土梁柱和砌体墙,此类结构的破坏主要是由梁柱构件破坏以及梁柱与砌体墙之间的连接破坏引起的。试验研究表明:层间位移角能够反映钢筋混凝土框架结构各层间构件变形的综合结果和层高的影响,而且与结构的破坏程度有较好的相关性^[11]。因此采用层间位移角作为钢筋混凝土框架结构的性能评估指标是合适的,也与我国现行建筑抗震设计规范规定的弹性和弹塑性层间位移角性能指标相一致。

我国现行建筑抗震设计规范将弹性层间位移角限值 1/550 和弹塑性层间位移角限值 1/50 分别作为钢筋混凝土框架结构“小震不坏”和“大震不倒”的抗震性能指标,但是未给出“中震可修”的抗震性能指标。因此将收集的国内外框架结构拟静力、拟动力和振动台试验数据归纳为不考虑填充墙影响的纯框架结构和考虑填充墙影响的框架结构两种类型,并分别进行数理统计分析,分析

结果表明试验数据大体上服从正态分布。在此基础上,本文针对现行建筑抗震设计规范“3 水准”抗震设防的不足和推荐采用抗震性能化设计的思想,提出了不考虑填充墙影响的纯框架结构和考虑填充墙影响的框架结构 5 水准性能量化指标。

在不考虑填充墙影响的纯框架结构量化指标提取过程中,选取国内 42 组框架结构试验数据^[12-20]进行统计分析,结果如表 3 所示。同理,在考虑填充墙影响的框架结构量化指标提取过程中,本文选取了国内外的 35 组试验数据^[21-26],经过统计分析,结果见表 4。

鉴于现行建筑抗震设计规范已经给出了“小震不坏”和“大震不倒”的量化指标,本文在表 3 和表 4 的基础上,结合现行建筑抗震设计规范的已有规定,建议不考虑填充墙影响的纯框架结构和考虑填充墙影响的框架结构的量化性能水准分别采用表 5 和表 6 的层间位移角限值。

表 3 纯框架结构统计结果
Tab.3 Statistical results of pure frame

| 位置 | 实测层间位移角 | | | |
|-------|---------|---------|-------|----------|
| | 均值 | 标准差 | 变异系数 | 均值 - 标准差 |
| 开裂点 | 1/521 | 1/1 514 | 0.344 | 1/794 |
| 屈服点 | 1/165 | 1/465 | 0.354 | 1/255 |
| 最高荷载点 | 1/62 | 1/159 | 0.390 | 1/102 |
| 极限荷载点 | 1/31 | 1/80 | 0.390 | 1/51 |

表 4 考虑填充墙影响的框架结构层间位移角统计结果
Tab.4 Statistical results of frame storey drift considering effect of infill walls

| 位置 | 实测层间位移角 | | | |
|-------|---------|-------|-------|----------|
| | 均值 | 标准差 | 变异系数 | 均值 - 标准差 |
| 开裂点 | 1/353 | 1/434 | 0.814 | 1/1 898 |
| 屈服点 | 1/127 | 1/167 | 0.763 | 1/538 |
| 最高荷载点 | 1/73 | 1/96 | 0.759 | 1/302 |
| 极限荷载点 | 1/38 | 1/75 | 0.509 | 1/77 |

表 5 纯框架结构量化性能水准
Tab.5 Quantified performance levels of pure frame

| 地震作用水平 | 性能水准 | 层间位移角限值 | 经济可接受性 | 安全性 |
|--------|------|---------------|--------|------|
| 小震 | 基本完好 | ≤1/550 | 完全接受 | 安全 |
| 中小震 | 轻微破坏 | 1/550 ~ 1/250 | 完全接受 | 安全 |
| 中震 | 中等破坏 | 1/250 ~ 1/100 | 可接受 | 安全 |
| 大震 | 严重破坏 | 1/100 ~ 1/50 | 不可接受 | 生命安全 |
| —— | 倒塌 | ≥ 1/50 | 不可接受 | 危及生命 |

表 6 考虑填充墙影响的框架结构量化性能水准

Tab.6 Quantified performance levels of frame considering effect of infill walls

| 地震作用水平 | 性能水准 | 层间位移角限值 | 经济可接受性 | 安全性 |
|--------|------|-----------------------|--------|------|
| 小震 | 基本完好 | $\leq 1/1\ 500$ | 完全接受 | 安全 |
| 中小震 | 轻微破坏 | $1/1\ 500 \sim 1/500$ | 完全接受 | 安全 |
| 中震 | 中等破坏 | $1/500 \sim 1/300$ | 可接受 | 安全 |
| 大震 | 严重破坏 | $1/300 \sim 1/50$ | 不可接受 | 生命安全 |
| —— | 倒塌 | $\geq 1/50$ | 不可接受 | 危及生命 |

2 基于时程分析法的框架结构抗震性能评估

在罕遇地震作用下,结构会部分或全部进入塑性状态,因此有必要分析和研究结构在弹塑性阶段的受力和变形性能。验算罕遇地震作用下的结构变形,采用的方法有简化的弹塑性分析方法和弹塑性时程分析法。采用弹塑性时程分析法对结构进行地震响应分析时,应按建筑场地类别和设计地震分组选用不少于两组的实际强震记录和一组人工模拟的加速度时程曲线。选用地震波的原则有以下两个:①每条时程曲线计算所得结构底部剪力、多条时程曲线计算所得的结构底部剪力平均值应与振型分解反应谱法计算结果在统计意义上相符;②综合考虑地震动 3 要素(地震动幅值、频谱和持时)的特性,使拟用的地震波符合建筑物场地未来地震动的幅值、频谱和持时参数,特别是地震波的频谱特性应尽量接近建筑场地地震时的特征周期。

2.1 工程概况

福州市王庄莲园 5#6#住宅楼于 1991 年建成并投入使用,主体为 8 层框架结构,采用现浇钢筋混凝土建造,填充墙采用 190 mm 厚 MU7.5 空心砖, M5.0 混合砂浆砌筑。钢筋混凝土框架梁柱与砌体填充墙通过拉接筋连接。场地位于闽江古河道,属建筑抗震不利地段,场地类别定为Ⅳ类。

2.2 有限元模拟

梁柱之间考虑为刚性连接,砌体填充墙采用 Saneinetjad^[27]提出的等效压杆模型,如图 1 所示。参数公式详见式(1)和(2)。

$$W_{ef} = 0.175(\lambda_h H)^{-0.4} \sqrt{H^2 + L^2} \quad (1)$$

$$\lambda_h = \sqrt[4]{(E_w t_w \sin(2\theta)) / (4E_c I_c H_{in})} \quad (2)$$

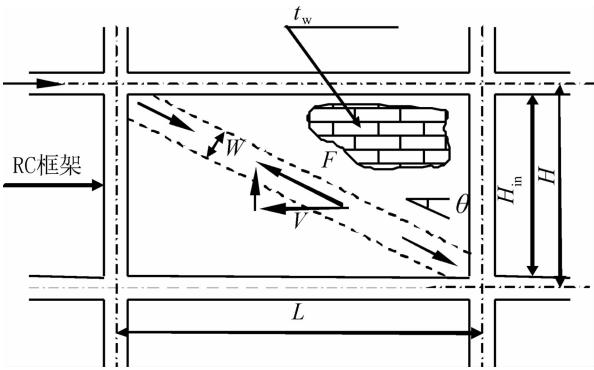


图 1 等效压杆模型

Fig. 1 Equivalent compression struts model

式中, H 和 H_{in} 分别是框架柱、填充墙高度; L 为框架梁长度; E_c 和 E_w 分别是框架梁柱、填充墙材料弹性模量; I_c 为框架柱的惯性矩; t_w 为填充墙厚度; θ 为等效压杆与水平框架梁的夹角。

在弹塑性时程分析过程中,本构关系模型至关重要。一个好的本构关系模型必定在理论上的严密性、参数的易确定性以及计算机实现的可能性间达到最优平衡。对于不同强度等级的钢筋混凝土构件,本文采用分离式建模方法,钢筋和混凝土的本构关系分别采用《混凝土结构设计规范》^[28]推荐的钢筋和混凝土单轴受压应力-应变曲线。而砌体填充墙则采用文献[29]提出的本构关系模型,如图 2。其表达式见式(3)和(4)。

$$\frac{\sigma}{f_m} = 1.96\left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_0}\right) - 0.96\left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_0}\right)^2, 0 \leq \frac{\varepsilon}{\varepsilon_0} \leq 1 \quad (3)$$

$$\frac{\sigma}{f_m} = 1.2 - 0.2\left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_0}\right), 1 \leq \frac{\varepsilon}{\varepsilon_0} \leq 1.6 \quad (4)$$

式中, $\varepsilon_0 = 0.002$, $\varepsilon_u = 0.0032$, f_m 为砌体抗压强度平均值。当各类砌体受压时,取 $f = 0.45 f_m$, 当各类砌体受拉、受弯、受剪时,可取 $f = 0.42 f_m$ 。

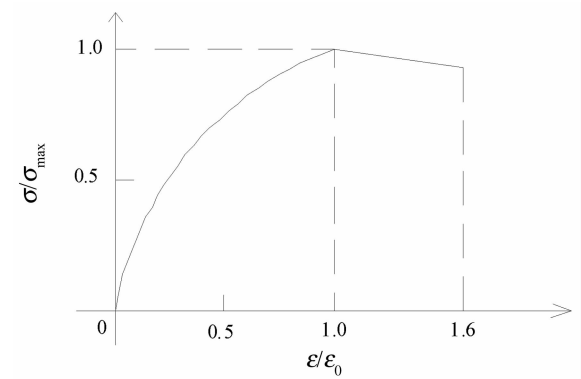
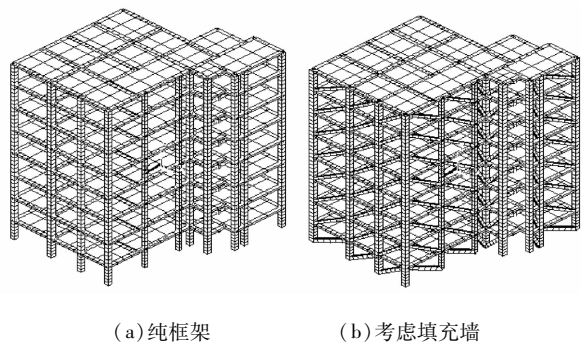


图2 砌体本构关系

Fig.2 Constitutive model of masonry



(a) 纯框架 (b) 考虑填充墙

图3 纯框架和考虑填充墙影响的框架结构有限元模型

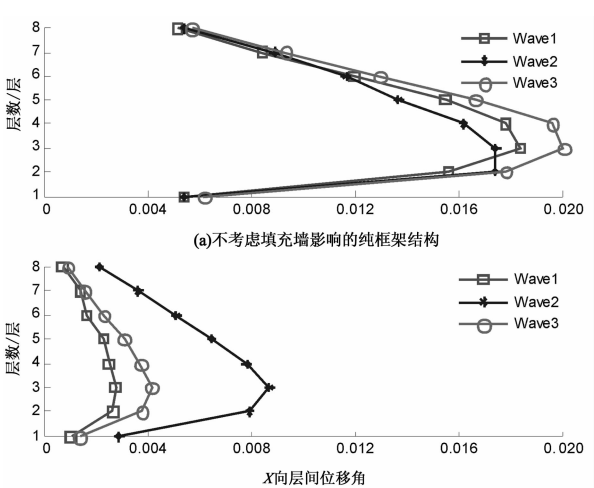
Fig.3 Finite element model of pure RC frame and frame considering effect of infill walls

确定本构关系模型后,运用 ANSYS 程序对王庄莲园 5#6#住宅楼建立不考虑填充墙影响的纯框架和考虑填充墙影响的框架结构两种有限元模型,并进行适当的网格划分,如图 3。其中梁柱和楼板分别采用 Beam 4 单元和 Shell 63 单元模拟,而代替填充墙的等效压杆则采用 Link8 单元模拟。上部结构与基础为刚性连接,不考虑发生滑移和扭转。为提取层间位移角方便起见,对同层楼板各节点的 U_x 、 U_y 和 U_z 3 个自由度进行耦合。

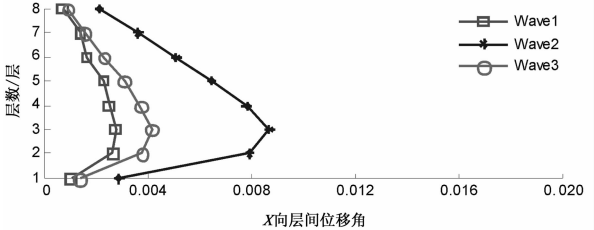
2.3 抗震性能评估

输入地震波为适合Ⅳ类场地土的天津宁河地震波、Loma Prieta 地震波以及上海人工地震波,分别记为 wave1、wave2 和 wave3。所有地震波均为双向输入,按现行建筑抗震设计规范调整后 X 方向与 Y 方向加速度峰值之比为 1:0.85。

对不考虑填充墙影响的纯框架和考虑填充墙影响的框架结构进行 7 度罕遇地震作用(大震)下的弹塑性时程分析,可得各层的 X 方向和 Y 方向层间位移角(storey drift)最大值如图 4、图 5。



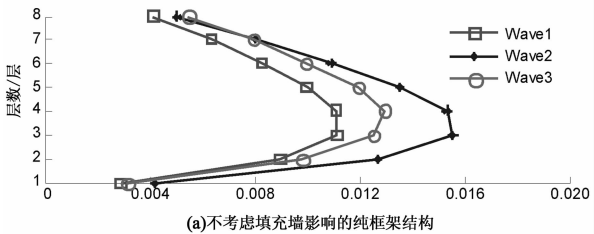
(a) 不考虑填充墙影响的纯框架结构



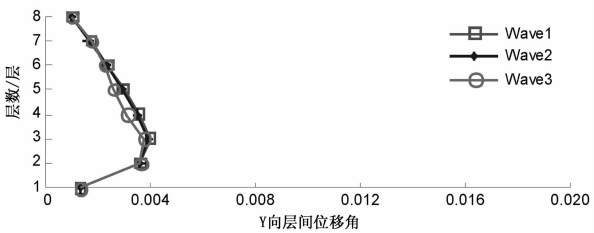
(b) 考虑填充墙影响的框架结构

图4 X方向层间位移角

Fig.4 Storey drifts in X direction



(a) 不考虑填充墙影响的纯框架结构



(b) 考虑填充墙影响的框架结构

图5 Y方向层间位移角

Fig.5 Storey drifts in Y direction

由图 4、5 可知,无论是不考虑填充墙影响的纯框架结构还是考虑填充墙影响的框架结构,在罕遇地震作用下,二、三、四层的 X 方向和 Y 方向的层间位移角值相对较大,为薄弱楼层。薄弱楼层的层间位移角值均小于我国现行建筑抗震设计规范规定的弹塑性层间位移角限值 1/50,同时也小于表 5、6 中严重破坏时的量化性能指标。需要注意的是,由于没有考虑填充墙的支撑作用,纯框架结构薄弱楼层的层间位移角非常接近 1/50 的限值,破坏已十分严重,接近倒塌边缘。

由于不同地震波作用下层间位移角的离散性,对 3 个地震波作用下框架结构 X 方向的层间

位移角进行算术平均,并参照表 5、6 给出的量化性能指标,可以得出 7 度大震作用下两种结构的抗震性能评估结果,如表 7 所示。

表 7 抗震性能评估结果

Tab.7 Results of seismic performance evaluation

| 层号 | 不考虑填充墙影响的 纯框架结构 | | 考虑填充墙影响的 框架结构 | |
|----|--------------------|------|------------------|------|
| | 层间位移角 | 性能水准 | 层间位移角 | 性能水准 |
| 1 | 1/178 | 中等破坏 | 1/571 | 中等破坏 |
| 2 | 1/59 | 严重破坏 | 1/209 | 严重破坏 |
| 3 | 1/53 | 严重破坏 | 1/201 | 严重破坏 |
| 4 | 1/56 | 严重破坏 | 1/214 | 严重破坏 |
| 5 | 1/66 | 严重破坏 | 1/254 | 严重破坏 |
| 6 | 1/82 | 严重破坏 | 1/333 | 中等破坏 |
| 7 | 1/113 | 中等破坏 | 1/457 | 中等破坏 |
| 8 | 1/185 | 中等破坏 | 1/802 | 轻微破坏 |

从表 7 可以看出:

1)在大震作用下,不考虑填充墙影响的纯框架结构的层间位移角远远大于考虑填充墙影响的框架结构相应值,这说明填充墙即使是在弹塑性阶段即填充墙已经发生破坏的情况下,仍然能够起到支撑框架的作用,降低地震作用对主体框架结构的损害。因此,考虑填充墙的支撑作用能够提高结构的抗震性能,具有很好的现实意义。

2)不论是不考虑填充墙影响的纯框架结构还是考虑填充墙影响的框架结构,二者都能够做

到“大震不倒”,满足现行建筑抗震设计规范和建筑抗震鉴定标准的要求。但是,大震作用下两种结构的薄弱楼层及其附近楼层均发生了严重破坏,有可能造成一定的人员伤亡和经济损失,有必要对薄弱层进行加固。

3)相对纯框架结构,考虑填充墙影响的框架结构的层间位移角值较小,其抗震性能有所提高但不明显,这是因为填充墙多为脆性材料,一般要先于主体结构构件发生破坏,从而吸收地震能量,充当了框架结构抵御地震作用的第一道防线。而填充墙等非结构构件的破坏也会影响框架结构抗震性能的提高。

3 结论

本文引入基于性能的抗震设计思想,通过统计分析大量国内外框架试验数据,提出了不考虑填充墙影响的纯框架结构和考虑填充墙影响的框架结构的性能量化指标,为后续的抗震性能评估提供了必要的依据。

通过对福州市一栋既有 RC 框架结构建立两种有限元模型进行时程分析,并结合提出的量化性能指标进行了抗震性能评估。研究表明:填充墙即使是在已经发生破坏的情况下,仍然能够起到支撑框架的作用,从而避免主体框架遭受损害。相比现行抗震鉴定标准的二级鉴定法,基于性能的既有抗震性能评估方法能够全面准确地反映结构的破坏状态和薄弱部位,一定程度上弥补了现行抗震鉴定标准经验性评判的不足,是一种比较准确而又可行的抗震性能评估方法。

参考文献:

[1] 郭子雄,吴毅彬,黄群贤. 砌体填充墙框架结构抗震性能研究现状与展望[J]. 地震工程与工程振动,2008,12(6): 172-174.

[2] 齐彬,郭子雄. 考虑填充墙影响的教学楼框架结构推覆分析[J]. 工程抗震与加固改造,2010,32(2):31-36.

[3] 杨伟,侯爽,欧进萍. 从汶川地震分析填充墙对结构整体抗震能力影响[J]. 大连理工大学学报,2009,49(5): 770-774.

[4] 韩军,李英民,刘立平,等. 5.12 汶川地震绵阳市区房屋震害统计与分析[J]. 重庆建筑大学学报,2008,30(5):21-27.

[5] 王威,薛建阳,章红梅,等. 框架结构在汶川 5.12 大地震中的震害分析及抗震启示[J]. 世界地震工程,2009,25(4): 131-135.

[6] 门进杰. 不规则钢筋混凝土框架结构基于性能的抗震设计理论和方法[D]. 西安:西安建筑科技大学,2007.

[7] 中国建筑科学研究院. GB50011-2010 建筑抗震设计规范[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2010.

[8] Federal Emergency Management Agency. NEHRP commentary on the guidelines for the seismic rehabilitation of buildings (FEMA273/FEMA274)[R]. New York:[s. n.], 1996: 247-255.

- [9] 门进杰,史庆轩,周琦. 框架结构基于性能的抗震设防目标和性能指标的量化[J]. 土木工程学报,2008,41(9): 76-82.
- [10] 中国地震局工程力学研究所,中国建筑科学研究院抗震研究所,哈尔滨工业大学. 建筑工程抗震性态设计通则(试用)[S]. 北京:中国计划出版社,2004.
- [11] 闫熙臣,高小旺. 钢筋混凝土框架结构抗震评估的新方法[J]. 工程抗震与加固改造,2007,29(1):103-105.
- [12] 钟益村,任富栋,田家骅. 二层双跨钢筋混凝土框架弹塑性性能试验研究[J]. 建筑结构学报,1981,2(3):31-41.
- [13] 徐云扉,胡庆昌,陈玉峰,等. 低周反复荷载下两跨三层钢筋混凝土框架受力性能的试验研究[J]. 建筑结构学报,1986,7(2):1-16.
- [14] 曹万林,王绍英,胡国振. 大开间异型柱框架弹塑性工作性能研究[J]. 世界地震工程,2000,16(1):40-46.
- [15] 郑建岚,黄鹏飞. 自密实混凝土框架结构抗震性能试验研究[J]. 地震工程与工程振动,2001,21(3):79-84.
- [16] 刘威,李杰. 钢筋混凝土异型柱框架低周反复加载试验研究[J]. 结构工程师,2002,6(3):56-61.
- [17] 薛伟辰,程斌,李杰. 双层双跨高性能混凝土框架抗震性能研究[J]. 土木工程学报,2004,37(3):58-65.
- [18] 吴炎海,程浩德. 带开孔梁钢筋混凝土框架拟静力试验研究[J]. 福州大学学报:自然科学版,2004,32(6):720-723.
- [19] 邹翾,周德源. 3层钢筋混凝土框架结构反复加载试验分析[J]. 四川建筑科学研究,2005,31(2):7-11.
- [20] 王秀芬,王铁成. 混凝土异形柱框架抗震性能的试验研究[J]. 工业建筑,2010,40(5):28-32.
- [21] 关国雄,夏敬谦. 钢筋混凝土框架砖填充墙结构抗震性能的研究[J]. 地震工程与工程振动,1996,16(1):87-98.
- [22] 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):4-6.
- [23] 邹昀. 带砌体填充墙的钢筋混凝土框架受力性能分析[J]. 江南大学学报,2002,3(3):76-81.
- [24] Marjani F, Ersoy U. Behaviour of brick infilled reinforced concrete frames under reversed cyclic loading[C]// International Symposium on Structural and Earthquake Engineering. Ankara:ECAS,2002:143-150.
- [25] Armin B. Mehrabi P, Shing B. Experimental evaluation of masonry-infilled RC frames[J]. Journal of Structural Engineering,1996,122(3):228-237.
- [26] Ghassan Al-Chaar. Non-ductile behaviour of reinforced concrete frames with masonry infill panels subjected to in-plane loading [D]. Chicago:University of Illinois, 1998.
- [27] Saneinejad A, Hobbs B. Inelastic design of infilled frames[J]. Journal of Structural Engineering, 1995, 121(4): 634-650.
- [28] 中华人民共和国住房和城乡建设部. GB50010-2002 混凝土结构设计规范[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2002.
- [29] 王茂. 简明砌体结构设计手册[M]. 北京:机械工业出版社,2003.

(责任编辑:陈雯)