

文章编号: 1000-4750(2016)09-0146-09

# 考虑填充墙平面内外相互作用评估 RC 框架- 填充墙结构抗整体性倒塌能力

韩建平<sup>1,2</sup>, 黄林杰<sup>1,2</sup>, 孙小云<sup>1,2</sup>

(1. 兰州理工大学甘肃省土木工程防灾减灾重点实验室, 甘肃, 兰州 730050; 2. 兰州理工大学防震减灾研究所, 甘肃, 兰州 730050)

**摘 要:** 首先简要阐述了可模拟填充墙平面内外相互作用的纤维离散化梁-柱单元模型。其次, 基于OpenSees分析软件, 对某倒塌试验的4层钢筋混凝土框架-填充墙结构进行了数值模拟, 数值模拟结果与试验结果的对比表明考虑平面内外相互作用的纤维离散化梁-柱单元模型模拟框架-填充墙结构中的填充墙是有效的。最后, 基于校准后的数值分析模型, 利用OpenSees分析软件对某钢筋混凝土框架-填充墙结构教学楼, 区分考虑和不考虑填充墙平面内外相互作用两种情况, 分别建立三维空间模型, 进行了静力推覆分析和增量动力分析, 进而利用24条地震动记录输入下的增量动力分析结果, 给出了具有50%倒塌概率的结构抗整体性倒塌能力。分析结果对比表明不考虑填充墙平面内外相互作用会明显低估结构的抗倒塌能力。

**关键词:** 平面内与平面外相互作用; 填充墙; 多层RC框架-填充墙; 增量动力分析; 抗整体性倒塌能力

**中图分类号:** TU352.1; TU375.4 **文献标志码:** A **doi:** 10.6052/j.issn.1000-4750.2015.02.0098

## GLOBAL COLLAPSE RESISTANCE CAPACITY INVESTIGATION OF INFILLED RC FRAME CONSIDERING IN-PLANE AND OUT-OF-PLANE INTERACTION OF INFILL WALLS

HAN Jian-ping<sup>1,2</sup>, HUANG Lin-jie<sup>1,2</sup>, SUN Xiao-yun<sup>1,2</sup>

(1. Key Laboratory of Disaster Prevention and Mitigation in Civil Engineering of Gansu Province,

Lanzhou University of Technology, Lanzhou, Gansu 730050, China;

2. Institute of Earthquake Protection and Disaster Mitigation, Lanzhou University of Technology, Lanzhou, Gansu 730050, China)

**Abstract:** Firstly, the model was discussed for beam-column elements with fiber discretization to consider the in-plane and out-of-plane interactions of infill walls. Then, a shaking table test model of a 4-storey infilled RC frame was developed and analyzed via the finite element software, OpenSees. The comparison with the experimental results indicates that the numerical model considering in-plane and out-of-plane interactions of unreinforced masonry infill walls is valid for modeling the infilled RC frame structure. Finally, based on the calibrated numerical model, a three-dimensional model for the infill RC frame of a teaching building was established via OpenSees. And the static pushover analysis and incremental dynamic analysis were carried out on the model with and without considering in-plane and out-of-plane interactions of unreinforced masonry infill walls. Furthermore, incremental dynamic analysis results under 24 suites of ground motion records were used to evaluate the global collapse resistance capacity of the structure with 50% collapse probability. The comparison of the results shows that without considering in-plane and out-of-plane interactions of infill walls, the global collapse resistance capacity of the structure will be underestimated obviously.

收稿日期: 2015-02-02; 修改日期: 2015-12-15

基金项目: 国家自然科学基金项目(51268036); 甘肃省科技支撑计划项目(1204FKCA126)

通讯作者: 韩建平(1970—), 男, 甘肃宕昌人, 教授, 博士, 博导, 主要从事结构抗震与减震控制、结构健康监测与损伤诊断研究(E-mail: jphan@lut.cn).

作者简介: 黄林杰(1988—), 男, 甘肃华池人, 硕士生, 主要从事工程结构抗震研究(E-mail: 15095428282@163.com);

孙小云(1988—), 女, 甘肃会宁人, 博士生, 主要从事工程结构抗震研究(E-mail: sxyhuining@163.com).

**Key words:** in-plane and out-of-plane interaction; infill walls; multi-storey infilled RC frame; incremental dynamic analysis; global collapse resistance capacity

在2008年我国汶川大地震、2010年海地大地震等特大地震中,由于建筑物的倒塌造成了严重的人员伤亡和财产损失<sup>[1-2]</sup>。因此,近年来结构遭受大震或特大地震作用下的抗倒塌能力研究成为基于性能地震工程研究的重要热点之一<sup>[3]</sup>。目前对于抗倒塌的研究主要集中在框架主体结构方面,并取得了较大进展,而对于填充墙等非结构构件及其影响并没有充分的考虑。在传统的框架-填充墙结构分析和设计中,通常将填充墙视为非结构构件,仅考虑填充墙对结构侧向刚度的整体贡献,而忽略填充墙与框架的相互作用。但震害分析和理论及实验研究均表明,填充墙与框架是协同工作的,填充墙对框架的侧向刚度、水平承载力、传力机制以及失效模式均有显著的影响。叶列平等<sup>[4]</sup>提出,充分利用填充墙使框架结构形成双重抗震防线,可显著提高框架结构的抗倒塌能力。李英民等<sup>[5]</sup>提出,均匀满布填充墙有利于框架结构抗震。现行规范规定对框架结构基本周期乘以0.6~0.7的折减系数以考虑填充墙对结构刚度的贡献,但并未考虑填充墙对框架刚度、强度和约束的实际影响,其合理性是值得怀疑的。

填充墙与框架的相互作用及填充墙的模拟由于相互作用机理复杂、影响因素多,目前还没有形成一致的结论<sup>[6-8]</sup>。2007年,Hashemi等基于拉压杆(Struct and Tie, SAT)模型,将填充墙的响应分为平面内和平面外两个方向,并考虑两个方向的相互作用。但该模型只适用于小位移假定下的计算,当平面内荷载和平面外位移较大时不再适用。针对此不足,Kadysiewski等<sup>[9]</sup>进一步利用SAT模型的平面内与平面外相互作用提出了一种比较稳定的纤维离散化梁-柱单元的填充墙模型。

本文首先对Kadysiewski等提出的纤维离散化梁-柱单元的填充墙模型进行了介绍,并分析了运用离散化的纤维单元体现填充墙平面内与平面外相互作用的原理。其次,基于OpenSees分析软件,对某钢筋混凝土框架结构倒塌试验研究中的4层2跨框架-填充墙结构进行数值模拟,通过数值模拟结果与试验结果的对比较验证采用纤维离散化梁-柱单元模拟填充墙的有效性。最后,基于校准后的数值分析模型,利用OpenSees分析软件以按现行抗震设计

规范设计的8度(0.2g)设防的某小学教学综合楼为例,分别按考虑和不考虑填充墙进行三维建模分析,从PEER地震动数据库和汶川地震记录中选择了24条地震动记录,对该结构进行了静力推覆分析(Pushover Analysis)和增量动力分析(Incremental Dynamic Analysis, IDA),最后利用增量动力分析结果,评估了考虑填充墙平面内与平面外相互作用时该结构的抗整体倒塌能力。

## 1 考虑平面内与平面外相互作用的填充墙模型

Kadysiewski等提出了一个如图1所示的纤维离散化梁-柱单元模型。在每一个填充墙平面内,该模型由一根既能承受压力又能承受拉力的对角斜向支撑组成,该对角斜向支撑由两个在中心节点处相连的梁-柱单元构成,在中心节点处有一个平面外的集中质量<sup>[9]</sup>。

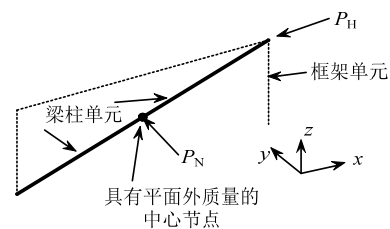


图1 纤维离散化梁-柱单元的填充墙模型

Fig.1 Proposed infill model using beam-column elements with fiber discretization

### 1.1 平面内特性

参考FEMA356,填充墙的平面内响应由图1所示的斜撑模拟,该斜撑的厚度(垂直于墙) $t_{inf}$ 等于墙的实际厚度,支撑的宽度 $a = 0.175(\lambda_1 h_{col})^{-0.4} L_{diag}$ 。其中, $\lambda_1$ 为用以确定填充墙支撑等效宽度 $a$ 的系

数, $\lambda_1 = \left( \frac{E_{inf} t_{inf} \sin 2\theta}{4E_f I_{col} h_{inf}} \right)^{1/4}$ , $h_{inf}$ 为填充墙的高度,

$E_f$ 和 $E_{inf}$ 分别为框架材料和填充墙材料的弹性模量, $I_{col}$ 为柱截面关于平面外轴的惯性矩, $\theta$ 的正切值表示填充墙高度和长度的比值,即 $\tan \theta = h_{inf} / L_{inf}$ <sup>[9-10]</sup>, $L_{inf}$ 为填充墙的长度; $h_{col}$ 为以梁中心线间计算的柱高度; $L_{diag}$ 为填充墙的对角长度。

依据FEMA356,等效支撑的刚度(位于填充墙

对角之间单元的刚度)为  $k_{inf} = \frac{a \cdot t_{inf} \cdot E_m}{L_{diag}}$ ，定义填充

墙的抗剪强度为  $V_{inf}$ ，则等效支撑轴向强度为：

$$P_{H0} = V_{inf} / \cos \theta \quad (1)$$

### 1.2 平面外特性

参考 FEMA356，将填充墙的平面外强度定义为<sup>[9-10]</sup>：

$$q_{ine} = \frac{0.7 f_{me} \lambda_2}{h_{inf} / t_{inf}} \times 144 \quad (2)$$

式中： $f_{me}$  为砌体抗压强度； $\lambda_2$  为长细比，按 FEMA356 表 7-11 确定。

假定填充墙模态是结构模态的一部分，将原填充墙与图 1 所示的等效对角支撑分别简化为图 2(a)、图 2(b)所示具有分布质量的无阻尼弹性简支梁模型和在跨中具有集中质量的无阻尼弹性简支梁模型，在求解过程中只考虑第一阶模态的影响。

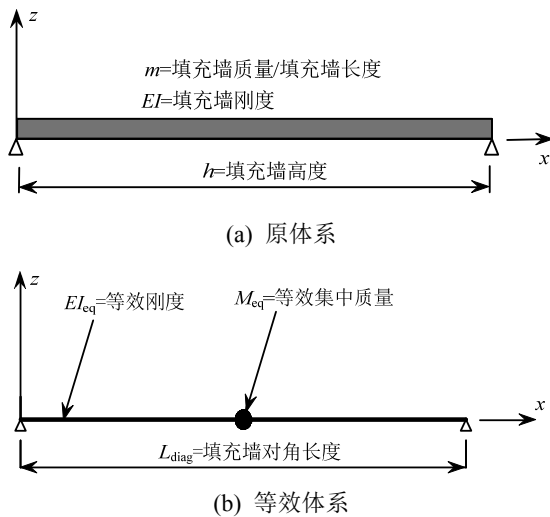


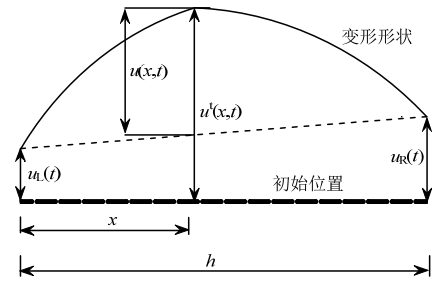
图 2 描述平面外响应的原体系与等效体系

Fig.2 Original versus equivalent systems for out-of-plane response

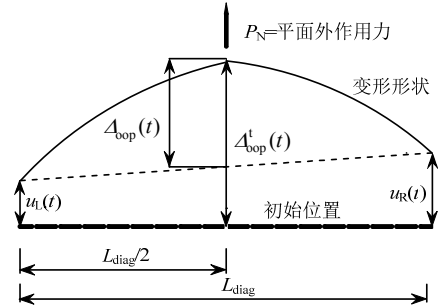
原体系和等效体系在支座运动下的一阶振型如图 3 所示。

原体系中任意一点在时刻  $t$  的位移  $u^t(x, t)$  由该点相对于梁的绝对位移  $u(x, t)$  和支座运动  $u_L(t)$ 、 $u_R(t)$  叠加得到；等效体系的运动  $\Delta_{oop}^t(t)$  由等效点位移  $\Delta_{oop}^t(t)$  和支座运动  $u_L(t)$ 、 $u_R(t)$  叠加得到。列出原体系运动方程为：

$$m \frac{\partial^2 u^t(x, t)}{\partial t^2} + EI \frac{\partial^4 u^t(x, t)}{\partial t^4} = 0 \quad (3)$$



(a) 原体系在支座运动下的一阶振型



(b) 等效体系在支座运动下的一阶振型

图 3 原体系与等效体系在支座运动下的一阶振型

Fig.3 First-mode deformation of original versus equivalent systems under base excitation

根据两个体系的支座运动、自振频率、基本响应相同，由文献[9]及解答具有分布质量的无阻尼弹性简支梁模型的相关结构动力学知识求解式 (3)，得到原体系的自振频率  $\omega = \frac{\pi^2}{h^2} \sqrt{\frac{EI}{m}}$ ，等效质量  $M_{eq}$  为填充墙总质量的 81%，即  $M_{eq} = 0.81 mh$ 。

求解原填充墙体系得屈服时弯矩为：

$$M_y = \frac{q_{ine} L_{inf} h^2}{8} \quad (4)$$

求解等效体系得屈服时弯矩为：

$$M_{eq,y} = 1.570 \frac{L_{diag}}{h} M_y \quad (5)$$

当无平面内作用力时平面外屈服弯矩  $M_{N0} = M_{eq,y}$ 。

### 1.3 考虑平面内与平面外的相互作用

Hashemi 和 Mosalam 在 2007 年基于 SAT 模型，证明平面内和平面外的抵抗能力有一相互作用，之后通过一些数值试验，证明当相互作用描述为如图 4 所示  $P-M$  相互作用曲线时模拟效果与实验结果吻合较好，其表达式如下：

$$\left( \frac{M_N}{M_{N0}} \right)^{3/2} + \left( \frac{P_H}{P_{H0}} \right)^{3/2} \leq 1.0 \quad (6)$$

式中： $M_N$ 是在平面内有力作用时的平面外抗弯承载力； $M_{N0}$ 是平面内没有力作用时的平面外抗弯承载力，其值等于式(5)所得 $M_{eq,y}$ ； $P_H$ 是平面外有力作用时等效支撑的轴向承载力； $P_{H0}$ 是式(1)给出的平面外无力作用时等效支撑的轴向承载力。

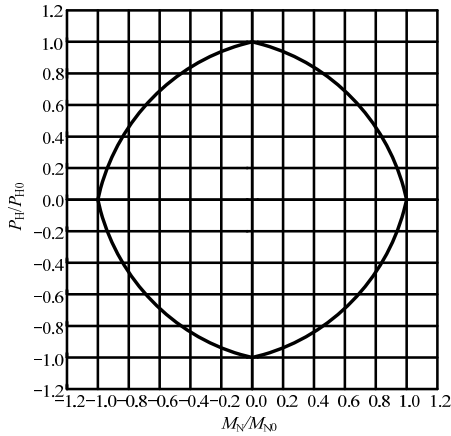
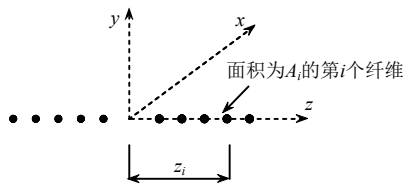


图 4 填充墙的 P-M 相互作用曲线

Fig.4 P-M interaction curve of typical infill panel



注：1) x轴沿构件轴向；  
2) y轴垂直于构件轴向；  
3) z轴垂直于构件轴向，指向平面外。

图 5 位于塑性铰区的纤维

Fig.5 Fiber layout at plastic hinge region

### 1.4 纤维截面模型

将图 2(b)所示的梁单元划分为如图 5 所示的有限个纤维单元，假定  $z$  轴右半轴离散点的个数为  $N_{pts}$ ，则总的纤维个数为  $2(N_{pts}-1)$ 。考虑到随着塑性中性轴的“滑移”，塑性阶段轴向力和弯矩发生了改变，任意一个纤维的屈服强度、位置、面积是不同的，但每个划分这些纤维的离散点的强度必须满足式(6)所示的相互关系。因此可以基于  $P-M$  相互作用曲线确定这些离散点的强度  $P$  及弯矩  $M$  进而计算这些纤维的屈服强度、位置和面积。其计算过程如图 6 所示，计算结果为：

$$F_{yi} = \frac{1}{2}[P_j - P_{j+1}] \quad (7)$$

$$Z_i = \frac{1}{2} \left[ \frac{M_{j+1} - M_j}{F_{yi}} \right] \quad (8)$$

式中： $F_{yi}$ 为第  $i$  个纤维的屈服强度； $P_j$ 为相互作用曲线中第  $j$  个离散点处的轴向承载力( $j=1$  时， $P=P_{H0}$ )； $Z_i$ 为第  $i$  个纤维距离横截面形心的距离； $M_j$ 为相互作用曲线上第  $j$  个离散点的平面外抗弯承载力( $j=N_{pts}$  时， $M=M_{N0}$ )。

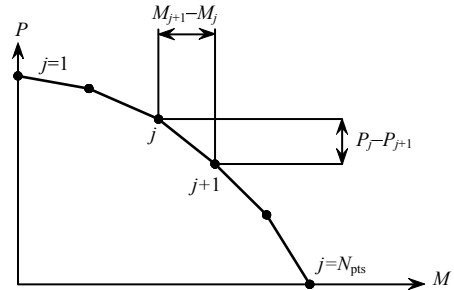


图 6  $A_i$  与  $Z_i$  的计算

Fig.6 Calculation of  $A_i$  and  $Z_i$

取所有纤维的弹性模量等于砌体的弹性模量  $E_m$ ，分配给各个纤维的面积必须满足：

$$\sum_{i=1}^{2(N_{pts}-1)} A_i = t_{inf} \times a, \quad \sum_{i=1}^{2(N_{pts}-1)} A_i \times Z_i^2 = I_{eq}$$

其中： $A_i$ 为第  $i$  个纤维截面的面积； $I_{eq}$ 为等效支撑的截面惯性矩。

为了满足以上两条件，同时能够较好地反映  $A_i$  与  $Z_i$  之间的关系，将  $A_i$  与  $Z_i$  之间的关系表述为如下的指数函数：

$$A_i = \gamma \times |Z_i|^n \quad (9)$$

所以，每个纤维的屈服应力  $f_{yi} = F_{yi} / A_i$ ，屈服应变  $\epsilon_i = f_{yi} / E_m$ 。

在 OpenSees 中基于纤维截面的对角构件用两个在跨中节点相连的带铰的梁单元进行模拟，铰的总长度(所有铰的长度之和)取斜撑总长度的 1/10，梁端与周围框架部分以弹性铰的方式连接。

## 2 振动台试验RC框架-填充墙结构的数值模拟

### 2.1 RC 框架-填充墙结构试验模型与数值模拟

为了研究钢筋混凝土框架-填充墙结构地震倒塌机理及倒塌模式，检验现有框架和填充墙分析模型的倒塌模拟效果，在第九届全国地震工程大会期间，中国地震局工程力学研究所开展了钢筋混凝土框架结构倒塌振动台试验，并结合试验举行了相应的数值模拟分析竞赛。本文主要在考虑填充墙平面内与平面外相互作用的情况下对框架柱及整体框架的动力倒塌试验进行分析研究及数值模拟预测，

以验证采用的数值模型的可靠性<sup>[11]</sup>。

该试验模型以外廊式教学楼为原型，按我国现行规范设计了一个如图7所示的7度(0.10 g)设防的4层2×2跨钢筋混凝土框架-填充墙结构，并按1：5比例缩尺后作为振动台试验模型，采用图8所示的地震动作为台面输入，对顶点位移时程曲线进行预测，以数值模拟结果与试验结果的吻合度作为评判标准，并以它们的均方根误差，即： $Error_{RMS} =$

$$\sqrt{\frac{1}{N} \times \sum_{i=1}^n (F_{comp_i} - F_{exp_i})^2}$$
 量化计算。

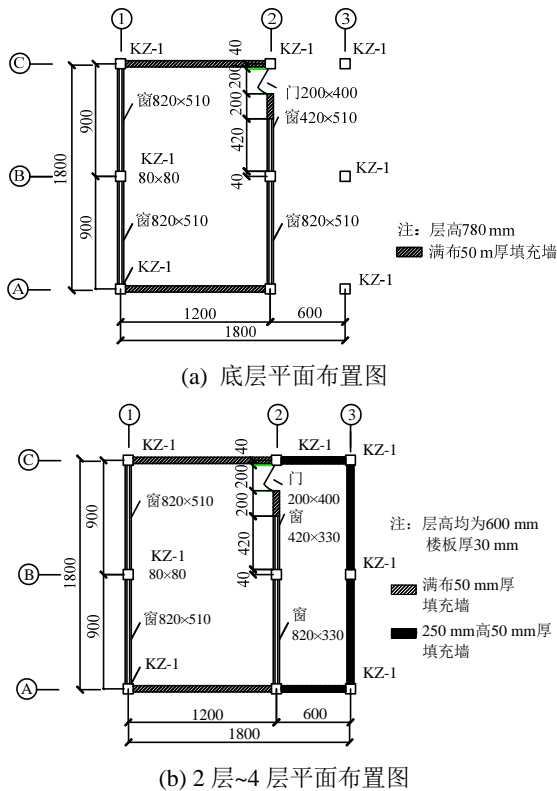


图7 4层RC平面布置图

Fig.7 The model of 4-storey RC planar frame structure

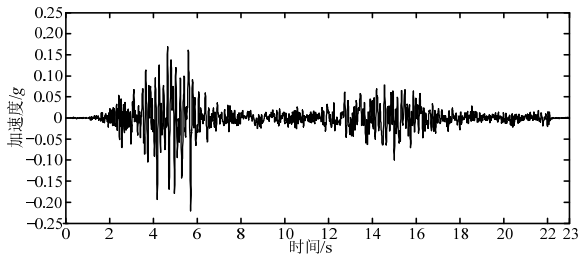


图8 振动台试验台面激励

Fig.8 Table excitation of the shaking table test

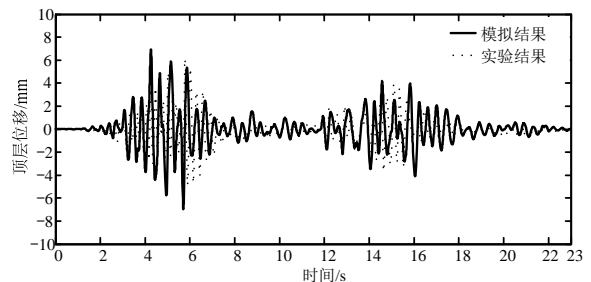
该模型底层层高780 mm，其他层层高均为600 mm。填充墙采用混凝土空心砌块，抗压强度为1.78 MPa，密度约1120 kg/m<sup>3</sup>，砌筑砂浆的立方体

试块抗压强度为3.49 MPa。楼板厚30 mm。1层~3层各配重1.5 t，4层配重1.23 t。

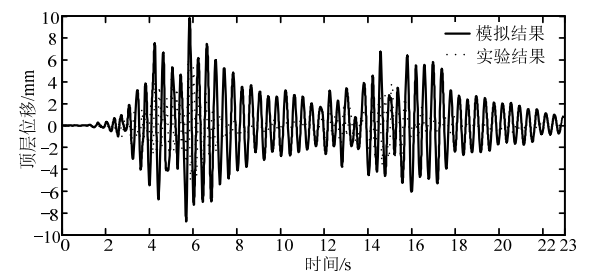
数值分析模型采用OpenSees中的纤维单元有限元模型，梁柱单元均采用基于纤维截面的dispBeamColumn单元，同时柱的几何坐标转换选用P-Delta转换以考虑P-Δ效应<sup>[12]</sup>。考虑到纵向受力钢筋和箍筋对核心区混凝土有一定的约束效应，对核心区和保护层混凝土的本构关系分别进行定义，均采用Concrete02本构模型<sup>[12-13]</sup>。钢筋采用目前为数不多的可以考虑强度、刚度退化的Reinforcing-Steel本构模型<sup>[12-14]</sup>。楼板采用刚性隔板(rigidDiaphragm)模拟，只考虑平面内转动和两个方向的平动，不考虑垂直于楼板的平动。填充墙采用前述的纤维离散化梁-柱单元的填充墙模型，用两个带铰的梁单元模拟，考虑平面内和平面外的相互作用。

2.2 试验结果与数值模拟结果的比较

图9所示是考虑与不考虑填充墙平面内与平面外相互作用进行数值模拟与试验所得结构顶点位移结果的对比，表明考虑填充墙平面内与平面外相互作用比不考虑填充墙平面内与平面外相互作用数值模拟所得顶点位移曲线与试验结果吻合更好。试验所得最大顶点位移为6.34 mm。不考虑填充墙平面内与平面外相互作用时，最大顶点位移为9.84 mm， $Error_{RMS} = 2.83$ ；考虑填充墙平面内与平面外相互作用时，最大顶点位移为6.96 mm， $Error_{RMS} = 1.72$ 。



(a) 考虑填充墙顶点位移曲线结果对比



(b) 不考虑填充墙顶点位移曲线结果对比

图9 顶点位移曲线结果对比

Fig.9 Comparison of roof displacement curves

### 3 某多层RC框架-填充墙结构的抗整体倒塌能力评估

#### 3.1 多层 RC 框架结构数值分析模型

以如图10所示某小学教学综合楼为研究对象进行建模分析。该工程共6层，1层层高4 m，其他层层高均为3.6m。填充墙采用加气混凝土砌块，容重 $\leq 800 \text{ kg/m}^3$ ，砌体砂浆采用M5混合砂浆，砌筑质量等级为B级。楼板采用厚为270 mm的空心楼板。工程所在地抗震设防烈度为8度，设计基本地震加速度值为0.2 g，场地类别为II类，设计地震分组为第三组，场地设计特征周期为0.45 s，建筑抗震设防类别为重点设防类。

选择OpenSees有限元分析软件为计算分析平台，混凝土本构采用Concrete02，考虑到纵向受力钢筋和箍筋对核心区混凝土的约束效应而导致承载能力的加强，对外包混凝土与核心混凝土的参数分别定义<sup>[12-13]</sup>。钢筋本构采用ReinforcingSteel。梁柱单元均采用基于纤维截面的dispBeamColumn单元<sup>[12-14]</sup>。在每个梁、柱单元均设置5个积分点以达到预期的计算精度和效率<sup>[12]</sup>。框架柱的几何坐标转换选用P-Delta转换(P-Delta Transformation)以考虑P- $\Delta$ 效应<sup>[12]</sup>。楼板采用刚性隔板(rigidDiaphragm)模拟，只考虑平面内转动和两个方向的平动，不考虑垂直于楼板的平动。填充墙采用前述纤维离散化梁-柱单元的填充墙模型，用两个带铰的梁单元模拟。

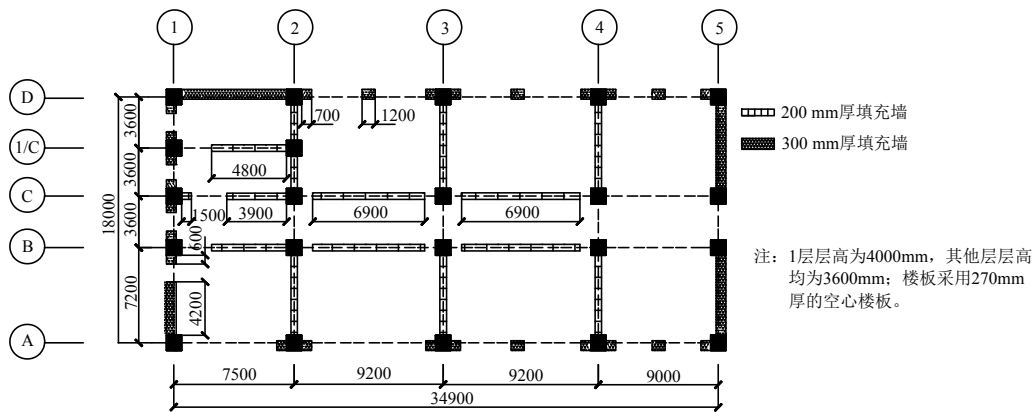


图10 6层三维空间框架结构模型

Fig.10 The model of 6-storey RC three-dimensional frame model

#### 3.2 静力推覆分析

采用静力推覆方法对两种模型的延性及承载能力进行分析对比，图 11 为两种模型按底部剪力法计算水平荷载作用下的推覆曲线。

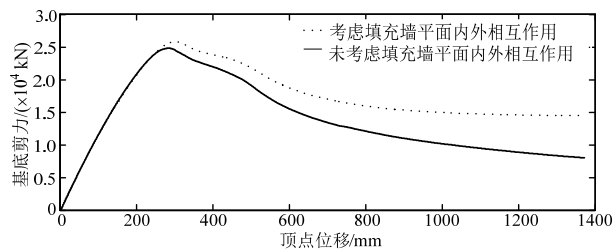


图11 Pushover曲线对比

Fig.11 Comparison of Pushover curves

图 11 所示结果表明，两种结构的 Pushover 曲线在顶点位移小于 280 mm 以前基本重合；不考虑与考虑填充墙平面内外相互作用结构的 Pushover 曲线分别在顶点位移超过 280 mm 和 300 mm 后进入下降段；考虑填充墙平面内与平面外相互作用模型的曲线在最高点处的基底剪力明显高于不考虑

填充墙平面内与平面外相互作用模型曲线在最高点处的基底剪力。进入下降段以后，考虑填充墙平面内与平面外相互作用结构的曲线下降幅度明显低于不考虑填充墙平面内与平面外相互作用结构的曲线。

#### 3.3 增量动力分析

##### 3.3.1 地震动输入

考虑到地震动的随机性，借鉴美国 ATC-63 计划提出的选取地震动记录原则，选取表 1 所示 24 条地震动记录进行结构的增量动力分析<sup>[12,15]</sup>。

##### 3.3.2 分析结果

将表1所示的24条地震动记录分别输入考虑与不考虑填充平面内与平面外相互作用的两种结构模型进行增量动力分析，分析过程中以  $S_a(T_1, 5\%)$  为强度指标进行调整，分别记录每次分析得到的最大层间侧移角  $\theta_{max}$ 。最后绘出  $S_a(T_1, 5\%)$  与  $\theta_{max}$  的关系曲线，即IDA曲线，如图 12(a)、图12(b)所示。

图12(a)、图12(b)所示结果表明, 层间侧移角  $\theta_{max}$  在0~0.01时, 两种模型分析得到的IDA曲线比较吻合, 说明结构在弹性阶段或损伤较小时填充墙平面内与平面外相互作用对结构的抗震性能不会产

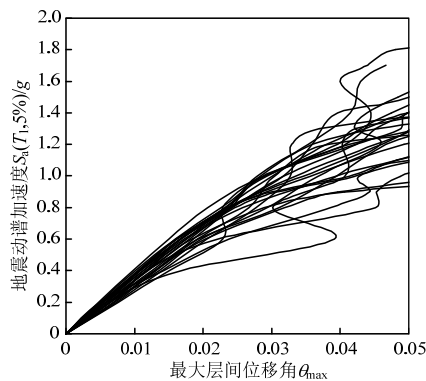
生较为明显的影响; 而  $\theta_{max}$  在0.01~0.05时, 同样的地震动谱加速度  $S_a(T_1, 5\%)$ , 不考虑填充墙平面内与平面外相互作用模型的侧移明显大于考虑填充墙平面内与平面外相互作用模型的侧移, 说明在

表 1 增量动力分析所选用的地震动记录

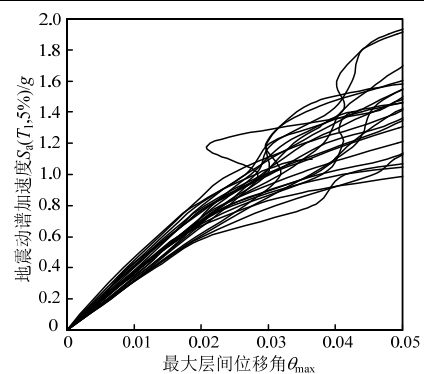
Table 1 Selected ground motion records for incremental dynamic analysis

序号	地震事件			台站	地震动分量
	名称	震级	发生年份		
Eq.1	Northridge, USA	6.7	1994	Beverly Hills-Mulhol	NORTHR/MUL279
Eq.2	Northridge, USA	6.7	1994	Canyon Country-WLC	NORTHR/LOS270
Eq.3	Duzce, Turkey	7.1	1999	Bolu	DUZCE/BOL090
Eq.4	Imperial Valley, USA	6.5	1979	Delta	IMPVALL/H-DLT352
Eq.5	Imperial Valley, USA	6.5	1979	EI Centro Array #11	IMPVALL/H-EI1230
Eq.6	Kobe, Japan	6.9	1995	Nishi-Akashi	KOBE/NIS090
Eq.7	Kobe, Japan	6.9	1995	Shin-Osaka	KOBE/SHI090
Eq.8	Kocaeli, Turkey	7.5	1999	Duzce	KOCAELI/DZC270
Eq.9	Kocaeli, Turkey	7.5	1999	Arcelik	KOCAELI/ARC090
Eq.10	Landers, USA	7.3	1992	Yermo Fire Station	LANDERS/YER360
Eq.11	Landers, USA	7.3	1992	Coolwater	LANDERS/CLW-TR
Eq.12	Loma Prieta, USA	6.9	1989	Gilroy Array #3	LOMAP/GO30090
Eq.13	Loma Prieta, USA	6.9	1989	Coyote Lake Dam (SW Abut)	LOMAP/CYC285
Eq.14	Superstition Hills, USA	6.5	1987	EI Centro Imp.Co	SUPERST/B-ICC090
Eq.15	Superstition Hills, USA	6.5	1987	Poe Road (temp)	SUPERST/B-POE360
Eq.16	Cape Mendocino, USA	7	1992	Rio Dell Overpass	CAPEMEND/RIO360
Eq.17	Chi-Chi, Taiwan	7.6	1999	CHY101	CHICHI/CHY101-N
Eq.18	Chi-Chi, Taiwan	7.6	1999	CHY041	CHICHI/CHY041-N
Eq.19	Tabas, Iran	7.4	1978	Dayhook	TABAS/DAY-TR
Eq.20	San Fernando, USA	6.6	1971	LA-Hollywood Stor	SRERNPEL180
Eq.21	Friuli, Italy	6.5	1976	Tolmezzo	FRIULI/A-TMZ270
Eq.22	Imperial Valley, USA	7	1940	EI Centro Array #9	IMPVALL/I-ELC180
Eq.23	汶川, 中国	8.0	2008	安县塔水	东西方向
Eq.24	汶川, 中国	8.0	2008	江油重华	东西方向

大震或特大震作用下, 即结构损伤较严重时, 填充墙平面内与平面外相互作用对结构抗震性能以及抗整体性倒塌能力的影响较为明显, 并且由于填充墙平面内与平面外相互作用使得结构的损伤发展较慢, 抗倒塌能力有所提高。



(a) 不考虑填充墙平面内与平面外相互作用



(b) 考虑填充墙平面内与平面外相互作用

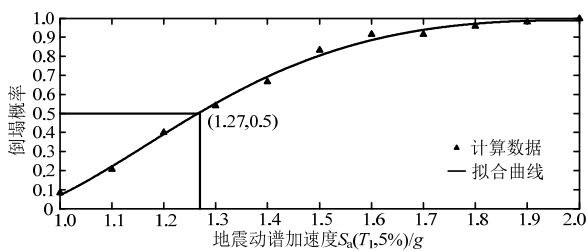
图12 不考虑与考虑填充墙平面内与平面外相互作用的IDA曲线

Fig.12 IDA curves with and without considering of in-plane and out-of-plane interaction of infill walls

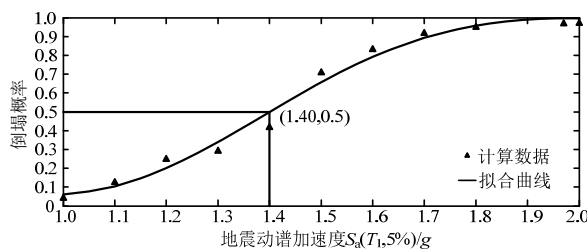
### 3.3.3 抗整体性倒塌能力评估

借鉴FEMA350建议, 以谱加速度  $S_a(T_1, 5\%)$  和

最大层间侧移角 $\theta_{\max}$ 分别作为地震动强度(Intensity Measure, IM)指标和结构损伤(Damage Measure, DM)指标,以20%初始斜率对应的 $S_a(T_1, 5\%)$ 和 $C_{DM} = \theta_{\max} = 1/20$ 构成IM-DM混合准则作为倒塌判定准则,获得对应于一定 $S_a(T_1, 5\%)$ 的倒塌概率<sup>[12,16]</sup>。建立 $S_a(T_1, 5\%)$ 为横轴、结构倒塌概率为纵轴的直角坐标系,统计每次计算结果得到如图13(a)、图13(b)所示的离散数据点<sup>[12]</sup>。进一步以 $S_a(T_1, 5\%)$ 为随机变量,按照正态分布模型对离散数据点进行拟合,获得图13(a)、图13(b)所示 $S_a(T_1, 5\%)$ 连续变化时结构的倒塌概率曲线。



(a) 不考虑填充墙平面内与平面外相互作用



(b) 考虑填充墙平面内与平面外相互作用

图13 不考虑与考虑填充墙平面内与平面外相互作用的倒塌概率曲线

Fig.13 Collapse probability curves with and without considering of in-plane and out-of-plane interaction of infill walls

图13同时也给出了结构倒塌概率达到50%时相应的 $S_a(T_1, 5\%)$ ,即以 $S_a(T_1, 5\%)_{50\%}$ 衡量结构抗整体倒塌能力的大小。不考虑和考虑填充墙平面内与平面外相互作用时结构抗整体倒塌能力 $S_a(T_1, 5\%)_{50\%}$ 分别为1.27g和1.40g,说明不考虑填充墙平面内与平面外相互作用会过低估计框架-填充墙结构的整体抗倒塌能力。

## 4 结论

基于OpenSees分析软件,对某倒塌试验的4层钢筋混凝土框架-填充墙结构进行了数值模拟,得到顶点位移时程曲线,并与试验结果进行了对比,结果表明:

(1) 考虑填充墙平面内与平面外相互作用比不考虑填充墙平面内与平面外相互作用数值模拟的顶点位移曲线与试验结果吻合更好,进而说明纤维离散化梁-柱单元的填充墙模型能够较好地模拟框架结构中的填充墙。

(2) 进行数值模拟时,在相同的地震动输入下,不考虑填充墙平面内与平面外相互作用会使得结构地震响应偏大。

以一空间RC框架-填充墙结构为例,利用OpenSees建立了三维数值分析模型,区分考虑和考虑填充墙平面内与平面外相互作用两种情况,对分析模型分别进行了单调荷载下的静力推覆分析和24条地震动作用下的增量动力分析,并且利用增量动力分析结果,给出了倒塌概率达到50%时结构的抗整体倒塌能力 $S_a(T_1, 5\%)_{50\%}$ ,分析结果表明:

(1) 结构变形较小时,填充墙平面内与平面外相互作用对结构承载力和变形的影响均不大,考虑和考虑填充墙平面内与平面外相互作用的Pushover曲线及IDA曲线基本重合。

(2) 结构进入弹塑性阶段以后,考虑和考虑填充墙平面内与平面外相互作用的IDA曲线随着地震动强度的提高,结构变形的增大呈现越来越明显的差异,考虑填充墙平面内与平面外相互作用后结构变形的增长明显低于不考虑填充墙平面内与平面外相互作用后结构变形的增长。

(3) 利用 $S_a(T_1, 5\%)_{50\%}$ 衡量结构抗整体倒塌能力的大小,不考虑填充墙平面内与平面外相互作用会低估框架-填充墙结构的抗整体倒塌能力。

因此,在对框架-填充墙结构进行大震及特大地震下的弹塑性地震反应分析及抗倒塌能力评估时,必须要考虑填充墙平面内与平面外相互作用的影响,以提高分析评估结果的合理性。

## 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 and Beijing Jiaotong University. Analysis on seismic damage of buildings in the Wenchuan earthquake [J]. Journal of Building Structures, 2008, 29(4): 1-9. (in Chinese)
- [2] Eberhard M O, Baldrige S, Marshall J, et al. The Mw 7.0 Haiti earthquake of January 12, 2010: USGS/EERI



- Advance Reconnaissance Team report [R]. Menlo Park, California: U.S. Geological Survey, 2010.
- [3] 王亚勇, 高孟潭, 叶列平, 等. 基于大震和特大震下倒塌率目标的建筑抗震设计方法研究方案[J]. 土木建筑与环境工程, 2010, 32(增刊 2): 291—297.  
Wang Yayong, Gao Mengtan, Ye Lieping, et al. Research strategy of building seismic design method based on collapse probability under great earthquakes [J]. Journal of Civil, Architectural & Environmental Engineering, 2010, 32(Suppl 2): 291—297. (in Chinese)
- [4] 叶列平, 陆新征, 赵世春, 等. 框架结构抗地震倒塌能力的研究—汶川地震极震区几个框架结构震害案例分析[J]. 建筑结构学报, 2009, 30(6): 67—76.  
Ye Lieping, Lu Xinzheng, Zhao Shichun, et al. Seismic collapse resistance of RC frame structures—Case studies on seismic damages of several RC frame structures under extreme ground motion in Wenchuan Earthquake [J]. Journal of Building Structures, 2009, 30(6): 67—76. (in Chinese)
- [5] 李英民, 韩军, 田启祥, 等. 填充墙对框架结构抗震性能的影响[J]. 地震工程与工程振动, 2009, 29(3): 51—58.  
Li Yingmin, Han Jun, Tian Qixiang, et al. Study on influence of infilled walls on seismic performance of RC frame structures [J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2009, 29(3): 51—58. (in Chinese)
- [6] Kaushik H B, Rai D C, Jain S K. Code approaches to seismic design of masonry-infilled reinforced concrete frames: A state-of-the-art review [J]. Earthquake Spectra, 2006, 22(4): 961—983.
- [7] Dolšek M, Fajfar P. The effect of masonry infills on the seismic response of a four-storey reinforced concrete frame—A deterministic assessment [J]. Engineering Structures, 2008, 30(7): 1991—2001.
- [8] Pujol S, Fick D. The test of a full-scale three-story RC structure with masonry infill walls [J]. Engineering Structures, 2010, 32(10): 3112—3121.
- [9] Kadysiewski S, Mosalam K M. Modeling of unreinforced masonry infill walls considering in-plane and out-of-plane interaction [R]. Berkeley: Report No. PEER 2008/102, Pacific Earthquake Engineering Research Center, University of California, 2009.
- [10] FEMA. FEMA 356, Prestandard and commentary for the seismic rehabilitation of buildings [R]. Washington, D C: Federal Emergency Management Agency, 2000.
- [11] 中国地震局工程力学研究所. 结构盲测竞赛通知[EB]. <http://www.caee.org.cn/mctz.htm>, 2014.3.28.  
Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration. Competition announcement on the structural blind test [EB]. <http://www.caee.org.cn/mctz.htm>, 2014.3.28.
- [12] 韩建平, 杨军平. 考虑结构构件退化特性评估大震下 RC 框架抗整体性倒塌能力[J]. 地震工程与工程振动, 2012, 32(6): 53—64.  
Han Jianping, Yang Junping. Investigation on global collapse resistance capacity of RC frame under severe earthquake considering deterioration characteristic of structural components [J]. Earthquake Engineering and Engineering Dynamics, 2012, 32(6): 53—64. (in Chinese)
- [13] Mazzoni S, McKenna F, Scott M H, et al. OpenSees Command Language manual [EB]. [http:// OpenSees.berkeley.edu](http://OpenSees.berkeley.edu), 2007.7.1
- [14] Kunnath S K, Heo Y A, Mohle J F. Nonlinear uniaxial material model for reinforcing steel bars [J]. ASCE Journal of Structural Engineering, 2009, 135(4): 335—343.
- [15] Applied Technology Council (ATC). FEMA P695, Quantification of building seismic performance factors [R]. Redwood City, California: Federal Emergency Management Agency, 2009.
- [16] FEMA. FEMA 350, Recommended seismic design criteria for new steel moment frame buildings [R]. Washington, D C: Federal Emergency Management Agency, 2000.