

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.20211111077

## 考虑地震动转动分量作用的砌体结构易损性分析\*

李安琪<sup>1</sup>, 李宏男<sup>1,2</sup>, 张皓<sup>1</sup>, 高箐萌<sup>3</sup>

(1. 沈阳建筑大学土木工程学院, 辽宁 沈阳 110168; 2. 大连理工大学土木工程学院, 辽宁 大连 116024;  
3. 碧桂园集团豫东区域, 河南 新乡 453000)

**摘要:**为考虑地震动转动分量对砌体结构地震响应和易损性的影响,基于ABAQUS有限元软件平台建立了村镇区域典型单层砌体结构有限元模型,选取层间位移角最大值作为性能指标来分析地震动转动分量对结构响应及易损性的影响;首先,选取三组典型地震动分别进行调幅,研究了结构在不同强度地震动平动和转动分量作用下的地震响应;其次,在PEER数据库选取80条地震动,研究了地震动转动分量对砌体结构地震易损性的影响,建立了地震易损性曲线。结果表明:(1)同时考虑地震动平动分量和转动分量作用时的结构层间位移角最大值比仅考虑地震动平动分量作用时有明显增大,随着PGA的增大,转动分量对结构的影响有增大的趋势;(2)由于地震动转动分量的作用,结构发生不同极限破坏状态时的超越概率均高于仅考虑平动分量作用的情况。该研究成果可为村镇砌体结构抗震设计与性能提升提供理论参考。

**关键词:** 砌体结构; 转动分量; 地震响应; 易损性

**中图分类号:** TU352; TU375.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2023)04-0763-07

## Vulnerability Analysis of Masonry Structure Considering the Action of Rotational Component of Ground Motion

LI Anqi<sup>1</sup>, LI Hongnan<sup>1,2</sup>, ZHANG Hao<sup>1</sup>, GAO Qingmeng<sup>3</sup>

(1. School of Civil Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang 110168, China;  
2. School of Civil Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China;  
3. Yudong Region of Country Garden Holdings Co., Ltd., Xinxiang 453000, China)

**Abstract:** In order to consider the influence of seismic rotational component on the seismic response and vulnerability of masonry structures, the finite element model of typical single-layer masonry structures in villages and towns is established based on ABAQUS finite element software platform. The maximum value of inter-story drift angle is selected as the performance index to analyze the influence of seismic rotational component on structural response and vulnerability; Firstly, three groups of typical ground motions are selected for amplitude modulation, and the seismic response of the structure under the action of translational and rotational components of the ground motions with different intensities is studied; Secondly, eighty ground motions from the PEER database are extracted to study the influence of rotational component of ground motion on structural seismic vulnerability, and the seismic

\* 收稿日期:2021-11-11;修回日期:2022-03-24

基金项目:国家重点研发计划(2018YFD110040201)、国家自然科学基金重点项目(51738007)、辽宁省教育厅基本科研项目(LJKMZ20220949)、沈阳市中青年科技创新人才支持计划(RC220171)资助

作者简介:李安琪(1997—),女,硕士。主要从事结构抗震研究。E-mail:lianqi9797@163.com

vulnerability curve is established. The results show that: (1) the maximum value of the inter-story drift angle of the structure considering both the translational component and the rotational component of the ground motion increases significantly than that considering only the translational component of the ground motion. With the increase of *PGA*, the influence of the rotational component on the structure tends to increase; (2) Due to the influence of the rotational component of ground motion, the exceedance probability of different limit failure states of the structure is higher than that considering only the translational component of ground motion. The research results can provide a theoretical reference for seismic design and performance improvement of masonry structures in villages and towns.

**Keywords:** masonry structure; rotational component; seismic response; vulnerability

## 0 引言

砖砌体结构住宅在我国村镇建筑中占据了相当大的比重,是目前我国村镇建筑中应用最广泛的结构形式之一。砌体的抗拉、抗弯和抗剪强度偏低,且由于砌体材料自身的特点,导致砌体结构刚度、自重大、延性差,在荷载作用下砌体结构极易发生小变形情况下的受拉屈服,引发脆性破坏以致倒塌,造成巨大的人员伤亡和财产损失。在遭受同等强度地震作用下,村镇区域的砌体结构等建筑发生倒塌的概率以及导致的人员伤亡数量均远高于城市区域。汶川地震震害统计分析结果显示,破坏严重或发生倒塌的建筑中砌体结构所占比重最大<sup>[1]</sup>,直接反映了目前我国村镇区域砌体结构抗震性能研究和设计管控不足的现象。

研究表明,地震发生时地表运动十分复杂,各点的相位、波速和周期等存在差异,地震动并非单向的一维运动,而是复杂的多维运动,地震动不仅包含三个平动分量,同时还具有三个转动分量<sup>[2]</sup>。1964年Alaska地震中,约有十二万平方公里面积的地面发生了倾斜,相对高差最大达到了2.5 m,显然是由地震动转动分量造成的;1994年的Northridge地震中<sup>[2]</sup>,由于转动分量作用,震源附近地面倾斜角度高达3.1度;1971年San Fernando地震中,桥梁倒塌的原因也是由于地震动水平分量和转动分量的耦合作用。由于受到观测水平和测量技术的限制,目前仍难以直接量测记录到地震动的转动分量,但国内外学者们已试图通过弹性波动理论等相关理论与方法间接地通过地震动平动分量来获取转动分量。1969年,N.M.Newmark<sup>[4]</sup>首次采用行波法利用地震动平动分量推导出扭转分量,M.D.Trifunac<sup>[5]</sup>也提出频域法来获取地震动转动分量,这些理论在该领域得到广泛应用。1989年,李宏男<sup>[6]</sup>提出,

不论结构平面是否规则,地震动扭转分量均会对结构响应产生影响,且扭转分量对角柱和结构边缘的剪力墙的内力影响较大;魏文晖等<sup>[7-8]</sup>研究了水平-摇摆地震动作用下带悬吊质量结构的地震响应,推导出了该结构的动力方程,同时进行了1:10缩尺模型振动台试验,结果表明,转动分量对结构影响不容忽视。

综上所述,只考虑地震动平动分量存在一定的局限性,无法准确把握地震动对结构的影响,应考虑地震动转动分量的影响,从而更准确评估多维地震作用下结构破坏模式及特征。对于村镇结构尤其是应用颇多的砌体结构,更应予以重视,研究转动分量对其造成的影响及破坏,对其性能进行评估,为村镇砌体结构抗震设计与性能提高提供理论参考。

本文基于弹性波动理论,利用MATLAB程序进行数值模拟,通过所选取的地震动平动分量推导出地震动转动分量。基于ABAQUS有限元软件平台建立单层砌体结构的有限元模型,进行非线性动力时程分析,选取层间位移角最大值作为量化指标,分析了地震动转动分量对砌体结构地震反应的影响。基于概率地震需求分析方法和易损性分析方法,进行地震易损性分析,进一步研究了地震动转动分量对砌体结构易损性的影响。

## 1 模型介绍

### 1.1 有限元模型建立

本文选取我国东北地区典型村镇砌体结构为研究对象,结构平面尺寸为11.5 m×7.9 m×3 m,屋顶标高5.4 m,如图1所示。屋面恒荷载取10 kN/m<sup>2</sup>,活荷载取0.5 kN/m<sup>2</sup>,其中砌体墙选取强度为MU10的烧结砖和M2.5的砂浆砌筑而成,整体密度取

1 000 kg/m<sup>3</sup>,泊松比取 0.2。墙体厚度为 240 mm,墙体和屋盖均采用 S4R 壳单元,所建立的有限元模型如图 2 所示。

屋顶活荷载取 0.5 kN/m<sup>2</sup>,其中砌体墙选取强度为 MU10 的烧结砖和 M2.5 的砂浆砌筑而成,整体密度取 1 000 kg/m<sup>3</sup>,泊松比取 0.2。

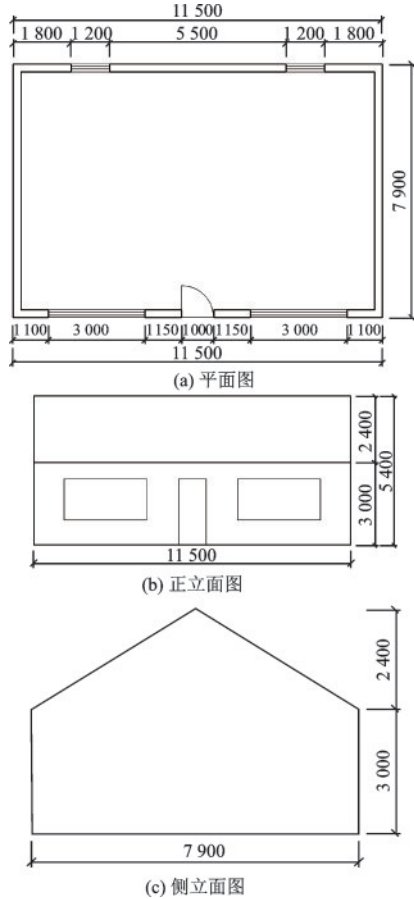


图 1 砌体结构的尺寸及布置  
Fig.1 The size and layout of the masonry structure

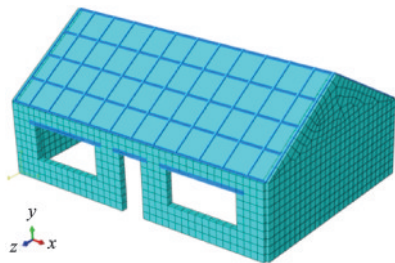


图 2 砌体结构的有限元模型  
Fig.2 Finite element models of masonry structure

## 1.2 砌体材料本构关系

砌体受压本构模型采用文献[9]中所建议的表达式(图 3(a)):

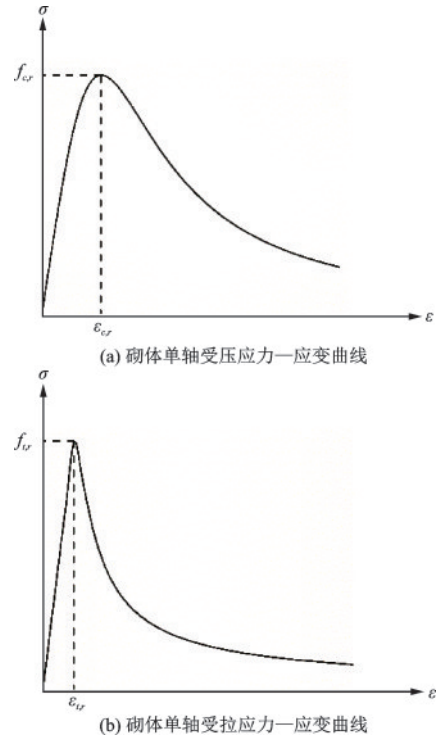


图 3 砌体本构关系曲线  
Fig.3 The constitutive relationship curve of masonry

$$y = \frac{\eta x}{1 + (\eta - 1)x^{\frac{1}{\eta-1}}} \quad (1)$$

$$x = \frac{\epsilon}{\epsilon_{cm}} \quad (2)$$

$$y = \frac{\sigma}{f_{cm}} \quad (3)$$

$$y = \frac{1.633x}{1 + 0.633x^{2.58}} \quad (4)$$

式中, $\eta=1.633$ ;  $f_{cm}$  为砌体轴心抗压强度平均值;  $\epsilon_{cm}$  为  $f_{cm}$  对应的应变。

根据《砌体结构设计规范》<sup>[10]</sup>(GB5003-2011)可计算砌体抗压强度平均值  $f_{cm}$  及其对应应变  $\epsilon_{cm}$ , 即:

$$f_{cm} = 0.78f_1^{0.5}(1 + 0.07f_2) \quad (5)$$

式中,  $f_1$  为砌块的抗压强度平均值;  $f_2$  为砂浆的抗压强度平均值。

$$\epsilon_{cm} = \frac{0.005}{f_{cm}} \quad (6)$$

取 10 倍屈服应变作为砌体受压应力—应变曲线中的极限应变, 砌体弹性模量为:

$$E = 370f_{cm}\sqrt{f_{cm}} \quad (7)$$

砖砌体的受拉破坏特性与混凝土相近, 因此本文近似采用混凝土受拉本构模型替代<sup>[11]</sup>, 砌体受拉时应力—应变关系的上升阶段为直线, 而峰值之后

的下降阶段表达式与混凝土受拉应力—应变关系相似,如图3(b)所示,其表达式为:

$$\begin{cases} y = x, x \leq 1 \\ y = \frac{x}{2(x-1)^{1.7} + x}, x > 1 \end{cases} \quad (8)$$

$$x = \frac{\epsilon}{\epsilon_{tm}} \quad (9)$$

$$y = \frac{\sigma}{f_{tm}} \quad (10)$$

式中,  $f_{tm}$  为砌体抗拉强度平均值;  $\epsilon_{tm}$  为  $f_{tm}$  对应的应变。

$$f_{tm} = 0.141 \sqrt{f_2} \quad (11)$$

$$\epsilon_{tm} = \frac{f_{tm}}{E} \quad (12)$$

### 1.3 模态分析

首先对结构模型进行模态分析并提取其振型图,得到结构的前两阶振型图(图4)。图4(a)和图4(b)分别为沿两个水平方向的平动;分别对应的周期为  $T_1=0.114$  s 和  $T_2=0.07$  s。

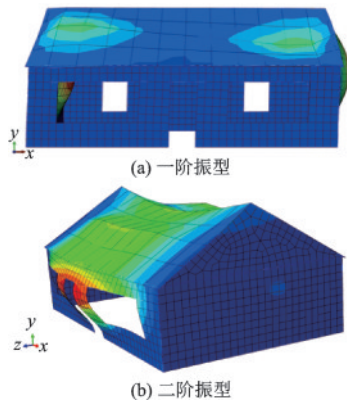


图4 结构前两阶振型

Fig.4 The first two vibration modes of masonry structure

### 1.4 地震动的选取

本文综合考虑地震动的不确定性对地震易损性结果的影响<sup>[12]</sup>,在美国太平洋地震工程研究中心(Pacific Earthquake Engineering Research Center, PEER)的强震动数据库选取80条天然地震动记录,如图5所示。

同时基于弹性波动理论中的频域法,应用MATLAB程序,通过傅里叶变换将地震动平动分量加速度曲线变换得到平动分量傅里叶谱,将平动分量傅里叶谱变换为转动分量傅里叶谱,再利用傅里叶逆变换将转动分量傅里叶谱变换为转动分量

加速度时程。图6给出了 LMSR GO3-090 工况下的地震动平动分量与转动分量加速度时程曲线。

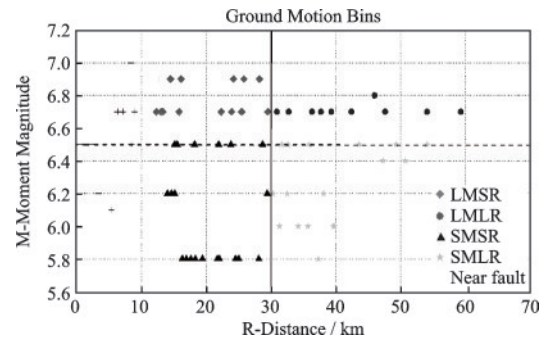
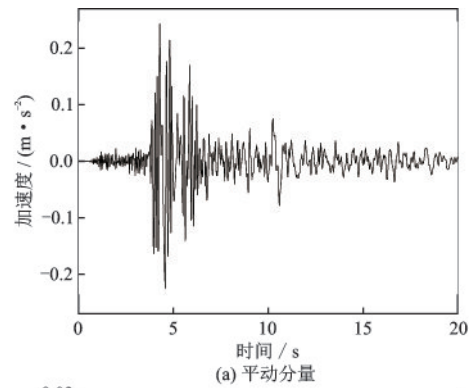
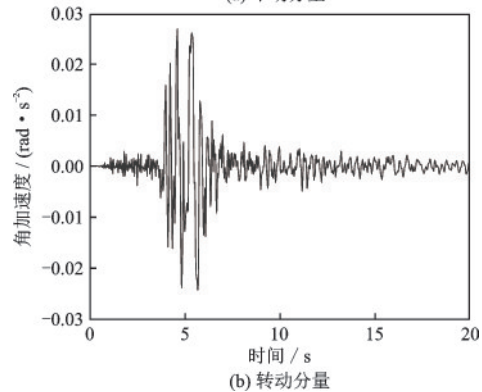


图5 挑选地震动记录的  $M_w$ - $R$  分布

Fig.5 Selected ground motion records in  $M_w$ - $R$  space



(a) 平动分量



(b) 转动分量

图6 工况 LMSR GO3-090

Fig.6 Record of ground motion LMSR GO3-090

## 2 结构地震响应分析

取编号为 SMLR A-BIR-90、SMLR A-BIR-180 和 LMLR CEN-155 三组地震动分别进行调幅,将 PGA 分别调至  $0.2g$ 、 $0.4g$  和  $0.6g$ 。为对比出转动分量对结构地震响应的影响,先将地震动平动分量(X方向)进行非线性地震反应分析,再同时输入地震动平动分量(X方向)和转动分量(绕Z轴的转动分量)进行分析,对比结构响用来评估地震动转动分量的影响。图7分别给出了三组地震动在不同工

况下 ( $PGA=0.2g$ 、 $PGA=0.4g$  和  $PGA=0.6g$ ) 层间位移角最大值的对比情况。

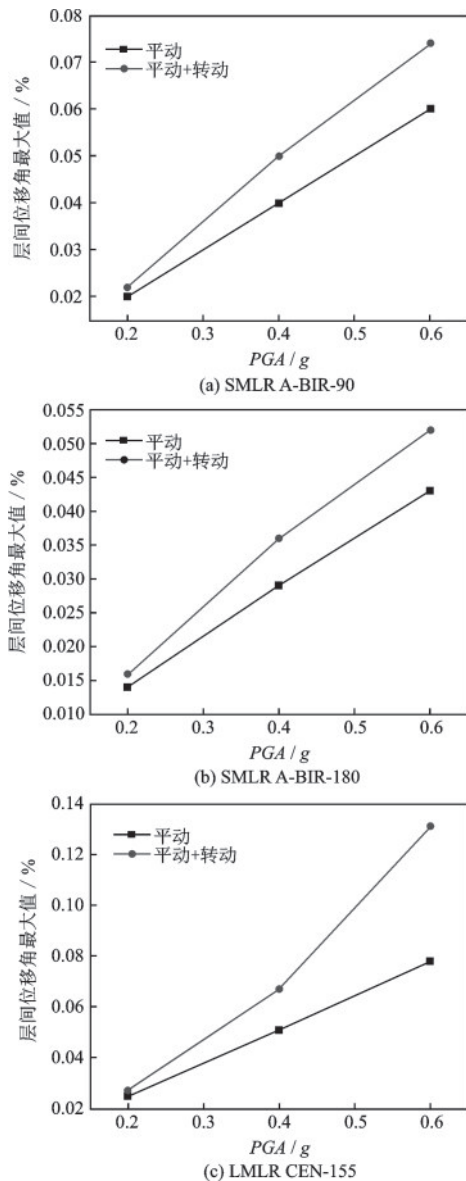


图7 层间位移角最大值对比

Fig.7 Comparison diagram of maximum value of inter-story drift angle

以 SMLR A-BIR-90 为例,当  $PGA=0.2g$  时,结构在仅考虑平动分量和同时考虑平动-转动分量作用下的层间位移角最大值分别为  $1/4\ 966$  和  $1/4\ 537$ ,相差率为 9.1%;当  $PGA=0.4g$  时,层间位移角最大值分别为  $1/2\ 483$  和  $1/2\ 018$ ,相差率为 20.0%;当  $PGA=0.6g$ ,层间位移角最大值分别为  $1/1\ 667$  和  $1/1\ 344$ ,相差率为 18.9%。

在震动 SMLR A-BIR-180 作用下,当  $PGA=0.2g$  时,结构在仅考虑平动分量和同时考虑平动-转动分量作用下的层间位移角最大值分别为

$1/7\ 025$  和  $1/6\ 437$ ,相差率为 12.5%;当  $PGA=0.4g$  时,层间位移角最大值分别为  $1/3\ 504$  和  $1/2\ 780$ ,相差率为 19.4%;当  $PGA=0.6g$  时,层间位移角最大值分别为  $1/2\ 338$  和  $1/1\ 910$ ,相差率为 17.3%。

同样,在震动 LMLR CEN-155 作用下,当  $PGA=0.2g$  时,结构在仅考虑平动分量和同时考虑平动-转动分量作用下的层间位移角分别为  $1/3\ 947$  和  $1/3\ 703$ ,相差率为 6.59%;当  $PGA=0.4g$  时,层间位移角最大值分别为  $1/1\ 973$  和  $1/1\ 500$ ,相差率为 23.9%;当  $PGA=0.6g$  时,结构在只有平动和平动转动同时作用时层间位移角分别为  $1/1\ 285$  和  $1/762$ ,相差率为 24.7%。

结果表明,考虑震动转动分量的影响时,层间位移角最大值均有所增大,转动分量对层间位移角最大值的影响最大可达到 23.9%。通过三组震动输入下的计算结果分析,当  $PGA=0.2g$ 、 $0.4g$  和  $0.6g$  时,层间位移角最大值平均增大了 9.667%、21.1% 和 20.3%。可以看出,PGA 较大时,震动转动分量对结构位移反应的影响有所增大,但是趋势不明显。

### 3 结构地震易损性分析

#### 3.1 地震易损性分析方法

地震易损性不仅考虑了结构自身不确定性对分析结果的影响,还将震动的不确定性考虑其中,该方法可以从概率上整体描述结构的抗震性能并定量给出震动强度与结构破坏程度间的关系,准确性强于传统意义上的抗震性能评定方法。结构需求参数 (Engineering Demand Parameter, EDP) 是衡量结构在震动作用下破坏程度的反应参数。目前常用的参数有层间位移角、顶层位移和损伤指数等,EDP 对评估结构的抗震性能以及进一步开展相关抗震设计至关重要。层间位移角作为一个分析过程中既简单易得又能方便直观地反映出结构的抗震需求的评估参数被广泛应用。因此,本节采用所选取的 80 条震动,选用层间位移角最大值 (ISDRmax) 作为工程需求参数 (EDP),对砌体结构进行易损性分析。

#### 3.2 概率地震需求模型

常用的概率地震需求模型的建立方法有一次条带法、两次条带法、云图法和调幅云图法等。其中,云图法不需要对震动参数进行调幅,在同等

计算精度下可减少分析次数,故本文选取云图法对砌体结构进行易损性分析。

选取 ISDR<sub>max</sub> 为工程需求参数,PGA 为地震动强度参数对结构进行概率地震需求分析。将 1.4 节所选的 80 条地震动多为地震激励对模型进行非线性时程分析,得到不同工况下地震动强度参数和工程需求参数 (IM<sub>*i*</sub> - EDP<sub>*i*</sub>) 的对应关系。H. Zhang 等<sup>[13]</sup>认为结构地震需求参数 EDP 和地震动强度参数 IM 之间符合对数线性关系:

$$\ln(\text{EDP}) = \ln a + b \ln(\text{IM}) \quad (13)$$

本文的概率地震需求模型 (PSDM) 是基于结构在平动分量作用和平动-转动分量同时作用下的时程分析结果进行线性拟合得到,其对数标准差为:

$$\sigma_{D|IM} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N [\ln(D_i) - \ln(aIM_i^b)]^2}{N-2}} \quad (14)$$

式中,σ<sub>D|IM</sub> 为地震需求的对数标准差;N 为回归分析中样本点个数;D<sub>*i*</sub> 为第 *i* 个地震需求峰值;IM<sub>*i*</sub> 为第 *i* 个地震动峰值;a 和 b 为回归参数。

图 8 给出了概率地震需求模型。其数学表达式见表 1。

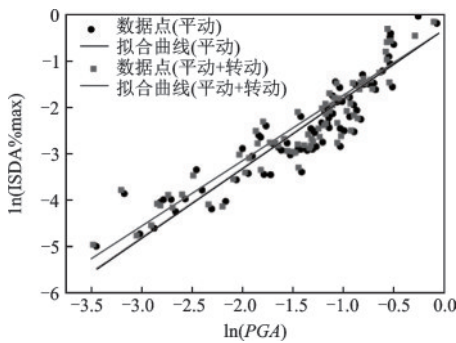


图 8 模型的概率地震需求模型

Fig.8 Probabilistic seismic demand model

表 1 地震需求分析参数

Table 1 Parameters for the probabilistic demand models

工况	回归方程	决定系数 R <sup>2</sup>	标准差
平动	ln(ISDA <sub>max</sub> ) = -0.536 + 1.414ln(PGA)	0.756	0.359
平动+转动	ln(ISDA <sub>max</sub> ) = -0.333 + 1.50ln(PGA)	0.826	0.317

### 3.3 易损性函数

本文选用的易损性函数<sup>[13]</sup>为:

$$P(D \geq C|IM) = \Phi \left[ \frac{\ln(\mu_D) - \ln(\mu_C)}{\sqrt{\sigma_{D|IM}^2 + \sigma_C^2}} \right] \quad (15)$$

式中,P 为给定 IM 下破坏状态大于或等于某一规定状态的破坏概率;D、C 为地震需求和结构能力;IM 为地震动强度参数;μ<sub>D</sub> 和 μ<sub>C</sub> 为地震需求和结构能力中位值;σ<sub>D|IM</sub> 和 σ<sub>C</sub> 分别为地震需求和结构能力标准差。

### 3.4 性态水准的划分和极限状态的定义

本文参考了国内外砌体结构规范以及抗震性能试验的相关研究成果,将砌体结构的破坏状态划为 5 个性态等级和 4 个极限状态,表 2 给出了 5 个性态等级所对应的结构破坏程度的划分标准。结构的地震易损性是指在不同强度地震作用下结构达到或超过某种极限状态时的条件概率,因此如何定义极限状态是结构易损性分析中的重要内容。选取峰值加速度 PGA 作为 IM,层间位移角作为 EDP,根据上述划分的 5 个性态等级划分了以下四个极限状态:轻微破坏 (LS-1)、中等破坏 (LS-2)、严重破坏 (LS-3) 和倒塌破坏 (LS-4),表 3 给出了四个极限状态所对应的层间位移角限值。

表 2 砌体结构性态水准与结构破坏状态

Table 2 Performance level and structural damage of masonry structure

性态水准	结构及构件的破坏
充分运行 (完好)	结构完好无损
运行 (轻微破坏)	墙体出现少量细微裂缝,结构使用功能不受影响,只需要简单维修
基本运行 (中等破坏)	墙体出现明显裂缝,结构使用功能受到一定的影响,但是经过维修后可达到正常使用状态
生命安全 (严重破坏)	结构构件出现大量裂缝,产生贯通水平、竖向通缝及斜裂缝,结构受到严重破坏,但可以保障生命安全,结构难以修复
接近倒塌	结构、构件出现大量的贯通水平、竖向通缝及斜裂缝,墙体砌块有酥裂、错位、脱落现象,生命安全难以保障

表 3 极限破坏状态划分

Table 3 Classification of limit states

极限状态	LS-1	LS-2	LS-3	LS-4
ISDR <sub>max</sub>	1/1 600	1/700	1/350	1/200

### 3.5 结果分析

如图 9 所示,当 PGA=0.2g 时,在 LS-1 极限状态下,结构在仅考虑平动分量和同时考虑平动-转动分量作用时达到轻微破坏 (LS-1) 时的超越概率分别为 41.14% 和 76.26%,相差 35.12%;当 PGA=

0.4g时,结构在达到LS-2极限破坏状态时的超越概率分别为50.52%和62.94%,增大了12.42%;结构在达到LS-3极限破坏状态时的超越概率分别为4.48%和7.68%,相差3.2%;当PGA=0.6g时,结构在达到LS-2极限破坏状态时的超越概率分别为87.33%和94.62%,增大了7.29%;结构在达到LS-3极限破坏状态时的超越概率分别为28.51%和44.13%,相差15.62%;当PGA=0.8g时,结构在达到LS-3极限破坏状态时的超越概率分别为59.23%和77.63%,增大了18.4%;结构在达到LS-4极限破坏状态时的超越概率分别为12.33%和16.08%,相差3.75%。由此可见,当考虑地震动转动分量时结构达到各极限破坏状态时的超越概率较只考虑平动分量时均有所增加。

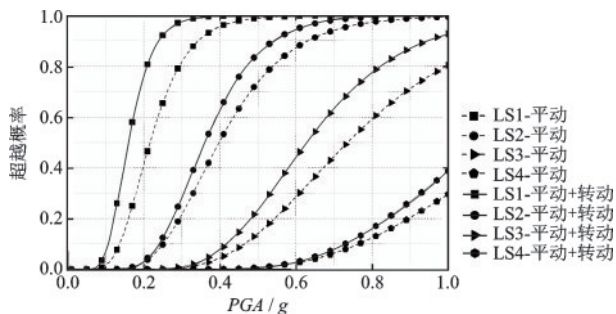


图9 砌体结构易损性

Fig.9 Fragility of masonry structure under earthquake

## 4 结 论

根据砌体结构易发生脆性破坏以致倒塌的特性,基于ABAQUS软件建立单层砌体结构并对其非线性时程分析,考虑地震动转动分量对砌体结构地震响应和易损性的影响,得到如下结论:

(1) 同时考虑地震动平动分量和转动分量作用时结构的层间位移角最大值比仅考虑地震动平动作用时有明显增大,随着PGA的增大,转动分量对结构层间位移角最大值的影响有增大趋势。

(2) 由于地震动转动分量的影响,结构发生不同极限破坏状态的超越概率均高于仅考虑地震动平动分量作用的情况。由此可见,地震动转动分量对砌体结构抗震性能影响不容小觑,在砌体结构抗震设计和分析时应予以适当考虑。

## 参考文献:

[1] 叶列平,陆新征.汶川地震建筑震害分析[J].建筑结构学报,2008,29(4):1-9.

Ye L P, Lu X Z. Analysis of building damage in Wenchuan earthquake [J]. Journal of Building Structure, 2008, 29(4):1-9. (in Chinese)

[2] 李宏男.关于地震动转动分量的研究[J].沈阳建筑工程学院学报,1991(1):88-93.  
Li H N. Study on rotational component of ground motion[J]. Journal of Shenyang Institute of Engineering, 1991(1):88-93. (in Chinese)

[3] Graizer V. Tilts in strong ground motion[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 2006, 96 (6) : 2090-2102.

[4] Newmark N M. Torsion in symmetrical buildings[C]// Selected Papers by Nathan M. Newmark: Civil Engineering Classics. ASCE, 1969:743-756.

[5] Trifunac M D. A note on rotational components of earthquake motions on ground surface for incident body waves[J]. International Journal of Soil Dynamics and Earthquake Engineering 1982, 1(1):11-19.

[6] 李宏男.地震动的转动分量及有关的结构反应分析[J].世界地震工程,1989(4):44-51.  
Li H N. Rotational component of ground motion and analysis of related structural response[J]. World Earthquake Engineering, 1989 (4):44-51. (in Chinese)

[7] 魏文晖,张迪,喻梦,等.带悬吊质量结构的多维地震反应[J].哈尔滨工业大学学报,2014,46(4):98-104.  
Wei W H, Zhang D, Yu M, et al. Seismic response of structures with suspended mass[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2014, 46(4):98-104. (in Chinese)

[8] 魏文晖,王安阳,胡梦菲,等.水平-摇摆地震动下具有悬吊质量结构反应分析[J].华中科技大学学报(自然科学版),2014,42(4):111-115.  
Wei W H, Wang A Y, Hu M F, et al. Response of the structure with suspended mass under coupled tilt and horizontal ground motion[J]. Huazhong University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2014, 42(4):111-115. (in Chinese)

[9] 杨卫忠.砌体受压本构关系模型[J].建筑结构,2008,38(10):80-82.  
Yang W Z. Constitutive relationship model for masonry materials in compression[J]. Building Structure, 2008, 38 (10):80-82. (in Chinese)

[10] 砌体结构设计规范:GB 50003—2011[S].北京:中国建筑工业出版社,2012.

[11] 混凝土结构设计规范:GB 50010—2010[S].北京:中国建筑工业出版社,2015.

[12] Zhang H, Sun T, Hou S W, et al. Effect of after-shocks on seismic fragilities of single-story masonry structures[J]. Frontiers in Physics, 2021, 9:69511.

[13] Zhang H, Li C, Wang Z F, et al. Seismic performance assessments of precast energy dissipation shear wall structures under earthquake sequence excitations [J]. Earthquakes and Structures, 2020, 18(2):147-162.

(本文编辑:池营营)