

基于增量动力分析的砌体结构地震疏散仿真研究

Simulation Research on Earthquake Evacuation of Masonry Structures Based on Incremental Dynamic Analysis

丁瑶¹, 徐子祺², 梁智超², 秦天一³

(1. 陕西工业职业技术学院, 陕西 咸阳 712000; 2. 河南省地震局, 河南 郑州 450018;
3. 河南省交通科技研究院, 河南 郑州 450015)

摘要: 为研究地震作用下处于砌体结构房屋内人员的疏散能力, 选取西安市城中村一栋典型砌体结构居民楼为研究对象。采用增量动力分析 (IDA, incremental dynamic analysis), 使用有限元软件对该居民楼建模, 输入 20 条地震波进行时程分析, 得到了在地震作用下每层的 IDA 曲线簇, 找出在 8 度基本设防烈度地震和罕遇地震作用下各楼层的倒塌时间, 这也就是人员可用的有效逃生时间, 两者对比可以看出人员的伤亡情况。结果表明: 在 8 度基本设防烈度地震作用下, 疏散人员所需的安全逃生时间比罕遇地震所需逃生时间少 10 s, RSET 为 85 s 至 95 s; 砌体结构首层最先发生倒塌, 顶层最后倒塌, ASET 为 8.72 s 至 10.89 s; 有效逃生时间远小于安全逃生时间, 不满足安全逃生的条件, 地震将会造成大量人员伤亡。

关键词: 砌体结构; 社会力模型; 增量动力分析; 所需逃生时间 (RSET); 可用有效逃生时间 (ASET)

中图分类号: TU362 文献标志码: A 文章编号: 1005-8249 (2024) 01-0155-08

DOI:10.19860/j.cnki.issn1005-8249.2024.01.027

DING Yao¹, XU Ziqi², LIANG Zhichao², QIN Tianyi³

(1. Shaanxi Industrial Vocational and Technical College, Xianyang 712000, China;

2. Earthquake Administration of Henan Province, Zhengzhou 450018, China;

3. Henan Provincial Institute of Transportation Science and Technology, Zhengzhou 450015, China)

Abstract: In order to study the evacuation ability of people in a masonry structure building under earthquake action, a typical masonry structure residential building in Chengzhong village of Xi'an city was selected as the research object. incremental dynamic analysis (IDA) was used to model the residential building with finite element software, and 20 seismic waves were input for time history analysis. IDA curve clusters of each floor under earthquake action were obtained. Find out the collapse time of each floor under the action of 8 degree basic fortification intensity earthquake and rare earthquake, which is the ASET, and the comparison of the two can see the casualties of personnel. The results show that under 8 degree earthquake, the evacuation time is 10s less than that under rare earthquake, and the RSET is 85s to 95s. The first floor of masonry structure collapses first, and the top floor collapses last, with ASET ranging from 8.72s to 10.89s. The ASET is far less than RSET, does not meet the conditions of safe escape, the earthquake will cause a large number of casualties.

Keywords: masonry structure; Social force model; incremental dynamic analysis; RSET; ASET

0 引言

西安市是陕西省的省会城市, 根据 2021 年的相关统计数据, 西安市三环内现有城中村 292 处。这些住宅大多数在建造时没有考虑抗震设防的要求, 仅

作者简介: 丁瑶 (1993—), 女, 硕士研究生, 主要研究方向: 地震人群疏散仿真。

收稿日期: 2023-06-28

研究与应用

一小部分采用圈梁和构造柱进行抗震加固，当地震发生时，未采用圈梁和构造柱的房屋将会发生倒塌^[1]。若有效逃生时间（ASET, available safe egress time）>安全逃生时间（RSET, required safe egress time），此时将不会产生伤亡；若 ASET<RSET，将会造成人员伤亡^[2]。李天贝等^[3]基于社会力模型，以四川省雅安市在 2013 年遭遇的 7.0 级特大地震为研究背景，将处于教室中的学生作为研究对象，发现了该模型中对人员疏散影响较大的参数，但并未研究 RSET，对人员伤亡情况未作出估计。徐子祺等^[4]对一栋无圈梁无构造柱的砌体结构房屋进行研究，发现了在 8 度设防烈度下的倒塌概率，但未研究 RSET 与 ASET 之间的对比关系。贺安特等^[5]考虑地震预警时间，对公寓楼进行倒塌模拟，但只考虑了一条地震波的影响，所得到的结果具有较大的随机性。因此，考虑到已有研究的理论与不足，选取西安市城中村一栋砌体结构居民楼，使用行人疏散仿真软件 AnyLogic 模拟遭遇地震时的逃生情况，从而得到 RSET。使用 ABAQUS 有限元软件，结合增量动力分析，得到 ASET，两者对比可以判断伤亡情况，为发生类似情况提供了可参考的现实依据。

1 工程实例

1.1 居民楼工程概况

研究对象为砌体结构房屋，采用 MU10 烧结普通砖，墙体厚度均为 240 mm，M5 水泥砂浆砌筑。预制空心楼板厚 120 mm，混凝土强度等级为 C20，无圈梁及构造柱。纵墙长 9.4 m，横墙长 9 m，层高 3 m。单侧楼梯宽度为 1.2 m，房门宽度 0.9 m，逃生大门宽度为 2 m，首层有三间房子住人，二至六层有四间房子住人，该居民楼总人数为 29 人，结构平面布置图如图 1 所示。

2 社会力模型的改进

2.1 初始社会力模型

社会力模型由德国学者 Helbing^[6]提出，该模型考虑了在行人的运动过程中，所受到的自驱动力与周围环境亦或是障碍物产生的作用力^[7]，具体有四部分组成：自驱动力 f_i ，行人间相互作用力 f_{ij} ，行人与障碍物间的作用力 f_{iw} 与随机力 ξ 。

社会力模型表达式为：

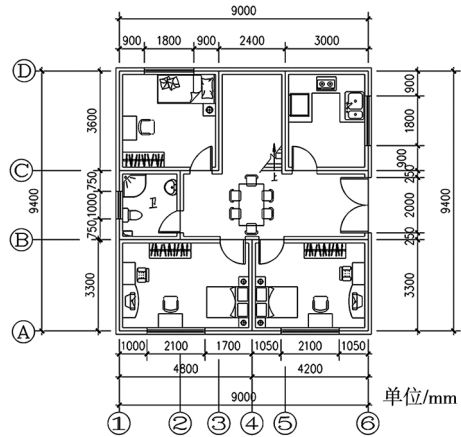


图 1 居民楼平面图
Fig.1 Model plan

$$F = m_i \frac{dv_i}{dt} = f_i + \sum_j f_{ij} + \sum_w f_{iw} + \xi \quad (1)$$

式中： m_i 为行人 i 的质量； v_i 为行人 i 的实际行走速度； t 为 v_i 对应的时间。

(1) 行人的自驱动力 f_i

在没有外界因素干扰的情况下，行人在行进过程中会以其期望的速度径直行走走到目的地，而此过程中行人所受到的力就是行人的自驱动力，表达式为：

$$f_i = m_i \frac{1}{t_i} (v_i^0 - v_i) \quad (2)$$

式中： v_i^0 为行人 i 的期望速度； v_i 为行人 i 的实际速度； t_i 为行人的反应时间。

(2) 行人间相互作用力 f_{ij}

$$f_{ij} = f_i + f_j \quad (3)$$

其中，行人间心理排斥力用 f_{ij}^{soc} 表示，由公式 (4) 可以计算；发生接触后，行人间会产生接触排斥力，用 f_{ij}^{ph} 表示，由公式 (5) 可以计算。

$$f_i = A_i \exp\left(\frac{r_i + r_j - d_{ij}}{B_i}\right) e_{ij} \quad (4)$$

式中： A_i 为作用力强度； B_i 为作用范围； r_i 为行人 i 的作用半径； r_j 为行人 j 的作用半径； d_{ij} 为行人 i 和行人 j 间的质心距离； e_{ij} 为行人 j 和行人 i 的作用力。

$$\begin{cases} f_j = kg(r_i + r_j - d_{ij}) + \mu g(r_i + r_j - d_{ij}) \Delta v_{ij} \\ \Delta v_{ij} = (v_i - v_j) \tau_{ij} \\ g(x) = g(r_i + r_j - d_{ij}) \end{cases} \quad (5)$$

式中： k 为行人身体间的挤压力系数； μ 为滑动摩擦系数；切向相对速度 Δv_{ij} 用来代表行人 i 与行人 j 在切

线方向的速率差; 切向单位向量 τ_{iw} 的方向垂直于 e_{ij} ; 函数 $g(x)$ 是用来判断行人 i 与行人 j 之间是否存在身体接触。

(3) 行人与障碍物间的作用力 f_{iw}

f_{iw} 由两部分构成, 一是行人对障碍物的心理排斥力, 二是行人与障碍物发生接触后产生的接触排斥力, 表达式为:

$$f_{iw} = f_t + f_w \quad (6)$$

式中: f_t 为心理排斥力, 可由公式 (7) 计算; f_w 为接触排斥力, 可由公式 (8) 计算。

$$f_t = A_i \exp\left(\frac{r_i - d_{iw}}{B_i}\right) e_{iw} \quad (7)$$

$$\begin{cases} f_w = kg(r_i - d_{iw}) + \mu g(r_i - d_{iw}) v_{iw} \tau_{iw} \\ g(x) = g(r_i - d_{iw}) \end{cases} \quad (8)$$

式中: d_{iw} 为行人 i 的质心与障碍物 w 边界两者之间的距离; e_{iw} 为障碍物对行人 i 的作用力。

2.2 社会力模型的改进

原始社会力模型并未考虑到行人的恐慌状态。当面临地震时, 行人普遍会产生一些非理智的行为活动, 其疏散速度也会因此受到影响。在此, 用恐慌因子来代表非理智的程度。恐慌因子设置越大, 行人产生拥堵、推攘、踩踏的概率就会越高, 因此为了更好地还原真实的疏散场景, 加入恐慌因子必不可少。

当发生地震时, 绝大多数的行人都会寻找与自己相关的熟人, 与家人、同事或者朋友结伴出逃, 而熟人因素会在逃生过程中给予行人极大的心理安慰, 而熟人间的吸引作用在初始模型中并未考虑。

基于以上分析, 为了能够真实反映居民楼内人员的疏散过程, 在社会力模型中添加恐慌因子和吸引力必不可少, 以此使研究更具现实意义。

2.2.1 恐慌因子

当遭遇外界刺激, 人员会表现出精神慌乱、紧张等特点, 进而逃生速度也会受到很大程度的影响。当面临的外界环境越危险, 行人逃生的意愿就会越发强烈, 特别是遭遇地震时引起的房屋晃动、周围房屋倒塌, 会给行人带来极大的心理负担, 恐慌因子也会因此而增大。用 P_{panic} 来代表恐慌因子, 反映在行人速度的改变上, P_{panic} 对最大速度及最小速度的影响程度不同, 考虑恐慌因子后实际速度的区间为:

$$v_i(t)' \in (v_i, \min(t) - P_{\text{panic}} \times v_{\Delta}(t), v_i, \max(t) + 2 \times P_{\text{panic}} \times v_{\Delta}(t)) \quad (9)$$

式中: $v_i(t)'$ 为修正后的实际速度; $v_i, \min(t)$ 为行人处于正常状态下的最小速度, $v_i, \max(t)$ 为最大速度, $v_{\Delta}(t)$ 为速度单位 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

2.2.2 吸引力

行人在疏散的过程中, 由于熟人相互吸引作用力的存在, 在此影响下, 行人会不断调整自己的期望速度, 以达到结伴逃生的目的, 行人间吸引力的公式为:

$$f_{iq} = E_i \exp[(r_{iq} - d_{iq})/F_i] \mathbf{n}_{iq} \quad (10)$$

式中: 行人 q 与行人 i 两者为熟人, 吸引力与排斥力的作用方向相反, E_i 取负数; r_{iq} 为行人肩宽之和; d_{iq} 为行人间的距离; \mathbf{n}_{iq} 为行人 q 指向行人 i 的单位方向向量。

综上所述, 在初始社会力模型中, 各个行人之间的相互作用力大小都是一样的, 而此种假设极不符合实际情况。考虑到朋友、家人的吸引作用, 改进原始社会力模型, 区分熟人和陌生人, 使研究结果更能真实地还原疏散过程。

3 居民楼建模仿真

3.1 人员参数设置

调研和统计了居民楼内的 29 名居民, 得出各个参数的标准差、均值, 并将各个参数作为符合高斯分布的随机数进行设置, 具体设置见表 1。

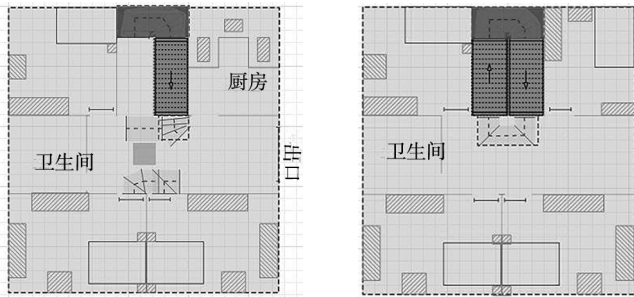
表 1 疏散人员参数设定
Table 1 Evacuation parameter setting

参数名称	均值	标准差	分布类型
质量/kg	65.38	2.75	正态分布
肩宽/cm	39.42	1.07	正态分布
胸厚/cm	24.31	0.84	正态分布
平地速度/(m/s)	1.43	0.19	正态分布
楼梯速度/(m/s)	0.91	0.04	正态分布

3.2 疏散场景布置

在 AnyLogic 仿真界面中, 10 个像素代表一个单元格, 默认 10 个像素为 1 m, 为了使比例尺更加精确, 通过 PedSettings 模块可以对像素比例尺进行调整, 最后可得 1 m=55 像素, 以此来定为本次模型的比例尺, 如下图 2 所示。

研究与应用



(a) 一层平面图 (b) 标准层层平面图

图 2 居民楼环境建模
Fig.2 Residential building model

3.3 疏散过程仿真

在 AnyLogic 软件中, 我们建立了环境模型、逻辑结构、辅助插件以及代码的编写, 从而构造如下仿真实验界面, 如图 3 所示。

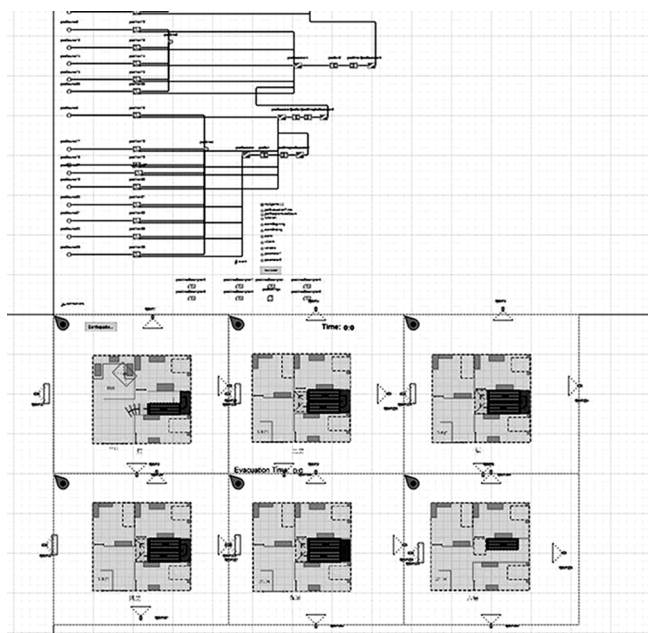


图 3 人员疏散仿真界面
Fig.3 Evacuation simulation

由于西安市抗震设防烈度为 8 度, 故对 8 度基本设防烈度地震 (以下简称中震) 和罕遇地震 (以下简称大震) 作用下的人员疏散能力进行分析, 疏散人员在 8 度中震作用下 $v_{max} \leq 0.24 \text{ m/s}$, 在 8 度大震作用下会造成房屋剧烈摇晃, 人员很难站立, 只能匍匐缓慢移动, 故 $v_{max} \leq 0.1 \text{ m/s}$ ^[8], 地震作用时间取文献 [9] 中所述的地震动持续时间, 即 18 s。地震作用时间结束后房屋停止摇晃, 行人恢复为正常速度, 人员感知地震的反应时间和疏散准备时间分

别为 1 s。假设地震发生时人员都处于屋内, 人员初始位置分布如图 4 所示。

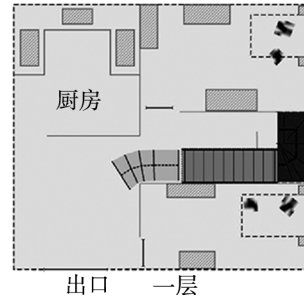
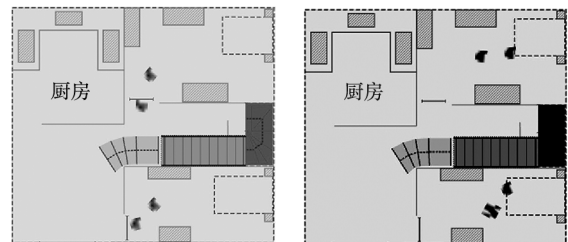


图 4 人员初始位置
Fig.4 Initial position of personnel

图 5 为人员在第 18 s 时的人员位置分布图。在中震作用下, 地震作用时间结束时人员刚移动至房间门口附近。在第 21 s 时, 第一个人成功疏散至居民楼外安全区域, 第 85 s 时本楼居民全部疏散至安全区域; 在大震作用下, 第 18 s 时人员只移动了很短的距离, 在第 24 s 时, 才有一名人员疏散至安全区域, 第 95 s 全员疏散至安全区域。图 6 为疏散人数随时间变化图。



(a) 基本设防地震作用下 (b) 罕遇地震作用下

图 5 第 18 s 人员位置分布
Fig.5 Personnel location distribution at the 18th second

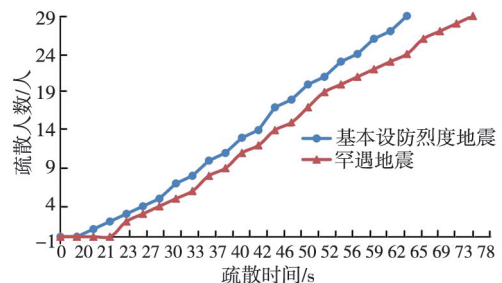


图 6 疏散人数随时间变化图
Fig.6 The number of evacuees varied over time

通过 AnyLogic 仿真软件并结合疏散过程可以得到居民楼每层人员的 RSET。人员从顶层向首层疏散的过程中, 首层的楼梯是一直被使用的, 而顶层的楼梯只有本层人员使用, 因此首层的 RSET 最大, 而

顶层的 RSET 最小，在 8 度中震和大震作用下各层的 RSET 见表 2。

表 2 各楼层人员的 RSET
Table 2 RSET of personnel on each floor /s

楼层	设防地震	罕遇地震
1	85	95
2	75	84
3	63	71
4	51	56
5	37	43
6	24	27

8 度大震与中震相比，因其在地震作用时间内人员行走困难，只能匍匐前进，因此在罕遇地震作用下的 RSET 比基本设防烈度地震作用下的 RSET 要长，在发生罕遇地震时更容易对人员的生命造成威胁。

4 砌体结构 IDA 分析

4.1 模态分析

当遭遇地震时，地震波和结构自振特性对结构的动力反应影响最大，自振特性包括固有频率和固

有振型，是地震分析的基础。若第 1 阶振型所对应的固有周期与地震波的卓越周期相近，则会发生共振，结构将更容易被破坏。此时 ASET 最小，为最不利状况，因此在进行 IDA 分析前应先进行模态分析。

除结构自重外，在 1 层、2 至 6 层的楼板上分别施加 2.0 kN/m^2 、 1.2 kN/m^2 的均布活荷载，楼梯活荷载标准值 2.5 kN/m^2 。底板容重为 21 kN/m^3 ，墙体容重为 14 kN/m^3 ，楼板和楼盖容重为 25 kN/m^3 。材料参数见表 3。

表 3 材料参数
Table 3 Material parameters

密度/ (kg/m^3)	弹性模量/Pa	阻尼比
2500	3.0×10^{10}	0.05

采用 Linear perturbation 进行模态分析，选用 Lanczos 求解器和单精度算法进行计算，提取模型前 6 阶的自振频率，求出各阶振型的固有周期，见表 4，前 3 阶振型如图 7 所示。

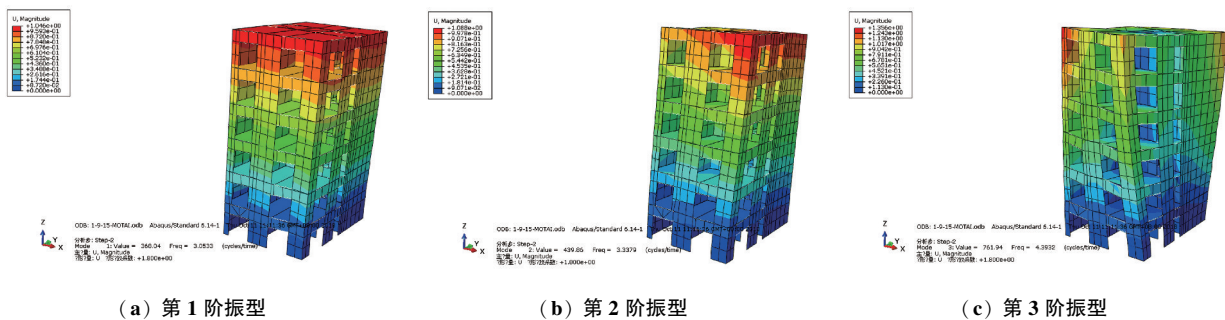


图 7 振型变形图
Fig. 7 Modal deformation diagram

表 4 前 6 阶振型的固有周期和自振频率
Table 4 Natural period and frequency of the first 6 modes

振型	频率/Hz	周期/s
第 1 阶	3.0874	0.3239
第 2 阶	3.3379	0.2996
第 3 阶	4.3932	0.2276
第 4 阶	9.7473	0.1026
第 5 阶	10.9410	0.0914
第 6 阶	13.1030	0.0763

由图 7 可知，第 1 阶振型为砌体结构横墙方向的平动，第 2 阶振型为砌体结构纵墙方向的平动，第 3 阶振型为扭转振型，前 3 阶振型情况正常。可以根据砌体结构的高度 H_0 计算基本周期：

$$T_1 = 0.0168(H_0 + 1.2) \quad (11)$$

居民楼高 18 m，代入式 (11) 得到砌体结构的基本周期为 0.324 s，模态分析所得到的第 1 阶振型固有周期为 0.328 s，与理论值比较接近，说明理论模型与实际结构特性相近，模型具有较高的可信度。

4.2 IDA 分析

所研究的对象位于西安市，以设计地震分组第一组，建筑场地类别 II 类，特征周期 0.35 s 为条件选择地震动。选用 20 条地震记录并按等步长法以 0.05 g 单调递增，得到一系列地震记录，以此得到较为准确的结果。

结构损伤参数 (DM, damage measure) 选取层间最大位移角 θ_{\max} (即结构层间最大位移与层高的比

研究与应用

值), 地震动强度 (IM, intensity measure) 选取地震动的峰值加速度。图 8 为西安市城中村典型砌体结构

居民楼各楼层的 IDA 曲线。

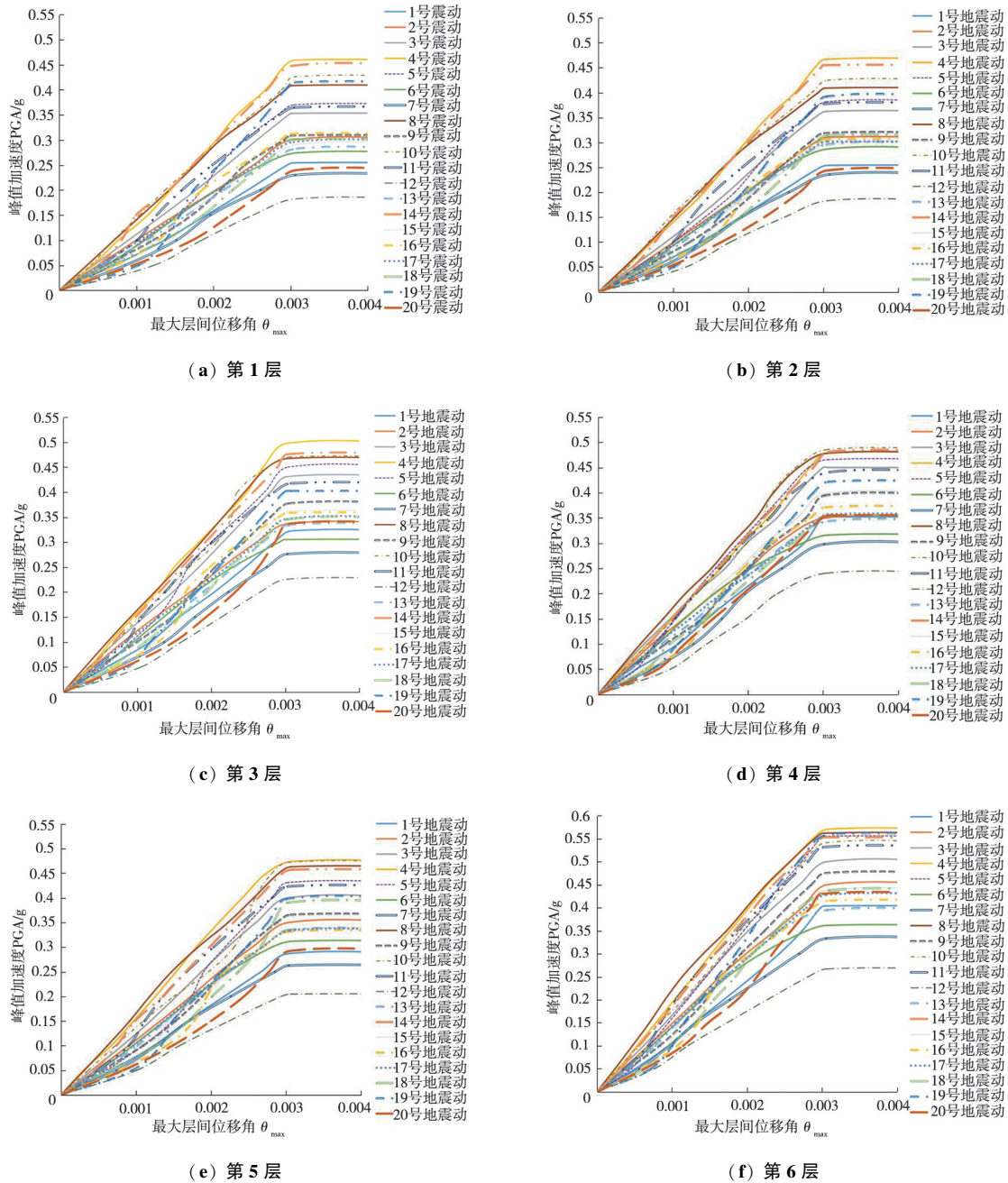


图 8 居民楼 IDA 曲线
Fig. 8 Residential building IDA curve

在某一 θ_{max} 值下, 会对应 20 个地面峰值加速度 (PGA, peak ground acceleration), 求得到不同 PGA 的均值 μ_{PGA} 和不同 PGA 的对数标准差 δ_{PGA} , 利用 $(\theta_{max}, \mu_{PGA})$ 、 $(\theta_{max}, \exp(-\delta_{PGA}))$ 、 $(\theta_{max}, \exp(-\delta_{IM}))$ 绘制 3 条曲线, 分别对应为 50%、

16%、84% 比例曲线, 其中 50% 比例曲线也称为均值曲线^[10], 如图 9 所示。

由图 9 可得, 在相同 PGA 值作用下, 首层的层间位移最大, 第 6 层的层间位移最小。原因是首层较大的开洞削减了本层的刚度, 降低了本层的承载力,

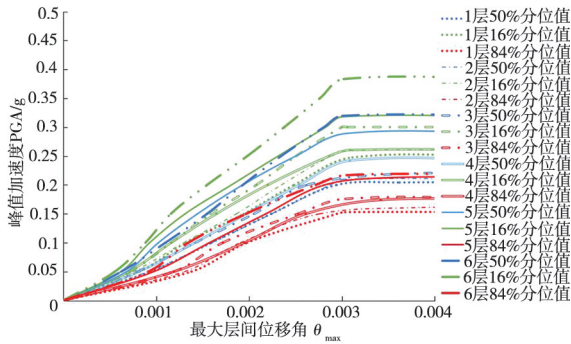


图9 居民楼 IDA 分位值曲线

Fig. 9 Residential building IDA quantile value curve

且首层承受了最大的地震作用和荷载，因此抗震性能最差，更容易破坏。

5 居民楼人员 ASET 分析与对比

5.1 居民楼人员 ASET 分析

文献 [11] [12] 表明，当层间位移首次达到 9 mm，则可以认为该楼层破坏。结合图 9 中 50% 均值曲线，通过筛选找到层间位移首次达到 9 mm 时所对应的时间，这个时间即为本楼层破坏的时间，也是人员可以利用的有效逃生时间 (ASET)。如图 10 所示。

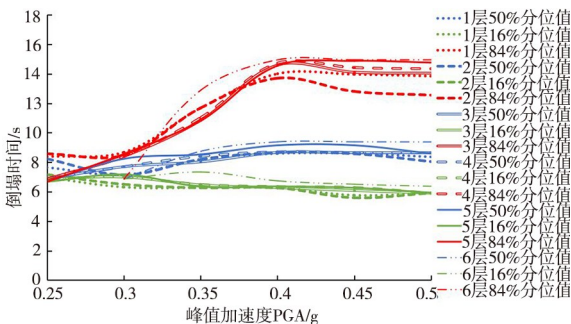


图10 各楼层的倒塌时间分位值曲线

Fig. 10 Collapse time quantile value curves of each floor

由图 10 可知，在地震作用下首层最先倒塌，而顶层最后倒塌。在同一楼层中，随着 PGA 的增大，会使楼层更快的破坏，ASET 变短，产生伤亡的概率将会增大。16% 和 84% 分位值曲线与 50% 分位值曲线偏差较大，说明倒塌时间离散性较大。

由 50% 分位值均值曲线可以总结出该砌体结构居民楼在 8 度抗震设防烈度作用下各楼层的倒塌时间，见表 5。

通过表 5 可以得到在 8 度中震作用下，首层的倒塌时间最短，为 9.89 s，顶层的倒塌时间最长，为

10.89 s；在 8 度大震作用下，首层的倒塌时间同样最短，为 8.72 s，顶层的倒塌时间最长，为 9.57 s。在遭遇地震时，疏散人员选择合理的疏散方案，在未倒塌的时间段内最大程度地逃生，是减少伤亡的关键。

表5 居民楼人员 ASET

地震烈度	1 层	2 层	3 层	4 层	5 层	6 层
设防地震	9.89	10.01	10.23	10.40	10.62	10.89
罕遇地震	8.72	8.85	8.94	9.10	9.21	9.57

5.2 居民楼人员 RSET 与 ASET 对比

结合表 2 和表 5，可以总结出在 8 度中震和大震作用下的 ASET 与 RSET，见表 6。

表6 8 度中震与大震作用下人员 ASET 与 RSET 对比

地震强度	时间类型	1 层	2 层	3 层	4 层	5 层	6 层
中震	ASET	9.89	10.01	10.23	10.40	10.62	10.89
	RSET	85	75	63	51	37	24
大震	ASET	8.72	8.85	8.94	9.10	9.21	9.57
	RSET	95	84	71	56	43	27

由表 6 可知，不论在中震作用下还是大震作用下，ASET 都远小于 RSET，不满足人员安全疏散的条件。若此时地震造成居民楼倒塌，将会造成大量人员伤亡。

在大震作用下各楼层的倒塌时间更快，首层倒塌时间快了 1.17 s，顶层快了 1.32 s，缩短了 ASET，且由于在地震作用时间内疏散人员无法站立，疏散速度降低，导致 RSET 增加，更不利于逃生。

6 结论

以西安市一栋典型砌体结构居民楼为研究对象，通过 AnyLogic 行人疏散仿真软件得到 RSET，与有限元 ABAQUS 数值模拟得到的 ASET 进行对比，主要得到了以下结论：

(1) 8 度中震作用下，疏散人员所需逃生时间比大震所需逃生时间短，这是由于大震会造成房屋严重的晃动，人员很难站立，只能匍匐前进。

(2) 8 度中震作用下，第 21 s 时有第一个人成功疏散至安全区域，第 85 s 时全员疏散完毕。在大震作用下第 24 s 有第一个人疏散至安全区域，相比慢了 3 s，全员疏散完毕的时间为 95 s，相比慢了 10 s。

(3) 通过 IDA 分析所得到的层间位移，确定了各楼层发生倒塌的时间。结果表明首层最先发生倒

研究与应用

塌, 顶层最后倒塌。在 8 度中震作用下, 人员有 9.89~10.89 s 的逃生时间; 在 8 度大震作用下, 人员有 8.72~9.57 s 的逃生时间。采取合理有效的抗震设防措施, 增加结构抗震能力, 有效利用可用的疏散时间, 是减少伤亡的关键。

(4) 对比 ASET 与 RSET, 在 8 度中震作用下和大震作用下, ASET 均远小于 RSET, 不满足人员安全疏散的条件。假如地震造成居民楼倒塌, 则将会产生大量人员伤亡。

参 考 文 献

- [1] 刘杰. 基于 ABAQUS 整体式模型下砌体结构抗震性能影响因素研究 [D]. 长沙: 湖南大学, 2014.
- [2] XIAO M L, CHEN Y, YAN M J, et al. Simulation of household evacuation in the 2014 Ludian earthquake [J]. Bull Earthquake Eng, 2016, 14 (6): 1757-1769.
- [3] 李天贝, 肖梅玲, 徐子祺, 等. 基于社会力模型的教室内地震疏散仿真 [J]. 科学技术与工程, 2019, 19 (3): 281-286.
- [4] 徐子祺, 肖梅玲, 邢倩倩, 等. 昆明市城中村砌体结构地震易损性与疏散能力分析 [J]. 科学技术与工程, 2019, 19 (24): 299-305.
- [5] 贺安特, 王宪杰, 张帆, 等. 地震预警对室内人员疏散影响 [J]. 湖南师范大学学报, 2021, 44 (3): 81-88.
- [6] HELBING D. Simulating dynamical features of escape panic [J]. Nature, 2000, 407 (6803): 487-90.
- [7] BERNARDINIG, D' ORAZIO M, QUAGLIARINI E, et al. An agent-based model for earthquake pedestrians' evacuation simulation in Urban scenarios [J]. Transportation Research Procedia, 2014, 2: 255-263.
- [8] L. A. L., J. A. M. Modeling the Occurrence of M-5 Caldera Collapse-Related Earthquakes in Kilauea Volcano, Hawaii [J]. Geophysical Research Letters, 2022, 49 (1): 5-11.
- [9] 钱向东, 崔赛飞, 程玉瑶. 由地震危险性分析估计场地震动持续时间 [J]. 三峡大学学报 (自然科学版), 2015, 37 (3): 1-4.
- [10] 马恺泽, 王彦鹏, 张少磊. 基于增量动力分析的钢框架-混凝土剪力墙结构地震易损性 [J]. 科学技术与工程, 2019, 19 (20): 339-344.
- [11] 于晓辉. 钢筋混凝土框架结构的概率地震易损性与风险分析 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2012.
- [12] 张菊辉. 基于数值模拟的规则梁桥墩柱的地震易损性分析 [D]. 上海: 同济大学, 2006.
- [6] PANG, XIAO-BO DAVID, THOMAS TC HSU. Fixed angle softened truss model for reinforced concrete [J]. Structural Journal, 1996, 93 (2): 196-208.
- [7] KITANO A, GOTO Y, JOH O. Investigation on ultimate shear strength of SRC interior beam-column joints [J]. WIT Transactions on The Built Environment, 1970, 41. 1999.
- [8] 闫长旺. 钢骨超高强混凝土框架节点抗震性能研究 [D]. 大连: 大连理工大学, 2009.
- [9] 王秋维, 田贺贺, 史庆轩, 等. 扩大十字形截面型钢混凝土柱-SRC 梁节点抗震承载力试验研究 [J]. 建筑结构学报, 2015, 36 (10): 96-104.
- [10] 曾磊. 型钢高强高性能混凝土框架节点抗震性能及设计计算理论研究 [D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2008.
- [11] HWANG S J, LEE H J. Strength prediction for discontinuity regions by softened strut-and-tie model [J]. Journal of Structural Engineering, 2002, 128 (12): 1519-1526.
- [12] 傅剑平, 游渊, 白绍良. 钢筋混凝土抗震框架节点传力机构分析 [J]. 重庆建筑大学, 1996, (2): 43-52.
- [13] 徐增全. 钢筋混凝土薄膜元理论 [J]. 建筑结构学报, 1995, 16 (5): 10-19.

(上接第 144 页)