

余克兴: 软土地基低层房屋砌体结构地震易损性分析 [J]. 华南地震, 2020, 40 (4): 152-158. [YU kexing. Seismic Vulnerability Analysis of Masonry Structure of Low-Rise Buildings on Soft Soil Foundation [J]. South China journal of seismology, 2020, 40 (4): 152-158]

软土地基低层房屋砌体结构地震易损性分析

余克兴

(朔黄铁路发展有限责任公司, 河北 沧州 062350)

摘要: 软土地基低层房屋砌体结构在中国应用较多, 但它在地震中易损性较高, 分析软土地基低层房屋砌体结构易损性, 能够为地震预测任务与震后灾害评价提供帮助。为此, 提出软土地基低层房屋砌体结构地震易损性分析方法, 建立软土地基低层房屋砌体结构墙体模型并采用基于 IDA 的房屋砌体结构易损性运算方法, 从差异开洞大小、差异开洞数目、差异砂浆强度、差异层高四个方面分析软土地基低层房屋砌体结构地震易损性。软土地基低层房屋砌体结构地震易损性分析结果显示, 软土地基低层房屋砌体结构墙体的开洞率较大, 易损性较高; 开洞数目少, 易损性低; 砂浆强度越小, 易损性较高; 层高越高, 易损性越高。

关键词: 软土地基; 低层; 房屋; 砌体结构; 地震; 易损性

中图分类号: TU471.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-8662 (2020) 04-00152-07

DOI: 10.13512/j.hndz.2020.04.021

Seismic Vulnerability Analysis of Masonry Structure of Low-Rise Buildings on Soft Soil Foundation

YU Kexing

(Shuohuang Railway Development Co., Ltd., Cangzhou 062350, China)

Abstract: The masonry structure of low-rise building on soft soil foundation is widely used in China, but it has high vulnerability in earthquake. Analyzing the vulnerability of masonry structure of low-rise building on soft soil foundation can provide help for earthquake prediction task and post earthquake disaster evaluation. Therefore, this paper puts forward the seismic vulnerability analysis method of low-rise building masonry structure on soft soil foundation, establishes the wall model of low-rise building masonry structure on soft soil foundation, and uses IDA based vulnerability calculation method of building masonry structure to analyze the seismic vulnerability of low-rise building masonry structure on soft soil foundation from four aspects: different opening size, different starting number, different mortar strength and different storey height. The results of seismic vulnerability analysis of masonry structure of low-rise building on soft soil foundation show that the opening rate of masonry structure wall of low-rise building on soft soil foundation is large and the vulnerability is high; the number of openings is small and the vulnerability is low, the smaller the mortar strength is, the higher the vulnerability is; the higher the floor height is, the higher the vulnerability is.

Keywords: Soft soil foundation; Low rise; House; Masonry structure; Earthquake; Vulnerability

收稿日期: 2019-10-12

作者简介: 余克兴 (1973-), 男, 工程师, 硕士研究生, 研究方向: 工民建和管理工程。

E-mail: ykx0902@sina.com

0 引言

地震危险性研究、地震易损性研究以及损失评价属于地震风险评价的三种核心问题。围绕建筑结构实施地震易损性分析属于实施地震风险评价的基本内容。分析地震易损性判断地震损害水平和结构损坏水平之间的关联性，对结构的抗震性能评价、震害预测以及地震损失评价等都存在十分关键的意义，也属于有关机构实施防震减灾任务的核心任务^[1]。

软土地基低层房屋砌体结构的核心受力构件是墙体，墙体中包含了砌块与砂浆。因为软土地基低层房屋砌体结构存在施工难度小、施工效率高、造价少等优势，在中国被大量应用于房屋建筑中^[2]。并且，近几年的地震震害资料显示，通过正确的抗震设计与严谨的施工质量控制下，软土地基低层房屋砌体结构均可实现抗震设防^[3-4]。基于中国国情而言，软土地基低层房屋砌体结构被大量应用，尤其是村镇与中下城市，砌体结构属于核心结构种类，所以，分析砌体结构的抗震性能存在一定现实意义。文献[1]基于墙体开洞情况对砌体房屋地震易损性进行研究，但是该方法仅分析墙体开洞对房屋抗震性的影响，研究范围存在约束；文献[2]提出主余震作用下防屈曲支撑框架结构联合易

损性分析方法，该方法仅针对于余震条件中的房屋易损性分析；文献[3]提出考虑柱脚转动刚度的多层钢框架易损性分析方法，该方法的分析核心是柱脚转动刚度。本文提出软土地基低层房屋砌体结构地震易损性分析方法，从多种方法全面分析软土地基低层房屋砌体结构地震易损性。

1 软土地基低层房屋砌体结构地震易损性分析方法

1.1 软土地基低层房屋砌体结构墙体模型建立

使用 ABAQUS 有限元软件建立的墙体模型通过 MU15 强度的烧结普通砖、M5 强度的水泥沙子制作^[5]。墙体圈梁、柱子、墙洞过梁等构件的核心材料为 C20 混凝土，受力钢筋是 HRB324 等级的钢筋，箍筋和分布筋是 HRB324 等级的钢筋。加载梁的核心材料是 C50 混凝土，设定有限元分析软件参数时，假定加载梁只在弹性阶段受力^[6-7]。本文采用的砌体房屋墙体模型尺寸和现实尺寸一样，墙体高度、厚度、宽度依次是 3101 mm、251 mm、4601 mm^[8]。墙体模型参数见表 1：

表 1 软土地基低层房屋砌体结构墙体模型参数
Table 1 model parameters of masonry structure walls of low-rise buildings on soft soil foundation

墙体编码	是否存在圈梁构造柱	高宽比	开洞模式	开洞方位	开洞值 / 宽 × 高 /mm	水平加载位移 /mm
A1	不存在	0.657	没有	没有	没有	16
A2	不存在	0.657	窗洞	中间部位	1101×1401	16
A3	不存在	0.657	窗洞	中间部位	1101×1401	16
A4	不存在	0.657	窗洞	中间部位	1701×1401	16
A5	不存在	0.657	窗洞	中间部位	2 个 851×1401	16

表 2 圈梁、构造柱和过梁参数
Table 2 Parameters of ring beam, structural column and lintel

构件名字	圈梁	构造柱	过梁
尺寸 /mm×mm	236×236	236×236	236×236
混凝土强度	A20	A20	A20
纵筋尺寸	5Φ15	5Φ15	3Φ15
箍筋 / 分布筋尺寸	7@131/81	7@131/81	Φ7@131

此类参数按照建筑抗震设计标准设置，存在科学性和可靠性^[9]。

1.2 基于 IDA 的房屋砌体结构易损性运算

软土地基低层房屋砌体结构的最大延伸系数反应遵循对数正态分布^[10-11]。所以,整理分析多时程分析获取的最大延伸系数结构值便能获取对数正态分布函数的参数^[12]。

在固定强度的地震干扰中,某极限情况下软土地基低层房屋砌体结构易损性表示在此强度地震干扰下,软土地基低层房屋砌体结构反应 B 大于此极限状况相应的结构承载力 C 的几率:

$$Q_g=Q_g(C\leq B)=\int_u^{\infty}[1-E_E(c)]g_P(c)dc \quad (1)$$

其中, $E_E(c)$ 描述极限载荷, $g_P(c)$ 描述开裂载荷, d 表示求导系数。若可以判断软土地基低层房屋砌体结构承载 C 和结构反应 B 的几率分布状况,能够通过式 (1) 获取软土地基低层房屋砌体结构大于每个破坏等级极限状况的几率^[13-14]。

如果软土地基低层房屋砌体结构的承载力与最高反应都遵循对数正态分布,式 (1) 能够描述成:

$$Q_g=\varphi\left[\frac{\ln(vf)-\ln(vC)}{(a_c^2+a_f^2)^{\frac{1}{2}}}\right] \quad (2)$$

其中, vC 、 vf 、 a_c^2 、 a_f^2 依次描述结构承载力、最大延伸系数反应的中值、对数标准差。

把软土地基低层房屋砌体结构楼层最大延伸系数正值与加速度峰值 PGA 依次设成对数后,两者存在线性关系,假定两者间的关联性是:

$$\ln(vC)=d\ln(PGA)+\beta \quad (3)$$

那么每个破坏等级极限状况的上下限几率能够描述成 PGA 的函数:

$$Q_g=\varphi\left[\frac{\ln(r^{\beta}(PGA))^d-\ln(vC)}{(a_c^2+a_f^2)^{\frac{1}{2}}}\right] \quad (4)$$

式 (4) 中, β 、 φ 描述回归系数。按照公式 (4) 便能够获取结构的易损性曲线,实现软土地基低层房屋砌体结构地震易损性分析^[15]。

2 实验分析

2.1 差异开洞大小砌体结构地震易损性分析

差异开洞大小砌体结构地震易损性分析的试验墙体依次是 A1、A2、A3、A4, 当中 A1 属于未开洞软土地基低层房屋砌体结构墙体,剩下的是开洞墙体;开洞大小通过开洞率衡量,开洞率较大,开洞便大;A2、A3、A4 的开洞率依次是 10.9%、13.8%、16.8%。墙体开洞模型见图 1:

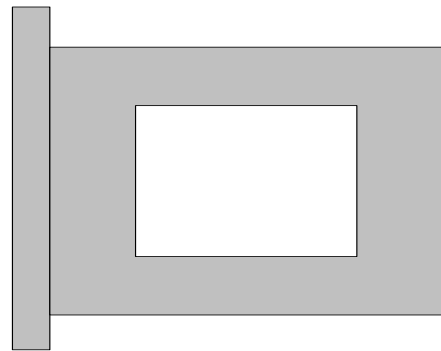


图 1 墙体开洞模型示意图
Fig.1 Schematic diagram of wall opening model

本文试验中的房屋砌体结构地震易损性试验应用的墙体属于低层墙体,输入提前设定完毕的地震波(图 2,下同),记载地震时开洞和没有开洞墙体抗震性能信息,见表 3:

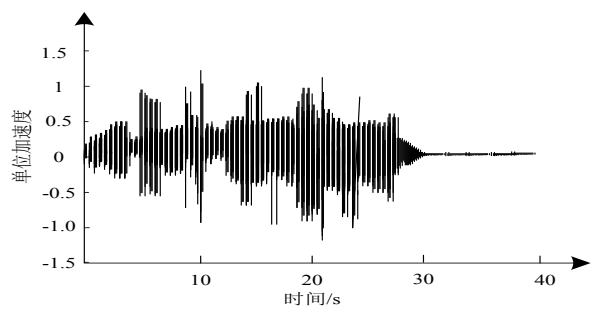


图 2 地震波加速情况
Fig.2 Acceleration of seismic waves

表 3 地震时开洞和没有开洞墙体抗震性能信息

Table 3 Information on seismic performance of walls with and without openings during an earthquake

墙体编码	开裂荷载 /kN	开裂位移 /mm	极限荷载 /kN	极限位移 /mm	破坏荷载 /kN	破坏位移 /mm
A1	240.76	1.5	387.9	8.13	328.07	17.4
A2	130.89	1.36	265.37	9.34	225	11.76
A3	107.43	1.19	241.36	8.6	203.49	10.53
A4	78.59	1.06	213.14	8.29	180.6	10.09

表3里,从A1到A4,极限荷载、破坏荷载值降低速度快,没有开洞墙体的开裂荷载是240.76 kN,10.9%开洞率墙体A2的开裂荷载降低了109.87 kN,13.8%开洞率墙体A3的开裂荷载降低了133.33 kN,16.8%开洞率墙体A4的开裂荷载降低了162.17 kN,所以,伴随软土地基低层房屋砌体结构墙体开洞率的提升,极限荷载、破坏荷载慢慢变小。因为墙体的荷载性能变差,房屋砌体结构易受地震干扰所损坏,所以地震时墙体的开洞率较大,房屋砌体结构易损性较高。

记载试验里软土地基低层房屋砌体墙体A1、A2、A3、A4的水平单调荷载-位移运算结果、刚度退化示意图依次见图3、图4:

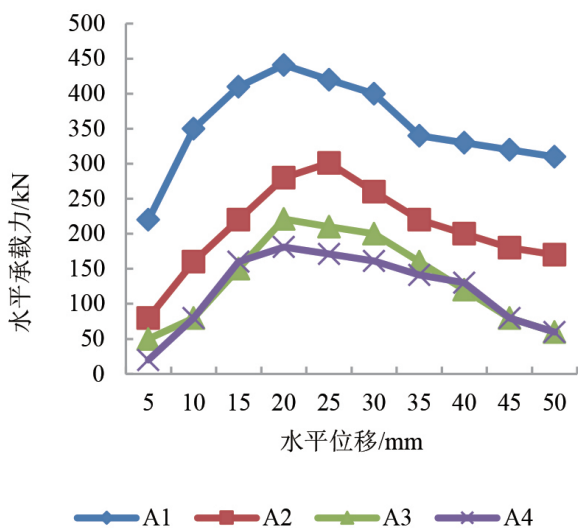


图3 开洞墙体水平单调荷载-位移运算结果

Fig.3 Horizontal monotonic load-displacement calculation results of the wall with openings

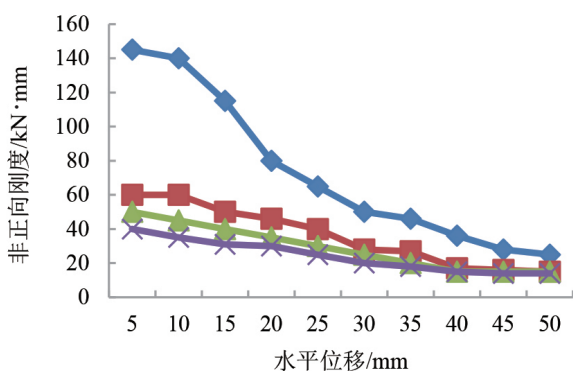


图4 开洞墙非正向刚度退化运算结果

Fig.4 Calculation results of non-positive stiffness degradation of wall with openings

图3中,4种曲线的趋势都是先上升后下降,差异之处在于,没有开洞墙体A1的水平承载力变大的幅度较高,最大值是441 kN,开洞墙体的水平承载力变大幅度较低,A2的最高水平承载力是301 kN,A3的最高水平承载力是221 kN,A4的最高水平承载力是181 kN,此数据代表,伴随开洞率的增大,软土地基低层房屋墙体水平承载力变大的幅度较低。地震出现时,砌体房屋结构水平承载力较低,房屋抗震性较差,在地震里受到损坏的情况越明显。

图4中,没有开洞的墙体和开洞墙体的非正向刚度示意图都伴随水平位移的增大逐渐变小,差异之处是没有开洞墙体A1的非正向刚度降低趋势明显,因为开洞墙体的初始非正向刚度变小,因此,非正向刚度降低的趋势趋于稳定;抵达极限承载力后,A2、A3、A4的非正向刚度相同,都低于A1的非正向刚度。因为墙体的非正向刚度逐渐变小,墙体承受地震损坏的性能较差,此类结构易损性较为显著。

图3、图4的试验结果表明,同一试验环境中,软土地基低层房屋砌体墙体的开洞率较大,则易损性较高。

2.2 差异开洞数目砌体结构地震易损性分析

因为遭到建筑抗震性准则的约束,房屋砌体墙洞较大存在一定弊端,所以,通过多个小墙洞描述不满足抗震标准的大墙洞。试验使用的双洞口设成A5,见图5:

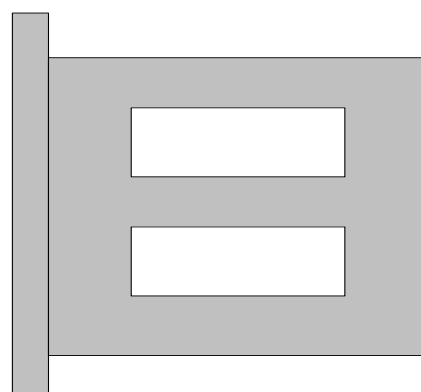


图5 双洞口墙体结构

Fig.5 Double-hole wall structure

按照以上设定,输入图2地震波,记载有关数据结果,运算获取差异开洞数目墙体的水平力一位移示意图、差异开洞数目墙体的刚度退化结果依次如图6、图7所示:

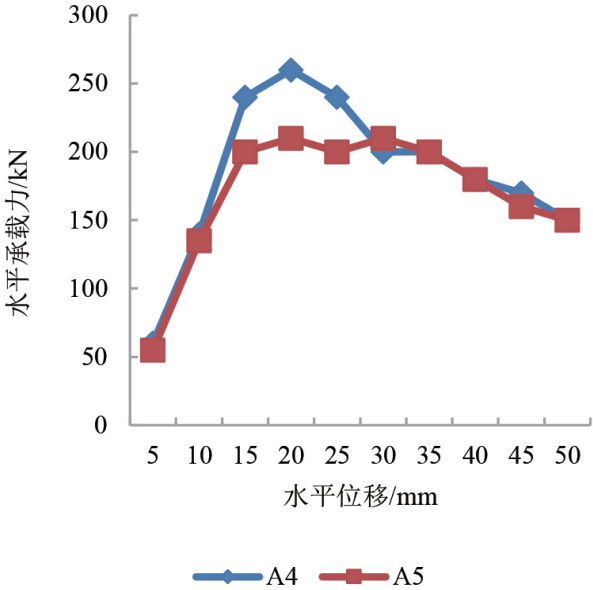


图 6 差异开洞数目墙体水平力 - 位移示意图

Fig.6 Schematic diagram of horizontal force-displacement of wall with different opening numbers

图 6 中, A4、A5 两类墙体的水平承载力 - 位移结果几乎一致, 但基于水平位移是 10~30 mm 区间两者的水平承载力存在差异, A4 的水平承载力较高, 因为 A4、A5 的开洞率一样, 则砌体墙体的开洞数目较少, 墙体的承载力最大值较大, 承受地震破坏的性能较好, 在地震灾害里易损性较低。

图 7 中, 试验前阶段, A4、A5 两类墙体的非正向刚度降低趋势规律类似, 降低速度很快; 试验后阶段 A4 降低速度变缓, A5 降低速度加快, 因此, 整体而言, 砌体房屋的墙体开洞数

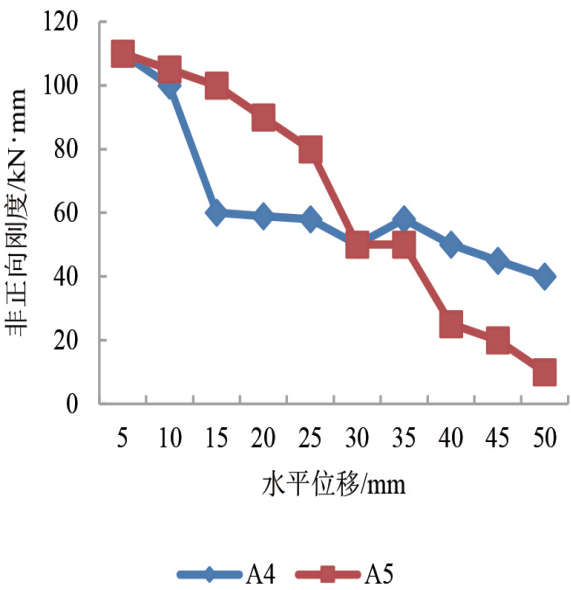


图 7 差异开洞数目墙体刚度退化结果

Fig.7 Results of stiffness degradation of walls with different opening numbers

目较多, 墙体的非正向刚度降低变快, 房屋砌体结构地震易损性较高。

2.3 差异砂浆强度砌体结构地震易损性分析

依次对 3 个 5 层的软土地基低层房屋砌体结构实施增量动力分析, 3 个结构层高都是 2000, 墙体属于 MU10 普通烧结砖, 砂浆依次是 M5、M7、M10 混合砂浆。运算获取 3 个结构在地震作用下的最高楼层延伸系数均值与标准差, 结果见表 4, 最高楼层延伸系数的平均 IDA 曲线见图 8:

表 4 差异砂浆强度结构在地震影响下最高楼层延伸系数

Table 4 The extension coefficient of the highest floor of the structure with different mortar strength under earthquake

砂浆强度类型	M5		M7		M10	
	均值	标准差	均值	标准差	均值	标准差
加速度峰值是 0.06 g	0.187	0.0459	0.1595	0.0434	0.1447	0.0372
加速度峰值是 0.11 g	0.375	0.0916	0.3188	0.0867	0.2893	0.0743
加速度峰值是 0.16 g	0.562	0.1374	0.4784	0.1301	0.4339	0.1114
加速度峰值是 0.21 g	0.754	0.1924	0.6379	0.1734	0.5785	0.1485
加速度峰值是 0.31 g	1.27	0.4694	1.0142	0.3758	0.9082	0.3287
加速度峰值是 0.41 g	2.057	0.9139	1.5244	0.6066	1.3484	0.6026
加速度峰值是 0.51 g	3.531	2.0419	2.3878	1.0704	2.0677	1.0678

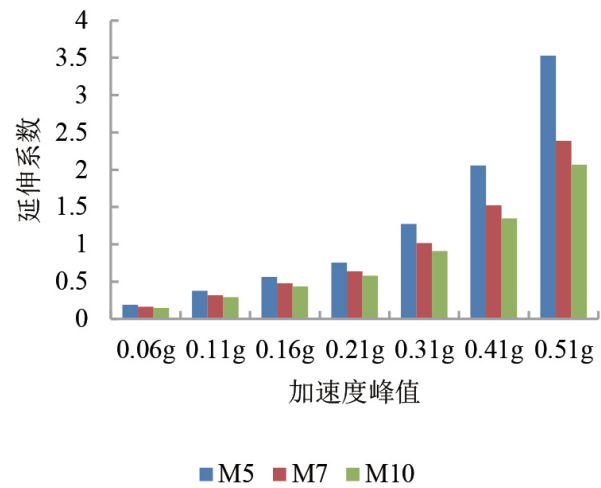


图 8 差异砂浆强度的三种结构 IDA 示意图
Fig.8 IDA schematic diagram of three structures with different mortar strength

分析表 8 中数据与图 6 可知，使用的砌筑砂浆强度存在差异时，软土地基低层房屋砌体

结构的最高楼层延伸系数存在差异，砂浆强度越小，软土地基低层房屋砌体结构的反应越大，但伴随加速度峰值的变大，差异砂浆强度结构反应间的差异愈发显著。在加速度峰值低于 0.21 g 时，结构属于弹性时期，伴随加速度峰值的变大，差异结构反应间差异变小。在加速度峰值高于 0.21 g 之后，砂浆强度是 M5 的结构步入弹塑性出现变形，位移反应强烈。

2.4 差异层高砌体结构地震易损性分析

依次对三个 3 层的砌体结构实施增量动力分析，三个软土地基低层房屋砌体结构的墙体都使用 MU10 普通烧结砖，砂浆强度都是 M7，层高依次是 2801 mm、3001 mm、3301 mm，获取三个结构最高楼层延伸系数均值与标准差见表 5，最高楼层延伸系数的均值 IDA 示意图见图 9。

表 5 差异层高砌体结构地震易损性分析结果
Table 5 Seismic vulnerability analysis results of masonry structures with different floor heights

砂浆强度类型	2801 mm		3001 mm		3301 mm	
	均值	标准差	均值	标准差	均值	标准差
加速度峰值是 0.06 g	0.132 04	0.045 13	0.138 49	0.047 84	0.0144 35	0.047 25
加速度峰值是 0.11 g	0.264 08	0.090 25	0.276 97	0.095 67	0.288 69	0.9448
加速度峰值是 0.16 g	0.396 11	0.135 36	0.415 46	0.143 48	0.433 03	0.147 12
加速度峰值是 0.21 g	0.528 14	0.180 48	0.553 94	0.191 33	0.577 37	0.188 96
加速度峰值是 0.31 g	0.812 11	0.308 19	0.862 27	0.345 79	0.896 77	0.327 14
加速度峰值是 0.41 g	1.180 67	0.544 28	1.250 93	0.517 15	1.353 17	0.569 57
加速度峰值是 0.51 g	1.837 33	1.084 82	1.866 33	0.866 86	2.108 41	1.079 99

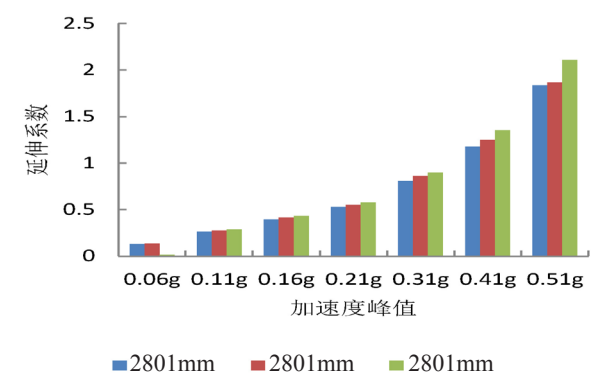


图 9 差异层高的三个结构 IDA 示意图
Fig.9 IDA schematic diagram of three structures with different floor heights

分析表中数据与图 9 可知，差异层高下，软土地基低层房屋砌体结构的最高楼层延伸系数反应存在不同，层高较低，结构的易损性较好，而此类差异不大，尤其是峰值加速度低于 0.41 g 时，软土地基低层房屋砌体结构的反应类似。伴随加速度峰值的变大，差异层高结构反应间差异变大，而不同层高结构间的易损性差异不大。层高越高的软土地基低层房屋砌体结构易损性越高。

3 结论

本文提出软土地基低层房屋砌体结构地震易损性分析方法,并将其应用于软土地基低层房屋砌体结构地震易损性模拟分析之中,得出以下几点结论:

(1) 地震时墙体的开洞率较大,房屋砌体结构易损性较高。

(2) 同一试验环境中,砌体墙体的开洞率较大,则易损性较高。

(3) 在加速度峰值低于 0.21 g 时,软土地基低层房屋结构属于弹性时期,伴随加速度峰值的变大,差异结构反应间差异变小。在加速度峰值高于 0.21 g 之后,砂浆强度是 M5 的结构步入弹塑性出现变形期,位移反应强烈。砂浆强度越小,软土地基低层房屋砌体结构的反应越大。

(4) 伴随加速度峰值的变大,差异层高结构反应间差异变大,而不同层高结构间的易损性差异不大。层高越高的软土地基低层房屋砌体结构易损性越高。

参考文献

- [1] 黄艺,王睿喆.墙体开洞影响下房屋砖砌体结构地震易损性分析[J].地震工程学报,2019,41(03):574-580.
- [2] 朱凯铭,郭玉荣.主余震作用下防屈曲支撑框架结构联合易损性分析[J].中国科技论文,2019,14(06):620-624.
- [3] 崔瑶,刘浩,王枫智,等.考虑柱脚转动刚度的多层钢框架易损性分析[J].建筑钢结构进展,2019,21(03):33-39.
- [4] 张朕磊.某超限塔楼基于 IDA 的地震易损性分析[J].结构工程师,2018,34(03):16-23.
- [5] 白国良,王世振,成羽.多类型地震动作用下高层结构的易损性分析[J].防灾减灾工程学报,2018,38(04):669-676.
- [6] 刘飞成,张建经.斜坡基底软土桩-网复合地基变形特性离心试验研究[J].岩石力学与工程学报,2018,37(1):209-219.
- [7] 单德山,董俊,李乔,等.基于非参数核密度估计的桥梁结构地震易损性分析[J].中国公路学报,2017,30(12):71-80.
- [8] 邓夕胜,蒋红雨,杨海军.配置高强钢筋混凝土框架结构的地震易损性分析[J].地震工程与工程振动,2019,39(03):205-213.
- [9] 谷音,李晓芳.考虑氯离子侵蚀的近海桥梁结构地震易损性分析[J].应用基础与工程科学学报,2019,27(05):1019-1032.
- [10] 苏毅,朱洪黎,孙达庆.对角预应力拉索重组竹框架地震易损性分析[J].世界地震工程,2018,34(04):084-94.
- [11] 魏鑫,孙国华,王跃,等.近场脉冲地震下半刚接钢框架内填暗竖缝 RC 墙结构易损性分析[J].世界地震工程,2017,33(04):32-41.
- [12] 陈力波,黄才贵,谷音.基于改进响应面法的公路简支梁桥地震易损性分析[J].工程力学,2018,35(04):208-218.
- [13] 石强,李艳玲,吴震宇,等.考虑震损指标相关性的重力坝地震易损性分析[J].人民黄河,2017,39(12):109-112+116.
- [14] 梁岩,闫佳磊,班亚云,等.多跨连续刚构桥梁地震易损性损伤指标计算方法[J].铁道科学与工程学报,2019,16(06):1466-1475.
- [15] 韩凤萍,王维,邓建国,李爱群.地震动特性对 HDRB 基础隔震剪力墙结构地震易损性的影响[J].工程抗震与加固改造,2019,41(03):36-42.