文章编号:1007 - 6069(2020)02 - 0085 - 07

建筑内部物品滑移破坏易脆性分析中的楼面运动强度指标

刘汉泉,曲 哲
(中国地震局工程力学研究所,中国地震局地震工程与工程振动重点试验室, 河北 三河 065201)

摘 要:合理选择建筑楼面运动强度指标是对建筑内部物品进行易脆性分析的基础。以建筑内部物品的滑移破坏为研究对象,通过单自由度简化模型模拟内部物品在地震引起的楼面运动作用下的滑移反应,并根据刚体在矩形脉冲作用下最大滑移距离的解析解,修正了目前常用的楼面运动强度指标。分析结果表明,物品在地震引起的楼面运动作用下的最大滑移距离远小于矩形脉冲作用下的解析解,且表现出相当大的离散性。未修正的楼面运动强度指标和最大滑移量之间在对数空间上呈比较明显的双线性关系,修正后的强度指标则与最大滑移量在对数空间上具有更好的线性关系。

关键词:内部物品;楼面运动;强度指标;工程需求参数;易脆性曲线
中图分类号:TU241.99 **文献标识码**:A

An intensity measure of floor motions for seismic fragility analysis of sliding contents in buildings

LIU Hanquan, QU Zhe
(Key Laboratory of Earthquake Engineering and Engineering Vibration, Institute of Mechanical Engineering, China Earthquake Administration, Sanhe 065201, China)

Abstract: The basis of seismic fragility analysis of sliding contents in buildings is choosing reasonably an intensity measure of floor motions. Taking the hazard associated with free standing sliding contents in buildings as the research object, the response of the sliding contents under the floor motion caused by the earthquake is simulated by a single-degree-of-freedom simplified model. The commonly used intensity measure of floor motions is modified by an analytical solution of the maximum sliding distance of a rigid body under a rectangular pulse. The results show that the maximum sliding distance of contents under the floor motion caused by the earthquake is much smaller than the analytical solution under a rectangular pulse, and it shows considerable dispersion. The relationship between the uncorrected intensity measure and the maximum sliding distance is obviously bilinear in logarithmic regression. The result is changed from bilinear to linear when choosing the modified intensity measure, which leads to better results.

Key words: contents; floor motion; intensity measure; engineering demand parameters; fragility curve

---

收稿日期:2020 - 01 - 28; **修订日期**:2020 - 02 - 17
基金项目:国家重点研发计划课题(2018YFC1504602),黑龙江省自然科学基金杰出青年项目(JQ2019E005)
作者简介:刘汉泉(1994 -),男,硕士研究生,主要从事建筑内部物品的地震易脆性模型方面研究. E-mail:liu_hanquan@163.com
通讯作者:曲 哲(1983 -),男,工学博士,研究员,主要从事建筑结构减隔震方面的研究. E-mail:quz@iem.ac.cn

引言

建筑结构在地震作用下的易脆性是结构在地震作用下发生损伤的可能性,通常采用结构在不同地震作用强度下达到某一损伤状态的超越概率来表示。其中,采用强度指标(IM)描述地震作用强度,常用的强度指标包括地面峰值加速度、地面峰值速度、谱加速度等[1];采用工程需求参数(EDP)定义结构的损伤状态,通常采用层间位移角作为工程需求参数。

类似地,建筑内部物品的易脆性可表示为物品在地震引起的楼面运动作用下达到某一损伤状态的超越概率。在楼面运动作用下,自由放置的物品可处于(1)静止,(2)滑移,(3)摇摆,(4)滑移-摇摆,(5)滑移-起跳和(6)摇摆-起跳等六种状态[2]。Shenton[3]提出了无锚固刚体不同反应模式的判定准则,为判断物体在地震动作用下进入何种反应模式提供了依据。

当物品与楼面之间的摩擦系数较小时,物品主要发生滑移运动。当滑移较大时,物品可能与其他物品或建筑构件发生碰撞并造成损伤。此时,可采用物品的最大滑移距离作为工程需求参数定义其损伤状态。Newmark[4]早在1965年便推导了刚体在矩形脉冲作用下的最大滑移距离的计算公式。近年来,随着基于性能的地震工程的发展和人们对非结构损伤的重要性的认识[5],建筑内部物品的滑移问题得到越来越多的关注[11-14]。然而,我国地震工程界对建筑内部物品的滑移反应尚没有系统的研究。

本文通过数值模拟考察目前常用的评价滑移易脆性的楼面运动强度指标的合理性,并提出相应的改进建议。

1 自由放置的内部物品的滑移反应分析

考察放置在水平面上的宽度为 b,高度为 h 的刚体在水平激励 $\ddot{x}_g$ 作用下的反应(图1)。刚体受到水平惯性力和摩擦力的共同作用。

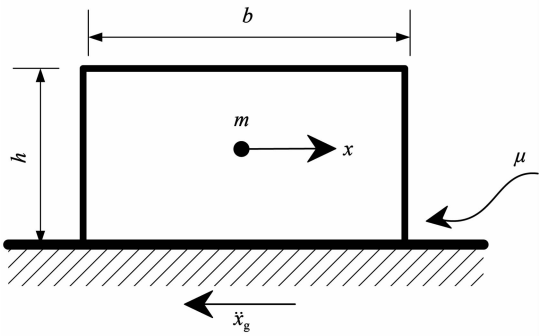


图1 内部物品滑移模型

Fig. 1 Sliding contents model

如果水平惯性力引起的力矩不超过刚体重量提供的恢复力矩(式1),则刚体只发生滑动,不会摇摆或起跳。

$$m|\ddot{x}_g|\frac{h}{2}\leqslant mg\frac{b}{2} \tag{1}$$

根据刚体滑移时的力的平衡,可建立其运动方程如式(2)所示。此处,忽略阻尼力的影响。

$$\ddot{x}(t)+\mu g\,\mathrm{sgn}[\dot{x}(t)]=-\ddot{x}_g(t) \tag{2}$$

式中,m 是物品的质量,g 是重力加速度,μ 是动摩擦系数,$\mathrm{sgn}[\dot{x}(t)]$是符号函数(式3)。

$$\mathrm{sgn}[\dot{x}(t)]=\begin{cases}1, & \dot{x}(t)>0\\ -1, & \dot{x}(t)<0\end{cases} \tag{3}$$

为求解刚体在地震引发的楼面运动作用下的滑移反应,在OpenSees中建立如图2所示的单自由度体系简化模型。节点1和2之间采用零长度的滑板支撑单元(Flat Slider Bearing Element)和库伦摩擦模型模拟刚

体和楼面之间的摩擦行为,忽略阻尼力的影响,且忽略滑动速度对摩擦系数的影响。

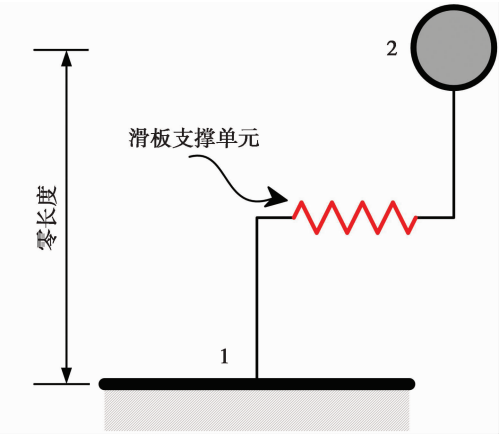
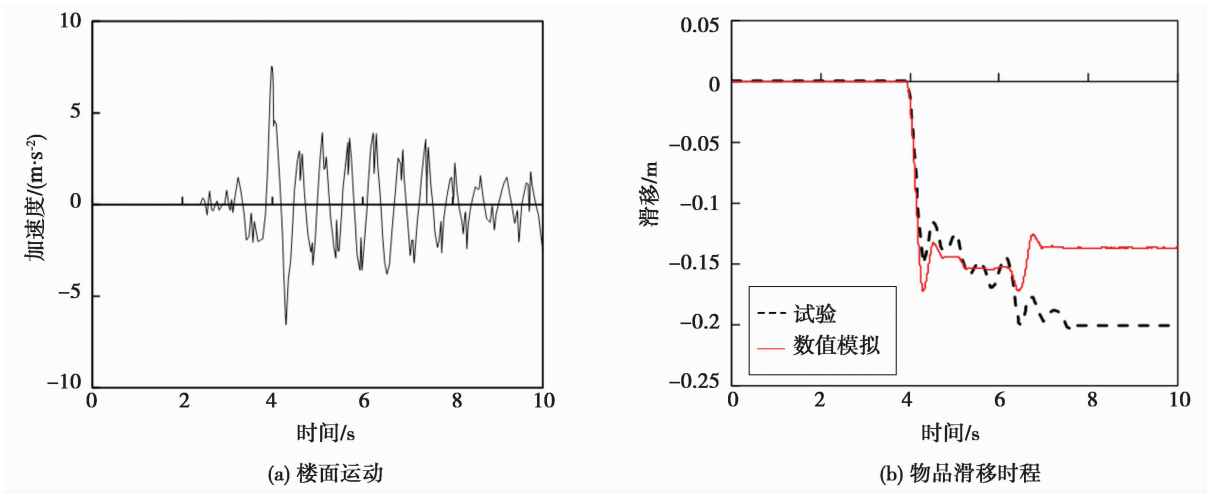


图 2　简化模型

Fig. 2　SDOF model

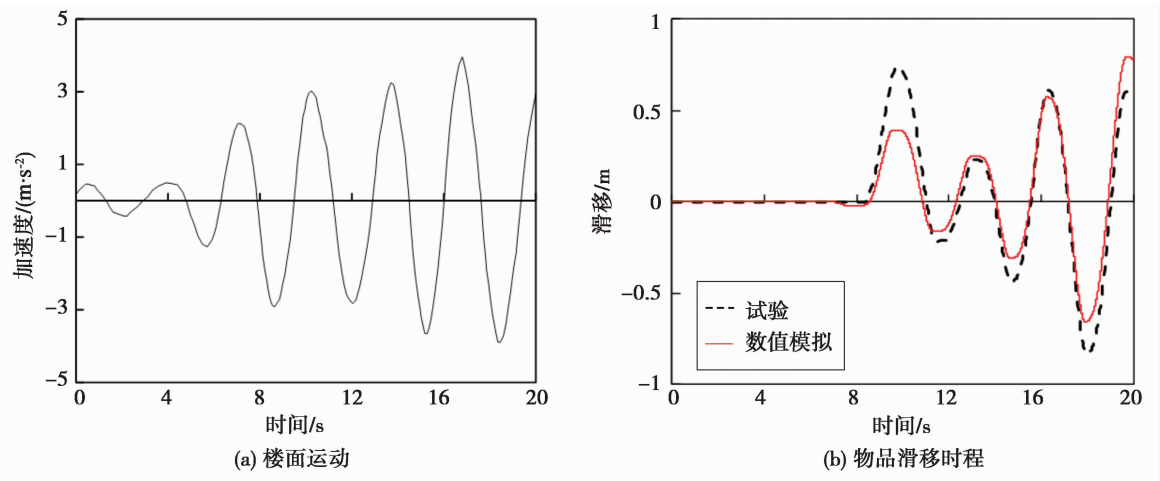
采用该简化模型模拟不同文献中的物品滑移振动台试验结果,以检验该模型的可靠性。选取以下三个试验:(1)ASP 冰箱在某实测的楼面运动作用下的振动台试验[6];(2)高层建筑子结构振动台试验中放置在顶层楼面的可单向滑动的钢块[9];(3)办公桌在等周期正弦脉冲激励作用下的振动台试验[10]。模拟结果分别如图 3、图 4 和图 5 所示。



(a) 楼面运动　　(b) 物品滑移时程

图 3　冰箱振动台试验

Fig. 3　Refrigerator shaking table test



(a) 楼面运动　　(b) 物品滑移时程

图 4　钢滑块振动台试验

Fig. 4　Steel-blocks shaking table test

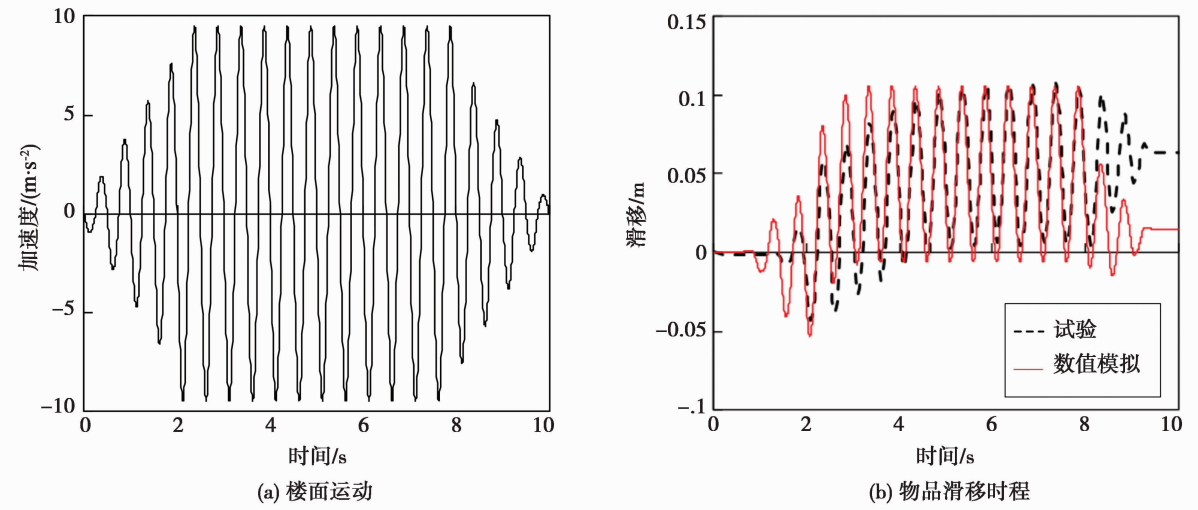


图 5 办公桌振动台试验

Fig. 5 Desk shaking table test

可见,本文采用的单自由度模型表现良好,尤其是能够比较准确地模拟不同物品的最大滑移距离。需要指出的是,对于上述(1)和(3)中的试验,在数值模拟时采用了相应文献中建议的拟合得到的摩擦系数。

2 物品滑移破坏易脆性分析

Newmark[4]推导了刚体在矩形脉冲作用下最大滑移距离的公式(式 4)。

$$u_{\max} = \frac{a_P T_P^2}{2}\left(\frac{a_P}{\mu g} - 1\right) \tag{4}$$

式中,$u_{\max}$ 是最大滑移距离;a_P 是矩形脉冲加速度幅值;T_P 是矩形脉冲作用时间。

基于 Newmark[4]的研究,Konstantinidis 等[6]使用如式(5)所示的无量纲化的 IM_1 和 EDP_1 描述建筑内部物品在地震引起的楼面运动作用下的滑移易脆性。

$$IM_1 = \frac{PFA}{\mu g} - 1, EDP_1 = \frac{u_{\max}\omega_P^2}{PFA} \tag{5}$$

式中,PFA 是峰值楼面加速度;$\omega_P = 2\pi/T_P$ 是地震引起的楼面运动的主要脉冲成分的脉冲圆频率。

然而,与上述无量纲化的 EDP_1 相比,直接采用最大滑移距离 $u_{\max}$ 定义物品滑移的损伤状态(即 $EDP_2 = u_{\max}$)具有更加明确的物理意义。相应地,采用如式(6)所示的楼面运动强度指标,仍能直观地反映峰值加速度、楼面运动频率和摩擦系数等参数的影响。

$$IM_2 = \left(\frac{PFA}{\mu g} - 1\right) \cdot PFA \cdot T_P^2 \tag{6}$$

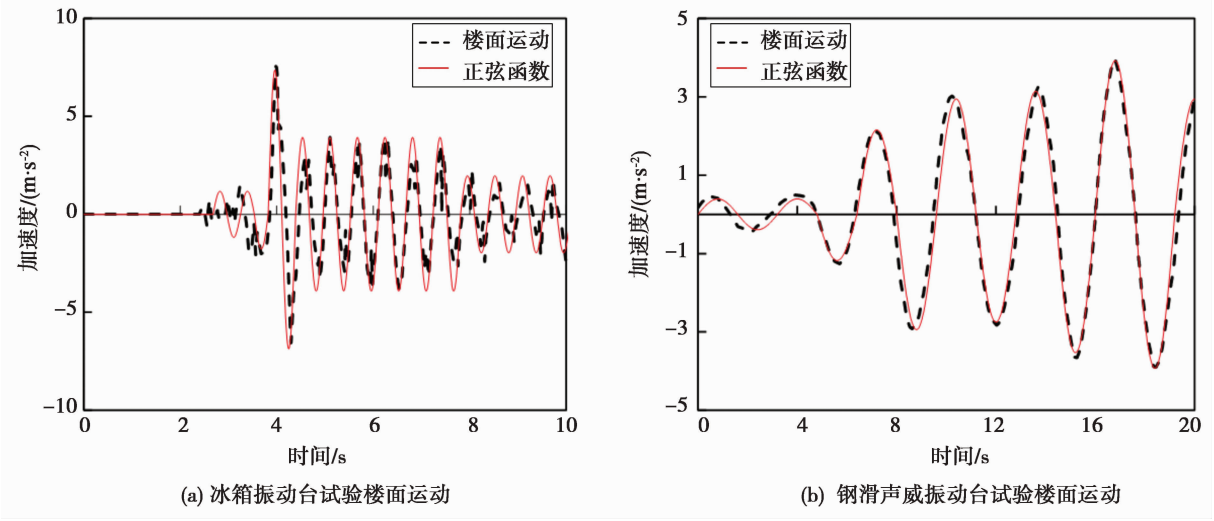
根据式(4),刚体在矩形脉冲作用下的 EDP_2 和 IM_2 之间具有式(7)所示的函数关系。

$$EDP_2 = \frac{IM_2}{2} \tag{7}$$

然而,Konstantinidis 等[6]的研究表明,刚体在地震引发的楼面运动作用下的最大滑移距离具有很大的离散性,难以表达成确定性的函数关系,而应将其视为随机变量。

在一阶模态主导的结构中,地震引发的楼面运动以一阶模态成分为主。例如,上述介绍的试验(1)和(2)中的楼面运动可以近似地表示为变幅的等周期正弦函数,如图 6 所示。其中,正弦函数的周期可采用建筑的一阶周期。

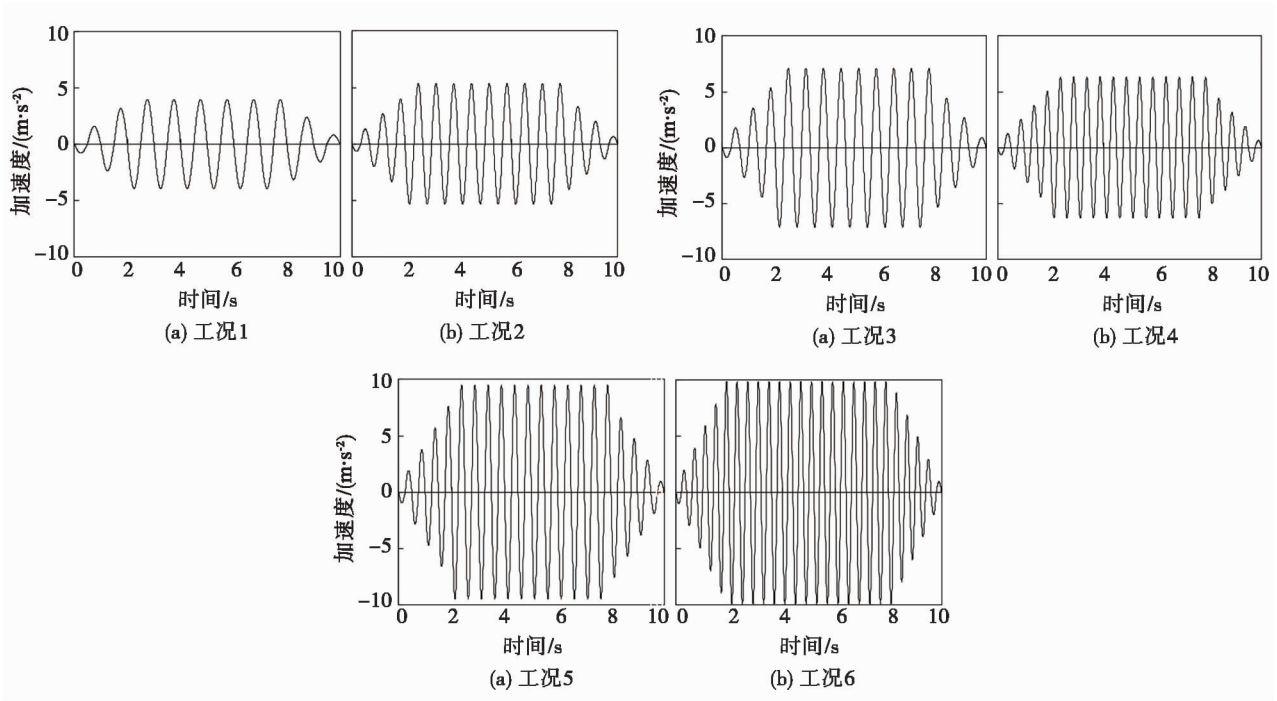
采用上述的单自由度简化模型,计算具有不同摩擦系数的刚体在文献[10]采用的 6 种不同的变幅等周期正弦函数激励下的最大滑移距离(图 7)。正弦激励的持时均为 10s,其幅值在最初 2s 内从零线性增加至 PFA,在最后 2s 内线性减小为零。摩擦系数从 0.02 到 0.8 以 0.02 的步长等幅增加。



(a) 冰箱振动台试验楼面运动　　(b) 钢滑声威振动台试验楼面运动

图 6　正弦函数对比楼面运动

Fig. 6　Comparison between sine function and floor motion



(a) 工况1　(b) 工况2　(a) 工况3　(b) 工况4

(a) 工况5　(b) 工况6

图 7　正弦函数

Fig. 7　Sine function

所有 240 个工况下物品的最大滑移距离 u_{max} 和式(6)定义的楼面运动强度指标 IM_2 的关系如图 8 所示。可见,楼面运动作用下的最大滑移距离往往远小于矩形脉冲作用下推导得到的结果,且表现出相当大的离散性。

内部物品滑移破坏的易脆性可以表示为不同楼面运动强度指标 IM 下最大滑移距离 u_{max} 超过某一限值 $\bar{u}$ 的概率 P_f。假设某一 IM 下的 u_{max} 服从对数正态分布,则有:

$$P_f = P(u_{max} > \bar{u} \mid IM) = 1 - \Phi\left(\frac{\ln\bar{u} - \mu}{\sigma}\right) \tag{8}$$

式中,Φ 是标准正态变量的累积分布函数,μ 是 $\ln(u_{max})$ 的均值,σ 是 $\ln(u_{max})$ 的标准差。

假设 $\ln(u_{max})$ 的均值 μ 和 $\ln(IM)$ 之间具有如式(9)所示的线性关系,其中 β 和 γ 是线性函数的系数。

$$\mu[ln(u_{max})] = \beta + \gamma \ln IM \tag{9}$$

同时可以得到 $\ln(u_{max})$ 的标准差如式(10)所示。

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n-1}\sum_{i=1}^{n}\left[\ln(u_{\max,i}) - \mu[\ln(u_{\max})]\right]^2} \tag{10}$$

将图 8 中的 IM_2 和 u_{max} 分析结果转换到对数空间并进行线性拟合，如图 9 所示。线性拟合的相关系数 R^2 仅为 0.850 7，标准差 $\sigma = 0.52$，且数据在对数空间上表现出明显的双线性特征。

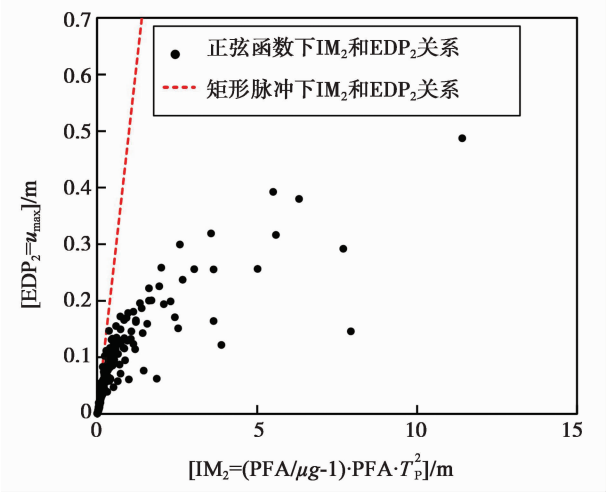


图 8 随机变量 IM 和 EDP

Fig. 8 IM and EDP

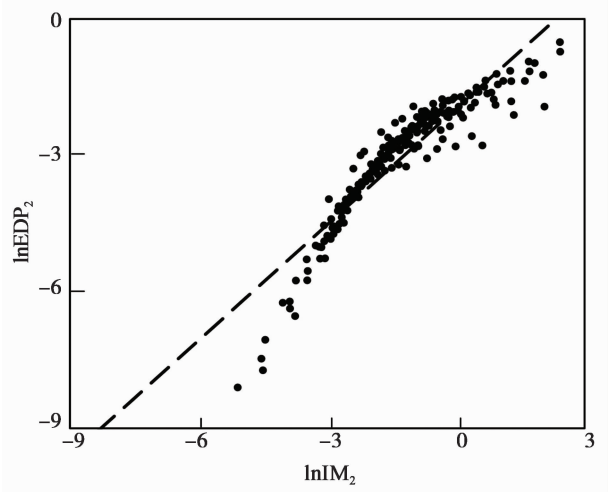


图 9 对数化回归分析

Fig. 9 Logarithmic regression

3 修正的楼面运动强度指标

式(6)所示的 IM_2 是根据物品在矩形脉冲作用下的最大滑移公式 4 转换得到的。在式(4)中，T_P 是矩形脉冲作用时间，当物品起滑时，即为滑移时间。然而楼面运动更接近于变幅的正弦函数。物品在一个周期的正弦脉冲作用下的滑移时间 T_S 并不等于脉冲周期 T_P。假设当楼面运动加速度 $|\ddot{x}_g| \geqslant \mu g$ 时物品开始滑移，可得正弦脉冲周期 T_P 和该周期内的滑移时间 T_S 的关系如式(11)所示(图 10)。

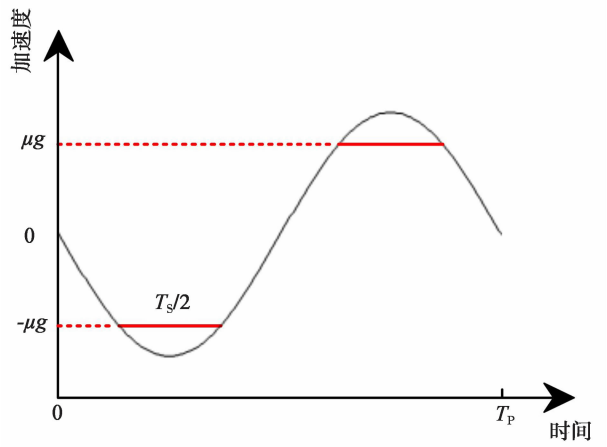


图 10 正弦脉冲滑移时间

Fig. 10 T_S under sine pulse.

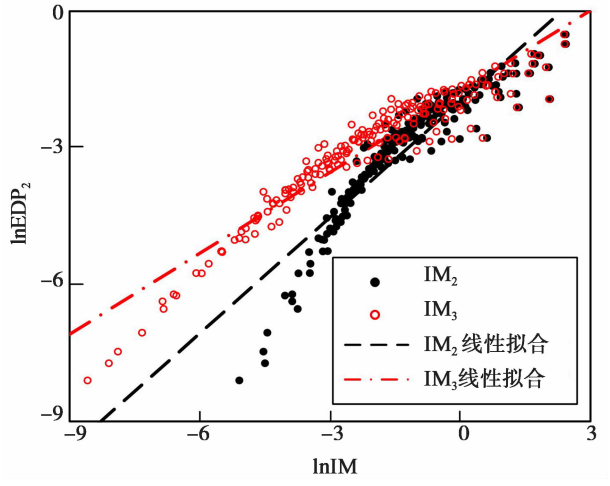


图 11 对数化回归分析对比

Fig. 11 Logarithmic regression

$$T_S = T_P\left(1 - 2\frac{\operatorname{asin}\dfrac{\mu g}{PFA}}{\pi}\right) \tag{11}$$

将式(6)中的脉冲周期替换为式(11)所示的滑移时间，可得如式(12)所示的修正的楼面运动强度指标

IM_3。

$$IM_3 = \left(\frac{PFA}{\mu g} - 1\right) \cdot PFA \cdot T_S^2 \tag{12}$$

IM_3和上述得到的 u_{max}在对数空间上的分布如图 11 所示。可见,与 ln(IM_2)相比,ln(IM_3)和 ln(u_{max})之间具有更好线性关系。采用 IM_3进行线性拟合,相关系数 R^2 提高至 0.909 3 ,标准差减小为 σ = 0.405 。通过拟合得到的标准差 σ 和式(9)中均值,可利用式(8)得到相应的易脆性曲线。

4　结论

以建筑内部物品的滑移破坏为研究对象,通过单自由度简化模型分析内部物品在地震引起的楼面运动作用下的滑移反应。通过分析可得出以下结论:

(1)物品在地震引起的楼面运动作用下的最大滑移距离远小于矩形脉冲作用下的解析解,且表现出相当大的离散性。

(2)现有的楼面运动强度指标在对数空间上与物品的最大滑移距离之间表现出明显的非线性关系。

(3)通过将现有强度指标中的楼面运动脉冲周期修改为与物品滑移时间相对应的等效周期,得到修正后的楼面运动强度指标。该强度指标在对数空间中与物品最大滑移距离之间具有更好的线性关系。

参考文献

[1] 叶列平,马千里,缪志伟. 结构抗震分析用地震动强度指标的研究[J]. 地震工程与工程振动,2009,29(4):9 - 22.
YE Lieping, MA Qianli, MIAO Zhiwei. Study on seismic intensity index for structural seismic analysis [J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2009,29(4): 9 - 22. (in Chinese)

[2] ISHIYAMA Y. Motions of rigid bodies and criteria for overturning by earthquake excitations[J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 1982, 10(5): 635 - 650.

[3] SHENTON III H W. Criteria for initiation of slide, rock, and slide-rock rigid-body modes[J]. Journal of Engineering Mechanics, 1996,122(7), 690 - 693.

[4] NEWMARK N M. Effects of earthquakes on dams and embankments[J]. Géotechnique,1965,15(2), 139 - 160.

[5] GAZETAS G, GARINI E, BERRILL J B, et al. Sliding and overturning potential of Christchurch 2011 earthquake records[J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 2012, 41(14): 1921 - 1944.

[6] KONSTANTINIDIS D, MAKRIS N. Experimental and analytical studies on the response of freestanding laboratory equipment to earthquake shaking [J]. Earthquake Engineering and Structural Dynamics,2009, 38(6):827 - 848.

[7] KONSTANTINIDIS D, NIKFAR F. Seismic response of sliding equipment and contents in base-isolated buildings subjected to broadband ground motions[J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 2015, 44(6): 865 - 887.

[8] NIKFAR F, KONSTANTINIDIS D. Peak sliding demands on unanchored equipment and contents in base-isolated buildings under pulse excitation [J]. Journal of Structural Engineering, 2017, 143(9): 04017086.

[9] NAGAO T, KAGANO H, HAMAGUCHI K. Full-scale shaking table test on furnitures subjected to long-period earthquake motions[C]//15th World Conference on Earthquake Engineering, Lisbon, Portugal. 2012.

[10] YEOW T Z, MACRAE G A, DHAKAL R P, et al. Validating the sliding mechanics of office-type furniture using shake-table experiments[J]. Bulletin of the New Zealand Society for Earthquake Engineering, 2018, 51(1): 1 - 11.

[11] LOPEZ G D, SOONG TT. Sliding fragility of block-type non-structural components. Part 1: unrestrained components[J]. Earthquake Engineering and Structural Dynamics 2003; 32(1):111 - 129

[12] MAKRIS N, BLACKl C J. Dimensional analysis of rigid-plastic and elastoplastic structures under pulse-type excitations[J]. Journal of Engineering Mechanics, 2004, 130(9): 1006 - 1018.

[13] CHAUDHURI S R, HUTCHINSON T C. Characterizing frictional behavior for use in predicting the seismic response of unattached equipment [J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2005, 25(7 - 10): 591 - 604.

[14] GESUALDO A, IANNUZZO A, MINUTOLO V, et al. Rocking of freestanding objects: theoretical and experimental comparisons[J]. Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2018, 56.