

基于能量的摩擦摆隔震结构隔震层 最大变形计算方法研究

何厚谊^{1,2}, 李吉超^{1,2}, 王涛^{1,2}

(1. 中国地震局工程力学研究所 地震工程与工程振动部门重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150080;
2. 地震灾害防治应急管理部重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150080)

摘要: 隔震技术是保证结构安全的有效手段。以摩擦摆隔震结构为例, 提出了一种基于最大瞬时输入能量分析的隔震层最大变形计算方法。首先基于非线性单自由度模型验证了隔震层最大变形与最大瞬时输入能发生时刻的一致性, 其次推导了隔震层的最大滑动位移与最大瞬时输入能段滞回耗能的关系, 进一步确定了隔震层最大变形与最大滑动位移的比例, 最终提出了基于最大瞬时输入能计算隔震结构隔震层最大变形的计算方法, 通过案例分析验证了该方法的可行性。研究结果表明: 隔震层的最大变形与最大瞬时输入能具有较高的相关性; 隔震层在最大瞬时输入能段的滞回耗能与最大瞬时输入能的比值随着结构等效周期变大呈减小趋势; 最大变形与最大滑动位移的比值可取0.55; 基于能量法计算的隔震层最大变形与结构实际最大变形的误差在10%以内。

关键词: 隔震结构; 摩擦摆支座; 能量分析; 最大位移; 简化计算方法

中图分类号: TU311; P315.9

文献标识码: A

Study on the calculation method of the maximum deformation of the isolation layer of friction pendulum isolated structures based on energy analysis

HE Houyi^{1,2}, LI Jichao^{1,2}, WANG Tao^{1,2}

(1. Key Laboratory of Earthquake Engineering and Engineering Vibration, Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration, Harbin 150080, China; 2. Key Laboratory of Earthquake Disaster Mitigation, Ministry of Emergency Management, Harbin 150080, China)

Abstract: Seismic isolation technology is an effective means to protect the safety of structures. Taking the friction pendulum isolation structure as an example, a method for calculating the maximum deformation of the isolation layer (MDIL) based on the maximum momentary input energy (MMIE) analysis is proposed. Firstly, the MDIL is verified to be occur simultaneously with the MMIE based on a nonlinear single degree of freedom (NSDOF) model. Secondly, the relationship between the maximum sliding displacement and the hysteretic energy consumption of the isolation layer is derived. The ratio of the MDIL to the maximum sliding displacement of the isolation layer is further determined. Finally, a method for calculating the MDIL based on the MMIE is proposed and verified using the NSDOF model. The results show that there is a high correlation between the MDIL and the MMIE. The ratio of the hysteretic energy of the isolation layer to the MMIE decreases with the increase of the equivalent period of the structure. The ratio of the MDIL to the maximum sliding displacement is about 0.55. Compared to the actual maximum deformation of the isolated structure, the calculated deformation using the energy method is with an error of 10%.

Key words: isolation structure; friction pendulum bearing; energy analysis; maximum displacement; simplified calculation method

收稿日期: 2024-04-16; 修回日期: 2024-05-15

基金项目: 中国地震局工程力学研究所基本科研业务费专项资助项目(2021EEEVL0310, 2020C03)

作者简介: 何厚谊(1998—), 女, 硕士研究生, 主要从事结构隔震设计方法研究。E-mail: hehouyi95@126.com

通讯作者: 李吉超(1990—), 男, 副研究员, 博士, 主要从事结构抗震与工程系统抗震韧性研究。E-mail: lijichao230@iem.ac.cn

0 引言

隔震技术作为目前世界上最有效的建筑抗震措施之一,在国内外得到了广泛应用,近年来我国隔震建筑数量快速增长,居世界领先地位^[1]。建筑结构隔震是在建筑基础、底部或下部结构与上部结构之间设置隔震支座,阻止地震能量向上传播,以延长整个结构体系的自振周期,减少输入上部结构的水平地震作用^[2]。国内外的大量试验和工程经验表明,隔震设计一般可使结构的水平地震作用降低60%左右,从而消除或有效地减轻结构和非结构的地震损坏,提高建筑物及其内部设施、人员在地震时的安全性,增强震后建筑物继续使用的能力^[3]。

常用的隔震装置有叠层橡胶隔震支座(包括天然橡胶隔震支座、铅芯橡胶隔震支座以及高阻尼橡胶隔震支座)、平板滑移隔震支座、滚动滑移隔震支座和摩擦摆支座。其中,摩擦摆支座以其对地震激励频率范围的低敏感性和高稳定性、较强的自复位能力、优良的隔震和消能机制等综合性能,近年来逐渐成为一种具有发展前景的隔震支座^[4]。相对于传统的建筑结构,采用基础隔震技术的建筑结构在地震作用下的绝对加速度反应会有效降低,但是隔震层会发生较大变形^[5]。隔震支座的极限变形是结构隔震设计的关键指标之一,隔震支座变形超过允许值时将产生破坏,显著增加整体结构倒塌的风险^[6],GB/T 51408—2021《建筑隔震设计标准》^[7]规定,摩擦摆隔震支座在罕遇地震作用下的水平位移不应超过支座设计极限位移的0.85倍。目前,摩擦摆隔震结构在设计时通常需要进行多次试算与迭代,流程较为繁琐,如果可以估算隔震层在罕遇地震下的极限位移,则可大大简化计算流程,节约时间成本。

HOUSNER^[8]首次提出能量法,把结构地震响应看成是地震能量输入、转化与耗散的过程,从能量平衡角度建立设计方法,形式简单且计算方便,能够较好地反映结构弹塑性发展与损伤累积的“全过程”。从输入能量和耗散能量的角度,可以捕捉到结构在地震作用下的非弹性变形历程^[9]。隔震结构在地震作用下的响应特征与单自由度模型相似,且绝大部分能量由隔震层消耗,从能量的角度对隔震结构进行分析具有较强的适应性^[10-12]。在能量法的研究内容中,最大瞬时输入能量是输入到结构的最大能量脉冲,必然引起较大的结构位移变形增量。HORI等^[13]研究发现,瞬时输入能量作为输入能量强度的指标,与地震的周期性或脉冲性等特征有关,也与结构的即时响应位移有关。叶列平等^[14-15]提出振动等能量准则,基于能量反应建立了单自由度体系最大弹性位移与弹塑性位移的关系。王常峰等^[16]研究了双线性系统最大瞬时输入能量对应的位移与结构最大位移之间的关系,并通过瞬时输入能量建立了弹性和双线性系统最大位移反应的关系。胡冗冗等^[17-19]研究了不同周期的单自由度弹性和弹塑性结构模型在不同能量分布的地震动作用下,瞬时输入能量最大值与结构最大位移反应的对应关系,提出了由瞬时输入能量推算结构最大位移反应的近似方法。陈遼等^[20]以瞬时输入能量在时间轴上的分布特征(瞬时输入能量时变特征)来描述地震能量输入历程的特点,并通过建立瞬时输入能量时变特征与结构位移历程之间的联系,获得了基于能量参数的弹性结构位移历程求解方法。前人的研究都已证明瞬时输入能量与地震下的结构位移响应有着密切的联系,但是大多数研究着眼于弹性结构下的位移响应,或是通过弹性系统计算非弹性系统最大位移反应,尚未给出可靠的非弹性系统下通过瞬时输入能直接计算最大位移的方法。

本文基于非线性单自由度模型,分析了隔震结构在地震作用下的能量反应与隔震层位移响应的关系,推导了基于瞬时输入能计算隔震层最大变形的理论模型并进行验证。

1 能量分析基本理论

1.1 单自由度摩擦摆隔震结构分析模型

对于基础隔震体系,其上部结构的层间侧移刚度通常远大于隔震层的水平刚度,地震中结构体系的水平位移主要集中在隔震层,上部结构只做水平整体平动,因此可近似将上部结构看作一个刚体,将隔震结构简化为单自由度模型进行分析^[3]。如图1所示,上部结构简化为一个质点,其质量为 m ,隔震层采用双线性本构、阻尼系统描述。本文采用时程分析方法计算隔震结构的位移响应,可自动考虑隔震层的滞回耗能,无需设置附加阻尼比,因此阻尼比取0.05,即结构本身的阻尼比。

本文是以摩擦摆隔震结构为例进行分析,单摆摩擦摆支座的力学模型可以简化为双线性模型^[21],如

图2所示。根据 GB/T 37358—2019《建筑摩擦摆隔震支座》^[22],支座的各个力学性能参数分别按照式(1)~式(4)计算:

$$K_p = \frac{\mu P}{d_y} \quad (1)$$

$$K_c = \frac{P}{R} \quad (2)$$

$$K_{\text{eff}} = \left(\frac{1}{R} + \frac{\mu}{D} \right) \cdot P \quad (3)$$

$$T_e = 2\pi \sqrt{\frac{P}{K_{\text{eff}}g}} \quad (4)$$

式中: K_p 为支座初始刚度; μ 为动摩擦系数; P 为支座所受竖向荷载,与上部结构质量有关; d_y 为屈服位移,一般取 2.5 mm。 K_c 为支座屈服后刚度; R 为支座等效曲率半径; K_{eff} 为支座等效刚度; D 为支座水平位移; T_e 为支座等效周期。

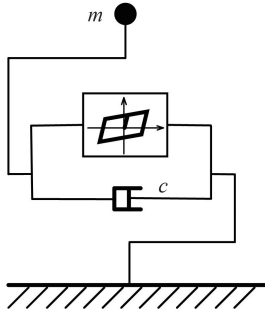


图1 单自由度隔震结构模型

Fig.1 SDOF isolation structure model

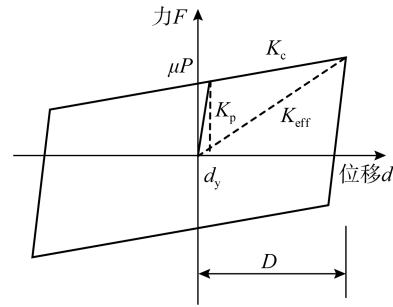


图2 摩擦摆支座的力-位移滞回曲线

Fig.2 Force-deformation hysteresis curve of friction pendulum bearing

1.2 瞬时输入能

SDOF 系统在相对坐标系下地震作用的动力方程为

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + F(x) = -m\ddot{x}_g \quad (5)$$

式中: m 为体系的质量; c 为体系的黏滞阻尼系数; $F(x)$ 为体系的恢复力; \ddot{x}_g 为地震地面运动加速度; x 、 \dot{x} 、 \ddot{x} 分别为体系相对于地面的位移、速度和加速度。

式(5)两边同乘相对速度,并在地震持续时间 $[0, t]$ 内积分,可得相对能量反应方程,如式(6)所示:

$$\int_0^t m\ddot{x}\dot{x}dt + \int_0^t c\dot{x}\dot{x}dt + \int_0^t F(x)\dot{x}dt = - \int_0^t m\ddot{x}_g\dot{x}dt \quad (6)$$

式中: $\int_0^t m\ddot{x}\dot{x}dt$ 为体系相对动能 E_K ; $\int_0^t c\dot{x}\dot{x}dt$ 为体系阻尼耗能 E_D ; $\int_0^t F(x)\dot{x}dt$ 为体系变形能 E_H ; $-\int_0^t m\ddot{x}_g\dot{x}dt$ 为地震动相对总输入能 E_I 。

式(6)的简化表达如式(7)所示:

$$E_K + E_D + E_H = E_I \quad (7)$$

定义瞬时输入能量(momentary input energy, MIE) ΔE 为连续2个速度0点间的能量输入,由于起止时刻速度均为0,动能增量为0, ΔE 由阻尼耗能增量 ΔE_D 及变形能增量 ΔE_H 组成,即

$$\Delta E = \Delta E_D + \Delta E_H \quad (8)$$

$$-\int_t^{t+\Delta t} m\ddot{x}_g\dot{x}dt = \int_t^{t+\Delta t} c\dot{x}\dot{x}dt + \int_t^{t+\Delta t} F(x)\dot{x}dt \quad (9)$$

2个速度0点之间的时间间隔称为瞬时段 Δt , Δt 为结构经历半次振动循环所需的时间,由于结构在地震过程中每一次往返振动所用的时间是变化的,因此 Δt 是一个变化值。

图3为单位质量 SDOF 结构经历 El Centro 地震动之后的能量反应时程,其中上方的曲线为系统总输入能量时程,下方的曲线为瞬时输入能量时程。由图可知,总输入能量呈波动上升趋势,根据能量平衡方程,总输入能是由体系动能、阻尼耗能以及变形能组成的,其中变形能包括弹性应变能和非弹性滞回耗能。在能量

时程中,阻尼耗能是不断增长的,滞回耗能呈增长趋势但是会出现某段时间不增长,而弹性应变能和动能都是可恢复能量^[23]。当某一时刻各项能量增量小于恢复的能量时,总输入能相较于上一时刻略有减小,因此并非持续单调增长。

瞬时输入能量时程由各个矩形组成,故又称为瞬时输入能量直方图,其中每个矩形的面积为对应时段 Δt 的输入能量值,面积最大的一段为最大瞬时输入能 ΔE_{\max} (maximum momentary input energy, MMIE),所有矩形的面积之和等于结构总输入能 E_1 。瞬时输入能直方图越狭长,表明结构在该时段上输入能量的强度越大,因此通过瞬时输入能直方图能够了解地震能量输入的历程,同时由于瞬时输入能量与结构位移之间有对应关系,因此通过瞬时输入能直方图也能够了解结构位移反应历程的特点^[20]。

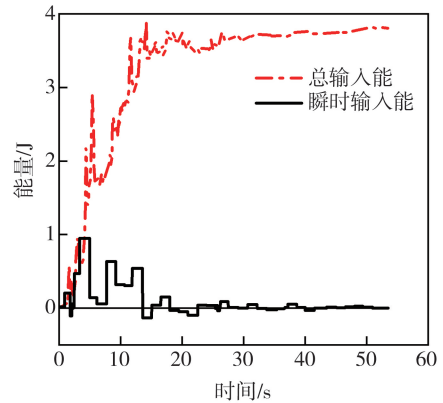


图 3 SDOF 体系典型能量反应时程曲线
Fig. 3 Typical energy response time history of SDOF system

2 基于瞬时输入能的隔震层最大位移计算

2.1 强震记录

本文选取 2 条典型的天然地震动 (El Centro 地震动和 Taft 地震动),以及 1 条人工地震动 Artificial 用于后续分析。人工地震动根据三类场地,第 2 组的抗震设计反应谱生成。为计算 8 度罕遇地震下的隔震层位移,根据 GB/T 50011—2010《建筑抗震设计标准》^[24]将输入的地震动 PGA 调幅为 400 cm/s^2 。3 条地震动的加速度时程曲线如图 4 所示。

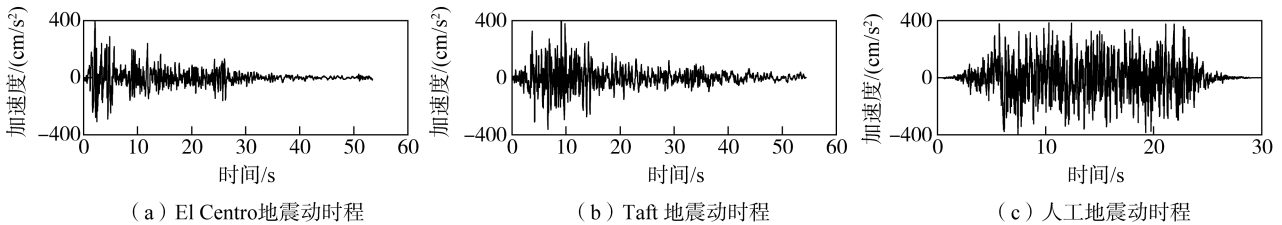


图 4 本文选用地震动的加速度时程曲线

Fig. 4 Acceleration time history curve of ground motion selected in this paper

2.2 最大瞬时输入能与结构最大位移的相关性分析

ΔE 为输入到结构中的能量脉冲,在结构能量反应过程中最大瞬时输入能量 ΔE_{\max} 必然引起较大的位移增量,使得结构在吸收 ΔE_{\max} 之后有可能达到位移反应的最大值^[19]。为研究摩擦摆隔震结构最大瞬时输入能与隔震层最大变形 (maximum deformation of isolation layer, MDIL) 的关系,现假设上部结构质量 $m = 1 \text{ kg}$, 阻尼比为 0.05,摩擦摆支座动摩擦系数 μ 为 0.02,支座曲率半径 R 为 3 m,初始刚度 $K_p = 80 \text{ N/m}$,屈服后刚度 $K_c = 3.33 \text{ N/m}$,隔震后的等效周期 T_e 为 2.719 s。3 条地震动作用下,结构的位移响应时程和瞬时输入能时程如图 5 所示。由图可知,结构最大位移响应 d_{\max} 正好发生在结构经历最大瞬时输入能 ΔE_{\max} 的时段。

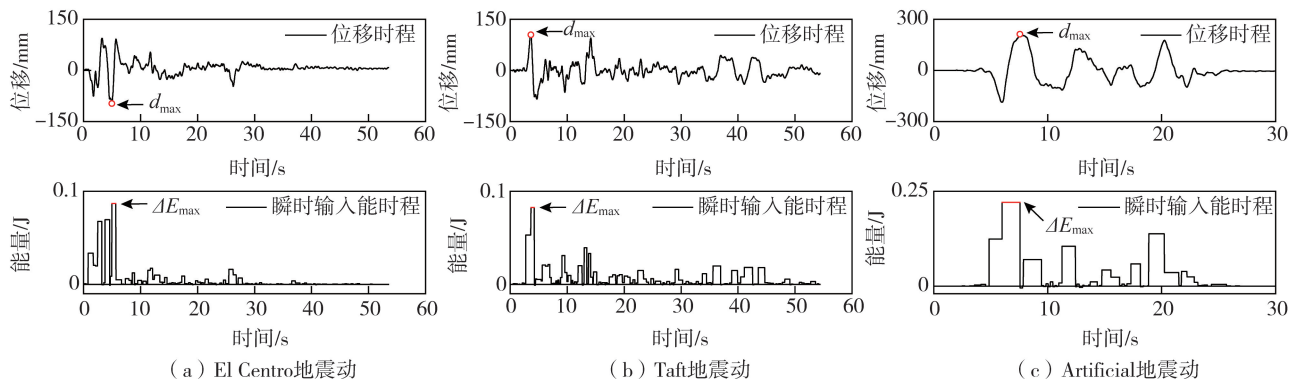


图 5 隔震层最大位移与最大瞬时输入能出现时刻对比

Fig. 5 Comparison of the occurrence time of MDIL and MMIE

下面讨论一般情况,由1.2节的定义可知,每一瞬时段 Δt 都有起止2个位移值,取其中绝对值较大的位移作为该时段 ΔE 对应的位移 d_E 。设计摩擦摆支座屈服位移为2.5 mm、曲率半径为3 m,计算动摩擦系数为0.005~0.100范围内 $d_{E_{\max}}$ 与 d_{\max} 的对比如图6所示。图中横坐标为按照式(3)、式(4)计算的隔震结构等效周期。对于El Centro地震动和Taft地震动, $d_{E_{\max}}$ 与 d_{\max} 在结构等效周期为1.8~3.5 s具有较好的一致性;对于人工地震动, $d_{E_{\max}}$ 与 d_{\max} 在结构等效周期超过2.5 s时具有较好的一致性。总体来说,在隔震结构的典型周期范围(2.5~4.0 s)内, $d_{E_{\max}}$ 与 d_{\max} 二者基本相同。因此, $d_{E_{\max}}$ 与 d_{\max} 有较好的对应关系,亦即 ΔE_{\max} 与 d_{\max} 有较好的对应关系,可以认为当结构在经历最大瞬时输入能的时刻出现最大位移响应。

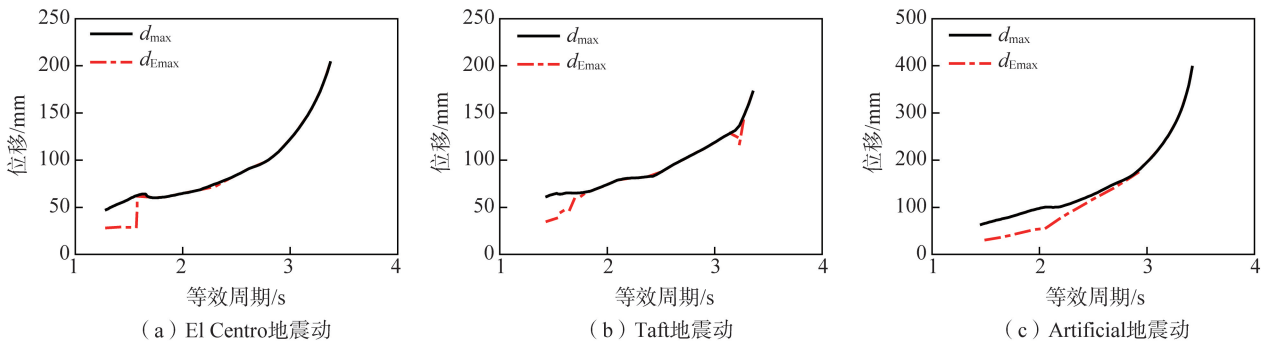


图6 最大位移与最大瞬时输入能对应的位移对比

Fig. 6 Comparison of MDIL and the displacement corresponding to MMIE

2.3 最大瞬时输入能与最大滑动位移的关系

以图5中El Centro地震动作用下结构的位移响应时程为例,将位移时程中所有速度为0时刻的点记为位移峰值点 d_p ,相邻2个位移峰值点之间的位移差记为滑动位移 Δd_p ,如图7所示。

通常情况下结构最大位移响应 d_{\max} 会与最大滑动位移 $\Delta d_{p_{\max}}$ 出现在同一时段 Δt ,即 d_{\max} 为图7中的 $d_{p(i)}$ 或 $d_{p(i+1)}$,将这一特殊时段记为 Δt_E 。又由2.2节的推论可知, Δt_E 时段会出现最大瞬时输入能 ΔE_{\max} 。因此只需找到 ΔE_{\max} 与 $\Delta d_{p_{\max}}$ 之间的关系,即可通过最大瞬时输入能推导结构最大位移。

已知 Δt 为结构经历半次振动循环所需的时间,因此 $\Delta d_{p_{\max}}$ 即为摩擦摆支座在 Δt_E 内完成的一次完整的单向滑动摩擦位移值,这段时间的滞回曲线为A点-B点-C点,如图8所示。前人在研究瞬时输入能段的滞回耗能时多采用直接积分的方式计算^[16],而本文为了将滞回耗能 ΔE_H 与最大滑动位移直接联系起来,便于后续推导瞬时输入能与最大位移的关系,提出了一种新的计算方法:先将滞回曲线补充为完整的一圈,则滞回耗能 ΔE_H 为平行四边形ABCD面积的一半,即阴影区域面积,如图8所示。

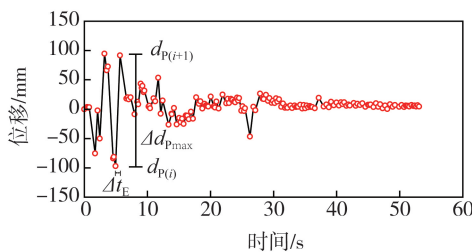


图7 位移峰值点与滑动位移定义

Fig. 7 Definition of displacement peak point and sliding displacement

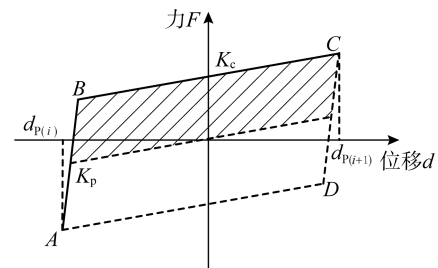


图8 隔震支座滑动位移与滞回曲线的关系

Fig. 8 Relationship between the sliding displacement and hysteresis curve of the isolation bearing

设计摩擦摆支座屈服位移为2.5 mm、曲率半径为3 m,计算动摩擦系数为0.005~0.100范围内 Δt_E 时段的滞回耗能 ΔE_H 占最大瞬时输入能 ΔE_{\max} 的比值 α 如图9所示。由图可知,对于3条地震动, α 在隔震后的等效周期1.5~3.5 s范围内呈现相同的规律,故 α 可以根据摩擦摆支座的动摩擦系数查表获得。

因此,由最大瞬时输入能推导最大滑动位移的方法是,通过查表得到 α 即可由 ΔE_{\max} 求出 ΔE_H ,如式(10)所示:

$$\Delta E_H = \alpha \Delta E_{\max} \quad (10)$$

由图8中 $\Delta d_{p_{\max}}$ 与 ΔE_H 的几何关系求出 $\Delta d_{p_{\max}}$,如式(11)所示:

$$\Delta d_{pmax} = \frac{\Delta E_H}{\left(1 - \frac{d_y}{\mu R}\right) K_p d_y} + 2d_y \tag{11}$$

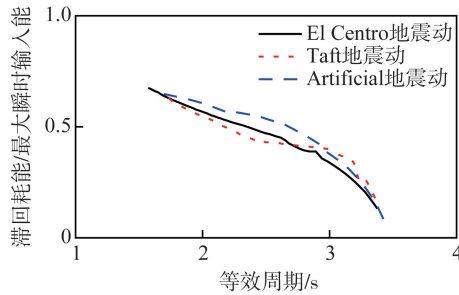


图 9 隔震支座滞回耗能与最大瞬时输入能的比值 α

Fig. 9 Ratio α of the hysteretic energy dissipation of the isolation bearing to MMIE

2.4 最大滑动位移与最大变形

隔震层的最大变形是指隔震层相对于位移 0 点在正向或负向的最大位移, 而隔震层的最大滑动位移是指相邻 2 个速度 0 点之间隔震层产生的最大位移增量。在最大瞬时输入能发生的时段, 为了耗散地震能量, 摩擦摆支座的滑动位移将高于其最大变形但小于等于 2 倍的最大变形。依然以 2.2 节采用的具体结构模型为例, 给出不同地震工况下的最大位移与最大滑动位移, 如表 1 所示。

表 1 隔震层最大变形与最大滑动位移的关系

Table 1 Relationship between the maximum deformation and the maximum sliding displacement of the isolation layer

工况	d_{max}/mm	$\Delta d_{pmax}/mm$	$(d_{max}/\Delta d_{pmax})/\%$
El Centro	97.1	188.8	51.4
Taft	104.6	181.7	57.6
Artificial	212.5	398.8	53.3
平均值	138.1	256.4	53.8

可以看出 d_{max} 与 Δd_{pmax} 的比值在 50%~60% 之间波动, 因此可以按照式 (12) 计算最大位移:

$$d_{max} = \beta \Delta d_{pmax} \tag{12}$$

式中系数 β 取 0.55。将式 (1)、式 (10)、式 (11) 代入式 (12), 得到由 ΔE_{max} 计算 d_{max} 的最终公式 (13):

$$d_{max} = \beta \left(\frac{\alpha \Delta E_{max}}{\mu P - \frac{P}{R} d_y} + 2d_y \right) \tag{13}$$

式中, 上部结构质量确定时支座所受竖向荷载 P 为已知, 屈服位移 d_y 为 2.5 mm, 系数 α 和 β 可通过大量计算统计得出, 当摩擦摆支座的 μ 和 R 确定时, 即可通过最大瞬时输入能 ΔE_{max} 求出最大位移。

3 最大位移计算流程与案例分析

3.1 计算流程

基于前文的分析与推导, 摩擦摆隔震结构隔震层的最大变形可根据最大瞬时输入能计算, 流程如图 10 所示。

总体来说, 该方法适用于具有双线性本构的隔震支座, 但是不同支座特性不同, 应进行针对性调整。本文以摩擦摆支座作为研究对象, 主要原因在于摩擦摆支座的可设计性较强, 支座的曲率半径、摩擦系数和尺寸均是可变参数。与之相比, 橡胶支座通常为现有产品, 尺寸、参数相对固定。另外, 摩擦摆支座的起滑位移固定, 因此可采用等屈服位移能量谱 (见 3.2 节), 这对于橡胶支座并不适用。

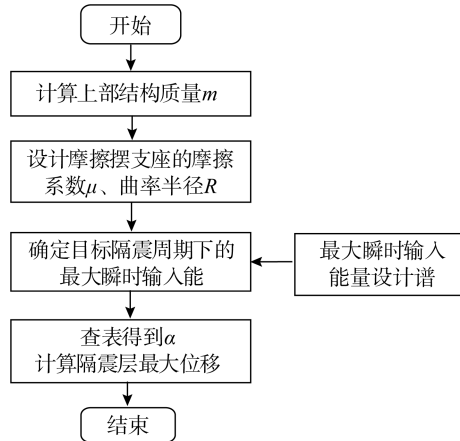


图10 摩擦摆隔震结构最大位移计算流程

Fig. 10 Calculation process of the MDIL of friction pendulum isolation structure

3.2 瞬时输入能量谱

为方便取任意周期点下的最大瞬时输入能 ΔE_{\max} , 需要建立最大瞬时输入能量谱。由 1.1 节可知, 摩擦摆支座的屈服位移 d_y 通常取 2.5 mm, 因此建立单自由度 (single degree of freedom, SDOF) 等屈服位移最大瞬时输入能量谱。取摩擦摆支座屈服位移为 2.5 mm、曲率半径为 3 m, 计算动摩擦系数为 0.005~0.100 范围内 3 条地震动各自的等屈服位移最大瞬时输入能量谱以及平均谱如图 11 所示。可以看出, 2 条天然地震动的最大瞬时输入能量谱曲线较为接近, 而人工地震动由于其反应谱在整个周期范围内能够与规范反应谱吻合较好, 相较于天然地震动, 会导致输入结构的能量更多、结构产生的地震响应更大, 因此最大瞬时输入能量在中长周期范围内远大于天然地震动。

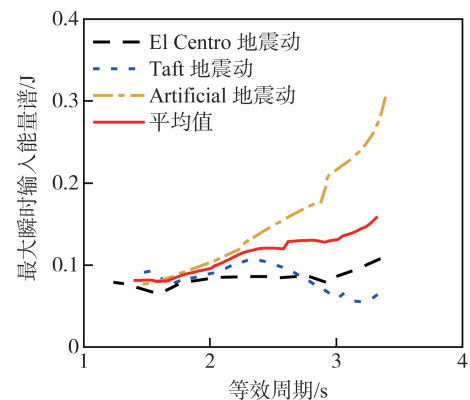


图11 3条地震动最大瞬时输入能量谱

Fig. 11 MMIE spectra of three ground motions

3.3 隔震层位移计算

选取一个实际隔震结构为例验证前述的理论推导。建筑模型如图 12 所示, 为一个地上 7 层、地下 1 层的钢筋混凝土框架结构。工程所在地区的抗震设防烈度为 8 度, 设计基本地震加速度峰值为 0.20 g, 设计地震分组第 2 组, 三类场地, 场地特征周期 0.55 s。本工程采用基底隔震方案, 在地下 1 层范围内利用摩擦摆支座设置隔震层。

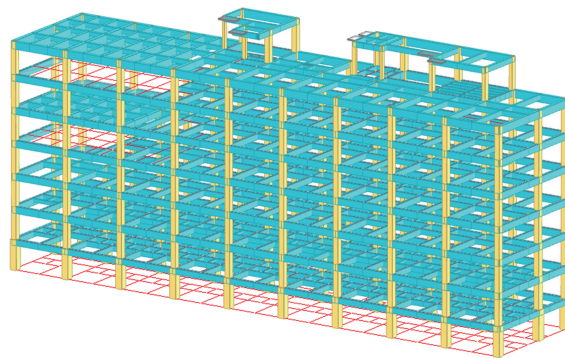


图12 隔震结构模型

Fig. 12 Isolation structure model

取隔震层其中一个支座作为分析对象, 其上部承受竖向荷载 3000 kN, 设计隔震支座的动摩擦系数 μ 为 0.02, 支座曲率半径 R 为 3 m, 初始刚度为 23520 kN/m。按照 3.1 节的方法及 3.2 节的能量谱推导出罕遇地震下隔震层的最大位移, 并与隔震层的实际位移响应作对比, 结果如表 2 所示。可以看出误差均在 10% 以内, 且能量法估算的位移均值比实际位移均值偏大, 作为设计参考是偏于安全的。

表 2 隔震层实际最大变形与基于瞬时输入能计算的变形值对比

Table 2 Comparison of the actual MDIL and the MDIL calculated based on the MMIE

计算方法	d_{\max}/mm			3 条地震动平均值
	El Centro 地震动	Taft 地震动	Artificial 地震动	
能量法	105.0	102.3	222.4	149.5
实际响应	97.5	105.9	218.0	140.5
误差/%	7.7	-3.4	2	6.4

4 结论

本文提出了一种基于最大瞬时输入能计算隔震结构隔震层最大变形的的方法,并用一个单自由度隔震模型验证了该方法的可行性。研究结论如下:

1) 隔震层的最大变形与最大瞬时输入能具有较高的相关性,往往同时发生。

2) 隔震层的最大滑动位移可由最大瞬时输入能段的滞回耗能求出,隔震层在最大瞬时输入能段的滞回耗能与最大瞬时输入能的比值随着结构等效周期变大呈减小趋势。

3) 隔震层最大变形与最大滑动位移的比值约为 0.55,采用能量法计算的隔震层最大变形与时程分析的结果相比误差小于 10%。

需要指出,上述结论根据 3 条地震动的分析结果给出,样本数量有限,未来还需要进一步验证该方法的普适性。

参考文献:

- [1] 戴君武,柏文,周宝峰,等.从泸定 6.8 级地震看建筑隔震技术发展亟待解决的问题[J].地震工程与工程振动,2022,42(6):1-11.
DAI Junwu, BAI Wen, ZHOU Baofeng, et al. Urgent problems need to be solved in the development of seismic base isolation for buildings from the Luding M_s 6.8 earthquake[J]. Earthquake Engineering and Engineering Dynamics, 2022, 42(6): 1-11. (in Chinese)
- [2] 陈鹏,周颖.摩擦摆支座隔震结构实用设计方法[J].地震工程与工程振动,2017,37(1):56-63.
CHEN Peng, ZHOU Ying. The applicable design method of isolated structure using friction pendulum system[J]. Earthquake Engineering and Engineering Dynamics, 2017, 37(1): 56-63. (in Chinese)
- [3] 薛素铎,赵均,高向宇.建筑抗震设计[M].第 3 版.北京:科学出版社,2012.
XUE Suduo, ZHAO Jun, GAO Xiangyu. Seismic design of buildings[M]. 3rd ed. Beijing: Science Press, 2012. (in Chinese)
- [4] 周云,龚健.摩擦摆隔震技术研究和应用的回顾与前瞻(II)——摩擦摆隔震结构的性能分析及摩擦摆隔震技术的应用[J].工程抗震与加固改造,2010,32(4):1-19.
ZHOU Yun, GONG Jian. State of the art and prospect of the research and application of friction pendulum isolation technology (II): Performance analysis of friction pendulum isolated structures and applications of friction pendulum isolation technology[J]. Earthquake Resistant Engineering and Retrofitting, 2010, 32(4): 1-19. (in Chinese)
- [5] 黄潇,胡志祥,王冬花,等.极罕遇地震作用下隔震结构碰撞响应与隔离缝宽度研究[J].地震工程与工程振动,2023,43(5):100-111.
HUANG Xiao, HU Zhixiang, WANG Donghua, et al. Study on pounding response and width of isolation joint of isolated structure under extreme rare earthquakes[J]. Earthquake Engineering and Engineering Dynamics, 2023, 43(5): 100-111. (in Chinese)
- [6] 欧进萍,武沛松,关新春.大位移摩擦摆底层和多层隔震韧性结构[J].防灾减灾工程学报,2021,41(4):657-676.
OU Jinping, WU Peisong, GUAN Xinchun. Seismic resilient base isolated structure equipped with super-large displacement friction pendulum bearing and isolated structure equipped with multi-super-large displacement friction pendulum bearing[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2021, 41(4): 657-676. (in Chinese)
- [7] GB/T 51408—2021 建筑隔震设计标准[S].北京:中国计划出版社,2021.
GB/T 51408—2021 Standard for seismic isolation design of building[S]. Beijing: China Planning Press, 2021. (in Chinese)
- [8] HOUSNER G. Limit design of structures to resist earthquakes[R]. California: Proceedings of the 1st World Conference on Earthquake Engineering, 1956.
- [9] 丁玉春,朱晞.地震动中输入能量的探讨[J].北京交通大学学报(自然科学版),2007,31(4):49-51.
DING Yuchun, ZHU Xi. Probe into input energy for the characterization of earthquake ground motions[J]. Journal of Beijing Jiaotong University, 2007, 31(4): 49-51. (in Chinese)
- [10] YAMAMOTO K, FUJITA K, TAKEWAKI I. Instantaneous earthquake input energy and sensitivity in base-isolated building[J]. The Structural Design of Tall and Special Buildings, 2011, 20(6): 631-648.

- [11] SUN M, SUN Y Z, LI L. Analyzing method based on the average power of the input energy into sliding isolation system[J]. Applied Mechanics and Materials, 2013, 470: 998–1002.
- [12] HABIB A, YILDIRIM U. Distribution of strong input energy in base-isolated structures with complex nonlinearity: A parametric assessment[J]. Multidiscipline Modeling in Materials and Structures, 2023, 19(2): 324–340.
- [13] HORI N, INOUE N. Damaging properties of ground motions and prediction of maximum response of structures based on momentary energy response[J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 2002, 31(9): 1657–1679.
- [14] 叶列平, 伍文杰. 基于能量准则的 SDOF 阻尼减震结构最大地震位移[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2001, 41(12): 72–74.
YE Lieping, WU Wenjie. Maximum seismic displacement of SDOF system with viscous damper based on the equal cyclic energy criteria[J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 2001, 41(12): 72–74. (in Chinese)
- [15] YE L P, OTANI S. Maximum seismic displacement of inelastic systems based on energy concept[J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 1999, 28(12): 1483–1499.
- [16] 王常峰, 朱东生. 双线性系统地震动瞬时能量研究[J]. 兰州铁道学院学报, 2001, 20(4): 54–59.
WANG Changfeng, ZHU Dongsheng. Research on instantaneous energy of bilinear system[J]. Journal of Lanzhou Jiaotong University, 2001, 20(4): 54–59. (in Chinese)
- [17] 胡冗冗, 王亚勇. 地震动瞬时能量与结构最大位移反应关系研究[J]. 建筑结构学报, 2000, 21(1): 71–76.
HU Rongrong, WANG Yayong. Study on the relationship between transient energy of ground shaking and maximum displacement response of structure [J]. Journal of Building Structures, 2000, 21(1): 71–76. (in Chinese)
- [18] 胡冗冗, 王亚勇. 基于瞬时输入能量的 SDOF 弹塑性结构最大位移反应分析[J]. 世界地震工程, 2002, 18(4): 155–158.
HU Rongrong, WANG Yayong. Maximum seismic displacement of inelastic SDOF structure based on momentary input energy [J]. World Earthquake Engineering, 2002, 18(4): 155–158. (in Chinese)
- [19] HU R G, WANG Y Y. Evaluation of long-period structural maximum displacement response on momentary input energy[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology (Urban Science Edition), 2006(4): 100–104.
- [20] 陈透, 刘哲锋, 沈蒲生. 基于瞬时输入能量时变特征的 SDOF 体系位移历程模拟[J]. 工程力学, 2011, 28(9): 66–71, 83.
CHEN Kui, LIU Zhefeng, SHEN Pusheng. The simulated deformation response of SDOF system based on time varying characteristic of momentary input energy[J]. Engineering Mechanics, 2011, 28(9): 66–71, 83. (in Chinese)
- [21] 周博威. 摩擦摆隔震高层框剪结构抗震性能试验研究[D]. 哈尔滨: 中国地震局工程力学研究所, 2019.
ZHOU Bowei. Experimental research on seismic performance of friction pendulum isolated high-rise frame-shear wall structures [D]. Harbin: Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration, 2019. (in Chinese)
- [22] GB/T 37358—2019 建筑摩擦摆隔震支座[S]. 北京: 中国标准出版社, 2019.
GB/T 37358—2019 Friction pendulum isolation bearings for buildings[S]. Beijing: Standards Press of China, 2019. (in Chinese)
- [23] 王德才. 基于能量分析的地震动输入选择及能量谱研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2010.
WANG Decai. Research on energy spectrum and the selection of earthquake accelerograms for dynamic analysis based on energy [D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2010. (in Chinese)
- [24] GB/T 50011—2010 建筑抗震设计标准[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.
GB/T 50011—2010 Code for seismic design of buildings[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2010. (in Chinese)