

DOI:10.3969/j.issn.1672-1144.2016.05.015

基于 3D - BASIS - ME 摩擦摆隔震系统 隔震效果分析

肖潇,孟琳,胥奇

(南华大学 土木工程学院, 湖南 衡阳 421001)

摘要: 摩擦摆隔震系统(FPS)由于其独特的结构形式,具有限位、自动复位以及通过滑动摩擦消耗地震能量等优点,能有效地减少地震作用对上部结构的影响,隔震效果明显,因此近年来得到广泛的应用。为了更深入地研究摩擦摆隔震系统的隔震效果及其影响因素,基于摩擦摆隔震系统的基本特性与隔震机理,利用隔震计算专用软件 3D - BASIS - ME 对隔震框架结构在不同地震波作用下的隔震效果进行了分析计算,与文献试验结果进行对比,发现数值结果与试验结果吻合良好,从而验证了 3D - BASIS - ME 软件计算的准确性与可行性,在此基础上对不同合成刚度的摩擦摆隔震系统的隔震效果进行数值分析,并确定了隔震效果最佳时,隔震系统的刚度范围,其结论可为实际工程的设计提供参考。

关键词: 摩擦摆隔震系统(FPS); 3D - BASIS - ME; 隔震效果; 系统刚度

中图分类号: TU352.12

文献标识码: A

文章编号: 1672-1144(2016)05-0080-05

Isolation Effects Analysis of Friction Pendulum System Based on 3D - BASIS - ME

XIAO Xiao, MENG Lin, XU Qi

(School of Civil Engineering, University of South China, Hengyang, Hunan 421001, China)

Abstract: Because of unique structure configuration and advantage of limit position, automatic reset, seismic energy consumption and other advantages of sliding friction, friction pendulum system (FPS) can effectively reduce the impact of the earthquake on the upper structure, so seismic isolation effect of FPS is obvious and it has been widely used in recent years. For more in-depth study of isolation effect of friction pendulum system and its influencing factors, based on the basic characteristic and isolation mechanism of FPS, the special isolation calculation software 3D - BASIS - ME was adopted in this paper to analyze isolation effect of a certain isolation frame structure under different input seismic waves. Compared with the test results, the feasibility and accuracy of 3D - BASIS - ME program were verified. Then the vibration isolation effect of the friction pendulum isolation bearings system under different stiffness conditions with 3D - BASIS - ME program were analyzed, and the appropriate stiffness value range of vibration isolation systems under the best isolation effect were determined. The study shows that the numerical results from the 3D - BASIS - ME are in good agreement with experiment results and the research results provides reference for practical engineering design.

Keywords: friction pendulum system (FPS); 3D - BASIS - ME; isolation effect; system stiffness

摩擦摆隔震系统 FPS(Friction Pendulum System, FPS)是美国学者 Victor Zayas 首先于 20 世纪 80 年代提出的一种经过改良的摩擦滑移隔震装置。该装置利用圆弧形滑动面来实现限位、自动复位等功能,

并利用滑动摩擦来消耗地震能量,以减小上部结构的地震作用,从而达到隔震效果^[1-5]。因此摩擦摆隔震支座系统由于隔震原理独特、施工简便、隔震效果具有较强稳定性和可靠性等优点,越来越受到工

收稿日期:2016-06-01

修稿日期:2016-07-24

基金项目:国家自然科学基金项目(51574151);国家安监总局安全生产重大事故防治关键技术科技项目(hunan - 0021 - 2015AQ);湖南省科技计划项目(2014GK3111);湖南省教育厅重点项目(15A163);衡阳市科技发展计划项目(2014KS24)

作者简介:肖潇(1968—),男,湖南衡阳人,博士,副教授,主要从事结构抗震和空间结构研究。E-mail:brightxiao@163.com

程界的欢迎^[6-9]。据统计,目前世界上已建成了几百座摩擦摆基础隔震建筑。Jangid R S^[10]对地震作用下最优摩擦摆隔震系统进行了研究;Becker T C 等^[11]提出了一种三重摩擦摆隔震支座非线性运动学模型;学者 Quaglini V 等^[12-16]对摩擦摆隔震结构进行了深入研究,特别是在 FPS 结构的工程设计方面。

我国第一个对 FPS 隔震装置进行地震振动台试验的是杨林等^[17]人。其研究表明:FPS 隔震装置不仅有效地延长了上部结构的自振周期,限制了过大的隔震层位移,而且具有自动复位的功能,隔震效果明显。涂劲松等^[18]通过模型振动台试验和数值仿真,对适用于高层建筑结构的大吨位摩擦摆隔震支座在不同地震荷载工况下的动力响应和隔震性能进行了深入研究,并总结了高层建筑结构的动力响应规律。

本文首先通过 3D - BASIS - ME 软件验算已有的 FPS 隔震模型的隔震效果,以验证软件在隔震计算中的准确性,然后通过 3D - BASIS - ME 软件分析计算摩擦摆隔震框架结构的隔震效果,确定影响其隔震效果的主要因素,以供实际工程的设计参考。

1 基本理论

1.1 FPS 的工作原理

摩擦摆隔震系统(FPS)是一种具有自复位能力的摩擦隔震体系,其消能的主要思路是通过安置在结构与基础之间或者上部结构与下部结构之间的 FPS 将结构物本身与地面隔离,在地震作用下,FPS 通过及时减小传递到结构的侧向力和水平位移,从而保护结构免受破坏。研究发现,在强震作用下,装有摩擦摆隔震支座的建筑可以使传递到结构的地震力有效降低 3~5 倍^[1]。

摩擦摆隔震装置的原理简图如图 1 所示,其装置是由滑道与滑块两部分构成,其中滑道是由一个不锈钢做的凹形球形表面,滑块是一个与滑道半径相同向下凸起的滑块,并在其表面涂有一层特殊的低摩擦材料,较常见的材料有聚四氟乙烯。其工作原理是将滑块置于凹形曲面中部,类似单摆运动,当受到外力作用时,滑块会沿圆弧面滑动,使得上部结构稍微抬高,而当外力消失时,滑块又会在上部结构的自重作用下自动滑到底部,这一过程也就是自动复位功能^[1-2]。同时这种装置也能有效地控制地震作用后结构的残余位移。图 2 为摩擦摆隔震系统计算模型的示意图。

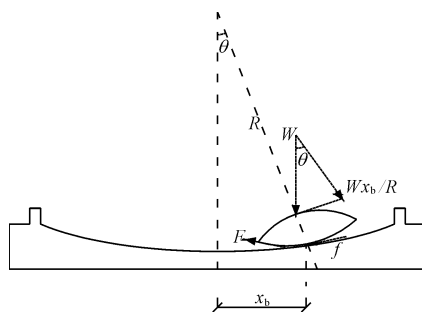


图 1 摩擦摆隔震系统原理简图

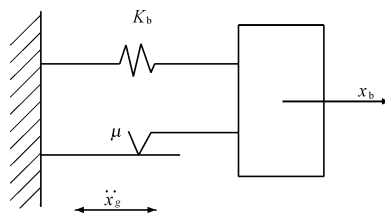


图 2 隔震系统计算模型图

假定图 1 上部结构的重量为 W ,圆弧滑动面半径为 R ,由力的平衡知,圆弧滑动面所受到的正压力为: $N = W \cos \theta$, 滑块的水平相对位移为 $x_b = R \sin \theta$, 滑块滑动摩擦力为 $f = \mu N \operatorname{sgn}(\dot{x}_b)$, 其中, μ 为摩擦摆支座滑块的滑动摩擦系数, $\operatorname{sgn}(\dot{x}_b)$ 为符号函数:

$$\operatorname{sgn}(\dot{x}_b) = \begin{cases} 1 & \dot{x}_b > 0 \\ -1 & \dot{x}_b < 0 \end{cases} \quad (1)$$

假设计算中取静力平衡位置为圆弧形滑道中滑块的初始静止位置,则由力的平衡关系,得到 FPS 隔震支座的水平恢复力为:

$$F = \frac{W x_b \cos \theta}{R} + f \cos \theta \quad (2)$$

式中: θ 表示滑块在圆弧形滑道上相对于滑道竖向对称轴所滑动的角度,其方向以逆时针滑动为正。当滑动的角度很小时, $\cos \theta \approx 1$, 则式(2)成为:

$$F = \frac{W x_b}{R} + \mu N \operatorname{sgn}(\dot{x}_b) \quad (3)$$

式中: $\frac{W x_b}{R}$ 表示滑块沿曲面滑动上升而产生的水平侧向恢复力, $\mu N \operatorname{sgn}(\dot{x}_b)$ 是滑块在圆弧面上滑动产生的摩擦力。

令

$$K_b = \frac{W}{R} \quad (4)$$

式中: K_b 为 FPS 的侧向刚度,代入式(3)得:

$$F = K_b x_b + \mu N \operatorname{sgn}(\dot{x}_b) \quad (5)$$

1.2 3D - BASIS - ME 软件及隔震验证

3D - BASIS - ME 软件是专门针对隔震结构非

线性动态分析,由美国 Buffalo 大学开发设计的。该软件既能分析独栋隔震建筑也能分析多栋复合隔震建筑,还能用于储液罐系统的动态分析。3D - BASIS - ME 软件操作简单,计算地震反应时,只需输入整个结构控制参数、上部结构参数以及隔震支座相关参数,编写 3DBME. DAT 文件,并将 3DBME. DAT 文件、地震波输入文件(根据具体分析情况) WAVEX. DAT、WAVEY. DAT、WAVEZ. DAT 以及程序执行文件 3DBME. exe 放入同一个文件夹中,点击程序执行文件即可计算得出结果。

对于隔震结构,计算隔震系统的动力反应时一般情况下可假定上部结构为一刚体,如图 3 所示。该模型有三个自由度,分别是垂直、水平和绕刚体形心转动的自由度,在地震作用下,系统运动方程为:

$$\begin{bmatrix} M & 0 & 0 \\ 0 & M & 0 \\ 0 & 0 & J \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{X}_v \\ \ddot{X} \\ \ddot{\theta} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} C_{11} & 0 & 0 \\ 0 & C_{22} & C_{23} \\ 0 & 0 & C_{33} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{X}_v \\ \dot{X} \\ \dot{\theta} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} K_{11} & 0 & 0 \\ 0 & K_{22} & K_{23} \\ 0 & K_{32} & K_{33} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} X_v \\ X \\ \theta \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} M & 0 & 0 \\ 0 & M & 0 \\ 0 & 0 & J \end{bmatrix} \ddot{X}_g \quad (6)$$

式中: M 为隔震房屋某个单元的总质量; J 为该模型绕形心的转动惯量; $\ddot{X}_v, \dot{X}_v, X_v$ 分别为模型形心处的竖向加速度、速度和位移; \ddot{X}, \dot{X}, X 分别为模型形心处的水平加速度、速度和位移; $\ddot{\theta}, \dot{\theta}, \theta$ 分别为该模型绕形心处转角加速度、转角速度和转角。

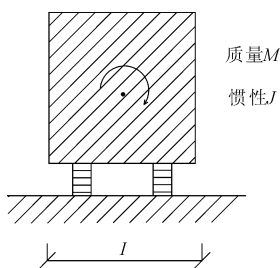


图 3 隔震计算简化模型

本文首先用 3D - BASIS - ME 软件计算文献 [19] 中的结构模型,该模型为一四层钢框架,总高 2.2 m,层高 0.55 m,隔震层质量为 880 kg,模型第 1 层、2 层质量均为 980 kg,模型第 3 层、4 层质量分别为 850 kg 和 370 kg,总质量为 4 060 kg。层间剪切刚度为 428 kN/cm。不隔震时,周期为 0.07 s,自振频率为 14.286 Hz,阻尼比为 0.02。采用 FPS 摩擦摆隔震支座,并分别输入 El Centro 波和天津波,对隔震结构模型进行地震反应计算。得到各楼层的最大加速度放大倍数曲线(如图 4、图 5 所示)和各楼层层

间位移曲线(如图 6、图 7 所示)。

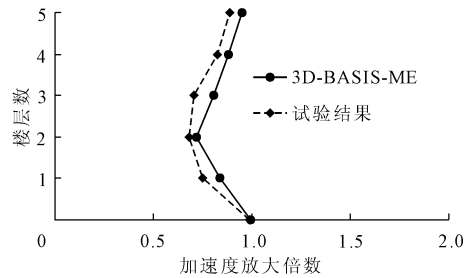


图 4 输入 El Centro 波时加速度放大倍数

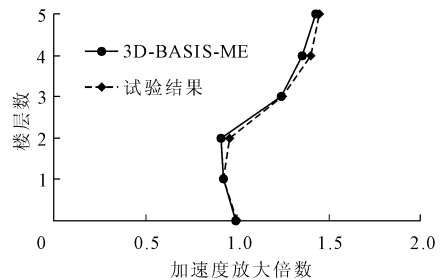


图 5 输入天津波时加速度放大倍数

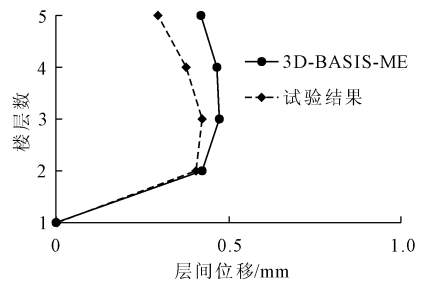


图 6 输入 El Centro 波时层间位移曲线

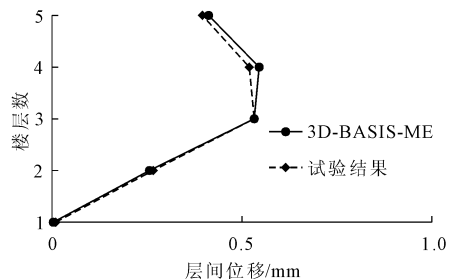


图 7 输入天津波时层间位移曲线

从上面曲线图的对比可以看出,3D - BASIS - ME 软件计算的隔震结构地震反应特性与试验结果基本吻合,证明 3D - BASI - ME 软件可以用于计算隔震结构的地震反应。

2 FPS 隔震效果分析

2.1 模型设计

假定一四层钢框架模型如图 8 所示,拟对其进行地震反应分析。该模型总高度 15.5 m,基础层高 2.5 m。隔震支座采用 FPS 摩擦摆隔震支座,整个隔

震系统 X、Y 和转动方向 3 个方向的合成刚度分别为 400 N/m、400 N/m、121 188 853.0 N/m。

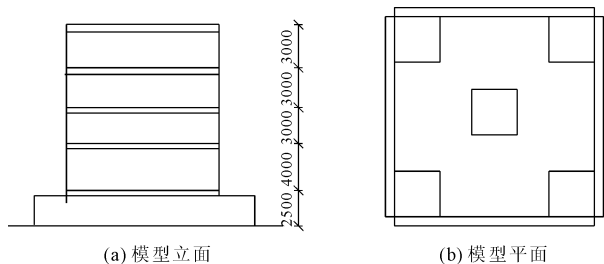


图 8 四层钢框架模型简图

2.2 不同地震波作用下 FPS 隔震结构地震反应分析对比

大量的隔振研究表明^[20],隔震建筑较适合建在硬土地地上,因此本文选用 3 条反映不同硬土地地的地震波(均为二类场地)进行分析,这 3 条波分别是唐山-北京饭店处地震波(N-S、E-W),El Centro 波(N-S、E-W)和 Taft 波(N-S、E-W),这三种地震波分别代表小、中、强地震波。其地震加速度峰值以及持续时长见表 1。

表 1 地震波参数对应表

地震波类型	时间步长/s	持续时间/s	加速度峰值/g
唐山波	0.01	49.22	0.10
Taft 波	0.02	54.38	0.20
El Centro 波	0.02	53.73	0.35

分别对模型施加三种地震波,计算隔震与不隔震情况下结构的地震反应。通过相同刚度条件下的隔震效果平均值来反映摩擦摆隔震支座的隔震效

表 2 FPS 隔震模型在各刚度条件下最大位移

地震波类型	不同刚度下最大位移/mm							
	150	200	250	300	350	400	450	500
唐山波	2.56	2.47	1.39	1.38	2.52	2.53	1.38	1.39
Taft 波	135.00	171.00	190.00	207.00	218.00	225.00	226.00	234.00
El Centro 波	826.00	725.00	689.00	941.00	994.00	872.00	838.00	847.00

从表 2 计算结果可以看出,结构在三种地震波作用下的最大位移随刚度变化趋势分别如图 10(a)、图 10(b)、图 10(c)所示。

从图 10(a)可以看出,在唐山波作用下隔震系统刚度总的变化规律为先减小再增加,再减小,呈波浪形变化;在刚度分别为 300 N/m 和 450 N/m 时,结构位移取得最小值,当刚度超过 300 N/m 后结构位移有增大的趋势,当刚度达到 400 N/m 时,结构位移缓慢变小。从图 10(b)可以发现,在 Taft 波作用下,

果。图 9 反映了不同地震波作用下摩擦摆隔震结构隔震效果对比图。

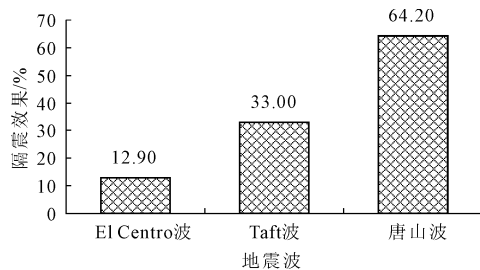


图 9 FPS 隔震结构效果图

从图 9 可以看出 FPS 隔震支座的隔震效果明显,特别是对于中小地震隔震效果尤为明显。对于唐山-北京饭店处地震波(峰值加速度 0.1 g)平均隔震效果超过 60%;对于 Taft 波(峰值加速度为 0.2 g)平均隔震效果达 33.0%;El Centro 波峰值加速度为 0.35 g,属于高强度的罕遇地震,平均隔震效果为 12.9%,虽然隔震效果略差,也体现出了隔震技术的优越性。

2.3 刚度对摩擦摆隔震支座隔震效果的影响

研究发现,体现隔震支座隔震效果的主要参数是隔震支座各个方向的合成刚度,因此有必要研究刚度对摩擦摆隔震支座隔震效果的影响。下面通过改变摩擦摆隔震支座的刚度大小分析比较隔震效果的变化情况。选用的刚度范围从 150 N/m ~ 500 N/m。分别计算在各刚度条件下模型的最大位移,以比较分析得出其最佳刚度值。计算结果如表 2 所示。

结构最大位移随隔震系统刚度增加而一直增大,但增大的趋势略有不同,以刚度 350 N/m 为分界点,先剧烈后平缓。而在 El Centro 波作用下(如图 10(c)所示)刚度值的变化类似于唐山波作用下位移的变化,只是变化的幅度更大,当刚度为 250 N/m 时取得最大位移的最小值 689 mm。综合以上结果可以初步得出结论,当隔震系统刚度接近 250 N/m 时,结构模型各地震波下的最大位移都较小,隔震效果较理想。

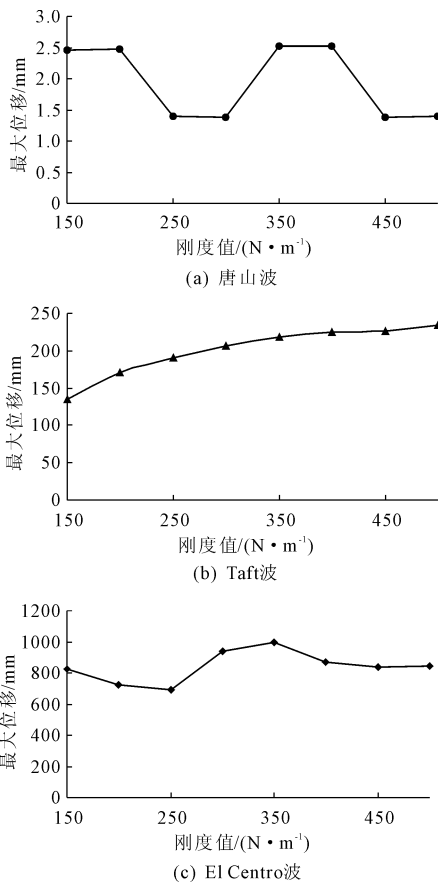


图 10 不同地震波作用下位移随刚度变化曲线

采用上述相同的方法,通过改变建筑高度,施加不同的地震波,计算结构最大位移最小时所对应的刚度值,其结果如表 3 所示。

表 3 各建筑高度所对应的最佳刚度值

建筑高度/m	10.0	15.5	20.0	30.0	35.0	50.0
最佳刚度 ($N \cdot m^{-1}$)	240	250	250	250	280	280

从表 3 可以看出当结构高度低于 30.0 m 时,最佳刚度值大都在 250 N/m,当结构高度超过 30.0 m 后,最佳刚度随结构高度增大有所增加。

3 结论

本文通过与文献[19]试验验算对比,证明了 3D - BASIS - ME 软件在隔震验算中的准确性与可行性。并通过对一四层钢框架结构模型分别用摩擦摆隔震支座隔震与不隔震的情况下不同地震波作用分析计算,其重要结论如下:

(1) 摩擦摆隔震系统对控制结构地震反应有较理想的效果,加之摩擦摆隔震支座便于施工,有较强的稳定性和可靠性等优点,使其具有一定的实际工

程意义。

(2) 摩擦摆隔震系统在小、中地震作用下隔震效果尤为显著,在实际工程中应充分利用其优点。

(3) 摩擦摆隔震系统受其刚度影响较大,由于隔震系统既要承受上部结构的重力,刚度不能过低;又要在地震来临时有可靠的变形能力,刚度不能过高,因此,每种结构都存在一个合适的刚度值,本文通过对不同高度的结构验算分析,从表 3 可以看出当结构高度不超过 30 m 时,刚度值接近 250 N/m 时,隔震效果最理想。

参考文献:

- [1] 陈翠翠. 摩擦摆隔震支座的研究及发展应用[J]. 四川建材, 2013, 39(2): 81-82.
- [2] Amezquita - Sanchez J P. Vibration control on smart civil structures: A Review[J]. Mechanics of Advanced Materials and Structures, 2014, 21: 23-38.
- [3] 王社良, 曹晓辉. 框架结构层间滑移隔震结构隔震效果分析[J]. 水利与建筑工程学报, 2012, 10(5): 30-36.
- [4] 樊禹江, 樊禹彤, 苗晓瑜, 等. 基于新型压电摩擦阻尼器的大底盘隔震结构智能混合控制研究[J]. 水利与建筑工程学报, 2016, 14(1): 39-44.
- [5] Villaverde R. Recent advances in base isolation technology [J]. JSEE, 2011, 13(3/4): 209-218.
- [6] Fallahian M, Khoshnoudian F, Loghman V. Torsionally seismic behavior of triple concave friction pendulum bearing[J]. Advances in Structural Engineering, 2015, 18(12): 2151-2166.
- [7] Moeindarbari H, Taghikhany T. Seismic optimum design of triple friction pendulum bearing subjected to near-fault pulse-like ground motions[J]. Struct Multidisc Optim, 2014, 50(4): 701-716.
- [8] Shaikhzadeh A A, Karamoddin A. Effectiveness of sliding isolators with variable curvature in near-fault ground motions [J]. Struct. Design Tall Spec. Build, 2016, 25(6): 278-296.
- [9] Tsai C S, Su H C, Chiang T C. Equivalent series system to model a multiple friction pendulum system with numerous sliding interfaces for seismic analyses[J]. Earthq Eng & Eng Vib, 2014, 13: 85-99.
- [10] Jangid R S. Optimum friction pendulum system for near-fault motions[J]. Engineering structures, 2005, 27(3): 349-359.
- [11] Becker T C, Mahin S A. Experimental and analytical study of the bidirectional behavior of the triple friction pendulum isolator[J]. Earthquake Engng Struct. Dyn, 2012, 41(3): 355-373.

(下转第 109 页)

(上接第 84 页)

- [12] Quaglini V, Dubini P, Poggi C. Experimental assessment of sliding materials for seismic isolation systems [J]. Bull Earthquake Eng, 2012, 10(2):717-740.
- [13] Ray T, Sarlis A A, Reinhorn A M, et al. Hysteretic models for sliding bearings with varying frictional force[J]. Earthquake Engng Struct. Dyn, 2013, 42(15):2341-2360.
- [14] Castaldo P, Tubaldi E. Influence of FPS bearing properties on the seismic performance of base-isolated structures[J]. Earthquake Engng Struct. Dyn, 2015, 44(15):2817-2836.
- [15] Cardone D, Gesualdi G, Brancato P. Restoring capability of friction pendulum seismic isolation systems[J]. Bull Earthquake Eng, 2015, 13(8):1-32.
- [16] Murat Eröz, Reginald DesRoches. The influence of design parameters on the response of bridges seismically isolated with the Friction Pendulum System (FPS)[J]. Engineering Structures, 2013, 56(34):585-599.
- [17] 杨林,常永平,周锡元,等.FPS 隔震体系振动台试验与有限元模型对比分析[J]. 建筑结构学报, 2008, 29(4):66-72.
- [18] 涂劲松,李 珠,刘元珍.摩擦摆隔震支座振动台试验、数值仿真及应用研究[J]. 世界地震工程, 2014, 30(2):237-246.
- [19] 杨林,周锡元,苏幼坡,等.FPS 摩擦摆隔震体系振动台试验研究与理论分析[J]. 特种结构, 2005, 22(4):1-4.
- [20] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑抗震设计规范:GB50011-2010[S]. 北京:中国建筑工业出版社, 2010.