

邹爽, 井上范夫, 五十子幸树. 滑移隔震结构设置连接摩擦阻尼器的地震反应研究[J]. 华南地震, 2017, 37(2): 86-91. [ZOU Shuang, INOUE Norio, IKAGO Kohju. Analysis and design of the combined isolation in high-rise frame core tube structure near field earthquake zone of high intensity [J]. South china journal of seismology, 2017, 37(2): 86-91.]

滑移隔震结构设置连接摩擦阻尼器的地震反应研究

邹爽¹, 井上范夫², 五十子幸树³

(1. 广州大学工程抗震研究中心, 广州 510006; 2. 日本东北大学 工学研究科, 宫城 仙台 9808579;

3. 日本东北大学 灾害科学国际研究所, 宫城 仙台 9808579)

摘要: 针对罕遇地震作用下, 滑移隔震结构滑移量过大控制力不足的问题, 提出了带有连接部件, 控制滑移隔震结构过大滑移量的被动控制装置-连接摩擦阻尼器。研究滑移隔震结构附加连接摩擦阻尼器时的地震反应情况, 并通过实际算例分析表明: 滑移隔震结构附加连接摩擦阻尼器能够在不削弱滑移隔震支撑对中小地震控制效果的基础上, 有效地控制大震以及罕遇地震作用时, 隔震层的最大滑移量和上部结构的响应加速度。验证了滑移隔震结构附加连接摩擦阻尼器的有效性和适用性。

关键词: 基础隔震, 滑移隔震, 摩擦阻尼器, 地震反应, 滑移

中图分类号: TU311.3

文献标志码: A

文章编号: 1001-8662 (2017) 02-0086-07

DOI: 10.13512/j.hndz.2017.02.014

Research on Seismic Responses of Friction Damper with Coupling Mechanism for Sliding Isolation Structures

ZOU Shuang¹, INOUE Norio², IKAGO Kohju³

(1. *Earthquake Engineering Research Test Center, Guangzhou University, Guangzhou 510405 China;*

2. School of Engineering, TOHOKU University, Sendai 9808579, Japan; 3. International Research Institute of Disaster Science, TOHOKU University, Sendai 9808579, Japan)

Abstract: In order to solve the problem, that slip excessive and inadequate control of sliding isolation structure when rare earthquake happen, a new device for controlling seismic displacement of sliding isolation structure by the means of a friction damper with coupling mechanism is created. Earthquake responses of sliding isolation structure with friction damper with coupling mechanism was researched. And through practical case study, that sliding isolation structure with friction damper with coupling mechanism can not weaken the control effect of sliding support for small earthquake, while controlling the maximum displacement of slip and the maximum

收稿日期: 2017-03-23

基金项目: 广东省自然科学基金项目(2016A030310255)

作者简介: 邹爽 (1984-), 女, 博士, 助理研究员, 从事建筑减隔震研究。

E-mail: zoushuang_2015@163.com.

acceleration of the upper structure for rare earthquake effectively. Verify that the sliding isolation structure with friction damper with coupling mechanism is effective and applicable.

Keywords: Base-isolated structure; Sliding isolation; Friction damper; Seismic response; Sliding

0 前言

基础隔震技术是近年来一种发展较快的抗震技术^[1-6]。因其经济、适用和可靠的抗震控制措施,在国内外得到了广泛的工程应用和发展。基础隔震技术是基于耗能和滤波原理来阻断或减少地震波向上部结构传播的被动控制系统^[7]。其中,基础滑移隔震技术因其具有简单易行、造价低廉受地面运动频率的影响较小,几乎不发生共振现象;发生滑移位移后,不影响竖向承载能力、减小上部结构的层间相对位移和内力等优点,而得到广泛的认可和长足的发展,形成了结构控制的新趋势。基础滑移隔震的基本原理是在建筑物的上部结构与基础之间设置滑移隔震装置及限位装置组成的隔震层;当发生一定强度的地震时,上部结构相对于基础整体水平滑动,通过隔震层的滑动隔离传向上部的地震力,限制由基础传递到上部结构的摩擦力及输入上部结构的地震能量,通过隔震层的位移变形,大大减小了上部结构的地震反应^[8-13]。但是,建筑物底部提供的摩擦力有限,当发生超过设防标准的大地震时,滑移隔震建筑的隔震层会发生过大的位移,甚至导致隔震主体结构与周围维护结构发生碰撞破坏^[14-16]。2011年日本东北大地震中,观测到的最大隔震层位移达到 0.335 m,超过设计中规定的 0.300 m 的隔震层预留安全距离^[7]。滑移量过大,对于滑移隔震系统来说,其负面问题就显得特别关键,从而造成了滑移隔震体系难以推广应用。

本文旨在分析滑移隔震结构隔震层滑移量过大导致负面问题产生的原因,介绍用于控制过大滑移量产生的连接摩擦阻尼器,研究滑移隔震结构附加连接摩擦阻尼器时的地震反应情况,并通过实际算例验证滑移隔震结构附加连接摩擦阻尼器的有效性和适用性。

1 隔震层的衰减特性

1.1 模型的建立

隔震体系的力学模型近似描述在一定条件下隔震体系的动力特性。隔震体系模型化的主要依

据是结构的整体变形特点、弹塑性动态分析的研究经验和实验研究的结果。本节主要研究隔震层响应位移与隔震层控制效果的关系。由于隔震建筑上部结构的层间位移相对于隔震层位移而言很小,因此,本节研究中忽略上部结构的影响,将隔震层上部结构简化为单质点系,选用 1 个自由度模型,见图 1,并对该模型进行如下假定:

- (1) 将隔震体系上部结构视为线弹性体。
- (2) 仅考虑水平方向地震作用,结构发生剪切变形。
- (3) 忽略动力作用对建筑基底与基础之间的摩擦系数的影响,将其视为常量,并符合库伦摩擦力定律。

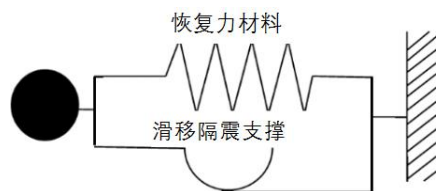


图 1 分析模型

Fig.1 Analysis model

1.2 隔震层的衰减特性

如图 1 所示的滑移隔震分析模型中,隔震层由滑移隔震支撑和恢复力材料构成。地震发生时,安装在隔振层中的滑移隔振支撑和恢复力材料发挥衰减作用。假定滑移隔震支撑的初始刚度无限大,隔震层的衰减特性可用刚塑性恢复力模型表示,见图 2,基于此可求得隔震层对整体结构的等价衰减系数 heq 。

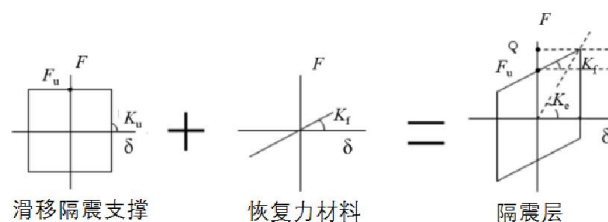


图 2 滑移隔震层刚塑性模型

Fig.2 Rigid-plastic model of slip isolation layer

$$h_{eq} = 0.8 \cdot \frac{1}{4\pi} \cdot \frac{\Delta W}{W} \quad (1)$$

$$\Delta W = 4 \cdot F_u \cdot \delta \quad (2)$$

$$W = \frac{1}{2} \cdot k_e \cdot \delta \quad (3)$$

$$k_e = k_f + \frac{F_u}{\delta} \quad (4)$$

$$F_u = \mu \cdot m \cdot g \quad (5)$$

将式(2)、(3)、(4)、(5)带入式(1)可得

$$h_{eq} = 0.8 \cdot \frac{1}{4\pi} \cdot \frac{4F_u\delta}{\frac{1}{2} \left(k_f + \frac{F_u}{\delta}\right) \delta^2} = \frac{2F_u}{\pi (F_u + k_f \delta^2)} \quad (6)$$

根据式(6)可绘制等价黏性衰减系数与隔震层位移的变化关系,见图3。由图可知隔震层的等价黏性衰减系数随着隔震层位移变大而逐渐降低。因此,随着隔震层位移的增大,滑移隔震支撑对整体的控制作用不足的缺陷也被放大,甚至会引起上部结构与周围维护结构之间发生碰撞破坏。这也是造成了滑移隔震体系难以推广应用的主要原因之一。

2 连接摩擦阻尼器的提出^[18]

为了弥补超过设防的罕遇大地震作用时,滑移隔震结构隔震层控制力不足的缺陷,一味地增大隔震层的衰减性能,又会增大上部结构的响应加速度,降低滑移隔震在中小地震作用下的控制

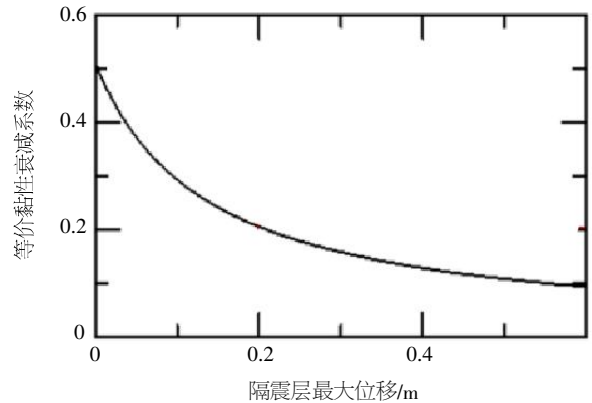


图3 隔震层等价衰减系数

Fi.3 Equivalent attenuation coefficient isolation layer

性能。针对这一矛盾,2009年日本东北大学井上教授等人研发了一种带有连接部件,控制罕遇地震作用时,滑移隔震层发生过大位移的被动控制装置-连接摩擦阻尼器(以下称FDC),见图4。

FDC由摩擦和连接两部分组成。摩擦部分由内部摩擦拉杆、摩擦套筒以及两侧螺旋弹簧构成。内部摩擦拉杆和摩擦套筒之间的相互摩擦产生摩擦力。可以人为调节摩擦套筒紧箍内部摩擦拉杆的程度来调节摩擦力的大小。两侧螺旋弹簧提供连接时的弹性初始刚度,缓冲由于连接而产生的冲击作用。连接部分是由外部拉杆和内部摩擦拉杆构成。FDC一旦连接非人力作用连接不再断开。阻尼器的连接距离可人为设定。

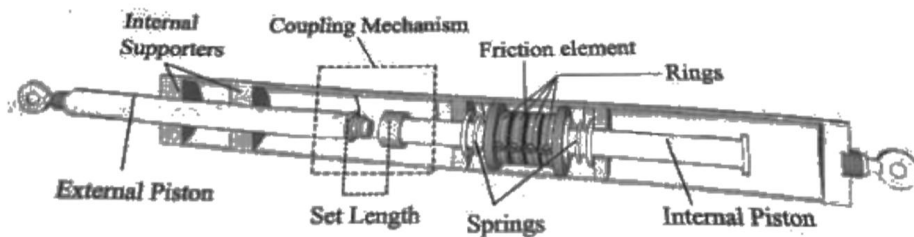


图4 FDC构造图

Fig.4 Structure of FDC

FDC在整个工作过程中分为2个阶段。

(1) 连接前: FDC变形小于设定连接距离 L_s , FDC不发挥作用,见图5a。

(2) 连接后: 当FDC的变形超过设定连接距离 L_s 时,见图5b,外部拉杆和内部摩擦拉杆发生连接,并传递内部摩擦拉杆上产生的摩擦力。当内部摩擦拉杆上产生力的作用时,首先摩擦部分的2根螺旋弹簧发生伸缩,发挥弹性恢复力的作用。当内部摩擦拉杆上产生的作用力大于摩擦部分设定的摩擦力 F_d 时,摩擦套筒和内部摩擦拉杆

之间开始发生相对滑动,产生摩擦力。基于此工作原理,FDC具有如图6所示的完全弹塑性的恢复力特征,并能够缓解由于FDC发生连接而产生的冲击作用,抑制高频振动的响应。

3 连接摩擦阻尼器附加振动反应算例分析

通过算例分析连接摩擦阻尼器附加振动反应特征,目的是探讨连接摩擦阻尼器对滑移隔震结

构地震响应的控制效果,进而证明连接摩擦阻尼器的有效性和适用性。

3.1 计算模型

取某 4 个质点滑移隔震体系分析,见图 7。各质点质量、水平侧移刚度,见表 1。上部结构的黏性衰减系数均为 3%,隔震层预留安全距离 0.35

m。滑移隔震支撑的摩擦系数为 0.04,固有周期为 4.06 s。

解析模型的振动特性见图 8。图 8a 所示为解析模型的振型系数,图 8b 所示为各阶振型的参与系数。FDC 的刚度 $K_d=1012.7\text{ kN/m}$,摩擦力 $K_d=34.3\text{ kN}$,设定连接距离 $L_s=0.104\text{ m}$ 。模型的建立满足 1.1 节中的假定。

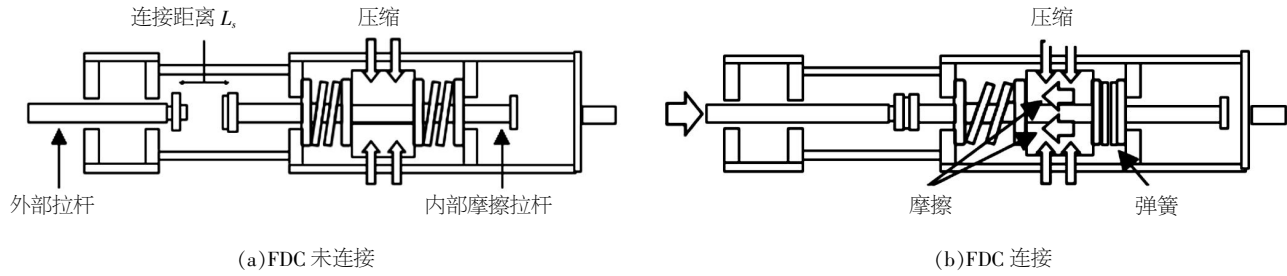


图 5 FDC 构造图
Fig.5 FDC mechanism

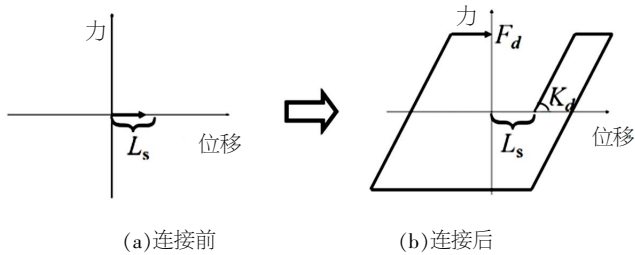


图 6 FDC 的力学模型
Fig.6 Restoring force model of the FDC

表 1 解析模型各层的质量、刚性		
Table 1 The quality, rigidity of each layer of analytical model		
层	质量/ton	水平刚度/(kN·m ⁻¹)
3	15	5 090
2	20	10 568
1	25	12 608
隔震层	15	182.2

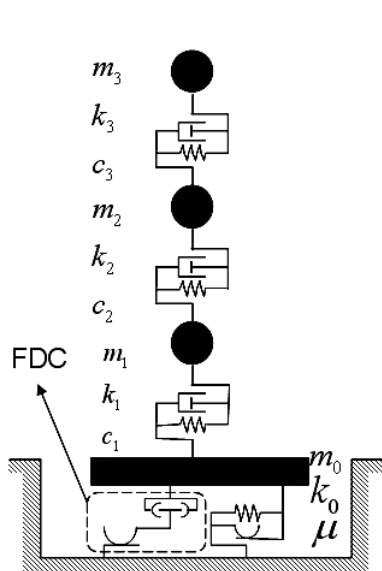


图 7 解析模型
Fig.7 Analytical model

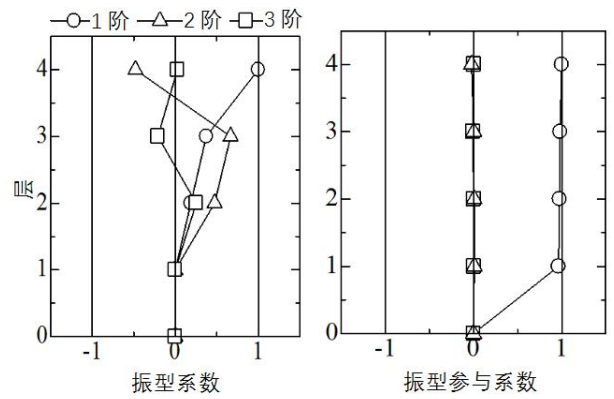


图 8 振动特性
Fig.8 Mode characteristics

3.2 输入地震动

地面输入激励见表 2。输入地震动采用 4 条实测地震波和具有相应地震特征的 5 条合成地震波。

5 条合成地震波是将 II 类场地的抗震设计反应谱(5%阻尼比)赋予相应实测地震记录的相位特性得到的。将实测地震波中的 El-Centro 波、八戸波、Taft 波分别调幅为 $PGV=0.25\text{ m/s}$ 作为多遇地震来考虑, $PGV=0.50\text{ m/s}$ 作为设防地震来考虑, $PGV=0.75\text{ m/s}$ 作为罕遇地震来考虑。5 条合成地震波作为大震来考虑。2011 年采集到的东日本大地震

MYG006 原始地震记录作为罕遇地震来考虑。图 9 所示为 5 条合成地震波的加速度反应谱。以下的解析中,分别输入以上所述多遇地震、设防地震和罕

遇地震动进行时程响应分析,对各地震动输入情况下结构的最大响应值进行评价。地震时程响应分析采用 Newmark- β 法中 $\beta=1/4$ 的平均加速度法。

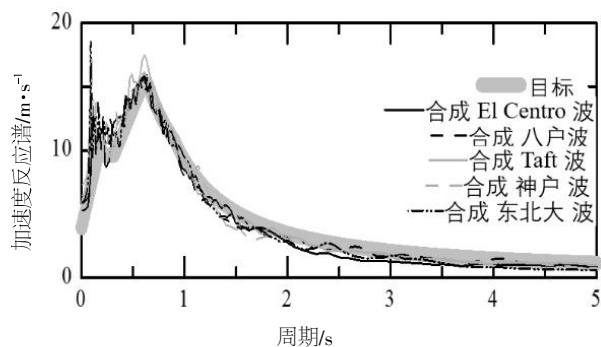


图 9 拟加速度反应谱

Fig.9 Acceleration response spectrum of artificial ground motion

3.3 解析结果

3.3.1 隔震层等价黏性衰减系数

图 10 所示为按照公式(6)忽略上部结构多质点的影响,将隔震层上部结构简化为单质点系求得的滑移隔震结构和滑移隔震结构附加 FDC2 种情况下,隔震层的等价黏性衰减系数与隔震层位移的关系。由图 10 可知,当隔震层位移达到 FDC 连接距离 0.10m 时, FDC 开始发挥作用,隔震层的等价黏性衰减系数由原来的 39%增加到 49%。在隔震层与周围维护结构预留安全距离 0.35m 处,隔震层的黏性衰减系数增加了 60%。

表 2 输入地震动

Table 2 Input ground motion

类型	输入地震动	表记
实测波	1940 年 Imperial Valley El-Centro NS 记录	El-Centro 波
	1968 年十勝沿海地震 八戸港湾事务所 EW 记录	八戸波
	1952 年 Kern County 地震 Taft EW 记录	Taft 波
	2011 年东日本沿海地震 K-net 古川 EW 记录	MYG006 波
合成波	合成 El-Centro 相位	合成 El-Centro
	合成八戸相位	合成八戸波
	合成神户相位	合成神户波
	合成 Taft 相位	合成 Taft 波
	合成东北大相位	合成东北大波

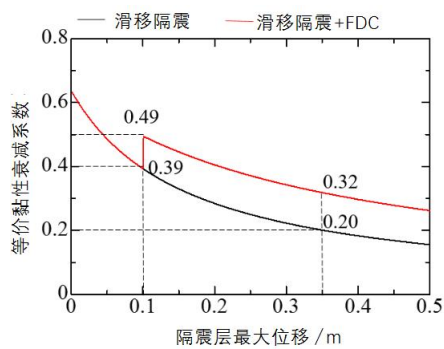


图 10 等价黏性衰减系数-隔震层位移关系

Fig.10 The relationship between equivalent viscous damping coefficient and seismic isolation layer displacement

3.3.2 结构最大响应值

各地震输入时滑移隔震结构和滑移隔震结构附加 FDC2 种情况下,结构最大响应值如表 3 所示。中震作用时, FDC 没有发生连接,结构的最大响应值没有变化。仅靠滑移隔震支撑就能起到较好的位移和加速度控制效果。大震作用时, FDC

开始发挥作用,结构的最大响应位移被减小了 24.7%,但是作为牺牲上部结构的最大加速度被放大了 18.3%。罕遇地震作用时,由于滑移隔震支撑控制力不足,隔震层最大响应位移超过了隔震层与周围维护结构之间的预留安全距离,存在着与周围维护结构之间发生碰撞破坏的危险。而隔震层附加了 FDC 后,不仅隔震层最大响应位移被降低了 13.0%,上部结构的最大响应加速度也被减小了 19.4%。

3.3.3 时程响应曲线

图 11 所示为 2011 年东日本大地震输入时,滑移隔震结构和滑移隔震结构附加 FDC2 种情况下,结构的时程响应曲线。由图可知,在第 87.5s 时刻,隔震层的最大响应位移达到 0.10 m, FDC 发生连接开始发挥作用。此后,便与滑移隔震支撑共同发挥作用,不但将隔震层的最大响应位移控制在安全距离之内,顶层和隔震层的响应加速度也被有效地抑制。

表 3 最大响应值
Table 3 Analysis result

隔震层	D_{\max} 多遇/m	A_{\max} 多遇/($\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$)	D_{\max} 设防/m	A_{\max} 设防/($\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$)	D_{\max} 罕遇/m	A_{\max} 罕遇/($\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$)
滑移隔震	0.068	2.67	0.278	3.50	0.357	4.99
滑移隔震+FDC	0.068	2.67	0.223	4.14	0.316	4.18

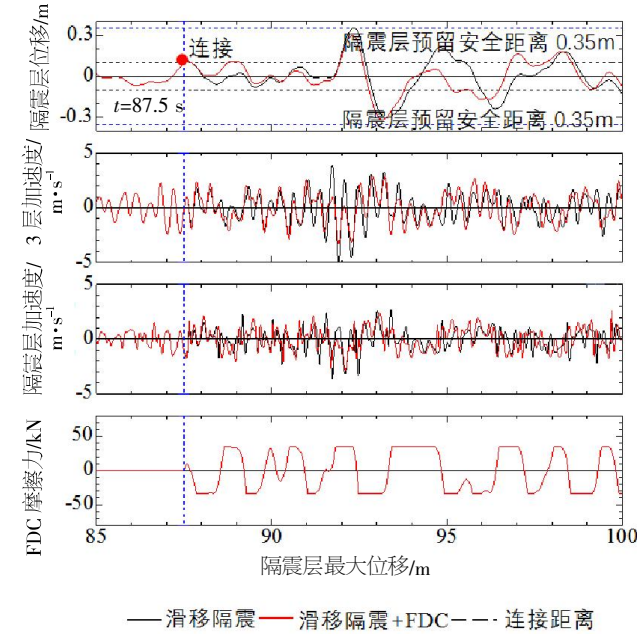


图 11 地震响应时程曲线(东北大地震波输入)
Fig.11 Time history

4 结语

针对滑移隔震结构随着隔震层位移量的增大,对整体的控制效果不理想的问题,本文介绍了用于控制滑移隔震结构隔震层过大滑移量的连接摩擦阻尼器的构造及工作原理,并通过实际算例分析表明,通过在滑移隔震层附加合适的连接摩擦阻尼器,能够在不削弱滑移隔震对中小地震控制性能的基础上,有效地控制大震和罕遇地震作用时,隔震层过大位移和上部结构响应加速度。验证了在滑移隔震结构隔震层附加连接摩擦阻尼器的有效性和适用性。

参考文献:

[1] 日本抗震构造协会编. 图解隔震结构入门[M]. 北京: 科技出版社.OHM 社, 1998.
[2] 武田寿一. 建筑隔震防震与控振[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1997.
[3] 唐家祥, 刘再华. 建筑结构基础隔震[M]. 武汉: 华中理工大学出版社, 1993.
[4] 苏经宇, 曾德民. 我国建筑结构隔震技术的研究与应用[J]. 地震工程与工程振动, 2001, 21 (4): 94-101.

[5] NAEIM F, Kelly J M. Design of seismic Isolated structure. From Theory to Practice[M]. New York: John Wiley and Sons inc, 1999.
[6] SKINNER R I, Robino W H, Mc Verry G H. An introduction to seismic Isolation [M]. New York: John Wiley and sons inc, 1993.
[7] 易方民, 高小旺, 苏经宇. 建筑抗震设计规范理解与应用[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2001.
[8] 毛利军, 李爱群. 建筑物滑移基础隔震结构的基本体系分解法[J]. 东南大学学报, 2005, 35 (2): 284-285.
[9] 邹爽, 池永昌, 容, 五十子幸树, 等. 连接型摩擦阻尼器对基础隔震结构地震响应位移控制的试验研究[J]. 华南地震, 2016, 36 (4): 97-103.
[10] 郑黎. 基础隔震技术与应用[J]. 江苏建筑, 2002 (1): 46-48.
[11] 吴兵, 冯沛芸. 中国隔震技术浅析[J]. 深圳大学学报, 2003, 20 (2): 79-81.
[12] 韩淼, 王秀梅. 基础隔震技术的研究现状[J]. 北京建筑工程学院学报, 2004, 20 (2): 11-13.
[13] 李红梅, 魏建国. 摩擦滑移隔震结构的减震分析[J]. 河北农业大学学报, 2002, 25 (3): 102-103.
[14] Arinori n, Iizuka m, Takanaka y, et al. Shaking Table Tests on Ultimate Behavior of Slender Base-Isolated Buildings-Part6: Effect of stopper on ultimate behaviors (in Japanese) [J]. Summaries of Technical Papers of Annual Meeting, Architectural Institute of Japan, 2000 (B-2): 649-650.
[15] Kajiit, Sakatani m, Hisada y. The elasto-plastic response analysis of seismically isolated structure in consideration of the collision (in Japanese) [J]. Summaries of Technical Papers of Annual Meeting, Architectural Institute of Japan, 2000 (B-2): 527-528.
[16] Kashiwa h, Nakayasu n, Nakashima m. Response and damage of base-isolated buildings subjected to very large earthquakes (in Japanese)[J]. Journal of Structural Engineering, Architectural Institute of Japan, 2005, 51B: 237-246.
[17] Iiba m., Azuhata t, Inoue n, et al. Behavior of seismically isolated structures for houses by the 2011 off the pacific coast of Tohoku earthquake, Part2 Field investigation and correlation between displacement and ground motion (in Japanese)[J]. Summaries of Technical Papers of Annual Meeting, Architectural Institute of Japan, 2012 (B-2): 513-514.
[18] Inoue n, Ikago k. Displacement control design - design method of seismic isolation, long-period buildings against earthquakes[M]. Japan: Maruzen Publishing, 2012.