

运用防屈曲支撑的混凝土框架结构的抗震性能研究^①

赵 杰¹, 孙晓艳¹, 霍林生²

(1.大连大学 土木工程技术与开发中心,辽宁 大连 116622; 2.大连理工大学 建设工程学部,辽宁 大连 116023)

摘要:简要介绍地震安全社区的实现途径以及防屈曲支撑的构成和性能参数。运用 ABAQUS 软件对有无安装防屈曲支撑的钢筋混凝土框架模型进行动力时程分析,总结分析防屈曲支撑对钢筋混凝土框架结构的减震效果。结果表明,防屈曲支撑能大大降低钢筋混凝土框架结构在罕遇地震作用下的层间位移角,提高建筑物抗震性能,使地震安全社区中抗震设防烈度为Ⅷ度的建筑物能够抵御Ⅷ度罕遇地震。

关键词:抗震性能; 设防烈度; 防屈曲支撑; 减震; 弹塑性动力时程分析

中图分类号: TU394⁺.2

文献标志码: A

文章编号: 1000-0844(2015)01-0100-06

DOI: 10.3969/j.issn.1000-0844.2015.01.0100

Seismic Performance of Concrete Frame Structures with Buckling-restrained Braces

ZHAO Jie¹, SUN Xiao-yan¹, HUO Lin-sheng²

(1. *Research and Development Center of Civil Engineering Technology, Dalian University, Dalian, Liaoning 116622, China;*

2. *Faculty of Infrastructure Engineering, Dalian University of Technology, Dalian, Liaoning 116023, China*)

Abstract: This article briefly introduces the seismic safety community and the composition and performance parameters of buckling-restrained braces. The seismic safety community is the community that experiences small destructive earthquakes. Specifically, these communities have carried out effective seismic fortification of all buildings in compliance with seismic hazard regulations. In the seismic safety community, improving the seismic performance of buildings is the primary goal. Local seismic fortifications meet the minimum seismic requirements, and the level of fortification of buildings is increased using certain technical measures. The traditional method of seismic fortification is to increase the size of major structural components, such as beams, columns, and shear walls, and to improve the ratio of reinforcements to buildings. However, increasing the amount of material increases cost and reduces the usable area of buildings. The new method calls for change to the seismic characteristics of the structure itself and improvements to its capacity for energy dissipation through the use of isolation and dissipation technologies. In the structural system, the seismic sections generally remain the same, and cost increases are small. Buckling-restrained braces have gained widespread application as measures for energy dissipation and earthquake resistance. They also overcome the disadvantages of traditional energy dissipation braces. The component's full section will yield during compression, effectively minimizing local buckling failure and overall buckling failure. Therefore, the energy dissipation capacity of the components is maximized and the seismic response of the structure is reduced. The Dalian Aonan

① 收稿日期: 2014-05-15

基金项目: 公益性行业科研专项经费项目(201508014); 大连市科技计划项目

作者简介: 赵 杰(1980—), 男, 河北邢台人, 讲师, 博士, 从事地下工程稳定分析和工程抗震研究. E-mail: zhaojie_gd@163.com

Mingxiu manor project described in the paper is a pilot project undertaken in the Dalian earthquake safety community. The project addresses building security and earthquake safety at the design stage. By installing buckling-restrained braces, the seismic characteristics of the structure itself are changed. To determine whether the structure can achieve the goals of seismic fortification, the project conducts an elastic-plastic analysis by installing buckling-restrained braces in the original frame structure. In this study, the ABAQUS software was used to conduct the dynamic and time-history analysis of two models of reinforced concrete framework: the origin structure and the structure with buckling-restrained braces added. The shock absorption effects of the buckling-restrained braces were analyzed. The results of the analysis showed that buckling-restrained braces could significantly reduce the inter-storey drift angle of a reinforced concrete frame during rare earthquakes and improve the level of seismic fortification buildings.

Key words: seismic performance; fortification intensity; buckling-restrained brace; shock absorption; elastic-plastic dynamic time-history analysis

0 引言

历史上大量破坏性地震(如唐山地震、汶川地震等)造成了严重人员伤亡^[1],为此 2009 年大连率先在全国提出建设“地震安全社区”的理念,把以往建设“安全社区”的理念提升到建设“地震安全社区”这样一个新的高度。在地震安全社区建设中,提高建筑结构的抗震性能是最核心的内容,要将当地的地震设防烈度视为最低抗震要求,通过一定技术措施适当提高社区建筑物的设防等级水平,主要有两种技术途径:

(1) 按照更高的设防烈度标准进行建筑结构体系的设计,加大受力结构部件(如梁、柱、剪力墙等)的几何尺寸,提高结构的配筋率等。但是,材料用量的增加使得造价提高、建筑使用面积减小,自重增加很大的同时对承载能力有了更高的要求。

(2) 应用隔震和消能减震技术^[2]改变结构自身的抗震特性,提高结构的耗能减震能力,结构体系中抗震构件截面一般不变,造价提高较少。

目前在建筑结构中安装软钢阻尼器、黏滞阻尼器、防屈曲支撑等都能起到良好的耗能效果,其中防屈曲支撑因具有良好的抗震性和经济性得到了广泛的应用。2000 年美国加州大学 Davis 分校植物与环境科学大楼采用 132 根屈曲约束支撑作为其抗侧力构件,成为美国第一栋采用屈曲约束支撑的结构。2008 年我国生产的 TJI 型屈曲约束支撑已经在上海世博中心、山西宾利国际商务公寓等一批建筑上得到了实际应用。本文所介绍的大连澳南·明秀庄园工程是大连地震安全社区建设中的一个试点项目,在设计阶段充分考虑了地震安全社区的建筑设防标准,对抗震规范规定的最低设防烈度下设计的建

筑物通过采用安装防屈曲支撑的消能减震技术来改变结构自身的抗震特性,使地震安全社区中抗震设防烈度为Ⅶ度的建筑物能够抵御Ⅷ度罕遇地震。

1 防屈曲支撑的构成

防屈曲支撑(BRB)克服了传统耗能支撑的弊端,由于增加了外包约束单元,内核元件在受压时会达到全截面屈服,能有效地控制支撑的局部屈曲破坏和整体屈曲破坏的发生,从而最大限度地发挥构件的耗能能力,减弱结构的地震反应^[3-4]。BRB 一般分为三部分:核心单元、约束单元及滑动机制单元(图 1)。

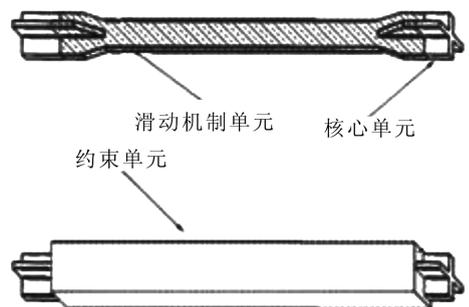


图 1 防屈曲支撑结构图

Fig.1 Buckling-restrained brace structure diagram

核心单元又称为主受力单元,是承受拉压作用并通过屈服而耗散地震能量的重要构件。约束单元又称侧向约束单元,主要作用是增强核心单元的抗弯刚度,避免核心单元在受压时产生低阶大幅值的屈曲变形,使之始终近似处于轴向受拉受压状态,最大程度地发挥防屈曲支撑的耗能能力。滑动机制单元又称脱层单元,该部分材料在核心单元与约束单元之间提供足够的滑动界面,从而使内芯钢材在受拉与受压时

尽可能有相似的力学性能,减小因核心单元与约束单元间产生握裹或摩擦力而造成的过大压力。

2 防屈曲支撑的性能参数

在实际应用中,屈曲支撑可视为一单纯轴力构件,它可由高低屈服强度钢板的使用及轴向各分段面积及长度比例的调整来达到所需的强度和刚度。以下分别介绍这些性能参数:

2.1 屈服承载力和极限承载力

支撑构件的屈服承载力 F_y 和极限承载力 F_{\max} 可表示如下:

$$F_y = A_c \cdot f_y \quad (1)$$

$$F_{\max} = \beta \cdot \Omega \cdot \Omega_k \cdot F_y \quad (2)$$

其中 A_c 为核心面积; f_y 为材料的屈服强度; β 、 Ω 、 Ω_k 分别反映最大轴压力与最大轴拉力之比、材料安全系数及应变硬化等效应的影响。试验结果证实 β 可取 1.1^[5], 而 Ω 及 Ω_k 可假设为 1.5。

2.2 名义屈服强度

文献[6]对安装屈曲支撑的结构模型进行了循环荷载试验,试验结果表明 BRB 的屈曲强度和外部混凝土套管或钢套管的挠曲强度有密切关系,建议 BRB 的名义屈服强度 P_b 可以用下式计算。

$$P_b = \frac{P_c}{1 + P_c \delta_0 M_y} = \frac{\pi^2 EI / L^2}{1 + (\pi^2 EI / L^2) \delta_0 M_y} \quad (3)$$

式中: E 为外部套管的弹性模量; I 为外部套管的惯性矩; L 为支撑长度; δ_0 为支撑初始缺陷(建议取 $L/1000$); M_y 为套管的名义屈服弯矩。

2.3 等效刚度

因为防屈曲支撑构件整体的截面积并非完全一致,而是包含连接段、过渡段和耗能段,因此防屈曲支撑构件的弹性刚度必须以此三段串联后的等效刚度来决定。连接段、过渡段、耗能段长度分别为 L_1 , L_2 , L_3 ; 面积分别为 A_1 , A_2 , A_3 ; 刚度分别为 K_1 , K_2 , K_3 , 钢材弹性模量为 E 。其中 $K = EA/L$, 则等效刚度为:

$$K = \frac{1}{\frac{1}{K_1} + \frac{1}{K_2} + \frac{1}{K_3}} = \frac{EA_1 A_2 A_3}{A_2 A_3 L_1 + A_1 A_3 L_2 + A_1 A_2 L_3} \quad (4)$$

3 工程实例计算

3.1 工程概况

该工程位于大连市中山区秀月街南侧,拟建楼

房为四层别墅,场地类别为 II 类,工程抗震设防烈度 VII 度,工作目标是通过消能减震技术的应用使抗震设防烈度为 VII 度的建筑物能够抵御 VIII 度罕遇地震。原方案为框架结构,本项目在框架结构中安装防屈曲支撑,对结构进行弹塑性分析,并判定结构是否达到“小震不坏、中震可修、大震不倒”的抗震设防目标^[7-8]。

本项目中防屈曲支撑采用的是 TJ60 型,即屈服承载力为 600 kN,等效刚度为 2×10^8 N/m,屈服后刚度比为 0.02。分别在原剪力墙位置,沿 x 方向设置 6 个防屈曲支撑, y 方向设置 3 个防屈曲支撑,结构中共设置 9 个。其整体模型如图 2 所示。

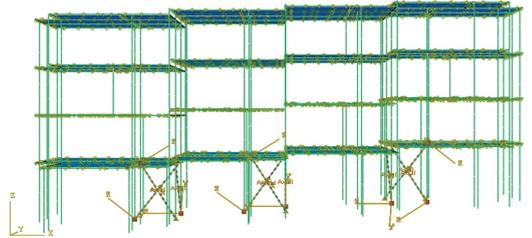


图 2 支撑布置三维图

Fig.2 Three-dimensional map of brace layout

3.2 计算软件选用及模型参数

计算程序采用 ABAQUS 软件,它包含一个丰富的、可模拟任意几何形状的单元库,并拥有各种类型的材料模型库,能够驾驭非常庞大复杂的问题和模拟高度非线性问题。模型建立中,梁柱构件采用截面纤维模型单元 B31,考虑剪切变形,并在梁柱截面设多个积分点用于反映截面的应力-应变关系,截面积分点由程序自动设置。将防屈曲支撑简化为一个连接单元,本构为钢结构的 Combine 模型,并赋予该单元所对应的支撑耗能属性^[9]。Combine 模型克服了常见的双线性模型中材料屈服应力面固定不变的缺陷,应力面在该模型下会随着塑性变形程度的增加而扩展;并且其可以考虑多个背应力相关影响下的变形情况,屈服后的塑性铰可通过支撑在屈服后的刚度变化来体现。

3.3 地震波的选取

根据《建筑抗震设计规范》^[10] 的规定,对罕遇地震验算采用三组强震地面运动加速度记录作为非线性动力时程分析的地震输入。在三组强震记录中,一组为与设计目标反应谱相符的人工模拟地面加速度时程,其余二组为与设计目标反应谱相符的真实强震地面加速度记录。地震波选取了三类地震波,一类为人工波,另外两类天然波分别为 Taft 波和

Northridge 地震波。各地震波的加速度时程图如图 3 所示。

3.4 计算结果及分析

3.4.1 自振周期及振型

建筑结构自振周期是一个重要的设计参数,它不仅与建筑平面布置、构件刚度、质量分布、材料特性等因素有关,还与建筑所处的地基状况以及地震

动强烈程度(含结构变形的状态)有关。它反映的是结构自身固有的动力学特性,是判断建筑设计是否合理的一个重要依据,也是衡量高层建筑结构刚度是否合理、质量与刚度是否匹配的重要指标。ABAQUS 对该别墅计算出的自振周期及振型如图 4 所示。

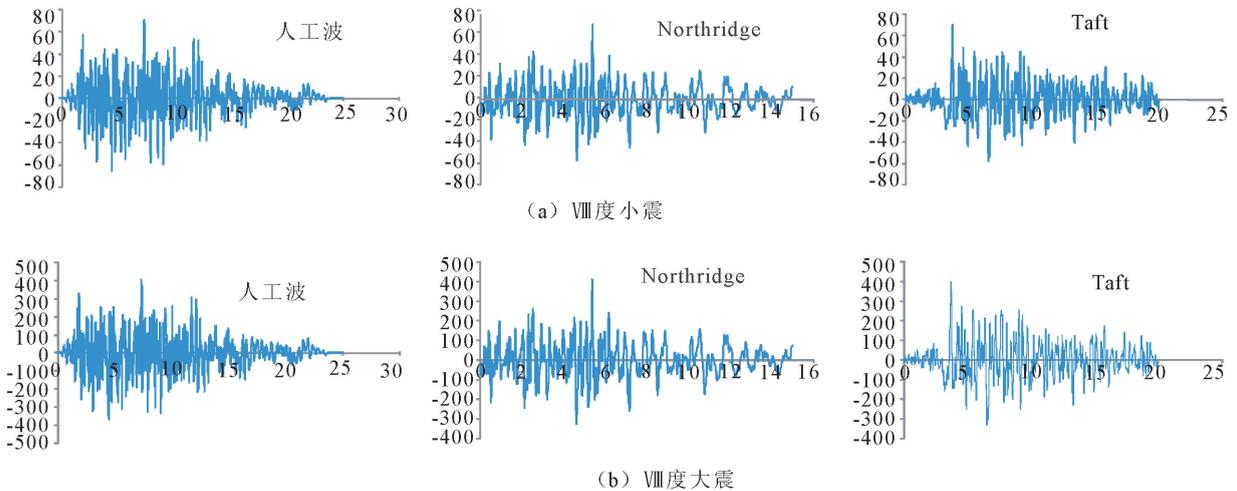


图 3 VIII 度小震和 VIII 度大震下地震波

Fig.3 Seismic waves of small earthquakes and strong earthquakes in VIII intensity zone



图 4 别墅 1~3 振型

Fig.4 Mode of vibration 1~3 of the villa

图 4 所示为该别墅的前 3 阶振型。对模型振型进行分析,由于该建筑物 X 方向的刚度比 Y 方向的刚度小,所以第 1 振型在建筑物的长轴方向,第 2 振型为 Y 方向“一边倒”平移,第 3 振型为扭转振型。《建筑抗震设计规范》3.5.3 条 3 款条文说明:结构在两个主轴方向的动力特性(周期和振型)宜相近。《高层建筑混凝土结构技术规程》^[11] 3.4.5 条也规定结构扭转为主的第一自振周期 T_1 与平动为主的第一自振周期 T_1 之比不应大于 0.9。经分析,该

模型的周期和振型都满足以上要求,说明该计算模型较为合理。

3.4.2 地震响应分析

分别在 VIII 度多遇和 VIII 度罕遇地震作用下沿水平方向双向输入三类地震波,X 方向为主方向。通过动力时程分析可得位移和层间位移角随楼层高度的变化情况,楼层位移变化如图 5(篇幅限制,仅列出 VIII 度多遇地震作用下的位移变化)。层间最大位移角汇总如表 2 所示。

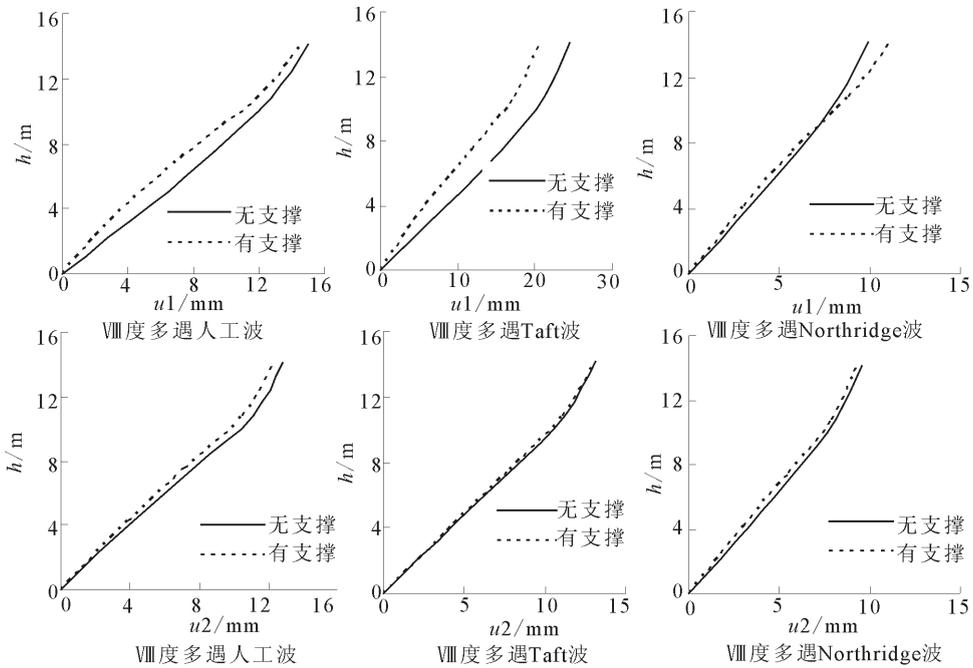


图5 三类地震波在无支撑和有支撑下X向和Y向的位移-高度曲线对比

Fig.5 Comparison of displacement in X,Y directions with and without BRA under the action of 3 seismic waves

从图5中可以看出加防屈曲支撑后,结构在3类地震波的作用下X和Y方向位移都有所减小,说明安装阻尼器后给结构附加了刚度和阻尼,达到了对结构振动进行控制的目的。表1为按文献[12]中能量方法计算出的等效阻尼比,可以看出在最大承载状态时等效阻尼比均大于《建筑抗震设计规范》中规定的结构一般阻尼比0.05,说明防屈曲支撑增加了整个结构的耗能能力。

表1 三类地震波下的等效阻尼比

Table 1 The equivalent damping ratios under three types of seismic waves

	人工波	Taft波	Northridge波
u1方向	0.088	0.096	0.061
u2方向	0.068	0.071	0.059

图5中还能看出Ⅷ度多遇Northridge波作用

下位移出现了先减小后增大的现象。这是因为本结构的防屈曲支撑集中布置在底层,其对底层的控制效果相对顶层而言效果更加明显。另外加防屈曲支撑结构刚度的抗侧刚度较纯框架结构大,整个结构在多遇地震作用下基本处于弹性的阶段,防屈曲支撑基本没有屈服,结构的地震作用增大,结构顶层的位移会放大。表2显示,加支撑前在Ⅷ度多遇Taft波下的最大层间位移角超过规范规定的1/550,加防屈曲支撑后,框架结构的弹性层间位移角均在规范规定的1/550范围之内,弹塑性层间位移角也均在规范规定的1/50范围之内。层间最大位移角的控制效果在10%~60%之间,这三类地震波中Taft波的减震控制效果最佳。对于不同类型的地震波,防屈曲支撑的减震效果是不同的,这说明地震波的频谱特性对于防屈曲支撑的控制效果起着重要的作用。

表2 三类地震波下的最大层间位移角

Table 2 Maximum inter-storey drift angles under three types of seismic waves

地震波	层间最大位移角					
	Ⅷ度多遇			Ⅷ度罕遇		
	无支撑	有支撑	影响效果/%	支撑	有支撑	影响效果/%
人工波	1/778	1/1077	-28	1/58	1/72	-19
Taft波	1/472	1/689	-31	1/71	1/165	-57
Northridge波	1/1235	1/1354	-9	1/151	1/210	-28

注:影响效果=(有支撑-无支撑)/无支撑

4 结论

采用 ABAQUS 有限元分析软件,建立了大连地震安全社区中某别墅三维结构分析模型,对其进行了地震作用下有支撑和无支撑的地震反应分析,初步获得如下结论:

(1) 结构各楼层的刚度分布较均匀,未发现明显薄弱层。采用合理设计后,防屈曲支撑对结构位移起到了良好地控制效果。

(2) 防屈曲支撑能大大降低钢筋混凝土框架结构在罕遇地震作用下的层间位移角,提高建筑物抗震性能,使地震安全社区中抗震设防烈度为Ⅶ度的建筑物能够抵御Ⅷ度罕遇地震。

(3) 防屈曲支撑能够有效地控制结构的地震反应,且构造简单、性能可靠,具有很好的应用价值。同时可进一步研究防屈曲支撑与结构之间的关系,优化配置,进一步改善消能减震效果。

参考文献 (References)

- [1] 李鑫,郭安宁,焦娇.地震灾害经济易损性评估研究——以甘肃省为例[J].西北地震学报,2012,34(3):284-288.
LI Xin, GUO An-ning, JIAO Jiao. Assessment of Economic Vulnerability Caused by Earthquake Hazard——Taking Gansu Province as an Example[J]. Northwestern Seismological Journal, 2012, 34(3): 284-288. (in Chinese)
- [2] 李慧,包超,杜永峰.近场地震作用下不规则层间隔震结构的动力响应分析[J].地震工程学报,2013,35(1):51-55.
LI Hui, BAO Chao, DU Yong-feng. Dynamic Response Analysis of Irregular Story Isolation Structures under Near-field Earthquake Conditions[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2013, 35(1): 51-55. (in Chinese)
- [3] 周云.防屈曲耗能支撑结构设计应用[M].北京:中国建筑工业出版社,2007:1-2.
ZHOU Yun. Application of the Buckling Restrained Brace in Structural Design[M]. Beijing: China Building Industry Press, 2007: 1-2. (in Chinese)
- [4] 钱洪涛,褚洪明,邓雪松.防屈曲支撑的研究与应用进展[J].防灾减灾工程学报,2007,27:225-233.
QIAN Hong-tao, CHU Hong-ming, DENG Xue-song. Progress in Research and Application of Buckling Restrained Brace[J].

- Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2007, 27: 225-233. (in Chinese)
- [5] 蔡克铨,黄彦智,翁崇兴.双管式挫屈束制(屈曲约束)支撑之耐震行为与应用[J].建筑钢结构进展,2005,7(3):1-8.
CAI Ke-quan, HUANG Yan-zhi, WENG Cong-xing. Seismic Performance and Applications of Double-tube Buckling-restrained Braces[J]. Progress in Steel Building Structures, 2005, 7(3): 1-8. (in Chinese)
- [6] CHEN Cheng-cheng. Recent Advances of Seismic Design of Steel Buildings in Taiwan[R]. Taiwan: National Center for Research on Earthquake Engineering, 2002: 105-123.
- [7] 王奇,干钢,方鸿强.某防屈曲支撑框架结构弹塑性时程分析[J].建筑结构,2012,42(11):44-48.
WANG Qi, GAN Gang, FANG Hong-qiang. Elasto-plastic Time History Analysis on a Buckling-restrained Braced Frames[J]. Building Structure, 2012, 42(11): 44-48. (in Chinese)
- [8] Jeffrey Berman, Michel Bruneau. Cyclic Testing of a Buckling Restrained Braced Frame with Unconstrained Gusset Connection[J]. Journal of Structural Engineering, 2009, 135(12): 1499-1510.
- [9] 姚楠,郑廷银,杨菊.约束屈曲支撑耗能性能有限元分析[J].江苏建筑,2010(1):49-51.
YAO Nan, ZHENG Ting-yin, YANG Ju. Finite Element Analysis of Dissipation Characteristics of Bulking-restrained Braces[J]. Jiangsu Building, 2010(1): 49-51. (in Chinese)
- [10] 中华人民共和国国家标准.GB50011-2010,建筑抗震设计规范[S].北京:中国建筑工业出版社,2010.
PRC National Standard. GB50011-2010. Code for Seismic Design of Building[S]. Beijing: China Building Industry Press, 2010. (in Chinese)
- [11] 中华人民共和国行业标准.JGJ3-2010,高层建筑混凝土结构技术规程[S].北京:中国建筑工业出版社,2010.
PRC National Standard. JGJ3-2010. Technical Specification for Concrete Structures of Tall Building[S]. Beijing: China Building Industry Press, 2010. (in Chinese)
- [12] 王亚勇,薛彦涛,欧进萍,等.北京饭店等重要建筑的消能减振抗震加固设计方法[J].建筑结构学报,2001,22(2):35-39.
WANG Ya-yong, XUE Yan-tao, OU Jin-ping, et al. Structural Analyses and Design of Seismic Retrofitting with Energy Dissipation Dampers for Beijing Hotel and Other Key Buildings in Beijing[J]. Journal of Building Structures, 2001, 22(2): 35-39. (in Chinese)