

文章编号: 1000-4750(2014)03-0001-10

# 建筑隔震结构研究进展与分析

朱宏平, 周方圆, 袁 涌

(华中科技大学土木工程与力学学院, 武汉 430074)

**摘 要:** 基础隔震技术在减震控制效果、防灾减灾以及社会经济效益等方面具有显著优势, 近几十年在建筑结构与桥梁工程领域中取得了成功应用。该文全面综述了国内外学者针对建筑基础隔震技术方面取得的研究成果以及工程应用研究现状, 总结了目前建筑基础隔震技术研究方面存在的不足, 为建筑基础隔震技术进一步的研究工作的制定提供参考, 同时通过对隔震技术在高层建筑领域中取得的进展及存在问题的阐述, 讨论了我国高层建筑结构隔震技术研究的下一步发展方向, 对隔震技术在我国高层建筑结构领域中的应用起到一定的促进作用。

**关键词:** 隔震支座; SMA 阻尼器; 减震控制; 高层建筑; 研究现状

**中图分类号:** TU352.12 **文献标志码:** A **doi:** 10.6052/j.issn.1000-4750.2013.05.ST05

## DEVELOPMENT AND ANALYSIS OF THE RESEARCH ON BASE ISOLATED STRUCTURES

ZHU Hong-ping, ZHOU Fang-yuan, YUAN Yong

(School of Civil Engineering &amp; Mechanics, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

**Abstract:** Base isolation technology has significant advantages in the effect of vibration control, disaster reduction, as well as in social and economic benefits. The recent decades have witnessed a successful application of this technology in the field of architectural structures at home and abroad. This paper reviews comprehensively the research achievements of domestic and international scholars in terms of base isolation technology and the status of the latest development and application of isolation technology in high-rise buildings, and then summarizes the deficiencies of the current isolation technology research, hoping to provide a reference for further researches. Meanwhile, through the elaboration of the progress and deficiency of isolation technology, the direction of the development of this technology in Chinese high-rise buildings has been discussed, and it will promote the application of isolation technology in Chinese high-rise buildings to some extent.

**Key words:** isolation bearing; SMA damper; vibration control; high-rise building; research progress

建筑物结构隔震技术是 20 世纪 60 年代出现的一项新技术, 多年来, 世界各国学者对此项技术开展了广泛、深入的研究, 并取得了引人注目的成果, 使这方面的研究工作成为当今土木工程学科中的热点研究课题, 并且形成成为一个新的学科分支。隔震技术是目前工程中应用最多的一种减震控制技术。由于其易于实施、减震控制效果好, 正受到越来越多国家的重视<sup>[1-2]</sup>。

隔震技术的本质作用就是使结构和(或)构件与可能引起破坏的地震地面运动分离开来。这种分离或解耦是通过增加系统的柔性和提供适当的阻尼来实现的<sup>[2]</sup>。结构隔震体系按隔震机理的不同划分, 目前主要有: 叠层橡胶垫隔振体系、滑动摩擦隔振体系、组合隔震体系、摩擦摇摆体系、滚轴或滚珠摩擦隔震体系、滑动凹面基础隔振体系、还有最近出现的适用于农村民居的钢筋沥青隔震体系及砂

收稿日期: 2013-05-01; 修改日期: 2013-11-28

基金项目: 国家杰出青年科学基金项目(50925828); 国家自然科学基金项目(51178203)

通讯作者: 朱宏平(1965—), 男, 湖北人, 教授, 博士, 博导, 主要从事建筑隔震及结构健康监测研究(E-mail: hpzhu@mail.hust.edu.cn).

作者简介: 周方圆(1985—), 男, 安徽人, 讲师, 博士, 主要从事建筑隔震及土结构相互作用研究(E-mail: fangyuanzhou@hust.edu.cn);

袁 涌(1976—), 男, 福建人, 副教授, 博士, 主要从事建筑隔震研究(E-mail: 277341562@qq.com).

垫层隔震体系等。由于各方面的原因,例如,结构安全性、结构可行性、造价的经济性等,隔振体系研究和应用较为广泛的主要是包括叠层橡胶垫隔震体系、滑动摩擦隔震体系、组合隔震体系,以及适用于农村民居的钢筋沥青隔震体系和砂垫层隔震体系。

## 1 建筑隔震技术的研究现状

常用的叠层橡胶垫主要有三种:天然夹层橡胶垫、铅芯夹层橡胶垫、高阻尼橡胶垫。高阻尼橡胶隔震技术,因其所特有的耗能优势及无污染特点目前正成为研究的热点。

### 1.1 高阻尼橡胶隔震支座

高阻尼橡胶隔震支座的构造与天然橡胶支座类似,不同之处在于,在天然橡胶和合成橡胶的橡胶聚合物中,加入添加剂、补强剂、可塑剂、硫化剂等配合物,制成高阻尼橡胶支座(HRB 支座),从而使其不仅具备天然橡胶支座的水平和竖向性能外,还具有较强的阻尼性能。由于其综合了弹簧和阻尼器功能,设计时可以不在隔震层安装其他阻尼器,因此高阻尼橡胶隔震支座代替了传统隔震结构所采用的隔震支座加阻尼器的结构形式,使隔震层的结构布置简单规则。目前这种阻尼器在日本有一定的应用,在国内,由于具有优良阻尼性能的橡胶没有取得较大进展,目前高阻尼橡胶支座在国内工程应用较少。

#### 1) 高阻尼橡胶隔震支座的基本力学性能。

具有高阻尼性质的橡胶增强了支座抗水平变形的能力,但对其竖向变形能力没有太大影响,为了增加高阻尼橡胶支座的竖向承载能力以及限制其水平过大变形,一般在高阻尼橡胶支座中加入叠层钢板。橡胶材料由于水平刚度较小,因此在水平荷载作用下,其具有较好的水平变形能力。高阻尼橡胶支座由于加入了一系列的高阻尼材料,在一定程度上增加了支座的阻尼,因此高阻尼橡胶支座除了能够提供一定的水平变形能力以外,其对水平变形还具有一定的抵抗作用,这种抵抗作用使它吸收地震能量的能力比普通的橡胶支座要强,起到一定的自复位效果。高阻尼橡胶隔震支座由于具有阻尼功能,其滞回曲线较为丰满。高阻尼橡胶支座在小变形领域刚度较大,随着变形的增大,其刚度会软化,在剪应变超过 200%后开始硬化。

高阻尼橡胶隔震支座是在天然橡胶和合成橡

胶的橡胶聚合物中,加入添加剂、补强剂、可塑剂、硫化剂等配合剂制作而成的。添加的聚合物使高阻尼橡胶隔震支座具有较复杂的非线性特性。由于高阻尼橡胶隔震支座中内部材料的不均匀性,在动力荷载作用下,内部复合材料会发生细微结构的损伤,从而会导致高阻尼橡胶隔震支座丧失较大的刚度,同时耗能特性也会相应降低。在通常情况下,上述刚度及耗能特性损失现象在很大程度上依赖于加载历史路径及高阻尼橡胶隔震支座在加载过程中发生的最大变形。因此在采用数值模拟对高阻尼橡胶隔震支座的动力特性进行模拟时必须考虑上述的刚度及耗能特性折减现象。

在一些国家的规范中<sup>[3-5]</sup>,关于高阻尼橡胶隔震支座的本构模型被指定采用 Bi-Linear 模型。然而根据最近一些学者<sup>[6-10]</sup>的研究表明高阻尼橡胶隔震支座的力学特点具有应变率迟滞特性。不同的应变率下,高阻尼橡胶隔震支座的应力-应变本构关系在加载过程中表现出了明显的应变率滞回现象,在卸载过程中也呈现了一定的应变率滞回特性。然而,传统的 Bi-Linear 模型由于初始刚度及折减刚度的数值为定值,因此不能有效模拟应力-应变本构关系随着应变率的变化而出现的滞回现象。

为了克服传统双折线模型在高阻尼橡胶隔震支座中应用的缺陷, Sano 及 Di-Pasquale<sup>[11]</sup>依据 Davienkov-Martine 法则提出了一个非应变率相关模型来近似等效考虑在不同的应变条件下高阻尼橡胶隔震支座的刚度的折减及阻尼的变化。Kikuchi 及 Aiken<sup>[12]</sup>等将 Bi-Linear 模型与 Ramberg-Osgood 模型相结合的方式,同样也提出了一个非应变率相关模型来近似模拟高阻尼橡胶隔震支座的本构关系。Abe 等<sup>[13]</sup>提出了一个双向弹塑性模型,来考虑在双向加载条件下,高阻尼橡胶隔震支座的应力-应变本构特性。然而以上所提到的数值模型有一个共同特点,它们考虑了在不同应变条件下高阻尼橡胶隔震支座刚度的折减及阻尼的变化,但是没有将应变率对高阻尼橡胶隔震支座本构关系的影响考虑进去。

考虑应变率的高阻尼橡胶隔震支座本构模型的相关研究并不是很多, Hwang 等<sup>[9]</sup>开发了一个模拟高阻尼橡胶隔震支座的阻尼及回复力模型。通过循环荷载试验,得到高阻尼橡胶隔震支座的在加载过程中的应力、应变等相关参数,利用非线性最小二乘法对试验数据进行拟合,将刚度和阻尼系数用

一系列的与高阻尼橡胶隔震支座的相对位移及速度相关的高次多项式进行表达。Hwang 等所提出的高阻尼橡胶隔震支座的非线性模型中考虑了应变率因素的影响,但是这种应变率的影响是通过非线性最小二乘法的模拟得到的,因此其非线性模型缺乏相应的物理基础。Tsai 等<sup>[14]</sup>以增量形式提出了一个应变率依存数值模型来模拟高阻尼橡胶隔震支座的非线性本构关系。该模型用应变、速度诱导力等参数来描述高阻尼橡胶隔震支座在荷载作用下的恢复力,然而,这种数值模型,无法清晰的阐述如何将速度诱导力从整个恢复力中分离出来,速度诱导力的物理意义不明确。Dall'Asta 等<sup>[6]</sup>通过对高阻尼橡胶隔震支座进行了大量的循环荷载剪切试验及简单的松弛试验确定了高阻尼橡胶隔震支座的受力特性对加载过程中应变率的依存性。在依据大量试验数据的基础上,Dall'Asta 等提出了高阻尼橡胶隔震支座的应变率依存非线性数值模型。但是这种应变率依存非线性数值模型由于加载条件比较单一,因此无法很好的用来模拟实际复杂使用情况下对高阻尼橡胶隔震支座的加载及卸载特性的描述。Bhuiyan 等<sup>[10]</sup>为了能合理提出一个考虑应变率依存性的高阻尼橡胶隔震支座的非线性模型,对高阻尼橡胶隔震支座进行了一系列的循环荷载剪切试验、分级的松弛试验及单调的松弛试验。提出了一个考虑高阻尼橡胶隔震支座非线性特性的流变模型。由于高阻尼橡胶隔震支座复杂的非线性应力-应变本构关系,如何提出一个合理的非线性模型来模拟高阻尼橡胶隔震支座的动力特性仍有待进一步的完善。

## 2) 高阻尼橡胶隔震支座+SMA 阻尼器。

由于高阻尼橡胶隔震支座在强地震作用下,有可能产生较大的支座位移,从而可能导致高阻尼橡胶隔震支座产生不可恢复的残余变形,因此为了保证隔震层的有效性及安全性,在地震烈度较大区域,一般会采用高阻尼橡胶隔震支座与阻尼器组合使用的形式。目前主要在建筑工程领域使用的阻尼器类型有粘滞阻尼器、粘弹性阻尼器、压电摩擦型阻尼器及 SMA(形状记忆合金)阻尼器等,SMA 阻尼器因其具有超弹性特性和高阻尼特性,目前在隔震领域里正在逐步形成一个新的科学分支<sup>[15-16]</sup>。利用 SMA 的特性制作阻尼耗能装置最早是由 Graesser 和 Cozzarelli<sup>[17]</sup>提出的。自此以后,SMA 阻尼耗能装置的相关研究在国内外得到陆续开展。

国外 SMA 阻尼耗能装置研究:1) 各种样式的阻尼器相继研发成功,并对其性能进行了测试。美国加州大学地震工程研究中心 Peter<sup>[18]</sup>等研制出一种用于土木结构地震反应的 SMA 被动阻尼装置,它的设计采用了多股超弹性 Ni-Ti 索缠绕到 2 个距离固定的椭圆型柱上,该装置称为单面阻尼器。如果将两个单面阻尼器组合起来,可制成双面阻尼器。性能测试结果表明,这种阻尼器具有稳定的迟滞性,受频率等因素的影响较小;美国加州 E.Sorb System 的 Robert<sup>[19]</sup>研制了另外一种 SMA 双面阻尼器,称为 CT 装置。装置的性能测试是在加州大学地震工程研究中心的一台带温控的卧式平面试验机上进行的。结果表明,在允许的范围内,该阻尼器性能不受频率影响,而且抗疲劳性能良好;Dolce M 等<sup>[20]</sup>介绍了两种基于形状记忆合金的被动控制装置,试验结果表明,这两种被动控制装置在大应变循环下具有优良的抗疲劳性、耐久性和可靠性。2) SMA 阻尼器对土木工程结构的减振效果研究。Williams、Chiu 和 Bernhard<sup>[21]</sup>采用 3 副形状记忆合金丝和 1 副钢丝制成适应式减振器,并研究了这种减振器对梁的减振能力,提出此种减振器有希望发展成一种高效的振动被动控制技术;Adachi Y 等<sup>[22]</sup>则提出一种形状记忆合金阻尼器,通过一系列的振动台试验,发现其能有效减小桥梁结构的地震反应,尤其是在形状记忆效应阶段,阻尼器的工作效果更好;Tamai 等<sup>[23]</sup>将 SMA 棒和钢筋复合在一起,形成一个耗能支撑装置,并将其安装在一榀架结构上,试验结果表明,这种耗能支撑装置可有效耗散结构输入的地震能量,并且在震后很容易进行修复和置换。

## 3) SMA 阻尼器。

在实际工程应用方面,意大利的 Indirli M 等<sup>[24]</sup>通过深入的理论论证,采用 SMA 作为加固元件对意大利的教堂钟塔进行加固。在 2000 年的地震中,教堂钟塔没受到任何破坏,形状记忆合金装置有效控制了地震加速度和能量的输入。采用 SMA 装置加固与传统加固方法相比,其优越性在于既能起到很好的加固效果,又能保证古建筑的完整性,这是一例成功应用于古建筑修复的事例。

在国内,土木工程界的学者也进行了大量的研究工作。彭刚等<sup>[25]</sup>对形状记忆合金耗能阻尼器设计理论方法进行了研究。以 Brinson 本构模型为理论依据,建立了阻尼器的热力学非线性方程及其求解方法,并利用 MATLAB 编制的计算机软件进行了

数值仿真计算。计算结果表明,形状记忆合金阻尼器具有较强的耗能能力;欧进萍等<sup>[26]</sup>就 X 形和三角形 SMA 板式阻尼器的阻尼力滞回模型进行了推导;李忠献等<sup>[27]</sup>提出应用形状记忆合金对斜拉桥的参数振动实施半主动控制,并数值模拟了其控制效果。结果表明,对斜拉桥参数振动进行 SMA 半主动控制,不仅大幅降低了斜拉索和桥面板的振动,而且能够有效抑制斜拉桥参数共振的发生;薛素铎等<sup>[28]</sup>提出一种新型 SMA 阻尼器,并对其在大跨空间结构中的减振控制理论和方法进行了相应的探讨。地震反应时程分析表明,SMA 阻尼器可有效减小结构地震反应;张继刚等<sup>[29]</sup>研制了一种锥形 SMA 阻尼器,并对其进行了性能试验。试验结果表明,这种 SMA 阻尼器具有良好的自复位能力,但其耗能能力和疲劳性差于丝材的 SMA 阻尼器;Han Yulin 等<sup>[30]</sup>设计了一种拉压扭超弹性 SMA 阻尼器,并进行了耗能试验研究;左晓宝<sup>[31]</sup>研制了一种变刚度复合摩擦 SMA 阻尼器,试验结果证明,其具有输出控制力大、耗能能力强等特性。李宏男等<sup>[32]</sup>利用超弹性 SMA 丝的耗能能力和自复位能力,提出了一种新型的 SMA 阻尼器,试验研究了该阻尼器在循环荷载作用下不同位移幅值、不同加载频率和不同初始位移条件下的力学性能,并通过建立的理论模型对阻尼器的力学性能进行了数值模拟。研究表明:开发的新型 SMA 阻尼器在循环荷载作用下形成稳定的滞回曲线,具有良好的耗能能力及自复位能力。

纵观近几年的研究现状,SMA 阻尼器可以分为以下三类:1) SMA 超弹性阻尼器,这是研究最多的一类阻尼器。这类阻尼器主要利用 SMA 超弹滞回耗能特性,达到耗散结构输入的能量。同时,在中等或小的受载情况下,其不会产生永久变形和位移,使 SMA 阻尼器具有自复位功能。2) SMA 形状记忆阻尼器。这类阻尼器主要是利用 SMA 的形状记忆效应和马氏体阶段 SMA 具有很高的阻尼特性研制的。由于 SMA 具有热滞效应,因而限制了这类阻尼器的应用研究。随着 SMA 材料性能的改进和加热方法的深入研究,这类阻尼器将会有很大的应用前景。3) SMA 复合阻尼器。这类阻尼器是将 SMA 与其他材料复合在一起制成阻尼器,从而使两种材料达到优势互补,提高阻尼器的性能。这也是研究比较多的一类阻尼器,试验也证明其具有很好的减振耗能特性。

目前已经发现的 SMA 材料的种类有上百种之多,其中被普遍认为具有实用价值且比较常用的主要有近等原子比 Ni-Ti 合金、Cu 基形状记忆合金和 Fe 基形状记忆合金。其中 Ni-Ti 合金作为一种基础材料被广泛应用于土木工程领域中的阻尼器设计中。Ni-Ti 记忆型合金最早是 1960 年被 Buehler 等<sup>[33]</sup>提出的。

Ni-Ti 记忆型合金具有以下特征:1) 弹性应变区域较大;2) 滞回阻尼特性;3) 高效可靠的耗能机制;4) 在 6%应变之后会出现应变硬化现象;5) 卓越的低-高周疲劳性能;6) 优越的耐腐蚀性能;7) 形状自回复能力;Ni-Ti 记忆型合金由于具备以上所提的超弹性及形状记忆特性而被目前广泛的应用在工程的各个领域。

Han 等<sup>[34]</sup>开发了一个同时考虑拉伸、压缩及扭转方向的动态阻尼器,Han 等研发的动态阻尼器包括两个同心管以及 Ni-Ti 记忆型合金。能量主要通过 Ni-Ti 记忆型合金进行耗散。通过大量的试验表明,能量通过内外管道耗散量的大小与内外管道内 Ni-Ti 记忆型合金的布置数量有很好的对应关系。

Clark 等<sup>[35]</sup>对将 Ni-Ti 记忆合金线缠绕在圆柱形的支撑构件上所组成的阻尼器支座进行了大量的试验研究,试验结果表明,Ni-Ti 阻尼器支座具有很好的动力性能,能很好的控制上部结构的地震反应。为了实现在不同环境温度效应下,Ni-Ti 记忆型合金阻尼器能够充分发挥去作用效能,一些学者<sup>[36-37]</sup>研制开发了一种能兼顾不同温度效应影响的 Ni-Ti 记忆型合金阻尼器,它的主要构造原理是在阻尼器中配置不同配置不同种类的 Ni-Ti 记忆型合金以满足在不同温度条件下阻尼器都能够很好的进行能量耗散,从而对结构动力效应起到控制作用。

## 1.2 其他隔震体系

### 1) 滑动摩擦隔震体系。

滑动摩擦隔震体系,其主要原理为:当结构受到较小的地面激励时,摩擦力阻止上部结构滑动,使结构保持稳定;当地面激励超过某一限值时,隔震层地震作用将超过摩擦力,滑动面开始滑动,发挥隔震作用。这时即使地面激励再增大传入上部结构的地震作用也不会随之增大。滑动摩擦隔震基础的关键在于滑动摩擦装置。滑动摩擦装置包括滑动摩擦元件和限位耗能元件,常见的滑动摩擦原由由上下钢板和中部滑动面三部分组成。摩擦面得材料

有聚四氟乙烯板、复合聚四氟乙烯和柔性石墨土层等。另外,上下承板可考虑用高强混凝土制作。滑动摩擦装置中的限位元件,并不承受竖向荷载,在水平荷载下只起稳定、复位和耗能限位作用。常见的限位原件有变截面刚杆、‘U’型热轧钢板和扭转梁等。目前关于滑动隔震体系和叠层橡胶隔震体系研究已较为成熟,国内外的工程应用也较多<sup>[38]</sup>。但是,由于滑动隔震体系没有自复位能力,在大震时将可能产生不可控制的位移,这是人们所不能接受的;而叠层橡胶支座虽有自复位能力,但是出于经济等多方面的考虑,其直径不可能做的太大,这样在大地震时过大的位移将可能使支座产生倾覆等问题,从而导致结构隔震控制的失败。为了综合利用这两种隔震体系的优点,平抛却其缺点,人们提出了组合隔震体系的概念。

## 2) 组合隔震体系。

最长用的组合隔震体系是由滑动摩擦隔震支座和叠层橡胶隔震支座并联组成,基本原理是系统中的叠层橡胶隔震支座提供系统的向心恢复力,而滑动摩擦隔震支座滞回耗能,隔离地震。所以,这种组合隔震体系兼有叠层橡胶隔震体系和滑动摩擦隔震体系的优点,有效避免了各自的缺点,近年来得到国内外的广泛应用<sup>[39-40]</sup>。

## 3) 钢筋沥青隔震体系及砂垫层隔震体系。

传统隔震技术减震消能效果优越,一般应用于政府大楼、医院、带有精密电器设备的厂房间、学校、核电站等对国计民生具有重大影响的建筑结构。目前针对于村镇及经济欠发达地区的防灾减灾问题已经逐渐引起人们的重视,国内外的一些研究机构和学者已经开始着手这方面的研究。国内尚守平等<sup>[41]</sup>提出了一种适用于农村地区隔震减震的钢筋-沥青隔震系统,并通过大量试验证明了该隔震体系可以有效减少上部结构动力响应,且造价低廉。窦远明等<sup>[42]</sup>进行了不同工况下的砂垫层隔震振动台试验研究,结果表明砂垫层隔震层可有效减少上部结构地震反应;刘斯宏等<sup>[43]</sup>在小型电动振动台上进行了土工袋和袋内填充物得水平减振对比试验,试验结果表明,土工袋具有较好的减振效果,且造价低廉,能很好应用于农村低矮房屋的减振要求。国外的加州大学伯克利分校地震工程研究中心(Earthquake Engineering Research Center, EERC)与英国的 Tun Abdul Razak Research Centre (TARRC)已经进行合作发展一种低成本的隔震技术用于发

展中国家<sup>[44-45]</sup>。联合国工业发展组织(United Nations Industrial Development Organization, UNIDO)同样致力于发展低成本的隔震系统,用于保护地震带的发展中国家人民生命财产安全,包括中国、埃及、印度与智利等。开发一种经济的适用于农村民居的隔震体系,目前也成为隔震领域中研究的热点之一。

## 2 高层建筑隔震技术的应用研究

隔震技术的应用研究在土木工程领域中占有重要的地位,目前主要被应用于多层房屋的减震中,通过以往发生的地震其有效性得到了很好的验证。随着经济的发展,在人口密集的经济发达地区,高层建筑等得到了飞速的发展,由于高层建筑具有结构刚度较小等特点,其动力特性与普通的多层结构有着明显的区别,因此近年来隔震技术在高层建筑结构的应用研究正日益被提上日程。

建筑物的高度和跨度不断增加,体型越来越复杂,结构抗震分析与设计难度不断增加,房屋建筑结构正向着高层、轻质和高强的方向发展,结构的刚度和阻尼大大减小,在地震荷载作用下,结构反应增大,高层建筑物抗震问题越显重要。我国许多已建和在建的高层建筑位于强震区,面临地震灾害威胁。传统抗震方法依靠结构本身性能,即结构的强度、刚度、变形能力和耗能能力来抵御动荷载,由于所受动荷载的不确定性,使所设计建造的结构有可能不满足功能和安全性的要求,即使能够保证主体结构的安全,也不能保证室内设备和装修的安全。在人民生活水平日益提高的今天,室内外装修的投资往往超过建筑结构的投资,甚至是好几倍。汶川大地震后的震灾调查表明,地震后高层建筑墙体开裂、室内设备和装修破坏的情况非常普遍,尽管主体结构没有破坏,但震灾损失仍然很大。特别是复杂而不规则的高层结构体系,在地震作用下容易产生薄弱部位,引起结构的严重破坏甚至倒塌,造成严重的人员伤亡和巨大的经济损失。因此,高层建筑的隔震成为近几十年来国内外的研究热点。高层建筑物采用隔震体系改变了传统的采用承重结构体系直接抵御地震作用的思路,能够更有效地保护房屋结构以及室内设备的安全,具有传统抗震技术无可比拟的优越性。

高层建筑中应用隔震技术的历史并不长。日本在1995年以前的隔震建筑高度都在60m以下,1997

年建成的 18 层 84.9m 高的 Sendai MT 大楼是日本第一幢高度超过 60m 的基础隔震高层建筑,它经历了 2003 年 5 月 26 日的 off-Miyagi 地震考验。目前世界上最高的隔震建筑物在日本的 Osaka City, 地下 1 层、地上 50 层加 2 层塔楼、主体高度 177.4m, 基础隔震, 于 2006 年 12 月竣工。美国最高的隔震建筑为 29 层, 我国目前最高的隔震建筑是山西太原的一栋 19 层隔震住宅。

高层建筑隔震存在几个疑点: 一是高层和超高层结构体系的自振周期较长, 采用隔震技术能否进一步延长其周期而达到理想的隔震效果; 二是倾覆效应使隔震支座轴力变化大; 三是隔震装置存在进入拉伸应力状态的可能性, 支座抗拉性能是否满足要求; 四是在风荷载作用下隔震层刚度是否足够。

对于高层建筑隔震是否有效果的问题, 不少学者通过计算机分析和振动台试验进行了探讨。苏键、周福霖等<sup>[46]</sup>采用弹塑性时程分析法研究高层隔震建筑的抗震性能, 对 20 层的框架、框-剪结构进行抗震和隔震效果对比分析。采用三条不同的地震记录(Park Field、El-Centro、San Fernando), 用 SAP2000 软件建立三维模型后进行弹塑性时程分析, 得到了三条地震记录作用下结构的层间位移角和各层加速度响应。结果表明, 隔震框架结构能比无隔震框架结构在 Park Field 地震波作用下层间位移角有所减小, 但在 El-Centro 和 San Fernando 地震波作用下层间位移角则增大了; 隔震后的框-剪结构的层间位移角最小且各层间变形基本一致; 隔震后框架结构与框-剪结构各层加速度响应均比非隔震时大幅度减小。对于框架隔震结构来说, 各支座均未出现受拉情况; 框-剪隔震结构在 Park Field 地震波作用下未出现受拉支座, 而在 El-Centro 和 San Fernando 地震波作用下剪力墙下面外侧的隔震支座均出现受拉。

曲哲、叶列平、潘鹏<sup>[47]</sup>分别从周期延长原理和隔震层滤波原理两个方面分析了高层建筑隔震的原理, 结果表明由于隔震后结构周期比非隔震结构周期无显著延长, 层间剪力计算的地震力减震效果并不十分显著, 但隔震技术仍可以显著降低结构的绝对加速度响应。

王曙光、杜东升、刘伟庆<sup>[48]</sup>采用规范设计反应谱进行高层隔震结构分析时指出, 必须充分考虑结构高阶振型的影响, 否则会大大低估结构减震效果。对规范中不同阻尼比的地震影响系数曲线修正

方法进行讨论, 对规范中采用的阻尼调整和形状参数提出修改建议。指出规范中容易导致隔震支座受拉的不合理规定, 提出了改进后的结构布置原则, 并对规范中隔震支座面压控制的计算方法提出修正建议。

付伟庆、刘文光、魏路顺<sup>[49]</sup>对 1/4 的缩尺大高宽比铅芯橡胶隔震结构模型进行了水平向振动台试验, 研究高烈度区不同场地波下隔震结构的动力响应。在某些地震波激励下, 大高宽比隔震结构中的支座出现了拉应力或者非线性变形。当输入的地震波中长周期成分较多时, 隔震结构的隔震效果不是很理想; 上部结构弯曲变形已占了较大部分; 在高烈度地区的隔震结构橡胶垫承受一定的拉应力后结构整体仍安全的, 而在某些不利地震动下, 橡胶垫可能受拉屈曲, 此时结构处于倾覆的临界状态。

对于高层建筑采用基础隔震后引起的抗倾覆问题和控制橡胶隔震支座受拉问题, 李宏男、吴金香<sup>[50]</sup>重点分析了竖向地震动对隔震结构高宽比限值的影响, 并考虑了场地条件、地震强度等因素和竖向地震动的综合影响, 给出了考虑水平和竖向地震动、地震强度以及场地条件等因素影响的高宽比限值的定量取值。

程华群、刘伟庆、王曙光<sup>[51]</sup>对高层隔震建筑设计中隔震支座受拉问题进行了分析, 提出采用大间距的竖向构件布置, 可使其隔震支座承受的重力荷载增大, 使隔震支座的直径变大, 提高隔震层的水平变形能力, 以避免隔震支座受拉的出现。还可以采用高抗拉能力的隔震支座, 或者叠层橡胶支座和弹性滑移支座组合的混合隔震技术。

对于高层隔震建筑物的风振问题, 杜永锋、朱前坤<sup>[52]</sup>研究了采用铅芯橡胶隔震垫的高层隔震建筑风振响应, 发现隔震建筑在风荷载作用下的位移响应、加速度响应、层间最大位移都要比非隔震建筑显著, 建议上部结构加设阻尼器以提高风振下的舒适度。Love J S 等<sup>[53]</sup>提出用调谐液体阻尼器(TLD)来控制基础隔震建筑的风振反应, 通过一个两层房子的算例分析表明, TLD 对减小基础隔震建筑物的风振反应有显著效果。

除了以上所阐述的传统意义上的基础隔震技术外, 层间隔震是继高层建筑基础隔震之后的另一个研究热点, 就是把隔震层从基础顶面往上移, 隔震层一般设在地上第一层的柱顶、房屋立面和刚度

突变处(如大底盘与塔楼之间)或者房屋顶层下面。国际上对层间隔震体系研究最多的是日本,并已经用到工程实践中。小林正人等<sup>[54]</sup>对层间隔震体系进行了系统的研究,分析了层间隔震体系的模态连成作用,以及层间隔震结构的弹性和弹塑性动力反应,分析结果表明:层间隔震结构的反应较非隔震结构小,但较基础隔震结构大,而且当隔震层位置较高时,上、下部结构的反应均增大;影响下部结构反应的因素是质量比,质量比增大则下部结构反应减小;下部结构塑性对上部结构和隔震层的反应影响很小,即使在大震时,下部结构出现塑性,上部结构仍可按弹性近似估算。徐忠根、周福霖等<sup>[55]</sup>较早的进行了层间隔震体系理论与应用研究,于1995年在汕头博物馆工程中采用层间隔震方案,将支座提高+6.00m标高处(二层柱顶)以防止台风引起的大海潮或高洪水位可能淹没隔震层。此后,国内学者周福霖<sup>[56]</sup>、张颖等<sup>[57]</sup>纷纷对层间隔震技术进行了研究,结合工程应用提出了设计和分析方法。我国学者谢军龙、罗小华<sup>[58-59]</sup>分别对屋顶隔震或加层减震的设计方法和减震效果进行了理论分析和振动台试验。周锡元等<sup>[60]</sup>分别对橡胶支座与柱串联体系的水平刚度、动力稳定性等进行了理论分析和试验研究。理论分析和试验研究结果表明:采用层间隔震能有效地减少上部结构的地震作用;当隔震层位于中部时,隔震层具有对上部隔震、对下部结构消能的双重减震作用;小震下层间隔震体系的失效概率由下部结构决定,而大震时下部结构首层与隔震层为薄弱层,对整体的失效概率贡献最大。目前国内外对于层间隔震体系的理论研究成果还不很充分,理论研究明显滞后于工程应用,大多数的研究是针对某一实际结构进行的振动台试验和相应的动力分析。

### 3 结论

本文介绍了当今在土木工程领域中几种隔震体系的研究现状,并重点阐述了高阻尼橡胶隔震支座的特点、基本力学性能以及常用的非线性模型,目前关于高阻尼橡胶隔震支座的非线性模型的研究已经取得了初步的进展,但由于由于高阻尼橡胶支座复杂的非线性应力-应变本构关系,如何提出一个合理的非线性模型来模拟高阻尼橡胶支座的动力特性仍有待进一步的完善。隔震技术在工程领域的应用研究方面,本文详细阐述了目前针对于高层

建筑隔震的相关进展及存在的缺陷。随着研究的深入,及新材料、新工艺的进一步发展,新的隔震设计思路,和新的隔震体系也会不断出现。要使隔震技术更加实用,隔震的设计理论有待进一步发展,应尽快制定适合我国国情和材料性能特点的隔震设计规范。

### 参考文献:

- [1] 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): 11-14.  
Han Miao, Wang Xiumei. Research status of base isolation [J]. Journal of Beijing Institute of Civil Eng. and Architecture, 2004, 20(2): 11-14. (in Chinese)
- [2] Skinner R I, Robinson W H, Mcvery G H. 工程隔震概论[M]. 谢礼立,周雍年,赵兴权,译. 北京:地震出版社, 1996: 1-393.  
Skinner R I, Robinson W H, Mcvery G H. An introduction to seismic isolation [M]. Translated by Xie Lili, Zhou Yongnian, Zhao Xingquan. Beijing: Earthquake Publishing House, 1996: 1-393. (in Chinese)
- [3] GSID-3, Guide specification for seismic isolation design [S]. 2000.
- [4] DHB-1, Design specifications of highway bridges. Part V: Seismic design [S]. 1996.
- [5] DHB-3, Design specifications of highway bridges. Part V: Seismic design [S]. 2002.
- [6] Dall'Asta A, Ragni L. Experimental tests and analytical model of high damping rubber dissipating devices [J]. Engineering Structures, 2006, 28(13): 1874-1884.
- [7] Hwang J S, Ku S W. Analytical modeling of high damping rubber bearings [J]. Journal of Structural Engineering, 1997, 123(8): 1029-1036.
- [8] Hwang J S, Wang J C. Seismic response prediction of HDR bearings using fractional derivatives Maxwell model [J]. Engineering Structures, 2002, 20(9): 849-856.
- [9] Hwang J S, Wu J D, Pan C T, Yang G. A mathematical hysteretic model for elastomeric isolation bearings [J]. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 2002, 31(4): 771-789.
- [10] Bhuiyan A R, Okui Y, Mitamura H, Imai T. A rheology model of high damping rubber bearings for seismic analysis: Identification of nonlinear viscosity [J]. International Journal of Solids and Structures, 2009, 46(7/8): 1778-1792.
- [11] Sano T, Di Pasquale G. A constitutive model for high damping rubber bearings [J]. Journal of Pressure Vessel Technology, 1995, 117(1): 53-57.
- [12] Kikuchi M, Aiken I D. An analytical hysteresis model for elastomeric seismic isolation bearings [J]. Earthquake

- Engineering and Structural Dynamics, 1997, 26(2): 215—231.
- [13] Abe M, Yoshida J, Fujino Y. Multi-axial behaviors of laminated rubber bearings and their modeling. I: modeling [J]. Journal of Structural Engineering, 2004, 130(2): 1133—1144.
- [14] Tsai C S, Chiang Tsu-Cheng, Chen Bo-Jen, Lin Shih-Bin. An advanced analytical model for high damping rubber bearings [J]. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 2003, 32(9): 1373—1387.
- [15] 刑德进. 新型 SMA 阻尼器及结构减震控制应用研究 [D]. 天津: 天津大学, 2006.  
Xing Dejin. New SMA damper and application for seismic reduction and control of structures [D]. Tianjin: Tianjin University, 2006. (in Chinese)
- [16] 刑德进, 李忠献. 形状记忆合金在土木工程中的研究与应用 [J]. 材料导报, 2006, 20(8): 62—68.  
Xing Dejin, Li Zhongxian. The study and application of shape memory alloy in civil engineering [J]. Materials Review, 2006, 20(8): 62—68. (in Chinese)
- [17] Gaesser E J, Cozzarelli F A. Shape memory alloys as new materials for a seismic isolation [J]. Journal of Engineering Mechanics, 1991, 117(11): 2590—2608.
- [18] Peter W C. Experimental and analytical studies of shape memory alloy damper for structural control [C]. Proceedings of SPIE, 1995, 2445: 241—251.
- [19] Robert C K. Structural damping with shape memory alloys: one class devices [C]. Proceedings of SPIE, 1995, 2445: 225—240.
- [20] Dolce M, Cardone D, Marnetto R. Implementation and testing of passive control devices based on shape memory alloys [J]. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 2000, 29(7): 945—968.
- [21] Williams K, Chiu G, Bernhard R. Passive adaptive vibration absorbers using shape memory alloys [C]// Proceedings of SPIE-The International Society for Optical Engineering Proceedings of the 1999 Smart Structures and Materials Smart Structures and Integrated Systems. Bellingham: SPIE Society of Photo Optical Instrumentation Engineers, 1999: 630—641.
- [22] Adachi Y, Unjoh S, Kondoh M. Development of a shape memory alloy damper for intelligent bridge systems [J]. Materials Science Forum, 2000, 31(34): 327—328.
- [23] Hiroyuki Tamai, Yoshikazu K. Pseudo-elastic behavior of shape memory alloy wire and its application to seismic resistance member for building [J]. Computational Materials Science, 2002, 25(7): 218—227.
- [24] Indirli M, Castellano M, Martelli A. Demo-application of shape memory alloy devices: The rehabilitation of the S. Giorgio Church Bell-Tower [C]. Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering, 2001, 4330: 262—272.
- [25] 彭刚, 李黎, 唐家祥. 形状记忆合金耗能阻尼器设计的理论方法 [J]. 工业建筑, 2002, 32(8): 47—49.
- Peng Gang, Li Li, Tang Jiaxiang. Theory method of designing shape memory alloy damper [J]. Industrial Construction, 2002, 32(8): 47—49. (in Chinese)
- [26] 李冀龙, 欧进萍. X 形和三角形 SMA 板式阻尼器的阻尼力模型 [J]. 地震工程与工程振动, 2002, 22(6): 109—114.  
Li Jilong, Ou Jinping. Damping force hysteresis loop model for X type and triangle SMA plate dampers [J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2002, 22(6): 109—114. (in Chinese)
- [27] 李忠献, 陈海泉, 李延涛. 斜拉桥参数振动有限元分析与半主动控制 [J]. 工程力学, 2004, 21(1): 131—135.  
Li Zhongxian, Chen Haiquan, Li Yantao. Finite element analysis and semi-active control of parametric vibrations of cable-stayed bridges [J]. Engineering Mechanics, 2004, 21(1): 131—135. (in Chinese)
- [28] 薛素铎, 董军辉, 卞晓芳. 新型 SMA 阻尼器在体育场挑篷结构中的减振效果分析 [J]. 空间结构, 2004, 10(2): 3—7.  
Xue Suduo, Dong Junhui, Bian Xiaofang. Vibration control for roofs of stadiums using a new type of shape memory alloy damper [J]. Spatial Structures, 2004, 10(2): 3—7. (in Chinese)
- [29] 张继刚, 吴斌, 欧进萍. 锥形形状记忆合金阻尼器性能分析与试验研究 [J]. 地震工程与工程振动, 2004, 24(6): 126—130.  
Zhang Jigang, Wu Bin, Ou Jinping. Experimental research and numerical analysis of hysteretic behavior of cone shape memory alloy dampers [J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2004, 24(6): 126—130. (in Chinese)
- [30] Han Yulin, Xing Dejin, Xiao Ertian. NiTi-wire shape memory alloy dampers to simultaneously damp tension, compression and torsion [J]. Journal of Vibration and Control, 2005, 11(8): 1067—1084.
- [31] 左晓宝, 李爱群, 倪立峰, 等. 一种超弹性 SMA 复合阻尼器的设计与试验 [J]. 东南大学学报, 2004, 34(4): 459—463.  
Zuo Xiaobao, Li Aiqun, Ni Lifeng, Chen Qingfu, et al. Design and experimental investigation of super-elastic SMA damper [J]. Journal of Southeast University (Natural and Science Edition), 2004, 34(4): 459—463. (in Chinese)
- [32] 李宏男, 钱辉, 宋钢兵, 高东伟. 一种新型 SMA 阻尼器的试验和数值模拟研究 [J]. 振动工程学报, 2008, 21(2): 179—184.  
Li Hongnan, Qian Hui, Song Gangbing, Gao Dongwei. A type of shape memory alloy damper: design, experiment and numerical simulation [J]. Journal of Vibration Engineering, 2008, 21(2): 179—184. (in Chinese)
- [33] Buehler W, Wiley R. The properties of TiNi and associated phases [R]. US Naval Ordnance laboratory,



- 1961, [AD 266607]: 61—75.
- [34] Han Y L, Xing D J, Xiao E T, Li A Q. Ni-Ti wire shape memory alloy dampers to simultaneously damp tension, compression, and torsion [J]. *Journal of Vibration and Control*, 2005, 11(8): 1067—1084.
- [35] Clark P W, Aiken I D, Kelly J M, Higashino M, Krumme R. Experimental and analytical studies of shape-memory alloy dampers for structural control [C]. *Proceedings of SPIE*, 1995, 2445: 241.
- [36] Olsen J S. Seismic dampers with composite Ni-Ti wires-A new damper system [D]. Trondheim, Norway: Norwegian University of Science and Technology (NTNU), 2006.
- [37] Van der Eijk C, Olsen J S, Zhang Z. Investigation of the Pseudo-Elastic Behavior in two Commercial Ni-Ti Alloys: Experiments and Modeling [C]. *Non-equilibrium Dynamical Phenomena in Inhomogeneous Solids*, 2006, 478: 13—16.
- [38] Chalhoub M S, Kelly J M. Sliders and tension controlled reinforced elastomeric bearings combined for earthquake isolation [J]. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 1990, 27(1): 256—263.
- [39] Ryota Maseki, Ichiro Nagashima, Masayoshi Hisano. An experimental study on application of hybrid-type base isolation system to high-rise buildings [C]. *12th World Conference On Earthquake Engineering*, 2000, 12: 991—996.
- [40] 吕西林, 朱玉华, 施卫星. 组合基础隔震房屋模型振动台试验研究[J]. *土木工程学报*, 2001, 34(2): 43—49.  
Lü Xilin, Zhu Yuhua, Shi Weixing. Shaking table test on building models with combined isolation system [J]. *China Civil Engineering Journal*, 2001, 34(2): 43—49. (in Chinese)
- [41] 尚守平, 周志锦, 刘可, 姚菲. 一种钢筋-沥青复合隔震层的性能[J]. *铁道科学与工程学报*, 2009, 6(3): 13—16.  
Shang Shouping, Zhou Zhijin, Liu Ke, Yao Fei. The research on the steel-asphalt isolation lay [J]. *Journal of Railway Science and Engineering*, 2009, 6(3): 13—16. (in Chinese)
- [42] 窦远明, 刘晓立, 赵少伟, 刘稚媛. 砂垫层隔震性能的试验研究[J]. *建筑结构学报*, 2005, 26(1): 125—128.  
Dou Yuanming, Liu Xiaoli, Zhao Shaowei, Liu Zhiyuan. An experimental study of isolating properties of sand cushion [J]. *Journal of Building Structures*, 2005, 26(1): 125—128. (in Chinese)
- [43] 刘斯宏, 王艳巧, 金远征. 土工袋基础减振隔震试验[J]. *水利水电科技进展*, 2012, 32(1): 87—90.  
Liu Sihong, Wang Yanqiao, Jin Yuanzheng. Experimental study on vibration reduction and isolation of bases with soil bags [J]. *Advances in Science and Technology for Water Resources*, 2012, 32(1): 87—90. (in Chinese)
- [44] Taniwangsa W, Kelly J M. Studies on seismic isolation for housing in developing regions [C]. *Proceedings of the 1th World Conference on Earthquake Engineering*, 1996, 261: 485—493.
- [45] Kelly J M. The tests of natural rubber isolators for the UNIDO demonstration building in Shantou City [C]. *Proceedings of International Workshop on the Use of Rubber-Based Bearings for the Earthquake Protection of Small Buildings*, 1994, 351: 263—271.
- [46] 苏建, 温留汉·黑沙, 周福霖. 高层隔震建筑性能分析[J]. *建筑结构*, 2009, 39(11): 40—42.  
Su Jian, Wenliuhan·Heisha, Zhou Fulin. Study on dynamic characteristics of base isolated high-rise building [J]. *Structure Engineering*, 2009, 39(11): 40—42. (in Chinese)
- [47] 曲哲, 叶列平, 潘鹏. 高层建筑的隔震原理与技术[J]. *工程抗震与加固改造*, 2009, 31(5): 58—63.  
Qu Zhe, Ye Lieping, Pan Peng. Theory and techniques of seismic isolation in high-rise buildings [J]. *Earthquake Resistant Engineering and Retrofitting*, 2009, 31(5): 58—63. (in Chinese)
- [48] 王曙光, 杜东升, 刘伟庆. 高层建筑结构隔震设计关键问题[J]. *南京工业大学学报*, 2009, 31(1): 71—77.  
Wang Shuguang, Du Dongsheng, Liu Weiqing. Key - problems of seismic isolation structure design in high rise buildings [J]. *Journal of Nanjing University of Technology*, 2009, 31(1): 71—77. (in Chinese)
- [49] 付伟庆, 刘文光, 魏路顺. 大高宽比隔震结构模型水平向振动台试验[J]. *沈阳建筑大学学报(自然科学版)*, 2005, 21(4): 320—324.  
Fu Weiqing, Liu Wenguang, Wei Lushun. Experimental study on horizontal vibration table of isolation structure model with large height-width ratio [J]. *Journal of Shenyang Jianzhu University (Natural Science)*, 2005, 21(4): 320—324. (in Chinese)
- [50] 李宏男, 吴香香. 橡胶垫隔震支座结构高宽比限值研究[J]. *建筑结构学报*, 2003, 24(2): 14—19.  
Li Hongnan, Wu Xiangxiang. Study on limit of height-to-Width ratio for base-isolated buildings with rubber bearings under earthquake [J]. *Journal of Building Structures*, 2003, 24(2): 14—19. (in Chinese)
- [51] 程华群, 刘伟庆, 王曙光. 高层隔震建筑设计中隔震支座受拉问题分析[J]. *地震工程与工程振动*, 2007, 27(4): 161—166.  
Cheng Huaqun, Liu Weiqing, Wang Shuguang. Analysis of the tension of rubber bearings in the design of isolated high-rise buildings [J]. *Journal of Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, 2007, 27(4): 161—166. (in Chinese)
- [52] 杜永峰, 朱前坤. 高层隔震建筑风振响应研究[J]. *工程抗震与加固改造*, 2008, 30(6): 64—68.  
Du Yongfeng, Zhu Qiankun. Analysis on wind-induced response of tall-story isolation [J]. *Earthquake Resistant*

- Engineering and Retrofitting, 2008, 30(6): 64–68. (in Chinese)
- [53] Love J S, Tait M J, Toopchi-Nezhad H. A hybrid structural control system using a tuned liquid damper to reduce the wind induced motion of a base isolated structure [J]. Engineering Structures, 2011, 33(3): 738–746.
- [54] 小林正人, 井澤保一, 洪忠憲. モード連成作用を考慮した中間層免震構造の各部地震応答予測[J]. 日本建築学会技術報告集, 2003, 527(7): 73–80.  
Kobayashi Masahito, Izawa Yasukazu, Koh Tadaki. The Prediction method of earthquake responses on mid-story isolation system considering modal coupling effect [J]. AIJ Journal of Technology and Design, 2003, 527(7): 73–80. (in Japanese)
- [55] 徐忠根, 周福霖. 汕头博物馆结构动力分析[J]. 世界地震工程, 1996, 19(2): 33–36.  
Xu Zhonggen, Zhou Fulin. Structural dynamic analysis of Shantou museum [J]. World Information on Earthquake Engineering, 1996, 19(2): 33–36. (in Chinese)
- [56] 周福林, 张颖, 谭平. 层间隔震体系的理论研究[J]. 土木工程学报, 2009, 42(8): 1–8.  
Zhou Fulin, Zhang Ying, Tan Ping. Theoretical study on story isolation system [J]. China Civil Engineering Journal, 2009, 42(8): 1–8. (in Chinese)
- [57] 张颖, 谭平, 周福霖. 基于能量平衡的层间隔震结构地震响应预测[J]. 振动与冲击, 2009, 28(4): 137–142.  
Zhang Ying, Tan Ping, Zhou Fulin. Seismic response prediction for a story-isolation structure based on energy balance method [J]. Journal of Vibration and Shock, 2009, 28(4): 137–142. (in Chinese)
- [58] 谢军龙, 周福霖. 多层房屋结构 TMD“加层减震”试验研究和应用[J]. 世界地震工程, 1998, 14(4): 57–60.  
Xie Junlong, Zhou Fulin. Test investigation of seismic reduction using additional stories as a TMD and its application to the existing multistory buildings [J]. World Information on Earthquake Engineering, 1998, 14(4): 57–60. (in Chinese)
- [59] 罗小华, 程超. TMD 原理应用在框架房屋结构加层减震时最优参数值的探讨[J]. 四川建筑科学研究, 2000, 26(2): 20–22.  
Luo Xiaohua, Cheng Chao. Optimal parameter research of TMD when it is applied to adding story and seismic decrease of frame building [J]. Building Science Research of Sichuan, 2000, 26(2): 20–22. (in Chinese)
- [60] 周锡元, 韩淼, 曾德民, 马东辉. 橡胶支座与 R/C 柱串联隔震系统水平刚度系数[J]. 振动工程学报, 1999, 12(2): 157–165.  
Zhou Xiyuan, Han Miao, Zeng Demin, Ma Donghui. Horizontal rigidity coefficient of the serial system of rubber bearing with column [J]. Journal of Vibration Engineering, 1999, 12(2): 157–165. (in Chinese)

注: 该文在第 22 届结构工程学术会议(2013 新疆)应邀作特邀报告