

隔震结构系列研究及在甘肃的工程应用

杜永峰, 李 慧, 程选生, 党 育

(兰州理工大学防震减灾研究所, 甘肃 兰州 730050)

摘要: 针对叠层橡胶支座基础隔震体系的性能、分析与设计等, 介绍了由笔者所在课题组完成的寒冷环境下叠层橡胶隔震支座力学性能试验研究的成果、实振型分解法分析非比例阻尼隔震结构动力响应、隔震结构动力分析软件、橡胶隔震器与地下室悬臂柱串联后所组成的结构系统动力稳定性、高烈度区使用智能隔震体系的控制算法及甘肃省隔震构造图集等研究成果。同时介绍了本课题组负责设计的甘肃省叠层橡胶支座隔震体系的若干工程简况。

关键词: 基础隔震; 橡胶隔震器; 动力稳定性; 非比例阻尼; 智能隔震; 动力可靠性

中图分类号: TU352.1*2; P315.9 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-0844(2005)04-0312-05

A Series of Studies on Isolated Structures and Their Application in Gansu Province

DU Yong-feng, LI Hui, CHENG Xuan-sheng, DANG Yu

(Institute of Earthquake Protection and Disaster Mitigation, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China)

Abstract: The result of a series of studies on base isolated structures carried out by the writer's research group from the view-point of performance, analysis and design of LRB isolated structures is presented. The studies include a cyclic test of rubber isolator in cold environment, real mode superposition method for dynamic analysis of non-proportionally damped isolated structures, a computer software for analysis and design of isolated structures, dynamic stability analysis of basement column serially connected with rubber isolator, control algorithms for smart isolation in regions with high earthquake intensity, and the standard drawing for the detailing design of base isolated buildings. A brief introduction is also made to some isolated buildings, designed by the writer's research group, with application of LRB isolators.

Key words: Base isolation; Rubber isolator; Dynamic stability; Non-proportional damping; Smart isolation; Dynamic reliability

0 前言

基础隔震已经成为在国内外受到广泛重视的减震控制新技术。这种体系的特点是造价相对低廉, 减震性能稳定, 被许多国家较早地应用于实际工程^[1]。在1994年的美国北岭地震和1995年的日本兵库县南部地震中, 数栋基础隔震工程初步显示了其优越的减震性能, 进一步推动了基础隔震技术在世界范围内的广泛应用。我国2001年7月颁布的建筑抗震设计规范(GB50011-2001)中, 也已将隔震和消能减震设计列为独立一章。这表明我国已经

开始将隔震和消能减震作为可在实际工程中推广应用的减震新技术。

但是在隔震结构体系具体应用阶段仍然有许多应用技术问题需要给予关注。首先, 我国地域辽阔, 各地气候条件相差比较大, 北方大部分地区冬季的气温相当低。随着使用环境温度的变化, 叠层橡胶隔震器的力学性能会有明显的改变。相比之下现有文献对高温环境下橡胶隔震器的力学性能给予了较多关注, 而对于低温环境下橡胶隔震器的力学性能的研究就很少见报道。其次, 隔震结构是一种非比

收稿日期: 2005-07-25

基金项目: 甘肃省建设科技攻关基金(JK99-07); 甘肃省经贸新技术基金(JM99-05)联合资助。

作者简介: 杜永峰(1962-), 男(汉族), 教授, 博士生导师, 主要从事结构工程研究。

例阻尼动力体系,但由于隔震层的解耦作用,隔震结构的非比例阻尼体系又有其自身的特点。针对这些特点建立工程实用分析方法,有利于该项技术为广大工程设计人员所接受,从而对于隔震技术的大面积推广应用有明显的益处。再次,国内外许多实际的隔震工程都采用了橡胶隔震器与地下室悬臂柱串联的结构方案,在我国已经建成的叠层橡胶隔震工程中这一方案所占比例更为显著,因此悬臂柱与橡胶隔震器串联系统的结构安全性受到了工程技术人员的广泛关注。

笔者所在课题组根据实际工程应用的需要,在 $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的寒冷环境下对叠层橡胶隔震器的力学性能进行了试验研究;建立了采用实振型分解法分析非比例阻尼隔震结构动力响应的工程实用算法;并对橡胶隔震器与地下室悬臂柱串联后所组成的结构系统动力稳定性方面做了初步的探讨。此外课题组还率先编制了叠层橡胶支座基础隔震建筑构造图集,并设计建造了甘肃省兰州市首栋叠层橡胶支座隔震工程。本文简要介绍这一系列研究课题的主要思路。

1 隔震结构系列研究

1.1 低温环境下橡胶隔震器的力学性能

叠层橡胶隔震器由橡胶和钢板经过硫化粘合而成,在低温环境下橡胶和钢板都会产生不同程度的硬化,从而使隔震器力学行为呈现明显的脆性。日本学者曾对 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 低温环境下的橡胶隔震器进行试验研究^[3]。然而在我国北方许多地区冬季的极端最低气温要远远低于这个温度。为了进一步了解叠层橡胶隔震器在更低温度环境下的力学性能,课题组对叠层橡胶隔震器分别在 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $-35\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的低温环境下进行压剪组合状态下的往复试验,获得了在该低温温度区间内橡胶隔震器应变率分别为50%、100%、150%、200%及250%时的数十条滞回曲线。并与室温下的相应指标进行对比。

试验在自制的橡胶隔震支座检测设备上进行。橡胶隔震支座检测设备可以提供1500 kN的竖向荷载,同时水平方向施加水平往复推力,能够在设计竖向轴力作用下实现对一般小直径橡胶隔震支座的力学性能的检测;可用2000 kN压力机对橡胶隔震支座竖向刚度等性能指标进行检测。数据采集由7V08数据采集仪完成。低温环境由 $-80\text{ }^{\circ}\text{C}$ 冷冻机提供。测温仪器是测量范围 $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$ ~ $1000\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的温

度传感器。

本试验共分两部分进行。第一部分测定橡胶支座的几个技术指标,包括水平初始刚度、水平屈服刚度,采取的主要方法是直接测定法,即往复滞回试验。按预定的低温温度水准,将橡胶隔震支座放在冷冻机中冷冻24小时以上;从冷冻机取出试件后套上绝热棉垫,迅速搬运;在压剪试验机上安装就位,做往复水平推剪试验。本试验还测定了橡胶隔震支座的竖向刚度。第二部分是低温环境条件下橡胶支座的温度场试验。主要用温度传感器直接测定橡胶支座在低温条件下温度场分布及其随时间的变化规律。试件放置在冷冻机中的冷冻时间同样为24小时以上。将试件取出后采用和推剪试验阶段相同的手法搬运,并安装在试验平台上。在初始阶段每隔5分钟测试一次,一小时后每隔10分钟测一次并记录,二小时后,测试结束。

基于两组正式试件,在5个不同温度水平(包含室温)、5个不同的应变率水平下的寒冷环境下低温压剪试验共获得了数十条滞回曲线。相应地,温度场的分布及其变化规律测试曲线也有数十条。限于本文的篇幅,仅列举几条典型的滞回曲线以及温度场曲线作为代表,分别如图1、图2所示。

根据试验所得到的平均初始刚度与室温下试验的结果对比^[2],可求得初始刚度随温度降低而升高

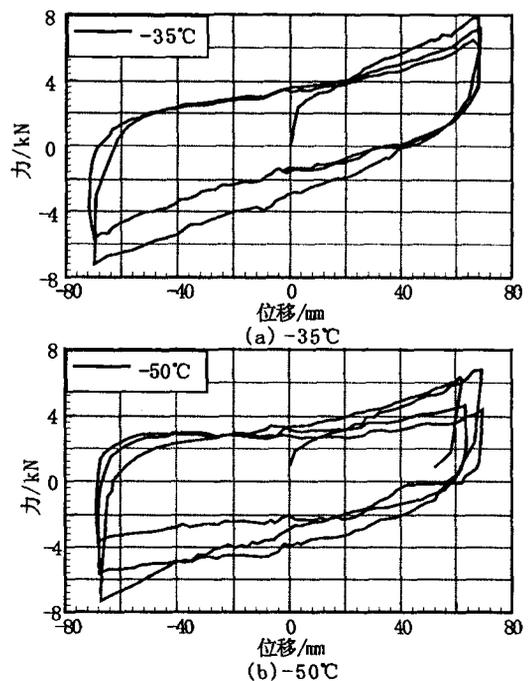


图1 典型的滞回曲线

Fig.1 Typical hysteretic curves.

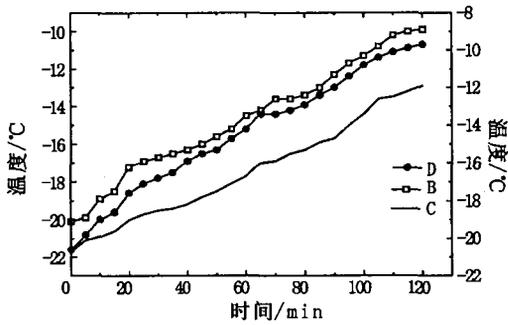


图2 -20°C,不同位置温度变化

Fig.2 Variation of temperature at different position, -20°C.

的规律(表1)。将上述平均初始刚度及平均屈服刚度代入 Skinner 的双线性模型公式,可以推算出试件的等效阻尼比随着温度降低而下降,见表1。

表1 温度对橡胶隔震支座力学性能的影响

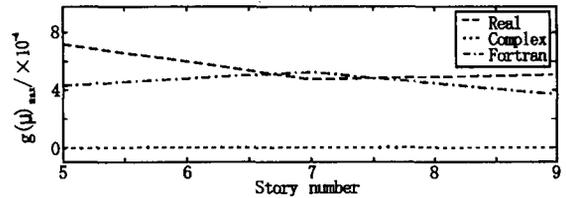
T / °C	20	-20	-35	-50
等效阻尼比	0.00	-1.6%	-2.4%	-4.1%
初始刚度	0.00	+6.8%	+14.4%	17%

1.2 非比例阻尼基础隔震结构体系的实用分析

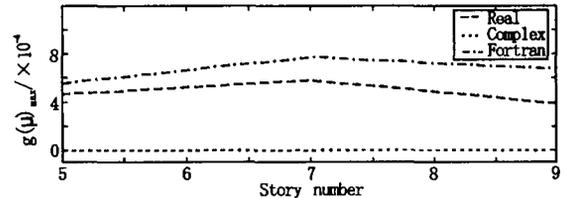
由于在隔震结构中隔震系统与上部结构阻尼特性截然不同,它们所组成的是一种典型的非比例阻尼体系。非比例阻尼特性对结构动力响应有相当大的影响,上个世纪中叶以来国内外学者一直将非比例阻尼结构的动力响应作为一种特殊议题加以研究,提出了多种不同的算法^[5]。上个世纪末的十多年里,随着结构控振技术研究的不断深入,以基础隔震、消能减振以及半主动控振为代表的结构控振新技术逐渐在实际工程中得到应用,给非比例阻尼体系不断赋予新的内涵。具有高阻尼隔震系统及附加阻尼消能装置的控制结构所组成的非比例阻尼体系的动力分析在近年来又受到国内外学者广泛的重视与研究^[6-7]。

求解非比例阻尼体系的方法大体上可分为实数域分析和复数域分析两大类。实数域的分析方法有两大优势:1)计算结果有明显的工程意义;2)分析方法易于为工程设计人员所接受。本课题组基于隔震层存在的对隔震体系动力响应有解耦作用的物理特性,将实振型分解法与拉普拉斯变换方法联合应用,提出了针对隔震结构这种特殊的非比例阻尼体系用实振型分解法求解其时域动力响应的工程算法。通过对三个实际的隔震工程在不同阻尼水准、不同输入波时的地震响应进行分析,并与现有的三种算法的结果进行对比可知,在设计阻尼水准下,本

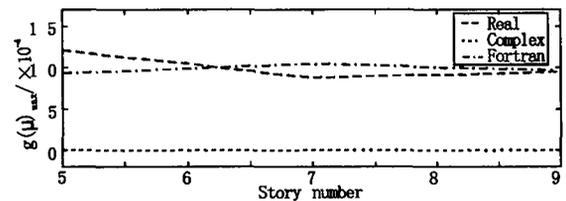
文提出的算法与双精度 Fortran 语言所编制的 Wilson-θ 法结果的精度基本相当。当输入不同地波时,本文算法求得的位移、速度及加速度峰值的最大相对误差分别不超过 0.07%、0.19% 和 0.27%。代表性的最大误差分别如图 3(a) - (c) 所示。



(a)位移峰值最大误差:1号波,设计阻尼



(b)速度峰值最大误差:1号波,设计阻尼



(c)加速度峰值最大误差:1号波,设计阻尼

图3 位移、速度和加速度峰值最大误差

Fig.3 Max errors of peak displacement, velocity and acceleration.

1.3 橡胶隔震器与地下室悬臂柱串联系统的动力稳定性

针对国内外不少工程的隔震支座都放在地下室悬臂柱顶部的问题,为保证悬臂柱-隔震支座串联系统的安全性,对该系统的动力稳定性进行了分析。综合考虑竖向荷载作用下的 $P-\Delta$ 效应、水平地震作用下的弯曲变形等因素,通过动力稳定性分析及频谱分析可确定此体系的最小柱截面尺寸。分析的结果可为此串联系统的工程设计与应用提供理论依据。典型的串联体系动力失稳区间如图4。

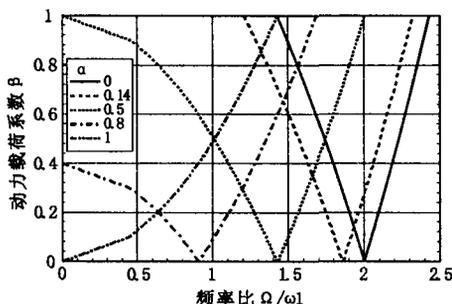


图4 串联体系主要动力失稳区间

Fig. 4 Main instability region of serially connected system.

1.4 智能隔震结构的控制算法

模拟地震激励输入结构的过程,将控制目标函数化解到每个时间步长上。用激励所产生的脉冲响应重新构造控制目标函数,直接从泛函变分出发,推导出了一种更为一般的最优控制算法,并用状态转移的数值方法加以实现。从概念上讲,本文算法是一种更为合理的结构最优控制算法。算例表明,在相同控制能量下本文算法能更有效地削减响应峰值,所产生的控制力能更好地跟踪响应和激励特征,且稳定性良好。

1.5 被动及智能隔震结构的耗能机理分析

本文采用 Bouc - Wen 模型,利用状态空间迭代法对基础隔震结构进行了多质点的弹塑性时程分析,并根据此结果利用能量方程,求得隔震结构的各项能量,绘制了各能量项时程曲线。由于基础隔震结构还存在一些局限,在一般的基础隔震结构上增设 MR 阻尼器使结构随地震作用调节阻尼力。对于此体系利用最优控制算法,求解出阻尼器在每时刻的最优控制力,并根据 MR 阻尼器的工作特点,提出了一种界限调节的半主动控制策略。最后对结构进行了时程分析。仿真结果表明,与隔震结构相比 MR 智能隔震结构在位移减小的同时上部结构的加速度略有增加,说明该体系有较好的控振效果^[12]。

1.6 被动及智能隔震结构的动力可靠性

采用零均值双过滤白噪声功率谱来描述地震地面运动。即设基岩运动具有白噪声谱,并用金井清

一田治见宏及克拉夫-彭津分别建议的两种过滤器进行双重过滤。在“小震”作用下采用的等效线性化的隔震层刚度及阻尼参数,建立线性的运动方程^[5]。在“大震”作用下隔震层采用 Bouc - Wen 模型,上部结构采用退化 Bouc - Wen 模型,并利用随机模型进行等效线性化,再用虚拟激励法迭代的模式计算随机响应。在“小震”下,以各层层间位移最大响应值不超过其弹性位移限值作为上部结构的功能状态界限,假定上部结构各层间的失效互不关联;在“大震”作用下,以各层层间位移最大响应及滞回耗能作为上部结构功能状态的界限,且假定上部结构各层间的失效相关。不论在“小震”还是“大震”下,隔震层的功能状态界限均以抗震规范规定的最大位移限值作为隔震层的功能状态界限。此外,还假定各层间位移最大响应值遵从极值 I 型分布,层间允许变形值服从对数正态分布。采用将非正态的随机过程和随机变量当量正态化的方法,用迭代法求出可靠度指标。

1.7 基础隔震结构动力分析设计软件简介

基础隔震结构动力分析设计软件 (ISNDP) 针对隔震建筑的非比例阻尼特性,参照规范条款,用 VB 和 FORTRAN 联合编制软件。该软件使用方便,计算精度完全满足工程要求。

1.8 甘肃省叠层橡胶隔震结构节点构造图集简介

为了推动基础隔震技术的工程应用,确保基础隔震结构的设计、施工质量,在调查研究的基础上编制了甘肃省基础隔震建筑构造图集,对基础隔震建筑所涉及的特殊构造问题提出了详尽的处理措施。该图集即将由甘肃省工程建设标准管理办公室出版。

2 橡胶隔震结构体系在甘肃省的典型工程应用

(1) 西北师范大学田家炳教育书院

该工程为综合性教学建筑,是兰州市第一栋采用叠层橡胶支座基础隔震的工程。平面布置呈品字形,主体分为三部分:南侧为六层、局部七层的主楼,高 28.90 m,最大高宽比 1.78;东西两翼为五层的教学楼高 20.2 m,最大高宽比 1.50。全部采用现浇钢筋混凝土框架结构。依据确定的减震目标,经过计算对比,该工程主楼分别布置 GZY300、GZY400 和 GZY500 型隔震支座 16、51、7 个,每侧翼楼分别布置 GZY300、GZY400 和 GZY500 型隔震支座 13、28、4 个。主楼、附楼隔震前后最大层间剪力比分别为

0.340、0.352,取水平向减震系数均为0.5^[5]。

(2) 武威市人民医院医疗康复中心

该工程为现浇钢筋混凝土框架结构,主体6层,局部8层,平面呈Z形。经过分析,共采用隔震支座136个,其中GZY500型60个,GZY600型76个,隔震前后最大层间剪力比为0.314,取水平向减震系数为0.5。

(3) 古浪黄羊川国际会议中心工程

该工程分四部分,两侧附楼为隔震建筑,其余部分分为非隔震建筑。附楼平面布置呈L形,主体四层,局部五层,小塔楼六层,采用现浇钢筋砼框架结构^[12]。经过分析,共采用GZY600型隔震支座98个,隔震前后最大层间剪力比为0.308,取水平向减震系数为0.5。

(4) 甘肃省疾病预防控制中心工程

该工程为甲类建筑,隔震前采用现浇钢筋砼框架-剪力墙结构,隔震后为现浇钢筋砼框架体系。主体地上八层,局部九层,地下一层,建筑总高度31.55 m。共分别采用GZY500和GZY600型隔震支座40个和78个,隔震前后最大层间剪力比为0.282,取水平向减震系数为0.5。

(5) 兰州市墙材革新节能办公室示范住宅楼

该工程为现浇钢筋混凝土框架结构,主体8层,局部9层,共五个单元,平面布置呈长方形。经过分析,共采用隔震支座77个,其中GZY400型58个,GZY500型19个,隔震前后最大层间剪力比为0.351,取水平向减震系数为0.5。

鸣谢:本课题研究过程中,汕头和泰隔震器材有限公司提供了本文低温试验所用的橡胶隔震器试件。在

此表示衷心地感谢。

[参考文献]

- [1] 周福霖. 我国结构隔震技术的发展应用和探讨[A]. 见: 工程结构隔震减震技术的新进展[C]. 北京: 地震出版社, 2004. 1-9.
- [2] 李慧, 韩建平, 宋斌, 等. 环境中叠层橡胶隔震支座力学性能的拟静力试验研究[J]. 低温建筑技术, 2003, (4): 33-35.
- [3] 邓学晶. 叠层橡胶垫基础隔震结构动力分析及试验研究[D]. 甘肃工业大学, 1999.
- [4] 尹维祥. 叠层橡胶支座稳定性及其受低温环境的影响[D]. 甘肃工业大学, 2001.
- [5] 张迪. 叠层橡胶支座基础隔震结构实用计算模型及工程应用[D]. 甘肃工业大学, 2001.
- [6] Clough R W, Mojtahedi S. Earthquake response analysis considering non-proportional damping[J]. Earthq. Engrg. and Struc. Dyn., 1976, 4(3): 489-496.
- [7] Igusa T, Der Kiureghian A, Sackman J L. Model decomposition method for stationary response of non-classically damped systems[J]. Earthq. Engrg. and Struc. Dyn., 1984, 12(1): 121-136.
- [8] Kelly J M. The role of damping in Seismic isolation[J]. Earthq. Engrg. and Struc. Dyn., 1999, 28(1): 3-20.
- [9] R W Clough, J Penzien. Dynamics of Structures [M]. (2nd ed). New York: McGraw-Hill, 1993.
- [10] Du YF, Li H, Spencer BF. Effect of Non-Proportional Damping on Seismic Isolation[J]. Journal of Structural Control, 2002, 9(3): 205-236.
- [11] 杜永峰, 李慧, B F Spencer, 等. 非比例阻尼隔震结构地震响应的实振型分解法[J]. 工程力学, 2003, (3): 24-32.
- [12] 党育. 基础隔震结构耗能及MR智能隔震结构时程分析[D]. 兰州理工大学, 2003.
- [13] 杜永峰, 党育, 李慧, 等. 基于非比例阻尼模型的隔震结构动力分析软件[J]. 建筑结构, 2003, 34(6): 32-35.