

吴迪, 沈朝勇, 熊焱, 等. 三维基础隔震(振)技术与装置研究简述[J]. 华南地震, 2020, 40(4): 101-109. [WU Di, SHEN Chaoyong, XIONG Yan, et al. Brief Review of Three-dimensional Base Seismic (Vibration) Isolation Technology and Device [J]. South China journal of seismology, 2020, 40(4): 101-109]

三维基础隔震(振)技术与装置研究简述

吴迪¹, 沈朝勇¹, 熊焱², 蒋国平³, 冼巧玲¹,

(1. 广州大学工程抗震研究中心, 广州 510405; 2. 华南理工大学亚热带建筑科学国家重点实验室, 广州 510604;
3. 福建江夏学院工程学院, 福州 350108)

摘要: 三向地震动与环境振动对工程结构的安全性和舒适性的影响, 越来越引起多方面重视。如何利用三维基础隔震(振)技术解决所面临的工程问题也逐渐受到关注。基于振动传递率与能力与需求关系, 探讨了三维隔震(振)系统对隔震(振)支座的需求特征。在国内外学者取得理论成果和科研实践基础上, 基于隔震(振)支座的构造特点对三维隔震(振)装置进行分类, 讨论不同三维隔震(振)支座的基本构造、适用性、组成特征、力学特征等。

关键词: 基础隔震; 三维隔震(振); 隔震支座; 隔震技术; 抗震分析

中图分类号: TU352.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-8662(2020)04-00101-09

DOI: 10.13512/j.hndz.2020.04.014

Brief Review of Three-dimensional Base Seismic (Vibration) Isolation Technology and Device

WU Di¹, SHEN Chaoyong¹, XIONG Yan², JIANG Guoping³, XIAN Qiaoling¹

(1. Earthquake Engineering Research & Test Center of Guangzhou University, Guangzhou 510405, China;
2. State Key Laboratory of Subtropical Building Science, South China University of Tech., Guangzhou 510640, China; 3. School of Civil Engineering, Fujian Jiangxia University, Fuzhou 350108, China)

Abstract: The influence of 3-dimensional (3D) ground motion and environmental vibration on the safety and comfort of engineering structures has attracted more and more attention. How to use the three-dimensional base isolation (vibration) technology to solve the engineering problems has gradually attracted attention. Based on the relationship between vibration transmissibility and relationship between capacity and demand, the demand characteristics of three-dimensional isolation (vibration) system for isolation bearings are discussed. On the basis of theoretical achievements and scientific research practice obtained by domestic and foreign scholars, the three-dimensional isolation devices are classified based on the structural characteristics of isolation isolators, and the basic structures, applicability, composition characteristics and mechanical characteristics of different three-dimensional isolation isolators are discussed.

Key words: Base seismic isolation; Three-dimension; Seismic isolator; Isolation technology; Seismic analysis

收稿日期: 2020-09-01

基金项目: 广州市教育局高校科研项目(201831826); 国家自然科学基金项目(51778160) 联合资助

作者简介: 吴迪(1978-), 男, 博士、副教授, 主要从事工程减振和结构抗震领域研究。

E-mail: 11795234@qq.com

通信作者: 熊焱(1978-), 女, 博士、副教授, 主要从事工程减振和结构抗震领域研究。

E-mail: xyan@scut.edu.cn

0 引言

在社会经济和科学技术迅速发展的今天,城市化和可持续发展的紧密联系在一起^[1]。二十一世纪以来,随着世界范围内城市化进程加速推进,城市和乡村工程结构面临诸多新的问题和挑战,例如地震与环境振动对城镇工程安全性和舒适性影响问题等^[2-3]。类似问题引起了工程结构领域专家和学者的高度重视^[4-6]。为解决上述问题,国内外研究者从隔震、减振和振动控制方面开展了理论、试验研究和开发,并在实际工程运用、隔震规范化和产业化方面取得了显著进展^[7-10]。

早期隔震装置功能主要针对水平向隔震和减振,对竖向减振效果不明显。1909年由Calantarients提出的一种建筑基础隔震设计方法^[11],该方法是指在结构物底部与地基之间设置隔震系统,通过延长结构的周期和适当增加阻尼,使结构加速度反应减弱,控制地面运动能量向结构物传递。隔震技术被证明是结构工程防震减灾的有效手段,并且逐步用于工程结构抗震与减振控制。在1994北岭地震^[12]、1995年神户地震^[13]和2013年芦山地震^[14]中,采用基础隔震和减振技术的工程结构经受了地震的考验,因此该技术获得各国工程减震控制领域的认可,并被使用于工程结构的基础隔震(振)。

近年来,随着三维隔震和减振技术积极的发展,国内外学者经过一系列理论研究和试验,提出和开发了不同种类的新型三维基础隔震和减振装置。本文在现有三维基础隔震和减振技术与应用研究成果基础上,针对工程结构抗震防灾需求进行介绍和分析,并对现有三维隔震(振)装置进行分类和讨论,希望本文的阐述和研究能对于新型三维隔震和减振技术的发展发挥一定推动作用。

1 三维隔震(振)技术与装置

1.1 三维隔震(振)技术简述

根据结构动力学的基本理论,基础隔震(振)系统可被简化为有阻尼单自由度体系。在外部

激励振动作用下,单自由度体系运动微分方程的表示为:

$$m\ddot{u} + c\dot{u} + ku = p_0 \sin \omega t \quad (1)$$

式(1)中, m 为单自由度质量, c 为粘滞阻尼系数, k 为刚度系数, u 、 \dot{u} 、 \ddot{u} 别为系统的位移、速度、加速度, ω 为外部荷载谐振动的圆频率。

根据式(1)可以推导基础隔震(振)体系的振动传递率(TR)^[15],即最大传递力(f_{\max})与外部激励的幅值(p_0)的比值:

$$TR = \frac{f_{\max}}{p_0} = \left\{ \frac{1 + [2\zeta(\omega/\omega_n)]^2}{[1 - (\omega/\omega_n)^2]^2 + [2\zeta(\omega/\omega_n)]^2} \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (2)$$

式中, ω_n 为隔震(振)体系的自振频率; ω 为外部激励荷载的振动频率; ζ 为阻尼比;

根据式(2)可以计算得到不同外部激励频率与结构自振频率比(ω/ω_n)情况下 TR 的分布情况如图1所示。根据图1所示的振动传递率的函数分布可知,增加阻尼比 ζ 与频率比 ω/ω_n 能有效降低外部激励传递给系统的作用力。且当 $\omega/\omega_n > \sqrt{2}$ 时, $TR < 1$,传递力小于外部激励的幅值。但是,在外部激励的频谱特性较为复杂,例如根据美国规范FEMA450将场地划分为A、B、C、D、E共5类^[16],选取不同场地的地震动计算得到其加速度反应谱图如图2所示。由图2可知不同场地的地震动加速度频谱特性差异较大。此外,外部激励振动的卓越频率也会随时间发生变化。显然,式(2)无法衡量现实外部激励的特殊性和随机性。此外,实际上传递力小于外部激励的幅值也不能保证上部结构安全性和舒适性的限值要求。根据实际隔震结构的设计经验,频率比 ω/ω_n 需要超过2才能达到较为有效的减震需求。

根据隔震(振)系统的理论分析,三维基础隔震和减振对装置的需求包括竖向承载力、刚度、阻尼等,在特定阻尼条件下隔震(振)装置的能力与需求关系可表示为图3所示。装置需要具备足够的竖向承载能力和自复位能力,满足承担上部结构全部荷载的需求,并能够在振动作用结束后结构恢复到初始状态。其次,装置需要拥有较低的刚度,满足提高降低隔震(振)系统振动传递率的需求。

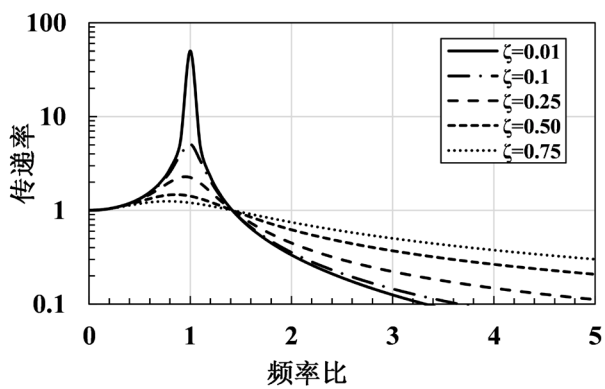


图1 不同阻尼比隔震（振）系统的振动传递率
Fig.1 Vibration transmission rate of a seismic isolation (vibration) system with different damping ratios

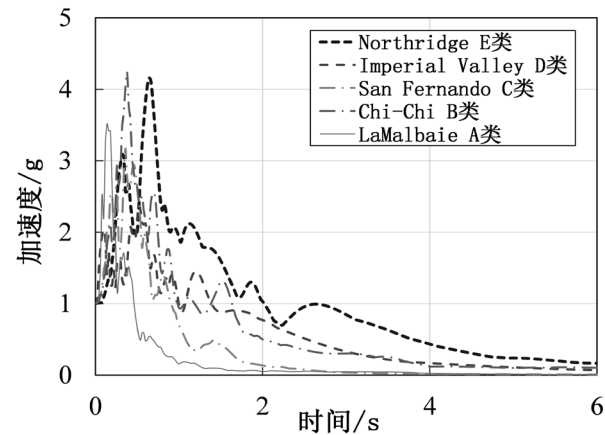


图2 不同场地地震动反应谱
Fig.2 Earthquake response spectrum of different sites

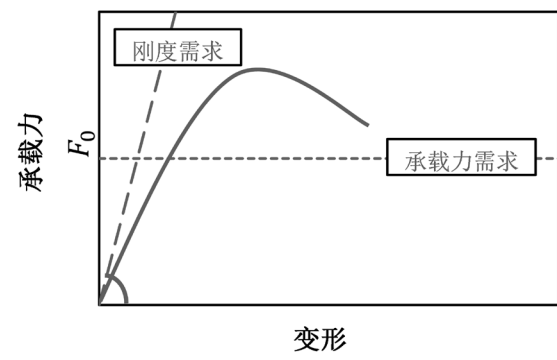


图3 隔震（振）装置的能力与需求关系
Fig.3 Relationship between capacity and demand of seismic isolation (vibration) device

1.2 三维基础隔震（振）装置分类

隔震（振）系统主要由隔震（振）装置（以下简称隔震装置）、阻尼装置、风反应控制装置等组成^[8]。隔震装置既需要承担结构的竖向荷载，还需通过其较低刚度改变工程结构的自振周期；同时，隔震装置良好恢复力实现地震后结构的自复位功能。此外，隔震装置还需要具备耐候性和耐腐蚀性等特征。在现有三维基础隔震（振）技术的研究成果的基础上，根据装置组成结构类型特点，可将其分类归纳如表1所示。

表 1 三维基础隔震装置
Table 1 Three-dimensional base isolation device

类型	名称	外部激励适用性	试验结果和特点
橡胶隔震支座	厚层橡胶隔震支座	竖向高频，水平向低频	竖向承载力适中，刚度中等，加工和维护简单 ^[17-26]
	纤维叠层橡胶隔震支座	竖向高频，水平向低频	竖向承载力较低，刚度较低，硫化难控制，维护简单 ^[27-36]
	纤维增强复合材料（FRP）	竖向高频，水平向低频	竖向承载力适中，刚度较低，加工和维护简单 ^[37-40]
	约束橡胶隔震支座	竖向中频，水平向低频	竖向承载力较高，刚度较低，加工和维护简单 ^[41-42]
金属弹簧隔震支座	螺旋弹簧隔震支座	三向高频	竖向承载能力较低，刚度低，加工和维护简单，阻尼较低，单位荷载造价较高 ^[43-47]
	弹簧组合隔震支座	竖向高频，水平向低频	竖向承载力适中，刚度较低，安装较复杂，维护简单 ^[48-51]
组合隔震支座	橡胶组合隔震支座	三向低频震动	竖向承载力适中，刚度较低，加工和维护简单 ^[52-54]
	空气弹簧组合隔震支座	三向低频震动	竖向承载力较高，刚度低，加工和维护较复杂，造价较高 ^[55-59]

2 橡胶隔震支座

2.1 厚层橡胶隔震支座

为解决普通叠层橡胶支座无法实现竖向隔震问题, Tajirian^[17-18]通过减少叠层钢板的数量, 从而降低橡胶隔震支座的竖向刚度, 解决了普通叠层橡胶隔震支座无法竖向隔震的问题^[17]。此后, 核电站内建筑结构采用了此类三维隔震支座^[18]。厚层橡胶隔震支座的结构构造如图4所示, 但增加橡胶层的厚度会减小支座第一形状系数, 降低叠层橡胶隔震支座的稳定性。Warn 和 Vu^[19]研究第一形状系数对厚层橡胶隔震支座三维隔震性能的影响, 但该研究忽略了竖向荷载等关键因素。陈浩文^[20]通过物理试验方法, 测量不同频率和支座压应力为 2~3 MPa 情况下振动加速度传递函数的变化曲线(如图5); 试验证明在地铁激振条件下普通阻尼厚层型橡胶隔振支座的隔振效果良好, 而由于高阻尼支座材料本身弹性模量较大, 导致地铁激振下发生共振反应。何文福等^[21]对比研究了不同振幅和频率组合下的普通橡胶隔震支座、铅芯橡胶隔震支座及厚层橡胶隔震支座的基本力学性能, 其试验结果表明厚层橡胶隔震支座在水平方向的基本力学性能良好, 在竖向具有大变形能力。朱玉华等^[22]设计了3种不同单层橡胶厚度的厚层铅芯橡胶隔震支座并进行力学性能试验, 研究竖向压缩刚度等基本力学性能随压应力、剪应变等的变化规律。邹立华等^[23]提出了一种预应力厚层橡胶隔震支座, 并在模型试验的基础上, 建立隔震结构非线性分析模型, 推导水平刚度计算解析公式。

在三维隔震(振)建筑结构的工程实践和结构设计方面。为提高地铁邻近建筑室内舒适度, 实现建筑水平和竖向的地震和环境减振, 周颖等^[24]采用厚层橡胶隔震支座对上海莘庄地铁上盖多塔结构进行层间隔震研究, 验证隔震结构在罕遇地震作用下的安全性能和结构抗风和微振动的性能。盛涛等^[25]对某地铁车站附近修建两层砌体结构进行足尺试验模型, 验证了采用橡胶隔震支座措施对提高地铁邻近建筑室内舒适度的有效性。Kanazawa 等^[26]采用振动台试验的方法研究水平向、竖向和三个方向输入地震动后结构的响应, 试验证明在一定频带宽

度范围内采用此类隔震系统具有一定减震效果。但是, 为了保证叠层橡胶隔震支座足够的稳定性, 橡胶层不能过厚, 所以需要综合考虑支座的竖向刚度和支座承载能力。

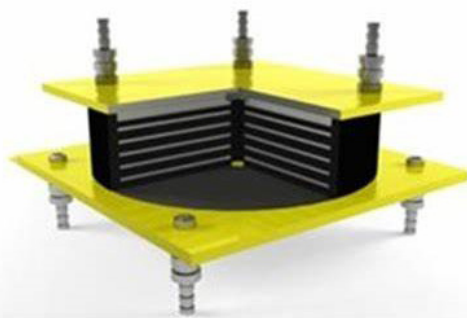


图4 厚层橡胶隔震支座

Fig.4 Thick-layer rubber seismic isolation bearing

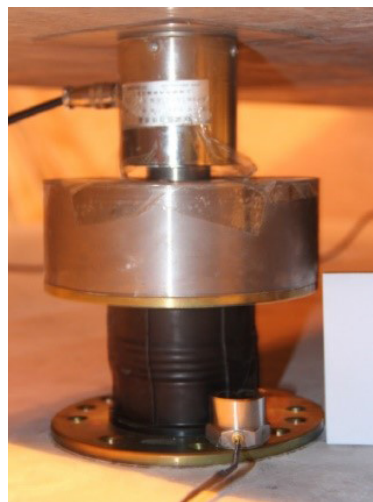


图5 厚层橡胶隔震支座试验^[20]

Fig.5 Test of thick-layer rubber seismic isolation bearing^[20]

2.2 纤维叠层橡胶隔震支座

1999年 Kelly 等^[27]采用纤维代替钢板有效降低了隔震支座的竖向和水平刚度。通过对支座力学性能进行理论和试验(如图6), 分析发现纤维隔震支座不仅拥有较好的耗能特性和较低的水平刚度, 而且具有质量轻、易于加工等优点^[28]。Pinarbasi^[29-30]对纤维约束叠层橡胶隔震支座的轴压和弯曲特性进行理论分析, 研究认为在轴压和弯曲状态下纤维橡胶隔震支座与普通钢板叠层橡胶隔震支座的力学特征^[31]存在一定区别。基于不同形状的约束弹性体的力学特征的理论研究成果^[32], Tsai 和 Kelly^[33]推导了条

形、圆形和长方形截面的纤维约束层状弹性体的压缩刚度和名义压缩刚度。Kelly 和 Takhirov^[34]通过考虑约束层状弹性体中弹性体体积压缩系数，对条形截面的约束层状弹性体的压缩刚度进行修正。Tsai^[35]通过考虑弹性层体积压缩系数和约束层状弹性体边界条件的影响，分别对条形和圆形截面的约束层状弹性体的压缩刚度进行修正。Spizzuoco 等^[36]进行了不同竖向压缩应力情况下纤维叠层橡胶隔震支座的压剪性能试验，并根据试验结果对隔振器的抗震设计性能进行了评估。虽然，纤维叠层橡胶隔震支座在实际应用中具有显著的优势，但隔震支座的竖向承载能力有限。这主要因为纤维叠层橡胶隔震支座内的纤维需要保持平直状态，同时，橡胶隔震支座的制造商在制造过程中，很难控制橡胶硫化以保证支座内纤维处于平整状态，纤维在橡胶隔震支座中经常出现卷曲现象，影响此类支座的竖向和水平的受力性能。



图6 纤维叠层橡胶隔震支座的压剪试验^[27]

Fig.6 Compression-shear test of fiber laminated rubber vibration isolation bearing^[27]



图7 FRP 叠层橡胶隔震支座的压剪试验^[40]

Fig.7 Compression-shear test of FRP laminated rubber isolation bearing^[40]

2.3 FRP 叠层橡胶隔震支座

由于纤维叠层橡胶隔震支座存在的制备的困难问题和竖向承载能力限制，于是有研究提

出采用代替纤维增强的 FRP 叠层橡胶隔震支座^[37]。相较于纤维叠层橡胶隔震支座，FRP 叠层橡胶隔震支座拥有竖向承载力大、加工简单等优点。张华等^[38]对 FRP 橡胶隔震支座进行了有限元数值模拟，研究支座在竖向加载作用下的力学性能进行研究，研究了支座的变形以及 FRP 加劲板应力的大小及分布。谭平等^[39]采用有限元方法研究了此类无约束型支座和可靠约束型支座的水平承载能力，揭示翘曲因素对于无约束型支座内部橡胶层应力状态影响的规律。吴迪等^[40]对 FRP 叠层橡胶隔震支座的压缩性能、剪切性能等进行力学性能试验研究（如图 7），试验表明支座具有足够的竖向承载力和水平极限变形性能，并对地震作用下某砌体隔震结构的地震响应进行有限元分析。

2.4 约束橡胶隔震支座

为使橡胶隔震支座既能保持较低的竖向和水平刚度，同时拥有较大的竖向承载能力，在叠层橡胶隔震支座理论研究的基础上吴迪等^[41]提出一种抗拔、限位、阻尼功能的约束橡胶隔震支座。通过周围约束层提高支座的稳定性，从而减少支座内叠层加劲钢板的数量，降低支座竖向刚度。同时，水平方向外部约束板为支座提供阻尼力，并在极限拉剪状态下为支座提供限位保护。对不同直径约束橡胶隔震支座进行拟静力试验研究（如图 8），试验表明约束板能够有效提高橡胶隔震支座的稳定性，同时该约束橡胶隔震支座具有较高的竖向承载能力和较低的竖向刚度，能够满足不同压应力状态下一般工程结构三维隔震的需求^[42]。但该支座在实际工程应用还有待进一步验证。



图8 约束橡胶隔震支座^[42]

Fig.8 Restrained rubber seismic isolation bearing^[42]

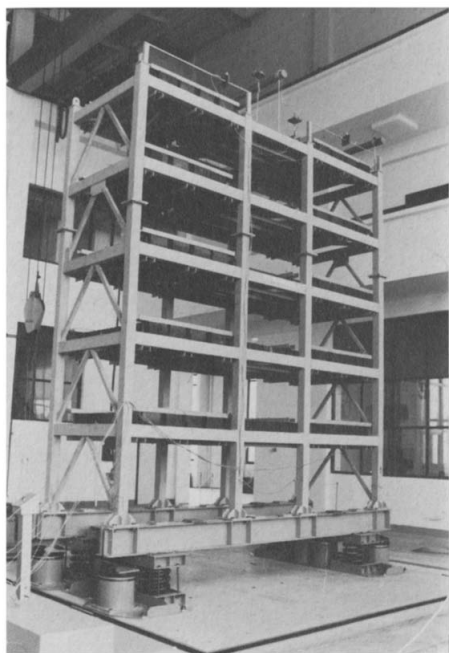


图9 采用金属弹簧隔震支座的建筑试验^[43]

Fig.9 Building test using metal spring seismic isolation support^[43]

3 金属弹簧隔震支座

弹簧主要是利用弹性工作的机械零件。根据形状划分金属弹簧的主要类型有,螺旋形、碟形、环形和板形等;其中,螺旋弹簧隔震支座被广泛应用于机械工程(如汽车等)的三维隔震和减振控制中。1985年Huffmann^[43]将金属弹簧隔震支座用于建筑结构的三维隔震保护系统中,如图9所示,对分别采用固定连接和螺旋弹簧隔震支座连接的一座5层钢框架建筑模型进行振动台试验,试验表明在有限振幅下,结构的地震作用力被有效降低,并能为建筑物和里面的人提供更多的保护。唐家祥和刘再华^[8]提出采用螺旋弹簧隔震支座进行工程结构基础隔震,并完善了相应的隔震理论和设计方法。Huang等^[44]采用超弹性镍钛形状记忆合金螺旋弹簧设计一种被动基础隔震系统,为并通过小比例尺寸的模型验证其有效性。但该由于该模型缩尺比例过小,时间工程的可行性有待测试。尹学军^[45]对螺旋弹簧隔震效率进行了理论分析和试验研究,介绍了三维弹簧隔震基础的有关案例。尚守平等^[46]提出一种三维复合螺旋弹簧隔震支座隔震墩,其所作的振动台模拟试验表明,三维复合隔震墩能有效减弱上部结构竖向

及水平向的加速度,具有良好的隔震效果,并且隔震墩具有良好的恢复原位性能。Ke等^[47]对复合材料螺旋弹簧的设计方法进行综述,包括材料选择、结构设计、性能匹配设计和优化设计,并介绍了其性能研究和制造工艺的重要研究成果。

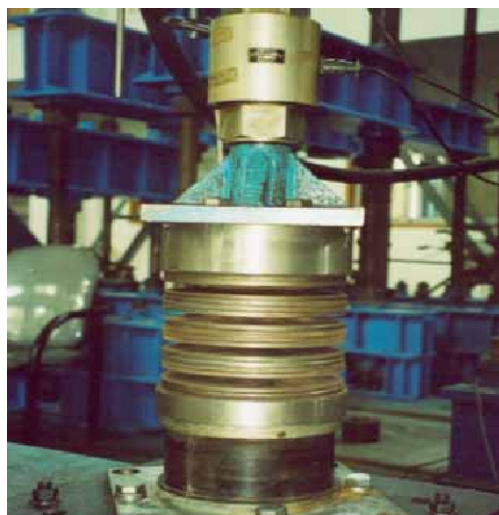
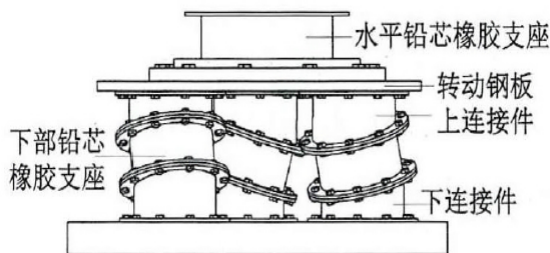
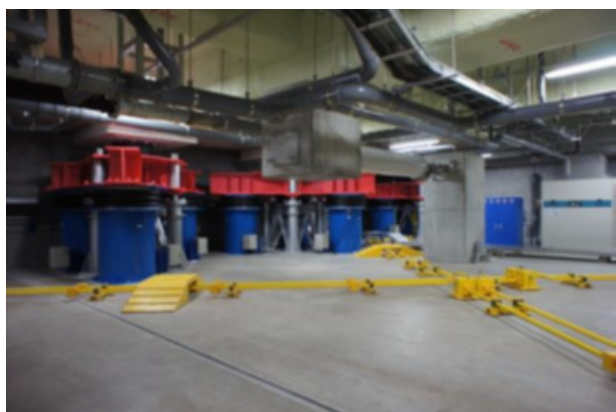
4 组合隔震支座

4.1 弹簧组合隔震支座

弹簧组合隔震支座是指通过弹簧隔震支座(如螺旋弹簧或碟簧支座)与其他隔震支座组合,从而实现支座的竖向承载能力和可调节刚度。1996年Fujita等^[48]提出采用螺旋弹簧和橡胶隔震支座组合的三维隔震系统,并对该系统进行理论和振动台试验研究,研究表明采用该隔震系统后水平方向第一阶结构自振频率可以达到0.5 Hz,竖直方向为3.5 Hz;该系统能有效实现三维隔震的目的。熊世树等^[49-50]提出一种铅芯橡胶碟簧三维隔震支座,该装置采用橡胶隔震支座与碟型弹簧相串联,橡胶隔震支座的竖向压应力采用10-15 MPa,试验表明此装置的水平和竖向阻尼性能良好(具体如图10所示);研究结果还说明,采用隔震支座的结构的三维隔震效果明显,楼层的地震反应比不隔震结构降低了50%以上;当竖向刚度小于2000 kN/mm,降低刚度对于减小结构的地震反应比较明显。颜学渊等^[51]对采用碟形弹簧的三维隔震高层结构进行地震动激励的振动台试验,试验结果表明装置能够减小三向结构的地震响应。

4.2 橡胶组合隔震支座

刘文光^[52]提出将不同橡胶隔震支座组合的一种倾斜旋转型三维隔震装置,并进行竖向压缩力学性能试验(如图11),推导了隔震装置的刚度和阻尼的理论计算公式。他们还比较了非隔震和隔震结构在不同地震波作用下竖向加速度、水平加速度、层间剪力和层间位移响应,研究表明该隔震装置在竖向变形状态下具有良好的阻尼耗能性能^[53]。高焘^[54]设计一种叠层橡胶隔震支座和厚层橡胶隔震支座串联的装置,利用普通叠层橡胶隔震支座隔离地震的水平分量,而厚层橡胶隔震支座用于竖向隔震和隔离地铁振动。

图 10 三维隔震支座力学性能试验^[49]Fig.10 Mechanical performance test of 3D seismic isolation bearing^[49]图 11 倾斜旋转型三维隔震装置^[52]Fig.11 Tilting and rotating three-dimensional seismic isolation device^[52]图 12 空气弹簧与支座组合的隔震装置^[58]Fig.12 Shock isolation device combined with air spring and support^[58]

5 结论和展望

三维基础隔震（振）技术是抵御地震和减轻环境振动对结构影响的重要途径。随着三维隔震（振）技术的深入研究和最新发展，三维基础隔震（振）装置被广泛应用于房屋建筑、桥梁等

4.3 空气弹簧组合隔震支座

1993 年 Uriu 等^[55]提出空气弹簧与橡胶隔震支座组成的三维基础隔震系统，并对该系统进行了地震模拟振动台试验研究，结果表明该系统能有效降低控制房屋的三向振动。日本为保护核电站工程结构免受地震的破坏，财政部积极推动核电站工程结构三维隔震技术的研究，包括采用空气弹簧和橡胶隔震支座组合的三维隔震技术的研究^[56]。为提高竖向隔震的效果和安全性，含蓄能器单元的空气弹簧与橡胶隔震支座的三维组合隔震装置被提出，并进行了三维地震试验验证装置的动力性能参数^[57]。Takayama^[58]将空气弹簧和橡胶隔震支座组合的三维隔震技术应用于建筑结构抗震的实际工程（如图 12 所示），并在东日本大地震中获得了结构地震监测数据，监测的振动响应分析表明三维隔震系统能够有效降低隔震结构在水平和竖向的地震加速度。Suhara 等^[59]通过模型几何缩尺比例为 1/10 的拟静力试验，研究空气弹簧和橡胶隔震支座的串联隔震装置的水平 and 竖向力学性能；其中空气弹簧的竖向压应力采用 1.6 MPa，橡胶隔震支座的竖向压应力采用 7.5 MPa；验证了该类组合支座的有效性，证明可将其被用于实际工程。



工程结构。本文对现有三维基础隔震（振）和减振装置和研究成果分类统计，对三维隔震（振）和减振装置进行类型划分；对不同类型三维隔震（振）装置的力学基本构造、力学特征、组成特征、加工和维护状况等进行讨论，并介绍其特色和优势。进一步明确三维隔震（振）装置的

需求主要包括刚度和承载力的两个方面,讨论三维基础隔震(振)系统的振动传递率和其它关键问题,为三维基础隔震技术的进一步开发研究提供参考。

参考文献

- [1] 周干峙. 城市化和可持续发展——在建设部中国城市化和城市发展战略座谈会上的发言[J]. 城建档案, 1998(04):5-6.
- [2] 罗奇峰, 那向谦. 1995年日本阪神地震近场强地面运动的特征[J]. 地震工程学报, 1997, 019(003):52-55.
- [3] 张显明, 朱晞. 近场竖向地震动对铁路桥梁地震反应的影响[J]. 华北科技学院学报, 2005, 2(4):30-33.
- [4] 陈清军, 袁伟泽, 曹丽雅. 长周期地震波作用下高层建筑结构的弹塑性动力响应分析[J]. 力学季刊, 2011(03):113-120.
- [5] 常乐, 任珉, 闫维明, 周福霖. 城市公路与高架路交通诱发建筑振动实测与分析[J]. 北京工业大学学报, 2008, 34(10):1053-1058.
- [6] 岳建勇, 刘峰. 地震和地铁引起上海某超高层建筑振动的实测分析[C]//第十二届全国振动理论及应用学术会议论文集. 南京:中国振动工程学会, 2017.
- [7] 周福霖. 工程结构减震控制[M]. 北京:地震出版社, 1997.
- [8] 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.
- [9] 周锡元, 阎维明, 杨润林. 建筑结构的隔震、减振和振动控制[J]. 建筑结构学报, 2002, 23(02):178.
- [10] 翁大根, 张超, 吕西林, 等. 附加黏滞阻尼器减震结构实用设计方法研究[J]. 振动与冲击, 2012, 31(21):80-88.
- [11] Kelly J M. A seismic base isolation: review and bibliography[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 1986, 5(4):202-216.
- [12] Elebi M. Successful performance of a base-isolated hospital building during the 17 January 1994 Northridge earthquake[J]. Structural Design of Tall Buildings, 1996, 5(2):95-109.
- [13] Asher J W, Hoskere S N, Ewing R D, et al. Performance of Seismically Isolated Structures in the 1994 Northridge and 1995 Kobe Earthquakes[C]// Building to Last. New York: ASCE, 2010.
- [14] 周云, 吴从晓, 张崇凌, 杨光明. 芦山县人民医院门诊综合楼隔震结构分析与设计[J]. 建筑结构, 2013, 043(024):23-27.
- [15] 克拉夫, 彭津. 结构动力学[M]. 北京:高等教育出版社, 1981:46-50.
- [16] Building Seismic safety Council, Federal Emergency Management Agency, National Earthquake Hazards Reduction Program. NEHRP Recommended provisions for seismic regulations for new buildings and other structures (FEMA450), Part1: Provisions, (2003ed)[S].
- [17] Tajirian F F, Kelly J M, Aiken I D, et al. Elastomeric bearings for three-dimensional seismic isolation[C]//Proceedings of ASME PVP conference. Nashville: Tennessee, 1990.
- [18] Tajirian F F, Kelly J M, Aiken I D. Seismic isolation for advanced nuclear power stations[J]. Earthquake Spectra, 1990, 6(2):371-401.
- [19] Warn G P, Vu B. Exploring the low shape factor concept to achieve three-dimensional seismic isolation[C]//20th Analysis and computation specialty conference. Chicago: ASME, 2012:1-11.
- [20] 陈浩文. 厚肉型橡胶隔振支座在地铁周边建筑物隔振中的应用[D]. 北京:清华大学, 2014.
- [21] 何文福, 刘文光, 杨彦飞, 杨骁. 厚层橡胶隔震支座基本力学性能试验[J]. 解放军理工大学学报(自然科学版), 2011, 012(003):258-263.
- [22] 朱玉华, 艾方亮, 任祥香, 卢文胜. 厚层铅芯橡胶支座力学性能[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2018, 46(9):1189-1194.
- [23] 邹立华, 饶宇, 黄凯, 郭润, 许志旭. 预应力厚层橡胶支座隔震性能研究[J]. 建筑结构学报, 2013(02):80-86.
- [24] 周颖, 陈鹏, 陆道渊, 王经雨. 地铁上盖多塔楼隔震与减振设计研究[J]. 土木工程学报, 2016(S1):89-94.
- [25] 盛涛, 李亚明, 张晖, 等. 地铁邻近建筑的厚层橡胶支座基础隔振试验研究[J]. 建筑结构学报, 2015, 36(2):35-40.
- [26] Kanazawa K, Hirata K, Matsuda A. Shaking table test of three-dimensional base isolation system using laminated thick rubber bearings[C]// The 15th SMiRT. Seoul: Smirt, 1999:367-374.
- [27] Kelly J M, Takhirov S M. Analytical and experimental study of fiber-reinforced strip isolators[M]. California: Pacific Earthquake Engineering Research Center, 2002.
- [28] G. D. Ashkezaria, A. Akbar Aghakouchaka, M. Kokabi. Design, manufacturing and evaluation of the performance of steel like fiber reinforced elastomeric seismic isolators [J]. Journal of materials processing technology, 2008, 197(1-3):140-145.
- [29] Pinarbasi S, Mengi Y, Akyuz U. Compressive and bending behavior of strip-shaped fiber-reinforced elastomeric bearings[C]// The 14th World Conference on Earthquake Engineering. New York: ASCE, 2008.
- [30] Pinarbasi S, Mengi Y. Elastic layers bonded to flexible reinforcements [J]. International Journal of Solids and Structures, 2008, 45(3-4):794-820.
- [31] Kelly, James M. Earthquake-Resistant Design with Rubber[M]. London: Springer, 1997.
- [32] Hsiang-Chuan, Tsai. Compression analysis of rectangular elastic layers bonded between rigid plates[J]. International Journal of Solids & Structures, 2005(42):3395-3410.
- [33] Tsai H C, Kelly J M. Stiffness analysis of fiber-reinforced rectangular seismic isolators[J]. Journal of Engineering Mechanics, 2002, 128(4):462-470.

- [34] Kelly JM, Takhirov SM. Analytical and experimental study of fiber-reinforced strip isolators[C]// Pacific Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley. PEER Report 2002/11, California: University of California Press, 2002.
- [35] Tsai, H.-C. Compression stiffness of circular bearings of laminated elastic material interleaving with flexible reinforcements[J]. International Journal of Solids and Structures, 2006 (43): 3484-3497
- [36] Spizzuoco M, Calabrese A, Serino G. Innovative low-cost recycled rubber-fiber reinforced isolator: experimental tests and finite element analyses[J]. Engineering Structures, 2014, 76: 99-111.
- [37] 吴迪, 谭平, 熊焱, 等. 一种玻璃纤维复合材料板夹层橡胶隔震垫: 101736830 B[P]. 2010-01-26.
- [38] 张华, 彭天波, 李建中, 等. FRP 橡胶支座压缩性能分析[J]. 地震工程与工程振动, 2011, 031(003): 154-160.
- [39] 谭平, 王斌, 金建敏, 周福霖. 纤维增强工程塑料板夹层橡胶隔震支座有限元分析[J]. 振动与冲击, 2014, 33(24): 95-100.
- [40] 吴迪, 霍维刚, 周福霖. 采用 GFRP 橡胶隔震技术的某砌体结构动力响应分析[J]. 广州大学学报(自然科学版), 2015, 14(6): 45-49.
- [41] 吴迪, 熊焱, 崔杰. 具有抗拔、限位、阻尼功能的三维隔震支座: CN110093994A[P]. 2019-6-03.
- [42] 吴迪, 邱仕义. 约束橡胶隔震(振)支座力学性能报告[R]. 广州: 广州大学, 2006.
- [43] Huffmann G K. Full base isolation for earthquake protection by helical springs and viscodampers[J]. Nuclear Engineering and Design, 1985, 84(3): 331-338.
- [44] Huang B, Zhang H, Wang H, et al. Passive base isolation with superelastic nitinol SMA helical springs[J]. Smart materials and structures, 2014, 23(6): 065009.
- [45] 尹学军. 三维弹簧隔震基础在汶川地震灾后重建重点防护建筑中的应用[C]// 汶川地震建筑震害调查与灾后重建分析报告. 北京: 中国土木工程学会, 2008: 479-488.
- [46] 尚守平, 苏俊, 崔向龙. 三维复合隔震墩试验研究[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2016, 043(005): 39-43.
- [47] Ke J, Wu Z, Liu Y, et al. Design method, performance investigation and manufacturing process of composite helical springs: A review[J]. Composite Structures, 2020, DOI: 10.1016/j.compstruct.2020.112747
- [48] Fujita S, Kato E, Kashiwazaki A, et al. Shake table tests on three-dimensional vibration isolation system comprising rubber bearing and coil springs[C]// International Association Earthquake Engineering. Proc. Eleventh World Conf. Earthquake Engineering, Acapulco, Mexico: WCEE, 1996.
- [49] 熊世树. 三维基础隔震系统的理论与试验研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2004.
- [50] 熊世树, 唐建设, 梁波, 等. 装有 3DB 的三维隔震建筑的平扭-竖向地震反应分析[J]. 工程抗震与加固改造, 2004(5): 17-22
- [51] 颜学渊, 张永山, 王焕定, 等. 三维隔震抗倾覆结构振动台试验[J]. 工程力学, 2010, 27(5): 91-96.
- [52] 刘文光, 余宏宝, Imam M I, 等. 倾斜旋转型三维隔震装置的力学模型和竖向性能试验研究[J]. 振动与冲击, 2017, 36(9): 68-73.
- [53] 常伟哲, 刘文光, 何文福, 等. 新型三维隔震装置设计及数值模拟[J]. 结构工程师, 2017, 33(3): 109-115.
- [54] 高焯. 新型三维隔震支座的设计研究[D]. 太原: 太原理工大学, 2019.
- [55] Uriu M, Yamamoto M, Shinzawa K, et al. Three-dimensional seismic isolation floor system using air spring and its installation into a nuclear facility[C]// Kussmaul K F. SMiRT-12. Stuttgart: Elsevier Science Publishers, 1993.
- [56] Morishita M, Kitamura S, Moro S, et al. Development of 3D seismic isolation technology for advanced nuclear power plant application[C]// Proceedings of International Conference on Advanced Nuclear Power (CD-ROM). Kyoto: GENES4/ANP2003, 2003.
- [57] Kashiwazaki A, Shimada T, Fujiwaka T, et al. Study on 3-dimensional base-isolation system applying to new type power plant reactor[C]// Proceedings of 18th International Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology. Prague, Czech: The Institution of Mechanical Engineers, 2005.
- [58] Takayama M. Development and application of seismic isolation and response control of buildings in Japan[C]// Proceedings of the 15th World Conference on Seismic Isolation, Energy Dissipation and Active Vibration Control of Structures. New Zealand: ASME, 2017.
- [59] Suhara J, Tamura T, Okada Y, et al. Development of three dimensional seismic isolation device with laminated rubber bearing and rolling seal type air spring[C]// ASME Pressure Vessels & Piping Conference. Vancouver, BC, Canada: ASME, 2002.