

文章编号:1673-2049(2019)04-0001-11

# 结构工程竖向隔震技术研究进展

邓长根<sup>1</sup>, 曾 苗<sup>1</sup>, 徐忠根<sup>2</sup>

(1. 同济大学 土木工程学院, 上海 200092; 2. 广州大学 土木工程学院, 广东 广州 510006)

**摘要:**为进一步推动竖向隔震技术在结构工程中的应用,对国内外竖向隔震技术的研究进展进行了详细阐述。从耗能材料、构造形式、隔震机理等方面对结构工程竖向隔震技术进行分类汇总,介绍了橡胶竖向隔震支座、弹簧竖向隔震支座、气压及液压竖向隔震支座等典型隔震技术与一些新型隔震技术,并对其起源发展、几何构造、隔震性能、改进优化及优点缺点进行总结和综合比较。在文献总结的基础上,提出了今后竖向隔震技术的发展方向与关注重点。结果表明:橡胶竖向隔震支座性能稳定,造价较低,但是耗能能力一般,竖向隔震效果有限;弹簧竖向隔震支座性能较好,理论研究与工程应用较为成熟与普遍,适合推广;气压及液压竖向隔震支座性能优异,但是对密封缸的密闭性要求较高,造价昂贵且维修难度大;部分新型竖向隔震支座仅停留在理论及试验研究阶段,由于其构造复杂,造价较高,难以应用于实际工程中;相关结论可为竖向隔震技术的发展提供参考。

**关键词:**结构工程;竖向隔震;隔震技术;隔震支座

**中图分类号:**TU973.2 **文献标志码:**A

## Progress of Research on Vertical Isolation Technology in Structural Engineering

DENG Chang-gen<sup>1</sup>, ZENG Miao<sup>1</sup>, XU Zhong-gen<sup>2</sup>

(1. College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China;

2. School of Civil Engineering, Guangzhou University, Guangzhou 510006, Guangdong, China)

**Abstract:** In order to promote the application of vertical isolation technology in structural engineering, the research progress on vertical isolation technology at home and abroad was elaborated. The vertical isolation technologies in structural engineering were classified according to energy-dissipating material, structural configuration, and isolation mechanism. Typical isolation technologies such as rubber vertical isolation bearing, spring vertical isolation bearing, pneumatic or hydraulic vertical bearing and some new isolation technology were introduced, and their developments, structural forms, isolation performances, optimization were summarized and compared. Based on literature review, the development direction and focus of vertical isolation technology in the future were put forward. The results show that the rubber vertical isolation bearing has stable performance and low cost, but its energy dissipation capacity is medium and its vertical isolation performance is limited; the spring vertical isolation bearing has good performance, and its theoretical research and engineering application are mature and universal, which are suitable for popularization; the performance of pneumatic or hydraulic vertical isolation bearings is excellent, but the requirement of sealing cylinder is high, the cost is expensive and the

收稿日期:2018-11-07

基金项目:国家自然科学基金项目(51678172, 51478330)

作者简介:邓长根(1962-),男,江西南城人,教授,博士研究生导师,工学博士,E-mail:dengcg@tongji.edu.cn。

maintenance is difficult; some new vertical isolation bearings only stay in the stage of theoretical and experimental research, because of its complex structure and high cost, it is difficult to be applied in practical engineering. The relevant conclusions can provide support for the development of vertical isolation technology.

**Key words:** structure engineering; vertical isolation; isolation technology; isolation bearing

## 0 引言

地震是人类面临的最严重的自然灾害之一,据统计,地球每年发生 500 万次地震,其中震级在 5 级以上的破坏地震约为 1 000 次<sup>[1]</sup>。为了减小地震作用对结构的影响,人类采取科学合理的抗震措施,一定程度上可避免地震带来的毁灭性打击。

隔震是指通过使用某种类型的支座来保护结构免受地震破坏性影响的概念,从而实现上部结构运动与地面震动“解耦”,这一概念在近几个世纪的工程设计中得到广泛的应用<sup>[2]</sup>。隔震结构的设计目的在于将基础与上部结构隔断,通过在基础与上部结构间设置隔震支座,利用隔震支座自身特性减小地震对上部结构的作用,并且隔震支座可有效调节结构自振周期,避开地震地面运动的主频带范围,减小共振效应,避免上部结构发生破坏。

目前,在进行建筑结构基础隔震设计时一般只考虑隔离水平地震作用,不考虑竖向隔震。广泛应用于实际工程的叠层橡胶支座、滑动隔震支座及滚动隔震支座等在减小水平地震作用方面表现良好,但是不具备竖向隔震的效果,甚至具有一定的地震放大效应<sup>[3-4]</sup>。

然而,实际地震动不仅包含水平地震动分量,还包含竖向地震动分量。以往结构设计中通常不考虑竖向隔震的原因在于:①认为竖向地震动分量强度较小,相比于水平地震动效应可忽略;②认为结构竖向构件留有一定承载富裕度,承载力安全系数较高。然而从中国汶川地震、唐山地震、台湾集集地震、日本阪神地震、美国山谷地震、前苏联格兹里地震等国内外近年发生的(特)大地震中获得的地震时程记录和震害数据表明<sup>[5-6]</sup>:在高烈度地震区,尤其在近断层地震区,地震动的竖向作用分量往往较为强烈,甚至可能超过水平地震作用分量,成为导致结构倒塌破坏的主导因素。

竖向地震作用下,结构竖向构件可能发生屈服从而无法满足上部建筑承载力要求,或是由于上下楼板振动不同步导致竖向构件中产生较大的局部拉压应力。不仅如此,其水平抗剪能力将受竖向地震

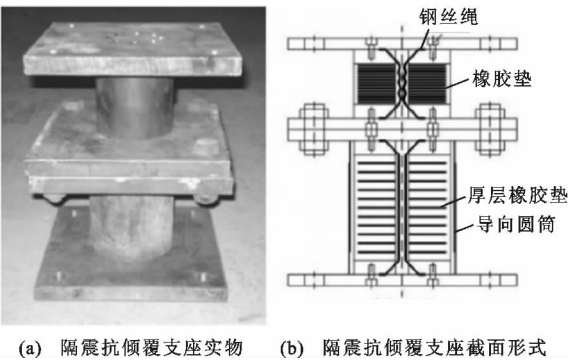
作用影响而减小<sup>[7]</sup>,此外,对于大跨度、长悬臂结构,竖向地震动将增大水平构件负弯矩区的抗震需求<sup>[8]</sup>。因此,在结构设计与研究中应充分考虑竖向地震作用对结构的影响。

鉴于此,近几十年来国内外学者对竖向隔震支座做了大量的理论分析及试验研究,取得一定的成果,为隔震支座的发展及其在实际工程中的应用提供了重要参考价值,并且进一步将竖向隔震支座与水平隔震支座串联或并联即可实现三维隔震。本文通过整理国内外文献并进行分析,总结结构工程领域中竖向隔震技术的研究进展,为竖向隔震技术及三维隔震技术的后续研究提供一定的参考。

## 1 橡胶竖向隔震支座

橡胶竖向隔震支座指利用橡胶垫与其他刚性材料组合承担上部荷载并耗散能量,橡胶的竖向阻尼及非线性恢复力将延长结构自振周期,以实现隔震的目的。Seigenthaler<sup>[9]</sup>设计出第 1 栋采用现代隔震概念的隔震建筑——南斯拉夫柏斯坦劳奇小学,这也是天然纯橡胶首次被应用于隔震支座,其水平刚度和竖向刚度均偏小,侧向滑移的同时带来较大的竖向变形。在中国,唐家祥等<sup>[10-11]</sup>和周福霖等<sup>[12-14]</sup>首先开展叠层橡胶支座的隔震性能研究,并将其应用于实际工程中。为提高橡胶支座的水平刚度,保证其在发生水平位移后不失稳,颜学渊等<sup>[15]</sup>在叠层橡胶支座上下连接盖板处各焊接导向圆筒(图 1),两圆筒间留有一定间隙。不同筒壁间隙支座试验结果如图 2 所示。由图 2 可以看出,当支座水平位移超过筒壁间隙时,荷载-位移关系表现为非线性,圆筒能有效起约束作用,同时可以看出这类支座竖向耗能性能较差。

魏陆顺等<sup>[16-17]</sup>提出由一水平橡胶支座及一竖向橡胶垫组成的三维隔震(振)支座,如图 3 所示。竖向加载刚度与频率特性及其在北京某地铁上盖框架建筑中的加速度时程实测结果如图 4 所示。由图 4 可以看出,该支座有着良好的竖向隔震和减振效果,具有一定的工程实用价值。



(a) 隔震抗倾覆支座实物 (b) 隔震抗倾覆支座截面形式

图 1 带导向圆筒厚橡胶层三维隔震支座  
Fig. 1 Three-dimensional Isolation Bearing with Thick Rubber Layer of Guided Cylinder

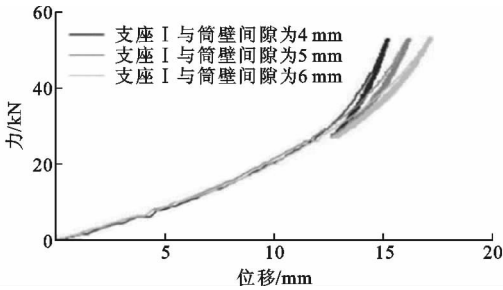


图 2 间隙对支座滞回性能的影响

Fig. 2 Effect of Gap on Hysteresis Performance of Bearing

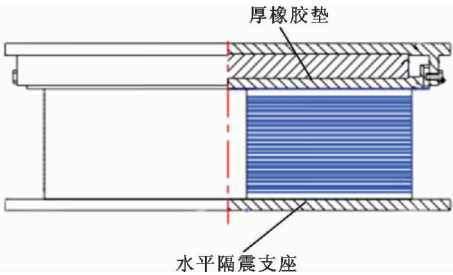


图 3 橡胶三维隔震支座

Fig. 3 Three-dimensional Isolation Rubber Bearing

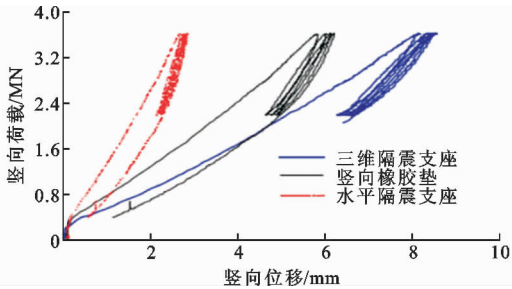


图 4 橡胶垫三维隔震支座竖向荷载曲线

Fig. 4 Vertical Load Curves of Three-dimensional Isolation Rubber Bearing

## 2 弹簧竖向隔震支座

弹簧由于其承载能力强、缓冲能力较好等优点

被广泛应用于竖向隔震支座中,弹簧竖向隔震支座也是目前国内外应用较为成熟的隔震支座之一。1989 年,为实现核电站建筑的三维隔震,Fujita 等<sup>[18]</sup>通过在橡胶支座中引入锥形弹簧以实现三维隔震,试验结果证明该支座能满足结构设计的隔震需求。Yoo 等<sup>[19]</sup>研发出由铅芯橡胶支座和碟形弹簧组成的三维隔震支座,用于隔离水平及竖向地震作用。Kitamura 等<sup>[20]</sup>对大尺寸碟形弹簧进行试验分析,该碟形弹簧外直径为 1 000 mm,内直径为 500 mm,足尺试验结果表明碟形弹簧在循环加载下竖向荷载-位移关系稳定,从而验证了大尺寸碟形弹簧在竖向隔震系统中的适用性。Somaki 等<sup>[21]</sup>在关于设备上下免震结构的具体化调查中分析了竖向位移蠕变对碟形弹簧设计方法的影响,并提出竖向隔震装置的最优化安装步骤及布置方式。

熊世树<sup>[22]</sup>提出了一种具有三向适宜刚度和阻尼性能的三维隔震支座——铅芯碟形弹簧橡胶支座(图 5),并针对其性能进行了理论分析,提出了铅芯碟形弹簧橡胶支座的设计理论和相应的计算方法,该支座除了可以用于建筑结构的三维基础隔震外,还可以用于机械设备的隔振。张玉敏等<sup>[23]</sup>设计了一种外围多个小碟形弹簧、中间 1 个大碟形弹簧的竖向隔震支座,并且在上下盖板间填充黏滞阻尼材料,通过选取 El Centro 波、松潘文县波以及 2 条人工波模拟竖向地震,时程分析结果表明,采取该隔震措施的建筑最大加速度可降低 40% 左右,未采取隔震措施的建筑加速度分布为“倒三角形”,采取该隔震措施后加速度分布基本为一条直线。赵亚敏等<sup>[24-25]</sup>提出了一种组合式碟形弹簧竖向隔震支座(DSB),如图 6 所示。DSB 竖向隔震模型振动台试验结果表明,随着输入地震加速度幅值的增加,DSB 竖向基础隔震模型的隔震层发生较大的竖向变形,而上部结构的层间相对位移变化不大,具有明显的竖向隔震效果,最后利用有限元分析软件,采用时程分析法对相同工况时模型结构的地震反应进行了数值分析,并与振动台试验结果进行了对比,结果表明两者吻合较好。

杨琼等<sup>[26]</sup>对阵列碟形弹簧柱支座 DHZ 的构造、原理进行了理论分析,并在此基础上进行了竖向单调加载和竖向循环加载试验,结果显示 DHZ 支座具有良好的稳定性和复位性能,并且其竖向刚度及耗能性能与碟形弹簧片的组合方式及叠合数量密切相关,如图 7 所示。Ou 等<sup>[27-28]</sup>基于铅芯橡胶隔震垫、组合碟形弹簧和菱形钢板阻尼器的各自力学性

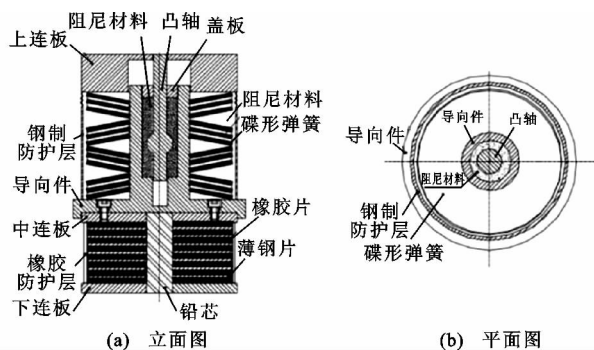


图 5 铅芯碟形弹簧橡胶支座

Fig. 5 Rubber Bearing with Lead-disc Spring

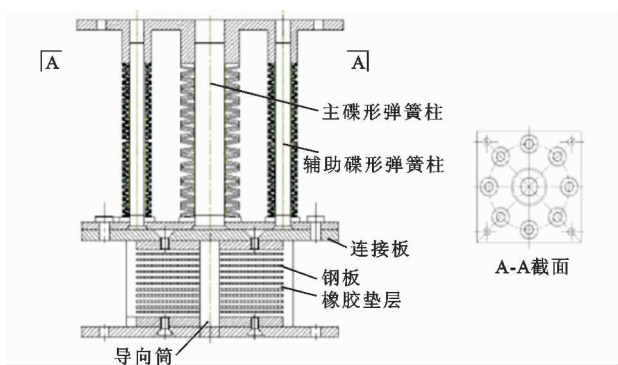


图 6 组合式碟形弹簧竖向隔震支座

Fig. 6 Vertical Isolation Bearing with Combined Disc Spring

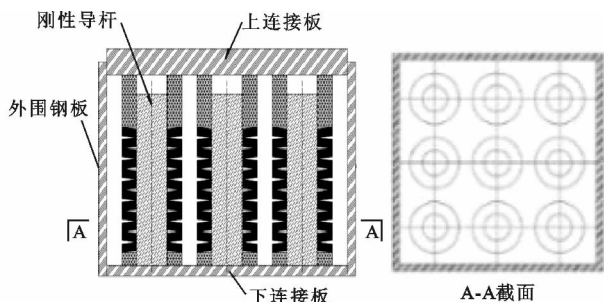


图 7 阵列碟形弹簧柱隔震支座

Fig. 7 Vertical Isolation Bearing with Disc Spring Column

能特点,设计开发出一种新型的三维隔震装置,如图 8 所示。竖向力学性能试验结果表明,菱形钢板阻

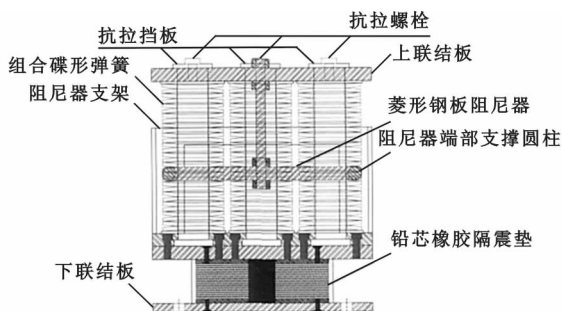


图 8 组合式三维隔震支座

Fig. 8 Combined Three-dimensional Isolation Bearing

尼器的设置可有效提高组合式碟形弹簧的阻尼耗能能力,滞回性能稳定,可有效改善支座隔震效果。

除碟形弹簧外,也有学者提出将螺旋弹簧应用于竖向隔震中。对比组合式碟形弹簧竖向隔震支座,陈晓城<sup>[29]</sup>提出利用螺旋弹簧代替辅助碟形弹簧的构造形式,如图 9 所示。螺旋弹簧具有刚度稳定、加工简单、造价较低等优点,但是刚度及承载力较小,该支座利用螺旋弹簧与碟形弹簧并联提供合适的刚度和承载力,并且并联的碟形弹簧转动能力较差,而并联的螺旋弹簧转动能力较强,能有效减小地震作用下柱脚端弯矩作用。将该隔震支座布置于一栋 6 层框架结构中,有无隔震措施的结构时程分析结果显示,该支座能有效延长结构的自振周期,实现隔震的目的。

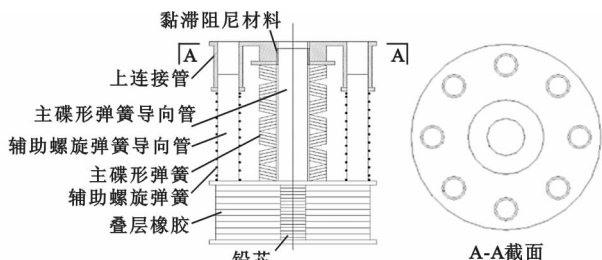


图 9 组合式碟形与螺旋弹簧竖向隔震支座

Fig. 9 Vertical Isolation Bearing with Combined Disc and Spiral Spring

尚守平等<sup>[30-31]</sup>提出由混凝土上墩块、下墩块、沥青油膏及螺旋弹簧组成的三维隔震墩,如图 10 所示。基于螺旋弹簧性能提出隔震设计方法及参数范围并进行分析,振动台试验结果及 1 栋 8 度设防的 2 层砌体结构时程分析结果表明,该支座竖向减震系数小于 0.6,水平减震系数小于 0.4,并且振动结束后上部结构能基本恢复到原有位置,实现规范要求中“小震不坏、中震可修、大震不倒”的设防目标。该支座隔震效果良好,构造简单,价格低廉,适合在高烈度的农村地区住宅隔震中推广应用,不过支座承载力较低,只能用于 1~3 层村镇建筑及文物保护建筑。

针对竖向地震动尤其是近断层竖向地震动对结构带来的不利影响,部分学者提出“负刚度理论”及“准零刚度理论”以实现结构竖向隔震。Zheng 等<sup>[32]</sup>采用由 2 个同轴环形永磁体组成的负刚度磁簧(NSMS)产生负刚度,抵消机械弹簧产生的正刚度。Le 等<sup>[33]</sup>提出一种由 2 根对称的负刚度弹簧(NNS)与 1 根机械弹簧并联的竖向隔震支座。与负刚度基础类似,Margielewicz 等<sup>[34]</sup>和 Liu 等<sup>[35]</sup>提



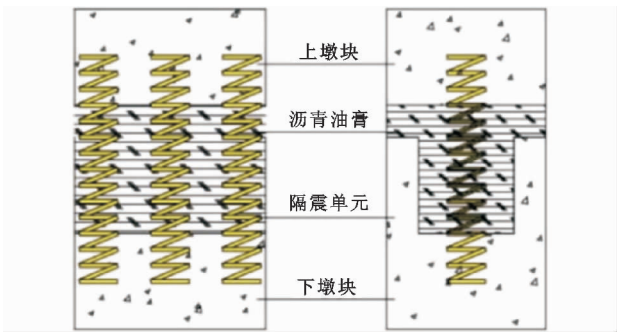


图 10 螺旋弹簧三维隔震墩

**Fig. 10 Three-dimensional Isolation Pier with Spiral Spring**  
出准零刚度支座,该支座由 1 竖向弹簧及 2 根对称的倾斜状态弹簧组成,如图 11 所示。这 2 类支座的  
最大特征为具有较高的静态刚度和接近于 0 的动态  
刚度点,能同时满足正常使用状态及隔震要求。有  
限元及试验结果表明,与无隔震系统相比,这 2 类  
支座均具有更大的隔离频率范围和更高的衰减率。

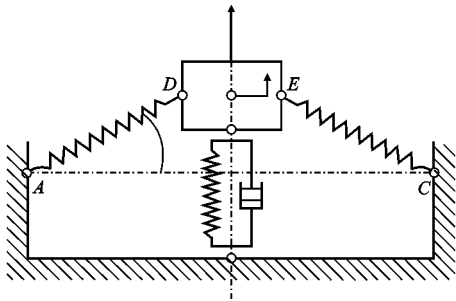
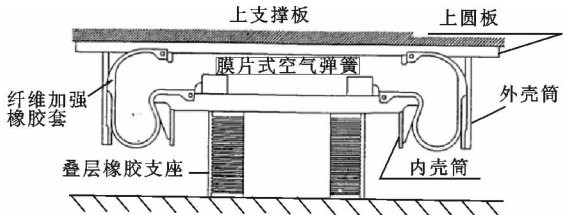


图 11 竖向地震动下准零刚度理论隔震结构模型  
**Fig. 11 Seismic Isolated Structure Model with Quasi-zero Stiffness Under Vertical Ground Motion**

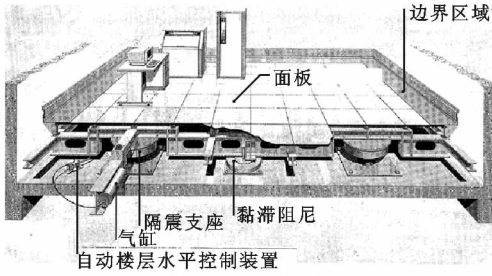
### 3 气压及液压竖向隔震支座

气压及油压支座是指在密闭容器中加入压力空气或液体等流体介质,利用空气或液体的非线性回复力提供阻尼耗散能量,并且通过刚度调整增大上部结构自振周期使其偏离地震动卓越周期,实现隔震效果,其中气压支座也称空气弹簧。目前,气压及油压等流体介质隔震支座在日本及美国等国家已取得一定的研究成果,并且已成功在实际工程中应用。在中国,空气弹簧在机械装置的隔振中已取得一定的应用,但是在建筑结构隔震中应用较少。

1989 年,为实现精密仪器的竖向隔震,Kashiwazaki 等<sup>[36]</sup>提出一种将气压支座与传统水平支座组合的三维隔震系统。Uriu 等<sup>[37]</sup>在核电站设施隔震设计中提出一种由空气弹簧、叠层橡胶支座、黏滞阻尼器及自动控制装置组成的三维隔震地板系统,如图 12 所示,实测结果表明该系统有较好的隔震



(a) 空气弹簧三维隔震支座



(b) 隔震地板系统

图 12 空气弹簧三维隔震地板系统  
**Fig. 12 Air Spring Three-dimensional Isolation Floor System**

效果。  
Kageyama 等<sup>[38]</sup>利用空气弹簧、U 型纤维橡胶片及防倾覆金属缆线研发出三维气压隔震支座,如图 13 所示。U 型纤维橡胶片内密封气体承担竖向荷载及利用非线性恢复力提供竖向阻尼,加载示意如图 14 所示。试验结果表明,该装置能有效应用于核电站结构隔震设计中。

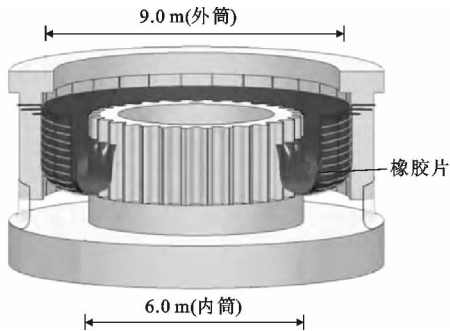


图 13 金属缆线空气弹簧三维隔震支座  
**Fig. 13 Metal Cable Reinforcing Air Spring Three-dimensional Isolation Bearing**

Fujita 等<sup>[39]</sup>研发了由空气弹簧支座及地震预警装置组成的智能空气弹簧隔震系统,如图 15 所示。非地震作用时,上部结构荷载由钢柱承担。地震发生时,P 波感应器检测到地震波并将信号传送至控制系统,此时压缩机启动向空气弹簧支座内充气,抬升结构实现隔震的目的,并且试验结果表明在系统接收到预警信号的 1.2 s 内装置实现上部结构的抬升,能有效隔离近场地震作用。

Tomizawa 等<sup>[40]</sup>提出一种利用装置中油管内阻

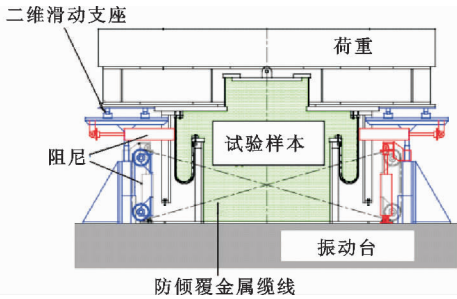


图 14 试验加载示意图

Fig. 14 Diagram of Test Loading

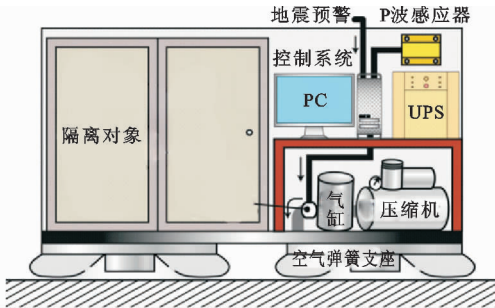


图 15 智能空气弹簧隔震系统

Fig. 15 Intelligent Air Spring Isolation System

尼油流动达到隔震的目的,当上部结构发生竖向运动或摇摆运动时,管内阻尼油发生流动,消耗地震能量,实现隔震,如图 16 所示。

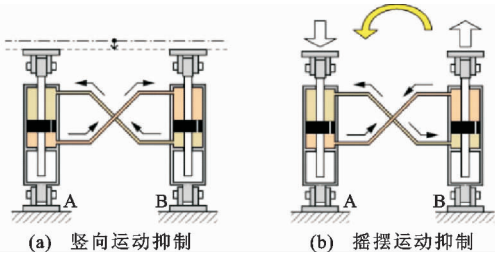


图 16 油阻尼器竖向隔震系统

Fig. 16 Vertical Isolation System with Oil Damper

## 4 其他竖向隔震支座

针对已有隔震支座存在的问题,如橡胶支座侧向刚度较小、稳定性差,气压油压隔震装置对密封技术要求较高,弹簧支座在重力作用下静力平衡变形量过大等,有学者提出其他类型竖向隔震技术。

徐赵东<sup>[41-42]</sup>提出了一种筒式阻尼器竖向隔震支座,该支座由 1 个黏弹性核心垫和 2 个筒式阻尼器并联组成,如图 17 所示。研究表明,该装置可显著增大结构的竖向刚度和阻尼,且上部结构的地震反应显著减小。李剑<sup>[43]</sup>提出一种新型带阻尼竖向隔震支座,通过上下套筒间热硫化黏结的夹层橡胶及挤压铅消能件提供阻尼,以实现竖向隔震,如图 18

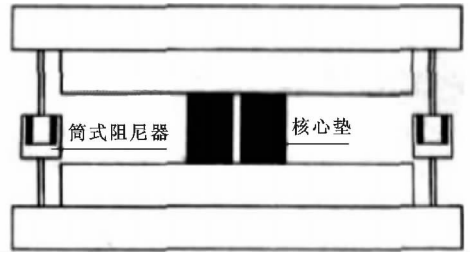


图 17 筒式阻尼器竖向隔震支座

Fig. 17 Vertical Isolation Bearing with Cylinder Damper

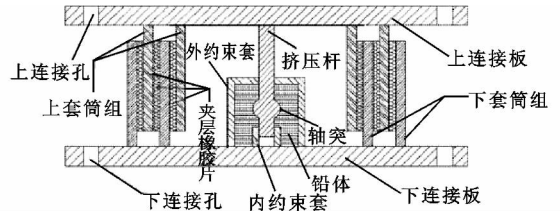


图 18 带阻尼竖向隔震支座

Fig. 18 Vertical Isolation Bearing with Damping

所示。

郭阳照等<sup>[44]</sup>通过在支座中内置挤压铅消能件以提供竖向阻尼,如图 19 所示。有限元分析结果显示,其挤压铅消能件在极小的竖向位移下就能发挥耗能作用,具有良好的滞回耗能性能。刘逸<sup>[45]</sup>提出集合球竖向隔震筒(图 20),并探究不同橡胶球硬度、隔震筒填充率、单一直径或混合直径橡胶球等不同因素对支座竖向刚度及耗能性能的影响,试验结果显示该支座具有良好的耗能性能。

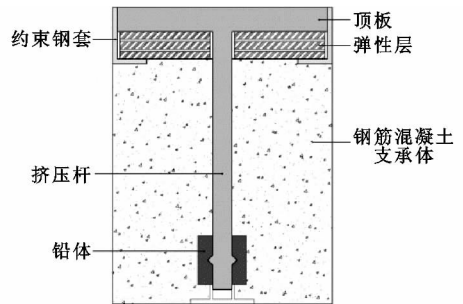


图 19 挤压铅消能件隔震墩

Fig. 19 Isolation Pier with Lead Extrusion Damping

夏昌等<sup>[46]</sup>开发了一种基于电磁悬浮技术的结构竖向隔震装置(图 21),该新型隔震装置能够方便地实现结构竖向振动的主动控制。当结构所受的振动激励已知时,通过实时控制电流,框架柱能够实现“免震”效果;当结构所受的振动激励未知时,磁悬浮竖向隔震支座能够高效地降低框架柱的竖向振动响应。姜袁<sup>[47]</sup>提出一种由形状记忆合金棒、上下套筒、上下支板、支杆及弹簧组成的蝶式竖向隔震耗能阻尼器,如图 22 所示。正常使用状态下,形状记忆

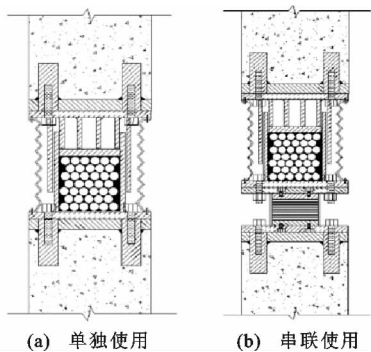


图 20 集合球竖向隔震筒

Fig. 20 Vertical Isolation Tube with Collecting Ball

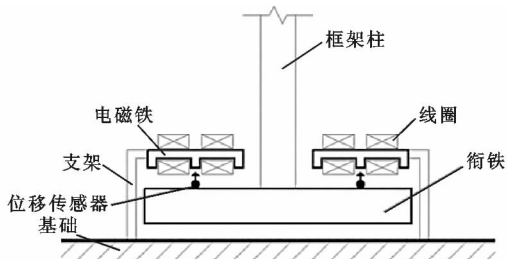


图 21 电磁悬浮技术隔震支座

Fig. 21 Isolation Bearing Based on Electromagnetic Levitation Technique

合金棒发生一定预变形,当上部结构发生振动时,合金棒持续变形至应力松弛,由此诱发形状记忆合金棒内部不断出现马氏体相变和逆相变,产生应力应变滞回耗能并工作在滞回环的中间丰满区,从而实现结构耗能及竖向隔震的目的。

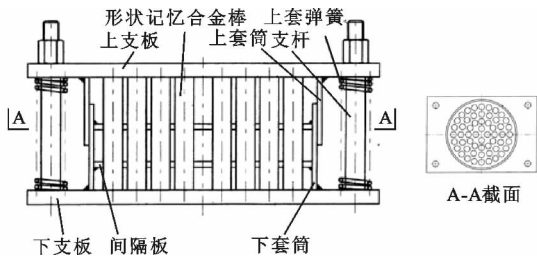


图 22 碟式竖向隔震耗能阻尼器

Fig. 22 Dish Vertical Isolation Energy Dissipation Damper

对于一些高层建筑,一种“大开间高底层”<sup>[48]</sup>的方案曾被国内外学者广泛接受,利用高底层的竖向变形提供耗能,实现隔震的目的。为进一步寻求减轻地震作用对上部结构的影响,有学者提出“软底层方案”,即通过控制建筑底层柱在地震中发生屈服甚至屈曲,从而实现竖向隔震耗能,但是此类无任何保护措施“软底层方案”由于柱子发生塑性失稳最终不可避免地导致结构倒塌,因此普通“软底层方案”不是一种降低地震加速度的好方法。“柔性桩方案”(图 23)对“软底层方案”作了以下改进:①利用柔性

端承桩屈曲耗能,桩身发生弯曲变形达到桩身与套筒之间的预留间隙后,外套筒约束桩身发生进一步弯曲变形;②桩顶设置合适类型的阻尼器,更好地达到隔震的目的;③桩承基础与地基之间预留合适的间隙实现“缓冲着陆”。

以上 3 种方案的共同原理为利用构件发生屈曲失稳实现结构的耗能,与此类似,Sato<sup>[49]</sup>基于“第一层柔弱层理论”提出了隔震耗能桩,通过桩自身弯曲及在套筒内填充沥青、皂土等材料实现竖向耗能,如图 23 所示。Tucchio 等<sup>[50]</sup>提出了一种竖向冲击隔离支座,如图 24 所示,在弹性体的合适位置设置若干空腔,正常使用情况下支座不变形,当有振动发生时,元件发生弹性屈曲,同时设备再与弹性体发生挤压从而实现耗能。

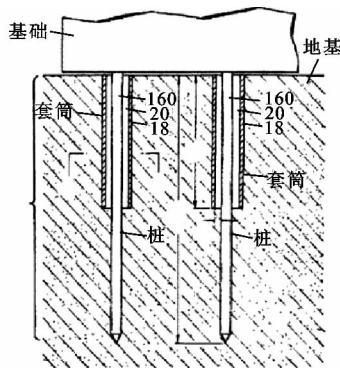


图 23 隔震耗能桩

Fig. 23 Isolation and Energy Dissipation Pile

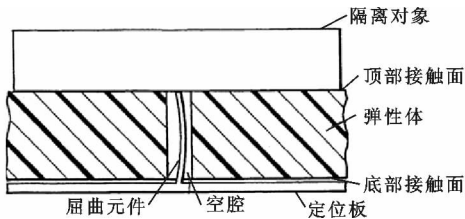


图 24 竖向冲击隔离装置

Fig. 24 Vertical Shock Isolation Apparatus

## 5 竖向隔震技术现有研究不足及展望

### 5.1 现有研究不足

(1)橡胶垫竖向隔震支座加工简单、性能稳定、造价较低,但是竖向抗拉能力较差,在地震动产生倾覆弯矩时支座极易失效,稳定性较差。不仅如此,橡胶垫竖向耗能能力较低,竖向隔震性能有限,需通过借助外部阻尼达到耗能效果。

(2)弹簧竖向隔震支座是目前运用最为广泛的一类隔震支座,该支座通过弹簧的竖向变形及碟形弹簧片间摩擦提供竖向阻尼及耗能,其性能较为稳

定,且碟形弹簧由于其构造特点可按需要进行各种组合,实现模块化装配与更换。为大幅度提高结构自振周期以使其偏离地震卓越周期,弹簧支座往往刚度较小,使得其在重力作用下的静力平衡变形量过大,使用效率较低。

近年来有学者提出根据“负刚度理论”及“准零刚度理论”设计得到的弹簧支座模型,此类支座具有较高的静态刚度和接近于 0 的动态刚度,能同时满足正常使用状态及隔震要求,是今后结构工程竖向隔震技术发展的一大方向。

(3)气压及液压竖向隔震支座利用流体介质的非线性力提供阻尼,性能优异,但是对密封缸的密闭性要求较高,造价昂贵且维修难度大。此类支座适用于较为重要的建筑设施,而对于一般的建筑设施不具有实用性。

(4)部分构造的竖向隔震支座仅停留在理论及试验研究阶段,由于其构造复杂,造价较高,目前难以应用于实际工程中。

## 5.2 展 望

(1)对于建筑结构,正常使用状态及地震作用阶段对竖向刚度、阻尼等指标的要求并不一致,为实现竖向隔震的目的,同时保证建筑的正常使用功能,隔震支座的下一阶段研究目标可朝着主动智能控制的方向发展,只有当传感器检测到地震波时,竖向隔震支座工作启动。

(2)针对中国广大乡镇建筑“小震致灾”甚至“小震大灾”的特点,尤其在高烈度地震区及近断层地震区,为提高广大乡镇建筑抗震性能,亟待研发一种造价低廉、构造简单的结构工程竖向隔震支座。

(3)目前竖向隔震技术在大跨度建筑、高层建筑等结构中已经有了一定的研究成果,但是对于长悬臂结构竖向隔震的研究仍不够充分。今后的研究中将进一步完善长悬臂结构隔震设计的理论体系及构造措施。

(4)建筑物需同时满足水平隔震及竖向隔震的需求,因此当调节隔震装置的竖向刚度及阻尼性能时应不影响其水平隔震的力学性能及隔震效率,反之亦然。因此,研发实用有效的三维隔震支座是隔震技术今后发展的一大挑战与方向。

## 6 结 语

在上部结构和基础之间设置隔震支座是提升建筑抗震性能的有效途径,本文总结了国内外现有竖向隔震支座的隔震机理、发展现状及存在的问题,并

在文献总结基础上提出展望。如何平衡地震作用下的隔震效果及正常使用状态下的性能要求,将竖向隔震技术有效利用在长悬臂结构,研发有效的三维隔震装置等也是支座构造进一步优化的方向。另外,降低支座成本、简化支座构造也是推广竖向隔震技术的重要途径。通过对竖向隔震技术的总结和展望,为竖向隔震技术的发展及其在实际工程中的应用提供参考。

## 参考文献:

## References:

- [1] 薛素铎,赵均,高向宇. 建筑抗震设计[M]. 3 版. 北京:科学出版社,2012.  
XUE Su-duo, ZHAO Jun, GAO Xiang-yu. Seismic Design of Buildings[M]. 3rd ed. Beijing: Science Press, 2012.
- [2] MAKRIS N. Seismic Isolation: Early History [J]. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 2019, 48(2): 269-283.
- [3] 许伟志,王曙光,杜东升,等. 大跨隔震结构多维地震响应有限元模拟[J]. 南京工业大学学报:自然科学版, 2017, 39(4): 131-137, 142.  
XU Wei-zhi, WANG Shu-guang, DU Dong-sheng, et al. Finite Element Analysis for Multi-dimensional Seismic Response of Long-span Isolated Structures [J]. Journal of Nanjing Tech University: Natural Science Edition, 2017, 39(4): 131-137, 142.
- [4] 党育,霍凯成. 多层隔震结构的竖向地震作用研究[J]. 地震工程与工程振动, 2010, 30(4): 139-145.  
DANG Yu, HUO Kai-cheng. Vertical Earthquake Responses of Multi-story Isolated Buildings [J]. Earthquake Engineering and Engineering Dynamics, 2010, 30(4): 139-145.
- [5] ELGAMAL A, HE L C. Vertical Earthquake Ground Motion Records: An Overview [J]. Journal of Earthquake Engineering, 2004, 8(5): 663-697.
- [6] 谢俊举,温增平,高孟潭,等. 2008 年汶川地震近断层竖向与水平向地震动特征[J]. 地球物理学报, 2010, 53(8): 1796-1805.  
XIE Jun-ju, WEN Zeng-ping, GAO Meng-tan, et al. Characteristics of Near-fault Vertical and Horizontal Ground Motion from the 2008 Wenchuan Earthquake [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2010, 53(8): 1796-1805.
- [7] PAPAZOGLU A J, ELNASHAI A S. Analytical and Field Evidence of the Damaging Effect of Vertical Earthquake Ground Motion [J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 1996, 25(10): 1109-1137.



- [8] KUNNATH S K, ERDURAN E, CHAI Y H, et al. Effect of Near-fault Vertical Ground Motions on Seismic Response of Highway Overcrossings[J]. Journal of Bridge Engineering, 2008, 13(3): 282-290.
- [9] SEIGENTHALER R. Earthquake-proof Building Supporting Structure with Shock Absorbing Damping Elements[J]. Schweizerische Bauzeitung, 1970, 20: 211-219.
- [10] 唐家祥, 李黎, 李英杰, 等. 叠层橡胶基础隔震房屋结构设计与研究[J]. 建筑结构学报, 1996, 17(2): 37-47, 79.
- TANG Jia-xiang, LI Li, LI Ying-jie, et al. Design and Research of Base-isolated Building with Laminated Rubber Bearings[J]. Journal of Building Structures, 1996, 17(2): 37-47, 79.
- [11] 朱宏平, 唐家祥. 叠层橡胶隔震支座的振动传递特性[J]. 工程力学, 1995, 12(4): 109-114.
- ZHU Hong-ping, TANG Jia-xiang. Vibrational Transmission Characteristics of Laminated Rubber Bearing[J]. Engineering Mechanics, 1995, 12(4): 109-114.
- [12] 周福霖. 工程结构减震控制[M]. 北京: 地震出版社, 1997.
- ZHOU Fu-lin. Engineering Structural Vibration Control[M]. Beijing: Seismological Press, 1997.
- [13] 徐忠根, 周福霖. 我国首栋橡胶垫隔震住宅楼动力分析[J]. 世界地震工程, 1996(1): 38-42.
- XU Zhong-gen, ZHOU Fu-lin. Dynamic Analysis of the First Rubber Bearing Isolated Dwelling of Our Country[J]. World Earthquake Engineering, 1996(1): 38-42.
- [14] 冼巧玲, 周福霖, 王伟. 橡胶垫隔震框架结构试验研究[J]. 世界地震工程, 1996(2): 23-28.
- XIAN Qiao-ling, ZHOU Fu-lin, WANG Wei. Testing Investigation for Building Frame with Isolating Rubber Bearings[J]. World Earthquake Engineering, 1996(2): 23-28.
- [15] 颜学渊, 张永山, 王焕定, 等. 三类三维隔震抗倾覆支座力学性能试验研究[J]. 振动与冲击, 2009, 28(10): 49-53, 224.
- YAN Xue-yuan, ZHANG Yong-shan, WANG Huan-ding, et al. Experimental Study on Mechanical Properties of Three Kinds of Three-dimensional Base Isolation and Overturn-resistance Devices[J]. Journal of Vibration and Shock, 2009, 28(10): 49-53, 224.
- [16] 魏陆顺, 周福霖, 任珉, 等. 三维隔震(振)支座的工程应用与现场测试[J]. 地震工程与工程振动, 2007, 27(3): 121-125.
- WEI Lu-shun, ZHOU Fu-lin, REN Min, et al. Application of Three-dimensional Seismic and Vibration Isolator to Building and Site Test[J]. Earthquake Engineering and Engineering Dynamics, 2007, 27(3): 121-125.
- [17] WEI L S, ZHOU F L, TAN P, et al. Research and Application on Three-dimensional Seismic and Vibration Isolation for Building[J]. Journal of Harbin Institute of Technology: New Series, 2011, 18(1): 62-66.
- [18] FUJITA T, NAKAJIMA K, SUGIMOTO H, et al. A 3-D Isolation Floor with a Direction Converter or Vibration for Vertical Isolation[C]//ASME. Proceedings of the 3rd Symposium on Seismic Vibration and Shock Isolation. Honolulu: ASME, 1989: 43-48.
- [19] YOO B, KOH H M, YUN C B, et al. Applications and Development in Base Isolation and Passive Energy Dissipation for Civil and Nuclear Structures in Korea[C]//KOH H M, MARTELLI A. Proceedings of the International Post-SMiRT Conference Seminar. Chonju: SMiRT-15, 1999: 117-130.
- [20] KITAMURA S, NAKATOGAWA T, MIYAMOTO A, et al. Experimental Study on Coned Disk Springs for Vertical Seismic Isolation System[C]//CAME. Transactions of 17th International Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology (SMiRT-17). Prague: CAME, 2003: K10-2.
- [21] SOMAKI T, MIYAMOTO A. The Investigation About Embodiment of Vertical Isolation Structure[M]. Ibaraki: Japan Nuclear Cycle Development Institute, 2004.
- [22] 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.
- XIONG Shi-shu. Theoretical and Experimental Research of Three-dimensional Seismic Base Isolation System[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2004.
- [23] 张玉敏, 苏幼坡, 梁军, 等. 碟形弹簧竖向减震装置的研究[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2005, 37(12): 1678-1680, 1697.
- ZHANG Yu-min, SU You-po, LIANG Jun, et al. A Study on Vertical Seismic Isolation System by Disk Spring[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2005, 37(12): 1678-1680, 1697.
- [24] 赵亚敏, 苏经宇, 周锡元, 等. 碟形弹簧竖向隔震结构振动台试验及数值模拟研究[J]. 建筑结构学报, 2008, 29(6): 99-106.
- ZHAO Ya-min, SU Jing-yu, ZHOU Xi-yuan, et al. Shaking Table Test and Numerical Analysis of Verti-

- cal-isolated Building Model with Combined Disk Spring Bearing[J]. Journal of Building Structures, 2008, 29(6): 99-106.
- [25] ZHAO Y M, SU J Y, LU M. Experimental Study on Three-dimensional Base-isolated Model with 3DIB[J]. Advanced Materials Research, 2011, 255-260: 2325-2329.
- [26] 杨琼, 郭阳照, 付航, 等. 阵列碟簧柱支座竖向隔震性能试验研究[J]. 建筑结构, 2017, 47(增2): 330-335.
- YANG Qiong, GUO Yang-zhao, FU Hang, et al. Experimental Study on Vertical Isolation Performance of Vertical Seismic Isolation Bearing of Disc Spring Column[J]. Building Structure, 2017, 47(S2): 330-335.
- [27] OU J P, JIA J F. Seismic Performance of a Novel 3D Isolation System on Continuous Bridges[J]. Proceedings of SPIE, 2010, 7643: 764304.
- [28] 贾俊峰, 欧进萍, 刘明, 等. 新型三维隔震装置力学性能试验研究[J]. 土木建筑与环境工程, 2012, 34(1): 29-34, 53.
- JIA Jun-feng, OU Jin-ping, LIU Ming, et al. Mechanical Performance Test of a Novel Three-dimensional Isolation Bearing[J]. Journal of Civil, Architectural & Environmental Engineering, 2012, 34(1): 29-34, 53.
- [29] 陈晓城. 竖向地震作用下基础隔震结构的动力响应分析[D]. 广州: 华南理工大学, 2011.
- CHEN Xiao-cheng. Dynamic Responses Analysis of the Structure with Base-isolation System Under the Action of Vertical Earthquake[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2011.
- [30] 尚守平, 崔向龙. 一种新型三维隔震墩隔震性能试验研究[J]. 合肥工业大学学报: 自然科学版, 2016, 39(4): 514-517.
- SHANG Shou-ping, CUI Xiang-long. Experimental Study of Isolation Performance of a New Type of Three-dimensional Isolation Pier[J]. Journal of Hefei University of Technology: Natural Science, 2016, 39(4): 514-517.
- [31] 尚守平, 王振, 尹奋. 新型三维隔震墩隔震单元参数设计研究[J]. 地震工程与工程振动, 2017, 37(4): 104-111.
- SHANG Shou-ping, WANG Zhen, YIN Fen. Research on Design of Element of the Seismic Isolation for a New Three-dimensional Seismic Isolation Pier[J]. Earthquake Engineering and Engineering Dynamics, 2017, 37(4): 104-111.
- [32] ZHENG Y S, ZHANG X N, LUO Y J, et al. Design and Experiment of a High-static-low-dynamic Stiffness Isolator Using a Negative Stiffness Magnetic Spring[J]. Journal of Sound and Vibration, 2016, 360: 31-52.
- [33] LE T D, AHN K K. Experimental Investigation of a Vibration Isolation System Using Negative Stiffness Structure[J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2013, 70: 99-112.
- [34] MARGIELEWICZ J, GASKA D, LITAK G. Evolution of the Geometric Structure of Strange Attractors of a Quasi-zero Stiffness Vibration Isolator[J]. Chaos, Solitons and Fractals, 2019, 118: 47-57.
- [35] LIU D W, LIU Y, SHENG D F, et al. Seismic Response Analysis of an Isolated Structure with QZS Under Near-fault Vertical Earthquakes[J]. Shock and Vibration, 2018, 2018: 1-12.
- [36] KASHIWAZAKI A, TANAKA M, TOKUDA N, et al. Test of Seismic Isolation Floor System by Using 3-dimensional Isolator[C]//WCEE. Proceedings of the Ninth World Conference on Earthquake Engineering. New York: WCEE, 1989: 845-850.
- [37] 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]//MPA. Transaction of the 12th International Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology (SMiRT). Stuttgart: MPA, 1993: 363-368.
- [38] KAGEYAMA M, IBA T, UMEKI K, et al. Development of Three-dimensional Base Isolation System with Cable Reinforcing Air Spring[C]//CAME. Transactions of 17th International Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology (SMiRT-17). Prague: CAME, 2003: K09-5.
- [39] FUJITA S, MINAGAWA K, TANAKA G, et al. Intelligent Seismic Isolation System Using Air Bearings and Earthquake Early Warning[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2011, 31(2): 223-230.
- [40] TOMIZAWA T, TAKAHASHI O, AIDA H, et al. Vibration Test in a Building Named "Chisuikan" Using Three-dimensional Seismic Isolation System[C]//WCSI. Proceedings of the 13th World Conference on Seismic Isolation. Sendai: WCSI, 2013: 1-8.
- [41] 徐赵东. (铅)粘弹性阻尼结构的试验与研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2001.
- XU Zhao-dong. Experiment and Study About the (Lead) Viscoelastic Structure[D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2001.
- [42] 徐赵东. 抗震加固的粘弹性阻尼减振(震)新技术[J].

- 建筑技术,2009,40(6):527-530.
- XU Zhao-dong. Stepping into New Era of Viscoelastic Damper Technique [J]. Architecture Technology, 2009,40(6):527-530.
- [43] 李 剑. 一种新型带阻尼竖向隔震支座:中国,CN 205189126U[P]. 2016-04-27.
- LI Jian. A New Type of Vertical Isolation Bearing with Damping:China,CN 205189126U[P]. 2016-04-27.
- [44] 郭阳照,潘 毅,吴 体,等. 新型内置挤压铅消能件竖向隔震墩的设计原理与减震性能分析[J]. 土木工程学报,2016,49(增 1):119-124.
- GUO Yang-zhao,PAN Yi,WU Ti,et al. Design Principle and Seismic Performance Analysis of a Vertical Isolation Pier with Lead Extrusion Damping Component[J]. China Civil Engineering Journal, 2016, 49 (S1):119-124.
- [45] 刘 逸. 集合球竖向隔震筒的力学性能试验研究[D]. 广州:广州大学,2017.
- LIU Yi. Experimental Study on Mechanical Properties of Collecting Ball Vertical Isolation Tube[D]. Guangzhou:Guangzhou University,2017.
- [46] 夏 昌,傅大宝,刘少克. 基于电磁悬浮技术的结构竖向隔震系统研究[J]. 土木工程学报,2014,47(增 1):197-201.
- XIA Chang,FU Da-bao,LIU Shao-ke. Research on Structural Vertical-isolation System Based on Electro Magnetic Levitation Technique[J]. China Civil Engineering Journal,2014,47(S1):197-201.
- [47] 姜 袁. 碟式竖向隔震耗能阻尼器:中国,CN 2602085Y[P]. 2004-02-04.
- JIANG Yuan. Disc-type Vertical Isolation Energy Dissipation Damper:China,CN 2602085Y[P]. 2004-02-04.
- [48] 黄永林. 基础隔震研究与应用的回顾与前瞻[J]. 地震学刊,1998(4):58-66.
- HUANG Yong-lin. Review and Prospect for Study and Application of Base Vibration Isolation[J]. Journal of Seismology,1998(4):58-66.
- [49] SATO T. Earthquake Insulating Building Structure:US,4707956[P]. 1987-11-24.
- [50] TUCCHIO M A,LAFRENIERE R A. Shock Isolation Method and Apparatus:US,5478058[P]. 1995-12-26.