

国家自然科学基金资助项目

建筑结构基础隔震

唐家祥 刘再华

华中理工大学出版社

国家自然科学基金资助项目

建筑结构基础隔震

唐家祥 刘再华

华中理工大学出版社

建筑结构基础隔震

唐家祥 刘再华

责任编辑 佟文珍

*

华中理工大学出版社出版发行

(武昌喻家山 430074)

新华书店湖北发行所经销

华中理工大学出版社印刷厂印刷

*

开本:787×1092 1/16 印张:16.75 插页:6 字数:405 000

1993年8月第1版 1993年8月第1次印刷

印数:1—1 000

ISBN 7-5609-0798-9/TU·11

定价:5.20元

(鄂)新登字第10号

内 容 提 要

基础隔震是结构被动控制中最重要的方法之一。它以崭新的概念进入建筑结构地震防护,正引起世界许多国家的重视。本书系统介绍建筑结构基础隔震的概念、理论、设计方法与测试技术。包括:基础隔震思想;力学原理;现代基础隔震系统的组成;基础隔震结构的可靠性与经济评价;隔震器、阻尼器力学性能与设计;上部结构设计理论与设计实例;通过全尺寸隔震结构的震动试验、地震观测以及模拟分析,验证基础隔震的有效性等。

本书读者对象:工业与民用建筑、桥梁、工程力学、核电站工程、国防工程、生命线工程等专业的工程技术人员、大专院校师生和研究人员。还可作为高年级大学生、研究生的教学参考书。

序

最近以来,建筑结构地震防护的另一种选择登上了舞台,引起世界许多国家的关注,这就是“建筑结构基础隔震”。所谓“基础隔震”,是在建筑物与基础之间设置一层具有足够可靠性的“隔震层”(也称“隔震系统”),控制地面运动向上部结构的传递。华中理工大学对基础隔震建筑结构进行的计算机分析和仿真表明:只要隔震系统的刚度与阻尼适当,上部结构的水平地震加速度反应可比不隔震时减小 80—90%,从而做到强震时建筑物只作轻微平动。“基础隔震”不需要外加能源,对于重量和体积都很大的建筑结构来说,是结构被动控制中很受青睐的方法。^[1]

“基础隔震”概念由来已久,早在 1881 年,日本河合浩藏就在《建筑杂志》上提出了“基础隔震”的设想^[1]。然而,把它变成可靠的现实并非是轻而易举的事情,它涉及复杂的材料研究和结构计算。直到近 20 年来,随着计算机在工程结构设计中的应用、高分子减震材料的发展以及机械耗能装置的出现,建筑结构基础隔震才在世界范围内获得成功。

模型试验与结构实践都已证明,“基础隔震”的效果是十分明显的。日本福冈大学对一幢单层房屋结构模型进行了基础隔震与非隔震地震模拟试验。强震时,非隔震模型晃动厉害,内部物品剧烈移动或倾倒;而隔震模型内,所有物品保持安定。美国加州大学伯克莱分校也对一幢五层楼房钢框架模型,在振动台上做过基础隔震与非隔震地震模拟对比试验,先后输入了四种地震波,结果,基础隔震时第五层的水平加速度反应只为不隔震时的 $1/5—1/9$ ^[2]。日本在仙台市东北大学校园内同一场地上并排修建了两幢结构完全相同的钢筋混凝土三层框架试验楼房,一幢采用基础隔震,另一幢没有采用。在一次地面运动水平加速度为 90cm/s^2 的地震中,不隔震的一幢楼顶水平加速度反应为 270cm/s^2 ,隔震的一幢楼顶水平加速度反应为 40cm/s^2 ,约为不隔震的 $1/7^*$ 。

用“基础隔震”方法去抵御地震灾害给建筑结构安全带来的危害,不仅可使结构本身免遭破坏,也能使建筑物内部设备、贵重物品安然无恙,还能做到强震时基本上不中断人的正常生产、工作与生活。因此,有的专家认为这是结构地震防护设计中的一次方法革命^[3]。据不完全统计,全世界至少有 25 个国家在开展“基础隔震”研究^[4],其中,美、日、法、新西兰、意大利、德国等 15 个国家已经共修建了 200 多座基础隔震建筑物。

建筑结构基础隔震有广阔的应用前景。用于首脑机关、指挥中心、通讯、警察、医院和电力等设施的房屋建筑,确保这些机关和部门在强震时能正常工作;用于放置贵重设备、仪器、产品的车间、仓库,避免设备、产品倾倒造成的破坏;用于桥梁,防止因地震落梁导致交通中断;用于博物馆,使那些失而不可复得的无价珍宝免遭震灾;用于核电站,不致因地震引进核泄漏;用于地震区内有历史价值的古建筑,不致因抗震加固使原有建筑风貌受到损坏;用于一般工业与民用建筑,使人民生命财产获得可靠的安全保障。

可以预料,不久的将来,结构工程师完全能够从传统的抗震结构、基础隔震结构和其它控制结构之间作出最合适的选择或综合。

本书是根据作者在国家自然科学基金资助项目“建筑物基础隔震”以及华中理工大学建筑工程学院土木系在这一领域进行的研究与积累的资料编写而成的。被引用的资料中,1/3 以上是 1988 年至 1992 年 10 月间国内外的最新研究成果。

* Izumi M. Earthquake Response Characteristics of Base-Isolated Building by Direct Comparison With a Non-Isolated One. The Architectural Reports of The Tohoku University, 29, 1990, 3

本书旨在把“建筑结构基础隔震”技术概括、系统地介绍给读者。全书共九章。第一章讲述“基础隔震”的基本概念、发展历史、力学原理以及一些经过实际考验的现代基础隔震系统和基础隔震建筑物。第二章通过理论、试验和对实际结构的观测,分析了基础隔震结构的可靠性与经济评价。第三章引用大量试验结果说明了各种隔震器、阻尼器的性能。第四至第六章讲述隔震器、阻尼器和上部结构的设计方法。这几章里,除了介绍理论分析外还包括完整的设计实例。第七章和第八章分别介绍怎样通过试验去确定隔震器、阻尼器和隔震结构的性能。包括试验内容、测试技术和主要设备等。第九章讨论基础隔震有效性的验证方法与实例。鉴于叠层橡胶隔震系统已受到各国广泛重视,1980年以来世界上已建成的基础隔震工程结构中,80%以上采用了这种系统,本书第四至九章将以叠层橡胶隔震系统为直接分析对象。

为省篇幅,作者没有把“结构动力学”基本理论系统地纳入本书,阅读本书时如遇这方面问题,请读者参阅有关书籍。

本书的第一章至第六章由唐家祥编写,第七章至第九章由刘再华编写。

在本书的撰写过程中,日本专家高山峰夫博士给予了支持、帮助;华中理工大学土木系“结构减震(振)与控制”课题组裴若娟副教授、张朝新副教授、梁波博士、许剑飞、熊世树讲师等分别在隔震系统设计、上部结构地震反应计算机程序方面、隔震系统测试设备、测试技术、隔震器性能试验方面、基础隔震结构地震反应计算理论、计算方法方面、基础隔震结构工程设计方面进行了卓有成效的研究,他们为本书引用的许多成果付出了辛勤劳动;工程结构隔震专家廖蜀樵高级工程师详细审阅了本书,提出了有益的修改意见;华中理工大学出版社为本书的出版给予了大力支持。在此,一并表示谢意。

作 者

1992年12月 武昌 喻家山

目 录

第一章 历史与现状	(1)
第一节 从古建筑中看到的基础隔震.....	(1)
第二节 基础隔震概念的提出及早期研究.....	(2)
第三节 基础隔震原理.....	(4)
第四节 现代基础隔震系统的组成.....	(5)
第五节 几种实用的基础隔震系统	(14)
第六节 现代基础隔震结构实例	(16)
第七节 基础隔震技术的最新发展	(29)
第二章 基础隔震结构的可靠性与经济评价	(34)
第一节 安全性	(34)
第二节 耐久性	(42)
第三节 耐火性	(48)
第四节 适用性	(49)
第五节 经济评价	(51)
第三章 隔震器与阻尼器的力学性能	(54)
第一节 概述	(54)
第二节 标准叠层橡胶支座	(55)
第三节 铅芯叠层橡胶支座	(61)
第四节 高阻尼叠层橡胶支座	(62)
第五节 滑动支座	(64)
第六节 弹塑性阻尼器	(67)
第七节 粘性阻尼器	(69)
第八节 油阻尼器	(71)
第九节 摩擦阻尼器	(72)
第四章 叠层橡胶支座设计	(74)
第一节 概述	(74)
第二节 形态设计	(76)
第三节 强度设计	(77)
第四节 刚度设计	(85)
第五节 耐久性设计	(97)
第六节 叠层橡胶支座有限元分析.....	(100)
第七节 管理与维修.....	(111)

第五章 弹塑性阻尼器设计	(113)
第一节 概念	(113)
第二节 塑性变形量计算	(114)
第三节 钢阻尼器设计	(117)
第四节 铅阻尼器设计	(122)
第五节 阻尼值的确定	(130)
第六章 结构设计	(138)
第一节 概述	(138)
第二节 输入地震动	(139)
第三节 单自由度系统地震反应分析	(146)
第四节 多自由度系统地震反应分析	(156)
第五节 隔震系统等效刚度特性	(158)
第六节 简易设计法	(165)
第七节 地震反应分析举例	(170)
第八节 设计实例	(175)
第七章 叠层橡胶支座性能试验	(200)
第一节 概述	(200)
第二节 压剪试验	(200)
第三节 压缩试验	(205)
第四节 耐久性预测试验	(208)
第五节 构造类型的影响	(219)
第八章 弹塑性阻尼器性能试验	(224)
第一节 软钢 U 型带片阻尼器	(224)
第二节 软钢圆柱棒与圆锥棒阻尼器	(226)
第三节 钢制圆环阻尼器	(226)
第四节 钢制花瓣阻尼器	(230)
第五节 铅阻尼器	(239)
第九章 基础隔震建筑的地震响应观测	(247)
第一节 基础隔震住宅的振动试验	(248)
第二节 基础隔震建筑的地震响应观测	(251)
参考文献	(258)

第一章 历史与现状

第一节 从古建筑中看到的基础隔震

首先,我们着眼于现存的古建筑,探索几处基础隔震思想的祖先。

一、紫禁城

闻名于世的紫禁城即北京故宫博物院(图 1-1,见彩页 1),是明成祖永乐帝从 1406 年起历时 14 年建造的一座皇城。

在南北约 1km、东西约 700m、面积 72 万 m^2 的城内数百个大小不同的建筑物排列成一个巨大的建筑群。这座现存的中世纪木结构建筑群虽然处在地震区内,但受到的地震灾害却很少。有的专家认为:奥秘之一是地下的一种柔性构造。在 1975 年开始的紫禁城设备配管工程中,从中枢部位地下 5—6m 处挖掘出略带粘性的物质,检查结果是一层煮过的糯米拌石灰^[5]。紫禁城的主要建筑都建在大理石高坛之上,下面有这样一层柔软的糯米层,就能够在一定程度上把建筑物与地震隔离开来,使建筑物免遭震灾。“煮过的糯米拌石灰”是否出自有意识的基础隔震思想尚可进一步探讨,但我国自古就有被称为“版筑”的地基处理技术,在 10—15cm 厚的粘土层间放置一些绳子,使之与土溶合,夯实、干燥、加厚成土坛,再在土坛上修建房屋^[6]。可以认为这种技术的演变或发展就是紫禁城的地下构造。

二、镰仓大佛

日本镰仓大佛(图 1-2)建于 1252 年,放置在日本高德院内。关东大地震时有震而不倒的表现。“国宝镰仓大佛由来记”一书中记述道:“大正 12 年(1923 年)大地震时,台座崩损,佛像

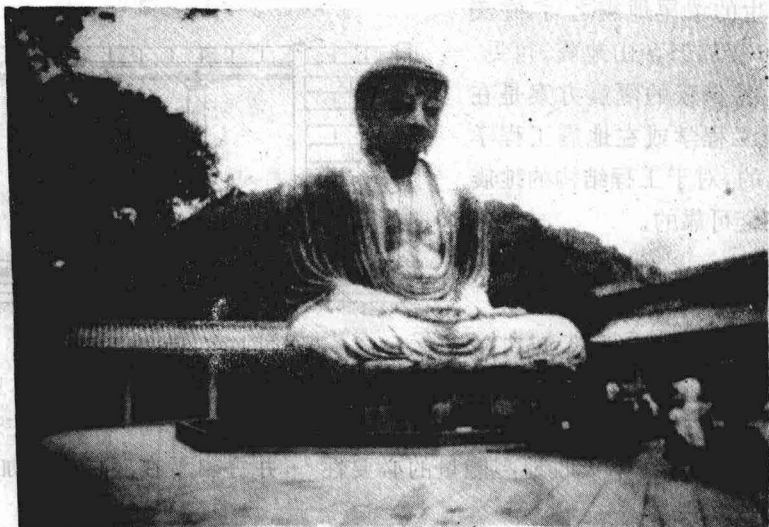


图 1-2 镰仓大佛

前倾未倒。”其它史料记载大佛向前滑出约 40cm。大佛能在地震时滑而不倒符合当今的基础隔

震思想,虽不能仅仅以此断言古代营建者考虑了隔震原理,但后来对大佛的修缮中,确实表现出应用基础隔震原理进行的指导。例如,1926年修缮时,曾把佛像固定在台座上。1960—1961年修缮时,因躯心大佛颈部在地震过程中被折断,又在台座与佛像之间铺了一层不锈钢板,等等。照此看来,至少距今30年前就有意识地实现了基础隔震结构。

第二节 基础隔震概念的提出及早期研究

一、基础隔震概念的提出

迄今为止,有记载说明最早提出基础隔震概念的人是日本的河合浩藏。他在日本《建筑杂志》1881年第12号上发表的“地震时不受大震动的结构”一文中,针对放有天平对振动敏感的设备建筑物,提出:“……要盖一种在地震时也不震动的房屋,这是一个非常棘手的问题。”为了实现这一目标,他的办法是先在地基上横竖交错地卧放几层圆木,圆木上做混凝土基础,再在混凝土基础上盖房子(图1-3),以便削弱地震向建筑物的传递。此外,他还提出:建筑物要低,在地震通路上挖沟切断地震传播路径等。

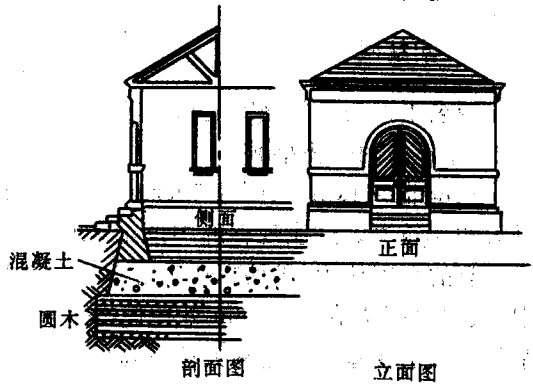


图 1-3 河合浩藏方案

1909年,卡兰特伦茨 J. A. 在美国斯坦福大学提出了另一种基础隔震方案*,如图1-4所示。即在建筑物与基础之间铺一层滑石或云母,地震时建筑物滑动,达到建筑物与地震隔离的目的。

一般认为,日本的地震工程学始于1881年10月发生的浓尾地震之后,在美国则是始于1906年的旧金山地震。可见,河合浩藏与卡兰特伦茨的隔震方案是在尚无科学的地震工程学或在地震工程学的萌芽时代提出的,对于工程结构的地震隔离不可能是完全可靠的。

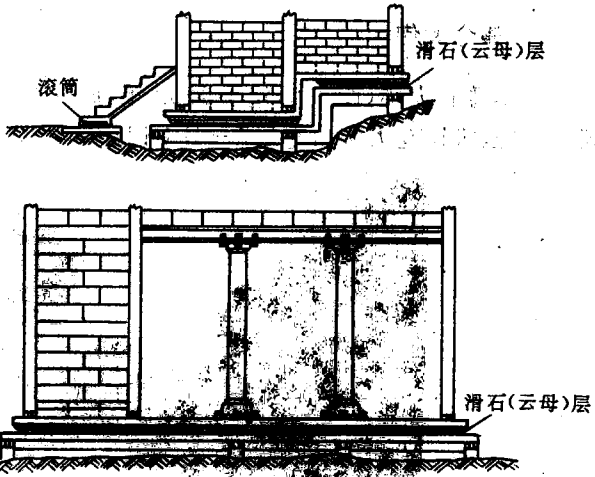


图 1-4 卡兰特伦茨方案

二、基础隔震技术的早期研究

随着地震工程学的发展,尤其是1923年日本关东大地震之后,有关基础隔震的研究已逐步深入。1924年,日本鬼头健三郎提出,在建筑物柱脚与基础之间插入轴承的隔震方案**。1927年,日本中村太郎在理论方面取得突破,他论述了在隔震系统中吸收地震能量的必要性^[7],并提出了在底柱上端加侧向阻尼器,

* Calantariants J. A. Improvements in and Connected with Building and Other Works and Appurtenances to Resist the Action of Earthquake and the Like. Engineering Library of Stanford University, California, 1909, 325371:1—11

** 鬼头健三郎. 建筑物耐震装置. 东京,大正13年,特许(61135).

把起垂直支承作用的柱子与吸能装置分离开来的隔震方案(图 1-5)。中村太郎提出的对阻尼

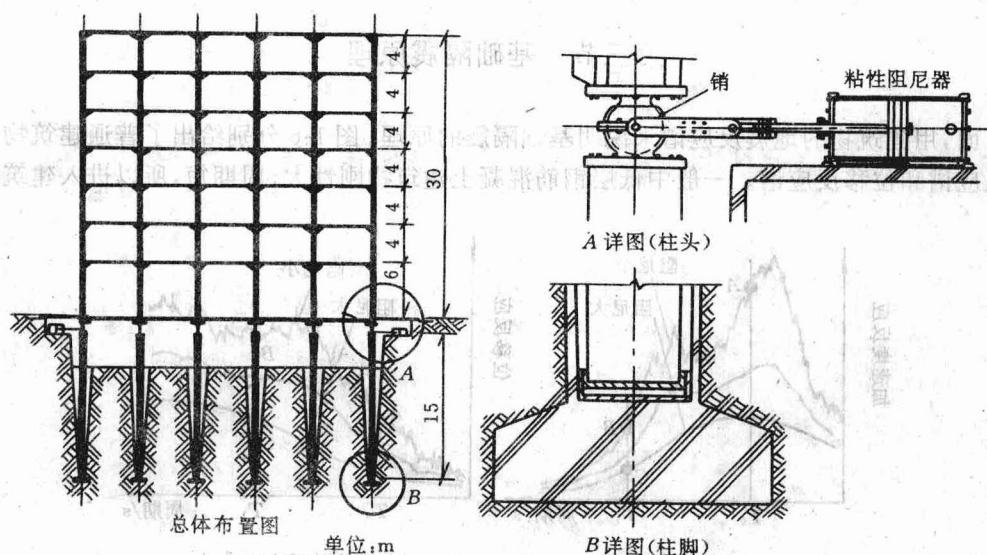


图 1-5 中村太郎方案

的认识,正是在此之前被各种基础隔震方案所忽视的。后来,一些设计者在使用卡兰特伦茨方案时都增添了额外的阻尼元件来满足对阻尼的要求。

在这一时期出现的另外一个隔震方法是采用柔性底层(Flexible First Storey),简称 F. F. S. 方法。设计时,使底层柱子的横向刚度大大低于它的铅直(竖向)刚度,在水平地震荷载作用下,结构的变形主要局限在底层柱子。1929 年,马特尔 R. R. 最早提出这一观点*。1935 年,格林 N. B. 对其进行了深入研究^[8],认为:由于底层柱子很柔,地震时必然发生较大的横向变形,而这种横向变形与竖向荷载的耦合作用加剧了柱子的屈曲问题。1969 年,芬特 M. 和卡汉 F. R. 提出把底层柱子设计成在地震荷载下屈服,以限制剪力向结构的其余部分传递,同时,屈服柱子的迟滞效应吸收能量使位移减小^[9]。1970 年,美国用 F. F. S. 法修建了一幢医院(Qlive View),在竣工后第二年发生的一次地震中,这幢医院受到相当严重的损坏。于是对 F. F. S. 法的可靠性产生了疑问。1973 年,科勃拉 A. K. 、克劳夫 D. P. 和克劳夫 R. W. 在计算机上进行研究后认为:F. F. S. 法是行不通的^[10]。因为,如果要减少上层结构的剪力,柱子屈服后的刚度(post-yield stiffness)必须小到不切实际的程度。其结果,水平位移仍然很大,竖向荷载对屈服柱子的影响使结构系统变得不可能实现。

日本建筑家岡隆一在进行了比较深入的理论研究后提出:“隔震系统应当兼备吸能和长周期两种特性^[11]。”他的这种观点至今仍然被广泛接受。然而,周期长到什么程度,能量吸收多少,这些定量问题的研究还是以后的事情。

隔震技术基础研究的其它侧面是地震观测和非线性振动理论的发展。美国从 1930 年前后开始用强震仪进行地震观测,1933 年在长滩(Long Beach)得到了世界上最早的地震记录。地震记录为分析、计算基础隔震结构奠定了荷载基础,而非线性振动理论为实现这种计算提供了方法,因为,基础隔震结构的地震反应通常属于局部非线性问题,虽然结构本身尚处于线弹性

* Martel, R. R. The Effects of Earthquakes on Buildings with a Flexible First Story. Bulltin of The Seismological Society of American, 1929, 3

阶段,但隔震系统却是非线性的。

第三节 基础隔震原理

下面,用建筑物的地震反应谱来说明基础隔震的原理。图 1-6 分别给出了普通建筑物的加速度反应谱和位移反应谱。一般中低层钢筋混凝土建筑物刚性大、周期短,所以进入建筑物的

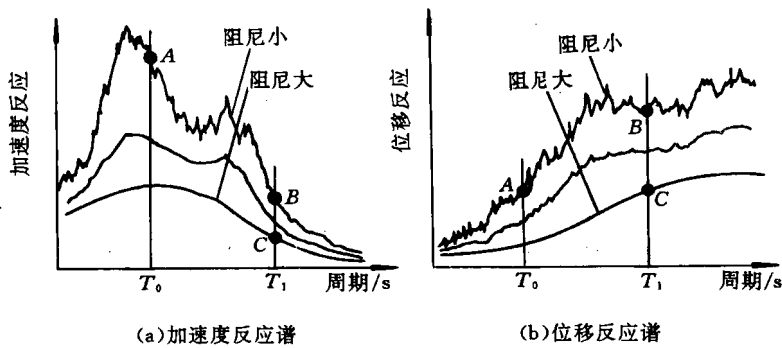


图 1-6 减弱建筑物地震反应的途径

加速度大,而位移反应小,如图中 A 点所示。现在延长建筑物周期,而保持阻尼不变,则加速度反应被大大降低,但位移反应却有所增加,如图中 B 点所示。要是再加大结构的阻尼,加速度反应继续减弱,位移反应得到明显抑制,这就是图中的 C 点。

综上所述,延长结构周期、给予适当阻尼使结构的加速度反应大大减弱。同时,让结构的大位移主要由结构物底部与地基之间的隔震系统提供,而不由结构自身的相对位移承担。这样一来,结构在地震过程中发生的变形非常之小,甚至像刚体那样作轻微平动,从而为结构物的地震防护提供更加良好的安全保障。这就是建筑结构基础隔震的基本原理。

两个完全相同的上部结构,一个进行基础隔震(称隔震建筑),一个不进行基础隔震(称普通建筑)。把它们都简化成单自由度系统,都输入 EL CENTRO NS 波进行分析,其结果示

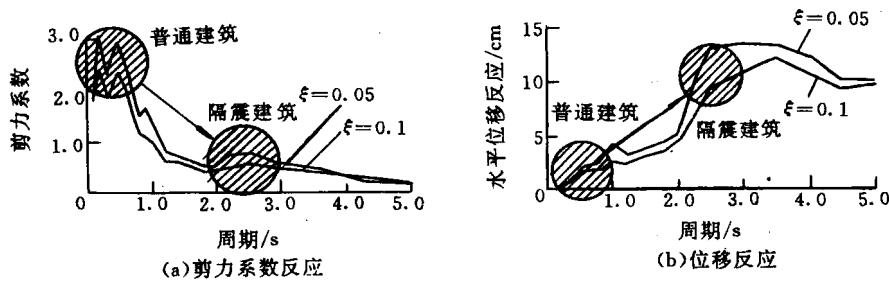


图 1-7 EL CENTRO NS 1940(0.1g)波反应谱

于图 1-7。可以看出,基础隔震建筑的水平剪力系数反应要比普通建筑的小得多,这对减小结构的地震内力与应力十分有利。另一方面,基础隔震建筑的水平位移比普通建筑的大,但因这种水平位移主要由隔震系统提供,上部结构发生类似于刚体的位移,而且绝对位移量较小,如图 1-8 所示。可以预测,通过合理地设计隔震系统,有可能出现在大地震时建筑物只发生轻微平动的情况。

图 1-9 通过结构强度和顶端水平位移之间的关系,比较了普通中低层建筑、按基础隔震设

计的中低层建筑与超高层建筑接受地震能量的情况。通过这些比较,读者可以进一步加深对基础隔震实质的了解。普通中低层建筑依靠上部结构较高的强度和较小的变形来吸收地震能量。基础隔震建筑则避开地震动的卓越周期,绝大部分地震能量通过隔震系统的大变形被吸收。这是两种设计思路的重要区别。因此,对于普通中低层建筑,必须确保上部结构具有较高的强度和适当的韧性,这是现行抗震设计的基本观点。基础隔震建筑的着眼点,是在上部结构和地基之间设置隔震系统,延长结构的整体周期,使地震引起的变形集中于隔震系统而不是上部结构。超高层建筑与中低层建筑不同,它本身就有较长的周期、具有良好的

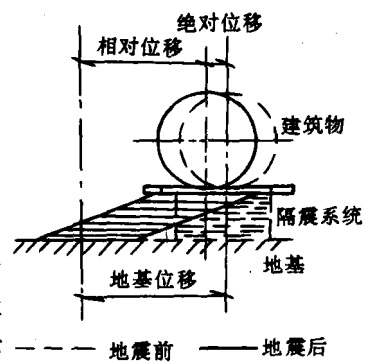


图 1-8 地震水平位移

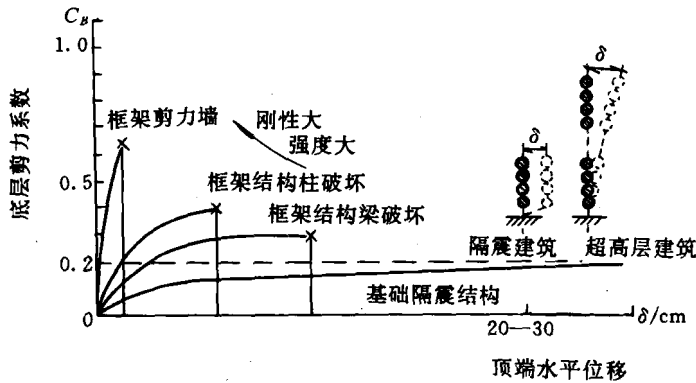


图 1-9 结构强度-顶端位移关系

柔性。超高层建筑与基础隔震建筑的区别,在于超高层建筑的地震能量全部被上部结构吸收,而且,各层吸收的能量大体均等。

由此可见,开发能够提供充分变形又能够良好地吸收地震能量的隔震系统,是基础隔震结构得以实现的关键。

第四节 现代基础隔震系统的组成

现今的基础隔震层已不再像早期的圆木和滑石层那样简易,而是一种性能更加可靠、功能更加完善的隔震系统。通常,这种隔震系统由隔震器、阻尼器、地基微震动与风反应控制装置等部分组成。当然,这并不意味着它们一定是各自独立的构(元)件,但作为隔震系统,具备上述几方面的功能却是必须的。必要时还要设置安全保险构造。

隔震器的作用是:一方面支承建筑物全部重量,另一方面由于它具有弹性,能延长建筑物的自振周期,使结构的基频处于高能量地震频率范围之外,从而能够有效地降低建筑物的地震反应。隔震器在支承建筑物时,不仅不能丧失它的承载能力,而且还要能够忍受基础与上部结构间预期的相对水平位移(几厘米甚至十几厘米)。此外,隔震器还应当具有良好的恢复力,使它在地震过去之后有能力恢复到原先位置。毫无疑问,较低的生产成本也是非常重要的。

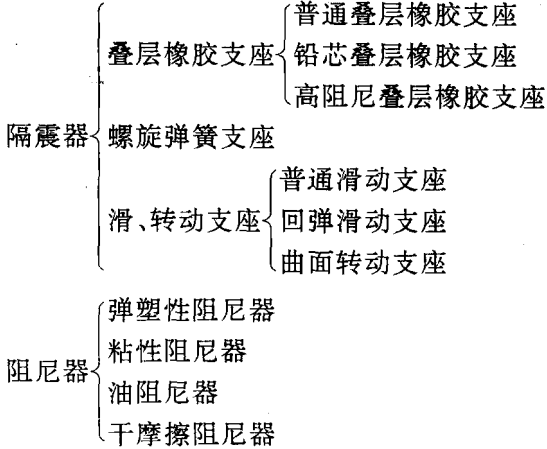
阻尼器的作用是吸收地震能量,抑制地震波中长周期成分可能给仅有隔震器的建筑物带来的大变位,并且在地震终了时帮助隔震器迅速恢复到原先位置。

设置地基微震动与风反应控制装置是为了增加隔震系统的早期刚度,使建筑物在风荷载

与轻微地震作用下能够保持安定。

考虑到万一出现个别隔震器失效的情况,需要立即、自动地提供支承以替代失效的隔震器工作,保证建筑物仍然处于安全状态,等待替换新隔震器,可设置安全保险构造。

常用的隔震器和阻尼器有



一、隔震器

1. 叠层橡胶支座

从本章第六节表 1-3 至表 1-10 以及参考文献[16]可以看出:叠层橡胶支座已为世界各国广泛接受和研究,用它组成的隔震系统是目前主要的基础隔震系统。

叠层橡胶支座由薄橡胶板与薄钢板交替叠合而成,如图 1-10(a)所示。最早出现的叠层橡胶支座没有加薄钢板,仅由若干层橡胶板叠合粘接而成,示于图 1-10(b)。由于薄钢板对橡胶板横向变形产生约束,使叠层橡胶支座具有非常大的竖向刚度。在水平刚度方面,薄钢板不影响橡胶板的剪切变形,因而保持了橡胶固有的柔韧性(图 1-11)。据此,我们可以设计、制造出竖向刚度比水平刚度大 1000 倍的叠层橡胶支座。

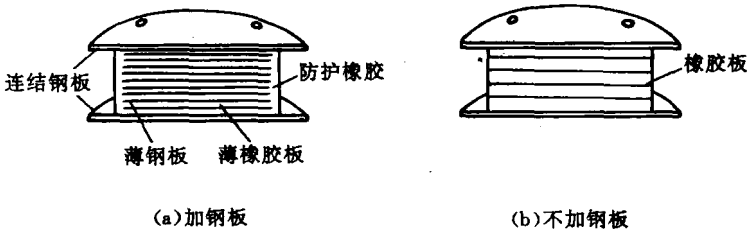


图 1-10 叠层橡胶支座

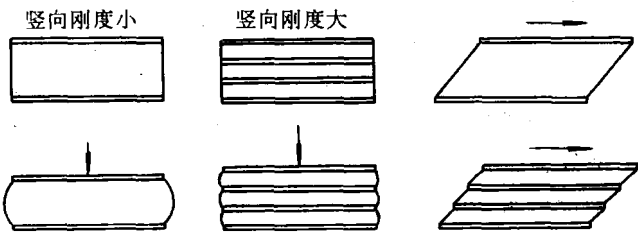


图 1-11 薄钢板对叠层橡胶支座性能的影响

叠层橡胶支座的性能还依赖于组成支座的橡胶材料的物性、支座的几何形状以及制造工艺等。用于制造叠层橡胶支座的橡胶材料主要有天然橡胶、氯丁二烯橡胶与其它多种人造橡胶。天然橡胶抗破坏、抗徐变性能、对变形的恢复能力都很强,弹性模量对温度变化的敏感性较弱,但抗臭氧、耐劣化的能力较差。在天然橡胶中加入添加剂可以提高其抗臭氧能力,效果良好。表 1-1 列出了叠层橡胶支座中使用的天然橡胶的力学性能。氯丁二烯橡胶虽有良好的抗臭氧性能,但抗徐变、耐寒性以及变形的复原能力都比不上天然橡胶。欧美、日本的叠层橡胶支

表 1-1 天然橡胶的力学性能

硬度 (JISA)	25%应力/MPa	延伸率×100	抗拉强度/MPa
40±5	0.34±0.1	>600	>20

座有使用天然橡胶的,也有使用氯丁二烯橡胶的。表 1-2 给出了各种橡胶材料性能的比较。

表 1-2 橡胶材料性能的比较

橡胶种类	天然橡胶	氯丁二烯橡胶	高阻尼橡胶
抗破坏性能	⊙	○	⊙
抗臭氧、抗酸腐蚀性	×	○	△
抗徐变性能	⊙	△	×
变形恢复性能	⊙	△	△
耐寒性	○	△	△

注:1. 天然橡胶中加进了添加剂(石墨、炭黑等)后,获得高阻尼橡胶。

2. ⊙—特好,○—好,△—一般,×—较差。

(1)普通叠层橡胶支座

普通叠层橡胶支座用天然橡胶或氯丁二烯橡胶制造。它只具有弹性性质,本身并无显著的阻尼性能,因此,通常它总是和阻尼器一起并行使用。

普通叠层橡胶支座按图 1-10(a)内容构造,先在薄钢板上涂满粘接剂,再把橡胶板与薄钢板累叠起来,置于高温高压下硫化成型,得到橡胶板与薄钢板连成一体的产品。又称粘接型叠层橡胶支座。

(2)铅芯叠层橡胶支座

在普通叠层橡胶支座中部竖直地灌入铅棒就成了铅芯叠层橡胶支座(图 1-12)。

灌入铅棒的目的:一是提高支座的吸能效果,确保支座有适度的阻尼;二是增加支座的早期刚度,对控制风反应和抵抗地基的微震动有利。

灌入铅棒的直径应根据设计要求通过计算确定。

铅芯叠层橡胶支座既有隔震作用又有阻尼作用,因此,它可以单独地在隔震系统中使用,而无须另设阻尼器,使隔震系统的组成变得比较简单。

(3)高阻尼叠层橡胶支座

这种支座采用高阻尼橡胶材料制造。高阻尼橡胶可以通过在天然橡胶中掺入石墨得到,根据石墨的掺入量可调节材料的阻尼特性。高阻尼橡胶也可以是高分子合成材料,这种人工合成橡胶不仅阻尼性能好,抗劣化性能也极佳。华中理工大学为高阻尼叠层橡胶支座合成的高分子橡胶材料,阻尼比达到 0.25,抗拉强度为 20MPa,剪切角>45°。和铅芯叠层橡胶支座一样,高

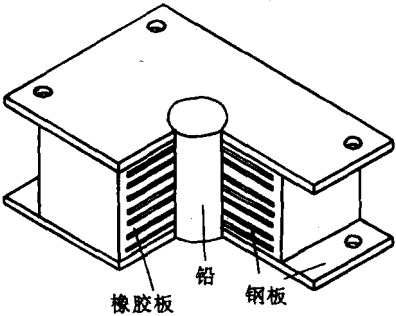


图 1-12 铅芯叠层橡胶支座

阻尼叠层橡胶支座也兼有隔震器与阻尼器的作用,在隔震系统中独立使用。

2. 螺旋弹簧支座

用于基础隔震的螺旋弹簧支座主要由金属圆柱形螺旋弹簧组成(图 1-13,见彩页 1),常用材料为锰钢、硅锰钢、铬钒钢等。螺旋弹簧的主要优点是材料和结构参数的可选范围较大,能适应不同的荷载变形,水平刚度小,弹性能稳定,耐久性好,价格低廉等。缺点是阻尼很小,阻尼比一般为 0.005—0.01。因此,需要和阻尼器一起使用。

单个金属螺旋弹簧的竖向(长度方向)刚度 K_V 由下式计算

$$K_V = \frac{Gd^4}{8n_1D^3}, \quad (1-1)$$

式中

G ——金属材料的剪切模量,

D ——弹簧螺旋的中径,

d ——弹簧簧杆的直径,

n_1 ——弹簧的工作圈数。

根据材料力学中的扭转分析,簧杆最大剪应力为

$$\tau_{\max} = \left(\frac{4c-1}{4c-4} + \frac{0.615}{c} \right) \frac{8Pc}{\pi d^2},$$

簧杆直径可由式(1-2)确定,

$$d = 1.6 \sqrt{\frac{RPc}{[\tau]}}, \quad (1-2)$$

式中

c ——弹簧指数, $c=D/d$, 一般情况下 $c=4-10$,

R ——曲度系数, $R = \frac{4c-1}{4c-4} + \frac{0.615}{c}$,

P ——作用在单个弹簧上的荷载,

$[\tau]$ ——簧杆容许剪应力。

单个螺旋弹簧的水平刚度 K_H 可由图 1-14 查得。图中 H_P 是弹簧在荷载 P 作用下的高度,有

$$H_P = H - \Delta, \quad (1-3)$$

Δ 是弹簧的压缩量,

$$\Delta = \frac{P}{K_V}, \quad (1-4)$$

H 是弹簧的自由高度,

$$H = nh + (n_2 - 0.5)d, \quad (1-5)$$

n 表示弹簧的总圈数,它是工作圈数 n_1 与弹簧两端的静止总圈数 n_2 之和,即

$$n = n_1 + n_2, \quad (1-6)$$

并且,当 $n_1 \leq 7$ 时,取 $n_2 = 1.5$,当 $n_1 > 7$ 时,取 $n_2 = 2.5$ 。 h 为弹簧节距,一般取

$$h = \frac{D}{2} - \frac{D}{3}. \quad (1-7)$$

在隔震系统中,如果有 r 个弹簧并联,每个弹簧的竖向刚度分别为 $K_{V1}, K_{V2}, \dots, K_{Vr}$,水平刚度分别为 $K_{H1}, K_{H2}, \dots, K_{Hr}$,则总竖向刚度 K_V 和总水平刚度 K_H 为

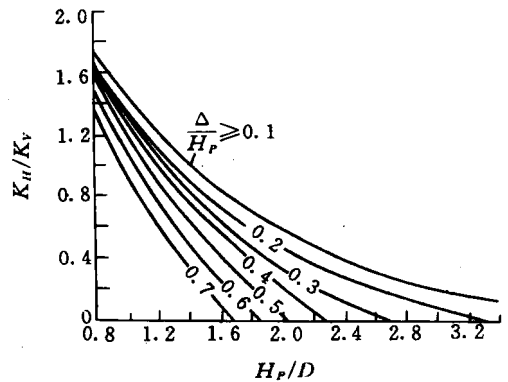


图 1-14 螺旋弹簧水平刚度

$$K_V = K_{V1} + K_{V2} + \cdots + K_{Vr}, \quad (1-8)$$

$$K_H = K_{H1} + K_{H2} + \cdots + K_{Hr}, \quad (1-9)$$

3. 滑、转动支座

(1) 普通滑动支座

砂垫层、石墨垫层滑动支座以及用不锈钢板和聚四氟乙烯为滑动材料的支座，都属于普通滑动支座。这类支座的特点是：利用支座的滑移使建筑物和地基解耦，除了滑移之外还兼有阻尼作用。然而，支座本身不具有位移恢复能力，不具备明确的周期，这一点是和具有特定周期、具有复原能力的叠层橡胶支座或金属螺旋弹簧支座不同的。

(2) 回弹滑动支座(R-FBI 系统)

回弹滑动支座由一组重叠放置又能相互滑动的带孔四氟薄板和一个中央橡胶核、若干个

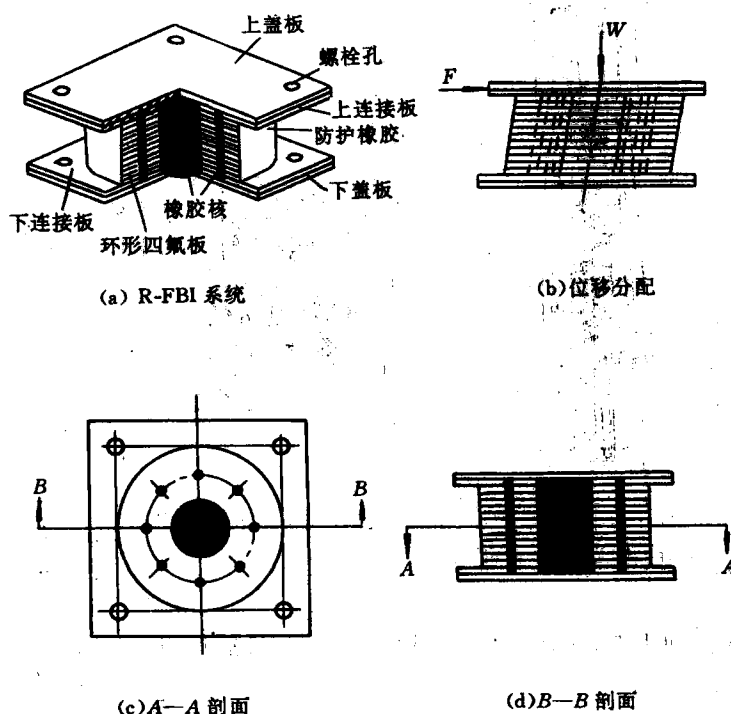


图 1-15 回弹滑动支座

卫星橡胶核组成，如图 1-15 所示*。橡胶核不承受竖向压力，其作用是对四氟薄板间的滑动位移与滑动速度沿支座高度加以分配，防止出现某些局部的过渡位移，并且向滑动位移提供恢复力。四氟薄板间的摩擦力对结构起着风控制和抗地基微震动作用。当结构受低水平激励时，摩擦力能阻止结构底面的横向运动。当地基震动超过一定程度后，横向荷载超过了静摩擦力，结构底面开始滑动，橡胶核发生变形，地震能量的相当一部分被四氟薄板间的摩擦所消耗。橡胶核不要求一定是圆柱形，四氟薄板的外轮廓也可以是方的。图 1-16 示出了它们的几种不同形式。

(3) 曲面转动支座

* Mostaghel N. Resilient-Friction Base Isolator. Report of Department of Civil Engineering, University of Utah, No. UTEC, 84-097, 1984. 203-212