

建筑隔震技术的研究现状

丰土根, 刘汉龙

(河海大学岩土工程研究所, 江苏南京 210098)

TL35-24

⑦
27-29.33

摘要:隔震技术是减小建筑物震灾的一种直接且十分有效的方法,随着地震实例对这种技术的检验,愈来愈显示出隔震装置无比的优越性.本文回顾和分析国内外隔震技术研究的进展,介绍隔震技术的原理和方法、多层橡胶垫和阻尼器的性能以及日本在隔震建筑方面的新进展;隔震层位置的设置、隔震建筑的高度及隔震建筑承受地震作用或强风荷载时的性能仍是需继续研究的课题.

关键词:隔震技术;多层橡胶垫;阻尼器;综述

建筑防震

中图分类号:TU352.1+2

文献标识码:A

文章编号:1006-7647(2000)01-0027-03

减轻建筑物震害的途径主要有两种:一种是进行地震预报,另一种则是隔震,即采用一定方法阻止地震能量传入建筑物.地震给人类带来了巨大的灾难,但同时也大大地促进了建筑抗震与隔震技术的发展.在隔震技术和理论方面,国外从 70 年代末,国内从 80 年代开始了研究,已有很多成熟的技术应用于建筑工程,并经受了大地震的检验.

1 隔震的发展概况

隔震的思想具有相当悠久的历史,但隔震研究的开始时间尚无公论.1906 年美国旧金山发生大地震,1909 年一位在美国居住的英国籍医生,利用滑石以滑动建筑物的构思在美国获得了许可^[1].1923 年日本发生关东大地震,1924 年日本的山下兴家^[2]和鬼头健三郎^[3]两人分别以弹簧及球体隔震方法取得专利.1933 年美国提出了柔弱底层的减震构想^[4,5],1934 年真岛健三郎提出了类似设想——鸡腿式结构隔震方案^[6].1940 年鹰部屋福平提出了在屋顶放置带滚轮的质量控震性抗震结构法^[7],是现代附加质量方法控制振动的先驱.约从 1954 年开始,小堀铎二等在进行非线性振动理论研究的基础上提出了“控震结构”方案——将地震引起结构振动的非线性特性作为结构物的抗震要素^[8].1965 年日本的松下清夫与和泉正哲教授在新西兰举行的第三次世界地震工程会议上提出以摇动球座装置进行隔震,这篇论文是世界上首次以解析方法论证隔震构造的文章.1969 年南斯拉夫震灾后,重建时的斯考比市在柏斯坦劳奇小学工程中首先使用了隔震橡胶

支承.而叠合橡胶真正作为实用的隔震结构的思想,大概始于 1970 年初的法国.此后,法国、新西兰、美国等国家,大致在同一时期,对作为隔震支承的叠合橡胶进行了大量的性能实验研究,并于 70 年代后期开始在实际建筑物中使用,直至今日.

隔震研究稍微先进的日本于 70 年代开始在放置电子计算机的楼板处局部设置隔震机构.此后,藤田隆史等进行了以机器等为对象的楼板隔震研究.

我国的隔震技术尚处在初始研究应用阶段.李立教授多年研究砂垫层隔震并在北京建成了一座四层隔震楼房.魏琰教授研究了预应力横缝摩擦剪力墙的层间结构,并提出了有关参数的计算公式.计算结果表明,摩擦缝的滑动能明显消减地震荷载.1998 年 5 月 12 日在广州华南建设学院召开《夹层橡胶隔震技术规程》第一次编制工作会议,所编《夹层橡胶隔震技术规程》填补了我国在隔震方面技术法规上的空白.

2 隔震的原理和方法^[9-12]

建筑物究竟是如何抵抗地震的?这因建筑物的不同而异.对一般的中、低层建筑物来说,确保较大的强度和适当的韧性是今日抗震设计的基本点.据此,完成设计的建筑物的剪力系数必须超过按建筑标准法一次设计所规定的 0.2.另外,就是本文主要叙述的隔震结构,即在上部结构与地基之间设置刚性很小的隔震装置,改变整个建筑物的自振周期,以避免地震的卓越周期,避免共振;同时在上部建筑和基础之间加设阻尼减震装置,用以吸收地震能量.理

论研究和实际地震都表明,这可以大大地减少地震时上部建筑物的加速度和层间变形,从而可以大大减少建筑物的内部破坏。

隔震方法按不同对象(地基、建筑物的基础、上部结构)分成三大类。

2.1 地基

地基的隔震方法又可分为绝缘和屏蔽两种。绝缘是希望在地基自身中降低输入波的方法。软弱地基或像人工地基那样较软的地基有输入加速度降低的性质。但是,为了保证对建筑物有长期支承能力,必需重视地基塑性位移的发生。此外,也有根据加大埋深后的高刚性基础,利用地基逸散衰减的方法。屏蔽是在建筑物周围挖深沟或埋入屏蔽板等,将长周期为卓越的那部分表面波隔断,但这种方法有不能屏蔽直下型输入波的缺点。

2.2 建筑物的基础

在基础与上部的构造之间设置隔震装置的方法,分为周期延长、能量吸收及绝缘等方法。周期延长法是采用某种装置将整个结构体系周期加长的方法。

作为装置,有将橡胶和钢板相互交错重叠的叠合橡胶。此外,还有柔性底层、深埋长柱、双柱等方案,但不论哪种方案,由于反应位移集中于此,有必要保证该处有充分的变形能力和韧性。实用中,一般同时加上减震阻尼装置。能量吸收是采用减震装置以控制地震时不产生过大变形,并在地震终了时尽早停止振动。一般是周期延长装置和绝缘装置共同使用。减震阻尼装置中有弹塑性阻尼器、粘性体阻尼器、油阻尼器或摩擦阻尼器等。而绝缘则是采用液体浮游、磁悬浮、滑动支承、滚动轴承等装置将地震动断开,如能保证机构的稳定性,这种方法是理想的隔震方法。

2.3 上部结构

上部结构的隔震方法分为能量吸收和附加振动体两种形式。能量吸收型是在任意层设置弹塑性阻尼器、粘性体阻尼器、油阻尼器或摩擦阻尼器等各种阻尼器以吸收地震能量。附加振动体型式则是在任

意层上加设振动体,构成新的振动体系,将振动由结构物本身向附加振动体转移。它们对地震和风等外力的抑制都有效果。

3 常用的隔震装置

3.1 多层橡胶垫^[9,10]

多层橡胶垫安装在建筑物与基础之间,它支承着建筑物的全部荷重,故要求垂直方向的刚度很大。为了使建筑物的周期延长,又必须使多层橡胶垫的水平刚度变小,因为水平刚度减小后,建筑物的加速度反应随之减小,但变位的反应反而变大。因此,多层橡胶垫必须具有充分的变形能力,即在大变形的情况下也能支承上部建筑物的重量。为了抑制过大的变形,常配用阻尼器以吸收振动能量。

由于橡胶在卸荷后具有恢复原状的性质,故多层橡胶垫经历大变形后,仍可借自身的恢复力恢复到原来的位置。

多层橡胶垫是由钢板与橡胶逐层接合而成的。由于加入钢板,它可有效地束缚垂直方向的体积变化而不约束水平方向的变形,也就是垂直刚度增大、水平刚度变小。多层橡胶垫直径 30~100 cm,每个支承荷重可达 50~500 t,大直径的可支承 700 t 以上。多层橡胶垫变形见图 1。

目前在日本开发应用的橡胶垫主要有三种:

a. 标准多层橡胶垫。由薄橡胶片与薄钢板间层重叠加热加压而成一整体。与单体橡胶相比,多层橡胶垫具有很强的垂直支承力,而在水平方向又保持了橡胶的柔性,在支承上部结构重量的同时还能把地震产生的摇摆变成缓慢的运动。

b. 高阻尼夹层橡胶隔震垫。在多层橡胶中使用具有高阻尼性能的橡胶,它既可支承上部结构重量,同时又有吸收地震能量的作用。

c. 铅芯夹层橡胶隔震垫。把铅注入多层橡胶中心,使隔震装置一体化。铅销子在地震时可吸收地震能量,同时还可使建筑物返回原来位置。

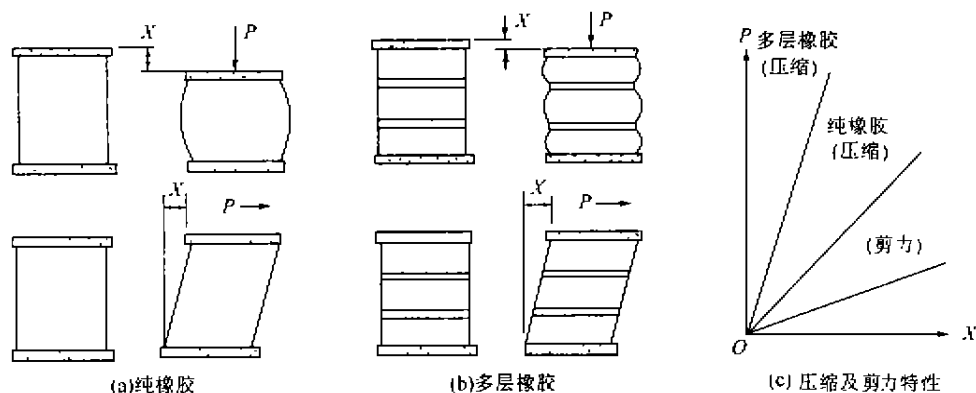


图 1 多层橡胶垫变形

3.2 阻尼器^[9,10]

阻尼器是吸收地震能量抑制变形的装置。目前国际上广泛用于工程上的阻尼器有：钢材阻尼器、粘性阻尼器、摩擦阻尼器和铅阻尼器。这几种阻尼器应用的部位见图 2。三种阻尼器的恢复力特性见图 3（图中 Q 为荷重， δ 为变形），多层橡胶垫加各种阻尼器的组合恢复力特性见图 4（图中 K 为刚度）。

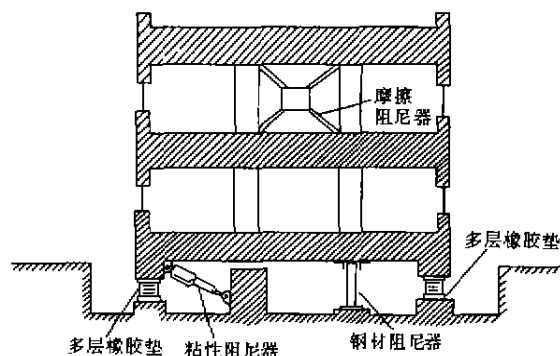


图 2 阻尼器种类

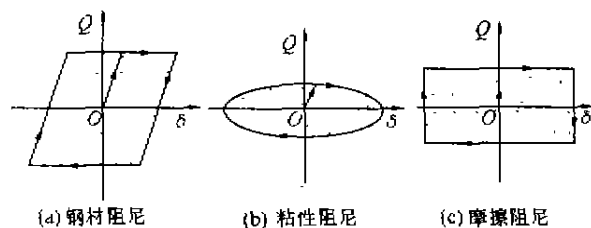


图 3 阻尼器恢复力特性

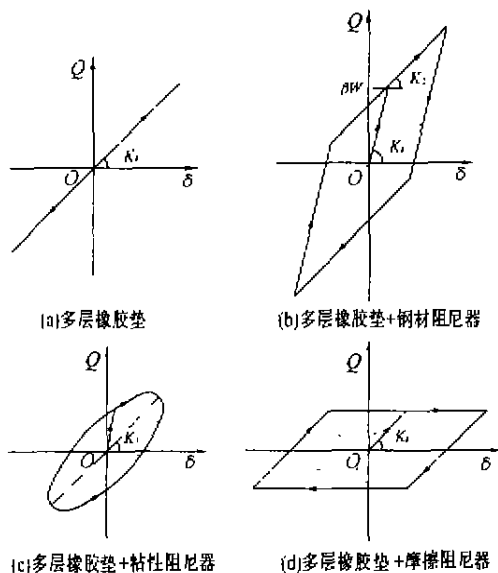


图 4 隔震装置恢复力特性

几种阻尼器的特点如下：

a. 钢材阻尼器。利用钢材的弹塑性来吸收地震能量，特殊的钢棒与特殊的轴承组合可开发出 40 cm 变形能力的高性能阻尼器。

b. 粘性阻尼器。利用粘性液体来抵抗吸收地震能量，这种阻尼器对中小地震是有效的。

c. 摩擦阻尼器，又叫摩擦缓冲器，由钢板组成，

上下板固定在基础一侧，中板固定在建筑物一侧。由于地震力作用，使这些钢板发生回转运动，由于摩擦力的作用使相互间的运动受到抑制。

d. 铅阻尼器。完全用铅棒制成的阻尼器可用来抑制较大变形，吸收地震能量。

4 日本隔震建筑最新进展

日本隔震建筑发展初期，多数房屋建在场地条件较好的 I、II 类场地上，1993 年以来，建在软弱场地或液化场地等 III 类场地上的隔震建筑数量呈逐年上升趋势。由于建在此类场地上的建筑其固有周期较长，因此隔震建筑多选用水平刚度较小的隔震器材，以使隔震层的固有周期加长，确保隔震建筑的隔震效果。地震观测记录表明，建在 III 类场地上的隔震建筑，同样可以达到满意的隔震效果。对于液化场地上的隔震建筑，为了防止地基变形较大，造成桩身的损伤，多数都进行地基改良，固化场地土。

隔震层位置的设定，目前仍是日本各大建筑公司、研究机构努力研究和开发的课题。隔震层设在基础顶部是采用最为广泛的形式，隔震层设在非基础顶部的隔震建筑（中间层隔震），目前呈逐年上升的趋势。中间层隔震建筑的隔震层设置在一层顶部、二层顶部，也有设置在结构中部的。

隔震建筑的高度也有逐年增加的趋势。据日本建筑中心的统计结果，1995 年前建成的隔震建筑高度均在 60 m 以下，而 1997 年 3 月开工的仙台森大厦高达 84.9 m。隔震建筑高度的增加使其建筑面积也显著增加。1996 年以前建筑面积超过 10 000 m²，隔震建筑有 24 件，占当时隔震建筑总数的 14.3%；1996 年一年间建成 43 件，占全年总数的 19.1%；1997 年有 39 件，占全年总数的 32.2%。

为提高抗震性能而进行隔震改建的建筑物数量也在增加。对于改建建筑，主要考虑的因素是可能性、费用及隔震效果。如何简便、有效地进行现有建筑的隔震改建，仍是日本各大建筑公司致力于研究的课题之一。

5 结 语

如何合理地保证建筑物的安全，是需要长期研究的课题。隔震方法是减小建筑物震灾的一种直接且十分有效的方法，其可靠性好，应在工程中推广应用。

隔震建筑向高层的发展带动了夹层橡胶隔震垫向大型化（直径达到 150 cm）及高压应力方向的发展。关于隔震层位置的设置、隔震建筑的高度及隔震建筑承受大、中、小地震作用或强风荷载时的性能，仍是需继续深入研究的课题。（下转第 33 页）

玄武岩为 1.00~1.06。

2.5 应力松弛系数

混凝土结构在荷载作用下,如果保持变形为常量,由于徐变的作用,则结构物内部应力将随时间逐渐减小,这种现象称为应力松弛,通常将任意时刻的应力与初始应力之比叫做应力松弛系数。若用弹塑性徐变理论计算松弛系数,则需要各加荷龄期的弹性变形和—簇徐变曲线。本试验只有两个加荷龄期,松弛系数只能按经验公式计算。经过分析比较,采用 J. J. Brooks 和 A. M. Neville 所提出的经验公式计算松弛系数,即:

$$K_P(t, \tau) = e^{-(0.090+0.686\varphi)} \quad (12)$$

式中: $K_P(t, \tau)$ 为任意龄期的松弛系数; φ 为徐变系数。

将式(12)求出的应力松弛系数列于表 5,由表 5 可以看出,两种配合比混凝土的应力松弛系数均随着持荷时间的增加而降低,符合松弛系数的一般规律,即龄期愈大,徐变愈小,应力松弛则小,因而松弛系数就越大。松弛曲线的方向始终向下。

表 5 混凝土的松弛系数

配合比 (t-τ)/d	正长岩混凝土			
	$C(t, 28)$ /(10 ⁻⁶ ·MPa ⁻¹)	$K_P(t, 28)$	$C(t, 180)$ /(10 ⁻⁶ ·MPa ⁻¹)	$K_P(t, 180)$
3	14.6	0.743	5.9	0.811
7	19.3	0.696	7.8	0.780
14	23.2	0.658	9.5	0.754
30	27.4	0.620	11.4	0.725
60	31.2	0.588	13.1	0.700
90	33.4	0.570	14.1	0.636
120	35.0	0.557	14.8	0.667
180	37.2	0.540	15.7	0.664
250	38.8	0.528	16.5	0.653

配合比 (t-τ)/d	玄武岩混凝土			
	$C(t, 28)$ /(10 ⁻⁶ ·MPa ⁻¹)	$K_P(t, 28)$	$C(t, 180)$ /(10 ⁻⁶ ·MPa ⁻¹)	$K_P(t, 180)$
3	19.8	0.700	6.4	0.795
7	25.6	0.648	8.6	0.757
14	30.6	0.606	10.2	0.731
30	36.1	0.562	12.2	0.700
60	41.2	0.525	13.9	0.674
90	43.9	0.506	14.8	0.661
120	46.0	0.492	15.4	0.653
180	48.9	0.473	16.2	0.641
250	51.0	0.460	17.0	0.630

3 结 语

a. 室内常规混凝土徐变试验,因受试件尺寸限制,通常须采用湿筛法剔除粒径大于 40mm 的骨料,因而灰浆率增高,徐变相应增大,这种影响是不能忽视的。

b. 原级配混凝土的弹性模量比湿筛去掉大于

40mm 粒径混凝土的弹性模量约高 2%~6%,这是因为湿筛后,灰浆率增大,从而变形能力增强的结果。

c. 在强度相同的条件下,正长岩骨料的混凝土徐变大于玄武岩骨料的混凝土徐变。这符合混凝土的徐变随着骨料的弹性模量的增加而减小的规律。

d. 原级配大试件混凝土的徐变较湿筛混凝土小试件的徐变一般低 30% 左右。

e. 原级配和湿筛二级配混凝土的徐变比满足与相应的灰浆率成正比的关系,其比例系数近似为 1.0,因此原级配大体积混凝土的徐变可根据湿筛二级配混凝土小试件徐变进行折算而得。

参考文献:

[1] 惠荣炎,黄国兴,易冰若.混凝土的徐变[M].北京:中国铁道出版社,1988.

(收稿日期:1999-03-17 编辑:熊水斌)

(上接第 29 页)

参考文献:

- [1] Calantarients J A. Improvements in and connected with building and other works and appurtenances to resist the action of earthquake and the like [R]. Paper No. 325371, Engineering Library, Stanford University, California, 1909.
- [2] 山下興家. 建築物耐震装置 [R]. 特許 No. 63867 號, 1924 (大正 13 年).
- [3] 鬼頭健三郎. 建築物耐震装置 [R]. 特許 No. 61135 號, 1924 (大正 13 年).
- [4] Martel R R. The effects of earthquakes on buildings with a flexible first story [J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 1929, 19(3): 53~60
- [5] Green N B. Flexible first story construction for earthquake resistance [J]. Transactions, American Society of Civil Engineers, 1935, 100: 182~190
- [6] 真島健三郎. 耐震家屋構造 [R]. 特許 No. 108167 號, 1934 (昭和 9 年).
- [7] 鷹部屋福平. 制振性耐震構造法 [J]. 建築雑誌, 636 號, 1938 (昭和 13 年).
- [8] 小堀鐸二, 南井良一郎. 制振系の解析 (制限構造に関する研究 1) [A]. 建築學會論文報告集, 66 號, 1960 (昭和 35 年).
- [9] 王优龙, 魏珪, 李康祺等. 隔震技术的研究与应用 [M]. 北京: 地震出版社, 1991.
- [10] 武田寿一. 建築物隔震防震与控振 [M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1997.
- [11] 吴章珠. 结构隔震的研究与应用综述 [J]. 华南地震, 1991, 11(4): 34~48
- [12] 唐家祥. 建筑结构基础隔震 [M]. 武汉: 华中理工大学出版社, 1993.

(收稿日期: 1998-09-22 编辑: 熊水斌)