

OHM 科学丛书

# 图解隔震结构入门

日本免震构造协会 编  
叶列平 译

科学出版社

OHM 社

1998

f. 《维护管理》工作组

(3-7 维护管理、附录 5. 隔震建筑业主的管理)

主任委员 三浦义胜 (株)鹿岛建设  
委 员 木村充一 (株)东京建筑研究所  
黑泽 明 (株)三菱建设  
古柴 丰 (株)三菱材料  
世泽贤一 (株)拓展产业  
铃木明雄 Euresse 工业株式会社  
高山桂一 (株)昭和电线电缆  
中村康一 (株)清水建设  
永井 浩 (株)间组  
长谷部广行 (株)西松建设  
前田卓摩 (株)佐藤工业  
山本 裕 (株)日建设计  
芳尺利和 Breecheston 工业株式会社  
秘 书 吉川秀章 (株)新日本制铁

g. 《规范化》工作组

(附录 6. JSSI 规范 I-01 天然橡胶系列多层橡胶隔震器的规格)

主任委员 寺本隆幸 (株)日建设计  
委 员 池永雅良 Euresse 工业株式会社  
远藤和夫 (株)横浜橡胶  
冈城 宽 (株)鸿池组  
数田史郎 (株)东洋橡胶工业  
加藤清之辅 (株)住友橡胶工业  
黑田 进 Nmitter  
佐佐木幸男 (株)竹中工务店  
下坂 茂 (株)石川岛播磨重工业  
西川一郎 (株)昭和电线电缆  
人见泰义 (株)日本设计  
山田 芳 (株)前田建设工业  
山本 裕 (株)日建设计  
秘 书 室田伸夫 Breecheston 工业株式会社

图字:01-97-1027 号

Original Japanese edition  
MENSHIN KOUZOU NYUUMON  
edited by Japan Society of Seismic Isolation  
Copyright © 1995 by Japan Society of Seismic Isolation  
published by Ohmsha, Ltd.  
This Chinese language edition is co-published by Ohmsha, Ltd. And  
SCIENCE Press  
Copyright © 1997  
All rights reserved.

本书中文版版权为科学出版社和 OHM 社所共有

免震構造入門  
日本免震構造協會 才一ム社 1995

### 图书在版编目(CIP)数据

图解隔震结构入门/日本免震构造协会编;叶列平译, - 北京:科学出版社, 1998.2

(OHM 科学丛书)

ISBN 7-03-006237-X

I. 隔… II. ①日… ②叶… III. 隔震-建筑结构 IV. TU352.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(97)第 19857 号

科学出版社 出版  
OHM 社

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

中国科学院印刷厂 印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

\*

1998 年 3 月第 一 版 开本:787×1092 1/16

1998 年 3 月第一次印刷 印张:11 1/2

印数:1-4 000 字数:249 000

定价:25.00 元

## 出版序言

日本免震构造协会于1993年6月成立,协会宗旨是“推动隔震结构健全地发展”。虽然很早就有隔震的思想,但经过数十年,这种方法才作为新技术得到科技界的承认。在日本,结构抗震方法很多,但隔震结构所占的比例还很少,远未普及。

虽然隔震结构目前并未成熟,但与历来采用的抗震结构相比,具有显著的抗震安全性。本协会的宗旨,目前的工作是普及和发展这种结构,技术委员会将努力致力于发表有关隔震结构的设计、监理、施工等方面的通俗读物。

作为这项成果之一,1994年《简易隔震结构设计(例)》出版后,根据会员们提出的批评意见继续进行了修改和补充。1995年1月17日,兵库县南部地震袭击城市中心,引起阪神·淡路大震害。以此为契机,抗震安全性重新引起人们的关注,成为一项社会问题。另一方面,人们的目标转向具有良好安全性的隔震结构。

基于这种现状,根据迄今所积累的资料,决定出版这本《隔震结构入门》。尽管涉及到内部资料,作为一般出版物还有未成熟的部分,但是,技术委员会还是决定公开近两年的努力所得到的资料。

隔震结构也可以说是抗震结构的一个分支。设计抗震结构,从地震动开始就包含许多难以确定的因素。实际设计中需要确定许多问题,设计行为就是指全部这些确定工作,包括许多的分析和计算步骤,这里很难一言而概之。本书也不例外,但在设想方面,未给出计算。

希望本书能在发展隔震结构方面有所贡献。感谢技术委员会各位同仁所做的努力。

日本免震构造协会  
副会长 山口昭一

## 前 言

建筑的设计是在工科高校或大学学习的基础上,需要经过 10 年的工作锻炼和经验积累,才能说有所掌握,其中包含许多的知识和经验,有些还很深奥,因此建筑设计不是容易的。隔震结构也一样,不仅要使其建造容易,还要了解和开发多层橡胶隔震器和阻尼器,掌握地震动及其动力分析等各种方法。

一般来说,隔震结构设计及所采用的材料与以往的设计习惯有许多不同之处。与一般结构相比,隔震结构的设计确实有一定的难度。例如,与钢材和混凝土相比,作为主体结构材料的橡胶,则缺乏使用经验。普通结构设计中,结构构件承载力的计算总是大一些以使设计偏于安全,与此相反,隔震结构的设计要考虑动力效应,“刚、柔”和“强、弱”的设计要适当,隔震器不能太刚,也不能太柔;阻尼器不能太强,也不能太弱。

举个简单的例子来说,在一般结构设计中,如果计算所需的桩或钢筋为 3.2 根,则设计采用 4 根是偏于安全的。而在隔震结构中,如果将阻尼器的屈服强度比设计所要求的强度增大,就不成为隔震结构。

一般结构设计的书中,都介绍设计方法的流程图  $A \rightarrow B \rightarrow C \cdots X \rightarrow Y \rightarrow Z$ ,设计按照由 A 确定 B,再确定 C 的程序进行。但是,在实际设计中,需要根据预算和规划,综合业主、建筑、结构、设备、施工等各方面的意见,通过协调使设计最为完善。几乎所有的设计,这些关系都很复杂,不考虑这些关系,仅按结构设计流程图是难以进行的。

总的来说,设计是经过不断反复计算分析,在不确定状态中,寻求满足各种设计条件的解决方案。每一个建筑都有每一个设计方法,所以建筑设计没有所谓的通用的一般设计法。建筑学会的《隔震结构设计指南》,也是基于这样的考虑方法,并不是给出设计程序或流程图。这本《隔震结构入门》也是一样。不过,对于初学隔震结构设计的人来说,这种考虑方法有些不习惯。为较好的学习和掌握隔震结构知识,作为入门,本书也给出设计步骤和流程图。

本书中,在介绍隔震结构构造和设计方法的基础上,还简要介绍了实际所采用的隔震器和阻尼器制造,并给出根据建筑学会包络设计法的设计步骤。

在我国<sup>①</sup>以及欧洲和美国,已建造了许多隔震结构,1994 年 1 月 17 日美国洛山矶地震中,南加利福尼亚大学的医院良好的隔震性能和观测记录成为加利福尼亚州隔震结构的典范,恰巧一年后日本兵库县南部地震中,神户市北部有二个隔震结构表现出更好的隔震性能,成为我国的隔震结构典范。

如果结构的强度很大,则在强震时,建筑物及其内部结构将承受超过 1G 加速度的作用,这已在 1978 年宫城县冲地震中东北大学记录到,在美国洛山矶地震和兵库县南部等地震中也记录到多次,这对结构设计人员来说已是众所周知,在建筑基准法的二次设计中考虑了这种强震反应。

---

<sup>①</sup> 指原著者所在日本国,后同。——编者注

对于如此大的地震作用,不是采用增强结构的强度使其保持在弹性阶段,而是适当减小强度,依靠结构的塑性变形防止破坏,也即是利用结构的延性来进行抗震设计,这是现在一般建筑结构的设计方法。总之,建筑物总要产生一定损坏。强度减小程度称为  $D_s$ , 日本取  $0.25 \sim 0.55$ , 美国虽然计算公式和取值不同,但考虑方法是相同的。然而,这种建筑设计方法是基于在强震时结构产生损坏为前提的,这很难对一般的人解释清楚。在阪神·淡路大地震中,引起人们的混乱,这不能不说是一个问题。因此,以不损坏建筑物为前提的隔震结构引起人们的重视。

对于隔震结构,在受到上述同等强度的作用时,上部结构的弹性反应只有  $0.1G \sim 0.2G$ , 不到一般抗震结构的  $1/5$ 。一般来说,对应  $1G$  弹性反应的建筑物,将结构的强度降低到  $0.25 \sim 0.55$ , 结构会产生一定的损坏,与此相比,  $0.10 \sim 0.20$  恰好是隔震结构的反应值。

隔震结构所具有的隔震效果是多方面的,本书的出版就是希望推动隔震结构的设计。

日本免震构造协会

技术委员会 主任委员 和田 章

## 委员会组成·执笔

### 技术委员会

主任委员 和田 章 东京工业大学  
委员 市川和男 (株)黑泽建设  
可儿长英 (株)东京建筑研究所  
片野赖昌 (株)熊谷组  
山口昭一 (株)东京建筑研究所

#### a. 《上部结构·基础结构的设计》工作组

(1. 隔震结构概要、2. 隔震结构的设计(2-1~2-5))

主 编 山本 裕 (株)日建设计  
委 员 公家正行 (株)东急建设  
下坂 茂 (株)石川岛播磨重工业  
千马一哉 (株)久米设计  
竹内 澈 (株)新日本制铁  
中山和美 (株)户田建设  
中山光男 (株)鸿池组  
森田秀美 (株)五洋建设

#### b. 《施工》工作组

(2-6 隔震层的构造、3. 隔震建筑的施工和维护管理(3-1~3-6))

主 编 田中 清 Fujita 株式会社  
委 员 岩部直征 (株)山下设计  
大泉敬实 (株)西松建设  
加藤广宣 (株)大日本土木  
神户英敏 Tosen 产业株式会社  
世泽贤一 Tosen 产业株式会社  
杉江隆昭 (株)佐藤工业  
杉山 诚 (株)间组  
早川行一 (株)佐藤工业  
柳尺延房 (株)日本国土开发

#### c. 《隔震器的性质及其连接方法》工作组

(4. 隔震器、附录 3. 隔震器产品目录)

主 编 高山峰夫 福岡大学  
委 员 池永雅良 Euresse 工业株式会社  
系山谦治 东京 Fabric 工业株式会社  
鹤野禎史 (株)川口金属工业

中村敏治 (株)大成建设  
西川一郎 (株)昭和电线电缆  
藤波健刚 (株)前田建设工业  
芳尺利和 Breecheston 工业株式会社

d. 《阻尼器的性质及其连接方法》工作组

(5. 阻尼器、附录 4. 阻尼器产品目录)

主 编 村井信义 (株)竹中工务店  
委 员 萩野伸行 (株)熊谷组  
早川邦夫 (株)奥村组  
早部安弘 (株)大成建设  
藤原英雄 (株)三菱建设  
岭胁重雄 (株)竹中工务店  
宫崎光生 (株)住友建设

e. 《简单设计法》工作组

(6. 隔震层的基本设计)

主 编 人见泰义 (株)日本设计  
委 员 铃木哲夫 (株)大林组  
迁田 修 (株)大成建设  
中泽俊幸 (株)东京建筑研究所  
野中康友 (株)安藤建设  
藤森 智 (株)松田平田  
宫永英彦 (株)飞岛建设

规范化·标准化委员会

主任委员 寺本隆幸 (株)日建设计  
委 员 远藤和夫 (株)横浜橡胶  
小幡 学 (株)久米设计  
木村充一 (株)东京建筑研究所  
下田郁夫 Euresse 工业株式会社  
中村康一 (株)清水建设  
永井 浩 (株)间组  
早川邦夫 (株)奥村组  
人见泰义 (株)日本设计  
三浦义胜 (株)鹿岛建设  
宫崎光生 (株)住友建设  
吉川秀章 (株)新日本制铁  
芳尺利和 Breecheston 工业株式会社  
秘 书 山本 裕 (株)日建设计



# 目 录

第 1 章 隔震结构概要	1
1.1 隔震结构的基本原理	1
1.2 隔震结构的特点	4
1.3 隔震结构的历史	6
1.3.1 明治·大正的隔震结构	6
1.3.2 昭和以后的隔震结构	8
1.3.3 多层橡胶的开发与隔震结构	11
1.4 适合于隔震结构的建筑物	12
1.4.1 适用建筑和隔震效果	12
1.4.2 隔震建筑物用途的实例	13
1.5 结构种类和规模	13
1.5.1 楼层面积	13
1.5.2 结构种类和高度	13
1.6 设计的自由度	14
1.6.1 偏心率	15
1.6.2 减少非结构构件、设备机器的抗震构造	15
1.6.3 结构构件截面减小	15
1.6.4 设计的自由度	17
1.7 隔震结构的造价	18
第 2 章 隔震结构的设计	22
2.1 隔震结构的基本方案	22
2.1.1 隔震结构的设计流程	22
2.1.2 软弱地基上的隔震建筑	22
2.1.3 隔震结构与上下震动	22
2.1.4 隔震层的位置	22
2.1.5 上部结构的类型与水平刚度	24
2.1.6 降低隔震层水平刚度的结构方案	25
2.1.7 多层橡胶层不产生拉力的结构方案	25
2.1.8 净空间距	26
2.1.9 隔震构件的配置	26
2.1.10 隔震构件的置换	27
2.2 设计剪力	27
2.2.1 隔震建筑的地震反应	27
2.2.2 设计剪力	28
2.2.3 设计剪力的实例和分布	30
2.2.4 抗震结构与隔震结构地震安全度的差别	30
2.3 上部结构的设计	31

2.3.1	强度与刚度	31
2.3.2	构件的设计	31
2.3.3	刚度不均匀(偏心率·刚性率)的影响	32
2.3.4	从地基约束中解放	33
2.4	基础结构的设计	33
2.5	隔震构件的设计	34
2.5.1	水平变形时的强度和刚度	34
2.5.2	多层橡胶周围的轴力传递	34
2.6	隔震层的构造	34
2.6.1	建筑的构造	34
2.6.2	设备的构造	37
<b>第3章</b>	<b>隔震结构的施工与维护管理</b>	<b>40</b>
3.1	施工概要	40
3.1.1	新建筑物	40
3.1.2	改建建筑	40
3.2	隔震构件的施工管理	40
3.3	隔震层的施工	41
3.4	上部结构的施工	46
3.4.1	施工方案	46
3.4.2	隔震结构施工的优点	46
3.5	设备管线的施工	47
3.6	工期	48
3.7	维护管理	50
<b>第4章</b>	<b>隔震器</b>	<b>54</b>
4.1	隔震器概要	54
4.2	多层橡胶隔震器的构造	55
4.2.1	多层橡胶隔震器的基本构造	55
4.2.2	橡胶材料的特征	55
4.2.3	多层橡胶隔震器的制造与质量管理	57
4.3	多层橡胶隔震器的性能	59
4.3.1	多层橡胶隔震器的受荷机构	59
4.3.2	压缩性能	61
4.3.3	受拉性能	61
4.3.4	压剪性能	62
4.3.5	耐久性	64
4.4	多层橡胶隔震器的设计	66
4.4.1	多层橡胶隔震器设计的基本方法	66
4.4.2	竖向刚度和水平刚度	67
4.4.3	设计面压	69
4.5	各种隔震器产品的特征	70
4.5.1	天然橡胶系列多层橡胶	70
4.5.2	高阻尼型多层橡胶	70
4.5.3	铅芯多层橡胶	71

4.5.4	滑移阻尼隔震装置 .....	71
4.5.5	其他隔震器 .....	72
<b>第 5 章</b>	<b>阻尼器 .....</b>	<b>75</b>
5.1	阻尼器概要 .....	75
5.1.1	钢材阻尼器 .....	75
5.1.2	铅阻尼器 .....	76
5.1.3	摩擦阻尼器 .....	77
5.1.4	油阻尼器 .....	78
5.1.5	粘滞阻尼器 .....	78
5.2	阻尼器的性能 .....	79
5.2.1	安全性 .....	79
5.2.2	安全富余度 .....	79
5.2.3	耐久性 .....	80
5.2.4	制作管理 .....	80
5.3	阻尼器的设计 .....	80
5.3.1	滞回型阻尼器 .....	81
5.3.2	粘滞型阻尼器 .....	81
5.4	阻尼器与隔震结构的反应 .....	82
5.4.1	等价阻尼和等价周期 .....	82
5.4.2	隔震结构在小振幅时的特性 .....	83
<b>第 6 章</b>	<b>隔震层的基本设计方法 .....</b>	<b>87</b>
6.1	基本方针和设计流程 .....	87
6.1.1	基本方针 .....	87
6.1.2	适用范围 .....	87
6.1.3	隔震层的基本设计流程和各项说明 .....	87
6.2	按隔震结构设计指南的设计法 .....	87
6.2.1	建筑物的条件 .....	89
6.2.2	设计方针·目的 .....	89
6.2.3	隔震层特性值的假定 .....	89
6.2.4	隔震构件的设计 .....	91
6.2.5	特性值的确认 .....	93
6.2.6	利用设计隔震层特性值预测反应 .....	93
6.2.7	设计方针·目的的确认 .....	93
6.3	采用反应谱的设计法 .....	94
6.3.1	等价线性化法 .....	94
6.3.2	反应谱 .....	95
6.3.3	反应预测方法 .....	95
6.3.4	根据等价阻尼和等价周期设定隔震层的特性值 .....	99
6.4	时程反应分析 .....	99
6.4.1	时程反应分析的概要 .....	99
6.4.2	分析示例 .....	101
6.5	隔震层的计算例题 .....	104
6.5.1	建筑概况 .....	104

6.5.2	隔震构件的计算	104
6.5.3	有阻尼性能多层橡胶隔震器的计算	107
<b>附录 1</b>	<b>从观测记录看隔震效果</b>	<b>108</b>
1.1	阪神·淡路大震害	108
1.1.1	WEST 大厦	108
1.1.2	松村组技术研究所·研究大楼	108
1.2	洛山矶地震	110
1.2.1	隔震结构医院	110
1.2.2	抗震结构医院	110
1.3	关东广域地震观测记录	111
1.4	隔震建筑与抗震建筑的观测结果比较	111
1.5	交通(铁道)振动的防振效果	111
<b>附录 2</b>	<b>实例</b>	<b>115</b>
2.1	有特色的实例	115
实例 1	建筑面积较大的实例(WEST 大厦)	116
实例 2	建筑物较高的实例(南大塚 2 号公共大厦)	117
实例 3	高宽比较大的实例(五洋建设技术研究所(隔震栋))	118
实例 4	上部结构偏心的实例(C.P. 福住大厦)	119
实例 5	有效利用隔震层的实例(东伸 24 大森大厦)	120
实例 6	中间层隔震的实例(阿圣那大厦)	121
实例 7	隔震·抗震的比较实例(小金井住宅)	122
实例 8	小规模住宅的实例(奥依莱斯工业疗养所)	123
实例 9	不规则平面的实例(USC 大学医院)	124
实例 10	改建的实例(盐湖城大厦)	125
实例 11	有特殊用途的实例(洛山矶消防指挥控制实验室)	126
2.2	各国部分实例	127
(1)	日本的实例	127
(2)	美国的实例	132
(3)	中国的实例	134
(4)	新西兰的实例	135
(5)	意大利的实例	135
<b>附录 3</b>	<b>隔震器的产品目录</b>	<b>136</b>
<b>附录 4</b>	<b>阻尼器的产品目录</b>	<b>145</b>
<b>附录 5</b>	<b>隔震建筑业主指南</b>	<b>151</b>
<b>附录 6</b>	<b>JSSI 规格 I-01 天然橡胶系列多层橡胶隔震器的规格(草案)</b>	<b>155</b>
6.1	前言	155
6.2	形状	155
6.3	材料特性	159
6.4	制作方法	161
6.5	性能	164

# 第 1 章 隔震结构概要

## 1.1 隔震结构的基本原理

对于地震作用,建筑物的结构设计历来都是以抗震设计法为主,该设计方法已在以建筑基准法为基础的各规范和指南中给出了具体的规定。与此相反,抑制地震作用,不使地震能量传递到建筑物的“隔震”或“制振”的方法已进入结构设计领域,近年来已有许多实际应用实例。

“制振结构”对于风和中小地震作用可以发挥较好的效果,“隔震结构”则在强烈地震作用时显示其很好的效果。洛山矶地震(1994 年 1 月 17 日)和阪神·淡路大地震中,许多“抗震结构”建筑物受到损坏或倒塌,包括家具翻倒造成人员伤害。另一方面,“隔震结构”的建筑物,建筑物本身及其内部的物品未受损坏,证实了其安全性和有效性,得到了社会的高度评价。

关于“抗震结构”、“隔震结构”、“制振结构”的分类及解释有各种各样的说法,这里按下图分类定义。实用中隔震结构多数采用多层橡胶隔震器,以下主要以它为讨论对象。

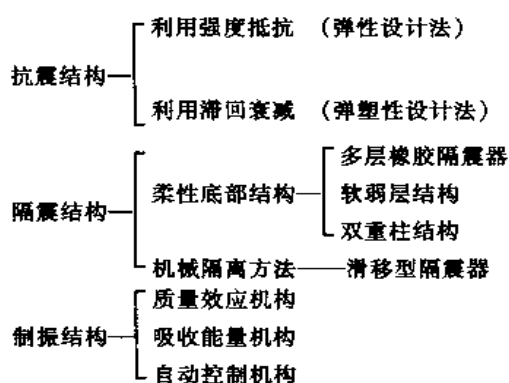


图 1-1 隔震结构的位置

图 1-2 为隔震结构原理的模型图。建筑物利用滚珠支承,由于滚珠很难防止横向滑移,所以需设置弹簧。

如果对建筑物施加一些横向推力,再很快释放,建筑物会象振子一样往复振动几个周期后停止。施加横向力时建筑物会产生一些变形,往复振动时建筑物也会有一些变形。

弹簧越强,振子的周期越短,弹簧越弱,周期就越长。极端情况,如果弹簧非常强,建筑物就不能在滚珠上振动,只有建筑物本身的往复变形振动。这就是一般建筑物的周期振动。但是,如果弹簧很弱,建筑物就会在施加的横向位置不动,没有成为振子。振子运动时,受到的指向原点的力的作用,其大小与距原点的距离成正比,该力称为恢复力。又,如果滚珠的摩擦力很小,则振动就不会停止,反之,则会立刻停止。阻止振动的力称为阻

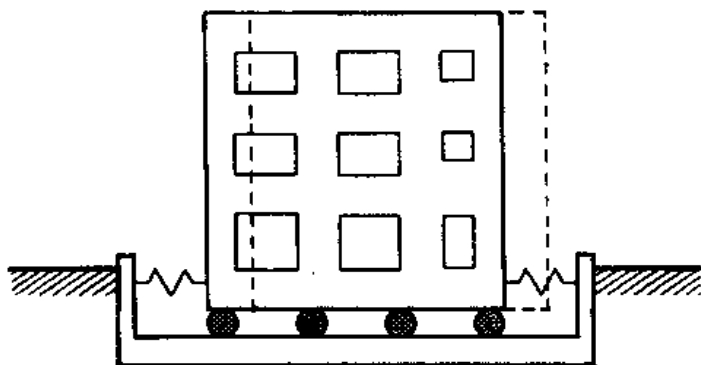


图1-2 隔震结构的模型图(1)

尼力。无阻尼力时,一旦产生振动,就永远振动下去,这对建筑物是十分不利的。因此,阻尼力的大小是很重要的。

总而言之,建筑物(振动体)取决于自振周期和阻尼性能两个因素,而自振周期又取决于质量和弹簧刚度。

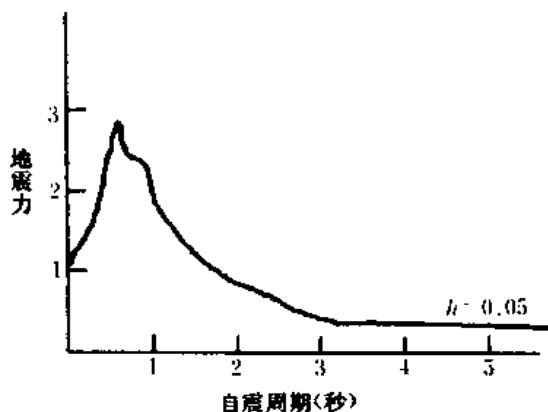


图1-3 建筑物自振周期与地震作用的关系

下面来研究如果图 1-2 建筑物的基础运动,即地震动作用时,建筑物受到怎样的作用力。对于具有某一自振周期的振动体,受到所观测到的地震动波形的作用,建筑物将不停地振动变形,其所受到的最大水平力是人们所关注的。在以建筑物的自振周期为横轴,最大水平力为竖轴的坐标中绘出该点。改变周期,同样可以得到一个点,这样进行下去,就可以得到图 1-3 所示的图形。

该图中,在某一周期作用于建筑物的地震力很大,过了该周期就逐渐减小。这种规律并不是随机的,也即是如果地震动的周期与建筑物的周期接近时,建筑物的振动就特别大。

选择不同的地震动,可以绘出同样的曲线,如此反复进行,可求得许多曲线,由此得到宏观的趋势,如图 1-4 所示。如果场地土坚硬,地震动的短周期成分较多,反之,场地土较软,则含有较多的长周期成分。建筑基准法中即是根据这一性质,确定地震力与建筑物自振周期和场地土种类有关的公式。

因此,建筑物的自振周期越长,场地土越坚硬,受到的地震力就越小。例如,自振周期为 0.3 秒的建筑物,适当减小弹簧刚度,使其周期增至 3 秒,由图 1-4 可知作用于建筑物的地震力将大幅度降低。

但是,由于弹簧刚度很小,即使地震力很小,建筑物与地基的相对位移(滑移)会很大,并且随自振周期的增加而增大。由此可知,图 1-2 中横向弹簧越柔,自振周期越大,建筑物的地震力越小,建筑物与基础的相对位移越大。换句话说,基础与建筑物的滑移越大,

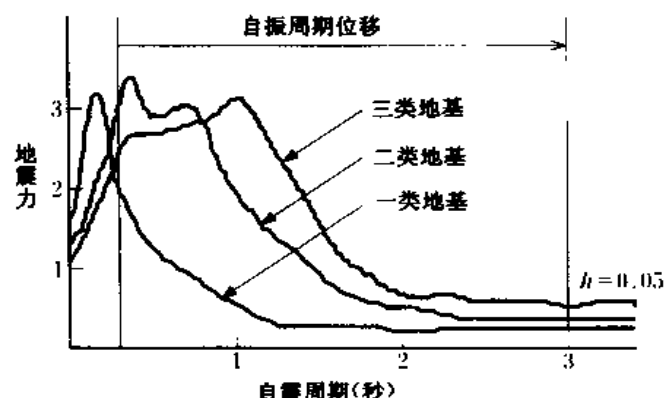


图 1-4 建筑物自振周期与地震作用的关系(场地类别)

地震力就越小,衰减力越大,滑移量就越小。这就是隔震结构的理论基本出发点。

### (1) 隔震器

要承受图 1-2 所示建筑物的重量并不容易。解决这一疑难问题的突破口是出现了多层橡胶隔震器。这种隔震器是由多层橡胶和钢板相互重叠而成。这样在施加竖向荷载时,由于橡胶受到钢板的约束,不会产生很大的横向变形。也就是说,在竖向具有很强的抗压能力,而对于水平方向的作用力,橡胶的剪切刚度很小,具有很大变形能力。

多层橡胶隔震器的直径、层数、每层橡胶的厚度可以任意变化,这就使得这种隔震器具有图 1-2 滚珠和弹簧组合的性能。

橡胶很早就使用于桥梁的支座,有文献表明 100 年前采用天然橡胶制成的“压缩型支座”目前仍在使使用。多层橡胶支承即是由这种桥梁橡胶支座的经验产生的,最初用于建筑物是 1965 年伦敦的地铁车站上面的建筑。采用多层橡胶支承防止了地铁的振动传递到上部建筑物。

除木结构外,象橡胶这样的有机材料,目前还没有作为建筑结构构件的一部分采用,但是根据各种试验结果,多年后性能稍有降低,实际中对使用没有问题。



图 1-5 多层橡胶的断面

### (2) 阻尼器

如果没有阻尼力,振动体一旦产生振动,就持续不断地振动下去,这是十分不利的。

实际上,图 1-3 和图 1-4 是按具有一定阻尼力绘制的。具有衰减力的部件称为阻尼器。

为防止路面凹凸不平对汽车运行时产生的冲击作用,车体采用弹簧支承,并配合阻尼器同时使用。这是因为弹簧的阻尼力很小,必须增加阻尼力才能使用。隔震结构也是一样,多层橡胶的阻尼力通常是不够的,需设置阻尼器。

阻尼器可以利用摩擦力、金属的塑性变形或粘滞材料制作,有很多种形式。

阻尼器的作用是吸收振动能量,所吸收的能量大部分转化为热能释放掉。汽车刹车时采用的刹车器,就是将汽车的动能转化为摩擦热能。

图 1-6 所示是目前隔震结构的模型图。

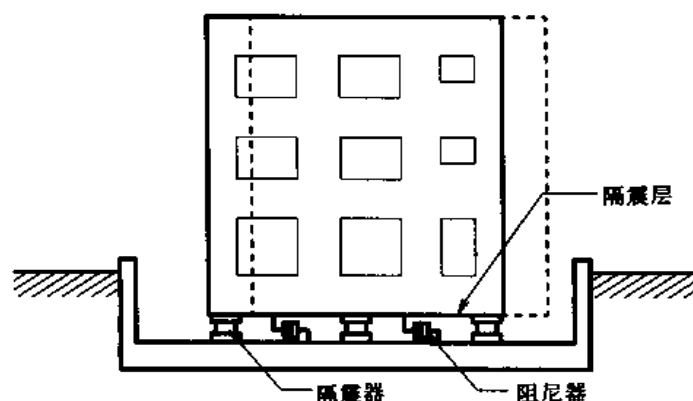


图 1-6 隔震结构的模型图(2)

## 1.2 隔震结构的特点

抗震设计的原则是,对频度较大的中小地震作用,建筑物基本不产生什么损坏;在罕遇大震作用时,依靠结构的破坏而不使人员造成伤亡,即大震时容许水平构件屈服或建筑物部分损坏。按抗震设计的建筑物,不能避免地震时的强烈晃动,当遭遇到大地震时,虽然可以保证人身安全,但不能完全保证财产(建筑物及其内部物品)的安全。这次阪神·淡路大地震中,由于家具翻倒等也造成了人员的伤亡。如果采用隔震结构就可以避免这种情况的发生,隔震结构可以减小上部结构的地震作用力、楼面的反应加速度和上部结构的层间变形,因此在大地震时,上部结构构件不会产生破坏,人员安全和财产安全均可以得到保证。隔震结构适用于医院、广播、学校等震后恢复中心的建筑物,也适用于博物馆、计算机中心等内部财产价值很高的建筑物,以及建筑物本身价值很高的历史建筑物,对其他用途的建筑物也同样可以发挥很好效果。

与目前的建筑物相比,隔震结构具有以下优点(参见图 1-7):

- 1)提高了地震时结构的安全性;
- 2)设计自由度增大;
- 3)防止内部物品的振动、移动、翻倒(防止次生伤害);
- 4)防止非结构构件的破损;
- 5)抑制了振动时不适感(提高了安定感和居住性);



6)可以保持机械、器具的功能。

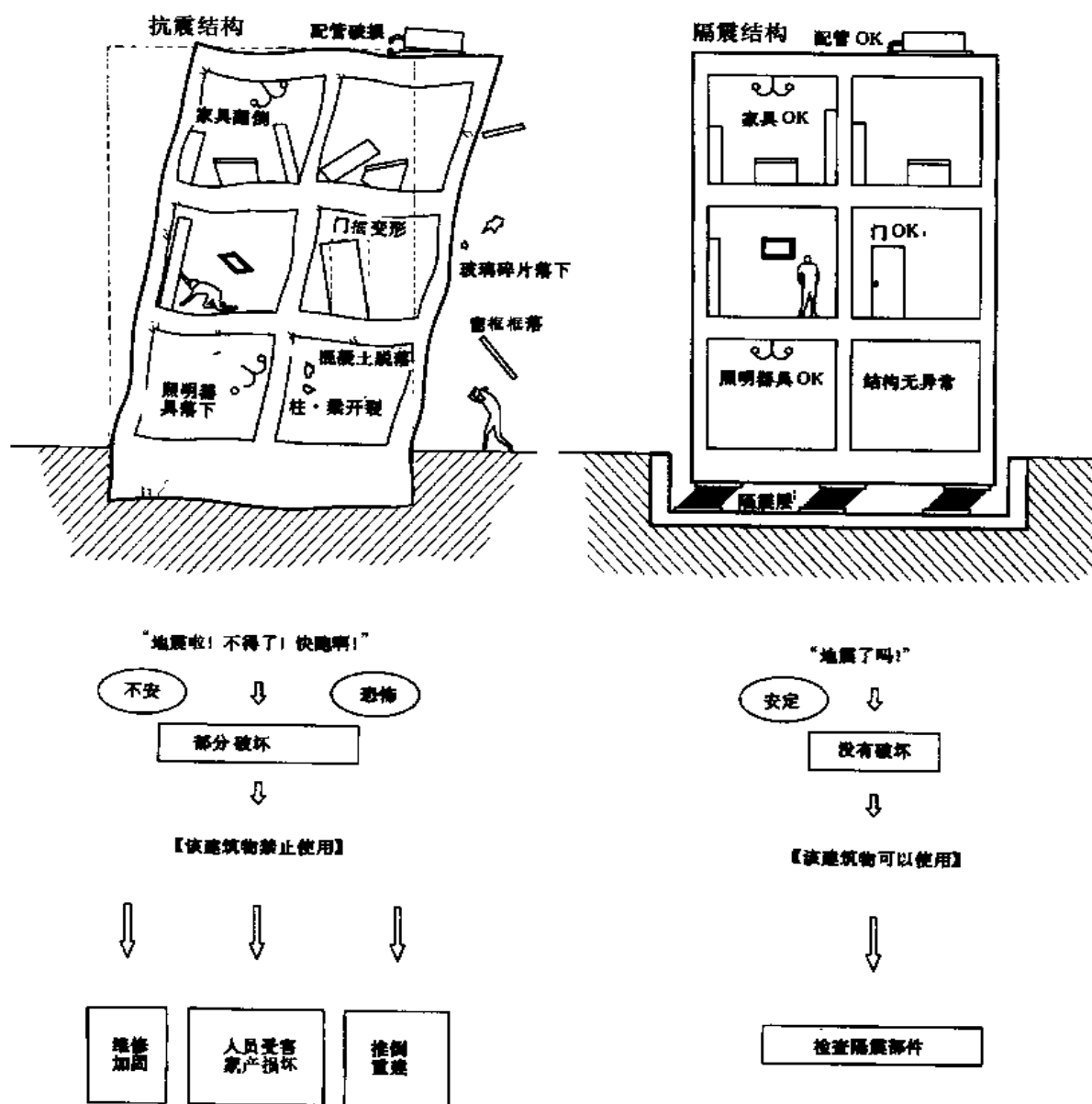


图 1-7 遭遇大地震时的情况

### 1.3 隔震结构的历史<sup>①</sup>

将建筑物与地基分离来抑制结构的振动,避免地震作用的思想,在地震反应分析技术出现前就已提出。并且许多这些设想有不少已付诸于实际应用。虽然,这些设想有些是由非建筑人员或相关人员提出,但经过专家们的理论分析和实验验证后,认为可行的有各种各样。这里,根据日本建筑学会《建筑杂志》记载的文献,介绍隔震结构的历史。

#### 1.3.1 明治·大正的隔震结构

《建筑杂志》记载的关于隔震、制振的最早的论文,是1891(明治24)年12期河合浩藏的“地震时不受大震动的结构”(图1-8)。这是采用类似天平器的对振动敏感的机构建造的建筑物,其具体方法如下:

- 1)在地基上并排铺设了数层圆木,将它们稍许固定,再在上面打水泥混凝土,建造建筑物。
- 2)认识到高的建筑物和柔性建筑物容易产生摇晃,采用了较低的建筑高度和三角形平面。
- 3)为隔断地震波,将建筑物周围挖空。
- 4)类似天平器的机构不能传递地震力,将该机构设置到基础底部,使其产生滑动。

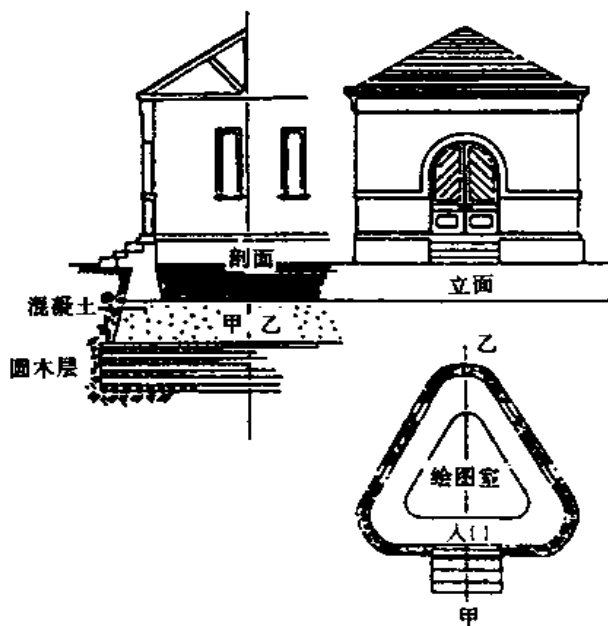


图 1-8 河合浩藏的“地震时不受大震动的结构”

<sup>①</sup> 本节是根据建设省建筑研究所大桥雄二推荐的下列文献编写的。

1)山口昭一,大桥雄二:“什么是隔震·制振?”,建筑技术, No. 429, 1987.5。

2)大桥雄二:“隔震结构的发展过程机器展望”,施工, No. 309, 1991.7——原注。

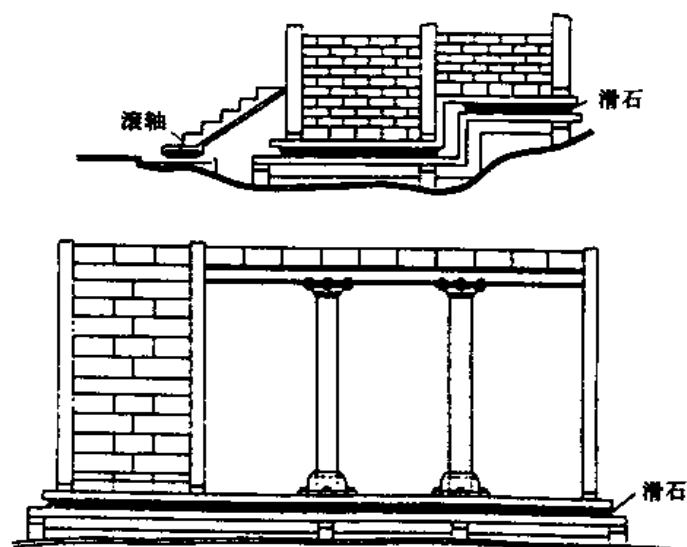


图 1-9 J.A. Calantarients 的隔震结构

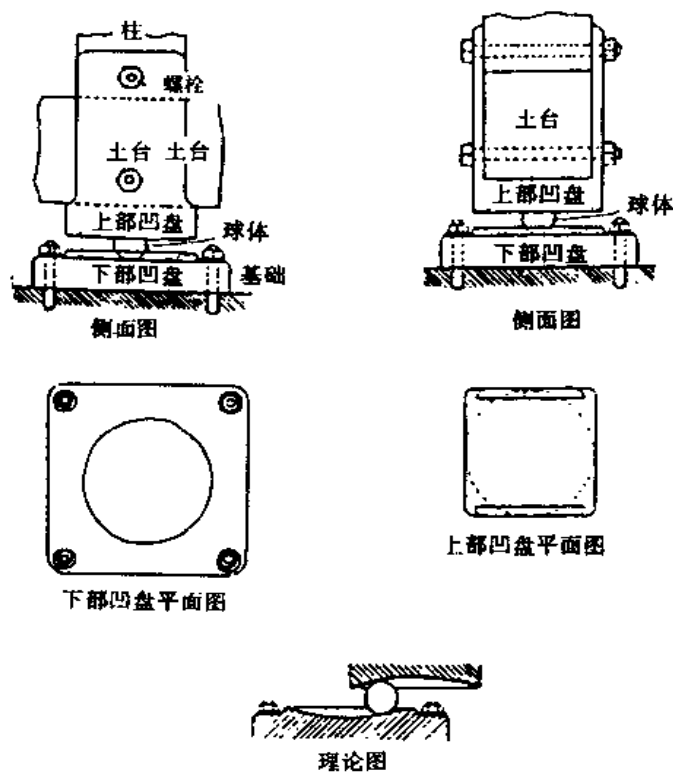


图 1-10 鬼头健三郎的“建筑物抗震装置”

特别要提到的是,最初由在美国的英国医生 J.A. Calantarients 于 1909(明治 42)年提出的隔震结构方案(图 1-9)。这个隔震结构在建筑物结构与基础之间用滑石层隔开,地震时建筑物可以滑动。在该方案中,针对地震时建筑物与基础之间产生的位移,煤气管和排水

管采用了可以变形的连接装置。

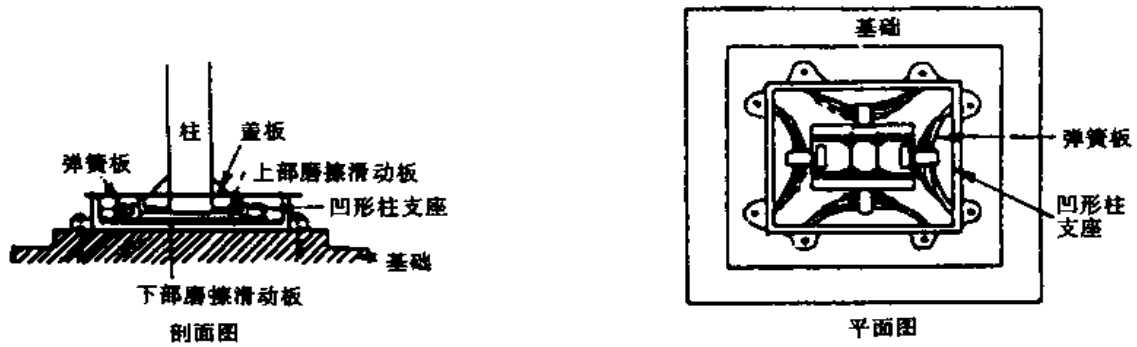


图 1-11 山下兴象的“结构物的抗震装置”

1923(大正 12)年关东大地震以后,日本也开始有隔震结构专利。1924(大正 13)年,鬼头健三郎和山下兴象提出了各种各样的隔震结构方案。鬼头的“建筑物抗震装置”专利,是在基础与柱脚处相对设置盘状凹面,其间放入球体来支承建筑物(图 1-10)。山下的“结构物抗震装置”专利,是在基础和柱脚间可以滑动,来减小上部结构的地震力(图 1-11)。为使柱脚能恢复到原来的位置,在基础和柱脚间设置了弹簧。

1.3.2 昭和以后的隔震结构

1927(昭和 2)年,中村太郎认为建筑物的抗震性能是能量方面的问题,指出如建筑物

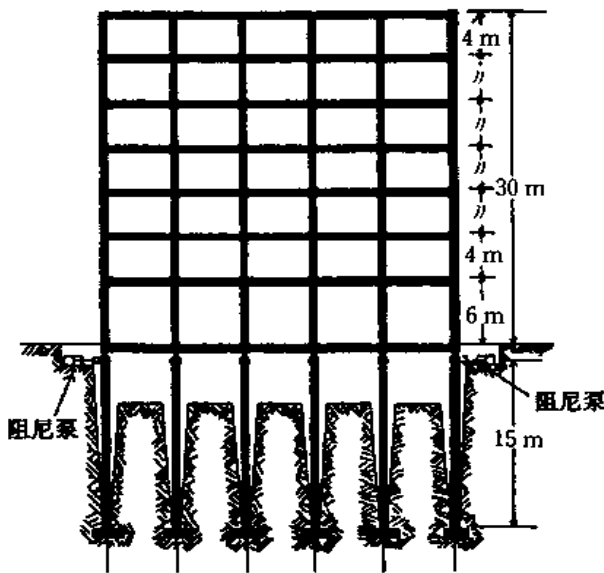


图 1-12 中村太郎的“吸收地震动能量的设备”

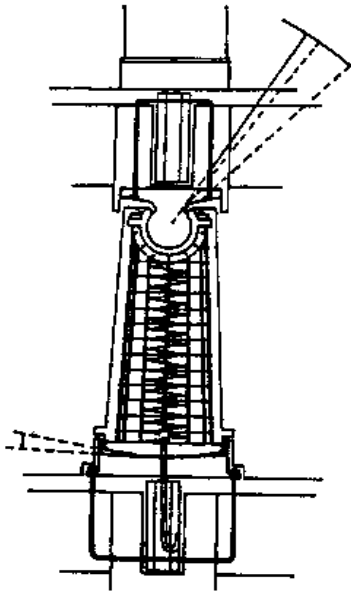


图 1-13 冈隆一的“隔震结构”

能吸收能量就可以增强抗震性能,为此提出了设置采用泵式阻尼器连接的机构。并且在同年建造了 7 层钢筋混凝土的建筑,该建筑地下层柱的上下端采用铰接构造建筑物可以

水平自由移动,设置了泵式阻尼器吸收能量的装置(图 1-12)。

1928(昭和 3)年以后,冈隆一提出了“隔震基础”的方案。这是在基础板上设置底部为半径很大的球面的柱,柱的上端设在该球面中心位置处,与上部结构采用球铰形状的连接构造。球铰连接部分利用摩擦增加阻尼力,并使得能抵抗风荷载的作用。(图 1-13)。冈隆一的设想于 1932(昭和 7)年获得“建筑物隔震装置”的专利,并应用于东京市土木局排水科的灭菌机房、不动储蓄银行姬路分店 1934(昭和 9)年和下关分店。

日本曾有过激烈的刚柔之争。在美国曾认为将建筑物底层部分做的柔一些,以减少地震力向上部的传递。这称为“柔性底层”。日本的真岛健三郎于 1934(昭和 9)年,也提出方案,获得“抗震住宅结构”专利(图 1-14)。

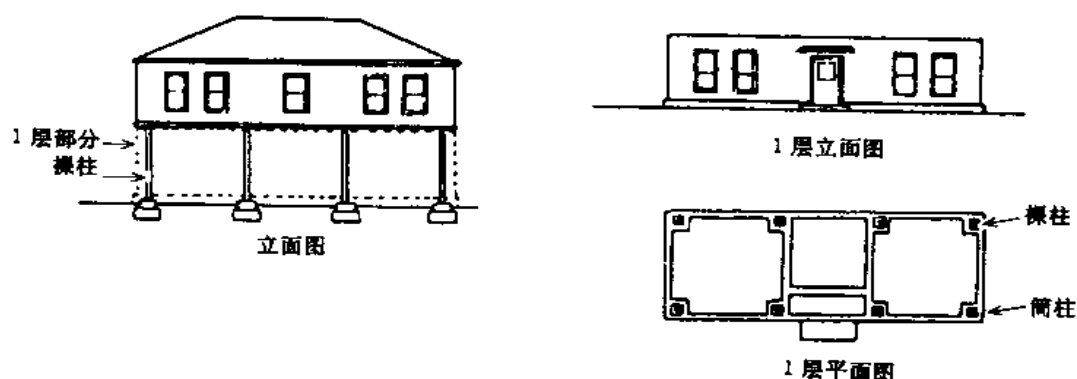


图 1-14 真岛健三郎的“抗震住宅结构”

1938(昭和 13)年,冈隆一将建筑物的地下部分做成防水的浮体,利用与挖土重量相当的浮力来支承,该方法获得“建筑物基础施工方法”的专利。同年,鹰部屋福平根据模型振动实验,提出在建筑物上部设置滚动质量层,利用质量层的惯性来减小建筑物的振动。该方法于 1940(昭和 15)年获得“制震性抗震结构”专利。冈隆一和鹰部屋福平于其后两年发表了滚动隔震结构方案的模型试验研究报告。

1951(昭和 26)年,大筑志夫在基础的两个垂直方向设置滚柱,四周用弹簧支承(传递限定地震力装置),该方法称为“减震机构法”(图 1-16)。如果大筑振动系统的自振周期很小的话,有一定的效果。

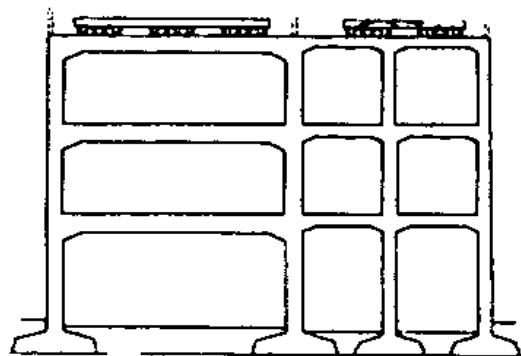


图 1-15 鹰部屋福平的“制震抗震结构”

1954(昭和 29)年,小堀泽二进行了非线性振动的研究,在基础部位采用先张钢丝或钢绞线,来避免具有非线性恢复力特性的建筑物在地震时的共振。小堀于 1957(昭和 32)年,提出原子炉两端用铰支柱支承,水平方向设置弹簧的制震结构方案(图 1-17)。1960(昭和 35)年,他定义“能使振动体制止地震动的性质”称为“制震”,发表了制震系统的分析研究报告。

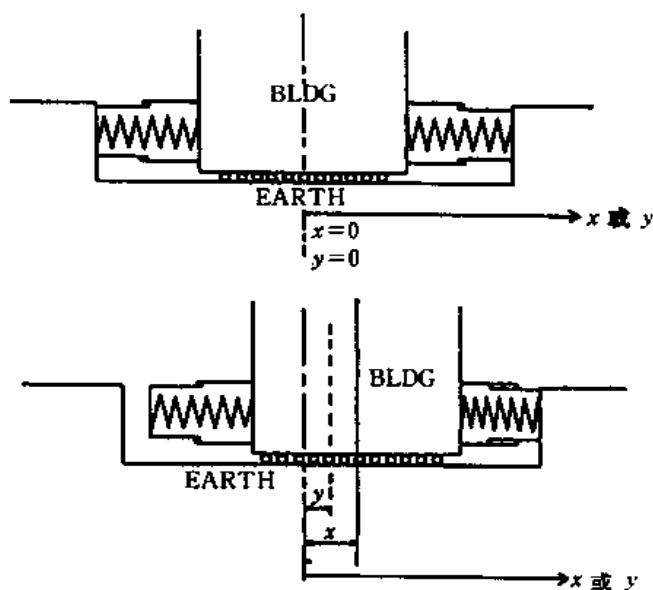


图 1-16 大筑志夫的“减震机构法”

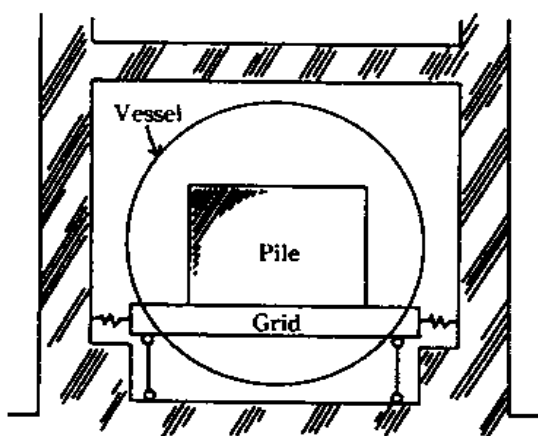


图 1-17 小堀泽二的原子炉的制震结构方案

1957(昭和 32)年,圆部泰寿对在建筑物顶点下挂物体形式的结构和摩擦阻尼器的制振效果进行了分析和震动实验,发表了研究报告。

1961(昭和 36)年,石田信一在基础上端和柱脚之间设置基础束与附近的土共同吸收震动能量,获得“建筑物抗震基础构造方法”的专利;万年真也和井户在球形结构物的球形凹面基础内采用注满水的方式使其浮起,该方法获得“抗震抗风抗核爆建筑物”的专利。

1964(昭和 39)年,胜田千利等发表了采用电动-液压式的自动制振系统的隔震结构研究报告(图 1-18)。

结构物支承在球形支座上,结构物内部设置地震计,根据其信号来控制作动器的工作,对结构物进行制振。胜田千利将该装置改进后,于 1965(昭和 40)年获得“隔震装置”的专利(图 1-19)。这是在基础部位设置能自由伸缩的斜杆,在斜杆上安装了能根据地震动检测机构指令工作的油缸,地震时使上部结构保持静止状态。

松下清夫、和泉正折是最早利用强震记录和计算机来分析隔震效果的。1965(昭和 40)年,在第三届世界地震工程会议上,二人发表了采用“摆动球”将基础与上部结构分开的隔震结构的分析研究论文。

1973(昭和 48)年,川股重也等发表了利用质量泵来减小地震反应的研究报告。1975

(昭和 50)年,和泉正折等定义“减震”是使地震力效应减小的抗震方法,并发表了介绍有关这类方法的研究历史,减震结构分析及其设计实例。

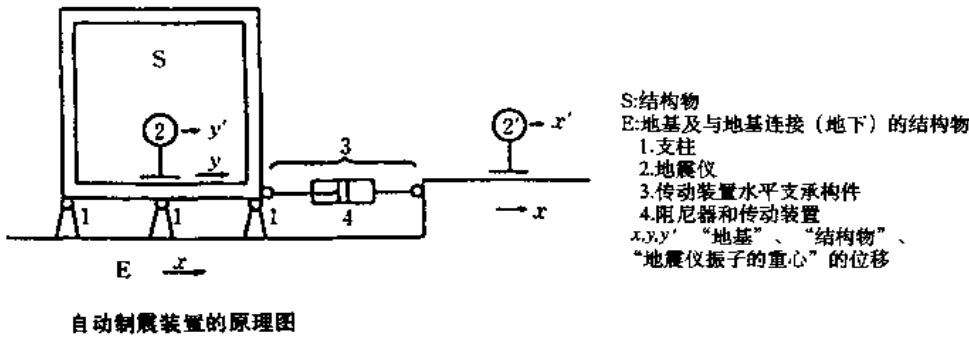


图 1-18 胜田千利的隔震装置(1964)

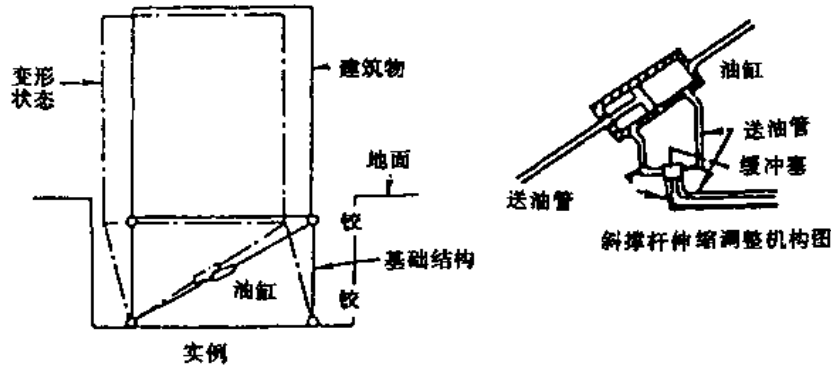


图 1-19 胜田千利的隔震装置(1965)



图 1-20 松下·和泉的“摆动球”

### 1.3.3 多层橡胶的开发与隔震结构

1969(昭和 44)年,南斯拉夫的斯克比市建造了采用橡胶支承的隔震结构小学。这种橡胶支承,水平方向和竖直方向都很柔,因此在承担建筑物的重量和施工方面都存在难点。

数年后法国提出了保证橡胶支承竖向承载力和刚度方法。这就是采用薄橡胶和钢板交错多层,使竖向刚度很高,水平刚度很低的“多层橡胶”。70 年代后期,马来西亚的拉穆

巴斯克小学、南非的开拜卢克核电站、法国的克拉瓦斯核电站等采用了多层橡胶的隔震结构建造。80 年代新西兰吾灵敦的吾里亚姆·克林顿大厦、美国加利福尼亚的福特赫卢司法中心大厦 等也是根据同样的方法建造的。

根据欧美多层橡胶隔震结构建筑的经验,以及建筑法规的修订,日本对隔震结构的研究也作了调整。多田英之和山口昭一与尤尼契卡等共同在日本最早采用多层橡胶建造了隔震结构住宅。由此为契机,以大手建设公司为中心开始了隔震技术的开发研究。至今已有近 80 栋隔震结构建筑完成或在建。

## 1.4 适合于隔震结构的建筑物

### 1.4.1 适用建筑和隔震效果

一般来说,隔震结构可以适合各种用途的建筑,并都能获得较好的隔震效果。表 1-1 列出了更适合隔震结构的建筑,其隔震效果更佳。

表 1-1 建筑物的用途和采用隔震结构的效果

建 筑 用 途	住 宅	办 公 楼	公 共 建 筑	防 灾 建 筑	美 博 物 馆	核 电 设 施	生 命 线 置	尖 端 设 施	纪 建 念 性 物
效 果	公寓 居民住宅 疗养院 养老院	一般办公 楼 办公大厦	政府办公 楼 大商店 医院 剧场 电影院 旅馆	急救医院 政府办公 楼 警察局 消防局 学校 公寓	美术馆 博物馆 资料馆 图书馆	核电站 研究所 核废弃物 仓库	电气、煤 气、水管 情报、通 讯、交通 电算中心	超精密加 工厂 研究所	纪念建筑 城墙 寺庙
结构安全性	安 全	安 全	安 全	安 全	安 全	安 全	安 全	安 全	安 全
设 计 自 由 度 (方案,截 面设计)	经 济 设计 自由度	经 济 设计 自由度							设计 自由度
内部物品 的振动,移 动,翻倒	安 全	安 全 正 常	安 全 正 常	安 全 正 常	物品得 到保护	物品得到 保护 正常工作 防止危险 物流出	物品得到 保护 正常工作 防止危险 物流出	正常工作 防止危险 物流出	安 全
防止构件 二次损坏	安全经济 设 计 自 由 度	安全经济 设 计 自 由 度	正 常	正 常	内部物 品得到 保护	正 常	正 常	正 常	安 全 设 计 自 由 度
振动时的 不愉快感	正 常	正 常	正 常	正 常					
设备,机械 保持正常 工作	正 常	正 常	正 常	正 常		正 常	正 常	正 常	正 常

隔震结构不仅应用于新建建筑,也可用于已有建筑的抗震加强,特别对历史建筑物和文化建筑物等的保护非常有效。



### 1.4.2 隔震建筑物用途的实例

1994 年底,国内评定的隔震结构有 79 件,美国报告的有 40 件。图 1-21 和图 1-22 分别为国内和国外各种用途隔震建筑的比例。国内有一半是用于研究所和业务楼、医院和公共建筑开始采用。国外多用于医院、防灾建筑、政府办公楼等,并开始用于居民住宅。图 1-23 表明在美国有很多已用于建筑物改建。

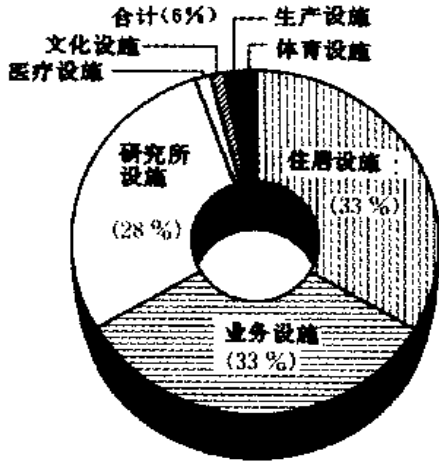


图 1-21 国内隔震建筑物的应用

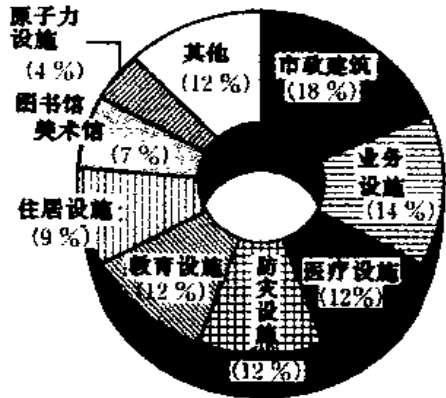


图 1-22 国外(除中国外)隔震结构的应用

## 1.5 结构种类和规模

这里根据实际应用情况叙述隔震结构适用的结构类型和规模。

### 1.5.1 楼层面积

经过评定的隔震结构建筑物中,楼层面积小于  $1000\text{m}^2$  的有 30 件,  $1000 \sim 10000\text{m}^2$  的有 34 件,  $10000\text{m}^2$  以上的有 7 件,包括私人住宅、办公楼、公共建筑等用途,规模大小不一。  $10000\text{m}^2$  以上的大型隔震结构中,特别是近  $50000\text{m}^2$  的电算中心和办公楼,使隔震结构的信誉大大提高。

### 1.5.2 结构种类和高度

经过隔震结构评定的建筑物,按建筑高度和层数来划分结构类型如图 1-24 和图 1-25 所示。

根据上图,上部结构采用 RC 结构和 SRC 结构的较多,也有 S 结构和木结构,没有看出对结构类型的特别限制。

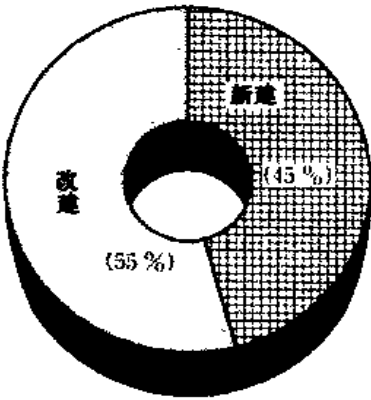


图 1-23 美国改建的隔震结构情况

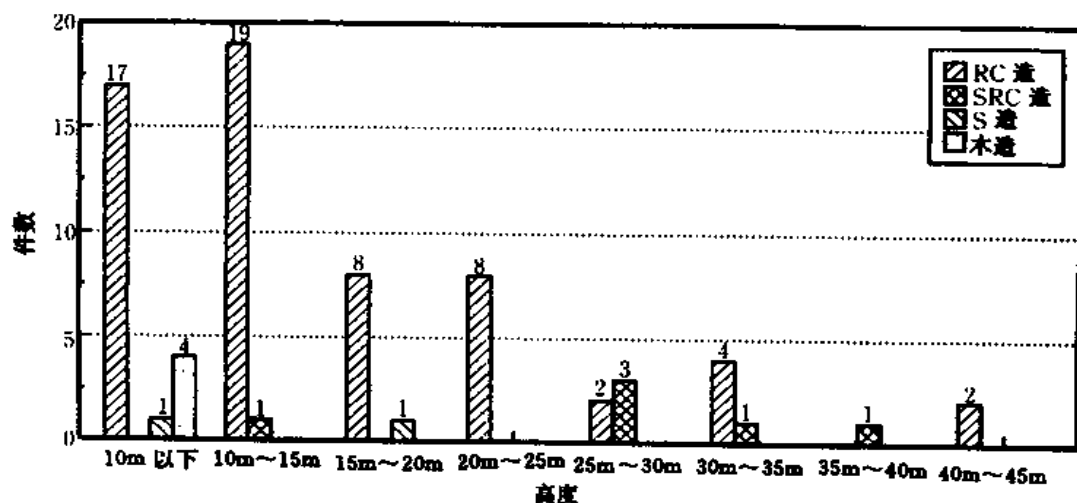


图 1-24 建筑高度的分布

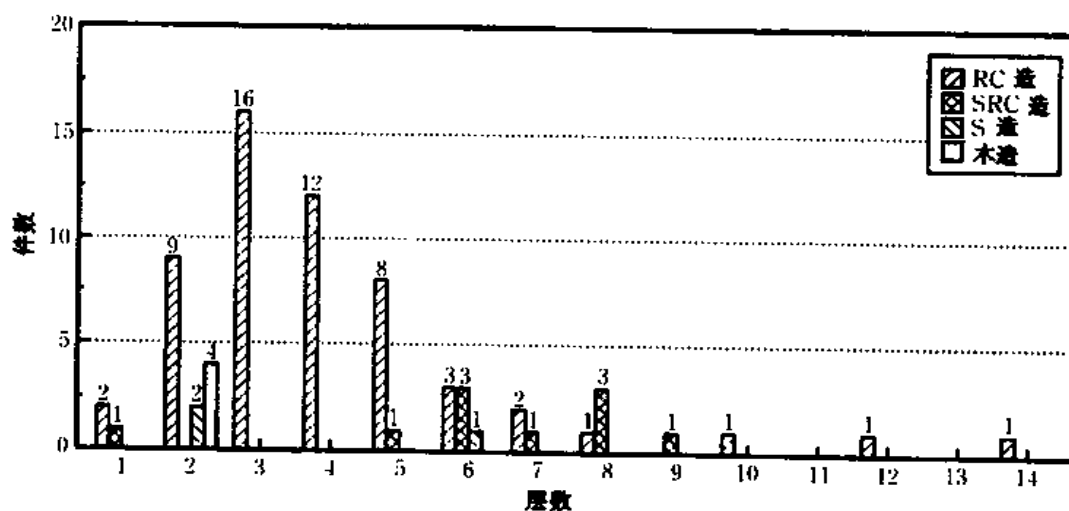


图 1-25 建筑层数的分布

高度超过 20~25m 时,一般建筑采用 SRC 结构或 S 结构,而在隔震结构中,由于地震力的减小,则可改为 RC 结构。

目前,日本隔震建筑最高达 49.2m(参照附录 2. 实例 2)。设计时采用适当的结构方案和配置隔震构件,使得地震时多层橡胶可不产生拉力,因此高层建筑和塔式建筑也可以采用隔震结构。

## 1.6 设计的自由度

图 1-26 所示的大胆的建筑形状,在建筑方案上是很有吸引力的。在多地震的日本,即使是矩形建筑,结构设计也是困难的。

但是,如果采用隔震结构,由于上部结构地震力的减小,层间变形也减小,安全性和适用性得到很大的改善,这就使建筑和设计自由度扩大。

下面介绍采用隔震结构,设计自由度扩大的具体项目。

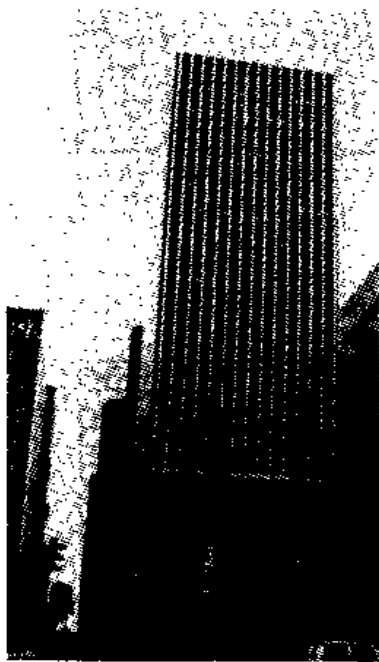


图 1-26 莱尼尔大厦

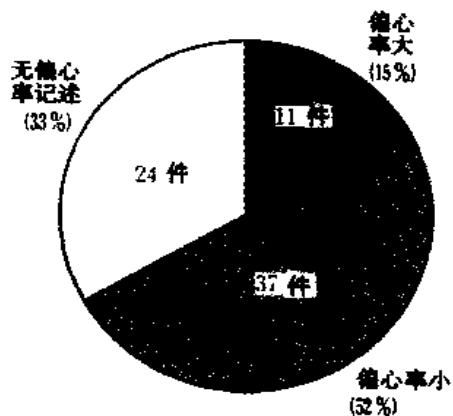


图 1-27 上部结构的偏心

### 1.6.1 偏心率

偏心率较大的建筑采用隔震结构,可以使上部结构的重心与隔震层的刚心一致,减小上部结构扭转的影响。

但是,采用隔震结构仍然应尽量从抗震结构方案角度来减小偏心率。

例如,在经过隔震结构评定的建筑物中,如图 1-27 所示,偏心率较大的有 11 件,考虑上部结构偏心进行振动分析的结果表明,其影响并不小。

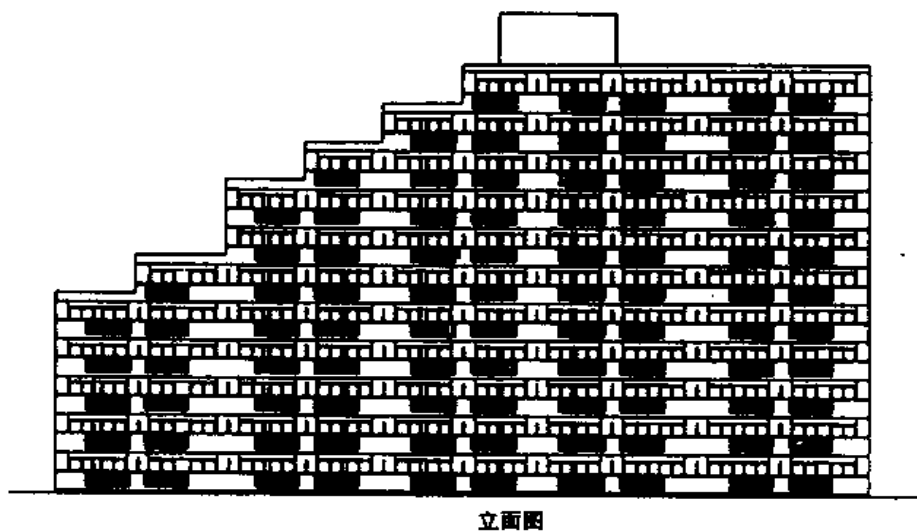
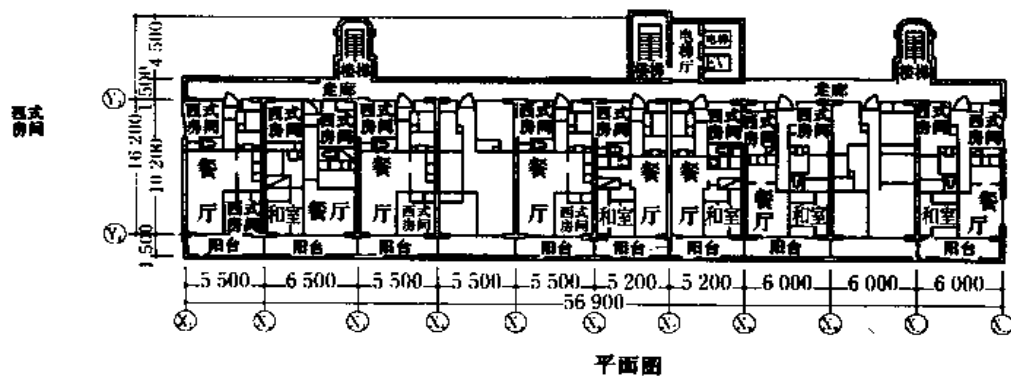
### 1.6.2 减少非结构构件、设备机器的抗震构造

采用隔震结构,使非结构构件及设备机械的抗震构造减少,设计和施工容易。

- ①内外装修简单
- ②活动地板、天花板、洒水灭火系统、设备机械等的抗震构造减少
- ③设备机械的基础和台座减小,锚固螺栓减少

### 1.6.3 结构构件截面减小

采用隔震结构使地震力降低,这样就从以往抗震结构方案取决于地震荷载中解放出来,使结构方案的确定可以着重于长期荷载。特别是在中高层建筑中,结构的梁柱截面尺寸可以减小。



部材断面

大 梁		柱	
非隔震	隔震	非隔震	隔震
 BH-600×200×9×19 2 D 25 2 D 25 13 200	 3 D 25 3 D 25 13 100	 BH 750×200×9×19 8 D 25 13 100	 6 D 22 10-D 16 13 100

图 1-28 结构构件截面减小

(日本建筑学会“隔震结构设计指南”(1989 年版)设计例 4(P.201))

例如,11层的住宅楼,采用隔震结构可以由 SRC 结构改为 RC 结构,并使梁柱截面减小。平面图、立面图及构件剖面见图 1-28(和室即日式房间)。

#### 1.6.4 设计的自由度

国内评定的隔震结构建筑物有 79 件,但是建筑形式和结构方案都未摆脱以往的模式。今后在实际采用隔震结构时,在充分理解其结构原理的基础上,应丢掉抗震结构的习惯和僵化的思路,充分发挥想象。根据自由想象的发挥,隔震结构可以如图 1-29、图 1-30 所示的各种方案。

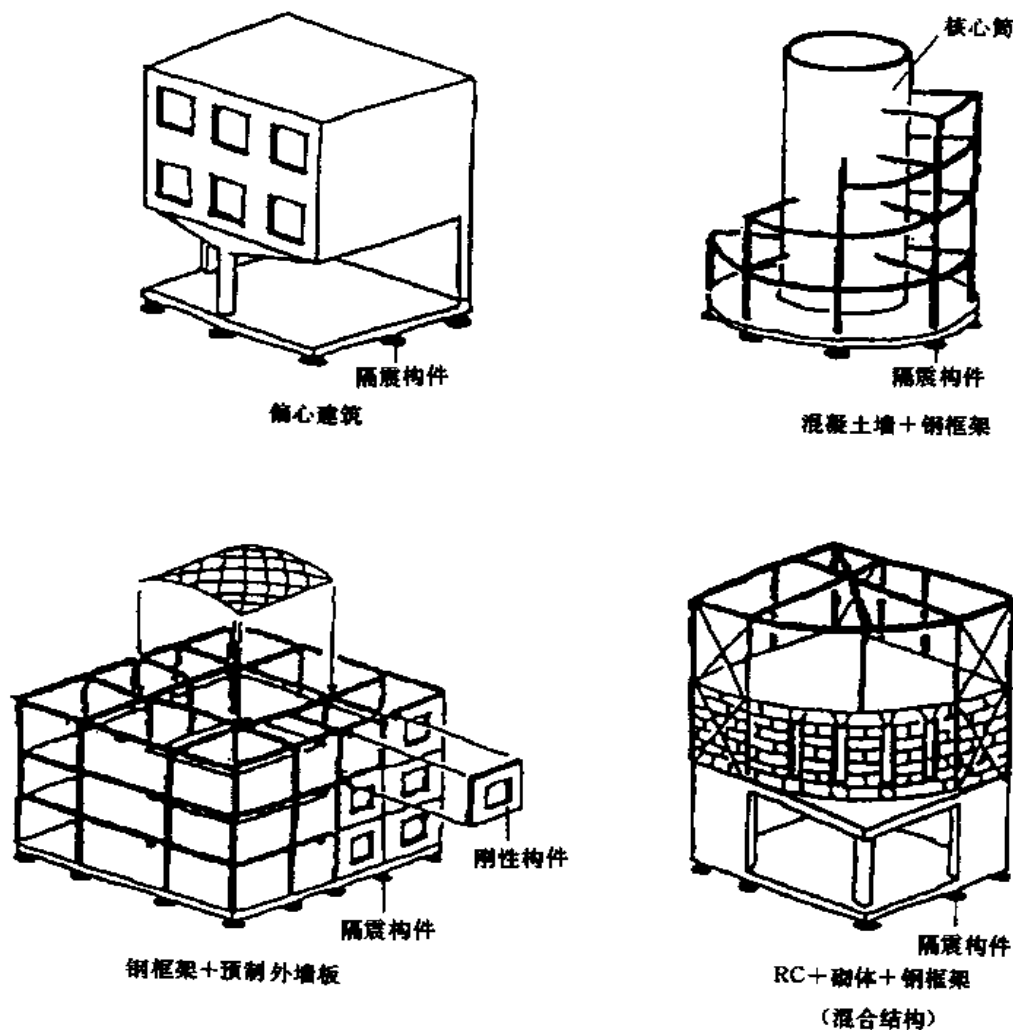


图 1-29 设计的自由度(1)

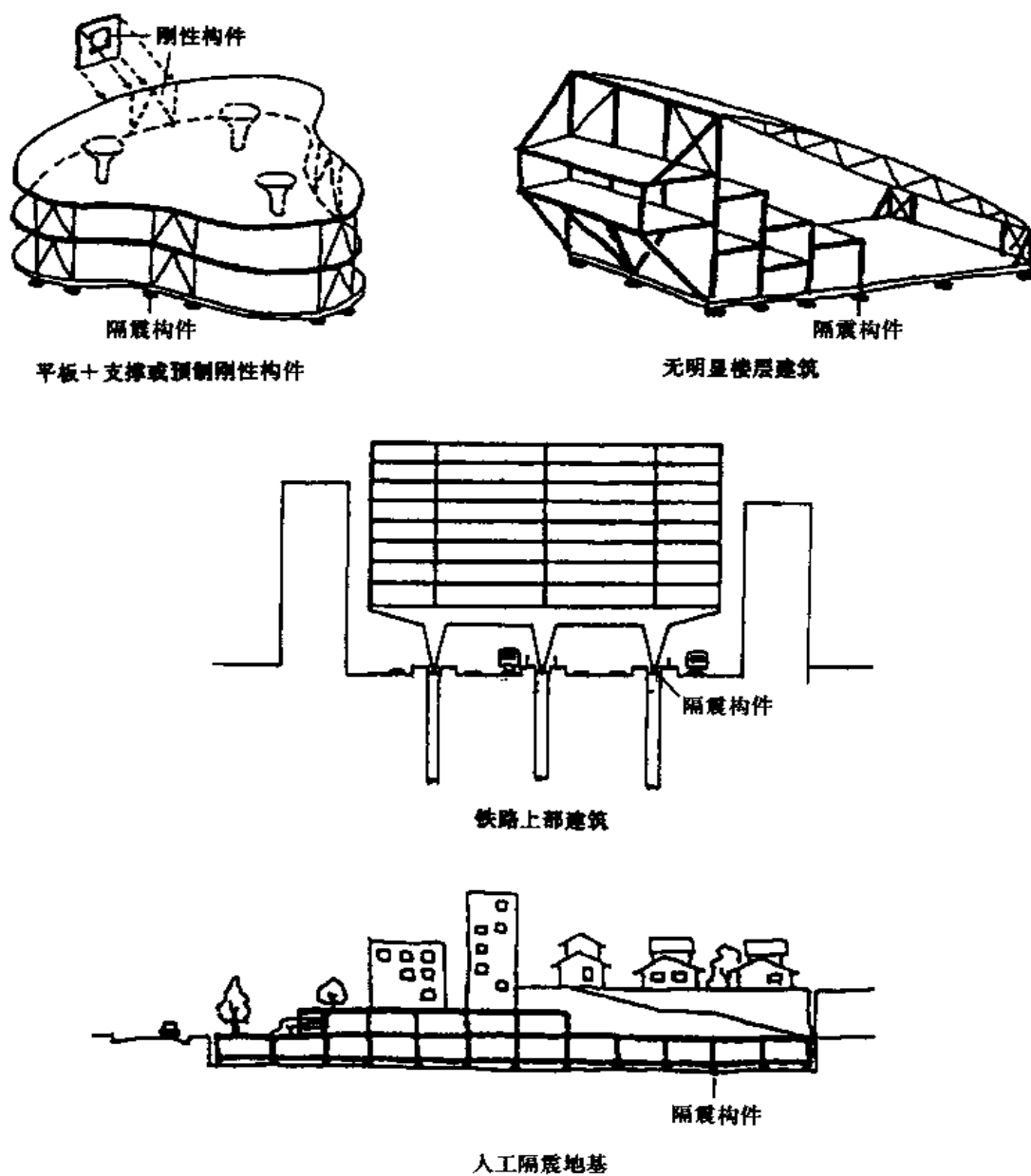


图 1-30 设计的自由度(2)

## 1.7 隔震结构的造价

隔震建筑在振动性能和抗震安全性方面提高了建筑物的附加价值,因此与以往建筑比较时,应考虑该附加价值进行综合评价。在考虑隔震建筑的造价时,不仅要考虑初始造

价(建设费用),如果从包括建筑物在使用期间遭受地震损坏的维修、重建、内部物品的损坏和经济损失的整个使用寿命期的价格来考虑,隔震建筑具有很好的经济性。但是,控制初始造价,仍是今后普及隔震建筑的主要因素之一。这里根据建筑规模和隔震层的位置,从全面角度讨论影响各项费用的变动。

隔震建筑的初始造价中,比一般费用增加的部分,如表 1-2 所示,包括隔震构件、隔震层附近的结构(隔震层上下的楼面,图 1-31)、设备管线的柔性连接。费用减少部分有,地震力减小使结构构件截面减小,由于层间变形很小使设备、装修的连接合理。例如,图 1-32 所示的基础设备,由于不需要防水层,使防水及其施工可以得到简化。

表 1-2 隔震结构与一般结构初始造价的比较

		价格增减项目		价格增减
		项 目	具体情况	
上部结构	结构部分	结构方面的减少	·构件截面减小 ·节省延性设计所需的钢筋和钢骨用量 ·可以由 SRC 结构改为 RC 结构	减少
		结构构件标准化	·构件截面容易统一	减少
	非结构部分	层间变形减少使装修材料费用降低	·内外装修连接的减少 ·门窗框减小 ·伸缩缝防水性改善	减少
		可节省材料	·内外装修构件的形状、板厚和钢筋用量减少 ·内外装修的受力构件截面减小、易标准化	减少
		设备机器的抗震大梁、抗震加强的减少	·活动地板、天花板抗震性改善 ·电梯、机房及其受力构件、锚固螺栓、基础减小 ·设备基础及台座,锚固螺栓的减小	减少
		装修材料、设备管线连接的简化	·设备管线支承构件数量减少 ·缓和与层间变形的协调	减少
基础结构		隔震层上下层楼面	·地下开挖量大、地下墙需加强 ·隔震层上下必需采用双重楼面使结构体积增大	增加
		基础结构尺寸的减小	·桩径减小 ·基础梁截面减小 ·独立基础尺寸减小	减少
隔震层		隔震构件	·隔震器和阻尼器	增加
		管线的连接	·管线采用柔性连接	增加

从日本国内隔震建筑的实例与以往结构造价的比较,全部工程费用虽有所增加,但隔震效果很好,上部结构和基础结构部分的造价减少很多,如果能有效利用隔震层作为设备层或停车场,可抵消隔震构件和隔震层费用的增加,因此总造价可能会减少。而且,对中高层建筑来说,隔震层在总建筑中占的比例较小,使造价增加率减小。

今后,隔震构件实现规格化、标准化,可以使综合价格降低。

以 11 层建筑物为例,采用隔震结构初始造价的变动概算如下(参见图 1-33)。

建筑物概况:

11 层 SRC 结构(一般结构)→RC 结构(隔震结构)

建筑占地面积 400m<sup>2</sup>      建筑面积 4400m<sup>2</sup>

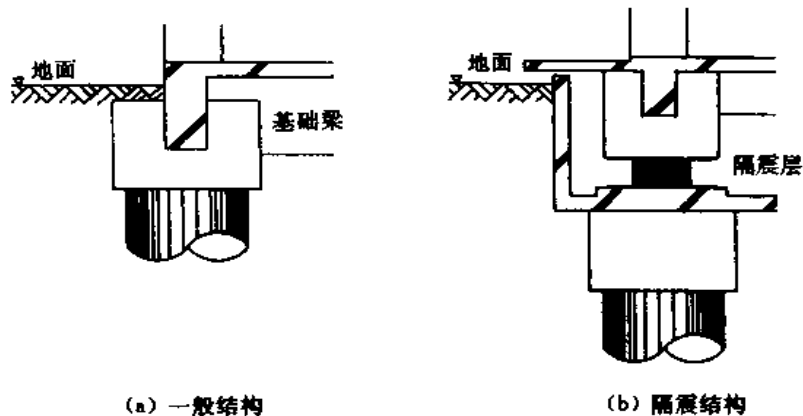


图 1-31 基础结构剖面图

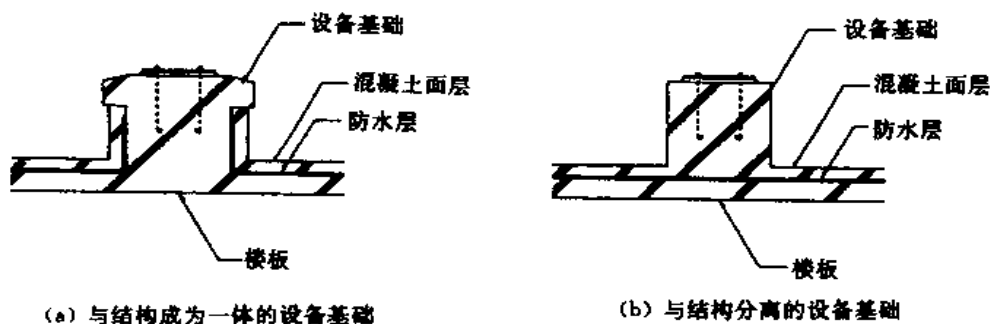


图 1-32 设备机器的基础

隔震构件概况:

多层橡胶隔震器  $\phi 700$  18 个  
阻尼器 14 个

造价增加:

- |                       |           |
|-----------------------|-----------|
| 1) 隔震构件费用             | 40000 千日元 |
| 2) 隔震层周围结构(双楼层)增加     | 20000 千日元 |
| 3) 基础底面加深增加工程量和施工量等费用 | 10000 千日元 |
| 4) 隔震层内设备柔性连接         | 5000 千日元  |

造价减少:

- |                   |             |
|-------------------|-------------|
| 1) 上部结构费用(SRC→RC) | - 40000 千日元 |
| 2) 非结构构件、设备抗震构造减少 | - 10000 千日元 |

采用隔震结构造价变动: 增加 25000 千日元

该建筑物总费用按 200 千日元/ $m^2$  取

$$4400m^2 \times 200 \text{ 千日元} = 880000 \text{ 千日元}$$

采用隔震结构造价增加率:

$$25000 \text{ 千日元} / 880000 \text{ 千日元} = 2.8\%$$



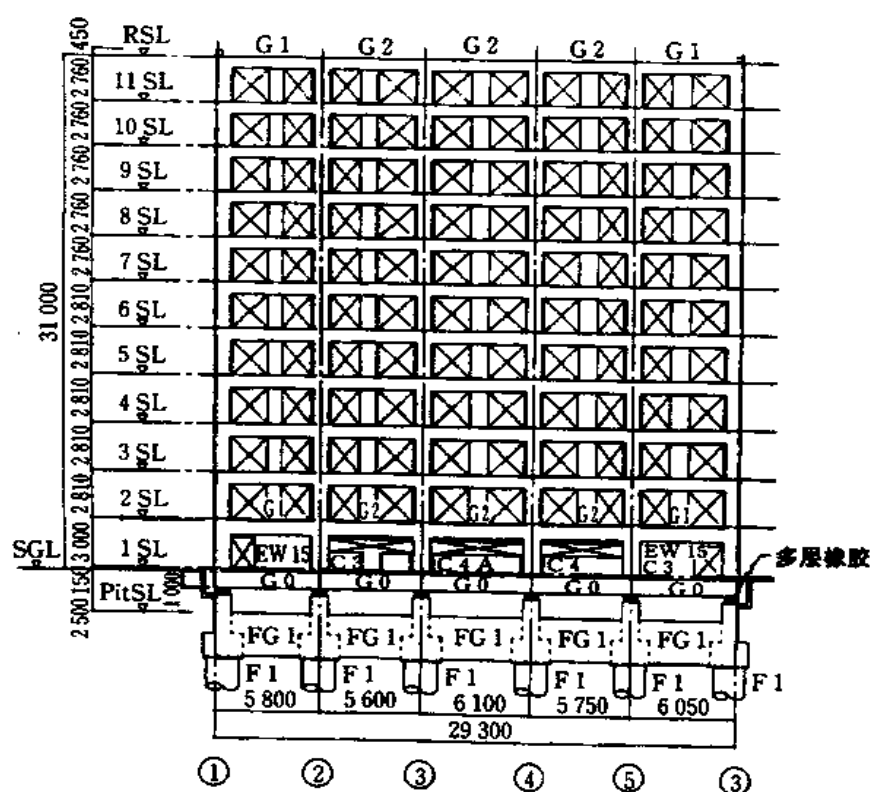


图 1-33 剖面图

上述概算中,如考虑结构的抗震性能,一般建筑在震度Ⅴ级地震时会引起轻微的损坏,而隔震建筑的震度Ⅶ级的大地震时也未受损害。由于震度不同,费用的比较没有意义,因此这里只是给出根据目前隔震构件的标准价格的试算结果,总费用增加在3%以下。

① 日本地震烈度分7个震度,最大7度,相当于我国的地震烈度12度。——译者注

## 第2章 隔震结构的设计

### 2.1 隔震结构的基本方案

#### 2.1.1 隔震结构的设计流程

隔震结构的设计流程如图 2-1 所示。以下为隔震结构初步设计阶段所应考虑的项目,对隔震结构基本方案非常重要。

#### 2.1.2 软弱地基上的隔震建筑

在软弱(第三类)场地土上建造隔震建筑,国内有 5 件。根据震度 V 度的地震观测记录,如采用水平刚度很小的隔震构件,隔震层的自振周期很长,隔震效果可以得到发挥。在软弱场地土上的建筑物,无论是否采用隔震与否,地震输入能量都会很大。设计人员在确定适当地震输入的基础上,对隔震构件的变形能力、能量吸收能力、上部结构的承载力水平等都应有一定的富裕。

#### 2.1.3 隔震结构与上下震动

一般来说,设计中很少验算上下地震动产生的作用。这是因为与结构物的自重(即长期荷载)相比,地震产生的上下惯性力较小,由上下地震动引起的地震损坏几乎未见。

一般多层橡胶隔震器,与柱具有同等程度的竖向刚度,因此对于上下地震动,隔震和抗震建筑物具有相同的地震反应。另一方面,对于水平地震动,隔震层的水平刚度很低,使隔震建筑的地震输入大幅度降低。建筑物的损坏、内部物品的移动翻到,主要是由于水平震动、或水平震动与上下震动的共同作用,因此即使在上下震动很大的直下型地震时,与抗震建筑相比,隔震建筑的损坏也会较小。但是,象计算机这类由于其自身加速度产生的问题,应采取其他的方法减小上下震动,保证更高的安全性。

对于建筑物外部的交通振动、机械振动,适当设计多层橡胶的竖向刚度和承压力,可以取得防振效果(参照附录 1.E 交通(铁道)振动的防振效果)。

#### 2.1.4 隔震层的位置

隔震层的位置如图 2-2 所示,分为设置在建筑物最下层的基础隔震和设置在建筑物中间层的中间层隔震。按与距地面位置的关系,分为(a)~(d)4 种类型。各种类型国内都有实际应用,这要根据建筑物的用途、性能、造价等来进行综合判断确定合适的隔震层位置。

图 2-3 所示的基础隔震,是将隔震构件应用于较大范围若干栋中低层住宅的底下部分,其空间可作为设备用房、停车场和共用管沟,这样可有效利用城市空间。如果 1 栋建筑物的重量非常小时,可以通过地下结构,使若干栋建筑物共用一个隔震结构,提高隔震效果。

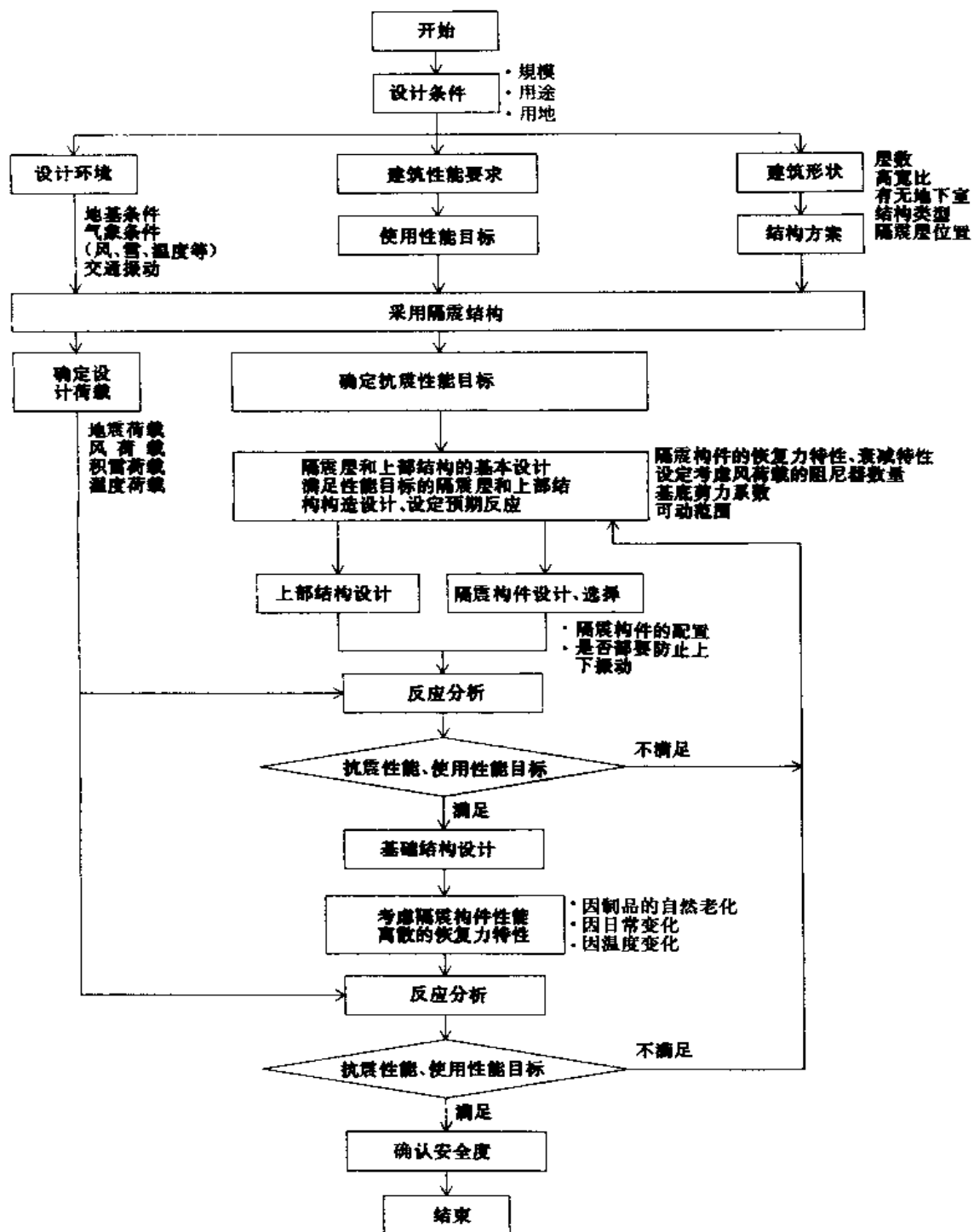


图 2-1 隔震结构的设计流程

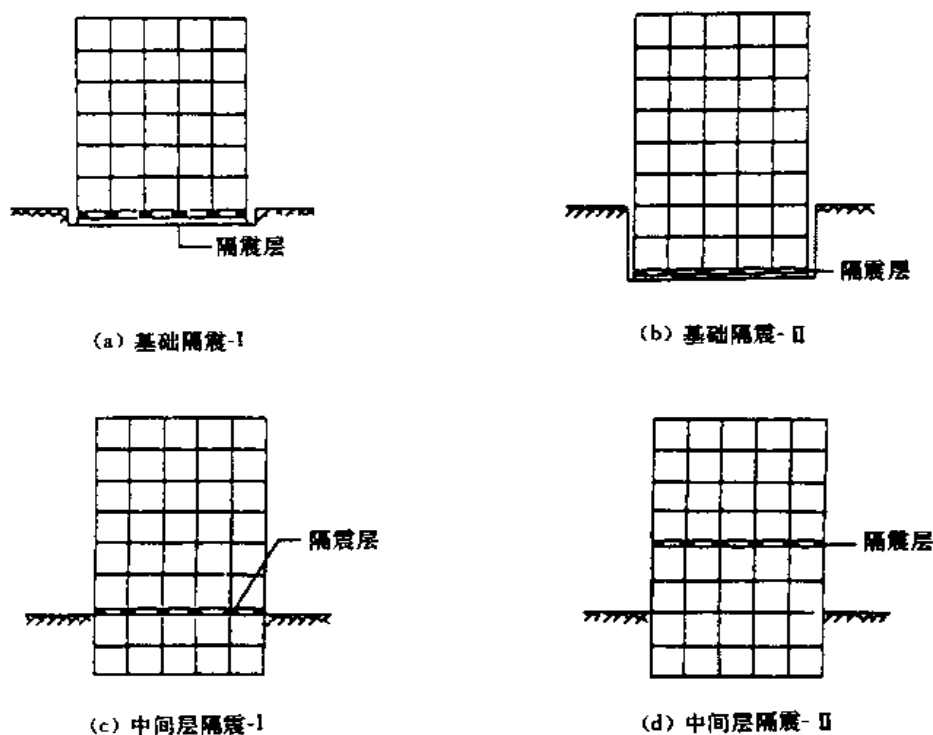


图 2-2 隔震层的位置

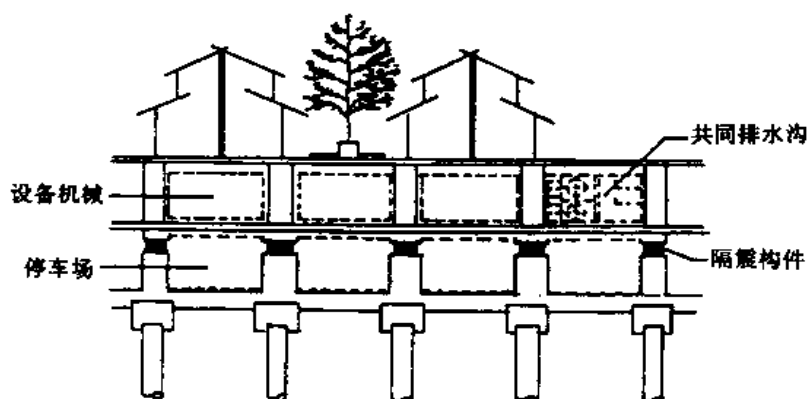


图 2-3 人工隔震地基

### 2.1.5 上部结构的类型与水平刚度

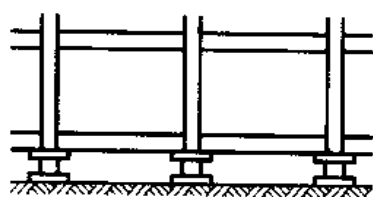
上部结构的自振周期很大程度上取决于建筑物的高度、结构类型和结构形式。隔震结构从概念上来说是在水平刚度很柔的弹簧的刚体,因此水平刚度很大的建筑物,沿高度楼层反应加速度、地震力和层间变形的减小程度基本一样。上部结构水平刚度较低的建筑物,与抗震结构相比,隔震结构还是可以取得有效的隔震效果,但上层的加速度反应比下层大。

前者如 RC、SRC 剪力墙结构或斜撑结构,是特别适合于隔震结构的结构类型和形式。

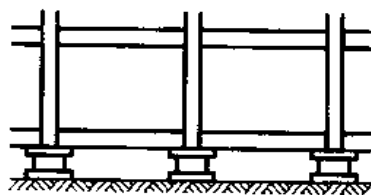
后者如钢结构和木结构等水平刚度较低时,可以采用多质点模型精确确定各层的地震反应量。

### 2.1.6 降低隔震层水平刚度的结构方案

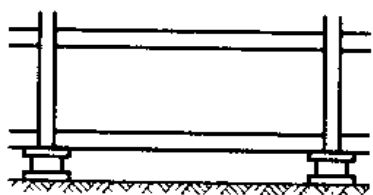
为了提高隔震效果,隔震层的水平刚度应十分低,使建筑物的自振周期增大。在图 2-4 中,方案(a)采用较小直径的多层橡胶,虽然可以降低隔震层的水平刚度,但受到多层橡胶变形极限的限制。方案(b)的直径较大,可以保证变形量,但隔震层的水平刚度没有减小,不能取得较好的隔震效果。为提高隔震效果,可以采用(c)所示的大间距、大直径多层橡胶的结构方案,使每个隔震器的受荷面积增大,而总数减少。方案(d)的上部结构最下层采用刚性底盘,多层橡胶的设置与柱的位置无关,与方案(c)相比造价较高。



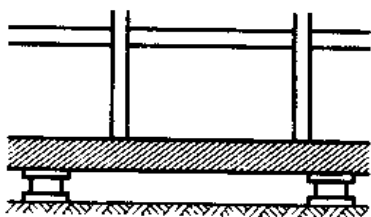
(a)多层橡胶直径越小  
极限变形量越小



(b)隔震层的水平刚度越  
大周期越短



(c)适当的多层橡胶的  
直径与结构方案



(d)采用刚性底盘使多层  
橡胶配置自由

图 2-4 上部结构方案(1)

### 2.1.7 多层橡胶层不产生拉力的结构方案

多层橡胶受拉剪的试验资料比受压剪的少,因此应保证其受力可靠。为此,多层橡胶与上部结构通常不采用螺栓连接,而采用铰接连接,使多层橡胶不产生拉力的方法。在结构方案中,高宽比相同的建筑物,如果使轴力集中于建筑物的两端,拉力的产生就会推迟(图 2-5)。

但是,高宽比不是隔震建筑方案的唯一限制条件。假定上部结构为刚体,地震输入能量与隔震构件吸收的能量相平衡,求得在地震倾覆力矩下多层橡胶不产生拉力的隔震建筑高宽比( $H/B$ )的上限结果如图 2-6 所示。由图可见,高宽比的上限与取决于隔震器总水平刚度的自振周期( $T_f$ )成比例增大。即,如适当确定隔震层的水平刚度和隔震构件的配置,是可以用于高宽比较大的细高建筑物。

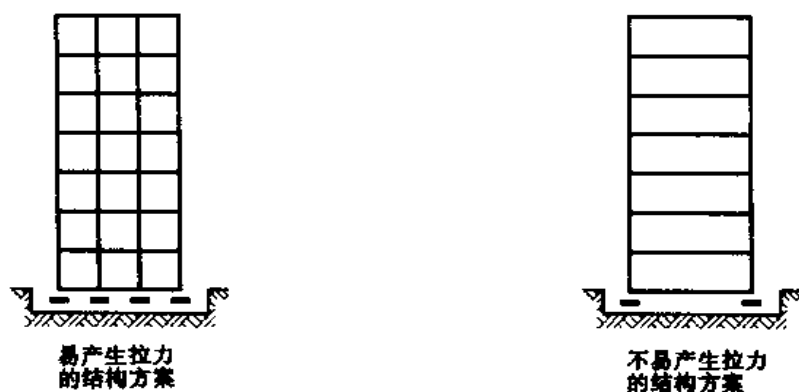


图 2-5 上部结构方案(2)

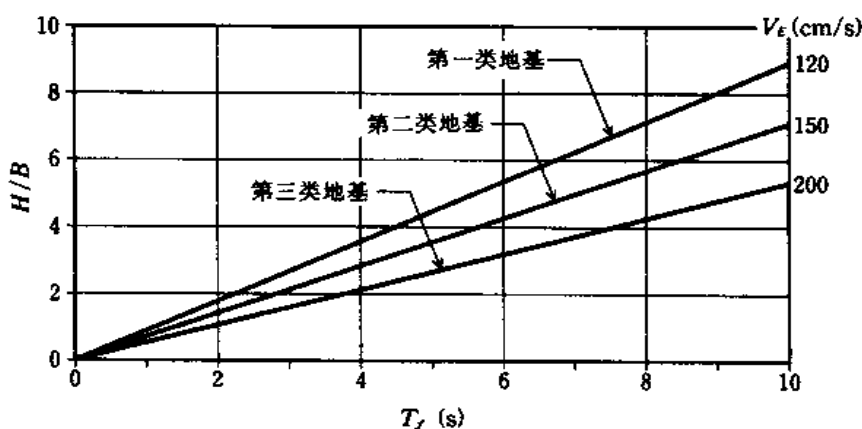


图 2-6 高宽比( $H/B$ )的上限与自振周期( $T_f$ )的关系  
(日本建筑学会“隔震结构设计指南”)

### 2.1.8 净空间距

隔震建筑在地震时的安全性,包括隔震层的承载性能、变形性能和能量吸收性能。开发性能良好的隔震构件,设计具有足够的安全系数,就可以保证充分的安全性。此外,如果遭遇特大地震作用,建筑物的变形不能导致碰撞。在水平方向,应保证具有上部结构地震变形的 1.5~2 倍的净空间距。竖向的净空间距,应考虑到多层橡胶的变形(徐变、温度变形、水平变形时的竖向沉降),以及施工误差来确定。

因此,要保证建筑物在使用期间,上部结构的变形不会产生碰撞,设计人员在工程竣工前应对以下措施给予说明。

- 1) 建立有效的维护管理制度(参照 3-7 维护管理)
- 2) 隔震建筑的施工单位和使用者的管理(参照附录 5. 隔震建筑业主的管理)
- 3) 隔震层等可动部位周围应有明显引起注意的标志。

### 2.1.9 隔震构件的配置

在隔震建筑的设计中,原则上应使隔震层所有隔震构件的刚心与上部结构的重心一

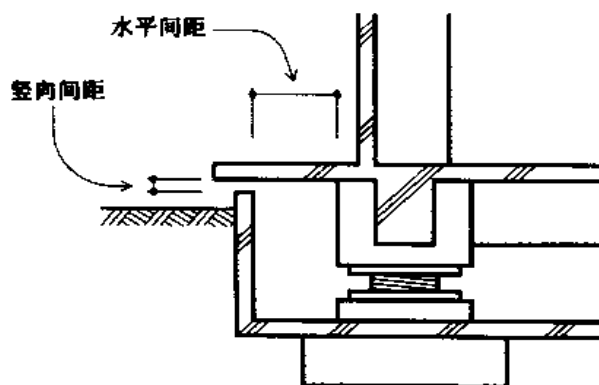


图 2-7 隔震层周围的间隙

致,不产生扭转。但是,由于建筑物的不规则,在柱下有 $1.5m$ 的尺寸范围配置多层橡胶隔震器,压力不会一样,因此仅靠隔震器会产生隔震层的刚心与上部结构的重心的不一致。采用与隔震器独立的阻尼器进行设计,在阻尼器的弹性范围内,可以使隔震层的刚心与上部结构的重心一致,避免隔震层的震动扭转的增加。如果阻尼器布置在建筑物外周,抑制扭转变形的效果更好。

#### 2.1.10 隔震构件的置换

隔震建筑中,变形和能量吸收都集中在隔震层,因此隔震构件有可以置换的隔震结构的优点。特别是与隔震器独立的阻尼器的置换一般较为方便,这就是所谓“地震时利用其吸收能量,然后更新构件”的结构体系。

由于隔震器承受建筑物的重量,不如阻尼器置换容易。国内已建造的许多隔震建筑,需根据当初设计的技术安全度,采用在建筑物或局部设置千斤顶来置换隔震器或对其进行加固。随着技术进步,在美国的建筑改造技术中,已可以对未加固的建筑物置换隔震器。置换隔震器时,要考虑加固费用和建筑的限制条件、置换的可能性、置换时的费用,与建筑主和设计人员综合商议确定。

## 2.2 设计剪力

### 2.2.1 隔震建筑的地震反应

下面以高度约为  $15m$  的 RC 建筑为例,来比较隔震结构与抗震结构的地震反应。在抗震结构中,这种规模的建筑物,其标准的自振周期约为  $0.3$  秒。在隔震结构中,需预先确定隔震器和阻尼器的各自特性,这里为明确把握建筑物的动力特性(恢复力、衰减),参照实际实例假定其自振周期为  $3.0$  秒。根据以上假定,隔震结构的地震反应具有以下特征:

- 1) 由于自振周期不同,隔震结构的地震剪力比抗震结构大幅度降低。
- 2) 隔震结构的变形大部分集中在隔震层且与地震剪力成反比趋势。
- 3) 隔震结构的地震剪力随衰减的大小而变化。增加衰减(阻尼器),隔震的地震剪力

降低效果有所减弱。但从能量理论来分析地震反应,对于某一地震输入存在地震剪力最小的衰减(参照“隔震结构设计指南”(p.436~439))。

4)隔震层的变形随阻尼器的衰减增大而减小。

上述地震反应的特征,用地震剪力和位移的地震反应谱来表示如图 2-8 所示。

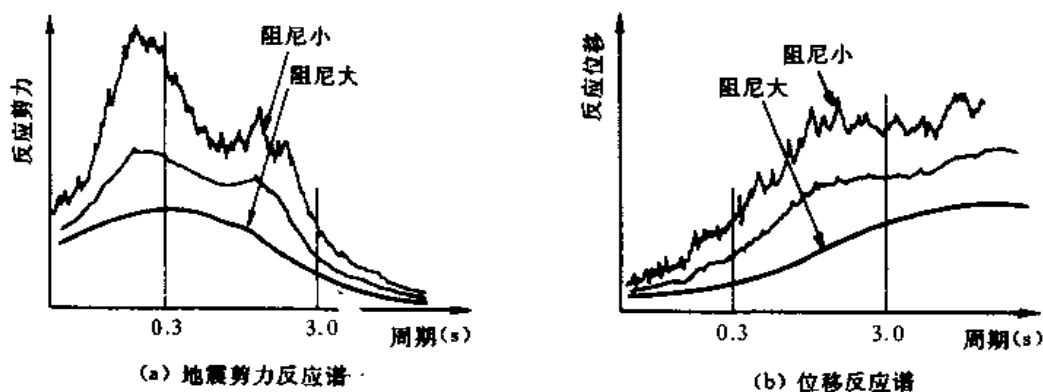


图 2-8 地震反应谱实例  
(日本建筑学会“隔震结构设计指南”)

由图 2-9 可见,在大震时隔震建筑的楼层加速度的降低效果非常显著,在小震时与一般建筑相近。另一方面,在强风作用时,建筑物的晃动对居住性和人们适应性不能超过一定限度,因此应与一般建筑一样,对风荷载需进行不摇晃设计。

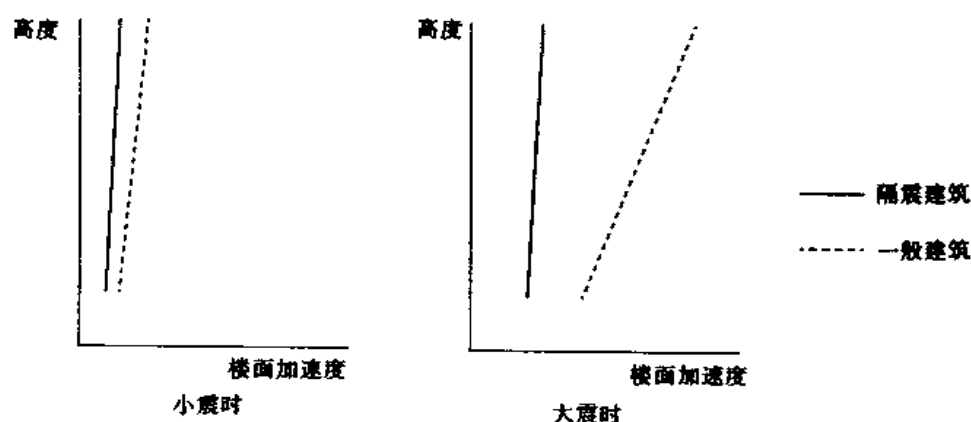


图 2-9 地震时楼层加速度比较

## 2.2.2 设计剪力

### (1)设计基底剪力系数

在设计剪力作用下,上部结构应处于允许应力范围内,但设计人员应根据结构安全性要求来确定设计剪力的大小。与抗震结构相比,隔震结构的设计基底剪力系数减小,其减小程度由设计人员确定。根据隔震层的基底剪力系数( $\alpha_1$ )与最大位移反应( $\delta_{\max}$ )的关系(图 2-10),确定设计基底剪力系数时需考虑的有关因素叙述如下。



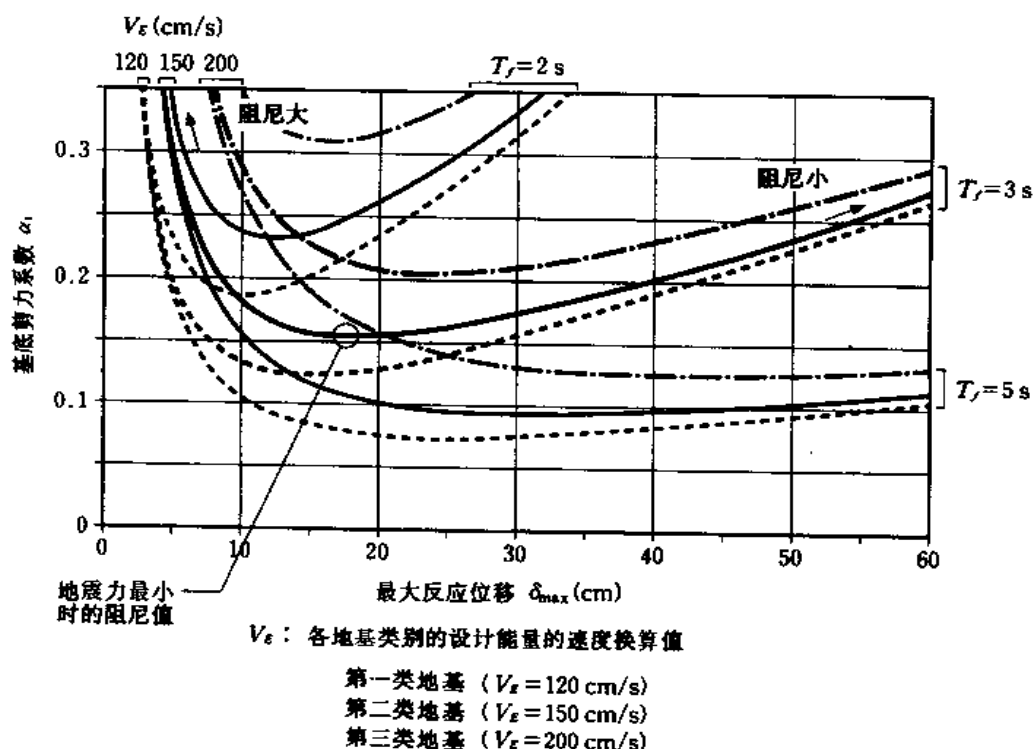


图 2-10 基底剪力系数  $\alpha_1$  与最大反应位移  $\delta_{\max}$  的关系

对于大震的反应要根据场地土类别和自振周期( $T_f$ )两个参数来进行评价。图中粗线表示前例( $T_f = 3.0$  秒)的情况,对第一类场地土( $V_e = 120 \text{ cm/s}$ ),基底剪力系数是可以小于 0.15。而对于同样规模的抗震结构设计,按必要水平承载力<sup>①</sup>计算的基底剪力系数超过 1.0,随延性和衰减的增大而减小。即,隔震建筑的设计基底剪力系数,对应于一般建筑的二次设计的外力。

$T_f$  比 3.0 秒越长,基底剪力系数就越小。 $\delta_{\max}$  超过 20cm 以上规模的地震时,对于取决于隔震构件特性的“隔震层变形”和“自振周期”的变化,基底剪力系数基本没有什么变化。

根据以上所述,对应场地土类别,由自振周期、最大反应位移和衰减量参数以及参考必要的有关试验结果,就可以确定符合结构安全性能要求的设计基底剪力系数。

## (2) 层剪力系数分布

隔震建筑的振型如图 2-11 所示,变形主要集中在隔震层,上部结构的变形基本上是由近似刚体的一次振型和受阻尼器水平刚度影响的二次以上的高次振型的组合。一般来说,与上部结构的水平刚度相比,隔震器的水平刚度很小,因此隔震建筑的层剪力系数分布和上部结构的增量,不仅与隔震器的反应值( $\alpha_f$ )有关,还与阻尼器的反应值( $\alpha_s$ )有关。隔震器和阻尼器设置适当时,各层的最大剪力系数( $\alpha_i$ )如图 2-12 所示,沿高度方向基本

① 日本建筑抗震设计分一次设计和二次设计,一次设计阶段为容许应力设计,二次设计阶段要求结构的水平承载力大于必要水平承载力。必要水平承载力是指在大震作用时,要求结构所应具有的水平承载力。——译者注

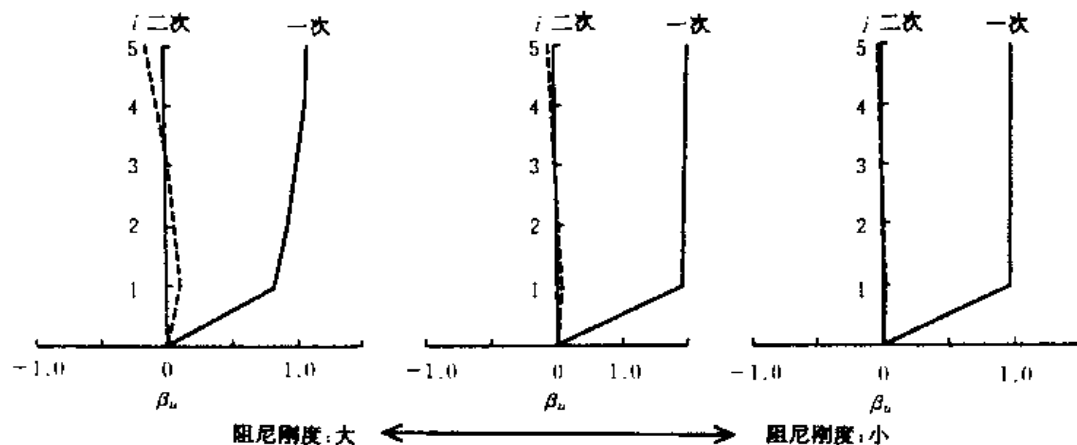


图 2-11 隔震建筑物的振型  
(日本建筑学会“隔震结构设计指南”)

上为直线分布形状(参照“隔震结构设计指南”(p.99~100))。

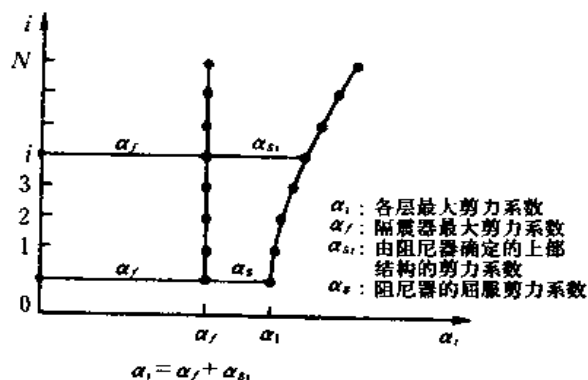


图 2-12 各层最大剪力系数分布  
(日本建筑学会“隔震结构设计指南”)

### 2.2.3 设计剪力的实例和分布

评定的隔震结构中,上部结构的设计基底剪力系数和设计剪力分布形状统计见图 2-13 和图 2-14。

设计基底剪力系数约有 60% 取 0.15,约有 30% 取 0.2。最近已有采用 0.12 的实例(参照附录 2. 实例 3)。

其次,设计剪力系数的分布形状有① $A_i$ 分布①;②沿高度方向分布相同;③待分析;三种情况。

如前所述,设计剪力是按可能的最大地震输入水平(相当于目前的水平 2 地震)的

反应值确定的。在早期为偏于安全,多采用建筑基准法一次设计的值( $C_0 = 0.2$ ,  $A_i$  分布),目前经过很多实践,设计剪力已趋于按反应值确定。

### 2.2.4 抗震结构与隔震结构地震安全度的差别

在遭遇特大地震作用时,抗震结构是以防止建筑倒塌和保证人身安全为目标,利用结构的损伤吸收地震能量,即所谓的进行二次设计。另一方面,对于隔震结构来说,地震能量主要是由隔震构件吸收,因此可以设计成大震时上部结构几乎不产生损伤。在隔震结

①  $A_i$  分布是根据建筑物的一次自振周期( $T$ )和重量的竖向分布系数( $\alpha_i$ )确定的剪力分布系数。

$$(A_i) = 1 + \left( \frac{1}{\sqrt{\alpha_i}} - \alpha_i \right) \frac{2T}{1 + 3T}, \alpha_i = \frac{W_i}{W}$$

$W_i$ — $i$  层的重量,  $W$ —建筑物总重量。——译者注

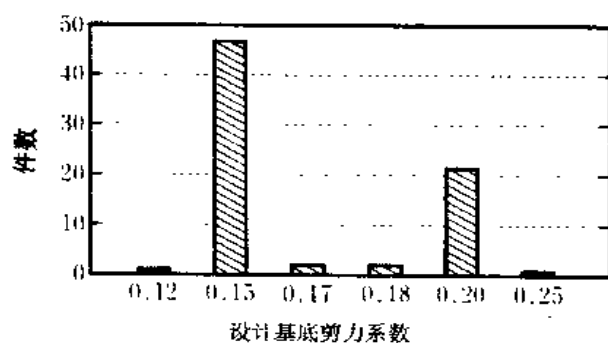


图 2-13 日本建筑中心评定的隔震结构的设计基底剪力

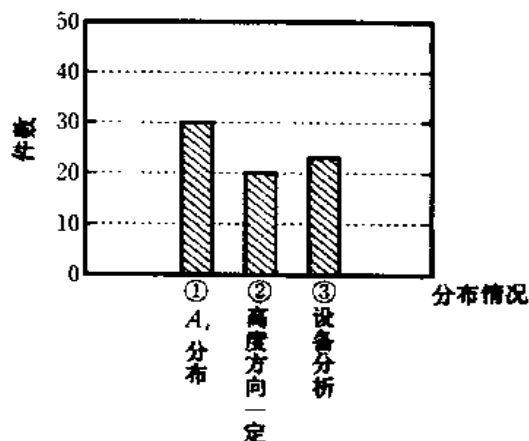


图 2-14 评定的隔震结构的设计剪力系数分布

构中,隔震构件的性能对建筑物在地震时的安全性影响很大,其性能要根据实际破坏试验的最终破坏情况确定,以保证设计具有充分的安全性。

目前的设计对于大于预计的地震作用时,由于抗震结构竖向承重构件的破坏引起倒塌的危险性不能说没有。为避免这种情况,有必要大幅度加强结构。此时建筑的水平刚度和承载力也相应增加,反应加速度亦随之加大,这对结构内部物品和非结构构件来说,是十分不利的。而在隔震结构中,只要隔震构件及其周围连接部位有可靠的安全系数,保证有充分水平位移距离,则对于超过二次设计水平的大震作用时,可以确保结构的安全性,内部物品和非结构构件的损伤也可以控制在最小的限度以内。

## 2.3 上部结构的设计

### 2.3.1 强度与刚度

在隔震结构中由于设置了隔震器,取决于隔震层水平刚度的建筑自振周期增大,使作用于上部结构的地震力减小。地震能量几乎都由隔震层的减震机构(阻尼器)吸收。但是,上部结构也还是应具有足够的强度以抵抗已减弱的地震力的作用。另一方面,在柔弱的隔震层上的结构应确保具有相对较高的水平刚度,地震时表现为刚体,从上至下各层加速度的减小程度基本上相同,以充分发挥隔震结构的优越性。

### 2.3.2 构件的设计

采用隔震结构的目的是减小地震力和楼层加速度,不需要上部结构的能量吸收能力和变形能力,地震时结构构件可以按处于弹性范围进行设计(弹性设计),使设计简捷。与隔震层相比,上部结构刚度很大,可以抑制地震反应沿高度方向的增加。同时,也可以放松新抗震法所确定的保证延性的有关规定。而且,也没有水平承载力的概念<sup>①</sup>。对于局

<sup>①</sup> 1981年日本对建筑结构抗震设计方法进行了较大的修改,称为新抗震法,补充了二次设计,按延性结构进行结构水平承载力计算,使结构水平承载力大于必要水平承载力,因此要求结构构件具有一定的延性。——译者注

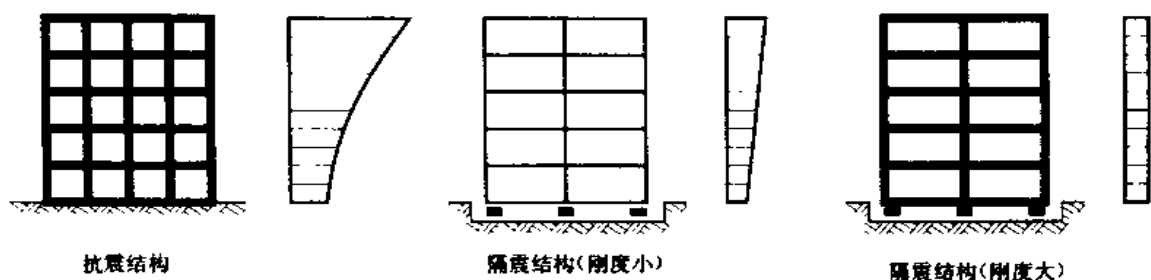


图 2-15 剪力系数分布

部来说,虽然短柱会引起地震力的集中,但由于地震力的减小,也可以按弹性设计。此外,还可以避免采用对建筑上和结构上不利的抗震缝。

另一方面,采用隔震结构时具有设计自由度,使塑性发展仅限于构件,且层承载力大于层剪力,因此可以确保建筑的水平刚度接近弹性刚度。这里所谓设计自由度,是指可以实现结构尺寸小型化的建筑形式,也就是说在大规模的建筑物中,可以实现抗震结构所不能做到的平面和立面方案。

对于建筑物自重、楼面活荷载、雪荷载等竖向荷载的设计,与抗震结构一样。但是,对于比地震作用持续时间长的风荷载,有必要约束隔震层的水平位移。风荷载下结构的设计,与竖向荷载情况相同,其计算同抗震结构。

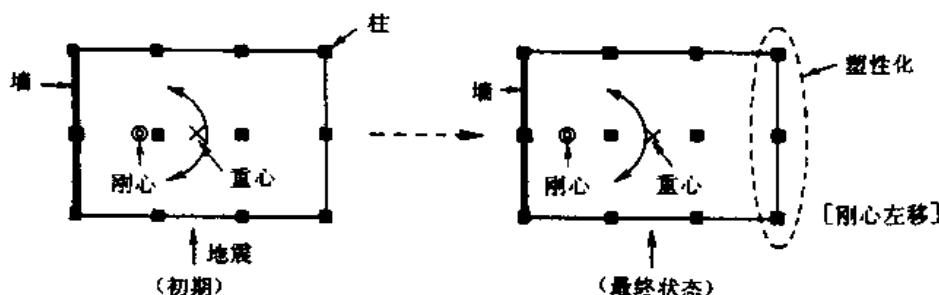


图 2-16 偏心较大的抗震结构地震时的状况

### 2.3.3 刚度不均匀(偏心率·刚性率)的影响

建筑平面内重心与刚心不一致时,地震作用会产生扭转变形。隔震建筑与抗震建筑由于扭转变形产生的应力增加和分配,在以下几个方面有所差别。

- 1) 隔震建筑地震时的水平力较小,应力增加的绝对值较小。
- 2) 建筑处于弹性范围时,隔震建筑相当于作用静力扭矩产生的应力增量,而抗震建筑则是动力效应,产生的应力增量很大。
- 3) 抗震建筑由于构件进入塑性,使偏心量增加,扭转变形进一步增大。

因此,对于偏心显著的建筑平面方案,采用隔震结构可能容易设计。

在抗震结构中,沿高度方向刚度变化会招致集中在某层破坏。在隔震结构中,隔震层

非常柔;具有很大大变形能力,使变形集中,上部结构与隔震层相比具有充分的刚度,即使相对刚度存在差异,其地震反应的差别也十分小。

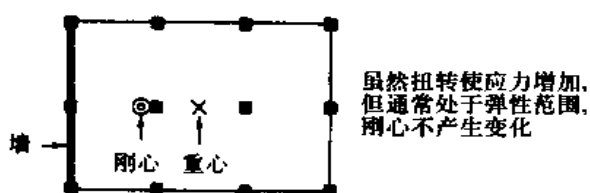


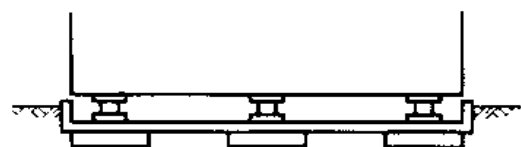
图 2-17 上部结构按弹性设计的隔震结构地震时的状况  
(日本建筑学会“隔震结构设计指南”)

#### 2.3.4 从地基约束中解放

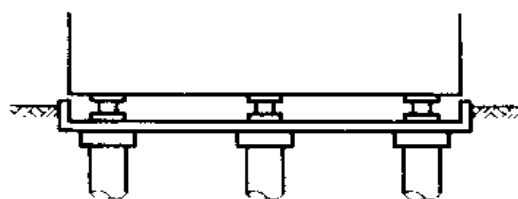
由于混凝土收缩或温度变化,建筑物会产生体积变化。抗震建筑与地基连接,地面受到约束,故易产生裂缝,在大规模建筑中需设置伸缩缝。而隔震建筑不与地基接触,因此没有受到约束力,只是隔震器随变形产生形状变化。实际上,国内许多工程实例报告表明混凝土表面几乎没有产生裂缝。

## 2.4 基础结构的设计

由于隔震层将建筑(上部结构)与基础隔开,使地震力大幅度降低,隔震建筑的基础结构与一般建筑相比,结构形式和荷载有很大差别。没有必要采用与一般建筑同样的结构形式和构件。但是从造价上来说,由于隔震建筑在隔震层需设置上下双层板面、以及由于隔震层使基础埋深增加,因此隔震建筑的基础结构方案对总造价影响很大。所以在设计中应给予重视。



直接(独立)基础



桩基础

图 2-18 无基础梁的结构方案

隔震建筑使上部结构与地基隔离,建筑物由隔震器支承,这是要考虑的首要因素。其次要考虑以下基础结构设计中的因素。

1)地基承载力一般小于隔震器的应力值(多层橡胶的面压),因此基础结构的作用是起到上部结构到地基应力传递。

2)基础结构应根据地基承载力,可选择直接承压和桩基础等各种基础结构(与抗震结构设计相同)。

3)由于采用隔震结构,上部结构产生的地震水平力减小,基础结构的尺寸可以减小。

4)采用独立基础或独立+桩基础时,建筑物是点支承,对于水平力传递,在定量确定基础和隔震器的容许转动量以及桩的应力状态和容许剪力的基础上,可以采用无基础梁的结构方案。

5)隔震层下部的板面,考虑到阻尼器和设备管线的设置、施工时和竣工时的检查、隔震器和基础水平方向相对位移的约束等,一般采用钢筋混凝土板。

考虑上述因素,图 2-18 为基础的典型设计方案。

## 2.5 隔震构件的设计

### 2.5.1 水平变形时的强度和刚度

大震时隔震层的水平变形达数十厘米。此时由于在隔震构件周围产生附加应力,因此必须保证其连接部位和周边结构具有与之相适应的强度和刚度。

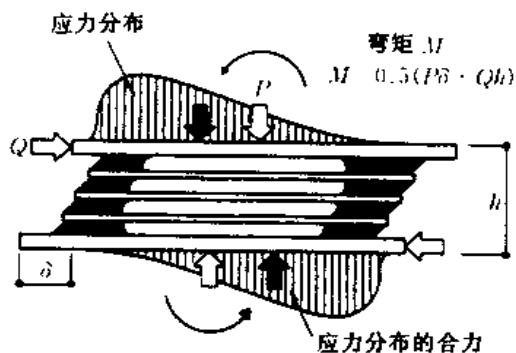


图 2-19 多层橡胶的受力机构和水平变形时的应力

#### (1) 隔震器(多层橡胶)周围

支承建筑物重量的多层橡胶周围,由于水平变形使应力分布的合力位置产生变化,引起偏心,上部结构和基础结构中相应产生弯矩  $M$ 。

在上部结构中,该弯矩多由多层橡胶上的梁(和柱)承受。上部结构最下层采用平板结构时,虽然可以使隔震层得到有效利用或降低隔震层的高度,但与梁结构相比,其抗弯强度和刚度较差,因此在建筑规模较大时,不能承受水平变形时产生的弯矩。

在一般基础结构中,设基础承受图 2-19 所示的应力分布。由于承受竖向力的基础和桩比

多层橡胶的面积大得多,因此基本上可以不考虑类似上部结构抵抗由于水平变形时产生合力位置移动引起的弯矩。

#### (2) 阻尼器周围

与隔震器独立设置阻尼器时,由于水平变形时的弯矩和剪力等在阻尼器周围产生附加应力,必须保证其连接部位和周边结构具有与之相适应的强度和刚度。地震时阻尼器周围产生的应力,取相应阻尼器的衰减力(数吨~数十吨)值确定。

### 2.5.2 多层橡胶周围的轴力传递

从迄今的工程实例来看,多层橡胶的长期面压在  $100\text{kg}/\text{cm}^2$  以下。如要进一步减小地震力和楼层加速度,多层橡胶将承受高轴力的作用,此时上下结构的轴力传递的计算就很重要。多层橡胶上下构件采用 RC 结构时,一般处于三向受压状态,应力传递没有问题。根据柱的实验,采用钢筋进行约束,比不约束时的强度提高 3~5 倍。当面压更大时,可以采用钢骨等强度较高的材料来传递轴力。

## 2.6 隔震层的构造

隔震构件设置在建筑物的哪一层,不仅是建筑方案、结构方案、设备方案,也是影响工期和造价的基本重要因素。本节从建筑和设备方案方面介绍隔震建筑的特殊构造。

### 2.6.1 建筑的构造

#### (1) 实际采用较多的基础隔震的楼梯、电梯坑、挡土墙和走道

- 1) 下到隔震层的楼梯应支承在隔震层上层的梁或下沉的墙壁上,与隔震层的下部隔开。
- 2) 隔震层的电梯坑壁连同底板应从隔震层上层主梁和次梁下沉,与隔震层的下部隔开。

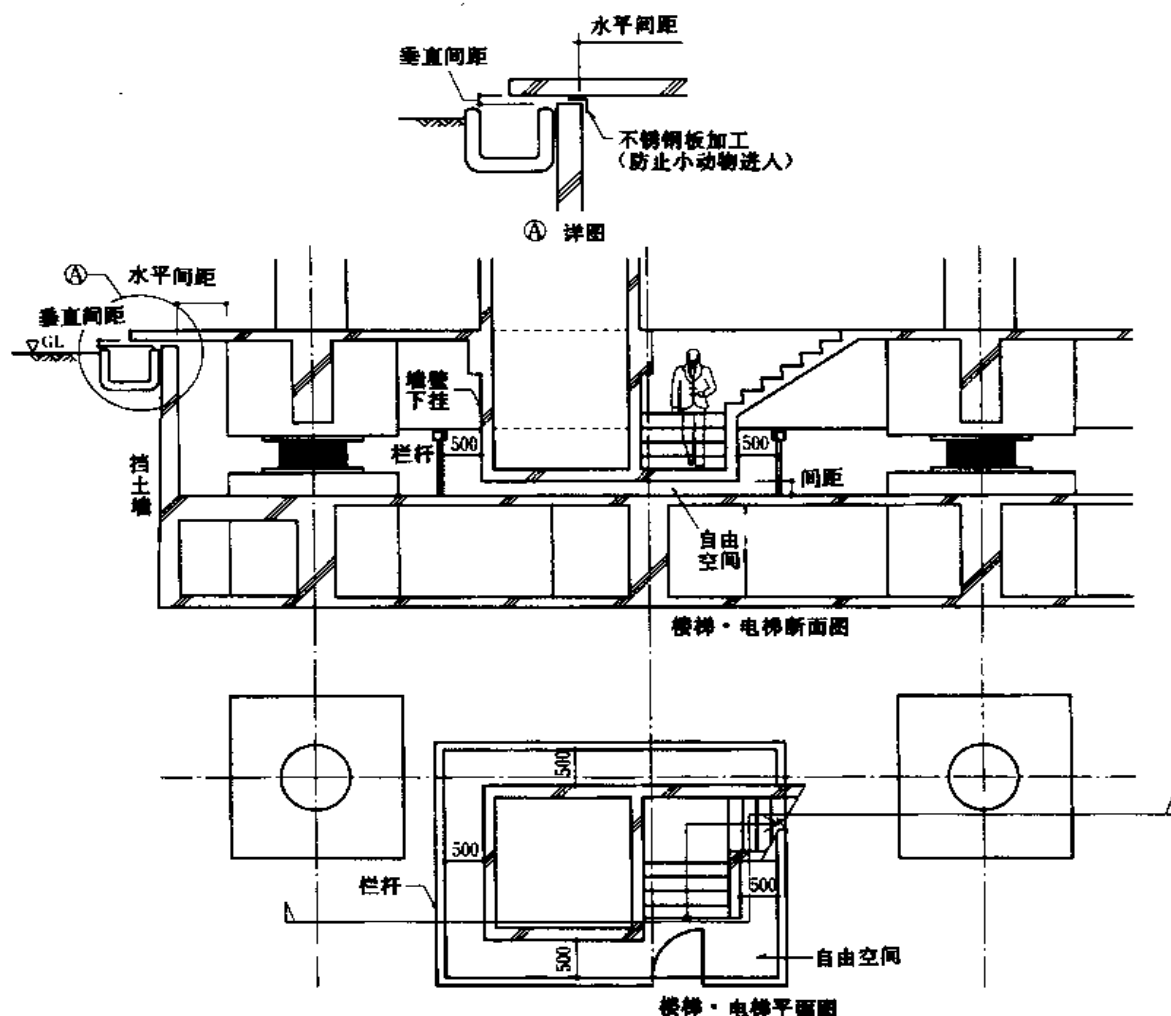


图 2-20 基础隔震时的楼梯、电梯坑、挡土墙和走道

3) 楼梯、电梯坑周围应有数十厘米的自由空间,其范围内应无妨碍基础、梁、管线等的水平位移的障碍物。

4) 隔震层周围的挡土墙和走道的构造应简单,有隔震层水平和竖向变形 1.5 倍的净空间距,空隙部分用铁板或网围起来,防止小动物进入。

(2) 中间层隔震时楼梯、电梯井、防火区等(图 2-21)

1) 由于楼梯、电梯井通过隔震层,都应采用混凝土井筒形式由上部结构下沉,四周应留有数十厘米的自由空间。

2) 隔震层可作为防火区。

(3) 隔震构件采用耐火材料包起来,可以利用隔震层作为停车场或仓库(图 2-22、图 2-23)





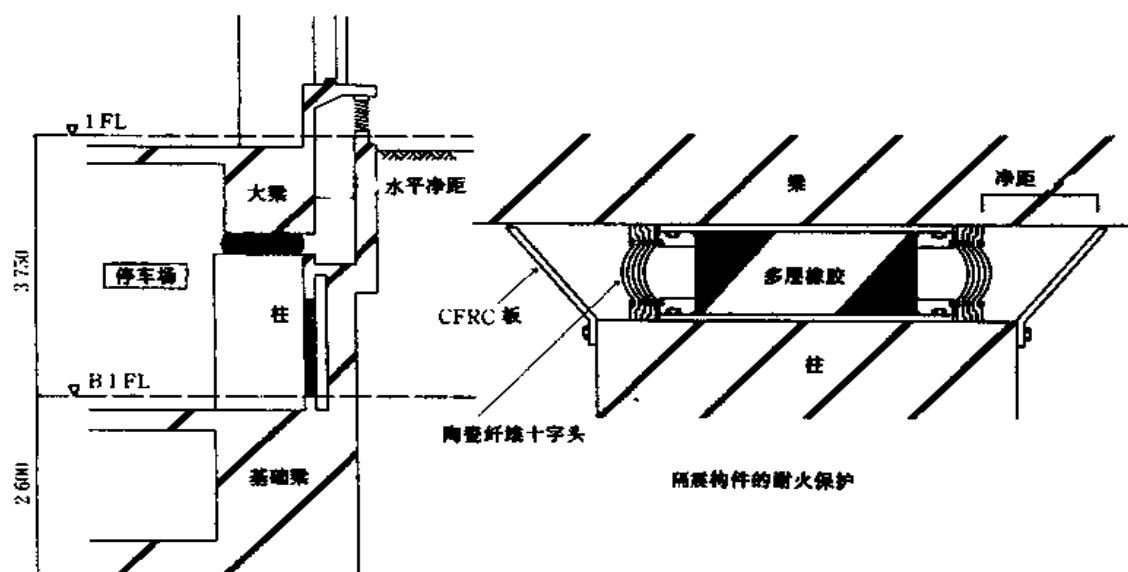


图 2-22 停车场利用的例子(东伸 24 大森大厦的构造)

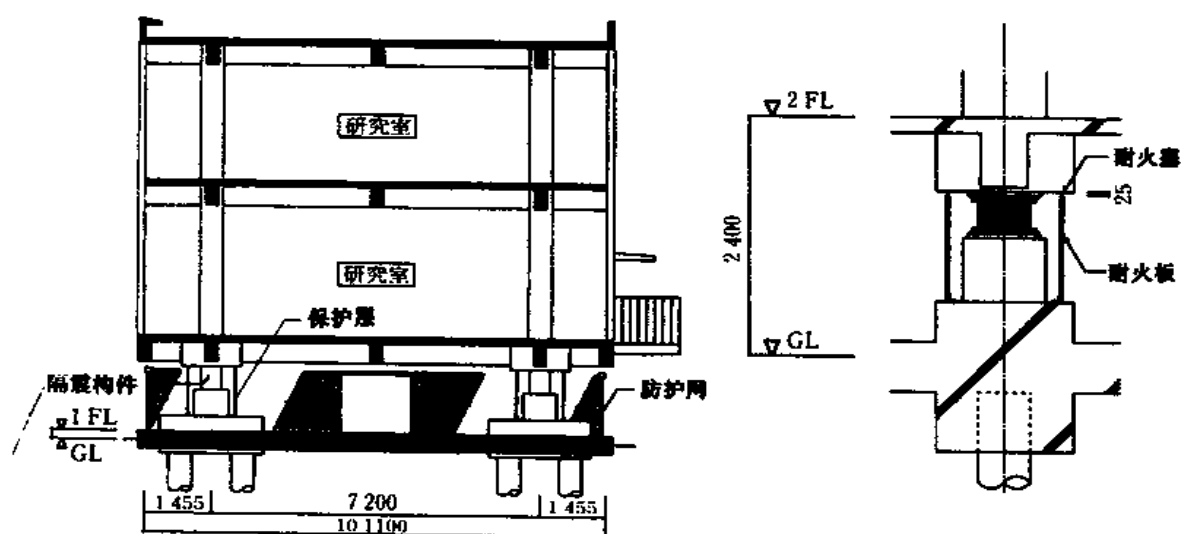


图 2-23 仓库利用的例子(福基特第 6 实验楼的构造)

### 2.6.2 设备的构造

给水管、暖气管、排水管、冷热水管等设备管线,以及电气线路和电话等通讯线路,分别安装在隔震层上部结构和隔震层下部结构,但必须相应随之产生较大变形,如图 2-24 和图 2-25 所示采用合适的材料做成柔性连接。对于雨水管等重要性较低的管线,可采用简单的构造处理。

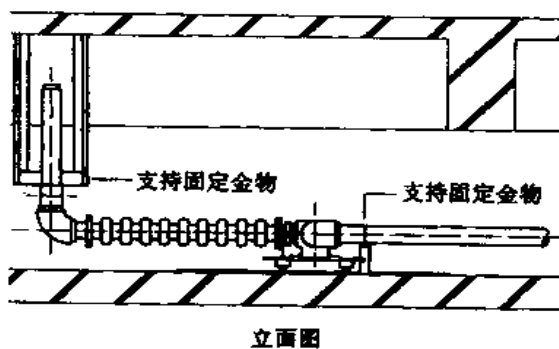
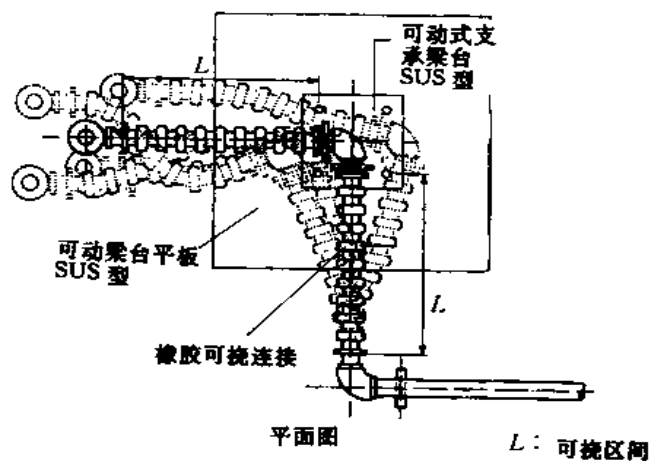


图 2-24 给水管、排水管、冷水管的可挠连接的构造

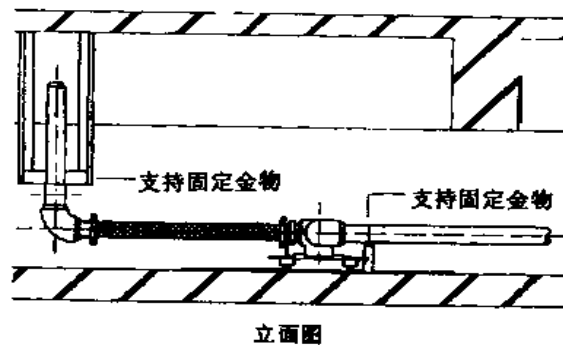
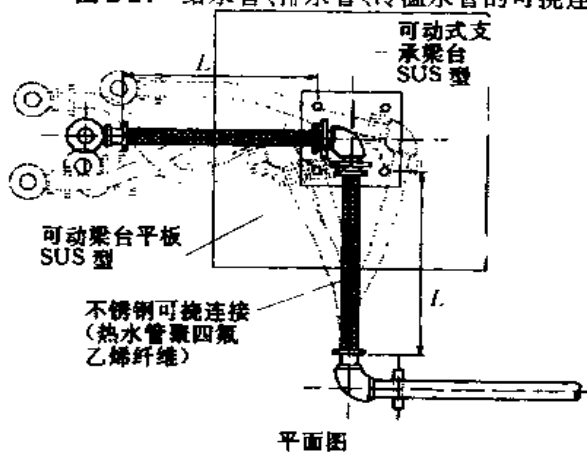


图 2-25 热水管、煤气管、蒸汽管、油管、消防管的可挠连接构造

在隔震建筑中,由于多层橡胶将上部结构与地基隔开,在隔震层也应设置避雷设施。

电气线路可以采用环状配线方式随隔震层产生位移,电话线等则可将塑料套管弯成弓状(图 2-26)。

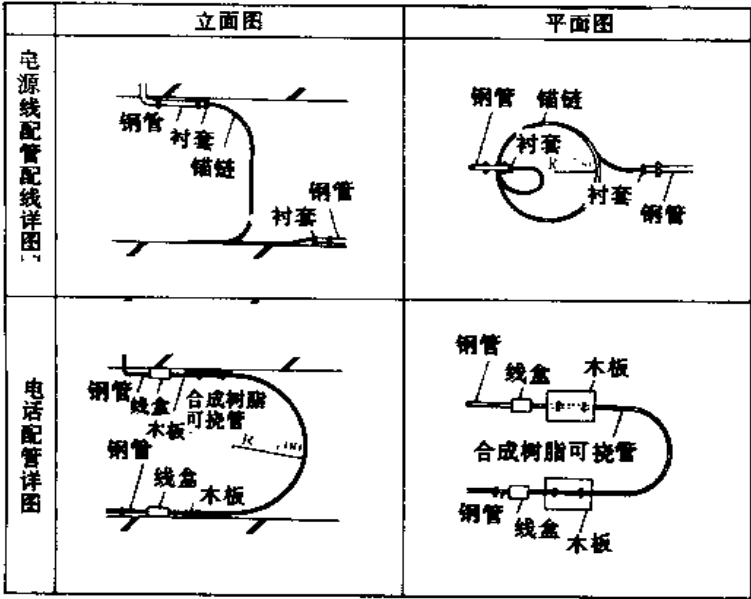


图 2-26 电气系统配线的构造

## 第3章 隔震结构的施工与维护管理

### 3.1 施工概要

#### 3.1.1 新建筑物

在隔震建筑中,由多层橡胶支承的上部结构和包含基础的下部结构被隔震构件分开,在确定施工方案时要充分考虑这一特征。因此,在设计阶段就应考虑隔震构件的安装顺序、施工计划和施工方案。

隔震构件的安装方法分为两大类:按一般施工顺序,在下部结构上设置隔震构件后再进行上部结构的施工,称为“隔震构件先安装法”;如果在多层橡胶位置及其周围先设置临时承台,待上部结构施工完成后,用多层橡胶取代承台,再安装其他隔震构件,称为“隔震构件后安装法”。但是,从已实施的工程来看,一般都采用隔震构件先安装法。以下为隔震构件先安装法施工的有关事项。

- ①隔震构件的施工管理方法
- ②隔震层的施工方法
- ③上部结构的施工方法
- ④施工管线的施工方法

#### 3.1.2 改建建筑

隔震结构不仅可以用于新建建筑,也可以用于已有建筑的抗震改建,这在国外已有很多应用实例。特别在美国,在保护文化价值很高的历史建筑的抗震改造中,都积极采用隔震结构。这是因为采用隔震结构使上部结构的地震力减小,因而对建筑本身改造很少,主要仅对基础部分进行改造。然而,在改建建筑施工中,一般要花费很多时间,因此要求详细制定施工方案。

在日本,已确定大阪市的中央大会堂(1918年建)采用隔震结构进行改建,以后会不断普及、推广。

### 3.2 隔震构件的施工管理

隔震建筑是对整个上部结构的设定自振周期和衰减,因此毫无疑问隔震构件的质量管理和施工管理十分重要。在施工管理中,安装时要防止损伤,保证精度。隔震结构的验收、安装(施工)以及完成时都要进行检查。各项检查项目如表 3-1 所示,隔震构件的施工管理流程见图 3-1。

如果必要,在建筑完成时,可以对建筑物的振动特性进行试验。该结果对以后的维护管理是有益的资料。振动试验可采用微动测定、激振器等强制振动试验、用油压千斤顶或作动器的加载试验、强制变形后释放的自由振动试验。

表 3-1 施工管理中的一般检查项目

检查类别	检 查 项 目
验收检查	<ul style="list-style-type: none"> <li>·质量确认(产品检查结果)</li> <li>·批号、数量</li> <li>·形状、尺寸</li> <li>·有无龟裂、损伤、氧化</li> </ul>
施工时检查	<p>(安装隔震构件下部底板时)</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>·锚固螺栓的位置、高度</li> <li>·底板的位置、高度、倾斜度</li> <li>·基底强度</li> <li>·底板表面状况</li> </ul> <p>(安装隔震构件时)</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>·隔震构件的位置、高度、倾斜度</li> <li>·安装螺栓的固定程度</li> <li>·有无外部损伤</li> <li>·铁件的防锈状况</li> </ul> <p>(安装隔震构件上部顶板时)</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>·锚固螺栓的位置、高度</li> <li>·顶板的位置、高度、倾斜度</li> <li>·顶板的表面状况</li> </ul>
完成时检查	<ul style="list-style-type: none"> <li>·隔震构件的高度和水平位移量</li> <li>(该项检查结果作为以后维护管理的初值)</li> <li>·安装螺栓的固定程度</li> <li>·有无外部损伤</li> <li>·铁件的防锈状况</li> <li>·建筑物周围有无妨碍物体</li> </ul>

### 3.3 隔震层的施工

隔震层的施工包括隔震构件下部基础的施工、隔震构件的安装和隔震构件上部基础的施工。其中特别重要的是多层橡胶下部基础的施工。多层橡胶下部基础的施工,一般埋入钢筋锚固刚架,在其上固定多层橡胶下部的底板,底板安装精度十分重要,但技术上并不困难。

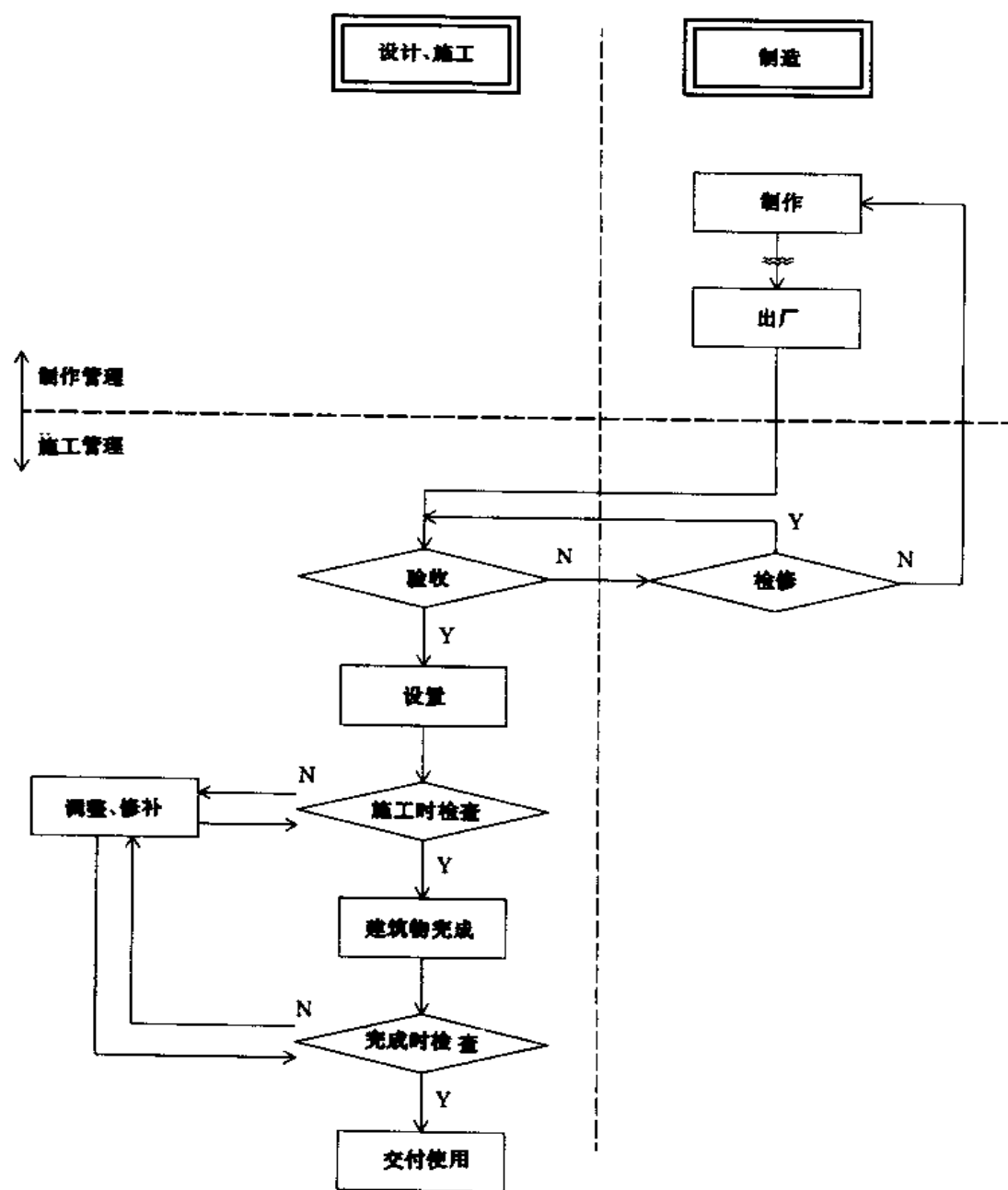


图 3-1 隔震构件的施工管理流程

其次与上部结构施工有关的是在施工中要采用约束构件防止隔震层的横向位移。隔震层的施工流程图实例见图 3-2, 施工情况见图 3-3 至图 3-10。

此外, 在已有建筑基础中插入隔震构件的隔震建筑的施工有其特殊之处。这种情况, 首先将上部结构顶起, 待隔震层和隔震构件周围的施工完成后, 再将上部结构放下。改建建筑隔震构件的设置实例见图 3-11。

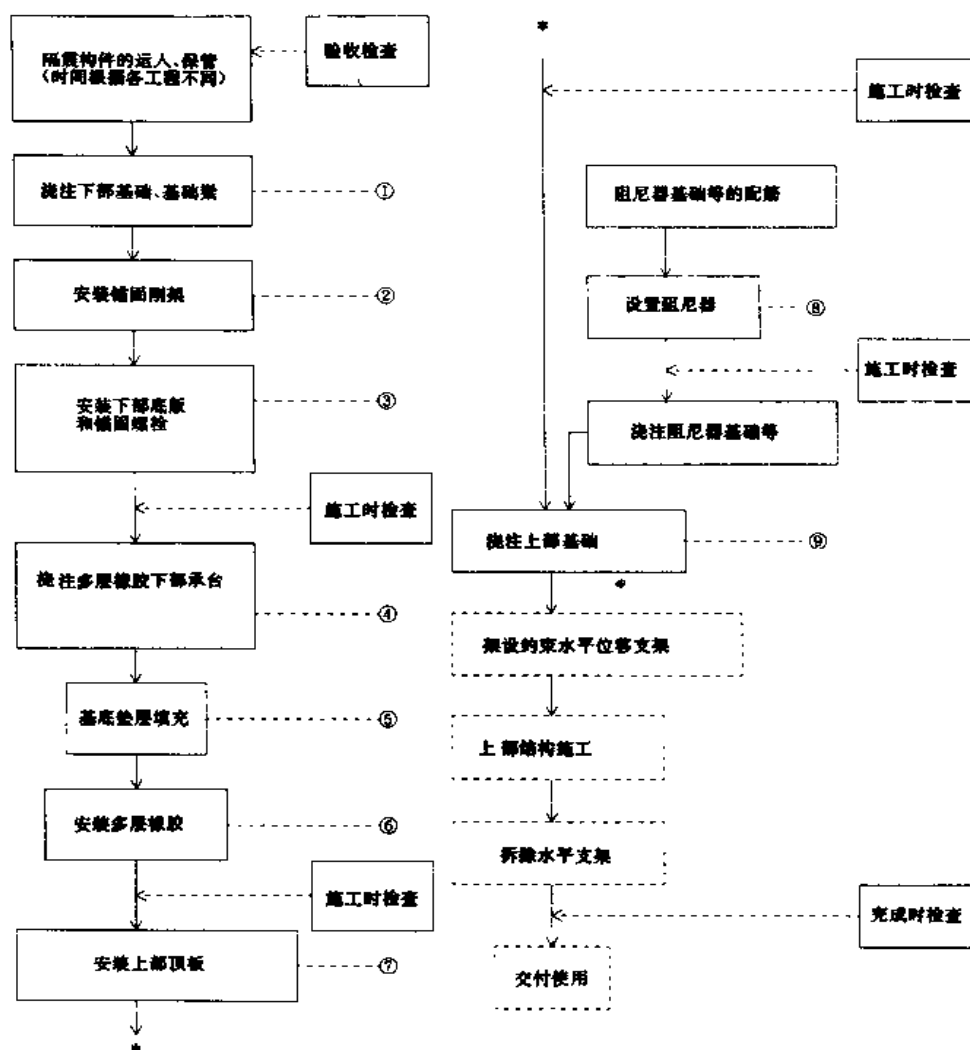


图 3-2 隔震层的施工流程图

图中的①~⑨与后面图中的号码对应

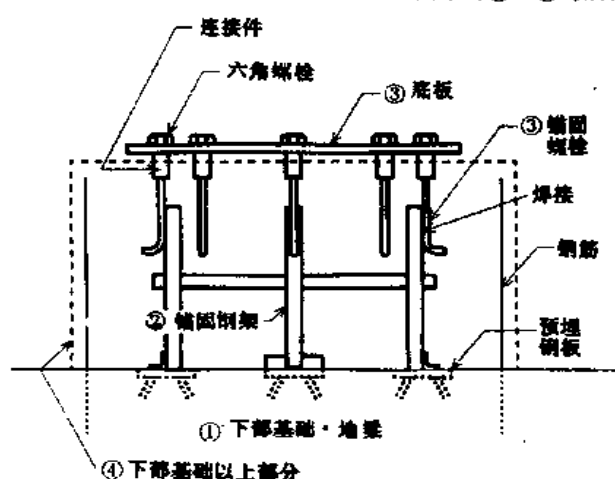


图 3-3 锚固钢架安装

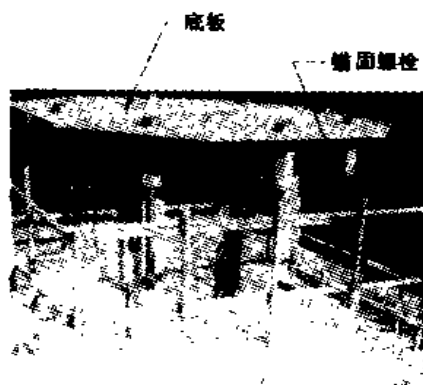


图 3-4 下部基础底板、锚固螺栓安装

(注)锚固螺栓保证底板的水平位置 and 高度垫层保证底板平整

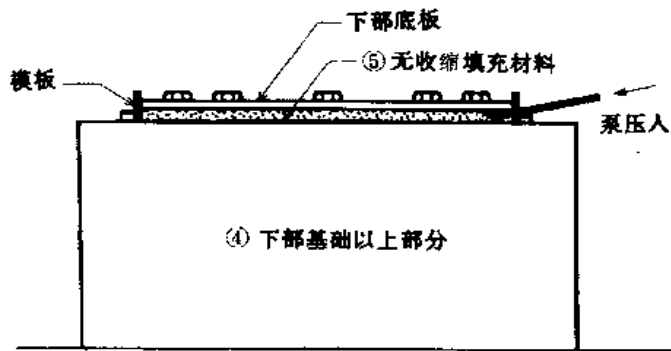


图 3-5 底板垫层填充

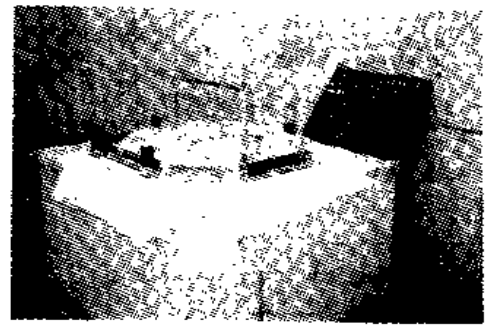


图 3-6 底板垫层填充

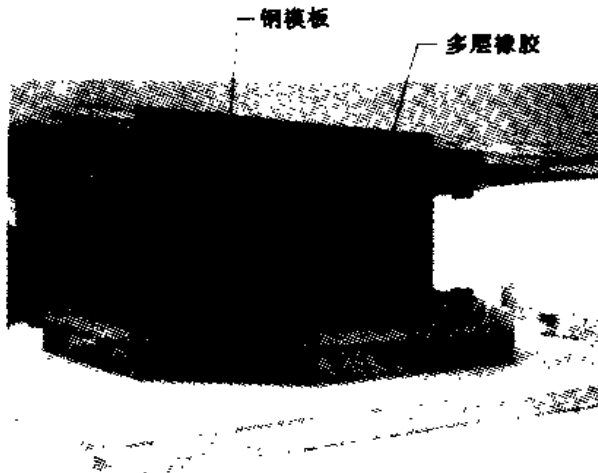


图 3-7 多层橡胶、上部顶板构造

(注)钢板兼作上部顶板,保证上部基础的平整和水平位置



图 3-8 阻尼器设置

(注)环形阻尼器见附录 4. 阻尼器产品目录中的 4



图 3-9 上部基础模板安装

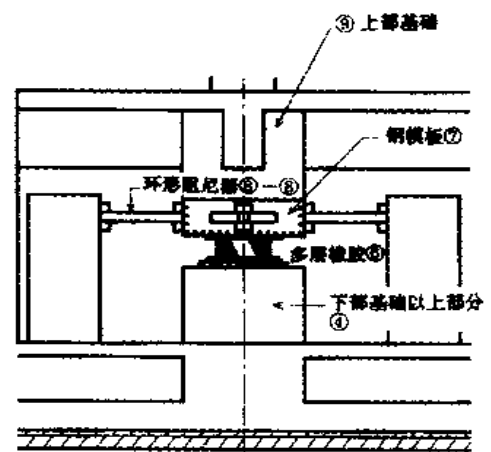


图 3-10 隔震构件设置完成时



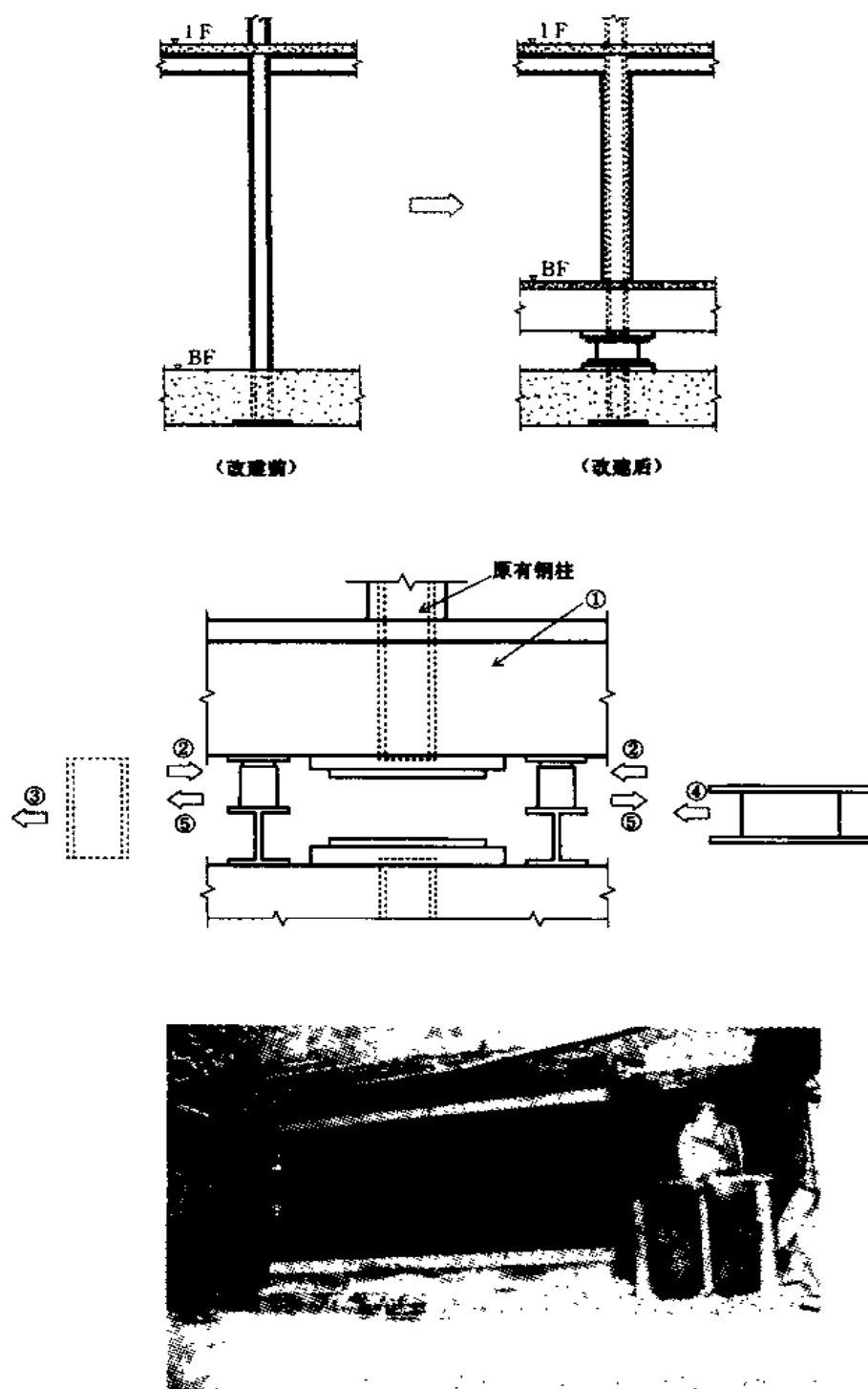


图 3-11 改建建筑中隔震构件的设置

改建建筑隔震构件设置方法实例

- ①原有钢柱和隔震构件上部结构用 RC 加固
- ②插入千斤顶承担建筑物的重量
- ③切断原有钢柱
- ④插入隔震构件
- ⑤落下千斤顶,由隔震构件承担建筑物重量

### 3.4 上部结构的施工

在上部结构的施工中,要考虑施工期间可能发生中小地震或强风以及施工荷载引起隔震层产生较大的相对水平位移,其他与一般建筑的施工没有太大的差别。

#### 3.4.1 施工方案

在上部结构施工中,隔震构件何时发挥作用,对施工方案有很大影响。

##### ①约束水平位移的情况

一般隔震构件下部基础部分完成后,安装隔震构件、进行上部结构的施工。此时,为约束隔震构件的水平位移,可设置临时支撑(图 3-12(a))或斜撑(图 3-12(b))。对于这种情况,上部结构的施工方案与一般建筑的施工相同。

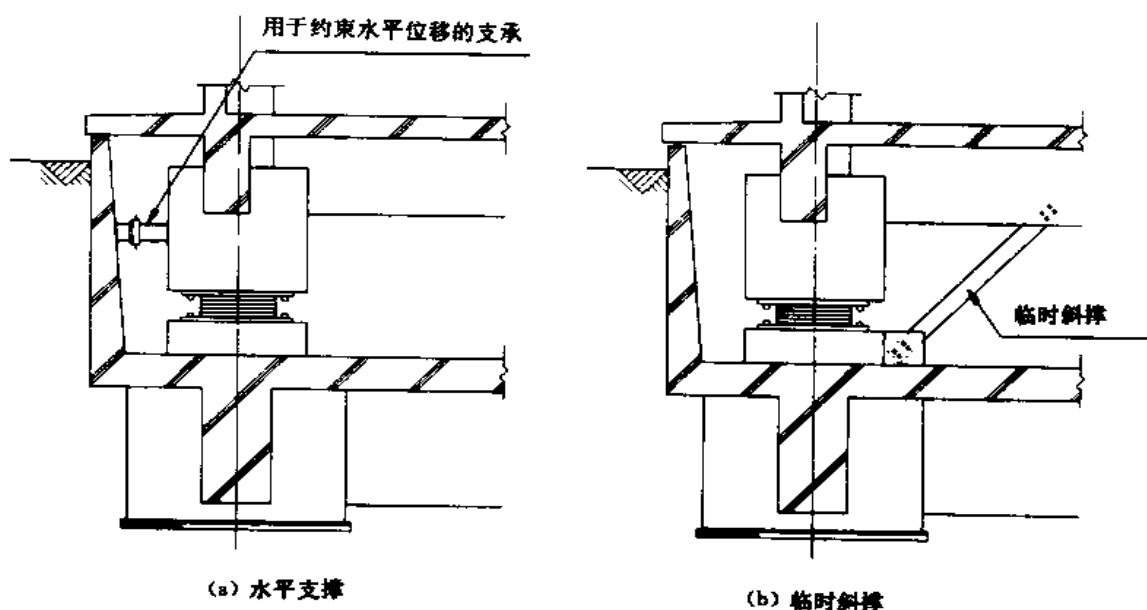


图 3-12 隔震构件水平位移的约束

##### ②不约束水平位移

在上部结构的施工中,由于上部结构尺寸减小,为简化施工,有时不约束隔震构件的水平位移较为有利。这种施工方法,不仅在设计时应进行验算,在施工方案上也应给予必要的考虑。

隔震层在一层以下时,外脚手架可以架设在一层沿廊上(图 3-13(a))。但是,在隔震层设置在中间层时,外脚手架不能支撑在上部结构上。

采用起重机时,可独立设立(图 3-13(b))。

#### 3.4.2 隔震结构施工的优点

由于采用隔震结构使上部结构地震力作用降低,截面尺寸减小,这给施工带来以下好处:

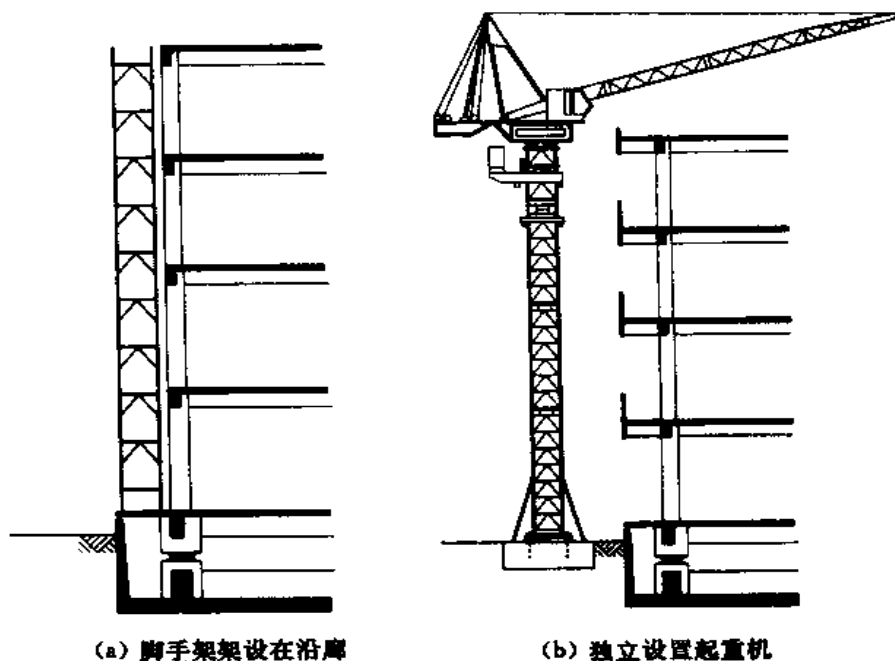


图 3-13 不约束隔震构件的水平位移

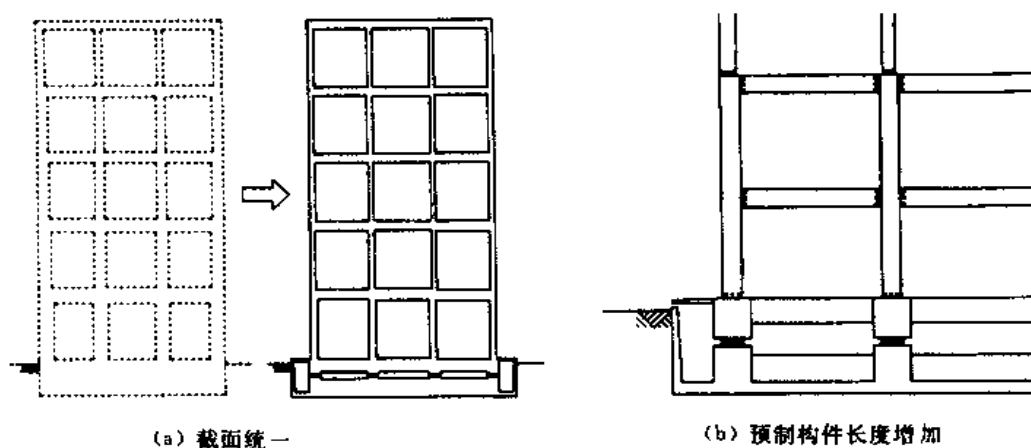


图 3-14 施工上的优点

- 1) 上部结构构件截面尺寸可以统一,使模板便于周转和装饰工程简化。
- 2) 在工业化施工中,可以增加预制构件长度,而重量增加较少,缩短施工周期,减少机械用时,降低造价。
- 3) 由于层间变形减小,幕墙等的固定较为简单。

### 3.5 设备管线的施工

隔震建筑设备管线的施工与通常建筑的不同之处,是通过隔震层的设备管线要采用

能随之产生较大相对水平位移的柔性连接。如在设备方案阶段仔细研究,柔性连接的施工在技术上没有特别的困难之处。主要有以下项目需要考虑。

- 1) 确定最大变形量
- 2) 柔性连接的构造
- 3) 设备管线的布置(保证净空间距)
- 4) 与设备有关配件的入口(保证替换时的进出)

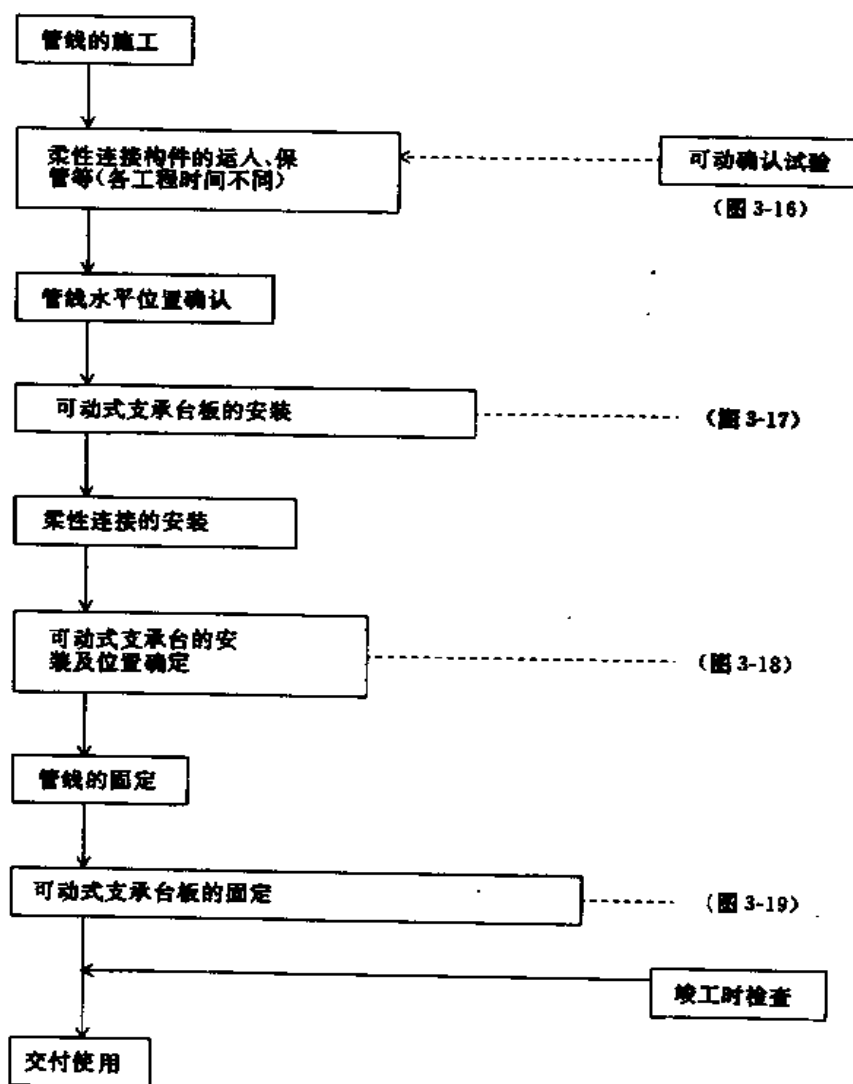


图 3-15 设备管线采用柔性连接施工流程图

### 3.6 工 期

隔震建筑的施工工期与一般建筑相比有很大差别,主要有以下原因:

- 1) 隔震构件的设置
- 2) 隔震层上下楼板的施工



图 3-16 柔性连接试验

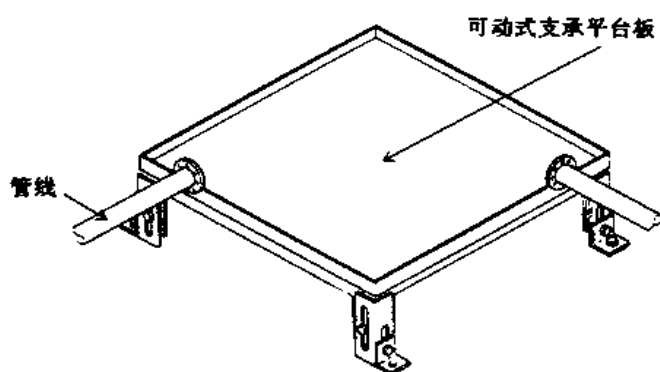


图 3-17 可动式支承架平台板临时固定

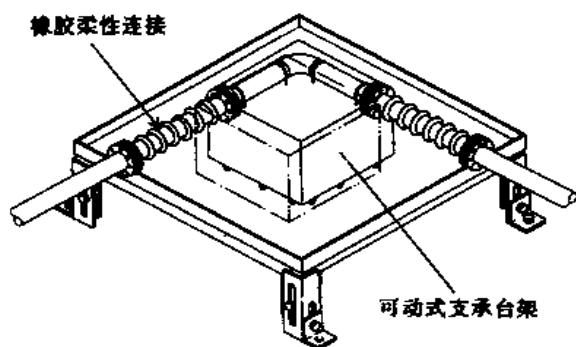


图 3-18 安装可动式支承架和位置

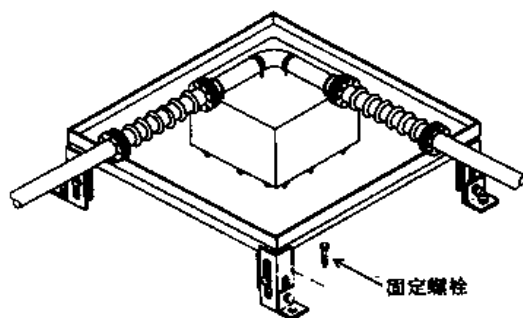


图 3-19 可动式支承架平台板的固定  
(注)可动式支承架平台板的位置  
调整后再固定

### 3) 隔震层空间的施工。

一般来说,隔震建筑需要有设置隔震构件的空间(隔震层空间),基础底面深度比一般建筑深,开挖和护坡工程施工时间增加。隔震构件的安装工期,根据建筑规模、隔震构件的位置和种类等的差异,为 0.1~1 个月,相当于整个工期的 0.5~5%。与一般建筑的整

个工期相比,上述 1)~3)的施工增加工期约 0.5~2 个月。实际隔震建筑(6 层 RC 结构,公共住宅,桩基础,多层橡胶+弹塑性阻尼器)的隔震构件安装工程进度表实例如图 3-20 所示。

虽然上述隔震构件安装(1)~3))使工期增加,但如果考虑将 S 结构或 SRC 结构改为 RC 结构、截面尺寸的统一、次要构件安装改造的简化等隔震结构所带来结构方案和施工方案上的优点,隔震建筑可以与一般建筑的工期相同或缩短。

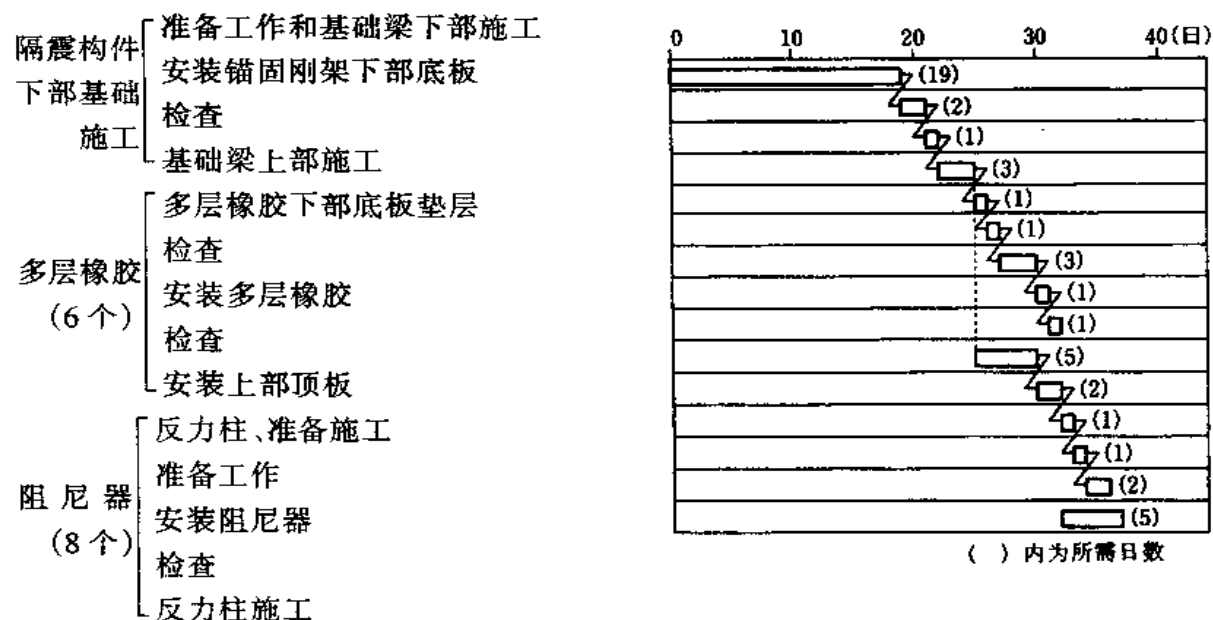


图 3-20 隔震构件设置工程进度表实例

### 3.7 维护管理

虽然任何一座建筑都需要维护管理,但对隔震建筑应特别重视。与一般建筑相比,隔震建筑有以下不同之处。

1)大震时隔震层产生较大的相对水平位移。

2)建筑物由隔震构件(多层橡胶、阻尼器)支承,隔震构件要产生很大的变形,并应保证其性能(恢复力、衰减)的发挥。

因此,隔震层及其建筑物周围,如果存在妨碍变形的物体、或对隔震构件产生损伤影响其承载力、或超过预期的老化,这些都将使隔震性能不能充分发挥,安全性降低。

此外,如果在隔震层的设备管线等的相应变形能力不够,会产生断裂、漏水等。

要对这些问题预先防范,维护管理就起到尤为重要的作用。

虽然一般认为隔震建筑的维护管理较为复杂、麻烦,但是如考虑到使隔震性能的发挥,也不是一件十分困难和花费很大的工作。

隔震建筑的维护管理的基本事项如下。

(1)目的

由于维护管理关系到将来隔震功能的发挥和建筑物的安全,因此,首先要保证当初的

设计思想和设计条件,其次要保证灾害发生后能发挥正常的功能。

(2)检查种类和时间

检查的目的和时间按以下分类:

- 1)竣工时检查——作为 b~d 检查时必要检测项目的初期值,在建筑物竣工时进行。
- 2)经常性检查——对建筑物的状况和隔震构件进行经常的巡视,及时发现异常,防止危险,每年 2 次。
- 3)定期检查——对经常性检查不能确认的隔震功能的异常情况和有关耐久性的性能由专门技术人员进行检查。竣工后第 1、3、5、10 年,以后约每 10 年进行一次。对预留的试件,在竣工每 10 年进行的定期性能试验。
- 4)临时检查——在大地震或火灾、浸水等灾害后立即检查隔震构件有无受到影响,检查人员和检查内容与定期检查相同。此外,在经常性检查时如发现异常也要进行。

(3)检查对象和项目

检查的对象和部位主要有以下三个。

- 1)隔震构件
- 2)隔震层和建筑物外周
- 3)设备管线及其柔性连接部位

管理内容要符合各项必要性能。隔震构件不仅能承担建筑物的重量,而且在地震时能实现减小地震动对建筑物输入的性能。隔震层及其建筑物外周,以及设备管线及其柔性连接部位,应具有在地震时随建筑物与地基间产生较大的相对变形的性能。

表 3-2 是维护管理项目、表 3-3 是具体的检查项目实例。

表 3-2 维护管理项目

部 位	必要性能	管理项目	管理方法
隔震构件	能安全承受建筑物	有无损伤 徐变 变形	外观检查 竖向变形测量 水平变形测量
	隔震性能	刚度 变形能力 衰减能力	外观检查
隔震层 建筑物外周	建筑物无水平位 移障碍	净空间距 有无障碍物	净空间距测量 障碍物目测检查
设备管线 柔性连接部位	随同变形能力	形状 有无损伤	目测检查 漏水等检查

(4)维护管理体制

(1)维护管理业务和实施人员

- 经常检查——原则上由建筑物所有者委托的建筑维护管理人员进行。
- 定期检查——原则上由隔震建筑及其维护管理专业技术人员进行。
- 临时检查——原则上由隔震建筑及其维护管理专业技术人员进行。

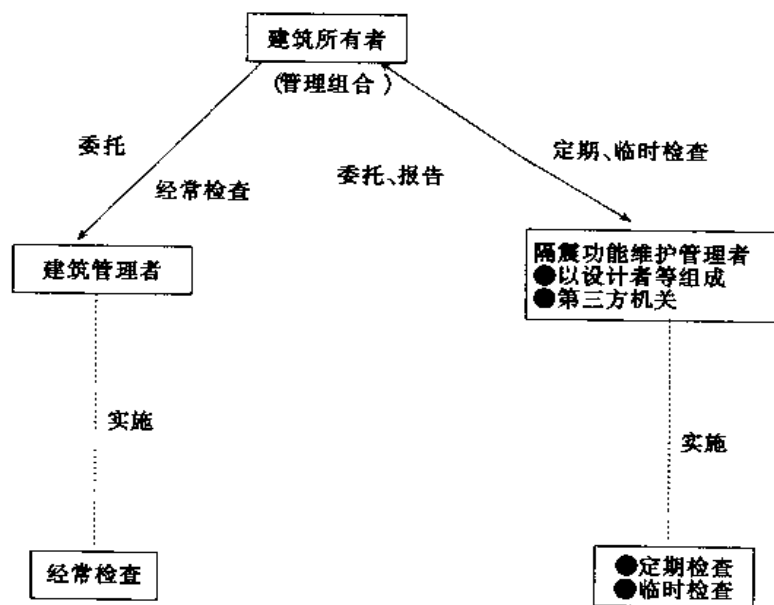
表 3-3 检查项目实例(经常性检查)

位 置	检查项目	检查方法	位 置	管理目标	报告 <sup>1)</sup>
隔震层、建筑物外周	周边环境	确保净空间距	外周隔震层	无障碍物	整顿、去除、报告(附实况照片)
	隔件震管构造线	障碍物	隔震层	无障碍物	
		可燃物		无可燃物	
		排水状况		排水状况良好	
隔震构件	多层橡胶	橡胶保护层外观	隔震层指定部位 <sup>2)</sup>	无异常、无异物	报告(附实况照片)
		损伤		无损伤	
		生锈		无浮锈、锈迹	
		安装部位		螺栓、铆钉无松动	
	阻尼器	阻尼器	隔震层指定部位 <sup>2)</sup>	形状无异常,无损伤	
		生锈		无浮锈、锈迹	
设备管部线路位	设备管部线路位	液体渗漏	隔震层	无异常	报告(附实况照片)
	设备管部线路位	增加,更换		不增加,更换	
	设备管部线路位	增加,更换		不增加,更换	
	设备管部线路位	增加,更换		不增加,更换	

1) 报告(附实况照片)中应包括不符合管理目标的情况。

2) 指定部位是指构件总数 10% 且 6 个以上,其中一半在隔震层的有代表性的部位,一半在靠近热源、水源、排水设备、振动源附近,竣工时由建筑物管理人员和维护管理机构商议确定。

## (2) 维护管理体制——基本按图 3-21 的体制实施



- 1) 由设计、施工、制造等组成  
2) 日本隔震结构协会等

图 3-21 维护管理体制

建筑所有者——建筑所有者从设计人员接受维护管理方案,委托维护管理机构进行维护管理业务。在接到维护管理机构的检查报告时,应进行必要的改善。



建筑管理人员——建筑管理人员承担经常性检查,并将结果向隔震功能维护管理人员报告。

隔震功能维护管理人员——由具有隔震结构知识的人员组成,进行定期检查和临时检查,审核经常性检查的结果,将检查结果向建筑所有者报告,并提出相应的改进措施和方案。

## 第4章 隔震器

### 4.1 隔震器概要

隔震器是指将建筑物与地基隔离的装置和机构。地震时将建筑物完全隔离,使建筑物浮在空中,目前的技术水平还不可能。所以,隔震器必须具有能承受建筑物重量的强度和刚度,而在水平方向则具有充分的柔度。隔震器的水平刚度越小,就越接近完全隔离(绝对隔震),使地震输入减小、反应加速度也非常小。另一方面,水平刚度越柔,地基与建筑物的相对位移增加就越显著。因此,反应加速度与隔震层位移的关系是相反的。但是,如果具有合适的衰减性能(阻尼器的特性),则既可以减小反应加速度,而且也可以使相对位移控制在适当的范围内。所以,对于隔震器要求具有承受荷载的能力、大变形性能和地震后能恢复原来位置的恢复性能等,在设计中定量把握恢复力特性是十分重要的。此外,经济性、施工性、耐久性等也是重要的性能。



图 4-1 多层橡胶隔震器的形状

多层橡胶可以满足上述工程上所要求隔震器的性能,且经济上也是可行的。图 4-1 所示为多层橡胶隔震器,它是由薄橡胶片与钢板交错叠放数层而成。多层橡胶的竖向刚度,通常与一根柱子的刚度相当。例如,多层橡胶的直径 70cm,总厚为 14cm(0.7 × 20 层),柱子的截面为 70 × 70cm,长度为 400cm 的 RC 柱。按 4-4 节的计算公式,多层橡胶的竖向刚度约为 2140t/cm,RC 柱的刚度约为 2500t/cm<sup>①</sup>,可见多层橡胶的受压刚度与 RC 柱基本相同。多层橡胶的水平方向的性能充分发挥了橡胶的特性,具有非常小的水平刚度和很大的变形能力。目前

已实现水平刚度小于竖向刚度的 1/1000。以前面的例子来比较多层橡胶和 RC 柱的水平变形能力。直径 70cm 的多层橡胶的水平变形能力为 40cm 左右,而 RC 柱的层间变形角如果为 1/200,则水平变形量约为 2cm。因此多层橡胶的水平变形能力相当于 20 层柱子的水平变形量的总和。

由以上分析可知,多层橡胶可以与柱或梁相同作为结构构件,但是应该认识到它通常具有相当于一根柱子的竖向刚度,而变形能力与建筑物的层间变形总和相当,这一点是很重要的。多层橡胶是由橡胶制成的,它是建筑结构的新材料,设计人员应该象对混凝土和钢材一样,充分掌握有关它的知识。

① 橡胶的材料常数取,  $G = 4\text{kg/cm}^2$ ,  $E_b = 20\text{t/cm}^2$ ,  $k = 0.85$ , 混凝土的弹性模量取  $210\text{t/cm}^2$ 。——原注

## 4.2 多层橡胶隔震器的构造

### 4.2.1 多层橡胶隔震器的基本构造

多层橡胶隔震器的基本构造如图 4-2 所示,由薄橡胶片与钢板相互交错叠置数层,上下有翼缘。平面形状多采用圆形,因为圆形与方向无关。

多层橡胶中心为空心孔。从多层橡胶的承载机构(应力分布状态)来考虑,最好没有该中心孔,但在多层橡胶制造时的加硫过程中,为使从外部加热时热分布均匀,保证产品质量,设置该中心孔是必要的。特别在多层橡胶的尺寸较大时,仅从外部加热,热的传递很不充分。为使多层橡胶适应气候变化,在多层橡胶外部设置保护层,该保护层是采用耐候性好的材料制作。

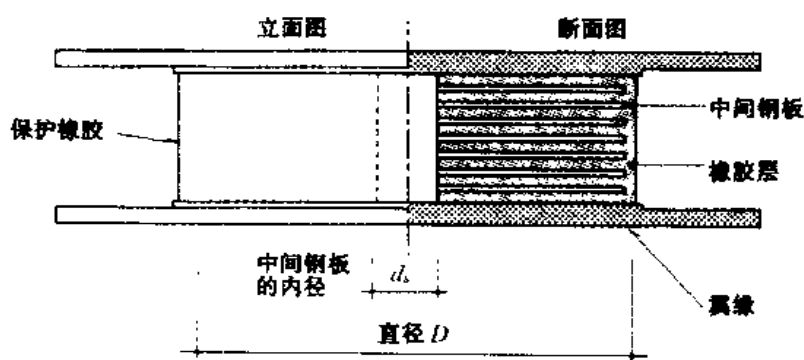


图 4-2 多层橡胶隔震器的基本构造

确定多层橡胶形状的主要参数有直径  $D$ 、每层橡胶厚度  $t_r$  和橡胶层数。由这些参数可以求得 1 次形状系数和 2 次形状系数。1 次形状系数  $S_1$  为 1 层橡胶的约束面积与自由表面积(侧面积)的之比,2 次形状系数  $S_2$  为多层橡胶直径与橡胶各层总厚度之比。 $S_1$  和  $S_2$  按式(4-1)计算。

$$S_1 = \frac{\frac{\pi}{4}(D^2 - d_s^2)}{\pi(D + d_s)t_r} = \frac{D - d_s}{4t_r}, S_2 = \frac{D}{nt_r} \quad (4-1)$$

$S_1$  主要是与竖向刚度和转动刚度有关的参数。 $S_1$  越大,相对直径来说橡胶片的厚度越薄,竖向刚度和弯曲刚度越大。 $S_2$  是与承载能力和水平刚度有关的参数。 $S_2$  越大,多层橡胶越扁平,越不容易压屈。

### 4.2.2 橡胶材料的特征

橡胶是高分子化合物,由细长链状的大分子弯曲成螺旋形状。虽然橡胶是固体,但它与其它固体不同之处在于橡胶具有类似“液体”的性质。由于橡胶是由很长的分子链卷曲盘旋缠绕成复杂的结构,因此分子整体不产生移动或转动,所以不会象液体那样流动,但是各个分子链由于热运动在结合点间分子产生转动,也就是微观布朗运动。该布朗运动

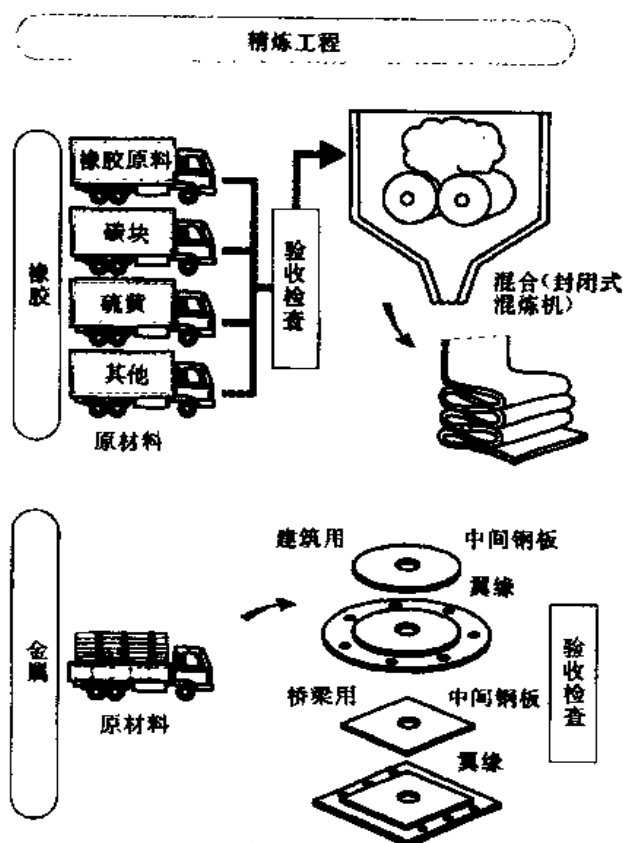
可以表示为液体分子的自由分子运动。这种长分子链集合体在静止时,最自然的形状是线球状(熵较大状态)。将橡胶分子链两端拉伸时(熵较小状态),由于分子链的微观布朗运动,产生恢复原来球状的弹性力。所以,橡胶的弹性是由于分子的热运动引起的。总之,是由熵较小状态恢复到熵较大状态产生的力。橡胶的这种弹性称为熵弹性。

具有金属晶格结构材料的弹性,是由于内部能量引起的,即称为能量弹性。橡胶材料在极低温度下,分子运动不活跃,就产生能量弹性。但是,产生这种变形的温度,对于天然橡胶来说在 $-50^{\circ}\sim -60^{\circ}\text{C}$ 以下,所以在通常使用温度下,橡胶可以发挥很大的变形能力。

普通橡胶产品都使用加硫橡胶。加硫橡胶的性质,随加硫剂的种类和加硫的条件变化很大。加碳墨可以使橡胶的强度大大增加。因此,加硫橡胶是橡胶原料、填充剂、加硫剂等组成的复杂的复合材料,既保持橡胶原有的特性,强度又很大。

在橡胶的制作工程中,加硫工程最重要。加硫工程就是在橡胶原料中混合碳墨等增强剂和硫磺,再加压、加热。经过这一工程,通过化学反应在橡胶分子链间形成硫磺连接的永久桥梁(架桥反应),这样橡胶产品就可以发挥橡胶的弹性。

橡胶材料的特征是弹性低、变形能力大。应力-应变关系为反S形非线性。橡胶材料的物理性能有弹性模量 $E$ 、剪切模量 $G$ 、破坏延伸率等。弹性模量就是当延伸率为100%时的模量。橡胶为非压缩性材料(体积变化很小),泊松比约为0.5。橡胶材料的常数的计算和试验方法,根据K6386《防振橡胶的橡胶材料》和K6301《加硫橡胶的物理试验方法》的规定采用。



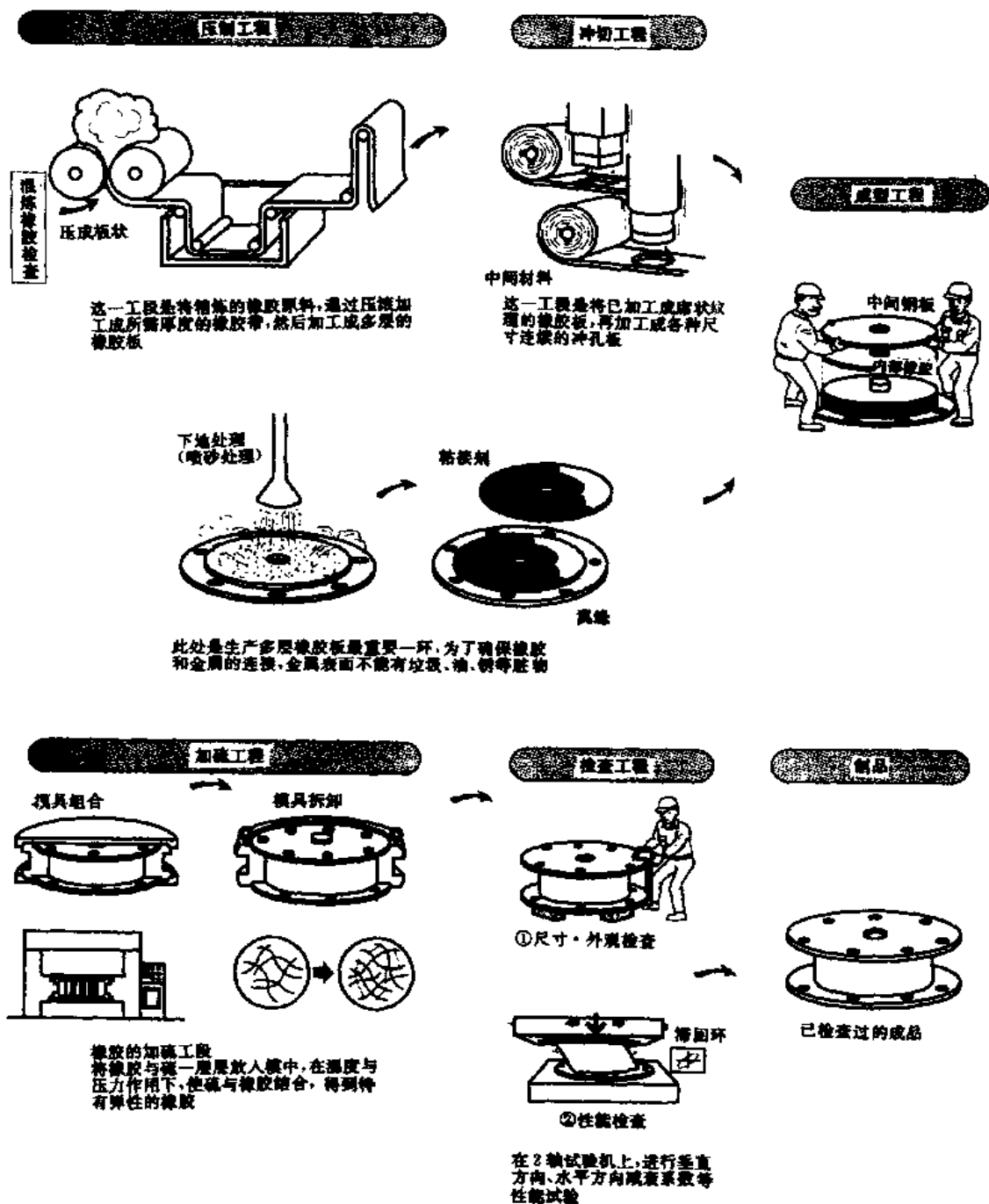


图 4-3 多层橡胶的制作工程

#### 4.2.3 多层橡胶隔震器的制造与质量管理

图 4-3 为多层橡胶制作工程概况的示意。橡胶材料与填充材料配合后,经过拌合,压制所需的厚度。然后,冲切成所需的直径,成为橡胶片。另一方面,将钢板表面处理,

涂上粘结剂。将这些橡胶片和钢板交错放入模具(金属制)内,加压加热、加硫后制成。制造过程中,制作人员的质量管理能力很重要。在制作中需要特别注意的事项有:

- 1) 橡胶材料的原料和配合
- 2) 橡胶片和钢板的厚度
- 3) 钢板的表面的处理和粘结剂的处理
- 4) 加硫条件(温度和时间)

有关隔震构件质量管理的流程的例子如图 4-4 所示。制作管理和工厂制造时的质量管理,由设计人员和制造者分别实施。设计人员应给出隔震构件的制作方法、审查制作者编写制造要领说明书、验收和产品确认。另一方面,制作者应按制作方法编写制造要领说明书,并按此产生隔震构件,检查产品质量和提供检查报告。

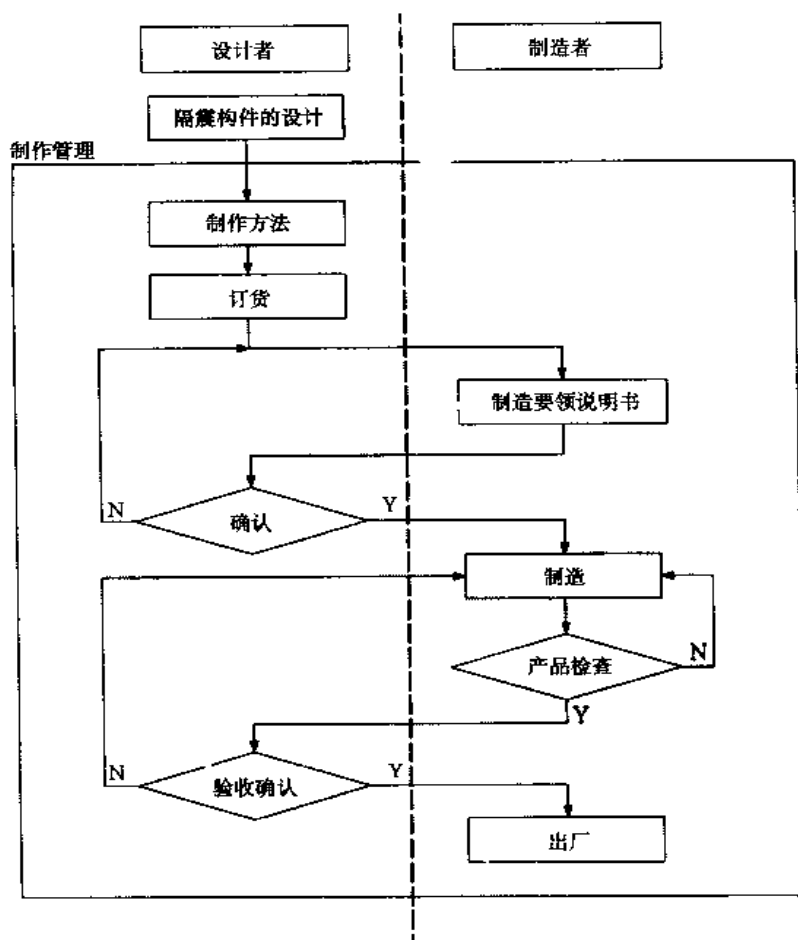


图 4-4 质量管理流程实例

通常,产品检查包括:检查是否符合制作说明书中规定的质量要求,原材料的材性试验,隔震构件的尺寸精度,以及进行性能检查(试验)。

## 4.3 多层橡胶隔震器的性能

### 4.3.1 多层橡胶隔震器的受荷机构

图 4-5 为多层橡胶的结构特征,比较了采用中间钢板加强和无加强的多层橡胶的压缩特性和剪切特性。图 4-6 为多层橡胶<sup>①</sup>  $500 \times 7-14$ <sup>②</sup> 的三维有限元分析得到的剪应变为 300% 时的主压应力分布<sup>[1]</sup>。根据这一分析结果,表示多层橡胶的应力分布和其内部压力状态的受荷机构示意图如图 4-7 所示。

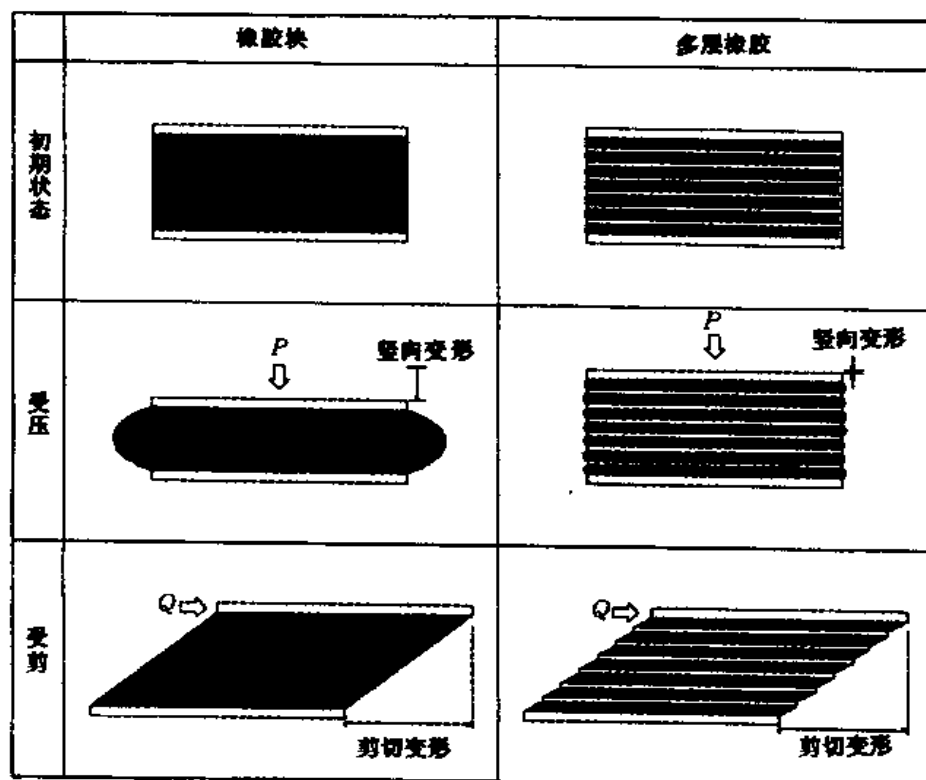


图 4-5 多层橡胶的特征

多层橡胶压缩时,橡胶片沿径向(外侧)变形。但是,由于受到中间钢板的约束,橡胶片变形很小。此时,中间压应力最大,成抛物线分布。由于中间钢板的约束作用和橡胶材料的特性(泊松比约为 0.5),橡胶中心部位为 3 轴受压状态(静水压)。因此多层橡胶受压时的弹性模量比橡胶本身的弹性模量大得多。

多层橡胶受水平力时,由于中间钢板不能约束剪切变形,其剪切变形即为橡胶本身的剪切变形,表明其水平刚度很小。剪切变形很大时,应力分布的合力向端部(外侧)移动,

① 此处原文为用天然橡胶制作的多层橡胶,本书以下多层橡胶多采用天然橡胶制作,为避免名词过长,译为多层橡胶。——译者注

② 多层橡胶的形状用  $D \times t_r - n$  表示( $D$ :直径。 $t_r$ :1 层橡胶的厚度, $n$ :橡胶的层数,单位:mm)。——原注

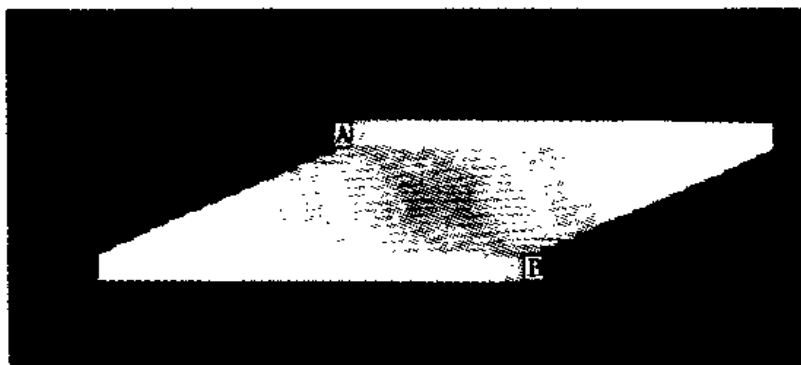


图 4-6 三维有限元分析的主应力分布  
(应力集中于 AB 对角线上)

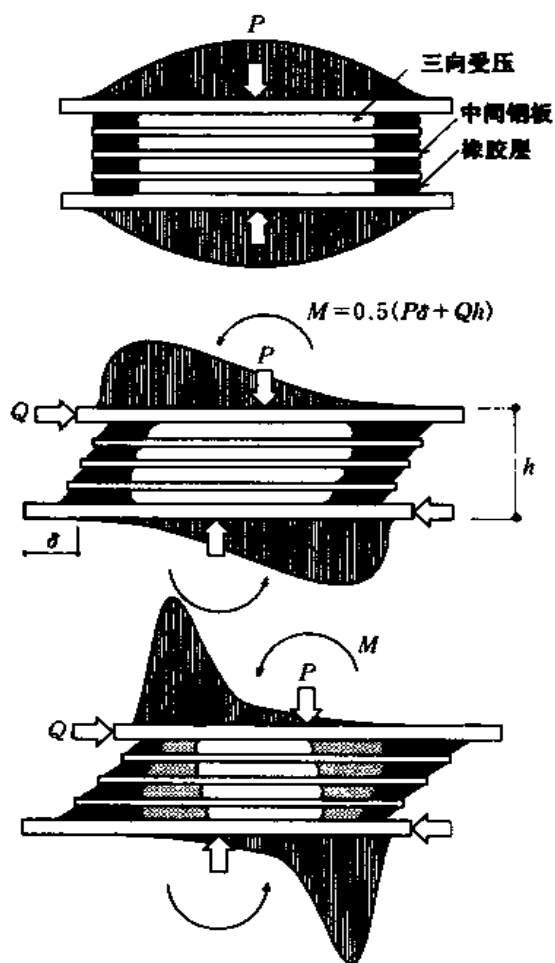


图 4-7 多层橡胶的受荷机构示意

另一侧产生很小的拉力。变形很大时,多层橡胶的中心部位仍处于 3 轴受压状态,可以保持承载能力,竖向压缩变形量也非常小。所以,多层橡胶的中心部位是承载能力的重要部位。



### 4.3.2 压缩性能

多层橡胶的最重要的基本性能是长期承载能力。如果总厚度相同,则每层橡胶厚度越薄,层数越多(1次形状系数越大),竖向刚度就越大,荷载-应变关系就越接近线性关系。反之,每层橡胶越厚,即1次形状系数越小,竖向刚度越小,可以对竖向的振动起到放振作用。

图4-8为面压达到 $300\text{kg}/\text{cm}^2$ 压缩试验的加载曲线。试件的1次形状系数不同,分别为 $500 \times 7-14$  ( $S_1=18$ )和 $500 \times 3.75-26$  ( $S_1=33$ )。在3种剪切变形下,分别进行了加压试验。1次形状系数小的试件,剪切变形越大,其非线性越显著;而 $S_1$ 较大时,剪切变形的影响越小。但无论有无剪切变形,两试件均发挥了较高的承载能力。

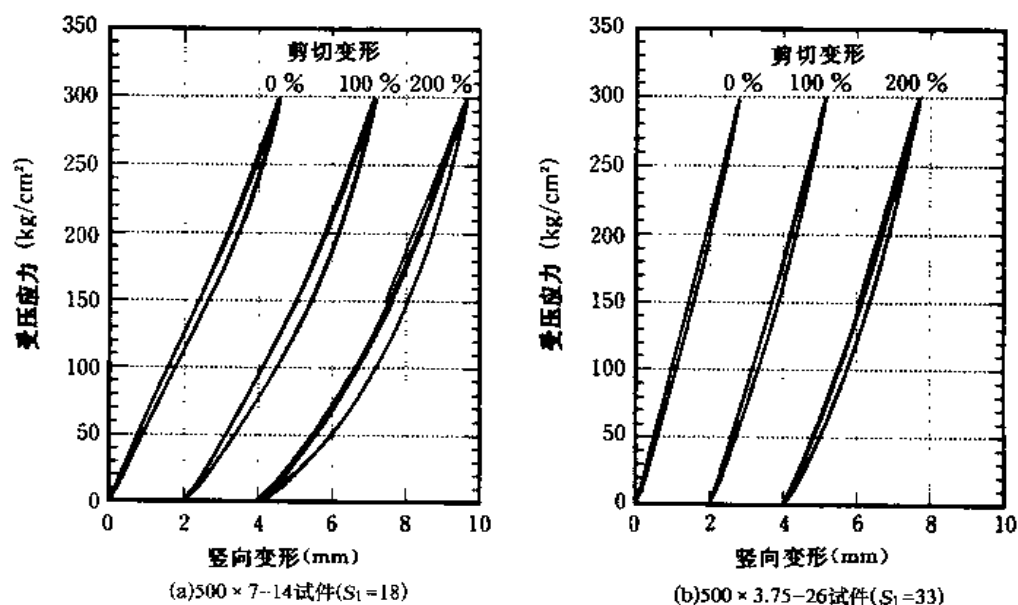


图4-8 压缩试验时的加载曲线

为确定多层橡胶的极限受压承载力,进行了动力压缩破坏试验<sup>[2]</sup>。试验得到的压应力-竖向变形关系如图4-9所示,试件为 $500 \times 7-14$  ( $S_1=18, S_2=5$ )。当平均压应力达到 $1200\text{kg}/\text{cm}^2$ (压力为 $2400\text{t}$ )时,表现出屈服现象,达到 $1500\text{kg}/\text{cm}^2$ (压力为 $3000\text{t}$ )以上破坏。图中也给出了静力加载试验的结果,两试验结果对应较好。同时,还进行剪切变形为 $240\text{mm}$ 的受压破坏试验。在由剪切变形时,破坏承载力虽有所降低,但与纯压时的趋势基本相同。图4-10给出了破坏面的状况。从破坏面观察,破坏是从中间钢板的中心孔部位钢板的受拉破坏开始,使橡胶片失去约束,破坏了多层橡胶的承载机构,直至完全破坏。这表明多层橡胶的极限承载力主要取决于中间钢板。中间钢板越厚,强度越大,可以发挥更高的极限承载力。

### 4.3.3 受拉性能

图4-11给出了 $500 \times 3.75-26$ 多层橡胶在剪切变形为200%时单调受拉的受力特性

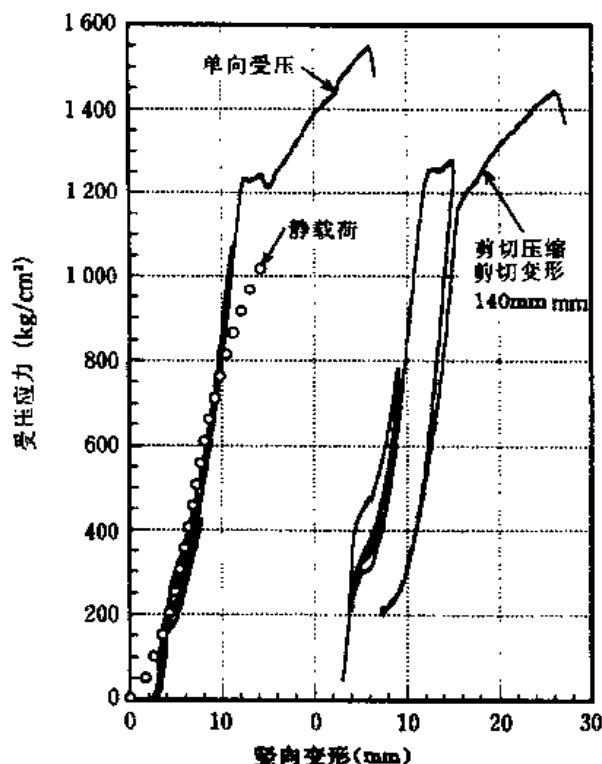


图 4-9 多层橡胶的压坏实验

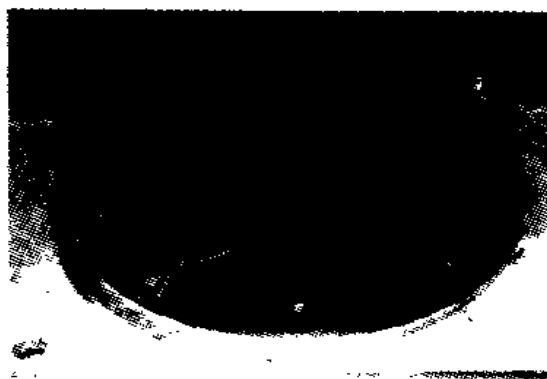


图 4-10 多层橡胶破坏面状况

和  $500 \times 7 - 14$  多层橡胶轴向受拉至破坏时的受力特性。与受压弹性性能相比,多层橡胶受拉时的应力-应变关系为双线型。随橡胶的材质不同,拉应力在  $10 \sim 20 \text{ kg/cm}^2$  以前,基本表现为弹性。但是,该弹性范围的受拉刚度只有受压刚度的  $1/10$  左右<sup>①</sup>。当受拉轴力大于此值时,荷载-变形关系表现为屈服,屈服后受拉刚度进一步减小。此时如果卸载,卸载曲线呈现较大的滞回面积,再恢复到初始状态。在受拉破坏时,可达到总厚度的 3 倍的伸长量。

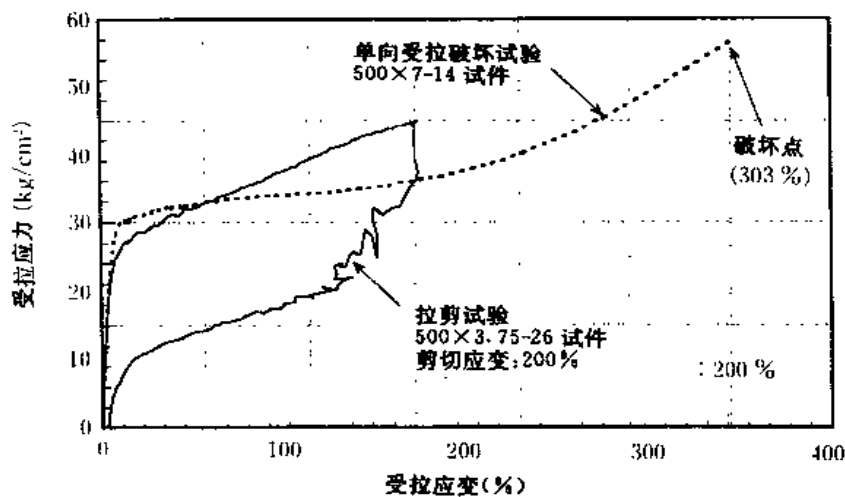
受拉变形过屈服点后,从外观上并未见损伤。但是在橡胶内部,由于受拉变形的作用,产生许多空孔。试验表明,多层橡胶经过较大的受拉变形后再压缩时,受压刚度降低为初期刚度的  $1/2$  左右。

由以上结果知,多层橡胶在受拉轴力作用下达到完全破坏虽然具有一定的延伸能力,但考虑到其后受压刚度和承载能力的降低,因此不希望作用拉力,如果有拉力作用,拉应力应小于  $10 \sim 20 \text{ kg/cm}^2$ 。

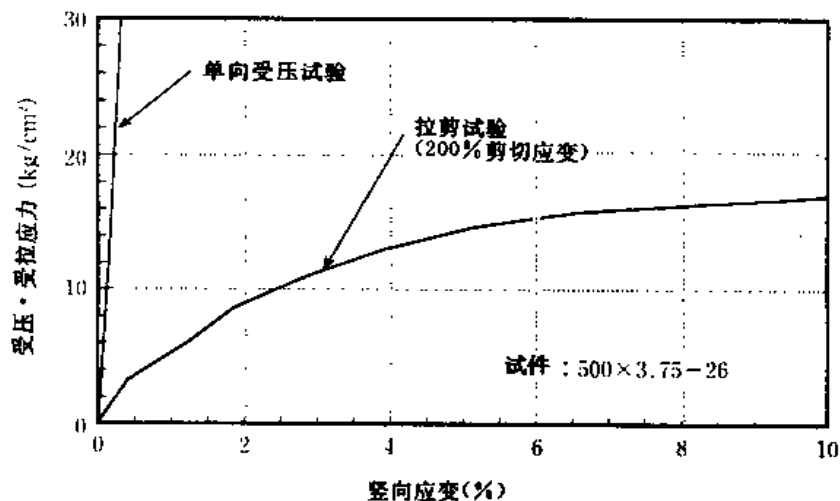
#### 4.3.4 压剪性能

多层橡胶在通常承受建筑物重量的同时,发生地震时水平方向必须具有柔度产生变形。由于地震时倾覆力矩的影响,对多层橡胶产生附加轴力作用。此外,由于不均匀沉降

<sup>①</sup> 多层橡胶受拉时,因为橡胶周边用螺栓安装了翼缘,这里的受拉刚度包含了安装部分的刚度。——原注



(a) 受拉应力-应变的关系



(b) 受压实验和受拉实验初始刚度的比较

图 4-11 天然橡胶多层橡胶的受拉实验

等的影响,多层橡胶上作用的轴力会产生变化。对于轴力的变化,多层橡胶不仅要能保持稳定承载能力,而且其受剪性能不能产生较大的变化,这对设计和分析来说都是很重要的。多层橡胶的性能(刚度和变形能力)与面压和 2 次形状系数有关,因此需要选择合适的形状和材质。根据多层橡胶的实验结果,2 次形状系数大于 5 时,轴力的变化对其弹性特性影响不大。2 次形状系数较小时,变形较大时会产生压屈,并且受压荷载的变化对其有较大的影响,所以需考虑变形能力与轴力变化的关系来确定设计变形和面压。

多层橡胶在单调加载至破坏的荷载-变形关系如图 4-12 所示。试件均采用天然橡胶,配合比有两种类型。试件 No.4,5 采用较为柔性的配合比。直径分为 500 和 600 两种,2 次形状系数都等于 5。图中纵轴剪应力,由剪力除以多层橡胶的截面积得到;横轴为

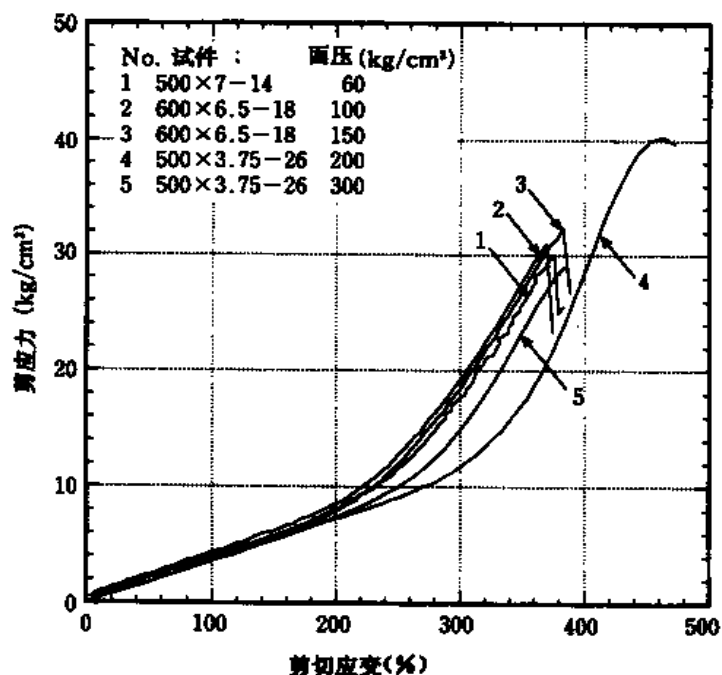


图 4-12 天然橡胶多层橡胶的破坏实验

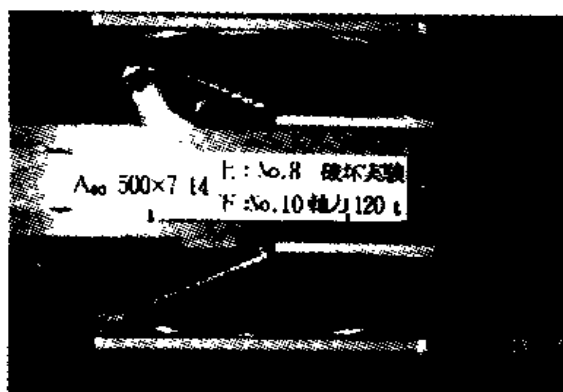


图 4-13 多层橡胶的压剪实验

剪应变,由剪切变形除以总橡胶厚度用百分率表示。剪应变为 100%表示剪切变形等于总橡胶厚度。图 4-13 为试件 No.1 的试验状况。可见在承受很大的剪切变形时,承载能力并未丧失。

由该图还可见,橡胶材质和 2 次形状系数基本相等的多层橡胶,其剪应力-剪应变的关系也基本相同。此外,压应力的变化,可以认为几乎没有影响。剪应变达到 250%时,基本保持线性关系。

如果剪切变形剪应变增大,荷载-变形关系呈现硬化,最后当剪应变达到 400%左右时破坏。应变硬化虽然可有效抑制隔震层的位移,但使其承担的剪力增大,上部结构的地震力增加,导致楼层反应加大。因此,从这一观点来看,多层橡胶的设计变形应控制在其线性界限变形以下。对于天然橡胶,其材质较柔,线性界限变形为 250%左右,而对于材质较硬的橡胶,则小于此值。

#### 4.3.5 耐久性

由于多层橡胶是采用的橡胶和钢板,所以多层橡胶的耐久性取决于橡胶材料老化。橡胶为有机材料,随使用年限增长,其性能逐渐产生变化。引起变化的原因有来自外部的物理作用(煤气、光、热、外力等)和内部的化学作用(聚合物、填充材料、加桥形态等)。由

于多层橡胶的使用环境受光和热等的影响较小,主要应特别注意的橡胶的氧化反应和徐变。

一般天然橡胶的氧化反应使其产生硬化。如图 4-14 所示,这是由于在橡胶分子(聚合物)的硫磺结合位置氧分子介入的结果。氧分子的介入使硫磺的结合断开,进一步又使其它聚合物结合,导致分子结合网点结构的增加,约束了橡胶分子移动,这就是硬化的原因。

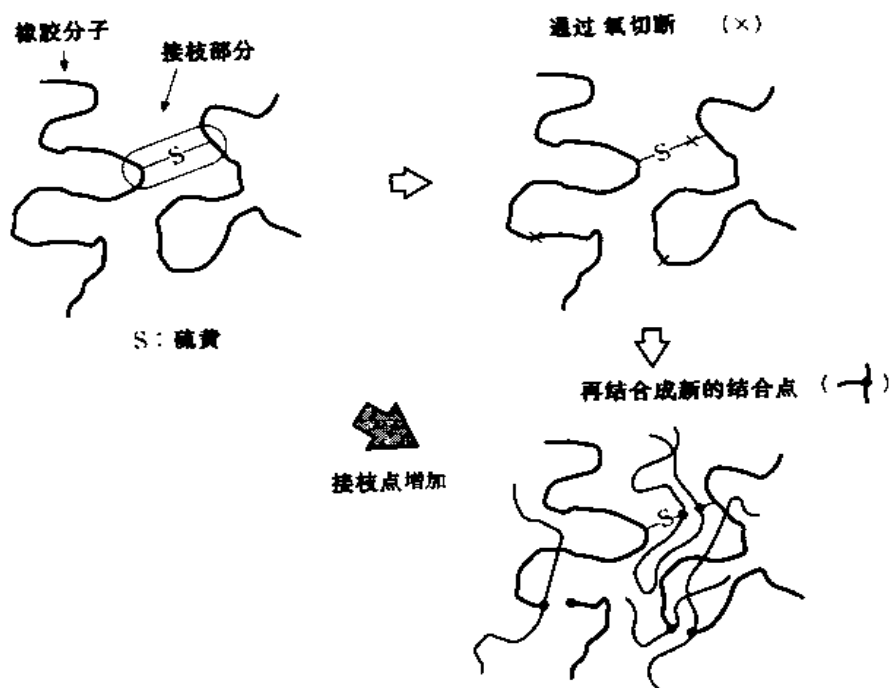


图 4-14 橡胶分子氧化的影响

但是,多层橡胶由橡胶薄片和钢板组成,氧化物质渗透到橡胶内部的表面积有限。因此,即使表面产生氧化老化,内部的橡胶却基本完好。根据已使用 100 年的奥斯特拉里亚的铁道防振垫的老化调查<sup>[3]</sup>,虽然橡胶周边部分有氧化老化层,但内部的橡胶几乎没有变化。根据化学反应速度理论,采用加热快速试验可以预测其状态。目前已进行了很多试验,研究多层橡胶的各种特性变化。例如,经过 60 年左右,刚度增加约 10~20%,破坏位移约降低 10%左右。在隔震建筑设计时考虑这些变化因素,就可以使问题得到完全解决。进一步,在多层橡胶与外部接触的表面部分可以采用耐候性较好的橡胶材料。

关于徐变,根据 2 年的足尺多层橡胶平均压应力为 110~150 的试验量测结果,并考虑气温变化产生的膨胀和收缩的修正,可以推断 100 年后徐变量不到总橡胶厚度的 10%<sup>[4,5]</sup>。根据加热快速试验的徐变现象进行预测,得到如图 4-15 所示的结果。由该图试件温度条件的变化结果,可以推断,多层橡胶在设置环境(20℃)下,徐变量约为总橡胶厚度的 3~5%。

从以上的试验和研究结果可知,多层橡胶作为结构构件,其耐久性完全满足要求。

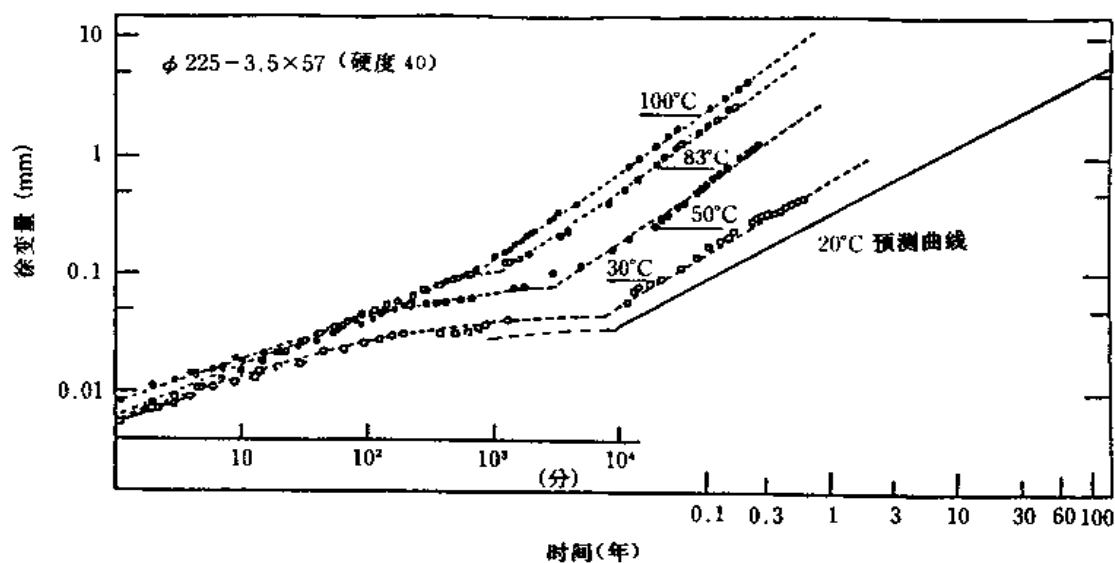


图 4-15 多层橡胶的徐变试验结果

## 4.4 多层橡胶隔震器的设计

### 4.4.1 多层橡胶隔震器设计的基本方法

多层橡胶的设计和选择与隔震建筑的反应大小密切相关,所以要想取得较好的隔震性能,关键取决于多层橡胶的形状和特性。因此,作为设计人员掌握隔震构件的性能十分重要。

在隔震结构中,隔震层的水平刚度比上部结构柔的多,因此可以将上部结构作为刚体,按单自由度模型进行反应分析是足够精确的。隔震结构按单自由度计算时,如忽略阻尼器的刚度,根据隔震器的水平刚度可按下式求得建筑物的周期。

$$T_f = 2\pi \sqrt{\frac{W}{K_f g}} \quad (4.2)$$

式中,  $T_f$ : 仅由隔震器水平刚度确定的周期

$W$ : 建筑物总重

$K_f$ : 多层橡胶隔震器的水平刚度

$g$ : 重力加速度

在上式中,如假定多层橡胶的形状和材质均相同,则由下节所示的水平刚度公式(剪切式:式(4-5))  $K_f$  代入得,

$$T_f = 2\pi \sqrt{\frac{n t_r \sigma}{G_g}} = 2\pi \sqrt{\frac{D \sigma}{S_2 G_g}} \quad (4.3)$$

根据上式,可以通过调整多层橡胶的形状  $D$ 、 $S_2$ (或总橡胶厚度  $n t_r$ )以及剪切模量  $G$  和平均压应力  $\sigma$ (以下称为面压),来自由的设定隔震建筑的基本周期。

#### 4.4.2 竖向刚度和水平刚度

多层橡胶的竖向和水平刚度可以按下面的式(4-4)~(4-6)求得。这些计算公式是根据橡胶的弹性理论,假定橡胶片的应力分布形状为抛物线推导的。

橡胶材料为非线性弹性体,应力-应变曲线呈反S形。但在实用上将多层橡胶作为线性弹性体,则以下公式可以适用。然而,由于高衰减橡胶表现为弹塑性性能,在采用以下公式时,要注意材料常数和计算刚度的适用范围。

竖向刚度:

$$K_v = \frac{E_{cb}A}{T_r} \quad (4-4)$$

$$E_{cb} = \frac{E_c E_b}{E_c + E_b}, E_c = E_0(1 + 2\kappa S_1^2)$$

水平刚度(纯剪切式):

$$K_{h0} = \frac{GA}{T_r} \quad (4-5)$$

水平刚度(压屈式):

$$K_h = \frac{P^2}{2k_r q \tan(qH_0/2) - PH_0}$$

$$q = \sqrt{\frac{P}{k_r} \left(1 + \frac{P}{k_s}\right)} \quad (4-6)$$

$$k_r = E_{cb}IH_0/T_r, k = GAH_0/T_r$$

$$E = \frac{E_r E_b}{E_r + E_b}, E_r = E_0 \left(1 + \frac{2}{3}\kappa S_1^2\right)$$

$$H_0 = T_s + T_r$$

式中,  $A$ : 截面积

$I$ : 截面惯性矩

$D$ : 多层橡胶的直径

$n$ : 橡胶层数

$t_r$ : 每层橡胶厚度

$t_s$ : 每层中间钢板厚度

$T_r$ : 橡胶层总厚度( $=nt_r$ )

$T_s$ : 中间钢板总厚度( $=nt_s$ )

$G$ : 橡胶的剪切模量

$E_0$ : 橡胶的竖向弹性模量(泊松比为0.5时,  $E_0 = 3G$ )

$E_b$ : 橡胶的体积弹性模量

$P$ : 压力

$H_0$ : 多层橡胶的总高度

$S_1$ : 1次形状系数

$S_2$ : 2次形状系数

$k_r$ : 有效弯曲刚度

$k_s$ : 有效剪切刚度

$\kappa$ : 取决于橡胶硬度的系数

上式中,  $E_c$  和  $E_r$  相当于为一层橡胶片的名义弹性模量。名义弹性模量中包含  $S_1^2$ , 可见1次形状系数的影响非常大。式中系数  $\kappa$  为橡胶的硬度修正系数, 与橡胶中的碳含量等添加剂有关, 可根据试验值拟合经验公式计算。接近生橡胶(剪切模量  $G$  在  $2\text{kg/cm}^2$  左右)时, 其  $\kappa$  接近于1。P.B.Lindley 给出天然橡胶的剪切模量  $G$  与  $\kappa$  的关系如表4-1。

表 4-1 剪切模量  $G$  与  $\kappa$  的关系 (P. B. Lindley)

$G(\text{kg/cm}^2)$	3.0	3.7	4.5	5.4	6.4	8.1	10.6
$\kappa$	0.93	0.89	0.85	0.80	0.73	0.64	0.57

名义弹性模量是用于修正体积弹性模量  $E_b$  的。一般,天然橡胶的泊松比约为 0.5,通常多按非压缩性材料(体积弹性模量  $E_b = \infty$ )处理。如假定为非压缩性,剪切模量  $G$  与弹性模量  $E_0$  的关系近似为  $E_0 = 3G$ 。但是,当 1 次形状系数很大时,橡胶层内部的 3 轴压应力很大,非压缩性的假定不成立。所以,体积弹性模量的修正很重要。根据 P. B. Lindley, 剪切模量对体积弹性模量几乎没有影响,约为  $20\text{t/cm}^2$ (文献 6),或  $10\text{t/cm}^2$ (文献 7)。另一方面,(文献 8)关于橡胶的体积弹性模量的文献调查和研究,表明其值约为  $20 \sim 30\text{t/cm}^2$ 。因此,根据这些资料,可以采用平均值约  $20\text{t/cm}^2$  作为体积弹性模量。

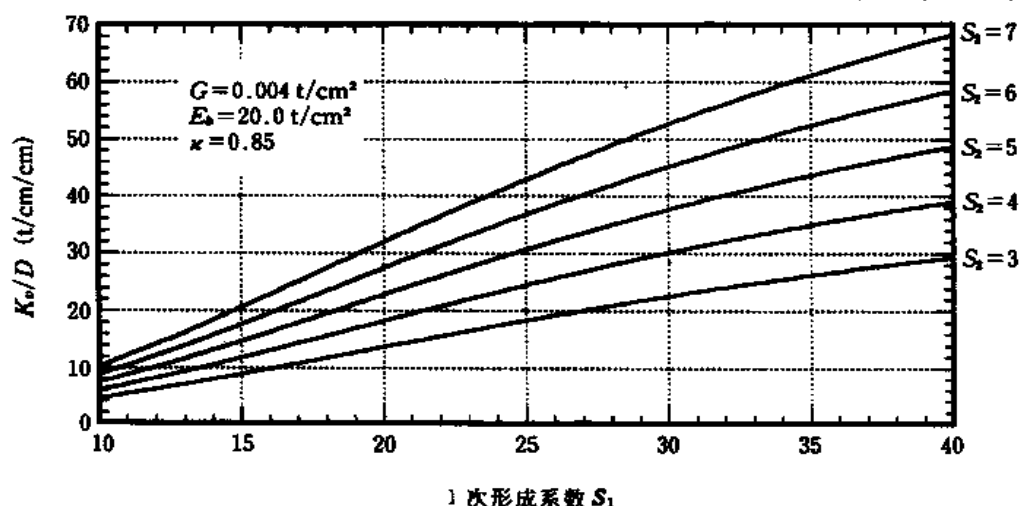
图 4-16 给出了竖向刚度  $K_v$  与橡胶直径  $D$  的比值  $K_v/D$  和形状系数的关系。图 4-17 给出了水平刚度  $K_h$  与橡胶直径  $D$  的比值  $K_h/D$  和面压  $\sigma$  的关系。在计算中取  $G = 0.004\text{t/cm}^2$ ,  $E_b = 20\text{t/cm}^2$ ,  $\kappa = 0.85$ 。竖向刚度  $K_v/D$  随形状系数的增大而增加。如果确定了橡胶的材质(剪切模量),选择合适的  $S_1$  和  $S_2$ ,则可以得到必要的竖向刚度。水平刚度随压应力的增大而逐渐减小。水平刚度为 0 时压应力为多层橡胶的压屈应力。由式 (4-6),  $K_h = 0$  时的荷载即为压屈荷载  $P_{cr}$ ,可由下式求得。

$$P_{cr} = \frac{k_r}{2} \left( \sqrt{1 + \frac{4\pi^2 k_r}{H_0^2 k_s}} - 1 \right) \quad (4-7)$$

将上式展开,经简化可得下式的压屈应力  $\sigma_{cr}$

$$\sigma_{cr} \approx 0.9 \times GS_1 S_2 \quad (4-8)$$

形状系数越大,水平刚度的降低速度越慢。即,1 次形状系数越大,弯曲刚度越大;2 次形状系数越大,多层橡胶越偏平,弯曲变形占总变形的比例就越小。具有这种形状的多层橡胶,压力的变化,对水平刚度的影响很小。因此,多层橡胶的形状,特别是 2 次形状系数应在一定值以上,以保证其变形能力和忽略水平刚度变化的影响。但是,对于水平刚度

图 4-16  $K_v/D$  与  $S_1$  的关系



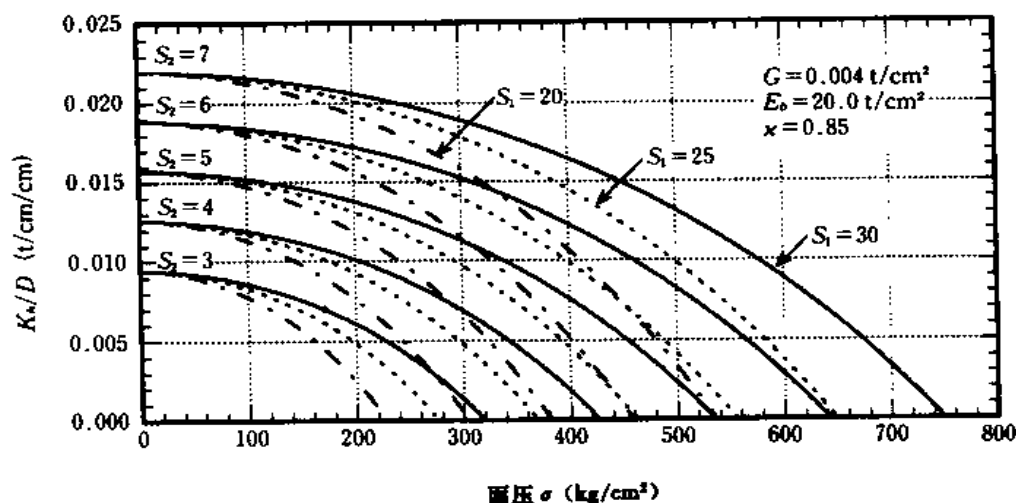


图 4-17  $K_h/D$  与面压的关系

较小的多层橡胶,在确定设计轴力和设计位移时,必须要考虑刚度随轴力的变化而变化。

另一方面,如果 2 次形状系数较大,水平刚度也成比例增大。多层橡胶的设计中既要保持稳定的变形,也要使水平刚度尽可能小。因此 2 次形状系数可以考虑取  $S_2=5$  左右。

由式(4-5)的水平刚度  $K_{h0}$  与式(4-6)压应力  $\sigma=0$  时的水平刚度一致。因此,当多层橡胶不受压力影响时,可以由纯剪切式推算多层橡胶的水平刚度。

#### 4.4.3 设计面压

在考虑多层橡胶的设计轴力时,必须考虑正常荷载和地震时倾覆力矩产生的附加轴力。在以往的设计中,多层橡胶的正常设计面压多设定在  $50 \sim 100 \text{ kg/cm}^2$  范围。现在通过对多层橡胶界限承载力的试验研究以及高压应力下剪切变形的试验,如果形状选择合适,多层橡胶在承受更高的压应力时也能保证其承载能力和变形能力,因此,正常面压可以使用到  $100 \sim 200 \text{ kg/cm}^2$  的范围。

建筑规模较大时,多层橡胶的轴力较高,可以使用直径较大的多层橡胶来承受较高的面压。例如,直径为  $70 \text{ cm}$  的多层橡胶,如忽略阻尼器的刚度,面压变化时按式(4-3)计算的自振周期如表 4-2。可见,如面压设定合适,忽略阻尼器刚度时建筑物的自振周期可以达到 4 秒以上。如果采用弹性更低的橡胶材料,则周期可更长。在这样的周期范围,地震反应非常小,几乎不受地震波特性的影响。

表 4-2 忽略阻尼器刚度时面压  $\sigma$  与自振周期  $T_f(s)$  的关系  
( $D=70 \text{ cm}$ ,  $S_2=5$  时)

剪切模量 $G(\text{kg/cm}^2)$	面压 $\sigma(\text{kg/cm}^2)$		
	50	100	150
4.0	2.66	3.75	4.60
3.0	3.07	4.33	5.31

隔震建筑中,隔震器和阻尼器特性的选择,决定了地震反应的性能。因此建筑物的性能就可以事先确定,并进行分析。所以,赋予隔震建筑什么样的性能是由设计人员决定的。在确定多层橡胶的配置、尺寸、数量和面压等时,应考虑与上部结构和阻尼器的相关性。

如图 4-7 所示,在单向时多层橡胶的应力为抛物线分布,中点最大。该最大值约为面压的 2 倍。在有剪切变形时,还会产生更大的应力集中。该应力集中同时也作用与结构,所以,安装多层橡胶的结构部分必须具有承受该应力集中的强度。

## 4.5 各种隔震器产品的特征

### 4.5.1 天然橡胶系列多层橡胶

天然橡胶系列多层橡胶是采用拉伸较强、徐变较小、温度变化对性能影响不大的天然橡胶制作的多层橡胶。图 4-18 所示为滞回曲线。其滞回环的面积较小,因此必须采用阻尼器作为吸收能量的构件。但是,这种多层橡胶的滞回特性与轴力变化和位移历程几乎无关,从小变形到大变形都具有稳定弹性性能。因此,在分析时计算模型非常简单,而且具有较高的精度。根据设计意图,多层橡胶可以与各种阻尼器组合,取得所需的隔震层的滞回性能。

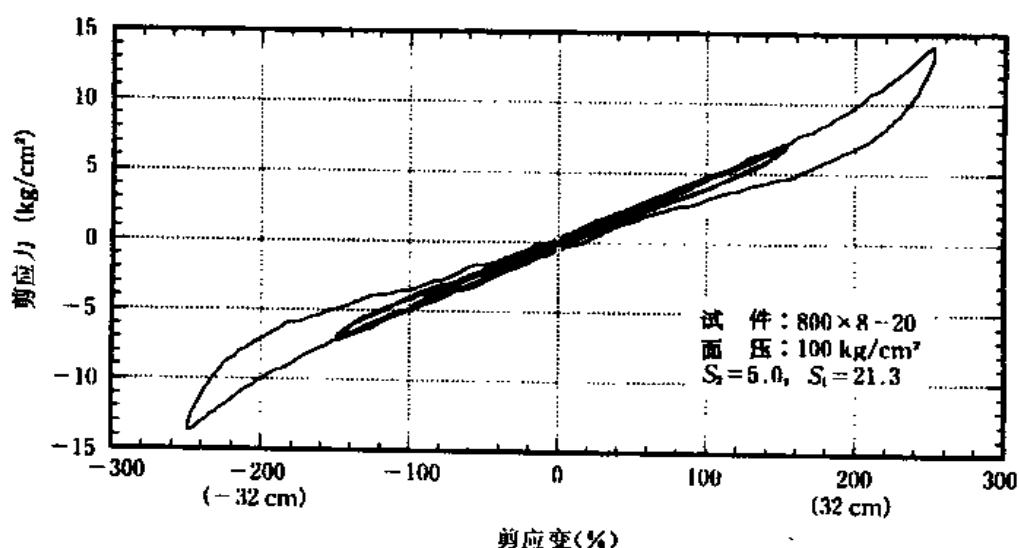


图 4-18 多层橡胶的滞回曲线

### 4.5.2 高阻尼型多层橡胶

高阻尼型多层橡胶是采用特殊配制的橡胶材料制作,其形状与天然橡胶系列多层橡胶相同。该橡胶粘性较大,其自身可以吸收能量。由于与阻尼器的功能形成一体,可以节省使用空间,施工上也较为方便。图 4-19 为这种多层橡胶的滞回曲线。滞回环的面积较大,表明有较大能量吸收能力。从滞回曲线可见,在变形较小时即表现为非线性,而且与反复次数、变形大小和位移历程相关。在建立反应分析模型时,可采用等价阻尼来计算阻尼特

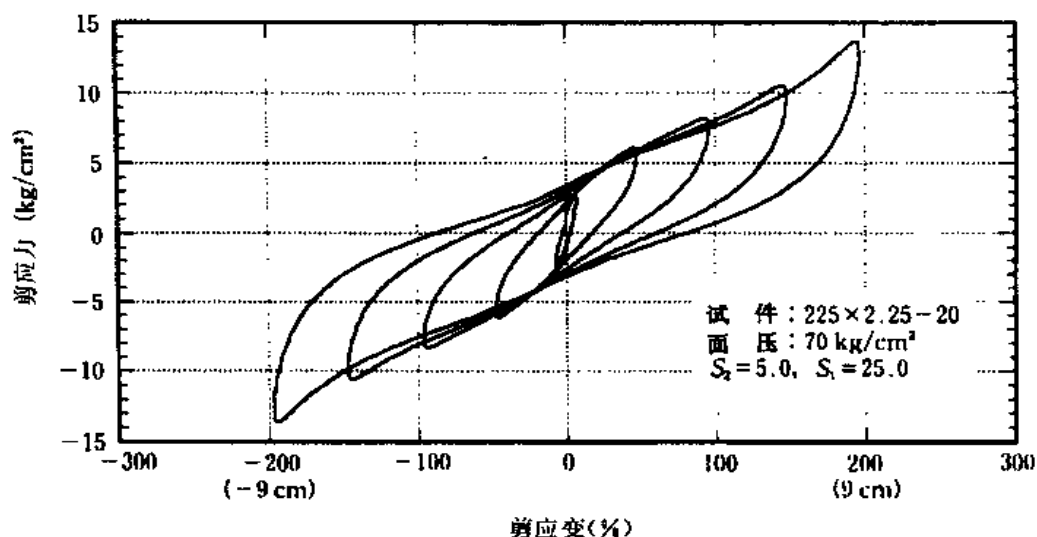


图 4-19 高阻尼型多层橡胶的滞回曲线

性,或采用滞回型恢复力特性进行分析。作为后一种方法的简单例子,多采用修正的双线型。

#### 4.5.3 铅芯多层橡胶

铅芯多层橡胶是在多层橡胶的中部圆形孔中压入铅,其构造如图 4-20 所示。多层橡胶产生剪切变形时,利用铅芯的塑性变形吸收能量,因此是一种阻尼器内置型多层橡胶。铅芯在接近纯剪切变形下,反复变形时可以发挥稳定的能量吸收能力。此外,由于阻尼器与多层橡胶形成一体,可以节省空间,在施工上也较为有利。

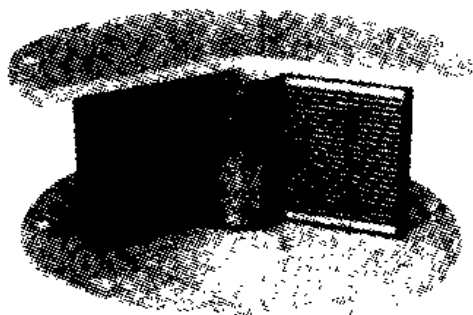


图 4-20 铅芯多层橡胶

图 4-21 所示为铅芯多层橡胶压剪时的特性。滞回特性表现为多层橡胶水平刚度和铅芯水平刚度的组合,滞回环呈双线型。不过滞回特性与剪切变形有一定的相关性。在反应分析时,多采用将滞回曲线修正为双线型模型,如图 4-22 所示。

#### 4.5.4 滑移阻尼隔震装置

使上部结构与基础产生滑动来减小水平地震力的隔震装置,是采用在多层橡胶上设置弹性滑动支承(粘接 PTFE 材料),以及限制水平变形的水平弹簧(橡胶材料)构成。隔震构件及结构组成如图 4-23 和图 4-24 所示。承受弹性滑动支承的滑动板由不锈钢制成。

中小地震时,弹性滑动支承产生弹性变形,由于周期特性较长,使地震力减小。当大地震时,由于产生滑动,地震力不再增大,同时由于摩擦消耗能量也使地震力减小。由于滑动现象没有固有周期,所以不与特定周期地震波存在特别强的响应。图 4-25 所示为恢复力特性。初期刚度为弹性滑动支承与水平弹簧的水平刚度之和,摩擦面产生滑动后,仅有水平弹簧的刚度。因此,恢复力特性可以近似双线性型。

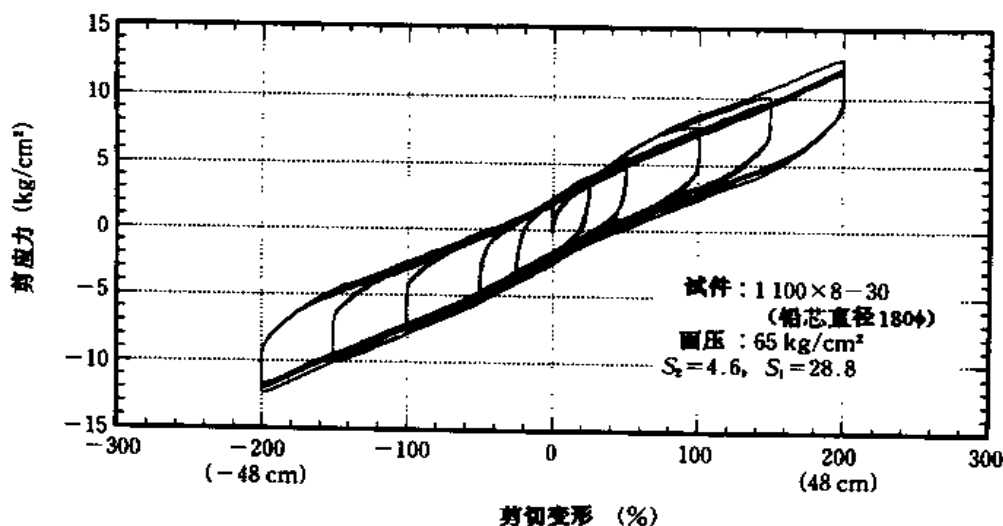


图 4-21 铅芯多层橡胶的滞回曲线

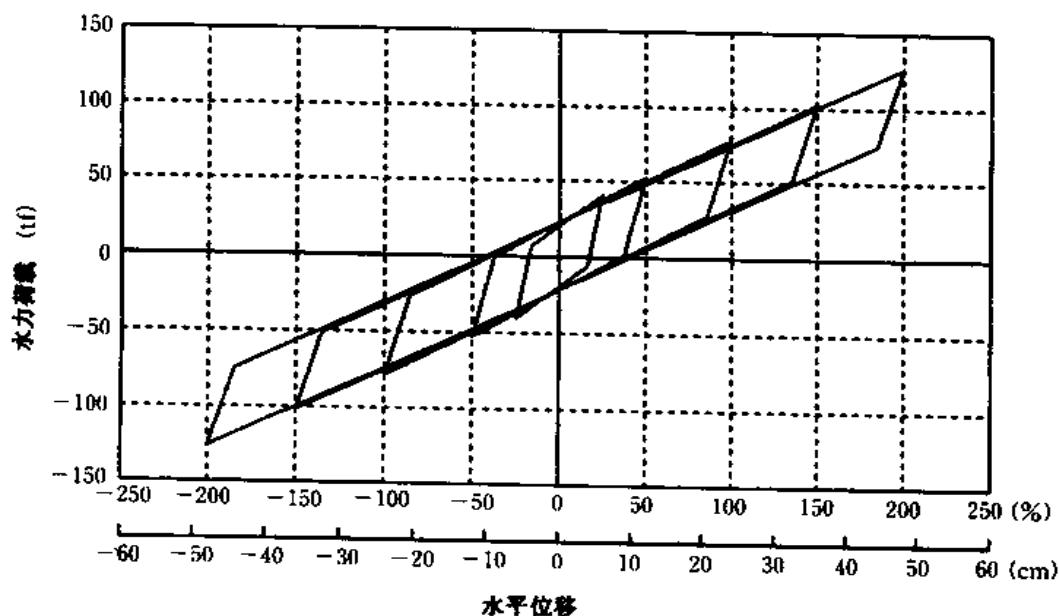
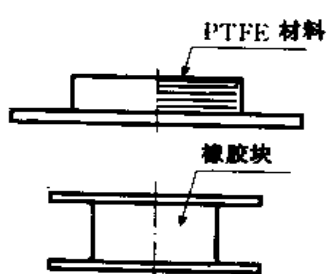


图 4-22 修正双线型模型



试验条件

隔震装置: 弹性滑动支承  $750\phi \times 3 + 85\phi \times 5$

水平弹簧  $350\phi \times 9$  (橡胶厚 150mm)

压 力: 2600t

#### 4.5.5 其他隔震器

除(1)~(4)介绍的隔震器外,还开发了多种多层橡胶。在附录多层橡胶的表中,给出了在多层橡胶中心部位插入

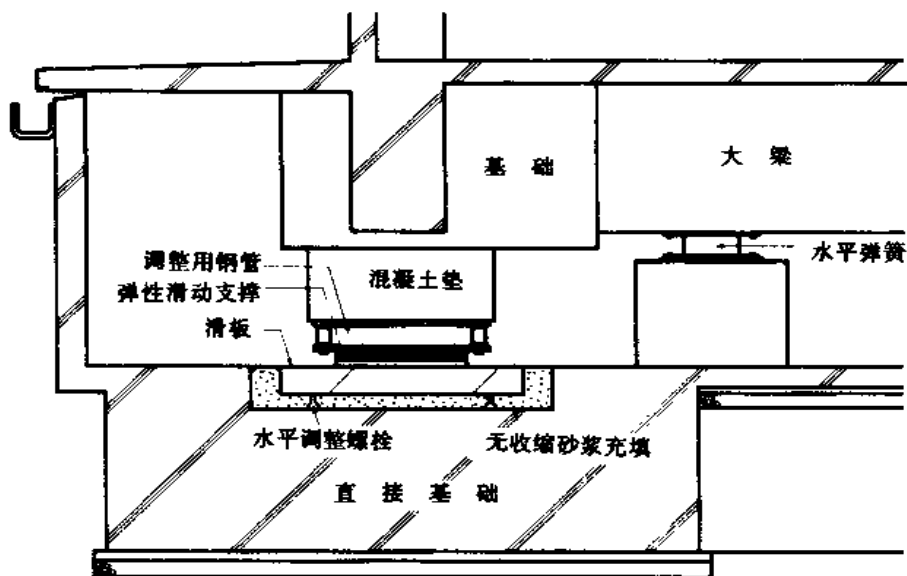


图 4-24 滑动阻尼隔震装置

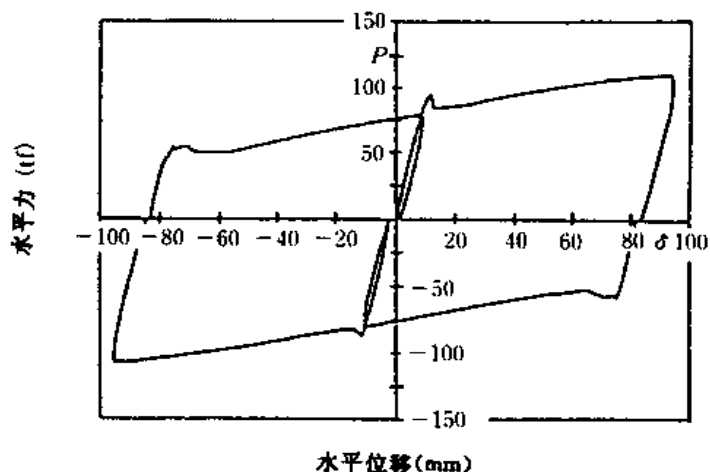


图 4-25 滑动阻尼隔震装置的滞回曲线

具有高衰减能力的粘性体(母体)的约束型多层橡胶。此外,冷粘接型多层橡胶作为最新的形式已进入使用阶段。这种多层橡胶省略了加硫粘接工程,更为经济且便于质量管理,剪切变形达到 300% 时恢复力特性仍基本保持线性<sup>[9]</sup>。美国在改建工程中,采用滑动支承与多层橡胶并用,不锈钢表面作成凹球面,由滑动形成摩擦摆系统(FPS, Friction Pendulum System)<sup>[10]</sup>。

#### 【参考文献】

- [1]高山、多田:“積層ゴムアイソレータの有限要素解析”、福岡大學工學集報、第 45 號、1990 年 9 月
- [2]高山、多田、ほか:“積層ゴムアイソレータの限界耐力に関する実験研究”、日本建築學會大會學術講演梗概集、

1991 年

- [3] A. Stevenson: "Longevity of Natural Rubber in Structural Bearing", *Plastics and Rubber Processing and Applications*, Vol. 5, No. 3, 1985
- [4] 高山、多田、ほか: 免震構造に関する実物実験(その19)", 日本建築學會大會學術講演梗概集、1989 年
- [5] 日本建築學會: "免震構造設計指針(第2版)" 1993 年
- [6] P. B. Lindley: "Natural Rubber Structural Bearings", *Joint Sealing and Bearing Systems for Concrete Structures*, Vol. 1, ACI, 1981
- [7] P. B. Lindley: "Engineering Design with Natural Rubber", *The Malaysian Rubber Producers Research Association*, 1974
- [8] 藤本、手塚: "ゴムの體積彈性率とポアソン比", 日本ゴム協會誌、59 卷、7 號、1986
- [9] 高山、多田、ほか: "実大 Isolator に関する実験研究(その9)冷間接着型アイソレータの限界変形性能試験", 日本建築學會九州支部研究報告、第 35 號、1995 年 3 月
- [10] 日本免震構造協會: "米國における免震建物の現況調査報告", 1994 年 6 月

## 第 5 章 阻 尼 器

### 5.1 阻尼器概要

阻尼器的作用是消耗振动时的能量,使隔震结构具有衰减性能,抑制地震时上部结构与地基产生过大的相对位移。与多层橡胶组合使用的阻尼器,从工作原理方面可以分为滞回型和粘滞型两类。图 5-1 所示为实用阻尼器的形式。

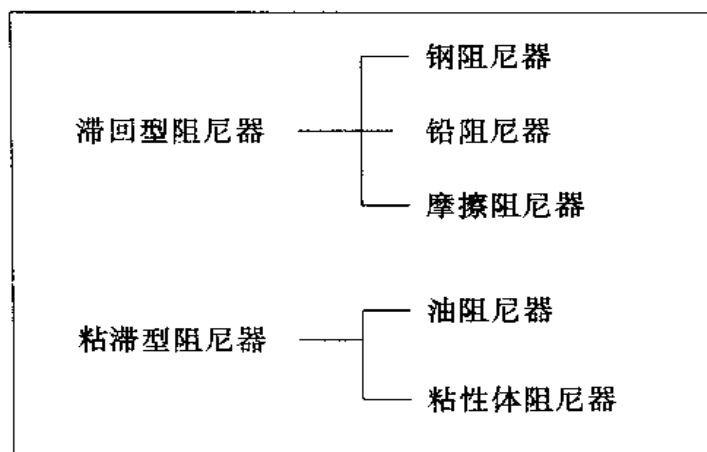


图 5-1 阻尼器的分类

滞回型阻尼器是利用变形滞回消耗能量,因此在设计时,应根据隔震建筑的周期、允许位移、基底剪力系数等条件,求得阻尼器的屈服剪力、界限变形量、能量吸收量等,同时要考虑其配置等条件来确定尺寸、数量。

粘滞型阻尼器是利用与速度有关粘性抵抗作用,从小振幅到大振幅的变化来获得衰减力。在设计时,应根据隔震建筑的周期、允许位移、反应加速度等条件,确定粘性衰减常数和阻尼器的抵抗力,并考虑配置和界限位移量等条件,确定其尺寸和数量。

此外,具有衰减性能的多层橡胶有铅芯多层橡胶、高阻尼型多层橡胶和滑动阻尼隔震构件。

在使用阻尼器时,应掌握各种阻尼器的基本特征,建筑物的条件,以及所要求的隔震效果,选择阻尼器或具有阻尼性能的隔震器。

以下介绍各种阻尼器的特征。

#### 5.1.1 钢材阻尼器

这种阻尼器是利用钢材的塑性变形,它要求在水平方向产生大变形时,竖向也应能随之变形,这对在支承部位的构造有一定要求。典型的钢材阻尼器的外观如图 5-2、图 5-3 所示。



图 5-2 环状阻尼器



图 5-3 棒形阻尼器

钢材是建筑材料中最常用的材料,对其力学性能和耐久性均有充分的了解。因此,在制作阻尼器时,容易设定其刚度、屈服荷载等特性,其滞回形态如图 5-4 所示,呈纺锤形,具有丰满的能量吸收能力。

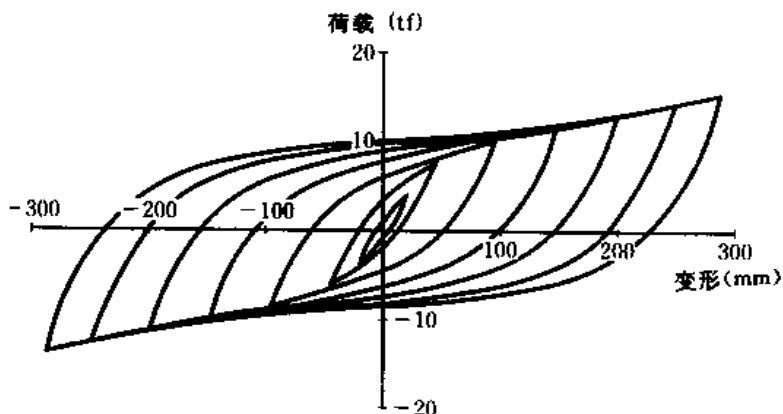


图 5-4 钢材阻尼器的恢复力特性

钢材阻尼器的制造不需要特殊的设备,制作费用也比较合适,坚实耐用,具有较大的衰减性能。

另一方面,由于是利用塑性变形才能发挥衰减效果,因此在屈服以前的小变形范围不能发挥阻尼器的作用。屈服变形大多达 3cm。此外,适当的防锈处理也是必要的。

### 5.1.2 铅阻尼器

这是利用高纯度铅在大变形范围具有良好的反复塑性变形能力。典型的铅阻尼器的外观如图 5-5 所示。

滞回特性如图 5-6 所示,近似矩形,具有很大的衰减性能。铅由于塑性变形产生的晶格缺陷,在常温下由于再结晶而恢复,所以表现出极好的延性特性,适用于大变形范围。



此外,由于比钢材屈服早,在小变形时也能发挥衰减性能。

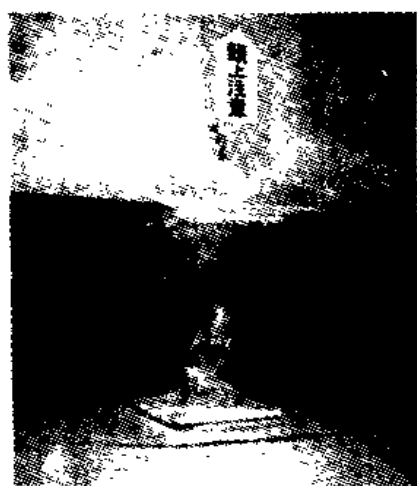


图 5-5 铅阻尼器

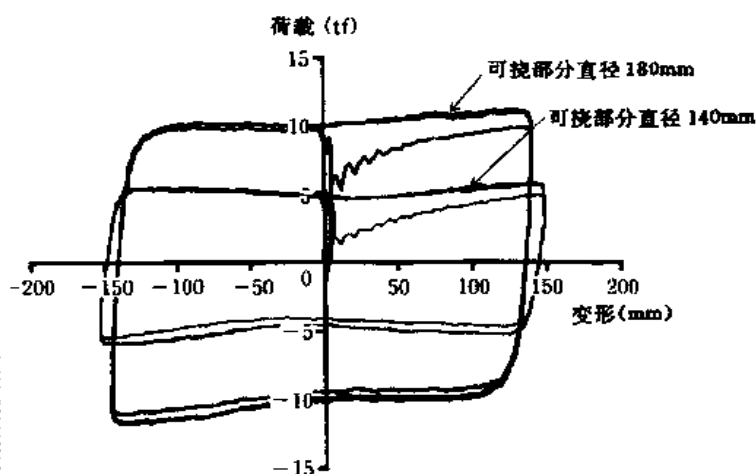


图 5-6 铅阻尼器的恢复力特性

### 5.1.3 摩擦阻尼器

是利用两面间的固体摩擦制作的。典型的摩擦阻尼器的外观如图 5-7 所示。恢复力如图 5-8 所示,其特征是产生滑动后荷载恒定不变。

利用摩擦面上的面压,可以调整滑动承载力,这是摩擦阻尼器的最大的优点。与钢材阻尼器相比,根据摩擦面的种类选择,在多次反复荷载下的可以发挥稳定的性能,摩擦力与振幅和频率无关。



图 5-7 摩擦阻尼器

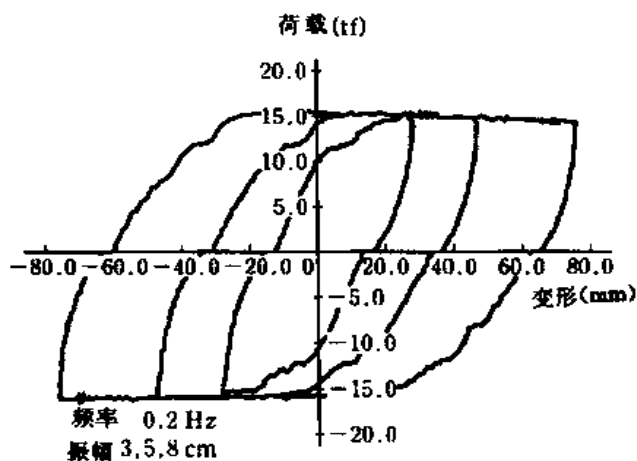


图 5-8 摩擦阻尼器的恢复力特性

另一方面,对于摩擦面的磨损、腐蚀以及灰尘的侵入要采取必要的措施。根据摩擦面

的种类,当振动频率达到一定值时,会产生早期烧坏,因此要兼顾性能要求进行选择。特别应注意地震反映不能引起面压的显著变化。不过,与钢材阻尼器相同,在滑动发生以前,阻尼器不能发挥作用。

### 5.1.4 油阻尼器

油阻尼器如图 5-9 所示,是利用活塞前后压力差使油流过阻尼孔产生阻尼力,这是车辆中广泛使用的减振器的大型化。典型的油阻尼器如图 5-10 所示。恢复力特性如图 5-11 所示,形状近似椭圆。

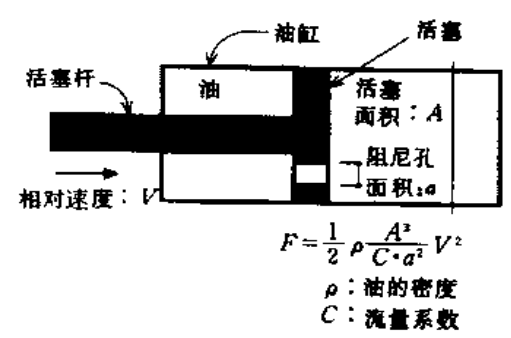


图 5-9 油阻尼器的机构

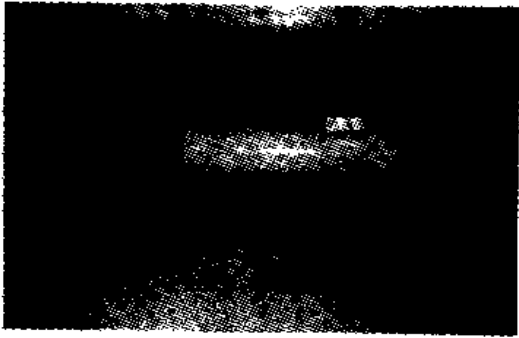


图 5-10 油阻尼器

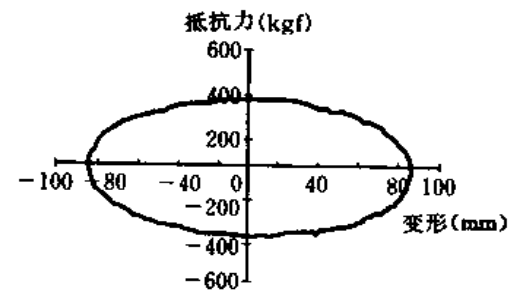


图 5-11 油阻尼器的恢复力特性

一般来说,隔震结构由于隔震效果,不考虑其刚度的影响,因此在中小地震时也具有隔震作用。此外,对于速度型阻尼机构,从小振幅到大振幅都可以产生阻尼力。假定阻尼力与速度成比例,就可以由阻尼常数设定有关性能,这就比较容易由反应谱把握隔震效果,这是它的一个优点。

一般,油阻尼器产生的阻尼力与速度和温度等有关,这是需要注意的。此外,油压的调整、漏油、灰尘的侵入等也要采取相应的对策,进行必要的维护。由于具有方向性,其安装设置需进行考虑,而且要求制作加工精密,体积较大时制作较为困难。

### 5.1.5 粘滞阻尼器

这是利用高粘性材料的剪切抵抗作用,如图 5-12 所示,典型的粘滞阻尼器如图 5-13 所示。恢复力特性如图 5-14 所示。

与油阻尼器相同,粘滞阻尼器对中小地震也具有隔震效果,从小振幅到大振幅都能产生阻尼力,因此由阻尼常数的形式比较容易掌握隔震效果。此外,它不具有方向性,机构比较简单。

一般,粘滞体的抵抗力与速度、温度等有关。而且,对粘滞体的粘度变化、灰尘的侵入等应采取对策和管理,避免空气进入粘滞体内。安装时,要确保水平精度。

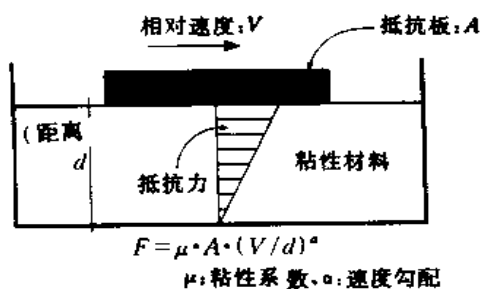


图 5-12 粘滞阻尼器的机构



图 5-13 粘滞阻尼器

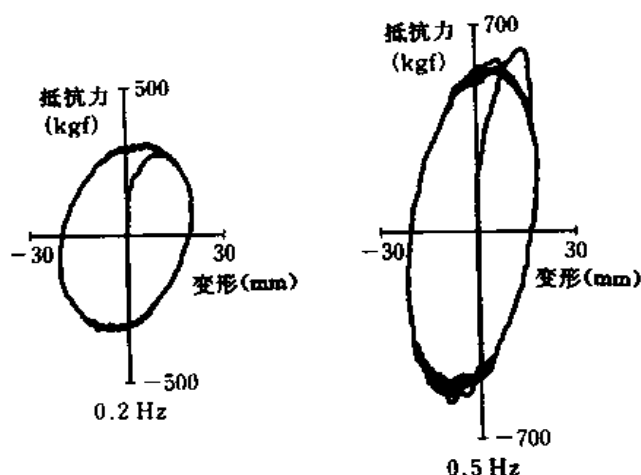


图 5-14 粘滞阻尼器的恢复力特性

## 5.2 阻尼器的性能

在使用各种阻尼器时,需注意以下事项。在附录 4 的阻尼器产品目录中,对于用于建筑物的阻尼器,要按以下事项进行性能试验。

### 5.2.1 安全性

对于阻尼构件要确保在长期荷载和地震时的安全性,及其阻尼性能和变形性能。

阻尼机构是抑制反应变形的,因此要对水平变形大小、速度、振动频率、反复位移次数、使用环境、老化等影响因素进行必要的检查。例如,对于钢材阻尼器,在大变形反复作用下,刚度降低,影响了阻尼性能;对于粘滞阻尼器,反复荷载作用使粘度降低、温度上升、过大的速度使粘滞体内进入空气、低温时粘度增大等影响阻尼力;对于摩擦阻尼器,摩擦板的老化等影响阻尼性能,这些都应给予检查。

### 5.2.2 安全富余度

对于相应的极限状态,必须确保阻尼构件具有相应的安全富余度,在可动范围内必须避免破坏。例如,对于钢材阻尼器,应检查由于腐蚀导致断面缺损,变形部位与结构构件

碰撞导致损伤产生低周疲劳等。对于粘滞阻尼器,应检查容器受抵抗板的冲击、多层橡胶的过大下沉使抵抗板与容器底部接触或对支承部件产生损伤。对于摩擦阻尼器,应检查反复荷载下摩擦面的磨损、锈蚀、以及过大变形时使部件损伤。对于铅阻尼器,应确认在过度的反复荷载下不产生熔化断裂。此外,当有过度的残余变形时,阻尼器应能更换。

### 5.2.3 耐久性

对于阻尼构件,要从材质、规格、技术档案资料及使用情况调查和试验等方面确保其耐久性。例如阻尼器的材料,如钢材、涂料、油等的组成成分需符合日本工业规格的种类。此外,要进行反复荷载下的疲劳性能和耐磨损性等的试验。为确保耐久性,设计中需要考虑阻尼器的更换。

### 5.2.4 制作管理

关于阻尼器的施工和维护管理,已在第3章“隔震建筑的施工和维护管理”中叙述,这里介绍阻尼器特有的制作管理。

制作阻尼器时,为确保其安全性和可靠性,需编制制作要领、检查报告书、养护检查、质量管理计划。例如,在阻尼器制作过程中,需检查原材料的物理特性、尺寸精度等。表5-1为钢材阻尼器产品的检查事项。在建筑现场验收时,要有产品检查项目和方法,如出现异常时,要有相应对策及施工计划。在这一阶段,要检查阻尼器的外观、有无裂纹、损伤、锈蚀等。

表 5-1 钢材阻尼器的产品检查(例)

分 类	试验·检查项目	检查内容
钢 棒	材料验收检查	轧制记录与 JIS 规格的符合情况
		原材料尺寸检查
	材料检查	机械性质检查
	尺寸检查	产品尺寸检查
加工产品	材料验收检查	轧制记录与 JIS 规格的符合情况
	尺寸检查	产品尺寸检查
涂 料	涂料验收检查	涂料罐商标的目视检查
		颜色检查
完成检查	外观·尺寸检查	阻尼器组装成品主要尺寸检查
		组装成品的涂膜厚度检查
		组装成品目测检查

## 5.3 阻尼器的设计

与多层橡胶的设计目标相同,阻尼器的设计包括阻尼器的选择、确定尺寸和数量。

首先需采用动力分析模型,对建筑物进行分析,确定阻尼器所要求的最合适的条件

(屈服剪力系数  $\alpha_s$ 、屈服位移  $\alpha_y$ 、阻尼常数  $h_{eq}$  等), 然后根据这些条件进行阻尼器的设计。

另一方面, 也可以根据本书第 6 章介绍的设计方法, 确定阻尼器的所必要的性能 (例如  $\alpha_s$ 、 $h_{eq}$ ), 然后由这些数据按附录 4 所提供的阻尼器产品目录选择阻尼器、数量和配置。

这里介绍滞回型阻尼器和粘滞型阻尼器的设计方法。

### 5.3.1 滞回型阻尼器

采用第 6 章的反应预测表, 确定滞回型阻尼器的屈服剪力系数  $\alpha_s$  等, 所有阻尼器的恢复力特性可以取如图 5-15 所示的双线性模型。

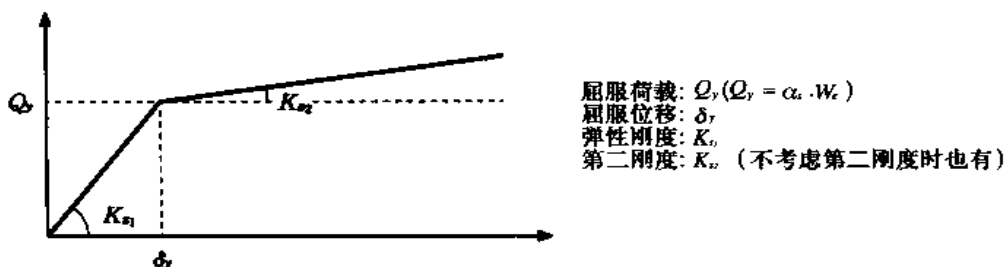


图 5-15 阻尼器的设计恢复力特性

阻尼器的数量可以由附录 4 初步确定。对于没有采用产品目录中的形状和尺寸时, 可根据每个阻尼器所要求的设计恢复力特性, 确定符合特性要求的尺寸, 必要时进行实验确认其性能是否满足性能要求。

### 5.3.2 粘滞型阻尼器

根据建筑物的总质量  $M$ 、等价周期  $T_e$ , 对所要求的等价阻尼系数  $h_{eq}$ , 必要的阻尼力  $F_D$  可以由 (5-1) 式表示。

$$F_D = \frac{4\pi}{T_e} M h_{eq} V \quad (5-1)$$

$V$  为反应速度。

另一方面, 由粘滞型阻尼器的阻尼机构得到的阻尼力  $F_D$  如 (5-2) 式所示。

$$F_D = f(\alpha, V) \cdot N \quad (5-2)$$

$\alpha$  为表示阻尼器形状的参数, 如粘性体阻尼器的抵抗板面积和粘性体厚度, 油阻尼器的活塞面积和阻尼孔直径、高阻尼橡胶的加密且面积和橡胶厚度等。  $N$  为阻尼器的数量。

根据 6-3 节所示的反应预测表, 并参考设计地震位移、加速度反应谱等, 确定必要的阻尼常数  $h_{eq}$ , 由 (5-1) 式求得必要的阻尼力后, 再由 (5-2) 式可以确定阻尼器的形状参数  $\alpha$ 。

(5-2) 式与速度 1 次方成比例时, 则可由  $V$  确定  $\alpha$ 。但一般 (5-2) 式多为非线性, 对于设计地震作用得到最大反应速度  $V_{max}$ , 需要假定平均速度  $V_{ef, max}$  (有效反应速度)。

$V_{max}$  可以由速度反应谱和初步反应分析求得。根据反应预测图表, 认为在最大值附近的反应近似周期为  $T_e$  的正弦波, 则由 (5-3) 式和 (5-4) 式得,

$$V_{max} = \frac{2\pi}{T_e} \delta_{max} \quad (5-3)$$

$$V_{\max} = \frac{T_e}{2\pi} \alpha_f g \quad (5-4)$$

式中,  $\alpha_f$  为隔震层的最大反应剪力系数;  $\delta_{\max}$  为隔震层的最大反应位移;  $g$  为重力加速度。

此外,  $V_{ef, \max}$  的近似值可由式(5-5)求得。

$$V_{ef, \max} = \frac{V_{\max}}{\sqrt{2}} \quad (5-5)$$

考虑粘滞型阻尼器的刚度与隔震周期关系不大,  $T_e$  可取的按多层橡胶隔震器刚度确定的周期  $T_f$ 。

## 5.4 阻尼器与隔震结构的反应

### 5.4.1 等价阻尼和等价周期

在隔震结构的反应性能中, 阻尼器的作用可以用等价阻尼和等价周期表示。

下面以滞回型阻尼器和粘滞型阻尼器为例, 说明能量吸收量的特征与等价阻尼和等价周期的关系(图 5-16、5-17)。

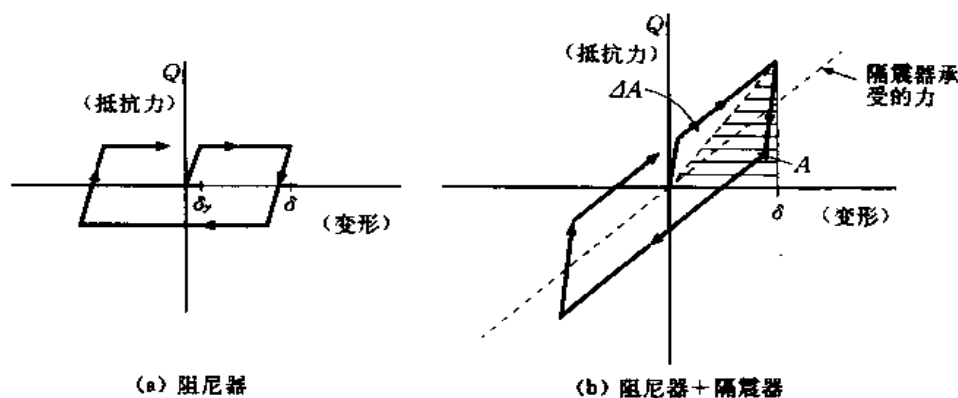


图 5-16 滞回型阻尼器的滞回环

#### ① 滞回型阻尼器

阻尼器的恢复力模型可取理想弹塑性, 且正负位移相等。位移等于  $\delta$  时, 阻尼器的每一循环的能量吸收量(滞回环面积  $\Delta A$ )为(5-6)式。

$$\Delta A = Q_y (\delta - \delta_y) \quad (5-6)$$

式中,  $Q_y$ : 屈服承载力;  $\delta_y$ : 屈服位移

阻尼器与多层橡胶组合时, 等价刚度  $K_e$  为(5-7)式, 隔震层的弹性应变能  $A$  为(5-8)式。

$$K_e = K_f + \frac{Q_y}{\delta} \quad (5-7)$$

$$A = \frac{1}{2} K_e \delta^2 \quad (5-8)$$

式中,  $K_f$ : 多层橡胶隔震器的总刚度  
因此等价阻尼常数  $h_{eq}$  为(5-9)式, 是随位移的增加而减少的。

$$h_{eq} = \frac{1}{4\pi} \cdot \frac{\Delta A}{A} = \frac{2}{\pi} \cdot \frac{Q_y(\delta - \delta_y)}{(K_f + Q_y/\delta)\delta^2} \quad (5-9)$$

等价周期  $T_e$  为(5-10)式, 随  $\delta$  的变化而变化。

$$T_e = T_f \sqrt{\frac{K_f}{K_e}} = T_f \sqrt{\frac{K_f}{K_f + Q_y/\delta}} \quad (5-10)$$

式中,  $T_f$ : 按  $K_f$  确定的隔震周期

## ② 粘滞型阻尼器

阻尼器的抵抗力  $F_D$  与速度的  $\alpha$  次方成比例 ( $F_D = CV^\alpha$ ;  $\alpha = 0.5 \sim 2.0$ ), 但这里为简单起见, 取为速度的 1 次方成比例。此外, 认为阻尼器没有刚度。

周期为  $T_f$ 、位移为  $\delta$  时, 每一循环阻尼器的能量吸收量 (滞回环面积  $\Delta A$ ) 为(5-11)式。

$$\Delta A = \frac{2\pi^2}{T_f} C \cdot \delta^2 \quad (5-11)$$

阻尼器与多层橡胶组合时, 隔震层的弹性应变能  $A$  为(5-12)式。

$$A = \frac{1}{2} K_f \cdot \delta^2 \quad (5-12)$$

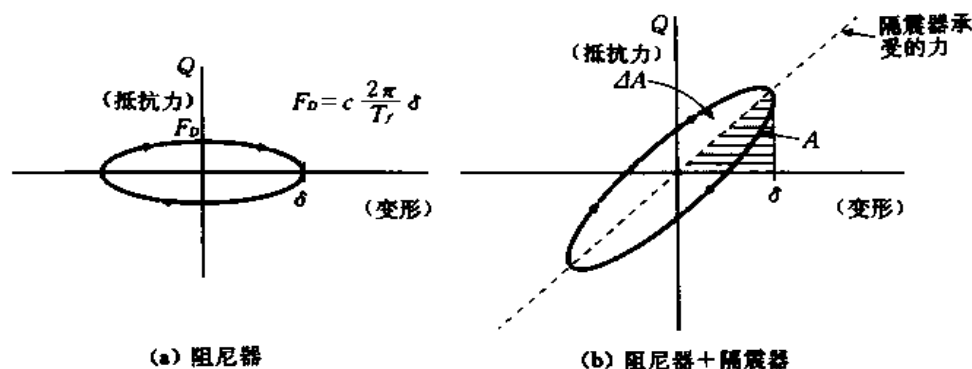


图 5-17 粘滞型阻尼器的滞回环

因此, 阻尼常数  $h$  按(5-13)式计算, 与位移无关。

$$h = \frac{1}{4\pi} \cdot \frac{\Delta A}{A} = \frac{\pi}{T_f} \cdot \frac{C}{K_f} = \text{const.} \quad (5-13)$$

但是, 当  $\alpha$  比 1 大时,  $h$  随位移的增加而增大,  $\alpha$  比 1 小时,  $h$  随位移的增加而减小。

等价周期  $T_e$  可认为与  $T_f$  基本相等。

$$T_e \approx T_f \quad (5-14)$$

## 5.4.2 隔震结构在小振幅时的特性

附录 4 给出的各种滞回型阻尼器的屈服位移 (摩擦阻尼器时为滑移位移) 汇总于表 5-2。虽然阻尼器的形状有一定的变化幅度, 但各种滞回型阻尼器的特性、恢复力特性不同, 屈服位移也不相同。

表 5-2 滞回型阻尼器的屈服(滑移)变形量

阻尼器的种类	屈服(滑移)变形量(cm)	备 注
摩擦阻尼器	0~	高衰减橡胶时在 1.5cm 左右
铅阻尼器	0.25~1.0	
钢材阻尼器	0.85~3.5	大多在 3cm 左右

图 5-18 和 5-19 所示为等价阻尼常数和等价周期随反应位移变化的计算例。计算例是在以下情况下求得的:仅按隔震器确定的隔震周期为 3.5 秒,阻尼器的屈服剪力系数  $\alpha_s$  为 0.05;各种阻尼器的屈服位移代表值分别按以下值考虑,摩擦阻尼器:0.02cm,铅阻尼器:1.0cm,钢材阻尼器:3.0cm。摩擦+铅的曲线是按摩擦阻尼器与铅阻尼器的屈服剪力系数的比例为 1:5 的组合得到的。计算例的各项数据列于表 5-3。

当反应位移大于 20cm 时,采用各种滞回型阻尼器的隔震建筑,等价周期  $T_e$  和等价阻尼系数  $h_{eq}$  基本相同。另一方面,在位移较小时,等价周期与阻尼器的种类有关,如采用摩擦阻尼器,对周期减小较大;而钢材阻尼器在屈服前,等价周期比其他阻尼器要长。当采用 2 种以上的阻尼器组合使用时,则在小位移范围可以对等价周期和等价阻尼有一定程度的调整。

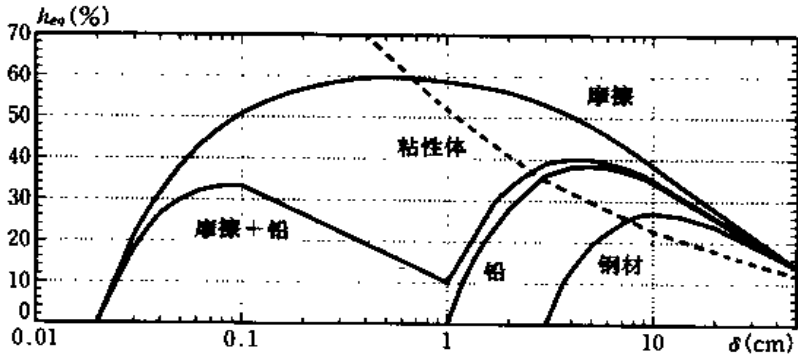


图 5-18 等价阻尼常数

表 5-3 计算例的各项数据

	$\delta_y$ (cm)	$T_f$ (s)	$\alpha_s$	备注
摩擦阻尼器	0.02	3.5	0.05	
铅阻尼器	1.0	3.5	0.05	
钢材阻尼器	3.0	3.5	0.05	
摩擦阻尼器 + 铅阻尼器	摩擦 0.02 铅 1.0	3.5	0.05	屈服承载力比摩擦 1:铅 5
粘滞阻尼器	-	3.0	-	$\delta = 30\text{cm}$ 时 $h = 0.15$

对于如图 5-13 所示的粘滞型阻尼器,由于这种阻尼器为非线性,在小位移时,等价阻尼系数很大,而与滞回型阻尼器相比,周期变化较小。



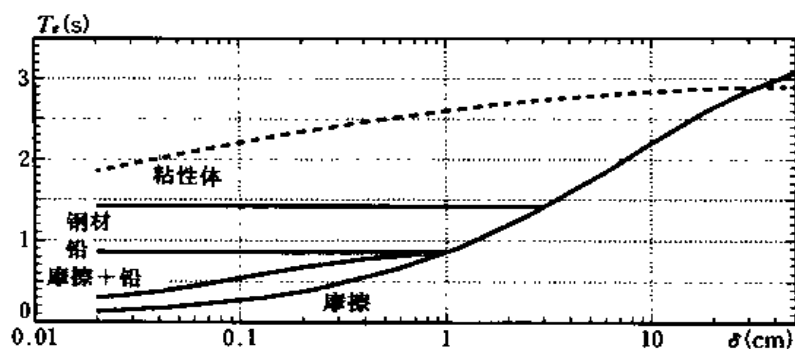


图 5-19 等价周期

图 5-20 和图 5-21 是分别根据 EL CENTRO NS 1940 和八户地震波 EW1968 地震波,按输入加速度最大值标准化后得到的加速度反应谱。由图可见,输入地震动不同,反应加速度小于输入加速度的  $T_e$  和  $h_{eq}$  有一定的范围。当  $T_e$  较大时,  $h_{eq} = 30\%$  左右,加速度的减低效果较好。

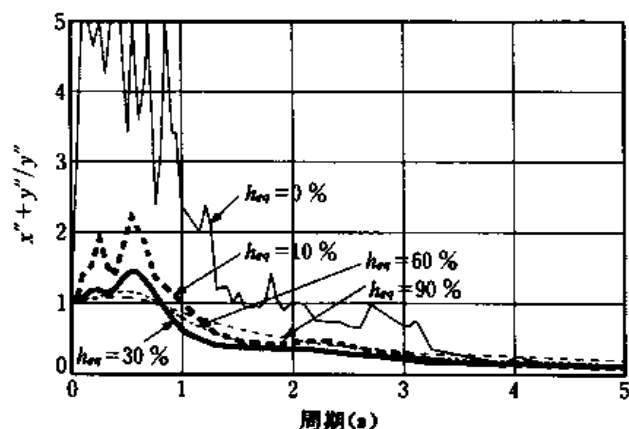


图 5-20 加速度反应谱(EL CENTRO NS 1940)

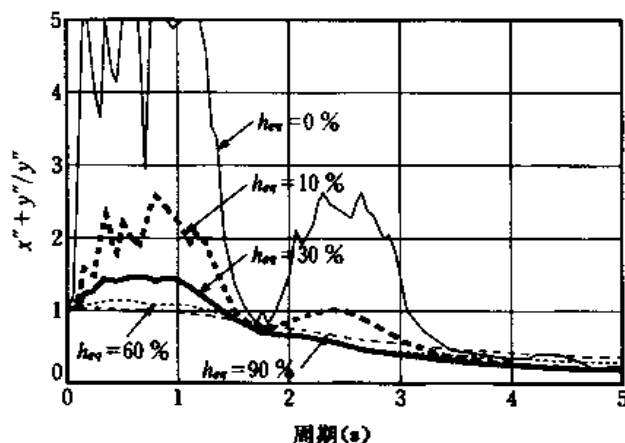


图 5-21 加速度反应谱(HACHINOHE EW 1968)

在小位移范围  $T_e$  很大的情况下,如果希望取得小震时的加速度减低效果,如何确保  $h_{eq}$ ,以及如果考虑风荷载下的反应,如何确保小位移范围的刚度(要使  $T_e$  很小),在设计方案上,阻尼器的选择是其中的一个条件。

此外,如果考虑地震反应具有非确定性,阻尼器在屈服前以及在卸荷刚性范围,不能吸收能量。因此,如果采用2种类型阻尼器的组合,使其中一个阻尼器早期屈服,或采用装有阻尼器的高阻尼橡胶作为辅助阻尼器,可以取得较好的效果。

## 第 6 章 隔震层的基本设计方法

### 6.1 基本方针和设计流程

#### 6.1.1 基本方针

均衡的隔震结构设计,需要对隔震结构的定性、定量的关系有全面的理解。本章介绍在初步设计阶段,不采用弹塑性动力分析,简单计算隔震层的位移和剪力等的方法。该设计方法,是根据日本建筑学会“隔震结构设计指南(1993)”中的能量平衡方法和反应谱方法。

在实际设计时,设计人员要由设定输入地震动水平,仔细计算隔震层和上部结构的动力反应,以及在强风时的动力反应,使预期的性能得以发挥。本设计方法,是根据给定的数据和特定的地震动所进行的反应分析结果综合判断,确保结构的安全性,取得最好的设计目标。

#### 6.1.2 适用范围

本章是以隔震层设置在一层以下或地下层以下的一般隔震结构为对象进行介绍。对于隔震层设置在中间层、大跨度结构等、以及不能保证平面刚度的建筑物,采用本设计方法还不充分,需要采用其他方法进行详细分析。

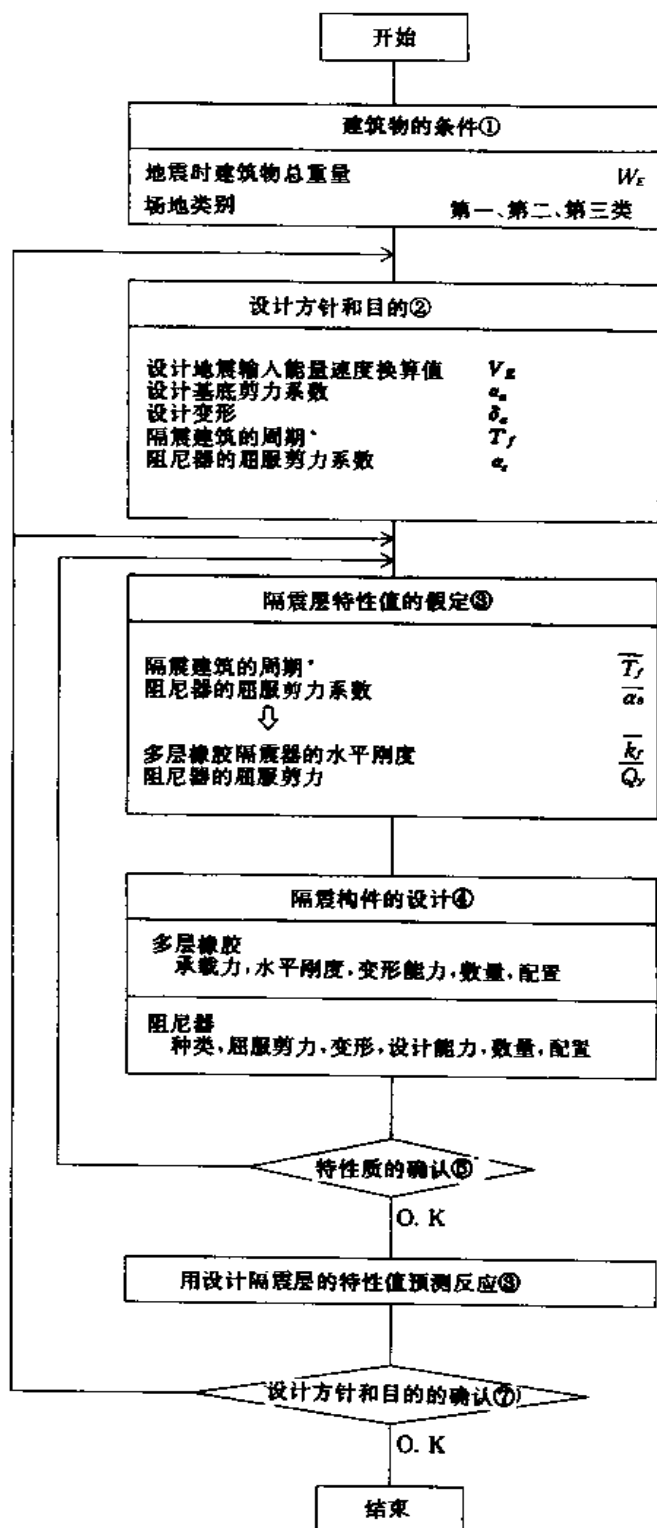
#### 6.1.3 隔震层的基本设计流程和各项说明

图 6-1 所示为隔震层的基本设计流程,流程说明如下。文中的序号与设计流程的项目对应。

- 1)建筑条件①、确定设计方针和目的②。
- 2)按满足②的条件假定隔震层的特性值③。
- 3)根据所假定的特性值,进行各隔震构件的设计④。当隔震构件不符合要求时,或由特性值确认⑤发现与假定的特性值相差较大时,返回③修正特性值后重新设计。
- 4)用设计的隔震层特性值进行反应预测⑥,确认设计方针和目的⑦。不满足设计方针和目的时,返回②或③重新设计。

### 6.2 按隔震结构设计指南的设计法

下面介绍根据“隔震结构设计指南(1993)”给出的能量平衡来预测反应的设计方法。反应预测是基于“地震时隔震结构所吸收的全部能量,除受地基影响外,仅与建筑物的重量和自振周期有关”的思路。在隔震建筑的周期范围内(2 秒以上),隔震结构所吸收的能量为一定值,根据地基的类别由设计能量的速度换算值  $V_E$  来设定所吸收的能量。 $V_E$  值可以按水准 2 的地震动,或建筑基准法施行令的二次设计水准,或建筑物所在地以往所遭



\* 仅由所有隔震器水平刚度确定的自振周期

图 6-1 隔震层的基本设计流程

受的最大地震动,以及预计将来可能遭受的最大的地震动来设定。 $V_E$  值设定在考虑设计目标和建筑物的重要性,确定合适的值。对于该  $V_E$  值,上部结构基本可以按弹性反应考虑。

下面说明隔震层基本设计流程的各项。

### 6.2.1 建筑物的条件①

对所设计建筑物的条件进行整理。

地震时建筑物的总重量  $W_E$ ,在计算隔震建筑的周期和作用于隔震层的力时需要用到。

根据地基的类别,判别建筑物所在的场地是属于一类、二类还是三类。特别对于三类场地地基,要考虑地震时,地基达到塑性化的卓越周期不能与隔震建筑的周期接近,隔震建筑的周期应取得足够长。

### 6.2.2 设计方针·目的②

为充分发挥隔震建筑的性能,设计人员应根据建筑物的设计方针,设定以下项目的数值。

根据设计目标、地基类别、建筑物的重要性等,确定设计地震动输入能量速度换算值  $V_E$  的大小。

设定设计基底剪力系数  $\alpha_a$

设定设计变形  $\delta_a$

设定隔震建筑的周期  $T_f$

$$T_f = 2\pi \sqrt{\frac{W_E}{gk_f}} (\text{s}) \quad (6-1)$$

$K_f$ :所有隔震器的水平刚度

$g$ :重力加速度( $980\text{cm/s}^2$ )

考虑隔震层产生的最大反应位移、最大反应层剪力等以及风荷载等,确定阻尼器的屈服剪力系数  $\alpha_s$ 。

这里没有必要设定所有的项目,而是需要确定设计方针的大致范围。设定这些设计方针项目的一般范围参考表 6-1。

### 6.2.3 隔震层特性值的假定③

这里以“隔震结构设计指南(1993)”中的设计方法得到的不同地基类别的图(图 6-3 ~ 图 6-5)来进行反应预测,假定隔震层的特性值。其中一个方法是根据基底剪力系数  $\alpha_1$  小于  $\alpha_a$ ,隔震层的最大位移  $\delta_{\max}$  小于  $\delta_a$  的要求,假定隔震建筑的周期和阻尼器的屈服剪力系数。

由于隔震构件(多层橡胶和阻尼器)产品与设计值之间存在误差,以及由于温度变化和老化等使刚度和阻尼器的屈服承载力产生离散,考虑这些影响因素,在各参数设定时应留有一定富余。图 6-2 为参数设定的一个例子。

表 6-1 设计方针的项目及其一般范围和说明

设计方针项目	一般范围	说 明
(1)设计地震输入能量的速度换算值 $V_E(\text{cm/s})$	第一类地基 120 第二类地基 150 第三类地基 200	由输入地震水平设定 $V_E$
(2)设计基底剪力系数 $\alpha_a$	0.1 ~ 0.2 左右	$\alpha_a$ 要考虑上部结构的反应剪力的大小来设定。特别当需要减小上部结构的反应剪力时,应以准则考虑 $\alpha_a$ 。
(3)设计变形 $\delta_a(\text{cm})$	20 ~ 50cm 左右,并小于多层橡胶直径的一半	$\delta_a$ 应小于多层橡胶隔震器的变形能力、阻尼器的变形能力和水平净距。
(4)隔震建筑的周期 $T_f(\text{s})$	2 ~ 5 秒左右	考虑地基卓越周期等确定。
(5)阻尼器的屈服剪力系数 $\alpha_i$	0.02 ~ 0.10 左右	$\alpha_i$ 的标准值为 0.05 左右。 $\alpha_i$ 过大,会影响上部结构的反应降低效果; $\alpha_i$ 过小,则地震时的反应位移会增大,而且在风荷载下建筑物容易产生晃动。
(6)竖向自振频率 $f_v$	10 ~ 20Hz 左右	是考虑隔震层竖向刚度时隔震建筑的自振频率。在特别需要考虑竖向振动时设定。
(7)层反应	由设计人员任意确定	在考虑维持设备、机器功能和居住性能时设定。

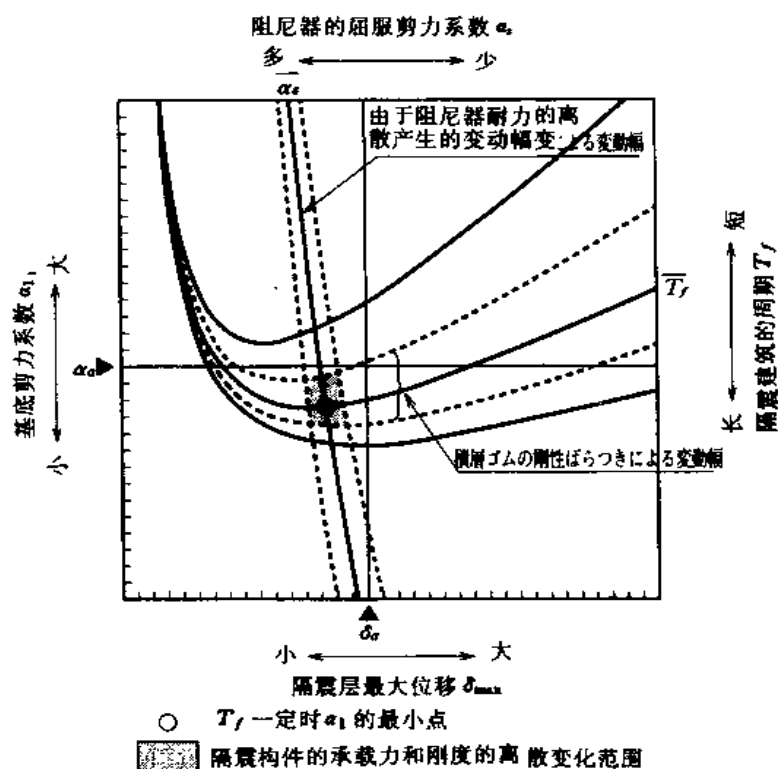


图 6-2  $\alpha_i, T_f, \alpha_a, \delta_{\max}$  的关系

由假定的隔震建筑的周期  $\bar{T}_f$  和阻尼器的屈服剪力系数  $\bar{\alpha}_s$ , 仅取决于多层橡胶隔震器群的水平刚度  $\bar{k}_f$  和阻尼器的屈服剪力  $\bar{Q}_y$ , 按(6-2)式和(6-3)式计算。

$$\bar{k}_f = \frac{4\pi^2 W_E}{g \bar{T}_f^2} \text{ (t/cm)} \quad (6-2)$$

$$\bar{Q}_y = \bar{\alpha}_s W_E \text{ (t)} \quad (6-3)$$

#### 6.2.4 隔震构件的设计④

用③假定的  $\bar{k}_f$  和  $\bar{Q}_y$ , 考虑多层橡胶隔震器和阻尼器的种类、性能、配置等, 进行隔震构件的初步设计。多层橡胶隔震器参考第4章设计, 阻尼器参考第5章设计。对于具有阻尼性能的多层橡胶隔震器, 将弹性性能考虑为隔震器、阻尼性能考虑为阻尼器, 本设计方法也可以适用。

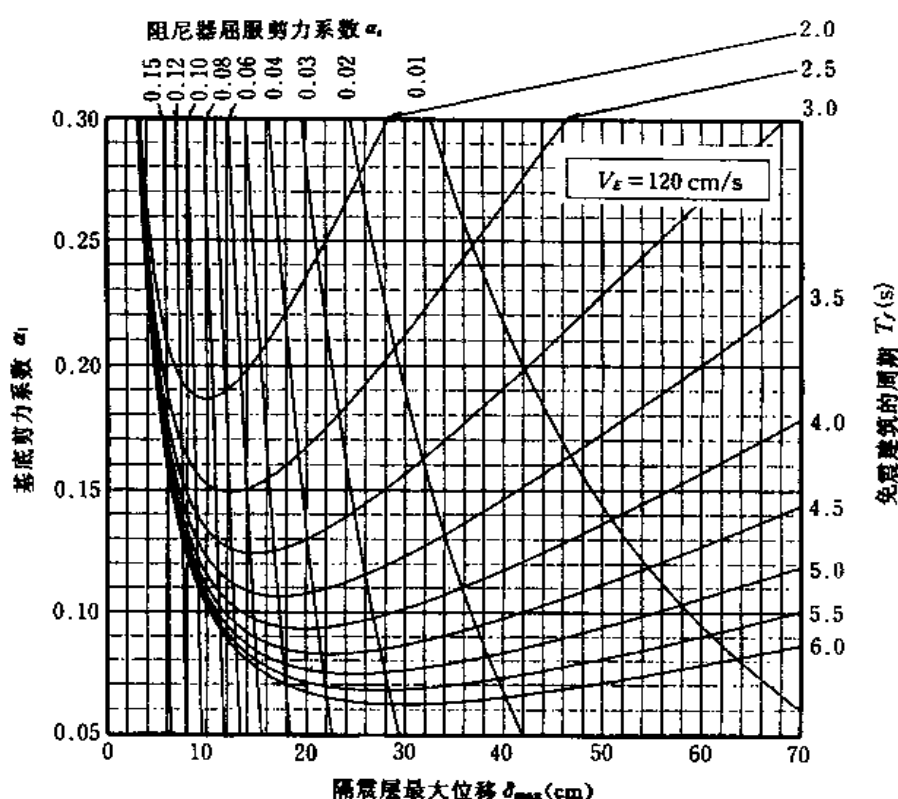


图 6-3 第一类场地的基底剪力系数与隔震层变形的关系 ( $V_E = 120 \text{ cm/s}$ )

##### (1) 多层橡胶隔震器

1. 要把握上部结构底部各柱下的竖向轴力的平面分布及其最大值和最小值。
2. 由隔震建筑的周期  $\bar{T}_f$ , 设定多层橡胶隔震器的平均面压。

早期的隔震建筑,  $\bar{T}_f$  为 2 秒左右, 但近来隔震建筑规模增大, 面压很高, 已设计了  $\bar{T}_f$  在 4 秒左右隔震效果非常好的隔震建筑。实际面压常用  $50 \text{ kg/cm}^2$  至  $150 \text{ kg/cm}^2$ 。

3. 多层橡胶隔震器的最小直径取隔震层设计位移  $\delta_d$  的 2 倍以上。
4. 各公垂线机隔震器的直径取决于柱下的竖向轴力。当柱下轴力较小, 大多数多层橡胶隔震器未达到平均面压, 取最小直径时, 隔震层的刚度将增大, 隔震建筑的周期就会比假定的周期缩短。此时, 需要考虑对上部结构的设计(柱的布置等)进行修改。
5. 参考第 4 章, 按各多层橡胶隔震器水平刚度的总和等于假定的  $\bar{k}_f$  来设计各隔震器。
6. 如果隔震层的大部分隔震器的直径很大, 则隔震层较为稳定, 这种情况下, 可以将一部分多层橡胶隔震器的橡胶总厚度增大, 减小 2 次形状系数(多层橡胶的直径/橡胶总厚度), 这是降低刚度值的有效方法, 但必须考虑各多层橡胶隔震器的 2 次形状系数、面压和最大变形量的均衡。

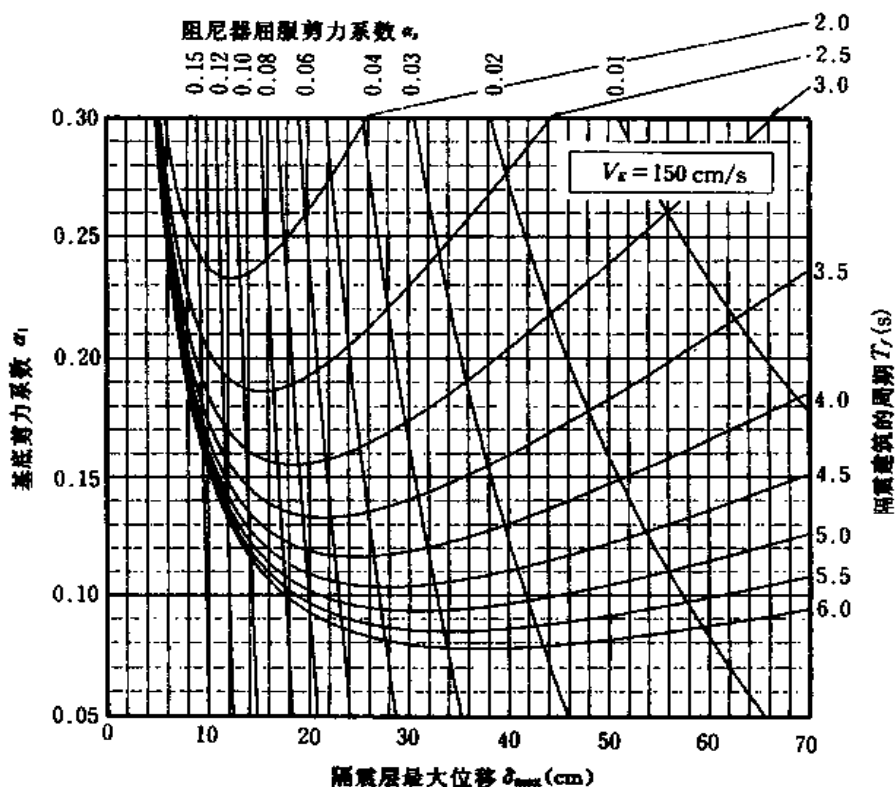


图 6-4 第二类场地的基底剪力系数与隔震层变形的关系 ( $V_E = 150 \text{ cm/s}$ )

## (2) 阻尼器

- 1) 参考第 5 章选择阻尼器的种类。
- 2) 应确认阻尼器的屈服位移  $\delta_y$  远小于设计位移  $\delta_d$ 。
- 3) 由各阻尼器屈服剪力之和等于假定的  $\bar{Q}_y$  来阻尼器的数量。
- 4) 阻尼器的配置应避免使隔震层产生偏心, 隔震层的刚心位置应与上部结构的重心位置一致。而且为增加抗扭刚度, 阻尼器应尽可能布置在隔震层平面的外侧。



### 6.2.5 特性值的确认⑤

用④设计的各隔震构件的特性值,按(6-4)式和(6-5)式求  $k_f$ 、 $Q_y$ ,确认与③假定的  $\bar{k}_f$ 、 $\bar{Q}_y$  基本一致。当误差较大时,隔震构件的设计不合适,应返回③对特性值进行修正。

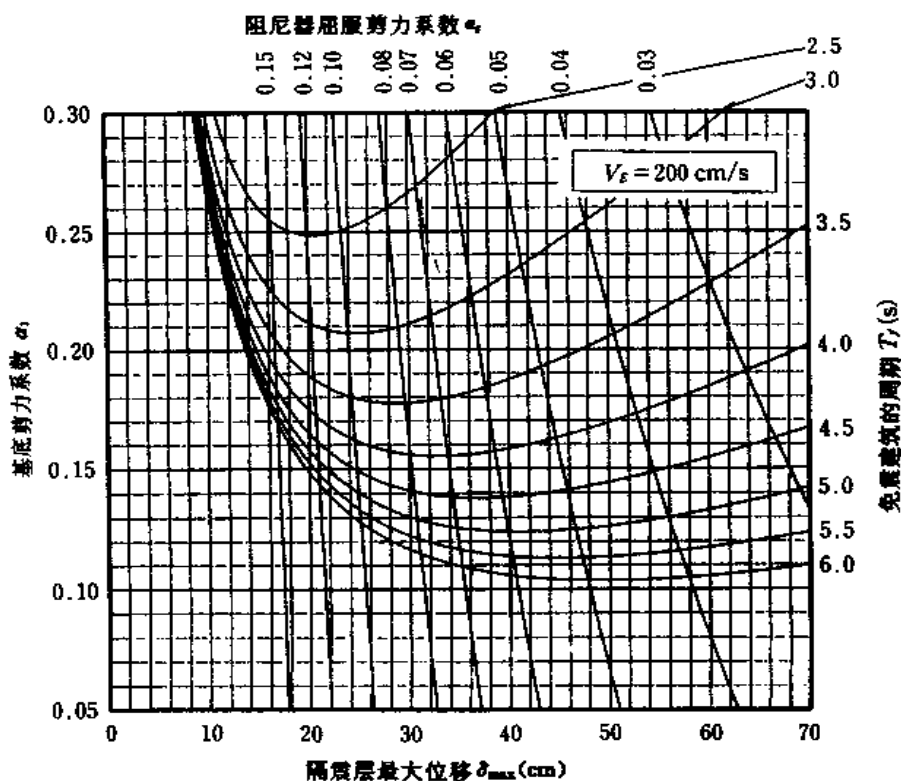


图 6-5 第三类场地的基底剪力系数与隔震层变形的关系 ( $V_E = 120\text{cm/s}$ )

$$k_f = \sum k_h (\text{t/cm}) \quad (6-4)$$

$$Q_y = \sum f_{yd} (\text{t}) \quad (6-5)$$

式中,  $k_h$ :各隔震器的水平刚度( $\text{t/cm}$ )  $f_{yd}$ :各阻尼器的屈服承载力( $\text{t}$ )

### 6.2.6 利用设计隔震层特性值预测反应⑥

将⑤设计的隔震构件的特性值代入(6-1)式和(6-6)式,求得隔震建筑的周期  $T_f$  和阻尼器的屈服剪力系数  $\alpha_s$ ,再由设计地震动输入能量的速度换算值  $V_E$ ,求得隔震层的基底剪力系数  $\alpha_1$  和隔震层的最大位移  $\delta_{\max}$ 。计算时应考虑隔震构件特性值的离散情况。按水准 2 的地震动和建筑基准法施行令的二次设计水准的反应预测可根据图 6-3 ~ 图 6-6 确定。

$$\alpha_s = \frac{Q_y}{E_E} \quad (6-6)$$

### 6.2.7 设计方针·目的确认⑦

在⑥中,考虑隔震构件特性值的离散求得的隔震层最大反应位移  $\delta_{\max}$  应小于②中设

定的  $\delta_a$ , 基底剪力系数  $\alpha_1$  应小于②中设定的设计基底剪力系数  $\alpha_a$ 。

## 6.3 采用反应谱的设计法

为全面反映结构物受地震动作用时的振动情况,对具有各种阻尼常数和自振周期单质点体系进行弹性振动反应计算,以反应的最大值为竖轴,自振周期为横轴表示的图形就是反应谱。反应谱有加速度( $S_a$ )反应谱、速度( $S_v$ )反应谱和位移( $S_d$ )反应谱。建筑基准法施行令中用于确定地震力大小的是加速度反应谱  $S_a$ 。从隔震结构受地震动时振动情况的总体来看,由隔震器和阻尼器构成的隔震层仅作水平方向的变形,上部结构作为一个刚体前后左右缓慢摇晃。因此,单质点体系的反应谱可以用于表示隔震结构的振动情况。

在隔震结构的设计中,最关心的数值是上部结构作用的水平力  $Q_1$  和隔震层产生的最大位移  $\delta_{\max}$ 。 $Q_1$  是地震时建筑物的总重量  $W_E$  与最大反应加速度  $\alpha_1$  的乘积,即为加速度反应谱  $S_a$ ,  $\delta_{\max}$  最大位移即为位移反应谱  $S_d$ 。

由于隔震结构的隔震层为弹塑性振动,为能应用反应谱,需将隔震结构置换为具有等价周期  $T_{eq}$  和等价阻尼  $h_{eq}$  的单质点体系。该方法称为等价线性化法。

本节介绍由地震时总重量  $W_E$ , 多层橡胶隔震器群的水平刚度  $k_f$  和阻尼器的屈服剪力系数  $\alpha_s$  等价为单质点的方法,以及按此进行反应预测的方法。进一步介绍由  $\delta_{\max}$  和  $\alpha_1$  求  $T_{eq}$  和  $h_{eq}$ , 以及由此计算多层橡胶隔震器的刚度  $k_f$  和阻尼器的屈服剪力系数  $\alpha_s$  的方法。

### 6.3.1 等价线性化法

假定隔震层的最大位移为  $\delta_{\max}$ , 则此时参照图 6-6, 等价刚度  $K_{eq}$ 、等介周期  $T_{eq}$  和等价阻尼常数  $h_{eq}$ 。

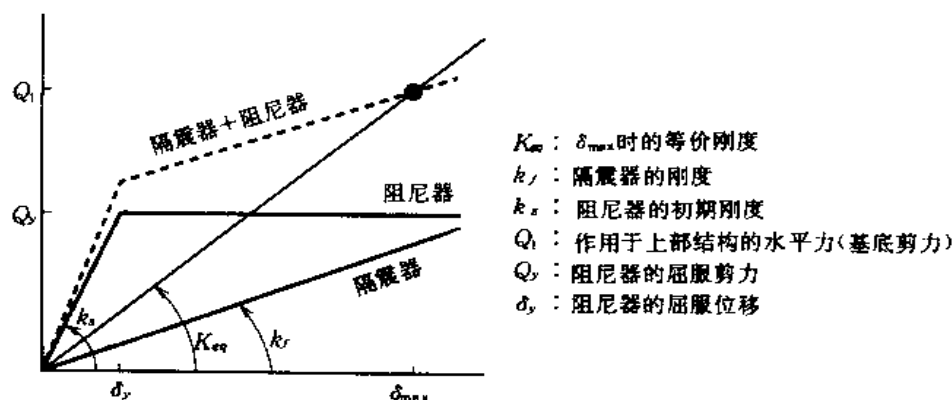


图 6-6 等价线性化

$$K_{eq} = k_f + \frac{\alpha_s W_E}{\delta_{\max}} \quad (\text{t/cm}) \quad (6-7)$$

$$T_{eq} = 2\pi \sqrt{\frac{W_E}{qK_{eq}}} \text{ (s)} \quad (6-8)$$

$$h_{eq} = \frac{1}{4\pi} \cdot \frac{4Q_Y(\delta_{\max} - \delta_Y)}{\frac{1}{2}K_{eq}\delta_{\max}^2} = \frac{g}{2\pi^3} \cdot \frac{T_{eq}^2 \alpha_s (\delta_{\max} - \delta_Y)}{\delta_{\max}^2} \quad (6-9)$$

这里,考虑  $\delta_{\max} \gg \delta_Y$ , 并将  $g = 980(\text{cm/s}^2)$  代入,得,

$$h_{eq} = \frac{15.8 T_{eq}^2 \alpha_s}{\delta_{\max}} \quad (6-10)$$

### 6.3.2 反应谱

将建筑基准法施行令中二次设计的基底剪力系数最小值  $C_0 = 1.0$  与振动特性系数  $R_i$  的乘积,作为阻尼常数为零时的加速度反应谱。考虑隔震结构的周期比较长,各反应谱可按(6-11)式和(6-12)式确定。

$$\text{加速度反应谱:} \quad S_A = \frac{1.6gT_c}{T_{eq}} \text{ (cm/s}^2\text{)} \quad (6-11)$$

$$\text{位移反应谱:} \quad S_D = \frac{1.6gT_c T_{eq}}{4\pi^2} \text{ (cm)} \quad (6-12)$$

上式中  $T_c$  与场地类别有关,综合考虑 6-2 节,一类、二类、三类场地的  $T_c$  分别取 0.48、0.60、0.80。各反应谱见表 6-2。

表 6-2 反应谱( $h_{eq} = 0.0$ )

场地类别	场地周期 $T_c(\text{s})$	加速度反应谱 $S_A$	速度反应谱 $S_V$	位移反应谱 $S_D$
第一类	0.48	$753/T_{eq}$	120	$19.1 T_{eq}$
第二类	0.60	$941/T_{eq}$	150	$23.8 T_{eq}$
第三类	0.80	$1254/T_{eq}$	200	$31.8 T_{eq}$

根据等价阻尼常数  $h_{eq}$ ,采用反应降低系数  $D(h_{eq})$ ,则隔震层的最大位移  $\delta_{\max}$  和基底剪力系数  $\alpha_1$ ,由前述不同地基类别的反应谱按(6-13)式、(6-14)式求得。

$$\delta_{\max} = S_D D(h_{eq}) \text{ (cm)} \quad (6-13)$$

$$\text{式中, } D(h_{eq}) = \frac{1}{\sqrt{7.5\pi h_{eq} + 1}}$$

$$\alpha_1 = \frac{S_A D(h_{eq})}{g} = \frac{1.6 T_c D(h_{eq})}{T_{eq}} \quad (6-14)$$

图 6-7 ~ 图 6-9 给出了不同地基类别的等价线性法的  $\delta_{\max}$  值和基底剪力系数  $\alpha_1$ 。

### 6.3.3 反应预测方法

下面介绍用反应谱来确定  $\delta_{\max}$ 、 $\alpha_1$  的反应预测的步骤。这对应于图 6-1 的③ ~ ⑦。

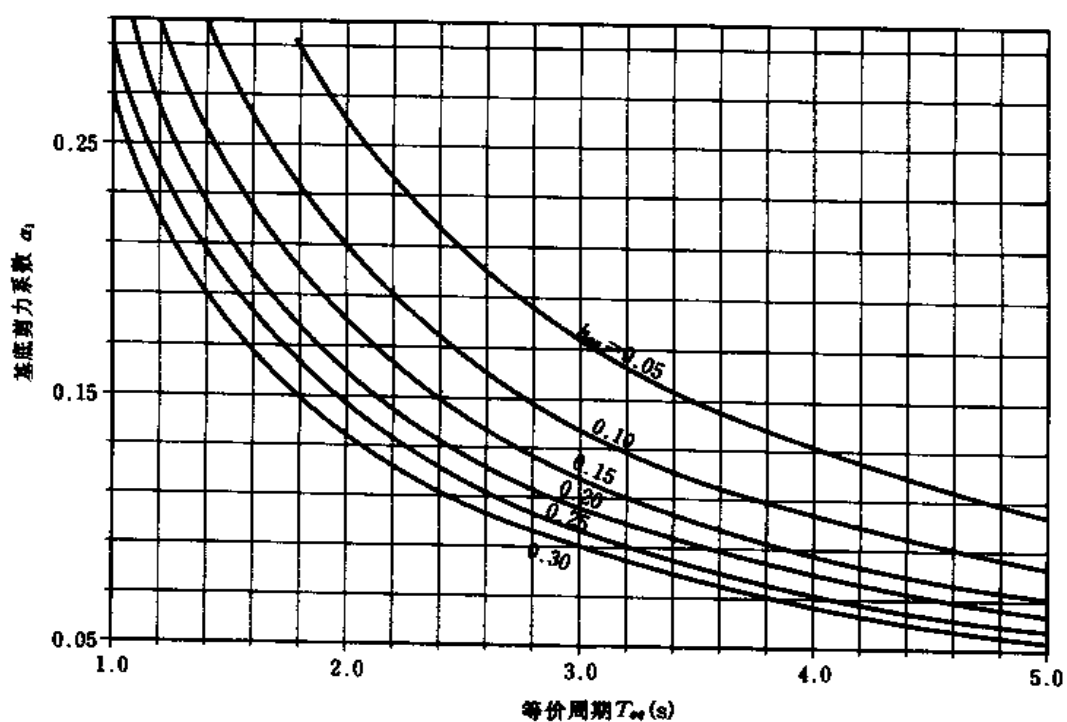
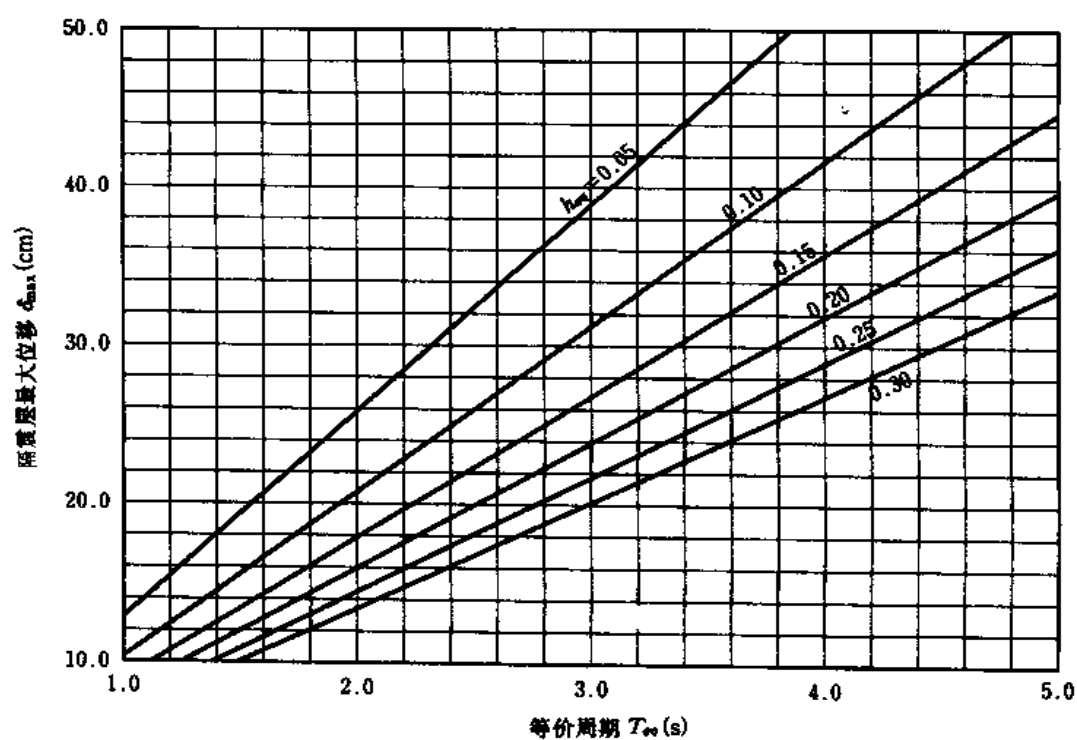


图 6-7 第一类场地反应谱

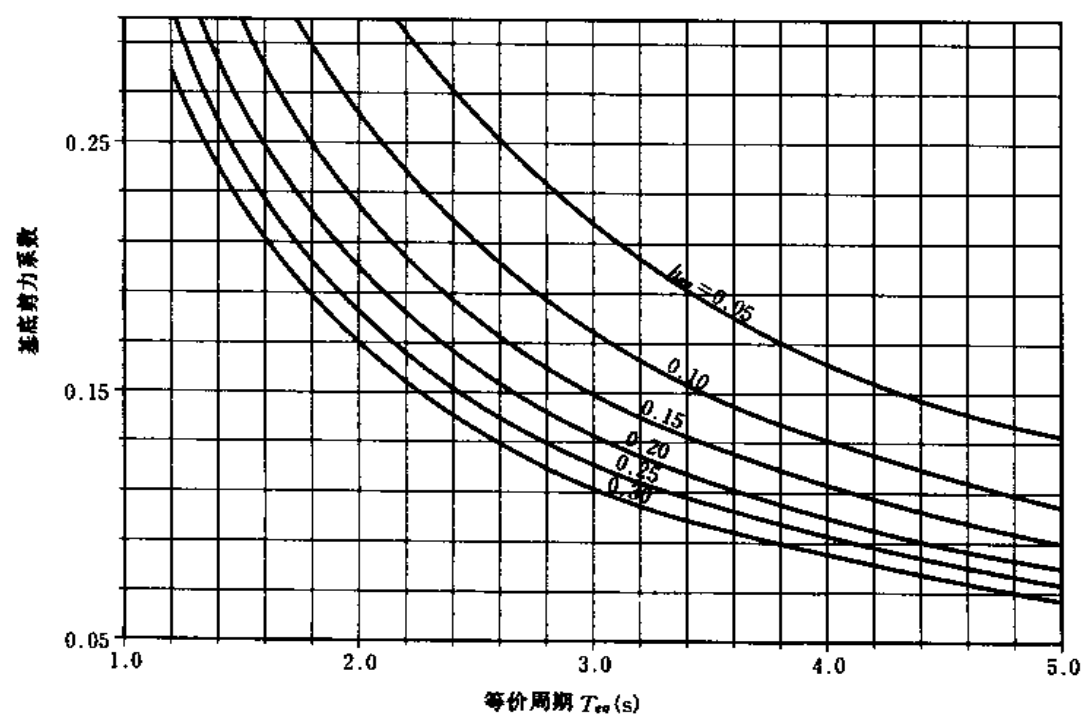
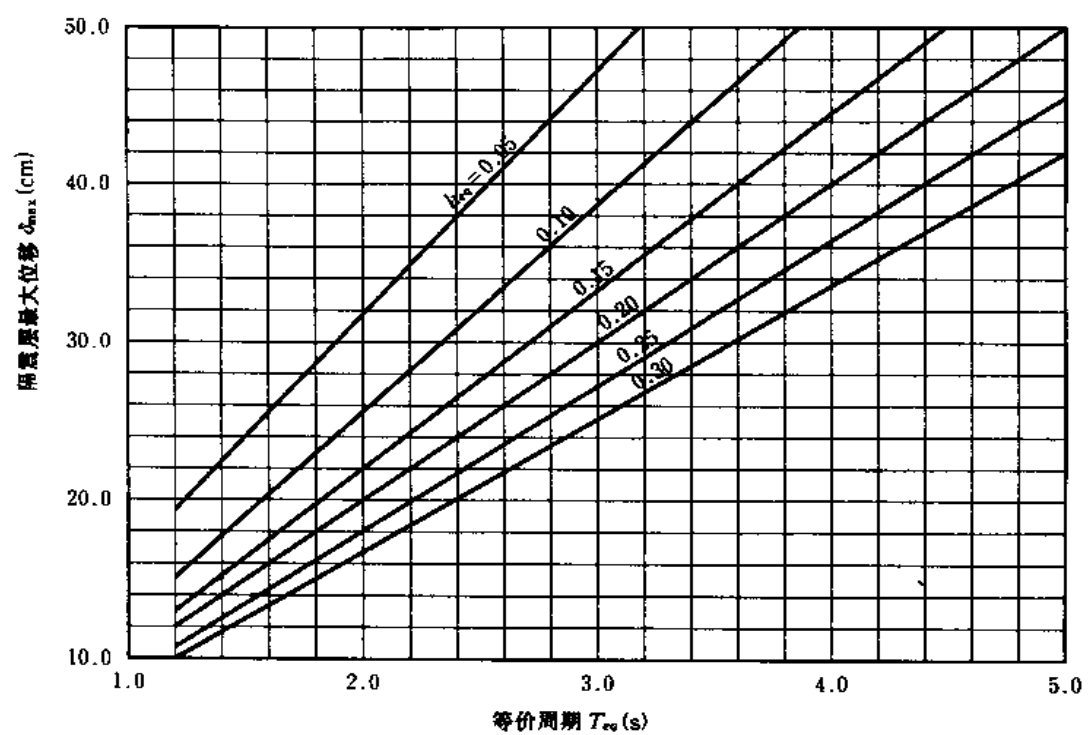


图 6-8 第二类场地反应谱

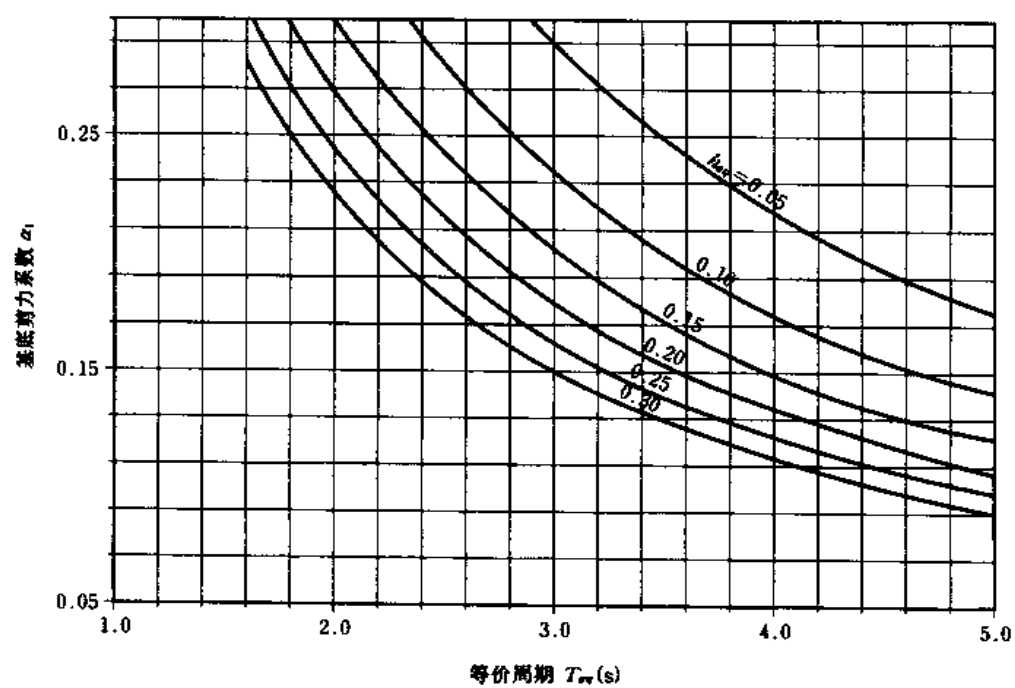
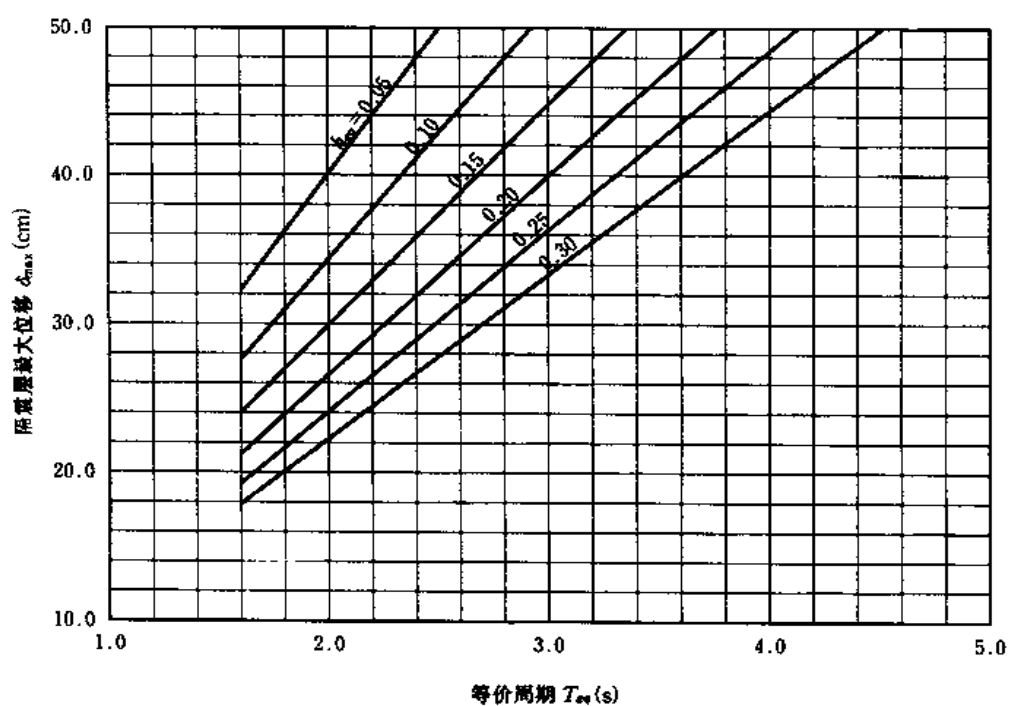


图 6-9 第三类场地反应谱

由多层橡胶隔震器的刚度  $k_f$  和地震时建筑物的总重量  $W_E$ , 求得隔震建筑的周期  $T_f$  和阻尼器的屈服剪力系数  $\alpha_s$ , 再按等价单质点体系进行反应预测。

首先, 假定隔震层的最大位移  $\overline{\delta_{\max}}$ 。由  $k_f$ 、 $\alpha_s$ 、 $\overline{\delta_{\max}}$  用(6-7)式、(6-8)式求得等价自振周期  $T_{eq}$ 。然后由(6-9)式求得  $h_{eq}$ , 再由图 6-7 ~ 图 6-9 求得  $\delta_{\max}$ , 与假定值  $\overline{\delta_{\max}}$  比较, 差别较大时, 对假定值修正后返回再进行计算, 最终求得  $\delta_{\max}$  和基底剪力系数  $\alpha_1$ 。

#### 6.3.4 根据等价阻尼和等价周期设定隔震层的特性值

由设定的设计基底剪力系数  $\alpha_a$  和设计位移  $\delta_a$ 、计算阻尼器的屈服剪力系数  $\alpha_s$  和多层橡胶隔震器的刚度  $k_f$  的方法如下。

首先, 由图 6-7 ~ 图 6-9 求得满足设计位移  $\delta_a$  和设计基底剪力系数  $\alpha_a$  的  $\delta_{\max}$ 、 $\alpha_1$ 、 $h_{eq}$ 、 $T_{eq}$ 。代入式(6-15)和式(6-16)求得  $\alpha_s$  和  $k_f$ 。

$$\alpha_s = \frac{h_{eq}\delta_{\max}}{15.8T_{eq}} \quad (6-15)$$

$$k_f = 4\pi^2 \frac{W_E}{gT_{eq}^2} - \frac{\alpha_s W_E}{\delta_{\max}} \text{ (t/cm)} \quad (6-16)$$

### 6.4 时程反应分析

为掌握隔震结构的实际性能, 采用时程反应分析是有效的手段。采用时程反应分析主要由以下 2 个目的。

#### (1) 确认隔震层基本设计方法的反应预测

在隔震层的基本设计方法中, 由地震动水平设定输入能量(能量反应谱), 根据能量平衡, 由隔震器和阻尼器的恢复力特性计算隔震层的最大位移和最大剪力系数。所求得值包含了多种时程反应分析的结果。而时程反应分析不仅能求得隔震层的反应剪力和反应位移, 而且能得到残余变形、上部结构的反应剪力分布、反应加速度分布等详细的情况。同时采用两种方法, 可以确保隔震结构的安全性。

由于反应值与所采用的地震动的动力特性有很大的关系, 因此仅采用时程反应分析进行设计, 有时不能给出全面的判断。所以, 在设计中要利用这两个方法的各自的长处。

#### (2) 把握 2 维和 3 维的反应

实际结构在地震时的反应是 3 维的。结构受上下振动和水平 2 个方向振动以及扭转振动的影响, 采用平面或空间模型进行时程反应分析可以更好的把握结构的详细反应情况, 确保结构的安全性。本节介绍规则隔震结构时程反应分析的概要及其分析实例。

#### 6.4.1 时程反应分析的概要

##### (1) 分析方法

根据阻尼器的种类, 时程反应分析有二种方法。对于弹塑性阻尼器, 恢复力模型为滞回型时, 可采用直接积分进行弹塑性时程反应分析。而对于粘滞型的油阻尼器, 除采用直接积分外, 可以采用振型组合方法进行弹性反应分析。

## (2)地震动输入

时程反应分析受地震动的频率特性和相位特性影响较大,因此可采用特性不同地震动输入。

地震动的选择要考虑建筑场地的状况和结构的特性,主要有以下几种:

- 1)EL CENTRO 波、TAFT 波等著名的地震动记录
- 2)考虑建设场地的地基特性的地震动
- 3)按能量谱的模拟地震动

## (3)分析模型

上部结构一般按以下方法建立模型。

- 1)采用每层一个质点的等价剪切型模型。
- 2)由于输入能量基本上由隔震层消耗掉,上部结构的恢复力特性可以采用弹性。

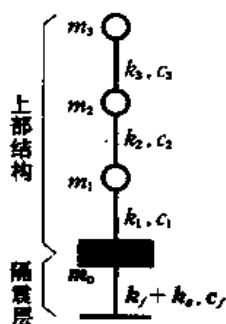
隔震层一般按以下方法建立模型。

- 1)考虑隔震层的最大位移在多层橡胶隔震器剪切变形的线性范围内(一般情况最大为 200%左右),所以在该范围内模型可取为线弹性。
- 2)因为阻尼常数可达  $h_f = 2 \sim 3\%$ ,所以公垂线机的内部阻尼可偏于安全地不考虑。
- 3)粘滞型阻尼器可按阻尼力与相对速度( $v$ )的  $n$  次方成比例( $F = C\dot{v}^n$ )确定阻尼常数( $C$ )和  $n$ 。
- 4)滞回型阻尼器可根据实验结果按双线性或三线性确定恢复力模型。
- 5)铅芯多层橡胶或高阻尼多层橡胶,可采用修正的双线性模型。

## (4)上部结构的阻尼

可以采用与应变能量成比例或直接指定各振型阻尼的方法,但一般采用与刚度成比例的方法来确定阻尼。此时,阻尼常数可按隔震层的一次自振周期设定。虽然阻尼常数可采用以往常用的值,但由于上部结构的层间变形很小,所以也可采用上部结构粘性阻尼的一半。

## (5)矩阵的形成



在等价剪切型模型中,阻尼矩阵可以按与刚度成比例的情况形成。下面以 3 层结构,加上隔震层,为 4 质点的等价剪切型模型为例说明(图 6-10)。

等价剪切型模型的运动方程式由下式给出,

$$[M]\{\ddot{x}(t)\} + [C]\{\dot{x}(t)\} + [K]\{x(t)\} = -[M]\{(1)\}\ddot{y}(t) \quad (6-17)$$

式中,  $[M]$ :质量矩阵;

$[C]$ :阻尼矩阵;

$[K]$ :刚度矩阵;

$\{x(t)\}$ :相对于地面的位移矩阵;

$\ddot{y}(t)$ :地震动加速度。

图 6-10 等价剪切型模型

各矩阵可表示为以下的形式。其中粗体字表示隔震层的结构特性。

质量矩阵



$$[M] = \begin{bmatrix} m_3 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & m_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & m_1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & m_0 \end{bmatrix} \quad (6-18)$$

式中,  $m_i (i=1,2,3)$ : 2、3 层楼面和层盖的质量;  $m_0$ : 1 层楼面的质量。

刚度矩阵

$$[K] = \begin{bmatrix} k_3 & -k_3 & 0 & 0 \\ -k_3 & k_3 + k_2 & -k_2 & 0 \\ 0 & -k_2 & k_2 + k_1 & -k_1 \\ 0 & 0 & -k_1 & k_1 + (k_f + k_s) \end{bmatrix} \quad (6-19)$$

式中,  $k_i (i=1,2,3)$ : 1、2、3 层的等价剪切刚度;

$k_f$ : 多层橡胶的水平刚度;

$k_s$ : 阻尼器的刚度(随位移面变化)。

阻尼矩阵

$$[C] = \begin{bmatrix} c_3 & -c_3 & 0 & 0 \\ -c_3 & c_3 + c_2 & -c_2 & 0 \\ 0 & -c_2 & c_2 + c_1 & -c_1 \\ 0 & 0 & -c_1 & c_1 + c_f \end{bmatrix} = \frac{2h_0}{\omega_0} \begin{bmatrix} k_3 & -k_3 & 0 & 0 \\ -k_3 & k_3 + k_2 & -k_2 & 0 \\ 0 & -k_2 & k_2 + k_1 & -k_1 \\ 0 & 0 & -k_1 & k_1 + \frac{h_f}{h_0} \cdot \frac{\omega_0}{\omega_f} k_f \end{bmatrix} \quad (6-20)$$

式中,  $c_i (i=1,2,3)$  为各层的阻尼常数

$$c_i = \frac{2h_0}{\omega_0} k_i \quad (6-21)$$

$\omega_0$ : 隔震层固定时上部结构的一次自振频率;

$h_0$ : 与  $\omega_0$  对应的阻尼常数;

$c_f$ : 隔震层的阻尼常数,  $c_f = \frac{2h_f}{\omega_f} k_f$

$\omega_f$ : 仅取决于隔震器群的水平刚度自振频率  $\sqrt{\frac{gk_f}{W_E}}$  (rad/s);

$h_f$ : 多层橡胶的阻尼常数。

## 6.4.2 分析示例

### (1) 分析模型

分析模型如图 6-11 所示, 隔震层的恢复力特性如图 6-12 所示。多层橡胶隔震器和上部结构取为弹性, 阻尼器取为完全弹塑性双线性模型。阻尼器的屈服承载力为 300t, 屈服位移为 1.3cm。

$$T_f = 3.04(\text{s})$$

$$\alpha_s = 0.05$$

采用直接积分法进行分析。阻尼取与刚度成比例,上部结构取为 2% ( $h_0 = 0.02$ ), 隔震层取为 1% ( $h_f = 0.01$ )。

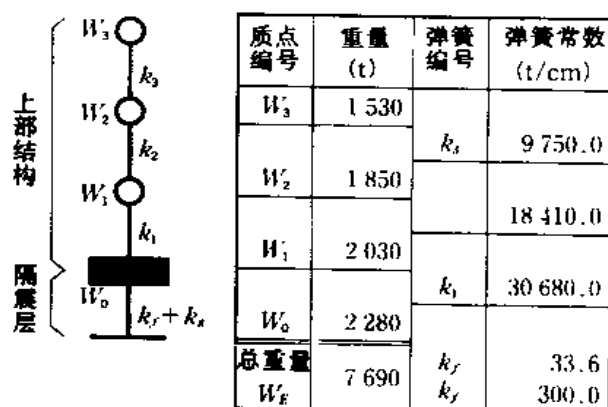


图 6-11 分析模型

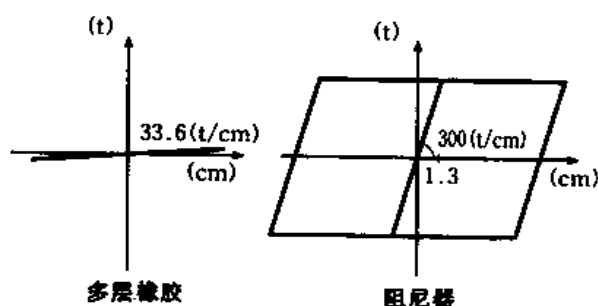


图 6-12 隔震层的恢复力特性

各矩阵如下所示。

$$[M] = \frac{1}{g} \begin{bmatrix} W_3 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & W_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & W_1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & W_0 \end{bmatrix} = \frac{1}{980} \begin{bmatrix} 1530 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1850 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 2030 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 2280 \end{bmatrix}$$

式中,  $g$  表示重力加速度 ( $\text{cm/s}^2$ )

$$[K] = \begin{bmatrix} k_3 & -k_3 & 0 & 0 \\ -k_3 & k_3 + k_2 & -k_2 & 0 \\ 0 & -k_2 & k_2 + k_1 & -k_1 \\ 0 & 0 & -k_1 & k_1 + (k_f + k_s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 9750 & -9750 & 0 & 0 \\ -9750 & 28160 & -18410 & 0 \\ 0 & -18410 & 49090 & -30680 \\ 0 & 0 & -30680 & 31013.6 \end{bmatrix}$$

(30713.6)

( ) 内为阻尼器屈服时的情况

$$[C] = \frac{2h_0}{\omega_0} \begin{bmatrix} k_3 & -k_3 & 0 & 0 \\ -k_3 & k_3 + k_2 & -k_2 & 0 \\ 0 & -k_2 & k_2 + k_1 & -k_1 \\ 0 & 0 & -k_1 & k_1 + \frac{h_f \omega_0}{h_0 \omega_f} k_f \end{bmatrix}$$

$$= \begin{bmatrix} 7.93 & -7.93 & 0 & 0 \\ -7.93 & 22.86 & -14.97 & 0 \\ 0 & -14.97 & 39.91 & -24.94 \\ 0 & 0 & -24.94 & 25.27 \end{bmatrix}$$

式中,  $\omega_0 = 7.83\text{Hz} \times 2\pi = 49.20\text{rad/s}$

$\omega_1 = 0.33\text{Hz} \times 2\pi = 2.07\text{rad/s}$

(2) 输入地震动

这里各输入地震动按最大加速度为  $500\text{cm/s}^2$  标准化<sup>①</sup>, 如表 6-3 所示。

表 6-3 输入地震动参数

地震动名称	实测记录		标准化 最大加速度 ( $\text{cm/s}^2$ )	分析 时间 (s)
	最大速度 ( $\text{cm/s}$ )	最大加速度 ( $\text{cm/s}^2$ )		
EL CENTRO 1940 NS	33.45	341.70	510.8	30.0
TAFT 1952 EW	17.71	175.95	496.8	30.0
HACHINOHE 1968 NS	34.08	225.00	330.1	35.0
HACHINOHE 1968 EW	35.81	182.90	255.4	35.0
TOKYO 1956 NS	7.63	74.00	484.9	11.0

(3) 分析结果

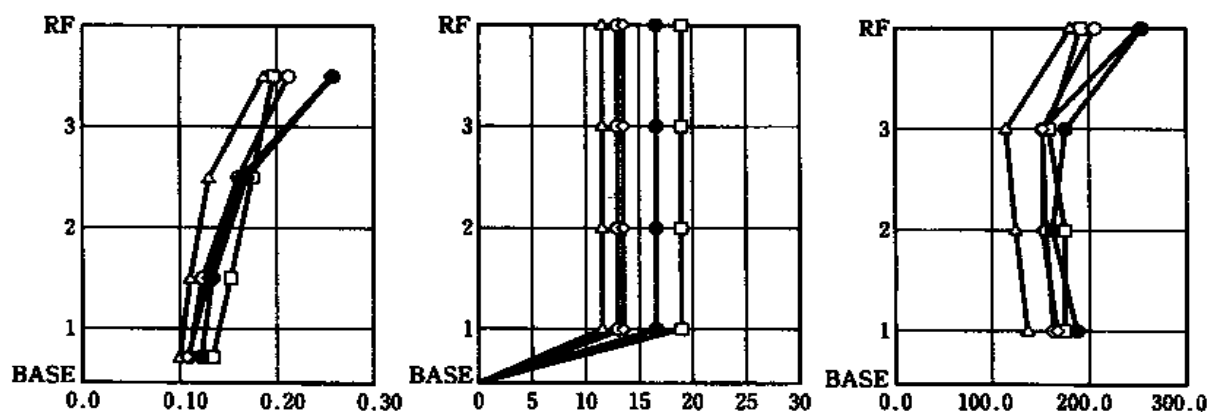


图 6-13 最大反应层剪力系数 图 6-14 最大反应位移( $\text{cm}$ ) 图 6-15 最大反应加速度( $\text{cm/s}^2$ )

① 原文误写为  $50\text{cm/s}$ 。——译者注

分析结果如表 6-4 所示。图 6-13 为最大反应层剪力系数,图 6-14 为最大反应位移,图 6-15 为最大反应加速度。

表 6-4 最大反应结果

符 号	地震动名称	隔震层的基底剪力系数	隔震层的位移 (cm)	能量输入 ( $t \cdot cm$ )	$V_E$ (cm/s)
—●—	EL CENTRO 1940 NS	0.1232	16.59	$6.040 \times 10^4$	124.1
—○—	FAFT 1952 EW	0.1075	13.00	$5.881 \times 10^4$	122.4
—◇—	HACHINOHE 1968 NS	0.1092	13.39	$8.114 \times 10^4$	143.8
—□—	HACHINOHE 1968 EW	0.1335	18.96	$9.369 \times 10^4$	154.5
—△—	TOKYO 1956 NS	0.1011	11.53	$2.072 \times 10^4$	72.7

## 6.5 隔震层的计算例题

本节给出按隔震层基本设计流程的计算实例。不过,本计算实例的隔震构件采用多层橡胶隔震器与钢棒阻尼器组合形式,即采用有阻尼性能的多层橡胶。

### 6.5.1 建筑概况

该建筑为 7 层大厦。采用钢结构,外墙采用预制板。平面采用典型的核心筒。

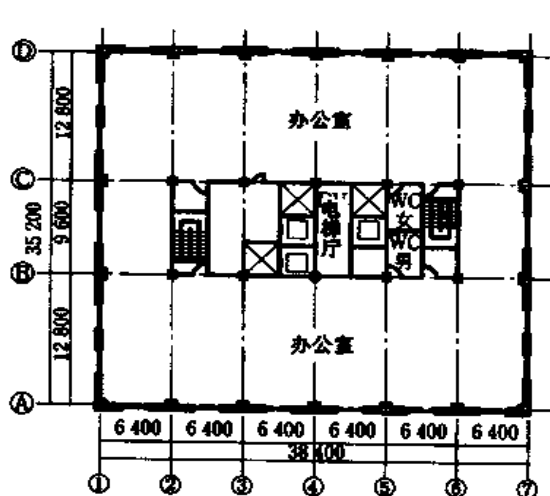


图 6-16 标准层平面图

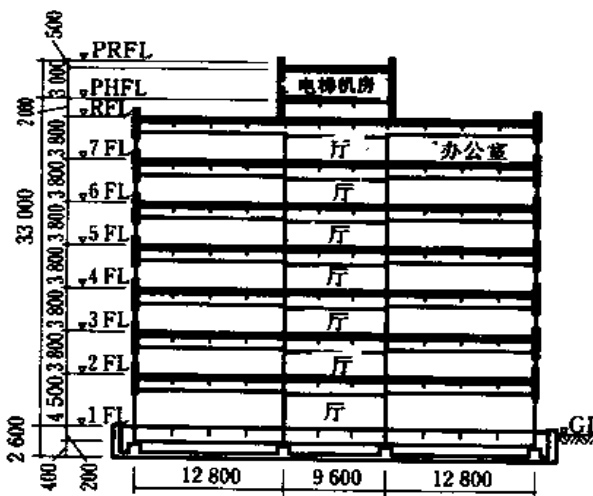


图 6-17 剖面图

### 6.5.2 隔震构件的计算

#### 1) 建筑物的条件

地震时建筑物总重量:  $W_E = 9800t$  地基类别: 第二类地基与护壁的净距: 40cm

#### 2) 设计方针、目的

设计地震动输入能量的速度换算值:  $V_E = 150cm/s$  (第二类地基)

设计基底剪力系数:  $\alpha_a = 0.15$       设计位移:  $\delta_a = 30\text{cm}$

3) 隔震层特性值的假定 由图 6-18, 假定隔震层采用下列特性值。

隔震层的周期:  $T_f = 3.8\text{s}$     阻尼器的屈服剪力系数:  $\bar{\alpha}_s = 0.050$

多层橡胶的水平刚度:  $k_f = \frac{4\pi^2 \cdot W_E}{g \cdot T_f^2} = \frac{4\pi \times 9800}{980 \times 3.8^2} 27.3\text{t/cm}$

阻尼器的屈服剪力:  $Q_y = \bar{\alpha}_s \cdot W_E = 0.050 \cdot W_E = 490.0\text{t}$

4) 隔震构件的设计 采用多层橡胶隔震器与钢棒阻尼器的组合。

① 多层橡胶隔震器

在各柱下设置多层橡胶隔震器, 数量为 28 个。考虑柱和外墙预制板的配置, 各柱相差并不大, 取每个多层橡胶的轴力为 350t。

平均面压为  $90\text{kg/cm}^2$ , 最大面压为  $120\text{kg/cm}^2$ 。

多层橡胶的直径取设计位移  $\delta_a$  的 2 倍, 即 600 $\phi$  以上。

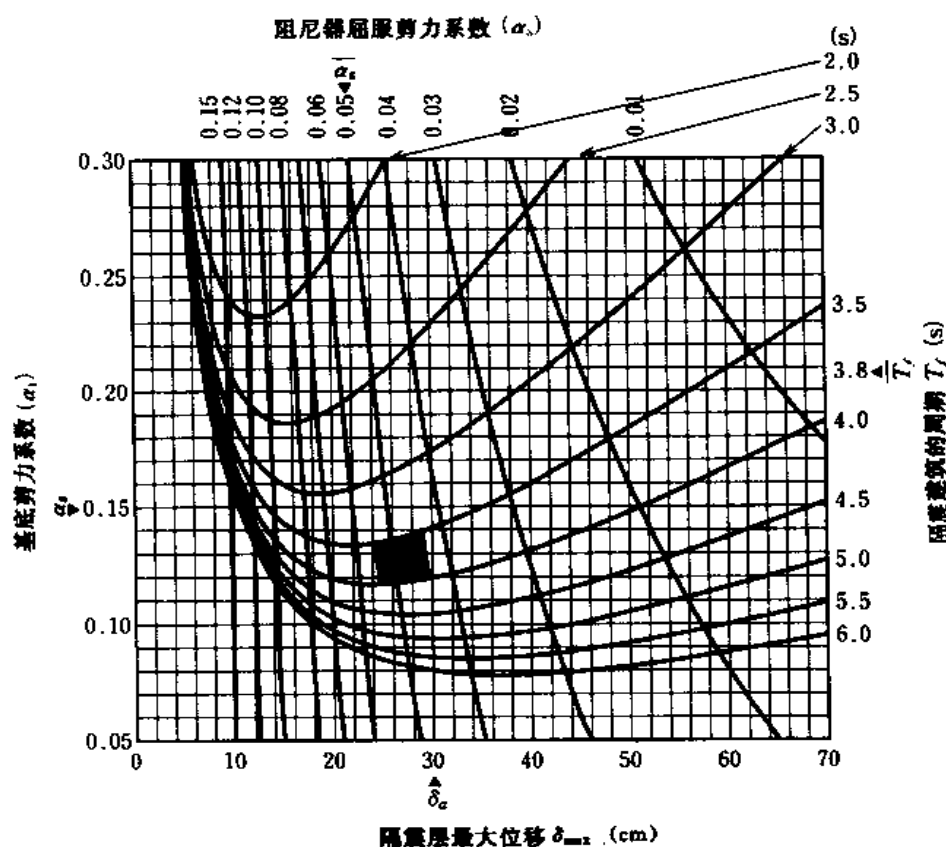


图 6-18 基底剪力系数与隔震层位移的关系 ( $V_E = 150(\text{cm/s})$ )

考虑以上条件, 中柱和边柱多层橡胶隔震器的直径均取 700 $\phi$ 。因此面压的平均为  $90\text{kg/cm}^2$ 。

考虑多层橡胶隔震器的稳定性, 二次形状系数  $S_2$  取 4~5 左右。

多层橡胶的剪切弹性模量  $G$  取  $4.0\text{kg/cm}^2$ 。采用假定的隔震层特性值计算, 橡胶层厚度 ( $h = n \cdot t_r$ ) 取以下值。

$$h = \frac{G \cdot A}{\bar{k}_f} = \frac{4.0 \times 35 \times 35 \times \pi \times 28}{27.3 \times 1000} = 15.8$$

橡胶每层厚度取 5mm, 32 层厚为  $h = 16\text{cm}$ , 则  $k_f = 26.9\text{t/cm}$ 。  $S_2 = D/h = 70/16 = 4.4$ , 在上述范围内。

## ② 阻尼器

采用屈服剪力为 21.0t、屈服位移为 3cm 的阻尼器。

数量  $490.0/21 = 23.3$ , 取 24 个。

变形能力为 40cm, 大于  $\delta_a = 30\text{cm}$ , 没有问题。

图 6-19 为多层橡胶隔震器和阻尼器的配置和数量。

5) 特性值的确认  $k_f = \sum k_h = 26.9\text{t/cm}$ , 与  $\bar{K}_f = 27.3\text{t/cm}$  比较, 没有问题。

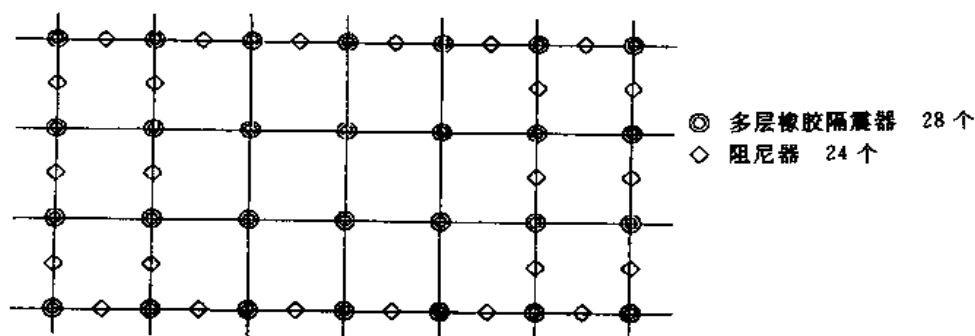


图 6-19 隔震构件的配置

$Q_y = \sum q_{fd} 504\text{t}$ , 与  $Q_y = 490\text{t}$  比较, 没有问题。

6) 用设计的隔震层特性值预测反应 对多层橡胶的刚度为 -10%、0%、20% 的 3 种变化情况和对阻尼器屈服剪力系数为 -10%、0%、10% 的 3 种变化情况的组合进行反应预测, 采用“隔震结构设计指南(1993)”的计算公式。多层橡胶:0%、阻尼器:0% 的组合情况的计算如下所示。计算结果如表 6-5 所示。

$$T_f = 2\pi \sqrt{\frac{W_E}{g \cdot k_f}} = 2\pi \sqrt{\frac{8400}{980 \times 26.9}} = 3.83\text{s}$$

$$\alpha_s = \frac{540.0}{9800} = 0.051 \quad \alpha_0 = \frac{2\pi V_E}{T_f g} = \frac{2\pi \times 150}{3.83 \times 980} = 0.251$$

$$\alpha = \frac{8\alpha_s}{\alpha_0} = \frac{8 \times 0.051}{0.251} = 1.625$$

$$\alpha_f = (-\alpha + \sqrt{\alpha^2 + 1})\alpha_0 = (-1.625 + \sqrt{1.625^2 + 1})0.251 = 0.071$$

$$\alpha_1 = \alpha_s + \alpha_f = 0.051 + 0.071 = 0.122$$

$$\delta_{\max} = \frac{T_f^2 \rho_f g}{4\pi^2} = \frac{3.83^2 \times 0.071 \times 980}{4\pi^2} = 25.9$$

表 6-5 反应预测结果

	多层橡胶 - 10%	多层橡胶 0%	多层橡胶 10%
阻尼器	0.116	0.115	0.115
- 10%	28.3	25.9	23.8
阻尼器	0.123	0.122	0.122
0%	28.1	25.9	23.7
阻尼器	0.137	0.135	0.134
10%	27.6	25.3	23.4

上:基底剪力系数  $\alpha_1$ ;下:位移量  $\delta_{max}$ (cm)

7)设计方针、目的确认

隔震层的最大位移  $\delta_{max} = 28.3\text{cm} < \delta_a = 30\text{cm}$ , 满足。

隔震层的基底剪力系数  $\alpha_1 = 0.137 < \alpha_a = 0.15$ , 满足。

6.5.3 有阻尼性能多层橡胶隔震器的计算

前面所示计算实例的隔震建筑,按同样的目标值,设计铅芯多层橡胶、高阻尼型多层橡胶,其结果如表 6-6 所示。

表 6-6 各隔震装置的设计例

			天然多层橡胶 + 钢棒阻尼器	铅芯多层橡胶	高阻尼型多层橡胶
隔震构件性能	形状	多层橡胶直径(mm)	700	700	700
		橡胶厚度×层数=总厚(cm)	0.5×32=16.0	0.5×32=16.0	0.6×27=16.2
		一次形状系数/二次形状系数	35.0/4.4	35.0/4.4	29.2/4.3
		有效截面积(cm <sup>2</sup> )	3848	3647(铅径 16cm)	3770(内径 10cm)
	性能	面压(t/cm <sup>2</sup> )(轴力:336t)	87	96	89
		剪切模量(kg/cm <sup>2</sup> )	4.0	4.5 <sup>1)</sup>	4.1 <sup>1)</sup>
		水平刚度(kg/cm)	961	1025	960
		竖向刚度(t/cm)	2671	2665	2350 <sup>2)</sup>
	屈服剪力(t)	21.0	17.1(铅径 16cm) <sup>3)</sup>	11.2 <sup>4)</sup>	
隔震层	特性值	水平刚度(t/cm)	26.9(多层橡胶数 28)	28.7(多层橡胶数 28)	26.9(多层橡胶数 28)
		竖向刚度(t/cm)	74788(")	74620(")	65800(")
		屈服剪力(t)	504(阻尼器数 24)	479(")	314(")
	反应	基底剪力系数	0.122	0.127	0.134
		反应位移值(cm)	25.9	26.7	37.3

- 1) 有阻尼性能多层橡胶的剪切弹性模量,由剪切变形 100%时的特性求得等价值。
- 2) 高阻尼多层橡胶的竖向刚度由实验结果计算。
- 3) 铅芯的等价屈服力由特性值取  $85\text{kg}/\text{cm}^2$ 。
- 4) 高阻尼多层橡胶的屈服剪力,由剪切变形 100%时的特性计算。

## 附录 1 从观测记录看隔震效果

### 1.1 阪神·淡路大震害

1995 年 1 月 17 日 5 时 46 分,兵库县南部发生地震,震源位于淡路岛北部。这是震级为  $M=7.2$  级的大地震,而且是直下型地震,震度达Ⅶ度<sup>①</sup>,是战后最大的自然灾害。

在这次地震中,有二栋隔震结构建筑得到了地震观测记录。从这些记录可以看到大地震时发挥的隔震效果,证实了隔震结构的有效性。

#### 1.1.1 WEST 大厦

建筑面积超过  $46000\text{m}^2$ ,是日本规模最大的隔震建筑(SRC 柱,S 梁,6 层),隔震层设置在基础与 1 层之间。

该建筑距震源东北 35km,在基础、1 层和 6 层进行了地震记录观测。表为各测点的最大加速度值,图 2 为东西方向的加速度时程波形。1 层水平方向的最大加速度值只有基础的  $1/3 \sim 1/4$ ,可见隔震效果得到充分发挥(参见附录 2、实例 1)。

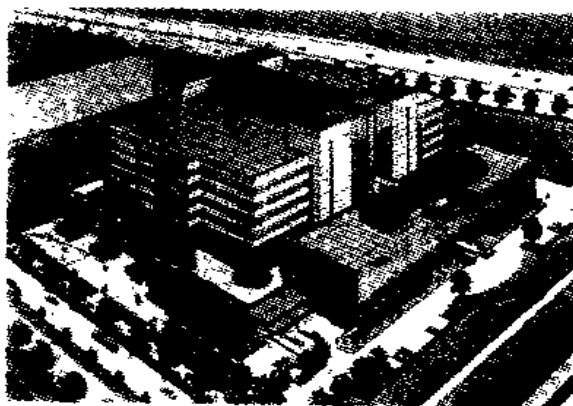


图 1 WEST 大厦全景

表 1 最大加速度(单位: $\text{cm/s}^2$ )

地震观测位置	方 向		
	东西	南北	上下
6 层	103	75	377
1 层	106	57	193
基础	300	263	213

#### 1.1.2 松村组技术研究所·研究大楼

在距震源东北 35km 的松村组技术研究所·研究大楼(3 层 RC 结构隔震建筑,采用高阻尼型多层橡胶)和毗邻的管理大楼(3 层 S 结构抗震建筑),得到了地震观测记录。最大加速度值见表 2。在研究大楼,1 层的最大加速度值比基础减小,使隔震效果得到发挥。而毗邻的管理大楼,其屋而最大加速度比研究大楼屋而大 2~5 倍。

<sup>①</sup> 日本气象厅对地震烈度的划分分为Ⅶ个震度,Ⅶ度为最高烈度。——译者注



地震观测位置

加速度波形(单位:cm/s<sup>2</sup>)

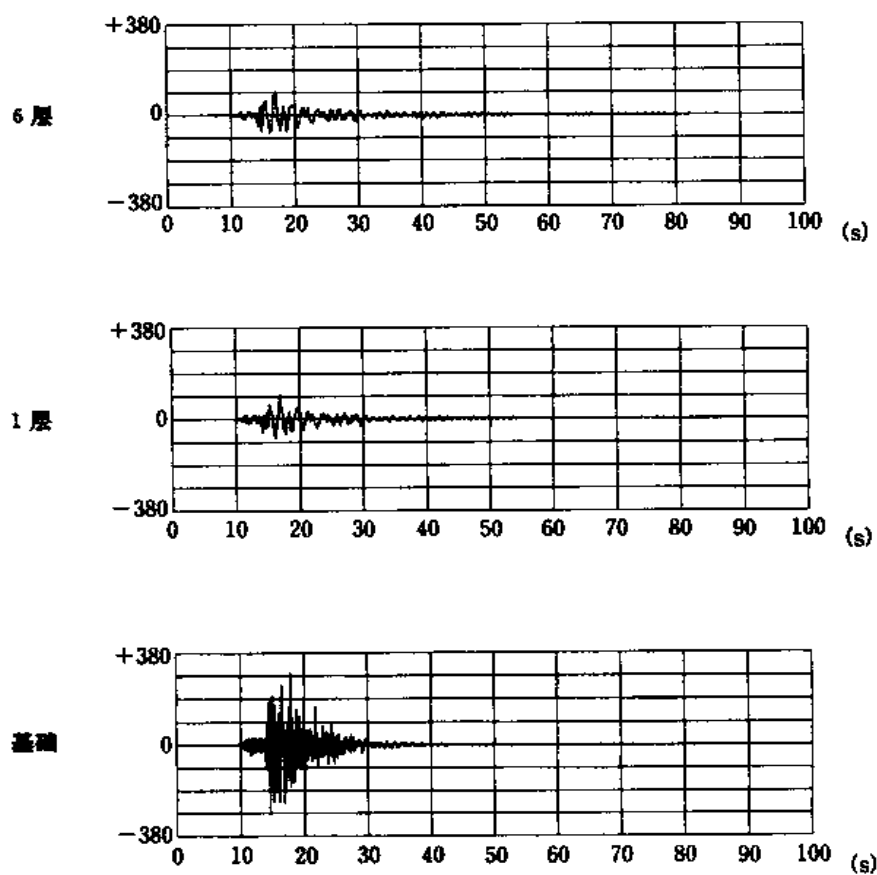
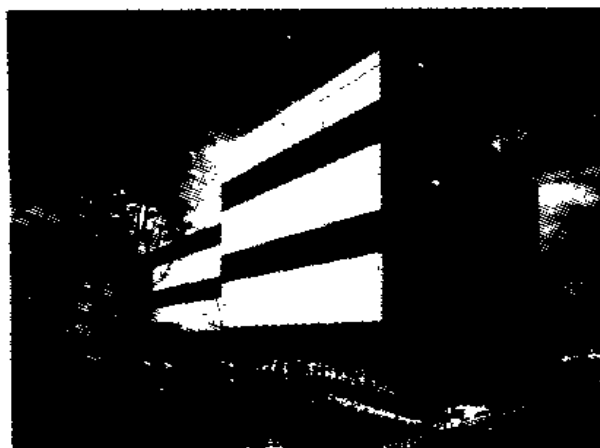


图2 时程波形



(右前部为隔震建筑、左后部为抗震建筑)

图3 松村组技术研究所 研究大楼和管理大楼

表 2 最大加速度(单位:cm/s<sup>2</sup>)

地震观测位置		方 向		
		东 西	南 北	上 下
研究大楼	屋面	273	198	334
	1 层	253	148	266
	基础	265	272	232
管理大楼		677	965	368

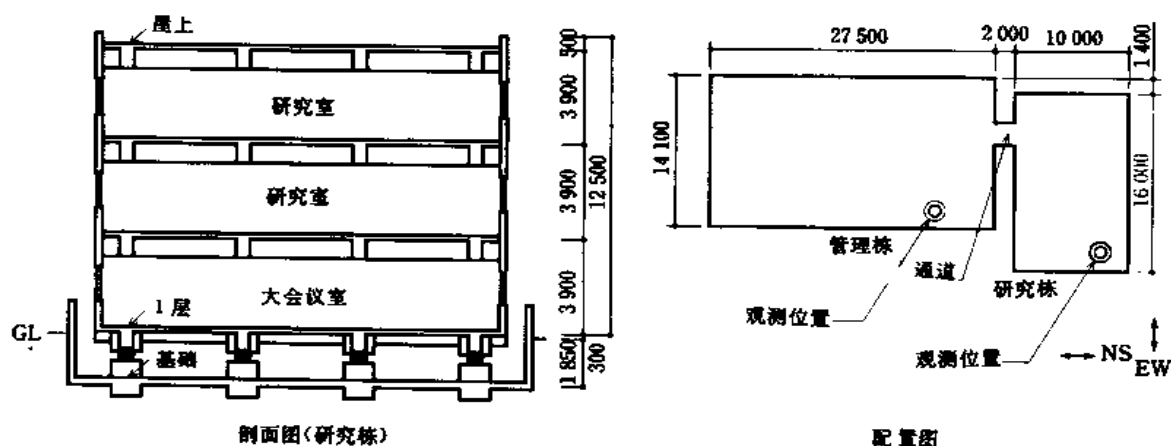


图 4 地震观测位置

## 1.2 洛山矶地震

1994 年 1 月 17 日 4 时 31 分(当地时间),在美国圣费尔南多发生了洛山矶地震,震级  $M=6.7$ ,也是直下型地震,死亡 56 人,伤超过 7300 人,损失很大。

在这次地震中,震中附近有两座医院,一座为抗震结构,一座为隔震结构,对照情况如下。

### 1.2.1 隔震结构医院

USC University 医院位于洛山矶市中心,是地下 1 层,地上 7 层的隔震结构。

医院距震源东南 36km,水平最大加速度观测结果为:地基上 0.49G,隔震构件下部 0.37G,建筑屋面 0.21G,1~7 层仅为 0.10~0.15G,证实了隔震效果。

在这次地震及其后的余震中,6~8 英尺高的花瓶等没有一个掉下来,建筑物内的各种机器等均未损坏,医院功能得到维持,成为防灾中心,起到十分重要的作用。(参照附录 2、实例 9)

### 1.2.2 抗震结构医院

Olive View 医院在 1971 年圣费尔南多地震中受到较大的损坏,10 年后更换地点重建,

增加了抗震强度。

该医院地上 6 层,距震中东北 15km,地基上水平最大加速度为 0.91G,1 层为 0.82G,屋面达 2.31G。建筑结构在 1G 以上的地震力作用下,剪力墙产生剪切裂缝。设备机器、医疗机械及家具等翻倒,病历等资料掉下、散乱。而且水管破裂,各层浸水,建筑物不能使用,完全丧失了医院的功能。

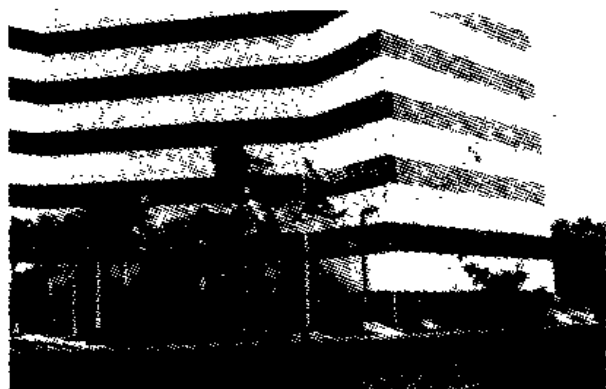


图 5 USC University 医院外观



图 6 Olive View 医院外观

### 1.3 关东广域地震观测记录

目前,日本的隔震建筑大部分在东京周边。1992 年 2 月 2 日(东京震度 V)的地震是迄今最强的,地震时有 21 栋(东京 9 栋、埼玉 4 栋、千叶 4 栋、神奈川 3 栋、茨城 1 栋)观测到地震记录,观测结果示于图 7。19 栋建造于第二类场地,其余 2 栋建造于第三类场地。图中给出了隔震建筑 1 层和基础部位的最大加速度,1 层最大加速度大部分小于基础部位,可见在震度 V 时发挥了充分的隔震效果。

### 1.4 隔震建筑与抗震建筑的观测结果比较

下面介绍 1992 年 2 月 2 日(东京震度 V)地震的记录观测结果。

在建筑物内设置的加速度计,记录到隔震建筑和抗震建筑 3 层的 Y 方向最大值,隔震建筑为 44Gal,约为抗震建筑为 209Gal 的 1/5(参照附录 2、实例 7)。

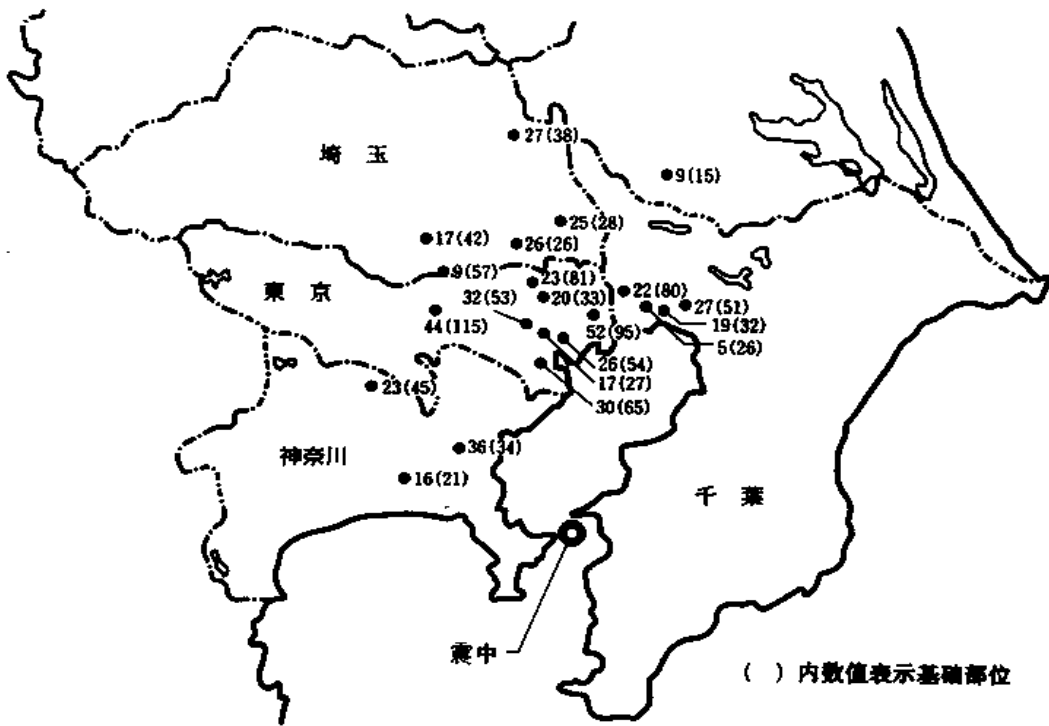
### 1.5 交通(铁道)振动的防振效果

该建筑物靠近日本铁路东海道线、京滨东北线。因此,为铁路的振动,采用了隔震结构。

下面介绍观测结果。图 13 为火车通过时观测到的地基振动加速度水平。由图可见,从 20Hz ~ 100Hz 振动加速度较大,25Hz ~ 80Hz 范围振动超过 60dB。

根据该数据预测隔震建筑和抗震建筑楼层中部位置的振动见图 14,同时也给出了隔震建筑的测定结果。由图可见,预测值与测定值符合较好,隔震建筑在 25Hz 以上时具有

较大的减振效果。(参照附录 2、实例 5)



地震年月日 和震中名称	震 级 震源深度
1992 年 2 月 2 日 东京湾	$M = 5.9$ $D = 93\text{km}$

图 7 东京周边的隔震建筑 1 层和基础部位的最大加速度



图 8 建筑全景

表 3 地震概要

地震年月日 和震中名	震源深度	震中距离
1992 年 2 月 2 日 东京湾	$M = 5.9$ $D = 93\text{ km}$	58 km



图 9 建筑配置图

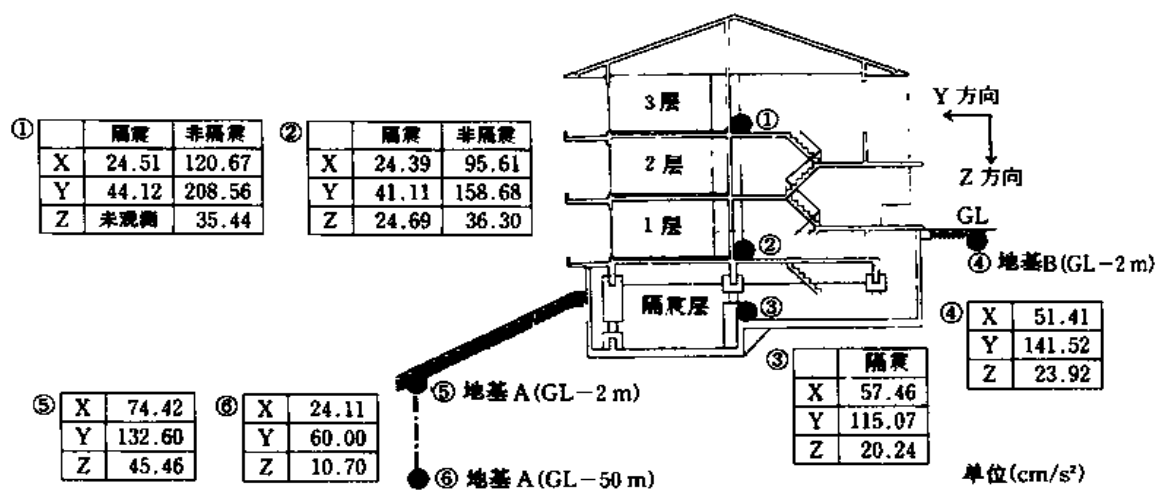


图 10 最大加速度分布图

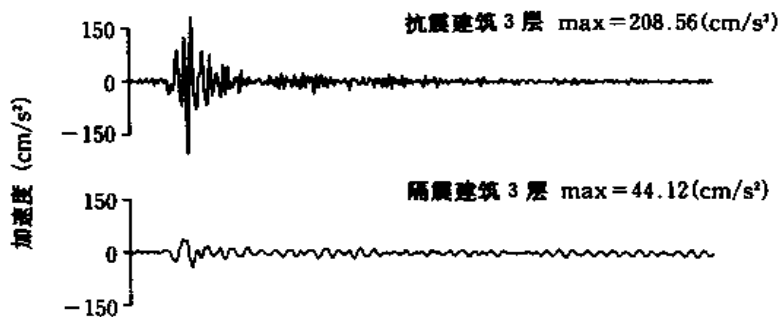


图 11 地震观测波形

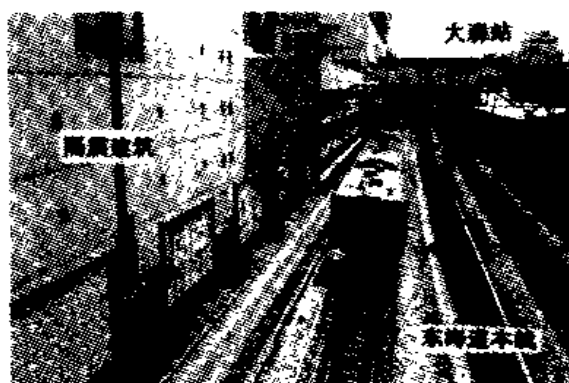


图 12 全景

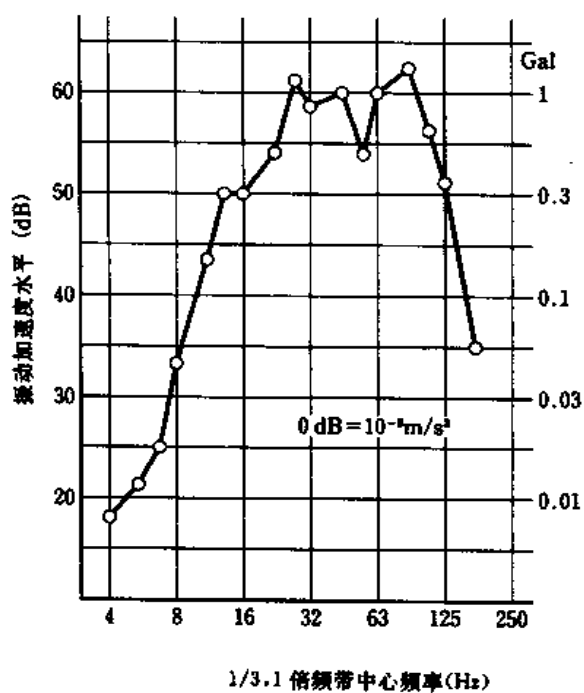


图 13 火车通过时地表振动测定结果  
(上下方向)

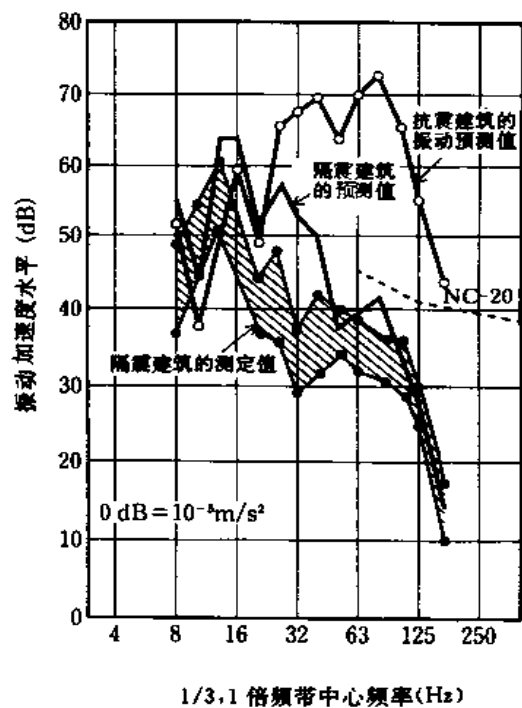


图 14 火车通过时地基振动和楼面振动预测值和实测值

## 附录 2 实 例

### 2.1 有特色的实例

国内<sup>①</sup>外有特色的隔震建筑实例见表 1。

表 1 实例表

No	建筑物名称	特 色
1	WEST 大厦	建筑面积很大
2	南大稼 2 号公共大厦	建筑高度较高
3	五洋建设技术研究所(隔震栋)	高宽比较大
4	C.P. 福住大厦	上部结构偏心
5	东伸 24 大森大厦	有效利用隔震层
6	阿圣那大厦	中间层隔震
7	小金井住宅	隔震和抗震的比较
8	奥依莱斯工业疗养院	小规模住宅
9	USC 大学医院	不规整平面
10	盐湖城大厦	改建
11	洛山矶消防指挥控制中心	用途上有特色

从下页以下的表中,“水平 2 地震时的自振周期”是指“水平 2 地震时由隔震层层间位移的等价刚度求得的自振周期”,但由于对各建筑物的隔震性能的评价指标不完全掌握,上述自振周期也包括考虑阻尼器的等价刚度求得的周期和仅考虑多层橡胶的等价刚度求得的周期。

此外,“设计层剪力系数”是设计人员根据设计思想设定的,其与动力分析中“水平 2 地震时的反应层剪力系数”的相关情况,随各建筑物而有所差异。

隔震构件指标  $\alpha_s$  和  $\alpha_f$  如表中所示。

阻尼器群的屈服剪力系数  $\alpha_s = {}_sQ_y/W$

隔震器群的最大剪力系数  $\alpha_f = {}_fQ_{max}/W$

这里,  ${}_sQ_y$ : 阻尼器群的屈服剪力

${}_fQ_{max}$ : 隔震器群的最大剪力

$Q_{max}$ : 水平 2 地震时隔震层的最大剪力

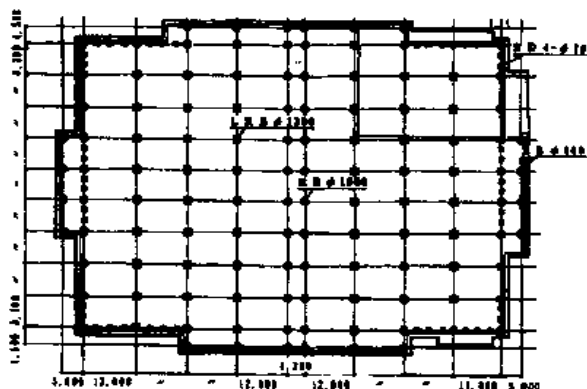
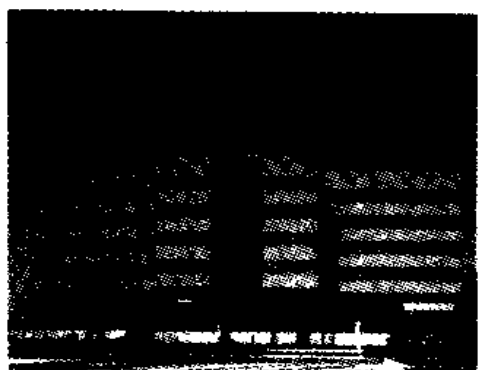
$Q_{max} = {}_sQ_y + {}_fQ_{max}$

$W$ : 上部结构的全部重量

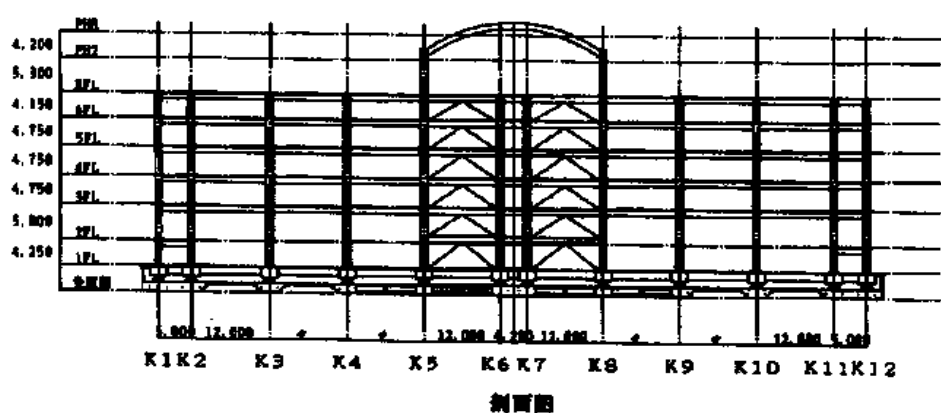
① 指原著者所在国。——编者注

# 实例 1 建筑面积较大的实例

WEST 大厦



隔震构件配管图



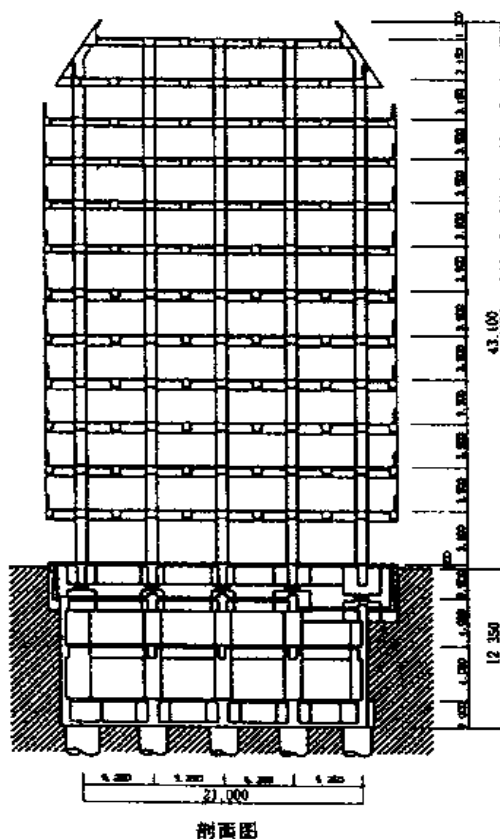
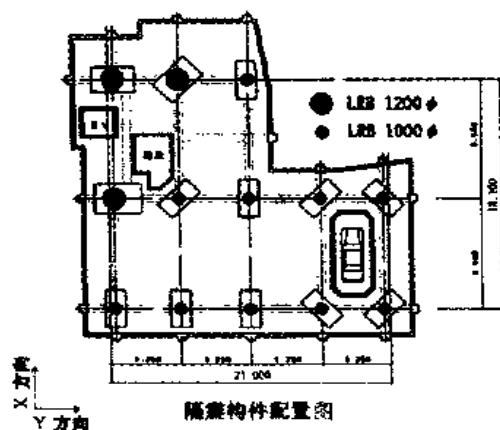
剖面图

用 途	办公楼	施工时间	1992.12 ~ 1994.11
结构设计	邮政建筑设计课·东京建筑研究所·结构计划研究所		
施 工	竹中·住友·奥村·那卡诺·三菱共同企业体		
层 数	地上 6 层·塔楼 2 层	最高高度	38.35m
占地面积	8563.16m <sup>2</sup>	建筑面积	46823.09m <sup>2</sup>
基 础	直接承压基础	地基类别	第一类地基
上部结构	钢骨钢筋混凝土结构(钢梁、一部分 SRC)、钢支撑、钢筋混凝土剪力墙		
设计层剪力系数	X 方向:0.15(1 层)~0.30(6 层) Y 方向:0.15(1 层)~0.30(6 层)		
水平 2 地震时的自振周期	X 方向: $T_1 = 3.3s$ Y 方向: $T_1 = 3.3s$		
水平 2 地震时隔震层的层间位移	X 方向:17.6cm Y 方向:17.6cm		
隔震构件	多层橡胶隔震器 800~1000 $\phi$ 66 个 铅芯多层橡胶隔震器 1200 $\phi$ 54 个 环状钢阻尼器 4-70 $\phi$ 44 个		
阻尼器群的屈服剪力系数	$\alpha_s = 0.03$	隔震器群的最大剪力系数	$\alpha_f = 0.05$
多层橡胶的长期面压	平均 93kg/cm <sup>2</sup> (最大 110kg/cm <sup>2</sup> )		
备 注	·由于采用框架结构,为保证刚度各层配置了支撑,建筑物底部 1、2 层外周配置了钢筋混凝土剪力墙,这些是根据隔震系统性能的要求确定的结构方案。		



## 实例 2 建筑物较高的实例

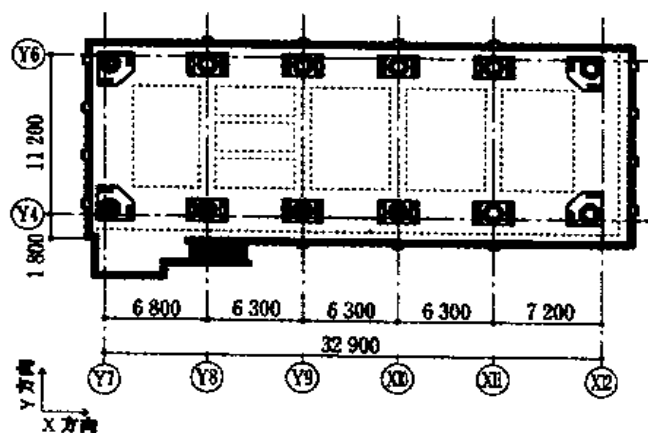
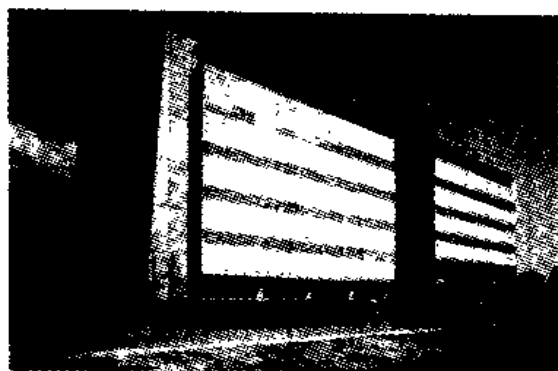
南大稼 2 号公共大厦



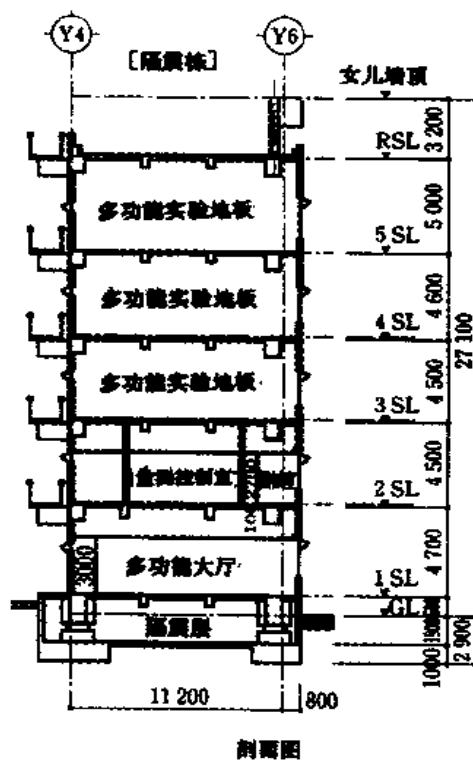
所在地	东京都丰岛区南大稼 2-37-5	用途	办公楼、商店、公共住宅
创意设计	发斯特设计	结构设计	住友建设
施工	住友建设	施工时间	1989.6 ~ 1991.3(22 个月)
层数	地下 2 层·地上 12 层·塔楼 2 层	最高高度	49.4m
占地面积	513.4m <sup>2</sup>	建筑面积	5962.6m <sup>2</sup>
基础	钢筋混凝土灌注桩	地基类别	第二类地基
上部结构	钢筋混凝土剪力墙—框架结构		
设计层剪力系数	X 方向:0.15(1 层)~0.30(12 层) Y 方向:0.15(1 层)~0.30(12 层)		
水平 2 地震时的自振周期	X 方向: $T_1 = 3.2s$ Y 方向: $T_1 = 3.3s$		
水平 2 地震时隔震层的层间位移	X 方向:28.8cm Y 方向:30.2cm		
隔震构件	铅芯多层橡胶隔震器 1000 ~ 1200 $\phi$ 13 个		
阻尼器群的屈服剪力系数	$\alpha_s = 0.05$	隔震器群的最大剪力系数	$\alpha_f = 0.07$
多层橡胶的长期面压	61 ~ 86kg/cm <sup>2</sup>		
备注	·地下有 2 层(GL-12.3m),采用地下层与地上层间隔震。 ·利用地下层作为机械式停车场		

# 实例3 高宽比较大的实例

## 五洋建设技术研究所(隔震栋)



隔震构件配置图

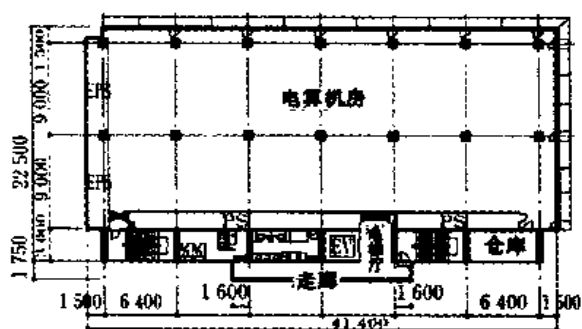
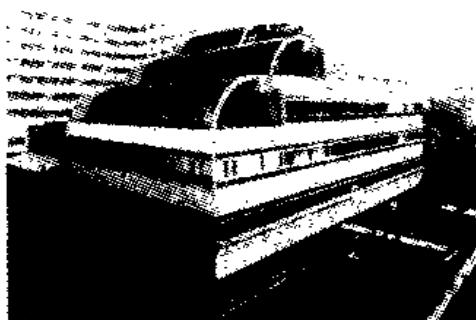


剖面图

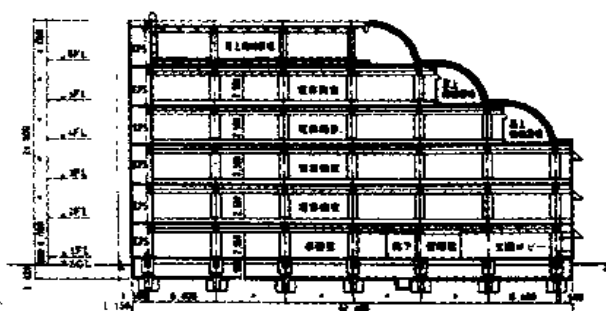
所在地	栃木县那须郡西那须野街四区街 1543-1	用途	办公楼、研究所
创意设计	五洋建设	结构设计	五洋建设
施工	五洋建设	施工时间	1993.6 ~ 1994.3(10个月)
层数	地上5层	最高高度	27.1m
占地面积	431.06m <sup>2</sup>	建筑面积	2106.04m <sup>2</sup>
基础	直接承压基础	地基类别	第一类地基
上部结构	预制钢筋混凝土框架结构		
设计层剪力系数	X方向:0.12(1层)~0.21(5层) Y方向:0.12(1层)~0.23(5层)		
水平2地震时的自振周期	X方向: $T_1=2.4s$ Y方向: $T_1=2.4s$		
水平2地震时隔震层的层间位移	X方向:22.3cm Y方向:22.1cm		
隔震构件	高阻尼型多层橡胶隔震器 12个		
阻尼器群的屈服剪力系数	—	隔震器群的最大剪力系数	—
多层橡胶的长期面压	56~68kg/cm <sup>2</sup>		
备注	・高宽比约为2.4。 ・基底剪力系数在国内最小。 ・与同样规模的非隔震栋同时建造。		

## 实例 4 上部结构偏心的实例

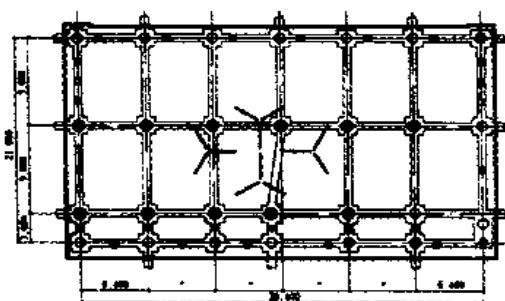
### C.P. 福住大厦



标准层平面图



剖面图



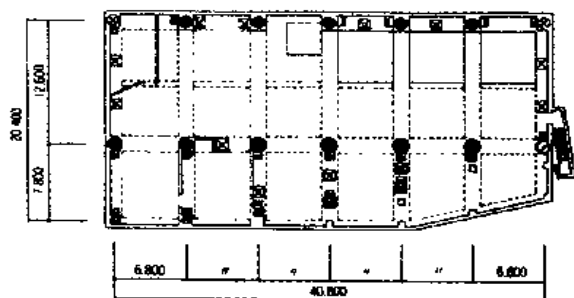
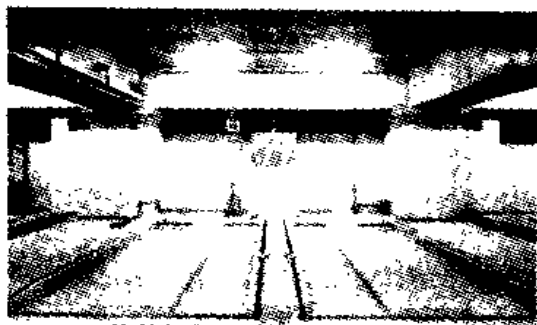
隔震构件配置图

- 多层橡胶隔震器(600φ)
- 多层橡胶隔震器(700φ)
- 铅阻尼器(一方向隔内方向)
- 铅阻尼器(二方向隔内方向)
- 摩擦阻尼器

所在地	东京都江东区福住 1-7	用途	办公楼、电算室
创意设计	日建设计	结构设计	日建设计(协助设计:福冈大多田研)
施工	户田建设	施工时间	1989.12 ~ 1991.5(18个月)
层数	地上 6 层	最高高度	24.8m
占地面积	951.12m <sup>2</sup>	建筑面积	4406.83m <sup>2</sup>
基础	钢筋混凝土灌注桩	地基类别	第三类地基
上部结构	钢筋混凝土剪力墙—框架结构		
设计层剪力系数	X 方向:0.20(1 层)~0.35(6 层) Y 方向:0.20(1 层)~0.35(6 层)		
水平 2 地震时的自振周期	X 方向: $T_1 = 3.2s$ Y 方向: $T_1 = 3.2s$		
水平 2 地震时隔震层的层间位移	X 方向:26.2cm Y 方向:25.6cm		
隔震构件	多层橡胶隔震器 600~700φ 27 个 铅阻尼器 28 个 摩擦阻尼器 12 个		
阻尼器群的屈服剪力系数	$\alpha_s = 0.03$	隔震器群的最大剪力系数	$\alpha_f = 0.10$
多层橡胶的长期面压	51 ~ 108kg/cm <sup>2</sup>		
备注	·核心筒偏置,上部结构偏心。(偏心率最大 1.2) ·超过 20m 的建筑物主体结构采用钢筋混凝土。		

# 实例 5 有效利用隔震层的实例

东伸 24 大森大厦



多层橡胶

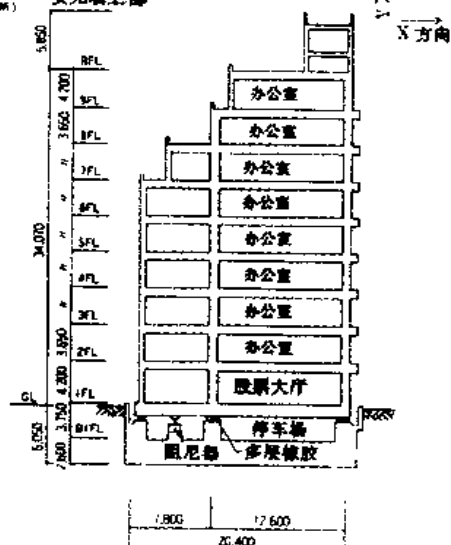
- 6001 层
- 5001 层
- 4001 层
- 3001 层
- 1501 层

图 阻尼器(12 套所)

图 支撑台座(4 套所)  
(19 套所)

隔震构件配置图

女儿墙上部

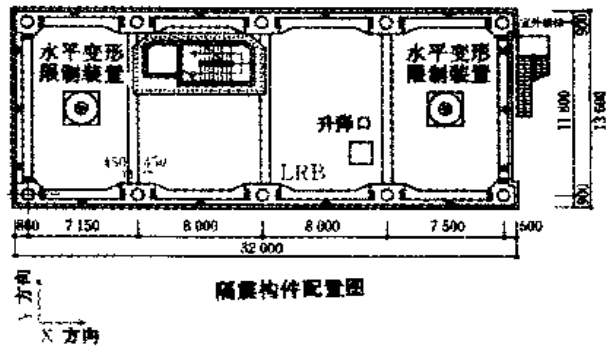
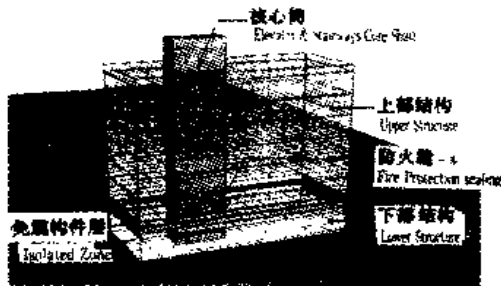
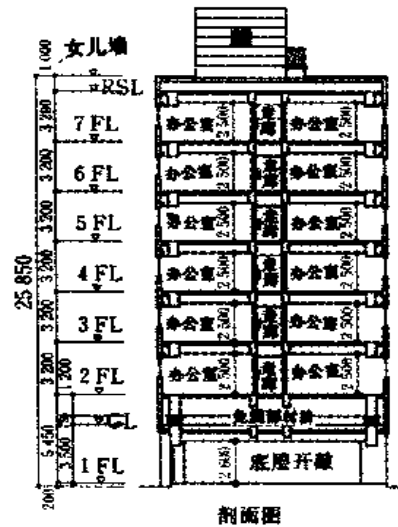
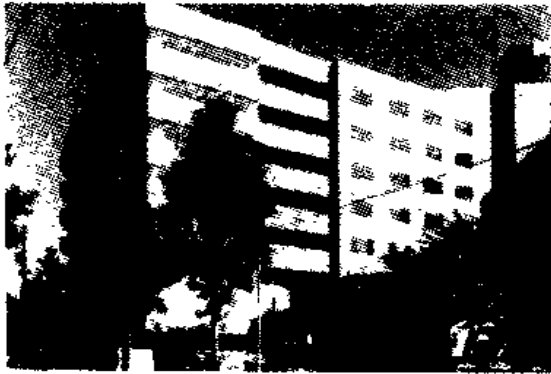


剖面图

所在地	东京都大田区大森北 1-2420-2	用途	办公楼、股票交易所
创意设计	鹿岛建设	结构设计	鹿岛建设
施工	鹿岛建设	施工时间	1989.3 ~ 1990.10(20 个月)
层数	地下 1 层·地上 9 层·塔楼 1 层	最高高度	39.92m
占地面积	811.03m <sup>2</sup>	建筑面积	7573.79m <sup>2</sup>
基础	直接承压基础	地基类别	第二类地基
上部结构	梁:钢 柱:钢骨钢筋混凝土		
设计层剪力系数	X 方向:0.15(1 层)~0.26(9 层) Y 方向:0.15(1 层)~0.26(9 层)		
水平 2 地震时的自振周期	X 方向: $T_1 = 3.2s$ Y 方向: $T_1 = 3.3s$ (仅多层橡胶)		
水平 2 地震时隔震层的层间位移	X 方向:26.6cm Y 方向:27.1cm		
隔震构件	多层橡胶隔震器 8600~1350 19 个 钢棒阻尼器 12 个		
阻尼器群的屈服剪力系数	$\alpha_s = 0.04$	隔震器群的最大剪力系数	$\alpha_f = 0.12$
多层橡胶的长期面压	48~75kg/cm <sup>2</sup>		
备注	·利用隔震层做停车场 ·隔离铁路的交通振动		

# 实例 6 中间层隔震的实例

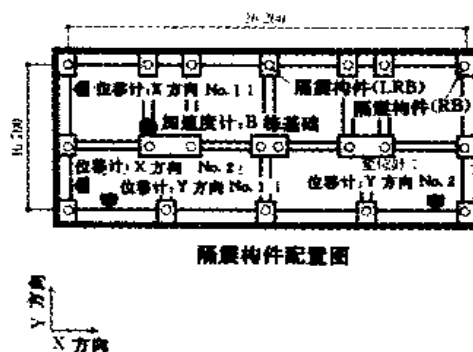
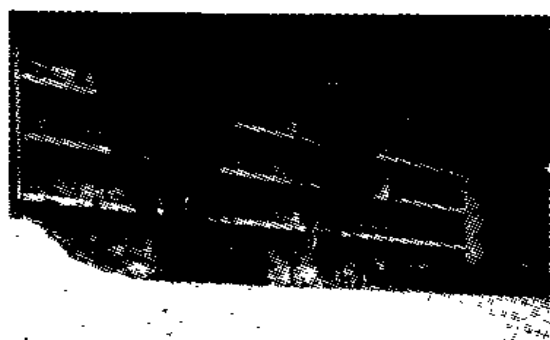
阿圣那大厦



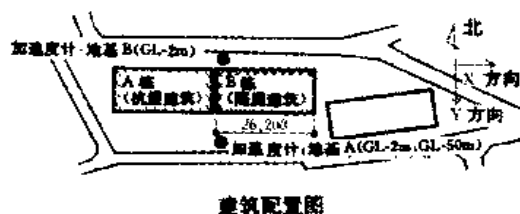
所在地	爱知县名古屋市市中区金山 1-202-1	用途	办公楼、商店
创意设计	住友建设	结构设计	住友建设
施工	住友建设	施工时间	1988.7 ~ 1989.7(14 个月)
层数	地上 7 层·塔楼 1 层	最高高度	30.0m
占地面积	495.4m <sup>2</sup>	建筑面积	3255.7m <sup>2</sup>
基础	钢筋混凝土灌注桩	地基类别	第二类地基
上部结构	钢筋混凝土剪力墙—框架结构		
设计层剪力系数	X 方向:0.30(2 层)~0.30(7 层) Y 方向:0.30(2 层)~0.30(7 层)		
水平 2 地震时的自振周期	X 方向: $T_1 = 2.2s$ Y 方向: $T_1 = 2.2s$		
水平 2 地震时隔震层的层间位移	X 方向:24.6cm Y 方向:24.6cm		
隔震构件	铅芯多层橡胶隔震器 800~900 $\phi$ 10 个		
阻尼器群的屈服剪力系数	$\alpha_s = 0.06$	隔震器群的最大剪力系数	$\alpha_f = 0.121$
多层橡胶的长期面压	45~80kg/cm <sup>2</sup>		
备注	·隔震层设置在 1 层和 2 层之间。(第 1 个采用中间层隔震) ·1 层的电梯从 2 层的结构下挂。 ·已经过隔震结构和防灾性能的评定。		

# 实例 7 隔震·抗震的比较实例

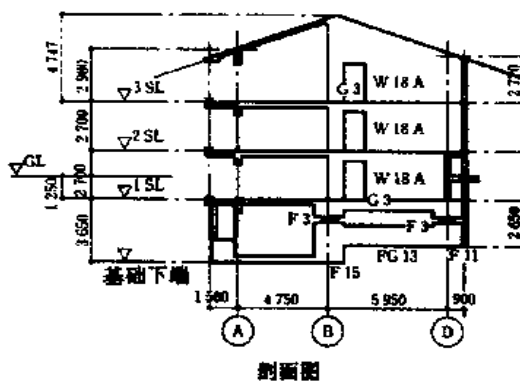
## 小金井住宅



隔震构件配置图



建筑配置图

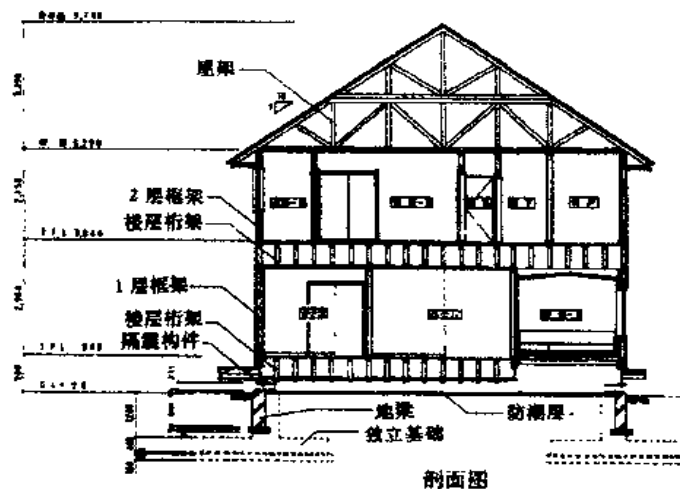
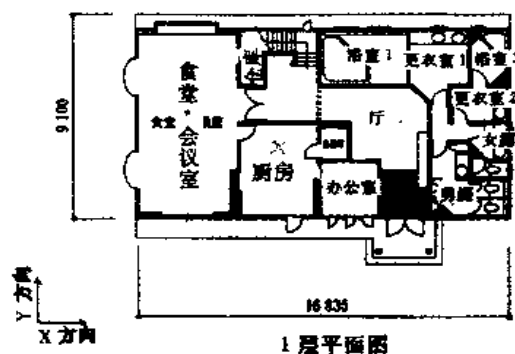


剖面图

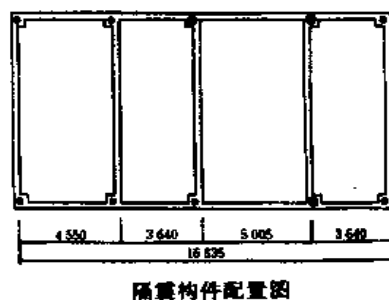
所在地	东京都小金井市贯井南街 3-492-1	用途	公共住宅
创意设计	福基塔	结构设计	福基塔
施工	砂原组	施工时间	1990.8~1991.6(11个月)
层数	地上3层	最高高度	8.02m
占地面积	298.8m <sup>2</sup>	建筑面积	714.3m <sup>2</sup>
基础	直接承压基础	地基类别	第二类地基
上部结构	壁式钢筋混凝土结构		
设计层剪力系数	X方向:0.20(1层)~0.27(3层) Y方向:0.20(1层)~0.27(3层)		
水平2地震时的自振周期	X方向: $T_1 = 1.9s$ Y方向: $T_1 = 1.9s$		
水平2地震时隔震层的层间位移	X方向:15.0cm Y方向:15.0cm		
隔震构件	铅芯多层橡胶隔震器 450φ 16个 多层橡胶隔震器 450φ 4个		
阻尼器群的屈服剪力系数	$\alpha_r = 0.06$	隔震器群的最大剪力系数	$\alpha_f = 0.09$
多层橡胶的长期面压	37~57kg/cm <sup>2</sup>		
备注	·为比较地震时的状态,进行地震观测,同一规模的隔震建筑和抗震建筑毗邻建造。		

## 实例 8 小规模住宅的实例

奥依莱斯工业疗养所



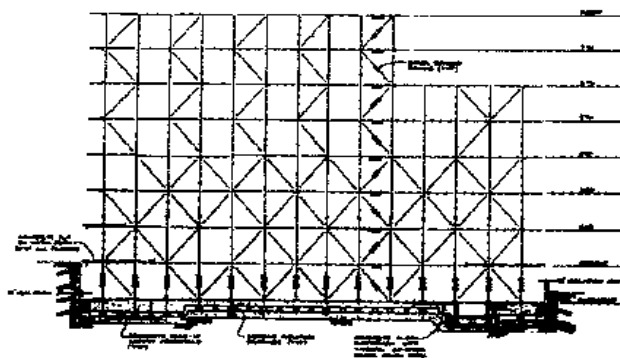
设计承载定额  
 \* : 10t 隔震构件  
 ● : 15t 隔震构件



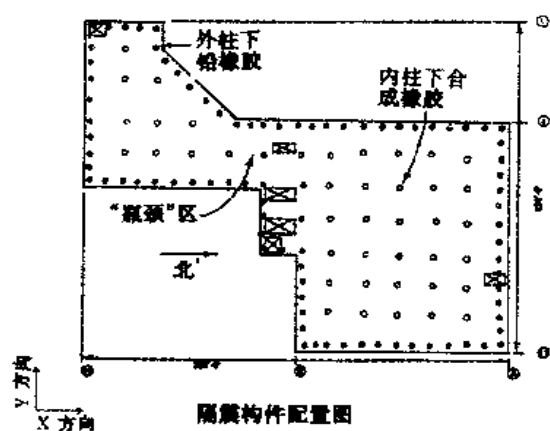
所在地	静冈县伊东市富户大室高原 6-144	用途	疗养所
创意设计	三井	结构设计	三井
施工	三井静冈分部	施工时间	1988.2 ~ 1989.5(15个月)
层数	地上 2 层	最高高度	9.79m
占地面积	157.33m <sup>2</sup>	建筑面积	309.59m <sup>2</sup>
基础	独立基础	地基类别	第二类地基
上部结构	壁式木框架结构		
设计剪力	按壁式木框架技术标准通告(昭和 57 年建设省第 56 号)技术计算墙量		
水平 2 地震时的自振周期	X 方向: $T_1 = 2.57s$ Y 方向: $T_1 = 2.57s$		
水平 2 地震时隔震层的层间位移	X 方向: 22.6cm Y 方向: 22.6cm		
隔震构件	铅芯多层橡胶隔震器 185 ~ 210 $\phi$ 10 个		
阻尼器群的屈服剪力系数	$\alpha_s = 0.04$	隔震器群的最大剪力系数	$\alpha_f = 0.15$
多层橡胶的长期面压	9.31kg/cm <sup>2</sup> (10t 用), 10.83kg/cm <sup>2</sup> (15t 用)		
备注	・在木结构住宅中首次采用隔震构件。 ・为有效利用隔震构件,楼盖采用桁架。 ・隔震构件在大变形时不产生屈服。		

# 实例 9 不规则平面的实例

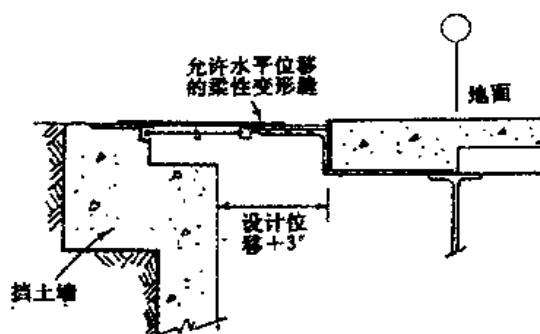
USC 大学医院



剖面图



隔离构件配置图



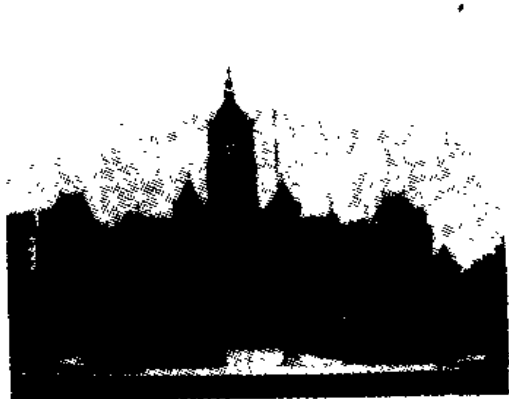
变形缝部位

所在地	美国加利福尼亚州	用途	医院
创意设计	S. Small, N. M. E. Inc., R. Associate	结构设计	KPFF
施工	—	施工时间	1988.9 ~ 1991.5 (21 个月)
层数	地下 1 层·地上 7 层	最高高度	36.0m
占地面积	4100m <sup>2</sup>	建筑面积	33000m <sup>2</sup>
基础	直接承压基础	地基类别	—
上部结构	钢支撑结构		
设计层剪力系数	0.15(1 层)		
大变形时的自振周期	X 方向: $T_1 = 2.3$ 、Y 方向: $T_1 = 2.2s$		
地震时隔震层的层间位移	66cm(66 个非线性时程分析结果)		
隔震构件	铅芯多层橡胶隔震器 68 个 多层橡胶隔震器 81 个		
阻尼器群的屈服剪力系数	—	隔震器群的最大剪力系数	—
多层橡胶的长期面压	—		
备注	·最早用于医院的隔震结构。 ·为便于患者的管理采用复杂的平面		

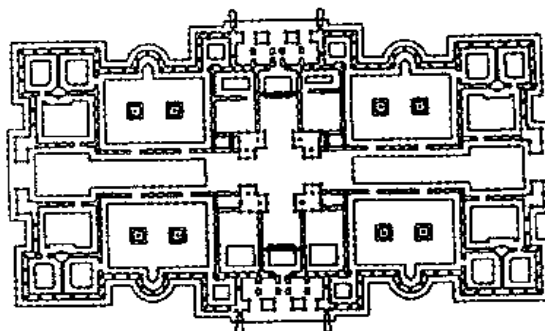


## 实例 10 改建的实例

盐湖城大厦



立面图

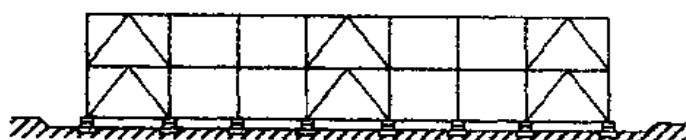
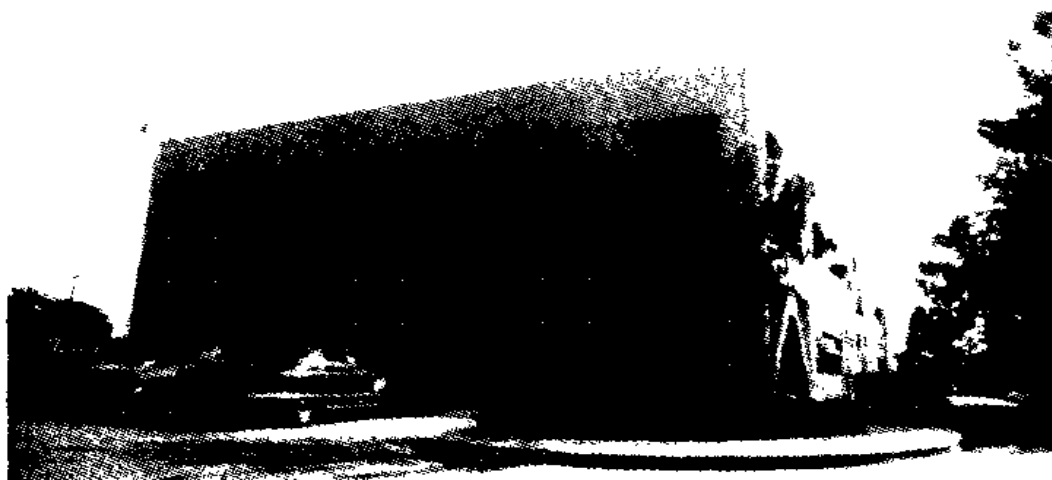


隔震构件配置图

所在地	美国艾塔州苏鲁特莱克市		用途	办公厅
创意设计	Ehrenkrantz 组		结构设计	Forell/Elsesser
施工	Jacobsen 建筑公司		施工时间	1987 ~ 1989
层数	地上 5 层(钟楼 12 层)		最高高度	76.2m
占地面积	3100m <sup>2</sup>		建筑面积	16000m <sup>2</sup>
基础	直接承压基础		地基类别	$V_s = 300\text{m/s}$ 以上
上部结构	砌体结构			
设计层剪力系数	0.20(1 层)			
大变形时的自振周期	2.5s			
地震时隔震层的层间位移	12.7cm(0.2G 输入)、30.4cm(0.4G 输入)			
隔震构件	铅芯多层橡胶隔震器 432 × 432 × 378 208 个 多层橡胶隔震器 432 × 432 × 378 239 个			
阻尼器群的屈服剪力系数	—		隔震器群的最大剪力系数	—
多层橡胶的长期面压	55kg/cm <sup>2</sup>			
备 注	· 最早将历史建筑(1894 年竣工)改建成隔震结构。 · 在旧基础与新浇筑的钢筋混凝土梁间插入隔震构件。			

# 实例 11 有特殊用途的实例

## 洛山矶消防指挥控制实验室



剖面图

所在地	美国加利弗尼亚州	用途	消防指挥中心
设计	Fluor = Daniel 工程公司	竣工	1990.4
层数	地上 2 层	建筑面积	3000m <sup>2</sup>
基础	—	地基类别	—
上部结构	钢支撑结构		
设计层剪力系数	0.15		
水平 2 地震时的自振周期	X 方向: $T_1 = 2.17s$ Y 方向: $T_1 = 2.17s$		
隔震层设计最大层间位移	24.4cm		
隔震构件	高阻尼型多层橡胶 32 个		
阻尼器群的屈服剪力系数	—	隔震器群的最大剪力系数	—
多层橡胶的长期面压	—		
备注	·由于种种原因,在非常事件发生时,要能接受电话报警、对事态指示配备紧急车辆。特别在洛山矶 Basin 发生大地震时,能保持建筑物的功能,所以采用隔震结构。		

## 2.2 各国部分实例

### (1) 日本的实例

表 2 日本国内的隔震建筑(由日本建筑中心隔震建筑评定)<sup>(1)</sup>

评定 编号 BCJ-隔	名 称	结构设计	用 途	结构种类 层数 建筑面积	隔震构件
—	八千代艾尼切卡隔震住宅	东京建筑研究所 多田英之	住宅	RC + 2 114.39	多层橡胶 6 个 摩擦阻尼器
1	尺田美喜国际福利事业 纪念克林顿资料馆	东京建筑研究所 艾尼切卡 多田英之	资料馆	RC - 1 + 2 547.22	多层橡胶 32 个 钢棒阻尼器 8 组
2	奥村组筑波研究管理楼	东京建筑研究所奥 村组	研究所	RC + 4P1	多层橡胶 25 个 钢棒阻尼器 12 组
3	大林组计算研究所 61 实 验楼	大林组	实验室	RC - 1 + 5 1623.89	多层橡胶 14 个 钢棒阻尼器 96 根
4	奥依莱斯工业藤尺事业 TC 栋	奥矣类丝工业 安井建筑设计事务 所住友建设	研究、 试验、 办公室	RC + 5 4765.40	铅芯多层橡胶 31 个 多层橡胶 4 个
5	船桥竹友宿舍	竹中工务店	宿舍	RC + 3 1530.20	多层橡胶 14 个 粘滞阻尼器 8 个
6	鹿岛建筑技术研究所西 调布音响实验楼	鹿岛建设	研究所	RC + 2 655.99	多层橡胶 18 个 钢棒阻尼器 14 个
7	尺田美喜国际福利事业 纪念克林顿资料馆	东京建筑研究所 艾尼切卡 多田英之	资料馆	RC + 2 293.82	多层橡胶 12 个 钢棒阻尼器 6 组
—	东北大学隔震实验楼	清水建设	验证实 验楼	RC + 3 417.14	多层橡胶 油阻尼器
8	Apt. 福宫	东京建筑研究所 奥村组	公 共 住 宅	RC + 4 681.80	多层橡胶 12 个 钢棒阻尼器 7 组
9	涉谷清水第 1 大厦	大林组	办公楼	RC - 1 + 4P1 3385.09	多层橡胶 20 个 钢棒阻尼器 108 根
10	富士得工业第 6 实验楼	富士得工业	研 究 设 施	RC + 3 306.63	铅芯多层橡胶 4 个
11	无机材研无振动楼	建设大臣官房官厅 营业部 营业计划科、筑波研 究学园都市设施管 理中心、大林组	研究所	RC + 1 616.00	多层橡胶 32 个 钢棒阻尼器 48 根
12	清水建设土浦营业所	清水建设	办公楼 宿舍	RC + 4 636.76	铅芯多层橡胶 10 个 多层橡胶 4 个

续表 2

评定 编号 BCJ-隔	名 称	结构设计	用 途	结构种类 层数 建筑面积	隔震构件
13	大成建设技术研究所 J 楼	大成建设	办公楼	RC +4P1 1173.20	多层橡胶滑动支承 8 个 水平弹簧 8 个
14	庚申稼第 3	东京建筑研究所 奥村组	公 共 住 宅	RC +3 476.28	多层橡胶 10 个 钢棒阻尼器 7 组
15	虎门三号大厦	清水建设	办公楼	SRC +8 337.99	多层橡胶 12 个 钢棒阻尼器 600 根
16	南越谷	住友建设	办公楼 住宅 商店	RC +10 3537.00	铅芯多层橡胶 14 个
17	熊谷道路一之江宿舍	熊谷组	单 身 宿 舍 办公楼	RC +3 771.00	多层橡胶 12 个 钢棒阻尼器 14 组
18	14F-PR 隔震结构建筑 物	九段建筑研究所 东京建筑研究所	公 共 住 宅	RC +14P2 16394.45	多层橡胶 84 个 钢棒阻尼器 164 组
19	竹中技术研究所	竹中工务店	研究所	S +2 405.60	多段多层橡胶 6 组 粘滞阻尼器 6 组
20	日本原子能发电热川疗 养所游泳池	大成建设	游泳池	RC +1 140.25	多层橡胶滑动支承 8 个 水平弹簧 4 个
21	小川	熊谷组	公 共 住 宅	RC +4 1186.35	高阻尼型多层橡胶 14 个
22	阿森那大厦	住友建设	办公楼 商店	RC +7P1 3255.72	铅芯多层橡胶 10 个
23	楠田大厦	间组	信 贷 办 公楼、商 店、住宅	RC -1+4P1 1047.12	高阻尼型多层橡胶 8 个
24	市川隔震住宅	东京建筑研究所 鸿池组	公 共 住 宅		多层橡胶 4 个 钢棒阻尼器 4 个 铅阻尼器 4 个
25	第 2 电算中心	清水建设 大崎综合研究所	电 算 中 心	RC +6 10032.00	高阻尼型多层橡胶 6 个
26	相模原机材中心 办公楼	东急建设	办公楼	RC +3 255.45	高阻尼型多层橡胶 40 个
27	东京都老年综合研 究、PET、老化动物 开发设施	久米建筑事务所 大林组	门 诊 医 疗所	RC -1+2 1112.07	多层橡胶 20 个 钢棒阻尼器 108 根
28	隔震装置三井[M-300] 奥依莱斯工业疗养所	三井	疗养所	木结构 +2 309.59	铅芯多层橡胶 10 个
29	哈白斯特比露孜	奥村组	商店 公 共 住 宅	RC +6 2065.18	多层橡胶 20 个 钢棒阻尼器 22 组

续表 2

评定 编号 BCJ-隔	名 称	结构设计	用 途	结构种类 层数 建筑面积	隔震构件
30	鹿岛建设技术研究所西 调布音响实验楼	鹿岛建设	研究所	RC + 2 655.99	多层橡胶 18 个 钢棒阻尼器 14 根 油泵阻尼器 12 个
31	东伸 24 大森大厦	鹿岛建设	办公楼 股票交易 所	SRC - 1 + 9P1 7573.79	多层橡胶 19 个 钢棒阻尼器 12 根
32	长谷工综合住宅性能试 验楼	东京建筑研究所 长谷工综合住宅工 程部	住宅性能 试验楼	RC + 3 680.83	多层橡胶 14 个 钢棒阻尼器 9 根 铅阻尼器 4 个
33	南大塚 2 号公共大厦	住友建设	商店 办公楼 公共住宅	RC - 2 + 12P2 5962.61	铅芯多层橡胶 13 个
34	飞岛建设技术研究所风 洞实验楼	飞岛建设	研究设施	RC + 3 555.75	内藏高阻尼型多层橡 胶 8 个
35	C.P. 福住大厦	日建设计福岡大学 多田研究室协助	办公楼 电算室	RC + 6 4406.83	多层橡胶 27 个 铅阻尼器 28 个 摩擦阻尼器 12 个
36	社员设施(LRB 栋)	前田建设工业	公 共 住 宅	RC + 4 652.72	铅芯多层橡胶 10 个
	社员设施(MRB-HD 栋)	前田建设工业	公 共 住 宅	RC + 4 652.72	高阻尼型多层橡胶 10 个
37	东邦煤气 四日市工厂管理中心	大成建设	办公楼	RC + 3P1 1799.63	多层橡胶滑动支承 18 个 水平弹簧 12 个
38	户田建设津田沼宿舍	户田建设	宿舍	RC + 2 201.84	多层橡胶 8 个 钢棒阻尼器 30 根
39	隔震装置三井[M-300]	三井	住宅	木结构 + 2 213.96	铅芯多层橡胶 6 个
40	小金井社住宅	福基塔工业	公 共 住 宅	RC + 3 714.30	铅芯多层橡胶 16 个 多层橡胶 4 个
41	操作中心	福基塔工业	电 算 中 心	SRC - 1 + 2P1 8657.06	铅芯多层橡胶 32 个 多层橡胶 6 个
42	浦和工业久喜工厂	间组	机 械 制 造工厂、 研究、会 议室	RC + 5P1 1525.08	高阻尼型多层橡胶 12 个
43	日本国土开发技术研究 所管理楼	日本国土开发	办公楼 研究所	RC + 3 955.05	多层橡胶 10 个 粘滞阻尼器 4 阻
44	广岛县农业情报中心	东京建筑研究所 全国农业设计	电 算 中 心	RC + 3(部分+4) 5423.68	铅芯多层橡胶 27 个
45	C-1 大厦	日本设计	办公楼	SRC - 1 + 7P1 37845.63	铅芯多层橡胶 68 个

续表 2

评定 编号 BCJ-隔	名 称	结构设计	用 途	结构种类 层数 建筑面积	隔震构件
46	计算流体力学研究所	竹中工务店	办公楼 机械室	RC +3 627.84	多层橡胶 9 个 粘滞阻尼器 4 组
47	三井建设机械材料部工 厂办公楼	三井建设	办公楼	RC +4P1 2186.64	高阻尼型多层橡胶 16 个 M 型滑动阻尼器 8 个
48	芝库巴技术研究所 音响、电波楼	间组	研究设 施	RC +2 481.64	多层橡胶 8 个 摩擦阻尼器 8 个
49	西松建设大和宿舍	西松建设	家 属 宿 舍	RC +3 1919.00	多层橡胶 18 个 钢环阻尼器 24 个
50	川口家属宿舍	大木建设	公 共 住 宅	RC +4 659.11	铅芯多层橡胶 8 个
51	动力燃料情报中心	日建设计 福岡大学多田研究 室协助	研究设 施	RC +4 3310.23	多层橡胶 32 个 铅阻尼器 54 个
52	安藤建设技术研究所第 三期	安藤建设	研究所	RC +3 544.72	铅芯多层橡胶 8 个
53	东洋橡胶工业柴又社馆	高桥上田设计事务 所熊谷组	社 馆	RC +7P1 3520.03	多层橡胶 22 个 钢棒阻尼器 22 组 油阻尼器 12 组
54	青木建设研究所(管理 楼)	东京建筑研究所青 木建设	研究所	RC -1+4 4400.00	铅芯多层橡胶 30 个
55	丝九大厦	鹿岛建设	办公楼 专用住 宅	SRC -1+8P1 2182.66	多层橡胶 8 个 钢棒阻尼器 6 组
56	大日本土木市单身宿舍	日建设计 福岡大学多田研究 室协助	宿 舍	RC +4 1185.84	多层橡胶 15 个 铅阻尼器 18 个
57	ENICOM 计算机中心	东京建筑研究所 新日本制铁	计 算 机 中心 办公楼	S +6P1 10962.24	多层橡胶 56 个 钢棒阻尼器 32 个 铅阻尼器 16 个
58	中部电力火力中心大厦、 西栋	清水建设	办公楼	SRC +6 6805.00	高阻尼型多层橡胶 27 个
	中部电力火力中心大厦、 东栋	鹿岛建设	办公楼	SRC +6P1 6768.00	铅芯多层橡胶 27 个
59	DOMANI 武藏野	西松建设	公 共 住 宅	RC +3 741.88	多层橡胶 12 个 钢环阻尼器 16 个
60	奥依莱斯工业新井宿住 宅	日本建设业经营协 会中央技术研究所	住 宅	木结构 +2 100.45	铅芯多层橡胶 4 个
61	佐藤工业蒲和宿舍	佐藤工业	公 共 宿 舍	RC +5 763.33	多层橡胶 6 个 钢板阻尼器 8 个
62	信越化学松井分厂警卫 所	清水建设 信越化学工业 普利切斯特	警卫所	RC +2P1 141.58	硅多层橡胶 4 个

续表 2

评定 编号 BCJ-隔	名 称	结构设计	用 途	结构种类 层数 建筑面积	隔震构件
63	三井建设柏大住宅	三井建设	公 共 住 宅	RC + 3 1040.11	高阻尼型多层橡胶 18 个 M 型滑动阻尼器 8 个
64	三井海上千叶本部大厦 计算机中心	日建设计 福岡大学多田研究 室协助	办公楼 (计算机 室)	SRC - 2 + 5P1 19757.00	多层橡胶 88 个 铅阻尼器 72 个 摩擦阻尼器 12 个
65	福吉塔技术研究所第 6 试验楼	福吉塔	研究设 施	RC + 3 306.63	铅芯多层橡胶 + 多层 橡胶 4 个
66	奥依莱斯工业足利工厂	日本建设业经营协 会中央技术研究所 皮·艾斯奥依莱斯工 业	办公楼	S + 2 281.1	铅芯多层橡胶 6 个 多层橡胶 2 个
67	西日本储蓄事务计算中 心(计算机楼)	邮政大臣官房建筑 部设计课东京建筑 研究所 结构计划研究所	电 算 中 心	SRC + 6P2 46823.09	铅芯多层橡胶 54 个 多层橡胶 66 个 钢棒阻尼器 44 个
68	府中	竹中工务店	公 共 住 宅	RC + 5 2931.06	多层橡胶 22 个 粘滞阻尼器 16 个
69	新学社东京分店	住友建设	办公楼	RC - 1 + 5 5282.41	周围约束型多层橡胶 18 个 高阻尼型多层橡胶 2 个 铅芯多层橡胶 4 个
70	柳田邸	日本建设业经营协 会中央技术研究所 皮·艾斯奥依莱斯工 业	住宅	木结构 + 2 194.80	铅芯多层橡胶 6 个
71	五洋建设技术研究所(隔 震楼)	五洋建设	办 公 楼 (研 究 所)	RC + 5 2106.04	高阻尼型多层橡胶 12 个
72	松村组技术研究所	松村组	办 公 楼 (研 究 所)	RC + 3 480.00	高阻尼型多层橡胶 8 个
73	东北开发连坊大厦	东北开发 大林组	办公楼	RC - 2 + 6 17318.32	
74	尼大平城山新 研究所	久米设计	办公楼 研究所	RC + 2 486.00	铅芯多层橡胶 12 个
75	T-1 计划	松田平田 久米设计	办 公 中 心	SRC + 7P2 37050.00	铅芯多层橡胶 131 个
76	东洋信托银行千叶本部 大厦	大林组	办公楼	SRC + 8P1 12800.31	高阻尼型多层橡胶 35 个
77	S 大厦	清水建设	办公楼	RC + 6P1 22986.85	高阻尼型多层橡胶 84 个

续表 2

评定 编号 BCJ-隔	名 称	结构设计	用 途	结构种类 层数 建筑面积	隔震构件
78	柳瀬川 RS A 栋、B 栋	鹿岛建设	公 共 住 宅	RC + 14P1 20534.00	高阻尼型多层橡胶 24 个
79	报德二宫神社殿	竹中工务店	神社	木结构 + 1 112.01	多层橡胶 5 个 粘滞体阻尼器 2 个
80	T 工厂	大成建设	工厂 办公楼	RC + 5P2 22070.00	弹性滑动支承 45 个 多层橡胶 56 个
81	动力燃料再处理设施	日建设计 福岡大学多田研究 室协助	原 子 能 研 究 设 施	RC + 5P1 5737.64	多层橡胶 32 个 铅阻尼器 80 个

1995 年 1 月

## (2) 美国的实例

表 3 新建的实例

No.	名称 (建设地)	结构设计	用途	结构种类 层数 建筑面积	隔震构件
1	山麓社团法律仲裁中心(兰克·库尔蒙哥市,加利福尼亚州)	Taylor & Gaines Reid & Taries 协助	仲裁所	S - 1 + 4 17000	HDR
2	飞机模拟制造工厂(盐湖城,犹他州)	Reavely 工程咨询公司	飞机模拟 制造设施	S + 4 9300	LRB
3	南加利福尼亚大学医院(洛山矶市,加利福尼亚州)	KPFF	医院	S - 1 + 4 17000	LRB
4	消防指挥控制中心(东洛山矶,加利福尼亚州)	Fluor - Daniel 工程公司	消防指挥 中心	S + 2 3000	HDR
5	凯瑟计算机中心(卡罗那市,加利福尼亚州)	Taylor & Gaines	计算中心	S + 2 10900	LRB HDR
6	Titan 固体火箭发动机仓库(凡德堡空军基地,加利福尼亚州)	Bechtel 公司	仓库	28000	HDR
7	Two 住宅(西洛山矶,加利福尼亚州)	David Lowe	住宅 办公楼	S + 3 3000	GERB
8	应急指挥控制中心(东洛山矶,加利福尼亚州)	DMJM	防灾中心	S + 3 440 × 2 = 880	HDR
9	旧金山公共图书馆(旧金山市,加利福尼亚州)	Olum Stret 设计事务所 Forell/ Elsesser 工程	图书馆	S - 2 + 5 35000	LRB
10	神白纳迪那医疗中心(克特彭市,加利福尼亚州)	KPFF Taylor & Gaines(设计与评论 1992)	医疗设施	5bldgs 83000	HDR
11	M.L. King Jr. - C.R. Drew 诊疗中心(沃特市,加利福尼亚州)	John Martin 咨询公司 BIC(设计与 评论 1992)	医疗设施	13000	HDR 铜合金滑 动支承
12	水控制中心—水质实验室(波特兰市,俄勒冈州)	Harris 组 DIS(设计进展 1992)		2600	LRB

为计划中

HDR:高阻尼橡胶支承

LRB:铅橡胶支承



表 4 改建实例

No.	名称 (建设地)	结构设计	用途	结构种类 层数 建筑面积	隔震构件
1	盐湖城市政大楼(盐湖城,犹他州)	E. W. Allen 咨询公司 Forell/ Elsesser 工程公司		石 + 5 16000	LRB
2	洛克威尔海豹海滨工厂(海豹海滨市,加利福尼亚州)	Englekirk & Hart		RC - 1 + 8 28000	LRB
3	玛开矿山学校(雷诺市,内华达州)	Jack Howard 咨询公司 BIC		+ 3 4700	HDR & PTEE 滑动支承
4	Marina 公寓(旧金山市,加利福尼亚州)	EPS	公寓	木 + S + 4 1900	FPS
5	车灵退休职工之家(帕罗奥托市,加利福尼亚州)	Renne & Peterson		+ 11 19600	LRB
6	长滨医院(长滨市,加利福尼亚州)	A. C. Martin 咨询公司 DIS	医院	RC + 12 33000	LRB
7	奥克兰城大厦(奥克兰市,加利福尼亚州)	Forell/Elsesser 工程公司 DIS	办公楼	S + 石 + 18 14000	LRB
8	美国上诉法庭(旧金山市,加利福尼亚州)	Skidmore, Owings & Merrill	法庭	S + 石 + 5 33000	FPS
9	克可豪佛大楼(旧金山市,加利福尼亚州)	Brandow & Johnston, 哈特组	学校 办公楼 教室	RC - 1 + 6P1 9300	LRB
10	教育服务中心(洛山矶市,加利福尼亚州)	Fleming 公司		8400	抗震隔板
11	旧金山市政大厅(旧金山市,加利福尼亚州)	(施工图设计正在进行)		56000	
12	亚洲艺术博物馆(旧金山市,加利福尼亚州)	Rutherford & Chekene C. Kircher 咨询公司(初步设计正在进行)	美术馆	16000	
13	50 联合国广场	H. J. Degenkolb 咨询工程公司(初步设计,1993)		32000	
14	加利福尼亚国家法院大楼(旧金山市,加利福尼亚州)	Rutherford & Chekene C. Kircher 咨询公司		23000	
15	Caltrans/CHP 管理中心	Forell/Elsesser 工程公司		3000	HDR
16	洛山矶市政大楼(洛山矶市,加利福尼亚州)	Nabih Youssef	市政大楼	+ 28 82000	HDR & PTFE 滑动支承

为计划中

LRB: 铅橡胶支承  
HDR: 高阻尼橡胶支承  
FPS: 摩擦摆系统  
PTFE: 聚四氟乙烯

### (3) 中国的实例

表 5 新建的实例

编号	名称·用途	结构设计	所在地	结构种类	层数 建筑面积(m <sup>2</sup> )	隔震构件
1	磅秤房	李立	安阳	砖墙 RC 楼板	+1 12	砂隔震
2	强震观察室兼住宅	李立	北京	砖墙 RC 楼板	+4 1536	砂隔震
3	仪器试验房	李立	新疆	砖墙 RC 楼板	+3 1296	砂隔震
4	住宅楼	刘德馨	西昌	砖墙 RC 楼板	+6 1296	砂隔震
5	住宅楼	刘德馨	西昌	砖墙 RC 楼板	+6 2016	砂隔震
6	住宅楼	税国斌	大理	砖墙 RC 楼板	+6 2000	钢滑板
7	住宅楼	税国斌	西安	砖墙 RC 楼板	-1+8 3240	钢滑板
8	住宅楼	税国斌	西安	砖墙 RC 楼板	+6 2112	钢滑板
9	住宅楼	周福霖 J. M. Keliy K. N. Fuller T. C. Pan	汕头	RC 结构	+8 3186	多层橡胶
10	住宅兼粮店	唐家祥	安阳	1~2 层 RC 结构 3~ 6 层砖墙 RC 楼板	-1+6 3339	铅芯多层 橡胶
11	住宅兼银行	周锡元, 周福霖	西昌	砖墙 RC 楼板	-1+6 3762	多层橡胶
12	住宅兼办公楼	唐家祥	西昌	RC 结构	+6 2153	铅芯多层 橡胶
13	住宅楼	周锡元, 周福霖	西昌	砖墙 RC 楼板	+6 1700	多层橡胶
14	住宅楼	周锡元, 周福霖	西昌	砖墙 RC 楼板	+6 1700	多层橡胶
15	住宅楼	周锡元, 周福霖	西昌	砖墙 RC 楼板	+6 1700	多层橡胶
16	学生宿舍楼	周福霖, 俞公骅	广州	RC 结构	+7 4416	多层橡胶
17	住宅兼办公楼	周福霖, 刘榆生	大理	RC 结构	+8 4816	多层橡胶
18	住宅兼办公楼	周锡元, 周福霖	西昌	RC 结构	+8 4816	多层橡胶
19	住宅兼办公楼	周锡元, 周福霖	西昌	RC 结构	+8 4816	多层橡胶
20	住宅兼办公楼	周锡元, 周福霖	西昌	RC 结构	+8 4816	多层橡胶
21	住宅兼办公楼	周锡元, 周福霖	西昌	RC 结构	+8 4816	多层橡胶
22	通讯机厂房(工厂)	唐家祥	岳阳	RC 结构	+7 9863	铅芯多层 橡胶
23	幼儿园学校(幼儿园)	周福霖, 吴仕元	汕头	RC 结构	+8 4000	多层橡胶
24	住宅楼	周福霖, 张炳祥	澄海	RC 结构	+8 4100	多层橡胶
25	住宅楼	周福霖, 张炳祥	澄海	RC 结构	+8 4100	多层橡胶

资料提供: 周福霖

华南建设学院西院(广州)副院长 教授

#### (4)新西兰的实例

表 6 新建的实例

No.	名 称	建设地点	高度 层数 建筑面积(m <sup>2</sup> )	隔震构件
1	威廉·克莱顿大厦	惠灵顿	17 + 4 17000	铅橡胶支承
2	联合大厦	奥克兰	49 + 12 7400	柔性支座钢阻尼器
3	惠灵顿中央警察局	惠灵顿	+ 10 11000	柔性支座铅挤压阻尼器
4	皮敦出版大楼	皮敦	14 4 层 950	铅橡胶支承

表 7 改建的实例

No.	名 称	建设地点	高度 层数 建筑面积(m <sup>2</sup> )	隔震构件
1	议会大厦, 惠灵顿(1921 年建, 建议改建)	惠灵顿	19.5 + 5 26500	人造铅橡胶支承
2	议会图书馆, 惠灵顿(1883/1899 年建, 建议改建)	惠灵顿	16 + 5 6500	人造铅橡胶支承

为计划中

#### (5)意大利的实例

表 8 新建的实例

No.	名 称	建设地点	隔震构件
1	SIP 地区行政中心(5 栋 7 层建筑)	安卡那	硫化多层橡胶(弹性支承 600 $\phi$ , $h = 190$ )
2	Nuovo Nucleo Arruolamento Volontari	安卡那	硫化多层橡胶
3	Centro Medico Della Legale Marina Militare	安卡那	硫化多层橡胶
4	Buildings Della Marina Militare	奥戈斯塔	硫化多层橡胶

#### [参考文献]

- [1]「ビルディングレター」日本建築センター
- [2] R. Ivan Skinner, William H. Robinson, Graeme H. McVerry  
「An Introduction to Seismic Isolation」John Wiley & Sons Ltd.
- [3]「米國に於ける免震建物の現況調査報告」日本免震構造協會, 1994 年 4 月
- [4]「ATC - 17 - 1」

### 附录3 隔震器的产品目录

本产品目录介绍了日本用于建筑物的多层橡胶隔震器的产品现状,有些产品未列入本目录。此外,尽可能注明了制作需特别注意的问题。

由本目录可见,各生产厂家间的产品的形状和材质等的制作是不统一的,所以在多层橡胶隔震器的制作中,要根据设计人员的要求制作。今后,产品形状将标准化,对各制作方法要进行调整,并逐步降低制造费用。

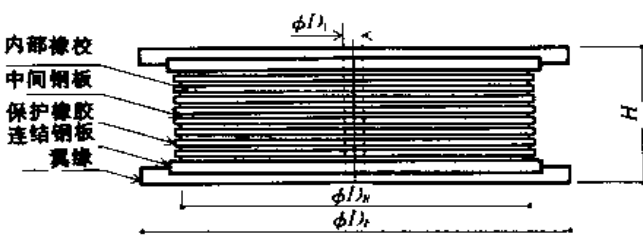
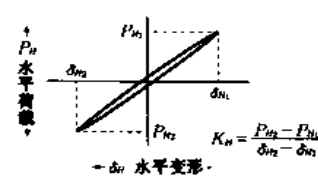
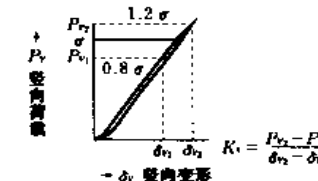
#### 本目录使用方法

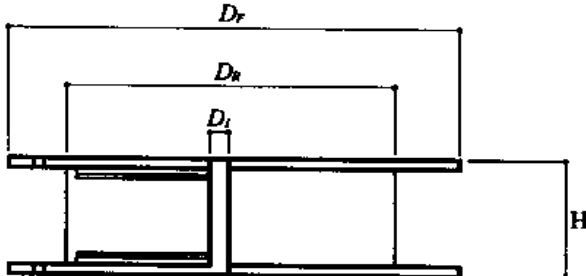
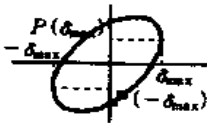
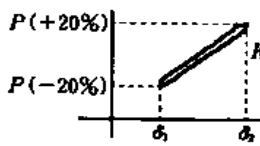
橡胶的外径是表示内部橡胶的直径,不包括保护橡胶的厚度。此外,在计算刚度和受压应力时,要扣除中心孔的面积。

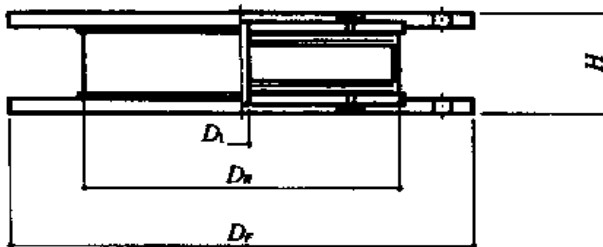
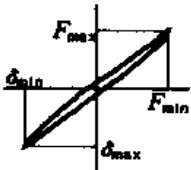
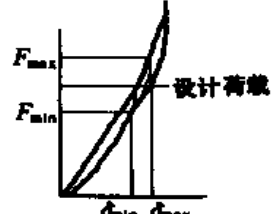
总高度表示包括翼缘在内的多层橡胶的高度。

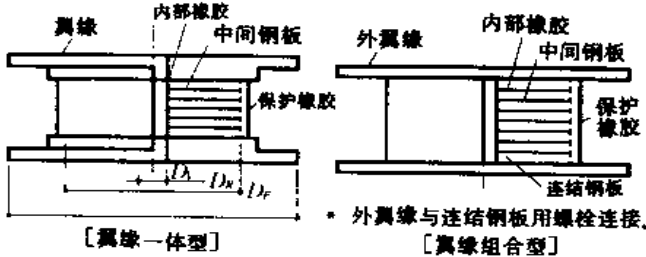
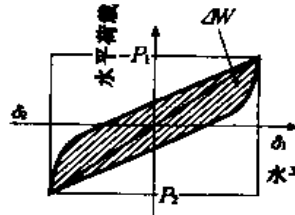
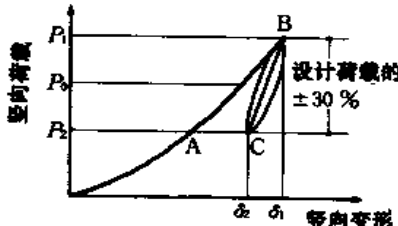
竖向刚度、水平刚度和阻尼常数,是根据产品的实验结果以及第4章的设计公式计算的。但是,目前这些特性值是在设计时考虑的,最终需根据实验确认。

此外,本目录中的产品仅汇总了目前的产品情况,实际使用时应与生产厂家进一步确认。

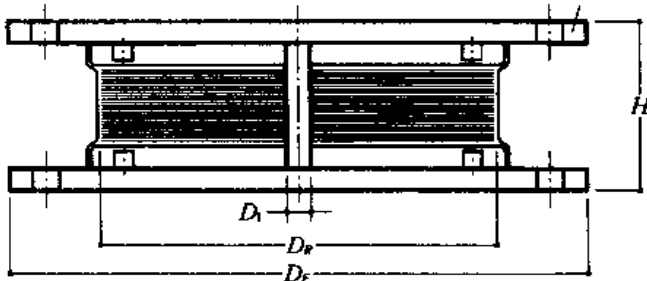
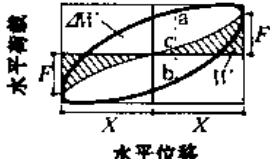
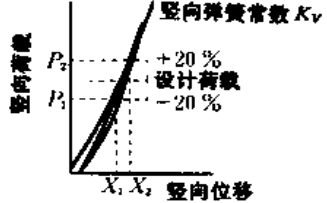
橡胶的种类	天然橡胶系列橡胶									
联系人	昭和電線電纜株式会社 免震システム推進室 西川一郎 〒229 東京都港区西新橋 2-29-5(第26中央ビル本館)							TEL	03-3437-7327	
								FAX	03-3437-7309	
多层橡胶形状								橡胶材质		
								天然橡胶 $G = 4.5\text{kg}/\text{cm}^2$		
橡胶外径 (mm)	500	600	700	800	900	1000	1100	1200		
1层橡胶厚度 (mm)	7.0	6.5	7.0	7.5	8.5	8.0	8.0	8.0		
橡胶层数	14	18	19	19	19	25	27	30		
橡胶总厚度(mm)	98.0	117.0	133.0	142.5	161.5	200.0	216.0	240.0		
中心孔径 (mm)	20	30	40	110	125	140	150	190		
中间钢板厚度(mm)	3.2	3.2	3.2	3.2	3.2	4.5	4.5	4.5		
保护橡胶厚度(mm)	5	5	5	5	5	5	5	5		
翼缘外径 (mm)	800	900	1000	1100	1200	1350	1450	1550		
总高度 (mm)	207.6	255.4	274.6	284.1	317.1	420.0	445.0	482.5		
1次形状系数 $S_1$	17.1	21.9	23.6	23.0	22.8	26.9	29.7	30		
2次形状系数 $S_2$	5.1	5.1	5.3	5.6	5.6	5.0	5.1	5		
竖向刚度 (t/cm)	1100	1700	2300	2400	2600	3400	4300	4900		
水平刚度 (t/cm)	0.90	1.08	1.30	1.56	1.74	1.73	1.94	2.07		
等价阻尼常数(%)	-	-	-	-	-	-	-	-		
备注	<p>水平刚度:对应剪应变<math>\pm 100\%</math> 加载时正负顶点值间的刚度。</p> <p>竖向刚度:对应面压<math>80\sim 100\text{kg}/\text{cm}^2</math> 间的刚度。</p> <div><math display="block">K_H = \frac{P_{H2} - P_{H1}}{\delta_{H2} - \delta_{H1}}</math><p>- <math>\delta_H</math> 水平变形 -</p></div> <div><math display="block">K_V = \frac{P_{V2} - P_{V1}}{\delta_{V2} - \delta_{V1}}</math><p>- <math>\delta_V</math> 竖向变形 -</p></div>									

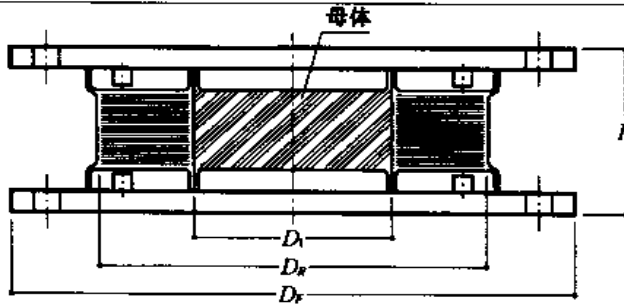
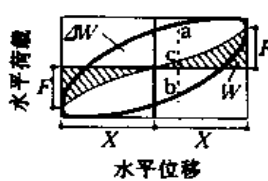
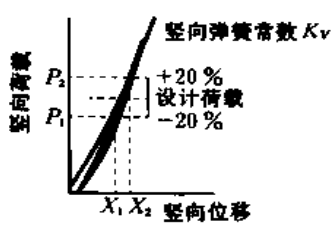
橡胶的种类	天然橡胶系列橡胶									
联系人	東洋ゴム工業(株) 化工品技術部免震プロジェクト数田史郎〒358 埼玉県人間市狭山ヶ原 302							TEL	0429-34-6712	
								FAX	0429-34-5736	
多层橡胶形状								橡胶材质		
								天然橡胶 $G = 4.5\text{kg/cm}^2$		
橡胶外径 (mm)	700	800	900							
1层橡胶厚度 (mm)	6	6	6							
橡胶层数	47	41	39							
橡胶总厚度(mm)	282.0	246.0	234.0							
中心孔径 (mm)	66	76	86							
中间钢板厚度(mm)	3.1	3.1	3.1							
保护橡胶厚度(mm)	10	10	10							
翼缘外径 (mm)	1000	1000	1000							
总高度 (mm)	486.6	442.0	423.8							
1次形状系数 $S_1$	26.25	30.00	33.75							
2次形状系数 $S_2$	2.48	3.25	3.85							
竖向刚度 (1/cm)	1269	2166	3197							
水平刚度 (1/cm)	0.703	1.052	1.400							
等价阻尼常数(%)	-	-	-							
备注	<p>水平刚度:对应水平位移<math>\pm 30\text{cm}</math>加载时正负顶点值间的刚度。由反复3次加载的第3次 <math>P-\delta</math> 曲线计算。</p> <p>竖向刚度:对应面压约 <math>40 \sim 60\text{kg/cm}^2</math> (设计荷载的<math>\pm 20\%</math>)间的刚度。由反复3次加载的第3次 <math>P-\delta</math> 曲线计算。</p> <div><math display="block">K_H = \frac{P(\delta_{\max}) - P(-\delta_{\max})}{2 \delta_{\max}}</math><math display="block">K_V = \frac{P(+20\%) - P(-20\%)}{\delta_2 - \delta_1}</math></div>									

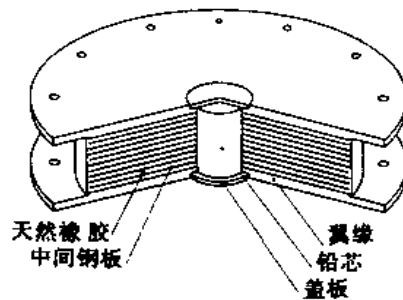
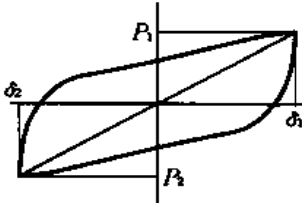
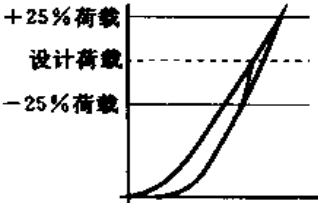
橡胶的种类	天然橡胶系列橡胶									
联系人	横浜ゴム(株) MB 販売本部 土木資材販売部 遠藤和夫 〒105 東京都港区新橋 6-1-11(秀和御成門ビル7 階)							TEL	0463-35-9681	
								FAX	0463-35-9763	
多层橡胶形状								橡胶材质		
								天然橡胶 $G = 4.5\text{kg/cm}^2$		
橡胶外径 (mm)	530	750	980							
1 层橡胶厚度 (mm)	4.8	4.8	4.8							
橡胶层数	24	24	24							
橡胶总厚度(mm)	115.2	115.2	115.2							
中心孔径 (mm)	30	50	100							
中间钢板厚度(mm)	3.0	2.2	3.0							
保护橡胶厚度(mm)	10	10	10							
翼缘外径 (mm)	750	770	1000							
总高度 (mm)	266	260	260							
1 次形状系数 $S_1$	26.0	36.5	45.8							
2 次形状系数 $S_2$	4.6	6.5	8.5							
竖向刚度 (t/cm)	1055	1925	3770							
水平刚度 (t/cm)	0.864	1.605	3.374							
等价阻尼常数(%)	-	-	-							
备注	水平刚度: 对应剪应变 $\pm 100\%$ 加载时正负顶点值间的刚度。 竖向刚度: 对应面压约 $40 \sim 60\text{kg/cm}^2$ 间的刚度。									
	<div><div></div><div><math display="block">K_H = \frac{F_{\max} - F_{\min}}{\delta_{\max} - \delta_{\min}}</math><math display="block">K_V = \frac{F_{\max} - F_{\min}}{\delta_{\max} - \delta_{\min}}</math></div><div></div></div>									

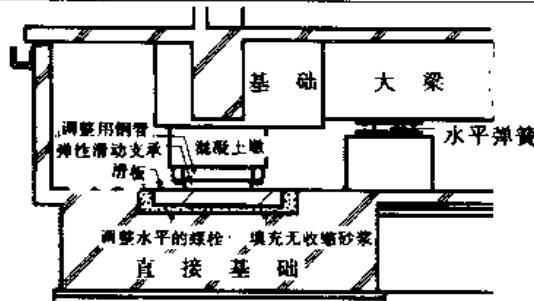
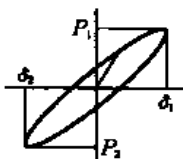
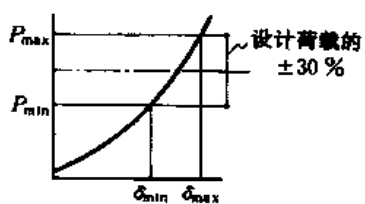
橡胶的种类	高阻尼型多层橡胶									
联系人	(株)ブリヂストン 建築用品販売部 建築免震事業推進室 曾谷宏平 〒103 東京都中央区日本橋 3-5-15(同和ビル8 階)							TEL	03-5202-6865	
								FAX	03-5202-6848	
多层橡胶形状								橡胶材质		
								高阻尼橡胶 $G = 8.2\text{kg/cm}^2$		
橡胶外径 (mm)	600	650	700	750	800	850	900	1000	1100	1200
1层橡胶厚度 (mm)	5.0	5.5	6.0	6.5	6.5	7.0	7.5	8.0	9.0	9.5
橡胶层数	40	36	33	31	31	29	27	25	21	21
橡胶总厚度(mm)	200.0	198.0	198.0	201.5	201.5	203.0	202.5	200.0	189.0	199.5
中心孔径 (mm)	100	100	100	100	150	150	150	200	200	200
中间钢板厚度(mm)	2.2	2.2	2.2	2.2	2.2	2.2	2.2	3.1	3.1	3.1
保护橡胶厚度(mm)	8.0	8.0	8.0	8.0	8.0	8.0	8.0	8.0	8.0	8.0
翼缘外径 (mm)	880	930	980	1070	1120	1170	1220	1370	1520	1590
总高度 (mm)	341.8	331.0	324.4	323.5	331.5	328.6	323.7	346.4	335.1	341.5
1次形状系数 $S_1$	25.0	25.0	25.0	25.0	25.0	25.0	25.0	25.0	25.0	25.0
2次形状系数 $S_2$	3.00	3.25	3.50	3.75	4.00	4.25	4.50	5.00	5.5	6.0
竖向刚度 (t/cm)	1400	1700	2000	2300	2500	2800	3200	4000	4900	5700
水平刚度 (t/cm)	1.2	1.4	1.7	1.9	2.1	2.4	2.7	3.3	4.0	4.6
等价阻尼常数 (%)	15.0	15.0	15.0	15.0	15.0	15.0	15.0	15.0	15.0	15.0
备注	<p>水平刚度: 对应剪应变 <math>\pm 50\%</math> 加载时正负顶点值间的等价刚度。</p> <p>竖向刚度: 对应面压约 <math>45 \sim 85\text{kg/cm}^2</math> 间的刚度。</p> <div><p>水平变形</p></div> <div><math display="block">K_h = \frac{P_1 - P_2}{\delta_1 - \delta_2}</math><math display="block">K_v = \frac{P_1 - P_2}{\delta_1 - \delta_2}</math></div> <div><p>竖向变形</p></div>									



橡胶的种类	高阻尼型多层橡胶									
联系人	住友ゴム工業株式会社 L & I 環境施設事業部 佐々木輝男 〒651 兵庫県神戸市中央区脇浜町 3-6-9						TEL	078-265-3053		
							FAX	078-265-3140		
多层橡胶形状							橡胶材质			
							高阻尼橡胶 $G = 6.8 \text{ kg/cm}^2$			
橡胶外径 (mm)	600	700	800	900	1000	1100				
1 层橡胶厚度 (mm)	6	6	6	6	6	6				
橡胶层数	22	25	25	25	25	25				
橡胶总厚度 (mm)	132	150	150	150	150	150				
中心孔径 (mm)	30	30	40	40	50	50				
中间钢板厚度 (mm)	4.5	3.2	3.2	3.2	3.2	3.2				
保护橡胶厚度 (mm)	6	6	6	6	6	6				
翼缘外径 (mm)	□850	□950	□1050	□1150	□1250	□1350				
总高度 (mm)	343	343	343	371	371	371				
1 次形状系数 $S_1$	23.8	27.9	31.7	35.8	39.6	43.8				
2 次形状系数 $S_2$	4.5	4.7	5.3	6.0	6.7	7.3				
竖向刚度 (t/cm)	2000	2800	4100	5600	7400	9500				
水平刚度 (t/cm)	1.4	1.7	2.3	2.9	3.6	4.3				
等价阻尼常数 (%)	15	15	15	15	15	15				
备注	<p>水平刚度: 对应剪应变 <math>\pm 50\%</math> 加载时正负顶点值间的等价刚度。</p> <p>竖向刚度: 对应面压约 <math>50 \sim 70 \text{ kg/cm}^2</math> 间的刚度。</p> <div style="display: flex; justify-content: space-around; align-items: flex-start;"> <div style="text-align: center;">  <p>水平位移</p> </div> <div style="text-align: center;"> <p><math>K_H = F/X</math></p> <p><math>X</math>: 最大水平位移 <math>F</math>: 最大水平位移时水平荷载</p> <p><math>K_V = (P_2 - P_1)/(X_2 - X_1)</math></p> </div> <div style="text-align: center;">  <p>竖向弹簧常数 <math>K_V</math></p> <p><math>P_2</math>: +20% 设计荷载 <math>P_1</math>: -20%</p> <p><math>X_1, X_2</math>: 竖向位移</p> </div> </div>									

橡胶的种类	高阻尼型多层橡胶(周围约束型多层橡胶)									
联系人	住友ゴム工業株式会社 L & I環境施設事業部 佐々木輝男 〒651 兵庫県神戸市中央区脇浜町 3-6-9						TEL	078-265-3053		
							FAX	078-265-3140		
多层橡胶形状							橡胶材质			
							内部橡胶:天然橡胶 $G = 6.8\text{kg/cm}^2$ 母体:合成橡胶 $G = 6.5\text{kg/cm}^2$			
橡胶外径 (mm)	700	800	900	1000	1100					
1层橡胶厚度 (mm)	6	6	6	6	6					
橡胶层数	23	25	25	25	25					
橡胶总厚度(mm)	138	150	150	150	150					
中心孔径 (mm)	290	340	440	490	590					
中间钢板厚度(mm)	4.0	3.2	3.2	3.2	3.2					
保护橡胶厚度(mm)	6	6	6	6	6					
翼缘外径 (mm)	□950	□1050	□1150	□1250	□1350					
总高度 (mm)	342	343	371	371	371					
1次形状系数 $S_1$	29.2	33.3	37.5	41.7	45.8					
2次形状系数 $S_2$	5.1	5.3	6.0	6.7	7.3					
竖向刚度 (t/cm)	3000	4100	5600	7400	9500					
水平刚度 (t/cm)	1.9	2.3	2.8	3.5	4.3					
等价阻尼常数(%)	18	18	20	20	20					
备注	<p>水平刚度:对应剪应变<math>\pm 50\%</math>加载时正负顶点值间的等价刚度。          竖向刚度:对应面压约<math>50 \sim 70\text{kg/cm}^2</math>间的刚度。</p> <div style="display: flex; justify-content: space-around; align-items: flex-start;"> <div style="text-align: center;">  <p><math>K_H = F/X</math>  <math>X_2</math>:最大水平位移  <math>F</math>:最大水平位移时水平荷载  <math>K_V = (P_2 - P_1)/(X_2 - X_1)</math></p> </div> <div style="text-align: center;">  <p>竖向弹簧常数 <math>K_V</math>  <math>+20\%</math>            设计荷载  <math>-20\%</math>  <math>X_1, X_2</math> 竖向位移</p> </div> </div>									

橡胶的种类		天然橡胶系列橡胶								
联系人	オイレス工業株式会社 第二営業開発発部〒252 東京都港区芝大門3-2 芝細目ビル	TEL		03-3433-1395						
		FAX		03-3459-8182						
多层橡胶形状		橡胶材质								
		天然橡胶 $G = 6.0\text{kg/cm}^2$								
橡胶外径 (mm)	550	600	700	800	900	1000	1100	1200	1300	
1层橡胶厚度 (mm)	5	5	6	7	8	8	8	8	8	
橡胶层数	34	34	28	24	21	21	21	21	21	
橡胶总厚度(mm)	170	170	168	168	168	168	168	168	168	
中心孔径 (mm)	110	120	140	160	180	200	220	240	260	
中间钢板厚度(mm)	2.5	2.5	2.5	2.8	3.2	3.2	3.2	4.0	4.5	
保护橡胶厚度(mm)	10	10	10	10	10	10	10	10	10	
翼缘外径 (mm)	950	1000	1100	1200	1300	1400	1500	1650	1750	
总高度 (mm)	317	317	308	312	312	322	322	348	358	
1次形状系数 $S_1$	27.5	30.0	29.2	28.6	28.1	31.3	34.4	37.5	40.6	
2次形状系数 $S_2$	3.2	3.5	4.2	4.8	5.4	6.0	6.6	7.1	7.7	
竖向刚度 (t/cm)	1400	1900	2500	3200	4000	5400	7000	8800	10800	
水平刚度 (t/cm)	1.89	2.25	3.10	4.04	5.12	6.32	7.65	9.10	10.68	
等价阻尼常数(%)	26.1	26.1	26.1	26.1	26.1	26.1	26.1	26.1	26.1	
备注	<p>水平刚度: 对应剪应变 <math>\pm 50\%</math> 加载时正负顶点值间的等价刚度。</p> <p>竖向刚度: 对应面压约 <math>50 \sim 90\text{kg/cm}^2</math> 间的刚度。</p> <div><math display="block">K_H = \frac{P_1 + P_2}{\delta_1 + \delta_2}</math></div>									

橡胶的种类	滑动阻尼隔震装置									
联系人	東京フアブリック工業(株) 技術部 渡辺喜夫、松本史郎 〒160 東京都新宿区新宿 3-23-7(新宿大栄ビル8F)						TEL	03-3356-3651		
							FAX	03-3356-3653		
多层橡胶形状							橡胶材质			
							防腐橡胶 $G = 8.0\text{kg}/\text{cm}^2$			
橡胶外径 (mm)	395	445	500	650	750	850				
1层橡胶厚度 (mm)	6	6	8	8	8	8				
橡胶层数	9	9	3	3	6	6				
橡胶总厚度(mm)	54	54	24	24	48	48				
中心孔径 (mm)	-	-	-	-	-	-				
中间钢板厚度(mm)	3.2	3.2	3.2	3.2	3.2	3.2				
保护橡胶厚度(mm)	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0				
翼缘外径 (mm)	700	700	762	935	1039	1166				
总高度 (mm)	120	120	70	70	104	104				
1次形状系数 $S_1$	16.5	18.5	15.6	20.3	23.4	26.6				
2次形状系数 $S_2$	7.3	8.2	20.8	27.1	15.6	17.7				
竖向刚度 (t/cm)	2445	3899	7880	22528	19919	33052				
水平刚度 (t/cm)	1.8	2.3	6.5	11.1	7.4	9.5				
等价阻尼常数 (%)	-	-	-	-	-	-				
备注	水平刚度: 对应剪应变 $\pm 70\%$ 加载时正负顶点值间的等价刚度。									
	竖向刚度: 对应面压约 $56 \sim 104\text{kg}/\text{cm}^2$ 间的刚度。									
										
	$K_N = \frac{P_1 - P_2}{\delta_1 - \delta_2}$ $K_V = \frac{P_{\max} - P_{\min}}{\delta_{\max} - \delta_{\min}}$									
										
	设计荷载的 $\pm 30\%$									

## 附录4 阻尼器的产品目录

表1~5为滞回型阻尼器的产品目录,表6为粘滞型阻尼器的产品目录。所列出的阻尼器都是选自实际使用的产品。表中各项说明如下。

外形尺寸(mm): 竖直方向设置时为平面形状 $\times H$ 高度。

水平方向设置时为截面形状 $\times L$ 长度。

主要尺寸(mm): 设计中要考虑的重要尺寸。

产品重量 : 原则上不包括底板的重量。

变形与反力 : 试验变形和反力。与速度有关的粘滞型阻尼器,是指按2~3秒振动周期等幅振动试验确定的最大值。当无试验数据时,是指由按可靠依据的计算值。

有无方向性 : 上一行表示有力学性能的方向,下一行有无方向的符号(Z为竖直方向)。

极限变形量(cm): 表示破坏或最终加荷时的试验值。

吸收能量(Jm) : 表示破坏或最终加荷时的累积吸收能量。

表1 滞回型阻尼器性能一览(钢材阻尼器)

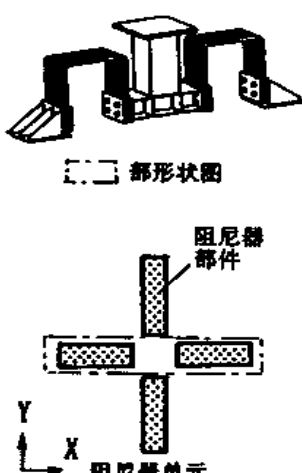
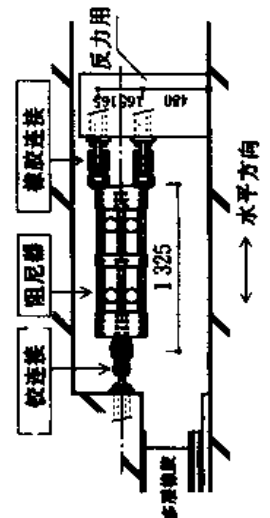
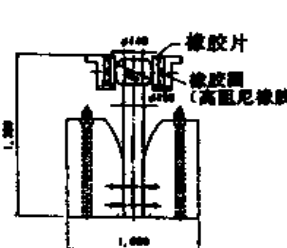
整理编号	1	2	3
名 称	M型滑动阻尼器	U字型弹塑性阻尼器	钢棒阻尼器
本体形状图	 <p>■ 部形状图</p> <p>阻尼器部件</p> <p>阻尼器单元</p>	 <p>反力用</p> <p>橡胶节点</p> <p>阻尼器</p> <p>橡胶节点</p> <p>水平方向</p> <p>1325</p> <p>多層鋼板</p>	 <p>橡胶片</p> <p>橡胶圈 (高阻尼橡胶)</p> <p>1,000</p>
能量吸收原理	随钢板的塑性变形吸收滞回能量	利用不锈钢板弯曲产生的塑性变形	钢棒的弹塑性变形 橡胶圈的粘弹塑性变形
外形尺寸(mm)	300×2200×H735(X,Y)	430×355×L1325	1,000×1,000×H1,000
主要部件尺寸(mm)	钢棒 19×23 门形 550×370	不锈钢板 6×60	150φ×H1,270
本体重量(kg)	300(阻尼器部件:40)	500	2,410
单位变形(mm)	3*1, 10, 20, 30	4, 8, 16, 20	0.85, 10, 20, 30
形反力	反力(t) 4.0, 4.5, 5.0, 6.0	18.5, 18.6, 21.1, 21.1	23.7, 27.5, 34.0, 51.1
有无方向性	<input checked="" type="checkbox"/> X <input checked="" type="checkbox"/> Y <input type="checkbox"/> Z <input type="checkbox"/> 有 <input checked="" type="checkbox"/> 无	<input checked="" type="checkbox"/> X <input type="checkbox"/> Y <input type="checkbox"/> Z <input checked="" type="checkbox"/> 有 <input type="checkbox"/> 无	<input checked="" type="checkbox"/> X <input checked="" type="checkbox"/> Y <input type="checkbox"/> Z <input type="checkbox"/> 有 <input checked="" type="checkbox"/> 无
界限变形量(cm)	30	40	
吸收能量(tm)	77	250	
标准防锈说明	镀亚铅、环氧树脂	环氧树脂涂料	钢棒:镀铬
联 络 人	三井建设(公司) TEL.0471-40-5204 FAX.0471-40-5217	佐藤工业(公司) TEL.03-5462-3613 FAX.03-5462-3702	鹿岛建设(公司) TEL.03-5474-3720 FAX.03-5474-3723
备 注	1 阻尼器单元的值(阻尼器部件:钢棒 19×20, 5根) 钢棒尺寸、根数可根据各建筑物设计	橡胶节点(高阻尼橡胶)的能量吸收、容许变形、初期刚度可任意设定	橡胶圈可限制弯曲变形,是有效的隔震和制振构造,对中小地震具有显著的隔震效果。

表 2 滞回型阻尼器性能一览(钢材阻尼器)

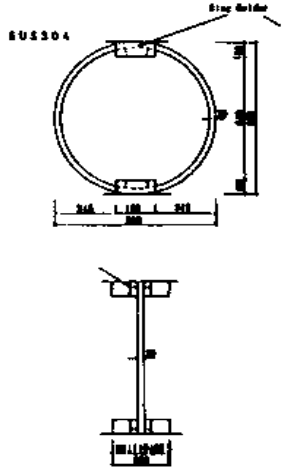
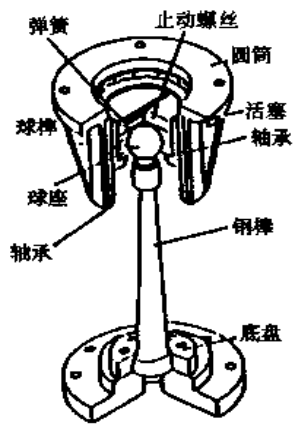
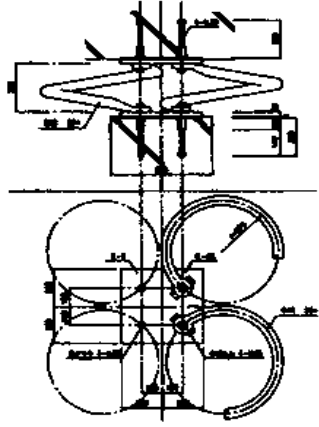
整理编号	4	5	6
名称	环形阻尼器	钢棒阻尼器	环形钢棒阻尼器
本体形状图			
能量吸收原理	利用钢材(不锈钢)弯曲产生的塑性变形	随钢棒的塑性变形吸收滞回能量	利用钢棒的弯曲产生塑性变形
外形尺寸(mm)	880 × 290 × H800	520φ × H950	1293 × H250
主要部件尺寸(mm)	30 × 30(基本)	80φ × H530	70φ
本体重量(kg)	可变	346(钢棒 23)	423
单位变形	变形(mm)	2.3	3
形反力	反力(t)	6.2	21.0
有无方向性	<input checked="" type="checkbox"/> X <input checked="" type="checkbox"/> Y <input type="checkbox"/> Z <input type="checkbox"/> 有 <input checked="" type="checkbox"/> 无	<input checked="" type="checkbox"/> X <input checked="" type="checkbox"/> Y <input type="checkbox"/> Z <input type="checkbox"/> 有 <input checked="" type="checkbox"/> 无	<input checked="" type="checkbox"/> X <input checked="" type="checkbox"/> Y <input type="checkbox"/> Z <input type="checkbox"/> 有 <input checked="" type="checkbox"/> 无
界限变形量(cm)	30	30	50
吸收能量(tm)	86	123	986
标准防锈说明	无		环氧树脂涂料
联络人	西松建设(公司)技术研究所 TEL.0462-75-1135 FAX.0462-75-6796	奥依莱斯工业(公司) TEL.03-3433-1395 FAX.03-3459-8182	新日本制铁(公司) TEL.03-3275-5766 FAX.03-3275-5963
备注	4个1组使用 单位变形的反力、能量吸收是指4个1组的值。	实际使用还有直径 127φ 形式的钢棒。	由于环状形态,大变形时轴向变形较小,反复耐久性能较好。

表 3 滞回型阻尼器性能一览(钢材阻尼器)

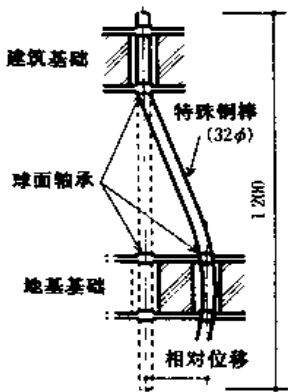
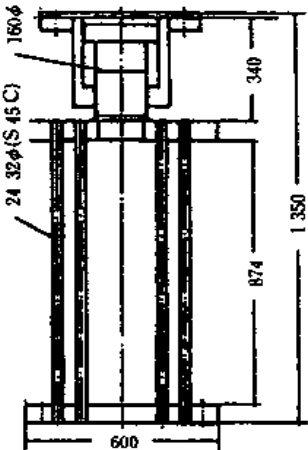
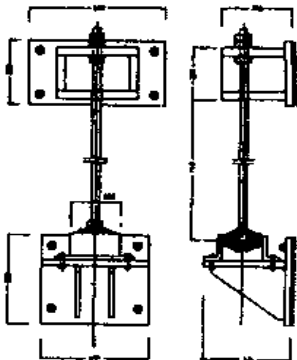
整理编号		7				8				9			
名 称		钢棒阻尼器				钢棒阻尼器				钢棒阻尼器			
本体形状图													
能量吸收原理		利用钢棒产生的塑性变形				随钢棒的塑性化,吸收滞回能量				随钢棒的塑性变形,吸收滞回能量			
外形尺寸(mm)		400×330×H1200				600φ×H1350				500×325×H1280			
主要部件尺寸(mm)		32φ×H1200				32φ×874				48φ×H1200			
本体重量(kg)		50				500				180			
单位变	变形(mm)	3	10	20	30	303	10	20	30	3.3	10.0	20.0	25.0
形反力	反力(t)	2.0	2.3	2.5	2.75	10.5	13.7	18.4	23.1	0.87	1.14	1.54	1.74
有无方向性		■X■Y□Z				■X■Y□Z				■X■Y□Z			
		□有 ■无				□有 ■无				□有 ■无			
界限变形量(cm)		35				32				36.5			
吸收能量(tm)		14				150				46			
标准防锈说明		环氧树脂涂料								环氧树脂涂料			
联 络 人		大林组(公司) TEL.03-5689-1757 FAX.03-5689-1774				清水建设(公司) TEL.03-3820-5516 FAX.03-3643-7260				户田建设(公司) TEL.03-3206-7186 FAX.03-3206-7180			
备 注		钢棒 SCM435 松菱建设制 球面滑动轴承 NTN 制				24根钢材组合成1组。竖向变形由活塞吸收。				构件随水平位移产生的轴向力由多层橡胶垫抑制。			



表 4 带阻型阻尼器性能一览(铅阻尼器、摩擦阻尼器)

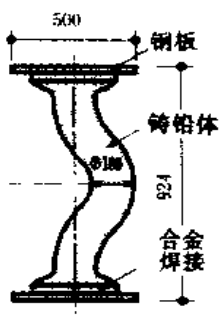
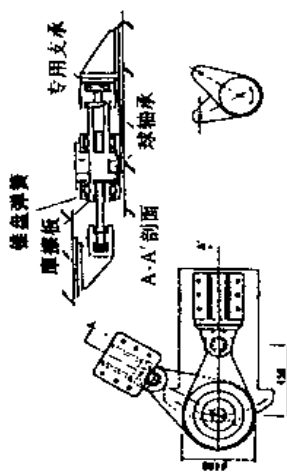

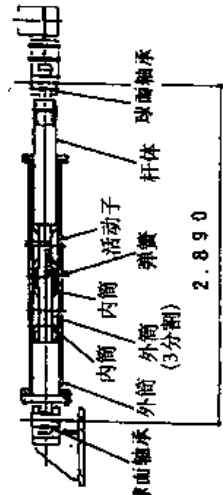
整理编号	10	11	12
名 称	U180 型铅阻尼器	摩擦阻尼器	改进型摩擦阻尼器
本体形状图			
能量吸收原理	利用铅的塑性变形吸收能量	利用金属间的摩擦吸收能量。	利用金属间的摩擦吸收能量。 低振幅时由高阻尼橡胶吸收。
外形尺寸(mm)	188 $\phi$ × H924	1050 × 850 × H320	1200 × 1100 × H515
主要 部 件 尺 寸 (mm)	180 $\phi$	400 $\phi$	420 $\phi$
本体重量(kg)	500	200	300
单位变 形(mm)	2    5    10    15	0    10    20    24	2    10    20    30
形反力 反力(t)	4    7    9    10	12.0    13.1    15.1    16.2	15.0    15.9    17.3    19.8
有无方向性	■X■Y□Z	■X■Y□Z	■X■Y□Z
	□有    ■无	■有    □无	■有    □无
界限变形量(cm)	60	26	38
吸收能量(tm)	400	无需考虑	无需考虑
标准防锈说明		相当 JIS-K-5621	相当 JIS-K-5621
联 络 人	三井材料(公司) TEL.03-5252-5363 FAX.03-5252-5426	住友金属工业(公司) TEL.03-3282-6244 FAX.03-3282-6762	住友重机械工业(公司) TEL.03-3245-4250 FAX.03-3245-4333
备 注	铅阻尼器的竖向与水平方向的 带阻特性有一些差异,但当 多个阻尼器同时使用时,可以 无方向性。	摩擦力、容许变形可以任意设 定。	低振幅时仅有高阻尼部分变 形。 摩擦力、容许变形和初期刚度 可任意设定。

表 5 滞回型阻尼器性能一览(摩擦阻尼器)

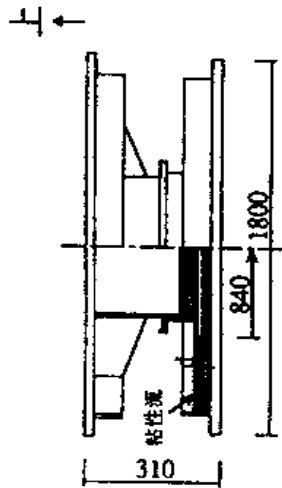
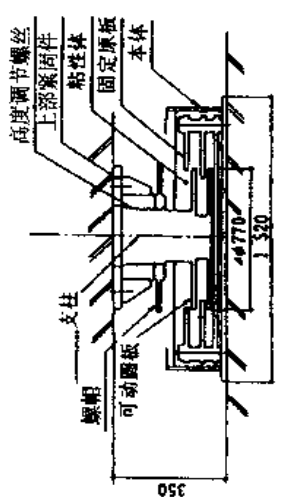
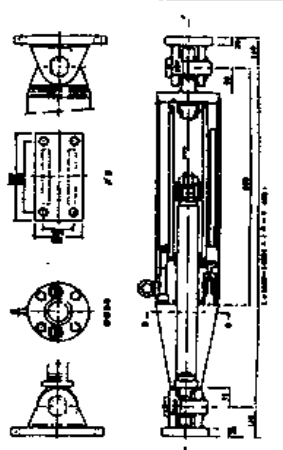
整理编号		13			
名 称		摩擦式阻尼器(20 吨)			
本体形状图					
能量吸收原理		利用摩擦块与外筒间的摩擦吸收能量			
外形尺寸(mm)		H500 × L3640			
主要部件尺寸(mm)		265φ × L2890			
本体重量(kg)		1220			
单位变形反力	变形(mm)	5	10	20	30
	反力(t)	20	20	20	20
有无方向性		<input checked="" type="checkbox"/> X <input type="checkbox"/> Y <input type="checkbox"/> Z			
		<input checked="" type="checkbox"/> 有 <input type="checkbox"/> 无			
界限变形量(cm)		45			
吸收能量(tm)		无须考虑			
标准防锈说明		外筒内面镀硬质铬 外筒外面涂环氧树脂			
联 络 人		住友金属工业(公司) TEL.06-466-6144 FAX.06-466-6229			
备 注		不需维护,除 20 吨外还有 10 吨形式。界限变形量(行程)在安装时可以设定。			

## 附录 5 隔震建筑业主指南

对设计和施工人员来说,隔震结构与以往熟悉的一般结构相比也存在许多差别,对建筑业主来说则更是不易掌握的结构。建筑物竣工后,建筑业主主要从设计和施工人员手中接管建筑物,因此,除技术人员隔几年一次定期检查使用状况外,建筑物能否发挥较好的隔震性能,建筑业主管理的作用很大。

本“隔震建筑业主指南”是针对建筑业主在建筑物的日常使用方面,对建筑物性能的特长和管理中应注意的问题而编写的。建筑业主在接手建筑物时,根据建筑物的特性,应与设计人员共同确定是否设置地震仪、维护管理体制等事项。

表 6 粘滞型阻尼器性能一览(粘性体、油)

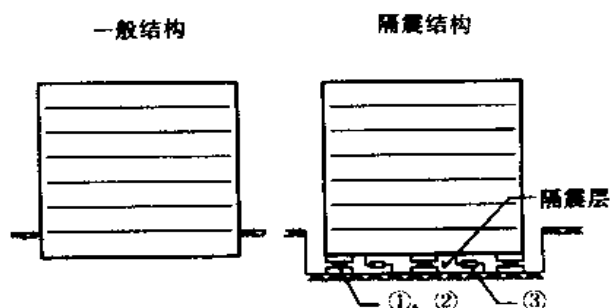
整理编号	14	15	16
名 称	粘性体阻尼器	粘性阻尼器	油阻尼器
本体形状图			
能量吸收原理	利用粘性流体的剪切抵抗作用 $F = 0.42e^{-0.0431} A(v/d)^{0.59}$	利用粘性流体的剪切抵抗作用	阻尼孔效应
外形尺寸(mm)	1800×1800×H310	φ1520×H350	216.3φ×L1470
主要部件尺寸(mm)	抵抗板直径 840φ	可动圆板 φ770	99φ×L500
本体重量(kg)	约 1500	约 1200	200
单位变形(mm)	5    10    20    30	1.0    8.0    16.0    24.0	10    (T=1.5sec)
形反力反力(t)	5.0    7.5    11.3    14.4	1.9    7.7    10.0    14.0	49
有无方向性	<input checked="" type="checkbox"/> X <input checked="" type="checkbox"/> Y <input type="checkbox"/> Z <input type="checkbox"/> 有 <input checked="" type="checkbox"/> 无	<input checked="" type="checkbox"/> X <input checked="" type="checkbox"/> Y <input type="checkbox"/> Z <input type="checkbox"/> 有 <input checked="" type="checkbox"/> 无	<input checked="" type="checkbox"/> X <input type="checkbox"/> Y <input type="checkbox"/> Z <input checked="" type="checkbox"/> 有 <input type="checkbox"/> 无
界限变形量(cm)	抵抗板的可动范围	30	20
吸收能量(tm)	无须考虑	无须考虑	无须考虑
标准防锈说明	镀熔融亚铅	涂树脂(涂5次)	盐化橡胶搪瓷
联 络 人	奥依莱斯工业(公司) TEL.03-3433-1395 FAX.03-3459-8182	特基考(公司) TEL.044-200-0243 FAX.044-200-0267	卡亚巴(公司) TEL.0427-46-5516 FAX.0427-45-6388
备 注	反力是在 0.5Hz, 20℃ d = 1cm 的计算值	小振幅时阻尼和刚度较大, 对强风时的振动特别有效。	

## 技 术 指 南

一般建筑结构是直接建造在地面上的,而隔震结构建筑与地面没有连接。建筑物与地面之间的空隙称为隔震层。

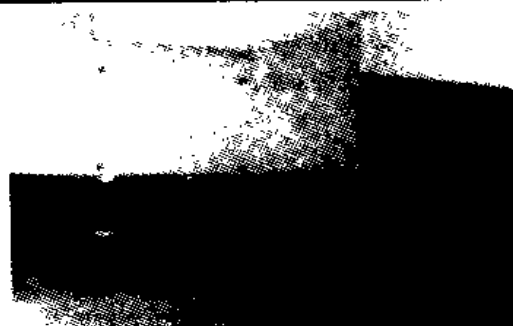
隔震层设置了隔震构件,具有三种性能:

- 1) 竖向具有承受建筑物重量的性能。
- 2) 为抑制地震时的摇晃,水平方向具有柔性弹簧性能。
- 3) 建筑物与地面之间产生水平方向运动时,具有吸收地震力、抑制变形、地震后能迅速停止晃动的性能。



具有 1)、2) 性能的构件称为隔震器,具有 3) 性能的构件称为阻尼器。

隔震器一般采用由橡胶和钢板相互交错重叠而成的多层橡胶。多层橡胶有时兼而具有 3) 的性能,有时没有。对于后者,必须与其他阻尼器组合使用。

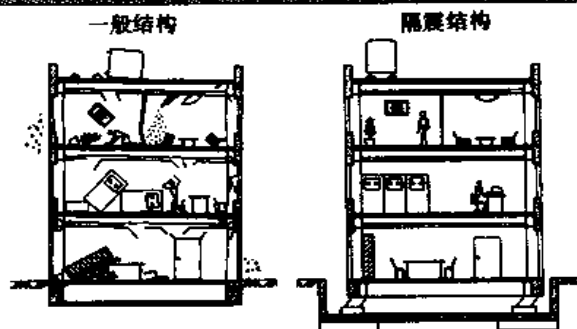


建筑物设置的隔震构件

隔震结构建筑受到的地震规模越大,与一般结构的差别越明显。其性能具有以下 3 点特长。

- 1) 减小地震时的楼面加速度。  
…楼面无剧烈摇晃,居住性较好,可防止内部物品的移动、翻倒、损坏。
- 2) 减小作用于建筑物的地震力  
…与一般结构相比,建筑物本身的损坏特别小,使财产价值得到保护。
- 3) 减小地震时建筑物的变形  
…玻璃、隔墙等的损坏很小,容易安装。

由于风的作用的时间比地震长,在台风等作用时,建筑物不会产生不愉快的摇晃,阻尼器可以阻止振动。



**地震时…**

柱、梁、墙损坏,天花板、窗玻璃损坏,设备、物品翻倒,喷水器可能漏水。

**地震后…**

建筑功能丧失,财产价值损失,可能修补、重建。

**地震时…**

建筑物、物品无损坏,减轻剧烈的摇晃。

**地震后…**

保持建筑功能,财产价值得到保全,检查后确认功能。

## 管 理 指 南

10年后、20年后或遭受大地震后,保证建筑物的隔震性能正常发挥,应确定管理体制进行检查。检查包括建筑管理人员进行的通常检查和专门技术人员的定期检查或临时检查。

检查记录是建筑物的档案,应妥善保管。

**通常检查** 每半年

建筑管理人员

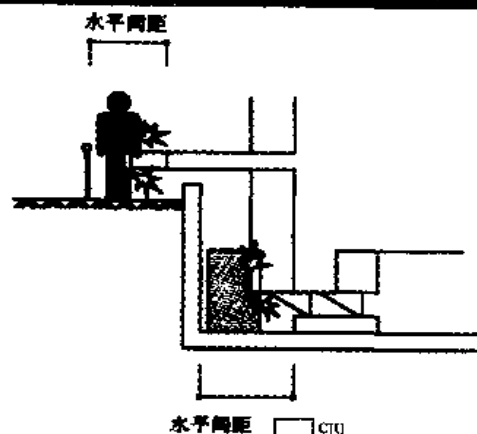
**定期检查** 1年,3年,5年,10年 以后每10年

专门技术人员

**临时检查** 地震、火灾浸水等灾害后

大地震时,建筑物与地面之间产生较大的水平移动。建筑物设计了移动□mm无冲撞的可动范围。

在该范围内如有障碍物,不仅在地震时会引起损坏,而且会使建筑物的隔震性能受到影响。业主应对此进行有效的管理,确保可动范围。此外,在可动范围,人员的进入也应十分留意。

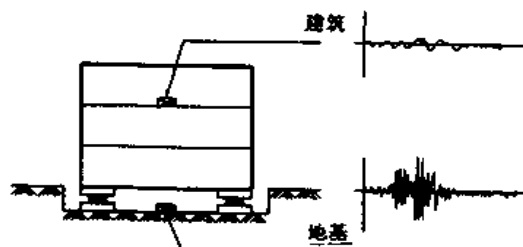


建筑物与周围连接的设备管线,应能随建筑物产生变形,不影响使用。即使这些管线采用固定的,在地震时受到损坏,也不能影响建筑物的隔震性能。设备的维修、改造和增加时,要与建筑设计人员联系,进行妥善的施工。



(可变形的设备)

在地基和建筑物的各部分设置地震仪,进行地震观测。根据观测记录可以判断和研究“地震时隔震性能是否充分发挥”、“何处产生异常”等问题。



## 附录6 JSSI 规格 I-01 天然橡胶系列多层橡胶 隔震器的规格(草案)

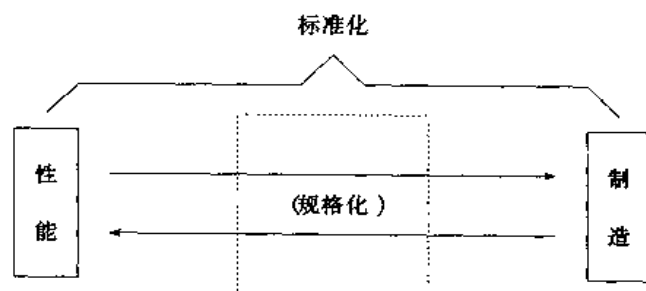
### 6.1 前 言

在通常的建筑中,要确定结构构件的规格,这样可以根据用途和分类选择合适的构件。在隔震结构中,目前隔震器和阻尼器等各种隔震构件的规格尚未一般化,制造上也存在差异。

为解决这一问题,特制定便于使用的隔震构件规格先试行。而且,本规格对于制造时的性能评价以及制造关系的标准化也有一定的作用。

隔震构件的规格化,是确定隔震构件产品性能的标准,使用和制造均可利用,应用中不能违反或误解。

标准化是包含规格化的各种产品的更详细的规定,具有统一、简单、经济,便于使用的特点,并能进一步推动制造。



本规格反映了目前的技术水平,主要应用于天然橡胶系列多层橡胶隔震器。作为日本隔震结构协会公开发表的规格,希望得到各方面的意见,进一步修改、完善。

### 6.2 形 状

#### 6.2.1 形状的定义

##### (1)各部分的名称

本规格的对象是通常使用的标准的加硫粘接天然橡胶系列多层橡胶隔震器。多层橡胶隔震器各部分的名称必须定下来。这里对名称进行统一和定义。

此外,对形状和制造方法,按保护橡胶分类定义了保护橡胶一体型和保护橡胶后卷型,按翼缘形状分类定义了翼缘一体型和翼缘组合型。

表 1.1 各部分的名称

名 称	符号	定 义	相关性能等
1 内部橡胶	—	橡胶层	力学性能
2 保护橡胶	—	外侧保护橡胶	耐久性能、耐候性能
3 保护橡胶一体型	G1	内部橡胶与保护橡胶一体成型	制造方法
4 保护橡胶后卷型	G2	橡胶层加硫后包裹保护橡胶	制造方法
5 中间钢板	—	钢板层	承载性能
6 翼缘	—	与基础部分安装用的钢板	
7 中心孔	—	橡胶层中心部分加热用的中心孔	制造方法
8 翼缘一体型	F1	橡胶层与翼缘一体成型	制造方法
9 翼缘组合型	F2	橡胶层加硫后安装翼缘	制造方法
10 连接钢板	—	翼缘组合型用的连接钢板	制造方法
螺栓	11 连接螺栓	翼缘与连接钢板连接的螺栓	
	12 翼缘螺栓	翼缘与底板连接的螺栓	

## (2) 各部分的形状尺寸

对于关系到多层橡胶隔震器性能的各部分的形状尺寸,按以下的统一名称和定义执行。

表 1.2 各部分的形状尺寸

名 称	符号	定义和计算式	有关性能等
1. 高 度 (mm)	总高	$H$	包括翼缘的总高
	产品	$H'$	产品的高度
2. 产品直径 (mm)	外径	$D_f$	翼缘部分的外径
	外径	$D_o$	橡胶部分的外径(内部+保护橡胶)
3. 橡胶直径 (mm)	外径	$D$	内部橡胶外径
	内径	$d$	内部橡胶内径
4. 橡胶层数	$n$	内部橡胶的层数	竖向刚度、水平刚度
5. 橡胶厚度 (mm)	1 层	$t_r$	1 层内部橡胶的厚度
	总厚	$T_r$	内部橡胶的总厚度 $T_r = nt_r$
6. 中间钢板 (mm)	1 层	$t_s$	1 层中间钢板的厚度
	总厚	$T_s$	中间钢板的总厚 $T_s = (n-1)t_s$
	孔径	$d_s$	中间钢板的内径
7. 橡胶截面积 ( $\text{cm}^2$ )	$A$	内部橡胶的有效截面积 $A = (D^2 - d_s^2) \cdot \pi / 4$	竖向刚度、水平刚度
8.1 次形状系数	$S_1$	受压面积/自由表面积 $S_1 = (D - d_s) / 4t_r$	竖向刚度
9.2 次形状系数	$S_2$	内部橡胶外径/橡胶总厚 $S_2 = D / T_r$	水平刚度、水平变形性能



(3)按保护橡胶分类和各部分名称

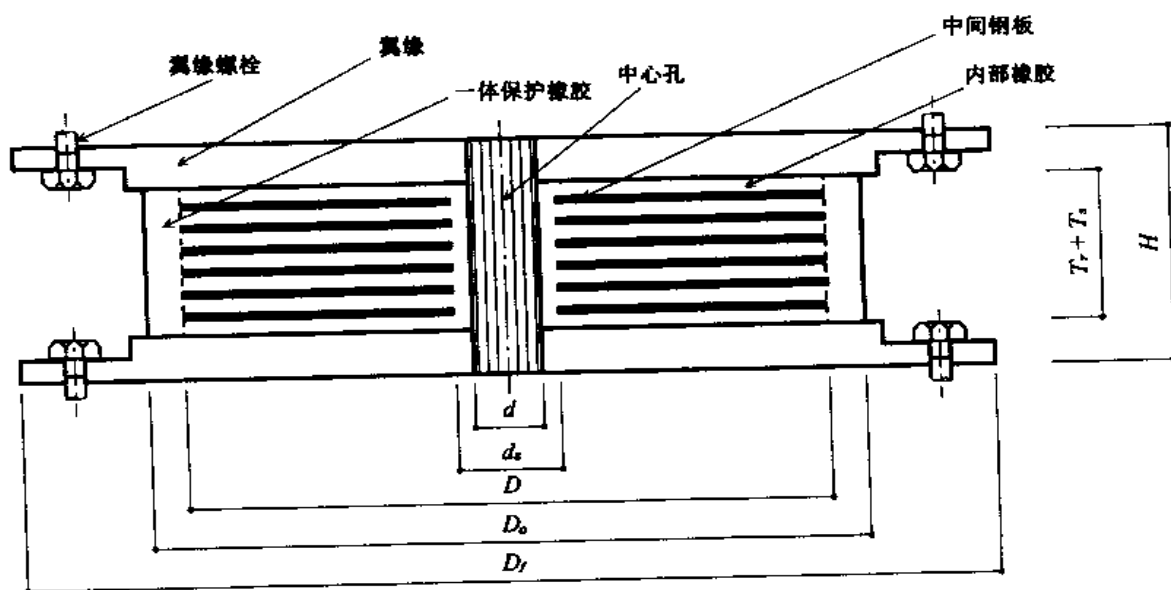


图 1.1 G1:保护橡胶一体型

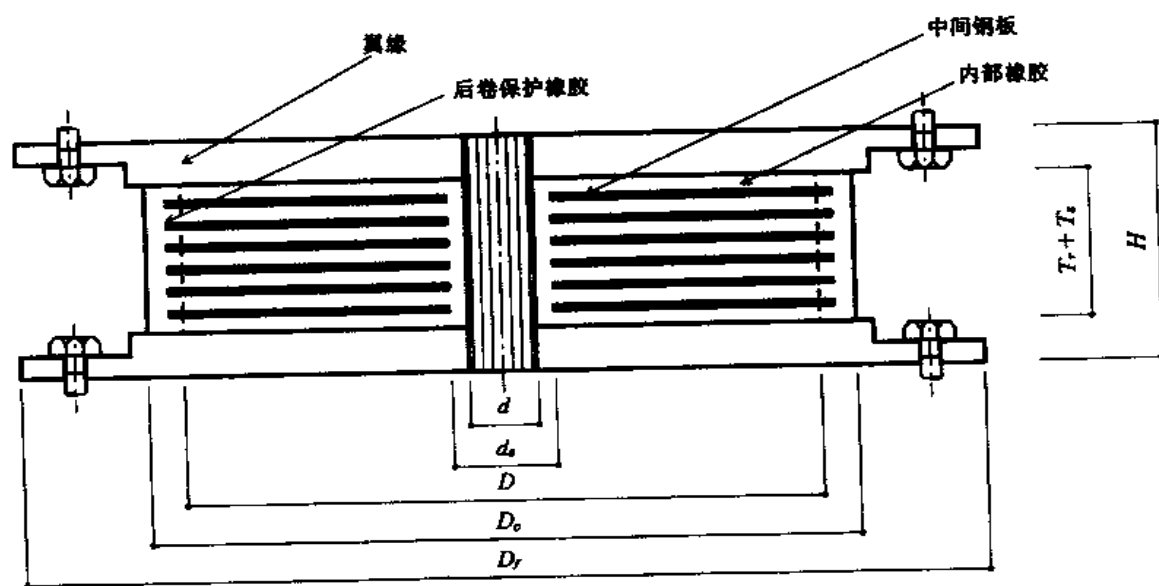


图 1.2 G2:保护橡胶后卷型

#### (4) 按翼缘形状分类和各部分名称

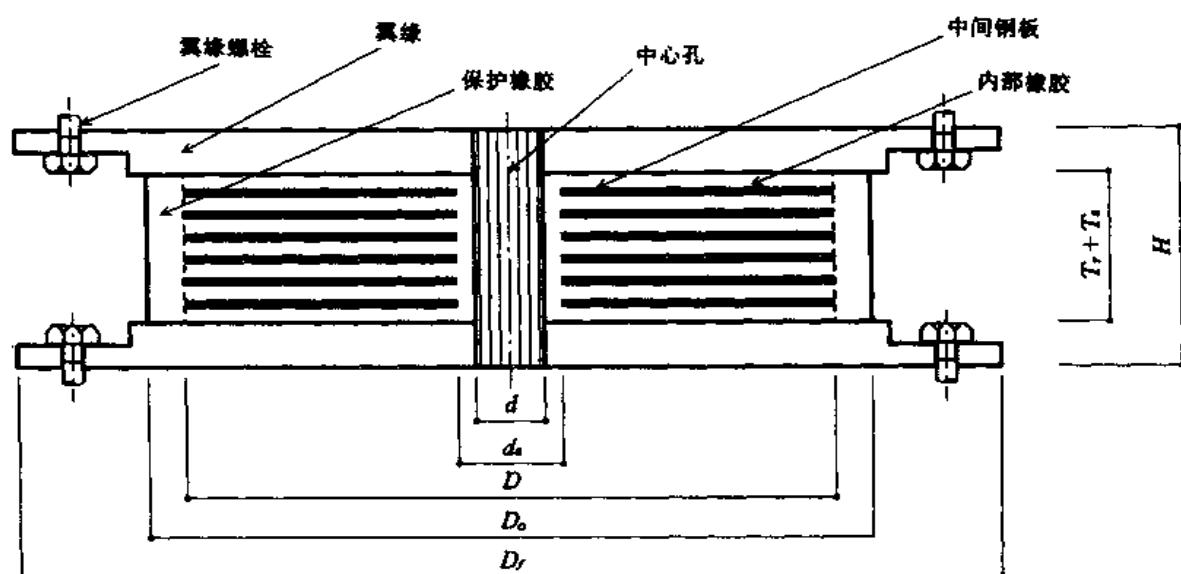


图 1.3 F1:翼缘一体型

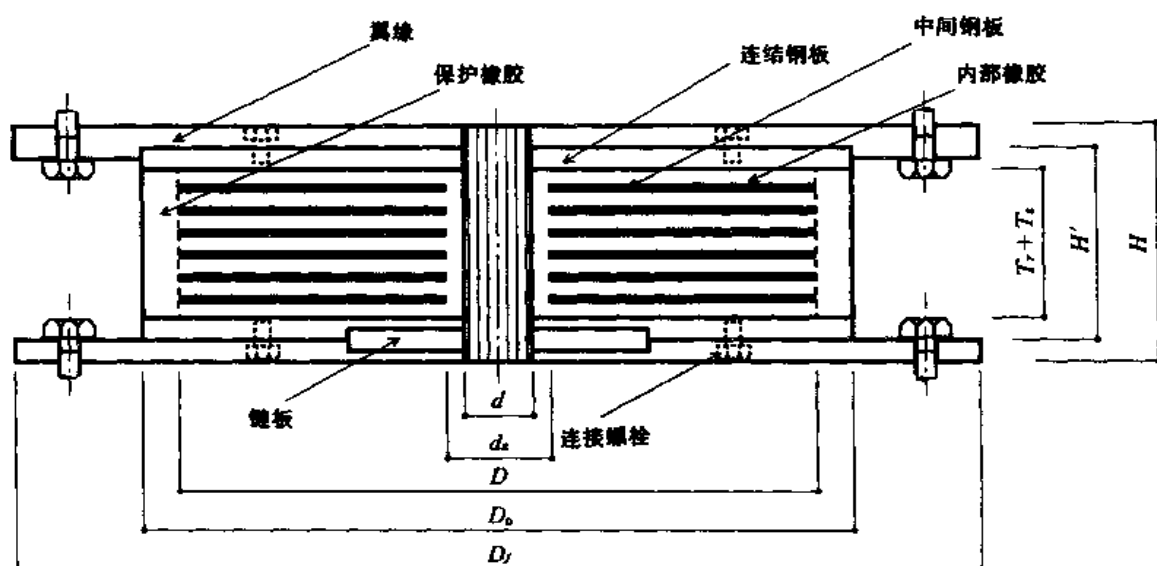


图 1.4 F2:翼缘组合型  
(上侧:A型、下侧:B型)

### 6.2.2 形状尺寸的容许误差

多层橡胶隔震器各部分的形状尺寸,根据图面用尺子等进行测量。尺寸容许误差必须满足下表的要求。产品高度的容许在按标准温度 20℃规定的,根据测定时的气温,取橡胶的线膨胀系数为  $5.8 \times 10^{-4}/^{\circ}\text{C}$ ,对尺寸进行修正。

这里所给出的形状尺寸的容许误差,是针对通常使用的标准的多层橡胶隔震器的—

个建议。在各种建筑中,如采用 特殊用途或使用状况不同的情况,可按其他 方法设定容许误差。

表 1.3 形状尺寸的容许误差

项 目	符号	容 许 误 差
1. 产品高度 <sup>*1</sup>	$H$	$\leq$ 设计值的 $\pm 1.5\%$ ,且 $\pm 6\text{mm}$ 与全部产品的平均值相差 $\leq \pm 2\text{mm}$
2. 产品的倾斜 <sup>*2</sup>	$\delta_p$	$\leq$ 翼缘外径的 $0.5\%$ ,且 $3\text{mm}$
3. 翼缘水平方向的偏移	$\delta_H$	$\leq 5\text{mm}$
4. 产品直径(翼缘外径)	$D_f$	$\leq \pm 3\text{mm}$ (JISG 0417 B 级)
5. 产品直径(橡胶部分外径)	$D_o$	$\leq$ 设计值的 $\pm 0.5\%$ ,且 $\pm 4\text{mm}$
6. 翼缘板厚	$T_f$	$\leq \pm 0.9\text{mm}$ (JISG 3193)
7. 翼缘位置的偏差		$\leq \pm 1.2\text{mm}$ (JISG 0405 中 级)

注)1 取 4 点测定的平均值

2 取对角的位置的差值

## 6.3 材 料 特 性

### 6.3.1 橡 胶

#### (1)橡胶材料的配合

天然橡胶系列多层橡胶隔震器,可采用内部橡胶和保护橡胶。

内部橡胶应采用受拉强度和延伸率较大、性能随温度变化较小、徐变较小的机械性能良好的以天然橡胶为主 的材料。

天然橡胶原料是色质柔和的粘弹性状物质,加硫混合炼制后,加热加压使分子内产生架桥而富有伸缩性,成为加硫橡胶。

进一步加碳黑等补强剂、油等可塑剂、防老化剂等,使加工性能和机械性能均较好。

表 2.1 为内部橡胶的标准配合比。

表 2.1 橡胶的配合比(重量比)

	内部橡胶	备 注
天然橡胶	66	保护橡胶可采用合成橡胶
补强剂	12	碳黑等
加塑剂	15	石油
加硫剂等	7	硫磺、加硫促进剂、防老化剂
合计	100	

#### (2)橡胶的物理特性

橡胶的物理特性,是确定直接影响建筑物隔震性能的多层橡胶隔震器的刚度和变形性能等的必要指标。

确定橡胶的物理特性,原本应确立一套多层橡胶隔震器的材料试验方法,但目前不可能。表 2.2 所示为按以往材料试验得到的内部橡胶的物理特性,由于制造上的原因会有

一定的误差。

表 2.2 橡胶的物理特性

试验项目		单位	物理特性	试验方法 <sup>1)</sup>
原始材料	受拉强度	kgf/cm <sup>2</sup>	160 以上	JIS K6301
	延伸率	%	600 以上	JIS K6301
	100 % 受拉应力	kgf/cm <sup>2</sup>	9 ± 2	JIS K6301
	300 % 受拉应力	kgf/cm <sup>2</sup>	33 ± 6	JIS K6301
	硬度	JIS A	38 ± 3	JIS K6301
	25 % 低伸长应力	kgf/cm <sup>2</sup>	2.9 ± 1	JIS K6301
	静剪切模量	kgf/cm <sup>2</sup>	3.1 ~ 6.4	JIS K6386
相当 60 年老化试验 <sup>2)</sup>	受拉强度变化率	%	- 10	JIS K6301
	延伸率变化率	%	- 15	JIS K6301
	100 % 受拉应力变化率	%	+ 20	JIS K6301

注<sup>1)</sup>JIS K6301:加硫橡胶的物理试验方法

JIS K6386:防震橡胶材料

<sup>2)</sup>试验条件:温度 100℃,加热 10 天

块体试件加热后,由试件内部取出试样(隔断空气)。

### 6.3.2 钢 材

多层橡胶隔震器使用的钢材,按表 2.3 的规格标准使用。

表 2.3 钢材的规格

钢材使用部位	钢 材 规 格	
	翼缘一体型	翼缘组合型
中间钢板	SS400 (JIS G 3101) SPCC (JIS G 3141) SPHC (JIS G 3131)	SS400 (JIS G 3101) SPCC (JIS G 3141) SPHC (JIS G 3131)
连接钢板	——	SS400 (JIS G 3101)
翼缘板	SS400 (JIS G 3101)	SS400 (JIS G 3101)
翼缘螺栓	六角螺栓(JIS B 1180) 摩擦高强六角螺栓 (JIS B 1186) 防锈用 “镀熔融亚铅螺栓” “镀熔融亚铅高强螺栓”	六角螺栓(JIS B 1180) 摩擦高强六角螺栓 (JIS B 1186) 防锈用 “镀熔融亚铅螺栓” “镀熔融亚铅高强螺栓”
连接螺栓	——	六角螺栓(JIS B 1180)

注:材质、螺栓尺寸根据计算确定。

### 6.3.3 油 漆

应根据实际使用状况保证切实的防锈,选择合适的油漆方法。

以下所示为一般做法。

### (1)油漆

多层橡胶隔震器的钢板外露部分的油漆方法如表 2.4 所示。

表 2.4

程 序	方 法
1)基地处理	打磨处理除锈
2)底涂	
3)中涂	树脂涂料
4)面涂	树脂涂料

### (2)镀溶解亚铅

钢板采用镀溶解亚铅时,按以下所示规格。

作业标准:JIS H9124

镀 层 量:JIS H8641

## 6.4 制作方法

### 6.4.1 制作工程

隔震结构中采用的天然橡胶系列多层橡胶隔震器,是由橡胶和钢板相互交错叠合成层状,加硫粘接成整体而成,由橡胶、钢板、翼缘(和连接钢板)3 种类型的部件组成。

图 3.1 所示为典型的天然橡胶系列多层橡胶隔震器的制作工程。

实际使用的橡胶材料以及模具、挤压等制造设备各种各样,制作条件也不相同,这些属于各公司的专利,所以不明确。

以下概要说明天然橡胶系列多层橡胶隔震器的各制作工程。

#### 1)配合计量

天然橡胶和碳黑、石油、硫磺等添加剂,按所需要的量确定配合比,在混合机适当混合,准备多层橡胶的制作。

#### 2)精炼(炼制橡胶)

在天然橡胶与配合剂混合的工程中,使用混合机进行炼制。

#### 3)压制、4)冲切

精炼后的橡胶,按多层橡胶 1 层的厚度压制加工成橡胶片,然后,根据所需的形状用模具冲切成橡胶片。

#### 5)切断加工

按中间钢板所需厚度,用钢板加工成所需的形状。

#### 6)机械加工、7)电镀加工

多层橡胶隔震器是通过翼缘与基础和建筑物的安装底板连接的。有连接钢板与翼缘为同一部件的一体型和通过螺栓与其他部件连接的翼缘组合型。与橡胶层接触面和反面要按所需的形状进行机械加工,并进行防锈的电镀加工。中间钢板也要进行同样的处理。

#### 8)表面处理、9)脱脂、10)涂粘结剂

橡胶与钢板表面要取得良好的粘结,钢板表面要进行处理使其具有适度的凹凸,进行脱脂清洗去除表面灰尘和油脂后,在钢板表面涂抹加硫粘结剂,使橡胶与钢板粘结。

#### 11)叠合

这是将准备好的橡胶片和中间钢板按所需要的数量交错重叠放入模具内的工程。多层橡胶隔震器的形式有保护橡胶一体型和保护橡胶后卷型,叠合方法有不同之处。

保护橡胶一体型:将橡胶片和中间钢板对中交互重叠后,周围卷上保护橡胶,一起放入圆形模具内。

保护橡胶后卷型:将橡胶片和中间钢板对中交互重叠后,同时将钢板端部固定于半边内模具,最后放入圆形模具内。

#### 12)加硫成型、13)最后加工

橡胶片、中间钢板在模具内叠合后,主要以蒸汽为热源向模具内加所需的压力,按所定的温度和时间进行加硫成型。该工程的目的是获得多层橡胶隔震器性能的重要工序,按各制造专利进行加工。结束后,经过冷却,从模具内取出,去除表面毛边。

#### 14)安装翼缘

对于翼缘组合型,经性能检查后,取下试验用翼缘,安装产品翼缘,再进行尺寸检查。

#### 15)卷上保护橡胶

对于保护橡胶没有同时成型的保护橡胶后卷型,检查尺寸后,为防止多层橡胶隔震器的老化,卷上耐候性较好的保护橡胶。

#### 16)油漆

对于钢板外露部分要进行油漆防锈。为防止施工时生锈,可在工厂先进行上涂,现场安装工程结束后,再进行油漆修补。

#### 17)包装、出厂

为防止运输中的损伤,采用包装材料进行包装。

### 6.4.2 质量管理

在批量生产天然橡胶系列多层橡胶隔震器时,为达到所要求的性能目标,制作过程要确保产品品质一致,因此按图 3.1 所示,应在材料阶段和制造假定进行下列检查。

#### (1)橡胶材料检查

为保证橡胶材料按正确的配合比进行精炼,需进行材料检查。检查项目一般是对合适的加硫度和橡胶片进行物理性能试验。

#### (2)钢材检查

对于中间钢板和翼缘等钢材,大多采用尺寸测量检查加工的形状。但是,在钢材验收阶段,要进行材质合格确认和尺寸确认检查。

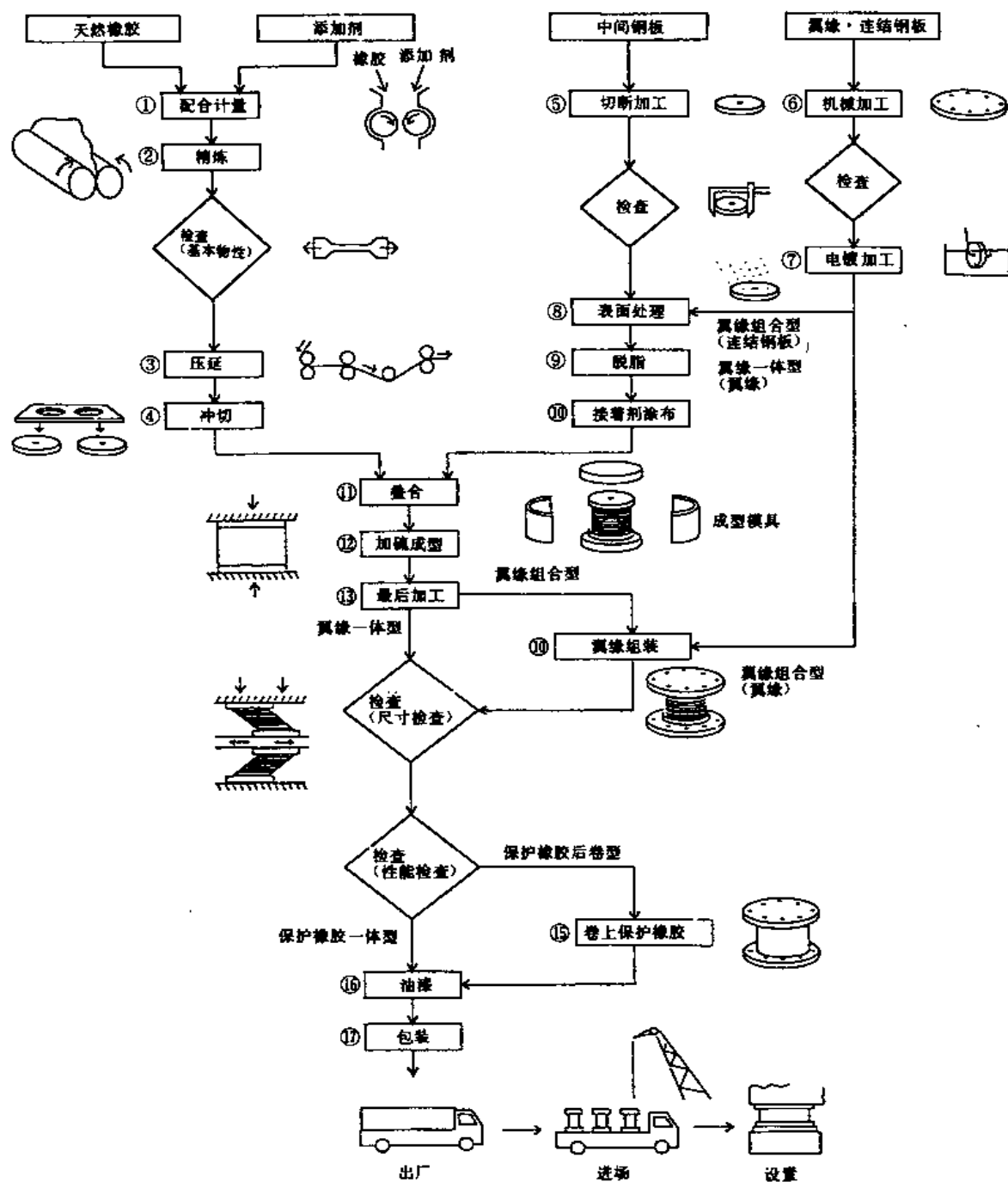


图 3.1 天然橡胶多层橡胶隔震器制作工程实例

### (3) 产品检查

对于每个产品,要按所要求的尺寸进行尺寸检查,按所要求的性能进行性能检查。  
性能检查项目一般为竖向刚度和水平刚度的测定,有时也需要进行变形性能确认。

## 6.5 性能

本项规定了天然橡胶系列多层橡胶隔震器性能的评价项目和评价方法。评价方法和标准不是绝对的,可以由用户和制造双方利用本规定共同商定。

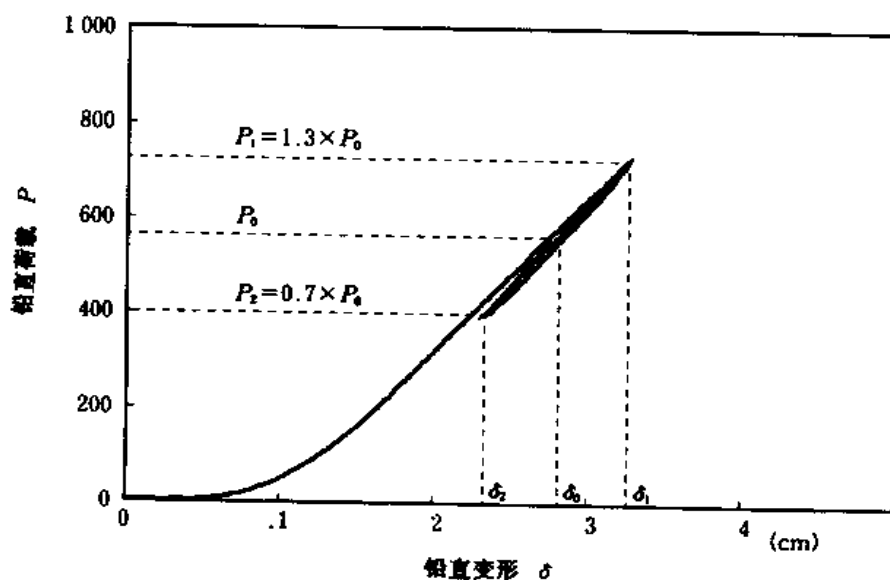
### 6.5.1 竖向性能

性能	评价项目	评价方法	标准
V1 竖向刚度	竖向弹簧常数 $K_v$ (t/cm)	按设计面压 $\sigma_0 \pm 30\%$ 反复施加竖向荷载 3 个循环,取第 3 个循环的荷载~变形曲线 $\sigma_0 \pm 30\%$ 上间的斜率作为 $K_v$ 。	设计值 $\pm 20\%$ 以内
V2 竖向变形能力	荷载-位移曲线	对 V1 的荷载~变形曲线,不能产生负斜率。	稳定的滞回特性
V3 设计荷载时 竖向变形量	设计荷载时 竖向变形量 $\delta_0$ (cm)	在 V1 的 3 个循环中,分别取面压 $\sigma_0 + 30\%$ 和 $\sigma_0 - 30\%$ 时的竖向变形作为 $\delta_1$ 和 $\delta_2$ ,设计荷载下的竖向变形量取 $\delta_0 = (\delta_1 + \delta_2)/2$ 。	

$$P_0 = \sigma_0 \times A$$

$$K_v = (P_1 - P_2) / (\delta_1 - \delta_2)$$

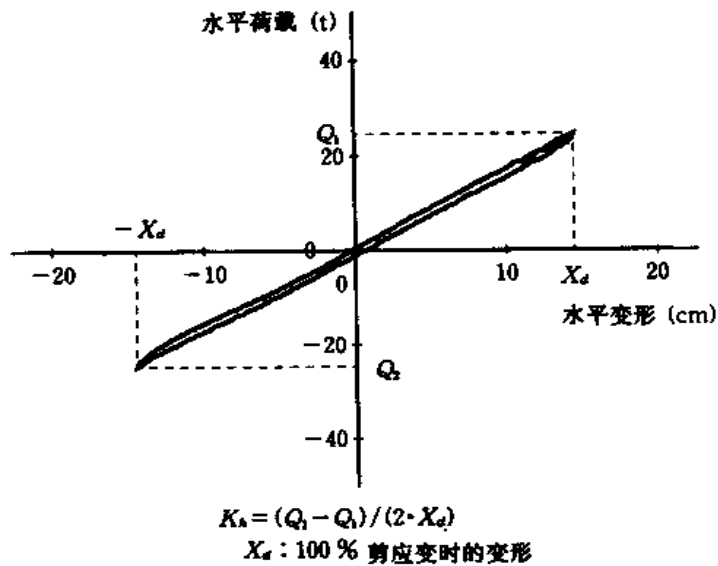
$$\delta_0 = (\delta_1 + \delta_2) / 2$$





## 6.5.2 水平性能

性 能	评价项目	评价方法	标 准
H1 水平刚度	水平弹簧常数 $K_h$ (t/cm)	在设计面压 $\sigma_0$ 下,按剪应变 $\gamma \pm 100\%$ 施加 3 个循环的水平力,取第 3 个循环 $\pm 100\%$ 间的斜率作为 $K_h$ 。	设计值 $\pm 20\%$ 以内 (平均值的 $\pm 10\%$ 以内)
H2 阻尼性能		由 H1 时的荷载 - 变形曲线,取下式计算出的值作为等价阻尼常数 $H_{eq}$ $H_{eq} = W / (\pi K_h \cdot X_d^2)$ $X_d$ : 水平力振幅, $W$ : 滞回环面积	$H_{eq} = 0.02 \sim 0.05$ (通常无规定)
H3 线性性能	线性界限应变 $\gamma_L$ (%)	1) 在设计面压 $\sigma_0$ 下,按剪应变 $\gamma \pm 100\%$ 施加 3 个循环,取第 3 个循环 $\pm 100\%$ 间的斜率作为 $K_h$ 。 2) 然后在设计面压 $\sigma_0$ 下,按剪应变 $\gamma \pm 200\%$ 施加 3 个循环。 3) 然后在设计面压 $\sigma_0$ 下,一直加载至破坏。 4) 在荷载 - 变形曲线上,取与原点连线的斜率等于 $K_{h1} = K_h \times 1.1$ 的点的应变作为线性界限应变 $\gamma_L$	$\gamma_L \geq 150\%$

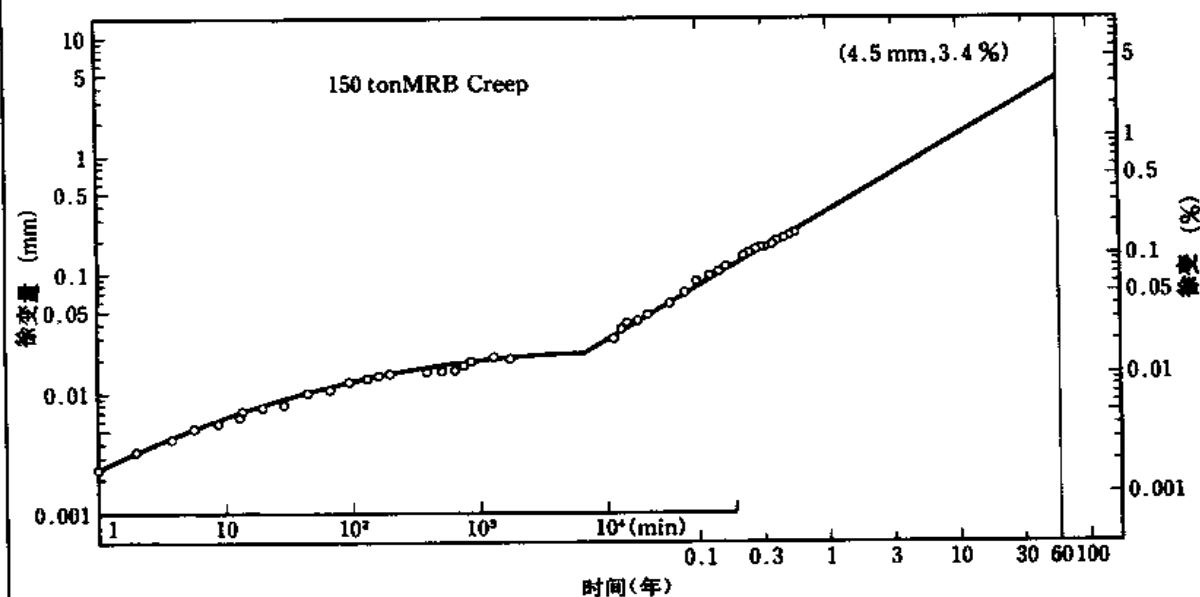


性 能	评价项目	评价方法	标 准
H4 破坏性能	破坏应变 $\gamma_B$ (%)	取在 H3 3) 达到破坏时的应变作为破坏应变 $\gamma_B$	$\gamma_B = 350\%$
H5 水平变形性能		在 H3 1)、2)、3) 的过程中, 荷载 ~ 变形曲线上不能产生负斜率。	
H6 水平变形时的 竖向变形量	水平变形时的 竖向变形量 $\delta_L$ (%)	在 H1 中, 取剪应变为 $\gamma \pm 100\%$ 时的竖向变形量作为 $\sigma_{L1}$ 和 $\sigma_{L2}$ $\delta_L = (\delta_{L1} + \delta_{L2})/2$	

Graph showing vertical deformation (cm) vs horizontal deformation (cm). The y-axis ranges from 0.1 to 0.9 cm, and the x-axis ranges from -40 to 40 cm. Two curves are shown, one for negative shear strain ( $\gamma = -100\%$ ) and one for positive shear strain ( $\gamma = +100\%$ ). The curves are symmetric about the y-axis. The vertical deformation at  $\gamma = 0$  is approximately 0.2 cm. The vertical deformation at  $\gamma = \pm 100\%$  is approximately 0.55 cm. The average vertical deformation at  $\gamma = \pm 100\%$  is labeled as  $\delta_L$ .

### 6.5.3 耐久性能

性 能	评价项目	评价方法	标 准
D1 徐变	徐变应变 $\epsilon_{CP}(\%)$	对承受设计面压 $\sigma_0$ 的小型多层橡胶进行加热快速老化试验,测得与初期竖向变形量的差值。此变形量与橡胶总厚度的比率为徐变应变 $\epsilon_{CP}$ 。	$\epsilon_{CP} = \frac{H(60\text{年}) - H(\text{初})}{H(\text{初})} \leq 0.08$
D2 竖向性能	竖向弹簧常数的 $K_v$ 随时变化率	由加热快速老化试验,求得小型多层橡胶的相对于初期竖向弹簧常数 $K_v$ 的变化率。	$\frac{K_v(60\text{年})}{K_v(\text{初})} \leq 1.2$
D3 水平性能	水平弹簧常数的 $K_h$ 随时变化率	由加热快速老化试验,求得小型多层橡胶的相对于初期水平弹簧常数 $K_h$ 的变化率。	$\frac{K_h(60\text{年})}{K_h(\text{初})} \leq 1.2$
	破坏变形的 $\gamma_B$ 随时变化率	由加热快速老化试验,求得小型多层橡胶的相对于初期破坏应变 $\gamma_B$ 的变化率。	$\frac{\gamma_B(60\text{年})}{\gamma_B(\text{初})} \geq 0.8$



## 6.5.4 各种影响

性 能	评价项目	评价方法	标 准
K1 反复加载次数的影响	水平弹簧常数 $K_h$ 随反复加载次数的变化率	在设计面压 $\sigma_0$ 下,按剪应变 $\gamma \pm 100\%$ 反复加载 50 次,求得相对于第 3 次循环时各循环的水平弹簧常数 $K_h$ 的降低率。	$\frac{K_h(50)}{K_h(3)} \geq 0.9$
K2 面压的影响	水平弹簧常数 $K_h$ 随面压的变化率	在面压分别为 50, 100, 150kg/cm <sup>2</sup> 下,测定剪应变 $\gamma \pm 100\%$ 间的水平弹簧常数 $K_h$ ,求得相对于 100kg/cm <sup>2</sup> 时 $K_h$ 的比率。	在 $S_2 \geq 5$ 时, $K_h(50)/K_h(100) \leq 1.15$ $K_h(150)/K_h(100) \geq 0.85$
K3 频率的影响	水平弹簧常数 $K_h$ 随频率的变化率	在频率 $f_h = 0.01 \sim 0.5\text{Hz}$ 下,测定剪应变 $\gamma \pm 100\%$ 间的水平弹簧常数 $K_h$ ,求得 $K_h(0.01)/K_h(0.5)$ 。	$\frac{K_h(0.01)}{K_h(0.5)} \geq 0.95$
K4 温度的影响	水平弹簧常数 $K_h$ 随环境温度的变化率	在温度分别为 $-10, 20, 40^\circ\text{C}$ 下,测定剪应变 $\gamma \pm 100\%$ 间的水平弹簧常数 $K_h$ ,求得相对于 $20^\circ\text{C}$ 时 $K_h$ 的比率。	$K_h(-10)/K_h(20) \leq 1.3$ $K_h(40)/K_h(20) \geq 0.9$
K5 应变的影响	水平弹簧常数 $K_h$ 随剪应变的变化率	在设计面压 $\sigma_0$ 下,测定剪应变分别为 $\gamma \pm 50, 100, 150, 200\%$ 时水平弹簧常数 $K_h$ ,求得相对于 $\pm 100\%$ 间 $K_h$ 的比率。	
K6 加载历史的影响	水平弹簧常数 $K_h$ 随加载历史的变化率	在设计面压 $\sigma_0$ 下,经历大变形 ( $\gamma \pm 200\%$ 之前及其后,测定 $\gamma \pm 100\%$ 间的水平弹簧常数 $K_h$ ,求得 $K_h(\text{前})/K_h(\text{后})$ 。	
<p>评价频率影响和温度影响时采用的小型剪切模型</p> 