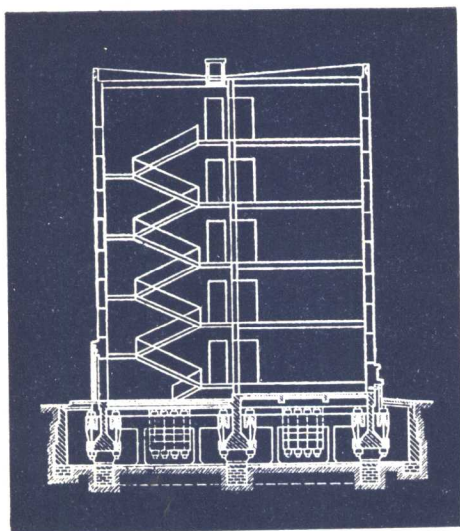




防止房屋和建筑物 破坏的避震装置

〔苏〕Ф·Д·泽联科夫 著 徐宗和 译

地震出版社

防止房屋和建筑物 破坏的避震装置

〔苏〕 Ф·Д·泽连科夫 著
徐宗和 译

地震出版社

1981

内 容 提 要

本书介绍了建造在特制避震装置上的一种房屋抗震的有效方法。书中对这种避震装置的抗震作用进行了理论分析；叙述了建造和使用这类房屋的经验，并列出了必要的参考资料。

本书可供从事地震工程理论和应用研究人员、地震工程设计人员以及建筑工程施工的技术人员参考。

АКАДЕМИЯ НАУК СССР
МЕЖДУВЕДОМСТВЕННЫЙ СОВЕТ ПО СЕЙСМОЛО-
ГИИ И СЕЙСМОСТОЙКОМУ СТРОИТЕЛЬСТВУ
(МСССС) ПРИ ПРЕЗИДИУМЕ АН СССР

Ф.Д.ЗЕЛЕНЬКОВ
ПРЕДОХРАНЕНИЕ ЗДАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ ОТ
РАЗРУШЕНИЯ С ПОМОЩЬЮ СЕЙСМОАМОРТИ-
ЗАТОРА

ИЗДАТЕЛЬСТВО «НАУКА» Москва 1979

防止房屋和建筑物破坏的避震装置

(苏)Ф.Д.泽连科夫 著

徐 宗 和 译

地震出版社 出版

北京复兴路63号

测绘出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行

各地新华书店经售

850×1168 1/32 1³/₄印张 39千字

1981年5月第一版 1981年5月第一次印刷

印数：0001—12000

统一书号：13180·106 定价：0.25元

编 者 的 话

本专著的作者、技术科学副博士、建筑工程师 Ф·П·泽连科夫于 1974 年逝世。直到临终前，他为在苏联地震区各类建筑物中推广自己提出并制作的避震基础，进行了深入细致的研究工作。

Ф·П·泽连科夫在研究抗震建筑问题时，特别注意到古代的营造师们在宏伟房屋和清真寺的墙下垫一层芦苇，来防止强震时房屋破坏的经验。他在分析了这一现象后得到一个启示，即在房屋和地基之间必需采用柔性联结，它可使建筑物在灾难性的地震波作用下化险为夷。

泽连科夫根据多年工作的成果，建造了避震的结构物。这种结构物所根据的两个基本原则是：把地震时产生振动的结构物看作悬吊摆；采用避震装置。这一结构形式称为避震基础。在该基础上建筑的房屋可以不增加任何抗震加固措施。泽连科夫建造的抗震建筑物曾获得过两次发明证书^[1, 2]。

这一项发明曾首次于 1959 年在阿什哈巴德建造的一座三层民房上应用，该房屋在苏联和全球都是首创的，当时在出版物上曾作了相当广泛的宣传^[3-5]。经过若干年的实践，避震基础达到了预期的目的。根据房屋的使用和测试部门提出的正式文件证实：阿什哈巴德地震，在烈度为 4、5 和 6 度时，房屋的居住者没有感到地震的冲击；避震基础和建在它上面的房屋都没有产生变形。这些部门是：塔吉克苏维埃社会主义共和国建工部和建材部（1966 年）；塔吉克抗震工程研究所（1966 年）；塔吉克建筑材料工业部的阿什哈巴德列宁玻璃联合企业（1973 年）。对于各种不同的房屋，计算其避震基础的隔震性能，是在地震烈度大于 9 度时进行的。因此，它对抗震工程实践是一大贡献，无疑具有国民经济意义，而对于某些举世无双的建筑物和能源建筑等，更是如此。

但是，目前这种形式的避震基础还不易广泛地应用到民用建筑群中去，而对水塔、烟囱和一些重心位置较高的建筑物，这种基础将限制使用。

苏联科学院力学研究所的研究员 B·Φ·茹拉弗列夫对避震装置的动力理论进行了分析研究，这一研究的结果已反映在本专著中。

泽连科夫的建议已发表在 1973 年第八届国际基础会议的论文集中^[6]，同时也已编入建筑工程院校的教科书内。

向读者推荐 Φ·Д·泽连科夫的专著，是对四卷装的“房屋和建筑物设计手册”的有价值的补充^[8]。编者确信，发表这一专著和书中所阐述的论点，不仅对抗震工程理论研究工作者，而且对抗震工程施工技术人员都将产生很高的兴趣。

国家奖金获得者、一级科学工作者、技术
科学副博士

Д·Е·波里申

目 录

绪 言	(1)
第一章 房屋在地震时破坏的原因和建筑物 现有抗震方法	(5)
第二章 基础受地震冲击作用时建筑物的 模拟实验研究	(10)
§2.1 实验一	(11)
§2.2 实验二	(12)
§2.3 实验三	(12)
§2.4 实验四	(14)
第三章 避震基础上房屋振动参数的计算	(15)
§3.1 避震基础的运动系统	(15)
§3.2 房屋振动周期的确定	(16)
§3.3 避震器吊杆长度的确定	(17)
§3.4 避震基础上房屋水平振动位移的确定	(17)
§3.5 避震基础上房屋地震荷载的确定	(20)
第四章 避震基础的结构	(22)
§4.1 柱的避震基础	(24)
§4.2 避震基础的弹簧	(25)
§4.3 避震基础的悬吊装置	(32)
§4.4 避震基础构件的强度计算方法	(41)
第五章 避震基础的建造工艺	(42)
§5.1 混凝土工艺和钢构件的安装	(42)
§5.2 避震基础钢构件的防腐保护	(43)
第六章 避震装置的经济评价	(44)
参考文献	(47)

绪 言

破坏性地震是一种非常可怕的自然灾害，因此，如何保证地震区建造的房屋和建筑物的安全，就成为从事地震工程和抗震工程工作的科学家、建筑学家和工程师所面临的一个问题。在苏联，首先要考虑的地区有摩尔达维亚、克里米亚、高加索、中亚细亚的一些共和国、哈萨克斯坦、西伯利亚和远东地区。在世界其他国家也经常发生破坏性地震。

长期以来，人们曾试图解释地球上的这一严重自然灾害，但没有获得成功。由于缺乏地震成因和性质的科学资料，因此，宗教经常利用地震来宣传迷信。十八世纪中叶，伟大的俄国学者M·B·罗蒙诺索夫首先对地震成因作出了真正科学的解释。他提出：“这种现象并非上帝的旨意，而是发生在地球内部的正常的地质过程。”〔9〕

1888年，俄国第一个地震学家奥尔洛夫把地震分为以下三种主要类型〔10〕：

1. 塌陷地震：地下空洞和顶、壁的塌陷引起的地震。
2. 火山地震：伴随火山爆发的地震。
3. 构造地震：地壳运动造成的地震。

这种按照发震的原因对地震进行分类的方法，一直为现代地震学所沿用，并且补充了第四种地震类型，即深源地震，或者称为深成地震。目前对于这种地震的机制和成因研究得还不够。

根据本世纪上半期非常不完全的统计，因地震而死亡的人数达百万人以上，并造成了数十亿卢布的财产损失。这就是为什么防止房屋遭受地震的破坏，是工程师和地震工程研究人员的一项重要任务的非常重要的任务的原因。

强烈地震对国民经济仍然是个威胁，因为目前还没有足够准确预报地震的方法，地震的突如其来会造成人员死亡。但是，一

些曾经遭受过 8、9 度地震的城市仍在不断地建筑和扩大工业企业、科研单位、设计院和中、高等专业学校，从而使这些城市的人口大为增加，其结果必然使国家额外增加抗震经费。因此，在大地震活动区建筑工业企业、能源、交通和其他工程，以及兴建城镇和乡村时，都非常重视强烈地震对它们可能造成的后果。由此可见，应当十分重视发展抗震研究工作，提高科研成果的效益，并尽快将科研成果应用到设计、施工的实践中去。

同时，应当指出，房屋和建筑物的抗震问题是一项非常复杂和困难的工程课题，如果不运用建筑师们世代代在地震危险区积累的兴建房屋和建筑物的经验；如果在解决该课题时，不集中世界各国的专家、工程师和设计师的力量，是不可能完成这项课题的。现代的研究方法和手段使工程抗震得到了很大的进展，但许多很重要的问题仍然没有解决。

国外抗震工程专家们一致认为，确保房屋具有抗御地震的性能是一项最复杂的工程课题，其主要困难在于不能准确地计算地震荷载。发生地震的原因是在地壳内部不断进行着的、伴随巨大能量积累和突然释放的构造运动过程，因此，必须研究出能确保苏联地震活动区房屋和建筑物可靠性的一套抗震措施。

在全苏地震工程会议的著作中也曾指出，至今还没有完全解决防止房屋遭受地震破坏的这一复杂问题。

地震工程理论研究的现状最充分地反映在国际第四届（1969 年）、第五届（1973 年）和第六届（1977 年）地震工程会议的论文集^{〔11〕}。

由于许多国家的学者和工程师的努力，拟定了一些建筑物在地震荷载作用下的计算方法，以及保证地震区内建筑物抗震性能的各种结构措施。而抗震房屋和建筑物的设计和施工要求，在各国都已编有专门的建筑规范。苏联专家们所制订的地震危险区抗震设计和施工规范及标准，在国际上是比较先进的^{〔11〕}。

为了提高房屋的抗震性能，除了计算房屋的地震力外，在规

范中还制订了一系列补充的加固措施。抗震措施（包括增设房屋加固的构件在内）有以下几个方面：

1. 在层间和屋顶高程的墙内，设钢筋混凝土抗震圈梁。
2. 墙角和墙间交接处配设钢筋，该钢筋与圈梁联结在一起。
3. 当墙的长度超过限制值时，须设钢筋混凝土柱，并用钢筋与墙体铆固。
4. 环绕窗、门洞开孔处，在墙内浇筑钢筋混凝土抱框。
5. 炉子用屋面铁皮罩住，烟囱用钢架支撑。
6. 顶棚铺钢丝网抹灰层。
7. 平面尺寸较长和形状复杂的房屋，用垂直抗震缝分成几个独立单元。
8. 房屋的平面形状要简单。
9. 采用高强材料。
10. 提高施工质量。

采取提高房屋抗震性能的措施，可使房屋在强震作用时免遭破坏。抗震措施的作用在 1948 年阿什哈巴德 9 度破坏性地震和 1966 年塔什干地震时得到了验证^[12]。

同时必须指出，抗震措施的投资是相当可观的，它随房屋类型、建筑场地和地震计算强度的不同而相差非常悬殊。

当前，地震工程研究人员正在努力探讨如何降低抗震措施的造价。已经提出了许多设计方案和建议，例如采用最合理的结构形式；在保证房屋抗震稳定性的同时，降低其基建投资等等。

本文将介绍一种在烈度为 10 度（包括 10 度在内）的强震作用下仍然可以防止房屋破坏的有效方法。为了保证房屋和建筑物的抗震性能，研究并采用了一种在工程上大家熟悉的合理的结构型式——避震装置。

在这种避震基础上，可用地方建筑材料建造任意平面形状和层数的房屋，而且，这些房屋可以不采取任何现有的抗震措施。

该结构在任一方向上都具有柔性，它可在需要的限度内吸收作用在房屋上的地震能量，并使地震荷载减小到足以保证房屋安全的程度。避震结构设置在房屋地上部分与地基之间的地下室（图 1）。

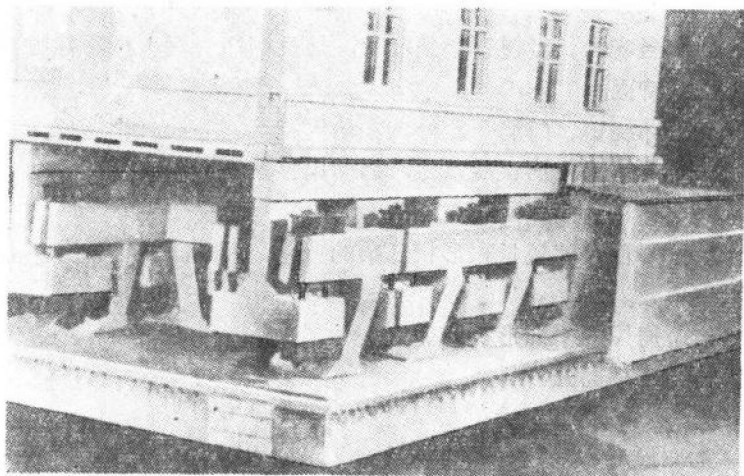


图 1 避震基础的模型

采用避震基础的房屋可以建造在遭受 10 度地震的区域内，而在这样的地区，规范和标准是不允许建筑无抗震措施的普通房屋和建筑物的。

下面，将把避震装置称为避震基础。

1959 年，苏联建造了世界上第一座有避震基础的三层砖房（图 2）。

作者向审阅本书手稿并提出宝贵意见和作了修改补充的主编、技术科学副博士波里申深表谢意。

作者还对数学-物理学副博士如拉弗列夫在避震基础计算方法和建筑在避震基础上的房屋在地震作用下的强度验算的数学分析工作上给予的协助表示感谢。

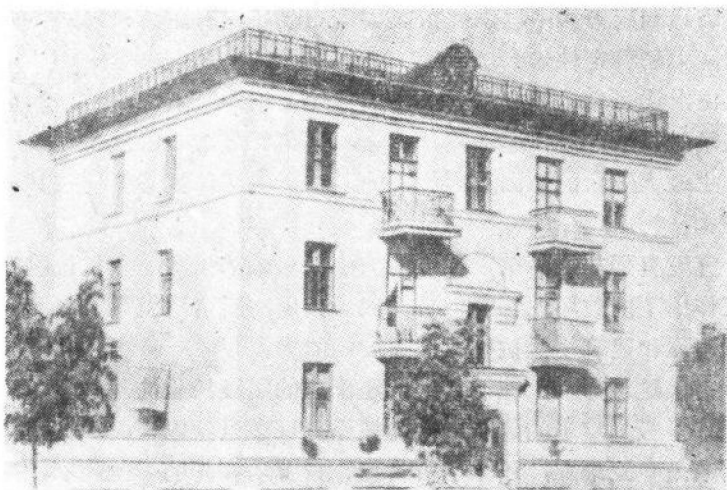


图2 建筑在避震装置上的房屋正面图

第一章 房屋在地震时破坏的原因和 建筑物现有抗震方法

在地震作用下，引起房屋破坏的物理过程的实质如下：

众所周知，随着两个物体之间联结刚度的增加，通过联结点从某一个物体传递到另一个物体的动能就会增大^[13]。

因为房屋的普通砖石和钢筋混凝土基础，其刚度很大，因此，这些基础具有传播动能的良好特性。这种能量以冲击的形式传给房屋，而冲击又引起地上结构的振动，并且结构的振动比基础的振动落后一个相位。由于惯性力的作用，在房屋和建筑物的承重结构中将产生很大的弯矩、拉应力和剪切应力，因此，在房屋的不同构件（墙、横梁、主梁等）中便出现裂缝和局部破坏。

如果房屋的方位与地震冲击的方向之间成某一交角，则在这些房屋的墙上，将产生各种应力波。应力波传播时，在墙角处就

出现明显的应力集中，由此引起墙角的破坏，房屋结构因而失去承载能力和稳定性。

由上述可知，如果房屋的基础和地上结构成刚性联结，而这种联结又能很好地传递动能，那么，这正好是造成房屋和建筑结构产生较大应力的原因。因此，为了防止破坏，就必须加强其承重结构。

究竟有那些提高抗震性能的方法，可以防止房屋和建筑物在地震作用下的破坏呢？我们首先应当指出，所谓“抗震性能”，是指房屋和建筑物抵抗破坏性地震的能力。

古代建筑师们，在世世代代建筑者的实践经验的基础上，累积了许多极为宝贵的建筑和结构知识。许多世纪以前，不论在高加索或是中亚细亚，还是在古希腊、古罗马和其他一些国家，建筑师们早已考虑了经常发生的地震灾害。例如，在十到十二世纪和稍晚一些的十四到十六世纪遗留至今的建筑物中，中亚的建筑师们在建造宏伟建筑物时，普遍采用了许多既巧妙又简单，同时也很有实效的措施^{〔14〕}。

对中亚几个共和国的纪念碑所作的考察研究表明，早在公元九到十世纪，许多建筑工匠们就相当了解地震对建筑物的各种作用方式。从出土文物中可以看出，中亚的建筑师们采用的抗震措施，是在粘土垫层上设置独特的基础结构和在勒脚部位垫一层芦苇圈带^{〔14〕}。他们非常注意采用具有弹性的粘合材料，那里，在几乎所有宏伟砖石建筑物的基础下，都设有一层粘土垫层。从十世纪的建筑开始，一直到十七世纪的纪念塔（碑），都可以考察到这种情况。

在建筑物的基坑内，先填充一层 60—80 厘米厚的可塑性陶土，然后在其上建造基础。可塑性较高的、搅拌很好的粘土砂浆，如果能保持相当的湿度，就可保证建筑物基础在任一方向上都能自由可塑，因此，它可以有效地吸收作用在建筑物上的很大一部分地震波能量。为了防止砖石结构的地震破坏，中亚的建筑师

们还把砖砌体的横卧缝增厚，直到与砖的厚度相差无几，并采用了可塑性和弹性的砂浆。

土库曼古代建筑师穆哈默德-宜宾-阿特西茨于古梅尔瓦建造桑札尔（Санжар）苏丹陵墓时，也采用了上述抗震的方法。该建筑物基础的平面图为一正方形，它的形状为一底面朝上的截锥体^[14]。在建造这一基础时，曾不断地向基坑内填充粘土。现在，这些粘土已形成一个由于长期保存而变得非常坚实的塑性粘土体。因此，土库曼的巨大宏伟建筑物的基础都曾置于很大的基槽中，并在槽内填充塑性很强的粘性土。建筑物的自重，决定了陵墓的沉降量和陵墓地下部分的埋设深度，而基础的特殊形状能使它在地震振动时安然自如。

总之，像这样在基础和房屋之间做一柔软垫层的方法，可使基础在地震波作用下产生移动而不使作用力传到上部结构。这一思路在中亚建造抗震建筑时起了决定性的作用。

目前已有许多种防止地震力破坏房屋和建筑物的方法，这些方法在不同程度上已由理论和实验所验证。而任何一种方法的建立，都是在两种截然对立的原则中选择其一的：一是根据建筑物的整体动力特性，去加固结构并使之与地基有牢固的刚性联结；另一种则相反，是减弱某些联结，使房屋相对于基础可以有一定的移动。

除上述两种设计抗震装置的原则外，还有一些其他的原则，其中之一是采用各式各样的隔屏来吸收和反射一部分地震波；此外，在建筑工程实践中，还采用以另外一些原则为根据的结构物的防震方法（如适应系统等）。

下面简述一下提高房屋和建筑物抗震性能的方法。

为了抗震，现在普遍采用钢筋混凝土抗震圈梁来加强每一楼层的联结。常用的框架也可以使房屋加固。现在已经在用刚度集中的框架来代替常用的框架。这种整体浇筑的钢筋混凝土支柱有许多优点，它既能使结构物具有较高的强度，又能节省钢材，还

可以增加房屋空间的利用率。悬吊结构的房屋就属于这种类型(图3, 4)。

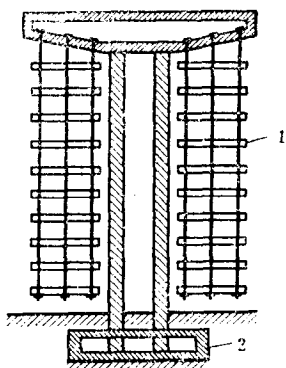


图3 悬吊楼层的房屋示意图

1. 悬吊的楼层; 2. 基础

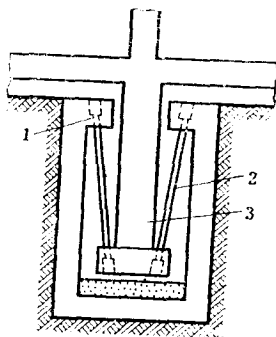


图4 悬吊结构的基础示意图

1. 基础; 2. 柔性吊杆; 3. 结构支承

房屋的抗震性能在很大程度上还取决于它的形状。在其他条件相同的情况下, 平面为圆形或正方形的房屋, 抗震性能最好。为了使高耸的房屋有较好的稳定性, 常常把它建成锥体形状。众所周知, 按“不倒翁”的原理进行设计, 可以使房屋具有较好的稳定性, 但是建筑这样的房屋显然是很困难的。

在设计长度大, 或者是柔性房屋时, 必须考虑结构各部分之间的相互影响。这时, 可采用各种铰接、缓冲器装置等。例如, 建筑柔性钢筋混凝土框架房屋时, 就可以采用外墙大板的柔性联结。

地基土的力学性质对房屋的抗震性能有很大的影响。震害分析表明, 建筑在泥炭土、淤泥、液状粘土、松土和砂土上的房屋, 破坏最为严重。为了防止房屋的破坏和倾倒, 采用了一直打到坚硬土上的桩式基础。也有人建议采用锚固基础。在软地基上建筑的房屋, 若设有刚度很大而且又很深的地下室, 则能大大提高其稳定性。日本就广泛采用这种方法。

为了抗震，有时也采用预应力结构和可承受塑性变形的专门支撑构件。还有一种统称为“柔性适应系统”的抗震结构（一种设有内部断毁支撑的系统），因为其应用是以这些特殊附加支撑联接的强度特性为根据的。这种系统的局部破坏不会使结构丧失整体强度，而只改变其动力特性（自振频率，位移量等）。各种一次性的避震装置也属于这种“适应系统”，它们的破坏不能使能量传递，而能吸收能量。

上面提到的大多数抗震结构物都很好经受地震的考验。但是，采取抗震措施，将使建筑物的造价随建筑场地烈度的高低有不同程度的提高。由于地震区内建设工作不断地发展，因此，建造既可靠又经济的抗震建筑，具有很大的国民经济意义，而隔震方法则正好是满足这一要求的建筑抗震措施。

按隔震原则建造的基础，就是通常所说的动力基础。它之所以能够隔震，不仅是因为避震装置有弹性，而且还因为它具有特殊几何形状的支承系统。因此，把它叫做动力基础。建筑在动力基础上的房屋，可以相对其平衡位置作某一频率的振动，频率的大小仅取决于支承的几何尺寸，并且可以在任意范围内进行调整。

这种基础的缺点是，只能抗御水平地震力的作用。但是，这一缺点很容易克服，例如，在基础和动力支承之间垫上15—35毫米厚的氯丁橡胶层，就可以使垂直荷载减少 $2/3—3/4$ ，烈度即可减弱1—2度。

隔震原则直接应用于抗震房屋的实例，就是采用弹性支承的基础。这种避震基础，包括弹簧和吊杆两个部分。这种避震基础既可以使房屋抗御水平方向的地震力作用，又可以抗御垂直方向的地震力作用，因此，它没有上述各类基础的缺点。

但是，如果要降低支承上的房屋的自振频率，不可避免地将要求额外提高其抗御外力作用的灵敏度。应当指出，动力基础支承的房屋，其振动频率和抗震灵敏度，可以互不相关地独自加以改变。建筑在弹性支承基础上的房屋，使用效果较差，当受到风

荷载作用或车辆运行等的影响时，会使居民有不舒适的感觉。考虑到这一因素，对避震装置提出了补充限制，即增加它的刚度。另外，弹性避震装置可能引起失稳的问题，也应当考虑。然而，弹性支承基础中存在的问题，对于这类基础的不同结构形式，其表现程度也是不相同的。

上述所有避震装置，存在一个共同的缺点，即当房屋沿支承竖轴产生扭转振动时，极易损坏。此时，荷载集中到一个支承上，使其中的某些支承发生破坏。我们认为，这种振动是最危险的。因此，与此有关的问题，还应当仔细地加以研究。

最后，应该指出，这种类型的避震基础和其他所有隔震装置相比，其优越性是造价低，而且与地震区的烈度高低无关。在高烈度区，如果采用加强承重结构等其他抗震措施时，其造价就高得多。因此，在大规模的建筑工程中，采用避震基础可以节省大量抗震措施的费用。

此外，必须着重指出，为了推广避震装置，还应动力支承基础结构形式的最佳方案进行理论和试验研究，并制订相应的设计标准。

以上就是在地震力作用下，防止房屋破坏的现有方法的简略介绍及其分析。

本专著将对避震基础（可视为动力基础的一种形式）作专门的阐述，目的是研究它在各种工作状态下的情况；验证地震时这种构件保证房屋安全的效果；介绍这类基础的各种方案并对它的经济价值加以评价。

第二章 基础受地震冲击作用时 建筑物的模拟实验研究

固体之间，若联结的刚度不同，将明显地影响物体之间相互

传递动能的大小（见第一章）。作者曾用五种简单的模型表示各类基础的特点及其作用，它们是：结构模型、地基模型、刚性联结的模型、非刚性联结的模型以及地震冲击模型。

结构模型用粘土砂浆砌的砖柱做成；地基模型用水平木托板做成；基础模型用第二个水平托板做成；用竖直方木柱或厚木板模拟刚性联结（与地基和基础模型做成刚性联结）；用钢杆模拟非刚性联结（在与地基联系的钢杆上面悬吊着地基模型）；用作用在托板（即地基）上的水平撞击，模拟地震冲击。

由这些简单的模型可以制作出复杂的模型。

§2.1 实验一

作者曾制作过四种复杂模型。每一种都是用不同刚性联结的四根竖直联杆，把相距 1 米的两层木托板联结而组成。这些复杂模型悬挂在固定的支承结构上。

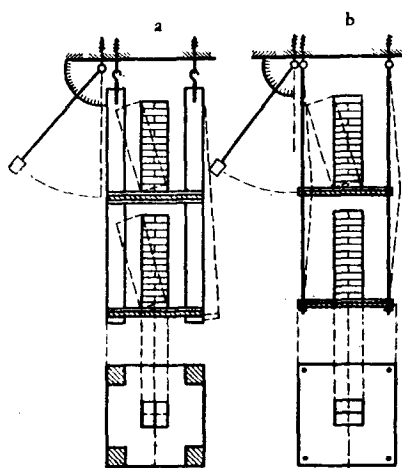


图 5 动能传递的模拟实验示意图

a——刚性联结； b——柔性联结

在第一种复杂模型中，托板与截面为 20×20 厘米的木方柱联结在一起；第二种模型中用的是截面为 4×20 厘米的厚板；第三种模型中用的是截面为 4×4 厘米的木棍；第四种模型中用的是截面直径为 3 毫米的钢杆。

在上下两托板上，分别用粘土砂浆砌筑完全相同的砖柱。沿水平方向在上层托板上施加大小不同的冲击力（图 5）。

在第一种复杂模型中，上下两托板上的砖柱在冲击力的作用