



抗震设计丛书

非结构抗震设计

叶耀先 钮泽蓁



地震出版社

非结构抗震设计

叶耀先 钮泽葵

地震出版社

1991

内 容 提 要

本书为配合《建筑抗震设计规范(GBJ11-89)》的实施而撰写,专门介绍非结构的抗震设计,是抗震设计丛书之一。全书共分八章,阐述非结构的类型、抗震设计总原则、非结构构件的相互作用,以及各类非结构的地震作用、抗震分析及构造设计。

本书可供抗震设计人员、管理人员及有关科研、教学人员参考。

非结构抗震设计

叶耀先 钮泽薰

责任编辑:王 伟

责任校对:李 昭

地 震 出 版 社 出 版

北京民族学院南路9号

朝阳展望印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行

全国各地新华书店经售

850×1168 1/32 7.75印张 205千字

1991年3月第一版 1991年3月第一次印刷

印数 0001—7000

ISBN 7-5028-0446-3/TU·31

(834) 定价: 4.50元

抗震设计丛书编委会

主 编: 叶耀先
副主编: 周炳章 魏 琏
委 员: 文良谟 叶耀先 刘大海
 沈世杰 宋绍先 周炳章
 周锡元 胡庆昌 胡德祥
 徐宗和 谢君斐 蒋苑秋
 蓝 天 裘民川 魏 琏

序 言

法国哲学家华莱理曾经说过：“科学，就是把许多成功的秘诀收集在一起”。我们这套《抗震设计丛书》就是把国内外成功的、经过实践和时间检验的、能保障房屋和工程结构地震安全的秘诀收集到一起，供广大从事抗震设计、研究、教学以及参与抗震防灾决策的有关人员参考。

地震灾难主要来源于房屋和工程结构的破坏或倒毁。以往强烈地震的后果表明，凡按良好的规范设计、有严格的施工监理，且地动参数与设计时采用的参数相适应的房屋或工程结构极少受害。这说明：强烈地震时房屋和工程结构的破坏虽不能避免，但却可以通过提高对抗震的理性认识，精心设计和精心施工而得以减轻；良好的抗震设计是保障新建房屋和工程结构地震安全的关键措施。

抗震设计所采用的地震荷载或地震作用是地震诱发的。所以，抗震设计必须以较大的破坏将发生在最近将来的概率为依据。否则，就像墨西哥地震工程专家E.罗森布卢斯所说的那样：“为了满足我们的要求，人类所有财富可能都是不够的，大量的一般结构将成为碉堡”。抗震设计的目标是小震不坏，中震能修，大震不倒。而一般静力设计的目标则是防止裂缝或破坏。抗震设计的这个特点要求设计人员不仅要有丰富的抗震设计经验，而且要掌握工程地震和抗震设计的知识与原理，仅仅会照套抗震设计规范是不可能做出经济、合理、安全的抗震设计的。为此，本丛书系统地介绍了工程地震知识、抗震设计原理、抗震设计经验和新颁布的抗震设计规范，以适应减轻地震灾害的需要。

目 录

前 言

第一章 绪 论	(1)
第一节 非结构的定义.....	(1)
第二节 非结构的类型.....	(3)
第三节 非结构地震安全的重要性.....	(6)
第四节 非结构的地震险情和责任者.....	(10)
第五节 非结构抗震设计和分析能力的发展.....	(13)
第二章 非结构震害和抗震经验	(21)
第一节 建筑非结构.....	(22)
第二节 机械非结构.....	(49)
第三节 电气非结构.....	(61)
第四节 建筑占用情况与人员伤亡.....	(63)
第三章 非结构的震害控制和原因分析	(65)
第一节 非结构损坏控制概念.....	(65)
第二节 结构的地震反应和非结构对反应的影响.....	(66)
第三节 刚性非结构的地震反应.....	(71)
第四节 柔性非结构的地震反应.....	(78)
第五节 相互作用.....	(79)
第六节 非结构构件地震破坏的原因.....	(89)
第七节 非结构构件的连接和锚固.....	(90)
第四章 公共建筑中的非结构	(93)
第一节 高层办公大楼.....	(93)
第二节 零售商场.....	(97)
第三节 低层办公楼.....	(100)
第五章 非结构的易损性与抗震措施案例	(103)
第一节 建筑非结构.....	(103)

第二节	机械非结构	(125)
第三节	电气非结构	(141)
第六章	非结构的抗震设计规定	(149)
第一节	非结构抗震设计的发展与现况	(149)
第二节	中国非结构抗震设计规定	(152)
第三节	非结构的地震侧力	(156)
第四节	美国非结构抗震设计规定	(157)
第五节	其他国家非结构抗震设计规定	(179)
第七章	陈列文物抗震措施	(190)
第一节	文物抗震特点	(190)
第二节	陈列文物的抗震措施实验设施	(191)
第三节	陈列柜试验结果	(192)
第四节	陈列柜内文物的抗震措施	(194)
第五节	陈列文物的试验结果	(201)
第八章	非结构抗震设计的试验研究	(214)
第一节	非结构墙体构件的抗震设计研究	(214)
第二节	计算机房高位楼板的抗震设计研究	(221)
第三节	带脚轮设备的抗震性能和措施	(227)
参考文献		(234)

前 言

千百年来，发生在世界各地的强烈地震的灾害反复说明，地震本身不会直接造成人员伤亡，直接造成人员伤亡的是人在里面生活和工作的建筑物。

支撑建筑物的骨架是结构构件，人们对如何保障结构构件在地震时的安全一向十分关注，这是理所当然的。至于房屋结构构件以外的非结构构件，如门，窗，隔墙，围护墙，屋面瓦，吊顶，灯具，室内家具、陈设和设备，烟囱，管道，电气等，由于造成的人员伤亡甚少，且其造价占建筑物总造价的比例不高，因而长期被人们所忽视，以致许多国家的抗震设计规范对非结构构件的抗震设计没有作出系统的规定，这也是容易理解的。

但是，近年来对建筑造价的分析指出：对于一般房屋，结构构件造价仅占建筑总造价的30%左右；对于设施完备的房屋，这个比值还要低，只有20%左右。一座房屋在地震时结构构件没有破坏，而非结构构件破坏了，在早年，损失并不大，而在今天，就意味着损失了建筑总造价的70%—80%，而且修复甚为困难。因此，现在世界各国开始日益更多地关注非结构构件的地震安全，这也是符合事物和人的认识的发展规律的。由于结构构件造价占建筑总造价的百分比不高，所以把建筑结构系统设计得更刚更强一些，总造价不会增加很多。这是抗震设计人员所面临的一个重要的观念的转变。

本书力求就非结构构件的抗震设计作比较全面的介绍。全书共分八章。第一章为绪论，阐述非结构的定义、类型、地震安全的重要性、地震险情和责任者，以及抗震设计和分析能力的发展历史。第二、三两章论述非结构构件的震害、震害原因分析和抗震经验。第四章阐述高层和低层办公楼及零售商场中的非结构构件的抗震设计。第五章论述非结构构件的易损性，并以实例说明

建筑、机械和电气三类非结构的抗震措施。第六章在阐述非结构构件抗震设计的发展与现状和非结构地震侧力之后，对中国、美国、日本、阿根廷、澳大利亚、哥伦比亚、印度尼西亚、墨西哥、新西兰、秘鲁、菲律宾等11个国家抗震设计规范中有关非结构构件抗震设计规定作了介绍。第七、八两章为陈列文物、非结构墙体、计算机高位楼板和带脚轮设备的抗震性能实验研究和抗震措施。

地震出版社蒋乃芳同志对本书的出版给予诸多鼓励和关注，王伟同志细心核对原稿，作者谨志衷心谢忱。

由于作者水平限制和有关非结构抗震设计方面国内文献缺乏，书中不妥和谬误之处，恳请读者不吝指正。

叶耀先 钮泽葵
1990年12月于北京

第一章 绪 论

多年来,甚至直到今天,抗震设计规范中对建筑物的非结构构件和系统只有很少量的规定。1964年美国阿拉斯加地震时,非结构的抗震问题开始引起人们的关注。随后发生的1971年美国圣费尔南多地震,1972年尼加拉瓜马拿瓜地震,1975年中国海城地震以及1976年中国唐山地震等多次强烈地震灾害,使政府官员、设计人员、房主、经理人员和用户等各有关方面人士越来越感受到非结构构件和系统的破坏可能导致重大的经济损失,使房屋使用功能丧失,并造成人员伤亡。于是,人们才逐步认识到非结构抗震设计问题的重要性并不亚于结构抗震设计。

第一节 非结构的定义

为了更好地了解非结构抗震设计,在本书的开头,需将“结构”(Structure)和“非结构”(Nonstructure)这两个在抗震设计中常用的名词加以说明。

一、结构的(Structural)

常用词有:结构破坏、结构部件或构件、结构抗震性能等。所谓房屋的结构部分,乃指房屋中作为骨架把房屋支撑起来并承受重力荷载、地震荷载、风荷载以及其他类型荷载的那部分。结构部分通常包括:柱、墩、杆;梁、大梁、桁架;楼盖、屋盖;板;承重墙及基础。在一般情况下,房屋均需经专业人员设计,并由结构工程师对结构部分作详细的计算分析和设计。

二、非结构的(Nonstructural)

常用词有:非结构破坏、非结构项目、非结构抗震性能等。所谓房屋的非结构部分,乃指房屋中结构部分以外的其他部分。简言之,即为柱、梁、楼盖、屋盖等结构部分以外的所有其他部

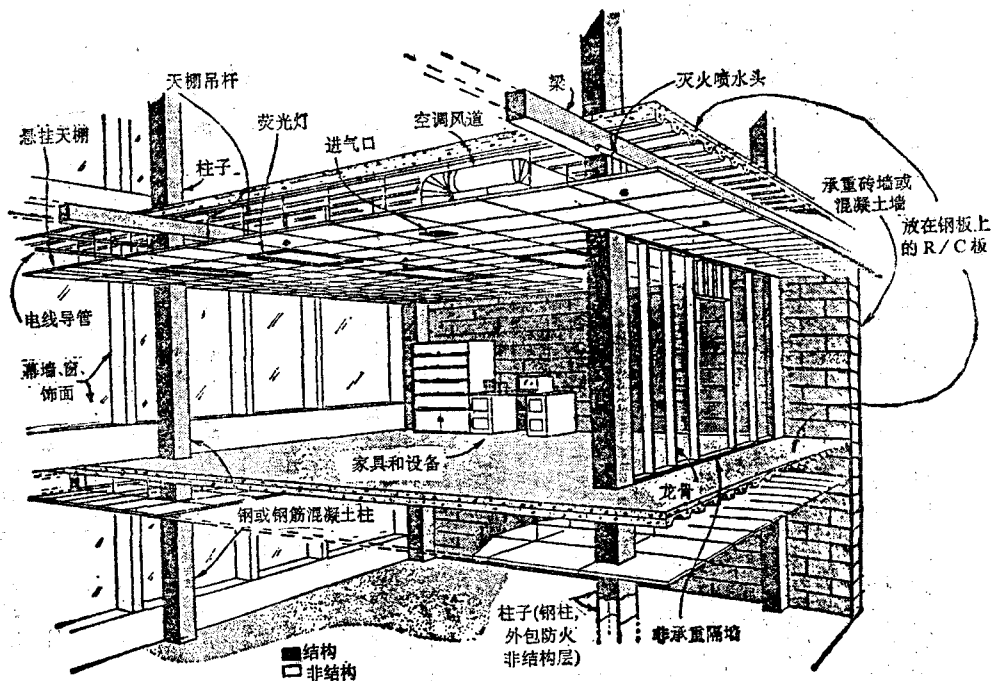


图1.1 一座典型房屋的结构与非结构部分示意图

分。一般说来，非结构部分包括：天棚、窗户、办公用设备、计算机、家具、各种陈设、空调设备、电器设备、灯具等等。在一般情况下，非结构部分都没有经结构工程师分析计算和设计，而是或者由建筑师、机械工程师、电气工程师或室内设计师指定，或者在没有任何专业技术人员参与的情况下，由业主或住户在房屋竣工后自行购置。正因为如此，在地震时非结构破坏的概率通常要比结构破坏概率高得多。

图1.1 为一座典型房屋的结构和非结构部分示意图。请注意，图中并未将所有的结构部分与非结构部分绘出。

第二节 非结构的类型

非结构系统、部件或构件可以从不同的角度进行分类。例如，按用途分类、按受力和固定方式分类、按力学特性分类以及对生命危险分类等。如前所述，所谓“非结构”主要乃指建筑物中除了受自重及其引起的作用力以外，不承受其他部件或构件或设施的重量或荷载作用的系统、部件或构件。从下面论述的非结构分类可以进一步理解非结构的确切含义和内容。

一、按功能分类

按照功能，常可把非结构分为以下三类。

1. 建筑系统、部件或构件

建筑非结构主要包括：

(1) 非结构墙体，如内隔墙、外填充墙、围护墙等；(2) 屋面构件，如瓦、混凝土板以及其他附着在屋面上的构件等；(3) 吊顶或天棚；(4) 固定在墙体或吊顶上的部件或构件，如壁灯、吊灯、吊篮等；(5) 搁置在楼、地面上的建筑设备或陈设，如计算机、书架、放置或悬挂物品的架子、陈列柜、贮存物品柜、试验设备等。

建筑非结构中的传统部件或构件，如隔墙、围护墙、屋面瓦

等在抗震设计中已经有所考虑，但对室内陈设和设施则尚未引起足够的注意。

2. 机械系统、部件或构件

机械非结构的抗震设计，除核电站设施或国防设施外，鲜为人们所关注。现代建筑对机械系统的依赖日益增长，故重视机械非结构的抗震设计实属必然。

机械非结构主要包括：

(1) 设备，诸如采用易燃或高温能源的锅炉及各种燃烧炉；
(2) 烟囱、烟道；(3) 材料输送系统；(4) 管道系统；(5) 消防系统；(6) 制造和处理机器；(7) 往复式或旋转式设备；(8) 贮液器、热交换器及压力容器。

3. 电气系统、部件或构件

同机械非结构相似，电气非结构也鲜为人们所注意。现代建筑功能的保持同电气非结构的正常运转密切相关。因此，掌握电气设施的抗震设计知识，对于现代设计人员乃是不可缺少的。

电气非结构主要包括：

(1) 电气管线和电缆系统；(2) 应急电气系统；(3) 通信系统，包括广播；(4) 电机中心、控制装置、电气传动装置、变压器等；(5) 电气控制板；(6) 烟、火监测系统；(7) 照明电气装置；(8) 电气引出线、电源插座。

二、按受力和固定方式分类

按照非结构的受力和固定方式，可将其分为以下几类。

- (1) 竖向突出构件，如女儿墙、出屋顶烟囱等；
- (2) 水平伸出构件，如阳台、雨篷等；
- (3) 竖向构件，如隔墙、围护墙等；
- (4) 附着构件，如装饰、饰面、面砖、烟道等；
- (5) 嵌入构件，如填充墙、板、门、窗等；
- (6) 悬挂构件，如吊顶、吊灯、悬挂墙板等；

(7) 独立搁置构件，如室内家具、陈设及设备。

三、按力学特性分类

按照非结构的力学特性，可将其分为以下两类。

1. 刚性非结构

当非结构的刚性很大时，来自其支承的加速度在非结构上产生的动力反应非常简单。如其支承本身是刚性的，则非结构各部分的反应加速度与其支承加速度相同，放大系数等于1；如其支承本身具有一定的柔性，则包括约束在内的非结构系统所代表的乃是一个次级动力系统，其动力性状犹如一个刚体，但非结构的运动通常会放大。

2. 柔性非结构

当非结构为柔性时，其在地震时的性状比较复杂，不能再用单自由度模型。柔性非结构的例子有：管道系统、大型设备的内部元件、电缆集盘等。

对于从直接费用，或者从系统运营的可靠度，或者从公众安全等角度来看都不很重要的非结构系统，可以通过等效静力分析来获得抗震设计所必须的数据。当非结构系统从经济、运营和安全来说都很重要时，就需要以楼面反应谱作为输入对非结构子系统作动力分析了。一般不需要作完全的动力分析。

四、按对生命危险分类

减轻地震时人的生命危险是人们最为关注的问题。按照非结构的破坏可能造成的生命危险，可将其分为以下三类。

1. 主要非结构

这是对人的生命危险性最大的非结构，其破坏可能引起房屋倒塌，例如墙板、填充墙、及刚性楼梯系统等。显然，预制钢筋混凝土外墙板如因连接不牢而破坏下落是对在其下活动的人员的致命威胁；刚性楼梯破坏会使人员无法脱险；填充墙倒塌不仅危及周围人群，而且可能引起房屋倒塌。

2. 次要非结构

这类非结构如玻璃、隔墙、天花板、楼梯、电梯、设备、搁板架及陈设等，其破坏塌落可能伤人。粉刷天棚掉落可能造成室内人员伤亡，但轻型瓦顶掉落则危害将会减轻。高于人头的重型灯具、设备、管道如因支承不牢而坠落则会伤害室内人员，但如与结构锚固牢靠且采取措施防止下落，则不致危及人生安全。笨重的砖隔墙倒塌会威胁人的生命，但轻型隔墙倒塌则不致造成人员死亡。

3. 供应非结构

这类非结构主要指供电系统、供气系统等。医院供电中断带来的危害不言而喻。有毒的化学容器破坏引起有毒气体或液体散逸对人的危害显而易见。有些供应非结构破坏则会给人带来不便。

由此可见，非结构破坏对人的影响应分为危害与不便两种，抗震设计也应有所区别。

第三节 非结构地震安全的重要性

房屋的非结构都是为了直接满足使用人员的需要而设置的。非结构的破坏或功能丧失可能会直接危及用户甚至附近户外人员的生命安全。这些构件的破坏还会造成主要应急设施无法继续使用。因此，设计人员必须认识到非结构的破坏可能会带来以下三种灾害。

一、人员伤亡

所有建筑法规、抗震设计标准和有关法律、法令的主要目标都是为了保障公众的利益和安全。结构抗震设计标准着重于防止结构倒塌，并以此来保护人员的安全。然而，房屋除了结构系统之外，在其内部和外部还有许多其他危及人员生命安全的隐患。

在过去的地震中，非结构的破坏造成人员伤亡的事例屡见不鲜。一盏10kg重的荧光灯具如果在天棚上连接不牢，地震时坠毁于人的头部，其后果不言而喻。吊顶或天棚的坠落、间隔墙体的

倒塌、玻璃的破碎、高而重的橱、柜、架的倾倒、灯具和进气格栅的掉落、消防器材的破坏、疏散设施的失灵、燃油贮存器的破坏、存有危险物质(如天然气及有毒物质等)的管线破裂、老旧房屋饰面砖块掉落以及现代建筑的预制混凝土板掉落等等，都是对公众生命安全威胁的险情。

最近几十年来，地震工程方面的进步和成就已经被成功地运用于结构的抗震设计，但对非结构则应用殊少。所以，在地震时，非结构比结构更易受到破坏。在医院里，人员直接面临着由于内部非结构系统中小型构件破坏可能造成的危害。在人口密集的城市市区，沿街人行道上人们穿流不息，一块外墙板的塌落可能危及许多人的生命，玻璃的破碎和掉落可能伤害下面的人群。在日本，不少高层建筑迎面采用玻璃幕墙。这类墙体，特别是采用柔性结构体系的高层建筑的玻璃幕墙，地震时最易因结构层间侧移过大而破碎。日本人惧怕地震时高层建筑玻璃破碎后下落所形成的“玻璃雨”是颇有道理的。

二、财产损失

由于统计数据缺乏，可以明确显示非结构破坏而造成重大经济损失的地震事例不多。但有些数据仍可说明此种现象。例如，在1971年美国圣费尔南多地震中，曾对25栋商业建筑作过调查。调查发现，在总损失中，结构破坏造成的损失占3%，电气和机械破坏占7%，外饰面占34%，而内饰面则占56%。可见，损失主要来自非结构破坏。又如，对这次地震中离震中较远的50栋高层建筑所进行的调查表明：所有房屋均没有严重的结构破坏；其中，43栋建筑隔墙破坏，18栋电梯破坏，15栋窗户破坏，8栋空调系统破坏。这些数据再次表明，在中等地震动时，仍然是非结构破坏所造成的损失大。再如，在这次地震中，有一座7层楼的假日旅馆，地震破坏损失约为建筑造价的10%左右，按1983年价值计算，约为36.3万美元。在这些损失中，结构破坏损失仅为5万美元，其余31.3万美元均为非结构破坏所造成。1972年尼加拉

瓜马拿瓜地震也有类似的情形。有两位工程师在对大型多层办公用房调查之后指出：在地震时，这些房屋的结构抗震性能良好。但是，如从非结构破坏情况来说，则建筑的设计是失败的。他们强调指出，虽然这些房屋结构完好，但非结构部件及构件的破坏却比较严重，修复很慢，而且费用很高。美国联邦应急管理厅(FEMA)1981年估计，未来可能发生在圣安德烈斯、豪伍德及纽波特-印格赖伍德断裂带的地震可能造成的损失为1680亿美元，其中室内陈设损失为580亿美元，约占1/3。如果再加上其他非结构损失，则比例更大。

世界各国的抗震设计规范和标准通常都把避免或减少人员伤亡放在首位，而将避免或减少财产损失放在第二位。从政府的角度来说，这无疑是正确的决策。但对设计人员来说，就不能忽略减轻财产损失，因为业主会反对支付由于地震破坏而引起的额外费用。再者，如果财产损失严重，特别是昂贵的非结构的破坏，可能会给一个社区或一个国家带来严重的经济灾难。1972年尼加拉瓜瓜马拿瓜地震和近年发生的强烈地震充分地证实了这个论点。许多事例说明，地震时房屋结构系统完好，而由于非结构系统遭到严重破坏，其修复费用竟高达与房屋原始造价相同。1971年2月9日美国圣费尔南多地震就有许多这样的事例。有人估计，非结构的破坏和其功能丧失所造成的总损失可能高达房屋建筑造价的1.0倍。

尽管目前政府颁发的抗震设计规范中有关非结构抗震设计的条文不多，可以预期这方面的规定将会逐步增多。其实，保障地震时人员安全和减少地震引起的财产损失是很难分开的，绝大多数非结构的抗震措施都能起到既能保护人员安全又能减少财产损失的功效。

三、运营中断

保障一项设施的连续运转是近年来对非结构抗震性能所提出的一个重要的新概念。这就是说，要求把房屋的非结构系统设计