

建筑结构抗震减震 与连续倒塌控制

● 胡庆昌 孙金墀 郑 琪 编著

中国建筑工业出版社

建筑结构抗震减震与 连续倒塌控制

胡庆昌 孙金墀 郑 琪 编著



中国建筑工业出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

建筑结构抗震减震与连续倒塌控制/胡庆昌等编著. —北京: 中国建筑工业出版社, 2007
ISBN 978-7-112-09131-7

I. 建… II. 胡… III. ①建筑结构-抗震设计②建筑结构-坍塌-控制 IV. TU352.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2007) 第 025076 号

本书前三章重点介绍有关结构抗震设计的重要概念和设计要求, 后三章主要介绍性能设计要点、隔震与消能减震设计方法和有关防止由于地震和人为事故引发结构连续倒塌的设计要求。本书内容包含了近年国内外有关研究和试验资料, 可供设计、研究人员参考。

* * *

责任编辑: 戚大庆 刘瑞霞

责任设计: 郑秋菊

责任校对: 王雪竹 关 健

建筑结构抗震减震与连续倒塌控制

胡庆昌 孙金墀 郑 琪 编著

*

中国建筑工业出版社出版、发行(北京西郊百万庄)

新华书店经销

霸州市顺浩图文科技发展有限公司制版

北京市彩桥印刷有限责任公司印刷

*

开本: 787×1092 毫米 1/16 印张: 16 $\frac{3}{4}$ 字数: 413 千字

2007 年 4 月第一版 2007 年 4 月第一次印刷

印数: 1—3 000 册 定价: 36.00 元

ISBN 978-7-112-09131-7

(15795)

版权所有 翻印必究

如有印装质量问题, 可寄本社退换

(邮政编码 100037)

本社网址: <http://www.cabp.com.cn>

网上书店: <http://www.china-building.com.cn>

前 言

地震是严重危及人类生命财产的自然灾害。我国是一个多地震国家,20 世纪 60 年代以来,多次遭受地震灾害,震害经验积累和建筑抗震设计规范的实施,对建筑抗震减灾起到了一定作用。

抗震概念来自实际震害的分析和结构的试验研究。值得注意的是,为了达到抗震要求,结构的承载力、延性、刚度和稳定均应满足地震作用对结构的要求。但供给和需求两方面都存在很多不确定因素,而两方面又互相影响。地震作用程度会影响结构的设计,而结构设计又会影晌地震对结构的效应,因此历次大地震总会发现一些新的问题,得到一些新的概念,从而提出新的设计方法。

随着我国经济建设的发展,各类大型建筑、高层和超高层建筑的兴建,对结构抗震设计提出了更高的要求,消能、隔震得到日益增多的应用,大量结构抗震试验研究成果的积累,使基于性能的抗震设计逐渐成为可能实现的方法。我国已编制了“建筑工程抗震性态设计通则,CECS 160:2004”供设计、施工单位试用。近年来世界各地多次发生对大型建筑人为破坏事件,造成建筑严重破坏甚至连续倒塌,与地震引起倒塌有相同之处,也有不同之处。地震和人为破坏对建筑造成连续倒塌已成为当前科研、设计关注的重要问题。

本着总结经验、广开思路的目的,本书还介绍和引用了近年来国内外一些有关资料和科研成果,有些内容我国现行规范尚未涉及或与我国现行规范不完全一致,相关内容可供建筑结构设计和研究工作中参考和探讨。

全书共分六章,北京市建筑设计研究院孙金辉教授级高级工程师、郑琪高级工程师分别参与前三章及后三章的编著。



2007 年 2 月

目 录

第一章 建筑结构抗震设计基本概念	1
第一节 建筑物震害分析与抗震设计	1
第二节 结构抗震设计的不确定因素和屈服机制	4
第三节 钢筋混凝土房屋抗震设计的延性	7
第四节 不规则结构的判别及平面扭转分析	17
第五节 不规则结构的震害特征和抗震设计对策	22
第六节 钢筋混凝土高层建筑的位移限值	28
第七节 地震作用倾覆力矩对钢筋混凝土建筑的影响	31
第八节 地震时建筑物之间的撞击	37
第九节 影响结构抗震性能的一些因素	42
第十节 抗震结构的基础	46
参考文献	50
第二章 钢筋混凝土结构抗震设计概念	52
第一节 钢筋混凝土结构抗震设计概念综述	52
第二节 钢筋混凝土框架结构	63
第三节 钢筋混凝土剪力墙结构	91
第四节 钢筋混凝土框架-剪力墙结构	106
第五节 高层建筑地下室结构	114
第六节 钢筋混凝土框架结构楼梯间的震害及抗震设计	118
参考文献	122
第三章 超高层建筑结构体系及工程实例	124
第一节 伸臂桁架筒体结构	124
第二节 巨型结构	131
第三节 空腹梁巨型柱剪力膜超高层结构体系	138
参考文献	140
第四章 基于性能的抗震设计	141
第一节 基于性能的抗震设计概述	141
第二节 基于结构性能的抗震设计方法	146
参考文献	166
第五章 建筑结构地震控制	167

第一节 房屋隔震和消能减震系统的基本原理	167
第二节 隔震结构设计	168
第三节 利用消能器的结构减震设计方法	183
参考文献	214
第六章 防止建筑结构连续倒塌的设计	215
第一节 防止房屋结构连续倒塌的基本概念	215
第二节 抗连续倒塌设计的荷载取值	223
第三节 钢筋混凝土房屋连续倒塌的分析与控制	224
第四节 楼板及板柱结构防止连续倒塌设计	227
第五节 钢结构控制倒塌设计	229
第六节 空间结构的连续倒塌	232
第七节 英国对连续倒塌的处理方法	234
第八节 提高结构及结构构件抗震性能与坚固性的若干措施	240
参考文献	252
附 录	253
附录 1 场地类别	253
附录 2 场地系数 F_v	253
附录 3 IBC-2000 表 1623. 2. 2. 1 设计位移 D_D 与最大位移 D_M	253
附录 4 钢框架 RBS 梁柱节点的构造与设计	254
附录 5 英制单位与法定单位换算	260

第一章 建筑结构抗震设计基本概念

第一节 建筑物震害分析与抗震设计

1. 震害经验

世界上一些大城市先后发生了若干次大地震，有的震中就在城区中心。通过震害分析对高层建筑的破坏规律逐步有了更多的认识，从而推动了科研工作，并取得了抗震设计经验。

1963 年南斯拉夫司考比地震证明框剪结构抗震性能有明显的优越性，即使是无配筋的剪力墙，墙开裂但框架完好。

1964 年日本新泻地震，对砂土地基液化问题引起重视。地基软，柔性结构破坏严重，刚性建筑整体倾斜，有的倾倒。

1964 年美国阿拉斯加地震，有些十几层高的剪力墙结构遭受破坏，有洞口剪力墙的洞口梁均有破坏，凡是洞口梁破坏的，则墙身完好。首层墙身有斜向裂缝，施工缝处多有水平错动。底层和施工缝处是剪力墙的薄弱部位，而洞口梁的破坏对墙肢起保护作用。

1967 年委内瑞拉加拉加斯地震，对倾覆力矩的作用表现出强烈反应。有些框架柱由于倾覆力矩产生的压力将柱压坏。有一栋十一层旅馆，下部三层为框架，上部为剪力墙，下部三层的柱顶均发生压剪破坏，主要由于轴力大、延性低。震害还说明建筑外型的高宽比较大时 (≥ 5)，对倾覆力矩的作用更要注意。

1968 年日本十胜冲地震，许多 2~4 层的钢筋混凝土结构破坏，对剪力墙的设置数量提出了必要墙量的规定。短柱的破坏引起重视，从而开展了对短柱的大量试验研究工作。

1971 年美国圣弗南多地震，首层空旷、刚度突变的结构破坏严重。六层楼的橄榄景医院，一至二层为框架结构，二层以上为剪力墙结构，上下刚度相差十倍，框架柱严重破坏，配有螺旋箍筋的柱表现良好。用坚实材料砌筑的填充墙对框架起不利作用，对柱产生附加轴力，对梁柱节点增大剪力。

1974 年马拿瓜地震，再一次证明双肢剪力墙的洞口梁屈服，对墙肢起保护作用。提出了洞口梁抗弯不要太强但要保证受剪承载力的设计方法。此外还说明剪力墙的设置对减轻非结构构件及设备系统的震害起重要作用。

1975 年日本大分地震，长、短柱合用的框架破坏严重。此外剪力墙沿对角线开洞非常不利。

1976 年我国唐山地震又一次证明框剪结构在防止填充墙及建筑装饰破坏方面比框架结构有明显的优越性。由砖砌填充墙形成的短柱，也遭受严重破坏。柱端、节点核心、角

柱及加腋梁的变截面处是框架结构的主要破坏部位。

1979 年美国加州爱尔生居地震, 柱在首层埋入地面处破坏, 说明地面的约束作用不能忽视。

1985 年墨西哥城地震, 梁、柱截面过小而且超量配筋造成框架倒塌, 无梁平板及双向密肋板结构由于冲剪, 破坏严重。

1995 年阪神地震再一次证明避免底部软弱层及防止中间层刚度、承载力突变的重要性。

1999 年台湾 921 地震大量柱端及底层墙、柱破坏导致倒塌, 说明加强预期塑性铰部位的承载力和构造的重要性。

2. 几个重要概念

为了达到抗震要求, 钢筋混凝土房屋结构的承载力、刚度、稳定、能量吸收及能量耗散等性能, 均应满足地震作用下的要求。

由于以上供给和需要的两方面存在很多不确定因素, 而两方面的因素又是互相影响的(例如, 地震作用程度会影响构件的设计, 而结构构件设计构造的不同又将影响地震对结构的效应), 因此, 孤立地考虑任何一方面会导致不合理的或不经济的设计。至今抗震设计很大程度靠判断, 而判断能力主要来自以往的震害分析经验和试验研究成果。这种判断称之为概念设计, 它是抗震设计很重要的一部分。在钢筋混凝土房屋抗震设计中, 除了经常提到的合理结构选型和布置以及采取正确的构造措施等原则以外, 更要注意以下几个重要概念。

第一, 承载力、刚度和延性要适应结构在地震作用下的动力要求, 并应均匀连续分布。在一般静力设计中, 任何结构部位的超强设计都不会影响结构的安全, 但在抗震设计中, 某一部分结构设计超强, 就可能造成结构的相对薄弱部位。因此在设计中不合理的任意加强以及在施工中以大代小改变配筋, 都需要慎重考虑。

第二, 采取有效措施防止过早的剪切、锚固和受压等脆性破坏。在这方面, “约束混凝土”是非常重要的措施。

第三, 尽可能设置多道抗震防线。强烈地震之后往往伴随多次余震, 如只有一道防线, 在首次破坏后再遭余震, 将会因损伤积累而导致倒塌。适当处理构件的强弱关系, 使其在强震作用下形成多道防线, 是提高结构抗震性能、避免倒塌的有效措施。

第四, 在地震作用下节点的承载力应大于相连构件的承载力。当构件屈服、刚度退化时, 节点应能保持承载力和刚度不变。

第五, 地基基础的承载力和刚度要与上部结构的承载力和刚度相适应。

第六, 合理控制结构的非弹性部位(塑性铰区), 实现合理的机制。

第七, 结构单元之间应遵守牢固连接或彻底分离的原则。高层建筑宜采取加强连接的方法, 而不宜采取分离的方法。

3. 合理的屈服机制及屈服过程

钢筋混凝土房屋的抗震设计要考虑某些结构构件进入非弹性。为了掌握结构的抗震性能, 尽可能做到经济合理的设计, 必须研究在地震作用下结构的屈服部位、屈服过程及最

后形成的屈服机制。

多层或高层钢筋混凝土房屋可以归纳为两类屈服机制，一种为总体机制，另一种为楼层机制。其他机制均可由这两种机制组合而成。

典型的楼层机制表现为在地震作用下仅竖向构件屈服，而横向构件处于弹性，结构的自由度与层数相同。

总体机制则表现为所有横向构件屈服而竖向构件除根部外均处于弹性，总体结构围绕根部作刚体转动，因此从结构总体而言仅有一个自由度。

以框架结构为例，层间位移及延性系数的分布对于楼层机制（柱铰机制）是非常敏感的，塑性变形集中现象随着地面运动的不同，可能在不同楼层发生，而总体机制（梁铰机制）则表现完全不同。由于只有一个自由度，层间位移的变化是很均匀的，而且对于地面运动并不敏感，这样就可以减少一部分不确定因素的影响，使设计者掌握较多的主动权。这也是为什么要在设计上采取措施控制结构的屈服部位，促使实现预期理想机制的主要原因。

理想的总体机制也就是最少自由度的机制，一方面防止塑性铰在某些构件上出现，另一方面迫使塑性铰发生在其他次要构件上，同时要尽量推迟塑性铰在某些关键部位的出现，例如框架柱的根部、双肢或多肢剪力墙的根部等。

在地震作用下首先进入屈服的构件称为主要耗能构件，这些构件在屈服进展过程中受约束于其他处于弹性的构件，这一阶段称为有约束屈服阶段。抗震设计就是要设法延长这一阶段以提高结构的抗震性能。这种由弹性阶段到有约束屈服阶段（弹塑性），再到无约束屈服阶段（全塑性）直到最后破坏，是地震作用下结构表现的全过程。

基于上述要求，选定主要耗能构件要注意以下几点：

第一，主要耗能构件的屈服过程应尽量保持受约束屈服，且具有良好的延性和耗能性能。

第二，为了保证主要耗能构件的延性，应选用承受轴向应力较小的构件，不宜选用承受竖向静荷载的主要构件。为了提高耗能能力，构件应具有相当的刚度。

第三，主要耗能构件耗能部位的破坏形态应当是弯曲破坏而不是剪切破坏，为此在进行构件承载力设计时，应按不同承载力的要求进行设计。

4. 抗震等级的含义

抗震等级是确定抗震分析及抗震措施的标准，可按照不同地震烈度、场地类别、建筑类别、结构体系和建筑高度确定。抗震等级的划分考虑了技术要求和经济条件，随着设计方法的改进和经济水平的提高，抗震等级亦将相应调整。《建筑抗震设计规范》中抗震等级共分四级，其中一级代表最高要求的抗震等级。

由于抗震等级综合考虑了不同因素，同以往只按烈度划分抗震措施相比显然较为合理。在同一结构中，对于重要结构部位采用较高抗震等级，例如框剪结构的剪力墙和部分框支结构的框架等。

采用框剪结构体系可以降低框架的抗震等级，但要求框架承担的嵌固部位倾覆力矩不大于嵌固部位总倾覆力矩的 50%，否则仍按框架结构的抗震等级考虑。根据这一要求确定了框剪结构的必要墙量。

5. 复杂结构的设计要求

对于复杂结构,应根据具体情况进行必要的计算分析,考虑扭转效应、空间作用及塑性变形集中的影响等。更重要的是掌握概念设计原则,采取有效的设计措施。

复杂结构的平面转折及体型和承载力突变部位均属于不利部位。对于这些部位应注意采取提高抗震性能措施,一方面提高薄弱部位的结构承载能力以推迟屈服,提高楼盖承载能力和整体性以保证地震力的传递,对复杂传力部位的主要构件根据具体情况宜按接近基本烈度进行核算,也就是将地震作用乘以 1.5~2.0 的增大系数。另一方面是采取构造措施提高不利部位的结构延性,例如对不利部位的抗侧力构件适当提高抗震等级,采取相应构造措施,避免屈服后过早破坏。根据具体情况,提高承载能力和提高延性的措施在同一结构部位可以并用。

当突出屋顶的塔楼与塔楼以下相邻楼层的刚度比大于 5 时,在高振型影响下的鞭梢效应比较明显。这种效应的大小取决于塔楼自振频率(塔楼根部视为固定)、主体结构自振频率及场地土频率。如三者非常接近,则鞭梢效应最大。减小鞭梢效应的合理方法是调整质量与刚度,使频率错开。塔楼位于房屋端部,扭转效应更为不利。按振型分解法分析有塔楼结构时,为了充分反映塔楼的鞭梢效应,一般要求计算 5 个振型以上。在较高地震烈度作用下,塔楼结构承载力往往难以满足要求。因此从构造和材料方面提高塔楼的延性是很必要的。根据具体情况,有些塔楼可采用型钢组合结构或钢结构,此时应保证塔楼与下部主体结构的可靠连接。

第二节 结构抗震设计的不确定因素和屈服机制

1. 抗震设计的不确定性

除了地震地面运动不确定性之外,工程结构方面还有以下不确定因素。

(1) 结构分析的影响

影响结构自振周期和动力反应有以下因素:质量分布不均匀;基础与上部结构共同工作;节点的非刚性转动;偏心、扭转及 $P-\Delta$ 效应;柱轴向变形以及非结构墙体刚度的影响等。节点非刚性转动的影响可达 5%~10%;高层建筑中柱子的轴向变形可使周期加长 15%,加速度反应降低 8%; $P-\Delta$ 效应可使位移增加 10%。至于非结构墙体的影响就更大,是分析时不能忽视的。

(2) 材料的影响

混凝土的弹性模量,随着时间的增长可比施工刚完成时降低 50%,在应变增大时还可能继续降低,这意味着周期可能增长 25%,加速度反应减少 10%。

钢筋混凝土构件的惯性矩 I 一般按毛截面计算,这是不正确的。竖向及侧向荷载的不同,都会影响中和轴的位置;柱配筋的不同可使周期相差达到 40%左右。

(3) 阻尼变化的影响

钢筋混凝土的阻尼系数一般为 5%,但当结构受震开裂后可达 20%~30%。而只要阻尼系数由 2%增为 10%,可使计算周期相差 50%左右。

(4) 基础差异沉降的影响

按一般荷载设计的框架结构,若地震剪力为 $0.1G_{eq}$ (G_{eq} 为结构等效总重力荷载);基础差异沉降为 1cm 时,可能造成框架在竖向及地震作用组合后的弯矩达 70% 的误差,而此误差在设计中一般未予考虑。

(5) 地基承载力

考虑地震的随机性及短期突然加载的影响,地基承载力的取值往往提高 $30\%\sim 50\%$,这种人为的估计也带来设计上的差异。

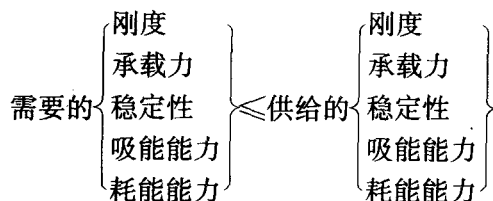
(6) 持续荷载的影响

钢筋混凝土柱承受长期轴压力在地震反复作用下,柱屈服前刚度可能降低 $30\%\sim 40\%$,耗能降低可达 40% 。

2. 一些专家学者的观点

美国应用技术局(ATC) R. Sharpe 工程师认为,至今抗震设计尚不能称为一门科学,有很多问题要靠工程判断。在结构布置上应考虑牢固连接或彻底分离,切忌连又连不牢,分又分不清,他还强调设计中必须考虑非结构构件的不利及有利作用。以下是美国加州大学 V. V. Bertero 教授对如何做好抗震设计的意见。

(1) 抗震设计的基本要求是:



困难在于如何可靠地确定“需要量”和真实的估计“供给量”。孤立地考虑上述要求两侧的某一项都会导致不合理与不经济的设计。

用复杂的三维计算程序可进行数学模型的空间动力分析,但在真实的估计建筑物抗震能力方面,则缺少相应的研究。目前估计建筑结构“供给量”的指标,是根据力学理论及拟静力试验求得的经验公式,并不能真实反映地震时的情况。惟一的方法是通过真实建筑物的整体试验分析,但限于试验条件,在这方面的研究是极少的。

目前除必要的计算外,更重要的是概念设计,包括合理的结构选型及正确的构造措施。

(2) 具体设计上应注意:

减轻自重;平立面尽量简单规则对称;承载力、刚度与延性应匹配;慎重考虑构件节点与支座的连接的承载力,钢筋混凝土结构要避免过早的剪切、锚固与受压破坏;设置多道防线;合理控制非弹性区域的部位;上部结构与基础在承载力与刚度方面应相互适应。

(3) 抗震规范的局限性

抗震设计规范都是结合本国或本地区的震害或研究成果制定的,有一定的片面性和局限性。规范只是对设计的最低要求,许多问题要设计者结合具体情况去考虑。

例如,以往不少美国工程师包括 UBC 规范都倾向于采用延性框架而不用框剪或剪力墙结构,其原因可能是 1964 年阿拉斯加地震中有若干栋框剪结构受到严重破坏,并有一

栋倒塌。然而仔细分析破坏的原因是：整体结构布置上存在概念设计的错误，构造设计上存在问题，材料质量有问题，以及施工质量不良。而 1967 年加拉加斯地震中框剪结构表现良好。美国加州大学伯克利分校对剪力墙的试验研究说明，当采取必要的构造措施，即使剪应力达到 $15\sqrt{f_c}$ psi (UBC 限值为 $10\sqrt{f_c}$)，仍具有较大的转动及位移延性，特别是当联肢墙的连接梁有较好延性时，更具有“强柱弱梁”的特点。

又如，不是绝对不能采用短柱，注意构造措施同时使剪应力小于 $10\sqrt{f_c}$ psi，可以做到有较好的延性（位移延性系数 $\mu_\Delta \geq 4$ ）。

对地震后的建筑进行统计分析说明：按规范设计的结构，其最大抗侧力能力一般为规范值的 2 倍以上，但仍有按规范设计的部分建筑遭受严重的结构及非结构破坏，这说明单纯提高承载力并不能解决抗震安全问题。

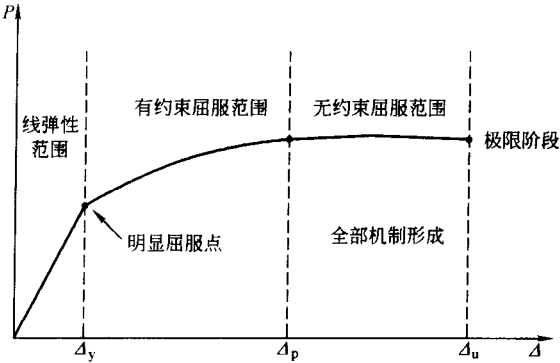


图 1-2-1 屈服历程（抗力与位移关系）

3. 结构体系的塑化过程

塑化过程包括两方面问题，一是屈服机制类别，二是机制形成过程中的屈服历程（图 1-2-1）。

（1）屈服机制有两种基本类别：楼层机制及总体机制，其他机制均可由这两种机制组合而成。

楼层屈服机制（图 1-2-2）仅竖向构件屈服，水平构件保持弹性，各层可以独立地沿地面运动方向移动，因此整个结构可有相当于总层数的自由度，但全部机制不一定在各层同时形成。只有这种机制可用剪切梁模型来表达。地面运动对其层间位移、梁和有柱铰框架的延性比是非常敏感的，如图 1-2-2 (a)、(b) 所示。装配大板结构的墙板沿水平缝滑动即属于此种性能。

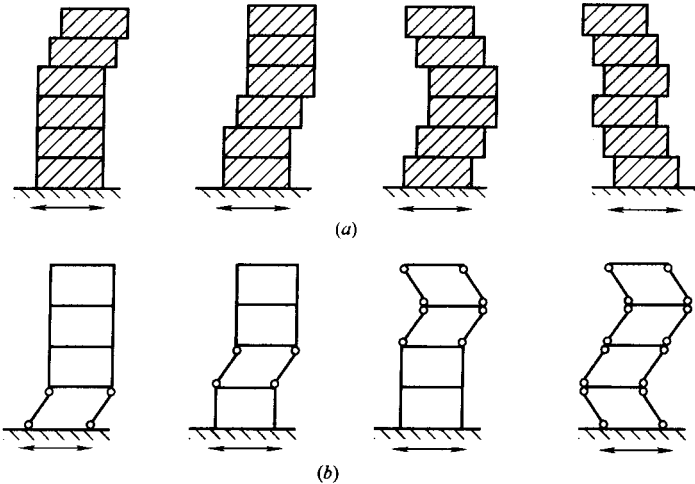


图 1-2-2 楼层屈服机制
(a) 墙体层间滑移；(b) 框架柱铰

整体屈服机制（图 1-2-3）所有水平构件屈服，竖向构件除根部外均处于弹性，整个结构绕根部作刚体转动，在平面内仅有一个自由度。其层间位移分布均匀，沿高度的延性要求可足够精确地用等效静力分析（非弹性）得到，侧力按倒三角形分布，最大顶点位移可采用动力分析的数值。这种层间位移及延性分布对于地面运动不敏感。

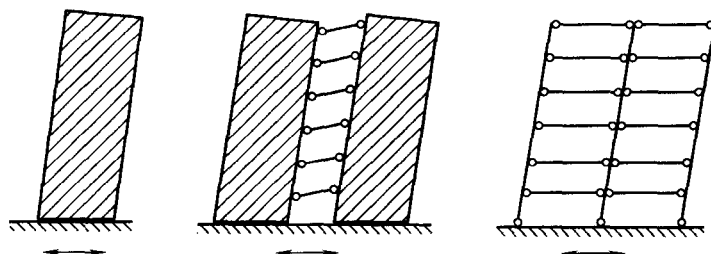


图 1-2-3 整体屈服机制

（2）在迫使实现整体屈服机制的同时，应使顶部、底部及中间的竖向构件在弹性阶段保持得愈久愈好，即主要耗能构件具有明显的约束屈服阶段。

选择主要耗能构件应注意以下条件：它们屈服后的变形受到其他处于弹性阶段构件所约束；它不是主要承受竖向荷载的构件（低层除外）；有较好的延性和饱满稳定的荷载-位移滞回环；它们应相当明显地占总刚度的一部分，但又有相对柔性。因此，主要耗能构件以水平构件为宜。

正如为实现所期望的构件破坏形态，对不同的破坏形态（如弯曲与剪切）采用不同的安全系数；对结构体系可采用不同的“力的折减系数”来实现所期望的塑化过程。利用有约束屈服阶段，可以使延性构件充分发挥耗能而脆性构件仍处于弹性（图 1-2-4），延性与脆性构件的共同工作，可实现一定的总体延性，这对于中地震区是可取的。

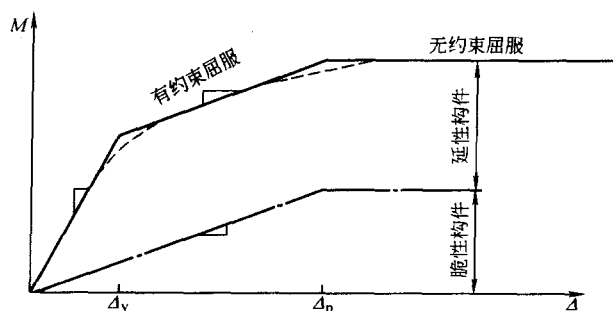


图 1-2-4 延性构件与脆性构件共同工作

第三节 钢筋混凝土房屋抗震设计的延性

利用结构延性进行钢筋混凝土房屋抗震设计是一种经济合理的方法。我国《建筑抗震设计规范》根据不同抗震等级规定不同抗震措施，抗震等级的划分反映了不同延性水平的要求。为了满足延性要求有时不得不加大构件截面、增加配筋及提高承载力，动力分析表明在地震作用下结构的部位和不同构件有不同的延性要求，此外不同的结构设计措施

也有一定影响, 抗震设计规范中有部分措施已反映了这方面的差别。

1. 延性结构设计的若干概念

(1) 结构延性与构件延性

《建筑抗震设计规范》根据不同抗震等级规定各类钢筋混凝土房屋的不同抗震措施, 抗震等级的划分反映了不同延性水平的要求。

由非弹性动力分析可以求得楼层或构件的延性要求, 抗震结构的设计应使结构或构件的有效延性满足所要求的延性。在实际工程设计中, 延性要求是以变形指标来表达的。保证构件有效延性的构造措施主要来自震害经验和试验研究。钢筋混凝土结构或构件的延性主要与应力状态及配筋构造有关。关于这几方面的定量关系, 新西兰和我国学者均曾提出分析方法, 也就是把延性要求与构造措施联系起来。

抗震措施不外乎采用合理的结构体系、调整构件承载能力和配筋方式。在合理的配筋情况下, 以受弯为主的梁构件可取得较高的延性。对于受剪为主的剪力墙和压应力较高的柱, 单纯改变配筋方式难以达到较高的延性, 较有效的措施是降低剪压比和轴压比。《建筑抗震设计规范》关于柱配箍量随轴压比不同而变化, 反映了压应力的影响。同框架结构相比, 框剪结构中的框架可以降低抗震等级, 反映了降低框架柱剪应力的效果。

在地震作用下, 结构受到周期作用, 在结构进入屈服之后, 周次愈多则结构破坏程度随之加剧。

通过耗能使结构振动迅速衰减是提高结构抗震性能的重要问题。为了提高结构的耗能能力, 在保证构件弯曲屈服的条件下应有足够的截面和刚度, 同时对混凝土要有良好的约束, 钢筋有良好的锚固。在相同承载力条件下, 高宽比较小的梁截面优于高宽比较大的梁截面。

抗震设计很重要的一个概念, 是在预计的地震持续时间内, 结构能提供较大的位移, 而结构的抗侧移能力无明显的降低, 且继续维持承受重力荷载的能力, 避免罕遇地震时建筑物倒塌, 此时结构的变形可能已远远超出了弹性范围, 结构、构件和材料性能都已处于非线性受力状态, 结构和构件依靠较大的变形能力和滞回特性吸收地震能量。在地震作用的整个过程中, 构件和结构承载力无明显降低的非线性反应特性即为延性。

抗震结构构件的延性要求, 应是塑性铰区的截面曲率延性大于构件的位移延性, 构件位移延性与截面曲率延性之间的关系可由构件塑性铰长度内的曲率积分表达。

构件截面曲率延性系数 μ_ϕ 表达式为

$$\mu_\phi = \phi_u / \phi_y \quad (1-3-1)$$

式中 ϕ_u ——构件截面混凝土达到极限压应变时的曲率;

ϕ_y ——构件截面受拉钢筋屈服时的曲率。

影响曲率延性的因素, 有轴向力、混凝土强度、钢筋屈服强度, 以及构件屈服部位的约束条件(如加密箍筋)等。

构件位移延性系数 μ_δ 如图 1-3-1 所示, 可用下式表达

$$\mu_{\delta} = \delta_u / \delta_y \quad (1-3-2)$$

式中 δ_u ——构件极限位移；

δ_y ——构件屈服位移。

结构延性通常以位移延性系数表达

$$\mu_{\Delta} = \Delta_u / \Delta_y \quad (1-3-3)$$

式中 Δ_u ——结构顶点位移或层间极限位移；

Δ_y ——结构顶点位移或层间屈服位移。

为了保证构件延性和结构延性，对材料的应变性能应有一定的要求，现行规范对钢筋和混凝土的强度按不同抗震等级提出了不同要求，如一、二级抗震等级的框架结构所使用的钢筋规定其抗拉强度实测值与屈服强度实测值的比值不应小于 1.25，且钢筋的屈服强度实测值与强度标准值的比值不应大于 1.3。

(2) 滞回特性

由试验研究得到的钢筋混凝土构件和结构的荷载-位移滞回曲线，表达了在反复周期荷载下受力性能的变化，反映了裂缝的开展和闭合、钢筋的屈服和强化、钢筋的粘结退化和滑移、混凝土局部破坏和剥落，是构件和结构破坏的综合反映，它概括了承载力、刚度和延性等特性，滞回环面积的大小还表明了构件和结构的耗能能力。

图 1-3-2 (a) 所代表的结构是一个理想化的弹塑性滞回曲线，现实中并不存在这种性能的结构，此图仅用于参照对比。图 1-3-2 (b) 为框架梁塑性铰部位理想状态的滞回曲线，滞回环面积约为图 1-3-2 (a) 理想化滞回曲线的 70%~80%，这就表明其塑性变形

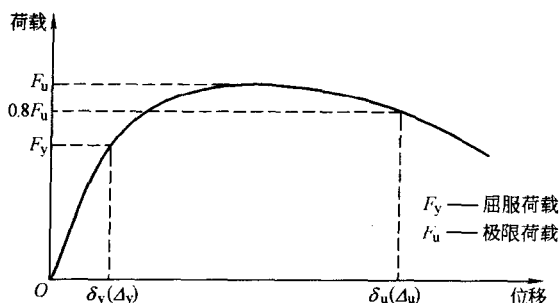


图 1-3-1 荷载-位移曲线

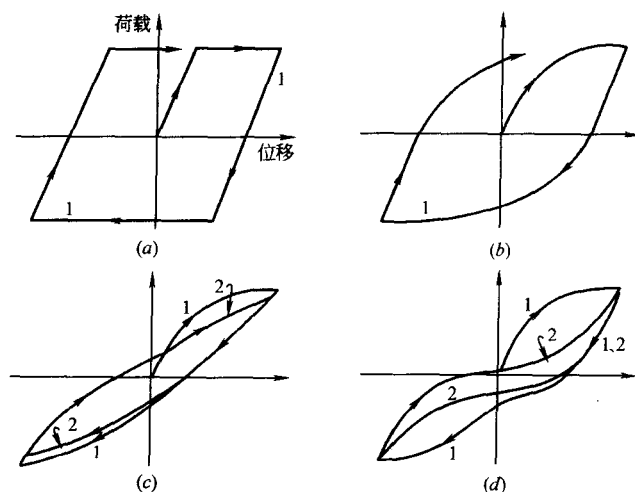


图 1-3-2 钢筋混凝土构件和结构的典型荷载-位移滞回曲线

(a) 理想弹塑性；(b) 梁上塑性铰；(c) 柱上塑性铰；(d) 矮墙

吸收的能量占地震反应能量的70%~80%。图1-3-2(c)为中等至较高轴压比柱的滞回曲线,以此图滞回环面积与图1-3-2(a)相比显然吸收地震能量的能力大大降低。图1-3-2(d)为在低轴力作用下矮墙的滞回曲线,显然表明在反复荷载作用下矮墙底部裂缝开展而引起了墙体滑移。

通过荷载-位移滞回曲线,可以较深入地了解构件和结构的抗震性能。

构件延性的要求一般都高于结构延性要求,二者的关系与结构塑性铰形成后的破坏机制有关。例如十层的框架结构按柱铰机制分析求得柱根截面曲率延性系数可达100以上,这对于一般钢筋混凝土结构是无法满足的,而对于相同层数梁铰机制的框架则柱根部截面曲率延性系数仅要求为柱铰机制的1/10,只要采取一定构造措施是不难满足的。大量分析说明当梁铰机制的框架结构总体位移延性系数为3~5时,楼层位移延性系数可能为3~10,而梁构件的位移延性系数可能为5~15或更多一些。

试验研究表明,梁截面的受压与受拉配筋比较接近时不难达到曲率延性系数 $\mu_\phi \geq 10$ 。压应力较大的柱截面位移延性系数 μ_Δ 一般不大于3,当柱截面混凝土有良好的约束时, μ_Δ 可以达到4~6。具有纵横配筋及对角交叉配筋剪力墙的 μ_Δ 也可以达到4~6。

(3) 不同抗震防线及不同结构部位的延性要求

由于地震有一定的持续时间而且可能是多次作用,为了增强结构的抗倒塌能力,抗震设计应使结构具有多道防线,如框架结构的梁和柱,框剪结构的连梁、剪力墙和框架,剪力墙结构的连梁和剪力墙肢等。第一道防线是在地震作用下首先进入屈服而进行耗能的主要构件,它们不应是承受竖向荷载的主要构件但必须具有良好的延性。对于抗震等级较低的结构主要考虑第一道防线,而对于较高的抗震等级则应考虑更多的防线。

在同一地震作用下,结构的不同部位有不同的延性要求,重点部位是预期首先屈服的部位,如梁端、柱脚、剪力墙根部、剪力墙连梁等。规范中给出了有关这些部位的构造措施,但是同样的构件由于所在部位不同,其延性要求也不尽相同,如位于周边转角、平面变化及相对薄弱楼层的构件等。重要的和不规则的高层建筑可以通过非线性动力分析获得每个构件或楼层的延性要求从而检验或调整设计以满足抗震要求。

一般设计都是假定上部结构嵌固于基础结构之上。为了保证上部结构能实现预期地震反应,基础结构必须有足够的承载力,当上部结构进入非弹性阶段并有一定超强时,基础结构仍处于弹性,因此基础结构设计主要是承载力问题而不必考虑延性要求,例如箱形基础和弹性地基梁等。当基础结构不能保证上部结构的嵌固,如单独柱基的系梁及某些框剪结构中剪力墙的基础梁等,此时上部结构应考虑基础转动对于内力分布的影响而相应基础结构的构造应适当考虑延性要求。

有地下室的高层建筑考虑上部结构嵌固于地下室顶部时,地下室结构的抗震等级和设计要求见第二章第五节。

(4) 延性设计中的承载力调整

沿建筑高度结构刚度和承载力有突变时,在结构进入非弹性阶段之后,某些部位会出现变形过大,或者某些构件产生脆性破坏。针对以上情况对某些薄弱楼层的受弯、受剪承载力进行加强,也就是接近弹性设计使这些部位不屈服或推迟屈服。某些关键部位如柱和墙的根部,在强震作用下最终总是要屈服的,但柱根部过早屈服则梁铰不能充分发展,剪力墙根部过早屈服则连梁也不能充分发挥耗能作用,因此对这些部位应当适当加强以延缓

屈服,同时还应考虑保证延性的构造措施。

高层建筑的底部由于使用需要较大空间,造成结构承载力和刚度的突变,如常见的框支剪力墙结构体系,在地震作用下由于塑性变形集中的影响,框支层对延性有很高的要求。当框支层的刚度与上部结构相比相差较大时,单纯采取提高延性的构造措施难以满足要求。此时按接近弹性设计并采取适当的保证延性措施是一种简单可行的方法。

对于平面不规则建筑的薄弱部位,主要是加强结构整体性和采取有效的保证延性构造措施。

接近弹性设计指接近基本烈度情况下的弹性设计。对于非常不规则的结构,更合理的设计方法是进行动力弹塑性分析调整承载力以满足其变形能力。

(5) 延性构件与非延性构件的共同作用

在实际建筑中延性构件与非延性构件(脆性构件)往往是并存的。例如框架结构的长柱与短柱,剪力墙结构的短墙肢与宽墙肢等。试验研究表明,在保证延性构件与非延性构件一定比例条件下,延性构件对脆性构件起稳定作用,使结构有较好的变形能力。

改善脆性构件的抗震性能主要是提高承载力(受剪承载力),减小应力(压应力与剪应力)。此外改变脆性构件的截面形状,采取特殊的配筋方式和对混凝土的约束都是有效的方法。

在结构的同一楼层内不希望所有构件同时屈服,而是某些耗能构件屈服以后有些构件仍处于弹性,这样就使“有约束屈服”持续较长阶段,保证结构的延性和抗倒塌能力。

在低烈度及中等烈度区比较规则的框架结构,可以把某些框架按抗震延性框架设计,而另一些框架按半刚接或铰接设计主要考虑承受竖向荷载,为了有利于抗扭,周边框架仍应按延性框架设计。同样条件下框剪结构的剪力墙可按延性剪力墙设计,而框架则除周边框架外,其他可按半刚接或铰接设计。

在剪力墙结构中联肢墙与独立墙肢可以并用。

总之根据不同要求,在设计中可以适当采用延性构件与非延性构件满足结构的总体延性要求。

(6) 非对称结构的延性要求

在抗震设计中对非对称结构应考虑由于地震引起的扭转作用。在强震作用下,延性结构可能很大程度进入非弹性,此时结构的非对称效应应用附加延性来表达比用附加剪力表达更为合理。大量的动力分析结果得到以下几点概念:

1) 位于结构的转角及边缘的抗侧力构件有较大的附加延性要求。

2) 非对称短周期结构($T_1 \leq 0.5s$)对附加延性有较高要求,长周期结构的附加延性要求较低。

非对称结构较大程度进入非弹性阶段以后,结构偏心的概念和弹性阶段有显然的不同。弹性阶段的偏心是指刚度与质量的偏心距。塑性偏心是当结构较大程度进入非弹性阶段后,抗侧力构件达到极限承载力,抗侧力构件的屈服承载力中心与结构平面质量中心的偏心距称为塑性偏心距。非对称结构的非弹性扭转反应与塑性偏心有直接的对比关系,利用塑性偏心概念可以有效地减小由于非对称引起的附加延性要求。例如按构件屈服承载力与塑性偏心矩相对应的原则进行设计。