

建筑抗震设计丛书

砌体结构抗震

● 郑山锁 薛建阳 王 斌 编著

Qiti jiegou
kangzhen

中国建材工业出版社

建筑抗震设计丛书

砌体结构抗震

郑山锁 薛建阳 王 斌 编著

中国建材工业出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

砌体结构抗震/郑山锁, 薛建阳, 王斌编著. —北京: 中国建材工业出版社, 2008. 11

(建筑抗震设计丛书)

ISBN 978-7-80227-468-6

I. 砌… II. ①郑…②薛…③王… III. 砌块结构—抗震设计 IV. TU352. 104

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2008) 第 181388 号

内 容 简 介

多层砌体房屋和多层内框架砌体房屋, 由于构造简单, 施工方便, 造价低廉并可就地取材等优点, 是我国民用建筑 (如办公楼、教学楼、旅馆、病房, 尤其住宅等) 的主要结构形式之一。底部框架—抗震墙砌体房屋是符合我国国情, 适应市场经济和城市建设发展需要的一种优越的抗震结构体系, 在经济欠发达地区尤为适用。本书全面、系统地介绍了底部框架—抗震墙砌体房屋的抗震性能试验与理论分析成果以及抗震分析、设计方法与计算理论, 并阐述了多层砌体房屋和多层内框架砌体房屋的抗震设计与计算方法。

全书共十一章, 主要包括: 底部框架—抗震墙砌体房屋模型的模拟地震振动台试验、拟静力试验和拟动力试验与理论分析结果, 房屋层间刚度和抗震强度的确定方法、弹塑性地震反应分析方法、抗震能力的分析方法与设计控制、框剪层抗震墙数量的合理确定与设置方法、实用抗震计算方法。最后, 结合《建筑抗震设计规范》(GB 50011—2001) 的有关条文, 介绍了底部框架—抗震墙砌体房屋、多层砌体房屋和多层内框架砌体房屋的抗震设计与计算方法, 包括抗震设计基本要求、抗震计算要点和抗震构造措施, 并附有设计计算实例和抗震构造详图。

本书可供土木工程专业的研究、设计和施工人员以及高等院校相关专业的师生参考。

砌体结构抗震

郑山锁 薛建阳 王 斌 编著

出版发行: 中国建材工业出版社

地 址: 北京市西城区车公庄大街 6 号

邮 编: 100044

经 销: 全国各地新华书店

印 刷: 北京密云红光印刷厂

开 本: 787mm × 1092mm 1/16

印 张: 19.5

字 数: 482 千字

版 次: 2008 年 11 月第 1 版

印 次: 2008 年 11 月第 1 次

书 号: ISBN 978-7-80227-468-6

定 价: 45.00 元

本社网址: www.jccbs.com.cn

本书如出现印装质量问题, 由我社发行部负责调换。联系电话: (010) 88386906

序

房屋结构就材料而言,有钢结构、钢筋混凝土结构、型钢混凝土结构、砖混结构、木结构、竹结构以及各种混合结构。它们的选用与很多因素有关,共同的要求是安全。底部框剪和底部两层框剪砌体房屋是符合我国国情,适应市场经济和城市建设发展需要的一种抗震结构体系,特别适合中西部等经济欠发达地区。它将满足使用功能要求,大大降低房屋造价,带来较大的经济效益和社会效益,以促进中西部经济的发展。

目前,在我国的一些大中城市,如东北的沈阳、大连、鞍山、青岛,西南的成都、重庆、攀枝花,西北的兰州、西宁、西安、宝鸡,以及北京、上海、太原、天津等都能看到在用或在建的这种房屋,其中就近年来建造的房屋中,底部两层框剪砌体房屋所占的比例日趋增多,表明这种结构形式受到人们的欢迎,有一定的应用前景。现行《建筑抗震设计规范》(GB 50011—2001)已经对这种房屋给出了明确规定,并从抗震设计基本要求、抗震计算要求和抗震构造措施方面提出了设计规定、原则和方法,但关于底部两层框剪砌体房屋的分析与设计计算方法还基本上是底层框剪砌体房屋的沿用。由于底部一层与两层框剪在受力和变形性能上存在较大差异,前者属于剪切或剪弯形,后者属于弯剪型,因此后者应按框架与中高抗震墙协同工作的方法进行水平地震作用下的内力计算,如仍按各抗侧力构件有效侧向刚度比例确定框架柱承担的地震剪力,则有可能使第二层柱配筋不足(计算内力偏小),造成很大的安全隐患。另外,在设计计算中尚需要解决的一些关键问题规范还未涉及。国内外全面系统介绍底部框剪砌体房屋的试验研究与理论分析成果以及抗震分析与设计计算方法的论著还没有。郑山锁教授、薛建阳教授等基于他们本人、本单位以及国内兄弟单位的研究成果,并结合我国现行《建筑抗震设计规范》(GB 50011—2001)的相关条文,于2002年9月撰写了《底部框剪砌体房屋抗震分析与设计》一书。该书全面、系统地介绍了底部框剪砌体房屋的抗震性能试验与理论分析成果以及抗震分析、设计方法与计算理论。该书的出版是对我国现行建筑抗震设计规范的完善与补充,方便了学习与交流,指导了工程设计与实践,从而促进了这种结构的推广应用。

“5·12”汶川特大地震给我国西部的四川、陕西和甘肃部分地区带来了巨大的人员伤亡和财产损失,但也为人类认知地震现象与规律,改进和完善现行建筑抗震设计规范提供了百年一遇的机会。西安建筑科技大学师生分五批去灾区考察受害结构。痛定思痛,在举国上下齐心协力、抗震救灾、重建家园之际,本书作者根据震害调查与分析资料,在原书的基础上修改了相关内容,加强了砌体结构抗震的内容,并增补了多层砌体房屋和多层内框架砌体房屋抗震设计与计算的有关内容,改名为“砌体结构抗震”,以期能为灾区恢复重建或修复加固尽点微薄之力。该书的出版无疑对研究工作者与工程界都是很有意义的,对于促进建筑结构形式的多样化,适应我国经济建设迅速发展的需要,以及普遍提高我国地震区建筑结构的抗震性能具有积极的作用。

俞茂宏

2008年10月于西安交通大学

前 言

多年来,多层砌体结构房屋,尤其多层砖房,由于具有构造简单,施工方便,造价较低并可就地取材等优点,一直是我国民用建筑(如办公楼、教学楼、旅馆、病房、住宅等)的主要结构形式之一,并且在今后相当长的时间内,砌体结构房屋仍将大量建造。对城镇临街建筑及居民小区建筑,考虑到商业经营(如开设商店、餐厅、银行、邮局及其他文化娱乐设施等)或办公(如设置服务大厅、会议室、汽车库等)需要,常做成底层框架—抗震墙、上部多层砌体房屋(简称底层框架—抗震墙砌体房屋),以增加底层空间、便于灵活布置。目前,随着市场经济的不断发展,在大中城市,尤其繁华地段的临街建筑和居民小区建筑中,底部一层空旷已不能满足使用要求,底部两层做成空旷的大房间,已是商品经济发展的迫切需要,它不仅适用,而且较全框架结构经济,具有显著的社会效益和经济效益,在相对经济落后和不发达地区尤为适用。鉴于此,我国现行《建筑抗震设计规范》(GB 50011—2001)^[1]在原《建筑抗震设计规范》(GBJ 11—89)^[2]关于底层框架—抗震墙砌体房屋抗震设计理论方法的基础上,增补了底部两层框架—抗震墙砌体房屋抗震设计的相关内容,并从抗震设计基本要求和抗震构造措施方面提出了这种房屋的抗震设计原则和规定,为这种房屋的推广应用提供了设计依据,并给出了具体方法与途径。然而,由于我国对这种结构体系系统的抗震试验与理论研究工作还相对滞后,致使规范所给出的底部两层框架—抗震墙砌体房屋的内力、强度、刚度和变形计算方法及相应理论还不成熟(基本上是底层框架—抗震墙砌体房屋的沿用),且对设计中的一些关键问题还尚未涉及。因此,作者基于本人以及国内外同仁多年来的相关试验与理论研究成果,结合我国现行《建筑抗震设计规范》(GB 50011—2001)^[1]的相关规定,于2002年9月撰写了“底部框架砌体房屋抗震分析与设计”一书,旨在向读者比较全面、系统地介绍这一符合我国国情的优越抗震结构体系,以期适应从事土木工程结构研究、设计、施工和教学工作的同仁的需要,并进一步促进这种结构推广应用。汶川“5·12”特大地震给我国西部的四川、陕西和甘肃部分地区带来了巨大的人员伤亡和财产损失,但也为人类认知地震现象与规律,改进和完善现行建筑抗震设计规范提供了千载难逢的机会。痛定思痛,在举国上下齐心协力、抗震救灾、重建家园之际,作者感到有责任根据震害调查与分析结果,在原书的基础上修改并增补有关内容,改名为“砌体结构抗震”,以期能为灾区恢复重建(或修复加固)并完善我国现行建筑抗震设计规范尽点微薄之力。

作者承蒙原冶金工业部、攀枝花钢铁(集团)公司、陕西省科技厅和西安交通大学开元股份有限公司等资助,在1995~2002年期间,系统地研究了底部框架—抗震墙砌体房屋的抗震性能与设计方法,先后进行了三榀底部框架—抗震墙砌体房屋1/6比例模型(其中,模型Ⅰ为底层框架—砖抗震墙、上部四层砖砌体房屋,模型Ⅱ为底部两层框架—砖抗震墙、上部三层砖砌体房屋,模型Ⅲ为底部两层框架—混凝土抗震墙、上部五层砖砌体房屋)的

模拟地震振动台试验,并结合“多层砌体房屋震害预测”课题,在成都、攀枝花、太原、西安等地实测了数十幢底部(一层和两层)框架—抗震墙砌体房屋的动力特性,在试验研究、现场动测及已有研究成果的基础上,对这种结构作了较为系统的理论分析及抗震设计方法和计算理论的研究。主要研究内容如下:(1)结构在水平地震作用下的力学性能,包括受力特点、变形特征、破坏形态等;结构在不同受力阶段的动力特性变化规律及地震反应分布规律;结构的抗震能力及其薄弱部位;结构动力分析的力学模型。(2)结构框剪层和砖砌体层的恢复力特性计算模型及其特征点的计算公式。(3)结构试验模型(配重不足)及原型的动力特性计算和弹塑性地震反应分析。(4)底部两层框架—抗震墙砖砌体房屋抗震能力的分析方法与设计控制,包括框剪层和砖砌体层的极限受剪承载力、侧向刚度、极限剪力系数的计算;第三层与第二层的极限剪力系数比和侧向刚度比的合理取值;结构薄弱楼层位置判别与破坏状态评定的方法和原则。(5)底部框架—抗震墙砌体房屋框剪层抗震墙数量的合理确定及其设置方法。(6)底部两层框架—抗震墙砌体房屋的抗震计算方法,包括楼层的水平地震作用、倾覆力矩、层间剪力、框架与抗震墙内力、剪力和倾覆力矩分配、构件受剪承载力、第二层楼板厚度及竖向荷载作用下底部两层框架的内力等。(7)底部框架—抗震墙砌体房屋的抗震设计基本要求和抗震构造措施。研究表明,经过合理设计的底部框架—抗震墙砌体房屋具有较大的抗震能力和良好的抗震性能(且底部两层框架—抗震墙砌体房屋优于底层框架—抗震墙砌体房屋),可以应用于6~8度抗震设防区。这一研究结论亦被“5·12”汶川特大地震所证实。作为以上科研成果的阶段总结,作者先后在国内中文核心期刊及国际学术会议上发表相关学术论文15篇^[3~17]。2001年6月,由陕西省科技厅组织、省教育厅主持,对作者完成的“底部框剪砖砌体房屋抗震性能及设计方法的研究”进行了技术成果鉴定,结论为:本课题研究取得很多颇有价值的创造性成果,达到国际先进水平,并获2001年度中国冶金科学技术进步二等奖、2002年度陕西省教育厅科学技术进步一等奖,2002年度西安市科学技术进步二等奖,2002年度陕西省科学技术进步三等奖。该项研究成果已在攀枝花钢铁(集团)公司商住楼,太原钢铁(集团)公司商住楼,西安交通大学校园周边“门面+住宅或办公”楼房开发和陕西省铜川市新商业区临街房屋,陕西省扶风县法门寺慈和医院商住楼等建筑中得到采用,建筑面积约20万m²,取得了显著的社会效益和经济效益。

在1997~2000年期间,作者所在的西安建筑科技大学土木工程学院梁兴文、李小文教授等先后承接和完成了国家自然科学基金和西安市建委资助的相关研究项目,进行了七层框支连续墙梁1/2比例模型的拟静力试验和一榀底部两层框架—混凝土抗震墙、上部四层砖砌体房屋1/2比例模型的拟动力试验,研究了结构的静力或动力反应与破坏机理;提出了墙梁水平承载力、竖向荷载作用下框架内力以及底部两层框剪砖砌体房屋第二层侧向刚度的计算方法,并提出了抗震设计建议^[18~23]。

另外,从1995年以来,中国建筑科学研究院抗震所、大连理工大学等单位分别进行了底层框剪砖砌体房屋^[24~32],底层和底部两层框剪组合墙房屋^[33~42]的抗震性能和设计方法的研究,取得了丰富的研究成果。

本书是基于以上研究成果,结合现行《建筑抗震设计规范》(GB 50011—2001)^[1]的相关条文,并参考刘大海等编著的《建筑抗震构造手册》^[43]的相关内容撰写的。本书在内容的

编排上，既注重全书的系统性，又考虑到每一章节的相对独立性，以便于读者学习。

参加本书编写的人员有：郑山锁（第一章、第三章～第六章、第八章～第十章、附录），薛建阳（第二章、第七章），王斌（第十一章），郑山锁任主编。

本书所涉及的有关作者的试验研究和理论分析工作，得到了导师赵鸿铁教授的亲切关怀和精心指导，导师俞茂宏教授评阅了全文并加序，在此谨向导师们表示诚挚的谢意。在本书的写作过程中，副教授杨勇、博士生王斌和李磊完成了部分绘图工作，在此一并致谢。作者也感谢西安建筑科技大学结构与抗震教育部及陕西省重点试验室张兴虎、刘煦、龚安礼、彭群珍、赵建德、李婉等老师在试验工作中提供的大量帮助，同时感谢对本书写作提供资料和对本书所涉及研究项目提供资助的单位和同志。

由于作者学识水平所限与时间紧迫，又由于研究工作本身带有探索性质，书中难免会有错误与不足之处，恳请读者赐正。

作者

2008年10月于西安

目 录

第一章 绪 论	1
§ 1.1 概 述	1
§ 1.2 震害及其分析	2
§ 1.3 建筑结构抗震设防的目标、方法和要求	5
§ 1.4 底部框剪砌体房屋的主要研究成果及设计方法	7
§ 1.5 与底部框剪砌体房屋相关结构的主要研究成果	10
第二章 底层框剪砌体房屋的抗震试验研究	13
§ 2.1 底层框架—砖抗震墙砌体房屋模型的振动台试验	13
§ 2.2 底层框剪砖砌体组合墙房屋模型的振动台试验	24
§ 2.3 底层框架—混凝土抗震墙砖砌体房屋的抗震试验	33
第三章 底部两层框剪砌体房屋的抗震试验研究	44
§ 3.1 底部两层框架—砖抗震墙砌体房屋模型的振动台试验	44
§ 3.2 底部两层框架—混凝土抗震墙砌体房屋模型的振动台试验	57
§ 3.3 底部两层框架—混凝土抗震墙砌体房屋模型的拟动力试验	71
§ 3.4 底部两层框架—混凝土抗震墙砌体房屋模型的拟静力试验	80
§ 3.5 框支连续墙梁抗震性能试验研究	88
第四章 底部框剪砌体房屋框剪层和砖砌体层的恢复力特性研究	94
§ 4.1 骨架曲线、各段刚度及特征点的坐标	94
§ 4.2 恢复力模型	102
§ 4.3 恢复力模型准确性验证	103
§ 4.4 结 论	106
第五章 底部框剪砌体房屋抗震能力的分析方法与设计控制	107
§ 5.1 楼层极限剪力系数的计算	107
§ 5.2 楼层弹性侧向刚度的计算	111
§ 5.3 砖砌体过渡层与相邻框剪层极限剪力系数比和侧向刚度比的合理取值	113
§ 5.4 在水平地震作用下房屋破坏状态的评定	120
§ 5.5 结 论	121

第六章 底部框剪砌体房屋框剪层抗震墙数量的合理确定	122
§ 6.1 框剪层地震剪力、侧向刚度及砖砌体层侧向刚度的计算	122
§ 6.2 影响抗震墙设置数量的因素分析	124
§ 6.3 抗震墙数量的确定	126
§ 6.4 结 论	130
第七章 底层框剪砌体房屋的抗震设计与计算	131
§ 7.1 抗震设计基本要求	131
§ 7.2 地震作用的计算与分配	137
§ 7.3 构件抗震强度验算	141
§ 7.4 抗震计算实例	144
第八章 底部两层框剪砌体房屋的抗震设计与计算	158
§ 8.1 抗震设计基本要求	158
§ 8.2 地震作用的计算	162
§ 8.3 地震作用的分配	163
§ 8.4 竖向荷载作用下底部两层框架内力计算	168
§ 8.5 构件抗震承载力验算	174
§ 8.6 抗震计算实例	178
第九章 底部框剪砌体房屋的抗震构造	186
§ 9.1 上部砖砌体层构造柱和圈梁的设置及其构造	186
§ 9.2 楼、屋盖的形式及其构造	188
§ 9.3 上部砖砌体层的连接构造	188
§ 9.4 底部框架托墙梁的截面和构造	190
§ 9.5 底部框架梁（托墙梁除外）、柱的截面和构造	191
§ 9.6 底部钢筋混凝土抗震墙的截面和构造	194
§ 9.7 底部黏土砖抗震墙的截面和构造	196
§ 9.8 基础的形式和构造	197
§ 9.9 钢筋混凝土抗震墙和框架柱根部构造	197
第十章 多层砌体房屋的抗震设计与计算	198
§ 10.1 抗震设计基本要求	198
§ 10.2 地震作用的计算与分配	202
§ 10.3 墙体抗震受剪承载力验算	210
§ 10.4 抗震构造措施	212
§ 10.5 抗震计算实例	229

第十一章 多层内框架砌体房屋的抗震设计与计算	236
§ 11.1 抗震设计基本要求	236
§ 11.2 地震作用的计算与分配	237
§ 11.3 构件抗震承载力验算	239
§ 11.4 抗震构造措施	239
§ 11.5 抗震计算实例	241
附录 1 底部两层框架—混凝土抗震墙、上部五层砖砌体房屋模型的试验数据和曲线	249
附录 2 底部框剪砌体房屋的抗震构造详图	262
附录 3 主要符号表	296
参考文献	297

第一章 绪 论

§ 1.1 概 述

砌体是指用诸如黏土砖、混凝土砌块、石材等块材与砂浆通过砌筑而形成的一种混合结构材料,包括无筋砌体(仅由块体和砂浆组成的砌体)和配筋砌体(在砌体中配置钢筋或钢筋混凝土构件的砌体)。砌体结构一般指主要竖向承重构件采用砌体墙、柱的结构。砌体结构房屋按其层数和承重墙体数量(或间距)的多少,主要可分为:

(1) 多层砌体房屋:指最大横墙间距控制在一定范围内的多层砌体房屋。

(2) 底部框架—抗震墙砌体房屋(简称底部框剪砌体房屋):指底层或底部两层由框架和抗震墙组成承重结构,上部各层为砌体结构的多层房屋。其中,根据房屋的设防烈度和层数的不同,底部抗震墙可以相应地选用砌体墙(包括烧结普通黏土砖、烧结多孔黏土砖、混凝土小型空心砌块砌体等)、钢筋混凝土墙或两者兼用。这种房屋底部的大空间可以用于设置服务大厅、商店、餐厅、银行、邮局、汽车库、会议室、地下铁道的出入口及其他文化娱乐设施等,而上部可作为隔墙较多的民用住宅或办公楼等。这种混合承重的房屋,比全框架结构经济(在相同使用功能条件下可节约造价 $(25\% \sim 30\%) n/(n+2)$, n 为砌体层的层数),且施工简单,因此在我国城市,尤其繁华地段的临街建筑和居民住宅小区的带商店的建筑中使用较多,在经济欠发达的中西部地区尤为适用。这种结构仍属于砌体房屋的范畴。

(3) 多层(多排柱)内框架砌体房屋:指外部由砌体墙(或带壁柱墙)承重、内部由(多排柱)框架承重的多层砌体房屋。

(4) 单层空旷砌体房屋:指最大横墙间距超过规定值且墙体数量少的单层砌体房屋。

(5) 单层非空旷砌体房屋:指最大横墙间距与多层砌体房屋相同的单层砌体房屋。

多层砌体房屋、底部框剪砌体房屋和多层内框架砌体房屋由于经济适用、构造简单、施工方便、易于就地取材等优点,多年来一直是我国民用建筑的主要结构形式之一,并且在今后相当长的时间内,砌体结构房屋仍将大量建造。但是,由于砌体是一种脆性材料,其抗拉、抗剪、抗弯强度均较低,因而未经过合理抗震设计的这类房屋的抗震能力和抗震性能均较差,大量的试验研究及国内外历次地震的震害也证实了这一点。特别是在我国唐山和汶川大地震中,位于高烈度区的砌体结构房屋,由于其结构体系不合理、横墙间距过大、纵墙开洞率过高、层高过大、外走廊悬臂过宽、采用预制楼(屋)面板而圈梁和构造柱设置欠缺、连接构造不可靠、施工质量差等原因而大量(整体或局部)倒塌,给人民的生命财产造成了巨大的损失。但是震害调查亦表明,只要经过合理的抗震设计(包括概念设计、抗震计算和构造设计),并确保良好的施工质量,则不仅在7、8度设防区,甚至在9度设防区,砌体结构房屋(尤其是底部框架—抗震墙砌体房屋)的震害亦较轻或基本完好。因此,认真

总结震害规律,分析破坏机理,研究有效的抗震措施,进行合理的抗震计算与设计,以提高砌体房屋的抗震能力与性能,是十分必要的。

在 1995 ~ 2002 年期间,作者与本单位同事以及国内兄弟单位的同仁对底层与底部两层框剪砌体房屋进行了大量细致深入的试验与理论研究,取得了许多颇有价值的创造性成果,并在此基础上,提出了底部框剪砌体房屋的抗震分析与设计计算方法。研究结果表明,经过合理设计的底部框架—抗震墙砌体房屋具有较大的抗震能力和良好的抗震性能(且底部两层框架—抗震墙砌体房屋优于底层框架—抗震墙砌体房屋),可以应用于 6 ~ 8 度抗震设防区。这一研究结论亦被“5·12”汶川特大地震所证实。

§ 1.2 震害及其分析^[44 ~ 60]

在地震作用(主要是水平地震作用)下,多层砌体房屋、底部框剪砌体房屋和多层内框架砌体房屋随地震烈度、结构布置、抗震构造措施以及场地条件的不同,主要有如下震害。

1.2.1 底层框剪砌体房屋

震害调查和试验研究表明,当底层无抗震墙(或抗震墙数量很少)时,底层框剪砌体房屋的震害集中在底层框架(或框架—抗震墙)部分,且墙比柱重,柱比梁重,内框架结构比全框架结构重。破坏状态:抗震墙沿对角线方向发生剪切破坏(出现交叉斜裂缝),框架柱上下端产生水平裂缝并局部压溃,形成柱铰机构,个别框架梁两端出现竖向裂缝。震害原因:主要是由于结构(刚度)上刚下柔或(抗侧力强度)上强下弱,加之底层所受地震作用相对较大,造成底层框架(或框架—抗震墙)变形过分集中、位移太大或丧失承载力而破坏。但上部各层(墙体)除了部分因连接构造太差而发生失稳破坏外,一般基本完好或轻微损坏(开裂),层间位移相对很小。当底层设置的抗震墙太多时,其震害现象与多层砌体房屋的震害相似,一般是第二层墙体破坏较严重。

表 1.1 为唐山地震后在天津市和唐山市调查所得的震害统计结果。由表可见,这种结构在地震时的严重破坏和倒塌一般发生在高烈度区。国内其他地区地震(尤其 5·12 汶川特大地震)震害调查也表明,在总层数为 2 ~ 5 层的这类建筑中,9 度地震烈度区,底层框剪完好,上部砌体房屋有中等程度的损坏,与同一地区同样层数的砌体房屋相比,震害现象明显减轻。但由于这类房屋的地震震害统计数字还很有限,尤其对层数较多的底层框剪砌体房屋,还缺乏实际震害调查资料,因此,对这类房屋的抗震设计仍应给予足够的重视,以防患于未然。国内外地震中都有这类房屋底层塌落或第二层以上砌体房屋倒塌的实例。例如 1976 年唐山地震中,分别有底层框剪砌体房屋底层塌落上部未塌的实例和上部砌体房屋倒塌底层框剪未塌的实例,地震模拟振动台试验中也出现过第二层以上砌体房屋倒塌而底层框剪未倒塌以及底层框剪严重破坏而第二层以上砌体房屋基本完好的情况。又如 1963 年南斯拉夫科普里地震、1972 年美国圣费南多地震、1976 年罗马尼亚地震、1978 年日本宫城冲地震和希腊萨洛尼卡地震、1979 年美国爱尔生居地震及 1995 年日本神户地震等都有底层框剪砌体房屋的底层或上部破坏和倒塌的例子。

表 1.1 底层框剪或内框架砌体房屋的震害统计结果

震害程度	地震烈度 调查情况	8 度（天津市）				10 度（唐山市）	
		底层内框架房屋		底层框剪房屋		底层内框架房屋	
		栋 数	%	栋 数	%	栋 数	%
基本完好		4	40	4	57	—	—
轻微损坏		4	40	3	43	—	—
中等破坏		2	20	—	0	—	—
严重破坏		—	0	—	0	1	17
倒 塌		—	0	—	0	5	83
合 计		10	100	7	100	6	100

1.2.2 底部两层框剪砌体房屋

近十多年来，底部两层框剪砌体房屋在我国一些大中城市已被越来越多地建造，虽然原《建筑抗震设计规范》GBJ 11—89 还未对其作明确规定，但设计人员都在按着各自的设计方法和原则设计出了这种类型的房屋，例如，1995 年以来，作者结合“多层砌体房屋震害预测”课题，曾在成都、攀枝花、太原、西安等地实测了数十幢这种房屋的动力特性，但由于目前这类房屋都未经过大震的考验，因此，还不能对这些设计的优劣做出评定。

根据作者本人、本单位以及国内兄弟单位同仁的抗震性能试验与理论分析结果，当底部两层设置的抗震墙数量太少时，第一、二层是这种结构体系的薄弱层，且混凝土抗震墙墙脚，砌体抗震墙墙体，框架柱端，尤其柱脚为薄弱部位。破坏状态：混凝土抗震墙沿（底层）根部截面发生弯剪破坏（出现贯通的水平裂缝和轻微斜裂缝）；砌体抗震墙沿各楼层对角线方向发生剪切破坏（出现贯通的交叉斜裂缝）；各层框架柱端部出现水平裂缝，继而压弯破坏，形成柱铰机构；框架梁基本完好或轻微破坏（一般仅个别梁两端出现竖向微裂缝）。当底部两层设置的抗震墙数量太多时，砌体过渡层—第三层及相对薄弱的砌体层是这种结构的薄弱层，其破坏现象与多层砌体房屋的震害情况（见下述）相似。

1.2.3 多层砌体房屋

根据国内外大量的震害调查结果，多层砌体房屋的主要震害可归纳为墙体开裂、房屋局部倒塌、房屋整体倒塌三类。

1. 墙体开裂

（1）墙体交叉斜裂缝：主要由于水平地震剪力在墙体中引起的主拉应力超过墙体的抗拉强度所致。当地震反复作用时，即形成交叉斜裂缝。通常在建筑物横墙、山墙及纵墙的窗间墙出现这种裂缝。底层地震剪力较上层大，所以底层墙体的交叉斜裂缝较上层严重。房屋的山墙刚度大，从而分配的地震剪力相对较大，加之所受的压应力较一般横墙小，故山墙的交叉斜裂缝又较一般横墙严重。

（2）竖直裂缝：常发生在纵横墙交接处。此处受力复杂，应力集中严重，是墙体抗震的薄弱环节。

(3) 水平裂缝：常发生在纵向窗间墙的上、下截面处以及楼（屋）盖与墙体连接处。前者是由于地震作用引起窗间墙受弯以及受剪所致，而后者则是由于楼（屋）盖与墙体锚固差，在地震作用下发生水平错动。

(4) 窗间墙沉降斜裂缝：当砂土地基“液化”引起喷水冒砂时，地基会出现不均匀沉降，从而导致窗间墙两侧出现约 45° 斜裂缝。

2. 房屋局部倒塌

(1) 墙角倒塌：因为墙角位于房屋尽端，房屋整体作用对它的约束作用较弱，同时地震引起的扭转作用在墙角处影响较大，故房屋墙角构造与连接不可靠时易出现倒塌。

(2) 纵墙倒塌：地震对房屋的作用可能来自任意方向，在双向地震作用下，纵横墙交接处受力复杂，应力集中严重。若因设计不当或施工缺陷造成纵横墙连接不可靠，则易出现整片纵墙外闪倒塌。

(3) 楼梯间墙体倒塌：楼梯间墙体受楼板的约束作用减弱，空间刚度差，特别是在顶层，墙体高度大，稳定性差，当地震烈度较高而构造与连接不可靠时，楼梯间墙体易出现倒塌。

(4) 变形缝两侧墙体倒塌：在地震中，由于变形缝宽度不足，缝两侧的墙体发生相互碰撞，从而导致房屋严重破坏或局部倒塌。

(5) 非结构构件倒塌：突出房屋的小烟囱、女儿墙、门脸、附墙烟囱等附属物，由于其与建筑物连接薄弱，加之“鞭端效应”会加大其动力反应，地震时易出现倒塌。另外，隔墙、室内装饰等因与建筑物连接薄弱，地震时也易出现倒塌。

(6) 外走廊坠落：外走廊由于其悬臂过宽，且连接构造不可靠，也易导致其局部坠落。

(7) 平面凹凸处房屋倒塌：若房屋平面凹凸变化过大，地震时应力集中严重，易造成房屋局部倒塌。

3. 房屋整体倒塌

(1) 底层先倒，上层随之倒塌：多发生在地震作用大，房屋的整体性较好，而底层墙体整体抗剪承载力不足且连接构造不可靠的情况下。首先底层倒塌，随之上部楼层整体坠落。当地基松散、承载力过低时，亦可造成底层先被摧毁，随之上层全部倒塌。

(2) 中、上层先倒，砸塌底层：多发生在房屋整体性较差且连接构造不可靠，上层墙体抗剪承载力过于薄弱的情况下。

(3) 上、下层同时倒塌：当地震作用很强，而墙体整体抗剪承载力很低且连接构造差时，多发生上、下层同时整体散碎坍塌。

(4) 楼（屋）面板整体塌落：多发生在采用预制楼（屋）面板且圈梁和构造柱设置欠缺、房屋整体性差的情况下。

(5) 施工质量差、连接构造不可靠亦可导致房屋整体或局部倒塌。

1.2.4 多层内框架砌体房屋

多层内框架砌体房屋横墙间距大，楼（屋）盖刚度以及房屋整体工作性能均相对较差，因此多层内框架砌体房屋的震害要比多层砌体房屋和全（钢筋混凝土）框架结构房屋严重。地震时，横向水平地震作用将由外部砌体墙体、柱与内部钢筋混凝土柱梁形成的框架来共同

承担。由于砌体与混凝土两种材料变形性能的较大差异,致使外墙平面外较早出现水平(弯曲)裂缝,并在轴力、剪力和弯矩的共同作用下较早破坏或倒塌,当内部框架采用单排柱时甚至导致房屋整体倒塌。故现行《建筑抗震设计规范》GB 50011—2001^[1]要求多层内框架砌体房屋的内框架应采用多排柱。

1.2.5 工程地质条件对震害的影响

震害调查表明,工程地质条件对建筑物的震害有较大影响。设计时,应从减小地震作用、防止地基失效的角度出发,来区分场地对建筑抗震的有利与不利影响,并依据一定的原则与要求来选择建筑场地。现行《建筑抗震设计规范》GB 50011—2001^[1]按场地上建筑物的震害轻重程度把建筑场地划分为对建筑抗震有利、不利和危险的地段。

抗震有利地段是指地震时地面无残余变形的区域,包括坚硬土或开阔、平坦、密实、均匀的中硬土等。抗震不利地段是指地震时地面产生明显变形或地基失效的区域,包括软弱土,液化土,条状突出的山嘴,高耸孤立的丘,非岩质的陡坡,河岸和边坡边缘,平面上成因、岩性、状态明显不均匀的土层(如故河道、疏松的断层破碎带、暗埋的塘浜沟谷和半填半挖地基)等。危险地段是指地震时可能发生严重地面残余变形的区域,包括地震时可能发生滑坡、崩塌、地陷、地裂、泥石流等及发震断裂带上可能发生地表位错的部位。在选择建筑场地时,首先应选择对抗震有利的场地而避开对抗震不利的场地,以大大减轻建筑物的地震灾害。若所选建筑场地存在液化、不均匀、软弱或膨胀等土层时,应采取相应措施予以加固处理。

震害调查亦表明,建造在(对抗震有利地段的)天然地基上的多层砌体房屋、底部框剪砌体房屋和多层内框架砌体房屋,在地震中极少发生由于地基破坏而引起的结构破坏,故对于上述建筑结构可不进行地基及基础的抗震承载力验算。

1.2.6 砌体结构房屋抗震设计的主要内容

多层砌体房屋、底部框剪砌体房屋和多层内框架砌体房屋的抗震设计可分成三个主要部分:

1. 抗震设计基本要求

抗震设计基本要求亦称抗震概念设计,包括合理的建筑场地选择,建筑和结构布置,房屋总高度、总层数、层高以及高宽比限值等。主要目的是减少房屋地震作用,使房屋各构件能均匀受力。

2. 抗震承载力验算

包括结构构件的地震作用效应及抗震承载力计算,以确保结构构件在水平地震作用下不发生材料强度破坏。

3. 抗震构造措施

主要包括加强房屋整体性和构件间连接强度的措施,如构造柱、圈梁、拉结钢筋的布置;对墙体间咬砌及楼板搁置长度的要求,框架梁、柱、墙、板的构造与连接等。

§ 1.3 建筑结构抗震设防的目标、方法和要求^[1,2,44~55]

近年来,国际上抗震设防目标的总趋势是:要求建筑物在使用期间,对不同程度和强度

的地震,应具有不同的抵抗能力,即应满足“小震不坏、中震可修、大震不倒”。这一抗震设防目标亦为我国现行建筑抗震设计规范^[1]所采纳。为了实现上述“三水准”抗震设防目标,我国规范提出了结构在弹性阶段(即小震作用下)按强度控制、并限制层间侧移,在弹塑性阶段(即大震作用下)按层间侧移控制的二阶段设计方法。并强调(在第一阶段设计中)通过概念设计和构造措施来满足大震不倒的设计思想,要求:

(1) 建筑及其抗侧力结构的平面布置宜规则、对称,并应具有良好的整体性;建筑的立面和竖向剖面宜规则,结构的侧向刚度宜均匀变化,竖向抗侧力构件的截面尺寸和材料强度宜自下而上逐渐减少,避免抗侧力结构的侧向刚度和承载力突变。

(2) 抗震结构体系应具有明确的计算简图和合理的地震作用传递途径;宜有多道抗震设防,避免因部分结构或构件破坏而导致整个体系丧失抗震能力或丧失对重力的承载能力;应具备必要的抗震承载能力,良好的变形能力和消耗地震能的能力;宜综合考虑结构体系的实际刚度和强度分布,避免因局部削弱或突变而形成薄弱部位,避免产生过大的应力集中或塑性变形集中,对可能出现的薄弱部位,宜采取措施改善其变形能力。

(3) 抗震结构构件应力求避免脆性破坏。对砌体结构,应按规定设置钢筋混凝土圈梁和构造柱、芯柱、配筋砌体或钢筋混凝土和砌体组合柱;对钢筋混凝土构件,应通过合理的截面选择、配筋和构造措施避免剪切破坏先于弯曲破坏,混凝土受压破坏先于钢筋屈服、钢筋锚固粘结破坏先于构件破坏。

(4) 还应加强结构各构件之间的连接,以保证结构的整体性,避免构件的节点破坏先于其连接的构件破坏。

结构分析应符合下列要求:

(1) 除国家现行建筑抗震设计规范^[1]特别规定者外,建筑结构应进行多遇地震作用下的内力和变形分析。此时,可假定结构与构件处于弹性工作状态,内力和变形分析可采用线性静力方法和线性动力方法。

(2) 不规则且具有明显薄弱部位可能导致地震时严重破坏的建筑结构,应按规范^[1]有关规定进行罕遇地震作用下的弹塑性变形分析。此时,可根据结构特点采用静力弹塑性分析或弹塑性时程分析方法。但当规范^[1]有具体规定时,尚可采用简化法计算结构的弹塑性变形。

(3) 当结构在地震作用下的重力附加弯矩大于初始弯矩的10%时,应计入重力二阶效应的影响。这里,重力附加弯矩指任一楼层以上全部重力荷载与该楼层地震层间位移的乘积;初始弯矩指该楼层地震剪力与楼层层高的乘积。

(4) 结构抗震分析时,应按照楼(屋)盖在平面内变形情况确定为刚性、半刚性和柔性的横隔板,再按抗侧力系统的布置确定抗侧力构件间的共同工作,并进行各构件间的地震内力分析。

(5) 质量和侧向刚度分布接近对称,且楼(屋)盖可视为刚性横隔板的结构,以及规范^[1]有关章节有具体规定的结构,可采用平面结构模型进行抗震分析。其余情况,应采用空间结构模型进行抗震分析。

(6) 利用计算机进行结构抗震分析,应遵循:计算模型的建立,必要的简化计算与处理,应符合结构的实际工作状态;计算机软件的技术条件应符合规范^[1]及有关标准的规定,

并应阐明其特殊处理的内容和依据；复杂结构进行多遇地震作用下的内力和变形分析时，应采用不少于两个不同的力学模型，并对其计算进行分析比较；所有计算机计算结果，应经分析判断确认其合理、有效后方可用于工程设计。

结构材料性能指标，应符合下列最低要求：

(1) 砌体结构材料：烧结普通黏土砖和烧结多孔黏土砖的强度等级不应低于 MU10，其砌体砂浆的强度等级不应低于 M5；混凝土小型空心砌块的强度等级不应低于 MU7.5，其砌体砂浆的强度等级不应低于 M7.5。

(2) 混凝土结构材料：混凝土的强度等级，框支梁、框支柱及抗震等级为一级的框架梁、柱、节点核芯区，不应低于 C30；构造柱、芯柱、圈梁及其他各类构件不应低于 C20。抗震等级为一、二级的框架结构，其纵向受力钢筋采用普通钢筋时，钢筋的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。

(3) 普通钢筋宜优先采用延性、韧性和可焊性较好的钢筋；普通钢筋的强度等级，纵向受力钢筋宜选用 HRB400 级和 HRB335 级热轧钢筋，箍筋宜选用 HRB335、HRB400 和 HPB235 级热轧钢筋。其中，钢筋的检验方法应符合现行国家标准《混凝土结构工程施工质量验收规范》GB 50204 的规定。

施工应符合下列要求：

(1) 在施工中，当需要以强度等级较高的钢筋替代原设计中的纵向受力钢筋时，应按照钢筋受拉承载力设计值相等的原则换算，并应满足正常使用极限状态和抗震构造措施的要求。

(2) 钢筋混凝土构造柱、芯柱和底部框剪砌体房屋中砌体抗震墙的施工，应先砌墙后浇构造柱、芯柱和框架梁柱。

上述抗震设防目标、方法和要求，也是我们在多层砌体房屋、底部框剪砌体房屋和多层内框架砌体房屋的抗震分析与设计中应该始终遵循的原则和依据。

§ 1.4 底部框剪砌体房屋的主要研究成果及设计方法

对于底部框剪砌体房屋，目前国外还尚未见到此方面的研究成果。以下就国内情况予以介绍。

1.4.1 底层框剪砌体房屋

目前，对这种结构的研究已处于相对成熟阶段，结构的地震反应分析主要采用反应谱法中的底部剪力法，而对于深入的理论研究用时程分析法居多。

文献〔61〕通过对底层框剪砌体房屋的变形特性，底层设计地震剪力、地震剪力的分配、地震倾覆力矩的分布及底层钢筋混凝土抗震墙和砖砌体抗震墙构造的分析，建议：为了避免薄弱底层因过度的变形（或应力）集中而发生严重破坏或倒塌，底层框剪砌体房屋的底层，不宜采用纯框架结构，应该结合底层的平面布置，沿房屋的纵向和横向，对称、均匀地布置一定数量的抗震墙，使第二层与底层的纵、横向侧向刚度比 λ_{21} 均不大于 3；底层框剪砌体房屋的底层纵向或横向地震剪力设计值应乘以变形集中效应系数 η_v ，取 $\eta_v = \sqrt{K_2/K_1}$