

底部框剪砌体房屋 抗震分析与设计

郑山锁 薛建阳 编著



中国建材工业出版社

底部框剪砌体房屋抗震分析与设计

郑山锁 薛建阳 编著

中国建材工业出版社

81.507

W1567.05

图书在版编目 (CIP) 数据

底部框剪砌体房屋抗震分析与设计/郑山锁等编著.

北京: 中国建材工业出版社, 2002. 5

ISBN 7-80159-271-9

I. 底… II. 郑… III. ①高层建筑—框架结构:
剪力墙结构: 砌块结构—抗震性能—分析②高层建筑—
框架结构: 剪力墙结构: 砌块结构—抗震设计
IV. TU398

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2002) 第 024912 号

内 容 简 介

底层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这种结构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。

全书共九章,主要包括: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;并结合《建筑抗震设计规范》(GB 50011—2001)的有关条文,提出了这种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。

本书可供建筑结构专业的科技工作者和高等院校相关专业的师生参考。

底部框剪砌体房屋抗震分析与设计

郑山锁 薛建阳 编著

*

中国建材工业出版社出版

(北京三里河路 11 号 邮编 100831)

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经销

北京丽源印刷厂印刷

*

开本: 787mm×1092mm 1/16 印张: 16.25 字数: 370 千字

2002 年 9 月第 1 版 2002 年 9 月第 1 次印刷

印数: 1~5 000 册 定价: 29.80 元

ISBN 7-80159-271-9/TU·133

序

改革开放以来,底部一层或两层框架—剪力墙的砌体结构得到广泛重视和迅速发展。这是由于经济建设的发展,促使沿街建筑的底层或底部两层成为商业和办公用房。另一方面,对小区环境质量要求的提高,多层建筑的底层成为开放式的空间,这不仅改善了房屋之间空气流通条件和居住质量,避免了底层房屋比较潮湿,采光和冬天日照较差的情况,并且增加了小区的公共活动空间和居民之间的交流条件。现在,一些南方城市已大量出现这类建筑,新加坡的大多数小区中的多层建筑的底层除了电梯间和少量书报摊和自行车存放处之外,都是流通的公共交通空间,任何人不得占用。这些都促使了底部框架—剪力墙砌体结构的研究、发展和推广应用。

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,底部两层框剪砖砌体房屋所占的比例日趋增多。表明这种结构形式越来越受人们的欢迎,应用前景广阔。即将颁布的新抗震设计规范 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、抗震计算要点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型,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,有关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,因此本书的出版无疑对研究工作者与工程界都是很有意义的。

五年来,本书两位作者对这一结构体系进行了全面、系统和深入的研究,取得了很多颇有价值的创造性成果,经陕西省科技厅组织鉴定,结论为达到国际先进水平。此种结构体系推广应用之后将会取得显著的经济和社会效益。

本书是两位作者基于本人、本单位以及国内兄弟单位的同仁的研究成果,并结合新的抗震设计规范 GB 50011—2001 的相关条文撰写的。这对于我国今后进一步进行相应结构的深入研究,补充、改进规范,以及指导工程设计与实践具有重要意义。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。

本书可供建筑结构专业的研究、设计、施工人员和大专院校相关专业的师生参考。希望读者能够从本书的学习中受益。

俞茂宏

2002年3月于西安交通大学

前 言

多年来,多层砌体房屋,尤其多层砖房,由于构造简单,施工方便,造价较低以及就地取材等优点,一直是我国民用建筑(如办公楼、教学楼、旅馆、病房,尤其住宅等)和公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、邮局及其它文化娱乐设施等)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(简称底层框剪砌体房屋),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。但抗震设计规范 GBJ 11—89^[1]只规定了底层框架—抗震墙、上部多层砌体房屋(简称底层框剪砌体房屋)的抗震设计方法,对底部两层框架—抗震墙、上部多层砌体房屋(简称底部两层框剪砌体房屋)没有明确规定。即将颁布的新规范 GB 50011—2001^[2]也只是从抗震设计基本要求和抗震构造措施方面提出了底部两层框剪砌体房屋的设计原则或规定,至于内力、强度、刚度和变形方面的计算方法和理论还不成熟(基本上是底层框剪砌体房屋的沿用)或尚未涉及。国内外,有关全面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尚未看到。因此,结合新的国家抗震设计规范 GB 50011—2001^[2]的颁布与实施,作者感到有责任向读者比较全面系统地介绍这一符合我国国情的优越的抗震结构体系,以期适应从事这一结构的研究、设计、施工和教学工作的同仁的需要,并进一步促进其应用与推广。

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的资助,自 1995 年就开始系统研究底部框剪砖砌体房屋,并且不断深化,一直持续至今,先后进行了三榀底部框剪砌体房屋 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,并在成都、攀枝花、太原、西安等地实测过 16 幢底部两层框剪砖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)底部两层框剪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)底部框剪砌体房屋框剪层抗震墙数量的合理确定及其设置方法。(6)底部两层框剪砖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)底部框剪砖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剪砖砌体房屋具有较大的抗震能力和良好的抗震性能(且底部两层框剪砖砌体房屋优于底层框剪砖砌体房屋),可以应用于6~8度抗震设防区。作为以上科研成果的阶段性总结,作者已在国内相关中文核心期刊上发表学术论文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。该项研究成果已在攀枝花钢铁(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中得到采用,建筑面积约8万m²,取得了显著的社会效益和经济效益,比一般钢筋混凝土全框架结构节约土建投资约1394万元。该项科研成果已于2001年12月获国家冶金科学技术进步二等奖,并获陕西省教育厅科学技术进步一等奖,现正在申报陕西省科学技术进步奖。

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,进行了七榀框支连续墙梁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、动力反应与破坏机理;提出了墙梁水平承载力、侧向刚度和竖向荷载作用下的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,结合新的抗震设计规范GB 50011—2001的相关条文,并参考刘大海、扬翠如等编著的《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。

本书编写分工为:郑山锁(第一章、第三章~第六章、第九章、附录),薛建阳(第二章、第七章),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,在此谨向导师表示诚挚的谢意。在本书的写作过程中,博士生杨勇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省重点实验室张兴虎、刘煦、彭群珍、赵建德等老师在试验工作中提供的大量帮助,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

2001年12月于西安

第一章 绪 论

§ 1.1 概 述

底部框剪砌体房屋指底部一层或两层为空间较大的框架—抗震墙、上部为多层砌体房屋,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(包括烧结普通粘土砖、烧结多孔粘土砖、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它文化娱乐设施等,而上部为隔墙较多的民用住宅或办公楼等沿街建筑。这种混合承重的房屋,具有比全框架结构经济(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)和施工简单的优越性,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。但是,这种结构仍属于砌体房屋的范畴。由于砌体是一种脆性材料,其抗拉、抗弯、抗剪强度均很低,因而未经过合理抗震设计的底部框剪砌体房屋的抗震能力和抗震性能均较差,大量的试验研究及历次的地震震害也证实了这一点。尤其是唐山地震中,位于高烈度区的底层框剪砖砌体房屋均发生了严重破坏,个别房屋倒塌,人民的生命财产遭受了严重的损失。同时,通过震害调查发现,在 6~8 度区,这种房屋的震害较轻或处于基本完好状态,特别是采取过适当构造措施的这种房屋,其抗震能力和性能均将明显得到改善。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,以提高房屋的抗震能力与性能,是十分必要的。

近年来,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砖砌体房屋进行了大量细致深入的试验研究和理论分析,取得了很多颇有价值的创造性成果,并在此基础上,提出了这种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剪砌体房屋具有较大的抗震能力和良好的抗震性能(且底部两层框剪砌体房屋优于底层框剪砌体房屋),可以应用于 6~8 度抗震设防区。

§ 1.2 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抗震设计规范所采纳。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量的能力;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)除抗震设计规范特别规定者外,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,应符合: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况;计算机软件的技术条件应符合规范及有关标准的规定,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:烧结普通粘土砖和烧结多孔粘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、圈梁及其它各类构件不应低于 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、RRB400 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及验收规范》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。

上述目标、方法和要求,也是我们在底部框剪砌体房屋的抗震研究和设计中应该始终遵循的原则和依据。

§ 1.3 震害及其分析^[44~60]

1.3.1 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。国内其它地区地震震害调查也表明,在总层数为二到三层的这类建筑中,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,没有震害加剧现象。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,还缺乏震害现场调查资料,因此,对这类房屋抗震设计时要特别注意。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。又例如 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

地震烈度 调查情况 震害程度	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

1.3.2 底部两层框剪砌体房屋

近年来,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,虽然规范 GBJ 11-89 未作明确规定,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,1997 年以来,作者就曾在成都、攀枝花、太原、西安等地实测过 16 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,砌体过渡层即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。

1.3.3 多层砌体房屋

根据国内外大量的震害调查结果,多层砌体房屋的震害大致如下:(1)房屋倒塌。当房

屋墙体特别是底层墙体整体抗震强度不足且抗震构造差时,易发生房屋整体倒塌;当房屋局部或上层墙体抗震强度不足,且抗震构造差时,易发生局部倒塌;另外,当构件间连接强度不足时,个别构件因失去稳定亦会倒塌。(2)墙体开裂、局部塌落。墙体裂缝主要是交叉斜裂缝和水平裂缝。墙体出现斜裂缝主要是抗剪强度不足,高宽比较小的墙片易出现斜裂缝,而高宽比较大的窗间墙易产生水平偏斜裂缝,当墙片出平面受弯时,极易出现通长水平缝。(3)墙角破坏。墙角为纵横墙的交汇点,地震作用下其应力状态极其复杂,因而其破坏形态多种多样,有受剪斜裂缝,也有受压的竖向裂缝,严重时块材被压碎或墙角脱落。(4)纵横墙连接破坏。纵墙和横墙交接处出现竖向剪切裂缝,严重时纵横墙脱开,外纵墙倒塌。(5)楼梯间破坏。主要是楼梯间墙体破坏,而楼梯本身很少破坏。这是因为楼梯在水平方向的刚度大,不容易破坏,而楼梯间墙体在高度方向缺乏有力支撑,空间刚度差,较易发生破坏。(6)楼盖与屋盖的破坏。主要是由于楼板搁置长度不够,引起局部倒塌,或是其下部的支承墙体破坏倒塌,引起楼、屋盖倒塌。(7)附属构件的破坏。如女儿墙、突出屋面的小烟囱、门脸或附属烟囱发生倒塌等;隔墙等非结构构件、室内装饰等开裂、倒塌。震害的原因:多层砌体房屋在地震作用下发生破坏的根本原因是地震作用时结构中产生的效应(内力或应力)超过了结构材料的抗力或强度。从这一点出发,我们可将多层砌体房屋发生震害的原因分为三大类。(1)房屋建筑布置、结构布置不合理造成局部地震作用效应过大,如房屋平立面布置突变造成结构刚度突变,使地震作用异常增大;结构布置不对称引起扭动振动,使房屋两端墙片所受地震作用增大等。(2)砌体墙片抗震强度不足,当墙片所受的地震作用大于墙片的抗震强度时,墙片将会开裂甚至局部倒塌。(3)房屋构件(墙片、楼盖、屋盖)间的连接强度不足使各构件间的连接遭受破坏,各构件不能形成一个整体,不能协同工作,当地震作用产生的变形较大时,相互间连接遭到破坏的各构件丧失稳定,发生局部倒塌。

§ 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,目前国外还尚未发现此方面的研究成果。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 $\eta_v = \sqrt{\frac{K_2}{K_1}}$ (注:文献[46])

建议取 $\eta_v = 1 + 0.17 \frac{K_2}{K_1}$; 规范建议根据第二层与底层侧向刚度比值的大小在 1.2~1.5 范围内选用。当抗震墙未受地震损伤而具有最大侧向刚度时。其所负担的地震剪力最大, 此时, 抗震墙的侧向刚度远大于框架的, 在同一方向上, 墙所分得的地震剪力常大于总地震剪力的 95%。因此, 在这个阶段, 可略去框架的刚度, 近似认为由抗震墙承担全部纵(或横)向地震剪力, 并按各抗震墙的侧向刚度比例将地震剪力分配至各墙片。确定底层框架柱所分担的地震剪力时, 则应考虑抗震墙开裂后侧向刚度减小引起的塑性内力重分布因素, 即应按楼层层间位移角达到 $\frac{1}{500}$ 时各抗侧力构件的有效侧向刚度比例分配。有效侧向刚度的取值, 框架不折减, 混凝土墙、粘土砖墙分别乘以折减系数 0.3 和 0.2。此外, 框架柱尚需考虑地震倾覆力矩引起的附加轴力, 各榀抗侧力构件承受的地震倾覆力矩, 可按底层抗震墙与框架柱的转动刚度比例分配。

在底层框架中的钢筋混凝土抗震墙, 高度往往小于长度, 属低矮剪力墙。在水平地震力及竖向荷载共同作用下, 由主拉应力引起墙面出现斜裂缝。此后, 作用于抗震墙顶面的水平剪力, 应由沿主斜裂缝方向的压力和竖直方向的拉力所平衡, 这样就要求有足够竖向钢筋将拉力传至基础。另外, 从力的平衡条件可知, 这里需要有水平抗剪钢筋来平衡沿顶边作用的剪力。如果假定主斜裂缝为 45° , 则在抗震墙内配置的钢筋网, 水平方向和竖向的配筋率应该相等, 且所有竖向钢筋应该妥善地锚固到基础中。如此, 低矮抗震墙也将具有足够的延性而避免脆性破坏。

底层框架中的砖砌体抗震墙, 具有一定的刚度和强度, 且有较大的阻尼, 能吸收较多的地震能量。但砖砌体材性脆, 易开裂形成剪切破坏, 开裂后刚度迅速衰减。为了提高砖砌体抗震墙的延性, 限制裂缝的开展, 沿砖砌体墙全长配置一定数量的水平钢筋是完全必要的。

以上研究成果被我国现行抗震设计规范 GBJ 11-89 和即将颁布的新规范 GB50011-2001 所采纳, 且构成了规范关于底层框剪砖砌体房屋的主要内容。但规范对第二层与底层侧向刚度比的取值已逐步有了改进, 规范 GBJ 11-89 要求 6、7 度时不应大于 3, 8、9 度时不应大于 2; 规范 GB 50011-2001 要求 6、7 度时不应大于 2.5, 8 度时不应大于 2.0, 且均不应小于 1.0, 9 度时不应采用该结构形式。

另外, 规范 GB 50011-2001 对底层各抗侧力构件承受的地震倾覆力矩的计算进行了简化, 提出底层各轴线承受的地震倾覆力矩, 可近似按底层抗震墙与框架柱的侧向刚度的比例分配确定。

1995~1998 年, 中国建筑科学研究院抗震所等单位, 进行了底层框剪砖砌体房屋抗震性能和设计方法的研究。该项目是根据我国城市建设和进一步扩大底层框剪砖砌体房屋在地震区的应用范围的要求开展的, 主要围绕改善底层低矮钢筋混凝土墙的抗震性能, 增强过渡楼层和这类房屋的整体抗震能力, 系统地进行了带边框开竖缝钢筋混凝土低矮墙和总层数为七层的底层框剪砖砌体房屋 $\frac{1}{2}$ 比例模型的试验研究, 以及一系列弹性、弹塑性和底层框架梁承担竖向荷载等分析研究。所取得的成果有^[24-32]: (1) 提出了这类房屋的抗震能力分析方

法;(2)提出了这类房屋第二层与第一层的侧向刚度比的合理取值范围为 7 度区 1.2~2.5, 8 度区 1.2~2.0, 特别指出其侧向刚度比不应小于 1.0, 并给出了估算公式, 这个合理取值既要求底层布置一定数量的抗震墙又防止因底层设置墙过多使薄弱楼层转移到上部砖砌体房屋部分;(3)提出了底层框剪砖砌体房屋底层的钢筋混凝土墙采用开竖缝墙, 以提高底层的变形和耗能能力;(4)提出了底层框剪砖砌体房屋的底层地震剪力设计值可不乘 1.2~1.5 的增大系数;(5)改进了地震倾覆力矩的计算方法;(6)给出了单跨梁承担竖向荷载的合理取值;(7)完善和改进了这类房屋的抗震设计理论和方法, 纠正了现行抗震设计规范过分加强底层和忽略过渡楼层的规定和缺陷, 提高了这类房屋的抗震设计理论水平;(8)建议底层框剪砖砌体房屋的层数限制为: 6 度区为八层, 7 度区为七层, 8 度区六层, 9 度区四层, 较抗震设计规范 GBJ 11-89 7、8、9 度区分别增加一层, 6 度区增加二层。利用本课题的研究成果, 卓有成效地进行了试点工程, 扩大了这类房屋在地震区的应用范围, 取得较好的社会效益和经济效益。该研究的部分成果已被规范 GB50011-2001 采纳。

文献[62]针对底层框剪砖砌体房屋底层抗震性能较差的问题, 提出了在底层设置劲性钢筋混凝土抗震墙的改革方案, 并通过劲性钢筋混凝土抗震墙在低周反复荷载下的试验研究, 得到了其恢复力特性计算模型。文献[63, 64]分别通过底层弹性和弹塑性层间位移的简化计算和分析, 指出, 当第二层与底层的侧向刚度比 $\lambda_{21} \leq 2$ 时, 底层的弹性和弹塑性位移将能满足规范要求。文献[65]通过大量的计算、分析和统计, 建议底层框剪砖砌体房屋底层地震剪力增大系数宜按公式 $\eta_v = 1.1 + 0.1 \frac{K_1}{K_2}$ 计算取值。文献[66]通过实例, 对地震区底层框剪砖砌体房屋的抗震设计进行了探讨, 指出底层框架横梁不应按墙梁计算。文献[67~71]结合工程实例, 分别对底层框剪砖砌体房屋的自振周期计算、扭转效应影响、转换层楼板设计及第二层与底层的侧向刚度比取值等进行了探讨。

1.4.2 底部两层框剪砖砌体房屋

对于这种新型结构, 此前国内学者进行了一些研究工作, 但大部分只是局限于对某一特定建筑或结合具体工程实例来对这种结构的抗震设计进行探讨。

文献[72]认为, 这种结构有两个可能较为薄弱的部位: 一个是竖向刚度发生突变的第二层, 此部位因变形超过极限容许变形值而发生破坏; 另一个是底层, 此部位由于承受较大的竖向荷载和地震作用, 框架柱一般可能沿斜截面出现剪切开裂, 发生脆性破坏, 特别是 P- Δ 效应更可能使破坏加剧。因此, 此类结构设计时, 在底部两层合理地设置抗震墙, 以增强底部的侧向刚度是至关重要的。此类结构的抗震性能和底部与上部刚度比、框剪结构层数和砌体结构层数都有关系。该文献通过一个特例的计算分析, 并根据工程实践, 建议 $\frac{K_3}{K_2}$ 应小于 1.5。

文献[73]就底部两层框剪砖砌体房屋, 结合工程实例对其变形和受力情况、结构计算、水平地震剪力的分配, 以及层侧向刚度比等问题进行了阐述, 并通过例题介绍了水平地震剪力分配的计算。为了安全起见, 建议对薄弱层弹塑性位移进行放大, 具体做法是对该层地震剪力乘以增大系数, 增大系数可根据第三层与第二层侧向刚度比值 λ_{32} 的大小, 在 1.2~1.5

范围内取用。地震剪力采用“底部剪力法”进行计算。且底部两层的纵向和横向地震剪力设计值应全部由该方向的抗震墙承担,并按各抗震墙侧向刚度比例分配,但当设有混凝土抗震墙时,底部框架柱承担的地震剪力设计值不能再沿用底层框剪砌体房屋所采用的按各抗侧力构件有效侧向刚度比例分配的方法进行,而应按框架—抗震墙协同工作的方法分析计算,以免造成第二层框架柱配筋不足(计算内力偏小)。

文献[74]根据抗震设计规范 GBJ 11-89 有关底层框剪砖砌体房屋的规定,从工程角度出发,对底部两层框剪砖砌体房屋的抗震设计问题进行了探讨。该文献建议第三层与第二层的侧向刚度比 λ_{32} ,在 7 度时宜取 1.0~2.0,8 度时宜取 1.0~1.5,且不宜小于 1.0,结构计算模型采用串联多质点体系,地震作用采用底部剪力法进行计算。底部两层地震剪力,应根据相邻层间侧向刚度比的大小乘以增大系数 η_v ,取 $\eta_v = 1 + 0.2 \frac{K_{i+1}}{K_i}$,其中 K_{i+1} 、 K_i 分别表示第 $i+1$ 层和第 i 层的侧向刚度。

文献[75]通过对六幢底部两层框架砖砌体房屋的动力特性实测,得到了这类房屋的自振频率(或周期)、阻尼、振型等参数,并探讨了这类房屋抗震设计的有关问题。

以上研究成果与即将颁布的新抗震设计规范 GB50011-2001 关于底部两层框剪砌体房屋的有关规定基本一致。但规范对底部框架柱承担的地震剪力计算仍沿用了底层框剪砌体房屋所采用按各抗侧力构件有效侧向刚度比例分配的方法,将可能造成较大的安全隐患。

为了掌握这类结构的力学性能及地震反应规律,提高这种房屋的抗震能力、性能和设计计算水平,以促进其在地震区推广应用,作者以及本单位的梁兴文教授等相继承蒙原冶金工业部、攀枝花钢铁(集团)公司、陕西省科技厅、西安交通大学开元股份有限公司和国家自然科学基金、西安市建委的资助,自 1995 年以来,对底部两层框剪砖砌体房屋的抗震性能与设计计算方法进行了系统的研究,先后进行了七榀框支连续墙梁 $\frac{1}{2}$ 比例模型的拟静力试验,三榀底部框剪砖砌体房屋(“一托四”、“二托三”、“二托五”) $\frac{1}{6}$ 比例模型的模拟地震振动台试验和一榀底部两层框剪、上部四层砖砌体房屋(“二托四”) $\frac{1}{2}$ 比例模型的拟动力试验。其中,底部抗震墙包括钢筋混凝土剪力墙和砖砌体剪力墙,上部砖砌体房屋包括三层、四层和五层。并在成都、攀枝花、太原、西安等地实测了 16 幢底部两层框剪砖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。所取得的成果有^[3~23]:掌握了这种结构的力学性能和地震反应的主要规律,以及砖砌体过渡层和相邻框剪层的破坏机制与破坏机理;提出了框支连续墙梁的水平承载力、侧向刚度和竖向荷载作用下的设计计算方法;提出了结构动力分析的力学模型和方法,尤其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;提出了结构抗震能力的分析方法与设计控制准则,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方法,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,以及结构薄弱楼层位置判别和破坏状态评定的方法和原则;提出了房屋框剪层抗震墙数量的确定及设置方法;提出了房屋的实用抗震计算方法,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的计算方法;建议:在设防烈度为 6(7)、8 度时,房屋的总高度分别不应超过 26 和 23 m,总层数分别不应超过 8 层和 7 层,这一要求比即将颁布的抗震设计规范 GB 50011-2001 的要求均相应增加一层。利用本课题的研究成果,卓有成效地进行了试点工程,扩大了这类房屋在地震区的应用范围,取得了显著的社会效益和经济效益。

§ 1.5 与底部框剪砌体房屋相关结构的主要研究成果

1.5.1 框支连续墙梁

底部框剪砌体房屋的砌体过渡层与相邻框剪层构成了框支连续墙梁结构。文献[18,76~80]通过试验或有限元方法,对框支连续墙梁在竖向及反复水平荷载作用下的受力过程,受荷状态及破坏机理进行了分析,提出了过渡层墙体和框架梁(托梁)的抗震设计建议。

1.5.2 底部框剪、上部钢筋混凝土一砖组合墙房屋

文献[33~42]通过对八层钢筋混凝土一砖组合墙(简称组合墙)房屋、底层框剪上部组合墙房屋及底部两层框剪上部组合墙房屋拟动力试验、模拟地震振动台试验、动力时程分析和可靠度分析,取得成果如下:这三种结构均具有较强的抗震能力,可在 7、8 度抗震设防区建造,且在适当控制组合墙体过渡层与相邻框剪层的侧向刚度比条件下,底部框剪上部组合墙房屋的抗震性能优于相应的组合墙房屋,底部两层框剪上部组合墙房屋的抗震性能略优于相应底层框剪上部组合墙房屋;组合墙体过渡层与相邻框剪层的侧向刚度比,在 7 度时不应大于 2.0,在 8 度时不应大于 1.4,且均不得小于 1.0;三种结构的变形均属于剪切型或以剪切变形为主的剪弯型,地震力沿楼层高度近似呈倒三角形分布,可采用现行抗震规范中的底部剪力法计算各楼层的水平地震剪力,但底部框剪层的纵、横向剪力设计值均应乘以地震效应增大系数;探讨了组合墙体、墙梁的强度和刚度计算方法,并提出了抗震设计建议。

1.5.3 钢筋混凝土低矮和中高抗震墙

文献[81~85]通过带边框钢筋混凝土低矮抗震墙的试验研究和弹塑性有限元分析,探讨了无洞墙和开洞墙的受力机理,给出了这种结构在水平受力各阶段的侧向刚度和受剪承载力计算公式,并提出适合低矮抗震墙的恢复力计算模型。文献[25,86,87]通过带边框并开竖缝钢筋混凝土低矮抗震墙的试验研究和非线性有限元分析,探讨了这种结构的受力过程、破坏机理,并给出了抗震墙在水平受力各阶段的侧向刚度、受剪承载力计算公式及恢复力计算模型。文献[88~92]基于试验研究和理论分析,给出了中高钢筋混凝土抗震墙在水平受力各阶段的刚度和强度计算公式。文献[93~95]通过两个十层新型(开竖缝)抗震耗能剪力墙结构模型的振动台试验和非线性有限元分析,研究了这种结构的地震反应、变形特性和耗能机理,提出了结构动力分析的(恢复力)计算模型。

1.5.4 砖填充墙钢筋混凝土框架

文献[96~103]通过砖填充墙钢筋混凝土框架在水平地震作用下抗震性能的试验研究和理论分析,考察了这种结构的力学性能,探讨了水平地震力的计算及其分配,提出了层间侧向刚度、开裂抗剪承载力和极限抗剪承载力的实用计算公式,并给出了该结构按层间剪切模型进行弹塑性动力反应分析的恢复力特性计算模型。

1.5.5 带钢筋混凝土构造柱(或水平配筋)的砖砌体墙片和房屋

采用配筋砌体和钢筋混凝土构造柱约束砌体,能够提高砖砌体结构的变形、耗能,尤其抗倒塌能力,改善其抗震性能,已被国内外大量的试验研究和震害调查结果所证实。文献[104~123]通过试验研究、弹塑性有限元分析或结合工程实例,探讨了带构造柱砖砌体、配筋砌体与无筋砌体在受力性能方面的差异,分析了构造柱的工作机理及与砖砌体协同工作的性能,提出了带构造柱墙体在弹性、开裂、屈服阶段的侧向刚度和承载能力计算公式,并给出了该结构按层间剪切模型计算时的恢复力特性计算模型。

1.5.6 多层剪切(或剪弯)型结构的计算和分析方法

目前国内外学者对剪切(或剪弯)型结构,尤其多层框架(或框剪)结构的抗震研究已十分深入,剪切型结构的有关计算分析方法和理论也相对成熟。文献[124~127]分别介绍了剪切型结构的水平地震作用、层间刚度、层间抗震极限强度和层间弹塑性位移反应的实用计算方法;文献[128]提出了一种新的剪切模型,该模型适用于分析层间由多种具有不同恢复力模型和参数抗侧力构件组成的多层剪切型结构。文献[129~132]详细介绍了广泛应用于多层剪切(或剪弯)型结构非线性地震反应分析中的多自由度层间剪切模型。这种模型适用于以剪切变形为主的多层砌体房屋及高宽比较小或强梁弱柱型框架结构等;该模型假定:层间水平杆件无限刚性,不产生弯剪及轴向变形;层间竖向杆件在水平力作用下不产生轴向变形,只作水平相对运动。故模型的层间刚度取决于各竖向杆件(即抗侧力构件)的弯剪刚度。文献[133]介绍了可用于求解多层剪切型结构非线性振动方程的一种有效方法——二级近似加速度逐步积分法。

第二章 底层框架砌体房屋的抗震试验研究

§ 2.1 底层框架—砖抗震墙砌体房屋模型的振动台试验

2.1.1 模型设计及试验方法

模型为一底层框架—砖抗震墙、上部四层砖砌体房屋,以攀枝花钢铁公司动力村商住楼典型的两个开间为原型,按缩尺比 $\frac{1}{6}$ 进行设计^[3,7]。模型抗震构造措施及各层混凝土、砖砌体和砂浆设计强度等级取与原型相同,钢筋直径大于或等于 $\phi 6$ 时用Ⅰ级钢筋,小于 $\phi 6$ 时用镀锌铁丝。模型框架梁柱的配筋率取与原型房屋相同,且对原型中的Ⅱ级钢筋乘以它与Ⅰ级钢筋的强度比系数。模型平、剖面及底层框架模板配筋图见图 2.1 和图 2.2,表 2.1 为材料性能试验结果。该房屋框剪层的楼梯间采用砖砌体横墙承重,其余部分为框架—砖填充墙。房屋框架梁柱、构造柱的混凝土设计强度等级均为 C20,各层砖的设计强度等级均为 MU10,第一、二层,三、四层和五层砂浆的设计强度等级分别为 M7.5、M5 和 M2.5。原型房屋是按 8 度Ⅱ类场地进行抗震设防的,其抗震承载能力、抗震构造措施(如构造柱、圈梁设置,墙、柱、梁的构造及其连接)等要求基本符合规范 GBJ 11—89 中底层框架砌体房屋的有关要求。

表 2.1 模型材料性能试验结果

材料类别	屈服强度 $f_y/\text{N}\cdot\text{mm}^{-2}$				极限强度 $f_u/\text{N}\cdot\text{mm}^{-2}$				弹性模量 $E_s/10^5\text{N}\cdot\text{mm}^{-2}$			
	$\phi 3$	$\phi 4$	$\phi 6$	$\phi 8$	$\phi 3$	$\phi 4$	$\phi 6$	$\phi 8$	$\phi 3$	$\phi 4$	$\phi 6$	$\phi 8$
钢 筋	267.6	272.1	321.4	298.2	372.5	389.6	469.1	437.0	2.13	2.06	1.95	1.88
其他材料	混凝土的抗压强度平均值为 $24.96\text{N}\cdot\text{mm}^{-2}$, 砖的抗压强度平均值为 $15.23\text{N}\cdot\text{mm}^{-2}$, 第一、二层, 三、四层和五层砂浆的抗压强度平均值分别为 7.22 、 4.92 和 $2.92\text{N}\cdot\text{mm}^{-2}$											

根据模型试验的相似理论^[134],得质量相似比 $S_m = S_E S_L^2$,其中 S_E 和 S_L 分别为模型材料的弹性模量相似比和长度相似比,取 $S_L = \frac{1}{6}$, $S_E = 1$,则 $S_m = \frac{1}{36}$ 。原型结构的总质量为 468 t,换算到模型上质量应为 13.0 t,但由于振动台承重能力的限制,模型上实际总质量为 3.155 t,故模型与原型正应力比 $S_\sigma = 0.243$ 。为了弥补和消除模型质量达不到设计要求所引起的与原型在受力性能方面的差异,采用了改变输入波加速度峰值及时间压缩比等措施。模型各层质量分布见表 2.2。