

数、高度和高宽比,房屋体型和结构布置,及合理选址等进行抗震概念设计;(2)加强构件间的构造连接以提高砌体结构的整体性;(3)通过配筋以提高墙体的抗震承载力和变形能力;(4)采用高强度、轻质量的新材料以及隔震技术等现代科学技术和手段.这些工作保证了在地震区建造的砌体房屋能满足“小震不坏,中震可修,大震不倒”的抗震设防要求.

抗震构造中重点强调加强构件间的连接以提高砌体结构的整体性,是在唐山大地震(1976 年)之后受到格外重视的.它要求通过设置构造柱(芯柱)、圈梁,以及楼、屋面板与墙体的连接,板与板、梁与墙的连接等,确保砌体结构成为一种箱形结构,在地震期间表现空间协同受力的特性,避免出现房屋丧失整体性、墙体出平面倾倒或楼板滑落等非竖向承载力不足因素导致的建筑倒塌.在建筑四角以及纵横墙交接处设置构造柱(先砌墙后浇柱,并在联结部位做成马牙槎,设拉结筋)或芯柱,再加上楼板附近的封闭圈梁的拉结,有效保证地震发生时各纵、横墙之间不发生脱离,确保结构抵抗两方向水平地震作用时的整体协同受力;当墙体发生开裂时,圈梁和墙体内的构造柱约束裂缝的扩展;开裂严重时,构造柱或芯柱限制大块开裂墙体的滑移和脱落,使开裂墙体在破坏严重时仍能继续承受一定的竖向荷载,避免房屋的倒塌.楼(屋)面板与墙体之间的可靠连接,是保证房屋作为一种箱形结构发挥空间作用的重要措施.加强板与板之间的连接,提高装配式楼板的整体性和刚度,并注意与搁置墙体及圈梁的拉结,是地震时楼板不发生塌陷的重要保证.通过这些抗震构造措施,可有效保证结构的整体效应,避免因单片墙体的出平面倾倒而导致的连锁反应,避免出现因楼板这种非抗震构件塌落而破坏墙体,进而倒塌的问题.

这些抗震构造措施中,以构造柱和圈梁的设置最为有效.该措施来源于唐山地震的灾后调查与总结.唐山地震之后,重点对两端设置钢筋混凝土构造柱的砖墙体的抗震性能进行了大量试验性研究和理论分析,在结合国外同类研究成果的基

础上,于 1981 年推出了《多层砖房设置钢筋混凝土构造柱抗震设计与施工规程》(JGJ 13—82),后又于 1994 年补充和修订为《设置钢筋混凝土构造柱多层砖房抗震技术规程》(JGJ/T 13—94)^[3],增加了在砖砌体中加设水平筋和可应用于底层框架-抗震墙砖房.这两本专门的有关构造柱的规程在国内被设计部门广泛应用,对提高我国多层砖砌体房屋的抗震性能起到了良好的作用.我国的《建筑抗震设计规范》(GB 50011—2001)^[4]对此也有具体的规定.1981 年以来发生的四川省道孚地震、新疆乌恰地震、云南省耿马地震和江西九江地震^[5]等都证明了设置构造柱和圈梁对提高砌体结构的抗震性能有很好的作用.

顺应国家的环保节能政策,混凝土空心砌块最近 10 年来在我国得到了大力推广和应用.混凝土空心砌块房屋沿用国外的经验,普遍采用芯柱-圈梁的抗震构造措施,但在芯柱施工中经常出现杂物未清净、钢筋偏离、混凝土灌不实等施工质量问题,妨碍该类房屋在我国的推广使用.多家单位进行了用钢筋混凝土构造柱代替芯柱的墙体抗震试验^[6~11],得到构造柱砌块墙体的承载能力、变形能力均优于芯柱墙体,即构造柱墙体的抗震性能优于芯柱墙体,由此肯定了用钢筋混凝土构造柱代替芯柱的想法,从而解决了空心砌块房屋的芯柱施工不便、质量难控制的不利问题,保证了砌块房屋的抗震构造.这方面,日本建筑学会的《砌体结构设计标准》(1989)^[12]的相关章节中也有类似的规定.

2 砌体结构的抗震加固技术

砌体结构抗震加固的一个主要内容是对早期建造的未抗震设防的房屋建筑进行加强整体性、提高抗倒塌能力的加固,以满足“大震不倒”的设防要求.唐山地震之后,我国开始对两端设置构造柱的构造柱墙体进行系统的研究,同期进行了外加钢筋混凝土构造柱加固多层砖房的研究^[13~18].研究指出在与墙体连接牢固的前提下,外加构造柱对墙体的抗侧能力、变形、防倒塌等抗震性能的影响上与构造柱墙体类似.在此基础上,国内普遍

采用外加钢筋混凝土构造柱、圈梁及钢拉杆的方式^[19,20],对未经抗震设防的砖混建筑进行大面积加固.这种针对房屋整体性的抗震加固效果,已在多次地震中得到肯定,相信在本次汶川地震的灾害统计中也会得到体现.

抗震加固的另一个主要内容是提高构件承载能力的加固或开裂墙体的灾后修复问题.对于这类问题,主要有外加钢筋网水泥砂浆面层、粘钢加固、混凝土板墙、增设抗震墙、X形钢支撑加固以及最近几年研究较多的FRP加固方法^[21]等,相关的资料不少,在实际中也均有应用并取得较好效果.但FRP的加固效果,往往只在FRP与砌体粘结完好的情况下才能达到,因此如何确保FRP与砌体之间的粘结完好,采用什么样的锚固措施,以及如何保证粘结的耐久性、长期性等,仍有待进一步的研究.它的推广和应用由于现阶段仍缺乏一个通用的设计、计算方法,也有待更进一步的深入研究.

也有通过改变原有房屋的结构体系或增加新的结构体系进行砌体房屋加固的.如在构造柱墙体的基础上加密构造柱的布置,使其形成钢筋混凝土-砖组合墙结构体系;或者增设新的框架结构,改变原有结构的传力方式,使新老结构形成两道抗震防线.

钢筋混凝土-砖组合墙结构体系^[22~24]是我国近代砌体结构研究中取得的一个重要成果.该结构体系是在设置构造柱的砖混房屋结构体系的基础上发展起来的,其初衷是为建造(超规范的)更高层数、更大开间的砖砌体房屋,目前已被广泛接受并在我国多个城市的中高层砌体新建筑中得到应用.利用该结构体系进行多层砌体房屋的抗震加固有望在结构整体性和抗震承载能力方面取得较好的效果.该结构体系自20世纪80年代后期开始,由沈阳市建委主持,辽宁省建筑设计研究院、大连理工大学、建研院抗震所、中国地震局工程力学研究所以及后期加入的哈尔滨建筑大学等多家单位组成课题组进行专门研究.它通过在墙体两端和内部设置钢筋混凝土小柱,每层顶设置钢筋混凝土小梁,形成建筑内所有墙段的约束增

强,从而在空间上和整体上使所有墙段的抗震能力都得到增强,建筑的抗震能力从而得到提升.试验表明,这种组合墙的抗剪承载能力与素墙体相比提高45%以上,约束柱根据其尺寸大小可承担50%以上的竖向力,延性普遍在3以上.由于该体系是构造柱房屋体系的发展,在施工方法和程序上与构造柱房屋相似,在施工上有可靠保证.在工程造价上由混凝土约束梁柱的截面变化及钢筋配置变化等导致的成本增加并不多,而结构的强度、变形和耗能能力等可有较大幅度提高.该钢筋混凝土-砖组合墙结构体系经过近20年的发展,在设计方法和工程经验上已可满足推广应用的程度.但在约束柱合理布置、材料强度匹配等问题上,仍有待更进一步的优化.

3 问题与对策

由于砌体结构的大量存在,对砌体结构抗震性能的研究一直是结构抗震研究的一个方面.我国也制定了相应的规范,并且进行了多次修改以适应新的砌体建筑材料出现.虽然钢结构框架结构等的抗震性能好,但限于财力和时间,灾后重建的大量农村民居仍以砌体结构为主.重视砌体结构的抗震构造和加固技术的研究及推广迫在眉睫,有关部门应该组织国内力量,推广已有的成熟经验,并开展深入的研究.

(1)重视村镇砌体房屋建设的标准设计与标准技术的推广应用

农村住宅因其特殊性,在地震中易受到损伤.它的特殊性,表现在设计、施工中缺乏专业人员的指导和监管,原材料不受控制,结构布置随意性大,在许多方面不符合抗震设防要求或者根本不设防,在历次地震中均表现出明显的易损性,造成大量的生命和财产损失.我国的相关规范中,对单层砌体结构的抗震构造缺乏相关具体内容,在一定程度上不能指导村民的自建.农村住宅大多采用传统砖木结构,主要承重部分采用砖砌体结构,顶盖部分采用木横梁加檩条瓦片,两者之间自然搭接缺乏锚固,门窗洞口的布置又有相当的任意性,使结构的整体性极差,极易在地震中发生局部倒塌或屋顶脱落.如何指导农村抗震新住宅的建

设以及如何对现有民房进行经济有效的抗震加固,是应该面对的问题.百度搜索显示,辽宁、江苏、福建、山西、海南、新疆等省已经相继出版发行了村镇住宅的抗震构造图集,部分省份推出了村镇住宅设计图集,国家住房与城乡建设部也在抓紧编制《村镇建筑抗震技术规程》和配套构造图集,估计很快就可颁布.但如何经济有效地加固现有村镇住房和抵御大震方面,仍缺乏有针对性的指导.

(2)加强砌体结构倒塌机制研究,优化破坏模式,注重抗震构造细节

砌体结构的“倒塌”一般可归为两大类:一类为承载能力不足引起的,另一类为抗震构造不足引起的.不同的抗震构造不足可引起不同的结构破坏模式,如单片墙的出平面外倾倒引起的连锁反应,联结不好导致楼(屋)面板的塌落而引起的连锁反应等.因此,有必要区分房屋倒塌的破坏模式,将“倒”和“塌”分开讨论,研究构造联结细节引起的砌体结构“倒塌”模式的变化,研究各类加固补强措施引起的砌体结构倒塌模式的变化.在此基础上,优化结构的抗震构造细节和加固补强措施.

(3)针对汶川地震的地震动特性,加强震中区附近的砖混房屋破坏特性研究

从一些地震动记录可以看出,这次汶川地震动的竖向加速度很大,有些竖向峰值加速度(PGA)甚至超过了水平峰值加速度.而砌体墙的抗剪能力受竖向压力的影响较大,震中区附近竖向地震的影响明显,竖向地震导致的墙体压力变化可能引起墙体抗剪能力减弱,薄弱楼层转移,进而可能引起结构的破坏模式发生变化,钢筋混凝土-砖组合墙的一些探索性工作已初步验证了这一点^[25].因此,对震中区破坏特性的研究可望进一步阐释震中区附近大量砖混房屋,包括低矮房屋的倒塌原因.在此基础上,提出有针对性的抗震构造措施.

(4)进一步研究砌体结构的弯曲影响问题

我国的抗震设计规范对多层砌体房屋总高度和总宽度的比值进行限制以考虑整体弯曲影响,

6、7、8、9度区分别不宜超过2.5、2.5、2.0、1.5,除此之外的结构设计计算公式及抗震构造措施中并不考虑弯曲影响.国内的试验和理论性分析表明,墙体的高宽比对其抗侧承载能力的影响非常明显.巴荣光^[26]通过伪静力试验研究得到:5层构造柱墙体(无洞、单排洞、双排洞,两端带翼缘,高宽比1.6)的抗侧极限承载力仅为单层墙体的0.43~0.50,可见弯曲在多层墙体的抗侧能力上的明显影响作用,是不容忽视的.美国规范以及前苏联的相关规定均与此试验结果相近.大连理工大学的7层和9层组合墙试验也得到了与此类似的结论^[25].因此,规范将单层墙片的研究成果用于多层墙片计算时,根据震害宏观调查不考虑整体弯曲影响,可能会偏于危险,有必要进一步研究.通过合理设置构造柱,改变构造柱的截面尺寸和配筋,提高房屋的抗弯性能,有望减小整体弯曲的不利影响^[27].

更进一步,仅仅对房屋的总体高宽比进行限制是不够的,对墙肢的高宽比或通过计算得到的剪跨比也应进行相应限制.例如比较常见的内走廊式的办公楼、宿舍,走廊两侧墙体的高宽比与建筑的总体高宽比之间至少相差一倍以上,按总体高宽比控制建造的房屋,其墙肢高宽比可能高达3以上,墙体的破坏可能以弯曲破坏为主,仍按剪切破坏的简化公式进行分析和抗震构造是非常危险的.

(5)加强砌体房屋结构的精细倒塌分析与概念设计研究

在结构的防灾设计中,有两种不同类型的研究方式.一种类型的研究是发展越来越复杂的精细结构分析,包括精细的弹塑性分析、几何和物理的非线性动力分析,考虑破坏和裂缝开裂的非线性分析,直至从结构元件破坏开始引起整个结构的倒塌分析;这样精细、全面的分析是很多研究人员努力的方向.对于砌体结构,模拟砌体结构从弹性、开裂到倒塌的全过程.这种精细分析应能适应从砌体到墙到整个结构的3个层次的模拟分析,重现地震中房屋的倒塌.与灾害调查、静力试验及振动台试验相结合,为结构抗震设计及加固服务.

这方面的相关研究,国内还未见有相关报道。

另一类型研究的特点是根据所研究问题的本质,抽象出简化模型;对这些反映问题本质的简化模型进行分析,得到规律的认识,形成有效的简化分析方法,包括形成规范、规则、规程。这些简化分析方法包括单自由度模型、多自由度模型、平面模型等。从事这方面研究的学者中,不乏国际著名的结构工程大师。这方面的研究工作目前仍很活跃,不仅可用于指导规范的制定,还在结构概念设计阶段起重要作用。美国斯坦福大学教授、著名结构工程专家 Krawinkler 指出:要有把握地进行倒塌预测还有相当长的路;而且倒塌预测无论现在或将来都不会是一个确定的过程。地面运动及模型的不确定性决定了这一切。这种情况使得从事设计、对工程成败负直接责任的工程师,在将精细分析的结果作为重要参考的同时,非常重视概念设计的研究。

(6)重视砌体结构的鲁棒性研究

鲁棒性是研究不确定性的一个重要概念。近几年,人们越来越认识到建筑结构鲁棒性要求的重要性,要求在未来不确定的潜在破坏或极端作用下结构不发生不相称的破坏,并具有抗连续倒塌的能力。欧美等一些国家的建筑规范都提出结构的鲁棒性要求。然而,这些规范都没有给出结构鲁棒性的具体评价指标。我国在这方面的研究还很缺乏。需要指出,不确定的潜在破坏或极端作用下发生不相称的破坏往往也是地震下结构破坏的重要可能途径,例如,地震下砌体预制板结构的破坏往往是因为预制板跌落后造成的连锁反应。结构的鲁棒性要求,体现了基于功能的抗震设计思想,即结构设计应按照结构功能的要求,利用所拥有的资源,寻求合理的、满意的、足够安全的设计方案,即在结构的可靠与经济之间选择一种合理的平衡,使结构在整个寿命周期内总造价最小,符合投资-效益准则^[28]。

4 结 语

本文认为无论是从现有的经济条件还是从采用绿色建筑材料来看,重视砌体结构的抗震构造和加固技术的研究及推广迫在眉睫,有关部门应

该组织国内力量,形成和推广标准设计、标准技术,推广已有的成熟经验,并对加固技术、垂直地震力、弯曲影响等对砌体结构抗震性能的影响问题开展深入的研究。对震中区破坏特性的研究可望进一步阐释震中区附近大量砖混房屋,包括低矮房屋的倒塌原因。

参考文献:

- [1] 北京市抗震节能农民住宅调研组. 推进农民建设抗震节能型住宅[J]. 建设科技, 2007(22):48-49
- [2] 郭会民,张宇隆. 山东农村住宅抗震设防思考[J]. 防灾博览, 2003(6):31-32
- [3] 中华人民共和国建设部. JGJ/T 13—94 设置钢筋混凝土构造柱多层砖房抗震技术规程[S]. 北京:中国计划出版社, 1994
- [4] 中华人民共和国建设部. GB 50011—2001 建筑抗震设计规范[S]. 北京:中国建筑工业出版社, 2001
- [5] 汤统壁,吴从晓,聂一恒,等. 江西九江地震砌体结构震害分析[J]. 广州大学学报(自然科学版), 2006(6):77-80
- [6] 金伟良,徐铨彪,潘金龙,等. 不同构造措施混凝土空心小型砌块墙体的抗侧力性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2001, 22(6):64-72
- [7] 杨德健,高水乎,孙锦镖,等. 构造柱-芯柱体系混凝土砌块墙体抗震性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2000, 21(4):22-27
- [8] 李利群,刘伟庆. 设置构造柱的混凝土小型空心砌块砌体抗震性能的研究[J]. 工程抗震, 2001(4):16-20
- [9] 周炳章,苗启松,何西令. 混凝土空心砌块芯柱与构造柱体系模型试验的研究[J]. 建筑砌块与砌块建筑, 2002, 115(1):21-27
- [10] 颜茂兰,高永昭,武惟娜. 砌块建筑设置钢筋混凝土构造柱抗震性能的研究[J]. 建筑砌块与砌块建筑, 2002, 115(1):28-31
- [11] 翟希梅,唐岱新. 带构造柱与带芯柱砌块墙体的抗震性能比较分析[J]. 建筑结构, 2003, 33(5):70-72
- [12] TAKANASHI Koichi, NISHIKAWA Takao, MORITA Shiro. AIJ Standard for Structural Design of Masonry Structures (1989 Edition) [S]. Tokyo: Architectural Institute of Japan, 1994
- [13] 多层砖房用外加钢筋混凝土柱加固的抗震设计与施工建议编制组. 多层砖房用外加钢筋混凝土柱加固

的抗震设计与施工建议[J]. 工程抗震与加固改造, 1984(2):27-30

[14] 刘锡荟,张鸿熙,刘经纬,等. 用钢筋混凝土构造柱加强砖房抗震性能的研究[J]. 建筑结构学报, 1981(6):47-55

[15] 钮泽臻,杜 麒,崔建友,等. 用外加钢筋混凝土柱加固砖墙的抗震性能[J]. 建筑结构学报, 1985(2): 51-61

[16] 邬瑞锋,贾阿兴,奚肖凤,等. 外加钢筋混凝土构造柱提高砖墙抗震性能的试验和分析[J]. 大连理工大学学报, 1983, **22**(4):17-24

(WU Rui-feng, JIA A-xing XI Xiao-feng, *et al.* Test and analysis of the earthquake-resistant behaviour of the brick-walls with reinforced concrete columns[J]. **Journal of Dalian University of Technology**, 1983, **22**(4):17-24)

[17] 夏敬谦,黄泉生. 构造柱与配筋砌体房屋抗震能力的试验研究[J]. 地震工程与工程振动, 1989, **9**(2):82-96

[18] 张 誉,王正云,高莲娣. 砌块房屋的薄扁构造柱抗震加固试验研究[J]. 建筑结构学报, 1996, **17**(3): 18-24

[19] 戴国莹. 现有建筑物抗震鉴定加固技术(四)——砖房抗震加固技术[J]. 建筑科学, 1995(4):68-71

[20] 林 震. 砌体结构房屋抗震加固评述[J]. 福建建筑, 2004, **88**(3):39-41

[21] 付 胜,黄奕辉. FRP 在砌体墙抗震(加固)中的应用[J]. 基建优化, 2007, **28**(2):107-110

[22] 王天锡,陈德高,张前国,等. 钢筋砼-砖组合墙体体系成套技术研究[C] // 首届全国砌体建筑结构学术交流会议论文集. 沈阳:[s n], 1991:1-8

[23] 刘立泉,刘 雯,陈德高,等. 钢筋混凝土-砖组合墙片抗震性能试验研究[C] // 第二届全国砌体建筑结构学术交流会议论文集. 成都:[s n], 1994:9-20

[24] 梁建国,张望喜,郑勇强. 钢筋混凝土-砖砌体组合墙抗震性能[J]. 建筑结构学报, 2003, **24**(3):61-69

[25] 阿肯江. 高层组合墙砌体结构的抗震性能[D]. 大连:大连理工大学, 1999

[26] 巴荣光. 多层砖砌体墙片抗震强度的试验研究[C] // 首届全国砌体建筑结构学术交流会议论文集. 沈阳:[s n], 1991:16-25

[27] 邬瑞锋,奚肖凤,蔡贤辉,等. 弯曲对组合墙体抗侧力的影响[J]. 建筑结构, 1997(2):14-18

[28] 李 刚,程耿东. 基于投资-效益准则的现有结构抗震加固策略[J]. 大连理工大学学报, 2003, **43**(4): 412-415

(LI Gang, CHENG Geng-dong. Strategies of cost-effective seismic rehabilitation for existing structures [J]. **Journal of Dalian University of Technology**, 2003, **43**(4):412-415)

Countermeasures and problems for seismic enhancement of masonry structures

CAI Xian-hui*, LI Gang, CHENG Geng-dong

(State Key Laboratory of Structural Analysis for Industrial Equipment,Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

Abstract: Wenchuan earthquake damaged the masonry buildings most seriously, but a large number of post-disaster reconstructing building in rural district will continue to be masonry structures. The earthquake-resistant constructional measures and strengthening technology for masonry structures in China are summarized firstly. Then, the constructional details, collapse mechanism, robustness, vertical seismic performance, bending effect, etc. for masonry structures are pointed out for further research. Finally, the formation and promotion of standard designs, standard technologies and the promotion of existing mature experiences are suggested.

Key words: masonry structure; seismic strengthening; earthquake-resistant constructional measure