

建筑结构的抗倒塌能力——汶川地震建筑震害的教训

叶列平, 曲哲, 陆新征, 冯鹏
清华大学土木工程系, 北京 100084

摘要: 工程结构的抗震能力是社会抗震防灾系统的第一道防线。建筑物的倒塌是震害的根源, 建筑物在地震中的破坏程度, 大体决定了震害的严重程度。因此, 建筑结构的抗震能力, 特别是抗倒塌能力, 对于社会整体抗震防灾非常重要。本文结合汶川地震中建筑震害的教训, 运用系统科学的思想分析了提高建筑结构整体抗震能力的途径, 重点针对建筑结构抗倒塌能力, 提出了建筑结构抗震设计中应注意的问题和改进建议。

关键词: 汶川地震; 建筑震害; 结构抗震体系; 抗倒塌设计; 鲁棒性; 整体稳定性; 整体牢固性

在城市抗震防灾系统的等级序列中, 建筑物和基础设施的抗震能力是抗震防灾的第一道防线。房屋建筑的倒塌与破坏是造成巨大灾难的根源, 正如美国科罗拉多大学的一位专家曾经说过, “造成伤亡的是建筑物, 而不是地震”。本文根据汶川地震中的典型建筑震害分析, 用系统科学的思想分析了提高建筑结构整体抗震能力的途径, 重点针对建筑结构抗倒塌能力, 提出了建筑结构抗震设计中应注意的问题和改进建议。

1 汶川地震中建筑震害的基本特点

汶川地震建筑震害表明, 随着我国房屋建筑抗震安全储备与设计水平的提高(从 74 抗震规范到 89 抗震规范再到 01 抗震规范), 从 80 年代到 90 年代再到 21 世纪后, 按照最新抗震标准设计建造的建筑物, 其震害有明显减轻的趋势。符合 89 和 01 抗震规范的建筑, 基本没有严重损坏或倒塌。对于体量不大、体型比较规则的, 采用现浇钢筋混凝土框架、砖混结构等成熟结构体系的建筑物, 当按 89 和 01 抗震规范进行设计, 并保证施工质量时, 总体上能够达到预期的抗震性能目标。这意味着良好的抗震设计和施工质量, 完全能够有效的减少因建筑物震害产生的损失, 特别是能够大量减少人员伤亡。

相反, 89 抗震规范以前的建筑震害明显较重, 特别是大量为采取抗震措施的砖混结构, 在这次地震中震害十分严重。另一方面, 村镇建筑和农民自建住宅, 由于缺乏必要的抗震知识和必要的技术指导, 加之年久失修, 震害也比较严重。图 1 和图 2 分别为安县秀水镇新旧两个街区的整体震害情况。



图 1 安县秀水镇旧街道震害



图 2 安县秀水镇新街道震害

2 汶川地震中主要结构形式的震害

本文主要讨论建筑结构的抗倒塌能力, 以下首先介绍汶川地震中主体结构损坏、严重破坏和倒塌的典型建筑震害。

2.1 砖混结构

四川地震区砖混结构的数量很多, 震害也非常严重。村镇的住宅、教学楼, 城市的一些旧的居民楼、办公楼、小型厂房大多采用这种结构。在汶川地震中, 大量砖混结构发生整体倒塌, 甚至是粉碎性倒塌,

造成了惨重的人员损失。图 3 为砖混结构的典型震害。



南坝镇小学教学楼垮塌



汉旺镇铁路货运站宿舍楼倒塌



荇华中学教学楼右段倒塌
(左段为框架结构)

图 3 砖混结构的震害

对一些倒塌的砖混结构建筑的调查发现,倒塌的主要原因可以归结为两点,一是结构形式不合理,如教学楼大多采用纵墙承重、大开间、大开窗、外挑走廊;二是抗震构造措施严重不足,如预制楼板无拉结、无后浇叠合层,特别无构造柱,甚至没有圈梁。具有这两个特点的砌体结构大多在设防烈度地震下发生整体性倒塌,甚至是粉碎性倒塌,许多砖混教学楼的整体倒塌更成为震后社会各界关注的焦点,造成了严重的社会影响(图 4)。



倒塌情况



预制板无拉结



无构造柱

图 4 都江堰聚源中学教学楼

然而震害调查中同时发现,一些按规范认真设计、结构形式和抗震构造措施合理的砖混结构房屋,抗震性能满足设防要求,见图 5。事实上,1976 年唐山地震以及上世纪末我国西部地区的多次地震震害都表明^{[1][2][3]},砖混结构中的现浇钢筋混凝土圈梁、构造柱对于结构在地震中保持整体性,避免发生整体倒塌具有非常重要的作用,特别是构造柱的作用尤为重要。只要构造措施得当,砖混结构完全可以实现预期的抗震设防目标。这次地震却重蹈了唐山地震惨烈震害的覆辙,很多是在结构体系和设计方面存在问题,具体原因将在下文详细讨论。



江油县雁门镇明德小学



绿天电动源有限公司办公楼

图 5 地震区完好保存的砖混结构

2.2 框架—砌体混合结构

这类混合结构大致可以分为竖向混合(如底部框架—上部砖混的结构)和水平混合(部分框架—部分砖混的结构)两类。它们表现出各自不同的典型震害。

竖向混合的框架—砌体混合结构多为底部软弱层破坏。在底框砖混建筑中,底层框架结构的刚度远小于上部结构,地震作用下底层框架变形集中,损伤严重,成为整个结构的软弱楼层,使结构发生局部型的破坏,甚至倒塌,而结构的其它部分则没能发挥其抗震能力。图 6 为几个典型的底部软弱层破坏震害。



小鱼洞镇某底框砖混结构的底框侧移变形



龙门山镇底框砖混结构底框柱和墙破坏



红白镇底框砖混加油站

图6 底框砖混结构的底层震害

对于框架-砌体水平混合结构,由于结构体系混乱,在地震作用下框架和砌体承重墙抗侧力构件的刚度和变形能力不协调,框架部分与砌体结构部分受力复杂,极易导致严重破坏。图7为框架-砌体水平混合结构的震害情况。框架-砌体水平混合结构的大量存在,不仅仅是这次地震受影响区域的局部问题,而是在我国西部地区具有一定的代表性,近年来西部地区的几次地震都反映出类似的问题,应该引起重视^[4]。



都江堰魁光街临街面



都江堰魁光街背街面



绵竹某办公楼倒塌

图7 水平混合框架-砖混结构的震害

2.3 框架结构

本次地震中,大多数框架结构的主体结构震害一般较轻,尽管如此,震害调查显示,框架结构的柱端出铰、柱端剪切破坏、节点区破坏等现象比较常见,见图8。这些震害表明,现行设计规范^[5]中要求柱铰机制机制的破坏模式没有实现,“强柱弱梁、强剪弱弯、强节点弱构件”等设计理念没有实现。在强柱弱梁方面,由于框架梁跨度过大使得其截面尺寸增大、楼板对框架梁的刚度和承载力贡献、建筑需要在框架梁的砌体或填充墙的刚度增强作用,规范对框架柱的轴压比限值过高使得框架柱的截面尺寸偏小等,使得框架梁或屋盖的实际刚度增大,在实际框架结构震害中,很少看到“强柱弱梁”型破坏。



南坝镇某框架结构出现柱铰机制破坏



都江堰某住宅框架结构底层侧移严重



都江堰某住宅框架结构底层坍塌



都江堰某住宅框架出现柱铰



绵阳某框架柱顶出现塑性铰



都江堰某框架柱塑性铰剪切破坏

图8 框架结构的破坏

在强剪弱弯方面,即使柱端首先发生弯曲破坏而形成塑性铰,巨大的轴压容易使混凝土压溃而发生剥离脱落,从而严重削弱柱端的抗剪能力,而柱端出铰并不会减小柱端受到的地震剪力,因而很容易引起剪切破坏。由此可见,需要考虑压弯破坏对柱端抗剪承载力降低的影响,提出切实可行实用的配筋构造技术,如连续箍筋技术,防止柱端混凝土强度严重退化,充分保证“强剪弱弯”。

另外,框架结构的围护结构和填充墙发生明显的震害,见图 9。这虽然不属于主体结构的破坏,但仍然会对人员安全造成威胁,同时也造成很大的财产损失,使灾后修复与重建成本大大增加,尤其是对住户的心理造成严重恐慌,不利于震后恢复正常生活和工作的开展。从性能化设计的角度出发,对填充墙、女儿墙、建筑外立面装饰材料等非结构构件也应进行相应的抗震性能和抗震安全的研究,并在性能化抗震设计的基础上,对非结构构件的抗震设计给出具体的规定。



都江堰市某建筑填充墙破坏

什邡市洛水中学食堂填充墙破坏

江油市某公共建筑填充墙外闪倒塌

图 9 框架结构的非结构构件破坏

2.4 逃生通道损坏严重

震害调查发现,楼梯间、悬挑走廊等灾后逃生通道的震害普遍较为严重。在现浇框架结构中,现浇楼梯的破坏主要集中在跑板或跑梁跨中断裂,填充墙开裂严重;而在采用预制钢筋混凝土梁式楼梯或板式楼梯的住宅结构中,楼梯梯板与两端支座连接处拉开,楼梯间与结构其它部分完全分离。如图 10 所示。



某建筑物从楼梯间处断开

都江堰市某建筑物楼梯倒塌

图 10 逃生通道破坏

在罕遇地震中建筑物应能保证“大震不倒”,这是对建筑物内人员生命安全的保障,其意义在于保证建筑物发生破坏后人员有机会逃离建筑物而获救。但是,即使建筑物能够“大震不倒”,逃生通道却严重损坏,人员也无法及时脱离险境。因此,在保证“大震不倒”的前提下,逃生通道的重要性应适当提高,有必要对楼梯间特别休息平台与梯板的抗震设计开展专门的研究,提高楼梯作为逃生通道的功能要求。

3 提高建筑物抗倒塌能力的设计思想

由于本次汶川地震属于特大罕遇地震,高烈度区保证建筑在罕遇地震中做到“大震不倒”,提高建筑物抗倒塌能力,减小地震中的人员伤亡是抗震防灾的最基本要求。这次汶川地震倒塌房屋 650 余万间,人员死伤基本上都是因为房屋建筑倒塌被埋或被砸。尽管我国抗震规范的第三阶段设防要求大震不倒,但大震抗倒塌计算一般仅针对少数重要建筑结构进行,而对大量一般结构,则主要依赖结构构造与概念设计。然而,这次汶川地震中倒塌的大多数是一般房屋建筑。因此,如何保证结构实现“大震不倒”的目标,特

别是针对一般房屋建筑,有必要进一步展开深入的研究。探究这些建筑倒塌的原因,除了地区抗震设防标准的问题外,研究建筑结构系统在灾害作用下的整体性,是提高结构整体抗震能力的关键。

3.1 结构系统的鲁棒性、整体稳定性和整体牢固性

建筑结构是由很多基本构件组成的一个复杂系统,本文基于系统科学的思想,探讨建筑结构系统的抗倒塌能力和设计建议。根据系统科学的基本概念,一个复杂系统的功能主要取决于其整体性。整体性是系统方法的核心和目标。系统的整体性可以简单的表述为“整体不等于部分之和”。对于建筑结构来说,一方面,构件的功能依赖于结构整体,任何构件一旦离开结构整体,就不再具有它在结构系统中所能发挥的功能;另一方面,构件影响结构整体的功能,任何构件一旦离开结构整体,结构整体丧失的功能不等于该构件在结构系统中所发挥的功能,可能更大,也可能更小。

由于系统组成的复杂性,采用同样的结构构件按不同方式所组成的建筑结构系统,其整体性可能表现为截然不同的结果。如果因为结构构件之间的互相依赖而加剧了结构系统整体功能的损失,则结构系统的整体抗震能力弱,这样的整体性属于**不利的整体性**,也即所谓结构系统的**易损性**。911事件后,国际工程界对建筑结构连续性倒塌机理的研究正是为了克服结构易损性可能造成的危害。与之相对的是**有利的整体性**,经过合理设计和组织的结构系统,能够利用元素之间的相互依赖与影响,最大限度地减少结构系统整体功能的损失,即所谓结构系统的**鲁棒性**。

鲁棒性是反映复杂系统整体性的一个重要特性。在讨论建筑结构时,结构专家也常用“**结构的整体稳定性**”和“**结构的整体牢固性**”来表述。事实上,“**鲁棒性**”、“**整体稳定性**”和“**整体牢固性**”是从不同的角度对结构系统整体性的描述。在系统方法中,**稳定性**有其特定的定义,而**整体牢固性**则是更接近工程的技术术语。为此,以下先从系统科学角度,对结构系统的“**鲁棒性**”、“**整体稳定性**”和“**整体牢固性**”的概念给予明确。

结构系统的鲁棒性是指,结构系统不会因为某个局部构件的破坏而出现与之不相称的整体功能丧失,也即局部构件破坏对结构整体性能没有造成什么影响,这可以直观的表达为一种“减法整体性”,即 $3-1>2$ 。文献[5]详细讨论了抗震结构的鲁棒性对于罕遇地震中结构抗倒塌能力的重要意义,并提出了增强结构系统抗震鲁棒性的方法,如增加结构的冗余度、明确不同构件的功能类型、实现多重抗震防线、提高结构的整体牢固性等。

结构系统的鲁棒性注重对损伤结果的描述,而结构系统的**整体稳定性**则注重对损伤过程的描述。这里所说的稳定性,是从结构状态突变的角度定义的广义稳定性,而一般经常讨论的压杆分叉失稳问题只是种种状态突变中的一种。在灾害作用下,结构系统从完好状态向破损状态甚至倒塌状态的变化过程,存在稳定的和不稳定的两种变化过程。如果发生突变破坏,建筑结构系统的倒塌过程将难以预测和控制。因此,希望结构系统的损伤破坏过程能够表现为连续稳定的渐进式破坏过程,这种破坏过程相对容易预测与掌控,而且破坏过程中结构系统的整体性依然能够得到保持。结构系统的连续稳定渐进式的破坏过程,可分解为多个连续稳定的阶段,每个阶段都有相应的损伤控制机制,并能充分发挥结构系统所有结构构件层次的承载能力和变形能力,从而有效的避免瞬间的突变式破坏。这种连续稳定的渐进式破坏过程,可以使得结构系统从开始破坏到最终倒塌有相当长的时间,并且在这一过程如果外界灾害作用停止,则整体结构系统破坏过程也停止,不会在短时间内继续发展,结构系统可以维持其整体状态,因而能够保证建筑内的人员逃离。文献[7]将结构在地震作用下的破坏模式分为整体型与局部型两种,其中整体型破坏模型具有连续稳定的破坏过程,且有利于充分发挥结构系统中各个部分的能力,是比较理想的破坏模式。文献[7]提出了在结构设计中保证整体型破坏模式的思路,并指出其关键在于正确认识结构系统的层次性并使构件功能及其安全储备与它们的重要性相匹配。

结构系统的鲁棒性与整体稳定性实际上是一个问题从不同角度的表述,前者描述结果,后者描述过程。因此,增强结构系统鲁棒性与稳定性的设计思路与途径是统一的。

除此之外,建筑结构系统成立的前提条件是构件之间的相互作用。如果在地震作用下,建筑结构系统可轻易地解体为单个构件,则上述结构系统的整体性也无从谈起。因此,结构系统的**整体牢固性**是实现上述**鲁棒性**和**整体稳定性**的前提,也即建筑结构系统应注重构件之间的连接构造,保证结构构件之间有利的相互作用能够得到充分的发挥,最大程度的实现结构系统的整体抗震能力目标。

尽管**整体牢固性**是实现上述**鲁棒性**和**整体稳定性**的前提,但结构系统的**鲁棒性**和**整体稳定性**属于整体结构系统层面的概念,与**整体牢固性**仍然具有不同的意义。比如,底框结构,可能底框柱与上部结构的连接构造措施很牢固,但由于这个结构系统属于局部型破坏机制,结构的整体抗震能力仍然不好。因此,结构系统的**鲁棒性**、**整体稳定性**和**整体牢固性**是保证结构系统整体抗倒塌能力不可或缺三个方面。

3.2 结构系统的安全储备

虽然建筑结构系统从建成伊始便是作为一个整体而存在的,具有整体性,但在一般常遇荷载(如竖向静力荷载等)作用下,建筑结构系统整体性的作用和意义并未得到充分体现,各个构件都处于正常工作状态,基本如同积木式结构的工作状态。只有在强烈的外界作用下(如罕遇地震等极端灾害),构件与构件之间的相互作用的强烈非线性特征,建筑结构系统的整体性才在保证整个结构系统安全中体现出其意义和价值。

图 11 用结构的侧向荷载-位移曲线表示结构系统在水平地震作用下的行为。图中 B 点为结构系统的宏观屈服点,屈服点前后结构系统的整体刚度发生明显的变化。图中 D 点为倒塌前后的临界点,称为“倒塌点”。倒塌点的定义目前还没有统一的结论,本文从结构整体稳定性角度来定义“倒塌点”,认为在水平作用停止,结构仍能承担其自重作用并恢复一定的弹性变形,即图 11 中 DE 段曲线,则没有倒塌;但如果撤去水平作用,结构在其自重作用下变形进一步加大而无法控制,即图 11 中 DF 段曲线,则结构倒塌。两种状态的临界点即为结构的倒塌点。

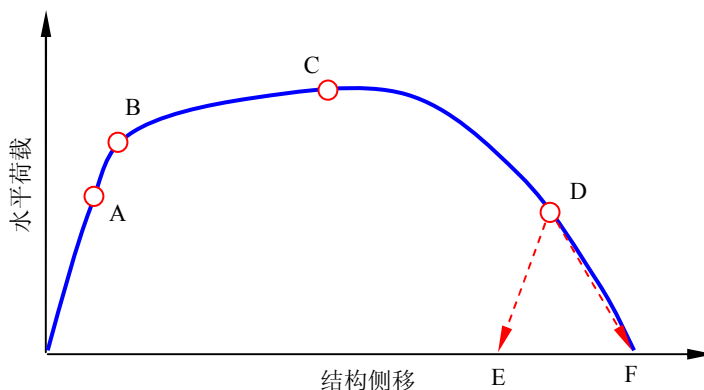


图 11 结构的抗侧行为

在“小震不坏”的设计阶段,为了保证结构不进入屈服,规范考虑到正常情况下可能的各种随机因素与结构安全储备,设定了低于屈服点 B 的“小震设计点”,如图 11 中的 A 点。在这一阶段,结构的安全储备主要由各个构件的承载力安全储备保证,即在数值上等于安全储备最小的构件的承载力安全储备。这种安全储备可以称为结构系统的“**基本承载力安全储备**”,如图 11 中 A 点与 B 点之间的承载力富余程度。其工程意义在于保证结构系统满足正常使用状况下的安全和适用性能需求。

在“大震不倒”的设计阶段,为了保证结构在实际地震中不发生倒塌,应该在倒塌点 D 之前合理设定“大震不倒设计点”,如图 11 中的 C 点。在我国现行规范中,大震不倒设计点 C 点对应于结构弹塑性层间位移要求,比如对 RC 框架和多高层钢结构要求弹塑性层间变形不得超过 1/50。“倒塌点”是客观存在的状态,而大震不倒设计点是考虑安全储备与各种随机因素,按照人为设定的“大震”等级进行设计计算的状态。事实上,从“大震不倒设计点 C”到“倒塌点 D”之间,结构可能并未倒塌,而是破坏的严重程度不同。

结构系统作为一个整体,其屈服表现为系统中的某些构件的屈服甚至破坏,这时整体结构的安全储备既与构件的安全储备相关,但又不完全取决于构件的安全储备,而是取决于取决于结构系统中所有构件在承载力、延性、耗能能力等各个方面储备的合理分布与等级层次。因此,结构系统的安全储备只有在结构系统整体的层次上才能表现出来,称为“**整体安全储备**”,对应于图 11 中 B 点与 C 点之间的富余程度。目前,通过对结构整体进入弹塑性的计算分析,可以得到结构的整体安全储备,目前抗震规范只要求重点工程进行计算,但对一般房屋建筑结构,还需要进一步开展研究,发展简化实用的计算,使得能够把握一般房屋建筑结构的“**整体安全储备**”水平。

当结构遭遇设计时没有考虑的意外作用(如巨震)时,结构状态可能超越 C 点。这时,图 11 中 C 点与 D 点之间的部分对于保证结构不倒塌具有决定性的作用。这部分储备目前难以通过计算手段加以确定,

可以称为“意外安全储备”，主要取决于结构系统的鲁棒性、整体稳定性和整体牢固性，但这方面的研究目前还相当缺乏。

提高房屋建筑的抗倒塌能力，一方面是要合理确定规范中的“大震不倒设计点”C点，如果在规定的大震水平作用下，结构响应不超过C点，则可以保证结构不发生倒塌；另一方面，由于地震发生的高度不确定性，建筑结构有可能遭遇比按规范设定的“大震”等级更大的巨震（比如，这次汶川地震，汶川和北川为7度抗震设防地区，设计大震为8度，却经历了约11度的地震。我国以前几次大地震也是这类情况，如1966邢台地震：设防7度，实际10度；1975海城地震：设防6度，实际9~11度；1976唐山地震：设防6度，实际11度）。因此，在遭遇实际地震情况下，结构状态可能超过大震设计点。这时就需要研究如何使得结构的倒塌临界点D点尽量推迟。

当结构状态超越屈服点B点，接近“大震不倒设计点”C点，甚至超越C点时，结构构件之间非线性作用非常强烈，有些构件已经屈服甚至退出工作，结构整体性对于保证结构系统的功能至关重要。因此在些阶段，应重点研究结构整体性，努力提高结构系统的鲁棒性、稳定性与整体牢固性。另外，在“大震设计点”C点之前，尚可以通过统计方法大体确定随机因素的影响，确定结构的安全储备；一旦超越C点，结构状态与地震作用都将无法统计或无法预计，这种随机性也要考虑。

图12为作者在这次汶川地震调查中收集到不同破坏程度的建筑震害状况。显然，这些建筑震害状况已超过抗震规范的“大震设计点”，有些并未倒塌，而有些则倒塌。尽管超过“大震设计点”可能也会造成一定的人员伤亡，但比彻底倒塌的人员伤亡要小很多。如前所说，“大震设计点”后结构系统的抗震性能主要取决于结构系统的鲁棒性、整体稳定性和整体牢固性，也即结构系统“倒塌点D”与“大震设计点C”之间的“意外安全储备”大小。因此，增强结构系统的鲁棒性、整体稳定性和整体牢固性，是提高结构的抗倒塌能力具的基本思想。



图12 “大震不倒设计点”C点以后不同破坏程度的建筑震害

综上所述，对于一般建筑结构的抗震设计，目前设计规范只明确了基本安全储备，而结构系统的整体安全储备和意外安全储备在概念上尚未明确，相应的工程教育也很缺乏。实际设计中有经验的工程师会凭借其丰富的经验和智慧合理发挥规范的抗震构造措施来实现结构系统的整体安全储备与意外安全储备。但由于规范目前对结构系统的整体安全储备与意外安全储备没有明确规定，大多未引起重视，特别是对于一般房屋建筑，甚至根本不被重视，甚至有些工程师尽量用足规范，不留任何余地，这固然有规范不够完善的地方，但这样的做法实际上是不具备工程师的基本素质的。

在砖混结构中，砖墙是主要承力构件，容易发生脆性破坏，破坏过程不稳定，且承重墙之间的连接容易被忽视，导致结构系统整体牢固性不良。圈梁与构造柱形成的整体受力框架可以为承重墙提供约束与连接，是提高结构系统的鲁棒性、稳定性和整体牢固性，有效提高增加结构意外安全储备的关键。然而，意外安全储备与传统设计中经常关注的基本安全储备分别来自不同的构件，使得砖混结构的整体性容易被设计、施工与管理人忽视，为这类结构在地震中的安全性埋下隐患，成为砖混结构抗震能力不足的最大问题。上文中提到的框架结构在震害中表现出的“强梁弱柱、强弯弱剪”等不良破坏模式，也是基本安全储备与意外安全储备错位的体现。梁、柱的承载力级差，构件弯、剪承载力的级差，都只有在结构进入屈服，

构件发生破坏以后才能体现出来,而在基本安全储备阶段无法体现。可见,现行设计规范与设计理论中在整体安全储备和意外安全储备方面的缺失,是汶川地震中大量房屋倒塌的主要原因之一。下面从三个方面对结构系统的“整体安全储备”和“意外安全储备”进行讨论,以期提高我国建筑结构的整体抗震性能。

4 提高建筑物抗倒塌能力的方法

本文以下分别从完善结构整体安全储备的第二阶段“大震不倒”抗震设计方法,以及从结构抗震体系和结构整体性两方面,对“大震不倒设计点”后增加结构意外安全储备和提高建筑物抗倒塌能力方法进行讨论。

4.1 完善第二阶段抗震设计方法

目前,我国房屋建筑采用三水准抗震设防目标,即“小震不坏,中震可修,大震不倒”,并采用二阶段设计方法予以实现。第一阶段为按小震进行抗震计算设计,这部分已经比较成熟,主要解决结构系统的基本安全储备。但对于第二阶段设计,由于结构抗地震倒塌的计算分析难度很大,目前我国抗震规范只对重要建筑有比较具体的大震验算规定,对一般建筑主要是通过采用合理的结构体系和采取抗震措施实现“大震不倒”。

抗震措施和构造是地震震害研究、试验研究和理论分析的成果。由于大震下结构倒塌问题的复杂性,现有研究成果很有限,目前我国抗震规范关于大震不倒的抗震措施还需要进一步完善,有必要通过总结震害特征、对建筑典型震害的实验再现与理论分析,进一步研究结构抗倒塌的设计方法和具体措施,在抗震规范中给出抗倒塌设计的具体规定。如日本 1981 年后执行的建筑基准法,规定 31m 以上的建筑均需进行按第二阶段进行抗震设计,所采用的方法包括:结构抗震承载力计算方法;极限抗震承载力计算方法;基于能量的计算方法,对于 60m 以上的建筑,则要求采用时程分析方法。可见,日本要求进行第二阶段抗震计算的建筑范围比我国规范大,而且有相应的配套的实用计算方法,便于设计人员具体应用。因此,建议进一步开展建筑结构抗地震倒塌设计方法研究,完善我国规范第二阶段设计方法的具体规定,扩大第二阶段设计的应用范围。

关于第二阶段设计方法,应结合结构抗震倒塌机制分析,开展建筑结构倒塌模式的研究。针对大震下结构整体安全储备目标,应在设计中控制结构的倒塌模式,使之存在不易倒塌的区域(如卫生间和楼梯),尽量保证建筑物内人员可以及时逃离,或为无法及时逃出的人员提供局部生存空间,等待外部人员的救援。

4.2 重视结构体系与选型

合理的结构形式和抗震体系是保证建筑抗震安全的首要因素。本次地震中,结构形式不合理、结构布置不规则,未有效设置圈梁好构造柱的砌体结构,在本次地震中破坏严重,特别是单跨、纵墙承重、外挑走廊的教学楼。这类建筑结构体系的抗震能力先天不足,再加上没有采取起码的抗震构造措施(未设置圈梁、构造柱,楼板没有拉结)和粗糙的施工质量,才酿成如此严重的后果。

根据系统科学方法的思想,结构的抗震能力,首先取决于结构系统的设计,即结构抗震体系的问题,其次是抗震构造措施,最后才是具体的抗震计算的问题。然而,在工程实践中,由于结构抗震体系和结构形式很多,无法简单的用规范条文做出规定,同时我国在建筑结构体系的工程教育方面长期存在一些问题,以至于工程师们只会死抠设计规范,并尽量用足规范的限制,不过分的说,就是尽量钻规范的空子,尽管规范可能存在不完善之处,但作为工程师不能用这种方式去应用规范,而应凭借自己的基本结构概念好对工程负责的态度进行设计(规范也要明确规定,按规范设计不能免除设计者的法律责任)。在这次震害调查中,绵阳市有位会用规范的“大胆”工程师,其设计的 10 多栋建筑中,有 3 栋倒塌,其余破坏严重或较为严重。这暴露出目前“重构件,轻结构”的抗震设计方法的危害。为此,有必要深刻总结地震震害经验,吸取震害教训,强化抗震规范中关于结构体系与选型方面的指导性条文,进一步大力完善我国的建筑规范体系,逐渐改变目前基于构件的规范条文体系和工程教育传统,建立立足于结构系统整体性的思想和规范体系,可以适当参考国外抗震规范中的成功经验,如日本规范通过偏心率和刚度率的具体规定明确了结构体系的要求。

另一方面,我国目前对结构选型和结构方案设计的审查力度还有待改进。建筑抗震设计审查应在重点针对结构抗震体系的合理性审查的基础上进行,而不是仅仅按规范条文逐条审查。调整并健全专业规范与相关法律法规之间的关系,突出规范的专业性与权威性,弱化其法规性。同时,为避免建筑师任意采用复杂不规则的建筑造型,给结构抗震设计造成困难,应规定建筑师和工程师共同对建筑结构安全担负责任。

需要指出的是,近年来我国建筑设计出现的了追求新奇特的趋势,造成大量不利于抗震的极不规则的建筑。建筑界的这种倾向会显著增加建筑抗震设计的难度,也会造成许多隐患。然而,尽管我国大量新奇特建筑不断出炉,但真正在世界上有影响的标志性建筑并不多。相反,美国、日本和西方的许多著名建筑大多不是以新奇特取胜,这一点值得我国建筑师认真反思。

4.3 重视对结构系统整体性的研究

建立基于结构系统整体性的规范体系,就必须从系统科学方法的高度,重视结构系统的整体性、鲁棒性、稳定性和牢固性的研究。而结构系统的整体性、鲁棒性、稳定性和牢固性正是使结构在极端灾害作用下保证安全的基本属性。

结构应被看作是由不同构件有机组织而成,构件与构件之间,构件与结构之间互相依赖、互相影响的一个系统。根据系统科学,安全可靠的构件并不一定意味着安全可靠的结构。当构件之间的组织关系不利结构系统整体性能目标时,结构将表现出易损性,极端的例子便是连续性倒塌,结构局部的破坏迅速扩散并导致与原因不相称的后果。没有圈梁和构造柱的砌体结构恰恰属于这种类型。砌体墙严重缺乏变形能力,容易发生脆性,而砌体墙偏偏又是结构中的主要承重构件。砌体墙某处一旦发生脆性破坏,巨大的内力重分布很容易在结构中引发连续性破坏,进而导致整个结构系统的短时间内连续性垮塌,预制楼板与楼体的不良连接更加剧了整个结构的整体倒塌。

然而另一方面,只要构件组织合理,能够形成有序的受力层次与破坏序列,就可以实现高鲁棒性的结构系统。圈梁、构造柱的重要意义就在于此。它们并不仅能显著提高砖墙的承重能力,更重要的是显著增强了结构的整体性,使之由易损性转变为鲁棒性。圈梁和构造柱通过对砌体墙的有效约束,提高了砖墙的变形能力,延缓了墙体的倒塌,并减小了结构短时间内快速解体的可能性。这种对结构系统抗震能力具有质变的提高,不是通过提高砌体强度和砂浆强度等量变措施可以达到的,它也恰恰体现了结构系统整体性研究的必要性。

从利用结构整体性的角度讲,提高结构抵御灾害的能力并不一定要大幅提高结构的承载力安全储备而导致大幅增加建设成本。恰恰相反,只要深入研究结构系统,合理利用结构系统的整体性,完全可以通过少量的抗震设计或构造措施(如设置构造柱、圈梁、楼板拉结等),显著提高结构的抗震性能。这符合我国乡镇、农村的经济发展水平,这方面的研究值得大力提倡。文献[9]中关于提高我国新疆地区大量存在的土坯房的抗震能力的建议是很好的例子。这次汶川地震中再次暴露出了砌体结构的问题,建议在总结这次震害中表现良好砌体结构的成功做法,吸取破坏严重甚至完全倒塌砌体结构的经验教训的基础上,就如何提高砌体结构的整体性与抗倒塌能力,开展进一步的细致研究,提出可靠的、且切实可行的砌体结构抗倒塌设计方法和构造措施。与此同时,也应加大对其他结构体系的整体性与抗倒塌能力问题的研究投入,为建立基于结构整体系统的规范体系打好基础。实现在巨震下人员可逃的结构不倒的目标。

五、结语

由于“大震不倒”对于减少地震人员伤亡非常重要,本文针对震害中大量房屋严重破损甚至完全倒塌的现象,讨论了提高建筑物抗倒塌能力的设计思想。主要结论如下:

(1) 建筑结构系统的安全储备分为基本安全储备、整体安全储备与意外安全储备三个层次。其中基本安全储备是构件层次的安全储备,整体安全储备和意外安全储备是系统整体层次上的安全储备。现行结构设计规范更多关注的是基本安全储备,而对整体安全储备和意外安全储备缺少明确的要求。

(2) 结构系统在可预计的多遇荷载作用下的安全性可以通过基本安全储备加以保障,而其抵御灾害的能力则依赖于结构系统的整体安全储备和意外安全储备。意外安全储备不足是汶川地震建筑结构震害严重的主要原因之一。

(3) 结构系统的意外安全储备主要来自其鲁棒性、稳定性和整体牢固性。其中整体牢固性是保证结构系统具有整体性的前提,它要求结构构件之间具有恰当而可靠的连接。鲁棒性和稳定性则可以使结构系统趋向于有利的整体性结果。鲁棒性要求结构系统不因局部受损而发生与原因不相称的破坏;稳定性要求结构系统的破坏过程具有多个层次,各个层次能够有效地控制损伤扩散的次序与程度。

(4) 建议从结构第二阶段抗倒塌设计、结构体系和结构系统整体性三个方面进一步开展深入的研究,完善我国现行规范,特别是应加强这方面的工程结构教育,提高我国建筑结构的抗倒塌能力的设计水平。

参考文献

- [1] 孙立群. "各类工程在唐山地震中的破坏规律和震害特征.": 23-27.
- [2] 白良, 叶燎原, 何纪政, 费维水 and 霍俊荣. "澜沧-耿马地震多层砖房的震害及机理简析." 云南工学院学报 5, no. 3 (1989): 35-43.
- [3] 唐丽华 and 尹力峰. "新疆巴楚-伽师 6.8 级地震极灾区砖结构房屋震害特点及分析." 内陆地震 21, no. 3 (2007): 238-43.
- [4] 非明伦, 周光全 and 卢永坤. "2007 年宁洱 6.4 级地震宁洱县城现代建筑典型震害分析." 地震研究 30, no. 4 (2007): 359-63.
- [5] GB50010-2002. 混凝土结构设计规范, 2002.
- [6] 叶列平, 程光煜, 陆新征, 冯鹏: 论建筑结构抗震的鲁棒性, 《建筑结构》, 38, no.6
- [7] Thom, R. 结构稳定性与形态发生学, 四川教育出版社, 成都: 1992
- [8] Ye LP, Qu Z, Failure mechanism and its control of building structures under earthquakes based on structural system concept, The International Symposium on Advances in Urban Safety, Nanjing, China, Oct. 2007, pp150-157
- [9] 阿肯江·托呼提, 亓国庆 and 陈汉清. "新疆南疆地区传统土坯房屋震害及抗震技术措施." 工程抗震与加固改造 30, no. 1 (2008): 82-86.
- [10] 日本建筑基准法, 1981