

文章编号:1673-2049(2012)01-0027-11

结构工程抗倒塌设计研究综述

黄 华^{1,2}, 刘伯权¹, 吴 涛¹, 叶艳霞¹

(1. 长安大学 建筑工程学院, 陕西 西安 710061; 2. 长安大学 公路学院, 陕西 西安 710064)

摘要:分析了地震、爆炸、冲击等造成结构倒塌的原因,指出了倒塌结构在设计、施工等方面存在的问题;归纳了现行规范在抗倒塌设计方面的相关内容,特别指出了中国规范在这方面的不足;总结了现有的破坏准则和抗倒塌设计方法,指出了其中的不足;最后从破坏准则、设计方法、规范修订等多个方面对今后的研究工作做了展望。

关键词:结构工程;抗倒塌设计;破坏准则;抗震设计;地震作用

中图分类号:TU312.3 **文献标志码:**A

Overview of Research on Collapse-resistant Design in Structure Engineering

HUANG Hua^{1,2}, LIU Bo-quan¹, WU Tao¹, YE Yan-xia¹

(1. School of Civil Engineering, Chang'an University, Xi'an 710061, Shaanxi, China;

2. School of Highway, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China)

Abstract: The reasons of collapse of structure under the special loads were analyzed, such as earthquake, blast, impact, and so on. The existing problems in design and construction of the collapsed structures were pointed out. The related contents about the collapse-resistant design of the existing codes were summarized, and the deficiencies of Chinese codes were pointed out in this regard. The existing failure criteria and collapse-resistant design methods were summed up, and their deficiencies were proposed. Finally, the prospects of the future research in collapse analysis were presented from failure criteria, design method and code amendment.

Key words: structure engineering; collapse-resistant design; failure criterion; seismic design; earthquake action

0 引 言

桥梁、建筑等工程结构的破坏和倒塌是导致人员伤亡、财产损失的主要原因,正如美国科罗多大学的一位专家所说,“造成伤亡的是建筑物,而不是地震”。对结构工程进行抗倒塌设计,保证地震、狂风(飓风)、爆炸以及冲击等荷载作用下结构的抗倒塌能力,显得尤为重要。

目前的抗倒塌设计主要分为 2 类:一类是抵抗

地震作用而进行的抗震设计;另一类是为抵抗越来越多的爆炸、冲击等特种荷载和恐怖袭击造成的结构连续性倒塌而进行的设计。前者造成大量人员伤亡和巨大的经济损失^[1]:1976 年中国唐山地震,死亡 24.28 万人,直接经济损失 150 亿美元;1995 年日本阪神地震,死亡 0.63 万人,直接经济损失 1120 亿美元;1999 年中国台湾集集地震,死亡 0.24 万人,直接经济损失 107 亿美元;2008 年中国汶川地震,死亡 6.92 万人,失踪 1.74 万人,直接经济损失

收稿日期:2011-11-18

基金项目:国家自然科学基金项目(51078037);教育部高等学校博士学科点专项科研基金项目(20090205120008);

中央高校基本科研业务费专项资金项目(CHD2012JC026)

作者简介:黄 华(1979-),男,江苏常州人,副教授,工学博士,博士后,E-mail:hhua@chd.edu.cn。

1.1 万亿人民币。后者与前者相比,同样会造成生命和财产损失,并产生重大社会影响,甚至引起社会恐慌:2001 年美国世贸大厦因恐怖袭击而倒塌,死亡和失踪 3 225 人,直接经济损失 450 亿美元;1996 年中国湖南邵阳“1·31”特大爆炸事件造成 605 间房屋倒塌,死亡 134 人,直接经济损失 1 960 万人民币;2001 年中国石家庄特大连环爆炸事件造成约几千平方米住宅楼损毁,108 人死亡。各国虽然在结构设计中都强调要保证结构的整体性,避免倒塌事件的发生,但各种灾害多次证明,如何有效防止结构物在遭受意外荷载,如地震、爆炸、冲击等作用下发生倒塌仍是一个亟待解决的问题。

1 结构倒塌的类型及特点

1.1 地震作用下的结构物倒塌

1.1.1 砌体结构

砌体结构倒塌如图 1 所示。根据最近一次的中国汶川地震统计,砌体结构在地震作用下的倒塌主要原因是震区抗震设防烈度为 7 度,远小于实际地震烈度,在 8 度、9 度区的倒塌率达到 50%~80%;其次是结构设计不合理,部分结构没有设置构造柱和圈梁[图 1(a)],但也有相当部分设置构造柱和圈梁[图 1(b),(c)]的结构发生倒塌,这就需要重新审视构造柱和圈梁的配筋情况能否满足“大震不倒”的要求;再次是由于结构层间刚度差异过大,导致低刚度层坍塌[如图 1(c)],而其他层完好,如何合理把握结构层间刚度再次成为研究重点;最后是材料和施工问题,部分倒塌结构采用的卵石、砂浆标号偏低,预制空心板连接锚固不到位;此外,还有局部坍塌,特别是弧形墙体、转角部位,对这些部位的构造及合理设计须进行专门研究。

1.1.2 混凝土结构

混凝土结构倒塌如图 2~4 所示。根据多次地震统计,混凝土结构倒塌最主要的原因在于对地震设防烈度的把握不准,实际地震烈度甚至远远超过地震区的设防烈度;其次是层间刚度比不合理,导致低刚度层破坏而倒塌。典型破坏如图 3 所示,由于日本较早的规范允许较弱的上部结构从 5 层以上开始,从而出现了高层建筑在中间层垮塌的现象,由图 2(c)可见,柱铰机制出现在二层也是由于其自身刚度较小。对导致层间刚度比不合理的因素需要进行研究并重新审视规范关于薄弱层规定的合理性。再次,大量框架结构没有实现“强柱弱梁”的破坏机制,而是柱首先出现铰而发生破坏,最终发展为倒塌,典



(a) 楼梯间倒塌



(b) 多层砌体结构倒塌



(c) 底框结构倒塌

图 1 汶川地震砌体结构倒塌

Fig. 1 Collapses of Masonry Structures in Wenchuan Earthquake

型的破坏如图 2(c)所示。刘伯权^[2]在 1994 年即指出:实际工程几乎无法实现“强柱弱梁”。因此对导致“强梁弱柱”的机理需要进一步研究,或寻求其他途径延迟柱较出现的时间,避免人员疏散之前出现倒塌。

1.1.3 钢及钢-混组合结构

钢结构破坏如图 5~6 所示。钢结构在地震中的表现较好,中国汶川地震调查统计表明,轻钢结构、钢-桁架拱等结构地震后可直接使用的占 57%,加固后可使用的占 43%^[3]。地震作用下某些构件发生断裂是存在的,尤其日本阪神地震中某高层住



(a) 某框架结构底层坍塌



(b) 某框架结构完全坍塌



(c) 某框架柱二层铰机制破坏

图 2 汶川地震混凝土结构倒塌

Fig. 2 Collapses of Concrete Structures in Wenchuan Earthquake

宅钢柱出现脆断,如图 6 所示。该结构设计时预期的破坏顺序是支撑、梁、柱,而实际破坏顺序恰好相反,钢柱首先破坏,并导致支撑和钢梁的破坏,有 53 根钢柱破坏,而仅有 6 处支撑和 16 处钢梁破坏。由此可以看出,钢结构中同样存在“强梁弱柱”的情况,同时节点处是焊缝密集处,应力集中现象明显,设计中如何避免此问题值得探讨。

1.2 爆炸、冲击荷载作用下的连续倒塌

建筑物在爆炸、冲击等特种荷载作用下发生连续性倒塌的事故近年来不断增多。图 7 为天然气爆



图 3 阪神地震某结构第 6 层破坏跨塌
Fig. 3 Collapse of the Sixth-story Structure in Kobe Earthquake



图 4 集集地震某结构底层破坏倒塌
Fig. 4 Collapse of Bottom Frame Structure in Chi-Chi Earthquake



图 5 汶川地震某钢结构断裂

Fig. 5 Rupture of Steel Structure in Wenchuan Earthquake
炸、汽车炸弹袭击以及飞机撞击等导致的局部坍塌或整体倒塌。当这些特种荷载作用到结构物上某一关键构件并致其损坏后,建筑物上部荷载传力途径发生改变,其余构件不能有效替代原构件承受传递过来的荷载时便发生连续坍塌。

1.3 2 类倒塌之间的区别与联系

地震作用下结构物的倒塌主要是在水平力作用下的破坏,倒塌过程中远不止形成一两个机构,而是同时出现多个,甚至是整层柱或其他抗侧力构件全



图 6 阪神地震某结构钢柱断裂

Fig. 6 Rupture of Steel Column of Certain Structure in Kobe Earthquake

部破坏。随着机构的形成,结构内力发生重分布,某些构件卸载,而另一些构件过载、失效,最终形成连锁反应,结构整体或局部倒塌。

连续性倒塌则是由局部的构件在爆炸、冲击等特种荷载作用下发生失效,导致周围的构件在结构重力作用下发生内力重分布而失效,从而导致连续性破坏。用美国《房屋及其他建筑最小设计荷载规范》(ASCE/SEI 7-05)^[4]的定义来说,就是初始的局部单元破坏向其他单元扩展,最终导致结构整体性的或大范围区域的倒塌。

地震作用下结构的倒塌可能伴随着连续性倒塌而发生,但反之不成立。Bilow 等^[5]认为抗震设计对提高结构的抗倒塌能力具有明显作用,甚至认为按最高抗震设计要求设计的结构满足相关规范的要求;Powell^[6]持不同意见,认为抗震设计对结构连续倒塌存在有益作用,但不能取代抗连续倒塌设计。

2 抗倒塌设计的基本原则

2.1 地震作用下的抗倒塌计算

2.1.1 日本规范

日本现行规范 BSL 2009^[7]是在总结 1995 年阪神地震教训和《81 规范》基础上修订而成,近几年的地震灾害表明,新规范的执行对降低地震灾害的损失是有成效的。

BSL 2009 采用“两水准”设防,“两阶段”设计。第一水准为中震,指建筑寿命期间内可能发生几次的地震,其地面地震加速度最大值约为 $0.08g \sim 0.19g$ 。该水准下,应保证结构几乎不发生破坏(非结构构件允许有不危及生命安全的适度破坏)。第二水准为强震,指在建筑物寿命期间可能发生一次的强烈地震,其地面地震加速度最大值可达 $0.3g \sim 0.49g$ 。该水准下,应保证结构不发生倒塌或不产



(a) 英国罗兰公寓天然气爆炸导致的破坏



(b) 美国Murrah大楼遭汽车炸弹袭击坍塌



(c) 美国世贸大楼遭袭坍塌

图 7 爆炸导致连续性坍塌

Fig. 7 Progressive Collapses Caused by Explosion

生致人伤亡的破坏。日本规范中没有明确规定设防烈度和建筑使用功能的重要性,而是直接通过标准基底剪力系数和地震区域系数反映抗震设防标准。两阶段设计中的第 1 阶段采用容许应力法计算;第 2 阶段通过对侧向荷载作用下极限承载力(结构的实际强度)进行验算,并确保结构变形在其延性承载力范围之内。

日本规范通过考虑不同区域地震的大小、结构质量分布、自振周期与土的类型等,直接规定各楼层地震剪力,并考虑建筑物上部结构和下部结构振动特性的不同,分别给出了地震剪力的计算公式。但对竖向地震作用的计算以及何时考虑竖向地震作用没有明确的规定。

2.1.2 美国规范

美国拥有较完整的抗震设防技术法规、技术规范或技术标准,IBC 2000^[8]是目前美国建筑抗震设计中应用最广的抗震规范,反映了美国抗震设计的科学技术水平。随着这些标准的执行,地震损失得到大幅降低,如 2001 年美国西雅图 7 级地震,没有造成一间房屋倒塌和一个人员死亡。

美国规范的抗震设计以“主要为防止地震下建筑物失效与生命损失提供安全保障”为设防目标,通过地震作用计算与抗震措施保证该目标的实现。它以单一水准下的“大震”(50 年超越概率为 2% 的地震)作为代表,在进行实际设计时用 2/3 的系数将其折减为接近于“中震”的设计地震(50 年超越概率为 10% 的地震),再选择结构的不同延性等级来满足其抵抗各种水准地震的要求,达到同时控制地震作用与结构塑性耗能能力的目的。计算的特殊性在于既考虑建筑体系类型,又考虑结构抗震措施所能提供的延性保证。计算过程中首先确定结构类型和延性等级,进而确定反应修正系数的取值,然后用它将弹性反应谱调整为弹塑性反应谱,以此作为动力计算的基础。对地震持时的影响,美国规范还通过调整地震强度和频谱来考虑。

美国规范在确定地震作用时,采用了美国地质调查所颁布的以特定场地类型为基准的地震灾害图。它的地震参数对应于 50 年超越概率为 2% 的“大震”,并通过调整地震强度和频谱来反映地震作用持续时间的影响。并且美国规范要求对所有进行地震作用计算的结构都必须考虑竖向地震作用。

2.1.3 中国规范

中国规范^[9]的抗震设计主要是依据“小震不坏,中震可修,大震不倒”的设防目标进行抗震设防,采用两阶段设计方法进行地震作用下的计算。其中小震、中震和大震分别为小于、等于和大于当地地震设防烈度的地震,称为众值烈度、基本烈度和罕遇烈度,50 年内的超越概率分别为 63%,10%,2%~3%,即重现期为 50,475,2 475~1 641 年。两阶段设计首先要求在小震下进行弹性承载力验算和弹性层间变形验算,以保证结构的强度,并按规范规定采

取抗震措施,达到“小震不坏、中震可修”的目的(第 1 阶段设计);其次,为满足“大震不倒”,还需要进行结构的弹塑性变形验算,以控制结构变形,保证结构的抗倒塌性能(第 2 阶段设计)。中国抗震计算方法与美国、日本大致相同,主要有静力理论的底部剪力法、动力理论的振型分解反应谱法和时程分析法,依据结构类型、布置形式、建筑高度等因素而分别采用,以发挥各自的优势。

中国规范、美国规范和日本规范均要求对地震作用下的建筑物倒塌进行控制,达到“大震不倒”的目的。中国规范依据各地抗震设防烈度来选取地震加速度,而日本、美国规范等直接采用地震动参数来反映设计地震作用则更为合理,可以避免长期把衡量地震灾害后果的综合尺度与新建工程的抗震设计指标混为一谈。历次地震的实际烈度与设防烈度的差异也说明以地震烈度作为设防指标是不合理的。如中国汶川抗震设防烈度为 7 度,而震中区域实际烈度为 9~11 度,远远超过设防烈度。如何选取合理的设防指标值得思考。

与日本规范相比,中国规范第 2 阶段设计仅对重要建筑有比较具体的计算规定,而一般建筑仅通过构造措施来实现“大震不倒”,进一步扩大第 2 阶段抗震计算的范围和建立简单实用的第 2 阶段计算方法应该是下一步改进规范的努力方向。

中国规范仅对 9 度时的高层建筑和 8,9 度时的大跨度与长悬臂结构规定考虑竖向地震作用效应,这与美国规范对所有抗震设计的建筑都要求考虑竖向地震作用是不同的。中国汶川地震造成的破坏(图 8)再次表明:竖向地震作用的影响不可忽视;地震来临时,结构物处于多维地震作用之下,破坏机理与单一方向地震力作用有所区别。

中国规范对地震持时的影响仅在重要结构采用时程分析法进行分析时才给予考虑,这与美国规范存在显著差异,并且考虑的地震动持续时间短。中国汶川地震的一个重要特征就是地震动持续时间长,从四川松潘地震监测台站记录发现,地震动最长持时接近 300 s,其中较大峰值的持时亦在 150 s 左右,其结果是结构经历了一个长持时的低周往复荷载运动,结构累积损伤明显^[10]。因此,需要在现有成果基础上研究地震持时的影响,以反映地震动特征三要素对结构地震作用的真实响应。

2.2 规范关于结构的抗连续倒塌计算

对结构物抗连续倒塌的研究最早开始于英国,目前欧美主要国家的规范中均提出了改善结构抗连



图 8 竖向地震作用影响

Fig. 8 Influences of Vertical Earthquake Actions

续倒塌能力的规定,如英国规范 BS 8110-1:1997^[11]、欧洲规范 EN 1991-1-7:2006^[12]等,其中尤以美国规范 GSA 2003^[13]和 UFC 4-023-03^[14]最为详细,前者由美国公共事务管理局编制,后者由美国国防部编制,对抗连续倒塌要求较前者高。这 2 个规范系统地阐述了结构连续性倒塌的概念、设计方法、设计过程以及分析流程,并建议了一些可供采纳的概念性设计措施来提高建筑物抗连续倒塌的能力。

目前,常用的抗连续倒塌设计方法包括直接方法和间接方法 2 种。直接方法针对明确的结构破坏或荷载进行设计和验算,包括变换荷载路径法和抵抗局部破坏法。前者要求结构发生局部破坏以后,破坏部位周边的构件可以有效地分担并传递破坏部分原来承担的荷载从而保证结构的整体性,该方法是国际上大部分规范均采用方法;后者要求结构的一部分或某个构件可以直接抵抗特定的非常规荷载而不发生破坏。间接方法从提高结构的连续性、冗余度、延性等方面入手,采取一定的措施来实现抵抗连续性倒塌,包括联系力方法以及综合措施方法。直接方法的核心思想是荷载传递路径的连续性以及完整性,它要求结构在竖向以及水平向能够有效地传递荷载;间接方法通过结构布局、楼板传力方式、结构的延性细节以及混凝土截面受拉侧钢筋布置等方法来提高结构抵抗连续性倒塌的能力。

对于建筑物抗连续性倒塌,中国尚没有明确规

定,只是在《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2002)中指出:结构应具有整体稳定性,结构的局部破坏不应导致大范围倒塌。陆新征等^[15]认为中国钢筋混凝土多层框架结构的抗连续倒塌能力存在不足,并对国外部分抗倒塌设计方法进行了设计验证,结果表明,国外部分抗倒塌设计并不完全适用于中国结构的设计,如何借鉴国外规范建立适用于中国结构抗连续倒塌设计的规范是当前必须研究的问题之一。此外,中国进行抗震设计的建筑能否抵抗爆炸等荷载作用下结构的连续性倒塌同样需要进行专门研究。

3 抗倒塌设计理论

3.1 破坏准则

破坏准则是进行倒塌分析的前提,目前按层次分,有材料层次(如应力、应变等)、构件层次、结构层次;按类型分,有强度准则、变形准则、机构准则、稳定准则、疲劳破坏准则、能量准则、变形/能量双重准则、等效延性破坏准则等。

3.1.1 强度准则和变形准则

强度准则认为最大应力或内力大于允许值时发生破坏,适用于脆性破坏的情况,对于延性破坏则不能很好地反映结构破坏后的情况。变形准则认为应变或变形(如位移、转角等)大于允许值时发生破坏,适用于延性破坏的情况。日本、美国、中国的抗震规

范都是通过强度计算和变形验算来保证结构的承载力和变形性能。虽然目前结构的弹塑性反应以结构的整体变形超过给定的限值或结构主要承重构件破坏作为结构的破坏标准,如中国规范规定钢筋混凝土框架弹塑性层间位移不能超过 $1/50$,但汶川地震实际观察发现部分框架结构层间位移达到 $1/20$ 而未倒塌。事实上,有些结构可能会发生很大的变形,它只是影响结构的安全性、耐久性等,并不至于发生倒塌破坏。

3.1.2 机构准则和稳定准则

机构和稳定准则主要用于结构或构件层次。当结构出现足够多的塑性铰时就可能使结构或构件成为机构而发生破坏。倪强等^[16]认为地震中柱子出现塑性铰是不可避免的,但不能用塑性铰的方式来判断倒塌,同时提出以形成机械铰机构来判定结构是否发生破坏。但实际地震表明钢筋混凝土结构形成机械铰机构的情况很少,而且在结构倒塌中同时有节点剪切破坏、柱端混凝土严重压碎、钢筋严重压曲、柱端出现断裂、错位等现象,如图 2,8 所示。因此,以机械铰机构的出现来判断结构倒塌存在不足。稳定准则认为结构或构件发生局部或整体失稳时破坏产生。对于高层混凝土结构,重力作用下发生局部或整体失稳是抗倒塌分析的一个根本问题,而水平荷载(地震作用、风荷载等)作用下结构产生过大位移,就必须考虑荷载-变形效应及相关影响因素。

3.1.3 疲劳破坏准则、能量准则及变形/能量双重准则

结构在动力作用下的破坏常用疲劳破坏准则、能量准则及变形/能量双重准则来衡量,其中变形/能量双重准则是在强度准则、变形准则和能量准则不能准确描述首超破坏及累积损伤作用相互影响的基础上提出的,该准则认为结构的破坏是由变形和能量累积消耗 2 个方面造成的,最具代表性的是 Park 等^[17]提出的规格化最大位移与规格化滞回耗能线性组合。但将变形和累积耗能用某种线性的关系联系在一起有着本质的不足:一方面构件吸收能量是不稳定的,受加载方式、路径等多种因素影响,并不是完全的线性关系;另一方面,它不能正确反映构件极限耗能随幅值的变化情况。

3.1.4 等效延性破坏准则

等效延性破坏准则^[18]将结构由大位移脉冲引起的首超破坏与弹塑性变形的循环作用引起的累积损伤破坏进行了统一。该准则的特点是考虑了结构低周疲劳特性引起的累积损伤,并与工程界熟悉的

延性指标衔接,从而有利于在实际设计中使用。等效延性破坏该准则得到了 3 个钢筋混凝土柱的试验检验。同时基于该准则发展了多层建筑考虑低周疲劳特性的抗倒塌验算使用方法^[19],弥补了运用该准则需要进行结构弹塑性时程反应分析的不足。等效延性破坏准则是基于构件层次的破坏准则,如何将构件损伤进行组合研究,为结构层次的地震损伤服务是下一步需要考虑的问题。同时,该准则基于钢筋混凝土柱的低周疲劳试验,尚未推广至面大量广的框剪结构、剪力墙结构。

近年来,各国学者一直在寻找以模型试验数据为基础的结构整体损伤评估方法。通过研究结构动力特征的变化进行损伤的量化评估,其中基于频率的结构损伤评估方法引人注目^[20]。原因主要在于频率既是最易测得的,也是当前技术测得最准的结构动力特征。计算机科学和结构动力参数识别技术的发展,使得准确获得结构的刚度参数及其变化规律、从结构的本质(结构自振频率的变化)来描述结构刚度的退化和结构损伤、揭示结构破坏机理成为可能。

3.2 抗震设计方法

建筑抗震设计理论从最初的静力阶段和反应谱阶段,发展到动力阶段及目前的基于性能的抗震设计理论阶段。

3.2.1 静力理论

静力理论是指估计地震力时,不考虑地震的动力特性和结构的动力性质(变形和阻尼),假定结构为刚性,地震力水平作用在结构或构件的质量中心上,其大小相当于结构的质量乘以一个比例常数。在静力理论中,输入的地震动以历史震害估计的地震动最大加速度为依据,采用沿高度分布的假定质量和加速度,不需要建立结构动力模型进行动力反应分析,设计原则也只是采用静力的允许应力,是一种经过极大简化的设计方法。

3.2.2 反应谱理论

反应谱理论考虑质点的地震反应加速度相对于地面运动加速度具有放大作用,采用动力方法计算质点的地震反应,建立与自振周期有关的速度、加速度和位移反应谱;再根据加速度反应谱计算出结构地震作用,然后按弹性方法计算出结构的内力,根据内力组合进行截面承载力设计。反应谱理论虽然考虑了结构物的动力特性(自振周期、振型和阻尼)所产生的共振效应,但在设计中仍然把地震惯性力看作是静力,因而只能称为准动力理论。在按弹性方

法计算的基础上,各国结合构造措施来考虑结构进入弹塑性阶段的性能。

3.2.3 动力时程理论

动力时程法把地震作为一个时间过程,选择有代表性的地震加速度时程作为地震动输入,建筑物简化为多自由度体系,并选择恰当的结构恢复力模型,直接对动力方程进行积分,计算得到每一时刻建筑物的地震反应,从而完成抗震设计工作。该方法较复杂,工作量大,在地震波选取、恢复力模型选取、结构计算模型选取等方面存在不足,中国规范仅将弹性时程分析方法规定为常遇地震作用下振型分解反应谱法的一种补充计算方法,对特别重要的建筑,可取多条时程曲线计算结果的平均值与振型分解反应谱法计算结果的较大值作为抗震设计依据。

3.2.4 基于性能的抗震设计理论

现行建筑抗震设计规范中提出“大震不倒”是通过避免建筑倒塌而不危及人的生命安全为基本目标进行抗震设防的。但地震所造成的经济损失,即使用功能丧失而震后恢复重建所需费用或所花费的时间可能大大超过社会和业主所能承受的限度。从唐山地震、阪神地震、集集地震以及最近一次的汶川地震可以看出,现行规范仅以保证人的生命安全为目标的抗震设防,在设计理念和适应社会需求等方面都存在的问题,应根据社会和业主对建筑抗震性能的多层次要求,使所设计的建筑在地震中不仅要能够抵御倒塌,还必须能够减少经济损失。因此,基于性能的抗震设计(Performance Based Seismic Design, PBSD)于 20 世纪 90 年代以后逐步兴起^[21]。

基于性能的抗震设计的主要思想是使抗震设计从宏观定性的目标向具体量化的多重目标过渡,业主和设计者可选择所需的性能目标;抗震设计中更强调实施性能目标的深入分析和论证,更有利于建筑结构的创新,经过论证(包括试验)可以采用非现行规范规定的新的结构体系、新技术、新材料;有利于针对不同抗震设防要求、场地条件以及建筑的重要性,采用不同的性能目标和抗震措施,它具有多级性、全面性、灵活性的特点。基于性能的抗震设计已成为近几年美国、日本和新西兰等国家在结构抗震方面的主要研究课题,并且美国洛杉矶和旧金山分别于 2005 年和 2007 年率先颁布基于性能的高层建筑抗震设计规范^[22-23],步入了基于性能的高层建筑抗震设计阶段。

当前,各国结构工程和地震工程界学者对基于性能的抗震设计开展的研究工作主要集中于:

(1)多级性能水准的确定与统一:生命安全水准、结构损伤水准和确保使用功能水准为当前规范普遍接受的三级性能水准。生命安全水准要求建筑在罕遇地震作用下不倒塌;结构损伤水准要求建筑损伤控制在可修复的范围内;确保使用功能水准要求结构不产生影响建筑直接使用的变形等。基于性能的抗震设计要求细化这三级性能水准并建立相应的结构设计准则。

(2)多级地震设防水准的确定与统一:当前规范普遍采用三级性能水准所对应的最高设防水准,在建筑使用期内遭遇一次地震危险的水准和可能遭受多次地震危险的三级地震设防水准。基于性能的抗震设计同样要求细化这三级地震设防水准。

(3)可行的结构设计与分析方法:基于性能的抗震设计要求建立适合在多级水准地震作用下实现多级性能水准的结构设计与分析方法。

(4)结构安全性评估方法的完善:由静力推覆分析方法和能力谱分析方法结合形成的静力弹塑性方法被普遍用来评估罕遇地震作用下建筑的抗震性能。

3.3 抗连续倒塌设计方法

结构抗连续倒塌设计与抗震设计和一般结构设计明显不同,主要是考虑因爆炸、冲击等意外事件导致部分构件失效退出工作后,剩余结构的抗倒塌能力及结构的设计目标、设计方法、计算模型有其自身特点。目前主要的设计方法有概念设计、拉结强度设计和拆除构件设计。

3.3.1 概念设计

概念设计主要从结构的整体性、延性、冗余度和构造措施等方面来加强结构的性能,使结构能跨越初始的局部破坏而不向外扩展,保证结构各部分在极限状态下“抱成一团”。主要通过合理的结构方案和结构布置,避免存在可能引发连续性倒塌的薄弱部位;加强构件间的连接构造,增强结构的整体性和连续性;增加结构的冗余度,使结构具有多个荷载传递路径及其传递能力;采用延性构造措施,使可能发生失效破坏的部位具有足够的延性;采用连续性配筋,使楼板和梁在达到承载力极限状态时能够发挥悬链线作用;墙和柱能承受一定的横向荷载。概念设计的缺点是难以量化,依赖于设计人员的水平和经验。

3.3.2 拉结强度设计

拉结强度设计是通过对接件和连接的抗拉强度进行设计,来满足最低抗拉强度要求,同时保证各相

连构件形成的传力路径是直线的和连续的。拉结强度设计主要通过梁、楼板等构件形成静定悬链线构件;通过上下连续贯通的柱子承担竖向拉力。拉结强度设计简便易行,无需对整个结构进行受力分析,但由于计算模型过于简化,其参数的经验性成分较多,对于复杂结构的可靠性和经济性也存在着一定问题。

3.3.3 拆除构件设计

拆除构件设计又称为替代路径设计法(AP法)。该法将结构中的部分构件拆除,分析结构在原有荷载作用下发生的内力重分布,判断结构是否会发生连续倒塌。如果结构发生连续倒塌,则通过增强拆除后的剩余构件来避免连续倒塌,这种方法的实质是增强结构的冗余度,提供有效的备用传力路径。分析时需要考虑材料特性、荷载取值与组合、可能初始破坏的构件、构件的极限承载能力或变形能力、可接受的破坏程度等基本问题。对于无法找到替代路径的构件,将其视为关键构件,通过保证其具有足够的强度来抵御意外荷载的作用。

对于抗连续倒塌设计,目前需要着重解决以下几个问题:部分规范中给出了关键构件的部位,但仅仅是针对简单规则的结构,而目前很多受到汽车炸弹袭击的建筑结构均比较复杂,因此这类建筑的关键构件如何确定,其简化方法如何建立;连续倒塌建筑如何考虑其性能问题,针对结构性能进行抗倒塌设计的方法如何建立;抗震设计建筑的抗连续倒塌能力如何鉴定。

4 需要解决的问题

4.1 建筑物薄弱层的确定

汶川地震倒塌建筑很大一部分是由于结构存在薄弱层,比较典型的是框架结构底层无填充墙和维护墙,直接形成薄弱层,但现行规范在设计中不考虑填充墙对结构刚度的影响,从而人为造成了设计上不存在而实际存在的薄弱层;另外,对于存在转换层的结构,如底框结构在转换层处发生破坏。针对薄弱层结构的研究需要从以下 3 个方面进行:

(1)对框架结构填充墙的刚度进行研究,分析其对结构抗震性能的影响和对结构抗侧刚度的贡献,建立薄弱层结构刚度计算方法。

(2)研究填充墙与主体结构之间的可靠连接方式,开发节能环保的新型填充墙结构。

(3)对转换层刚度突变问题进行研究,充分考虑各种影响因素,分析地震作用下发生破坏的作用机理,建立合理的刚度计算方法。

4.2 “强柱弱梁”机制

汶川地震再次证明现行规范无法保证“强柱弱梁”机制的实现,因此需要进一步研究以下 4 个问题:

(1)当前仅通过框架梁刚度放大系数来调整楼板对其刚度的贡献存在不足,需要综合考虑各种因素的影响,合理调整框架梁刚度。

(2)结构跨度增大使得框架梁截面尺寸很大,而造成梁自身刚度很大,应研究柱梁刚度比对“强柱弱梁”机制的影响。

(3)对框架梁弯矩调幅系数、柱端弯矩放大系数进行研究,综合考虑各种影响因素,确定更为合理的系数取值。

(4)研究合理的构造措施,延缓柱铰出现的时间,避免人员疏散之前出现倒塌。

4.3 地震作用的计算

中国规范与国外规范相比,地震作用取值偏低,且依据抗震设防烈度取值,竖向地震作用考虑范围较小,针对此问题需要进行以下 3 个方面的研究:

(1)中国规范中地震作用的取值依据各地抗震设防烈度来选取地震加速度,而实际地震的烈度与抗震设防烈度差异明显,如何建立考虑场地条件、建筑结构、历史地震等因素的科学合理的抗震设防烈度值得探讨。

(2)针对实际地震烈度与抗震设防烈度差异很大的问题,寻求以地震烈度区划为参考,依据建筑物重要性划分合理的安全等级,由安全等级确定设防标准的新的抗震设防体系。

(3)地震震害多次表明竖向地震作用不可忽视^[24-25]。美国规范对抗震设计的建筑均考虑竖向地震作用,针对中国规范,需要研究考虑扩大竖向地震作用的计算范围以及合适的简化计算方法、构造措施。

4.4 规范第 2 阶段抗震设计

“大震不倒”主要通过第 2 阶段的设计来保证,这就需要针对以下 2 个问题展开进一步的研究:

(1)中国规范与日本规范相比,需要进行第 2 阶段设计的建筑范围很小,考虑经济合理地增大第 2 阶段抗震设计的范围。

(2)日本规范在第 2 阶段抗震设计时采用结构抗震承载力计算方法、结构抗震极限承载力计算方法、基于能量的计算方法、时程分析法等,而中国规范存在欠缺,需要建立和完善第 2 阶段抗震设计实用计算方法。

4.5 等效延性破坏准则

等效延性破坏准则考虑了结构低周疲劳特性引

起的累积损伤,与工程界熟悉的延性指标衔接,且发展了多层建筑考虑低周疲劳特性的抗倒塌验算使用方法,具有一定的优越性。对等效延性破坏准则的进一步发展主要需要考虑以下 3 个方面:

(1)该准则考虑了结构低周疲劳特性引起的累积损伤,但不能够准确描述结构最大位移与累积损伤破坏界限的相互影响以及构件延性随地震幅值的影响。

(2)该准则是基于构件层次的破坏准则,如何将构件损伤组合研究,为结构层次的地震损伤服务是下一步需要考虑的问题。

(3)该准则基于钢筋混凝土柱的低周疲劳试验,尚未推广至面大量广的框剪结构、剪力墙结构。

4.6 基于性能的抗震设计

基于性能的抗震设计是未来抗震设计发展的主要方向,针对其发展中存在的问题,可从以下 4 个方面进行研究:

(1)针对美国已执行的基于性能的高层建筑抗震设计规范,研究适合于中国国情的基于性能的高层建筑抗震设计规范。

(2)发展适合于多级地震设防水准下多级性能水准的效率高而有效的一般设计方法,及与此对应的结构性能水准、相应的结构损伤状态和结构设计准则。

(3)研究如何采用特定的损伤状态来度量特定的地震设防水准,建立位移和损伤之间的定量关系、多级损伤量化指标、结构使用功能丧失和损伤之间的定量关系、建筑内部设备性能发挥与损伤指标的关系。

(4)开展基于性能的结构抗震控制研究,集合现代控制技术,建立基于位移或损伤的结构抗震控制方法。

4.7 抗连续倒塌设计

当前各种突发事件使结构抗连续倒塌设计变得非常迫切,而中国对此类问题的研究尚处于起步阶段,需要开展的研究工作很多。

(1)借鉴国外规范关于抗倒塌设计方法,研究适用于中国国情的设计方法。

(2)研究抗震设计与抗倒塌设计之间的相互关系及通用性问题。

4.8 地震作用下结构损伤识别、剩余寿命预测、健康监控研究

中国汶川地震造成大量房屋破坏、损毁和倒塌。对于受到破坏但尚具有维修使用价值的房屋如何进

行快速评估、损伤部位和程度识别、估算其在反复地震作用下的剩余寿命、重大结构的健康监控等是迫切需要解决的问题。

5 结 语

结构抗倒塌问题是目前各国工程结构研究的热点,笔者结合历次地震和恐怖袭击,特别是中国汶川地震,阐述了抗倒塌设计方面存在的问题和研究中的不足,指出了下一步需要关注的主要问题。

参考文献:

References:

- [1] 叶耀先. 房屋建筑震害启示[J]. 住宅产业, 2008(6): 40-45.
YE Yao-xian. Lessons Learnt from Building Damages in Earthquake[J]. Housing Industry, 2008(6): 40-45.
- [2] 刘伯权. 关于钢筋混凝土框架抗震设计的几个问题[J]. 西北建筑工程学院学报, 1994(1): 1-3.
LIU Bo-quan. About a Few Problems in a Seismic Design of Reinforced Concrete Frames[J]. Journal of Northwest Institute of Architectural Engineering, 1994(1): 1-3.
- [3] 清华大学、西南交通大学、北京交通大学土木工程结构专家组. 汶川地震建筑震害分析[J]. 建筑结构学报, 2008, 29(4): 1-9.
Civil and Structural Groups of Tsinghua University, Southwest Jiaotong University, Beijing Jiaotong University. Analysis on Seismic Damage of Buildings in the Wenchuan Earthquake[J]. Journal of Building Structures, 2008, 29(4): 1-9.
- [4] ASCE/SEI 7-05, Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures[S].
- [5] BILOW D N, KAMARA M. U. S. General Services Administration Progressive Collapse Design Guidelines Applied to Concrete Moment-resisting Frame Buildings[C]//BLANDFORD G E. Proceedings of the 2004 Structures Congress. Reston: ASCE, 2004: 1-6.
- [6] POWELL G. Progressive Collapse; Case Studies Using Nonlinear Analysis[C]//ASCE. Proceedings of the 2005 Structures Congress and 2005 Forensic Engineering Symposium. Monterey: ASCE, 2005: 1-7.
- [7] BSL 2009, The Building Standard Law of Japan[S].
- [8] IBC 2000, International Building Code 2000[S].
- [9] GB 50011—2001, 建筑抗震设计规范[S].
GB 50011—2001, Code for Seismic Design of Buildings[S].

- [10] 滕 军,李祚华,和雪峰.基于汶川震害分析的强地震作用下结构地震累积损伤研究[J].工程抗震与加固改造,2008,30(6):7-12,23.
TENG Jun, LI Zuo-hua, HE Xue-feng. Study on Cumulative Damage of Structure Under Strong Earthquake Excitation Based on Wenchuan Earthquake Analysis[J]. Earthquake Resistant Engineering and Retrofitting, 2008, 30(6): 7-12, 23.
- [11] BS 8110-1;1997, Structural Use of Concrete—Part 1: Code of Practice for Design and Construction[S].
- [12] EN 1991-1-7; 2006, Eurocode 1: Actions on Structures. Part 1-7: General Actions—Accidental Actions [S].
- [13] GSA 2003, Progressive Collapse Analysis and Design Guidelines for New Federal Office Buildings and Major Modernization Projects[S].
- [14] UFC 4-023-03, Design of Buildings to Resist Progressive Collapse[S].
- [15] 陆新征,李 易,叶列平,等.钢筋混凝土框架结构抗连续倒塌设计方法的研究[J].工程力学,2008,25(增2):150-157.
LU Xin-zheng, LI Yi, YE Lie-ping, et al. Study on Design Method to Resist Progressive Collapse for Reinforced Concrete Frames[J]. Engineering Mechanics, 2008, 25(S2): 150-157.
- [16] 倪 强,唐家祥.基于震害的钢筋混凝土框架结构倒塌机理的集成多媒体仿真研究[J].建筑结构学报,2000,21(2):52-58.
NI Qiang, TANG Jia-xiang. Research on Integrated Multimedia Simulation System for RC Frame Structure Collapse Based on Earthquake Disasters[J]. Journal of Building Structures, 2000, 21(2): 52-58.
- [17] PARK Y J, ANG A H S. Mechanistic Seismic Damage Model for Reinforced Concrete[J]. Journal of Structural Engineering, 1985, 111(4): 722-739.
- [18] 刘伯权,白绍良,刘 鸣.抗震结构的等效延性破坏准则及其子结构试验验证[J].地震工程与工程振动,1997,17(3):77-83.
LIU Bo-quan, BAI Shao-liang, LIU Ming. Equivalent Ductility Damage Criteria of Earthquake-resistant Structures and Their Verification by Substructure Method[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 1997, 17(3): 77-83.
- [19] 刘 鸣,刘伯权,赖 明.多层建筑考虑低周疲劳特性的抗倒塌验算实用方法[J].重庆建筑大学学报,1996,18(1):32-38.
LIU Ming, LIU Bo-quan, LAI Ming. An Effective Design Method for Preventing Collapse of Multi-story Buildings Taking Account of Structural Low-cycle Fatigue Character[J]. Journal of Chongqing Jianzhu University, 1996, 18(1): 32-38.
- [20] KOYLUOGLU H U, NIELSEN S R K, ABBOTT J, et al. Local and Modal Damage Indicators for RC Frames Subject to Earthquake[J]. Journal of Engineering Mechanics, 1998, 124(12): 1371-1379.
- [21] MOEHLE J P. Displacement-based Design of RC Structures Subjected to Earthquakes[J]. Earthquake Spectra, 1992, 8(3): 403-428.
- [22] LATBSDC 2005, An Alternative Procedure for Seismic Analysis and Design of Tall Buildings Located in the Los Angeles Region[S].
- [23] SEAONC 2007, Recommended Administrative Bulletin on the Seismic Design & Review of Tall Buildings Using Non-prescriptive Procedures[S].
- [24] 何晗欣,刘建新.能力谱方法在桥梁抗震性能评估中的适用性[J].长安大学学报:自然科学版,2009,29(4):48-52.
HE Han-xin, LIU Jian-xin. Application of Capacity Spectrum Method in Anti-seismic Evaluation of Bridges[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2009, 29(4): 48-52.
- [25] 周勇军,彭晓彬,宋一凡.在用简支梁桥横向地震动研究[J].长安大学学报:自然科学版,2008,28(5):58-62.
ZHOU Yong-jun, PENG Xiao-bin, SONG Yi-fan. Seismic Vibration of Existing Simply-supported Beam Bridges[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2008, 28(5): 58-62.