

首例油阻尼器破坏对结构设计的经验教训 ——日本3·11地震的启示

谢丽宇¹ 唐和生¹ 薛松涛^{1,2,*}

(1. 同济大学结构工程与防灾研究所, 上海 200092; 2. 东北工业大学建筑系, 日本, 仙台 982-8577)

摘要 日本3·11震后调查发现一栋消能减震钢结构上的油阻尼器发生了严重的损伤和破坏,表明消能构件在极端荷载作用下是可能受损、甚至完全失效的。明确提出了在设计概念上,消能构件是提高结构抗震能力的附属设备,是可消耗的、可替换的,应重视消能减震结构的抗震概念设计。总结了消能减震结构基于性能的设计方法还有许多问题需进一步解决和完善。

关键词 消能减震结构,消能构件,油阻尼器,极限状态,日本3·11地震

DOI:10.15935/j.cnki.jggcs.2015.02.002

Lessons Learned for Design of Passively-controlled Structures from the Great East Japan Earthquake

XIE Liyu¹ TANG Hesheng¹ XUE Songtao^{1,2,*}

(1. Institute of Structural Engineering and Disaster Reduction, Tongji University, Shanghai 200092, China;

2. Department of Architecture, Tohoku Institute of Technology, Sendai 982-8577, Japan)

Abstract Oil dampers of a steel building in Sendai City were seriously damaged by the Great East Japan Earthquake in 2011. This event showed the dampers have their own limit states under extreme loading condition, which hasn't been investigated fully and thoroughly. This paper indicates that the energy dissipation devices are additional components for improving the seismic capacity of the main frame, and these devices are disposable and replaceable when degraded or damaged. The seismic design concept of passively-controlled structures should be studied and valued during the initial design stage. In the near future, more efforts need to be spent in investigating the performance-based theory of passively-controlled structures.

Keywords passively-controlled structure, energy dissipation device, oil damper, limit state, the Great East Japan Earthquake

1 引言

自从20世纪70年代,地震工程领域的科学家及工程师们就开始积极搜寻能有效抑制结构地震响应的控制方法,从而达到减少地震对结构的损伤、保护结构的目的。在结构振动控制的研究和应用中,目前许多消能减震技术已经较为成熟,这些技术广泛采用新材料和新方法增加建筑结构

的附加阻尼或改变原有体系的固有特征,以此增加结构体系的耗能能力,减少地震对结构体系的破坏。这些技术不仅适用于新建建筑,也可用于既有建筑的抗震加固及改造。根据日本隔震协会(JSSI)2012年的统计^[1],共有超过2600栋的商业或住宅建筑以及超过3800栋的独栋住宅采用了隔震结构体系,超过950栋建筑采用了消能减震控制技术。

目前我国正努力推广高强钢筋、高强混凝土

收稿日期:2015-01-12

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51208377,51478356);日本学术振兴会科学研究助成基金(26420559)

* 联系作者,Email:xue@tongji.edu.cn

在建筑行业中的应用,预计到 2015 年末,C60 高强混凝土用量将达到总量的 10%,高强钢筋的产量占螺纹钢总产量的 80%,在建筑工程中高强钢筋使用量达到建筑用钢筋总量的比例从目前的 35% 提高到 65% 以上。高强钢筋、高强混凝土的采用使得结构越来越轻,也越来越柔,结构层间变形明显大于 20 年前修建的建筑。因此,为提高结构的抗震性能和风振舒适度,利用结构振动控制的思想在高层建筑中采用消能减震技术显得越来越有必要,可以预见到其应用前景也将更为广泛。

随着消能减震结构体系日趋广泛的应用和深入的研究,各国都相继制定出相应的消能减震结构设计、加固、施工的规范和规程。在结构的设防烈度下,消能构件也应具备良好的变形能力和耗能能力。我国的《建筑抗震设计规范》(GB 50011—2010)^[2]规定,消能构件应根据罕遇地震下的预期结构位移(设计位移)控制要求进行设置,消能部件的极限位移(速度)应不小于罕遇地震下消能构件最大位移(速度)的 1.2 倍,如果是速度相关型的消能构件,还应满足在此极限速度下的承载力要求。在 FEMA 273 的指导规范中,在最大考虑地震(Maximum Considered Earthquake)下,消能构件的极限位移(速度)应不小于消能部件最大位移(速度)的 1.3 倍。2013 年,我国颁布的《建筑消能减震技术规程》(JGJ 297—2013)^[3]体现了基于性能的抗震设计方法,建议消能减震结构应结合建筑的实际需求选择性能水准,针对罕遇地震有如下的叙述:“当遭受高于本地区抗震设防烈度的罕遇地震影响时,消能构件不应丧失功能,主体结构不致倒塌或发生危及生命的严重破坏。”在消能减震结构的性能水准的判别中,严重破坏的结构对竖向构件损坏的描述是多数严重破坏,部分倒塌,但耗能部件也仅是轻微损坏,没有退出工作。

从以上的规范条文可以看到,在地震工程领域,通常认为只要消能构件满足了设计位移(速度)要求,这些消能部件在设防地震或罕遇地震的作用下仍然能按设计时期望的工作性能正常工作,而忽略了可能因地震等极端荷载、材料老化等造成消能构件损坏、性能上退化的问题。但是 2011 年发生了震级规模 9.0 级的日本东北地区太平洋近海地震,这是日本有观测纪录以来规模最大的地震,给日本东北地区造成了巨大的灾害,在震后调查中发现,一些隔震结构的隔振垫和消能减震结构的消能构件发生

了严重的损伤和破坏,地震工程领域的研究者们开始认识到消能构件具有工作极限状态,在罕遇地震或超过罕遇地震的作用下,消能构件是有可能出现损伤或破坏的。

2 油阻尼钢结构的震害案例

薛松涛等首次报道了^[4]日本 3·11 地震对一栋 8 层钢结构建筑所安装的消能减震装置造成的破坏。这是位于日本宫城县仙台市东北工业大学校园内的一栋行政楼,建于 2003 年,高 34.2 m、长 48 m、宽 9.6 m,地下一层为钢筋混凝土结构,地上八层为混凝土预制楼板的钢结构,第一层和第二层构成底部大空间(该合并层在下文中均用一层指代),层高为 8 m,如图 1 所示。该结构在无消能构件布置的情况下,已满足日本对学校建筑的抗震规范要求,但为了验证该大学自主研发的一类油阻尼器的抗震性能,同时也为了提高该栋行政楼的结构抗震性能,在每层(合并层的 V 形斜撑贯通一、二两层)的两个方向上各安装了 4 个油阻尼器,一共安装了 56 个油阻尼器。

该油阻尼器为日本东北工业大学的 Kawamata 和 Funaki 等人自主研发的阻尼装置^[5-6],如图 2 所示,由位于中部的一个缸体和一对分别位于两侧的活塞组成。为了降低缸体和活塞之间密封性的加工精度要求,采用了黏弹性材料作为缸体和活塞之间的密封材料,这样的工艺可以降低阻尼装置的生产费用。当油阻尼器受到外力作用时,缸体和活塞产生相对运动,活塞一侧的油腔容积变小,迫使油液经节流孔流向体积增大的另一侧油腔,油液高速通过节流孔产生很强的湍流效应,起到耗散能量的作用。根据试验结果,该油阻尼器的阻尼恢复力由密封材料的黏弹性恢复力和湍流形成的恢复力两部分组成,整体呈现出与激振频率和振幅非线性相关的特性。

共有两种尺寸的油阻尼器安装于该栋行政楼,分别具有不同的节流孔尺寸和活塞工作行程,一层的油阻尼器工作行程为 16 mm,三至八层的油阻尼器工作行程为 8 mm。油阻尼器通过 U 形的固定支座将楼板与活塞头连接起来,中间部分的缸体与 V 形斜撑连接,如图 1(c)和图 1(d)所示。在地震作用下,层间位移使缸体与活塞发生相对运动,为了避免缸体与固定于楼板的支座发生直接的碰撞,另外增设了活塞的缓冲行程,一层

的油阻尼器具有 8 mm 的缓冲行程 ,三至八层油

阻尼器的缓冲行程为 5 mm。

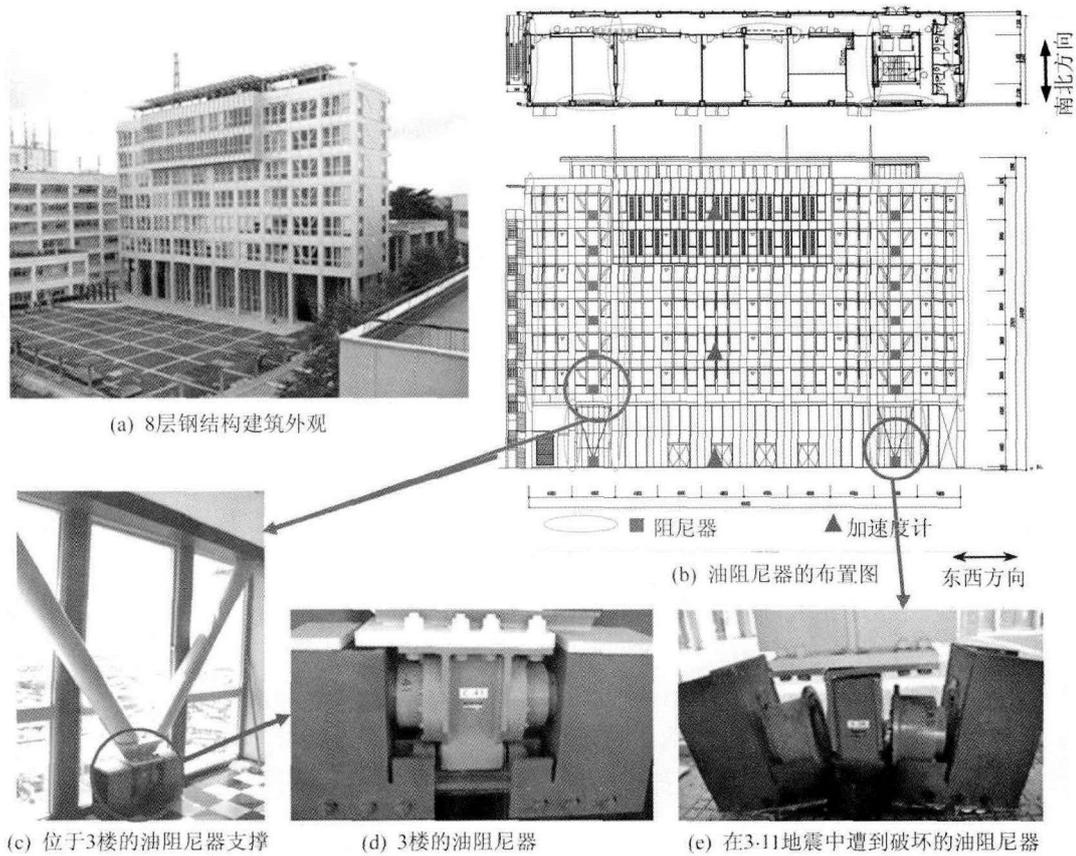


图 1 位于日本东北工业大学的油阻尼器钢结构

Fig. 1 8-story Administration Building of Tohoku Institute of Technology in Sendai City Japan

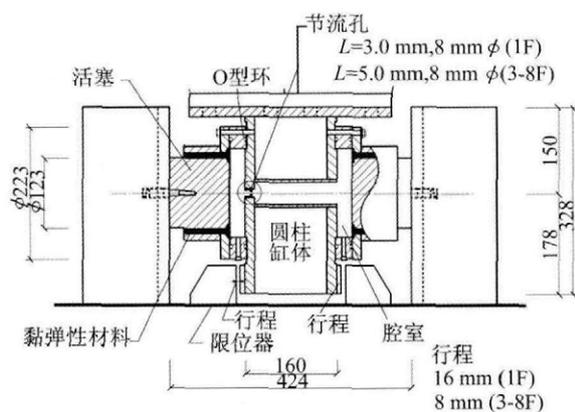


图 2 油阻尼器的构造和尺寸

Fig. 2 Dimension of the oil damper

为了验证整体结构和油阻尼器的性能 ,在该栋结构上安装了结构动力响应采集系统。在一层、四层和八层分别安装了 2 个方向的加速度计 ,如图 1(b) 所示。在一层和八层各选取了长边和短边方向的一个油阻尼器并安装了力和位移的传感器 ,用于采集油阻尼器在地震作用下的相对位

移和阻尼恢复力响应数据。

2005 年 8 月 16 日 ,该栋钢结构经历了一次较大的地震 ,结构一层经历的最大加速度东西方向为 114 gal ,如图 3 所示 ,南北方向为 117 gal。位于该楼一层东西方向的油阻尼器的力一位移曲线如图 4 所示 ,其油阻尼器两端的相对位移接近 19 mm ,超过了一层的油阻尼器工作行程 16 mm ,但由于缓冲行程的设置 ,避免了缸体和支座之间的碰撞 ,阻尼力接近 60 kN。八层东西方向的油阻尼器所经历的相对层间位移较小 ,不超过 2 mm ,阻尼力也只有 3 kN。八层油阻尼器所耗散的能量不足一层的油阻尼器的 1% ,可见 ,阻尼系统的耗能能力主要集中于底层的油阻尼器。

2011 年 3 月 11 日地震发生时 ,结构的监测系统因供电问题失效 ,距离该栋结构 50 m 处的地震观测仪记录下了当时的地面加速度 ,东西向的最大加速度为 354 gal ,南北向为 280 gal。如此强烈的地震造成一层的 8 组油阻尼器被完全破坏 ,油液发生泄漏 ,如图 1(e) 所示。由于强烈的地震

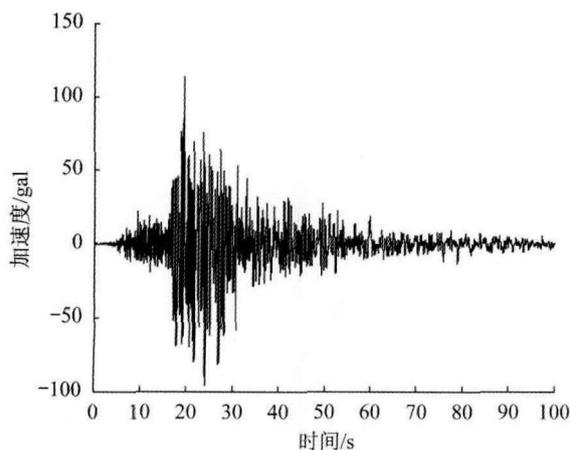
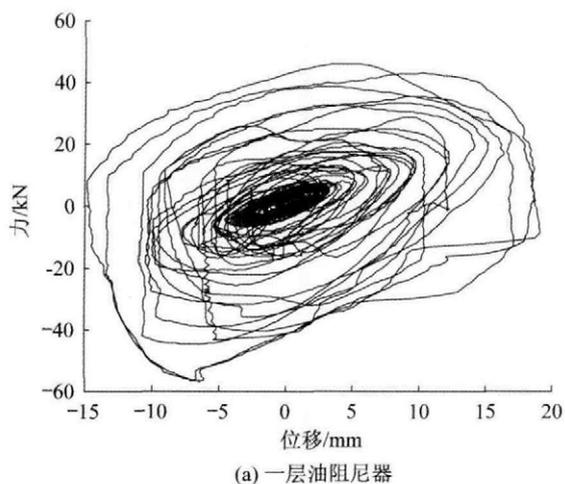
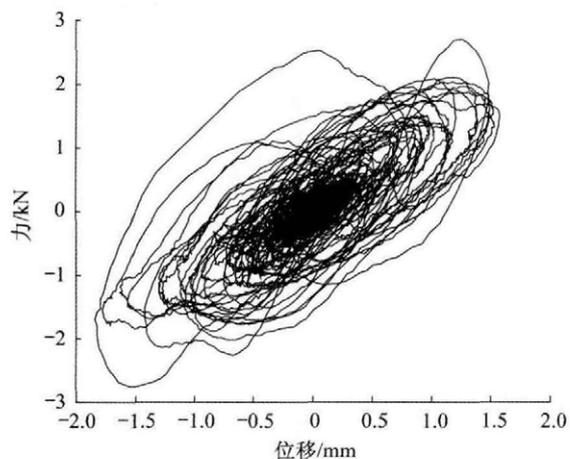


图 3 一层东西方向加速度时程曲线(2005/08/16)

Fig. 3 Acceleration response at 1st floor in EW direction (2005/08/16)



(a) 一层油阻尼器



(b) 八层油阻尼器

图 4 在地震作用下东西向油阻尼器的滞回曲线(2005/08/16)

Fig. 4 Hysteresis loop of oil dampers in EW direction (2005/08/16)

作用,位于一层的油阻尼器经历了远远超出其工作行程及缓冲行程范围的冲击,致使固定于 V 形斜撑上的中部缸体与固定阻尼器的 U 形支座发生了直接的碰撞,造成了位于地面 U 形支座的张开以及两侧活塞的脱落。位于三层、四层油阻尼器的黏弹性密封材料发生严重的磨损,导致油液的完全泄漏,不能提供阻尼恢复力,但油阻尼器的机械构件并未发生任何损伤和塑性变形。除了油阻尼器的受损,该栋结构的其他部分并未发生任何的结构损伤,在经过震后评估后,重新投入使用。

谢丽宇等^[7]详细描述了 3 · 11 地震对油阻尼器产生的破坏,通过系统识别的方法重新建立了该消能减震结构的计算模型,对造成油阻尼器破坏的原因进行了重演。阻尼器破坏主要原因是由于该结构油阻尼器工作行程的不合理设计,底层油阻尼器的可允许行程(阻尼器的工作行程加上缓冲行程)仅为 24 mm,与其底部大空间的层高 8m 相比较而言,仅为 0.3% 的层间位移,还未超过日本的钢结构规范中针对层间位移的弹性极限 0.5%。经过系统识别,对 3 · 11 地震引起结构动力响应的模拟,其底层层间位移大大超过了 0.3%,达到了 0.8% 的层间位移。论文也讨论了油阻尼器的极限状态和基于损伤的模式,可以判断该油阻尼器达到了位移极限状态,也就是阻尼器的位移行程超过了其可允许的行程范围,造成了油缸与两边支座的碰撞,最终导致了阻尼器的失效破坏。

3 消能减震结构的抗震概念设计

20 世纪 70 年代以来,在经历了历次严重的地震灾害后,研究者认识到结构概念设计往往比结构计算设计显得更为重要,通过震害实例,总结了结构构件和非结构构件的抗震设计的基本原则。王亚勇在汶川地震的震害调查报告中指出^[8]结构的抗震概念设计十分重要,还需要改善和提高。我国的《建筑抗震设计规范》对结构总体布置及细部构造的规定正是体现了抗震概念设计的基本原则,经过几次对《建筑抗震设计规范》的修订,更好地反映出实际情况,提高我国建筑结构的整体防灾水平。

90 年代后,在经历了 1994 年美国 Northridge 和 1995 年日本阪神地震后,学界认识到了基于性

能抗震设计的重要性,由此地震工程领域开始从基于承载力或强度的抗震设计方法向基于性能的抗震设计方法转变。根据建筑物的使用功能和重要性以及地震设防水准确定建筑物的抗震性能目标,按照该目标进行结构抗震设计。但由于地震破坏作用的复杂性和不确定性,以及各种计算模型的假设条件与实际情况的差距,计算结果还不足以精确地反映实际结构,难以量化并合理地表示结构性能水平,也难以形成一个统一、明确的结构性能水平划分方法。在性能化抗震设计仍需要发展的阶段,仅仅依靠理论计算还不足以保证结构的安全性、可靠性,因此,结构抗震概念设计仍然是设计阶段非常重要的一个环节,需要根据地震灾害和工程经验等形成的基本设计原则和设计思想,进行结构的总体布置和确定细部构造,在总体上把握设计的基本原则。

一方面,因高强材料的采用使得结构更高、更柔,为控制地震或风振引起的结构振动,消能减震技术的应用日趋广泛;另一方面,国内建筑为追求造型独特的外观,而牺牲了结构的抗震概念设计的基本原则,在结构细化设计阶段如结构不满足抗震计算的要求,就在结构中大量采用消能减震装置以满足抗震规范对变形控制等的要求。此外,2011年日本3·11地震造成了一些消能减震结构阻尼器的破坏和损伤,这些案例也为消能构件的应用敲响了警钟。消能构件可能在极端荷载条件下破坏,亦或在正常使用过程中出现劣化、性能下降的问题。因此,需要更为全面地、深入地研究消能构件的性能对结构抗震性能的影响,在设计阶段,也需要将消能减震系统与主体结构结合起来进行整体结构的抗震概念设计,目前这方面还缺少深入的研究。

赵真和谢礼立^[9]归纳了结构抗震概念设计的基本原则:① 尽量保持结构整体性以及整体的稳定性;② 保持结构的质量和刚度沿结构分布的均匀性和对称性;③ 确保整体结构体系及其子体系能发挥耗散地震能量的作用。针对消能减震结构的抗震概念设计,这些基本原则也同样适用,反映在《建筑抗震设计规范》(GB 50011—2010)^[2]和《建筑消能减震技术规程》(JGJ 297—2013)^[3]中,如:消能构件的布置应使结构在两个主轴方向的动力特性相近,尽量使结构的质量中心和刚度中心重合,减小扭转地震效应;在立面布置上,应避免因局部的刚度削弱或突变形成薄弱

部位,造成过大的应力集中或塑性变形集中。

结构设计师必须认识到的一点是:消能构件是可能受损甚至完全失效的。在设计概念上,消能构件是提高结构抗震能力的附属设备,是可消耗的、可替换的,消能减震系统应和框排架结构的柱间支撑或柱子的翼墙、剪力墙结构的连梁等一样成为结构抗震的第一道防线,在地震作用下可以率先受损、破坏,以消耗地震能量,保护结构的第二道防线主体结构,如框架结构的柱子、高层结构的剪力墙等。但要,需要确保结构在消能减震系统失效情况时最低设防目标的设定。

在消能构件与主体结构的连接上,应避免消能构件的破坏影响到与结构构件的连接,从而增加了结构构件的损伤程度。消能构件与主体结构的连接可采用强连接和弱连接。强连接的方式可以使结构更好地将层间变形传递到消能构件上,但另一方面也会增加结构构件的荷载,李钢等^[10]指出:位移型阻尼器在消能减震结构中可能引起柱子轴向力增加而导致柱子轴压比不满足要求,使得柱子的延性降低。弱连接会削弱层间变形对消能构件的影响,但可以避免消能构件的破坏影响到结构构件的承载能力。目前仍需要对消能构件与主体结构的连接方式进行研究,使消能构件提供附加耗能能力的同时,不影响到结构构件的承载能力。

另外,结构设计应为结构提供未来消能构件的维护、替换的便利性。目前在一些实际工程案例中,施工单位或业主将结构的耗能斜撑嵌在隔墙中,一方面不利于结构抗震,不利于耗能构件吸收足够的变形;另一方面也不利于耗能构件的维修和替换。

4 基于性能消能减震结构设计

随着消能减震结构日益广泛的应用,1993年美国SEANOC首先颁布了有关消能减震技术的指导方法,用于指导如何在新建建筑中安装消能构件^[11]。90年代,地震工程领域正开始从基于承载力或强度的抗震设计方法向基于性能的抗震设计方法的转变,根据建筑物的使用功能和重要性以及地震设防水准确定建筑物的抗震性能目标,按照该目标进行结构抗震设计,从而将结构的震害损失控制在预期的范围之内。90年代中期FEMA对既有结构的消能减震技术加固方法的研

究进行了资助^[12],发展出四种基于位移的设计方法,包括了线性静力法、线性动力法、非线性静力法和非线性动力法,并将该四种方法写入了 NEHPR (Guidelines for the Seismic Rehabilitation of Buildings) 和 FEMA 273^[13] 的规范中,这些方法正是体现了基于性能抗震设计理念的转变。我国 2013 年颁布的《建筑消能减震技术规程》(JGJ 297—2013)^[3] 体现了基于性能的设计思想,建议消能减震结构应结合建筑的实际需求选择性能水准和性能目标,根据结构的位移(变形)判别消能减震结构的性能水准。

在基于性能的抗震设计中,为了量化结构性性能目标需要选择能合理、有效地反映结构抗震性能水准的指标,这是性能设计方法的一个重点和难点问题。常用的结构性性能指标有位移指标、延性指标、与能量相关的指标、与力相关的指标及一些混合型的指标。国内外主要采用位移指标对结构的抗震性能水准进行量化,基于位移的设计方法也日益成熟,已逐渐应用于实际工程结构的设计中,该方法大致可分为两大类:第一类为间接方法,将传统的基于承载力(强度)的抗震设计与抗震性能检验结合起来,如研究和应用最多的是能力谱法;第二类是直接采用基于位移的抗震设计方法,把位移作为结构的抗震性能指标,根据结构的功能和重要性设定确定结构的抗震性能目标,据此计算地震作用和进行结构设计。

FEMA 和 ATC - 40 所推荐使用的能力谱法是一种静力非线性方法,它将地震反应谱曲线和结构能力谱曲线转换成相同的坐标,交点处(结构的性能点)的位移为性能目标位移。非弹性需求谱可通过强度折减系数对弹性反应谱进行折减,还可以对谱进行统计研究,直接获得非弹性设计谱。

Lin 等^[14] 提出了基于位移的消能减震结构设计方法,根据在一定水准地震作用下确定预期的位移目标,计算地震作用,采用迭代计算直至结构达到预期的位移变形。针对我国目前抗震设计仍采用加速度反应谱的设计方法,李钢和李宏男^[10] 将现行规范加速度反应谱转化为绝对位移反应谱,通过结构构件设计为主,阻尼器作为强度补充的方法建立基于位移抗震设计方法。刘鹏飞等^[15] 先采用假定的位移模式,将多自由度结构体系转换为等效单自由度体系,确定等效阻尼比和目标位移后,根据位移反应谱计算等效周期,完成

结构的刚度和承载力设计。

丁春花等^[16] 将耗能减震加固结构的性能进行了四个水准的划分,针对结构重要性的不同提出了三个设防目标,并根据参照国内外对结构抗震性能进行控制的性能指标,采用了层间位移角限值对设防目标进行了量化。邓雪松等^[17] 在研究中指出主体结构保持一定的性能水准时,消能构件可处于不同的性能水准,提出了耗能器和连接构件的性能水准的划分,并对位移相关型耗能器性能水准进行了量化。《建筑消能减震技术规程》(JGJ 297—2013)^[3] 根据结构的变形(位移)将消能减震结构的性能水准分为五级:基本完好、轻微损坏、中等破坏、严重破坏和倒塌,描述了关键构件、竖向构件及消能构件的损伤状态,并在抗震设防目标上进行了宏观的设定。

关于消能构件的性能要求,结构不同的性能水准(除了倒塌)对消能构件损伤的描述都是一致的(无损伤),在设计时也采用了统一的消能构件极限位移(速度),应不小于罕遇地震下消能构件最大位移(速度)的 1.2 倍,在规范中还尚无针对结构不同的性能目标设定相匹配的消能构件性能目标。但由于缺乏消能减震结构的震后损伤统计数据及消能减震结构极限性能、连续破坏模式的研究,目前有关消能减震结构的抗震性能指标的选择、性能水准的划分、抗震性能目标的确定还缺乏充分的理论依据,大多数还是采用定性的方法或参考无振控结构的性能指标,这些抗震性能设计理论中最基本的问题还有待于进一步的解决。

5 结 论

消能减震结构基于性能的设计方法是大势所趋,但还有许多问题需进一步的解决和完善:

(1) 尚未展开消能构件极限状态的研究,消能构件在强震作用下的实际性态也需深入调查和研究。

(2) 受现阶段模型试验和非线性数值模拟研究水平的制约,对消能减震结构的抗震极限性能和连续破坏机制的认识还比较有限,缺乏考虑消能构件极限状态消能减震结构体系在主余震、群震和近场地震等极端荷载作用下破坏模式的研究。

(3) 缺乏足够的试验资料和震害数据,对消

能减震结构的抗震性能指标的选择、性能水准的划分还比较模糊,这些具体的性能指标与结构整体性能之间的对应关系还缺乏必要的理论依据,定性的描述仍多于定量的界定。

(4) 缺乏消能构件性能水准方面的试验研究,针对消能构件和连接构件的性能目标的设定还不明确,应与主体结构的目标相匹配。

(5) 由于地震作用和结构抗震性能与生俱来的不确定性,基于概率的结构性能化设计还有待完善,应建立不同概率水平地震作用下描述消能减震结构局部与整体性能的多级性能指标。

消能减震结构的应用历史只有 40 多年,许多结构都没有经历过强震的考验,更缺乏消能构件的震害资料,对其消能构件的极限性能的研究开展亦不充分,再加上结构体系本身的复杂性,人们对其在强震作用下的动力损伤演化过程和破坏机理等方面的认识还不够深入。谢丽宇等^[18]总结了减振系统极限状态和减振高层建筑在极端灾害下的灾变机理的研究现状,未来仍需要开展系统、深入的研究,探索考虑极端灾害效应的性能控制设计理论,建立减振系统可修复、可替换的高层建筑一体化初始、再生设计方法。

参考文献

- [1] JSSI. Report of response-controlled buildings [R]. Japan Society of Seismic Isolation (JSSI) Investigation Committee, Tokyo, 2012.
- [2] 中华人民共和国住房和城乡建设部. GB 50011—2010 建筑抗震设计规范 [S]. 北京:中国建筑工业出版社, 2010.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. GB 50011—2010 Code for seismic design of buildings [S]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2010. (in Chinese)
- [3] 中华人民共和国住房和城乡建设部. JGJ 297—2013 建筑消能减震技术规程 [S]. 北京:中国建筑工业出版社, 2013.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. JGJ 297—2013 Technical specification for seismic energy dissipation of building [S]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2013. (in Chinese)
- [4] Cao M, Tang H, Funaki N, et al. Study on a real 8F steel building with oil damper damaged during the 2011 Great East Japan Earthquake [C]. 15th World Conference on Earthquake Engineering, Lisbon, Portugal, 2012.
- [5] Funaki N, Kang J, Kawamata S. Vibration response of a three-storied full-scale test building passively controlled by liquid dampers sealed by viscoelastic material [C]. 16th International Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology, Washington DC, USA, 2001.
- [6] Kawamata S, Funaki N, Itoh Y. Passive control of building frames by means of liquid dampers sealed by viscoelastic material [C]. 12th World Conference on Earthquake Engineering, Auckland, New Zealand, 2000.
- [7] Xie L, Cao M, Funaki N, et al. Performance study of an eight-story steel building equipped with oil dampers damaged during the 2011 Great East Japan Earthquake. part 1: structural identification and damage reasoning [J]. Journal of Asian Architecture and Building Engineering, 2015, 14(1):181-188.
- [8] 王亚勇. 汶川地震震害启示: 抗震概念设计问题 [C]. 2008 年汶川地震建筑震害分析与重建研讨会论文集, 北京, 2008:51-58.
Wang Yayong. Wenchuan Earthquake: problems of the seismic concept design [C]. Seminar on Structural Damage Analysis and Post-disaster Reconstruction of 2008 Wenchuan Earthquake, Beijing, 2008:51-58. (in Chinese)
- [9] 赵真, 谢礼立. 从欧洲抗震设计规范的一般规定浅谈结构抗震概念设计的重要性 [J]. 地震工程与工程振动, 2011, 31(5):190-195.
Zhao Zhen, Xie Lili. A brief discussion on importance of seismic concept design of structures based on general rules of Eurocode 8 [J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2011, 31(5):190-195. (in Chinese)
- [10] 李钢, 李宏男. 基于位移的消能减震结构抗震设计方法 [J]. 工程力学, 2007, 24(9):88-94.
Li Gang, Li Hongnan. Direct displacement-based design for buildings with passive energy dissipation devices [J]. Engineering Mechanics, 2007, 24(9):88-94. (in Chinese)
- [11] Whittaker A S, Aiken I D, Bergman D, et al. Code requirements for the design and implementation of passive energy dissipation systems [C]. Proceeding of ACT 17-4 Seminar on Seismic Isolation, Passive Energy Dissipation and Active Control, Redwood City, USA, 1993, 2:497-508.
- [12] Kircher C A. Seismic regulations for passive structural control systems—overview of United States codes [C].

- 2nd World Conference on Structural Control ,Chiches-
ter UK ,1999.
- [13] FEMA. NEHRP Recommended provision for seismic
regulations for new buildings and other structures [S].
Washington DC: Federal Emergency Management A-
gency 2003.
- [14] Lin Y Y ,Tsai M H ,Hwang J S ,et al. Direct displace-
ment-based design for building with passive energy
dissipation systems [J]. *Engineering Structures* 2003 ,
25 (1) :25-37.
- [15] 刘鹏飞 ,刘伟庆 ,王曙光 ,等. 基于位移的减震结构
设计方法研究 [J]. *世界地震工程* ,2009 ,25 (1) :
43-47.
Liu Pengfei ,Liu Weiqing ,Wang Shuguang ,et al. Stud-
y on displacement-based design method for energy dis-
sipation structures [J]. *World Earthquake Engineer-
ing* 2009 ,25 (1) :43-47. (in Chinese)
- [16] 丁春花 ,周云 ,邓雪松 ,等. 耗能减震加固结构的性
能水准与设防目标 [J]. *工程抗震与加固改造* ,
2004 (6) :35-40.
Ding Chunhua ,Zhou Yun ,Deng Xuesong ,et al. Per-
formance levels and fortification objects of seismic ret-
rofitting of structure with dissipators [J]. *Earthquake
Resistant Engineering and Retrofitting* ,2004 (6) :35-
40. (in Chinese)
- [17] 邓雪松 ,汤统壁 ,周云 ,等. 耗能减震钢结构性能水
准与目标的初步研究 [J]. *防灾减灾工程学报* ,
2008 28 (1) :104-109.
Deng Xuesong ,Tang Tongbi ,Zhou Yun ,et al. Prelimi-
nary research of performance levels and objectives for
steel structure with energy dissipated dampers [J].
*Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engi-
neering* 2008 28 (1) :104-109. (in Chinese)
- [18] 谢丽宇 ,唐和生 ,薛松涛. 减振高层建筑的极限破
坏及性能再生的研究现状及前景 [J]. *结构工程
师* 2014 30 (3) :205-212.
Xie Liyu ,Tang Hesheng ,Xue Songtao. State-of-the-art
and future trend in limit state and rehabilitation of vi-
bration-controlled high-rise buildings [J]. *Structural
Engineers* 2014 30 (3) :205-212. (in Chinese)



海啸浸水地



被海啸冲至岸上的船只



悼念遇难者



损毁的钢结构建筑

日本2011年3·11大地震震害深度分析的启示

日本是个地震多发的国家，经历了数次破坏力巨大的地震灾害后，逐渐形成了较为完善的防灾、减灾及灾后重建体系，具备了卓越的结构抗震技术，完善的建筑结构抗震鉴定及加固方法，尤其是近年来消能减震新材料和新技术的应用也越来越广泛。但日本在2011年3·11大震灾中结构抗震及防灾、减灾规划领域仍出现了一些预想不到的问题，例如消能减震装置的破坏、加固后建筑的破坏、大跨度体育馆钢屋架和RC柱的节点处的锚栓破坏等。

本期“日本2011年3·11大地震震害深度分析”系列文章，正是为了阐述和分析日本3·11大地震在结构及防灾领域出现的问题和原因。“他山之石，可以攻玉”，日本在应对自然灾害方面的经验及教训，对于同为自然灾害频发的中国具有非常重要的借鉴意义，可为中国今后防灾减灾和结构抗震事业的发展提供宝贵经验。

（本期作者供稿）