

强震下减振高层建筑破坏机理的研究现状及思路

薛松涛^{1,2}, 谢丽宇¹, 唐和生¹

(1. 同济大学 结构工程与防灾研究所, 上海 200092; 2. 日本东北工业大学 工学部建筑学科, 日本 仙台)

摘 要: 因高强材料在结构工程中的应用, 结构变得更高、更柔, 为控制地震或风振引起的结构振动, 结构减振技术的应用在我国日趋广泛。但是, 日本 3.11 震后调查发现一些减振结构的减振装置出现损伤, 其中一些甚至受到破坏, 表明减振器是具有工作极限状态的。而目前世界范围内减振高层建筑极限破坏的研究尚未系统展开, 面对我国频发、超预期发生的重(特)大地震灾害缺乏充分的应对策略和技术储备, 当前的规范可能会对减振高层建筑的防灾带来重大挑战。本文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, 提出了研究减振高层建筑在强震等极端灾害下的极限破坏机理及控制理论和思路。

关键词: 减振高层建筑; 减振器; 极限状态; 日本 3.11 地震

中图分类号: TU973.25

文献标志码: A

Review and future trend in limit state of vibration-controlled high-rise buildings under extreme earthquakes

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

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

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

Abstract: Due to the utilization of high-strength concrete and steel material in building construction, the high-rise buildings are becoming taller and more flexible. In order to suppress the structural vibration induced by the earthquakes or winds, the vibration control techniques are getting more applications currently. However, oil dampers of a steel building were damaged by the historic great earthquake of East Japan in 2011. This event proved that the dampers have their own limit states, which hasn't been investigated fully and thoroughly. In this paper, several damage events of vibration-controlled buildings are reported after the field investigation of 3.11 Earthquake in Japan, including the oil dampers, steel dampers and lead isolators. And the state-of-the-art of current research in the failure process of vibration-controlled system and buildings is summarized. In the near future, more efforts needs to be spent in investigating the performance-based theory of controlled high-rise structures and establishing the integrated design and retrofit methodology which incorporates the idea of recoverable and replaceable dampers.

Key words: vibration-controlled structure; energy dissipation device; limit states; 3.11 earthquake

引言

高层建筑仍是我国未来建设的主要发展方向, 是人多地少的城市朝集约化发展所不可替代的建筑形式。

收稿日期: 2014-04-06; 修订日期: 2014-06-26

基金项目: 国家自然科学基金项目(51208377, 51278369)

作者简介: 薛松涛(1963-), 男, 教授, 博士, 主要研究方向为结构抗震与振动控制、结构健康监测. E-mail: xue@tongji.edu.cn

然而,高层建筑在强震或强台风作用下可能发生安全性或舒适性问题,由于其容纳人员众多、功能多样、结构复杂,一旦出现极限状态下的破坏,将导致超出一般建筑的灾难性后果。目前我国的设计规范和方法仍然是以满足预期可能发生的理想状态为目标,但面对我国频发、超预期发生的重(特)大自然灾害缺乏充分的应对策略和技术储备,当前的规范可能会对国家的防灾策略带来重大挑战。因此,有必要深入研究高层建筑在强震、强台风等极端灾害下的极限破坏机理及控制理论和方法,从战略角度重新规划和制定高层建筑的设计规范和方法,以确保极端灾害发生时国民经济不致遭到灾难性打击。

目前从安全性和舒适度考虑,高层建筑的发展趋势是在结构体系中加装减振(震)系统,有效控制由地震或风振引起的结构振动,提高结构的抗风、抗震性能。早在1972年,为了控制美国世贸大厦的风致响应舒适度,结构中就已经安装了一万余个粘弹性阻尼器;而强台风和地震频发的日本,现在已经拥有4000栋以上的减振高层建筑,如日本东京新建地标 Sky Tree,为了最大程度地减少地震响应,安装了大量的油阻尼器。国内现有减振建筑还不是很多,但发展势头强劲,新建减振建筑数量迅猛增长,住建部于2014年2月发文大力推广减振建筑。目前我国已建成的减振建筑如上海环球金融中心,顶部安装了两台风阻尼器;在建的上海中心将要安装电涡流调谐质量阻尼器;汶川大地震后,四川新建了大量减振公共建筑。

事实证明,在现有规范设计范围内,减振系统在高层建筑的安全性及舒适度控制方面有着优异的表现。但非常遗憾的是,从世界范围来看,很少有研究考虑过极端荷载作用下减振系统的失效问题和失效后的应对方法,亦没有考虑过失效以后高层建筑本体结构的性能,以及主灾害之后结构性能迅速再生的设计方法。实际上,即使没有受到极端荷载的作用,减振系统作为一个机械构件,其使用寿命也远远小于建筑本身的寿命。基于此,在建筑物的有效寿命期内,有必要考虑减振系统的失效状态及其应对方法。

2011年3月11日的东日本大地震,导致地震中心仙台市内一栋建筑的减振系统失效,安装于一层的油阻尼器全部遭到破坏,同时另一栋隔震建筑的隔震设备也出现了裂缝,这是高层建筑减振系统在世界范围内首次出现的破坏现象。当时造成了灾区民众的巨大恐慌,也让我们必须面对以下不容回避的问题:减振系统作为一种机械系统,除了其老化失效以外,在极端灾害下有可能突然破坏。因此,有必要形成应对此类灾害的新方法和新思路,包括寻找减振系统的破坏原因,评价减振系统损伤后建筑本体结构的性能,同时研究新的减振结构再生设计方法。

1 减振结构的震害案例

1.1 速度型减振阻尼器破坏

薛松涛等首次报道了^[1]日本3.11地震对一栋8层钢结构的消能减震装置造成的破坏。这是位于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,如图1A所示。该结构在无减振器布置的情况下,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,在每层的两个方向上各安装了4个油阻尼器,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 等人自主研发的新型阻尼装置^[2,3],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,采用了粘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。根据实验结果,该油阻尼器的阻尼恢复力由密封材料的粘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型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型斜撑连接,如图1C和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之间发生直接的碰撞,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,三至八层的油阻尼器为5 mm。

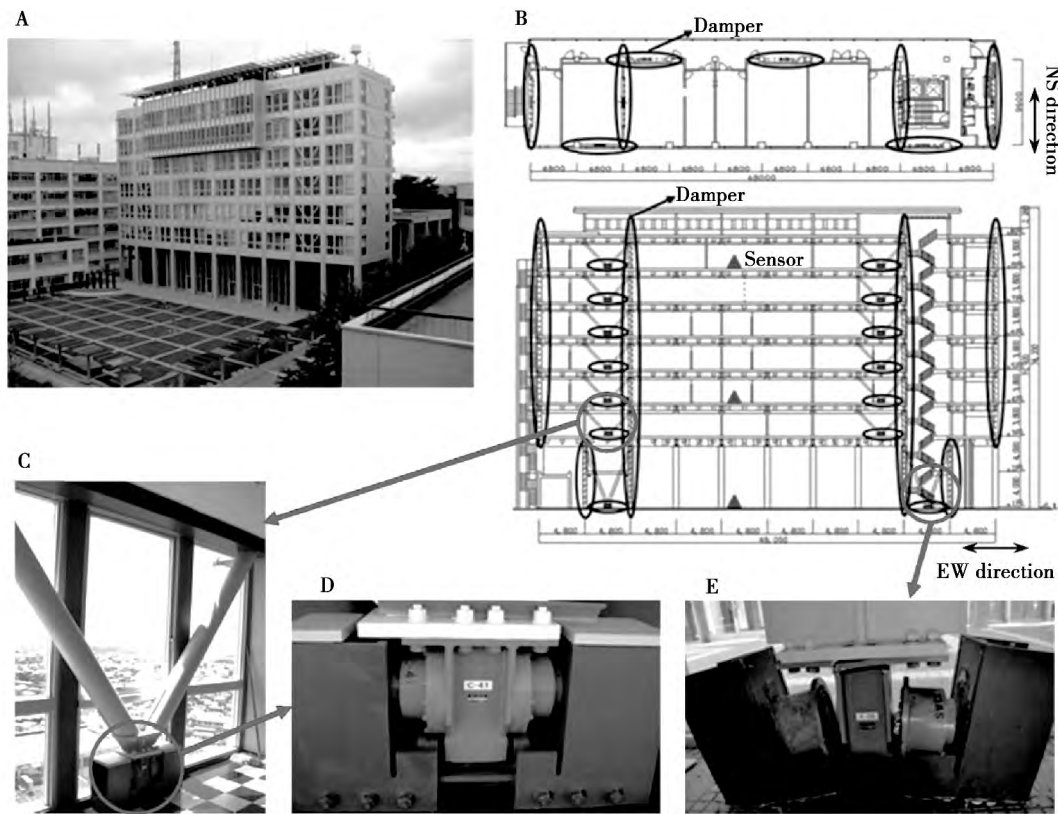


图1 位于日本东北工业大学的油阻尼器钢结构(A. 8层钢结构建筑外观 B. 粘滞阻尼器的布置图 C. 位于3楼的粘滞阻尼器支撑 D. 3楼的粘滞阻尼器 E. 在3.11地震中遭到破坏的粘滞阻尼器)

Fig. 1 8-story Administration Building of Tohoku Institute of Technology in Sendai City, Japan. (A) The exterior appearance of the building. (B) The allocation of oil dampers and accelerometers: blue rectangles represent oil dampers, red triangles are accelerometers. (C) The brace of oil dampers on the 3rd floor. (D) Intact oil damper on the 3rd floor before the 3.11 earthquake. (E) Damaged oil damper on the 1st floor after the 3.11 earthquake.

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1B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。

3.11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1E所示。由于强烈的地震作用,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型斜撑上的中部缸体与固定阻尼器的U型支座发生了直接的碰撞,造成了位于地面U型支座的张开以及两侧活塞的脱落。位于三层、四层油阻尼器的粘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。

1.2 其他减振系统损伤案例

日本3.11地震后,日本隔震协会(JSSI)立即成立了振动控制结构的调查委员会对隔震结构和消能减震结构进行了震害调查^[4,5],调查对象包括了日本境内的327栋隔震结构。有30栋装配有铅芯隔振垫的结构上发现了问题。一些隔震结构的铅芯隔振垫在3.11地震后受到了损伤,出现了裂缝;另有一栋隔震结构的铅芯隔振垫在3.11地震前已有深度为8 mm的裂缝,地震后裂缝深度扩展至32 mm。

日本隔震协会(JSSI)在3.11地震的震后调查中也发现了金属阻尼器(steel dampers)受到了损伤^[5],如金属阻尼器的残余变形,以及用于固定金属阻尼器的高强螺栓发生了松动。一些结构的软钢阻尼器进入了屈服状态,软钢阻尼器正是利用其材料在屈服之后的耗能特性来增加结构阻尼,在地震之后可能已经进入屈服阶段,造成耗能能力的降低,需要在震后进行检查、评估,确定是否需要更换。

速度型减振器、位移型金属阻尼器以及隔震垫的损伤案例改变了“结构布置了减振系统就安全无患”的传统看法,警示我们,无论是突发极端灾害作用还是长期性能退化,减振系统都有可能失效。在正常使用过

程中阻尼器也可能因一些原因造成性能上的退化或失效,如粘滞阻尼器可能因为漏油的问题造成性能的下降,粘弹性阻尼器的粘弹性材料与钢板之间的脱落,摩擦阻尼器接触面的属性可能随着时间而发生变化。如何从初始设计和再生设计出发,保证减振系统性能退化甚至失效后高层建筑的安全性能是未来需要面对的重大挑战。

2 减振高层建筑在强震作用下的破坏机理

2.1 减振系统的极限状态

一方面改造加固结构采用了减振器才使结构满足了抗震性能上的要求,另一方面消能减震技术降低新建建筑的抗震需求和位移需求,减少构件的尺寸,减轻了构件的重量,采用减振器的振动控制策略使减振器成为重要的结构构件。由于它们在提高结构抗震性能方面的重要作用,减振器的性能退化和失效会对结构产生不利的影响。

以工程中广泛采用的粘滞阻尼器为例,许多实验研究都证实了粘滞阻尼器具有良好的耗能性能,但通常都是在阻尼器的极限位移(速度)范围内进行测试和性能监测,没有测试阻尼器在极端荷载条件下的性能。Miyamoto 等^{[6][7]}指出了粘滞阻尼器可能的几种极限状态:承载力极限状态、位移极限状态、混合承载力一位移极限状态,针对粘滞阻尼器建立了可以考虑其极限状态和失效模式的简化模型,并可将该模型应用于消能减震结构的非线性动力分析^[8]。用于高层建筑中控制风振的粘滞阻尼器,其变形要求通常很小(几个毫米),但却有很大的阻尼力,这些粘滞阻尼器在高频微幅风振的作用下,可能会发生减振器的疲劳问题^[9],但这一方面的研究非常罕见,粘滞阻尼器的疲劳极限状态也是需要进一步的深入研究。

隔震垫的铅芯在常温环境下经过塑性变形的循环加载可使铅的多晶体发生再结晶,因此具有良好的耗能性能。隔振结构在风荷载作用下,隔震垫会经历微幅而频繁的往复位移,而目前尚不清楚风荷载的作用是否会引起铅芯裂缝的产生,除了隔震垫的位移极限状态,疲劳极限状态也需展开深入的研究。

2.2 减振高层建筑的灾变机理

由于存在减振装置的非线性作用,减振高层建筑的动力响应也是非线性的。在极端动力荷载作用下,减振装置和结构本身都可能进入弹塑性损伤状态,甚至发生局部破坏或整体失效。因此,在减振高层建筑的性能化设计中,需要准确分析不同荷载水准下的结构非线性动力响应,从而对减振装置、结构构件和结构整体的弹塑性损伤和非线性变形等建立可靠的量化评估,这是减振高层结构性能设计与控制的理论基础。

我国现行抗震设计规范基于“大震不倒”的抗震设计实践用于减振高层建筑的设计与分析面临诸多挑战:1) 过于粗略的弹塑性变形分析掩盖了实际结构构件与被动减振保护系统在强地震作用下的复杂力学行为;2) 未能就结构构件和减振保护系统的实际极限状态给出清晰的界定;3) 不能体现减振结构体系在被动减振保护系统突然出现极限破坏后的整体抗震性能。因此建立更加科学、合理的考虑的设计方法已势在必行。

Kasai 等^[10,11]在世界最大的振动台 E-Defense 上对一实比例消能减震结构进行了三维模拟振动台试验,测试了安装 5 种不同的阻尼器的消能减震结构的地震响应和抗震性能,这些阻尼器包括了粘滞阻尼器、粘弹性阻尼器、金属阻尼器和摩擦阻尼器。这些试验表明,阻尼器能大量耗散地震输入结构的能量,增加数倍于原有结构的阻尼比,有效地衰减结构的位移、速度和加速度响应,降低结构的层间剪力。但这些消能减震结构试验的研究重点均是在阻尼器正常工作情况下结构的动力响应及抗震性能,目前还尚未有考虑阻尼器极限状态的消能减震结构振动台试验,也无考虑阻尼器极限状态的消能减震结构连续破坏的研究。

目前从减振结构的试验来看,存在的主要问题有:减振器本身的力学性能试验较难真实反应减振器安装在整体结构中的受力条件,高层结构的减振振动台试验较少,足尺模型的振动台试验更少,在缩尺模型中减振器本身的缩尺比例带来的性能误差尚不明确。因此非常有必要针对减振结构的试验开展研究,积累试验数据和经验,为减振高层结构设计提供辅助手段。

3 研究前景及思路

减振高层建筑的应用历史只有 30 多年,许多结构都没有经历过强震、强台风的考验,更缺乏减振器的灾

害资料,对其减振器的极限性能的研究开展亦不充分,在加上结构体系本身的复杂性,人们对其在极端灾害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。尽管减振技术的应用日益广泛,但其抗灾问题并未真正解决,抗灾研究还落后于发展的需要。

强震作用下减振系统失效以后,还必须保证高层建筑本体结构的安全性,在设计中,不仅要考虑减振系统本身的极限性能,同时还要考虑本体结构在全寿命周期内的性能退化。如何从初始设计和再生设计出发,保证减振系统失效后高层建筑的安全性能是今后面临的重大挑战,需要解决以下几个关键问题:

(1) 极端灾害下减振高层建筑的灾害效应及极限破坏机理

在减振高层建筑的结构设计中主要考虑的极端动力荷载是强震和强台风,但因减振系统使用的历史不长,尚缺乏在广泛范围内经受极端动力荷载作用的检验,需要从基础理论、试验分析和数值模拟三个方面系统地展开研究,揭示建筑本体结构和减振系统在极端灾害作用下的极限状态和灾变机理。

(2) 考虑建筑本体结构及减振系统耦合的高层建筑性能演化规律

减振高层建筑在强震或强台风的作用下,可能会导致建筑本体结构和减振系统的损伤和性能退化,因此,需要研究考虑建筑本体结构极限性能变化及减振系统极限性能变化的情况下,耦合高层建筑的破坏极限、评估方法和性能演化规律。在此基础上,提出基于结构灾后现状的减振控制方法,以此对灾后建筑本体和减振系统进行再生设计与修复,从而实现对减振高层建筑耦合性能的提高。

(3) 高层建筑抗灾性能控制理论

要实现灾后减振高层建筑性能的再生和提高,就必须防范于未然,考虑减振高层建筑的初始一体化设计。因此在设计阶段,既要考虑极端灾害对本体结构和减振系统的损伤作用,也需要考虑建筑寿命期内减振系统和材料的常时或突发的性能退化,使得减振系统具有可替换性、可修复性和可提高性,同时作为分灾系统可承担极端灾害给整体结构带来的损伤,甚至失效破坏,但不影响本体结构的主要功能。以此建立本体结构的最低设防目标,确立分灾系统的抗灾性能目标,确保整体结构具有鲁棒性。

因此,研究减振器的极限性能,研究考虑减振器的极限性能的减振结构在极端动力作用下的连续破坏机理和极限性能,进而发展控制结构损伤的基于性能的分析与设计方法,可保障减振结构的安全,有效控制灾害造成的经济损失,为结构防灾和城市防灾提供科学依据和技术支持,是城市、社会、环境可持续发展的重要内容。

参考文献:

- [1] 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]// Lisbon, Portugal: 2012.
- [2] 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]// Washington DC, USA: 2001.
- [3] Kawamata S, Funaki N, Itoh Y. Passive control of building frames by means of liquid dampers sealed by viscoelastic material [C]// Auckland, New Zealand: 2000.
- [4] Kasai K, Mita A, Kitamura H, et al. Performance of seismic protection technologies during the 2011 Tohoku-Oki Earthquake [J]. Earthquake Spectra. 2013, 29(s1): S265 - S293.
- [5] JSSI. Report of Response-Controlled Buildings [R]. Tokyo, Japan: Japan Society of Seismic Isolation (JSSI) Investigation Committee, 2012.
- [6] Miyamoto H, Gilani A S J, Wada A, et al. Limit states and failure mechanisms of viscous dampers and the implications for large earthquakes [J]. Earthquake Engineering and Structural Dynamics. 2010, 39(11): 1279 - 1297.
- [7] Miyamoto H K, Gilani A S J, Wada A. Identification and modeling of limit states of viscous dampers under large earthquakes [C]// San Francisco, CA, United states: 2009937 - 948.
- [8] Miyamoto H K, Gilani A S J, Wada A, et al. Collapse risk of tall steel moment frame buildings with viscous dampers subjected to large earthquakes-Part I: Damper limit states and failure modes of 10-storey archetypes [J]. Structural Design of Tall and Special Buildings. 2010, 19(4): 421 - 438.
- [9] Yoshida M. Evaluation of fatigue damage to a damper induced by a typhoon [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics. 1998, 74: 955 - 965.
- [10] Ji X, Hikino T, Kasai K, et al. Damping identification of a full-scale passively controlled five-story steel building structure [J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics. 2013, 42(2): 277 - 295.
- [11] Kasai K, Ito H, Ooki Y, et al. Full scale shake table tests of 5-story steel building with various dampers [C]// Toronto: 20101292.