

减振高层建筑的极限破坏及性能再生的研究现状及前景

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. 日本东北工业大学工学部建筑学科, 仙台)

摘要 因高强混凝土和高强钢筋的采用, 结构向更高、更柔的方向发展, 为控制地震或风振引起的结构振动, 结构减振技术的应用日趋广泛。但是, 日本“3.11”震后调查发现一栋减振钢结构的油阻尼器发生了严重的损伤和破坏, 表明减振器是具有工作极限状态的, 而目前减振高层建筑极限破坏的研究尚未系统展开。首先描述了日本“3.11”地震后减振结构的震害案例, 总结了对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, 针对减振高层建筑的本体结构和减振系统, 提出了基于三个极限状态的研究思路, 提炼了极限破坏机理、抗灾性能演化规律、设计和再生性能控制理论的三个关键问题, 未来需要开展系统、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。

关键词 减振高层建筑, 减振器, 三个极限状态, 性能再生, 日本“3.11”地震

State-of-the-art and Future Trend in Limit State and Rehabilitation of Vibration-controlled High-rise Buildings

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, 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 had been 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. The framework of three limit states of vibration-controlled buildings is originally proposed to explore the failure mechanism of controlled structures, considering the coupling effect of the vibration-controlled system and structural mainframe. The key problems lie in the failure mechanism, the performance evolution and the performance-based design/retrofit philosophy of vibration-controlled buildings. In the near future, more efforts need 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.

Keywords vibration-controlled structure, energy dissipation device, three limit states, rehabilitation, 3.11 earthquake

收稿日期: 2014-06-10

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51208377, 50708076)

* 联系作者, Email: xue@tongji.edu.cn

1 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。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黏弹性阻尼器;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器也出现了裂缝,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,同时研究崭新的减振结构再生设计方法。

2 减振结构的震害案例

2.1 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1层为钢筋混凝土结构,地上8层为混凝土预制楼板的钢结构,第1层和第2层构成底部大空间,如图1(a)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。根据实验结果,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,1层的油阻尼器工作行程为16 mm,3~8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 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之间发生直接的碰撞,另外增设了活塞的缓冲行程,1 层的油阻尼器具有 8 mm 的缓冲行程,3~8 层的油阻尼器为 5 mm。

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 1(e) 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 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。

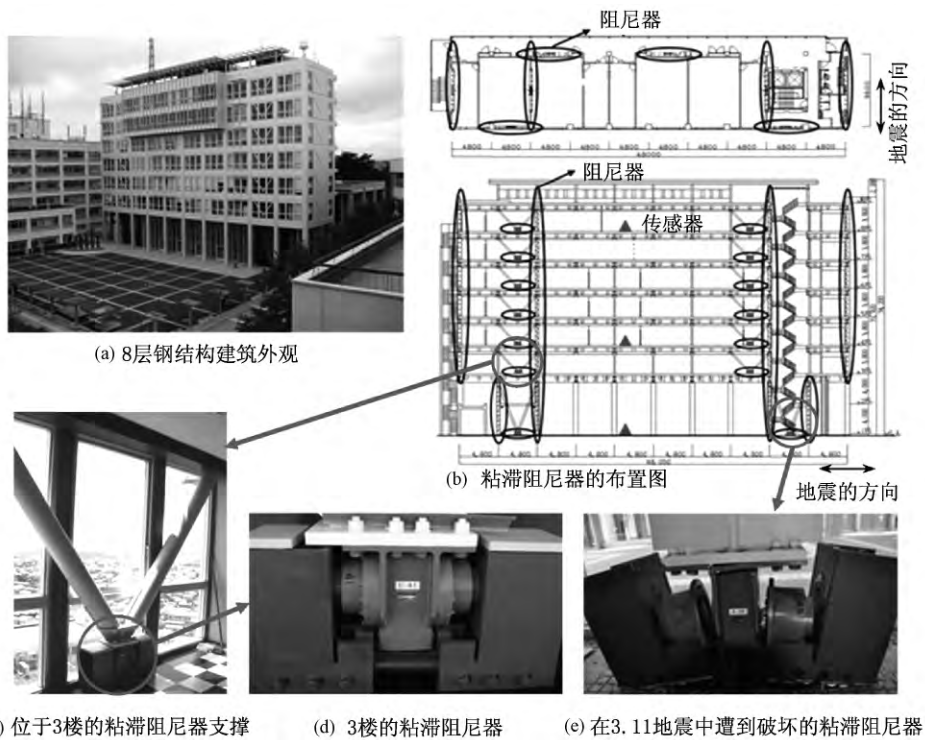


图 1 位于日本东北工业大学的油阻尼器钢结构

2.2 隔震垫损伤

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(60%分布在东京附近,25%位于宫城县)和 130 栋消能减震结构。位于宫城县隔震结构所经历的最为大的隔震层位移为 41.5 cm,平均值约为 20 cm,而在关东地区,隔震垫所经历的最大位移是 18 cm,平均约为 5 cm。根据日本隔震协会(JSSI)2009 年的调查^[5],日本有 13% 的隔震结构采用了铅芯隔振垫(lead damper),共有超过 6 000 个铅芯隔震垫用于实际的工程应用中,但在 2011 年 12 月的震后

调查中发现,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。

2.3 非速度型金属阻尼器损伤

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(图 4(a)),以及用于固定金属阻尼器的高强螺栓发生了松动(图 4(b)),但在该次调查中并未在已屈服的金属阻尼器上发现裂缝。

位于日本东京工业大学的 G3 栋建筑 ,在结构和摇摆墙之间采用了软钢阻尼器进行连接 ,在“3. 11”地震作用下 ,平均层间位移角约为 1/1 900 的情况下 ,一部分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 ,确定是否需要进行阻尼器的更换。

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 ,如黏滞阻尼器可能因为漏油的问题造成性能的下降 ,黏弹性阻尼器的黏弹性材料与钢板之间的脱落 ,摩擦阻尼器接触

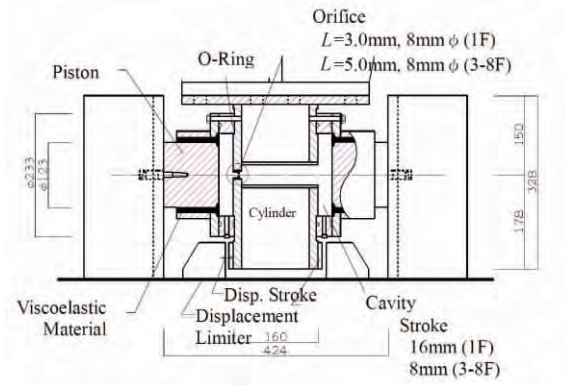
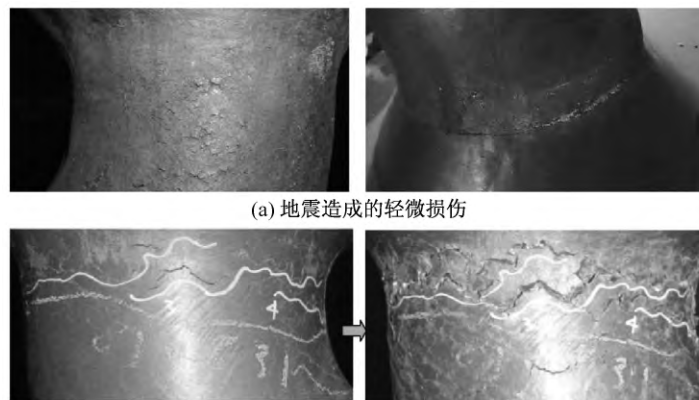


图 2 油阻尼器的构造和尺寸
Fig. 2 Dimension of the oil damper.



(a) 地震造成的轻微损伤
(b) 地震加剧了已有的铅芯隔振垫损伤

图 3 铅芯隔振垫损伤案例^[5]

Fig. 3 dAMAGE CASES of lead dampers^[5]

面的属性可能随着时间而发生变化。

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。这对目前不考虑减振系统性能退化或失效的减振结构设计方法是否妥当提出了疑问。

减振建筑的结构设计必须回到原点 ,从建筑初始设计开始就需要考虑减振系统的失效问题 ,研究不同类别减振系统的极限问题 ,研究不同形式抗震、抗风高层建筑结构的极限破坏机理 ,探明建筑物在使用寿命内抗灾性能的演化规律 ,确立崭新的灾后结构性能再生设计方法 ,最终形成适用于工程应用的建筑本体结构和减振系统的一体化设计方法。

3 减振高层建筑的极限状态和灾变机理研究

3.1 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 ,另一方面减振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黏滞阻尼器为例 ,许多实验研究都证实了黏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]指出了黏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—位移极限状态 ,针对黏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



(a) 金属阻尼器的残余变形



(b) 高强螺栓发生了松动

图 4 金属阻尼器损伤案例^[5]Fig. 4 Damage cases of damage of metal damper^[5]

振的黏滞阻尼器,其变形要求通常很小(几个毫米),但却有很大的阻尼力,这些黏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,黏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。

减振技术具有良好的发展前景,其产品的研发应用十分活跃,在可预期的未来,新型减振系统将继续涌现,但各类减振系统在极限状态下的性能分析仍然需要进行大量的研究,以确保在极端灾害情况下建筑物的安全,并对减振技术进行完善。各类减振技术与新型、复杂、特殊结构的结合,还需进一步探索这些新的减振结构体系在极端荷载作用下的极限状态和灾变机理。

3.2 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,减振高层建筑的动态响应也是非线性的。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 上对一实比例耗能减震结构进行了三维模拟振动台试验,测试了安装 5 种不同的阻尼器的耗能减震结构的地震响应和抗震性能,这些阻尼器包括了黏滞阻尼器、黏弹性阻尼器、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。但这些耗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耗能减震结构振动台试验,也无考虑阻尼器极限状态的耗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映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。

4 基于三个极限状态的研究思路

4.1 三个极限状态的提出

减振结构可明确划分为两部分,本体结构与减振系统,通过调整减振系统的耗能比例,可有效

地控制本体结构的塑性变形,实现预先设定的结构的各项性能水准。本体结构功能部分由若干功能子结构组成,保证结构的各种正常使用功能。减振系统功能部分由减振器组成,其可靠度低于本体部分,在遇大震时失效破坏,但其破坏不影响结构的主要功能,引起的损失相对较小,易于迅速修复以恢复结构的正常使用功能。这样,在各种正常使用荷载及小震等非灾害荷载作用下,结构主要功能部分和减振系统共同发挥作用,本体结构处于弹性状态,结构的各项性能满足正常使用功能,在大震等灾害荷载作用下,结构的减振系统开始发挥分灾作用,部分减振器显著进入塑性消能阶段甚至失效破坏,以保证本体结构部分屈服程度不大甚至于不屈服,从而达到所要求的建筑物的各项性能指标,维护整个结构体系的各种正常使用功能。

根据以上的抗震思想,极端灾害下减振高层建筑具有三个极限状态:高层建筑正常运行时的极限状态(有减振系统耦合);减振系统在不同工况下的极限状态;减振系统失效后的建筑本体结构的极限状态(无减振系统耦合),如图5所示。

根据前述减振系统的灾害案例,表明减振系统具有工作极限状态,在极端情况下若减振系统完全失效,无法起到任何作用,本体结构具有的极限性能应能满足最低设防目标的要求,以保证结构体系“大震不倒”。在正常情况下,通过调整、设定减振系统的抗灾性能目标,可使减振系统耦合的整体结构具有比本体结构更好的抗灾性能,在极端灾害作用下,本体结构与减振系统也能协同工作,进入预先设定的理想极限状态。但在实际结构中,由于减振系统和本体结构在正常使用过程中也可能发生性能退化或经历一些突发事件,以及灾害造成的损伤的不确定性,使减振系统和本体结构的损伤模式和失效路径偏离了预先设定的模式,未能达到原先设定的性能目标。实际应用中,减振结构的灾变机理应介于本体结构的极限状态和耦合结构的极限状态之间。另外,在灾害发生后,减振系统或本体结构可能生部分损伤,应对灾后的结构进行残余性能评估;也应该将减振系统具有可替换性、可修复性的思想贯穿于减振结构设计、使用阶段及再生阶段的全过程,形成减振结构的一体化初始/再生设计方法。

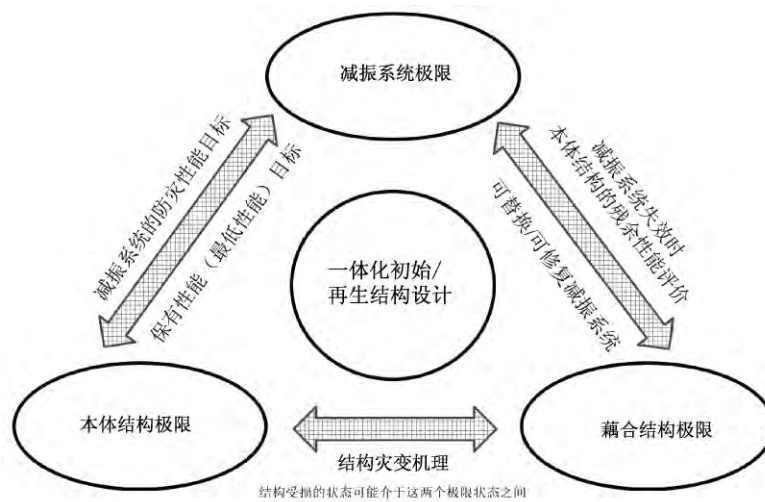


图5 减振高层建筑的三个极限状态

Fig. 5 Three limit states of vibration-controlled high-rise buildings

4.2 极端灾害下减振高层建筑全寿命性能演化过程

高层建筑的性能是指其在抵御灾变时能够表现出的最大保有性能,图6中纵轴所示的建筑本体结构和减振系统性能的耦合。建筑本体结构性能是指减振建筑去除减振系统后建筑本体结构的保有性能(圆点填充部分);减振系统性能是指建

筑结构安装的减振系统的自有性能(斜线下方空白部分);一个完整的减振建筑具有的保有性能包括了建筑本体结构性能和减振系统性能,同时二者间还存在一部分非线性耦合的性能重叠(斜线填充部分)。图中的三种填充方式对应了减振高层建筑的三个极限状态,也就是建筑本体结构极限、减振系统极限及它们耦合时的极限。

图6中粗实线代表减振高层建筑性能随时间

变化的过程(简化为直线,忽略非线性演化的过程),粗虚线(包括与粗实线重叠的部分)表示减振系统性能随时间变化的过程。减振建筑在使用过程中,日常的劣化和可能的突发灾变,均会使其保有性能随时间不断变化,性能发展的整体趋势是不断降低的(粗实线)。图中细虚线(包括与粗实线重叠部分)表示了减振系统为减振建筑所提供的附加性能的演化过程,当遇到突发灾变或达到使用寿命时,减振系统有可能完全失效,这时就无法为建筑提供任何附加的性能保障。图中粗实线和粗虚线的变化对应了建筑结构的性能演变。

建筑初始性能 h_0 为新建建筑本体结构性能 h_1 与新装减振系统性能的耦合。极端灾害时,减振系统首先起到抵御作用,假设图中 t_1 时刻发生的灾害超出了减振系统的设计极限,减振系统将完全失效,如图中向下的红色箭头所示。由于减振系统与建筑本体结构之间存在部分重叠性能,此时的建筑保有性能将跌落至 h_3 ,即建筑本体结构性能水平。在不进行减振系统再生的情况下,随着时间的推移,建筑

保有性能将继续缓慢下降,如图中 t_1 和 t_2 间的粗实线所示。如对减振系统再生,如图中向上的箭头所示,建筑的保有性能将提高。理想的再生设计应使再生后的建筑保有性能 h_2 在 t_2 时刻超过其初始性能 h_0 ,即 $h_2 > h_0$ 。图中假设 t_3 时刻再次发生的灾害使减振系统部分失效,建筑保有性能将再次跌落至建筑本体结构性能水平 h_5 。当在 t_4 时刻对减振系统再次再生时,建筑保有性能将提高到 h_4 水平,理想情况下再生后的保有性能 h_4 应超过之前保有性能 h_2 ,即 $h_4 > h_2$ 。从性能控制角度来说,每次建筑保有性能因遭遇灾害下降后,由于建筑本体结构保有性能始终在逐渐劣化,总有 $h_5 < h_3 < h_1$,而理想的减振建筑再生设计应使得建筑每次再生后的保有性能均超过之前水平,也就是使 $h_4 > h_2 > h_0$ 。图中的向上箭头、向下箭头对应了灾变和再生时的建筑性能的突变。如何有效地控制损伤发生后建筑结构的性能、设定再生性能目标以及制定灾变与再生之间的应对方法,这也是需要进一步研究的关键问题。

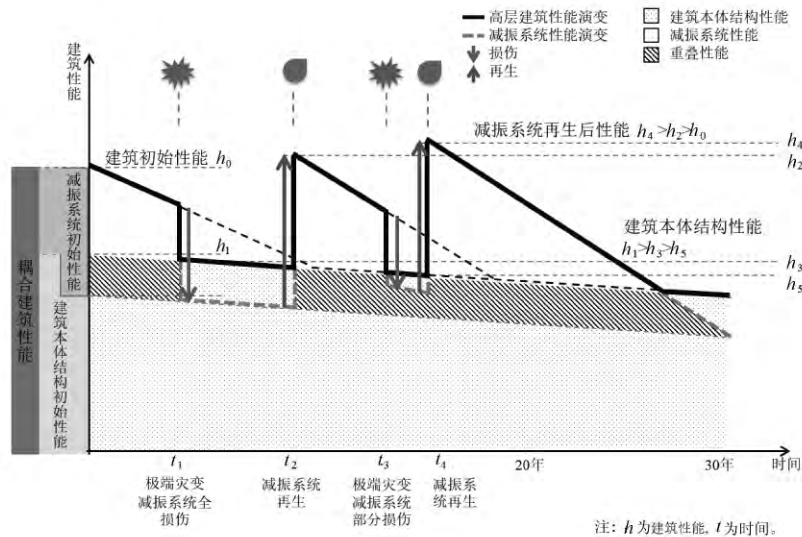


图 6 极端灾害下减振高层建筑全寿命性能演化示意图

Fig. 6 Performance evolution of controlled high-rise building under extreme loading condition

5 发展趋势与应用前景

要彻底解决减振系统失效以后的高层建筑再生设计问题,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,包括了三个极限状态的研究:不同结构类型高层建筑正常运行时的极限状态(有减振系统耦合);减振系统的极限状态;减

振系统失效后本体结构的极限状态。

(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,包括高层建筑全寿命性能演化过程及耦合时的精细化数值模拟。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,从而实现减振高层建筑耦合性能的提高。

(3) 高层建筑抗灾性能控制和再生理论。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。

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。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、环境可持续发展的主要内容。

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]. TSth World

Conference on Earthquake Engineering 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]. 16th International Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology 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]. 12th World Conference on Earthquake Engineering 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 K , 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 , 2009:937-948.
- [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 and 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]. Proceedings of the 9th U.S. National and 10th Canadian Conference on Earthquake Engineering. Toronto: 2010.