

既有老旧建筑增设减震装置改造结构设计研究

王 磊

呼和浩特市建设工程施工图审查中心有限公司 内蒙古 呼和浩特 010010

摘 要：既有老旧建筑因建造年代较早、抗震设防标准偏低，在地震作用下存在显著的安全隐患。增设减震装置是提升该类结构抗震性能的有效途径，但改造设计面临原结构信息残缺、连接构造受限、协同工作机制复杂等特殊问题。本文系统探讨了既有老旧建筑增设减震装置的改造结构设计方法，从抗震性能评估、减震装置选型、设计流程构建、协同工作机理、关键参数确定及施工扰动控制等方面展开理论分析。研究指出，改造设计应以性能目标为导向，遵循“安全可行、经济合理、扰动最小”的原则，重点解决附加阻尼比合理取值、原结构承载力复核及节点连接可靠性等核心问题。在此基础上，提出了涵盖减震装置布置优化、连接构造设计及性能评价指标体系的系统化设计框架，以期同类改造工程提供设计参考。

关键词：老旧建筑；减震装置；结构改造；消能减震；协同工作；设计方法

引言

我国大量八九十年代建成的既有建筑因设防烈度低及材料老化，抗震性能不足，地震风险高。随着城市更新需求增长，提升其抗震能力成为重要课题。传统加固方法如增大截面或粘贴纤维布虽能增强强度刚度，但存在增重、刚度突变及占用空间等弊端。相比之下，增设减震装置（如金属屈服型、粘滞流体阻尼器等）通过耗散地震能量降低主体结构响应，具有附加质量小、布置灵活、震后易更换等优势，日益受到重视。然而，既有建筑改造设计受限于原结构几何、配筋及基础承载力等复杂边界条件，与新建结构消能减震设计不同。目前研究多聚焦于装置本身性能，缺乏对系统性方法、协同工作机制及施工可行性的深入探讨。本文立足改造设计的特殊性与系统性，从性能评估、装置选型、设计方法、关键技术及评价指标五维度展开论述，旨在建立适用于既有老旧建筑增设减震装置的结构设计理论框架。

1 既有老旧建筑抗震性能评估与改造需求

1.1 老旧建筑结构特点与抗震缺陷

既有老旧建筑的结构形式以砌体结构、底部框架—抗震墙结构及多层钢筋混凝土框架结构为主。其抗震缺陷集中体现在以下几个方面。首先，设计标准偏低，多数建筑按设防烈度7度或更低进行设计，且未考虑近断层效应或场地类别的不利影响。其次，材料强度退化，混凝土碳化、钢筋锈蚀、砌体砂浆粉化等导致构件实际承载力较设计值明显下降。再次，结构体系不完善，如砌体结构缺乏构造柱和圈梁的有效拉结，框架结构柱端

箍筋加密区不足、节点核心区未配置足够的横向钢筋，致使结构延性较差。此外，使用功能变更导致楼面荷载增加、开墙洞或楼板开洞等改造行为进一步削弱了结构整体性。上述缺陷的综合作用使得老旧建筑在遭遇中强地震时易发生脆性破坏，增设减震装置旨在从能量耗散层面弥补结构自身抗震能力的不足。

1.2 增设减震装置的适用性分析

并非所有老旧建筑均适宜增设减震装置，其适用性需从技术、经济与施工三个层面进行综合研判。技术层面，原结构应具备基本完整性和一定刚度，若结构已严重破损或存在明显不均匀沉降，应先进行结构修补和地基处理，不宜直接增设减震装置。经济层面，减震装置成本、连接构件费用及施工措施费需与建筑后续使用年限内的预期效益相权衡，通常对于重要性较高或人员密集的公共建筑更具经济合理性^[1]。施工层面，现场应具备减震装置的安装空间和操作条件，且增设过程不应导致原结构局部承载力超限。综合而言，增设减震装置尤其适用于设防烈度为7~8度区、结构高度不超过60m、原结构梁柱节点或墙体具有一定传力能力的既有建筑。对于设防烈度9度及以上或场地条件极为不利的建筑，应优先考虑其他更为彻底的加固方案。

2 减震装置类型与选型原则

2.1 常用减震装置及其工作机理

目前工程中常用的减震装置主要包括金属屈服型阻尼器、粘滞流体阻尼器、摩擦型阻尼器和粘弹性阻尼器四类。金属屈服型阻尼器利用钢材屈服后的塑性滞回

变形耗散能量,其耗能能力强、性能稳定、造价较低,但在大震后需更换。粘滞流体阻尼器依靠粘滞介质在活塞运动过程中产生的阻尼力做功耗能,其耗能与速度相关,具有双向耗能性能好、输出力平滑的优点,但对密封性和介质温度较为敏感。摩擦型阻尼器通过摩擦副之间的滑动摩擦做功,耗能能力取决于正压力和摩擦系数,其滞回环近似矩形,耗能效率高,但长期使用后摩擦面性能可能退化。粘弹性阻尼器利用粘弹性材料的剪切滞回变形耗能,兼具刚度和阻尼特性,适用于风振和小震控制,但其耗能能力受环境温度和激励频率影响显著。选型时需根据老旧建筑的结构类型、预期地震水平、使用环境及维护条件综合确定。

2.2 选型影响因素与匹配策略

增设于既有建筑中的减震装置选型需重点考虑以下匹配因素。其一,刚度匹配,装置的附加刚度不宜过大,以免改变原结构层间刚度分布,导致薄弱层转移。其二,阻尼比需求,根据目标性能水平确定所需附加阻尼比,再折算为装置的总耗能能力。其三,行程与安装空间,老旧建筑层高普遍偏低,梁下或柱侧可利用净空有限,应优先选用尺寸紧凑的装置型式^[2]。其四,连接方式,应优先选择与原结构梁柱节点或墙体连接可靠、传力路径直接的装置,减少额外增设过渡构件的数量。基于上述因素,建议采用分档选配策略:对刚度富裕较大的砌体结构,可选用金属屈服型或摩擦型阻尼器;对刚度适中、变形能力较好的框架结构,宜选用粘滞流体阻尼器;对风震联合控制需求较高的建筑,可考虑粘弹性阻尼器。同时,应通过多轮试算确定装置参数,实现减震效果与经济性的协调统一。

3 增设减震装置的结构设计方法

3.1 基于性能的设计目标与流程

既有老旧建筑增设减震装置的设计应采用基于性能的设计方法,明确不同地震水平下的性能目标。设防地震下,主体结构应基本保持弹性,减震装置进入耗能工作状态,层间位移角限值可较原结构放宽但不得超过规范限值的80%。罕遇地震下,主体结构允许进入塑性但不应发生倒塌,减震装置应充分发挥耗能能力,且滞回环饱满稳定。设计流程可分为五个阶段:第一阶段,收集原结构设计资料并补充现场检测数据,建立有限元基准模型;第二阶段,设定目标性能指标并计算所需附加阻尼比;第三阶段,选择减震装置类型与布置方案,进行初步设计;第四阶段,对增设后的结构进行弹性和弹塑性时程分析,校核各性能指标;第五阶段,对不满足要求的方案进行迭代调整,直至达到预设目标。该流程

强调设计过程的可逆性和可调性,以适应老旧建筑信息不完整所带来的不确定性。

3.2 减震装置布置与连接构造设计

减震装置的布置应遵循“均匀、对称、分散”的原则,使附加阻尼在平面和竖向分布均衡,避免扭转效应。在平面布置上,宜将装置设置于结构周边或变形较大的部位,如框架结构的边跨柱间、砌体结构的外纵墙与横墙交接处。在竖向布置上,应避免在软弱层集中设置,防止因附加刚度导致层间剪力突变,建议沿高度均匀设置且每层设置数量不低于总数的10%。连接构造是改造设计的关键环节,对于钢筋混凝土框架结构,通常采用钢牛腿或预埋板与梁柱节点连接,连接焊缝或高强螺栓应传力可靠,且连接件的承载力应高于减震装置极限输出的1.2倍。对于砌体结构,需增设钢筋混凝土托架或配筋砂浆带作为传力中介,将阻尼力扩散至墙体。连接构造设计尚应充分考虑施工误差和温度变形的影响,预留足够的调节余量。

3.3 主体结构与减震装置的协同工作设计

增设减震装置后,主体结构与减震装置构成复合耗能体系,二者协同工作的本质在于地震作用力在“原结构抗力体系”与“附加耗能体系”之间的合理分配。协同设计需解决三个核心问题。第一,变形相容,减震装置的变形应与主体结构层间位移相协调,避免因装置变形滞后或超量而导致连接件破坏或主体结构局部应力集中^[3]。第二,内力重分布,附加装置承担部分地震剪力后,原结构各构件内力相应减小,但应注意竖向构件轴力可能因附加倾覆力矩而增大,需重新复核柱或墙肢的压弯承载力。第三,阻尼比叠加,结构总阻尼比由原结构固有阻尼和减震装置提供的附加阻尼比组合而成,二者并非简单线性叠加,需根据装置类型和变形状态采用能量比法或模态应变能法进行迭代计算。协同设计应贯彻“弱装置、强主体”的原则,确保即使在减震装置失效的极端情形下,主体结构仍不致倒塌。

4 结构改造中的关键技术问题

4.1 附加阻尼比确定与参数优化

附加阻尼比的合理确定是改造设计的核心参数之一。由于老旧建筑原结构阻尼比通常较新建结构偏大(实测值多在5%~8%),增设减震装置后的总阻尼比并非越高越好,过高的附加阻尼可能导致装置过早屈服或连接件超荷。建议以罕遇地震下结构最大层间位移角满足限值要求为控制条件,反推所需最小附加阻尼比,再结合经济性因素取1.2~1.5倍安全系数。参数优化方面,对于金属屈服型阻尼器,需优化屈服荷载和初始刚

度,使其在设防地震下即进入耗能状态,而在风振和小震下保持弹性;对于粘滞阻尼器,需优化阻尼系数和速度指数,使耗能效率最大化。优化算法可采用基于时程分析的参数扫描法或梯度下降法,但应控制分析次数以避免计算量过大。

4.2 既有基础与竖向构件的承载力验算

增设减震装置后,虽主体结构地震作用总剪力有所降低,但减震装置输出的集中力通过连接件传递至梁柱节点或墙体,可能引起局部附加弯矩和剪力,进而影响竖向构件及基础的受力状态。因此,必须对与减震装置直接相连的框架柱、剪力墙肢及其下方基础进行承载力验算。验算时应注意荷载组合的取值,除重力荷载和地震作用外,尚应考虑减震装置最大输出力产生的附加内力组合。对于基础承载力不足的情况,可采用扩大基础截面或增设锚杆静压桩的方法进行补强,但补强设计应与减震装置施工统筹安排,避免二次开挖对原结构造成额外扰动^[4]。此外,对于基础埋深较浅的老旧建筑,应特别注意减震装置安装节点处的局部承压验算,必要时增设钢垫板或扩大传力垫块。

4.3 施工可行性及对原结构的扰动控制

既有建筑改造施工空间受限,减震装置的安装涉及开孔、植筋、焊接、混凝土凿除等作业,对原结构存在不同程度扰动。设计阶段应充分考虑施工可行性,提出具体的扰动控制措施。首先,连接件植筋时应避开原结构主筋,采用无损探测设备确定钢筋位置,必要时调整锚固位置或采用化学锚栓替代。其次,焊接作业应控制热影响区范围,采用分段对称焊接以减少残余应力和变形,高温季节应防止因局部过热导致混凝土爆裂。再次,安装减震装置时,应设置临时支撑以分担施工荷载,并在装置就位后按设计要求的预压力或初始位移进行精确调节。施工过程中应布设位移和应变监测点,实时反馈结构响应,若监测值超出预警阈值应立即停工并采取卸荷措施。总体而言,改造设计应遵循“先加固后安装、先卸载后连接”的施工顺序原则,将施工扰动降至最低。

5 设计验证与性能评价指标

对增设减震装置的既有老旧建筑进行设计验证,需建立多级性能评价指标体系。一级指标为层间位移角,

对应设防和罕遇地震限值,反映整体变形安全裕度;二级指标为楼层加速度响应,确保峰值加速度在人体舒适度阈值内,保障人员及设备安全;三级指标为减震装置累积滞回耗能占总输入能量比例,要求不低于30%,以验证装置有效性;四级指标为连接节点应力比,最大应力比不应超过0.85,预留安全储备。评价方法宜采用非线性时程分析,选取不少于7组符合场地条件的地震波双向输入,取包络值评判。此外,应通过现场动力特性测试(如脉动法)获取实际自振频率和阻尼比,与设计值对比,偏差超15%时需修正模型并重新评价。该体系兼顾整体性能、局部安全和耗能效率,能全面反映改造设计的有效性。

6 结语

本文系统论述了既有老旧建筑增设减震装置的改造结构设计,涵盖性能评估、装置选型、设计方法、关键技术及评价指标。核心观点指出,改造本质是在原结构约束下引入耗能机制以提升抗震韧性,关键在于实现减震装置与原结构的协同工作。设计应坚持基于性能的目标导向,重点把控附加阻尼比确定、连接构造可靠性及施工扰动控制。提出的“评估—设计—验证—调整”闭环迭代框架,旨在应对老旧建筑信息不确定性带来的挑战。展望未来,该领域需在四个方向深入探索:一是发展快速检测与智能评估方法,提供精准基础数据;二是研发空间小、效率高且易更换的新型减震装置;三是建立考虑长期服役性能退化的设计理论;四是完善验收标准与健康监测技术。通过多学科交叉融合,推动减震改造向更安全、经济、高效方向发展。

参考文献

- [1] 周云,陈曦,吴从晓.既有建筑减震加固设计方法研究进展[J].建筑结构学报,2022,43(6):1-12.
- [2] 潘鹏,王涛,林楷奇.消能减震结构设计理论与工程应用[M].北京:中国建筑工业出版社,2021.
- [3] 李爱群,苏毅,徐赵东.粘滞阻尼器在既有框架结构加固中的应用研究[J].土木工程学报,2023,56(2):28-37.
- [4] 陈永祁,马良喆,张玉良.金属屈服型阻尼器性能及其在老旧建筑改造中的适用性分析[J].工程抗震与加固改造,2024,46(1):15-23.