

新型隔震技术在超高层结构抗震优化中的模拟与应用

宋浩东

(山东华科规划建筑设计有限公司, 山东 聊城 252000)

摘要 随着城市建筑密度不断提升,超高层建筑在城市中日益增多,其抗震安全性问题受到人们的广泛关注。传统刚性抗震设计在高烈度地震下往往存在变形大、损伤重等问题,难以保障结构安全与正常运行。新型隔震技术通过在结构底部设置隔震装置,有效延长结构自振周期、降低地震影响,提升结构韧性与稳定性。本文基于摩擦摆隔震支座(FPS)与高阻尼隔震橡胶支座(HDR),结合某典型工程项目,进行建模分析与实际应用研究,验证其对结构层间位移和基底剪力的控制效果,并提出了针对不同类型工程的隔震选型建议与优化思路,以期优化超高层建筑的抗震设计提供技术参考。研究表明,新型隔震技术具有良好的减震性能和工程适用性。

关键词 超高层建筑;抗震优化;数值模拟;摩擦摆支座;隔震设计

中图分类号: TU97

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.25.004

0 引言

超高层建筑在提升土地利用效率与城市功能集成方面发挥着重要作用。但由于其结构高柔性、大质量、高重心等特点,在地震作用下所受响应明显强于普通建筑,传统刚性抗震设计存在构造复杂、成本高和震后恢复困难等问题。新型隔震技术以延长结构自振周期、耗散地震能量、减小地震响应为核心,成为近年来抗震设计的重要方向。摩擦摆隔震支座、高阻尼隔震橡胶支座、磁流变阻尼器等隔震装置逐步应用于高层与超高层建筑。本文通过典型工程案例,对新型隔震技术进行建模分析与应用效果评估,验证其在减震控制方面的有效性,并提出相应的设计优化建议与发展方向,旨在为超高层建筑抗震体系的创新提供参考。

1 超高层结构抗震与隔震技术综述

1.1 新型隔震技术的分类与作用机制

新型隔震技术是一种通过在结构与基础之间设置隔震装置,以延长结构自振周期、降低地震输入能量的抗震手段。相较于传统加固或增强抗震刚度的方法,隔震技术更侧重于减小地震力的传递,实现结构整体“柔性抗震”。常见的新型隔震技术主要包括铅芯橡胶支座(LRB)、高阻尼隔震橡胶支座(HDR)、摩擦摆支座(FPS)、磁流变阻尼器(MRD)、粘滞阻尼器(VFD)和滑移隔震装置等。这些装置通过形变、滑移、耗能或智能调控等方式有效吸收地震能量、控制结构响应。其基本作用机制可分为两类:一类是通过柔性支座改

变结构动力特性,从而减少地震输入;另一类则是通过附加阻尼元件耗散能量,降低结构震动^[1]。新型技术的发展正趋向智能化、高性能和可调控,为超高层结构提供了更加可靠的减震方案。

1.2 新型隔震技术在高层建筑中的应用现状

随着城市建设密度的不断提高,超高层建筑日益增多,其抗震安全性成为结构设计中的重点难题。由于超高层建筑质量大、自振周期长、柔性强,对地震作用特别敏感,传统加固手段难以满足抗震性能与舒适性的双重要求。近年来,新型隔震技术在高层及超高层建筑中的应用逐渐受到重视。在实践中,越来越多的项目开始在结构底部或关键节点引入高性能隔震装置,以降低地震剪力与层间位移。例如:北京大兴国际机场、台北101、成都天府国际机场航站楼等地标建筑均在设计中引入隔震或阻尼系统。同时,随着材料技术、传感技术与智能控制系统的融合,部分建筑还实现了隔震装置的“主动控制”或“半主动调节”,提升了隔震系统的响应能力与适应性。但在实际推广中仍存在成本高、施工复杂、维护难度大等问题,亟待通过模拟验证、标准建设和工程集成进一步推动技术成熟与落地应用。

2 新型隔震技术的建模与模拟分析

2.1 模型建立与分析流程

在新型隔震技术的模拟分析中,建立合理的结构动力学模型是关键步骤之一。

首先,根据实际建筑结构选定典型的超高层框架—核心筒结构模型,明确结构层数、材料参数、构件布置与荷载条件。建模软件常选用 ETABS、SAP2000 或 OpenSees 等平台,通过引入隔震装置的力学模型,实现结构与隔震系统的协同模拟。在建模过程中,应充分考虑非线性行为、二阶效应以及装置的滞回特性。

其次,进行静力分析,验证模型合理性,并开展多工况下的地震响应时程分析。分析流程包括模型搭建、参数设定、地震动输入、计算执行及结果评估,最终提取关键响应指标用于对比。该流程可用于比较不同隔震技术或不同布置方式下的结构性能差异,为优化设计提供数据支撑。

2.2 地震动选取与输入方式

合理选择和输入地震动是隔震模拟分析中至关重要的一环。通常应选取具有代表性的地震记录,包括不同震级、不同震中距和不同地质条件下的地震波,以全面反映隔震结构在各类地震作用下的响应特征。为满足规范要求,地震动应进行谱线拟合处理,使其反应谱与目标设计谱吻合;常用方法包括时程加速度调整或反应谱匹配法。在分析中一般输入 3~5 条双向地震动进行平均处理,采用水平两向及垂向同时输入方式更符合实际。对于超高层建筑,由于其周期较长,应选取含有中长周期成分的地震动,以确保分析结果对位移反应更敏感^[2]。输入方式通常为地面加速度输入,若设置隔震层,则需特别注意基底自由场条件和接触节点的边界约束设定。通过合理地震动选取与输入方式,可以有效提高模拟结果的代表性和安全性。

2.3 关键指标对比分析

为了评估新型隔震技术在超高层结构中的减震效果,通常选取多个关键响应指标进行对比分析。核心指标包括最大层间位移角、顶点位移、基底剪力、各层加速度响应及能量耗散比等。层间位移反映结构的整体变形能力,是衡量结构安全性的直接指标;加速度则关系到人员舒适性和非结构构件的破坏风险;基底剪力则体现了结构与地基的相互作用强度。在对比分析中,需设置“无隔震”“传统隔震”和“新型隔震”三类工况进行模拟,分析各类装置在不同地震波作用下的响应变化。通过结果对比,往往可见新型隔震技术显著降低了结构顶点加速度与层间剪力,表现出更优的减震性能^[3]。滞回能量曲线、变形模式图等可视化手段也可作为分析辅助,进一步揭示其耗能特性与控制效果。此类指标对比为工程设计中合理选择与布置隔震装置提供了直观依据。

3 工程案例分析与实际应用效果评估

3.1 工程概况与结构设计简介

本研究选取的工程案例位于四川某地震高烈度区域的中心城市,是一座集办公、政务服务与会议功能于一体的区域地标性综合体建筑。项目总高度约为 260 米,结构形式采用钢筋混凝土框架—核心筒体系,地上共 55 层,地下 3 层,结构总面积超过 18 万平方米。场地类别为 III 类,地震设防烈度为 8 度,设计基本地震加速度值达到 0.3 g。由于该项目处于龙门山断裂带影响区域,地震风险等级较高,因此在建筑概念设计初期即引入新型隔震设计策略,旨在提升建筑整体的抗震性能和震后可恢复性。建筑功能分区明确,上部为办公区,中部为政务会议中心,下部为多功能服务配套,结构体系布置考虑竖向荷载不均及抗震对称性,采用加强核心筒与外围框架联合工作模式,并设置转换层以增强整体稳定性。为提高建模准确性,结构分析模型引入了楼板协同作用、构件非线性以及剪切变形等因素,并严格依据《建筑抗震设计规范》(GB50011)及《建筑隔震设计规范》(GB/T51408)对关键连接节点进行专项加固设计,从源头确保结构具备良好的延性和强震响应能力。

3.2 隔震系统布置与关键节点设计

为提升本项目在地震作用下的整体韧性与响应控制能力,设计团队选用了摩擦摆隔震支座与高阻尼隔震橡胶支座联合组成的复合隔震系统。隔震层设于地下二层与地下三层之间,布置支座共计 76 个,主要分布在框架柱与核心筒底部,形成结构与基础之间的减振隔层。在支座布置中,采用对称布置原则以保证建筑在震动过程中受力均匀,同时为适应不同区域荷载大小,支座刚度设计分级配置。为防止在地震中发生异常滑移,所有支座设置限位装置,关键节点处还配合阻尼器形成协同耗能体系^[4]。裙楼与主楼连接部分采用柔性连接系统,以消除水平位移差引发的构造冲突。在设备机房、地下管网等敏感区域设有实时位移与加速度监测装置,实现结构运行状态的全过程监控。整个隔震系统不仅满足震后不倒的基本安全要求,还兼顾了运营舒适性、经济性与施工便捷性,为后续类似项目提供了可复制的技术范式。

3.3 模拟结果与实际观测对比分析

为全面评估隔震系统的减震效果,设计团队基于 OpenSees 平台建立了详细的三维结构动力分析模型,并引入 5 组经谱线拟合处理的地震动数据进行非线性时程分析。模拟结果显示,采用复合隔震系统后,最大层间位移角降低了约 52%,顶部水平加速度降低 30% 以上,结构整体滞回耗能能力显著提升,基底剪力减

少了近45%，表现出良好的能量耗散能力与响应延迟特性。在模拟过程中，还对比了不同支座刚度配置方案，结果表明：在支座刚度适当分布的情况下，结构各层响应更加平滑、整体变形协调性提升明显^[5]。竣工后，该建筑在某次区域中震中受到了实际地震考验，所部署的结构健康监测系统记录的实时数据与仿真预测基本吻合，表明设计建模与分析方法具备较强的准确性与工程指导价值。关键监测点未出现结构裂缝、幕墙脱落或设备错位等情况，验证了该隔震设计在实际地震工况下的优越表现。

4 抗震优化策略与发展建议

4.1 不同隔震技术的适用性探讨

在隔震设计中，选择合适的隔震装置对于实现预期的抗震目标至关重要。目前常见的隔震技术主要包括高阻尼隔震橡胶支座(HDR)、铅芯橡胶支座(LRB)、摩擦摆隔震支座(FPS)以及新兴的磁流变阻尼器(MRD)等。HDR具备结构简单、稳定性强的优点，适用于周期较长、对变形容量要求高的超高层建筑；LRB因具备更强的耗能能力，在地震作用强烈地区应用广泛，尤其适合医疗、通信等功能重要的建筑；FPS则因滑移面存在自复位能力，更适合用于短周期或地震波复杂地区的项目。在实际设计中，还需考虑使用功能、地震区位、地下结构约束条件及运维可达性等因素。智能型或半主动型装置如MRD能根据地震实时状态调整力学参数，未来在高价值超高层建筑中应用潜力巨大。在实际应用中，往往通过模拟比选不同装置类型和布置方式，综合评估其性能与成本，以获得最优抗震配置。

4.2 优化设计建议与实施路径

要实现新型隔震技术在超高层建筑中的高效应用，必须在设计、施工及运维各阶段形成完整的闭环体系。在设计阶段，应引入“性能化抗震设计”理念，明确隔震目标，结合结构响应分析与地震风险评估，开展多轮参数敏感性分析，确保隔震系统整体刚度匹配与响应协调。在施工阶段，应严格执行支座安装技术规范，关注底板找平、限位结构设置及支座防腐、防水等细节处理，保障装置功能的可靠实现。需在结构交界面设置合理的位移缝与防撞设施，避免在地震期间发生非结构性破坏。在运维阶段，应建立隔震装置定期巡检与预警机制，并通过BIM+IoT平台实现对支座状态的远程监测与维护日志追踪。建议在重大项目中采用“设计—施工—监测—反馈”一体化实施路径，通过全过程信息化手段将结构设计与隔震系统实时数据联通，为后续项目积累实践数据与经验支撑，进一步优化设计流程与系统集成效率。

4.3 智能监测与未来发展方向

随着建筑智能化与数字孪生技术的发展，隔震系统也正逐步迈入智能监测与智能控制的新阶段。在未来的超高层建筑中，隔震装置不仅是一个被动减震部件，更将成为可感知、可调控的智能结构节点。通过部署分布式传感网络，包括MEMS加速度计、光纤应变计、无线位移计等，可以实时监测隔震层的位移、加速度、温度与耗能状态，实现设备健康评估与故障预警。结合云计算与人工智能技术，建筑结构响应可进行实时分析与震情预测，系统还可根据当前震动强度自动调整阻尼参数或启动锁定机制，确保建筑物在不同震级下具备最优响应能力。在工程运维层面，结合BIM平台与建筑数字档案，未来可实现隔震系统的三维可视化运维管理，极大地提升运维效率与安全性。在政策层面，应加快推动隔震装置的数字标准制定与智能装置检测认证机制，为新型技术在超高层建筑中的应用创造有利条件。

5 结束语

围绕新型隔震技术在超高层结构中的应用展开研究，系统分析不同类型隔震装置的性能特点，并通过典型工程案例进行建模与地震响应模拟。研究表明，新型隔震装置如摩擦摆隔震支座、高阻尼隔震橡胶支座等，在降低层间位移、控制基底剪力和提升结构韧性方面具有显著优势。结合实测数据验证可知，该类装置具备良好的实用性和工程适应性。本文提出了隔震设计优化建议，包括装置布置策略、构造处理细节以及基于信息化平台的智能监测路径，为今后相关项目提供了可参考的技术框架。虽然当前新型隔震技术在部分超高层建筑中取得了积极成果，但在标准完善、成本控制和长期运维等方面仍需持续改进。未来应加强隔震系统与智能建筑技术的融合，推动其在更多工程中的推广与应用。

参考文献：

- [1] 谷前进. 新型高层隔振装置抗震结构模型振动台试验研究[J]. 广东建材, 2025, 41(04): 155-158.
- [2] 龚振峰. 基于绿色建筑理念的结构隔震技术优化路径研究[J]. 新城建科技, 2025, 34(03): 61-63.
- [3] 陈娟. 新型抗震技术在高层建筑工程中的应用分析[J]. 新城建科技, 2025, 34(03): 119-121.
- [4] 王宝彤, 蒋姗, 王龙梅, 等. 楼板隔震结构抗震性能研究综述[J]. 低温建筑技术, 2025, 47(02): 19-23.
- [5] 李铁军. 基于新型材料的建筑结构抗震设计优化研究[J]. 新城建科技, 2025, 34(02): 110-112.