

建筑结构设计中的隔震减震措施分析

李润川

中土大地国际建筑设计有限公司, 河北 石家庄 050000

[摘要]建筑结构设计中的隔震减震措施是提升工程抗震性能、保障生命财产安全的关键技术, 本篇文章结合具体工程案例, 对建筑结构中的隔震减震设计方案进行了阐述。研究结果表明: 基于铅芯橡胶支座(LRB)的隔震系统和VFD+BRB的混合减震方案可以在中震或罕遇地震情况下大幅提升建筑的抗震性能。

[关键词]铅芯橡胶支座; 减震; 隔震

DOI: 10.33142/aem.v7i5.16759

中图分类号: TU352

文献标识码: A

Analysis of Seismic Isolation and Reduction Measures in Building Structure Design

LI Runchuan

Zhongtu Dadi International Architectural Design Co., Ltd., Shijiazhuang, Hebei, 050000, China

Abstract: The seismic isolation and damping measures in building structure design are key technologies to improve the seismic performance of engineering and ensure the safety of life and property. This article elaborates on the seismic isolation and damping design schemes in building structures based on specific engineering cases. The research results indicate that the seismic isolation system based on lead rubber bearings (LRB) and the hybrid seismic reduction scheme of VFD+BRB can significantly improve the seismic performance of buildings under moderate or rare earthquake conditions.

Keywords: lead rubber bearings; shock absorption; isolation

引言

地震灾害对建筑结构的破坏性影响促使工程领域不断探索更有效的抗震技术, 传统的抗震设计依赖结构自身的强度与延性耗散地震能量, 但难以避免较大损伤, 而隔震减震技术通过“以柔克刚”或“主动消能”的理念成为现代抗震设计的重要发展方向。本文基于隔震减震技术的分类与机理, 提出了相应的隔震与减震的设计方案, 旨在为优化建筑抗震性能提供科学依据, 随着新材料与智能化技术的发展, 隔震减震措施的应用前景将更加广阔, 对提升建筑韧性具有重要意义。

1 工程概况

某建筑工程位于地震频发区域, 是一座集办公、科研及多功能会议为一体的现代化综合建筑, 总占地面积约为3.5万 m^2 , 总建筑面积为29.6万 m^2 , 建筑高度为25m, 共5层。该综合性建筑为钢筋混凝土框架结构体系, 设计为符合抗震设计的乙类标准, 抗震设防烈度为8度, 基本地震加速度为0.2g。鉴于该地区的地震活动比较频繁, 为保证建筑的长期使用性, 设计团队决定采用全面的减震隔震设计理念来提升建筑物的抗震性能。

2 建筑结构设计中的隔震设计方案

2.1 隔震装置及特点

隔震装置是建筑物与地基之间具有弹性的过渡层, 其创新设计点在于通过延长结构的自振周期来大幅度地降低地震波对建筑物输入的能量, 由此对建筑结构发挥良好

的保护作用, 使其免受地震损害。这一领域中橡胶隔震支座是应用范围最为广泛的隔震装置, 这是因为其水平柔性极为良好且垂直刚度也保持在稳定状态, 还具有隔震和复位两个核心功能, 在地震发生时能够有效吸收和分散地震能量, 为建筑结构提供必要的隔震保护, 而且在地震过后还能够帮助建筑结构迅速恢复到原始位置, 减少因地震引起的永久变形。滑动隔震支座的设计原理是使建筑结构能够在地震时相对于地基产生水平方向的相对位移, 借助这种位移过程中产生的摩擦力来有效吸收并分散地震能量, 从而减轻地震对建筑结构的影响, 该支座的摩擦系数是可以调整的, 能够适应不同地震烈度和不同建筑结构的抗震需求。弹簧阻尼器隔震装置则是把弹簧的弹性和阻尼器的耗能特性深度融合在一起, 在垂直和水平方向上都能提供有效的隔震效果, 弹簧能够吸收和分散地震能量, 而阻尼器则能够进一步消耗这些能量, 两者凭借协同配合一起发挥效能使建筑结构在地震中保持相对稳定。这三类隔震装置的优势各不相同, 在具体进行选择时应当将建筑特点与场地条件结合起来进行综合考量, 随着新型复合材料和智能控制技术快速跃进并得到了高效使用, 铅芯橡胶支座(LRB)的问世增强了隔震装置在性能和适用性方面的整体水平, 使建筑结构抗震设计拥有了更广阔的选择空间^[1]。

2.2 隔震结构设计

该综合建筑采用铅芯橡胶支座(LRB)为隔震系统的

核心部件，它由多层橡胶板片与钢板交替叠合在一起，并采用精密黏结工艺固定成型，核心构造主要涉及隔震支座主体、中心铅芯组件以及弹性筒缓冲层，其中橡胶-钢板复合层在支座中心区域预留了铅芯孔道，内部置有纯度比较高的铅芯，并且在外围安装了特种弹性筒，与铅芯孔内壁形成紧密接触的界面体系。这种隔震系统基于橡胶层的剪切变形来实现限位功能，并利用铅芯的塑性变形特性提供了更为优异的阻尼耗能效果，这种创新性的设计理念使得支座具备弹性恢复与能量耗散的双重机制，不但可以借助橡胶层的弹性变形存储并释放能量，还能依托铅芯的滞回特性将地震输入能量消耗掉，相关工程实测表明：这种铅芯橡胶支座系统可以大幅降低水平地震作用力，将地震剪力削减到传统结构的 50% 以下，大幅度改善结构的地震响应特性。基于对竖向压应力分布、拉应力分布、水平变形、偏心率等关键参数的分析，该综合建筑一共采用 78 个铅芯橡胶隔震支座（LRB），有效直径为 620mm，总高度 236mm，屈服力 92kN，屈服后刚度为 920kN/m。隔震支座的平面布置（见图 1）综合考虑了上部结构的荷载分布、刚度中心及地震作用下的变形需求，使得各个支座的受力处于比较均匀的状态，规避掉局部应力集中情况，并基于对间距和位置的优化实现了对结构偏心率的控制，使得整体隔震效率得到大幅提升^[2]。

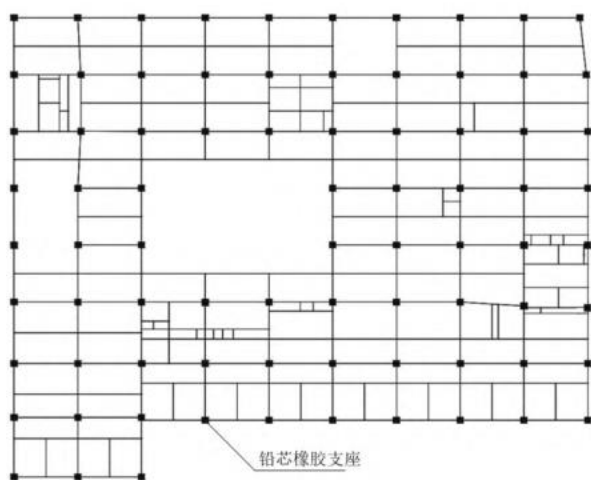


图 1 铅芯橡胶支座布置

2.3 隔震性能分析

本项目的隔震性能分析采用 ETABS 2022 有限元分析软件进行精细化模拟，依据《建筑抗震设计规范》（GB 50011—2010）要求，采用 RH2TG036 天然地震波（图 2），它的波频谱特性与项目场地类别相匹配，可以有效反映出结构在设防地震作用下的动力响应。同时，TH2TG035 天然地震波（图 3），具有比较高的峰值加速度（PGA）和长周期分量，能在极端地震作用下对结构的非线性行为及隔震系统的极限性能进行考察^[3]。

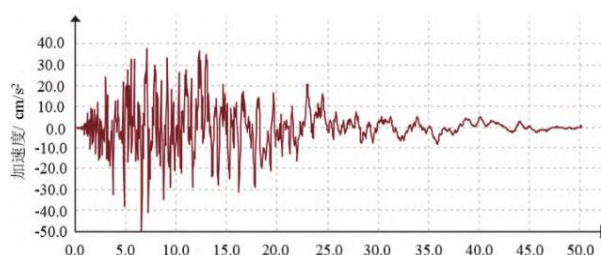


图 2 RH2TG036 天然地震波

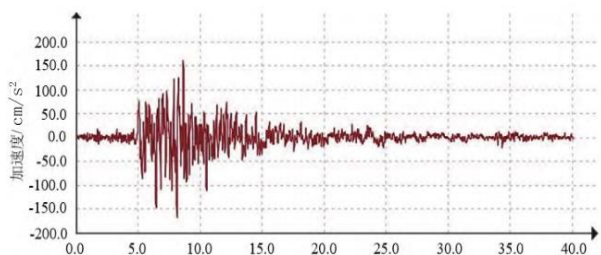


图 3 TH2TG035 天然地震波

2.3.1 中震情况下隔震性能分析

基于 ETABS 软件的数值模拟，本研究对比分析了传统抗震结构（无隔震措施）与采用铅芯橡胶支座（LRB）隔震结构在中震情况下的抗震性能差异，表 1 列出了两种结构体系在各楼层的层间位移角计算结果，该参数是评估结构抗震性能的关键指标之一^[4]。

表 1 中震情况下有无隔震措施的层间位移角

楼层-方向	无隔震措施	布置铅芯橡胶支座
1-X	1/267	1/1182
2-X	1/253	1/1126
3-X	1/291	1/1345
4-X	1/337	1/2017
5-X	1/474	1/2592
1-Y	1/274	1/1178
2-Y	1/245	1/1128
3-Y	1/286	1/1521
4-Y	1/362	1/2134
5-Y	1/455	1/2708

依照表 1 中的数值模拟结果，中震情况下 X 向抗震性能在没有进行隔震措施时，最大层间位移角为 1/253，采用铅芯橡胶支座隔震后降低到了 1/1126，降幅达到 77.5%，抗震性能比较明显。同时，在无任何隔震措施的情况下，Y 向抗震性能的最大层间位移角为 1/245，采用隔震措施后优化到了 1/1178，降幅为 79.2%，抗震效果更为突出。经隔震优化后，结构在 X、Y 双向的最大层间位移角均远低于《建筑抗震设计规范》（GB 50011-2010）对 I 类建筑在中震工况下 1/400 的限值要求，其中 X 向位移角仅为规范限值的 35.5%，Y 向位移角仅为规范限值的

34.0%，这一量化分析结果充分验证了铅芯橡胶支座隔震方案的有效性^[5]。

2.3.2 罕遇地震情况下隔震性能分析

基于 ETABS 软件的数值模拟，本研究对比分析了传统抗震结构（无隔震措施）与采用铅芯橡胶支座（LRB）隔震结构在罕遇地震情况下的抗震性能差异，如表 2 所示。

表 2 罕遇地震情况下有无隔震措施的层间位移角

楼层-方向	无隔震措施	布置铅芯橡胶支座
1-X	1/152	1/728
2-X	1/123	1/749
3-X	1/148	1/985
4-X	1/268	1/1207
5-X	1/307	1/1514
1-Y	1/155	1/735
2-Y	1/131	1/772
3-Y	1/167	1/952
4-Y	1/233	1/1183
5-Y	1/275	1/1669

经隔震优化后，结构在罕遇地震作用下的性能表现：X 向和 Y 向的移角仅为规范限值（1/100）的 13.4% 与 13.0%，说明铅芯橡胶支座能有效控制结构在极端地震作用下的变形，完全满足《建筑抗震设计规范》（GB 50011—2010）对罕遇地震工况的严格要求。

3 建筑结构设计中的减震设计方案

3.1 减震装置及特点

在建筑减震设计的领域中，使用频率较高且应用范围较为广泛的各减震装置在机制和优势方面存在较大的差异性，黏滞阻尼器此种减震装置主要是通过流体在特定结构中的流动和剪切变形来消耗地震能量，从而有效地减轻地震对建筑结构的影响，其对于不同的荷载和变形需求均表现出良好的适应性；金属阻尼器则是通过材料的塑性变形来消耗地震能量，其具有耐久可靠的特点，即使是在长期的地震作用下依旧能保持稳定的性能；调谐质量阻尼器则是利用附加质量系统来抑制主体结构响应，将其应用在高层建筑等结构中能获得良好的成效；屈曲约束支撑此种减震装置则是高度集成了支撑承载和耗能特性，能够将刚度与阻尼都覆盖到，当前这些装置的材料和构造正在不断转向创新性发展方向，在实际选择时应将它们的力学特性、温度敏感性和长期稳定性等多种因素都纳入到考量范围内，通过精准模拟来确定每种装置的最优参数并对这一数值反复验证来确保其合理性。近年来，磁流变液此种智能材料得到了合理的使用，使得减震装置能够根据实际地震波的变化进行实时调节，表现出良好的适应性，而针对复杂结构的抗震需求，多功能复合减震装置的研发工作则为

这些结构提供了更多样的抗震设计方案选择区间。

3.2 减震结构设计

粘滞阻尼器（VFD）和屈曲约束支撑（BRB）是现代建筑结构中两种比较典型的消能减震装置，前者主要是由活塞系统、密封缸体以及高黏度阻尼材料等部件所组成，基于黏滞材料在活塞运动过程中所产生的剪切变形来实现对结构振动能量的耗散，让结构动力响应得到充分抑制。屈曲约束支撑基于三明治式构造，由核心钢板、无粘结材料层、外围约束套筒及填充砂浆所组成，它具备独有的双阶段工作性能，当处于常遇地震作用下时会保持弹性工作状态，一旦进入到罕遇地震阶段，核心钢板就会优先进入到塑性变形阶段，借助比较稳定的滞回行为耗散地震输入能量，为主体结构提供更加可靠的抗震保护。

作为速度型阻尼器，VFD 主要是借助阻尼效应耗散地震能量，对于结构刚度的影响相对比较小，它的优势在于可以降低结构的地震响应，但由于不提供附加刚度，所以耗能能力在地震作用比较强的情况下会受到限制。而 BRB 属于位移型阻尼器，可以大幅提升结构的侧向刚度，在小震或风荷载作用下通过保持弹性可以增加结构的抗侧移能力，而在罕遇地震下核心钢板会屈服并耗能，但由于刚度比较大，屈服后的耗能能力相对比较有限。为了发挥出这种减震装置的优势，项目团队决定布置 VFD 与 BRB 的混合减震方案，将 VFD 作为主要耗能元件，负责吸收地震能量并降低结构动力响应，而 BRB 当作刚度增强元件来使用，它可以协同控制结构的侧向位移，使整体抗变形能力得到大幅提升。

3.3 减震性能分析

3.3.1 中震情况下减震性能分析

基于计算机分析软件对原抗震结构和 VFD 与 BRB 的混合减震方案的结构进行对比分析，重点考察了两种结构体系在 X、Y 方向的层间位移角响应，如表 3 所示。计算结果表明，未设置减震措施的原结构在中震作用下的层间位移角已经接近规范限值，其中 X 向最大层间位移角达到 1/251，Y 向最大层间位移角为 1/235，虽然满足现行《建筑抗震设计规范》（GB 50011—2010）中框架-剪力墙结构 1/200 的限值要求，但安全裕度较为有限。采用 VFD 与 BRB 协同工作的混合减震方案后，结构抗震性能得到了明显提升，X 向最大层间位移角降低至 1/442，减震效果达到 43.1%；Y 向最大层间位移角更降至 1/478，减震效率达 53.4%。这种非线性消能减震体系的优势体现在：VFD 通过黏滞流体产生的阻尼力有效耗散地震能量，而 BRB 则在保持轴向承载力的同时通过钢材屈服耗能，二者协同工作大幅改善了结构的变形性能。另外，减震后结构在 X、Y 两个主轴方向的层间位移角

分布更加均匀,最大层间位移角出现的楼层位置也发生了改变,说明混合减震装置优化了结构的刚度分布和耗能机制。

表 3 中震情况下有无减震措施的层间位移角

楼层-方向	无减震措施	布置混合减震结构
1-X	1/305	1/502
2-X	1/251	1/442
3-X	1/295	1/571
4-X	1/472	1/823
5-X	1/551	1/1125
1-Y	1/323	1/519
2-Y	1/235	1/478
3-Y	1/267	1/535
4-Y	1/381	1/621
5-Y	1/472	1/893

3.3.2 罕遇地震情况下减震性能分析

在罕遇地震作用下,建筑结构的抗震性能会直接影响到建筑的倒塌风险和内部人员严重,项目团队在计算机分析软件的帮助下,对比了原抗震结构与 VFD+BRB 混合减震方案的结构的层间位移角响应,如表 4 所示。根据数据结果可以看出,在罕遇地震作用下,未设置减震措施的原结构层间位移角较大,X 向和 Y 向的最大层间位移角为 1/172,该数值已接近或超过《建筑抗震设计规范》(GB 50011—2010)对框架-剪力墙结构在大震下的限值要求 1/200,表明原结构在罕遇地震下会进入弹塑性阶段,存在比较大的结构损伤风险。而采用 VFD+BRB 混合减震方案后,X 向最大层间位移角降至 1/253,减震效率达 31.9%;Y 向最大层间位移角降至 1/221,减震效率达 22.4%;该结果也表明:VFD 基于黏滞阻尼效应耗散地震能量,BRB 则通过钢材的屈服耗能,二者协同作用可以有效抑制结构的层间变形,而减震结构的层间位移角分布更加均匀,说明混合减震装置优化了结构的刚度和耗能分布,避免大范围薄弱层的形成。

表 4 罕遇地震情况下有无减震措施的层间位移角

楼层-方向	无减震措施	布置混合减震结构
1-X	1/213	1/276
2-X	1/172	1/253
3-X	1/225	1/341
4-X	1/366	1/552
5-X	1/487	1/711
1-Y	1/201	1/258
2-Y	1/172	1/221
3-Y	1/212	1/305
4-Y	1/396	1/552
5-Y	1/468	1/798

4 结语

综上所述,本文结合具体工程案例对建筑结构设计中的隔震减震措施进行分析,研究结果表明:采用铅芯橡胶支座(LRB)的隔震结构设计可以大幅降低建筑在中震和罕遇地震情况下的层间位移角;基于 VFD+BRB 的混合减震方案同样可以在以上情况下取得较好的抗震效果。

[参考文献]

- [1]范惠英.建筑结构设计中的隔震减震措施分析[J].中国建筑装饰装修,2025(8):91-93.
- [2]成小慧,王瑛岚.建筑结构设计隔震减震技术探讨[J].城市建设理论研究(电子版),2025(9):67-69.
- [3]赵春燕,逢毓卓.建筑结构设计中的隔震减震设计研究[J].中国高新科技,2025(1):84-86.
- [4]蔡官民.建筑结构设计中的隔震减震措施研究[J].新城建科技,2024,33(12):123-125.
- [5]陈默子,郭程昕.隔震减震控制技术在复杂高层建筑设计中的应用[J].城市建设理论研究(电子版),2024(35):178-180.

作者简介:李润川(1983.11—),男,毕业院校:湖南大学,专业:土木工程,单位:中土大地国际建筑设计有限公司,工程师。