近场地震作用下隔震建筑结构设计优化研究

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：近场地震动以其长周期速度脉冲、高峰值加速度和显著竖向分量等特征，对隔震建筑结构的安全性构成特殊威胁。传统隔震设计主要依据远场地震动参数，在近场条件下暴露出一系列适应性不足的问题。本文系统分析了近场地震动的工程特征及其对隔震结构的影响机制，在此基础上提出以脉冲周期匹配、位移需求控制、竖向稳定性保障和能量耗散优化为核心的设计优化框架，并从基础隔震、层间隔震与混合隔震三种形式出发，探讨了各自适用的优化策略。研究认为，近场隔震设计优化的本质在于从" 基于强度" 的被动设防转向" 基于性态" 的主动调控，需要在地震输入识别、隔震层参数匹配、耗能机制配置和抗倾覆验算等多个维度实现协同优化。本文旨在为近场地震区隔震建筑的设计实践提供理论参考与方法支撑。

关键词：近场地震动；隔震结构；速度脉冲；设计优化

引言

隔震技术通过在基础与上部结构之间设置水平柔性层，延长结构自振周期以避开地震能量集中频段，已成为提升建筑抗震安全性的有效手段。然而，大量震害观测表明，在近场地震作用下，隔震建筑的实际表现与设计预期之间存在显著偏差。1994 年美国北岭地震、1995 年日本阪神地震及 2008 年中国汶川地震中，部分隔震建筑出现了隔震层位移超限、上部结构加速度响应放大乃至隔震支座受拉破坏等现象，促使学术界重新审视近场条件下隔震设计的适用性问题。近场地震动区别于远场地震动的核心特征在于其蕴含高能量的速度脉冲，这种脉冲效应在时域上表现为一次或数次大幅值、长周期的速度或位移波动，在频域上则表现为低频成分的显著富集。传统隔震设计通常以远场地震记录为输入依据，其设计谱的峰值周期较短，且较少单独考虑速度脉冲的影响。当隔震结构遭遇近场脉冲型地震时，隔震层的长周期特性恰与脉冲周期形成" 共振式" 耦合，导致隔震层位移需求被大幅低估，上部结构的加速度响应也可能因高阶振型参与而超出预期。面对这一矛盾，国内外研究已从震害统计、理论分析和设计方法修订等角度展开探索。美国 ASCE7-16 规范已明确要求在近场区域内考虑脉冲效应的影响，我国《建筑隔震设计标准》（GB/T51408—2021）也在近场系数调整方面做出了规定。但总体而言，现有设计方法仍以" 校正系数" 方式对远场设计框架进行修补，尚未形成针对近场特征的系统性优化设计理论。

1 近场地震动的工程特征及其对隔震结构的影响

1.1 近场地震动的运动学特征

近场地震动通常指震源破裂距离小于 20km 范围内的地面运动记录，其工程特征可归纳为三个主要方面。第一，方向性效应与速度大脉冲。当断层破裂方向朝向场地传播时，破裂速度与剪切波速接近，导致地震波在短时间内叠加形成长周期速度脉冲，脉冲周期一般在 1.0~3.0s 之间，峰值速度可达远场记录的数倍以上[1]。第二，峰值加速度较高且衰减缓慢。近场区域峰值加速度（PGA）通常超过 0.3g，在近断层特殊地质条件下更可达到 0.6g 以上，且高频成分显著。第三，竖向地震动分量不容忽视。近场竖向峰值加速度（PGV）与水平向之比较远场明显增大，竖向地震动对隔震支座的竖向力状态产生重要影响。

1.2 近场地震动对隔震结构的特殊作用机制

隔震结构的设计逻辑在于延长周期以" 避让" 地震能量。当结构基本周期 Tb 延长至 2.0~4.0s 时，在远场地震动条件下通常能有效降低加速度响应。然而，近场速度脉冲的卓越周期恰处于 1.0~3.0s 区间，恰好落入隔震结构的周期延长范围。这意味着隔震层不仅未能避让地震能量，反而因周期接近脉冲周期而产生准共振效应，隔震层位移需求急剧增大。进一步分析表明，这种作用可以从三个层面加以理解。其一，隔震层位移的超量放大。脉冲型速度时程的一次大幅值波动相当于对隔震层施加了拟静态的" 单次循环" 位移荷载，其位移峰值远高于基于反应谱法的估算结果，可能超越隔震支座的容许变形能力。其二，上部结构加速度响应的放大回弹。虽然隔

震层过滤了高频分量，但长周期脉冲可能激发上部结构的低阶振型，且脉冲的突然终止会产生高阶振型响应，导致上部结构楼层加速度有时甚至超过非隔震结构。其三，竖向地震动对隔震支座稳定性的削弱。橡胶隔震支座在水平大变形状态下竖向受压承载力本已下降，竖向地震动引起的附加拉压循环进一步降低其稳定性，严重时可能导致支座受拉脱空或屈曲失稳。

1.3 现有设计方法的适应性局限

目前国内外抗震设计规范对近场效应的处理主要采用近场系数（near-faultfactor）对设计谱进行调整，即在确定设计地震动参数时乘以大于 1.0 的放大系数。这种处理方式虽然在一定程度上提高了设防水平，但本质上仍属于弹性反应谱框架下的参数修正，存在若干固有局限。首先，近场系数无法反映速度脉冲的波形特征和持续时间效应，而脉冲形态对隔震层位移响应的影响往往比峰值大小更为关键[2]。其次，反应谱法本身基于平稳随机过程假定，对具有强非平稳性的近场地震动适用性不足。再者，对竖向地震动的处理过于简化，多数规范仅以水平向地震动的固定比例估算竖向分量，忽略了近场竖向地震动的独立特征。这些局限表明，在近场条件下隔震设计需要超越” 系数调整” 的修补思路，构建更具针对性的优化设计方法。

2 近场隔震结构设计优化的理论框架

2.1 优化目标与约束条件

近场隔震结构设计优化应以” 性态控制” 为基本导向，明确在多级设防目标下的性能要求。具体而言，可将优化目标分解为以下层次：在低强度地震作用下，隔震层保持弹性，上部结构基本无损伤；在中强度近场地震作用下，隔震层允许进入弹塑性状态但残余位移可控，上部结构仅出现可修复损伤；在罕遇近场地震作用下，隔震层位移不超过容许限值，上部结构不发生倒塌，关键构件保持竖向承载能力。优化问题的约束条件包括几何约束（隔震层位移限值、支座变形能力）、强度约束（支座竖向承载力、上下部结构连接强度）和功能约束（建筑正常使用要求、设备加速度限值）。优化的实质是在上述多约束条件下，寻找使结构整体抗震性能达到最优的参数配置方案。

2.2 基于脉冲参数的设计地震动输入

鉴于反应谱法在近场条件下的局限性，建议在近场隔震设计中直接采用基于脉冲参数的地震动输入策略。具体而言，应根据场地断层类型、震级和距离等条件，识别可能的速度脉冲周期 Tp 和峰值速度 Vp，构造或选择与目标脉冲参数相匹配的地震动时程作为输入。对于重要建筑，宜采用多条脉冲地震记录进行动力时程分析，并以响应统计值（如平均值加一倍标准差）作为设计依据。在无法获得充足脉冲记录的情况下，可采用简化的等效脉冲模型（如半正弦波或 Ricker 小波叠加）与背景地震动时程叠加构造人工地震动，确保输入时程能够同时表征近场地震动的速度脉冲特性和高频随机特性。

2.3 多目标优化设计方法

近场隔震设计优化本质上是一个多目标优化问题，需要在隔震层位移、上部结构加速度和支座竖向拉力等多个相互竞争的性能指标之间寻求协调最优。建议采用基于性态的优化设计流程：首先根据场地条件和建筑重要性确定设计地震动输入；其次以隔震层等效周期和阻尼比为主要设计变量，通过参数化分析建立各性能指标与设计变量之间的响应面关系；然后采用多目标优化算法（如 NSGA-II 或多属性决策方法）求解 Pareto 最优解集；最后根据项目实际侧重从 Pareto 解集中选定最终设计方案。

3 隔震结构设计优化策略

3.1 隔震层参数优化

隔震层参数优化是近场隔震设计的核心环节。优化的首要任务是实现隔震层等效周期 Tb 与预期脉冲周期 Tp 之间的” 主动失谐”。当 Tp 可识别时，应避免 Tb 与 Tp 接近，具体可通过调整隔震支座的布置密度、改变铅芯橡胶支座与天然橡胶支座的数量比例等方式实现。但需注意，过度缩短 Tb 会增大上部结构加速度响应，过度延长 Tb 则可能使位移超限，二者之间存在最优平衡区间。参数研究表明，当 Tb/Tp 处于 0.6 以下或 1.8 以上时，脉冲放大效应显著减弱，在可行条件下应优先将设计参数配置于该区间[3]。此外，隔震层等效阻尼比的优化同样关键。增大阻尼比可有效抑制隔震层位移峰值，但过高的阻尼会降低隔震层在长周期段的位移能力并增大高频传递。研究表明，近场条件下隔震层等效阻尼比宜控制在 15%~25% 范围内，具体取值应根据脉冲周期和设计位移综合确定。

3.2 耗能机制优化配置

近场脉冲型地震动对隔震结构的能量输入具有高度集中性，在短短数秒内将大量能量注入结构。因此，耗能机制的配置应从” 分散耗能” 的思路转向” 多级耗能” 的思路。具体策略包括：在隔震层设置铅阻尼器或黏滞阻尼器作为第一道耗能防线，利用其较早进入屈服或黏滞耗能的特性，在脉冲初期即开始耗散地震能量；在上

部结构与隔震层连接部位设置可更换的耗能连接件作为第二道防线，当隔震层位移达到设定阈值时启动辅助耗能；在隔震支座内部通过优化铅芯布置方式提高其自身耗能效率。应特别指出的是，近场条件下黏滞阻尼器的速度指数参数选择具有重要意义。低速度指数（0.2~0.4）的阻尼器在高速脉冲作用下可产生较大的阻尼力，位移控制效果显著，但需注意其对上部结构加速度的放大效应，必要时可采用速度指数分级配置策略。

3.3 抗倾覆与竖向稳定性优化

近场竖向地震动对隔震建筑稳定性的威胁在现行设计中常被低估。优化的要点首先在于合理控制隔震支座的面压比。面压比过大会增加支座在水平大变形时的失稳风险，面压比过小则可能导致支座在竖向地震作用下出现拉力。建议近场条件下支座平均面压比控制在 8~12MPa 之间，并根据竖向地震动强度进行专项验算。其次，对于高宽比较大的隔震建筑，应在隔震层周边设置抗拔装置或限位装置。抗拔装置应允许水平自由变形而约束竖向抬起，可采用 U 形钢板或缆索式抗拔机构[4]。限位装置则是在隔震层位移接近限值时启动的软着陆式保护机构，其刚度和行程应经专门设计，以兼顾正常使用状态下的自由变形和极端状态下的安全保护功能。

3.4 基于性能的差异化优化策略

不同类型隔震形式在近场条件下的优化侧重点应有所区别。对于基础隔震结构，因隔震层位于基底，隔震层位移直接转化为整体结构的侧移，应重点控制位移需求和支座竖向稳定性。对于层间隔震结构，因隔震层设置于结构中部，上下部结构的动力耦合效应更为复杂，优化重点在于上下部刚度比的合理匹配，应避免隔震层上下刚度差异过大导致鞭梢效应。对于混合隔震（隔震与消能减震联合应用）结构，应合理分配隔震层的位移耗能功能和消能器的阻尼耗能功能，避免两者功能重叠或相互干扰，建议以隔震层承担主要位移需求（约 60%~70%），消能器承担主要耗能任务（约 60%~80%）。此外，韧性导向下的可恢复功能设计为近场隔震优化提供了新思路。通过在隔震层采用自复位装置（如形状记忆合金或预应力筋束），可有效控制残余位移，使建筑在近场主震后迅速恢复使用功能，这对于近场区域的应急功能保障建筑尤为重要。

4 结语

近场地震动以其特有的速度脉冲效应、高能量输入和显著竖向分量，对隔震建筑结构构成了区别于远场地震的特殊威胁。传统以反应谱法为基础的设计方法在近场条件下的适应性不足，本质原因在于该方法未能充分反映脉冲型地震动的非平稳性、集中能量输入和周期匹配效应等关键特征。本文提出的设计优化框架强调了从”系数修正” 向” 机制匹配” 转变的必要性，认为近场隔震结构优化的核心在于实现隔震层动力特性与输入地震动特征之间的主动协调而非被动适应。在具体策略层面，周期失谐、多级耗能、竖向稳定控制和差异化方案选择构成了相互关联的优化路径，需要在实际设计中综合权衡、协同运用。需要指出的是，近场地震动具有显著的断层机制依赖性和场地条件特异性，不存在普遍适用的”最优” 设计方案。设计者应在充分识别场地地震危险性的基础上，以性能目标为导向，在安全性、经济性和功能性之间寻求符合具体工程情境的平衡点。未来，随着强震观测数据的积累和人工智能优化方法的发展，近场隔震设计有望从” 经验指导下的有限方案比选” 走向” 数据驱动下的智能优化决策”。

参考文献

[1] 王曙光, 刘伟庆, 杜东升, 等. 近断层脉冲型地震动作用下基础隔震结构位移响应研究 [J]. 建筑结构学报,2022,43(3):78-87.

[2] 韩淼, 杜红凯, 李海涛. 近场地震下隔震结构速度脉冲效应及设计方法研究进展 [J]. 工程力学,2023,40(2):1-14.

[3] 潘鹏, 林旭川, 聂鑫. 竖向地震动对橡胶隔震支座受力性能的影响分析 [J]. 土木工程学报,2022,55(6):32-42.

[4] 周颖, 吕西林. 近断层隔震结构抗震设计方法对比研究 [J]. 地震工程与工程振动,2023,43(1):12-23.