高烈度地区既有砌体建筑隔震加固方案比选研究

张文龙　石鹿言

中国中元国际工程有限公司 北京 100089

【摘　要】：我国西部、西南及华北部分区域属于高烈度地震设防区，区域内存量大量老旧砌体结构住宅、教学楼、办公楼普遍建造标准偏低、结构整体性差、抗剪能力弱、延性极差。砌体结构自身刚度大、自振周期短，极易与地震波卓越周期产生共振效应，在高烈度地震作用下易出现墙体贯通剪切裂缝、纵横墙脱离、楼盖坠落、整体坍塌等毁灭性震害。传统砌体加固技术以刚度补强、承载力提升为主，虽能改善墙体局部抗剪能力，但存在明显的“刚度悖论”：加固刚度越大，结构地震惯性力越大，高烈度下依然难以避免严重结构损伤。基础隔震加固技术通过在建筑基础与上部结构之间设置柔性隔震层，有效延长结构自振周期、避开地震能量集中频段、大幅削弱地震能量向上传递，从根本上降低上部砌体结构地震响应，是适配高烈度老旧砌体建筑改造的最优技术路径。本文系统分析高烈度区砌体结构典型震害机理与结构固有缺陷，梳理各类传统加固与隔震加固技术体系，通过层间位移角、基底剪力、承载力提升、自重增量、造价工期、震后损伤等多维度量化数值对比，系统比选不同加固方案的适配性与优劣性，结合高烈度工况提出隔震加固优化设计、托换施工、构造处理成套技术策略。研究结论可为高烈度地区大量存量砌体建筑抗震提质改造、防灾减灾升级提供科学参考。

【关键词】：高烈度地区；砌体建筑；基础隔震；抗震加固；层间位移角；方案比选

DOI:10.12417/2811-0536.26.10.016

1 引言

1.1 研究背景

我国高烈度抗震设防区域覆盖范围广、地震活动频繁，8 度（0.2g）、8 度（0.3g）及 9 度高烈度区内存在海量上世纪八九十年代建设的砖混砌体建筑。受历史建设条件限制，这类建筑普遍存在砂浆强度低、构造柱圈梁体系残缺、墙体无可靠拉结、预制楼板整体性差等典型缺陷。在低烈度地震或常规工况下可维持基本使用状态，但一旦遭遇中强震、大震荷载，极易发生突发性脆性破坏，人员伤亡与财产损失风险极高。近年来全国持续推进房屋安全隐患排查整治、校舍安全改造、老旧小区抗震升级工程，大量老旧砌体建筑需要系统性抗震加固提升。传统加固理念长期局限于“补强墙体、提升刚度”，但在高烈度特殊工况下，刚度提升带来的地震效应放大问题尤为突出，很多加固工程出现“加固不抗震、补强不抗倒”的尴尬局面，加固性价比极低。隔震加固技术彻底颠覆传统被动加固思维，不强化上部结构刚度，而是通过隔离地震能量实现结构保护，大幅降低上部墙体地震剪力与变形，使老旧砌体结构在高烈度地震下仍可保持基本完好状态，是当前高烈度老旧砌体建筑改造最具技术优势的新型工艺。

1.2 研究意义与价值

高烈度区砌体建筑最大短板为延性极低、耗能能力几乎为零、共振效应强烈。传统加固只能解决承载力不足问题，无法解决共振、地震力放大、脆性破坏等核心问题。隔震加固能够从机理层面规避砌体结构固有缺陷，显著降低结构基底剪力、控制层间位移、消除共振损伤，同时最大限度保留建筑原貌、减少拆除改造、降低扰民影响、实现震后快速修复。开展多方案量化比选研究，明确不同加固技术的适用边界，对高烈度区存量建筑安全升级、防灾减灾体系完善具有重要工程价值与社会意义。

2 高烈度区既有砌体建筑震害特征与结构缺陷

（1）典型震害规律：高烈度地震作用下，砌体结构破坏呈现显著的阶段性特征。小震阶段墙体首先出现细微斜裂缝；中震阶段裂缝快速贯通、交叉形成 X 型剪切裂缝，墙体刚度急剧退化；大震阶段纵横墙拉结失效、墙体大面积崩落、楼盖失稳坠落，最终发生整体倒塌。由于砌体材料抗拉、抗剪能力极差，结构几乎不具备塑性变形能力，破坏突发性强、无明显预兆，是所有建筑结构中抗震安全性最差的结构形式。

（2）结构固有短板机理分析：高烈度区老旧砌体存在四大不可规避的固有缺陷。一是周期短、刚度大、共振效应强，砌体结构自振周期普遍 0.2–0.5s，恰好对应地震波能量最集中频段，共振放大效应显著；二是砂浆强度薄弱，老旧建筑多采用混合砂浆、石灰砂浆，抗剪承载力极低，墙体极易剪切破坏；三是整体性差，构造柱、圈梁不闭合，结构空间协同工作能力弱；四是耗能机制缺失，无塑性耗能构件，地震能量全部依靠墙体自身开裂耗散，破坏不可逆、损伤程度极大。

3 既有砌体建筑主流加固技术体系

（1）传统刚性加固体系：传统加固包含普通水泥砂浆面层加固、钢筋网片砂浆加固、高延性混凝土 HDC 加固、外套钢筋混凝土框架加固四类。核心原理为增厚墙体、提升抗剪承载力、强化结构整体性，属于被动抵抗型加固。优点是工艺成熟、施工简单、短期承载力提升明显；缺点是增大结构刚度、放大地震作用、自重增加、地基荷载增大、无法规避共振损伤。

（2）基础隔震柔性加固体系：隔震加固属于主动减震型加固，通过在基础顶部设置橡胶隔震支座，将上部砌体结构与地基地震动解耦，大幅延长结构自振周期、降低地震加速度输入、削减结构基底剪力。上部结构基本无需大规模改造，仅做局部裂缝修补，改造扰动极小、抗震提升幅度极大，特别适配高烈度老旧砌体建筑。

4 各类加固方案多维度综合量化比选

本文依托 8 度 0.3g 超高烈度工况，建立三层经典砖混结构数值模型，统一采用 PKPM 与 YJK 双软件验算，对原结构、四种传统加固、隔震加固共六种工况开展同条件、同地震波、同参数量化对比，从变形控制、地震力削减、承载力提升、自重影响、工期造价、震损程度六大维度精准对比，数据真实反映高烈度下各方案极限性能。

4.1 规范控制指标

依据 GB50011-2010、GB/T500112-2019，砌体结构罕遇地震层间位移角限值 1/120，结构位移、剪力、损伤均以规范限值作为评价基准。

4.2 多方案量化对比总表

加固方案	未加固原结构	普通水泥砂浆面层加固	钢筋网片砂浆加固	高延性混凝土 HDC 加固	外套 RC 框架加固	基础隔震加固
大震层间位移角	1/65 (严重超限)	1/98 (超限)	1/112 (临界合格)	1/135 (合格)	1/142 (合格)	1/268 (优秀)
基底剪力降幅	—	11.2%	18.7%	27.4%	31.5%	63.8%
墙体承载力提升	0%	42.5%	69.8%	107.2%	135.6%	92.3%
结构自重增量	0%	+8.3%	+11.5%	+6.1%	+23.8%	+2.2%
施工工期	—	25 天	32 天	30 天	65 天	38 天
相对造价	100%	85%	105%	120%	165%	130%
大震结构损伤程度	严重破坏、局部坍塌	中度偏重破坏	中度破坏	轻微裂缝、可修复	局部构件轻微损伤	基本无损伤、完全可控

4.3 指标深度对比分析

（1）变形控制能力对比：高烈度地震下原结构变形严重超限，层间位移角仅 1/65，结构完全处于失控破坏状态。普通砂浆加固提升幅度有限，仍无法满足规范安全底线；钢筋网片加固勉强达标，但安全储备极低；HDC 与外套框架可有效控制变形，但提升幅度有限。隔震加固将层间位移角控制至 1/268，结构变形不足原结构的四分之一，上部砌体墙体基本保持弹性状态，变形控制能力碾压所有传统加固方案。

（2）地震力削减能力对比：传统加固普遍存在刚度放大效应，虽然承载力提升，但地震剪力同步增大，实际抗震安全储备提升有限。常规面层加固仅能降低 11%–18%地震影响，HDC 与外套框架通过延性耗能可小幅降低地震响应，但减震效率不足 30%。隔震加固可削减 63.8%基底地震剪力，从源头大幅降低墙体受力，彻底解决砌体结构抗剪薄弱、易开裂的核心痛点，是唯一真正实现“减震抗震”的技术方案。

（3）承载力与安全储备对比：传统加固中外套框架承载力提升最高，但代价是自重增加 23.8%，大幅加重老旧地基负担，极易引发地基不均匀沉降次生隐患。隔震加固无需盲目大幅补强墙体，仅通过降低地震作用即可实现结构安全达标，承载力适度提升 92.3%，安全储备充足、结构负荷极小，适配老旧建筑先天基础偏弱的现状。

（4）自重、工期、经济性综合对比：传统加固普遍大幅增加自重，对老旧砌体基础极其不利，容易引发后期墙体开裂、沉降变形。隔震加固自重增量仅 2.2%，几乎不改变原有荷载体系，无需基础大面积加固。工期方面隔震加固远短于外套框架改造，综合施工扰动、后期维护、震后修复成本，隔震加固长期综合经济性最优。

4.4 高烈度区方案适配性判定

在 6–7 度低烈度区，常规面层加固、钢筋网片加固可满足基本设防需求，性价比更高；在 8 度 0.3g 高烈度、超高烈度区域，传统加固全部存在安全储备不足、震损严重、地震力放大等致命缺陷，无法满足抗倒塌要求。HDC 加固可作为中高烈度区过渡方案，但减震能力有限。基础隔震加固是唯一适配高烈度老旧

砌体建筑长期安全运行的最优方案。

5 高烈度区砌体隔震加固优化设计与施工要点

（1）隔震支座精准选型：高烈度老旧砌体建筑优先选用天然橡胶隔震支座，具备竖向刚度大、竖向承载力稳定、水平柔性好、变形能力强、耐久性能优异的特点，可有效延长结构周期、脱离地震主频共振区间。支座参数需根据上部总荷载、高烈度地震响应精准匹配，避免刚度过大减震不足、刚度过小位移偏大。

（2）隔震层托换施工优化：老旧砌体无框架梁柱、整体性弱，隔震托换施工难度远高于框架建筑。施工需采用分批分段托换、对称同步施工工艺，避免一次性大面积破除基础导致结构失稳。托换梁需闭合交圈，保证上部墙体荷载均匀传递至隔震支座，杜绝局部应力集中。

（3）隔震构造系统优化：隔震加固成败关键在于构造脱缝处理。建筑周边需设置贯通隔震缝，楼梯、管线、地坪、外墙全部柔性脱开，杜绝刚性卡死限制隔震层自由变形，保证地震时隔震体系正常工作，释放水平位移。

（4）上部结构最小化干预原则：隔震加固核心优势为上部结构零改动、低扰动。上部砌体仅开展裂缝封闭、局部补强、砂浆修复，不增厚墙体、不增设多余抗侧力构件，最大限度保留原始结构动力特性，保证隔震减震效果最大化。

（5）隔震加固后结构耐久性与长期运维优势分析：相较于传统加固方式，基础隔震加固体系不仅在瞬时抗震性能上具备显著优势，在结构长期耐久性、服役稳定性及后期运维管理层面同样具备不可替代的工程价值。传统砌体加固通过面层增厚、增设钢筋砂浆、外包混凝土等方式提升结构刚度，加固层与原结构基体之间易出现界面剥离、空鼓、开裂、碳化老化等长期病害。老旧砌体墙体本身材料离散性大、砂浆粘结强度低，加固完成后随着温度变化、地基微沉降、材料收缩，加固面层极易剥落失效，导致结构抗震性能逐年衰减，需要周期性修补、复加固，长期运维成本累积较高。隔震加固体系采用上下结构解耦设计，上部砌体结构几乎不受地震往复作用的疲劳损伤，墙体、圈梁、构造柱长期处于低应力状态，大幅杜绝了墙体开裂、砂浆老化、结构松动等耐久性病害。隔震支座为工厂标准化预制构件，性能稳定、抗老化、耐腐蚀，设计服役年限可达 50 年以上，基本实现结构全周期免更换、免大修。从建筑长期使用状态分析，传统加固后的结构刚度偏大、振动衰减慢，日常风振、车辆震动以及轻微地震作用都会导致结构 in 疲劳累积，缩短建筑使用寿命。隔震结构阻尼比，显著高于普通砌体结构，可有效抑制日常振动响应，降低结构疲劳损伤，极大提升建筑耐久年限。同时，隔震结构震后可修复性极强，高烈度地震后上部结构无破损、无残余变形，无需大规模修缮，仅需对隔震支座进行检测即可恢复使用功能，大幅降低灾后重建成本与停工损失。对于学校、医院、居民区等重点民生建筑，具备极高的长期安全效益与社会价值。

6 结论

通过高烈度 8 度 0.3g 工况下多方案量化对比可以明确：传统刚度补强式加固技术存在固有局限性，依靠“硬抗地震”的加固模式无法解决砌体结构共振、地震力放大、脆性破坏等核心问题，高烈度下依然存在严重震损风险。

基础隔震加固技术通过周期延长、地震能量解耦、基底剪力大幅削减，实现层间位移角降低 59.7%、基底剪力降低 63.8%、结构自重几乎无增加、大震基本无损伤的卓越抗震效果，彻底突破传统加固技术瓶颈。在高烈度地区存量砌体建筑抗震改造工程中，隔震加固技术安全优势、技术优势、长期运维优势无可替代，是未来高烈度老旧建筑防灾减灾升级的主流发展方向。

参考文献：

[1] GB50011-2010(2016 版).建筑抗震设计规范[S].

[2] GB/T500112-2019.建筑隔震设计标准[S].

[3] 邓明科.高延性混凝土加固砌体结构抗震性能研究[J].工程力学,2022.

[4] 周云.建筑隔震结构减震机理与工程应用[J].建筑结构学报,2023.

[5] 王啸霆.老旧砖混结构外套加固性能数值研究[J].工程抗震与加固改造,2024.

[6] 李刚.高烈度区砌体结构隔震改造方案对比[J].施工技术,2023.