

框架结构抗震性能检测与加固技术研究

吴龛铸

广州建设工程质量安全检测中心有限公司 广东广州 510000

摘要: 伴随城市化进程的持续推进, 框架结构建筑在城市建筑体系中逐渐占据核心位置, 为增强其在地震作用下的安全性能与稳定状态, 本文对框架结构抗震性能检测的技术流程与方法开展系统研究, 并针对结构存在的缺陷问题, 探究了多种先进的加固技术, 文章着重分析动静载试验技术、结构健康监测方式及无损检测手段在工程实践中的适用情况与高效特性, 同时, 阐述外包钢、粘贴纤维复合材料及节点增设支撑等主流加固技术的施工步骤与技术指标, 研究成果为提高框架结构抗震能力、完善结构加固方案提供了切实的技术支撑与实践参考。

关键词: 框架结构; 抗震性能; 结构检测; 加固技术; 无损检测

引言

在地震频发区域, 框架结构因应用范围广泛而成为抗震加固研究的重点对象, 随着建筑使用时间的增加, 材料老化与设计标准的差异使得部分结构抗震能力有所欠缺, 工程实践中迫切需要一套科学、高效且以技术为导向的检测与加固体系, 本文以技术应用为核心要点, 从检测方法的选择、设备配备到加固施工技术进行全面探讨, 致力于提升结构在地震作用下的安全余量与可靠程。

一、框架结构抗震性能检测技术体系构建

1. 动静载试验技术流程与参数设定

动静载试验是评估框架结构抗震性能的核心手段之一, 动载试验借助施加周期性或脉冲荷载, 模拟地震作用下结构的受力反应; 静载试验则运用恒定荷载评估结构的变形性能与承载力储备情况, 开展试验前需选择适宜的加载设备, 像液压伺服加载系统、电动推拉器等都较为常用, 同时要配备荷载控制系统, 以此实现力控、位移控或能量控方式的精准加载, 传感器的布置方案应结合结构形式与受力特点综合确定, 常用的测量设备有位移计、加速度计、应变计和光纤光栅传感器等, 分别用于记录梁柱节点、楼层侧移、关键构件变形及应力变化情况, 数据采集系统需具备多通道、高采样率和抗干扰性能, 保障结构在试验加载过程中各项响应数据的完

整性与及时性。

2. 结构健康监测系统集成应用

结构健康监测系统 (SHM) 能够实现框架结构的实时状态感知与动态预警, 是构建抗震性能评估体系的重要组成部分, SHM 系统一般包含传感网络、数据采集模块、远程传输单元、数据管理平台及智能诊断模块, 在框架结构中, 传感器节点应覆盖结构层间位移点、关键连接节点和水平支撑部位, 形成多点感知与空间协同网络, 采集模块需整合高精度模数转换、电源管理与温湿度补偿功能, 以适应长期连续工作的现场环境, 数据传输采用有线 CAN 总线或无线 ZigBee、LoRa 网络, 依据建筑规模与干扰环境合理选择类型; 服务器端设有数据缓存、异常筛查与状态诊断功能, 实现地震事件中的实时结构响应分析与自动报警, 预警机制通过设定动态阈值, 对结构的加速度、位移与应变突变进行监测, 结合模态参数变化分析, 评估结构是否存在损伤、变形集中或支撑退化问题, 进而为维护决策与加固措施提供技术支持。

3. 无损检测方法在结构评估中的作用

无损检测技术为评估框架结构内部损伤与老化提供了高效、直观的手段, 尤其在抗震性能检测中发挥着关键作用, 常用的无损检测方法包括雷达探测、超声波检测、电磁感应检测与红外热成像等, 主要用于识别混凝土裂缝、钢筋锈蚀、空鼓脱粘及界面劣化等隐蔽性缺陷, 雷达检测可穿透混凝土层, 扫描并反演其内部结构完整性, 适用于梁柱内部裂纹分析与钢筋分布定位; 超声波检测通过传播时差与波速变化反映材料密实度及裂缝深

作者简介: 吴龛铸 (1994.09——), 男, 汉, 广东湛江人, 本科学历, 研究方向: 建筑结构检测、结构鉴定。

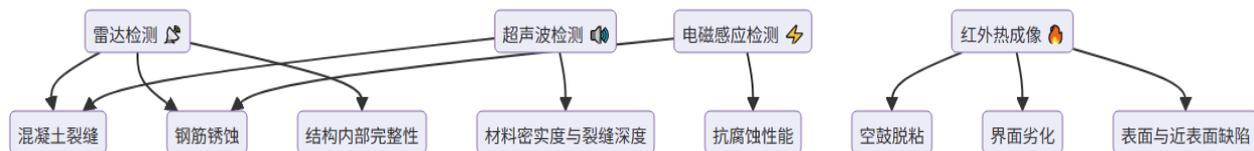


图1 结构评估中无损检测方法作用图

度，尤其适用于节点区应力集中的结构检查；电磁感应用于探测钢筋锈蚀程度与位置，可评估结构抗腐蚀性能对抗震能力的影响；红外热成像通过温度场分布识别空鼓、蜂窝等表面与近表面缺陷，适用于大面积构件快速筛查。如图1所示。

二、检测数据分析与抗震性能判定技术

1. 挠度、位移与应变数据的同步采集处理

在框架结构抗震性能检测工作中，挠度、位移及应变构成核心响应参数，它们直观体现结构遭遇地震时的变形能力与应力分布状况，为得到准确数据，需借助集成式数据采集系统完成多参数同步收集，这类系统一般可支持16通道以上的数据采集，同步采样误差控制在 $1\mu\text{s}$ 以内，采样频率不低于1000Hz，挠度测量借助激光位移计或线性差动变压器（LVDT）实施，测量范围为 $\pm 100\text{mm}$ ，精度达到0.01mm；位移数据常依靠高精度惯性测量单元（IMU）或光纤陀螺仪获取，以此实现三维位移的同步监测；应变数据采集则运用电阻应变片、光纤布拉格光栅传感器（FBG），精度能够达到 $1\mu\epsilon$ 水平，数据同步处理阶段，采用GPS校时或PPS（每秒脉冲）信号实现时间校准，同时结合时域滤波手段（选用Butterworth低通滤波器，设定截止频率为10Hz）与小波阈值降噪技术去除背景干扰及虚假信号，保障信号幅值与相位的稳定及一致。

2. 结构动力特征提取与模态识别技术

结构动力特征的辨别是评判抗震性能的关键技术步骤，主要涵盖固有频率、阻尼比和振型的提取工作，当框架结构受到地震作用或人工激振时，会在特定频率范围内产生振动响应，这就需要运用频域与时频域分析技术进行精准辨别，频域分析采用快速傅里叶变换（FFT），其频率分辨率优于0.05Hz，适合提取主频特征；小波分析（如Daubechies小波变换）则擅长辨别非平稳信号、局部频率变化及模态耦合等问题，能有效确定时变模态参数与微损伤特征的位置，振型辨别采用随机子空间识别（SSI）或主成分分析（PCA）等模态参数提取方法，并结合模态一致性系数MAC（Modal Assurance

Criterion）判断模态辨别精度，规定MAC值超过0.9方可认可，阻尼比通过半功率带宽法或Hilbert包络分析法提取，典型框架结构的阻尼比处于2%~5%之间。

三、框架结构加固施工技术工艺研究

1. 外包钢加固技术的施工流程与节点处理

外包钢加固技术借助在原有混凝土构件外部包裹钢板，实现构件承载力、延性及抗震性能的提升，适用于柱、梁及节点区等承受高应力部位的加固作业，施工前期需完成构件表面预处理，通过机械打磨与高压水洗操作清除混凝土表面疏松层及油污，要求表面粗糙度达到CSP3级以上，并保持干燥状态，之后进行钢板切割与定位工作，依据设计需求选用Q235或Q345型号钢板，厚度常规取值为6~12mm，定位焊接阶段运用点焊方式对钢板进行初步固定，确保钢板与混凝土表面紧密贴合且维持设计缝隙宽度，防止出现偏移情况，随后向钢板与原构件之间灌注高强无收缩灌浆料，灌浆料强度需不低于60MPa，灌浆作业时环境温度控制在5~35℃，螺栓锚固采用化学锚栓或膨胀螺栓，钻孔深度为螺栓直径的8~10倍，锚固力应不小于20kN，以此保证钢板在地震作用下不会发生剥离现象。

2. 粘贴纤维增强复合材料技术规范

纤维增强复合材料加固以碳纤维布（CFRP）为主要材料，其具备自重轻、强度高、施工简便等特性，适用于增强构件延性与变形能力，CFRP布的选型需参考抗拉强度与弹性模量指标，常用规格为 $300\text{g}/\text{m}^2$ 和 $600\text{g}/\text{m}^2$ ，其中抗拉强度应达到3400MPa以上，弹性模量需超过200GPa，粘贴施工前需将构件表面打磨平整，清除尖角与凸起部分，使平整度误差控制在2mm以内。界面处理分为底涂层与找平层两步施工，底涂厚度需控制在0.3~0.5mm，确保纤维与混凝土之间形成良好附着效果，CFRP粘贴采用湿法施工工艺，施工环境温度需控制在10~30℃，各层之间的施工间隔时间不得超过2小时，粘贴压力通过橡胶压轮均匀滚压施加，以此保证纤维布无气泡、褶皱及脱胶问题。常用粘结胶的性能要求如下表所示1：

表1 粘贴纤维增强复合材料技术规范

参数名称	技术要求	说明
抗拉强度	≥ 30MPa	保证高强结合力
抗剪强度	≥ 15MPa	提高剪切抵抗力
拉伸弹性模量	≥ 3000MPa	保证应变协调
剪切粘结强度	≥ 4MPa (C30混凝土)	附着力必须满足混凝土 剥离前失效
初固时间	3~6小时	保证有效操作时间
完全固化时间	7天	达到最终力学性能

3. 节点增设支撑与能量耗散装置技术

在节点加固过程中，增设支撑构件与能量耗散装置是提高结构抗震韧性的有效方式，斜撑通常选用钢管或H型钢，安装于梁柱节点之间形成斜向构造体系，增加结构滞回面积并提高整体刚度，施工时必须于节点区设置加厚钢板基础或安装角钢节点套筒，保证新添支撑构件的受力路径连续不间断，屈曲约束支撑（BRB）是典型的能量耗散装置，其核心由约束核心钢板与外套管填充物构成，具有良好的耗能能力和重复承载性能，安装过程中需严格把控轴心度与锚固端部板刚度，采用双向限位螺栓防止发生轴向滑移，对于配备多层斜撑系统的框架结构，应按照层间刚度分布情况优化支撑布置方式。

四、结构加固效果评估与施工后性能验证

1. 加固前后模态特性对比分析方法

结构模态参数是衡量框架结构抗震性能变化的关键指标，加固效果可借助加固前后模态特性的对比分析得到验证，现场再次检测时，采用激振器或冲击锤实施模态激励，配合高精度加速度传感器布置在结构关键层位与构件节点处，完成响应数据采集，数据处理运用频谱分析与时频分析相结合的方式，提取结构加固前后各阶固有频率、阻尼比及振型特征，频率提升意味着结构刚度增强，通常要求一阶频率提升幅度不低于10%，二阶及以上频率需同步提升且无畸变情况，阻尼比作为反映耗能能力的指标，理想变化是从加固前的1.5%~2.5%提高到2.5%~4.0%，若采用屈曲约束支撑等耗能构件，可进一步提升至5%以上，振型一致性分析运用模态保证准则（MAC），评估振型的匹配程度，若MAC值从原来的0.85提高到0.95以上，表明结构刚度分布更均匀、模态耦合减轻，加固后结构力学特性趋于稳定。

2. 二次动载试验与实测数据校核

加固完成后开展二次动载试验，是验证结构动态响

应能力的直接方法，过程包含荷载施加、响应监测、数据比对与性能验证。试验荷载可采用扫频激振或随机激振形式，激振频率范围覆盖结构一阶至三阶模态频率区间，施加荷载峰值一般控制在1~2kN，模拟小震响应状态，在各测点同步布置加速度、位移与应变传感器，采样频率设定为2000Hz以上以保障响应精度。数据采集结束后，与加固前动载数据进行对比，重点分析响应幅值、相位响应曲线、阶次幅频特征及能量耗散曲线，若加固后结构响应幅值明显降低（如楼层位移峰值下降30%以上），说明结构整体刚度提升；响应相位延迟减少，代表动力特性改善；模态响应频带宽度扩大，体现能量耗散能力增强，此外，利用响应数据计算动力放大系数（DAF），若DAF从加固前的2.5降至1.7以下，则表明加固提升了振动控制效果。

结语

通过对框架结构抗震性能检测与加固关键技术的系统研究，明确了高效检测手段、精准数据分析方法与先进加固工艺的协同路径，实践证实，合理的检测评估体系与技术型加固措施能显著提升结构整体抗震能力、延性与稳定性，在未来工程应用中，应持续优化检测技术集成化、加固工艺标准化与性能评估量化水平，为城市建筑抗震安全提供更科学可靠的技术保障。

参考文献

- [1] 马国辉. 预应力现浇桥梁加固结构抗震性能检测方法研究[J]. 建筑技术, 2021, 52(11): 1358-1361.
- [2] 张荣. 基于ABAQUS的框架结构抗震性能分析[J]. 安徽建筑, 2025, 32(07): 77-79. DOI: 10.16330/j.cnki.1007-7359.2025.7.27.
- [3] 李梦园, 张艺琼, 赵聪, 杨小卫. 外墙挂板耗能连接框架结构抗震性能研究[J]. 山西建筑, 2025, 51(15): 52-57+62. DOI: 10.13719/j.cnki.1009-6825.2025.15.011.
- [4] 商昊江. BRB+VFD减震加固大底盘单塔楼多层框架结构抗震性能研究[J]. 水利与建筑工程学报, 2025, 23(03): 143-150.
- [5] 李靖. 方钢管混凝土组合异形柱框架结构抗震性能研究[D]. 山东交通学院, 2025. DOI: 10.27864/d.cnki.gsjtd.2025.000019.