

老旧钢筋混凝土框架结构可靠性检测鉴定分析

刘文强

亿通工程检测有限责任公司 内蒙古 呼和浩特 010010

摘要: 为精准评估老旧钢筋混凝土框架结构服役安全性能, 本文依托现行建筑检测与可靠性鉴定规范, 阐述结构可靠性衰减机理与常见损伤类型。结合回弹法、钻芯法等现场检测技术, 完成数据修正与误差优化, 通过有限元软件建立精细化计算模型, 验算构件及整体结构承载力、变形与抗震性能。最终完成结构可靠性分级评定, 针对性提出维修加固、限载使用及长期运维监测方案, 为老旧框架结构安全管控提供技术支撑。

关键词: 老旧钢筋混凝土框架; 结构可靠性; 检测鉴定

引言: 大量既有钢筋混凝土框架结构服役年限久远, 受材料老化、环境侵蚀、荷载累积作用及早期设计标准局限影响, 普遍出现混凝土剥落、钢筋锈蚀、结构刚度衰减等病害, 整体可靠性持续下降, 存在显著安全隐患。为保障建筑服役安全、适配城市更新改造需求, 亟需开展系统性可靠性检测与鉴定工作。本文系统梳理相关理论规范、检测技术与鉴定方法, 科学评估结构服役状态, 为老旧建筑安全处置与运维管控提供依据。

1 老旧钢筋混凝土框架结构可靠性鉴定理论与规范体系

1.1 结构可靠性核心理论

(1) 结构可靠性定义, 包含安全性、适用性、耐久性三大核心评价指标。结构可靠性指结构在规定时间内与条件下完成预定功能的能力。安全性要求能承受各种作用且局部受损不整体倒塌; 适用性要求正常使用下变形裂缝可控; 耐久性要求材料劣化不显著降低承载力。(2) 可靠度与失效概率计算原理, 结构抗力、荷载效应的随机特性分析。可靠度以概率度量, 失效概率 $P < \sub > f < /sub \geq P(R-S < 0)$, R 为抗力, S 为荷载效应。抗力 R 受材料强度离散性影响呈对数正态分布; 荷载效应 S 随时空变异呈极值 I 型分布。采用一次二阶矩法计算可靠指标 β , 判定是否满足目标可靠度。(3) 老旧结构可靠性衰减机理, 材料劣化、构件损伤、结构体系性能退化规律。碳化致钢筋锈蚀膨胀, 截面损失与粘结退化; 反复荷载累积损伤使刚度衰减; 节点箍筋锈断、梁端承载力下降, 冗余度降低, 可靠性非线性加速衰减。

1.2 检测鉴定相关规范与标准

(1) 国内现行老旧建筑检测、可靠性鉴定及抗震鉴定核心规范体系。含《建筑结构检测技术标准》(GB/T50344)、《民用建筑可靠性鉴定标准》(GB50292)、《工业建筑可靠性鉴定标准》(GB50144)、《建筑抗震鉴定标准》(GB50023) 及《建筑抗震设计规范》(GB50011), 采用构件、子单元、鉴定单元三级评级。(2) 新旧规范差异对比, 明确老旧结构鉴定的规范适配原则与修正要求。遵循“目标可靠度不变、验算方法现行”原则, 材料强度依实测值按龄期修正, 荷载按后续年限折减。混凝土强度取 0.75 ~ 0.90 折减, 钢筋强度按锈蚀率折减, 地震影响系数按后续年限调整^[1]。(3) 特殊工况鉴定标准, 针对结构改造、荷载变更、环境侵蚀的专项鉴定要求。改造须按改造后受力状态验算; 荷载变更核查与原设计差异并验算超载构件; 环境侵蚀补充氯离子测定、电阻率测试等, 按 GB/T51355 预估剩余寿命。

1.3 老旧框架结构常见损伤类型及成因

(1) 混凝土损伤, 包含碳化、酥松、剥落、裂缝等病害及成因分析。碳化为 CO_2 反应使钝化膜破坏; 酥松由冻融或化学侵蚀引起; 剥落源于锈胀力超限; 裂缝包括受弯裂缝、剪切斜裂缝及收缩裂缝, 成因涉及超载、温差及碱骨料反应。(2) 钢筋损伤, 涵盖钢筋锈蚀、保护层失效、钢筋截面衰减等问题。锈蚀为电化学反应, 体积膨胀 2 ~ 4 倍; 保护层失效为厚度不足或碳化已达筋面; 截面衰减包括均匀减薄和坑蚀缺口, 降低延性、增加脆断风险。(3) 结构体系损伤, 梁柱节点损伤、构件变形、结构刚度衰减、不均匀沉降等病害。节点损伤为混凝土压碎、箍筋外鼓、锚固滑移; 构件变形含梁挠度超限和柱侧移过大; 刚度衰减源于累积损伤; 不均匀沉

降由地基差异或施工扰动引起,产生附加内力威胁整体稳定。

2 老旧钢筋混凝土框架结构现场检测技术与数据处理

2.1 检测前期准备工作

(1) 工程资料收集,整理原始设计图纸、施工记录、维修改造档案、地质勘察资料。检测前系统收集原始设计图纸(结构施工图、变更洽商记录)、施工验收资料(混凝土浇筑记录、材料检验报告)、历次改造加固档案及岩土工程勘察报告。资料缺失时通过走访原建设单位或查阅城建档案馆补充,为检测方案制定提供基础依据。(2) 现场踏勘排查,初步核查结构布局、构件现状、使用荷载及环境影响因素。踏勘重点核实结构布置与图纸一致性(柱网尺寸、梁截面)、目视检查构件缺陷(裂缝、渗漏、露筋、剥落),调查当前使用荷载及环境类别(室内湿度、腐蚀源、冻融条件),划定重点检测区域。(3) 检测方案制定,明确检测范围、检测项目、检测方法及质量控制标准。依据资料分析和踏勘结果确定检测范围、抽样比例(构件总数的5%~20%,且不少于3个同类构件)、方法组合(回弹-钻芯综合法、钢筋扫描配合开凿验证),执行GB/T50344、JGJ/T23等标准,落实仪器检定、人员持证和记录格式等质控措施。

2.2 核心项目现场检测技术

(1) 混凝土性能检测,采用回弹法、钻芯法检测混凝土强度,检测混凝土碳化深度。回弹法按JGJ/T23布置测区(每构件10个测区),碳化深度采用1%~2%酚酞酒精溶液测试;当回弹离散性大或推定强度存疑时,采用钻芯法(直径75mm或100mm)校核,芯样高径比1:1,经抗压试验获取换算强度。(2) 钢筋性能检测,扫描钢筋间距、保护层厚度,检测钢筋锈蚀程度与有效截面尺寸。采用钢筋扫描仪测定保护层厚度和间距,每构件不少于3个区域;锈蚀程度采用半电池电位法定性判定(电位差小于-350mV表明锈蚀概率大于95%);关键受力钢筋开凿暴露后测量实际剩余直径(精度0.02mm),计算截面损失率^[2]。(3) 结构构件变形与裂缝检测,测量梁柱挠度、构件裂缝宽度与分布规律。梁挠度采用精密水准仪测量跨中及1/4跨处相对沉降(精度±0.1mm);裂缝采用宽度观测仪(精度0.02mm)记录位置、走向、最大宽度、长度及形态,绘制裂缝分布展开图,判别受力性质。(4) 结构整体参数检测,检测结构层间位移、整体倾斜、基础沉降等指标。层间位移采用全站仪测量各楼层同一竖向测点水平位移;整体倾斜采用投点法测量顶部相对底部水平位

移;基础沉降采用水准仪测量周边观测点,判定不均匀沉降及其速率变化趋势。

2.3 检测数据整理与误差修正

(1) 检测数据统计筛选,剔除异常无效数据,梳理有效检测样本。采用 3σ 准则或格拉布斯法识别异常值——测值超出样本均值 ± 3 倍标准差范围时,结合现场记录综合判断剔除。确保有效样本量满足规范最低要求,分类整理各检测项目有效数据集。(2) 检测误差分析,明确设备误差、操作误差、环境误差的来源与影响。设备误差源于仪器标定偏差(回弹仪率定值超出 80 ± 2)、探头老化;操作误差包括回弹仪不垂直、钻芯偏心或端面不平、碳化测试试剂浓度偏差;环境误差涉及温度湿度(回弹值需温度修正)、混凝土表面干湿状态(潮湿时偏低10%~20%)。逐项量化分析,建立误差追溯台账^[3]。(3) 数据修正与取值,结合规范要求对检测数据修正,确定结构实际性能参数。回弹值先进行角度和浇筑面修正,再按碳化深度进行龄期修正换算强度;钻芯强度按CECS03进行高径比和直径修正;保护层厚度实测超偏时按最不利值取值。后续验算采用修正后综合强度代表值(取回弹换算强度与钻芯修正强度较低值),确保鉴定结论可靠。

3 老旧钢筋混凝土框架结构可靠性分析与综合鉴定

3.1 结构计算模型建立与参数取值

(1) 基于实测数据采用PKPM、ANSYS等软件建立框架结构有限元计算模型。以现场检测获取的构件实际截面尺寸、钢筋布置、材料强度为基础,在PKPM中建立三维整体模型,梁柱采用杆系单元,楼板按刚性假定;关键节点或局部复杂区域采用ANSYS精细化实体模型补充分析,边界条件依据实际基础形式和楼层约束确定,确保计算简图与实际受力相符。(2) 模型参数赋值,根据实测强度、截面尺寸、损伤情况修正模型参数。混凝土强度取检测综合评定值,钢筋强度按实测锈蚀率折减(截面损失率大于5%时折减屈服强度);构件截面按实测最不利值输入,对存在明显裂缝或缺陷的构件折减刚度(开裂截面惯性矩取0.5~0.85倍完整值);节点区考虑粘结滑移影响,设置转动弹簧单元模拟半刚性特征。(3) 荷载组合取值,结合现行规范与实际使用工况确定恒载、活载、风荷载、地震荷载组合。恒载按实际构造做法计算;活载依据实际使用功能按GB50009取值;风荷载和地震作用按GB50009和GB50011计算,地震影响系数按后续使用年限折减。荷载组合按承载能力极限状态和正常使用极限状态分别考虑,分项系数按现行规范执行。

3.2 结构构件可靠性分析

(1) 梁构件承载力、刚度、抗裂性能可靠性验算与评估。承载力验算进行正截面抗弯和斜截面抗剪验算, 确定安全裕度; 刚度验算采用有效惯性矩法计算长期挠度, 与限值 $l_0/200$ 或 $l_0/250$ 比较; 抗裂验算控制裂缝宽度不超过 0.3mm (室内) 或 0.2mm (室外), 不满足时标记。(2) 柱构件抗压、抗剪承载力及轴压比可靠性分析。轴压比按实测强度计算 $n = N/(f_c A)$, 与规范限值 (一级 0.65 、二级 0.75 、三级 0.85) 对比; 正截面受压承载力考虑二阶效应; 斜截面抗剪按实测箍筋验算, 锈蚀箍筋按剩余截面折减。(3) 梁柱节点、主次连接构件受力性能与可靠性判定。节点核心区按 GB50011 验算抗剪承载力; 节点箍筋配置不满足或核心区开裂严重时判定可靠性不足; 主次梁连接处验算吊筋和附加箍筋配置, 焊接或预埋件连接复核焊缝及锚固长度^[4]。

3.3 结构整体可靠性与抗震性能评估

(1) 结构整体刚度、稳定性、变形性能综合分析。计算多遇地震下弹性层间位移角并与 $1/550$ 限值对比; 刚重比不小于 10 , 不满足时考虑 $P-\Delta$ 效应; 周期比不大于 0.9 、位移比不超过 1.5 , 超限时判定扭转不规则。(2) 多遇地震、罕遇地震工况下结构动力响应与抗震可靠性评估。多遇地震下振型分解反应谱法弹性验算承载力; 罕遇地震下 Pushover 或时程分析获取性能点, 校核薄弱层层间位移角不超过 2% 。后续使用年限 40 年时地震作用取现行 85% , 30 年取 75% , 20 年取 60% 。(3) 结构薄弱层、薄弱构件识别及失效风险分析。依据位移角突变楼层或弹塑性变形集中区域识别薄弱层; 首层柱底、顶层柱顶、梁端塑性铰区为薄弱构件。采用构件重要性系数识别关键构件, 对抗震构造不足且承担较大地震剪力的构件判定为高风险失效点。

3.4 结构综合鉴定结论与处置建议

(1) 结构安全性、适用性、耐久性综合等级评定。按 GB50292 三级鉴定体系, 安全性分为 A_s 、 B_s 、 C_s 、 D_s 四级; 适用性分为 A_a 、 B_a 、 C_a 三级; 耐久性依据碳化深度、锈蚀程度和裂缝状态综合判定, 划分 $I \sim IV$ 级。最终综合确定整体可靠性等级。(2) 针对损伤缺陷、性

能不足问题提出加固、维修、限载、停用等分级处置方案。一级正常使用定期巡查; 二级局部维修封闭裂缝修补剥落; 三级采取加固措施 (梁粘碳纤维布或粘钢、柱外包型钢或增大截面、节点加腋或外包钢板、基础锚杆静压桩或注浆), 同步限载使用 (活荷载不超过设计值 70%); 四级立即停用疏散, 委托专项方案整体加固或拆除重建^[5]。(3) 老旧框架结构后期运维监测建议。对二级及以上结构建立长期健康监测体系, 重点监测最大变形构件、最大裂缝构件和沉降观测点, 每半年监测一次 (沉降每季度), 台风或地震后加密。建立运维档案记录荷载变化和环境变迁, 每 5 年复检一次, 安装位移传感器和应变计实时预警, 实现定期检测向连续监测转变, 确保全服役周期安全可控。

结束语

本文完整完成老旧钢筋混凝土框架结构可靠性检测鉴定全流程分析, 明确了结构损伤成因、性能衰减规律及核心检测验算要点, 完成结构安全、适用、耐久性综合评级。研究厘清了老旧结构鉴定的规范适配与参数修正关键要点, 针对性制定分级处置方案与长效运维监测机制。研究成果可有效解决老旧框架结构安全评估难题, 为同类既有建筑检测鉴定、加固改造及全周期安全运维提供参考借鉴。

参考文献

- [1] 张望喜, 李顺涛, 刘鑫. 老旧钢筋混凝土框架结构病害检测与可靠性鉴定研究 [J]. 建筑科学与工程学报, 2023, 40(02): 88-95.
- [2] 吴超, 侯松, 吴伟. 城市更新中老旧钢筋混凝土框架结构检测鉴定与性能评估 [J]. 建设机械技术与管理, 2025, 38(06): 97-99.
- [3] 朱耀国. 老旧混凝土结构耐久性检测指标与剩余使用寿命评估 [J]. 工程检测, 2024, 34(05): 41-46.
- [4] 王四清, 陈宇, 艾辉军. 基于性能的老旧钢筋混凝土框架结构安全鉴定方法 [J]. 桂林理工大学学报, 2022, 42(03): 568-574.
- [5] 杨智良. 既有钢筋混凝土框架结构可靠性检测及病害成因分析 [J]. 工程质量, 2023, 51(08): 78-82.