

基于可靠度理论的既有建筑抗震性能评估与加固优先级排序方法

田学付¹ 胡家梁²

1. 天津顺港建设工程质量检测有限公司 天津 300000

2. 天津喜利得建筑质量鉴定检测有限公司 天津 300000

摘要:在既有建筑抗震性能评估领域,可靠度理论发挥着关键作用。本文先阐述可靠度理论在抗震性能分析中的基础模型,涵盖结构可靠性基本概念、随机变量与不确定性分析以及可靠度计算方法。接着构建既有建筑抗震性能可靠度评估框架,包括结构体系分类、抗震性能可靠度分解及多层次评估模型。进而提出加固优先级排序的可靠度驱动方法,涉及排序原则、基于可靠度增量的排序模型及多目标决策优化方法。最后探讨可靠度理论在加固策略制定中的扩展应用,为既有建筑抗震加固提供全面指导。

关键词:既有建筑;可靠度理论;抗震性能评估;加固优先级排序;多目标决策

引言:既有建筑在长期使用过程中,面临着地震等自然灾害的潜在威胁,其抗震性能直接关系到人员生命安全和财产保障。可靠度理论作为一种科学的分析方法,能够综合考虑结构在地震作用下的各种不确定性因素,通过量化结构的作用效应与抗力之间的关系,为评估既有建筑的抗震性能提供有力支撑。深入研究基于可靠度理论的既有建筑抗震性能评估与加固优先级排序方法,有助于准确识别建筑的抗震薄弱环节,合理分配加固资源,提高建筑的抗震能力,具有重要的现实意义。

1 可靠度理论在抗震性能分析中的基础模型

1.1 结构可靠性基本概念

结构功能函数用于描述结构在给定工况下的工作状态,通过量化结构作用效应与抗力之间的关系,构建极限状态方程^[1]。极限状态方程是划分结构正常工作与失效状态的核心依据,其表达式的合理性直接决定可靠度分析的准确性。可靠指标与失效概率之间存在明确数学对应关系,可靠指标数值越大,结构失效概率越低,二者通过概率积分方法建立定量关联,是衡量结构抗震可靠程度的核心量化手段。抗震性能的可靠度量需结合结构抗震响应特征,选取位移、内力、延性等关键指标,这些指标通过反映结构在地震作用下的变形能力、受力状态及耗能水平,实现抗震性能的可靠度量化描述,为后续分析提供基础依据。

1.2 随机变量与不确定性分析

材料性能的随机性源于原材料质量波动、施工工艺差异及服役环境影响,混凝土强度、钢筋屈服强度等关键材料参数均呈现一定离散性,需通过统计分析方法确定分布类型与特征参数。几何参数的变异性体现在构件

尺寸偏差、节点连接方式差异等方面,这类变异性会改变结构受力分布,进而影响结构抗震可靠度。地震动输入的随机性是抗震可靠度分析的核心不确定性来源,地震波谱特性、峰值加速度等参数受地震发生机制、传播路径及场地条件影响,呈现复杂随机分布特征,需通过合理的随机模型描述其不确定性,确保可靠度分析的合理性。

1.3 可靠度计算方法

一次二阶矩法包含一次可靠度法与二次可靠度法,凭借计算效率高、原理简洁的优势,在结构可靠度分析中应用广泛,其适用性主要取决于结构功能函数的非线性程度,适用于功能函数近似线性或轻度非线性的结构抗震可靠度计算。蒙特卡洛模拟凭借通用性强的特点,可适用于复杂结构及高度非线性功能函数的可靠度计算,通过大量随机抽样模拟结构响应,获得失效概率的统计估计值,解决复杂结构可靠度计算难题^[2]。响应面法与代理模型通过构建结构响应与随机变量之间的近似函数关系,替代复杂的结构力学分析过程,大幅提升可靠度计算效率,尤其适用于大型复杂建筑结构的抗震可靠度高效计算,实现计算精度与效率的平衡。

2 既有建筑抗震性能的可靠度评估框架

2.1 结构体系分类与特征提取

框架结构、剪力墙结构、混合结构的动力特性存在显著差异,框架结构依赖梁柱节点传递荷载,侧向刚度相对较弱,自振周期较长,在地震作用下容易产生较大的侧向位移,对结构的整体稳定性构成挑战;剪力墙结构凭借墙体整体性提供较强侧向刚度,自振周期较短,抗侧移能力突出,能够有效地抵抗地震作用下的侧

向力,减少结构的侧向变形;混合结构融合两种体系优势,动力响应呈现复合特征。结构冗余度与荷载传递路径需通过量化分析明确,冗余度反映结构抵御局部失效的能力,荷载传递路径的合理性直接影响结构受力均匀性,合理的荷载传递路径能够使结构在地震作用下均匀受力,避免局部应力集中,二者共同决定结构抗震可靠基础。非结构构件对整体可靠度的影响不可忽视,填充墙、隔断等构件虽不直接承担主体荷载,但会改变结构整体刚度与阻尼特性,可能改变结构的自振周期和动力响应特性,进而影响结构在地震作用下的受力情况,可能引发结构受力集中,进而影响整体抗震可靠度,需纳入评估体系。

2.2 抗震性能的可靠度分解

小震不坏对应结构弹性阶段可靠度分析,此阶段结构仅发生弹性变形,可靠度分析聚焦结构弹性抗力与小震作用效应的平衡,通过量化弹性阶段结构响应,确保地震作用下结构不产生永久性损伤。中震可修指向弹塑性阶段可靠度评估,该阶段结构进入弹塑性工作状态,需分析结构弹塑性变形能力与耗能特性,通过可靠度计算判断结构损伤程度,确保损伤可通过修复恢复正常使用功能。大震不倒核心是倒塌风险与极限状态可靠度分析,聚焦结构达到极限状态时的承载能力与抗倒塌性能,通过量化极限状态下的可靠指标,控制结构倒塌概率,保障结构在极端地震作用下的安全性。

2.3 多层次可靠度评估模型

构件层次可靠度评估聚焦梁、柱、节点等关键部件,这类部件是结构抗震的核心承载单元,其可靠度直接影响结构整体性能,关键部件的失效可能导致结构整体性能急剧下降,甚至引发结构倒塌,需通过量化构件承载力、延性及抗损伤能力,完成单个构件可靠度计算。结构层次评估围绕整体结构的抗震承载力与变形能力展开,结合构件可靠度结果,分析结构整体受力协调性与抗侧移能力,整体受力协调性好的结构能够更好地发挥各构件的抗震作用,提高结构的整体抗震性能,实现整体结构抗震可靠度的综合判断。系统层次评估涵盖结构-非结构-设备系统的协同可靠度,考虑三者之间的相互作用与耦合效应,结构、非结构和设备系统之间的相互作用可能影响结构的整体动力响应和抗震性能,量化不同系统协同工作时的可靠水平,确保整个建筑系统在地震作用下的整体可靠性。

3 加固优先级排序的可靠度驱动方法

3.1 加固优先级排序的核心原则

结构重要性是加固优先级排序的首要原则,医院、学

校等生命线工程承担着应急保障与公共服务职能,其抗震安全直接关联人员生命与公共利益,在地震发生时,这些建筑的正常使用对于救援工作和社会的稳定至关重要,排序中需赋予更高优先级^[3]。抗震性能薄弱环节的识别是排序的核心前提,软弱层、短柱等部位在地震作用下易发生损伤甚至失效,直接降低结构整体可靠度,这些薄弱环节往往是结构抗震的短板,优先加固它们能够有效提高结构的整体抗震性能,需优先识别并纳入加固序列。加固后可靠度提升的边际效益分析的核心是衡量加固投入与可靠度提升的匹配关系,通过量化单位加固投入带来的可靠度增量,能够使加固资源的分配更加合理,避免资源的浪费,优先选择边际效益较高的加固对象,实现资源高效利用,兼顾加固效果与经济性。

3.2 基于可靠度增量的排序模型

加固前后结构可靠指标的差值计算是排序模型的核心量化依据,通过精准计算加固前初始可靠指标与加固后目标可靠指标的差值,明确各加固对象的可靠度提升空间,差值越大说明加固后结构的抗震性能提升越显著,排序优先级也就越高,差值越大,排序优先级越高。关键构件加固对整体可靠度的贡献度存在显著差异,核心承载构件的加固可有效提升结构整体可靠水平,非核心构件加固贡献度相对较低,核心承载构件是结构抗震的关键,其性能的提升对整体结构的影响更为显著,需通过量化分析明确各构件贡献权重,指导排序优化。加固措施的敏感性分析针对截面增大、材料更换等不同加固方式展开,分析各类措施对可靠度提升的影响程度,不同加固方式对结构可靠度的影响不同,敏感性分析能够帮助选择最适合的加固措施,明确不同措施的适用场景,为排序过程中的加固方案选择提供支撑,确保排序结果的合理性与可操作性。

3.3 多目标决策优化方法

加固优先级排序需兼顾可靠度、成本、工期、施工难度等多项目标,需通过综合权重分配平衡各目标影响,避免单一目标主导导致排序失衡,多目标综合考虑能够使加固决策更加科学合理,符合工程实际需求。权重分配需结合加固工程实际需求,基于各目标的重要程度进行量化赋值,确保排序结果贴合工程实际,合理的权重分配能够准确反映各目标在加固决策中的重要性。层次分析法在优先级排序中可实现多目标的系统化分析,通过构建层次结构模型,将复杂的排序问题分解为不同层次,通过两两比较确定各指标权重,层次分析法能够使权重分配更加客观、科学,减少主观因素的影响,提升权重分配的科学与合理性。动态规划与遗传

算法可实现排序方案的优化求解, 动态规划通过分阶段决策逐步优化排序序列, 遗传算法依托模拟生物进化过程实现全局寻优, 二者结合能够充分发挥各自的优势, 解决多目标约束下的加固优先级排序难题, 二者结合可有效解决多目标约束下的加固优先级排序难题, 获得最优排序方案。

4 可靠度理论在加固策略制定中的扩展应用

4.1 加固方案的可靠度匹配设计

不同加固措施的可靠度提升效果存在差异, 粘钢加固可有效提升构件承载力与刚度, 增强结构抗侧移能力, 进而提升可靠水平; 碳纤维加固凭借轻质高强特性, 能在不显著增加结构自重前提下, 强化构件延性与抗损伤能力; 增设剪力墙可优化结构侧向刚度分布, 减少受力集中, 提升整体结构抗震可靠度^[4]。加固后结构体系的冗余度优化需结合可靠度目标, 通过调整构件布置与连接方式, 增加荷载传递路径, 提升结构抵御局部失效的能力, 确保结构在部分构件损伤情况下仍能维持整体稳定。抗震构造措施的可靠度强化需聚焦关键部位, 箍筋加密可提升构件抗剪能力与延性, 减少塑性铰形成后的破坏程度; 节点加强能增强梁柱节点传力可靠性, 避免节点率先失效, 进一步强化结构整体抗震可靠度。

4.2 全生命周期可靠度管理

加固后结构的长期性能退化模型需结合材料老化规律、服役环境影响, 量化结构性能随时间的衰减过程, 明确不同服役阶段的可靠度变化趋势, 为后续维护决策提供依据。定期检测与维护是维持结构可靠度的关键, 通过定期检测可及时发现结构损伤与性能退化, 针对性采取维护措施, 延缓性能衰减速度, 确保结构可靠度长期满足使用要求。抗震性能的可持续性评估需立足全生命周期视角, 结合结构退化规律与维护策略, 分析不同阶段结构抗震可靠度水平, 确保结构在整个服役期内始终具备满足要求的抗震能力, 实现加固效果的长期稳定。

4.3 新兴技术与可靠度理论的融合

智能传感器在结构健康监测中的应用可实现结构响应的实时采集, 精准捕捉结构位移、内力等关键参数的变化, 为可靠度分析提供实时数据支撑, 提升可靠度评估的准确性与时效性。大数据与机器学习在可靠度预测中具备显著潜力, 通过整合结构监测数据、材料性能数据及环境数据, 利用机器学习算法构建可靠度预测模型, 可实现结构可靠度的精准预判, 提前识别可靠度下降风险^[5]。数字化孪生技术可构建结构虚拟孪生体, 同步映射结构实际状态, 结合实时监测数据与可靠度理论, 实现加固优先级的动态调整, 根据结构性能变化及时优化加固策略, 提升加固工程的科学性与针对性。

结束语

基于可靠度理论的既有建筑抗震性能评估与加固优先级排序方法, 从基础模型构建到评估框架搭建, 再到加固优先级排序及加固策略扩展应用, 形成了一套完整且科学的体系。该方法充分考虑了结构抗震过程中的各种不确定性因素, 通过多层次评估和多目标决策优化, 实现了加固资源的合理分配, 提高了既有建筑的抗震可靠度。在实际工程应用中, 该方法能够有效指导既有建筑的抗震加固工作, 保障建筑在地震作用下的安全性, 为城市的安全发展提供坚实保障。

参考文献

- [1]葛栋材.建筑结构抗震性能鉴定技术应用分析[J].安徽建筑,2025,32(08):186-189.
- [2]王金国.医疗建筑结构抗震性能设计与优化研究[J].科技创新与应用,2025,15(22):122-124+129.
- [3]肖从真,李建辉,马天怡,等.既有建筑结构加固改造与性能提升现状与发展[J].工业建筑,2024,54(1):20-30.
- [4]黄永胜.既有建筑结构改造与加固技术的研究与应用[J].现代装饰,2024,580(11):37-39.
- [5]王翠坤,赵世春.建筑抗震鉴定与加固改造关键技术研究[J].建筑结构学报,2022,43(7):1-12.