

复杂环境下建筑结构安全鉴定技术研究

程志 王智慧

北京紫衡轩建筑工程检测有限公司, 北京 102499

[摘要]复杂环境下建筑结构性能退化与安全评定是土木工程的重要内容之一。本篇文章结合实际工作对复杂环境下建筑结构的安全问题进行了总结归纳,在此基础上从几何变形检测、损伤缺陷检测、环境响应监测三方面介绍了相应的检测技术,并简要介绍了结构分析模型、安全性评定、适用性与耐久性鉴定以及抗震性能鉴定的相关研究进展。指出在现有研究基础上开展基于多源信息融合的结构安全评定方法研究对于保障既有结构在整个服役寿命期内的安全使用有着非常重要的作用。

[关键词]复杂环境; 建筑结构; 安全鉴定; 检测技术

DOI: 10.33142/aem.v8i2.19035

中图分类号: TU745.1

文献标识码: A

Research on Safety Appraisal Technology for Building Structures in Complex Environments

CHENG Zhi, WANG Zhihui

Beijing Zihengxuan Construction Engineering Testing Co., Ltd., Beijing, 102499, China

Abstract: Performance degradation and safety assessment of building structures in complex environments are important aspects of civil engineering. This article summarizes and summarizes the safety issues of building structures in complex environments based on practical work. On this basis, corresponding detection technologies are introduced from three aspects: geometric deformation detection, damage defect detection, and environmental response monitoring. The research progress on structural analysis models, safety assessment, applicability and durability evaluation, and seismic performance evaluation is briefly introduced. It is pointed out that conducting research on structural safety assessment methods based on multi-source information fusion on the basis of existing research plays a very important role in ensuring the safe use of existing structures throughout their service life.

Keywords: complex environment; building structure; safety appraisal; detection technology

引言

伴随着城市化进程加快,越来越多既有建筑进入服役中后期,它的安全性直接影响到人们生活安全。不同于新建建筑,既有建筑长期处于各种环境中,受到侵蚀、老化、荷载等多种因素综合作用下,它的结构性能会随时间发生很大变化,在一些工业腐蚀严重地区、沿海地区、严寒冻融地区以及高烈度地震区,由于长期受到腐蚀或者严寒冻融的影响,造成建筑结构损坏程度和结构承载能力下降问题更加明显。据资料报道,盐分对结构耐久性的影响可以达到10%~70%,而严寒冻融对结构耐久性的影响可以达到10%~50%。如何合理评价处于复杂环境中的建筑物的安全状态是目前工程建设领域的重点研究内容之一。结构安全鉴定包含了检测方法、分析方法及评级标准等内容。近年来,由于传感技术、数字成像、机器学习等的发展,结构安全鉴定已经从单点检测发展成为全方位立体检测、从被动式检测发展成为

主动式检测。本文结合实际工程应用背景,总结建筑结构安全鉴定主要技术,希望能够给既有建筑的维修、加固起到一定的指导作用。

1 复杂环境下建筑结构安全问题分析

复杂的环境中建筑结构的安全性受到多种因素的影响,而且这些因素之间又是相互关联和影响的,在时间和空间上又是不断变化着的,同时出现的问题也是比较多的。根据环境的作用不同,建筑物所处的复杂环境分为三种情况:物理作用(温度的变化、冻融、干湿交替)造成材料的体积变化以及微裂纹的发展;化学作用(氯盐侵蚀、硫酸盐侵蚀、碳化)使得材料的性能下降;力学作用(反复的荷载作用、偶尔的过大的荷载、地基的不均匀沉降)改变了结构所承受的外力大小。而在这些因素的综合作用下,结构的安全性会逐渐降低。以钢筋混凝土结构为例,氯离子渗透导致钢筋锈蚀是耐久性衰减的主要原因;锈胀使混凝土受保护层开裂脱落,减弱钢筋和混凝土之间的黏结作

用,从而造成结构强度损失。而对于钢结构,在腐蚀环境中截面削弱、应力集中问题非常严重。西安建筑科技大学王友德及徐善华老师等人对腐蚀环境下既有钢结构抗震性能进行大量研究,提出锈蚀水平不同维度描述指标,建立“三层次-两阶段”的抗震能力评价方法,为工业腐蚀条件下钢结构抗震安全性评价提供有效途径。同时恶劣环境也会对整个结构系统的整体行为产生很大影响。由于环境影响的不均匀性造成材料损伤程度不同,从而改变了结构刚度的空间分布,产生内力重新分配,有可能使得一些非重要构件变为新的薄弱部位。而且环境和荷载的影响是相互作用的,在腐蚀性环境中承受疲劳荷载的构件其使用寿命一般要比单独一个因素的作用要小。所以对于处于复杂环境中的建筑结构的的安全评价不能局限于单一的因素或者单一的构件上,而应该考虑到环境与结构之间的相互影响进行整体性的分析和判断。

2 复杂环境下建筑结构检测技术

2.1 结构几何形态与变形检测

结构几何形态及变形是体现结构整体工作状态的关键因素。传统的检查需要使用水准仪或全站仪等仪器得到一些特征点坐标,但是不能够很好地体现出整个结构变形情况。最近几年来,三维激光扫描技术为几何形态检测带来新的方法。三维激光扫描可以获取结构表面大量点云数据,从而可以得到整个结构形态。而清华大学结构工程检测中心对三维激光扫描也进行了研究,他们发现利用三维激光扫描可以得到结构卸载前后的变形,找到最大的变形处;相比仅仅测量几个节点而言,三维点云包含的信息更丰富。对于古建筑研究,在古建筑保护方面,有学者采用基于点云曲面曲线拟合法,得到构件点云中心点坐标,进而求出挠度以及倾斜角,可以很好地实现对古建筑木结构变形分析;而多视角几何三维重建也是常用的方法之一。这种方法是以前运动恢复结构作为基础,在找到特征点后进行配准,再根据相机内参外参恢复出稀疏点云,最后利用稀疏点云集成密集点云,之后就可以利用数字图像处理或者深度学习提取损伤,此方法所需硬件较少,速度快,点云色彩逼真,精度高,适合大范围结构扫描。

2.2 结构损伤与缺陷检测

结构损伤与缺陷的及时发现对于避免结构突然失效十分重要。根据不同的结构以及工作条件采用合适的无损检测技术和传感器是重要的。如表 1 所示,总结了一些常用的结构损伤检测技术及其原理、应用特点以及优缺点。

表 1 结构损伤与缺陷检测技术对比

检测技术	基本原理	适用范围	技术特点与优势
探地雷达	电磁波反射与衰减	混凝土内部缺陷、钢筋/钢纤维分布、衬砌厚度	可以做到非接触测量,300MHz 频率可以穿过含有钢纤维混凝土复合材料,分辨出多层不同的界面。
超声波法	应力波传播与反射	混凝土内部空洞、裂缝深度、匀质性评价	对缺陷定位较准确,但需耦合剂,检测效率相对较低
冲击回波法	应力波共振频率	混凝土板厚度、内部脱空、分层缺陷	单面检测,无需耦合剂,适用于衬砌和楼板检测
红外热成像	表面温度场分布	表层缺陷、渗漏、剥离、粘贴质量	非接触、大面积快速筛查,受环境条件影响较大
导波检测	超声导波传播特性	线状结构(管道、拉索)的长距离检测	可覆盖全长,对微小损伤敏感,长期监测需考虑环境因素变化的影响

检测方法的选择要根据结构形式、检测条件以及缺陷特性等进行选择,比如在隧道衬砌检测过程中,钢纤维混凝土中的电磁散射会对探地雷达产生干扰,研究表明,300MHz 的雷达波可以很好地穿过深层的注浆层,可分辨出防水层、钢纤维混凝土层、钢筋混凝土层、注浆层之间界面,但是 700MHz 的信号只能到达钢纤维混凝土层位置,这就说明频率大小对复杂复合材料结构无损检测有重要影响。另外,在长时间检测情况下,外界环境改变也会对检测造成很大影响。一个持续时间约为 4.5 年室外结构监测得到近 640 万个导波数据,温度范围在-12.2°C到 52.5°C之间,还有雨、雪等天气情况,对非控制动态环境下损伤检测具有重要意义。

2.3 环境作用与结构响应监测

对环境影响以及结构反应进行长期观测是实现预警式安全评估的有效途径。观测系统需要同时采集环境信息和结构反应:环境信息主要是温度、湿度、风速、氯离子含量等宏观和微观环境因素;而结构反应主要是应力应变、位移、振动和裂缝等力学反应。已有工作表明,利用有限元模型与实际环境激励相结合的方式,在线识别模态可以得到较好的固有频率、振型等模态参数,有利于结构损伤检测。基于环境激励的方法不需要人为地施加荷载,成本低而且不会影响到结构正常使用,适合大体积复杂结构。监测数据分析是核心,需要进行数据标准化、机器学习等手段去除由外界条件(比如温度)引起的影响,得到反映结构实际变化的信息。另外,对于长时间的监测需要有一定的定期标定措施来保证传感

器的稳定性。

3 复杂环境下建筑结构分析与评定方法

3.1 结构分析计算模型

结构分析计算模型是沟通检测数据及安全评价的重要纽带。在复杂服役环境中既有结构分析建模存在几何尺寸确定、材料本构、边界条件以及荷载描述等问题，分析模型要尽可能真实地反应结构的实际状况，即已经发生的变形、损伤以及材料劣化情况。基于检测结果优化得到有限元模型是一种常用手段。几何建模中，三维激光扫描点云可以转化为有限元网格，从而形成体现结构实际变形情况的几何模型。以激光点云为基础建立古建筑现状模型，可以准确构造出此时此刻的状态下结构的有限元模型，以便进行灾害时的损伤评估。材料本构，要依据现场检测得到材料强度、弹性模量及损伤情况确定实际力学参数；锈蚀钢筋、劣化混凝土等材料可以使用考虑损伤本构模型^[1]。复杂的环境作用是建模难点。环境作用包括长期累积作用（腐蚀、冻融）以及短期极端作用（台风、地震）。长期作用可以用材料参数折减或者通过引入损伤演化模型来考虑；短期作用则作为荷载工况施加到结构上。研究表明，古建筑结构在受到 0.7 kN/m^2 以上的台风作用下会产生损伤，这可以给类似结构抗风安全性评价起到一定指导意义。随着 AI 技术的发展，机器学习辅助的结构分析模型具有较好的应用前景，利用深度神经网络或随机森林等方法可以得到预测结构地震响应的模型，在计算最大层间位移及基底剪力方面能够达到较快速度，对于结构初筛有利。

3.2 结构安全性鉴定评级

结构安全性鉴定是对结构承载能力及整体稳定性是否满足要求做出评价。我国现行标准采用分级评定方法，分别对构件、子单元以及鉴定单元进行评定并划分出不同的安全等级，在此过程中主要关注承载能力、构造措施以及变形情况等方面问题。而在复杂环境中进行结构安全性鉴定时应注意，由于环境作用造成材料损伤以及截面削弱必须计入承载力计算之中：对于混凝土结构要考虑到因钢筋锈蚀造成的截面损失以及混凝土与钢筋之间黏结破坏所带来的影响；而钢结构则需要根据实际截面尺寸确定净截面面积同时还要考虑锈蚀形态对应力集中所起的作用^[2]。基于模糊综合评判法的安全性评价方法，通过对已有建筑物结构安全性进行模糊综合评判，能够准确地判断出已有建筑物结构的安全性，而且对于检测结果不确定性和评价标准模糊性有良好解决办法。在鉴定评级过程中还应该重视环境对承载能力的影响，比如处在

腐蚀环境中结构虽然目前检测达到要求，但是也应该根据监测数据推算出该结构未来发展趋势，若有必要可以适当缩短鉴定周期或者进行保护等。

3.3 结构适用性与耐久性鉴定

适用性鉴定是针对结构在正常使用条件下变形、裂缝以及振动等进行评判；而耐久性鉴定是针对结构在环境作用下保持其预定功能的时间长短来进行评价。它们都属于结构正常使用功能的评判项目。耐久性鉴定以环境作用分析及材料耐久性能测试为依据，对结构尚余寿命及耐久性等级做出判断^[3]。耐久性评价方法与环境指数和耐久指数有关，环境指数增量 ΔSp 表示不同环境影响，如盐分影响较大时 ΔSp 值为 $10\sim70$ ，严寒冻融影响较大时 ΔSp 值为 $10\sim50$ ；耐久指数特征值 Tp 包括设计、材料、施工等各方面因素，总和可达到 $344\sim447$ 。这是一个对耐久性进行量化的标准。表 2 列出了影响混凝土结构耐久性主要因素以及它们对应的量化评定标准。

耐久性评价应根据现场检测及长周期监测结果不断调整。对一些重要的或是处于较差环境中的结构可以安装一些耐久性监测仪器仪表，以观察其变化情况，在监测发现结构耐久性快速降低时，要提前发出警告并且及时做出相应对策。

表 2 混凝土结构耐久性主要影响因素及评定指标

影响维度	具体因素	评定指标	指标范围
环境作用	盐分侵蚀	环境指数增量	10~70
环境作用	冻融循环	环境指数增量	10~50
材料性能	水灰比	密实性耐久指数	20~-15
材料性能	单位用水量	用水量耐久指数	10~-25
材料性能	氯盐含量	氯盐耐久指数	5~-30
构造措施	保护层厚度	保护层指数	依设计要求确定
施工质量	养护条件	养护耐久指数	3~-15

3.4 结构抗震性能鉴定

抗震性能鉴定是复杂条件下建筑结构安全性评价工作的必要内容之一，主要是评价结构在未来的地震中是否有足够的安全储备以及可能出现何种破坏方式。不同于新建工程，既有建筑抗震鉴定必须考虑到已经遭受过的地震损害、材料的老化以及环境的影响等。鉴定时应结合结构剩余使用年限、类别、场地情况以及设防烈度进行必要的规定。《既有建筑鉴定与加固通用规范》GB55021-2021 提出，对既有建筑抗震措施进行鉴定，应依据建筑结构的使用寿命长短，按照建筑结构类型、所处地区的抗震设防烈度以及场地类别、建筑抗震设防类别来确定主要要求

并有针对性地检查。场地条件影响较大:若场地属于III、IV类,则对于设计基本地震加速度分别为0.15g和0.30g的地方,其抗震措施应分别取用8度和9度的要求。在复杂的环境下锈蚀结构的抗震性能的研究是当前热点问题之一。有研究指出,在腐蚀环境中如何对钢结构进行抗震性能评价需要建立从“材料-构件-结构”的退化过程模型,全面考虑锈蚀对材料的力学性质、构件的滞回性能以及整个结构的抗震能力的影响。从分析的角度可以使用静力弹塑性分析或者动力时程分析来进行不同烈度下结构的响应情况,同时要考虑到环境侵蚀对结构承载力和延性的不利影响。结构规则性检查也是抗震鉴定的重要环节。若平面、立面的质量、刚度分布以及抗侧力构件的布置存在较大不对称性,应考虑扭转的影响;竖向构件不连续或者刚度突变处是薄弱环节,需要查明这些位置。对不规则结构的地震作用要关注扭转效应及薄弱部位的反应。

4 结语

复杂环境下建筑结构安全鉴定是一个涉及多个领域的综合性工作。本文认为:一是安全性能具有时变性和相互影响的特点,环境作用下的量测是鉴定的基础;二是三维激光扫描、探地雷达等检测手段各有特点,要根据实际

情况选择合适的方法进行检测;三是分析模型需要表达出结构的真实情况,而机器学习可以简化建立准确度较高的分析模型的过程;四是安全性、适用性、耐久性和抗震能力是构成一个建筑结构是否安全的必要条件,随着传感技术和人工智能的发展,结构的安全鉴定正在向自动化、实时化方向发展,在以后的工作中还需要关注多个信息源综合应用的问题以及环境-荷载之间的演变关系以及基于概率的风险评价方法的研究以更好地服务于既有建筑物的整个生命周期管理。

[参考文献]

- [1]杜东辉.复杂环境下装配式建筑主体结构施工精度控制技术分析[J].中国建筑金属结构,2025,24(11):112-114.
- [2]刘国权.复杂环境下基坑降水影响邻近建筑结构的对策分析[J].工程技术研究,2024,9(8):222-224.
- [3]郭建祥,魏晓斌,孙正华,等.周边环境作用下大型公共建筑结构安全智能监测与评估方法[J].建筑安全,2026,41(2):1-4.

作者简介:程志(1993.3—),毕业院校:中国地质大学,所学专业:土木工程,当前就职单位:北京紫衡轩建筑工程检测有限公司,职务:检测鉴定部项目负责人,职称级别:初级职称。