

Research on Structural Design and Construction Quality Control of Public Buildings

Jinxiu Yuan

CCCC (Qingdao) Urban Construction Co., Ltd., Qingdao, Shandong, 272000, China

Abstract

Public buildings are important facilities that serve the public and carry urban functions. In order to improve the safety and durability of public building structures, design points such as load values, node structures, earthquake resistance and fire prevention are analyzed. Factors affecting construction quality, such as material entry, key processes, and on-site management, are sorted out, and a full process control system is constructed before, during, and after the construction. Based on engineering practice, key measures such as drawing review, three inspection system, on-site supervision, and inspection and acceptance are clearly defined to effectively reduce quality hazards. Research has shown that strengthening the integrated control of design and construction, implementing standardization and information technology methods, can significantly improve the structural quality of public buildings and ensure the safety and reliability of engineering.

Keywords

public buildings; structural design; construction quality; quality control; structural safety

公共建筑结构与施工质量控制研究

苑进修

中交(青岛)城市建设有限公司, 中国·山东 青岛 272000

摘要

公共建筑是服务社会公众、承载城市功能的重要设施,为提升公共建筑结构安全性与耐久性,分析荷载取值、节点构造、抗震防火等设计要点,提出梳理材料进场、关键工序、现场管理等施工质量影响因素,构建事前、事中、事后全过程控制体系。结合工程实践,明确图纸会审、三检制、旁站监理、检测验收等关键措施,有效减少质量隐患。研究表明,强化设计施工一体化管控、落实标准化与信息化手段,可显著提升公共建筑结构品质,保障工程安全可靠。

关键词

公共建筑; 结构设计; 施工质量; 质量控制; 结构安全

1 引言

加强公共建筑结构与施工质量控制,是工程建设必须重视的核心工作。城市发展的各个功能区也在不断地完善,基础设施建设不断增加,这就对公共建筑的需求不断增加,而公共建筑的施工质量直接影响城市的发展,加上由于受到设计等各个方面的影响,会出现公共建筑设计问题,影响人们的使用。

2 工程项目概况

济宁高新区双创中心建设项目位于济宁市高新区孟子大道以南,风雅路以东,贾北路以北,杨柳街以西。总占地面积为 11.73 公顷(约 176 亩),总建筑面积为 233017 平方米。其中地上总建筑面积为 189975 平方米,包括研发中

心 42289 平方米,风雨廊 2176 平方米,文体中心 11193 平方米,生活配套中心 9569 平方米,信息中心 3004 平方米,人才公寓 12581 平方米,双创中心 31800 平方米,企业孵化中心 7500 平方米,综合服务中心 28500 平方米,企业展厅 8479 平方米,体育综合体 29934 平方米,风雨廊 950 平方米,相关配套设施 2000 平方米;地下总建筑面积为 43042 平方米,包括停车场和设备用房。配套建设项目区内供水、排水、消防、供电、道路等基础设施。

抗震设防烈度 7 度,耐火等级二级,防水等级一级,设计使用年限 50 年,结构安全等级二级,采用平整碾压处理地基,钢筋型号为 HPB300、HRB400,钢绞线 15.2,钢筋连接方式机械连接、电渣压力焊、搭接。主要构件混凝土强度等级:垫层 C20,基础 C35,墙柱 C35、C30,梁板 C40,圈梁、过梁、构造柱 C25。混凝土保护层厚度:基础及地下室底板底面(有垫层时保护层厚度应从垫层顶面算起)、地下室外墙与土体接触侧钢筋的保护层厚度不应小于 50mm(地下室外墙的墙厚应向土体接触侧另加厚 25mm 以

【作者简介】苑进修(1986—),男,中国山东聊城人,本科,高级工程师,从事路桥、市政、隧道、工民建研究。

满足保护层厚度要求)

属暖温带半湿润季风性气候,平均降雨量 655.5mm、最大降雨量 1128mm(2003 年)、最小降雨量 316mm 历年平均气压为 1012.3 百帕,年际变化规律为冬高夏低;年平均气温 13.7℃,极端最低 -22.3℃,极端最高 40.6℃。年平均风速为 2.9m/s,全年主导风向为东南风,其次为东风;大风(瞬时风速 > 17m/s) > 8 级,主要为冬季寒潮大风和夏季雷雨阵风,全年平均 17.5 次,最多 30 次,最小 8 次,极大值为 35m/s。拟建场地大部原为耕地、林地,局部为拆旧建新场地,地势较平坦,场区内各钻孔标高在 36.35~37.48m 之间,最大高差 1.13m。

3 公共建筑结构设计的主要内容

3.1 基础设计

公共建筑的基础设计是其中的重点,任何的建筑没有一个稳固的根基都会导致公共建筑出现安全问题,因此加强对公共建筑的基础设计也是其中的重中之重。在进行公共建筑的基础结构设计中,首先要有较大的埋置深度,通过较大的埋置深度可以保障建筑能够比较稳定,避免公共建筑出现整体的倾斜,同时也可以减少地基附加压力,提高公共建筑地基的承载力。

3.2 主体结构设计

学校、影剧院、体育馆以及医院等大部分公共建筑,屋面造型复杂,都具有复杂的空间结构,因此,设计人员分析结构受力比较困难,如果在主体结构设计不合理,结构设计概念有误,存在质量安全问题,通常会导致安全事故出现。所以在设计时,对主体结构进行概念设计,使主体结构要有足够弹性变形能力。

3.3 预应力混凝土梁设置

在一些公共建筑设计中,如果公共建筑功能或者需求较为特殊,还需要考虑建筑的使用情况,对楼板舒适度进行验算。如体育馆建筑,经常会有篮球、网球等剧烈运动,如果区域梁跨度过大,则就会出现比较强烈的竖向振动,为了增强楼板的舒适度,消除使用者的不安全感,避免发生共振现象,建筑结构竖向自振频率需要大于 3Hz。

3.4 建筑顶部设计

在设计建筑顶部时,需要对相关计算模型进行结构计算。一般情形下,需要单独计算公共建筑的顶部,同时还需要实施建模计算,计算顶部与下部混凝土框架连接。

3.5 荷载设计

在对公共建筑顶部荷载进行分析阶段,需要考虑建筑物的恒荷载、活荷载、风荷载,同时也要考虑到地震作用的实际情况,需要对上述荷载多种组合工况进行计算,如果建筑物在多地震带,则还需要考虑双向地震,其中包含竖向地震和水平地震。根据建筑所属地理位置,选取合理的荷载参数,如基本风压、抗震设防烈度、地震分组等关键参数。

3.6 抗震结构设计

在结构设计中,抗震设计作为最重要部分,对于整个

建筑的安全性有直接影响。目前最常用的抗震建筑材料为钢结构,材料的抗震性能较好,且重量较轻,使建筑整体性得到提升,建筑抗震性能也有所提高。由于钢结构材料具有较高强度,在地震作用下就会承受较大能量,且由于钢结构的材料特性容易仅仅出现变形,则会导致整体结构倒塌、断裂情况发生^[1]。

3.7 承重结构

在公共建筑结构设计中,承重结构的设计是其中的重要环节。在一个建筑中,结构设计中的承重是任何建筑必不可少的,保证建筑的承重能力对于保障建筑使用至关重要,一旦出现问题会造成较大的人身安全,因此,在公共建筑的结构设计中,要重视承重结构的设计。

4 控制施工质量加强建筑结构设计措施

4.1 完善施工管理制度

在完善施工管理制度工作中,通过详细规定各阶段的任务、责任和工作流程,可以确保每个环节都有明确的指导,从而降低因信息不畅导致的误解和错误。在数字化时代建立统一的信息管理平台,包括项目管理软件、数据存储和共享平台等,可以确保信息的及时传递和准确记录。

4.2 引入精细化管理理念

今天的建筑行业更加注重现代化与创新性,施工管理方面应该突破传统施工管理的束缚,全面引入精细化管理理念。精细化管理的第一步是明确管理目标。项目管理团队需要对施工现场的各个区域进行分级管理,将质量管理、进度管理和成本管理等关键部分进行细化。通过制

4.3 加强原材料质量控制

材料不合格,结构一定不安全,坚持“先检验、后使用”。钢筋要检查合格证、出厂报告,进场取样复试,重点检查强度、伸长率、重量偏差,分类堆放,防雨防锈,不混用规格;水泥、砂石、外加剂,保证水泥安定性必须合格,砂石含泥量、级配符合要求,外加剂不超标、不影响耐久性;优先使用商品混凝土,控制坍落度,运输时间不宜过长,严禁现场随意加水;其他砌块、砂浆、防水材料、连接件等材料均需合格,涉及结构安全的材料必须复检。

4.4 实施关键工序质量控制

钢筋工程按图下料,弯钩、尺寸正确,绑扎间距均匀,不漏扣、少扣,保护层用垫块控制,不位移,焊接、机械连接接头合格,拧紧到位;混凝土工程浇筑前清理杂物,浇水湿润,分层浇筑、振捣密实,不过振、不漏振,大体积混凝土控温;构造柱、过梁浇筑密实。

4.5 隐蔽工程与关键部位控制

隐蔽工程一旦覆盖,问题难以发现,必须严格验收,基础、桩基、钢筋布置、预埋件、防水层、后浇带等;验收合格并留影像资料后方可覆盖;高支模、深基坑、钢结构安装等危大工程必须专项方案+专家论证+旁站监督^[2]。

4.6 精进施工技术

首先要成立科学的施工管理组织,施工单位要根据工

程建设的实际需求和实际情况协调合适的管理人员,进行工作分配,在管理过程中定期召开会议,明确及追踪分配好的各项任务,做好相应协调配合工作。另外施工单位应充分认识到技术控制制度对建筑施工的重要性,深入研究和分析管理制度。落实工作责任制和奖罚分明的激励政策,同时对措施落实进行监督,保证管理人员工作落实。推动技术创新,提升管理智能化水平,引入信息化管理平台,对材料、设备等资源进行信息化台账管理,实现精准调度。

5 设计与施工协同控制措施

设计阶段控制,强化图纸审查,消除错、漏、碰、缺;图纸会审要充分,施工单位提前提出疑问;设计人员深入现场,及时处理变更;推广 BIM 技术,提前发现碰撞与受力问题。

施工过程控制,推行样板引路,先做样板间、样板墙,统一标准;严格执行“三检制”:自检、互检、专检;关键工序旁站监理,全程监督;加强人员培训,持证上岗;完善质量台账,问题整改闭环。

验收与资料控制,分部分项工程逐项验收,不合格不进入下道工序;混凝土试块、钢筋接头等试验资料齐全;隐蔽验收、变更、签证手续完整;竣工验收严格按规范,不降低标准^[3]。

6 结合项目进行结构与施工质量控制案例分析

6.1 工程概况与建设条件

本项目为综合性公共建筑群,配套建设给排水、消防、供电、道路等基础设施,使用功能复杂、人员密集。场地地势平坦,钻孔标高 36.35~37.48m,高差 1.13m,以耕地、林地及拆旧建新场地为主,地质条件相对稳定。区域属暖温带半湿润季风气候,年平均气温 13.7℃,极端气温 -22.3℃~40.6℃,年均降雨量 655.5mm,最大降雨量 1128mm,主导风向为东南风,瞬时极大风速 35m/s,对结构抗风、防水、耐久性要求较高。

6.2 结构设计要点与针对性控制

6.2.1 地基与基础设计

场地地势平坦、土质均匀,采用平整碾压地基处理,施工简便、经济性强,满足上部荷载与沉降控制要求。基础混凝土强度等级为 C35,垫层 C20,兼顾强度与施工可行性。地下建筑面积达 43042 m²,防水等级一级,设计重点强化抗渗与保护层控制。

6.2.2 结构体系与安全控制

项目采用钢筋混凝土框架及框架-剪力墙结构体系,保证空间灵活与抗侧刚度。结构安全等级二级、7度抗震设防,设计严格执行“小震不坏、中震可修、大震不倒”目标,合理布置抗侧力构件,控制结构扭转效应,关键节点加强配筋与箍筋加密,满足公共建筑高冗余度要求。

6.2.3 材料与耐久性设计

钢筋采用 HPB300、HRB400,预应力构件使用 15.2 钢

绞线,强度匹配、经济性优。混凝土强度分级明确:基础与墙柱 C35/C30、梁板 C40、圈梁构造柱 C25,实现受力合理与成本优化。地下结构保护层厚度不小于 50mm,地下室外墙加厚 25mm 补偿保护层,有效防止钢筋锈蚀,适应区域潮湿、冻融气候条件,满足 50 年使用年限。

6.3 施工关键环节质量控制

6.3.1 地基处理质量控制

采用分层平整碾压,严格控制压实度与标高,检测地基承载力达标后方可进入下道工序,避免不均匀沉降,为上部结构提供稳定支撑。

6.3.2 钢筋工程控制

钢筋连接采用机械连接、电渣压力焊、搭接相结合,框架柱、暗柱等竖向受力筋优先机械连接与电渣压力焊,保证接头质量与施工效率。严格控制锚固长度、搭接长度与保护层厚度,使用专用垫块与马凳,防止钢筋位移。

6.3.3 混凝土工程控制

按构件等级精准供料,梁板 C40、基础与墙柱 C35,严控坍落度与运输时间,严禁现场加水。地下结构采用抗渗混凝土,分层振捣密实,及时养护。大体积构件实施测温养护,控制内外温差,减少温度裂缝,满足防水等级一级要求。

6.3.4 防水与气候适应性控制

针对年均降雨 655.5mm、极端温差大的特点,屋面、地下室顶板与外墙严格按一级防水施工,加强节点密封与防水层搭接。结合冬季低温、夏季高温与大风气候,合理安排混凝土浇筑与养护时间,避免冻害、干缩与风致裂缝。

6.3.5 隐蔽工程与验收管理

对地基、基础、钢筋连接、预埋件、防水层等实行“三检制”与隐蔽验收,留存影像资料,高支模等危大工程执行专项方案与旁站监督,确保工序质量闭环。

7 结语

公共建筑结构安全是工程建设的底线,设计是源头,施工是关键,管理是保障。在结构设计方面,应合理选择体系、准确计算荷载、重视抗震与构造设计,避免漏算、错算与不合理构造;在施工方面,应严格控制材料、规范工序、强化验收,杜绝偷工减料与野蛮施工;同时加强设计与施工协同,健全管理制度与责任体系,才能有效提高公共建筑结构可靠性与耐久性。只有从源头抓起、全过程管控、多方协同发力,才能真正建造出安全、舒适、耐用的公共建筑,为社会公众提供可靠的使用保障。

参考文献

- [1] 付文超,李喆.大型公共建筑精细化施工管理及其质量控制技术研究[J].智能建筑与工程机械,2025,7(9):49-51
- [2] 尚晓红.加强建筑工程结构与施工管理对策研究[J].中国科技纵横,2025(9):99-101
- [3] 白快,俞浩亮,张科,朱星,戴龙.基于BIM技术的建筑工程施工中结构设计的策略研究[J].居业,2025(7):100-102

Research on Intelligent Detection Cause Analysis and Treatment Strategies for Highway Subgrade and Pavement Diseases

Chunyan Chen

Shanxi Changzhi Highway Survey & Design Institute Co., Ltd., Changzhi, Shanxi, 046000

Abstract

Addressing the challenges of low-efficiency manual inspections, experience-dependent cause analysis, and generalized treatment strategies in traditional highway maintenance, this study establishes an integrated technical framework encompassing “intelligent detection, mechanism analysis, and targeted treatment.” By integrating multi-source sensing devices with an improved YOLOv8 algorithm, the research achieves integrated detection of both surface and hidden distresses, with void identification accuracy reaching 93.8%. Through field monitoring and numerical simulation, the evolution patterns of distresses under coupled hydro-thermal-mechanical fields are revealed, with main controlling factors identified using Random Forest and Logistic Regression. A three-dimensional distress classification and grading standard is established, along with targeted treatment technologies addressing four causative mechanisms. Digital twin and life-cycle cost analysis are introduced to optimize maintenance decision-making. The research outcomes provide theoretical support and practical references for scientific, precise, and intelligent highway maintenance.

Keywords

highway subgrade; pavement; intelligent detection; cause analysis; targeted treatment

公路路基路面病害智能检测、成因分析及处治对策研究

陈春艳

山西长治公路勘察设计院有限公司, 中国·山西 长治 046000

摘要

针对传统公路养护中人工检测效率低、成因分析依赖经验、处治方案粗放等问题, 本文构建了“智能检测—机理分析—靶向处治”全链条技术体系。研究集成多源传感设备与改进YOLOv8算法, 实现表观与隐性病害一体化检测, 脱空识别精度达93.8%; 通过现场监测与数值模拟揭示水-热-力多场耦合作用下病害演化规律, 采用随机森林与Logistic回归辨识病害主控因子; 建立三维度病害分类分级标准与四类成因的靶向处治技术, 引入数字孪生与全生命周期成本分析优化养护决策。研究成果为公路养护科学化、精准化与智能化提供了理论支撑与实践参考。

关键词

公路路基; 路面; 智能检测; 成因分析; 靶向处治

1 引言

现在我国的公路网的建设和养护已经是同等重要, 传统人工巡查效率低、主观性强, 难以发现深层隐性病害, 不能及时进行预防病害工作。人工智能等技术发展为构建“智能检测—精准诊断—靶向处治”体系提供了条件, 能够提升养护的科学性, 但现在的研究仍存在“检-诊-治”衔接不足、机理不明、精细化程度低等问题。

本文构建多源数据融合检测平台, 实现表观与隐性病害一体化检测; 揭示多场耦合作用下病害机理; 提出基于病

害特征的靶向处治对策, 并通过实证验证其可行性。研究在体系层面构建“检-诊-治”闭环框架, 在方法层面引入多源融合与多场耦合分析, 在应用层面提出基于特征库的靶向处治方法, 兼具理论价值与工程意义。

2 基于多源数据融合的路基路面病害智能检测技术研究

2.1 多源传感平台构建

为突破传统检测效率低、难以发现隐性病害的局限, 本研究构建了“地-空”协同的多源传感检测平台。车载系统集成高分辨率线阵相机、三维激光扫描仪和红外热成像仪, 实现路面表观病害的高效采集与三维量化; 三维探地雷达阵列可获取路基内部结构数据, 识别脱空、含水率异常等

【作者简介】陈春艳(1975—), 女, 中国河南沁阳人, 本科, 高级工程师, 从事公路勘察设计研究。

隐性病害；无人机搭载可见光 / 热成像吊舱，弥补高边坡、桥梁衔接段等复杂区域的检测盲区。各传感器通过高精度 GPS/INS 组合导航系统实现时空配准，为后续融合分析奠定数据基础。主要传感设备的技术参数与功能定位见表 2-1。

表 2-1 多源传感设备性能对比表

传感器类型	采集数据	主要技术参数	检测对象	功能定位
高分辨率线阵相机	路面高清影像	分辨率 1mm/pixel, 采集速度 60km/h	裂缝、坑槽、龟裂	表观病害精细成像
三维激光扫描仪	路面点云	扫描频率 200Hz, 测距精度 2mm	车辙、沉陷、平整度	三维形态量化
红外热成像仪	路面温度场	热灵敏度 0.05°C, 像素 640 × 512	基层松散、含水异常	早期隐性病害辅助探测
三维探地雷达	路基雷达剖面	天线频率 200MHz~2GHz, 探测深度 3m	脱空、松散、含水率	深层结构探查
无人机吊舱	可见光 / 热成像视频	4K 可见光, 热成像分辨率 640 × 512	高边坡、桥梁衔接段	复杂区域补充巡检

建包含裂缝、坑槽等典型病害的高质量数据集。改进点包括：在骨干网络中引入 CBAM 注意力机制，增强细小病害的特征表达；采用基于 PANet 的多尺度自适应特征融合网络，替换原有颈部结构，提升不同尺度病害的融合效率；引

2.2 基于改进 YOLOv8 的路面病害识别算法

针对路面病害尺度差异大、细小特征难提取等问题，本研究以 YOLOv8 为基线进行改进。首先对采集图像进行光照均衡、去噪等预处理，并整合公开数据集与自采数据构

入 Focal Loss 缓解正负样本不平衡问题。改进后的算法结构如图 2-1 所示。在 RDD2020 和 UAPD 数据集上的测试表明，平均精度 (mAP) 提升 3.2~5.8 个百分点，参数量降低 7%，实现了精度与效率的平衡。

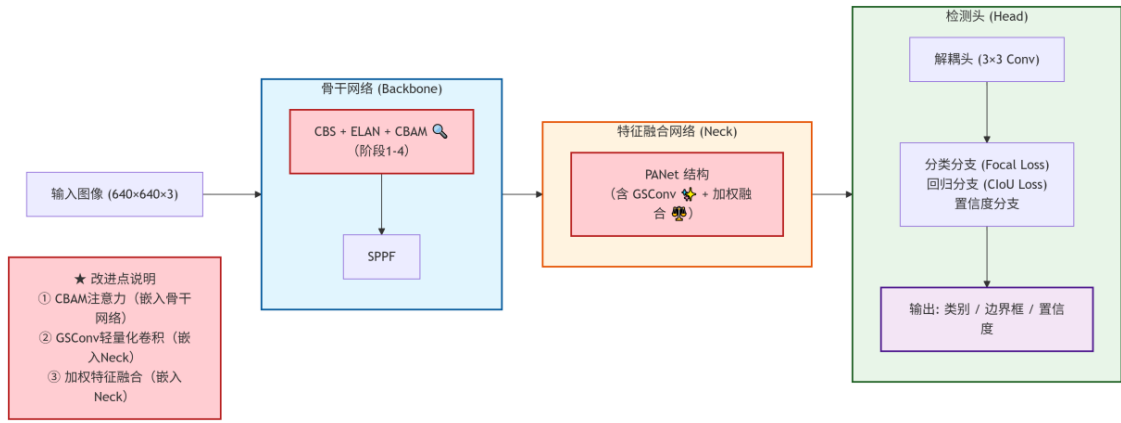


图 2-1 改进 YOLOv8 算法结构图

2.3 探地雷达智能解译与多源数据融合

针对脱空、松散等典型隐性病害构建基于 MobileViT 的双视图融合模型，利用 B-scan(垂直剖面)和 C-scan(水平切片)信息，通过特征交错加权融合突出关键特征，进行深度学习实现自动识别三维探地雷达图谱中典型隐性病害。试验表明脱空识别精度达 93.8%，体积误差率低于 4.3%，多视图融合准确率达 90.5%。

通过空间配准将病害位置与 GPR 异常区域关联，构建路基路面一体化病害分布图谱，将表观与深层数据进行融合。裂缝位置若对应深层脱空则判别为结构性反射裂缝，车辙若与基层含水率异常对应则归为水损害型，实现从表观现象追溯深层病因的关联诊断。这个融合分析框架为后续成因机理研究与靶向处治提供了数据支撑。

3 典型病害成因机理与多因素耦合分析

3.1 现场监测与病害演化规律

为对比不同条件下路基路面病害的演化规律，选取季冻区、黄土地区、盐渍土地区典型路段开展长期原位监测，

布设温湿度、含水率、土压力等传感器，结合北斗与 InSAR 技术获取路基变形数据。监测路段特征对比见表 3-1。

3.2 水 - 热 - 力多场耦合机理

基于 COMSOL Multiphysics 建立水 - 热 - 力三场耦合模型，控制方程包括热量传输方程 (考虑相变潜热)、水分迁移方程 (Richards 方程) 和冰 - 水相变方程，开展室内物理模型试验与数值模拟。数值模拟结果：冻结过程中水分向冻结锋面迁移，最大迁移量达初始含水率的 20%；冻融循环导致路基累积变形。典型病害形成机理总结见表 3-2。

3.3 基于机器学习的病害主控因子辨识

本文从数据层、模型层、因子效应层和知识层让机器进行学习，进行成因分析，系统性的识别不同病害类型的参数。如图 3-1 所示，对所有监测到的数据进行量化处理后进行多模型融合评估，再用 Logistic 回归模型分析每个因子的效应，最终建立病害成因的数据库。

系统采用了随机森林、XGBoost 和 LightGBM 三种集成学习算法对量化后的影响因素进行重要程度评估。

表 3-1 典型监测路段特征对比

路段类型	气候区	路基填料	主要病害类型	监测参数	监测周期
季冻区	寒冷湿润	粉质粘土	冻胀、翻浆	温度、含水率、冻深	3 年
黄土地区	半干旱	黄土	湿陷、沉陷	含水率、土压力、沉降	2 年
盐渍土地区	干旱	盐渍土	盐胀、溶陷	含盐量、温度、变形	2 年

表 3-2 典型病害形成机理总结

病害类型	主导因素	作用机理	典型特征
水损坏型	降雨、积水	水分入渗导致基质吸力降低、有效应力减小	路基软化、差异沉降
冻融型	温度梯度	水分迁移冻结产生冻胀，融化时强度降低	季节性起伏、翻浆
结构疲劳型	重载交通	基层底部疲劳开裂，反射至面层	龟裂、车辙
特殊土质型	盐分、含水率	盐胀（硫酸盐）或溶陷（氯盐）	隆起、沉陷

随机森林通过基尼指数计算特征重要性：

$$Importance(X_j) = \frac{1}{N} \sum_{t=1}^N \sum_{m \in t} \Delta Gini(m, X_j)$$

其中，N 为决策树数量， $\Delta Gini(m, X_j)$ 为节点 m 使用

特征 X_j 分裂时基尼指数的下降量。

XGBoost 和 LightGBM 的特征重要性计算方式类似，均可基于增益 (Gain) 来衡量特征的重要性。增益表示使用该特征进行分裂时带来的损失函数减少量的总和，其计算公式可统一表示为：

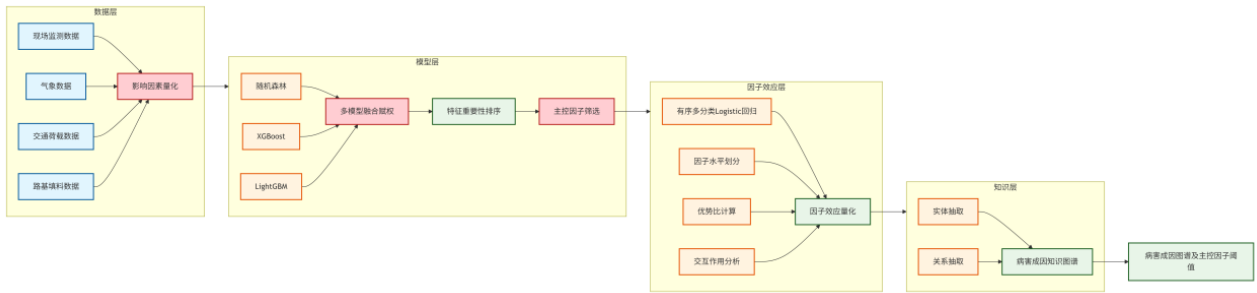


图 3-1 机器学习成因分析流程图

$$Importance(X_j) = \sum_{t \in T} \sum_{s \in S_j^t} Gain(s)$$

其中，T 为所有决策树的集合， $S_j(t)$ 为第 t 棵树中使用特征 X_j 进行分裂的节点集合，Gain(s) 为节点 s 分裂时带来的增益值。在模型输出中，增益通常归一化为相对百分比，数值越高表示特征越重要。

为避免单一模型的偏差，采用 MACBETH 方法对三个模型赋予权重，得到融合后的特征重要性排序。根据累积贡献率原则 ($\geq 85\%$) 筛选出各类病害的主控因子，为后续深入分析奠定基础。

筛选出主控因子后，进一步采用有序多分类 Logistic 回归分析各因子对病害等级的影响程度。有序多分类 Logistic 回归模型基于累积概率建模，其表达式为：

其中，Y 为病害严重等级 (I 级=1, II 级=2, III 级=3)，X 为影响因子向量， β 为回归系数向量， α_j 为第 j 个累积概率对应的截距参数 (满足 $\alpha_1 < \alpha_2$)。

通过计算各因子的优势比 ($OR=e^{\beta}$)，可量化因子变化一个单位对病害等级提升的影响倍数。同时，引入因子间的交互项 (如含水率 \times 冻融次数)，分析多因素协同作用

对病害发展的影响。例如，季冻区路基的冻胀变形分析显示，“高含水率 ($> 20\%$) + 强降温 (日降幅 $> 10^\circ\text{C}$)” 的交互作用可使冻胀概率提升约 3.2 倍，远高于单因子作用。

4 基于病害特征的靶向处治对策与工程验证

4.1 病害分类分级与处治目标

为克服传统处治“一刀切”的局限，建立基于多源检测结果的精细化病害分类体系。分类涵盖三个维度：①表观特征 (裂缝类、变形类、松散类)；②深层病因 (水损害、冻融、疲劳、特殊土质)；③发展态势 (稳定型、发展型、快速恶化型)。在此基础上，制定多指标综合的严重程度分级标准 (I ~ III 级)，见表 4-1。

针对不同等级，设定三层级处治目标：①功能性修复 (I 级病害，恢复平整度、抗滑等)；②结构性补强 (II 级病害，提升承载能力、阻断裂缝)；③耐久性提升 (III 级病害及特殊土质病害，增强抗水损、抗冻融、抗盐胀性能)。

4.2 面向不同成因的靶向处治技术

水损害主导型：优化排水系统，设置防渗阻水层，或采用透水性基层。

冻融与盐胀主导型：采用盐渍土自降盐排导技术或易设置应力吸收层。
 溶盐吸附处理技术。 表观功能衰减型：采用微表处、稀浆封层、含砂雾封
 结构性疲劳主导型：基层加铺土工格栅或玻纤格栅， 层等预防性养护技术或超薄磨耗层恢复路面功能。

表 4-1 病害三维分类与分级标准

维度	具体指标	I级(轻微)	II级(中等)	III级(严重)
表观特征	裂缝宽度	< 3 mm	3~6 mm	> 6 mm
	坑槽深度	< 2 cm	2~5 cm	> 5 cm
	车辙深度	< 10 mm	10~25 mm	> 25 mm
深层病因	基层状态	基本完好	局部松散	脱空或松散严重
	路基含水率	正常范围	异常升高	饱和或积水
发展态势	发展速率	低于阈值	阈值范围内	高于阈值

4.3 基于数字孪生的养护决策优化

构建养护对策知识图谱，引入全生命周期成本分析(LCCA)，将未来不同时点的成本统一折现，现值计算公式为：

$$PVC = \sum_{t=0}^T \frac{C_t}{(1+r)^t}$$

其中 C_t 为第 t 年的机构成本、用户成本与环境成本之和， r 为折现率， T 为分析期。通过数字孪生模型对备选方案进行虚拟实施与性能预测，结合多目标优化生成 Pareto 最优方案集。

4.4 与现行行业标准的衔接

本文病害分级与《公路技术状况评定标准》(JTG 5210) 中的路面损坏状况指数(PCI)存在明确对应关系，分级在 PCI 基础上增加了深层病因与发展态势维度，弥补了宏观指标无法反映病害成因与演化趋势的局限，养护对策与《公路沥青路面养护设计规范》(JTG 5421) 形成衔接，

对应关系如下表。

5 结语

本文围绕“智能检测—机理分析—靶向处治”全链条技术体系开展系统研究，主要结论如下：

(1) 智能检测方面：构建了集成多源传感设备的“地-空”协同检测平台，提出基于改进 YOLOv8 的病害识别算法，检测精度提升 3.2~5.8 个百分点；建立探地雷达智能解译方法，脱空识别精度达 93.8%，实现了表观与隐性病害一体化检测。

(2) 成因机理方面：通过现场监测与数值模拟揭示了水-热-力多场耦合作用下病害演化规律，冻胀量达 51 mm、融沉量 13 mm；采用随机森林与 Logistic 回归辨识了各类病害的主控因子，构建了病害成因知识图谱。

(3) 靶向处治方面：建立三维度病害分类与三级分级标准，提出四类成因的差异化处治技术；构建基于数字孪生与 LCCA 的养护决策优化方法，实现方案智能生成与比选。

表 4-2 本文处治目标与行业养护对策对应关系

本文处治目标	对应行业养护对策	适用 PCI 范围	核心任务	代表性技术
功能性修复	预防性养护 / 功能性修复养护	PCI ≥ 80 (预防性) PCI 70~85 (功能性)	恢复平整度、抗滑、防水等使用功能	微表处、稀浆封层、超薄磨耗层
结构性补强	结构性修复养护	PCI < 70	提升承载能力，阻断深层病害发展	基层加筋、应力吸收层、铣刨重铺
耐久性提升	——	特殊土质 / 气候区	增强抗水损、抗冻融、抗盐胀性能	盐渍土自降盐排导、防冻层、抗冻融改良

参考文献

[1] 《中国公路学报》编辑部. 路基工程科技发展与趋势展望[J]. 中国公路学报, 2025, 38(12).
 [2] 杨东宽, 高光磊, 尹诗雨, 等. 基于DFES-YOLOv5s的道路脱空病害智能检测优化算法研究[J]. 中北大学学报(自然科学版), 2025, 46(4): 499-507. DOI: 10.3969/j.issn.1673-3193.2025.04.011.
 [3] 基于改进YOLOv8的探地雷达道路隐性病害检测方法[J]. 现代雷达, 2025. DOI: 8d388966-1120-422f-8617-15c3400ac97a.
 [4] 陈登峰, 孟屯良, 何拓航, 等. 路基病害雷达图像多视图融合识别方法[J]. 测绘通报, 2025(6): 97-102. DOI: 10.13474/j.cnki.11-2246.2025.0617.