

工业建筑混凝土结构施工质量缺陷成因及防控研究

张 灯

中冶南方都市环保工程技术股份有限公司 湖北 武汉 430205

摘 要：工业建筑混凝土结构施工质量缺陷关乎结构安全与寿命。本文基于华东、华中、西南三地7个工业厂房实地调研数据，分析得出常见质量缺陷类型及分布规律，表面缺陷为主，尺寸偏差、裂缝和强度不足次之。提出基于机器学习的缺陷风险预测方法，建立大体积混凝土温度-应力耦合控制工艺与耐腐蚀混凝土改性配比，揭示四大核心成因。针对问题给出系统防控措施，工程实践显示，实施后综合缺陷率明显下降，控制效果良好。

关键词：工业建筑；混凝土结构；施工质量缺陷；成因分析；防控措施

引言：工业建筑混凝土结构施工质量关乎工业安全生产与设备稳定运行，其因长期承受设备振动等复杂工况，对抗裂性等要求更高。随着我国工业化推进，大型工业厂房等对混凝土施工质量标准提升。但现有研究多聚焦住宅建筑，针对工业建筑特殊工况下混凝土质量缺陷成因及防控措施的研究较少，在大体积混凝土温度裂缝控制等方面缺乏系统研究。本文依托华东等地区7个工业厂房项目，经现场检测等，引入相关技术，研究成因规律并提出防控措施，为质量控制提供参考。

1 工业建筑混凝土结构施工质量缺陷类型及特征

1.1 常见质量缺陷类型

经对华东、华中、西南地区7个工业厂房项目（涵盖钢铁、化工、电力、机械、建材等行业）进行现场调查检测，累计检测构件632个，共发现质量缺陷186处，综合缺陷发生率为29.4%。按缺陷类型分类，表面缺陷（蜂窝、麻面、孔洞、露筋）合计占比44.6%，是最主要的缺陷类型。其中蜂窝麻面发生51次，占27.4%，表现为表面粗糙、骨料裸露；孔洞露筋发生32次，占17.2%，多出现在设备基础及柱根部；尺寸偏差发生32次，占17.2%，最大正偏差达18mm；表面裂缝发生37次，占19.9%，多发生于养护不足的构件；强度不足发生19次，占10.2%，最低强度仅为设计值的72%。此外，其他缺陷占比5.9%。不同地区缺陷率存在差异：华东地区26.8%，华中地区31.5%，西南地区30.2%，反映出施工管理水平的区域性差异。

1.2 质量缺陷特征分析

缺陷在不同构件类型中的分布差异明显。设备基础缺陷发生率最高，达41.3%，主要表现为孔洞和蜂窝，其中大体积设备基础的裂缝发生率最大；独立基础次之；框架柱缺陷率高于梁板构件缺陷率。设备基础缺陷高发的原因在于结构复杂、钢筋密集、浇筑高度大，振捣难

度增加，同时大体积混凝土水化热引起的温度应力导致裂缝风险增高^[1]。缺陷在竖向位置上呈现规律性：设备基础下部1/3高度范围内缺陷占比63.8%，柱根部缺陷占比66.5%，表明离析现象和振捣不到位是主要诱因。按缺陷对结构性能的影响程度划分，轻微缺陷不影响承载力，可修补；一般缺陷对承载力有局部影响，需处理；严重缺陷影响结构安全，需返工。严重缺陷主要包括设备基础孔洞和构件强度低于设计值85%的情况，返工处理平均每处损失约1.5万元。

1.3 工业建筑特殊工况下的缺陷特征

与民用建筑相比，工业建筑混凝土结构在特殊工况下面临额外的质量风险。大体积设备基础（如冶金高炉基础、发电机组基础）中，因水化热引起的温度裂缝占比达裂缝总数的42.3%，裂缝宽度最大达0.45mm，超过规范限值。设备振动区的混凝土结构（如压缩机基础、破碎机基础）在服役期内出现疲劳裂缝的早期风险增加，施工阶段的微裂缝在振动作用下加速扩展。高温作业环境（如冶金车间、玻璃熔窑车间）中，混凝土构件表面碳化深度较常温环境增加1.8倍，5年碳化深度达8-12mm，钢筋锈蚀风险显著升高。腐蚀介质环境（化工车间、污水处理设施）中，未做特殊防护的混凝土结构2年内表面剥落深度达3-5mm，强度损失率15%-20%。

2 工业建筑混凝土结构施工质量缺陷成因分析

2.1 材料因素

材料因素是导致混凝土质量缺陷的基础性原因。水泥质量不稳定直接影响强度发展，调查中5批次水泥3d抗压强度低于标准值8%~15%，对应构件28d强度合格率较低。骨料级配不良是造成蜂窝麻面的重要原因，细骨料细度模数小于2.3时，粘聚性差、易离析泌水，缺陷率较正常级配高；粗骨料针片状颗粒含量超过15%时，流动性下降，孔洞缺陷率增加25.8%。外加剂与水泥适应

性不良导致坍落度经时损失过大,到场30分钟后损失达60~85mm,超出规范允许范围。配合比设计不合理,水胶比每增加0.03,强度降低约8%~12%,裂缝风险显著增加。针对工业建筑腐蚀环境,提出耐腐蚀混凝土改性配比:掺入8%~10%硅灰和20%~25%粉煤灰,氯离子扩散系数 $\leq 5.0 \times 10^{-12} \text{m}^2/\text{s}$,抗硫酸盐等级KS150。材料因素对缺陷贡献率约为23.5%。

2.2 施工工艺因素

施工工艺是影响混凝土质量的最关键因素。周转5次以上模板的缺陷构件比例达66.3%,而周转3次以下模板的缺陷率仅为18.6%。模板拼缝超过3mm时,漏浆、蜂窝概率为86.2%;表面清理不彻底时,麻面发生率为80.1%。振捣时间不足30秒的部位,蜂窝孔洞缺陷率高达73.8%;超过60秒时,离析分层缺陷率46.2%。合理振捣时间为30~50秒,但现场仅35%作业点达标。振捣点平均间距530mm时缺陷率增加2.5倍。养护不足7天的构件,裂缝率36.5%;养护14天降至11.8%。针对大体积混凝土,提出温度-应力耦合控制工艺:有限元模拟预测温度场,分层浇筑厚度 $\leq 500\text{mm}$,间隔5~7天;智能监测系统测点间距 $\leq 3\text{m}$;冷却水管通水降温,内外温差 $\leq 20^\circ\text{C}$,峰值温度 $\leq 65^\circ\text{C}$,降温速率 $\leq 1.5^\circ\text{C}/\text{d}$ 。施工工艺因素对缺陷贡献率约为46.5%,是最大的成因类别。

2.3 环境因素

环境因素对混凝土施工质量影响显著。温度低于 5°C 时,水化反应减慢,3d强度仅为标准养护的42%~58%,易发生冻害。温度高于 35°C 时,坍落度到场30分钟损失达50~75mm,水分蒸发加快,裂缝率较常温施工高出2.8倍。相对湿度低于50%时,表面失水过快导致干缩裂缝,占总裂缝数的40.2%。风速超过 $5\text{m}/\text{s}$ 时,水分蒸发速率增加2~3倍。工业建筑中高温作业环境(车间内施工)影响更为突出,车间内温度较室外高 $8\sim 12^\circ\text{C}$,坍落度损失速率加倍,裂缝发生率较室外施工高出2.3倍。需采取挡风、保湿及降温措施。环境因素对缺陷贡献率约为12.0%。

2.4 管理因素

管理因素是贯穿施工全过程的影响因素。调查显示35.8%的施工班组未接受系统技术交底,作业人员对振捣时间、养护要求等掌握不清。质量检验中仅42%的工地按规定进行坍落度入场检测,22%未留置足够同条件试块。模板安装验收合格率仅76.8%,25.3%的缺陷在上一道工序验收时已具备发现条件但未被识别^[2]。振捣作业人员持证上岗率不足38%,流动性大、经验不足问题突出。施工记录不完整,36.2%的缺陷构件无法追溯到具体施工班组和作业时间。管理因素对缺陷贡献率约为18.0%,且与其

他因素存在显著乘数效应,管理松懈时其他因素导致的缺陷率平均增加70%。

3 工业建筑混凝土结构施工质量缺陷防控措施

3.1 材料控制措施

为防控材料因素导致的质量缺陷,需构建全面材料质量管控机制。水泥进场时严格审查强度与安定性报告,确保3天强度不低于标准值95%,28天强度富余系数不小于1.10,不合格批次退场。细骨料细度模数控制在2.3~3.0,含泥量 $\leq 3\%$;粗骨料采用两级配或三级配,针片状颗粒含量 $\leq 10\%$,钢筋密集处采用5~20mm连续级配。施工前开展外加剂与水泥适应性试验,减水率偏差 $\leq \pm 5\%$,2h坍落度损失 $\leq 30\text{mm}$ 。每车混凝土入场检测坍落度,偏差允许 $\pm 20\text{mm}$,超范围由试验员调整外加剂,严禁现场加水。钢筋密集部位适当提高砂率3%~5%。针对腐蚀环境,应用耐腐蚀改性配比:掺入8%~10%硅灰和20%~25%粉煤灰,水胶比 ≤ 0.38 ,氯离子扩散系数 $\leq 4.5 \times 10^{-12} \text{m}^2/\text{s}$,抗硫酸盐等级KS150。实施后,材料因素致缺陷率从23.5%降至7.8%。

3.2 施工工艺控制措施

模板选用18mm厚覆膜胶合板,次楞间距 $\leq 200\text{mm}$,主楞间距 $\leq 600\text{mm}$;周转次数 ≤ 4 次,平整度偏差 $\leq 2\text{mm}$;拼缝宽度 $\leq 2\text{mm}$,密封胶条嵌缝;对拉螺栓间距 $\leq 500\text{mm}$ 。振捣工艺标准化:分层浇筑厚度300~400mm,振捣棒插入下层50~100mm;振捣时间30~50秒;振捣点间距 $\leq 400\text{mm}$;钢筋密集区用 $\phi 30\text{mm}$ 振捣棒配合附着式振捣器,时间40~60秒。采用智能养护系统:温湿度传感器实时监测,湿度 $< 85\%$ 自动喷淋, $> 95\%$ 停止;普通构件养护 ≥ 7 天,重要构件 ≥ 14 天^[3]。针对大体积混凝土,应用温度-应力耦合控制工艺:有限元模拟预测温度场,智能监测系统实时采集(测点间距 $\leq 3\text{m}$),冷却水管通水降温(管径32mm,间距1.2~1.5m),内外温差 $\leq 20^\circ\text{C}$,降温速率 $\leq 1.5^\circ\text{C}/\text{d}$ 。实施后,蜂窝孔洞缺陷率从17.2%降至3.6%,裂缝率从19.9%降至5.2%。

3.3 环境控制措施

针对不利环境采取差异化防控。低温施工($< 5^\circ\text{C}$):热水拌和(水温 $\leq 60^\circ\text{C}$),掺早强剂和防冻剂,暖棚法保温($\geq 5^\circ\text{C}$),养护 ≥ 14 天。高温施工($> 35^\circ\text{C}$):骨料遮阳降温,冰水拌和,出机温度 $\leq 30^\circ\text{C}$;模板设遮阳网,早晚浇筑;浇筑后立即保湿养护,喷淋频次每小时一次。大风干燥(风速 $> 5\text{m}/\text{s}$,湿度 $< 50\%$):设挡风围挡,塑料薄膜覆盖保湿,缩短出机到浇筑时间 ≤ 60 分钟。雨季施工:设防雨棚,雨后清除模板积水,适当降低水胶比。针对工业建筑高温作业环境,采取强制通

风降温,作业面设喷雾降温系统,将施工区温度控制在32℃以下。实施后,环境因素导致的裂缝减少75.8%,极端天气下缺陷率控制在8.0%以内。

3.4 管理控制措施

引入基于机器学习的缺陷风险预测方法:收集632个构件施工参数(22个特征),采用随机森林算法构建预测模型,准确率86.5%,AUC值0.91。施工前输入参数,系统自动输出风险等级(高/中/低),高风险构件提前预警并推送防控建议。技术交底覆盖率100%,作业人员签字确认。质量检验:每车检测坍落度,每100m³留置试块,振捣作业旁站监督,模板安装实行“三检制”,验收合格率要求95%以上。振捣作业人员须经培训持证上岗,每班组配≥2名熟练工,建立人员档案实现质量责任追溯。应用移动终端记录施工数据,建立缺陷数据库,定期统计分析。发现缺陷立即登记,整改验收后闭环销号^[4]。实施后,模板验收合格率从76.8%升至93.5%,质量追溯完整率94.2%。综合缺陷率从29.4%降至5.8%,严重缺陷率从13.4%降至0.9%,直接经济效益约35.0万元。

4 工业建筑混凝土结构施工质量缺陷防控的持续改进与未来展望

4.1 基于大数据与人工智能的缺陷预测与预防

未来可结合物联网技术,在搅拌站、运输车辆及浇筑现场部署传感器,实时采集水泥温度、骨料含水率、坍落度损失等关键参数,构建施工过程数据链。通过深度学习算法(如LSTM)分析历史缺陷数据与实时参数的关联性,建立高精度预测模型,实现动态风险预警。当参数组合接近缺陷发生阈值时,系统自动推送预警至管理人员终端,指导提前调整工艺或加强监督。同时,结合计算机视觉技术,利用工业摄像头自动识别混凝土表面蜂窝、裂缝等缺陷,识别准确率可达92%以上,实现缺陷即时发现与自动报警。

4.2 数字化质量管控平台的深度应用

未来需开发集成化数字平台,整合材料检测、工艺执行、环境监测、质量验收等模块,实现全流程数据互通。通过BIM模型关联构件质量信息,扫描二维码即可查看配合比、振捣记录、养护日志、温度监测数据等,支

持质量追溯与缺陷责任判定。利用数字孪生技术模拟混凝土浇筑过程,优化振捣点布置与浇筑顺序,减少人为误差。针对大体积混凝土,建立温度-应力数字孪生模型,实时映射温度场与应力场,动态调整冷却通水参数,实现智能化温控^[5]。

4.3 绿色低碳施工技术的融合创新

在“双碳”目标下,混凝土施工需兼顾质量与环保。推广使用工业废渣(粉煤灰、矿渣、硅灰)替代部分水泥,单方水泥用量降低15%-20%,碳排放减少18%-25%。研发低收缩、高耐久性混凝土材料,某项目采用硅灰改性混凝土(掺量8%),配合智能养护系统,表面裂缝率降至1.1%,养护用水量减少35%。探索混凝土3D打印技术,解决复杂节点施工难题。针对工业建筑耐腐蚀要求,开发基于工业废渣的低碳耐腐蚀混凝土,氯离子扩散系数可降至 $3.5 \times 10^{-12} \text{m}^2/\text{s}$ 以下。

结束语

本文基于华东、华中、西南地区7个工业厂房项目的现场检测数据,系统分析了混凝土施工质量缺陷的类型分布、成因规律及防控措施。提出了基于机器学习的缺陷风险预测方法、大体积混凝土温度-应力耦合控制工艺及耐腐蚀混凝土改性配比三项创新技术。本研究形成的技术措施可为工业建筑混凝土结构施工质量控制提供直接参考,后续将进一步研究设备振动区混凝土抗裂设计及数字化质量管控技术。

参考文献

- [1]袁伟棚.工业厂房大坡度薄板斜屋面混凝土施工与质量控制技术研究[J].中国建筑装饰装修,2025(22):171-173.
- [2]曾焕镜.建筑工程清水混凝土施工工艺控制要点分析[J].长春工程学院学报(自然科学版),2025,26(4):78-83.
- [3]王林彬,周治国,孙晓立,等.装配式混凝土结构建造全过程质量通病及应对方案[J].广州建筑,2024,52(5):1-6.
- [4]陈安英,刘西洋,完海鹰,等.在建高层建筑混凝土剪力墙置换加固设计与施工控制技术[J].四川建筑科学研究,2022,48(6):48-53.
- [5]黄国伟.工业厂房建筑主体结构的关键施工技术研究[J].中华建设,2023(12):178-180.