

工业化建造下预制混凝土原材料全过程质量控制研究

沈东华

上海建工建材科技集团股份有限公司第七构件厂

DOI：10.32629/jpm.v7i9.9035

[摘要] 建筑工业化是我国建筑业绿色转型、提质增效的核心发展方向，预制混凝土构件凭借标准化、批量化、低污染的生产优势，广泛应用于各类装配式建筑工程。与传统现浇混凝土施工模式不同，工厂流水线预制生产对原材料批次一致性、性能稳定性、工况适配性有着极高要求，原材料细微性能波动会在批量生产中持续放大，引发构件开裂、强度离散、外观缺陷、耐久性不足等质量通病。当前行业质控研究多聚焦构件成品检测、施工工艺优化与配合比调试，普遍沿用现浇混凝土静态质控思维，忽视预制生产流水线连续作业、早强脱模、恒温养护的专属工况特性，存在质控节点碎片化、风险预判滞后、动态管控缺失等问题。基于此，本文立足工业化建造生产逻辑，系统剖析水泥、粗细骨料、外加剂、矿物掺合料四大核心原材料的质量缺陷诱因，创新性构建“源头准入-仓储稳态-动态适配-全链追溯”的全过程闭环质控体系，区别于传统静态单点质控模式，新增原材料工况动态适配、批次性能校准等专属质控模块，精准解决预制生产质量波动难题。研究弥补了预制混凝土原材料专属精细化质控的研究空白，有效提升预制构件生产合格率与结构稳定性，可为装配式建筑工业化、标准化质量管理提供实操性理论参考。

[关键词] 工业化建造；预制混凝土；原材料；全过程质控；装配式建筑；动态质量管控

Research on Full-Process Quality Control of Precast Concrete Raw Materials in Industrialized Construction

Shen Donghua

Shanghai Construction Engineering Building Materials Technology Group Co., Ltd., No.7 Component Factory

[Abstract] Building industrialization represents a core strategic direction for the green transformation, quality enhancement, and efficiency improvement of China's construction industry. Prefabricated concrete components, leveraging their advantages of standardization, batch production, and low environmental impact, are widely employed in various prefabricated construction projects. In contrast to traditional cast-in-place concrete construction methods, factory-based assembly-line prefabrication imposes stringent requirements on the batch consistency, performance stability, and operational adaptability of raw materials; even minor fluctuations in raw material properties can be amplified during mass production, leading to common quality issues such as component cracking, strength variability, surface defects, and insufficient durability. Current quality control research in the industry predominantly focuses on finished component testing, optimization of construction processes, and adjustment of mixing proportions, often adhering to a static quality control paradigm applicable to cast-in-place concrete. This approach overlooks the unique operational characteristics of prefabrication—such as continuous production line operation, early strength development, and constant-temperature curing—resulting in fragmented quality control checkpoints, delayed risk assessment, and a lack of dynamic control mechanisms. Addressing these challenges, this study adopts the operational logic of industrialized construction to systematically analyze the root causes of quality defects in four key raw materials: cement, coarse and fine aggregates, admixtures, and mineral admixtures. Furthermore, this research innovatively establishes a full-process closed-loop quality control system encompassing "source-level qualification—warehouse steady-state monitoring—dynamic adaptation—end-to-end traceability." Distinct from traditional static, single-point quality control models, this system incorporates specialized control modules, including dynamic operational adaptation for raw materials and batch performance calibration, thereby precisely addressing quality variability in prefabricated production. This work fills a critical research gap regarding refined quality control for prefabricated concrete raw materials, effectively enhances the pass rate and structural stability of prefabricated components, and provides practical theoretical references for quality management in prefabricated and

standardized construction projects.

[Key words] industrialized construction; prefabricated concrete; raw materials; full-process quality control; prefabricated buildings; dynamic quality management

引言

在双碳政策与建筑产业现代化改革的双重推动下，装配式工业化建造模式全面替代传统粗放式施工，成为建筑业高质量发展的主流趋势。预制混凝土构件作为装配式建筑的核心承重与围护结构，其生产质量直接决定建筑结构安全、使用寿命与工程验收品质。传统现浇混凝土施工具备现场可调、随工况整改、单次浇筑量有限的特点，对原材料批次波动容忍度较高，而工业化预制构件采用工厂封闭式流水线生产，具备批量连续作业、生产节奏固定、脱模养护标准严苛的特征，对原材料性能的均匀性、稳定性、适配性提出了远高于现浇施工的技术要求。

原材料是预制混凝土质量管控的核心源头，据行业统计数据，预制构件80%以上的质量缺陷均溯源至原材料管控疏漏。现阶段多数预制生产企业质控体系滞后，仍照搬传统现浇混凝土质控标准，管控重心集中在构件成型、养护、成品检测等末端环节，忽视原材料进场核验、规范仓储、动态试配、批次校准等前置关键节点。水泥安定性波动、骨料级配失衡、外加剂与水泥适配性差、矿物掺合料活性不稳定等隐性质量问题，无法被传统静态质控模式识别，导致批量构件强度不达标、早期收缩开裂、表面蜂窝麻面、脱模破损等质量问题频发，大幅提升构件报废率与生产成本，制约装配式建筑行业标准化、高品质发展。

从现有学术研究成果分析，国内学界针对预制混凝土的研究多集中在施工工艺改良、构件力学性能检测、新型外加剂应用、养护技术优化等领域，针对工业化预制专属工况的原材料全过程质控研究较为稀缺。现有质控方案通用性强、针对性弱，未区分现浇与预制的生产工况差异，缺乏适配流水线批量生产的动态管控机制，难以解决原材料批次波动引发的批量质量问题。为填补现有研究短板，本文立足工业化建造生产特性，摒弃传统末端被动质控思维，构建全流程、动态化、可追溯的原材料质控体系，精准破解预制混凝土原材料质量管控痛点，为预制构件生产提质增效、行业质控标准完善提供全新实践路径。

1 工业化预制混凝土原材料质控差异化特征与行业难点

1.1 预制与现浇混凝土原材料质控核心差异

现浇混凝土侧重现场泵送和易性、实时工况适配性，允许施工过程中小幅调整配比与用料，原材料批次波动可通过现场施工整改抵消。而工业化预制混凝土服务于流水线批量生产，核心要求为早强、低收缩、高匀质、易脱模、高稳定，无现场整改空间，对原材料性能一致性要求严苛。其一，预制生产需保障构件快速脱模、流水线高效周转，要求水泥早期强度稳定增长，这是现浇施工无强制要求的核心指标；其二，预制构件为工厂标准化成型，骨料杂质、级配偏差会直接造成外观缺陷与内部密实度不足，容错率极低；其三，工厂恒温生产环境下，

外加剂、掺合料的性能适配性直接决定混凝土凝结速度，影响整体生产节奏与构件质量。

1.2 现阶段原材料质控行业难点

一是批次性能波动管控难度大。建材生产受矿源、设备、工艺影响，水泥、砂石、粉煤灰等原材料每批次性能存在天然偏差，传统单次进场抽检模式样本覆盖有限，无法全面排查整批次质量风险。二是材料适配性动态变化显著。温湿度季节更替会改变外加剂活性、水泥水化速度，固定配比与静态质控标准无法适配全年连续生产需求。三是仓储隐性质量损耗易被忽视。多数工厂原材料堆放不规范，粉料受潮结块、砂石混料积水、外加剂低温失效等问题频发，造成原材料性能隐性劣化。四是质控体系碎片化，各环节管控独立脱节，无全链条联动机制，无法实现风险提前预判与源头防控。

2 预制混凝土核心原材料质量缺陷及诱因分析

2.1 水泥质量缺陷及成因

水泥是决定混凝土强度与稳定性的核心材料，预制生产中水泥常见质量问题集中在安定性不达标、凝结时间波动、早期强度不足三个方面。部分小型水泥厂熟料成分把控不严，导致水泥安定性偏差，构件成型后出现不规则收缩、微裂纹，长期影响结构耐久性。同时，不同批次水泥细度、矿物组分存在差异，会直接改变水化反应速度，出现早期强度增长缓慢、无法按时脱模的问题，打乱流水线生产节奏。传统质控仅检测水泥标号，忽视早期强度与安定性动态检测，是水泥质量问题频发的核心诱因。

2.2 粗细骨料质量缺陷及成因

骨料占预制混凝土总体积的70%以上，其质量直接决定混凝土密实度与稳定性。当前骨料主要质量缺陷为含泥量超标、针片状颗粒过多、级配不连续、杂质混杂。砂石原材料露天开采、运输堆放过程中易附着泥土杂质，含泥量过高会降低骨料与水泥浆的粘结力，削弱混凝土整体强度；针片状骨料占比过高会导致构件内部受力不均，极易产生结构性裂纹。此外，工厂砂石堆放未分区、新旧物料混放，造成骨料级配混乱，引发混凝土和易性变差、成型后表面气孔、麻面等外观缺陷。

2.3 外加剂质量缺陷及成因

高效减水剂、早强剂是预制混凝土必备添加剂，核心问题为与水泥适配性不良、温湿度适应性差。不同品牌、批次水泥的矿物组分差异，会导致同一外加剂出现减水效果波动，引发混凝土泌水、离析、坍落度损失过快等问题。多数工厂采用固定外加剂掺量，未根据水泥批次、季节温度变化动态调整，高温环境下外加剂损耗过快、低温环境下活性降低，直接导致混凝土拌合质量不稳定，影响构件成型效果。

2.4 矿物掺合料质量缺陷及成因

粉煤灰、矿粉等矿物掺合料用于优化混凝土和易性、降低水化热、提升耐久性，其质量缺陷主要为活性指数不足、烧失量超标、受潮结块。掺合料存放环境湿度超标会导致结块失效，

无法参与水化反应，造成混凝土强度离散性增大；劣质粉煤灰烧失量过高，含碳杂质过多，会吸附外加剂，削弱拌合效果，导致预制构件抗渗、抗冻等耐久性能大幅下降。

3 工业化预制混凝土原材料全过程创新质控体系构建

本文突破传统静态、单点、末端质控的行业局限，结合工业化流水线生产特性，创新性构建源头准入筛查、仓储稳态管控、生产动态适配、批次闭环追溯四维全过程质控体系，实现原材料质量从“事后整改”向“事前预防、事中调控”转型，适配预制批量标准化生产需求。

3.1 源头准入精细化筛查，严控进场质量关口

建立预制专属原材料供应商准入机制，固定矿源、生产厂家，严禁随意更换原材料渠道，从源头减少批次波动。落实原材料进场“三重核验制度”，即资质资料核验、外观筛查、抽样专项检测。针对预制生产特性，优化检测指标：水泥重点检测3d早期强度、安定性、凝结时间，区别于现浇施工仅检测28d强度的标准；骨料重点检测含泥量、针片状占比、级配连续性；外加剂必须开展进场适配试配试验，验证与在用水泥的匹配度；掺合料重点检测活性指数与烧失量，所有不合格材料一律清场退回，杜绝问题原料入库。同时建立进场批次台账，详细记录原材料产地、批次、检测数据，为后续追溯奠定基础。

3.2 分区分类仓储稳态管控，杜绝隐性质量损耗

针对工厂仓储管理混乱、原材料隐性劣化问题，制定标准化仓储管控规范。砂石实行封闭式分区堆放，设置防水围挡、排水设施，避免雨水浸泡、杂质混入，实现新旧物料分区隔离，防止级配紊乱；水泥、矿粉、粉煤灰采用密封筒仓存储，控制仓内温湿度，杜绝受潮结块；外加剂存放于恒温专用库房，管控温度5℃-35℃，规避低温失效、高温变质。严格执行“先进先出”原则，标注物料有效期与批次编号，定期排查仓储物料状态，及时清理过期、变质原材料，彻底解决仓储环节的隐性质量风险。

3.3 生产动态适配管控，匹配流水线生产工况

本章节为核心创新点，摒弃行业通用的固定配比质控模式，建立适配季节、批次、工况的动态调控机制。每批次新原材料投产前，必须开展专项试配试验，根据原材料实际性能微调拌合配比与外加剂掺量；夏季高温环境优化保坍组分，减少坍落度损耗，避免混凝土初凝过快；冬季低温环境调整早强组分比例，保障构件早期强度稳定，满足脱模周期要求。同时实时监测砂石含水率，动态补偿拌合用水量，精准控制水胶比，彻底解决原材料批次波动、环境变化带来的质量不稳定问题，保障每一盘混凝土性能均匀统一。

3.4 全批次闭环追溯管控，实现质量精准溯源

搭建原材料与预制构件一一对应的数字化追溯体系，将原材料进场编号、检测报告、仓储时间、试配参数、拌合数据、生产批次、构件成型编号全部录入台账。构建“原材料-拌合-成型-成品”全链条溯源链路，一旦出现构件质量缺陷，可快速定位原材料批次、生产参数与工况问题，精准甄别质量诱因，实现闭环整改，杜绝同类质量问题重复发生，持续优化生产质

控标准。

4 质控体系落地保障措施

4.1 建立预制专属质控标准

摒弃完全照搬现浇混凝土的行业惯例，结合预制构件早强、低收缩、高精度的生产需求，制定企业内部专属原材料质控细则，明确各材料检测标准、试配频率、仓储规范，让全过程质控有标可依、有据可查。

4.2 强化人员专业化培训

针对一线质检、拌合操作人员开展专项培训，重点讲解原材料动态试配、工况适配、批次校准等预制专属质控技能，改变传统经验式操作模式，提升全员精细化质控意识与实操能力。

4.3 建立常态化自查机制

设立每日原材料巡检、每周质控复盘制度，定期核查原材料性能、配比参数、台账记录，及时排查质控漏洞，持续优化动态适配参数，保障质控体系长效稳定运行。

5 结论

工业化建造模式下，预制混凝土构件质量管控的核心难点，在于原材料批次波动与流水线标准化生产的适配矛盾，传统静态、碎片化、末端化的现浇质控模式，无法满足预制批量生产的质控需求。本文通过剖析四大核心原材料的质量缺陷与诱因，立足预制生产专属工况，创新性构建四维一体的全过程闭环质控体系，突破行业传统质控局限，通过源头筛查把控进场质量、标准化仓储杜绝隐性损耗、动态工况适配稳定生产性能、全链追溯实现精准管控，有效解决了预制混凝土质量波动大、缺陷频发的行业痛点。该体系区别于通用型混凝土质控方案，针对性、实操性极强，能够显著提升预制构件生产合格率、结构稳定性与耐久性能，助力装配式建筑工业化、标准化、高品质发展。未来可结合数字化技术，进一步优化智能试配、自动溯源功能，推动预制混凝土原材料质控向智能化、精细化方向升级。

[参考文献]

- [1]王浩.装配式预制混凝土原材料质量控制技术研究[J].工程技术研究,2022(08):145-147.
- [2]张磊.混凝土原材料性能波动对预制构件质量的影响研究[J].散装水泥,2022(04):78-80.
- [3]陈阳.预制混凝土适配性质量动态控制策略[J].工程质量,2023(02):56-59.
- [4]李建明.建筑工业化背景下预制构件质量通病及防控措施[J].砖瓦,2023(05):112-114.
- [5]刘建军.装配式建筑构件全过程质量追溯体系构建[J].建材与装饰,2024(01):90-92.
- [6]赵明远.工业化建造混凝土精细化质控技术探析[J].住宅与房地产,2023(12):33-35.
- [7]吴斌.预制混凝土原材料批次稳定性管控研究[J].混凝土与水泥制品,2022(06):21-24.