

装配式建筑质量溯源中区块链技术的应用逻辑与信任机制研究

赵庆华

(江苏大学土木工程与力学学院, 江苏 镇江 212013)

摘要: 装配式建筑依靠构件工厂预制、现场装配的建造模式推动建筑业工业化转型, 但“生产—运输—装配”多主体分段管理格局, 造成质量信息割裂、溯源取证困难、责任界定模糊等行业难题。传统中心化质量溯源系统存在数据易篡改、信息信任基础薄弱、跨组织信息共享动力不足等固有缺陷, 难以支撑装配式建筑全生命周期质量管控。区块链具备分布式账本、密码学存证、不可篡改、全程可追溯的技术特征, 为重构装配式建筑质量溯源体系提供全新技术范式。本文首先剖析装配式建筑质量溯源现实困境, 阐释区块链对可信溯源难题的回应逻辑; 构建“物理层—数据层—合约层—仲裁层”四层区块链溯源系统架构, 厘清 RFID、物联网支撑构件“一物一码”可信上链路径, 解析双层自适应区块链平衡业务隐私保护与全局追溯需求的内在逻辑; 重点从供应链信任中介效应、智能合约建构技术信任、溯源可视化提升主体信任感知三个维度, 揭示区块链环境下装配式建筑质量信息信任生成与传递机制。研究表明: 区块链并非单纯的数据存储工具, 而是重塑装配式建筑供应链信任关系的制度性技术载体; 通过技术信任弥补组织间人际信任不足, 打通质量信息可信传递通道。最后总结区块链溯源落地约束条件, 为装配式建筑质量数字化管控、健全工程质量追责体系提供理论参考。

关键词: 装配式建筑; 质量溯源; 区块链; 供应链; 信任机制; 智能合约

中图分类号: TU17; F42 **文献标识码:** A **文章编号:** 3134-9781(2026)04-0016-03

1 装配式建筑“生产—运输—装配”多环节分立与质量信息断裂的结构性成因

装配式建筑全流程天然划分为设计深化、构件生产、物流运输、现场装配、运维五大阶段, 各阶段归属不同独立市场主体, 形成分段式管理格局。构件生产环节由预制工厂负责, 钢筋加工、混凝土浇筑、蒸汽养护、出厂检测等工序信息由工厂独立归档; 运输环节由物流企业管控构件防护、运输轨迹、装卸记录; 装配阶段由施工单位完成吊装、套筒灌浆、构件拼接; 监理、建设单位仅在关键节点开展抽样验收。各参与主体独立建立信息台账, 数据存储标准、记录格式互不统一, 形成大量“信息孤岛”。

从信息流转特征来看, 当前装配式质量信息传递属于线性单向传递模式。上游主体仅向下游交付构件实体, 配套质检资料以纸质文件、零散电子报表形式移交, 缺少持续同步的动态信息链路。一旦发生设计变更、构件返修、运输磕碰等事件, 变更记录、整改资料难以同步传递至后续环节。从责任视角分析, 分段管理模式各方存在明显机会主义倾向: 预制厂倾向于隐瞒生产瑕疵, 运输企业较少主动上报构件损伤, 施工现场简化验收流程, 信息隐瞒行为进一步加剧质

量信息失真。

2 区块链赋能质量溯源的系统架构与技术逻辑

2.1 “物理层-数据层-合约层-仲裁层”四层溯源系统架构

2.1.1 物理层

物理层是系统数据来源, 覆盖装配式建筑供应链全部实体要素, 包含预制构件、RFID无源标签、物联网传感器、移动智能终端、运输定位设备、环境监测装置。每一块预制构件出厂前嵌入RFID芯片, 赋予唯一身份编码; 传感器实时采集构件养护温湿度、运输振动、装卸冲击数据; 现场管理人员通过移动端扫码完成验收信息录入。物理层实现实体构件状态感知, 建立物理实体与数字标识的绑定关系, 是整个溯源体系的数据入口。

2.1.2 数据层

数据层承担数据清洗、加密、存储任务。物联网原始数据经过边缘计算剔除噪声数据, 结构化整理为标准化质量档案; 采用SHA256哈希算法对原始数据加密, 将哈希值上链保存, 原始大容量文件(图纸、检测影像)存储于分布式文件系统IPFS, 仅将文件索引地址写入区块链区块, 节约链上存储空间。数据层实

现原始信息轻量化上链,完成数据加密、索引管理、账本同步。

2.1.3 合约层

合约层是系统自动化运行核心,部署预制质量管控智能合约。将装配式构件验收规范、质量指标阈值、信息上报时限、权限规则转化为可编程合约。当采集数据超出规范阈值,智能合约自动触发预警;构件流转至下一环节,自动校验上一阶段质检资料完整性,缺少关键记录时禁止流转确认。合约层实现质量规则自动执行,减少人工干预,降低人为操作带来的管理漏洞。

2.1.4 仲裁层

仲裁层面向质量纠纷场景,集成零知识证明、证据提取接口与监管节点接入通道。发生质量争议时,仲裁层根据授权调取链上完整时序记录,自动整理标准化溯源证据;引入住建监管部门作为可信节点参与共识,链上存证记录可直接对接工程质量监督与司法鉴定流程。同时通过隐私计算技术,在不泄露企业机密前提下完成数据交叉核验,实现“可追溯、可举证、不泄密”。

四层架构自上而下形成闭环:物理层感知实体信息,数据层完成可信存储,合约层实现过程自动管控,仲裁层支撑纠纷处置,完整覆盖装配式构件全生命周期溯源业务需求。

2.2 物联网设备与RFID技术对预制构件“一物一码”可信上链的支撑机制

构件唯一标识是实现精准溯源的基础。传统二维码容易破损、复制,难以适应预制构件高温养护、户外运输、现场吊装复杂工况。无源RFID芯片具备耐磨损、远距离识别、不可复制优势,适合预埋于预制构件内部,实现构件终身唯一身份标识,达成“一物一码”管理目标。

在构件模具装配阶段,将RFID芯片预埋在预制构件内部,芯片内写入全局唯一UID编码,同步在区块链系统注册构件基础信息:构件类型、尺寸、原材料批次、设计图纸编号。构件生产全过程,工人通过射频读写设备扫描标签,依次录入钢筋原材料合格证、混凝土配合比、浇筑时间、蒸养曲线、出厂强度检测报告;运输途中,车载终端持续绑定构件标签,记录运输路线、装卸时间、冲击预警信息;施工现场进场验收、吊装定位、灌浆施工记录持续关联UID编码。

所有扫码采集信息实时生成哈希摘要上链,UID编码作为索引串联全部质量数据。后续运维阶段,工作人员通过手持设备远距离读取构件芯片编码,一键调取从生产到装配完整档案。RFID硬件保障实体构件标识唯一性,区块链保障标识关联的数据不可篡改,

二者结合实现物理构件与数字档案永久绑定,解决构件身份混淆、资料与实体脱节的行业难题。

3 信任生成与传递的机制路径

3.1 区块链对装配式建筑供应链信任关系的正向中介效应

装配式建筑供应链属于临时性项目型合作网络,预制厂、施工单位大多为短期项目合作,长期合作关系较少,组织间信任基础薄弱。信息不对称条件下,各方普遍采取保守策略,隐瞒不利质量信息,进一步破坏协作信任,形成恶性循环。

区块链作为中介载体,改变信任建立逻辑。传统供应链信任依赖人际信任、企业声誉,属于主观信任;区块链依靠分布式存证、密码学验证提供客观可信证据,降低合作双方对对方道德自律的依赖。在区块链溯源体系中,所有质量操作自动留下不可消除的时序记录,机会主义行为会永久留存证据,大幅抬高信息造假、隐瞒缺陷的成本,倒逼参与主体规范报送真实质量信息。

从信任传导链条来看:区块链可信存证→减少信息不对称→降低各方防范心理→促进供应链信息共享→持续积累正向协作体验→巩固组织间长期信任。区块链并不直接产生信任,而是搭建稳定可信的信息沟通渠道,充当信任生成的中介变量。在多次项目实践后,基于区块链的技术信任逐步转化为供应链组织间制度化信任,推动装配式行业供应链协同模式升级。

3.2 智能合约驱动的质量数据自动核验与过程透明化对“技术信任”的建构

技术信任区别于传统人际信任,是参与主体基于系统规则、算法机制、加密保障形成的信赖。智能合约是建构技术信任的核心工具。研究将现行装配式施工质量验收规范、构件出厂标准、工序交接要求编写为链上智能合约,形成标准化自动核验规则。

构件每完成一道工序,相关质量数据上链后自动触发合约校验。例如:预制构件混凝土强度未达到设计标准,智能合约自动锁定出厂流转权限,禁止构件流转至下一环节;运输过程传感器监测到剧烈冲击,系统自动标记构件风险,进场验收环节强制重点检测。全过程核验由代码自动执行,不受人干预,验收标准统一、执行尺度固定,消除人工审核主观偏向。

智能合约将“口头约定、纸质合同”转变为链上可自动执行的数字规定,实现过程透明化。所有预警信息、核验记录全网节点可查,规则公开、流程可复现。参与方不再单纯依靠对方自觉,而是信赖确定性的算法规则,逐步建立起稳定的技术信任。当质量纠

纷出现时,各方能够认可链上自动生成的记录作为评判依据,大幅降低协商、诉讼成本。

4 结论

本文围绕装配式建筑质量溯源难题,系统剖析区块链技术的应用逻辑与信任生成机制。研究得出结论如下:第一,装配式建筑质量溯源困境根植于“生产—运输—装配”多环节分立带来的信息断裂,中心化溯源系统数据易篡改的短板持续削弱质量档案可信度;区块链依靠分布式账本、不可篡改、全程时序追溯特征,能够有效回应可信溯源诉求,但区块链只能保障数据上链后不被篡改,必须搭配物联网自动采集手段遏制源头造假。第二,“物理层—数据层—合约层—仲裁层”四层架构适配装配式业务场景,RFID技术支撑预制构件“一物一码”实体标识,双层自适应区块链

模型可以有效平衡全局追溯需求与企业商业隐私保护,为区块链溯源平台开发提供架构参考。第三,区块链通过中介作用改善供应链信息不对称,智能合约构建客观稳定的技术信任,溯源可视化提升各类主体信任感知,形成“技术规则—客观证据—主观信任感知”完整信任传递链条。区块链重塑装配式供应链信任范式,实现从依赖人际声誉信任向依托技术制度信任转型。

参考文献:

- [1] 李国强,陈以一.装配式混凝土结构连接节点质量控制理论与技术[M].北京:中国建筑工业出版社,2021.
- [2] 曹洋,苏振民,李娜.基于区块链的建筑供应链信息共享管理系统架构研究[J].建筑经济,2019,40(05):69-74.
- [3] 尚春静,姚凯卿,李小冬,等.基于区块链的装配式建筑建造质量智能管理平台研究[J].建筑经济,2022,43(05):76-83.

Research on Application Logic and Trust Mechanism of Blockchain Technology in Quality Traceability of Prefabricated Buildings

Zhao Qinghua

(Faculty of Civil Engineering and Mechanics, Jiangsu University, Zhenjiang, Jiangsu 212013)

Abstract: Prefabricated buildings promote the industrial transformation of the construction industry through the construction mode of factory prefabrication of components and on-site assembly. However, the multi-agent segmented management pattern of "production-transportation-assembly" leads to industry problems such as fragmented quality information, difficult traceability and evidence collection, and ambiguous responsibility definition. Traditional centralized quality traceability systems have inherent defects including easily tampered data, weak information trust foundation, and insufficient motivation for cross-organizational information sharing, which cannot support the whole-life-cycle quality management of prefabricated buildings. With the technical characteristics of distributed ledger, cryptographic evidence storage, immutability and full traceability, blockchain provides a new technical paradigm for reconstructing the quality traceability system of prefabricated buildings. This paper analyzes the practical dilemmas of quality traceability for prefabricated buildings and explains the response logic of blockchain to credible traceability problems. A four-layer blockchain traceability system architecture of "physical layer-data layer-contract layer-arbitration layer" is constructed. It clarifies the support path of RFID and internet of things for credible uplink of "one object, one code" of prefabricated components, and analyzes the internal logic of two-layer adaptive blockchain balancing business privacy protection and global traceability requirements. From three dimensions including the intermediary effect of blockchain on supply chain trust, the construction of technical trust driven by smart contracts for automatic verification of quality data and process transparency, and the path of quality traceability visualization to improve trust perception of non-technical participants, this paper reveals the generation and transmission mechanism of quality information trust under blockchain environment. The study demonstrates that blockchain is not merely a data storage tool, but an institutional technical carrier to reshape trust relationships in prefabricated construction supply chains. It makes up for the lack of interpersonal trust between organizations through technical trust and opens up credible transmission channels for quality information. Finally, the constraints of blockchain traceability implementation are summarized, so as to provide theoretical support for digital quality management of prefabricated buildings and improvement of engineering quality accountability system.

Keywords: prefabricated building; quality traceability; blockchain; supply chain; trust mechanism; smart contract