



基于 AHP 的预制构件生产质量影响因素分析

李 俊

(五邑大学 土木建筑学院, 广东 江门 529020)

摘要: 与传统的现浇作业相比,装配式建筑是建造方式的重大变革,其建造过程涉及预制构件生产、现场安装等多个环节,对质量管理提出了更高的要求。预制构件作为装配式建筑的主要组成单元,其质量直接影响建筑整体的结构安全和使用功能。为了更有针对性的指导装配式建筑预制构件生产的质量管理,本文通过对装配式预制构件生产全过程进行分析,依据全面质量管理理论对常见质量影响因素等进行归纳总结,并基于层次分析法原理构建质量风险分析模型,采用权重值衡量各因素对构件生产质量的影响大小。结果表明:质量管理组织机构、原材料质量、人员技术水平、模台生产线这4项因素对预制构件生产质量的影响最大,应作为质量管理的重点加以管控。本文成果可为类似项目的质量管理决策提供参考。

关键词: 预制构件; 生产质量; 因素分析; 层次分析法

中图分类号: TU756; TU712.3

文献标识码: A

文章编号: 1673-8993(2024)11-0067-06

doi: 10.13402/j.gcjs.2024.11.151

Analysis on production quality influencing factors of prefabricated components based on AHP

LI Jun

(School of Civil Engineering and Architecture, Wuyi University, Jiangmen 529020, Guangdong, China)

Abstract: Compared with the traditional cast-in-place operation, the prefabricated building is a major change in the construction method, and the construction process involves multiple links such as prefabricated component production and on-site installation, which puts forward higher requirements for quality management. As the main component of the prefabricated building, the quality of prefabricated components directly affects the overall structural safety and use function of the building. In order to guide the quality management of prefabricated building prefabricated components production in a more targeted manner, the whole production process of prefabricated components is analyzed, the common quality influencing factors are summarized according to the total quality management theory, a quality risk analysis model is constructed based on the principle of analytic hierarchy process, and the weight value is used to measure the impact of each factor on the production quality of components. The results show that the four factors of quality management organization, raw material quality, personnel technical level and mold table production line have the greatest impact on the production quality of prefabricated components, and should be controlled as the focus of quality management. The results can provide a reference for quality management decision-making of similar projects.

Key words: prefabricated components; production quality; factor analysis; analytic hierarchy process (AHP)

住建部在《“十四五”建筑业发展规划》^[1]中提出,我国要大力推广应用装配式建筑,培育一批装配式建筑生产基地,到2025年,30%以上的

新建建筑类型都将为装配式建筑。发展装配式建筑是实现建筑业高质量发展,向工业化、智能化、绿色化转型升级的必然要求。预制构件生产是装

收稿日期: 2024-02-01

作者简介: 李 俊(1988—),男,高级工程师,从事施工技术与管理工。

装配式建筑建造的重要环节，其质量的好坏将直接影响到装配式建筑的整体质量和结构安全。然而，现阶段对于预制构件的生产质量管理还是以管理者的定性判断为主，非常依赖于个人经验^[2-3]。因此，如何科学地构建质量风险指标体系，对常见的质量影响因素进行分析，制定针对性的预控措施尤为重要。

目前已有不少学者对此问题展开了研究，姚福义^[4]从信息管理角度开展了构件质量控制方法研究，提出了信息管理视角下的构件产品质量控制方法；刘冠权等^[5]在 PC 构件质量风险评价中引入了物元可拓方法，并应用在了 PC 构件企业的质量风险评价中；孙宏明等^[6]针对施工准备、构件进场验收、现场安装等阶段对装配式建筑施工中的主要质量风险进行了分析和总结；董峻睿^[7]从 EPC 总承包模式的角度研究了装配式建筑工程的质量管理方法；温鸿武等^[8]采用主成分分析法将影响装配式建筑构件生产质量的因素分为混凝土作业、原材料、设计 3 个方面，并针对性地提出了管理建议。

综上，目前在装配式建筑预制构件生产质量控制的研究已从一般的定性分析发展到了运用如模糊评价法、物元可拓方法等各类评价方法、手段进行分析，提出了构件生产不同阶段的质量控制措施，较少结合全面质量管理理论，从“人、机、料、法、环”5 大要素的角度进行分析。因此，本文结合预制构件生产管理现状，基于层次分析法(analytic hierarchy process, AHP)，并针对“人、机、料、法、环”5 大要素建立质量风险分析模型，通过计算各质量影响因素的权重来反映

其对构件生产质量的影响，以期为针对性的做好生产过程中的质量管理提供借鉴。

1 层次分析法基本原理

层次分析法是由美国科学家萨蒂提出的一种定性和定量相结合的多准则决策方法。这种方法将复杂的决策系统层次化，再通过逐层比较各种关联因素组建模型，适用于具有分层交错评价指标的目标系统，而且目标又很难准确定量描述的决策问题^[9]。

1.1 结构模型建立

依据全面质量管理理论^[10]，根据装配式预制构件生产现状，并结合行业专家意见，将总目标设定为装配式建筑预制构件生产质量，准则层分为人员、材料、机械、方法、环境 5 大方面，指标层由质量管理组织机构、技术交底、工作经验、技术水平等 18 项因素组成，具体如图 1 所示。

1.2 判断矩阵构造

对层次结构模型中的各因素进行两两比较，比较的结果以 1~9 标度方法来表示，其具体含义如表 1 所示。

表 1 判断矩阵比较标度

标度	含义
1	两者同等重要
3	前者比后者稍微重要
5	前者比后者明显重要
7	前者比后者非常重要
9	前者比后者极端重要
2,4,6,8	重要性位于上述两个相邻等级之间
倒数	结果互为倒数

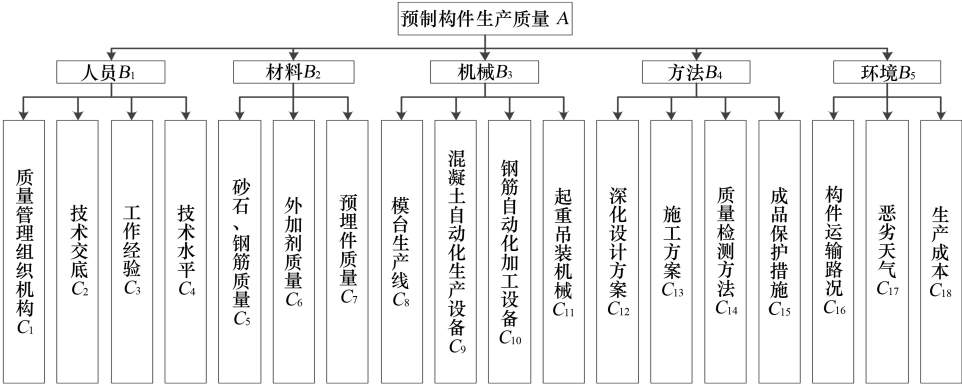


图 1 预制构件生产质量风险评价层次结构模型

1.3 层次单排序权重值计算

一般情况下,采用几何平均法求判断矩阵的特征根与特征向量。

(1) 对判断矩阵行元素求积,再求 $1/n$ 次幂,如式(1)、(2)所示。

$$M_i = \prod_{j=1}^n b_{ij} \quad i=1,2,3,\dots,n \quad (1)$$

$$W_i = \sqrt[n]{M_i} \quad (2)$$

式中: M_i 为判断矩阵行元素求积的结果; W_i 为行元素求积后的 $1/n$ 次幂; b_{ij} 为判断矩阵中的行元素值; i, j 分别为判断矩阵的行、列; n 为判断矩阵阶数。

(2) 对向量 W 进行归一化。

$$W = [W_1, W_2, W_3, \dots, W_n]^T \quad (3)$$

$$W'_i = \frac{W_i}{\sum_{i=1}^n W_i} \quad (4)$$

式中: W'_i 为向量归一化的结果。

判断矩阵的特征向量 $W' = [W'_1, W'_2, W'_3, \dots, W'_n]^T$ 为所求特征向量, W'_i 表示第 i 个被比较因素的权重值。

(3) 计算判断矩阵最大特征根 $\lambda_{\max}$ 。

$$\lambda_{\max} = \sum_{i=1}^n \frac{(AW)_i}{nW_i} \quad (5)$$

式中: A 为判断矩阵; $(AW)_i$ 为向量 AW 的第 i 个元素。

1.4 层次单排序一致性检验

由于预制构件生产质量管理问题的复杂性,在进行各因素间的两两比较时可能会出现相互矛盾的情形,为了确保判断矩阵的合理性,必须进行一致性检验。

(1) 计算一致性指标 CI 。

$$CI = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1} \quad (6)$$

(2) 计算一致性比率 CR 。

$$CR = \frac{CI}{RI} \quad (7)$$

式中: RI 为平均随机一致性指标,取值如表 2 所示。当 CR 值小于 0.1 时,判断矩阵满足要求,否则需要进行调整,直到满足为止。

表 2 一致性指标对照

阶数	1	2	3	4	5	6	7	8	9
一致性比率	0	0	0.52	0.89	1.12	1.26	1.36	1.41	1.46

1.5 层次总排序权重值计算

在多层结构的分析模型中,每个层次对总目标有着不同的影响权重。指标层第 i 个元素对于目标层的影响权重计算公式如下。

$$c_i = \sum_{j=1}^m a_j c_{ij} \quad (8)$$

式中: a_j 为准则层因素对目标层的影响权重值; c_{ij} 为指标层因素对准则层的影响权重值; m 为准则层所包含的因素数量。

1.6 层次总排序一致性检验

层次总排序计算后需进行一致性检验,计算公式如下。

$$CR = \frac{\sum_{j=1}^m a_j CI_j}{\sum_{j=1}^m a_j RI_j} \quad (9)$$

式中: CI_j 、 RI_j 分别为准则层第 j 个因素判断矩阵的一致性指标、一致性比率。

当 CR 值小于 0.1 时,一致性检验通过。

2 预制构件生产质量各因素影响权重计算

2.1 判断矩阵建立及一致性检验

通过现场调研并结合行业专家的意见,采用 1~9 标度法建立各判断矩阵,如表 3~8 所示。

表 3 判断矩阵 $A-B$

A	B_1	B_2	B_3	B_4	B_5
B_1	1	2	2	3	5
B_2	1/2	1	2	3	4
B_3	1/2	1/2	1	2	4
B_4	1/3	1/3	1/2	1	2
B_5	1/5	1/4	1/4	1/2	1

表 4 判断矩阵 B_1-C

B_1	C_1	C_2	C_3	C_4
C_1	1	2	4	2
C_2	1/2	1	2	1/2
C_3	1/4	1/2	1	1/3
C_4	1/2	2	3	1

表 5 判断矩阵 $B_2 - C$

B_2	C_5	C_6	C_7
C_5	1	3	5
C_6	1/3	1	3
C_7	1/5	1/3	1

表 6 判断矩阵 $B_3 - C$

B_3	C_8	C_9	C_{10}	C_{11}
C_8	1	2	3	4
C_9	1/2	1	2	3
C_{10}	1/3	1/2	1	3
C_{11}	1/4	1/3	1/3	1

表 7 判断矩阵 $B_4 - C$

B_4	C_{12}	C_{13}	C_{14}	C_{15}
C_{12}	1	2	3	4
C_{13}	1/2	1	3	3
C_{14}	1/3	1/3	1	2
C_{15}	1/4	1/3	1/2	1

表 8 判断矩阵 $B_5 - C$

B_5	C_{16}	C_{17}	C_{18}
C_{16}	1	3	1/2
C_{17}	1/3	1	1/3
C_{18}	2	3	1

2.2 判断矩阵层次单排序计算及一致性检验

根据公式(1)~(7)对建立的 6 个各判断矩阵的特征向量、最大特征根及一致性比率等进行计算,结果如下。

(1) 判断矩阵 $A - B$

特征向量 $W = [0.377, 0.219, 0.12479, 0.130, 0.095]^T$

最大特征根 $\lambda_{\max} = 5.368$

一致性指标 $CI = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1} = \frac{5.368 - 5}{5 - 1} = 0.092$

查表 2 得 $RI = 1.12$, 故

$CR = \frac{CI}{RI} = \frac{0.092}{1.12} = 0.082 < 0.1$

因此,一致性检验符合要求。

(2) 判断矩阵 $B_1 - C$

特征向量 $W = [0.434, 0.182, 0.098, 0.286]^T$

最大特征根 $\lambda_{\max} = 4.046$

一致性指标 $CI = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1} = \frac{4.046 - 4}{4 - 1} = 0.015$

查表 2 得 $RI = 0.89$, 故

$CR = \frac{CI}{RI} = \frac{0.015}{0.89} = 0.017 < 0.1$ 因此,一致性

检验符合要求。

(3) 判断矩阵 $B_2 - C$

特征向量 $W = [0.637, 0.258, 0.105]^T$

最大特征根 $\lambda_{\max} = 3.039$

一致性指标 $CI = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1} = \frac{3.039 - 3}{3 - 1} = 0.019$

查表 2 得 $RI = 0.52$, 故

$CR = \frac{CI}{RI} = \frac{0.019}{0.52} = 0.037 < 0.1$

因此,一致性检验符合要求。

(4) 判断矩阵 $B_3 - C$

特征向量 $W = [0.463, 0.275, 0.176, 0.085]^T$

最大特征根 $\lambda_{\max} = 4.087$

一致性指标 $CI = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1} = \frac{4.087 - 4}{4 - 1} = 0.029$

查表 2 得 $RI = 0.89$, 故

$CR = \frac{CI}{RI} = \frac{0.029}{0.89} = 0.033 < 0.1$

因此,一致性检验符合要求。

(5) 判断矩阵 $B_4 - C$

特征向量 $W = [0.460, 0.303, 0.143, 0.094]^T$

最大特征根 $\lambda_{\max} = 4.081$

一致性指标 $CI = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1} = \frac{4.081 - 4}{4 - 1} = 0.027$

查表 2 得 $RI = 0.89$, 故

$CR = \frac{CI}{RI} = \frac{0.027}{0.89} = 0.03 < 0.1$

因此,一致性检验符合要求。

(6) 判断矩阵 $B_5 - C$

特征向量 $W = [0.333, 0.140, 0.52]^T$

最大特征根 $\lambda_{\max} = 3.054$

一致性指标 $CI = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1} = \frac{3.054 - 3}{3 - 1} = 0.027$

查表 2 得 $RI = 0.52$, 故

$CR = \frac{CI}{RI} = \frac{0.027}{0.52} = 0.052 < 0.1$

因此,一致性检验符合要求。

2.3 层次总排序计算及一致性检验

预制构件生产质量影响因素分析层次结构模

型包含目标层、准则层和指标层，属于多层结构，因此需根据公式(8)计算最底层因素对于总目标的综合排序权重，结果如表 9 所示。

根据公式(9)层次总排序一致性检验计算结果如下。

得出 CR 值小于 0.1，一致性检验通过。

$$CR = \frac{\sum_{j=1}^m a_j CI_j}{\sum_{j=1}^m a_j RI_j} = \frac{0.377 \times 0.015 + 0.219 \times 0.019 + 0.179 \times 0.029 + 0.130 \times 0.027 + 0.095 \times 0.027}{0.377 \times 0.89 + 0.219 \times 0.52 + 0.179 \times 0.89 + 0.130 \times 0.89 + 0.095 \times 0.52} = 0.027$$

3 结果分析及预控措施

根据表 10 的计算结果，质量管理组织机构、原材料质量、人员技术水平、模台生产线为排名前四的高风险质量影响因素。因此主要针对以上 4 个方面提出预控措施，提高预制构件生产过程中质量管理的针对性和预控性，提升质量管理水平。

(1) 建立健全质量管理组织机构。工程质量管理水平的高低、产品质量的好坏关键在于项目团队。一个健全、完善的质量管理组织机构，是保证工程质量符合要求的组织保障。质量管理组织机构可以保证单位各部门协同工作，落实全面质量管理体系的要求。要以全员参与为基础，制定质量责任制，不断强化责任主体质量意识。质

量管理需要明确每个岗位在质量工作中的具体任务和职责，调动和激发所有员工积极性和潜能，使工程质量管理工作的不流于形式，将高风险质量影响因素的管控措施真正落实到位，为工程质量保驾护航。

(2) 重视混凝土原材料的质量管理。当前我国装配式建筑产业规模正在快速增长，但建筑市场的监管体系、制度法规还不够完善，建筑市场仍然存在大量质量不符合规范要求的水泥、砂石、钢筋等建筑材料。为确保预制构件生产混凝土所使用的主要原材料符合规范要求，一方面要做好当地原材料供应企业的调研，选择信誉好、材料质量稳定的企业作为原材料供应商；另一方面要加强对原材料质量的监督管控，进场的原材料应

表 9 预制构件生产质量影响因素权重计算结果

目标层	准则层		指标层		合权重值	排序
	项目	权重值	项目	权重值		
预制构件 生产质量 A	人员 B ₁	0.377	质量管理组织机构 C ₁	0.434	0.164	1
			技术交底 C ₂	0.182	0.069	5
			工作经验 C ₃	0.098	0.037	11
			技术水平 C ₄	0.286	0.108	3
	材料 B ₂	0.219	水泥、砂石、钢筋材料质量 C ₅	0.637	0.139	2
			外加剂质量 C ₆	0.258	0.057	7
			预埋件质量 C ₇	0.105	0.023	14
			模台生产线 C ₈	0.463	0.083	4
	机械 B ₃	0.179	混凝土自动化生产设备 C ₉	0.275	0.049	9
			钢筋自动化加工设备 C ₁₀	0.176	0.032	12
			起重吊装机械 C ₁₁	0.085	0.015	16
			深化设计方案 C ₁₂	0.460	0.060	6
	方法 B ₄	0.130	施工方案 C ₁₃	0.303	0.039	10
			质量检测方法 C ₁₄	0.143	0.019	15
			成品保护措施 C ₁₅	0.094	0.012	18
			构件运输路况 C ₁₆	0.333	0.031	13
	环境 B ₅	0.095	恶劣天气 C ₁₇	0.140	0.013	17
			生产成本 C ₁₈	0.528	0.050	8

严格遵守材料验收程序,具有完整的质量证明文件,并在生产过程中定期对水泥、骨料、钢筋这些易出现质量波动的材料进行抽检,当材料出现质量问题,不符合使用要求时,严禁继续使用。所有材料进场验收及试验检测资料应完整、真实并做好归档。

(3) 加强职业技能培训。专业技术工人是保证装配式建筑产业稳定健康发展的基础。2020 年,人力资源社会保障部办公厅公布了包括装配式建筑施工员在内的 16 种新职业^[11],明确了其职业编码和主要工作任务。相比传统建筑,装配式建筑对施工精度、施工技术及现场组织管理的要求更高,需特别重视和加强预制构件生产一线工人的职业技能培训。预制构件生产企业应通过组织参加各类装配式建筑产业技术工人培训、开展职业技能竞赛、校企合作等途径,培养专业技术过硬的技术人员和产业工人,打造专业化的装配式建筑技术工人队伍,提高工人的整体技术素养。

(4) 加强模台生产线的管理及维护。模台生产线作为混凝土预制构件从置模到固化脱模过程中的载体,对预制构件最终质量产生重要影响。因此,在大规模生产前应先进行试运行,检验生产线的整体稳定性和可靠性,验证生产组织及各项控制措施的合理性。正式投产后,应进行定期检查并做好维护保养工作,确保模台生产线处于平稳受控状态。

4 结 语

本文通过对预制构件生产环节的质量影响因素进行科学的归纳和总结,运用 AHP 法分析各因素对产品质量的影响大小,从而找出高风险的质量因素,针对性地提出预控措施,使得质量管理做到“有的放矢”。根据分析结果,质量管理组织机构、原材料质量、人员技术水平、模台生产线

这 4 项因素对预制构件生产质量的影响最大,在构件生产中应重点管控。由于预制构件生产的复杂性,不同类型的构件在生产工艺、产品标准、安装要求等方面存在较大差异,其质量影响因素也不尽相同,后续需进一步探讨和研究其他因素对构件生产质量的影响。

参考文献:

- [1] 住房和城乡建设部. 住房和城乡建设部关于印发“十四五”建筑业发展规划的通知[EB/OL]. (2022-01-19)[2024-01-05]. https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2022-01/27/content_5670687.htm.
- [2] 杨娜,张涛,郭建明. 装配式混凝土建筑施工技术及质量控制分析研究[J]. 建筑技术开发,2024,51(1): 39-41.
- [3] 雷克,赵瑞华,肖伟. 预制混凝土构件质量控制研究综述[J]. 建筑技术,2015,46(增刊2):40-42.
- [4] 姚福义. 预制构件产品质量的形成机理及控制方法研究[D]. 重庆:重庆大学,2022.
- [5] 刘冠权,王越,奚浩,等. 基于改进物元可拓模型的 PC 构件质量风险评价[J]. 混凝土,2022(1):161-166.
- [6] 孙宏明,张狄龙. 装配式混凝土建筑施工质量风险及控制要点研究[J]. 工程质量,2023,41(10):22-26.
- [7] 董峻睿. EPC 模式下装配式建筑工程质量管理研究[J]. 低碳世界,2023,13(7):73-75.
- [8] 温鸿武,郭震,李福顺. 基于主成分分析法的装配式建筑构件生产质量影响因素研究[J]. 工程质量,2023,41(7):12-16.
- [9] 侯福均,吴祈宗. 运筹学与最优化方法[M]. 北京:机械工业出版社,2022.
- [10] 唐先德. 新编全面质量管理学[M]. 北京:中国水利水电出版社,2012.
- [11] 人力资源社会保障部办公厅. 关于发布智能制造工程技术人员等职业信息的通知[EB/OL]. (2020-02-25)[2024-01-05]. https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2020-02/26/content_5490210.htm.