



基于组合赋权法的大体积清水混凝土饰面 施工方案评估及应用

周春林, 陈孟, 李承轩

(中交四航局第四工程有限公司, 四川 成都 610213)

摘要: 大体积混凝土在施工过程中容易受到不同程度污染、混凝土体表面不平整及外观质量不够美观等问题的影响, 综合考虑经济性、美观性、环保性及技术可行性等技术指标, 如何选择最优的饰面方案成为施工质量保障的重要考量。为此, 基于层次分析法的组合赋权方法计算主观权重, 采用粗熵法计算客观权重。通过计算权重偏好系数误差得到组合权重, 并结合合作博弈方法和最小偏差为目标确定组合权重进行评价。以嘉陵江梯级渠化利泽航运枢纽船闸工程为例, 从基面处理、材料配合比优化及保护材料涂装等工序上对多个方案进行比选, 所采用的模型计算得出饰面清水混凝土施工选择 58.35% 的权重值为最优方案。在实际投入使用后明显改善了船闸混凝土体的外观质量, 以期为其他类似工程项目提供参考。

关键词: 清水混凝土涂装; 船闸水运工程; 大体积混凝土; 组合赋权法

中图分类号: U65

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2024)06-0239-06

Evaluation and application of mass fair-faced concrete decorative surface construction scheme based on combination weighting method

ZHOU Chunlin, CHEN Meng, LI Chengxuan

(The Fourth Engineering Company of CCCC Fourth Harbor Engineering Co., Ltd., Chengdu 610213, China)

Abstract: In the construction process, mass concrete is prone to varying degrees of pollution, uneven concrete surfaces, and inadequate aesthetic quality. When considering a combination of technical criteria such as economy, aesthetics, environmental friendliness, and technical feasibility, selecting the optimal decorative scheme has become an important consideration for ensuring construction quality. Therefore, this paper utilizes a combination weighting method based on the Analytic Hierarchy Process to calculate subjective weights and employs the rough entropy method to calculate objective weights. Furthermore, by calculating the error of weight preference coefficient, the combination weight is obtained, and combined with cooperative game method and minimum deviation as the objective, the combination weight is determined for evaluation. Taking the Jialing River Cascade Canalization Lize Navigation Hub Shiplock Project as an example, multiple schemes are compared, and selected from the processes of foundation treatment, material mix ratio optimization, and protective material coating. The model used calculated that the imitation clearwater concrete coating construction, with a weight value of 58.35%, is selected as the optimal scheme. After being put into practical use, the appearance quality of the ship lock concrete is significantly improved, in order to provide reference for other similar engineering projects.

Keywords: clear water concrete coating; ship lock water transportation engineering; mass concrete; combination weighting method

收稿日期: 2023-11-06

作者简介: 周春林 (1970—), 男, 硕士, 副高级工程师, 从事港口与航道工程、水运工程等施工技术管理工作。

在大体积混凝土施工中常采用低热普硅混凝土浇筑, 由于混凝土料坍落度低、水灰比小、骨料粒径大, 浇筑成型后混凝土表面粗糙、不光滑, 拆模后表面存在气泡及细孔。近些年, 专家学者采用多种饰面技术解决相关问题^[1-4], 但依然存在其他的缺陷。如虽然砂浆二次抹面能有效控制施工成本, 但存在明显色差、斑块、整体形象外观不自然以及耐久性较差等问题。清水混凝土往往在色差控制、混凝土外加剂、模具、振捣人员以及入模状态等方面存在较高的要求, 这在一定程度上制约了清水混凝土的发展。仿清水混凝土涂装施工技术是针对上述弊端发展起来的, 属于清水混凝土施工中的装饰清水混凝土的一种, 以扩大清水混凝土技术的适用面, 但施工成本往往较高。因此, 针对不同工程, 如何选用最优的大体积混凝土饰面方案成为了研究热点。

国内专家对此进行了研究, 通过方案比选, 杨卫国^[5]利用清水混凝土涂装的斥水及封闭效果的特点, 将其应用在港珠澳大桥临水环境的保护施工中。李邵鹏等^[6]通过层次分析法建立清水混凝土外观性能评定体系, 综合比选出花园式下沉广场项目清水混凝土最优配合比。在传统仿清水混凝土涂装施工过程中依旧存在一些缺陷^[7]。由于仿清水混凝土涂装所用保护涂料中含有疏水的硅烷与硅氧烷等材料, 大量使用情形下对环境有一定影响, 另外在船闸工程应用条件下挂篮多次滚涂施工作业, 具有一定的安全隐患, 对施工作业人员的技术要求也较高^[8]。

以嘉陵江梯级渠化利泽航运枢纽船闸工程为研究对象, 该项目所处水域存在恶劣气候条件, 对混凝土结构具有一定腐蚀性, 且项目所在场地将对公众开放, 具有一定景观要求。因此, 要求混凝土表面进行装饰性处理以改善外观。为提升船闸水运工程混凝土外表面清水效果, 科学地选择最优的施工方案, 本文在构建船闸水运工程清水混凝土方案比选评估体系的基础上, 运用基于

博弈论思想的组合赋权技术^[9], 综合模糊层次分析法(FAHP)的主观能动性及熵权法的客观性, 确定各评价指标的权重系数, 得到最适于工程项目的实施方法, 经现场实际应用后取得良好效果, 验证了该方法的合理性。旨在为类似船闸水运工程的混凝土外表面清水效果处理提供参数借鉴和思路。

1 AHP 组合赋权法

1.1 层次分析法

层次分析法(AHP)适用于具有层次结构的评价指标体系和难以量化描述的决策问题^[10]。AHP 采用 1~9 的比例量表确定评价指标的权重, 然后由专家给出两个指标标准或两个指标对某一特定目标的重要尺度。具体步骤如下:

1) 将评价问题分为目标层、准则层和次准则层 3 个层次, 并对因子 i 和因子 j 相互比较时的重要程度设定权重。

2) 构建多因素比较矩阵。假设有 n 个因子 $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$, 需要在任意两个元素之间进行比较。结果构成比较矩阵 A , 即:

$$A = [a_{ij}]_{n \times n} \quad (1)$$

式中: a_{ij} 为矩阵元素, 代表 x_i 相对于 x_j 的尺度重要性, $a_{ii} = 1, a_{ij} = 1/a_{ji} (i \neq j)$ 。

3) 确定因素的权重。计算比较矩阵 A 的最大特征值 λ_{\max} , 求出其对应的归一化特征向量 W , 即:

$$AW = \lambda_{\max} W \quad (2)$$

式中: $(\omega_1, \omega_2, \omega_3, \dots, \omega_n)$ 表示 n 个因素的权重。

4) 利用加号法和标绘法计算特征值和特征向量。 A 按列归一化:

$$\tilde{A} = a_{ij} / \sum a_{ij} \quad (3)$$

逐行求和:

$$\tilde{W}_i = \sum \tilde{A} \quad (4)$$

将其归一化, 权重 W_i 为:

$$W_i = \tilde{W}_i / \sum \tilde{W}_i \quad (5)$$

5) 一致性检查。当 x_1 比 x_2 重要, x_2 比 x_3 重要时, 我们可以认为 x_1 比 x_3 重要。矩阵一致比率验算方法如下式:

$$R_c = \frac{I_c}{I_R} = \frac{(\lambda_{\max} - n)/(n-1)}{I_R} \quad (6)$$

式中: R_c 为一致性比率, 满足 $R_c < 0.1$, 表示判断矩阵通过一致性检验; I_c 为一致性指标; I_R 为随机一致性指标; n 为判断矩阵的阶数。随机一致性指标 I_R 的取值与判断矩阵的阶数 n 有关, 见表 1。

表 1 随机一致性指标 I_R 的取值

n	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
I_R	0	0	0.58	0.90	1.12	1.24	1.32	1.41	1.45	1.49	1.51

当所有判断矩阵都通过一致性检验后, 即可把判断矩阵对应的特征向量归一化, 计算出所有元素对于上一级指标的相对重要性。准则层指标的权重集 $A = (\omega_1, \omega_2, \omega_3, \dots, \omega_m)$, 其中 ω_m 表示中间层第 m 个指标的权重; 因素层指标的权重集 $A_i = (A_{i1}, A_{i2}, A_{i3}, \dots, A_{ij})$, 其中表示准则层指标中的第 j 个指标对应的因素层指标中的第 i 个指标的权重。准则层各指标的权重之和为 1, 且每 1 个准则层对应的因素层指标的权重之和为 1。

6) 以同样的方式计算得到目标层的总阶向量, 由自下向上的原则得到总体权重。

1.2 熵权法

熵权法属于客观赋权法的一种, 利用熵值反映评分表中的信息量, 根据信息量的大小赋予各指标权重。

1) 根据多名专家对体系指标的评分, 归一化处理后得到标准化评分矩阵 P' 。

2) 求解各指标信息熵:

$$e_j = \frac{1}{\ln m} \sum_{i=1}^m g_{ij} \ln g_{ij} \quad (7)$$

$$g_{ij} = p'_{ij} / \left(\sum_{j=1}^n p'_{ij} \right) \quad (8)$$

式中: e_j 为第 j 项指标的熵值; g_{ij} 为第 j 项指标下

第 i 个样本值占该指标的比重; p'_{ij} 为归一化处理后的样本值; m 为样本数量。

3) 各指标权重计算:

$$\omega_j = (1 - e_j) / \sum_{j=1}^n (1 - e_j) \quad (9)$$

式中: ω_j 为第 j 项指标的权重; $(1 - e_j)$ 为计算信息熵冗余度(差异)。

1.3 基于博弈论确定指标的组合权重

根据上文得出两种赋权方法对应的权重 W_1 和 W_2 , 引入博弈论的理论来确定评估指标的组合权重, 将要组合的两者权重视为博弈的双方, 最优组合权重视为博弈的平衡, 即应满足上述权重 W_1 和 W_2 与组合权重的离差极小化, 步骤如下:

1) 构造基本的权重向量集:

$$W = \lambda_1 W_1 + \lambda_2 W_2 \quad (10)$$

式中: W 为评价指标权重集的一种可能的权重向量; W_1 和 W_2 为两种赋权方法对应的权重; λ_1 、 λ_2 为线性组合系数。

2) 建立目标函数, 并转化为最优化一阶导数方程组:

$$\begin{cases} \lambda_1 W_1 W_1^T + \lambda_2 W_1 W_2^T = W_1 W_1^T \\ \lambda_1 W_2 W_1^T + \lambda_2 W_2 W_2^T = W_2 W_2^T \end{cases} \quad (11)$$

3) 将上式所得线性组合系数进行归一化处理得到 λ_1^* 、 λ_2^* , 进而得到评估指标的最优组合权重为:

$$W = \lambda_1^* W_1 + \lambda_2^* W_2 \quad (12)$$

2 方案比选及效果评价模型

2.1 评估指标体系构建

本文方案优选将建立 3 个层次的评估体系, 第 1 层目标层定为船闸大体积混凝土饰面施工可行性; 第 2 层准则层从经济因素、安全与环境评估因素、技术因素及质量因素 4 个维度进行划分; 第 3 层次准则层则通过相关指标进行划分, 最终方案优选评价体系层次结构见图 1。

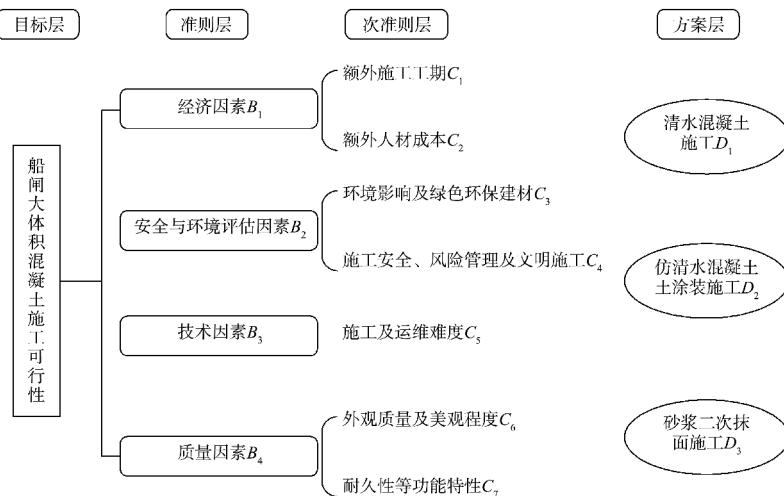


图 1 方案优选评价体系层次结构

2.2 准则层与次准则层因素权重计算

2.2.1 FAHP 法(模糊层次分析法)确定指标的主观权重

对次准则层中的 7 个指标以目标层船闸大体积混凝土施工可行性为考量要求, 按 9 标度法进行重要性评定, 取其平均值, 从而建立 A 要素判断矩阵(MATRIXA)。并由矩阵 A 经 Matlab 数据处理分析软件计算得各次准则层指标权重 C_i 为 0.05、0.18、0.02、0.10、0.03、0.42、0.20, 准则层指标权重应为其所属次准则层权重之和, 因此可得 B_i 为 0.23、0.12、0.03、0.62。由 FAHP 法得出的指标权重中, 外观质量及美观程度因素为次准则层中排名第 1 的因素, 占比权重为 $C_6=0.42$; 质量因素为准则层中排名第 1 的因素, 占比权重 $B_4=0.62$, 说明专家普遍倾向船闸混凝土质量本身达标, 且外观美观大气的重要性更高, 这也是该工序施工的根本目的。

2.2.2 熵权法确定指标的客观权重

熵权法属于客观赋权法的一种, 通过挖掘指标原始评分值中包含的信息量, 利用信息熵计算各指标的熵权, 继而得到各指标的权重系数, 基于目标层对次准则层 7 个指标的评分见表 2, 可采用熵权法从中提取信息熵, 进而得到指标的客观权重。

表 2 船闸次准则层评分

专家编号	C_1	C_2	C_3	C_4	C_5	C_6	C_7
1	5.0	3.0	1.0	9.0	3.0	10.0	10.0
2	7.0	8.0	6.0	7.0	7.0	9.0	7.0
3	9.0	8.5	3.0	8.0	4.0	9.0	7.5
4	4.5	6.0	3.0	5.0	3.0	9.5	8.0
5	5.0	8.0	4.5	8.0	3.5	9.0	7.5

根据指标的评分值进行归一化处理、比重计算、信息熵计算, 最后得到各次准则层指标权重 C'_i 为 0.18、0.10、0.09、0.08、0.09、0.30、0.16, 进而得到准则层指标权重 B'_i 为 0.28、0.17、0.09、0.46。

2.2.3 博弈论确定指标的组合权重

博弈论将 FAHP 法和熵权法得出的权重作为博弈的双方, 从数学角度来说, 当两者平衡状态时可得出最优组合权重。根据次准则层的主观权重 C_i 和客观权重 C'_i 构建权重向量集, 求解可得优化组合后的次准则层指标权重 C^*_i 为 0.08、0.16、0.04、0.09、0.04、0.39、0.19, 进而得到准则层指标 B^*_i 为 0.25、0.13、0.04、0.58。

3 工程应用

3.1 工程概况

嘉陵江梯级渠化利泽航运枢纽工程是长江经济带发展战略中的重点交通项目, 工程规模为大

Ⅱ型, 其中一期工程计划工期 18 个月, 工程位于重庆市合川区大石街道利泽码头嘉陵江干流上游约 3.5 km 处, 雨量充沛、气候湿润、雾气重且紫外线强。其中, 船闸全长 937.3 m, 由上下闸首、闸室、上下游引航道的主辅导航墙、靠船墩、分水墙组成, 船闸主体总浇筑量约为 29.00 万 m³, 迎水面面积约为 2.7 万 m², 单仓最大浇筑量每仓最大约为 0.45 万 m³。

3.2 方案设计

3.2.1 清水混凝土施工(方案 1)

清水混凝土模板分类包括木胶合板、玻璃钢模板及钢模板, 前两者通常不适用于大体积混凝土, 因此工程拟选用钢模板作为浇筑的模具, 辅以透水模板布及水性脱模剂。明缝处预留施工缝, 根据模板宽度设置禅缝, 振捣时间控制在 3~5 min。

基于船闸主体混凝土浇筑原配合比进行试验配合比设计。为呈现清水混凝土素朴、灰白的质感, 减少粉煤灰掺合料对混凝土颜色的影响, 应尽量减少粉煤灰的加入, 并采用灰白色粉煤灰。将传统使用的 PLH42.5 低热硅酸盐水泥更改为白色 PW42.5 硅酸盐水泥, 可以减少大体积混凝土仓中水泥前期水化反应过程中释放的大量热量, 并使混凝土表面颜色趋于一致、均匀、光洁。所用骨料应级配连续, 含泥量控制在 1.5% 以下, 外加剂采用品质较高的聚羧酸类高效减水剂。清水混凝土所使用原材应尽量控制在同一厂家生产, 经试验得到清水混凝土施工方案所用配合比见表 3, 其设计强度等级为 C30, 满足设计要求。

表 3 清水混凝土施工方案配合比 kg/m³

白水泥	粉煤灰	砂	碎石	外加剂	水
320.0	50.0	780.0	1 190.0	2.4	195.0

3.2.2 仿清水混凝土涂装施工(方案 2)

当船闸外表面全部具备饰面清水混凝土施工条件时, 可采用分散式可拆卸吊篮作为工作平台,

进行连续清水混凝土喷漆施工作业。

1) 基底处理: 涂刷前需先进行基底处理, 清理残留在墙体的外露钢筋、土工布、铁锈油污、雨痕及浮浆等; 然后对台型螺母孔洞、细微裂缝、气泡及麻面等进行修补, 在此过程中应尽量做到修补用砂浆与原混凝土颜色、强度一致; 最后使用砂纸对船闸墙面不平整区域进行浅层打磨。

2) 原料色差调整: 针对混凝土浇筑时及基底处理后产生的色斑、色差及污渍, 采用专业的基底色差修补剂, 现场调配至与原有混凝土接近的颜色, 该工序施工完毕后需消除明显色差, 整体饰面整齐、干净。此工序是饰面清水混凝土施工中的关键环节, 对施工人员和施工材料均要求较高, 需严格控制施工质量。

3) 3 层涂刷: 分别指以无机类涂料进行底层滚涂、以有色有机类涂料进行中层批刮和面层喷涂, 组成整个体系, 进一步消除色差, 调整面板平整度。在该工序施工过程中只有通过墙体表面防水测试, 达到不渗水, 才可进行下道涂刷。

4) 保护剂涂刷: 最后整体喷涂 1 遍防污透明保护剂, 使之脱模后具有哑光质感, 且在墙体表面形成 1 层透明保护膜, 隔绝外界对混凝土的侵蚀污染。用水泼墙面, 水滴会形成明显的流珠, 且墙面颜色无任何变化, 该效果直观且显著。

3.2.3 砂浆二次抹面施工(方案 3)

砂浆二次抹面施工同样采取吊篮施工作业, 工序分为: 1) 基层处理; 2) 浇水湿润; 3) 分层抹灰; 4) 成品保护。

3.3 方案比选及效果评价

根据方案设计内容、特征及难点, 基于次准则层 7 个指标对方案层的优劣势进行综合分析对比。为消除方案层中针对不同指标评价的量纲和单位, 对所得数据采用标准化的方法消除其量纲

的影响,使其在同一个数量级上,便于进行综合比较。在得到数据后,对方案层的 D_1 、 D_2 及 D_3 分别采用一致矩阵法,根据次准则层的因素 C_i 进行两两对比,得到成对的比较矩阵,从而建立方案性判断矩阵 $A_1 \sim A_7$ 。将 $A_1 \sim A_7$ 逐一经软件计算,得出 3 个方案相对于每 1 个次准则层的指标权重 $D_1 \sim D_7$,由矩阵 $D_1 \sim D_7$ 和 C_i^* 乘积可得方案层相对于目标层的权重 W_{fi} 。结果表明,($W_{f2} = 58.35\% > (W_{f1} = 24.85\%) > (W_{f3} = 16.83\%)$,方案 2 优于方案 1 和 3。经计算可得,以上判断矩阵的一致性检验均符合要求。

4 结论

1) 方案比选是对多个评判指标的综合评价,提高了方案优选的客观性、科学性与系统性,从经济、安全环保、技术、质量等多方面考虑,并引入次准则层 7 个指标,进一步细化对方案评估的体系构建,可为清水混凝土工程方案比选提供评估体系思路。其中,次准则层中外观质量及美观程度因素排名第 1,占比权重为 $C_6 = 0.42$;质量因素为准则层中排名第 1 的因素,占比权重 $B_4 = 0.62$,因此在相关外观饰面施工中,应以质量为第一目标。

2) 方案比选模型采用基于融合 FAPH 法及熵权法的主客观性的组合赋权技术,在模型计算后可得方案 2 饰面清水混凝土施工所占权重为 $W_{f2} = 58.35\%$,为最优方案。通过嘉陵江梯级渠化利泽航运枢纽一期工程项目的船闸迎水面饰面清水混凝土施工,较好地验证了该评价模型可靠合理、切实可行。

3) 在实际施工中,可采用水性氟碳树脂涂料类型的色差修复剂、封闭渗透及透明保护剂,通

过“色差调节+3 层涂料+保护剂涂刷”的方式完成饰面清水混凝土施工,清水饰面效果良好,证明了大体积混凝土水运工程在环境复杂情形下,采用饰面清水混凝土施工可有效提升墙体外表的美观程度。

参考文献:

- [1] 苏川,徐文龙,贺飞,等.大面积现浇饰面清水混凝土结构综合施工技术[J].施工技术(中英文),2023,52(3):125-131.
- [2] 谷邛英,钟京,杜昱霖.雄安站清水混凝土应用关键技术研究[J].铁道工程学报,2022,39(8):81-86.
- [3] 杨欢,符业晓,黄勇.仿清水混凝土保护材料在船闸主体混凝土涂装中的应用[J].水运工程,2023(10):142-145.
- [4] 裴须强,朱玉雪,李婷,等.丙烯酸乳液改性抹面砂浆及其性能探究[J].混凝土,2023(7):131-135.
- [5] 杨卫国.高等级清水混凝土建筑保护涂装应用[J].中国港湾建设,2018,38(8):57-59,68.
- [6] 李绍鹏,汪亮,王建强,等.基于层次分析法的清水混凝土外观性能评价[J].新型建筑材料,2018,45(2):12-15.
- [7] 姜骞,王强,徐文.油性与水性脱模剂对清水混凝土表观质量影响研究[J].混凝土,2023(6):183-187.
- [8] 刘细军,张德志,杨如仙,等.石灰石粉胶凝材料体系海工清水混凝土的配制及性能研究[J].公路,2022,67(7):367-371.
- [9] 景耀斌,顾伟红,瞿强.基于博弈论组合赋权的水工隧洞 TBM 施工地质适宜性评价模型[J].安全与环境工程,2021,28(2):95-101,108.
- [10] 范成伟,李敏,明杏芬,等.二元联系数-投影灰靶理论在装配式建筑绿色施工评估中的应用[J].安全与环境学报,2023,23(8):2906-2915.

(本文编辑 赵娟)