

DOI:10.3969/j.issn.1672-1144.2023.01.005

基于网络层次分析法的地铁站 渗漏水风险灰色模糊综合评价

王晓睿, 马小坚, 于怀昌

(华北水利水电大学 地球科学与工程学院, 河南 郑州 450045)

摘要:近年来,随着城市轨道交通快速发展,地铁渗漏水问题频发,为充分探究地铁站渗漏水原因,改善车站渗漏水情况,建立科学有效的防水系统,在风险辨识的基础上结合网络层次分析法与灰色模糊综合评价法构建地铁站渗漏水风险评估模型,以郑州某地铁站项目为例分析了地铁站渗漏水原因总结了城市地铁站渗漏水特点,构建了地铁站渗漏水风险指标体系,对地铁站渗漏水风险进行了综合评价。结果表明该模型能准确地评价城市地铁防水施工工程项目,为城市地下交通工程项目防水施工风险综合评价提供一种定性与定量结合的新思路、新方法。

关键词:网络层次分析法;灰色模糊综合评价法;地铁站;防水系统;综合评价

中图分类号: TU94⁺3.1

文献标识码: A

文章编号: 1672—1144(2023)01—0027—05

Grey Fuzzy Comprehensive Evaluation of Leakage Risk of Subway Station Based on Network Analytic Hierarchy Process

WANG Xiaorui, MA Xiaojian, YU Huaichang

(School of Earth Science and Engineering, North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou, He'nan 450045, China)

Abstract: In recent years, with the rapid development of urban rail transit, subway leakage problems occur frequently. In order to fully explore the reasons of subway station leakage, improve the station leakage, and establish a scientific and effective waterproof system, a subway station leakage risk assessment model is built on the basis of risk identification combined with network analytic hierarchy process and gray fuzzy comprehensive evaluation method. A subway station project in Zhengzhou was taken as an example to analyze the reasons of water leakage in subway stations and summarize the characteristics of water leakage in urban subway stations. A subway station leakage risk index system was constructed to comprehensively evaluate the water leakage risk in subway stations. The results show that the model can accurately evaluate the waterproof construction project of urban subway, and provide a new idea and method for the comprehensive evaluation of the waterproof construction risk of urban underground traffic projects.

Keywords: Analytic Network Process; Grey-fuzzy Comprehensive Evaluation; subway station; waterproof system; comprehensive evaluation

二十一世纪的今天,城市人口的急剧增长让城市承受着从未有过的交通压力,交通堵塞成为常态,城市想要继续高速发展便急需发展安全高效的交通方式,而近年来地铁的出现刚好满足了这一需求。然而地铁虽然有效缓解了城市交通压力,但因为地铁建设是在地下,受地质条件、自然环境以及各种因

素影响,地铁站防水成为了地铁建设一大难题,车站一旦渗水,地铁站建设就会受到严重影响,严重情况下还会影响到人民生命安全,因此有必要对地铁站渗漏水问题进行针对性的科学的研究。

对于地铁站渗漏水问题原因的研究表明,渗漏水问题的核心便是车站结构受各种因素影响发生

开裂,进而产生裂隙。公志浩等^[1]在研究南京地铁张府园站防水时提到地铁车站渗漏水原因是由于车站结构混凝土开裂、地下水压力以及地下连续墙与内衬墙间没有防水层等。刘玉莲等^[2]提出渗漏水原因是由于防水卷材以及混凝土自身问题导致,其中混凝土问题主要指混凝土质量不达标以及后期施工过程施工不规范等。

在风险评价及渗漏水研究方面,汤维、丁列云等首先分析了地铁工程施工安全的评价,建立了评价指标,并设定了安全管理水平等级,为地铁施工的标准化、规范化提供了借鉴^[3-4]。

同时朱明娇^[5]基于系统论的视角,从地铁车站渗漏水问题出发分析了防水系统的构成和地铁车站结构特点,并介绍了分析地铁车站防水系统时用到的研究方法,包括层次分析法、模糊综合评价法、和风险矩阵分析法,为相关问题的研究提供了更为科学的方法。

但是不难看出,国内外针对地铁车站渗漏水方面的研究过于单一,同时对渗漏状况及原因评价采用多指标综合定量的方法也比较少,此外大多数研究集中于运营阶段,对于前期防治工作的研究并不多见,因此,在地铁车站施工前期对地铁车站渗漏水风险进行整体的评估及预防具有一定的研究价值。通过问卷调查分析渗漏水影响因素各项指标的占比,基于指标间具有关联性以及研究问题的模糊性和灰色性,本文采用网络层次分析法 (Analytic Network Process) 与灰色模糊综合评价法 (Grey-fuzzy Comprehensive Evaluation) 相结合的方式提出了基于模糊综合评价的城市地铁车站渗漏水风险评估模型,为地下交通工程项目提供一种定性定量相结合的分析方法。

1 地铁车站渗漏水现状及原因分析

据不完全统计,截止 2021 年 12 月 31 日,全国已有 51 个城市开通运营城市轨道交通线路将近三百条,总运营里程高达近万千米,地铁车站 5 216 座且数量在不断在增加。这些已运营和在建的地铁车站,在建设及使用期间,时常发生结构渗漏水问题^[6]。

其中地铁车站主体结构渗漏水现象屡见不鲜,严重影响其运行安全。笔者对一些典型的渗漏水案例进行研究,发现国内各大城市渗漏水原因众多且渗漏水情况复杂。本文针对郑州部分地铁线路渗漏水情况作了详细调研,调研情况如图 1。

就郑州地铁车站渗漏水情况调研发现,地铁车站

渗漏水原因众多,涉及面众多,包括前期地质勘查不全面、设计方案不完善、施工组织不当、防水施工人员缺乏培训、防水材料失效等。本文考虑到渗漏水原因虽然众多但有很多原因对于后期渗漏水事故的发生影响微乎其微,因此在下文进行渗漏水风险指标构建的过程中将渗漏水原因进行要因缩减,方便风险指标的整体评价。

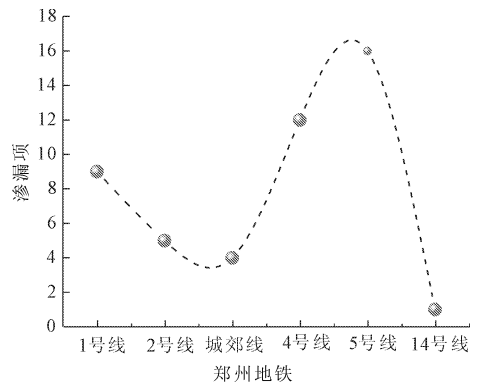


图 1 郑州地铁各线渗漏水情况

2 地铁车站渗漏水风险指标体系构建

地铁车站渗漏水一直是地下空间开发一大问题也是一大难题^[7]。付振杰^[8]提出地铁车站,在具体施工作业过程中,由于多种因素的干扰,施工人员存在违规操作,最终导致地铁车站竣工后,主体结构出现大面积渗漏水现象,造成后期经济成本增高,甚至影响乘客安全出行。张勇^[9]提出在地铁车站工程建设过程中,混凝土质量是防水工程的重中之重,混凝土质量直接决定地铁车站工程施工质量。林海山^[10]从勘查设计阶段和施工阶段分别对地铁外墙渗漏水的原因进行了分析。通过对上述研究成果进行整理和归纳,本文将地铁车站渗漏水原因归结于人员、材料、施工技术、施工组织管理、施工环境五类(见表 1)。

2.1 人员对渗漏水的影响

地铁建设过程中,管理人员、技术人员、施工人员以及其他人员是地铁建设的主力军,在施工过程中管理人员的监管不当,技术人员的不专业以及施工人员的违规操作都会影响地铁车站防水工作的正常开展,从而导致渗漏水问题的发生。

2.2 材料对渗漏水的影响

地铁车站防水过程中,防水材料分为自防水材料 and 外防水材料,自防水材料以混凝土为主,外防水材料以防水卷材及细部结构防水材料为主。防水材料一旦失效,将直接导致结构渗漏水问题的发生,因此材料也是研究渗漏水问题的关键。

2.3 施工技术对渗漏水的影响

施工技术主要是指在地铁车站不同部位采用不同的施工方式,进行针对性的防水施工。单一的防水施工会导致自防水混凝土以及外防水材料的破坏等,直接影响到防水工程质量。

2.4 施工组织管理对渗漏水的影响

施工组织管理贯穿整个工作的全过程,包括了施工方案的选用、组织施工人员的培训以及整个防水施工过程的组织。因为施工组织管理关系到防水工作有条不紊的进行,因此施工组织管理对于渗漏

水问题的作用也不可忽视。

2.5 施工环境对渗漏水的影响

施工环境指防水施工过程中所面临的各种自然环境因素,包括地质条件、高温、洪水以及其他不确定自然灾害。防水施工过程中,受地下施工环境以及防水材料性能的限制,高温、洪水等都会造成防水工作的困难,同时还会影响到后期渗漏水的发生。因此,有必要将施工环境也作为影响地铁车站渗漏水的一个重要原因。

表 1 地铁渗漏水风险指标

目标层	准则层	指标因素层	指表因素说明
地铁车站 渗漏水风险	人员	违规操作	施工人员不能够按照设计图纸施工
		监管不到位	现场施工管理人员对施工过程监管不到位
		技术缺乏	施工人员在特殊节点防水技术不了解
	材料	自防水混凝土	混凝土没有达到相关施工要求
		防水卷材	防水卷材防水性能不佳
		其他防水材料	细部节点防水材料选用不当
	施工技术	底板施工	混凝土浇筑问题、预留施工缝问题
		侧墙施工	混凝土浇筑问题、防水卷材破坏问题
		顶板防水	防水涂料涂刷不当
		细部结构防水	防水材料选用不当、施工粗糙
	施工组织管理	施工方案	施工方案与现场不协调
		施工水平	施工工人没有接受专业培训
		施工组织	防水施工组织不当
	施工环境	地质条件	地下水含量过多、地质条件恶劣等
		洪灾地震	部分地域降水量丰富导致防水失效
高温		天气炎热使得防水材料失效	
		其他自然灾害	海啸、大风等天气

3 问卷调查与数据分析

本文以郑州市地铁十二号线西周站为工程背景,以相关领域施工人员、设计人员及相关专家作为对象,调查地铁车站影响渗漏水的各项指标占比情况,问卷共设置 17 个三级指标,采用五级层次(非常严重、较严重、一般、较轻、非常轻)选项进行问卷题项设置,分别将上述风险指标对地铁车站渗漏水影响进行了调查。

通过 SPASS17.0 信度和效度分析,可判断问卷具有良好结构效度。后期对调查问卷进行整理,构造出模糊评价的评判矩阵(统计结果见表 2)。

4 基于 ANP 指标权重的确定

目前,对于指标权重的确定,大多数学者采用

AHP^[11-12](层次分析法),但 AHP 中假设各个指标相互独立,忽略了各个指标间的关联,因此局限性很强。网络层次分析法(ANP)^[13-14]是在层次分析法(AHP)的基础上发展出的一种针对多目标、多准则问题的分析方法,主要用来处理一些比较复杂的工程决策问题。一般的控制层由决策目标与决策准则构成,网络层由各决策指标及指标相互关系构成完整网络层。

4.1 构建 ANP 单网络结构模型

根据地铁车站防水施工特点,并结合工程的实际状况,建立地铁车站防水施工风险评价的 ANP 结构模型,同时,根据设计人员、施工人员、防水专家以及相关人员的共同探讨,通过排除部分不可能因素并分析各指标间的关系,最终确定风险指标间的相互影响关系。依据评价指标间的影响关系,在

Yaanp 软件内构建施工风险因素 ANP 单网络结构模型,如图 2 所示。

表 2 调查问卷题项频率统计

单位:%

	非常严重	较严重	一般	较轻	非常轻		非常严重	较严重	一般	较轻	非常轻
U_{11}	15.0	47.2	33.2	4.6	0.0	U_{34}	3.2	47.5	39.0	6.7	3.6
U_{12}	5.0	35.0	45.5	12.3	3.2	U_{41}	3.8	46.4	38.6	7.2	4.0
U_{13}	3.2	50.2	37.2	6.2	3.2	U_{42}	2.5	40.2	42.3	12.3	2.7
U_{21}	15.0	60.2	20.2	3.6	0.0	U_{43}	3.2	42.3	40.2	12.2	2.1
U_{22}	6.8	42.5	30.2	12.3	8.2	U_{51}	2.5	40.2	42.7	12.3	2.3
U_{23}	2.5	37.2	55.6	3.5	1.2	U_{52}	6.8	32.7	50.2	7.2	3.1
U_{31}	3.8	35.6	40.2	16.1	4.3	U_{53}	3.2	47.2	42.7	4.5	2.4
U_{32}	2.5	42.3	42.1	11.1	2.0	U_{54}	1.2	30.2	50.1	16.4	2.1
U_{33}	3.2	48.2	42.0	4.2	2.4						

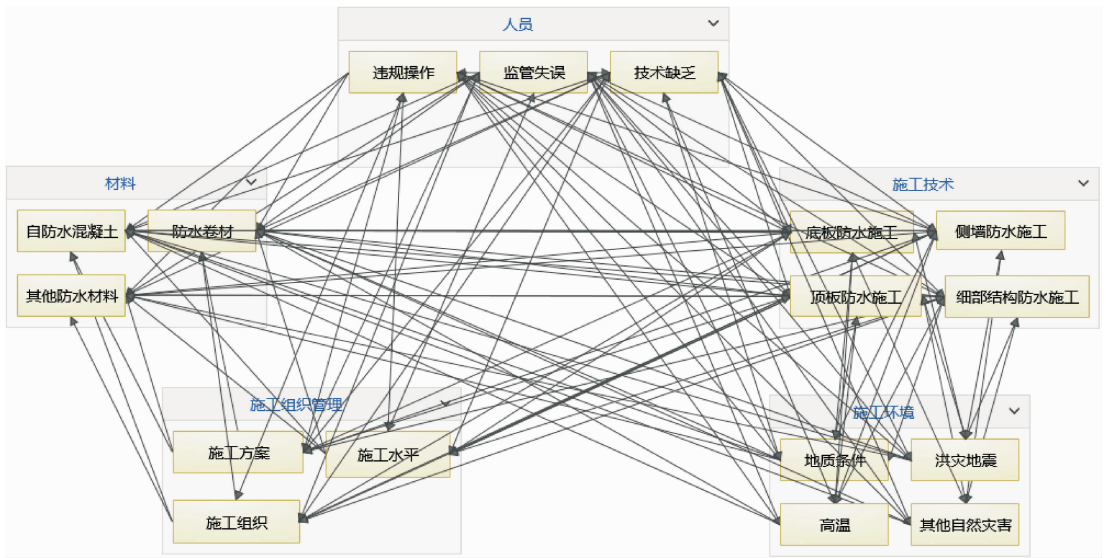


图 2 Yaanp 软件模式下地铁车站防水施工 ANP 结构模型

4.2 判断矩阵值的输入及结果

根据专家经验数据及 yaanp 软件计算得出二、三级指标权重(见表 3)。

4.3 各权重排序图

根据上述判断矩阵及各影响因子权重绘制出影响地铁车站渗漏水各因素权重排序图,见图 3。

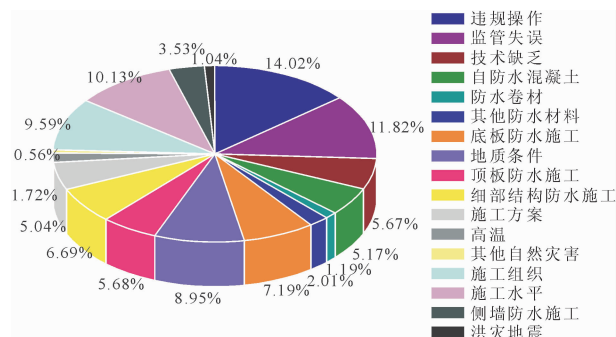


图 3 各权重排序图

4.4 地铁车站渗漏水风险的灰色模型综合评价模型

灰色模糊综合评价法是一种结合了灰色关联与模糊数学理论,在已知信息不充分的情况下,评价具有模糊因素的事物或现象,是要一种评价具有模糊因素事物或现象的方法^[15]。

4.4.1 构建因素集及评价集

本文中因素集由 U 表示,由前文的指标体系可知,本文中的因素集为二层集:

第一层因素:

$$U_{\otimes} = \{(U_1, Y_1)\} (U_2, Y_2) (U_3, Y_3) (U_4, Y_4) (U_5, Y_5)\}$$

第二层因素:

$$U_1_{\otimes} = \{(U_{11}, Y_{11}) (U_{12}, Y_{12}) (U_{13}, Y_{13})\}$$

$$U_2_{\otimes} = \{(U_{21}, Y_{21}) (U_{22}, Y_{22}) (U_{23}, Y_{23})\}$$

$$U_3_{\otimes} = \{(U_{31}, Y_{31}) (U_{32}, Y_{32}) (U_{33}, Y_{33}) (U_{34}, Y_{34})\}$$

$$U_4_{\otimes} = \{(U_{41}, Y_{41}) (U_{42}, Y_{42}) (U_{43}, Y_{43})\}$$

表 3 各指标权重占比

一级指标	二级指标	权重 q_1	三级指标	权重 q_2	$q_1 \times q_2$
U	U ₁	0.483	U ₁₁	0.445	0.215
			U ₁₂	0.375	0.181
			U ₁₃	0.180	0.087
	U ₂	0.053	U ₂₁	0.618	0.328
			U ₂₂	0.142	0.008
			U ₂₃	0.240	0.013
	U ₃	0.112	U ₃₁	0.312	0.035
			U ₃₂	0.153	0.017
			U ₃₃	0.245	0.027
			U ₃₄	0.290	0.032
	U ₄	0.039	U ₄₁	0.204	0.008
			U ₄₂	0.409	0.016
			U ₄₃	0.387	0.015
	U ₅	0.043	U ₅₁	0.211	0.009
			U ₅₂	0.246	0.011
U ₅₃			0.408	0.018	
U ₅₄			0.134	0.006	

$$U_5 = \{(U_{51}, Y_{51})(U_{52}, Y_{52})(U_{53}, Y_{53})(U_{54}, Y_{54})\}$$

本文依据地铁车站渗漏水风险影响因素分布情况建立含 5 个等级的评价集, $Y = \{ \text{非常严重, 较严重, 一般, 较轻, 非常轻} \}$ 。

4.4.2 构建权重集

目前已经基于 ANP 的方法计算了各个指标的权重 q_i , 权重集可以看成是评价对象与因素集之间的灰色模糊关系。结合权重 q_i 与其对应的灰度 r_i , 构成权重集:

$$A_{\otimes} = \{(q_1, r_1)(q_2, r_2)(q_3, r_3) \cdots (q_m, r_m)\} (q_1, r_1)(q_2, r_2)(q_3, r_3) \cdots (q_m, r_m)$$

4.4.3 构建因素判断矩阵及灰色模糊合成

在灰色模糊综合评判过程中, 单因素模糊评价是综合评价的关键, 本文通过统计调查法来确定底层指标的隶属度 λ , 再进行单因素评价。

$$R_{\otimes} = \begin{bmatrix} (\lambda_{11}, Y_{11}) & (\lambda_{12}, Y_{12}) & \cdots & (\lambda_{1n}, Y_{1n}) \\ (\lambda_{21}, Y_{21}) & (\lambda_{22}, Y_{22}) & \cdots & (\lambda_{2n}, Y_{2n}) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ (\lambda_{m1}, Y_{m1}) & (\lambda_{m2}, Y_{m2}) & \cdots & (\lambda_{mn}, Y_{mn}) \end{bmatrix}$$

其中, λ_{ij} 表示第 i 个因素的属于第 j 个等级的可能性, Y_{ij} 是相应指标信息的灰度。其中 $i = 1, 2, \dots, m$; $j = 1, 2, \dots, n$ 。引进决策集, 使得:

$$A_{\otimes} = A_{\otimes} \cdot R_{\otimes} = [(b_i, y_i)]_n = [(\sum_{j=1}^m a_j \cdot \lambda_{ji}, \prod_{j=1}^m (1A(Y_j + Y_{ji})))]$$

并进行灰色模糊合成。

4.4.4 评价结果处理

根据指标体系, 渗漏水影响因素人员因素包括三个相关指标: 监管不到位、技术缺乏、违规操作。本文指标权重根据专家打分得出, 故可认为这部分信息很充分, 本文假设所有指标的灰度值都为 0.1。对于人员因素, 该 3 个指标构成的权重集为:

$$A_1 = \{(0.445, 0.1), (0.375, 0.1), (0.180, 0.1)\}$$

一般研究渗漏水评价指标的过程中, 某项指标被选用的次数越多, 可认为该指标的信息越充分。综合上文统计分析结果, 可构建人员的评判矩阵为:

$$R_1 = \begin{bmatrix} (0.150, 0.003) & (0.472, 0.003) & (0.332, 0.003) \\ (0.050, 0.003) & (0.350, 0.003) & (0.455, 0.003) \\ (0.032, 0.225) & (0.502, 0.244) & (0.372, 0.205) \\ (0.046, 0.003) & (0.000, 0.003) \\ (0.123, 0.003) & (0.032, 0.003) \\ (0.062, 0.216) & (0.032, 0.234) \end{bmatrix}$$

引进灰色模糊集 B_1 , 在 Excel 中建模并计算, 结果为:

$$B_1 = A_1 \cdot B_1 = [(0.091, 0.023)(0.432, 0.025)(0.385, 0.021)(0.078, 0.222)(0.018, 0.024)]$$

根据最大隶属度原则, 可以判断, 人员在地铁车站防水过程中对车站渗漏水问题有严重影响, 同理, 得出材料、施工技术、施工组织管理、施工环境其对车站渗漏水影响情况依次减弱。

5 结 论

本文在研究网络层次分析法与灰色模糊综合评价法相结合的基础上, 结合问卷调查及专家经验构建了地铁车站防水施工风险评价指标体系和基于 ANP 的模糊综合评判模型; 同时, 运用该模型对郑州地铁 12 号线西周站车站防水工程进行风险评估, 说明其操作步骤。研究的结论及意义如下:

(1) 按照风险辨识及网络层次法相关理论, 依据地铁防水施工工艺步骤, 结合事故致因理论以人员、材料、施工技术、施工组织管理以及施工环境为一级指标构建了包括 17 个二级指标的风险评价指标体系, 分别对其进行了风险辨识及分析。

(2) 依据风险辨识结果, 构建了基于 ANP 的灰色模糊综合评判模型, 应用评判模型对郑州地铁 12 号线西周站地铁车站渗漏水风险进行了评价, 该方法考虑了风险因素之间的内在关联, 使得结果更加客观更加科学。

- fields[J]. Computers and Geotechnics, 2012, 41: 23-35.
- [15] Mroueh H, Shahrouh I. Use of sparse iterative methods for the resolution of three-dimensional soil/structure interaction problems[J]. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 1999, 23(15):1961-1975.
- [16] Bhandari A, Han Jie. DEM study of a shall foundation under vertical loading[C]// 2009 International Foundation Congress and Equipment Exposition, Contemporary Topics in Ground Modification, Problem Soils and Geo-Support, ASCE, Reston, VA, 2009:465-472.
- [17] Fu Zhongzhi, Chen Shengshui, Liu Sihong. Discrete element simulations of shallow plate-load tests[J]. International Journal of Geomechanics, 2016, 16(3): 04015077.
- [18] Ei Shamy U. DEM simulation of the seismic response of shallow foundation on liquefiable soil[C]// Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics IV Congress, 2008.
- [19] 蒋明镜,李磊,孙超. 地基承载力尺寸效应离散元分析[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2015, 43(5):649-656.
- [20] Bui H H, Kobayashi T, Fukagawa R, et al. Numerical and experimental studies of gravity effect on the mechanism of lunar excavations[J]. Journal of Terramechanics, 2009, 46(3):115-124.
- [21] Jiang Mingjing, Konrad J M, Leroueil S. An efficient technique for generating homogeneous specimens for DEM studies[J]. Computers and Geotechnics, 2003, 30(7):579-597.
- [22] Fuglsang L, Ovesen N Krebs. The application of the theory of modelling to centrifuge studies [J]. Centrifuges in soil mechanics, 1988:119-138.
- [23] 徐光明,章为民. 离心模型中的粒径效应和边界效应研究[J]. 岩土工程学报, 1996, 18(3):80-86.
- [24] 蒋明镜. 现代土力学研究的新视野——宏微观土力学[J]. 岩土工程学报, 2019, 41(2):195-254.

(上接第 31 页)

(3) 通过对地铁车站渗漏水风险进行综合评价,一方面对西周站的现场施工起到了指导作用,另一方面也为之后的地铁车站防水工程风险评价提供借鉴。

参考文献:

- [1] 公治浩,张娜. 地铁车站结构渗水原因及治理[J]. 能源技术与管理, 2005(5):50-51, 75.
- [2] 刘玉莲,王安成. 成都某地铁车站防水设计及渗漏治理[J]. 中国建筑防水, 2011(24):25-27.
- [3] 汤维. 地下工程防水所面临的问题及措施[J]. 灾害与防治工程, 2010(1):70-74.
- [4] 丁烈云,吴贤国,骆汉宾,等. 地铁工程施工安全评价标准研究[J]. 土木工程学报, 2011, 44(11):121-127.
- [5] 朱明娇. 基于系统工程的城市地铁车站防水施工控制研究[D]. 长沙:湖南大学, 2017.
- [6] 李鹏飞,高墅,何志刚. 地铁车站结构防水分析与防水设计探讨[J]. 中国建筑防水, 2016.
- [7] 孙海英. 地铁防水施工技术研究[D]. 石家庄:石家庄铁道大学, 2018.
- [8] 付振杰. 地铁车站主体结构渗漏水原因及预防措施[J]. 山西建筑, 2017, 43(8):102-103.
- [9] 张勇. 地铁车站主体结构渗漏水原因分析及防治技术[J]. 智能城市, 2021, 7(6):134-135.
- [10] 林海山. 濒海地区(厦门)地铁地下车站外墙裂缝及渗漏水防治初探[D]. 厦门:厦门大学, 2019.
- [11] 许树柏. 实用决策方法:层次分析法原理[M]. 天津:天津大学出版社, 1988.
- [12] 金起波,刘源. 基于 AHP-模糊综合评价法的城际轨道交通工程施工风险研究[J]. 湖南交通科技, 2021, 47(3):141-143, 192.
- [13] Saaty T L. Decision making with the analytic hierarchy process[J]. International Journal of Services Sciences, 2008, 1(1):83.
- [14] 王岩,黄宏伟. 地铁区间隧道安全评估的层次-模糊综合评判法[J]. 地下空间, 2004, 24(3):301-305.
- [15] 李晗. 基于灰色模糊理论的风险管理研究[D]. 南宁:广西大学, 2019.