

DOI:10.3969/j.issn.1672-1144.2023.06.001

# 基于网络层次分析法的盾构隧道 管片渗漏水风险评估

王晓睿<sup>1</sup>, 肖荣邦<sup>1</sup>, 许晓光<sup>2</sup>, 张 昭<sup>3</sup>

(1. 华北水利水电大学 地球科学与工程学院, 河南 郑州 450045;

2. 郑州地铁集团有限公司建设分公司, 河南 郑州 450014;

3. 上海隧道工程有限公司, 河南 郑州 450003)

**摘要:** 为充分探究盾构隧道管片渗漏水形成机理, 科学评估以此所造成的各类风险并在此基础上进行有效防控, 以风险辨识理论结合网络层次分析法构建地铁盾构隧道管片渗漏水网络层次模型, 并以某城市地铁隧道区间管片渗漏水为例, 分析管片渗漏水的原因和特点, 搭建管片渗漏水风险指标体系, 同时运用此模型对该区间管片渗漏水进行综合评价。结果表明: 通过网络层次分析法搭建的管片渗漏水风险评估模型可在工程实际应用中有效提高准确率, 为管片防水质量控制提供参考依据。

**关键词:** 盾构隧道; 管片渗漏水; 网络层次分析法; 综合评价

中图分类号: U457.2

文献标识码: A

文章编号: 1672-1144(2023)06-0001-06

## Water Leakage Risk Assessment of Shield Tunnel Sheet Based on Network Hierarchical Analysis

WANG Xiaorui<sup>1</sup>, XIAO Rongbang<sup>1</sup>, XU Xiaoguang<sup>2</sup>, ZHANG Zhao<sup>3</sup>

(1. School of Earth Science and Engineering, North China University of Water Resources and Electricity Power, Zhengzhou, He'nan 450045, China;

2. Construction Branch of Zhengzhou Metro Group Co., Ltd., Zhengzhou, He'nan 450014, China;

3. Shanghai Tunnel Engineering Co., Ltd., Zhengzhou, He'nan 450003, China)

**Abstract:** In order to fully investigate the formation mechanism of water leakage from pipe sheet, and assess the various risks caused by it and carry out effective prevention and control, this work constructed a network hierarchy model of water leakage from pipe sheet in shield tunnel of subway based on risk identification theory combined with network hierarchy analysis, and analyzed the causes and characteristics of water leakage from pipe sheet and builds a risk index system of water leakage from pipe sheet taking water leakage from pipe sheet in a city underpass tunnel interval as an example. At the same time, a comprehensive evaluation of the water leakage of the pipe sheet in the interval was also carried out. The results show that the network hierarchical analysis of the risk assessment model can be built through the network of water leakage in the actual application of the project to effectively improve the accuracy of waterproofing quality control for the pipe sheet to provide a good reference basis.

**Keywords:** shield tunnel; pipe sheet water leakage; network hierarchical analysis; comprehensive evaluation

近年来地铁飞速发展, 据交通运输部轨道交通数据统计, 截至2023年2月共有54个城市(不含港澳台)开通运营城市地铁轨道, 交通线路291条,

运营里程9 628.2 km。在长期运营过程中, 盾构隧道管片渗漏水现象频繁发生, 且不同水文地质条件下均有分布。管片渗漏水不仅会影响隧道结构稳定

收稿日期: 2023-07-30

修稿日期: 2023-09-07

基金项目: 国家自然科学基金青年项目(51309100); 河南省科技攻关项目(222102320231)

作者简介: 王晓睿(1975—), 男, 博士, 教授, 主要从事数值计算的研究及其岩石裂纹扩展方面的应用。E-mail: wxrui203@163.com

和行车安全,还会加速设备腐蚀,导致设备故障和寿命缩短,影响地面建筑和地下管线系统。因此,深入探究隧道管片渗漏水影响因素及其风险等级是提高隧道运营安全,减少渗漏水情况发生的关键。

关于隧道管片渗漏水的特点及原因分析,李岳、代显奇<sup>[1,2]</sup>研究得出盾构隧道管片渗漏水部位集中在环缝处,且施工和运营两个阶段都会导致管片渗漏水的情况发生。在隧道管片渗漏水风险评价和病害研究方面,陈君等<sup>[3]</sup>提出盾构隧道结构安全性能只依靠单项指标是存在局限性的。杨春山等<sup>[4]</sup>在对渗漏水病害研究的基础上,提出将复杂的问题简单化,依据因素间互相影响和隶属关系进行层次划分,建立相关层次结构模型进行评价分析。在研究方法的选择上,王密田等<sup>[5]</sup>基于运营期隧道病害成因复杂和衬砌变形采集困难的基础上提出可基于灰色关联度和贝叶斯网络等方法。Li 等<sup>[6]</sup>考虑到隧道状况评估的复杂性,提出能测量隧道困境的数学组合模型 TSI,为建立运营期隧道病害致灾风险评估模型提供了新思路。

从国内外针对盾构管片渗漏水研究内容不难看出,影响渗漏水的原因不是简单的一个或两个因素造成的,而是多因素、复杂且具有长时效过程。但相关研究存在局限性,大多数人只聚焦于线性的渗漏水关系,忽略渗漏水因素之间的耦合关系,且因为施工期的因素复杂性,多数研究的重点在运营期间,导致渗漏水的研究具有间断性。在前人研究的基础上,充分考虑盾构隧道建设运营的整个周期,建立渗漏水因素多维度关联耦合的网络层次分析模型(ANP),科学量化盾构隧道管片渗漏水的影响因素,同时确定各风险指标的权重比例,以期对管片渗漏水风险控制和防治提供依据。

## 1 隧道管片渗漏水情况及原因分析

郑州自 2013 年开通地铁以来共有运营线路 10 条,运营里程 235.2 km,在运营过程中,存在大量渗漏水现象,盾构隧道管片渗漏水是郑州地铁渗漏水的主要内容之一。经过对郑州地铁 5 号线沙口路站-月季公园站盾构隧道区间的实地调研和管片渗漏水情况的统计分析,发现渗漏水病害多处于纵向和环向的接缝处、手孔区以及环梁等区域<sup>[7]</sup>,如图 1 所示,渗漏水点统计见表 1 所示。

由表 1 可知,拼接缝渗漏水比例高达 75%,为盾构隧道主要渗漏水点,螺栓孔为次要漏水点。环梁处漏水点占 10%,隧道两个洞门均有渗漏水现象发生。



图 1 盾构隧道渗漏水位置图

表 1 渗漏水点统计表

渗漏水位置	渗漏水数量/个	渗漏水比例/%
T 型缝	10	50
纵横缝	5	25
螺栓孔	2	10
环梁	2	10
预留注浆孔	1	5

盾构隧道管片渗漏水问题的发生,一部分与施工期复杂的施工状况有关,另一部分则可能因为运营过程中,多种荷载耦合作用,导致接头的防水能力减弱,产生渗漏水现象。张文静<sup>[8]</sup>对隧道运营期间渗漏水风险进行分析,确定出渗漏水的 6 种状态,并提出渗漏水的病害是多因素之间相互影响导致。

通过研究郑州地铁盾构管片渗漏水的特点,查阅盾构隧道渗漏水相关资料,分析后发现盾构隧道管片渗漏水原因众多,涉及面甚广,管片接缝渗漏水发生原因比较复杂,包括人员自身问题、施工问题、地质环境的变化、方案、材料、内部压力、外部荷载等诸多影响因素。若单一的考虑施工期或运营期的某个因素是不准确的<sup>[9]</sup>,基于因素间相互影响,利用多因素的网络层次理论,构建盾构管片渗漏水评价体系。

## 2 隧道管片渗漏水风险指标因素

在文献调研、专家问讯、结合相关施工人员经验的基础上,将 5 号线隧道区间盾构隧道渗漏水总结

出5个主要影响因素:人员、施工组织、施工技术、地质环境、材料劣化。在此基础上完成管片渗漏水风险指标提取和风险指标体系构建。

### 2.1 人员对管片渗漏水的影响

盾构隧道建设包含运输、盾构、拼装、注浆及后期防护等一系列过程,这需要项目组的各级人员共同努力,他们作为贯穿盾构隧道建设和运营周期的建设和维护者,其施工的规范程度,操作是否得当深深影响着盾构隧道的施工质量。人员监管、技术水平和器械使用情况都是影响盾构隧道施工质量的重要因素。

### 2.2 施工组织对管片渗漏水的影响

在盾构隧道项目建设之前,需要对即将要做的任务做出设计和规划,详细而又合理的施工组织方案必不可少,这其中包括防水设计、施工方案和组织规划,任何一个环节的疏漏,都会直接或间接影响后续的工作内容,从而导致管片渗漏水情况的发生。因此重视施工组织工作,研究其对管片渗漏水的影响程度,是合理构建管片渗漏水风险评价体系不可或缺的内容。

### 2.3 施工技术对管片渗漏水的影响

在盾构隧道建设和运营过程中,施工技术是保证其顺利进行的核心内容<sup>[10]</sup>。盾构隧道的建设相比明挖段使用混凝土浇筑而言,更加复杂和精密。止水带粘贴状态,管片拼装精度、同步注浆量多少<sup>[11]</sup>将会直接影响到管片的防水体系。而在盾构机掘进过程中,可能存在管片连接处螺栓预紧力不够,从而导致接缝处张开,继而发生管片渗漏水的情况。因此,施工技术是管片渗漏水影响因素研究必须考虑的因素之一。

### 2.4 地质环境对管片渗漏水的影响

地质环境的变化往往影响着盾构隧道管片的自防水体系。若土层以软土地基为基础,在振动荷载或过大的承载压力下,就会发生沉降,从而使隧道管片产生上浮或下沉现象<sup>[12]</sup>,致使接头处产生张开、错台等问题。若周围有河流,或地下渗流过多时,水压变化会比较明显,影响孔隙水压,导致出现渗漏水<sup>[13-14]</sup>。同时化工厂所排废水等酸性物质会改变土壤酸碱度从而对管片、止水带等产生腐蚀,从而破坏自防水体系。其他如地震、海啸等不可预知的地质环境因素,一旦发生后果非常严重,因此地质环境变化的影响不可忽视。

### 2.5 材料劣化对管片渗漏水的影响

在管片运输和拼装过程中,容易导致边角处所

受应力较大,从而出现管片角部破碎、开裂等情况<sup>[15]</sup>。同时密封止水条在过大的应力作用下、会产生蠕变及应力松弛等现象,止水能力下降。在预紧螺栓时,未安装防水垫或是防水垫损坏,则会直接导致螺栓孔处发生渗漏水。因此,材料自身性能或结构劣化,也是整个风险评价的重要内容。盾构管片渗漏水风险因素指标如表2所示。

表2 盾构管片渗漏水风险指标

风险指标	指标内容	导致后果
人员	监管不到位	监管不到位引起施工不良
	技术缺乏	施工人员对于复杂施工处缺乏经验
	器械使用不当	千斤顶推力过大,盾构机姿态不佳
施工组织	防水设计不佳	接头端防水方案不适用
	施工方案不佳	施工方案未与现场结合
	组织规划不合理	组织规划不够明晰,施工混乱
地质环境	地下水水位变化	接头处孔隙压力增大,渗透水压增大
	土体沉降	土层发生沉降,隧道发生变形
	土壤酸碱碱性变化	对材料产生腐蚀性
	其他不良地质环境	破碎带、岩溶区等易发生变形区
施工技术	止水带粘贴不好	止水带连接不密实,产生缝隙
	拼装质量不佳	管片拼接缝处不平整,内张外角
	连接处压紧力不够	接缝处连接不紧密,张开量过大
	压浆量不足	后期发生沉降变形
材料劣化	止水橡胶劣化	老化、应力松弛
	管片结构缺陷	破损、开裂、张开、错台
	螺栓失效	螺栓孔密封圈缺失

## 3 基于ANP的模型构建

网络层次分析法(ANP)<sup>[16]</sup>是层次分析法(AHP)的扩展,考虑到该评价体系中的指标之间存在相互关联、相互影响的关系<sup>[17]</sup>,本文采用网络层次分析法(ANP)对接缝渗漏水评价体系进行定量研究,进一步确定各评价指标的权重。该方法研究过程中充分考虑了指标间的反馈性和相互作用,能准确反映内部元素间的依存关系并定量化评价系统内部联系<sup>[18]</sup>,已被应用于各领域的评价研究之中。

### 3.1 ANP模型的建模思路

ANP模型结构分为两层,由控制层和网络层组成,如图2所示,分别反映相关目标实现的评判标准和网络化结构的评价指标。首先是构造控制层次,将决策目标界定,再构造网络层次,要归类确定每一个元素,分析其网络结构和相互影响关系,并通过调查分析,建立网络结构的评价指标体系。

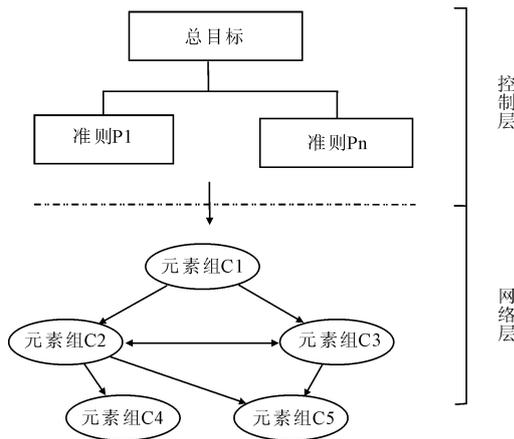


图 2 网络层次结构

### 3.2 超矩阵建立

#### (1) 建立超矩阵。

在决策目标和决策准则确定之后,确定控制层元素有  $B_1, B_2, \dots, B_m$ , 网络层有元素集  $C_1, C_2, \dots, C_n$ ,  $C_i$  有元素  $C_{i1}, C_{i2}, \dots, C_{in}, i = 1, 2, \dots, n$ 。将控制层中的元素  $C_p$  作为准则,同时将  $C_j$  中的元素  $C_{j1}$  作为次准则,然后进行互相之间的标度比较,由此构建判断矩阵,从而得到归一特征向量  $(w_{i1}, w_{i2}, \dots, w_{in})^T$ ,也称为网络元素排序向量,在前者的基础上进行一致性检验。经过上述步骤,可以得到相对于其他元素的排序向量,构造超矩阵记为:

$$W_{ij} = \begin{pmatrix} w_{i1}^1 & w_{i1}^2 & \dots & w_{i1}^{m_j} \\ w_{i2}^1 & w_{i2}^2 & \dots & w_{i2}^{m_j} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ w_{in}^1 & w_{in}^2 & \dots & w_{in}^{m_j} \end{pmatrix}$$

超矩阵  $W_{ij}$  的列向量为  $C_{ij}$  中的元素  $C_{i1}, C_{i2}, \dots, C_{in}$ , 若元素组  $C_j$  中的元素与  $C_i$  中的元素之间不会互相影响,则超矩阵  $W_{ij} = 0$ , 由此,最终可以在准则  $C_p$  下得到超矩阵  $W_o$ 。其他控制层元素的超矩阵,也可以用此方法计算求得:

$$W_{ij} = \begin{pmatrix} w_{11} & w_{12} & \dots & w_{1N} \\ w_{21} & w_{22} & \dots & w_{2N} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ w_{N1} & w_{N2} & \dots & w_{NN} \end{pmatrix}$$

#### (2) 构建加权超矩阵。

在控制层准则  $C_p$  下,对  $C_p$  下  $C_j (j = 1, 2, \dots, n)$  个元素相对于准则进行优势度比较,从而可以得到归一化的排序列向量  $(a_{1j}, a_{2j}, \dots, a_{nj})$ , 由此可得到一个加权矩阵  $A = \begin{pmatrix} a_{11} & \dots & a_{n1} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ a_{n1} & \dots & a_{nn} \end{pmatrix}$ , 其中  $a_{ij} \in [0, 1]$ , 并且  $\sum^n a_{ij} = 1$ 。假如参与比较的两个元素间没有影响,那么  $a_{ij}$  为 0, 那么就可以进行下一步加权超矩阵的构造  $\bar{W} = \bar{W}_{ij} = A \times W = (a_{ij} \times \bar{W}_{ij}) (i = 1, 2, \dots, N; j = 1, 2, \dots, N)$ 。

(3) 计算极限超矩阵为了使元素之间所存在的相互依存关系更加清楚,在加权超矩阵的工作的基础上增加超矩阵稳定处理。计算每个超矩阵的极限  $\lim_{k \rightarrow +\infty} \left( \frac{1}{N} \right) \sum_{k=1}^N W^k$  的相对排序向量,若存在收敛且唯一的极限,则代表着评价指标的权重求解成功,矩阵中对应行的数值为权重结果。

3.3 软件选择及 ANP 的建模过程

yaanp 软件是 yaahp 软件的升级版,是一种常用的计算机网络层次分析法辅助应用软件,可利用网络分析法和层级分析法对决策活动提供模式建立、运算和支持大数据分析。而常用的 SD 软件对于复杂的网络层次结构,模型数据较多的情况,往往不够准确,并且分析效率低。故在此前提下,采用 yaanp 软件进行 ANP 模型的分析计算。

### 3.3 软件选择及 ANP 的建模过程

根据盾构隧道施工和运营情况,结合郑州地铁隧道管片区间渗漏水的特点<sup>[19]</sup>,得出风险指标间的相互影响关系。分析各指标间的关系,在此基础上构建出盾构隧道管片渗漏水风险评价的 ANP 网络层次模型,再通过 yaanp 软件构建盾构管片渗漏水风险因素单网络结构模型。结构建模如图 3 所示。

4 基于 ANP 的算例分析和权重确定

## 4 基于 ANP 的算例分析和权重确定

### 4.1 标度判断标准

在 Yaanp 软件内,可基于评价指标间依存关系的分析,构建相应的判断矩阵,再根据相关领域专家的意见对因素间的重要程度进行标度评判。专家成员由设计人员、项目高工、行业专家组成,决策运算采用常见的 9 分标度法,如表 3 所示。

表 3 标度参考表

标度	标度定义
1	$i$ 因素与 $j$ 因素具有相同重要性
3	$i$ 因素比 $j$ 因素相比略重要
5	$i$ 因素与 $j$ 因素相比更加重要
7	$i$ 因素与 $j$ 因素相比非常重要
9	$i$ 因素与 $j$ 因素相比绝对重要
2, 4, 6, 8	介于上述两因素标度重要性的中间状态
倒数	$j$ 因素与 $i$ 因素相互比较, $a_{ji} = 1/a_{ij}$

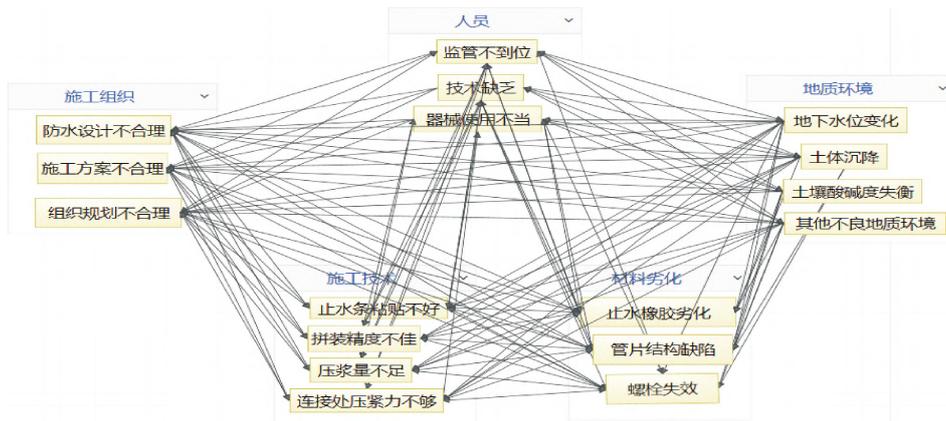


图 3 yaanp 软件下盾构管片渗漏水 ANP 模型

4.2 权重比例

在标度值确定后,依据 yaanp 软件计算得到各指标因素权重,如表 4 所示。

对 5 号线隧道区间管片渗漏水的评价结果进行分析:一级指标的权重比例大小关系为,人员(0.381 221) > 施工组织(0.286 122) > 施工技术(0.184 501) > 材料劣化(0.097 502) > 地质环境(0.050 656),五个因素逐渐对盾构隧道管片渗漏水的影响比重减小、人员作为隧道区间施工周期中重要的一环,其施工行为与盾构隧道工程质量紧密相关。二级指标中监管不到位(0.218 136) > 防水设计不合理(0.182 231) > 技术缺乏(0.142 380) > 止水条粘贴不好(0.103 146) > 施工方案不合理

(0.073 805),监管和技术缺乏是人员对管片渗漏水影响的主要内容,影响着人员的权重占比。止水条粘贴不好在整个施工技术排名靠后的情况下仍在二级指标中排名第四,其重要程度可见一斑。

人员因素和施工组织因素占比都超过了 20%, 分别占比为 38.12%、28.61%,这表明人员因素和施工组织因素在重要程度上,都占有绝对优势。这是由于施工人员的行为受施工组织的约束,而施工组织的合理性又直接影响施工人员的施工质量,两者密不可分,是盾构隧道管片渗漏水风险影响因素的核心内容。同时人员因素中监管问题又是重中之重,监管的严格程度往往代表着施工质量的水平。在施工组织因素中,防水方案合理性因素占比达到

表 4 各指标权重占比

一级指标	二级指标	部分权重	全局权重	排序	权重	总排序
人员 C1	监管不到位 C11	0.572204	0.218136	1	0.381221	1
	技术缺乏 C12	0.373484	0.142380	3		
	器械使用不当 C13	0.054312	0.020705	12		
施工组织 C2	防水设计不合理 C21	0.636899	0.182231	2	0.286122	2
	施工方案不合理 C22	0.257950	0.073805	5		
	组织规划不合理 C23	0.105151	0.030086	8		
地质环境 C3	地下水位变化 C31	0.263294	0.013337	13	0.050656	5
	土壤酸碱度失衡 C32	0.117886	0.005972	16		
	土体沉降 C33	0.562211	0.028479	9		
	其他不良地质环境 C34	0.056610	0.002868	17		
施工技术 C4	止水条粘贴不好 C41	0.559057	0.103146	4	0.184501	3
	拼装精度不佳 C42	0.254948	0.047038	7		
	连接处压紧力不够 C43	0.121716	0.022457	11		
	压浆量不足 C44	0.064279	0.011860	14		
材料劣化 C5	止水橡胶劣化 C51	0.648091	0.063190	6	0.097502	4
	管片结构缺陷 C52	0.244126	0.023803	10		
	螺栓失效 C53	0.107783	0.010509	15		

63.7%,且在二级因素中排名第二,防水设计作为管片自防水体系的核心内容,完善好防水方案就很大程度上避免了盾构隧道管片渗漏水的可能性。

地质环境权重占比为 5.06%,虽然也对盾构隧道管片渗漏水有影响,但其影响比重不高,归其原因是地质环境的变化是一种长期的叠加过程,不如前几个影响因素的直接性,且一般来说,没有频繁的地质活动或深度的人为影响,地质环境的状态是比较稳定的。

## 5 结 论

通过研究分析郑州地铁 5 号线盾构隧道渗漏水实际,结合专家经验和文献研究,总结盾构管片渗漏水风险影响因素指标体系,确定 5 个一级指标 17 个二级指标。同时运用网络层次分析法对相关风险指标进行量化研究。在此基础上确定了各风险因素指标的权重比例。结论如下:

(1) 盾构隧道管片渗漏水 ANP 风险评价模型符合实际,通过将各风险因素指标定量化,得出了各风险因素对管片渗漏水的影响程度。

(2) 一级指标中人员是管片渗漏水的最主要影响因素。二级指标中止水带的状态在一级指标比例不占优的情况下仍排名前列,是施工中值得关注的问题。

(3) 此评价体系具有现实意义,一方面从整体性的角度分析了沙口路区间盾构管片渗漏水出现的原因,另一方面对其管片渗漏水的防护措施和管片渗漏水的综合治理提供了参考。

### 参考文献:

- [1] 代显奇,王 军,李占先,等. 盾构隧道渗漏水病害成因与防治现状 [J]. 人民长江,2022,53(11):186-192.
- [2] 李 岳. 超大直径越江盾构隧道管片错台及渗漏影响研究 [J]. 现代隧道技术,2018,55(4):42-46.
- [3] 陈 君. 地铁盾构隧道结构安全评估方法研究 [J]. 城市轨道交通研究,2021,24(S1):52-56.
- [4] 杨春山. 运营地铁盾构隧道衬砌结构安全评估体系研究 [D]. 广州:广东工业大学,2012.
- [5] 王密田. 运营期隧道病害风险评估及预警系统开发

[D]. 徐州:中国矿业大学,2021.

- [6] Li Xiaojun, Lin Xiaodong, Zhu Hehua, et al. Condition assessment of shield tunnel using a new indicator: The tunnel serviceability index [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2017,67:98-106.
- [7] 吴怀娜,沈水龙,马宇宏,等. 上海越江隧道渗漏现状调查与分析 [J]. 地下空间与工程学报,2013,9(3):663-668.
- [8] 张文静. 盾构隧道运营期渗漏水风险评价与管理 [D]. 武汉:华中科技大学,2019.
- [9] 李翔宇,李新源,李明宇,等. 地铁盾构隧道渗漏水的产生原因及分布规律 [J]. 建筑科学,2020,36(S1):233-238.
- [10] 刘德军,仲 飞,黄宏伟,等. 运营隧道衬砌病害诊治的现状与发展 [J]. 中国公路学报,2021,34(11):178-199.
- [11] 张冬梅,冉龙洲,闫静雅,等. 注浆对盾构隧道渗漏引起的孔隙水压力变化的影响 [J]. 岩土力学,2017,38(12):3427-3435,3444.
- [12] 袁云辉,高 永. 盾构隧道收敛与病害特征及性能相关性研究 [J]. 地下空间与工程学报,2023,19(1):319-325.
- [13] 刘 印,江明明. 盾构隧道接头渗水对其变形及内力的长期影响 [J]. 人民长江,2017,48(21):96-102.
- [14] 孙智慧,唐 勇,刘 涛. 盾构隧道局部渗漏水对其力学特性的影响 [J]. 现代隧道技术,2021,58(4):141-149.
- [15] 邵 华,王 蓉. 上海地铁盾构隧道病害影响因素及特征分析 [J]. 现代隧道技术,2018,55(S2):922-929.
- [16] Saaty T L. Fundamentals of the analytic network process-dependence and feedback in decision-making with a single network [J]. Journal of Systems Science and Systems Engineering, 2004,13:129-157.
- [17] 林盼达,张冬梅,闫静雅. 运营盾构隧道结构安全评估方法研究 [J]. 隧道建设,2015,35(S2):43-49.
- [18] 潘海洋,黄远春,曹江英. 隧道渗漏水病害等级评价体系研究 [J]. 铁道工程学报,2010,27(1):63-67.
- [19] 吴贤国,王 雷,王俊红,等. 基于云模型 TOPSIS 的盾构隧道渗漏水治理方案评价优选研究 [J]. 信阳师范学院学报(自然科学版),2021,34(2):316-323.