



引文格式: 钟宏伟, 秦鹏飞, 卢再光, 等. 富水砂土隧道注浆加固效果评价研究: 以郑州地铁 7 号线砂土隧道为例[J]. 西北地质, 2025, 58(1): 315-322. DOI: 10.12401/j.nwg.2023172

Citation: ZHONG Hongwei, QIN Pengfei, LU Zaiguang, et al. Evaluation on Grouting Reinforcement Effect of Water-rich Sand Tunnel: Take the Sandy Tunnel of Zhengzhou Metro Line 7 as An Example[J]. Northwestern Geology, 2025, 58(1): 315-322. DOI: 10.12401/j.nwg.2023172

富水砂土隧道注浆加固效果评价研究: 以郑州地铁 7 号线砂土隧道为例

钟宏伟¹, 秦鹏飞^{2,3,*}, 卢再光¹, 张颖²

(1. 郑州铁路职业技术学院铁道工程学院, 河南 郑州 450010; 2. 黄河科技学院工学部, 河南 郑州 451000; 3. 重庆交通大学水利水运工程教育部重点实验室, 重庆 400074)

摘要: 在地质环境日趋复杂和恶劣的工程背景下, 注浆加固的质量要求越来越高, 建立科学合理的注浆效果评价体系, 具有重要的理论意义和研究价值。针对注浆量核算法、检查孔分析法、P-Q-t 曲线法及地球物理探测法等工程中应用较广泛的注浆效果检测方法, 通过抽取一、二级影响因素确立层次评价体系, 并结合专家意见与实际工况构建了注浆效果评价数学模型。然后基于模糊数学的基本原理, 将权向量作为评价因素的权重进行量化, 通过矩阵运算实现了模糊现象的数学表达, 完成了砂土隧道注浆效果的准确评价。最后结合郑州地铁 7 号线砂土隧道, 通过模糊评价综合分析, 认为注浆效果等级达到良好等级(B)。隧道实际开挖期间, 未出现任何形式的水文、地质干扰, 表明评价方法科学高效, 可为其他工程施工提供指导或参考。

关键词: 隧道注浆; 检查孔分析; 地球物理探测; 模糊理论; 效果评价

中图分类号: P642.2

文献标志码: A

文章编号: 1009-6248(2025)01-0315-08

Evaluation on Grouting Reinforcement Effect of Water-rich Sand Tunnel: Take the Sandy Tunnel of Zhengzhou Metro Line 7 as An Example

ZHONG Hongwei¹, QIN Pengfei^{2,3,*}, LU Zaiguang¹, ZHANG Ying²

(1. School of Railway Engineering, Zhengzhou University of Railway Vocational Technology, Zhengzhou 450010, Henan, China; 2. Department of Engineering, Huanghe University of Science and Technology, Zhengzhou 451000, Henan, China; 3. Key Laboratory of Hydraulic and Waterway Engineering of the Ministry of Education, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China)

Abstract: In the increasingly complex and harsh geological environment, the quality requirements of grouting reinforcement are getting higher and higher. It is of great theoretical significance and research value to establish a scientific and reasonable grouting effect evaluation system. Aiming at the grouting effect detection methods

收稿日期: 2023-01-10; 修回日期: 2023-08-26; 责任编辑: 贾晓丹

基金项目: 重庆交通大学水利水运工程教育部重点实验室开放基金(SLK2023B07), 河南省高等学校重点科研项目“砂砾地层水泥注浆浆液扩散规律与加固机理研究”(24A560011), 河南省水利厅科技攻关项目(GG 202345), 黄河科技学院博士科研启动基金项目(02032695)联合资助。

作者简介: 钟宏伟(1977-), 男, 硕士, 讲师, 从事工程地质方面的研究。E-mail: 735036835@qq.com。

* 通讯作者: 秦鹏飞(1984-), 男, 博士, 副教授, 从事注浆技术方面的研究。E-mail: 929163723@qq.com。

widely used in projects such as grouting amount accounting method, inspection hole analysis method, P-Q-t curve method and geophysical detection method, the hierarchical evaluation system is established by extracting the primary and secondary influencing factors, and the mathematical model for grouting effect evaluation is built based on expert opinions and actual working conditions; Then, based on the basic principle of fuzzy mathematics, the weight vector is quantified as the weight of evaluation factors, and the mathematical expression of fuzzy phenomenon is realized through matrix operation, so as to complete the accurate evaluation of grouting effect in sandy soil tunnels; Finally, combined with the sand tunnel of Zhengzhou Metro Line 7, through the comprehensive analysis of fuzzy evaluation, it is considered that the grouting effect grade is good. During the actual excavation of the tunnel, there is no hydrological and geological interference in any form, which indicates that the evaluation method is scientific and efficient and can provide guidance or reference for other engineering construction.

Keywords: geotechnical grouting; inspection hole analysis; geophysical exploration; fuzzy theory; impact assessment

注浆压力作用下产生的渗透-压密-劈裂效应,可有效提升岩土介质薄弱区域的强度和整体稳定性,保证工程安全和正常运营。注浆工程属于隐蔽工程,注浆效果的准确评价关系着工程的长期服役性能和经济效益(Park, 2018; 张庆松等, 2018)。在地质环境日趋复杂和恶劣的工程背景下,注浆加固的质量要求越来越高,建立科学合理的注浆效果评价体系,具有重要的理论意义和研究价值。

李术才等(2019)运用 TSP 物探法、注浆压力-流量-时间(P-Q-t)法、检查孔法及数字摄像法,对青岛胶州湾海底隧道注浆效果进行了综合检验。Lu 等(2020)推导了富水砂岩波速-渗透率理论模型,基于 Wyllie-Clemenceau 波速-孔隙率公式及 Kozeny-Carman 渗透方程,建立了富水砂岩注浆效果定量评价体系。Ballesteros 等(2021)运用灰色关联度分析法(GRA)和层次分析法(AHP),结合模糊数学基本原理对软土隧道注浆效果进行了评价分析。Yan 等(2023)提出了基于模糊综合评价法的注浆效果评价模型,实现了岩溶帷幕注浆效果多层次、多维度的综合评价。

上述研究大多是基于现场经验或物探检测结果,对注浆效果作出初步和直观的评价,定量深入分析则略显不足,且没有形成具有指导性的统一标准。为此笔者结合郑州地铁7号线隧道建设项目,针对其注浆加固效果进行深刻分析评价。首先通过抽取一级、二级评价指标确立层次评价体系,并结合专家意见与实际工况构建注浆效果评价数学模型,然后基于模糊数学的基本原理,将权向量作为评价因素的权重进行量化,通过矩阵运算实现了模糊现象的数学表达,完成

了砂土隧道注浆效果的准确评价,对注浆效果评价从半经验化向定量化转变起到了推动作用,研究成果具有一定的工程实用价值。

1 郑州地铁砂土隧道

以郑州地铁工程项目建设为依托,针对砂土隧道不良地质注浆加固效果,建立系统、科学的评价方法。郑州地铁7号线陈砦-白庙站为更新世含黏土砂砾层,地质环境复杂,地下水赋存丰富。砂粒为石英质中粗砂,结构松散,静力触探锥尖阻力 $q_c=5.93$ MPa,标贯击数平均值为 9.4 击;砾石粒径不均一,分布范围约为 2.91~14.42 cm,外观呈次圆-浑圆状。地下水以架空空隙和粒间间隙为赋存空间和运移通道,水流渗透速度快,侵蚀性强(图1)。



图1 开挖、治理中的砂土隧道照片

Fig. 1 Picture of sand tunnel under excavation and treatment

2022年3月隧道左侧拱壁发生涌水、溃砂,导致隧道结构局部坍塌。为提高隧道洞室稳定性,保证后

期施工顺利进行,现场采用水泥、水泥-水玻璃浆液,进行软弱区域注浆加固治理。注浆加固总长度 1 139 m,帷幕圈厚度 2.6 m。注浆作业结束后,采用压力-注浆量-时间(P-Q-t)法、检查孔法、数字钻孔摄像技术分析,及地球物理探测法对加固效果进行了评价。

2 模糊评价体系构建

2.1 评价因素比选

富水砂层等不良地质的注浆加固与改良处理,是多因素综合作用、交互影响的复杂系统工程,注浆效果的评价应从多方位、多层次着手,才能取得科学、客观和准确的结果(程少振等, 2019; 贾杰等, 2023)。笔者将注浆加固效果归纳为 A、B、C、D 4 个等级, A 等级表明注浆作业实现预期目的,完全满足工程建设和运维的需要, D 等级则表明注浆设计方案存在缺陷,未能起到必要的防渗加固效果。A→B→C→D 等级变化过程中,注浆效果依次变差。

目前 P-Q-t 曲线法、物探检测法、注浆量核算法和检查孔分析法,在注浆效果评定方面应用较为普及,笔者将这 4 种方法定为一级指标;从一级指标中抽取关键因素形成二级指标,由此构建注浆效果评价的分级体系。P-Q-t 曲线法的关键因素为注浆过程中的 P-t、Q-t 曲线,物探检测法为时间域电磁法(TEM)和地质雷达法数据特征,注浆量核算法为注浆总量及浆液充填量与地质结构的契合度,检查孔分析法则为渗水量和芯样采取率。

2.2 模糊评价权重

本研究综合采用 P-Q-t 曲线法、物探检测法、注浆量核算法和检查孔分析法,对注浆效果进行评定。由于评价所考虑的因素多且类型复杂,传统处理方法很难取得满意的结果,为此采用模糊数学的方法来进行系统分析。模糊理论的基本思想是,对大规模、复杂不确定性现象进行子集划分、隶属判别,利用精确的数学手段实现其恰如其分的处理(钟登华等, 2017; Xin et al, 2020)。

在充分考虑专家意见及注浆效果各影响因素层次的基础上,模糊评价体系所建立的判断矩阵为:

$$J = \begin{bmatrix} 1 & \cdots & m_{1j} \\ \vdots & 1 & \vdots \\ m_{i1} & \cdots & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

采用逐项求和的方法对模糊矩阵进行归一化处理,继而对其处理后的各行要素求取算术平均值:

$$z_i = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n J(m_{ij}) (i = 1, 2, 3) \quad (2)$$

结合矩阵运算和特征空间理论,可得与最大特征值相应的权向量为:

$$U = (z_1, z_2, \dots, z_n)^T \quad (3)$$

2.3 准确性校验

为提高评价体系的准确性,可采用一致性指标 IU 对分析过程进行控制:

$$IU = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1} \quad (4)$$

$$\lambda_{\max} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n J(m_{ij}) z_i \quad (5)$$

式中: IU 为模糊判断矩阵一致性评价指标; λ_{\max} 为一致性判断矩阵的最大特征根。由于专家意见的主观性和影响因素的离散性, IU 指标有时不足以表征判断矩阵的一致性,为此可增加一项指标对 IU 值进行校正(陈湘生等, 2020):

$$CU = \frac{IU}{IA} \quad (6)$$

式中: CU 为修正后的一致性指标; IA 为平均随机一致性指标。当 $CU \leq 0.1$ 时认为判断矩阵通过一致性检验,反之则需要反复调整直至符合要求(王学平等, 2010)。

3 层次分析评价

郑州地铁 7 号线富水砂土隧道地质环境恶劣,注浆加固过程中联合使用了纯水泥浆、水泥-水玻璃双液浆及 CW 环氧树脂等多种材料。与加固材料和工艺相适应,注浆机械采用的是 BW150 型活塞式注浆泵、3ZBQS12/10 型煤矿用气动双液注浆泵等新型设备。水泥浆液现场配置,水灰比由 1.5 : 1 至 0.6 : 1 逐级变浓,密度大致为 1.29~1.74 g/cm³。水泥-水玻璃双液浆体积比设计为 3 : 1~5 : 1,水玻璃浆液浓度为 36~43 Be。CW 环氧树脂采用初始黏度 6~20 mPa·s、密度 1.02~1.06 g/cm³ 的高性能环保材料。

3.1 P-Q-t 曲线法

P-Q-t 曲线法通过对自动监测设备,所记录注浆压力 P、注浆速度 Q 等参数的分析,实现注浆加固效果的评判。P-Q-t 曲线法不需现场开挖,具有简洁、智能、高效的优势。

注浆作业中采用LJ型三参数记录仪,对注浆参量P、Q及t进行追踪,根据采集到的数据绘制P-t、Q-t曲线,客观评价注浆加固效果。

(1)P-Q-t曲线分析。A5、A35钻孔P-t、Q-t曲线变化趋势见图2、图3,从图中可以看出,注浆压力P随时间t呈上升趋势,注浆速率Q随时间t呈增减波动趋势。分析原因是由于注浆初期压力起升较慢,浆液以渗透方式扩散,浆液充填了砂土结构中的不密实区域。15 min后浆液转向砂土的粒间孔隙扩散,注浆速率逐步下降,浆液积聚导致扩散通道上的压力升高,砂层内部产生轻微劈裂破坏。

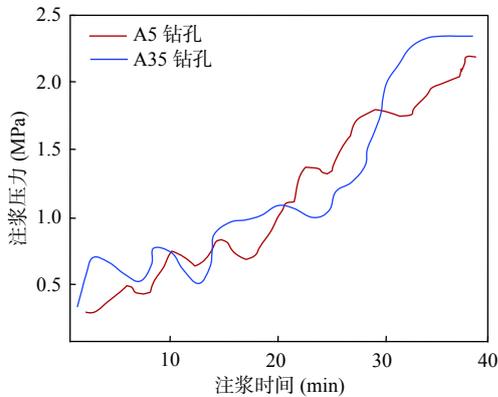


图2 P-t 曲线特征

Fig. 2 P-t curve characteristics

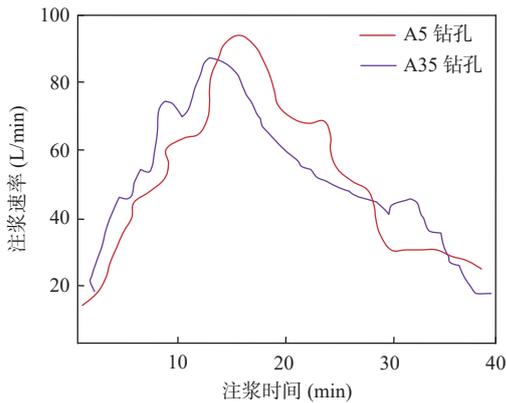


图3 Q-t 曲线特征

Fig. 3 Q-t curve characteristics

(2)P-Q-t权重。注浆压力决定着浆液的扩散形态和结石体的宏观结构,因而是注浆效果评价中的关键因素。相较于Q-t曲线,P-t曲线及其变化特征更具有实际工程意义。将 a_{12} 权重设定为5,得其判断矩阵

$$G_1 = \begin{bmatrix} 1 & 5 \\ 1/5 & 1 \end{bmatrix} \quad (7)$$

根据式(2)、(3),可得权向量:

$$U_1 = (0.83, 0.17) \quad (8)$$

3.2 地球物理探测法

针对富水砂土隧道的构造特点,采用地质雷达法、瞬变电磁法对注浆加固后的地质体进行探测。通过分析电磁波、感应电流的变化,推测注浆加固体的物理形态,进而评价加固效果(图4、图5)。



图4 Zond 地质雷达现场探测

Fig. 4 Zond detecting system

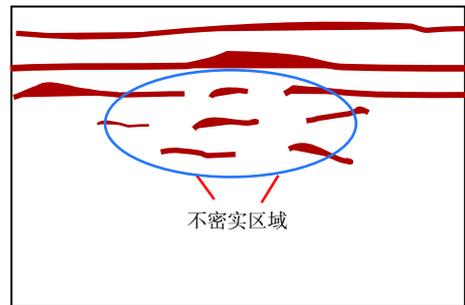


图5 雷达探测结果分析

Fig. 5 Analysis of radar detection results

(1)地质雷达法。使用Zond探地雷达,对隧道核心区段电阻率、介电常数等性能参数进行了检测。分析DK18+136-138拱圈、侧壁雷达反射波与透射波波形,发现浆液在隧道结构内分布均匀、连续,隧道结构坚固、完整。仅DK18+137局部区域信号异常,存在不密实部位,地质雷达探测结果与P-Q-t法推测结果基本一致。

(2)TEM法。使用YCS200瞬变电磁仪对注浆区段防水性能进行检测,结合相关资料对探测结果进行了合理解译。根据电磁感应的强弱和一维反演,推测注浆加固区段电阻率呈较高态势,表明注浆帷幕起到了良好止水效果,地下水向反方向迁移。

(3)物探法权重。地质雷达携带方便,现场测试

较瞬变电磁法受外界干扰小,分析结果更加真实可信,因此将 a_{12} 的权重定为 2。

$$G_2 = \begin{bmatrix} 1 & 2 \\ 1/2 & 1 \end{bmatrix} \quad (9)$$

根据式(2)、(3),可得权向量:

$$U_2 = (0.67, 0.33) \quad (10)$$

3.3 注浆量核算

综合考虑工程地质、水文地质条件及长期运营耐久性要求,本工程注浆帷幕厚度设计为 2.6 m,注浆压力 1.6~2.2 MPa。注浆孔排距 1.6 m,一次成孔,分序灌注(图 6)。注浆管分段长度 2 m,管口与注浆泵使用高压胶管连接。根据注浆总量及浆液充填量与地质构造的契合性,对注浆加固区实际效果进行整体评价。

(1)注浆总量分析。注浆设计方案中水泥用量为 9.6 t,而实际施工中水泥消耗量达到了 11.8 t,比原计划超出 22.9%。分析原因是砂砾石地层存在架空结构,松散结构的卵砾石层吸收了部分水泥、水玻璃浆液,使得注浆总量增加。

(2)浆液充填量与地质构造的契合度分析。由于砂土结构的天然复杂性和自然变异性,隧道断面岩性成分改变较大,浆液充填量明显受地质构造影响,注浆量区域分布呈现较大的离散性。左侧拱及穹顶为稳定地质结构,浆液充填量偏少,右侧拱土质成分复杂,注浆量较其他区域显著偏多。部分钻孔注浆量(m^3)见表 1。

(3)注浆量权重。根据专家经验及富水砂土隧道灾害治理的特征,认为注浆总量相较于浆液充填量与地质构造的契合度作用更加突出,是衡量注浆效果的显著因素,因而将 m_{12} 的权重定为 3。由此构建的注浆量分析法判断矩阵为:

$$G_3 = \begin{bmatrix} 1 & 3 \\ 1/3 & 1 \end{bmatrix} \quad (11)$$

根据模糊判断矩阵归一化处理方法及线性代数运算准则,可得最大特征值相应的权向量为(Wu et al, 2020; Yan et al, 2020):

$$U_3 = (0.75, 0.25) \quad (12)$$

3.4 检查孔分析

通过施打检查孔可直观察看结石体胶结质量,准确计算渗漏涌水量,检查孔布置遵循“均匀连续、适度加密”的准则,力求全面、准确反映砂土隧道的加固质量。现场检测时共施打孔位 17 处,占总设计注浆孔数量的 10%,基本覆盖隧道不良地质区域。

(1)取心率。对隧道结构控制性部位和成分变化性大的区域,进行取心率法以检测注浆效果。实测表明注浆加固后砂土心样采取率平均可达 80%,局部地质区段达 90%~93%。心样外观连续完整,仅部分发生折断、残损。浆液充填不饱满的区段主要为粉细砂,注浆压力衰减在此不足以有效注入。宏观而论,砂土物理力学性状整体得到了显著改善。

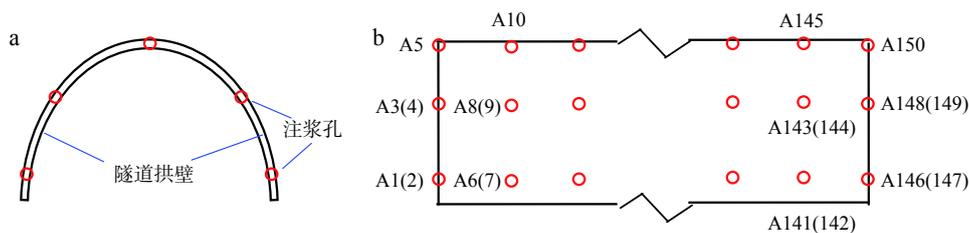


图 6 注浆孔横剖面布置(a)和纵剖面布置图(b)

Fig. 6 (a) Cross section layout of grouting holes and (b) Vertical section layout

表 1 单孔注浆量统计(m^3)

Tab. 1 Single hole grouting quantity statistics(m^3)

A1-A5	A6-A10	A31-A35	A36-A40	A66-A70	A91-A95	A96-A100	A115-A120	A135-A140	A135-A140
27.4	25.9	41.1	39.1	29.9	30.9	29.1	27.4	28.4	27.9
31.7	33.7	35.7	37.7	34.8	35.4	34.8	33.3	33.8	30.3
37.6	28.4	35.2	27.9	40.1	39.1	40.3	29.1	41.2	29.3
35.7	33.1	36.1	33.1	32.8	34.4	30.8	37.8	30.7	30.8
35.7	37.9	34.8	35.8	38.1	37.1	39.1	31.1	34.6	38.5

(2)涌水量分析。隧址区地下水丰富,帷幕注浆钻孔施打期间,地下水急速涌出,水泥-水玻璃浆液被冲释。注浆作业单位及时调整浆液浓度、配比,提高浆液抗冲释能力,逐步实现了不良区域封堵、加固治理。探孔检测时发现,部分孔位涌水量大幅减少,涌水位置向深部转移,注浆封堵、加固取得明显效果。

以 D3 和 D12 注浆检查孔为例进行对比分析, D3 钻孔在水文地质勘察期间实测涌水量为 $64 \text{ m}^3/\text{h}$, 注浆治理后涌水量降低为 $0.2 \text{ m}^3/\text{h}$; D12 钻孔勘察时实测涌水量为 $22 \text{ m}^3/\text{h}$, 注浆治理后涌水量降低为 $0.1 \text{ m}^3/\text{h}$ 。注浆封堵率平均达到 95% 左右, 实现了预期治理效果。检查孔涌水量统计分析见表 2。

表 2 检查孔涌水量统计分析

Tab. 2 Statistical analysis of water inflow from inspection hole

号别	孔位深度 (m)	单点涌水量 (m^3/h)	平均涌水量 ($\text{L}/(\text{min}\cdot\text{m})$)	号别	孔位深度 (m)	单点涌水量 (m^3/h)	平均涌水量 ($\text{L}/(\text{min}\cdot\text{m})$)
D1	26	1.10	0.90	D11	27	0.90	0.30
D3	25	0.20	0.08	D13	25	0.10	0.02
D5	27	0	0	D15	26	0	0
D9	28	0.80	0.10	D17	27	0	0

(3)检查孔权重。涌水量接近于 0 的探查孔数量越多,表明注浆结石体的完整性越好。涌水量比取心率权重高,将其设为 4,得判断矩阵:

$$G_4 = \begin{bmatrix} 1 & 4 \\ 1/4 & 1 \end{bmatrix} \quad (13)$$

权向量经线性运算为:

$$U_4 = (0.8, 0.2) \quad (14)$$

4 基于模糊理论的分级综合评价

基于模糊理论的综合评价法消除了单一评价方法的不足,具有结果清晰、系统性强的特点,非常适宜于复杂不确定性问题的分析处理(Shi et al, 2016; Feng et

al, 2018)。前述 4 种评价方法的重要程度依次为:注浆量核算法、检查孔分析法、P-Q-t 曲线法、物探检测法。模糊综合评价判断矩阵为:

$$J = \begin{bmatrix} 1 & 2 & 5 & 7 \\ 1/2 & 1 & 4 & 6 \\ 1/5 & 1/4 & 1 & 3 \\ 1/7 & 1/6 & 1/3 & 1 \end{bmatrix} \quad (15)$$

相应的权向量为 $U = (0.51, 0.33, 0.11, 0.05)$, 一致性检验符合要求。

4.1 注浆效果评价矩阵

依据模糊综合评价基本原理,针对 4 种评价方法的二级指标,建立单因素评价矩阵 V_{Ai} (表 3),进行一级综合评价。因素权重按 A、B、C、D 顺序逐级赋值(李培楠等, 2020)。

表 3 单因素模糊评价矩阵

Tab. 3 Single factor fuzzy evaluation matrix

评价指标	因素权重(A/B/C/D)				评价指标	因素权重(A/B/C/D)			
总注浆量	0.25	0.50	0.15	0.10	P-t 特征	0.50	0.25	0.15	0.10
地层契合度	0.20	0.60	0.15	0.05	Q-t 特征	0.35	0.25	0.30	0.10
涌水量	0.10	0.50	0.30	0.10	地质雷达法	0.30	0.20	0.40	0.10
取心率	0.15	0.45	0.30	0.10	TEM 法	0.05	0.35	0.50	0.10

将指标权重向量 U 与单因素评价矩阵 V_{Ai} 相乘,可以得出各模糊评价集的隶属向量,进而可逐级对注浆效果作出准确、客观的评价。隶属向量计算方法为(魏久传等, 2019):

$$V_1 = U_3 \times V_{A1} = (0.75 \quad 0.25) \cdot \begin{bmatrix} 0.25 & 0.50 & 0.15 & 0.10 \\ 0.20 & 0.60 & 0.15 & 0.05 \end{bmatrix} = (0.24, 0.53, 0.15, 0.07) \quad (16)$$

同理,其他隶属向量可依次计算求得: $V_2 = (0.11, 0.49, 0.30, 0.10)$; $V_3 = (0.47, 0.25, 0.18, 0.10)$; $V_4 = (0.22, 0.25, 0.43, 0.10)$ 。将隶属向量组合、整理,构成二级指标评价的模糊矩阵,然后将其与相应的权向量相乘,得到二级综合模糊评价结果(张连震等, 2018)。

$$V = U \times R' = (0.51, 0.33, 0.11, 0.05) \cdot \begin{bmatrix} 0.24 & 0.53 & 0.15 & 0.07 \\ 0.11 & 0.49 & 0.30 & 0.10 \\ 0.47 & 0.25 & 0.18 & 0.10 \\ 0.22 & 0.25 & 0.43 & 0.10 \end{bmatrix} = (0.22, 0.47, 0.22, 0.08) \quad (17)$$

4.2 评价结果定量分析

利用模糊矩阵单值化方法对注效果进行定量分析,以确定注浆结果的具体等级。将 A、B、C、D 4 个等级赋予数值,分别为 $c_1=0$ 、 $c_2=2$ 、 $c_3=4$ 、 $c_4=6$ 。将其与最终指标评价结果加权平均,可分析出最终效果(邓聚龙等, 2016)。

$$T = \frac{\sum_{i=1}^n v_i c_i}{\sum_{i=1}^n v_i} = (0 \times 0.22 + 2 \times 0.47 + 4 \times 0.22 + 6 \times 0.08) / 12 = 0.19 \quad (18)$$

根据模糊综合评判,并适当参考专家经验,T 值对应 4 个等级(表 4)。分析认为注浆效果评定为 B,隧道开挖中不会出现威胁施工的地质灾害,注浆加固实现了预期目的。

表 4 模糊评价等级划分

Tab. 4 Fuzzy evaluation level

等级	指标取值	工程表现	等级	指标取值	工程表现
A	$0 < T \leq 0.1$	注浆加固完全达到预期设想	C	$0.3 < T \leq 0.6$	需做二次处理以预防工程事故
B	$0.1 < T \leq 0.3$	发生工程事故的可能性很小	D	$0.6 < T \leq 1$	注浆失败,需重新设定预案

5 结论

(1)针对注浆效果评价方法中的一级、二级因素进行综合分析,通过抽取主要评价指标确立层次评价体系,并结合专家意见与实际工况构建了注浆效果评价数学模型。

(2)基于模糊数学的基本原理,将权向量作为评价因素的权重进行量化,通过矩阵运算实现了模糊现象的数学表达,完成了砂土隧道注浆效果的准确评价。

(3)以郑州地铁 7 号线砂土隧道为例,通过模糊评价综合分析,认为注浆效果等级为 B。隧道实际开挖期间,未出现任何形式的水文、地质干扰,表明评价结果真实可信,可为其他工程施工提供指导或参考。

参考文献(References):

陈湘生,付艳斌,吕桂阳,等.基于小孔扩张弹塑性理论的注浆起始劈裂压力研究[J].中国公路学报,2020,33(12):154-163.
CHEN Xiangsheng, FU Yanbin, LV Guiyang, et al. Study on Initial Fracture Pressure of Grouting Based on the Elastic-plastic Theory of Cavity Expansion[J]. China Journal of Highway and Transport, 2020, 33(12): 154-163.

程少振,陈铁林,郭玮卿.土体劈裂注浆过程的数值模拟及浆脉形态影响因素分析[J].岩土工程学报,2019,41(3):1667-1676.
CHENG Shaozhen, CHEN Tielin, GUO Weiqing. Numerical Simulation of Fracture Grouting and Analysis of Influencing Factors of Grout Vein Morphology[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 2019, 41(3): 1667-1676.
邓聚龙.灰色系统基本方法(第5版)[M].武汉:华中科技大学出版社,2016.
DENG Julong. Basic methods of grey system(5th ed.)[M]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology Press, 2016.
贾杰,覃礼貌,于振涛,等.某艰险山区铁路隧道岩溶发育特征及涌突水危险性评价[J].西北地质,2023,56(3):258-267.
JIA Jie, QIN Limao, YU Zhentao, et al. Karst Development Characteristics and Water Inrush Risk Assessment of Railway Tunnel in a Difficult and Dangerous Mountain Area[J]. Northwestern Geology, 2023, 56(3): 258-267.
李培楠,石来,李晓军,等.盾构隧道同步注浆纵环向整体扩散理论模型[J].同济大学学报(自然科学版),2020,48(5):629-637.
LI Peinan, SHI Lai, LI Xiaojun, et al. Theoretical Model of Synchronous Grouting Longitudinal Circumferential Integrated Diffusion of Shield Tunnels[J]. Journal of Tongji University(Natural Science), 2020, 48(5): 629-637.
李术才,薛翊国,苏茂鑫,等.青岛胶州湾海底隧道涌水断层注浆效果综合检验方法研究[J].岩石力学与工程学报,2019,38(7):1382-1388.

- LI Shucui, XUE Yiguo, SU Maoxin, et al. Study of Comprehensive Test Method for Grouting Effect of Water Filling Fault in Qingdao KiaoChow Bay Subsea Tunnel[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2019, 38(7): 1382–1388.
- 王学平, 李稳哲. 地质构造对鄂尔多斯盆地南缘岩溶地下水的控制作用[J]. *西北地质*, 2010, 43(3): 106–112.
- WANG Xueping, LI Wenzhe. Geological Tectonics Control on the Karstic Water in the South Margin of the Ordos Basin[J]. *Northwestern Geology*, 2010, 43(3): 106–112.
- 魏久传, 韩承豪, 张伟杰, 等. 基于步进式算法的裂隙注浆扩散机制研究[J]. *岩土力学*, 2019, 40(3): 913–919.
- WEI Jiuchuan, HAN Chenghao, ZHANG Weijie, et al. Mechanism of fissure grouting based on step-wise calculation method[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2019, 40(3): 913–919.
- 张连震, 张庆松, 刘人太, 等. 基于浆液-岩体耦合效应的微裂隙岩体注浆理论研究[J]. *岩土工程学报*, 2018, 40(11): 2003–2011.
- ZHANG Lianzhen, ZHANG Qingsong, LIU Rentai, et al. Grouting mechanism in fractured rock considering slurry-rock stress coupling effects[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2018, 40(11): 2003–2011.
- 张庆松, 王洪波, 刘人太, 等. 考虑浆液扩散路径的多孔介质渗透注浆机理研究[J]. *岩土工程学报*, 2018, 40(5): 918–924.
- ZHANG Qingsong, WANG Hongbo, LIU Rentai, et al. Infiltration grouting mechanism of porous media considering diffusion paths of grout[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2018, 40(5): 918–924.
- 钟登华, 樊贵超, 任炳昱, 等. 基于分形理论的坝基裂隙岩体注浆灰量与导水率关系研究[J]. *水利学报*, 2017, 48(5): 576–587.
- ZHONG Denghua, FAN Guichao, REN Bingyu, et al. Research on the relationship between cement take and transmissivity of fractured rocks under dam foundation based on fractal theory[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2017, 48(5): 576–587.
- Ballesteros D, Giralt S, Garcia, et al. Quaternary regional evolution based on karst cave geomorphology in Picos de Europa[J]. *Geomorphology*, 2021, 336: 133–151.
- Feng K, He C, Qiu Y, et al. Full-scale tests on bending behavior of segmental joints for large underwater shield tunnels[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2018, 75(2): 100–116.
- Lu Yinlong, He Mengqi, Li Wenshuai, et al. Micromechanical mechanisms of grouting reinforced in rock joints and microstructure optimization of grout-rock bonding interfaces[J]. *Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2020, 39(9): 1808–1818.
- Park D, Oh J. Permeation grouting for remediation of dam cores[J]. *Engineering Geology*, 2018, 233: 63–75.
- Shi C, Cao C, Lei M, et al. Effects of lateral unloading on the mechanical and deformation performance of shield tunnel segment joints[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2016, 51(1): 175–188.
- Wu H, Shen S, Chen R, et al. Three-dimensional numerical modeling on localised leakage in segmental lining of shield tunnels[J]. *Computers and Geotechnics*, 2020, 122: 103549.
- Xin C L, Wang Z Z, Yu J. The evaluation on shock absorption performance of buffer layer around the cross section of tunnel lining[J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2020, 131: 106032.
- Yan Fugen, Zou debing, Min Zhenghui, et al. Effect Analysis of karst curtain grouting based on fuzzy comprehensive evaluation[J]. *Yangtze River Report*, 2023, 54(5): 182–188.
- Yan G, Shen Y, Gao B, et al. Damage evolution of tunnel lining with steel reinforced rubber joints under normal faulting: an experimental and numerical investigation[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2020, 97: 103223.