基于可拓层次分析法的基坑注浆加固效果评价

——以济南地铁9号线荷花路站为例

梁宗高[1]，王晋进[2]，原 葆[3]，唐耀东[1]，温 安[3]，张九州[4]

（1. 中国水利水电第十一工程局有限公司，郑州 450001；2. 济南轨道交通集团建设投资有限公司，济南 250101；
3. 中电建铁路建设投资集团有限公司，北京 100071；4. 中南大学土木工程学院，长沙 410075）

摘要：针对基坑注浆效果评价的模糊性和多指标性问题，提出融合层次分析法与可拓学的综合评价模型，构建5大类18项指标的评价体系。采用区间数判断矩阵和动态关联度计算优化模糊指标权重，通过一致性检验验证权重合理性。结果表明，开挖取样法贡献度最高，其次为检查孔法和分析法。济南荷花路站案例评估综合关联度为0.099 4，对应Ⅱ级风险，证实模型在复杂地质条件下的适用性，可为注浆方案优化与效果评估提供理论依据和实践参考。

关键词：基坑工程；注浆加固；效果评价；可拓层次分析法

中图分类号：U121 **文献标志码：**A **文章编号：**1671－1807(2026)01－0036－08

随着城市化进程的快速推进，深基坑工程在高层建筑、地铁隧道及地下空间开发中扮演着重要角色。然而，受地质条件复杂性、地下水动态变化及施工扰动等因素影响，基坑工程常面临土体强度不足、变形超限及渗透失稳等风险。注浆加固技术作为改善土体力学性能和控制变形的有效手段，被广泛应用于基坑工程的土体改良与灾害防控中。然而，注浆加固效果受浆液配比、注浆工艺、地层条件等多因素耦合影响，其评价过程具有模糊性、动态性和多指标性特征，亟须构建科学合理的综合评价体系[1-6]。

经典的层次分析法（analytic hierarchy process，AHP）将复杂问题按照影响因素分解，通过构建判断矩阵计算各因素权重，适用于多目标决策问题，实现评价目标的定量化分析解决[7]。层次分析法在选择最佳方案方面具有一定的优势，但是也存在许多缺陷，如缺少对专家判断模糊性的考虑以及构造判断矩阵时要求矩阵必须满足一致性等。可拓学是研究事物的可拓性和事物开拓的规律与方法并用以解决矛盾问题的科学[8]。可拓层次分析法借助可拓学理论，在层次分析法的基础上，解决具有区间数的判断矩阵的权重向量，提供了一种新的评价方法。董伟智等[9]采用可拓层次分析法构建沥青混合料路用性能综合评价体系，通过区间数判断矩阵和权重计算实现科学评价。王志杰等[10]用改进可拓法结合层次分析法建立新建隧道双侧近接施工风险评价模型。姜安民等[11]基于层次分析-可拓模型评估公路隧道施工风险，结合权重与可拓理论定级，实例结果与实际情况吻合。杨继华等[12]利用可拓学理论与层次分析法评价地质因素对TBM（tunnel boring machine，隧道掘进机）掘进效率的影响，模型验证与实际掘进参数一致，可为工程选型提供参考。陈晶等[13]结合改进三标度AHP与模糊可拓理论，提出模糊可拓层次分析法评估在役混凝土桥梁耐久性。刘芳平和周建庭[14]采用模糊可拓层次分析法评估大跨径桥梁综合性能，通过可拓区间数判断矩阵和模糊综合评判。张弓亮等[15]结合AHP与可拓理论建立高速公路养护质量动态评价模型。任洋和李天斌[16]通过关联度计算与模糊AHP对比，基于层次分析的可拓学理论预测围岩大变形等级。康志强等[17]应用层次分析法确定可拓学模型中岩体质量评价指标权重。

现以济南地铁9号线荷花路站基坑注浆加固工程为研究对象，创新性地构建了融合层次分析法与可拓学的综合评价模型，通过建立包含5大类18项指标的评价体系，实现了对注浆效果的多维度量化评估。相比传统评价方法，本文具有以下创新性突

收稿日期：2025-05-16

作者简介：梁宗高（1985—），男，河南周口人，高级工程师，研究方向为安全工程；王晋进（1985—），男，陕西城固人，高级工程师，研究方向为土木工程；原葆（1975—），男，山西长治人，高级工程师，研究方向为水利水电建筑；唐耀东（1997—），男，河南新郑人，工程师，研究方向为安全工程；温安（1992—），男，河北保定人，工程师，研究方向为安全技术及工程；张九州（2000—），男，河南安阳人，硕士研究生，研究方向为土木工程。

破：①采用区间数判断矩阵处理专家判断的模糊性，通过动态关联度计算优化了不确定性指标分析；②引入可拓学理论解决判断矩阵一致性问题，通过物元分析实现了风险等级的精准划分；③结合工程实例验证了模型在复杂地质条件下的适用性，与工程实际吻合。研究成果不仅为注浆方案优化提供了权重计算与效果分级的双重理论依据，更通过工程实践，为类似项目提供了可复用的技术路径与决策支持工具。

1　可拓层次分析法理论基础

1.1　层次分析法

层次分析法将复杂问题分解为若干层次和若干因素，在同一层次中将各因素进行比较、判断和计算，得到不同方案的风险水平，从而为方案的选择提供决策依据。

层次分析法的核心步骤是构造判断矩阵，矩阵数值的准确性将影响最终评价的准确性，构造的 n 阶判断矩阵为

$$\boldsymbol{A}=[a_{ij}]_{n\times n}=\begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \cdots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ a_{n1} & a_{n2} & \cdots & a_{m} \end{bmatrix} \tag{1}$$

式中：a_{ij} 为两个指标重要性程度相互比较的判断结果，本文邀请一些具有地铁基坑专业背景的专业人员进行打分，按照 1～9 标度法对指标两两比较，来量化其相对重要性。标度法含义见表 1。

1.2　可拓学

可拓学以矛盾问题的智能化处理为研究内容，采用定性和定量相结合的方法探讨解决矛盾问题。它需要先对各组成要素进行分析，确定待评价对象的物元表达形式：

$$M=(A,C,U) \tag{2}$$

式中：A 为事物对象；C 为事物的特征；U 为事物特征量值。

表 1　1～9 标度法含义

标度	含义
1	i 与 j 重要性等同
3	i 比 j 稍重要
5	i 比 j 明显重要
7	i 比 j 明显强烈重要
9	i 比 j 明显极其重要
2、4、6、8	判断处于上述中间值
倒数($1/a_{ij}$)	j 与 i 的比较结果

通过对分析对象进行物元分析，划分集合 M 为若干子集，并构造它们的经典域物元和节域物元。

1.3　可拓层次分析法的概念与应用路径

工程施工往往受多重因素影响，如何综合多种因素对工程开展相应的施工风险评估，在施工前极为重要。可拓层次分析法借助可拓学理论，在常规的层次分析法基础上，为解决具有区间数的判断矩阵的权重向量，提供了一种新的评价方法。通过可拓层次分析法针对具体工程建立评价模型，进行风险评估，需要根据实际情况构建风险评估体系，借助层次分析法来量化评估体系中各指标的相对重要性，借助可拓学理论对分析对象进行物元分析。基于可拓层次分析法，可以从多角度、多方面评估工程项目施工的风险水平，并采取相应措施降低工程风险。

2　可拓层次评价模型的构建

当影响工程风险的指标因素过多时，想通过各指标的精确权重值分析风险较为困难。通过建立可拓层次风险评价模型，计算各指标与各风险的关联度，再通过整体风险关联度大小来判定评估对象风险状况。可拓层次分析法评价流程如图 1 所示。

2.1　构建评价指标体系

对注浆效果评价的因素较多，选取部分对注浆效果评价较为重要的分析法、检查孔法、开挖取样法、物探法和其他因素 5 大类、18 个主要因素，建立评价指标体系（图 2）[18]。

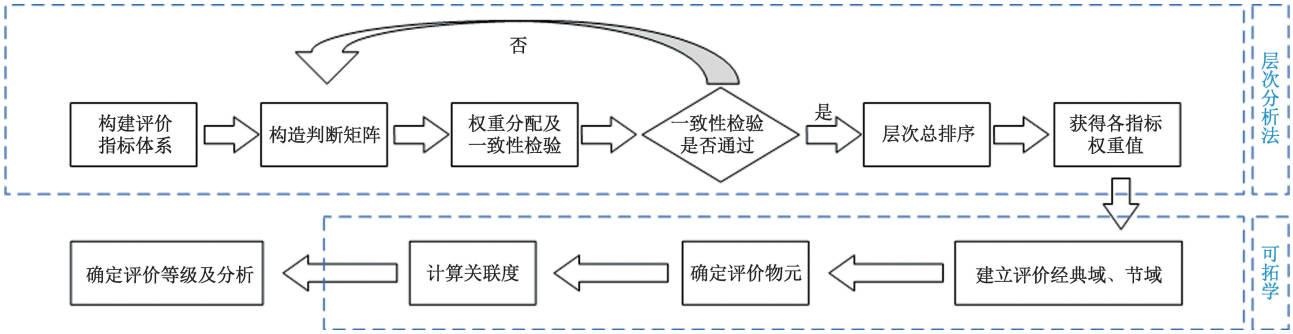


图 1　可拓层次分析法评价流程

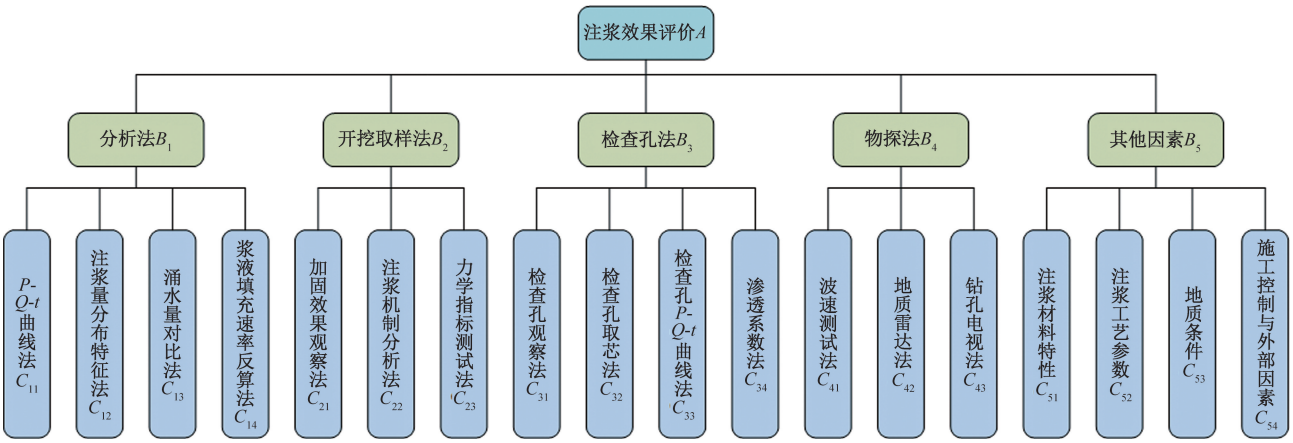


图 2　基坑注浆效果评价评价指标体系

2.2　计算指标权重

按式(1)构造 n 阶判断矩阵，采用几何平均法确定判断矩阵的特征向量，具体步骤如下。

(1)计算判断矩阵每一行的乘积 M_i。

$$M_i = \prod_{j=0}^{n} a_{ij}, \quad i = 1,2,\cdots,n \tag{3}$$

式中：a_{ij} 为两个指标重要性程度相互比较的判断结果，含义见表 1；M_i 为第 i 行所有元素的乘积，反映该行对应指标在所有比较中的综合影响。

(2)计算 M_i 的 n 次方根 $\overline{w}_i$。

$$\overline{w}_i = \sqrt[n]{M_i} \tag{4}$$

式中：$\overline{w}_i$ 为第 i 个指标的未归一化权重，是几何平均数的形式，用于消除极端值的影响，更稳定地反映平均重要性。

(3)对向量 $\overline{\boldsymbol{w}}_i = [\overline{w}_1, \overline{w}_2, \cdots, \overline{w}_n]^{\mathrm{T}}$ 进行归一化处理：

$$w_i = \frac{\overline{w}_i}{\sum_{j=1}^{n} \overline{\boldsymbol{w}}_j} \tag{5}$$

式中：w_i 为第 i 个指标的最终权重。

(4)计算最大特征值：

$$\lambda_{\max} = \sum_{i=1}^{n} \frac{(\boldsymbol{A\omega})_i}{n\boldsymbol{\omega}_i} \tag{6}$$

式中：$\lambda_{\max}$ 为判断矩阵的最大特征值，用于一致性检验；$\boldsymbol{A}$ 为 $n \times n$ 判断矩阵。

(5)计算一致性指标，进行一致性检验。

$$\mathrm{CI} = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1} \tag{7}$$

式中：CI 为一致性指标，反映判断矩阵偏离一致性的程度。当随机一致性比率 $\mathrm{CR} = \frac{\mathrm{CI}}{\mathrm{RI}} < 0.10$ 时，判别矩阵满足一致性检验，如一致性检验不通过，需要调整判别矩阵的元素取值，RI 为平均随机一致性指标。

2.3　计算关联度

通过对分析对象进行物元分析，划分集合 M 为若干子集，并构造它们的经典域和节域。

(1)构建经典域和节域。按照设定的施工风险影响程度等级，将分析对象的风险水平划分为 $p(p=1,2,\cdots,m)$ 种等级，则风险评价分析经典域可表示为式(8)，节域表示为式(9)。

$$\boldsymbol{M}_{A0} = (A, C_{ij}, U_{pij}) = \begin{bmatrix} A & C_{11} & U_{p11} \\ & C_{12} & U_{p12} \\ & \vdots & \vdots \\ & C_{ij} & U_{pij} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_i & C_{11} & \langle a_{p11}, b_{p11} \rangle \\ & C_{12} & \langle a_{p12}, b_{p12} \rangle \\ & \vdots & \vdots \\ & C_{ij} & \langle a_{pij}, b_{pij} \rangle \end{bmatrix} \tag{8}$$

式中：$\boldsymbol{M}_{A0}$ 为系统经典域；$U_{pij} = \langle a_{pij}, b_{pij} \rangle$ 表示事物特征 C_{ij} 对应的风险影响评价指标第 p 级取值范围的极值范围。

$$\boldsymbol{M}_{AP} = (P, C_{ij}, U_{ijp}) = \begin{bmatrix} P & C_{11} & U_{11p} \\ & C_{12} & U_{12p} \\ & \vdots & \vdots \\ & C_{ij} & U_{ijp} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P & C_{11} & \langle a_{11p}, b_{11p} \rangle \\ & C_{12} & \langle a_{12p}, b_{12p} \rangle \\ & \vdots & \vdots \\ & C_{ij} & \langle a_{ijp}, b_{ijp} \rangle \end{bmatrix} \tag{9}$$

式中：$\boldsymbol{M}_{AP}$ 为系统节域；p 为节域风险影响状态分级的全体；$U_{ijp} = \langle a_{ijp}, b_{ijp} \rangle$ 为风险影响评价指标 C_{ij} 对应全体等级总的取值范围。

(2)确定评估对象物元 $\boldsymbol{M}_{AK}$。

$$\boldsymbol{M}_{AK} = (Q, C_{ij}, X_{ij}) = \begin{bmatrix} Q & C_{11} & x_{11} \\ & C_{12} & x_{12} \\ & \vdots & \vdots \\ & C_{ij} & x_{ij} \end{bmatrix} \tag{10}$$

式中：Q 为待评估对象；$X_{ij} = (x_{11}, x_{12}, \cdots, x_{ij})$ 为待评估物元环境影响评价指标实测特征量值。

(3)计算风险影响关联度。据点与有限区间距的定义，按式(11)计算关联函数值。

$$t_{ij}^{p}=\begin{cases}\dfrac{-\rho(x_{ij},U_{pij})}{|U_{pij}|}, & x_{ij}\in U_{pij}\\ \dfrac{\rho(x_{ij},U_{pij})}{\rho(x_{ij},U_{ijp})-\rho(x_{ij},U_{pij})}, & x_{ij}\notin U_{pij}\end{cases} \tag{11}$$

式中：t_{ij}^{p}为待评估风险影响指标C_{ij}相对于第p级风险影响程度的关联度，且有：

$$\rho(x_{ij},U_{pij})=\left|x_{ij}-\frac{1}{2}(a_{pij}+b_{pij})\right|-\frac{1}{2}(b_{pij}-a_{pij}) \tag{12}$$

$$\rho(x_{ij},U_{ijp})=\left|x_{ij}-\frac{1}{2}(a_{ijp}+b_{ijp})\right|-\frac{1}{2}(b_{ijp}-a_{ijp}) \tag{13}$$

$$|U_{pij}|=\left|\frac{b_{pij}-a_{pij}}{2}\right| \tag{14}$$

（4）待评价指标B_i关于第i个风险状态水平的综合关联度。

$$\sigma_i^{p}=\sum_{j=1}^{n}w_{ij}t_{ij}^{p} \tag{15}$$

（5）基坑注浆效果评价程度的确定。

构造关联度向量

$$\sigma_i=(\sigma_i^{1},\sigma_i^{2},\cdots,\sigma_i^{p}) \tag{16}$$

（6）确定风险影响程度。若$\max(\sigma_i^{p})=\sigma_i^{l}$，其中$l=1,2,\cdots,p$，则判定第$i$个待评估对象$B_i$属于第$l$种环境影响程度。

3　工程应用

3.1　工程概况

荷花路站为济南轨道9号线一期工程的第5座车站，车站位于光华大道与卧东路交叉路口，西南侧公园绿地内，沿光华大道东西向敷设。车站为地下两层、11 m岛式站台车站，总长为251.6 m，共设3个出入口，2组风亭，1个安全出入口。车站主体基坑围护结构采用吊脚桩＋锚索与钻孔灌注桩＋内支撑的支护形式，标准段基坑深约19.2 m，小里程端基坑开挖深度约20.99 m，大里程端基坑开挖深度约20.47 m，车站主体围护结构采用1 000 mm/1 200 mm钻孔灌注桩，桩顶设冠梁。站两端区间均为盾构区间，车站小里程端接华山东站，车站大里程段接小清河站。根据工程筹划，本站大小里程端均为盾构接收。荷花路站总平面布置图如图3所示，工程地质纵断面图如图4所示。

场地覆盖层主要由新近人工填土（Q_4^{ml}）及燕山期辉长岩风化带组成，局部分布第四系全新统冲洪积（Q_4^{al+pl}）黏性土组成。各岩土层主要分布情况详述如下。

（1）杂填土。杂色，稍密～湿，在采石坑位置主要以回填岩屑及碎石块为主，局部回填开采遗留的大块辉长岩岩块，块径20～50 cm，充填黏性土，在现状道路上，表层多为路面结构层。场区普遍分布，厚度为1.30～22.40 m，平均9.87 m，层底标高为13.03～33.88 m，平均24.11 m；层底埋深为1.30～22.40 m，平均9.87 m。

（2）素填土。黄褐色，松散，稍湿，以黏性土为主，局部含少量碎石、砖屑、灰渣、植物根系等。主要在场地东南侧人工土坡位置，厚度为0.80～13.00 m，平均6.65 m，层底标高为18.30～39.89 m，平均31.67 m，层底埋深为0.80～15.50 m，平均7.48 m。

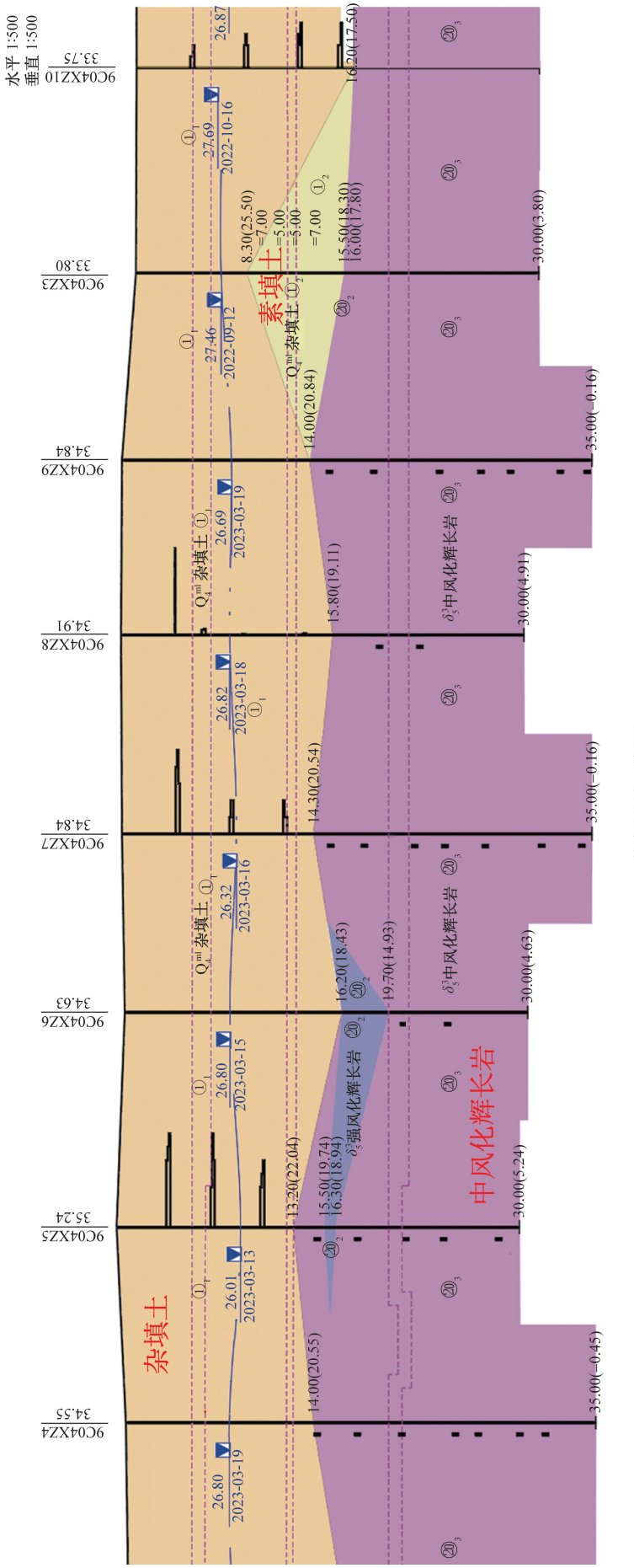
（3）中风化辉长岩。灰绿色，中粗粒结构，块状构造，节理裂隙较发育，见方解石岩脉，岩芯多呈柱状，柱长5～750 cm，最大2.0～2.4 m，锤击声脆，采取率为85%～95%，RQD（岩石质量指标）＝70～85，属于坚硬岩，较完整，岩体基本质量等级为Ⅱ级。场区普遍分布，本层未揭穿，最大揭露深度40.00 m，相应层底标高为－2.98 m。

3.2　现场注浆

采用水泥：水：水玻璃＝1∶1∶0.1比例喷出，喷出后浆液在混合后可以在很短时间内凝固成桩，节约施工时间，避免水泥浆的浪费，节省原材料。并在荷花路站围护桩不均匀覆盖层加固中得到应用，结合其作用原理和机制加快施工进度，确保围护桩成桩质量的有效性，以便为其他同类工程提供借鉴。双液三管高压旋喷桩施工方法示意图如图5所示。



图3　荷花路站总平面布置图



数值为深度，单位为m

图 4 工程地质纵断面图

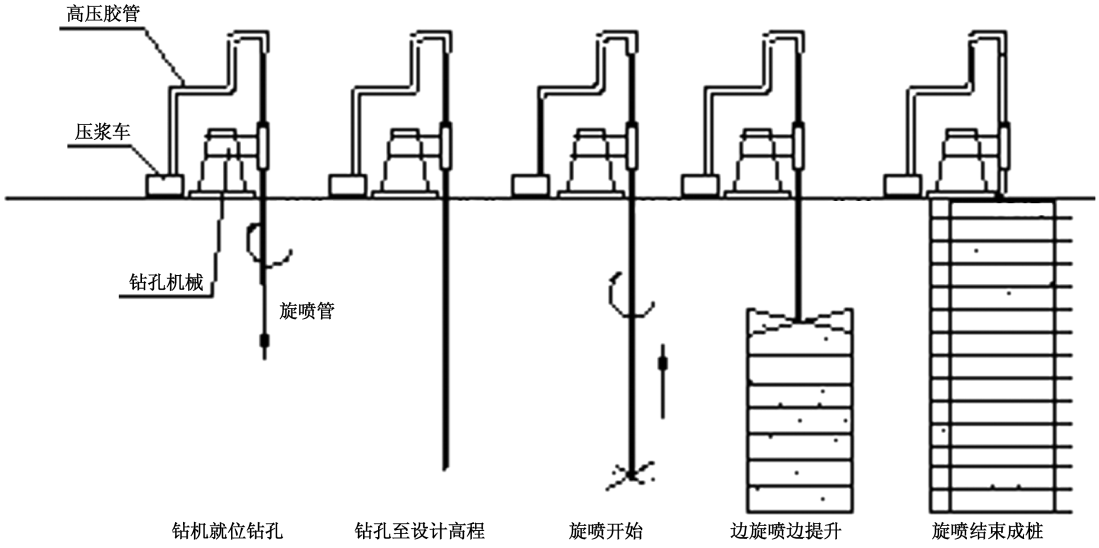


图 5　双液三管高压旋喷桩施工方法示意图

为准确确定旋喷桩加固参数,在车站围护桩前应详尽了解本项目的地形、土体和水文地质状况。按照设计提供的布孔方式采取双液高压旋喷加固技术,成孔质量得到了大大提高,桩身垂直度、桩径桩身质量取得了较好的效果。

3.3　指标权重计算

基于基坑注浆效果评价指标体系,采用 1～9 标度法按层次构造如式(1)所示的判断矩阵,通过式(3)～式(7)计算各指标的权重并进行一致性检验。将目标层 A-B 和准则层 B_1-C、B_2-C、B_3-C、B_4-C、B_5-C 以及 B_6-C 的权重分配分别列于表 2～表 7。

表 2　A-B 判断矩阵及权重分配

A	B_1	B_2	B_3	B_4	B_5	ω_i	一致性检验
B_1	1	0.25	0.5	1	4	0.136 9	
B_2	4	1	2	4	8	0.463 5	$\lambda_{max}=5.059$
B_3	2	0.5	1	2	4	0.231 8	CI=0.015
B_4	1	0.25	0.5	1	2	0.115 9	CR=0.013<0.1
B_5	0.25	0.125	0.25	0.5	1	0.051 9	

表 3　B_1-C 判断矩阵及权重分配

B_1	C_{11}	C_{12}	C_{13}	C_{14}	ω_i	一致性检验
C_{11}	1	2	2	2	0.391 7	$\lambda_{max}=4.061$
C_{12}	0.5	1	0.5	1	0.164 6	CI=0.02
C_{13}	0.5	2	1	2	0.279 2	CR=0.023<0.1
C_{14}	0.5	1	0.5	1	0.164 6	

表 4　B_2-C 判断矩阵及权重分配

B_2	C_{21}	C_{22}	C_{23}	ω_i	一致性检验
C_{21}	1	4	2	0.571 4	$\lambda_{max}=3$
C_{22}	0.25	1	0.5	0.142 9	CI=0
C_{23}	0.5	2	1	0.285 7	CR=0<0.1

表 5　B_3-C 判断矩阵及权重分配

B_3	C_{31}	C_{32}	C_{33}	C_{34}	ω_i	一致性检验
C_{31}	1	0.25	2	4	0.256 6	$\lambda_{max}=4.249$
C_{32}	4	1	2	4	0.480 7	CI=0.83
C_{33}	0.5	0.5	1	2	0.175 2	CR=0.094<0.1
C_{34}	0.25	0.25	0.5	1	0.087 6	

表 6　B_4-C 判断矩阵及权重分配

B_4	C_{41}	C_{42}	C_{43}	ω_i	一致性检验
C_{41}	1	2	0.5	0.311 9	$\lambda_{max}=3.054$
C_{42}	0.5	1	0.5	0.197 6	CI=0.027
C_{43}	2	2	1	0.490 5	CR=0.051<0.1

表 7　B_5-C 判断矩阵及权重分配

B_5	C_{51}	C_{52}	C_{53}	C_{54}	ω_i	一致性检验
C_{51}	1	1	2	4	0.363 6	$\lambda_{max}=4$
C_{52}	1	1	2	4	0.363 6	CI=0
C_{53}	0.5	0.5	1	2	0.181 8	CR=0<0.1
C_{54}	0.25	0.25	0.5	1	0.090 9	

由表 2～表 7 可知,基坑注浆效果评价分析中各层均满足一致性检验要求,之后对各指标进行综合权重计算,自高至低排序,可得到基坑注浆效果评价指标层次总排序,见表 8。

由表 8 可知,基坑注浆效果评价指标中,效果最显著的是开挖取样法,其次是检查孔法、分析法、物探法与其他因素。

建立基坑注浆效果评价等级表,将风险划分为 5 个等级,建立等级域 $U=\{$Ⅰ级,Ⅱ级,Ⅲ级,Ⅳ级,Ⅴ级$\}=\{$轻度,较轻,中度,较重,重度$\}$,等级划分标准见表 9。研究相关文献并结合专家意见,规定各级别计分标准为 91～100、81～90、71～80、61～70、0～60。

邀请一些具有地铁基坑专业背景的专业人员，针对本工程对基坑注浆效果评价指标进行打分，各指标总分为 100 分，分数随着风险程度的减小而增加，取得各专家的评分后，对偏离较大的分值进行修正，再取平均值构建经典域，各指标平均得分见表 10。

表 8　基坑注浆效果评价指标层次排序

总目标	一级指标	一级权重	二级指标	二级权重	综合权重	排序
A	$\boldsymbol{B}_1$	0.136 9	C_{11}	0.391 7	0.053 6	7
			C_{12}	0.164 6	0.022 5	12
			C_{13}	0.279 2	0.038 2	9
			C_{14}	0.164 6	0.022 5	13
	$\boldsymbol{B}_2$	0.463 5	C_{21}	0.571 4	0.264 8	1
			C_{22}	0.142 9	0.066 2	4
			C_{23}	0.285 7	0.132 4	2
	$\boldsymbol{B}_3$	0.231 8	C_{31}	0.256 6	0.059 5	5
			C_{32}	0.480 7	0.111 4	3
			C_{33}	0.175 2	0.040 6	8
			C_{34}	0.087 6	0.020 3	14
	$\boldsymbol{B}_4$	0.115 9	C_{41}	0.311 9	0.036 1	10
			C_{42}	0.197 6	0.022 9	11
			C_{43}	0.490 5	0.056 8	6
	$\boldsymbol{B}_5$	0.051 9	C_{51}	0.363 6	0.018 9	15
			C_{52}	0.363 6	0.018 9	16
			C_{53}	0.181 8	0.009 4	17
			C_{54}	0.090 9	0.004 7	18

表 9　基坑注浆效果评价等级划分标准

等级	划分标准
Ⅰ级	注浆效果优秀，完全满足设计要求
Ⅱ级	注浆效果良好，基本满足设计要求
Ⅲ级	注浆效果一般，需补强处理
Ⅳ级	注浆效果较差，存在显著风险
Ⅴ级	注浆失效，存在重大安全隐患

表 10　基坑注浆效果评价二级指标关联度

一级指标	二级指标	得分
分析法 B_1	*P-Q-t* 曲线法 C_{11}	83
	注浆量分布特征法 C_{12}	91
	涌水量对比法 C_{13}	94
	注浆填充速率反算法 C_{14}	88
开挖取样法 B_2	加固效果观察法 C_{21}	87
	注浆机制分析法 C_{22}	82
	力学指标测试法 C_{23}	92
检查孔法 B_3	检查孔观察法 C_{31}	94
	检查孔取芯法 C_{32}	87
	检查孔 *P-Q-t* 曲线法 C_{33}	87
	渗透系数法 C_{34}	82
物探法 B_4	波速测试法 C_{41}	87
	地质雷达法 C_{42}	79
	钻孔电视法 C_{43}	81
其他因素 B_5	注浆材料特性 C_{51}	89
	注浆工艺参数 C_{52}	83
	地质条件 C_{53}	84
	施工控制与外部因素 C_{54}	88

根据式(11)计算基坑注浆效果评价二级指标关联度，计算结果见表 11。

结合表 11 得到的基坑注浆效果评价指标关联度，根据式(15)计算一级指标及总目标的综合关联度(表 12)，根据式(16)、式(17)确定风险程度评价结果。

由表 12 所示的综合关联度可知，本工程施工风险的总目标最大综合关联度为 0.099 4，属于Ⅱ级，对应评价级别为“注浆效果良好，基本满足设计要求”。

表 11　基坑注浆效果评价二级指标关联度

评估指标	Ⅰ级	Ⅱ级	Ⅲ级	Ⅳ级	Ⅴ级
C_{11}	−0.291 7	0.600 0	−0.150 0	−0.433 3	−0.575 0
C_{12}	0.200 0	−0.100 0	−0.550 0	−0.700 0	−0.775 0
C_{13}	0.800 0	−0.400 0	−0.700 0	−0.800 0	−0.850 0
C_{14}	−0.142 9	0.400 0	−0.400 0	−0.600 0	−0.700 0
C_{21}	−0.187 5	0.600 0	−0.350 0	−0.566 7	−0.675 0
C_{22}	−0.307 7	0.400 0	−0.100 0	−0.400 0	−0.550 0
C_{23}	0.400 0	−0.200 0	−0.600 0	−0.733 3	−0.800 0
C_{31}	0.800 0	−0.400 0	−0.700 0	−0.800 0	−0.850 0
C_{32}	−0.187 5	0.600 0	−0.350 0	−0.566 7	−0.675 0
C_{33}	−0.187 5	0.600 0	−0.350 0	−0.566 7	−0.675 0
C_{34}	−0.307 7	0.400 0	−0.100 0	−0.400 0	−0.550 0
C_{41}	−0.187 5	0.600 0	−0.350 0	−0.566 7	−0.675 0
C_{42}	−0.343 8	−0.045 5	0.200 0	−0.300 0	−0.475 0
C_{43}	−0.321 4	0.200 0	−0.050 0	−0.366 7	−0.525 0
C_{51}	−0.083 3	0.200 0	−0.450 0	−0.633 3	−0.725 0
C_{52}	−0.291 7	0.600 0	−0.150 0	−0.433 3	−0.575 0
C_{53}	−0.272 7	0.800 0	−0.200 0	−0.466 7	−0.600 0
C_{54}	−0.142 9	0.400 0	−0.400 0	−0.600 0	−0.700 0

表 12　基坑注浆效果评价一级指标及总目标的综合关联度

目标层		Ⅰ级	Ⅱ级	Ⅲ级	Ⅳ级	Ⅴ级	级别
B	$\boldsymbol{B}_1$	0.016 2	0.023 6	−0.056 2	−0.083 1	−0.096 6	Ⅱ级
	$\boldsymbol{B}_2$	−0.017 1	0.158 9	−0.178 8	−0.273 7	−0.321 1	Ⅱ级
	$\boldsymbol{B}_3$	0.012 8	0.075 6	−0.096 9	−0.141 9	−0.164 4	Ⅱ级
	$\boldsymbol{B}_4$	−0.032 9	0.032 0	−0.010 9	−0.048 2	−0.065 1	Ⅱ级
	$\boldsymbol{B}_5$	−0.010 3	0.024 5	−0.015 1	−0.027 4	−0.033 5	Ⅱ级
A		−0.007 1	0.099 4	−0.115 1	−0.178 1	−0.209 4	Ⅱ级

4　结论

(1)可拓层次分析模型有效整合了层次分析法(AHP)的权重量化能力与可拓学的矛盾问题处理优势，克服了传统 AHP 对模糊性、动态性指标分析的不足。通过一致性检验(CR＜0.1)验证了权重分配的合理性，表明模型适用于多因素注浆效果的评价。

(2)权重计算表明，基坑注浆效果评价指标中，效果最显著的是开挖取样法，其次是检查孔法、分

析法、物探法与其他因素。

(3)通过济南荷花路站基坑工程应用,总目标关联度最大值为0.099 4,对应风险等级为II级,注浆效果良好,基本满足设计要求。

参考文献

[1] 王晓蕾,姬治岗. 破碎围岩注浆加固效果评价技术研究进展[J]. 科学技术与工程,2020,20(7):2528-2536.

[2] 毛平尧,苏俊鹏. 压密注浆在浅层抛石地基中的应用[J]. 科技和产业,2020,20(8):188-192.

[3] 吴峥,姚黎芳,陈学良,等. 基坑开挖对下卧管线竖向变形影响的数值分析[J]. 科学技术与工程,2021,21(7):2843-2849.

[4] 刘禹,许振翔,李世堂,等. 盾构下穿建筑物变形分析与控制措施:以济南地铁4号线隧道为例[J]. 科技和产业,2024,24(13):271-278.

[5] 李泽玮,王丰年,朱淳,等. 填土介质劈裂注浆加固机理试验及效果评价[J]. 科学技术与工程,2024,24(22):9547-9557.

[6] 王利民,冯志耀. 群洞施工邻近既有线深孔注浆加固范围研究[J]. 科技和产业,2024,24(16):252-257.

[7] 刘豹,许树柏,赵焕臣,等. 层次分析法:规划决策的工具[J]. 系统工程,1984(2):23-30.

[8] 蔡文. 可拓学概述[J]. 系统工程理论与实践,1998(1):77-85.

[9] 董伟智,张爽,朱福. 基于可拓层次分析法的沥青混合料路用性能评价[J]. 吉林大学学报(工学版),2021,51(6):2137-2143.

[10] 王志杰,李振,蒋新政,等. 新建隧道双侧近接既有隧道施工风险评价研究[J]. 铁道工程学报,2020,37(5):47-53.

[11] 姜安民,董彦辰,张晓波. 基于层次分析-可拓模型的公路隧道施工风险评估[J]. 数学的实践与认识,2019,49(11):297-305.

[12] 杨继华,朱韶彬,闫长斌,等. 基于可拓学理论的TBM掘进效率地质影响因素研究[J]. 隧道建设(中英文),2018,38(5):782-789.

[13] 陈晶,鲍学英,赵延龙. 基于模糊可拓层次分析法的在役混凝土桥梁耐久性评估[J]. 安全与环境学报,2015,15(4):16-20.

[14] 刘芳平,周建庭. 基于模糊可拓层次分析法的大跨径桥梁综合评估[J]. 中外公路,2015,35(3):93-99.

[15] 张弓亮,肖平,张荣辉,等. 基于AHP的可拓理论在高速公路养护质量评价中的研究[J]. 数学的实践与认识,2015,45(11):31-38.

[16] 任洋,李天斌. 基于层次分析的可拓学理论围岩大变形预测方法及应用[J]. 现代隧道技术,2011,48(4):6-12,18.

[17] 康志强,冯夏庭,周辉. 基于层次分析法的可拓学理论在地下洞室岩体质量评价中的应用[J]. 岩石力学与工程学报,2006(S2):3687-3693.

[18] 张民庆,张文强,孙国庆. 注浆效果检查评定技术与应用实例[J]. 岩石力学与工程学报,2006(S2):3909-3918.

Evaluation of Grouting Reinforcement Effect of Foundation Pit Based on Expandable Hierarchy Analysis Approach: Hehua Road Station of Jinan Metro Line 9

LIANG Zonggao[1], WANG Jinjin[2], YUAN Bao[3], TANG Yaodong[1], WEN An[3], ZHANG Jiuzhou[4]

(1. Sinohydro Bureau 11 Co.,Ltd., Zhengzhou 450001, China; 2. Jinan Rail Transit Group Construction Investment Co.,Ltd., Jinan 250101, China; 3. PowerChina Railway Construction Investment Group Co.,Ltd., Beijing 100071, China; 4. School of Civil Engineering, Central South University, Changsha 410075, China)

Abstract: Aiming at the fuzzy and multi-indicator problem of pit grouting effect evaluation, a comprehensive evaluation model integrating the hierarchical analysis method and topology is proposed, and an evaluation system with 5 categories and 18 indicators is constructed. The interval number judgment matrix and dynamic correlation calculation were employed to optimize the fuzzy index analysis, and the reasonableness of weights was verified through consistency tests. The results show that the excavation sampling method has the highest contribution, followed by the inspection hole method and the analysis method. The comprehensive correlation degree of 0.0994 in the case evaluation of Jinan Hehua Road Station corresponds to class II risk, which confirms the applicability of the model under complex geological conditions and provides a theoretical basis and practical reference for the optimization and effect evaluation of grouting schemes.

Keywords: foundation pit engineering; grouting reinforcement; effect evaluation; extenics hierarchy analysis method