

铁路工程地质勘察钻孔质量的层次-模糊综合评判

赵晋乾

(中铁第四勘察设计院集团公司,湖北 武汉 430063)

摘要:通过对铁路工程地质勘察钻孔质量评价因素的多层次、多因素研究,建立铁路勘察钻孔质量综合评判指标体系层次模型,运用层次分析法确定每个影响因素的权重,并采用模糊数学基本原理对铁路钻孔质量进行综合评判。在评判模型中,综合考虑影响铁路工程钻探质量的定量、非定量指标,以其成孔条件、钻探记录、原位测试为基本准则层,根据实际现场判断手段确立每个准则下的指标层,将指标层针对评判分级标准转换成隶属度矩阵,利用模糊数学原理综合评判铁路钻孔钻探质量等级。

关键词:铁路工程;地质勘察;钻孔质量;层次分析法;模糊数学;模糊综合评判

中图分类号:U412.22;P634 **文献标识码:**A **文章编号:**1672-7428(2015)01-0080-05

Hierarchy-Fuzzy Comprehensive Evaluation on Drilling Quality of Geological Investigation for Railway Engineering/ZHAO Jin-qian (China Railway SIYUAN Survey and Design Group Co., Ltd., Wuhan Hubei 430063, China)

Abstract: Through the study on multilevel, multivariate in the evaluation on the quality of geological investigation drilling for railway engineering, the comprehensive evaluation index system hierarchical model is established for investigation drilling quality of railway engineering, the weight of each affecting factors is determined by AHP and the drilling quality of railway engineering is judged on the basis of the basic principles fuzzy mathematics. In the evaluation model, the quantitative and non quantitative indexes which affect the drilling operation quality of railway engineering are comprehensively taken into account; taking the hole formation conditions, drilling record, situ measurement as basic criterion layer, based on the situ judgement, each index layer under criterion layer is determined, which is then converted into membership matrix according to evaluation grading standards, the comprehensive evaluation on drilling quality grade for railway engineering is made by fuzzy mathematics principle.

Key words: railway engineering; geological investigation; drilling quality; analytical hierarchy process; fuzzy math; fuzzy comprehensive evaluation

0 引言

在各种勘探技术与手段中,由于钻探可直观、客观地对不同深度的地层岩性、地质构造、地下水发育程度进行揭露,因此,钻探在铁路工程地质勘察中得到广泛应用,为各类型工点设计提供最为直接的、可靠的工程地质资料。钻孔质量的可靠性、准确性直接影响工程设计可靠性。因此客观的、有效的评价钻孔质量尤为重要。

钻孔质量本身是一个多层次、多因素、多目标、多参数的系统工程,因此对钻孔质量评价也应是一个多层次、多指标的复杂系统工程。但是由于勘察阶段、钻孔目的、钻探要求、技术人员的专业技能差异、指标测试方法的不可操作性、以及某些指标本身的非定量化性等原因,使得钻孔质量评价具有层次性、模糊性、随机性。因此本文将在对传统影响钻孔

质量的指标统计分析的基础上,构建合理、科学的钻孔质量分层评价指标体系,采用层次-模糊理论对铁路工程勘察钻孔进行质量评价^[1]。

现在高速铁路、重载铁路对各类型工点的承载力、沉降量要求极为苛刻,相应的对地质勘探的要求也愈来愈严格,构建严格、合理的评价体系尤为重要。

1 模糊-综合评判体系简介

模糊数学的概念为:通过精确的数学方法来处理无法用数字精确描述的模糊概念与事物^[2];综合评判的概念为:综合反映一个系统工程特点,然后将各因素用数学方法进行综合来评价这个事物的状态。模糊综合评判就是通过一定的数学方法来确定每个影响因素的权重值,组成权重矩阵,同时构建隶

属度函数, 求出隶属度矩阵, 将其组合形成评价指标值, 利用指标值来确定评价等级。其特点是评价结果不是一个绝对的数字, 而是以一个模糊集合来表示。这个评判体系适合于对多影响因素、多层次的模糊系统进行综合评价。

模糊 - 层次综合评判, 即以层次分析法 (AHP)^[3] 来确定各影响因素权重的一种模糊综合评判方法。AHP 法是由美国运筹学家 T. L. Saaty 最先提出来的, 此种方法能把复杂系统工程的决策思维与评判体系进行分层, 把决策过程中定性与定量的因素、静态与动态的因素有机地结合起来。它通过把复杂的系统工程分解为不同目标层, 每个目标层都包括几个组成要素, 将这些要素按照支配关系, 分组形成有序的递阶层次结构, 通过两两比较的方式确定层次中诸因素的相对重要性, 然后完成判断矩阵的建立、排序计算与一致性检验等过程^[3]。此方法计算得到的最后结果比较客观、符合实际, 具有一定的说服力; 同时, 可将人的主观性决策依据用数字的形式表达出来, 使之条理化、科学化, 从而可避免由于决策者的主观性导致权重预测与实际情况相矛盾的现象发生, 克服了决策者的个人偏好, 提高了决策的有效性。

2 钻孔质量评判模型的确立

钻探质量评价模型, 将从终孔条件、钻探记录、原位测试 3 个准则考虑; 成孔条件从孔深、孔径、岩心采取率 3 个因素来鉴定钻孔是否达到终孔条件; 钻探记录通过记录的及时性、分层的准确性、岩性描述的准确性 3 个因素来考虑; 原位测试从动探、标贯试验 2 个方面进行评价。本模型由 2 个层次、3 个准则、8 个因素按照树形结构组成, 其结构详见图 1。

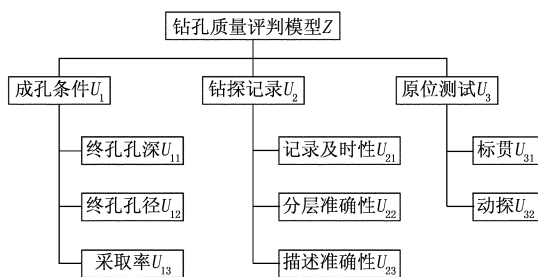


图 1 钻孔质量“三合一”结构质量评价体系

2.1 层次分析法确定权重向量

2.1.1 各指标判断矩阵的建立

根据钻孔质量评价模糊 - 层次结构模型、钻探工程、岩土工程理论, 采用基于层次分析法 (AHP) 确定影响“钻孔质量”的各准则与每个准则下所包括指标之间的相对重要程度, 建立判断矩阵表及相应判断矩阵, 见表 1~4。

表 1 判断矩阵表 Z

钻孔质量 Z	U_1	U_2	U_3
U_1	1	2	4
U_2	1/2	1	2
U_3	1/4	1/2	1

表 2 判断矩阵表 U_1

成孔条件 U_1	U_{11}	U_{12}	U_{13}
U_{11}	1	5	2
U_{12}	1/5	1	1/3
U_{13}	1/2	3	1

表 3 判断矩阵表 U_2

钻探记录 U_2	U_{21}	U_{22}	U_{23}
U_{21}	1	1/5	1/3
U_{22}	5	1	3
U_{23}	3	1/3	1

表 4 判断矩阵表 U_3

原位测试 U_3	U_{31}	U_{32}
U_{31}	1	1
U_{32}	1	1

在每个准则层的基础上, 确立其包含要素相互两两比较结果表, 由以上判断矩阵表 (表 1~4) 得到每一层对上一层判断矩阵, 具体如下。

(1) 准则层对目标层 Z 的判断矩阵 A_Z :

$$A_Z = \begin{bmatrix} 1 & 2 & 4 \\ 1/2 & 1 & 2 \\ 1/4 & 1/2 & 1 \end{bmatrix}$$

(2) 指标层对准则层 U_1 的判断矩阵 A_{U_1} :

$$A_{U_1} = \begin{bmatrix} 1 & 5 & 2 \\ 1/5 & 1 & 1/3 \\ 1/2 & 3 & 1 \end{bmatrix}$$

(3) 指标层对准则层 U_2 的判断矩阵 A_{U_2} :

$$A_{U_2} = \begin{bmatrix} 1 & 1/5 & 1/3 \\ 5 & 1 & 3 \\ 3 & 1/3 & 1 \end{bmatrix}$$

(4) 指标层对准则层 U_3 的判断矩阵 A_{U_3} :

$$A_{U_3} = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & 1 \end{bmatrix}$$

2.1.2 各指标的权重的确定

根据公式 $A_w = \lambda_{\max} w$ 与构造判断矩阵 A , 计算出其最大特征值 $\lambda_{\max}$ 及其对应的特征向量 w , 将特征向量 w 归一化, 得到的向量 w' , 其作为各因素相对于上层准则的相对权重值向量。一般来讲, 在层次分析法中计算最大特征值和特征向量, 并不需要非常高的精度, 用近似计算即可, 一般采用 Matlab 数学计算工具计算。

(1) 判断矩阵 A_Z 的最大特征值 $\lambda_{\max} = 3.0$, 对应的特征向量为:

$$w_Z = [0.8729 \quad 0.4364 \quad 0.2182]^T$$

将向量 w_Z 归一化, 得到准则层对目标层 Z 的权重集为:

$$A_Z = \{a_1, a_2, a_3\} = \{0.571, 0.286, 0.143\}$$

(2) 判断矩阵 A_{U_1} 的最大特征值 $\lambda_{\max} = 3.0037$, 对应的特征向量为:

$$w_{U_1} = [-0.8711 \quad -0.1640 \quad -0.4629]^T$$

将向量 w_{U_1} 归一化, 得到指标层对准则层 U_1 的权重集为:

$$A_{U_1} = \{a_{11}, a_{12}, a_{13}\} = \{0.582, 0.109, 0.309\}$$

(3) 判断矩阵 A_{U_2} 的最大特征值 $\lambda_{\max} = 3.0385$, 对应的特征向量为:

$$w_{U_2} = [0.1506 \quad 0.9161 \quad 0.3715]^T$$

将向量 w_{U_2} 归一化, 得到指标层对准则层 U_2 的权重集为:

$$A_{U_2} = \{a_{21}, a_{22}, a_{23}\} = \{0.105, 0.637, 0.258\}$$

(4) 判断矩阵 A_{U_3} 的最大特征值 $\lambda_{\max} = 2$, 对应的特征向量为:

$$w_{U_3} = [0.7071 \quad 0.7071]^T$$

将向量 w_{U_3} 归一化, 得到指标层对准则层 U_3 的权重集为:

$$A_{U_3} = \{a_{31}, a_{32}\} = \{0.5, 0.5\}$$

为保证每一准则下各个影响要素得到的相对权重合理, 要对判断矩阵 ($n \geq 3$) 进行一致性检验, 以观察其是否具有满意的一致性。否则, 应修改判断矩阵, 直到满足一致性标准为止^[3]。采用 Saaty 推荐公式计算一致性检验指标, 具体如下:

$$CR = CI / RI \tag{1}$$

$$CI = (\lambda_{\max} - n) / (n - 1) \tag{2}$$

式中: $\lambda_{\max}$ ——判断矩阵最大特征值; n ——判断矩阵阶数; RI ——平均随机一致性指标, 其值随着 n 的

变化而变化, 具体取值见表 5。

表 5 RI 与判断矩阵阶数 n 的关系^[5]

n	3	4	5	6	7	8	9	10
RI	0.62	0.89	1.12	1.26	1.36	1.41	1.46	1.49

判断矩阵 A_Z 的一致性比例 $CR = CI / RI = (3 - 3) / 0.62 / 2 = 0 < 0.1$, 满足一致性要求。

判断矩阵 A_{U_1} 的一致性比例 $CR = CI / RI = (3.0037 - 3) / 0.62 / 2 = 0.003 < 0.1$, 满足一致性要求。

判断矩阵 A_{U_2} 的一致性比例 $CR = CI / RI = (3.0385 - 3) / 0.62 / 2 = 0.031 < 0.1$, 满足一致性要求。

根据上节中采用层次分析法计算所得各指标相对于准则层的相对权重以及各准则相对于目标层的相对权重计算结果, 可以计算出各指标相对于目标层的绝对权重如下:

$$A = [a_{11} a_{11}, a_{11} a_{12}, a_{11} a_{13}; a_{21} a_{21}, a_{21} a_{22}, a_{21} a_{23}; a_{31} a_{31}, a_{31} a_{32}] \\ = [0.332, 0.062, 0.176; 0.030, 0.182, 0.074; 0.072, 0.072]$$

2.2 建立铁路勘察钻孔质量评价集

2.2.1 铁路勘察钻孔质量的评价等级

综合考虑铁路勘察钻孔质量评价的要求与目的, 保证质量能够满足其最基本的 3 项准则, 建立 3 个等级进行评价, 即 $m = 3$, 构成评价集为:

$$V = \{v_1, v_2, v_3\} = \{\text{优良}, \text{合格}, \text{不合格}\}$$

钻孔质量各等级对评价因素的具体描述如下。

优良: 钻孔在《铁路工程地质勘察规范》(TB 10012—2007)、《铁路工程地质钻探规程》(TB 10014—2012)、《建筑工程地质勘探与取样技术规程》(JGJT 87—2012) 范围内能正确鉴别岩土名称及其基本性质, 确定其埋藏深度及其厚度, 能标准的采取符合质量要求的岩土试样或进行原位测试, 能很好满足各类型工点设计的所需的地层物理力学参数。

合格: 钻孔在《铁路工程地质勘察规范》(TB 10012—2007)、《铁路工程地质钻探规程》(TB 10014—2012)、《建筑工程地质勘探与取样技术规程》(JGJT 87—2012) 范围内能基本鉴别岩土名称及其基本性质, 确定其埋藏深度及其厚度, 能采取符合质量要求的岩土试样或进行原位测试, 能基本满足各类型工点设计的所需的地层物理力学参数。

不合格:钻孔不能鉴别岩土名称及其基本性质,不能确定其埋藏深度及其厚度,不能采取符合质量要求的岩土试样或进行必要的原位测试,不能满足各类型工点设计的所需的地层物理力学参数。

2.2.2 各项指标相对于评价集中的各个等级定义

参考《铁路工程地质勘察规范》(TB 10012—2007)、《铁路工程地质钻探规程》(TB 10014—2012)、《建筑工程地质勘探与取样技术规程》(JGJT 87—2012),对模糊 - 层次模型指标层中各项指标相对于评价集中的各个等级定义如表 6 所示。

表 6 指标等级定义表^[5-7]

指 标	钻孔质量等级		
	优 良	合 格	不 合 格
终孔孔深	满足设计要求,并一定安全储备	基本满足设计要求	不能满足设计要求
终孔孔径 $\varnothing$	$> 89 \text{ cm}$	$75 \text{ cm} < \varnothing \leq 89 \text{ cm}$	$< 75 \text{ cm}$
岩心采取率	粘性土: $\geq 95\%$ 砂类土: $\geq 80\%$ 碎石类土: $\geq 75\%$ 强风化岩石: $\geq 80\%$ 弱风化岩石: $\geq 90\%$	粘性土: $\geq 90\%$ 砂类土: $\geq 70\%$ 碎石类土: $\geq 65\%$ 强风化岩石: $\geq 65\%$ 弱风化岩石: $\geq 80\%$	粘性土、砂类土、碎石类土、强风化岩石、弱风化岩石中有一类采取不够
记录及时性	记录紧跟每个钻进回次	记录滞后钻进 1~2 个回次	记录滞后钻进 2 个回次(包括 2 个)
分层描述准确性 (t 为地层界线深度偏差值)	$-2 \text{ cm} \leq t \leq 2 \text{ cm}$	$-5 \text{ cm} \leq t \leq 5 \text{ cm}$	$t < -5 \text{ cm}$ 与 $t > 5 \text{ cm}$
描述准确性	客观、准确	基本满足要求	描述有误
标贯试验	粘性土、粉土及砂类土试验点间距为 1 m,严格按照规范要求操作	粘性土、粉土及砂类土试验点间距为 1~3 m,基本按照规范要求操作	粘性土、粉土及砂类土试验点间距 $> 3 \text{ m}$,未按照规范要求操作
动探试验	卵石土、碎石土、岩层全强风化层试验点间距为 1 m,严格按照规范要求操作	卵石土、碎石土、岩层全强风化层试验点间距为 1~3 m,基本按照规范要求操作	卵石土、碎石土、岩层全强风化层试验点间距为 $> 3 \text{ m}$,未按照规范要求操作

2.2.3 指标层各指标因素隶属度的确立

在模糊数学中,以隶属度来描述事物权重的模糊界限^[8],根据隶属的建立原则以及指标的属性原则,可以采用 2 种方式来确定指标的隶属度。当指标属于连续型随机变量,一般采用公式法。在本模型中,终孔孔深、记录及时性、描述准确性属于离散型,根据其实测数据表,确定其对评价集 V 中各元素的隶属度。本模型指标层中其余指标属于连续型随机变量,可通过公式法将实测值求出其隶属度,隶属函数的种类很多,这里根据各指标的随机分布特征,采用“降半梯形分布”^[8],其公式见式(3)~(6)。

$$U_I = \begin{cases} 1 & x \leq s_1 \\ (s_2 - x)/(s_1 - s_2) & s_1 < x \leq s_2 \\ 0 & x > s_2 \end{cases} \quad (3)$$

$$U_{II} = \begin{cases} 0 & x < s_1 \text{ 或 } x > s_3 \\ -(s_1 - x)/(s_2 - s_1) & s_1 < x \leq s_2 \\ (s_3 - x)/(s_3 - s_2) & s_2 < x \leq s_3 \end{cases} \quad (4)$$

$$U_{III} = \begin{cases} 0 & x < s_2 \text{ 或 } x > s_4 \\ -(s_2 - x)/(s_3 - s_2) & s_2 < x \leq s_3 \\ (s_4 - x)/(s_4 - s_3) & s_3 < x \leq s_4 \end{cases} \quad (5)$$

$$U_{IV} = \begin{cases} 0 & x \leq s_1 \\ (s_2 - x)/(s_2 - s_1) & s_1 \leq x \leq s_2 \\ 1 & x > s_2 \end{cases} \quad (6)$$

选取南龙铁路定测期间某一桥梁钻孔,进行分析,确定每一因素的实测值对应评价集的隶属度,具体详见表 7。

2.2.4 对钻孔质量的模糊综合评判

由层次分析法得出每一个指标的权重值,组成权重向量;同时将以上 8 个指标的对钻孔质量的隶属度组成单因素评价集,然后组成综合评判矩阵:

$$A = \begin{bmatrix} 0.332 \\ 0.062 \\ 0.176 \\ 0.030 \\ 0.182 \\ 0.074 \\ 0.072 \\ 0.072 \end{bmatrix}^T \quad R = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0.3 & 0.7 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 1/3 & 2/3 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 1/2 & 1/2 & 0 \\ 0 & 1/2 & 1/2 \end{bmatrix}$$

将权重集 A 视为一行模糊矩阵,则模糊综合评判关系可表示为:

$$B = A \times R = [0.5555 \quad 0.4085 \quad 0.036]$$

表 7 南龙铁路某钻孔指标实测值与隶属度

指 标	实 测 值	指标的隶属度		
		优良	合格	不合格
终孔孔深	35 m(进入弱风化基岩 10 m,非灰岩),较好的设计要求	1	0	0
终孔孔径	89 cm	0	1	0
岩心采取率	粉质粘土:97%;碎石类土:68%;强风化岩石:85%;弱风化岩石:96%	0.3	0.7	0
记录及时性	记录落后一个钻进回次	0	1	0
分层描述准确性	地层界线深度平均偏差值为 4 cm	1/3	2/3	0
描述准确性	描述准确、客观与钻取岩心一致	1	0	0
标贯试验	试验点平均间距 2 m,规范操作	1/2	1/2	0
动探试验	试验点平均间距 3 m,规范操作	0	1/2	1/2

对上式综合评判结果,采用最大隶属度原则,最大隶属度为 0.5555,属于评价集的优良等级,因此可判断该钻孔质量为“优良”等级。

3 结 论

在铁路工程地质勘察钻孔质量分析中,相比较以前单因素、分散的、定性的评价,采用层次-模糊综合评判体系,建立合理的因素集与评价集,可减少受技术人员的专业水平因素与个人主观判断因素影响,从多层次、多因素、多系统方面考虑,较为客观的、量化评价每个钻孔的质量等级。在高铁的工程地质钻探的评价中具有重要的意义,具有较大的优越性。

(上接第 59 页)

取样,对泥沙颗粒、级配、状态等进行试验室数据验证及分析,才能确保适航厚度数据的准确。

(3) 现场定点取样是室内准确获取颗粒组成分析、泥沙沉降分析、重度、淤泥流变特征等唯一手段,开发回淤层浮泥采集装置是非接触走航式检测手段的补充与完善,具有广阔的应用市场和发展前途。

参考文献:

[1] 黄建维. 粘性泥沙运动规律在淤泥质海岸工程中的应用[J]. 海洋工程, 2011, 29(2): 52-58.

[2] Inglis C. C., Allen F. H. The regimen of the Thames estuary as affected by currents, salinities, and river flow[C]. Proceedings of the Institution of Civil Engineers, Maritime and Waterways Engineering Division Meeting, 1957: 827-868.

[3] JTJ 325—2006, 淤泥质海港适航水深应用技术规范[S].

[4] JTS 133—2013, 水运工程岩土勘察规范[S].

参考文献:

[1] 赵晋乾. 山岭公路隧道注浆效果评价及技术指南研究[D]. 四川成都: 成都理工大学, 2006.

[2] 王铭文. 模糊数学讲义[M]. 吉林长春: 东北师范大学出版社, 1988.

[3] 刘新宪, 朱道立. 选择与判断——AHP(层次分析法)决策[M]. 上海: 上海科学普及出版社, 1990.

[4] 许树伯. 层次分析法原理[M]. 天津: 天津大学出版社, 1988.

[5] TB 10012—2007, 铁路工程地质勘察规范[S].

[6] TB 10014—2012, 铁路工程地质钻探规范[S].

[7] JGJT 87—2012, 建筑工程地质勘探与取样技术规程[S].

[8] 张春宇. 二级模糊综合评判在公路边坡稳定性分析中的应用[J]. 公路工程, 2008, 33(5).

[5] JTJ/T 320—96, 疏浚岩土分类标准[S].

[6] 牛桂芝, 沈小明, 裴文斌. SILAS 适航水深测量系统测试研究[J]. 海洋测绘, 2003, 23(5): 24-26.

[7] 王志东. Silas 和 Densitune 系统在航道工程中的应用[J]. 港工技术, 2011, 48(1): 51-53.

[8] 蔡耀军, 孙云志, 魏岩峻, 等. 中国水利工程地质勘察科技发展前沿[J]. 水利学报, 2005, 12(S1): 524-531.

[9] 辛文杰, 贾雨少, 何杰. 港珠澳大桥沉管隧道试挖槽回淤特征分析[J]. 水利水运工程学报, 2012, (2): 71-78.

[10] 程瑾, 陈尚士, 胡宝安, 等. 一种中闭锁式泥土取样器: 中国, ZL201020513399.0[P]. 2011-05-11.

[11] 程瑾, 陈尚士, 赵海涛, 等. 一种齿型取样器封口装置: 中国, ZL201220330329.0[P]. 2013-01-02.

[12] 陈尚士, 程瑾, 曹凯, 等. 一种逆止封闭式取土器: 中国, ZL201220330330.3[P]. 2013-02-06.

[13] 闻邦椿. 机械设计手册[M]. 第 5 版. 北京: 机械工业出版社, 2010.

[14] 钮建定, 胡建平, 张成, 等. 淤泥质浮泥采集装置: 中国, ZL201320430416.8[P]. 2013-07-18.