

DOI:10.3969/j.issn.1672-1144.2019.03.026

基于云模型评价盾构施工安全等级

杨均¹, 阮永芬², 陈赵慧², 吴龙³, 董发俊⁴

(1. 中铁四院集团西南勘察设计有限公司, 云南昆明 650031;

2. 昆明理工大学建筑工程学院, 云南昆明 650500;

3. 中铁十一局集团城市轨道交通工程有限公司, 湖北武汉 430074;

4. 中国水利水电第十四工程局有限公司, 云南昆明 650200)

摘要: 根据河流情况、地质条件、降雨、盾构埋深等多个评价指标, 利用云模型和组合赋权法对盾构在泥炭土中施工安全性进行评价。首先根据盾构施工等级分类标准生成每个评价等级的云数字特征, 然后建立评价因子的云模型, 并得到评价因子的确定度, 运用距离函数将层次分析法和改进熵权法进行组合, 得到指标组合权重, 根据权重及确定度计算出综合确定度, 综合确定度值最大原则确定盾构施工的安全等级。该场地地层由泥炭质土、黏质粉土及粉土互层组成, 盾构施工下穿多个河道, 正直雨季, 设计施工风险大。应用云模型并充分考虑各种因素影响, 进行施工安全等级评价, 为设计及施工安全风险分析提供理论依据。明确风险等级, 在设计及施工中有针对性的采取措施, 做到经济安全。

关键词: 盾构施工; 云模型; 距离函数; 安全等级; 泥炭质土

中图分类号: U291.69; TU94⁺1

文献标识码: A

文章编号: 1672-1144(2019)03-0150-05

Evaluation of Shield Construction Safety Classes Based on cloud model

YANG Jun¹, RUAN Yongfen², CHEN Zhaohui², WU Long³, DONG Fajun⁴

(1. Southwest Non-Ferrous Exploration Design Co., Ltd., Kunming, Yunnan 650031, China;

2. Faculty of Civil Engineering and Mechanics, Kunming University of Science and Technology, Kunming, Yunnan 650500, China;

3. China Railway 11th Bureau Group Urban Rail Engineering Co., Ltd., Wuhan, Hubei 430074, China;

4. Sinohydro Bureau 14 Co., Ltd., Kunming, Yunnan 650200, China)

Abstract: According to multiple evaluation indexes such as river condition, geological condition, rainfall, and shield burial depth, cloud model and combined weighting method were used to evaluate the construction safety of shield in peat soil. First according to shield construction level classification criteria to generate each assessment level digital characteristics of cloud, and then establish evaluation factor of cloud model, and get the certainty degree of evaluation factors, and then using the distance function are combined analytic hierarchy process (AHP) and improved entropy weight method, get the index portfolio weight, according to the weight and calculate the comprehensive certainty degree, comprehensive certainty degree maximum value principle to determiners the safety classes of the shield construction. The site's stratum is composed of peat soils, clayey silt and silt interlayers, and shield construction undergoes multiple river channels. The straight rainy season has a high design and construction risk. Through the cloud model and full consideration of the influence of various factors, the paper conducts the construction safety level evaluation, provides theoretical basis for on-site design and construction safety risk analysis, clarifies the risk level, and can take targeted measures in the construction to achieve economic security.

Keywords: shield construction; cloud model; distance function; safety grade; peat soil

收稿日期: 2019-02-01

修稿日期: 2019-03-02

基金项目: 云南省重点研发计划项目(2018BC008)

作者简介: 杨均(1982—), 男, 四川雅洪人, 硕士, 工程师, 主要从事隧道与地下工程设计及管理工作。E-mail: 380962039@qq.com

通信作者: 阮永芬(1964—), 女, 云南宣威人, 教授, 主要从事岩土工程方面的教学及科研工作。E-mail: ryy64@aliyun.com

随着社会经济的发展,城市地铁建设会越来越多。盾构法因施工速度快、自动化程度高、对周边环境影响小等特点,在地下工程施工中被大量应用,施工技术也日益完善,但在城市施工有时也会存在很大的安全隐患。城市地铁的盾构施工不可避免的会穿越建(构)筑物密集地段,若地层土质条件较差,周边环境复杂,盾构施工必然会对周围地层产生扰动,这不仅会影响到隧道结构自身的安全,产生隧道管片上浮、开裂、漏水等系列病害;还会引起房屋不均匀沉降,从而产生变形破坏;导致河床坍塌,河底透水等,危及到邻近建构筑物、河道及地下管线的正常使用^[1]。特别是场地土质特殊及雨季,潜在风险会更大,所以对其设计及施工中存在的隐患进行事前安全等级评判分级,针对不同风险等级采用相应的工程措施进行防范就显得非常重要。

评价安全等级的方法有很多,如距离判别分析法^[2-3]、可拓理论^[4-5]、模糊数学法^[6]、神经网络法^[7]、灰色理论法^[8]等评价方法。但上述方法难以同时顾及模糊性、随机性和评价权重三者对盾构施工安全等级评价结果的影响,实际应用中都存在一定缺陷。现采用云模型作为评价方法,实现了评价指标从定性到定量的相互转化,同时兼顾模糊性与随机性问题。并采用主客观综合赋权法对相对影响大的指标赋予更多权重,克服了单一赋权法不准确的缺点,能够充分挖掘原始数据中隐含的信息,减少人为因素引起的误差,使各个指标的权重系数更加合理,评价结果更加有效。

1 云模型原理

云模型是李德毅等^[9]基于定性概念和定量值的不确定提出的变换模型。云模型是建立在概率论和模糊数学的基础上实现的,主要研究事物的模糊性和随机性之间的关联性。其定义如下:假设 A 为一普通集合,称之为论域, C 是与 A 相关的定性概念,若定量值 $x \in A$,且 x 可以由 C 随机实现,就能得到 x 与 C 的关联程度 $\mu(x) \in [0,1]$,其中 μ 是个随机数,而 x 在论域 A 中称为云滴。顶部的分布称为云,即 $\mu: A \rightarrow [0,1] \forall x \in A \rightarrow \mu(x)$ 。

云模型用三个云数字特征值来表示,它们具体的物理意义如下:期望 E_x 是云在论域空间分布中的期望值,是最典型的数值。熵 E_n 代表定性概念的度量粒度,也是定性概念随机性的度量。超熵 H_e 是度量熵的不确定性,可以反映云滴凝聚程度。

云数字特征值的计算方法如下:

$$E_x^p = \frac{M_p + N_p}{2} (p = 1, 2, \dots, n) \quad (1)$$

$$E_n^p = \begin{cases} \frac{E_x^2 - E_x^1}{3} p = 1 \\ \frac{E_x^p - E_x^{p-1}}{3} p \geq 2 \end{cases} (p = 1, 2, \dots, n) \quad (2)$$

$$H_e = \beta \quad (3)$$

式中: E_x^p 和 E_n^p 分别代表第 p 等级的期望值和熵,其中 $p = 1, 2, \dots, n$; M_p 和 N_p 是评价指标对应的某一等级的上下边界值; H_e 为云的超熵, β 是常数,为了使各值对应的确定度更加准确,本文中取 β 值为 0.01。

云发生器为云模型建立定性与定量间关系的工具。将云模型的三个云数字特征值及云滴数目 N 输入正向云发生器中,从而可以计算得到云滴,具体算法程序如下:

(1) 首先计算得到正态随机数 y_i , 均值为 E_n , 标准差为 E_x 。

(2) 然后根据上一步骤得到一个均值为 E_x , 标准差为 y_i 的正态随机数 x_i 。

(3) x_i 为定性概念的具体量化值,称为云滴。

(4) 根据式(4)来计算随机数的确定度。

$$\mu = e^{-\frac{(x_i - E_x)^2}{2y_i^2}} \quad (4)$$

(5) 得到其中一个云滴为 (x_i, μ_i) 。

(6) 重复上述步骤(1)~步骤(5),生成所需要的 N 个云滴为止,从而 N 个云滴可组成这个云。

2 评价指标权重确定

权重的合理确定直接影响到评价结果,权重确定方法主要有主观和客观权重法两种,各自存在优缺点。

2.1 层次分析法

层次分析法是一种主客观权重确定法,由美国运筹学家 Saaty 提出,它是在深入分析复杂决策问题的性质,影响因素和内部关系的基础上,分析了定量信息较少的决策者决策数学思维过程^[10]。本研究采用改进 AHP 法生成判断矩阵,优点是减少矩阵元素比较时误判的概率,省略判断矩阵一致性的步骤,提高计算效率。具体计算步骤如下:

(1) 构造判断矩阵 R :

$$R = (r_{ij})_{n \times n} \quad (5)$$

式中,如果第 i 个指标与第 j 个指标相比第 i 个更重要,就取 $r_{ij} = 1$;假如第 i 个指标与第 j 个指标相比同等重要,取 $r_{ij} = 0$;假如第 i 个指标与第 j 个指标

相比,第 j 个指标更重要,取 $r_{ij} = -1$ 。

(2) 计算最优传递矩阵 B 以及一致性判断矩阵 C : 矩阵 B 中的元素为 $b_{ij} = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n (r_{ik} + r_{kj})$, 矩阵 C 中的元素为 $c_{ij} = \exp(b_{ij})$ 。

(3) 求解 C 的特征向量 w : 先计算出判断矩阵 C 中各行元素的乘积 $p_i = \sum_{j=1}^n c_{ij}$, 然后可得到 $\bar{w}_i = \sqrt[n]{p_i}$, 最后对向量 $\bar{w} = [\bar{w}_1, \bar{w}_2, \dots, \bar{w}_n]^T$ 进行归一化处理, 可得特征向量 $w = [w_1, w_2, \dots, w_n]^T$, 即为各指标的权重系数。

2.2 熵权法

熵权法是客观权重确定法, 它由实测指标值所提供的信息量大小来确定各指标权重的方法^[11]。假设有 m 个待测事物样本和 n 个评价因子, 其中样本数据值对应的矩阵为 $X_{ij} = (x_{ij})_{m \times n}$, X_{ij} 的值越大, 在最终评价中这个指标对应的确定度也就越大, 客观权重向量 W_j 的主要计算如下:

(1) 计算第 i 项评价指标下第 j 个样本的比重:

$$P_{ij} = \frac{X_{ij}}{\sum_{i=1}^n X_{ij}}, i = 1, 2, \dots, n; j = 1, 2, \dots, m \quad (6)$$

(2) 计算信息熵值:

$$E_i = -k \sum_{j=1}^m P_{ij} \times \ln P_{ij} \quad (7)$$

式中 $k = 1/\ln(m)$ 与样本数有关的常数。

(3) 计算信息熵的冗余度:

$$g_i = 1 - E_i \quad (8)$$

(4) 计算指标权重:

$$w_i = \frac{g_i}{\sum_{j=1}^m g_{ij}} \quad (9)$$

采用公式(9)计算客观权重时, 当指标信息熵值 E_i 趋近于 1 时, 不同指标产生的微小差异可能导致诸如熵权较大变化之类的问题。为了克服此类问题, 对式(9)进行改进, 得到改进熵权法计算公式如下:

$$W_i = \frac{\exp(\sum_{k=1}^m E_i + g_i) - \exp(E_i)}{\sum_{l=1}^m [\exp(\sum_{k=1}^m E_i + g_i) - \exp(E_i)]} \quad (10)$$

2.3 距离函数

为了使两个权重 w_{i1} 与 w_{i2} 之间的差异程度及其相应的分配系数差异一致, 采用距离函数来确定主、客观权重间的分配系数 γ 和 β 。设距离函数为 $d(w_{i1}, w_{i2})$, 则

$$d(w_{i1}, w_{i2})^2 = \sqrt{\sum_{i=1}^n (w_{i1}, w_{i2})^2} \quad (11)$$

$$d(w_{i1}, w_{i2})^2 = (\gamma - \beta)^2 \quad (12)$$

求出 γ 与 β , 利用线性加权方法, 则可得到第 i 个评价指标的综合权重为

$$w_i = \gamma w_{i1} + \beta w_{i2} \quad (13)$$

式中: w_i 为综合权重向量 W 的第 i 个分量。

2.4 综合确定度的确定

评价样本的安全性评价指标息息相关, 在地铁盾构施工的影响下研究其安全性, 选择指标, 并赋予相应权重, 根据云模型正向云发生器的算法, 计算出相应确定度, 综合各指标的权重, 得到综合确定度的公式如下:

$$U_{p,i} = \sum_{i=1}^n \mu_{p,i} w_i, p = 1, 2, \dots, 4; i = 1, 2, \dots, n \quad (14)$$

式中: $U_{p,j}$ 为 j 事物对应 p 个等级的综合关联度数值; $\mu_{p,i}$ 为 j 事物的第 i 评价指标对应的第 p 等级的确定度; 其中 w_i 为综合权重。计算得到的综合确定度根据隶属度最大的原则, 确定对应指标的等级。

3 工程实例

3.1 工程概况

昆明地铁 5 号线金海新区站至福保站隧道区间线路出金海新区站后, 在履善巷环湖东路路口下穿环湖东路, 而后线路延环湖东路西侧敷设, 先后下穿盘龙江、大清河、正大河及海河后进入福保站。起点里程 DK21 + 355.965, 终点里程 DK23 + 117.872, 线路全长 1 761.907 m。采用盾构法施工, 隧道埋深约在 13.9 m ~ 28.30 m。在里程 DK22 + 267.00、DK22 + 518.000 处各设置联络通道及泵房一座, 拟采用矿山法施工。

本场地的不良地质为砂土液化, 软土为人工填土和泥炭质土。拟建工程为地下区间和各类通道, 也是 5 号线下穿泥炭土的首期工程, 工程意义和社会影响重大, 破坏后果很严重, 按国家标准^[12], 拟建工程地质复杂程度等级为一级场地(复杂场地)、周边环境风险等级为一级、重要性等级为一级, 现场勘察期间于钻孔内测得稳定水位为地表下 1.20 m ~ 6.50 m, 高程 1 884.79 m ~ 1 888.39 m。受含水层层面起伏影响, 具微承压性。勘察范围内, 自上而下可分为第四系人工填土层(Q_4^{ml})及第四系全新统冲湖积层(Q_4^{al+1})二个地层单元, 该层主要由黏质粉土、泥炭质土及黏土组成。土层的物理力学指标如表 1 所示。

表 1 土的物理性质指标

土层类型	平均厚度/m	重度/($\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$)	孔隙比	天然含水率/%	f_{sk} /kPa	岩土施工工程等级
素填土	5.00	18.5	—	—	—	1
黏质粉土	7.90	19.1	0.74	25.59	120	2
泥炭质土	3.68	12.5	3.08	139.75	50	2
黏土	6.47	17.8	1.10	38.00	100	2
粉土	6.22	18.6	0.77	28.17	120	2

3.2 评价指标标准

为合理准确评价目标对象的安全等级,评价指标的选择尤为重要,仅选择单指标进行评价会使评价结果具有局限性,为保证地铁隧道施工安全,采用系统科学方法对工程影响范围内建(构)筑物安全性进行多因素综合评判更为客观合理^[13],所以应对评价指标的选择进行认真分析。

昆明地铁 5 号线 20 多个站点间的盾构区间就有 10 多个必须穿越湖相沉积的泥炭质土层,该土层性质特殊^[14],灵敏度较高,扰动后强度大幅度下降,蠕变量也大,土体的变形将造成区间隧道沉降增大,另外此层土还和涌水量或大降水时易产生潜蚀、流砂的黏质粉土及粉土互层出现,其存在也增加了施

工风险。研究盾构区间段的上方有 4 条河流穿过,河流对地下水有补给作用,所以河流流经面积及河道坡度对于河流来说是重要指标;地下水位埋深对工程施工影响也非常大,同时也能间接反映河流间的水力联系。昆明最近几年雨量密集,单点暴雨量大,雨季长,从 4 月—10 月,对河流、地下水位埋深及工程施工安全的影响非常大。通过以上分析,结合场地勘测资料、现场实际情况、隧道设计、盾构施工等资料,与施工单位共同探讨,选择泥炭质土层厚度、盾构埋深、河道坡降、大雨天数、河流流经面积和地下水位埋深 6 个主要评价指标进行分析评价,6 个指标的安全等级评价标准如表 2 所示。4 条河流的相关信息及分析指标的实测数据如表 3 所示。

表 2 安全等级划分标准

安全等级	河流流经面积/ km^2	河道坡降/%	大雨天数/d	泥炭质土层厚度/m	地下水位埋深/m	盾构埋深/m
风险很高 I	70 ~ 100	10 ~ 20	26 ~ 40	16 ~ 30	0.5 ~ 3.0	4 ~ 10
风险高 II	40 ~ 70	6 ~ 10	16 ~ 26	8 ~ 16	3.0 ~ 6.0	10 ~ 16
风险一般 III	20 ~ 40	1 ~ 6	8 ~ 16	4 ~ 8	6.0 ~ 16.0	16 ~ 30
风险低 IV	0 ~ 20	0 ~ 1	0 ~ 8	0 ~ 4	16.0 ~ 30.0	30 ~ 50

表 3 现场实测数据

河流名称	盾构埋深/m	地下水位埋深/m	软土厚度/m	河道流经面积/ km^2	河道坡降/%	大雨天数/d
盘龙江	19.11	4.60	6.18	75.5	1.80	10.48
大清河	10.90	4.00	3.00	2.0	0.36	10.48
海河	5.60	4.00	0.00	29.8	0.47	10.48
正大河	13.22	1.81	4.91	3.6	0.48	10.48

3.3 评价指标确定度函数

据表 2 给出的安全等级划分标准,采用 MATLAB 编程软件对云模型进行编程绘图,得到不同指标确定度函数。研究表明云滴度函数呈正态分布,并且在两个相邻云滴之间存在交叉区域,交叉区域

也充分体现了云模型的模糊性和随机性。

根据式(5)模拟第 i 个指标,从而得到属于第 p 个等级的 2 000 个云滴,即可构成第 i 个评价指标与对应第 p 个等级的可云模型数据归一化处理后如表 4 所示。权重计算结果见表 5。

表 4 现场实测数据归一化值

河流名称	盾构埋深	地下水位埋深	软土厚度	河道流经面积	河道坡降	大雨天数
盘龙江	0.7274	0.6123	0.7319	0.9290	0.9209	0.5000
大清河	0.4149	0.5325	0.3553	0.0246	0.1842	0.5000
海河	0.2132	0.5325	0.0000	0.3667	0.2404	0.5000
正大河	0.5032	0.2409	0.5815	0.0443	0.2456	0.5000

表 5 权重计算表

权重类别	权重					
	盾构埋深	地下水位埋深	软土厚度	河道流经面积	河道坡降	大雨天数
主观权重	0.3200	0.2293	0.1643	0.1177	0.0844	0.0844
客观权重	0.1447	0.1823	0.1986	0.1773	0.1470	0.1501
综合权重	0.2727	0.2166	0.1736	0.1338	0.1013	0.1021

基于以上计算与数据统计,根据式(13)计算得到综合权重系数,根据式(14)得到的评价结果如表6所示。根据表6的评价结果可知,海河与正大河的风险性等级为Ⅰ级,属于风险性高的河流,高于其它河。海河河底离盾构顶仅有5.6 m,其它河流10 m以上,河底标高1 885.5 m,是几条河中最浅的,但流域面积又相对较大;不经计算分析,可能会认为大清河的风险高于正大河,因大清河底与盾构间距离更近,河底软土层较厚,河道径流面积及河道坡度和正大河相差不大,所以应该大清河风险排名第二,风险也很高。可通过本文分析正大河风险高于大清河,在大清河下盾构施工时,确实涌水量及地面变形大,但因事前风险评判结果有了认识,事前做好了应对措施。盘龙江下盾构埋深较深,水位也相对较深,所以风险一般。现已安全完成了金一福区间的盾构施工,评判结果和实际情况较吻合。

表 6 河流安全等级综合评价结果

河流	不同等级评价价值				评价结果
	Ⅰ	Ⅱ	Ⅲ	Ⅳ	
盘龙江	0.0000	0.2166	0.5475	0.0000	Ⅲ
大清河	0.0000	0.4569	0.0000	0.3413	Ⅱ
海河	0.3698	0.2161	0.0000	0.2670	Ⅰ
正大河	0.1984	0.0000	0.1623	0.1262	Ⅰ

4 结 论

选择5号线下穿特殊区域软土泥炭质土、地下水丰富及风险较高的4条河道的首期金福盾构区间盾构施工段进行分析。运用云模型与综合赋权法评价盾构设计及施工的风险源及进行安全等级评判,有一定的创新性。

通过分析评判划分出不同的潜在风险等级,为设计施工安全风险分级以及安全措施的制定提供理论依据,也为设计的提出风险应对措施提供分析依据。针对施工存在的风险等级,设计中根据分析等级的不同提出加强监测的频次,视监测结果进行二次注浆及跟踪注浆的处理措施,同时施工中制定必

要的应急方案,以确保施工期间沿线的几条河在施工期间能够正常使用及运营安全。评价分析结果对设计及施工都有很好的参考价值,实际意义突出。

参考文献:

- [1] 王志良,瞿嘉安,申林方,等.泥炭质土层盾构施工扰动引起隧道长期沉降的研究[J].岩土工程学报,2017,39(8):1416-1424.
- [2] 宫凤强,李夕兵.距离判别分析法在岩体质量等级分类中的应用[J].岩石力学与工程学报,2007,26(1):190-194.
- [3] 邱道宏,张乐文,李术才,等.基于权重反分析方法的加权距离判别法及应用[J].岩土力学,2010,31(10):3243-3247.
- [4] 梁桂兰,徐卫亚,谈小龙.基于熵权的可拓理论在岩体质量评价中的应用[J].岩土力学,2010,31(2):535-540.
- [5] 沈世伟,许君臣,代树林,等.基于熵值赋权法的节理岩体隧道爆破质量可拓学评价[J].土木工程学报,2013,46(12):118-126.
- [6] 苏经宇,周锡元.泥石流危险等级评价的模糊数学方法[J].自然灾害学报,1993(2):83-90.
- [7] 邱道宏,陈剑平,阙金声,等.基于粗糙集和人工神经网络的洞室岩体质量评价[J].吉林大学学报(地球科学版),2008,38(1):86-91.
- [8] 冯玉国.灰色优化理论模型在地下工程围岩稳定性分类中的应用[J].岩土工程学报,1996,18(3):62-66.
- [9] 李德毅,刘常昱,杜 祎,等.不确定性人工智能[J].软件学报,2004,15(11):1583-1594.
- [10] 苟 敏.地铁区间隧道盾构施工风险管理研究[D].青岛:青岛理工大学,2014.
- [11] 阮永芬,高春钦,李志伟,等.基于改进 AHP 与熵权法的膨胀土胀缩等级云模型评价[J].江苏大学学报(自然科学版),2017,38(2):218-223.
- [12] 城市轨道交通岩土工程勘察规范:GB 50307—2012[S].北京:中国计划出版社,2012.
- [13] 李 明,吴 波,李春芳.深基坑工程周边建筑物安全模糊综合评价[J].隧道建设(中英文),2018,38(S1):58-66.
- [14] 阮永芬,刘岳东,王 东,等.昆明泥炭及泥炭质土对建筑地基的影响[J].昆明理工大学学报(理工版),2003,28(3):121-124.