

文章编号:1001-1986(2005)01-0041-03

## 秦岭特长隧道涌水量的预测研究

刘丹,李启彬 (西南交通大学环境科学与工程学院,四川 成都 610031)

**摘要:** 论述了模糊聚类理论用于隧道涌水量预测的基本思路与方法,提出了影响隧道涌水量的主要因素及其量化公式,并以秦岭特长隧道(Ⅱ线)为对象,预测出其涌水量介于  $1.0 \sim 3.0 \text{ m}^3/\text{d} \cdot \text{m}$  之间,与该隧道开挖后的实际涌水量  $2.07 \text{ m}^3/\text{d} \cdot \text{m}$  基本吻合,从而证明了用该方法进行预测的合理性。

**关键词:** 模糊聚类;隧道涌水量;预测

**中图分类号:** P641.2 **文献标识码:** A

## A study on prediction of water inflow into Qinling tunnel

LIU Dan, LI Qi-bin

(School of Environmental Science and Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

**Abstract:** The paper deals with basic thought and method of prediction of water inflow into tunnel by fuzzy clustering theory, and presents main factors influencing water inflow and their quantized formulae. The water inflow is estimated at  $1.0$  to  $3.0 \text{ m}^3/\text{d} \cdot \text{m}$ , taking Qinling extra-long tunnel as an example, which tallies basically with the measured water inflow of  $2.07 \text{ m}^3/\text{d} \cdot \text{m}$ . This shows the reasonableness of the prediction method.

**Key words:** Fuzzy clustering; water inflow into tunnel; prediction

## 1 引言

隧道涌水量预测计算是隧道设计的一个重要依据。然而,由于隧道所处自然环境的复杂多变,其地质与水文地质条件的高度不确定性,给隧道涌水量的准确计算带来极大的困难<sup>[1]</sup>;另一方面,经验丰富的隧道水文地质工作者往往能够根据自身经验对隧道涌水量作出大或小的定性评估,尽管这种评估是模糊的,不精确的,但有时仍有重要的参考价值。特别是考虑到地质工程界的许多概念、判断和语言多具有模糊性,或多或少地存在着“亦此亦彼”的模糊现象。模糊(Fuzzy)数学就是解决这类问题的强有力的工具。本文拟以秦岭特长隧道(Ⅱ线)为对象,尝试应用Fuzzy聚类的理论与方法进行隧道涌水量的预测研究。

## 2 研究背景

秦岭特长隧道位于北秦岭山区,山脉走向东西向。隧道地区北邻渭河盆地的剥蚀残丘带,南接南秦岭的山区河谷带。据文献<sup>[2]</sup>,该区地形起伏较大,切割深度  $200 \sim 600 \text{ m}$ ,北坡较南坡陡峻,最高峰牛背梁海拔高程  $2800 \text{ m}$ 。隧道地区位于湿润季风气候区,最大降雨量约  $1225 \text{ mm/a}$ ,但多年平均降雨量变

化在  $690 \sim 775 \text{ mm}$ ,南坡的降雨量高于北坡。年降雨量的时空分布不均,超过60%降雨量多集中在6~9月这4个月中,且降雨量随高度的增加而增加。石砭峪河是本区的主干河流,属渭河四级支流,区内长约十余km,最大洪峰流量  $31.5 \text{ m}^3/\text{s}$ ,枯期流量  $0.43 \text{ m}^3/\text{s}$ ,其主要支流有水洞子沟,大板岔沟等,属黄河水系。岭南水系多呈树枝状分布,支流多而长,属长江水系。隧址区出露的地层是一套经历了多期变质作用,岩浆活动和混合岩化作用的复杂岩性的地层组合(图1)。主要岩石类型为混合花岗岩( $M_1^r$ )、混合片麻岩( $M_1^m$ )和含绿色矿物混合花岗岩( $M_1^n$ )。区内断裂构造发育,走向各异,其中NW向的 $F_4$ 、 $F_5$ 和 $F_2$ 断层控制了隧道地区的构造格局,而 $f_{q1}$ 、 $f_{q12}$ 、 $f_{q13}$ 等次级断层则与隧址区的水文地质条件相关。研究区地下水主要为裂隙潜水。在天然状态下,大气降水是地下水的主要补给源,区域径流分别是由南向北(岭北)和由北向南(岭南)的总体径流方向流动,地下水排泄形式以泉及区域径流形式排泄为主;隧道修建后,地下水的排泄形式将发生变化。

## 3 基本原理

当两种事物之间的关系不宜用“有”或“无”作肯定或否定的回答时,可以考虑用模糊关系来加以描

收稿日期:2004-03-31

基金项目:铁道部重点科技发展项目(95G-48-H)

作者简介:刘丹(1956—),男,四川人,西南交通大学教授,博导,从事环境地质、地下水污染控制方面的研究。

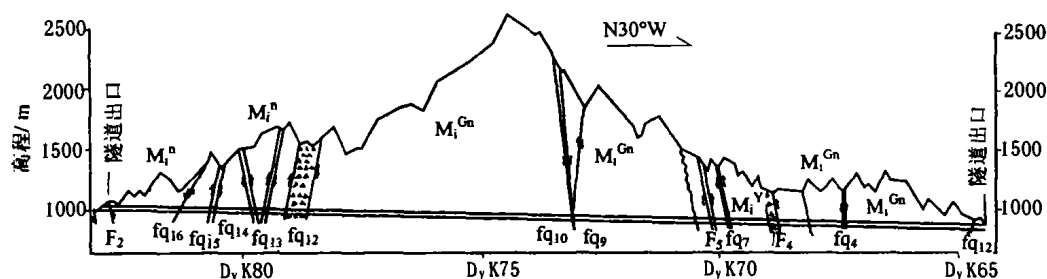


图 1 秦岭隧道地质剖面

Fig. 1 Geologic section of Qinling tunnel

述,其定义<sup>[3]</sup>为:给定论域  $U, V$ ,称  $U \times V$  (直积空间)的一个模糊子集  $R \in \mathcal{B}(U \times V)$  的一个二元模糊关系,简称模糊关系。通常,只要给出直积空间  $U \times V$  中的模糊集  $R$  的隶属函数  $\mu_R(u, v)$ ,集合  $U$  到  $V$  的模糊关系  $R$  也就确定了。对于有限集合  $U$ ,如能建立  $U$  上的一个模糊等价矩阵,便可按它的  $\lambda$ -截矩阵对  $U$  进行分类, $\lambda$  取不同的值,分类的结果也不同。从理论上讲,可以借助于普通聚类分析的相似系数的确定方法,来确定  $U$  上的模糊相似矩阵。由上述方法建立起来的模糊相似矩阵还不是等价矩阵,但可以通过求传递闭包将其改造为模糊等价矩阵。 $U$  上的模糊等价矩阵建立起来后,取其  $\lambda$ -截集构成的矩阵  $R_\lambda = (\lambda r_{ij})$ ,此即是在  $\lambda$  水平之下的等价的布尔矩阵,由它便可确定  $U$  的一个分类,改变  $\lambda$  的值,就可得到不同的分类。基于上述,可将  $n$  座隧道的涌水程度的相似关系用模糊子集  $R$  描述,其隶属函数  $\mu_R$  表示隧道涌水的相似程度。据此确定的涌水量相似性,能反映出各隧道之间存在的模糊关系,借助于上述数学处理方法,即可对隧道涌水量做出预测。

### 3 方法与步骤

#### 3.1 样本数据准备

设  $U = \{u_1, u_2, u_3, u_4, u_5, u_6, u_7, u_8\}$  为 8 座涌水隧道的集合,影响每座隧道涌水的 4 大要素为年降水量、地质—水文地质条件、地表汇流条件和地表水体补给条件,构成集合  $V = \{v_1, v_2, v_3, v_4\}$ 。隧道的涌水状况由 4 大要素综合评价后的指标值来描

述,指标值按以下方法确定<sup>[4]</sup>:

年降水量指标 ( $v_1$ ): 可采用隧道所在地区的年平均降水量,即  $v_1 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n P_i$ 。

地质—水文地质条件指标: 可采用式  $v_2 = \frac{\sum k_i l_i}{\sum l_i} + \sum \gamma_i$  进行计算,式中:  $k_i$  为分段含水层(系统)的渗透系数(m/d);  $l_i$  为分段含水层(系统)沿隧道轴线的长度(m);  $\gamma_i$  为断裂构造的强化因子,可按断裂与隧道的空间几何关系确定。

地表汇流条件指标: 可利用式  $v_3 = \alpha\beta(1 - \theta/90)$  进行计算,式中,  $\alpha$  为植被发育系数,可按 3 种情况取值,  $0 \leq \alpha < 0.3$  (差);  $0.3 \leq \alpha < 0.7$  (中等);  $0.7 \leq \alpha < 1$  (好);  $\beta$  为地貌类型系数,取值如下: 对于中高山,中低山和丘陵区,  $\beta$  可分别取 1~2, 2~4 和 4~5;  $\theta$  为地面坡度(度)。

地表水体补给条件指标: 可按式  $v_4 = qf/Q$  计算,式中,  $q$  为地表水单位时间的下渗量;  $Q$  为地表水单位时间的总水量;  $f$  为与隧道埋深有关的系数。当埋深小于或等于 800 m 时,  $f$  可取 0.5~1; 当埋深对于 800 m 时,  $f$  取 0~0.5。

根据收集的实际资料,并利用上述公式,可将其数字化(表 1)。

#### 3.2 建立样本间的相似模糊关系

由于表 1 中数据的量纲不同,在建立模糊相似关系前,应对数据进行归一化处理。利用夹角余弦法建立各样本间的模糊关系,代入经归一化后的数据,得相似矩阵:

表 1 样本数据

Table 1 Data of the samples

要素	$u_1$	$u_2$	$u_3$	$u_4$	$u_5$	$u_6$	$u_7$	$u_8$
$v_1$	575	750	590	560	690	550	670	570
$v_2$	56.4	87.0	78.5	35.7	72.0	8.2	58.0	42.5
$v_3$	0.84	1.25	1.19	0.60	0.98	0.41	0.85	0.66
$v_4$	0.17	0.25	0.20	0.09	0.22	0.02	0.10	0.11
$q/m^3 \cdot (d \cdot m)^{-1}$	3.18	5.41	5.09	0.41	5.03	0.10	1.94	0.27
隧道全长 $L/m$	2715	1410	2025	2458	5170	1250	3409	3741
隧道名称	大黑山	中山	大冷沟	摩天岭	南乡山	桃园	桂生	花果山

$$R_S = \begin{bmatrix} 1 & & & & & & & \\ -0.29 & 1 & & & & & & \\ 0.42 & 0.62 & 1 & & & & & \\ 0.22 & -0.99 & -0.71 & 1 & & & & \\ -0.21 & 0.97 & 0.54 & -0.95 & 1 & & & \\ -0.01 & -0.94 & -0.82 & 0.97 & -0.92 & 1 & & \\ -0.95 & 0.23 & -0.35 & -0.17 & 0.13 & 0.02 & 1 & \\ 0.31 & -0.99 & -0.65 & 0.99 & -0.94 & 0.98 & -0.25 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

然后确定模糊等价关系,先用公式  $r_{ij} = 0.5 + r_{ij}/2$

将上述相似矩阵中元素转变为非负,再利用平方法求  $R_s$  的传递闭包,经计算得:

$R \rightarrow R^2 \rightarrow R^4 \rightarrow R^8 = R^{16} = t(R)$ , 故

$$t(R) = R^{16} = \begin{bmatrix} 1 & & & & & & & \\ 0.71 & 1 & & & & & & \\ 0.71 & 0.81 & 1 & & & & & \\ 0.66 & 0.66 & 0.66 & 1 & & & & \\ 0.71 & 0.99 & 0.81 & 0.66 & 1 & & & \\ 0.66 & 0.66 & 0.66 & 0.98 & 0.66 & 1 & & \\ 0.61 & 0.61 & 0.61 & 0.61 & 0.61 & 0.61 & 1 & \\ 0.66 & 0.66 & 0.66 & 1.00 & 0.66 & 0.98 & 0.61 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

根据上述求出的模糊等价关系,令  $\lambda$  从 1 降到 0 变化,求出  $R_\lambda$ ,可得不同的分类。考虑到所取样本的实际条件,认为取  $\lambda = 0.80$  所得的分类矩阵( $\lambda$  截矩阵)是合理的,即有:

$$t(R)_{0.80} = \begin{bmatrix} 1 & & & & & & & \\ 0 & 1 & & & & & & \\ 0 & 1 & 1 & & & & & \\ 0 & 0 & 0 & 1 & & & & \\ 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & & & \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & & \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

据此,可将所选隧道样本的涌水量程度分为 4 类:

第一类(I):  $u_1$

第二类(II):  $u_2, u_3, u_5$

第三类(III):  $u_4, u_6, u_8$

第四类(IV):  $u_7$

根据模糊子集的概念,各隧道的实际涌水量  $q$  大小也是一个模糊子集,可用如下解析式表示:

$$\mu_u(q) = \begin{cases} 1 & q \geq 5.0 \\ (q - 3.0)/4.0 + 0.5 & 3.0 \leq q < 5.0 \\ (q - 1.0)/4.0 & 1.0 \leq q < 3.0 \\ 0 & q < 1.0 \end{cases} \quad (4)$$

基于该式,可计算选定样本的隶属函数值  $\mu_u(q)$ ,用其表示各样本隶属于涌水量模糊集合的程度。同时,也可作为定量预测隧道涌水量范围的重要参考标准。

### 3.3 预测与结果讨论

预测分以下两步进行:

a. 数据准备 对前述 4 类样本,如果某类只有一个样本时,其要素值即为该样本本身的要素指标值(如第一和第四类);若某类由多个样本组成,则其要素指标值取这些样本的均值(如第二和第三类)。对待预测的秦岭 II 线平导新样本 V,其要素指标值按前述公式计算确定,详见表 2。

表 2 预测数据

Table 2 Data for prediction

要素	I	II	III	IV	V
$v_1$	575.0	676.7	560.0	670.0	720.0
$v_2$	56.4	79.2	28.8	58.0	55.0
$v_3$	0.84	1.14	0.56	0.85	0.65
$v_4$	0.17	0.22	0.07	0.10	0.15

b. 聚类与预测 根据表 2 数据,重复前述分类过程,得新的模糊聚类分析结果:

$$t(R) = R^8 = \begin{bmatrix} 1 & & & & & \\ 0.58 & 1 & & & & \\ 0.56 & 0.56 & 1 & & & \\ 0.49 & 0.49 & 0.49 & 1 & & \\ 0.49 & 0.49 & 0.49 & 0.61 & 1 & \end{bmatrix} \quad (5)$$

取不同的阈值  $\lambda$ ,可得不同的分类矩阵  $t(R)_\lambda$ 。

当取 0.60 时,截矩阵:

$$t(R)_{0.60} = \begin{bmatrix} 1 & & & & & \\ 0 & 1 & & & & \\ 0 & 0 & 1 & & & \\ 0 & 0 & 0 & 1 & & \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & \end{bmatrix} \quad (6)$$

符合实际情况。此时,新样本 V 类与原样本 IV 类( $q = 1.94 \text{ m}^3/\text{d} \cdot \text{m}$ )属同一类,表明秦岭特长隧道(II 线)最大涌水量应介于  $1.0 \sim 3.0 \text{ m}^3/\text{d} \cdot \text{m}$  之间,这与该隧道开挖后的实际单位最大涌水量  $2.07 \text{ m}^3/\text{d} \cdot \text{m}$  是吻合的<sup>[2]</sup>,证明了用该方法进行预测的合理性(表 3)。

值得指出的是:a. 由于隧道设计中关心的是最大涌水量,因而本次也是针对此而进行预测的。用相同的方法,也可进行隧道稳定涌水量的预测;b. 对新样本的预测,也可将其与原有的单个样本(不按同类取几个样本的平均值)直接进行聚类,有时可使预测结果更为合理;c. 如果隧道涌水量的预测值与施工时的实测值一致或接近,表明分类样品的选定和量化均是合理的,可作为预测依据加以保存;若两者相差较大,则应重新评价基础资料的正确性,并对指标的量化公式进行修正,直至预测结果合理为止。经过这样反复的修改、补充和验证,可使用于预测的资料更趋客观和合理,从而使涌水量的预测结果更为准确。

### 4 结论

a. 模糊数学方法可用于隧道涌水量的定量预测。预测结果的准确与否,在很大程度上取决于分类样品的选定和数量化。

b. 不同岩类地区的隧道都可选作样本,但若根据待预测隧道所在地区的岩类来建立分类样品的话,效果往往会更好。

文章编号:1001-1986(2005)01-0044-02

## 古汉山矿软岩巷道地质因素分析

赵兴东<sup>1</sup>,王述红<sup>1</sup>,贾明魁<sup>2,3</sup>,贾安立<sup>2</sup>

(1. 东北大学岩石破裂与失稳研究中心, 辽宁 沈阳 110004;

2. 中国矿业大学, 北京 100083; 3. 焦作煤业集团公司, 河南 焦作 454002)

**摘要:** 针对古汉山矿软岩巷道围岩变形破坏和严重底膨问题, 通过对巷道围岩进行地应力测量、物理力学性质分析测试、矿物成份分析和节理裂隙调查, 确定了底膨巷道的软岩类型, 这为解决软岩巷道的支护问题提供了基础。

**关键词:** 软岩; 底膨; 地应力; 节理

**中图分类号:** TU163 **文献标识码:** A

## Geologic analyses on soft rock roadway in Guhanshan coal mine

ZHAO Xing-dong<sup>1</sup>, WANG Shu-hong<sup>1</sup>, JIA Ming-kui<sup>2,3</sup>, JIA An-li<sup>3</sup>

(1. Center for Rock Instability and Seismicity Research, Northeastern University, Shenyang 110004, China ;

2. China University of Mining and Technology, Beijing 100083, China ;

3. Institute of Jiaozuo Coal Mine Group Corporation, Jiaozuo 454002, China }

**Abstract:** Based on the in-situ measurements of ground pressure and physical and mechanical properties of rocks in Guhanshan coal mine, and analysis of minerals composition and fissures in rock, the type of soft rock was determined to investigate the deformation and failure of surrounding rocks and floor heave happened in extremely soft rock roadway in Guhanshan coal mine, which provides the basic news for support of rock soft.

**Key words:** soft rock; floor heave; ground pressure; joint

## 1 概述

河南焦作矿区古汉山矿为新建矿井, 主、副井筒垂直深度为 550 m。由于在建设过程中遇到复杂的地质条件, 井底车场、西大巷及采区主要巷道大部分位于泥岩、砂质泥岩和粉砂岩互层中, 软弱破碎带及构造应力集中, 因而大部分巷道长期处于连续变形破坏状态, 底膨现象尤为严重, 巷道前掘后膨, 严重影响了矿井建设工期, 增加了矿井建设投资。

## 2 巷道破坏情况

古汉山矿西大巷巷道断面形状为半圆拱形, 支护形式为锚网喷支护, 但是支护以后, 巷道受地质构造

影响, 一个月后即发生变形破坏, 其破坏变形特征是: 巷道拱顶下沉冒落, 呈反拱形, 局部有肩窝, 肩部张裂错动, 部分地段发生大面积剥落; 两帮呈条带状鼓出, 巷道净宽收敛严重; 底板底膨现象十分严重, 进而造成巷道失稳破坏。观测资料显示(图 1), 巷道施工后 10~25 d 左右发生变形并开裂, 有底膨发生, 巷道两帮收敛量累计为 200~700 mm, 底膨量为 500~900 mm, 巷道断面收敛量达 20%~45%, 无法保证巷道的正常使用。巷道破坏后, 曾采取多种维修方式, 如锚索支护、工字钢强力支护、混凝土砌碛、联合支护等, 均难以控制巷道的持续变形, 严重威胁矿井的安全生产。平均 1~2 个月必须修复一次, 要么撬掉混凝土

收稿日期: 2004-02-23

作者简介: 赵兴东(1975—), 男, 辽宁省辽中县人, 东北大学资源与土木工程学院博士生, 主要从事岩石破裂与失稳研究。

c. 样本的数量化应着重考虑影响隧道涌水量的主要因素, 其中气候(降水量)、水文(地表水体)、地形与植被和地质-水文地质(渗透系数)要素尤为重要, 前两者在一定程度上决定了补给水源的多少, 次者则与实际入渗量的大小密切相关, 而后者决定地下水的传导能力。本次提出的相应的量化公式, 由预测结果证明是较为恰当的。但如何进一步合理地量化它们, 仍是一个值得继续深入探讨的问题。

## 参考文献

- [1] 石文慧. 论铁路隧道涌水及泥屑流突出灾害的防治[J]. 铁道勘测与设计, 1993, (1): 1-14.
- [2] 吴云生, 李法昶, 楼文虎. 秦岭隧道施工设计地质成果验证情况汇报[J]. 铁道勘测设计, 1999, (1): 1-7.
- [3] 张俊福, 邓本让, 朱玉仙. 应用模糊数学[M]. 北京: 地质出版社, 1988.
- [4] Junzheng M. Application of fuzzy mathematics in forecasting the quantity of gush water in tunnel[J]. Tunnels and Water (J. Manuel Serrano), 1988, 1: 211-216.