

隧洞开挖循环进尺的模糊分级统计法分析与研究

杨小林

(四川省水利水电勘测设计研究院, 四川 成都 610072)

【摘要】 针对隧洞开挖程序及循环进尺的理论研究与工程实际结合不够好的问题,在大量工程实践资料的基础上,运用模糊集的思想方法来探讨循环进尺的定量决策问题。所建立的数学模型对实际工程施工循环进尺进行回报,其结果正确。该方法具有一定的指导意义。

【关键词】 隧洞开挖; 循环进尺; 模糊统计; 隶属函数

中图分类号: TV554

文献标识码: B

文章编号: 1000-0860(2003)02-0037-04

1 概述

隧洞工程施工中,根据其不同的围岩地质条件、断面形状与尺寸、钻孔设备及施工习惯等,在合理选择开挖程序的基础上,分析并确定不同部位、不同地质条件下可行的开挖循环进尺及循环时间,特别是对开挖断面较大、地质条件特别差的浅埋、软岩隧道,确定与之相适应的开挖程序、循环进尺及循环时间尤为重要。这样,一方面可以最大限度地利用围岩的自身承载能力,在围岩由塑性变形发展为松散破坏的有限时间内,进行必要的初期加固,而不至于产生垮塌现象;另一方面,长隧洞引水式电站,循环进尺的合理选择与否,亦是影响工程总工期的重要因素。

在一定条件下,隧洞开挖后围岩的自承载能力随开挖循环进尺、循环时间及隧洞断面面积的增大而减弱,因此,要把围岩看成是主要承载结构,并充分发挥围岩的承载能力,必须重视对开挖循环进尺和循环时间的合理选择。为此,在不良地质条件下施工,常常采用短进尺、多循环及分部开挖的施工措施,使钻孔、出渣及支护能在围岩保持自稳的时间内完成。此外,短进尺、多循环也是减轻爆破对围岩稳定影响的重要措施。

但是,如何根据工程具体情况合理选择开挖程序及循环进尺,是一个难以定量的问题,本文基于对若干典型地下洞室开挖程序、循环进尺及循环时间的实际统计资料,应用模糊分级统计法,研究如何定量确定合理的循环进尺。

作者收集了国内外近百座隧道工程实例,并按其施工程序、分部开挖断面大小、围岩的地质特点、主要机械设备、支护方式及支护时机,对其中若干个典型工程的成功经验和失败教训进行了统计分析和归类。

2 模糊分级统计法及其影响因子

模糊分级统计法是用了解决实际工程分级问题的一种模

糊集方法。它从模糊集角度来定义实际工程中“相近”的参数概念,规定相应的隶属函数,进而按隶属函数算出模糊频数,以便得到合理的统计结果。考虑到影响循环进尺的围岩地质条件、断面大小、设备能力及施工习惯等的级别的明确划分均具有模糊性,采用此法,使得实际工程的个例不仅代表它本身,也代表了与之相近的一群,因而更能反映客观实际。

2.1 模糊分级统计法

设一个应变变量决策对象记为 Y , k 个自变量(因子)记为 X_k , $k=1, 2, \dots, K$, 按一定界限将应变量和自变量划分成级别,如深孔、正常、浅孔循环三级。划分后的分类变量分别记为 Y_m ($m=1, 2, \dots, M$) m 为应变量的级别数; X_{kj} ($k=1, 2, \dots, K$, $j=1, 2, \dots, J$), j 为第 k 个自变量的级别数。隶属函数 $\mu^m(Y)$ 表示应变变量 Y 隶属于第 m 个级别的程度,显然对不同级别而言,隶属函数是不同的。并以属于第 l 个 Y 级别中的个例的 $\mu^m(Y)$ 的均值作为分级隶属函数 μ_l^m 。

对自变量则统计处于第 k 个自变量第 j 个级别中的个例落入第 l 个 Y 级别内的分级统计频数 n_{kjl} 。如上所述,为了使分级频数更合理,应计算模糊频数,即对第 k 个自变量的第 j 个级别的个例落入第 l 个模糊 Y 级别的模糊频数为

$$q_{kjl}^m = \sum_l \mu_l^m n_{kjl} \quad (1)$$

式中 $l=1, 2, \dots, M$; $k=1, 2, \dots, K$; $j=1, 2, \dots, J$ 。

计算自变量级别所占的频数比,即

$$a_{kj} = \sum_m q_{kjl}^m / \sum_j \sum_m q_{kjl}^m \quad (2)$$

计算级频率,即

收稿日期: 2002-09-17

作者简介: 杨小林(1970—),男,四川成都人,工程师。

$$P_{kj}(Q_m) = q_{kj}^m / \sum_m q_{kj}^m \tag{3}$$

最后,用模数矩阵合成或普通矩阵乘法来做综合判断,即

$$R^T = A^T \times P \tag{4}$$

式中 $A^T = (a_1 \ a_2 \ \dots \ a_M)$ 分别为待判个例的自变量级别的频数比; T 表示转置; P 为自变量级别的分级频率组成的矩阵,即

$$P = [P_{kj}(Q_m)]_{b \times M} \tag{5}$$

2.2 参数范围选择

在研究题目中,需决策的对象为某隧洞工程的循环进尺 W ,影响因子暂取4个。其中: X_1 为围岩地质条件; X_2 为隧洞断面面积或开挖跨度; X_3 为开挖(钻孔)设备; X_4 为施工习惯(反映决策者的人为主观因素)。

对 W 、 X_1 、 X_2 、 X_3 、 X_4 的等级标准可按经验选取,一般应遵循以下原则。

2.2.1 围岩较好的地下洞室开挖程序及开挖循环进尺

围岩为Ⅰ~Ⅲ类的中小型断面的地下洞室,通常采用全断面开挖的施工程序以加快施工进度,只要适当地控制好爆破,一般不易产生塌方。而对于大型或特大型地下洞室开挖,则需采用分部、分台阶的施工程序开挖。

地质条件好、断面不大的Ⅰ、Ⅱ类围岩,由于其具有足够长的自承载能力,可采用深钻孔、大循环进尺减小辅助作业时间,以加速掘进,支护形式可采用局部喷锚,甚至取消支护。理论上,循环进尺可大大超过5m,但实际施工中,限于凿岩设备性能及操作水平,为控制因钻孔外插角而引起的径向超挖,一般选择了循环进尺在3~5m内。也有专家认为,爆破采用楔形掏槽方式时,循环进尺选用1/2~2/3倍洞宽或洞高为好。Ⅲ类围岩属地质条件稍差的围岩,围岩具有一定的自承载能力,其开挖循环进尺一般以控制径向超挖、发挥设备性能、加快掘进速度为主来确定,多数工程在2.0~3.0m内。

2.2.2 不利地质条件下地下洞室的开挖程序及开挖循环进尺

对于围岩为Ⅳ~Ⅴ类的小型隧洞开挖,一般根据隧洞断面形状及尺寸,并针对地质条件的特殊性,采用全断面或微台阶的施工程序开挖。而对于大中型断面的地下洞室施工,则必须采用适合于不同地质特点的灵活多样的开挖方式,其中分层分部的开挖方式较多。

国内外的若干工程采用新奥法施工实践证明:Ⅴ类围岩开挖,小断面隧洞及大断面隧洞的导洞开挖循环进尺多数控制在0.4~1.5m内,中型断面隧洞的上台阶开挖进尺控制在0.6~1.0m;Ⅳ类围岩的循环进尺则可增加至1.6~2.4m,并采用小药量控制爆破,在围岩自稳时间内,可有较充裕的时间完成初期支护以阻止围岩塑性区扩展为松散破坏。

综上分析结果,确定参数范围如表1所列。

表1中 X_j 表示影响循环进尺的第 k 个自变量的第 j 级别, W_l 表示循环进尺的第 l 个 k 级别。

2.3 循环进尺的模糊统计预测模型

2.3.1 建立分级统计频数表

首先根据若干实际工程实测的数据,可以统计得出对应于 X_1 、 X_2 、 X_3 和 X_4 的不同级别的浅孔、正常、深孔循环的分级频数

表 1 参数范围

变 量	级别划分	划分界限
W 进尺	W_1 浅孔	$0\text{ m} < W \leq 2\text{ m}$
	W_2 正常	$2\text{ m} \leq W < 4\text{ m}$
	W_3 深孔	$4\text{ m} \leq W$
X_1 地质	X_{11}	Ⅴ类围岩
	X_{12}	Ⅳ、Ⅲ类围岩
	X_{13}	Ⅱ、Ⅰ类围岩
X_2 跨度	X_{21}	小断面 $L \leq 4.5\text{ m}$
	X_{22}	大中断面 $4.5\text{ m} < L \leq 12\text{ m}$
	X_{23}	特大断面 $L > 12\text{ m}$
X_3 设备	X_{31}	小型(手风钻等)
	X_{32}	正常(经改装的钻孔平台车)
	X_{33}	大型(液压凿岩台车)
X_4 习惯	X_{41}	保守型
	X_{42}	正常型
	X_{43}	冒进型

n_{kjl} ,如表2所列。

由表2中对 W_1 、 W_2 和 W_3 的划分可知,这是一种截然划分,即当循环进尺为1.9m时为浅孔,而当 W 为2.1m时为正常,更合理的显然是考虑浅孔与正常、正常与深孔的中介性。这就是说,不仅(0,2)范围内属浅孔,(2,4)范围也应较低程度属浅孔。下面讨论确定合理的隶属函数形式。

表 2 分级频数 n_{kjl}

决策因子	浅孔 W_1	正常 W_2	深孔 W_3	$\sum_{j=1}^3 n_{kjl}$
X_{11}	70	5	0	75
X_{12}	25	40	30	95
X_{13}	5	55	70	130
X_{21}	55	15	5	75
X_{22}	30	60	35	125
X_{23}	15	25	60	100
X_{31}	70	15	1	86
X_{32}	25	20	4	49
X_{33}	5	65	95	165
X_{41}	70	12	5	87
X_{42}	25	70	15	110
X_{43}	5	18	80	103

2.3.2 确定合理的隶属函数

将模糊统计预测模型用于实际工程的另一关键在于确定合理的隶属函数。模糊性来源于对象本身的不确定性,造成了元素对集合隶属关系的不确定,所以隶属函数的指派要反映这些元素对集合的隶属程度。指派隶属函数对应用者来说确是一件难事,但通过隶属函数的指派可以将人的实际经验注入到解决问题的方法中去。由于隶属函数的不同,所得新数据集自然也不同,对于问题的答案也不同,因此应合理地指派隶属函数,使之更能反映客观事物的真实变化。

根据对常用的阶梯型、指数型、正态型、线性型、幂函数型、

戒上(下)型七种模糊分布曲线的分析和对隶属函数的反复套用试探,并结合大量工程实际资料统计分析和验证,本文探索出以下形式的隶属函数。

属于深孔的隶属函数为

$$\mu^1(W) = \begin{cases} 0 & W > 4 \\ \frac{1}{1 + (W/2)^2} & 4 \geq W \geq 0 \end{cases} \quad (6)$$

同理,设计属于深孔的隶属函数时也将(2.4)视为中介区,故有隶属函数

$$\mu^3(W) = \begin{cases} 0 & 0 \leq W \leq 2 \\ \frac{1}{1 + [(W-2)/2]^2} & 2 < W \leq 8 \end{cases} \quad (7)$$

属于正常的隶属函数为

$$\mu^2(W) = \begin{cases} 0 & 6 < W \\ \frac{1}{1 + (W-3)^2} & 0 \leq W \leq 6 \end{cases} \quad (8)$$

下面计算各循环进尺级别中的个例属于浅孔、正常和深孔的隶属度的平均值,其算法举例如下:

$$\mu^3(W) (8 \geq W > 4) = \frac{1}{4} \int_4^8 \frac{dW}{1 + [(W-2)/2]^2}, \text{令 } Y = \frac{W-2}{2}, \text{上式} = -\frac{1}{2} \int_1^{\frac{3}{2}} \frac{dY}{Y^2 (1+Y^2)} = \frac{1}{2} (\frac{1}{Y} + \lg^{-1} Y) \Big|_1^{\frac{3}{2}} \approx 0.77.$$

同理,可计算得其他级别的隶属度平均值,这样得到关于浅孔、正常和深孔的模糊分级隶属函数

$$\begin{cases} \mu^1(W) = 0.79/R_1 + 0.32/R_2 + 0/R_3 \\ \mu^2(W) = 0.23/R_1 + 0.79/R_2 + 0.23/R_3 \\ \mu^3(W) = 0/R_1 + 0.21/R_2 + 0.77/R_3 \end{cases} \quad (9)$$

式中 $R_1 = (0, 2)$, $R_2 = (2, 4)$, $R_3 = (4, 8)$ 为计算隶属度平均值时所取的循环进尺级别.上述三式可统一表达为

$$\mu^m(R) = \bigcup \mu_{R_l}^m \quad (10)$$

式中 $m=1, 2, 3$; $l=1, 2, 3$.

2.3.3 建立模糊统计预测模型

按公式(1)计算各决策级别对循环进尺模糊级别的模糊分级频数,如表3所列。

表3 模糊分级频数 q_{ij}^m

决策因子	浅孔 W_1	正常 W_2	深孔 W_3	$\sum_m q_{ij}^m$
X_{11}	56.90	20.05	1.05	78.00
X_{12}	32.55	44.25	31.50	108.30
X_{13}	21.55	60.70	65.45	147.70
X_{21}	48.25	25.65	7.00	80.90
X_{22}	42.90	62.35	39.55	144.80
X_{23}	19.85	37.00	51.45	108.30
X_{31}	60.10	28.18	3.92	92.20
X_{32}	26.15	22.47	7.28	55.90
X_{33}	24.75	74.35	86.80	185.90
X_{41}	59.14	26.73	6.37	92.24
X_{42}	42.15	64.50	26.25	132.90
X_{43}	9.71	33.77	65.38	108.86

对比表3和表2可知,由于隶属函数设计的不同,分级频数和模糊分级频数可以很不相同.随后计算各影响因子级别的频数比和分级频率,其结果如表4所列。

表4 因子级别的模糊频数比和分级频率

因子	因子级别	因子级别的频数比	模糊分级频率
X_1	X_{11}	$A_{11}=0.23$	$P_{11}(W_1)=0.73$ $P_{11}(W_2)=0.26$ $P_{11}(W_3)=0.01$
	X_{12}	$A_{12}=0.32$	$P_{12}(W_1)=0.30$ $P_{12}(W_2)=0.41$ $P_{12}(W_3)=0.29$
	X_{13}	$A_{13}=0.44$	$P_{13}(W_1)=0.15$ $P_{13}(W_2)=0.41$ $P_{13}(W_3)=0.44$
X_2	X_{21}	$A_{21}=0.24$	$P_{21}(W_1)=0.60$ $P_{21}(W_2)=0.32$ $P_{21}(W_3)=0.09$
	X_{22}	$A_{22}=0.43$	$P_{22}(W_1)=0.30$ $P_{22}(W_2)=0.43$ $P_{22}(W_3)=0.27$
	X_{23}	$A_{23}=0.32$	$P_{23}(W_1)=0.18$ $P_{23}(W_2)=0.34$ $P_{23}(W_3)=0.48$
X_3	X_{31}	$A_{31}=0.28$	$P_{31}(W_1)=0.65$ $P_{31}(W_2)=0.31$ $P_{31}(W_3)=0.04$
	X_{32}	$A_{32}=0.17$	$P_{32}(W_1)=0.47$ $P_{32}(W_2)=0.40$ $P_{32}(W_3)=0.13$
	X_{33}	$A_{33}=0.56$	$P_{33}(W_1)=0.13$ $P_{33}(W_2)=0.40$ $P_{33}(W_3)=0.47$
X_4	X_{41}	$A_{41}=0.28$	$P_{41}(W_1)=0.64$ $P_{41}(W_2)=0.29$ $P_{41}(W_3)=0.07$
	X_{42}	$A_{42}=0.40$	$P_{42}(W_1)=0.32$ $P_{42}(W_2)=0.49$ $P_{42}(W_3)=0.20$
	X_{43}	$A_{43}=0.33$	$P_{43}(W_1)=0.09$ $P_{43}(W_2)=0.31$ $P_{43}(W_3)=0.60$

现以围岩地质条件和开挖跨度影响因子为例,计算频数比如下:

$$a_{11} = \frac{78.0}{78.0+108.3+147.7} = 0.23; \quad a_{12} = \frac{144.8}{80.9+144.3+108.3} = 0.43;$$

$$P_{11}(W_2) = \frac{20.05}{78.00} = 0.26.$$

(下转第43页)

学性能指标明显好于不掺纤维的混凝土。

在 #28 试验块做了增加纤维掺量的试验，纤维掺量由 0.9 kg/m³ 增至 1.2 kg/m³，其力学性能指标见表 7。

表 7 #28 试验块混凝土力学性能试验成果

级配 编号	抗压强度/MPa					劈拉强度/MPa		抗折强 度/MPa	抗冻 等级	抗渗 等级
	3 d	7 d	28 d	60 d	90 d	7 d	28 d			
A-4	20.7	30.0	37.5	39.4	42.7	1.6	2.25	3.4	>F100	>W8

5.3.2 Ⅱ期面板混凝土质量评定

二期面板混凝土质量评定结果见表 8。

表 8 Ⅱ期面板混凝土质量评定结果

项 目	抗压强度 /MPa	抗渗 等级	抗冻 等级	劈裂抗拉强度 /MPa	抗折强度 /MPa
最大值	50.1	>W12	>F150	2.94	3.4
最小值	29.2	>W8	>F100	2.1	
平均值	38.8				
组数 (n)	108	7	6	15	1

6 结 语

在Ⅱ期面板开浇前，我局对班组长以上的施工及管理人员

(责任编辑 欧阳越)

(上接第 39 页)

3 在紫坪铺水利枢纽工程的验证和预测

该工程 #1、#2 导流隧洞Ⅲ、Ⅳ类围岩开挖进尺情况，其影响因子为：围岩为Ⅲ、Ⅳ类时，开挖跨度 13.0 m，采用三臂钻钻孔，施工习惯暂按正常考虑，确定其影响因子分别划入 X_{12} 、 X_{23} 、 X_{33} 、 X_{42} ，从表 4 查出，相应的频数比分别为 0.32、0.32、0.56、0.40，将它们与 X_{12} 、 X_{23} 、 X_{33} 、 X_{42} 所对应的模糊分级频率用矩阵乘法多因子线性综合，即：

$$\begin{bmatrix} 0.32 & 0.32 & 0.56 & 0.40 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} 0.30 & 0.41 & 0.29 \\ 0.18 & 0.34 & 0.48 \\ 0.13 & 0.40 & 0.47 \\ 0.32 & 0.49 & 0.20 \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} 0.354 & 0.660 & 0.590 \end{bmatrix}$$

从该例的综合结果看出，以 0.660 数值最大，故该隧洞在Ⅲ、Ⅳ类围岩条件下，采用多臂钻造孔时，按正常施工习惯，其合理循环进尺为正常循环 ($Q \leq W \leq 4$)，这一预测结果与该工程初步设计阶段采用工程类比法，以及施工阶段承包商考虑多种综合因素后确定的进尺参数 ($Q=2.5 \sim 3.0$ m) 一致。

该工程 #1、#2 导流隧洞均穿过 F_3 大断层 (宽 75~90 m)，属Ⅴ类围岩，上部开挖断面为 14.1~7.0 m，采用中心留核部，环形开挖，手风钻打孔，管棚法施工，本模型预测的正常循环进尺为

进行了详细的技术交底，并对一期面板施工工艺欠佳工序提出改进方案，使操作人员心中有数，避免盲目施工。并实施机关干部值班制度，及时解决施工问题。

严把混凝土拌和材料计量关，除砂石料由电子秤计量外，水泥、粉煤灰、聚丙烯纤维、外加剂均采用人工投放，为避免误投，采用专人投放，确保计量准确。

精心施工，混凝土拌和均匀，振捣密实及时做好面板混凝土的养护及保护工作。混凝土的内在质量是好的，各项指标均满足设计要求。

纤维混凝土宜在 30℃ 以下气温施工，坍落度最佳控制范围为：出机口 4~6 cm，仓面 2~3 cm，此值可保证运输、入仓、振捣、滑模及抹面的顺利进行。

每立方米掺 1.2 kg 纤维比掺 0.9 kg 纤维对提高混凝土抗裂有好处，但出模后抹面比较困难。

试验表明，掺入聚丙烯纤维后能减少混凝土干缩约 7%，开裂指数约 60%，提高极限拉伸约 8%，降低弹性模量约 9%，提高弯曲韧性系数 35%，抗冻等级从 F100 提高到 F200。掺入改性聚丙烯特种纤维可以明显减少混凝土收缩和开裂，改善混凝土的变形性能和提高耐久性。

$W=1.0 \sim 1.5$ m，当循环进尺 $W>2.0$ m 时，其施工习惯倾向冒进。该断层在前期开挖中，循环进尺达到 2.5~3.0 m，虽然将小管棚改为大管棚，但由于进尺过长，出现来不及进行初期支护而塌方的事故，对导流洞工期造成较大影响。该断层后期施工中，循环进尺均控制在 1.5 m 以内，施工趋于安全，开挖及支护正常化。

导流隧洞施工支洞围岩主要为Ⅱ类，开挖断面为 8 m×7 m，采用三臂钻钻孔，按上述方式采用本模型对该工程的循环进尺进行评价，当循环进尺 $W=3.0 \sim 3.5$ m 时，属正常施工习惯、合理循环进尺；当循环进尺 $W>3.8$ m 且接近 4 m 时，其施工习惯倾向冒进。该支洞施工过程中，多数循环进尺接近 4 m，出现较多的超欠挖等不利情况，证明该模型回报结果正确。

4 结 语

在本方法中，考虑到循环进尺级别划分的模糊性，探索并设计出模糊分级隶属函数，这样，落入某决策因子级别中的个例所对应的某循环进尺级别的分级频率不再是分明的，而是模糊频数。这意味着，一个个例不仅代表它本身，也代表了与之相近的一群，故模糊分级统计更能反映预测的循环进尺的实际合理性。应用该模型对二滩、大桥、漫湾、隔河岩等若干工程的隧洞开挖循环进尺进行回报，其结果与实际施工情况相吻合，说明该方法对地下工程施工具有一定的指导意义。

(责任编辑 林雁庆)