

围岩变形的非线性统计分析

高正夏,侯曙光,卢刚

(河海大学土木工程学院,江苏 南京 210098)

摘要 根据洞室围岩的变形特征,同时考虑了岩石材料的流变特性、开挖过程中的时空效应以及地下水影响,利用数理统计中的非线性模型,找出相关变量之间的表达式,建立了围岩变形的非线性回归模型,并将其用于工程实践,结果表明,该模型具有较高的可信度.

关键词 围岩 回归模型 开挖 时空效应

中图分类号 TU433

文献标识码 A

文章编号 1000-1980(2003)03-0321-03

在地下工程的施工中,围岩的稳定及变形历来是设计及施工中十分重要的两大问题.由于围岩自然特性的复杂性和其力学上的不完善性以及工程上的特殊性,因此,沿用传统的方法进行工程稳定和变形分析,会遇到很大的困难,往往出现理论和实际不相符合的状况.

洞室开挖后,围岩的应力状态将发生变化,即产生应力重分布,这是一个非常复杂的物理力学过程,要可靠地解决围岩稳定和控制围岩的变形问题,需要研究的不确定因素较多,其中一个难题是如何评估和处理岩体的流变性对围岩内力和变形的影响^[1].有限元应用于地下工程,由于能较好地模拟开挖工况,能考虑复杂的边界条件及不同介质,能同时计算围岩的变形与应力,而成为分析地下工程问题的灵活、实用和有效的手段,但是其计算精度和可靠性受岩体的物理力学参数控制.由于自然界岩石材料的地域性、多相性和不均匀性,故较难寻找一个统一的本构关系来模拟强度和变形全过程.在洞室开挖施工监测中,可以量测到反映综合效应作用的围岩变形量的最大值及其速率,但围岩变形(称为效应量)和各种影响因素(称为原因量)之间不可能用单一模式来描述,即它们之间的关系是不确定的,找不到它们之间的一个确定的数学函数表达式,所以效应量和原因量之间是一种非确定的依赖关系,称之为统计关系.本文将利用数理统计中的非线性模型,找出具有这种相关关系的变量之间的数学表达式,并讨论表达式在多大程度上反映这些变量之间的相关关系.利用这些数学表达式以及表达式的精度估计,可以作未知量的预报.

1 非线性回归模型

1.1 非线性回归的特点

作为统计模型之一的回归模型,在应用之前需根据观测数据的分布作出判断,给出一个假定的模式,这就要求使用者有一定的经验和技巧.在此基础上通过残差平方和函数的最小二乘法估算,辨识出给定模型中的参数,然后再进行统计检验,从而做出预报.当前线性回归模型发展的较为完善.而对于一般的非线性回归模型,用于工程实际的尚不多见.但是由于其能够较为全面的反映工程的实际状况,所以其应用前景相当广泛^[2].和一般的线性回归模型一样,非线性回归分析也要在众多的因子中挑选那些与效应量密切相关的因子,组成回归方程,与效应量不密切相关的因子予以剔除.由于回归方程中仅包含那些与效应量有显著相关关系的因子,因而方程是最优的.

1.2 洞室变形的非线性回归模型^[3]

根据围岩变形曲线的特点,可以假定其回归模型为指数曲线型.因此,设观测时间序列为 $\{t_i\}$, 位移观测值序列为 $\{u_i\}$, ($i = 1, 2, \dots, n$), 该模型的表达式为

$$u = A(1 - e^{-at}) \quad (1)$$

式中 a, A 为常数. 两边取对数,

$$\ln \frac{A}{A-u} = at \quad \text{令 } y = \ln \frac{A}{A-u}$$

则对应观测数据序列有一相应的 $\{y_i\}$, 则有

$$y = at \quad (2)$$

式(1)即变成一般的线性回归模型.

判别变量 y 与 t 之间线性关系密切程度是用相关系数 r 来表示:

$$r = \frac{\sum (t - \bar{t})(y - \bar{y})}{[\sum (t - \bar{t})^2 \sum (y - \bar{y})^2]^{1/2}}$$

显然 $|r| \leq 1$. 当 $|r| = 1$ 时称为完全线性相关, 当 $|r| = 0$ 时称为全无线性相关, $|r|$ 越接近于 1, 线性相关越大. 由于岩石材料具有流变的特性, 洞室围岩的变形必须考虑时空效应, 而根据实测围岩变形过程曲线的变形规律和施工过程亦表明: 洞室变形主要取决于分段开挖的进尺和流变引起的时间效应, 因此统计模型选用两类因子: 一是分段开挖进尺, 二是时效. 同时, 考虑到地下水对施工的重要影响, 将地下水位也作为一个影响因子^[3].

1.2.1 开挖进尺因子和进尺分量

洞室开挖^[2]直接造成围岩变形, 这种影响一般具有非线性关系的特征, 可以将其分解成一个多项式级数, 并取前 3 项. 用 S 表示各段的开挖进尺, 设 $R = S/F$, 则每一段的开挖进尺分量

$$Y_{S_i} = B_1 R_i + B_2 R_i^2 + B_3 R_i^3 \quad i = 1, 2, 3 \quad (3)$$

式中 B_i ——统计方程系数, R ——开挖进尺因子.

若洞室是分 K 段开挖的, 则全部开挖进尺分量

$$Y_S = \sum_{i=1}^K (B_{j+1} R_i + B_{j+2} R_i^2 + B_{j+3} R_i^3) \quad j = 3(i-1) \quad (4)$$

具体因子的选取: 每段开挖以前, 进尺 $S = 0$, 开挖过程中为实测值, 该段开挖完成后取最终进尺. 由于各因子的数值大小不一, 有时相差很大, 其统计方程系数也会相差很大, 为使系数合理一些, 用 F 来调整, 它本身没有具体物理意义, 可凭经验或试算来确定. 全部开挖进尺因子数 $N_S = 3 \times K$.

1.2.2 时效因子和时效分量

根据实测过程线, 并结合洞室变形规律, 时效影响一般符合指数函数规律, 时效因子

$$U = C(1 - e^{-bt}) \quad (5)$$

每段的时效分量

$$Y_{ti} = DU_i$$

式中 b ——常数; D ——统计方程系数; t ——时间; C ——调整常数.

K 段开挖的时效分量

$$Y_t = \sum_{i=1}^K D_{N_{S+i}} U_i \quad (6)$$

具体因子选取: 该段开挖前 $t = 0$, 开挖后按实际时间取值. 时效因子数 $N_t = K$.

1.2.3 地下水位影响分量

地下水位是地下工程施工监测的一个重要内容, 它的变动直接影响作用在支护上的山岩压力大小, 从而影响围岩变形. 地下水位影响分量

$$Y_w = \sum_{i=1}^2 A_i H^i \quad (7)$$

1.3 统计模型

综合式(2)(4)(6)(7), 地下洞室的变形应包括 3 个分量: 开挖进尺分量 Y_S , 时效分量 Y_t 以及地下水位影响分量 Y_w , 统计模型为

$$y = E + (Y_{S_t} + Y_w) t + Y_t \quad (8)$$

2 计算实例

2.1 现场资料

以广东省韶关杨溪水一级电站引水隧洞试验段为例. 对段内 5 个断面进行了变形观测, 测试断面分布在

桩号 6+125~6+170.

2.2 计算参数

因子数 按 3 段开挖, $K=3$. 开挖进尺因子数 $N_s=9$. 时效因子数 $N_t=3$. 全部因子数 $N=N_s+N_t+N_w=14$. 依经验数据取调整常数 $F=20, C=1, a=0.01$.

2.3 计算结果

以 140 d 的观测资料,取 II-1 测孔 2 号观测点处为计算预测点(见图 1),利用上述建立的统计模型进行计算,可得回归方程:

$$y=1.971-3.468R_1+1.961R_1^2-1.008R_1^3-1.912R_2+3.846R_2^2-0.902R_2^3+4.776R_3^2-0.516R_3^3+0.883U_2$$

复相关系数 $R=0.9612$, 剩余标准差 $S=0.3775$, 检验值 $F=16.2641$.

从回归方程可以看出,在设置的 14 个因子中,有 9 个因子入选. 其中开挖进尺因子入选 8 个,时效因子入选 1 个,而地下水位影响因子则没有入选. 表明围岩变形主要取决于开挖分段和速率,而时间效应以及地下水影响处于次要地位. 回归方程的复相关系数为 0.9612,显著性检验为高度显著,说明所选统计模型具有较高的精度,计算预测值与实测值的比较(图 2),表明模型具有较好的可信度.

3 总 结

- a. 从洞室开挖的时空效应着手,认为影响围岩变形的主要因素是开挖分段、开挖进尺和流变产生的时间效应,考虑地下水对围岩的影响,以此为原因量因子,建立统计模型,取得了较好的效果.
- b. 算例中时间效应量处于次要地位主要是由于该洞室实施了快速施工,支护比较及时,岩石材料的流变性尚未得到充分发展. 同时由于地下水位变动幅度不大,故其对围岩变形影响比较小.
- c. 在围岩变形资料的整理分析中统计理论用的比较少,主要是因为围岩变形的机理比较复杂,影响因素多,规律性差,测值的误差比较大. 本文对此作了尝试,取得了有益的成果. 计算表明,如果能认真分析围岩变形的原因,正确选择因子和模型,用统计分析理论进行围岩变形的分析,就可以取得较好的效果.

参考文献:

[1] 周维垣. 高等岩石力学[M]. 北京 水利电力出版社,1989. 122—128.
[2] 朱维申,何满朝. 复杂条件下围岩稳定性与岩体动态施工力学[M]. 北京 科学出版社,1995. 46—55.
[3] 邵乃辰. 统计理论在围岩变形分析中的应用[J]. 大坝观测与土工测试,2001,25(1) 58—76.

Nonlinear statistical analysis of surrounding rock deformation

GAO Zheng-xia, HOU Shu-guang, LU Gang
(College of Civil Engineering, Hohai Univ., Nanjing 210098, China)

Abstract: According to the characteristics of surrounding rock deformation of caverns, and in consideration of the rheological property of rock materials, the space-time effect during cavern excavation, and the influences of groundwater, the non-linear model in mathematical statistics was adopted to find the relationships between some relevant variables, and a non-linear regression model for surrounding rock deformation was developed. The application of the model to practice shows that the model is of high reliability.

Key words: surrounding rock ; regression model ; excavation ; space-time effect

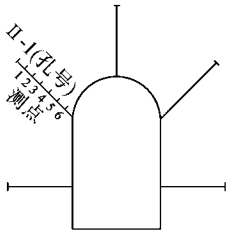


图 1 变形观测点布置
Fig.1 Arrangement of deformation observation points

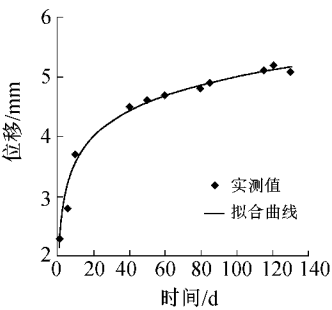


图 2 实测值与拟合曲线的比较
Fig.2 Comparison of measured values with fitting curve