

PLS 法与隧道围岩稳定性分类

解华明¹, 丁华²

(1. 中国地质大学 研究生院, 湖北 武汉 430074, 2. 浙江有色工程公司 地球物理研究院, 浙江 绍兴 312000)

摘 要: 围岩稳定性是隧道工程支护设计的基本参数, 采用偏最小二乘回归法, 综合考虑多因变量影响因素, 对隧道围岩稳定性分类进行回归建模, 并取得较好效果。

关键词: 围岩稳定性; 影响因素; 偏最小二乘回归

中图分类号: P631.4 文献标识码: A 文章编号: 1000-8918(2003)04-0320-03

隧道围岩是指隧道工程周围受开挖影响范围内的岩体, 是一复杂介质, 影响其稳定性的因素较多。目前对于隧道围岩稳定性分类仍处于一个探索阶段, 分类还带有一定事实上的模糊和不确定性, 因而如何定量对隧道围岩稳定性进行分类, 值得人们进行深入地探讨。

1 PLS 法基本原理

偏最小二乘回归 (partial least-squares regression 简记为 PLS) 是一种新型的多元统计数据分析方法, 其是在 1983 年由伍德 (S. Wold) 和阿巴诺 (C. Albano) 等人提出, 针对多元变量进行回归计算, 首先应用于化工领域, 近几年又广泛应用于市场分析和金融等领域^[1]。

1.1 算法前提

在偏最小二乘法回归中, 其首要的优点是将实测数据进行标准化, 从而使各因变量数据在回归计算过程中处于一个“平等”的地位。

(1) 中心化处理, 是指平移交换, 即

$$\dot{x}_{ij} = x_{ij} - \bar{x}_j \quad i = 1, 2, \dots, n; j = 1, 2, \dots, s \quad (1)$$

其中, x_{ij} 为实测数据, $\bar{x}_j = \sum_{i=1}^n \frac{x_{ij}}{n}$, n 为回归数据量, s 为变量个数。变换可以使新坐标系的原点与样本点集合的重心重合, 而这样的变换既不会改变样本点间的相互位置, 也不会改变变量间的相关性。

(2) 压缩处理, 是指无量纲化, 即

$$\dot{x}_{ij} = x_{ij}/s_j, \quad (2)$$

其中, $s_j = [\sum_{i=1}^n \frac{x_{ij} - \bar{x}_j}{n}]^{1/2}$, 该变换可以消除实测数据

中因测量单位不同, 而不能真正反映数据本身变化情况的假变异现象, 从而使每一个变量都具有同等的表现力。

(3) 标准化处理, 即综合 (1) 和 (2) 式

$$\dot{x}_{ij} = (x_{ij} - \bar{x}_j)/s_j, \quad (3)$$

1.2 计算步骤

对于单因变量的偏最小二乘回归, 首先要将实测自变量数据 x 和因变量数据 y 按上述方法转为标准化数据, 得到自变量矩阵 E_0 和因变量矩阵 F_0 。

(1) 已知 E_0 、 F_0 , 有

$$W_1 = \frac{E_0' F_0}{\|E_0' F_0\|}, t_1 = E_0' W_1, p_1 = \frac{E_0' t_1}{\|t_1\|^2}, r_1 = \frac{F_0' t_1}{\|t_1\|^2},$$

则有 $E_1 = E_0 - t_1 p_1', F_1 = F_0 - t_1 r_1$ 。

(2) 已知 E_1 、 F_1 , 有

$$W_2 = \frac{E_1' F_1}{\|E_1' F_1\|}, t_2 = E_1' W_2, p_2 = \frac{E_1' t_2}{\|t_2\|^2}, r_2 = \frac{F_1' t_2}{\|t_2\|^2},$$

则有 $E_2 = E_1 - t_2 p_2', F_2 = F_1 - t_2 r_2$ 。

(3) 如此计算 m 步可以得到 m 个成分 t_1, t_2, \dots, t_m , 则回归得到

$$F_0^* = r_1 t_1 + r_2 t_2 + \dots + r_m t_m,$$

另外

$$t_h = E_{h-1} W_h = E_0 W_h^*,$$

其中 $W_h^* = \prod_{j=1}^{h-1} (I - W_j p_j) W_h, h = 1, 2, \dots, m,$

从而有 $F_0^* = E_0 (r_1 W_1^* + r_2 W_2^* + \dots + r_m W_m^*)$ 。(4)

最后再利用 (3) 式将回归方程转为实测变量形式的方程

$$y = a_0 + a_1 x_1 + a_2 x_2 + \dots + a_m x_m. \quad (5)$$

算法的终止采用交叉有效性检验, 假设 y_{hi}^* 为取

t_1, t_2, \dots, t_h 用全部样本点回归后第 i 个样本点的拟合值, $y_{h(i)}$ 为取 t_1, t_2, \dots, t_h 用舍去 i 样本点的全部样本回归后第 i 个样本点的拟合值, 定义 $S_h = \sum_{i=1}^n (y_i - y_{hi}^*)^2$, $P_h = \sum_{i=1}^n (y_i - y_{h(i)}^*)^2$ 和 $Q_h^2 = 1 - (P_h / S_{(h-1)})$, 若 $Q_h^2 \geq 0.0975$, 则引进的新成分 t_h 会对模型预测能力有明显的改善作用, 否则不予引进。

1.3 算法特点

偏最小二乘回归方法与普通的多元回归分析在思路上的主要区别, 就是它在回归建模过程中采用了信息综合与筛选技术, 它不再直接考虑因变量集合与自变量集合的回归建模, 而是变量系统中提取若干个对系统具有最佳解释能力的新综合变量(又称为成分), 然后利用成分进行回归建模。

2 影响隧道围岩稳定性因素

影响隧道围岩稳定性的因素较多, 如围岩材料质量、围岩完整性、围岩地应力和地下水地质条件等^[2], 但目前能被观测并量化的主要有以下参数。

饱和抗压强度 R_b , 它可以直接给出围岩的物理力学指标, 是围岩稳定性分类的基础。

岩体纵波波速 v_p , 即弹性波在岩体中的传播速度, 可大体上反映岩体的致密程度和坚硬程度, 计算公式为

$$v_p = [(\lambda + 2G) / \rho]^{1/2} \quad (6)$$

其中, λ 为拉梅常数, G 为剪切模量, ρ 为密度。

E_d 为动弹模量, 它基本反映出岩体对拉伸或挤压的阻力大小, 计算公式为

$$E_d = \rho v_s^2 (1 + 2\sigma) \quad (7)$$

式中, ρ 为密度, v_s^2 为横波波速, σ 为泊松比。

I 为完整系数, 对于岩体来说, 其孔隙度和含水量的大小都将影响纵波传播速度, 因而定义

$$I = (v_p^2 / v_p^{*2})^{1/2} \quad (8)$$

其中, v_p 为岩体纵波波速, v_p^* 为岩块纵波波速。

在地下水水文地质条件方面, 地下水不仅增加

围岩支护结构上的支承压力, 使围岩强度降低, 还将加速围岩溶蚀, 甚至产生渗漏和泉涌, 影响隧道工程的正常使用。

3 实例应用

3.1 应用原理

通过分析可知, R_b, v_p, E_d 和 I 影响因素的大小基本上可以反映出围岩稳定性情况, 参考有关规范^[3]和文献^[4], 可得出隧道围岩分类表, 并对各类围岩给出分值, 则分值就是关于 R_b, v_p, E_d 和 I 的函数。

表1 隧道围岩分类

| 围岩类别 | I | II | III | IV | V | VI |
|------------------------------|------|------|-------|-------|-------|------|
| R_b /MPa | <5 | ≥5 | ≥15 | ≥30 | ≥45 | ≥60 |
| v_p /(km·s ⁻¹) | <1 | ≥1 | ≥1.75 | ≥2.75 | ≥3.75 | ≥4.5 |
| E_d /MPa | <0.1 | ≥0.1 | ≥0.5 | ≥2 | ≥3 | ≥4 |
| I | <0.4 | ≥0.4 | ≥0.5 | ≥0.6 | ≥0.7 | ≥0.8 |
| 分值 y | <1 | ≥1 | ≥2 | ≥3 | 4 | ≥5 |

3.2 回归计算

对表1, 采用 PLS 法, 利用 R_b, v_p, E_d 和 I 对 y 回归建模, 可得

$$y = 0.0178R_b + 0.2778v_p + 0.2386E_d + 2.5091I - 0.2801 \quad (9)$$

表2 回归计算结果

| R_b /MPa | 60 | 45 | 30 | 15 | 5 |
|------------------------------|------|------|------|------|------|
| v_p /(km·s ⁻¹) | 4.5 | 3.75 | 2.75 | 1.75 | 1 |
| E_d /MPa | 4 | 3 | 2 | 0.5 | 0.1 |
| I | 0.8 | 0.7 | 0.6 | 0.5 | 0.4 |
| 赋予分值 | 5 | 4 | 3 | 2 | 1 |
| 拟合分值 | 5.00 | 4.03 | 3.00 | 1.85 | 1.11 |

由表2 可以看出利用 PLS 法回归拟合的分值与赋予分值稳定较好, 并考虑地下水对围岩质量的影响, 将(9)式变为

$$y = \alpha(0.0178R_b + 0.2778v_p + 0.2386E_d + 2.5091I - 0.2801) \quad (10)$$

其中, α 为一系数, 大小与水文地质条件有关, 根据水文地质条件的定性分类: 简单、一般、中等和差, 分别给 α 赋值为 1、0.85、0.70 和 0.55。

表3 隧道围岩稳定性分类结果

| 序号 | R_b /MPa | v_p /(km·s ⁻¹) | E_d /MPa | I | 水文地质条件 | 拟合分值 | 分类结果 |
|----|------------|------------------------------|------------|------|--------|------|------|
| 1 | 48.6 | 3.56 | 2.54 | 0.64 | 中等 | 2.65 | III |
| 2 | 35.4 | 2.54 | 1.20 | 0.68 | 一般 | 2.59 | III |
| 3 | 29.8 | 2.48 | 1.01 | 0.57 | 中等 | 1.83 | II |

3.3 分类结果

我们以龙(游)丽(水)一级公路(松阳段)初步隧道工程地质勘察的部分段为例, 其最终给出的分类结果(表3), 与我们的实际勘察吻合较好。

4 结论

(1) 围岩稳定性是隧道工程支护设计的基本参

数,如能较为准确地给出隧道围岩稳定性的分类结果,对实际工程施工有着较高的指导意义,值得人们在此方面深入研究。

(2)针对 R_b 、 v_p 、 E_d 和 I 参数,采用偏最小二乘回归法进行建模,可以得到一个较高的计算精度,可供工程实践参考使用。

参考文献:

[1] 王惠文. 偏最小二乘回归方法及其应用[M]. 北京:国防工业出版社, 1999.

[2] 胡建华,王福寿,张世雄,等. 地下工程围岩稳定性的 MBP 神经网络识别[J]. 岩土工程界,2001,(4):63-64.

[3] JTJ064—98. 公路工程地质勘察规范[S]. 北京:人民交通出版社,1998.

[4] 莫撼,杨亚新. 水文地质及工程地质地球物理勘查[M]. 北京:原子能出版社,1997.

PARTIAL LEAST-SQUARES REGRESSION AND STABILITY CLASSIFYING OF TUNNEL WALL ROCKS

Xie Hua-ming¹, Ding hua²

(1. Graduate School, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China; 2. Institute of Geophysical ZNEC, ShaoXing 312000, China)

Abstract: Stability of the tunnel wall rock is a basic parameter in designing of any tunnel timbering project. Using the Partial Least-Squares Regression computation, this paper has classified the stability of tunnel wall rocks. The result shows that the method is effective.

Key words: stability of tunnel wall rock; influential factor; partial least-squares regression

作者简介:解华明(1979-),男,中国地质大学(武汉)数学地质与遥感地质研究所在读硕士研究生,2001年于华东地质学院资源与环境工程系获学士学位,发表论文数篇。



· 服务信息 ·

岩 矿 石 物 性 服 务

物化探研究所物性实验室一直从事岩矿石物性的调查与研究,取得了大量的科研及生产成果,并积累了较先进的各种物性参数的测试设备。现承担地质大调查项目《全国岩石物性数据库建库》的公益性工作,已积累了河北、河南、山西、陕西、江西、宁夏等六省区 19 万条区域岩矿石物性数据。以此为基础,物化探所物性实验室将继续服务于地质勘探事业,提供多方位的岩矿石物性服务。

物性数据服务:免费提供公益性物性数据。

物性测试服务:提供岩矿石规格化样品加工,物性参数(电阻率、极化率、磁化率、剩磁强度及方向、

密度、弹性波速等)的测试。

物性研究服务:根据特定的地质勘探任务,提供物性工作设计、野外样品采集、室内测试研究等协助性的物性工作。

联系人:李 磊

地址:河北省廊坊市金光道物化探研究所物性实验室

邮编:065000

Tel:0316-2212703

E-mail: lxwjuan@heinfo.net