

能力统计量在土工试验室开展测试比对方面的应用

李 姝 于洪民

(北京市勘察设计研究院有限公司,北京 100038)

【摘 要】 采用统计学的方法,选取定量结果的常用统计量—— z 比分数、偏倚的估计值和百分相对差对土工试验室开展比对试验(人员比对、仪器比对、试验室间比对)的结果进行综合分析,为在缺乏相关规范的情况下,分析评价岩土体物理力学性质指标的合理性提供一定的参考依据。

【关键词】 土工试验;比对测试;定量评价

【中图分类号】 TU 411

【文献标识码】 A

doi:10.3969/j.issn.1007-2993.2018.02.012

Application of Statistics in Comparative Test at Geotechnical Laboratory

Li Shu Yu Hongmin

(Beijing Geotechnical Institute Engineering Consultants Ltd, Beijing 100038, China)

【Abstract】 In order to analyze results of geotechnical test in comparison between operatives, apparatuses, and laboratories, select common parameters such as z -score, bias estimation and percentage relative difference based on mathematical statistics, which makes it possible to evaluate reasonability of physical and mechanics properties index of rock and soil, in the case of lacking the relevant specification.

【Key words】 geotechnical test; comparative test; quantitative estimate

0 引 言

岩土试验室的能力评价是反映其技术质量能力的重要手段,开展比对试验是为达到验证目的所采取的主要方法。比对试验主要通过人员比对、仪器比对、试验室间比对的方式来评估其数据的合理性,以验证该类试验的可靠性,从而判定试验室的能力水平。土工试验规范指出了常规试验数据的误差范围,提出了试验精度的要求;勘察设计规范采用变异系数来评估试验参数的合理性,但仍有大量的试验指标无法通过查阅相关的规范对其进行分析评价。采用统计学的方法,选取定量结果的常用统计量,依据《能力验证结果的统计处理和能力评价指南》^[1]评估岩土体试验数据的合理性、准确性,以新的方式研究岩土体物理力学指标测试结果的可靠性。

1 常用统计量

指标 1 偏倚估计值 D

$$D = x - X$$

式中: x 为参加者结果; X 为指定值。

统计量中不推荐使用 $|D|$ 或 D^2 , 这样会掩盖

偏倚的符号。当结果显示出偏倚大于 $3\hat{\sigma}$ 或小于 $-3\hat{\sigma}$ 时,则发出“行动信号”;当偏倚大于 $2\hat{\sigma}$ 或小于 $-2\hat{\sigma}$ 则发出“警戒信号”。这里系数为 2 和 3 的原因:若 x 来自于服从正态分布的总体,且 X 和 $\hat{\sigma}$ 分别为总体均值和标准差的优良估计值,那么 D 值也近似服从正态分布,其均值为零,标准差为 $\hat{\sigma}$ 。在这样的条件下,偏倚的估计值落在 $-3\hat{\sigma} < D < 3\hat{\sigma}$ 区间外的概率为 0.3%,而落在 $-2\hat{\sigma} < D < 2\hat{\sigma}$ 区间外的概率则有 5%。正因为行动信号发生概率很低,当没有真正的问题存在时,行动信号是很难出现的,所以若出现了行动信号则认为有异常情况出现是合理的,笔者选取 $-2\hat{\sigma} < D < 2\hat{\sigma}$ 区间为试验值的合理区间。

指标 2 百分相对差 $D\%$

$$D\% = \frac{x - X}{X}$$

式中: x 为参加者结果; X 为指定值。

百分相对差与偏倚有等价的解释,即当试验结果的百分相对差大于 $300\hat{\sigma}/X$ 或小于 $-300\hat{\sigma}/X$ 时,应认为产生了一个“行动信号”;当百分相对差大于

$200\hat{\sigma}/X$ 或小于 $-200\hat{\sigma}/X$ 时,可认为产生一个“警戒信号”,笔者选取 $-200\hat{\sigma}/X < D\% < 200\hat{\sigma}/X$ 区间为试验值的合理区间。

指标 3 z 比分数:

$$z = \frac{x - X}{\hat{\sigma}}$$

式中: x 为参加者结果; X 为指定值; $\hat{\sigma}$ 为能力评定标准差。

当结果的 z 值大于 3 或者小于 -3 时,发出“行动信号”;当 z 值大于 2 或者小于 -2 时,发出“警戒信号”;当 $|z| \leq 2$,表明“满意”,无需采取进一步措施,笔者选取 $-2 < z < 2$ 区间为试验值的合理区间。

1.1 指定值 X 的确定方法

a. 已知值——根据特定能力验证物品配方确定的结果;

b. 有证参考值——根据定义的检测或测量方法确定;

c. 参考值——根据对能力验证物品和可溯源到国家标准或国际标准的标准物质/标准样品或参考标准的并行分析、测量或比对来确定;

d. 由专家参加者确定的公议值——专家参加者应当具有可证实的测定被测量的能力,并使用已确认的、有较高准确度的方法,且该方法与常用方法有可比性;

e. 由参加者确定的公议值——使用统计方法,并考虑离群值的影响。例如,以参加者结果的稳健平均值、中位值(也称为中位数)等作为指定值。

1.2 能力评定标准差 $\hat{\sigma}$ 的确定方法

a. 规定值——与能力评价的目标和目的相符,由专家判定或法规规定;

b. 经验值——根据以前轮次的能力验证得到的估计值或由经验得到的预期值;

c. 由统计模型得到的估计值;

d. 由精密度试验得到的结果;

e. 由参加者结果得到的稳健标准差、标准化四分位距、传统标准差等。

1.3 指定值 X 、能力评定标准差 $\hat{\sigma}$ 的计算方法

1.3.1 稳健平均值和稳健标准差

该算法来自《测量方法与结果的准确度(正确度和精密度)》^[2],应用此算法计算得到数据平均值和标准差的稳健值。稳健性是估计算法的特点,而不是其产生估计值的特点,因此严格来说,称由此算法计算的平均值和标准差是稳健的是不确切的,应理解为利用稳健算法计算的总体均值和总体标准差的均值估计。

从一个特定检测中得到的结果总数为 p ,按递

增顺序排列数据,表示为: X_1, X_2, \dots, X_p ,这些数据稳健平均值和稳健标准差记为 X^* 和 S^* 。采用公式 1、公式 2 分别计算 x^* 和 s^* 的初始值(med 表示中位数),考虑到试验数据一般为两组,笔者采用稳健平均值和稳健标准差的初始值作为数据平均值和标准差的稳健值。

$$X^* = \text{med } X_i \quad (1)$$

$$S^* = 1.483 \times \text{med } |X_i - X^*| \quad (2)$$

1.3.2 中位值和标准化四分位距

中位值(med)和标准化四分位距(NIQR)是数据集中和分散的度量,与平均值和标准差相似。中位值是分布中间位置的一个估计,标准化四分位距等于四分位距(IQR)乘以因子 0.7413,四分位距是高四分位数和低四分位数的差值。对一组由小到大排列的数据,居于中间位置的数据为中位值,有一半的数据高于它,一半的数据低于它;居于下 1/4 位置的数据为下四分位数或低四分位数(Q_1),该组数据的 1/4 低于 Q_1 ,3/4 高于 Q_1 ;居于上 1/4 位置的数据为上四分位数或高四分位数(Q_3),该组数据的 1/4 高于 Q_3 ,3/4 低于 Q_3 。在大多数情况下 Q_1 和 Q_3 通过数据值之间的内插法获得。

从一个特定检测中得到的结果总数为 p ,按递增顺序排列数据,表示为: X_1, X_2, \dots, X_p ,这些数据的中位值按公式(3)计算,其 IQR 值和 NIQR 值按公式(4)、公式(5)计算。

$$\text{med}(x) = \begin{cases} X_{(\frac{p+1}{2})} \\ \frac{X_{(\frac{p}{2})} + X_{(\frac{p}{2}+1)}}{2} \end{cases} \quad (3)$$

$$\text{IQR} = Q_3 - Q_1 \quad (4)$$

$$\text{NIQR} = 0.7413 \times \text{IQR} \quad (5)$$

注:因子 0.7413 是从“标准”正态分布中导出。

倘若结果是从相似的 A 和 B 两个样品中获得,首先按公式(6)、公式(7)分别计算每个参加者结果的标准化(用 S 表示)和标准化差(用 D 表示),再计算所有参加者 S 和 D 的中位值以及标准化四分位距,即 $\text{med}(S)$ 、 $\text{NIQR}(S)$ 、 $\text{med}(D)$ 、 $\text{NIQR}(D)$ 。最后按公式(8)、公式(9)计算两个 z 比分数,即试验室间 z 比分数(ZB)和试验室内 z 比分数(ZW),其判定准则同 z 比分数。 ZB 主要反映结果的系统误差, ZW 主要反映结果的随机误差。对于样品对, $ZB \geq 3$ 表明该样品对结果太高, $ZB \leq -3$ 表明其结果太低, $|ZW| \geq 3$ 表明这两个结果间差值太大。

$$S = (A + B) / \sqrt{2} \quad (6)$$

$$D=(A-B)/\sqrt{2} \quad (7)$$

$$ZB=\frac{S-\text{med}(S)}{\text{NIQR}(S)} \quad (8)$$

$$ZW=\frac{D-\text{med}(D)}{\text{NIQR}(D)} \quad (9)$$

2 比对试验

以岩石点荷载试验、土体弹性模量试验以及基床系数试验为例,其中点荷载试验为人员比对,弹性模量试验为仪器比对,基床系数试验为试验室间比对。笔者对这些试验数据进行分析,以评估结果的准确性、可靠性、稳定性。

2.1 点荷载试验

两名试验员(甲、乙)各进行1组(15个试样)不规则块体的点荷载试验,选择试样最小尺寸方向为加载方向,将试样放入球端圆锥之间,使上下锥位于试样中心处,与试样紧密接触,量测加载点间距及通过两加载点最小截面的宽度或平均宽度,加载点距试样自由端的距离不应小于加载点间距的0.5倍。稳定地施加载荷,使试样在10~60 s内破坏,记录破坏载荷,破坏面贯穿整个试样并通过两加载点视为有效试验。测试结果显示:试验员甲的岩石点荷载强度为0.72 MPa,试验员乙的岩石点荷载强度为0.70 MPa。

2.2 弹性模量试验

试验采用TSZ-2型应力式全自动三轴仪(见图1),将圆柱形土样在侧向应力($\sigma_2=\sigma_3=400$ kPa)作用下,用轴向反复加荷、卸荷的方法确定土的弹性变形,计算土的弹性模量。每隔1 min施加1级压力(75 kPa),达到第4级压力(300 kPa)时,逐级卸压,每隔1 min卸1级,直至施加的轴向压力全部卸去。按上述方法重复加荷、卸荷4遍后,继续加压至600 kPa时结束试验。绘制加压、卸压与轴向变形关系曲线(见图2),将最后一个滞回圈的两端点连成直线,其斜率为土的弹性模量,第一台三轴仪测试土样的弹性模量为26 MPa,第二台三轴仪测试土样的弹性模量为26.3 MPa。

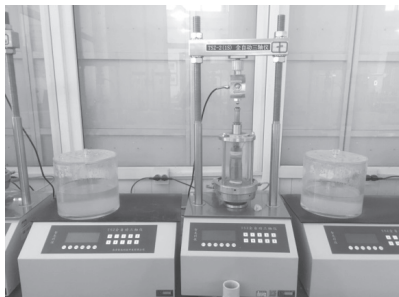


图1 应力式全自动三轴仪

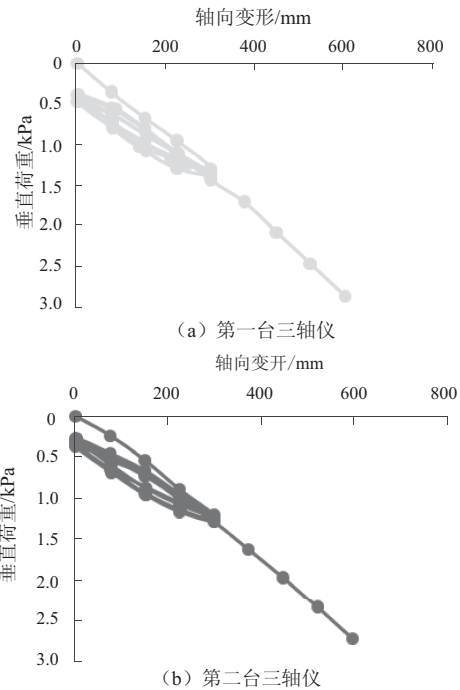
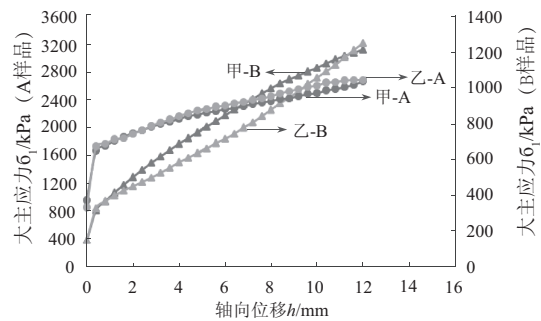


图2 垂直荷重与轴向变形关系曲线

2.3 基床系数试验

甲、乙试验室分别测试两个样品(A、B),先在三轴仪上进行 K_0 固结,最大固结围压为400 kPa,固结稳定后在 $\Delta\sigma_3/\Delta\sigma_1=0.2$ 的条件下以0.08 mm/min的剪切速率进行三轴慢剪试验,绘制大主应力随轴向位移变化曲线(见图3),其割线模量为土的基床系数。计算结果显示,甲试验室测试的A样品基床系数为34.088 MPa/m,B样品基床系数为204.01 MPa/m;乙试验室测试的A样品基床系数为37.727 MPa/m,B样品基床系数为202.96 MPa/m。



(注:样品A对应左边的纵坐标,样品B对应右边的纵坐标。)

图3 大主应力随轴向位移变化曲线

3 试验成果分析

为了综合评估试验数据的可靠性,对弹性模量和点荷载试验成果均同时采用 z 比分数、偏倚的估计和百分相对差三种指标进行评估;基床系数试验

结果来自不同试验室的两个样品,但样品间差异大,分别对 A、B 样品进行 z 比分数、偏倚的估计和百分相对差分析。计算时,笔者均选则中位值作为指定值 X ,偏倚的估计法和百分相对差法的能力评定标准差选用稳健标准差 S^* , z 比分数法的能力评定标

准差选用标准化四分位距(NIQR)。各类试验结果比对成果见表 1—表 3,计算结果显示各指标值均在允许的误差范围内,评判结果为一致性满意,一定程度反映试验人员操作符合要求,试验设备工作性能稳定,试验数据具有可靠性。

表 1 点荷载试验比对成果表

比对方法	试验人员	甲	乙	标准
z 比分数法	试验结果	0.720	0.700	
	中位值(med)		0.710	
	标准化四分位距(NIQR)		0.007413	$ z < 2$
	z 比分数	1.349	-1.349	
偏倚的估计法	试验结果	0.720	0.700	
	中位值 X^*		0.710	
	$ X - X^* $	0.010	0.010	$ D < 2\hat{\sigma}$ $ D < 0.03$
	稳健标准差 S^*		0.01483	
百分相对差法	试验结果	0.720	0.700	
	中位值 X^*		0.710	
	$ X - X^* $	0.010	0.010	$ D\% < 200\hat{\sigma}/X^*$ $ D\% < 4.177$
	稳健标准差 S^*		0.01483	
	百分相对差 $D\%$	1.408	-1.408	

表 2 弹性模量试验比对成果表

比对方法	试验仪器	第一台三轴仪	第二台三轴仪	标准
z 比分数法	试验结果	26.000	26.300	
	中位值(med)		26.150	
	标准化四分位距(NIQR)		0.111195	$ z < 2$
	z 比分数	-1.349	1.349	
偏倚的估计法	试验结果	26.000	26.300	
	中位值 X^*		26.150	
	$ X - X^* $	0.150	0.150	$ D < 2\hat{\sigma}$ $ D < 0.445$
	稳健标准差 S^*		0.22245	
百分相对差法	试验结果	26.000	26.300	
	中位值 X^*		26.150	
	$ X - X^* $	0.150	0.150	$ D\% < 200\hat{\sigma}/X^*$ $ D\% < 1.701$
	稳健标准差 S^*		0.22245	
	百分相对差 $D\%$	-0.574	0.574	

表 3 三轴基床系数试验比对成果表

比对方法	试验室	甲	乙	标准
样品 A z 比分数法	试验结果	34.088	37.727	
	中位值(med)		35.908	
	标准化四分位距(NIQR)		1.34879535	$ z < 2$
	z 比分数	-1.349	1.349	

续表

比对方法	试验室	甲	乙	标准	
样品 A	试验结果	34.088	37.727		
	中位值 X^*		35.908		
	偏倚的估计法	$ X - X^* $	1.820	1.820	$ D < 2\hat{\sigma}$ $ D < 5.397$
	稳健标准差 S^*		2.6983185		
	偏倚的估计值 D	-1.820	1.820		
百分相对差法	试验结果	34.088	37.727		
	中位值 X^*		35.908		
	$ X - X^* $	1.820	1.820	$ D\% < 200\hat{\sigma}/X^*$ $ D\% < 15.029$	
	稳健标准差 S^*		2.6983185		
	百分相对差 $D\%$	-5.067	5.067		
比对方法	试验室	甲	乙	标准	
z 比分数法	试验结果	204.010	202.960		
	中位值 (med)		203.485		
	标准化四分位距 (NIQR)		0.3891825	$ z < 2$	
样品 B	z 比分数	1.349	-1.349		
	试验结果	204.010	202.960		
	中位值 X^*		203.485		
	偏倚的估计法	$ X - X^* $	0.525	0.525	$ D < 2\hat{\sigma}$ $ D < 1.557$
	稳健标准差 S^*		0.778575		
百分相对差法	偏倚的估计值 D	0.525	-0.525		
	试验结果	204.010	202.960		
	中位值 X^*		203.485		
	$ X - X^* $	0.525	0.525	$ D\% < 200\hat{\sigma}/X^*$ $ D\% < 0.765$	
	稳健标准差 S^*		0.778575		
百分相对差 $D\%$	0.258	-0.258			

注意到 z 比分数法的结果为常数 1.349, 笔者认为 z 比分数法将中位值作为指定值 X , 标准化四分位距 (NIQR) 作为能力评定标准差, 而比对数据只有两组, 那么各数据到中位值的距离 d 等于四分位距 IQR, z 比分数法的计算值为 $1d/0.7413 \text{ IQR} = 1.349$, 说明 z 比分数法选用的指定值 (中位值) 和能力评定标准差 (标准化四分位距) 不适用于两组数据之间的比对。将标准化四分位距调整为稳健标准差 (公式 2), z 比分数为常数 0.674。依据公式 (1)、公式 (2) 获取稳健平均值和稳健标准差的初始值后, 根据以下步骤 (公式 (10) — 公式 (13)) 更新稳健平均值 X^* 和稳健标准差 S^* , 当稳健标准差的第三位有效数字和稳健平均值相对应的数字在连续两次迭代中不再变化时, 即可认为过程是收敛的, z 比分数的计算结果为常数 0.624。分析认为当数据只有两组时, z 比分数计算公式中的分子与分母有公因式 $(X - X^*)$ 导致其结果为常数。

$$\delta = 1.5S^* \quad (10)$$

对每个 X_i 计算:

$$X_i^* = \begin{cases} X^* - \delta, & \text{若 } X_i < X^* - \delta \\ X^* + \delta, & \text{若 } X_i > X^* + \delta \\ \text{其他} \end{cases} \quad (11)$$

$$X^* = \sum X_i^* / p \quad (12)$$

$$S^* = 1.134 \sqrt{\sum (X_i^* - X^*)^2 / (p - 1)} \quad (13)$$

4 结论

试验室往往开展大量的比对试验, 主要以人员比对、仪器比对、试验室间比对的方式来评估其试验结果的合理性。国家规范、行业标准起着一定的指导作用, 《土工试验方法标准》^[3] 指出, 开展含水率试验时, 必须对两个试样进行平行测定, 当含水率小于 40% 时, 其测定的差值不得大于 1%, 而当含水率大于或等于 40% 时, 其测定的差值不得大于 2%; 对于密度试验, 亦进行两次平行测定, 差值不得大于 0.03 g/cm³; 计算渗透系数时, 应取 3~4 个在允许差值 (不大于 2×10^{-n}) 范围内数据的平均值作为试样在该孔隙比下的渗透系数。《北京地区建筑地基基础勘察设计规范》^[4] 提出, 当指标的变异系数超过

规定值时,应重新统计。但仍有大量的试验指标无法通过查阅相关的规范、标准对其进行分析评价。

本次评估采用了 z 比分数、偏倚的估计值和百分相对差三种指标综合进行分析,选择中位值作为指定值 X ,偏倚的估计法和百分相对差法的能力评定标准差选用稳健标准差 S^* , z 比分数法的能力评定标准差选用标准化四分位距(NIQR),计算各统计量,并指出了试验值的合理区间分别为 $-2\hat{\sigma} < D < 2\hat{\sigma}$, $-200\hat{\sigma}/X < D\% < 200\hat{\sigma}/X$, $-2 < z < 2$ 。 z 比分数指标更为综合,笔者建议可同时采用稳健标准差 S^* 和标准化四分位距(NIQR)作为能力评定标准差进行评价,但应注意当试验数据只有两组时,不宜选用 z 比分数法。

通过以上分析可知,采用数理统计手段评估岩

土体的测试结果,可在缺乏相关规范的情况下为分析评价试验指标提供一定的参考依据。

参 考 文 献

- [1] CNAS-GL02 能力验证结果的统计处理和评价指南[S].
- [2] GB/T 6379.5—2006 测量方法与结果的准确度(正确度和精密度)第5部分:确定标准测量方法精密度的可替代方法[S].
- [3] GB/T 50123—1999 土工试验方法标准[S].
- [4] DBJ 11—501—2009 北京地区建筑地基基础勘察设计的规范[S].

收稿日期:2017-11-06

(上接第 68 页)

3)在本次试验条件下,通过对比第二组与第三组试验锚索,可以看出加长高压旋喷锚索的锚固体长度未能提高其抵抗变形的能力,分析认为是两方面因素综合作用的结果,一方面是受施工质量波动和局部土层条件变动的影响;另一方面,在本次试验条件下,当锚索锚固长度达到 9 m 时,已接近临界锚固长度,通过增大锚固长度以控制位移的增长,作用不明显。因此在设计中应当引起注意,合理设计锚固段长度,避免造成材料浪费。

4)采用双锚盘的高压旋喷锚索与采用单锚盘在抵抗塑性变形能力上有较显著的提升,塑性变形是锚索在工作过程中预应力损失的主要原因之一,因此双锚盘锚索较强的抗塑性变形能力有利于减小锚杆长期预应力损失,提高锚杆工作状态的稳定性,延长其使用寿命。

参 考 文 献

- [1] 程良奎,杨志银,等. 岩土加固实用技术[M]. 北京:地震出版社,1994.
- [2] 崔江余,贺长俊,杨桂芹. 旋喷自带钢绞线锚杆现场试验研究[J]. 岩土工程学报,2009, 31(12):1947-1951.
- [3] 周予启,刘卫未,刘 芳. 旋喷锚桩在软土地区超大深基坑中的应用[J]. 施工技术,2012, 41(7):10-13.
- [4] 刘全林. 旋喷搅拌加劲桩对软土基坑支护的机理及其支护刚度的确定方法[J]. 岩土工程学报,2011, 33(s1):339-343.
- [5] 陈新年,奚家米,张 琨. 锚杆(索)作用力学特性分析

及让压试验[J]. 煤田地质与勘探,2011,39(6):45-47.

- [6] 路 威,秦 景,娄 鹏,等. 旋喷锚杆锚固体直径计算方法及影响参数试验研究[J]. 岩土工程学报,2014,38(10): 1783-1788.
- [7] Shen S L, Wang Z F, Sun W J, et al. A field trial of horizontal jetgrouting using the composite-pipe method in the soft deposits of Shanghai[J]. Tunneling and Underground Space Technology,2013,35:142-151.
- [8] 陈志博,土向军,丁文其. 大直径可回收锚杆力学特性数值分析[J]. 岩土工程学报,2012, 34(增 1): 172-176.
- [9] 孙 克,李美梅. 关于高压旋喷锚索与普通锚索的对比试验研究[J]. 煤炭工程,2016,48(9):84-86.
- [10] JGJ/T 282—2012 高压喷射扩大头锚杆技术规程[S].
- [11] JGJ 120—2012 建筑基坑支护技术规程[S].
- [12] GB 50086—2015 岩土锚杆与喷射混凝土支护工程技术规范[S].
- [13] 沈 俊,顾金才,张向阳,等. 拉力型和压力型自由式锚索现场拉拔试验研究[J]. 岩石力学与工程学报,2012,31(增 1):3291-3297.
- [14] 尤春安. 全长粘结式锚杆的受力分析[J]. 岩石力学与工程学报,2000,19(3):339.
- [15] 张季如,唐保付. 锚杆荷载传递机理分析的双曲函数模型[J]. 岩土工程学报,2002,24(2):188-192.

收稿日期:2017-10-13