

隧道围岩抗剪强度指标 $c, \tan \varphi$ 的概率特征*

The probabilistic property of shear strength parameters
 c and $\tan \varphi$ for rock mass around the tunnel

谭忠盛 高 波 关宝树
(西南交通大学地下工程及岩土工程系, 成都, 610031)

中图法分类号 TU 452

作者简介 谭忠盛, 男, 1967 年生, 西南交通大学桥梁与隧道工程专业博士研究生。

1 前 言*

在结构可靠度分析中, 对基本随机变量进行概率统计分析是一项十分艰难而又十分关键的任务, 因为它必须收集大量的资料, 做大量的试验, 然后对其进行统计分析。在铁路隧道荷载、混凝土偏心受压以及超、欠挖等方面进行了大量的研究, 取得了它们的统计特征, 为隧道结构可靠度分析提供了可靠的依据。但是对隧道围岩抗剪强度指标的统计特征还没有进行太多的研究, 一般还都是以经验假设为主, 而在分析基于连续介质模型隧道的可靠度或分析隧道洞门可靠度时, 围岩凝聚力 c 、内摩擦系数 $\tan \varphi$ 的概率统计特征的获得是至关重要的。为此, 本文试图在这方向作些研究。

笔者从水工及铁路隧道工程的试验资料中收集了围岩抗剪强度指标 $c, \tan \varphi$ 值共 265 组, 并根据铁路隧道围岩 6 级分类标准, 进行整理、分类及统计分析。所得成果可为隧道结构可靠度分析提供必要的统计数据。

2 凝聚力 c 、内摩擦系数 $\tan \varphi$ 的概率特性

2.1 c 和 $\tan \varphi$ 的统计参数计算

由于收集到的各级围岩抗剪强度指标 $c, \tan \varphi$ 的样本数不太多, 因此在对其母体统计参数进行估计时存在着统计不定性。为了考虑统计不定性, 本文参照文献[1]的方法计算小子样的母体统计参数的估计值:

$$\mu_c = \bar{c} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n c_i \quad (1)$$

$$\delta_c = \frac{S_c}{c} \sqrt{\frac{2n^3 - 5n^2 - n + 2}{2n(n-1)(n-3)}} = \frac{1}{c} \sqrt{\frac{2n^3 - 5n^2 - n + 2}{2n(n-1)(n-3)}} \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (c_i - \bar{c})^2} \quad (2)$$

式中 μ_c, δ_c 分别为考虑统计不定性时 c 的均值和变异系数; $\bar{c}, S_c$ 分别为在样本容量为 n 时 c 的平均值和标准差; c_i 为 c 的样本值。

$\tan \varphi$ 的均值和变异系数的计算公式与 c 相同, 可用式(1) (2) 计算。 c 和 $\tan \varphi$ 的线性相关系数则由下式计算^[2, 3]:

$$\rho_{c, \tan \varphi} = \frac{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (\tan \varphi_i - \mu_{\tan \varphi})(c_i - \mu_c)}{\sigma_{\tan \varphi} \sigma_c} \quad (3)$$

式中 $\sigma_{\tan \varphi}, \sigma_c$ 分别为 $\tan \varphi$ 和 c 的标准差, 其余符号意义与前同。由式(1) ~ (3) 求得各级围岩抗剪强度指标 c 和 $\tan \varphi$ 的统计参数如表 1 所示。

表 1 各级围岩抗剪强度指标 c 和 $\tan \varphi$ 的统计参数

Table 1 Statistic data of shear strength parameters
 c and $\tan \varphi$ for rocks of different classes

围岩 级别	样本数	μ		δ		ρ	
		c /kPa	$\tan \varphi$	c /kPa	$\tan \varphi$	c /kPa	$\tan \varphi$
VI	40	12.45	0.54	0.45	0.20	-	0.26
V	61	46.30	0.57	0.42	0.21	-	0.38
IV	54	0.22	0.78	0.45	0.36	-	0.38
III	62	0.79	0.96	0.50	0.32	-	0.54
II	37	2.18	1.12	0.35	0.27	-	0.38
I	11	13.09	1.19	0.33	0.27	-	0.23

2.2 c 和 $\tan \varphi$ 的概率分布

首先根据各级围岩抗剪强度指标 c 和 $\tan \varphi$ 的样本值分别绘出统计直方图, 如图 1, 图 2 所示。

从直方图可以看出, c 和 $\tan \varphi$ 的分布呈正态或略为正偏态。因此, 可分别假设它们为结构可靠度分析中常用的 3 种概型: 正态、对数正态和极值 I 型分布, 并由 K-S 检验法进行检验, 从而求得它们的最优概率分布类型。检验结果: ① 各级围岩的 $c, \tan \varphi$ 都不拒绝正态分布的假设; ② I ~ III 级围岩 c 的最优概率分布为对数正态, IV ~ VI 级围岩 c 的最优概率分布为正态; ③ I 和 VI 级围岩 $\tan \varphi$ 的最优概率分布为对数正态, II ~ V 级围岩 $\tan \varphi$ 的最优概率分布为正态。

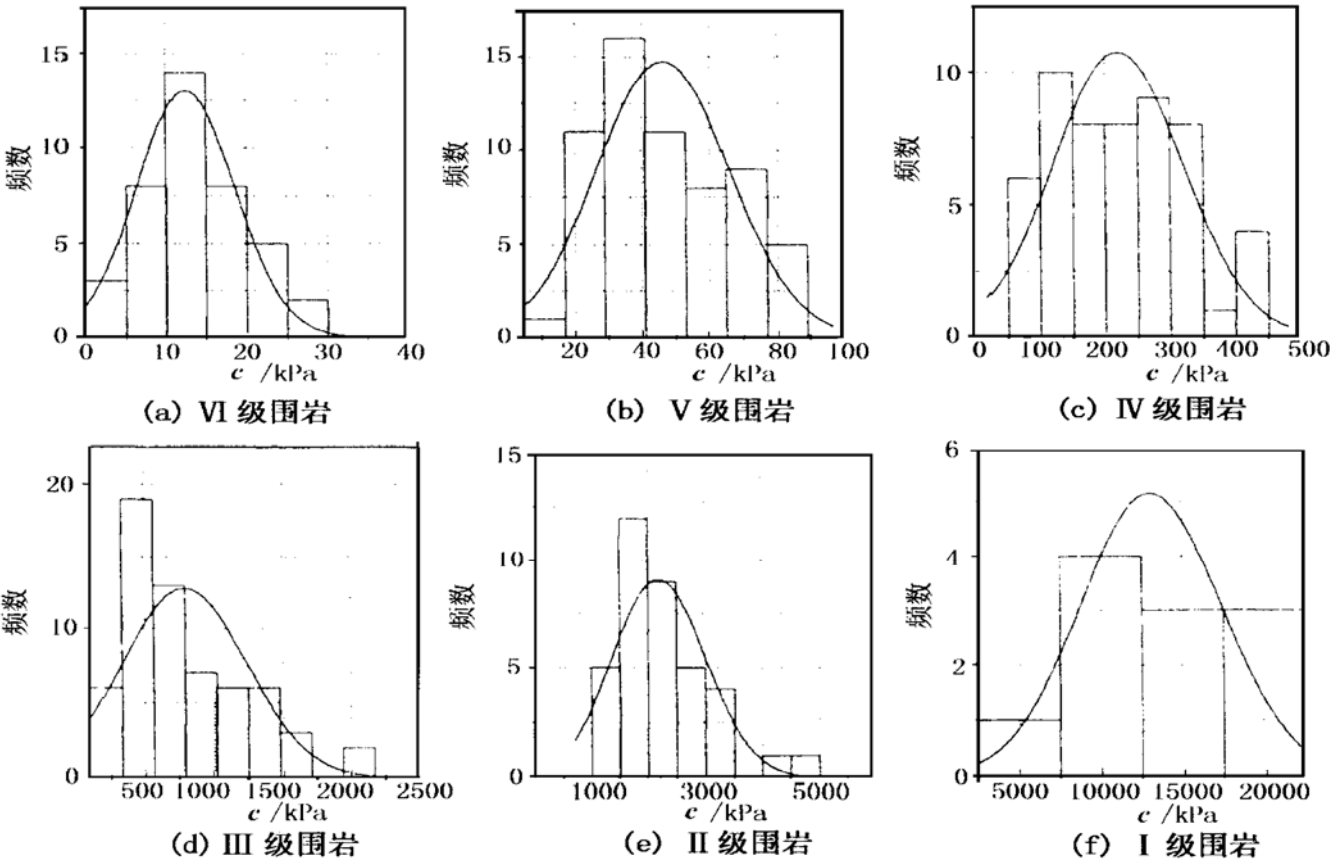


图 1 各级围岩参数 c 的频率直方图

Fig. 1 Frequency histogram of c for rock of different classes

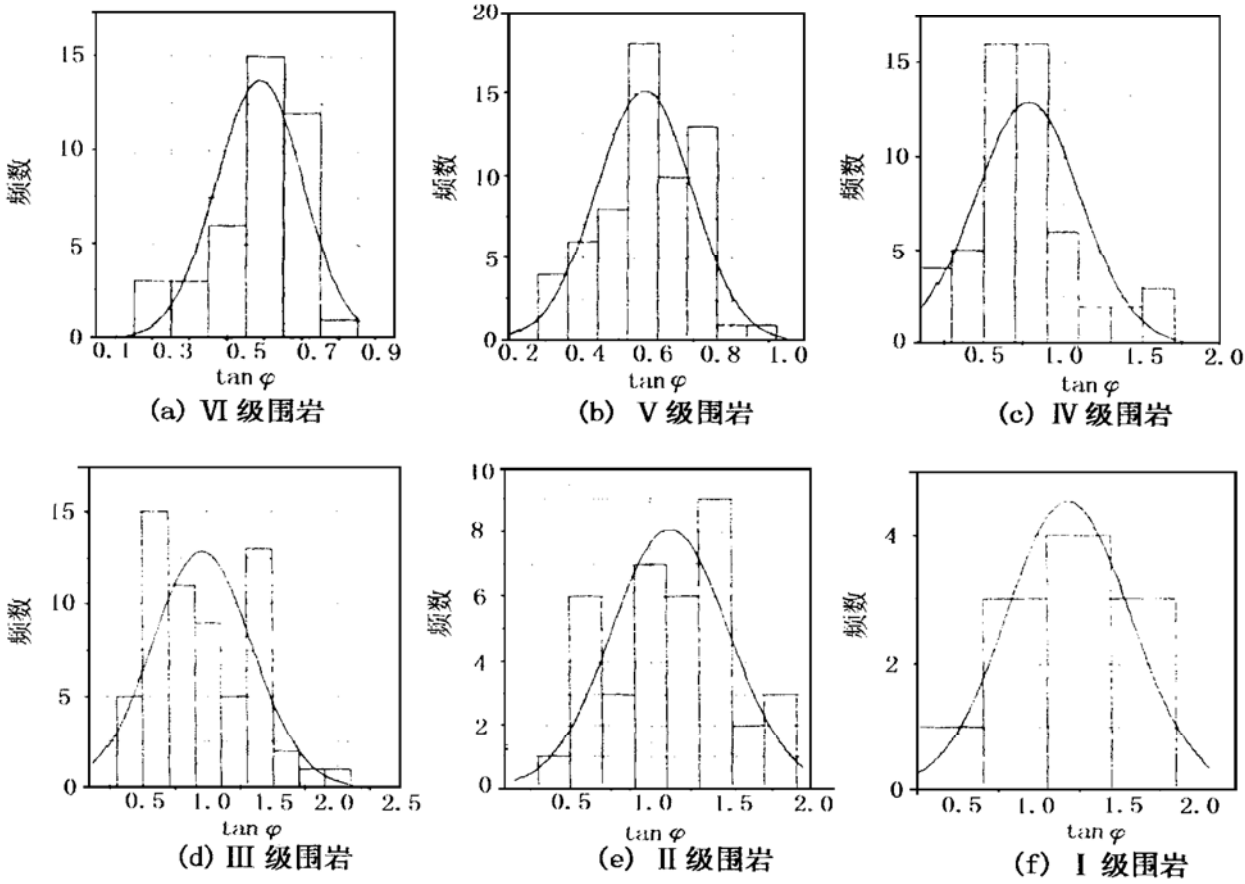


图 2 各级围岩参数 $\tan \varphi$ 的频率直方图

Fig. 2 Frequency histogram of $\tan \varphi$ for rock of different classes

从概率分布的假设检验结果来看, 各级围岩的 c , $\tan \varphi$ 最优概率分布为正态的居多, 同时注意到最优概率分布为对数正态时也不拒绝正态分布的假设。因此, 为了使用上的方便, 可把各级围岩的 c , $\tan \varphi$ 的概率分布类型统一取为正态分布。由于 I 级围岩的 c , $\tan \varphi$ 的样本数太少, 所得结果仅供参考。

3 计算摩擦系数 $\tan \varphi_0$ 的概率特性

为了将围岩的凝聚力 c 、内摩擦角 φ 综合成一个指标, 以便于土压力的计算, 因此, 隧道设计规范提出了计算摩擦角 φ_0 的概念, 其物理意义为

$$\tan \varphi_0 = \tan \varphi + c/p \quad (4)$$

式中 p 为标定情况下的法向应力。

由式(4)可以看出, 若要求 $\tan \varphi_0$ 的统计特征, 则必须知道 c , $\tan \varphi$ 及 p 的统计特征, 但 p 一般是未知的, 因此很难直接求出 $\tan \varphi_0$ 的统计特征。本文参照松尾稔^[4] 分析土抗剪强度统计特征的方法, 对 $\tan \varphi_0$ 的统计特征进行了分析。首先取一系列的 p 值, 如 50, 100, 200 kPa 等, 然后将每一个 p 值代入式(4), 并对 c , $\tan \varphi$ 按实际概率分布用蒙特卡罗法进行随机抽样, 从而得到 $\tan \varphi_0$ 的样本, 对样本进行统计分析后即可得到 $\tan \varphi_0$ 的统计特征。由于对应于每一个 p 值都可以得到 $\tan \varphi_0$ 的一个统计特征, 因此, 可以得到 $\tan \varphi_0$ 的一系列统计特征。经过对各级围岩进行这样的分析处理后得到以下两点结论: ①同一级围岩不同的 p 值所得 $\tan \varphi_0$ 的概率分布类型基本相同; ②同一级围岩不同的 p 值所得 $\tan \varphi_0$ 的变异系数变化不大。因此, 可以认为经过这样处理所得各级围岩 $\tan \varphi_0$ 的概率分布类型和变异系数能代表实际情况。但由于得不到 $\tan \varphi_0$ 的均值, 因此, $\tan \varphi_0$ 的均值可按隧道设计规范取定。

在分析 $\tan \varphi_0$ 的变异系数时, 也可以由误差传递公式求得

$$\delta_{\tan \varphi_0} = \frac{\sqrt{p^2 \cdot \sigma_{\tan \varphi}^2 + \sigma_c^2}}{\sigma \cdot \mu_{\tan \varphi} + \mu_c} \quad (5)$$

式中 $\sigma_{\tan \varphi}$, σ_c 分别为 $\tan \varphi$ 和 c 的标准差。对于正应

力 p 在一定范围内取不同的值时, 由式(5) 计算的变异系数变化不大, 这与上述用蒙特卡罗法随机抽样所得的结论一致。但尽管对 p 取定某值时, 由理论分析法也不容易甚至得不到 $\tan \varphi_0$ 的概率分布类型。

由随机抽样法 $\tan \varphi_0$ 进行统计分析后, 并将所得的结果与有关资料相比较, 给出各级围岩 $\tan \varphi_0$ 的统计特征的建议值如表 2 所示。

表 2 各级围岩 $\tan \varphi_0$ 的统计特征

Table 2 Statistical characteristics of rock of different classes

围岩级别	均值	变异系数	最优概率分布
VI		0.25	
V		0.25	
IV		0.35	正态
III		0.35	分布
II		0.30	
I		0.30	

注: 均值按隧道设计规范选取。

4 结 论

本文对铁路隧道各级围岩的抗剪强度指标 c , $\tan \varphi$ 进行了概率统计分析, 得到了 c , $\tan \varphi$ 的均值、方差、变异系数、最优概率分布以及 c , $\tan \varphi$ 的互相关系数, 同时经过计算分析并参考有关资料, 给出了各级围岩计算摩擦系数 $\tan \varphi_0$ 的概率统计特征的建议值。本文所得成果可供隧道结构可靠度分析中参考选用。

参 考 文 献

- 1 姚明初. 结构基本变量样本容量较小时分布参数的统计不定性. 见: 工程结构可靠性全国第三界学术交流会议论文集. 南京: 1992. 40~44
- 2 希德尔·J N 著. 工程概率设计原理与应用. 陈立周等译. 北京: 科学出版社, 1989
- 3 范明桥, 盛金保. 土强度指标 φ , c 的互相关性. 岩土工程学报, 1997, 19(4): 100~104
- 4 松尾稔著. 地基工程学——可靠性设计的理论和实际. 万国朝等译. 北京: 人民交通出版社, 1990

本刊为读者补缺启事

- 1 凡直接向本部订阅《岩土工程学报》, 缺期者请函告本部, 以便补寄。
- 2 凡向当地邮局订阅本刊, 缺期者应由收费邮局负责, 本部视库存情况予以补缺。
- 3 凡论文第一作者尚未收到赠阅本刊者, 请函告本部, 以便补寄。

- 4 本刊向历届编委赠送《岩土工程学报》, 凡缺期者请函告本部, 以便补寄。
- 5 凡读者持装订错误之本刊, 请退还本部, 以便补寄。
- 6 本刊之长期赠阅对象(单位或个人), 当投寄地址变更时, 请及时通报本部, 以免邮件误投。

(本刊编辑部)