

# 抗剪强度概率特性的相关与非相关回归统计法

陈立宏

(北京交通大学土木建筑工程学院, 北京 100044)

**摘要:** 正确统计土体抗剪强度指标的均值和标准差是确定抗剪强度参数合理取值的关键手段。由于实验组数较少, 相对均值而言, 标准差或变异系数的统计显得十分困难。特别是传统的线性回归方法并不能获得真正的抗剪强度指标标准差。基于概率论和泰勒展开方法, 提出了能计算抗剪强度指标标准差和相关系数的回归统计方法, 同时也给出了简单有效的不考虑强度指标互相关性的回归统计方法, 并利用大围压下土体抗剪强度变异性主要来源于 $f$ 的特性, 将大围压下的数据进行综合统计, 解决了土工实验中棘手的样本数量问题。应用不同的方法对小浪底心墙料 320 个三轴实验成果进行了统计分析, 发现不同方法都能较好地预测强度参数的不确定性。然而较大的负相关系数的存在使得矩法得到的标准差要高于非相关回归统计的结果, 因此在实际应用中, 利用矩法的成果时不应忽略相关系数, 而在诸如分项系数设计或其它默认相关系数为 0 的条件下, 应使用基于非相关假定的回归统计成果, 否则将高估抗剪强度的不确定性。

**关键词:** 线性回归; 标准差; 相关系数; 强度指标; 三轴;

**中图分类号:** TU443      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1000-4548(2013)08-1397-06

**作者简介:** 陈立宏(1975-), 男, 博士, 副教授, 主要从事岩土力学可靠度和稳定性方面的研究与教学工作。E-mail: lhchen@bjtu.edu.cn。

## Correlated and uncorrelated linear regression statistical methods for probabilistic characteristics of shear strength

CHEN Li-hong

(School of Civil Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

**Abstract:** Calculating the mean value and the standard deviation is the key step to determine the characteristic value of the shear strength parameters. The calculation of the standard deviation is much more difficult than that of the mean value due to the limited sets of strength tests. The traditional linear regression method can not obtain the valid standard deviation of shear strength index. A modified linear regression method capable to calculate the standard deviation of shear strength index is proposed based on the probability theory and the Taylor expansion method. Different assumptions dependent or independent of cohesion and friction coefficient are employed. Considering that the main variation of the shear strength of soil is determined by means of the friction coefficient under the large confining pressure, the problem of sample number can be solved by using all the test results under large pressure together based on the hypothesis that the cohesion and the friction coefficient are uncorrelated. The modified regression method and moment method are adopted to calculate the standard deviation and the correlation coefficient of shear strength indexes of core clay of Xiaolangdi Embankment Dam. The results show that different methods can provide good prediction of the uncertainty of shear strength whether the cohesion and the friction coefficient are correlated or not in assumption. The standard deviations obtained from the moment methods should be used with the coefficient of correlation. When the correlation between the cohesion and the friction coefficient is ignored, the uncorrelated regression methods should be adopted.

**Key words:** linear regression; standard deviation; correlation coefficient; shear strength parameter; triaxial test

## 0 引言

抗剪强度是土体最重要的指标, 是岩土工程设计中最核心的参数之一。抗剪强度参数的合理取值是岩土工程师面临的首要工作。由于设计中通常采用的不

基金项目: 国家自然科学青年基金项目(50909002); 水利部公益性行业科研专项项目(200801005)

收稿日期: 2012-08-06

是均值，而是一定分位数或保证率的值。例如《建筑地基基础设计规范》采用的就是 95% 保证率来求解抗剪强度指标的标准值<sup>[1]</sup>。因此在确定抗剪强度参数时不仅需要均值，也需要统计其标准差或变异系数。岩土材料强度指标的获取通常需要进行多组室内外强度试验，依据强度理论对试验结果进行分析，然后结合工程经验进行综合判定。在这过程中数理统计方法是最常见的手段。数理统计方法主要包括矩法和线性回归法两种，这两种方法对均值的统计效果都较好，但是对于标准差则由于试验样本数少以及方法本身的缺陷，常常显得无能为力。矩法通常会得到偏大的标准差。而常规线性回归方法得不到所需要的标准差<sup>[2-3]</sup>。针对线性回归方法这一缺陷，孙万禾等<sup>[3]</sup>、黄传志等<sup>[4]</sup>对直剪试验提出简化相关法，假定抗剪强度参数  $c$  和  $f$  为独立不相关的随机变量，线性回归抗剪强度  $\tau$  的方差和正应力平方来得到  $c$  和  $f$  的标准差。这一方法由于假设  $c$ ， $f$  不相关而受到一些质疑<sup>[5]</sup>。

本文基于线性回归和泰勒展开，给出了利用线性回归法求解  $c$ ， $f$  标准差、变异系数和相关系数的办法，同时给出了基于不相关假设的求解方法。并通过小浪底心墙料 320 组三轴固结排水实验实例验证对比了矩法、相关线性回归和非相关线性回归三轴方法得到的成果，对如何正确统计和合理使用不同方法的成果进行了讨论。

## 1 相关系数的讨论

土力学中最常用的强度理论就是莫尔-库仑抗剪强度理论。1776 年，库仑在直剪试验的基础上总结了库仑公式：

$$\tau_f = c + \sigma_n \tan \varphi , \quad (1)$$

式中， $\tau_f$  为剪切破坏面上的剪应力，即土的抗剪强度， $\sigma_n$  为破坏面上的法向应力， $\varphi$  为土的内摩擦角， $c$  为土的黏聚力，对于无黏性土， $c=0$ 。

1900 年 Mohr 提出：在土的破坏面上的抗剪强度是作用在该面上的正应力的单值函数：

$$\tau_f = F(\sigma) . \quad (2)$$

用该函数即可判断土体是否破坏，由该函数确定的曲线称为抗剪强度包线，又称莫尔破坏包线。如果土体单元某一个面上的法向应力和剪应力落在破坏包线外，则土体发生破坏，反之则没有；如果刚好落在破坏包线上，称土体到达了极限状态。这就是著名的莫尔-库仑强度准则。库仑公式只是在一定应力水平下式的线性特例，大多数的岩土工程问题都采用了线性的库仑公式。

根据概率论和式（1）可知：

$$\sigma_\tau^2 = \sigma_n^2 \sigma_f^2 + \sigma_c^2 + 2\rho \sigma_n \sigma_f \sigma_c , \quad (3)$$

式中， $\sigma_\tau$ ， $\sigma_c$  和  $\sigma_f$  分别为抗剪强度  $\tau_f$ ，黏聚力  $c$  和摩擦系数  $f$  的标准差， $\rho$  为相关系数。

大量学者对强度指标黏聚力  $c$  和摩擦系数  $f$  的相关性进行过研究。Lumb 认为对于一般的原状样相关性相对较小，而重塑土的相关性较大<sup>[6]</sup>。范明桥通过 58 组直剪实验统计认为相关系数为  $-0.2 \sim -0.8$ <sup>[7]</sup>。谭忠盛等对各类围岩的统计得到的相关系数为  $-0.26 \sim -0.54$ <sup>[8]</sup>。一致公认的结果是相关系数为负值。也正因为负的相关系数的存在，使得矩法统计得到的标准差比其它方法得到的标准差要偏大。

港口工程中提出针对直剪实验的简化相关法<sup>[3-4]</sup>，也即认为  $c$  和  $f$  不相关，式（3）改写为

$$\sigma_\tau^2 = \sigma_n^2 \sigma_f'^2 + \sigma_c'^2 , \quad (4)$$

式中， $\sigma_\tau'$ ， $\sigma_c'$  和  $\sigma_f'$  分别为抗剪强度  $\tau_f$ 、黏聚力  $c$  和摩擦系数  $f$  的标准差，符号 ' 仅仅为了表明非相关统计得到的标准差区别于式（3）中的标准差。

根据式（4），可以认为， $\sigma_\tau^2$  与  $\sigma_n^2$  是线性关系，通过线性回归，可以得到相应的标准差  $\sigma_c'$  和  $\sigma_f'$ 。这就是简化相关法的思路。

范明桥曾对简化相关法进行了讨论，认为不考虑变异系数，在理论上不够严密<sup>[5]</sup>。

虽然考虑相关系数能更好地模拟和预测抗剪强度的变异性，但是工程实践中往往将  $c$  和  $f$  当做独立变量考虑。这主要有 3 方面的原因：①作为独立变量考虑比较简单；②在当前各种设计规范，尤其基于极限状态分项系数方法的设计规范中，确定  $c$  和  $f$  的标准值都仅考虑各自的标准差，而并未将相关系数考虑在内；③计算相关系数目前仅有矩法能实现，线性回归方法无法获得相关系数，而矩法往往存在样本数量的困境。

无论式（3）还是式（4），本质上是两种对于抗剪强度指标不确定性的不同预测模型。这意味着如果是以  $c$  和  $f$  相关开展统计得到的参数概率特性，那么开展抗剪强度可靠度或概率计算分析时，必须考虑相关系数。反之，如果在进行计算分析时不考虑  $c$  和  $f$  的相关性，那么采用的统计参数也应当是基于不相关假设的。

考虑到当前主要的设计理论框架体系和工程实践中都是默认了  $c$  和  $f$  并不相关这一前提，换而言之，如果直接应用利用矩法得到的标准差，将获得更为保守的设计。为了更好的匹配这一体系，需要提供不考虑相关性或者隐含考虑相关性的强度指标标准差计算统计方法。从这个意思上说，简化相关法虽然不够严密，但是提供了一种基于线性回归的统计方法，能较好地解决通常统计中样本不足的问题，同时也隐性地考虑了相关性。

## 2 三轴试验参数统计方法

笔者曾提出了根据进行线性回归的大小主应力法<sup>[9]</sup>, 该方法比常用的  $pq$  法在理论更严密, 也符合线性回归的前提, 因此本文以该方法为基础进行讨论。对于  $n$  组三轴试验数据, 其破坏线的方程为

$$\sigma_1 = 2c \tan\left(\frac{\varphi}{2} + \frac{\pi}{4}\right) + \sigma_3 \tan^2\left(\frac{\varphi}{2} + \frac{\pi}{4}\right) = A + B\sigma_3, \quad (5)$$

式中,  $\sigma_1$ ,  $\sigma_3$  为大、小主应力,  $\varphi$  为土的内摩擦角,  $A$  和  $B$  为系数,  $A = 2c \tan\left(\frac{\varphi}{2} + \frac{\pi}{4}\right)$ ,  $B = \tan^2\left(\frac{\varphi}{2} + \frac{\pi}{4}\right)$ 。

根据式(5)有

$$\sigma_{\sigma_1}^2 = \sigma_3^2 \sigma_B^2 + \sigma_A^2 + 2\rho_{AB}\sigma_A\sigma_B, \quad (6)$$

其中, 第  $i$  组  $\sigma_1$  的标准差为

$$\left(\sigma_{\sigma_1}^i\right)^2 = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m \left(\sigma_{1j}^i - \bar{\sigma}_1^i\right)^2 \quad (i=1, 2, \dots, n), \quad (7)$$

式中,  $m$  为第  $i$  组试验的试样数, 上标  $i$  表示第  $i$  组的数据,  $\bar{\sigma}_1^i$  为第  $i$  组的  $\sigma_1$  的均值,  $\sigma_{1j}^i$  为第  $i$  组试验第  $j$  个试样的大主应力,  $\sigma_A$ ,  $\sigma_B$  为系数  $A$ 、 $B$  的标准差,  $\rho_{AB}$  为  $A$ ,  $B$  的相关系数。

相应地,

$$\left. \begin{aligned} f &= \tan \varphi = \tan\left(2 \tan^{-1} B^{0.5} - \frac{\pi}{2}\right), \\ c &= \frac{A}{2} \tan\left(\frac{\varphi}{2} + \frac{\pi}{4}\right) = \frac{A}{2} B^{0.5}. \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

将式(8)在  $A$ ,  $B$  均值处泰勒展开, 忽略二阶小量, 根据概率理论, 就可以得到相应的  $c$  和  $f$  的标准差、相关系数为

$$\sigma_f^2 = \left(\frac{\partial f}{\partial B}\right)^2 \sigma_B^2, \quad (9)$$

$$\sigma_c^2 = \left(\frac{\partial c}{\partial A}\right)^2 \sigma_A^2 + \left(\frac{\partial c}{\partial B}\right)^2 \sigma_B^2 + 2 \frac{\partial c}{\partial A} \frac{\partial c}{\partial B} \rho_{AB} \sigma_A \sigma_B, \quad (10)$$

$$\begin{aligned} \rho_{cf} &= \frac{E[(c - c_m)(f - f_m)]}{\sigma_c \sigma_f} \\ &= \frac{1}{\sigma_c \sigma_f} \left( \frac{\partial f}{\partial B} \frac{\partial c}{\partial B} \sigma_B^2 + \frac{\partial f}{\partial B} \frac{\partial c}{\partial A} \rho_{AB} \sigma_B \sigma_A \right) \\ &= \frac{1}{\sigma_c} \left( \frac{\partial c}{\partial B} \sigma_B + \frac{\partial c}{\partial A} \rho_{AB} \sigma_A \right). \end{aligned} \quad (11)$$

其中

$$\frac{\partial f}{\partial B} = \frac{1 + f^2}{(1 + B)B^{0.5}}, \quad (12)$$

$$\frac{\partial c}{\partial A} = \frac{1}{2B^{0.5}}, \quad (13)$$

$$\frac{\partial c}{\partial B} = \frac{-A}{4B^{1.5}}. \quad (14)$$

如果采用变异系数来表示, 式(9)、(10)变得更为简单。根据摩擦系数  $f$  和系数  $B$  的关系可知  $f$  的变异系数  $V_f$  与  $B$  的变异系数的  $V_B$  关系为

$$\begin{aligned} V_f &= \frac{\sigma_f}{f_m} = \frac{\frac{\partial f}{\partial B} \sigma_B}{f_m} = \frac{\frac{\partial f}{\partial B} B V_B}{f_m} \\ &= \frac{1 + f_m^2}{(1 + B)B^{0.5}} B V_B = \frac{1 + f_m^2}{f_m} \frac{B^{0.5}}{1 + B} V_B \\ &= \frac{1 + \tan^2 \varphi}{\tan \varphi} \frac{\tan\left(\frac{\varphi}{2} + \frac{\pi}{4}\right)}{1 + \tan^2\left(\frac{\varphi}{2} + \frac{\pi}{4}\right)} V_B = \frac{V_B}{2 \sin \varphi}, \end{aligned} \quad (15)$$

式中,  $f_m$  为  $f$  的均值。

同样黏聚力  $c$  的变异系数  $V_c$  为

$$\begin{aligned} V_c &= \frac{\sigma_c}{c_m} \\ &= \frac{\sqrt{\left(\frac{\sigma_A}{2B^{0.5}}\right)^2 + \left(\frac{A\sigma_B}{4B^{1.5}}\right)^2 - \frac{A}{4B^2} \rho_{AB} \sigma_A \sigma_B}}{\frac{A}{2} B^{0.5}} \\ &= \sqrt{\frac{V_A^2 + V_B^2}{4 - \rho_{AB} V_A V_B}}, \end{aligned} \quad (16)$$

式中,  $V_A$  是  $A$  的变异系数,  $c_m$  为  $c$  的均值。

现在问题集中在如何利用式(5)~(7)求解  $A$ ,  $B$  的概率特性参数。如果要考虑  $A$ ,  $B$  的相关性, 从理论上讲, 利用二次多项式回归残差  $\sigma_{\sigma_1}^2$  和围压平方  $\sigma_3^2$ , 即可得到  $A$ ,  $B$  的标准差和相关系数。当不考虑  $A$ ,  $B$  的相关性时, 也即假设  $\rho_{AB}=0$  时, 就可以用线性回归残差  $\sigma_{\sigma_1}^2$  和围压平方  $\sigma_3^2$ , 得到  $A$ ,  $B$  的标准差。

## 3 实例应用

黄河小浪底大坝修建过程中, 从主坝防渗心墙黏土中采用挖坑取样的方法提取碾压后的原状土, 进行了大量的土工试验<sup>[10-11]</sup>。其中包括了 64 组 320 个心墙料原状样的固结排水 CD 三轴试验。每组进行 4~6 个不同应力等级的试验, 其中最小围压为 100 kPa, 最大围压达到 1700 kPa。所有的试验成果如图 1 所示。利用线性拟合可以得到回归系数  $A$  和  $B$  分别为 227.9 和 2.188, 根据式(9)可以求得  $c$  和  $f$  的均值为 77.0 kPa 和 0.402。

根据前面介绍的方法可以对  $\sigma_1$  的残差与的  $\sigma_3$  分别进行线性回归拟合与二次项拟合, 如图 2, 3 所示。利用第 2 节中介绍的公式和方法, 可以得到  $c$ ,  $f$  的统计结果, 如表 1 所示。为进行对比分析, 利用矩法进

行统计的结果也列在表1中,从表1中可以发现:

(1)对于最常用的矩法,其 $c$ , $f$ 的变异系数要明显高于不考虑相关性的回归方法。

(2)同样都考虑相关性的矩法和线性回归方法,得到的变异系数以及相关系数较为接近。

获得了 $c$ 和 $f$ 的标准差、相关系数,就可以根据式(3)用于进行土体抗剪强度变异性的预测。预测结果详见图4。从图4中可以发现:

(1)总体上,3种方法预测得到的抗剪强度标准差与方差相近。

(2)非相关线性回归得到的结果位于矩法和相关线性回归法两者之间。

(3)正应力较小时,非相关线性回归得到的抗剪强度标准差要大于矩法。

(4)正应力较大时,抗剪强度标准差主要受 $f$ 标准差的影响,从而呈现与正应力明显的线性关系。

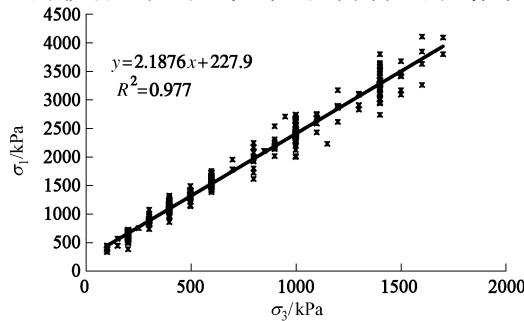


图1 大小主应力法拟合小浪底大坝心墙料强度参数

Fig. 1 CD triaxial test results of core clay of Xiaolangdi Embankment Dam

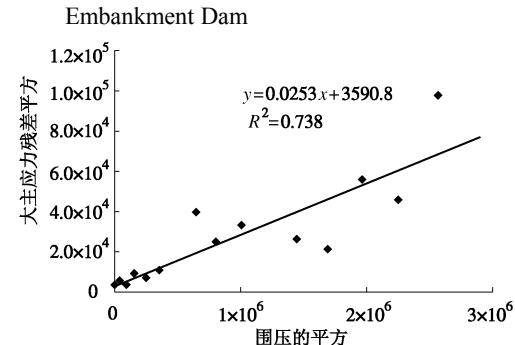


图2 大主应力的残差平方的线性回归

Fig. 2 Linear regression of squared residual of  $\sigma_1$

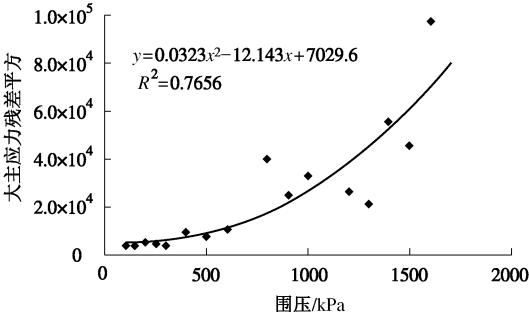


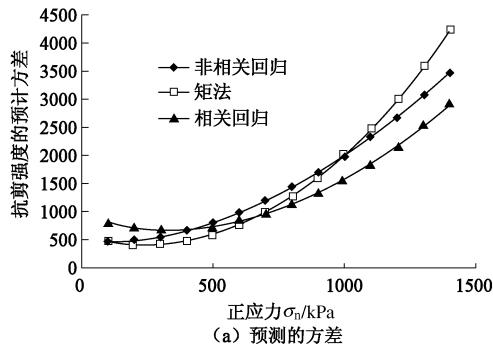
图3 大主应力的残差平方的二次多项式回归

Fig. 3 Quadratic polynomial regression of squared residual of  $\sigma_1$

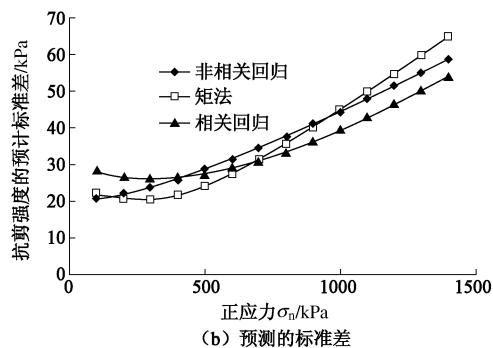
表1 不同方法得到的强度指标变异特性

Table 1 Variability characteristics of shear strength parameters

方法	$V_A$	$V_B$	$\rho_{AB}$	$V_f$	$V_c$	$\rho_{cf}$
相关回归	0.368	0.082	-0.481	0.110	0.389	-0.49
非相关 回归	0.263	0.073	0	0.098	0.2746	0
矩法	0.331	0.102	-0.504	0.128	0.378	-0.565



(a) 预测的方差



(b) 预测的标准差

图4 不同方法预测的抗剪强度方差和标准差

Fig. 4 Predicted variance and standard deviation of shear strength by different methods

#### 4 几点讨论

第3节的应用实例很好地说明了不同的统计方法都能对抗剪强度参数的不确定性进行良好的预测。对于最常用的矩法,应用标准差的同时也须使用相关系数。而实际工作中常用的做法却恰恰相反,应用矩法求解 $c$ , $f$ 的标准差、变异系数后,往往不进行相关系数的求解,在应用中常常默认相关系数为0。这一问题在进行分项系数设计计算中尤为突出。在极限状态分项系数设计中,标准值往往都是某一分位数,也即均值减去标准差的某个倍数。在进行材料强度指标的分项系数标定中也都默认 $c$ , $f$ 是独立变量。而由于负的相关系数的存在,使得考虑相关系数的矩法得到 $c$ , $f$ 的变异系数要明显偏高。如果使用矩法时忽略相关系数将造成对抗剪强度变异性过高的估计。因此针对这类问题,采用非相关的回归统计方法更为合理、简单。

虽然理论上可以应用第2节的方法进行计算,但

是从图2, 3中可以发现 $\sigma_1$ 的残差与 $\sigma_3$ 的二次多项式和线性回归的结果并不理想, 相关系数 $R^2$ 仅为0.766和0.738。拟合得到的结果, 特别是 $c$ 受数据影响较大。同时一般工程也不可能开展如小浪底那么多的试验, 因此在进行计算分析时, 必须综合以往的试验成果和工程经验加以统筹考虑。

如果采用非相关回归方法, 当围压较大,  $(\sigma_3\sigma_B)^2 \gg (\sigma_A)^2$ 时, 即大围压下 $\sigma_1$ 的方差可忽略 $(\sigma_A)^2$ 的影响, 此时可以采用:

$$\sigma_{\sigma_1}^2 = \sigma_A^2 + \sigma_3^2\sigma_B^2 \approx \sigma_3^2\sigma_B^2, \quad (17)$$

因此可以采用下式统计 $B$ 的标准差:

$$\sigma_B = \frac{S_{\sigma_1}}{\sigma_3} = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n \frac{(\sigma_{1i} - A - B\sigma_{3i})^2}{\sigma_{3i}^2}, \quad (18)$$

式中,  $S_{\sigma_1}$ 为 $\sigma_1$ 的样本方差,  $n$ 为统计样本数, 下标*i*表示试样号。

上述做法的主要好处在于, 可将满足 $(\sigma_3\sigma_B)^2 \gg (\sigma_A)^2$ 条件的试验数据一起统计, 从而解决了试验样本不足的问题。

众所周知, 库仑抗剪强度公式仅是在莫尔强度准则在低应力条件下的线性特例, 在试验应力较大的情况下, 抗剪强度破坏包线将呈现明显的非线性, 高围压下莫尔强度包线是向下弯曲的<sup>[12]</sup>。在小浪底实例中, 应力范围较大, 最大试验围压达到了1700 kPa。因此采用线性指标统计得到的变异系数将包含一定的模型误差。为了对这一问题进行分析, 可以将小浪底试验数据按最大围压分别为600, 800, 1000, 1200, 1400, 1700 kPa分别进行统计, 结果如表2所示。从表2和图5中可以清楚地发现,  $f$ 的变异系数相差不大, 基本为0.1左右。而 $c$ 的变异系数随围压的增加有明显的增加, 在围压 $\sigma_3 \leq 1000$  kPa时,  $c$ 的变异系数小于0.20。当围压 $\sigma_3$ 从1000 kPa增加到1700 kPa时,  $c$ 的变异系数从0.19增加到0.27。从这一结果看, 模型导致的误差主要出现在 $c$ 的变异性中, 这一点也可从图1中得到印证。图1中的回归直线的左端并不在试验数据的中点, 而是有明显的上翘, 直线左端值要大于 $\sigma_3=100$  kPa时的 $\sigma_1$ 均值。

表2 不同最大围压下抗剪强度指标变异性

Table 2 Variability of shear strength parameters under different maximum confining pressures

$\sigma_3$ /kPa	$A$	$B$	$V_B$	$c$ /kPa	$f$	$V_f$	$V_c$
600	150.84	2.396	0.065	48.72	0.451	0.08	0.18
800	168.47	2.341	0.074	55.05	0.438	0.09	0.16
1000	192.10	2.172	0.080	65.17	0.398	0.11	0.19
1200	201.41	2.247	0.080	67.18	0.416	0.10	0.22
1400	218.49	2.206	0.078	73.55	0.406	0.10	0.26
1700	226.16	2.187	0.078	77.00	0.402	0.10	0.27

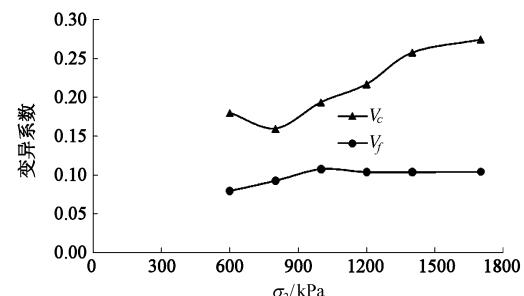


图5 不同最大围压下的抗剪强度指标变异性系数

Fig. 5 Coefficient of variation under different maximum confining pressures

## 5 结论

统计方法是获取合理的抗剪强度指标的主要手段, 由于土体材料的天然变异性, 相对均值而言, 标准差或变异系数的统计要困难许多。

(1) 本文提出了基于线性回归的三轴试验参数统计方法, 可以考虑或不考虑 $c$ ,  $f$ 的相关性。虽然本文方法是针对三轴试验的, 但是直剪试验的统计也可应用这一思路, 而且将更为简单。同时提出了利用大围压下, 土体抗剪强度变异性主要来源于 $f$ 的特性, 将大围压下的数据进行综合统计, 解决了土工试验中最为棘手的样本数量问题。

(2) 应用常规矩法获得的 $c$ ,  $f$ 的标准差必须与相关系数联合使用, 才能避免高估抗剪强度的不确定性。

(3) 不少工程实践问题往往是在默认 $c$ ,  $f$ 不相关的前提下进行的, 此时应尽量使用基于非相关回归统计得到的成果。

(4) 对于小浪底这样一级坝的碾压心墙料, 可以发现黏聚力 $c$ 的变异系数为0.22~0.27, 出现了较明显的随围压的增长而增加的现象, 导致这一现象的主要原因在于高围压时, 抗剪强度出现了较强的非线性特性, 而采用库仑强度理论进行统计, 引入了一部分的模型误差。

## 参考文献:

- [1] GB50007—2001 建筑地基基础设计规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2002. (GB50007—2001 Code for design of building foundation[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2002. (in Chinese))
- [2] 陈立宏, 陈祖煜, 李广信. 线性回归抗剪强度指标方法的改进[J]. 岩土力学, 2007, 28(7): 1421~1426. (CHEN Li-hong, CHEN Zu-yu, LI Guang-xin. A modified linear

- regression method to estimate shear strength parameters[J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, 28(7): 1421 - 1426. (in Chinese))
- [3] 孙万禾, 杨金良. 土的抗剪强度指标统计方法的分析[J]. 港口工程, 1996(3): 5 - 16. (SUN Wan-he, YANG Jin-liang. Analysis of statistical methods of shear strength parameters of soil[J]. Harbour Engineering, 1996(3): 5 - 16. (in Chinese))
- [4] 黄传志, 孙万禾. 土的抗剪强度指标统计方法的探讨[J]. 水运工程, 1989(1): 45 - 51. (HUAN Chuan-zhi, SUN Wan-he. Discussion of statistical methods of shear strength parameters of soil[J]. Port & Waterway Engineering, 1989(1): 45 - 51. (in Chinese))
- [5] 范明桥, 盛金报. 土强度指标 $\phi, c$  的互相关性[J]. 岩土工程学报, 1997, 19(4): 100 - 104. (FAN Ming-qiao, SHENG Jin-bao. Relation of shear strength parameters of soil  $\phi, c$ [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1997, 19(4): 100 - 104. (in Chinese))
- [6] LUMB P. The variability of natural soils[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1966, 30(2): 74 - 97.
- [7] 范明桥. 黏性填筑土强度指标 $\phi, c$  的概率特性[J]. 岩土工程学报, 2000, 19(4): 100 - 104. (FAN Ming-qiao. Probabilistic property of shear strength parameters  $\phi, c$  of refilled clay[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2000, 19(4): 100 - 104. (in Chinese))
- [8] 谭忠盛, 高波, 关宝树. 隧道围岩抗剪强度指标 $c, \tan\varphi$  的概率特征[J]. 岩土工程学报, 1999, 21(6): 760 - 762. (TAN Zhong-sheng, GAO Bo, GUAN Bao-shu. The probabilistic property of shear strength parameters  $c$  and  $\tan\varphi$  for rock mass around the tunnel[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1999, 21(6): 760 - 762. (in Chinese))
- [9] 陈立宏, 陈祖煜, 李广信. 三轴试验抗剪强度指标线性回归方法的讨论[J]. 岩土力学, 2005, 26(11): 1785 - 1789. (CHEN Li-hong, CHEN Zu-yu, LI Guang-xin. Discussion of linear regression method to estimate shear strength parameters from results of triaxial tests[J]. Rock and Soil Mechanics, 2005, 26(11): 1785 - 1789. (in Chinese))
- [10] 黄委会小浪底工程质量检测联营体. 小浪底主坝防渗体挖坑取样试验及现场检测成果综合分析报告[R]. 郑州: 黄委会小浪底工程质量检测联营体, 2001. (Yellow River Conservancy Commission of the Ministry of Water Resources Xiaolangdi Engineering Quality Inspection Joint Venture. Report of digging and sampling experiment of cut-off wall of main dam of Xiaolangdi and comprehensive analysis of site detection results[R]. Zhengzhou: Yellow River Conservancy Commission of the Ministry of Water Resources Xiaolangdi Engineering Quality Inspection Joint Venture, 2001. (in Chinese))
- [11] 陈立宏. 土石坝固结和稳定的风险与可靠度分析[D]. 北京: 清华大学, 2003. (CHEN Li-hong. Risk and reliability analysis of consolidation and stability of earth-rockfill dams[D]. Beijing: Tsinghua University, 2003. (in Chinese))
- [12] 陈立宏, 陈祖煜. 堆石非线性强度特性对高土石坝稳定性的影响[J]. 岩土力学, 2007, 28(9): 1807 - 1810. (CHEN Li-hong, CHEN Zu-yu. Effect of nonlinear strength of rockfill on slope stability of high earth-rock dam[J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, 28(9): 1807 - 1810. (in Chinese))

## 《建筑科学与工程学报》2014年征订通知

《建筑科学与工程学报》是国家教育部主管, 长安大学与中国土木工程学会联合主办的学术性期刊, 是《中文核心期刊要目总览》2011 版来源期刊, 主要报道建筑科学与工程领域的最新研究成果, 包括结构工程、岩土工程、防灾减灾工程及防护工程、桥梁工程、市政工程、建筑材料、建筑学、力学、暖通空调等专业及相关领域的科研、设计、施工方面的研究成果与工程实践总结。

《建筑科学与工程学报》的主要读者对象为建筑科学与工

程领域的科研人员、工程技术人员、大专院校师生及管理决策人员。

《建筑科学与工程学报》为季刊, 大16开本, 128页, 每期定价30.00元(含邮寄费), 全年共120.00元, 国内外公开发行, 邮发代号: 52-140, 订阅时也可直接汇款至《建筑科学与工程学报》编辑部, 欢迎国内外读者订阅!

地 址: 西安市南二环路中段长安大学内; 邮 编: 710064; 电 话: (029)82334397; E-mail: jzxb@chd.edu.cn。  
(《建筑科学与工程学报》编辑部 供稿)