

基于面积和应力修正的直剪试验数据分析

余 凯^{1, 2}, 姚 鑫¹, 张永双¹, 李成功³, 欧 璐⁴

(1. 中国地质科学院 地质力学研究所, 北京 100081; 2. 中国地质大学 工程技术学院, 北京 100083;
3. 西南交通大学 经济管理学院, 四川 成都 610031; 4. 中国科学院 地质与地球物理研究所, 北京 100029)

摘要: 直剪试验具有方便、经济的优点, 被广泛应用, 提高直剪试验数据的可靠性具有重要意义。在总结前人研究成果的基础上, 将直剪试验结果数据的修正分为 2 类: 单点面积修正方法和多点面积修正方法。通过简化受剪切土体受力物理模型, 提出基于面积修正和正应力修正的单点面积应力修正方法。结果表明: 该方法有效、可靠的, 修正后的强度指标要大于其他 2 种方法, 并且对 3 种方法的实际运用进行简单探讨。在推导过程中, 提出面积修正系数和正应力修正系数。修正系数结果表明: 随着剪切位移的增加, 有效剪切面上的剪应力大于实测值; 有效剪切面积上的正应力小于施加的竖向应力, 并且随着剪切位移的增加而逐渐减小; 非有效剪切面上的正应力呈逐渐增大趋势。由于直剪试验本身的缺陷, 使得其修正后的强度参数与三轴试验结果存在一定差别。提出的单点面积应力修正方法提高了利用直剪试验获取土体抗剪强度参数的可靠性和准确性。

关键词: 土力学; 直剪试验; 抗剪强度参数修正; 面积修正; 应力修正

中图分类号: TU 41

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 6915(2014)01 - 0118 - 07

ANALYSIS OF DIRECT SHEAR TEST DATA BASED ON AREA AND STRESS CORRECTION

YU Kai^{1, 2}, YAO Xin¹, ZHANG Yongshuang¹, LI Chenggong³, OU Lu⁴

(1. *Institute of Geomechanics, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100081, China;*

2. *College of Engineering and Technology, China University of Geosciences, Beijing 100083, China;*

3. *School of Economics and Management, Southwest Jiaotong University, Chengdu, Sichuan 610031, China;*

4. *Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China)*

Abstract: The direct shear test(DST) is widely used because of its convenience and economy. It is of great significance to improve the reliability of the DST data. Based on the summary of former test results, the DST data correction is divide into two types, single-point area correction method and multipoint area correction method. By simplifying the force analysis model of shearing soil, an area-stress correction(ASC) method is presented. The results show that this method is effective and reliable. The corrected strength parameters are more than those of other two methods. A simple discussion on the practical application of these methods is done. In the derivation process, the area correction coefficient and the normal stress correction coefficient are put forward. The correction coefficients of ASC show that the shear stress on the effective shear plane is greater than the measured results; and the normal stress on the effective shear area is less than the applied vertical stress with the shear displacement increasing. The normal stress on the non-effective shear plane is increasing. Since the disadvantages and defects of

收稿日期: 2013 - 01 - 30; **修回日期:** 2013 - 04 - 08

基金项目: “十一五”国家科技支撑项目(2011BAK12B09); 国家自然科学基金资助项目(41072269); 中国地质调查局工作项目(1212010914025)

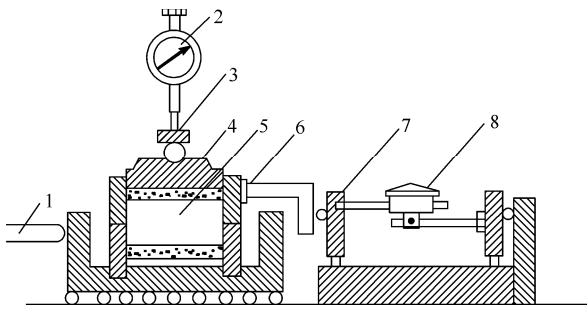
作者简介: 余 凯(1988 -), 男, 2011 年毕业于中国地质大学(北京)土木工程专业, 现为硕士研究生, 主要从事工程地质与地质灾害方面的研究工作。
E-mail: yukai198883@126.com

the DST, there are some differences between the corrected strength parameters and those of triaxial test. The mathematical analysis and test results indicate that ASC method is effective and reliable. It improves the accuracy of soil shear strength parameters obtained from DST.

Key words: soil mechanics; direct shear test; shear strength parameters correction; area correction; stress correction

1 引 言

目前测定土的抗剪强度参数的室内试验主要有：直剪试验(慢剪、快剪、固结快剪)、三轴试验(CU, CD, UU)、环剪试验、无侧限抗压强度试验、单剪试验等。李广信等^[1-2]对不同试验获得的土的强度指标应用进行了论述。三轴试验和环剪试验的主要特点有结果准确、可靠，但历时周期长，制样要求高等。直剪试验由于设备简单(见图 1^[3]、2)、易操作、方便、经济，因而被广泛应用。相关规程及规范都将其作为获取土体抗剪强度指标的主要技术手段之一^[3-4]。所以，提高该试验方法试验数据的可靠性在滑坡治理、地基处理、填方、堤坝工程等方面具有重要意义。



1—推动座；2—位移计；3—垂直加荷框架；4—压力板；5—试样；6—剪切盒；7—测力计；8—测力百分表

图 1 直剪仪装置示意图^[3]

Fig.1 Schematic diagram of direct shear apparatus^[3]

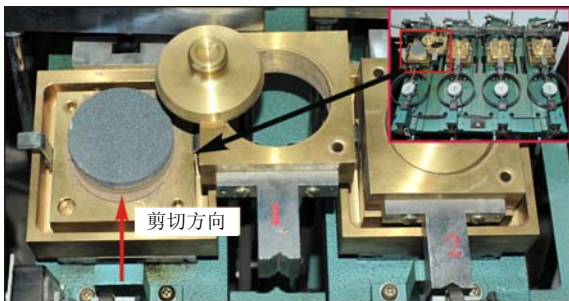


图 2 应变式直剪仪

Fig.2 Strain-controlled direct shear apparatus

H. Kishida 等^[5-9]对直剪试验存在的不足进行了探讨，并针对这些不足进行了相关修正。在试验过程中，随着剪切位移的增加，有效剪切面积逐渐减

小和剪切面上正应力不稳定的规律性得到了各学者的一致认可^[10]。胡黎明等^[10-12]从数值模拟的角度(有限元法、离散元法等)模拟直接剪切过程中剪切带范围、剪切面上剪应力变化等特征。数值模拟虽然考虑了剪切盒壁与剪切土体的相互作用，但是很少考虑到剪出的土体底部与下部剪切盒顶面接触部分的作用力(见图 3 中 σ_1)的影响。图 3 中， σ_0 为剪切土样顶部受均布压力； P 为右侧面均布压力； σ_1 为剪切盒对非有效剪切面 A_1 上作用均布正应力； σ_2 为有效剪切面 A_2 上作用均布正应力； τ' 为有效剪切面 A_2 上均匀分布的剪切应力；点 Q 为有效剪切面积的中心。大多学者认为有效剪切面上的正应力逐渐增大^[7, 9]。本文针对有效剪切面积和有效正应力，提出了单点面积应力修正方法，得出有效剪切面上的正应力逐渐减小的推论，为室内直剪试验的结果修正提供了理论依据。通过修正，提高了利用直剪试验获取土体抗剪强度参数的可靠性和准确性，具有重大的工程意义。

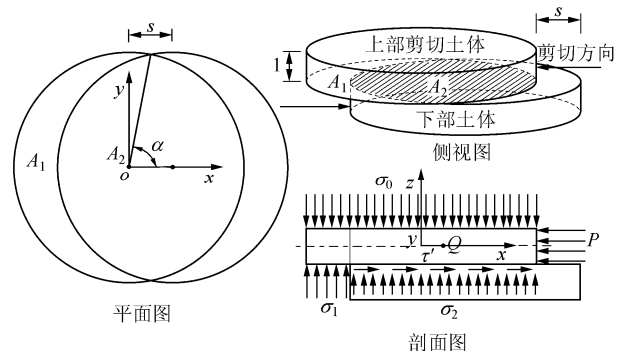


图 3 剪切过程受力示意图

Fig.3 Sketch of force analysis during shearing process

2 直剪试验原理

常规的室内直剪仪为应变控制式直剪仪，系统组成如图 1 所示。试样尺寸为 $\phi 61.8 \text{ mm} \times 20 \text{ mm}$ 。

根据库仑定律，土的抗剪强度可以表示为

$$\tau_f = c + \sigma \tan \varphi \tag{1}$$

式中： τ_f 为抗剪强度， c 为黏聚力， σ 为作用在剪切面上的正应力， φ 为土的内摩擦角。

直剪仪的剪应力计算公式^[3-4]为

$$\tau = CR \tag{2}$$

式中： τ 为试样所受剪切应力(kPa)， C 为测力计系数(kPa/(0.01 mm))， R 为测力计量表读数(0.01 mm)。

通过施加不同的垂直应力得到相应抗剪强度值，用最小二乘法拟合抗剪强度与垂直应力关系曲线，得到抗剪强度参数 c ， φ 值。

3 直剪试验修正方法

由于直剪试验存在诸多缺陷，如剪切面积的动态变化、剪切面上应力分布不均、剪切过程中排水条件不明确等，何满潮等^[6-9]针对直剪试验过程进行了相关修正。可以总结为以下 2 种方法：(1) 单点面积修正方法；(2) 多点面积修正方法。

3.1 单点面积修正方法

现行的土工试验标准、规程均是采用应变控制式直剪仪^[3-4]，其本质是利用牛顿第二定律来求得相应的剪应力：

$$F - \tau A = ma \tag{3}$$

式中： m 为剪切土体质量； F 为测力计测出的水平推力； A 为试样的剪切面积； a 为剪切土体的加速度，当 $a = 0$ 时有 $\tau = F/A$ ，面积校正后的抗剪强度为

$$\tau_i = \tau' = \frac{\tau A_0}{A_2} = \frac{CRA_0}{A_2} = \tau\beta \tag{4}$$

式中： $\beta = A_0/A_2$ 为剪应力修正系数。显然 β 只与剪切位移有关。可认为对土体施加的水平推力就是剪切面上的剪力。这也是为什么不用应力控制式直剪仪，而推荐采用应变控制式直剪仪的根本原因。

根据施加正应力与剪应力的关系拟合出土体抗剪强度参数。如果仅仅考虑面积修正，则得出修正后强度指标要略大于修正前强度指标^[9]。若不考虑正应力修正，该方法称为单点面积修正方法。

3.2 多点面积修正方法

多点面积校正方法本质是基于动量守恒或能量守恒。由上部土体平行于剪切方向的动量守恒和上部土体能量守恒可得

$$\int_{t_1}^{t_2} [F(t)dt - \tau A(t)dt] = m\Delta v \tag{5}$$

$$\int_{s_1}^{s_2} [F(s)ds - \tau A(s)ds] = \Delta E \tag{6}$$

式中： t_1 ， t_2 分别为剪切始、末时间； Δv 为剪切初始速度差； ΔE 为动能差； s_1 ， s_2 分别为剪切始、末位移。

由于上部土体初始状态速度变化与质量的乘积

远小于水平推力对时间的积分，所以可以认为 $m\Delta v = 0$ ， $\Delta E = 0$ ，假设剪切面上的剪应力为定值，式(5)，(6)可以统一写成：

$$\tau = \frac{\int_{q_1}^{q_2} F(p)dp}{\int_{q_1}^{q_2} A(p)dp} \text{ 或 } \tau_i = \frac{X_i}{Y_i} \tag{7}$$

式中： q_1 ， q_2 分别为剪切始、末时间或剪切始、末位移； X_i 为水平推力在时间范围内的积分或水平推力在剪切位移范围内的积分； Y_i 为有效剪切面积在时间范围内的积分或有效剪切面积在剪切位移范围内的积分。修正结果表明：修正后的结果大于修正前的结果^[8]。此时若令 $q_2 = q_1 + \Delta q$ ，当 Δq 无穷小时， $\tau = F(p)/A(p)$ ，所以其实质依然是面积校正。积分方式的表达物理意义是剪应力在时间 $t_1 \sim t_2$ 范围内或 $s_1 \sim s_2$ 范围内取平均值，所以将这种方法称为多点面积修正方法，当积分范围趋于 0 时退化为单点面积修正方法。

3.3 2 种方法适用性讨论

上述 2 种修正方法都从面积校正出发，对直剪试验进行了修正，但是都没有考虑正应力修正。通过面积修正可以得到修正后的剪应力大于修正前的。但是需要注意的是，单点面积修正法对应明确的时间和剪切位移，是一个点的概念，选取时具有随意性，所以得出的结果离散性比较大。多点面积修正对应的是时间变化范围或剪切位移变化范围，是一个线的概念，相比前一种方法有一定提高，所得剪应力为积分时间段内的平均值。但是，剪应力变化幅度越大，所求得的结果误差越大。

未做正应力校正的直剪试验以获取土体的峰值强度指标、再生强度指标以及残余强度指标时，2 种方法都可以用。运用时略有区别：(1) 若土样剪切出现应变软化(剪应变 - 剪应力曲线有峰值)，直接取峰值点，用单点面积修正较好，若为应变硬化(剪应变 - 剪应力曲线没有峰值)，则用多点面积修正法较好；(2) 一般反复剪呈现应变软化，则应采用多点面积修正方法来获取残余强度指标较好。

但是，处于什么状态下的土体适合修正，以及处于某种状态下的土体能不能修正等问题还有待深入研究。

4 直剪试验正应力修正

- 剪切过程中基本假设：(1) 剪切面贯通且平直；(2) 压力板和透水石施加的压力均匀分布；(3) 忽略

剪切侧壁左端与试样之间力的作用；(4) 有效剪切面和非有效剪切面上的应力均匀分布。

对上部剪切土样进行受力分析，其受力物理模型如图 3 所示。传统剪切力计算式给的是整个剪切面上的平均剪应力。所以，有效剪切面上的剪应力 τ' 可由 X 方向力平衡($X=0$) 求出。利用上部剪切滑动土体在 X 方向力的平衡可得

$$F_{剪} = CRA_0 = \int_{A_{侧}} P dx dy = \int_{A_2} \tau' dx dy = \tau' A_2 \quad (8)$$

因此 $\tau' = \frac{CRA_0}{A_2}$ ，其中， A_2 为试样有效剪切面积，其计算公式为

$$A_2 = 4 \int_{s/2}^r \sqrt{r^2 - x^2} dx = 2\alpha r^2 - r^2 \sin(2\alpha) \quad (9)$$

其中，

$$\alpha = \arccos(s/2r)$$

对点 Q 的 Y 轴力矩平衡 $M_{YQ} = 0$ ，则可得

$$M_{\sigma_1} = M_{\sigma_0} + M_{\tau} \quad (10)$$

其中，

$$M_{\sigma_1} = \int_{-r}^{s/2} 2\sigma_1 \left(\frac{s}{2} - x \right) \sqrt{r^2 - x^2} dx - \int_{s-r}^{s/2} 2\sigma_1 \left(\frac{s}{2} - x \right) \sqrt{r^2 - (x-s)^2} dx = \frac{\sigma_1 s \pi r^2}{2} \quad (11)$$

$$M_{\sigma_0} = \sigma_0 A_0 s / 2 \quad (12)$$

$$M_{\tau} = \tau' A_2 l / 2 \quad (13)$$

式中： r 为试样半径； s 为剪切位移； α 为图 3 中的圆心角； l 为剪切盒上部试样高度，一般为 10 mm。

将式(10)~(13)联立求解可得

$$\sigma_1 s \pi r^2 = \sigma_0 s A_0 + \tau' A_2 l \quad (14)$$

此时，由 Y 方向力的平衡得

$$\sigma_1 A_1 + \sigma_2 A_2 = \sigma_0 A_0 \quad (15)$$

$$A_1 + A_2 = A_0 \quad (16)$$

联立式(9)~(11)可得有效剪切面上有效正应力为

$$\sigma' = \sigma_2 = \sigma_0 - \frac{\tau' l}{s \pi} [\pi - 2\alpha + \sin(2\alpha)] \quad (17)$$

联立式(1)，(3)有

$$\frac{\tau_f - c}{f} = \sigma_0 - \frac{C R l [\pi - 2\alpha + \sin(2\alpha)]}{s [2\alpha - \sin(2\alpha)]} \quad (18a)$$

$$\tau_f = c + f \left\{ \sigma_0 - \frac{C R l [\pi - 2\alpha + \sin(2\alpha)]}{s [2\alpha - \sin(2\alpha)]} \right\} = c + f \sigma' \quad (18b)$$

式(18b)称为直剪试验修正公式。运用时也是通

过对试验点面积和应力修正，然后运用最小二乘法拟合得出土体抗剪强度参数值。

5 直剪试验的单点面积应力修正

5.1 有效剪切面积修正

直接剪切试验在试样剪切过程中剪切面积随着剪切位移的变化不断改变。对有效剪切面积进行动态修正(式(4))，结果如图 4 所示。表 1 列出了给定剪切位移时的面积修正系数取值。

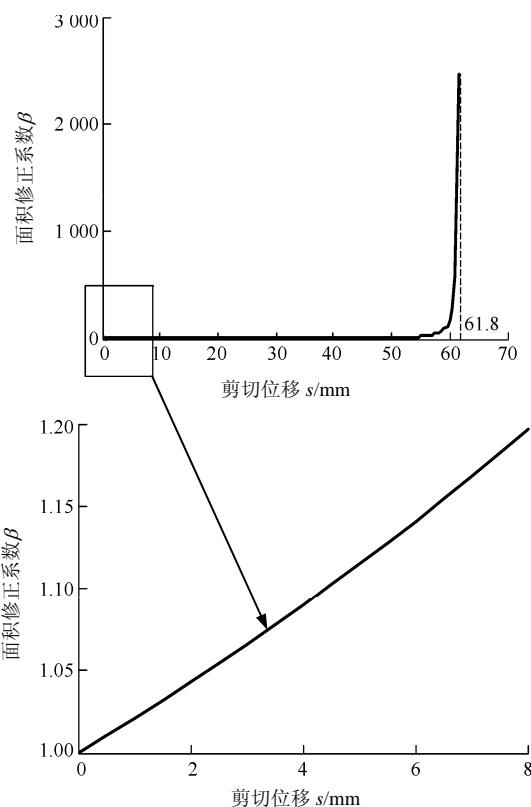


图 4 面积修正系数曲线

Fig.4 Area correction coefficient curves

表 1 面积修正系数取值

Table 1 Values of area correction coefficient

s/mm	β	s/mm	β
0.0	1.000	4.5	1.102
0.5	1.010	5.0	1.115
1.0	1.021	5.5	1.128
1.5	1.032	6.0	1.141
2.0	1.043	6.5	1.154
2.5	1.054	7.0	1.168
3.0	1.066	7.5	1.182
3.5	1.078	8.0	1.197
4.0	1.090		

面积修正系数随着剪切位移的增加不断增大，也就是说，有效剪切面上的剪应力比直剪试验实测的剪应力值要大。

5.2 有效正应力修正

将式(4)代入式(17)，或直接由式(18b)可得

$$\sigma' = \sigma_0 - \frac{CRI[\pi - 2\alpha + \sin(2\alpha)]}{s[2\alpha - \sin(2\alpha)]} = \sigma_0 + \frac{CRI}{s} \left(1 - \frac{A_0}{A_2} \right) = \sigma_0 + CR\beta_0 \quad (19)$$

式中： $\beta_0 = l(1 - \beta) / s$ ，为正应力修正系数(见图 5)。表 2 列出了给定剪切位移时的正应力修正系数取值。

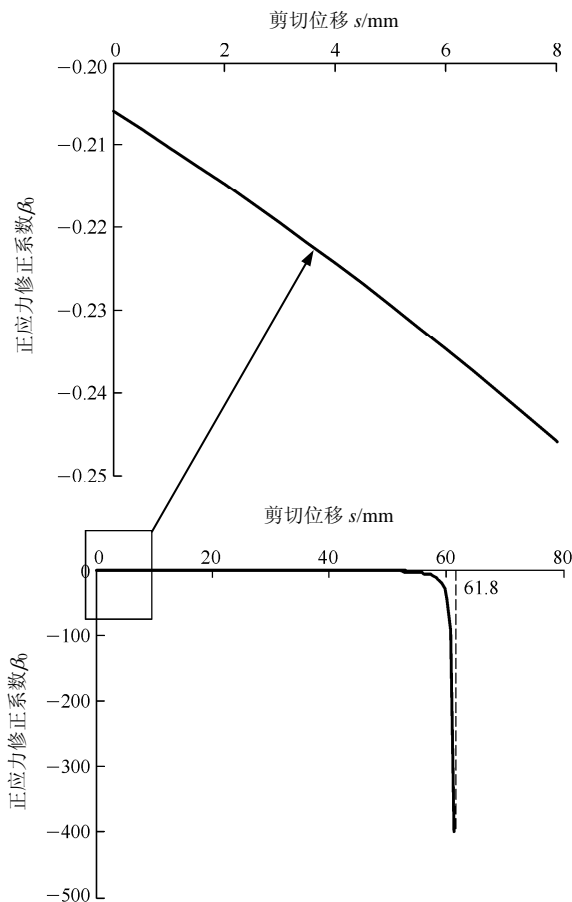


图 5 正应力修正系数曲线

Fig.5 Normal stress correction coefficient curves

表 2 正应力修正系数取值

Table 2 Values of normal stress correction coefficient

s/mm	β_0	s/mm	β_0
0.5	-0.208	4.5	-0.227
1.0	-0.210	5.0	-0.229
1.5	-0.213	5.5	-0.232
2.0	-0.215	6.0	-0.235
2.5	-0.217	6.5	-0.237
3.0	-0.220	7.0	-0.240
3.5	-0.222	7.5	-0.243
4.0	-0.224	8.0	-0.246

从式(19)和表 2 中可以看出：正应力修正系数绝对值随着剪切位移的增加而逐渐减小，也表明了有效剪切面上的正应力随着剪切位移的增加而不断减小。

5.3 修正公式的应用讨论

正应力修正系数必须要有对应的时间点和剪切位移才能求出，这也就限定了只能用单点面积修正法。多点面积修正给的是时间或剪切位移变化范围内的平均剪应力，没有明确或特定的时间点和剪切位移点的概念，不易求得正应力修正系数。所以，当对有效剪切面积做正应力修正时只能用单点面积修正方法对剪应力进行修正。

这里将上述面积修正和正应力修正再通过最小二乘法拟合，得到土体抗剪强度参数的方法称为直剪试验单点面积应力修正方法。

相关直剪试验数值模拟表明，剪切面上的应力分布在剪切方向后方表现为减小趋势，顺着剪切方向呈增大趋势^[10]，且破坏方式呈渐进性破坏。另外，剪切面上主应力方向发生偏转，当剪切位移达到一定程度时基本保持稳定^[13-14]，所以修正公式适用的前提条件是剪切面已经贯通。修正点的选择：(1) 峰值强度或再生强度，若为应变软化情况，直接选取峰值点；若为应变硬化，参考土工试验方法标准和规程选取，剪切位移为 4~6 mm 范围内取点进行修正。(2) 残余强度选取反复剪切稳定点来修正。

5.4 单点面积应力修正方法实例分析

试样为粉土~粉质黏土，土粒相对密度 $d_s = 2.721$ ，制样孔隙比 $e = 0.375$ ，抽气饱和后静置一夜。在 300 kPa 压力下固结稳定。分别施加 200, 300, 400, 500 kPa 竖向应力剪切破坏，剪切速率为 0.8 mm/min，得到剪切位移与剪应力的关系曲线(见图 6)。

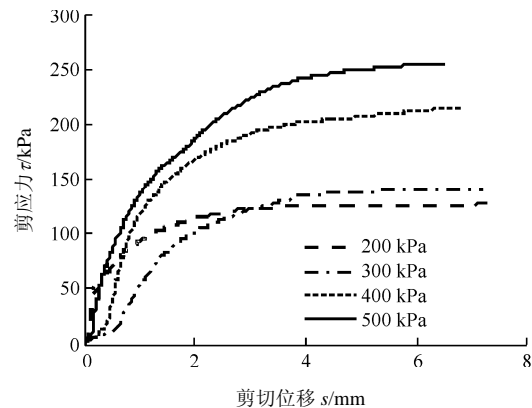


图 6 剪切位移与剪应力关系曲线

Fig.6 Relation curves between shear displacement and shear stress

由于剪切位移 - 剪应力曲线表现为应变强化，取剪切位移为 4 mm 时对应的剪应力进行相关修正(见表 3)。

表 3 单点面积应力修正前、后数据对比
Table 3 Comparison of stress data by single point area correction method before and after correction

修正前		修正后	
正应力 σ /kPa	剪应力 τ /kPa	剪应力 τ /kPa	正应力 σ /kPa
200	125.646	136.954	171.855
300	134.945	147.090	269.772
400	202.560	220.790	354.627
500	242.840	264.696	445.604

修正后的抗剪强度参数要大于修正前的抗剪强度参数(见图 7, 表 4)。为了验证推导结果的准确性，利用三轴试验数据进行验证。三轴试验测定土的强度指标具有较高的准确性。假设推倒结果正确，在直剪数据不做修正的情况下得出的强度指标应小于三轴试验得出的强度指标(见表 5)，与魏汝龙等^[15-17]的研究结果相吻合。

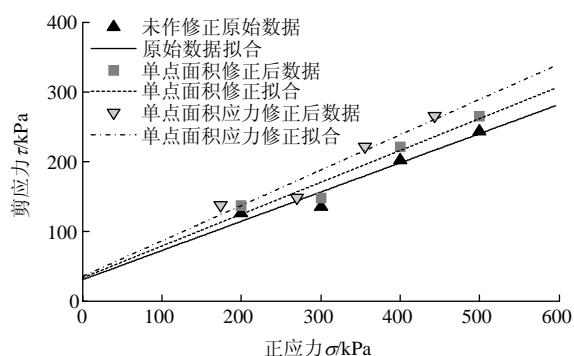


图 7 修正前、后强度参数对比

Fig.7 Comparison of strength parameters before and after correction

表 4 修正前、后抗剪强度参数

Table 4 Strength parameters before and after correction

取值类型	黏聚力/kPa	内摩擦角/(°)	相关系数 r
修正前	29.8	22.7	0.967
修正后 单点面积修正法	34.9	24.4	0.967
单点面积应力修正法	37.1	26.6	0.960

6 适用性探讨

不同的试验方法测得的土的强度指标有较大区别，但是对于同一类土，控制试验过程的排水条件

表 5 修正结果对比

Table 5 Comparison of correction data

土类 别	固结快剪		修正后强度指标		固结不排水剪	
	黏聚力/kPa	内摩擦角/(°)	黏聚力/kPa	内摩擦角/(°)	黏聚力/kPa	内摩擦角/(°)
粉土	19.0	29.1	23.7	34.8	27.6	40.1
	15.0	30.1	18.8	35.9	13.5	43.1
	17.0	27.1	20.9	32.2	27.0	40.1
	14.0	30.1	17.5	35.9	22.3	39.8
	17.0	27.1	20.9	32.2	20.5	38.5
	20.0	25.4	24.4	30.1	23.7	27.3
粉质黏土	21.0	20.1	24.9	23.4	14.8	31.5
	20.5	22.4	24.6	26.3	26.5	34.1
	31.0	14.2	35.8	16.3	33.8	26.3
黏土	30.0	15.2	34.8	17.5	32.3	22.4
	47.5	13.4	54.7	15.4	54.4	24.4
	42.0	14.2	48.5	16.3	54.4	24.4

相似时，得出的抗剪强度参数变化不应太大。

对于渗透系数较大的粗粒土、碎石土、砂土而言，固结快剪得出的强度指标接近有效应力指标，应与固结不排水剪有效应力指标做对比。反之，对于渗透系数较小的黏土、粉质黏土而言，固结快剪得出的强度指标应与固结不排水总应力指标做对比。有些学者直接将快剪和不固结不排水剪数据做对比，没有考虑到排水条件对结果的影响^[18]，从而得出错误的认识。

从表 5 中可以看出，修正后的抗剪强度参数更加接近真实值，但是与三轴试验得出的结果有一定差距。造成差距原因是直剪试验的缺陷，如：给定剪切面并非理想剪切面、剪切面上应力分布不均、不能严格控制排水条件等。

7 结论与讨论

(1) 总结了 2 种基于面积的直剪试验修正方法：单点面积修正法和多点面积修正法。2 种修正方法均适用于峰值强度、再生强度、残余强度指标的修正。若土样剪切出现应变软化，直接取峰值点，用单点面积修正法较好；若为应变硬化，则要用多点面积修正法较好。一般反复剪呈现应变软化，则应该用多点面积修正方法来获取残余强度指标较好。

(2) 提出了直剪试验的面积修正和应力修正的单点面积应力修正方法。当剪切面贯通时，运用上述的修正方法是有效和可行的，并且修正后的抗剪

强度参数更为准确可靠。

(3) 从理论公式的推导得出：有效剪切面上的正应力随着剪切位移的增加逐渐减小。

(4) 修正后的指标单点面积应力修正方法得出的强度指标最大，其次是单点面积修正，不做任何修正的强度指标最小。

(5) 根据以往的试验数据，得到修正前直剪试验得出的强度指标要小于三轴试验强度指标。由于直剪试验的缺陷和试样的饱和程度的影响(基质吸力的大小影响)，使得修正后的强度指标与三轴试验强度指标仍然存在差别。

(6) 由于修正后强度指标大于未修正之前，也就是说修正后的强度指标用于滑坡等稳定性评价时是偏于危险的(稳定系数要大于未修正时的稳定性系数，可能导致本应该防护治理的边坡修正后不用治理)，同时也可以说成是偏于经济的。如何将经济可行与技术合理结合在一起，值得探索。

(7) 为验证修正前、后的数据，选择试验的过程中，需要注意和控制试验过程中排水条件一样或者相似。首先，要结合实际工程的排水条件及固结条件来选择相应试验，获取相应的强度参数。其次，直剪试验必须控制排水条件，假设排水条件不同，同一直剪试验成果有很大的随意性。直剪试验由于靠剪切速率来控制排水条件，所以在有条件的情况下可以选用三轴试验或者环剪试验来获取土体抗剪强度参数，应用到工程实际中，才能取得很好的社会效益。

(8) 对于“什么样的土需要修正”这个问题，需要进一步的研究。

致谢 感谢成都理工大学付小敏研究员和郑海君老师对本文的帮助！

参考文献(References):

[1] 李广信. 高等土力学[M]. 北京: 清华大学出版社, 2004: 143 - 155.(LI Guangxin. Advanced soil mechanics[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2004: 143 - 155.(in Chinese))

[2] 李广信, 吕 禾. 土强度试验的排水条件与强度指标的应用[J]. 工程勘察, 2006, (3): 11 - 14.(LI Guangxin, LU He. Drainage conditions for tests of soil strength and the application of strength indices[J]. Journal of Geotechnical Investigation and Surveying, 2006, (3): 11 - 14.(in Chinese))

[3] 中华人民共和国国家标准编写组. GB/T 50123—1999 土工试验方法标准[S]. 北京: 中国计划出版社, 1999.(The National Standards Compilation Group of the People's Republic of China. GB/T 50123—1999 Standard for soil test method[S]. Beijing: China Planning Press, 1999.(in Chinese))

[4] 中华人民共和国行业标准编写组. JTG E40—2007 公路土工试验规程[S]. 北京: 人民交通出版社, 2007.(The Professional Standards

Compilation Group of the People's Republic of China. JTG E40—2007 Test methods of soils for highway engineering[S]. Beijing: China Communications Press, 2007.(in Chinese))

[5] KISHIDA H, UESUGI M. Tests of the interface between sand and steel in the simple shear apparatus[J]. Géotechnique, 1987, 37(1): 45 - 52.

[6] 何满潮. 直剪试验中的有效面积校正[J]. 露天开采, 1986, (2): 16 - 19.(HE Manchao. Effective area correction in the direct shear test[J]. Opencast Mining Technology, 1986, (2): 16 - 19.(in Chinese))

[7] 刘海波, 张丽华, 林大超, 等. 直剪试验有效剪切面积动态变化的改进计算[J]. 沈阳建筑大学学报: 自然科学版, 2010, 26(3): 503 - 506.(LIU Haibo, ZHANG Lihua, LIN Dachao, et al. The improve calculation of the dynamic changes of the effective shear area in the direct shear test[J]. Journal of Shenyang Jianzhu University: Natural Science, 2010, 26(3): 503 - 506.(in Chinese))

[8] 张敏江, 郭 尧, 张丽萍, 等. 直剪试验中对土抗剪强度的一种修正方法[J]. 沈阳建筑大学学报: 自然科学版, 2005, 21(2): 96 - 98.(ZHANG Minjiang, GUO Yao, ZHANG Liping, et al. A revising method of shear strength of soils in direct shear test[J]. Journal of Shenyang Jianzhu University: Natural Science, 2005, 21(2): 96 - 98.(in Chinese))

[9] 徐志伟, 周国庆, 刘志强, 等. 直剪试验的面积校正方法及误差分析[J]. 中国矿业大学学报, 2007, 36(5): 658 - 662.(XU Zhiwei, ZHOU Guoqing, LIU Zhiqiang, et al. Correcting method and error analysis for sample area in direct shear test[J]. Journal of China University of Mining and Technology, 2007, 36(5): 658 - 662.(in Chinese))

[10] 胡黎明, 马 杰, 张丙印. 直剪试验中接触面渐进破坏的数值模拟[J]. 清华大学学报: 自然科学版, 2008, 48(6): 943 - 946.(HU Liming, MA Jie, ZHANG Bingyin. Numerical simulation of interface failure during direct shear tests[J]. Journal of Tsinghua University: Science and Technology, 2008, 48(6): 943 - 946.(in Chinese))

[11] THORNTON C, ZHANG L. Numerical Simulations of the direct shear test[J]. Chemical Engineering and Technology, 2003, 26(2): 153 - 156.

[12] LIU S H. Simulating a direct shear box test by DEM[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2006, 43(2): 155 - 168.

[13] 蒋明镜, 王富周, 朱合华, 等. 密实散粒体宏观特性的直剪试验离散元数值分析[J]. 河海大学学报: 自然科学版, 2010, 38(5): 538 - 544.(JIANG Mingjing, WANG Fuzhou, ZHU Hehua, et al. DEM simulation of macro-micro mechanical properties of dense granular materials in direct shear test[J]. Journal of Hohai University: Natural Science, 2010, 38(5): 538 - 544.(in Chinese))

[14] WANG J, DOVE J E, GUTIERREZ M S. Discrete-continuum analysis of shear banding in the direct shear test[J]. Geotechnique, 2007, 57(6): 513 - 526.

[15] 魏汝龙. 三轴和直剪试验的固结快剪指标[J]. 大坝观测与土工测试, 1998, 22(1): 23 - 41.(WEI Rulong. Consolidated undrained strength targets obtained by triaxial and direct shear test[J]. Dam Observation and Geotechnical Tests, 1998, 22(1): 23 - 41.(in Chinese))

[16] 王艳宏, 杨金钟. 直剪试验和三轴剪切试验对比分析[J]. 天津建设科技, 2005, 15(增 1): 209 - 210.(WANG Yanhong, YANG Jinzhong. Comparative analysis of direct shear test and triaxial shear test[J]. Tianjin Construction Science and Technology, 2005, 15(Supp.1): 209 - 210.(in Chinese))

[17] ROWE P W. The relation between the shear strength of sands in triaxial compression, plane strain and direct shear[J]. Geotechnique, 1969, 19(1): 75 - 86.

[18] 王文志, 孙 红, 石志亮. 浅谈直剪试验与三轴试验的异同[J]. 内蒙古水利, 2011, (2): 19 - 20.(WANG Wenzhi, SUN Hong, SHI Zhiliang. Similarities and differences between the direct shear test and triaxial shear test[J]. Inner Mongolia Water Resources, 2011, (2): 19 - 20.(in Chinese))