

有效剪切面积对直剪试验结果的影响分析

詹金林¹,雷国辉¹,施建勇¹,程大鹏²

(1.河海大学岩土工程研究所,江苏 南京 210098;2.南京市水利规划设计院有限责任公司,江苏 南京 210016)

摘要:我国现行土工试验的国家标准和行业规程中,对于直剪试验数据的整理和分析均未考虑剪切过程中土体本身或土体与其他材料接触面上剪切面积的变化.为此,推导了剪切过程中接触面剪切位移与有效剪切面积之间的关系,分析了现行数据整理方法引起的计算误差.结果表明,现行数据整理方法低估了土体或土体与其他材料接触面上的剪切应力和抗剪强度指标,直剪试验的剪切方向应沿着试样盒的长边方向布置.

关键词:直剪试验;剪切面积;黏聚力;内摩擦角;接触面

中图分类号:TU411.7 文献标识码:A 文章编号:1000-1980(2007)02-0213-04

岩土工程问题计算分析结果与实测结果的吻合程度不仅取决于计算方法(包括数学模型、初始条件和边界条件)的合理性,还取决于计算参数的可靠性.在与土体抗剪强度有关的诸如挡土结构物上的土压力、地基承载力^[1]、边坡稳定性^[2]以及土与其他材料(结构或筋材)间黏结与滑移共同作用^[3]等工程问题中,抗剪强度指标的正确确定直接关系到工程设计与施工的安全、经济和合理性.直剪试验作为确定土体或土与其他材料接触面间抗剪强度指标的一种简便而快捷的方法,仍然广泛应用于科学研究和生产实践中^[2-3].因此,充分认识和完善直剪试验数据的整理分析方法具有一定的工程实用价值.为此,本文推导了剪切过程中接触面剪切位移与有效剪切面积之间的关系,分析了现行数据整理方法所引起的计算误差.

1 现行试验数据整理方法

直剪试验包括普通的直接剪切试验(主要用于测定细粒土的慢剪强度指标)和反复直剪试验(主要用于测定细粒土的残余强度)^[4],一般采用应变控制式直剪仪^[4-5].试样盒通常为圆形(如图 1 所示),内径 61.8 mm,高度 20 mm,剪切前预定剪切面上试样的接触面积为 30 cm².直剪试验的试样盒也可以是方形或矩形.如用于测定土工织物或土工膜与土之间的界面摩擦阻力或拉拔摩擦阻力的试样盒分别规定^[6]在条件许可时其平面尺寸宜大于 60 mm×60 mm 和 25 cm×20 cm;Lings 等^[7]改进的直剪仪试样盒为方形,边长 100 mm.目前,直剪仪在试样盒的形状和尺寸^[7-8]、适用的土类^[9]、加载能力^[10]、加载方式^[11]以及量测手段^[12-13]等方面已经有了很大的改进,但是还处于研究探索阶段.

对于直剪试验数据的整理和分析,我国现行有关土工试验的国家标准^[5]和行业规程^[6,14-16]均采用式(1)计算剪切试验过程中土体或土与其他材料接触面上的剪应力:

$$\tau_c = \frac{CR}{A_0} \times 10$$

(1)

式中: τ_c ——试样所受的剪应力,kPa; C ——测力计率定系数,N/0.01 mm; R ——测力计读数,0.01 mm; 10 ——单位换算系数; A_0 ——试样的初始断面积,cm².对于圆形试样盒:

$$A_0 = \pi D^2/4$$

式中 D 为直径,cm.对于矩形试验盒:

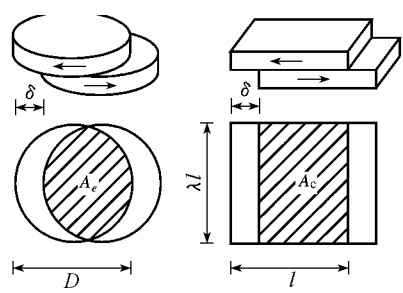


图 1 直剪试验的剪切示意图
Fig.1 Schematic diagram of shearing in direct shear test

$$A_0 = \lambda l^2$$

式中： l ——平行于剪切方向的边长， cm ； λ ——垂直于剪切方向的边长与 l 的比值。

2 考虑有效剪切面积的分析方法

对于圆形试样盒，其上下盒的错动如图 2 所示。根据对称性，土样的有效接触面积为 4 倍的 ABC 所包围的面积（即扇形 OAB 与三角形 OAC 的面积之差）。因此，土样的有效接触面积为^[17]

$$A_e = 4 \left[\frac{1}{2} \theta \left(\frac{D}{2} \right)^2 - \frac{1}{2} \frac{D}{2} \frac{\delta}{2} \sin \theta \right] = \frac{D^2}{2} \left(\theta - \frac{\delta}{D} \sin \theta \right) \tag{2}$$
$$\theta = \arccos(\delta/D)$$

式中 θ 用弧度表示； δ 为剪切位移， cm 。

对于矩形或正方形试样盒（图 1）土样的有效接触面积为

$$A_e = \lambda l(l - \delta) \tag{3}$$

因此，考虑有效剪切面积的剪应力计算公式为

$$\tau_a = \frac{CR}{A_e} \times 10 \tag{4}$$

3 误差分析

现行的直剪试验数据整理方法引起计算剪应力值的绝对误差 e_a 和相对误差 e_r 分别为

$$e_a = \tau_c - \tau_a = CR \times 10 \times \left(\frac{1}{A_0} - \frac{1}{A_e} \right) \tag{5}$$

$$e_r = \frac{\tau_c - \tau_a}{\tau_a} = \frac{A_e}{A_0} - 1 \tag{6}$$

由此通过简单的推导，对于圆形试样盒：

$$e_a = CR \times 10 \times \left[\frac{4}{\pi D^2} - \frac{2D}{D^2(\theta - \frac{\delta}{D} \sin \theta)} \right] \tag{7}$$

$$e_r = \frac{2}{\pi} \left(\theta - \frac{\delta}{D} \sin \theta \right) - 1 \tag{8}$$

$$e_{an} = e_a / (10CR) \tag{9}$$

图 3 和图 4 为根据我国规范^[14-16]定义的圆形试样盒标准尺寸计算得到的归一化剪切应力绝对误差值（ e_{an} ）和相对误差值（ e_r ）分别与剪切位移（ δ ）和试样盒直径（ D ）之间的关系。从图中可以看出，绝对误差和相对误差均为负值，说明现行不考虑剪切平面上土样有效接触面积的数据处理方法低估了接触面上的剪切应力。随着剪切位移的增加，按现行方法计算的剪切应力所引起的误差相应增大。而随着试样盒直径的增加，计算误差却相应减小。按照现行规范中定义的剪切应力在有峰值情况下剪切位移为 4 mm 和无峰值情况下为 6 mm 的试验终止标准，计算剪切应力的相对误差值将分别达到 8.24% 和 12.24%。只有当试样盒直径超过 15 cm 时，最大相对误差才小于 5%。

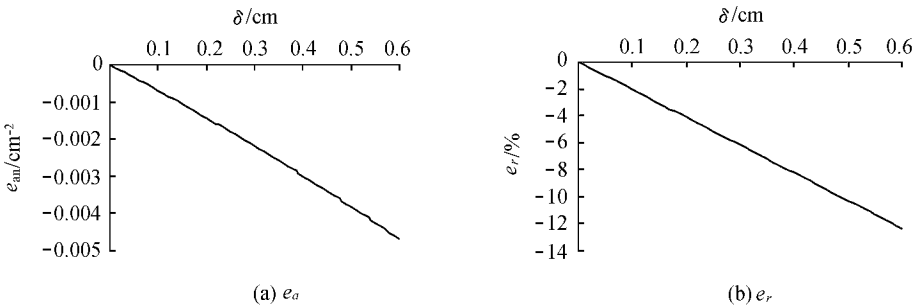


图 3 圆形试样盒剪切位移与剪切应力计算误差关系

Fig.3 Relationship between shear displacement and calculation error of shear stress of circular shear box

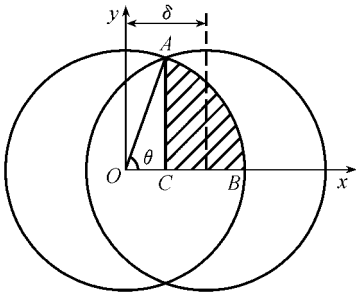


图 2 圆形试样盒的有效剪切面积
Fig.2 Effective shearing area
of circular shear box

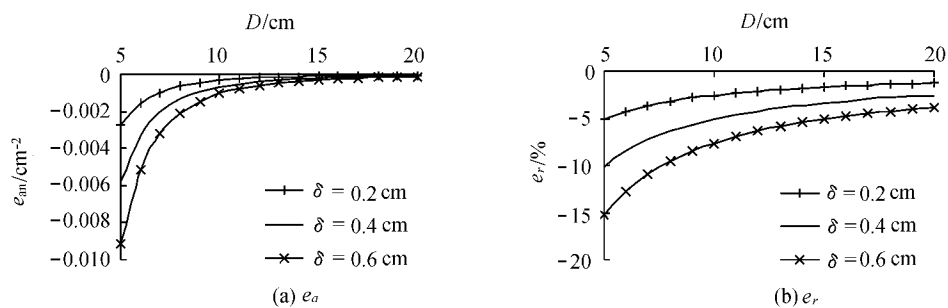


图 4 圆形试样盒直径与剪切应力计算误差关系

Fig.4 Relationship between diameter of circular shear box and calculation error of shear stress

对于矩形试样盒：

$$e_a = CR \times 10 \times \frac{-\delta}{\lambda l^2(l-\delta)} \tag{10}$$

$$e_r = -\frac{\delta}{l} \tag{11}$$

从式 (10) 和 (11) 可以容易地看出，与圆形试样盒类似，随着剪切位移的增加和平行于剪切方向试样盒长度的减小，计算的剪切应力误差值相应增大。值得一提的是，式 (10) 中的 δl^2 代表的是试样的断面积，因此，随着平行于剪切方向试样盒边长的增加，计算的剪切应力误差值将相应减小。说明如果按照现行的直剪试验数据分析方法，试样的剪切方向最好沿着试样盒的长边方向布置。

直剪试验中，土样或土样与其他材料接触面间的抗剪强度指标（黏聚力和内摩擦角）是根据剪切破坏时接触平面上的剪切应力和法向应力的包络线分析得到的。内摩擦角由破坏包络线的斜率计算得到，黏聚力是破坏包络线在剪应力轴上的截距。因此，采用现行的数据分析方法低估了剪应力，从而导致对抗剪强度指标的低估。

显然，对于纯土样的直剪试验，本文误差分析中忽略了剪切错开后在法向应力作用范围内土样与试样盒盒体（一般为铜制的）接触面积（ $A_0 - A_e$ ）之间的剪切应力。根据现有的文献资料，土与光滑铁板之间的摩擦角只有土体本身内摩擦角的一半^[18]甚至更低^[19]。因此，实际误差可能只有本文结果的一半左右。砂土的直剪、单剪和三轴试验结果的对比已经证实了直剪试验对内摩擦角的低估^[20]。

实用上，在进行土样与其他材料接触面间的直剪试验时，如果能够将试样盒的上下部分做成上盒小下盒大^[21]，则可以消除上下盒错开引起剪切面积减小所带来的误差。

4 结 论

- a. 现行的直剪试验数据分析方法中不考虑剪切过程中剪平面上的剪切面积随剪切位移的发展而变化的关系，低估了剪切面上的剪切应力和抗剪强度指标。
- b. 随着剪切位移的增加和平行于剪切方向试样盒直径或长度的减小，按现行方法计算剪切应力所产生的误差相应增加。在 4 mm 和 6 mm 的剪切位移下，最大相对误差分别达到 8.24% 和 12.24%。若考虑剪切错开后土样与试验盒盒体之间的剪切应力，实际误差可能只有一半左右。
- c. 对矩形试样，其剪切方向应沿着试样盒的长边方向布置。
- d. 在直剪试验中考虑接触面的有效接触面积，有助于正确认识土样或土样与其他材料接触面间的剪切特性。

参考文献：

[1] 中华人民共和国建设部，国家质量监督检验检疫总局. GB 50007—2002 建筑地基基础设计规范[S]. 北京：中国建筑工业出版社，2002.

[2] 中华人民共和国水利部. SL 274—2001 碾压式土石坝设计规范[S]. 北京：中国水利水电出版社，2002.

[3] 国家质量技术监督局，中华人民共和国建设部. GB 50290—98 土工合成材料应用技术规范[S]. 北京：中国计划出版社，

1998.

- [4] 国家技术监督局. GB/T 15406—94 土工仪器的基本参数及通用技术条件[S]. 北京: 中国标准出版社, 1995.
- [5] 国家质量技术监督局, 中华人民共和国建设部. GB/T 50123—1999 土工试验方法标准[S]. 北京: 中国计划出版社, 1999.
- [6] 中华人民共和国水利部. SL/T 235—1999 土工合成材料测试规程[S]. 北京: 中国水利水电出版社, 1999.
- [7] LINGS M L, DIETZ M S. An improved direct shear apparatus for sand[J]. Géotechnique, 2004, 54(4): 245-256.
- [8] JEWELL R A. Direct shear tests on sand[J]. Géotechnique, 1989, 39(2): 309-322.
- [9] 陈正汉, 扈胜霞, 孙树国, 等. 非饱和土固结仪和直剪仪的研制及应用[J]. 岩土工程学报, 2004, 26(2): 161-166.
- [10] 周国庆, 赵光思, 别小勇. 超高压直残剪试验系统及其初步应用[J]. 中国矿业大学学报, 2001, 30(2): 118-121.
- [11] SHIBUYA S, MITACHI T, TAMATE S. Interpretation of direct shear box testing of sands as quasi-simple shear[J]. Géotechnique, 1997, 47(4): 769-790.
- [12] HU L, PU J. Testing and modeling of soil-structure interface[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, American Society of Civil Engineers, 2004, 130(8): 851-860.
- [13] 张嘎, 张建民. 大型土与结构接触面循环加载剪切仪的研制及应用[J]. 岩土工程学报, 2003, 25(2): 149-153.
- [14] 中华人民共和国交通部. JTJ 051—93 公路土工试验规程[S]. 北京: 人民交通出版社, 1993.
- [15] 中华人民共和国铁道部. TB/T 10102—2004 铁路工程土工试验规程[S]. 北京: 中国铁道出版社, 2004.
- [16] 中华人民共和国水利部. SL 237—1999 土工试验规程[S]. 北京: 中国水利水电出版社, 1999.
- [17] BARDET J P. Experimental soil mechanics[G]/Upper Saddle River, New Jersey: Prentice Hall, 1997: 421-442.
- [18] POTYONDY J G. Skin friction between various soils and construction materials[J]. Géotechnique, 1961, 11(4): 339-353.
- [19] KISHIDA H, UESUGI M. Tests of the interface between sand and steel in the simple shear apparatus[J]. Géotechnique, 1987, 37(1): 45-52.
- [20] ROWE P W. The relation between the shear strength of sands in triaxial compression, plane strain and direct shear[J]. Géotechnique, 1969, 19(1): 75-86.
- [21] YIN J H, CHU L M, SU L J. Study on the interface shear strength of soil nails in a completely decomposed granite soil by laboratory pullout tests and large-size direct shear box tests[C]/Proceedings of the 16th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering. Rotterdam: Millpress Science Publishers, 2005: 2617-2620.

Effect of effective shearing area on result of direct shear tests

ZHAN Jin-lin¹, LEI Guo-hui¹, SHI Jian-yong¹, CHENG Da-peng²

(1. Geotechnical Research Institute of Hohai University, Nanjing 210098, China ;

2. Nanjing Water Conservancy and Design Institute Co., Ltd, Nanjing 210016, China)

Abstract In the existing national standard and specification for geotechnical test in China, the variation of shearing areas of soil body and the interface between soil body and other materials during the shearing process was not taken into account in the interpretation of direct shear test data. For this reason, the relationship between the shear displacement and the effective shearing area of the interface during the shearing process was deduced, and the errors induced by the existing data interpretation method were analyzed. The result shows that the existing method underestimates the shear stress and shear strength parameter of soil body and the interface between soil body and other materials, and that the shearing direction in the direct shear test is preferred to be along the long side of the shear box.

Key words direct shear test; shearing area; cohesion; angle of internal friction; interface