

# 土体抗剪强度参数的钻孔剪切试验方法初探

于永堂<sup>1,2,3</sup> 高远<sup>1</sup>

(1. 西安建筑科技大学土木工程学院,陕西西安 710055;2. 机械工业勘察设计研究院有限公司,陕西西安 710043;  
3. 陕西省特殊土工程性质与处理技术重点实验室,陕西西安 710043)

**【摘要】** 介绍了一种通过钻孔剪切试验测定土体抗剪强度参数的原位测试新方法,从试验原理、试验设备和试验数据处理分析方法等方面对钻孔剪切试验进行了总结。为验证钻孔剪切试验的工程适用性,采用美国 Iowa 钻孔剪切测试仪分别对非饱和黄土及饱和黄土的抗剪强度指标进行了实测。试验结果表明,钻孔剪切试验可快速、直接地得到黄土的抗剪强度参数,试验数据的线性相关性较高。针对现有钻孔剪切试验中存在的问题,建议了今后的研究方向。

**【关键词】** 钻孔剪切试验;原位测试;黄土;抗剪强度指标

**【中图分类号】** TU 411

**【文献标识码】** A

doi:10.3969/j.issn.1007-2993.2015.04.002

## Study on Borehole Shear Test for Soil Shear Strength Parameter Testing

Yu Yongtang<sup>1,2,3</sup> Gao Yuan<sup>1</sup>

(1. College of civil engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, Shaanxi China;  
(2. China JK Institute of Engineering Investigation and Design Co., Ltd, Xi'an 710043, Shaanxi, China;  
(3. Shaanxi Key Laboratory of Engineering Behavior and Foundation Treatment for Special Soil, Xi'an 710043, Shaanxi, China)

**【Abstract】** The Borehole Shear Test(BST) was introduced as a new in-situ method for determining shear strength parameters of soils. The borehole shear tests are summarized, including the shearing mechanism, test equipment and test data processing method etc. To evaluate the engineering applicability of the test, the Iowa borehole shear tester are adopted to determine shear strength parameters of unsaturated loess and saturated loess in geotechnical investigation. The test results show that, the BST is a rapid and direct method of measuring the in, situ shear strength of loess, and gains a good linear relativity between normal stress and shear stress. Then in view of existence question in BST, the recommendations for future research are also proposed.

**【Key words】** Borehole Shear Test; in-situ test; loess; shear strength parameter

## 0 引言

岩土工程勘察、地基处理效果评价及建筑物基础设计时常需要获取土的抗剪强度参数。室内试验是获取土体抗剪强度参数最常用的测试方法,其优点是边界条件易于控制,缺点是在取样、运输、制样和试验过程,土样的结构易受到扰动,影响试验结果的准确性和代表性。原位测试则可以在一定程度上保持土体的天然结构、含水量以及应力状态,因而能提高土工参数测试结果的准确性,使测试结果更接近于土的真实性质。原位大型直剪试验、十字板剪切试验是测定抗剪强度参数的常用方法。大型直剪试验的优点是对土样的扰动小,测试结果准确可靠,缺点是对深层土体的测试较为困难,且需要耗费大

量人力、物力。十字板剪切试验的优点是设备简单、操作方便,缺点是仅适用于软土,不适用于硬度较大的粘性土。标贯试验、触探试验、扁铲试验等是通过大量对比试验,建立原位测试参数与抗剪强度参数之间的相关关系和经验公式来确定土体的抗剪强度参数<sup>[1]</sup>,其测试结果具有较大的经验性和一定程度的不确定性。

近年来,钻孔剪切试验方法被引入我国用于土体的抗剪强度参数原位测试。钻孔剪切试验实际上是通过在钻孔侧壁上进行的一系列直剪试验来测定土的粘聚力和内摩擦角<sup>[2]</sup>,该方法已在美国、法国等国得到了应用,并已制定了试验标准<sup>[3,4]</sup>。目前,钻孔剪切试验已成功用于砂土、淤泥、粘土、泥岩、海相

**基金项目:** 国家科技支撑计划项目(NO. 2013BAJ06B01)

**作者简介:** 于永堂,1983年生,男,满族,辽宁鞍山人,博士研究生,工程师。主要研究方向:湿陷性黄土地基处理技术,土工测试技术。E-mail: yuyongtang@126.com

软粘土、硬粘土、硬质土等<sup>[5-12]</sup>土体的抗剪强度参数原位测试,也被用于研究土体的先期固结压力和土体模量<sup>[13]</sup>,分析边坡稳定性<sup>[6,14]</sup>和预测钻孔桩承载能力<sup>[12]</sup>等。

国内对钻孔剪切试验的研究才刚起步,仅有学者在边坡工程中采用 Iowa 钻孔剪切试验仪测定了坡积、残积土和强风化土的抗剪强度指标<sup>[15]</sup>。我国黄土分布面积广泛,因其自立性好,成孔较容易的特征,使钻孔剪切试验在黄土场地中具有较好的应用前景。本文对钻孔剪切试验原理、试验设备、试验数据整理分析方法等进行了系统总结,并在黄土场地进行了应用尝试,阐述了今后需要进一步深入研究的方向。

## 1 钻孔剪切试验原理与试验方法简介

### 1.1 试验原理

钻孔剪切试验的原理见图 1。试验前,首先在测试地层中钻孔,通过取样器清孔使孔壁光滑。试验时,将带有环形齿的剪切板沿径向扩张并压入周围土壁中,对孔壁施加已知的法向压力  $\sigma$  使土体固结,然后对剪切板施加垂直向上的提拉力  $T$ 。在某一法向压力下逐渐增加剪切应力,齿状凸起间土体就会沿图 1 中所示的剪切面或附近部位形成近似直线的剪切面。试验过程可通过测力装置测定剪切应力峰值强度  $\tau$ ,土体剪破后继续测读可得到残余强度  $\tau_r$ 。

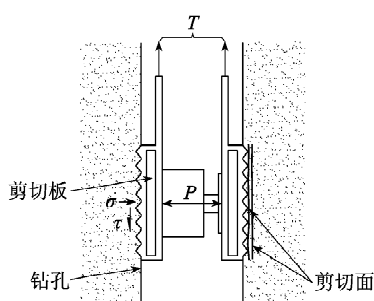


图 1 钻孔剪切试验原理图

若作用于钻孔圆周的总有效剪切面积为  $S$ ,则有:

$$\tau = T/S \quad (1)$$

钻孔剪切试验与室内直剪试验相似,通过测定一定数量、不同法向压力下的剪切强度来确定破坏包络线。但室内直剪试验采取对不同土样分别进行剪切试验,而钻孔剪切试验则通过分级加载的方法对同一位置处的土体进行测试。钻孔剪切试验过程,当一次剪切完成后,卸除剪切力,对孔壁施加更大的固结压力,重复上述剪切工作,每个法向压力对应一个抗剪强度(见图 2)。Lutenegger 等<sup>[7]</sup>通过对试验

过程土体的孔压监测发现,排水时间在试验过程是累计的,因此钻孔剪切试验可认为是一种固结排水试验。根据土样种类不同,一个典型试验需要 4~5 数据点,大约需要 30~60 min。将试验获得的法向压力与剪切强度数据绘制 Mohr-Coulomb 剪切破坏包线,其截距即为粘聚力,斜率倾角即为内摩擦角(见图 2)。

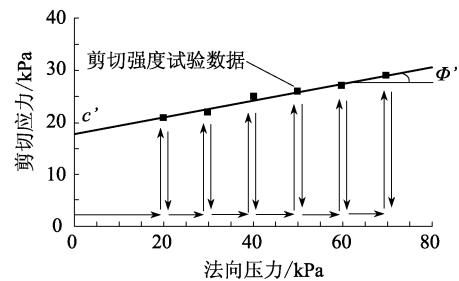


图 2 典型钻孔剪切试验过程

### 1.2 试验设备

根据钻孔剪切试验原理开发的钻孔剪切仪,主要部件包括:剪切头、连接设备和地表控制设备。剪切头主要由剪切板和活塞组成;连接设备主要由提供上拔力的拉杆和用于连接剪切探头内部压力膜到地表加压设备的塑胶管路组成;地表控制设备主要由承载板、上拔力(剪切力)提供装置、法向压力控制装置、拉杆锁定装置和测力计等组成。目前常用的钻孔剪切试验设备主要有美国的 Iowa 钻孔剪切仪(见图 3)和法国的 Phicometre 钻孔剪切仪(见图 4)。

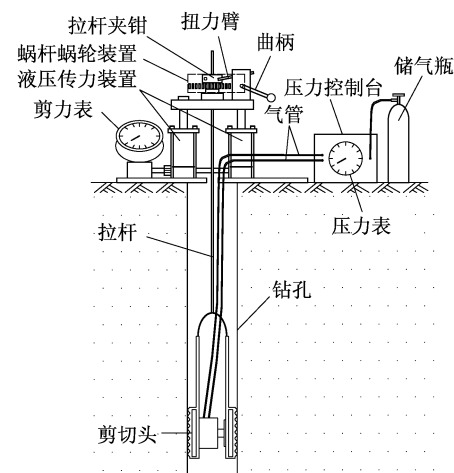


图 3 Iowa 钻孔剪切仪

剪切头是钻孔剪切试验仪最关键的部件,上述两种仪器的剪切头和上拔力提供方式有差别。其中,Iowa 钻孔剪切仪的剪切探头由 2 块带有平行齿状凸起的弧形剪切板和可带动剪切板扩张和回缩的活塞组成,通过人工转动曲柄,通过涡轮蜗杆转向装置提供上拔力。如图 4 所示,Phicometre 钻孔剪切

仪与 Iowa 钻孔剪切仪不同,剪切头是一个金属壳体,壳体上带有环形不锈钢刀片,由壳体内部一个压力腔来保持探头的膨胀状态,采用一个中空千斤顶提供上拔剪切力<sup>[16]</sup>。

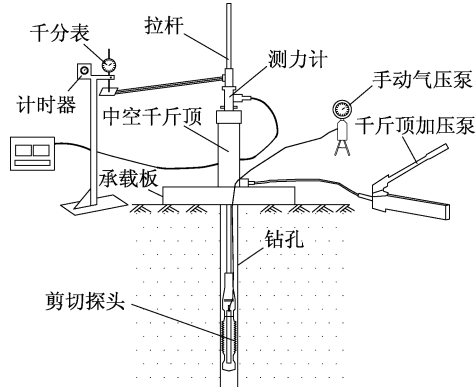


图4 Phicometer 钻孔剪切试验仪

### 1.3 试验数据的整理及分析方法

试验结束后应通过仪器测力装置校正曲线计算实测应力,试验得到的剪切峰值强度、残余强度尚应扣除剪切头、拉杆自重产生的初始应力值  $\tau_0$ 。此外,还要对试验中测定的数据需要进行选择与处理,然后采用最小二乘法或其他数据拟合方法,绘制摩尔-库伦破坏包线。试验中常见的试验曲线特征见图5。图5中的曲线特征可以解释如下<sup>[2,10,13,17]</sup>:

1)图5(a)为常见的“标准”曲线,具有土体受力小于先期固结压力的特征。当法向压力超过先期固结压力时,抗剪强度将高于图中剪切包络线所对应的强度,处于剪切破坏包络线以内。

2)图5(b)中由起始的若干数据点求得的内摩擦角近似为  $45^\circ$ ,粘聚力接近为零。上述情况一般出现在硬粘土的试验中,随法向压力增大,剪切板上的齿状凸起逐步嵌入土中,摩擦阻力与施加的法向压力成比例变化,抗剪强度测量值偏小。此外,当试验点处的孔壁上有泥浆时,前一两组数据偏低,当泥浆被推开,所获得的数据才代表被测土体。

3)图5(c)曲线特征是中低压力下数据点正常,但在高压时,数据点趋向水平或下降。一般出现在饱和软土试验中,主要受超孔隙水压力影响,也可能是剪切板完全张开后无法施加更大法向压力。

4)图5(d)曲线特征是在某一数据点处剪切强度突然增大,且在实际剪切包络线上方。其原因可能为剪切板下遇有砾石,使剪切强度突然增大,当砾石被翻转或者推到一侧后数据恢复正常。

5)图5(e)曲线特征是剪切破坏包线在纵坐标上的截距为负值,即粘聚力为负值。该种情况常发

生在地下水位以下深层砂土的试验中,水压力作用方向与法向应力相反,处理数据时应从法向压力测试值中扣除活塞上作用的水压。

6)图5(f)曲线特征为法向固结压力大于和小于先期固结压力的数据点分别各在一条剪切破坏包线上。试验中法向压力(侧压力) $P_{ch}$ 作用于水平方向,则可求得先期固结压力为  $P_c = P_{ch} / (1 - \sin\phi)$ 。

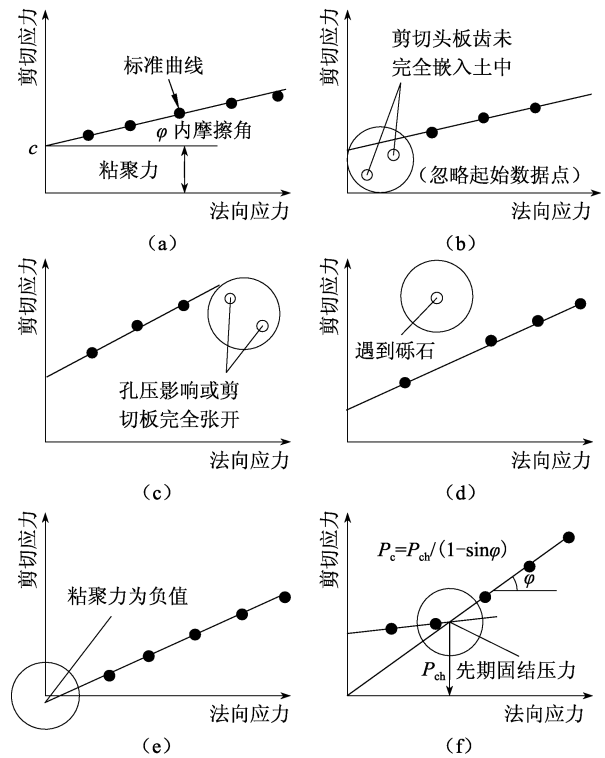


图5 钻孔剪切试验典型曲线<sup>[17]</sup>

## 2 现场应用效果

试验场地位于西安市东郊某工地,稳定地下水位在地面下约 10.4 m,地层结构为黄土与古土壤互层,试验土层包括了非饱和黄土及饱和黄土。试验设备采用美国 Iowa 钻孔剪切试验仪,剪切板面积为  $50.8 \text{ mm} \times 63.5 \text{ mm}$ ,钻孔直径为 76mm。因国内尚无钻孔剪切试验相关规范,本次主要参考 ASTM 标准<sup>[3]</sup>进行。本次共进行了 4 组试验,其中在非饱和黄土中进行了 2 组,饱和黄土中进行了 2 组。试验过程所施加的初始法向压力及分级增量,根据土的软硬程度参照文献<sup>[17]</sup>确定,第一级法向压力取 20~35 kPa,分级法向压力增量取 10~20 kPa。非饱和黄土第一级压力固结时间为 15 min,以后每级压力固结时间为 5 min;根据文献<sup>[7]</sup>的研究成果,饱和土第一级固结时间取为 20 min,以保证超孔隙水压力消散,以后每级固结时间为 10 min,以 2 r/s 的转速转动曲轴,提供上拔力,试验结果见图 6 和表 1。

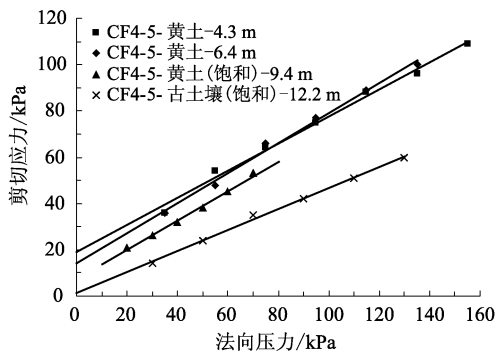


图6 黄土的钻孔剪切试验成果

表1 钻孔剪切试验结果

土层名称	深度 h/m	含水率 w/%	液性 指数 I <sub>L</sub>	粘聚力 c/kPa	内摩 擦角 φ/(°)	相关 系数 R <sup>2</sup>	备注
Q <sub>3</sub> 新黄土	4.3	16.3	-0.04	16.5	32.0	0.994	水位上
	6.4	18.1	0.01	14.2	33.0	0.993	水位上
	9.4	31.2	1.01	7.1	32.5	0.994	水位上
Q <sub>3</sub> 古土壤	12.2	25.6	0.57	1.3	24.4	0.997	水位下

本次试验,每级压力下剪切过程耗时约为1 min,剪切位移1~2 mm时,剪切应力即可达到峰值,继续剪切有一个较稳定的残余强度。由图6可知,法向压力与剪切应力的线性相关性较好( $R^2 > 0.98$ ),位于同一土层且含水率接近的试验点,试验结果离散性较小。通过现场钻探揭示,在试验地层7.8~10.4 m深度范围内,黄土因毛细作用,呈现饱和软塑状态。钻孔剪切试验结果显示,该饱和软黄土层的粘聚力明显低于上部非饱和土。由于饱和软黄土的强度低、承载力小,受钻探扰动,缩孔严重,剪切头很难放置至试验深度,试验较为困难。但是,鉴于钻孔剪切试验不需取样,可在短时间得到大量的试验数据,在成孔质量较高的黄土地层,能够得到较好的测试结果,该方法可为土体抗剪强度指标的原位测试提供一种新的途径。

### 3 结论

1) 钻孔剪切试验数据中法向压力与剪切应力的线性相关性较好,通过采用最小二乘法或其他数据拟合方法,绘制摩尔库伦破坏包线可快速确定土体的抗剪强度参数,可在较小范围内得到大量试验数据。

2) 钻孔剪切试验可测定土体峰值强度和残余强度,可在同一钻孔不同深度处进行试验,从而可以较容易测定土体抗剪强度指标在空间上的变异情况。

3) 在饱和软黄土中,试验钻孔缩孔严重,剪切探头不易安放在试验位置,试验难度大,但对于成孔质量高的非饱和黄土地层,可获得较好的测试结果。

### 4 展望

钻孔剪切试验作为一种新的原位测试手段,国内外已经开展了一系列的研究工作,但仍有一些技术问题需要今后进一步研究解决,主要包括:

1) 现有钻孔剪切试验尚无法量化排水条件(如排水、不排水、部分排水)以及剪切过程的孔压变化对土体抗剪强度参数的影响,因此需要对钻孔剪切试验设备、测试手段和方法做进一步的改进研究。

2) 钻孔剪切试验方法与传统直接剪切试验的试验工况等差异较大,但其试验边界条件及荷载条件与类似介质接触面剪切有相似性。将本试验与接触面剪切试验进行比对,建立对应试验条件下相应抗剪强度指标成果的合理应用路径是今后的研究方向。

3) 目前采用的钻孔剪切试验方法,对孔壁施加的法向压力没有考虑土层深度变化,由于水平向变形特性的存在,该试验的法向压力水平将直接影响试验量化结论,因此需要开展不同深度的侧向土压力水平及土的应变特性对试验结果的影响研究。

### 参考文献

- [1] 工程地质手册. 常士骝,张苏民,项勃,等. 工程地质手册(第四版)[M]. 北京: 中国建筑工业出版社,2006.
- [2] Handy R L, Fox N S. A soil bore-hole direct shear test device[J]. Highway Research news,1967,(27): 42-51.
- [3] ASTM subcommittee D18.02. Suggested method for Performing the Borehole Shear Test[S]. American Society for Testing and Materials,1987.
- [4] Association Française de Normalisation(AFNOR). XP P94-120 Sols: reconnaissance et essais-Essai de cisaillement au phicomètre[S]. AFNOR Eds., 1997.
- [5] Demartincourt, J P, Bauer, G E. The modified bore-hole shear device[J]. Geotechnical testing journal, 1983,(6):24-29.
- [6] Handy R L. Borehole shear test and slope stability [C]. Proceedings of In-Situ '86. Geotechnical Division, Blacksburg, VA. :ASCE,1986,161-175.
- [7] Lutenegeger A J, Tierney K F. Pore pressure effects in borehole shear testing[J]. ASCE In-situ 86, 1986, 752-764.
- [8] Millan A, Escobar S E. Use of the BST in volcanic soils[C]. Proc. VIII Pan-American Conf. on SMFE. 1987,101-114.

(下转第208页)

后方坑洞进水口至地坪塌陷处和廊道下方到排水井存在水通道。从而可以推测由于道路以下存在渗水通道,水将泥沙带入排水井,经过长时间的水土流失,造成道路下方严重脱空,导致路面坍塌。

2) 根据注水试验,可以判断变电站后方坑洞进水口与港池底板下方存在水力联系,由地坪塌陷处附近流入港池。结合现场调查,得知塌陷处周边路面下脱空 0.2~0.85 m。通过物探手段,判断地层异常深度 4~10 m,疑似渗水通道。

3) 路面脱空是船厂安全的严重隐患,如未及时查明原因及脱空范围,容易引发事故,造成巨大的损失。物探技术属于无损检测,对地形条件要求较低,实施起来较勘探等手段方便,不影响船厂正常的生产。物探技术应用于路面脱空探测效果明显,成本低,速度快。

#### 参 考 文 献

- [1] 孙洪星,康永华,耿德庸,等. 煤层采空区浅层地震法探测效果[J]. 工程勘察,1998(4): 66-68.
- [2] 葛双成,江影,颜学军. 综合物探技术在堤坝隐患探测中的应用[J]. 地球物理学进展,2006,21(1): 263-272.
- [3] 何展翔,王永涛,刘云祥,等. 综合物探技术新进展及应用[J]. 石油地球物理勘探,2005,40(1):108-112.
- [4] 李军辉. 物探技术在预防西山地面塌陷灾害中的应用[J]. 方法应用,2008,3(3):30-33.
- [5] 张胜业,潘玉玲. 应用地球物理学原理[M]. 武汉:中国地质大学出版社,2004.
- [6] 苗庆库,李玮,朱旭东. 高密度地震法在工程勘察中的应用[J]. 物探装备,2002,12(2):132-133.
- [7] 牟义,黎灵,张永超,等. 浅层地震法探测浅煤层采空区试验研究[J]. 煤炭技术,2014,33(6):69-71.
- [8] 张明山,张贝贝,宋宪存. 注水法在煤层气排采中的应用[J]. 辽宁工程技术大学学报(自然科学版),2009,28(6):891-893.
- [9] Lutenegeger A J, Timian D A. Reproducibility of borehole shear test results in marine clay[J]. Geotechnical Testing Journal,1987,10(1):13-18.
- [10] Handy R L, Schmertmann J H, Lutenegeger A J. Borehole shear tests in a shallow marine environment[J]. ASTM Special Technical Testing Publication 883, 1985, 140-153.
- [11] Lutenegeger A J, Remmes B D, Handy, R L. Borehole shear tests for stiff soil[J]. Journal of Geotechnical Engineering Division, 1978(104): 1403-1407.
- [12] Miller G A, Azad S, Hassell C E. Iowa borehole shear testing in unsaturated soil[C]. Geotechnical Site Characterization, Rotterdam, 1998.
- [13] White D J, Handy R L. Preconsolidation pressures and soil moduli from borehole shear tests[C]. Proceedings of In-situ 2001, Bali, Indonesia, 2001.
- [14] Tice J A, Sams C E. Experiences with landslide instrumentation in the southeast[J]. Transportation Research Record, 1974, 482: 18-29.
- [15] 娄奕红,俞三溥. 土的钻孔剪切试验及其工程应用[J]. 交通科技与经济,2002,(4):6-8.
- [16] APAGEO. Phicometer operating instructions [Z]. 2011.
- [17] Handy R L. Borehole Shear Test Manual[Z]. Handy geotechnical instruments, Inc., Madrid, Iowa, 2009.

收稿日期:2015-03-16

(上接第 172 页)

收稿日期:2015-04-09