

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.20210606001

黄土钻孔剪切变形与强度特性研究*

于永堂^{1,2,3}, 朱建民³, 郑建国^{1,3}, 黄晓维¹, 张龙¹, 张洁⁴

(1. 机械工业勘察设计研究院有限公司 陕西省特殊土性质与处理重点实验室, 陕西 西安 710043; 2. 中联西北工程设计研究院有限公司, 陕西 西安 710077; 3. 西安建筑科技大学土木工程学院, 陕西 西安 710055; 4. 同济大学地下建筑与工程系, 上海 200092)

摘要: 为揭示黄土钻孔剪切过程的变形和强度特征, 在传统钻孔剪切仪上增加法向位移和剪切位移传感器, 并采用改进的钻孔剪切仪在典型西安黄土中进行不同深度的钻孔剪切试验, 同时在相邻探井内取原状土样进行三轴固结不排水剪切试验和直剪试验(固结快剪、快剪), 最后将不同试验方法测得的抗剪强度参数进行对比分析。试验结果表明, 法向应力-法向位移关系曲线可通过刺入压密阶段、似弹性变形阶段和塑性变形阶段描述其特征; 在首级法向应力下的剪切破坏过程中, 剪切应力历经短期弹性、长期弹塑性增大阶段, 直至达到相对稳定值; 在分级法向应力下的剪切破坏过程中, 剪切应力历经从零增大至比例强度的弹性阶段, 从比例强度增大至峰值强度的弹塑性阶段和从峰值强度降低至残余强度的屈服破坏阶段; 当法向应力控制在似弹性变形阶段范围时, 剪切应力与法向应力之间呈良好的线性关系, 较好地符合摩尔-库伦强度准则; 钻孔剪切试验测得的内摩擦角普遍高于三轴固结不排水剪切试验和直剪试验(固结快剪、快剪)结果, 但黏聚力除在浅部地层(10 m深度范围内)中高于直剪试验(固结快剪、快剪)结果外, 均小于三轴固结不排水剪切试验和直剪试验(固结快剪、快剪)结果。

关键词: 黄土; 钻孔剪切试验; 变形特性; 强度特性; 抗剪强度参数

中图分类号: TU413 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2022)05-1104-09

Study on Deformation and Strength Characteristics of Xi'an Loess by Borehole Shear Tests

YU Yongtang^{1,2,3}, ZHU Jianmin³, ZHENG Jianguo^{1,3}, HUANG Xiaowei¹, ZHANG Long¹, ZHANG Jie⁴

(1. Shaanxi Key Laboratory of Behavior and Treatment for Special Rock and Soil, China Jikan Research Institute of Engineering Investigations and Design Co., Ltd., Xi'an 710043, China;

2. China United Northwest Institute for Engineering Design & Research Co., Ltd., Xi'an 710077, China;

3. College of Civil Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China;

4. Department of Geotechnical Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: In order to reveal the deformation and strength characteristics of loess in the process of Borehole Shear Tests (BST), the normal displacement sensor and shear displacement sensor were installed in the traditional borehole shear instrument, and the modified borehole shear instrument was applied to the BSTs at different depths in a typical loess stratum, Xi'an. Meanwhile, undisturbed soil

* 收稿日期:2021-06-06;修回日期:2021-11-19

基金项目:陕西省秦创原“科学家+工程师”队伍建设项目(2022KXJ-086)、陕西省青年科技新星计划项目(2018KJXX-001)、国机集团重点研发项目(SINOMACH 2017-科-249)资助

作者简介:于永堂(1983—),男,高级工程师,博士。主要从事岩土工程测试与装备、特殊土工程性质评价与地基处理技术的开发与应用研究。E-mail:yuyongtang@126.com

samples were taken from the adjacent exploration well for triaxial consolidated undrained shear tests, and consolidated and unconsolidated quick direct shear tests. Finally, the shear strength parameters measured by different test methods are compared and analyzed. The test results show that the relation curve of normal stress versus normal displacement can be described by the penetration-compaction stage, quasi-elastic deformation stage, and plastic deformation stage. The shear failure process under the first normal pressure goes through the short-term elastic stage and the long-term elastic-plastic stage until it reaches the relatively stable shear strength. The shear failure process under the increments of normal pressure goes through the elastic stage when the shear stress increases from zero to the proportional strength, the elastic-plastic stage when the proportional strength increases to the peak strength, and the yield failure stage when the peak strength decreases to the residual strength. When the normal stress is in the range of quasi-elastic deformation stage, there is a good linear relationship between the shear stress and the normal stress, which conforms to the Mohr-Coulomb strength criterion; The internal friction angles measured by BSTs are generally higher than those of triaxial consolidated undrained shear tests, consolidated and unconsolidated quick direct shear tests, but the cohesions are lower than those of triaxial consolidated undrained shear tests and direct shear tests except that it is higher than that of direct shear tests in shallow stratum (within 10 m depth).

Keywords: Loess; borehole shear test; deformation characteristics; strength characteristics; shear strength parameters

引 言

黄土在我国中西部地区广泛分布,是一种多孔隙、弱胶结的第四纪沉积物,具有特殊的大孔隙结构、成分均匀无层理、垂直节理发育且对水具有特殊的敏感性^[1]。黄土的抗剪强度参数是黄土地区工程建设中关注的重点问题,其取值直接影响工程稳定性分析和设计计算的可靠性。目前,黄土地区在堤坝、基坑和边坡的稳定性分析,地基承载力计算和稳定性分析,以及挡土墙和地下结构物土压力计算时,所采用的抗剪强度参数主要通过室内直接剪切试验和三轴试验测得,但室内试验中试样脱离原始地质环境,存在应力释放,受取样、运输和试样制备等过程扰动等因素干扰,对于具有结构疏松、垂直节理、大孔隙和水敏性的黄土而言,天然性状和力学特性必然受到影响,导致测试结果易产生较大偏差。原位试验方法能够保持测试对象的天然条件,应力状态更符合客观实际状态,因此行业技术发展的导向尽可能采用原位试验手段^[2]。

钻孔剪切试验(Borehole Shear Test)是一种通过在钻孔侧壁上进行不同法向应力下的直接剪切试验,测定岩土体抗剪强度参数 c 、 φ 值的原位试验方法^[3]。钻孔剪切试验能够实现获取不同深度、较

硬土体抗剪强度参数的原位测试方法,且具有操作便捷、试验速度快、可重复性高等特点^[4],是对传统抗剪强度参数测试方法的重要补充。钻孔剪切试验适用于黏性土、粉土、粉砂等细颗粒土地层^[5],特别是在不易取原状土样的场地和土层性质变化较大的滑坡土体抗剪强度参数测试中具有优势^[6]。

钻孔剪切试验在国外已有 50 余年的研究和应用历史,国外学者将钻孔剪切试验用于海相软黏土^[7]、硬黏土^[8]、残积土^[9]和非饱和土^[10]等细颗粒土的抗剪强度参数测试,还有学者将钻孔剪切试验用于确定土的先期固结压力和模量^[11]、模拟桩-土界面相互作用^[12]和估算桩基础承载力等^[7]。钻孔剪切试验引入我国时间不长,我国学者曾尝试将该试验用于黄土^[13]、膨胀土^[14]、残积土^[15-16]、粉质黏土^[17]和填土等^[18]的抗剪强度参数测试,在实践中发现了一些问题,例如传统钻孔剪切试验仪不具备观测法向位移和剪切位移功能,无法绘制法向应力与法向位移曲线、剪切应力与剪切位移曲线,不能依据曲线特征获得比例强度、峰值强度和残余强度等确定相应的强度参数,无法满足现有《岩土工程勘察规范》^[19]中对现场直剪试验成果分析的需求。此外,钻孔剪切试验过程的法向应力施加和固结时间等试验控制参数的选择与土的软硬程度有关^[5],但由于试验在钻孔中进行,从地面无法判断孔内的土层软硬程

度,目前国内对试验控制参数的确定,仅能参照国外经验,是否适合国内土质尚有待验证。上述问题均与钻孔剪切变形和强度特性不明确有关,从而在一定程度上制约了该技术在实际工程中应用进程。

本文在传统 Iowa 钻孔剪切仪上增加了法向位移和剪切位移观测系统,并在典型西安黄土地层中进行了现场试验,研究了黄土钻孔剪切变形与强度特性。相关成果可为钻孔剪切试验操作、数据处理和成果应用提供参考。

1 试验概况

1.1 试验原理及设备

钻孔剪切试验原理如图 1 所示,试验时将带有齿状突起的剪切头,通过拉杆放入孔内试验深度,施加气压力使活塞推动剪切板扩张,对孔壁施加法向应力使土体固结稳定,然后向上提拉拉杆,对剪切板齿尖下部的土体施加剪切力,实现齿尖下部土体与孔周围土体的直接剪切破坏。

当剪切板扩张对孔壁施加压力时,活塞对剪切板施加法向应力 P ,此时剪切板对孔壁施加法向应力为 σ ;当对土体剪切时,拉杆对剪切板施加竖向拉

力 F ,此时剪切板对孔壁施加的剪切应力为 τ ,若单块剪切板的有效作用面积为 A ,则得到:

$$\sigma = P/A \quad (1)$$

$$\tau = F/(2A) \quad (2)$$

钻孔剪切过程观测剪切应力变化,读取每级法向应力下的抗剪强度,根据摩尔-库伦(Mohr - Coulomb)强度准则:

$$\tau = c + \sigma \tan(\varphi) \quad (3)$$

对多组(一般 4~5 组)试验数据采用最小二乘法线性回归,求得黏聚力 c 和内摩擦角 φ 。

钻孔剪切试验设备主要由剪切头、测量与控制系统等组成。剪切板尺寸为 $B \times L = 50.8 \text{ mm} \times 63.5 \text{ mm}$ (B 为圆弧长, L 为板高),剪切齿高为 2.2 mm,齿角为 60° ,齿间距为 2.54 mm,法向压力控制范围为 0~440 kPa,所能提供的最大剪切应力为 350 kPa。本次在传统钻孔剪切仪上增加了法向位移和剪切位移观测系统(图 1),其中法向位移传感器的最大量程为 15 mm,线性精度为 $\pm 0.08\%$ F.S,法向位移传感器的本体固定在剪切头的活塞上(一侧剪切板与活塞腔体固定连接,另一侧剪切板与活塞杆连接,可沿活塞轴向伸缩),法向位移传感器的顶杆与剪切板内侧接触,用于观测反向撑开量;剪切位移传感器的最大量程为 50 mm,线性测量精度为 $\pm 0.1\%$ F.S,传感器本体通过位移传感器夹具与拉杆连接,顶杆与加载平台顶面接触。位移传感器与数据采集器相连,可直接显示位移测量值。改进后的钻孔剪切仪如图 2 所示。

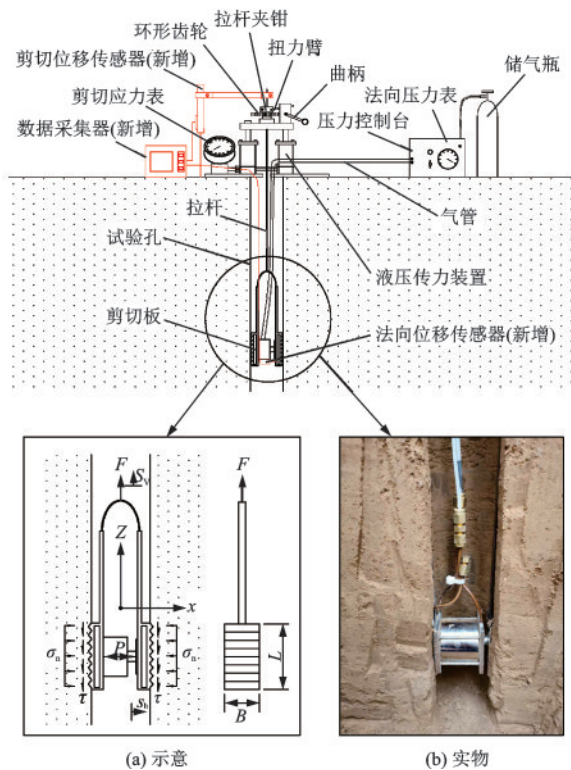


图 1 钻孔剪切试验原理

Fig.1 Principle and device of the borehole shear test



图 2 改进的钻孔剪切仪

Fig.2 Modified borehole shear test instrument

1.2 试验场地及土层基本性质

试验场地位于西安市北部泾阳南塬(图 3),距西安约 20 km,毗邻泾河南岸,试验场地中心坐标为东经 $108^\circ 45' 34''$,北纬 $34^\circ 29' 52''$,海拔 459.62 m,属于典型的黄土台塬地貌,场地平坦。钻孔剪切试验点的土层剖面如图 4 所示。试验深度范围内,自上而

下依次为耕土层(Q_4^{pd})、黑垆土(Q_4^{el})、马兰黄土及古土壤(Q_3^{eol+el})、离石黄土(Q_2^{eol})。

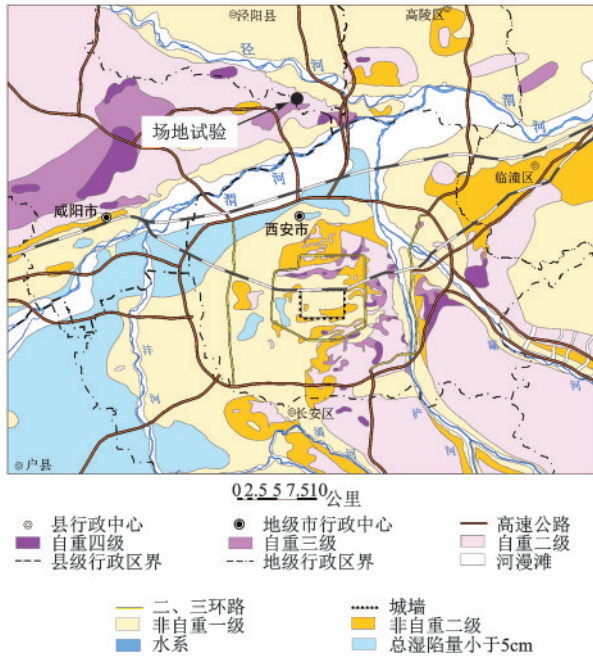


图3 试验场地位置
Fig.3 Location of the test site in Xi'an

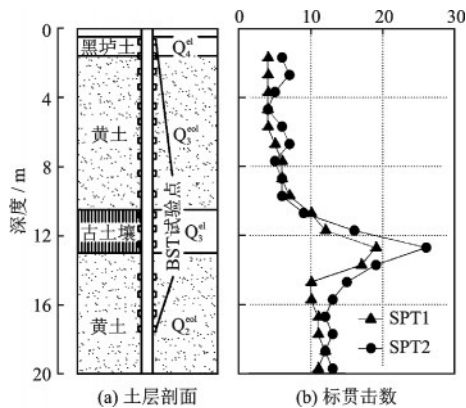


图4 钻孔剪切试验点的土层剖面
Fig.4 Soil profile of the borehole shear test site

黄土垂直节理发育,具有显著的各向异性,一方面有水平面内沉积的结构特征,分布有大孔隙,另一方面有沿铅垂线方向分布的微裂隙构造特征,即垂直方向和水平方向的性质存在差异。为此,本次在距试验孔Z1约2.5 m的探井中取垂直方向和水平方向的原状土样进行室内三轴试验(CU)和直剪试验(固结快剪、快剪),取土深度0.6~17.6 m;在距试验孔Z1约2.5 m的钻孔SPT1、SPT2中进行标贯试验,试验深度范围1.7~19.7 m。

1.3 试验方法与过程

本次共完成5个钻孔的剪切试验,其中Z1为深孔,试验深度范围为0.6~17.6 m,用于测试不同深度黄土的抗剪强度特性;Z2~Z5为浅孔,试验深度范围为3.4~3.7 m,用于研究法向应力与法向位移关系曲线特征。为减少成孔过程对测试孔壁的扰动,每次试验孔的成孔过程,首先采用外径127 mm的取土器清孔,然后采用外径76.2 mm、壁厚1.8 mm、刃角外倾的薄壁取土器静压成孔40 cm,作为试验孔内测试段。试验时,将剪切头下放至孔内测试深度,首先施加1 kPa的接触压力,使剪切齿的齿尖接触孔壁,然后加压至预定的试验法向应力,同时采用法向位移传感器观测位移量,固结稳定后提拉剪切头对孔壁土体施加剪切力。

本次钻孔剪切试验采用分级加载剪切法(Multi-stage Testing,简称MT法),即在同一测试位置,逐级增大法向压力,每级压力固结稳定后进行剪切,试验过程不改变测点位置。剪切力施加采取位移控制模式,剪切速率为0.05 mm/s(曲柄转速为2 r/s),剪切过程采用位移传感器观测剪切位移量,位移数据采集频率为10次/s。剪切过程软件可自动记录法向位移、剪切位移和剪切力,并在软件中绘制曲线,方便对试验过程进行全程监控。当测力计读数出现峰值或稳定值后,继续剪切2 mm后停止剪切;当无明显峰值(即无明显应力跌落现象)或稳定值时,参照规范^[19]中原位直剪试验的剪切破坏标准,取剪切位移为剪切板剪向高度1/10(剪切板的剪向高度为63.5 mm,等同于试体尺寸,对应剪切位移量约为6.35 mm)剪切强度作为极限强度,为了保证试验结果的可靠性,最大剪切位移量超过8 mm后停止加载。

2 试验结果与分析

2.1 法向应力与法向位移关系曲线特性

典型黄土及古土壤的法向应力与法向位移关系曲线如图5所示。由图可知,试验土层的法向应力与法向位移关系曲线可分为刺入压密阶段、似弹性变形阶段和塑性变形阶段三个主要阶段。

(1) 第I阶段:刺入压密阶段。随法向应力增大,法向位移快速增大,该阶段的前期变形主要为齿尖刺入孔壁引起,后期变形还包含有齿尖下部扰

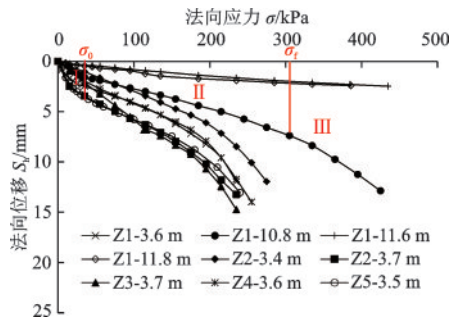


图5 法向应力与法向位移关系曲线

Fig.5 Curves of normal stress versus normal displacement

动土和未扰动土的压缩等,其特征是曲线呈上凸形,其斜率随法向应力的增加而降低。

(2) 第Ⅱ阶段:似弹性变形阶段。法向应力与法向位移之间近似呈线性关系,直线段的起点为初始压力 σ_0 , 终点为临塑压力 σ_i , 该阶段齿尖下部土中应力处于弹性平衡状态,剪切板下部土中应力小于其孔壁土体的承载能力。

(3) 第Ⅲ阶段:塑性变形阶段。当法向应力超过法向应力与法向位移关系曲线直线段终点的临塑压力 σ_i 后,法向位移先快速增大,该阶段齿尖下部土中应力处于塑性平衡状态,因法向应力范围和剪切板扩张范围限制,尚未达到极限压力 σ_0 。该阶段的变形特征是曲线呈上凹形,其斜率随法向应力的增加而增大。

如图5所示,在相同的法向应力下,古土壤(Z1-11.6 m、Z1-11.8 m)的法向位移量明显小于黄土,在剪切板的最大扩张范围内,尚未进入塑性变形阶段。法向应力与法向位移关系曲线的变化特征与土体软硬程度密切相关。为保证剪切齿的齿尖能刺入孔壁中,形成足够大的咬合力,仪器操作手册^[22]建议,对于中等硬度土,首级法向压力取35 kPa,分级法向应力增量取15~35 kPa,此时的法向应力试验区段与图5所示的法向位移曲线的似弹性变形段相对应。本次为讨论合理的法向压力施加区段,在Z2钻孔内深度3.8 m处,进行了法向应力范围为10~270 kPa的钻孔剪切试验。法向应力与剪切强度关系曲线如图6所示。

如图6所示,当法向应力在似弹性变形段内 $\sigma_0=30 \text{ kPa} \leq \sigma \leq \sigma_i=180 \text{ kPa}$ 时,法向应力与剪切应力之间具有较高的线性相关性,能较好的符合摩尔-库伦破坏准则;当法向应力小于初始压力 $\sigma_0=30 \text{ kPa}$ 时,峰值抗剪强度值落在了似弹性变形段摩尔-库伦破坏包线的下部;当法向应力超过临塑压力

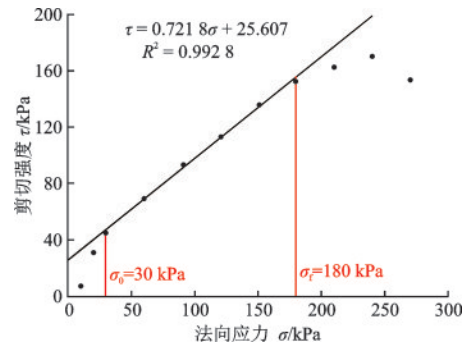


图6 剪切强度与法向应力关系曲线

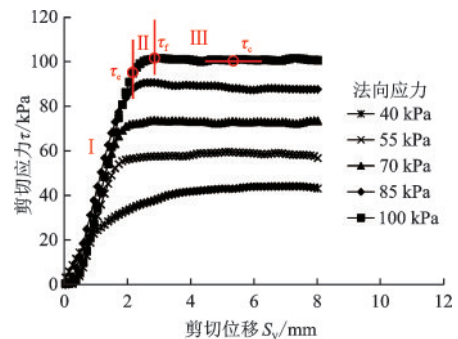
Fig.6 Curves of shear strength versus normal stress

$\sigma_i=180 \text{ kPa}$ 时,剪切应力随法向应力增大逐步转变为斜率逐渐降低的曲线增大关系,当法向应力达到270 kPa时,对应的抗剪强度出现陡降,表明法向应力施加后,剪切板下部土体已经进入塑性状态。

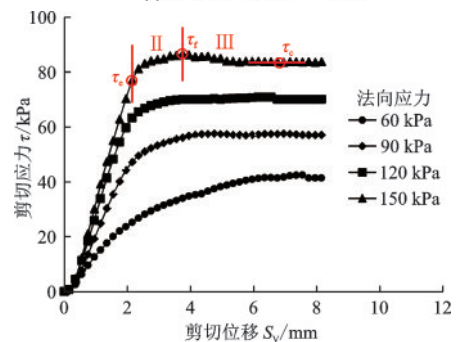
2.2 剪切应力与剪切位移关系曲线特性

当法向应力控制在似弹性变形段内时,采用MT法试验时,不同法向应力下的典型剪切应力与剪切位移关系曲线如图7所示。

由图7可知,由于在剪切位移初期,剪切应力随剪切位移的增加,初期曲线呈下凹状,该曲线阶段较短,主要由少量剪切变形、仪器剪切力加载构件



(a) 法向应力增量 $\Delta\sigma=15 \text{ kPa}$



(b) 法向应力增量 $\Delta\sigma=30 \text{ kPa}$

图7 剪切应力与剪切位移关系曲线

Fig.7 Curves of shear stress versus shear displacement

间的接触变形和拉紧变形等组成。在首级法向应力作用下,剪切过程历经短期的弹性阶段、长期的弹塑性阶段,直至达到相对稳定的抗剪强度值,剪切应力与剪切位移关系曲线呈缓变型,常出现剪切位移超过 6 mm 时仍未出现峰值或稳定值的情况;在各分级法向应力作用下,剪切位移达到 2~6 mm 时,一般会出现峰值或稳定值,剪切位移曲线呈现以下特点:

(1) 第 I 阶段:剪切应力随剪切位移的增加,逐渐达到比例强度 τ_c (剪切应力与剪切位移曲线直线段末端相应的剪切应力) 二者之间呈近似线性关系。这一阶段为剪切应力从零增大至比例强度的弹性(准弹性)阶段,剪切板下部土体产生裂隙。

(2) 第 II 阶段:剪切应力随剪切位移的增加,增大速度逐渐放缓,直至增加到峰值强度 τ_1 ,二者呈斜率逐步降低的曲线增大关系。在相同剪切变形增量下,剪切应力增量逐步递减。这一阶段为塑性变形阶段,剪切板下部土体裂隙发展和增长。

(3) 第 III 阶段:剪切应力随剪切位移增大达到峰值强度,随后剪切应力缓慢降低,剪切变形持续增大,但部分曲线的剪切应力跌落现象并不显著,这一阶段剪切应力从峰值强度(或稳定值)降低至残余强度 τ_c ,形成了贯通的剪切破坏带(面)。

2.3 钻孔剪切试验与室内试验结果的对比分析

对钻孔 Z1 内不同试验深度的钻孔剪切试验数据采用最小二乘法进行线性回归得到摩尔-库伦破坏包线如图 8 所示。试验深度范围内的钻孔剪切试验、三轴试验和直剪试验结果见表 1。由图表可知,通过法向应力与法向位移关系曲线判断土层软硬程度,可控制法向应力在似弹性变形段范围内时,各钻孔剪切试验点的剪切应力与法向应力的线性相关性较好,相关系数 R^2 均大于 0.98。

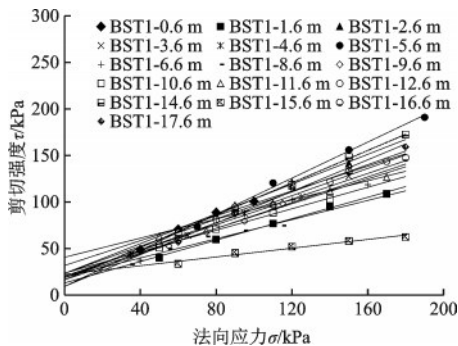


图 8 剪切强度与法向应力关系曲线

Fig. 8 Curves of shear strength versus normal stress

不同试验方法的剪切力作用方向与黄土节理发育方向的关系如图 9 所示。由图可知,钻孔剪切试验(BST)的剪切力作用方向与黄土节理发育方向近似平行。在室内试验中,当试验土样采取垂直取样时,直剪试验(固结快剪(CQT)、快剪(QT))的剪切力作用方向与黄土节理发育方向垂直;当试验土样采取水平取样时,直剪试验(CQT、QT)的剪切力作用方向与黄土节理发育方向平行;三轴试验(TST)的剪切力作用方向与黄土节理发育方向成一定交角。从剪切面位置相似的角度出发,钻孔剪切试验与垂直取样的三轴剪切试验和水平取样的直剪试验结果在剪切力作用方向与黄土节理发育方向方式是一致的,但由表 1 和图 9 可知,总体上直剪试验固结快剪测得的黏聚力,水平样大于垂直样,但内摩擦角二者相差不大;三轴剪切(TST)试验测得的黏聚力,垂直样大于水平样,但内摩擦角二者相差不大。

不同试验方法测得的抗剪强度指标对比结果如图 10 所示。由图表可知,钻孔剪切试验(BST)测得的内摩擦角除个别试验点(试验深度 15.6 m)外,普遍高于三轴试验(CU)和直剪试验(CQT、QT)结果,但黏聚力除在浅部地层(10 m 内)中高于直剪试验

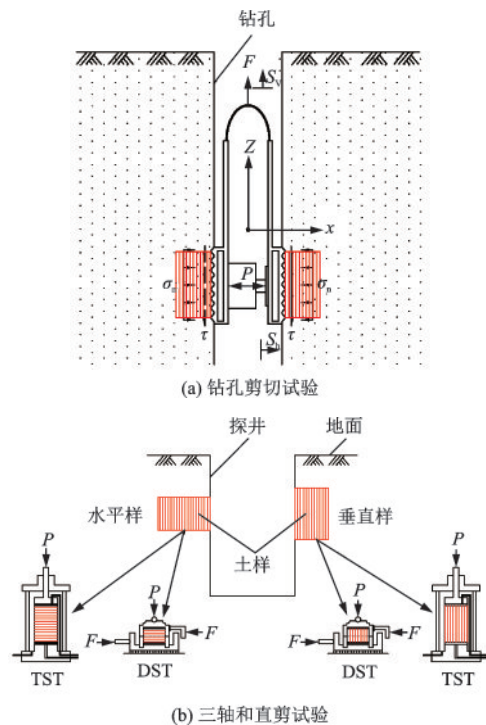


图 9 剪切力作用方向与黄土节理发育方向的关系示意

Fig.9 Schematic diagrams of the relationship between the shear force direction and the loess joint development direction

表1 黄土的基本性质及钻孔剪切试验、三轴试验和直剪试验结果汇总

Table 1 Summary of the basic properties of loess, the results of BSTs, triaxial shear tests, and direct shear tests

土层名称	试验编号	深度 h/m	含水率 w/%	干密度/(g·cm ⁻³)	塑性指数 I _p	液性指数 I _L	BST			取样方向	TST(CU)		CQT(固结快剪)		QT(快剪)	
							黏聚力 c _{BST} /kPa	内摩擦角 φ _{BST} /°	相关系数 R ²		黏聚力 c _{CU} /kPa	内摩擦角 φ _{CU} /°	黏聚力 c _{CDST} /kPa	内摩擦角 φ _{CDST} /°	黏聚力 c _{DST} /kPa	内摩擦角 φ _{DST} /°
Q ₄ ^{pd} 黄土	T1	0.6	17.1	1.32	11.8	-0.11	16.3	41.0	0.983	垂直	-	-	17.2	26.7	16.5	22.2
											水平	-	-	27.3	25.1	-
Q ₄ ^{el} 黑垆土	T2	1.6	17.2	1.30	11.5	-0.09	19.7	41.2	0.996	垂直	26.3	19.6	16.3	28.2	12.1	21.7
										水平	28.9	19.2	23.8	26.7	-	-
Q ₃ ^{col} 黄土	T3	2.6	16.2	1.28	11.2	-0.15	23.4	38.6	0.996	垂直	35.4	17.3	11.7	27.5	19.2	22.8
										水平	26.8	21.5	14.6	27.4	-	-
	T4	3.6	18.4	1.21	10.9	0.09	23.3	36.1	0.985	垂直	35.6	20.0	14.9	26.8	6.7	24.4
										水平	26.5	20.8	10.9	24.8	-	-
	T5	4.6	17.6	1.23	11.2	-0.02	20.3	34.6	0.997	垂直	25.8	22.6	17.3	27.8	5.2	25.1
										水平	32.6	19.6	18.2	26.0	-	-
T6	5.6	17.1	1.21	11.2	-0.07	17.3	41.9	0.990	垂直	38.2	21.0	13.5	25.4	7.3	27.3	
									水平	35.1	19.5	11.6	29.3	-	-	
T7	6.6	19.05	1.21	11.3	0.10	18.7	33.5	0.981	垂直	31.7	20.1	15.4	21.1	16.8	25.2	
									水平	25.8	21.5	15.8	26.7	-	-	
T8	7.6	19.9	1.20	10.9	0.22	-	-	-	垂直	17.5	27.3	16.0	23.5	11.2	24.5	
									水平	32.6	23.9	18.7	26.6	-	-	
T9	8.6	20.4	1.29	11.1	0.24	19.4	27.3	0.982	垂直	37.2	26.4	18.8	27.9	9.9	27.1	
									水平	38.4	23.1	21.8	22.5	-	-	
T11	9.6	20.3	1.28	11.5	0.19	16.5	34.6	0.989	垂直	34.0	24.2	14.1	24.8	30.8	22.8	
									水平	35.8	23.1	18.2	27.5	-	-	
T12	10.6	19.3	1.39	11.3	0.13	23.6	30.0	0.996	垂直	38.3	25.7	21.9	23.6	35.8	24.3	
									水平	55.7	22.0	28.0	25.9	-	-	
Q ₃ ^{el} 古土	T13	11.6	17.5	1.51	11.2	-0.04	40.7	27.2	0.988	垂直	56.4	26.0	30.7	26.4	53.6	22.3
										水平	56.4	23.5	30.8	30.0	-	-
壤	T14	12.6	19.9	1.40	12.7	0.05	19.1	36.2	0.996	垂直	-	-	-	-	29.2	24.1
										水平	-	-	-	-	-	-
T15	13.6	16.0	1.42	11.0	-0.16	-	-	-	垂直	59.4	21.3	42.3	22.3	-	-	
									水平	59.5	22.6	26.0	26.8	-	-	
T16	14.6	17.6	1.34	11.2	-0.03	8.3	42.6	0.999	垂直	35.7	24.2	24.3	24.1	32.1	25.6	
									水平	43.8	22.9	24.6	26.1	-	-	
Q ₂ ^{col} 黄土	T17	15.6	16.1	1.33	11.0	-0.15	22.1	13.2	0.983	垂直	32.5	21.6	29.7	20.0	17.8	27.9
										水平	26.9	29.0	25.4	28.9	-	-
T18	16.6	13.4	1.34	10.7	-0.36	31.6	33.7	0.980	垂直	39.6	22.4	24.2	22.6	21.3	23.6	
									水平	35.7	21.1	22.8	21.8	-	-	
T19	17.6	16.4	1.39	10.8	-0.10	17.7	38.5	0.996	垂直	53.1	22.2	28.7	24.4	33.6	24.4	
									水平	39.4	20.6	25.0	25.1	-	-	

(固结快剪、快剪)结果外,其余各类工况(不同深度、不同取样方向)均小于三轴试验(CU)和直剪试验

(固结快剪、快剪)结果。由图10和图4可以看出,黏聚力与标贯击数随土层深度增加表现出同增同减的

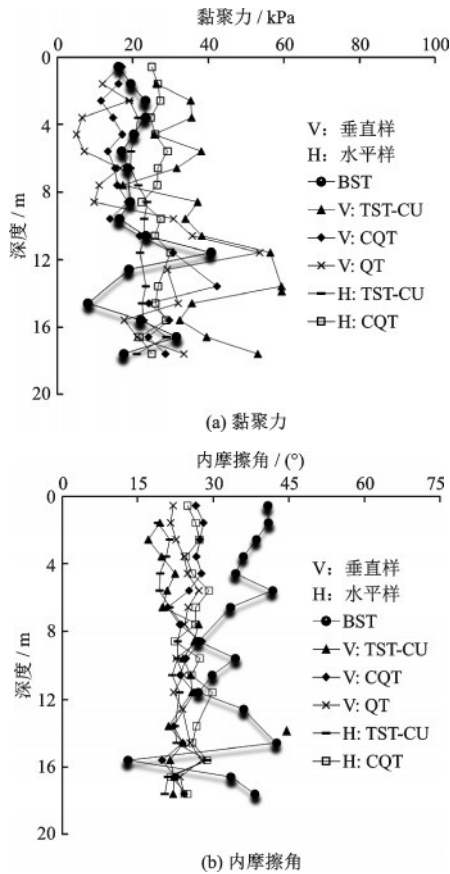


图10 不同试验方法测得抗剪强度参数对比结果
Fig.10 Comparison of shear strength parameters measured by different test methods

趋势,而内摩擦角呈现出相反的趋势。从土层来看,二者物理力学性质的差别体现在:黄土层多孔发育,颗粒较粗,颗粒间棱角接触较多,结构相对不稳定,而古土壤则较密实,颗粒较细,黏粒含量多,黏化作用强,颗粒间多以棱边接触或为黏土包围,结构相对稳定,具有较大的力学强度^[20-21],土层硬度随深度逐渐增大,并且古土壤硬度明显高于黄土,以上土性差异使得黄土层较古土壤层所测得的黏聚偏低。

3 讨论

上文中三种试验方法所测抗剪强度参之间的差异与试验原理的差异有关。本次试验均非饱和黄土中进行,因此,不需要考虑固结排水问题,总体上三种剪切试验方法的差别如下:

(1)在钻孔剪切试验中,剪切面一侧为土体,另一侧为刚性带齿剪切板,齿尖刺入土中使齿尖下部土体固结,剪切时带动齿尖下部土体产生剪切破坏面(带),剪切过程剪切面积基本不变,剪切过程剪

切面不一定是试样的最薄弱面。此外,只有当法向应力作用下,剪切齿对孔壁土体的咬合作用足够大,同时保证土体不发生屈服破坏,才能保证测得土体自身的抗剪强度参数。

(2)在室内直剪试验中,剪切面(带)两边的介质材料均是土,剪切过程土样的剪切面积不断变小(计算抗剪强度时是按照土样的原截面计算),剪切破坏先从边缘开始,剪切面上剪切应力分布不均匀(边缘会发生应力集中现象),剪切面不一定是试样的最薄弱面。

(3)在三轴剪切试验时,试样在围压作用下固结,试样中的应力状态明确,一般认为破裂面是在试样的最薄弱面处,而不像室内直剪试验中限定在上下盒之间的截面处,土颗粒间相互错动产生的摩擦效应较为显著,尤其是土体本身的薄弱面。

上述三种试验在原理上的差别,导致了试验所测得的抗剪强度参数之间必然存在范围性偏差,内在机理尚需要在未来进一步探讨。考虑到目前黄土地区在工程设计中采用的抗剪强度指标多是由室内试验测得,当采用钻孔剪切试验时,需要注意钻孔剪切试验所测抗剪强度参数与室内试验结果之间的差异,以保证对抗剪强度参数的合理取用。

4 结论

本文通过典型西安黄土的钻孔剪切试验,探讨了钻孔剪切的变形与强度特性,得到如下主要结论:

(1)在分级加载条件下,法向位移曲线包括三个主要阶段:剪切齿刺入孔壁及其下部土体压缩过程的刺入压密阶段;法向位移随法向应力呈线性增大的似弹性变形阶段;法向位移随法向应力呈曲线增大,直至屈服破坏前的塑性变形阶段。

(2)分级加载剪切法的钻孔剪切破坏过程:首级法向应力下,剪切应力历经弹性增大、弹塑性增大,直至达到相对稳定值;后续分级法向应力下,剪切应力首先从零线性增大至比例强度,接着曲线增大至峰值强度,最后降低至残余强度。

(3)钻孔剪切试验的法向应力需控制在似弹性变形段内,以确保剪切齿与孔壁土体咬合紧密,同时土体结构也不至于发生屈服破坏,此时钻孔剪切试验的法向应力与剪切应力之间具有较高的线性相关性,能较好的符合摩尔-库伦破坏准则。

(4) 钻孔剪切试验测得的内摩擦角普遍高于三轴试验(CU)和直剪试验(固结快剪、快剪)结果,但黏聚力除在浅部地层(10 m内)中高于直剪试验(固结快剪、快剪)结果外,均小于三轴试验(CU)和直剪试验(固结快剪、快剪)结果。

参考文献:

- [1] 刘祖典. 黄土力学与工程[M]. 西安: 陕西科学技术出版社, 1997: 1-25.
Liu Z D. Loess mechanics and engineering[M]. Xi'an: Shaanxi Science and Technology Press, 1997: 1-25. (in Chinese)
- [2] 沈小克, 蔡正银, 蔡国军. 原位测试技术与工程勘察应用[M]. 土木工程学报, 2016, 49(2): 98-120.
Shen X K, Cai Z Y, Cai G J. Applications of in-situ tests in site characterization and evaluation[M]. China Civil Engineering Journal, 2016, 49(2): 98-120. (in Chinese)
- [3] Handy R L, Fox N S. A soil borehole direct shear test device[J]. Transportation Research Record, 1967, 27: 42-51.
- [4] Lutenegeger A J, Timian D A. Reproducibility of borehole shear test results in marine clay[J]. Geotechnical Testing Journal, 1987, 10(1): 13-18.
- [5] Drnevich V P. Suggested method for performing the borehole shear test[J]. Geotechnical Testing Journal, 1987, 10(1): 19-25.
- [6] Hong Y, White D J, Schaefer V R. In-Situ borehole shear test and rock borehole shear test for slope investigation[C]// Geoshanghai International Conference, Shanghai, 2006: 293-298.
- [7] Handy R L, Schmertmann J H, Lutenegeger A J. Borehole shear tests in a shallow marine environment. In: Chaney, R.C., Demars, K.R. (eds.) Strength Testing of Marine Sediments: Laboratory and In-Situ Measurements [M]. Philadelphia: ASTM STP 883, 1985: 140-153.
- [8] Lutenegeger A J, Remmes B D, Handy R L. Borehole shear test for stiff soils[J]. Journal of the Geotechnical Engineering Division, 1978, 104 (NGT11): 1403-1407.
- [9] Lutenegeger A J, Adams M T. Tension tests on bored piles in residual soil[J]. Geotechnical Special Publication, 1999, 92: 43-53.
- [10] Miller G A, Azad S, Hassell C E. Iowa borehole shear testing in unsaturated soil[J]. Geotechnical Site Characterization, 1998, 2(1): 1321-1326.
- [11] White D J, Handy R L. Preconsolidation pressures and soil moduli from borehole shear tests[C]//Proceedings from International Conference on In Situ Measurement of Soil Properties and Case Histories, Bali, 2001.
- [12] Abdelsalam S S, Suleiman M T, Sritharan S. Enhanced load-transfer analysis for friction piles using a modified borehole shear test[J]. Geotechnical Testing Journal, 2012, 35(6): 1-11.
- [13] 于永堂, 郑建国, 刘争宏, 等. 钻孔剪切试验及其在黄土中的应用[J]. 岩土力学, 2016, 37(12): 3635-3641.
Yu Y T, Zheng J G, Liu Z H, et al. Borehole shear test and its application to loess[J]. Rock and Soil Mechanics, 2016, 37(12): 3635-3641. (in Chinese)
- [14] 李晶晶, 孔令伟, 穆坤. 膨胀土原位孔内剪切试验与强度响应特征[J]. 岩土力学, 2017, 38(2): 453-461.
Li J J, Kong L W, Mu K. In-situ borehole shear test on expansive soil and its strength characteristics[J]. Rock and Soil Mechanics, 2017, 38(2): 453-461. (in Chinese)
- [15] 安然, 孔令伟, 张先伟. 残积土孔内剪切试验的强度特性及广义邓肯-张模型研究[J]. 岩土工程学报, 2020, 42(9): 1723-1732.
An R, Kong L W, Zhang X W. Mechanical properties and generalized Duncan-Chang model for granite residual soils using borehole shear tests[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2020, 42(9): 1723-1732. (in Chinese)
- [16] 冯文凯, 易小宇, 白慧林, 等. 原位钻孔剪切试验及其在残坡积土中的应用[J]. 科学技术与工程, 2017, 17(34): 289-293.
Feng W K, Yi X Y, Bai H L, et al. In-situ borehole shear test and its application in residual slop soil[J]. Science Technology and Engineering, 2017, 17(34): 289-293. (in Chinese)
- [17] 张建经, 马东华, 曾鹏毅, 等. 新型便携式钻孔剪切仪研发与测试分析[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2019, 38(11): 90-97.
Zhang J J, Ma D H, Zeng P Y, et al. Development and test analysis of a new portable borehole shear equipment [J]. Journal of Chongqing Jiaotong University (Natural Science), 2019, 38(11): 90-97. (in Chinese)
- [18] 陈俊新. 基于原位钻孔剪切试验的填方边坡治理数值模拟—以南平开元房地产边坡为例[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2018: 26-45.
Cheng J X. Numerical study of the control of a backfill slope based on in-situ borehole shear test—take Nanping—Kaiyuan real estate slope for example [D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2018: 26-45. (in Chinese)

(本文责编:周小潭)

(下转第 1120 页)