

文章编号: 1007-2993(2023)04-0465-05

## 黄土原位钻孔剪切试验研究

黄晓维<sup>1</sup> 刘子君<sup>2</sup> 杨振荣<sup>1</sup> 郑建国<sup>1</sup>

(1. 机械工业勘察设计研究院有限公司, 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)

**【摘要】** 准确获得黄土原位土体抗剪强度参数对黄土工程至关重要。将钻孔剪切试验应用于西安某黄土滑坡原位土体抗剪强度参数测试, 提出了黄土场地中适宜的成孔方法, 在原 Iowa 钻孔剪切仪基础上加装微型位移测量系统和剪切力测量系统, 精确测量法向位移与剪切应力, 并将钻孔剪切试验结果与室内直剪试验结果进行了对比。结果表明, 改进后的设备测试更加可视化、可控化; 试验阶段法向压力-位移分布近似在一条直线上, 土体处于似弹性变形阶段; 首级法向压力固结时间为 10 min, 后续每级压力固结时间为 5 min, 满足试验要求并能保证试验成功率; 与室内直剪试验相比, 钻孔剪切试验测得的内摩擦角平均大 40.8%, 黏聚力平均小 12.7%。钻孔剪切试验数据之间相关性较好, 测试效果良好, 可为今后黄土原位土体抗剪强度参数测试提供借鉴与指导。

**【关键词】** 钻孔剪切试验; 法向压力; 固结时间; 黄土

**【中图分类号】** TU 413

**【文献标识码】** A

doi: 10.3969/j.issn.1007-2993.2023.04.016

## Research of In-situ Borehole Shear Test of Loess

Huang Xiaowei<sup>1</sup> Liu Zijun<sup>2</sup> Yang Zhenrong<sup>1</sup> Zheng Jianguo<sup>1</sup>

(1. China Jikan Institute of Engineering Investigation and Design Co., Ltd., Xi'an 710043, Shaanxi, China; 2. China United Northwest Institute for Engineer Design & Research Co., Ltd., Xi'an 710077, Shaanxi, China)

**【Abstract】** It is very important to accurately obtain the in-situ shear strength parameters of loess for loess engineering. In this study, borehole shear test (BST) was applied to test the shear strength parameters of loess on a loess landslide in Xi'an. The suitable drilling method in loess site was proposed, and a micro displacement-shear strength measurement system was added on the basis of the original Iowa borehole shear test to accurately measure the normal displacement and shear stress. The results of BST and direct shear test were compared. The results show that the improved equipment is more visible and controllable; the normal stress is proportional to displacement, which indicates that the soil is in the stage of quasi elastic deformation. To ensure the reliability of the results, the time for consolidation under the first stage of normal stress needs 10 min while 5 min meet the requirement in the subsequent stages. Compared with the direct shear test, the internal friction angle measured is larger for 40.8% on average while cohesion is 12.7% smaller. The borehole shear test shows a good performance on the test of the shear strength parameters of loess in-situ.

**【Key words】** borehole shear test; normal pressure; consolidation time; loess

### 0 引言

我国黄土地区分布广泛, 黄土工程问题突出<sup>[1]</sup>。在黄土地区岩土工程设计中, 黄土土体的抗剪强度参数是最基本、最重要的力学参数, 直接关系到工程的安全与稳定<sup>[2]</sup>。获取土体抗剪强度参数途径主要有室内试验和原位试验<sup>[3]</sup>。室内试验需进行现场取样, 土样脱离原位后应力完全释放, 经过包装、运输和再制样, 会产生不同程度的扰动, 最终的测试结果常难以反映土体的实际强度, 给工程设计带来一定

制约。原位试验是在不扰动或基本不扰动岩土层的情况下, 通过特定的试验仪器对岩土层进行测试, 最大程度保持土体的天然结构、含水率及原始应力水平, 测试结果更能反映土体的真实特性。

土体现场剪切试验方法主要有现场直接剪切试验(大剪试验)、十字板剪切试验和钻孔剪切试验。现场直接剪切试验成本高, 费时费力, 其应用常受制于地质环境条件。十字板剪切试验适用于测试饱和软黏土不排水抗剪强度和灵敏度, 对黄土不具适用性。

**作者简介:** 黄晓维, 男, 1993 年生, 汉族, 甘肃平凉人, 硕士研究生, 工程师, 主要从事岩土工程测试与监测技术研究。E-mail: 943284261@qq.com

钻孔剪切试验(Borehole Shear Test, 简称BST)是由 Handy<sup>[4]</sup>提出的一种测定岩土体强度参数的原位测试方法,通过在预先成好的钻孔孔壁上进行一系列直剪试验,以此测定土的黏聚力  $c$  和内摩擦角  $\varphi$ 。钻孔剪切试验测试过程简便,可在难以取样、施工环境恶劣的复杂地质环境中应用。国外现已成功应用于砂土、粉质黏土、硬质土、残积土等细颗粒土体原位强度测试<sup>[5-7]</sup>,并在边坡稳定性分析中进行了土体强度参数的测试<sup>[8]</sup>。黄土工程场地复杂,取样困难,土体强度参数难以获取,而黄土具有自立性好,极易成孔的特点。因此将钻孔剪切试验应用于黄土土体抗剪强度参数测试具有广泛的应用前景<sup>[9-11]</sup>。

将钻孔剪切试验应用于西安某黄土滑坡的原位土体抗剪强度参数测试,并在原 Iowa 仪器设备和试验方法的基础上进行了优化和改进,增加了法向位移观测系统和剪切力测量系统,实现了试验过程中力和位移的实时监测,得到了科学的固结判定标准;此外,提出了适宜的成孔工艺,分别在滑坡坡顶、坡体中部和坡脚处进行了测试,并与室内直接剪切试验结果进行了对比分析。结果表明,改进后的设备在黄土工程原位土体强度参数测试中具有广泛应用前景。

## 1 钻孔剪切试验原理与方法

### 1.1 试验原理

常用的钻孔剪切仪见图 1,与室内直剪试验原理类似,钻孔剪切仪通过将两片带齿的环形剪切板放入钻孔内测试深度处,后施加法向水平压力  $P$  使得剪切板进入孔壁土体内,待固结一定时间后,通过提拉力  $T$  使土体发生剪切破坏(见图 2)。此时,施加于剪切板上的法向压力为  $\sigma$ ,剪切板对孔壁土体产生的剪切力为  $\tau$ ,单个剪切板的有效受力面积为  $A$ ,则

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

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

钻孔剪切试验原理示意图见图 2。通过测得多组不同法向压力下的剪切力数据,采用最小二乘法进行线性回归,求得回归方程,即获得 Mohr-Coulomb 破坏包络线,便可得到某测试深度处土体的抗剪强度参数,一般要求线性回归系数  $R^2$  不小于 0.98。

### 1.2 试验设备

Iowa 钻孔剪切仪主要包括剪切头、试验平台、蜗杆系统、气源等。改进的仪器在原设备基础上,加装了法向位移传感器、位移采集系统、剪切力测量系统,改进后的仪器见图 3,各组构具体如下:

(1) 钻孔剪切仪:本次试验使用的仪器型号为

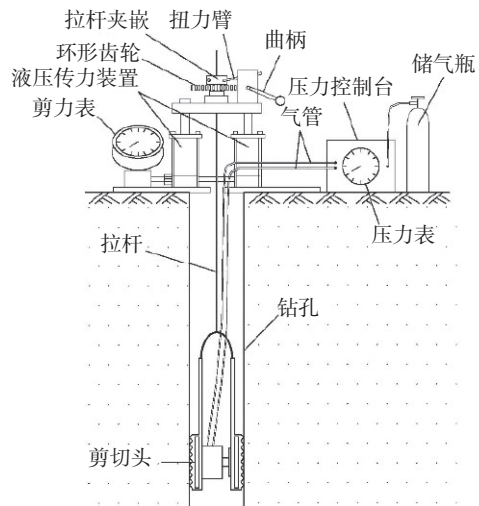


图 1 钻孔剪切仪示意图

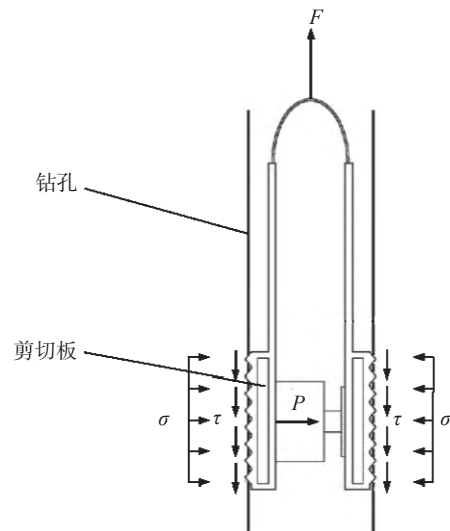


图 2 钻孔剪切试验示意图



图 3 改进后的钻孔剪切仪现场测试

A104,考虑到工程试验场地的土体较硬,齿尖难以刺入土中,为此设计并加工了高压剪切板,其外形长宽尺寸为  $63.5 \text{ mm} \times 47 \text{ mm}$ ,齿距为  $2.54 \text{ mm}$ ,齿角度为  $45^\circ$ ,齿高为  $2.2 \text{ mm}$ 。设备可施加法向压力范围为  $0 \sim 550 \text{ kPa}$ 。在不施加法向压力情况下,剪切头外围直径为  $75 \text{ mm}$ 。

(2) 微型位移测量系统:法向位移采用直线位移传感器,有效量程  $15 \text{ mm}$ ,安装于剪切头下部、两剪

切板之间,通过线缆与位移采集系统配套使用,可直接测量剪切板嵌入土体的深度,进一步得到法向位移,对判定土体是否固结稳定提供了可靠数据。

(3)剪切力测量系统:在原仪器基础上增加称重传感器作为剪切力测量系统,最大量程 5000 N,并与高速采样智能仪表相连,可实时读取称重传感器测得的剪切力大小,并记录一次试验过程中的剪切力峰值。

(4)薄壁成孔器:国内缺乏钻孔剪切试验钻孔成孔器,本次对外径 76.2 mm、长度 762 mm、壁厚为 1.7 mm 的美标取土器进行二次加工,通过向内开刃(刃角外倾),刃口角度为 7°,刃宽为 0.6 mm,面积比为 9.56%,配套钻机进行钻孔预成孔,最大程度减少了试验段成孔对孔壁土体的扰动。

### 1.3 试验方法

(1)预钻成孔:现场试验时,采用钻机配套 108 mm 的钻具钻进到离试验段上方 0.5 m 时,换用直径为 76.2 mm 的刃角外倾薄壁成孔器静压成孔,一次最大可成孔深度为 600 mm。

(2)仪器安装:通过拉杆连接,将剪切头放置测试深度处,架设试验平台,再通过拉杆夹钳将拉杆连同剪切头整体固定到试验平台上,用螺栓锁紧。将氮气源与仪器控制面板相连,再接通位移采集系统。

(3)法向加压:视土质的软硬程度,合理施加首级法向压力及后续逐级压力增量,设置适宜固结时间,并结合法向位移判断剪切板是否嵌入孔壁土体内。

(4)剪切破坏:以 2 r/s 的速度旋转曲柄,即以 0.05 mm/s 的剪切速率进行试验,利用蜗杆系统提供的上拔力致使土体产生剪切破坏,通过数据采集装置记录剪切过程中的最大剪切力。

(5)剪力归零:反转曲柄使得剪力值读数回到剪切头初次安装时的初始读数,然后再施加下一级法向压力,重复上述步骤进行试验。

(6)数据处理:重复步骤(1)~(5),依次得到 4~5 组不同法向应力  $\sigma$  下土体剪切破坏的最大剪力值  $\tau$ ,在  $\sigma$ - $\tau$  的直角坐标系下绘制散点图,根据 Mohr-Coulomb 强度准则  $\tau = \sigma \tan \phi + c$ ,用最小二乘法求得破坏包线,进而求得土体抗剪强度参数  $c$ 、 $\phi$  值<sup>[12-13]</sup>。

## 2 试验场地概况

西咸新区空港新城太平镇陈负村 6 组滑坡位于太平镇村陈负村南部泾河南岸一级阶地与黄土塬交接地带,距泾阳县城中心约 8.6 km,距太平镇太平堡村东侧约 600 m,临兴高速北侧约 400 m,滑坡下方距太平镇陈负村约 300 m,滑坡前缘东距泾河约 1.2 km。该坡体原为黄土塬边高陡边坡,坡体高约 69 m,

坡面陡立,前缘临空,为滑坡的发生提供了空间条件。根据工程地质测绘调查及勘探揭露,该滑坡滑体边界较明显,滑坡后缘有明显的圈椅状滑坡后壁,呈陡坎状,滑坡侧缘壁明显可见,坡顶及坡脚处混凝土路面出现破坏迹象,滑坡现场全貌见图 4。因此,获得可靠的黄土土体抗剪强度参数对该滑坡的稳定性计算、分析与治理极为关键。



图 4 滑坡现场全貌图

滑坡体主要由第四系全新统滑坡堆积黄土状土( $Q_4^{del}$ )组成,表层约 1.0 m 富含腐殖质及植物根系,厚度变化较大。层厚 2.40~17.00 m。滑带土为第四系中更新统风积黄土( $Q_2^{2eol}$ ),呈黄褐—灰黑色,土体结构杂乱,含水量一般,可塑状态,力学强度相对较低,厚度 0.10~1.5 m 左右。滑床地层由第四系全新统冲洪积黄土状土( $Q_4^{al+pl}$ )及粉质黏土( $Q_4^{al+pl}$ )构成,局部为圆砾和粗沙层。经现场钻孔钻探揭露,坡底地下稳定水位埋深 8.00~10.80 m。

本次试验在滑坡体上布置三个钻孔,分别为 ZK2-3(标高 410.63 m)、ZK2-4(标高 396.31 m)、ZK2-5(标高 368.92 m),钻孔分布见图 4,共进行了 11 组测试。考虑现场地下水位埋深,为保证成孔质量,试验在非饱和黄土中进行,本次测试深度为 1.5~8.0 m,试验土层从上之下依次为黄土状土( $Q_4^{del}$ )、黄土( $Q_2^{2eol}$ )、粉质黏土( $Q_4^{al+pl}$ ),土层基本物理性质指标的统计平均值见表 1。

表 1 土的基本物理性质指标

地层	天然重度 $\gamma/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-3})$	含水率 $w/\%$	孔隙比 $e$	饱和度 $S_r/\%$	液限 $w_l/\%$	塑限 $w_p/\%$	塑性 指数 $I_p/\%$	液性 指数 $I_L$
黄土状土 ( $Q_4^{del}$ )	18.2	18.4	0.74	68.8	29.1	17.6	11.5	0.07
黄土 ( $Q_2^{2eol}$ )	18.9	20.4	0.70	79.6	29.5	17.8	11.7	0.22
粉质黏土 ( $Q_4^{al+pl}$ )	18.1	22.5	0.80	77.4	29.7	17.9	11.8	0.39

## 3 钻孔剪切试验结果分析

### 3.1 钻孔剪切试验的法向变形特性

钻孔剪切试验的法向加压方式与分级压力直接



影响着测试结果的准确性。施加压力过小,会使得剪切板无法嵌入孔壁土体内,从而使得剪切发生在孔壁土体表面;施加压力过大,易使土体提前发生破坏。这两种情况都不能测得土体的真实抗剪强度参数。因此应对软硬程度不同的土层选取合适的首级法向压力和分级增加压力。试验测试了工程场地内不同土层不同深度处的法向压力与法向位移数据,绘制二者关系曲线(见图5)。由图5可知,各级法向压力-位移散点分布整体呈现似线性分布,法向位移随着法向压力的增大而线性增加,可推断在固结阶段土体处于似弹性变形阶段,从而保证了试验结果的准确性。

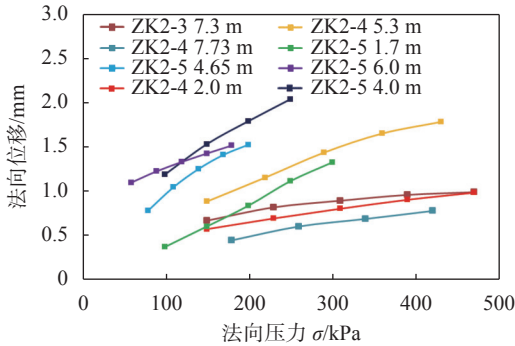
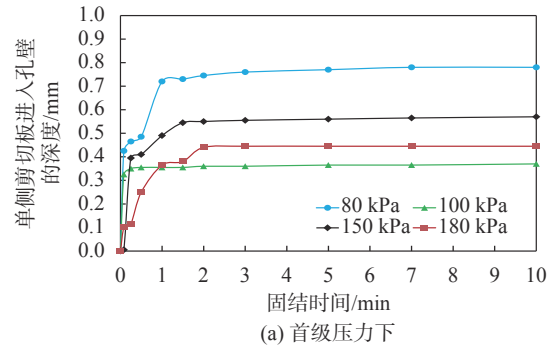


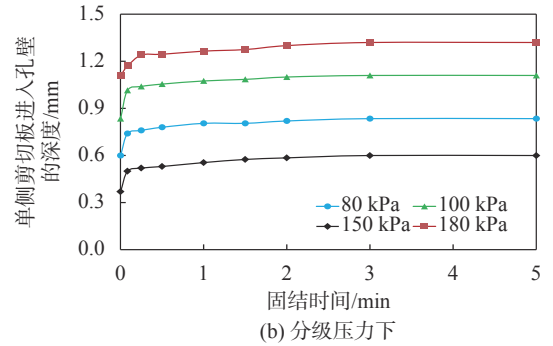
图5 法向压力-位移关系

钻孔剪切试验的固结时间决定着剪切板是否与土体紧密接触,并达到对剪切板周围土体进行排水固结的效果,对试验的成功与否起着重要作用<sup>[14-15]</sup>。试验研究了黄土层不同深度处首级和分级法向压力下剪切板刺入土体并固结稳定的位移-时间关系,具体如图6所示。

由图6结果可知,每级压力下固结时间-位移曲线先急剧增大,再出现偏折,后趋于稳定,呈现典型的“双折线”形态。对不同土层,首级法向压力固结时



(a) 首级压力下



(b) 分级压力下

图6 固结位移-时间关系

间在 10 min 后基本能达到稳定;分级压力下 5 min 后曲线趋于平直段,表明剪切板刺入土体的变形趋于稳定,结合法向位移数据,计算得变形速率为 0.01 mm/min,因此,对于同类型土层工程场地,可作为固结稳定的判定依据。

### 3.2 钻孔剪切试验的抗剪强度参数

按 Mohr-Coulomb 强度准则,将各级法向压力下的试验结果采用最小二乘法求得破坏包线,得到土体抗剪强度参数  $c$ 、 $\varphi$  值,钻孔剪切试验与室内直剪试验测得的土体抗剪强度参数结果见表2,二者对比结果见图7。各组数据拟合度  $R^2$  均大于 0.98,试验规

表2 钻孔剪切试验与室内直接剪切试验结果

土层	试验编号	钻孔	深度 $h/m$	钻孔剪切试验(BST)			直剪试验(DST)		备注
				内摩擦角 $\varphi/(^\circ)$	黏聚力 $c/kPa$	相关系数 $R^2$	内摩擦角 $\varphi/(^\circ)$	黏聚力 $c/kPa$	
$Q_4^{del}$	L1	ZK2-5	1.70	40.73	15.78	0.994	21.1	25.6	
	L2	ZK2-4	2.00	42.84	37.38	0.996	22.5	41.8	
	L3	ZK2-3	2.30	26.23	10.26	0.993	19.1	27.0	
	L4	ZK2-3	4.30	26.43	35.40	0.994	18.7	33.2	
	L5	ZK2-5	2.60	36.64	33.61	0.983	19.3	32.8	
	L6	ZK2-5	4.00	44.45	28.96	0.998	23.3	34.2	
	L7	ZK2-5	4.56	41.67	17.10	0.994	21.3	27.7	
	L8	ZK2-4	5.30	34.53	39.01	0.996	20.6	30.4	
$Q_2^{2eol}$	L9	ZK2-3	7.30	22.27	87.35	0.987	15.3	29.7	
	L10	ZK2-4	7.73	43.25	23.30	0.988	22.9	27.8	
$Q_4^{al+pl}$	L11	ZK2-5	6.00	39.52	8.60	0.999	20.4	15.2	粉质黏土

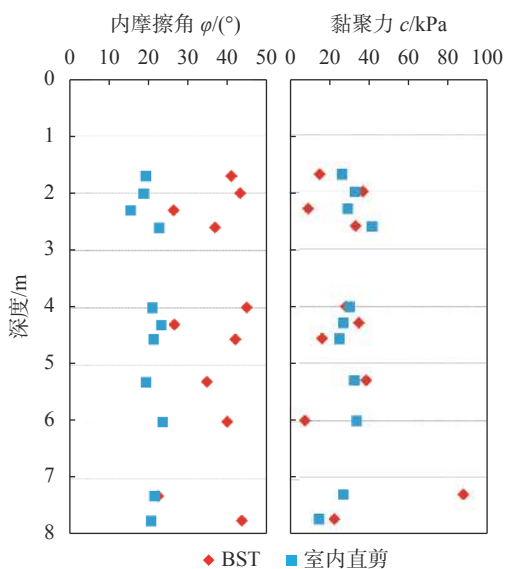


图7 钻孔剪切试验与室内直剪试验数据散点图

律性较强,测试结果可靠,整体取得了良好效果。

由表2可知,L3和L11钻孔剪切试验测得的黏聚力 $c$ 值较小,结合现场钻孔揭露,L3在ZK2-3内深度2.3 m处,该处地层为回填土,土质较为疏松,且有建筑垃圾回填;L11在坡底的ZK2-5内深度6.0 m处,该处地层为粉质黏土,且含水率较高,因而 $c$ 值较小。与室内直剪试验对比发现,钻孔剪切试验测得的内摩擦角普遍偏大,数据离散性较强;而测得的黏聚力较为接近,数据散点分布整体密集(见图7)。

#### 4 结论

(1)先采用钻机配套108 mm的钻具钻至试验段上方0.5 m,然后换用直径76.2 mm刃角外倾薄壁成孔器静压成孔,最大程度地减少对孔壁土体的扰动,该工法可在原位黄土土体强度参数测试中推广应用。

(2)通过在Iowa钻孔剪切仪加装法向位移传感器,对试验过程中产生的法向位移实时测量;同时,增加的剪切力测量系统能直接获取剪切力峰值,试验过程更加可视化、可控化。在本次试验法向压力范围内,法向压力与法向位移呈近似线性关系,试验土体处于似弹性变形阶段。

(3)参照美国ASTM标准<sup>[16]</sup>,采用分级加载剪切试验方法时,当首级法向压力固结10 min、分级压力固结5 min时,法向位移变形速率小于0.01 mm/min,此时法向位移曲线已相对稳定。

(4)基于Mohr-Coulomb强度准则,对钻孔剪切试验数据采用最小二乘法求解抗剪强度参数时,具有较高的拟合精度,所测抗剪强度参数与室内直剪试验相比,内摩擦角平均大40.8%,黏聚力平均小12.7%,二者差异原因还需开展进一步研究。

#### 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.
- [2] 骆飞, 罗强, 蒋良淮, 等. 土体抗剪强度指标变异水平对边坡稳定安全系数取值的影响[J]. 土木建筑与环境工程, 2015, 37(4): 77-83.
- [3] 陈志辉. 土体原位测试技术新进展[J]. 中国水运, 2011, 11(6): 100-101.
- [4] HANDY R L, FOX N S. A soil bore-hole direct-shear test device[J]. Highway Research News, 1967, 27: 42-51.
- [5] IRIGOYEN A, P. CODUTO D. Shear strength of unsaturated soils using the borehole shear test[C]//Geotechnical Engineering for Infrastructure and Development, 2015.
- [6] LUTENEGGER A J, REMMES B D, HANDY R L. Borehole shear test for stiff soil[J]. Journal of the Geotechnical Engineering Division, 1978, 104(11): 1403-1407.
- [7] LUTENEGGER A J, HALLBERG G R. Borehole Shear Test in Geotechnical Investigations[M]. West Conshohocken, PA; ASTM International, 1981.
- [8] HANDY R L. Borehole shear test and slope stability[C]//Borehole Shear Test and Slope Stability. Use of in Situ Tests in Geotechnical Engineering, 2008.
- [9] 冯文凯, 白慧林, 易小宇, 等. 原位钻孔剪切试验在优化边坡稳定性评价中的应用[J]. 科学技术与工程, 2018, 18(4): 234-238.
- [10] 陈俊新. 基于原位钻孔剪切试验的填方边坡治理数值模拟[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2018.
- [11] 张继文, 于永堂. 钻孔剪切试验的研究现状与展望[C]//2016年全国工程勘察学术大会论文集(下册), 2016.
- [12] 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.
- [13] 于永堂, 高远. 土体抗剪强度参数的钻孔剪切试验方法初探[J]. 岩土工程技术, 2015, 29(4): 169-172.
- [14] 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, 3649.
- [15] LUTENEGGER A J, TIERNEY K F. Pore pressure effects in borehole shear testing[C]//Use of in Situ Tests in Geotechnical Engineering, 2010.
- [16] ASTM Standards. Standard Test Methods for Deep Foundations Under Static Axial Tensile Load: D3689M-07[S]. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2013.