

DOI: 10.11779/CJGE20230876

# 一种适用于细粒土的新型叠片式单剪仪研制与应用

朱俊高<sup>1</sup>, 陈 鸽<sup>\*1</sup>, 王 涛<sup>1</sup>, 夏 勇<sup>2</sup>, 彭文明<sup>2</sup>, 罗启迅<sup>2</sup>

(1. 河海大学岩土力学与堤坝工程教育部重点实验室, 江苏 南京 210098; 2. 中国电建集团成都勘测设计研究院有限公司, 四川 成都 610072)

**摘要:** 研制了一种适用于细粒土的新型叠片式单剪仪。该单剪仪试样室采用若干内部尺寸长×宽为 100 mm×40 mm 的回字形叠片, 有效地减小了常规圆形叠环式单剪仪压力室剪切时试样侧倾、受力严重不均的问题。销钉式变形控制杆能使试样剪切变形均匀, 叠片试样室外围的导向侧板控制了剪力的方向性, 新型的杠杆支点结构有效解决杠杆倾斜时加载杆力传递变化的问题。该单剪仪结构稳定、易于操作, 集应力/应变控制式功能于一身, 可实现对细粒土的均匀剪切。基于该单剪仪对某黏土进行了抗剪强度和剪切蠕变试验, 分析了黏土的抗剪强度参数和剪切蠕变规律, 初步验证了该单剪仪的优良工作性能。

**关键词:** 单剪仪; 应力/应变控制; 均匀剪切; 细粒土; 蠕变试验; 抗剪强度

**中图分类号:** TU411      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1000-4548(2024)12-2668-07

**作者简介:** 朱俊高(1964—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事土体基本性质及本构关系、土石坝工程研究。

E-mail: zhujungao@hhu.edu.cn.

## A novel simple shear apparatus with stacked steel laminations for fine grained soil

ZHU Jungao<sup>1</sup>, CHEN Ge<sup>1</sup>, WANG Tao<sup>1</sup>, XIA Yong<sup>2</sup>, PENG Wenming<sup>2</sup>, LUO Qixun<sup>2</sup>

(1. Key Laboratory of Ministry of Education for Geotechnics and Embankment Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;

2. Power China Chengdu Engineering Corporation Limited, Chengdu 610072, China)

**Abstract:** A new simple shear apparatus is invented for fine grained soil based on the existing designs. Some rectangular-stacked steel laminations are used for the new simple shear apparatus. The internal dimensions of the steel laminations are 100 mm in length and 40 mm in width. It effectively eliminates the common issues such as sample tilting and uneven stress distribution during shear testing compared to the conventional simple shear apparatuses. The pin type deformation control rod can ensure uniform shear deformation of the specimen. The guiding side plate around the specimen chamber controls the direction of the shear force. The new lever support structure effectively solves the problem of load rod force transmission because the lever is tilted. The simple shear apparatus is featured with stable structure and easy operation. It combines the stress/strain control functions into one unit, allowing for the uniform shear testing of fine-grained soils. The shear strength tests and shear creep tests on clay are carried out using the novel simple shear apparatus. Meanwhile, the parameters of shear strength and the laws of creep are analyzed. The test results validate the good performance of the novel simple shear apparatus.

**Key words:** simple shear apparatus; stress or strain-control; homogeneous shear; fine grained soil; creep test; shear strength

## 0 引言

单剪仪相比三轴仪成本低、结构简单, 相比直剪仪, 试样内部应力更加均匀、破坏面不固定、能测定土体的剪应变, 因而得到了广泛关注。

目前常用的单剪仪为刚性叠环式单剪仪。1936 年瑞典岩土所研制出了最早的叠环式单剪仪<sup>[1]</sup>, 该仪器在侧向用橡皮膜包裹试样, 试样外套着若干个叠环以防止其固结时发生侧向膨胀, 剪力施加在顶部, 受剪时叠环可以相互错动。但是此仪器存在制样困难、竖向力及剪力方向易偏转、剪应力/应变分布不均等问题<sup>[2]</sup>。

为克服单剪仪上述缺点, 众多学者对其进行了改进<sup>[3-13]</sup>。国外方面, 如美国的 GCTS 单剪测试系统<sup>[3-4]</sup>和英国 GDS 公司研制的各种新型单剪仪, 包括 DSS<sup>[5-6]</sup>、VDDCSS<sup>[7-8]</sup>以及 CSS<sup>[9]</sup>等。改进后的单剪仪性能得到了提升, 但仍存在以下问题: ①试样形状都

基金项目: 长江水科学研究联合基金重点支持项目 (U2040221); 华能集团总部科技项目 (HNKJ20-H45); 河海大学大型仪器设备共享基金项目 (GX202205B)

收稿日期: 2023-09-11

\*通信作者 (E-mail: chenge@hhu.edu.cn)

为圆柱形, 因边界挤压且试样易倾覆导致应力易集中; ②试样用橡皮膜包裹使得装样特别困难, 且橡皮膜对土体剪切强度有一定影响。

国内学者也为改进单剪仪进行了一些有益尝试<sup>[10-13]</sup>。潘东毅<sup>[10]</sup>研制了一种单剪仪, 采用电磁体连接叠板减小叠板之间的摩擦力, 但是电磁力对位移传感器等电子仪器的使用会产生干扰。冯大阔等<sup>[11]</sup>也对叠环式单剪仪进行了改进, 但采用了容易引起应力集中的圆柱形试样。长江科学院研发了一种低摩阻叠环式双向动剪切试验机<sup>[13]</sup>, 该仪器的试样设计为立方体, 受力较圆柱形试样更均匀。

综上所述, 叠环式单剪仪使用广泛, 经多次改进仍存在一定问题。针对这些问题, 本文研制了一种适用于细粒土的新型叠片式单剪仪, 克服了目前主流单剪仪的一些缺陷, 并利用此仪器进行了初步试验, 包括土体的抗剪强度试验及不同应力水平下的单剪蠕变试验。

## 1 新型叠片式单剪仪的设计与开发

### 1.1 设计思想

适用于细粒土的新型单剪仪需要解决 5 个基本问题。

(1) 为制样方便, 该单剪仪拟采用试样周围无橡皮膜的试样室, 且该试样室可以固定叠片, 防止土体被挤到叠片之间, 另此结构不能影响剪切。

(2) 由于试样顶部的试样帽水平向固定, 试样发生剪切变形后叠片一侧容易上翘, 导致剪应力分布不均(图 1), 如能减小或消除试样剪切变形后倾覆转动的趋势, 将显著提高试验结果精度。

(3) 由于侧壁摩擦力的影响, 坚向压力在从上往下传递的过程中, 总的坚向力沿叠片往下方会逐渐减小, 使得相邻叠片的相对位移不均匀。需要保证每相邻两层叠片的剪切位移差量  $\Delta x$  相等(图 1), 即试样剪切变形均匀。

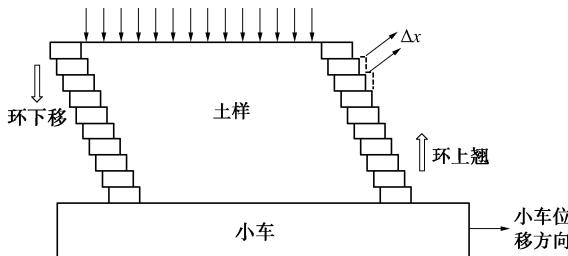


图 1 一般单剪仪受力及位移示意图

Fig. 1 Schematic diagram of shear deformation in normal simple shear apparatus

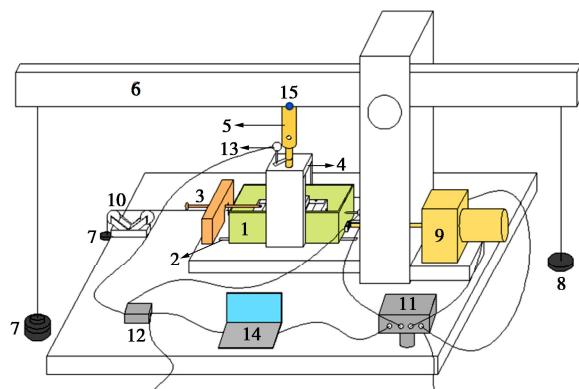
(4) 为了防止剪切时叠片左右晃动, 保证试样

只在一个水平方向受剪, 使剪应力分布更均匀, 需设计限制叠片水平偏移的结构。

(5) 采用杠杆施加竖向荷载时, 由于试样竖向变形导致杠杆在竖直平面内旋转, 从而杠杆支点位置发生变化, 导致竖向荷载无法准确传递, 需要解决支点变化的问题。

### 1.2 仪器的基本结构

为了达到上述基本要求, 笔者研制了适用于黏土、粉土等细粒土的新型叠片式单剪仪, 包括试样盒、加载系统以及量测系统, 见图 2。试样盒为单剪仪的核心结构, 是保证试验精准进行的关键, 也是单剪仪研制的难点; 加载系统包括水平及竖向加载系统; 量测系统包括一系列电子采集设备, 实现力和位移的自动采集。仪器的详细介绍如下。



1—试样盒; 2—导轨; 3—顶杆; 4—加载杆支架; 5—竖向传力结构; 6—杠杆; 7—砝码;  
8—平衡砝码  
水平加载系统: 9—水平伺服电机; 10—滑轮; 11—数显控制器  
量测系统: 12—集线器; 13—位移传感器; 14—电脑

图 2 新型叠片式单剪仪

Fig. 2 New simple shear apparatus

#### (1) 试样盒

试样盒包括叠片组、叠片组外框以及小车, 详细结构如图 3 所示。叠片组由 13 个不锈钢回字形叠片组成, 叠片表面抛光处理, 其内部平面尺寸为 100 mm × 40 mm, 即试样的长宽比为 2.5 : 1。长度远大于宽度使试样剪切变形后倾覆转动的趋势比正方体或圆柱体试样显著减小, 平面上剪应力分布更加均匀。叠片组最上层叠片 A 较厚 (6 mm), 以确保试样固结后上透水板的底部仍位于叠片 A 中; 最下层叠片 B 的厚度为 4 mm, 余下的 11 个叠片每片厚度为 2 mm, 以下称为薄叠片。剪切试验时叠片 A 固定不动, 叠片 B 固定在小车上, 试样实际剪切高度如图 4 (c)。

为了保证相邻两层薄叠片的剪切位移差量相等, 设置销钉式变形控制杆。将每层叠片端部设置 3 个腰孔, 分别将 3 个变形控制杆穿过 3 个腰孔 (图 4(a)), 在叠片 A 的前端 (以剪切方向为前) 沿垂直于剪切方

向设置一个通孔，放入一个可以使变形控制杆绕着转动的销钉，销钉依次穿过 3 个变形控制杆顶端的小孔（图 4 (b)）。

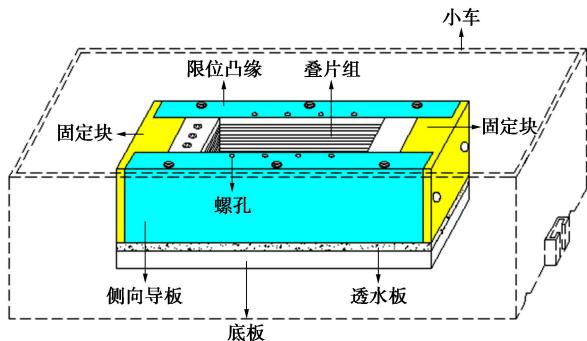


图 3 试样盒结构示意图

Fig. 3 Schematic diagram of structure of sample box

由于叠片 A 固定不动，叠片 B 固定于小车，如果小车被拉动，则变形控制杆发生倾斜使其余薄叠片产生位移（图 4 (c)）。变形控制杆倾斜需要有足够的空间，因此设置剪切方向的孔径大于变形控制杆的直径。变形控制杆与下层腰形孔（叠片 B 上的腰形孔）的后侧孔壁接触，前侧孔壁留有空隙，与中层腰形孔（薄叠片上的腰形孔）的前侧孔壁接触，后侧孔壁留有空隙，与上层腰形孔（叠片 A 上的腰形孔）的前后两侧孔壁均留有空隙，同时，变形控制杆的底端与叠片 B 的底面之间留有竖向间隙，保证变形控制杆转动后底部不会突出叠片 B 外。变形控制杆不仅限制了叠片在垂直于剪切方向的位移，更重要的作用是使得各层叠片剪切错动均匀，保证试样从上到下剪应力剪应变的均匀性。

叠片组外框由底板、两个侧向导板及前后两个固定块组装而成，是一个顶部开口的长方体空腔，如图 3。底板固定在小车内，两个侧向导板相对布设在底板的左右两侧，前后固定块相对布设在底板的前后两端，中间的长方体空腔放置叠片组。叠片组外框的内部尺寸与叠片组的平面尺寸基本一致，从而限制叠片在装样及固结时沿水平面发生滑移。为了防止剪切时叠片组外框对叠片产生摩擦力，两个侧向导板与叠片组之间分别留有 0.01 mm 的间隙。外框为可拆卸式，在剪切时可以将剪切方向的前后固定块拆除，不影响叠片沿剪切方向滑移。

侧向导板上设有朝试样中心腔方向的限位凸缘，在限位凸缘上设置了螺孔，螺孔内拧入螺钉以压住叠片 A，保证在制样及固结过程中相邻叠片间不产生缝隙，从而土样不被挤出。螺钉在剪切时拆除，减轻叠片间摩擦力。侧向导板在剪切时保留，防止叠片在水平向偏移。

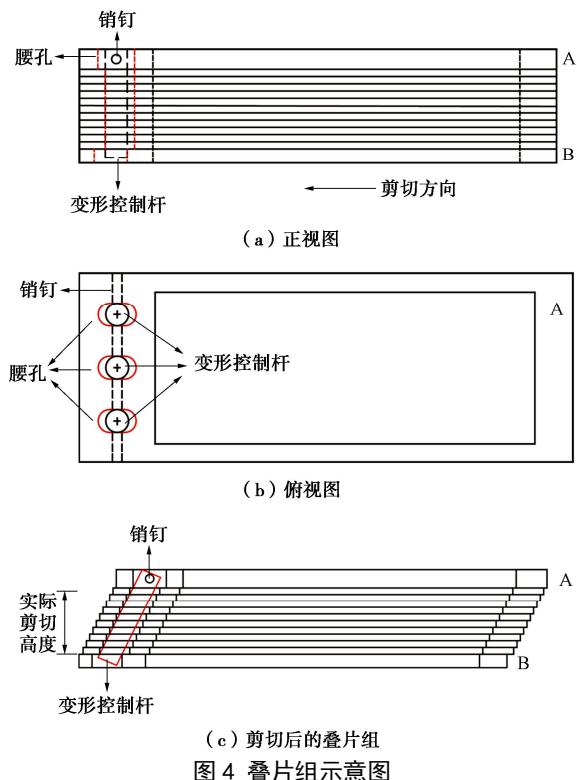


图 4 叠片组示意图

Fig. 4 Schematic diagram of stacked steel sheets

为了进行试样饱和以及给试样施加水平剪切力，该单剪仪设计了无顶盖长方形小车（图 3）。透水板固定于小车底板上面，并和叠片 B 框固定连接。小车底板下面设置导轨，导轨上布设小钢珠，小钢珠上涂抹凡士林，以减小小车底部摩擦力，保证剪切时小车沿剪切方向自由滑动。

## (2) 加载与量测系统

加载系统为试样提供竖向和水平向荷载，量测系统测定位移或剪力。竖向荷载通过杠杆系统施加，水平加载系统包含两种加载模式。一种是采用水平伺服电机进行水平加载（等应变加载），另一种采用通过钢丝绳连接于小车的砝码进行加载（等应力加载）。下面重点介绍竖向加载系统的杠杆支点及竖向传力结构（图 5）。

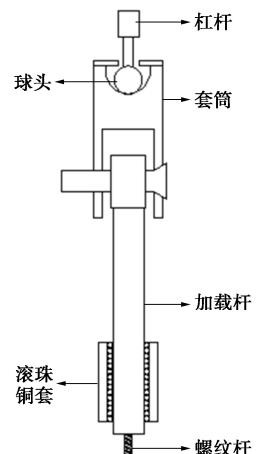


图 5 杠杆支点及竖向传力结构（垂直于杠杆向）剖面图

Fig. 5 Structural cross-section of vertical loading system

为了保证竖向力施加在试样顶端, 加压盖板与透水板固定在一起, 并深入叠片 A 1~1.5 mm, 加载杆下端螺纹杆旋进加压盖板。加载杆中下部穿过固定于加载杆支架的滚珠铜套。加载杆顶部与一个套筒铰接, 在套筒上开设球槽, 设计球头将杠杆与套筒连接, 套筒对球头产生的反作用力可以减小因杠杆转动对试样产生的水平力, 可以解决由于土体竖向变形导致杠杆旋转支点位置变化造成的竖向荷载变化的问题, 详细构造如图 5 所示。

为了进一步消除试样顶部加压盖板可能的水平位移, 布置了一个水平顶杆(图 2 中结构 3)以顶撑加压盖板。顶杆前端头部可以顶住加压盖板和叠片 A。

### 1.3 摩擦力测定

小车底部与导轨的摩擦力以及叠片之间的摩擦力会影响试验精度, 为论证新型叠片式单剪仪的合理性与可靠性, 对摩擦力进行了试验测定。

首先, 测试小车底部与钢珠、导轨之间的摩擦力。在小车上放置不同重量的砝码, 伺服电机拉动小车水平滑动, 测得对应不同竖向荷载  $F_N$ (含砝码重+小车及叠环重)下伺服电机的拉力  $F$ , 试验结果如图 6 所示。图中可以看出, 拉力与竖向荷载  $F_N$  的线性拟合效果很好, 拟合相关系数达到了 0.99。拟合直线的斜率即是小车底部与导轨的摩擦系数, 为 0.0027。由于此摩擦力与试样竖向荷载有关, 因此, 此摩擦系数尽管很小, 但并不能说明摩擦力可以忽略。关于此摩擦力具体量值大小, 将在下节结合试验进行论证。

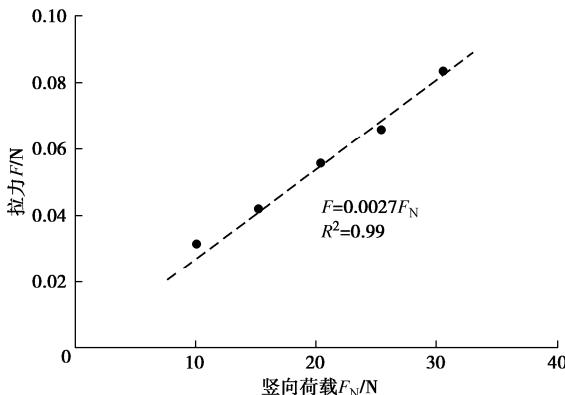


图 6 小车底部与导轨的摩擦试验拟合曲线

Fig. 6 Curve of frictional force for box and rail

进一步, 对叠片之间的摩擦力进行测定。将叠片组置于小车底板, 在顶层叠片上施加不同的竖直向下压力, 伺服电机拉动小车水平滑动, 分别测得对应的伺服电机的拉力  $F$ ,  $F$  减去小车底部与导轨之间摩擦力即为叠片间摩擦力, 据此计算的叠片之间的摩擦系数为 0.0264。

试验时叠片间法向压力主要由叠片自重引起, 全

部叠片的重量仅为 5.48 N, 计算出叠片之间最大摩擦力(叠片 B 的顶面)为 0.145 N, 这个摩擦力相对于剪力来说占比很小, 可以忽略不计。

### 1.4 新型单剪仪的技术优势

新研制的叠片式单剪仪具有 6 点技术优势。

(1) 叠片组外框防止制样和固结时土体挤到叠片之间, 并有效控制了叠片沿水平向的单向滑动。

(2) 叠片组内长宽比 2.5:1, 即试样为长方体, 剪切变形后倾覆转动的趋势远比正方体或圆柱体试样小, 平面上剪应力更均匀。

(3) 变形控制杆能有效保证相邻叠片的位移差量相等, 实现对土体均匀剪切。

(4) 剪切时叠环之间的摩擦力很小, 可以忽略不计; 小车底部摩擦力也不大, 可以忽略, 或依据标定进行修正。

(5) 顶杆顶撑加压盖板及叠片 A, 可以消除或减小剪切过程中加载杆弯矩及加载杆与套筒间摩擦力。

(6) 杠杆支点及竖向传力结构可很好地适应竖向荷载加载杠杆支点水平位置的变化。

## 2 初步试验成果及分析

### 2.1 试验土料

为了进一步测试所研制的仪器, 对某工程的原状土分别进行应变控制和应力控制类试验, 包括土体的抗剪强度试验及蠕变试验, 土体的级配曲线如图 7 所示, 主要物理力学参数列于表 1, 根据规范此土属于低液限黏土, 经过测量, 土样的先期固结压力为 1900 kPa, 属于超固结土。

表 1 土体的基本物理力学参数

Table 1 Fundamental physical-mechanical parameters of soil

$G_s$	$w/\%$	$\rho/(g \cdot cm^{-3})$	$e$	$w_L/\%$	$w_p/\%$	$I_l$	$I_p$
2.75	32.93	1.91	0.879	37.08	17.67	0.74	19.41

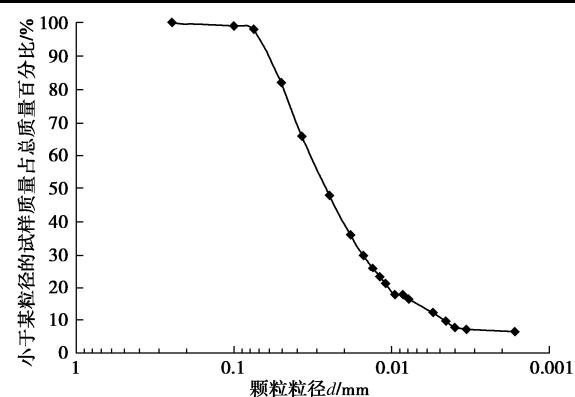


图 7 试验土体的颗粒级配曲线

Fig. 7 Grain-size distribution curves of test soil

## 2.2 抗剪强度试验结果分析

利用新研制的仪器测定上述原状土饱和状态下固结排水的强度参数。试验竖向固结压力  $p$  分别为 100, 200, 500, 1000 kPa, 固结时间 24 h。剪切速率 0.015 mm/min, 剪应力达到峰值或者平缓即停止剪切。

图 8 展示了不同竖向压力  $p$  下土体的剪应力-剪应变关系曲线, 为了使试验结果更可靠, 同时进行了平行试验, 随着剪应变  $\gamma$  的增大, 剪应力  $\tau$  增长速度先快后慢直至达到稳定, 稳定时对应的剪应力即抗剪强度  $\tau_f$ 。随着竖向压力  $p$  增大, 剪应力达到稳定时对应的剪应变也增大。

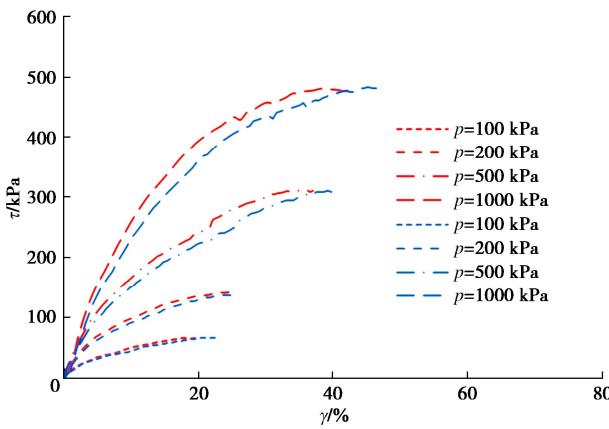


图 8 土体在不同竖向压力下的应力应变曲线

Fig. 8 Stress-strain curves of soil under different vertical pressures

将两组重复试验的试验结果列于表 2。从图 8 和表 2 中可以看出, 两组试验的可重复性比较高, 最终不同竖向固结压力下的抗剪强度取两组试验的平均值。

表 2 不同竖向固结压力下两组重复试验的抗剪强度

Table 2 Shear strengths under different vertical pressures of two repeated tests

竖向固结压力/kPa	抗剪强度/kPa		均值强度/kPa
	试验一	试验二	
100	65.7	65.8	65.8
200	140.2	136.5	138.4
500	310.8	312.8	311.8
1000	494.1	481.9	488.0

从图 8 可以初步观察得到: 破坏剪应变与法向应力有关, 而且较高法向应力下破坏剪应变可能达到较大的值。如果试验结束时的剪应变值较小, 可能会低估土体的强度。

进一步地, 图 9 绘制了不同竖向固结压力下原状土的抗剪强度线。图 9 (a) 为单剪试验结果, 可以看出在较低的竖向压力下(小于 500 kPa 时), 抗剪强度与竖向压力有很强的线性相关性, 线性拟合相关系数达到了 0.99, 测得此时原状土的有效内摩擦角为  $31.2^\circ$ , 有效黏聚力为 10.28 kPa。但是在高竖向压力

下, 即竖向压力达到 1000 kPa 时, 试验所测抗剪强度比采用上述线性拟合得到的强度参数计算的抗剪强度小 21%, 表现出明显的非线性。

笔者同时进行了相同压力条件的慢剪试验, 如图 9 (b) 所示, 土体也出现了明显的非线性行为, 线性指标中, 有效内摩擦角比单剪试验大  $2.3^\circ$ , 这可能是由于直剪试验破坏面并不是土体的最薄弱面引起的。两种试验结果较为接近, 验证了仪器的合理性。

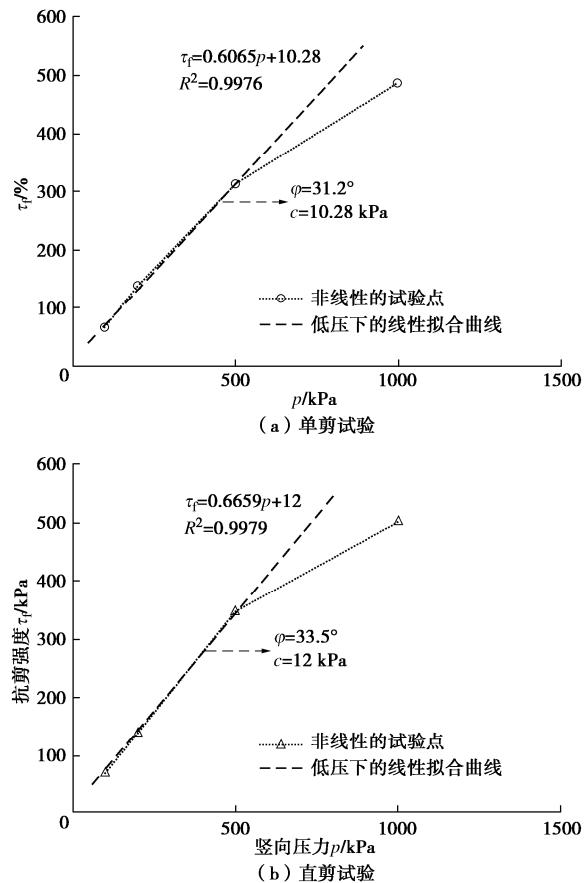


图 9 不同竖向压力下的抗剪强度

Fig. 9 Shear strengths under different vertical pressures

因此在使用抗剪强度指标时要注意在哪种压力条件下, 对于不同竖向固结压力下的抗剪强度线可以分为两段折线, 针对不同的竖向压力使用不同的强度指标。

下面针对本节的强度试验结果研究小车底部滚珠摩擦力的大小。利用新型单剪仪进行强度试验过程中, 不同固结压力下剪切时小车底部产生的摩擦力是不同的。根据试样固结应力可计算得小车底部法向力, 并依据第 2 节的摩擦系数计算摩擦力, 如表 3 所示。根据各固结应力下的抗剪强度, 得试样破坏时剪力, 从而计算摩擦力对应此剪力占比。

表 3 可以看出, 摩擦力相对较小, 可以忽略。当然, 也可以对试样实际受到的剪力进行修正, 即实际施加在试样上的剪力为测定的剪力扣除相对应的摩擦

力。

表3 不同竖向压力下小车底部的摩擦力

Table 3 Frictional forces for box and rail at different vertical pressures

固结应力/kPa	法向力/N	摩擦力/N	抗剪强度/kPa	剪力/N	摩擦力占比/%
100	392	1.058	65.8	263.2	0.41
200	784	2.117	138.4	553.6	0.38
500	1960	5.292	311.8	1247.2	0.42
1000	3920	10.584	488.0	1952.0	0.54

### 2.3 蠕变试验结果分析

利用新研制的仪器对上述原状土进行固结排水蠕变试验。试验竖向固结压力为 100 kPa, 固结稳定后对试样分级施加剪应力, 对应的剪应力水平  $s$  (定义为剪应力  $\tau$  与破坏剪应力  $\tau_f$  之比) 分别为 0.2, 0.4, 0.6, 0.8。每级剪应力持荷时间为 5~10 d, 每级荷载下剪切变形稳定后施加下一级荷载, 稳定标准参考文献 [14], 即 1 d 内应变量小于 0.5%, 则认为达到稳定, 得到  $\gamma$ - $t$  蠕变曲线如图 10 所示。

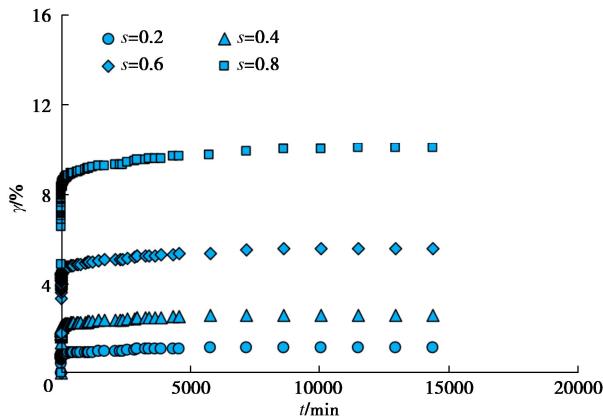


图 10 竖向压力 100 kPa 时的  $\gamma$ - $t$  曲线

Fig. 10  $\gamma$ - $t$  curves at vertical pressure of 100 kPa

从图 10 可以看出, 此原状土在恒定剪应力下表现出明显的蠕变特性。剪应变随时间的变化趋势可以分为衰减蠕变和稳定蠕变两个阶段, 在蠕变初期, 剪应变持续增长但速率逐渐减慢; 在后期, 剪应变逐渐趋于稳定。当应力水平  $s$  为 0.2, 0.4 时, 剪应变在第 3 天即达到稳定, 此时剪应变分别为 1.07%, 2.51%; 而当  $s=0.8$  时, 剪切历时 7 d 才达到稳定, 此时的剪应变为 10.02%。值得注意的是, 在剪切时孔隙水压力对剪应变有一定影响, 图 10 所列出的剪应变值为总应变值, 包括孔隙水排出阶段的应变值。

### 3 结论与展望

本文研制了一种适用于细粒土的新型叠片式单剪

仪, 并进行了初步试验验证, 得到 5 点结论。

(1) 该单剪仪的长方体形叠片组防止试样倾覆和应力集中, 销钉式变形控制杆实现试样均匀剪切, 竖向传力结构解决了支点偏移问题。仪器结构简单, 摩擦力小, 精度高。

(2) 利用该单剪仪对某工程原状黏土进行了抗剪强度和蠕变试验, 初步验证仪器的有效性。

(3) 单剪强度试验时, 其破坏剪应变可能较大, 因此, 建议进行土体单剪强度试验时, 剪应变最大值不宜太小。

(4) 所试验的黏土有一定的蠕变特性, 剪应力水平越大, 剪切蠕变稳定时间越长, 稳定时对应的剪应变越大。

(5) 由于竖向荷载通过杠杆系统施加, 无法防止剪切过程中试样高度发生变化, 因此难以开展固结不排水单剪试验, 为了使该仪器的适用范围更广泛, 后续考虑增加竖向伺服电机系统。

### 参考文献:

- [1] 吴明, 傅旭东, 夏唐代, 等. 压实土不固结不排水单剪、直剪试验对比[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(增刊 2): 4147-4152. (WU Ming, FU Xudong, XIA Tangdai, et al. Comparison of unconsolidated and undrained simple shear and direct shear tests of compacted soil[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(S2): 4147-4152. (in Chinese))
- [2] 吴则祥, 陈佳莹, 尹振宇. 考虑砂土初始各向异性的单剪试验模拟分析[J]. 岩土工程学报, 2021, 43(6): 1157-1165. (WU Zexiang, CHEN Jiaying, YIN Zhenyu. Finite element simulation of simple shear tests considering inherent anisotropy[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2021, 43(6): 1157-1165. (in Chinese))
- [3] 原鹏博. 城市固体废弃物大型单剪试验研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2011. (YUAN Pengbo. Large-scale Simple Shear Testing of Municipal Solid Waste[D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2011. (in Chinese))
- [4] 余世章. 钙质砂单剪试验及宏细观力学分析[D]. 天津: 天津大学, 2018. (YU Shizhang. The Simple Shear Test of Carbonate Sand and Macroscopic and Microscopic Mechanical Analysis[D]. Tianjin: Tianjin University, 2018. (in Chinese))
- [5] XU D S, LIU H B, RUI R, et al. Cyclic and postcyclic simple shear behavior of binary sand-gravel mixtures with various gravel contents[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2019, 123: 230-241.

- [6] MEDICUS G, KWA K A, CERFONTAINE B. A consistent calibration process for the Matsuoka–Nakai friction angle under direct simple shear conditions for clay hypoplasticity[J]. Computers and Geotechnics, 2022, **150**: 104888.
- [7] ZHANG M, YANG Y M, ZHANG H W, et al. DEM and experimental study of bi-directional simple shear[J]. Granular Matter, 2019, **21**(2): 24.
- [8] JIN H X, GUO L, SUN H L, et al. Undrained cyclic shear strength and stiffness degradation of overconsolidated soft marine clay in simple shear tests[J]. Ocean Engineering, 2022, **262**: 112270.
- [9] NONG Z Z, PARK S S, LEE D E. Comparison of sand liquefaction in cyclic triaxial and simple shear tests[J]. Soils and Foundations, 2021, **61**(4): 1071-1085.
- [10] 潘东毅. 一种大型高精度单剪仪结构, CN203705277U[P]. 2014. (PAN Dongyi. Large-Scale Simple Shear Testing of Municipal Soil Waste. CN203705277U[P]. 2014. (in Chinese))
- [11] 冯大阔, 张建民. 粗粒土与结构接触面静力学特性的大型单剪试验研究 [J]. 岩土工程学报, 2012, **34**(7): 1201-1208. (FENG Dakuo, ZHANG Jianmin. Monotonic and cyclic behaviors of coarse-grained soil-structure interface using large-scale simple shear device[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012, **34**(7): 1201-1208. (in Chinese))
- [12] 邵生俊, 王强, 吴飞洁. 一种新型动单剪仪的研发与试验验证 [J]. 岩土力学, 2017, **38**(6): 1841-1848. (SHAO Shengjun, WANG Qiang, WU Feijie. Development and test verification of a new cyclic simple shear apparatus[J]. Rock and Soil Mechanics, 2017, **38**(6): 1841-1848. (in Chinese))
- [13] 王艳丽, 饶锡保, 潘家军, 等. 砂砾石垫层料与混凝土面板接触面特性的大型单剪试验研究 [J]. 岩土工程学报, 2019, **41**(8): 1538-1544. (WANG Yanli, RAO Xibao, PAN Jiajun, et al. Mechanical behaviors of interface between sand-gravel cushion material and concrete face slab by large-scale simple shear tests[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2019, **41**(8): 1538-1544. (in Chinese))
- [14] 孙钧. 岩土材料流变及其工程应用[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1999. (SUN Jun. Rheology of Geotechnical Materials and its Engineering Application[M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 1999. (in Chinese))

## 《岩土工程学报》征订启事

《岩土工程学报》创刊于 1979 年, 是我国水利、土木、力学、建筑、水电、振动等六个全国性学会联合主办的学术性科技期刊。由南京水利科学研究院承办, 国内外公开发行。主要刊登土力学、岩石力学领域中能代表当今先进理论和实践水平的科学的研究和工程实践成果等。报道新理论、新技术、新仪器、新材料的研究和应用。欢迎国家自然科学基金项目及其他重要的研究成果向本刊投稿, 倡导和鼓励有实践经验的作者撰稿, 并优先利用这些稿件。主要栏目有黄文熙讲座、综述、论文、短文、工程实录、焦点论坛、讨论和简讯等。

本刊为全国中文核心期刊、中国科学引文数据库 (CSCD) 核心期刊和中国科技核心期刊。本刊被“工程索引 Ei Compendex 数据库”“Scopus 数据库”等国际数据库收录。本刊官网 ([www.cgejournal.com](http://www.cgejournal.com)) 全文发布本刊所有刊载文章, “中

国知网”“万方网”“维普网”全文收录本刊。

本刊读者对象为土木建筑、水利电力、交通运输、矿山冶金和油气资源等行业中从事岩土力学与岩土工程专业的科研、设计、施工、监理和学习人员。

本刊为月刊, A4 开本, 双栏排版, 222 页, 每月中旬出版, 每期定价 40 元, 全年定价 480 元。

本刊国际标准刊号 ISSN 1000 - 4548, 国内统一刊号 CN 32 - 1124/TU, 国内发行代号 28 - 62, 国外发行代号 MO 0520。欢迎广大读者在全国各地邮局订购, 也可在编辑部订购 (不另收邮费)。编辑部订购地址: 南京虎踞关 34 号《岩土工程学报》编辑部; 邮编: 210024; 联系电话: 025-85829534, 85829543, 85829553, 85829556; 传真: 025-85829555; E-mail: ge@nhri.cn。

(本刊编辑部)