第36卷 第1期 地质灾害与环境保护 Vol. 36, No. 1
2025年3月 Journal of Geological Hazards and Environment Preservation March 2025

DOI:10.3969/j.issn.1006－4362.2025.01.013 文章编号: 1006－4362(2025)01－0081－07

砾石土扭剪仪的研制及应用

汪妍珺[1,2,3],陈安[1,2,3],刘克文[4],刘柯[1,2,3]

1.昆明理工大学国土资源工程学院,昆明 650093;
2.自然资源部高原山地地质灾害预报预警与生态保护修复重点实验室,昆明 650216;
3.云南省高原山地地质灾害预报预警与生态保护修复重点实验室,昆明 650216;
4.云南建投第一勘察设计有限公司,昆明 650031

摘要: 土的抗剪强度对研究土体的承载力、稳定性及变形特性具有重要意义,正确选择土样的抗剪强度指标是十分重要的。砾石土在建筑工程行业被广泛使用,为研究砾石土的抗剪强度研制出一款扭剪仪,该仪器由支撑框架、圆柱形剪切盒、负载装置(十字板头)、垂直加载系统、扭矩测量装置(扭矩传感器)5部分组成。对该仪器进行校准试验确定仪器的校准系数为0.86,为后续仪器的推广及改进奠定了基础。首次将扭剪仪应用于实际工程中,对砾石土进行剪切试验,得到其内摩擦角φ为30.11°,黏聚力c为5.51 kPa,库仑定律为:$\tau=5.51+0.58\sigma$。砾石土扭剪仪的研制为研究砾石土的抗剪强度提供了新的方法。

关键词: 砾石土;抗剪强度;扭剪仪;参数标定
中图分类号: TU502;TU432 **文献标识码:** A

Development and Application of a Torsional Shear Apparatus for Gravelly Soils

WANG Yanjun[1,2,3], CHEN An[1,2,3], LIU Kewen[4], LIU Ke[1,2,3]

1. School of Land Resources Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093, China;
2. Key Laboratory of Plateau Mountain Landslide Early Warning and Ecological Restoration, Ministry of Natural Resources, Kunming 650216, China;
3. Yunnan Provincial Key Laboratory of Plateau Mountain Landslide Early Warning and Ecological Restoration, Kunming 650216, China;
4. Yunnan Construction and Investment Group First Geotechnical Survey and Design Co., Ltd., Kunming 650031, China

Abstract: The shear strength of soils is critical for evaluating their bearing capacity, stability, and deformation characteristics, making the accurate determination of shear strength parameters essential. Gravelly soils are widely used in construction, yet existing testing devices face limitations in characterizing their shear behavior. This study developed a novel torsional shear apparatus specifically for gravelly soils, comprising five components: a support frame, cylindrical shear box, loading device (cross-vane head), vertical loading

收稿日期:2024-04-20 **改回日期:**2024-06-06
第一作者简介:汪妍珺(1998－),女,硕士研究生,主要研究方向为工程地质与地质灾害。E-mail:870567171@qq.com
通讯作者:陈安(1971－),男,博士,教授,主要研究方向为水文地质、工程地质、环境地质及地下工程水害防治。E-mail:373034075@qq.com
引文格式:汪妍珺,陈安,刘克文,等.砾石土扭剪仪的研制及应用[J].地质灾害与环境保护,2025,36(1):81-87.
WANG Yanjun, CHEN An, LIU Kewen, et al. Development and application of a torsional shear apparatus for gravelly soils[J]. Journal of Geological Hazards and Environment Preservation, 2025, 36(1): 81-87.

system, and torque measurement system (torque sensor). Calibration tests confirmed the instrument's calibration coefficient as 0.86, establishing a foundation for its optimization and broader application. The apparatus was first applied to shear tests on gravelly soils in practical engineering, yielding key parameters: an internal friction angle (φ) of 30.11°, cohesion (c) of 5.51 kPa, and a Coulomb's law formulation $\tau=5.51+0.58\ \sigma$ $\tau=5.51+0.58\sigma$. This innovation provides a new methodological framework for studying the shear strength of gravelly soils.

Key words: Gravelly soil; Shear strength; Torsional shear apparatus; Parameter calibration

0 引言

土的抗剪强度是研究土体强度及稳定性的一个重要力学性质指标。当土体受到外部的作用力时，土体产生抵抗外部力的作用并且能够保持其自身不会发生破坏所承受的极限应力被称之为土体的强度[1]。目前测量土样抗剪强度的土工试验主要是直接剪切试验、三轴压缩试验、十字板剪切试验和无侧限抗压强度试验[2]。其中以直剪剪切试验使用的最为普遍，然而直剪试验存在一定的剪切破坏面人为假定、剪切面上应力应变分布不均匀、正应力不稳定、剪切盒内壁与试样之间存在摩擦力、试验工程中不能严格控制排水条件、剪切速率无法保证相同、剪切盒尺寸的限制等缺陷[3-9]，这就导致试验结果产生一定的误差。

随着我国建筑行业的飞速发展，砾石土常应用于建筑工程领域，同时在路基和坝基工程中也被广泛应用。因此砾石土的抗剪强度对工程建设的稳定性、安全性及经济性起着至关重要的作用。然而由于常规直剪仪剪切盒尺寸的限制导致对于粒径＞2 mm 的土样无法使用直剪仪准确测量其抗剪强度，为解决这一弊端，国内外学者对剪切仪器进行改造。

长沙交通学院[10]（现为长沙理工大学）自主研发了大型直接剪切试验仪，每个剪力盒直径和高度分别为 15.2 cm 和 6.0 cm。梅英宝[11]改进了应变控制式直剪仪，将试样的直径和高度分别变为 102 mm 和 40 mm，增大了直剪试验的颗粒粒径，减小扰动。张嘎[12]等研制了 TH-20 t 大型土与结构接触面循环加载剪切仪，该仪器设计剪切盒尺寸为 500 mm×360 mm。淮阴工学院[13]研发了大型土石混合料室内大型直剪试验系统，在使用该仪器进行剪切试验时有两种尺寸的剪切盒可供选择。闵弘[14]等人研制了现场室内两用大型直剪仪，剪切盒尺寸为 500 mm×500 mm×410 mm，可对粒径≤50 mm 的试样进行剪切，且最大剪切位移可达 140 mm。徐进等人[15]研制了大型粗粒土直剪试验机，有效解决了粗粒土在直剪试验过程中剪切面上正应力不恒定和分布不均的问题。吉林大学的罗永江、王生等人[16]研制了 SZJ8-2 型数字显示岩心直剪仪，该仪器可以准确地获取岩石的抗剪强度参数。河海大学的刘斯宏等人[17]研制了便携性现场和室内两用直剪仪，它可以最大限度地消除试样与剪切盒内壁摩擦力的影响，对正应力不稳定与偏心问题做出改善。

1 扭剪仪的结构组成及工作机理

1.1 试验仪器工作原理

砾石土扭剪仪的设计参考了十字板剪切仪的结构原理，改变了传统直剪仪的剪切盒及水平力的作用，将方形剪切盒改为大容积圆筒状剪切盒，又用十字板代替常规直剪仪的水平力使试样发生剪切破坏的。其工作原理：进行测量时，将十字板头置于试样中，并采取某些措施将其固定，通过给十字板头施加外力使十字板可以在试样中匀速转动，当扭矩达到最大值时说明试样被剪坏，记录此时的最大扭矩值 M，带入公式将其换算为土的抗剪强度 C_u。试样的剪切破坏面为十字板旋转所形成的圆柱体试样顶面，假设试样发生剪切破坏的剪切面直径为 D，高度为 H，试验过程中产生的最大扭矩为 M，推测抗剪强度公式为：

$$C_u=\frac{12}{\pi D^3}M$$

式中，M 为土体产生的最大抵抗扭矩；D 为剪切面的直径，m；C_u 为抗剪强度，kPa。

1.2 试验仪器结构

砾石土扭剪仪主要由 5 部分组成，包括支撑框架、圆柱形剪切盒、负载装置（十字板头）、垂直加载系统、扭矩测量装置（扭矩传感器）等。仪器占地体积约为 170 cm×170 cm×130 cm，如图 1、图 2 所示。

（1）支撑框架：仪器的整体支撑框架选用高强度的刚性材料制成，对仪器起到固定支撑的作用。支撑框架长 400 mm，宽 400 mm，高 1 100 mm。框

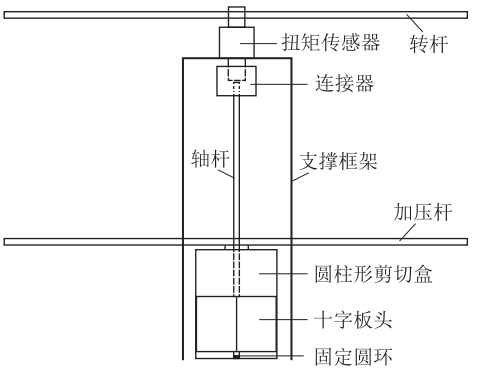


图 1　砾石土扭剪仪设计剖面图

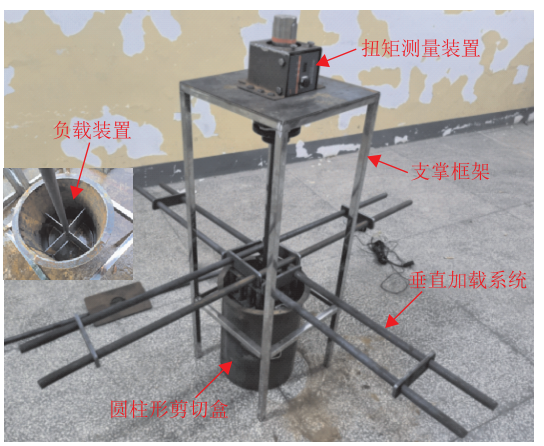


图 2　砾石土扭剪仪实物图

架顶部为有一圆孔的方形台面，用来将扭矩传感器和联轴器相连，又使用螺栓性能为 4.8 的六角螺栓将传感器与支撑框架固定，保证其在试验过程中不因扭动的作用而发生偏移，使测得的扭矩更加准确。

(2) 圆柱形剪切盒：研究表明，当试样中最大粒径小于试样尺寸 8～10 倍时，可不受剪切盒约束的影响[18]，因此砾石土扭剪仪剪切盒为直径 $D=30$ cm，高度 $H=40$ cm，盒厚 $d=4$ mm 的圆柱形剪切盒，剪切盒采用刚性材料制成。为保证试验过程中试验装置的稳定性，将剪切盒与地面固定，并在剪切盒底部安有一固定圆环使十字板头与之嵌套固定，使十字板轴杆在试验过程中不会随意移动且始终处于中心位置。除此之外，在剪切盒底部留有一个排水孔，当需要排水条件时将排水孔打开，不需要时则使用橡胶塞将排水孔堵住。

(3) 负载装置：砾石土扭剪仪的负载装置为十字板头及与其相连的轴杆，该装置是将 4 个钢板连接在轴杆外侧形成一个十字状形状，称作十字板头。负载装置的轴杆上部与扭矩传感器相连，下部与固定圆环嵌套固定，对整个仪器的稳定起到重要作用。十字板总体的高度为剪切盒高度的一半，即其高为 200 m；各个板的长为 130 m，厚度为 2 mm。十字板边缘与剪切盒内壁尽量贴合，使剪切过程中仅有试样顶面发生剪切破坏。

(4) 垂直加载系统：砾石土扭剪仪的垂直加载系统是对试样施加垂直压力的装置，主要由加压板、加压杆及重力袋组成。在试验过程中，垂直压力通过叠加重力袋来施加，由于垂直加载系统自身结构特性，会将需要施加的垂直压力分为 4 份平均到每段加压杆上，但由于加压杆自身存在重力，因此在计算不同垂直应力所对应的压力时，需先除却加载杆的自身重力后再将其平均分为 4 份，即为各段加载杆上所需的重力袋的重力。

(5) 扭矩测量装置：扭矩传感器可以精确测量试验过程中的扭矩变化，本试验装置的扭矩测量装置选用了安徽蚌埠大洋传感系统工程有限公司制作的 DYN-200 应变式扭矩传感器。扭矩传感器作为一种精密的测量设备能用来测各种扭矩(N·m)、转速(RPM)等变量。扭矩测量范围为 0～2 000 N·m，扭矩传感器的测量精度为 1。采用联轴器将扭矩传感器与负载装置固定连接成一个整体，保证在剪切过程中试验装置在竖直方向上不会发生偏移。

2　校准系数的确定

2.1　校准试验原理

对砾石土扭剪仪进行仪器校准试验时，选择使用常规直剪仪所测得的抗剪强度数据作为参照标准，认为其测量结果是准确且可信的。对同种试样在常规直剪仪和砾石土扭剪仪两种仪器下分别进行剪切试验，对试验结果进行处理，得到两种仪器在相同垂直压力下的抗剪强度。又通过对比两组仪器的抗剪强度，得到新型扭剪仪的标定系数 ζ，确定扭剪仪的修正关系。

2.2　试验方案及数据处理

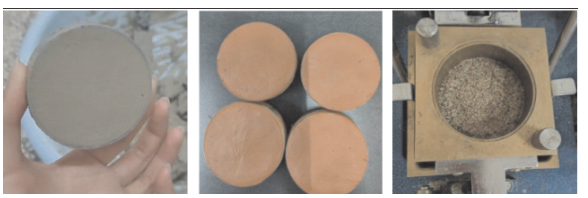
本次试验选用的 3 种不同的土样：膨润土、黏土和砂土进行校准试验。对试验所选用的 3 种土样过 2 mm 筛，将过筛后的土样置于别处贮存。取足够试验用的膨润土及黏土放置于干燥的容器中，随后向容器中缓慢加入水，使容器中所取的土样完全浸湿并可固结成块，将其静置一段时间，装入玻璃缸内盖紧，润湿一昼夜备用。

2.2.1　试样制备

常规直剪仪的试样制备(图 3)：取浸润完成的土样将其放入击实仪中，使用击实仪将土样击实到一定的密度后用推土器推出。给环刀内壁涂抹一层

凡士林后切取试样，由此得到试验所需的膨润土及黏土的环刀试样。由于砂土没有黏聚力，可将砂土直接放入剪切盒中，用木槌击打至一定密度。并对试样的含水率进行检测，经称量、烘干、计算后得膨润土的含水率为 38.25%，黏土的含水率为 37.76%，砂土含水率几乎不变。

砾石土扭剪仪的试样制备（图 4）：按上述含水率配置足够的试样，放入保湿皿中备用。由于试样尺寸过大，没有办法复刻常规直剪仪的试样制备方法，因此在对土样按照含水率配制完成后，将试样逐层放入圆柱形剪切盒中，并层层压实以此来保证试样密度。



(a) 膨润土试样 (b) 黏土试样 (c) 砂性土试样

图 3 常规直剪仪试样制备

(a) 膨润土试样 (b) 黏土试样 (c) 砂性土试样

图 4 新型扭剪仪试样制备

2.2.2 试验设计

本次校准试验的目的是为确定砾石土扭剪仪校准系数。仪器校准的思路：使用直剪仪对膨润土、黏土及砂土进行剪切试验，对试验结果进行处理得到土样的抗剪强度；又使用扭剪仪对 3 种试样进行剪切试验，对试验结果进行处理得到在该仪器下土样的抗剪强度。通过库仑定律求得在同一法向应力下土样的抗剪强度大小，对比分析得到新型扭剪仪的校准系数 ζ，使 $\tau=\zeta C_u$。校准系数的确定可以使试验结果更加精确，并为后续扭剪仪的应用及推广奠定基础。

使用常规应变式直剪仪对 3 种试样（膨润土、黏土、砂土）进行剪切试验，将其分为 3 组，每种土样对应一组。每组分别制备 5 个试样，其中一个试样作为备用试样，每组 4 个试样分别在 4 种不同的法向应力：50 kPa、100 kPa、150 kPa、200 kPa 下进行剪切试验。剪切速率选择 0.08 mm/min，记录量力环读数，当量力环内指针不再转动或发生后退时停止试验，说明试样已经被剪切破坏。

使用新型扭剪仪对 3 种试样（膨润土、黏土、砂土）进行剪切试验，将其分为 3 组，每种土样对应一组。将制备完成的试样按要求放入剪切盒后，对其施加不同的法向应力进行剪切试验。由于受实际情况的限制，在试样上受到的法向应力为 25 kPa、50 kPa、75 kPa、100 kPa。剪切速率尽可能控制一致，当扭矩测量装置读取到最大扭矩值则停止试验。此时试样已经被剪切破坏，记录试验过程中扭矩最大值 M。

2.2.3 试验结果

（1）将使用直剪仪进行剪切试验过程中记录的量力环表的读数带入如下公式中，得到 3 种试样在不同法向应力下的抗剪强度，见表 1。

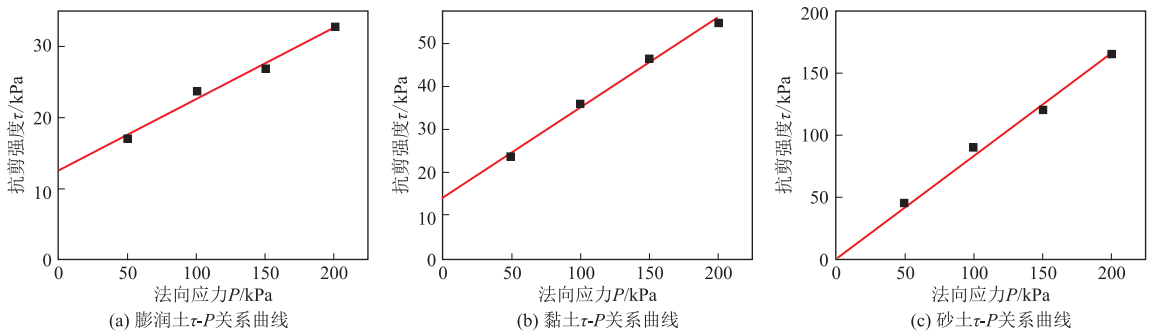
$$\tau = CR$$

式中，τ 为抗剪强度；C 为量力环系数，$C=1.802$；R 为量力环百分表读数。

表 1 常规直剪仪剪切试验结果

法向应力 P/kPa	抗剪强度 τ/kPa		
	膨润土	黏土	砂土
50	17.12	23.79	45.05
100	23.79	36.04	89.74
150	27.03	46.49	120.37
200	32.80	54.78	166.14

根据表 1 的试验处理结果绘制 3 种试样使用扭剪仪进行剪切试验时的抗剪强度 τ 与法向应力 P 的关系曲线，如图 5 所示。由曲线得到在此仪器下的抗剪强度指标。



(a) 膨润土τ-P关系曲线 (b) 黏土τ-P关系曲线 (c) 砂土τ-P关系曲线

图 5 常规直剪仪的 τ-P 关系曲线

根据拟合曲线可知膨润土试样的内摩擦角 φ 为 5.71°，黏聚力 c 为 12.62 kPa，其库仑定律为 $\tau=12.62+0.1\sigma$；黏土试样的内摩擦角 φ 为 11.86°，黏聚力 c 为 14.42 kPa，其库仑定律为 $\tau=14.42+0.21\sigma$；砂性土试样的内摩擦角 φ 为 39.81°，其库仑定律为 $\tau=0.83\sigma$。

（2）将使用砾石土扭剪仪的剪切试验所得到的最大扭矩值带入公式中，得到 3 种试样在不同的法向应力下的抗剪强度大小，见表 2。

根据上表的试验处理结果绘制 3 种试样使用扭剪仪进行剪切试验时的抗剪强度 C_u 与法向应力 P 的关系曲线，如图 6 所示。由曲线得到在此仪器下的抗剪强度指标。

表 2　扭剪仪剪切试验结果

法向应力 P/kPa	抗剪强度 τ/kPa		
	膨润土	黏土	砂土
25	17.57	23.07	23.97
50	19.95	28.58	48.83
75	23.52	34.98	72.64
100	26.20	41.09	94.97

根据拟合曲线可知使用扭剪仪进行剪切试验时，膨润土的内摩擦角 φ 为 6.84°，黏聚力 c 为 15.45 kPa，其库仑定律为 $C_u=15.45+0.12\sigma$；黏土内摩擦角 φ 为 13.50°，黏聚力 c 为 16.82 kPa，其库仑定律 $C_u=16.82+0.24\sigma$；砂性土内摩擦角 φ 为 43.83°，黏聚力 c 可忽略不计，其库仑定律 $C_u=0.96\sigma$。

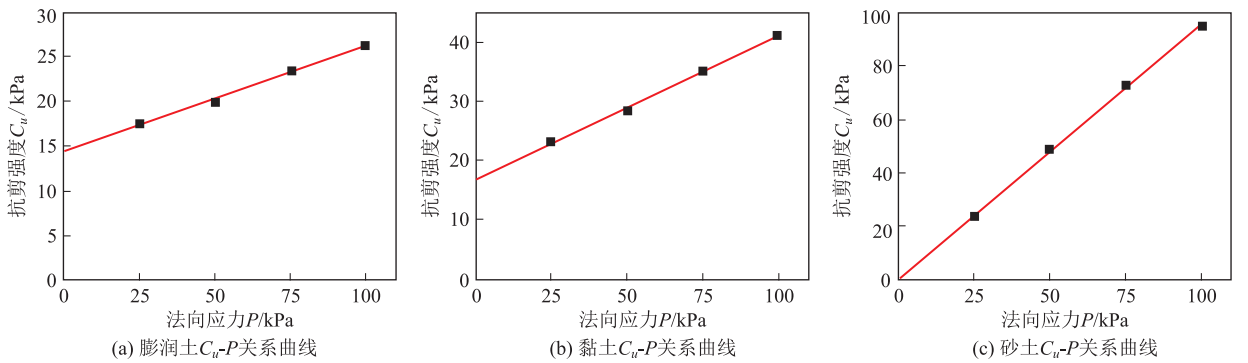


图 6　扭剪仪试验关系曲线

利用库仑定律计算出 3 种试样在收到相同法向应力下的抗剪强度，将两种仪器得到的剪切试验结果进行汇总，对比分析得新型扭剪仪的标定系数 ζ。汇总情况见表 3。

表 3　两种仪器抗剪强度对比

垂直应力 P/kPa	直剪仪抗剪强度 τ/kPa			扭剪仪抗剪强度 C_u/kPa		
	膨润土	黏土	砂土	膨润土	黏土	砂土
25	15.12	19.67	20.75	17.57	23.07	23.97
50	17.62	24.92	41.50	19.95	28.58	48.83
75	20.12	30.17	62.25	23.52	34.98	72.64
100	22.62	35.42	83.00	26.20	41.09	94.97

根据上表中的数据对比可以发现使用直剪仪测量得到的抗剪强度比扭剪仪的试验结果偏小，这是由于两种仪器制造时所使用的材质不同并且进行试验的剪切方式也有不同。由此使得试样在使用两种仪器进行试验时所受到的垂直应力及剪应力并不完全一致，最终导致两种仪器的试验结果产生差异，校准系数的确定可以使试验结果更加精确。

由试验结果对比可知两种仪器的抗剪强度之间存在明显的线性关系，常规直剪仪与扭剪仪的抗剪强度之比 ζ 约为 0.86，确定扭剪仪的仪器校准系数为 $\zeta=0.86$。因此，建立扭剪仪剪切试验结果的修正关系为：$\tau=\zeta C_u$。

3　功能特性

此次研制的砾石土扭剪仪的支撑框架为可拆卸式刚性框架，框架整体属于稳定性结构，具有很好的整体稳定性，可以保证试验过程中整个装置的安全、稳定。在安装仪器时剪切盒与地面固定连接，十字板头与剪切盒嵌套固定，使剪切盒与十字板头在试验过程中始终稳定，并保证十字板头可在试样中保持竖直状态转动，这样可避免由于试验装置自身结构导致对试样的试验结果产生影响。扭剪仪的研制目的是研究砾石土的抗剪强度，因此剪切盒的尺寸选取应满足砾石土的颗粒尺寸并结合实际情况而确定。并且该试验仪器采用了扭矩传感器测量扭矩，不仅可精准测得剪切试验过程中的扭矩大小，还可以实时观测试验中数据变化，准确记录试验过程中的最大扭矩值。

该试验装置选用扭剪的剪切方式对试样进行剪切试验，这种剪切方式可以使试样在剪切过程中剪切面积始终不变，可以使施加在剪切面土层上的法

向应力分布均匀，从而有效地避免了垂直应力发生偏心的现象。除此之外通过对土样施加扭力使其发生剪切变形，其剪切力的方向与土样的主应力方向一致，因此扭剪试验可以更好地模拟实际土体的剪切行为，还可以减小试样在剪切过程中由于摩擦力的影响而产生的误差。

但是砾石土扭剪仪除了上述所列举的优点外，也存在一些结构和设计上的缺陷。例如试验中垂直压力的稳定性还需要进一步改善，由于是人为施加外力使转杆转动无法确保扭剪速率完全恒定，试样的密实度也存在一定的差异。并且由于仪器整体的材料密度都较大，剪切盒的尺寸较大，垂直加载时所需的重力袋数量多且重力较大，因此仪器的整体体积和重量相对来说比较大，这就导致仪器在装卸及搬运上存在一定的困难。

4 工程应用

4.1 工程概况

本文以“昆明宝象河流域排水收集系统改造工程”为依托。该工程穿越地层主要为灰岩层、圆砾层、粉质黏土层，其中以圆砾层为主要施工地层，该地层中砾石粒径大于 2 mm 的砾石含量约 60%～80%，以中等风化砂岩及玄武岩为主，充填物主要为黏性土、粉土、粉细砂，整体土层大致由砾石、砂砾、细粒土壤等组成，属于较典型的砾石土。为保障工程施工的安全性，需要对该地层土的强度进行测量，然而其无法使用常规应变式直剪仪进行剪切试验。因此为了可以较准确地测量工程地土体的强度，使用研制的砾石土扭剪仪进行剪切试验，同时也为后续工程中此类土样抗剪强度的测量提供新的工具。

4.2 试验方案设计

将试验所用砾石土分为 4 组，对每组施加不同的垂直压力下：25 kPa、50 kPa、75 kPa、100 kPa，对砾石土试样做不排水剪切试验(图 7)。

(1) 将剪切盒固定后，在剪切盒内壁及十字板头均涂抹上一层凡士林，将十字板头放入剪切盒中。往剪切盒中加入待测土样，边加边压实，直至土样填满剪切盒的 3/4。

(2) 把加压板缓慢地放于试样顶部平面上，固定支撑框架；随后将扭矩测量装置置于支撑框架上部平台，通过六角螺栓将其固定；最后使用联轴器将负载装置及扭矩传感器连接。

(3) 通过给垂直加载系统的加压杆上叠加重力袋达到给试样施加法向应力的作用。法向应力施加完成后给转杆施加一定的外力，使之带动十字板头在试样中匀速转动，使试样发生剪切破坏。当扭矩测量装置测量出最大扭矩值时说明试样已经被剪坏，可停止试验。

(4) 将最大扭矩值带入公式中求得土样的抗剪强度，根据试验结果绘制抗剪强度与法向应力的关系曲线，得到其抗剪强度指标。

图 7 砾石土剪切试验过程

4.3 试验结果处理及分析

砾石土试样在扭剪仪下进行剪切试验所得到的最大扭矩 M，带入公式求得其抗剪强度的大小，对试验结果进行校准，校准系数为 0.86。具体试验数据见表 4。

表 4 砾石土剪切试验结果

垂直应力 P/kPa	最大扭矩 M/N·kN	抗剪强度 C_u/kPa	修正后抗剪强度 C_u'/kPa
25	153	22.78	19.59
50	258	38.41	33.03
75	411	61.18	52.62
100	478	71.16	61.19

根据试验结果绘制修正后抗剪强度 C_u' 与垂直应力 P 的拟合关系曲线见图 8。计算出试样的抗剪强度参数：内摩擦角 φ、黏聚力 c。

由图 8 可知砾石土的内摩擦角 φ 为 30.11°，黏聚力 c 为 5.51 kPa，其抗剪强度为：$\tau=5.51+0.58\sigma$。工程项目勘察报告提供该砾石土内摩擦角为 28°，黏聚力为 5 kPa，据此可进一步证明该扭剪仪试验结果的可靠性。

5 结论

本文为研究砾石土的抗剪强度研制出一款砾石土扭剪仪，并首次将该仪器应用于实际工程中，对砾石土进行抗剪强度测量，得到了如下结论：

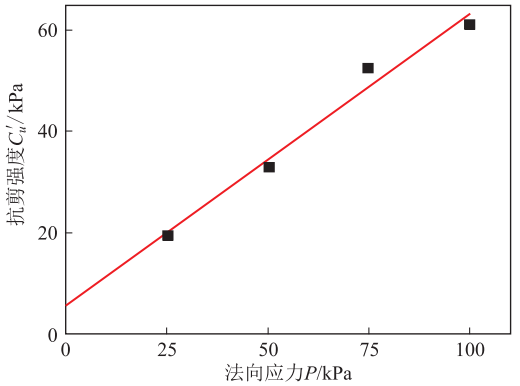


图 8　砾石土 C_u'-P 关系曲线

（1）砾石土扭剪仪由支撑框架、圆柱形剪切盒、负载装置（十字板头）、垂直加载装置、扭矩测量装置（扭矩传感器）等部分组成。工作原理为：对十字板施加外力使其在试样中匀速转动，直至试样发生剪切破坏，记录试验过程中的最大扭矩，通过公式将最大扭矩换算为土的抗剪强度 C_u。

（2）砾石土扭剪仪使用扭剪的剪切方式，相比传统的直剪试验，该种剪切方式能够保持试样在剪切过程中的接触面积始终不变，从而有效地避免了垂直应力发生偏心，使法向荷载可始终均匀分布；可以更好地模拟实际土体的剪切行为；减小土样在剪切过程中由于摩擦力的影响而产生的误差。

（3）选用 3 种不同的土样（膨润土、红黏土、砂性土）对扭剪仪进行校准试验。确定砾石土扭剪仪的校准系数为 $\zeta=0.86$，由此明确扭剪仪剪切试验结果的修正关系：$\tau=0.86\ C_u$。

（4）使用砾石土扭剪仪对砾石土及泥浆减阻进行剪切试验，得到砾石土试样的抗剪强度指标：内摩擦角 φ 为 30.11°，黏聚力 c 为 5.51 kPa，库仑定律为：$\tau=5.51+0.58\ \sigma$。进一步证明该扭剪仪试验结果的可靠性。

参考文献

[1] 岳鹏坡. 土的抗剪强度及其在工程勘察中的应用[J]. 中国水运（下半月），2017，17(8)：337-338.

[2] 马玉华. 浅谈土的抗剪强度试验[J]. 中国高新技术企业，2015，(8)：134-135.

[3] 姜佳豪，冯少杰，吕腾锋. 浅谈土体直剪试验的缺陷及影响因素[J]. 科技风，2015，(6)：34.

[4] BISHOP A W. The Use of the slip circle in the stability analysis of slopes[J]. Geotechique，1955，5(1)：7-17.

[5] 李博. 西藏邦铺矿区高原特殊碎石土力学特性的大型直剪试验研究[D]. 武汉：中国地质大学，2013.

[6] 陈祖煜. 土质边坡稳定性分析——原理・方法・程序[M]. 北京：中国水利水电出版社，2003.

[7] 谢乐妃. 土的直接剪切试验与影响因素分析[J]. 江西建材，2023，(5)：118-119，122.

[8] 刘奋军，董琪. 浅谈土体直剪试验的缺陷[J]. 科技风，2011，(3)：115，141.

[9] 邓忠信，鲁嘉，彭凯，等. 影响直接剪切试验的因素分析与参数修正[J]. 广西水利水电，2006，(3)：13-16.

[10] 周志刚，李文，宋勤德. 大型直剪仪试验的尺寸效应[J]. 长沙交通学院学报，1999，15(1)：47-49.

[11] 梅英宝，严家平. 砾质黏性土直接剪切试验研究[J]. 路基工程，2000，(5)：36-37.

[12] 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.

[13] 董云，柴贺军. 土石混合料室内大型直剪试验的改进研究[J]. 岩土工程学报，2005，27(11)：94-98.

[14] 闵弘，刘小丽，魏进兵，等. 现场室内两用大型直剪仪研制(I)：结构设计[J]. 岩土力学，2006，27(1)：168-172.

[15] 徐进，刘建锋，高春玉，等. 新型粗粒土直剪试验机研制[J]. 四川大学学报(工程科学版)，2008，40(4)：12-16.

[16] 罗永江，王生，封灿林，等. SZJ8-2 型数字显示岩心直剪仪的研制和应用[J]. 地质装备，2010，11(4)：30-31，23.

[17] 刘斯宏，臧德记，汪易森，等. 便携式现场和室内两用直剪仪的研制[J]. 岩土工程学报，2010，32(6)：938-943.

[18] CHEN Xiaobin，ZHANG Jiasheng，XIAO Yuanjie，et al. Effect of roughness on shear behavior of red clay-concrete interface in large-scale direct shear tests [J]. Canadian Geotechnical Journal，2015，52(8)：1122-1135.