

DOI: 10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202012039

自反力双剪面大型剪切仪研发及应用研究

龚 辉¹, 郭娜娜², 葛邦云³

(1. 珠海市建设工程质量监测站, 广东 珠海 519000; 2. 贵州桥梁建设集团有限责任公司,
贵州 贵阳 550000; 3. 中交二航局昆明分公司, 云南 昆明 650000)

摘要: 原位直剪是测定土石混合料强度参数最为普遍也是最可靠的试验方法之一,但是现有原位直剪仪在试验过程中存在法向加压系统不合理、无法预留剪切缝等多方面的缺陷,影响试验结果的精度。本文对传统原位剪切仪进行有针对性的改造,研制出自反力双剪面大型剪切仪,该大型原位直剪仪有以下特点:(1)设备自身提供水平反力;(2)剪切过程中垂向加压系统固定,无需滚轴排;(3)剪切盒之间可预留可调节宽度的剪切缝,适用性更广;(4)装置模块化程度高,便于搬运、组装和拆卸。通过与单环剪切仪进行现场对比试验发现,与单环剪切仪得到的试验结果相比,自反力双剪面大型剪切仪得到的剪应力-剪切位移曲线为标准双曲线,并且可得到大剪切位移情况下的剪切曲线,通过大剪切位移曲线读取的最大剪应力更贴合实际。与单环剪切仪得到的抗剪强度值相比,内摩擦角低 4.6°,而黏聚力高 41.14 kPa。同时通过对两种剪切仪得到的剪切破坏面进行图像对照,可明显发现自反力双剪面大型剪切仪得到的剪切破坏面较为平整,未出现单环剪切仪对的剪切破坏面下凹现象。

关键词: 原位试验;大型直剪;双剪面

中图分类号: TU473.1

文献标志码: A

文章编号: 1000-3665(2021)05-0168-08

Application and research on large in-situ self-reacting direct shear apparatus owning two shear interfaces

GONG Hui¹, GUO Nana², GE Bangyun³

(1. Zhuhai Construction Engineering Quality Monitoring Station, Zhuhai, Guangdong 519000, China;
2. Cuizhou Bridge Construction Group Co. Ltd., Guiyang, Guizhou 550000, China; 3. Kunming Branch of
CCCC Second Navigation Bureau, Kunming, Yunnan 650000, China)

Abstract: The in-situ shear test has been justified as one of the most reliable and common method used to test shear strength of soil-rock mixture. However, the existing in-situ shear test apparatuses show some shortcomings in practice that will influence the accuracy of the test results, including the unreasonable normal pressure system and unable to reserve shear opening, etc. A new self-reacting direct shear apparatus owning two shear interfaces is introduced. The apparatus is characterized by the followings: (1) it provides horizontal reaction force by itself; (2) the vertical pressure system is fixed during shearing without roller row; (3) the adjustable width of shear opening can be reserved between shear boxes; (4) it is of high modularity, and is easy to handle, assembly and disassembly. It is validated through comparison with the single-box direct shear test. Compared with the experimental results obtained by the single box shear apparatus, the shear stress-shear displacement curve obtained by the self-reacting direct shear apparatus is a standard hyperbolic curve, and the shear stress-displacement curve

收稿日期: 2020-12-18; 修订日期: 2021-01-26

基金项目: 国家自然科学基金项目(41630643); 国家自然科学基金面上项目(41272305)

第一作者: 龚辉(1986-), 男, 博士研究生, 高级工程师, 主要研究方向为土石混合料工程特性研究、岩土试验检测新技术。

E-mail: 354129582@qq.com

under large shear displacement can be obtained. The maximum shear stress read by shear stress-displacement curve under large shear displacement is more practical. Compared with the shear strength obtained by the single-ring shear apparatus, the internal friction angle is 4.6 degree lower and the cohesion is 41.14 kPa higher. At the same time, through the image comparison of the shear failure surface obtained by the two shear apparatuses, it can be obviously found that the shear failure interfaces obtained by self-reacting direct shear apparatus owning two shear interfaces is relatively flat, and there is no concave phenomenon of the shear failure surface on the single-ring shear instrument.

Keywords: in-situ test; large direct shear test; two shear interfaces

直接剪切仪(直剪仪)是岩土工程中最早使用的一种测定土样抗剪强度的仪器,具有操作直观简单方便的特点,在岩土力学教学 and 实际工程测试中被广泛使用。直剪仪分为室内直剪仪和现场原位直剪仪,由于室内试验尺寸有限,并且是取回试样进行试验,极易受到扰动,特别是对于粗粒土而言,室内直剪仪难以得到真实赋存环境下的材料特性,大部分涉及粗粒土的工程应直接在工程现场选取一定数量的典型场地,就地进行原位试验,避免试样获取、搬运过程中对的土样搅动影响。

而现有大部分现场原位直剪仪装置采用单剪切盒的形式过于简陋,法向加压反力和水平支撑有限^[1-6]。也有学者们研发了采用双剪切盒形式的现场室内两用大型直剪仪^[7-10],但还是无法避免剪切过程中出现法向偏压现象,限制了其在工程中的运用。为了得到准确可信的试验结果,本文对现有原位直剪仪的结构和加载方式进行剖析,在总结现有原位直剪仪不足的同时,研制出一种新的双剪面自反力原位直剪仪,摒弃了传统直剪仪所用的滚轴排,采用三环结构,实际剪切自平衡的同时,专门设置侧导轨限制了剪切环的转动自由度,消除了由剪切引起的附加力矩,使剪切面的应力分布更加均匀合理。

1 现有原位直剪仪的类型及存在的问题

现有原位直剪仪按剪切环的数量主要有单环剪切仪和双环剪切仪;法向压力施加的方式主要有堆载法(图 1a、b、c)和地锚法(图 1d)两种。

1.1 单环原位剪切仪

A 型单环直剪仪(图 1a)使用操作方便,剪切过程中法向定压,但难于采用钢锭提供足够的法向反力。在法向加压的过程中极易失稳或钢锭板直接压在剪切盒侧壁上面造成试验结果失真。而且在剪切过程中整个法向加压系统沿着剪切方向平移,易引起法向

加压钢锭侧翻导致试验失败。

为了解决这一问题,研究者们提出了 B 型单环直剪仪^[2-4](图 1b),并在土样顶部和法向加压千斤顶之间增加了滚轴(珠)排系统解决剪切过程的移动问题,但是剪切力作用下,剪切环带动试样沿剪切方向平移,无法保证施加的法向压力始终是垂直施加在试样中心,导致试样处于偏心受压状态,不能严密符合岩土力学库伦-摩尔破坏原理要求的荷载作用条件。杨雄等^[5]提出的 C 型单环直剪仪(图 1c)可以有效避免加压时的法向偏压问题,但是 C 型单环直剪仪在现场实施时有很大难度,具体试验时上部堆载荷重通常略大于试验所需法向荷重,所以剪切滑动难于实现。而晏鄂川等^[6]提出的 D 型(图 1d)单环直剪仪采用地锚提供反力,巧妙地将滚轴(珠)排设置在地梁与竖向拉杆连接处。另外,单环剪切仪均采用后缘开挖面作为水平荷载的反力支撑,在高法向压力作用时,后缘支撑体因反力不足容易发生提前破坏,导致试验提前中止。

1.2 双环原位剪切仪

后来陆续研究出了双环直剪仪,大多采用反力架提供水平向反力^[7-10](图 2)。其中最大尺寸的为中国科学院武汉岩土力学研究所研发的现场室内双双环大型直剪仪^[7],采用反力架自身重量或顶部堆载联合施加法向反力,整体为可拆卸式,仪器长为 2.759 m、高 1.649 m。杨文智等^[11]研发了一种自平衡双环原位剪切仪(图 3),在下环上设计 1 个平衡槽,实现了水平加载的自平衡,减小了水平加载的作业空间。

从图 2 和图 3 可以看出,双环直剪仪和自平衡双环直剪仪虽然在设备上的改进解决了水平反力不足的问题,但在剪切过程中的法向偏压问题仍然存在,同时还存在以下不足亟待改进:

(1)未预留剪切缝或剪切缝宽度不可调:工程现场的试样内部或多或少掺杂有岩块,在剪切力作用下剪切面附近的岩石碎块发生翻滚、移位,并扰动周边

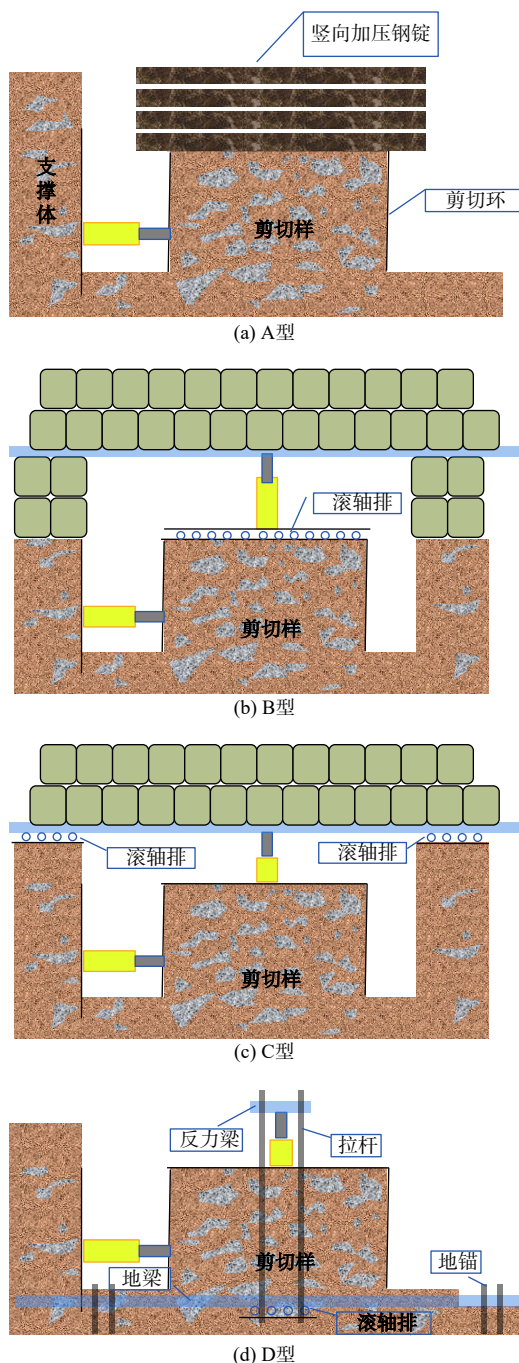


图 1 单环直剪仪示意图

Fig. 1 Schematic diagrams of the single-box direct shear instrument

土体,使剪切面由一张面发展成为一个带状体。如图 4 所示,这个带状体厚度即是剪切前应预留的剪切缝宽度。对于岩体剪切而言,同样由于粗糙度不同也将导致剪切面呈带状体^[12-13]。

无论是土样还是岩样均要求试验设备在剪切前预留一个合理宽度的剪切缝。若预留缝隙尺寸太小,盒壁将制约颗粒的滚动和错动,造成抗剪强度偏高。

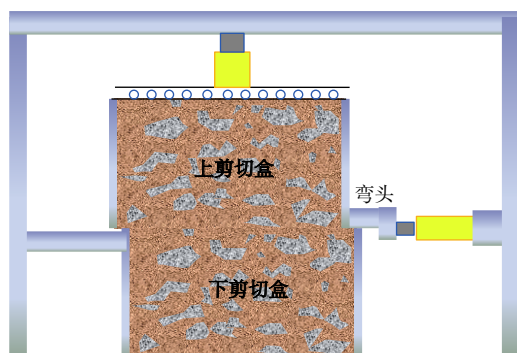


图 2 普通双环直剪仪示意图

Fig. 2 Schematic diagram of common double-box direct shear instrument

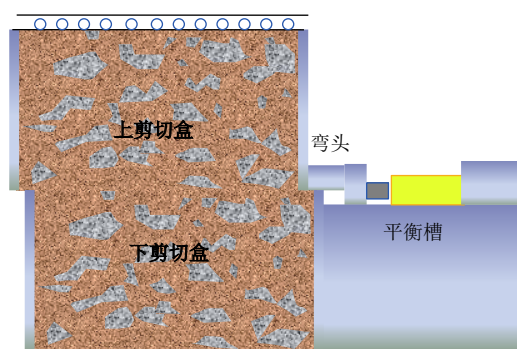


图 3 双环自平衡直剪仪示意图

Fig. 3 Schematic diagram of the self-balanced double-box direct shear instrument



图 4 实际剪切破坏面示意图

Fig. 4 Actual shear failure interface

反之预留缝隙尺寸太大,剪切过程中试料会挤出,从而减小有效剪切面积,测试得到的抗剪强度偏低。有学者^[14-15]提出预留的剪切缝宽度可取为颗粒最大粒径或平均粒径的某一倍数,但是土石混合料剪切带的厚度除了与土石混合料的粒度组成有关以外,还与土石混合料的含石量有很大的关系,徐文杰^[1]通过原位直剪试验发现,随着块石含量的增加,其剪切带逐渐变宽。因此预留剪切缝的宽度必须是动态可调的。

(2) 剪切环附加力矩问题: 为了得到准确的力学参数,剪切时推力作用线尽量接近剪切面,但现场试验要求预留一定宽度的剪切缝,预留剪切缝不可避免造成水平力作用线与剪切面的偏离。Jewell^[16]的研究成果表明对于单剪切盒和双环直剪仪上盒的受力状态如图 5 所示,水利水电粗粒土试验规程(DL/T 5356—

2006)^[17] 要求水平千斤顶轴线与剪切面距离不宜大于试样边长或直径的 5%。

(3) 滚轴(珠)对试验结果的影响问题: 除了 A 型单环直剪仪以外的单双环直剪仪均在法向加压千斤顶与顶板之间采用了滚轴(珠)排, 滚轴(珠)与顶板之间是线(点)接触。在高法向压力作用下, 滚轴(珠)与顶板之间摩阻力不容忽视, 在数据处理时必须予以剔除, 但这个摩阻力值具体数值不易测定, 其值在剪切过程中非定值。

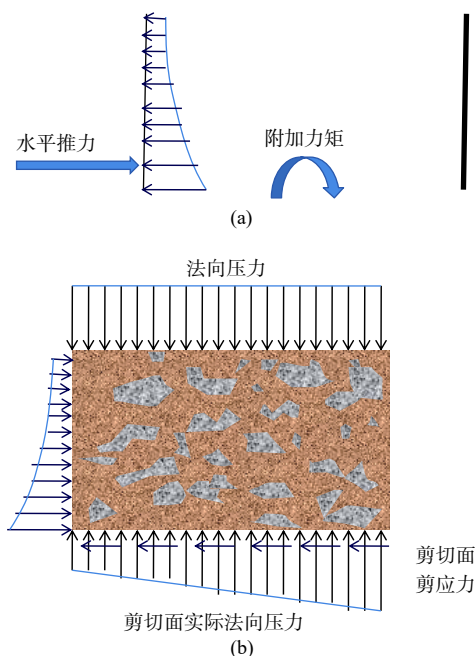


图 5 顶部自由的剪力引起的力偶 (a) 及试样受力简图 (b)

Fig. 5 Stresses and couples induced by shear force

2 自反力双剪面大型原位直剪仪的研制

2.1 结构组成及工作原理

如图 6 所示, 自反力双剪面大型剪切仪包括传力支座、上环、中环、下环、侧导轨、缝衬瓦、竖向千斤顶、水平向千斤顶、环上垫枕、小梁、球头。上环和下环通过底部传力支座的上下拉杆和侧导轨上的螺丝连接为一体化^[18]。

(1) 剪切环: 本次 3 个剪切环平面尺寸完全一致, 截面为圆形, 直径为 60 cm, 高为 20 cm, 可试验的粗粒土最大粒径可达 120 mm。中环为主要剪切环, 上下环在剪切过程中固定不动, 提供水平反力, 试验过程在中环的上下顶面同时形成剪切面。

(2) 缝衬瓦: 缝衬瓦的内缘尺寸和剪切环内缘尺寸完全一致, 为了安装拆卸方便, 单个环面的缝衬瓦

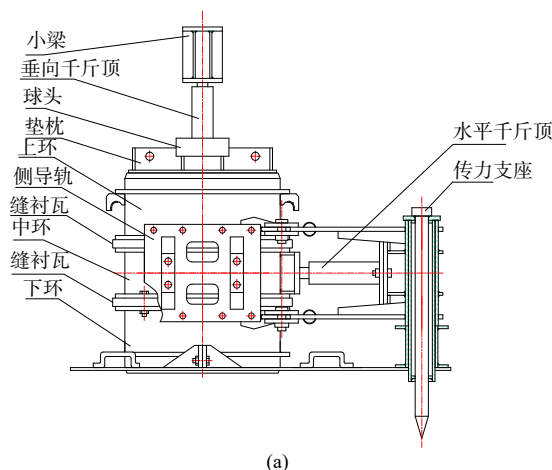


图 6 双剪面自反力大型原位直剪仪正视图 (a) 及实体仪器 (b)

Fig. 6 Front view and photo for the large self-reacting direct shear apparatus owning two shear interfaces

由 2 块半圆形环板组成, 本装置的单块缝衬瓦厚度为 10 mm, 可多块重叠放置, 可预留宽度为 10, 20, 30, 40, 50, 60 mm 的剪切缝, 可适用于最大颗粒粒径不超过 180 mm 的粗粒土原位剪切试验。

(3) 侧导轨: 侧导轨是为了克服原有原位剪切仪中剪切环剪切过程中剪切环发生旋转而专门设计, 侧导轨大样图见图 7。侧导轨通过 4 根螺钉分别与上环和下环的螺孔固定, 在中环两侧相应位置设置侧滑板, 保证中环在剪切过程中只发生平动, 不能发生转动。

(4) 法向反力系统: 法向反力装置中无需安放滚轴排, 直接安放顶部直接放置法向反力系统, 法向反力可视现场情况采用锚拉桩、堆载压重提供, 若在试洞中还可利用洞顶作为反力支撑。

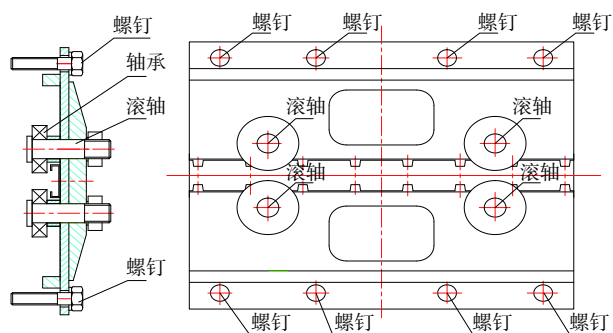


图 7 侧导轨大样图

Fig. 7 Schematic diagram of side rail

(5)数据采集系统:自反力双剪面大型剪切仪的数据采集系统与原有剪切仪一样,在中环前部安装剪切位移计,环刀上垫枕上对称安装 2 个法向位移计。

2.2 特点

自反力双剪面大型剪切仪的特点如下:

(1)水平剪切自平衡:设有上、中、下 3 个剪切环,中环为主剪切环,上环和下环在剪切过程提供水平向反力,实现水平荷载的自平衡。

(2)取消滚轴排,剔除滚轴排对试验结果的影响:剪切时上环、垫枕、竖向千斤顶均不发生位移,因此无需加装滚轴排。

(3)预留可调节宽度的剪切缝:在安装设备时,根据试样最大颗粒粒径分别在上环与中环之间、中环与下环之间安放相应厚度的缝衬瓦,单个环面的缝衬瓦由 2 块半圆形环板组成,为了能适应不同粒径的粗粒土的原位剪切,本装置的单块缝衬瓦厚度分 5 个厚度,实现了剪切缝的动态调整。

(4)消除剪切环偏转发生的附加力矩引起剪切面法向偏心:专门设置侧导轨,通过侧导轨固定上下环的同时限制中环的转动自由度,作用在剪切面上仅有法向应力和剪切应力,无附加力矩产生,上中下 3 个剪切环的受力状态如图 8 所示。

3 试验验证

为了验证自反力双剪面大型剪切仪的可行性,在云南某土石混合料大型填方工程中,采用单环剪切仪及自反力双剪面大型剪切仪分别对土石混合填料进行现场试验,现场的填料为高塑性黏土夹杂碎石,有效粒径 $d_{10}=0.077\text{ mm}$,限制粒径 $d_{30}=0.490\text{ mm}$, $d_{60}=3.481\text{ mm}$ 。计算得出不均匀系数 $C_u=d_{60}/d_{10}=45.213$,曲率系数 $C_c=0.896$ 。现场采用核磁密度仪测得剪切样的湿密度为 1.971 g/cm^3 ,干密度为 1.615 g/cm^3 ,含水

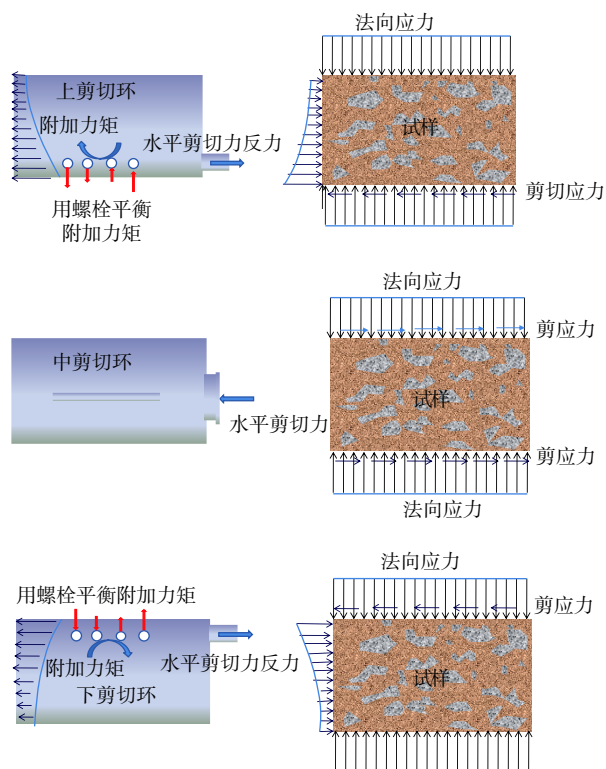


图 8 各剪切环和试样受力简图

Fig. 8 Diagram of force (stresses) for shear boxes and test samples

率为 22.02%。

单环剪切仪的法向加载采用质量为 0.5 t 的吨块,根据现场加载情况,法向应力为 64.92, 86.56, 129.84 kPa,吨块过多后在剪切后期极易发生倾倒。自反力双剪面大型剪切仪采用堆载反压的方式提供法向荷载,试验过程中采用法向应力为 155.24, 312.04, 468.84, 594.19 kPa 进行 4 个试样的剪切试验(图 9)。

3.1 剪切应力-剪切位移曲线

图 10 为单环剪切仪试验结果得到的剪切应力-剪切位移曲线。由图 10 可见,法向压力 64.92 kPa 对应的剪应力-剪切位移近似于双曲线,只是在局部出现了异常。剪切位移为 11.29~12.31 mm 时剪应力也现了小幅骤升,当剪切位移为 33.21 mm 时,剪应力达到其峰值 73.368 kPa。随后进入软化阶段,当剪切位移达到 39.50 mm 时剪应力软化到 68.376 kPa,剪应力也达到了残余稳定值 68.376 kPa;法向压力 86.56 kPa 对应的剪应力-剪切位移曲线近似为双曲线。剪切位移达到 18.34 kPa 时,剪应力达到峰值。随后进入剪切软化阶段,当剪切位移为 33.50 mm 时,剪应力已软化到 84.238 kPa,并未达到残余稳定值;法向 129.84 kPa 对应的剪应力-剪切位移曲线可分为 2 个阶段:(1)双曲线段(0.00~9.62 mm):在此阶段,剪应力随剪切位移



图 9 自反力双剪面大型剪切仪应用现场试样修整图

Fig. 9 Field sample modification diagram of new shear apparatus application

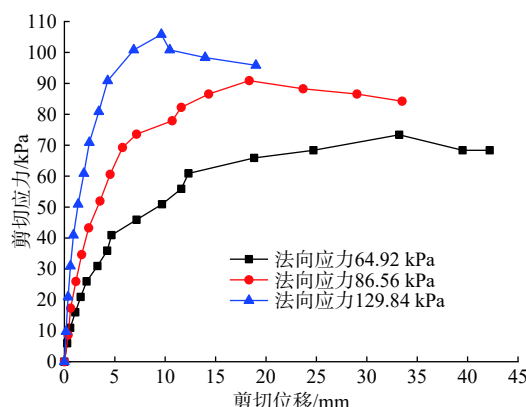


图 10 单环剪切仪剪切应力-位移曲线

Fig. 10 Shear stress-displacement curves for the single-box shear apparatus

呈双曲线上升,当剪切位移达 9.62 mm 时,剪应力达到其峰值 105.816 kPa。(2)软化阶段(9.62 ~ 19.00 mm):当剪切位移大于 9.62 mm 后,剪切即呈现软化规律,在剪切位移为 9.62 ~ 10.45 mm 区间段,剪应力出现小幅骤降。在剪切位移为 10.45 ~ 19.00 mm 区间段,剪切呈现有细微的软化。

图 11 为自反力双剪面大型剪切仪试验结果得到的剪应力-剪切位移曲线。可见,4 个法向应力下的剪切曲线都较为平滑,为标准双曲线趋势,剪切位移 30 mm 以后剪切应力增幅较小,由于自反力双剪面大型剪切仪在法向加压过程中更加稳当,所以可得到大剪切位移情况下的剪切曲线。但是,与单环剪切仪得到的试验曲线对比可发现,单环剪切仪试验时很早便发生了应变软化现象,其原因并不是试样发生了应变软化,而是法向加压系统在平推过程中已经发生失稳和偏心所致。

3.2 剪切强度

采用线性拟合求取 2 种剪切仪试验得到的强度(图 12),可见剪切强度整体符合库仑-莫尔强度准

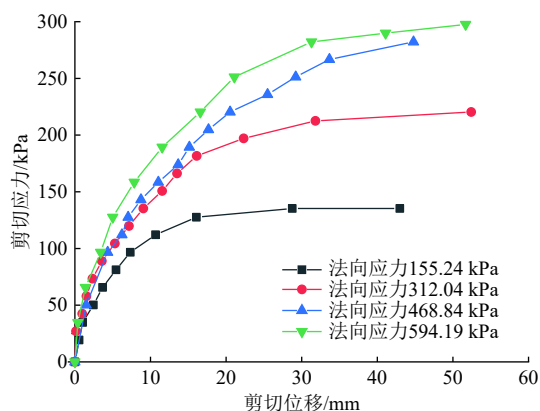


图 11 自反力双剪面大型剪切仪剪切应力-位移曲线

Fig. 11 Shear stress-displacement curves for new shear apparatus self-reacting direct shear owning two shear interfaces

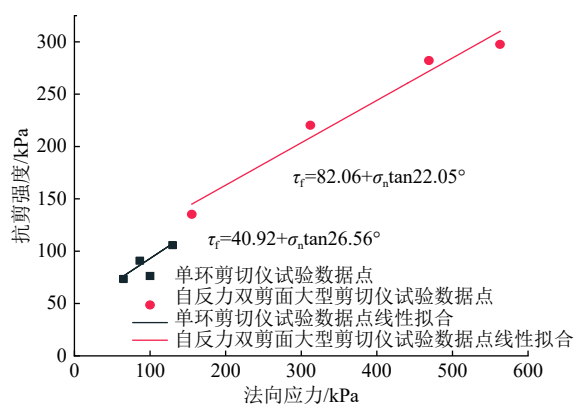


图 12 强度参数拟合对比

Fig. 12 Comparison between strength parameter fittings of two shear apparatuses

则。采用单环剪切仪得到的内摩擦角为 26.56°,黏聚力为 40.92 kPa。采用自反力双剪面大型剪切仪得到的内摩擦角为 22.05°,黏聚力为 82.06 kPa。可见与单环剪切相比,自反力双剪面大型剪切仪得到的内摩擦角低 4.6°,而黏聚力高 41.14 kPa,其主要原因是单环剪切仪在剪切后期法向加载系统极易发生倾覆,导致高法向应力对应的最大剪切应力未真实获取。

3.3 剪切破坏面

图 13 为单环剪切仪试验得到的剪切破坏面,从图上可发现剪切面明显下凹,剪切面极不平整。图 14 为自反力双剪面大型剪切仪试验得到的剪切破坏面,剪切面较为平整,未出现单环剪切试验的剪切面下凹现象,剪切面上也未见有岩块剪碎现象。

4 结论

(1)针对传统剪切仪存在的缺陷,研制了双剪面自反力现场大型直剪仪,其具有水平剪切自平衡、法



图 13 单环剪切仪得到的典型剪切破坏面

Fig. 13 Shear failure interface attained through the single box apparatus



图 14 自反力双剪面大型剪切仪得到的典型剪切破坏面

Fig. 14 Shear failure interface attained through self-balanced in-situ shear equipment owning two shear interfaces

向加压系统在剪切过程中固定而无需滚轴排、剪切盒之间可预留可调节宽度的剪切缝、通过侧导轨限制剪切盒在剪切过程中的转动消除附加力矩对剪切面应力状态的影响、各部分组装和拆卸都非常方便而特别适用于野外作业等特点。

(2)原位剪切试验对比证明,自反力双剪面大型剪切仪可得到大剪切位移情况下的剪切曲线,为标准双曲线;从曲线上读取的最大剪切应力更符合实际,与单环剪切试验结果相比,线性拟合得到的内摩擦角低 4.6° ,而黏聚力高 41.14 kPa 。

(3)用自反力双剪面大型剪切仪的剪切破坏面较为平整,未出现单环剪切试验的剪切面下凹现象。

(4)本次现场试验对比验证了测试方式的可行性与结果可靠性,自反力双剪面大型剪切仪经过专门的设计改进,测试结果更加准确可信。

参考文献 (References) :

- [1] 徐文杰,胡瑞林,岳中琦,等.基于数字图像分析及大型直剪试验的土石混合体块石含量与抗剪强度关系研究[J].岩石力学与工程学报,2008,27(5):996-1007. [XU Wenjie, HU Ruilin, YUE Zhongqi, et al. Research on relationship between rock block proportion and shear strength of soil-rock mixtures based on digital image analysis and large direct shear test[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(5): 996-1007. (in Chinese with English abstract)]
- [2] 罗丽娟,赵法锁,陈新建,等.巨型黄土滑坡剪出口滑带土的原位剪切试验研究[J].西安科技大学学报,2009,29(4):459-464. [LUO Lijuan, ZHAO Fasuo, CHEN Xinjian, et al. In situ shear experiment on the shear crack of giant loess landslide[J]. Journal of Xi'an University of Science and Technology, 2009, 29(4): 459-464. (in Chinese with English abstract)]
- [3] 张勇,魏玉峰,程英建.一种软弱带土的原位直剪仪:CN104807706 A[P]. 2015-07-29. [ZHANG Yong, WEN Yufeng, CHEN Yingjian. A insitu-shear equipment for weak soil: CN104807706 A[P]. 2015-07-29. (in Chinese)]
- [4] 黄斌,程展林,饶锡保,等.一种粗粒土现场大型直剪试验设备:CN203858163U[P]. 2014-10-01. [HUANG Bin, CHENG Zhanlin, RAO Xibao, et al. Large direct shear field test equipment for coarse-grained soil: CN203858163U[P]. 2014-10-01. (in Chinese)]
- [5] 杨雄,程小俊,何忠意.原位直剪试验装置的优化研究及应用[J].江西理工大学学报,2012,33(3):30-33. [YANG Xiong, CHENG Xiaojun, HE Zhongyi. Research on the optimization of field direct shear test apparatus and its application[J]. Journal of Jiangxi University of Science and Technology, 2012, 33(3): 30-33. (in Chinese with English abstract)]
- [6] 晏鄂川,胡学军,文国军,等.一种大型岩土体原位直

- 剪试验装置: CN105806721A[P]. 2016-07-27. [YAN Echuan, HU Xuejun, WEN Guojun, et al. Large rock-soil mass in situ direct shear testing apparatus: CN105806721A[P]. 2016-07-27. (in Chinese)]
- [7] 董云, 柴贺军, 杨慧丽. 土石混填路基原位直剪与室内大型直剪试验比较[J]. *岩土工程学报*, 2005, 27(2): 235 - 238. [DONG Yun, CHAI Hejun, YANG Huili. Comparison of shear test in site and lab large-scale shear test for rock-soil aggregate of roadbed[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2005, 27(2): 235 - 238. (in Chinese with English abstract)]
- [8] 李长隆, 李军, 金嗣淳, 等. 原位直剪仪: CN104977216A[P]. 2015-10-14. [LI Changlong, LI Jun, JIN Sichun, et al. In situ direct shear apparatus: CN104977216A[P]. 2015-10-14. (in Chinese)]
- [9] 刘斯宏, 臧德记. 便携式现场和室内两用直剪试验仪及其取样测试方法: CN101105433[P]. 2008-01-16. [LIU Sihong, ZANG Deji. Portable on-spot and indoor dual-purpose direct-cutting experiment instrument and its sampling method: CN101105433[P]. 2008-01-16. (in Chinese)]
- [10] 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. [MIN Hong, LIU Xiaoli, WEI Jinbing, et al. A new large direct shear apparatus for field and laboratory test (I): configuration[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2006, 27(1): 168 - 172. (in Chinese with English abstract)]
- [11] 杨文智, 鲁先龙, 苏荣臻, 等. 一种剪切自平衡原位直剪仪: CN105758736 A[P]. 2016-07-13. [YANG Wenzhi, LU Xianlong, SU Rongzhen, et al. A self balancing field direct shearing equipment: CN105758736 A[P]. 2016-07-13. (in Chinese)]
- [12] 张清照, 沈明荣, 丁文其. 结构面在剪切状态下的力学特性研究[J]. *水文地质工程地质*, 2012, 39(2): 37 - 42. [ZHANG Qingzhao, SHEN Mingrong, DING Wenqi. Study on the mechanical properties of rock mass discontinuity under shear condition[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2012, 39(2): 37 - 42. (in Chinese with English abstract)]
- [13] 朱小明, 刘博, 王长柏, 等. 含二阶规则起伏体结构面的剪切试验研究[J]. *水文地质工程地质*, 2011, 38(3): 38 - 41. [ZHU Xiaoming, LIU Bo, WANG Changbai, et al. A study of shearing tests of structural plane with regular second-order asperities[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2011, 38(3): 38 - 41. (in Chinese with English abstract)]
- [14] 王光进, 杨春和, 张超, 等. 粗粒含量对散体岩土颗粒破碎及强度特性试验研究[J]. *岩土力学*, 2009, 30(12): 3649 - 3654. [WANG Guangjin, YANG Chunhe, ZHANG Chao, et al. Experimental research on particle breakage and strength characteristics of rock and soil materials with different coarse-grain contents[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2009, 30(12): 3649 - 3654. (in Chinese with English abstract)]
- [15] 翁厚洋, 朱俊高, 余挺, 等. 粗粒料缩尺效应研究现状与趋势[J]. *河海大学学报(自然科学版)*, 2009, 37(4): 425 - 429. [WENG Houyang, ZHU Jungao, YU Ting, et al. Status quo and tendency of studies on scale effects of coarse-grained materials[J]. *Journal of Hohai University (Natural Sciences)*, 2009, 37(4): 425 - 429. (in Chinese with English abstract)]
- [16] JEWELL R A. Direct shear tests on sand[J]. *Géotechnique*, 1989, 39(2): 309 - 322.
- [17] 中华人民共和国国家发展和改革委员会. 水电水利工程粗粒土试验规程: DL/T 5356—2006[S]. 北京: 中国电力出版社, 2007. [National Development and Reform Commission. Code for coarse - grained soil tests for hydropower and water conservancy engineering: DL/T 5356—2006[S]. Beijing: China Electric Power Press, 2007. (in Chinese)]
- [18] 龚辉, 尚思良, 徐炎兵, 等. 一种获取岩土体强度参数的原位剪切装置及安装方法: CN106198257A[P]. 2016-12-07. [GONG Hui, SHANG Siliang, XU Yanbing, et al. In-situ shearing device capable of acquiring strength parameters of rock-soil body and mounting method: CN106198257A[P]. 2016-12-07. (in Chinese)]

编辑: 张明霞