

DOI: 10.16285/j.rsm.2017.0155

组装机变尺寸直剪仪的研制

薛晨^{1,2,3}, 符文熹^{1,2}, 何思明⁴

(1. 四川大学 水力学与山区河流保护国家重点实验室, 四川 成都 610065; 2. 四川大学 水利水电学院, 四川 成都 610065; 3. 中铁第一勘察设计院集团有限公司, 陕西 西安 710043; 4. 中国科学院成都山地灾害与环境研究所 山地灾害与地表过程重点实验室, 四川 成都 610041)

摘要: 由于粗粒土的直剪试验存在显著的尺寸效应, 且室内常规直剪仪无法调整试样尺寸, 所以难以准确获得粗粒土的抗剪强度参数。基于此问题, 介绍了一种可以改变试样尺寸的组装机变直剪仪。该直剪仪由出力装置、位移量测装置、反力框架、剪切盒等部分组成。通过改变每一层剪切盒的钢环嵌套个数来改变试样的直径, 直径有 6.18、10、15、20 cm 4 个取值; 改变剪切盒的叠置层数来改变试样的高度, 高度有 5、10、15、20 cm 4 个取值, 试样直径和高度共有 16 种组合。在此基础上, 选取薛城水电站引水隧洞开挖弃渣为试样, 进行 5 组平行直剪试验, 验证了该直剪仪的可重复性以及试验结果的可靠性。改变试样直径 D 与高度 H 的组合, 进行一系列直剪试验研究了该试样直剪试验的尺寸效应, 得出该试样的合理试样尺寸。

关键词: 粗粒土; 尺寸效应; 改进直剪仪

中图分类号: TU 415

文献标识码: A

文章编号: 1000-7598 (2018) 10-3907-08

Development of assembled variable dimension direct shear apparatus

XUE Chen^{1,2,3}, FU Wen-xi^{1,2}, HE Si-ming⁴

(1. State Key Laboratory of Hydraulics and Mountain River Engineering, Sichuan University, Chengdu, Sichuan 610065, China; 2. College of Water Resource & Hydropower, Sichuan University, Chengdu, Sichuan 610065, China; 3. China Railway First Survey Design Institute Group Ltd., Xi'an, Shaanxi 710043, China; 4. Key Laboratory of Mountain Hazards and Earth Surface Process, Institute of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of Sciences, Chengdu, Sichuan 610041, China)

Abstract: Due to the significant size effect in the direct shear test of coarse grained soil, and the incapability of the general indoor direct shear apparatus to adjust the size of the sample, it is difficult to obtain the shear strength parameters of coarse grained soil. Therefore, an assembled direct shear apparatus which can be employed to change the size of the sample is introduced. This direct shear apparatus is composed of an output device, a displacement measuring device, a reaction frame, and a shear box. By changing the number of steel rings nested in each shear box, the diameter of the sample can be set to be 6.18, 10, 15 and 20 cm. By changing layers of shear boxes, the height of the sample can be set to be 5, 10, 15 and 20 cm. The values of diameter and height of the sample can form 16 combinations in total. On this basis, abandoned slags from the diversion tunnel of Xuecheng Hydropower Station were selected as samples, and then 5 groups of parallel direct shear tests were carried out to verify repeatability of the direct shear apparatus and reliability of the test results. By changing the diameter D and height H , a series of direct shear tests was conducted to study the size effect of the sample, and to determine the reasonable size of the sample.

Keywords: coarse grained soil; size effect; modified direct shear apparatus

1 引言

粗粒土分布广, 储量丰富, 具有抗剪强度大、沉陷变形小、透水性强等优良工程特性, 因而在水利水电工程、路基工程以及道路桥梁工程中应用广

泛。其抗剪强度对自然边坡或填充结构(如土坝、路堤、防洪堤等)的稳定性有重要影响, 因而研究粗粒土的抗剪特性很有必要^[1-2]。

用于表征粗粒土抗剪强度的 Mohr-Coulomb (MC) 参数(内摩擦角 φ 和黏聚力 c), 一般需要

收稿日期: 2017-04-28

基金项目: 国家自然科学基金(No. 41472325); 四川省国际合作项目(No. 2018HH0082); 国家重点基础研究发展规划项目(973 计划)(No. 2015CB057903)。This work was supported by the National Natural Science Foundation of China (41472325), the Science and International Cooperation Project of Sichuan Province (2018HH0082) and the National Program on Key Basic Research Project (973 Program) (2015CB057903).

第一作者简介: 薛晨, 男, 1992 年生, 硕士研究生, 主要从事岩石力学与工程方面的研究。E-mail: 492481618@qq.com

通讯作者: 符文熹, 男, 1972 年生, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事岩石力学与工程方面的研究和教学。E-mail: wxf_lee@scu.edu.cn

通过直剪试验和三轴剪切试验确定。与三轴剪切试验相比,直剪试验具有设备简单、操作方便、固结快、传力明确等诸多优点。但粗粒土直剪试验尺寸效应明显,颗粒粒径与剪切盒的相对大小,上下剪切盒间剪切缝宽度等因素对 MC 参数有显著影响。

国内外学者就此问题进行了广泛的研究。文献[3-4]分别对粗粒土直剪试验的尺缩方法和试验中粗粒土颗粒运动特征等问题进行了研究。Orlando 等^[5]研究了砾粒材料在直剪试验中的颗粒尺寸与试验仪器边界条件之间的关系,并将直剪试验结果同三轴试验进行对比分析。Li^[6]、Liu^[7]等利用离散元法对直剪试验进行了模拟,得出了如果直剪仪器尺寸过小对密砂会得出偏高的 MC 参数,而对松砂得到的 MC 参数则会偏低的结论。这些研究主要关注尺寸效应的内在机制,却对减小或消除尺寸效应的直剪仪研制方面的报道较少。由于目前的室内环刀一般不适宜进行粗粒土的直剪试验,一些学者研制了一批中型或大型室内与原位直剪仪器^[8-12]。但目前所研制的直剪仪很少同时具有体积小、重量轻、拆卸组装方便、施加反力大等优点。尤其是无法改变试样和剪切盒的相对大小,难以考虑粗粒土直剪试验的尺寸效应。

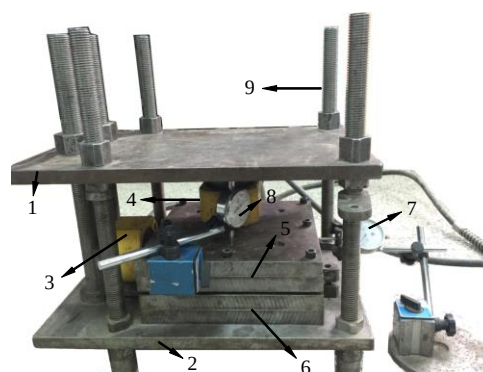
本文研制的组装式变尺寸直剪仪造价低、结构刚度大、拆卸组装简单、野外携带方便。不仅可以完成砂土、卵石、砾石土类粗粒料的剪切试验,而且可以进行软岩的剪切与压缩试验;更重要的是可以改变剪切盒的嵌套叠置组合,实现对试样高度与直径的改变,研究粗粒土的尺寸效应以选择合适的试样尺寸,获得更加准确的 MC 参数。本文在介绍该直剪仪出力装置、位移量测装置、反力框架、剪切盒等构造基础上,选取薛城水电站引水隧洞开挖弃渣为试样,进行了 5 组平行直剪试验,验证了该直剪仪的可重复性以及试验结果的可靠性;然后改变试样的直径 D 与高度 H 的组合,研究该试样直剪试验的尺寸效应,得出该试样的合理尺寸,对其他土样可以采取类似方法确定合理尺寸以获得更加准确的抗剪强度参数。

2 新型直剪仪的研制

2.1 仪器主要构造

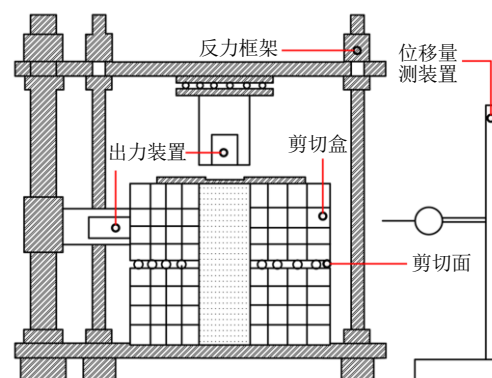
该组装式变尺寸直剪仪由出力装置、位移量测装置、反力框架、剪切盒等部分组成。总体尺寸为长 49 cm、宽 33 cm、高 48 cm。仪器主体部分为 Q235 碳素结构钢加工而成,总重约 150 kg。其总体布置如图 1 所示。该直剪仪已经获得一项发明专利

利^[13],与专利主要介绍仪器的各项参数与功用不同,本文对直剪仪可靠性与试验结果的可重复性进行了详细分析与说明,并着重于粗粒土抗剪强度参数的尺寸效应研究,以便运用此直剪仪更加准确确定粗粒土抗剪强度参数。



1—垂向反力板, 2—放样底板, 3—水平千斤顶, 4—垂向千斤顶, 5—上剪切盒, 6—下剪切盒, 7—水平位移计, 8—垂向位移计, 9—反力钢柱。

(a) 模型整体构造



(b) 模型剖面构造

图 1 组装式变尺寸直剪仪总体布置

Fig.1 General arrangement of assembled variable dimension direct shear apparatus

2.1.1 位移量测装置与出力装置

位移量测装置采用数显仪。出力装置为水平向和垂直向安装的液压千斤顶。利用 MTS185 岩石试验机校核液压千斤顶活塞内部油压的作用面积,根据试样的受剪截面面积与受压截面面积与活塞内部油压作用面积的比例关系,换算出试样所受正应力与剪应力值。

2.1.2 反力框架

反力框架为一板柱框架结构,由两块特制钢板与 6 根螺纹钢筋用螺栓固定而成。下部钢板称为放样底板,试验时用于放置固定下剪切盒。上部钢板为垂直反力板,用于与垂直方向千斤顶结合对试样施加法向压力。用 6 根螺纹钢筋连接两块钢板,其

中 4 根较细, 直径为 2.5 cm, 另外两根较粗, 直径为 3.0 cm。放样底板与反力顶板之间的距离可以通过调整螺母高度进行改变。

2.1.3 剪切盒

剪切盒分为上剪切盒与下剪切盒, 由钢结构内外叠置嵌套而成。通过改变每层剪切盒的钢圈嵌套个数来改变试样直径。单层的剪切盒套件可以嵌套 1~4 个钢环, 最外圈的钢环形状为外方内圆, 方形边长 27 cm, 内径 $r_1=20$ cm; 次外圈钢环的外径 $R_2=20$ cm, 内径 $r_1=15$ cm; 第 3 圈钢环的外径 $R_3=15$ cm, 内径 $r_3=10$ cm; 最内圈钢环的外径 $R_4=10$ cm, 内径为室内直剪试验标准环刀直径 $r=6.18$ cm。故试样

的直径有 6.18、10、15、20 cm 4 个取值。单层剪切盒套件的设计图如图 2 所示。通过改变钢结构叠置的层数来改变试样高度。单层剪切盒套件的高度为 2.5 cm, 可以叠置 1~4 层, 故试样高度 H 有 5、10、15、20 cm 4 个取值。剪切盒叠加设计图如图 3 所示。改变直径和高度, 共有 16 种组合。

上下剪切盒之间平行于剪切方向设有导槽, 内置刚性滚珠保证剪切方向水平。可以通过改变内置钢珠的大小来改变剪切缝宽度, 用以研究剪切缝宽度对粗粒土抗剪强度参数的影响。但本文不涉及此问题的讨论, 将在后续研究中继续进行研究。该剪切盒已经获得一项实用新型专利^[14]。

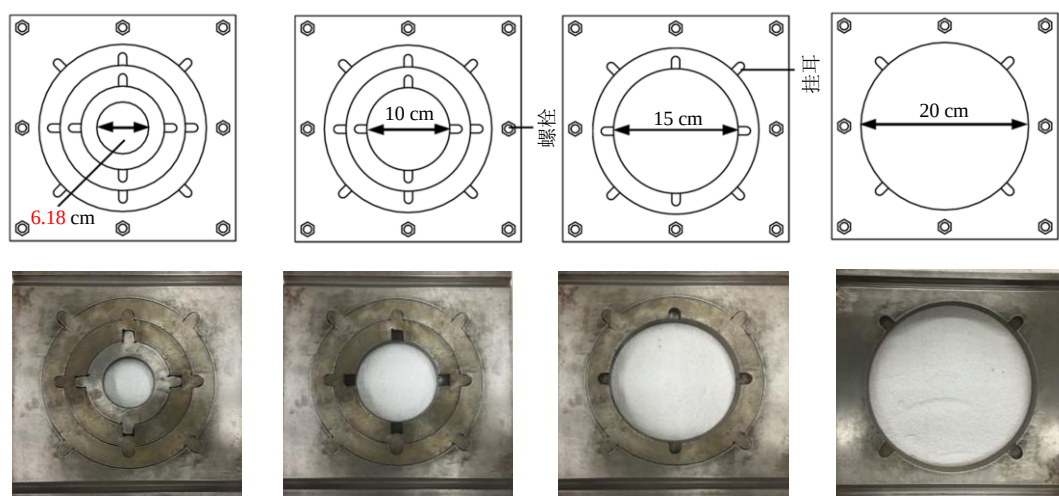


图 2 剪切盒水平嵌套示意图

Fig.2 Schematic diagram of horizontal nesting of shear box

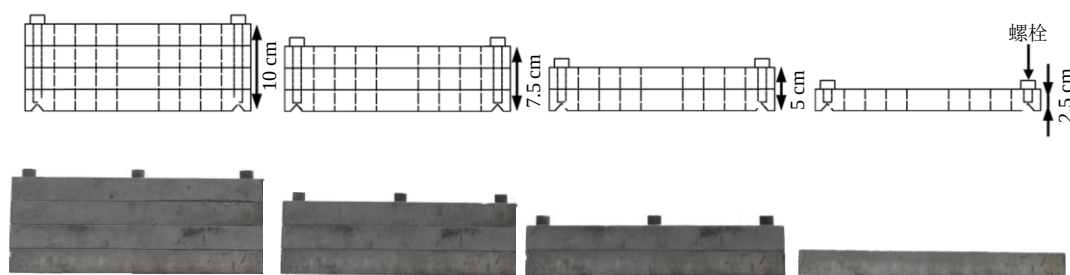


图 3 剪切盒垂直叠置示意图

Fig.3 Schematic diagram of vertical stacking of shear box

2.2 技术参数

组装式变尺寸直剪仪的技术参数如表 1 所示。在工作过程中, 结构部件受力与变形均要满足要求。

计算各部件的应力与变形情况, 并用有限元软件进行验证。结果表明所有部件与连接件的强度安全系数均大于 3.0, 且变形很小。

表 1 组装式变尺寸直剪仪技术参数

Table 1 Technical parameters of assembled variable dimension direct shear apparatus

试样直径 D/cm	试样高度 H/cm	千斤顶最大输出荷载/kN		千斤顶内部油压 作用面积/ cm^2	位移测量	最大颗粒尺寸 $d_{\max}/\text{mm}$	最大剪切位移 /mm	加载方式
		水平	法向					
6.18, 10.00, 15.00, 20.00	5, 10, 15, 20	27	27	45.56	标准刻盘的百分表	5	20	应力控制式

2.3 主要功能

该直剪仪剪切盒尺寸较大, 仪器整体刚度强, 可用于砂土、砾石土等粗粒料和软岩的直接剪切与侧限压缩试验。

由于该直剪仪可改变试样的高度与直径进行直剪试验, 故对某粒径满足要求的粗粒土试样, 通过不同试样尺寸的直剪试验, 可以探究试样尺寸对抗剪强度的影响, 以确定该种土样的合理尺寸来更加准确确定其抗剪强度。

上下剪切盒之间设置剪切缝, 改变上下剪切盒间光滑导槽内的滚珠大小, 可以控制剪切缝宽度。本仪器可控制剪切缝宽度最小为 0.8 mm, 最大宽度为 20 mm。针对不同级配的粗粒土, 进行不同剪切缝宽度的直剪试验, 探究剪切缝宽度对抗剪强度的影响规律, 来确定该种土样的合理剪切缝宽度。

2.4 工作原理

试验时, 首先根据需要研究的试样直径选择内外嵌套的钢环个数, 根据试样高度将同样嵌套方式的一至数层剪切盒叠放并固定。然后进行土样装填, 试样装填需要分层击实, 来确保试样密度的均一性。因为要确保剪切破坏发生在土体内部, 而非层间接合面, 所以装填的层数必须是奇数, 以确保剪切缝被土样完全覆盖。由于该新型直剪仪剪切盒的单层高度为 5.0 cm, 所以可令每次装填的高度为 1.0 cm。为防止装填的土料从开缝处露出, 需要用特制环形泡沫塑料环填充剪切缝, 并在剪切盒内壁涂抹凡士林。试样装填完毕后, 在试样上盖上承压板, 利用垂直向千斤顶施加法向应力。

千斤顶与反力板之间设有光滑导槽, 确保试样受剪时与上剪切盒同步运动。由于剪切面的滚珠排与剪切盒间存在摩擦力, 垂直向千斤顶与反力板导槽也存在摩擦力, 仪器部件间的这两个摩擦力可以在剪切盒不装样时测得。作用在试样上的真实剪切力是水平向千斤顶推力减去这两个摩擦力。

法向应力施加完毕后, 安装水平位移量测装置 (无侧限压缩试验时为垂直位移量测装置), 保持法向应力不变, 启动水平向千斤顶施加剪应力 τ 。水平剪切荷载采用分级施加, 每级的荷载增量控制在法向荷载的 5%~10%, 同时, 每级荷载在 20 s 内施加完毕。在剪切过程中, 当剪应力荷载达到峰值后, 剪切位移曲线中出现明显的水平段或者当剪切位移达到试样直径的 10% 时, 可以认为土样被剪坏。此时的剪应力大小作为土样在给定的法向压力下的抗剪强度值。改变法向应力, 得到相应的抗剪强度。绘制抗剪强度与法向应力的关系曲线, 得到试样抗

剪强度 MC 参数 φ 和 c 。

3 试验验证

3.1 土样准备

本文选用了薛城水电站引水隧洞开挖弃渣来验证该仪器的可重复性以及试验结果的可靠性, 并以此来研究粗颗粒土抗剪强度的尺寸效应。该粗粒土主要岩性为千枚岩, 颗粒多呈角砾状, 磨圆度较差。其天然密度为 1.96 g/cm^3 , 天然含水率为 2.22%。其粒径分布曲线如图 4 所示。其特征尺寸及参数为: $d_{10}=0.35 \text{ mm}$, $d_{30}=0.8 \text{ mm}$, $d_{60}=5.0 \text{ mm}$, $C_u=14.29$, $C_c=0.37$, 其中 d_{10} 、 d_{30} 、 d_{60} 分别代表粒径分布曲线上纵坐标为 10%、30%、60% 时所对应的土粒粒径, C_c 、 C_u 分别代表土样的不均匀系数和曲率系数。

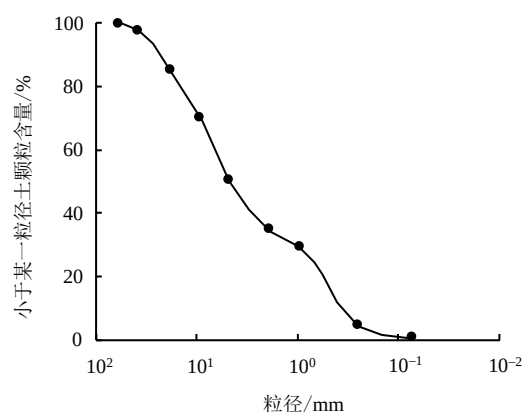


图 4 薛城水电站引水隧洞弃渣粒径分布曲线

Fig.4 Particle size distribution curve of abandoned slags in the diversion tunnel of Xuecheng Hydropower Station

3.2 再现性与可靠性验证

本文选用了 5 组粗颗粒土的平行直剪试验来检验该直剪仪的再现性和结果的可靠性。这 5 组试验均是在试样直径 $D=20 \text{ cm}$, 试样高度 $H=10 \text{ cm}$, 上下剪切盒缝宽 $T=10 \text{ mm}$ 的条件下进行的。5 组平行直剪试验的剪切位移曲线如图 5 所示, 抗剪强度及 MC 参数如表 2 所示。

从图 5 和表 2 中的数据可以看出, 5 组剪切试验的剪切位移曲线具有良好的一致性。在同级正应力下, 试样的抗剪强度也十分接近, 5 组直剪试验所获得的试样的 MC 参数也差异很小。试验结果表明, 直剪仪具有良好的再现性, 试验结果可靠性较高。

3.3 尺寸效应研究

本文主要研究试样直径与高度对其抗剪强度与 MC 参数的影响, 剪切缝宽度不变, 根据《土工试验规程》^[15] 中建议, 选取土颗粒最大粒径 10 mm 作

为剪切缝宽度。所选土样中的粗颗粒部分粒径范围是 5~10 mm，对于其他粒径范围的土样可以用类

似的方法来进行探究，以获得合理的试样尺寸消除粗粒土抗剪强度的尺寸效应。

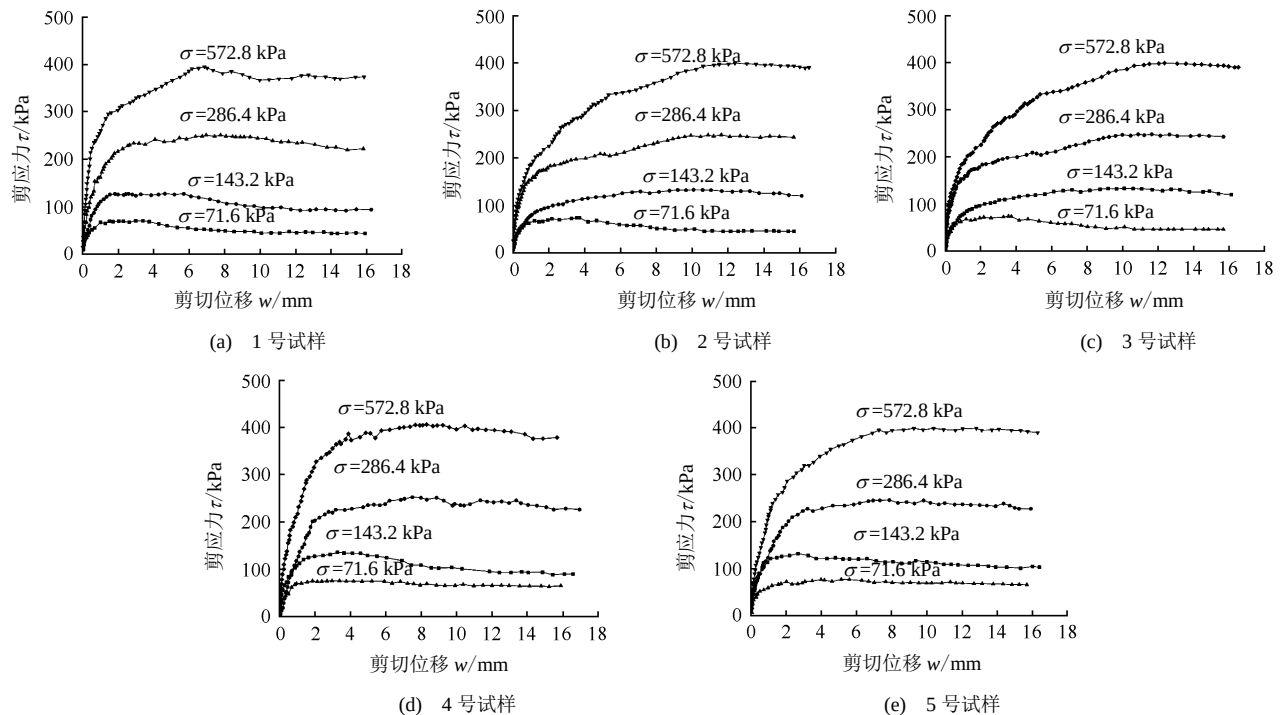


图 5 $D=20$ cm, $H=10$ cm, $T=5$ mm 时试样的水平位移-剪应力关系图

Fig.5 Relationships between shear stress and shear displacement of samples for $D=20$ cm, $H=10$ cm, $T=5$ mm

表 2 平行直剪试验结果

Table 2 Results of direct shear tests performed in parallelism

试验条件	编号	不同法向应力 σ (kPa) 时的抗剪强度 τ /kPa				MC 参数	
		71.6	143.2	286.4	572.8	$\varphi /(^{\circ})$	c /kPa
$D=20$ cm $H=10$ cm $T=10$ mm	1	71.03	127.67	251.01	395.38	32.76	38.53
	2	74.83	133.29	248.32	399.68	32.70	41.64
	3	76.47	132.99	250.92	400.06	32.67	42.95
	4	75.33	135.46	252.68	405.59	33.12	42.13
	5	78.22	132.88	246.46	398.83	32.45	43.36
平均值		76.18	132.46	249.88	399.91	32.75	41.72

3.3.1 试样直径的影响

选取试样高度 $H=10$ cm，上下剪切盒之间的缝宽 $T=10$ mm。试样直径 D 取值分别为 6.18、10、15、20 cm，试验数据见表 3。

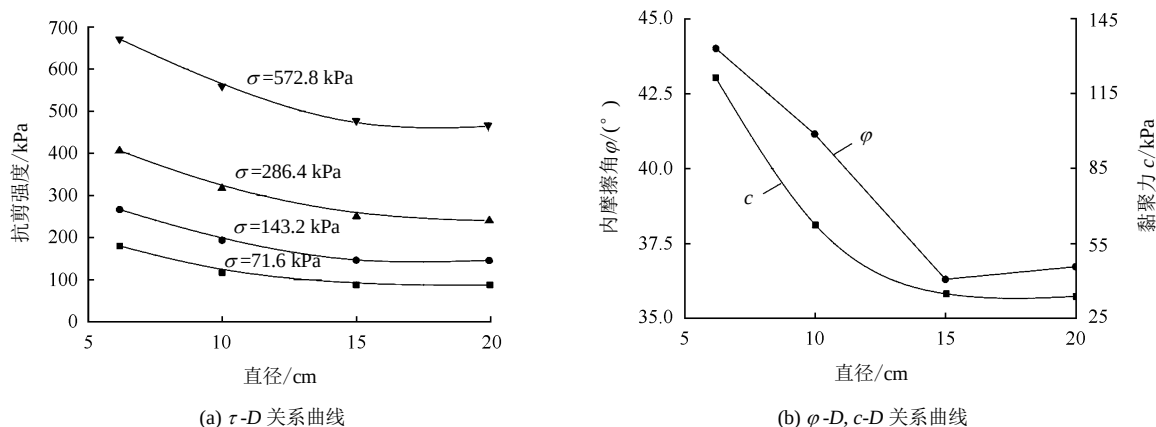
根据表 3 中的试验数据，得到土样抗剪强度 τ 、

内摩擦角 φ 以及黏聚力 c 与试样直径 D 之间的关系曲线，如图 6 所示。从图 6(a)中可以看出，在各法向压力下，随着试样直径的不断增大，试样的抗剪强度逐渐减小，最后趋于稳定。MC 参数也有类似的变化关系，如图 6(b)所示。通过对变试样直径直

表 3 不同试样直径下的试验结果 ($H=10$ cm, $T=10$ mm)

Table 3 Results of direct shear tests with different diameters ($H=10$ cm, $T=10$ mm)

直径 D /mm	不同法向应力 σ (kPa) 时的抗剪强度 τ /kPa				MC 参数	
	71.6	143.2	286.4	572.8	$\varphi /(^{\circ})$	c /kPa
20.00	86.68	146.58	240.83	463.91	36.75	34.03
15.00	88.36	136.13	250.67	454.31	36.30	35.11
10.00	116.80	194.85	316.58	560.04	41.12	62.66
6.18	180.55	266.87	406.49	670.75	44.01	121.76

图6 抗剪强度 τ 及MC参数 ϕ 和 c 随试样直径 D 的变化关系Fig.6 Variation of the shear resistant stress τ and the MC parameters ϕ and c with the diameter D

剪试验的结果进行分析可以看出,当试样直径 D 超过15 cm时,试样的抗剪强度以及MC参数均趋于稳定。所选土样的合理试样直径 D 应不低于15 cm。

3.3.2 试样高度的影响

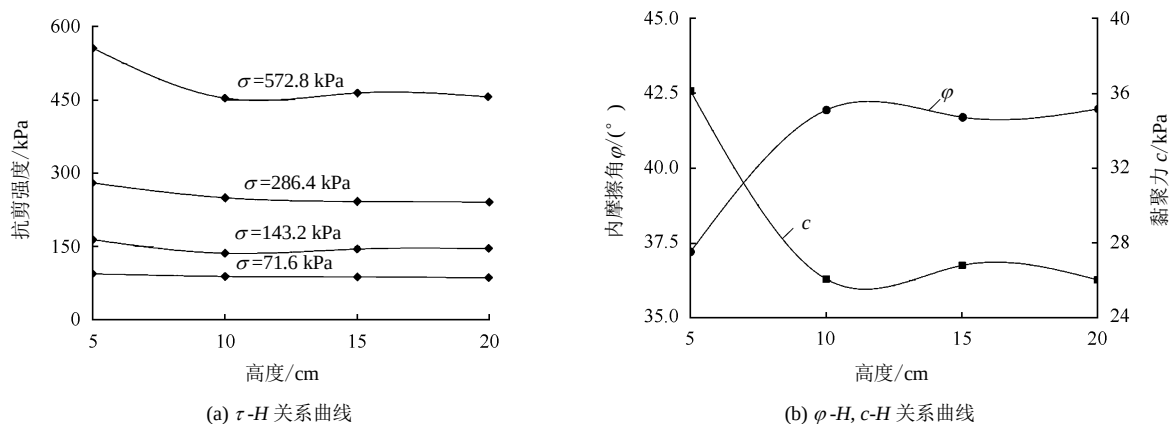
在变试样高度直剪试验中,试样直径 $D=15$ cm,上下剪切盒之间的缝宽 $T=10$ mm,试样高度 H 取值分别为5、10、15、20 cm。试验数据如表4所示。

根据表4中的试验数据,得到土样抗剪强度 τ 、

内摩擦角 ϕ 以及黏聚力 c 与试样高度 H 之间的关系曲线,如图7所示。从图7(a)中可以看出,在各法向压力下,随着试样高度的不断增大,试样的抗剪强度逐渐减小,最后趋于稳定。MC参数也有类似的变化关系,如图7(b)所示。通过对试样直剪试验的结果进行分析可以看出,当试样高度 H 超过10 cm时,试样的抗剪强度以及MC参数均趋于稳定。所选土样的合理试样高度不应低于10 cm。

表4 不同试样高度下的试验结果($D=15$ cm, $T=10$ mm)Table 4 Results of direct shear tests with different heights ($D=15$ cm, $T=10$ mm)

高度 D /mm	不同法向应力 σ (kPa)时的抗剪强度 τ /kPa				MC 参数	
	71.6	143.2	286.4	572.8	ϕ /(°)	c /kPa
20	85.55	145.34	241.19	456.24	36.26	35.16
15	88.93	144.50	243.19	464.56	36.76	34.72
10	88.36	136.13	250.67	454.31	36.30	35.11
5	94.51	164.53	280.55	557.31	42.57	27.56

图7 抗剪强度 τ 及MC参数 ϕ 和 c 随试样高度 H 的变化关系Fig.7 Variation of the shear resistant stress τ and the MC parameters ϕ and c of waste residue with height H

实际上粗粒土是由大小不一的颗粒组成的,特别是无黏性的砂砾石、砂卵石、石渣、堆石的颗粒。

虽然单个颗粒的强度很高,但是粗粒土体的抗剪强度不只是决定于单个颗粒的强度,而是颗粒之间的

摩擦力、咬合力以及少量的黏聚力。在剪切破坏过程中,并不是剪破每个颗粒,而是使颗粒间发生相对位移,即颗粒间发生滑动和翻滚,在剪切面附近形成一个剪切带。粗粒土颗粒粒径较大,装在刚性盒中,颗粒在剪切过程中发生的滑动和滚动,必然因受到刚性盒的约束和限制,造成抗剪强度测量值失真。

要避免这种约束作用,一方面要求颗粒粒径与刚性剪切盒尺寸之间有合理的比例关系,另一方面上下剪切盒之间应有合理的开缝尺度,以保证颗粒在剪切过程中不受刚性盒的限制而能较自由地运动。这样一来,就有必要研究不同试验仪器尺寸及剪切缝开度对粗粒土抗剪强度的影响,即尺寸效应与剪切缝开度效应,以便确定相应合理的试样尺寸与剪切缝开度。

4 结 论

(1) 本文研制的组装式变尺寸直剪仪由钢结构相互嵌套叠置组装而成,该直剪仪可以进行砂土、砾石土等粗粒料和软岩的直接剪切与侧限压缩试验。直剪试样的高度、直径和上下剪切盒间的剪切缝宽度均可改变。运用该直剪仪进行直剪试验,可以定量研究试样直径、高度等因素对粗颗粒土抗剪强度的影响,确定合理的试样尺寸,得到更加准确的试样抗剪强度与 MC 参数。

(2) 5 组平行直剪试验结果的一致性较好,表明直剪仪具有良好的再现性,试验结果可靠性较高。尺寸效应试验反映了试样直径大小和高度对抗剪强度参数的影响,其中变试样直径($H=10\text{ cm}$, $T=10\text{ mm}$)试验表明试样合理直径 D 应不低于 15 cm 。变试样高度试验($D=15\text{ cm}$, $T=10\text{ mm}$)表明试样合理高度 H 应不低于 10 cm 。为了确定粗颗粒土的真实抗剪强度,按照直剪试验的方法,应当消除其尺寸效应,以保证测试结果的正确性和合理性。

(3) 本文在研究粗颗粒土的尺寸效应时,仅仅选用了 $5\sim 10\text{ mm}$ 粒径的土样来进行试验,因而仅评估出了 $5\sim 10\text{ mm}$ 所选土样的最佳试样尺寸。同时,由于本文所用组装式变尺寸直剪仪仅适用于最大粒径小于 20 mm 的粗颗粒土的直剪试验,因而对于其他尺寸的粗颗粒土,可以通过改变剪切盒的高度及直径,用类似的方法来测量粗粒土抗剪强度的尺寸效应。

参 考 文 献

[1] 李哲,王芝银,谢永利. 粗粒土类别的分形图解[J]. 长

安大学学报(自然科学版), 2004, 24(6): 15—19.

LI Zhe, WANG Zhi-yin, XIE Yong-li. Fractal graphic of sands categories[J]. **Journal of Chang'an University (Natural Sciences)**, 2004, 24(6): 15—19.

[2] 程展林,丁红顺,吴良平. 粗粒土试验研究[J]. 岩土工程学报, 2007, 29(8): 1151—1158.

CHENG Zhan-lin, DING Hong-shun, WU Liang-ping. Experimental study on mechanical behaviour of granular material[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2007, 29(8): 1151—1158.

[3] 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 Hou-yang, ZHU Jun-gao, YU Ting, et al. The status quo and trend of research on scale effect of coarse aggregate[J]. **Journal of Hohai University (Natural Sciences)**, 2009, 37(4): 425—429.

[4] 周海娟,马刚,袁葳,等. 堆石颗粒压缩破碎强度的尺寸效应[J]. 岩土力学, 2017, 38(8): 2425—2433.

ZHOU Hai-juan, MA Gang, YUAN Wei, et al. Size effect on the crushing strengths of rock particles[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2017, 38(8): 2425—2433.

[5] ORLANDO A D, SHEN H H. Effect of particle size and boundary conditions on the shear stress in an annular shear cell[J]. **Granular Matter**, 2012, 14(3): 423—431.

[6] LI Y R, AYDIN A. Behavior of rounded granular materials in direct shear: Mechanisms and quantification of fluctuations[J]. **Engineering Geology**, 2010, 115(1—2): 96—104.

[7] LIU S H. Simulating a direct shear box test by DEM[J]. **Canadian Geotechnical Journal**, 2011, 43(2): 155—168.

[8] 王家全,周岳富,唐咸远,等. 可视大模型加筋土直剪数采仪的研发与应用[J]. 岩土力学, 2017, 38(5): 1533—1540.

WANG Jia-quan, ZHOU Yue-fu, TANG Xian-yuan, et al. Development and application of large size direct shear test apparatus with visual and digital collection functions for reinforced soil[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2017, 38(5): 1533—1540.

[9] 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.

ZHANG Ga, ZHANG Jian-min. Development and application of cyclic shear apparatus for soil-structure interface[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2003, 25(2): 149—153.

[10] 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.

- XU Jin, LIU Jian-feng, GAO Chun-yu, et al. Development of new testing apparatus on direct shear test for coarse-grained soils[J]. **Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition)**, 2008, 40(4): 12—16.
- [11] 蔡正银, 茅加峰, 傅华, 等. NHRI-4000 型高性能大接触面直剪仪的研制[J]. **岩土工程学报**, 2010, 28(9): 1319—1322.
- CAI Zheng-yin, MAO Jia-feng, FU Hua, et al. Development of NHRI-4000 high performance with large contact surface direct shear apparatus[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2010, 28(9): 1319—1322.
- [12] JIANG Y, XIAO J, TANABASHI Y, et al. Development of an automated servo-controlled direct shear apparatus applying a constant normal stiffness condition[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, 2004, 41(2): 275—286.
- [13] 符文熹, 郑星. 组装式变尺寸直剪压缩仪: 中国, 102435510[P]. 2013-06-12.
- FU Wen-xi, ZHENG Xing. A superimposition-nest type of direct shear and compression testing apparatus capable of the variation of size: China, 102435510[P]. 2013-06-12.
- [14] 郑星, 符文熹. 组装式变尺寸双面剪切仪: 中国, 102494958[P]. 2012-08-15.
- ZHENG Xing, FU Wen-xi. A superimposition-nest type of double-plane shearing testing apparatus capable of the variation of size: China, 102494958[P]. 2012-08-15.
- [15] 南京水利科学院. SL237—1999 土工试验规程[S]. 北京: 中国水利水电出版社, 1999.
- Nanjing Hydraulic Research Institute. SL237—1999 Specification of soil test[S]. Beijing: China Water and Power Press, 1999.

(接第 3890 页)

《岩土力学》2018 年第 2 期被 EI 收录论文 (45 篇, 收录率 100%)

序号	论文题名	作者	页码
18	盐溶液饱和黏土的力学行为模拟	颜荣涛, 纪文栋, 陈星欣, 等	546—552
19	不同因素对排水沟渠水平冻胀力的影响	田亚护, 胡康琼, 邵博文, 等	553—560
20	多年冻土活动层浅层包气带水-汽-热耦合运移规律	张明礼, 温 智, 董建华, 等	561—570
21	膨胀土初始破损与湿干交替耦合作用下的力学行为	毛 新, 汪时机, 程明书, 等	571—579
22	低幅应变条件下粉质黏土泊松比的非线性特征	陈树峰, 孔令伟, 黎澄生	580—588
23	相对湿度作用下的石膏矿护顶层突变破坏机制分析	夏开宗, 陈从新, 宋许根, 等	589—597
24	土-水特征曲线滞后阻塞模型	黎澄生, 孔令伟, 柏 巍, 等	598—604
25	水位升降条件下牵引式滑坡离心模型试验	苗发盛, 吴益平, 谢媛华, 等	605—613
26	高低压下不同力学特性的砂土统一模型	陆 勇, 周国庆, 顾欢达	614—620
27	深部三维圆形洞室岩爆过程的模拟试验	司雪峰, 宫凤强, 罗 勇, 等	621—634
28	基于不同方向模量损失率的含瓦斯煤各向异性渗透模型	亓宪寅, 李家卓, 王 威	635—643
29	三轴压缩下含夹层盐岩破坏机制	马旭强, 施锡林, 尹洪武, 等	644—650
30	基于 3 个不等粒径颗粒接触模型的土-水特征曲线	刘星志, 刘小文, 陈 铭, 等	651—656
31	多孔含水岩层的相似材料配比研究	刘金辉, 李文泉, 刘宇森, 等	657—664
32	白鹤滩水电站左岸坝肩开挖边坡稳定性分析	李 韬, 徐奴文, 戴 峰, 等	665—674
33	考虑滑坡渐进破坏的改进简布条分法	王 振, 叶晓明, 刘永新	675—682
34	平面 P 波入射下浅埋平行双洞隧道注浆加固减震机制	王帅帅, 高 波, 范凯祥, 等	683—690
35	工作面长度对覆岩空间结构演化及大采高采场矿压规律的影响	刘 畅, 刘正和, 张俊文, 等	691—698
36	土坡体系可靠度分析方法及在高土石坝工程中的应用	吴震宇, 陈建康	699—704
37	基于巨厚岩层-煤柱协同变形的煤柱稳定性	张 明, 姜福兴, 李家卓, 等	705—714
38	空心包体应变计地应力分量计算方法及应用	闫振雄, 郭奇峰, 王培涛	715—721
39	局部冲刷对风机支撑系统承载性能的影响	刘红军, 杨 奇	722—727
40	岩体裂隙模拟的扩展有限元法应用研究	罗先启, 郑安兴	728—734
41	低温裂隙岩体水-热耦合模型研究及数值分析	黄诗冰, 刘泉声, 程爱平, 等	735—744
42	基于广义塑性理论的尾砂本构模型在 ABAQUS 中的二次开发	崔 旋, 董威信, 周汉民, 等	745—752
43	软黏土中地下结构浮力测试试验与分析	宋林辉, 王宇豪, 付 磊, 等	753—758
44	模型相似材料内部应变光纤量测应变传递	孙阳阳, 王 源, 张清华, 等	759—764
45	基于 EMS 微震参数的岩爆预警方法及探讨	马春驰, 李天斌, 张 航, 等	765—774