

散粒体材料间接接触面力学特性的单剪试验研究

张丙印, 付 建, 李全明

(清华大学 水利水电工程系 岩土工程研究所, 北京 100084)

摘 要: 在清华大学土与结构接触面循环加载剪切试验机的基础上, 研制了可进行两种散粒体间接接触面试验的叠环式单剪试验系统, 并对糯扎渡高心墙堆石坝坝料的接触特性进行了系统的试验研究。结果表明, 两种散粒体材料间接接触面的强度包线为其单相材料强度下的包线。当达到破坏强度后, 在接触界面附近会产生集中的“刚塑性”接触面剪切变形, 其位置发生在强度最薄弱处。两种散粒体间的接触变形特性可通过刚塑性模型来描述。

关 键 词: 散粒体; 接触面; 单剪试验; 刚塑性模型

中图分类号: TU45

文献标识码: A

Experimental study on mechanical behavior of interface between two granular materials

ZHANG Bing-yin, FU Jian, LI Quan-ming

(Department of Hydraulic Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: On the basis of the cyclic shear apparatus for soil-structure interface in Tsinghua University, a laminar-ring simple shear apparatus for the study of the mechanical behavior of interface between granular materials is developed. A series of experiments are conducted with the embankment materials used in Nuozhadu high earth core dam. It is confirmed that the shear strength envelope of the interface is the lower shear strength envelope of the two granular materials. When the failure strength is reached, concentrated rigid plastic shear deformation takes place in an area near the interface with the lowest strength. The rigid-plastic model can be used to simulate the deformation behavior of the interface between two granular materials.

Key words: granular material; interface; simple shear test; rigid-plastic model

1 前 言

在土工建筑物中经常会遇到不同材料的交界面, 即不同材料的接触界面。由于接触界面两侧材料特性的差异, 在界面两侧常存在较大的剪应力并发生位移不连续现象, 从而导致较为复杂的应力和变形状态, 如在心墙堆石坝中存在着心墙土料-反滤料以及坝体土石料-基岩等多种类型的接触界面。这些接触界面的存在, 对坝体和心墙相关部位应力和变形的性状有较大影响。由于这些部位通常又是坝体易发生事故的薄弱环节, 使得合理地描述这些接触面的力学特性成为近年得到广泛关注的热点研究课题。

目前国内外学者对接触面问题的研究多集中在对一侧为散粒体另一侧为非散粒体的接触特性之上^[1~4], 而对另一类常见的土体接触问题, 亦即

对两种散粒体间接接触特性的研究却相对较少。陈愈炯^[5]通过三轴试验, 研究了土体之间接触面的抗剪强度。刘开明^[6]通过大型直剪试验, 研究了两种散粒体接触面的力学特性。上述研究均是在指定了破坏面发生位置的条件下进行的。但是对两种散粒体的接触问题, 破坏面发生的位置是首先需要研究和探讨的问题。

笔者在清华大学岩土工程研究所研制的大型接触面循环加载剪切试验机 (TH-20 t CSSASSI) 的基础上, 设计和研制了可进行两种散粒体间接接触面试验的叠环式单剪试验系统, 并对糯扎渡高心墙堆石坝心墙混合土料-反滤料以及心墙砾石土料-反滤料的接触特性进行了系统地研究。

2 试验设备

清华大学 TH-20t CSASSI 试验机的设备原理见

图 1。该设备可提供较大的接触面试验尺寸，施加较大的荷载和相对位移。为了模拟和观测法向应力-应变关系及其与切向应力-应变关系的耦合，该设备可提供常压力和常刚度等类型的法向边界条件^[3]。

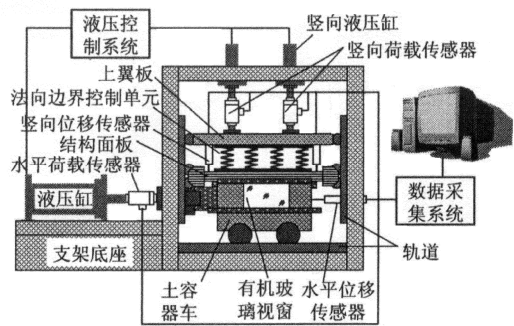


图 1 TH-20 t CSASSI 系统原理图^[3]
Fig. 1 Schematic view of TH-20t CSASSI

为了进行两种散粒体的接触面试验，在上述试验机的基础上开发研制了叠环式单剪试验系统。图 2 为该系统的工作原理图，其主要组成部分包括：加压活塞、上盒方形铁环框、中间加有滚针的叠环系统、下盒土车以及水平位移传感器阵列等。其核心部分为设置在两种散粒体交界面上部和下部的滚针叠环系统。该系统共由叠在一起的 9 片厚 5 mm 的钢环组成，为了减少环间的摩擦力，在每个环两端的上下两面均开有浅槽，槽内放置直径为 3 mm 的滚针轴承。试验时法向力由加压活塞直接加在试样上，滚针叠环系统在法向基本不受力，加之环间设置的滚针轴承，环间摩擦力很小，滚针叠环系统只对试样土体的横向变形有约束作用，切向位移可在每一个环间自由发生。在试验过程中，当对试样施加切向应力时试样可在每一个环间发生剪切变形，产生剪切面的具体位置由上下两种材料的特性及其接触面的性质决定。因而，采用上述的滚针叠环系统不必人为限定剪切面的位置，可较好地模拟两种散粒体材料的接触特性。水平位移传感器阵列由多个位移传感器组成，量测试验过程中每一个钢环的切向位移，数据由计算机自动采集。单剪系统的主要性能指标如表 1 所示。

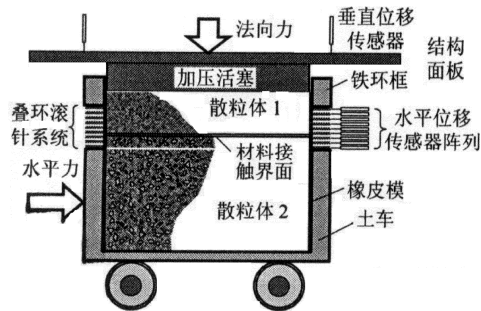


图 2 单剪土盒示意图
Fig. 2 Schematic view of simple shear box

表 1 单剪系统的主要性能指标

Table 1 Parameters of the simple shear system					
接触面尺寸 / cm		荷载 / kN		最大位移 / cm	
长	宽	切向	法向	切向	法向
25	25	200	200	10	5

3 试验概况

使用研制的叠环式单剪试验系统，对糯扎渡高心墙堆石坝心墙混合土料-反滤料以及心墙砾石土料-反滤料的接触特性进行了系统地研究。

所用土石料采用糯扎渡心墙堆石坝的设计用料。主要包括(1) 心墙混合土料:为土料场开采的坡、残积层土料及部分强风化砂泥岩混合料;(2) 心墙砾石土料: 由混合土料和碎石料按 65:35 的比例混合而成，所掺入的碎石料采用人工破碎的花岗岩碎石料，其级配如表 2 示;(3) 反滤料: 采用人工破碎的花岗岩碎石料，其级配如表 2 示。各种坝料的物性指标如表 3 示。

表 2 掺砾用碎石料和反滤料级配
Table 2 Grain size distribution of the gravel and filter material (%)

土料		颗粒直径/ mm						
		120	80	60	40	20	10	5
掺砾	原始	100	78	66	56	42	22	24
碎石	试验				100	75	48	29
反滤料						100	82	67

表 3 土料物性及制样指标
Table 3 Physical properties of soil samples

土料	比重	塑限 /%	液限 /%	最大干密度 $\rho_{dmax} / g \cdot cm^{-3}$	最优含水量 $\omega_{op} / \%$
混合土料	2.71	32.6	19.2	1.77	16.0
砾石土料				1.89	13.8

对两种心墙土料，制样干密度 $\rho_d=0.99\rho_{dmax}$ ，制样含水量 $\omega=\omega_{op}+1\%$ 。试样分 9 层击实，每层单独称重，层间刨毛。对掺砾石土料，由于试样的直径较小，需对掺入碎石料的粒径进行缩尺。试验中采用了等量替换的方法，掺入碎石料的最大粒径为 40 mm，其试验用级配见表 2。反滤料采用表 2 的原始级配进行试验，制样干密度 $\rho_d=1.94 g/cm^3$ 。

主要进行了心墙混合土料-反滤料以及心墙砾石土料-反滤料两组不同坝料组合的接触面试验，每组分别包含有 6 个法向正应力点，如表 4 所示。为了对比分析，还分别对混合土料和反滤料单种坝料进行了 6 个和 3 个法向正应力点的单剪试验(表 4)。所有的试验均采用非饱和慢剪的方式进行，所采用的切向剪切速率为 0.5 mm/min。

表 4 试验方案总表

Table 4 Summary of the test cases

土石料	接触界面正应力 / kPa
混合土料-反滤料	100, 300, 600, 900, 1500, 2 500 每组 6 点
砾石土料-反滤料	
混合土料	300, 600, 900, 1500, 2 500
反滤料	100, 300, 600

4 试验成果及其分析

试验结果表明,由心墙混合土料-反滤料和心墙砾石土料-反滤料两组试验得到的规律基本相同,以下仅对第一组试验的成果进行分析。

4.1 接触面强度特性

由于在实际工程中土体往往沿着土的接触面发生滑动,因而人们通常将土体的接触界面作为软弱面来考虑,并将土的抗剪强度指标降低后使用于接触面上。如在工程实践中,对于砂土-粘土接触面常取粘土内摩擦角的全部和粘聚力的一半作为接触面的抗剪强度指标。但上述惯用方法既无理论根据,也并未得到试验成果的论证^[5]。

从原理上讲破坏面发生的位置应由强度和变形两方面的条件共同决定,从强度方面讲破坏面应总是沿着阻抗最小的面发生。对于土体和结构物接触面的强度问题已有学者进行了大量和深入地论证,典型的工作如胡黎明等提出的接触面临界相对粗糙度的概念等^[4]。而对于两种散粒体间的接触面问题则相对较为复杂。此时的接触面不能再简单认为是两者之间无厚度的材料分界面。在材料组成上,通常会由于两者之间的嵌入咬合,形成一个材料组成上的过渡带。所以在两种散粒材料的交界面附近可认为实际上存在有三种材料。在力学响应方面,同样也可将两种散粒体间的接触面看作是上述三种材料间相互作用的结果,亦即交界面附近两种散粒体材料及其过渡带相互作用的结果共同决定了散粒体材料间接触面的力学性质。对于接触面的强度问题也是如此,此时破坏面可能发生的位置有 3 处:两种散粒材料内部或者是在过渡带上。从上述分析可见,由于将破坏剪切面固定,因而使用直剪试验进行两种散粒材料接触面问题的研究是不合适的。

陈愈炯等^[5]事先假定剪切面的位置,使用在剪切面两侧分别为粘性土和粗粒土的试样,用三轴试验研究了两种散粒体间接触面的强度问题。试验结果证实,剪切面发生在相对较弱的粘土侧。但该法仍需事先假定剪切面的位置。

图 3 和图 4 为混合土料-反滤料两种料组合试

样、单种混合土料以及单种反滤料大型单剪试验的试验结果。图 3 示出了混合土料-反滤料试验,当试样发生剪切破坏时,各叠环的位置及所发生的环间相对位移的分布。显然,发生较大环间相对位移的部位即为发生剪切破坏的部位。从试验结果可见,对混合土料-反滤料试样,发生剪切破坏的位置并不固定,而是随着法向应力的增加由下部逐渐向上部移动。当法向应力较小时,破坏面发生在试样下部的反滤料中。随着法向应力的增高,破坏面的位置逐渐上移。在法向应力较高时,破坏面发生在试样上部的混合土料中。

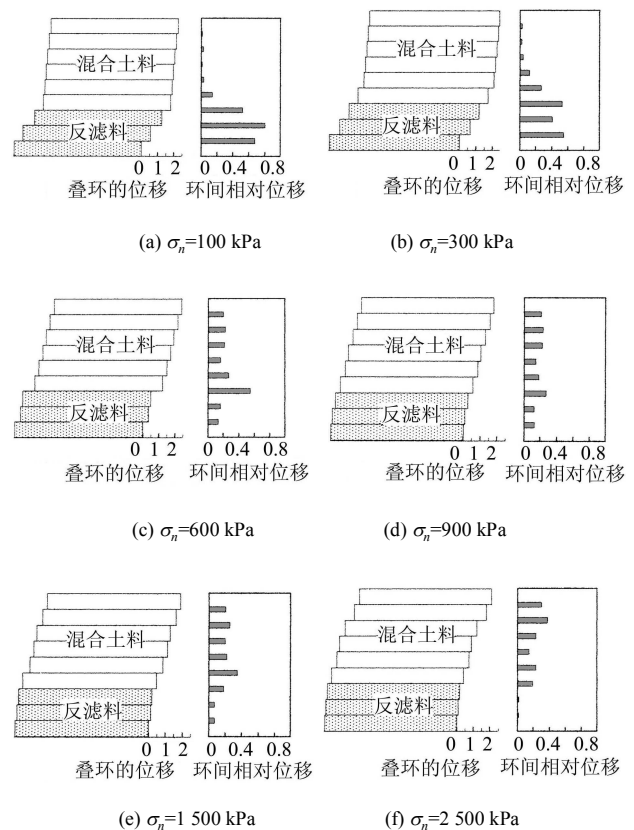


图 3 混合土料-反滤料试验结果 (单位: cm)
Fig. 3 Test results of composite soil-filter material (unit: cm)

上述破坏面的发生位置随法向应力的的大小逐步上移的现象,实质上是由反滤料-过渡带-混合土料复合体系各部强度特性相互作用结果所决定的。

图 4 给出了混合土料-反滤料组合试样、单种混合土料以及单种反滤料由大型单剪试验所得到的强度包线。从图中可以看出,反滤料的摩擦角相对较大,而混合土料的粘聚力的数值较高。因此当法向应力较小时,在反滤料-过渡带-混合土料复合体系中,反滤料区域为薄弱区,是破坏面发生的区域;而当法向应力较大时,混合土料区域为薄弱区,

是破坏面发生的区域。上述的结果表明, 两种散粒体材料间接触面的强度包线为其单相材料强度的下包线。

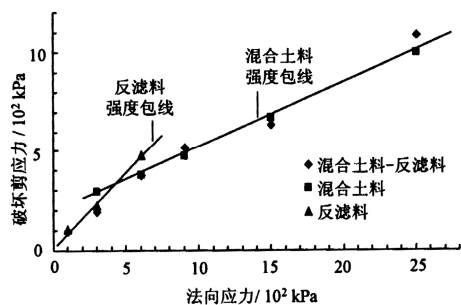


图 4 混合土料-反滤料接触面强度

Fig. 4 Strength of the composite soil-filter material interface

4.2 切向变形特性

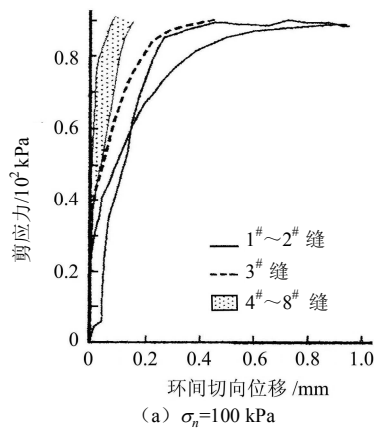
从图 3 可以看出, 与固定剪切面的直剪型接触面试验不同, 对于采用滚针叠环装置后的单剪型接触面试验, 由于具有多个可发生剪切变形的剪切面, 因此, 剪切变形并不集中发生在某一个特定的剪切面上。在所有可发生剪切变形的剪切面上(叠环的交界面上), 由于在试验过程的某一时刻均受到相同的剪应力, 因而均发生了一定量的剪切变形, 变形的大小取决于该面上应力和变形的条件及该处材料的特性。

试验结果表明, 在两种材料的交界面附近剪切变形并不是均匀分布或呈连续变化的, 而是存在有剪切变形相对集中的剪切带或剪切面, 亦即在两种材料的交界面附近, 当剪切应力达到接触面的抗剪强度时, 会发生相对集中的剪切变形并导致位移不连续的现象。因此在交界面处设置接触面单元以模拟这种位移不连续现象是必要的。

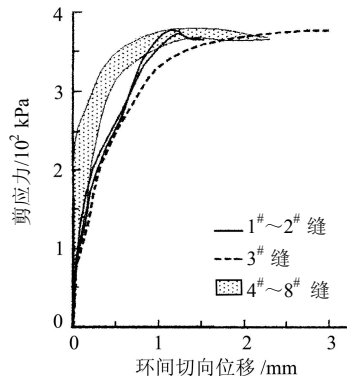
为了进一步分析环间位移的规律, 图 5 给出了混合土料-反滤料试验在典型正应力作用下环间切向位移随切向剪切应力变化的过程曲线, 可以看出总体上环间切向变形的发生可分为 2 个阶段:

(1) 破坏前阶段。此阶段对于各个环间缝, 剪应力均未达到破坏强度, 环间所产生的切向位移由土体试样的剪切变形在环间分配得到, 其大小同各个环间缝处试样的刚度相关。从图 5 所示的试验结果可见, 当法向应力较小时反滤料刚度相对混合土料较小, 使得位于反滤料处的 1[#]和 2[#]环间缝的切线变形较大。随着法向应力的增加, 反滤料刚度相对增加并最终超过混合土料, 1[#]和 2[#]环间缝的切线变形也逐渐变得小于其它缝的变形。需说明的是, 在

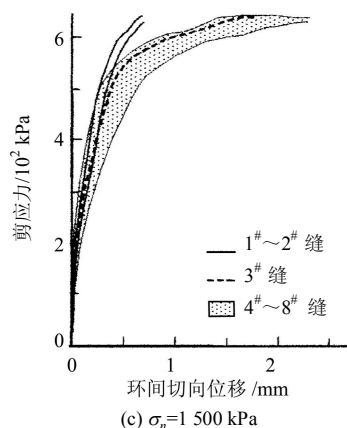
破坏以前的阶段, 环间缝的切线变形也同环间缝的数目有关, 增加环间缝的数目将使每个环间缝所分得的切向变形变小。因此该部分位移同接触面的变形特性无关, 在计算中该部分变形可由普通土体单元的变形得到。如果土体的变形只处于该阶段, 则不需要设置接触单元。



(a) $\sigma_n=100$ kPa



(b) $\sigma_n=600$ kPa



(c) $\sigma_n=1500$ kPa

图 5 混合土料-反滤料试验结果

Fig. 5 Test results of composite soil - filter material

(2) 破坏后阶段。此阶段对于一些抗剪强度相对较小的环间缝, 剪应力已达到破坏强度, 使得在这些环间缝中的个别缝处产生集中的切向位移。该部分切向位移真正反映了接触面的变形特性。从图 5 可以看出, 在扣除了第 1 阶段的变形后, 破坏后阶段的变形具有“刚塑性”的变形特征, 这与殷宗

泽等得到的土与结构物接触面切向“刚塑性”的变形特征类似^[7]。当土体变形处于该阶段时,由于存在有剪切变形相对集中的剪切带或剪切面,亦即在两种材料的交界面附近,会发生相对集中的剪切变形并导致位移不连续的现象。因此,在交界面处设置接触面单元以模拟这种位移不连续现象是必要的。根据本文的试验结果,集中切向位移发生的位置,由前面所讨论的反滤料-过渡带-混合土料复合体系的强度特性所决定,其位置发生在强度最薄弱处。本次试验条件下由于总是有几个环间缝几乎同时达到破坏强度,所以破坏后环间缝位移发生的位置有一定的随机性。

4.3 法向变形特性

图 6 显示了混合土料-反滤料试验过程中,法向变形随剪应力的变化曲线。可见土体法向变形的基本特性与法向正应力的大小有关。当法向应力较小时 ($\sigma_n=100$ 和 300 kPa),法向变形表现为剪胀;当法向应力增加时 ($\sigma_n=600$ 和 900 kPa),法向变形转变为剪缩,且随着法向应力的增加剪缩性(曲线的斜率)增大;当法向应力继续增加时 ($\sigma_n=1500$ 和 2500 kPa),法向变形仍为剪缩,但剪缩性相对逐步减小。

同切向变形一样,需将法向变形特性区分为剪切破坏前和破坏后来进行分析。破坏前法向变形的剪胀或剪缩由整个试样土体的变形特性决定,变形量的大小也同试样的高度相关。在计算中该部分变形可由普通土体单元的变形得到。当试样发生剪切破坏以后,由于剪应力基本不再增加,此后的法向变形主要由发生在破坏面上的水平剪切变形引起。从图 6 可见,此部分法向变形总体量级较小,对一般土工问题可以忽略。

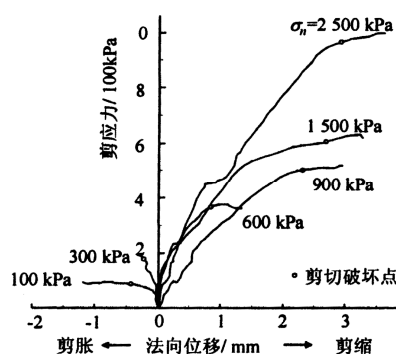


图 6 混合土料-反滤料试验的剪胀特性

Fig. 6 Dilative property of the composite soil-filter material interface

5 结 语

本文在清华大学大型接触面循环加载剪切试验机的基础上,研制了可进行两种散粒体间接接触面试验的叠环式单剪试验系统,并对糯扎渡高心墙堆石坝坝料的接触特性进行了系统的研究,结果表明:

(1) 在散粒体接触界面附近存在着由两种散粒材料及过渡带所组成的三相复合体系,接触面的强度和变形特性由体系各部共同作用的结果所决定。

(2) 两种散粒体材料间接接触面的强度包线为其单相材料强度的下包线。

(3) 在两种散粒体接触界面处,其剪切变形分为两个阶段,在达到破坏强度前,不存在变形的不连续现象。而当达到破坏强度后,会产生集中的“刚塑性”接触面剪切变形,其位置发生在强度最薄弱处。

(4) 对散粒体的接触问题,可用“刚塑性”模型描述其切向的变形特性并忽略法向变形特性。

参 考 文 献

- [1] Uesugi M, Kishida H. Influential factors of friction between steel and dry sands[J]. *Soils and Foundations*, 1986, 26(2): 33—46.
- [2] Desai C S, Ma Y. Modelling of joints and interfaces using the disturbed-state concept[J]. *Numerical and Analytical Method in Geomechanics*, 1992, 16: 623—653.
- [3] 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(4): 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(4): 149—153.
- [4] 胡黎明, 濮家骝. 土与结构物接触面力学物理力学特性试验研究[J]. *岩土工程学报*, 2001, 23(4): 431—435. HU Li-ming, PU Jia-liu. Experimental study on mechanical characteristics of soil-structure interface[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2001, 23(4): 431—435.
- [5] 陈愈炯, 刘杰, 愈培基. 土的接触面抗剪强度[A]. 中国土木工程学会第三届土力学及基础工程学术会议论文选集[C]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1981.117—123.
- [6] 刘开明, 余静. 不同材料间接接触面特性的实验研究[A]. 中国土木工程学会第四届土力学及基础工程学术会议论文选集[C]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1986.
- [7] 殷宗泽, 朱泓, 许国华. 土与结构材料接触面的变形及其数学模拟[J]. *岩土工程学报*, 1994, 16(3): 14—22. YIN Zong-ze, ZHU Hong, XU Guo-hua. Numerical simulation of the deformation in the interface between soil and structural material[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 1994, 16(3): 14—22.