

文章编号: 1000-7598 (2009) 11-3256-05

土与结构接触面力学特性环剪试验研究

杨有莲^{1,2}, 朱俊高^{1,2}, 余挺³, 吴晓铭⁴

(1. 河海大学 岩土力学与堤坝工程教育部重点实验室, 南京 210098; 2. 河海大学 岩土工程科学研究所, 南京 210098;
3. 成都勘测设计研究院, 成都 610072; 4. 国电大渡河流域水电开发有限公司, 成都 610016)

摘要: 利用环剪仪对不同的土与混凝土接触面的力学特性进行了研究。分别对有泥皮及没有泥皮的接触面情况进行试验, 并对剪切面位于黏土内的情况进行了试验。结果表明, 不同接触面的应力-应变特性差异很大, 泥皮的存在明显改变了接触面的性状; 对没有泥皮的情况, 剪切破坏面可能发生在土体内部, 也可能发生在土-混凝土接触界面; 而有泥皮时, 破坏面始终发生在泥皮内部。试验的各种接触界面中, 破坏时平均剪应力与法向应力具有较好的线性关系, 接触面强度可用摩尔-库仑准则较好地描述; 当有泥皮存在时, 摩擦角为没有泥皮时的 63.4 %。

关键词: 环剪仪; 接触面; 泥皮; 应力应变关系; 摩擦强度; 摩擦角

中图分类号: TU 411

文献标识码: A

Experimental study of mechanical behaviour of soil-structure interface by ring shear test

YANG You-lian^{1,2}, ZHU Jun-gao^{1,2}, YU Ting³, WU Xiao-ming⁴

(1. Key Laboratory of Ministry of Education for Geomechanics and Embankment Engineering, Hohai University, Nanjing 210098 China; 2. Geotechnical Research Institute, Hohai University, Nanjing 210098, China; 3. Chengdu Hydroelectric Investigation and Design Institute, Chengdu 610072, China;
4. Daduhe Hydropower Development Co., Ltd, Chengdu 610016, China)

Abstract: The mechanical behaviour of soil-structure interface was investigated by using ring shear apparatus. The different interfaces include three types. The test results show that the stress-strain behaviour of different interfaces is apparently different. Mud-cake can change the contacting properties of interface. For the case without mud-cake, failure plane may occur in soil or on soil-structure interface. For that with mud-cake, for example drilling pore pile, failure plane is always taking place in mud-cake. In all tests, the relationship between average shear stress and normal stress is linear; and the shear strength of interface may be described with Mohr-Coulomb criterion. Friction angle of interface with mud-cake is only 63.4 % of that without mud-cake.

Key words: ring shear apparatus; interface; mud-cake; stress-strain relationship

1 引言

土与结构物之间接触面性状的准确模拟对合理地分析土与结构的共同作用有重要影响。很多实际工程设计中需要考虑接触面、土与结构相互作用的问题, 如面板堆石坝中的面板与碎石垫层^[1]、桩及混凝土防渗墙等与地基土之间^[2-3]。国内外关于接触面的研究很多, 已取得了不少研究成果^[4-9]。

钻孔灌注桩和混凝土防渗墙的施工广泛采用泥浆护壁的工艺, 这种工艺在护壁的同时也常常在孔壁上残留泥浆套层——泥皮, 泥皮的存在改变了土-

结构相互作用的性状。因此, 有关泥皮的变形及强度的性质近年来有些研究^[2-5, 10], 但仍不成熟。

早期的接触面研究多用直剪仪^[11]。该仪器不仅使得接触面附近的土体应力不均, 而且其变形条件与实际出入较大。因此, 近年来, 利用单剪试验进行接触面应力变形-强度特性的研究较多^[1, 4, 8, 12]。单剪试验中土体变形条件与实际比较接近, 但接触面上的应力分布仍不均匀, 尤其在剪切变形较大时。相比之下, 环剪试验能够保持接触面上应力均匀。

本文对土体内部、土体与混凝土和泥皮土与混

收稿日期: 2008-08-12

基金项目: 国家自然科学基金委员会、二滩水电开发有限责任公司雅砻江水电开发联合基金项目 (No. 50639050)。

第一作者简介: 杨有莲, 女, 1976年生, 博士研究生, 从事软基加固与基础工程研究。E-mail: ylyang@mailsvr.hhu.edu.cn

通讯作者: 朱俊高, 男, 1964年生, 教授, 博导, 主要从事土体基本特性与本构关系、土石坝工程研究。E-mail: zhujungao@hhu.edu.cn

凝土块 3 种接触类型的接触界面力学特性进行了排水环剪试验,对土与不同结构接触界面的摩擦强度、强度指标以及变形机制进行了初步分析和探讨,分析了泥皮对钻孔灌注桩承载力的影响以及桩-土剪切破坏面的位置。为了叙述方便,约定土体内部的剪切面称为“土体内部接触界面”,土与混凝土之间夹有一薄层泥皮的剪切面称为“泥皮土与混凝土接触界面”。

2 试验设备

试验是在河海大学 HJ-1 型环剪仪上进行。该仪器受力条件好、操作方便。扭矩、垂直及剪切位移均通过计算机采集。HJ-1 型环剪仪试验容器见图 1、2。

与传统反复直剪仪相比,该设备的明显优势是在剪切过程中可以在一个方向进行连续剪切,并且剪切面积固定不变,还可施加较大的荷载(最大法向应力和水平荷载均为 1 000 kPa),可研究大变形条件下的强度降低问题等优点。因此,环剪仪是研究残余强度较好的仪器。

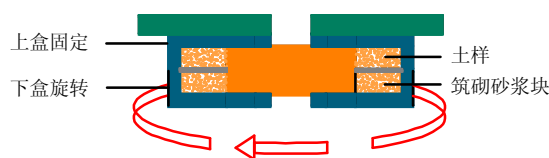


图 1 HJ-1 型环剪仪试样容器剖面图

Fig.1 Sample container cross-section of HJ-1 ring shear apparatus

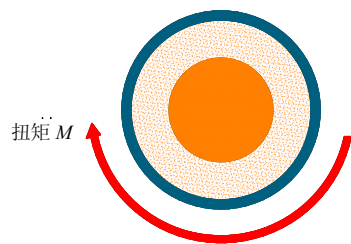


图 2 HJ-1 型环剪仪试样容器平面图

Fig.2 Sample container plan view of HJ-1 ring shear apparatus

3 试验方案

试验所用土料取自双江口大坝工程心墙塑性黏土料,主要物理性指标如下:土料相对密度为 2.70,液限为 34.3%,塑限为 20.3%,塑性指数为 14,为低液限黏土。

按含水率 19%配制试验用土料,装入塑料袋中

密封保养 1~2 d,使土样充分吸收水分均匀后,采用静压法控制试样干密度至 1.64 g/cm^3 ,分别制作成外径为 95 mm、内径为 55 mm、高分别为 10 mm 和 20 mm 的两种尺寸的环状土样。试验时,土样放在上剪切盒,其顶面通过透水板上的刀刃切入固定在上剪切盒。

在制作混凝土块时,考虑到试块尺寸较小,因此,用 M20 的筑砌砂浆环状试验块来代替混凝土试验块。为了制作环状试验块,还专门研制了一套模具,其外径为 95 mm,内径为 55 mm,高为 10 mm。为保证其表面有一定的粗糙度符合工程实际,打毛了其表面。试验时,混凝土试验块放在下面的剪切盒,其下底面通过 4 个销钉固定于下剪切盒,不考虑表面粗糙度的影响,整个试验中混凝土试验块没有更换,但每次试验结束后都要对其表面进行清理。试验泥皮采用水和膨润土拌合而成。试验时,将制好的泥皮按设计的厚度平铺在混凝土试验块上,泥皮厚度控制在约 1~2 mm。

试验内容包括:①土体内部的剪切试验;②土体与混凝土的剪切试验;③泥皮土与混凝土的剪切试验。

试验采用应变控制式的环剪仪,平均剪切速率 $\bar{v} = 0.021 \text{ mm/min}$,加载时间控制在 10 h,即平均剪切位移为 12.5 mm 时,停止试验。在 4 个法向应力 50、100、200、400 kPa 下固结后进行剪切试验,测定土与不同结构接触界面应力-应变关系曲线。土与结构接触界面剪切时,分别置于上、下剪切盒,结构表面要预先凿平,严格控制接触界面水平。装样后待土体法向变形完成后开始剪切,剪切时上盒固定不动、下盒转动,记录整个试验过程中时间 t 所对应的扭矩 M 和法向位移,并得到各接触界面平均剪应力-平均剪切位移之间的关系,以及平均剪切位移-法向位移之间的关系。

需要说明的是,在环形旋转剪切试样中,水平面的剪切变形随半径是变化的。因此,采用平均剪应力 τ 和平均剪切位移 s ,计算公式为

$$\tau = \frac{3M}{2\pi(R_2^3 - R_1^3)} \quad (1)$$

$$s = \bar{v}t \quad (2)$$

式中: M 为扭矩; R_1 和 R_2 分别为试样的内径和外径; $\bar{v}$ 为平均剪切速率; t 为剪切时间。

4 试验结果分析

4.1 试验数据

对土体内部、土与混凝土及泥皮土与混凝土 3

个不同接触类型分别在 4 个法向应力下进行了 12 组环剪试验。下面根据试验数据列出了各接触界面抗剪强度和抗剪强度指标, 分别见表 1~2。

表 1 各接触界面抗剪强度
Table 1 Shear strengths of interfaces

接触面类型	参数	法向应力/kPa			
		50	100	200	400
土体内部	峰值强度/kPa	46.45	73.60	127.4	238.0
土与混凝土	峰值强度/kPa	37.83	74.48	129.9	239.7
泥皮土与混凝土	峰值强度/kPa	30.42	48.66	81.29	149.9
泥皮土与混凝土	残余强度/kPa	29.86	43.13	73.00	127.81
泥皮土与混凝土	软化系数	0.98	0.89	0.90	0.85

表 2 各接触界面抗剪强度指标
Table 2 Shear strength indexes of interfaces

参数	接触类型		
	土体内部	土与混凝土	泥皮土与混凝土
摩擦角 $\varphi / (^{\circ})$	28.71	29.62	18.78
黏聚力 c / kPa	18.74	13.94	13.84

4.2 不同垂直压力作用下的应力-应变特性

图 3 给出了不同接触类型在 50、100、200、400 kPa 共 4 组压力下的平均剪应力与平均剪位移关系曲线。通过对比发现, 不同接触界面的平均剪应力-平均剪位移曲线变化明显不同。由图可得以下试验结果:

(1) 土体在低法向压力下的软化特性比高法向压力下的软化特性明显。这可能是由于土体颗粒之间的胶结作用和孔压消散的程度致使有效应力的不同所引起的。众所周知, 岩土抗剪强度由凝聚力和摩擦力组成。其中由胶结力提供的凝聚力成份具有脆性, 在变形不大时就达到峰值, 而摩擦力成份只有在发生相当大的变形后才能充分发挥出来, 具有塑性。在排水条件下, 当法向压力较低时, 孔压较大, 有效围压较小, 土体颗粒之间的胶结强度基本不破损, 在剪切过程中胶结强度发挥了重要作用, 因此, 在较低法向压力时表现为很强的应变软化现象; 当法向压力较高时, 孔压较小, 有效围压较大, 胶结强度会被削弱, 在剪切过程中摩擦力成份发挥重要作用, 因此, 在高法向压力时表现为塑性流动或稍软化。

(2) 土体与混凝土接触界面表现为较好的应变硬化现象, 基本上不随法向压力的变化而改变。这可能是由于其接触界面的吸附强度较小, 在剪切过程中摩擦强度起重要作用, 因此, 表现为塑性流动或稍有软化。对于一般桩基工程来说, 可以不考虑侧阻力软化对桩基承载力的影响。

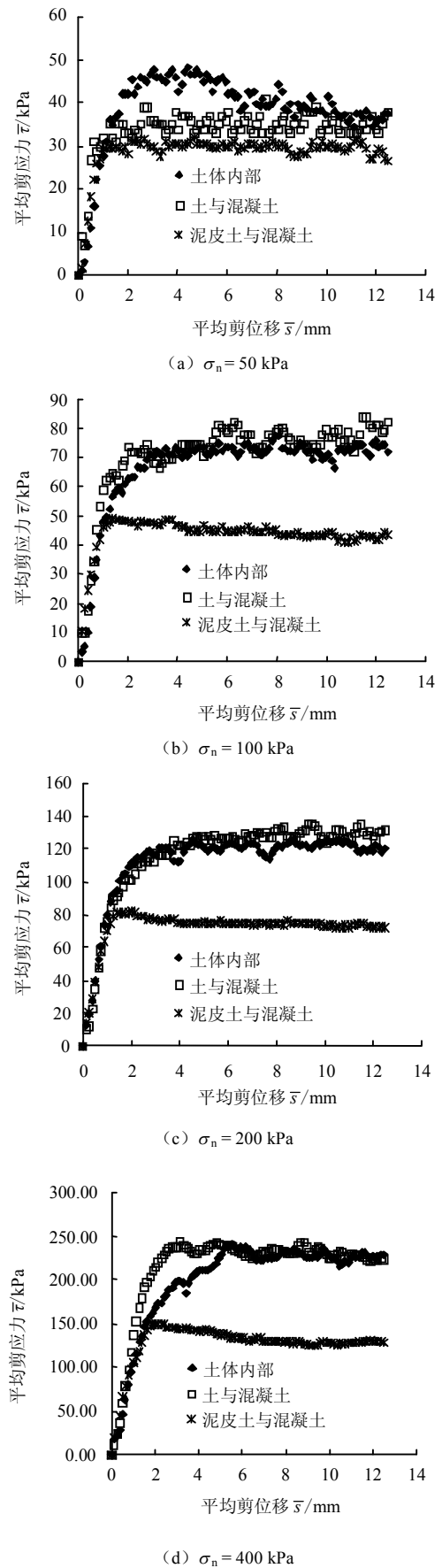


图 3 不同法向压力下各接触界面 $\bar{\tau}-\bar{s}$ 曲线
Fig.3 $\bar{\tau}-\bar{s}$ curves of interfaces in different normal pressures

(3) 泥皮土与混凝土接触界面表现为应变软化现象, 并随法向压力的增大而增强的趋势。这可能是由于泥皮土本身的特性决定的。泥皮土与结构的刚度差别很大且结构物渗透系数非常小, 导致土体与结构间的吸附强度不能充分发挥, 在剪切过程中摩擦强度起主要作用, 泥皮具有润滑作用, 使得泥皮土与混凝土接触界面强度降低, 表现为应变软化现象。又由于接触界面咬合作用引起表观黏聚力随法向压力的增大而增大, 因此, 泥皮土与混凝土接触界面的应变软化现象随法向压力的增大而增强的趋势。在泥浆护壁钻孔灌注桩工程施工中, 应该考虑泥皮对钻孔灌注桩承载力的影响。

4.3 接触界面抗剪强度及强度指标

表 1、2 给出了各接触界面抗剪强度及抗剪强度指标。从表中可知: ①泥皮土与混凝土接触界面抗剪强度总是小于土体的内部、土体与混凝土接触界面抗剪强度。这说明, 钻孔灌注桩工程中, 桩-土破坏面始终发生在桩侧泥皮内, 这主要是因为桩侧泥皮存在时在桩-土之间形成一薄弱层, 导致桩-土之间在较小相对位移下即易产生滑移, 使得桩侧阻力降低; ②泥皮土与混凝土接触界面峰值抗剪强度为土与混凝土接触界面抗剪强度的 62.5%~80.4%, 法向应力越大, 接触界面抗剪强度软化现象越明显, 其软化系数约为 0.9, 这说明桩侧泥皮的存在, 将使桩侧阻力降低, 约降低 0.9 倍, 并且导致桩-土体系产生渐进破坏, 因此, 在钻孔灌注桩工程中, 不能忽略护壁泥浆在钻孔时形成的泥皮对摩擦阻力的影响; ③随着法向应力的增加, 土体内部接触界面抗剪强度先大于、随后又小于土与混凝土接触界面抗剪强度。总的来说, 对于本文试验, 二者差值不太明显。这说明, 对于一般桩基工程, 桩-土破坏面可能发生在桩-土接触界面或桩侧土体内部, 可以把桩周土层的极限抗剪强度当成桩身的摩阻力; ④对于本试验, 各接触界面的抗剪强度均随法向压力的增加而呈线性增大。

图 4 给出了各接触界面抗剪强度与法向应力及线性拟合曲线。由图可知, 各接触界面的平均剪应力与法向应力关系具有较好的线性关系, 说明泥皮的存在对平均剪应力与法向应力之间的关系没有影响。因此, 各接触界面的平均剪应力可用摩尔-库仑强度准则来描述。当有泥皮存在时, 接触界面摩擦角大大降低, 约为没有泥皮时的 63.5%。对于本文试验, 泥皮的存在对黏聚力影响不太大。可见, 钻孔灌注桩工程中, 泥浆的润滑作用是导致桩侧摩阻力的下降重要因素。

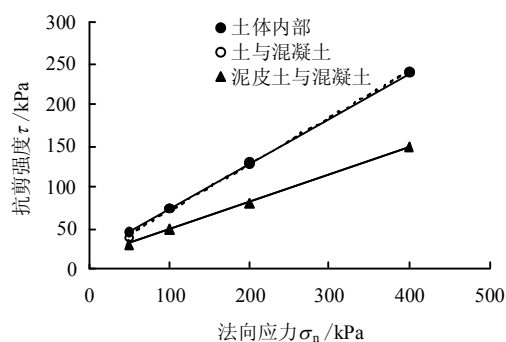


图 4 各接触界面抗剪强度与法向应力及线性拟合曲线

Fig.4 Relation between shear strength and normal pressure of interfaces

5 结 论

通过环剪仪对土与不同结构接触界面的力学特性进行了相关试验分析, 试验结果表明:

(1) 土与混凝土接触界面关系曲线总体上表现为硬化型, 可用双曲线拟合; 当有泥皮存在时, 桩-土接触面的 $\tau-s$ 关系曲线表现为软化现象; 随着垂直压力的增大, 软化现象逐渐增强。

(2) 当有泥皮时, 桩-土接触面的剪切强度明显下降, 并随着垂直压力的增大而增大, 说明桩侧泥皮的存在, 会使桩侧阻力降低, 在钻孔灌注桩工程中, 不能忽略护壁泥浆在钻孔时形成的泥皮对桩侧摩阻力的影响。

(3) 各接触界面的抗剪强度与法向压力之间表现较好的线性关系, 可以用摩尔-库仑强度准则描述。对于本试验, 泥皮土与砼接触面外摩擦角约为没有泥皮时的 63.5%, 泥皮的存在对黏聚力影响不太大, 泥皮的影响主要表现在对外摩擦角的影响上。

(4) 接触界面力学特性的研究是个复杂的课题, 尤其是当有泥皮存在时, 还需进一步进行试验分析。

参 考 文 献

- [1] 周小文, 龚壁卫, 丁红顺, 等. 砾石垫层-混凝土接触面力学特性单剪试验研究[J]. 岩土工程学报, 2005, 28(7): 876—880.
ZHOU Xiao-wen, GONG Bi-wei, DING Hong-shun, et al. Large-scale simple shear test on mechanical properties of interface between concrete face and gravel underlayer[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2005, 28(7): 876—880.
- [2] 张忠苗, 辛公锋, 吴庆勇, 等. 考虑泥皮效应的大直径超长桩离心模型试验研究[J]. 岩土工程学报, 2006, 28(12): 2066—2071.

- ZHANG Zhong-miao, XIN Gong-feng, WU Qing-yong, et al. Centrifuge model tests on super-long piles with large diameters considering mudcake effect[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2006, 28(12): 2066—2071.
- [3] 韩国城, 邵龙潭. 混凝土防渗墙与砂之间静力剪切特性试验研究[J]. 岩土工程学报, 1994, 16(3): 112—115.
HAN Guo-cheng, SHAO Long-tan. Experimental study of static shear characteristics of concrete cutoff wall-sand[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 1994, 16(3): 112—115.
- [4] 张治军, 饶锡保, 王志军, 等. 泥皮厚度对结构接触面力学特性影响的试验研究[J]. 岩土力学, 2008, 29(9): 2433—2438.
ZHANG Zhi-jun, RAO Xi-bao, WANG Zhi-jun, et al. Experimental study on influence of slurry thickness on mechanical behavior of interface between gravel and concrete[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2008, 29(9): 2433—2438.
- [5] 张嘎, 张建民. 夹有泥皮粗粒土与结构接触面力学特性试验研究[J]. 岩土力学, 2005, 26(9): 1374—1378.
ZHANG Ga, ZHANG Jian-ming. Experimental study on monotonic behavior of soil-structure interface with slurry[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2005, 26(9): 1374—1378.
- [6] 张丙印, 付建, 李全明. 散粒体材料间接接触面力学特性的单剪试验研究[J]. 岩土力学, 2004, 25(10): 1522—1526.
ZHANG Bing-yin, FU Jian, LI Quan-ming. Experimental study on mechanical behavior of interface between two granular materials[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2004, 25(10): 1522—1526.
- [7] HOSOI T. Consideration to the skin friction of diaphragm wall foundation[C]//3rd Int. Conf. on Deep Foundation Practice Incorporating on Pile Talk. Singapore: [s. n.], 1994.
- [8] KISHIDA H, UESUGI M. Tests of the interface between sand and steel in the simple shear apparatus[J]. **Geotechnique**, 1987, 37(1): 45—52.
- [9] FAKHARIAN K, EVGIN E. Cyclic simple shear behavior of sand steel interfaces under constant normal stiffness condition[J]. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, 1997, 123 (12): 1096—1105.
- [10] 张治军, 饶锡保, 丁红顺, 等. 不同含水率泥皮对接触面力学特性影响的试验研究[J]. 长沙科学学院院长报, 2007, 24(5): 60—63.
ZHANG Zhi-jun, RAO Xi-bao, DING Hong-shun, et al. Experimental study on mechanical behaviors of interface for mud-cake with different moisture content[J]. **Journal of Yangtze River Scientific Research Institute**, 2007, 24(5): 60—63.
- [11] 殷宗泽, 朱弘, 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 structure material[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 1994, 16 (3): 14—22.
- [12] 高俊合, 于海学, 赵维炳. 土与混凝土接触面特性的大型单剪试验研究及数值模拟[J]. 土木工程学报, 2000, 33(4): 42—46.
GAO Jun-he, YU Hai-xue, ZHAO Wei-bing. Characteristics study of interface between soil and concrete by using large size single shear apparatus and numerical analysis[J]. **China Civil Engineering Journal**, 2000, 33(4): 42—46.

书 讯

地基基础工程 基坑支护工程（建筑工程新技术丛书）

建筑科学类, 林寿、杨嗣信主编, 大 32 开, 200 千字, 180 页, 平膜装, 估价: 30 元, 2009 年 9 月出版, ISBN: 978—7—112—11146—1

本书是《建筑工程新技术丛书》之一, 以地基基础工程和基坑支护工程为专题, 主要介绍了近些年在建筑工程施工领域所采用的新技术、新工艺和新材料等, 旨在为新技术的推广应用起到促进作用。读者对象: 建筑业工程技术人员、管理人员。

(摘自 新华书目报·科技新书目)