

粗粒料试验中界面摩阻力的试验研究

程展林, 左永振, 姜景山, 丁红顺

(长江科学院水利部岩土力学与工程重点实验室, 湖北 武汉 430010)

摘要: 土工试验中界面摩阻力的存在对试验成果的影响不可忽视, 摩阻力影响到试验成果的可靠性, 摩阻力的大小和减小摩阻力的措施是普遍关心的问题。目前, 还没有一种很好的试验方法直接测定土体材料与加载结构(钢结构)间的摩阻力, 并研究减小摩阻力的措施。为此, 专门设计了一种试验设备, 并针对粗粒料进行了系统的试验, 探讨了界面摩阻力的试验方法、粗粒料界面摩阻力大小和某种减小摩阻力措施的有效性。试验表明, 粗粒料与加载结构间的摩阻力与正应力成正比, 摩擦系数达 0.45 左右, 经一定“减摩”措施处理后, 摩擦系数可降至 0.1 左右, 要更大程度上消除摩阻力是一件非常困难的事。因此, 在土工试验设备设计及试验成果整理中有必要考虑界面摩阻力这一影响因素。

关键词: 土工试验; 摩擦力; 粗粒料; 减摩措施

中图分类号: TU411.3

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2009)03-0331-04

作者简介: 程展林(1963-), 男, 湖北武穴人, 教授级高级工程师, 主要从事土力学研究。E-mail: chengzhl@mail.crsri.cn。

Experimental research on interface friction in granular materials

CHENG Zhan-lin, ZUO Yong-zhen, JIANG Jing-shan, DING Hong-shun

(Key Laboratory of Geotechnical Mechanics and Engineering of the Ministry of Water Resources, Yangtze River Scientific Research Institute, Wuhan 430010, China)

Abstract: The influence of interface friction on the soil tests can't be neglected, and its value has certain effects on the reliability of the test results, so the magnitude of its value and the measures become the universal issue. At present, there isn't any kind of good test method to measure the friction between samples and the load structures (steel structures) and to study the measures. A kind of test equipment is developed, and designed systematic tests on granular materials are carried out. The test method of interface friction, the frictional values of granular materials, and the validity of measures are discussed. The tests indicate that there is an proportional relationship between the friction and the normal pressure. The friction coefficient reaches about 0.45. After certain measures are taken, it may fall to 0.1. It's extremely difficult to eliminate the fiction in a greater degree. Therefore, the interface friction should be considered in the design of the soil tests and in the analysis of the test results.

Key words: soil test; friction force; granular material; measure

0 前 言

在土工试验中, 如压缩试验、三轴试验等, 土体材料(试样)与加载结构(钢结构)之间由于变形的不协调两者之间往往将产生摩擦力(简称界面摩阻力), 界面摩阻力的存在直接影响到试样的真实受力, 影响到试样的变形大小和形态, 甚至会使试验成果出现不确定性^[1]。同时有学者注意到, 在大型直剪仪中, 剪切面上的正压力明显偏低^[2]; 固结试验中, 孔压滞后和偏低^[3]。界面摩阻力的存在影响到试验成果的可靠性, 因此, 有必要设法尽可能地减少界面摩阻力(减摩措施)以提高试验精度。赖勇等^[4]提出在三轴试验试样的上、下端部设置润滑层可以起到很好的效果, 大大降低径向应变的不均一程度; 西德埃森采

矿研究中心在直剪试验中采用浸腊纱绸纸加上工业用凡士林, 摩擦系数为 0.05; 中国矿业大学采矿系^[5]采用青壳纸、聚四氟乙烯薄膜、聚乙烯薄膜、层间涂工业润滑油或在以上基础上加塑料砂组成的减摩复合夹层材料, 摩擦系数为 0.04~0.05。施建勇等^[3]在固结试验中进行了减小侧壁摩阻力的对比试验, 采用将薄膜两面均涂上凡士林并贴于护环内壁上的方法, 结果表明可以部分的消除侧壁摩阻力。

目前, 还没有一种很好的试验方法直接测定土体

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研究基金项目(50639050)

收稿日期: 2008-01-22

材料与加载结构（钢结构）间的摩阻力，并研究减小摩阻力的措施。为此，本文专门设计了一种试验设备，并针对粗粒料进行了系统的试验，探讨了界面摩阻力的试验方法、粗粒料界面摩阻力大小和某种减小摩阻力措施的有效性。

1 三轴试验界面摩阻力的影响探讨

为研究粗粒土的变形机理，笔者进行了 CT 三轴试验^[6]，图 1 为粗粒料 CT 三轴试验（ $\sigma_3=0.2\text{ MPa}$ ， $\epsilon_a=14.4\%$ ）某一剖面上颗粒的位移矢量。在某一应变状态下，试样中不同区域中的颗粒的位移存在较大差异，在上、下端部近似三角形区域中的颗粒的相对位移极小，类似于浅基础下主动朗金区，即俗称的“弹性核”；此区域外的试样中部区域中的颗粒的相对位移较大，在竖向压缩的同时，伴随着较大的水平位移，试样的宏观应变主要由该区域的颗粒的位置调整引起。郭培玺和林绍忠^[7]的 DDA 数值分析成果也反映出相同规律，图 2 为三轴试验 DDA 数值分析成果。表明界面摩阻力的存在对三轴试验试样的上、下端部一定区域内的变形具有约束作用。

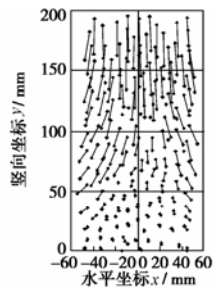


图 1 颗粒位移矢量图

Fig. 1 Displacement vectors of particles

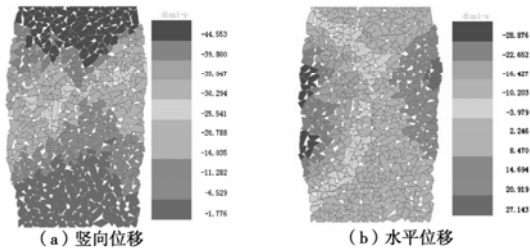


图 2 颗粒位移云图

Fig. 2 Displacement picture of particles

这一现象应该引起对粗粒料室内试验方法的思考：室内试验的试样与工程中微单元体之间的变形模式是否具相似性；三轴试验首先是用于测定土体的抗剪强度，用于测定土体的应力应变会产生多大的试验误差。

2 界面摩阻力试验方法

2.1 试验设备

试验设备的原理如图 3 所示。试样容器为内径约 330 mm 铁质圆桶状容器，在试样容器中部按一定的

密度要求制备试样，必要时在容器内侧与试样间进行减摩措施处理。在试样上、下端置加压帽，在上加压帽与反力架间置荷重传感器 1，以测定试样上部所受荷载；在下加压帽以下置荷重传感器 2，以测定试样下部所受荷载；在传感器 2 下置油缸 1，以控制试样下端变位；在试样容器下面置油缸 2，以控制试样上端荷载。

试验过程如下：首先关油缸 1，使试样下端不发生位移；对油缸 2 进行加压，即试样上端加载（大小由荷重传感器 1 测定），至某一约定应力大小，并保持荷载大小不变；开油缸 1，使试样整体相对于试样容器向下缓慢匀速移动；由荷重传感器 2 测定试样下端荷载稳定值。重复上述过程，测定不同试样上端荷载 P_1 下的试样下端荷载 P_2 。

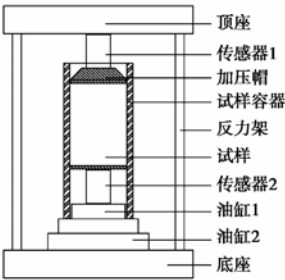


图 3 试验设备原理图

Fig. 3 Schematic picture of test equipment

2.2 受力分析

试样的受力状态如图 4。传感器 1 和传感器 2 测得试样上、下端荷载分别为 P_1 ， P_2 ，试样截面积 $A=\pi R^2$ ，试样侧面积 $S=2\pi RH$ ，土体静止侧压力系数 $K_0=1-\sin\phi$ ，则土体对试样容器内侧的平均正应力 $\sigma=\frac{P_1+P_2}{2A}K_0$ 。若试样与试样容器间相对变形充分且摩擦力系数为 K_f ，则试样所受摩擦力总和 $F=\sigma K_f S$ 。根据力的平衡，有

$$P_1 - P_2 - F = 0,$$

由此可得试样与试样容器间摩擦力系数如下：

$$K_f = \frac{2 \cdot (P_1 - P_2) A}{(P_1 + P_2) S K_0} \quad (1)$$

因此，只要测得荷载 P_1 作用下的试样下端荷载 P_2 ，就可以根据上式求得界面摩擦力系数 K_f 。

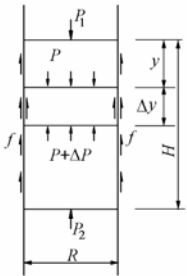


图 4 试样受力分析图

Fig. 4 Analysis of stresses acting on samples

2.3 试验用料

试验材料选取双江口堆石坝主堆石料, 试样圆度较差, 存在明显的棱角, 其试验级配如图 5。试样最大干密度 2.137 g/cm^3 。对此粗粒料进行了系统的界面摩擦阻力试验, 探讨了试样密度、试样高度、试样下端是否移动、不同减摩措施等因素的影响。

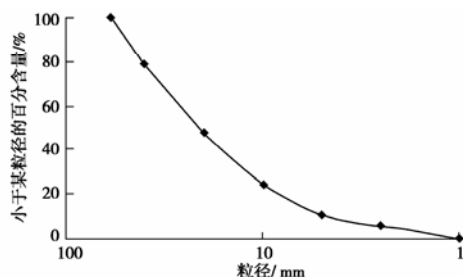


图 5 试样级配曲线图

Fig. 5 Gradation curves of test specimens

3 试验成果分析

为了探讨试验方法的合理性、界面摩擦阻力大小及影响因素, 进行了一系列比较性试验, 几组典型试验成果如图 6~10 所示。试验成果有一个共同的规律是界面摩擦系数与正应力大小无关, 即粗粒料与钢结构间的摩擦阻力与正应力成正比。

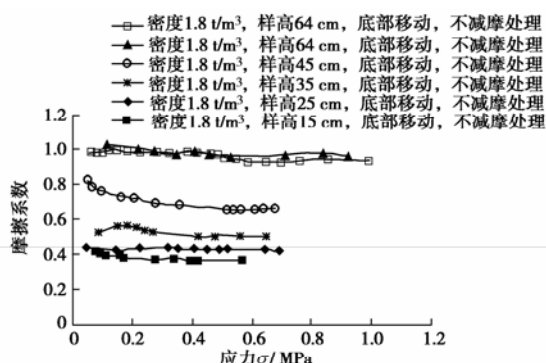


图 6 试样高度的影响

Fig. 6 Influence of sample height

图 6 给出了不同试样高度（其他试验条件一致：试样下端产生移动，试样干密度为 1.8 t/m^3 ，不减摩处理）的界面摩擦系数，共 6 组试验，高径比范围为 $0.46 \sim 2$ ，其中两组为平行试验。取图 6 中的摩擦系数平均值值得摩擦系数与试样高度的关系曲线，如图 7。试验成果表明，当试样高度（或高径比）大到一定时，试验成果出现较大的偏差，原因有两方面，其一，采用上文式 (1) 计算摩擦系数时隐含了一个假定，即界面正压力在高度方向上线性分布；其二，拱效应。因此，在界面摩擦阻力试验中，控制一定的高径比是非常必要的。试验也表明，在试样高径比小于 1 后，摩擦系数的差别较小，如图 7 中试样高度在 $15 \sim 35 \text{ cm}$ 时的曲线斜率较为平缓。因此，进行本文介绍的界面

摩擦阻力试验时，应合理地选择试样高度（或高径比）。

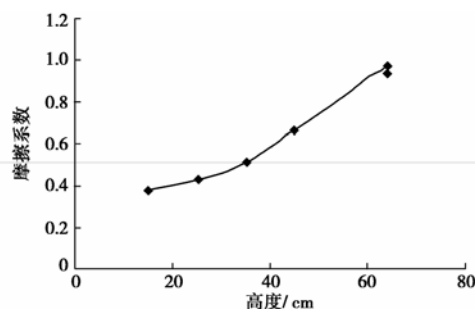


图 7 摩擦系数与试样高度关系

Fig. 7 Relationship between sample height and friction coefficient

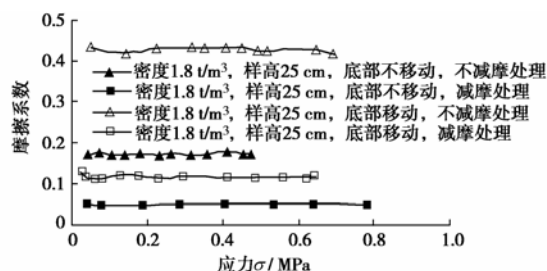


图 8 试样下端移动的影响

Fig. 8 Influence of bottom migration of samples

图 8 比较了试样底部移动对试验成果的影响，即试样上部加载时，试样下部是否下移，对测定的界面摩擦系数有多大影响。图 8 给出了两组试验成果，在其他试验条件一致的情况下，试样下部不移动测到的界面摩擦系数约为试样下部移动的 $1/3$ 。对于这样的结果应该是比较容易理解的，文中式 (1) 是在假定试样与试样容器间相对变形充分条件下得到的，若在试样上部加载过程中试样下部不移动，试样与试样容器间的相对变形仅来源于试样的压缩变形，界面摩擦阻力沿高度可能是上部为 σK_f ，下部为 0 的曲线型分布，因此，计算得到的界面摩擦系数偏小是合理的。至于两者间的比值是否是 $1/3$ ，应视试验条件而定。界面摩擦阻力试验应保证试样下端充分变形是必要条件。

图 9 给出了不同密度下的摩擦系数和采取减摩措施的实际效果，所有成果都是在样高 25 cm 、试样下端移动条件下得到的，即理论上合理的试验成果。从图 9 可以看出，粗粒料的界面摩擦系数在 0.45 左右，采取减摩措施后的摩擦系数降低到 0.15 左右，可见采取减摩措施后，摩擦系数有较大程度的降低；同时，试样密度对界面摩擦系数有一定影响，但影响很小。

对于粗粒料而言，界面摩擦系数达 0.45 左右，由此可见，对于刚性界面相对较大的土工试验，如直剪试验、压缩试验、刚性加压板的三轴试验、物理模型试验等，界面摩擦阻力对试验成果的影响是不可忽视的。

本文采取了两种减摩措施，第一种是在试样和容器间加两层内涂润滑油的薄膜，图 8, 9 中的减摩处理既是采用的此种措施。第二种是在第一种润滑油中加

一层直径为 1 mm 的钢珠。图 10 给出了两种减摩措施后的实际效果。从图 10 中可以发现,两种减摩措施下的摩擦系数差别较大,第一种减摩效果更明显,摩擦系数可降至 0.1 左右。合理的减摩措施对降低界面摩阻力是非常有效的,但是,界面摩阻力不可能完全消除,要更大程度上消除摩阻力是一件非常困难的事,因此,在土工试验设备设计及试验成果整理中要充分考虑界面摩阻力这一影响因素是必要的。

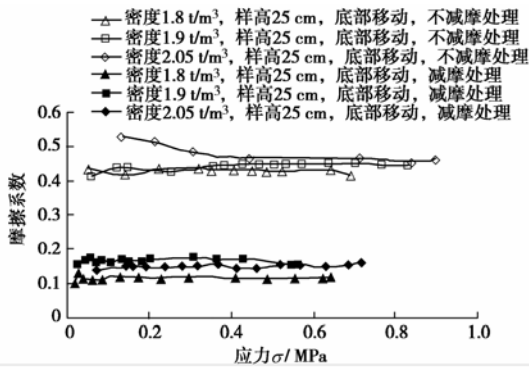


图 9 减摩前后的摩擦系数

Fig. 9 Friction coefficients before and after measures

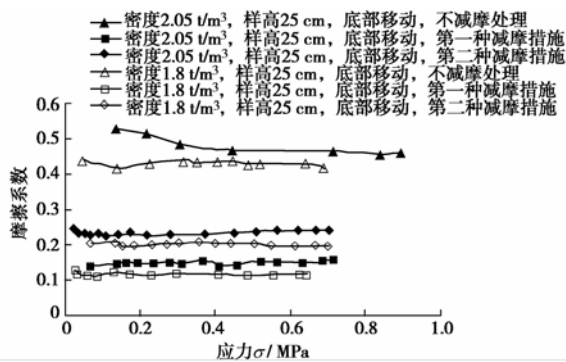


图 10 不同减摩措施下的摩擦系数

Fig. 10 Friction coefficients under different measures

本文最后指出的是,文中介绍的界面摩阻力并不是粗粒料某种特定土工试验中实际的界面摩阻力,因为它和试样在界面上的相对位移大小和方向有关。本文只是研究了与界面摩阻力有关的摩擦系数。

4 结 语

土工试验中界面摩阻力的存在对试验成果的影响不可忽视,摩阻力影响到试验成果的可靠性,摩阻力的大小和减小摩阻力的措施是普遍关心的问题。本文认为,对于粗粒料采取一定措施,摩擦系数可降至 0.1。

对于本文介绍的界面摩阻力试验方法,选取合理的试样高度和加载方式是非常重要的,否则,试验成果会产生偏差。试样高度不宜大于试样直径;试验过程中应保证试样下端产生充分变形。

界面摩擦系数与正应力大小无关,试样密度对界

面摩擦系数有一定影响,但影响很小。

对于粗粒料而言,不作减摩处理时,界面摩擦系数达 0.45 左右,对于刚性界面相对较大的土工试验,如直剪试验、压缩试验、刚性加压板的三轴试验、物理模型试验等,界面摩阻力对试验成果的影响是不可忽视的。

参考文献:

- [1] 程展林, 丁红顺. 论堆石料力学试验中的不确定性[J]. 岩土工程学报, 2005, 27(10): 1222 - 1225. (CHENG Zhan-lin, DING Hong-shun. Research on indeterminacy of rockfill test result[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2005, 27(10): 1222 - 1225. (in Chinese))
- [2] 周志刚, 李文胜, 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(3): 47 - 49. (ZHOU Zhi-gang, LI Wen-sheng, SONG Qin-de. The effect of size on tests by large direct shear apparatus[J]. Journal of Changsha Communications University, 1999(3): 47 - 49. (in Chinese))
- [3] 施建勇, 问延熙, 雷国辉, 艾英铎, 赵 阳. 固结试验及其相关问题的讨论[J]. 河海大学学报, 2004(3): 213 - 215. (SHI Jian-yong, WEN Yan-xu, LEI Guo-hui, AI Ying-bo, ZHAO Yang. Discussion on consolidation test and some relative problems[J]. Journal of Hohai University, 2004(3): 213 - 215. (in Chinese))
- [4] 赖 勇. 砂土常规三轴试验中若干问题的探讨[J]. 地基处理, 2004(9): 60 - 64. (LAI Yong. Discussion on several problems in conventional triaxial tests of sands[J]. Ground Improvement, 2004(9): 60 - 64. (in Chinese))
- [5] 易宏伟, 张少华, 李忠华. 模型边界摩擦系数的测试与减摩材料的研究[J]. 阜新矿业学院学报, 1995(1): 20 - 24. (YI Hong-wei, ZHANG Shao-hua, LI Zhong-hua. Measurement of boundary friction factors of models and studies on antifriction material[J]. Journal of Fuxin Mining Institute, 1995(1): 20 - 24. (in Chinese))
- [6] 程展林, 吴良平, 丁红顺. 粗粒土组构研究之颗粒运动[J]. 岩土力学, 2007, 28(增): 29 - 33. (CHENG Zhan-lin, WU Liang-ping, DING Hong-shun. Research on movement of particle of fabric for granular material[J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, 28(S): 29 - 33. (in Chinese))
- [7] GUO Pei-xi, LIN Shao-zhong. Numerical simulation of mechanical characteristics of coarse granular materials by discontinuous deformation analysis[C]// Proceedings of the 8th International Conference on Analysis of Discontinuous Deformation, Beijing, 2007: 57 - 60.