

文章编号:0253-9993(2008)10-1157-06

深部土-结构接触面与界面层力学特性的 直接剪切试验

周国庆¹, 夏红春^{1,2}, 赵光思¹

(1. 中国矿业大学 深部岩土力学与地下工程国家重点实验室, 江苏 徐州 221008; 2. 聊城大学 建筑工程学院, 山东 聊城 252059)

摘 要: 介绍了研究深部土与结构接触面及界面层力学特性的试验系统及研究方法, 重点阐述了模拟不同粗糙面的“旋转结构面法”及研究界面层中力学特性的“下移结构面法”。通过该设备及方法, 研究了在不同法向应力、不同结构面粗糙度等条件下, 土-结构接触面以及周围不同位置处(界面层内)土体的剪切力学特性。大量试验结果表明, 该设备及方法能够较好地再现和研究土与结构物接触面与界面层内土体的主要力学特性及其与相关因素之间的关系。

关键词: 界面层; 直接剪切; 下移结构面; 旋转结构面

中图分类号: TU452 **文献标识码:** A

Direct shear experiment of deep soil-structure interface and interface layer mechanical characteristics

ZHOU Guo-qing¹, XIA Hong-chun^{1,2}, ZHAO Guang-si¹

(1. State Key Lab. for Geomechanics and Deep Underground Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221008, China; 2. School of Civil Engineering, Liaocheng University, Liaocheng 252059, China)

Abstract: The experimental system and methods of deep soil-structure interface and interface layer mechanical characteristics especially the methods of rotating the structure surface and moving down the structure surface gradually were introduced. The shear mechanical characteristics of the soil-structure interface and the soil near the structure (interface layer) were studied under different normal stress and different structure roughness by using the DRS-1 high normal stress direct and residual shear apparatus. The experimental results show that the mechanical characteristics and its influencing factors of soil-structure interface and interface layer can be studied well by using this experimental apparatus and the methods.

Key words: interface layer; direct shear; moving down the structure surface; rotating the structure surface

1987 年以来, 我国华东矿区在深厚表土层中用冻结法和钻井法施工的立井井筒, 先后有 100 余个发生井壁横向破裂灾害, 严重影响了矿井的正常生产, 甚至引发安全事故, 造成巨大的经济损失。

对于井壁破裂的机理, 岩土工程界、采矿界以及相关领域的专家学者提出了不同的假说, 其中竖直附加力说得到了大多数专家及学者的认可。该假说认为: 特殊地层含水层水位因采矿或非采矿活动而下降, 含水层的有效应力增大, 产生固结压缩, 引起上覆土体下沉。土体在下沉过程中, 由于接触摩擦对井壁产生向下的竖直附加力, 原井筒井壁设计时未认识也未考虑此力, 附加力对井壁作用自上而下累积到一定量值后, 混凝土井壁不能承受巨大的竖直附加力而破坏, 附加力是导致众多井筒井壁发生破裂的主要原

收稿日期: 2007-11-07 责任编辑: 柴海涛

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973)基金资助项目(2002CB412704); 国家自然科学基金重点资助项目(50534040); 国家科技支撑计划资助项目(2006BAB16B01)

作者简介: 周国庆(1961—), 男, 江苏扬州人, 博士生导师。Tel: 0516-83590608, E-mail: gqzhou. cumt@ yahoo. com. cn

因^[1-4]。因此,在分析土体与井壁相互作用时,除了考虑根据土体与井壁的特性,分别采用不同的应力-应变关系外,对于土体与井壁之间的接触面,由于其特殊性质,还要考虑其可能发生既不同于结构也不同于土体的力学响应^[5-7]。

长期以来,不少学者对土-结构接触面性能的试验仪器进行了大量的研究。主要有盒式直剪仪、三轴试验仪、叠环式接触面单剪仪、扭剪仪、共振柱仪以及接触面循环加载剪切仪等^[8-12]。尽管后几种试验设备相对盒式直剪仪在某些方面可以更好地再现土-结构接触面在剪切过程中的力学特性,但是由于系统本身及试验操作过程的复杂性,盒式直剪仪的应用仍较为广泛。到目前为止,大部分仪器仅满足相对低法向应力条件下的试验要求,无法将其用于深部土-结构接触面的力学特性试验研究。

另外,在直剪试验中,由于人为固定了剪破面的位置,因此剪切破坏恰恰发生在 2 种材料的接触面上。但事实上,破坏未必一定在这个接触面上发生,在结构和土体发生相互滑移的过程中,由于结构物表面粗糙程度的影响,必然导致结构面周围一定范围内土体应力场和位移场的演变与重分布,从而使抗剪强度最弱的土体首先发生破坏,由于结构物和土体所处的应力状态、结构物表面的粗糙程度以及周围土体性质的不同,将可能使破坏处的位置不再固定^[13]。对于单剪仪,尽管通过试验可以同时得到距离结构面不同高度处土体的变形,但是所得到的土体 τ - γ 曲线中,其 τ 均取接触面处的剪切应力,显然与实际情况不符。本文简要介绍研究深部土与结构接触面及界面层力学特性的超高压直剪试验系统,以及模拟不同接触面粗糙度和研究接触面附近土体(本文称之为“界面层”)中力学特性的试验方法。

1 试验系统

试验研究用 DRS-1 型超高压直剪试验系统由主机、控制系统、测量系统以及数据采集系统 4 部分组成,如图 1 所示。

1.1 主机与控制系统

主机包括水平加载、法向加载装置;剪切框、反力架和基座等部件。水平和法向加载均采用蜗轮蜗杆及滚珠丝杆传动方式,步进电机驱动,最大出力 60 kN。针对 3 种不同大小的试样(50, 30 和 20 cm²),剪切框备有 3 套上盒和下盒及相应的透水石、垫块和加荷帽,推动框公用。反力架用来承受剪切反力,并支撑水平荷载传感器。基座由型钢制成,以支撑整个设备。

1.2 测量与数据采集系统

试验测量参数包括剪切荷载、法向荷载、剪切位移和法向位移。剪切和法向荷载采用拉式负荷传感器量测,剪切位移和法向位移采用位移传感器量测。

本试验系统由计算机及 DATATAKER515 组成的数据采集系统对试验测量参数进行采集, DATATAKER515 将接收到的直剪系统的输出电压输入计算机,通过事先标定曲线及换算关系求出相应的输出变量。

2 试验方法

2.1 试验材料的选取

研究表明,土的抗剪强度受众多因素影响。不同地区、不同成因、不同类型土的抗剪强度往往差别很大,即使同一种土,在不同密度、含水量、剪切速率以及法向应力等条件下,其抗剪强度的数值及影响因素的贡献也不相同^[7]。以目前的试验设备与技术条件,若想取得原状土样较为困难。为使试验具有可重复性,以便于研究结果的评价与比较,本文试验材料主要选用福建标准中砂。

2.2 结构面的选取及粗糙度的确定

由于我国目前煤矿立井主要采用混凝土井壁,因此,比较理想的情况是从现场取原状土样进行土与混



图 1 DRS-1 型高压直剪试验系统

Fig. 1 DRS-1 high stress direct shear experiment system

凝土接触面力学特性的试验。但考虑到混凝土试块的可重复利用性差，本文用粗糙钢板作为理想界面研究深部土与井壁接触面的力学特性。为了验证粗糙钢板试验所得到的接触面受力变形基本规律的合理性和实用性，进行了不同法向应力条件下的标准砂与粗糙混凝土接触面的直剪试验。图 2 为不同法向应力条件下，粗糙钢板（表面粗糙度分维数 $D=1.149$ ）、粗糙混凝土（实测表面粗糙度分维数 $D=1.146$ ，具体测试方法见文献 [14]）与标准砂的直剪试验结果。

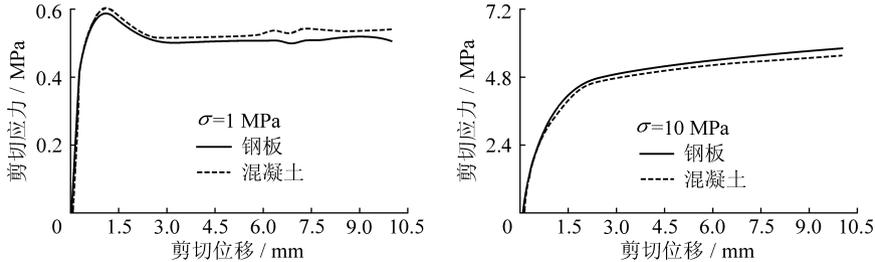


图 2 粗糙钢板（或粗糙混凝土）-标准砂接触面直剪试验结果

Fig. 2 Direct shear results of coarse steel plate and concrete-standard sand interface

由图 2 可见，在各种应力条件下，二者与标准砂的直剪试验结果的曲线形状基本相同，呈现出较为一致的力学特性，可将粗糙钢板与标准砂接触面的试验结果沿用到混凝土与标准砂接触面的力学特性分析之中，而不会产生较大的误差。

对混凝土表面粗糙度的评定，目前主要有灌砂法、硅粉堆落法、触针法以及分数维法等，由于前 3 种方法的局限性^[14]，本文选用分数维法对混凝土表面粗糙度进行评定。

根据分形的自相似性原理，混凝土表面可以认为是自相似的，在某一个标度域内，只需测定任意局部区域的分形维数，即为整个断面的分形维数，这一原理为试验及理论分析提供了极大的方便。

本文使用文献 [14] 中的轮廓曲线仪绘出具有代表性的曲线，然后根据所需精度选择所需码尺将曲线近似为非等边长生成元，量出各边长并将其值输入自行编制的分形维数计算程序，得到该曲线的分形维数，最后求出所有曲线分形维数的均值，则得到所研究混凝土表面粗糙度的分形维数。

2.3 试验用钢板粗糙度确定的工程依据及实现方法

结构-土接触面的力学特性受土性、结构面粗糙程度、法向应力、剪切速率等多种因素的影响，其中结构面粗糙度是一个重要因素。然而，如前所述，结构表面形状千差万别，呈现出不同的特征，很难精确描述其特征。同样，在试验室内完全再现实际工程的结构面也是不可能的，只能通过一定的技术手段来模拟实际结构的粗糙表面。本文采用特制的粗糙钢板接触面以及旋转不同角度的方法模拟混凝土表面的不同粗糙度。图 3 为实际的预制混凝土桩及灌注桩表面，试验前对其结构表面进行了测试，其表面粗糙度的分维数分布范围列于表 1，大部分桩基表面粗糙度分维数在 1.001 ~ 1.140 之间。对于矿山井壁，由于其所处位置的特殊性，无法实测其表面粗糙度，但考虑到其常见的施工工艺，可以判断其表面粗糙度基本接近于混凝土灌注桩。

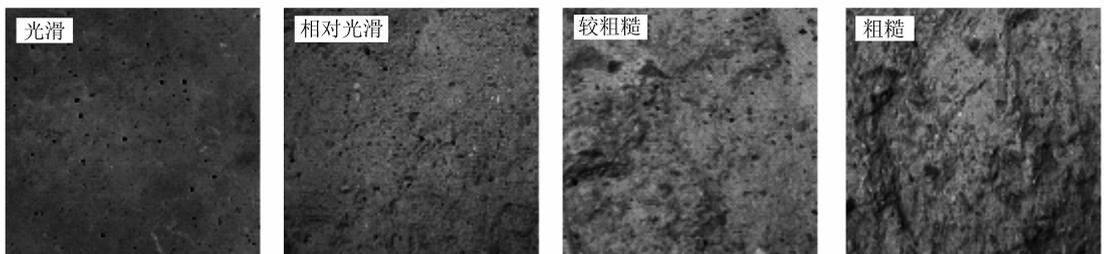


图 3 不同粗糙程度的混凝土表面

Fig. 3 Concrete surface of different rough

表 1 实测工程结构表面粗糙度分维数

Table 1 Roughness of structure surface

工程结构名称	分形维数范围	实测曲线数目
预制桩	$1.001 \leq D < 1.005$	18
	$1.005 \leq D < 1.010$	5
灌注桩	$1.108 \leq D < 1.120$	9
	$1.120 \leq D \leq 1.149$	22

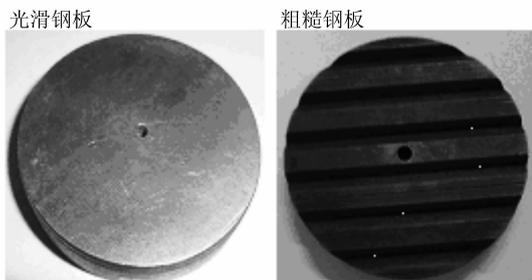


图 4 试验用模拟混凝土表面的粗糙钢板

Fig. 4 Steel plate surface for experiment

试验特制如图 4 所示的光滑及粗糙钢板, 采用旋转钢板与剪切方向成不同角度, 即改变粗糙钢板凹槽与剪切方向之间夹角 θ 的方法 (图 5), 以模拟不同粗糙程度的结构面; 按照前述结构面粗糙度的确定方法即可计算出旋转至不同位置时, 所代表结构面粗糙度的分维数. 当钢板与剪切方向平行时, 粗糙度分维数 $D=1$, 此时可以模拟预制桩、沉井井壁等较为光滑的结构面; 当钢板与剪切方向垂直时, 粗糙度分维数 $D=1.159$, 旋转角度 $\theta=15, 30, 45, 60, 75^\circ$ 时, 结构面粗糙度分维数 D 分别为 1.012, 1.043, 1.084, 1.122, 1.149. 此时可以模拟灌注桩、现浇混凝土井壁等较为粗糙的表面; 而光滑钢板可以模拟钢管桩等极为光滑的结构面. 通过旋转粗糙钢板来模拟结构面不同粗糙度的方法基本可以涵盖工程中常见的情况 (表 1), 从而实现使用同一块粗糙钢板即可模拟不同粗糙程度的混凝土结构面.

2.4 土-结构界面层力学特性研究试验方法

研究土-结构接触面周围一定位置处土体力学特性的比较理想的方法是, 当结构物和土体发生相对滑移时, 能够同时测出不同位置处土体的应力和位移的分布, 据此确定出最容易发生破坏的位置. 显然, 此方法在实际操作过程中难以实现. 本文采用将结构面置于直剪仪下盒, 通过不断微调下移结构面位置的试验方法

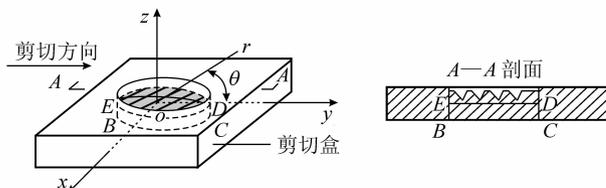


图 5 试验方法

Fig. 5 Experimental method

法 (如图 5 所示, 通过改变粗糙钢板下垫块 BCDE 的厚度即可实现结构面的不断下移), 实现对距离结构面不同位置处, 即界面层内土体力学特性的研究.

3 初步试验结果分析

采用上述方法分别对土-结构接触面和界面层内土体的力学特性进行了试验研究. 图 6, 7 分别为不同法向应力条件下, 不同粗糙度的结构-土接触面及界面层内土体的剪切应力-剪切位移曲线.

试验发现, 施加不同法向应力时, 结构面粗糙程度对土-结构接触面力学特性的影响程度不同. 当法向应力相对较低时 (图 6 (a)), 随着结构面粗糙程度增加, 接触面处剪切应力-剪切位移曲线的软化特性不但逐渐增强, 而且其峰值应力逐渐增加, 其残余应力与结构面粗糙程度基本无关, 表现为其曲线随着剪切位移的增加而逐渐重合. 而当法向应力相对较高时 (图 6 (b), (c), (d)), 结构面粗糙程度基本不影响土-结构接触面处力学特性, 其表现为剪切应力-剪切位移曲线均呈应变硬化型, 而且除 $\sigma=10 \text{ MPa}$, $D=1$ 的相对光滑的结构面外, 其余曲线基本重合.

由图 7 可见, 当法向应力较低时, 对于相对光滑的结构面, 随着与结构面距离的增加, 土体的软化特性逐渐增强, 但当距离增大到一定值后则基本不再变化 (图 7 (a)), 本文将这一影响土-结构面力学特性的土体范围为“界面层”; 而对于较粗糙的结构面, 尽管界面层内土体随着与结构面距离的增加, 其峰值剪应力增大, 但土体均表现出应变软化特性 (图 7 (b)). 同时由图 7 (a), (b) 还可以看出, 在接触

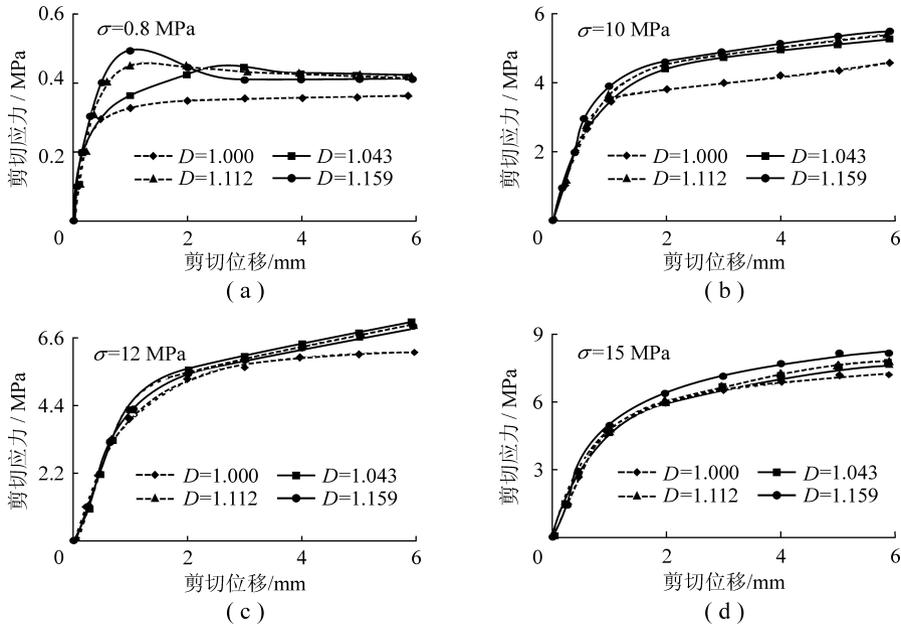


图 6 不同粗糙度的结构-土接触面处剪切应力-剪切位移曲线

Fig. 6 Shear stress-displacement curves of different rough structure-soil interface

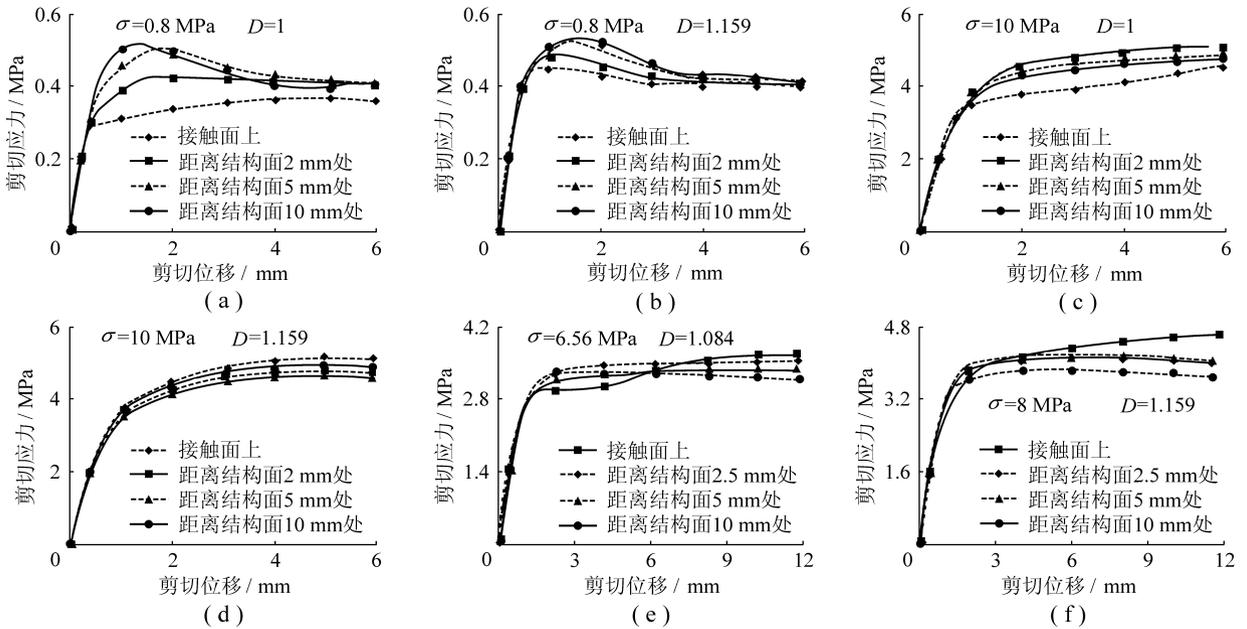


图 7 距离结构面不同位置处剪切应力-剪切位移曲线

Fig. 7 Shear stress-displacement curves of different place from structure surface

面上土体的峰值剪应力低于其它位置处土体的峰值剪应力；而当法向应力相对较高时，界面层的土体均表现出应变硬化特性（图 7 (c) ~ (f)），随着距离的增加，界面层中土体的剪切强度将可能低于接触面处的剪切强度，即剪切破坏面并非接触面，而在界面层中。

4 结 论

(1) 采用旋转粗糙钢板与剪切方向成不同角度的方法模拟不同粗糙程度的结构面。该法可以模拟工

程中常见的混凝土结构粗糙表面, 并有其独特的优点: 模拟结构面试块可以重复使用, 大大简化了试验准备工作, 减少了试验系统误差, 提高了试验结果的准确性和可比较性; 采用分维数变量定量确定结构面粗糙度, 可在一定条件下实现结构面粗糙度的定量描述。

(2) 采用微调下移模拟结构面位置的方法, 研究获得了界面层内土体的剪切力学特性; 改变了传统单剪仪所得到的距离结构面不同高度处土体的 τ - γ 曲线中, 其 τ 均取接触面处的剪切应力的不足。

(3) 进行了不同法向应力条件下的标准砂与粗糙混凝土接触面以及粗糙钢板接触面的直剪试验。研究表明, 在不同法向应力条件下, 二者试验结果的曲线形状基本相同, 呈现出较为一致的力学特性, 因而可以将粗糙钢板与标准砂接触面的试验结果沿用到混凝土与标准砂接触面的力学特性分析之中。

(4) 法向应力和结构面粗糙程度是影响土-结构接触面及界面层内土体力学特性的关键因素, 深部土-结构接触面与界面层力学特性与浅部土有本质区别, 将另文阐述。

参考文献:

- [1] 崔广心, 杨维好, 吕恒林. 深厚表土层中的冻结壁和井壁 [M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 1998.
- [2] 周国庆, 程锡禄. 特殊地层中的井壁应力计算问题 [J]. 中国矿业大学学报, 1995, 24 (4): 24-30.
Zhou Guoqing, Cheng Xilu. Study on the calculation of shaft lining surrounded by special strata [J]. Journal of China University of Mining and Technology, 1995, 24 (4): 24-30.
- [3] 周国庆. 特殊地层含水层注浆加固参数与井壁附加力关系的研究 [D]. 徐州: 中国矿业大学, 1996.
Zhou Guoqing. Study on relationships between the additional vertical force of shaft lining and the grouting parameters of aquifer in special strata [D]. Xuzhou: China University of Mining & Technology, 1996.
- [4] Zhou Guoqing, Cui Guangxin, Lü Henglin, et al. Simulation study on reinforcing overburden to prevent and cure the rupture of shaft lining [J]. Journal of China University of Mining and Technology, 1999, 9 (1): 1-7.
- [5] Brandt J R T. Behavior of soil-concrete interfaces [D]. Edmonton, Alberta, Canada: The University of Alberta, 1985.
- [6] Kishida H, Uesugi M. Tests of the interface between sand and steel in the simple shear apparatus [J]. Geotechnique, 1987 (37): 45-52.
- [7] 钱家欢, 殷宗泽. 土工原理与计算 (第2版) [M]. 北京: 中国水利水电出版社, 1996.
- [8] Clough G W, Duncan J M. Finite element analysis of retaining wall behavior [J]. Journal of Soil Mechanics and Foundation Engineering Division, ASCE, 1971, 97 (12): 1 657-1 673.
- [9] Vucetic M, Lacasse S. Specimen size effect in simple shear test [J]. Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE, 1982, 108 (12): 1 567-1 585.
- [10] Desai C S, Rigby D B. Cyclic interface and joint shear device including pore pressure effects [J]. Geotech & Geotec Engng, 1997, 123 (6): 568-579.
- [11] 俞培基, 秦蔚勤. 在共振柱仪上研究接触面的动力变形特性 [J]. 水利学报, 1995, 26 (1): 81-85.
Yu Peiji, Qin Weiqin. Cyclic deformation behavior of interface studied on research column test device [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1995, 26 (1): 81-85.
- [12] 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 Jianmin. Development and application of cyclic shear apparatus for soil-structure interface [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2003, 25 (2): 149-153.
- [13] 夏红春. 高应力条件下土-结构接触面与界面层力学特性研究 [D]. 徐州: 中国矿业大学, 2006.
Xia Hongchun. Mechanical characteristics of soil-structure interface and interface layer under high normal stress condition [D]. Xuzhou: China University of Mining & Technology, 2006.
- [14] 杜时贵, 葛军荣. 岩石节理粗糙度系数 JRC 测量新方法 [J]. 西安公路交通大学学报, 1999, 19 (2): 10-13.
Du Shigui, Ge Junrong. The new measuring method of joint roughness coefficients [J]. Journal of Xi'an Highway University, 1999, 19 (2): 10-13.