

文章编号: 1000-7598-(2005) 09-1374-05

夹有泥皮粗粒土与结构接触面力学特性试验研究

张 嘎, 张建民

(清华大学 岩土工程研究所, 北京 100084)

摘 要: 进行了粗粒土与结构之间夹有泥皮和无泥皮两种状态的接触面单调和循环剪切试验, 初步研究了夹有泥皮时接触面静动力学特性的规律和作用机理。试验表明, 泥皮对粗粒土与结构接触面的力学特性有重要影响。当泥皮不厚时, 接触面仍表现出粗粒土与结构接触面的基本力学特性。泥皮越厚, 接触面的抗剪强度越低, 相对法向位移会越大。当泥皮极厚时, 泥皮将隔断粗粒土与结构面的接触而成为泥皮与结构接触面。泥皮对接触面力学特性的影响程度不仅与泥皮本身的特性及其厚度有关, 还与构成接触面的结构面材料与粗粒土的特性有关。

关 键 词: 接触面; 粗粒土; 泥皮; 试验; 力学特性

中图分类号: TU 411

文献标识码: A

Experimental study on behavior of soil-structure interface with slurry

ZHANG Ga, ZHANG Jian-min

(Institute of Geotechnical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: The mechanical behavior and mechanism of the interface between structure and coarse grained soil with slurry were investigated through conducting monotonic and cyclic tests of both interfaces with and without slurry. The interface with slurry between structure and coarse grained soil can be thought as the one between structure and slurry if the slurry is thick enough. Whereas, the behavior of the interface with slurry would be similar to that of the interface between structure and coarse grained soil if the slurry is not thick enough, which is only affected quantitatively by the slurry. For example, the shear strength would be reduced and the compression would be increased if the slurry becomes thicker. The behavior and thickness of slurry as well as the behavior of structure material and soil are main factors to the behavior of the interface between structure and coarse grained soil with slurry.

Key words: interface; coarse-grained soil; slurry; test; mechanical behavior

1 引 言

土与结构接触面的静动力学特性对土体与结构物系统尤其是对结构物的应力分布具有重要影响。现已进行了多种接触面试验, 对各种土与结构接触面力学特性的基本规律和主要影响因素进行了较深入的研究, 并已取得了一些重要成果^[1~8]。如 Clough 和 Duncan 基于直剪试验结果提出了剪应力与相对切向位移的双曲线关系^[1], 张嘎等进行了较系统的单调和循环剪切试验, 研究了粗粒土与结构接触面的静动力学特性^[7, 8]。

在实际的粗粒土等材料(如覆盖层)中进行防渗墙等结构施工时, 一般采用泥浆护壁再行浇筑防渗墙的方法, 这样在结构与粗粒土之间会或多或少

的形成一层泥皮。这层泥皮可能会改变原来粗粒土与结构接触面的力学特性, 对防渗墙等结构的力学响应产生较明显的影响, 因此受到工程界的关注。但目前关于泥皮对粗粒土与结构接触面的影响尚无较系统的研究成果发表。

本文对夹有泥皮和无泥皮两种情况下的粗粒土与结构接触面进行了单调和循环剪切试验, 采用对比分析方法研究了泥皮对该类接触面力学特性的影响, 初步探讨了有泥皮时粗粒土与结构接触面力学特性的规律及受力变形中的作用机理。

2 接触面试验

2.1 试验设备

接触面试验采用笔者等新研制的大型土与结

收稿日期: 2004-04-03

修改稿收到日期: 2004-06-27

基金项目: 国家自然科学基金项目资助 (No. 50279015, 50309008)。

作者简介: 张嘎, 男, 1976 年生, 博士, 讲师, 主要从事岩土工程的教学科研工作。E-mail: zhangga@tsinghua.edu.cn

构接触面循环加载剪切仪(TH-20t CSASSI)进行^[9]。该设备采用了先进的加载控制和现代测量技术,实现了加载和数据采集的自动化,可进行各种土与结构接触面单调和循环剪切试验,还可进行大型侧限压缩试验。与国内外同类试验设备相比,在试验及测试技术方面具有以下新特性:(1)该设备具有较大的接触面尺寸(长 50 cm、宽 36 cm),可施加较大的荷载(接触面切向与法向均为 200 kN)和相对位移(接触面切向 15 cm、法向 5 cm),适用于粒径较大的粗粒土;(2)直接在接触面上高精度地施加法向边界条件和测量受力变形;(3)可实现常应力、常位移和常刚度等法向边界条件;(4)可从细观角度观察和测量接触面变形及结构面附近土颗粒的运动。因此,该设备能够较好地再现包括粗粒土在内的各类土与结构形成的接触面在单调和循环荷载作用下的力学响应,适于对夹有泥皮的粗粒土与结构接触面进行试验研究。

2.2 试验条件

试验粗粒土采用察汗乌苏混凝土面板堆石坝覆盖层中的卵石混合土,根据实际测量级配通过等量替代确定其试验级配,粒径在 0.1~40 mm 范围内变化(干密度 $\rho_d=2.1 \text{ g/cm}^3$, 平均粒径 $d_{50}=15 \text{ mm}$)。防渗墙材料采用现浇混凝土模拟,未经任何光滑处理,表面较为粗糙。为了对比分析不同接触面的响应差异,还采用粗糙度为 1 mm 的钢板与均匀砾构成的接触面进行试验,其中均匀砾为人工开采料,粒径在 5~10 mm 范围内,级配较为均匀(干密度 $\rho_d=1.75 \text{ g/cm}^3$, 平均粒径 $d_{50}=7 \text{ mm}$)。试验时土料装入土容器车内,高 25 cm,采用分层击实的方法来达到试验所需的干密度。泥皮材料为粘性土,塑性指数为 27,试验采用的含水量为 26%。制备泥皮时将泥皮材料按规定厚度平铺在粗粒土上,然后轻轻压平,从而模拟在粗粒土与结构之间存在泥皮的情形。直剪试验表明泥皮材料的强度指标较低,其摩擦角远小于粗粒土。

接触面试验包括不同法向应力条件下的单调和往返剪切两类,加载按位移控制,其中往返剪切试验采用对称剪切,对混凝土与粗粒土接触面取幅值为 35 mm,对钢板与均匀砾接触面取幅值为 50 mm。两种试验剪切速率均为 1 mm/min。

3 试验结果及分析

本文统一规定相对法向位移以压缩为正,膨胀为负。由于试验过程中接触面的面积不变,因此相对法向位移的变化可以看作是接触面的体积变化。

3.1 单调应力-应变关系

图 1 和图 2 分别给出了不同法向应力条件下卵石混合土与混凝土之间无泥皮和有泥皮(厚 3 mm)两种接触面单调剪切试验得到的剪应力 τ 与相对切向位移 u 、相对法向位移 v 与相对切向位移 u 的关系曲线,图中不同形状的点表示不同法向应力条件下的试验结果。可以看出,卵石混合土与混凝土之间有无泥皮存在的两种接触面都表现出与一般粗粒土与结构接触面相似的规律^[7]:切向应力与相对位移关系未出现应变软化;剪切作用引起了较显著的

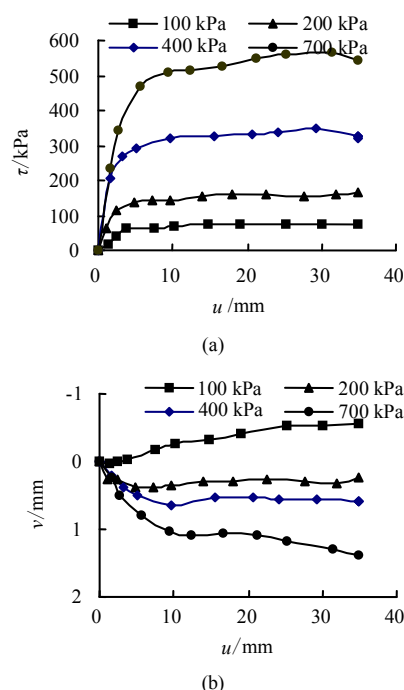


图 1 无泥皮时接触面单调剪切试验结果

Fig. 1 Monotonic test results of the interface without slurry

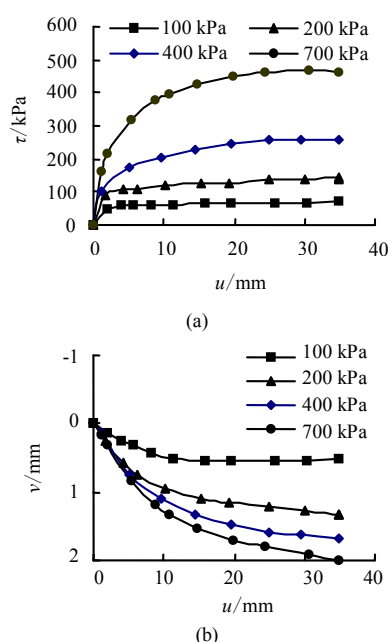


图 2 泥皮厚 3 mm 时接触面单调剪切试验结果

Fig. 2 Monotonic test results of the interface with slurry

相对法向位移, 法向应力越大, 剪切作用引起的相对法向位移也就越大; 剪应力和相对法向位移都随着相对切向位移增加而逐渐增大, 而且当剪应力已基本达到峰值时, 相对法向位移仍在变化。有无泥皮存在的两种接触面的差别主要表现在定量规律上。在相同法向应力条件下, 有泥皮接触面的峰值剪应力有所降低, 相对法向位移有所增大, 特别是在法向应力为 100 kPa 时, 相对法向位移由无泥皮时的以剪胀为主变为有泥皮时的以剪缩为主。

图 3 给出了卵石混合料与混凝土之间有无泥皮两种条件下试验测得的抗剪强度与法向应力的关系及线性拟合结果, 其中抗剪强度取单调剪切作用下接触面的峰值剪应力。由图可知, 在本文试验的法向应力范围内, 有无泥皮存在的两种接触面的抗剪强度与法向应力关系均表现出较好的线性。因此, 接触面的抗剪强度可用摩尔-库仑准则中的摩擦角 φ 来描述。试验测得无泥皮的接触面摩擦角为 40° , 而有 3 mm 厚的泥皮的接触面摩擦角降为 34° , 这表明在粗粒土与结构之间存在泥皮时未改变抗剪强度与法向应力的定性关系, 但使得接触面的摩擦角有所降低。

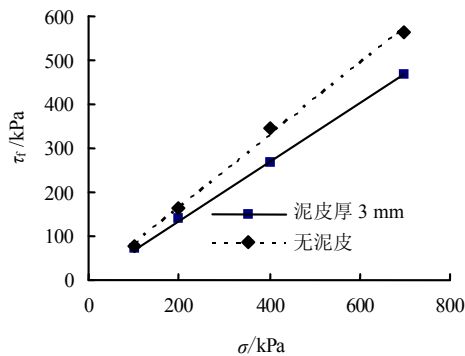


图 3 接触面抗剪强度与法向应力关系
Fig. 3 Monotonic shear strength of the interface

3.2 循环应力-应变关系

图 4 和图 5 分别给出了法向应力为 700 kPa 条件下卵石混合土与混凝土之间无泥皮和有泥皮 (厚 3 mm) 两种接触面的往返剪切试验结果, 包括第 1 个剪切循环内的剪应力 τ 与相对切向位移 u 以及相对法向位移 v 与相对切向位移 u 的关系。对比两图可知, 卵石混合土与混凝土之间有无泥皮存在的两种接触面都表现出与一般粗粒土与结构接触面相似的规律^[8]: 接触面的剪应力和相对法向位移的变化规律与剪切方向存在较大关联, 表现出一定的接触面异向性; 剪切过程中接触面的峰值剪应力变化不大, 相对法向位移总体上增加; 当发生卸载时接触面的相对法向位移有所增大, 表现出卸载体缩特性。

有无泥皮存在的两种接触面的差别也主要表现在定量规律上, 如有泥皮接触面峰值剪应力有所降低, 初始剪切引起的相对法向位移有所增大。

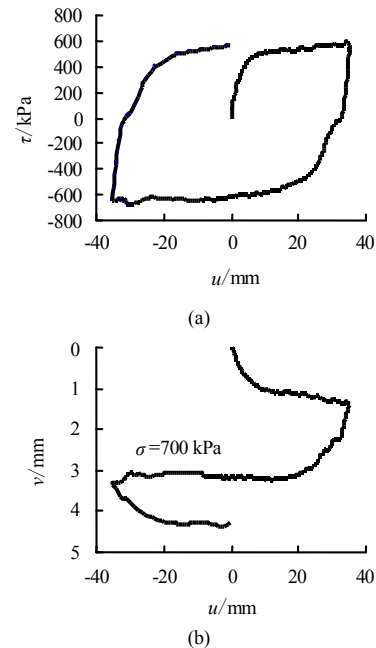


图 4 无泥皮的接触面往返剪切试验结果
Fig. 4 Cyclic test results of the interface without slurry

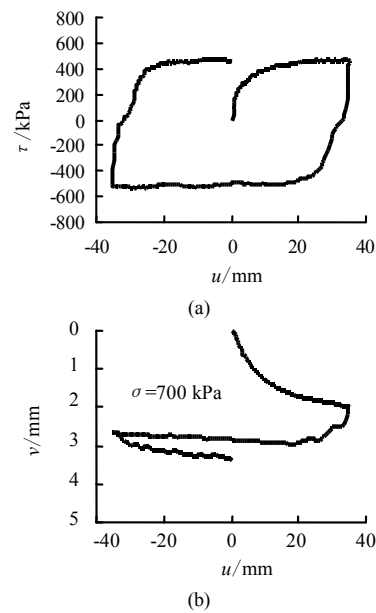


图 5 泥皮厚 3 mm 的接触面往返剪切试验结果
Fig. 5 Cyclic test results of the interface with slurry

图 6 分别给出了泥皮厚 3 mm 的接触面在往返剪切 1 个循环前后土表面的照片, 图中深色部分为泥皮, 浅色为粗粒土颗粒。可以看出剪切作用使得原来粗粒土表面的泥皮有一部分进入其附近粗粒土的孔隙内, 同时有些粒径较大的土颗粒已经露出表面。这表明部分泥皮在剪切过程中进入结构面附近的土中, 并未完全隔断粗粒土与混凝土面的接触, 因此接触面还表现出一般粗粒土与混凝土接触面的

特性;同时,泥皮使得粗粒土与混凝土的接触面积减小,造成接触面的抗剪强度有所降低,泥皮本身的较高压缩性及其进入粗粒土的孔隙都使得接触面的相对法向位移较无泥皮情形有所增大。



(a) 初始状态

(b) 剪切后

图 6 泥皮厚 3 mm 接触面的照片

Fig. 6 Photo of the interface with slurry of 3mm

3.3 影响因素

为了讨论泥皮厚度对粗粒土与结构接触面力学特性的影响,图 7 给出了法向应力为 700 kPa 条件下卵石混合土与混凝土之间泥皮厚度增为 10 mm 时的接触面往返剪切试验结果。对比图 5 和图 7 有关结果可以发现,泥皮变厚后接触面的抗剪强度进一步降低,剪切引起的接触面体缩更为明显,而且剪应力和相对法向位移的接触面异向性也大为减弱。这表明泥皮的存在使得原来粗粒土与结构接触面的力学特性发生变化,泥皮厚度增大使得接触面的剪切和体变特性都由粗粒土与结构接触面逐渐趋向于泥皮与结构接触面。

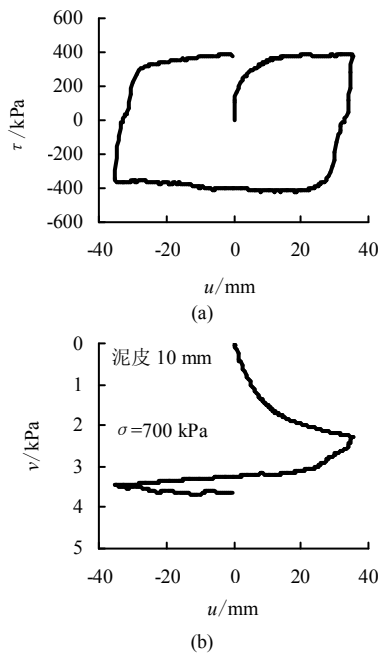


图 7 泥皮厚 10 mm 的接触面往返剪切试验结果

Fig. 7 Cyclic test results of interface with slurry of 10 mm

为了讨论构成接触面的材料对夹有泥皮时的粗粒土与结构接触面力学特性的影响,图 8 和图 9

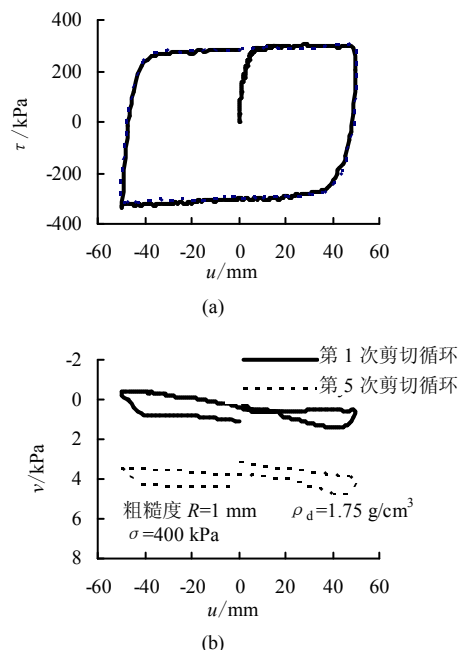


图 8 无泥皮的均匀砾型接触面往返剪切试验结果

Fig. 8 Cyclic test results of interface by homo-gravel without slurry

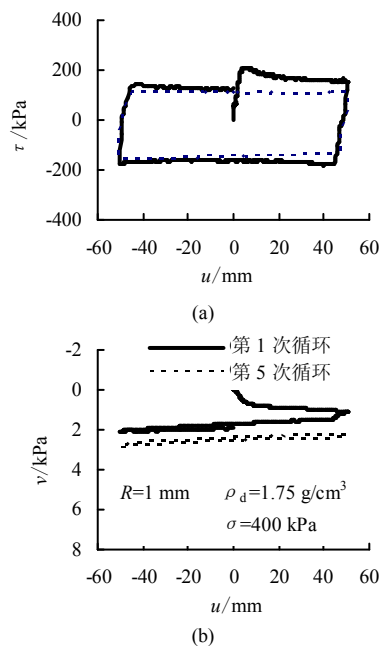


图 9 泥皮厚 3 mm 时的均匀砾型接触面往返剪切试验结果

Fig. 9 Cyclic test results of interface by homo-gravel with slurry

分别给出了法向应力为 400 kPa 条件下均匀砾与粗糙钢板之间无泥皮和有 3 mm 厚泥皮这两种接触面的往返剪切试验结果。从图 8 可以看出,均匀砾与粗糙钢板之间无泥皮的接触面表现出包括无明显应变软化、接触面异向性、相对法向位移在剪切过程中不断累积等粗粒土与结构接触面力学特性的典型规律。图 9 则表明均匀砾与粗糙钢板之间有泥皮的接触面出现较明显的应变软化,抗剪强度在剪切过程中明显降低且远小于无泥皮接触面,相对法向位移除在第一个剪切循环内变化较大外,随循环次数

增加变化不大。有泥皮和无泥皮的接触面不仅在定量上差别很大,而且在定性规律上也不相同,有泥皮接触面已经明显表现出某些泥皮本身的力学特性。试验结束后观察均匀砾表面发现,由于均匀砾级配较均匀,在剪切中泥皮较难进入均匀砾内部,而只是发生剪切压密,从而在均匀砾与结构面之间形成了一层泥皮,隔断了两者的接触。这与图 6 所示情况明显不同。由于结构面与泥皮接触面强度大于泥皮本身的强度,剪切主要发生在泥皮中,从而使得该接触面的力学特性与泥皮较为接近。

虽然均匀砾与粗糙钢板接触面和卵石混合土与混凝土接触面在无泥皮时的力学响应比较接近,泥皮厚度也均为 3 mm,但由于两种土的几何特性(如级配和最大粒径)不同,因此两种接触面的力学响应差异很大。上述分析表明,除了泥皮的特性及其厚度之外,构成接触面的粗粒土与结构面的特性也是夹有泥皮接触面力学特性的主要影响因素。

3.4 有泥皮接触面的受力变形机理

一般来说,粗粒土与结构接触面(无泥皮)和泥皮与结构接触面(泥皮极厚)是夹有泥皮的粗粒土与结构接触面的两个极端情况。对于由粗粒土与结构形成的接触面,随着粗粒土与结构之间的泥皮增厚,其力学特性将由无泥皮情形向泥皮极厚情形过渡。对于泥皮不是很厚的情形,由于粗粒土的粒径较大,在剪切过程中泥皮材料会部分进入粗粒土的孔隙内,还不能形成一完整层来隔断粗粒土与结构面的接触,但会减少这种接触,在接触面上存在着粗粒土、泥皮和结构三种材料的相互作用。此时,接触面还表现出粗粒土与结构接触面的基本力学特性,同时泥皮会导致其出现抗剪强度降低、相对法向位移增大等定量规律上的差异。达到泥皮极厚这一条件不仅与泥皮本身的厚度有关,还与结构面和粗粒土的特性尤其是几何特性存在很大关联。

需要指出,泥皮材料及其存在状态(如含水量,密度等)受到土体与结构物系统的施工条件和实际运行工况的控制和影响,加之泥皮的厚度沿接触面的分布也很不均匀,而泥皮的状态又会极大地影响到泥皮乃至土与结构接触面的力学特性。因此,粗粒土与结构之间存在泥皮的接触面的力学特性及影响因素更为复杂。本文只是在较理想条件下对这一课题进行了初步试验研究,还有待从现场调查和室内试验等方面进行更为深入的研究。

4 结 语

本文进行了粗粒土与结构之间有无泥皮的接触面单调和循环剪切试验,通过对比分析,探讨了

有泥皮接触面力学特性的规律,初步阐明了泥皮在粗粒土与结构接触面受力变形中的作用机理。得到以下几点初步结论:

(1) 泥皮对粗粒土与结构接触面的力学特性有重要影响,当泥皮极厚时,泥皮将隔断粗粒土与结构面的接触而成为泥皮与结构接触面。

(2) 当泥皮不很厚时,接触面仍表现出与粗粒土与结构接触面相近的力学特性;泥皮越厚,接触面的抗剪强度一般越低,相对法向位移会越大。

(3) 泥皮对粗粒土与结构接触面力学特性的影响程度不仅与泥皮厚度有关,还与构成接触面的结构面与粗粒土的特性(包括几何特性)有关。

参 考 文 献

- [1] Clough G W, Duncan J. M. Finite element analysis of retaining wall behavior[J]. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE*, 1971, 97 (SM12): 1657—1672.
- [2] Desai C S, Drumm E C, Zaman M M. Cyclic testing and modeling of interfaces[J]. *Journal of Geotechnical Engineering*, 1985, 111(6): 793—815.
- [3] Uesugi M, Kishida H. Frictional resistance at yield between dry sand and mild steel[J]. *Soils and Foundations*, 1986, 26(4): 139—149.
- [4] 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): 1 096—1 105.
- [5] 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 structure material[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 1994, 16 (3): 14—22.
- [6] 胡黎明, 濮家骝. 土与结构物接触面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.
- [7] 张嘎, 张建民. 粗粒土与结构接触面单调力学特性的试验研究[J]. *岩土工程学报*, 2004, 26 (1): 21—25.
ZHANG Ga, ZHANG Jian-ming. Experimental study on monotonic behavior of interface between soil and structure [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2004, 26 (1): 21—25.
- [8] 张嘎, 张建民. 循环荷载作用下粗粒土与结构接触面变形特性的试验研究 [J]. *岩土工程学报*, 2004, 26 (2): 254—258.
ZHANG Ga, ZHANG Jian-ming. Experimental study on cyclic behavior of interface between soil and structure[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2004, 26 (2): 254—258.
- [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-ming. Development and application of a cyclic shear apparatus for soil-structure interface[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2003, 25 (2): 149—153.