

自钻式原位剪切旁压仪的开发及应用

徐光黎¹, 张晓伦², 王春艳¹

(1. 中国地质大学岩土钻掘与防护教育部工程研究中心, 湖北 武汉 430074; 2. 广州市设计院, 广东 广州 510620)

摘要: 精确地评价土的力学性质, 提供可信赖的设计参数, 对岩土工程设计具有重要的现实意义。在现有的试验方法中, 土的强度和变形参数是由精度相异的不同试验方法得出的, 并且不可避免存在不同程度地扰动土体结构, 释放土中应力。自钻式原位剪切旁压仪采用自钻式钻进, 其独特的结构和加载方式使该方法能够同时直接测出土的强度和变形参数, 还能得到静止土压力、剪切反力系数, 评价桩周摩擦力等力学参数。由于它是一种在钻孔内的测试技术, 所以能获得土层中不同深度的力学参数。试验结果表明, 自钻式原位剪切旁压仪特别适合于难易采样、制样的易扰动、强度低的土层, 如砂性土、淤泥质土的强度试验。

关键词: 原位测试技术; 自钻式原位剪切旁压仪; 加载方式; 强度参数; 变形参数

中图分类号: TU413

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2010)06-0950-06

作者简介: 徐光黎(1963-), 男, 浙江金华人, 博士, 教授, 博士生导师, 从事岩土工程的教学与科研工作。E-mail: xu1963@cug.edu.cn。

Development and application of self-boring in-situ shear pressuremeter

XU Guang-li¹, ZHANG Xiao-lun², WANG Chun-yan¹

(1. Engineering Research Center of Rock-Soil Drilling & Extraction and Protection of Ministry of Education, China University of

Geosciences, Wuhan 430074, China; 2. Guangzhou Design Institute, Guangzhou 510620, China)

Abstract: It is of great importance to precisely appraise the mechanical characteristics and to provide credible design parameters of soils for the design of foundation engineering. At present, the strength and deformation parameters are tested by different test methods whose precisions differ from each other, and the soils are disturbed inevitably to some degree, so do the stresses in the soils. The self-boring in-situ shear pressuremeter test, namely SBISP, adopts the self-boring technique. Its unique structure and loading method make it possible to directly attain many mechanical parameters, such as the strength and deformation parameters, earth pressure at rest, coefficient of subgrade shear reaction and pile friction. The SBISP test is a testing technique in the drilling boreholes, so it can obtain the mechanical parameters of the soils at different depths. The results of the field tests show that SBISP can obtain the strength and deformation parameters at the same time by one test, and that the values tested by SBISP can be used as the corresponding ones.

Key words: in-situ testing technique; self-boring in-situ shear pressuremeter test; loading method; strength parameter; deformation parameter

0 引言

国内外许多学者都在探索研制、开发室内的或原位的土工试验方法^[1-7]。室内试验能很好地控制试验的排水条件、应变和应力条件, 试验本身精度高, 再现性强。但是, 室内试验试样体积小, 脱离附存的地质环境、应力释放和原始结构在不同程度地被破坏, 而且试验条件与实际问题的边界条件相异, 所以室内试验得出的结果有不能完全反映实际问题之处。在原位试验方法中, 代表性的有静力触探、十字板剪切试验、旁压试验和平板载荷试验等方法, 无需采样, 能够在原始应力环境中进行测试。但是, 由于难以控制土中

的排水条件, 孔隙水压、应力、应变分布不均, 边界条件含糊等原因, 给结果解析上造成数学上的或物理上的困难。触探试验和十字板剪切试验能直接或间接地测出土的抗剪强度, 但不能评价土的变形参数。旁压试验和平板载荷试验能直接评价土的变形参数, 但不能评价土的抗剪强度。现有的试验方法测试项目单一, 不能系统地获取土的力学参数, 土的强度和变形参数是由精度相异的不同试验方法得出的, 难以系统

基金项目: 国家自然科学基金项目(40572152); 留学回国人员启动基金项目

收稿日期: 2009-02-12

地评价土的力学参数的概率统计特征。

中国科学院院士沈珠江教授指出^[5]：“要取得可靠的土质参数，只有通过原位测试……”。开发研制多功能的自钻式原位测试新技术，是获得高精度易扰动土力学参数的唯一有效途径。为此，我们在充分吸收国内外^[1-8]传统原位试验方法的长处的基础上，研制开发了一种新的原位测试仪——自钻式原位剪切旁压仪

(Self-boring in-situ shear pressuremeter, 简称SBISP)。经过试验和分析对比发现，SBISP具有：自钻式成孔技术，可极大地减少土的扰动程度；测定器采用高强度钢板，使孔壁的应力分布更为均匀，更接近轴对称分布假定；多级加载方式，可同时系统地获取土的抗剪强度、变形模量、静止土压力和剪切反力系数等参数，摒弃了传统试验单一性的局限，一机多用等优点。特别是，相对传统的旁压试验方法，SBISP在同一深度能获得多个变形模量值，可进行参数的离散性分析。限于篇幅，本文着重介绍基于SBISP估算土体的抗剪强度 c ， ϕ 值，并与三轴试验结果进行比较。

1 试验装置

自钻式原位剪切旁压试验可以看作是原位测定变形模量的旁压试验和室内测定抗剪强度的直剪试验的一种组合试验方法。它由自钻式钻进系统、测定器系统、加载系统和数据采集系统等组成，如图1所示。

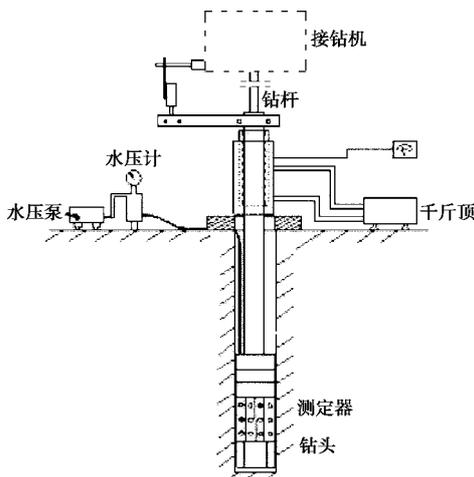


图1 自钻式原位剪切旁压试验装置图

Fig. 1 SBISP device

1.1 自钻式钻进系统

自钻式钻进系统是为尽可能地减小土体扰动而设计的。在试验区段之前，可由一般的钻头预钻成孔。在试验区段则由自钻式钻头钻进，将测定器插入到预定的试验深度，从而避免扰动土体。因此它可以获得土体不同深度的力学参数。

1.2 测定器系统

测定器由圆筒、橡皮膜、载荷板等组成，如图2和3所示，测定区间长度30 cm。从地面向橡皮腔内注入高压水，使橡皮膜膨胀，再由载荷板将径向应力传递到周围土体。载荷板是用高强度的不锈钢制作而成的，因此，通过测定器施加给周围的土体的应力分布均匀，变形一致。在测定器上还装有载荷传感器。

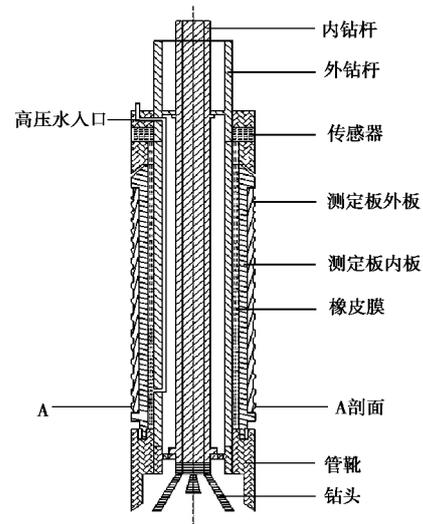


图2 测定器纵剖图

Fig. 2 Sectional view of the probe

由于测定器的表面粗糙度直接影响界面的摩擦特性，所以设计了不同粗糙度的测定器的载荷板。在实际应用时，根据土中结构物的表面粗糙度来确定选用载荷板。这对模拟实际土中结构物的摩擦力，如桩周摩擦力是十分有利的。如图4所示，测定器的光滑型加载板可以看作是钢管桩表面；粗糙型载荷板可以模拟灌注桩表面。

Kishida等(1987)通过单剪试验结果^[9]，认为粗糙度与摩擦系数的关系如下：当钢材料表面粗糙度小于临界粗糙度时，钢-土界面处发生滑动；此区间内钢表面最大摩阻力随着粗糙度的增加而增大。当钢表面粗糙度超过临界粗糙度时，土体内发生剪切破坏；最大摩阻力出现上边界，并且等于土体的抗剪强度。Ochiai等(1997)在正常固结黏性土和超固结黏性土中做了钢-土界面摩擦特征的试验研究^[10]，提出了正常固结黏性土的内摩擦角与钢材料粗糙度之间的关系。认为当钢表面粗糙度小于0.5 mm时，界面处摩擦角为29°；随着粗糙度的增加，界面处摩擦角也逐渐增大；当粗糙度大于5 mm时，土体发生剪切破坏，这时界面处的摩擦角等于土体发生剪切破坏的内摩擦角。

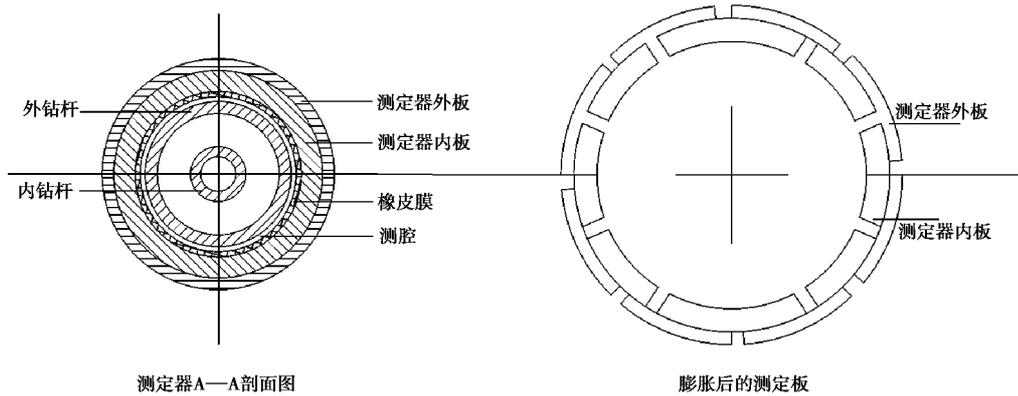


图3 膨胀前后的测定器 A—A 横剖图

Fig. 3 A—A cross section of the probe

由于 SBISP 粗糙型测定器的载荷板表面加工成凹凸形状，具有足够的粗糙度，我们认为这时的界面摩擦强度是土的抗剪强度。

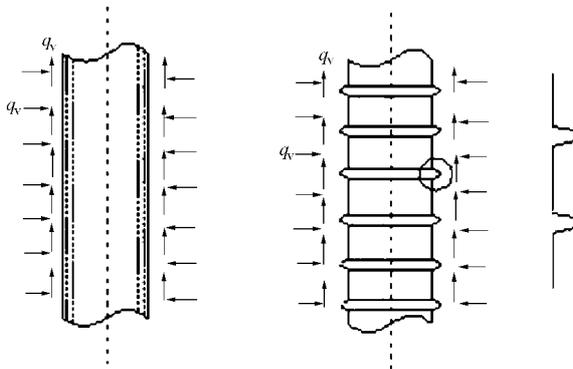


图4 光滑型和粗糙型载荷板

Fig. 4 Type of smooth and coarse loading plate

1.3 加载系统

自钻式原位剪切旁压试验的加载系统由径向加载和竖直加载两部分组成，采用逐级加载的加载方式。首先由径向加载系统中的水压泵向测腔内施加高压水，通过橡皮膜、载荷板向周围土体施加径向应力 q_v （垂直于钻孔壁）。径向应力达到一定的应力水平后，由竖直加载系统中的千斤顶通过钻杆给测定器施加一个水平剪切应力 q_H （平行于孔壁）。剪切应力通过控制剪切位移的方式来控制其加载速率。在施加剪切应力的过程中，始终保持径向应力水平不变。在确认了剪切应力峰值后，再施加下一级径向应力，然后施加对应的水平剪切应力，如此重复。另外，第一级径向应力的大小应稍微大于土的初始水平应力，以后施加的每一级径向应力为前一级应力的 1.25 倍。通过这种多级加载方式，可以得出一系列的径向应力 - 径向变形关系、径向应力 - 剪切应力和剪切应力 - 剪切位移的关系。

1.4 数据采集系统

径向应力、剪切力、剪切位移和送水量等数据通过数据采集仪转化成数字，再与计算机连接自动采集。

2 获得的力学参数及其方法

自钻式原位剪切旁压试验的加载方式如图 5 所示。通常，施加 5 级循环荷载可获得满意的试验结果。

由多级加载方式可求得一组径向应力 - 剪切应力的数据；在每一级荷载条件下，可分别得出径向应力 - 径向变形、剪切应力 - 剪切位移的对应关系。根据以上的对应关系，可以分别求得土体的变形模量 E 、静止土压力 P_0 、抗剪强度 c 、 j 值、桩周摩擦力 f 、剪切反力系数 C_s 。

3 推求抗剪强度

3.1 SBISP 试验的典型曲线

某场地 10 m 埋深范围内主要为黏性土，地下水位埋深 4.0 m。在 2.4, 5.4 m 深度分别进行了一次 SBISP。为了分析 SBISP 获得的变形与强度参数，分别整理出了 2.4 m 测试深度处的径向压力、送水体积、竖向剪应力、竖向剪位移等关系曲线。其典型曲线如图 6 所示。

(1) 径向压力和竖向剪应力与剪位移关系

从图 7 中可以看出，第一级至第五级径向压力依次为 48, 65, 85, 105 和 122 kPa；对应的剪应力峰值依次为 15.8, 19.8, 22.4, 25.7 和 28.2 kPa；每一级径向压力稳定后均为一定值，在该压力作用下，对应的剪应力随着剪位移的增加而逐渐达到剪应力峰值；随着径向压力的增加，剪应力峰值也逐渐提高。

(2) 剪应力峰值强度与径向压力关系

在 SBISP 多级加载试验中，根据剪应力峰值与径向压力的关系，可以得到土的抗剪强度 $c=8.5$ kPa, $\varphi=$

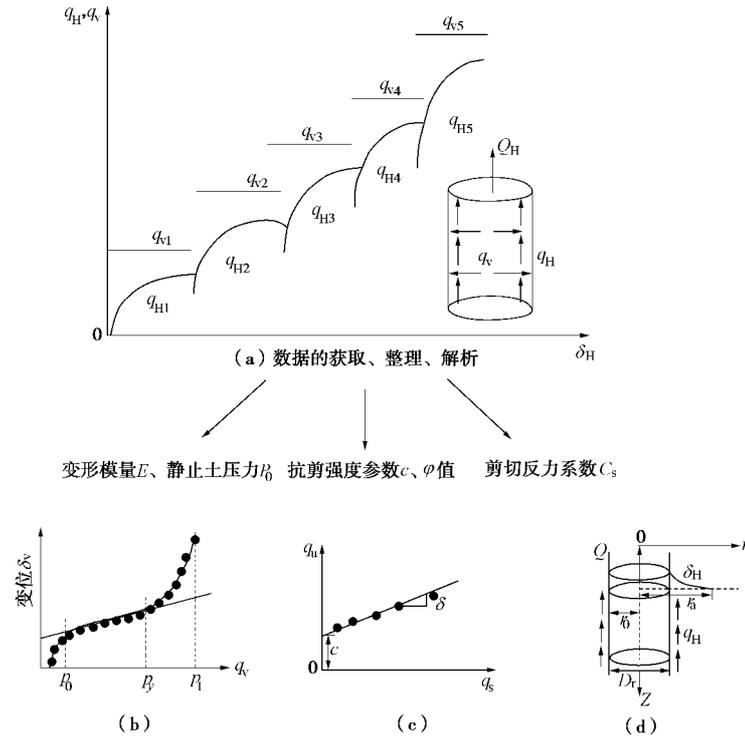


图 5 加载方式及其获得力学参数示意图

Fig. 5 Schematic plan of loading method and gaining main mechanical parameters

9.3°, 如图 7 和表 1。对应于日本原状土采样技术采取的不扰动土样的直剪试验 $c=14.1 \text{ kPa}$, $\varphi=6.8^\circ$ 和三轴试验 $c=16 \text{ kPa}$, $\varphi=11^\circ$, 其结果是可以接受的。

由图表可知, SBISP 获得的 2.4 m 处的抗剪强度与室内的三轴试验、直剪试验结果相近; 在地下水位以下、测试深度 5.4 m 时的黏聚力 c 值相对偏小, 内摩擦角 φ 基本一致。这是由于试验土样体积、排水等不同条件综合作用的结果, 总体上, SBISP 测定器与土体界面的摩擦强度值可以近似地用来解释土的抗剪强度, 可直接作为土的强度参数。

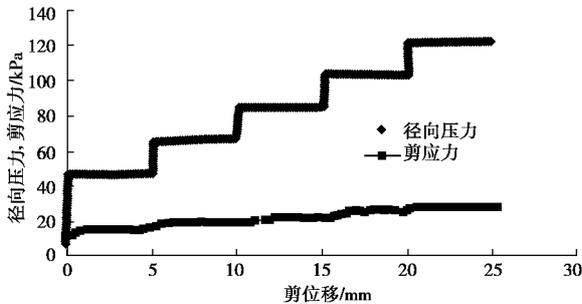


图 6 径向压力和剪应力 - 剪位移关系曲线图

Fig. 6 Relationship among radial stress, shear stress and shear displacement

表 1 SBISP 与常规试验对比结果

Table 1 Comparison between SBISP and normal test results

深度 /m	SBISP		直剪		三轴	
	c_k /kPa	φ_k /($^\circ$)	c_k /kPa	φ_k /($^\circ$)	c_k /kPa	φ_k /($^\circ$)
2.4	8.5	9.3	14.1	6.8	16	11
5.4	14.8	10.7	22.2	11	33.1	14

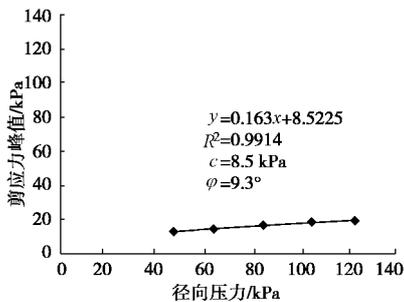


图 7 剪应力峰值强度与径向压力关系曲线图

Fig. 7 Relationship between peak strength of shear stress and radial stress

3.2 SBISP 试验强度参数统计特征

为了能给实际工程提供准确而且精确的参数, 本次对所有试验中的抗剪强度参数进行统计分析^[11], 以期能找出其普遍规律。

图 8 为目前试验得出的 SBISP 和室内三轴试验结果对比图。从中可以看出, 整体来看, SBISP 获得的内摩擦角 φ 与常规三轴试验测得的内摩擦角 φ 的拟合结果大致相等; 与固结不排水条件下的内摩擦角 φ 的结果最为接近, 这与钻孔直剪试验^[12]的结论一致。但是也发现, 对于本身抗剪强度大 (c 值大于 50 kPa, E 大于 20 MPa) 的黏性土, SBISP 获得的 φ 值与接常规试验结果相近, 但是黏聚力 c 值则小于常规试验值,

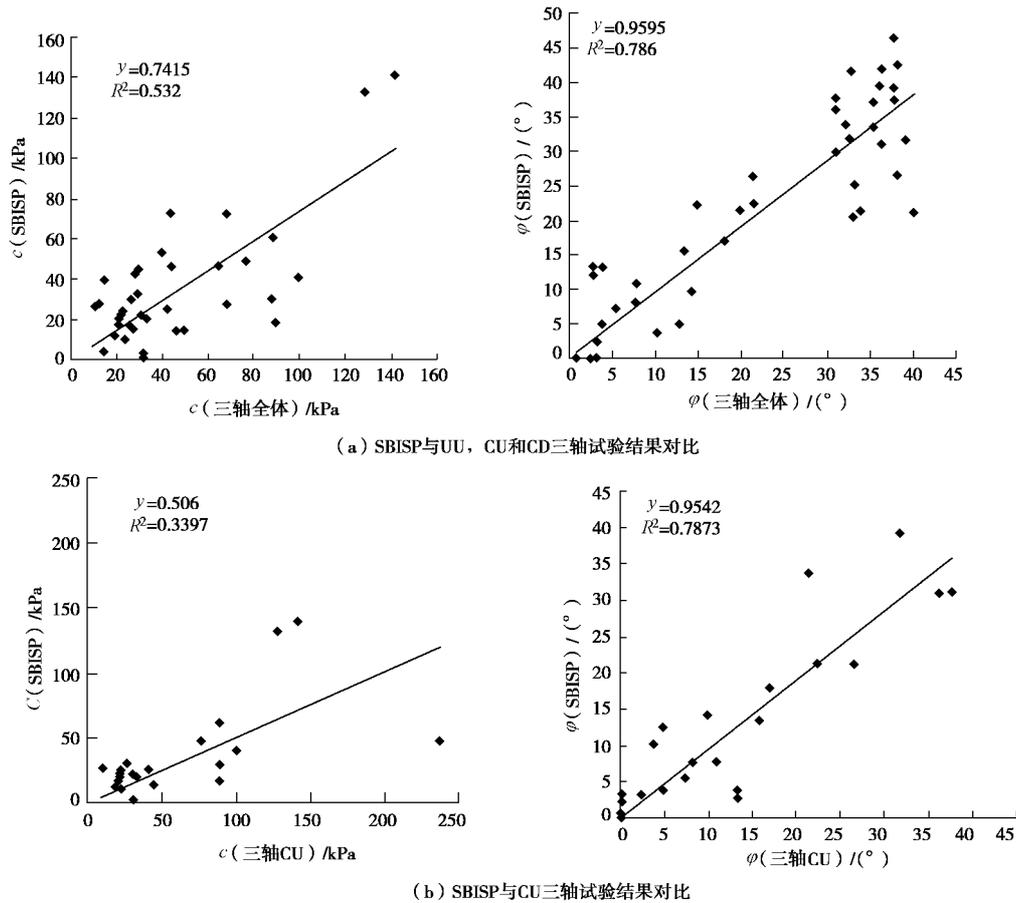


图8 SBISP与常规三轴试验结果关系图

Fig. 8 Relationship between SBISP and normal triaxial test results

有时甚至 SBISP 值小很多。由此表明, SBISP 特别适合于难易采样、制样的易扰动、强度低的土层, 如砂性土、淤泥质土的强度试验。

综合分析认为, 在 SBISP 系统试验中, 它不能像室内试验那样人为地进行边界排水条件的控制。因此, 实际的排水条件视土体的透水系系数而定。在设定的加载速率下, 对于饱和黏土, 固结排水条件接近于 UU; 对于砂土, 接近 CD; 对于一般土层, 更接近于 CU 条件。从统计角度看, SBISP 试验值与 CU 三轴试验可比性最好。

4 结 语

SBISP 可以看作是测定变形模量的旁压试验和测定抗剪强度的直剪试验的一种组合试验方法, 由自钻式掘进系统、测定器系统、加载系统、量测系统和数据采集系统等组成。自钻式掘进系统可最大限度地避免土层扰动。由于其独特的结构与加载方式, 能够同时测定在径向压力和竖向剪切应力作用下的径向压力、径向位移、竖向剪应力、竖向剪位移, 根据对应关系, 能够一次试验同时获取土的变形与强度参数,

避免了传统上采用的不同的试验方法获取不同的土工参数, 参数精度不同的缺点。且可获得土层中不同深度的力学参数; 无需采样、搬运、制样, 大量节省了获取实验结果的时间。从 SBISP 试验结果统计规律看, SBISP 获得的内摩擦角 φ 与原状土样的常规三轴试验测得的内摩擦角 φ 结果大致相等; 与固结不排水条件下的内摩擦角 φ 的结果最为接近。对于强度低、易扰动土体测试尤为合适。

限于篇幅, 本文只介绍了基于 SBISP 推求土体抗剪强度的成果, 对于变形模量、静止土压力、桩周摩擦力等方面的应用将另文介绍。并进一步改进与完善 SBISP 仪器, 特别是孔隙水压力方面的测试技术和分析, 积累试验数据, 着力推广 SBISP 的应用。

参考文献:

- [1] 徐光黎, 滕伟福, 前田良刀, 落合英俊, 坂手道明. 自钻式原位摩擦剪切试验法的开发与利用[C]// 全国岩土与工程学术大会论文集, 2003: 291 - 297. (XU Guang-li, TENG Wei-fu, MAEDA Y, OCHIAI H, SAKATE M. Development and application of self-boring in-situ friction test[C]//

- Proceedings of National Geotechnical and Engineering Symposium, 2003: 291 - 297. (in Chinese))
- [2] MAEDA Y, XU Guang-li, OCHIAI H, SAKATE M, SAKATE T, OGATA, UNO K. A new self boring in-situ friction testing technique[C]// 1st Int Conf on Site Characteristics, Atlanta, USA, 1998: 831 - 836.
- [3] MAEDA Y, OCHIAI H, WADA N, XU Guang-li, NAKATANI T, YAMAMOT T. Deformation moduli of soft soils interpreted by SBIFT[C]// 1st Int Conf on Advances in Structural Engineering and Mechanics, Seoul, Korea, 1999: 23 - 25.
- [4] MAEDA Y, XU Guang-li, OCHIAI H, SAKATE T, UNO K. Comparisons between the mobilized shaft resistance of pile and the results measured in SBIFT[C]// Inter Conference on Foundation Failures, Singapore, 1997: 317 - 326.
- [5] 沈珠江. 原状取土还是原位测试—土质参数测试技术发展方向刍议[J]. 岩土工程学报, 1996, **18**(5): 90 - 91. (SHEN Zhu-jiang. Soil sampling on site or in-situ testing—a preliminary research on development of soil parameters testing technology[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1996, **18**(5): 90 - 91. (in Chinese))
- [6] 孟高头. 土体原位测试机理、方法及其工程应用[M]. 北京: 地质出版社, 1997: 161 - 204. (MENG Gao-tou. Mechanical method and engineering application of in-situ testing in the earth[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1997: 161 - 204. (in Chinese))
- [7] 王钟琦. 岩土工程测试技术[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1986: 243 - 245. (WANG Zhong-qi. Geotechnical engineering testing technology[M]. Beijing: China Architecture and Building Press, 1986: 243 - 245. (in Chinese))
- [8] 陈祖煜. 土质边坡稳定分析——原理·方法·程序[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2003: 127 - 136. (Soil slope stability analysis—theory, methods and program[M]. Beijing: China Water Power Press, 2003: 127 - 136. (in Chinese))
- [9] KISHIDA H, UESUGI M. Tests of the interface between sand and steel in the simple shear apparatus[J]. Geotechnique, 1987, **37**(1): 45 - 52.
- [10] OCHIAI H, YASUFUKU Omime, et al. An application of friction test on clay-steel system to overconsolidated clay[J]. Technology Reports of Kyushu University, 1997, **70**(2): 159 - 166.
- [11] 陈立宏, 陈祖煜, 李广信. 线性回归抗剪强度指标方法的改进[J]. 岩土力学, 2007, **28**(7): 1421 - 1426. (CHEN Li-hong, CHEN Zu-yu, LI Guang-xin. A modified linear regression method to estimate shear strength parameters[J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, **28**(7): 1421 - 1426. (in Chinese))
- [12] 《工程地质手册》编委会. 工程地质手册[M]. 第四版. 北京: 中国建筑工业出版社, 2007: 234 - 252. (Editorial Committee of Engineering Geology Manual. Engineering geology manual[M]. 4th ed. Beijing: China Architecture and Building Press, 2007: 234 - 252. (in Chinese))