

# 干湿循环下膨胀土现场大型剪切试验研究

吴珺华<sup>1</sup>, 袁俊平<sup>2,3</sup>

(1. 南昌航空大学土木建筑学院, 江西 南昌 330063; 2. 河海大学岩土力学与堤坝工程教育部重点实验室, 江苏 南京 210098;  
3. 河海大学岩土工程科学研究所, 江苏 南京 210098)

**摘要:** 为获得干湿循环作用形成的裂隙对膨胀土抗剪强度特性的影响, 采用现场大型剪切仪分别对未经历和经历干湿循环作用的膨胀土进行了剪切试验。膨胀土未经历干湿循环作用时, 剪切位移较小时剪应力即可达到峰值, 随后逐渐降低; 试样的应力应变关系均呈现出明显的软化特征。经历干湿循环作用后的膨胀土, 峰值剪应力与未经历干湿循环作用的相比明显减小, 而软化特征不明显。经历干湿循环作用的膨胀土抗剪强度参数都有不同程度的降低, 其中黏聚力降低幅度较大, 摩擦角降低幅度较小。试验结果表明干湿循环诱发膨胀土裂隙发育, 抗剪强度迅速衰减, 是导致膨胀土工程失稳破坏的主要因素。

**关键词:** 膨胀土; 现场试验; 干湿循环; 抗剪强度

**中图分类号:** TU47      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1000-4548(2013)S1-0103-05

**作者简介:** 吴珺华(1985-), 男, 江西吉安人, 博士, 讲师, 主要从事非饱和土理论及膨胀土基本性质研究。E-mail: wjh0796@163.com。

## Field tests on expansive soil during wetting-drying cycles using large shear apparatus

WU Jun-hua<sup>1</sup>, YUAN Jun-ping<sup>2,3</sup>

(1. College of Civil Engineering and Architecture, Nanchang Hangkong University, Nanchang 330063, China; 2. Key Laboratory of Ministry of Education for Geomechanics and Embankment Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 3. Geotechnical Research Institute, Hohai University, Nanjing 210098, China)

**Abstract:** In order to obtain the characteristics of strength of field expansive soil including cracks caused by wetting-drying cycles, the specimens both with and without undergoing wetting-drying cycles are tested by means of the field large shear apparatus. When the expansive soil does not undergo wetting-drying cycles, the shear stress reaches the peak value quickly and then reduces gradually; the stress-strain relations show the obvious softening. When the expansive soil undergoes wetting-drying cycles, the peak shear stress is much less than the values of expansive soil and the characteristics of softening are less obvious compared with those of the expansive soil which does not undergo wetting-drying cycles. The shear strength of expansive soil undergone wetting-drying cycles decreases to some degree compared to that of undisturbed expansive soil, and the decreased degree of cohesion is much greater than that of friction angle. It is shown that crack propagation due to wetting-drying cycles result in the reduction of shear strength, and it is the major factor to lead to instability and damage of projects in expansive soil areas.

**Key words:** expansive soil; field test; wetting-drying cycle; shear strength

## 0 引言

膨胀土是一种富含蒙脱石、伊利石等强亲水性矿物的特殊性黏土, 具有强烈的吸水膨胀、失水收缩特性。自然条件下, 由于降雨蒸发的周期性变化, 膨胀土经历长期的干湿循环, 使得土体反复湿胀干缩, 导致裂隙大量生成, 土体结构被破坏, 导致膨胀土滑坡具有浅层性、长期性、平缓性、牵引性等特殊形态<sup>[1-2]</sup>。Terzaghi<sup>[3]</sup>根据试验结果指出裂隙土体的强度只有原

状土块强度的1/5~1/10。Williams等<sup>[4]</sup>对裂隙黏土进行了现场剪切试验, 系统讨论了裂隙形态对抗剪强度的影响, 认为裂隙土体的残余强度是控制土体长期稳定性的重要参数。Morris等<sup>[5-6]</sup>依据不同理论建立了裂隙深度、土体物理力学性质参数和给定吸力分布之间的

基金项目: 国家自然科学基金项目(51008117); 南昌航空大学博士启动基金项目(EA20121115)

收稿日期: 2013-02-28

理论关系。Hayroyan<sup>[7]</sup>进行了不同裂隙形态下的土体强度试验, 试验结果表明裂隙的发展会导致土体的强度不断降低, 不利于边坡的长期稳定。Kodikara等<sup>[8]</sup>基于室内试验分析了土体抗剪强度与不同饱和度、裂隙发育程度等之间的关系。袁俊平等<sup>[9]</sup>对不同裂隙发育程度的非饱和膨胀土进行了三轴剪切试验, 建立了饱和度、裂隙度与抗剪强度之间的关系。杨和平等<sup>[10]</sup>对宁明原状膨胀土进行了有荷载条件模拟干湿循环过程的试验研究, 得到其胀缩变形和强度的变化规律。安骏勇等<sup>[11]</sup>对原状膨胀土用平面应变等应力比卸荷试验, 发现土体强度降低与卸荷试验过程中微裂隙的张开有关。刘华强等<sup>[12]</sup>采用室内直剪仪, 研究了不同干湿循环次数下膨胀土的饱和抗剪强度规律, 指出干湿循环是导致膨胀土饱和抗剪强度迅速衰减的主要原因。吕海波等<sup>[13]</sup>通过对南宁地区原状膨胀土经历干湿循环后的强度试验, 探讨了膨胀土抗剪强度与含水率、循环次数、循环幅度等循环控制参数的关系。徐彬等<sup>[14]</sup>通过室内干湿循环试验获得了含裂隙的膨胀土试样, 利用直剪仪和三轴仪研究了含裂隙土体强度的影响因素和变化规律。刘松玉等<sup>[15]</sup>研究了干湿循环对击实膨胀土胀缩特性的影响。这些研究结果表明, 随着干湿循环次数的增加, 膨胀土抗剪强度和胀缩变形性能均有不同程度的降低。干湿循环作用引起膨胀土表面裂隙发育, 是导致许多膨胀土边坡工程在施工完成时具有较高的稳定性, 但经历若干年后仍发生失稳破坏的主要因素。许多学者采用室内试验的方法来研究干湿循环作用下产生的裂隙对膨胀土抗剪强度的影响<sup>[12-14]</sup>。室内试验试样裂隙的发育受到尺寸、试验条件的限制, 难以完全反映裂隙对抗剪强度的影响。实际工程中, 裂隙尺寸和规模均较大, 现场干湿循环产生的裂隙更符合实际特征, 而受现场条件的限制, 关于干湿循环作用诱发裂隙对现场膨胀土抗剪强度影响的研究尚不多见。本文采用现场大型剪切仪, 进行了膨胀土的现场剪切试验, 对现场膨胀土的抗剪强度特性进行了初步研究。

## 1 试验研究方法

### 1.1 试验场址

现场试验场址位于南水北调中线工程总干渠第IV渠段, 河南省新乡市潞王坟乡境内, 土体的基本参数见表1和图1。现场试验处的土体主要由中等膨胀性黏土组成。由于试样的干密度和含水率对剪切强度的影响较大, 为保证试样剪切面的含水率和干密度基本一致, 根据不同水平位置钻孔取样的结果, 同时便于仪器布置、人员操作及试验点的代表性, 在桩号SY0+298的左岸一级马道以下坡面开挖了试验平台,

挖掘深度为1.5 m左右, 保证试验处的应力历史和应力状态基本一致。有研究表明, 经历四次干湿循环后的土体强度基本达到稳定<sup>[12]</sup>, 故本次试验分别进行了3次和5次干湿循环, 试验处土体试验前后的基本参数见表2, 其中EX-0为未经历干湿循环作用的试样, EX-3和EX-5分别为经历了3次和5次干湿循环作用的试样。可以看出, 不同位置处的试样参数基本相同以下分析忽略这些参数的影响。

表1 现场膨胀土的基本参数

Table 1 Parameters of field expansive soil

液限 /%	塑限 /%	比重	最大干密度 /(g·cm <sup>-3</sup> )	最优含水率 /%
29.5	15.1	2.72	1.81	15.7

表2 试样剪切面处参数

Table 2 Soil parameters at shearing surface

试样 编号	试验 阶段	干密度 /(g·cm <sup>-3</sup> )	含水率 /%	孔隙比	自由膨 胀率/%
EX-0	试验前	1.57	25.16	0.73	62.2
	试验后	1.56	25.27	0.71	62.1
EX-3	试验前	1.58	25.46	0.75	62.4
	试验后	1.57	25.31	0.72	62.2
EX-5	试验前	1.59	25.75	0.75	61.9
	试验后	1.57	25.78	0.73	61.8

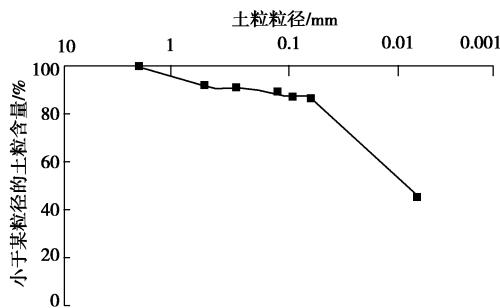


图1 膨胀土的粒径分布曲线

Fig. 1 Particle-size distributions curve of expansive soil

### 1.2 试验准备

试验仪器为河海大学刘斯宏研发的便携式现场和室内两用直剪试验仪<sup>[16]</sup>, 设备实物见图2, 主要包括: 钢方框若干, 300 mm×300 mm×100 mm, 用来制备试样; 铸铁块若干, 每块重50 kg, 用于上覆压力的施加, 每添加一块相当于施加5 kPa的上覆压力; 施力台, 用来固定施力装置和施加水平拉力; 柔性钢链条, 用于连接钢方框和施力台, 将水平拉力施加在钢方框上; 力传感器, 用来记录水平拉力, 最大量程为3T; 位移传感器, 用来记录位移, 最大量程50 mm; 数据采集盒, 用来自动采集相关试验数据。其它辅助设备主要有蓄电池、数据连接线、固定钢管、整平沙袋、

校准尺和电脑等。

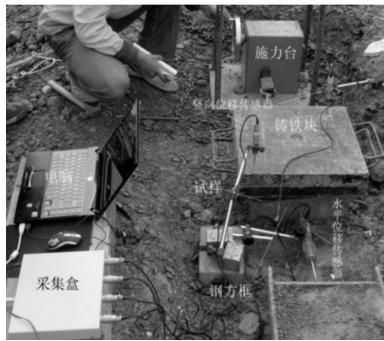


图 2 现场大型剪切设备

Fig. 2 Field shearing equipments

### 1.3 试验方案

笔者采用人工切削的方式制备剪切试样, 见图 3。EX-0 处试样制好后立即开始试验, 用以获得未经历干湿循环作用的原状膨胀土的强度特性; 将 EX-3 和 EX-5 处位置整平后, 用喷壶向土体表面洒水直至水分不再入渗, 用隔水膜覆盖表面不少于 24 h。将膜揭开后让试样处于自然环境下蒸发至表面水分基本稳定。至此一次干湿循环完成, 如此可进行数次干湿循环。循环结束后同样采用人工切削的方式制备剪切试样。



图 3 大型剪切试验样

Fig. 3 Shearing samples

### 1.4 试验步骤

现场大型剪切试验示意图见图 4, 主要步骤为

(1) 开启计算机和采集盒, 将所有传感器与采集盒接好, 调试好传感器的工作性能。

(2) 确定试样位置与施力台的合适距离以固定施力台, 将施力台的伸缩杆完全伸出, 以便留出足够的施力空间。用柔性钢链将钢方框与施力台伸缩杆连接起来。

(3) 在试样顶部放置沙袋并整平, 在沙袋上方水平放置若干铸铁块, 这样能够保证上覆压力可完全作用于土体上。本文采用的上覆压力分别为 10, 25, 35, 50 kPa。在铸铁块顶部对角位置固定竖向位移传感器, 在钢方框靠近施力台一侧固定水平位移传感器, 在施力台后侧固定力传感器。注意所有位移传感器应留有足够的伸缩空间以保证量程。

(4) 开启自动采集软件, 设置相关参数, 并将所有传感器数据清零。将软件显示接口设置为“力 - 位移”关系, 便于控制试验进程。剪切速率控制在 0.09 mm/s。当出现峰值应力后, 根据需要可将伸缩杆退回重新施加拉力。

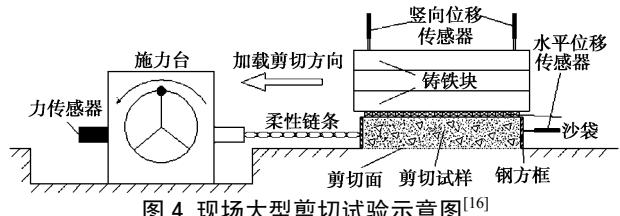


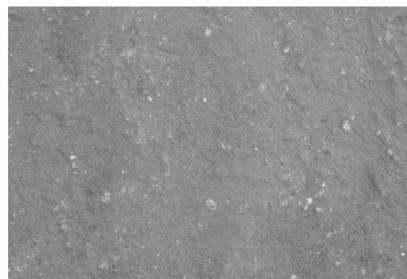
图 4 现场大型剪切试验示意图<sup>[16]</sup>

Fig. 4 Schematic diagram of field shearing tests<sup>[16]</sup>

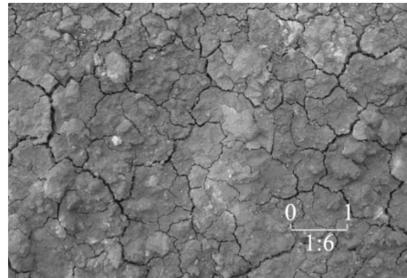
## 2 试验结果分析

### 2.1 裂隙发育形态

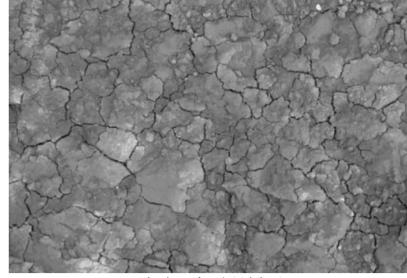
未经历干湿循环、3 次和 5 次干湿循环作用的试样表面见图 5。可以看出, 随着干湿循环次数的增加, 主裂隙首先生成, 形态特征明显; 当循环至一定次数后, 主裂隙边缘土颗粒剥落, 形态逐渐模糊, 并有新的小裂隙生成, 土体表面破碎程度加剧, 这与实际情况下的裂隙发育过程较一致。通过对裂隙的现场测量, 其平均开展深度约为 120 mm (3 次循环) 和 140 mm (5 次循环), 均比钢方框的高度要大, 表明试验时的剪切面均能经过裂隙发育部位, 能够有效地反映裂隙发育处的强度特性。



(a) 未经历干湿循环



(b) 3次干湿循环



(c) 5次干湿循环  
比例尺 1:6  
单位: cm

图 5 试验前试样表面裂隙

Fig. 5 Cracks at soil surface before shearing

### 2.2 剪应力 - 剪切位移关系

图 6 (a)、6 (b) 和 6 (c) 分别为未经历干湿循环作用膨胀土(原状土)、经历 3 次和 5 次干湿循环后的剪应力 - 剪切位移关系曲线。试验结果表明:

(1) 原状土的剪应力与剪切位移呈典型的非线性关系, 上覆压力越大, 曲线越陡, 试样在剪切位移较小时剪应力即达到峰值; 经历干湿循环作用的土体, 在初始剪切阶段, 剪应力随着剪切位移的增加而增加, 表现为线性关系; 随着剪切过程的继续进行, 剪应力与剪切位移的非线性关系逐渐表现, 剪应力不断增大直至峰值。

(2) 原状土的剪应力达到峰值后, 剪切位移的继续增大过程中, 剪应力与剪切位移之间表现出一定的应变软化, 随着反复剪切过程的增加, 剪应力减小的愈明显, 两处试样的应力应变关系曲线均呈现出明显的软化特征; 经历干湿循环作用的土体, 剪应力达到峰值后, 随着剪切位移的继续增大, 剪应力与剪切位移之间也表现出一定的软化特性, 但与原状土的相比不明显; 随着反复剪切过程的进行, 剪应力有所减小, 减小程度不及原状土的试验结果。

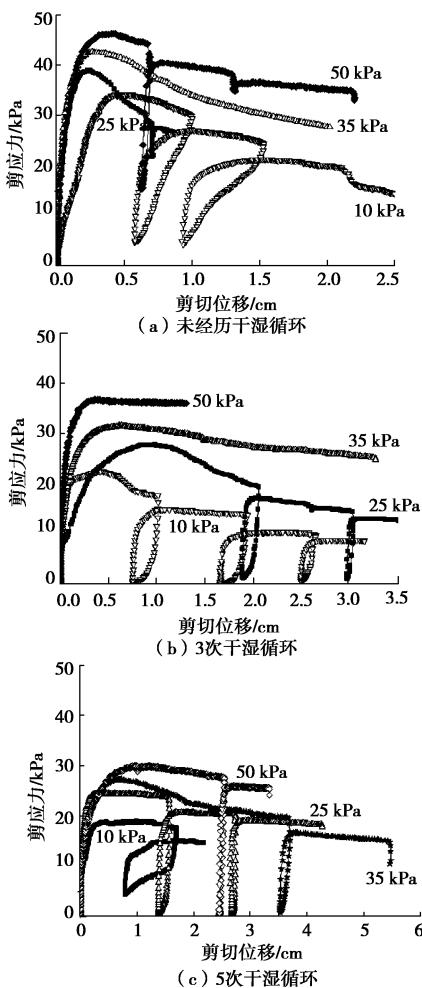


图 6 膨胀土的剪应力与剪切位移关系

Fig. 6 Relationship between shear stress and strain

## 2.3 抗剪强度

将不同条件下的峰值剪应力与上覆压力的关系及

拟合结果分别绘于图 7 中。可以看出, 无论是否经历干湿循环作用, 上覆压力与峰值剪应力近似为线性关系, 可采用莫尔 - 库仑强度准则进行拟合, 拟合结果一并列于图 7。

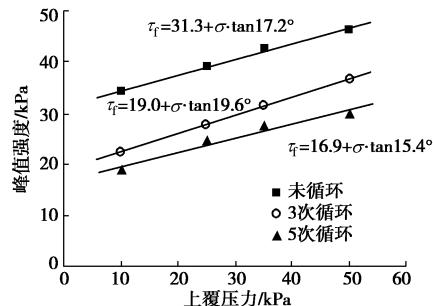


图 7 现场膨胀土的抗剪强度

Fig. 7 Shear strength of field expansive soil

需要指出的是, 受现场条件及试验仪器的限制, 试验过程中未能对土体吸力进行连续性观测, 此处的峰值强度包含了吸力对强度的贡献, 存在一定的不足。原状膨胀土的抗剪强度参数较大, 工程性质好。原状膨胀土受应力历史、结构性等的影响, 土体表现出明显的超固结性和结构性, 土颗粒之间相互咬合和黏结, 结构紧密, 土体强度值较高; 经历干湿循环作用后, 膨胀土的强度参数都有不同程度的降低, 其中黏聚力降低幅度较大, 摩擦角降低幅度较小。干湿循环作用使得土体反复胀缩变形, 裂隙发育, 土体破碎松散, 导致土体抗剪强度的降低, 尤其对黏聚力的影响更为明显。可以看出, 干湿循环作用诱发裂隙对土体的抗剪强度有着重要的影响, 长期的干湿循环作用对土体强度的衰减是非常明显的。需要注意的是, 由于原状膨胀土具有较明显的软化特性, 因而也要尽量避免产生过大剪切变形使得土体软化, 强度降低, 导致工程问题的发生。

## 3 结 论

本文采用现场大型剪切仪, 对原状膨胀土和经历干湿循环作用的膨胀土进行了大型剪切试验, 获得了现场膨胀土的强度特性。主要成果如下:

(1) 膨胀土经历干湿循环作用后, 表面裂隙发育明显。随着干湿循环次数的增加, 主裂隙首先生成, 形态特征明显; 当循环至一定次数后, 主裂隙边缘土颗粒剥落, 形态逐渐模糊, 并有新的小裂隙生成, 土体表面破碎程度加剧。

(2) 未经历干湿循环作用的膨胀土, 剪切位移较小时剪应力即达到峰值, 随着剪切位移的继续增加, 剪应力减小且幅度较明显; 随着反复剪切过程的增加, 剪应力减小的越明显, 试样的应力应变关系曲线均呈现出明显的软化特征。经历干湿循环作用后的膨胀土, 峰值剪应力与未经历干湿循环作用的相比明显减小, 试样的应力应变关系曲线呈现出一定的软化特征, 但

不明显。

(3) 原状膨胀土未遭受干湿循环作用, 土颗粒之间相互咬合和黏结, 结构紧密, 土体遭受破坏所需要的外力较大, 强度值较高; 经历干湿循环作用后, 膨胀土的强度参数都有不同程度的降低, 其中黏聚力降低幅度较大, 摩擦角降低幅度较小。

(4) 受现场条件及试验仪器的限制, 试验过程中未能对土体吸力进行连续性观测。今后应研发或改进可在现场剪切试验过程中控制吸力的试验设备, 更准确的获得现场膨胀土真实的力学特性, 更有利于指导实际工程。

## 参考文献:

- [1] 刘特洪. 工程建设中的膨胀土问题[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1997. (LIU Te-hong. Problems of expansive soil in engineering construction[M]. Beijing: China Building Industry Press, 1997. (in Chinese))
- [2] 陈建斌, 孔令伟, 郭爱国. 降雨蒸发条件下膨胀土边坡的变形特征研究[J]. 土木工程学报, 2007, 40(11): 70 - 77. (CHEN Jian-bin, KONG Ling-wei, GUO Ai-guo. Deformation characteristics of expansive soil slopes under precipitation and evaporation[J]. China Civil Engineering Journal, 2007, 40(11): 70 - 77. (in Chinese))
- [3] TERZAGHI K. Stability of slopes of natural clay[C]// Proc 1st Int Conf Soil Mech Found Eng Cambridge. Mass, 1936, 1: 161 - 165.
- [4] WILLIAMS A, JENNINGS J E. The in-situ shear behavior of fissured soil[C]// Proc 9th ICSM FE. Tokyo, 1977.
- [5] MORRIS P H, GRAHAM J, WILLIAMS D J. Cracking in drying soils[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1992, 29: 263 - 277.
- [6] MORRIS P H, GRAHAM J, WILLIAMS D J. Crack depths in drying clays using fracture mechanics[J]. Fracture Mechanics Applied to Geotechnical Engineering, ACSE Geotechnical Special Publication, 1994: 40 - 53.
- [7] HAYROYAN S H. Impact of shrinkable fracturing on shear strength in clay soils[C]// The 67th European Association of Geoscientists and Engineers, EAGE Conference and Exhibition. Madrid, Spain 2005: 1513 - 1516.
- [8] KODIKARA J K, CHOI X. A simplified analytical model for desiccation cracking of clay layers in laboratory tests[C]// Proceedings of the Fourth International Conference on Unsaturated Soils, Geotechnical Special Publication. Carefree, Arizona, USA, 2006: 2558 - 2569.
- [9] 袁俊平, 殷宗泽. 膨胀土裂隙的量化指标与强度性质研究[J]. 水利学报, 2004(6): 108 - 113. (YUAN Jun-ping, YIN Zong-ze. Quantitative index of fissure and strength characteristics of fissured expansive soils[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2004(6): 108 - 113. (in Chinese))
- [10] 杨和平, 张锐, 郑健龙. 有荷条件下膨胀土的干湿循环胀缩变形及强度变化规律[J]. 岩土工程学报, 2006, 28(11): 1936 - 1941. (YANG He-ping, ZHANG Rui, ZHENG Jian-long. Variation of deformation and strength of expansive soil during cyclic wetting and drying under loading condition[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, 28(11): 1936 - 1941. (in Chinese))
- [11] 安骏勇, 蒋刚, 王钊. 基于平面应变试验的非饱和膨胀土强度分析[J]. 岩土力学, 2007, 28(12): 2649 - 2652. (AN Jun-yong, JIANG Gang, WANG Zhao. Analysis of shear strength of unsaturated expansive soil under plane strain test[J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, 28(12): 2649 - 2652. (in Chinese))
- [12] 刘华强, 殷宗泽. 裂缝对膨胀土抗剪强度指标影响的试验研究[J]. 岩土力学, 2010, 31(3): 727 - 731. (LIU Hua-qiang, YIN Zong-ze. Test study of influence of crack evolution on strength parameters of expansive soil[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(3): 727 - 731. (in Chinese))
- [13] 吕海波, 曾召田, 赵艳林. 膨胀土强度干湿循环试验研究[J]. 岩土力学, 2009, 30(12): 3797 - 3802. (LÜ Hai-bo, ZENG Zhao-tian, ZHAO Yan-lin. Experimental studies of strength of expansive soil in drying and wetting cycle[J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(12): 3797 - 3802. (in Chinese))
- [14] 徐彬, 殷宗泽, 刘述丽. 膨胀土强度影响因素与规律的试验研究[J]. 岩土力学, 2011, 32(1): 44 - 50. (XU Bin, YIN Zong-ze, LIU Shu-li. Experimental study of factors influencing expansive soil strength[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(1): 44 - 50. (in Chinese))
- [15] 刘松玉, 季鹏, 方磊. 击实膨胀土的循环膨胀特性研究[J]. 岩土工程学报, 1999, 21(1): 9 - 13. (LIU Song-yu, JI Peng, FANG Lei. Approach to cyclic swelling behavior of compacted expansive clays[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1999, 21(1): 9 - 13. (in Chinese))
- [16] 刘斯宏, 赞德记, 汪易森. 便携式现场和室内两用直剪试验仪及其取样测试方法, 中国, 200710025380[P]. 2011-01-12. (LIU Si-hong, ZANG De-ji, WANG Yi-sen. Portable in-situ and indoor direct shear equipment and its sampling method, Ching, 200710025380[P]. 2011-01-12.

(本文责编 黄贤沙)