

文章编号：1006-4710(2014)04-0473-06

膨胀土的收缩与开裂特性试验研究

赵亚楠，党进谦

(西北农林科技大学 水利与建筑工程学院,陕西 杨凌 712100)

摘要：膨胀土因其高胀缩性带来很多工程问题,膨胀土的收缩及开裂对工程危害更大。通过对安康膨胀土进行收缩试验与开裂试验,研究膨胀土的收缩变形特性与开裂规律。结果表明:膨胀土的收缩变形受初始含水率的影响显著,受干密度影响较小,给出了计算收缩应变的公式;非饱和膨胀土的收缩变形存在各向异性,以侧向变形为主,并随着含水率增加向各向同性过渡;裂缝的长度、宽度服从对数正态分布,面积服从负指数分布,交点服从均匀分布,裂缝的交角以90°左右为主;厚度越大、温度越高开裂含水率越高。

关键词：收缩变形；膨胀土；裂缝；开裂含水率

中图分类号：TU443 文献标志码：A

Research on the shrinking and cracking properties of expansive soil

ZHAO Ya'nan, DANG Jinqian

(College of Water Resources and Architectural Engineering, Northwest A&F University, Yangling 712100, China)

Abstract: Expansive soil has brought about numerous engineering problems due to its behaviors of expanding and shrinking, the shrinking and cracking of expansive soil can greatly endanger engineering works. The shrinking deformation behaviors and cracking laws of expansive soil are studied through the tests of Ankang shrinkage soil and cracking. The testing results indicate that the shrinking deformation of shrinkage soil is obviously subjected to the influence of initial moisture content rate and to the less influence of dry density. Also, the formula to calculate shrinkage strain is given out. There exists the anisotropy in shrinkage deformation of unsaturated expansive soil, with the side deformation in the transformation to isotropy, The length and width of cracking are found to follow the logarithmic normal distribution, area conforms to the negative exponential distribution. crossing points obey the uniform distribution, and crossing angles of cracks are mostly around 90°. Accordingly, the larger the thickness is , the higher the temperature, and the higher the moisture content rate in the cracks will be.

Key words: shrinking strain; expansive soil; crack; cracking water content

膨胀土是一种具胀缩性的土。人们对膨胀土的强度^[1-2]、本构关系^[3-4]、胀缩变形规律^[5-6]、渗透以及膨胀土边坡的稳定性^[7-8]进行研究时将膨胀土视为连续介质,忽视了膨胀土由于收缩而开裂的现象。膨胀土干燥收缩并开裂形成裂缝,造成土体结构不连续,对其在干湿交替作用下的中浅层土的非饱和渗流^[9]、抗剪强度^[10-12]等工程性质产生较大的影响。以往的胀缩变形研究与实践多以计算膨胀量为主,主要对膨胀带来的灾害进行分析预防,实际上,由于

膨胀土收缩产生的裂缝为地表径流创造入渗通道,造成局部开裂区域渗水量激增、不能愈合的裂缝导致渗透系数突变^[9],加剧土体冲刷、渗流场发生改变,是引起地基变形和浅中层滑坡的重要因素^[7-8]。对于裂缝的研究,易顺民^[13]等从形态学的角度采用分维数定量描述膨胀土裂缝,殷宗泽^[14]采用灰度熵定量描述裂缝,分维数与灰度熵是对裂缝的整体定量描述,取得了良好的效果,但是仍缺乏对裂缝的几何特征如宽度、长度、面积等裂缝细节的分析。

收稿日期：2014-05-10

基金项目：国家自然科学基金资助项目(50979094)。

作者简介：赵亚楠,男,硕士生,研究方向为特殊土力学与工程。E-mail: izolt@163.com; 党进谦,男,教授,研究方向为岩土工程数值模拟与应用、岩土体工程性质与稳定性等。E-mail: dangjinqian@163.com。

为了研究土的收缩变形以及开裂特性,本研究通过收缩试验与开裂试验,分析干湿状态和压密程度对土收缩变形的影响,描述裂缝的发展过程,用统计的方法对裂缝进行定量描述,探讨影响裂缝开裂的因素,为工程实际提供一定的理论依据。

1 试验方法

1.1 膨胀土收缩试验

分五组制备土样,各组的含水率分别为11%、15%、19%、23%、27%,每组包含五个干密度 1.61 g/cm^3 、 1.53 g/cm^3 、 1.45 g/cm^3 、 1.37 g/cm^3 、 1.29 g/cm^3 。土样直径6.18 cm,高2 cm。土样用烘箱烘干,测量烘干后的直径、高度,计算体积应变、竖向应变、横向应变。土样物理指标见表1。

表1 土样物理指标

Tab. 1 Physical properties of soil samples

土样类别	最大干密度/ (g/cm ³)	比重	液限/%	塑限/%
安康土	1.61	2.70	45.27	26.17

1.2 膨胀土开裂试验

膨胀土用木棒碾碎后过1 mm筛,放入烧杯中加水搅拌至泥浆状,静置2 h后滤去表层水,将泥浆倒入容器(30 cm×40 cm)中,保证均匀,放入烘箱中干燥,模拟开裂过程。

1.3 膨胀土开裂影响因素试验

为研究土层厚度对开裂的影响,在相同的铝盒中倒入泥浆,厚度分别为2 mm、4 mm、6 mm、8 mm、10 mm、12 mm、14 mm,称重后放入烘箱中(110℃),记录开裂含水率(初始含水率为70%)。

为研究温度对开裂的影响,在几个相同的铝盒中装入厚度为3 mm的泥浆(初始含水率为70%),称重后分别置于70℃、90℃、110℃下,每隔一段时间称质量,计算含水率。

2 结果分析

2.1 含水率、干密度对体应变的影响

图1、图2分别为初始含水率、干密度与收缩体应变的关系曲线。从图1可知,含水率-体应变拟合曲线近似于指数函数,在相同干密度下体应变受含水率影响显著。从图2可以看出,干密度-体应变拟合曲线近似平行于横轴,表明相同初始含水率下干密度对体应变几乎没有影响,但随着干密度的增加,体应变有受到抑制的趋势。含水率和干密度对体应变的影响程度差别很大,这与不同条件下土中水的存在形

式密切相关。含水率变化对收缩影响很大,在工程中必须控制土的初始含水率以减少体积收缩。

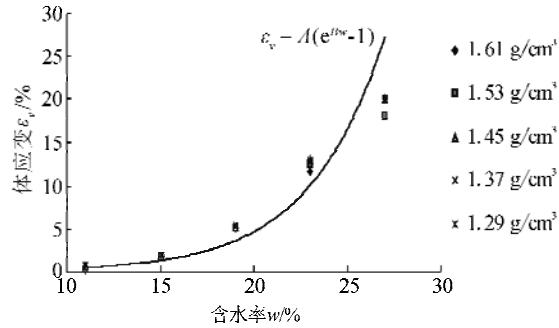


图1 含水率与体应变的关系

Fig. 1 Relationship between water content and volumetric strain

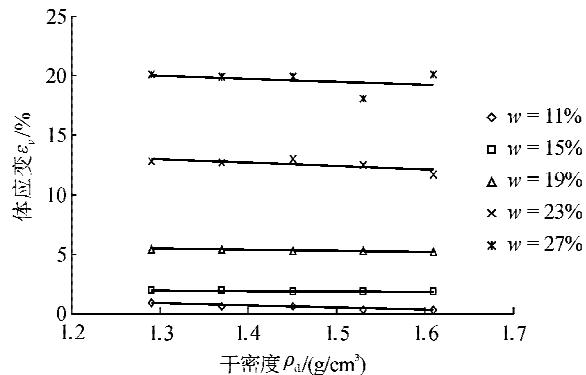


图2 干密度与体应变的关系

Fig. 2 Relationship between dry density and volumetric strain

含水率为11%时,在干燥后引起土体积的变化很小,不到1%;当含水率达到19%时,虽然与11%时的孔隙比相同,但土出现较明显的体积变化,达到了6%以上;含水率达到27%时,收缩体应变达到了20%左右。膨胀土微观上由集合体构成,集合体内部具有一层或者多层的层叠体,含水率越低,层叠体内的堆叠层数越高。含水率越高,越多的水存在于集合体之间的孔隙(大孔隙)中,在干燥失水后产生的收缩应变量越大。

相同含水率下干密度的改变并没有对体积应变产生较明显的影响。但是,随着干密度增大,土趋于密实,干燥后收缩有受到抑制的趋势,但是这种变化很小。由于体应变受干密度变化的影响很小,在保证达到设计压实度的前提下,增加压实度以期控制收缩变形是低效不经济的。忽略干密度的影响,经拟合得到体应变计算公式,为:

$$\epsilon_v = 0.0322e^{0.2497w} \quad (1)$$

2.2 膨胀土收缩潜势、各向异性及其定量描述

Grossman^[16]用线性伸长系数 COLE (coefficient of linear extensibility) 评价粘土的收缩潜势,即:

$$COLE = \left(\frac{V_w}{V_d} \right)^{1/3} - 1 \quad (2)$$

式中, V_w 和 V_d 分别是土的湿体积与干燥后体积, 当 $COLE < 0.03$ 代表低收缩潜势, $0.03 \leq COLE < 0.06$ 代表中收缩潜势, $COLE \geq 0.06$ 代表高收缩潜势。

Bronswijk^[16]用几何因子 r_s 评价土变形的各向异性, 即:

$$r_s = \frac{\ln(V_s/V_0)}{\ln(Z_s/Z_0)} \quad (3)$$

式中, V_s 与 V_0 分别是土干燥后与干燥前的体积, Z_s 与 Z_0 分别是干燥后与干燥前的高度, $r_s = 3$ 为各向同性收缩, $r_s \neq 3$ 为各向异性收缩, $r_s < 3$ 时竖向变形为主, $r_s > 3$ 时横向变形为主。

表 2 是初始干密度为 1.61 g/cm^3 时, 不同初始含水率土样的线性伸长系数和几何因子。

表 2 不同含水率下的线性伸长系数和几何因子
Tab. 2 COLE and r_s under different water content

w/%	11	15	19	23	27
COLE	0.001	0.006	0.021	0.042	0.078
r_s	7.41	8.45	5.86	5.72	3.33

表 2 表明, 含水率小于 23% 时, 收缩潜势低, 11% 时收缩潜势很小, 收缩量也很小。含水率达到 23% 时上表现出中度的收缩势, 27% 时为高收缩势, 收缩势对含水率敏感, 在工程应用中应严格控制土的含水率。

由表 2 可知, 试验各初始含水率土样的几何因子 r_s 都大于 3, 初始含水率越大几何因子越小。说明土样在非饱和条件下的收缩以横向收缩为主, 导致黏性土收缩开裂, 随着初始含水率的增大, 收缩逐渐变为各向同性, 可以预测土在饱和时的收缩是各项同性收缩。

2.3 膨胀土的开裂规律及裂缝定量描述

图 3~5 表示土开裂的过程及开裂时的状态。由图 3~5 可知, 土样的开裂首先产生 Y 或 I 形状的裂口(图 3 数字处), 裂口扩展延伸形成狭长的裂缝, 在一些裂缝的垂直方向上会产生新的裂缝, 两个正在发展中的裂缝总是近乎垂直相交。裂缝继续延伸变长, 变宽, 当土样的含水率基本不再变化, 变形达到稳定, 裂缝发展速度逐渐变缓, 最终停止发育, 形成裂缝网络, 将土分割成许多多边形, 以四边形居多(图 5)。

非饱和的应力应变关系表示为:

$$\epsilon_h = \frac{\sigma_h - \mu_a - \mu(\sigma_v + \sigma_h - 2\mu_a)}{E} + \frac{\mu_a - \mu_w}{H} \quad (4)$$

极限状态下, 令 $\epsilon_h = 0$, 由式(4)可得横向应力为:

$$\sigma_h - \mu_a = \frac{\mu(\sigma_v - \mu_a)}{1 - \mu} - \frac{E(\mu_a - \mu_w)}{H(1 - \mu)} \quad (5)$$

在开裂初始阶段, 深度很小, 前者可以忽略不计, 即:

$$\sigma_h - \mu_a = -\frac{E(\mu_a - \mu_w)}{H(1 - \mu)} \quad (6)$$

式(6)表明裂缝产生是横向抗拉强度小于吸力引起的横向应力的结果, 随着含水率的减小, 土的抗拉强度与吸力都增加^[17-21], 在降低至某一含水率时, 达到极限平衡后土体开裂, 实际上土粒分布不均匀, 在抗拉强度较小的薄弱点处会首先开裂, 垂直于裂缝方向的抗拉强度最小, 裂缝总是垂直相交的。



图 3 开裂初始状态
Fig. 3 State of initial cracking

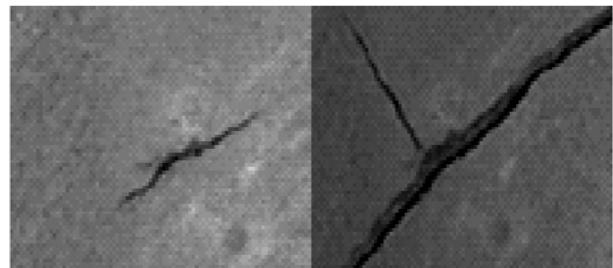


图 4 开裂垂直发展(右侧放大)
Fig. 4 Cracking in vertical direction

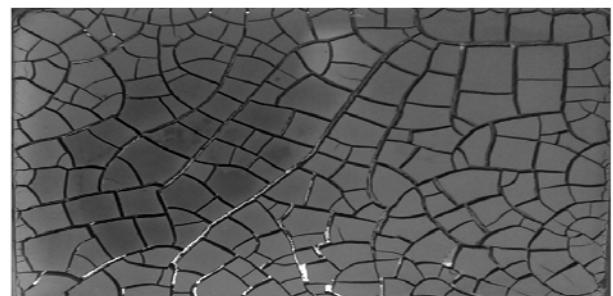


图 5 开裂完全状态
Fig. 5 Final cracking pattern

采用 AutoCAD 软件处理图 5 的开裂图像, 对裂缝的长度、宽度、面积、交点、交角进行了统计, 统计结果见图 6~11。

从图 6 可看出, 面积在 $0 \sim 2 \text{ cm}^2$ 之间的分布频率最大, 为 32.3%, 随着面积增大, 分布频率逐渐减小, 达到 $16 \sim 18 \text{ cm}^2$ 之间时分布概率为 0.4%, 最

大面积 17.2 cm^2 是试验土样表面积的 $1/70$, 面积服从负指数分布。

从图 7 和图 8 可以看出, 随着长度(宽度)的增加, 其对应的分布频率先增大后减小, 裂缝的长度与宽度分别在 $1.5\sim2 \text{ cm}$ 和 $2\sim3 \text{ mm}$ 之间达到了最大分布频率 24.2% 和 33.9% , 而长度(宽度)较小或者较大时其分布频率都比较低, 宽度与长度服从对数正态分布。

从图 9 和图 10 可以看出, 沿着长度与宽度方向, 裂缝交点的分布频率近似相等, 服从均匀分布。从图 11 可以看出, 裂缝之间的交角基本以 90° 左右 ($80^\circ\sim100^\circ$) 为主, 其分布频率达到了 73.6% , 这也与裂缝的垂直发展模式相吻合。

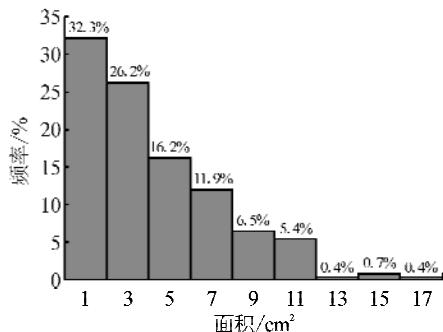


图 6 裂缝面积分布
Fig. 6 Area distribution

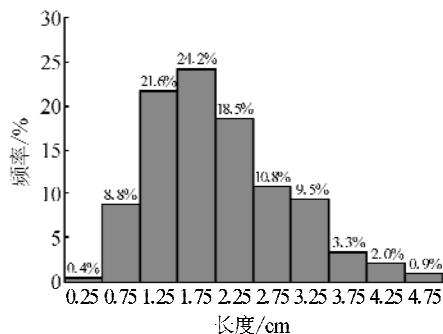


图 7 裂缝长度分布
Fig. 7 Length distribution

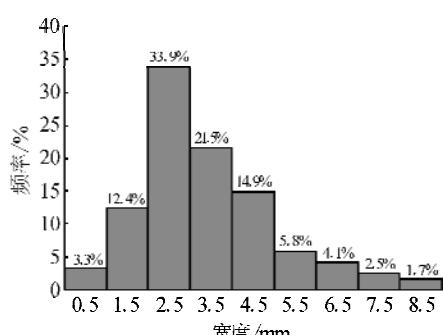


图 8 裂缝宽度分布
Fig. 8 Width distribution

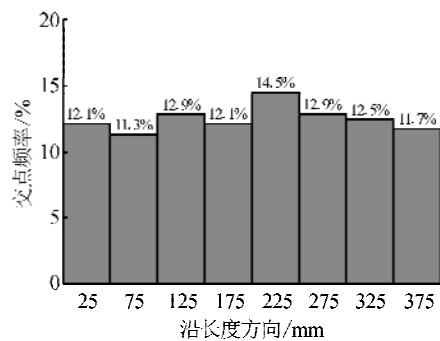


图 9 交点沿长度分布
Fig. 9 Points distribution along length

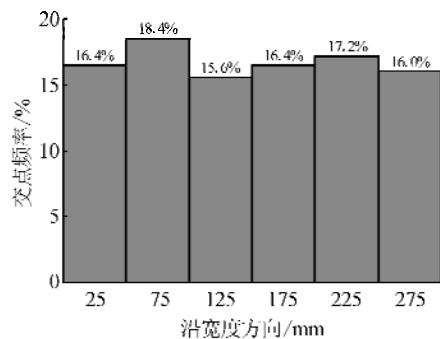


图 10 交点沿宽度分布
Fig. 10 Points distribution along width

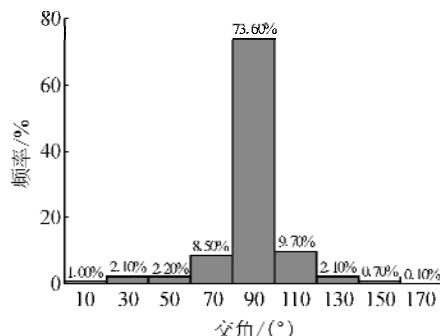


图 11 交角分布
Fig. 11 Crossing angle distribution

2.4 膨胀土开裂影响因素分析

裂缝出现时的含水率对工程实际具有重要意义, 因此本研究以开裂含水率为研究开裂的标度。

图 12 为土样厚度与开裂含水率关系, 相同温度、初始含水率条件下, 厚度越大, 开裂含水率越大。

图 13 为不同温度下土样的含水率随时间变化的过程。从图 13 可知, 在 70°C 、 90°C 、 110°C 下含水率随时间的变化分为三个阶段: 调整阶段, 温度逐渐升高蒸发作用逐渐增强, 含水率变化率增大, 这一阶段持续时间较短 (5min 以内), 并随着温度升高变短, 这一阶段没有开裂发生; 常速阶段, 含水率随时间变化基本符合线性关系, 温度越高, 坡度越陡, 这一阶段持续时间较长, 开裂多发生在这一阶段的中

期附近;残余阶段,含水率降低至一个很小的值,蒸发基本停止,这一阶段持续时间较短,并随着温度升高变短,开裂达到最终状态。

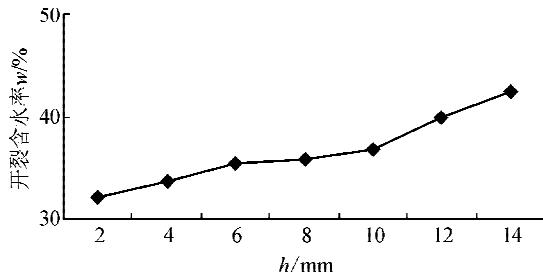


图 12 厚度与开裂含水率的关系

Fig. 12 Relationship between thickness and cracking water content

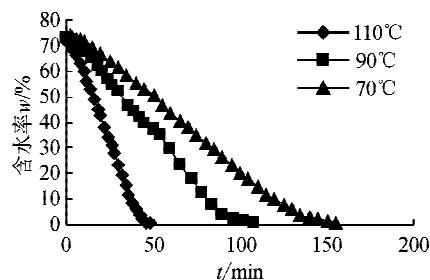


图 13 不同温度下含水率随时间变化关系

Fig. 13 Relationship between water content and time under different temperature

将图 13 中不同温度下的第二阶段直线斜率的绝对值定义为失水速率 k_T , 进一步研究发现, k_T 越大, 开裂含水率也越大, 如图 14 所示。 k_T 实际上反映了外界干燥程度, k_T 越大, 土越容易开裂。

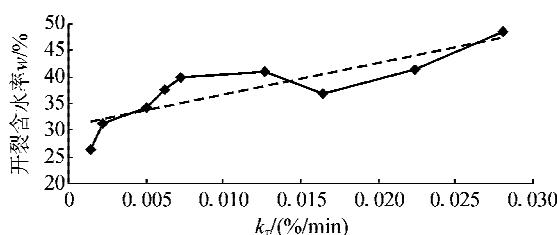
图 14 k_T 与开裂含水率的关系

Fig. 14 Relationship between k_T and cracking water content

本试验还做了室温(24°C)下的对比试验,发现室温下的含水率-时间变化曲线符合良好的指数函数关系,如图 15 所示,即: $w = w_0 e^{-k_T t}$, w_0 为初始含水率, k_T 为失水速率。常温下 $k_T = 0.00145$, 对应的开裂含水率是 26.2%, 小于其他较高温度下的值。

由此可见较高的温度和厚度会导致土在开裂时处于较高的含水率状态。

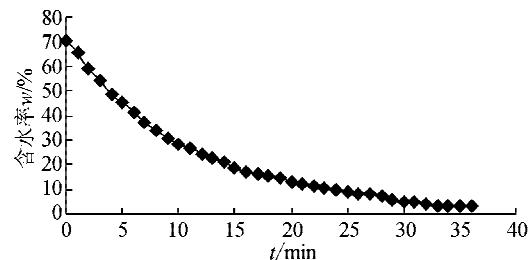


图 15 室温下含水率随时间变化关系

Fig. 15 Relationship between water content and time under normal temperature

3 结 论

膨胀土的收缩变形受含水率影响显著,并随含水率增加收缩变形量呈指数级增加;膨胀土的收缩受到自身干密度的影响相对于含水率较小。干密度的增加会在一定程度上抑制收缩变形,但这种抑制作用小于含水率的作用,尤其是在高含水率情况下。非饱和状态下,膨胀土的收缩变形具有各向异性,并随着含水率增加逐渐向各向同性过渡,非饱和膨胀土的收缩潜势对含水率变化敏感,工程中应当注意控制膨胀土的含水率以控制侧向收缩引起开裂。

膨胀土开裂总是从薄弱地带开始,之后延伸扩展,与其他裂缝接近垂直相交,并在垂直于裂缝的方向上产生次生裂隙。裂缝的面积服从负指数分布,裂缝的长度与宽度服从对数正态分布,裂缝的交点沿长度与宽度方向都服从均匀分布,裂缝之间的交角以 90° 左右为主。这一结果对于试验、数值模拟裂缝的产生发展具有重要意义。

膨胀土裂缝的产生是横向抗拉强度小于由吸力引起的拉应力的结果,与其开裂时的含水率有关,有待于进一步研究。针对本实验结果,厚度越大、温度越高开裂含水率越高。

参 考 文 献:

- [1] 卢再华,陈正汉,曹继东,等.原状膨胀土的强度变形特性及其本构模型研究[J].岩土力学,2001,22(3):339-342.
Lu Zaihua, Chen Zhenghan, Cao Jidong. A study on strength and deformation characteristics and the constitutive model of natural expansive soils [J]. Rock and Soil Mechanics, 2001, 22(3):339-342.
- [2] 徐永福.非饱和膨胀土结构性强度的研究[J].河海大学学报,1999,27(2):86-89.
Xu Yongfu. A study on the structural strength of unsaturated expansive soils [J]. Journal of Hohai University, 1999, 27(2):86-89.
- [3] 卢再华,陈正汉.非饱和原状膨胀土的弹塑性损伤本构模型研究[J].岩土工程学报,2003,25(4):422-426.
Lu Zaihua, Chen Zhenghan. An elastoplastic damage

- constitutive model of unsaturated undisturbed expansive soil[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2003, 25(4):422-426.
- [4] Gens A, Alonso E E. A framework for the behaviour of unsaturated expansive clays[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1992, 29:1013-1032.
- [5] 谭罗荣, 孔令伟. 膨胀土膨胀特性的变化规律研究[J]. 岩土力学, 2004, 25(10):1555-1559.
Tan Lourong, Kong Lingwei. Study on variation regularity of swelling behavior of expansive soil[J]. Rock and Soil Mechanics, 2004, 25(10):1555-1559.
- [6] 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 Heping, Zhang Rui, Zheng Jianlong. 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.
- [7] 陈生水, 郑澄峰, 王国利. 膨胀土边坡长期强度变形特性和稳定性研究[J]. 岩土工程学报, 2007, 29(6):795-799.
Chen Shengshui, Zheng Chengfeng, Wang Guoli. Researches on long-term strength deformation characteristics and stability of expansive soil slopes[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2007, 29(6):795-799.
- [8] 殷宗泽, 袁俊平, 韦杰等. 论裂隙对膨胀土边坡稳定的影响[J]. 岩土工程学报, 2012, 34(12):2155-2161.
Yin Zongze, Yuan Junping, Wei Jie. Influence of fissuring on slope stability of expansive soil[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012, 34(12):2155-2161.
- [9] Emad Jahangir, Olivier Deck, Farimah Masrouri. Estimation of ground settlement beneath foundations due to shrinkage of clayey soils[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2012, 49(7):835-852.
- [10] Kleppe J H, Olson R E. Desiccation cracking of soil-barriers[J]. Hydraulic Barriers in Soil and Rock ASTM, 1985;263-275.
- [11] Yuen K, Graham J, Janzen P. Weathering-induced fissuring and hydraulic conductivity in a natural plastic clay[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1998, 35:1101-1108.
- [12] 吕海波, 曾召田, 赵艳林, 等. 膨胀土强度干湿循环试验研究. 岩土力学, 2009, 30(12):3797-3802.
Lu Haibo, Zeng Zhaotian, Zhao Yanlin, et al. Experimental studies of strength of expansive soil in drying and wetting cycle[J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(12):3797-3802.
- [13] 易顺民, 黎志恒, 张延中. 膨胀土裂隙结构的分形特征及其意义[J]. 岩土工程学报, 1999, 21(3):294-298.
Yi Shunmin, Li Zhiheng, Zhang Yanzhong. The fractal characteristic s of fracture s in expansion soil and its significance[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1999, 21(3):294-298.
- [14] 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, 6:1-7.
Yuan Junping, Yin Zongze. Fissure quantization criteria and strength characteristics of expansive soil[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2004, 6:1-7.
- [15] Grossman R B, Brasher B R, Franzmeier D P, et al. Linear extensibility as calculated from natural-clod bulk density measurements[J]. Soil Science Society of America Proceedings, 1968, 32(4):570-573.
- [16] Bronswijk J J B. Shrinkage geometry of a heavy clay soil at various stresses[J]. Soil Science Society of America Journal, 1990, 54(5):1500-1502.
- [17] 党进谦, 郝月清, 李靖. 非饱和黄土抗拉强度的研究[J]. 河海大学学报, 2001, 29(6):106-108.
Dang Jinqian, Hao Yueqing, Li Jing. A study on tensile strength of unsaturated loose soil[J]. Journal of Hohai University, 2001, 29(6):106-108.
- [18] 冉龙洲, 宋翔东, 唐朝生. 干燥过程中膨胀土抗拉强度特性研究[J]. 工程地质学报, 2011, 04(4):620-626.
Ran Longzhou, Song Xiangdong, Tang Chaosheng. Laboratorial investigation on tensile strength of expansive soil during drying[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, 04(4):620-626.
- [19] 唐朝生, 施斌, 刘春, 等. 黏性土在不同温度下干缩裂缝的发展规律及形态学定量分析[J]. 岩土工程学报, 2007, 29(5):743-749.
Tang Chaosheng, Shi Bin, Liu Chun, et al. Developing law and morphological analysis of shrinkage cracks of clayey soil under different temperatures[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2007, 29(5):743-749.
- [20] 唐朝生, 崔玉军, Anh-Minh Tang, 等. 土体干燥过程中的体积收缩变形特征[J]. 岩土工程学报, 2011, 33(8):1271-1279.
Tang Chaosheng, Cui Yujun, Tang Anhmin. Volumetric shrinkage characteristics of soil during drying[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, 33(8):1271-1279.
- [21] Abu-Hejleh A N, Znidarcic D. Desiccation theory for soft cohesive soils[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1995, 121(6):493-502.

(责任编辑 李虹燕)