

DOI: 10.11779/CJGE202002007

环境湿度与温度对压实膨胀土裂隙发育影响试验研究

刘观仕¹, 陈永贵^{2*}, 曾宪云³, 张贵保³

(1. 中国科学院武汉岩土力学研究所岩土学与工程国家重点实验室, 湖北 武汉 430071; 2. 同济大学土木工程学院地下建筑与工程系, 上海 200092; 3. 长沙理工大学土木工程学院, 湖南 长沙 410114)

摘要: 裂隙是影响膨胀土工程性质的重要因素。以南阳某高速公路膨胀土为对象, 采用大尺寸压实膨胀土试样进行不同环境湿度与温度下的裂隙发育试验, 通过数码相机摄影并基于自编程序进行土样表面图像的量化分析, 获得裂隙率、均宽及总长等典型特征参数, 进而探讨环境湿度与温度对膨胀土裂隙发育规律的影响。结果表明: 大尺寸土样裂隙发育特征相较环刀样和薄层饱和泥浆样更接近路基与边坡等工程实际; 环境湿度越高, 初期裂隙发展越慢, 发育持续时间越长, 后期裂隙特征统计参数反而越大; 环境温度越高, 初期裂隙发展越快, 但裂隙回缩稳定速度也越快, 后期裂隙特征统计参数反而越小; 低湿度或高温度使土样表面易于产生更多肉眼不可见的微裂隙, 是裂隙特征统计参数与理论分析相比偏小的重要原因, 而高湿度与低温度则有利于收缩应力向深层土体传递, 促使裂隙偏向数量更少但更宽和更深方向发展。

关键词: 压实膨胀土; 湿度; 温度; 裂隙率; 裂隙宽度; 裂隙长度

中图分类号: TU43 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4548(2020)02-0260-09

作者简介: 刘观仕(1974—), 男, 博士, 副研究员, 主要从事膨胀土工程特性方面的研究工作。E-mail: gslu@whrsm.ac.cn。

Effects of ambient air humidity and temperature on crack development of compacted expansive soils

LIU Guan-shi¹, CHEN Yong-gui^{2*}, ZENG Xian-yun³, ZHANG Gui-bao³

(1. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China; 2. Department of Geotechnical Engineering, College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 3. School of Civil Engineering, Changsha University of Science and Technology, Changsha 410114, China)

Abstract: Cracks are one of the most significant influences on physical and mechanical properties of expansive soils. Some expansive soils, taken from Nanyang Expressway, are compacted to large-size samples and then dehydrated gradually in a closed greenhouse with various ambient air humidities and temperatures for desiccation tests, and a camera is utilized to record the development of cracks on the surfaces of samples. The captured images are disposed and then analyzed quantitatively to obtain typical characteristic parameters of surface cracks, such as crack ratio, average width and total length, for further exploration of crack developing laws. The results show that the cracks observed from the large big-size samples are more similar to those on the site such as embankments and slopes compared to the ring-knife-made or thin-saturated-slurry samples. The higher the ambient air humidity, the slower the cracks develop in the early stage, and the longer the developing time lasts, while the larger the statistical characteristic parameters of surface cracks in the later stage. The higher the ambient air temperature, the faster the cracks develop in the early stage, and the faster the cracks retract and become stable, while the smaller the statistical characteristic parameters of surface cracks in the later stage. Low ambient air humidity or high ambient air temperature makes it easy for the surface of soil samples to generate more invisible micro-fissures, which is an important reason for the small statistical characteristic parameters of cracks compared with the theoretical analysis. High ambient air humidity or low ambient air temperature may be beneficial to the transfer of shrinkage stress to deeper soil layer, and promote the development of cracks with fewer branches, larger width and deeper depth.

Key words: compacted expansive soil; humidity; temperature; crack ratio; crack width; crack length

0 引言

堤防、大坝、基础、垫层、遮盖层等工程中, 土

基金项目: 国家自然科学基金项目(51279200, 41772279); 长沙市科技计划项目(KQ1602037); 湖南省教育厅科研项目(15A009)

收稿日期: 2018-06-30

***通信作者** (E-mail: cyg@tongji.edu.cn)

体干缩开裂不仅影响土的水-力学性质,而且危害工程整体性^[1]。膨胀土中亲水性黏土矿物含量高,对环境湿热变化敏感,气候作用下干缩湿胀剧烈,裂隙持续发育,工程性能受显著影响,因此裂隙性是膨胀土边坡稳定的关键因素^[2]。

裂隙按成因可分为胀缩裂隙和非胀缩裂隙,胀缩裂隙与胀缩性密切关联,易引起浅表层边坡失稳^[3],是膨胀土裂隙研究的重点。目前,可采用CT法^[4]进行三维裂隙测试,可采用远距离光学显微镜观测法^[5]进行裂隙表面连续观测,但两者均不能应用于大尺寸土样和原位土体;超声波法和电阻率法^[6]定量分析尚有一定距离;数码摄影法具有快速、准确、低成本等优点,被许多学者所采用^[7-13]。试样制备方面,以泥浆^[8, 14]、非压实膏状^[15]或高含水率膨胀土制作的试样^[16],与原位或工程压实土的状态不一致;厚度较薄的试样^[15]无法充分反映厚度方向湿度梯度对裂隙发育的影响。另外,试验中普遍采用 $\Phi 61.8$ mm环刀样,不能反映尺寸效应,也无法考虑土体下部对上部收缩的抑制作用。裂隙发育特征定量研究方面,刘春等^[12]对裂隙图像进行智能识别获取裂隙特征参数,实现了计算机定量分析;王军等^[17]提出了裂隙度的概念及定量描述方法;黎伟等^[7]、张家俊等^[10]、曹玲等^[15]研究了干湿循环对裂隙特征参数的影响;马佳等^[8]研究了脱湿情况下膨胀土裂隙的产生、传播、扩展过程;李雄威等^[9]基于自动化分形统计建立了土体裂隙分布与含水率、渗透系数及变形模量的关系;许锡昌等^[16]、夏冬生等^[18]试验研究了初始含水率、干密度、蒙脱石含量对开裂特征的影响;Nahlawi等^[19]研究了泥浆及压缩黏土的干缩开裂含水率、干缩系数、开裂面积、间距与深度等的变化规律;Tollenaar等^[20]研究了泥样含水率、厚度、尺寸、底部材料等初始与边界参数对干缩开裂的影响;Velde等^[21]现场观察了多种耕作土和泥浆沉积土的表面裂隙特征;Susanga等^[22]研究认为裂隙出现位置受控于土体缺陷或孔隙。通常,土体膨胀和收缩形成的胀缩裂隙受大气环境影响较大,如降雨、蒸发、温度变化等^[3],因此研究温度与湿度对裂隙发育的影响至关重要。唐朝生等^[14]采用 $0.026\text{ m}^2 \times 5\text{ mm}$ 的泥浆样,分别在 30°C 、 40°C 、 50°C 的烘箱(湿度分别为50%、30%和22%)中恒湿失水干缩,定性研究了温度对裂隙长度、节点数等的影响;申科等^[23]对膨胀土环刀样进行了 100°C 、 75°C 、 50°C 条件下的湿干循环试验;Tollenaar等^[1]研究认为土体表面结构和孔隙结构在蒸发过程中具有重要作用,蒸发速率对土体最终含水率分布影响很大;Tang等^[24]研究了3种温度下泥浆土裂隙网络的宽度、长度与分块面积等几何参数的统计变化规律。

但是,现有文献鲜见基于大尺寸压实土样及考虑

环境湿度和温度对压实膨胀土样裂隙发育影响的量化试验研究。本文自制模型箱制备较大尺寸($40\text{ cm} \times 40\text{ cm} \times 34\text{ cm}$)的压实膨胀土样,通过人工气候试验箱进行环境湿度与温度控制,开展裂隙发育试验;试验过程中,实时拍摄膨胀土裂隙发育图像,采用改进的裂隙图像特征参数提取方法对各阶段裂隙特征进行量化分析,分析环境湿度和温度对膨胀土裂隙扩展的影响规律。

1 裂隙发育试验方案

1.1 试验土样基本参数

试验土样取自河南南阳某高速公路施工现场,天然土样可塑,黄褐色,含铁锰结核,黏粒含量较高,裂隙面呈蜡状光泽。土体基本物性参数为:天然含水率为25.4%~26.8%,颗粒相对密度为2.81,自由膨胀率为58.5%,收缩系数为0.38,缩限为11.0%,天然重度为 19.8 kN/m^3 ,干密度为 1.57 g/cm^3 ,液限为55.4%,塑性指数为26.2,体缩率为20.3%,渗透系数为 $8.7 \times 10^{-7}\text{ cm/s}$ 。按照《公路土工试验规程》(JTGE40—2007)进行重型击实试验,确定最佳含水率为18.1%,最大干密度为 1.78 g/cm^3 。

1.2 土样制备及试验方法

采用净空尺寸为 $40\text{ cm} \times 40\text{ cm} \times 40\text{ cm}$ 的试验箱将膨胀土压实成样。试验箱侧板采用10 mm厚钢板焊接且以角钢帮焊加固,底板采用螺栓与箱体连接固定,承压钢板厚度15 mm,尺寸略小于试验箱净空(图1)。使用5000 kN测力千斤顶对试验箱内土体进行压实(图2)。将土样放置于设计定制的人工气候试验箱内脱湿,箱内温度、湿度可循环控制,精度分别为 $\pm 0.5^\circ\text{C}$ 、 $\pm 2.5\%$ (图3)。



图1 土样试验箱及盖板

Fig. 1 Box for compaction of soil samples



图2 油压测力千斤顶

Fig. 2 Lifting jack for compaction



图3 人工气候试验箱

Fig. 3 Artificial climate test box

试样制备步骤如下：膨胀土散样风干碾碎后过 2 mm 标准筛；为便于裂隙发育的观察，本试验选择压实含水率 w 为 25%，控制压实度 K 为 80%，相应干密度为 1.424 g/cm^3 ；计算并称量好湿土质量，分成三等份逐次装入试验箱中刮平，用千斤顶压实，控制压实后试样高度即可使试样达到设计的密度（压实度），压实后的试样高度为 34 cm。

试样制备完成后，将装土样的试验箱整体移入人工气候试验箱内进行脱湿，观察裂隙发育。

1.3 土样表面裂隙图像获取

采用索尼 DSC-W80 数码相机摄影记录土样表面脱湿开裂过程，相机有效像素为 720 万。每次摄影时，固定位置设置 4 个均匀白炽灯光源，保证相同照明条件；同时，利用托架固定相机，避免位置变化及人为抖动等因素干扰成像。当土样含水率基本维持不变且前后两次拍摄的裂隙图像特征参数没有明显变化后，结束试验。

1.4 裂隙图像处理

将摄影获得的裂隙图像，转化成像素为 0 或 1 的二值图像，通过计算程序提取和分析裂隙特征参数。刘春等^[12]开发的 CIAS 系统能量化分析裂隙的裂隙率、裂隙长度以及节点数、分块面积等参数。黎伟等^[13]、曾宪云等^[25]基于 MATLAB 软件改进了裂隙特征参数的提取方法，可以对裂隙率、裂隙总长、条数、均长和均宽、最大宽度以及裂隙方向等多个参数进行统计分析；本文对此进行了综合处理应用。

2 试验结果与分析

共进行了 9 组裂隙发育试验，温度分别控制为 20 °C，30 °C 和 40 °C，湿度分别控制为 40%，60%，80%，摄影裂隙发育图像均为 40 cm × 40 cm，典型的二值化图像如图 4 所示。

从图 4 可以看出，裂隙发育过程可划分为 3 个阶段：①细小裂隙发育阶段，为土样脱湿初期，表面出现分布较密集、分块较均匀的裂隙网；②主裂隙发育阶段，随着脱湿过程持续，少数裂隙持续增宽变长并逐渐形成主裂隙，多数裂隙消失或变小变短；③裂隙稳定回缩阶段，几乎所有裂隙都有所收缩，并逐渐趋

于稳定。对比其他学者的研究可知，饱和膨胀土试样的小裂隙较少，没有明显的主裂隙及收缩现象^[8]；小环刀试样的裂隙很少，没有明显的收缩现象^[14]；泥样获得的裂隙数量很少且相对较均匀^[24]。这些试样裂隙发育的差异主要由于试样制备方法和尺寸大小不同，本文采用较大尺寸压实土样的试验结果与现场裂隙试验结果^[26]比较一致，更接近路基与边坡等工程实际。

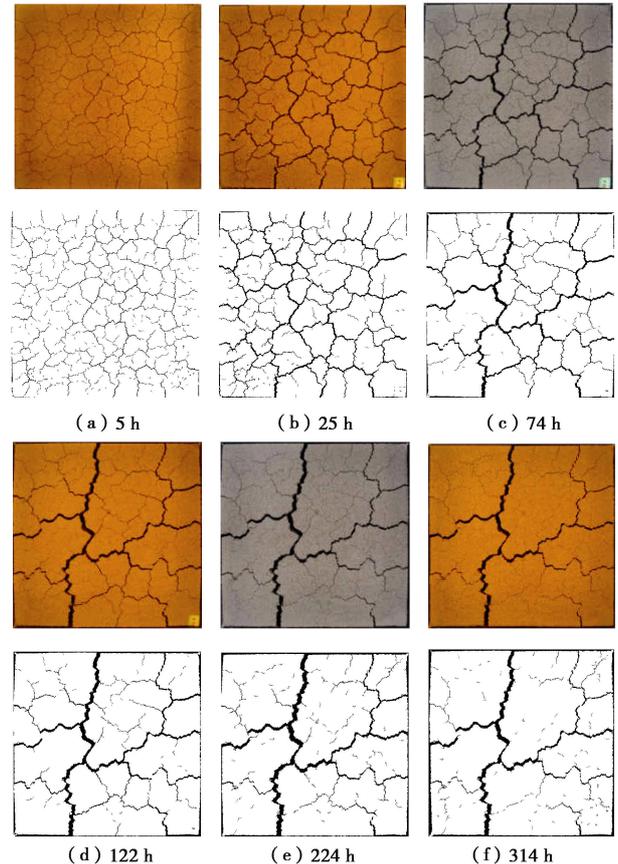
图4 裂隙及二值化图像 ($T=30^\circ\text{C}$, $\text{RH}=40\%$)

Fig. 4 Cracks and binarization images

影响裂隙土工程性质的几何要素包括裂隙的走向、倾角、宽度、深度、长度以及裂隙分布密度等^[5]，常用指标包括裂隙率、裂隙长度、裂隙宽度和裂隙条数^[5, 7-8, 14, 16]。本文选取面积裂隙率、裂隙均宽和裂隙总长 3 个参数进行分析，并采用广义裂隙面积定义裂隙率，即同时考虑土体与试验箱之间的收缩间隙面积，具体计算方法见文献^[13]。试验终止时土样裂隙特征参数见表 1。

2.1 环境湿度与温度对裂隙率的影响

(1) 环境湿度影响

不同环境湿度下的裂隙率变化曲线见图 5。从图 5 可以看出，环境湿度越大，初期裂隙率发育越慢，但发育持续时间越长，回缩稳定的时间越晚，试验终止时裂隙率越大。20 °C，30 °C，40 °C 条件下，80% 湿度环境的裂隙率较 40% 湿度环境的裂隙率分别增大 23.8%，71.5%，55.9%。

表 1 试验终止时裂隙特征参数统计

Table 1 Final statistical characteristic parameters of cracks

编号	温度 / $^{\circ}\text{C}$	湿度 /%	裂隙率 /%	裂隙均宽 /mm	裂隙总长 /mm
#1	20	40	9.78	4.16	3758
#2	20	60	10.40	4.07	4089
#3	20	80	12.11	4.73	4135
#4	30	40	6.88	3.42	3268
#5	30	60	11.09	4.13	4290
#6	30	80	11.80	4.44	4147
#7	40	40	6.76	3.01	3591
#8	40	60	9.96	2.92	5446
#9	40	80	10.54	3.74	4100

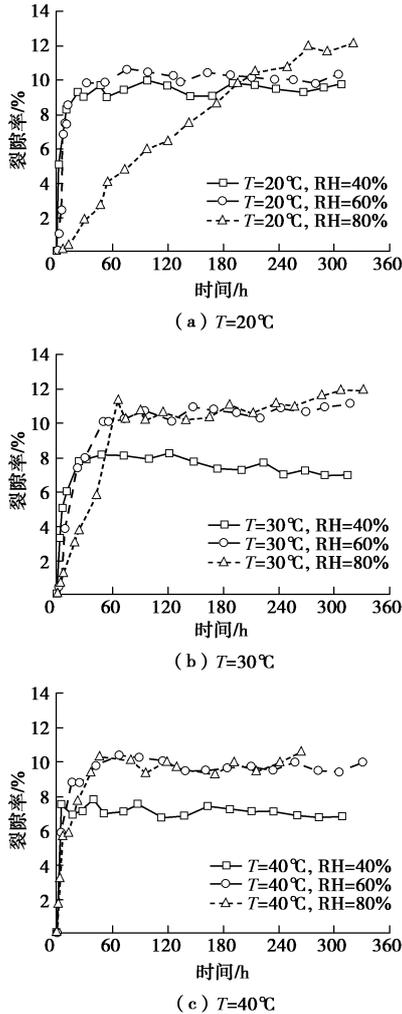


图 5 不同环境湿度下的裂隙率变化

Fig. 5 Change of crack ratios under different air humidities

不同环境温度下的最终裂隙率与湿度关系如图 6 所示, 试验终止时裂隙率随环境湿度的增大而增大, 温度较高时增大趋势更加显著。

(2) 环境温度影响

不同环境温度下的裂隙率变化曲线见图 7。从图 7 可以看出, 环境温度越高, 初期裂隙率增长越快, 但回缩稳定的速率也越快, 试验终止时裂隙率越小。40%, 60%, 80%湿度环境下, 40 $^{\circ}\text{C}$ 温度环境的裂隙率较 20 $^{\circ}\text{C}$ 温度环境的裂隙率分别减小 30.9%, 0.4%, 13.0%。

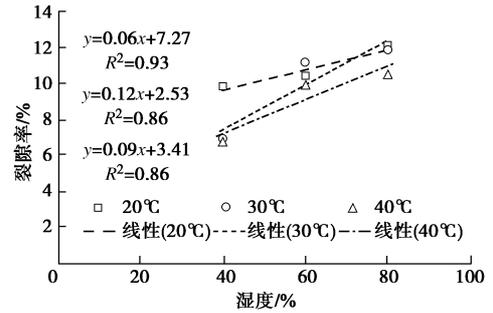


图 6 裂隙率与湿度关系

Fig. 6 Relationship between crack ratio and relative moisture

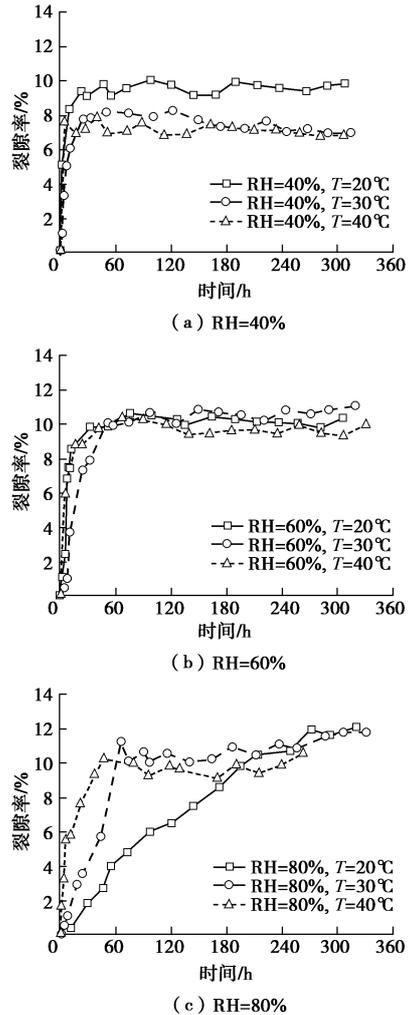


图 7 不同环境温度下的裂隙率变化

Fig. 7 Change of crack ratios under different air temperatures

不同环境湿度下的最终裂隙率与温度关系如图 8 所示, 试验终止时裂隙率随温度的升高而减小, 湿度较小时减小趋势更为明显。

2.2 环境湿度与温度对裂隙均宽的影响

(1) 环境湿度影响

不同环境湿度下的裂隙均宽变化见图 9。图 9 显示, 环境湿度越大, 初期裂隙均宽增长越慢, 但中后期增长越快, 试验终止时裂隙均宽越大。20 $^{\circ}\text{C}$, 30 $^{\circ}\text{C}$, 40 $^{\circ}\text{C}$ 环境温度下, 80%湿度环境下裂隙均宽较 40%湿度环境时分别增大 13.7%, 29.8%, 24.3%。

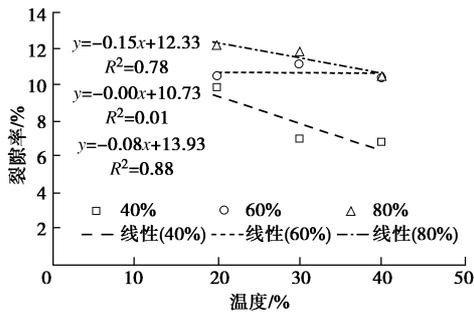


图8 裂隙率与温度关系

Fig. 8 Relationship between crack ratio and temperature

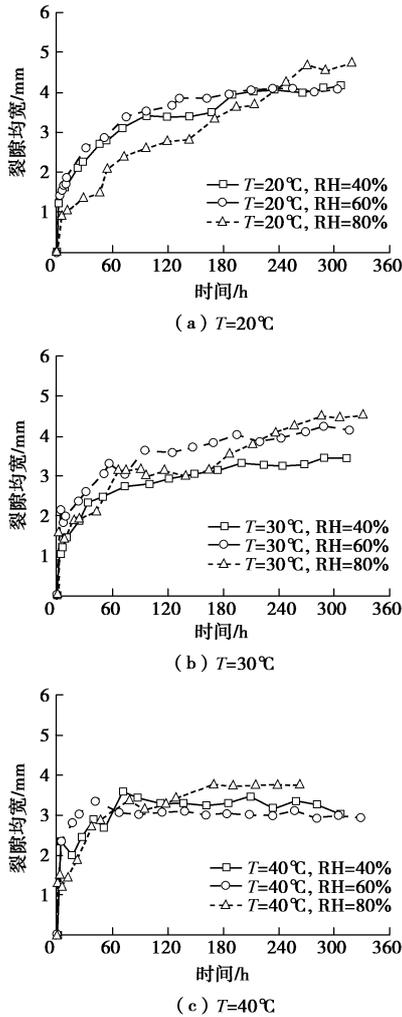


图9 不同环境湿度下的裂隙均宽变化

Fig. 9 Change of average crack widths under different air humidities

(2) 环境温度影响

不同环境温度下的裂隙率均宽变化见图 10。图 10 显示, 环境温度越高, 初期裂隙均宽增长越快, 试验终止时裂隙均宽越小。40%, 60%, 80%湿度环境下, 40℃温度环境的裂隙均宽较 20℃温度环境的裂隙均宽分别减小 27.6%, 28.3%, 20.9%。

2.3 环境湿度与温度对裂隙总长的影响

(1) 环境湿度影响

不同环境湿度下的裂隙总长变化曲线见图 11。从图 11 可看出, 环境湿度越大, 初期裂隙发育的总长度

越小, 而试验终止时裂隙总长反而越大。20℃, 30℃, 40℃环境温度下, 80%湿度环境的裂隙总长较 40%湿度环境时分别增大 10.0%, 26.9%, 14.2%。

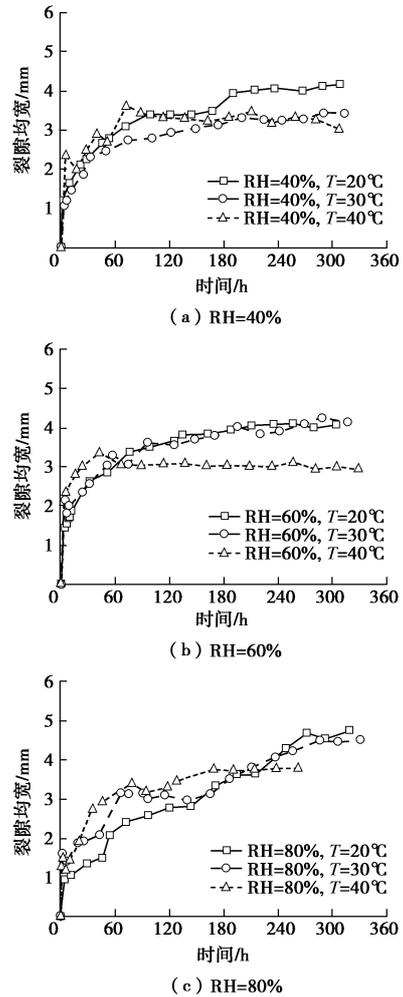
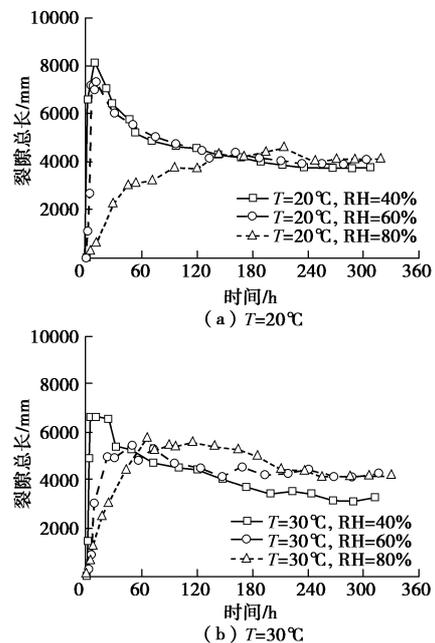


图10 不同环境温度下的裂隙均宽变化

Fig. 10 Change of average crack widths under different air temperatures



(b) T=30℃

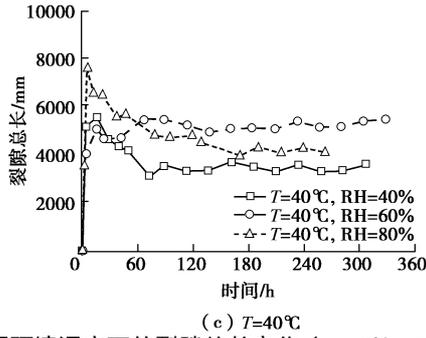


图 11 不同环境湿度下的裂隙总长变化 ($T=20^{\circ}\text{C}$, 30°C , 40°C)
Fig. 11 Change of total crack lengths under different air humidities

(2) 环境温度影响

不同温度环境下的裂隙总长变化曲线见图 12。可以看出, 环境温度越高, 初期裂隙总长增长越快, 但中后期增长越慢, 回缩稳定速度也越快, 试验终止时裂隙总长越小。40%, 60%, 80%湿度环境下, 40°C 温度环境的裂隙总长较 20°C 温度环境的裂隙总长分别增大 -4.4%, 33.2%, -0.8%。

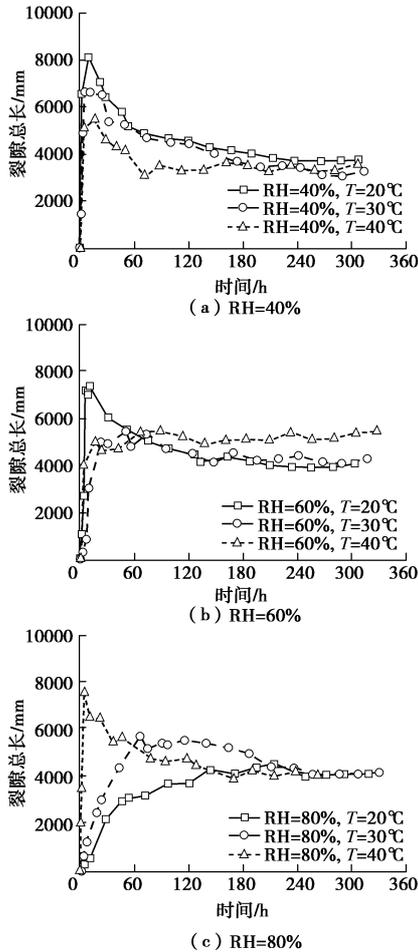


图 12 不同环境温度下的裂隙总长变化 (RH=40%, 60%, 80%)
Fig. 12 Change of total crack lengths under different air temperatures

3 讨 论

土体脱水收缩变形开裂, 本质上是吸力引起的自

身内力作用的结果, 殷宗泽等^[27]、Susanga 等^[22]直接称为收缩应力, 而曾浩等^[28]将干燥收缩过程中土颗粒间产生的相互挤压力定义为收缩应力。

试验和研究表明, 方形大尺寸压实土样表面裂隙发育的主要有两方面原因: ①表层土体最先失水, 引发不均匀收缩变形, 形成横向 x 和 y 两个方向的收缩应力, 如图 13 所示, 当收缩应力大于土体抗拉强度与土自重引起的侧向压应力之和时, 土体就会开裂^[27], 因初期横向失水收缩程度远大于竖向, 裂隙主要沿垂直于拉应力的 x 和 y 方向发育; ②表层土体蒸发失水多、快, 收缩较大, 深层土体失水少、慢, 收缩较小, 土体上下两部分的收缩变形差异会导致土体表面产生较大拉应力, 从而导致原有裂隙的不断发育并产生新的裂隙^[7]。由此可见, 裂隙的发育不仅与土体失水收缩程度相关, 而且与土体下层对上层收缩变形的抑制约束相关。



图 13 试验后土样照片

Fig. 13 Post-test photo of soil sample

试验终止后试样含水率的分布见图 14。从图 14 可以看出, 试样含水率从表面的 11% 逐渐变化到底部的 25% (与初始含水率一致), 表明距表面深度越大, 土体的失水程度越轻, 其急剧变化段与可见裂隙深度一致。对比分析图 13, 14 可知, 土体表面收缩变形最大, 而土体下部无收缩变形, 因此土体下部必然对上部产生约束; 即使裂隙竖向发展, 约束作用始终存在, 直至横向裂隙产生。对于环刀样或饱和薄层泥土浆样的室内试验, 表面失水收缩时没有或者缺少足够的深层土体约束, 裂隙发育到一定程度后相互完全断开并形成若干分块, 各分块单独收缩, 其裂隙发育规律与大尺寸试样存在明显差异。

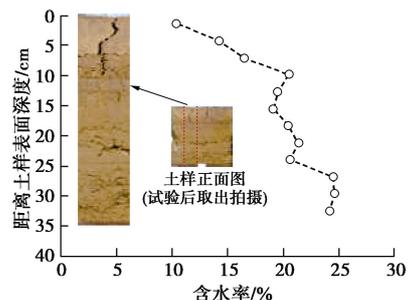


图 14 试验后土样含水率 (#9)

Fig. 14 Distribution of water content along depth of post-test soil sample (No. 9)

裂隙的发育程度与土中水的蒸发量密切相关,蒸发量愈大,土体失水愈多,收缩量愈大,裂隙越发育。非饱和土表面蒸发通量常采用 Penman-Wilson 公式进行计算^[29]:

$$E = \frac{\Gamma R_n + \eta E_b}{\Gamma + \eta A} \quad (1)$$

式中 E 为蒸发通量 (mm/d); Γ 为饱和蒸汽压和温度关系曲线的斜率; R_n 为土表面净辐射量; η 为湿度常数; $E_b = f(u)e_a(B - A)$, 其中 $f(u)$ 为风函数, e_a 为土表面空气蒸汽压, B 为空气相对湿度的倒数, A 为土表面相对湿度的倒数。

根据式 (1), 空气相对湿度越高, B 值越小, E 值也越小; 温度越高, Γ , R_n , E_b 越大, E 值越大。本文试验终止时, 各试样测得的表面含水率约为 8%~11%, 相应的失水量约为 14%~17%; 试样底部含水率为 25%, 相应的失水量为 0。

3.1 环境湿度对裂隙发育影响的原因分析

根据收缩机理及公式 (1) 分析可知, 环境湿度越高, 土样表面失水越慢越少, 收缩变形量越小, 裂隙率越小。试验初期, 环境湿度越高, 裂隙发育速度越慢, 主要是因为环境湿度越高时蒸发通量越小, 失水收缩越慢, 裂隙发育越慢。但是, 随着裂隙发育时间持续, 后期裂隙率、裂隙均宽等参数反而越大。这一现象可能是因为: 环境湿度较低而蒸发速度 E 较大、失水收缩较快时, 土体内收缩应力较快增长, 在浅表面引发裂隙后快速释放, 由此产生的裂隙反而可能较小 (甚至多为肉眼不可见)、较多但较浅, 能够统计的裂隙率较小; 而当环境湿度高而蒸发速度 E 较小时, 收缩应力增长较慢, 利于朝更宽、更深土体传递, 导致裂隙向数量更少但更宽和更深方向发展, 由此产生的可见裂隙较少但较宽、较深, 能够统计的裂隙率较大。

为了寻求更多证据, 采用含砂 25% 的钠蒙脱土压实环刀样 ($\Phi 61.8$ mm) 进行脱湿试验, 两试样初始干密度和含水率相同, 前期分别在 30% 和 60% 环境湿度下脱湿, 后期脱湿至相同含水率, 试样照片见图 15。

可以看出, 1 倍率拍摄的试样照片图 15 (c) (实物缩小) 中均看不到裂隙, 统计的裂隙率均为 0%, 可推论为湿度对裂隙发育无影响; 而从 8 倍率照片 15 (a), (b) (实物放大) 中则可以发现裂隙, 其中 a 的裂隙较小且较多, 15 (b) 中的裂隙较少但较长, 统计裂隙率分别为 3.68% 和 2.86%, 湿度影响显著。这一结果证实了高湿度与低湿度环境对表面裂隙发育特征的影响机理, 而通过普通摄影不能发现土样表面原本存在的微小裂隙, 以及初期可见而后期闭合但实际上以更微小形态存在的裂隙, 使裂隙率统计结果偏低, 一定程度上导致低湿度环境下裂隙特征统计参数反而较小

的原因。

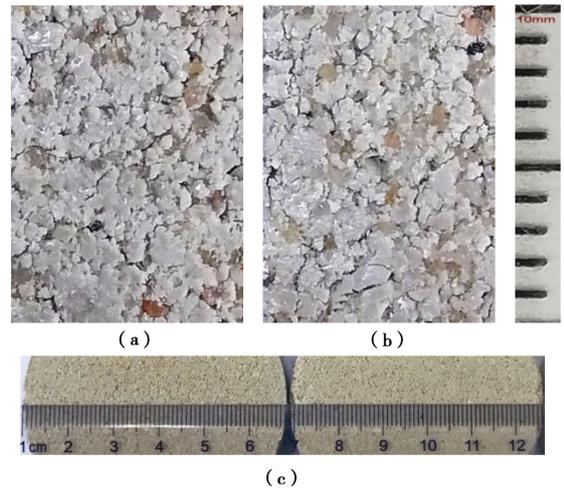


图 15 不同湿度下蒙脱土样收缩裂隙对比试验

Fig. 15 Shrinkage comparison of montmorillonite samples under different air humidities

3.2 环境温度对裂隙发育影响的原因分析

同样, 试验结果综合表明, 环境温度越高, 初期裂隙发育越快, 但回缩稳定的速度也越快, 后期裂隙率越小, 裂隙均宽值越小。许锡昌等^[16]采用环刀样试验, 发现脱湿环境温度较高时试样的最终裂隙度较小, 反之亦然; 唐朝生等^[14, 30]采用饱和和黏性浆样, 土样表面裂缝总长度、裂缝率等特征参数随温度的增加而减少, 但裂缝平均宽度等参数随温度的增加而增大。虽然试样制备方法不同, 两位学者关于后期裂隙发育程度与环境温度关系方面的结论与本文基本一致, 但与公式 (1) 的推论“温度越高, E 值越大, 裂隙发育程度越高”不符, 其原因应与低湿度对裂隙发育的影响类似。环境温度越高, 蒸发速度越快, 土体内收缩应力快速增长集中, 从而越早在浅表面产生更多肉眼不可见的微小裂隙, 减弱或中止了裂隙继续向深层发展, 由此产生的可见裂隙反而较少、较窄、较浅, 统计的裂隙率相对较小, 而对于形成的主次要裂隙, 温度越高, 裂隙深处土体中水蒸发越快, 导致裂隙发育越好, 宽度相对越大。此外, 申科等^[23]、Tang 等^[24]发现饱和土样在高温 ($50^{\circ}\text{C} \sim 105^{\circ}\text{C}$) 环境下, 温度越高, 裂隙发展越快, 裂隙率越大, 土体最终被裂隙切割得越破碎。这一结果是在高温、低湿度 ($<10\%$) 试验条件下获得的, 与本文试验湿度与温度范围相差较大, 原因有待于进一步研究。

3.3 裂隙的摄影图像分析方法的局限

本研究采用的面积裂隙率、裂隙总长和裂隙均宽 3 个特征参数中, 裂隙率的统计最具意义且最为可靠, 能较全面准确地反映土样表面收缩开裂前后的面积收缩; 裂隙总长能反映裂隙发展所处的阶段, 但是, 对

主裂隙和次裂隙长度采用相同的计算方法显然不尽合理, 且计算结果波动相对较大; 裂隙均宽值能反映裂隙发育的程度, 但受裂隙总长统计结果的影响明显。在裂隙参数的统计分析过程中, 趋于稳定阶段的裂隙率有近 1% 的波动, 表明采用摄影图像及处理程序中产生的统计误差难以避免。

4 结 论

采用大尺寸压实膨胀土土样, 基于摄影图像处理方法研究了不同环境湿度 (40%~80%) 与温度 (20℃~40℃) 对裂隙发育的影响规律, 得到以下 4 点结论。

(1) 采用 40 cm 的压实膨胀土样获得的裂隙发育特征较环刀样和薄层饱和泥浆样更接近路基与边坡等工程实际。

(2) 环境湿度越高, 初期裂隙发展越慢, 但发育持续时间越长, 后期裂隙率、裂隙均宽等特征统计参数越大。

(3) 环境温度越高, 初期裂隙发展越快, 但裂隙回缩稳定的速度也越快, 后期裂隙率、裂隙均宽等特征统计参数越小。

(4) 较低的环境湿度或较高的环境温度, 使土样表面易于产生更多肉眼不可见的微裂隙, 是裂隙特征参数与理论分析相比偏小的重要原因; 较高的环境湿度或较低的环境温度, 虽然因土中水的蒸发速度降低而减慢了裂隙发育速度, 但有利于收缩应力向更深层土体的传递, 因此裂隙偏向数量更少但更宽更深的方向发展, 裂隙特征统计参数相对较大。

鉴于裂隙发育的复杂性及统计分析方法的局限性, 同时室内试验与工程实际中膨胀土裂隙发育条件的差异性, 环境湿度与温度对土体裂隙发育过程的影响尚有待更深入细致研究。

参考文献:

- [1] TOLLENAARR N, VAN PAASSEN L A, JOMMI C. Small-scale evaporation tests on clay: influence of drying rate on clayey soil layer[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2018, **55**: 437 - 445.
- [2] 包承纲. 非饱和土的性状及膨胀土边坡稳定问题[J]. *岩土工程学报*, 2004, **26**(1): 1 - 15. (BAO Cheng-gang. Behavior of unsaturated soil and stability of expansive soil slope[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2004, **26**(1): 1 - 15. (in Chinese))
- [3] 程展林, 龚壁卫. 膨胀土边坡[M]. 北京: 科学出版社, 2015: 65 - 66. (CHENG Zhan-lin, GONG Bi-wei. *Expansive Soil Slope*[M]. Beijing: Science Press, 2015: 65 - 66. (in Chinese))
- [4] 卢再华, 陈正汉. 膨胀土干湿循环胀缩裂隙演化的 CT 试验研究[J]. *岩土力学*, 2002, **23**(4): 417 - 422. (LU Zai-hua, CHEN Zheng-han. A CT study on the crack evolution of expansive soil during drying and wetting cycles[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2002, **23**(4): 417 - 422. (in Chinese))
- [5] 袁俊平, 殷宗泽, 包承纲. 膨胀土裂隙的量化手段与度量指标研究 [J]. *长江科学院院报*, 2003, **20**(6): 27 - 30. (YUAN Jun-ping, YIN Zong-ze, BAO Cheng-gang. Quantitative description method & index for fissures in expansive soil[J]. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 2003, **20**(6): 27 - 30. (in Chinese))
- [6] GREVE A K, ACWORTH R I, KELLY B F J. Detection of subsurface soil cracks by vertical anisotropy profiles of apparent electrical resistivity[J]. *Geophysics*, 2010, **75**(4): WA85-WA93.
- [7] 黎 伟, 刘观仕, 汪为巍, 等. 湿干循环下压实膨胀土裂隙扩展规律研究[J]. *岩土工程学报*, 2014, **36**(7): 1302 - 1308. (LI Wei, LIU Guan-shi, WANG Wei-wei, et al. Crack propagation law of compacted expansive soils under wetting-drying cycles[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2014, **36**(7): 1302 - 1308. (in Chinese))
- [8] 马 佳, 陈善雄, 余 飞, 等. 裂土裂隙演化过程试验研究 [J]. *岩土力学*, 2007, **28**(10): 2230 - 2208. (MA Jia, CHEN Shan-xiong, YU Fei, etc. Experimental research on crack evolution process in fissured clay[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2007, **28**(10): 2230 - 2208. (in Chinese))
- [9] 李雄威, 冯 欣, 张 勇. 膨胀土裂隙的平面描述分析[J]. *水文地质工程地质*, 2009, **36**(1): 96 - 99. (LI Xiong-wei, FENG Xin, ZHANG Yong. Depicting and analysis of expansive soil fissure in view of plane[J]. *Hydrogeology and Engineering Geology*, 2009, **36**(1): 96 - 99. (in Chinese))
- [10] 张家俊, 龚壁卫, 胡 波, 等. 干湿循环作用下膨胀土裂隙演化规律试验研究[J]. *岩土力学*, 2011, **32**(9): 2729 - 2734. (ZHANG Jia-jun, GONG Bi-wei, HU Bo, etc. Study of evolution law of fissures of expansive clay under wetting and drying cycles[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2011, **32**(9): 2729 - 2734. (in Chinese))
- [11] 唐朝生, 崔玉军, TANG A M, 等. 膨胀土收缩开裂过程及其温度效应[J]. *岩土工程学报*, 2012, **34**(12): 2181 - 2187. (TANG Chao-sheng, CUI Yu-jun, TANG ANH-MINH, et al. Shrinkage and desiccation cracking process of expansive soil and its temperature-dependent behavior[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2012, **34**(12): 2181 - 2187. (in Chinese))
- [12] 刘 春, 王宝军, 施 斌, 等. 基于数字图像识别的岩土体裂隙形态参数分析方法[J]. *岩土工程学报*, 2008, **30**(9): 1383 - 1388. (LIU Chun, WANG Bao-jun, SHI Bin, et al. Analytic method of morphological parameters of cracks for rock and soil based on image processing and recognition[J].

- Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2008, **30**(9): 1383 - 1388. (in Chinese))
- [13] 黎伟, 刘观仕, 姚婷. 膨胀土裂隙图像处理及特征提取方法的改进[J]. 岩土力学, 2014, **35**(12): 3620 - 3626. (LI Wei, LIU Guan-shi, YAO Ting. Improvement of methods for crack image processing and crack feature extraction of expansive soil[J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, **35**(12): 3620 - 3626. (in Chinese))
- [14] 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 - 748. (TANG Chao-sheng, SHI Bin, LIU Chun, et al. Developing law and morphological analysis of shrinkage cracks of clay soil at different temperature[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2007, **29**(5): 743 - 748. (in Chinese))
- [15] 曹玲, 王志俭, 张振华. 降雨-蒸发条件下膨胀土裂隙演化特征试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2016, **35**(2): 413 - 421. (CAO Ling, WANG Zhi-jian, ZHANG Zhen-hua. Experimental research of cracking process of expansive soil under rainfall infiltration and evaporation[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2016, **35**(2): 413 - 421. (in Chinese))
- [16] 许锡昌, 周伟, 陈善雄. 南阳重塑中膨胀土脱湿全过程裂隙开裂特征及影响因素分析[J]. 岩土力学, 2015, **36**(9): 2569 - 2576. (XU Xi-chang, ZHOU Wei, CHEN Shan-xiong. Study of cracking characteristics and influencing factors for remolded Nanyang expansive soil in dehydration process[J]. Rock and Soil Mechanics, 2015, **36**(9): 2569 - 2576. (in Chinese))
- [17] 王军, 龚壁卫, 张家俊, 等. 膨胀岩裂隙发育的现场观测及描述方法研究[J]. 长江科学院院报, 2010, **27**(9): 74 - 78. (WANG Jun, GONG Bi-wei, ZHANG Jia-jun, et al. Field observation and description method of cracks development on expansive rock[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2010, **27**(9): 74 - 78. (in Chinese))
- [18] 夏冬生, 刘清秉, 项伟, 等. 蒙脱石含量对黏土表面干缩裂隙影响试验研究[J]. 长江科学院院报, 2016, **33**(9): 83 - 86. (XIA Dong-sheng, LIU Qing-bing, XIANG Wei, et al. Deformation properties of saturated dispersive clay[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2016, **33**(9): 83 - 86. (in Chinese))
- [19] NAHLAWI H, KODIKARAJK. Laboratory experiments on desiccation cracking of thin soil layers[J]. Geotechnical and Geological Engineering, 2006, **24**: 1641 - 1664.
- [20] TOLLENAAR R N, VAN PAASSEN L A, JOMMI C. Observations on the desiccation and cracking of clay layers[J]. Engineering Geology, 2017, **230**: 23 - 31.
- [21] VELDE B. Structure of surface cracks in soil and muds[J]. Geoderma, 1999, **93**: 101 - 124.
- [22] SUSANGA C, JAYANTHA K, BENJAMIN S. Salient factors controlling desiccation cracking of clay in laboratory experiments[J]. Géotechnique, 2013, **63**(1): 18 - 29.
- [23] 申科, 朱潇钰, 张英莹. 不同温度下膨胀土裂隙演化规律研究[J]. 水电能源科学, 2017, **35**(3): 116 - 118. (SHEN Ke, ZHU Xiao-yu, ZHANG Ying-ying. Study on crack evolution law of expansive soil under different temperatures[J]. Water Resources and Power, 2017, **35**(3): 116 - 118. (in Chinese))
- [24] TANG Chao-sheng, SHI Bin, LIU Chun, et al. Influencing factors of geometrical structure of surface shrinkage cracks in clayey soils[J]. Engineering Geology, 2008, **101**: 204 - 217.
- [25] 曾宪云, 刘观仕, 陈永贵, 等. 摄影图像应用于膨胀土裂隙特征分析中的几个问题[J]. 土工基础, 2018, **32**(1): 46 - 49. (ZENG Xian-yun, LIU Guan-shi, CHEN Yong-gui, et al. Some considerations of applying digital images in the expansive soil crack analyses[J]. Soil Engineering and Foundation, 2018, **32**(1): 46 - 49. (in Chinese))
- [26] 张华. 非饱和渗流研究及其在工程中的应用[D]. 武汉: 中国科学院武汉岩土力学研究所, 2002. (ZHANG Hua. Research on Unsaturated Seepage and Its Application to Engineering[D]. Wuhan: Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, 2002. (in Chinese))
- [27] 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 Zong-ze, YUAN Jun-ping, WEI Jie, et al. Influences of fissures on slope stability of expansive soil[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012, **34**(12): 2155 - 2161. (in Chinese))
- [28] 曾浩, 唐朝生, 刘昌黎, 等. 膨胀土干燥过程中收缩应力的测试与分析[J]. 岩土工程学报, 2019, **41**(4): 717 - 725. (ZENG Hao, TANG Chao-sheng, LIU Chang-Li, et al. Measurement and analysis of shrinkage stress of expansive soils during drying process[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2019, **41**(4): 717 - 725. (in Chinese))
- [29] WILSON H W, FREDLUND D G, BARBOUR S L. Coupled soil-atmosphere modeling for soil evaporation[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1994, **31**: 141 - 152.
- [30] TANG C S, CUI Y J, TANG A M, et al. Experiment evidence on the temperature dependence of desiccation cracking behavior of clayey soils[J]. Engineering Geology, 2010, **114**: 261 - 266.