

膨胀土收缩开裂过程及其温度效应

唐朝生¹, 崔玉军², Anh-minh Tang², 施斌¹

(1. 南京大学地球科学与工程学院, 南京 210093; 2. 法国国立路桥大学, 法国 巴黎 77455)

摘要: 温度作为主要的外部环境因素之一, 对膨胀土水-力学性质有重要影响。为了了解膨胀土在不同温度条件下的干缩开裂特性, 开展了一系列干燥试验。试验中共配制了9组初始饱和的泥浆试样, 干燥环境温度分别为22℃、60℃和105℃。在干燥过程中, 实时监测试样的含水率变化及表面裂隙的演化过程, 利用数字图像处理技术, 对裂隙图像进行了定量分析, 获得了表面裂隙率 R_{sc} ; 采用填充法, 测量了裂隙的体积。结果表明: 在干燥初期, 试样中水分蒸发速率为常数, 且随温度的增加而增加, 试样达到残余含水率所需时间随温度的增加而减小; 裂隙出现时对应的临界含水率 w_{lc} 受温度的影响非常明显, 当温度从22℃增加到105℃时, w_{lc} 从38.0%增加到90.9%; 在裂隙发展前期, R_{sc} 增速较缓, 随后进入快速发展期, 较小的含水率变化可导致 R_{sc} 迅速增加; 当含水率接近终期临界含水率 w_{fc} 或缩限时, 裂隙发展趋于稳定, 且 w_{fc} 基本不受温度的影响; 在高温环境下, 膨胀土的裂隙发育程度较低温环境高, 存在明显的温度效应。

关键词: 膨胀土; 温度; 蒸发; 收缩; 裂隙; 图像处理

中图分类号: TU43 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4548(2012)12-2181-07

作者简介: 唐朝生(1980-), 男, 湖南衡阳人, 博士, 主要从事环境岩土工程和工程地质方面的教学和研究工作。

E-mail: tangchaosheng@nju.edu.cn.

Shrinkage and desiccation cracking process of expansive soil and its temperature-dependent behaviour

TANG Chao-sheng¹, CUI Yu-jun², Anh-minh Tang², SHI Bin¹

(1. School of Earth Sciences and Engineering, Nanjing University, Nanjing 210093, China; 2. Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, Paris 77455, France)

Abstract: During drying, expansive soil shrinks and induces desiccation cracks on surface due to water evaporation. The presence of cracks significantly weakens soil structure and stability, and results in various engineering problems. Better understanding the processes of shrinkage and desiccation cracking is essential in analyzing drought effects on buildings constructed on expansive soil. As temperature is one of the most important external factors that control the hydro-mechanical behaviour, desiccation tests are therefore conducted on initially saturated expansive soil slurry to investigate the temperature effects on shrinkage and cracking characteristics. Nine specimens are prepared and dried under 22℃, 60℃ and 105℃ respectively. Water loss and surface crack evolution are monitored during the whole drying period. The image processing technique is employed to quantitatively characterize the crack pattern, and surface crack ratio R_{sc} is determined to describe surface cracking extent. In addition, the filling method is used to measure the crack volume by using pure sands. It is found that the initial evaporation rate of soil water is constant and increases with increasing temperature; the drying period that needs to reach the residual water content decreases with increasing temperature; and the initial critical water content w_{lc} at the onset of cracking is significantly influenced by temperature: as temperature increases from 22 to 105 °C, w_{lc} increases from 38.0 to 90.9%. After crack initiation, it is found that the ratio R_{sc} increases slowly at the beginning stage, and then increases quickly even when water content decreases slightly. However, as the water content reaches the final critical water content w_{fc} or shrinkage limit, R_{sc} gradually reaches stabilization, and the effect of temperature on w_{fc} is insignificant. The experimental results also show that the desiccation cracking behaviour of expansive soil significantly depends on environmental temperature; in general, the higher the temperature, the more the development of cracks on specimen surface.

基金项目: 国家自然科学基金项目(41072211); 高等学校博士学科点专项科研基金(新教师基金课题)项目(20090091120037); 江苏省自然科学基金项目(BK2011339)

收稿日期: 2010-12-18

修改稿返回日期: 2012-08-22

Key words: expansive soil; temperature; evaporation; shrinkage; desiccation crack; image processing technique

0 引言

膨胀土不同于一般黏性土，它是一种典型的裂隙性土，在干燥环境中因失水收缩很容易在表面形成纵横交错的裂隙网络，即人们所熟悉的龟裂。龟裂的产生对土体工程性质有重要影响，并导致各种工程问题。如龟裂会降低土体的承载力，增加土体的压缩性，使房屋建筑开裂破坏^[1-2]；龟裂会成倍增加土体的渗透性，对水工结构物的功能性和稳定性产生负面影响^[3]；垃圾填埋中屏障材料和黏土覆盖层的龟裂会为渗滤液的迁移提供快捷通道，对地下水和地质环境构成威胁^[4]；除此之外，龟裂还是影响膨胀土边坡稳定性关键因素，能为雨水入渗提供便利条件，导致边坡的安全系数大幅下降，诱导滑坡灾害的发生^[5-6]。由此可见，膨胀土的龟裂问题涉及的领域多，范围广。随着极端干旱性气候的频发，可以预见的是，由龟裂带来的各种工程问题只会越来越多，越来越显著。

目前国内外关于膨胀土龟裂的报道主要集中在两个方面：龟裂图像的定量分析和龟裂对土体工程性质的影响^[7-14]。尽管前人的研究成果有利于帮助人们从科学上进一步了解和认识土体的龟裂现象，由于土体自身的复杂性以及龟裂形成和发展过程的不确定性，到目前为止，人们在面临工程中的龟裂问题时还没有找到有效的解决办法。其中最根本的原因是人们对龟裂的认识还仅仅停留在表面现象上，对龟裂的形成机理还不完全清楚。目前普遍认为膨胀土的龟裂是土中水分蒸发的结果，而土中水分的蒸发过程则直接取决于环境温度的高低。因此，本文为了了解温度对膨胀土干缩开裂过程的影响，在控制环境温度条件下，开展了一系列室内干燥试验，利用数字图像处理技术，定量分析了膨胀土在干燥过程中表面裂隙网络的形态学特征，探讨了温度对体积收缩的影响。相关结果对进一步认识膨胀土的龟裂机理及指导膨胀土地区的工程实践有重要意义。

1 试验材料和方法

1.1 土样和试验过程

本试验所用土样为巴黎地区的 Romainville 膨胀土，其基本物理性质如表 1 所示。作为基础研究，本文以初始饱和的泥浆试样为研究对象，主要因为泥浆试样结构简单，均质，易于制备，试验具有较好的重复性，便于结果分析。具体试验过程如下：①将取回的土样风干碾碎，并过 2 mm 筛；②称取一定量的筛下膨胀土粉末，加入适量的蒸馏水，充分搅拌均匀，配制初始含水率为 170% 的饱和泥浆；③称取定量的泥浆置于直径为 117 mm 的玻璃盘中，并在振动台

上振动 5 min，以排除搅拌过程中在泥浆产生的密闭气泡；④将玻璃盘连同泥浆试样密封在塑料袋中，静置 24 h，以便泥浆沉积稳定，最终沉积厚度约 10 mm；⑤将试样置于控温烘箱中干燥失水，观测龟裂的形成和发展过程。

试验中一共配制了 9 组试样，对应的干燥温度分别为室温（22±1℃）、60℃和 105℃，其中每个温度条件下同时放置 3 个平行试样。在干燥过程中，定时称量试样的质量，测量含水率变化，并同时对试样表面进行拍照，记录裂隙的形成和发展过程。

表 1 Romainville 膨胀土的物理性质

Table 1 Physical properties of Romainville expansive soil

比重	液限 $w_L/\%$	塑性 $w_P/\%$	塑性指 数 I_P	缩限 $w_s/\%$	黏粒含量 (<2 μm)/%
2.79	77	40	37	12	79

1.2 数字图像处理

为了定量分析试样在干燥过程中表面龟裂网络的几何形态学特征，课题组自行开发了一套专业的龟裂图像处理系统 CIAS。利用该系统可对拍摄的龟裂数码图像进行二值化、去杂点和骨架化处理（图 1），定量获得龟裂网络及其所围成块区的几何形态参数，如龟裂的分形维数、裂隙长宽、裂隙条数、裂隙宽度、交点个数、块区面积和周长等^[12-13]。本文主要利用 CIAS 系统计算试样在不同含水率时对应的表面裂隙率 R_{sc} ，定量描述试样在干燥过程中裂隙发育程度。其中 R_{sc} 定义为裂隙面积与试样的初始总面积之比。

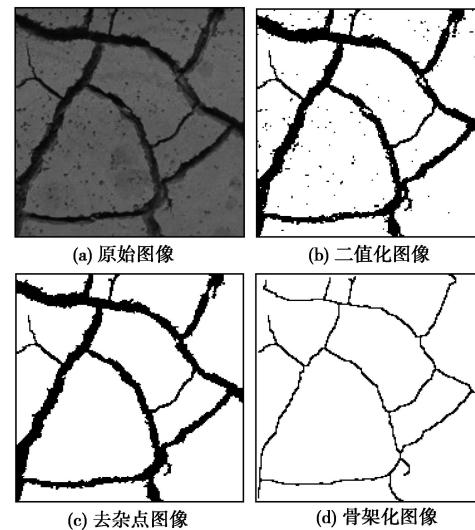


图 1 龟裂图像处理

Fig. 1 Crack image processing

1.3 裂隙体积测量

采用数字图像处理技术只能对表面裂隙网络进行分析，所获得参数只能反映裂隙网络的二维特征。但

在研究膨胀土的体积收缩时, 仅仅知道裂隙的面积是显然不够的, 还应该掌握裂隙在深度方向的延伸情况和裂隙的体积。然而, 在自然环境中, 由于土质条件的多变性, 裂隙在深度方向上的延伸路径异常曲折, 不同点位和不同深度处裂隙的剖面形状具有明显的差异性, 目前还没有很好的方法能对裂隙的体积进行直接测量。过去人们采用插片/丝法, 即将一根细长的金属片/丝插入裂隙中, 通过测量金属片/丝的插入长度, 粗略获得裂隙的深度, 然后假定裂隙的剖面轮廓为规则对称的矩形、“V”形或抛物线形, 利用测得的裂隙长度最终计算出研究范围内裂隙的体积。这种方法虽然简单易行, 但由于插片/丝法在空间测量点上的局限性和裂隙剖面形状假设的不合理性, 所计算得的裂隙体积不可避免地存在较大的误差, 而且这种方法受人为操作的影响较大, 测量结果一般只能作为现场试验参考之用。

本文尝试用填充法对室内干燥后试样的裂隙体积进行测量。所采用的填充材料为粒径 $0.2\sim0.3$ mm 的纯净石英砂, 其自然堆积密度 $\rho_0=1.61\text{ g/cm}^3$ 。具体测量过程如下: ①用游标卡尺测量干燥完成后土块的厚度 h , 取多块土样多次测量取平均值; ②将石英砂缓慢倒入装有试样的玻璃盘中, 让石英砂自然填充裂隙, 如图 2 所示, 倒满后, 用直尺刮平表面, 称量盘内砂的总质量, 记为 M_1 ; ③将玻璃盘中的土块全部取出, 再次倒满石英砂, 之后再次称量盘内砂的总质量, 记为 M_2 。则试样干燥完成后最终体积 V_s 为

$$V_s = (M_2 - M_1) / \rho_0 \quad ; \quad (2)$$

裂缝的体积 V_c 为

$$V_c = (M_1 - M_0) / \rho_0 \quad . \quad (3)$$

式中, M_0 为图 2 中试样上部砂的质量, 其体积可根据玻璃盘的面积 S 和上部砂的厚度 $(H-h)$ 求得。则式(3)可变形为

$$V_c = M_1 / \rho_0 - S(H-h) \quad . \quad (4)$$

试样最终的裂缝体积率 R_{cv} 定义为

$$R_{cv} = V_c / (V_c + V_s) \times 100\% \quad . \quad (5)$$

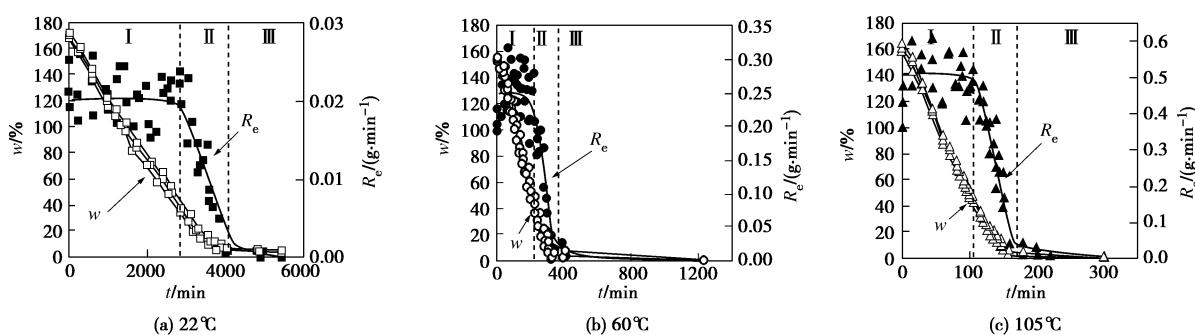


图 3 试样含水率及蒸发速率随干燥时间的变化

Fig. 3 Changes of water content and evaporation rate of specimens with drying time

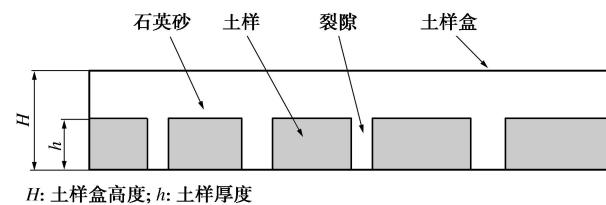


图 2 石英砂填充裂隙示意图

Fig. 2 Schematic drawing of desiccation cracks filled by sands

2 试验结果

2.1 膨胀土中水分蒸发过程

图 3 给出了试样在不同温度条件下含水率 w 及蒸发速率 R_e (单位时间内的失水质量, g/min) 随干燥时间 t 的变化。从图 3 中可以看出, 同组试验各平行样的干燥曲线 ($w-t$) 形式基本一致, 说明该试验具有良好的可重复性。在干燥初期, 含水率的减小与干燥时间几乎呈直线关系, 随着干燥时间的延长, 干燥曲线发生转折并逐渐趋于平缓。当试样达到残余含水率时, 干燥曲线几乎水平, 含水率不再随时间发生变化。对于室温下 (22°C) 干燥的试样而言, 大约 4000 min 后含水率才趋于稳定, 是 60°C 和 105°C 下试样的 13 倍。 22°C 下试样的最终平均残余含水率为 4.5% , 60°C 为 0.6% , 而 105°C 干燥后通常认为其最终含水率为 0 。

通过计算干燥曲线的斜率, 可得蒸发速率 R_e 随干燥时间 t 的变化, 即蒸发曲线, 结果也绘于图 3 中。从图 3 中可以看出, 无论在低温还是在高温条件下, 蒸发曲线均呈典型的台阶形, 土中水分的蒸发过程大致经历 3 个阶段: I 常速率阶段、II 减速率阶段以及 III 残余稳定阶段。常速率阶段主要发生在干燥初期, 此时试样的含水率较高。通过计算得到试样在 22°C , 60°C 和 105°C 下干燥时的初始平均蒸发速率 R_e 分别为 0.02 , 0.25 和 $0.5\text{ g}/\text{min}$ 。换言之, 温度平均每升高 1°C , 初始蒸发速率增加约 30% 。通过计算还可以发现, 试样中 70% 以上的水分蒸发基本上都在常速率阶段。此后, 水分蒸发进入减速率阶段, R_e 随干燥时间

迅速减小，最终趋于稳定。在整个干燥过程，减速率阶段历时相对较短，且随温度的增加而减小。如 22℃时约为 1000 min, 60℃时约为 180 min, 105℃时约为 70 min。

2.2 膨胀土龟裂演化过程及定量分析

图 4 给出了试样在 22℃ 条件下干燥至不同含水率时对应的龟裂图像。从图 4 中可以看出，当含水率为 34.1% 时（图 4 (a)），试样表面只有 2 条独立裂隙。此后，随着含水率的减小，试样表面新生裂隙逐渐增多，裂隙开始迅速发展，并相互交叉成网，将试样分割成若干大小不等的块区。将图 4 (d) 与图 4 (f) 的最终龟裂图像对比可以发现，当试样的含水率达到 23.0% 时，龟裂网络的轮廓基本已经定型，后续干燥过程中除已有裂隙宽度增加外，裂隙条数和节点个数保持不变，试样表面没有产生新的裂隙。

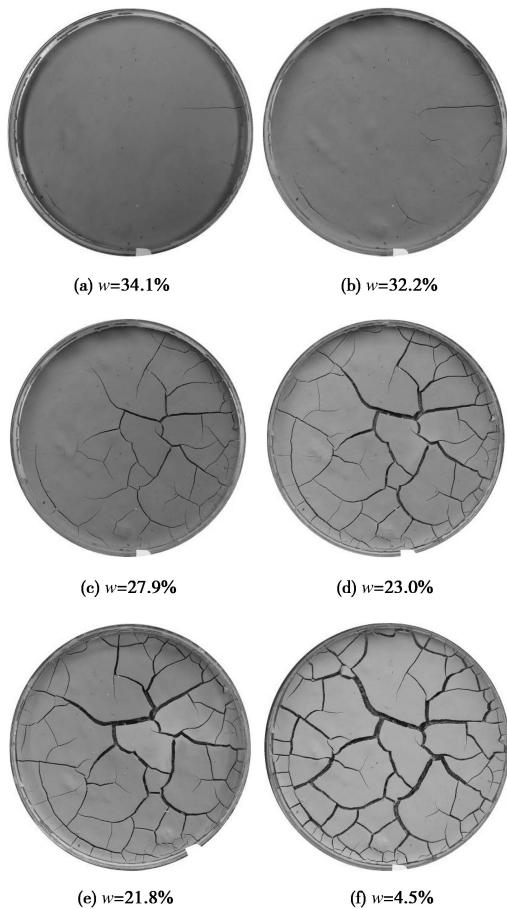


图 4 试样在 22℃ 条件下干燥至不同含水率时对应的典型龟裂图像

Fig. 4 Typical crack patterns under different water contents of specimen dried at 22°C

利用 CIAS 系统对拍摄的龟裂图像进行定量分析，获得了试样在不同含水率状态下的表面裂隙率 R_{sc} 及对应的典型裂隙图像，结果如图 5 所示，本文将图 5 中的 R_{sc} - w 曲线称之为开裂曲线。从图 5 中可以看出，在裂隙出现后的初始阶段， R_{sc} 随含水率的减少缓

慢增加，随后 R_{sc} 进入快速发展阶段，新生裂隙不断发育。然而，随着干燥的继续，当土样的含水率低于一定值时， R_{sc} 的增幅突然减少并逐渐趋于稳定。干燥结束后，试样在 22℃、60℃ 和 105℃ 条件下的最终平均 R_{sc} 分别为 14%，17% 和 22%，即表面分别有 14%，17% 和 22% 的面积为裂隙所覆盖，该结果也说明温度的增加促进了裂隙的发展。从对应的裂隙图像中看出，温度越低，裂隙以细长型为主；温度越高，裂隙以短粗型为主。

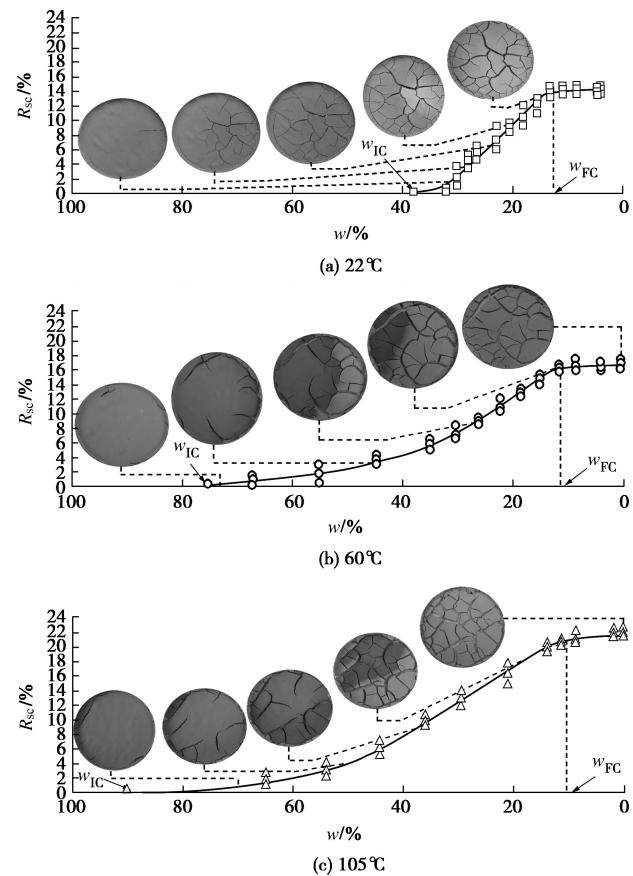


图 5 干燥过程中试样表面裂隙率 R_{sc} 随含水率的变化关系及对应典型裂隙图像

Fig. 5 Changes of surface crack ratio R_{sc} with decreasing water content during drying and corresponding typical crack pattern

2.3 膨胀土龟裂的临界含水率

从图 5 的开裂曲线上还可以确定 2 个关键含水率参数：初始临界含水率 w_{IC} 和终期临界含水率 w_{FC} 。其中 w_{IC} 为试样表面刚出现裂隙时对应的含水率， w_{FC} 为曲线上 R_{sc} 从递增过渡到稳定时拐点处所对应的含水率。

从图 5 中可以看出， w_{IC} 受温度的影响非常明显。当温度从 22℃ 增加到 105℃ 时， w_{IC} 增加了 1.39 倍，从 38.0% 增加到 90.9%。与 w_{IC} 不同的是， w_{FC} 受温度的影响不太明显，主要在 10%~13% 范围内变化。

将图 5 中的开裂曲线与图 3 中的干燥曲线相结合进行分析，可以发现，尽管试样表面出现裂隙时对应

的含水率 w_{IC} 随温度的增加而增加, 而对应的干燥时间则随温度的增加而减小。如在 60℃ 和 105℃ 环境下, 试样分别经历大约 145 min 和 60 min 干燥后表面便出现裂隙, 而在 22℃ 环境下, 大约 2 d 后才在试样表面观察到首条干缩裂隙。结合图 5 的开裂曲线和图 3 中的蒸发曲线还可以发现, 首条裂隙出现时, 土中水分蒸发均处于常速率阶段, 而且有相当一部分裂隙的发展也在常蒸发速率阶段完成。如在 22℃ 下, 几乎 40% 的表面裂隙发生在常速率阶段。

2.4 裂隙体积

采用前文提到的填充法, 对干燥结束后的三组试样的裂隙体积进行了测量, 得到 22℃、60℃ 和 105℃ 条件下试样的最终平均体积 V_s 分别为 24.4, 24.6 和 25.1 cm³; 平均厚度 h 分别为 2.64, 2.75 和 2.96 mm; 平均裂隙体积率 R_{cv} 分别为 13.3%, 17.6% 和 21.1%。将 R_{cv} 与 R_{sc} 进行对比, 发现二者在数值上非常接近, 可以推测裂隙沿深度方向的截面形状基本上呈矩形。这主要是因为本次实验所配制的试样比较薄, 在裂隙的形成和发展过程中, 裂隙能完全贯穿整个厚度, 几乎不受下层土体的约束, 裂隙上下宽度基本一致, 受深度的影响可以忽略。然而, 在自然条件下, 由于土体自重和地下水作用, 裂隙在竖直方向的延伸深度是有限的, 一般上宽下窄。在条件允许的情况下, 也可采用填充法对现场土体的裂隙体积进行测量, 评价土体的收缩特性。

3 讨 论

3.1 温度对膨胀土中水分蒸发过程的影响

宏观上, 水的蒸发是指水由液态逐渐转变为气态的过程; 微观上, 水的蒸发实际上是水分子在动能作用下克服液体内分子间引力, 脱离液面逃逸到大气中的过程。对于土体而言, 其蒸发过程不同于纯水, 比纯水要复杂得多, 受温度、相对湿度、空气流动速度、太阳辐射、孔隙水盐分浓度、土的孔径、土结构、土层厚度和吸力等诸多因素的影响^[15-17]。Hillel^[18]指出, 土体中水分蒸发的发生和维持必须满足 3 个条件: ① 土体表面上有持续的热量供应; ② 大气中的蒸汽压必须低于土体表面的蒸汽压; ③ 从土体内部有持续的水分供应到蒸发面(土/气界面)。

在高温条件下, 水分子的运动速度和动能较高, 而水的黏滞性、表面张力以及土体的持水能力则随温度的升高而降低^[19]。因此, 相对于低温条件, 土中水分子更容易逃逸到大气中, 在相同时间内失水量及对应蒸发速率随温度的增加而增加(图 3)。除此之外, 温度还会影响水-土相互作用, 有研究指出^[20], 温度升高会导致黏土颗粒的吸附结合水向自由水过渡, 扩

散层厚度变薄, 黏土颗粒对水分子的有效约束能力降低, 水分子逃逸到大气中所需克服的阻力因此而减小, 蒸发加剧。但需要指出的是, 在本文的研究中, 温度并不是影响水分蒸发速率的唯一因素。Tang 等^[19]通过试验发现, 高温环境中空气相对湿度一般较低。换言之, 温度升高, 土-气界面之间的相对湿度梯度增加, 这也有利于促进了土中水分的蒸发。

随着干燥的继续, 试样中水分的蒸发从常速率阶段逐渐过渡到减速率阶段(图 3), 单位时间内失水量减小, 这可能是因为: ① 试样内部的自由水随干燥时间的延长而减少, 吸力逐渐增加, 水分子向大气逃逸的阻力增大; ② 试样剖面上吸力发展导致土体与大气之间的蒸汽压梯度下降; ③ 空气进入试样中, 水/气界面向土体内部发展, 从孔隙水中逃逸出来的水分子需要穿越上层干燥土体才能到达蒸发面(土/气界面), 水分子的迁移路径因此而延长, 蒸发速率必然降低。此外, 孔隙中气泡的存在还会干扰剖面水分原有的迁移路径, 使迁移到蒸发面所需的时间延长。

3.2 温度对膨胀土开裂过程的影响

膨胀土的干缩开裂主要受干燥过程中土吸力大小的控制。对于初始饱和的试样, 蒸发从试样表面开始, 首先使表层土体由饱和状态变为非饱和状态, 导致吸力的产生, 并在表层土体中形成张拉应力场。当土颗粒之间的张拉应力超过土颗粒之间的抗拉强度时, 裂隙便会产生^[21]。但除吸力外, 膨胀土的其它物理力学性质如黏土矿物成分、压缩模量、泊松比、剪切强度和抗拉强度等也对龟裂的形成和发展有重要影响^[1]。

从图 5 的结果可以看出, 温度作为外部环境因素, 不仅直接影响土中水分的蒸发, 还对裂隙出现的时间、临界含水率 w_{IC} 及裂隙的演化过程有明显的制约作用。温度越高, 试样出现裂隙时对应的时间越短, 这是因为蒸发速率的增加会导致表层土体中吸力发展速率的增加^[15], 由此引起的表面张应力场则会在相对较短的时间内超过土体的抗拉强度, 产生裂隙。此外, 有研究指出土体的强度参数会随温度的增加而降低^[22-23], 这在一定程度上也为裂隙的快速发展创造了有利条件。正是由于高温条件下试样出现裂隙所经历的干燥时间缩短, 水分蒸发量可能因此而减小, 从而解释了图 5 中 w_{IC} 随温度的增加而增加的现象。

图 5 的结果还表明, 裂隙形成后, 表面裂隙率 R_{sc} 受温度的影响很明显。首先, 在干燥过程中, 即使在含水率相同的条件下, 高温环境中试样对应的 R_{sc} 较大, 说明表面裂隙的发育程度随温度的增加而增加。这是因为高温环境对应高吸力发展速率, 表层土体中吸力的增加会导致土颗粒排列更紧密, 为裂隙发展提供更多的空间。其次, 在干燥结束后, 试样的最终 R_{sc} 也随温度的升高而增加。这主要是因为温度越高, 孔

隙中残余的水分越少(图3),颗粒间距进一步缩小,裂隙发育程度因此而增加。

3.3 膨胀土的开裂与收缩之间的关系

由前文的分析可知,膨胀土裂隙的发展过程与体积收缩过程密切相关,图5中 R_{sc} 随含水率的增加在本质上归因于孔隙比的减小。通常情况下,收缩性越强的土体,干燥过程中越容易产生龟裂,裂隙发育程度越高。许多收缩研究表明,当含水率达到缩限时,土体已经处于最密实状态,颗粒间距缩小到极限。在后续干燥中,尽管含水率继续减小,但孔隙比基本保持不变,体积收缩趋于停止。从本文获得的开裂曲线(图5)可知,当含水率低于 w_{FC} 时, R_{sc} 逐渐趋于稳定,试样表面不再形成新的裂隙,裂隙宽度也不再扩展,龟裂网络的发展基本停止。因此,可以推断试样的收缩变形也达到了极限状态,开裂曲线上拐点处对应的临界含水率 w_{FC} 应该与土体的缩限含水率具有相同的物理意义。将3组试样的 w_{FC} 与表1中给出的Romainville膨胀土的缩限含水率 w_s 进行对比,也可以发现二者在数值上非常接近,进一步证实了上文分析的合理性。

因此,开裂曲线在一定意义上反映了土体的收缩特性。但是是否可以简单地认为 R_{sc} 越大,土体体积收缩越多呢?这还需要进一步地探讨。首先,土体的收缩由两部分构成:横向收缩与竖向收缩。 R_{sc} 实际上反映的只是土体的横向收缩,而多数情况下,土体的收缩具有各向异性的特点^[24]。其次,由定量分析结果可知,尽管3组试样在干燥结束后的最终 R_{sc} 随温度的增加而增加,但试样的最终体积 V_s 也呈增加趋势,说明试样在整个干燥过程中实际发生的总收缩量随温度的增加而减小。这似乎与前文提到的高温促进体积收缩相矛盾,实际上可能不完全如此。温度在促进裂隙快速发展和横向收缩的同时,有可能对试样在竖向的沉降变形产生了抑制作用。尤其是温度较高时,土中水分蒸发时间较短,水-土作用方式相对剧烈,土颗粒没有充足的时间进行重排以达到最密实的状态。测试结果也表明,105℃下干燥的试样最终厚度比22℃高12%,孔隙比大9%。除此之外,温度增加会导致土颗粒和孔隙水发生热胀变形,这也可能是相关原因之一。通过上述分析可知, R_{sc} 在描述土体的收缩特性时还存在一定的局限性。在今后的工作中,笔者认为有必要深入研究开裂曲线($R_{sc}-w$)与土体的收缩曲线($e-w$)二者之间的定量关系,从而为预测裂隙发展提供理论基础。此外,还应该在膨胀土收缩变形的温度效应方面开展更系统的研究工作。

4 结 论

本文在控制温度条件下,对初始饱和的膨胀土试样

开展了一系列室内干燥试验,分析了温度对土中水分蒸发过程和龟裂形成发展过程的影响,探讨了膨胀土体积收缩特性与开裂之间的关系,得到如下7点结论。

(1) 在干燥过程中,膨胀土中水分蒸发过程由常速率阶段、减速率阶段和残余稳定阶段3个阶段组成。温度越高,常速率阶段对应的蒸发速率越大,试样达到残余含水率所需时间越短,最终残余含水率越小。

(2) 膨胀土裂隙的形成和发展是一个长期的过程,表面出现第一条裂隙时土体处于常速率蒸发阶段,此后的短时间内裂隙发展较快,新生裂隙不断涌现,并相互交织成网,而在后期裂隙发展变缓,裂隙网络的整体布局基本不随含水率的继续减小而变化。

(3) 利用数字图像处理技术可对膨胀土裂隙网络进行定量分析,所获得的表面裂隙率 R_{sc} 可作为衡量裂隙发育程度的指标。在裂隙发育初期, R_{sc} 随含水率的减小迅速增加,但当含水率接近缩限时, R_{sc} 的增速逐渐减缓并最终趋于稳定。

(4) 填充法可用于测量膨胀土裂隙的体积,对于较薄的试样,由于裂隙完全贯穿试样厚度,体积裂隙率 R_{cv} 与 R_{sc} 在量值上相近。

(5) 环境温度对膨胀土裂隙的形成和发展过程有重要影响。温度越高,膨胀土出现裂隙对应时间越短,对应的初始临界含水率 w_{IC} 越高,表面裂隙发育程度越高。即使是在含水率相同的情况下,在高温环境中干燥的试样表面裂隙率也明显增加。

(6) 膨胀土的裂隙发展与的体积收缩过程在本质上密切相关,即宏观裂隙的扩展可认为是微观孔隙收缩的表现。

(7) 膨胀土的开裂曲线($R_{sc}-w$)在某种程度上反映了土体的收缩特性,从开裂曲线拐点处确定的终期临界含水率 w_{FC} 与膨胀土的缩限含水率具有相同的物理意义,二者在数值上比较接近,且 w_{FC} 受温度的影响不明显。

致 谢: 本试验工作在法国国立路桥大学土力学试验中心(CERMES/ENPC)完成。

参 考 文 献:

- [1] MORRIS P H, GRAHAM J, WILIAMS D J. Cracking in drying soils[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1992, 29: 263-267.
- [2] NELSON J D, MILLER D J. Expansive soils: problems and practice in foundation and pavement engineering[M]. New York: John Wiley, 1992.
- [3] ALBRECHT B A, BENSON C H. Effect of desiccation on compacted natural clays[J]. ASCE J of Geotech and Geoenvir

- Engrg, 2001, **127**: 67 - 75.
- [4] MILLER C J, MI H, YESILLER N. Experimental analysis of desiccation crack propagation in clay liners[J]. Journal of the American Water Resources Association, 1998, **34**(3): 677 - 686.
- [5] 姚海林, 郑少河, 陈守义. 考虑裂隙及雨水入渗影响的膨胀土边坡稳定性分析[J]. 岩土工程学报, 2001, **23**(5): 606 - 609. (YAO Hai-lin, ZHENG Shao-he, CHEN Shou-yi. Analysis on the slope stability of expansive soils considering cracks and infiltration of rain[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2001, **23**(5): 606 - 609. (in Chinese))
- [6] 孔令伟, 陈建斌, 郭爱国, 等. 大气作用下膨胀土边坡的现场响应试验研究[J]. 岩土工程学报, 2007, **29**(7): 1065 - 1073. (KONG Ling-wei, CHEN Jian-bin, GUO Ai-guo, et al. Field response tests on expansive soil slopes under atmosphere[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2007, **29**(7): 1065 - 1073. (in Chinese))
- [7] SILVESTRI V, SARKIS G, BEKKOUCHI N, et al. Evapotranspiration, trees and damage to foundations in sensitive clays[C]// Canadian Geotechnical Conference, 1992, Vol. II: 533 - 538.
- [8] MILLER C J, MI H, YESILLER N. Experimental analysis of desiccation crack propagation in clay liners[J]. Journal of the American Water Resources Association, 1998, **34**(3): 677 - 686.
- [9] VOGEL H J, HOFMANN H, ROTH K. Studies of crack dynamics in clay soil: experimental methods, results, and morphological quantification[J]. Geoderma, 2005, **125**: 203 - 211.
- [10] 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 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 - 749. (in Chinese))
- [11] 唐朝生, 施斌, 刘春, 等. 影响黏性土表面干缩裂缝结构形态的因素及定量分析[J]. 水利学报, 2007, **38**(10): 1186 - 1193. (TANG Chao-sheng, SHI Bin, LIU Chun, et al. Factors affecting of the surface shrinkage cracks' structure and morphology of clay soil and quantitative analysis[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2007, **38**(10): 1186 - 1193. (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. The analysis method of Morphological parameters of rock and soil crack based on image processing and recognition[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2008, **30**(9): 1383 - 1388. (in Chinese))
- [13] TANG C, SHI B, LIU C, et al. Influencing factors of geometrical structure of surface shrinkage cracks in clayey soils[J]. Engineering Geology, 2008, **101**(3/4): 204 - 217.
- [14] 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.
- [15] KAYYAL M K. Effect of the moisture evaporative stages on the development of shrinkage cracks in soil[C]// Proceedings of First International Conference on Unsaturated Soils, 1995: 373 - 379.
- [16] PRAT P C, LEDESMA A, LAKSHMIKANTHA M R. Size effect in the cracking of drying soil[C]// Proceedings of the 16th European Conference of Fracture. Springer, 2006.
- [17] RODRÍGUEZ R, SÁNCHEZ M, LEDESMA A, et al. Experimental and numerical analysis of desiccation of a mining waste[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2007, **44**: 644 - 658.
- [18] HILLEL D. Introduction to soil physical[M]. New York: Academic Press, 1982.
- [19] TANG A M, CUI Y J. Controlling suction by the vapour equilibrium technique at different temperatures and its application in determining the water retention properties of MX80 clay[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2005, **42**: 1 - 10.
- [20] VILLAR M V, LLORE A. Influence of temperature on the hydro-mechanical behaviour of a compacted bentonite[J]. Applied Clay Science, 2004, **26**: 337 - 350.
- [21] CORTE A, HIGASHI A. Experimental research on desiccation cracks in soil[R]. Research report 66, U.S. Army Snow Ice and Permafrost Research Establishment, Wilmette, Illinois, 1960.
- [22] MITCHELL J K. Shearing resistance of soils as a rate process[J]. ASCE Journal of Soil Mechanics and Foundation, Engineering Division, 1964, **90**(1): 231 - 251.
- [23] HUECKEL T, BALDI G. Thermoplasticity of saturated clays: Experimental constitutive study[J]. ASCE Journal of Geotechnical Engineering, 1990, **116**(12): 1178 - 1769.
- [24] BRONSWIJK J J B. Modeling of water balance, cracking and subsidence of clay soils[J]. J Hydrol (Amsterdam), 1988, **97**: 199 - 212.