

DOI: 10.16108/j.issn1006-7493.2019004

引用格式: 王东伟, 唐朝生, 李胜杰, 曾浩, 施斌, 张必勇. 2019. 膨胀土干缩变形特性试验研究[J]. 高校地质学报, 25(5): 756-765

膨胀土干缩变形特性试验研究

王东伟¹, 唐朝生^{1*}, 李胜杰¹, 曾浩¹, 施斌¹, 张必勇²

1. 南京大学地球科学与工程学院, 南京 210023; 2. 长江岩土工程总公司, 武汉 430010

摘要: 膨胀土是一种典型的问题性土, 对气候变化非常敏感, 在干旱气候条件下, 极易发生体积收缩变形, 引发各种工程地质问题。为了研究膨胀土的干缩变形特性, 开展了一系列室内干燥试验, 测定了膨胀土的收缩特征曲线, 重点分析了初始含水率和干密度对干缩变形过程的影响, 并进一步探讨了水泥固化抑制膨胀土干缩变形的效果和机理。结果表明: (1) 膨胀土的干缩变形过程存在三个典型阶段: 正常收缩、残余收缩和零收缩; (2) 初始含水率越高, 试样蒸发速率越快, 且干缩变形完全后试样孔隙比越小而最终收缩应变越大, 干缩变形越明显; (3) 初始干密度越大, 试样蒸发速率和最终体积收缩应变越小, 提高初始干密度对试样干缩变形具有一定的抑制作用; (4) 在膨胀土中掺入适量的水泥能显著降低试样的体积收缩应变, 对干缩变形具有良好的抑制效果; (5) 膨胀土的干缩变形具有明显的各向异性特征, 并且与初始状态有关。

关键词: 膨胀土; 干燥收缩; 初始条件; 收缩特征曲线; 水泥固化

中图分类号: P642

文献标志码: A

文章编号: 1006-7493 (2019) 05-756-10

Experimental Study on Volumetric Shrinkage Behavior of Expansive Soil

WANG Dongwei¹, TANG Chaosheng^{1*}, LI Shengjie¹, ZENG Hao¹, SHI Bin¹, ZHANG Biyong²

1. School of Earth Sciences and Engineering, Nanjing University, Nanjing 210023, China;

2. Changjiang Geotechnical Engineering Company, Wuhan 430010, China

Abstract: Expansive soil is a kind of typical soil with problems, which is very sensitive to climate change. it is prone to volumetric shrinkage deformation under drought conditions, causing various engineering geological problems. In order to study the desiccation shrinkage deformation characteristics of expansive soil, a series of indoor drying experiments were carried out to determine the shrinkage characteristic curves of expansive soils, and the effects of initial moisture content and dry density on the shrinkage deformation process were mainly analyzed. The effect and mechanism of cement solidification on suppressing desiccation shrinkage deformation of expansive soil are further discussed. The results show that: (1) There are three typical stages in the shrinkage deformation process of expansive soils: normal shrinkage, residual shrinkage, and zero shrinkage. (2) The higher the initial moisture content, the faster the evaporation rate of the sample, and the smaller the void ratio of the sample after the shrinkage deformation is complete, and the larger the final shrinkage strain, the more obvious the shrinkage deformation will be. (3) The larger the initial dry density, the smaller the sample evaporation rate and the final volume shrinkage strain, and the increase of the initial dry density has a certain inhibitory effect on the shrinkage deformation of the sample. (4) Incorporating proper amount of cement in expansive soil can

收稿日期: 2019-01-13; 修回日期: 2019-02-27

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41572246; 41772280); 江苏省自然科学基金项目 (BK20171228; BK20170394); 优秀青年科学基金项目 (41322019); 国家自然科学基金重点项目(41230636); 中央高校基本科研业务费专项资金联合资助

作者简介: 王东伟, 男, 1995年生, 硕士研究生; E-mail: MF1729025@smail.nju.edu.cn

*通讯简介: 唐朝生, 男, 1980年生, 教授, 主要从事工程地质和环境岩土工程方面的研究工作; E-mail: tangchaosheng@nju.edu.cn

significantly reduce the volumetric shrinkage strain of the sample, and it has a good suppressive effect on shrinkage deformation. (5) The dry shrinkage deformation of expansive soil has obvious anisotropic characteristics and is related to the initial state.

Key words: expansive soil; desiccation shrinkage; initial conditions; shrinkage characterization curve; cement solidification

Corresponding author: TANG Chaosheng, Professor; E-mail: tangchaosheng@nju.edu.cn

膨胀土富含亲水性矿物, 具有遇水膨胀, 失水收缩的特点, 其物理力学性质对气候变化极为敏感 (李生林和施斌, 1992), 为工程上的一类典型特殊土。中国膨胀土分布广泛, 其工程性质的不稳定性经常引发各种工程地质灾害, 造成巨大经济损失 (杨和平等, 2003, 2005; 卢冰等, 2008)。

需要指出的是, 过去关于膨胀土的研究主要集中在其遇水膨胀的特性上 (邵梧敏等, 1994; 包承纲等, 2004; 谭罗荣和孔令伟, 2004; 汪贤恩等, 2015), 相对而言, 对其干缩变形问题的研究明显不足。然而, 近年来, 受全球气候变化的影响, 极端干旱气候频发, 由膨胀土干缩变形产生的危害越来越受到研究人员的关注。如膨胀土在干旱气候下失水收缩会导致地面沉降, 损坏地表基础设施 (Silvestri et al., 2011)。此外, 虽然膨胀土的力学强度会随着含水率的减少而增加 (缪林昌等, 1999), 但干缩引起的土体开裂会极大破坏土体的完整性, 导致其整体力学性质的劣化。尤其是干缩裂隙的存在会为雨水入渗提供快捷通道, 进一步弱化深层土体性质。目前已有研究表明, 很多膨胀土边坡的失稳都与坡面的干缩裂隙存在着直接或间接的关联 (Nelson and Miller, 1997; Lloydhughes, 2002; Tang et al., 2008; Li and Zhang, 2011; 姚海林等, 2001; 孔令伟等, 2004; 徐彬等, 2010; 殷宗泽等, 2012; 王清标等, 2014)。因此, 深入研究膨胀土的干缩变形特性, 是防治相关工程地质问题或灾害的重要前提。

近年来, 国内外学者对土体的干缩变形特性开展了一系列研究, 并取得了重要进展。如 Braudeau 等 (1999) 和 Boivin 等 (2006) 研究发现: 对于自然中结构性较强的原状饱和土而言, 其收缩过程可分为四个阶段, 即结构收缩、正常收缩、残余收缩和零收缩阶段; Alonso 等 (1999) 基于室内试验发现, 在控制吸力的条件下, 膨胀土的胀缩变形可分为两个部分: 微观结构变形和

宏观结构变形; 唐朝生等 (2011a) 对黏性土在干燥过程中的收缩变形特性进行了研究, 发现土体的收缩变形具有明显的各向异性, 且轴向收缩和径向收缩对体积收缩的贡献取决于初始含水率。此外, 学术界普遍认为干燥过程中土体的收缩变形主要是由吸力变化引起的。栾茂田等 (2008) 对干燥过程中非饱和重塑土的收缩变形特性进行了研究, 发现土体在宏观上的收缩变形随基质吸力的增大而增大, 但当基质吸力增长到某一临界值后, 土体的体积变化趋于稳定, 这一现象也被很多学者在试验中得到验证 (唐朝生等, 2012a), 并将该临界吸力值与土体的进气值相关联。然而, 当干燥过程中的土体进入高吸力范围后, 基于经典非饱和土力学的理论基础已不再适用 (Fredlund and Rahardjo, 1993; Lu and Likos, 2004)。除了干缩变形问题, 一些学者就膨胀土的失水开裂 (龟裂) 问题也开展了大量研究。如唐朝生等 (2012a, b) 对干燥过程中膨胀土龟裂的发育及演化特征进行了深入研究, 并探究了温度、黏粒含量和试样尺寸等因素对龟裂的影响; Towner (1987) 和 Peron 等 (2009) 将土体开裂与体积收缩建立联系, 并指出土体开裂是由土体的不均匀收缩引起的; Li 等 (2011) 基于原位观察试验对膨胀土干缩开裂特征进行了研究, 发现膨胀土的裂隙发育分为初始阶段、初级阶段和稳定阶段, 并且土体裂隙发育与其内部水分场的演化存在紧密的耦合作用, 蒸发速率的大小直接影响裂隙的发育速度与裂隙网络的几何形态, 同时裂隙的发育也会加快土体内水分的蒸发。

此外, 为了应对膨胀土带来的工程地质危害, 工程上常需要对膨胀土进行改良。目前工程上常用的膨胀土改良方法主要有换土法、化学固化法等。在化学固化法中, 掺入石灰或水泥作为固化剂, 使其与膨胀土内部颗粒进行作用, 能有效降低膨胀土的吸水性和膨胀性, 提高膨胀土的强度, 该方法也被公认为是改良膨胀土切实有效

的方法之一(熊海帆, 2010; Byers, 2014)。研究人员还发现, 掺入固化材料能够抑制膨胀土的收缩性质, 降低膨胀土引发的工程地质灾害(George, 1968), 但目前学术界对化学固化法的研究主要集中在其对膨胀土膨胀特性的影响, 而对其收缩特性抑制效果的研究相对不足, 无法对在工程中水泥固化土体的收缩特性评价做出相应指导。

综上所述, 以往学者分别从蒸发特性、收缩应变以及孔隙比变化等方面研究膨胀土的干燥收缩特性, 但却鲜少有人将这些因素综合考虑, 并将其蒸发特性与收缩应变结合起来探究这些基础现象下的机理, 以更加全面地了解膨胀土在干缩过程中的变化特征。为此, 本文开展了一系列室内干燥试验, 着重探究不同初始状态(含水率和干密度)下膨胀土的干缩变形特性, 得到了土体在干缩变形过程中的蒸发特征曲线、收缩应变曲线以及收缩特征曲线, 并将其与不同水泥掺量的膨胀土进行对比, 结合土水相互作用原理, 分析了膨胀土的初始状态以及固化时水泥掺量对收缩特性的影响。研究成果对进一步认识膨胀土干缩变形特性以及指导工程实践具有一定意义。

1 试验材料和方法

1.1 试验材料

本试验所采用的土样为南京浦口地区的膨胀土, 该土样富含亲水性黏土矿物, 其中伊利石含量约为73.6%, 其次为蒙脱石和高岭石, 含量分别为17.9%和8.5%, 自由膨胀率在60%~90%之间, 为中膨胀土。土样基本物理性质如表1所示。此外, 试验中所用的水泥为市面上销售的325级普通硅酸盐水泥, 比重为3.1。

1.2 试验方法

为分别探究初始含水率和初始干密度对膨胀土干缩变形过程的影响和水泥固化效应对膨胀土干缩变形的抑制作用, 本文开展了两组试验, 将纯膨胀土试样编号为S1-S8, 水泥固化试样编号为G1-G3。其制备过程如下:

表1 浦口膨胀土基本物理性质

Table 1 Basic physical properties of Pukou expansive soil

比重 G_s	液限 $w_l/\%$	塑限 $w_p/\%$	塑性指数 I_p	黏粒含量 <0.002 mm	砂粒含量 >0.074 mm
2.70	76	29	47	14.82%	10.31%

将取回的浦口膨胀土风干粉碎, 过2 mm筛, 分为两组。一组与适量的蒸馏水混合搅拌, 使土样达到纯膨胀土试验预设的含水率; 另一组加入适量水泥和蒸馏水, 混合均匀配制到目标水泥掺量以及目标含水率。将配制好的两组土样放入塑料袋中密闭养护24 h, 以让水分在土中分布均匀。养护结束后, 称取适量土样, 倒入环刀模具中, 将土样压制为高20 mm, 直径61.8 mm的圆柱形试样, 同时, 压实后试样也达到了目标干密度。纯膨胀土组的S1-S8试样相关参数如表2所示。

水泥固化组的G1-G3试样初始含水率与初始干密度分别为26%和1.6 g/cm³。定义水泥掺量为水泥的质量占水泥—膨胀土混合物总质量的百分比, 本文所配制的G1-G3试样的水泥掺量分别为3%、5%和8%。为使水泥对膨胀土的固化改良作用充分发生, 还需将配制好的G1-G3试样用保鲜膜封好, 并放在保湿器中养护28d。

而后控制试验环境温度和湿度恒定, 将所有制备完成的试样置于室温环境(25℃)中干燥, 每隔一段时间使用天平和游标卡尺测量试样的质量、直径和高度。为增强游标卡尺的测量准确度, 每次均在试验不同部位测量4次, 取平均值。当土样质量在24 h内保持不变时, 则认为干燥收缩过程结束。最后将试样放在105℃烘箱中烘干24 h, 获得干土质量 m_d 。土样在某一特定时刻的含水率 w 和孔隙比 e 可由以下公式求得:

$$\omega = \frac{(m_0 - m_d)}{m_d} \times 100\% \quad (1)$$

$$e = \frac{G_s \cdot (1 + 0.01 \cdot \omega)}{\rho} - 1 \quad (2)$$

式中, m_0 为土样某一时刻的质量, m_d 为烘干后干土质量, G_s 为土样比重, ρ 为土的天然密度。由此可以确定三种土样在收缩过程中孔隙比随含水率的变化, 进一步得到土体收缩特征曲线。

2 试验结果与讨论

2.1 蒸发特征

图1给出了试样S1-S8的含水率和蒸发速率随时间的变化曲线。在密封养护过程中, 由于土样在袋中的蒸发无法避免, 部分水分蒸发凝结到塑料袋壁, 造成开始进行试验时初始含水率与目标含水率有细微差别, 但并不影响试验结果。由图1

表2 S1-S8 各组试样初始参数
Table 2 Initial parameters of each sample (S1-S8)

编号	目标初始含水率/%	初始干密度/(g cm ⁻³)	饱和度/%	直径/mm	高度/mm	孔隙比
S1	13	1.8	70.2	61.8	20	0.5
S2	13	2	100	61.8	20	0.35
S3	19	1.4	55.2	61.8	20	0.93
S4	19	1.6	74.6	61.8	20	0.69
S5	19	1.8	100	61.8	20	0.5
S6	26	1.4	75.6	61.8	20	0.93
S7	26	1.6	100	61.8	20	0.69
S8	35	1.4	100	61.8	20	0.93

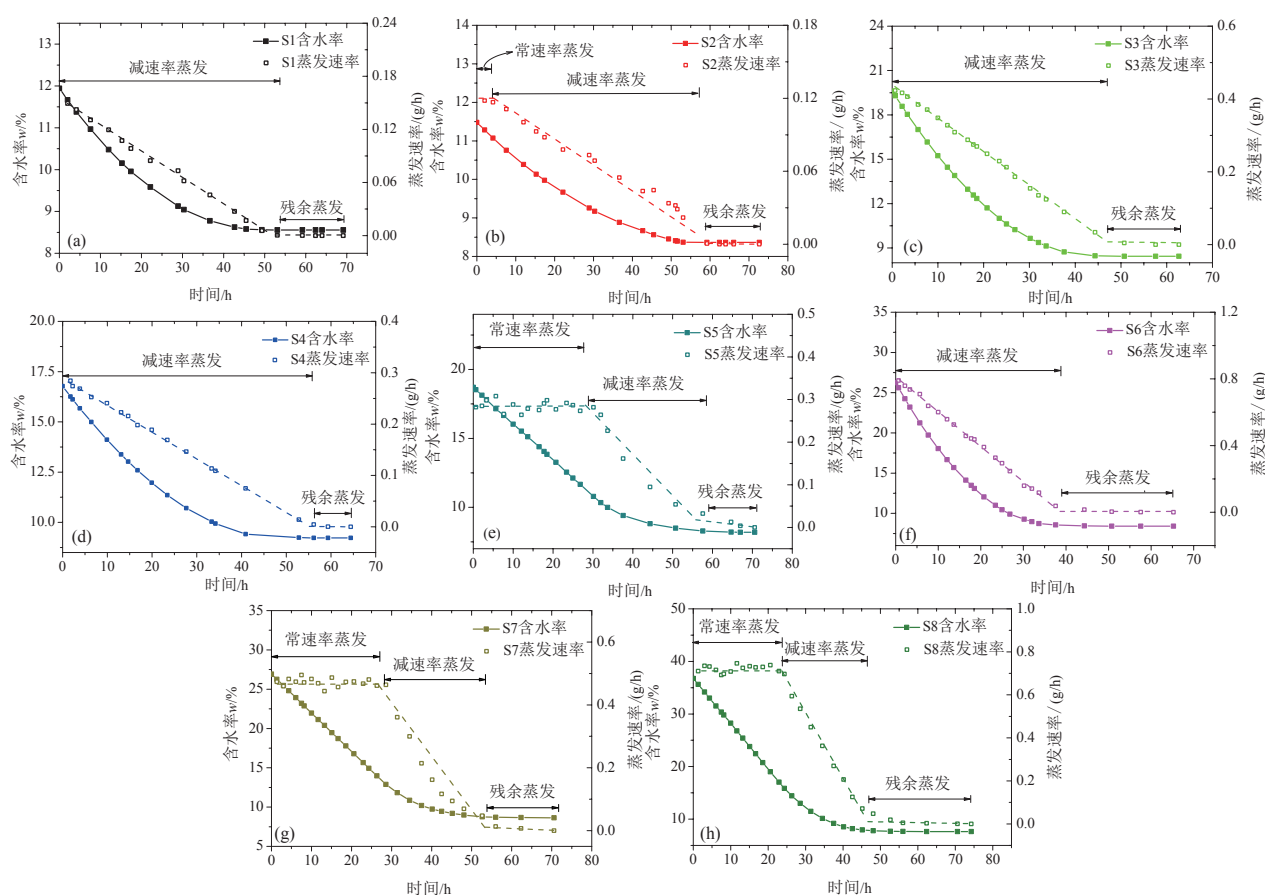


图1 浦口膨胀土的蒸发特征曲线

Fig. 1 Evaporation characteristic curves of Pukou expansive soil

可知, 试样 S2、S5、S7、S8 的蒸发过程可分为 3 个阶段: 常速率、减速率以及残余蒸发阶段。即试样 (S2、S5、S7、S8) 在初始蒸发阶段失水量随时间增长呈较好的线性关系, 蒸发速率基本为一常数: 0.12 g/h (S2)、0.3 g/h (S5)、0.5 g/h (S7) 以及 0.7 g/h (S8), 此时试样处于常速率蒸发阶段。随着蒸发的持续, 土体含水率不断减小, 能够供给土气界面蒸发的水分逐渐减少, 并且随着吸力的

增加, 对水分子运动的阻力越来越大, 因此蒸发速率在随后的蒸发过程中逐渐减少 (唐朝生等, 2011b), 蒸发特征曲线变为下凹型曲线, 土体蒸发进入减速率阶段。当干燥过程继续进行, 含水率到达一定值时, 土体蒸发速率趋近于 0, 含水率不再发生变化, 这一阶段为残余蒸发阶段, 对应的含水率称为残余含水率。

值得注意的是, 与试验 S2、S5、S7、S8 不同

的是, 试样S1、S3、S4、S6的蒸发曲线只存在减速率与残余蒸发阶段, 未发现常速率蒸发阶段(图1b, e)。出现这一现象的原因主要在于, 试样初试为非饱和状态, 此时试样内部已经存在较大的吸力(张吉明等, 2007), 因此非饱和状态的试样在蒸发起始就受到了吸力的影响, 同时水气两相间蒸气压梯度减小(Wilson et al., 1997; 唐朝生等, 2011b), 土体内部水分蒸发直接进入了减速率阶段。

此外, 从图1中还可以看出, 初始状态的不同对试样的蒸发过程存在较大的影响。在相同的初始含水率条件下, 随着初始干密度的增大, 试样的起始蒸发速率逐渐减小。如当初始含水率都是19%时, 初始干密度为 1.4 g/cm^3 、 1.6 g/cm^3 、 1.8 g/cm^3 的试样的起始蒸发速率分别为 0.42 g/h 、 0.29 g/h 、 0.28 g/h (图1c, d, e)。这主要是因为随着初始干密度的增大, 土颗粒的间距不断减小, 液相连通性也变差, 这导致水分子在向外逃逸过程中的路径变长变窄, 因而引起土体水分蒸发速率的下降。另一方面, 试样的初始含水率越大, 其起始的蒸发速率也越大。如当初始干密度都为 1.4 g/cm^3 时, 初始含水率为19%、26%、35%的试样的起始蒸发速率分别为 0.42 g/h 、 0.69 g/h 、 0.71 g/h (图1c, f, h)。这与前文提到的部分试样存在常速率蒸发阶段的原因相似, 此处不再赘述。对于不同初始状态的试样, 其残余含水率之间的差异并不明显, 这主要是因为所有试样整个蒸发过程都在相同的环境下进行, 决定土体最终持水性能的关键影响因素即温度和相对湿度相同, 因此在土体干燥完全后表现出了相似的残余含水率(Lu and Likos, 2004)。

在水泥—膨胀土混合物(试样G1-G3)的干燥过程中, 含水率和蒸发速率随干燥时间的变化如图2

所示。由图可见, 试样中水分蒸发过程也可分成前文所描述三个阶段, 但不同水泥掺量对试验的蒸发特性存在很大影响。当水泥掺量分别为3%、5%、8%时, 其对应常速率蒸发阶段的蒸发速率平均值为 0.49 g/h 、 0.43 g/h 、 0.41 g/h , 即随着水泥掺量的不断增大, 试样在常速率蒸发阶段的蒸发速率逐渐减小。并且, 试样蒸发结束后, 各水泥掺量对应的残余含水率分别为9.63%、10.24%、10.49%, 说明当水泥掺量增加时, 试样的残余含水率随之增加。值得注意的是, 相较于水泥掺量从3%增加到5%的变化, 当水泥掺量从5%增加到8%时, 试样的蒸发速率与残余含水率的变化有所减小。

出现上述现象的主要原因在于, 当水泥与膨胀土混合时, 水泥颗粒表面的矿物会和土中的水发生水化和水解反应, 生成氢氧化钙、水化硅酸钙等一系列水化物, 并且水泥中的硫酸钙与铝酸三钙一起与水反应生成水泥杆菌(钙矾石), 这些反应将大量的自由水以结晶水的形式固定下来(熊海帆, 2010), 这实际上降低了土体的初始含水率。此外, 孔隙水在溶解了化合物之后化学势能降低, 降低了其与外界环境的相对湿度差, 因此蒸发速率随水泥的含量的增加而减少。并且由于本文测量含水率的方法是测量质量后通过公式计算得出, 这样以结晶水形式固定在试样中的水也会被计算进含水率中, 因此蒸发结束后, 残余含水率自然就增加了。

2.2 收缩变形特征

根据试验过程中测量得到的直径与高度数据计算出试样的体积, 再由式(3)–(5), 分别得到试样的轴向收缩应变 ε_a 、径向收缩应变 ε_r 和体积收

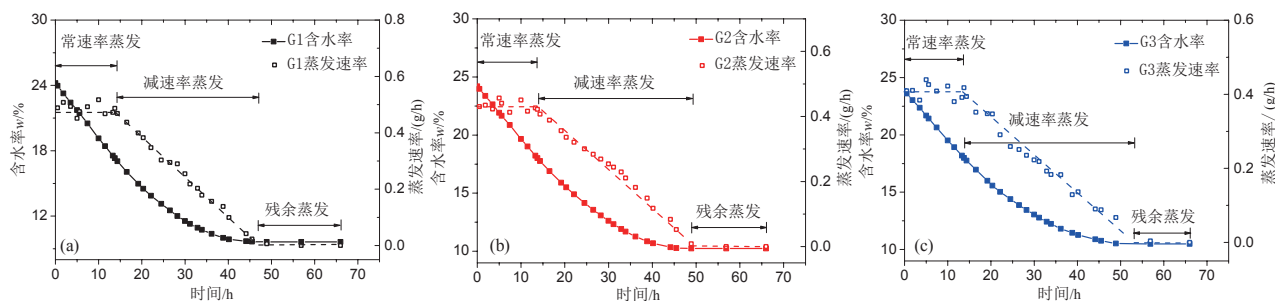


图2 水泥固化浦口膨胀土的蒸发特征曲线

Fig. 2 Evaporation characteristic curves of Pukou expansive soil with cement consolidation

缩应变 ε_v :

$$\varepsilon_a = \frac{n_0 - h}{h_0} \times 100\% \quad (3)$$

$$\varepsilon_r = \frac{d_0 - d}{d_0} \times 100\% \quad (4)$$

$$\varepsilon_v = \frac{V_0 - V}{V_0} \times 100\% \quad (5)$$

式中 h_0 、 d_0 、 V_0 分别是试样的初始高度、直径以及体积, h 、 d 、 V 分别是试样的实时高度、直径以及体积。

试验测定得到初始状态与收缩应变的关系以及水泥掺量与收缩应变的关系如图3、4所示, 同时其结果具体可见于表3。由图3和表3的结果可看出, 试样的最终轴向、径向和体积收缩应变随初始干密度的增加而减小。如初始含水率相同的试样S1和S2 ($w=13\%$), 其初始干密度分别为 1.8 g/cm^3 和 2.0 g/cm^3 , 在干燥结束后试样S1和S2的最终轴向收缩应变分别为 1.84% 和 1.76% , 最终径向收缩应变分别为 2.11% 和 1.82% , 以及最终体积收缩应变分别为 5.76% 和 5.30% 。此外, 从图4中可以

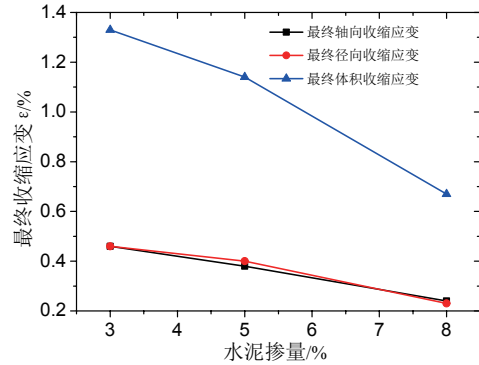


图4 最终轴向、径向、体积收缩应变与水泥掺量的变化关系

Fig. 4 The effect of cement content on the final axial, radial and volume shrinkage strain

看出, 初始干密度的影响在低含水率的土样中表现得更加明显。这与Reeve等(1980)通过试验所得出的结论一致。由此可见, 初始干密度的增加对土体干缩变形有一定的抑制作用。此外, 图3表明在初始干密度相同的条件下, 试样的最终轴向、径向和体积收缩应变随初始含水率的增加而增加。比如, 在初始干密度 ρ_d 都为 1.4 g/cm^3 的条

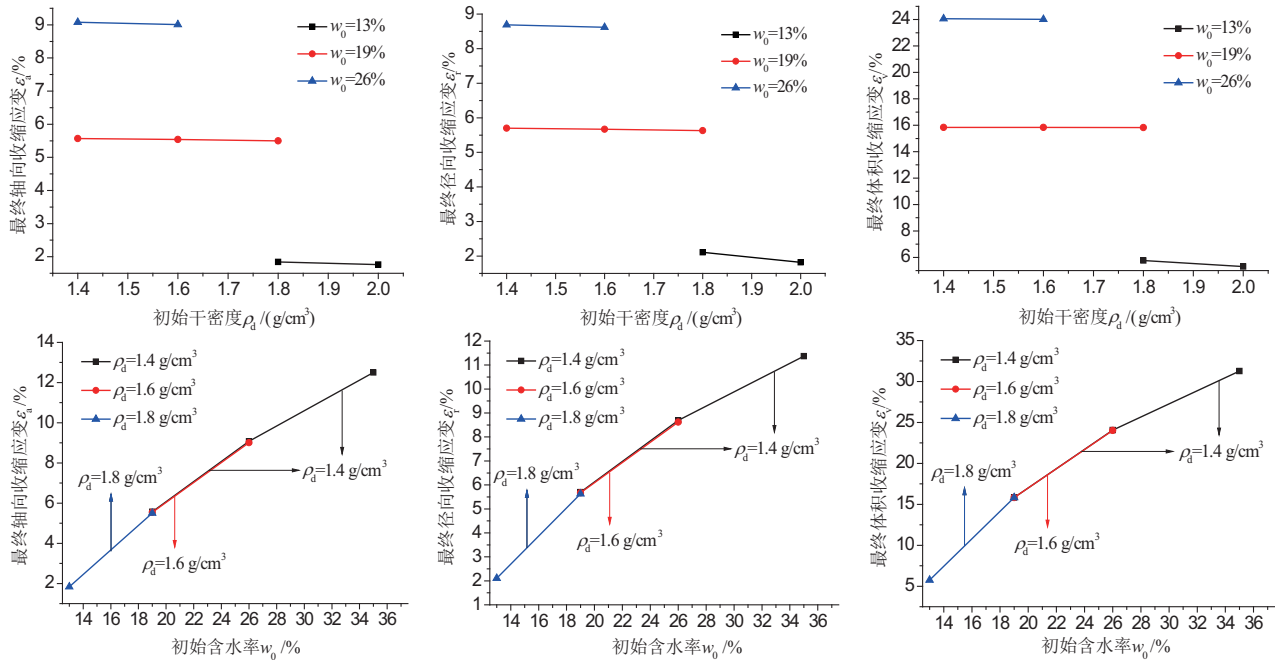


图3 最终轴向、径向、体积收缩应变与初始干密度及初始含水率的变化关系 图(a)(b)(c)分别表示初始干密度对试样(a)最终轴向收缩应变(b)最终径向收缩应变(c)最终体积收缩应变的影响; 图(d)(e)(f)分别表示初始含水率对试样(d)最终轴向收缩应变(e)最终径向收缩应变(f)最终体积收缩应变的影响

Fig. 3 The effect of initial dry density and initial water content on the final axial, radial and volume shrinkage strain. Figures (a)(b)(c) show the effect of initial dry density on (a)final axial shrinkage strain (b) final radial shrinkage strain (c) final volumetric shrinkage strain; figures (d)(e)(f) show the effect of initial water content on (d)final axial shrinkage strain (e) final radial shrinkage strain (f) final volumetric shrinkage strain

表3 试样干燥结束后的收缩应变结果
Table 3 Shrinkage results of samples after drying

编号	初始条件	最终轴向收缩应变 ε_a /%	最终径向收缩应变 ε_r /%	最终体积收缩应变 ε_v /%
S1	$\rho_d = 1.8 \text{ g/cm}^3$, $\omega_0 = 13\%$	1.84	2.11	5.76
S2	$\rho_d = 2.0 \text{ g/cm}^3$, $\omega_0 = 13\%$	1.76	1.82	5.30
S3	$\rho_d = 1.4 \text{ g/cm}^3$, $\omega_0 = 19\%$	5.57	5.70	15.84
S4	$\rho_d = 1.6 \text{ g/cm}^3$, $\omega_0 = 19\%$	5.54	5.66	15.83
S5	$\rho_d = 1.8 \text{ g/cm}^3$, $\omega_0 = 19\%$	5.50	5.63	15.83
S6	$\rho_d = 1.4 \text{ g/cm}^3$, $\omega_0 = 26\%$	7.97	7.79	21.75
S7	$\rho_d = 1.6 \text{ g/cm}^3$, $\omega_0 = 26\%$	7.93	7.74	21.72
S8	$\rho_d = 1.4 \text{ g/cm}^3$, $\omega_0 = 35\%$	12.50	11.37	31.28
G1	水泥掺量为3%	0.46	0.46	1.33
G2	水泥掺量为5%	0.38	0.40	1.14
G3	水泥掺量为8%	0.24	0.23	0.67

件下, 当初始含水率从26%上升到35%时, 其对应土样的最终轴向应变从7.97%上升到12.50%, 最终径向收缩应变从7.79%上升到11.37%, 最终体积收缩应变从21.75%上升到31.28%。这主要因为当土体含水率增加时, 单个土颗粒外的结合水膜厚度以及颗粒之间的距离都会随之增加, 这为土颗粒在失水过程中相互靠拢提供了充足的空间; 而土颗粒间的连接强度会随之减小。此外, 当含水率增大时, 土体的饱和度增加, 吸力及粒间有效应力降低, 土颗粒在收缩时克服的阻力变小, 收缩变形更容易发生(唐朝生等, 2011a)。

图4展示了掺有水泥的试样的干缩变形特征, 从中可以发现, 试样的最终轴向、径向和体积收缩应变在掺入水泥后有明显的减小现象, 这说明水泥可以在一定程度上抑制膨胀土的收缩, 并且该抑制性随着水泥掺量的增加而增强, 吴新明等(2007)也得到了相似的研究结果。其原因主要在于当水泥被掺入土中形成各种水化物之后, 这些水化物有的自身硬化, 有的则与周围的黏土颗粒发生离子交换和团粒化作用(倪宏革和周红, 2007; Prusinski and Bhattacharja, 1999; Firoozi et al., 2017), 即土体颗粒中自带的钠钾离子, 可以和水水泥水化之后形成的钙离子进行交换, 形成较大的团粒。它们的大小已经达到了胶体的范围, 比表面积是原来水泥颗粒的千倍, 具有很大的表面能, 这种表面能使得胶体粒子拥有强大的吸附活性, 能使团粒进一步结合。这些反应发生的结果

就是混合物中的粗颗粒含量进一步增大, 塑性减小, 收缩性降低。此外, 水泥水化产物能对土颗粒进行有效的胶结, 形成骨架, 极大限制土样的收缩变形。

本文根据公式(1)、(2), 确定各试样在收缩过程中不同含水率对应的孔隙比, 由此可以得到出各组试样的收缩特征曲线, 如图5、6所示。Cornelis等(2006)提出, 收缩特征曲线的2个转折点对应的含水率分别为土样的进气点含水率和缩限值。从图5可以看出, 初始干密度对试样的缩限和进气点含水率影响并不明显; 如试样S3、S4、S5初始含水率同为19%, 虽然初始干密度分别为1.4 g/cm³、1.6 g/cm³、1.8 g/cm³, 但缩限含水率都在8.94%附近, 而进气点含水率也在11.97%附近。另外可以发现, 初始干密度越大, 试样的最终孔隙比越小, 土体干燥完成后越密实。例如, 当初始含水率同为26%时, 初始干密度由1.4 g/cm³增加到1.6 g/cm³, 最终孔隙比则由0.51减小到0.35。但是当初始含水率增大时, 试样的缩限和进气点含水率也都随之增大, 而其最终孔隙比却随之减小。如当初始干密度均为1.4 g/cm³时, 初始含水率为19%、26%、35%的试样S3、S6、S8的缩限含水率分别为8.94%、10.38%、11.56%; 由于S3直接进入残余收缩阶段, 未测到其进气点含水率, S6、S8的进气点含水率分别为13.11%、17.37%; 而这三个试样的最终孔隙比则为0.75、0.51、0.41。

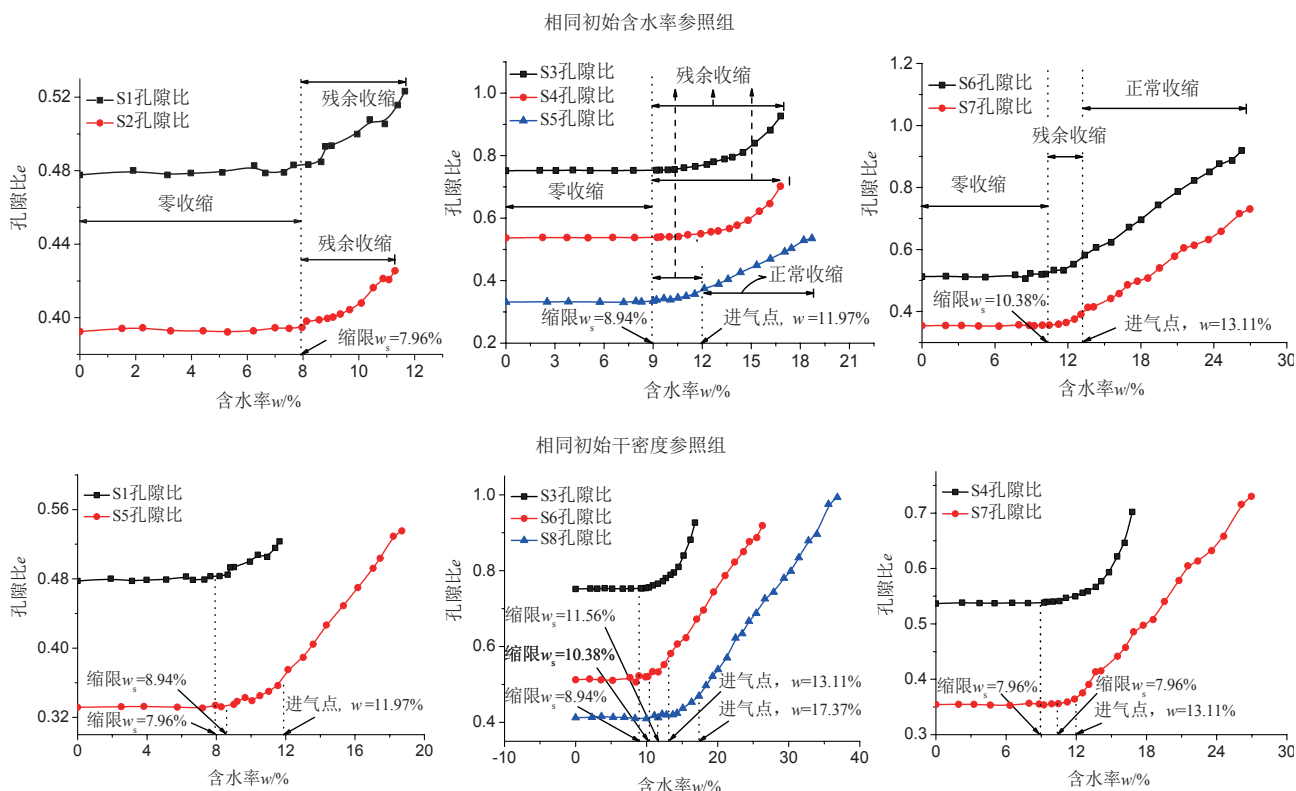


图5 浦口膨胀土的收缩特征曲线

Fig. 5 Shrinkage characteristic curves of Pukou expansive soil

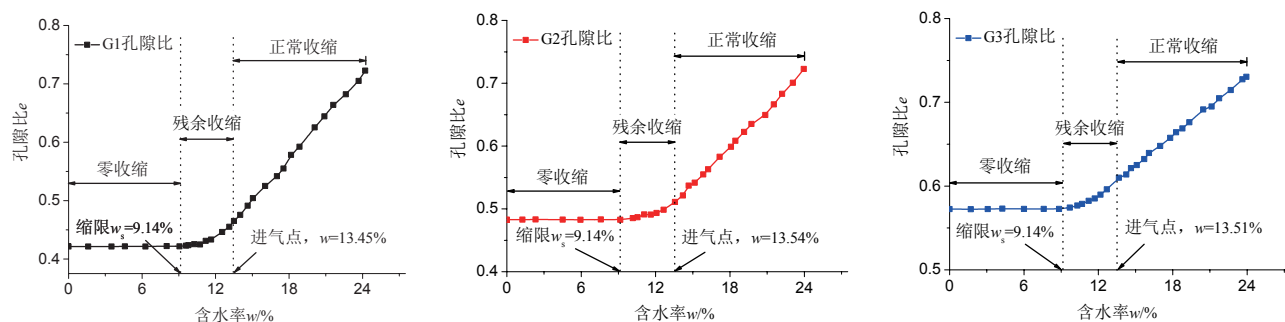


图6 水泥固化浦口膨胀土的收缩特征曲线

Fig. 6 Shrinkage characteristic curves of Pukou expansive soil with cement solidification

根据土力学的定义, 缩限含水率及进气点含水率是由土体自身性质决定的, 同一种土的缩限含水率与进气点含水率应该是一个定值。然而本文观察到的这两个特征点却因初始状态的不同而发生变化。这主要因为试验测定实时含水率的方法是测量试样的实时质量再由公式 (1) 计算得到, 这种方法得到的含水率事实上是土体的整体含水率, 亦可称为平均含水率, 即默认土体中水分的分布是绝对均匀没有差异的。但实际的蒸发过程是一个从表面到内部的过程, 土体表面的水

分先被蒸发产生水势不均, 内部的水分向表面转移继续蒸发。这样一来土体各部分的局部含水率是不同的, 在土体表面达到缩限含水率或者进气点含水率时内部的含水率却还没有达到这两个点, 所以虽然从土体局部来说缩限含水率与进气点含水率是一定的, 但是试验测定的整体缩限及进气点含水率却会发生变化。而如前文所述, 初始含水率会影响试样的蒸发特性, 不同蒸发特性进一步影响试样中水分的分布, 因此整体含水率与局部含水率的偏差存在差异, 其表现即为测定

缩限含水率与进气点含水率的规律性变化。

对于不同初始状态下试样最终孔隙比的变化,初始干密度对其影响的原因显而易见,初始干密度越大的试样越密实,初始孔隙比越小,可以看到初始干密度为 1.6 g/cm^3 、 1.8 g/cm^3 试样(S4、S5)的初始孔隙比已经分别小于初始干密度为 1.4 g/cm^3 、 1.6 g/cm^3 试样(S3、S4)的最终孔隙比了,再经过干燥收缩过程,孔隙比进一步减小,最终孔隙比也就和初始干密度表现出负相关关系。而初始含水率对最终孔隙比的影响则是因为,土体在到达缩限以前一直进行干燥收缩,孔隙比会持续减小,不同试样实际的缩限含水率为定值,初始含水率高的试样收缩持续更长,收缩量更大,孔隙比减小也越多,所以在初始干密度相同的情况下其最终孔隙比越小。

在图6中,可以发现随着水泥掺量的增加,进气点和缩限对应的含水率没有明显变化,所有试样进气点含水率几乎都在 13.5% 左右,而缩限也都在 9.14% 左右。但是最终孔隙比发生了变化,且随着水泥掺量的增加而增加。具体来说,当水泥掺量分别为 3% 、 5% 和 8% 时,其对应土样的最终孔隙比分别为 0.36 、 0.43 、 0.53 。且将掺入水泥的试样与具有相同初始压实状态的S7试样(图1g)比较,发现试样的进气点含水率与缩限含水率没有发生明显变化,然而最终孔隙比明显增大,且水泥掺量越大,最终孔隙比的增加越显著。说明水泥掺量越大,土样干燥收缩结束之后越疏松,这与水泥水分产物形成的三维骨架支撑作用有关。因为水泥骨架本身不会发生收缩,只有填充在骨架之间的土样会发生收缩,进而使骨架之间的孔隙增加。此外,掺入水泥的团粒化作用也对上述现象有一定贡献(Firoozi et al., 2017)。

3 结论

为了研究膨胀土的干缩变形特性,本文开展了一系列室内干燥试验测定膨胀土的蒸发特征曲线以及收缩特征曲线,并综合分析了它们的变化规律。此外,还基于水泥固化抑制膨胀土干缩变形的效果,探讨了其作用机理。得到了如下结论:

(1) 饱和膨胀土的蒸发特征曲线可分为常速率、减速率以及残余蒸发三个阶段。当初始含水率一致时,土体的初始蒸发速率随着初始干密度

的增大而减小;当初始干密度一致时,土体的初始蒸发速率随着初始含水率增大而增大。此外,初始干密度与初始含水率对土体的残余含水率影响并不明显。

(2) 干燥完成后,当初始含水率一定时,纯膨胀土试样的最终轴向、径向和体积收缩应变随初始干密度的增加而减小;而在初始干密度相同的条件下,土体的最终轴向、径向和体积收缩应变随初始含水率的增加而增加。

(3) 初始干密度对土体的缩限和进气点含水率的影响并不明显。但初始干密度越大,土体的最终孔隙比越小,土体干燥完成后越密实;初始含水率越大,土体的缩限和进气点所对应的含水率也随之增大,最终孔隙比却随之减小。

(4) 膨胀土中掺入水泥后,土体在常速率蒸发阶段的蒸发速率随水泥掺量的增大而减小,但残余含水率随水泥掺量的增大而增大。此外,试样的最终轴向、径向和体积收缩应变均随水泥掺量的增大而减小,最终孔隙比随水泥掺量增大而增大,但试样的进气点与缩限没有发生明显变化。这说明水泥可以在一定程度上抑制膨胀土的收缩变形,并且抑制效果随水泥掺量的增大而增大。

参考文献 (References):

- 包承纲. 2004. 非饱和土的性状及膨胀土边坡稳定问题[J]. 岩土工程学报, 26(1): 1-15.
- 孔令伟, 郭爱国, 赵颖文, 等. 2004. 荆门膨胀土的水稳性及其力学效应[J]. 岩土工程学报, 26(6): 727-732.
- 李生林, 施斌. 1992. 中国膨胀土工程地质研究[M]. 南京: 江苏科学技术出版社.
- 缪林昌, 仲晓晨, 殷宗泽. 1999. 膨胀土的强度与含水量的关系[J]. 岩土力学, 20(2): 71-75.
- 卢冰, 刘川顺, 牛飞, 等. 2008. 南阳膨胀土地区房屋开裂的原因和治理对策[J]. 土工基础, 22(5): 39-40.
- 栾茂田, 汪东林, 杨庆, 等. 2008. 非饱和重塑土的干燥收缩试验研究[J]. 岩土工程学报, 30(1): 118-122.
- 倪宏革, 周红. 2007. 膨胀土固化材料的分类与固化机理[J]. 路基工程, 6: 21-23.
- 邵梧敏, 谭罗荣, 张梅英, 等. 1994. 膨胀土的矿物组成与膨胀特性关系的试验研究[J]. 岩土力学, (1): 11-19.
- 谭罗荣, 孔令伟. 2004. 膨胀土膨胀特性的变化规律研究[J]. 岩土力学, 25(10): 1555-1559.
- 唐朝生, 崔玉军, Tang Anh-Minh, 等. 2011a. 土体干燥过程中的体积收缩变形特征[J]. 岩土工程学报, 33(8): 1271-1279.
- 唐朝生, 施斌, 顾凯. 2011b. 土中水分的蒸发过程试验研究[J]. 工程地质学报, 19(6): 875-881.

- 唐朝生, 崔玉军, TANG Anh-Minh, 等. 2012a. 膨胀土收缩开裂过程及其温度效应[J]. 岩土工程学报, 34(12): 2181-2187.
- 唐朝生, 施斌, 刘春. 2012b. 膨胀土收缩开裂特性研究[J]. 工程地质学报, 20(5): 663-673.
- 汪贤恩, 谭晓慧, 辛志宇, 等. 2015. 膨胀土收缩性质的试验研究[J]. 岩土工程学报, 37(s2): 107-114.
- 王清标, 张聪, 温小康, 等. 2014. 膨胀土胀缩机理及其在控制隧道沉降中的应用[J]. 地下空间与工程学报, 10(6): 1426-1432.
- 吴新明, 巫锡勇, 周明波. 2007. 水泥改良膨胀土试验研究[J]. 路基工程, 2: 94-95.
- 熊海帆. 2010. 膨胀土水泥改性试验研究[D]. 武汉: 武汉理工大学.
- 徐彬, 殷宗泽, 刘述丽. 2010. 裂隙对膨胀土强度影响的试验研究[J]. 水利水电技术, 41(9): 100-104.
- 杨和平, 曲永新, 郑健龙, 等. 2003. 中国西部公里建设中膨胀土工程地质问题的初步研究[J]. 长沙交通学院院报, 19(1): 1-6.
- 杨和平, 曲永新, 郑健龙. 2005. 宁明膨胀土研究的新进展[J]. 岩土工程学报, 27(9): 981-987.
- 姚海林, 郑少河, 陈守义. 2001. 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, 23(5): 606-609.
- 殷宗泽, 袁俊平, 韦杰, 等. 2012. 论裂隙对膨胀土边坡稳定的影响[J]. 岩土工程学报, 34(12): 2155-2161.
- 张吉明, 李顺群, 任庆新. 2007. 非饱和土的基质吸力与毛细吸力[J]. 山西建筑, 33(23): 1-3.
- Alonso E E, Vaunat J and Gens A. 1999. Modelling the mechanical behaviour of expansive clays [J]. Engineering Geology, 54(1-2): 173-183.
- Boivin P, Garnier P and Vauclin M. 2006. Modeling the soil shrinkage and water retention curves with the same equations [J]. Soil Science Society of America Journal, 70(4): 1082-1093.
- Braudeau E, Costantini J M, Bellier G, et al. 1999. New device and method for soil shrinkage curve measurement and characterization [J]. Soil Science Society of America Journal, 63(3): 525-535.
- Byers J G. 2014. Treatment of expansive clay canal lining [C]// Expansive Soils, ASCE.
- Cornelis W M, Corluy J, Medina H, et al. 2006. Measuring and modelling the soil shrinkage characteristic curve [J]. Geoderma, 137(1-2): 179-191.
- Firoozi A A, Olgun C G, Firoozi A A, et al. 2017. Fundamentals of soil stabilization [J]. International Journal of Geo-Engineering, 8(1): 26.
- Fredlund D G and Rahardjo H. 1993. Soil Mechanics for Unsaturated Soils [M]. New York: John Wiley & Sons.
- George K P. 1968. Shrinkage characteristics of soil-cement mixtures [J]. Highway Research Record, 255: 42-58.
- Li J H and Zhang L M. 2011. Study of desiccation crack initiation and development at ground surface [J]. Engineering Geology, 123(4): 347-358.
- Lloydhughes B. 2002. Long-range predictability of European drought [J]. EGS-AGU-EUG Joint Assembly.
- Lu N and Likos W J. 2004. Unsaturated Soil Mechanics [M]. New York: John Wiley & Sons.
- Nelson J and Miller D J. 1997. Expansive Soils: Problems and Practice in Foundation and Pavement Engineering [M]// Structure and function in cell signalling. John Wiley & Sons: 2212-26.
- Peron H, Hueckel T, Laloui L, et al. 2009. Fundamentals of desiccation cracking of fine-grained soils: experimental characterisation and mechanisms identification [J]. Canadian Geotechnical Journal, 46(10): 1177-1201.
- Prusinski J and Bhattacharja S. 1999. Effectiveness of Portland cement and lime in stabilizing clay soils [J]. Transportation Research Record Journal of the Transportation Research Board, 1652(1): 215-227.
- Reeve M J, Hall D G M and Bullock P. 1980. The effect of soil composition and environmental factors on the shrinkage of some clayey British soils [J]. European Journal of Soil Science, 31(3): 429-442.
- Silvestri V, Soulié M, Lafleur J, et al. 2011. Foundation problems in Champlain clays during droughts. II. Case history [J]. Canadian Geotechnical Journal, 29(2): 169-187.
- Tang C S, Shi B, Liu C, et al. 2008. Influencing factors of geometrical structure of surface shrinkage cracks in clayey soils [J]. Engineering Geology, 101(3): 204-219.
- Towner G D. 1987. The mechanics of cracking of drying clay [J]. Journal of Agriculture Engineering Research, 36(2): 115-124.
- Wilson G W, Fredlund D G and Barbour S L. 1997. The effect of soil suction on evaporative fluxes from soil surface [J]. Canadian Geotechnical Journal, 34: 145-155.