

文章编号:1004-4574(2013)03-0198-07

基于线弹性力学的非饱和红粘土裂缝开展分析

陈爱军^{1,2}, 张家生¹

(1. 中南大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410075; 2. 湖南工程学院 建筑工程学院, 湖南 湘潭 411108)

摘要:湖南郴宁高速公路沿线分布的红粘土是一种典型的高塑性粘土, 极易干燥失水开裂导致严重的工程病害。以郴宁高速公路红粘土为研究对象, 分析了粘土干缩裂缝的开展机理, 采用线弹性力学和非饱和土力学理论, 在一定的假设条件下导出了考虑土体抗拉强度的裂缝开展深度的理论解。理论解分析表明, 裂缝开展深度主要受地表基质吸力控制, 地表基质吸力越大, 裂缝越深; 当吸力梯度较小时, 吸力梯度对裂缝深度的影响较大; 土体参数泊松比对裂缝开展深度的影响较小。

关键词:红粘土; 非饱和土; 裂缝深度; 地表基质吸力; 吸力梯度

中图分类号: TU43

文献标志码: A

Analysis of crack development of unsaturated red clay based on linear elasticity mechanics

CHEN Aijun^{1,2}, ZHANG Jiasheng¹

(1. School of Civil Engineering, Central South University, Changsha 410075, China; 2. School of Architecture Engineering, Hunan Institute of Engineering, Xiangtan 411108, China)

Abstract: The red clay distributed along the Chen-Ning Expressway in Hunan Province is a typical high-plasticity clay, which is readily to dry and crack and cause serious engineering diseases. With the red clay of Chen-Ning Expressway as an object of study, the mechanism of clay shrinkage crack was analyzed herein. Based on the linear elastic and unsaturated soil mechanics theories, certain assumptions and with the tensile strength of the soil in mind, a theoretical solution of the crack depth was derived. Analysis of the theoretical solution shows that, the depth of the crack development is mainly controlled by the surface matrix suction. The greater the surface matrix suction, the deeper the cracks; crack depth is greatly influenced by the suction gradient when the suction gradient is small; crack depth development is less influenced by the Poisson ratio.

Key words: red clay; unsaturated soils; crack depth; surface matrix suction; suction gradient

红粘土(laterite)一词由英国旅行家 Buchanan 于 1807 年首次提出^[1]。它指出露在地表的碳酸盐岩在更新世以来的湿热环境中, 经过一系列复杂的物理和化学风化, 特别是红土化作用, 形成并覆盖在基岩上, 呈棕红色或黄褐色的高塑性粘土^[2]。它主要分布在北纬 30°与南纬 30°之间的热带、亚热带地区。亚洲、欧洲、南美洲, 特别是非洲有大面积的红粘土土分布。我国地域辽阔, 红粘土分布广泛, 其主要分布区在我国南方各省区, 如广西、云南、贵州、湖南等省(自治区), 总出露面积达 20 余万 km²。

公路、铁路和水利工程建设中遇到的红粘土问题主要是由于其易开裂引起的, 路基及其边坡的开裂为深

收稿日期: 2012-07-26; 修回日期: 2012-09-15

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50908233/E0806)

作者简介: 陈爱军(1974-), 男, 讲师, 博士研究生, 主要从事特殊土处理研究. E-mail: caj3026@sina.com

部红粘土的失水提供了通道,从而促使深部土体收缩,使裂隙逐渐加宽;同时裂隙更有利于地表水下渗,引起土体软化,并可能由此引起边坡的滑坡等工程病害。因此开展红粘土的开裂理论和试验研究,探讨影响红粘土开裂的主要因素,寻找防治红粘土开裂的工程措施,具有重要的理论价值与工程应用意义。

引起红粘土开裂的因素比较多,最主要是干燥失水收缩引起开裂。国外学者对普通粘土的开裂研究较多^[3-7],国内学者则主要集中对膨胀土开裂的研究^[8-12]和对地裂缝形成的宏观原因分析^[13-14],但是国内外对开裂深度的现场实测研究较少,主要原因是勘探开挖过程中扰动产生的应力释放导致无法获得真实的测量数据^[3]。南京大学唐朝生等^[15]通过室内试验对粘土裂缝形成的影响因素和裂缝的形态进行了初步的研究;吴珺华等^[10]提出用变湿应力来计算膨胀土土体的胀缩变形并建立了用含水率变化计算变湿应力的理论模型,揭示了裂隙产生的机理,这对红粘土开裂机理研究有一定的借鉴作用;Morris 等^[3]调查了澳大利亚和加拿大粘土的开裂形态,从理论上分析了开裂深度与土体含水量、吸力、土体抗剪强度和抗拉强度与开裂深度的关系;Trabelsi 等^[4]通过对粘土开裂的试验研究,把开裂的发展与土体的吸力和抗拉强度联系起来,并建立有限元模型实现对粘土开裂过程的模拟。

1 湘南红粘土的物理力学性质

郴(州)宁(远)高速公路地处湖南省南部,沿线分布有大量红粘土,在用红粘土填筑路堤时产生了大量的裂缝(如图1),某些干缩严重的裂缝贯穿了整个填筑层以致于大大降低路堤的强度和稳定性;同时,红粘土边坡如不及时施作防护工程而产生裂缝,在反复干湿循环作用下也将导致边坡滑坡等病害(如图2)。为了研究红粘土的工程性质,笔者在郴宁高速公路取土进行相关的物理力学性质试验,试验结果如表1、表2和表3所示。

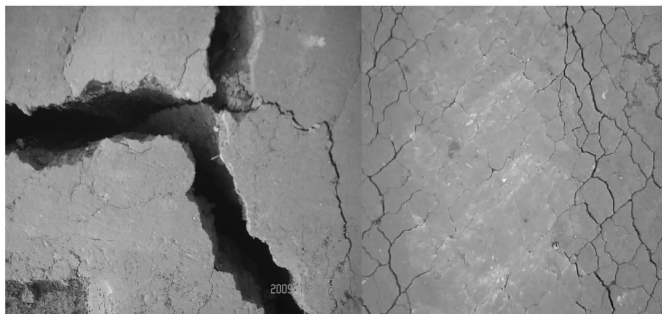


图1 红粘土路堤开裂
Fig.1 Crack of red clay embankment



图2 红粘土边坡滑坡
Fig.2 Landside of red clay slope

表1 红粘土的矿物组成

Table 1 Mineral composition of red clay

	绿泥石	伊利石	高岭石	石英	赤铁矿
	15	15	25	40	5

表2 红粘土的剪切强度指标

Table 2 Shear strength indexes of red clay

指标	剪切类型					
	直剪原状样		直剪重塑样		三轴重塑样	
类型	c/kPa	$\varphi/(\circ)$	c/kPa	$\varphi/(\circ)$	c/kPa	$\varphi/(\circ)$
数值	24	25.2	24	25.3	40.1	18.9

表3 红粘土的基本物性指标

Table 3 Basic physical property indexes of red clay

天然含水量/%	比重	液限/%	塑限/%	塑性指数	<0.002 mm 颗粒含量	压缩系数 $a_{1-2}/(\text{MPa}^{-1})$	压缩模量 E_s/MPa	压缩指数 C_c	自由膨胀率/%
30.9	2.65	61	35	26	44.2	0.29	6.34	0.10	28.5

分析表 1 - 表 3 可知,红粘土的粘土矿物成分主要以绿泥石、伊利石和高岭石为主,基本不含强膨胀性的蒙脱石,这也说明了它自由膨胀率低的原因;天然水量较高,略低于塑限;液限大于 50%,塑性达 26%,小于 0.002 mm 的胶粒含量高达 44.2%,说明它是一种颗粒高度分散且粘性极强的高塑性粘土,高含水量时表现出来的物理性质较差;另一方面,相对于其它的高液限土,它的压缩性小,抗剪强度高,力学性质较好,在不受外界水温作用影响时可以作为路基填料使用。因此,这种红粘土具有典型红粘土的共性,但又与其它地区的红粘土^[16]的性质不完全一样,具有其特性。

2 红粘土干缩开裂机理分析

土样的体积变化可以由不同的因素引起,如湿度、压力、温度和化学环境的变化等。从土的微观结构来分析,土的体积变化实质是土粒间排斥力和吸引力平衡状态变化的结果。

饱和土样的干缩可分为 3 个阶段:第 1 阶段土体失水的体积等于土体收缩的体积,土体仍保持饱和,为正常的干缩;第 2 阶段土体的收缩开始变慢,土体收缩的体积小于失水的体积,空气开始进入土中孔隙,土体进入非饱和阶段;第 3 阶段土体由于土粒排列结构的变化而发生收缩,这种收缩往往是不可恢复的,为残余的干缩。

土中含水量减小时,土样体积发生干缩的力,是土样边界处孔隙的水-气间弯液面两侧压力差引起,土孔隙内产生负孔隙水压力(基质吸力),使土粒向内收缩。当这种收缩力超过土粒间的阻力时,就使土粒互相拉拢,土体发生收缩,但这时土样仍为饱和。随着土粒间距的减小,土粒间的阻力变大,当收缩力不能克服土粒间的阻力,土体就不再收缩,于是失水的孔隙由空气来取代,这时土样进入非饱和状态。阻止土粒靠拢的力包括:(1)土粒或土粒表面结合水膜的相互接触;(2)颗粒间极短距离的排斥力。

土体在干缩的过程中,当土体不受约束处于自由变形状态时,含水量降低导致基质吸力增加,宏观上土体会呈现均匀收缩而不会产生裂隙。实际上,土体的水分丧失是不均匀的,土体表面的水分丧失速度较快,即土体表面的含水量最小,产生的基质吸力最大,引起土体的收缩最大;土体内部的水分丧失较慢,其含水量相对较大,产生的基质吸力较小,引起的土体收缩也较小。这种不均匀的收缩变形会在土体内部产生类似于温度应力的变湿应力^[10],变湿应力引起拉应力超过土体的抗拉强度时,土体便产生张拉裂缝,这种最开始产生的裂缝称为主裂缝。由于主裂缝的产生释放了土中的拉应力,反而有利于避免其它区域裂缝的产生,但随着含水量的继续丧失,由于主裂缝是土体最薄弱的环节,主裂缝便继续在土体表面和内部扩展。在主裂缝网络形成之后,随着试样干缩过程的继续,主裂缝处开始出现分叉,形成次一级的裂缝,将试样表面分割成最终面积大小应近似相等的区块^[15]。

3 非饱和红粘土裂隙深度的求解

3.1 基于线弹性力学非饱和土的弹性本构关系

假设红粘土是均质、各向同性的,应用非饱和土的弹性本构关系的应力应变关系^[17]得到下式:

$$\varepsilon_v = \left(\frac{\sigma_v - u_a}{E} \right) - \frac{2\mu}{E}(\sigma_h - u_a) + \frac{(u_a - u_w)}{H}; \quad (1)$$

$$\varepsilon_h = \left(\frac{\sigma_h - u_a}{E} \right) - \frac{\mu}{E}(\sigma_v + \sigma_h - u_a) + \frac{(u_a - u_w)}{H}. \quad (2)$$

式中: ε_v 为竖直方向的法向应变, ε_h 为水平方向的法向应变, σ_v 为竖直方向的总法向应力, σ_h 为水平方向的总法向应力, μ 为泊松比, E 为与 $(\sigma - u_a)$ 变化有关的弹性模量, H 为与 $(u_a - u_w)$ 变化有关的弹性模量, u_a 为孔隙气压力, u_w 为孔隙水压力。

式(2)对两个水平方向均适用。完整、均质的非饱和土体处于静止状态时,即无侧向位移,水平方向应变可取为零(即 $\varepsilon_h = 0$),根据式(2),净水平应力可用竖向应力来表示:

$$(\sigma_h - u_a) = \frac{\mu}{1 - \mu}(\sigma_v - u_a) - \frac{E}{(1 - \mu)H}(u_a - u_w). \quad (3)$$

基质吸力为零(即 $u_a - u_w = 0$),土中水平应力可以表示为

$$(\sigma_h - u_a) = \frac{\mu}{1 - \mu}(\sigma_v - u_a). \tag{4}$$

式(4)中的 $\frac{\mu}{1 - \mu}$ 即为静止土压力系数 K_0 ,由此可见,对于饱和红粘土,静止土压力系数只与泊松比有关,但对于非饱和红粘土,静止土压力系数的确定要复杂的多,除了与弹性参数 μ, E, H 有关,还与基质吸力有关。

3.2 红粘土开裂深度的求解

大量粘土抗拉强度试验研究表明^[4,18-20],粘性土具有一定的抗拉强度,抗拉强度与土的干密度、含水量、饱和度和吸力有关,对于一定深度范围内的填土,可以假设干密度是恒定的,而含水量、饱和度和吸力三者是相互关联的,为简化问题,暂不考虑含水量和饱和度的影响,只考虑吸力对抗拉强度的影响。Trabelsi等^[4]和冉龙洲等^[20]从试验中发现抗拉强度与吸力存在正线性相关,即吸力的增大会有助于抗拉强度的提高,因为吸力可以表征土体中水的一种能量状态,而水的能量影响着水的存在形式和水-土之间的相互作用,进而影响颗粒间的联接强度。抗拉强度和吸力的关系可以用下式表示:

$$\sigma_l = a(u_a - u_w) + b. \tag{5}$$

式中: σ_l 为土的抗拉强度; a, b 为试验参数,与土性有关。

当土体受到的拉应力达到并超过土体所能承受的抗拉强度时,土体便会形成张拉裂缝,并继续向土体深度扩展。因此,令土体处于开裂前的极限平衡状态,结合式(3)和式(5),可以得到:

$$(\sigma_h - u_a) = -\left(\frac{\mu}{1 - \mu}(\sigma_v - u_a) - \frac{E}{(1 - \mu)H}(u_a - u_w)\right) = a(u_a - u_w) + b. \tag{6}$$

另外,土中竖向应力 σ_v 可以用下式计算:

$$\sigma_v = \rho gh. \tag{7}$$

式中: ρ 为土体总密度, g 为重力加速度, h 为竖向裂缝的深度。

基质吸力与土的含水量(饱和度)有关,土体不同深度的含水量不一样,导致不同深度土体的基质吸力也是变化的。潘宗俊等^[9]和姚海林等^[12]人通过现场实测结果发现,地下表层土体含水量主要受气候影响较大,风化深度(2~4 m)以下土的含水量基本不受气候变化影响而保持不变。因此,地下土体的基质吸力变化也具有类似规律,假设地表基质吸力为 u_1 ,风化深度为 W ,风化深度处的基质吸力为 u_2 ,吸力随深度的变化率为 k (简称吸力梯度), u 随 h 的变化关系具体如图3所示。

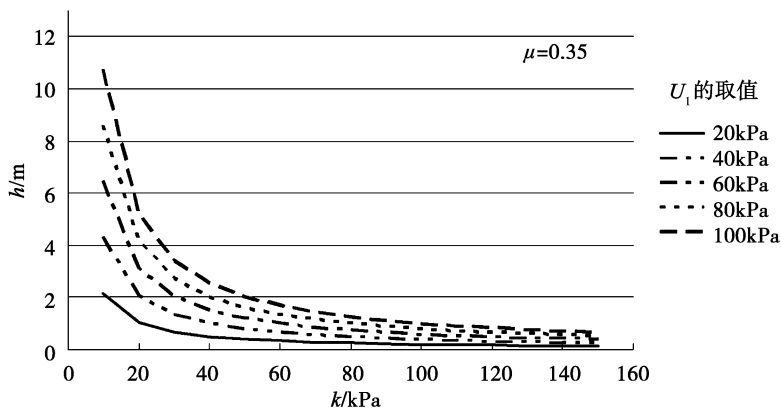


图3 基质吸力沿土体深度的变化

Fig.3 Change of matric suction with the soil depth

当 $h \leq W$ 时, $(u_a - u_w)_z = u_1 - kh;$ (8)

当 $h > W$ 时, $(u_a - u_w) = u_2.$ (9)

一般情况下,土体开裂深度小于风化深度^[9,12],因此,对于各向同性和一维应变状态下,可以取 $E/H = 1 - 2\mu$,基质吸力用式(8)表示,竖向应力用式(7)表示,这样可以求得裂缝深度的表达式:

$$h = \frac{u_1 N - b(1 - \mu)}{\rho g \mu + Nk}; \tag{10}$$

式中:

$$N = (1 - 2\mu) + a(1 - \mu). \tag{11}$$

可见,如果土性参数是确定的,开裂深度与地表基质吸力 u_1 和吸力梯度 k 有关,且地表基质吸力越大,表明地表土体越干燥,导致土的开裂深度越大。因此,该公式物理意义明确,参数少,求解简单,为理论探讨非饱和和粘土开裂深度提供了新的途径。

4 关于裂缝开展深度理论解的讨论

根据公式(10),影响土体开裂的因素除了土性参数 μ, a, b 外,还有地表基质吸力 u_1 、吸力梯度 k 。试验参数 a 和 b 的取值范围较大,冉龙洲等^[20]采用法国 Romainville 膨胀土(小于 $2\mu\text{m}$ 的黏粒含量为 79%),做竖向单轴直接拉伸试验,得到 $a = 14.477$ 和 $b = 1.657$; Trabelsi 等^[4]取自突尼斯 Beja 一个不稳定边坡的天然土,做水平单轴直接拉伸试验,得到 $a = 3.14, b = 584$ 。两位学者得到了相同的试验规律,但由于采用的试验方法(试验设备)和土样都不一样,导致试验参数 a 和 b 差别较大。为方便计算,土的密度取 1880kg/m^3 ,重力加速度 g 取 9.8m/s^2 , $a = 14.477, b = 1.657$,泊松比 μ 取 $0.35 \sim 0.5$ 。根据不同的 μ, u_1 和 k 计算裂缝开展深度 h ,考虑到参数的实际变化范围, μ 取 $0.25 \sim 0.5, u_1$ 取 $0 \sim 120\text{kPa}, k$ 取 $10 \sim 120\text{kPa}$,计算结果如表 4、图 4 - 图 6 所示。

土是由土粒、空气和水组成的三相体,在微观层次上不是连续介质,土内部分布着大量的微小裂缝,因此理论计算太小的裂缝深度是没有意义的,因此假设裂缝深度 $h > 5\text{mm}$ 为宏观可见裂缝,由表 4 可知,当 $U_1 > 0.2\text{kPa}$ 且 $k < 40\text{kPa}$ 时,才可见宏观裂缝。当地表基质吸力超过 $0.4 \sim 0.8\text{kPa}$ 时,不管吸力梯度大小都可见宏观裂缝,说明只有地表基质吸力超过某一范围才会出现宏观裂缝。

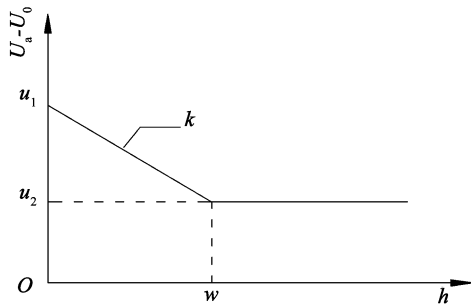


图 4 地表基质吸力对开裂深度的影响

Fig. 4 Impact of surface matrix suction on crack depth

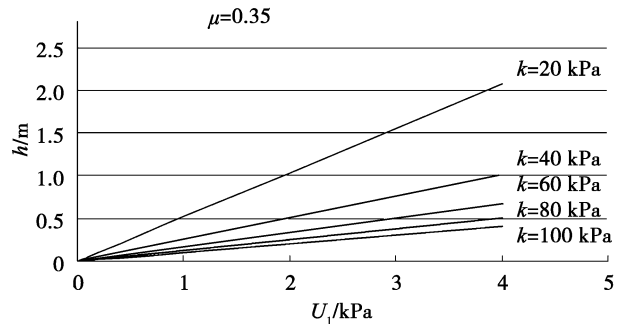


图 5 吸力梯度对开裂深度的影响

Fig. 5 Impact of suction gradient on crack depth

表 4 不同的 u_1 和 k 组合对应的 h

Table 4 Values h corresponding to different combinations of u_1 and k

k/u_1	120	100	80	60	40	20	10
0.02	0.000 2	0.000 2	0.000 3	0.000 3	0.000 5	0.001 0	0.002 2
0.04	0.000 3	0.000 4	0.000 5	0.000 7	0.001 0	0.002 1	0.004 3
0.08	0.000 7	0.000 8	0.001 0	0.001 4	0.002 0	0.004 2	0.008 6
0.2	0.001 7	0.002 0	0.002 5	0.003 4	0.005 1	0.010 4	0.021 5
0.4	0.003 4	0.004 0	0.005 0	0.006 7	0.010 2	0.020 7	0.043 1
0.8	0.006 7	0.008 1	0.010 1	0.013 5	0.020 4	0.041 5	0.086 1
2	0.016 8	0.020 1	0.025 2	0.033 7	0.050 9	0.103 7	0.215 2
4	0.033 5	0.040 3	0.050 4	0.067 5	0.101 8	0.207 3	0.430 5
8	0.067 1	0.080 6	0.100 9	0.134 9	0.203 6	0.414 7	0.861 0
20	0.167 7	0.201 4	0.252 2	0.337 3	0.509 0	1.036 7	2.152 4
40	0.335 3	0.402 9	0.504 5	0.674 6	1.018 0	2.073 4	—
80	0.670 6	0.805 7	1.008 9	1.349 3	2.036 0	—	—
120	1.005 9	1.208 6	1.513 4	2.023 9	3.054 0	—	—

注:表中 μ 取 0.35,“—”表示一般情况下不会出现的组合。

图4表示当 k 取不同的值时, u_1 对 h 的影响。从图4可以发现,当吸力梯度 k 不变时,随着地表基质吸力 u_1 的增大,开裂深度是线性增加的,并且当 k 较小时, u_1 对 h 的影响较大。在外界风和阳光照射作用下,地表土体会因含水量的丧失而干燥收缩,如果收缩不均匀或受到约束,土中将产生拉应力,当拉应力达到或超过土的抗拉强度,土体便开始出现张拉裂缝。土的含水量越小,土颗粒间的吸力越大,土体的收缩越显著,对开裂深度的影响越大。因此,在用红粘土填筑路堤和开挖红粘土边坡的施工过程中,及时封闭红粘土表层和加强保湿对防止裂缝的产生非常重要。

图5表示当 u_1 取不同的值时, k 对 h 的影响。从图5可以发现,当 k 小于20 kPa时, h 随着 k 的增加而急剧减小,当 k 在20 kPa和60 kPa之间时, h 随着 k 的增加而缓慢减小,当 k 超过60 kPa后, h 的变化不大。而且,当 u_1 越大时, k 对 h 的影响越明显。在基质吸力 u_1 和 u_2 保持不变的情况下,吸力梯度越小,说明风化深度越深,裂缝深度也会越大,这是符合实际情况的^[9]。

图6列出了5组 u_1 和 k 组合的 μ 对 h 的影响,从图6可以发现,不同 u_1 和 k 组合所对应的 $\mu-h$ 曲线基本是平行的,随着 μ 的增大, h 小幅增长,以 $u_1=60$ kPa, $k=40$ kPa为例, μ 从0.25增大到0.5,而相应的 h 从1.517 m增加到1.549 m, μ 增加了100%,而对应的 h 只增加了2.1%,说明 μ 对 h 的影响是非常微小的, h 主要还是受 u_1 和 k 的控制。泊松比 μ 是土体应力应变关系的重要参数,表示材料轴向受力时侧向变形与轴向变形的比值,它的大小会直接影响土体的强度和变形特征。虽然土体泊松比 μ 受各种因素的影响较大,但是它的取值对开裂深度的影响不大。

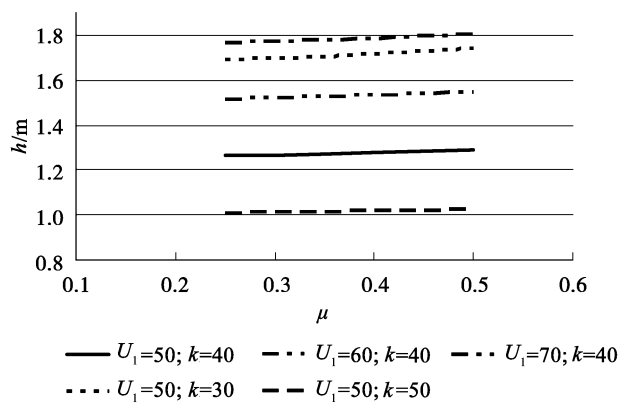


图6 泊松比 μ 对开裂深度 h 的影响

Fig. 6 Impact of Poisson ratio on crack depth

5 结语

(1) 湘南地区红粘土是具有高含水量、高孔隙比、高塑性、较高强度和低压缩性的区域性特殊土,它的易裂性给工程建设带来了较大的安全隐患;

(2) 红粘土的干缩裂缝是由于土体丧失水分产生的基质吸力超过土粒间的排斥力而收缩,当土体的不均匀收缩产生的拉应力超过其抗拉强度时产生干缩裂缝;

(3) 应用线弹性力学和非饱和土力学理论推导出考虑土体抗拉强度的红粘土裂缝开展深度的理论计算公式,裂缝开展深度与土体密度 ρ 、泊松比 μ 、试验参数 a 和 b 、地表基质吸力 u_1 和土体浅层吸力梯度 k 有关;

(4) 地表基质吸力与裂缝开展深度的存在正线性相关,吸力梯度较小时对裂缝开展深度影响较大,泊松比的变化对裂缝开展深度的影响较小;土体参数 a 、 b 对裂缝开展深度有一定的影响,本文假设的 a 、 b 不一定合理,实际计算时必须根据试验结果获得。

参考文献:

- [1] Madu R M. An investigation in to the geotechnical and engineering properties of some laterite of eastern Nigeria[J]. Engineering Geology, 1997 (11): 247 - 258.
- [2] 姜洪涛. 红粘土的成因及其对工程性质的影响[J]. 水文地质工程地质, 2000(3): 33 - 37.
JIANG Hongtao. The origin of red clay and the effect on engineering properties[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2000, 3: 33 - 37 (in Chinese)
- [3] MORRIS P H, GRAHAM J, WILLIAMS D J. Cracking in drying soils[J]. Can. Geotech. J, 1992, 29: 263 - 277.
- [4] Trabelsi H, Jamei M, Zenri H, et al. Crack patterns in clayey soils: experiments and modeling[J]. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 2011, DOI: 10.1002/nag.1060.
- [5] Yesiller N, Miller C J, Inci G, et al. Desiccation and cracking behavior of three compacted landfill liner soils[J]. Engineering Geology, 2000, 57: 105 - 121.
- [6] Konrad J M, Ayad R. Desiccation of a sensitive clay: field experimental observations[J]. Can. Geotech. J. 1997, 34: 929 - 942.

- [7] Peron H, Hueckel T, Laloui L, et al. Fundamentals of desiccation cracking of finegrained soils; experimental characterisation and mechanisms identification[J]. *Can. Geotech. J.* 2009, 46: 1177 – 1201.
- [8] 郑少河, 金剑亮, 姚海林. 地表蒸发条件下的膨胀土初始开裂分析[J]. *岩土力学*, 2006, 27(12): 2229 – 2233.
ZHENG Shaohe, JIN Jianliang, YAO Hailin. Analysis of initial cracking behavior of expansive soil due to evaporation[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2006, 27(12): 2229 – 2233. (in Chinese)
- [9] 潘宗俊, 谢永利, 杨晓华, 等. 基于吸力量测确定膨胀土活动带和裂隙深度[J]. *工程地质学报*, 2006, 14(2): 206 – 211.
PAN Zongjun, XIE Yongli, YANG Xiaohua, et al. Depth identification of the active and cracking zones in expansive soils from in – situ suction measurement[J]. *Journal of Engineering Geology*, 2006, 14(2): 206 – 211. (in Chinese)
- [10] 吴珺华, 袁俊平, 卢廷浩. 基于变湿应力概念的膨胀土初始开裂分析[J]. *岩土力学*, 2011, 32(6): 1631 – 1636.
WU Junhua, YUAN Junping, LU Tinghao. Analysis of initial cracking behavior of expansive soil due to moisture change stress[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2011, 32(6): 1631 – 1636. (in Chinese)
- [11] 李培勇, 杨庆, 栾茂田, 等. 非饱和膨胀土裂隙开展深度影响因素研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2008, 27(增1): 2967 – 2972.
LI Peiyong, YANG Qing, LUAN Maotian, et al. Research on influential factors of crack propagation depth of unsaturated expansive soils [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2008, 27(S1): 2967 – 2972. (in Chinese)
- [12] 姚海林, 程平, 吴万平. 基于收缩试验的膨胀土地基变形预测方法[J]. *岩土力学*, 2004, 25(4): 1688 – 1692.
YAO Hailin, CHENG Ping, WU Wanping. A simplified method for predicting heave in expansive soil grounds based on three – dimensional shrinkage tests[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2004, 25(4): 1688 – 1692. (in Chinese)
- [13] 刘会平, 潘安定, 王艳丽, 等. 广东省的地质灾害与防治对策[J]. *自然灾害学报*, 2004, 13(2): 101 – 105.
LIU Huiping, PAN Anding, WNAG Yanli, et al. Geological disasters in guangdong province and their prevention and control[J]. *Journal of Natural Disasters*, 2004, 13(2): 101 – 105. (in Chinese)
- [14] 杨涛, 宫辉力, 赵文吉, 等. 北京顺义区地裂缝分布特征及成因分析[J]. *自然灾害学报*, 2010, 19(6): 100 – 106.
YANG Tao, GONG Huili, ZHAO Wenji, et al. Distribution characteristics and cause analysis of ground fissures in Shunyi district of Beijing[J]. *Journal of Natural Disasters*, 2010, 19(6): 100 – 106. (in Chinese)
- [15] 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. (in Chinese)
- [16] 谭罗荣, 孔令伟. 某类红粘土的基本特性与微观结构模型[J]. *岩土工程学报*, 2001, 23(4): 458 – 462.
TAN Luorong, KONG Lingwe. Fundamental property and microstructure model of red clay[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2001, 23(4): 458 – 462. (in Chinese)
- [17] FREDLUND D G, RAHARDJO H. *Soil Mechanics for Unsaturated Soils*[M]. New York: Wiley Interscience, 1993.
- [18] 党进谦, 郝月清, 李靖, 等. 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, et al. Study on tensile strength of unsaturated loess[J]. *Journal of Hohai University*, 2001, 29(6): 106 – 108. (in Chinese)
- [19] 朱俊高, 梁彬, 陈秀鸣, 等. 击实土单轴抗拉强度试验研究[J]. *河海大学学报*, 2007, 35(2): 186 – 190.
ZHU Jungao, LIANG Bin, CHEN Xiuming, et al. Experimental study on uniaxial tensile strength of compacted Soils[J]. *Journal of Hohai University*, 2007, 35(2): 186 – 190. (in Chinese)
- [20] 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, 19(4): 620 – 625.
RAN Longzhou, SONG Xiangdong, TANG Chaosheng. Laboratorial investigation on tensile strength of expansive soil during drying[J]. *Journal of Engineering Geology*, 2011, 19(4): 620 – 625. (in Chinese)