

土工格栅抑制黄土干缩裂隙试验分析

郭鸿^{1,2}, 马帅帅¹, 王普¹, 曹龙¹, 陈能远², 薛道耐¹, 胡囡楠¹

(1. 陕西理工大学 土木工程与建筑学院, 陕西 汉中 723000; 2. 信息产业部电子综合勘察研究院, 陕西 西安 710054)

摘要: 为了探究土工格栅对黄土干缩裂隙的抑制作用及其在黄土路基中的工程作用, 分别在不同蒸发温度、不同试样厚度试验条件下, 对有、无格栅的黄土试样表面裂隙发展演化特征进行定性描述和定量分析。结果表明: 土工格栅对水分蒸发过程中裂隙的抑制作用明显; 黄土干缩裂隙的发生和发展可分为3个阶段, 即形成阶段、加速阶段和稳定阶段; 黄土在干缩过程中裂隙数量与裂隙节点的比值 ϵ 反映了裂隙的贯通程度, 该值越小说明裂隙贯通程度越强。土工格栅对干缩裂隙的贯通抑制作用明显, 且可有效减缓裂隙发展速度, 扩散土体内部干缩应力, 这对于黄土地区的路基干缩裂隙治理提供了一种新的思路。

关键词: 黄土; 干缩裂隙; 土工格栅; 加固

中图分类号: TU411.3

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2020)04-0118-06

Analysis of loess dry shrinkage cracking restrained by geogrid

GUO Hong^{1,2}, MA Shuaishuai¹, WANG Pu¹, CAO Long¹,
CHEN Nengyuan², XUE Daonai¹, HU Jiannan¹

(1. School of Civil Engineering and Architecture, Shaanxi University of Technology, Hanzhong 723000, China;

2. China Electronic Research Institute of Engineering Investigations and Design, Xi'an 710054, China)

Abstract: In order to investigate the inhibitory effect of geogrid on the dry shrinkage cracking of loess and its engineering application to loess subgrade, the surface crack development of loess samples with and without geogrid under different evaporation temperatures and different sample thickness was qualitatively described and quantitatively analyzed. The results show that the geogrid has obvious inhibitory effect on the development of the cracks in the process of water evaporation. The occurrence and development of the dry shrinkage cracks of the loess samples can be divided into three stages, namely the formation stage, the acceleration stage and the stabilization stage. The ϵ defined in this paper is the ratio of the number of cracks to the number of crack nodes, it can reflect the penetration depth of the crack, the smaller the value, the deeper the penetration. Geogrid has obvious inhibitory effect on the penetration of dry shrinkage cracks, and can effectively slow the development speed of cracks and diffuse the internal shrinkage stress of the loess samples. This provides a new idea for treating the dry shrinkage of the subgrade in loess area.

Key words: loess; dry shrinkage crack; geogrid; reinforcement

1 研究背景

在广大的黄土区域内, 由于土体内部水分蒸发而引起的干缩裂隙^[1-3]十分常见。在黄土地区的堤坝、路基等工程中, 由于季节性降雨^[4]和干旱交替的气候特点, 黄土路基贯通裂隙现象已经成为公路路基病害之一。

引起土体干缩裂隙的原因一般是由于土颗粒之间的“吸引力”增大, 土颗粒出现“团聚”现象, 宏观上的表现则是颗粒被“撕裂”, 出现干缩裂隙。在农业领域, 土体的干缩裂隙直接影响农作物的生长、发育及产量^[5]; 在岩土工程领域, 土体的干缩裂隙对土工构筑物的安全造成了不可忽视的隐患。比如在降雨后, 如果出现连续干旱天气, 黄土持续失水会导

收稿日期: 2019-08-19; 修回日期: 2019-10-28

基金项目: 陕西省重点研发计划项目(2020SF-430, 2018ZDXM-SF-024); 陕西省教育厅专项科研项目(19JK0174); 陕西理工大学人才启动基金项目(SLGQD2017-03)

作者简介: 郭鸿(1984-), 男, 陕西长武人, 博士, 讲师, 主要研究方向为岩土工程、颗粒物质力学、离散元数值模拟。

致干缩裂隙不断扩展,而干旱过后的降水将会更容易渗入黄土构筑物深层,从而使得深层黄土的黏聚力和内摩擦角减小,这就为滑坡或不均匀沉降埋下了隐患。近年来由于土体干缩裂隙对工程严重的影响而受到学者们的广泛关注。Horgan 等^[6]定量描述了土体的干缩裂隙,并建立了可以模拟干缩裂隙发展演化过程的模型;Ringrose - Voase 等^[7]通过试验,解决了土体颗粒表面裂隙定量测量的问题;Vogel 等^[8]基于室内试验的方法揭示了黏性土干缩裂隙的内在机制和动力学特征,并建立了基于动力学的裂隙模型;Yoshida 等^[9]采用 Biot 固结理论,对农田饱和黏土的干缩裂隙进行了预测研究。

影响土体干缩裂隙的因素很多,如蒙脱石含量^[10]、颗粒特性^[11]、土体内部含水情况^[12]以及土水特征等^[13-15]。以往针对土体干缩裂隙的研究基本都集中在裂隙产生的力学机制、几何形态的定量描述以及裂隙模型等方面,对于裂隙的抑制方法尚未见文献报道。从土体裂隙产生的机理看,主要是因为黏土抗拉强度达到极限而导致局部颗粒被“撕裂”。土工格栅具有良好的力学特性,在工程上常常被用于增加土体的抗拉、抗剪强度,因此被广泛应用于土体加固工程中^[16-20]。鉴于此,本文从公路工程的背景出发,综合考虑环境温度、土层厚度和有无格栅等条件,分析出土工格栅、环境温度、土体厚度等对黄土干缩裂隙的影响规律,弥补土工格栅对黄土干缩裂隙影响方面的研究空缺,并对黄土地区路基的干缩裂隙防治提供相应的理论依据。

2 试验材料与试验方案

2.1 试验材料

试验采用的黄土为西安市某工程基坑深 5 m 处的 Q₃ 黄土,土样的物理性质指标见表 1,土样取回后经室内风干粉碎并过 2 mm 筛;本试验所用土工格栅为双向聚酯经编涤纶型,如图 1 所示,其力学指标见表 2。

2.2 试验方案

在试验方案的确定中,综合考虑土工格栅、试样厚度及温度对裂隙的影响。试样厚度共分 3 种,分别为 5、9、14 mm(用 H₁、H₂、H₃ 表示),试样的直径均为 15 cm,试验温度分别为 30、40、50℃(用 T₃、T₄、T₅ 表示)。试验中不加格栅用 N 表示,加格栅用 G 表示;厚度主要依靠控制分装质量来实现;温度依靠调节恒温烘干箱的温度来实现。通过对上述不同试样进行组合,可以得到这 18 个试样标签,如表 3 所示。



图 1 双向聚酯经编涤纶土工格栅

表 1 土样的物理性质指标

试样	比重	液限/%	塑限/%	按塑性 图分类	颗粒组成/%		
					>0.05 mm	0.05 ~ 0.005 mm	<0.005 mm
Q ₃ 黄土	2.7	31.8	19.3	中液限黏质土	14.2	65.6	20.2

表 2 土工格栅力学指标

网格尺寸/ (mm × mm)	横向肋宽/ mm	纵向肋宽/ mm	纵肋间距/ mm	横向抗拉强度/ (kN · m ⁻¹)	纵向抗拉强度/ (kN · m ⁻¹)
14 × 19	5	2	2	35	50

表 3 18 个试样标签

试验温度	H ₁ = 5 mm		H ₂ = 9 mm		H ₃ = 14 mm	
	N - 无格栅	G - 有格栅	N - 无格栅	G - 有格栅	N - 无格栅	G - 有格栅
T ₃ = 30℃	NH ₁ T ₃	GH ₁ T ₃	NH ₂ T ₃	GH ₂ T ₃	NH ₃ T ₃	GH ₃ T ₃
T ₄ = 40℃	NH ₁ T ₄	GH ₁ T ₄	NH ₂ T ₄	GH ₂ T ₄	NH ₃ T ₄	GH ₃ T ₄
T ₅ = 50℃	NH ₁ T ₅	GH ₁ T ₅	NH ₂ T ₅	GH ₂ T ₅	NH ₃ T ₅	GH ₃ T ₅

需要指出的是,本文试验采用恒温蒸发,且试验温度区间有限,而实际黄土构筑物工程的干缩问题,受风速、气候等因素影响,长时间恒温的可能性较小,且温度区间很可能会超出 $30\sim 50^{\circ}\text{C}$ 的区间。另外,由于试样尺寸有限,边界可能对土体干缩裂隙有一定影响,在本文中暂未考虑尺寸效应。尽管如此,本文试验方案对于研究蒸发温度对干缩裂隙的影响具有一定的理论指导意义。

试验时称取一定量的风干土置于搅拌容器中,后加入一定量的水,配置含水率为60%的泥浆。搅拌均匀后,按厚度对比分装质量将试样分装,将准备

好的格栅加入到标签为G的试样中,用泥浆将格栅埋没。整平所有试样并放在水平桌面静置1h,而后称取所有试样质量,将试样放入对应温度的烘干箱中,保证试样在对应温度下恒温失水。试验过程中每间隔2h要对试样进行图像采集和数据采集。

3 结果与分析

3.1 含水率及水分蒸发速率变化

根据采集到的数据,分别计算得到试验温度为 $30、40、50^{\circ}\text{C}$ 下所有试样的含水率和蒸发速率随时间变化曲线,如图2所示。

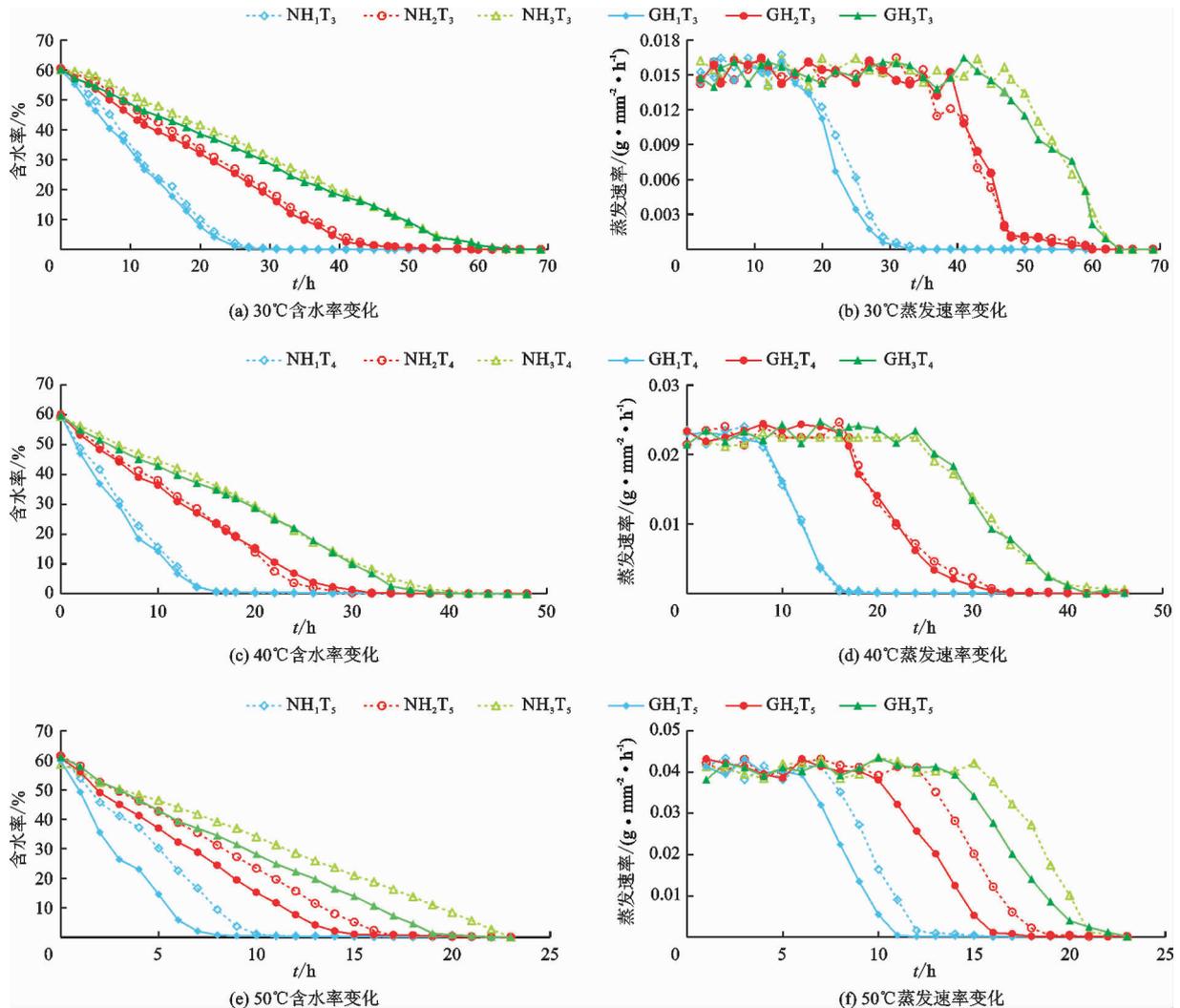


图2 不同试验温度下各试样含水率和蒸发速率随时间变化曲线

由图2(a)、2(c)、2(e)可知,所有试样含水率变化曲线都有相同的趋势,即在含水率大于2%时,含水率随时间呈线性变化;当含水率降小于2%时,曲线近似平行于时间轴。因此曲线会出现转折点,观察在此拐点所对应的图像,与其他图像相比较,发

现在此拐点后裂隙再无变化,说明此时裂隙的发展已经稳定。

对所有试样含水率曲线进行分析,得出含水率曲线转折点,分析达到该转折点需要的时长可知,试验温度在 $30、40^{\circ}\text{C}$ 时,有无格栅对裂隙稳定所需时

间没有影响;在 50℃ 时,有格栅试样裂隙稳定所需时间比无格栅试样裂隙稳定时间要短。说明在高温情况下,格栅缩短了黄土裂隙稳定的时间。

对比观察蒸发速率曲线可知,一定温度下,试样蒸发速率在某一时段内上下浮动,之后会迅速降低,如 30℃ 下的所有试样初始蒸发速率为 0.012 ~ 0.018 g/(mm²·h);40℃ 下试样初始蒸发速率为 0.02 ~ 0.025 g/(mm²·h);50℃ 下试样初始蒸发速率为 0.035 ~ 0.045 g/(mm²·h)。由此可知:在一定温度下,黄土中水的蒸发速率是一定的。同时观察 2(b)、2(d)、2(f) 可知,初始蒸发速率与土体厚度、和加筋与否均无关。但是从蒸发速率开始快速

衰减的时间来看,厚度越大,开始快速衰减前的耗时越长,且同等条件下,有格栅黄土的衰减耗时更长,尤其是在 50℃ 时比较明显。

3.2 干缩裂隙图像分析

裂隙的形成和发展是改变土体结构的主要因素,这是极其复杂的过程,不过其具有一定的规律性。认识和了解其规律对于研究裂隙的形成机理和土体中水分的迁移有极大的帮助^[3]。

3.2.1 土工格栅抑制干缩裂隙分析 以试验温度为 40℃ 时的情况为例,在试样含水率相同的条件下分析试样厚度及土工格栅对其裂隙形态的影响,如图 3 所示。

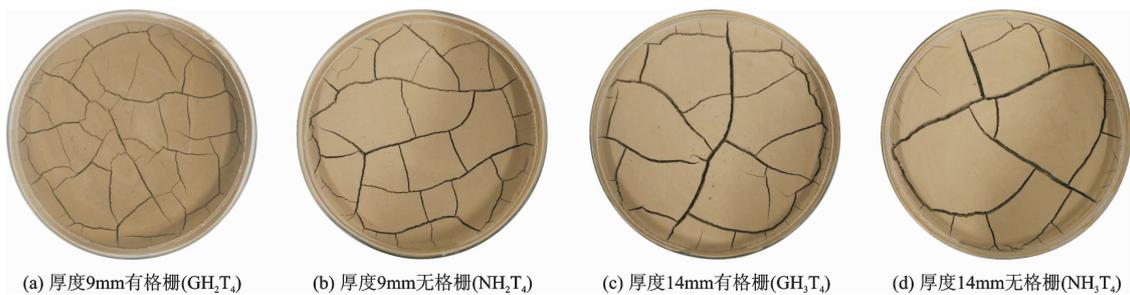


图3 含水率相同时试样不同厚度及土工格栅对其裂隙的影响对比(试验温度 40℃)

分析图 3 可以看出,在温度、厚度相同条件下,加格栅试样比不加格栅的试样出现裂隙多,且加格栅试样裂隙在试样表面分布比不加格栅试样要均匀。另外,加格栅试样裂隙比较细而窄,且在中心区域裂隙比较密集,但是大多并未形成贯通裂隙;试样越厚的土体裂隙会越少,但是其宽度越大。在实际工程中,长而宽的裂隙遇到强降水,水会从裂隙快速流入土内,容易造成滑坡、崩塌、泥石流等自然灾害,对于施工安全和工程质量是致命的。

试样的干缩裂隙最大宽度和最大深度反映了土工格栅的加固效果。以 40℃ 为例,测量了不同试样厚度情况下裂隙的最大宽度和深度,如图 4 所示。由于试样的厚度在 9 ~ 14 mm 之间,干缩稳定后裂隙均贯穿到了试样底部,因此,加固前后裂隙深度均一样。但是土工格栅对于最大裂隙宽度影响较大,当试样厚度分别为 5、9 和 14 mm 时,最大裂隙宽度分别减小了 20%、24% 和 34%。这就说明土工格栅对于抑制黄土干缩裂隙的作用明显,且随着试样厚度的增加效果更趋明显。

3.2.2 黄土试样裂隙发展 黄土试样从完全饱和到完全干燥的过程中,裂隙不断发展演变。以 30℃ 下厚度为 14 mm 不加格栅试样(NH₃T₃)的裂隙发展过程为例,如图 5 所示。

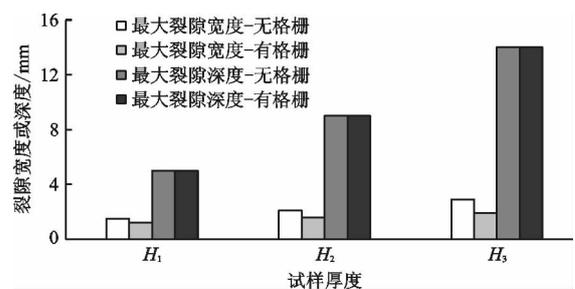


图4 不同试样厚度下土工格栅对试样最大裂隙宽度和深度的影响(试验温度 40℃)

观察图 5 中试样裂隙形态发现,试样在 37 h 的裂隙形状与 69 h 的裂隙形状大致相同,说明 37 h 以后没有其他新的裂隙产生。但是在 37 h 以前,裂隙的数量、宽度和深度在缓慢增加。对试样采集到的图像观察发现,所有试样都有以上规律。因此可将裂隙的发展分为 3 个阶段:

(1) 形成阶段,在此阶段内,试样的裂隙会迅速增加,但是大多数裂隙是比较窄的;

(2) 加速阶段,其表现为不再有新裂隙的产生,只是形成阶段产生的裂隙加宽加深;

(3) 稳定阶段,在此时间段内,试样含水率继续减小,但试样裂隙的数量、宽度、深度不再随时间的改变而改变。为探究土工格栅对裂隙发展的抑制作

用,将每一阶段起始时间以及试样此时的含水率进行分析(以40℃为例),如表4所示。

由表4可知,相同温度和厚度情况下,土工格栅对于裂隙发展起到一定的作用,具体表现为:试样厚度较小时,土工格栅加快了裂隙的形成;试样厚度较大时,土工格栅减小了裂隙的形成。这一结果给实

际工程带来重要启示,即在土工格栅加固黄土的施工过程中,“保护层”的厚度非常重要,必须达到一定的厚度才能有效抑制黄土干缩裂隙。需要指出的是,由于室内试验的局限性,目前尚无法给出工程具体的“保护层”厚度,需要用模型试验或现场试验予以解决。

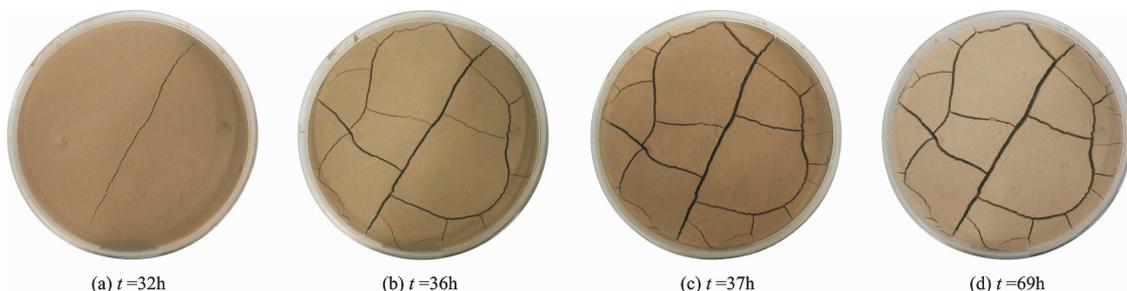


图5 NH_3T_3 试样不同时间裂隙形态

表4 不同试样开裂的3个阶段对应的时间(t)及含水率(w)

阶段	NH_1T_4		NH_2T_4		NH_3T_4		GH_1T_4		GH_2T_4		GH_3T_4	
	t/h	$w/\%$										
第1阶段	8	22.7	16	23.5	22	25.5	6	29.5	14	27.1	22	24.9
第2阶段	12	9.15	20	13.9	34	5.37	8	18.5	18	18.9	28	13.9
第3阶段	14	2.28	26	2.02	42	1.69	14	2.39	28	2.28	34	2.54

3.2.3 裂隙节点数和裂隙条数 土体干缩裂隙中,裂隙数和节点数都具有一定规律,对此分析黄土干缩裂隙稳定时的裂隙数和节点数。在此定义一个比值 ϵ ,表达式为:

$$\epsilon = \frac{N_{crack}}{N_{node}} \quad (1)$$

式中: N_{crack} 为试样的裂隙数; N_{node} 为试样的裂隙节点数。

ϵ 值可以表征干缩裂隙对土体“分割”程度,当比值较大时,说明土体被裂隙分隔块数较少,而且此时裂隙与裂隙间处于“近似平行”状态(即裂隙节点少);当比值较小时,说明土体被裂隙分隔块数较多,此时裂隙纵横交错现象越明显。根据试样干缩裂隙稳定后得到的裂隙情况,分析其 ϵ 值,如表5所示(以40℃为例)。

由表5可以看出,不论土样有无格栅,试样中裂隙数和节点数都随着试样厚度的增加而减少。结合实际图像可知,虽然裂隙数和裂隙节点数减小,但是无格栅时裂隙宽度有所增大。另外,由 ϵ 值的分析可知:对于无格栅土样来说,其随着试样厚度的增加而增大,而对于有格栅土样来说,其随着试样厚度的

增加而减小。这种有趣的现象说明,土工格栅能够有效地抑制干缩贯通裂隙的发展,且随着试样厚度的增加,抑制效果越加明显。这和上一小节分析的结果是一致的。

表5 各试样裂隙数、裂隙节点数及其比值(试验温度40℃)

试样编号	裂隙数	裂隙节点数	比值 ϵ
GH_1T_4	167	141	1.18
GH_2T_4	58	52	1.12
GH_3T_4	35	34	1.02
NH_1T_4	252	202	1.25
NH_2T_4	107	82	1.30
NH_3T_4	51	38	1.35

4 结论

本文通过黄土的干缩裂隙试验,对不同蒸发温度和试样厚度下有、无土工格栅黄土试样的干缩裂隙进行了分析,主要得到了以下结论:

(1) 格栅作用对黄土的初始蒸发速率几乎没有影响,但是使得蒸发速率衰减时间提前,尤其在50℃时比较明显,说明土工格栅在温度较高时促使

了土体内部水分的运移。

(2)在温度、厚度相同条件下,有格栅黄土的裂隙数目较多,较均匀,宽度较小,说明土工格栅使得黄土内部在干缩时受力更均匀。

(3)裂隙的产生分为3个阶段:一是形成阶段,在此阶段内,试样的裂隙开始形成;二是加速阶段,随着含水率的降低,新的裂隙迅速发展;三是稳定阶段,蒸发速率极小,干缩裂隙几乎不再改变。

(4)通过裂隙数和裂隙节点数的比值 ϵ 发现,有格栅黄土的 ϵ 值总体上比无格栅的小,且随着试样厚度的增大而减小,说明土工格栅能够有效扩散黄土干缩应力。另外,也说明了在实际施工过程中,土工格栅的埋置需要一定的“保护层”厚度来发挥其最佳加筋效果。

参考文献:

- [1] 曹玲,王志俭. 土体表面干缩裂隙的形态参数定量分析方法[J]. 长江科学院院报, 2014, 31(4): 63-67+76.
- [2] 孙强,龚绪龙,张玉良,等. 黏土失水干缩裂缝发育动态试验研究[J]. 水文地质工程地质, 2014, 41(5): 144-147.
- [3] 曾浩,唐朝生,林鑫,等. 土体干缩裂隙发育方向及演化特征的层间摩擦效应研究[J]. 岩土工程学报, 2019, 41(6): 1172-1180.
- [4] 张萌,申同庆,马荣,等. 作物根系影响下的农田干缩裂隙网络多重分形分析[J]. 灌溉排水学报, 2019, 38(8): 45-52.
- [5] 郭鸿,高斌,李军,等. 降水条件下土堤稳定性分析[J]. 人民黄河, 2016, 38(2): 45-47.
- [6] HORGAN G W, YOUNG I M. An empirical stochastic model for the geometry of two-dimensional crack growth in soil (with discussion)[J]. Geoderma, 2000, 96(4): 263-276.
- [7] RINGROSE - VOASE A J, SANIDAD W B. A method for measuring the development of surface cracks in soils: Application to crack development after lowland rice [J]. Geofisica Internacional, 1996, 71(3): 245-261.
- [8] VOGEL H J, HOFFMANN H, LEOPOLD A, et al. Studies of crack dynamics in clay soil: II. A physically based model for crack formation[J]. Geoderma, 2005, 125(3): 213-223.
- [9] YOSHIDA S, ADACHI K. Numerical analysis of crack generation in saturated deformable soil under row-planted vegetation[J]. Geoderma, 2004, 120(1): 63-74.
- [10] 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+92.
- [11] 李正辉,王世梅,金来福. 粗颗粒对黏性土干缩开裂影响的试验研究[J]. 长江科学院院报, 2019, 36(6): 99-105.
- [12] 刘梦茹,程大伟,卢玉东. 考虑蒸发锋面的包气带一维液相运动方程解析解[J]. 水资源与水工程学报, 2019, 30(1): 40-45.
- [13] 郭鸿,陈茜,陈栋梁,等. 原状黄土土水特征曲线拟合方法研究[J]. 人民长江, 2016, 47(19): 92-95.
- [14] 郭鸿,李军,王鹏程,等. 原状黄土土水特征曲线预测方法研究[J]. 中国科技论文, 2018, 13(1): 37-40.
- [15] 张玉伟,宋战平,翁效林. Q_3 原状黄土与重塑黄土的土水特性研究[J]. 水资源与水工程学报, 2019, 30(3): 224-229.
- [16] 孙润生. 土工格栅在拓宽公路中加固效果及其应用技术研究[D]. 济南:山东大学, 2018.
- [17] 朱逢斌,缪林昌,王月香. 土工格栅加筋路堤的非线性数值分析[J]. 公路交通科技, 2013, 30(2): 19-25.
- [18] 米慧杰,王玉鹏,罗烈日. 土工格栅加筋高陡坡路堤稳定性及其影响因素分析[J]. 中外公路, 2014, 34(1): 44-48.
- [19] 马林,张蕾,刘力源. 离石加筋黄土的力学特性及加筋效果研究[J]. 华北水利水电大学学报(自然科学版), 2019, 40(4): 77-82.
- [20] 孙中明,璩继立. 棕榈加筋土抗剪强度的影响因素分析[J]. 水资源与水工程学报, 2016, 27(5): 203-207.