

DOI: 10.11779/CJGE2023S10003

玄武岩纤维对黏土干缩开裂特征的影响

王 峰, 原俊红*, 吴图那胜

(内蒙古大学交通学院, 内蒙古 呼和浩特 010070)

摘要: 黏土的膨胀收缩会导致裂缝的产生, 裂缝的产生会显著改变其水理-力学性能, 常引起各类工程地质问题。为了研究玄武岩纤维对黏土抗裂性的改善作用, 进行了室内试验, 对取自呼和浩特市郊区某建筑工地黏土, 共设计 5 组试样以定量分析纤维掺量对黏土开裂的影响, 并采用数字图像处理技术进行了分析, 并结果表明: 土体试样的开裂可分为三个阶段, 分别为裂隙产生阶段、裂隙网格形成阶段、裂隙宽度扩展阶段; 在掺入纤维的土体试样中, 其裂隙之间的正交性会发生改变, 并会产生更多的死端裂隙; 玄武岩纤维抑制了土体的开裂, 降低了裂隙宽度、裂隙比, 随着纤维含量的增加, 土体试样首次开裂所对应的含水率减小。

关键词: 玄武岩纤维; 含水率; 黏土; 裂隙比; 裂隙宽度

中图分类号: TU442 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2023)S1-0128-04

作者简介: 王 峰(1997—), 男, 硕士研究生, 主要从事岩土工程有关的研究。E-mail: 2746580884@qq.com。

Influences of basalt fibers on characteristics of shrinkage cracking of clay

WANG Feng, YUAN Junhong, WU Tunasheng

(Transportation Institute, Inner Mongolia University, Hohhot 010070, China)

Abstract: The expansion and contraction of clay can lead to the formation of cracks, which can significantly alter its hydraulic and mechanical properties and often cause various engineering geological problems. In this study, the indoor experiments are conducted to investigate the improvement effects of basalt fibers on the cracking resistance of clay. A total of 5 sets of samples are designed to quantitatively analyze the effects of fiber content on clay cracking. The soil is taken from a construction site in the suburbs of Hohhot and analyzed using the digital image processing technology. The final results show that the cracking of the soil samples can be divided into three stages: crack generation stage, crack grid formation stage, and crack width expansion stage. In the soil samples mixed with fibers, the orthogonality between the cracks will change, and more dead end cracks will be generated. Through the researches, it is found that the basalt fibers inhibit the cracking of soil, reducing the width and ratio of cracks. With the increase of the fiber content, the moisture content corresponding to the first cracking of the soil samples decreases.

Key words: basalt fiber; moisture content; clay; crack ratio; crack width

0 引言

黏土可以用作填埋场衬里系统中的不透水屏障材料, 以及垃圾填埋场衬垫和覆盖物等围护系统^[1-2]。然而, 当黏土开裂到一定程度后, 很可能会导致填埋场衬里系统的防渗屏障受损^[3], 从而产生渗液, 可能会污染土壤及地下水。因此, 对抑制黏土开裂的研究具有现实意义。

有研究人员发现, 在土体中加入天然或合成纤维会增加其承载力和抗剪强度。Tang 等人发现当纤维含量从 0% 增加到 0.2% 时, 抗拉强度能够增加 65.7%^[4]。纤维增强有助于防止裂隙的形成, 并降低材料的膨胀势、液化势、导热性和脆性行为^[5]。一般的加筋纤维有废轮胎纺织纤维^[6]、聚丙烯纤维、天然椰壳纤维、玄武岩纤维等^[7-10]。并且当纤维夹杂物较多时, 土体和纤维之间的接触更紧密, 土体渗透性会降低^[11-12]。

纤维还能够有效防止纵向和横向裂纹的发展, 减小裂纹的宽度、深度^[13]。

然而现有的研究中, 对于纤维改良黏土作为黏土屏障的应用却很少受到关注。此外, 一般的加筋材料, 如聚丙纤维等材料密度远远低于土体密度, 在实际加筋过程中很容易造成搅拌不匀等现象, 而应用玄武岩纤维则能够很好地解决这一问题。因此在本研究中, 对不同纤维含量的黏土进行了室内试验, 以研究加入玄武岩纤维对黏土开裂的影响。

1 试验材料及方法

1.1 玄武岩纤维

基金项目: 内蒙古自然科学基金项目 (2021MS04023)

收稿日期: 2023-07-05

*通信作者(E-mail: yjh@imu.edu.cn)

表 1 土的基本物理参数
Table 1 Basic physical parameters of soil

土体类型	G_s	塑限 w_p /%	液限 w_L /%	塑性指数 I_p	颗粒成分/%		
					砂粒	粉粒	黏粒
黏土	2.71	25.3	53.7	28.4	48.19	26.35	25.46

玄武岩纤维主要由 SiO_2 、 Al_2O_3 、 FeO 、 Fe_2O_3 组成, 从化学成分来看, 与玻璃纤维相似, 玄武岩纤维具有较高的抗拉强度。化学性质方面, 玄武岩纤维具有良好的耐酸、耐碱性, 能够适用于各种环境。因此, 与聚丙烯、聚酯纤维相比, 玄武岩纤维在耐碱性方面拥有抵抗各种恶劣环境的优势。本次试验采用的玄武岩纤维呈薄片状, 长度为 5 mm。

1.2 试验用土

试验所用土样取自呼和浩特市近郊, 取土深度 1.8 m, 土的各项物理参数见表 1。

1.3 试样制备及试验过程

在试样制备中, 采用不同的纤维含量(纤维质量与纤维、干土质量和之比分别为 0%, 0.6%, 1%, 2%, 4%), 用 TN0~TN4 表示。制备干黏土和纤维的混合物, 加水配置成泥浆状, 样品初始含水率均为 60%, 并均匀搅拌约 10 min 使土体和纤维充分混合均匀, 将制备泥浆倒入容器(25 cm×25 cm×4 cm)中, 在工作平台上轻轻敲击装有泥浆的容器, 以去除气泡。试验中的玻璃容器内表面没有任何划痕, 以提供均匀干燥的表面。用塑料薄膜覆盖制备的样品, 并将其静置 24 h。

试验在恒温 23℃ 和 48% 的相对湿度下进行, 在固定时间, 用电子秤测重, 以获得水分损失, 并同步用固定的相机拍摄样品图像。

1.4 图像处理

数字图像处理技术已成为研究土体开裂和测量裂隙表面特征的常用手段。首先要进行图像采集, 之后对图像进行处理, 为减小边界效应, 选取图片中部 20 cm×20 cm 区域进行研究。

数码相机拍摄的照片为真彩图像, 包含着大量的色彩信息, 色彩信息对裂隙图像的计算会造成影响, 故需要将图像进行二值化处理。最后经过识别提取裂隙信息便可以获得需要的数据, 具体处理过程如图 1 所示。

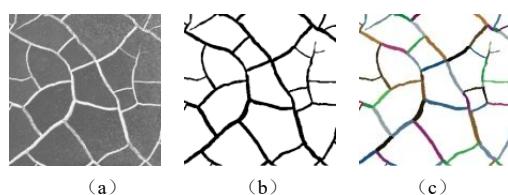


图 1 图像处理过程

Fig. 1 Image processing process

2 试验结果与分析

2.1 试样蒸发过程

试验中, 随着水分的蒸发, 不同纤维含量的试样表面裂隙发育呈现不同特点, 图 2 为各组试样含水率随时间的变化图, 从图中可知含水率变化大致可分为三个阶段, 第一阶段在 0 到 60 h 之间呈现线性下降趋势。第二阶段在 60 到 90 h 之间, 当纤维掺量小于 2% 时, 刚开始会呈现急速下降的趋势随后便会趋于平缓, 但当纤维含量大于等于 2% 时, 刚开始会缓慢下降随后便会呈现急速下降的趋势, 与纤维掺量小于 2% 的变化趋势恰好相反。第三阶段在 90 到 120 h 之间时, 试样中含水率变化趋于平缓。

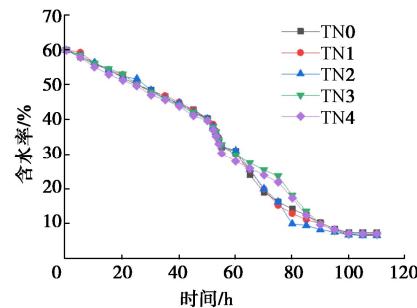
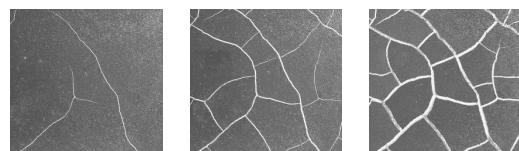


图 2 含水率随时间变化图

Fig. 2 Variation of moisture content over time

2.2 裂隙动态发育过程

通常, 内部产生的裂缝倾向于从其两端扩展, 直到与另一个裂缝相交, 由于应力释放垂直于现有裂缝, 所以会在主裂缝的边缘产生新的裂缝并继续扩展, 直到其与另一条现有裂缝以大致直角相交。在没有加入纤维的黏土试样中, 两个裂缝之间的交角几乎是正交的, 各裂隙相互贯通, 无死端裂隙, 如图 3 (a) 所示。而加入纤维的土体试样中, 裂缝的正交性发生了变化。纤维的存在改变了通过土体厚度产生的拉应力的内在传播和释放, 如图 3 (b) 所示, 裂隙角度小于或大于 90° 的非正交裂缝组成的不规则裂隙网络, 且有了较多的死端裂隙, 并随纤维含量的增加, 该趋势愈发显著。充分表明, 纤维的存在影响了裂缝的自由发育。



(a) 未掺纤维 TN0

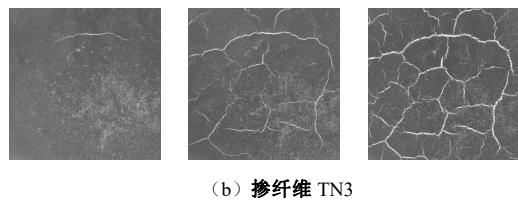


图 3 裂隙发育过程

Fig. 3 Crack development process

2.3 试样裂隙参数变化规律

(1) 裂隙宽度

通过多次测量裂缝边界点到另一边的最短距离的平均值来确定裂缝宽度。图 4 中记录了平均裂缝宽度随时间的变化。

从图 4 可以看出, 由于纤维的“桥梁”作用, 纤维改良土体试样的裂缝宽度小于未加纤维试样, 并随着纤维含量的增加, 裂缝宽度逐渐变小, 当纤维含量超过 1%, 纤维的抑制效果逐渐减弱。因此, 纤维可以提高黏土试样的整体刚度。裂缝宽度的减小和裂缝层刚度的提高是改进屏障系统性能的外在表现。

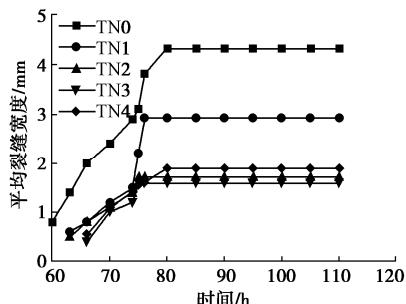


图 4 平均裂缝宽度随时间变化图

Fig. 4 Variation of average crack width over time

(2) 裂隙比

裂隙比定义为裂缝总面积与土体表面积之比, 如式 (1) 所示。

$$\xi = \frac{S_{ci}}{S_0} \times 100\% \quad , \quad (1)$$

式中: ξ 为裂隙比 (%), S_0 为土体表面积, S_{ci} 为裂缝面积。不同纤维含量的试样裂隙比随含水率的变化如图 5 所示。从图 5 可以看出, 随着玄武岩纤维含量的增加, 裂隙比有明显的减小趋势, 当纤维掺量为零时裂隙比为 14.67%, 而当纤维掺量为 2% 时, 裂隙比仅为 6.04%。纤维改良试样中较细、较短和不规则的裂缝使裂隙比降低, 从而提高土体试样的完整性。

3 分析与讨论

黏土屏障的性能主要取决于其完整性。在试验中, 由于黏性土的干缩开裂, 完整性受到严重影响。在未加纤维的试样中, 形成分离的块状区域 (图 6 (a)), 区域完全分离, 可以移动, 破坏了黏土层完整性, 改

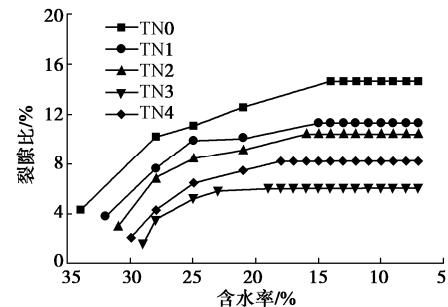


图 5 裂隙比-含水率变化图

Fig. 5 Variation of crack ratio-moisture content

变了黏土的性能。但在加入纤维的改良试样中, 即使在试验结束时形成贯通裂缝, 各块状区域之间也依然有纤维连接 (图 6 (b)), 试样仍能承受张拉应力。

在试验的开始阶段, 土颗粒之间的孔隙全部由水分填充, 纤维则随机分布于土体中, 如图 7 (a)。随着水分不断蒸发, 土颗粒之间水分减少, 由于受到重力作用, 土颗粒重新分布, 原本由水分所占据的空间逐步被土颗粒取代, 宏观上表现为土体收缩变形。试样变形以竖向沉降为主, 沉降值 ΔY_1 , 如图 7 (b) 所示。当试样逐步由饱和状态转变为非饱和状态时, 由于水分减少和基底吸力增加, 土体和纤维之间的有效接触面积和法向应力随着土体干燥而增加, 这种变化增加了抗拉强度, 并有助于纤维抑制土体分离。随着水分的进一步蒸发, 当土体局部的张拉应力大于等于抗拉强度时, 裂隙便会产生, 此时土体沉降量为 ΔY_2 (图 7 (c))。当裂隙出现后, 由于裂隙尖端应力集中状态, 裂隙不断变深变宽, 纤维“桥接作用”会不断增加, 阻碍裂隙发育。当土体内应变彻底释放后, 土体裂隙发育完成, 到达了稳定阶段, 此时土体沉降量为 ΔY_3 (图 7 (d))^[14]。

玄武岩纤维通过与土颗粒充分接触, 减小孔隙, 加强土颗粒之间的摩擦力, 有效限制土颗粒移动, 促进土颗粒团聚, 优化了土体受力时的强度和变形性能。

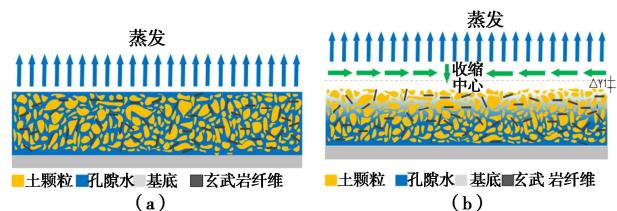


(a) TN0 裂缝

(b) TN2 裂缝

图 6 纤维桥接作用 (放大图)

Fig. 6 Bridging effects of fibers (enlarged image)



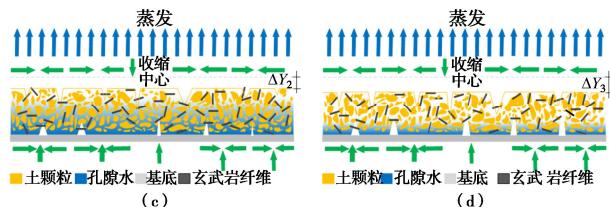


图 7 龟裂演化机制

Fig. 7 Evolution mechanism of cracking

4 结 论

通过玄武岩纤维对黏土裂隙发育的影响研究, 主要得到以下结论:

(1) 纤维可以减小裂缝宽度, 由于渗透系数与裂缝宽度成正相关, 从而有效减小土体渗透系数。

(2) 由于纤维的桥接作用, 黏土的开裂模式发生了显著变化。加入纤维的土体抑制了裂缝宽度、裂缝面积和裂缝的扩展, 并降低了裂缝网格的连通性。土体的整体强度和刚度不会显著降低。

(3) 加入纤维的土体, 裂隙出现有一定滞后性, 且纤维掺量越高, 滞后现象越显著。

参考文献:

- [1] JAVADI S, GHAVAMI M, ZHAO Q, et al. Advection and retardation of non-polar contaminants in compacted clay barrier material with organoclay amendment[J]. *Applied Clay Science*, 2017, **142**: 30-39.
- [2] DEMDOUM A, GUEDDOUDA M K, GOUAL I, et al. Effect of landfill leachate on the hydromechanical behavior of bentonite-geomaterials mixture[J]. *Construction and Building Materials*, 2020, **234**: 117356.
- [3] SAFARI E, JALILI GHAZIZADE M, ABDULI M A, et al. Variation of crack intensity factor in three compacted clay liners exposed to annual cycle of atmospheric conditions with and without geotextile cover[J]. *Waste Management*, 2014, **34**(8): 1408-1415.
- [4] LI J, TANG C S, WANG D Y, et al. Effect of discrete fibre reinforcement on soil tensile strength[J]. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 2014, **6**(2): 133-137.
- [5] HEJAZI S M, SHEIKHZADEH M, ABTAHI S M, et al. A simple review of soil reinforcement by using natural and synthetic fibers[J]. *Construction and Building Materials*, 2012, **30**: 100-116.
- [6] NARANI S S, ABBASPOUR M, MIR MOHAMMAD HOSSEINI S M, et al. Sustainable reuse of Waste Tire Textile Fibers (WTTFs) as reinforcement materials for expansive soils: with a special focus on landfill liners/covers[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020, **247**: 119151.
- [7] TANG C S, SHI B, GAO W, et al. Strength and mechanical behavior of short polypropylene fiber reinforced and cement stabilized clayey soil[J]. *Geotextiles and Geomembranes*, 2007, **25**(3): 194-202.
- [8] SHAH V, WANARE R, R IYER K K, et al. Evaluation of the role of fibres and admixture(s) on sustainable crack reduction in expansive soil[J]. *Materials Today: Proceedings*, 2023.
- [9] OWINO A O, HOSSAIN Z. The influence of basalt fiber filament length on shear strength development of chemically stabilized soils for ground improvement[J]. *Construction and Building Materials*, 2023, **374**: 130930.
- [10] NDEPETE C P, SERT S, BEYCIOĞLU A, et al. Exploring the effect of basalt fibers on maximum deviator stress and failure deformation of silty soils using ANN, SVM and FL supported by experimental data[J]. *Advances in Engineering Software*, 2022, **172**: 103211.
- [11] PARASTAR F, HEJAZI S M, SHEIKHZADEH M, et al. A parametric study on hydraulic conductivity and self-healing properties of geotextile clay liners used in landfills[J]. *Journal of Environmental Management*, 2017, **202**: 29-37.
- [12] PAUL S, SARKAR D. Performance evaluation of natural fiber reinforced Laterite soil for road pavement construction[J]. *Materials Today: Proceedings*, 2022, **62**: 1246-1251.
- [13] BU F, LIU J, MEI H, et al. Cracking behavior of sisal fiber-reinforced clayey soil under wetting-drying cycles[J]. *Soil and Tillage Research*, 2023, **227**: 105596.
- [14] 丁选明, 方华强, 刘汉龙, 等. 纤维改性珊瑚泥裂隙动态演化规律试验研究[J]. *岩土工程学报*, 2023, **45**(9): 1801-1812. (DING Xuanming, FANG Huaqiang, LIU Hanlong, et al. Dynamic evolution laws of desiccation cracking of fiber-improved coral silt[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2023, **45**(9): 1801-1812. (in Chinese))

(编校: 明经平)