玄武岩纤维改良弱膨胀土的强度及裂隙特性

宋琨[1*]，刘跃[1]，阮迪[1]，黄维[2]，袁晶晶[2]，艾东[2]

1. 三峡大学防灾减灾湖北省重点实验室，湖北 宜昌 443002；
2. 湖北省地质局第七地质大队，湖北 宜昌 443100

* 通信作者，E-mail：songkun_ctgu@163.com

2024-04-07 收稿；2024-07-30 修回；2024-09-20 接受
基金项目：国家自然科学基金项目 (42077239)
中图分类号：TU443　　文章编号：2096-8523(2026)01-0110-11　　doi: 10.19509/j.cnki.dzkq.tb20240143

摘　要：膨胀土引发的工程地质问题成为了制约城市地质安全的关键。为了研究玄武岩纤维改良膨胀土的效果和机理，以湖北宜昌三峡机场弱膨胀土为研究对象，通过掺入质量分数为 0.2%，0.4% 和 0.6% 的玄武岩纤维改良土的三轴压缩试验和干湿循环试验，并结合数字图像处理技术，研究改良土的强度和干湿循环下的表面裂隙随纤维掺量的变化规律。结果表明：玄武岩纤维掺量对改良土的黏聚力影响明显，对内摩擦角影响不显著，玄武岩纤维掺量为 0.4% 时，改良土的黏聚力提高了 57.1%；不同玄武岩纤维掺量的改良系数均大于 1.0，掺量为 0.4% 时改良效果最佳；首次干湿循环后，改良土和素膨胀土没有出现裂隙，后续循环期次玄武岩纤维改良土裂隙面积率和分形维数均比原土小，裂隙面积率的最大差值由 2.41% 增至 4.54%，分形维数的最大差值由 0.058 降至 0.037，掺量为 0.4% 时，玄武岩纤维抑制土的裂隙效果最好。“嵌固”在土体中的纤维使裂隙尖端的应力集中程度降低，从而限制了裂隙的发展。研究结果可为区域性玄武岩纤维改良弱膨胀土的工程应用提供参考。

关键词：弱膨胀土；玄武岩纤维改良；三轴压缩；干湿循环；裂隙抑制机理；数字图像处理技术；表面裂隙

膨胀土是一种对水敏感的特殊岩土，由于其富含亲水性矿物，具有强烈的亲水性、超固结性、反复胀缩性、浅层破坏性和多裂隙性等不良工程特性[1-2]，其对工程造成的影响巨大。膨胀土的反复“吸水膨胀和失水收缩”特性会产生大量的裂隙，使得土体结构破坏，从而威胁工程安全。目前，化学、生物和物理法是常用的改良土方法。化学改良易对局部环境产生危害[3]，生物改良起作用时间相对较长且难以控制改良效果，物理改良则对环境污染小且成本较低，如掺入纤维[4]。由于纤维具有良好的相容性，通常被视为均质各向同性材料，因此，部分学者[5-7]开始对不同纤维改良土的力学性能进行了研究。NAMJOO 等[8]通过拉拔试验和直剪试验，研究了含水率对砂土-格栅界面剪切特性的演变规律，结果表明：随着含水率降低，筋土界面抗剪强度参数增加。宋飞等[9]提出了土工格室加筋正常固结黏土的应力应变响应计算模型，并进行了三轴固结排水剪切试验，结果显示，土工格室约束作用对黏土的内摩擦角影响较小，但黏聚力有所增加，随应变的增加或围压的减小，纤维加筋效果逐渐明显。

膨胀土的工程应用与外界条件密切相关，为此，部分学者针对干湿循环下的膨胀土裂隙发育问题已有一些研究成果。张家俊等[10]研究了膨胀土在干湿循环条件下的裂隙演化特性，结果表明裂隙的逐步发育会使裂隙的总长度与总面积逐步增加。马鸿发等[11]发现土体的干燥收缩过程可分为减速阶段和残余阶段，高干密度和高掺砂率试样会使土体失水、各向收缩应变和裂隙降低。干湿循环作用会破坏土体的整体性，使土体结构破坏，降低其强度，在膨胀土边坡中产生“裂隙优势流”[12-13]，使得土体裂隙进一

著录信息：宋琨，刘跃，阮迪，等. 玄武岩纤维改良弱膨胀土的强度及裂隙特性 [J]. 地质科技通报，2026，45(1)：110-120.
SONG Kun, LIU Yue, RUAN Di, et al. Strength and cracking behavior of weak expansive soil improved by basalt fiber[J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 2026, 45(1): 110-120.

© Editorial Office of Bulletin of Geological Science and Technology. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license.　https://dzkjtb.cug.edu.cn

步发育。QI 等[14]、ZHAO 等[15]、ZHOU 等[16]、HUANG 等[17] 的研究也表明了干湿循环对于膨胀土裂隙演化的影响不可忽视。

对于纤维加固膨胀土的研究，张丹等[18] 基于光纤布拉格光栅(fiber Bragg grating，简称 FBG)的光学传感技术，采用快剪试验和收缩试验研究了玄武岩纤维改良膨胀土的强度参数和收缩变形特征，研究表明随着纤维掺量的增加，膨胀土的抗剪强度提高，其收缩系数显著下降，膨胀土土体内部应变分布不均匀的状态得到改善。韩春鹏等[19]、郝建斌等[20] 通过无侧限抗压强度试验和干湿循环试验，研究了聚丙烯纤维与剑麻纤维加固膨胀土的力学特性和开裂特性，结果表明膨胀土中掺加纤维，能显著提高土体无侧限抗压强度，且掺入聚丙烯纤维质量分数为 0.7%，剑麻纤维质量分数为 0.4% 时，对土体加筋效果最为显著。朱锐等[21] 为探明冻融循环下改良膨胀土的工程特性及其作用机理，开展了木质素纤维改良膨胀土的系列室内试验，木质素纤维的掺入可有效改善冻融循环下膨胀土的体变、抗剪、抗压和抗拉强度特性，且当掺量(质量分数，下同)和长度分别为 2% 和 1 mm 时，纤维改良膨胀土冻融特性的作用效果最明显。苏玲霞等[22] 也对素膨胀土及加筋土展开了干湿循环试验，得出改良效果最优的纤维掺量为 0.3%。这些研究成果均说明掺入纤维能有效改善膨胀土的力学性能和抑制膨胀土裂隙的开展。

前人的研究较好揭示了纤维能有效提高膨胀土的工程特性，但对玄武岩纤维改良膨胀土的物理力学特性及其作用机理则相对研究较少。以湖北宜昌猇亭区的弱膨胀土为研究对象，开展室内固结不排水三轴压缩试验、干湿循环试验，采用数字图像处理技术——颗粒(孔隙)及裂隙图像识别与分析系统(particles (pores) and cracks analysis system，简称 PCAS)获取试样裂隙参数，探究玄武岩纤维对猇亭区三峡机场弱膨胀土的改良效果，研究玄武岩纤维改良弱膨胀土的物理力学特性及其作用机理，为区域性玄武岩纤维改良弱膨胀土的工程应用提供依据。

1　试样的制备及基本参数的测定

1.1　膨胀土

膨胀土试样取自湖北省宜昌市猇亭区三峡机场(图 1)。现场土体呈现出土黄色，天然状态下处于硬塑状态。

将取回的试样烘干、去除杂质、粉碎和过筛。如图 2 所示，试样粒径分布以 0.01 ~ 0.1 mm 为主，占比 68.42%，小于 0.01 mm 的粒径分布占比为 14.91%，大于 0.1 mm 的粒径分布占比为 16.67%。通过 X 射线衍射(X-ray diffraction，简称 XRD)试验分析其成

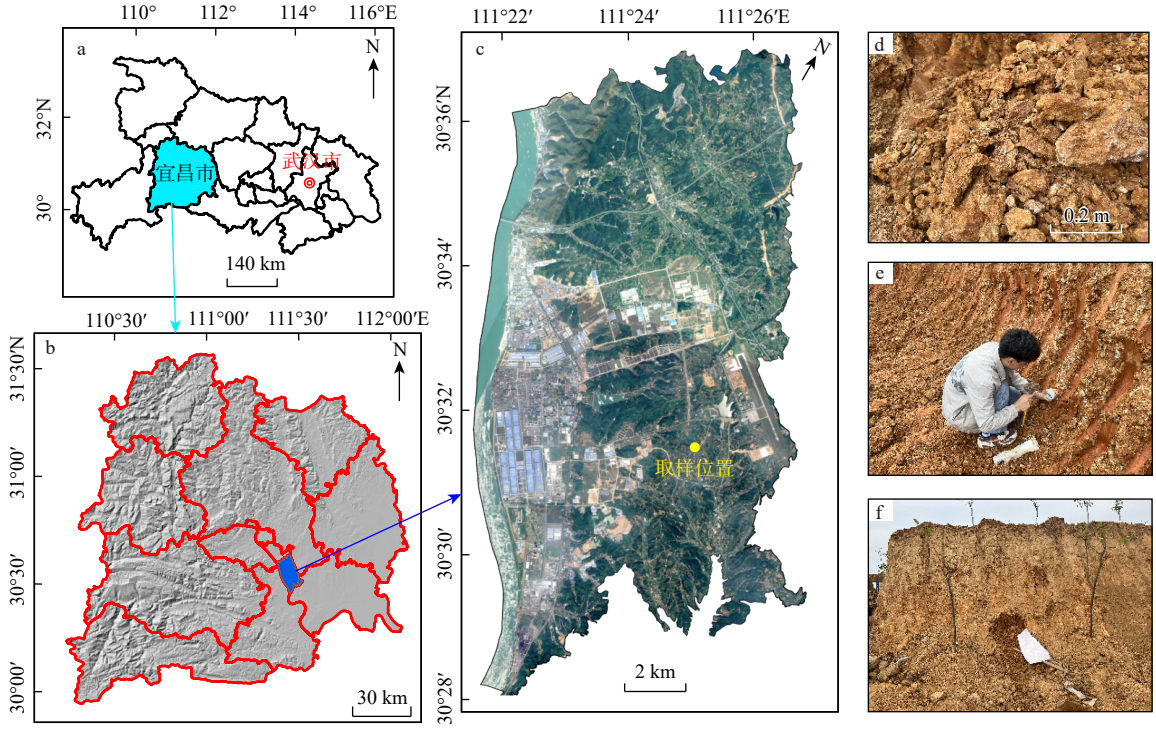


图 1　取样地理位置及周边环境

Fig. 1　Sampling location and surrounding environment

分构成, 成分构成约为 w(石英)为 59.1%, w(伊利石)为 15.8%, w(高岭石)为 10.4%, w(蒙脱石)为 6.8%。对选取的膨胀土基本物理性质按《土工试验方法标准》(GB/T 50123−2019)[23] 测定, 表 1 为膨胀土的基本物理指标, 由界限含水率试验知所用重塑试样为高液限黏土。本研究试验所用的弱膨胀土按照《膨胀土地区建筑技术规范》(GB 50112−2013)[24] 判别。

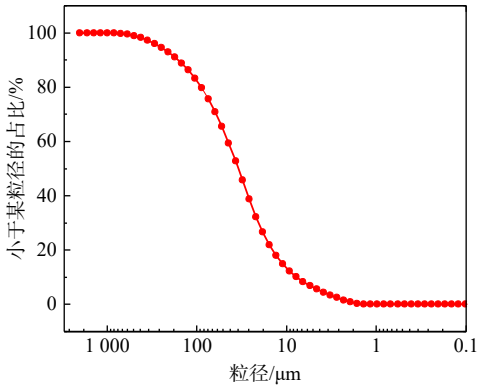


图 2　试验土颗粒级配曲线

Fig. 2　Grain size distribution curve of test soil

表 1　膨胀土基本物理指标

Table 1　Basic physical properties of expansive soil

液限 ω_L/%	塑限 ω_P/%	塑性指数 I_P	天然含水率 ω/%	天然湿密度/(g·cm^{-3})	最优含水率 ω/%	最大干密度/(g·cm^{-3})	自由膨胀率 F_S/%
55.01	16.18	38.83	20.94	2.02	18.25	1.73	48.00

1.2　玄武岩纤维

天然状态下的玄武岩纤维颜色通常为褐色, 具有较明显的金属光泽(图 3), 其制作过程中产生的废弃物少, 是一种无机环保高性能的纤维材料, 其本身可以在自然环境中降解, 与其它材料具有良好的相容性。本试验采用的玄武岩纤维由上海臣启化工科技有限公司生产, 长度为 12 mm, 玄武岩纤维的物理力学参数见表 2。

1.3　试样的制备

三轴试样制备过程严格根据《土工试验方法标准》(GB/T 50123−2019)[23] 进行。将干土质量占比为 0, 0.2%, 0.4%, 0.6%, 长为 12 mm 的玄武岩纤维掺入到过 2 mm 筛的试样中, 精确到 0.01 g。为使纤维在土中更好地拌合和分散, 在掺入之前先将纤维置于烘箱中烘干, 取出之后再研磨分散, 采取“先分散、后掺入、再少量拌合”的方法进行制备。依据配比, 按一定顺序把试验材料放入搅拌盆内, 按照最优含水率制样后, 用保鲜膜置于密封器皿中闷料养护 24 h。采用湿击实法制备尺寸为(直径×高)39.1 mm×80 mm 的试样, 在击实器内侧均匀涂上一薄层凡士林, 便于脱模, 击实 6 层, 每层击实约 15 次至同一高度, 每层之间需进行刮毛, 以确保试样各层间的对接良好。最后, 将配制好的试样置于密封器皿中备用。



图 3　12 mm 玄武岩纤维

Fig. 3　12 mm basalt fibers

表 2　玄武岩纤维物理力学参数

Table 2　Physical and mechanical parameters of basalt fiber

抗拉强度/MPa	弹性模量/GPa	纤维密度/(g·cm^{-3})	断裂伸长率/%	熔点/℃
2 000 ~ 2 200	85 ~ 90	2.699	2.8	1 450

干湿循环试样制备的过程为: 首先在试样中掺入与干土质量比为 0, 0.1%, 0.2%, 0.3%, 0.4%, 0.5% 和 0.6% 的玄武岩纤维, 然后向试样注孔加水, 同样按最优含水率制样, 闷料养护 24 h, 最后对试样进行重塑, 使用液压千斤顶按照最大干密度制备直径为 61.8 mm, 高 20 mm 的环刀样。

2　试验方案

2.1　三轴压缩试验

本试验采用南京土壤仪器厂有限公司生产的 TSZ-2 型全自动三轴仪。三轴试验前设置好仪器参数, 试样的固结、加载和数据采集可以在计算机控制下自动完成。为更贴合实际情况, 拟进行三轴固结不排水(CU)试验。三轴压缩试验模拟天然状态下降雨强度较大的情况, 此时土体处于饱和含水率状态[25]。按照《土工试验方法标准》(GB/T 50123−2019)[23] 的规范, 固结不排水试验的轴向应变速率设置为 0.08 mm/min, 依次取 100, 200 和 300 kPa 围压, 按照规范以峰值强度或 20% 轴向应变为破坏标准(表 3)。

2.2　干湿循环试验

为更加接近膨胀土边坡由于季节变化、降雨入渗和蒸发等情况, 试验采用烘干和真空罐饱和增湿的方式对试样进行干湿循环处理。把制备好的试样

表 3　三轴压缩试验方案

Table 3　Triaxial compression test scheme

试验方法	围压/kPa	纤维掺量/%	含水率/%	剪切速率/（mm·min^{-1}）
固结不排水（CU）	100，200，300	0	18.25	0.8
		0.2	18.25	0.8
		0.4	18.25	0.8
		0.6	18.25	0.8

分为 2 组，每组试样 6 个，其中一组为素膨胀土，另外一组为改良土，同时对 2 组试样进行干湿循环试验。对试样进行多组饱和含水率平行试验，得到饱和含水率约 24%，结合 2022 年 8 月宜昌旱情平均土壤含水率为 12.7%[26]，以 6% 为干湿循环幅度，控制饱和、烘干的含水率分别为 24% 和 12%。先将准备好的试样依次放入叠式饱和器中，再将叠式饱和器放入真空罐。采用真空泵抽出罐内空气，抽气时间控制约 2 h，使罐内达到真空后停止抽气，静置 24 h，测量试样含水率约 24%。将增湿好的试样放入干燥器恒温箱中，调节烘箱温度在 40℃，持续 24 h，取出试样，含水率控制约 12%。根据上述方法，共对试样反复进行 6 次干湿循环试验。采用支架固定，使用手机记录干燥后试样裂隙照片。

对采集的原始图像先用 Photoshop 软件进行裁剪得到长和宽像素相等的图像，采用数字图像处理技术中的 PCAS 对试样表面裂隙进行二值化和降噪处理[27]，得到裂隙二值化图像，最后对表面裂隙参数进行分析。本研究试验的技术路线见图 4。

3　实验结果及分析

3.1　改良土强度分析

图 5 为围压为 100，200 和 300 kPa 下的 CU 试验主应力差–轴向应变关系曲线。从图 5 中可以得到：①改良土的主应力差与轴向应变表现出高度一致性和同步性，即主应力差随着轴向应变的增加而逐渐增大。主应力差轴向在应变范围内没有出现明显的峰值点，说明试样强度在逐步提高，具有逐渐应变硬化的特性。②在同一轴向应变条件下，主应力差随着围压的增加而增大，即高围压下的主应力差值显著大于低围压下的主应力差值。这是因为围压增大会使试样的孔隙比减小，试样变得更加紧密。此时，

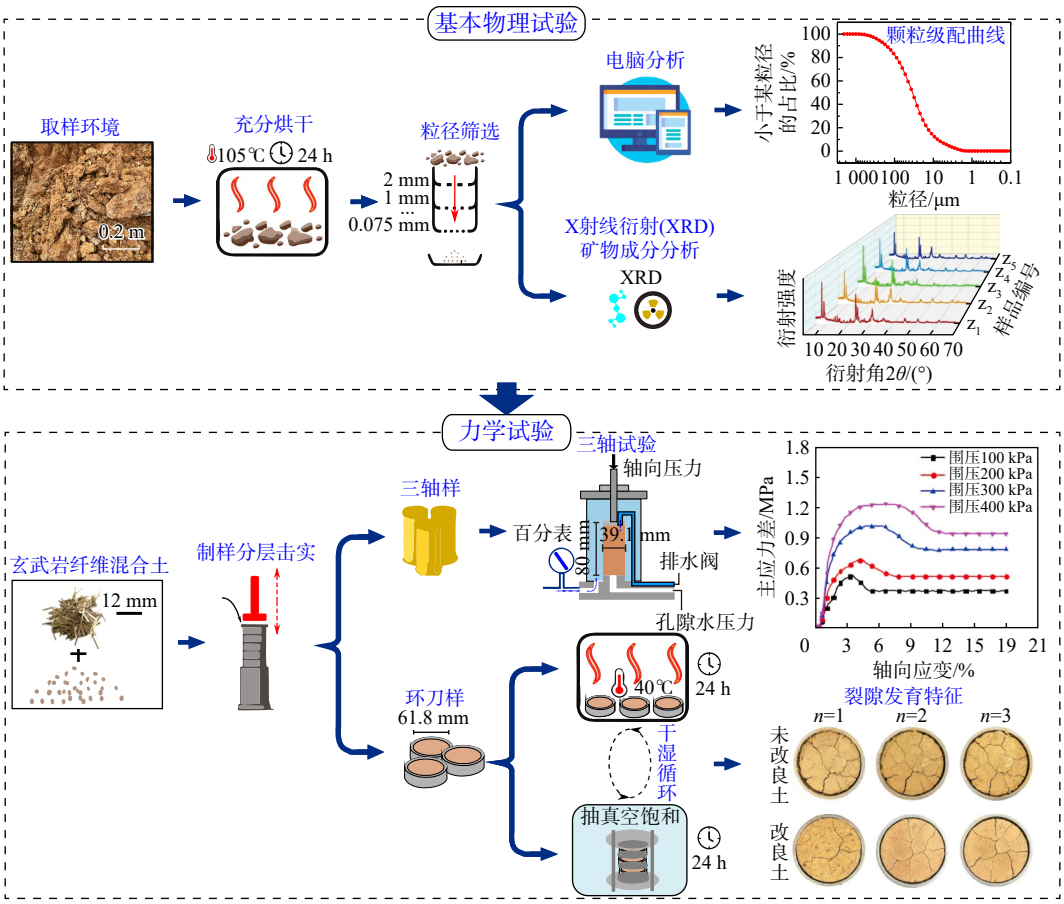


图 4　试验技术路线图（n 为干湿循环次数）

Fig. 4　Experimental workflow

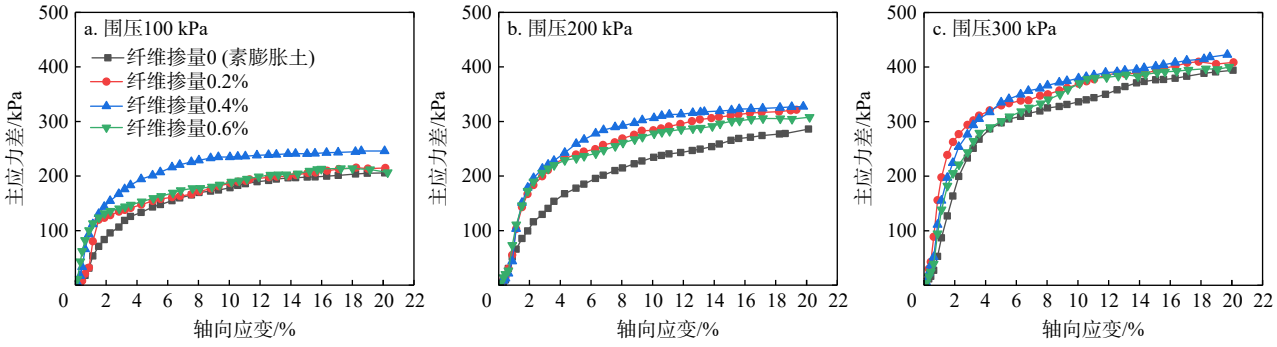


图 5　各围压下的主应力差–轴向应变曲线

Fig. 5　Major principal stress difference-axial strain curves under different confining pressures

纤维与土颗粒之间形成较强的摩擦咬合作用，使膨胀土的延性得到进一步提高。改良膨胀土的主应力差明显比素膨胀土的主应力差大，在纤维掺量为 0.4% 时，各围压下的主应力差达到最大值 245.9，327.3，422.8 kPa(表 4)，可以得出纤维掺量存在着一个最优值，纤维掺量为最优值时改良土强度达到最大。③从改良土的主应力差–轴向应变关系来看，在初始段，主应力差随轴向应变的增加而增长缓慢。这是因为孔隙度较大，轴向应变的增加导致各部分发生剪切错动，细小颗粒移向疏松孔隙处，试样逐渐被挤密。此阶段的抗剪强度主要依赖于各部分之间的摩擦作用。主应力差随着轴向应变的快速增加，试样变得非常紧实，纤维开始发挥明显的改良作用，改良土的抗剪强度由土颗粒之间的摩擦和纤维拉应力提供，且随着轴向应变的增加，纤维改良作用越明显。

表 4　各围压下不同纤维掺量改良土的最大主应力差

Table 4　Maximum major principal stress difference of improved soil with different fiber contents under different confining pressures

围压/kPa	纤维掺量0	纤维掺量0.2%	纤维掺量0.4%	纤维掺量0.6%
100	205.8	215.3	245.9	214.0
200	286.0	321.4	327.3	307.8
300	394.2	408.7	422.8	400.1

剪切阶段孔隙水压力–轴向应变关系曲线如图 6 所示，从整体上看，素膨胀土的孔隙水压力大于改良土的孔隙水压力，同时低围压下孔隙水压力增长缓慢，孔隙压缩度较低，但随着围压增大，孔隙很难被进一步压缩，高围压下进而会出现陡增现象。在剪切初始阶段，孔隙水压力随着轴向应变的持续增加而增大。这是因为试样孔隙水是不可压缩流体且难以排出，土样受到剪切作用导致体积减小(剪缩)，会提高孔隙水压力。随着剪切过程的进行，孔隙水压力曲线逐渐变缓并且有下降的趋势。原因是在剪切过程中，试样土颗粒的相对移动、重排，颗粒间的孔隙会逐渐贯通，孔隙水压力就会慢慢消散，此时试样表现为剪胀。

土的抗剪强度是指土体抵抗外荷载所产生的剪应力而导致土体破坏的极限能力，由黏性土的库伦公式，分别计算得到各掺量下试样的强度指标如表 5 所示。

根据表 5 可以得出，掺入玄武岩纤维后土体的黏聚力随着纤维掺量的增加先出现上升后下降。有效黏聚力相对素膨胀土分别提高了 22.6%，57.1% 和 20.6%。同时，土的内摩擦角的变化幅度较小，有效内摩擦角相对素膨胀土提高了 3.3%，−1.1% 和 −3.3%。前者出现这种现象的原因是在试样被剪切压密的过程中，适量的纤维与土颗粒之间产生的拉应力和摩擦咬合作用可以增大土体的抗剪强度，但随着纤维掺量的增大，纤维在土体中交叉和重叠的机率增大，易形成软弱面，降低了其抗剪强度。后者内摩擦角变化幅度小的原因是土颗粒之间的摩擦力和咬合力要大于土颗粒与纤维之间的摩擦和咬合作用，说明玄武岩纤维主要通过增加黏聚力来改善土体的抗剪性能。

由于试验所用的是饱和黏土试样，改良土的试样在试验完成后破坏形态均为鼓胀型破坏，是明显的塑性破坏，与文献 [28] 的试验结果一致。

3.2　改良土改良效果分析

对试样进行改良效果分析，玄武岩纤维均匀分布于土中，对土体的整体稳定性和抗拉强度产生了积极作用[29]。为方便评价改良效果，引入强度改良系数(R)[30-31]。

$$R=\frac{(\sigma_1-\sigma_3)_{\text{f-max}}}{(\sigma_1-\sigma_3)_{\text{s-max}}},\qquad(1)$$

式中：$(\sigma_1-\sigma_3)_{\text{f-max}}$ 为改良土破坏时的主应力差；$(\sigma_1-\sigma_3)_{\text{s-max}}$ 素膨胀土破坏时的主应力差。

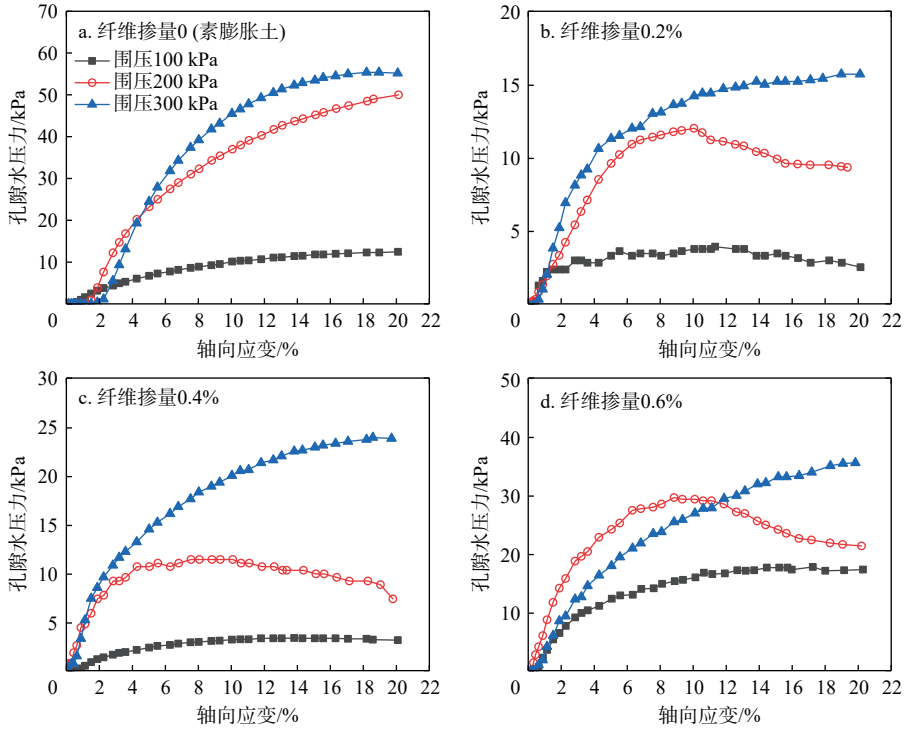


图 6　各纤维掺量下的孔隙水压力–轴向应变曲线

Fig. 6　Pore water pressure-axial strain curves under different fiber contents

表 5　玄武岩纤维改良土强度指标

Table 5　Strength indices of basalt fiber-improved soil

纤维掺量/%	C/kPa	φ/(°)	C'/kPa	φ'/(°)
0	36.4	18.7	35.0	18.0
0.2	44.4	19.0	42.9	18.6
0.4	56.5	17.9	55.0	17.8
0.6	43.2	18.5	42.2	17.4

注: C. 黏聚力; φ. 内摩擦角; C'. 有效黏聚力; φ'. 有效内摩擦角

表 6　强度改良系数

Table 6　Strength improvement coefficients

纤维掺量/%	围压/kPa		
	100	200	300
0	1	1	1
0.2	1.05	1.12	1.04
0.4	1.19	1.14	1.07
0.6	1.04	1.08	1.02

依次计算得出围压为 100, 200 和 300 kPa 时的强度改良系数(表 6)。由表 6 可知: 随着纤维掺量的增加, 改良土强度改良系数先出现增大后减小, 其原因与黏聚力分析的一致; 在各围压条件下, 改良土的强度改良系数均大于 1.0, 并且当改良土的纤维掺量为 0.4% 时, 强度改良系数最大, 围压 100, 200, 300 kPa 时强度改良系统分别为 1.19, 1.14 和 1.07, 改良效果最明显; 在玄武岩纤维掺量为 0.2%, 0.4% 和 0.6% 下进行改良, 均能不同程度提高试样的剪切强度。

3.3　改良土裂隙变化规律

为了直观得到改良土随干湿循环次数变化的裂隙发展规律, 在试验过程中, 选取纤维掺量为 0, 0.2%, 0.4%, 0.6% 的试样进行拍照记录, 并裁剪得到像素大小为 2 700×2 700 的原图像(图 7)。可以看出, 随着干湿循环次数的增加, 4 种纤维掺量的试样表面裂隙都在增大, 与素膨胀土相比, 改良土裂隙面积和裂隙复杂程度都小于素膨胀土。

对采集的图像进行二值化和降噪处理得到如图 8 所示。裂隙面积率是指试样表面裂隙面积占总面积的比率, 能较好反映出土体整体的开裂程度, 分形维数是指试样形状不规则程度的综合指标, 分形维数越大, 表明试样裂隙越多、裂隙形状越复杂[32], 可以用来反映试样表面的裂隙化程度。因此, 本研究用裂隙面积率和分形维数来反映改良膨胀土裂隙随干湿循环次数的变化规律。

在第 1 次干湿循环期间, 素膨胀土和改良土都没有出现裂隙。随着干湿次数的进行, 素膨胀土和改良土的裂隙面积率也在同步变大, 但到第 6 次干湿循环后素膨胀土和改良土的裂隙面积率变化不显著。与素膨胀土相比, 各次干湿循环条件下, 纤维改良土裂隙面积率和分形维数均比素膨胀土小, 第

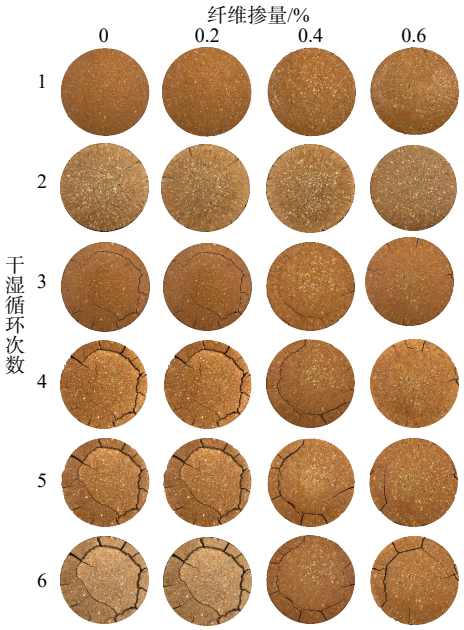


图 7　干湿循环过程中试样裂隙发育情况

Fig. 7　Development of cracks in samples during dry-wet cycles

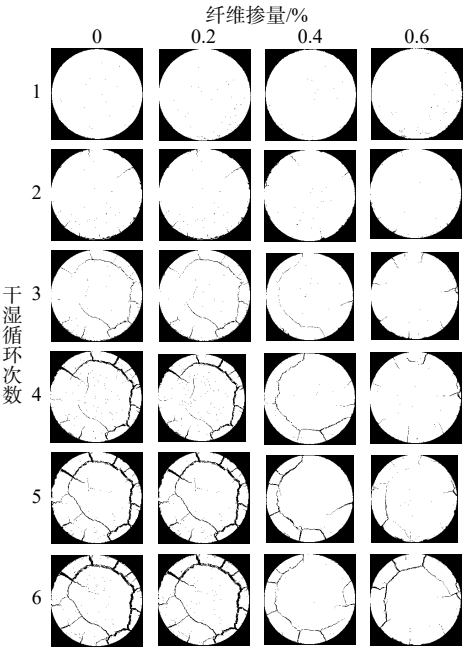


图 8　干湿循环过程中试样裂隙二值化图像

Fig. 8　Binarized images of cracks in samples during dry-wet cycles

2 ~ 6 次干湿循环裂隙面积率的最大差值分别为 2.41%, 3.36%, 3.76%, 4.54% 和 4.13%, 分形维数的最大差值分别为 0.058, 0.050, 0.044, 0.047 和 0.037(图 9)。分析可知, 在前几次的干湿循环中对膨胀土裂隙的影响较为明显, 即试样表面和内部有原始裂隙的扩展和新的细微裂隙的发育, 随着干湿次数的逐渐增多, 这些裂隙也在不断地扩张形成贯通裂隙,

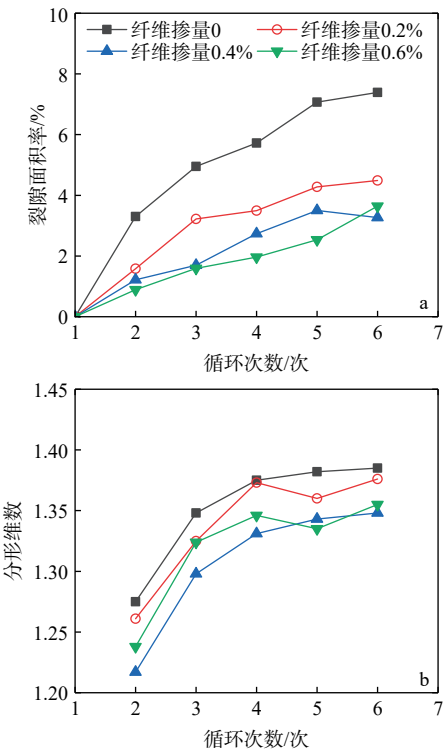


图 9　试样裂隙参数与循环次数的关系

Fig. 9　Relationship between crack parameters and number of cycle in samples

但随着水气界面的交换, 裂隙发育会变缓, 最终发育会停止。总体上看, 从第 1 次干湿循环开始, 后续每一次循环中的裂隙发展模式均呈现出对与上一轮模式的继承和发展。

随着纤维掺量增大, 膨胀土裂隙面积率先下降, 纤维掺量增大到 0.4% 后, 裂隙面积率曲线逐渐变平缓, 分形维数也是先逐渐下降, 纤维掺量增大到 0.4% 之后出现上升。纤维掺量为 0.4% 时, 第 2 ~ 6 次干湿循环相较于素膨胀土的裂隙面积率分别降低了 2.09%, 3.25%, 2.99%, 3.98% 和 4.13%, 分形维数分别降低了 0.058, 0.050, 0.044, 0.039 和 0.037(图 10)。出现这种情况的原因是适当的纤维掺量可以有效地分散于土体中, 并能提高土颗粒之间的摩擦力, 从而在土体形成裂隙时, 减缓裂隙扩展所产生的张拉应力, 这一过程有助于限制裂隙的扩展。然而, 掺入过量纤维可能导致土体分散性减弱, 降低了纤维与土颗粒之间的摩擦力, 使土体抵抗含水率梯度引起的张拉应力的能力减弱, 从而降低了抑制试样裂隙扩展的效果。

4　裂隙发育规律和改良土作用机理

膨胀土的颗粒高度分散[33], 富含蒙脱石、伊利石

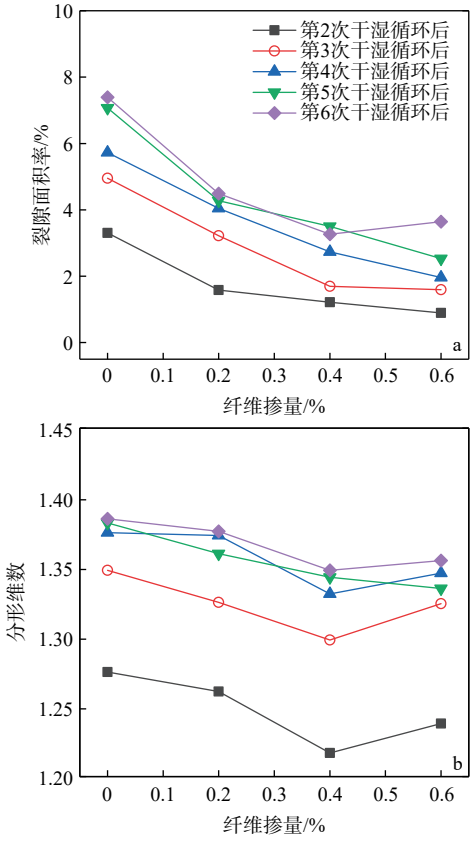


图 10　试样裂隙参数与纤维掺量的关系

Fig. 10　Relationship between crack parameters and fiber content in samples

等强亲水性矿物是其裂隙发育的物质基础，由温度和湿度的外界因素引起的含水率梯度的变化是裂隙产生的根本原因。在干湿条件下，TANG 等[34] 认为裂隙发育往往开始于土体有缺陷的薄弱处，并且裂隙会朝耗能最低处的路径向外扩展。随着脱湿过程的进行，一方面土体内存在不同含水率梯度，导致土体自身张拉应力小于含水率梯度造成的张拉应力，裂隙尖端存在着应力集中，随着含水率下降和时间的增加裂隙进一步扩展，应力集中的程度在裂隙尖端处会越来越明显，遵循能量最优原则，裂隙会沿着薄弱处发展。随着裂隙的贯通、相交，长度逐渐趋于稳定，但是由于水气交界面的扩大，基质吸力和表面张力的作用范围变广[35]，裂隙尖端仍然存在持续累积的应变能，此时实现张拉应力的方式是微小裂隙的加宽和发育。另一方面在收缩过程中土体内部蒸发速率小于向外部逐渐延伸的蒸发速率，并且土体从边缘到中心的含水率逐渐增大，裂隙发育方向与含水率大小存在负相关关系，当内部与外部、边缘与中心蒸发速率相同时，裂隙发育将变迟缓，最终发育就会停止。

郭永春等[36] 引入颗粒堆积模型，提出膨胀土的吸水膨胀机制除了土颗粒膨胀和晶格膨胀以外，还包括土的结构膨胀，故土颗粒之间接触关系和排列组合关系的变化对膨胀土的吸水膨胀具有着重要作用。在干湿循环条件下，膨胀土的裂隙发展过程是不断的发展和愈合，其表现的形式是土体反复收缩与膨胀。纤维的作用是限制土颗粒的膨胀和土颗粒之间接触关系与排列组合的不断变化，即限制土颗粒自身体积的增加与结构反复变化的过程。当土体出现裂隙时，纤维会在裂隙间起到“嵌固”作用，并承担部分由含水率梯度引起的张拉应力，其表面的摩擦力和张拉应力阻止了裂隙张开，这种作用限制了土颗粒膨胀和结构膨胀，使得裂隙尖端的应力集中程度降低，从而限制了裂隙的发展(图 11)。纤维加固膨胀土的过程大致如下：当土体产生初始裂隙时，此时纤维强度较高，在裂隙尖端的集中应力不足已抵抗纤维的张拉应力，使土体无法继续开裂；当纤维与土体接触面的剪应力足够高时，纤维与土体的接触会出现局部的脱粘，土体就会发生滑移，此时裂隙进一步扩展，但纤维仍然可以抵抗土体表面的张拉应力，能有效提高土体的残余强度；当纤维达到极限应力，裂隙尖端的集中应力大于纤维的张拉应力时，纤维就会被拉断，进而纤维会出现失效的情况。随着纤维含量或干湿次数的增加，纤维在土体中交叉、错动和重叠的机率增大，使玄武岩纤维的嵌固效果减弱，从而减小其对裂隙发育的抑制作用。

5　结　论

(1)掺入玄武岩纤维后对改良土的黏聚力影响

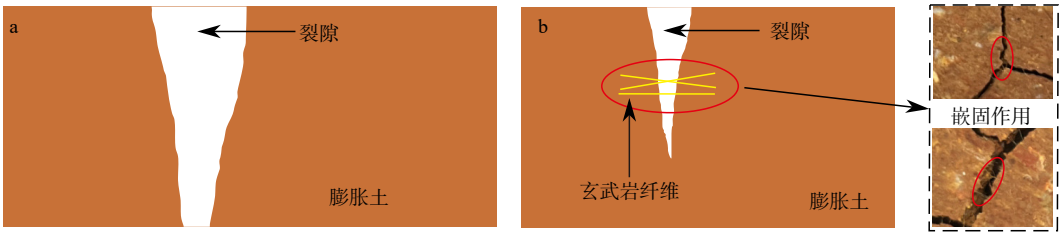


图 11　玄武岩纤维的“嵌固”作用示意图（a. 膨胀土；b. 纤维改良膨胀土）

Fig. 11　Schematic diagram of "embedding" effect of basalt fiber

明显，对内摩擦角影响并不显著；改良土有效黏聚力相对素膨胀土提高了 22.6%，57.1% 和 20.6%，有效内摩擦角相对素膨胀土提高了 3.3%，−1.1% 和−3.3%，说明玄武岩纤维主要通过提升黏聚力来改善土体的抗剪性能。

（2）随着纤维掺量的增加，强度改良系数先增大后减小；在各围压条件下，改良土的强度改良系数均大于 1.0，并且当改良土纤维掺量为 0.4% 时，改良系数最大，分别为 1.19，1.14 和 1.07，改良效果最明显，说明在玄武岩纤维掺量为 0.2%，0.4% 和 0.6% 下进行改良，均能不同程度提高试样的剪切强度。

（3）第 1 次干湿循环后试样都没有出现裂隙，随着干湿次数的逐步增加，素膨胀土和改良土的裂隙面积率在同步增加，但到第 6 次干湿循环后素膨胀土和改良土的裂隙面积率变化不再明显；纤维掺量为 0.4% 时，从第 2 ~ 6 次干湿循环相较于素膨胀土的裂隙面积率分别降低了 2.09%，3.25%，2.99%，3.98% 和 4.13%，分形维数分别降低了 0.058，0.050，0.044，0.039 和 0.037。

（4）当试样出现裂隙时，纤维在裂隙间起到了“嵌固”作用，这种作用抑制了土的结构膨胀，使裂隙尖端应力集中程度降低，从而限制了裂隙的发展。

所有作者声明不存在利益冲突。

The authors declare that no competing interests exist.

参考文献：

[1] ZHANG C, WANG W, ZHU Z D, et al. Mechanical behaviors and damage model of expansive soil admixed with composite materials[J]. Arabian Journal of Geosciences, 2021, 14(15): 1439.

[2] 廖世文. 膨胀土与铁路工程 [M]. 北京：中国铁道出版社，1984.
LIAO S W. Expansive soil and railway engineering[M]. Beijing: China Railway Publishing House, 1984.（in Chinese）

[3] 郝建斌，李耕春，刘志云，等. 干湿循环作用下剑麻纤维加筋膨胀土的抗裂作用及影响因素 [J]. 湖南大学学报（自然科学版），2024，51(1)：147-158.
HAO J B, LI G C, LIU Z Y, et al. Anti-cracking mechanism of sisal fiber-reinforced expansive soil under dry-wet cycle and its influencing factors[J]. Journal of Hunan University（Natural Sciences）, 2024, 51(1): 147-158.（in Chinese with English abstract）

[4] 雷胜友，丁万涛. 加筋纤维抑制膨胀土膨胀性的试验 [J]. 岩土工程学报，2005，27(4)：482-485.
LEI S Y, DING W T. Experiment on restraining expansibility of expansive soil with reinforced fiber[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2005, 27(4): 482-485.（in Chinese with English abstract）

[5] DIAMBRA A, IBRAIM E, MUIR WOOD D, et al. Fibre reinforced sands: Experiments and modelling[J]. Geotextiles and Geomembranes, 2010, 28(3): 238-250.

[6] 李丽华，万畅，刘永莉，等. 玻璃纤维加筋砂土剪切强度特性研究 [J]. 武汉大学学报（工学版），2017，50(1)：102-106.
LI L H, WAN C, LIU Y L, et al. Shear strength characteristics of glass fiber reinforced sandy soil[J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2017, 50(1): 102-106.（in Chinese with English abstract）

[7] WANG Y X, GUO P P, REN W X, et al. Laboratory investigation on strength characteristics of expansive soil treated with jute fiber reinforcement[J]. International Journal of Geomechanics, 2017, 17(11): 04017101.

[8] NAMJOO A M, SOLTANI F, TOUFIGH V. Effects of moisture on the mechanical behavior of sand-geogrid: An experimental investigation[J]. International Journal of Geosynthetics and Ground Engineering, 2021, 7(1): 5.

[9] 宋飞，石磊，樊明尊. 土工格室加筋正常固结粉质黏土应力应变响应 [J]. 地质科技通报，2024，43(1)：184-193.
SONG F, SHI L, FAN M Z. Stress-strain response of geocell-reinforced normally consolidated silty clay[J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 2024, 43(1): 184-193.（in Chinese with English abstract）

[10] 张家俊，龚壁卫，胡波，等. 干湿循环作用下膨胀土裂隙演化规律试验研究 [J]. 岩土力学，2011，32(9)：2729-2734.
ZHANG J J, GONG B W, HU B, et al. Study of evolution law of fissures of expansive clay under wetting and drying cycles[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(9): 2729-2734.（in Chinese with English abstract）

[11] 马鸿发，刘清秉，李靖. 掺砂率与干密度对膨润土收缩特性影响 [J]. 地质科技通报，2023，42(6)：76-85.
MA H F, LIU Q B, LI J. Effect of shrinkage characteristics of bentonite with different sand mixing rates and dry densities[J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 2023, 42(6): 76-85.（in Chinese with English abstract）

[12] 黄晓虎，易武，黄海峰，等. 优势流入渗与坡体变形关系研究及应用 [J]. 岩土力学，2020，41(4)：1396-1403.
HUANG X H, YI W, HUANG H F, et al. Study and application of the relationship between preferential flow penetration and slope deformation[J]. Rock and Soil Mechanics, 2020, 41(4): 1396-1403.（in Chinese with English abstract）

[13] 宋琨，陈伦怡，刘艺梁，等. 降雨诱发深层老滑坡复活变形的动态作用机制 [J]. 地球科学，2022，47(10)：3665-3676.
SONG K, CHEN L Y, LIU Y L, et al. Dynamic mechanism of rain infiltration in deep-seated landslide reactivate deformation[J]. Earth Science, 2022, 47(10): 3665-3676.（in Chinese with English abstract）

[14] QI Y Z, WANG Z Z, XU H Q, et al. Instability analysis of a low-angle low-expansive soil slope under seasonal wet-dry cycles and river-level variations[J]. Advances in Civil Engineering, 2020, 2020(1): 3479575.

[15] ZHAO G T, ZOU W L, HAN Z, et al. Evolution of soil-water and shrinkage characteristics of an expansive clay during freeze-thaw and drying-wetting cycles[J]. Cold Regions Science and Technology, 2021, 186: 103275.

[16] ZHOU Z H, BAI Y, WU Y T, et al. Multiscale study on the microstructural evolution and macromechanical deterioration of expansive soil under dry-wet cycles[J]. Journal of Mechanics, 2022, 38: 610-620.

[17] HUANG Z, SUN H Y, DAI Y M, et al. A study on the shear strength and dry-wet cracking behaviour of waste fibre-reinforced expansive soil[J]. Case Studies in Construction Materials, 2022, 16: e01142.

[18] 张丹, 许强, 郭莹. 玄武岩纤维加筋膨胀土的强度与干缩变形特性试验 [J]. 东南大学学报(自然科学版), 2012, 42(5): 975-980.
ZHANG D, XU Q, GUO Y. Experiments on strength and shrinkage of expansive soil with basalt fiber reinforcement[J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 2012, 42(5): 975-980. (in Chinese with English abstract)

[19] 韩春鹏, 田家忆, 张建, 等. 干湿循环下纤维加筋膨胀土裂隙特性分析 [J]. 吉林大学学报(工学版), 2019, 49(2): 392-400.
HAN C P, TIAN J Y, ZHANG J, et al. Analysis of crack characteristics of fiber-reinforced expansive soil under wetting-drying cycle[J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2019, 49(2): 392-400. (in Chinese with English abstract)

[20] 郝建斌, 张焕, 李耕春, 等. 粉煤灰-剑麻纤维复合改良膨胀土强度及裂隙发育特性 [J]. 铁道科学与工程学报, 2022, 19(9): 2620-2628.
HAO J B, ZHANG H, LI G C, et al. Strength and cracking characteristics of expansive soil improved by fly ash and sisal fiber[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2022, 19(9): 2620-2628. (in Chinese with English abstract)

[21] 朱锐, 王燕杰, 黄英豪, 等. 木质素纤维改良膨胀土的冻融特性及微观机理 [J]. 农业工程学报, 2024, 40(2): 263-272.
ZHU R, WANG Y J, HUANG Y H, et al. Freeze-thawing characteristics and microscopic mechanism of expansive soil treated with lignin fibers[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2024, 40(2): 263-272. (in Chinese with English abstract)

[22] 苏玲霞, 雷云, 刘旭, 等. 干湿循环下纤维改良膨胀土裂隙特性研究 [J]. 非金属矿, 2023, 46(6): 32-35.
SU L X, LEI Y, LIU X, et al. Study on the fracture characteristics of fiber-amended swelling soil under dry and wet cycles[J]. Non-Metallic Mines, 2023, 46(6): 32-35. (in Chinese with English abstract)

[23] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 土工试验方法标准: GB/T 50123−2019[S]. 北京: 中国计划出版社, 2019.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Standard for geotechnical testing method: GB/T 50123−2019[S]. Beijing: China Planning Press, 2019. (in Chinese)

[24] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 膨胀土地区建筑技术规范: GB 50112−2013[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2013.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Technical code for building in expansive soil regions: GB 50112−2013[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2013. (in Chinese)

[25] 毛正君, 耿咪咪, 毕银丽, 等. 紫花苜蓿-黄土复合体抗剪强度时间效应研究 [J]. 煤炭科学技术, 2023, 51(11): 234-247.
MAO Z J, GENG M M, BI Y L, et al. Study on the time effect of shear strength of alfalfa-loess composite[J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(11): 234-247. (in Chinese with English abstract)

[26] 张鹏宇, 朱喜文, 田苏茂, 等. 宜昌蒸发站 2010-2021 年土壤墒情变化规律分析 [J]. 水资源研究, 2023, 12(2): 190-197.
ZHANG P Y, ZHU X W, TIAN S M, et al. Law analysis of soil moisture change in Yichang evaporation station from 2010 to 2021[J]. Journal of Water Resources Research, 2023, 12(2): 190-197. (in Chinese with English abstract)

[27] LIU C, TANG C S, SHI B, et al. Automatic quantification of crack patterns by image processing[J]. Computers & Geosciences, 2013, 57: 77-80.

[28] 尤波, 徐洪钟, 董金梅. 玄武岩纤维加筋膨胀土三轴试验研究 [J]. 防灾减灾工程学报, 2015, 35(4): 503-507.
YOU B, XU H Z, DONG J M. Triaxial tests of expansive soil reinforced with basalt fibe[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2015, 35(4): 503-507. (in Chinese with English abstract)

[29] 庄心善, 余晓彦. 石灰-玄武岩纤维改性膨胀土强度特性的试验研究 [J]. 土木工程学报, 2015, 48(增刊 1): 166-170.
ZHUANG X S, YU X Y. Experimental study on strength characteristics of expansive soil modified by lime-basalt fiber[J]. China Civil Engineering Journal, 2015, 48(S1): 166-170. (in Chinese with English abstract)

[30] 徐洪钟, 彭轶群, 赵志鹏, 等. 短切玄武岩纤维加筋膨胀土的试验研究 [J]. 建筑科学, 2012, 28(9): 44-47.
XU H Z, PENG Y Q, ZHAO Z P, et al. Experimental study on short basalt fiber reinforced expansive soil[J]. Building Science, 2012, 28(9): 44-47. (in Chinese with English abstract)

[31] 王协群, 郭敏, 胡波. 土工格栅加筋膨胀土的三轴试验研究 [J]. 岩土力学, 2011, 32(6): 1649-1653.
WANG X Q, GUO M, HU B. Triaxial testing study of expansive soil reinforced with geogrid[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(6): 1649-1653. (in Chinese with English abstract)

[32] 顾欣, 徐洪钟. 干湿循环作用下纤维加筋膨胀土的裂隙及强度特性研究 [J]. 南京工业大学学报(自然科学版), 2016, 38(3): 81-86.
GU X, XU H Z. Study on crack properties of fiber-reinforced expansive soil under condition of wetting-drying circle[J]. Journal of Nanjing Tech University (Natural Science Edition), 2016, 38(3): 81-86. (in Chinese with English abstract)

[33] 宋成林, 张大亮, 王迎超, 等. 基于主客观赋权和功效系数法的膨胀土胀缩性评价 [J]. 地质科技通报, 2024, 43(6): 136-143.
SONG C L, ZHANG D L, WANG Y C, et al. Evaluation of swelling-shrinkage of expansive soil based on subjective and objective weighting and efficiency coefficient methods[J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 2024, 43(6): 136-143. (in Chinese with English abstract)

[34] TANG C S, CHENG Q, LENG T, et al. Effects of wetting-drying cycles and desiccation cracks on mechanical behavior of an unsaturated soil[J]. Catena, 2020, 194: 104721.

[35] TIAN B G, CHENG Q, TANG C S, et al. Healing behaviour of de-

siccation cracks in a clayey soil subjected to different wetting rates[J]. Engineering Geology, 2023, 313: 106973.

[36] 郭永春, 刘家志, 尤安俊, 等. 基于颗粒堆积模型的膨胀土结构膨胀机制 [J]. 工程地质学报, 2025, 33(1): 58-65. GUO Y C, LIU J Z, YOU A J, et al. Expansion mechanism of expansive soil structure based on particle packing model[J]. Journal of Engineering Geology, 2025, 33(1): 58-65. (in Chinese with English abstract)

Summary for “玄武岩纤维改良弱膨胀土的强度及裂隙特性”

Strength and cracking behavior of weak expansive soil improved by basalt fiber

SONG Kun[1*], LIU Yue[1], RUAN Di[1], HUANG Wei[2], YUAN Jingjing[2], AI Dong[2]

1. Hubei Key Laboratory of Disaster Prevention and Mitigation, China Three Gorges University, Yichang Hubei 443002, China;
2. The Seventh Geological Brigade of Hubei Geological Bureau, Yichang Hubei 443100, China

* Corresponding author, E-mail: songkun_ctgu@163.com

Abstract: The engineering geological problems caused by expansive soil have become a key factor restricting urban geological safety. [**Objective and Methods**] In order to study the effect and mechanism of basalt fiber in improving expansive soil, weak expansive soil from Three Gorges Airport, Yichang, Hubei, was taken as the research object. By adding 0.2%, 0.4%, and 0.6% basalt fiber to the soil, triaxial compression test and dry-wet cycle test were conducted, combined with digital image processing technology, to investigate the strength of the improved soil and the variation of surface cracks under the dry-wet cycle with fiber content. [**Results**] The results showed that the content of basalt fiber had a significant effect on the cohesion of the improved soil but had no significant effect on the internal friction angle. When the content of basalt fiber was 0.4%, the cohesion of the improved soil increased by 57.1%. The improvement coefficient for different basalt fiber contents was greater than 1.0, with the best improvement effect occurring at 0.4%. After the first dry-wet cycle, no cracks were observed in either the improved soil or the untreated expansive soil. The crack area ratio and fractal dimension of the basalt fiber-improved soil in subsequent cycles were smaller than those of the original soil. The maximum difference in the crack area ratio increased from 2.41% to 4.54%, and the maximum difference in the fractal dimension decreased from 0.058 to 0.037. When the content was 0.4%, the fiber had the best effect in inhibiting the cracking of the soil. The fiber embedded in the soil reduced the stress concentration at the crack tip, which limited the development of the crack. [**Conclusion**] The research results can provide valuable references for the engineering application of basalt fiber-improved weak expansive soil at the regional scale.

Key words: weak expansive soil; basalt fiber improvement; triaxial compression; dry-wet cycle; crack inhibition mechanism; digital image processing technology; surface crack

Received: 2024-04-07; Revised: 2024-07-30; Accepted: 2024-09-20

doi: 10.19509/j.cnki.dzkq.tb20240143