文章编号:1674-2974(2024)01-0147-12 DOI:10.16339/j.cnki.hdxbzkb.2024014

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

郝建斌†,李耕春,刘志云,崔福庆,蒋臻蔚
(长安大学 地质工程与测绘学院,陕西 西安 710054)

摘 要:为研究干湿循环作用下纤维加筋膨胀土的抗裂效果,分别开展了素土和剑麻纤维加筋膨胀土的干湿循环试验,并采用图像处理技术提取试样表面裂隙参数,分析了剑麻纤维含量及长度、干湿循环次数、试样含水率对裂隙发育的影响.结果表明:1)剑麻纤维加筋膨胀土具有较好的抗裂性能,且剑麻纤维的掺入对膨胀土的裂隙率和裂隙平均宽度影响较大,相较于素土试样,最优加筋土试样的裂隙率和裂隙平均宽度均比素土试样减小了约1/2.2)纤维长度相同时,随着纤维含量的增大,裂隙率、裂隙总长度、裂隙平均宽度和分形维数均呈先减小后增大的趋势,且纤维含量为0.4%时各参数值最小;纤维含量相同时,纤维长度对各裂隙参数影响不大.3)随着干湿循环次数的增加,加筋土和素土试样裂隙参数均呈逐渐增大趋势,但纤维加筋土裂隙率和裂隙平均宽度的增大幅度均比素土小;从第5次干湿循环开始,各裂隙参数增长趋缓.4)单次脱湿过程中,试样含水率由20%降至10%时,裂隙急剧发育,且素土裂隙的发育对含水率的变化更加敏感,含水率低于10%时,随着含水率的减小,试样裂隙率变小并趋于稳定;相同含水率条件下,剑麻纤维加筋土具有更好的抗裂性能.5)剑麻纤维加筋膨胀土的抗裂机理主要表现在两方面,一方面是剑麻纤维的掺入增大了膨胀土的渗透系数,促进了试样内水分的均匀分布,减小了试样各处的胀缩差异;另一方面纵横交错的剑麻纤维约束了聚集体之间大孔隙的收缩.

关键词:膨胀土;纤维加筋;干湿循环;裂隙扩展;抗裂性能
中图分类号:TU443 **文献标志码**:A

Anti-cracking Mechanism of Sisal Fiber-reinforced Expansive Soil under Dry-wet Cycle and Its Influencing Factors

HAO Jianbin†, LI Gengchun, LIU Zhiyun, CUI Fuqing, JIANG Zhenwei
(School of Geology Engineering and Geomatics, Chang'an University, Xi'an 710054, China)

Abstract: To study the anti-cracking effect of fiber-reinforced expansive soil under the dry-wet cycles, the dry-wet cycle tests of plain soil and sisal fiber-reinforced expansive soil were carried out, respectively. The surface

* **收稿日期**:2022-12-29
基金项目:国家自然科学基金资助项目(41472266,42077260), National Natural Science Foundation of China(41472266,42077260);长安大学中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(300102262204), Fundamental Research Funds for the Central Universities of CHD(300102262204)
作者简介:郝建斌(1975—),女,山西武乡人,长安大学教授,工学博士
† 通信联系人,E-mail: Haojb@chd.edu.cn

crack parameters of the sample were extracted by image processing technology, and the effects of sisal fiber content and length, dry-wet cycle times, and sample moisture content on the crack development were analyzed. The results show that: 1) The sisal fiber-reinforced expansive soil has good crack resistance, and the addition of sisal fiber has a great impact on the crack ratio and average crack width of the expansive soil. Compared with the plain soil sample, the crack ratio and average crack width of the optimal reinforced soil sample are about 1/2 less than that of the plain soil sample. 2) When the fiber length is the same, with the increase of the fiber content, the fracture ratio, the total length of the crack, the average width of the crack, and the fractal dimension all decrease first and then increase, and when the fiber content is 0.4%, each parameter value is the smallest. When the fiber content is the same, the fiber length has little influence on the fracture parameters. 3) With the increase of dry-wet cycles, the fracture parameters of both reinforced soil and plain soil samples gradually increase, but the increase of fracture ratio and average width of fiber-reinforced soil is smaller than that of plain soil. From the fifth dry-wet cycle, the growth of fracture parameters slows down. 4) During the single dehumidification process, when the water content of the sample decreases from 20% to 10%, the fracture develops rapidly, and the development of the plain soil fracture is more sensitive to the change in the water content. When the water content is lower than 10%, the fracture ratio of the sample decreases and tends to be stable. Under the same moisture content, sisal fiber-reinforced soil has better crack resistance. 5) The anti-cracking mechanism of sisal fiber-reinforced expansive soil is mainly manifested in two aspects. On the one hand, the addition of sisal fiber increases the permeability coefficient of expansive soil, promotes the uniform distribution of water in the sample, and reduces the difference between expansion and contraction across the sample. On the other hand, the crisscross sisal fibers restrict the shrinkage of macropores between aggregates.

Key words: expansive soil; fiber-reinforced; dry-wet cycling; crack propagation; anti-cracking ability

膨胀土是一种高塑性黏土,主要由蒙脱石、伊利石和高岭石等亲水性矿物组成,具有吸水膨胀、失水收缩的特点[1-2].在膨胀土地区,季节交替等因素使膨胀土反复胀缩,导致土体产生大量裂隙,对膨胀土的强度、变形等都有极大影响,各种工程事故及自然灾害频发[3].且随着干湿循环次数增加,裂隙逐渐发育与扩展,裂隙宽度、长度、深度和数量都逐渐增加[4-5],对路基边坡的稳定性非常不利,特别在路基边坡坡面防护植被生长成一定规模前,隐患不容忽视,因此对其浅表膨胀土的改良处理就尤为重要.

为改善膨胀土的抗裂性能,提高其强度,研究人员不断探寻改良方法.如化学改良方法,在膨胀土中掺入粉煤灰[6]、石灰[7]、水泥[8]等,该方法对膨胀土抗裂性的提高有一定效果,但对局部环境有一定危害.与化学方法相比,物理改良方法对环境污染较小且成本较低,如掺入绿砂[9]、风化砂[10]、碎石[11]、纤维[12]等.其中采用纤维对膨胀土进行改良是一项很有前景的技术[13],近几年也取得了一些研究成果.如吴继玲等[14]对聚丙烯纤维改良膨胀土的裂隙发育情况与干湿循环次数的关系进行了定性分析;韩春鹏等[15]定量分析了聚丙烯纤维膨胀土的裂隙面积率、裂隙总长度随干湿循环次数的变化规律;顾欣等[16]研究了干湿循环作用下玄武岩纤维加筋膨胀土的裂隙发育规律;Chaduvula 等[17]研究了聚酯纤维长度、含量对膨胀土开裂的影响.以上研究表明,纤维加筋抑制膨胀土裂隙发育与扩展的作用是非常显著的,但目前的研究主要局限于人造纤维加筋,而有研究[18]表明,人造纤维土体用作坡面防护时往往不利于植物生长,在生态方面存在一定的隐患,显然是不理想的,因此开展低碳环保的天然纤维加筋膨胀土的研究是很有必要的.

剑麻纤维是一种质地坚硬、耐腐蚀、富有弹性的天然纤维,其分布范围广,产量大,是较为理想的天然加筋材料.剑麻纤维改良的膨胀土具有绿色环保、低成本等优点,可应用于公路、铁路边坡坡面防护及

梯田筑坎等工程.本文以剑麻纤维加筋膨胀土为研究对象,研究干湿循环作用下加筋土的抗裂作用,以及纤维含量、纤维长度、干湿循环次数及试样含水率对加筋膨胀土裂隙发育与扩展的影响.

1　试验材料与试验方案

1.1　试验材料

试验用膨胀土取自陕西省安康市汉滨区某工地,取土深度约地下 2 m.天然土呈棕黄色,质硬,裂隙发育,从电子显微镜扫描图像(图 1)可以看出,膨胀土颗粒多以片状、扁平状聚集体形式存在,此外还有粒状,颗粒边缘呈无规律的参差形,粒间为无规则排列状态,颗粒间孔隙较明显.将天然土风干碾碎后过 2 mm 筛,依据《公路土工试验规程》(JTG 3430—2020),测得其基本物理性质指标如表 1 所示.根据《膨胀土地区建筑技术规范》(GB 50112—2013)中对于膨胀土的分类标准,该膨胀土为弱膨胀土.

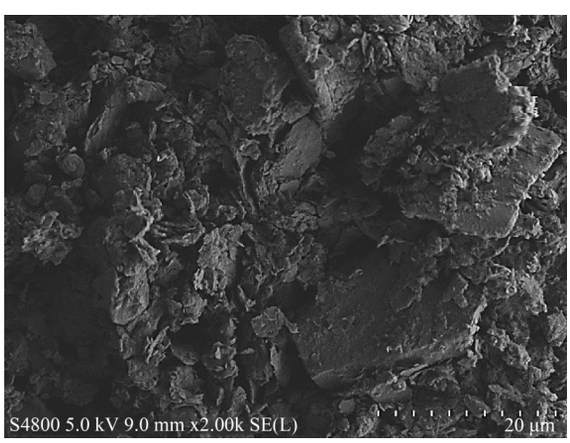


图 1　膨胀土电镜扫描图像

Fig.1　Electron microscope scanning image of expansive soil

表 1　膨胀土基本物理性质

Tab.1　Physical properties of expansive soil

最优含水率/%	最大干密度/(g·cm^{-3})	液限/%	塑限/%	塑性指数	自由膨胀率/%
17.4	1.66	45	23	22	56

剑麻纤维产自广西壮族自治区,纤维平均直径 0.12 mm,断裂伸长率为2.1%,平均拉伸强度564.39 MPa,平均拉伸模量 26.97 GPa.在扫描电子显微镜下放大 500 倍,剑麻纤维表面呈粗糙束状,如图 2 所示.

1.2　试样制备

将膨胀土风干、碾碎后过 2 mm 筛,再放入烘箱烘干备用,烘箱温度设置为 105 ℃.参考已有研究[19],并考虑试样尺寸(试样高 20 mm、直径 61.8 mm)的影响,剑麻纤维含量(质量比,为干剑麻纤维质量与干土质量之比)取 0.1%、0.2%、0.3%、0.4%、0.5% 和 0.6%,长度分别为 5 mm、10 mm、15 mm、20 mm 和 25 mm.加筋土试样的详细配合比设计如表 2 所示.

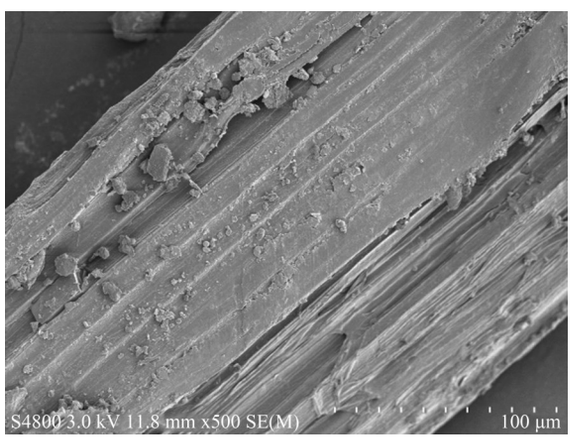


图 2　剑麻纤维电镜扫描图像

Fig.2　Electron microscope scanning image of sisal fiber

表 2　加筋土试样配合比设计

Tab.2　Proportioning design of reinforced soil samples

试样编号	纤维长度/mm	纤维含量/%
1~6	5	0.1、0.2、0.3、0.4、0.5、0.6
7~12	10	0.1、0.2、0.3、0.4、0.5、0.6
13~18	15	0.1、0.2、0.3、0.4、0.5、0.6
19~24	20	0.1、0.2、0.3、0.4、0.5、0.6
25~30	25	0.1、0.2、0.3、0.4、0.5、0.6

制备试样时,先按比例将剑麻纤维与干膨胀土进行混合,多次搅拌使剑麻纤维均匀分散在土中,然后向膨胀土喷洒蒸馏水,边喷水边进行拌和,直至喷洒的蒸馏水质量达到预先计算值时停止喷洒,继续拌和至水与土充分混合且纤维与湿土无团聚状后装入密封袋静置 24 h,采用静压法制备重塑试样.试样干密度与含水率分别为 1.66 g/cm^{3}和 17.4%.

1.3　干湿循环试验方案

开展正式试验前,分别采用 2 个素土试样和 2 个加筋土试样(剑麻纤维长 10 mm,含量 0.4%)对试验条件进行了预干湿循环试验,根据试验结果并参考文献[19]拟定如下试验方案:首先,采用真空饱和法

对试样增湿 12 h,然后在恒温箱中进行脱湿 24 h,恒温箱温度设置为 50 ℃.增湿后试样含水率达到饱和(含水率约为 23%),脱湿后试样含水率约为 1.5%.试样完成一次增湿(12 h)、脱湿(24 h)过程即为一次循环,如此反复循环 6 次.

为观察试样在脱湿过程中的裂隙发育和质量变化情况,在试样放入恒温箱后,定时对其进行称重并对表面进行拍摄.经过预试验对试样裂隙发育的观察,确定较优的数据采集时间点为试样放入恒温箱后 1.5 h、3 h、4.5 h、6 h、12 h 和 24 h.

2 试验结果与分析

2.1 干湿循环次数对裂隙发育的影响

在干湿循环试验过程中,31 组试样的表面裂隙发育程度均随干湿循环次数的增加而增加,5 次干湿循环后裂隙扩展速度变缓.选取纤维含量为 0.4% 的加筋土试样(纤维长度分别为 5 mm、10 mm、15 mm、20 mm、25 mm)和素土试样进行比较分析,图 3 为该 6 组试样分别经过 6 次干湿循环后表面的裂隙发育情况.

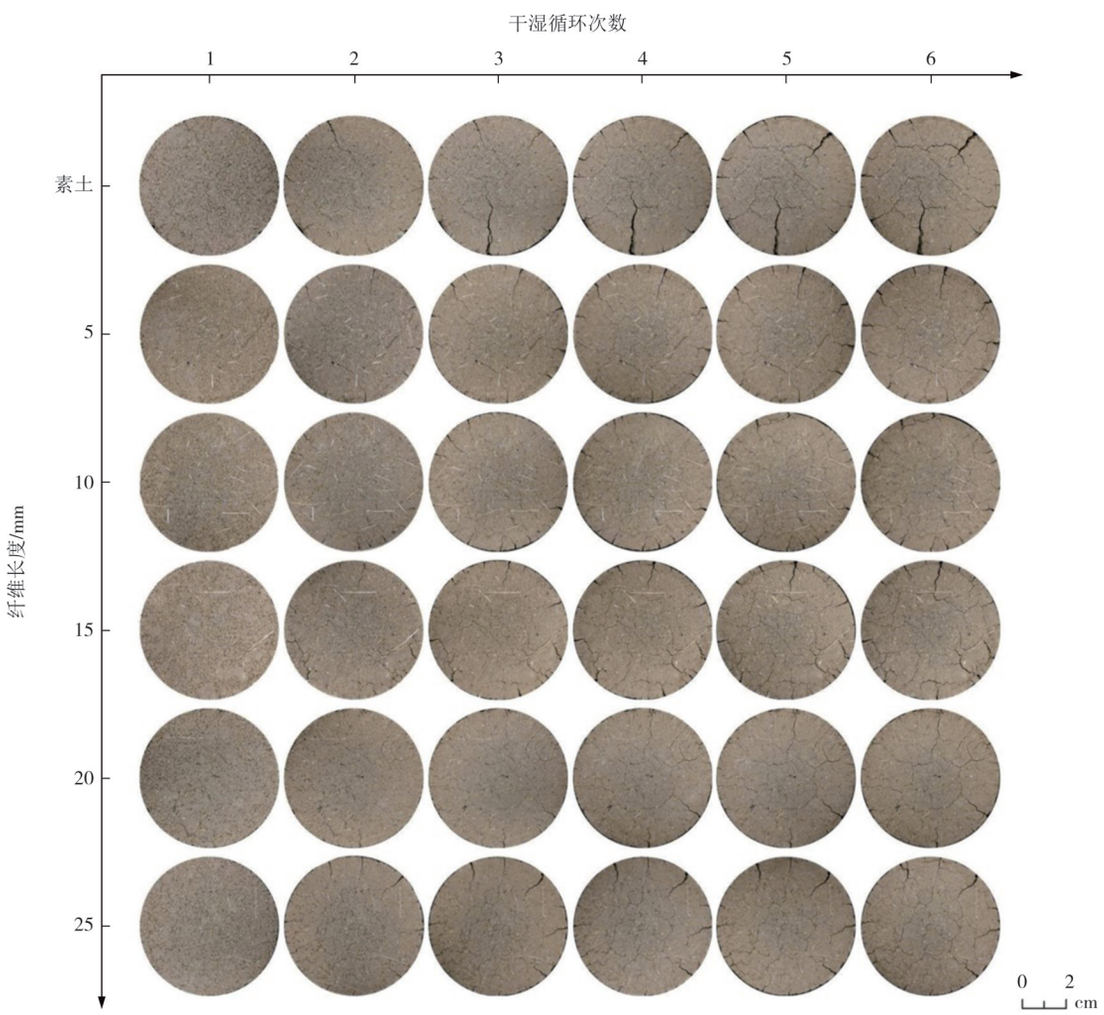


图 3 不同干湿循环次数后素土和部分加筋土试样(纤维含量为 0.4%)表面的裂隙发育情况

Fig.3 Crack development on the surface of plain soil and some reinforced soil samples (fiber content is 0.4%) after different dry-wet cycles

从图 3 可以看出,第 2 次干湿循环后,各试样表面均出现可见裂隙,其中素土试样有两处发育有沿径向的宽大裂隙,加筋土试样表面裂隙发育较为均匀,无宽大裂隙;第 3~6 次干湿循环过程中,素土试样表面裂隙发育程度更高,各试样新裂隙数量持续增加,已出现的裂隙沿原有裂隙通道继续发育,表现为长度和

宽度增加,试样表面裂隙逐渐形成网状结构.

为进一步对试样裂隙的大小、数量、形态及分布特征等进行定量分析,采用南京大学唐朝生教授课题组开发的CIAS图像处理技术[20]对每次干湿循环后的试样表面裂隙率(试样表面裂隙的像素面积与开裂后试样总像素面积之比)、裂隙总长度(试样表面所有裂隙长度之和)、裂隙平均宽度(试样表面裂隙宽度之和与裂隙数量之比)和分形维数[21]等参数进行分析识别,结果如图4所示.其中分形维数的大小可以反映试样表面的裂隙化程度,分形维数值越大表示裂隙化程度越高,越趋于布满试样表面;值越小表示试样表面裂隙越轻微.由于第1次干湿循环后试样表面基本无可见裂隙,裂隙各参数均从第2次干湿循环开始统计.

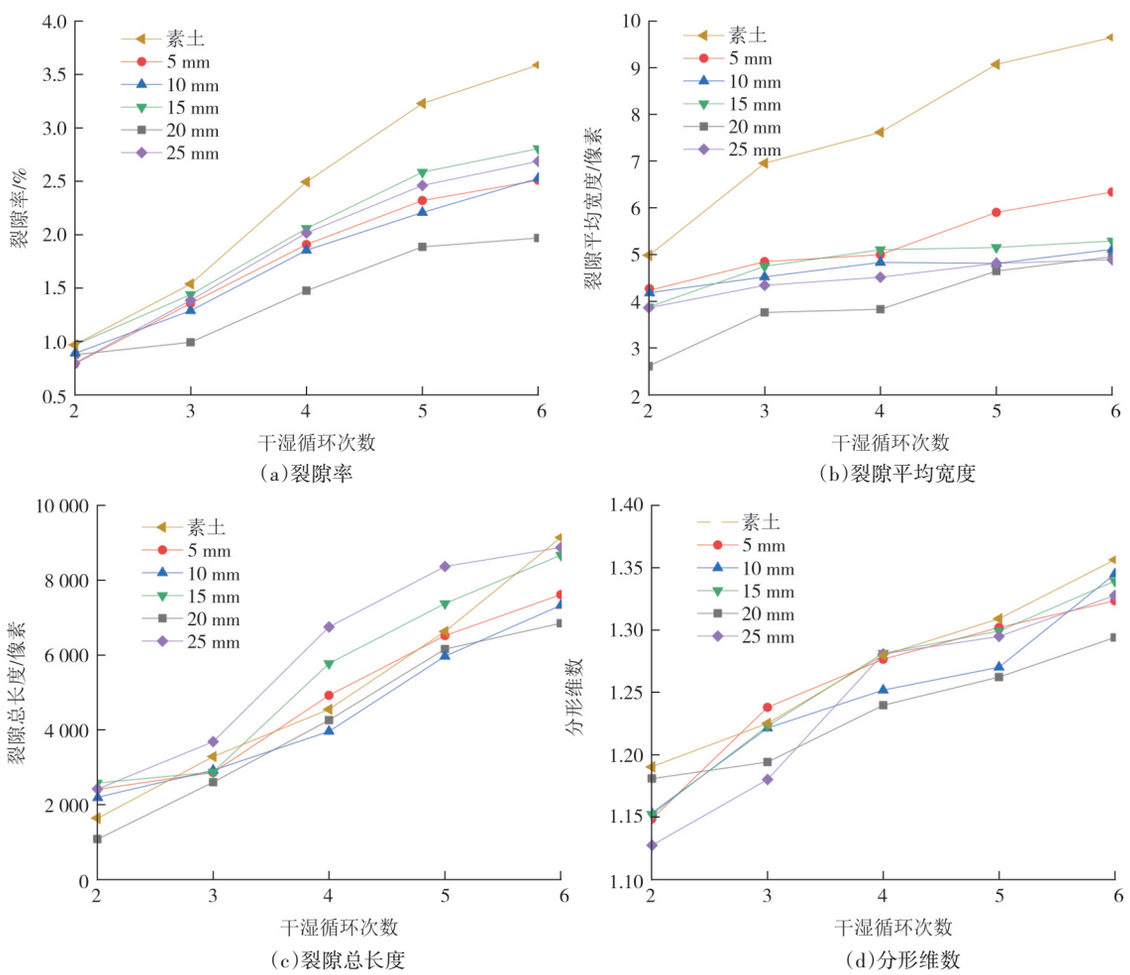


图4　部分加筋土试样(纤维含量为0.4%)裂隙参数与干湿循环次数的关系

Fig. 4　Relationship between crack parameters of partially reinforced soil samples (fiber content is 0.4%) and the number of dry-wet cycles

从图4可以看出,随着干湿循环次数的增加,素土试样和加筋土试样各裂隙参数均逐渐增大.这是由于试样在脱湿过程中形成裂隙,当试样饱和时,土体发生膨胀使原有发育裂隙闭合,但原有裂隙处土体的抗拉强度仍较低,当试样再次脱湿时,原有裂隙会首先张开形成新的水分蒸发表面.随着蒸发的进行,由收缩产生的拉应力超过土体抗拉强度时,新裂隙产生,原有裂隙则在尖端应力集中条件下进一步扩展.随着干湿循环反复进行,裂隙便不断发育扩展.

由图4(a)和4(b)可知,各次干湿循环后,纤维加筋土裂隙率和裂隙平均宽度均比素土小,且随着循环次数的增加,差值越来越大.各次干湿循环后,裂隙率最大差值分别为0.18%、0.55%、1.02%、1.34%和1.62%,裂隙平均宽度最大差值分别为2.362 7像素、3.191 8像素、3.785 3像素、4.421 7像素和4.756 4像素.这是因为当原有裂隙在增湿过程中闭合时,土体与纤维之间的接触关系基本能回到原始的接触状

态,对土体的约束作用基本没有减弱,起到了限制裂隙进一步扩展的作用.同时,随着裂隙的不断发育,试样被分割为多个小土块,水分在试样中蒸发的路径变得更短[22],因此蒸发时试样的内外含水率差异减小,当裂隙发育到一定程度时,由含水率梯度产生的拉应力会低于土体的抗拉强度,此时裂隙就会停止发育.

由图4(c)和4(d)可知,各次干湿循环后,加筋土的裂隙总长度和分形维数的增幅与素土无明显差异.说明随干湿循环次数的增加,加筋土与素土的裂隙发育速度是基本一致的,纤维的加入并不能限制裂隙的产生,只能限制裂隙的拓宽,也说明由干湿循环产生的张拉力较大,导致了新细小裂隙的发育.

2.2 剑麻纤维对试样裂隙发育的影响

图5为素土试样和加筋土试样经过6次干湿循环后,试样表面的裂隙发育情况.从图中可以看出,素土试样表面裂隙呈现长、直、宽的形态,裂隙密度小,微裂隙较少,裂隙边缘较平滑,存在贯穿趋势;相比于素土,加筋土试样裂隙宽度明显变窄,裂隙密度较大,微裂隙数量增多,且裂隙纵横相连,形成网状结构.此外,还可看出当试样中纤维长度相同时,纤维含量为0.3%~0.5%之间的试样表面裂隙发育程度较低.

同样,对各试样6次干湿循环后表面的裂隙率、裂隙总长度、裂隙平均宽度和分形维数进行了提取计算,结果如表3所示.

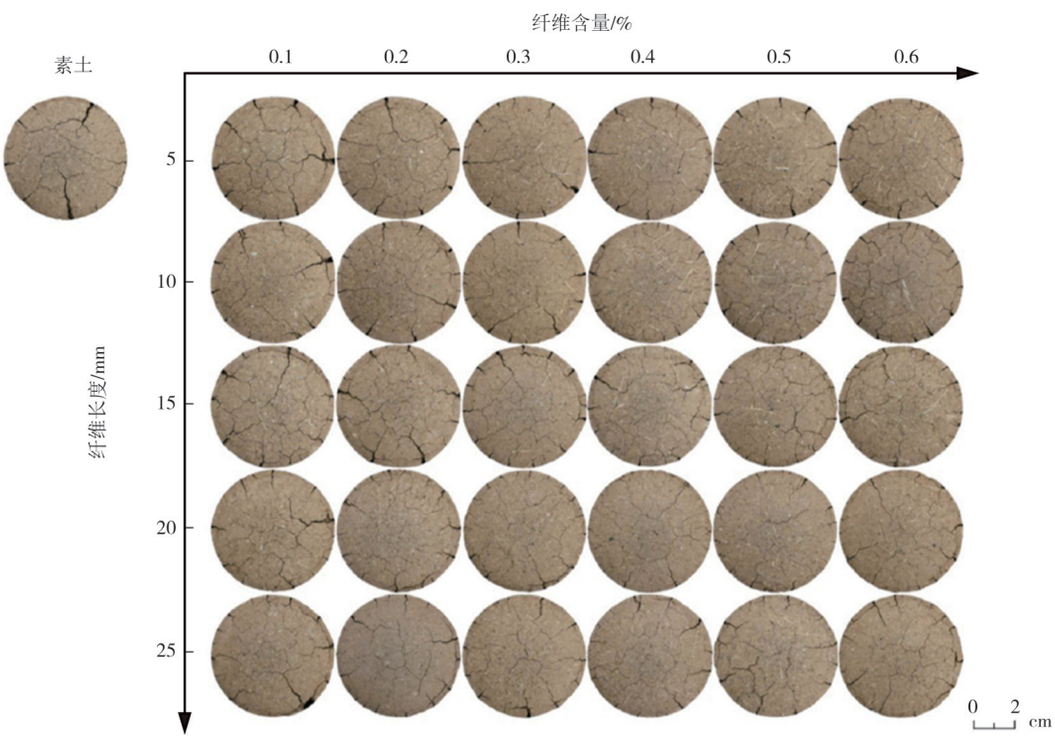


图5 6次干湿循环后试样表面裂隙发育情况

Fig. 5 Crack development on the surface of the sample after 6 dry-wet cycles

2.2.1 纤维含量的影响

图6为不同纤维长度下,加筋土试样表面各裂隙参数与试样中纤维含量的关系.由图可知,随着纤维含量的增大,裂隙率、裂隙平均宽度、裂隙总长度和分形维数均呈先减小后增大的趋势,且当纤维长度相同时,纤维含量为0.4%时各参数值最小.

由图6(a)和6(b)可以看出,剑麻纤维含量对膨胀土的裂隙率和裂隙平均宽度的影响较为明显.总体上,加筋土试样裂隙率(除试样1和试样12考虑误差以外)均小于素土试样裂隙率,裂隙平均宽度(除试样19和试样25考虑误差以外)均小于素土试样裂隙平均宽度,其中加筋土裂隙率最小值为素土裂隙率的55%,加筋土裂隙平均宽度最小值为素土裂隙平均宽度的46%.由图6(c)可见,当纤维含量较小或较大时,试样裂隙总长度反而大于素土试样裂隙总长度,这是因为加入纤维虽然减少了宽大裂隙,但发育了更多细小裂隙,且这些细小裂隙纵横交错,互相贯通,导致裂隙总长度增大.

表 3　试样表面裂隙参数

Tab.3　Crack parameters of the sample

试样编号	纤维长度/mm	纤维含量/%	裂隙率/%	裂隙平均宽度/像素	裂隙总长度/像素	分形维数
素土	0	0	3.589	8.646 6	9 143.231	1.356 3
1	5	0.1	4.075	8.119 7	15 671.745 9	1.387 5
2	5	0.2	3.458	7.466 2	11 095.635 5	1.367 8
3	5	0.3	2.627	6.549 2	7 940.514 1	1.326 8
4	5	0.4	2.511	6.339 4	7 615.561 8	1.323 5
5	5	0.5	2.733	6.342 6	9 498.854	1.343 1
6	5	0.6	3.121	7.558 6	9 322.798 1	1.361 9
7	10	0.1	3.204	6.300 7	11 287.814 1	1.355 5
8	10	0.2	3.126	5.905 9	10 104.026 9	1.366 4
9	10	0.3	2.762	5.887	10 425.787 1	1.370 4
10	10	0.4	2.528	5.111 8	7 329.574 4	1.344 8
11	10	0.5	3.242	6.477 7	11 736.443 7	1.360 2
12	10	0.6	3.892	6.047 6	10 914.399 4	1.355 9
13	15	0.1	3.578	7.388 1	12 164.010 8	1.370 8
14	15	0.2	3.488	7.664 3	13 357.330 8	1.365 9
15	15	0.3	3.254	5.858 6	10 554.883 6	1.364 1
16	15	0.4	2.807	5.292 3	8 669.591 4	1.339 2
17	15	0.5	2.940	6.132 3	10 467.094 3	1.359 8
18	15	0.6	3.242	6.170 4	12 908.955	1.362 5
19	20	0.1	3.302	9.929	1 0817.059 8	1.355 4
20	20	0.2	2.897	5.403	8 956.251 8	1.345 7
21	20	0.3	2.650	6.098	8 837.878 2	1.324 4
22	20	0.4	1.970	3.953 4	6 849.934 2	1.294 1
23	20	0.5	2.267	4.929 6	7 319.628 7	1.316 7
24	20	0.6	2.471	4.798 3	9 209.443 8	1.320 2
25	25	0.1	3.565	11.787 8	10 662.765 9	1.367 6
26	25	0.2	2.905	7.026 9	10 405.413 5	1.334 9
27	25	0.3	2.764	7.600 2	9 303.554	1.331 0
28	25	0.4	2.687	4.890 2	8 872.925 9	1.327 7
29	25	0.5	2.801	5.586 4	9 876.193 1	1.336 4
30	25	0.6	2.879	5.883 9	9 794.333 2	1.334 3

图 6(d)中,当剑麻纤维含量为 0.1% 时,加筋土试样(除试样 7 考虑误差外)的分形维数均大于素土的分形维数(1.356 3),说明细小裂隙将试样表面分割得更加破碎;随着纤维含量增加,加筋土试样表面分形维数先减小后增大,在纤维含量为 0.4% 时达到最小,试样表面裂隙化程度最低.结合图 5 可见,当纤维含量为 0.4% 时,试样表面裂隙数量较少,且在试样边缘处裂隙相对较密,中间区域较为完整,与总裂隙长度变化趋势保持一致.

2.2.2　纤维长度的影响

图 7 为不同纤维含量时,加筋土试样表面各裂隙参数与试样中纤维长度的关系.可以看出,随着纤维长度的变化,各裂隙参数的变化整体亦是先减小后增大的趋势,纤维长度为 20 mm 时达到最小值.这是由于纤维含量相同时,长度较小的纤维数量虽相对多,但纤维随机分散在土中,单个纤维对土体的锚固作用较小,对裂隙的发育和扩展的限制作用较小;当纤维较长时,虽然单个纤维的锚固作用加强,但纤维间距增大,且如果裂隙扩展方向与纤维长度方向平行时,基本不会起到限制裂隙扩展的作用.

图 7(a)和图 7(b)中,纤维含量为 0.1%、纤维长度为 20 mm 和 25 mm 时,裂隙率和裂隙平均宽度的值出现与整体变化趋势不一致的情况.结合图 5 可以看出,纤维长度为 20 mm 的试样在右侧边缘处出现了小面积土块掉落,纤维长度为 25 mm 的试样在右下角边缘处有土块掉落的情况,在计算时掉落面

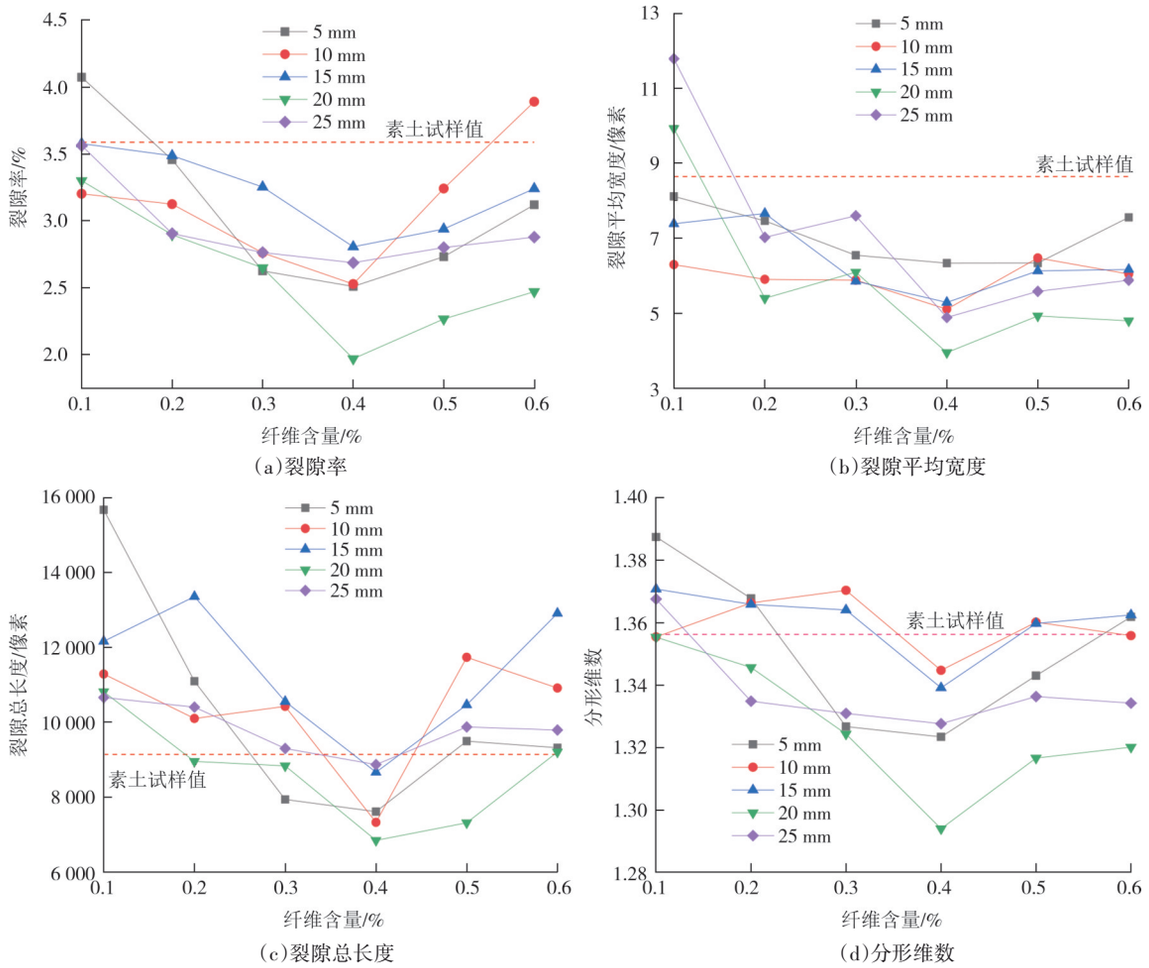


图6 加筋土试样裂隙参数与纤维含量的关系

Fig.6 Relationship between crack parameters and fiber content of reinforced soil samples

积也被图像识别成裂隙,因此使得计算数值偏大,但对整体结论影响不大.此外,纤维长度为5 mm,纤维含量为0.1%的试样也有类似现象.

图7(c)中,纤维长度为15 mm,纤维含量为0.2%和0.6%的试样的裂隙长度值较大.观察图5可以看出,两个试样边缘处均发育有较长的环向裂隙,可能是边缘处径向分布纤维较少导致的.

2.3 含水率对裂隙发育的影响

根据以上分析,水分的蒸发对试样裂隙发育的影响较大.为了做进一步分析,以#22试样(纤维长度20 mm,纤维含量0.4%)与素土试样第4次脱湿过程为例进行对比分析.

以上裂隙参数中,裂隙率能综合反应裂隙的分布特征[23],因此仅以裂隙率进行分析.图8为第4次脱湿过程中试样的含水率、裂隙率随脱湿时间的变化图.根据干湿循环试验方案,脱湿过程在恒温(50 ℃)状态下持续24 h.从图中可以看出,加筋土和素土试样的含水率在脱湿1.5 h、3 h、4.5 h后含水率均相差较大,且加筋土试样含水率较大;随着脱湿的继续进行,差距越来越小,脱湿6 h后含水率基本无明显差距.当脱湿时间小于4.5 h时,同一时刻加筋土和素土试样的裂隙率也相差较大,且差距越来越大;随着脱湿的继续进行,两者裂隙率基本保持稳定.当含水率由20%降至10%时,是裂隙急剧发育的阶段,且素土裂隙的发育对含水率的变化更加敏感.当加筋土试样含水率为10%时,其裂隙率为1.84%,而素土试样含水率约为14%时即可达到相同的裂隙率.可见,在相同含水率条件下,剑麻纤维加筋土具有更好的抗裂性能.如前所述,这是因为剑麻纤维增大了试样的渗透系数,加速了试样内部水分向表面传导,这样促进了试样内水分的均匀分布,降低了含水率梯度,从而降低了试样中的应力水平,缓减了裂隙的产生.

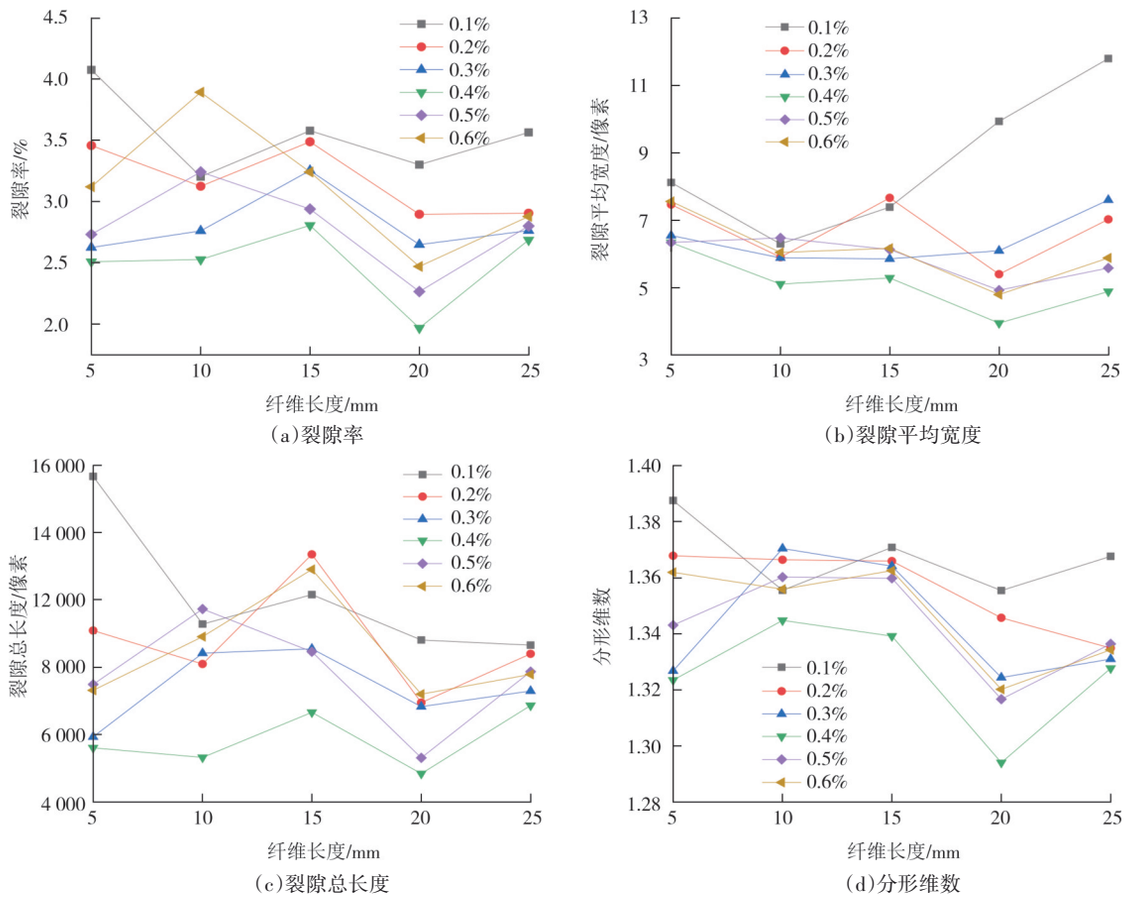


图 7　加筋土试样裂隙参数与纤维长度的关系

Fig. 7　Relationship between crack parameters and fiber length of reinforced soil samples

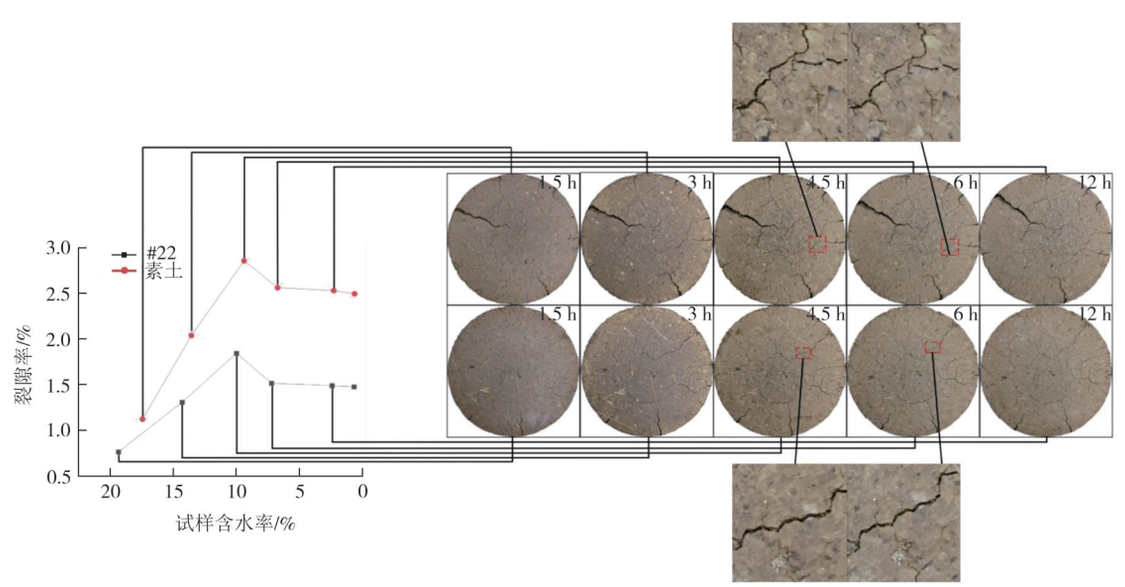


图 8　试样裂隙率与试样含水率之间的关系

Fig. 8　Relationship between the crack ratio and the moisture content of the sample

2.4　抗裂机理分析

膨胀土因吸水膨胀、失水收缩形成的胀缩裂隙是最主要的裂隙类型[23].由水分迁移规律可知,在脱湿过程中,试样表面水分蒸发速率大于内部蒸发速率,由于膨胀土的渗透性较差,内部水分短时间内难以到达试样表面,因此试样形成内高外低的含水率梯度,由试样中心到边缘含水率逐渐降低,如图 9 所示.由于膨胀土湿胀干缩的特性,这种内外干湿差异

使试样外部收缩程度大于内部,导致出现试样外部受拉的情况,当某处拉力值超过土体最大抗拉强度时,初始裂隙便开始产生,随着脱湿时间的增加,裂隙尖端应力集中程度越来越严重,导致裂隙进一步扩展.课题组对素土试样和加筋土试样(纤维长度20 mm,含量0.4%)的渗透系数进行了测定,发现加筋土试样渗透系数为1.727 83×10^{-6} cm/s,约为素土试样渗透系数(7.072 96×10^{-7} cm/s)的2.4倍.可见,在膨胀土中加入剑麻纤维促进了试样内水分的均匀分布,减小了试样各处的胀缩差异,从而降低了试样中的应力水平,缓减了裂隙的产生.

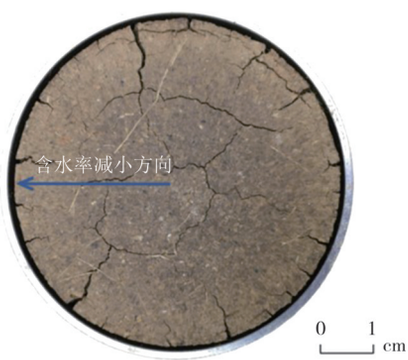


图9 试样表面水分分布

Fig. 9 Moisture distribution on the surface of the sample

另外,纤维在试样内部彼此交错(图10),对土体形成网络约束,当试样产生裂隙时,纤维在裂隙间起到了"桥接"作用[24],如图10所示.这种"桥接"作用在一定程度上对试样脱湿过程中产生的应力起到了分散作用,减少了应力集中现象,抑制了裂隙在长度和宽度方向的增长.因此加筋土试样表面长裂隙较少,微小裂隙发育且分布较均匀,这些裂隙纵深较浅且未延伸至底部,不会对土体本身稳定性产生特别大的影响[24].纤维的这种"桥接"作用在很大程度上取决于纤维与土壤基质间的界面相互作用[24],剑麻纤维粗糙的表面(图2)与土壤间形成了一定的界面作用力.当纤维含量或长度逐渐增大时,这种作用逐渐增强,但随着纤维含量或长度进一步增大,纤维在土壤中出现重叠、聚集的几率也增大,穿过潜在裂隙的几率减小,使得整体上"有效"界面作用(剑麻纤维与土体接触产生的能够抑制裂隙发育的力学作用)减小,对裂隙的抑制作用减弱.

从微观角度分析,膨胀土在脱湿过程中内部存在的黏土聚集体之间的孔隙逐渐缩小[23],大孔隙向小孔隙转变,因此裂隙扩展主要受试样中大孔隙的多少及大孔隙的收缩程度影响.在压实度较高的情况下,大孔隙主要是黏土颗粒聚集体之间、聚集体和粒状颗粒之间的大孔隙(见图1),纵横交错的剑麻纤维对大孔隙的收缩起到了一定的约束作用,使得试样内收缩力分布较为均匀,没有形成长裂隙,而是分布较为均匀且数量较多的细小裂隙.

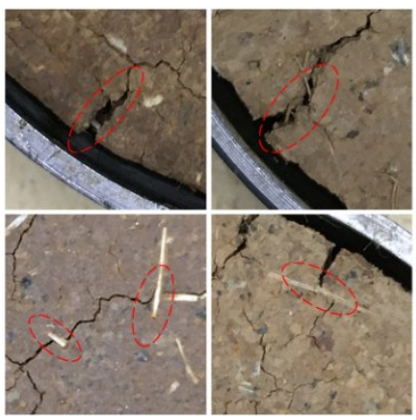


图10 剑麻纤维的"桥接"作用

Fig.10 "Bridging" effect of sisal fibers

3 结 论

1)剑麻纤维加筋土具有较好的抗裂作用,对膨胀土的裂隙率和裂隙平均宽度影响较大,相较于素土试样,加筋土试样的裂隙率和裂隙平均宽度最大减小了约1/2.

2)当剑麻纤维长度相同时,随着纤维含量的增大,裂隙率、裂隙总长度、裂隙平均宽度和分形维数均呈先减小后增大的趋势,且纤维含量为0.4%时各参数值最小;纤维长度对裂隙参数的影响较小.

3)随着干湿循环次数的增加,加筋土和素土试样的裂隙率、裂隙总长度、裂隙平均宽度和分形维数呈逐渐增大趋势,且纤维加筋土裂隙率和裂隙平均宽度的增大幅度均比素土小.从第5次干湿循环开始,各裂隙参数增长趋缓.

4)单次脱湿过程中,素土和加筋土试样的含水率差距越来越小,脱湿6 h后含水率基本无明显差距;当脱湿时间小于4.5 h时,同一时刻加筋土和素土试样的裂隙率也相差较大,且差距越来越大,随着脱湿的继续进行,两者裂隙率基本保持稳定.素土试样裂隙的发育对含水率的变化更加敏感.

5)剑麻纤维增大了膨胀土的渗透系数,促进了试样内水分的均匀分布,减小了试样各处的胀缩差异;加筋土试样渗透系数为1.727 83×10^{-6} cm/s,约为素土试样渗透系数(7.072 96×10^{-7} cm/s)的2.4倍.

6)随机分布在土体中纵横交错的剑麻纤维约束了集聚体之间大孔隙的收缩,抑制了纤维加筋土内细小裂隙的进一步拓宽.

7)试验试样均为环刀试样,受尺寸效应的影响,该试验结果可能具有一定的局限性,后续将进一步开展大尺寸试样的相关试验,对剑麻纤维加筋膨胀土的抗裂性能及机理进行必要的补充.

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): 1-12.

[2] 黎伟,刘观仕,汪为巍,等. 湿干循环下压实膨胀土裂隙扩展规律研究[J]. 岩土工程学报,2014,36(7):1302-1308.
LI W, LIU G S, WANG W W, et al. Crack propagation law of compacted expansive soils under wetting-drying cycles [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014, 36(7): 1302-1308. (in Chinese)

[3] 骆赵刚,许冲,杨振北,等. 土体裂隙的量测表征及开裂试验研究[J]. 地下空间与工程学报,2021,17(1):126-134.
LUO Z G, XU C, YANG Z B, et al. Study on fracture measurement of soils and quantitative analysis of the cracking process [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2021, 17(1): 126-134. (in Chinese)

[4] 蔡正银,陈皓,黄英豪,等. 考虑干湿循环作用的膨胀土渠道边坡破坏机理研究[J]. 岩土工程学报,2019,41(11):1977-1982.
CAI Z Y, CHEN H, HUANG Y H, et al. Failure mechanism of canal slopes of expansive soils considering action of wetting-drying cycles [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2019, 41(11): 1977-1982. (in Chinese)

[5] 汪时机,王晓琪,李达,等. 膨胀土干湿循环裂隙演化及其土-水特征曲线研究[J]. 岩土工程学报,2021,43(S1):58-63.
WANG S J, WANG X Q, LI D, et al. Evolution of fissures and bivariate-bimodal soil-water characteristic curves of expansive soil under drying-wetting cycles [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2021, 43(S1): 58-63. (in Chinese)

[6] 庄心善,彭伟珂,吴镜泊. 粉煤灰改良膨胀土脱湿过程裂隙发展规律与影响因素研究[J]. 科学技术与工程,2017,17(6):252-258.
ZHUANG X S, PENG W K, WU J B. Study of cracking characteristics and influencing factors for flyash-treated expansive soil in dehydration process [J]. Science Technology and Engineering, 2017, 17(6): 252-258. (in Chinese)

[7] 边加敏,蒋玲,王保田. 石灰改良膨胀土强度试验[J]. 长安大学学报(自然科学版),2013,33(2):38-43.
BIAN J M, JIANG L, WANG B T. Experiment on the strength of lime-treated expansive soil [J]. Journal of Chang'an University (Natural Science Edition), 2013, 33(2): 38-43. (in Chinese)

[8] 刘加冬,路洪斌,殷宗泽. 水泥改良膨胀土的裂隙演化规律试验研究[J]. 嘉兴学院学报,2020,32(6):58-63.
LIU J D, LU H B, YIN Z Z. A study on the fissure of expansive soil improved with cement [J]. Journal of Jinxing University, 2020, 32(6): 58-63. (in Chinese)

[9] 张鑫,孙树林,魏永耀,等. 掺绿砂改良膨胀土室内试验研究[J]. 岩土力学,2012,33(S2):209-212.
ZHANG X, SUN S L, WEI Y Y, et al. Laboratory test study of properties of expansive soil improved by waste foundry sand [J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, 33(S2): 209-212. (in Chinese)

[10] 杨俊,黎新春,张国栋,等. 不同粒径风化砂改良膨胀土的特性试验[J]. 成都理工大学学报(自然科学版),2015,42(1):26-33.
YANG J, LI X C, ZHANG G D, et al. Experimental study on characteristics of improved expansive soil by mixing different sizes of weathered sands [J]. Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition), 2015, 42(1): 26-33. (in Chinese)

[11] 许英姿,黄政棋,苏超,等. 掺碎石改良宽度对膨胀土侧向膨胀力影响研究[J]. 铁道科学与工程学报,2021,18(6):1456-1463.
XU Y Z, HUANG Z Q, SU C, et al. Study on the influence of modified width of gravel on lateral swelling force of expansive soil [J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2021, 18(6): 1456-1463. (in Chinese)

[12] 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. Experimental investigation on restraining the swell of expansive soil with fibre-reinforcement [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2005, 27(4): 482-485. (in Chinese)

[13] SOLTANI A, DENG A, TAHERI A. Swell-compression characteristics of a fiber-reinforced expansive soil [J]. Geotextiles and Geomembranes, 2018, 46(2): 183-189.

[14] 吴继玲,武升平,郑方万. 干湿循环对纤维膨胀土特性影响的试验研究[J]. 工程勘察,2011,39(9):14-18.
WU J L, WU S P, ZHENG F W. Features study of impact on fiber expansive soil with wetting-drying cycles [J]. Geotechnical Investigation & Surveying, 2011, 39(9): 14-18. (in Chinese)

[15] 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)

[16] 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 University of Technology (Natural Science Edition),2016,38(3):81-86.(in Chinese)

[17] CHADUVULA U, VISWANADHAM B V S, KODIKARA J. A study on desiccation cracking behavior of polyester fiber-reinforced expansive clay[J]. Applied Clay Science, 2017, 142: 163-172.

[18] 贾卓龙,晏长根,李博,等. 瓜尔豆胶固化纤维黄土的抗侵蚀特性及生态护坡试验研究[J]. 岩土工程学报,2022,44(10):1881-1889.
JIA Z L, YAN C G, LI B, et al. Experimental study on erosion resistance and ecological slope protection of guar gum-treated fiber-reinforcement loess [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2022, 44(10):1881-1889.(in Chinese)

[19] 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)

[20] 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 C S, SHI B, LIU C, 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)

[21] 刘春, 王宝军, 施斌, 等. 基于数字图像识别的岩土体裂隙形态参数分析方法[J]. 岩土工程学报, 2008, 30(9): 1383-1388.
LIU C, WANG B J, SHI B, et al. Analytic method of morphological parameters of cracks for rock and soil based on image processing and recognition [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering,2008,30(9):1383-1388.(in Chinese)

[22] 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)

[23] 汪为巍. 膨胀土裂隙演化三维分布特征及微观结构分形规律研究[M]. 武汉: 武汉大学出版社, 2019.
WANG W W. Study on three-dimensional distribution characteristics and microstructure fractal law of expansive soil fracture evolution [M]. Wuhan: Wuhan University Press, 2019.(in Chinese)

[24] 喻永祥, 闵望, 宋京雷, 等. 剑麻纤维复合黏性土裂隙发育特征及其机理研究[J]. 矿产勘查 ,2021, 12(6): 1448-1454.
YU Y X, MIN W, SONG J L, et al. Study on fracture development characteristics and mechanism of sisal fiber composite clay [J]. Mineral Exploration, 2021, 12(6): 1448-1454.(in Chinese)