

引用本文:王 欢,曹义康,任俊玺. 干湿循环对粉砂土改良膨胀土裂隙及强度影响[J]. 建筑科学与工程学报,2022,39(5):213-221.

WANG Huan, CAO Yi-kang, REN Jun-xi. Influence of Dry-wet Cycle on Crack and Strength of Silty Sand Improved Expansive Soil[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2022, 39(5): 213-221.

DOI:10.19815/j.jace.2021.07006

干湿循环对粉砂土改良膨胀土裂隙及强度影响

王 欢, 曹义康, 任俊玺

(河南大学 土木建筑学院, 河南 开封 475004)

摘要:为探究黄泛区粉砂土改良膨胀土路基在干湿循环作用下裂隙发育与强度的影响规律,设计并开展了室内干湿循环试验,分别进行了 11%、13%、15%、17% 四种不同含水率下改良膨胀土经历不同干湿循环次数的直剪试验,然后采用 MATLAB 开发的图像处理技术对干湿循环作用后的土样裂隙进行定量分析,探讨改良膨胀土的裂隙率和抗剪强度的关系。结果表明:随着含水率的增大,改良膨胀土的裂隙率、黏聚力和内摩擦角逐渐减小;当含水率一定时,裂隙的发展随干湿循环次数的增加而增大,改良膨胀土的黏聚力和内摩擦角随着裂隙率的增大而减小;当含水率为 11% 时,前两次干湿循环作用导致改良膨胀土的裂隙快速发展,裂隙率曲线较陡,黏聚力下降较快,但是内摩擦角变化不大,改良膨胀土的裂隙率和黏聚力的判定系数达到 0.95;当含水率为 17% 时,前 4 次干湿循环作用下改良膨胀土的裂隙虽然发育迟缓但裂隙率增长较快,4 次干湿循环之后裂隙率的增长变得不明显,裂隙率曲线较平缓,黏聚力和内摩擦角下降较少,改良膨胀土的裂隙率和黏聚力的相关系数仅为 0.70。

关键词:改良膨胀土;干湿循环;含水率;抗剪强度;裂隙率

中图分类号:TU443

文献标志码:A

文章编号:1673-2049(2022)05-0213-09

Influence of Dry-wet Cycle on Crack and Strength of Silty Sand Improved Expansive Soil

WANG Huan, CAO Yi-kang, REN Jun-xi

(School of Civil Engineering and Architecture, Henan University, Kaifeng 475004, Henan, China)

Abstract: In order to explore the influence law of crack development and strength of silty sand improved expansive soil subgrade in the Yellow River flood area under the action of dry-wet cycle, the indoor dry-wet cycle tests were designed and carried out. Direct shear tests of improved expansive soil under four different moisture contents of 11%, 13%, 15% and 17% were carried out respectively. Then, the image processing technology developed by MATLAB was used to quantitatively analyze the cracks of soil samples after dry-wet cycle, and the relationship between the crack rate and shear strength of improved expansive soil was discussed. The results show that the crack rate, cohesion and internal friction angle of the improved expansive soil decreases gradually with the increase of water content. When the moisture content is constant, the development of cracks increases with the increase of dry-wet cycles, and the cohesion and internal

收稿日期:2021-07-02

基金项目:河南省高等学校重点科研项目(18A580002);开封市科技发展计划项目(1801004);甘肃省交通运输厅科研项目(2013-07)

作者简介:王 欢(1982-),男,河北唐县人,讲师,工学博士,E-mail:happy_king0924@sina.com。

friction angle of improved expansive soil decrease with the increase of crack rate. When the moisture content is 11%, the first two dry-wet cycles lead to the rapid development of cracks in the improved expansive soil. The crack rate curve is steep and the cohesion decreases rapidly, but the internal friction angle changes little. The correlation coefficient between the crack rate and the cohesion of the improved expansive soil reaches 0.95. When the moisture content is 17%, although the cracks of the improved expansive soil develop slowly under the first four dry-wet cycles, the crack rate increases rapidly. After the four dry-wet cycles, the growth of the crack rate becomes insignificant, the crack rate curve is relatively flat, and the decreases of cohesion and internal friction angle are less. The correlation coefficient between the crack rate and cohesion of the improved expansive soil is only 0.70.

Key words: improved expansive soil; dry-wet cycle; moisture content; shear strength; crack rate

0 引言

膨胀土组成物质(如强吸水性的蒙脱石和伊利石等)特殊,具有多裂隙性、强胀缩性和超固结性等三大特性^[1-2],其中多裂隙性是影响膨胀土工程特性的关键因素。膨胀土在中国分布较广,一直以来严重危害工程建设的安全,被称为“工程中的癌症”^[3]。

膨胀土中裂隙的发育和扩展会严重破坏土体结构的完整性,并降低土体结构的强度和整体稳定性^[4]。因此研究干湿循环条件下不同含水率膨胀土的裂隙发育具有特殊意义。目前,工程中预防膨胀土危害的措施大多以化学改良为主,通常是将粉煤灰、水泥、石灰或者化学改良剂等掺入膨胀土中,虽然在一定程度上起到改良的效果,对膨胀土的胀缩性有显著的抑制作用,但是长期大面积的使用会对土壤环境造成污染,且成本较高^[5-7]。黄泛区粉砂土作为一种天然砂,具有绿色清洁、取材方便等优点,用来改良膨胀土具有良好的应用前景。因此,国内外不少学者对天然砂改良膨胀土的工程性质做了大量的研究^[8-9]。Zhao 等^[10]研究了冻融和干湿循环过程中膨胀土中水分和收缩特性的演变,发现冻融和干湿循环对大孔隙系统破坏较显著,从而引起裂缝的产生。Qi 等^[11]研究了膨胀土边坡产生裂缝的原因,发现由于季节性干湿循环引起膨胀土体抗剪强度降低,导致边坡失稳破坏。Rao 等^[12]研究了石灰改良膨胀土经过干湿循环作用后的强度变化规律,发现随着干湿循环次数的增多,改良土的强度变小。Costa 等^[13]认为裂隙的出现是由土体的结构缺陷或内部孔隙导致的。Lecocq 等^[14]研究了影响土体裂隙发育的因素以及裂隙宽度的发育规律。刘观仕等^[15]通过室内模拟试验,研究了不同温度和湿度对膨胀土裂隙发育的影响规律,结果表明环境温度

较高时,初期裂隙发育较快,湿度较大时,裂隙发育较缓慢。张水兵等^[16]采用不同掺量的石灰改良膨胀土,通过室内龟裂试验发现随着石灰掺量的增加,裂隙率的峰值明显减小。包惠明等^[17]通过室内模拟干湿循环试验,研究了干湿循环作用对膨胀土裂隙发育的影响,结果表明随着干湿循环次数的增加,膨胀土的裂隙发育越来越多。黄震等^[18]通过石灰和风化砂改良膨胀土,研究了改良膨胀土的裂隙发育对土体抗剪强度的影响,结果表明石灰和风化砂均能够明显地抑制改良膨胀土裂隙的发育,改良后膨胀土的黏聚力均有所增加。庄心善等^[19]研究了粉煤灰掺量对膨胀土裂隙率的影响,结果表明粉煤灰改良膨胀土的裂隙发育程度随粉煤灰掺量的增加而不断减小。王建磊等^[20]研究了水泥改良膨胀土的力学性质受干湿循环的影响,发现水泥能够明显提高膨胀土的抗剪强度,胀缩性也有明显减弱,且水泥改良膨胀土受干湿循环作用的影响很小。凡超文^[21]研究了黄泛区粉砂土改良膨胀土的基本特性以及最佳掺量问题,得出膨胀土中掺入 30% 粉砂土能够显著改善膨胀土的抗剪强度、抗压强度以及基本物理性能,未改良素膨胀土的自由膨胀率为 50.20%,30% 粉砂土改良后膨胀土的自由膨胀率为 33.50%,30% 粉砂土可将弱膨胀土改良成非膨胀土,由此可以满足工程建设使用标准。上述研究主要是针对化学改良膨胀土裂隙发育的一般规律以及裂隙的产生对土体强度的影响,但是对于粉砂土改良膨胀土抗裂性能方面的研究较少。

本文以粉砂土改良膨胀土在不同含水率下随干湿循环次数的裂隙发育为研究对象,开展室内模拟干湿循环试验和直接剪切试验,采用 MATLAB 图像处理分析技术,对干湿循环过程中所获得的裂隙图像进行处理,分析不同含水率的改良膨胀土随干

湿循环次数的裂隙发育规律以及裂隙的扩展对土体强度的影响。

1 试验方案

1.1 试验仪器

试验采用的仪器为 HK-PZ-SL 型 PPS 四联直剪仪,如图 1 所示。快剪法的剪切位移为 6 mm,剪切速率为 0.80 mm·min⁻¹,所设定的垂直压力分别为 100、200、300、400 kPa,所需土样尺寸为 61.80 mm×20 mm。



图 1 HK-PZ-SL 型 PPS 四联直剪仪

Fig. 1 HK-PZ-SL Type PPS Quadruple Straight Shear

1.2 试验土样

试验所用膨胀土取自河南省新乡市,取土深度

约为地表以下 1.50 m,该地段土层主要由第三系泥灰岩风化、中更新统残破积成因的重粉质壤土以及第四系上更新统坡洪积成因的黄土状重粉质壤土组成^[22]。根据《公路土工试验规程》(JTG 3430—2020)^[23]对土样进行液塑限试验、直接剪切试验、击实试验、自由膨胀率试验等确定膨胀土的物理性质指标(表 1)。从表 1 可知,试验用土的自由膨胀率为 50.20%,根据《膨胀土地区建筑技术规范》(GB 50112—2013)^[24]分类标准可判定所取土样为弱膨胀土。粉砂土取自黄河北岸的新阳市原阳县,通过室内试验确定该地区粉砂土的基本物理性质如表 2 所示。

1.3 试样制备

由于干湿循环作用对土体裂隙的发展影响比较大,因此试验采用烘干和喷雾的方式对改良膨胀土进行干湿循环处理。试验选择 30%的粉砂土改良膨胀土,为更加接近膨胀土在自然条件下的干湿循环作用,控制烘箱干燥时的温度为 40℃。为使试样含水率更加均匀,用保鲜膜严密包裹试样并置于密闭容器中养护 24 h。

表 1 试验所取膨胀土基本物理性质指标

Table 1 Basic Physical Property Indexes of Expansive Soil Taken in Test

| 液限/% | 塑限/% | 塑性指数/% | 黏聚力/kPa | 内摩擦角/(°) | 最优含水率/% | 最大干密度/(g·cm ⁻³) | 自由膨胀率/% |
|-------|-------|--------|---------|----------|---------|-----------------------------|---------|
| 36.07 | 16.10 | 19.97 | 78.50 | 25.64 | 15.90 | 1.78 | 50.20 |

表 2 试验所取粉砂土基本物理性质指标

Table 2 Basic Physical Property Indexes of Silty Sand Taken in Test

| 最大干密度/(g·cm ⁻³) | 最优含水率/% | 塑性指数/% |
|-----------------------------|---------|--------|
| 1.82 | 12.30 | 9.50 |

由击实试验确定 30%粉砂土改良膨胀土的最优含水率为 13.10%,最大干密度为 1.87 g·cm⁻³。对泡水后的压实试样进行试验确定最大饱和含水率为 22.95%,最低饱和含水率为 19.14%。设定每个干湿循环周期含水率为 10%~20%,根据《公路土工试验规程》(JTG 3430—2020)^[23],含水率梯度宜按 2%~3%递增,因此本试验分别设定 11%、13%、15%、17%四个含水率,进行 5 次干湿循环试验,每次循环需要 4 个试件,1 个含水率试验需要 24 个试件。将取回的膨胀土和粉砂土风干碾碎,过 2 mm 筛,将膨胀土中掺入 30%的粉砂土,放入 105℃烘箱中烘 8 h 以上,然后按照最大干密度和最优含水率配置土样,采用环刀尺寸为 61.80 mm(直径)×20 mm(高度),以 96%压实度静压成型。

1.4 试验方法

(1)首先取 24 个试件在室内自然风干,直到其质量达到 10%含水率时的质量。为避免试件遇水崩解破坏,可以用土工布包裹试件置于水槽中,不断向试件喷水,反复称量试件的质量,直到其达到预定含水率时的质量停止喷水。为使试件表面和内部达到一致含水率,取出 4 个试件解开土工布,用保鲜膜包裹试件,并放入密闭盒中养护 24 h,至此完成第 0 次干湿循环。

(2)对剩余的 20 个试件继续喷雾加湿,直到其质量达到含水率 20%时的质量,采用烘箱进行干燥处理,控制干燥时的温度为 40℃,然后取出试件解开土工布放入烘箱中进行脱水,反复称量试件的质量,直到其达到预定含水率时的质量停止脱水,取出 4 个试件用保鲜膜包裹放入密闭盒中养护 24 h,将剩余的 16 个试件继续脱水,直到其质量达到含水率 10%时的质量,停止脱水,至此完成第 1 次干湿循环。

(3)剩余的 16 个试件重复第 2 步的试验过程,继续完成第 2~5 次干湿循环。

(4)为保证拍摄的效果,采用支架将相机固定在同一高度,每次设置相同的拍摄参数,将干湿循环后的改良膨胀土放置在相机正下方拍摄,记录第 0、1、2、3、4、5 次干湿循环后的改良膨胀土的裂隙照片。采集土样的局部裂隙进行分析,经 MATLAB 处理后的图片如表 3 所示。

(5)经过干湿循环后对同一含水率的试样分别施加 100、200、300、400 kPa 垂直压力,然后以相同的剪切速率进行直剪试验,得出试件在各级荷载下的抗剪强度。

2 裂隙定量评价方法

2.1 裂隙率的定义

试验采用裂隙率对裂隙进行定量分析,计算公式为

$$\delta_f = \frac{\sum_{i=1}^n A_i}{A} \times 100\% \quad (1)$$

式中: δ_f 为裂隙率; n 为裂缝的总条数; A 为试样总面积; A_i 为第 i 条裂缝的面积。

2.2 裂隙图像的处理

为了更加直观并定量描绘不同含水率的改良膨胀土随干湿循环次数的裂隙发展变化规律,将前期图片通过 PHOTOSHOP 进行预处理,然后利用基于 MATLAB 开发的裂隙图像处理程序^[25]进行灰度化、二值化等处理,使得土体裂隙更加清晰,细节更加明显。最终得到转化后的二值化图像如图 2 所示,其中仅有黑白 2 种像素,裂隙用黑色像素表示,其余部分用白色像素表示,其具体的处理流程如图 3 所示。

量化裂隙的裂隙率为黑色像素占整个图片像素(黑色与白色像素的和)的百分比,计算公式为

$$\delta_f = \frac{n_b}{n_b + n_w} \times 100\% \quad (2)$$

式中: n_b 为黑色像素点的个数; n_w 为白色像素点个数。

3 裂隙产生的机理及试验结果分析

3.1 裂隙产生的机理

与一般土不同,膨胀土具有典型的吸水膨胀、失水收缩的特性。在降水和蒸发的过程中,土体会发生明显地膨胀或者收缩,导致土体孔隙变大,结构松散,裂隙开始产生。由于上部土体失水较快,膨胀土表面收缩,下部土体水分减少缓慢,导致膨胀土收缩

不均,裂隙将进一步发展,下部水分继续蒸发,从而使裂隙向土体深处延伸。

试验发现,用粉砂土、粉煤灰、水泥或石灰改良后的膨胀土也会在干湿循环后产生裂隙,但是相对于未改良的膨胀土,裂隙的产生有明显的改善,因此不同含水率改良膨胀土在干湿循环作用下的裂隙发展是本试验的研究重点。

3.2 试验结果分析

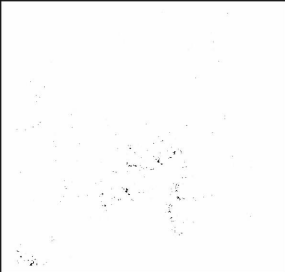

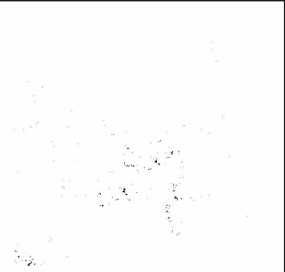




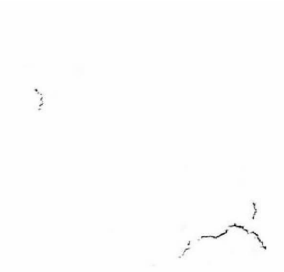
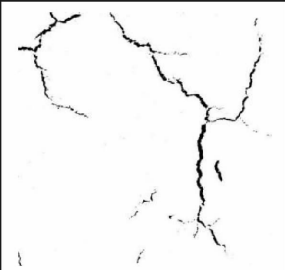





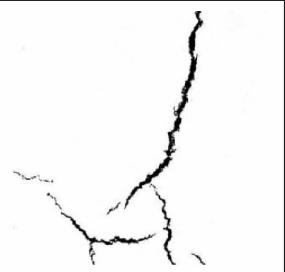


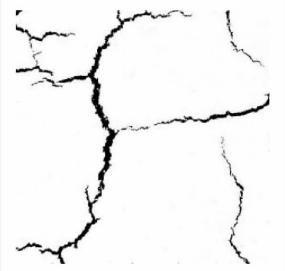
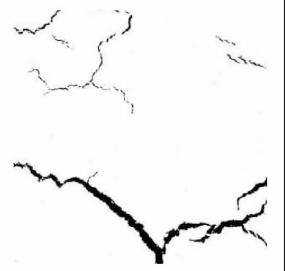
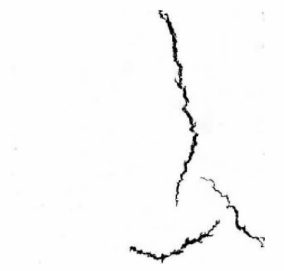




3.2.1 干湿循环次数和裂隙的发育规律

为了更加直观地描述不同含水率的改良膨胀土裂隙随干湿循环的变化规律,以干湿循环次数为横坐标,裂隙率为纵坐标,绘制出裂隙率在不同含水率下随干湿循环次数的变化曲线,如图 4 所示。

从图 4 可以发现,干湿循环次数和含水率对改良膨胀土裂隙的发展都起着重要的作用。不同含水率的改良膨胀土裂隙的发育位置、大小、走向不尽相同,但是其总体发育规律基本一致。当含水率为 11% 时,第 1 次干湿循环作用后的裂隙率基本为第 0 次循环的 3 倍以上,当含水率为 17% 时,第 1 次干湿循环作用产生的裂隙和第 0 次循环相比基本没有增长。不同含水率的改良膨胀土经过第 0、1 次干湿循环的作用,裂隙的产生都比较少,裂隙率曲线较平缓,裂隙发育比较慢;经过第 1 次干湿循环作用后,裂隙率曲线开始变陡,裂隙进入快速发展阶段;第 4、5 次之后,裂隙率曲线又开始变缓,裂隙基本不再增长。

随着含水率的增大,改良膨胀土的裂隙率在逐渐减小。这主要是因为含水率较高的改良膨胀土中含有较多的水分,水分子会在土颗粒周围形成一层致密的水膜,在水分蒸发时,水膜会慢慢变薄,基质吸力的作用会把土颗粒重新紧密排列。当水分蒸发时,改良膨胀土会由于干缩而产生一种拉应力,当土颗粒之间的黏结力大于干缩产生的拉应力时,裂隙的发育就会受到限制。因此在土体表面就没有表现出太多裂缝的开裂。当含水率为 11% 时,由于土体上部失水速率大于土体下部,所以上部土体失水较多,且由于膨胀土具有低渗透性的特点,导致土体内部水分很难在较短时间内均匀分布,土颗粒之间由于干缩而产生的拉应力大于土颗粒之间的黏结力,土体表面就开始形成裂隙。当再次吸水时土体又开始膨胀,裂隙开始愈合,但是发育的裂隙不能完全恢复到原来的状态,当再次脱湿时,原来的裂隙会首先张开,由于原有裂隙很脆弱,会沿着原有裂隙向土体深部继续延伸。含水率较低时,土颗粒之间的黏结

表 3 试样局部裂隙发育
Table 3 Partial Crack Development of Soil Sample

| 循环次数 | 不同含水率(%)时土样局部裂隙发育 | | | |
|------|---|---|--|---|
| | 11 | 13 | 15 | 17 |
| 0 |  |  |  |  |
| 1 |  |  |  |  |
| 2 |  |  |  |  |
| 3 |  |  |  |  |
| 4 |  |  |  |  |
| 5 |  |  |  |  |

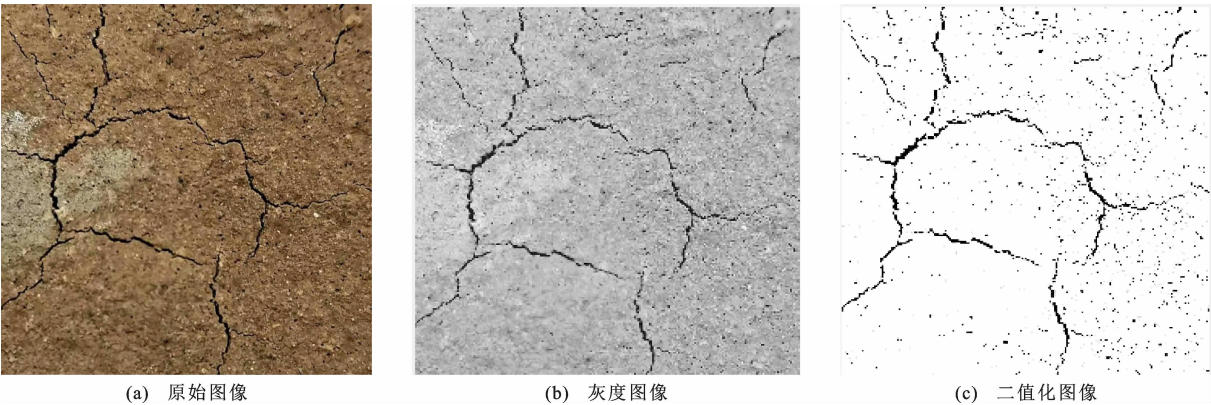


图 2 裂隙图像二值化处理

Fig. 2 Binary Processing of Crack Image

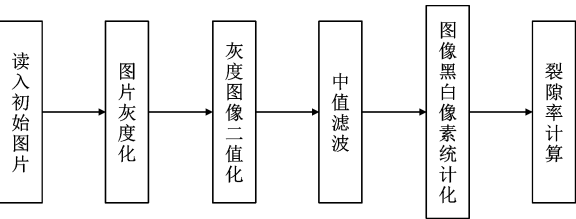


图 3 MATLAB 图片处理流程

Fig. 3 Image Processing Flow with MATLAB

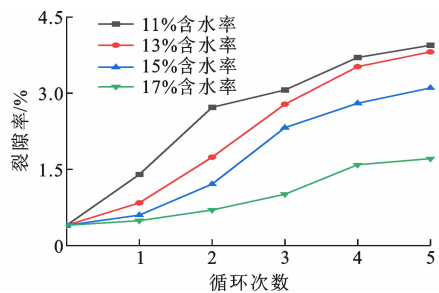


图 4 不同含水率下裂隙率与循环次数关系

Fig. 4 Relationship Between Crack Rate and Cycle with Different Moisture Contents

力随着水分流失在不断地减少,土体干缩产生的拉应力在不断地释放,在反复干湿循环作用下新的裂隙会持续发育,并不断地向土体深部延伸。因此低含水率的改良膨胀土的裂隙率随着干湿循环次数的增加而增加,其裂隙的发育、扩展会一直持续下去。

当含水率为17%时,土体内部含有较多的水

分,电荷的作用在土颗粒周围产生一层较厚的水膜,在水分蒸发的过程中,水膜会逐渐变薄,由于基质吸力的存在,土颗粒将会重新排列,彼此之间产生一种拉应力。由于蒸发的水量总是小于内部土体的含水量,土颗粒之间的黏结力大于干缩产生的拉应力,因此土体裂隙发育比较缓慢。

3.2.2 裂隙对抗剪强度的影响

为了研究干湿循环效应对不同含水率改良膨胀土强度的影响,对改良膨胀土进行了5次干湿循环后,分别施加100、200、300、400 kPa的4种垂直压力进行直接剪切试验,得到不同含水率改良膨胀土在干湿循环下的抗剪强度参数,如表4所示。

从表4可以看出,随着干湿循环次数的增加,不同含水率改良膨胀土的黏聚力和内摩擦角都在减小,究其原因主要是由于随着干湿循环的作用,改良膨胀土内外水分蒸发情况不同,土体表面水分蒸发较快,土体由于干缩而产生裂缝,表面变的松散,水分会沿着已有裂缝向土体深部延伸,导致裂缝发展越来越多。由于收缩变形是完全不可逆的,土体结构开始遭到破坏,整体稳定性降低,土颗粒之间摩擦力减小,导致土体黏聚力和内摩擦角不断减小。不同含水率改良膨胀土的内摩擦角和裂隙率的关系如图5所示。

从图5中可以看出,随着裂隙率的增加,内摩擦

表 4 不同含水率的改良膨胀土经历干湿循环后的抗剪强度参数

| 含水率/% | 不同干湿循环次数下的内摩擦角 $\varphi/(^{\circ})$ | | | | | | 不同干湿循环次数下的黏聚力 c/kPa | | | | | |
|-------|-------------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|------------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|
| | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| 11 | 26.70 | 24.20 | 24.80 | 24.30 | 23.80 | 23.60 | 210.50 | 178.00 | 148.50 | 146.50 | 118.00 | 105.40 |
| 13 | 24.50 | 22.00 | 23.00 | 21.00 | 19.80 | 19.50 | 118.50 | 108.00 | 103.50 | 67.50 | 64.00 | 49.50 |
| 15 | 22.50 | 21.00 | 21.20 | 19.50 | 19.20 | 18.90 | 95.10 | 70.50 | 60.50 | 42.30 | 37.50 | 32.80 |
| 17 | 20.10 | 19.00 | 19.50 | 19.10 | 18.70 | 18.20 | 72.30 | 52.50 | 45.50 | 34.60 | 32.00 | 31.70 |

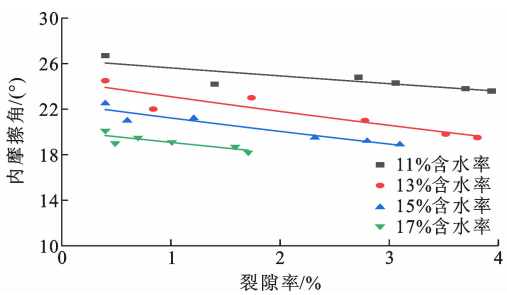


图 5 不同含水率改良膨胀土内摩擦角和裂隙率的关系

Fig. 5 Relationship Between Internal Friction Angle and Crack Rate of Improved Expansive Soil with Different Moisture Contents

角随着含水率的增大而逐渐减小。因为含水率较大的土样由于电荷作用会在土颗粒表面形成一层水膜,从而使得内摩擦角变小,随着干湿循环次数的增加,改良膨胀土的内摩擦角降低幅度较小。当含水率为 11%、13%、15%、17% 时,经过 5 次干湿循环作用后,裂隙率分别增长了 8.85 倍、8.53 倍、6.75 倍、3.28 倍,可以看出当含水率较大时裂隙的发育较弱,但是改良膨胀土的强度却是最低的,这是由于含水率较高时,土颗粒之间存在较高的孔隙水压力,当孔隙水压力大于土颗粒之间的拉应力时,裂隙发育就比较困难,同时强度也是最低的,不同含水率的土样随着干湿循环次数的增加,裂隙的发育程度减小。

对不同含水率的粉砂土改良膨胀土在一定干湿循环次数下的裂隙率进行统计,将粉砂土改良膨胀土黏聚力和裂隙率的数据进行相关拟合,结果见图 6。拟合函数和拟合系数见表 5,其中, a 、 b 均为不同含水率下的指数, R^2 为裂隙率和黏聚力 2 组数据的判定系数。

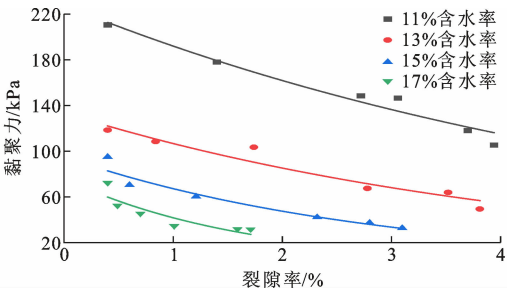


图 6 不同含水率改良膨胀土黏聚力和裂隙率的关系

Fig. 6 Relationship Between Cohesion and Crack Rate of Improved Expansive Soil with Different Moisture Contents

从图 6 和表 5 可以看出,黏聚力和裂隙率近似线性关系。在 5 次干湿循环过程中,不同含水率的粉砂土改良膨胀土的黏聚力都随着裂隙率的增加而

表 5 改良膨胀土黏聚力与裂隙率之间的拟合函数及拟合系数

| Table 5 Fitting Function and Fitting Coefficient Between Cohesion and Crack Rate of Improved Expansive Soil | | | | |
|---|--------------------|--------|-------|-------|
| 含水率/% | 拟合函数 | a | b | R^2 |
| 11 | $c=ae^{b\delta_f}$ | 227.69 | -0.17 | 0.95 |
| 13 | | 133.32 | -0.22 | 0.91 |
| 15 | | 95.09 | -0.35 | 0.87 |
| 17 | | 76.18 | -0.60 | 0.70 |

不断降低,这说明粉砂土改良膨胀土反复胀缩产生的变形不能完全恢复,因此在土体产生裂隙后,原有的裂隙未能完全闭合,新的裂隙不断产生,使得原有裂隙变的非常脆弱,导致土体结构变松散,从而使得土体的黏聚力逐渐降低。

4 结 语

(1)针对膨胀土地区的基础工程,本文进行了室内模拟试验,初步获得不同含水率下改良膨胀土裂隙率随干湿循环次数的变化规律,研究结论具有一定的工程参考价值。

(2)MATLAB 软件的图像处理技术为土体裂隙定量分析提供了方便快捷的途径,在评价改良膨胀土的裂隙率方面具有高准确性、快捷的优点。进一步开发数字图像处理技术来定量分析土体的裂隙,将提高图像分析的精确性;开发三维图像处理分析的技术,将能更加全面、快速、高效地实现对土体裂隙的定量分析。

(3)含水率较低的粉砂土改良膨胀土前两次的干湿循环对裂隙的发展影响最大,从宏观和微观上可以发现裂隙发育较快,土体表面变松散,结构整体性遭到破坏,土颗粒之间的黏结力变小,致使改良膨胀土的抗剪强度逐渐降低。第 2 次干湿循环以后,改良膨胀土的裂隙率仍在增长,但是增长幅度较小,裂隙率曲线较平缓。

(4)对于含水率较高的粉砂土改良膨胀土,裂隙率的增长趋势一直较平缓,虽然裂隙发育的较少或者扩展较慢,但是高含水率改良膨胀土的抗剪强度却是最低的。因此实际基础工程宜在干旱季节施工,对于有条件的工程场地,应设法避免干湿循环的作用,以保障基础的整体安全性、稳定性。

参考文献:

References:

[1] 廖世文. 膨胀土与铁路工程[M]. 北京:中国铁道出版社,1984.

- LIAO Shi-wen. Expansive Soil and Railway Engineering[M]. Beijing: China Railway Publishing House, 1984.
- [2] 刘特洪. 工程建设中的膨胀土问题[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1997.
- LIU Te-hong. Problem of Expansive in Engineering Construction[M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 1997.
- [3] 郑健龙, 杨和平. 公路膨胀土工程[M]. 北京: 人民交通出版社, 2009.
- ZHENG Jian-long, YANG He-ping. Expansive Soil Engineering of Highway[M]. Beijing: China Communications Press, 2009.
- [4] 唐朝生, 施 斌, 刘 春. 膨胀土收缩开裂特性研究[J]. 工程地质学报, 2012, 20(5): 663-673.
- TANG Chao-sheng, SHI Bin, LIU Chun. Study on Desiccation Cracking Behaviour of Expansive Soil[J]. Journal of Engineering Geology, 2012, 20(5): 663-673.
- [5] 孙树林, 郑青海, 唐 俊, 等. 碱渣改良膨胀土室内试验研究[J]. 岩土力学, 2012, 33(6): 1608-1612.
- SUN Shu-lin, ZHENG Qing-hai, TANG Jun, et al. Experimental Research on Expansive Soil Improved by Soda Residue[J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, 33(6): 1608-1612.
- [6] AHMADI CHENARBONI H, HAMID LAJEVARDI S, MOLAABASI H, et al. The Effect of Zeolite and Cement Stabilization on the Mechanical Behavior of Expansive soils[J]. Construction and Building Materials, 2021, 272: 121630.
- [7] LU Y, LIU S H, ZHANG Y G, et al. Freeze-thaw Performance of a Cement-treated Expansive Soil[J]. Cold Regions Science and Technology, 2020, 170: 102926.
- [8] 杨 俊, 袁 凯, 张国栋, 等. 干湿循环对风化砂改良膨胀土回弹模量影响研究[J]. 长江科学院院报, 2015, 32(11): 40-44, 51.
- YANG Jun, YUAN Kai, ZHANG Guo-dong, et al. Effect of Wetting-drying Cycle on Resilient Modulus of Expansive Soil Improved by Weathered Sand[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2015, 32(11): 40-44, 51.
- [9] PHANIKUMAR B R, DEMBLA S, YATINDRA A. Swelling Behaviour of an Expansive Clay Blended with Fine Sand and Fly Ash[J]. Geotechnical and Geological Engineering, 2021, 39(1): 583-591.
- [10] 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.
- [11] 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(1): 1-12.
- [12] RAO S M, REDDY B V V, MUTTHARAM M. Effect of Cyclic Wetting and Drying on the Index Properties of a Lime-stabilised Expansive Soil[J]. Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Ground Improvement, 2001, 5(3): 107-110.
- [13] COSTA S, KODIKARA J, SHANNON B. Salient Factors Controlling Desiccation Cracking of Clay in Laboratory Experiments[J]. Géotechnique, 2013, 63(1): 18-29.
- [14] LECOCQ N, VANDEWALLE N. Dynamics of Crack Opening in a One-dimensional Desiccation Experiment[J]. Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications, 2003, 321(3/4): 431-441.
- [15] 刘观仕, 陈永贵, 曾宪云, 等. 环境湿度与温度对压实膨胀土裂隙发育影响试验研究[J]. 岩土工程学报, 2020, 42(2): 260-268.
- LIU Guan-shi, CHEN Yong-gui, ZENG Xian-yun, et al. Effects of Ambient Air Humidity and Temperature on Crack Development of Compacted Expansive Soils[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2020, 42(2): 260-268.
- [16] 张水兵, 谢建斌, 林海威, 等. 基于分形理论的改良膨胀土龟裂发展规律探究[J]. 水电能源科学, 2018, 36(7): 95-98.
- ZHANG Shui-bing, XIE Jian-bin, LIN Hai-wei, et al. Development Law of Improved Expansive Soil Cracks Based on Fractal Theory[J]. Water Resources and Power, 2018, 36(7): 95-98.
- [17] 包惠明, 魏雪丰. 干湿循环条件下膨胀土裂隙特征分形研究[J]. 工程地质学报, 2011, 19(4): 478-482.
- BAO Hui-ming, WEI Xue-feng. Fractal Research the Crack Characteristic Expansive Soil Under Wetting-drying Cycle[J]. Journal of Engineering Geology, 2011, 19(4): 478-482.
- [18] 黄 震, 陈 斌. 改良膨胀土胀缩裂隙及与抗剪强度的关系研究[J]. 水文地质工程地质, 2016, 43(3): 87-93.
- HUANG Zhen, CHEN Cheng. A Study of the Swelling Shrinkage Cracks of the Modified Expansive Soil and Its Relationship with the Shear Strength[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2016, 43(3):

- 87-93.
- [19] 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 Xin-shan, PENG Wei-ke, WU Jing-bo. 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.
- [20] 王建磊,王艳巧,杨广栋,等.干湿循环条件下水泥改性膨胀土变形和强度试验[J].郑州大学学报(工学版),2016,37(4):62-66.
- WANG Jian-lei, WANG Yan-qiao, YANG Gang-dong, et al. Experimental Research Deformation and Shear Strength on Cement-treated Expansive Soil During Wetting-drying Cycles[J]. Journal of Zhengzhou University (Engineering Science), 2016, 37(4): 62-66.
- [21] 凡超文.黄泛区粉砂土改良弱膨胀土工程特性研究[D].开封:河南大学,2019.
- FAN Chao-wen. Study on Engineering Characteristics of Improved Weak Expansive Soil of Silty Sand Along the Yellow Rive [D]. Kaifeng: Henan University, 2019.
- [22] 何文龙.南水北调中线新乡潞王坟膨胀土改良及生态修复研究[D].郑州:华北水利水电大学,2015.
- HE Wen-long. Research on the Improvement and Ecological Restoration of the Luwangfen Expansive Soil in Xinxiang, the Middle Route of the South-to-North Water Transfer Project[D]. Zhengzhou: North China University of Water Resources and Electric Power, 2015.
- [23] 公路土工试验规程:JTG 3430—2020[S].北京:人民交通出版社,2020.
- Test Methods of Soils for Highway Engineering: JTG 3430—2020 [S]. Beijing: China Communications Press, 2020.
- [24] 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.
- Technical Code for Building in Expansive Soil Regions: GB 50112—2013 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2013.
- [25] 王家文,李仰军. MATLAB 7.0 图形图像处理[M].北京:国防工业出版社,2006.
- WANG Jia-wen, LI Yang-jun. MATLAB 7.0 Graph and Image Processing [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2006.