

DOI: 10.13718/j.cnki.xdzk.2022.08.019

膨胀土裂隙演化规律及掺砂改良效果试验研究

张继伟¹, 汪时机^{1,2}, 骆赵刚¹

1. 西南大学 工程技术学院, 重庆 400715;
2. 重庆市建筑物全生命周期健康检测与灾害防治工程研究中心, 重庆 408100

摘要: 在荷载和气候环境作用下, 不同种类的膨胀土裂隙开展程度不同. 通过大尺寸泥浆试样开展一系列膨胀土干缩裂隙演化试验, 并利用数字图像处理技术对裂隙演化的整个过程进行定量分析. 试验对比研究了 3 种膨胀土的裂隙演化情况, 并对其中裂隙开展程度最高的邯郸膨胀土进行风化砂改良. 试验结果表明, 3 种地区的膨胀土裂隙演化过程可以分为 4 个阶段, 分别是裂隙萌芽阶段、裂隙发育阶段、裂隙拓宽阶段和裂隙稳定阶段; 3 种不同地区膨胀土的裂隙形态有较大差异, 合肥膨胀土裂隙密集且细长, 邯郸膨胀土裂隙稀少且粗短, 而广西膨胀土裂隙发育不良, 存在未贯通裂隙; 邯郸膨胀土存在“次生微裂隙”特性, 会对土体造成进一步劣化; 风化砂改良会加快邯郸膨胀土裂隙的发育, 使其在更短的含水率区间内完成整个裂隙演化过程; 风化砂改良对邯郸膨胀土的裂隙开展程度有显著的抑制作用, 在掺砂率小于 30% 时, 掺砂率越大, 抑制效果越好.

关键词: 膨胀土; 裂隙演化; 定量分析; 掺砂改良; 抑制作用

中图分类号: TU443

文献标志码: A

文章编号: 1673-9868(2022)08-0176-09

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Experimental Study on Crack Evolution Law of Expansive Soil and Improvement Effect of Sand Mixing

ZHANG Jiwei¹, WANG Shiji^{1,2}, LUO Zhaogang¹

1. College of Engineering and Technology, Southwest University, Chongqing 400715, China;
2. Chongqing Engineering Research Center of Structure Health Monitoring and Disaster Prevention in Full-Life-Cycle, Chongqing 408100, China

Abstract: Under the action of load and climate environment, different types of expansive soil cracks develop differently. Through large-size mud samples, a series of experiments on the evolution of dry shrinkage cracks in soil were carried out. The whole process of crack evolution was quantitatively analyzed by digital image processing technology. The evolution of cracks of three kinds expansive soil were studied. Improvement of expansive soil of the Handan, which has the highest degree of crack development, was performed with weathered sand. The experimental results showed that the crack evolution of expansive soil in three areas can be divided into four stages, named as crack germination stage, crack development stage, crack

收稿日期: 2021-09-04

基金项目: 国家自然科学基金项目(11972311, 11572262).

作者简介: 张继伟, 硕士研究生, 主要从事土体裂隙量化表征方面的研究.

通信作者: 汪时机, 教授, 博士研究生导师.

widening stage and crack stability stage. There were great differences in the crack morphology of expansive soils in three different areas. The cracks of Hefei expansive soil were dense and slender, the cracks of Handan expansive soil were rare and short, the cracks of Guangxi expansive soil were poorly developed with unpenetrated cracks. Handan expansive soil had the characteristic of “secondary micro-cracks”, which caused a further damage to the soil. The improvement by weathered sand accelerated the development of cracks in Handan expansive soil by completing the whole process of crack evolution in a shorter water content interval. The development of cracks in Handan expansive soil was obviously reduced by the improvement with weathered sand. When the sand mixing rate was less than 30%, the greater the sand rate, the better the inhibition effect.

Key words: expansive soil; cracking evolution; quantitative analysis; improvement with sand; inhibition

膨胀土是一种以亲水性蒙脱石为主要矿物成分的特殊黏性土,具有显著的胀缩性、超固结性和裂隙性^[1]。膨胀土自身特殊的工程特性加上外界气候条件的变化,使其在天然状态下往往存在着大量杂乱无章的裂隙网络^[2]。无论是裂隙网络对土体结构完整性的直接破坏,还是裂隙网络通过增大地表水的渗流路径来加剧对土体的侵蚀,都会劣化膨胀土的物理力学性质^[3],这种劣化效应是膨胀土地区地质灾害和工程事故频发的主要原因^[4]。因此,研究膨胀土的裂隙演化规律对于工程地质灾害的防治具有重要意义。

众多学者采用不同试验方法以不同的角度对土体裂隙进行了许多研究。袁俊平等^[5]利用光学显微镜分别对原状膨胀土和重塑膨胀土的裂隙演化过程进行全程观测,发现灰度熵可以作为评价裂隙发育程度的一个指标,灰度熵越大,裂隙演化越完善;唐朝生等^[6-9]结合国内外已有研究成果,对裂隙演化的形成过程、影响因素、定量分析进行了探讨,建立了一套裂隙图像分析系统以提取裂隙形态参数指标,并探究了环境温度对膨胀土裂隙演化规律的影响;骆赵刚等^[10-11]通过改进膨胀土泥浆试样并结合图像处理对裂隙演化过程进行定量分析,探讨了尺寸和温度及二者耦合作用对裂隙演化的影响,发现厚度对裂隙演化过程影响最为显著,厚度越小,裂隙越密集细长。除了初始状态、温度、尺寸等影响因素,土体的开裂过程可能还会受到自身矿物成分及其物理力学性质的影响,即不同性质膨胀土的开裂规律可能不同,目前还缺少相关方面的细致研究。

此外,在实际工程中常采用掺加化学或生物添加剂的方法来改善膨胀土恶劣的工程特性。杨俊等^[12]研究了掺砂改良膨胀土的无荷膨胀率随干湿循环次数的变化规律,发现风化砂改良对土体无荷膨胀率的抑制效果不大,且抑制效果随着干湿循环次数的增加而逐渐减小;康靖宇等^[13]通过室内试验对水玻璃改良土的力学特性展开研究,验证了水玻璃改良可以抑制膨胀土的膨胀特性并提高它的强度;庄心善等^[14]通过定量分析粉煤灰改良膨胀土的裂隙演化过程,发现粉煤灰掺量越大,改良膨胀土裂隙度越小,但改良后的裂隙萌发临界含水率无明显变化;覃永富等^[15]利用巨大芽孢杆菌改良膨胀土,发现改良后的膨胀土强度参数都有较为明显的提高;Izzo 等^[16]研究了土壤在多种改良技术下的干燥开裂试验,发现添加生物制品塑料是抑制土体开裂最有效的改良方法。但是在已有的研究报道中,定量地评价改良膨胀土裂隙特性的研究还比较鲜见。

本文主要通过开展室内土体裂隙演化试验,利用数字图像处理技术对裂隙演化过程进行定量分析。试验对比了广西、合肥、邯郸 3 种膨胀土的裂隙演化情况,对裂隙开展程度最高的邯郸膨胀土进行了风化砂改良试验,并对其改良效果加以评价。试验结果对进一步揭示膨胀土裂隙演化的机理和膨胀土地区的工程治理都有一定的参考价值。

1 试验材料与方法

1.1 试验材料

本次试验所用膨胀土分别采自广西南宁、安徽合肥滨湖新区和河北邯郸,它们的基本物理性质指标如表 1 所示。将取回的膨胀土分别烘干、碾碎、再烘干后,取 2 kg 过 2 mm 筛的膨胀土备用。所用风化砂取自重庆市北碚区嘉陵江流域附近,将取回的砂先烘干再筛分,其基本物理性质如表 2 所示。

表 1 试验膨胀土基本物理性质指标

膨胀土类别	液限(w_l)/%	塑限(w_p)/%	缩限(I_p)/%	自由膨胀率/%
广西膨胀土	53.4	25.3	10.9	62
合肥膨胀土	52.6	26.1	9.7	51
邯郸膨胀土	81.9	47.3	13.2	139

表 2 风化砂基本性质指标

颗粒组成/%			级配指数	
1~2 mm	<1 mm	<0.1 mm	不均匀系数 C_u	曲率系数 C_c
29.5	60.2	10.3	24.1	0.6

1.2 试验方法

试验采用直径 300 mm、高 60 mm 的圆柱体无盖容器,根据预试验测试结果,控制试样的干密度为 1.1 g/cm^3 ,厚度约为 10 mm,此时试样易于制作,均匀性好,裂隙网络特征较为明显.试样制备前将容器四周均匀涂抹上凡士林,以消除边界摩擦对裂隙开展的影响.试样制备时,先将称好质量的干土和砂均匀混合后倒入容器,再缓慢加水直到试样过饱和呈可流动状态,然后搅拌、振捣 5 min 左右,以排除试样中的气泡并使其均匀成型.将试样静置 24 h 后放入烘箱,使其持续失水.之后每隔 1 h 将试样取出放在预先设置好的拍照台上称质量、拍照,记录下裂隙演化图像并根据试样整体质量的减少量来计算出对应图像的含水率.当裂隙骨架形态基本不变后,增大时间间隔为 3 h,直到试样质量减少量小于 0.1 g.控制烘箱温度为 $35\text{ }^{\circ}\text{C}$,以模拟实际膨胀土地区干旱的气候条件.

试验总共设置 18 个试样,分别为广西、合肥、邯郸膨胀土和掺砂率为 10%,20%,30%的改良邯郸膨胀土 6 组,每组 3 个平行试样,结果取均值.

1.3 图像处理

试验得到的裂隙图片先通过 PS 软件将试样与背景分离出来,然后再采用 MATLAB 软件对分离出来的裂隙图像进行处理,处理过程包括灰度化、二值化、除杂、膨胀腐蚀和骨架化等,得到白色像素点表示的裂隙和裂隙骨架,统计裂隙和裂隙骨架的像素点.通过公式(1)、公式(2)将像素尺寸转化为实际尺寸,通过公式(3)、公式(4)、公式(5)计算得到裂隙基本指标:裂隙度 R_f 、裂隙总长度 L_f 和裂隙平均宽度 B_f .

$$\frac{A_{\text{实}}}{A_{\text{像}}}=\frac{A_0}{A_0'}$$

(1)

$$\frac{L_{\text{实}}}{L_{\text{像}}}=\sqrt{\frac{A_0}{A_0'}}$$

(2)

式中, $A_{\text{实}}$ 和 $L_{\text{实}}$ 表示实际面积和实际长度, $A_{\text{像}}$ 和 $L_{\text{像}}$ 表示像素点面积、像素点长度, $A_0=\pi d^2/4$ 表示试样实际总面积, A_0' 表示像素点总面积.

$$R_f=\frac{A_{\text{实}}}{A_0}$$

(3)

$$L_f=L_{\text{实}}$$

(4)

$$B_f=\frac{A_{\text{实}}}{L_f}$$

(5)

式中, R_f 表示裂隙度, L_f 表示裂隙总长度, B_f 表示裂隙平均宽度.

2 试验结果与讨论

2.1 3 种不同地区膨胀土裂隙演化规律

图 1 分别是广西、合肥和邯郸 3 种膨胀土的裂隙演化过程,通过图 1 发现,3 种不同地区的膨胀土裂隙演化基本规律相同,只是在演化细节上有所差异.整个裂隙演化过程可以划分为 4 个阶段,第 1 个阶段是

裂隙萌芽阶段,随着干燥失水过程的持续进行,试样含水量不断减小,直到表面自由水分完全蒸发,试样开始收缩并与光滑容器四周分离,不久后裂隙便在试样表面的多个薄弱点萌发,如图 1(a),图 1(e),图 1(i)所示. 广西和合肥膨胀土的裂隙萌芽含水率在 40%左右,邯郸膨胀土的裂隙萌芽含水率在 70%左右;第 2 个阶段是裂隙发育阶段,伴随着较小的试样含水率变化,新裂隙不断萌发和旧裂隙迅速发展,主要表现在新旧裂隙不断延伸并相交,试样裂隙表面骨架不断变化,最终趋于稳定,在这个阶段裂隙有少量的拓宽、加深. 广西和合肥膨胀土的裂隙骨架稳定含水率在 30%左右,邯郸膨胀土的裂隙骨架稳定含水率在 50%左右;第 3 个阶段是裂隙拓宽阶段,是裂隙演化过程中的主要耗时阶段,试样的裂隙在基本不变的骨架下不断拓宽、加深,直到将土样分割成多个独立的土块;第 4 个阶段是裂隙稳定阶段,试样含水率减小到某一阈值,试样失水困难,裂隙形态基本稳定不变,如图 1(d),图 1(h),图 1(l)所示,3 种膨胀土的裂隙稳定含水率分别在 8%,6%,11%左右.

通过图 1(d),图 1(h),图 1(l)发现,3 种膨胀土的最终裂隙形态差别较大,合肥膨胀土裂隙密集而细长,很多条细小裂隙将土样分割成数十个土块,土块面积小而均匀;邯郸膨胀土裂隙少而宽大,较少的宽大裂隙将土样分割成十几个土块,土块面积大;广西膨胀土裂隙形态则介于两者之间,但其存在明显的裂隙发育不良特征,有多条未贯通裂隙.

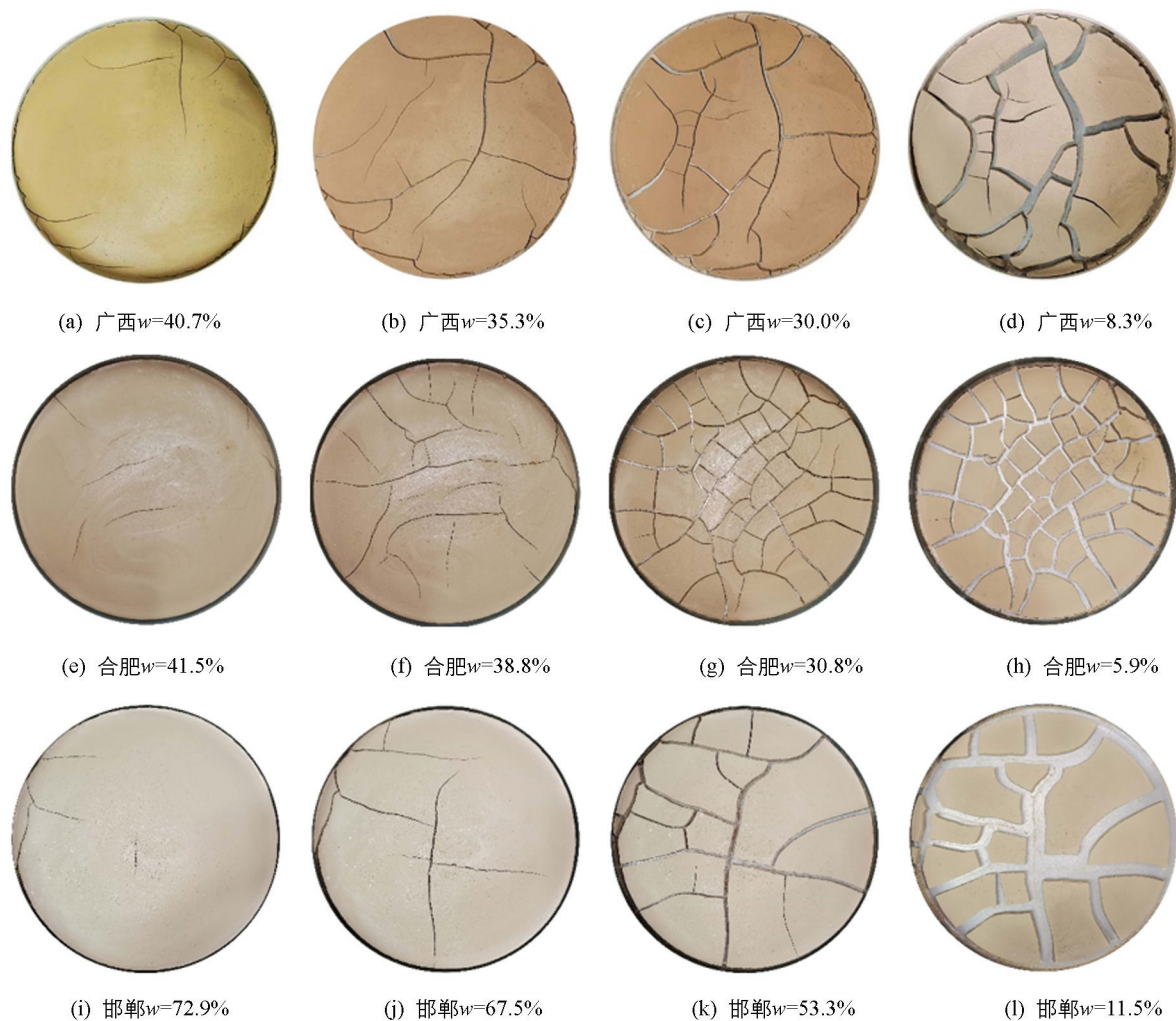


图 1 膨胀土裂隙演化过程

在试验的最后,不同于广西和合肥膨胀土,邯郸膨胀土在裂隙稳定阶段,土样表面相继萌发了多条裂隙,这些裂隙十分细小,并且没有继续发育的趋势,如图 2 所示,这种二次裂隙的萌发称为邯郸膨胀土的“次生微裂隙”特性. 如图 2(a)所示,在裂隙稳定阶段的邯郸膨胀土试样土块面积大,土块四周裸露,相比于只有一个自由表面的土块中部来看,土块四周的失水速度明显比中部快许多,所以当土块整体含水率接

近失水困难含水率临界值时,土块中部的含水率还明显高于失水困难含水率,这里的失水困难含水率指的是在持续蒸发失水条件下,试样的水分几乎不再减少的一个临界含水率,与土体的缩限大小密切相关.当试样整体含水率由 11.5%降低到 11%时,伴随着的是土块中部含水率的较大幅度减小,并且由于邯郸膨胀土的胀缩性较强,所以由土体饱和度下降而引发的吸力增大,随之产生的表面张拉应力也迅速增大,当它超过土体表面的抗拉强度后,裂隙便又在大土块中部出现.最后,大土块中部的含水率很快也下降到失水困难含水率临界值附近,水分蒸发困难,二次裂隙的演化缺少动力,只能保持刚开裂时的形态,试样的裂隙形态彻底稳定不变.

这些二次裂隙虽然细小,但是会直接破坏土体的完整性,增强渗透性,降低土体的强度,对土体工程性质造成进一步的劣化,在实际工程中应加以重视.



图 2 邯郸膨胀土“次生微裂隙”特性

图 3 是 3 种膨胀土的裂隙基本指标随含水率的变化曲线.从图 3(a)中可以看出,土体裂隙萌发后,3 种膨胀土的裂隙度随含水率的变化趋势相同,随着含水率减小,裂隙度先快速增加,后增加速度慢慢放缓,最终趋于稳定,达到最大值,并且广西膨胀土和合肥膨胀土的裂隙度变化曲线基本重合,从图 1 来看,两种膨胀土的演化过程也非常相似,结合两者相差较小的基本物理性质指标,表明不同土体的基本物理性质相近,其裂隙的演化规律也基本相同. Tang 和 Yesiller 等^[17-18]指出膨胀土的裂隙开展程度与其本身的收缩特性和黏粒含量密切相关,总体上说,膨胀土塑性指数越高,裂隙开展程度就越高.邯郸膨胀土塑性指数高达 34.6,裂隙开展程度最高,裂隙度最大,达到了 0.39,说明试样表面近 40%的面积被裂隙覆盖.广西膨胀土的塑性指数为 28.1,比合肥膨胀土的塑性指数要大,但是因为广西膨胀土裂隙发育不良,所以裂隙度最小,只有 0.23.图 3(b)是 3 种膨胀土裂隙总长度随含水率的变化曲线,裂隙总长度的增长主要发生在裂隙发育阶段,总长度在较高的含水率下达到最大值并一直保持不变.可以看出,合肥膨胀土的裂隙总长度最大为 3 558 mm,广西膨胀土次之为 2 615 mm,邯郸膨胀土最小为 2 227 mm.结合裂隙度曲线,发现合肥膨胀土裂隙度小,裂隙总长度大,表现出裂隙比较细长,而邯郸膨胀土裂隙度大,裂隙总长度小,表现出裂隙比较粗短,这与图 1 中的结果一致.图 3(c)是裂隙平均宽度随含水率的变化曲线,3 种膨胀土的裂隙平均宽度随着含水率的下降逐渐增加,最后趋于稳定.邯郸膨胀土的裂隙平均宽度最大为 12.3 mm,广西膨胀土次之为 6.2 mm,合肥膨胀土最小为 4.9 mm.3 种膨胀土的裂隙平均宽度与裂隙度的变化趋势相似,说明裂隙开展程度越高,裂隙的平均宽度越大.因为邯郸膨胀土的“次生微裂隙”特性,二次裂隙十分细小,可以看作是面积为 0 的裂隙线,所以邯郸膨胀土的裂隙总长度与平均宽度曲线在最后有突变情况.

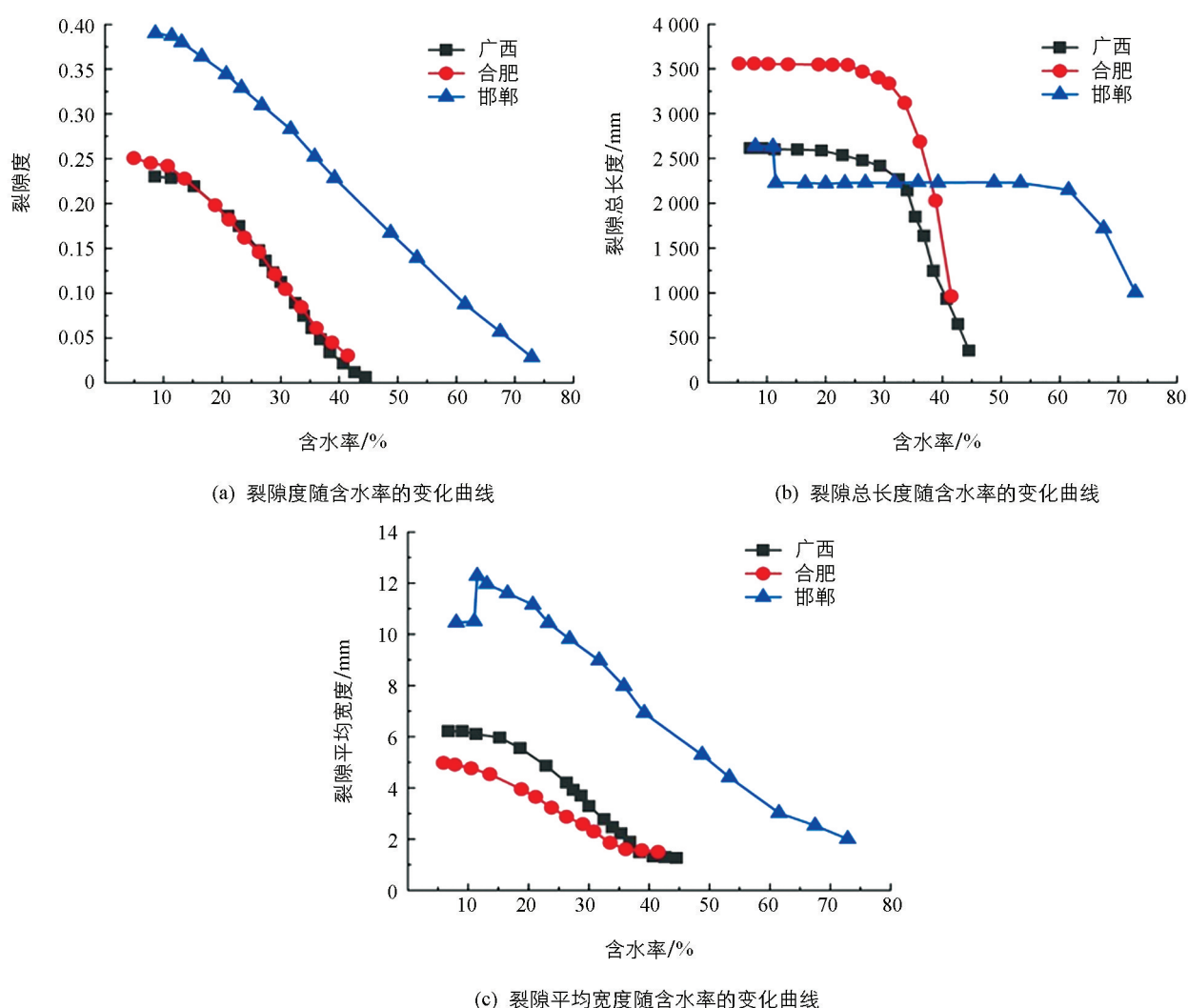


图 3 3 种膨胀土裂隙基本指标变化曲线

2.2 掺砂邯郸膨胀土裂隙改良效果

图 4 是不同掺砂率的邯郸膨胀土的裂隙演化过程,可以看出掺砂改良并没有改变邯郸膨胀土裂隙演化的基本规律,整个裂隙演化过程依然可以分为 4 个阶段。对比图 4(d),图 4(h),图 4(l),图 4(p)可以发现,随着掺砂率的增加,邯郸膨胀土裂隙的面积和宽度逐渐减小,土块数量逐渐减少,土块面积逐渐增大;并且邯郸膨胀土的“次生微裂隙”特性也在减弱甚至消失,当掺砂率在 10% 时,邯郸膨胀土还表现出较弱的“次生微裂隙”特性,在大土块表面还有几条细小裂隙如图 4(h)所示,当掺砂率在 20% 和 30% 时,“次生微裂隙”特性完全消失,这说明风化砂改良对邯郸膨胀土二次裂隙的开展有较好的抑制作用,可以避免邯郸膨胀土受到二次损害,增强土体的完整性。

图 5 是不同掺砂率的邯郸膨胀土裂隙基本指标随含水率变化曲线,从图中可以发现,风化砂改良对邯郸膨胀土的开裂含水率几乎没有影响,总体还是保持在 70%~80%。但是加入风化砂的邯郸膨胀土的裂隙度、裂隙总长度和裂隙平均宽度都在更高的含水率情况下达到最大值并保持稳定,且掺砂率越高,稳定含水率越大,说明风化砂改良加快了邯郸膨胀土的裂隙发育,在实际膨胀土地基工程中,土体裂隙越快发育完全,我们就能越早地采取相应补救措施,达到节约时间和成本的目的,这样看来,这种“加快效应”对实际工程中的地基长期稳定性总体上是有利的。图 5(a)是不同掺砂率的邯郸膨胀土裂隙度随含水率的变化曲线,其中掺砂率 30% 的改良土的裂隙度最小,最大只有 0.22,比没有改良的土体裂隙度降低了 44%;其次是掺砂率 20% 的改良土,裂隙度有 0.31,比原土样降低了 21%;最后是掺砂率 10% 的改良土,裂隙度有

0.36, 只比原土样降低了 7.7%。图 5(b) 为不同掺砂率的邯郸膨胀土裂隙总长度随含水率的变化曲线, 10%, 20%, 30% 掺砂率的改良土的最大裂隙总长度分别是 2 051, 1 887, 1 668 mm, 比没有改良的膨胀土裂隙总长度分别降低了 7.9%, 15.2%, 25%。结合裂隙度的改良情况来看, 较低的掺砂率对邯郸膨胀土裂隙开展程度的抑制效果不太明显, 越高的掺砂率对邯郸膨胀土的裂隙开展程度有越好的抑制效果。图 5(c) 是不同掺砂率的邯郸膨胀土的裂隙平均宽度随含水率的变化曲线, 0%, 10%, 20%, 30% 掺砂率的改良土的最大裂隙平均宽度分别是 12.2, 11.8, 11.5, 9.5 mm。可以看出, 风化砂改良对邯郸膨胀土的裂隙宽度的影响不大, 但是在 30% 掺砂率情况下, 土体裂隙平均宽度也有较为明显的减小。

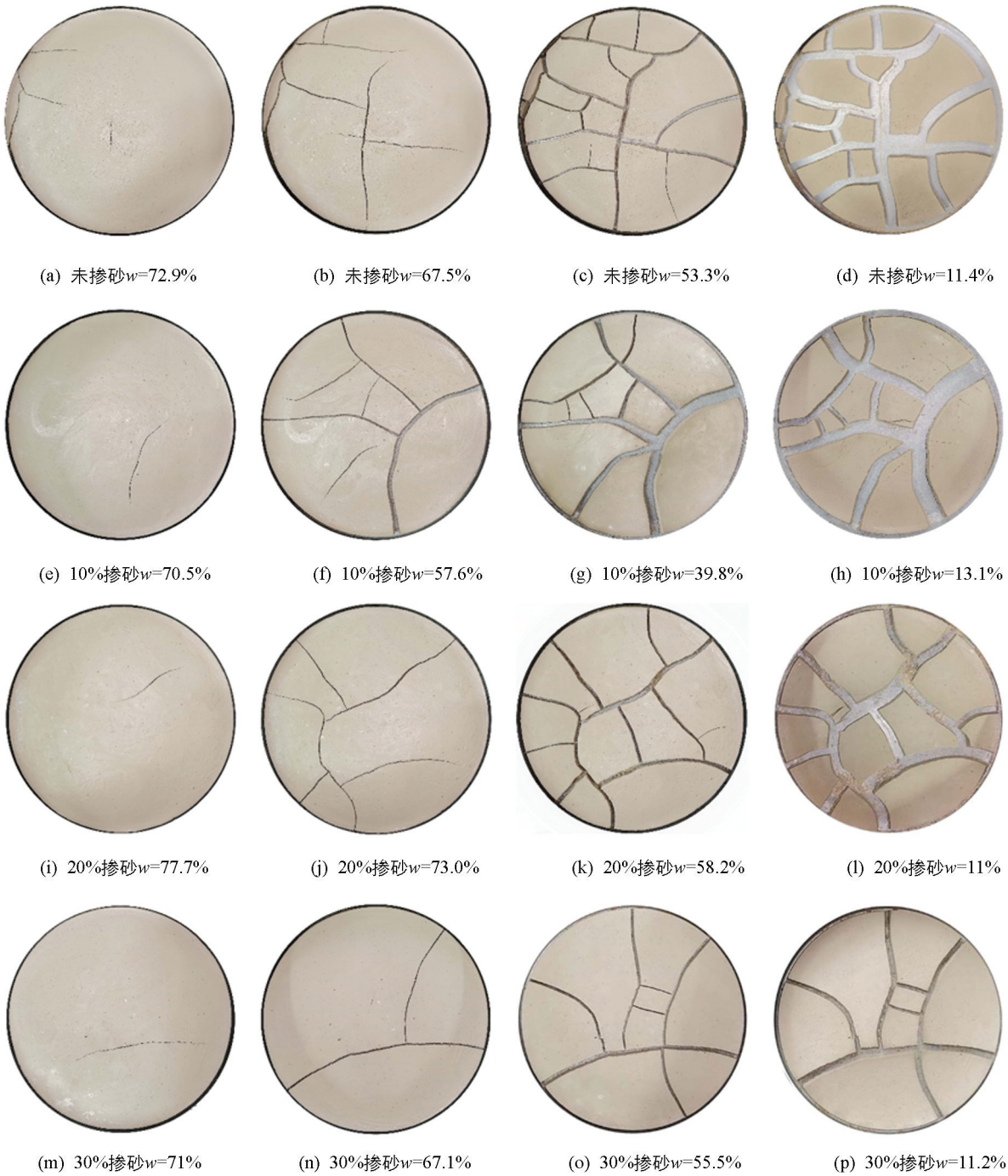


图 4 不同掺砂率的邯郸膨胀土裂隙演化图像

风化砂改良对邯郸膨胀土裂隙开展程度的抑制作用主要在于减弱了土体的胀缩性, 表现为增大摩擦力、减小收缩空间。风化砂表面粗糙、棱角分明、质地坚硬且自身基本没有收缩性, 当风化砂颗粒和土颗粒

均匀混合后, 两者间会产生有效的摩擦力, 抑制土颗粒间的相对收缩, 从而减少裂隙开展的动力; 由于掺砂率较大, 增大了土体的非黏粒含量, 且风化砂颗粒占据了部分土颗粒间的孔隙, 减少了土体可以收缩的总空间, 从而降低土体裂隙的开展程度. 从总体上来看, 更高的掺砂率能更有效地抑制邯郸膨胀土的裂隙开展, 减少裂隙对土体的破坏程度, 并且还能加快膨胀土裂隙的发育进程, 增强土地地基的长期稳定性, 其改良效果就越好.

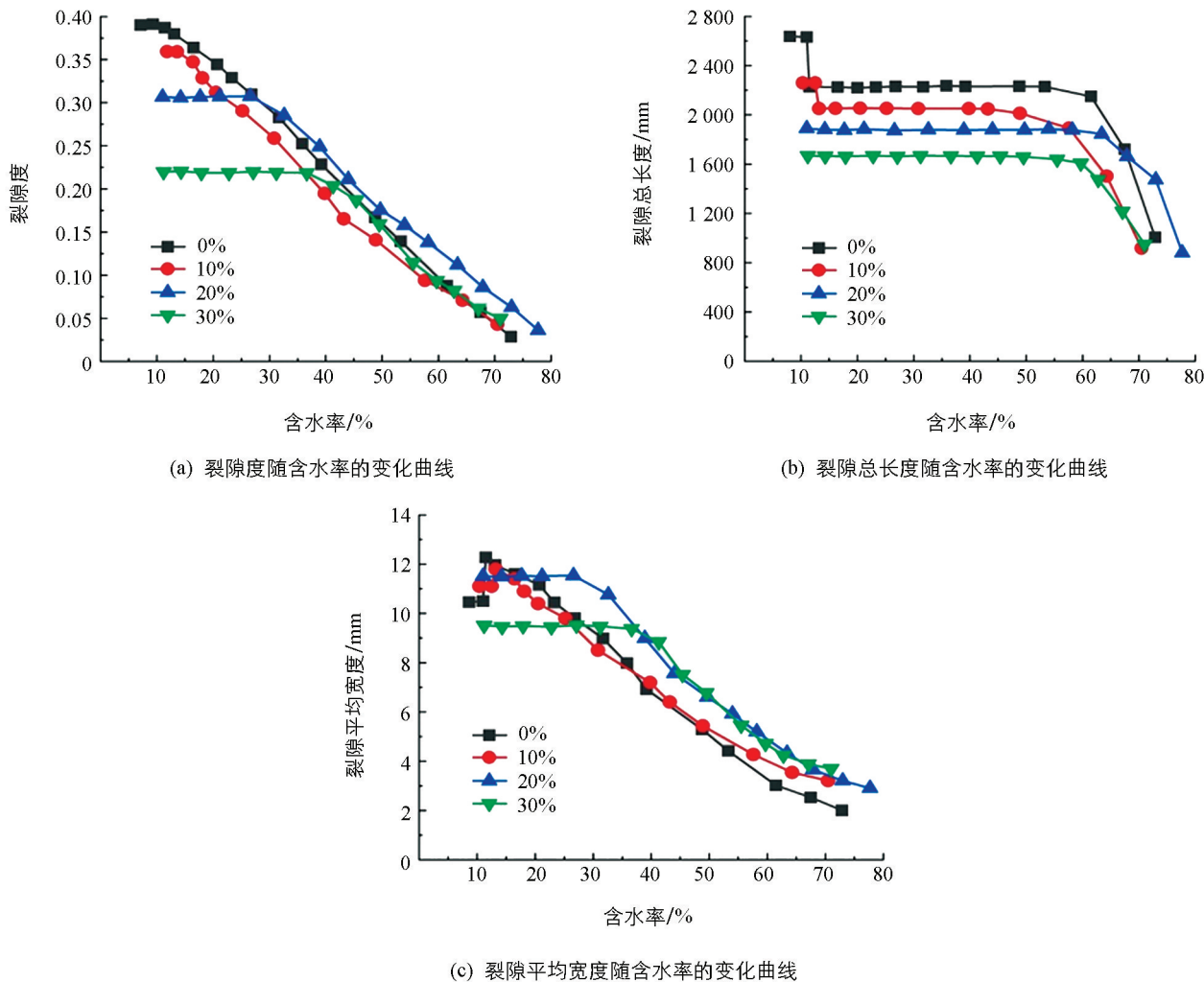


图 5 不同掺砂率的邯郸膨胀土裂隙基本指标变化曲线

3 结论

本文主要通过室内干缩开裂试验研究了 3 种典型膨胀土地区的膨胀土裂隙的不同演化情况, 并针对其中裂隙开展程度最高的邯郸膨胀土进行了风化砂改良, 通过试验结果得到以下 3 点结论:

- 1) 3 种不同地区膨胀土的裂隙演化基本规律相同, 都可以划分为 4 个阶段, 分别是裂隙萌芽阶段、裂隙发育阶段、裂隙拓宽阶段和裂隙稳定阶段. 但它们的裂隙形态有较大差异, 合肥膨胀土裂隙密集且细长, 很多条细小裂隙将土样分割成数十个土块, 土块小而均匀; 邯郸膨胀土裂隙少且短粗, 较少的短粗裂隙将土样分割成十几个土块, 土块面积大; 广西膨胀土裂隙发育不良, 还存在多条未贯通裂隙.
- 2) 邯郸膨胀土存在“次生微裂隙”特性, 会对土体造成进一步损伤, 对实际工程的危害程度不容忽视, “次生微裂隙”特性的产生机理和破坏程度还有待进一步的研究.
- 3) 风化砂改良会加快邯郸膨胀土裂隙发育, 使其在更短的含水率区间里完成整个演化过程, 风化砂改良对邯郸膨胀土裂隙的开展程度包括“次生微裂隙”特性都有较好的抑制作用, 当掺砂率小于 30% 时, 掺砂率越高, 改良效果就越好.

参考文献:

- [1] 包承纲. 非饱和土的性状及膨胀土边坡稳定问题 [J]. 岩土工程学报, 2004, 26(1): 1-15.
- [2] 龚壁卫, 程展林, 胡波, 等. 膨胀土裂隙的工程特性研究 [J]. 岩土力学, 2014, 35(7): 1825-1830, 1836.
- [3] 刘华强, 殷宗泽. 裂缝对膨胀土抗剪强度指标影响的试验研究 [J]. 岩土力学, 2010, 31(3): 727-731.
- [4] 徐彬, 殷宗泽, 刘述丽. 膨胀土强度影响因素与规律的试验研究 [J]. 岩土力学, 2011, 32(1): 44-50.
- [5] 袁俊平, 殷宗泽, 包承纲. 膨胀土裂隙的量化手段与度量指标研究 [J]. 长江科学院院报, 2003, 20(6): 27-30.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] 唐朝生, 崔玉军, TANG A M, 等. 膨胀土收缩开裂过程及其温度效应 [J]. 岩土工程学报, 2012, 34(12): 2181-2187.
- [9] 唐朝生, 王德银, 施斌, 等. 土体干缩裂隙网络定量分析 [J]. 岩土工程学报, 2013, 35(12): 2298-2305.
- [10] 骆赵刚, 汪时机, 杨振北. 膨胀土湿干胀缩裂隙演化及其定量分析 [J]. 岩土力学, 2020, 41(7): 2313-2323.
- [11] 骆赵刚, 汪时机, 张继伟, 等. 膨胀土裂隙发育的厚度效应试验研究 [J]. 岩土工程学报, 2020, 42(10): 1922-1930.
- [12] 杨俊, 刘世宜, 张国栋, 等. 干湿循环对风化砂改良膨胀土无荷膨胀率的影响 [J]. 西南大学学报(自然科学版), 2016, 38(9): 159-165.
- [13] 康靖宇, 王保田, 单熠博, 等. 水玻璃改良膨胀土的室内试验研究 [J]. 科学技术与工程, 2019, 19(5): 267-271.
- [14] 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.
- [15] 覃永富, 卢望, 袁梦祥, 等. 巨大芽孢杆菌改良邯郸强膨胀土试验研究 [J]. 西南师范大学学报(自然科学版), 2020, 45(8): 87-95.
- [16] IZZO M Z, MILETIC M. Sustainable Improvement of the Crack Resistance of Cohesive Soils [J]. Sustainability, 2019, 11(20): 5806-5819.
- [17] TANG C S, CUI Y J, SHI B, et al. Desiccation and Cracking Behaviour of Clay Layer from Slurry State under Wetting-Drying Cycles [J]. Geoderma, 2011, 166(1): 111-118.
- [18] YESILLER N, MILLER C J, INCI G, et al. Desiccation and Cracking Behavior of Three Compacted Landfill Liner Soils [J]. Engineering Geology, 2000, 57(1/2): 105-121.

责任编辑 汤振金
孙文静