

钙质结核调控膨胀土裂隙发育的机制与量化表征

贺 林^{1,2} 周秉伟¹ 黄波清¹

(1. 陕西地矿汉中地质大队有限公司, 陕西汉中 723000; 2. 西安科技大学地质与环境学院, 陕西西安 710000)

【摘要】 通过在重塑膨胀土中设置不同面积覆盖率的钙质结核类异质体, 研发“土体裂隙识别系统”, 对脱湿过程中裂隙发育的全过程进行动态监测与量化分析。试验结果表明, 异质物对膨胀土裂隙的几何特征与发育进程产生了显著影响, 对裂隙率等量化指标实施了系统性调控。随着异质物覆盖率的上升, 土体的起裂含水率与拐点含水率出现提前现象, 裂隙发育趋向于沿异质物边界构建更为直接且数量较少的扩展路径, 同时对裂隙向更宽形态的演变起到抑制作用。其中, 15.7% 覆盖率为调控效应阈值, 在此覆盖率下, 土体裂隙率、裂隙总长度和分形维数均达到最大值。异质物对裂隙发育的影响呈现阶段性特征, 以应力集中、分割约束以及界面效应共同作用决定了裂隙的萌生、扩展与稳定过程。研究成果可为深入理解含异质物土体裂隙发育机理以及相关工程实践提供理论依据。

【关键词】 钙质结核; 异质物; 膨胀土; 调控机制; 量化表征

【中图分类号】 TU443

【文献标识码】 A

doi: 10.20265/j.cnki.issn.1007-2993.2025-0348

Mechanism and quantitative characterization of calcareous concretion regulating crack development in expansive soil

HE Lin^{1,2} ZHOU Bingwei¹ HUANG Boqing¹

(1. Shaanxi Geology and Mining Hanzhong Geological Brigade Co., Ltd., Hanzhong, 723000, Shaanxi, China; 2. School of Geology and Environment, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an, 710000, Shaanxi, China)

【Abstract】 In this study, calcareous concretion-like heterogeneities with different area coverage were incorporated into remolded expansive soil, and the Soil Crack Identification System was employed to dynamically monitor and quantitatively analyze the entire process of crack development during dehydration. The test results show that the heterogeneities have a significant influence on the geometric characteristics and development of the expansion soil cracks, systematically regulating quantitative indicators such as crack rate. With the increase of the heterogeneities coverage, the crack initiation and inflection point moisture content occur earlier, and the crack development tends to form a more direct and fewer expansion paths along the boundaries of the heterogeneities, and inhibits the evolution of cracks to wider morphology. Among them, the coverage of 15.7% is the threshold of regulation effect. Under this coverage, the crack rate, total crack length and fractal dimension all reach the maximum value. The influence of heterogeneities on crack development exhibits staged characteristics, with the stress concentration effect, partition constraint effect and interface effect acting together to determine the process of crack emergence, expansion and stabilisation. The research findings can provide a theoretical basis for an in-depth understanding of the mechanism of crack development in heterogeneous soils and related engineering practices.

【Key words】 calcareous concretion; heterogeneities; expansive soil; regulation mechanism; quantitative characterization

0 引言

土体裂隙作为影响土体物理力学特性、渗透性能及工程稳定性的关键结构要素, 其形成与演化机制一直是岩土工程领域的研究热点^[1]。特别是在路基、边坡及水利工程中, 广泛分布的含异质物膨胀土在干湿循环作用下产生的裂隙, 往往会发展成为主要的渗

流通道和结构失稳的控制性弱面, 对工程安全构成严重威胁^[2]。因此, 明晰异质物对裂隙发育的调控机制, 对于评价此类土体的工程特性、预测其长期稳定性具有一定的理论意义和实践价值。

在自然界中, 膨胀土等黏性土体内部通常并非均质, 常含有尺寸与分布各不相同的钙质结核、碎石等

基金项目: 陕西地矿集团有限公司 2024 年科研专项资金项目(KYQ202415)

作者简介: 贺 林, 男, 1983 年生, 在读博士研究生, 高级工程师, 主要从事岩土工程相关科研工作。E-mail: helin@stu.xust.edu.cn

硬质异质物。这些异质物的存在,使土体内部应力场分布与水分迁移路径更为复杂,进而对裂隙的萌生位置、扩展路径以及最终网络形态产生显著影响。然而,当前关于土体裂隙的研究大多聚焦于均质土体,或者将异质性作为一种宏观的“非均匀性”加以探讨。例如,段喜璐^[3]对砾石改良膨胀土地基的变形特性进行了研究;杨 俊等^[4]通过试验研究了天然砂砾石改良膨胀土后力学指标的变化,并构建了相关数学预估拟合模型;刘丽萍等^[5]、冯 斌^[6]通过在膨胀土中掺入圆砾或砂砾石开展相关试验,探究了改良后土体物性的变化;黎 宇等^[7]采用电石渣、矿渣作为固化材料对膨胀土进行改良,通过对比试验,研究了改良固化前后土体的力学、水稳性能差异及微观机制。上述研究主要集中于异质物掺入对膨胀土物性的改良方面,但对于异质物的具体含量、分布与裂隙发育的定量调控关系,尤其是其内在物理力学机制的研究仍显欠缺。

针对上述问题,本文通过开展室内模拟实验,在重塑膨胀土中设置不同面积覆盖率的钙质结核类异质体,研发“土体裂隙识别系统”,对脱湿条件下裂隙发育的全过程实施动态监测与量化分析。旨在揭示异质体覆盖率对裂隙萌生机制、发育模式及网络复杂性的定量影响规律,以期更为深入地阐释含异质体土体的裂隙发育机理,为相关工程实践提供理论依据。

1 膨胀土裂隙演化与定量分析试验

膨胀土,一种广泛存在于全球的特殊裂隙性黏土,展现了显著的多裂隙、超固结、强亲水以及反复膨胀收缩的特性,并且其破坏通常发生在浅层^[8-9]。在岩土工程领域,对膨胀土裂隙的研究始终是一个核心且热门的议题^[10-11]。尤其是近年来,围绕膨胀土这类黏性土体的裂隙变化和定量描述,众多研究者开展了大量研究并取得了一定进展^[12-15]。

1.1 研究工具的开发

为实现对裂隙发育过程的较高精度和自动量化分析,本文所有图像处理与参数计算均依托“土体裂隙识别系统”完成。该系统基于 AI 深度学习构建扩展训练数据集,实现了深度学习技术的优化,利用 Python 编程语言、PyTorch 框架以及 UNet 模型,能够自动识别和处理拍摄所得平面裂隙图像,实现对土体裂隙的定量分析。与前人研发的相关软件^[10, 16]相比,该系统采用了经过优化的 DeepLabV3+深度学习图像分割算法,有效提升了图像分割的精确度,一定程度上解决了特征细节易丢失和目标边界模糊的问

题;建立了包含一定数量的土体裂隙图像训练数据库,可进行深度学习训练,提高了系统对裂隙的识别能力;同时,系统具备区域框选功能,能够识别和计算任选区域的裂隙及其量化指标。软件主要包含三个功能模块:文件的输入输出、图像预处理以及量化指标的计算与结果展示。经技术验证,软件裂隙识别整体准确性超过 90%,随着训练数据库的持续完善和丰富,准确性还可进一步提升。软件功能架构、软件界面和图像处理流程如图 1—图 3 所示。

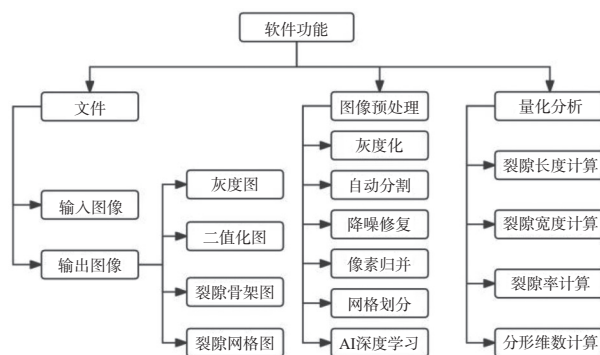


图 1 软件功能框架

Fig. 1 Software functional framework



图 2 软件界面

Fig. 2 Software interface

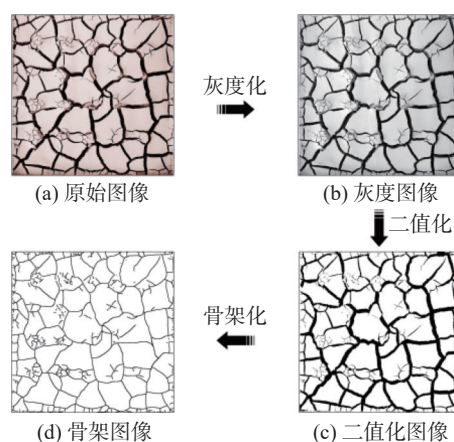


图 3 图像处理流程

Fig. 3 Image processing flow

1.2 试验材料

土样采自陕西汉中洋县金水镇,取土深度约1.5 m,液限约40.7%,塑限约24.1%,缩限约7.5%。土体颗粒粒径小于0.075,0.005,0.002 mm的土颗粒占总质量的百分比分别为83.5%,48.6%,33.4%。自由膨胀率约为47%,根据《公路路基设计规范》(JGJ D3—2015),属弱膨胀土,其他物理性质指标见表1。采集的土样经翻晒、剔除杂质、人工破碎后,用碎土设备碾散,过2 mm筛网,采用四分对角取样法选取适量土样备用。试验所用异质物为从原状土中剥离筛选出的钙质结核,选取长宽相近、等效粒径约30 mm的样本。选择该尺寸主要有两点考虑:一是经现场探查确认,30 mm是现场钙质结核的优势粒径,具有良好代表性;二是与300 mm×300 mm的样盒尺寸相比,该尺寸既能保证对裂隙网络的调控作用显著,便于观测界面效应,又能避免因尺寸过大主导整个试样应力场的问题。

表1 土样基本物理性质指标
Tab.1 Basic physical properties indexes of soil samples

天然含水率 w/%	天然密度 $\rho/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	土粒比重 G_s	孔隙比 e	饱和度 $S_r/\%$
19.2	2.02	2.69	0.605	86.3

1.3 试样制备与试验方案

取过筛土样加入经计算所需的水量,制备成初始含水率为45%的泥浆试样,并对试样进行充分拌制及振捣以排除气泡,静置一段时间,待试样基本稳定。试验设5个试验组,异质物面积占试样表面积百分比设计为0%,10%,15%,20%,25%。考虑到自然界钙质结核等异质尺寸并非都符合30 mm标准粒径,异质物实际比例按所有异质物实际面积之和计算。基于植入异质物投影面积,各试验组最终实际覆盖率为0%,9.5%,15.7%,19.6%,23.6%。

将制备重塑土分层填入300 mm×300 mm×120 mm有机玻璃样盒,土层厚80 mm。为避免人为主观布设导致的异质物聚集或稀疏偏差,确保异质物分布随机和试验可重复性,采用“网格基准+随机偏移”法布设,该方法既保留了随机性,又通过网格约束实现了变量控制。以9.5%试验组为例,其布设方法示意图如图4所示,先根据覆盖率确定异质物数量,在试样表面建立虚拟网格做定位基准,再给每个网格基准点施加±10 mm随机偏移量,生成最终布设位置。将钙质结核样植入这些位置的土样表层,确保其顶面与土体表面齐平。

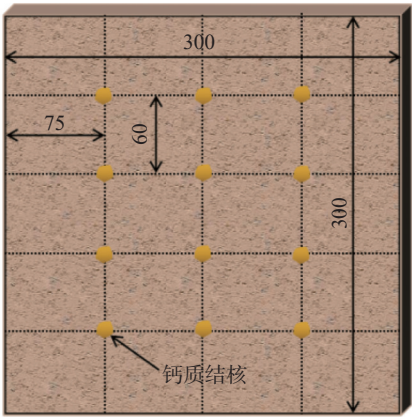


图4 “网格基准+随机偏移”方法示意图(单位:mm)
Fig.4 Schematic diagram of “mesh-based benchmark+random offset” method (Unit: mm)

将制备完成的样盒放置于45℃恒温加热灯下进行持续加热,并辅以室温控制措施,模拟土体失水过程(见图5),过程中对试样表面温度及室温实时监测,确保满足试验设计要求。每隔一段时间使用高清相机垂直拍摄试样表面,并用天平称量试样总重以计算实时含水率。持续观测,直至裂隙网络基本停止发育为止。



图5 恒温加热脱湿过程
Fig.5 Constant temperature heating and dehumidification process

2 试验结果

2.1 裂隙发育演化过程

图6展示了从0%到23.6%实际覆盖率下,各组试样裂隙网络的动态演化过程。从图中可以观察到两种截然不同的裂隙发育模式。在0%试验组中(见图6(a)),裂隙在含水率降至约34.88%时,首先沿试样多侧边界萌生,随着失水过程的推进,这些初始裂隙由四周向土体内部扩展,并不断产生新的次级分支,相互连接,最终形成密集交织的网状结构。然而,随着异质物的引入,裂隙的萌生与扩展模式发生了根本性改变。在含异质物组(见图6(b)—图6(e)),裂隙始于异质物与土体的接触界面,而非试样边界,且起裂含水率逐渐升高。这些初始裂隙一旦形成,便优

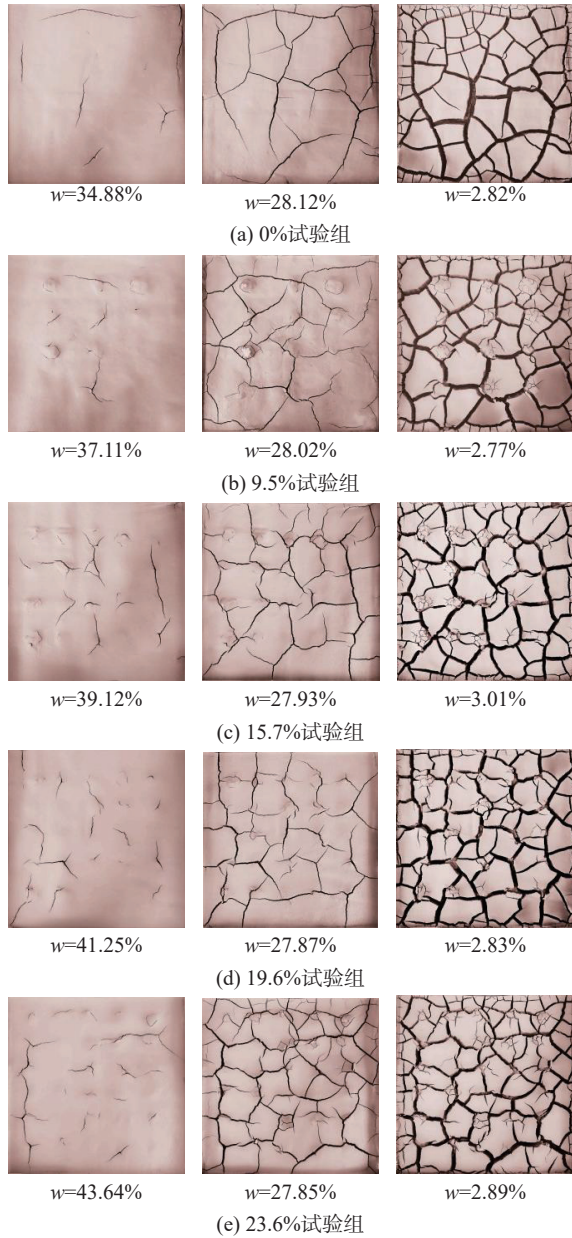


图 6 土体裂隙随含水率变化演化过程

Fig. 6 Evolution of soil cracks with moisture content

先沿着连接不同异质物的方向或平行于异质物密集区的方向扩展,形成贯通性的主裂隙。这种现象随着覆盖率的增加愈发显著:在 9.5% 试验组(见图 6(b)),裂隙兼具边界和界面萌生的特点;而在 23.6% 试验组(见图 6(e)),裂隙发育则完全由异质物主导。

通过对比分析各试验组裂隙发育稳定后的最终网络形态可以发现,异质物覆盖率对裂隙的几何特征产生了显著影响。就裂隙形态而言,0% 对照组的裂隙路径呈现出蜿蜒曲折、多分叉的“随机游走”特征。而随着覆盖率的增加,裂隙路径逐渐被“规整”,当覆盖率达到 15.7% 时,裂隙形态开始由异质物形成的网格决定。在高覆盖率组中,裂隙形态主要表现为平

直或大曲率半径的简单曲线,清晰地显示出由异质物控制的应力路径。

在裂隙连通性与节点类型方面,0% 试验组形成了具有较高连通性的闭合网络,裂隙节点主要为 X 型、Y 型、T 型。随着异质物覆盖率的提升,裂隙网络的连通性显著降低,Y 型、T 型节点近乎消失,近似正交的 X 型和“十字”型节点占据主要地位。在分割土块的几何特性方面,0% 试验组所产生的土块在尺寸和形态上呈现出多样性,主要为三边形、四边形和五边形。而当异质物覆盖率增加时,土块尺寸的差异逐渐减小,形态开始以四边形为主。

2.2 裂隙量化指标

采用自主开发的系统对各组试样的裂隙几何参数进行了提取与分析。将 5 组试样在不同时间点的裂隙量化指标与含水率变化的关系绘制于图 7。

裂隙率是指土体中裂隙面积占土体总面积的百分比,反映了裂隙在土体中所占的相对面积大小。图 7(a)呈现了各组试样裂隙率随含水率的演变关系。所有曲线均呈现出随含水率降低而递增的态势。在各试验组中,15.7% 试验组的裂隙率增长速率及最终稳定值均为最大,其后依次为 23.6%、19.6%、9.5% 和 0% 试验组。值得关注的是,各试验组试样的起裂临界含水率随异质物覆盖率的增加而系统性提升。0% 试验组的起裂含水率约为 34.88%,而 23.6% 试验组的起裂含水率则达到 43.64%,揭示了在异质物存在情况下的“提前起裂”现象。此外,裂隙发育趋于稳定的拐点含水率随异质物占比的升高而提前出现,0% 试验组的该数值约为 6.95%,而 23.6% 试验组则达到了 10.16%。

裂隙总长度是指土体表面所有裂隙长度之和,该指标能够直观反映裂隙网络的发育程度。图 7(b)展示了各组试样裂隙总长度与含水率变化之间的相关曲线。在裂隙发育初始阶段,各组试样的裂隙总长度均呈现快速增长态势,其中 19.6% 和 23.6% 试验组的增长趋势相对平缓。15.7% 试验组的裂隙总长度增长速率及最终稳定值在各组中均为最大,其后依次为 9.5%、0%、19.6% 和 23.6% 试验组。高覆盖率组(19.6%、23.6%)的裂隙总长度稳定值普遍低于低覆盖率组(9.5%、15.7%),而 0% 试验组的数值处于两者之间。这意味着,在高覆盖率条件下,土体裂隙发育存在沿着异质物边界形成更为直接、数量更少的“裁弯取直”扩展路径的倾向。

裂隙平均宽度是指将土体中所有被测量裂隙的宽度进行累加,再除以裂隙总数得到的平均值,该指

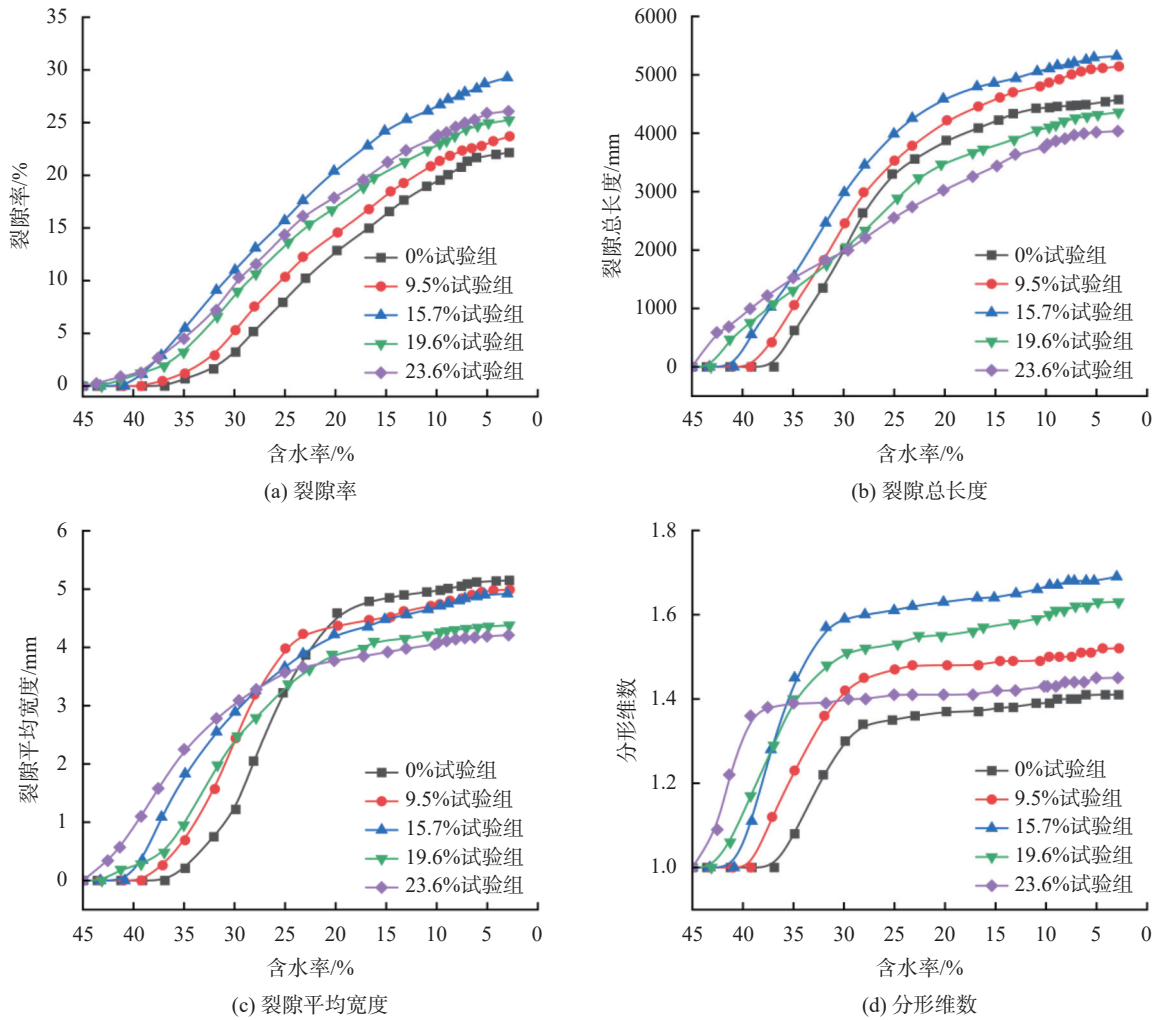


图7 裂隙量化指标随含水率变化关系

Fig. 7 Relationship between crack quantification indices and moisture content

标量化了裂隙的张开程度。图7(c)呈现了各组试样裂隙平均宽度随含水率的变化趋势。所有试验组的平均宽度均随含水率的降低而增大,且最终稳定值随异质物覆盖率的上升而降低。最为突出的特征为,当异质物覆盖率达到15.7%之后,最终的裂隙平均宽度出现了较为显著的阶跃式下降。从数据层面看,异质物覆盖率为0%的试验组,其裂隙平均宽度最终稳定值为5.15 mm;异质物覆盖率为15.7%的试验组,该数值为4.92 mm,降幅约为4.4%;而异质物覆盖率为23.6%的试验组,相较于0%试验组降幅达18.3%。这表明,异质物的存在抑制了土体裂隙向更宽的形态演变。

分形维数是表征裂隙网络复杂程度的参数,其值越大,说明裂隙分支越多、网络越复杂。图7(d)呈现了各组试样裂隙网络分形维数的动态变化。随含水率的降低,所有试验组的分形维数均呈现增长态势,这意味着裂隙网络的复杂程度有所提升。其中,

23.6%试验组的裂隙网络分形维数初期增长速率最为显著,而15.7%试验组的分形维数最终稳定值则达到最高。值得关注的是,在覆盖率达到15.7%之前,分形维数随覆盖率的递增而增大,并于15.7%覆盖率时达到峰值;而当覆盖率达到15.7%后,变化趋势出现反转,裂隙网络开始朝简单化发展。

3 分析与讨论

3.1 异质物对裂隙量化指标的影响

异质物的存在导致膨胀土在干燥收缩过程中的应力分布与裂隙扩展路径发生了显著变化,对裂隙率、裂隙总长度、裂隙平均宽度及分形维数等量化指标产生显著调控作用,且呈现出明显的阶段性特征。

图8为各试验组起裂含水率及裂隙发育稳定拐点含水率的变化趋势图。从图中可以看出,起裂临界含水率的系统性提高以及裂隙发育稳定拐点含水率的提前显现,揭示了异质物对裂隙的萌生与扩展具有“时间调控”效应。当覆盖率为15.7%时,其裂隙率

增长速率与最终稳定值均达到最大值, 这表明在此覆盖率条件下, 异质物的存在对裂隙率的影响尤为突出。经分析可得, 当覆盖率低于 15.7% 时, 试样的裂隙发育仍以不规则网络结构为主要特征; 而当覆盖率高于 15.7% 时, 试样的裂隙发育则转变为以异质物形成的网格化裂隙为主; 覆盖率为 15.7% 的试样则兼具上述两种形态, 致使其裂隙面积占比显著增加。同时, 异质物与膨胀土的刚度差异引发界面应力集中现象, 加速了裂隙在界面处的萌生, 且裂隙绕开异质物时会产生大量分支, 导致存在异质物的试验组裂隙率普遍高于 0% 试验组。

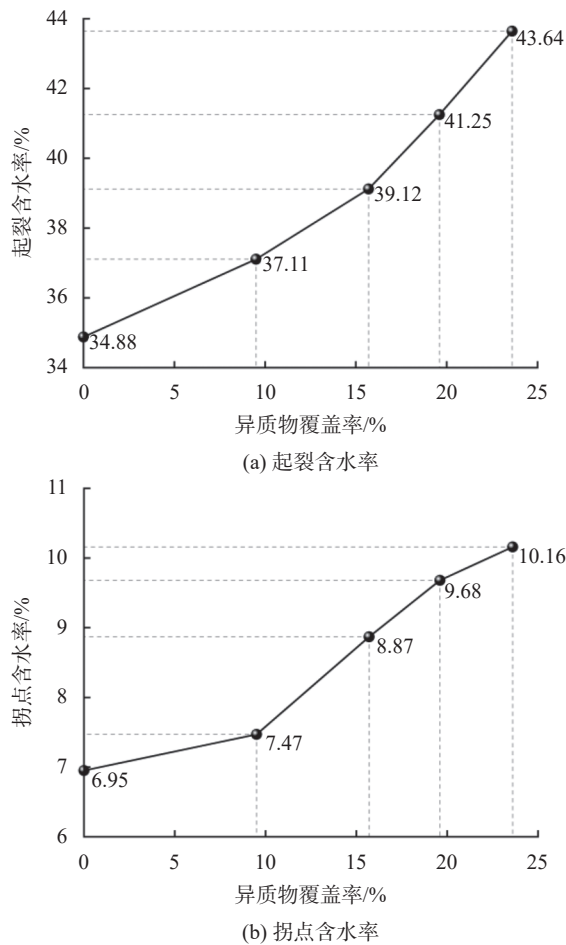


图 8 起裂含水率和拐点含水率随异质物覆盖率变化关系
Fig. 8 Relationship between the crack initiation and inflection point moisture content with heterogeneities coverage

在裂隙总长度方面, 其变化呈现“先升后降”趋势, 如图 9 所示。0% 试验组的裂隙总长度主要由主裂隙贡献, 整体处于中等偏上水平。覆盖率为 9.5% 和 15.7% 试验组的裂隙总长度显著增加, 其中 15.7% 试验组达到最大值, 较 0% 试验组提升约 16.2%。分析认为, 这是由于低覆盖率的结核使裂隙扩展路径发生弯曲, 同时诱发大量分支裂隙, 大大增

加了裂隙的总延伸长度。而覆盖率为 19.6% 和 23.6% 试验组的裂隙总长度随覆盖率升高逐渐降低, 23.6% 试验组的总长度仅为 15.7% 试验组的 75.8%。这是因为密集分布的结核将土体分割后, 裂隙无法进行长距离延伸, 单条裂隙的长度缩短, 且裂隙数量增长也受到限制, 导致总长度大幅下降。

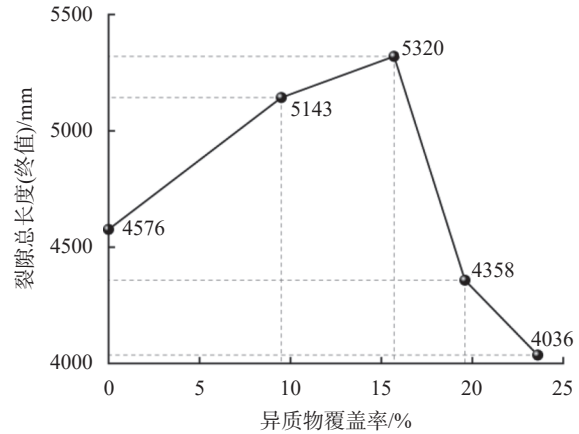


图 9 裂隙总长度随异质物覆盖率变化关系
Fig. 9 Relationship between total crack length and heterogeneities coverage

裂隙平均宽度随异质物覆盖率的增加呈现单调递减态势, 如图 10 所示。0% 试验组的裂隙平均宽度最大, 这是因为无钙质结核阻碍时, 收缩应力主要集中于主裂隙, 使得主裂隙能够持续拓宽。覆盖率为 9.5% 和 15.7% 试验组的平均宽度略低于 0% 试验组, 细小裂隙占比增加, 平均宽度进一步降低。覆盖率为 19.6% 和 23.6% 试验组的平均宽度继续下降, 23.6% 试验组的平均宽度最小。分析认为, 这是由于异质物的存在使裂隙分散化, 应力被分配到更多裂隙中, 单条裂隙的拓宽动力不足, 且高覆盖率下小区域内的裂隙受空间限制难以发展为宽裂隙。另外, 异质物的存在使裂隙在扩展过程中需不断绕开刚性结核, 路径被分割为多段短裂隙, 与 0% 试验组中可连续延伸的长主裂隙明显不同。短裂隙的拓宽空间本身就受限于块体尺寸, 且分散的应力无法支持其像主裂隙那样持续增宽, 因此最终的平均宽度显著小于 0% 试验组。

分形维数变化呈现出“先升后降”趋势, 如图 11 所示。0% 对照组的分形维数处于最低水平, 这表明该组裂隙网络结构相对简单, 以主裂隙为主, 分支相对较少。在覆盖率为 9.5% 和 15.7% 试验组中, 分形维数随覆盖率的增加而增大, 在 15.7% 试验组达到最大值。此时, 裂隙网络由主裂隙、次裂隙和微裂隙相互交织构成, 表明在特定覆盖率下, 异质物能够使

裂隙网络达到最为复杂的形态。而 19.6% 和 23.6% 试验组的分形维数稍有下降,但仍高于 0% 试验组。高覆盖率的钙质结核虽会使小区域内微裂隙数量增多,但在将土体分割为孤立区域后,裂隙网络的连通性降低,整体复杂程度有所减小。

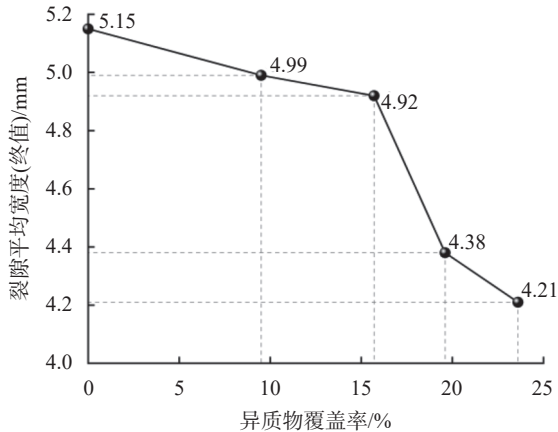


图 10 裂隙平均宽度随异质物覆盖率变化关系

Fig. 10 Relationship between average crack width and heterogeneities coverage

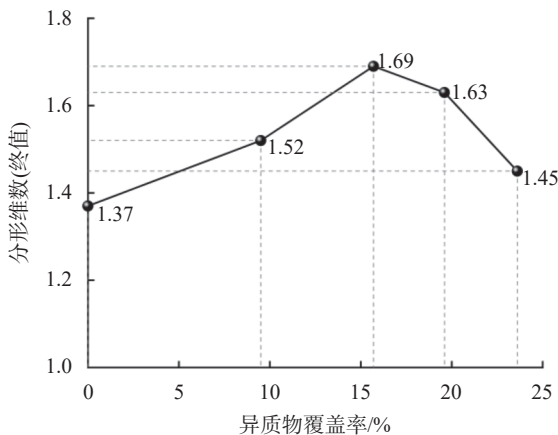


图 11 分形维数随异质物覆盖率变化关系

Fig. 11 Relationship between fractal dimension and heterogeneities coverage

3.2 异质物对裂隙发育过程的调控机制

异质物对膨胀土裂隙发育过程的调控机制主要体现在应力集中效应、分割约束效应以及界面效应三个方面,三者共同作用决定了裂隙的萌生、扩展与稳定过程。

应力集中效应是低覆盖率异质物促进裂隙萌生的关键机制。钙质结核的刚度远大于膨胀土,在干燥收缩过程中,膨胀土失水收缩,而钙质结核因低收缩性对周围土体形成约束,导致界面处产生显著的拉应力集中。随着异质物覆盖率的升高,界面总面积增大,应力集中点数量增多,使得土体在更高的含水率下即

可满足裂隙萌生的抗拉强度条件,表现为起裂含水率随覆盖率升高而增大。

分割约束效应在高覆盖率下主导裂隙的扩展过程。当异质物覆盖率超过一定阈值(本文中的 15.7%),密集分布的钙质结核将膨胀土分割为多个独立的小区域。每个小区域的收缩空间受到严格限制,土体的整体收缩量大幅降低,收缩应力难以累积到足以引发大裂隙扩展的程度。同时,裂隙在扩展过程中被结核阻断,无法跨区域延伸,只能在小区域内形成相对短而窄的裂隙。这种分割作用使得裂隙更早进入稳定阶段,表现为趋稳拐点含水率随覆盖率升高而增大。

界面效应则影响着裂隙的扩展路径与形态特征。钙质结核与膨胀土的界面通常是力学性质的薄弱区,界面黏结强度较低。在干燥收缩产生的剪切应力作用下,界面处易发生剥离,为裂隙的萌生提供了优先路径。裂隙在扩展过程中,会优先沿着界面或绕开刚性结核延伸,导致裂隙路径弯曲,同时诱发大量分支裂隙。这一效应在 9.5% 和 15.7% 试验组中表现尤为明显,使得裂隙网络的复杂性增加,分形维数升高。而在高覆盖率组中,界面数量过多,裂隙被限制在小区域内,界面效应对裂隙形态的影响相对减弱。

此外,异质物的存在还改变了膨胀土的整体收缩特性。0% 试验组的膨胀土能够进行较均匀收缩,收缩潜力得以充分发挥,裂隙发育也相对较为充分;而含异质物的试样,其收缩特性受到异质物的干扰,低覆盖率时因应力集中促进收缩不均,高覆盖率时因分割约束抑制整体收缩,最终导致不同覆盖率组的裂隙发育呈现出差异化的动态过程。

综上所述,异质物借助应力集中、分割约束以及界面效应的协同作用,促使裂隙发育由相对均匀应力场作用下的“随机游走”模式转变为应力集中与界面优先破坏作用下的“确定性绕行”模式,进而对膨胀土裂隙的量化指标及发育过程产生系统性影响,且这些影响随异质物覆盖率的变化呈现出显著的阶段性特征。

本次研究较为系统地探讨了异质物覆盖率对膨胀土裂隙发育的影响规律与作用机理,但受试验条件与设计思路限制,仍存在以下局限性:天然异质物多呈现不同形态、粒径的无序分布状态,本研究对异质物形态、尺寸和布设方式的简化处理与实际工程存在偏差,可能影响工程适用性;未直接测定异质物与膨胀土的界面黏结强度、摩擦系数等参数,难以量化应力集中的具体数值;未考虑干湿循环作用等。但通

过单一尺寸的量化和机理研究,可为后续多尺度研究奠定基础。上述局限性也为后续研究指明了方向,通过优化试验设计与测量手段,可进一步提升对异质物-膨胀土相互作用机制的认知。

4 结论

通过开展系统性试验,并对裂隙发育过程中的应力集中效应、分割约束效应及界面效应进行综合分析,揭示了异质物协同上述三种效应系统性地影响膨胀土裂隙的量化指标及发育模式的作用机制。主要研究结论如下:

(1)钙质结核异质物的引入对膨胀土裂隙的几何特征与发育进程产生了显著影响,系统性地调控了裂隙率、裂隙总长度、裂隙平均宽度以及分形维数等关键量化指标,其中 15.7% 的覆盖率在调控效应中存在明显的阈值特性。

(2)钙质结核异质物的覆盖率对裂隙发育具有重要影响,表现出明显的阶段性特征。在较低覆盖率时,异质物主要通过应力集中效应促进裂隙的萌生与扩展;而在较高覆盖率时,分割约束效应占据主导,限制了裂隙的跨区域延伸与发育。

(3)钙质结核异质物与膨胀土的界面效应对裂隙的扩展路径与形态特征具有显著影响。在较低覆盖率时,使得裂隙倾向于沿着界面或绕开异质物进行延伸,增加了裂隙网络的复杂性。而在较高覆盖率组时,界面效应对裂隙形态的影响相对减弱,裂隙的发育更多受到分割约束效应的限制,表现出更为简单、直接的扩展形态。

参 考 文 献

- [1] 黄芙蓉, 方雅蓉, 谭梦娟, 等. 聚丙烯纤维改良膨胀土干缩裂隙试验研究 [J]. 岩土工程技术, 2023, 37(4): 461-464. (HUANG F R, FANG Y R, TAN M J, et al. Experimental study on dry shrinkage cracks of expansive soil modified by polypropylene fiber[J]. Geotechnical Engineering Technique, 2023, 37(4): 461-464 (in Chinese))
- [2] 陈熠坤, 储 亚, 蔡国军, 等. 膨胀土自由膨胀率影响因素及试验机理研究 [J]. 岩土工程学报, 2025, 47(10): 2195-2203. (CHEN Y K, CHU Y, CAI G J, et al. Study on influencing factors and experimental mechanism of free swelling rate of expansive soil[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2025, 47(10): 2195-2203. (in Chinese))
- [3] 段喜璐. 砾石改良膨胀土地基变形特性研究 [D]. 西安: 西安工业大学, 2017. (DUAN X L. Study on deformation characteristics of expansive soil foundation improved by gravel[D]. Xi'an: Xi'an Technological University, 2017. (in Chinese))
- [4] 杨 俊, 袁 凯, 狄先均, 等. 天然砂砾改良膨胀土力学指标试验及模型分析 [J]. 江苏大学学报 (自然科学版), 2016, 37(3): 359-366. (YANG J, YUAN K, DI X J, et al. Experiment and mathematical model on mechanical properties of natural gravel improving expansive soil[J]. Journal of Jiangsu University (Natural Science Edition), 2016, 37(3): 359-366. (in Chinese))
- [5] 刘丽萍, 高维冉, 王胜利, 等. 圆砾改良膨胀土膨胀性试验研究 [J]. 西安工业大学学报, 2014, 34(8): 630-634. (LIU L P, GAO W R, WANG S L, et al. Experimental study on expansive soil improved by circular gravel[J]. Journal of Xi'an Technological University, 2014, 34(8): 630-634. (in Chinese))
- [6] 冯 斌. 天然砂砾改良膨胀土胀缩变形试验及相关模型预估 [J]. 洛阳理工学院学报 (自然科学版), 2018, 28(1): 7-15. (FENG B. Experimental study on swelling shrinkage characteristics of natural gravel improving expansive soil and forecast of relative model[J]. Journal of Luoyang Institute of Science and Technology (Natural Science Edition), 2018, 28(1): 7-15. (in Chinese))
- [7] 黎 宇, 胡明鉴, 郑思维, 等. 电石渣-矿渣固化膨胀土强度及微观机制研究 [J]. 岩土力学, 2024, 45(S1): 461-470. (LI Y, HU M J, ZHENG S W, et al. Study on the strength and microscopic mechanism of calcium carbide slag-slag cured expansive soil[J]. Rock and Soil Mechanics, 2024, 45(S1): 461-470. (in Chinese))
- [8] 宋慧平, 孙春雨, 冯政君, 等. 工业固废改良膨胀土研究进展 [J]. 科学技术与工程, 2025, 25(27): 11451-11464. (SONG H P, SUN C Y, FENG Z J, et al. Research progress on industrial solid waste improvement of expansive soils[J]. Science Technology and Engineering, 2025, 25(27): 11451-11464. (in Chinese))
- [9] 马英洁, 张凌凯, 张 浩. 干湿循环条件下膨胀土膨胀特性试验研究 [J]. 岩土工程技术, 2023, 37(6): 708-712. (MA Y J, ZHANG L K, ZHANG H. Study on expansion characteristics of expansive soil under dry-wet cycle conditions[J]. Geotechnical Engineering Technique, 2023, 37(6): 708-712. (in Chinese))
- [10] 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))
- [11] 杨颜齐, 王桂尧, 赵 亚, 等. 泥炭处治膨胀土的裂隙演

- 化试验研究 [J]. 公路交通科技, 2025, 42(2): 61-67. (YANG Y Q, WANG G Y, ZHAO Y, et al. Experimental study on peat-treated expansive soil fracture evolution[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2025, 42(2): 61-67. (in Chinese))
- [12] 刘俊东, 唐朝生, 曾 浩, 等. 干湿循环条件下黏性土干缩裂隙演化特征 [J]. 岩土力学, 2021, 42(10): 2763-2772. (LIU J D, TANG C S, ZENG H, et al. Evolution of desiccation cracking behavior of clays under drying-wetting cycles[J]. Rock and Soil Mechanics, 2021, 42(10): 2763-2772. (in Chinese))
- [13] 曹雪山, 章 伟, 李国维, 等. 膨胀土裂隙发育特征量化方法的试验研究 [J]. 岩土工程学报, 2023, 45(12): 2556-2564. (CAO X S, ZHANG W, LI G W, et al. Experimental study on quantitative method for crack development characteristics of expansive soils[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2023, 45(12): 2556-2564. (in Chinese))
- [14] 张红日, 杨济铭, 徐永福, 等. 基于数字图像相关技术的膨胀土三维裂隙扩展特性研究 [J]. 岩土力学, 2024, 45(S1): 309-323. (ZHNG H R, YANG J M, XU Y F, et al. Study on three-dimensional crack propagation characteristics of expansive soil based on digital image correlation technology[J]. Rock and Soil Mechanics, 2024, 45(S1): 309-323. (in Chinese))
- [15] 姜海波, 张 军, 喻天龙, 等. 湿干冻融下渠基膨胀土裂隙发育与强度衰减规律研究 [J]. 水利水电技术 (中英文), 2025, 56(7): 190-200. (JIANG H B, ZHANG J, YU T L, et al. Research on crack development and strength attenuation of expansive soil under wet-dry freeze-thaw effect[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2025, 56(7): 190-200. (in Chinese))
- [16] 谷英东, 程 青, 唐朝生, 等. 不同干密度条件下植被土干缩开裂特性试验研究 [J]. 岩土工程学报, 2023, 45(11): 2420-2428. (GU Y D, CHENG Q, TANG C S, et al. Desiccation cracking behavior of vegetated soil with various dry densities[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2023, 45(11): 2420-2428. (in Chinese))

收稿日期: 2025-08-07