

高填方渠堤土劈裂强度及裂隙演化特性

于怀昌, 张建豪, 王子睿, 吴天龙, 王卓然

Strength and fracture evolution characteristics of high fill canal levee soil

YU Huaichang, ZHANG Jianhao, WANG Zirui, WU Tianlong, and WANG Zhuoran

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202311063>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

渠坡非饱和膨胀土含水率与强度关系试验研究

An experimental study of the relationship between water content and strength of unsaturated expansive soil on canal slope

李斌, 郝继锋, 鞠远江, 宋博, 章博, 罗小斌, 王泽智, 吕宁 水文地质工程地质. 2022, 49(5): 129-136

含裂隙膨胀土无侧限抗压强度特征试验研究

An experimental study of the unconfined compressive strength characteristics of the expansive soil with cracks

李关洋, 顾凯, 王翔, 施斌 水文地质工程地质. 2022, 49(4): 62-70

多级荷载下弱膨胀土的膨胀变形特性试验研究

An experimental study of expansion deformation characteristics of weak expansive soil under multi-stage load

边加敏 水文地质工程地质. 2020, 47(5): 125-133

基于IPP图像处理的膨胀土微观结构定量研究

A quantitative study of microstructure of expansive soil based on IPP image processing

侯超群, 席瑶, 孙志彬, 高可可 水文地质工程地质. 2019, 46(2): 156-156

干湿过程中膨胀土最大剪切模量及其预测

The maximum shear modulus of expansive soil during wetting-drying processes and its prediction

陈伟, 孙德安, 张俊然 水文地质工程地质. 2021, 48(6): 89-96

基于有限元软件自定义本构模型的膨胀土边坡降雨入渗分析

An analysis of rainfall infiltration of expansive soil slope based on the finite element software custom constitutive model

饶鸿, 王金淑, 赵志明, 吴光, 冯涛 水文地质工程地质. 2021, 48(1): 154-162



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

DOI: 10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202311063

于怀昌, 张建豪, 王子睿, 等. 高填方渠堤土劈裂强度及裂隙演化特性 [J]. 水文地质工程地质, 2025, 52(1): 97-103.
YU Huaichang, ZHANG Jianhao, WANG Zirui, et al. Strength and fracture evolution characteristics of high fill canal levee soil[J].
Hydrogeology & Engineering Geology, 2025, 52(1): 97-103.

高填方渠堤土劈裂强度及裂隙演化特性

于怀昌, 张建豪, 王子睿, 吴天龙, 王卓然

(华北水利水电大学地球科学与工程学院, 河南 郑州 450046)

摘要: 劈裂强度是影响土质边坡稳定性的重要因素之一。由于不同土体的水敏性不同, 使得不同含水率下土体的强度和变形存在差异。为探讨不同初始含水率条件下膨胀土和改性土的劈裂强度特性和裂隙演化机制差异, 采用粒子图像测速 (particle image velocimetry, PIV) 技术对南阳市南水北调中线工程高填方渠堤中的膨胀土和改性土进行了一系列劈裂试验, 试验结果表明: (1) 膨胀土和改性土的荷载-位移曲线具有相同阶段, 但不同含水率下的阶段特征有所差异; (2) 膨胀土试样的临界含水率和峰值荷载均小于改性土试样, 但 2 种土体的峰值荷载随着含水率的增加呈先增加后减小的变化规律, 具有单峰值特征; (3) 由位移矢量场可知, 膨胀土和改性土试样劈裂破坏时均是主裂隙呈径向垂直, 次生裂隙发育, 不同初始含水率的膨胀土和改性土试样的裂隙发育形态基本一致。研究结果对类似工程的稳定性防治具有借鉴意义。

关键词: 南水北调中线工程; PIV 技术; 膨胀土; 改性土; 劈裂试验

中图分类号: TV223.2

文献标志码: A

文章编号: 1000-3665(2025)01-0097-07

Strength and fracture evolution characteristics of high fill canal levee soil

YU Huaichang, ZHANG Jianhao, WANG Zirui, WU Tianlong, WANG Zhuoran

(College of Geosciences and Engineering, North China University of Water Resources and Electric Power,
Zhengzhou, Henan 450046, China)

Abstract: The splitting strength is one of the important factors affecting the stability of soil slope. Due to the different water sensitivity of different soils, the strength and deformation of soils under different water contents are different. To investigate the splitting strength characteristics and fracture evolution mechanism of expansive soil and modified soil under different initial water content, particle image velocimetry (PIV) technology was used to conduct a series of splitting tests on expansive soil and modified soil in the high fill canal embankment of the middle route of the South-to-North Water Transfer project in Nanyang City. The test results show that the load-displacement curves of expansive soil and modified soil have the same stage, but the stage characteristics are different under different water contents. The critical water content and peak load of the expanded soil sample are smaller than that of the modified soil sample, but the peak load of the two soils increases first and then decreases with the increase of water content, and has the characteristics of single peak. According to the displacement vector field, it can be seen that both expansive soil and modified soil samples have radial and vertical main cracks and secondary cracks develop during splitting and failure. The crack development morphology of expansive soil and

收稿日期: 2023-11-30; 修订日期: 2024-04-09

投稿网址: www.swdzcgdz.com

第一作者: 于怀昌 (1978—), 男, 博士, 教授, 主要从事地质工程方面的研究。E-mail: yuhuaichang@ncwu.edu.cn

通讯作者: 张建豪 (1997—), 男, 硕士研究生, 主要从事岩土工程方面的研究。E-mail: 1084487703@qq.com

modified soil samples with different initial water contents is basically the same. The research results in this study have reference significance for the stability control of similar projects.

Keywords: Middle Route of South-to-North Water Diversion project; PIV technology; expansive soil; modified soil; splitting test

南水北调工程是当今世界上最大的水利工程,是关系到我国可持续发展的一项战略性水利基础设施,其中南水北调中线工程跨越三省二市,渠道长度达约 1 432 km^[1-3]。渠道经过多种地层,线路上布置的数百种建筑物形式各异,因此遇到的岩土工程问题很多,其中膨胀土渠道边坡的稳定问题最为复杂。“十二五”期间,根据当时工程建设的实际需要,相关单位研究了深挖膨胀土渠道浅层滑坡和深层结构面滑坡的治理抗滑措施及作用机理,提出了膨胀土水泥改性处理施工技术^[4]。

近些年来,关于水泥改良土体力学特性和影响因素的研究较多。Nguyen 等^[5]研究发现,随着水泥掺量的增加,能够显著提高粉土的抗剪强度。魏洪山等^[6]对水泥改良土单轴拉伸强度进行了系统的研究,发现了水泥掺量、龄期、含水率和干密度对水泥改良土单轴拉伸强度的影响规律。Ding 等^[7]以水泥改良冻土为研究对象,基于单轴无侧限抗压试验结果,探讨了水泥改良冻土强度和弹性模量与水泥掺量和养护龄期的关系。吴燕开等^[8]不仅对改良土的物理力学性质变化规律进行了研究,而且还结合扫描电镜和能谱分析,探讨了改良土内部的微观结构和物质。

随着社会经济的发展,施工难度逐渐加大,工程建设中的张拉破坏问题越来越突出,因此抗拉强度成为工程建设中一项不可避免的重要因素^[9]。而劈裂抗拉试验作为间接测量抗拉强度的一种方法,被广泛应用于改良土体力学特性的研究当中^[10-14]。杨博瀚等^[15]通过对不同水泥掺量条件下的黄土开展劈裂抗拉强度试验,发现当水泥掺量到达一定程度时,试样在受压时会发生明显的脆性破坏特征,产生脆裂破坏。张辉等^[16]通过对水泥、石灰和粉煤灰等固化剂掺量对试样的劈裂抗拉强度的影响研究,发现水泥掺量对劈裂抗拉强度的影响最为显著。然而,大多数学者往往只针对土体劈裂抗拉强度的影响因素进行了研究,却忽略了土体在劈裂过程中的裂隙发育机制。

随着科学技术的发展,粒子图像测速(particle image velocimetry, PIV)技术在岩土工程领域也逐步开始得到应用^[17-20],尤其对研究拉伸测试过程中试样的变形规律,更是提供了一个全新的思路。张俊然等^[21-22]

基于 PIV 技术,通过开展劈裂试验,不仅对膨胀土抗拉强度公式进行了修正,而且得到了径向劈裂试验过程中荷载-裂隙-位移矢量场三者之间的内在联系。黄伟等^[23]应用自行设计研发的土体材料拉伸装置,基于 PIV 技术,得到了土体强度与变形之间的关系。土体的强度和变形是导致土质边坡破坏的重要因素,研究土体强度和变形之间内在关系对探究土质边坡的破坏机理有着重要作用。

因此,本文基于 PIV 技术,对南水北调中线工程高填方渠堤中的膨胀土和水泥改性膨胀土开展劈裂试验,对比研究了 2 种土体在不同含水率条件下的劈裂强度特性和劈裂裂隙演化机制,以期对南水北调中线工程高填方渠堤的稳定性防治提供重要的试验数据和借鉴意义。

1 试验材料与试样制备

1.1 试验材料

本次试验所用材料取自南阳市南水北调中线工程高填方渠堤。其中,膨胀土取自渠基处,取土深度 0.5 m 左右,水泥改性膨胀土(以下简称“改性土”)取自渠堤表面,取土深度 1.0 m 左右。经查阅该渠段设计资料,所取改性土的水泥掺量为 4%。根据《土工试验方法标准》(GB/T 50123—2019)^[24]对膨胀土和改性土进行基本物理特性试验,获得相关物理性质参数(表 1)。

表 1 土样基本物理性质指标
Table 1 Basic physical property index of soil

土样	液限 / %	塑限 / %	塑性 指数	最优含 水率/ %	最大干密度 /(g·cm ⁻³)
膨胀土	46.5	25.4	21.1	23.3	1.60
改性土	45.0	26.5	18.5	24.8	1.55

为研究试验土样中各颗粒组分的相对含量以及土体颗粒组成情况,采用比重瓶法测得土样的颗粒级配曲线,如图 1 所示。

1.2 试样制备

本试验选用直径 61.8 mm、高 20 mm 的标准重塑环刀样,采用千斤顶静压制样法。步骤如下:1)将取回的土样放入 105 °C 烘箱中烘干;2)将烘干的土样粉碎后过 2 mm 筛;3)称取 500 g 等质量土样若干份;4)按

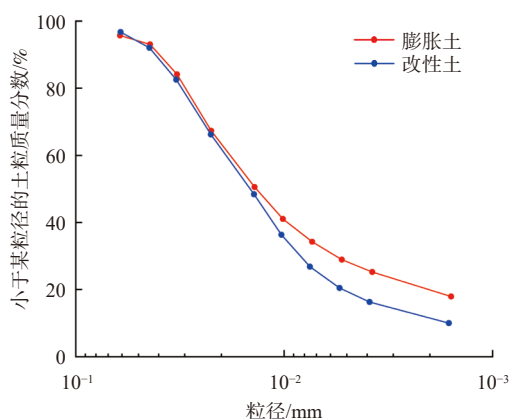


图 1 颗粒级配曲线

Fig. 1 Particle grading curve

目标含水率向称好的土样中喷洒定量水并充分搅拌; 5) 将搅拌好的土样放入密封袋中静置 24 h, 使水分在土体内均匀分散; 6) 静置完成后, 称取目标质量的土样放入制样器中并使用千斤顶静压; 7) 将静压完成后的试样脱模后用保鲜膜包裹, 放置 24 h 以上, 使静压过程中产生的超静孔隙水(气)压力充分消散。

2 试验方法与试验方案

2.1 试验方法

本次试验采用基于 PIV 技术的劈裂试验设备, 试验设备装置示意图如图 2 所示。试验设备由加载系统和 PIV 系统 2 部分组成, 加载系统包括 CMT4000 型电子万能试验机和数据采集系统, 主要负责施加径向荷载和试验数据的采集; PIV 系统包括高速电荷耦合器件(charge coupled devices, CCD)相机、泛光灯和 Davis 8.0 处理软件, 主要负责拍摄试样照片和分析试样在劈裂过程中的变形场并生成位移矢量图。具体试验步骤如下: 1) 将试样放置在万能实验机上, 调整好泛

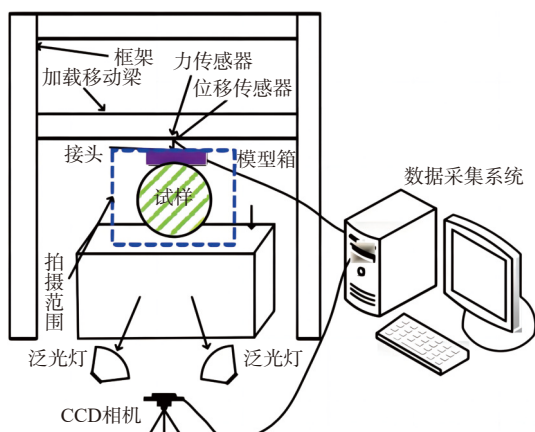


图 2 试验装置示意图

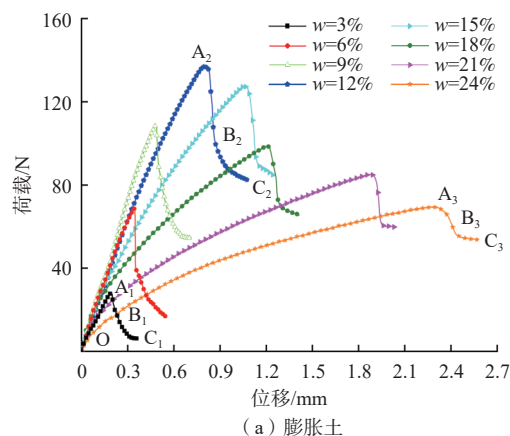
Fig. 2 Schematic diagram of apparatus

光灯及 CCD 相机位置, 对 CCD 相机进行对焦处理, 确保拍摄的照片完整、清晰; 2) 设置加载系统的试验参数和 PIV 系统的拍摄频率; 3) 启动万能试验机对试样进行预加载; 4) 开始正式加载并同步进行拍摄。

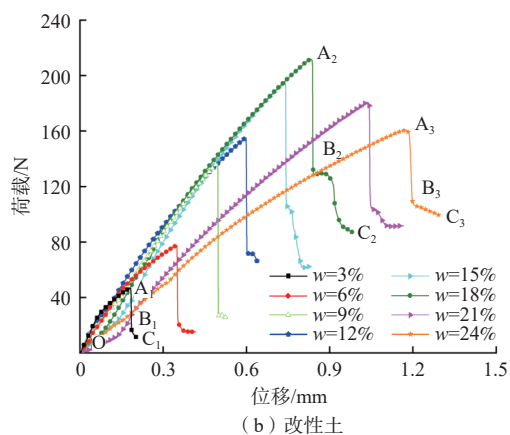
3 劈裂试验结果分析

3.1 荷载-位移关系曲线分析

图 3 为膨胀土和改性土试样的荷载-位移关系曲线。从图中可以看出, 荷载-位移关系曲线可以被划分为 3 个阶段: OA 段——荷载持续增长阶段, 随着径向位移的持续增加, 荷载持续增加, 直至达到峰值; AB 段——荷载急剧下降阶段, 随着径向位移的小幅度继续增加, 荷载急剧下降; BC 段——荷载缓慢下降阶段, 荷载急速下降后, 下降速率减慢, 由原来急剧下降转变为缓慢下降。



(a) 膨胀土



(b) 改性土

图 3 荷载-位移关系曲线

Fig. 3 Load-displacement relationship

注: 图中 w 为含水率。

从图 3(a)(b)中可以看出, 在含水率为 3%、6%、9% 时, 膨胀土试样的荷载-位移关系曲线在 OA 段近似直线, 具有明显的脆性特征, 此时改性土试样的荷

载-位移关系曲线在 OA 段的中间位置略微凸起。在含水率为 12%、15% 时, 膨胀土试样的荷载-位移关系曲线在 OA 段则表现出一定的应变软化现象^[25], 此时改性土试样的荷载-位移关系曲线在 OA 段中间位置的凸起逐渐消失, 曲线逐渐变得相对平滑。在含水率为 18%、21%、24% 时, 膨胀土试样的荷载-位移关系曲线在 OA 段表现出明显的应变软化现象, 此时改性土试样的荷载-位移关系曲线在 OA 段变得更加平滑, 其应变软化现象并不明显。

3.2 峰值荷载-含水率关系曲线分析

膨胀土和改性土的峰值荷载-含水率关系曲线如图 4 所示。随着含水率的增加, 2 种土体的峰值荷载均呈现先增大后减小的变化规律, 表现出单峰值的特征, 将峰值对应的含水率称为临界含水率。从图 4 中可以看出, 膨胀土和改性土的临界含水率分别为 12% 和 18%, 膨胀土的临界含水率明显小于改性土的临界含水率。

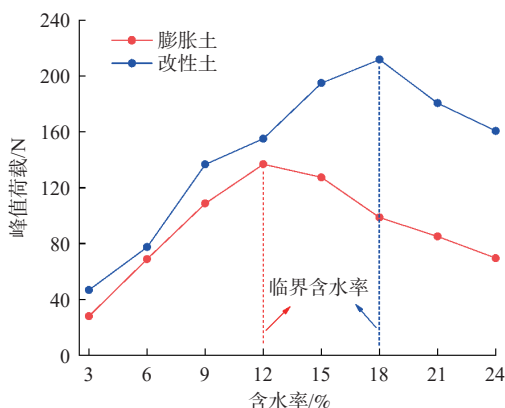


图 4 峰值荷载-含水率关系曲线

Fig. 4 Peak load-water content relationship

在 3% ~ 24% 的含水率范围内, 膨胀土和改性土在相同含水率条件下, 膨胀土的峰值荷载明显小于改性土的峰值荷载。当含水率小于膨胀土的临界含水率时, 2 种土体的峰值荷载差值在 8.65 ~ 27.97 N 范围内波动; 当含水率介于膨胀土和改性土的临界含水率之间时, 2 种土体的峰值荷载差值随含水率的增大而显著增加, 并在含水率达到改性土的临界含水率时, 峰值荷载的差值达到最大值 (113.19 N); 当含水率大于改性土的临界含水率时, 2 种土体的峰值荷载差值在 91.15 ~ 95.48 N 范围内波动。

3.3 峰值荷载-位移关系曲线分析

膨胀土和改性土的峰值荷载-位移关系曲线如图 5 所示, 图中 2 条曲线上的点对应的含水率从左到右依

次为 3% ~ 24%。从图 5 中可以看出, 膨胀土和改性土在含水率相同的情况下, 其峰值荷载对应的位移在含水率低于 9% 时相差不大; 而当含水率高于 9% 时, 随着含水率的增加, 膨胀土与改性土峰值荷载对应的位移差值则越来越大。

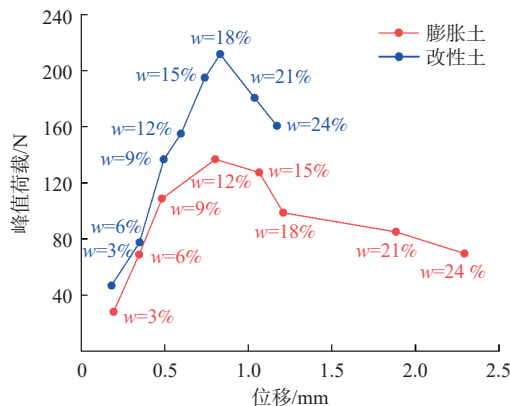


图 5 峰值荷载-位移关系曲线

Fig. 5 Peak load-displacement relationship

4 劈裂破坏特征分析

不同初始含水率下的膨胀土和改性土试样的劈裂破坏特征类似。以低含水率 (3%)、临界含水率 (膨胀土为 12%, 改性土为 18%)、高含水率 (24%) 3 组含水率为例分析膨胀土及改性土的劈裂破坏特征。图中颜色的深浅表示试样的应力集中程度, 进而表示试样的变形程度。

图 6 中的 A、B、C 点与图 3 中标注的 A、B、C 点对应。如图 6 所示, 不同初始含水率下的膨胀土试样和改性土试样的裂隙分布和发育过程基本一致。试样在荷载持续增长阶段的峰值荷载 A 点主要发生的是压缩变形, 试样内部微小孔隙被逐渐压缩, 荷载持续增加, 直至达到最大值, 此时试样表面未出现明显裂隙; 峰值荷载 A 点过后, 试样内部开始出现微小裂隙并向试样表面扩展, 直至试样表面出现明显主裂隙, 主裂隙位于试样的中间位置, 沿径向分布, 近似于一条直线, 此时荷载急剧下降到达 B 点; 最后试样主裂隙贯通加宽, 次生裂隙开始发育, 荷载缓慢下降至 C 点。当试样的位移较大时, 位移矢量场会出现空白区。

5 讨论

土体的强度特征主要源于胶结物或气液收缩膜作用产生的间接接触连结^[26]。改性土由于在土中掺入了水泥, 水泥遇水会发生水化反应, 产生的水化胶结

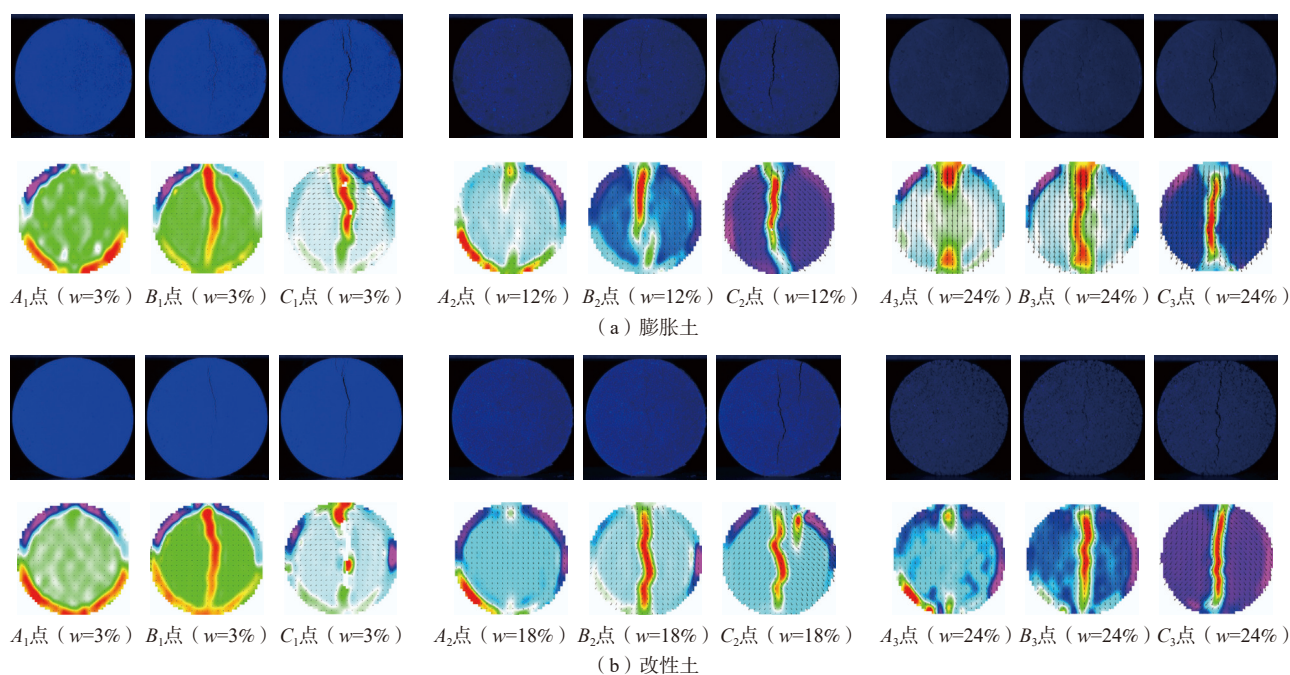


图6 不同初始含水率下膨胀土和改性土劈裂裂隙扩展情况及位移矢量场

Fig. 6 Expansion of split fissure and displacement vector field of expanded soil and modified soil under different initial water contents

物将土体颗粒胶结在一起并填充于土体颗粒的缝隙之中,从而提高土体的劈裂抗拉强度^[27]。当含水率较低时,改性土中水泥的水化反应不完全,只产生了少量水化胶结物不均匀的填充于土体颗粒之间,从而导致改性土的荷载-位移关系曲线在含水率较低时,OA段的中间位置出现凸起现象,这也是低含水率时改性土劈裂强度相较于膨胀土提高不多的原因。随着含水率的增加,改性土中水泥的水化反应愈发完全,直至在临界含水率时完全反应,荷载-位移曲线在OA段也变得平滑,峰值荷载也提高至最大值。同时,在水泥掺量一定的情况下,改性土劈裂强度的提高是有限的,同时由于改性土中水泥遇水发生水化反应的原因,在相同含水率的条件下,膨胀土和改性土在达到峰值荷载时其位移出现差异性。

南水北调中线工程是我国调配水资源的重大战略性基础工程,其高填方渠堤的稳定性防治是保障社会经济可持续发展的重中之重^[28-29]。基于本文研究内容,在南水北调中线工程高填方渠堤工程中,为确保渠堤的稳定性,渠堤土的含水率宜控制在土体的临界含水率附近,此时土体强度达到最大值且变形能力适中。

6 结论

(1)膨胀土和改性土试样的劈裂试验过程分为3个阶段:OA段,荷载持续增长阶段;AB段,荷载急速

下降阶段;BC段,荷载缓慢下降阶段。

(2)膨胀土试样在低含水率(3%~9%)时,荷载-位移关系曲线具有明显的脆性特征,在高含水率(12%~24%)时具有应变软化现象;改性土的脆性特征和应变软化现象均不明显。不同初始含水率条件下,膨胀土和改性土试样的荷载-位移曲线均呈先增加后减小的变化规律,具有单峰值特征。

(3)膨胀土试样的临界含水率和劈裂抗拉强度均小于改性土试样。在水泥掺量一定的条件下,水泥改良后的膨胀土能够显著提高其强度,但提高的程度有限。

(4)膨胀土和改性土试样劈裂破坏时均是主裂隙径向垂直,并伴有次生裂隙的发育,不同初始含水率下的膨胀土和改性土的裂隙发育形态基本一致。

参考文献 (References) :

- [1] 任海平,段春建,张铁财,等.南水北调中线总干渠悬浮物时空分布及其与浮游植物的关系[J].长江流域资源与环境,2022,31(11):2473-2480. [REN Haiping, DUAN Chunjian, ZHANG Tiecai, et al. Spatial distribution and variation of suspended solids in the main channel of the middle route of the south-to-north water diversion project and relationships with phytoplankton community[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2022, 31(11): 2473-2480. (in Chinese

- with English abstract)]
- [2] 李春意, 贾彭真, 赵海良, 等. 南水北调中线渠首深挖方膨胀土渠段边坡形变时空演化规律分析 [J]. 河南理工大学学报(自然科学版), 2023, 42(6): 76 – 85. [LI Chunyi, JIA Pengzhen, ZHAO Hailiang, et al. Spatiotemporal evolution of slope deformation law of deeply-excavated canal over the middle route of South-to-North Water Diversion Project[J]. Journal of Henan Polytechnic University (Natural Science), 2023, 42(6): 76 – 85. (in Chinese with English abstract)]
- [3] 李斌, 郝继锋, 鞠远江, 等. 渠坡非饱和膨胀土含水率与强度关系试验研究 [J]. 水文地质工程地质, 2022, 49(5): 129 – 136. [LI Bin, HAO Jifeng, JU Yuanjiang, et al. An experimental study of the relationship between water content and strength of unsaturated expansive soil on canal slope[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2022, 49(5): 129 – 136. (in Chinese with English abstract)]
- [4] 蔡耀军. 南水北调中线膨胀土渠道工程地质勘察关键技术 [Z]. 武汉: 湖北省科学技术厅, 2016. [Cai Yaojun. Key technology of engineering geological survey of expansion soil channel in middle line of South-to-North Water Transfer project[Z]. Wuhan: Department of Science and Technology of Hubei Province, 2016. (in Chinese)]
- [5] NGUYEN T T, NGUYEN M D, NGUYEN T, et al. Interface shear strength behavior of cement-treated soil under consolidated drained conditions[J]. *Buildings*, 2023, 13(7): 1626.
- [6] 魏洪山, 王伟志, 徐永福, 等. 水泥改良土的拉伸强度特性及其计算方法 [J]. 水文地质工程地质, 2022, 49(6): 81 – 89. [WEI Hongshan, WANG Weizhi, XU Yongfu, et al. Tensile strength characteristics and calculation methods of the cement stabilized soil[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2022, 49(6): 81 – 89. (in Chinese with English abstract)]
- [7] DING Fei, SONG Lei, YUE Fengtian. Study on mechanical properties of cement-improved frozen soil under uniaxial compression based on discrete element method[J]. *Processes*, 2022, 10(2): 324.
- [8] 吴燕开, 乔晓龙, 李丹丹, 等. 干湿循环下钢渣粉水泥改良膨胀土室内试验研究 [J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 2021, 53(3): 319 – 329. [WU Yankai, QIAO Xiaolong, LI Dandan, et al. Experimental study on expansive soil improved by steel slag powder-cement under dry-wet cycles[J]. Journal of Xi'an University of Architecture & Technology(Natural Science Edition), 2021, 53(3): 319 – 329. (in Chinese with English abstract).]
- [9] 易朋莹, 林军志, 陈涛, 等. 斜倾厚层山体弯曲-侧滑机理分析——以重庆武隆庆口滑坡为例 [J]. 中国地质灾害与防治学报, 2024, 35(3): 36 – 42. [YI Pengying, LIN Junzhi, CHEN Tao, et al. Mechanism of bending-sideslip of inclined thick bedding slope: A case study of qingkou landslide in Wulong, Chongqing[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2024, 35(3): 36 – 42. (in Chinese with English abstract)]
- [10] 姜恒超, 李青林, 杨志勇, 等. 玻璃纤维水泥改良土劈裂抗拉强度试验研究 [J]. 铁道科学与工程学报, 2019, 16(11): 2742 – 2747. [JIANG Hengchao, LI Qinglin, YANG Zhiyong, et al. Experimental study on split tensile strength of glass fiber cement improved soil[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2019, 16(11): 2742 – 2747. (in Chinese with English abstract)]
- [11] 杨林, 刘雨彤, 宋玉鑫. 外加剂改性水泥石灰土力学及收缩特性试验研究 [J]. 中外公路, 2018, 38(1): 288 – 293. [YANG Lin, LIU Yutong, SONG Yuxin. Experimental study on mechanical properties and shrinkage of cement-lime stabilized soil modified with additives[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2018, 38(1): 288 – 293. (in Chinese with English abstract)]
- [12] 贺志彬. 水泥固化剂稳定粉砂土的强度特性试验研究 [J]. *山西建筑*, 2017, 43(25): 118 – 120. [HE Zhibin. Experimental study on strength properties of silty soil mixed with cement and curing agent[J]. *Shanxi Architecture*, 2017, 43(25): 118 – 120. (in Chinese with English abstract)]
- [13] 刘雨彤, 杨林. 冻融作用下 PPF 稳定土力学性能研究 [J]. 冰川冻土, 2017, 39(4): 850 – 857. [LIU Yutong, YANG Lin. Study of the mechanical properties of stabilized soil containing PPF under freezing and thawing cycles[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2017, 39(4): 850 – 857. (in Chinese with English abstract)]
- [14] 张伟清. 纤维与纳米粘土改性石灰土劈裂强度特性研究 [J]. 广东土木与建筑, 2023, 30(7): 115 – 118. [ZHANG Weiqing. Splitting strength of fiber and nano-clay modified lime soil characteristic research[J]. Guangdong Architecture Civil Engineering, 2023, 30(7): 115 – 118. (in Chinese with English abstract)]
- [15] 杨博瀚, 翁兴中, 刘军忠, 等. 改性聚丙烯纤维和水泥加固黄土的力学性能 [J]. *建筑材料学报*, 2016, 19(4): 694 – 701. [YANG Bohan, WENG Xingzhong, LIU Junzhong, et al. Mechanical properties of modified polypropylene fibre reinforced cement stabilized loess[J]. *Journal of Building Materials*, 2016, 19(4): 694 – 701. (in Chinese with English abstract)]
- [16] 张辉, 杨黎, 陈永辉, 等. 连云港海相固化软土抗拉强

- 度特性及预测方法[J]. *水运工程*, 2023(6): 192 – 198. [ZHANG Hui, YANG Li, CHEN Yonghui, et al. Tensile strength characteristics and prediction method of solidified marine soft soil in Lianyungang[J]. *Port & Waterway Engineering*, 2023(6): 192 – 198. (in Chinese with English abstract)]
- [17] 常记, 杨晓峰, 姚兆明. 基于 PIV 技术的水平桩土相互作用试验研究[J]. *宁夏工程技术*, 2023, 22(1): 7 – 11. [CHANG Ji, YANG Xiaofeng, YAO Zhaoming. Experimental study of soil-pile interaction of laterally loaded vertical piles based on PIV technique[J]. *Ningxia Engineering Technology*, 2023, 22(1): 7 – 11. (in Chinese with English abstract)]
- [18] 张昕, 董浩, 徐迎迎, 等. 竖向循环荷载作用下砂土中单桩承载特性模型试验研究[J]. *岩土力学*, 2023, 44(3): 673 – 684. [ZHANG Xin, DONG Hao, XU Yingying, et al. Experimental study on the bearing capacity of piles in sand under cyclic loading[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2023, 44(3): 673 – 684. (in Chinese with English abstract)]
- [19] 杨晓峰, 李伟, 姚兆明. 基于 PIV 技术的冲刷条件下桩-土水平变形机制[J]. *长江科学院院报*, 2023, 40(2): 102 – 108. [YANG Xiaofeng, LI Wei, YAO Zhaoming. PIV-based research on horizontal deformation mechanism of pile-soil under scour condition[J]. *Journal of Changjiang River Scientific Research Institute*, 2023, 40(2): 102 – 108. (in Chinese with English abstract)]
- [20] 王亚超, 窦斌, 喻勇, 等. 不同冷却方式下高温花岗岩巴西劈裂及声发射特性试验研究[J]. *地质科技通报*, 2022, 41(3): 200 – 207. [WANG Yachao, DOU Bin, YU Yong, et al. Experimental study on Brazilian split test and acoustic emission characteristics of high temperature granite under different cooling methods[J]. *Bulletin of Geological Science and Technology*, 2022, 41(3): 200 – 207. (in Chinese with English abstract)]
- [21] 张俊然, 翟天雅. 基于 PIV 劈裂试验膨润土抗拉强度公式的修正[J]. *土木工程学报*, 2023, 56(4): 119 – 128. [ZHANG Junran, ZHAI Tianya. Modification of bentonite tensile strength formula based on PIV splitting test[J]. *China Civil Engineering Journal*, 2023, 56(4): 119 – 128. (in Chinese with English abstract)]
- [22] 张俊然, 王俪锦, 姜彤, 等. 基于 PIV 技术的高吸力下压实膨润土径向劈裂试验研究[J]. *应用基础与工程科学学报*, 2021, 29(3): 691 – 701. [ZHANG Junran, WANG Lijin, JIANG Tong, et al. Diametric splitting tests on compacted bentonite at different high suctions based on PIV technique[J]. *Journal of Basic Science and Engineering*, 2021, 29(3): 691 – 701. (in Chinese with English abstract)]
- [23] 黄伟, 项伟, 王菁莪, 等. 基于变形数字图像处理的土体拉伸试验装置的研发与应用[J]. *岩土力学*, 2018, 39(9): 3486 – 3494. [HUANG Wei, XIANG Wei, WANG Jing'e, et al. Development and application of digital image processing technology based soil tensile apparatus[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2018, 39(9): 3486 – 3494. (in Chinese with English abstract)]
- [24] 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)]
- [25] 姜彤, 翟天雅, 张俊然, 等. 基于粒子图像测速技术的黄土径向劈裂试验研究[J]. *岩土力学*, 2021, 42(8): 2120 – 2126. [JIANG Tong, ZHAI Tianya, ZHANG Junran, et al. Diametric splitting tests on loess based on particle image velocimetry technique[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2021, 42(8): 2120 – 2126. (in Chinese with English abstract)]
- [26] 汤连生, 桑海涛, 侯涛, 等. 花岗岩残积土抗拉强度试验研究[J]. *中山大学学报(自然科学版)*, 2014, 53(6): 98 – 105. [TANG Liansheng, SANG Haitao, HOU Tao, et al. Experimental study on tensile strength of granite residual soil[J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni*, 2014, 53(6): 98 – 105. (in Chinese with English abstract)]
- [27] 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 Jiadong, LU Hongbin, YIN Zongze. A study on the fissure of expansive soil improved with cement[J]. *Journal of Jiaxing University*, 2020, 32(6): 58 – 63. (in Chinese with English abstract)]
- [28] 孙丹阳, 李和学, 刘强, 等. 地下水停采后地面沉降区地下水氟的演化规律: 以沧州市为例[J]. *地质科技通报*, 2023(4): 218 – 227. [SUN Danyang, LI Hexue, LIU Qiang, et al. Evolution of groundwater fluoride in land subsidence areas after groundwater cessation: A case study at Cangzhou[J]. *Bulletin of Geological Science and Technology*, 2023(4): 218 – 227. (in Chinese with English abstract)]
- [29] 雷坤超. 南水北调前后北京平原区地下水和地面沉降演变特征[J]. *地质学报*, 2024, 98(2): 591 – 610. [LEI Kunchao. Characteristics of groundwater and land subsidence evolution before and after the South-to-North Water Diversion Project in Beijing, China[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2024, 98(2): 591 – 610. (in Chinese with English abstract)]