

含裂隙膨胀土无侧限抗压强度特征试验研究

李关洋, 顾 凯, 王 翔, 施 斌

Experimental study on unconfined compressive strength characteristics of an expansive soil with cracks

LI Guanyang, GU Kai, WANG Xiang, and SHI Bin

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202111033>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

冻融循环作用下黄土无侧限抗压强度和微观规律的试验研究

Effect of freezing–thawing cycles on mechanical properties and microscopic mechanisms of loess

刘乐青, 张吾渝, 张丙印, 谷遇溪, 解邦龙 水文地质工程地质. 2021, 48(4): 109–115

膨胀土边坡非饱和渗流及渐进性破坏耦合分析

A coupling analysis of unsaturated seepage and progressive failure of an expansive soil slope

陈亮胜, 韦秉旭, 廖欢, 张寒冰 水文地质工程地质. 2020, 47(4): 132–140

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

无侧限压缩条件下黏性土磁各向异性研究

A study of anisotropy of magnetic susceptibility of cohesive soil under unconfined compression

孙茜, 阎长虹, 刘羊 水文地质工程地质. 2021, 48(1): 123–130

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.1000-3665.202111033

李关洋, 顾凯, 王翔, 等. 含裂隙膨胀土无侧限抗压强度特征试验研究 [J]. 水文地质工程地质, 2022, 49(4): 62-70.

LI Guanyang, GU Kai, WANG Xiang, *et al.* An experimental study of the unconfined compressive strength characteristics of the expansive soil with cracks[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2022, 49(4): 62-70.

含裂隙膨胀土无侧限抗压强度特征试验研究

李关洋, 顾 凯, 王 翔, 施 斌

(南京大学地球科学与工程学院, 江苏 南京 210023)

摘要: 膨胀土易发育大量裂隙, 对其工程性质影响显著。引入一种膨胀土试样预制裂隙方法, 对特定裂隙形态下膨胀土试样开展无侧限抗压试验, 研究了膨胀土强度特征受裂隙形态的影响, 并揭示了裂隙的作用机制。研究表明: (1) 裂隙形态显著影响试样破坏模式, 垂直于受力方向裂隙越宽, 破坏模式由剪切-拉伸破坏向张拉破坏转变; 平行于受力方向裂隙条数越多, 破坏模式由剪切破坏向鼓胀破坏转变。(2) 垂直于受力方向裂隙形态对膨胀土试样应力-应变关系影响显著。裂隙越宽, 闭合应变越大; 裂隙越深, 初始起裂应力越小, 强度增量越大; 平行于受力方向裂隙形态则对应力-应变关系无明显影响。据此划分多级上升型、波动上升型、多级下降型、标准型 4 种曲线形态。(3) 裂隙方向显著影响含裂隙土的强度折减, 含与受力方向平行裂隙试样的峰值强度接近无裂隙试样, 含与受力方向垂直裂隙试样的峰值强度与变形模量随裂隙条数增加而降低, 具有良好的对数函数关系, 峰值应变受裂隙影响小。研究结果可为膨胀土边坡浅层性失稳机制提供一定的理论依据, 为相应的裂隙土体工程设计与施工提供指导。

关键词: 膨胀土; 裂隙形态; 无侧限抗压试验; 强度特征; 破坏模式

中图分类号: TU411.6

文献标志码: A

文章编号: 1000-3665(2022)04-0062-09

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

LI Guanyang, GU Kai, WANG Xiang, SHI Bin

(School of Earth Sciences and Engineering, Nanjing University, Nanjing, Jiangsu 210023, China)

Abstract: Expansive soil is prone to develop a large number of cracks, which have a significant impact on its engineering properties. A prefabricated crack method of expansive soil samples is introduced to carry out the unconfined compression strength on the expansive soil samples under the specific crack morphology. The influence of the crack morphology on the strength characteristics of the expansive soil is examined, and the mechanism of crack action is revealed. The results show that: (1) The crack morphology has a significant effect on the failure mode of the samples. When the cracks become wider, which are perpendicular to the stress direction, the failure mode changes from shear-tensile failure to tensile failure. When the cracks parallel to the stress direction become more and more, the failure mode changes from shear failure to swelling failure. (2) The shape of the cracks perpendicular to the stress direction has a significant effect on the stress-strain relationship of the expansive soil samples. The wider the crack is, the greater the closed strain is. The deeper the crack is, the smaller

收稿日期: 2021-11-13; 修订日期: 2021-12-07

投稿网址: www.swdzcgc.com

基金项目: 国家重点研发计划课题子任务 (2019YFC1509901); 国家自然科学基金面上项目 (41977217)

第一作者: 李关洋 (1998-), 男, 硕士研究生, 主要从事膨胀土胀缩性和裂隙性研究。E-mail: MF20290011@smail.nju.edu.cn

通讯作者: 顾凯 (1987-), 男, 博士, 副教授, 硕士研究生导师, 主要从事地质灾害防控和环境岩土工程研究。E-mail: gukai@nju.edu.cn

the initial crack initiation stress is and the greater the strength increment is. The shape of cracks parallel to the stress direction has no obvious effect on the stress-strain relationship. Based on the results, four types of curves are divided, namely, the multi-level rise, fluctuation rise, multi-level decline and standard curve. (3) The direction of crack obviously affects the strength reduction of the cracked soil. The peak strength of the sample containing cracks parallel to the stress direction is close to that of the non-cracked sample. The peak strength and deformation modulus of the sample containing cracks perpendicular to the stress direction decrease with the increasing crack number, and have a good logarithmic function relationship. The peak strain is less affected by crack. This study can provide a theoretical basis for the shallow instability mechanism of the expansive soil slope, and a guidance for the design and construction of the corresponding cracked soil engineering.

Keywords: expansive soil; crack morphology; unconfined compression strength; strength characteristics; failure mode

自然界的土体中常发育裂隙,裂隙会显著影响土体的工程性质。一方面,裂隙会破坏土体的完整性,在土体中产生软弱区,导致土体强度的降低和压缩性的增加^[1-3];另一方面,裂隙可以为入渗提供优先路径^[4],降低土体有效应力,诱导土体破坏^[5-7]。膨胀土富含蒙脱石等强亲水性黏土矿物,具有“吸水膨胀,失水收缩”的特性^[8-9]。在气候因素影响下,膨胀土经历反复胀缩,导致裂隙大量生成,土体结构被破坏^[10]。徐彬等^[11]指出,裂隙发展状态下膨胀土的强度在数值上仅接近其残余强度。因此,研究含裂隙膨胀土的强度特征具有重要意义。

近年来,众多学者研究了裂隙网络的发育规律。袁俊平等^[12]指出,裂隙网络量度指标是评价含裂隙土体工程性质的重要参考依据。一般采用一整套与裂隙网络几何形态特征密切相关的量度指标体系来评价土体裂隙发育程度^[13],并且有专门的裂隙网络定量分析系统^[14]。但目前的研究多是集中在裂隙发育特性与机理解释上^[15-18],裂隙与土体强度特征的关系研究较少,且多是规律性认识,缺少定量描述与机制分析^[19-22]。此外,模拟自然条件下产生的裂隙有很大的随机性,即在相同的实验条件下,裂隙网络的量度指标不尽相同,不具有可复制性;即使在相同的裂隙参数下,裂隙形态及其组合形式也不尽相同,这些因素对强度的影响在研究中无法被考虑。因此,亟需一种可重复的裂隙网络制作方法,进一步研究特定裂隙形态及其组合对土体强度特征的影响。

在岩体研究中,预制裂隙是常见的样品处理方法,从而能够定量研究岩体裂隙对其力学性质的影响。也有学者将预制裂隙方法应用到土体的研究中,程龙虎等^[23]在标准圆柱试样上切割不同倾角的贯通

裂隙,并用较高含水率的黄土进行填充,通过无侧限抗压试验探究裂隙倾角对裂隙性黄土的破坏模式与强度特性的影响。而对于膨胀土,其强度特征受裂隙控制,膨胀土边坡失稳呈现出与一般黏性土不同的浅层性失稳特征^[5,9]。因此,相比于贯通裂隙,研究膨胀土表面裂隙更为合理。

本文采用一种标准化预制裂隙方法制备特定裂隙形态的膨胀土试样,研究了含裂隙膨胀土的强度特征,并探讨了其产生机制与发展规律,以期为相应的裂隙土体工程设计与施工提供指导。

1 试验材料与方法

1.1 试验材料

试验所用膨胀土土样取自安徽省淠史杭灌区某边坡,土样棕黄色,土质紧密。其基本物理力学性质指标为:比重 2.64,液限 59.3%,塑限 26.8%,塑性指数 33.5,最优含水率 17.8%,最大干密度 1.76 g/cm^3 ,自由膨胀率 55%。根据土的分类标准^[24]和技术规范^[25],试验用土为高液限黏土,按膨胀潜势分属弱膨胀土。

1.2 制样与试验方法

将现场取回的原状膨胀土粉碎过 2 mm 筛,并烘干。按初始含水率 20.8%,将一定质量的水与干土充分混合后,置于密封袋中保存 24 h,分层压实,按干密度 1.71 g/cm^3 制成直径 50 mm、高 100 mm 的圆柱试样。用保鲜膜包裹试样并置于养护箱中保存 24 h,保持温度 20℃、湿度 $\geq 95\%$ 。

试样养护完成后,利用台锯制备特定形态的裂隙。通过调节刀片超出台面的高度控制裂隙深度,通过更换不同宽度刀片控制裂隙宽度,刀片两侧与之平行的卡槽用于控制裂隙分布并固定试样,将试样沿刀

片方向匀速推切或旋转即可制备规则裂隙。为便于研究裂隙方向、条数、深度、宽度的影响,设计垂直于受力方向的环向裂隙(C_{pe})和平行于受力方向的纵向裂隙(C_{pa}),预制裂隙深度 3, 6 mm 共 2 种, 宽度 1, 2 mm 共 2 种, 条数 1~4 共 4 种(图 1)。包括无裂隙对照组(CTR)在内, 每种裂隙形态制定 3 个平行样。编号方式为: 宽度 W(1, 2 mm)深度 D(3, 6 mm)方向 L/C(纵向/环向)条数(1~4)-组别(1~3), 如 W1D3C1-1。

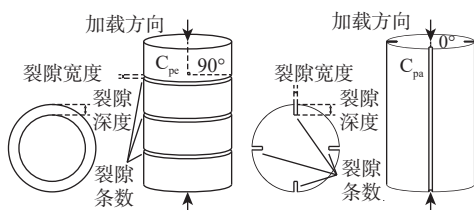


图 1 预制裂隙形态示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the crack morphology

利用无侧限抗压仪确定含裂隙膨胀土无侧限抗压强度, 设备加载速率 1 mm/min, 进行至轴向应变为 12%。加载后, 每隔 30 s 拍照记录试样破坏过程, 试验装置见图 2。

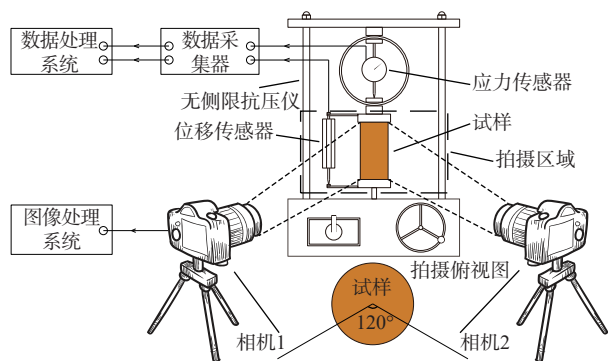


图 2 试验装置示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the test apparatus

2 含裂隙膨胀土的无侧限抗压破坏特征

无侧限条件下特定裂隙形态膨胀土试样典型破坏特征见表 1。由表 1 可见, 裂隙方向显著影响试样破坏模式, C_{pe} 越宽, 破坏模式由剪切-拉伸破坏向张拉破坏转变。这是由于最大主应力方向与裂隙垂直, 裂隙处临空面处于受拉状态, 当拉应力大于抗拉强度时裂纹起裂, 预制裂隙闭合前, 次生裂纹持续受拉沿垂向扩展, 裂隙宽度通过控制闭合快慢而影响拉裂纹发育程度。宽度较小时(W1D6C2-1), 裂纹随着预制裂隙闭合转为斜向扩展, 试样破坏时仍有明显的剪切

面; 宽度较大时(W2D3C2-1), 拉应力作用显著, 破坏时裂纹明显向两侧张开, 表面土体外掀。 C_{pa} 条数越多, 破坏模式由剪切破坏向鼓胀破坏转变。这是由于预制裂隙限制了裂纹扩展路径, 即破坏被“约束”在试样内部。条数较少时(W2D3L1-1), 裂隙对试样破坏影响较小, 仍以剪切破坏为主; 条数较多时(W2D6L4-1), 试样侧向鼓胀, 无明显剪切破坏面。

相比于无裂隙试样剪切面突然出现, C_{pe} 相当于最大主应力方向的临空面, 为裂纹发育提供了让位空间, 试样破坏过程伴随裂纹发育, 可通过裂纹判断试样所处破坏阶段及可能的破坏模式, 试样塑性增强。

3 含裂隙膨胀土无侧限抗压应力-应变分析

3.1 含与受力方向垂直裂隙试样应力-应变曲线特征

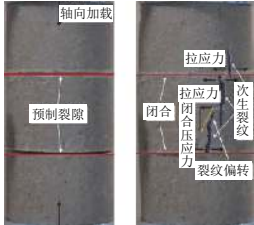
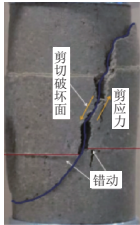
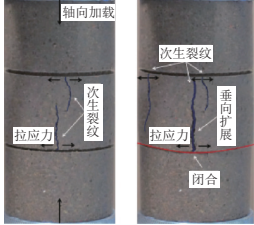
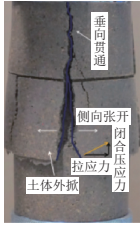
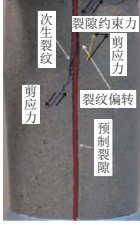
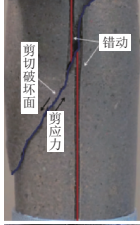
裂隙形态对无侧限抗压下膨胀土试样的应力-应变关系有着显著的影响, 图 3 为几组典型的应力-应变曲线。由图 3 可见, 含 C_{pe} 试样的应力-应变曲线整体呈应变软化型。试样压缩过程大致分为 4 个阶段。弹性压密段(OA): 在应力加载初期, 试样处于线弹性变形阶段, 应力随应变增加线性上升; 塑性压密段(AB、BC): 随着裂隙形态的不同, 此阶段可出现不同的应力路径; 裂纹扩展段(CD): 峰值强度 q_u 后, 应力随应变增加缓慢下降, 具有塑性破坏特征; 裂纹贯通段(DE): 应力下降斜率逐渐减小, 直至趋于稳定, 出现残余强度 τ_c 。与无裂隙试样相比, C_{pe} 主要在 AB、BC 段产生影响, 而 OA、CD、DE 段则无明显差异。这是由于应力加载初期(OA), 土体未开裂部分单独提供强度, C_{pe} 影响尚未显现; 裂纹扩展、贯通阶段(CD、DE), C_{pe} 闭合, 试样趋于“完整”, 由于与无裂隙试样受力特征相似, 曲线形态也相似。

进入塑性压密段(AB、BC)后, 应力随应变增加的上升斜率逐渐减小并趋于稳定, 此后出现 3 种应力路径: (1) 应力稳定后, 再次随应变增加近似线性上升, 见图 3(a); (2) 应力随应变增加缓慢下降后, 再次呈线性上升, 见图 3(b); (3) 应力随应变增加缓慢下降后, 出现一段应力稳定平台, 见图 3(c)。说明 C_{pe} 改变了试样受力状态, 并影响 q_u 的大小与出现位置。这是由于 C_{pe} 宽度、深度不同, 裂隙闭合时间以及闭合后的强度提升也不同。

为定量表征 C_{pe} 对塑性压密段试样受力的影响, 图 4 为某典型应力-应变曲线及其微分后得到的斜率曲线, 根据斜率为零处的实际破坏阶段, 分别定义了初始起裂应力 $q_{ic}/$ 应变 ε_{ic} 、闭合应力 $q_c/$ 应变 ε_c 、扩展

表 1 不同裂隙形态试样破坏过程及特征描述

Table 1 Description of the failure process and characteristics of the samples with different crack morphologies

试样编号	破坏模式	次生裂纹起裂、扩展	破坏形态	破坏特征描述
W1D6C2-1	剪切-拉伸破坏			裂隙临空面拉应力最大, 裂纹于裂隙两侧受拉起裂; 裂隙闭合前, 裂纹受拉垂向发育, 闭合后, 裂纹受剪应力作用偏转; 破坏受拉-剪混合作用, 剪切破坏面明显
W2D3C2-1	张拉破坏			裂纹于裂隙两侧受拉起裂; 裂隙闭合前后, 裂纹受拉垂向扩展, 并受拉-压应力作用侧向张开; 破坏受拉应力作用显著
W2D3L1-1	剪切破坏			裂纹受剪起裂, 在裂隙处受约束作用偏转; 破坏受剪应力作用, 剪切破坏面明显
W2D6L4-1	鼓胀破坏	无		裂隙约束作用明显, 试样表面剪切裂纹不发育; 破坏时, 试样受压侧向鼓胀, 裂隙受压侧向张开

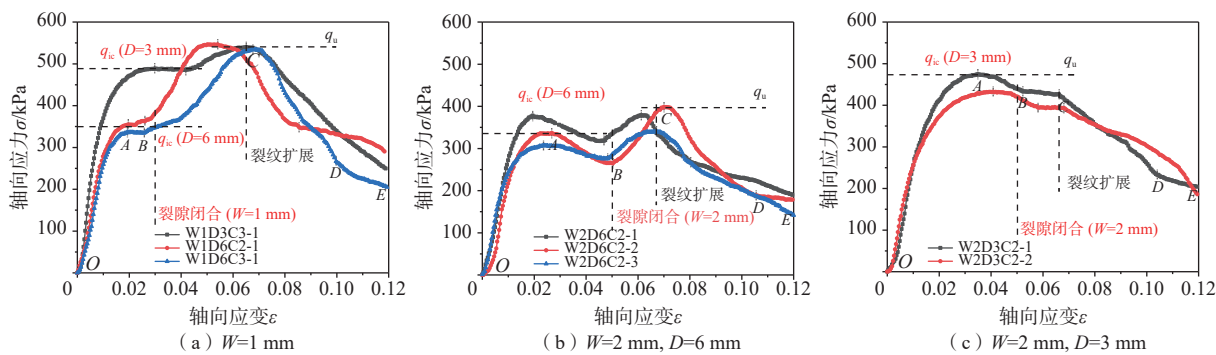


图 3 C_{pe} 特定宽度、深度下部分应力-应变曲线

Fig. 3 Partial stress-strain curves of C_{pe} with specific width and depth

应力 q_c /应变 ϵ_c 。为表征裂隙闭合的强度提升, 定义强度增量 Δq :

$$\Delta q = \frac{q_u - q_c}{q_u} \times 100\%$$

(1)

结合图 3 可得, 初始起裂应力 q_{ic} 由裂隙深度控制, $D=3\text{ mm}$ 时 q_{ic} 在 480 kPa 左右, $D=6\text{ mm}$ 时 q_{ic} 在

330 kPa 左右, 约为 $D=3\text{ mm}$ 时的 2/3, 说明裂隙较深时, 土体未开裂部分截面积较小, 提供的强度较小。相应地, 裂隙闭合时提供的强度增量较大, $D=3\text{ mm}$ 时 Δq 在 5.4% ~ 6.5% 之间, $D=6\text{ mm}$ 时 Δq 在 11.2% ~ 16.0% 之间, 约为 $D=3\text{ mm}$ 时的 2 倍。闭合应变 ϵ_c 由裂隙宽度控制, 裂隙越宽, ϵ_c 越大, $W=1\text{ mm}$ 时 ϵ_c 约为

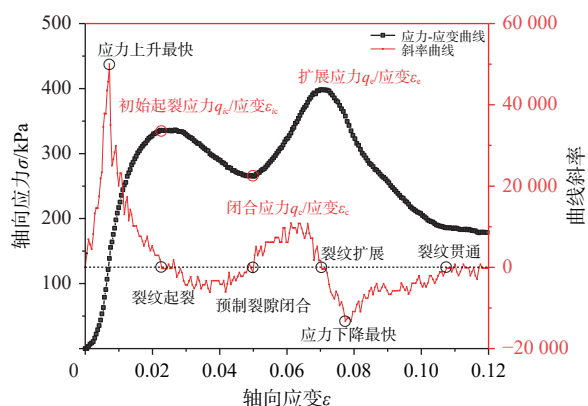
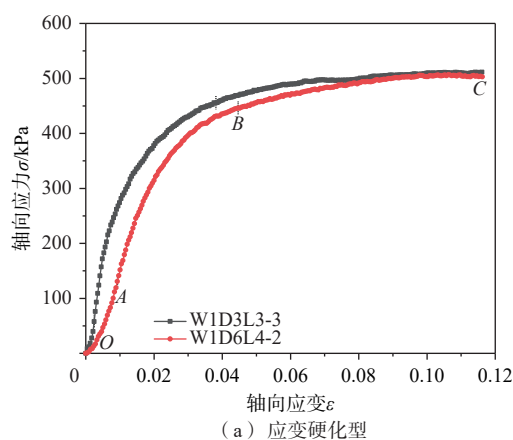
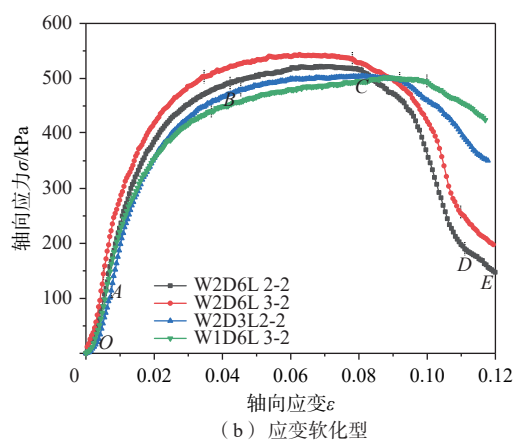


图4 应力-应变曲线关键点示意图

Fig. 4 Schematic diagram of the key points of the stress-strain curve



(a) 应变硬化型



(b) 应变软化型

图5 C_{pa} 部分应力-应变曲线Fig. 5 Partial stress-strain curves of C_{pa}

现为应力随应变增加的上升斜率逐渐减小,直至趋于稳定,曲线形态与无裂隙试样无明显差异。这是由于裂隙与最大主应力方向平行,对试样轴向变形影响不大。

图5(a)中曲线呈应变硬化特征,试验结束时,仍保留峰值强度 q_u 。图5(b)中曲线则呈应变软化特征,应力开始下降或出现残余强度 τ_r 。经统计试样破坏模式发现,应变硬化型曲线均出现在鼓胀破坏试样中,而剪切破坏试样曲线表现出明显的应变软化特征。

3.3 应力-应变曲线概化模型与定量分析

为深入研究裂隙形态对膨胀土试样应力-应变关系的影响,据试验结果建立应力-应变曲线概化模型,并将其划分为多级上升型、波动上升型、多级下降型、标准型4种(图6)。

经统计,无裂隙试样与含 C_{pa} 试样应力-应变曲线呈标准型;含 C_{pe} 试样中,曲线形态可通过裂隙宽度、深度简单判别(图6、图7),但存在不满足规律的个

0.03, $W=2$ mm 时 ε_c 约为 0.05。而不论何种曲线形态下,扩展应变 ε_e 均在 0.06 ~ 0.07 之间,说明 C_{pe} 闭合后影响较小。

经上述分析可知, C_{pe} 的闭合是塑性压密段形态差异的根本原因。裂隙与最大主应力方向垂直,是众多裂隙方向的一种特殊情况,而从受力角度分析,曲线形态改变并非 C_{pe} 独有,其存在于预制裂隙在裂纹扩展阶段前发生闭合的任意裂隙方向。

3.2 含与受力方向平行裂隙试样应力-应变曲线特征

由图5可知,含 C_{pa} 试样压缩过程同样分为弹性压密、塑性压密、裂纹扩展、裂纹贯通4个阶段。与含 C_{pe} 试样不同的是,塑性压密段未受裂隙影响,表

例。因此,提出一种反映裂隙对曲线形态与试样强度影响的量化指标 A :

$$A = a_1 \cdot a_2 \quad (2)$$

$$a_1 = \frac{q_{ic}}{q_u} \quad (3)$$

$$a_2 = \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_e} \quad (4)$$

式中, a_1 反映了裂隙深度的影响, a_2 反映了裂隙宽度的影响,标准型曲线 $A \approx 1$, A 值与应力-应变曲线形态关系见图7。可以看出, A 值具有明确的物理意义: A 值越大, C_{pe} 对曲线形态(即试样受力状态)与强度影响越明显。 $A < 0.5$ 时,应力-应变曲线呈多级上升型,而强度相比于无裂隙试样无明显变化; $A > 0.5$ 时,裂隙试样强度折减明显,且曲线形态有明显差异。

4 宏观力学特性分析

4.1 含裂隙膨胀土峰值强度

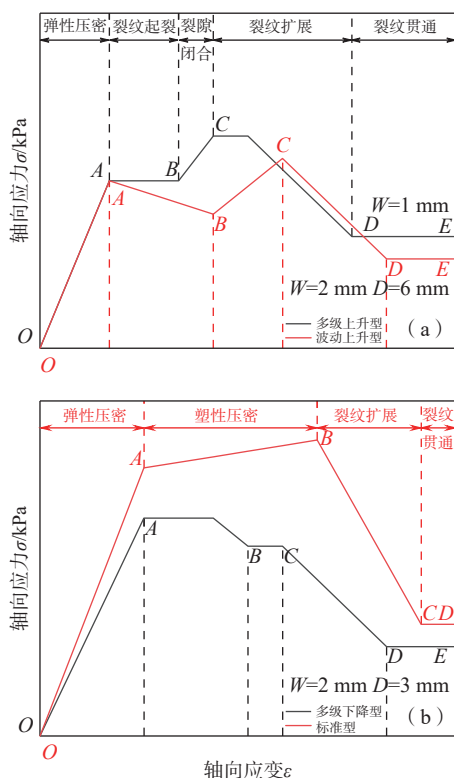


图 6 含裂隙膨胀土应力-应变曲线模型

Fig. 6 Stress-strain curve model of the expansive soil with cracks

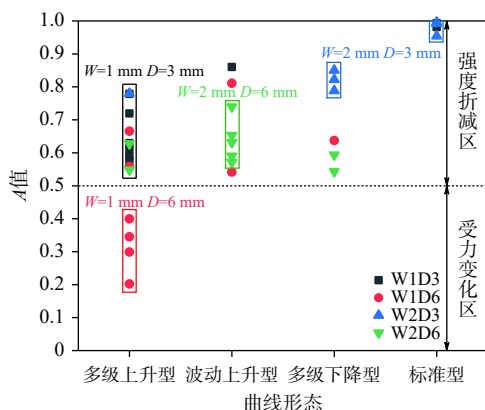


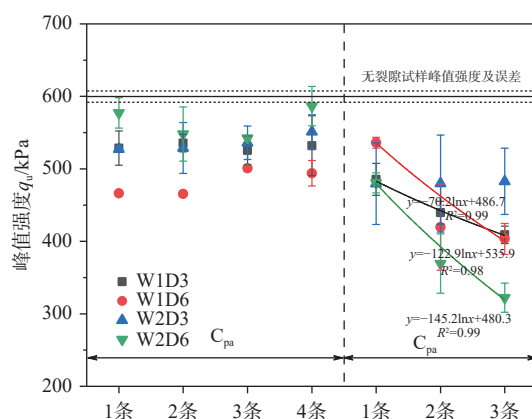
图 7 曲线形态量化指标

Fig. 7 Quantitative index of the curve shape

注: 图例为一种裂隙宽度、深度组合下所有 C_{pe} 试样。

图 8 给出了峰值强度 q_u 随裂隙方向、条数变化的情况, 含裂隙试样的 q_u 值均低于无裂隙试样。

含 C_{pa} 试样 q_u 受裂隙条数影响小, 集中在 450 ~ 600 kPa, 整体以 W2D6 组最高、W1D6 组最低, W2D3、W1D3 两组基本持平, 说明宽裂隙试样 q_u 较高, 深裂隙试样 q_u 波动较大。这是两种因素综合作用的结果, 一方面, 裂隙破坏了试样的完整性; 另一方面, 裂隙限制了剪切面的扩展路径, 相当于给试样施加了侧向约束。裂隙宽度较大时 ($W=2$ mm), 裂纹不易切穿裂隙,

图 8 q_u 与裂隙方向条数关系图Fig. 8 Relationship between q_u and crack direction and number

注: 图例为一种裂隙宽度、深度组合下所有试样。

裂隙约束作用更明显; 裂隙宽度较小时 ($W=1$ mm), 裂隙内端部应力集中较强, 破坏作用更明显, 而深度会放大宽度的影响。因此, W2D6 组试样约束作用最大, q_u 最高; W1D6 组试样破坏作用最大, q_u 最低。随着裂隙条数的增加, 约束与破坏作用同时增强, 表现为 W2D3 组试样在 1、2 条裂隙时, q_u 略小于 W1D3 组试样, 而在 3、4 条裂隙时, q_u 反而更大, 这也验证了上述分析。

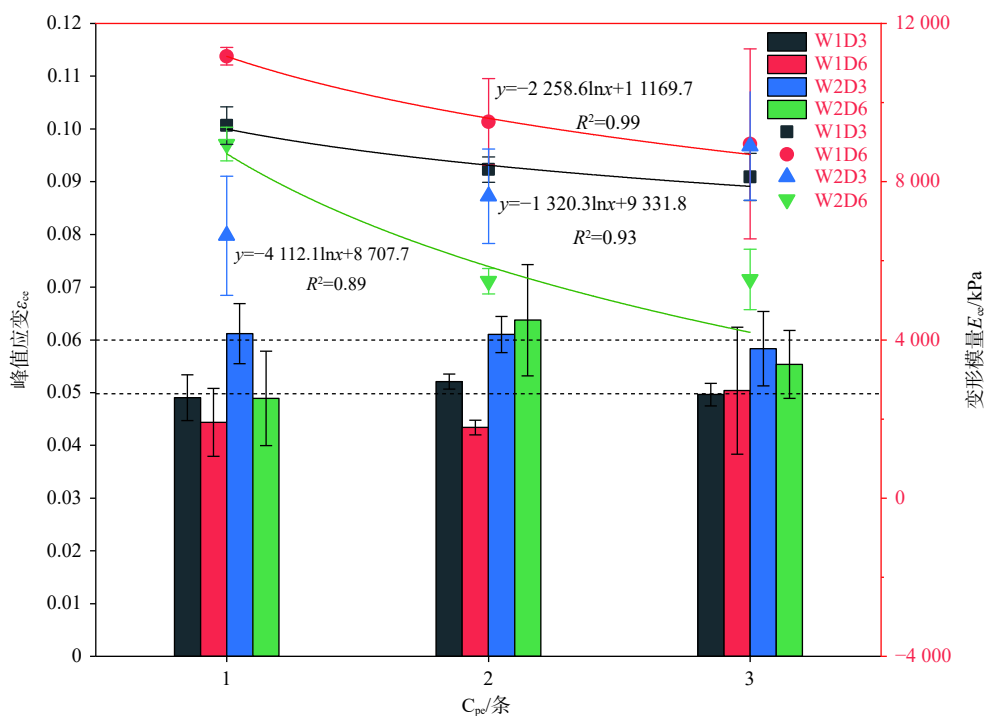
含 C_{pe} 试样 q_u 随裂隙条数的增加而减小。二者具有良好的对数函数关系, 其相关系数均达到 0.98 以上。其中 W2D6 组降幅达 32.95% 最大, W1D6 组降幅 24.75%, W1D3 组降幅 15.76% 最小。说明裂隙越宽越深, q_u 减小越明显。这是由于裂隙条数增加, 进一步破坏试样完整性, 裂隙越宽、越深, 加剧了轴向变形与应力集中作用, q_u 越小。

4.2 含裂隙膨胀土变形模量与峰值应变

变形模量 E_{50} 是评价土体抵抗变形能力的重要参数, 在数值上近似等于弹性压密段的割线模量。而对于含 C_{pe} 试样, 塑性压密段情况复杂, 原有的 E_{50} 不能完全反映裂隙对土体变形的影响。因此, 定义适用于含裂隙膨胀土的变形模量 E_{ce} :

$$E_{ce} = \frac{q_c}{\varepsilon_c} \quad (5)$$

E_{ce} 即为预制裂隙闭合点的割线斜率, 其涵盖了 C_{pe} 集中作用阶段, 综合反映了裂隙深度、宽度的影响。由图 9 可以看出, E_{ce} 随裂隙条数增加而降低, 二者之间具有良好的对数函数关系, 其相关系数均在 0.89 以上。另一方面, E_{ce} 与 q_u 随裂隙条数的变化规律一致, 说明含裂隙膨胀土强度与刚度之间存在紧密

图 9 C_{pe} 试样 ε_{ee} 、 E_{ee} 与裂隙条数关系图Fig. 9 Relationship between ε_{ee} and E_{ee} of the C_{pe} samples and crack number注: 图例为一种裂隙宽度、深度组合下所有 C_{pe} 试样。

的内在关联。 E_{ee} 较变形模量 E_{50} 小,但更为符合“裂隙越发育越易变形”的实际情况,因此, E_{ee} 可以表征含裂隙膨胀土的变形特征。

对于含 C_{pe} 试样,峰值应变 ε_0 常因曲线形态而改变,与裂隙形态间规律不明显。因此,尝试用 E_{ee} 对 q_u 进行归一化处理,从量纲角度分析, q_u/E_{ee} 可视作某种与峰值强度相关的应变 ε_{ee} ,图9给出了 ε_{ee} 与裂隙条数的关系,可以看出, ε_{ee} 稳定在0.05~0.06之间,考虑到制样与试验过程中的不确定性,可以认为 ε_{ee} 不受裂隙形态的影响。另一方面, ε_{ee} 与具有明显应变软化特征的标准型曲线 ε_0 处于同一水平,说明 C_{pe} 下 q_u 较早出现。相比于 ε_0 ,归一化得到的 ε_{ee} 更为普遍适用于含裂隙膨胀土。

5 对裂隙膨胀土边坡问题的启示

殷宗泽等^[5]指出,膨胀土边坡失稳呈现出浅层性,这是由于裂隙开展深度一般为3~4 m,而无裂隙膨胀土强度较高难以切割,因此滑面多在此范围内开展。

实际工程中,膨胀土边坡在气候因素作用下裂隙纵横交错,本文研究细化了裂隙方向与受力方向的关系,在此基础上指出,与最大主应力方向近似垂直的裂隙可能导致膨胀土边坡浅层失稳,而平行于最大主

应力方向分布的裂隙对膨胀土边坡破坏影响较小。从试验结果看,含 C_{pe} 试样破坏时,表面发育较多次生裂纹,并出现土块脱落现象,这在宏观可能表现为浅层破坏。此外,含 C_{pe} 试样峰值强度降低明显,尤其裂隙较宽、条数较多时,强度仅为无裂隙时的1/2。徐彬等^[11]与刘华强等^[26]基于室内直剪试验发现,抗剪强度指标随裂隙开展发生一定程度衰减,这与本文结果一致。直剪试验剪应力与裂隙面近乎垂直,与本文 C_{pe} 情况近似。而含 C_{pa} 试样破坏时表面则较为完整,且峰值强度受裂隙宽度、深度、条数影响小,接近无裂隙试样强度。

本次研究还发现,不仅是裂隙处土体强度降低, C_{pe} 存在会产生局部应力集中,诱导内部未开裂土体破坏,降低整体强度,可能造成浅层破坏后的二次破坏。因此,实际工程中应尽量避开多条裂隙与最大主应力方向近似垂直的场地,并着重关注宽裂隙的方向、条数、分布等相关信息,有针对性的采取支护措施。

6 结论

(1)裂隙形态显著影响膨胀土试样破坏模式与应力-应变关系,存在剪切-拉伸破坏、张拉破坏、剪切破坏、鼓胀破坏4种典型破坏模式,以及多级上升型、波

动上升型、多级下降型、标准型 4 种应力-应变曲线形态。

(2) 裂隙方向显著影响含裂隙土的强度折减, 裂隙平行主应力方向时峰值强度接近无裂隙试样, 裂隙垂直主应力方向时, 峰值强度与变形模量随裂隙条数增加而降低, 具有良好的对数函数关系, 峰值应变受裂隙影响小。

(3) 与最大主应力方向垂直的裂隙影响较大, 强度折减严重, 且试样破坏时, 表面发育较多裂纹, 完整性更差。工程中, 应格外关注裂隙与最大主应力方向关系, 避免裂隙对土体强度造成明显影响。

参考文献 (References):

- [1] MORRIS P H, GRAHAM J, WILLIAMS D J. Cracking in drying soils[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 1992, 29(2): 263 – 277.
- [2] HEWITT P J, PHILIP L K. Problems of clay desiccation in composite lining systems[J]. *Engineering Geology*, 1999, 53(2): 107 – 113.
- [3] HT RAYHANI M, YANFUL E K, FAKHER A. Desiccation-induced cracking and its effect on the hydraulic conductivity of clayey soils from Iran[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2007, 44(3): 276 – 283.
- [4] 陈铁林, 邓刚, 陈生水, 等. 裂隙对非饱和土边坡稳定性的影响[J]. *岩土工程学报*, 2006, 28(2): 210 – 215. [CHEN Tielin, DENG Gang, CHEN Shengshui, et al. Effects of fissures on stability of unsaturated soil slope[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2006, 28(2): 210 – 215. (in Chinese with English abstract)]
- [5] 殷宗泽, 袁俊平, 韦杰, 等. 论裂隙对膨胀土边坡稳定的影响[J]. *岩土工程学报*, 2012, 34(12): 2155 – 2161. [YIN Zongze, YUAN Junping, WEI Jie, et al. Influences of fissures on slope stability of expansive soil[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2012, 34(12): 2155 – 2161. (in Chinese with English abstract)]
- [6] 陈守义. 考虑入渗和蒸发影响的土坡稳定性分析方法[J]. *岩土力学*, 1997, 18(2): 8 – 12. [CHEN Shouyi. A method of stability analysis taken effects of infiltration and evaporation into consideration for soil slopes[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 1997, 18(2): 8 – 12. (in Chinese with English abstract)]
- [7] 姚海林, 郑少河, 陈守义. 考虑裂隙及雨水入渗影响的膨胀土边坡稳定性分析[J]. *岩土工程学报*, 2001, 23(5): 606 – 609. [YAO Hailin, ZHENG Shaohe, CHEN Shouyi. Analysis on the slope stability of expansive soils considering cracks and infiltration of rain[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2001, 23(5): 606 – 609. (in Chinese with English abstract)]
- [8] 王保田, 张福海. 膨胀土的改良技术与工程应用[M]. 北京: 科学出版社, 2008. [WANG Baotian, ZHANG Fuhai. Improvement technology and engineering application of expansive soil[M]. Beijing: Science Press, 2008. (in Chinese)]
- [9] 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. [BAO Chenggang. Behavior of unsaturated soil and stability of expansive soil slope[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2004, 26(1): 1 – 15. (in Chinese with English abstract)]
- [10] 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 Tehong. Expansive soil problem in engineering construction[M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 1997. (in Chinese)]
- [11] 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. [XU Bin, YIN Zongze, LIU Shuli. Experimental study of factors influencing expansive soil strength[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2011, 32(1): 44 – 50. (in Chinese with English abstract)]
- [12] 袁俊平, 殷宗泽. 膨胀土裂隙的量化指标与强度性质研究[J]. *水利学报*, 2004, 35(6): 108 – 113. [YUAN Junping, YIN Zongze. Quantitative index of fissure and strength characteristics of fissured expansive soils[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2004, 35(6): 108 – 113. (in Chinese with English abstract)]
- [13] 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 Chaosheng, SHI Bin, LIU Chun, 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 with English abstract)]
- [14] 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 Chun, WANG Baojun, SHI Bin, 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 with English abstract)]
- [15] 唐朝生, 施斌, 崔玉军. 土体干缩裂隙的形成发育过程及机理[J]. *岩土工程学报*, 2018, 40(8): 1415 – 1423.

- [TANG Chaosheng, SHI Bin, CUI Yujun. Behaviors and mechanisms of desiccation cracking of soils[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2018, 40(8): 1415 – 1423. (in Chinese with English abstract)]
- [16] 林鑫, 唐朝生, 程青, 等. 基于数字图像相关技术的土体干缩开裂过程研究[J]. 岩土工程学报, 2019, 41(7): 1311 – 1318. [LIN Luan, TANG Chaosheng, CHENG Qing, et al. Desiccation cracking behavior of soils based on digital image correlation technique[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2019, 41(7): 1311 – 1318. (in Chinese with English abstract)]
- [17] 骆赵刚, 汪时机, 杨振北. 膨胀土干湿胀缩裂隙演化及其定量分析[J]. 岩土力学, 2020, 41(7): 2313 – 2323. [LUO Zhaogang, WANG Shiji, YANG Zhenbei. Quantitative analysis of fracture evolution of expansive soils under wetting-drying cycles[J]. Rock and Soil Mechanics, 2020, 41(7): 2313 – 2323. (in Chinese with English abstract)]
- [18] 韦秉旭, 刘斌, 刘雄. 膨胀土裂隙定量基本指标研究[J]. 水文地质工程地质, 2015, 42(5): 84 – 89. [WEI Bingxu, LIU Bin, LIU Xiong. Research on the quantitative basic index of expansive soil cracks[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2015, 42(5): 84 – 89. (in Chinese with English abstract)]
- [19] 陈开圣. 干湿循环下红黏土裂隙演化规律及对抗剪强度影响[J]. 水文地质工程地质, 2018, 45(1): 89 – 95. [CHEN Kaisheng. Evolution of cracks in red clay under wetting-drying cycles and its influence on shear strength[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2018, 45(1): 89 – 95. (in Chinese with English abstract)]
- [20] 韦秉旭, 黄震, 高兵. 压实膨胀土表面裂隙发育规律及与强度关系研究[J]. 水文地质工程地质, 2015, 42(1): 100 – 105. [WEI Bingxu, HUANG Zhen, GAO Bing. Research on the relationship between fracture development rules and strength of the compacted expansive soil[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2015, 42(1): 100 – 105. (in Chinese with English abstract)]
- [21] 黄震, 陈铖. 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. (in Chinese with English abstract)]
- [22] 刘宽, 叶万军, 高海军, 等. 干湿环境下膨胀土力学性能劣化的多尺度效应[J]. 岩石力学与工程学报, 2020, 39(10): 2148 – 2159. [LIU Kuan, YE Wanjuan, GAO Haijun, et al. Multi-scale effects of mechanical property degradation of expansive soils under drying-wetting environments[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2020, 39(10): 2148 – 2159. (in Chinese with English abstract)]
- [23] 程龙虎, 聂如松, 刘飞. 裂隙性黄土单轴抗压试验研究[J]. 水文地质工程地质, 2017, 44(5): 80 – 85. [CHENG Longhu, NIE Rusong, LIU Fei. An experimental study of the uniaxial compressive strength of fractured loess[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2017, 44(5): 80 – 85. (in Chinese with English abstract)]
- [24] 中华人民共和国建设部. 土的工程分类标准: GB/T 50145—2007[S]. 北京: 中国计划出版社, 2008. [Ministry of Construction of the People's Republic of China. Standard for engineering classification of soil: GB/T 50145—2007[S]. Beijing: China Planning Press, 2008. (in Chinese)]
- [25] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 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. [Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Technical code for building in expansive soil regions: GB 50112—2013[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2013. (in Chinese)]
- [26] 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. [LIU Huaqiang, YIN Zongze. Test study of influence of crack evolution on strength parameters of expansive soil[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(3): 727 – 731. (in Chinese with English abstract)]

编辑: 张明霞