

裂隙性对膨胀土抗剪强度的影响研究

杨寓友¹, 王叶娇¹, 程 岩²

(1. 上海大学 力学与工程科学学院, 上海 200444; 2. 上海交通大学 船舶海洋与建筑工程学院, 上海 201100)

摘要: 胀缩性、裂隙性是膨胀土的基本特性, 膨胀土内部裂隙对边坡破坏有着巨大的影响, 常引起工程事故。为研究裂隙性对膨胀土抗剪强度的影响, 以南阳膨胀土作为研究对象, 分别研究裂隙倾角、裂隙条数、裂隙形状等因素对膨胀土力学性质产生的影响。采用 CT 扫描试验观测了原状土内部裂隙发育情况; 通过对含有不同裂隙倾角、条数、形状以及不同裂隙间填充物情况的含裂隙土样进行直剪试验, 分析裂隙性对膨胀土抗剪强度的影响。结果表明: 裂隙的产生会破坏土体整体性, 降低膨胀土抗剪强度; 裂隙条数增多, 裂隙相互交汇会进一步降低土体强度; 膨胀土抗剪强度指标(黏聚力、内摩擦角)随裂隙面倾角的减小先减小后增大; 当裂隙面倾角为膨胀土破坏面倾角时其抗剪强度最低; 裂隙面倾角越接近破坏面倾角其抗剪强度越低, 反之越高; 引入裂隙膨胀土黏聚力和内摩擦角的弱化度, 建立了其抗剪强度指标随倾角变化的预测模型。

关键词: 膨胀土; 裂隙性; 抗剪强度; 黏聚力; 内摩擦角

中图分类号: TU443

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2024)04-0554-09

Research on the influence of fracture characteristics on shear strength of expansive soil

YANG Yuyou¹, WANG Yejiao¹, CHENG Yan²

(1. School of Mechanics and Engineering Science, Shanghai University, Shanghai 200444, China;

2. School of Ocean and Civil Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 201100, China)

Abstract: Swelling shrinkage and fissuring are the basic characteristics of expansive soil, and the internal cracks of expansive soil have a huge impact on slope failure, often causing engineering accidents. In order to study the influence of crack characteristics on the shear strength of expansive soil, Nanyang expansive soil is taken as the research object, and the effect of crack characteristics, such as dip angle, number and shape, on the mechanical properties of expansive soils were studied respectively. The CT scanning test was used to observe the development of internal cracks in undisturbed soil, and the influence of cracks on the shear strength of expansive soil was analyzed by direct shear test of fractured soil samples with different crack dip angles, numbers, shapes and fillers between different cracks. The experiment results show that the crack damages the integrity of the soil mass and decreases the shear strength. As cracks continue to develop, the intersection of cracks further damages the integrity of soils. The shear strength parameters of expansive soils (cohesion force and the interior friction angle) first decreases and then increases with the increasing crack dip angle. When the inclination angle of the fracture surface is the inclination angle of the failure surface of the expansive soil, the shear strength is the lowest. The closer the dip angle of the fracture surface is to the dip angle of the failure surface, the lower the shear strength is, and vice versa. The prediction model of shear strength index changing with dip angle is established by introducing the weakening degree of cohesion and internal friction angle of fractured expansive soil.

Key words: expansive soil; crack characteristics; shear strength; cohesion force; internal friction angle

膨胀土是一种具有胀缩性和裂隙性的特殊土^[1]; 对天气变化十分敏感, 降雨和冻融都极易触发这些不良性质^[2]。在膨胀土地区施工常发生地基

隆起、路基开裂边坡失稳等工程灾害^[3]。随着社会发展, 膨胀土地区的工程活动日益增加, 解决膨胀土地区工程问题变得愈加迫切^[4-5]; 研究

收稿日期: 2023-04-06

修回日期: 2024-05-28

基金项目: 国家自然科学基金(41702306)

第一作者: 杨寓友(1997—), 男, 硕士生, 主要从事非饱和土力学研究。E-mail: 1025405701@qq.com

通信作者: 王叶娇(1988—), 女, 博士, 副教授, 主要从事非饱和土力学研究。E-mail: yejiaowang@shu.edu.cn

裂隙发育演化规律以及裂隙对膨胀土力学性质的影响可以为膨胀土灾害治理提供理论参考^[6-7]。

膨胀土内部裂隙对边坡破坏有着巨大的影响。裂隙土边坡的破坏模式与裂隙倾角有着密切的关系，不规则的倾斜裂隙边坡可能直接构成潜在滑动面的一部分，边坡失稳可能沿土体强度较弱的地方发展^[8]；裂隙数量、裂隙长度、裂隙宽度都对膨胀土边坡稳定性影响显著，裂隙土黏聚力随裂隙发展有所降低^[9]；膨胀土的裂隙比与含水率、渗透系数之间的关系也对膨胀土强度有着客观影响，表面裂隙比与含水率之间呈线性关系，裂隙引起的土体强度衰减及渗流条件改变是导致边坡失稳的直接原因^[10]。国内外学者常采用数码成像、CT 扫描、超声波测量等方法观测膨胀土的裂隙率、裂隙数量和裂隙体积等裂隙特征参数^[11-13]。胡东旭^[14]利用 Matlab 编程对土体 CT 图进行三维重建，预测裂隙局部发展和分布情况，发现发育开始于微裂纹等薄弱处，延伸扩展逐渐形成裂隙面、裂隙体；汪为巍^[15]通过压汞试验，研究内部裂隙发育微观结构变化，膨胀土脱湿后结构变化显著，总孔隙体积急剧减小，大孔隙比急剧增加；Diana^[16]通过定义卷积神经网络 (CNN)，改变卷积层和超参数，开发了四种深度学习模型来预测土的裂隙发展形态。

许多学者针对裂隙土强度问题进行研究：杨和平^[17]研究了干湿循环对裂隙土强度的影响，裂隙土黏聚力和内摩擦角均随干湿循环次数增加而减小；胡卸文^[18]通过三轴试验讨论了裂隙倾角、裂隙数量和裂隙壁黏土厚度对土体力学性质的影响，裂隙面倾角在 45~55°之间时裂隙土抗剪强度最低，裂隙土抗剪强度随裂隙数量和裂隙壁黏土厚度增加逐渐降低；Xu^[19]通过单轴压缩试验研究了振动参数对不同倾角裂隙土应力-应变曲线的影响，裂隙土单轴抗压强度随倾角呈 U 形变化，裂隙面倾角 45°时裂隙土单轴抗压强度最低；高志傲^[20]采用 GCTS 动静真三轴仪对膨胀土进行单向循环荷载试验，发现随着裂隙角度的增大，裂隙膨胀土的动弹性模量呈现出先减小后增大的趋势。目前，研究裂隙面倾角对膨胀土抗剪强度的影响时，通常选取 0、30、60、90°这几个典型裂隙面倾角作为代表进行研究^[21-22]；此外，选取裂隙面倾角的范围不一致也导致结论不尽相同^[23-24]；现实中裂隙面倾角并非局限于这些角度，同时，裂隙发育变化情况也是复杂多样的^[25]。本文选取更加广泛、密集的裂隙面倾角取值以及考虑不同裂隙条数、不同裂隙形状、不同裂隙间填充物情况的裂

隙土土样，组成含有不同裂隙组合的裂隙土土样来研究裂隙性对膨胀土抗剪强度的影响。首先采用 CT 扫描观测原状土中裂隙发展情况，取得含有不同裂隙面倾角的原状土土样，使用定制的切割模具，制备含有不同裂隙组合的裂隙重塑土土样，通过直剪试验测得其抗剪强度参数，并建立裂隙土抗剪强度随裂隙面倾角变化的预测模型。

1 试验材料

1.1 膨胀土基本物理性质

试验所用土样取自河南省南阳市宛城区红泥湾镇，取土深度约为 6 m。土样基本物理性质如表 1 所示，原状土干密度为 1.6 g/cm³，原状土含水率为 20%，属于弱膨胀土。

表 1 南阳膨胀土基本物理性质

Tab. 1 Basic characteristics of the Nanyang expansive soils

参数	数值
土粒相对密度 G_s	2.7
液限 $\omega_L/\%$	47.4
塑限 $\omega_P/\%$	25.3
塑性指数 I_P	22.1
原状土干密度 $\rho_d/\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$	1.6
原状土含水率 $\omega/\%$	20.0
自由膨胀率 $\delta_f/\%$	52.0

1.2 土样制备

采用 CT 扫描技术，对原状土样进行内部三维重建，观测整块原状土样内部裂隙空间分布情况。如图 1 所示。整块的原状土内部存在很多细小裂隙和发育较大的裂隙。定义裂隙面与水平面的夹角为裂隙倾角，根据原状土三维重建结果选取含有连续裂隙面的部位进行切割取样，得到含有不同裂隙倾角的原状土试样，用于直剪试验。直剪试样为高度 20 mm，直径 50 mm 的圆饼样。

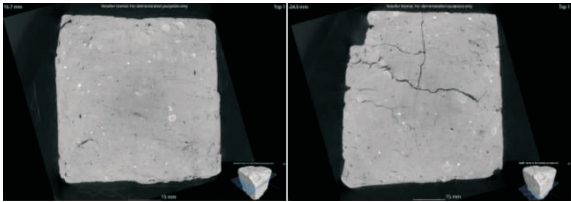


图 1 原状土样 CT 观测图

Fig. 1 Observation of CT scanning

另外，将原状土样进行风干、粉碎、过筛后制备成土颗粒用于制备重塑土样。取适量土颗粒喷洒蒸馏水均匀搅拌，控制含水率达到 20%；用保鲜袋将拌好后的土样密封保存，静置 12 h，使得土样中的水分分布均匀。采用静态压实方法控

制重塑土样干密度为 1.6 g/cm^3 , 重塑土试样的干密度和含水率均控制与原状土试样一致。

如图2所示, 定制不同裂隙面倾角的不锈钢环状模具, 包括含有单条裂隙和含有平行两条裂隙(以下简称双裂隙)的两组模具。将制备好的重塑土直剪试样放入模具中, 使用直径为 0.5 mm 的金刚丝沿模具裂隙切割出含有目标裂隙面的重塑土直剪试样。其中两条交叉成 X 状的裂隙土样(以下简称 X 裂隙)是通过单条裂隙模具切割一次后, 将模具旋转 180° , 再次切割后得到, 各种模具制样效果以图3所示为例。



图2 用于切割土样的模具图

Fig. 2 Cutting molds for soil samples

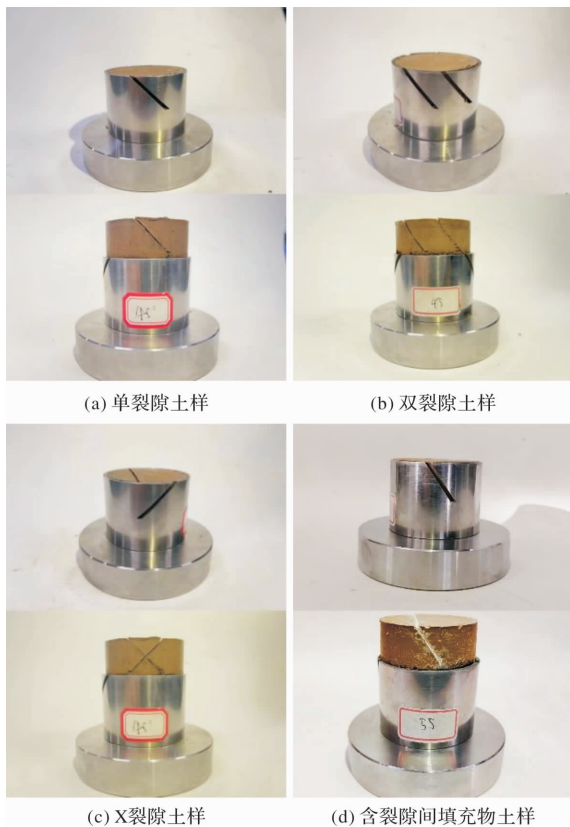


图3 不同裂隙土样的制样图

Fig. 3 Preparation for soil samples with different cracks

2 裂隙性对抗剪强度影响

2.1 试验方案

使用模具切割出带有 0° 、 30° 、 40° 、 45° 、 50° 、 55° 、 60° 、 70° 、 90° 倾角的单裂隙、双裂隙、X 裂隙的重塑土样。使用气动式直剪仪测量含有不同裂隙面情况膨胀土的抗剪强度。剪切方式为快剪, 将竖向压力分别设置为 25 、 50 、 100 、 150 、 200 kPa , 剪切速度为 0.8 mm/min , 剪切位移 6 mm 后停止, 得到不同竖向应力下剪切应力与位移图, 并通过剪切应力与竖向应力关系计算得到膨胀土样的抗剪强度。

2.2 裂隙面倾角的影响

基于摩尔-库伦公式拟合分析, 得到不同条件下裂隙原状土和裂隙重塑土直剪试验的抗剪强度参数 c 、 φ 。 τ - σ 关系曲线近似看作直线。

图4为无裂隙重塑土以及含有不同裂隙面倾角重塑土的剪切应力与竖向应力关系图。无裂隙重塑土黏聚力 $c = 84.34 \text{ kPa}$, 内摩擦角 $\varphi = 22.15^\circ$, 破坏面倾角为 $45^\circ + \varphi/2$, 即 56.08° 。如图4(a)所示, 在各个竖向应力下, 含有裂隙的膨胀土抗剪强度均低于无裂隙膨胀土, 说明裂隙的产生使得膨胀土抗剪强度降低。

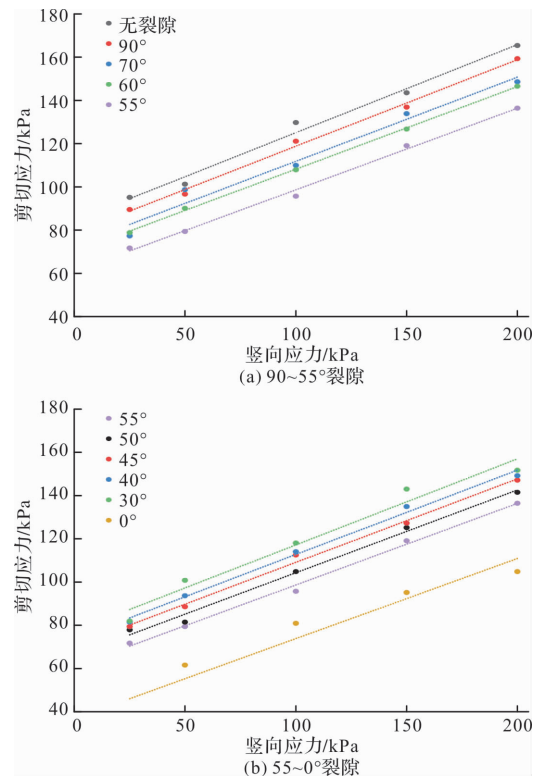


图4 无裂隙重塑土和不同裂隙面倾角重塑土剪切应力与竖向应力关系图

Fig. 4 Relationship of shear stress with vertical stress for remolded soils without cracks and with cracks of different dip angles

图4(a)为裂隙面倾角为90、70、60、55°的单条裂隙重塑土剪切应力与竖向应力关系图,其抗剪强度随倾角的减小逐渐降低;图4(b)为裂隙面倾角为55、50、45、40、30、0°的单条裂隙重塑土剪切应力与竖向应力关系图,其抗剪强度随倾角的减小逐渐升高。但是0°除外,因为直剪试验的局限性,裂隙面倾角0°时恰好与剪切面重合,所以直剪试验测得其抗剪强度较低。不包括裂隙面倾角0°,裂隙重塑土抗剪强度整体随着裂隙面倾角减小先减小后增大,裂隙面倾角为55°时其抗剪强度最低。同时,裂隙面倾角55°接近无裂隙重塑土的破坏面倾角(56.08°),因此推断:含裂隙膨胀土的裂隙面倾角与无裂隙膨胀土破坏面倾角相同时,含裂隙膨胀土的抗剪强度最低;含裂隙膨胀土的裂隙面倾角越接近无裂隙膨胀土破坏面倾角,含裂隙膨胀土的抗剪强度越低,反之越高。

图5分别为无裂隙原状土土样以及裂隙面倾角为90、55°的原状土的剪切应力与竖向应力关系图。无裂隙原状土的抗剪强度大于裂隙面倾角90°原状土的抗剪强度;裂隙面倾角为90°原状土的抗剪强度大于裂隙面为55°的原状土的抗剪强度。原状土抗剪强度随裂隙面倾角的变化规律与重塑土抗剪强度随裂隙面倾角的变化规律一致。

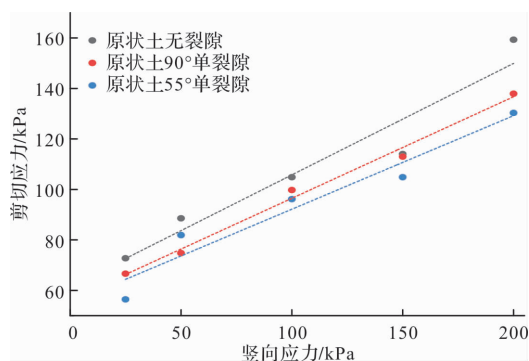


图5 不同裂隙面倾角原状土剪切应力与竖向应力关系图
Fig. 5 Relationship of shear stress with vertical stress for undistributed soils with crack of different dip angles

含裂隙重塑土的黏聚力和内摩擦角随裂隙面倾角的变化规律分别如图6、图7所示。含裂隙重塑土黏聚力和内摩擦角整体随着裂隙面倾角减小先减小后增大,整体呈V形趋势变化。裂隙面倾角为55°时,裂隙重塑土黏聚力和内摩擦角均为最小,即当裂隙面倾角与膨胀土破坏面倾角相同时,其黏聚力和内摩擦角最小。可以得出:含有裂隙的膨胀土裂隙面倾角越接近破坏面倾角时,其黏聚力和内摩擦角越小。

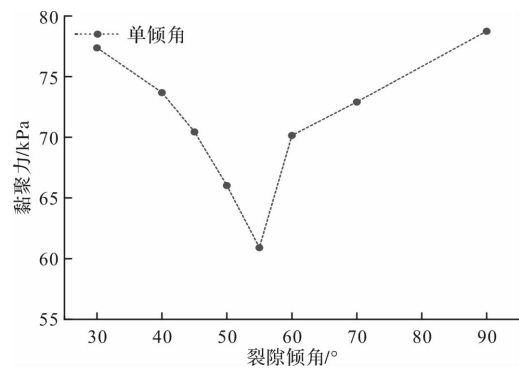


图6 不同裂隙面倾角条件下重塑土样的黏聚力变化图
Fig. 6 Variations of cohesion force with crack dip angle for remolded soils

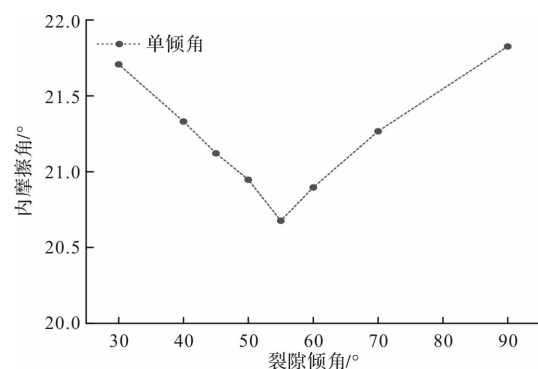


图7 不同裂隙面倾角条件下重塑土内摩擦角变化图
Fig. 7 Variations of interior friction angle with crack dip angle for remolded soils

2.3 裂隙条数与形状的影响

图8(a)为无裂隙重塑土以及含有单条和平行两条90°裂隙面倾角的重塑土的剪切应力与竖向应力关系图。图8(a)~(h)为含有70、60、55、50、45、40、30°的单裂隙、双裂隙、X裂隙重塑土剪切应力与竖向应力关系图。图9、图10为不同裂隙类型(单裂隙、双裂隙、X裂隙)条件下,重塑土样的黏聚力和内摩擦角随倾角变化的演变规律。单裂隙、双裂隙、X裂隙重塑土的抗剪强度随裂隙面倾角整体变化的趋势保持一致:均为随裂隙面倾角减小先减小后增大,呈V形趋势变化,当裂隙倾角为55°时最低。单裂隙、双裂隙、X裂隙重塑土的黏聚力和內摩擦角同样呈V形变化,当裂隙倾角为55°时最小。当裂隙倾角为55°时,单裂隙重塑土黏聚力 $c = 60.91$ kPa, 內摩擦角 $\varphi = 20.68^\circ$; 双裂隙重塑土黏聚力 $c = 60.32$ kPa, 內摩擦角 $\varphi = 20.63^\circ$; X裂隙重塑土黏聚力 $c = 57.52$ kPa, 內摩擦角 $\varphi = 20.16^\circ$ 。在相同裂隙面倾角条件下,单裂隙重塑土的黏聚力和內摩擦角大于双裂隙重塑土的黏聚力和內摩擦角,并且双裂隙重塑土的黏聚力和內摩擦角大于X裂隙重塑土的黏聚力和內摩擦角。

内摩擦角。结果表明:裂隙条数增多和裂隙交汇发育会进一步破坏膨胀土土体的结构,使得膨胀

土的抗剪强度逐步降低。

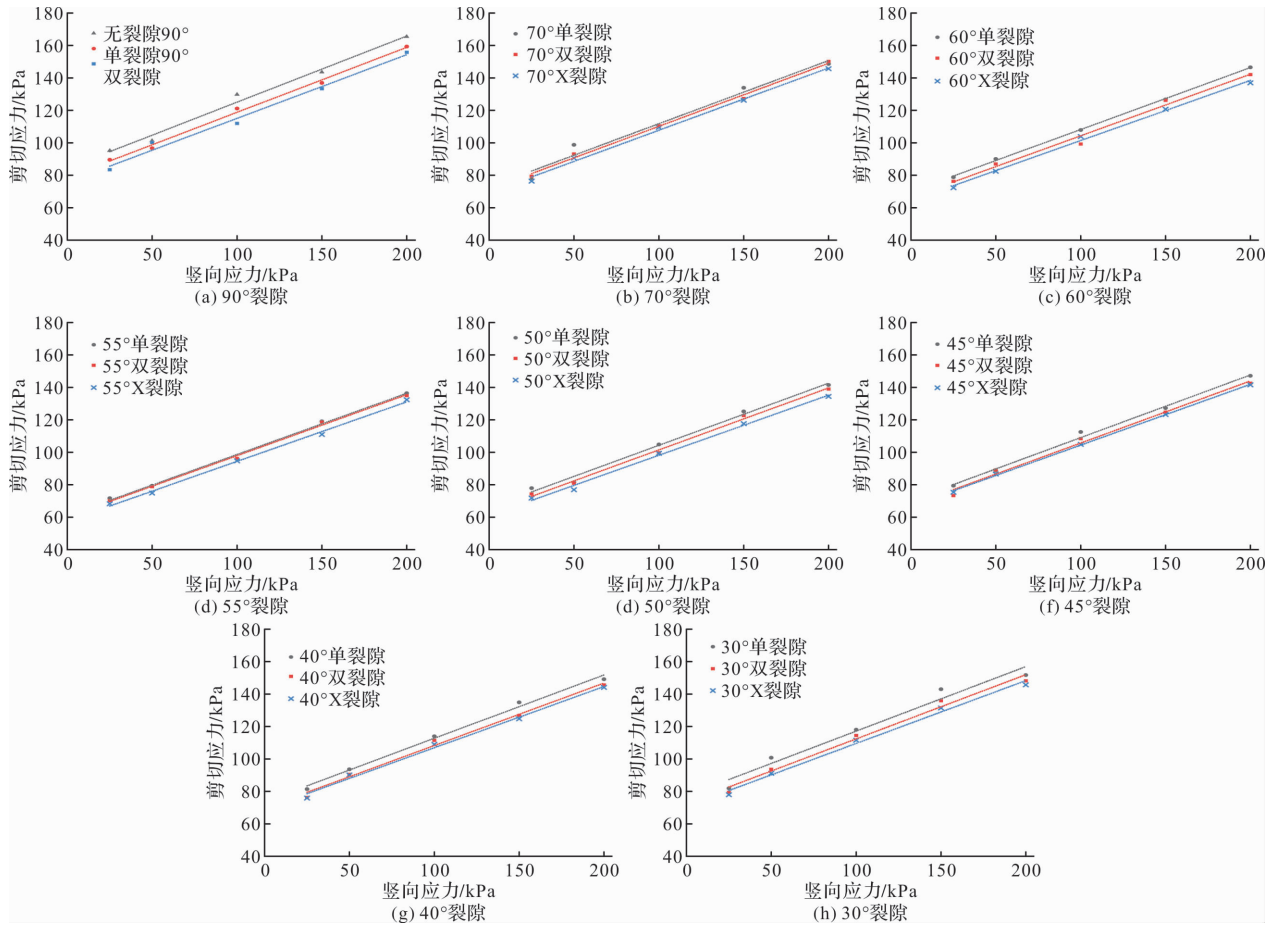


图8 不同裂隙类型的重塑土剪切应力与竖向应力关系图

Fig. 8 Relationship of shear strength with vertical stress for remolded soils with different number and shape of crack

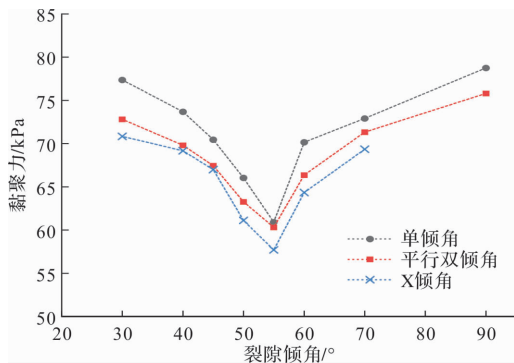


图9 不同裂隙类型的重塑土黏聚力随裂隙倾角的变化图
Fig. 9 Variation of cohesion force with crack dip angle for remolded soils with different number and shape of cracks

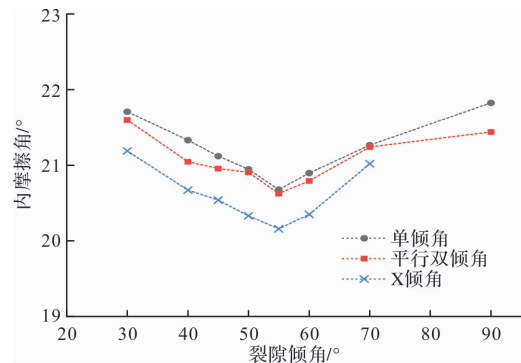


图10 不同裂隙类型的重塑土内摩擦角随裂隙倾角的变化图
Fig. 10 Variation of interior friction angle with crack dip angle for remolded soils with different number and shape of cracks

2.4 裂隙间填充物的影响

原状土原生裂隙间常见填充物主要为蒙脱石^[26];因此,本文中采用主要成分为蒙脱石的膨润土作为重塑土裂隙间的填充物,如图3(d)所示。在裂隙处分别填充含水率为20%与30%的膨润土。图11~图13分别为裂隙间含不同填充物重塑土的

剪切应力与竖向应力关系图、黏聚力以及内摩擦角随裂隙面倾角变化图。在相同裂隙面倾角条件下,填充20%含水率膨润土单裂隙重塑土的抗剪强度与单裂隙无填充重塑土的抗剪强度相比整体略微降低;填充30%含水率膨润土单裂隙重塑土的抗剪强度则明显低于单裂隙无填充重塑土和填

充20%含水率膨润土单裂隙重塑土的抗剪强度. 填充20%含水率膨润土单裂隙重塑土和填充30%含水率膨润土单裂隙重塑土的黏聚力和内摩擦角随裂隙面倾角减小先减小后增大; 与单裂隙无填充重塑土黏聚力和内摩擦角随裂隙面倾角的变化趋势保持一致, 均当倾角为 55° 时最小. 结果表明: 填充物并不改变裂隙土抗剪强度随倾角变化的趋势; 填充的蒙脱石未经压实, 其强度较低; 裂隙间蒙脱石含水率增加会导致裂隙土样整体抗剪强度降低^[27]. 说明原生裂隙间填充物含有蒙脱石是裂隙土抗剪强度降低的原因. 因为蒙脱石具有强吸水性, 蒙脱石沿着裂隙聚集并吸水膨胀使得裂隙继续发育, 从而逐渐破坏土体结构^[28].

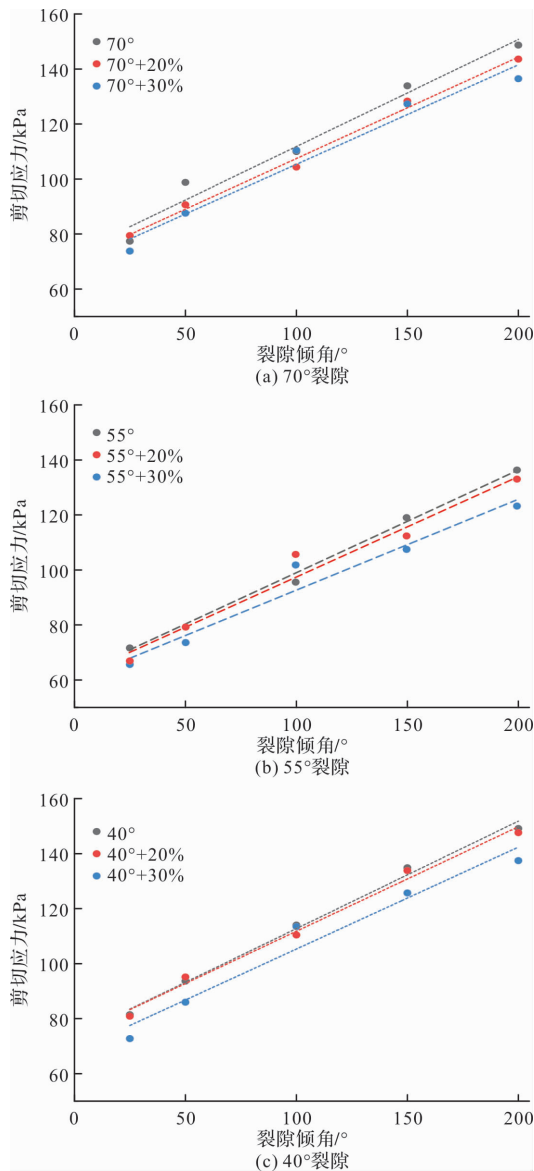


图 11 裂隙间含不同填充物重塑土的剪切应力与竖向应力关系图

Fig. 11 Relationship of shear stress with vertical stress for remolded soils with different fillings of cracks

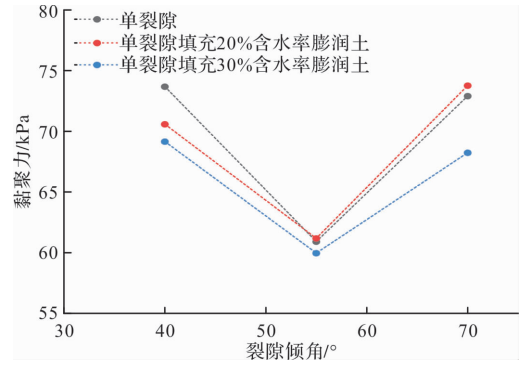


图 12 裂隙间含不同填充物重塑土黏聚力随裂隙倾角的变化图

Fig. 12 Variation of cohesion force with crack dip angle for remolded soils with different fillings of cracks

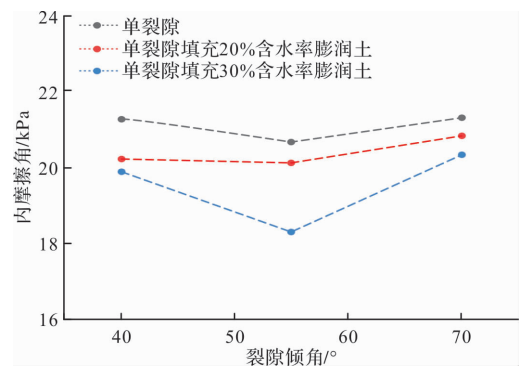


图 13 裂隙间含不同填充物重塑土内摩擦角随裂隙倾角的变化图

Fig. 13 Variation of interior friction angle with crack dip angle for remolded soils with different fillings of cracks

3 裂隙土抗剪强度参数随倾角变化的模型

由原状土和重塑土直剪试验结果可知, 裂隙对膨胀土抗剪强度具有弱化作用, 弱化程度随倾角变化. 由此定义弱化度 δ 表达式为

$$\delta_c = c'/c \quad (1)$$

$$\delta_\varphi = \varphi'/\varphi \quad (2)$$

式中: δ_c 为黏聚力弱化度; c' 为裂隙土黏聚力; c 为无裂隙土黏聚力; δ_φ 为内摩擦角弱化度; φ' 为裂隙土内摩擦角; φ 为无裂隙土内摩擦角.

对不同裂隙面倾角重塑土的黏聚力和内摩擦角实测值进行正态函数拟合, 拟合公式如下.

$$y = y_0 + Ae^{-\frac{(x-x_c)^2}{2\sigma^2}} \quad (3)$$

单裂隙、双裂隙、X 裂隙黏聚力和内摩擦角随倾角变化的弱化度拟合结果如图 14~图 19 所示. 单裂隙、双裂隙、X 裂隙的黏聚力和内摩擦角随裂隙面倾角弱化曲线拟合度 R^2 均在 0.9 左右, 拟合效果较好, 符合实际情况. 通过弱化度拟合曲线和无裂隙膨胀土可以得到含各个裂隙面倾角的裂

隙土的黏聚力和内摩擦角, 关系如下.

$$\begin{cases} c_1 = f(\delta_c) c \\ \tan \varphi_1 = f(\delta_\varphi) \tan \varphi \end{cases} \quad (4)$$

式中: c 、 φ 分别为无裂隙膨胀土黏聚力和内摩擦角; c_1 、 φ_1 分别为裂隙土弱化后黏聚力和内摩擦角.

根据库伦公式可推算出含有不同裂隙面倾角的膨胀土抗剪强度.

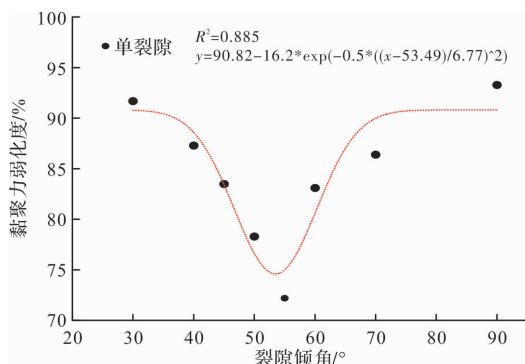


图 14 单裂隙重塑土黏聚力弱化度随倾角变化拟合图

Fig. 14 Fitting curve of the weakening degree of cohesion force with respect to crack dip angle for remolded soils with single crack

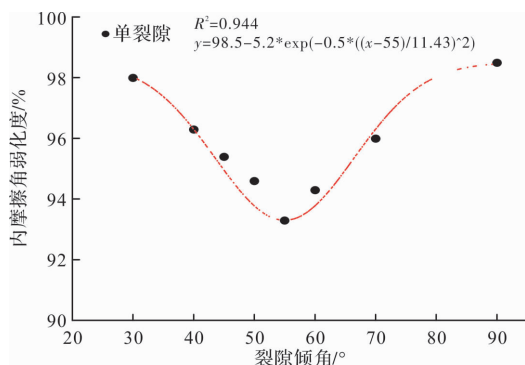


图 15 单裂隙重塑土内摩擦角弱化度随倾角变化拟合图

Fig. 15 Fitting curve of the weakening degree of interior friction angle with respect to fracture dip angle for remolded soils with single crack

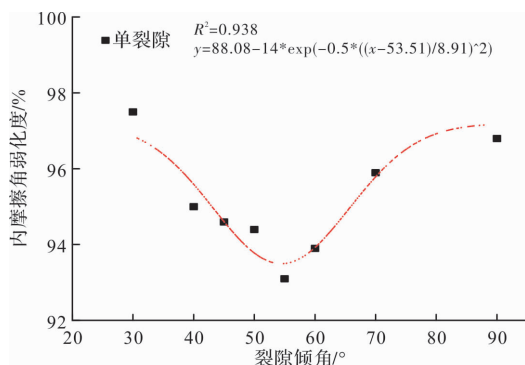


图 16 双裂隙重塑土黏聚力弱化度随倾角变化拟合图

Fig. 16 Fitting curve of the weakening degree of cohesion force with respect to fracture dip angle for remolded soils with double cracks

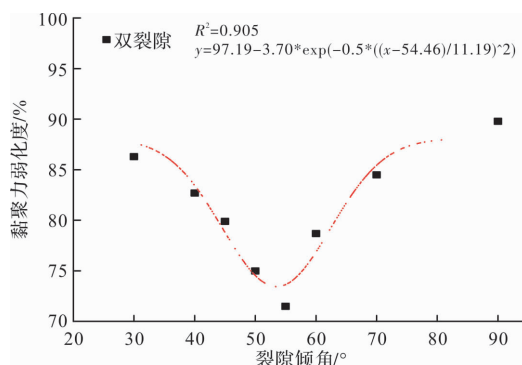


图 17 双裂隙重塑土内摩擦角弱化度随倾角变化拟合图

Fig. 17 Fitting curve of the weakening degree of interior friction angle with respect to crack dip angle for remolded soils with double crack

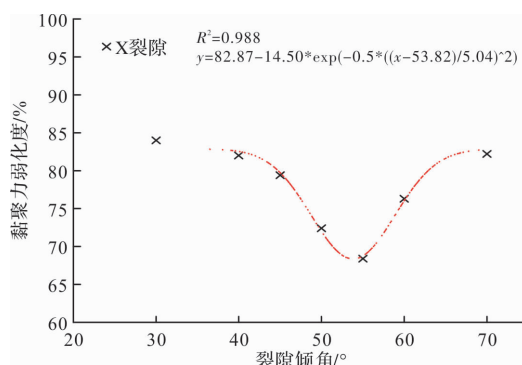


图 18 X 裂隙重塑土黏聚力弱化度随倾角变化拟合图

Fig. 18 Fitting curve of the weakening degree of cohesion force with respect to fracture dip angle for remolded soils with X-shape cracks

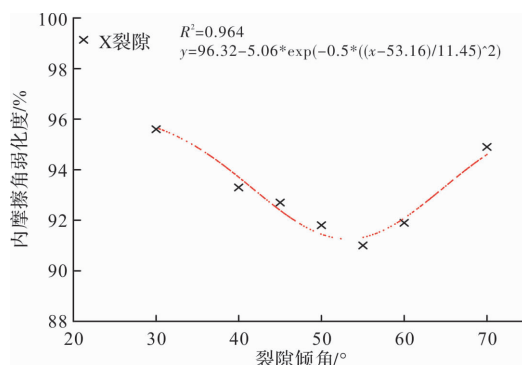


图 19 X 裂隙重塑土内摩擦角弱化度随倾角变化拟合图

Fig. 19 Fitting diagram of the weakening degree of interior friction angle with respect to crack dip angle for remolded soils with X-shape cracks

4 结论

本文通过对含有不同裂隙组合以及不同裂隙间填充物的膨胀土土样进行直剪试验, 并对试验结果进行分析, 建立了裂隙土抗剪强度参数随裂隙面倾角变化的模型, 得到以下结论:

(1)随着裂隙产生,裂隙条数增多,裂隙相互交汇逐步破坏了土体的整体性,降低了膨胀土的抗剪强度;

(2)膨胀土抗剪强度随裂隙面倾角减小先减小后增大,当裂隙面倾角为膨胀土破坏面倾角时其抗剪强度最低;

(3)通过对含有不同裂隙面倾角膨胀土黏聚力和内摩擦角的弱化度进行预测拟合,结合库伦公式可以推算出含有不同裂隙面倾角膨胀土的抗剪强度;

(4)模拟现实中裂隙间填充物常含有蒙脱石的情况,在裂隙间填充主要成分是蒙脱石的膨润土后,随着填充物含水率的增加,裂隙土的抗剪强度降低。

参考文献 References

- [1] 龚壁卫. 膨胀土裂隙、强度及其与边坡稳定的关系[J]. 长江科学院院报, 2022, 39(10): 1-7.
GONG Biwei. Relationship of fracture and strength with stability of expansive soils[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2022, 39(10):1-7.
- [2] 郭从洁,时伟,杨忠年,等. 冻融作用下初始含水率对膨胀土边坡稳定性的影响研究[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 2021, 53(1): 69-79.
GUO Congjie, SHI Wei, YANG Zhongnian, et al. Research on the influence of initial moisture contents on the stability of the expansive soil slope under freeze-thaw cycles[J]. J. Xi'an Univ. of Arch. & Tech. (Natural Science Edition), 2021, 53(1): 69-79.
- [3] CHIJOKE C I, DONALD C N. Influence of dilatancy behavior on the numerical modeling and prediction of slope stability of stabilized expansive soil slope[J]. Arabian Journal for Science and Engineering, 2021, 46(1): 11387-11413.
- [4] HOU Dinggui, ZHOU Yunying, ZHENG Xinyu. Seepage and stability analysis of fissured expansive soil slope seepage and under rainfall[J]. Indian Geotech J, 2023, 53(1): 180-195.
- [5] 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]. J. Xi'an Univ. of Arch. & Tech. (Natural Science Edition), 2021, 53(3): 319-329.
- [6] 靳福杰,王叶娇,徐永福,等. 蒸发-降雨条件下膨胀土边坡裂隙演化模拟[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2022, 53(1): 239-249.
- [7] 崔郁雪,杨忠年,时伟,等. 冻融循环下非饱和膨胀土一维土柱模型试验研究[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 2021, 53(3): 393-403.
CUI Yuxue, YANG Zhongnian, SHI Wei, et al. Experimental study on one dimensional soil column model of unsaturated expansive soil under freeze thaw cycles [J]. J. Xi'an Univ. of Arch. & Tech. (Natural Science Edition), 2021, 53(3): 393-403.
- [8] WANG M Y, LI D Q, TANG X S, et al. Modeling irregularly inclined fissure surfaces within nonuniform expansive soil slopes[J]. International Journal of Geomechanics, 2022, 22(8): 04022124.
- [9] ZHEN H, WEI B X, ZHANG L J, et al. Surface crack development rules and shear strength of compacted expansive soil due to dry-wet cycles[J]. Geotechnical and Geological Engineering, 2019, 37(4): 2647-2657.
- [10] XIONG W L, YONG W, JING W Y, et al. Unsaturated expansive soil fissure characteristics combined with engineering behaviors [J]. Journal of Central South University, 2012, 19(12): 3564-3571.
- [11] SUN D X, LIU X F, YUAN S Y, et al. Three-dimensional characterization of cracks in undisturbed mile expansive soil using X-ray computed tomography[J]. Soil and Foundations, 2023, 63(3): 101282.
- [12] 杨济铭,张红日,陈林,等. 基于数字图像相关技术的膨胀土边坡裂隙形态演化规律分析[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2022, 53(1): 225-238.
YANG Jiming, ZHANG Hongri, CHEN Lin, et al. Analysis of crack morphology evolution law of expansive soil slope based on digital image correlation technology[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2022, 53(1): 225-238.
- [13] CHEN K S, SHENG C K. The evolution of cracks in red clay under wet and dry cycles and its influence on shear strength[J]. Earth and Environmental Science, 2020, 525(1): 012161.
- [14] 胡东旭,李贤,周超云,等. 膨胀土干湿循环胀缩裂隙的定量分析[J]. 岩土力学, 2018, 39(S1): 318-324.
HU Dongxu, LI Xian, ZHOU Chaoyun, et al. Quantitative analysis of swelling and shrinkage cracks in expansive soil[J]. Rock and Soil Mechanics, 2018, 39(S1): 318-324.

- [15] 汪为巍,王荣,臧濛,等. 膨胀土裂隙三维空间分布特征试验研究[J]. 科学技术与工程, 2017, 17(6): 245-251.
WANG Weiwei, WANG Rong, ZANG Meng, et al. Experimental research on three-dimensional space distribution characteristics of the expansive soil cracks[J]. Science Technology and Engineering, 2017, 17(6): 245-251.
- [16] ANDRUSHIA A D, NEEBHA T M, UMDEVI S, et al. Shrinkage crack detection in expansive soil using deep convolutional neural network and transfer learning[J]. Journal of Civil Engineering, 2022, 26(10): 4202-4213.
- [17] 杨和平,唐咸远,王兴正,等. 有荷干湿循环条件下不同膨胀土抗剪强度基本特性[J]. 岩土力学, 2018, 39(7): 2311-2317.
YANG Heping, TANG Xianyuan, WANG Xingzheng, et al. Shear strength of expansive soils under wet-dry cycles with loading[J]. Rock and Soil Mechanics, 2018, 39(7): 2311-2317.
- [18] 胡卸文,李群丰,赵泽三,等. 裂隙性粘土的力学特性[J]. 岩土工程学报, 1994(4): 81-88.
HU Xiewen, LI Qunfeng, ZHAO Zesan, et al. Mechanical properties of fissured clay[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1994(4): 81-88.
- [19] XU J, ZHOU L Y, LI Y F, et al. Experimental study on uniaxial compression behavior of fissured loess before and after vibration[J]. International Journal of Geomechanics, 2022, 22(2): 04021277.
- [20] 高志傲,孔令伟,王双娇,等. 循环荷载下不同裂隙方向饱和和原状膨胀土动力特性试验研究[J/OL]. 岩土工程学报, 1-13 [2024-06-25]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1124.tu.20240510.0842.002.html>.
GAO Zhiao, KONG Lingwei, WANG Shuangjiao, et al. Experimental study on dynamic characteristics of saturated undisturbed expansive soil with different fissure orientations under cyclic loading[J/OL]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1-13 [2024-06-25]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1124.tu.20240510.0842.002.html>.
- [21] 吴瑞安,张永双,张俊才,等. 川西松潘地区裂隙性黄土强度特性试验[J]. 科学技术与工程, 2019, 19(6): 236-242.
WU Ruian, ZAHNG Yongshuang, ZHANG Juncai, et al. Tests on strength properties of fractured loess in Songpan area, western Sichuan[J]. Science Technology and Engineering, 2019, 19(6): 236-242.
- [22] 胡波,龚壁卫,程展林,等. 膨胀土裂隙面强度的直剪试验研究[J]. 西北地震学报, 2011, 33(S1): 246-248.
HU Bo, GONG Biwei, CHENG Zhanlin, et al. Direct shear test on shear strength of fissure-plane in expansive soil[J]. Northwestern Seismological Journal, 2011, 33(S1): 246-248.
- [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): 80-85,91.
CHENG Longhu, NIE Rusong, LIU Fei. An experimental study of the uniaxial compressive strength of fractured loess[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2017, 44(5): 80-85,91.
- [24] 孙萍,彭健兵,吴树仁,等. 裂隙性黄土力学特性试验研究[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2015, 46(6): 2188-2195.
SUN Ping, PENG Jianbing, WU Shuren, et al. An experimental study on mechanical properties of fractured loess[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2015, 46(6): 2188-2195.
- [25] 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.
GONG Biwei, CHENG Zhanlin, HU Bo, et al. Research on engineering properties of fissures in expansive soil[J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, 35(7): 1825-1830.
- [26] 胡波,龚壁卫,程展林,等. 南阳膨胀土裂隙面强度试验研究[J]. 岩土力学, 2012, 33(10): 2942-2946.
HU Bo, GONG Biwei, CHENG Zhanlin, et al. Test study of shear strength of fissure-plane in Nanyang expansive soil[J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, 33(10): 2942-2946.
- [27] 石北啸,韩华强,宿辉,等. 膨胀土裂隙问题研究现状及展望[J]. 人民黄河, 2014, 36(2): 118-120,123.
SHI Beixiao, HAN Huaqiang, SU Hui, et al. Research status and prospect of expansive soil crack problems[J]. Yellow River, 2014, 36(2): 118-120,123.
- [28] 黄志全,张瑞旗,张晓丽,等. 膨胀土裂隙面抗剪强度及影响因素试验研究[J]. 工业建筑, 2015, 45(9): 99-103,98.
HUANG Zhiquan, ZHANG Ruiqi, ZHANG Xiaoli, et al. Experiment study of shear strength of crack surface and its influencing factors for expansive soil[J]. Industrial Construction, 2015, 45(9): 99-103,98.

(编辑 李睿奇)