

DOI:10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.201910033

循环荷载作用下正融粉质黏土强度特征与 滞回环演化规律

崔宏环^{1,2}, 王文涛¹, 何静云¹, 王小敬³, 金成勇³, 徐磊³

(1. 河北建筑工程学院, 河北 张家口 075000; 2. 河北省土木工程诊断、改造与抗灾重点实验室, 河北 张家口 075000; 3. 北旺建设集团有限公司, 河北 承德 067000)

摘要: 季冻区路基春融过程中, 特别是反复循环荷载作用下, 极易造成承载能力显著降低、翻浆冒泥等灾害现象, 但是目前对季冻区路基的研究大多数都停留在冻结土和经历冻融循环后全融土阶段, 正融土的研究比较少。本文对正融粉质黏土进行了不同融化温度、冻结负温、含水率以及围压下的三轴单调加载和循环加卸载试验, 研究发现经历循环加卸载的试样强度较单调加载绝大多数均有降低, 每次循环会对试样造成一定的损伤; 峰值强度随含水率的增大、围压减小而下降显著, 主要由于试样顶端融化时存在大量水分和围压的约束作用造成; 冻结负温和融化温度影响了融化速率, 温度越低, 前期强度越高, 随时间推移影响减弱; 用滞回环弹模量定义了损伤变量, 发现损伤变量与循环次数呈正相关; 不同因素影响下, 损伤变量的增长区别在于损伤快速发展和缓慢发展时对应循环次数上的差异; 基于滞回环面积定义了耗散能, 而损伤变量与耗散能却存在一定此消彼长的相关性。

关键词: 正融土; 循环荷载; 滞回环; 损伤变量; 耗散能

中图分类号: P642.14; TU445

文献标识码: A

文章编号: 1000-3665(2020)04-0174-09

Strength characteristics of the melting silty clay under cyclic loading and the evolution law of hysteresis loop

CUI Honghuan^{1,2}, WANG Wentao¹, HE Jingyun¹, WANG Xiaojing³, JIN Chengyong³, XU Lei³

(1. Hebei University of Architecture, Zhangjiakou, Hebei 075000, China; 2. Hebei Provincial Key Laboratory of Civil Engineering Diagnosis, Reconstruction and Disaster Resistance, Zhangjiakou, Hebei 075000, China; 3. Beiwang Construction Group Co., Chengde, Hebei 067000, China)

Abstract: In seasonal frozen subgrade in the process of melting in spring, especially under the again and again action of cyclic loading, it is easy to cause the mud pumping capacity to significantly reduce to result in disasters phenomena. Current researches of seasonal frozen subgrade mostly stay in the frozen soil and soil after freezing and thawing cycle melt phase, and little is known about the melting soil. In this paper, triaxial monotonic loading and cyclic loading and unloading tests are carried out on the melting silty clay under different melting temperatures, negative freezing temperatures, water content and confining pressures. It is found that the strength of the samples under cyclic loading and unloading is lower than that of most samples under monotone loading, and each cycle will cause certain damage to the samples. Because there is a large amount of water and confining pressure during melting, the peak strength of the sample decreases with the

收稿日期: 2019-10-22; 修订日期: 2019-12-17

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(51878242); 河北省教育厅自然科学重点项目资助(ZD2018101); 张家口市科学技术与地震局指导项目资助(1811009B-17); 河北建筑工程学院创新基金项目资助(XB201810)

第一作者: 崔宏环(1974-), 女, 博士, 教授, 从事冻土基本性质与路基路面工程本构模型研究。E-mail: cuihonghuan729@163.com

通讯作者: 王文涛(1994-), 男, 硕士研究生。E-mail: wangwentao1012@163.com

increasing water content and the decreasing confining pressure. The negative temperature of freezing and melting temperature affect the melting rate. The lower the temperature, the higher the strength in the early stage and the weaker the influence with time. The damage variables are defined by the rebound modulus of the hysteresis ring. Under the influence of different factors, the difference in the growth of damage variables lies in the difference in the corresponding cycle times when damage develops rapidly and slowly. Dissipative energy is defined based on the area of hysteresis ring, but there is a negative correlation between the damage variable and dissipative energy.

Keywords: melting soil; cyclic load; hysteresis loop; damage variable; dissipative energy

中国多年冻土和季节性冻土区分布面积分别占国土面积的 21.5% 和 53.5%^[1]。在这些地区,土体每年至少要经历一次冻融循环作用^[2-3]。冻结时,由于水分迁移,土体产生冻胀现象^[4-6];融化时,由于土基下层未完全溶解,上层土体排水受限,使承载能力显著降低,强度显著弱化^[7]。冻土作为由固体颗粒、冰、液态水、气体组成的一种四相复合体,尤其是在冻土正融的过程中,四相体十分不稳定,发生一系列翻浆冒泥、边坡滑塌等冻害现象^[8]。

循环加卸载作用是常见的一种受力形式,如人工冻结法施工的开挖支护过程、车辆荷载对路基下冻土的作用等^[9],肖福坤等^[10]对煤样进行单轴循环加卸载试验,对应力-应变曲线、弹性应变能与滞回环面积关系等进行了分析;高娟等^[11]研究发现三轴循环剪切过程中损伤及压融等力学性质对冻结盐渍土的强度及变形影响显著;徐湘田等^[12]开展了冻结黄土静力条件下的三轴加卸载试验与单调加载对比试验,研究了两种应力路径下冻结黄土的变形和损伤特性;詹可亮等^[13]基于循环加卸载试验,得到了岩石的循环次数与滞回环的拟合公式。

也有少数学者对正融土进行了一定的研究,窦帅^[14]在无载条件下正融土剪切模量弯曲元试验中发现,正融黏土和砂土的剪切模量随温度的升高而降低,两者呈对数关系;王博等^[15]研究发现高压正融土-结构接触面剪切强度受法向压力和解冻程度等因素影响显著;杜艳^[16]通过对正融土在无侧限单轴动力压缩试验发现,顶板冷却温度和顶板融化温度及外界荷载对温度场、变形量等因素对动应力幅值影响显著;刘琳^[17]进行了冻土的单轴无侧限抗剪强度试验,结果表明:含水量、冷却温度、融化温度是冻土强度弱化的重要影响因素;彭丽云等^[18-19]通过无侧限试验研究了含水率、冷却温度、融化温度和动应力幅值对正融土样的应力应变和强度特性的影响,但只对正融土进行了无侧限抗压试验,不能体现路基土体真实的工作状态。

基于上述分析,冻土正在融化过程的强度弱化被大多数学者忽略,尤其是正融土路基在循环荷载作用下的研究更是少之又少,因此本文对粉质黏土进行正融土三轴循环加卸载试验,对三轴循环荷载作用下正融粉质黏土强度特征与滞回环演化规律进行了研究。

1 试验概况

1.1 试样制备及物理性质

(1)试验所用土样取自河北省张承高速沿线,根据《公路土工试验规程》(JTG E40—2007)^[20]规定的试验方法进行基本物理性质试验后,判定所取土样为低液限粉质黏土。本文采用电动击实仪,通过重型击实法进行试验,表 1 为击实试验的参数。试验所得土样主要的物理性质指标见表 2。

表 1 重型击实试验的参数

Table 1 Parameters of the compaction test

锤底直 径/cm	锤质 量/kg	落高/ cm	试筒尺寸		试样尺寸		每层 层数	击实功/ 击数 (kJ·m ⁻³)
			内径/ cm	高/ cm	高/ cm	体积/ cm ³		
5.0	4.5	45.0	10.0	12.7	12.7	997.0	5	27
								2 687.0

表 2 土样的物理性质指标

Table 2 Physical properties of the soil specimens

液限/ %	塑限/ %	塑性 指数	最优含水率/ %	最大干密度/ (g·cm ⁻³)	土壤 类别
29	16	13	12	1.94	CL

(2)制备试样。试样制备过程依据《土工试验方法标准》(GB/T 50123—1999)^[21]和《公路土工试验规程》(JTG E40—2007)^[20],将采集的土样烘干后过 2 mm 筛,加水均匀搅拌配置成相应含水率的散土体,在限制蒸发条件下保持 12 h,使土中水分均匀。按照其含水率和干密度进行计算,称取相应质量的散土体装入模具,制成直径为 61.8 mm、高度为 125 mm 的圆柱形试样,完成后连同模具一起装入保鲜袋进行密封处理,放入聚乙烯泡沫板保证单向冻结,如图 1 所示。

然后放入高低温交变箱,在相应的冻结负温下冻结 12 h 后取出。随即脱模并套上乳胶套,装入试验仪器,在相应的融化温度和围压下进行正融土三轴循环荷载试验。

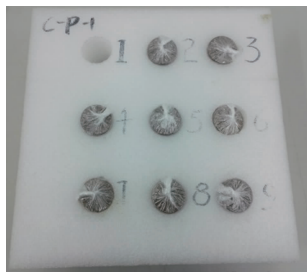


图 1 装有试样的聚乙烯泡沫板

Fig.1 Polyethylene foam plate with samples

1.2 试验方案

(1) 考虑到正融土路基强度的影响因素主要包括土体本身和外部环境因素两类,因此本文结合正融土路基和当地的气候特点,选取了 4 种影响因素进行全面试验,4 种影响因素分别是含水率、围压、冻结负温、融化温度。其中含水率为 9%、12%、15%,围压为 20, 50, 80 kPa,冻结负温为 -5 , -10 , -15 $^{\circ}\text{C}$,融化温度为 6 $^{\circ}\text{C}$ 和 12 $^{\circ}\text{C}$ 。

(2) 本文所用的三轴循环荷载试验方法具体步骤是:在某一围压下对试样进行三轴压缩,当轴向应变达到 ε_{a1} 时开始第一次卸载,卸载到偏差应力为零(即 $\sigma_1 - \sigma_3 = 0$),再加载到轴向应变为 ε_{a2} 后开始第二次卸载,依此类推进行 N 次循环,本文试验中前三次加卸载的轴向应变差约为 2%,后两次加卸载的轴向应变差约为 3%,即达到 2%、4%、6%、9%、12% 的轴向应变时卸载,每个围压下进行 5 个加载-卸载-再加载循环,典型的试验曲线如图 2 所示。

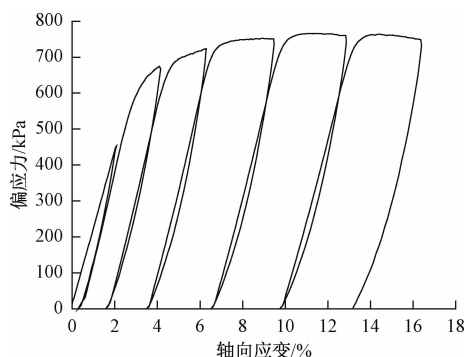


图 2 典型应力应变曲线

Fig.2 Typical stress-strain curve

(3) 试样从高低温交变箱取出装入仪器约 2 min

左右,装样阶段的融化量几乎很小,试验只模拟装入仪器后正融土的剪切过程,剪切和卸载速率为 1.67×10^{-2} mm/s,试样轴向应变达到 15% 时试验结束^[21]。试验循环加卸载试验用时约为 26 min,室内环境下试样芯部完全融化到试验温度约 30 min,试验条件基本满足正融土剪切试验的正融过程。为对比循环荷载作用的影响,在与加卸载试验相同试验条件进行了常规三轴压缩试验。试验采用的设备是由冻土三轴仪改造而成的高低温三轴仪,仪器可以保证试验过程中融化温度恒定不变。

2 试验结果分析

2.1 应力应变曲线

试验得到正融粉质黏土常规及循环加卸载条件下的全过程应力应变曲线,限于篇幅只列出部分试验条件下的试验结果。图 3 为含水率 9%、冻结负温 -5 $^{\circ}\text{C}$ 、融化温度 6 $^{\circ}\text{C}$ 各围压下应力应变曲线。

从图 3 可以看出,不同围压条件下常规三轴压缩试验与循环加卸载试验应力-应变曲线整体趋势基本相同。每次加卸载曲线不能完全重合,加载曲线始终在卸载曲线的上方,形成塑性滞回环。每次卸载完成后,土体都会产生一定程度的塑性变形,且随循环次数增加,塑性变形逐渐增长。但是经历循环加卸载的试样强度较单调加载的试样强度绝大多数均有降低的趋势,这表明循环荷载作用会对土体产生不利的影响,土体试样经历反复的循环荷载,必然会造成土体内部土颗粒骨架结构发生重新排列,每一次循环会产生了一定的塑性损伤,造成强度弱化的现象。

2.2 各因素强度特征

图 4 为不同围压下应力应变曲线,由图 4 可知,围压对正融土强度的影响明显。随着围压不断增大,试样强度有较大的提高。围压较小时土样应力应变曲线呈软化型,在轴向应变小于 15% 时就出现应力峰值。随着围压增大,向硬化破坏发展,无明显峰值点。其原因是较低围压下土体破坏面上的正压力较小,使由内摩擦引起的抵抗破坏的能力较弱,主要依靠冰的胶结作用来抵抗形变与破坏,而且冰融化较慢,冰胶结的脆性破坏在应力应变曲线上则表现为软化现象。

图 5 为不同含水率下应力应变曲线,含水率对正融土强度的影响也比较明显。峰值强度最大的仍为含水率 9% 的试样,其次是含水率为 12%,强度最小为含水率 15%。主要由于在单向冻结的过程中,土样未冻区的水分向冷端迁移,使得在试样的顶端汇聚了水分

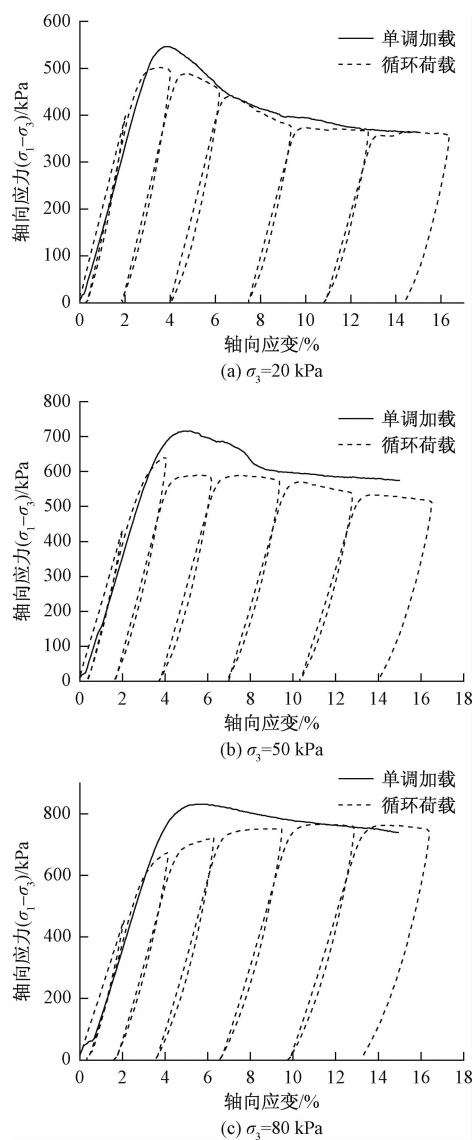


图3 各围压下应力应变对比曲线

Fig. 3 Stress-strain correlation curve under the different confining pressures

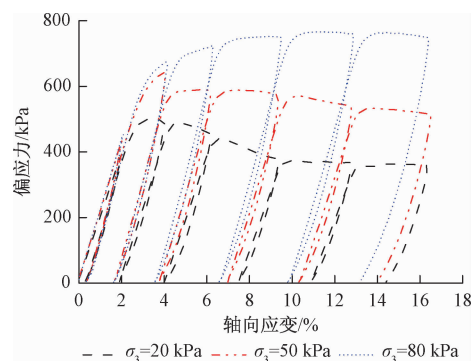


图4 不同围压下应力应变曲线

Fig. 4 Stress-strain curves under different confining pressures

并结成冰造成正融时强度的差异。

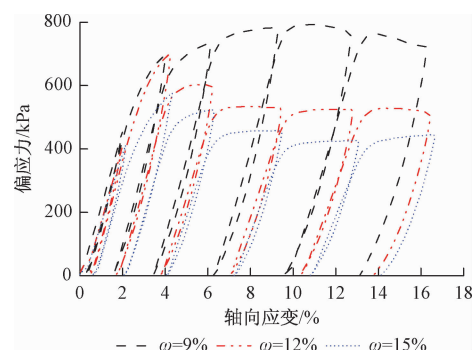


图5 不同含水率下应力应变曲线

Fig. 5 Stress strain curve under the different moisture content

图6为不同冻结负温下应力应变曲线,可以看出冻结负温越低,土样峰值强度越大,但是土体的残余强度却表现出相反的规律,冻结负温越低时,残余强度也越低。当土体的含水率一定时,冻结负温的变化不仅影响着土样中含冰量的大小和冰晶体的内部结构,而且影响了土样冻结速率和冻结过程中水分迁移的程度,而含冰量的高低又决定着冰晶体对土颗粒的胶结程度,从而影响了冻土的强度。

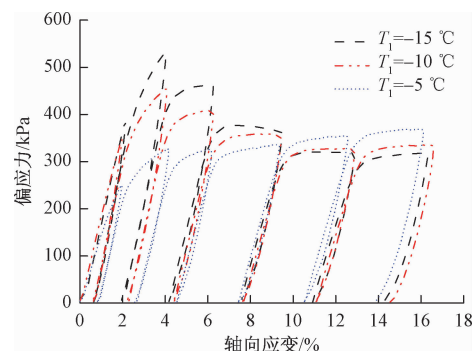


图6 不同冻结负温下应力应变曲线

Fig. 6 Stress-strain curves under different freezing negative temperatures

图7为不同融化温度下应力应变曲线,从中可以看出,土样正融剪切过程中,融化温度较低时,土样一般表现出较高的强度,有明显峰值点,表现为脆性破坏;随着融化的升高,试样强度均略有下降,且无明显的峰值点,表现为延性破坏,融化温度影响前期峰值强度的出现,而对于残余强度几乎没有太大影响。试验中融化温度的差异造成了试样的融化速度不同,融化温度越低,土样融化速度越慢,土样还没有进行缓慢的融化排水固结就已经发生了破坏,接近于冻土的破坏特征;随着融化温度的升高,土样的融化排水固结速度明显加快,表现出压缩变形特性。随着时间推移,不同温度下融化程度慢慢趋于一致,因此残余强度相差

不大。

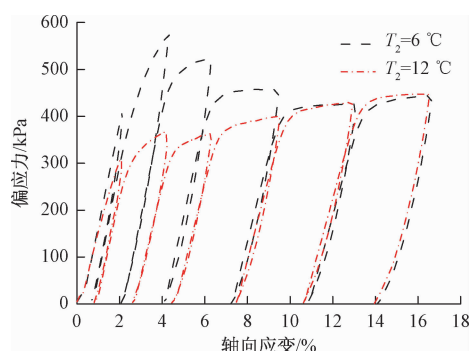


图7 不同融化温度下应力应变曲线

Fig.7 Stress-strain curves under different melting temperatures

3 滞回环演化规律

3.1 滞回环回弹模量

研究正融土循环加卸载过程中弹性模量的演化规律时,需要借助其应力-应变曲线来确定各个滞回环的等效弹性模量。滞回环回弹模量可以通过计算滞回环斜率得到,其数值大小表征了土样刚度,即抵抗变形的能力^[11]。取各试验因素不同水平下的回弹模量,绘制其与加卸载循环次数的关系曲线。

图8为不同围压、融化温度、冻结负温、含水率条件下,滞回环回弹模量随循环次数的变化规律。随着荷载循环次数的增加,滞回环回弹模量均呈现不同程度的降低。经过5次循环后,模量最小降幅为10%左右,最大降幅达25%。表明试样随着循环次数的增加,抵抗变形的能力越来越弱,逐渐破坏。

随着围压的增大,滞回环回弹模量的损失量逐渐减小,并且回弹模量降低速率最大处向右推移,表明围压在一定程度限制了试样的横向变形,增强了试样抵

抗变形的能力,但随着应力继续增大,围压不足以抵抗变形,使得回弹模量降低明显且向图像右侧移动(图8a)。

在6 °C融化时,回弹模量呈二次抛物线降低,在12 °C时降低速率明显加快,土体在融化过程中,12 °C较6 摄氏度融化略快。在外荷载作用下,液态水融化较快且较多,造成强度显著弱化,回弹模量显著下降。试验中融化温度越低,土样融化速度越慢,土样可以进行一定程度上缓慢的融化排水固结,模量变化正是土体由硬到软渐变的过程(图8b)。

不同冻结负温差异主要体现在第二次荷载时,模量最大值为-15 °C,最小为-5 °C,随着循环次数的增加,不同冻结负温的差异逐渐减小。考虑为冻结负温越低,融化时,前期土体温度也较低,表现出较大的刚度,随着融化过程继续进行,不同冻结负温下土体融化的温度差越来越小,数据上表现为回弹模量的差值也相差不大(图8c)。

不同含水率下回弹模量差异较大,含水率为9%时模量较大,然后依次是12%和15%,这也与前述不同含水率下强度的差异相吻合,9%时强度最大。随着循环次数的增大和融化的进行,土体不同含水率状态下回弹模量的下降趋势基本一致,并且在4次循环后下降速率显著放缓(图8d)。

3.2 损伤特征

导致材料力学性能劣化的微观结构的变化被称为损伤,损伤变量是度量材料损伤程度的工具。Rabotonov 最早根据有效承载面积定义了以下形式的损伤变量:

$$D = \frac{S - \bar{S}}{S} \quad (1)$$

式中: S ——试样初始截面积;

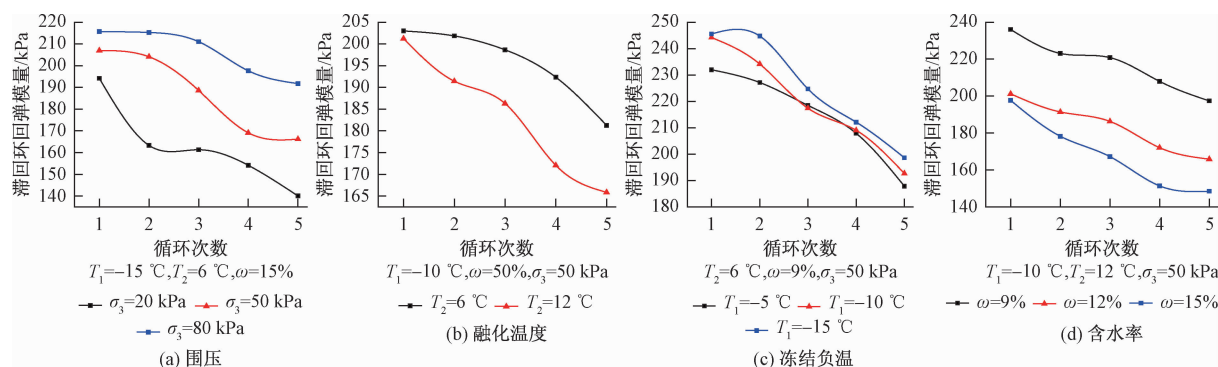


图8 滞回环回弹模量演化规律

Fig.8 Evolution law of elastic modulus of hysteresis loop

$\bar{S}$ ——受损后的有效面积。

可知, $D=0$ 时对应于材料的无损状态, $D=1$ 时对应完全损伤状态, 即可描述材料的损伤行为。实际中, 由于受损后的有效面积不易准确计算和测量, 很难用上式定义损伤^[12]。一种常用的非直接测量方法是根据材料弹性模量的劣化来计算材料的损伤, 损伤变量的公式如下:

$$D = \frac{E - \bar{E}}{E}$$

(2)

式中: E ——试样无损状态时的弹性模量;
 $\bar{E}$ ——受损时的弹性模量。

本文基于材料劣化造成损伤的本质采用式(2)描述正融土的损伤特征。根据正融土的三轴循环加卸载试验, 取前文滞回环回弹模量为各受损状态时的弹性模量, 还需要确定正融土无损状态时的弹性模量, 图 3 表明, 第一次卸载和加载曲线基本重合, 因此取第一次循环的回弹模量作为无损状态的弹性模量^[12]。表 3 为各循环次数下的回弹模量。

图 9 为正融土损伤变量随循环次数的发展规律, 由图 9 可知, 随着循环次数的增加, 循环次数与损伤变

量呈正相关, 不同的因素影响下, 也表现出相似的趋势。主要由于正融土融化过程的进行, 土体逐渐变软, 使得土体损伤增大。如图 9a 所示, 小围压下损伤较快, 发生在 1, 2 次循环左右, 中高围压状态主要集中在 3, 4 次循环。分析认为, 围压越大, 前期抵抗变形能力较强, 到达峰值强度的时间较慢, 抑制了损伤发展。由图 9b 可看出, 不同融化温度时, 损伤差异较大, 温度越高, 损伤明显越大, 差异正是因为试样融化速度的不同, 土体同一时间段的刚度差异较大, 土体融化较快的土体先一步变软, 造成损伤较大。由图 9c 可知, 冻结负温对正融土的损伤影响主要体现在中间循环次数上差异较大, 初始和末尾循环时损伤比较接近, 这也与不同温度土体正融时的温度随时间的变化相吻合, 温度差异主要在前中期, 损伤变化规律与温度较为一致。由图 9d 可知, 含水率越高时, 土体的损伤越明显, 15% 含水率的损伤明显高于中低含水率。分析认为, 含水率较大时, 冻结时土体上部有大量冻结水, 正融过程水分大量融化, 破坏了土体的结构性, 强度明显弱化, 损伤量也随之较大。

表 3 各循环次数下的回弹模量
Table 3 Resilience modulus under each cycle number

循环 次数	冻结温度/℃			融化温度/℃		围压/kPa			含水率/%		
	- 5	- 10	- 15	6	12	20	50	80	9	12	15
	E/kPa										
1	232.0	244.2	245.6	203.0	201.2	194.2	207.0	215.7	236.1	201.2	197.7
2	227.2	234.2	244.8	201.9	191.4	163.3	204.1	215.3	223.1	191.4	178.3
3	218.5	217.4	224.7	198.7	186.3	161.3	188.6	211.0	220.9	186.3	167.2
4	207.9	209.0	212.1	192.3	172.1	154.2	169.1	197.7	208.0	172.1	151.4
5	187.8	192.7	198.6	181.3	165.9	140.1	166.2	191.8	197.4	165.9	148.5

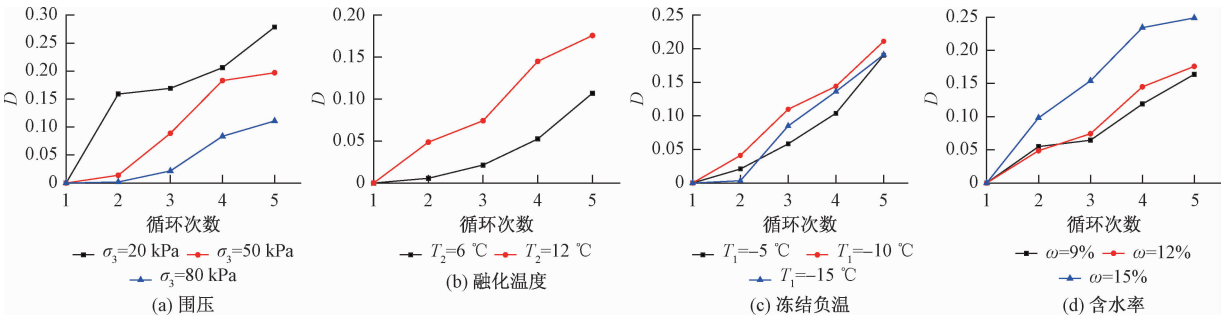


图 9 正融土损伤变量随循环次数的发展规律
Fig. 9 Melting law of the soil damage variable along with the development of the cycles

3.3 耗散能与损伤变量

图 10 为试件在循环加卸载过程中的滞回环曲线, 可以看出, 当加载至某一应力水平再卸载, 卸载曲线不

沿着加载的路径, 而是低于原来的加载曲线。由此可认为, 试件吸收的能量 (外载荷对试件所做的功) 转化为三个部分: 一部分是试件耗散能, 另一部分是试件产

生的塑性变形能,最后一部分以弹性应变能的形式积聚在试件里,卸载时可释放出来。加载曲线下的面积是试件吸收的能量,卸载曲线下的面积是试件释放的弹性能,滞回环的面积则代表了试件的损伤能,也称为耗散能。试件的加卸载曲线按照 $O \rightarrow A \rightarrow B \rightarrow C \rightarrow D \rightarrow E \rightarrow B \rightarrow F$ 的顺序变化,其中曲线 BC-DEB 所围成的面积即为一次加卸载的滞回环面积。通过对加卸载应力-应变曲线的积分,可以依次求出每个滞回环的面积。

从图 11 可以看出,试样的耗散能随着循环次数呈现线性增长,总体呈现前期缓慢增长,刚度较大,抵抗变形能力较强,耗散能较小,中期随着水分慢慢融化,土体变软,变形增大,耗散能增长迅速,中后期当土样强度达到峰值点时,由于土的压密,大量能量被转化成

塑性能储存起来,土体内部的耗散能增速放缓;耗散能对围压、融化温度、含水率敏感性较大,对冻结负温敏感性较小。

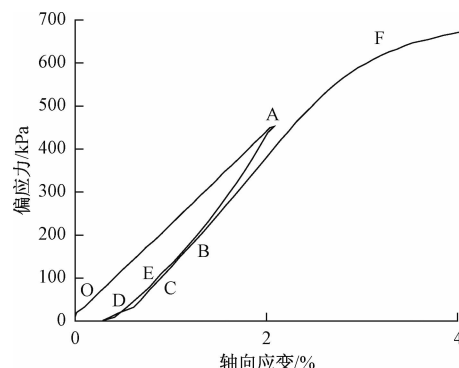


图 10 滞回环曲线

Fig. 10 Hysteresis loop curve

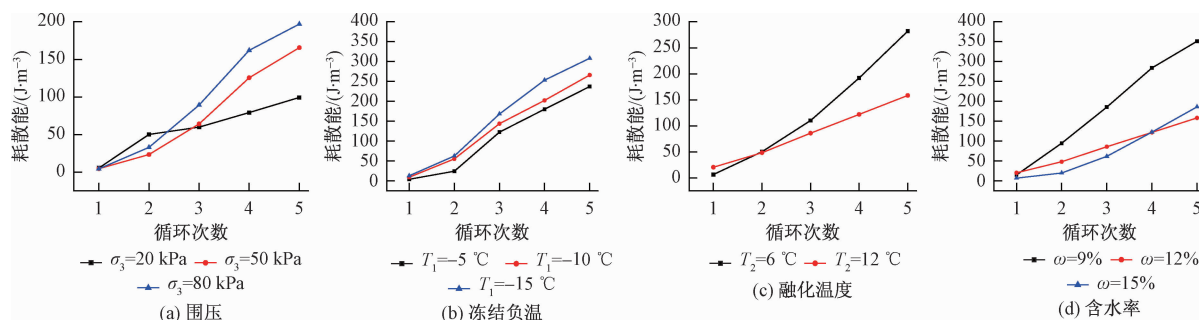


图 11 耗散能演化规律

Fig. 11 Evolution law of dissipated energy

通过两两对比图 9 中损伤变量与图 11 耗散能变化规律,以图 12 含水率为例进行详细对比,发现损伤变量与耗散能的变化随着循环次数的增加,总体趋势是相同的,但更加显而易见的,损伤变量与耗散能存在此消彼长的相关性,损伤变量整体较高的试样却表现出较低的耗散能,损伤变量较低的试样却表现出较高的耗散能。不难发现,损伤变量表现为某次循环下土

体的裂缝以及压密,通过土体的塑性形变表现出来,对应的是塑性形变能;而耗散能相当于循环荷载下土样内部空隙的闭合、土体结构及土壤颗粒的损伤破坏过程中外力所做的功,代表着土体靠自身消除机械振动的能力^[11];二者与弹性能共同构成了试件吸收的总能量,当总能量一定时,其中一个能量的变化,必定会引起其他能量与其相反的量变。加卸载过程中,较高的损伤变量说明土样发生了较大塑性变形,则土体依靠自身消除外力的能力变弱,产生的耗散能反而较低,这与试验结果也相吻合。

4 结论

(1) 每次加卸载曲线不能完全重合,加载曲线始终在卸载曲线的上方,形成塑性滞回环,经历循环加卸载的试样强度较单调加载的试样强度绝大多数均有降低的趋势,每一次循环会产生了一定的塑性损伤,造成强度弱化的现象。

(2) 围压增大,试样强度提高,围压较小时土样呈

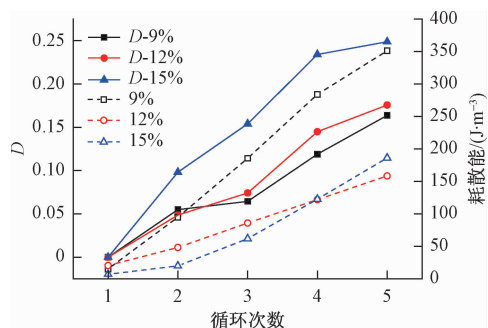


图 12 不同含水率下损伤变量与耗散能变化规律

Fig. 12 Variation rules of the damage variables and dissipated energy under different moisture content

软化型,围压增大,向硬化破坏发展,无明显峰值点;峰值强度随含水率的增大下降显著;冻结负温和融化温度主要影响正融土样的前期强度,负温和融化温度越低,前期强度越高,随时间推移影响减弱。

(3)随着荷载循环次数的增加,滞回环回弹模量均呈现不同程度的降低,经过5次循环后,模量最小降幅为10%左右,最大降幅达到25%。试样随着循环次数的增加,抵抗变形能力越来越弱,逐渐破坏,各因素下演化规律与强度特征规律基本对应。

(4)用滞回环回弹模量定义了损伤变量,损伤变量与循环次数呈正相关,不同因素影响下,损伤变量增长表现出相似的趋势,区别在于损伤快速发展和缓慢发展时对应循环次数上的差异。

(5)试样的耗散能随着循环次数呈现线性增长,总体呈现前期缓慢增长、中期增长迅速、后期增速有所放缓的规律,耗散能对围压、融化温度、含水率敏感性较大,对冻结负温敏感性较小。损伤变量与耗散能存在一定此消彼长的相关性,损伤变量整体较高的试样表现出较低的耗散能,损伤变量较低的试样却表现出较高的耗散能。

参考文献 (References):

- [1] 徐学祖,王家澄,张立新. 冻土物理学[M]. 北京: 科学出版社, 2001. [XU X Z, WANG J C, ZHANG L X. Physics of frozen soil[M]. Beijing: Science Press, 2001. (in Chinese)]
- [2] 周幼吾,郭东信,邱国庆,等. 中国冻土[M]. 北京: 科学出版社, 2000. [ZHOU Y W, GUO D X, QIU G Q, et al. Frozen soil in China[M]. Beijing: Science Press, 2000. (in Chinese)]
- [3] 陈肖柏,刘建坤,刘鸿绪,等. 土的冻结作用与地基[M]. 北京: 科学出版社, 2006. [CHEN X B, LIU J K, LIU H X, et al. Soil freezing action and foundation[M]. Beijing: Science Press, 2006. (in Chinese)]
- [4] KONRAD J M, NIXON J F. Frost heave characteristics of a clayey silt subjected to small temperature gradients[J]. Cold Regions Science and Technology, 1994, 22(3): 299-310.
- [5] KWEON G, HWANG T. Deformational characteristics of subgrade soils and subbase materials with freeze-thaw[J]. KSCE Journal of Civil Engineering, 2013, 17(6): 1317-1322.
- [6] SOLANKI P, ZAMAN M, KHALIFE R. Effect of freeze-thaw cycles on performance of stabilized subgrade[J]. Geotechnical Special Publication, 2013, 230(230): 566-580.
- [7] 王秋枝. 季节性冻土地区铁路路基冻害及其防治措施[J]. 铁道勘察, 2009, 35(3): 22-25. [WANG Q Z. Frozen injury of railway subgrade around seasonal frozen earth area as well as prevention measures[J]. Railway Investigation and Surveying, 2009, 35(3): 22-25. (in Chinese)]
- [8] 马巍,王大雁. 冻土力学[M]. 科学出版社, 2014. [MA W, WANG D Y. Mechanics of frozen soil[M]. Science Press, 2014. (in Chinese)]
- [9] MA W, CHANG X X. Analyses of strength and deformation of an artificially frozen soil wall in underground engineering[J]. Cold Regions Science and Technology, 2002, 34(1): 11-17.
- [10] 肖福坤,申志亮,刘刚,等. 循环加卸载中滞回环与弹塑性应变能关系研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(9): 1791-1797. [XIAO F K, SHEN Z L, LIU G, et al. Relationship between hysteresis loop and elastoplastic strain energy during cyclic loading and unloading[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, 33(9): 1791-1797. (in Chinese)]
- [11] 高娟,赖远明. 冻结盐渍土三轴剪切试验过程中的损伤及压融分析[J]. 岩土工程学报, 2018, 40(4): 707-715. [GAO J, LAI Y M. Damage and pressure melting analysis of frozen saline soils in process of triaxial compression tests[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2018, 40(4): 707-715. (in Chinese)]
- [12] 徐湘田,赖远明,周志伟,等. 循环与单调加载作用下冻结黄土的变形与损伤特性[J]. 冰川冻土, 2014, 36(5): 1184-1191. [XU X T, LAI Y M, ZHOU Z W, et al. Laboratory investigation on the deformation and damage characteristics of frozen loess under triaxial cyclic and monotonic loading conditions[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2014, 36(5): 1184-1191. (in Chinese)]
- [13] 詹可亮,薛俊华,刘之喜. 岩石循环加卸载作用下能量的演化规律[J]. 煤矿安全, 2019, 50(3): 49-52. [ZHAN K L, XUE J H, LIU Z X. Evolution laws of dissipated energy under rock cyclic loading and unloading[J]. Safety in Coal Mines, 2019, 50(3): 49-52. (in Chinese)]
- [14] 窦帅. 基于侧装式弯曲元法的正融土剪切模量特性研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2018. [DOU S. Study on shear modulus of thawing soils by side-

- mounted bender elements [D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2018. (in Chinese)]
- [15] 王博, 刘志强, 赵晓东, 等. 高压正融土与结构接触面剪切力学特性试验研究 [J]. 岩土力学, 2017, 38(12): 3540 – 3546. [WANG B, LIU Z Q, ZHAO X D, et al. Experimental study on shearing mechanical characteristics of thawing soil and structure interface under high pressure [J]. Rock and Soil Mechanics, 2017, 38 (12): 3540 – 3546. (in Chinese)]
- [16] 杜艳. 动荷载作用下 109 国道正融砂质粉土路基填料变形特性研究 [D]. 北京: 北京交通大学, 2010. [DU Y. The study in unconfined compression tests under dynamic load of sandy soil in 109th national highway [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2010. (in Chinese)]
- [17] 刘琳. 正融土无侧限抗压强度试验研究 [D]. 北京: 北京交通大学, 2007. [LIU L. Study on unconfined compression test of thawing frozen soil [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2007. (in Chinese)]
- [18] 彭丽云, 刘建坤, 田亚护, 等. 正融土无侧限抗压试验研究 [J]. 岩土工程学报, 2008, 30 (9): 1338 – 1342. [PENG L Y, LIU J K, TIAN Y H, et al. Unconfined compression tests on thawing soil [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2008, 30(9): 1338 – 1342. (in Chinese)]
- [19] 彭丽云, 刘建坤. 正融粉质黏土在循环荷载作用下的变形特性研究 [J]. 岩土工程学报, 2010, 32 (4): 567 – 572. [PENG L Y, LIU J K. Deformation properties of thawing silty clay under cyclic loading [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, 32(4): 567 – 572. (in Chinese)]
- [20] 交通部公路科学研究院. 公路土工试验规程: JTG E40—2007 [S]. 北京: 人民交通出版社, 2007. [Research Institute of Highway Ministry of Transport. Test Methods of Soils for Highway Engineering: JTG E40—2007 [S]. Beijing: China Communications Press, 2007. (in Chinese)]
- [21] 中华人民共和国水利部. 土工试验方法标准: GB/T 50123—1999 [S]. 北京: 中国计划出版社, 1999. [Ministry of Water Resources of the People ' s Republic of China. Geotechnical test method standard: GB/T 50123—1999 [S]. Beijing: China Planning Press, 1999. (in Chinese)]

编辑: 张明霞