

文章编号:1673-9469(2023)04-0106-07

DOI:10.3969/j.issn.1673-9469.2023.04.015

冻融循环作用下砂质黄土强度劣化特性及影响因素研究

卢智¹, 谢波², 宋飞², 邓军涛^{1*}

(1. 机械工业勘察设计院有限公司, 陕西 西安 710043; 2. 长安大学 地质工程与测绘学院, 陕西 西安 710054)

摘要: 为揭示砂质黄土在冻融循环作用下的强度特性, 以榆林子洲某地砂黄土为研究对象, 对其进行不同初始条件的冻融循环试验, 并测定土体冻融后的三轴剪切强度。结果表明: 砂黄土冻融后表面出现明显的结构破坏现象; 土体粘聚力随着冻融循环次数增加先减小然后有所回升, 土体冻融后的粘聚力随初始含水率的增加而减小, 冻结温度对不同含水率土体粘聚力的影响不同; 土体内摩擦角在冻融循环作用下有所减小, 总体下降量不大; 土体强度下降主要受粘聚力劣化影响; 高含水率极端低温冻结及低含水率较高温冻结均加速了冻融循环作用对土体强度的破坏。

关键词: 砂质黄土; 冻融循环; 冻结温度; 含水率; 抗剪强度

中图分类号: TU411

文献标识码: A

Study on Strength Deterioration Characteristics and Influencing Factors of Sandy Loess Under Freeze-Thaw Cycles

LU Zhi¹, XIE Bo², SONG Fei², DENG Juntao^{1*}

(1. China JIKAN Research Institute of Engineering Investigations and Design Co., Ltd., Xi'an, Shaanxi 710043, China; 2. College of Geological Engineering and Geomatics, Chang'an University, Xi'an, Shaanxi 710054, China)

Abstract: To reveal the strength characteristics of sandy loess under freeze-thaw cycles, taking sandy loess in Zizhou, Yulin, as a research object, the freeze-thaw cycle experiments on the sandy loess with different initial conditions was carried out, and the triaxial shear strength of the soil was determined after freezing and thawing. The results showed that: the surface of sandy loess after freezing and thawing showed a obvious structural damage phenomenon; the cohesion of soil body decreased with the increase of the number of freeze-thaw cycles firstly and then rebounded; the cohesive force of soil body after freezing and thawing decreased with the increase of the initial water content, and the freezing temperature had different influences on the cohesive force of soil body of different water content. It was also found that the friction angle of soil body decreased under freeze-thaw cycles, but the overall decrease was not significant and the decrease of soil body strength was mainly affected by the deterioration of cohesive forces. Both extreme low-temperature freezing at higher water contents and higher-temperature freezing at lower water contents accelerate the destruction of soil strength under freeze-thaw cycles.

Key words: sandy loess; freeze-thaw cycle; freezing temperature; water content; shear strength

我国黄土多分布于较高纬度地区, 季节性冻土发育, 冻融作用导致黄土强度劣化常引起滑坡等地质灾害发生, 研究冻融作用下黄土强度特性十分重要。前人关于冻融循环作用下土体强度的

研究结论差异较大。有的研究认为土体粘聚力随冻融循环先减小后趋于稳定, 内摩擦角无明显变化^[1-3], 但有些研究发现冻融循环作用导致土体粘聚力减小, 但内摩擦角有所增大^[4-6]。还有一些研

收稿日期: 2023-03-09

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(41877247); 榆林市地质灾害成灾规律与风险管控研究项目(SQZB2021-135)

作者简介: 卢智(1994-), 男, 湖北鄂州人, 硕士, 助理工程师, 主要从事地质灾害防治方面的工作。

* 通讯作者: 邓军涛(1979-), 男, 湖北仙桃人, 博士, 教授级高级工程师, 主要从事工程地质等方面的生产与科研工作。

究结论比较特殊,例如:Guo 等^[7]研究发现土体粘聚力随冻融循环先减小后增大再减小,内摩擦角先增大后减小并趋于稳定;李丽等^[8]试验发现土体粘聚力随冻融循环先增大然后趋于稳定。冻结温度也是影响冻融作用的关键因素,胡再强等^[9]发现不同含水率土体粘聚力随冻结温度的降低而增大。张辉等^[10]研究发现冻结温度对不同含水率原状土体冻融后粘聚力与内摩擦角的影响不明显。Sun 等^[11]试验发现冻融后土体的粘聚力随冻结温度降低而减小,内摩擦角受冻结温度影响较小。此外有些研究还发现不同土体存在特殊的最不利冷却温度或最不利冻融温度梯度,在此条件下土体的冻融力学性质最差^[12-13]。

目前针对砂质黄土冻融力学性质的研究较少,具体冻融特性尚不十分清楚,且试验条件少有同时考虑含水率、温度及冻融次数。故本文以榆林市子洲县砂质黄土为研究对象,研究冻融循环次数、初始含水率及冻结温度对其冻融强度的影响,以期为当地地质灾害防治及工程建设提供参考。

1 试验材料及方案

1.1 试验材料

试验用土取自榆林子洲某地 Q₃ 砂质黄土,为充分体现冻融作用对土体的影响,试验用土需采取新鲜未冻融土体。子洲县最大冻土深度为 1.15 m,因此自地面 2 m 以下切取新鲜未冻融土体,测定其基本物理性质指标,试验结果见表 1。图 1 为土体粒径分布曲线,土中粉粒(0.005 ~ 0.075 mm)含量为 79.78%,砂粒(>0.075 mm)含量为 8.64%,物质组成特点说明研究区黄土为较典型砂质黄土^[14]。

表 1 土体基本物理性质指标

Tab.1 Indexes of basic physical properties of soil

天然 密度/ (g·cm ⁻³)	干 密度/ (g·cm ⁻³)	土粒 密度/ (g·cm ⁻³)	天然 含水率 /%	塑限 /%	液限 /%	塑性 指数
1.46	1.39	2.68	5.11	15.80	23.14	7.34

1.2 土样制备

本次试验使用原状土样,制备方法参照《土工试验方法标准》,抗剪强度测定采用三轴剪切试验,将原状土体先削成比标准三轴试样稍大的土块,再用切土器切削成尺寸为 φ39.1 mm×80 mm 的标准三轴试样,按规定取余土测定含水率。土

样含水率配置采用增湿法,配置完成后,为防止试验时与外界发生水分交换,使用保鲜膜完全包裹土样密封,并将其放置在保湿皿中保湿 24 h 以上,使土样中的水分分布均匀。

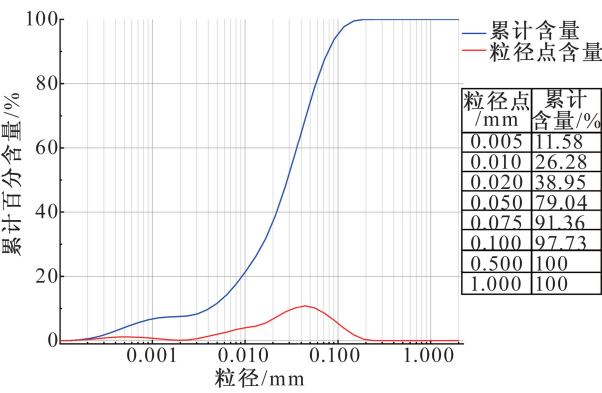


图 1 土体粒径分布曲线
Fig.1 Soil particle size distribution curve

1.3 试验方案

本次试验分为两部分,先对三轴试样进行冻融循环试验,再对冻融后试样进行三轴剪切试验。

(1)冻融循环试验:冻融试验设置为封闭环境下的多向快速冻结试验,冻融时将试样用密封袋密封。试样含水率分别设置为天然含水率 5.11%、塑限含水率 15.8%及中间含水率 10%。冻结温度根据子洲县近 10 年霜冻期最低气温及平均低温分别设置为-25、-10℃。冻结过程在低温试验箱中进行,融化时将土样放在室温(29℃)条件下自然融化,冻结及融化时间均为 12 h。根据前人研究经验,土体力学性质在冻融 10 次后基本稳定,因此设置冻融循环次数(N)分别为 0、1、4、7、10、14,冻融一轮为一次完整循环。

(2)三轴剪切试验:对冻融完成后的土样立即进行三轴剪切试验,为避免固结过程影响冻融循环后土体的结构特征,采用不固结不排水剪(UU)试验。围压按 100、200、300 kPa 设置,剪切速率为 0.4 mm/min,剪切结束条件为土样轴向应变达到 20%。试验方案见表 2。

表 2 试验方案一览表

Tab.2 List of test programs

试样含 水率/%	冻结 温度/℃	融化 温度/℃	冻融循 环次数	围压/kPa
5.11 10、15.8	-10、-25	29	0、1、4 7、10、14	100、200、300

2 试验结果

2.1 试样外观特征

图 2 为天然含水率土体及塑限含水率土体冻融循环后的外观特征。可以看出,在未经冻结时,两种土表面均较为光滑平整,可见黄土的天然孔隙结构。冻融 7 次后,土体表面均出现了颗粒脱离现象,局部可见较多脱离颗粒形成小团粒。冻融 14 次后,两种土样表面都出现了较为明显的破坏现象,裂隙扩张,局部土粒剥离产生的凹坑逐渐扩展、连通,相较于天然含水率土体,塑限含水率土体土粒剥离现象更为明显,产生凹坑数量也更多。

2.2 粘聚力

2.2.1 循环次数的影响

图 3(a) 为 $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 冻结时不同含水率土体粘聚力与冻融循环次数的关系曲线,可见土体的粘聚力随着冻融循环次数的增加先降低后有所回升。例如:含水率为 5.11% 时,土体粘聚力在循环次数为 1、4、7、10、14 时,下降量分别为 3、4、2、3、-4 kPa;含水率为 10% 时,下降量分别为 13、8、5、13、-20 kPa;含水率为 15.8% 时,下降量分别为 6、3、0、0、0 kPa,可见同一含水率下,粘聚力在最初几

次冻融时下降量大,下降量随循环次数增大而减小,且下降量基本在 10 次循环左右达到最大。

2.2.2 含水率及冻结温度的影响

图 3(b) 为 $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 冻结时粘聚力与含水率关系曲线。可见,土体冻融后粘聚力随含水率增大而减小,且含水率越大,粘聚力下降量越大,例如: $N=4$ 时,含水率由 5.11% 增大至 10% 时,粘聚力下降了 5 kPa,由 10% 增大至 15.8% 时,下降了 21 kPa。天然含水率下,粘聚力随循环次数增加变化明显;含水率增大至塑限,粘聚力仅在首次冻融时减小,之后则无明显变化。

如图 4 可见冻结温度对不同含水率土体粘聚力的影响不同。以 5.11%、10% 含水率土体为例:当含水率为 5.11% 时,粘聚力随着冻结温度降低而增大;当含水率为 10% 时,粘聚力随冻结温度降低而减小。

2.3 内摩擦角

图 5 为不同含水率土体内摩擦角与循环次数关系曲线,可见,5.11% 和 15.8% 含水率土体的内摩擦角整体上略有下降,但是下降幅度不大,10% 含水率土体内摩擦角特征表现为不规则波动,整体无明显变化。此外,同一循环次数下,内摩擦角基本随含水率的增大而减小。对比图 6(a)(b) 能够发现,同一含水率土体的内摩擦角在不同冻

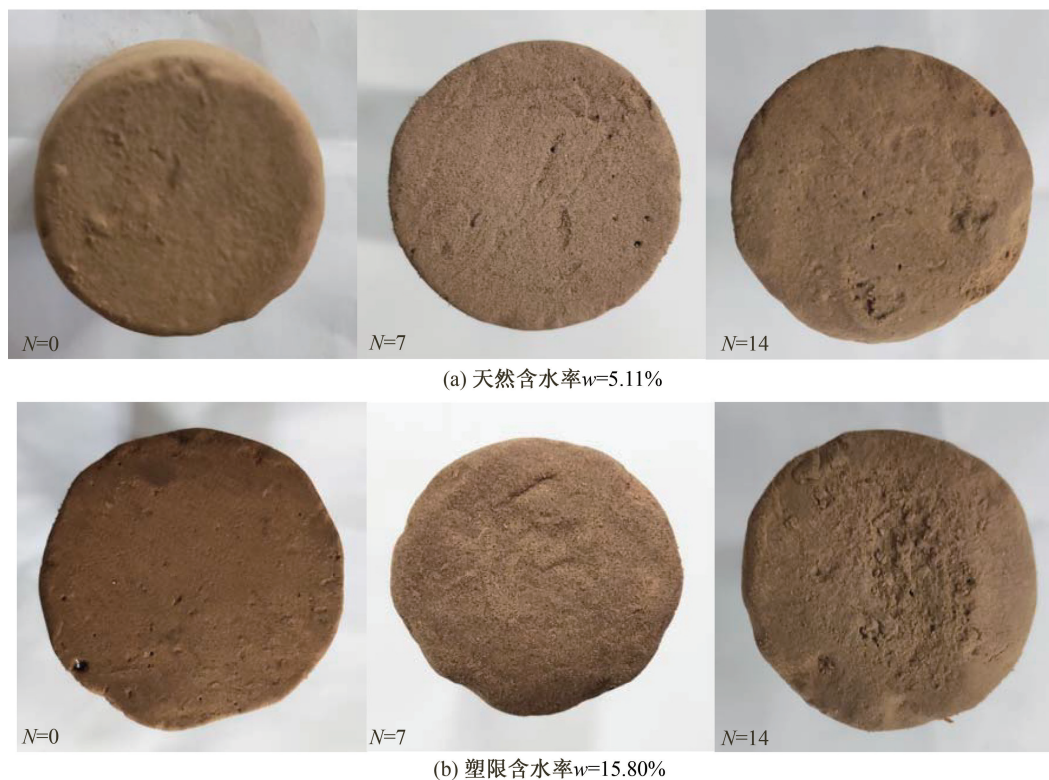


图 2 试样冻融后外观特征

Fig. 2 Apparent characteristics of specimens after under freeze-thaw cycles

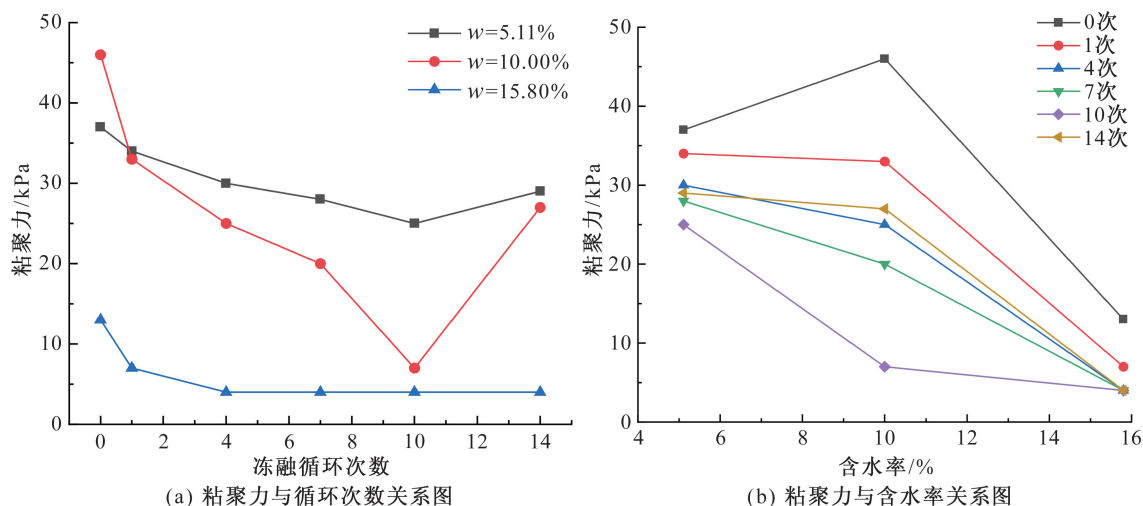


图3 砂黄土冻融后粘聚力特征图(-25 °C)

Fig. 3 Statistical chart of cohesive forces after freezing and thawing of sandy loess (-25 °C)

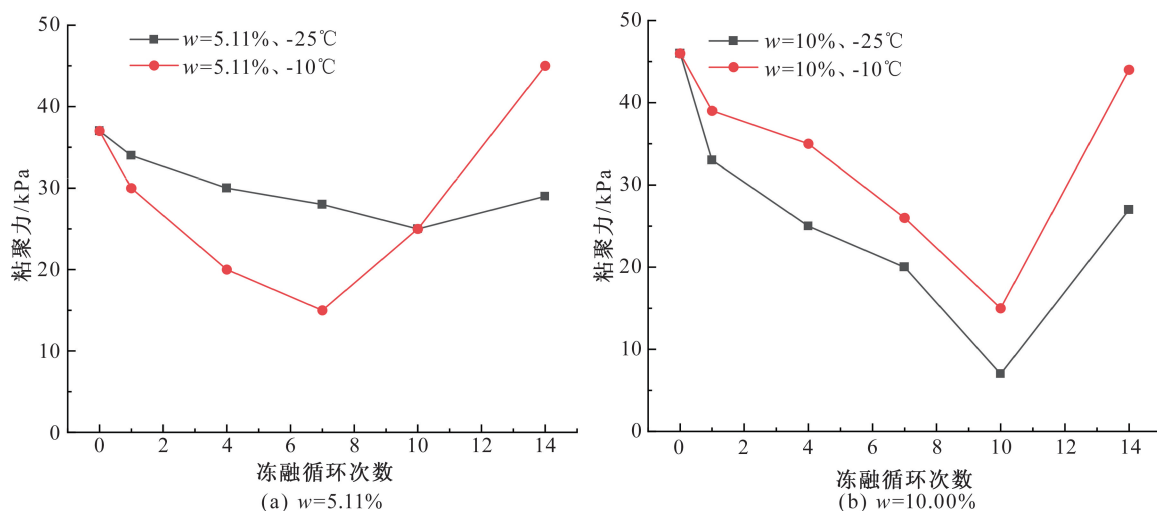


图4 不同冻结温度下粘聚力与循环次数关系图

Fig. 4 Cohesive forces versus number of freeze-thaw cycles relationship curves under different freezing temperatures

结温度下数值十分接近,说明冻结温度对土体内摩擦角无较大影响。

2.4 峰值强度

2.4.1 循环次数的影响

图6是围压为100 kPa时不同含水率土体峰值强度与循环次数关系曲线。可见,土体的峰值强度随着冻融循环次数增加而减小,冻融进行到一定次数时,土体峰值强度的下降趋势逐渐减弱,甚至表现为有所回升。例如图6(a)中,10%含水率土体在冻融次数为1、4、7、10、14次时,峰值强度分别下降了27.07、39.14、2.44、17.31、-35.38 kPa,循环4次后下降量最大,之后下降趋势减缓,循环14次时峰值强度有所回升。

2.4.2 含水率及冻结温度的影响

由图6可以看出,同一循环次数下,含水率越大,土体峰值强度越小,且冻融后峰值强度下降空间减小,例如图6(a)中,含水率5.11%、10%、15.8%土体粘聚力最大值分别为355.48、299.59、194.47 kPa,最小值分别为208.89、213.63、137.79 kPa,较最大值分别下降了146.59、85.96、56.68 kPa。当含水率达到15.8%时,土体峰值强度整体较小。

对比图6(a)(b)可以看出,冻结温度对不同含水率土体峰值强度的影响不同。例如5.11%含水率土体在-25 °C和-10 °C冻结时,峰值强度降到最小所需的循环次数分别为14次、4次,即冻结温度越高,峰值强度下降越快。而10%含水率土体在-25 °C冻结时,冻融4次后峰值强度便趋于稳定,说明冻结温度越低,强度下降越快。

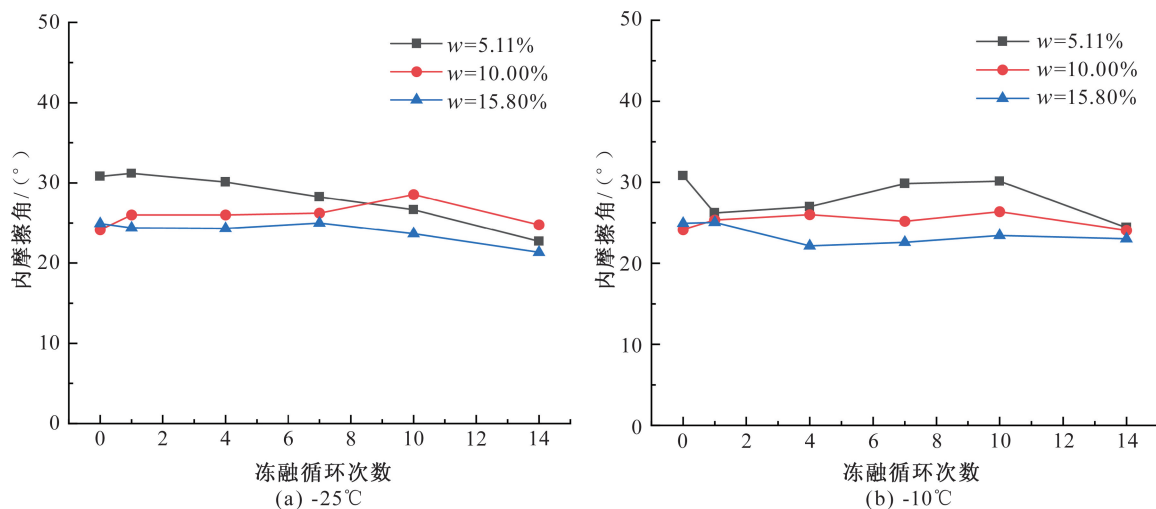


图5 不同含水率下土体内摩擦角与循环次数曲线

Fig. 5 Friction angle versus number of cycles curves in soil under different water contents

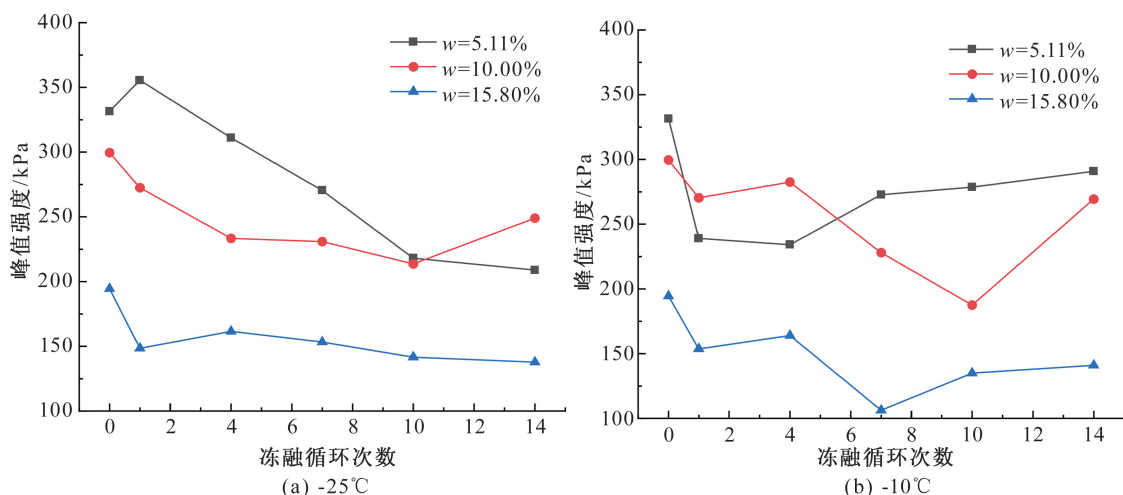


图6 不同含水率土体峰值强度与循环次数曲线(100 kPa)

Fig. 6 Shear strength versus number of number of cycles for soils under different moisture contents (100 kPa)

3 砂黄土冻融特征规律

3.1 土体表面破坏特征分析

冻融循环作用使土体表面发生明显破坏,如图2所示,冻融循环次数越大,破坏作用越强烈。在土体冻融过程中,冻结时水分向冷端迁移,即由土体内部向外层迁移,而融化时,由于室温较高,导致冰晶融化速率快,水分在土中的回迁速度较慢,最终导致水分的迁移量大于回迁量,如此多次循环后土体外层的水量增大,水分冻结形成的冰晶数量和体积较大,冻胀和融沉作用更加强烈,严重破坏土粒间联结,表现为土体表面的破坏现象。高含水率土体冻融后表面的破坏现象更甚于低含水率土体,这是因为高含水率导致冻融过程中迁移到土体外层的水量更大,因此冻融作用对其结

构破坏更加强烈。

3.2 土体粘聚力特征分析

同一含水率土体粘聚力随冻融循环次数增加先减小,冻融10次后粘聚力有所回升。这是因为在初始冻融阶段,土体中的水分不断冻结为冰晶,冰晶体快速形成,填充、扩张孔隙,使土颗粒间联结减弱,造成土体强度下降,随着冻融作用的进行,水分逐渐向土体外层迁移造成局部水分集中,土体内冰晶体积不断增大,对土结构持续累加破坏,导致土体强度持续降低。冻融10次左右,土中未冻水含量降低,冰晶体积和数量已逐渐达到峰值,即水分冻结对土的冻胀破坏达到极限,强度下降趋势减弱,而此时土体结构松散,抵抗自身重力及融沉作用的能力降低,两种作用叠加下使土颗粒间联结有所增强,促使土体结构强度有所恢复,

因此粘聚力有所回升。但总体上,特别是短期冻融时,冻融作用仍导致了土体粘聚力降低。

土体冻融后的粘聚力随初始含水率的增加而减小,且含水率越大,粘聚力下降幅度越大。天然含水率下,土体随冻融进行表现为明显的累积破坏效应,粘聚力对循环次数有着明显响应,含水率增大到塑限时则没有这种表现,这是因为一方面含水率增大导致土中自由水含量增加,润滑作用及溶解作用弱化了粒间联结,使土体的原始强度下降,含水率越大,土体原始结构强度破坏越严重。另一方面在同一温度下,含水率高的土体内可形成的冰晶体积和数量都显著增多,提升了土体冻胀破坏的效果,从而使冻融作用对土体结构的破坏效应增强;在较少的冻融循环次数下土体结构强度即降到最低,导致冻融累积破坏效应不明显。

不同冻结温度对不同含水率土体粘聚力影响不同,这与不同温度下水分冻结速率和可迁移量有关。对于5.11%含水率土体而言,-10℃冻结时,土体中水分的冻结速度较慢,使得水分有较多时间和空间向外层迁移,造成土中局部水量集中,冻胀及水软化作用对土结构破坏效应也就更强;而-25℃冻结时,土体中水分冻结速度快,孔隙很快被封闭,水运通道阻塞,水分迁移量和速度都较小,难以出现-10℃时的水分集中,形成的冰晶体积不大,冻胀破坏效应不强,故粘聚力在极低冻结温度小反而较大。而10%含水率土体,虽然在-25℃冻结时水分迁移较慢,但其水分总量大,水分相对迁移量增加,并且大量自由水可直接冻结形成较大体积冰晶,使相同时间内产生的冰晶体积和数量大于-10℃冻结时,冻胀破坏效应更强,故粘聚力随冻结温度降低而减小,这也说明高含水率土体在极端低温冻融条件下更易导致土体强度劣化。含水率达到15.8%时,在不同冻结温度下,土体粘聚力均在首次冻融时下降最大,之后粘聚力则在一定范围内保持相对稳定,与冻融循环次数关系不大,这是因为此含水率下,土中自由水含量很高,土体粘聚力的劣化主要是水对结构的软化作用导致,而冻融循环作用对其影响减弱。

3.3 土体内摩擦角特征分析

土体内摩擦角随着冻融循环次数增加而有所减小。这是因为原状土颗粒间接触密实,经过冻融作用,土中孔隙冻胀扩大,土颗粒之间接触减少,因此导致内摩擦角降低,在最初几次冻融时,

变动并不明显,但随着冻融累积破坏,结构愈加疏松,内摩擦角逐渐降低。土颗粒表面的结合水膜随含水率增大而变厚,润滑作用使土粒表面的摩擦力降低,因此导致土体内摩擦角随含水率增大而减小。不同冻结温度改变了水分的冻结速度,但并没有改变土粒间结构破坏的方式,因此土体内摩擦角受冻结温度影响小。

3.4 土体峰值强度特征分析

土体峰值强度随着冻融循环次数增加而减小。如图6所示,峰值强度在最初几次冻融后下降明显,之后则处在一个相对稳定区间,图6(b)中,冻融1次、4次时,5.11%含水率土体峰值强度小于10%含水率土体,冻融7次后则相反。分析认为:-10℃冻结时,水分冻结速度慢,可发生明显迁移,10%含水率土体内孔隙水含量大,冻结时孔隙被冰封程度高,水分迁移受阻,但5.11%含水率则相反,因此其水分迁移速度快,水分较快集中,冻胀破坏较快使土体结构强度降低,冻融7次后,5.11%含水率土体冻胀破坏达到极限,强度开始回升,而10%含水率土体此时累积水分迁移量大,因此冻胀对土体结构的破坏超过5.11%含水率土体。这一点也说明,较高温冻结时,土体内水分可发生明显迁移且与土体初始含水率密切相关,含水率越小,水分迁移越快,冻融对土体结构破坏速度越快。

与粘聚力变化特征相似,随着土样初始含水率增大,土体的峰值强度明显减小,且含水率越大,峰值强度的总体下降量越小,冻结温度对不同含水率土体峰值强度的影响不同,这一点同样与粘聚力变化特征相同。以上说明冻融后土体强度下降的主要原因是粘聚力的劣化。

4 土体粘聚力劣化趋势拟合

基于-25℃冻结条件下粘聚力与冻融循环次数、含水率的数量关系,得到它们的特征曲线如图3所示,土体粘聚力随冻融循环次数的增加呈非线性函数关系,对粘聚力试验数据进行拟合分析时发现,拟合效果较好,具体如下:

$$C = a + b \cdot \exp(-k \cdot N) \quad (1)$$

式中, C —粘聚力,kPa; N —冻融循环次数; a 、 b 、 k —拟合参数。

不同含水率条件下粘聚力与循环次数的拟合参数具体数值见表3,除10%含水率土体外,相关

系数 R^2 均大于 0.9, 拟合效果较好。

表 3 粘聚力与循环次数的拟合参数值 ($-25\text{ }^{\circ}\text{C}$)
Tab. 3 Fitting parameter values for cohesive forces
versus number of cycles relationship ($-25\text{ }^{\circ}\text{C}$)

含水率 /%	拟合参数			
	a	b	k	R^2
5.11	27.072 6	9.958 5	0.353 8	0.900 5
10.00	18.241 5	27.004 2	0.487 6	0.739 9
15.80	3.973 2	9.029 9	1.097 2	0.999 9

由表 3 可以看出, 参数与含水率之间存在数学关系, 因此, 参数值 a 、 b 、 k 作为已知量, 分析含水率的影响, 拟合发现拟合参数与含水率 w 之间存在函数关系, 具体见式(2)~(4)。

$$a = 38.787\ 7 - 2.17w, R^2 = 0.992\ 6 \quad (2)$$

$$b = -38.937\ 4 + 12.665\ 4w - 0.609\ 8w^2, \\ R^2 = 0.999\ 6 \quad (3)$$

$$k = -0.081\ 6 + 0.070\ 6w^2, R^2 = 0.909\ 9 \quad (4)$$

将参数拟合式代入式(1)中, 可得 $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 冻融循环条件下粘聚力劣化的表达式如下:

$$C = 38.787\ 7 - 2.17w + (-38.937\ 4 + \\ 12.665\ 4w - 0.609\ 8w^2) \cdot \exp(- \\ (-0.0181\ 6 + 0.070\ 6w^2) \cdot N) \quad (5)$$

5 结论

1) 冻融循环作用导致砂黄土结构破坏, 且随冻融循环次数增加或含水率增大而加剧。

2) 砂黄土粘聚力随冻融循环次数增加先减小后有所回升、随初始含水率增加而减小。冻结温度对不同含水率土体粘聚力影响不同, 含水率为 5.11% 时, 粘聚力随冻结温度降低而增大; 含水率为 10% 时, 粘聚力随冻结温度降低而减小; 含水率为 15.8% 时, 冻融作用的影响较小。

3) 土体内摩擦角在冻融循环作用下有所减小, 但总体下降量不大。

4) 冻融循环作用导致土体强度下降的主要原因是粘聚力的劣化。

5) 高含水率极端低温冻结及低含水率较高温冻结两种组合条件均加速了冻融循环作用对砂黄土强度的破坏。

参考文献:

[1] 龙建辉, 张玲玲, 邢鲜丽, 等. 基于温度路径的冻融

作用下黄土强度及微观结构研究[J]. 煤田地质与勘探, 2021, 49(4): 242-249.

[2] 叶万军, 刘宽, 杨更社, 等. 冻融循环作用下黄土抗剪强度劣化试验研究[J]. 科学技术与工程, 2018, 18(3): 313-318.

[3] 郑方, 邵生俊, 王松鹤. 复杂应力条件下冻融作用对黄土强度的影响[J]. 岩土工程学报, 2021, 43(S1): 224-228.

[4] BRAGAR E, PRONONZIN Y, ZHUSSUPBEKOV A, et al. Evaluation of the Strength Characteristics of Silty-Clayey Soils During Freezing-Thawing Cycles [J]. Applied Sciences. 2022, 12(2): 802.

[5] 周有禄, 武小鹏, 李奋, 等. 冻融循环作用下重塑黄土强度劣化试验研究[J]. 铁道建筑, 2018, 58(10): 78-80.

[6] LIU K, YE W J, JING H J. Shear Strength and Microstructure of Intact Loess Subjected to Freeze-Thaw Cycling [J]. Advances in Materials Science and Engineering, 2021, 2021: 1173603.

[7] GUO Z K, ZHANG Z Z, MU Y X, et al. Effect of Freeze-Thaw on Mechanical Properties of Loess with Different Moisture Content in Yili, Xinjiang [J]. Sustainability, 2022, 14(18): 11357.

[8] 李丽, 张坤, 张青龙, 等. 干湿和冻融循环作用下黄土强度劣化特性试验研究[J]. 冰川冻土, 2016, 38(4): 1142-1149.

[9] 胡再强, 刘寅, 李宏儒. 冻融循环作用对黄土强度影响的试验研究[J]. 水利学报, 2014, 45(S2): 14-18.

[10] 张辉, 王铁行, 罗扬. 非饱和原状黄土冻融强度研究[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2015, 43(4): 210-214, 222.

[11] SUN Y Q, MENG S J, WANG M, et al. Deterioration Effect of Freeze-Thaw on Mechanical Properties of Roadbed Clay Under Unfavorable Conditions [J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2021, 80: 4773-4790.

[12] 李双好, 李元勋, 高欣亚, 等. 冻融作用对原状黄土抗剪强度的影响规律[J]. 土木与环境工程学报(中英文), 2020, 42(1): 48-55.

[13] 胡田飞, 刘建坤, 房建宏, 等. 冻融循环下冷却温度对粉质黏土力学性质影响的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2017, 36(7): 1757-1767.

[14] 张永双, 曲永新. 陕北晋西砂黄土的胶结物与胶结作用研究[J]. 工程地质学报, 2005(1): 18-28.

(责任编辑 周雪梅)