

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2020.043

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



平面应变条件下冻融循环对黄土力学性质的影响

李宝平¹, 平高权¹, 张玉^{1,2}, 杨倩¹

(1. 西安工业大学 建筑工程学院, 西安 710021; 2. 西安理工大学 陕西省黄土力学与工程重点实验室, 西安 710048)

摘要:以原状黄土为研究对象,通过平面应变试验,研究冻融循环对原状黄土物理力学性质的影响。结果表明:随着冻融循环周期的增大,土样表面损伤越严重;在同含水率、同固结围压的条件下,原状黄土的偏应力-轴向应变 $(\sigma_1 - \sigma_3) - \epsilon_1$ 曲线随着冻融循环次数的增大而逐渐减小,并且冻融循环对原状黄土 $(\sigma_1 - \sigma_3) - \epsilon_1$ 曲线的劣化作用随着含水率的增大而增大,随着固结围压的增大而减小;根据摩尔-库伦强度准则,得出粘聚力和内摩擦角均随着含水率的增大呈线性减小,粘聚力随着冻融循环周期的增大呈指数减小,内摩擦角随着冻融循环周期的增大而减小,且在 3° 范围内变化。基于试验数据的合理性,拟合出原状黄土随冻融循环周期的劣化模型,该模型经试验验证可较好地描述原状黄土随冻融循环周期的劣化规律。

关键词:冻融循环;平面应变;冻融黄土;原状黄土;劣化模型

中图分类号: TU444 **文献标志码:** A **文章编号:** 2096-6717(2021)02-0041-08

Effects of freeze-thaw cycles on mechanical properties of loess under plane strain

LI Baoping¹, PING Gaoquan¹, ZHANG Yu^{1,2}, YANG Qian¹

(1. Civil and Architecture Engineering, Xi'an Technological University, Xi'an 710021, P. R. China, 2. Shaanxi Key Laboratory of Loess Mechanics and Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, P. R. China)

Abstract: Taking undisturbed loess as the research object, the effects of freeze-thaw cycles on the physical and mechanical properties of undisturbed loess were studied through plane strain tests. The results show that: as the freeze-thaw cycle increases, the surface damage of the soil sample becomes more severe; under the conditions of the same moisture content and consolidation confining pressure, the partial stress-axial strain of the undisturbed loess $(\sigma_1 - \sigma_3) - \epsilon_1$ curve gradually decreases with the increase of the number of freeze-thaw cycles, and the degradation of the original loess $(\sigma_1 - \sigma_3) - \epsilon_1$ curve by the freeze-thaw cycle increases with the increase of the water content and with the consolidation. As the confining pressure

收稿日期: 2020-01-15

基金项目: 国家自然科学基金(11802218);陕西省科技计划(2019JQ-432, 2019JQ-835);陕西省黄土力学与工程重点实验室项目(LME201801)

作者简介: 李宝平(1971-),男,副教授,主要从事岩土工程研究, E-mail: 459485782@qq.com。

张玉(通信作者),男,副教授,博士, E-mail: 153673438@qq.com。

Received: 2020-01-15

Foundation items: National Natural Science Foundation of China (No. 11802218); Science and Technology Plan Project of Shaanxi Province (No. 2019JQ-432, 2019JQ-835); Shaanxi Key Laboratory of Loess Mechanics and Engineering (No. LME201801)

Author brief: LI Baoping (1971-), associate professor, main research interest: geotechnical engineering, E-mail: 459485782@qq.com.

ZHANG Yu (corresponding author), associate professor, PhD, E-mail: 153673438@qq.com.

increases, it decreases. According to the Mohr-Coulomb strength criterion, it is concluded that both the cohesive force and the internal friction angle show a similar linear decrease with the increased water content, and the cohesive decreases exponentially with the increase of the freeze-thaw cycle, and the internal friction angle decreases slightly with the increase of the freeze-thaw cycle, but the fluctuation within 3° . Based on the rationality of the test data, a degradation model of the undisturbed loess along with the freeze-thaw cycle is fitted, which can be used to well describe the degradation law of the undisturbed loess with the freeze-thaw cycle after the test validation.

Keywords: freeze-thaw cycle; plane strain; freeze-thaw loess; undisturbed loess; degradation model

冻土是特殊土体,可以分为瞬时冻土、季节性冻土以及多年冻土。冻土在中国西北地区分布广泛,主要为季节性冻土。随着中国西北地区的基础建设、高速公路和铁路网越来越密集,农业灌溉量增加,工程地质环境越来越脆弱,在此过程中,冻融病害引发的问题频发。在实际工程中,平面应变是土体经常受到的一种应力状态,如填方路基和基坑等都属于平面应变受力状态,而这些构筑物在运行中都会经受冻融循环作用^[1]。为了探索冻融在基础工程中的影响,有必要研究平面应变条件下冻融对黄土力学性质的影响。

许多学者对此进行了研究,其中,张玉等^[2]对原状黄土的平面应变强度、变形特性及中主应力变化的规律进行了详细分析。董晓宏等^[3]通过对冻融循环后的黄土进行直剪试验,分析不同冻融循环次数对黄土物理力学性质的影响,得出冻融循环导致土样内水分迁移进而影响其表面结构,使得土样表观破坏程度随含水率、干密度以及冻融循环次数的增大而增大。谷琪等^[4]提出,并非所有 0°C 以下的土体在冻结过程中都会发生冻胀现象,在冻结过程中,土体中矿物质发生冷缩,土体中水分发生冻胀。因而决定土体发生冻胀还是冻缩的是土体含水率的大小,在冻胀和冻缩之间存在一个使土体在冻结过程中不产生变化的临界含水率。同时,分析了冻融循环过程中土体的变形及土体湿陷性规律,但未分析黄土的力学性质及其强度的变化。罗爱忠等^[5]探究了单轴应力条件下不同初始结构性黄土的结构性变化特性,发现含水率不同试样的初始结构强度不同;当试样的初始含水率达到一定值后,含水率的增大对黄土试样的初始结构性影响较明显,对黄土结构性参数指标的影响相对较小。Ma^[6]对比分析了不同含水率和围压下黄土常规三轴试验和平面应变试验的差异,得出平面应变条件下的土体强度明显大于常规三轴条件。Wang 等^[7]通过对压实细粒黏土进行多次冻融循环,探究冻融循环后土壤的物理力学特性的变化,发现随着冻融次数的增加,试样的黏

聚力降低,内摩擦角增大。Li^[8]进行了密集和松散压实黄土的冻融循环试验,但仅对冻融循环后黄土的物理性质进行对比分析,并未提出冻融循环对于冻土力学性能的影响。Bi 等^[9]对增湿黄土进行冻融循环试验,得出试样在冻融初期变形显著,而后逐渐趋于稳定。Alshibli 等^[10]通过对水泥浆固结高岭土进行常规三轴试验和平面应变试验对比发现,平面应变条件下试件和常规三轴试件失效破坏的模式各不相同,且平面应变试样的强度明显高于常规三轴试样。

对平面应变黄土或冻融作用对黄土的影响已经进行了广泛的研究,早期主要研究其物理性质,在实际工程中,直剪试验并不能准确模拟其真实应力状态,故有必要研究平面条件下冻融循环对黄土力学特性的影响^[11-14]。笔者利用改造后的 XGT 型真三轴仪^[15],以原状黄土为研究对象,研究原状黄土在冻融循环后的强度问题,分析冻融减弱黄土结构性的机理,研究冻融对于原状黄土强度的降低作用,得到原状黄土随冻融循环周期的劣化模型。

1 试验准备

试验所用原状黄土取自西安咸阳机场附近,根据《土工试验规范标准》(GB/T 50123—1999)^[16]规定的原状黄土样取法取得,取土深度为 $6\sim 8\text{ m}$,土样属于 Q_3 黄土,通过室内土工试验得到黄土的基本物理性质指标,其基本物理性质如表 1 所示。

表 1 土样的物理指标

Table 1 Physical properties of soil samples

天然含水率 $\omega/\%$	天然干密度 $\rho/(g \cdot cm^{-3})$	初始孔隙比 e_0	塑限 $w_p/\%$	液限 $w_L/\%$	塑性指数 I_p	液性指数 I_L
19.50	1.35	1.06	15.32	30.24	14.92	0.28

咸阳地区冬季极端温度为 -20°C ^[17],冻融循环试验以 -20°C 冻结 12 h,室温融化 12 h 为一次冻融循环周期,冻融周期为 0、3、5、10 次;然后将冻融后土体进行平面应变试验。试样制备时,取大块原状土

样,将其削制成 $7\text{ cm}\times 7\text{ cm}\times 14\text{ cm}$ 的试样,通过水膜转移法和自然风干法使其含水率达到 17.00%、21.00%、24.00%、28.00%,固结围压分别设置为 50、100、200、300 kPa,以轴向应变达到 12% 时为土样破坏标准^[18-20],则试验结束,具体试验设计如表 2 所示。

表 2 土样试验参数

Table 2 Soil sample test parameters

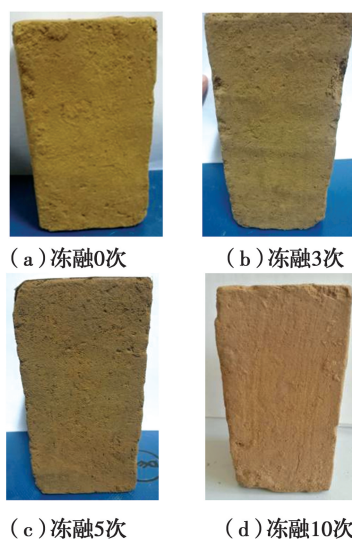
冻融循环周期/次	含水率/%	固结围压/kPa
0、3、5、10	17.00、21.00、24.00、28.00	50、100、200、300

2 试验结果及分析

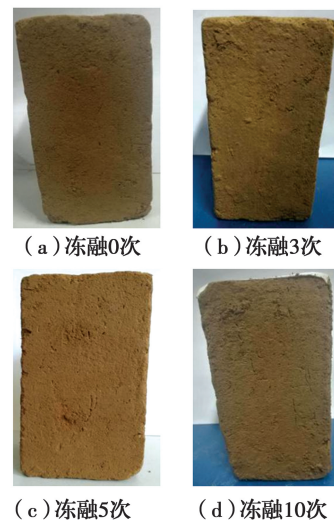
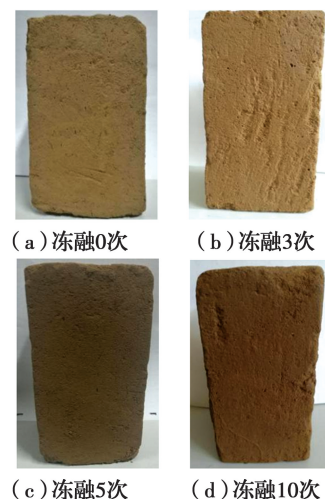
2.1 冻融循环试验结果及机理分析

对含水率为 17.00%、21.00%、24.00%、28.00% 的土样各进行 0 次、3 次、5 次、10 次冻融循环试验,试验发现,不同冻融循环周期以及不同含水率对土样表面的冻融破坏有着重要影响。

由图 1 可以看出,含水率为 17% 的土样在冻融 0 次时只有微量虫孔且土样密实;冻融 3 次后,土样表面出现少量细小裂隙;冻融 5 次和冻融 10 次后,土样裂隙数量增多且裂隙增大。这是由于在冻结过程中土样表面开始结晶,迫使土样内部水分不断向土样表面转移,土体表面冻结冰晶不断扩大,并向土体内部延伸。在融化过程中,土样表面先开始融化,并向土样内部扩展,如此往复,土样内部逐步形成水分迁移通道。随着冻融周期的增大,土样中水分来回迁移的次数增多,连续冲刷土样内部,使得通道不断增多、增大,从而使得土样表面出现裂隙和虫孔,且土样破坏也越来越严重。

图 1 $\omega=17.00\%$ 土样冻融循环后表面Fig. 1 $\omega=17.00\%$ surface of soil sample after freeze-thaw cycle

由图 2~图 4 可看出:土样在冻融 0 次时只有少量虫孔,土样密实;在冻融 3 次之后,土样出现较多裂隙;冻融 5 次之后,土样表面出现较密集的裂隙;冻融 10 次之后,土样表面出现大且密集的裂隙,土样表面破坏严重。其中,含水率为 24.00% 的土样在冻融 10 次时和含水率为 28.00% 的土样在冻融 5 次和冻融 10 次时,土样表面均出现不同程度的水分冲刷痕迹。这是因为高含水率的土体在融化时,土体表面冰晶先融化,融化的水分一部分没有浸入到内部,顺着土体表面流动,因此,造成土样表面不同程度的水分冲刷痕迹。

图 2 $\omega=21.00\%$ 土样冻融循环后表面Fig. 2 $\omega=21.00\%$ surface of soil sample after freeze-thaw cycle图 3 $\omega=24.00\%$ 土样冻融循环后表面Fig. 3 $\omega=24.00\%$ surface of soil sample after freeze-thaw cycle

由此可见,含水率一定时,土样表面的破坏程度随着冻融循环周期的增大而增大,说明冻融循环周期是影响土样破坏的一个主要因素。冻融周期一定

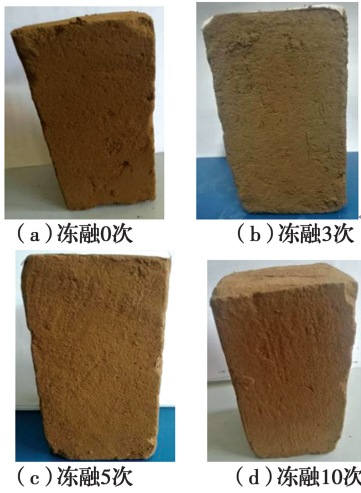


图 4 $\omega=28.00\%$ 土样冻融循环后表面

Fig. 4 $\omega=28.00\%$ surface of soil sample after freeze-thaw cycle

时,含水率越大,土样表面破坏越严重,说明土样初始含水率是影响冻融循环破坏的重要因素。

2.2 平面应变试验结果及力学性质分析

图 5 为相同固结围压、相同含水率状态下,不同冻融循环周期下的应力-应变曲线图。

由图 5 可知,土样在相同含水率相同固结围压的情况下,土样 $(\sigma_1 - \sigma_3) - \epsilon_1$ 曲线均为应变硬化型。由曲线图可以看出,在相同含水率相同固结围压下,土样的 $(\sigma_1 - \sigma_3) - \epsilon_1$ 曲线随着冻融周期的增大而降低,但 $(\sigma_1 - \sigma_3) - \epsilon_1$ 曲线的降低并非随着冻融循环周期均匀下降;土样的剪切强度随着含水率的增大而减小;随着冻融周期的增大土样剪切时的初始斜率越来越小,即土样的初始模量随着冻融周期的增大而降低; $(\sigma_1 - \sigma_3) - \epsilon_1$ 曲线随着固结围压的增大而减小,且减小趋势随着固结围压的增大而降低。

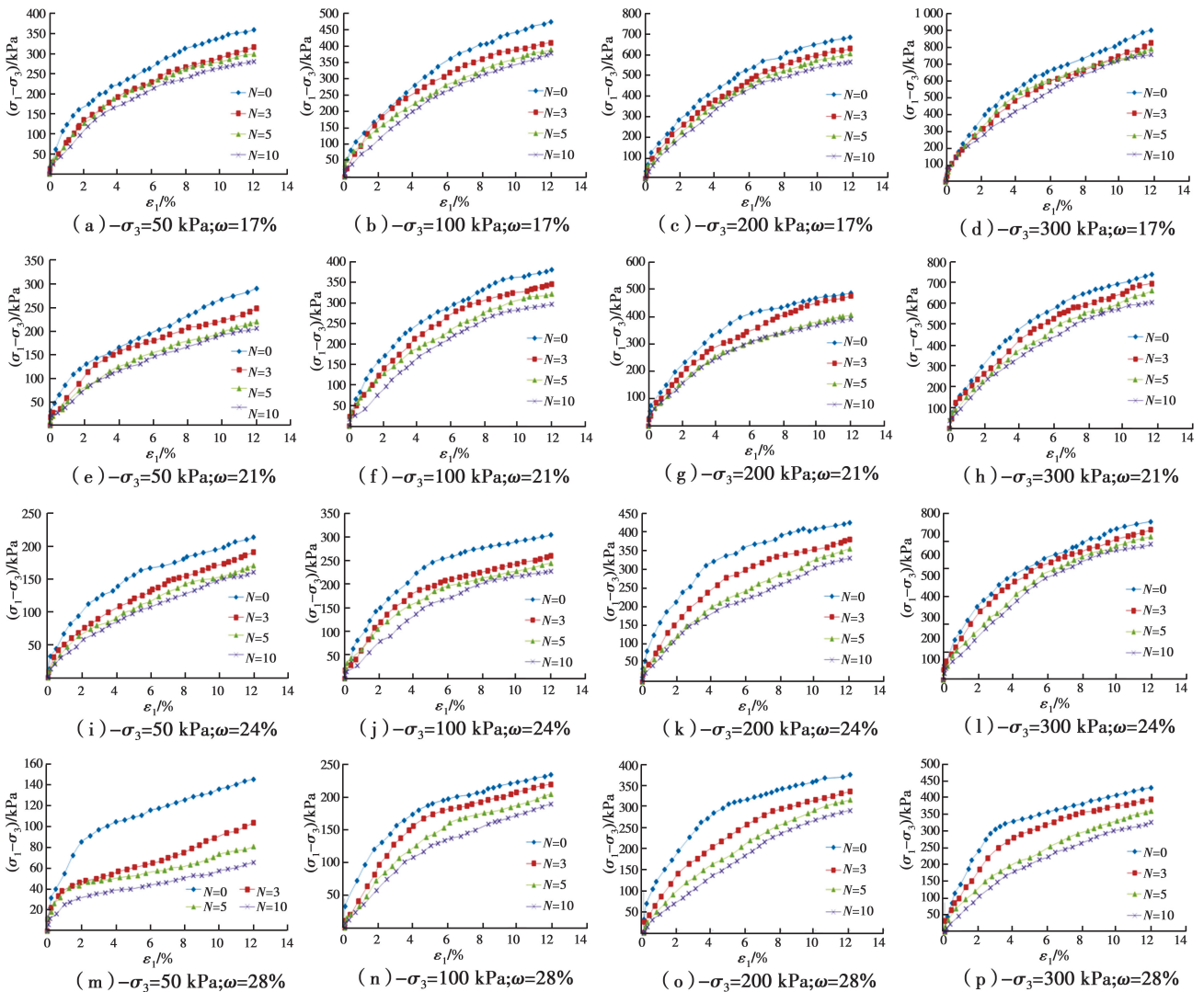


图 5 土样的应力-应变曲线

Fig. 5 Stress-strain curves of soil samples

造成上述现象的原因是:在冻融循环过程中,土样内部形成水分转移的通道,造成土样内部空隙增大,使得土样强度减小,从而降低土样的承载力,因此,土样的应力-应变曲线不断向下移动,初始剪切斜率不断减小;随着冻融循环周期的增大,土样内外水分迁移通道已经形成,冻融循环对土样破坏就越不明显,土样在开始冻融时,内外部水分第 1 次迁移对土样造成的破坏最大,因此,土样的应力-应变曲线随着冻融循环周期的增大,逐渐缓慢减小;随着土样含水率的增大,土样在冻融循环时内外水分流动量增大,对土样的的破坏也随之增大,与大含水率土样的 $(\sigma_1 - \sigma_3) - \epsilon_1$ 曲线相比较,较小含水率的土样有明显下降;基于固结排水试验,在固结过程中,随着固结围压的增大,对土样的压密作用增大,冻融循环过程使土样变得疏松,土样在冻融循环造成的松散作用抵消了一部分固结围压对土样的压密作用,使得大围压应力状态下冻融循环对土样的破坏作用不明显。

3 原状黄土抗剪强度特性的分析

通过对数据的整理,运用摩尔-库伦强度准则,通过其应力摩尔圆以及强度包线,可以得到其黏聚力 c 和内摩擦角 φ ,如表 3 所示。

表 3 抗剪强度汇总表

Table 3 Summary of shear strength

冻融循环周期 N /次	含水率 ω /%	黏聚力 c /kPa	内摩擦角 φ /($^\circ$)
0	17.00	71.60	31.26
	21.00	57.10	27.85
	24.00	49.10	24.26
	28.00	36.40	21.62
3	17.00	60.20	30.50
	21.00	46.50	27.48
	24.00	38.40	24.12
	28.00	25.80	21.48
5	17.00	56.80	29.96
	21.00	42.50	26.93
	24.00	33.20	23.79
	28.00	20.60	20.94
10	17.00	55.00	29.11
	21.00	39.00	25.82
	24.00	30.70	23.05
	28.00	17.50	19.94

由图 6 可以看出,在相同冻融周期下,试样的黏聚力 c 随含水率的增大呈线性降低。这是因为,随

着试样含水率的增大,土体内部自由水含量增大,溶解了土体之间的胶结物质,使得土体颗粒间的胶结作用下降,并且对土体颗粒之间的联结也有一定程度的损害,由此造成试样黏聚力 c 随含水率的增大而降低。

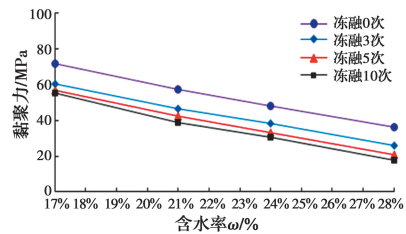


图 6 不同冻融循环周期下含水率与黏聚力的关系曲线
Fig. 6 Relationship between moisture content and cohesion under different freeze-thaw cycles

由图 7 可知,在相同冻融周期下,试样的内摩擦角 φ 随含水率的增大而呈现出直线下降趋势。这是因为土体颗粒之间的联结水膜随着含水率的增大而变厚,在土体受剪过程中,土颗粒间发生相互错动时起到润滑作用,从而降低土体颗粒之间的摩擦力,使得内摩擦角随着含水率的增大而降低。

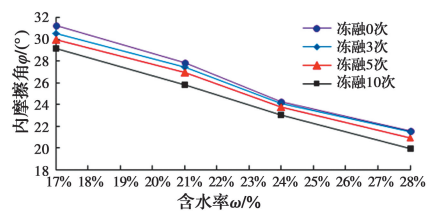


图 7 不同冻融循环周期下内摩擦角与含水率的关系曲线
Fig. 7 Relationship between internal friction angle and water content under different freeze-thaw cycles

由图 8 可知,含水率一定时,黏聚力 c 随着冻融循环周期 N 的增大而呈指数减小。在冻融初期,试样的黏聚力 c 降低较快,后期随着冻融周期 N 的增大,黏聚力 c 降低值逐渐减小,最终趋于某一稳定值,其原因与土样应力-应变曲线随冻融循环周期 N 的增大而降低一样。

由图 9 可知,含水率一定时,摩擦角 φ 随着冻融循环周期 N 的增大呈线性降低,且变化幅度均在 3° 以内。

由图 8、图 9 可以看出,黏聚力 c 随冻融循环周期 N 的增大呈指数减小趋势;黏聚力 c 随着含水率 ω 的增大呈线性降低趋势。

因此,以冻融循环周期 N 对黏聚力 c 的影响为主建立其劣化模型;则黏聚力 c 与冻融循环周期 N

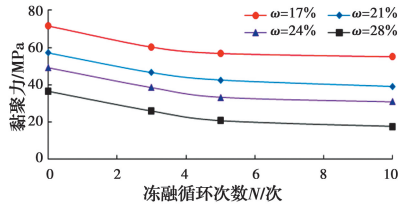


图 8 黏聚力 c 与冻融循环周期 N 之间的曲线关系
Fig. 8 Curve relationship of cohesion c with respect to freeze-thaw cycle period N

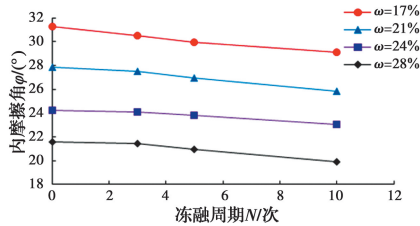


图 9 内摩擦角 φ 与冻融循环周期 N 之间的曲线
Fig. 9 Curve of internal friction angle φ with respect to freeze-thaw cycle period N

的假设关系式为

$$c = e^{(aN^2 + bN + d)} \quad (2)$$

式中： c 为原状黄土的粘聚力； N 为原状黄土冻融循环周期； a 、 b 、 d 为与含水率 ω 有关的拟合参数。

拟合分析结果如表 4 及图 10 所示。

表 4 曲线拟合结果

Table 4 Curve fitting results

含水率/%	a	b	d	R^2
17	0.004 2	-0.068 15	4.269 97	0.996 09
21	0.004 25	-0.080 58	4.004 51	0.999 83
24	0.005 68	-0.104 19	3.896 11	0.992 25
28	0.006 99	-0.144 04	3.597 55	0.990 51

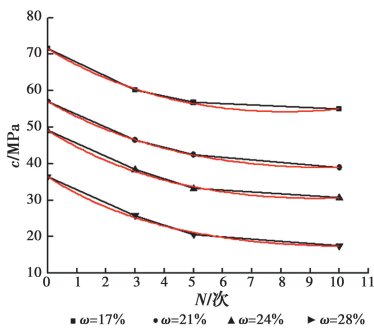


图 10 拟合曲线
Fig. 10 Fitting curve

由图 10 和表 4 可知，拟合曲线与试验中曲线拟合状态良好，并且其拟合优度 R^2 均在 0.99 以上，更

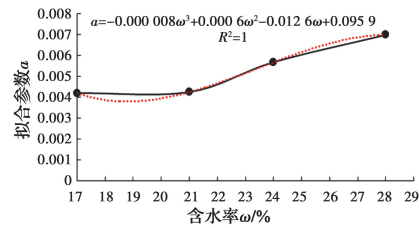
定量说明曲线拟合状态良好。

图 11 为拟合参数 a 、 b 、 d 与含水率 ω 的曲线关系。由图 11 可知，拟合曲线与实验曲线拟合优度 R^2 均大于 0.99，曲线拟合良好，原状黄土随冻融循环周期的劣化模型中，该劣化模型是基于冻融循环劣化思想构建的指数函数，形式虽较为复杂，但该模型与其核心参数冻融循环次数 N 和含水率 ω 匹配度较高；与含水率 ω 有关的拟合参数 a 、 b 、 d 表达形式虽复杂，但拟合曲线状态良好，匹配程度高；该劣化模型能较好地预测黄土经冻融后的强度衰减关系，对已知含水率的黄土经冻融后的力学特性进行预测，有很好的效果。

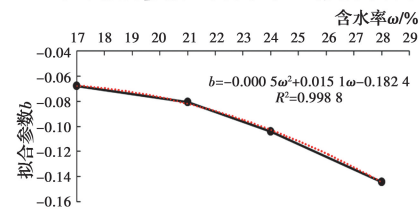
$$a = -0.000\ 008\omega^3 + 0.000\ 6\omega^2 - 0.012\ 6\omega + 0.095\ 9 \quad (3)$$

$$b = -0.000\ 5\omega^2 + 0.015\ 1\omega - 0.182\ 4 \quad (4)$$

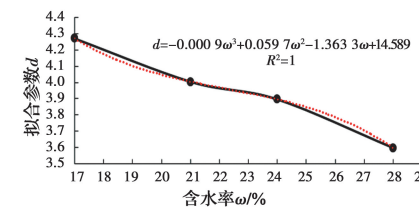
$$d = -0.000\ 9\omega^3 + 0.059\ 7\omega^2 - 1.363\ 3\omega + 14.589 \quad (5)$$



(a) 拟合参数 a 与含水率 ω 的关系曲线



(b) 拟合参数 b 与含水率 ω 的关系曲线



(c) 拟合参数 d 与含水率 ω 的关系曲线

图 11 拟合参数与含水率 ω 曲线

Fig. 11 Fitting parameters and water content curve

4 结论

1) 冻融循环条件下的原状黄土，试样表面破坏程度随着冻融循环周期 N 的增大而增大；随着含水率 ω 的增大，冻融循环对原状黄土试样的表面破坏

越显著。

2)土样的抗剪强度随着冻融周期的增大而降低,随着含水率的增大而减小,随着固结围压的增大而减小,且减小趋势随着固结围压的增大而降低。其中,高含水率、低围压下,冻融循环对土样的破坏作用较为明显;土样的初始模量随着冻融周期的增大而降低。

3)不同冻融循环周期下,土样的黏聚力 c 和内摩擦角 φ 均随含水率的增大呈线性降低;含水率一定时,黏聚力 c 随着冻融循环周期 N 的增大呈指数减小;内摩擦角 φ 随着冻融循环周期 N 的增大呈线性降低,且变化幅度均在 3° 以内。

4)以冻融循环周期 N 对黏聚力 c 的影响为主建立其劣化模型,原状黄土随冻融循环周期的劣化模型如式(2)~式(5)。

参考文献:

- [1] 许健,李诚钰,王掌权,等. 原状黄土冻融过程抗剪强度劣化机理试验分析[J]. 土木建筑与环境工程, 2016, 38(5): 90-98.
XU J, LI C Y, WANG Z Q, et al. Experimental analysis on the mechanism of shear strength deterioration of undisturbed loess during the freeze-thaw process [J]. Journal of Civil, Architectural & Environment Engineering, 2016, 38(5): 90-98. (in Chinese)
- [2] 张玉,邵生俊. 平面应变条件下黄土的竖向加载变形与强度特性分析[J]. 土木工程学报, 2016, 49(3): 112-121.
ZHANG Y, SHAO S J. An analysis of vertical loading deformation and strength characteristics of loess under plain strain condition [J]. China Civil Engineering Journal, 2016, 49(3): 112-121. (in Chinese)
- [3] 董晓宏,张爱军,连江波,等. 长期冻融循环引起黄土强度劣化的试验研究[J]. 工程地质学报, 2010, 18(6): 887-893.
DONG X H, ZHANG A J, LIAN J B, et al. Laboratory study on shear strength deterioration of loess with long-term freezing-thawing cycles [J]. Journal of Engineering Geology, 2010, 18(6): 887-893. (in Chinese)
- [4] 谷琪,王家鼎,司冬冬,等. 不同含水率下黄土冻融循环对湿陷性影响探讨[J]. 岩土工程学报, 2016, 38(7): 1187-1192.
GU Q, WANG J D, SI D D, et al. Effect of freeze-thaw cycles on collapsibility of loess under different moisture contents [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2016, 38(7): 1187-1192. (in Chinese)
- [5] 罗爱忠,邵生俊,方娟,等. 不同结构性黄土的单轴抗压试验及破坏模式[J]. 土木建筑与环境工程, 2014, 36(4): 74-80.
LUO A Z, SHAO S J, FANG J, et al. Single compression experimental analysis and failure mode of loess with different structural [J]. Journal of Civil, Architectural & Environment Engineering, 2014, 36(4): 74-80. (in Chinese)
- [6] MA L. The comparison of the loess mechanical properties under plane strain and conventional triaxial experiments [J]. Advanced Materials Research, 2014, 919/920/921: 791-794.
- [7] WANG D Y, MA W, NIU Y H, et al. Effects of cyclic freezing and thawing on mechanical properties of Qinghai-Tibet clay [J]. Cold Regions Science and Technology, 2007, 48(1): 34-43.
- [8] LI G Y, MA W, MU Y H, et al. Effects of freeze-thaw cycle on engineering properties of loess used as road fills in seasonally frozen ground regions, North China [J]. Journal of Mountain Science, 2017, 14(2): 356-368.
- [9] BI G Q. Study on influence of freeze-thaw cycles on the physical-mechanical properties of loess [J]. Advanced Materials Research, 2012, 442: 286-290.
- [10] ALSHIBLI K A, AKBAS I S. Strain localization in clay: plane strain versus triaxial loading conditions [J]. Geotechnical and Geological Engineering, 2007, 25(1): 45-55.
- [11] 许健,王掌权,任建威,等. 冻融条件下重塑黄土渗透规律试验分析[J]. 西北农林科技大学(自然科学版), 2017, 45(7): 134-142.
XU J, WANG Z Q, REN J W, et al. Experimental analysis on permeability of remolded loess under freeze-thaw condition [J]. Journal of Northwest A & F University (Natural Science Edition), 2017, 45(7): 134-142. (in Chinese)
- [12] 倪万魁,师华强. 冻融循环作用对黄土微结构和强度的影响[J]. 冰川冻土, 2014, 36(4): 922-927.
NI W K, SHI H Q. Influence of freezing-thawing cycles on micro-structure and shear strength of loess [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2014, 36(4): 922-927. (in Chinese)

- [13] 周泓, 张泽, 秦琦, 等. 冻融循环作用下黄土基本物理性质变异性研究[J]. 冰川冻土, 2015, 37(1): 162-168.
ZHOU H, ZHANG Z, QIN Q, et al. Research on variability of basic physical properties of loess under freezing-thawing cycles [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2015, 37(1): 162-168. (in Chinese)
- [14] 肖东辉, 冯文杰, 张泽, 等. 冻融循环对兰州黄土渗透性变化的影响[J]. 冰川冻土, 2014, 36(5): 1192-1198.
XIAO D H, FENG W J, ZHANG Z, et al. Research on the Lanzhou loess' s permeabilities changing with freezing-thawing cycles [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2014, 36(5): 1192-1198. (in Chinese)
- [15] 邵生俊, 罗爱忠, 邓国华, 等. 一种新型真三轴仪的研制与开发 [J]. 岩土工程学报, 2009, 31(8): 1172-1179.
SHAO S J, LUO A Z, DENG G H, et al. Development of a new true tri-axial apparatus [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2009, 31(8): 1172-1179. (in Chinese)
- [16] 土工试验方法标准: GT/T 50123—1999[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1999.
Standard for soil test method: GT/T 50123-1999 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 1999. (in Chinese)
- [17] 张焘, 张树誉, 刘新生. 近 53 年咸阳最高最低气温变化特征分析[J]. 河北省科学院学报, 2015, 32(4): 67-76.
ZHANG T, ZHANG S Y, LIU X S. Analysis of Xianyang nearly 53 years maximum and minimum temperature variation characteristics [J]. Journal of the Hebei Academy of Sciences, 2015, 32(4): 67-76. (in Chinese)
- [18] 石建刚, 邵生俊, 陶虎, 等. 非饱和土的真三轴试验及强度变形特性分析[J]. 岩土工程学报, 2011, 33(Sup1): 92-97.
SHI J G, SHAO S J, TAO H, et al. True triaxial tests and strength deformation behaviors of unsaturated soils [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, 33(Sup1): 92-97. (in Chinese)
- [19] 邵生俊, 陈菲, 代亚锋, 等. 结构性黄土的剪切带及强度特性的真三轴试验研究[J]. 岩土力学, 2015, 36(Sup1): 66-70, 84.
SHAO S J, CHEN F, DAI Y F, et al. Shear band mechanism and strength characteristics of structural loess tested by true triaxial apparatus [J]. Rock and Soil Mechanics, 2015, 36(Sup1): 66-70, 84. (in Chinese)
- [20] 方瑾瑾, 邵生俊, 李荣, 等. 真三轴条件下 Q3 黄土的屈服特性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2016, 35(9): 1936-1944.
FANG J J, SHAO S J, LI R, et al. Yield characteristics of Q3 loess in true triaxial tests [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2016, 35(9): 1936-1944. (in Chinese)

(编辑 胡玲)