

重塑黄土冻融过程抗剪强度劣化特性试验研究

许 健¹, 王掌权¹, 任建威¹, 袁 俊^{2,3}

(1. 西安建筑科技大学土木工程学院, 陕西 西安 710055;

2. 中国电力工程顾问集团 西北电力设计院有限公司, 陕西 西安 710075;

3. 中国科学院西北生态环境资源研究院冻土工程国家重点实验室, 甘肃 兰州 730000)

摘要: 以西安 Q3 重塑黄土为研究对象, 对经受冻融作用后的黄土试样开展电镜扫描和直剪试验, 研究重塑黄土冻融过程微观结构和剪切强度变化规律。结果表明: 重塑黄土体冻融过程微观结构发生显著变化, 主要表现在冻融过程中骨架颗粒间冰晶生长导致的土体大骨架颗粒数量显著减少。冻融过程土体表面结构特征发生改变, 其破坏程度与土体初始条件相关, 含水率越高, 冻融周期越多, 土样表面特征破坏越明显。重塑黄土粘聚力随冻融周期增加以指数规律衰减, 随含水率增加呈线性减小趋势, 随干密度增加呈线性增加趋势。内摩擦角冻融过程变化规律不明显。基于室内试验数据, 最终提出了重塑黄土粘聚强度劣化模型。

关键词: 重塑黄土; 冻融作用; 电镜扫描; 抗剪强度

中图分类号: TU444

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2017)02-0200-07

Experimental research on shear strength deterioration of remolded loess under the freezing-thawing cycle

XU Jian¹, WANG Zhangquan¹, REN Jianwei¹, YUAN Jun^{2,3}

(1. College of Civil Engineering, Xi'an Univ. of Arch. & Tech., Xi'an 710055, China;

2. Northwest Electric Power Design Institute of Co. Ltd. of China Power Engineering Consulting Group, Xi'an, 710075, China;

3. State Key Laboratory of Frozen Soil Engineering, Northwest Institute of Eco-Environment and Resources, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China)

Abstract: The influence of freeze-thaw cycle on the microstructure and strength of Xi'an Q3 remolded loess was studied by SEM and direct shear tests. The results show that during the freeze-thaw process, the growth of ice crystal results in obvious destruction of large particles aggregate. Freezing-thawing has caused more serious damage on the surface structure of soil with the increase of initial water content and freezing-thawing times. The cohesion of remolded loess exponentially decreases during the freeze-thaw process. The cohesion linearly decreases with the increase of water content, and linearly increases with the dry density increasing. The internal friction angle of remolded loess has no obvious change rule during the freeze-thaw process. Based on the indoor test results, a cohesion strength deterioration model of remolded loess was finally established.

Key words: remolded loess; freeze-thaw action; SEM; shear strength

黄土在我国分布相当广泛, 其总面积达 64 万 km², 约占我国国土面积的 6.3 %, 以“黄土高原”著称, 且多分布在北方季节冻土区。由于该地区处在中高纬度, 昼夜温度与季节温度波动较大, 地表土层受季节冻融作用的影响显著^[1-2]。表层土体处于反复冻结与融化状态, 即受季节影响呈周期性冻结融化的土, 冬季冻结, 夏季全部融化, 称之为“季节冻土”。这也使得黄土地区除面临标志

性的水敏性问题挑战外, 反复冻融循环作用也导致一系列季节冻土工程问题, 其中边坡冻融灾害问题一直是困扰岩土工程师的难题^[3-6](图 1)。沈珠江^[7]指出在寒区进行工程活动时, 如路堑开挖、新削边坡和路基修建等, 深层土体暴露在冻融作用之下, 需考虑冻融循环对土体物理力学性质的影响。

国内外学者对冻融作用后土体物理力学性质

收稿日期: 2016-03-20

修改稿日期: 2017-03-21

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51478385, 51208409), 冻土工程国家重点实验室开放基金资助项目(SKLFSE201312)

作者简介: 许健(1980—), 男, 博士, 副教授, 主要从事寒区岩土工程研究。E-mail: xujian@xauat.edu.cn



图 1 黄土边坡冻融剥落破坏

Fig. 1 Spalling hazards caused by freeze-thaw action

方面,做了大量研究工作. VIKLANDER^[8]对不同密实状态的土体进行研究,观察冻融过程中土体体积的变化规律,指出冻融作用对土体具有双重作用,即对松散土体具有压密作用,对于密实土有冻胀作用,并在宋春霞^[9]等人的研究中得到验证. CHUVILIN^[10]、BONDARENKO^[11] 及 YONG R N^[12]对不同类别土体剪切强度分别展开研究,结论差异较大. 齐吉琳^[13]以饱和黄土和粉质粘土为研究对象,对经过一次冻融循环前后的土样进行土力学实验,发现了冻融后土的力学特征有一定变化. 李国玉^[14]对压实黄土进行补水条件的冻融试验,分析其工程性质的变化规律. 王铁行^[15]综合考虑含水率及温度的影响,对冻融作用下非饱和黄土的力学性质开展深入研究. 叶万军^[16]对比研究了相同冻融条件下洛川及铜川两地黄土表观特征及物理力学性质的变化规律.

综上所述,冻融作用对土体力学性质影响规律与试验条件、土样初始状态及土性紧密相关. 基于此,本文从试样微观结构、表观特征和抗剪强度三方面,综合研究冻融作用对西安 Q3 重塑黄土强度的影响规律.

1 试验方案

1.1 试验材料及试样制备

试验所用黄土均取自西安市长安区深度 5~6 m 某基坑侧壁,属 Q₃ 黄土. 土样基本物理参数列于表 1,其颗粒级配曲线如图 2 所示.

表 1 土样物理特性参数

Tab. 1 The physical parameters of test soil

比重	干密度	含水量	液限	塑限	塑性
G_s	ρ_d (g/cm ³)	w /%	w_L /%	w_P /%	指数 I_P
2.65	1.7	17.5	33.86	18.65	15.21

将所取土样风干后过 2 mm 筛并取出足够土样放

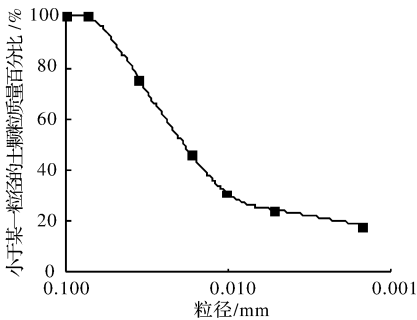


图 2 土样颗粒级配曲线

Fig. 2 Grading curve for test soil

在干燥器中备用. 然后称取足够土量用蒸馏水配制成不同含水率土样. 为了使土样的含水率比较均匀,将制配的土样放在保湿缸中 24 h. 根据试样的干密度称取足够湿土,压制成直径为 61.8 mm,高度为 20 mm 的环刀样. 试样制备过程中要求试样干密度与所需干密度之差小于或等于 0.01 g/cm³,并要求含水率与所需含水率之差不大于 0.1 %,以保证试验结果离散性较小. 试样种类见表 2.

表 2 试样种类

Tab. 2 Sample type

干密度 /g · cm ⁻³	含水率 1/%	含水率 2/%	含水率 3/%	含水率 4/%	饱和含 水率/%
1.4	15	18	21	28	33.6
1.5	15	18	21	—	28.9
1.6	15	18	21	—	24.7
1.7	15	18	—	—	21.0

注:表中符号“—”表示不存在此种试样.

1.2 冻融试验

采用封闭不补水冻融试验方法,即将保鲜膜包裹于试样外侧,并进行多向快速冻结与融化,使得冻融时试样的水分迁移较少. 本试验以低温 20 ℃冻结 12 h,高温+20 ℃融化 12 h 为一个冻融周期,冻融周期采用:0、2、5、7、14、17、20.

1.3 电镜扫描试验

将含水率为 18 % 的重塑黄土压制成干密度为 1.7 g/cm³ 的土样,随后割成长方体样品(1 cm×1 cm×2 cm),并利用保鲜膜进行包裹,置于恒温试验箱内进行冻融实验. 对冻融作用后的样品进行风干与刻槽处理,最后采用 Quanta 600 FEG 场发射扫描电镜对试样新鲜断面进行扫描.

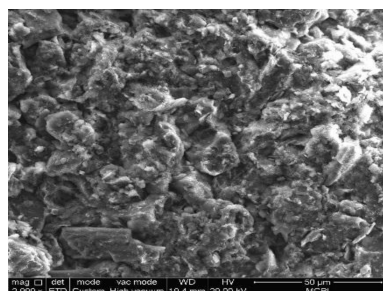
1.4 直剪试验

采用《土工试验方法标准》为试验依据,对冻融前后土样进行直剪试验,试验时分别施加 100 kPa、200 kPa、300 kPa 及 400 kPa 垂直方向压力. 试样采用 ZJ 型应变控制式四联直剪仪.

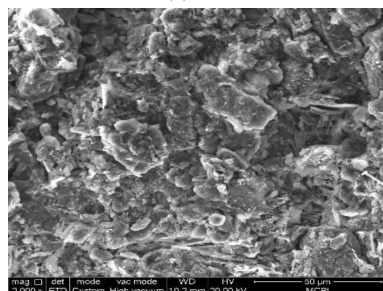
2 试验结果与分析

2.1 微观结构特征

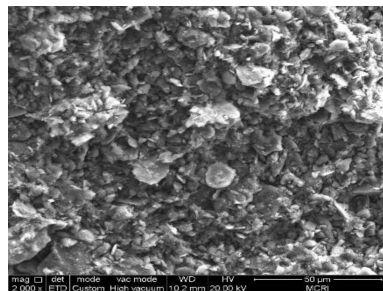
图 3 给出重塑黄土冻融过程微观结构特征图片 ($\times 2000$)。如图所示,冻融前,试验黄土的骨架颗粒以胶结集粒、单体圆粒及片状颗粒为主,且颗粒间镶嵌紧密,呈粒状-凝块、镶嵌、胶结结构。多次冻融后,微观结构特征发生显著变化,黄土大骨架颗粒数量明显减少,且变得较为松散,小孔隙也随之增多。产生这种现象的原因是:试样冻结过程中,内部冰晶生长导致试样孔隙体积增加,挤压骨架颗粒。



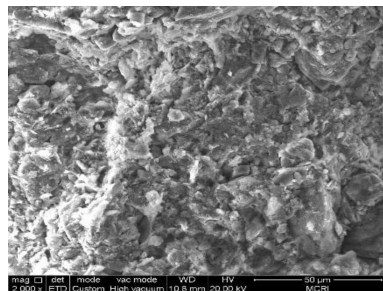
(a) $N=0$



(b) $N=2$



(c) $N=10$



(d) $N=20$

图 3 冻融过程 SEM 图像

Fig. 3 SEM images of loess after different freezing-thawing times

2.2 表面特征

图 4 所示为不同含水率试样经受 17 个冻融周期后其表面特征变化规律。由图可见,低含水率试样 (w 不大于 18%) 在冻融后试样表面特征变化不大;含水率为 21% 试样冻融后表面结构变的较为疏松,孔隙比增大,出现碎屑;饱和试样表面产生较大裂缝。

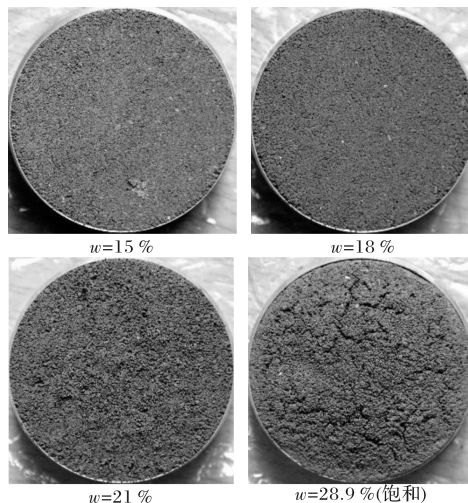
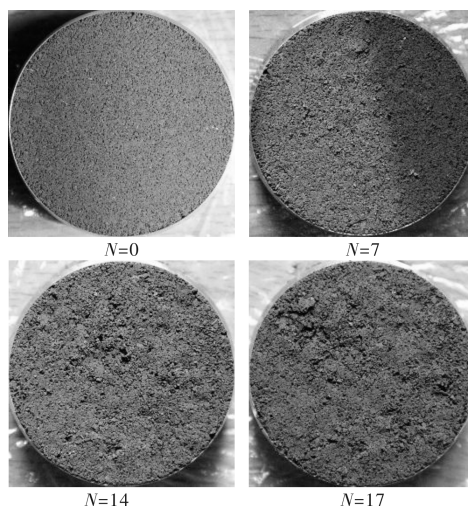


图 4 不同含水率试样冻融作用下表面特征变化
($\rho_d = 1.5 \text{ g/cm}^3$, $N=17$)

Fig. 4 The surface feature of specimen with different water content

图 5 所示为高含水率试样 (w 大于等于 21%) 冻融过程表面特征变化规律。由图可见,含水率为 21% 试样在冻融过程中表面出现碎屑,随着冻融周期增加,试样表面碎屑增多。饱和试样冻融过程中首先出现碎屑,在冻融 14 个周期后开始出现裂缝,随冻融周期增加,表面裂缝增多增大且裂缝开始相互贯通。



(a) $\rho_d = 1.6 \text{ g/cm}^3$, $w=21\%$

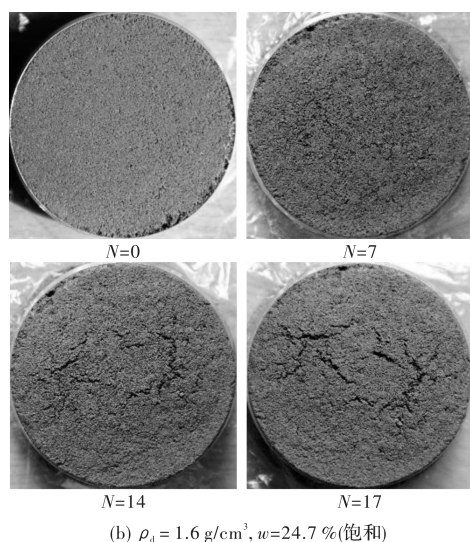


图5 不同周期冻融作用下试样表面特征变化
Fig. 5 The surface feature of specimen at different freezing-thawing times

图6所示为不同干密度饱和试样表面特征变化。由图可见,干密度 ρ_d 为 1.4 g/cm^3 试样表面出现较大裂缝,裂缝相互贯通,将试样表面分割成块;干密度 ρ_d 为 1.5 g/cm^3 和 1.6 g/cm^3 试样表面裂缝数量相对较少、宽度较窄;干密度为 1.7 g/cm^3 试样仅有几条微裂缝。

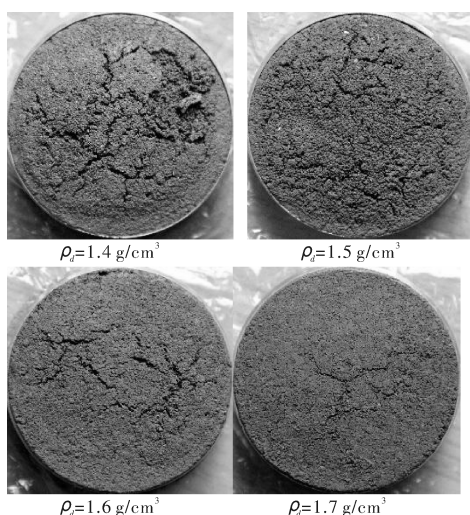


图6 不同干密度试样冻融作用下表面特征变化
(饱和, $N=17$)

Fig. 6 The surface feature of specimen under different dry density

综合上述分析,不难发现冻融作用对土体表面结构破坏严重,且含水率越高,冻融周期越多,土体表面特征破坏越严重。这主要是冻融过程中的水分迁移作用使得土体表面含水量增加,尤其是含水率较高时,长期冻融过程中土样上部冻融变形和形态破坏严重。

2.3 粘聚力

2.3.1 冻融周期对粘聚力的影响

冻融周期对不同含水率重塑黄土(干密度为 1.6 g/cm^3)粘聚力的影响关系曲线,如图7(a)所示。从图中可以看出,随冻融周期增加,饱和试样粘聚力呈稍稍增大趋势。对于非饱和试样,其粘聚力表现为减小趋势;随冻融周期增加,粘聚力降低值逐渐减小,最终趋于新平衡状态的残余强度,其变化规律符合指数形式。非饱和状态下试样粘聚力的减小主要是由于冻结过程中土体孔隙内部冰晶生长和冷生结构形成在黄土骨架颗粒间产生劈裂作用,导致黄土颗粒间的胶结性降低。当试样处于饱和状态时,水膜厚度增加,自由水增多,冻融后水分向土体表面迁移较明显,使得剪切面含水率减小,因而冻融后试样粘聚力呈稍稍增大趋势。此外,含水率较大时,试样本身初始结构强度较低,因而粘聚力劣化幅值和速率减小。

含水率为15%,不同干密度条件下粘聚力与冻融周期变化规律如图7(b)所示。由图可见,粘聚力随冻融周期增加亦呈指数衰减趋势,与图7(a)表现出相似的变化规律,且粘聚力劣化幅度与速率随干密度增大有增大趋势。这主要是因为干密度增大时,其土颗粒联结更紧密,低温冻胀作用对土体结构破坏作用也更为强烈,导致粘聚力降低幅度和速率增大。

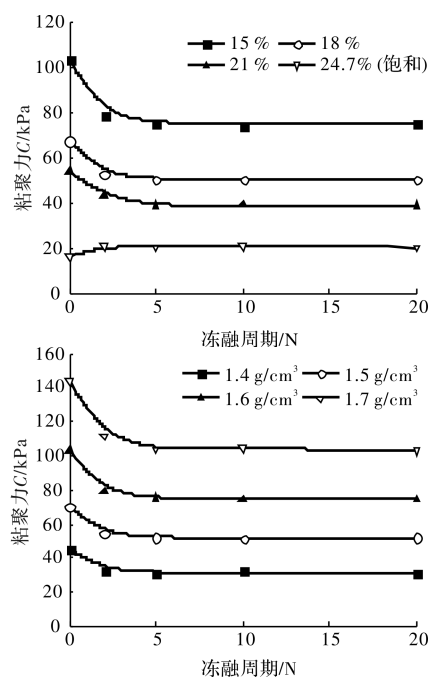


图7 粘聚力与冻融周期关系曲线

Fig. 7 The variation of cohesion at different freezing-thawing times

2.3.2 含水率对粘聚力的影响

重塑黄土冻融过程粘聚力随含水率变化曲线

如图 8 所示. 从图中可以看出, 粘聚力随含水率增加呈线性衰减特征. 这主要是因为土体含水率增加时, 颗粒间水膜加厚, 导致土体粘聚强度降低. 此外, 基于前述分析(图 7), 经受冻融作用的试样其粘聚力趋于稳定, 导致粘聚力随含水率变化规律近似重合.

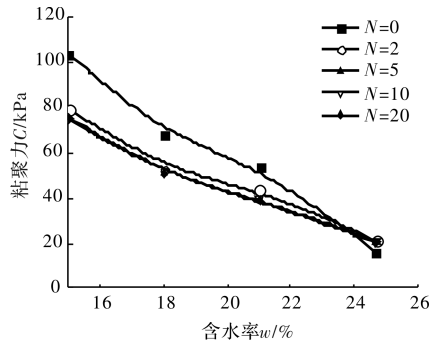


图 8 粘聚力与含水率关系曲线 ($\rho_d = 1.6 \text{ g/cm}^3$)

Fig. 8 The variation of cohesion with water content

2.3.3 干密度对粘聚力的影响

图 9 给出冻融过程干密度对重塑黄土粘聚力的影响规律. 如图所示, 粘聚力随干密度增大变化显著, 呈线性增大规律. 从图中还可以看出, 冻融后粘聚力与干密度的变化规律曲线近似重合, 这与前述粘聚力随含水率的变化规律是一致的.

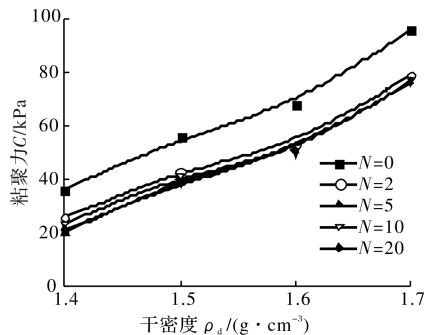


图 9 粘聚力与干密度关系曲线 ($w = 18\%$)

Fig. 9 The relationship between cohesion and dry density

2.4 内摩擦角

图 10 给出重塑黄土内摩擦角随冻融周期变化规律曲线. 不难发现, 重塑黄土内摩擦角随冻融周期增加无明显变化, 且波动范围较小. 这主要是由于影响土体内摩擦角的主要因素是土颗粒接触面积和形状, 而冻融循环对上述因素影响不明显.

2.5 强度劣化模型

基于上述冻融过程粘聚力变化规律, 对粘聚力进行多因素拟合分析, 给出其劣化模型表达式.

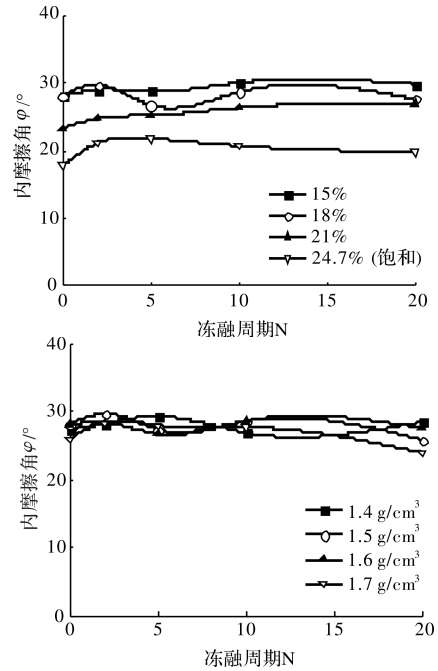


图 10 内摩擦角与冻融周期关系曲线

Fig. 10 The change rule of internal friction angle during freeze-thaw process

试验研究表明, 粘聚强度与冻融周期符合指数变化规律, 可用下述函数进行表示:

$$C = ae^{bN} + c \quad (1)$$

式中: C 为粘聚力, kPa; N 为冻融周期; a 、 b 、 c 为拟合参数, 与含水率相关, 见表 3.

表 3 拟合参数 1

Tab. 3 Fit parameters 1					
含水率/%	15	18	21	24.7(饱和)	
参数	a	27.88	17.42	12.3	-4.71
	b	-1.398	-0.979	-0.731	-1.000
	c	75.34	50.08	39.63	20.82
	R^2	0.991	0.978	0.954	0.937

考虑含水率影响, 分析表 3 中数值发现, 对 a 、 b 、 c 进行多项式拟合能取得更好相关性. 拟合表达式见式(2)-(4), 结果如表 4 所示.

$$a = a_1 w^2 + a_2 w + a_3 \quad (2)$$

$$b = b_1 w^2 + b_2 w + b_3 \quad (3)$$

$$c = c_1 w^2 + c_2 w + c_3 \quad (4)$$

表 4 拟合参数 2

Tab. 4 Fit parameters 2			
i	a_i	b_i	c_i
1	0	-169	2 327
2	-320	72	-1 463
3	76.3	76.3	241.3

将式(2)-(4)代入式(1), 可得重塑黄土体粘聚强度与含水率和冻融周期的关系表达式:

$$C_{1.6} = (-320w + 76.3) e^{(-169w^2 + 72w - 8.4)N} + 2$$

$$327w^2 - 1463w + 241.3 \quad (5)$$

式中: $C_{1.6}$ 表示干密度为 1.6 g/cm^3 试样的粘聚力。

其它干密度试样粘聚强度劣化规律见式(6)–(8)。

$$C_{1.4} = (-96w + 29.0)e^{(-25w^2 + 15w - 2.7)N} + 231w^2 - 170w + 45.1 \quad (6)$$

$$C_{1.5} = (-198w + 50.8)e^{(-16w^2 + 10w - 2.1)N} + 1484w^2 - 860w + 147.3 \quad (7)$$

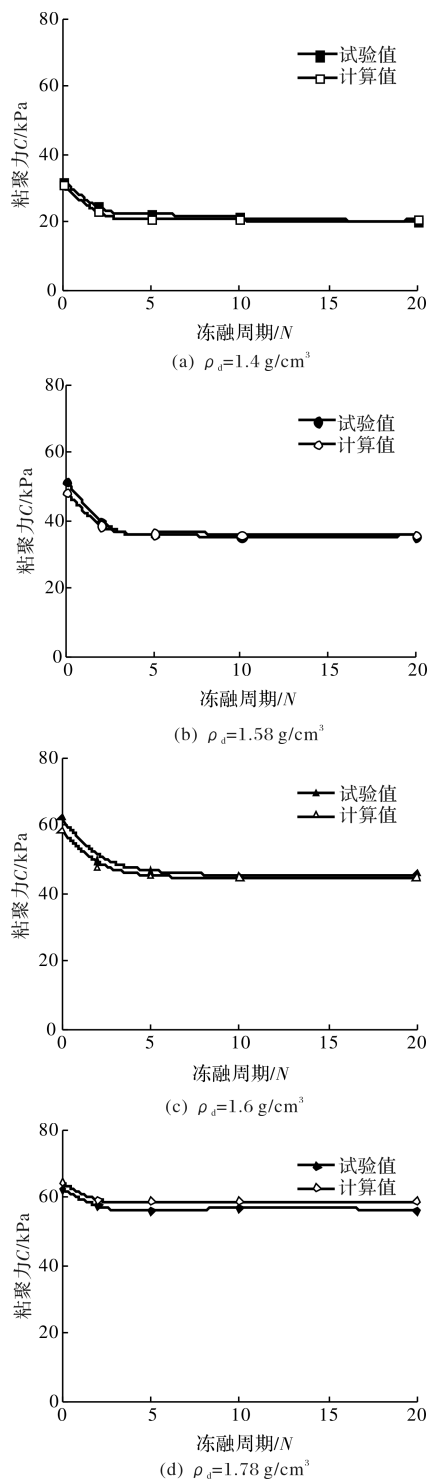


图 11 模型验证

Fig. 11 Modelling verification

$$C_{1.7} = (-791w + 159.8)e^{(169w^2 - 64w + 5.0)N} -$$

$$13864w^2 + 3697w - 135.1 \quad (8)$$

式中: $C_{1.4}$ 、 $C_{1.5}$ 、 $C_{1.7}$ 分别表示干密度为 1.4 g/cm^3 、 1.5 g/cm^3 及 1.7 g/cm^3 试样的粘聚强度。

利用含水率为 19.5% 试样冻融前后试验数据对模型进行验证, 如图 11 所示. 结果表明, 模型试验值和计算值相差较小, 该模型能够较好的预测重塑黄土粘聚强度劣化特性。

3 结论

(1) 冻融作用对重塑黄土微观结构影响显著, 表现在黄土大骨架颗粒数量明显减少, 颗粒变的较为松散, 小孔隙也随之增多。

(2) 冻融过程土体表面结构特征发生改变, 其破坏程度与土体初始条件相关, 含水率越高, 冻融周期越多, 土体表面特征破坏越严重。

(3) 重塑黄土粘聚力随冻融周期增加以指数规律衰减, 其衰减幅值和速率与含水率负相关, 与干密度正相关; 粘聚力随含水率增加表现出线性减小趋势, 随干密度增加表现出线性增加规律. 内摩擦角随冻融周期增加变化规律性不明显, 呈波浪形变化趋势。

(4) 针对重塑黄土粘聚力的变化规律进行拟合分析, 得到粘聚强度劣化模型表达式. 结果表明, 该模型公式能很好描述试验黄土粘聚力劣化规律。

参考文献 References

- [1] 曾磊, 赵贵章, 胡炜等. 冻融条件下浅层黄土中温度与水分的空间变化相关性[J]. 地质通报, 2015, 34(11): 2123-2131.
ZENG Lei, ZHAO Guizhang, HU Wei, et al. Spatial variation characteristics of temperature and moisture in shallow loess layer under freezing-thawing condition [J]. Geological Bulletin of China, 2015, 34(11): 2123-2131.
- [2] 王铁行, 刘自成, 岳彩坤. 浅层黄土温度场数值分析[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 2007, 39(4): 463-467.
WANG Tiehang, LIU Zicheng, YUE Caikun. Thermal regime in shallow soil strata in loess plateau[J]. J. of Xi'an Univ. of Arch. & Tech. (Natural Science Edition), 2007, 39(4): 463-467.
- [3] 连江波. 冻融循环作用下黄土物理性质变化规律[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2010.
LIAN Jiangbo. Study on the variation of physical properties of loess under freezing-thawing cycles[D].

- Yangling; Northwest A&F University, 2010.
- [4] 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 Hong, ZHANG Ze, QIN Qi, 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.
- [5] 马世雄. 冻融作用对黄土边坡剥落影响的试验研究[D]. 西安: 西安科技大学, 2012.
MA Shixiong. Experimental study of freezing-thawing to spalling of loess slope[D]. Xi'an: Xi'an University of Science and Technology, 2012.
- [6] 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.
HU Zaiqiang, LIU Yin, LI Hongru. Influence of freezing-thawing cycles on strength of loess[J]. Shuili Xuebao, 2014, 45(s2): 14-18.
- [7] 沈珠江. 抗风化设计—未来岩土工程设计的一个重要内容[J]. 岩土工程学报, 2004, 26(6): 866-869.
SHEN Zhujiang. Weathering resistant design—An important aspect of future development of geotechnical engineering design[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2004, 26(6): 866-869.
- [8] Viklander Peter. Permeability and volume changes in till due to cyclic freeze/thaw[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1998, 35(3): 471-477.
- [9] 宋春霞, 齐吉琳, 刘奉银. 冻融作用对兰州黄土力学性质的影响[J]. 岩土力学, 2008, 29(4): 1077-1086.
SONG Chunxia, QI Jilin, LIU Fengyin. Influence of freeze-thaw on mechanical properties of Lanzhou loess[J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, 29(4): 1077-1086.
- [10] Chuvilin Ye M, Yazynin OM. Frozen soil macro-and microtexture formation[C]//Proceedings of 5th International Conference on Permafrost. Trondheim, Norway: Tapir Publishers, 1988: 320-323.
- [11] BONDARENKO G I, SADOVSKY A V. Water content effect of the thawing clay soils on shear strength [C]// Proceedings of the 6th International Symposium on Ground Freezing. Rotterdam, Netherlands: A. A. Balkema, 1991: 123-127.
- [12] YONG R N, BOONSINUK P, YIN C W P. Alter nation of soil behavior after cyclic freezing and thawing [C] //Proceedings of 4th International Symposium on Ground Freezing. Rotterdam, Netherlands: A. A. Balkema, 1985: 187-195.
- [13] 齐吉琳, 张建明, 朱元林. 冻融作用对土结构性影响的土力学意义[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(s2): 2690-2694.
QI Jilin, ZHANG Jianming, ZHU Yuanlin. Influence of Freezing-thawing on soil structure and its soil mechanics significance[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22(s2): 2690-2694.
- [14] 李国玉, 马巍, 李宁, 等. 冻融对压实黄土工程地质特性影响的试验研究[J]. 水利与建筑工程学报, 2010, 8(4): 5-7.
LI Guoyu, MA Wei, LI Ning, et al. Experimental Research on Impact of Freezing and Thawing on Geotechnical Properties of Compacted Loess[J]. Journal of Water Research and Architectural Engineering, 2010, 8(4): 5-7.
- [15] 王铁行, 罗少锋, 刘小军. 考虑含水率影响的非饱和原状黄土冻融强度试验研究[J]. 岩土力学, 2010, 31(8): 2378-2382.
WANG Tiehang, LUO Shaofeng, LIU Xiaojun. Testing study of freezing-thawing strength of unsaturated undisturbed loess considering influence of moisture content[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(8): 2378-2382.
- [16] 叶万军, 杨更社, 彭建兵, 等. 冻融循环导致洛川黄土边坡剥落病害产生机制的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(1): 199-205.
YE Wanjun, YANG Gengshe, PENG Jianbing, et al. Test research on mechanism of freezing and thawing cycle resulting in loess slope spalling hazards in Luochuan[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(1): 199-205.

(编辑 沈波)