

原状与重塑黄土冻融劣化机理对比试验研究*

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,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,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,兰州 730000)

摘 要:通过对西安 Q₃ 原状和重塑黄土在冻融作用下的电镜扫描和直剪试验,对比研究了原状和重塑黄土冻融过程抗剪强度劣化机理及规律。结果显示:冻融过程原状和重塑黄土微观结构都发生显著变化,土体胶结性变差。冻融条件下试样表观结构特征破坏较为严重,且原状黄土表观结构劣化程度更为严重。黏聚力随冻融次数增加均呈指数衰减趋势;原状黄土黏聚力高于重塑黄土,但随冻融次数增加,两者差异逐渐减小;原状黄土黏聚力衰减幅值及速率高于重塑黄土。随含水量增加,黏聚力总体呈线性减小变化规律,且反复冻融后黏聚力随含水量变化曲线分布特征近似重叠。冻融作用对内摩擦角无显著影响。随冻融次数增加,黏聚力冻融损伤系数表现出呈指数增加特征;原状黄土黏聚力冻融损伤系数高于重塑黄土。

关键词:重塑黄土;原状黄土;冻融作用;电镜扫描;抗剪强度

中图分类号:TU444 文献标识码:A 文章编号:1673-0836(2018)03-0643-07

Comparative Test Study on Deterioration Mechanism of Undisturbed and Remolded Loess during the Freeze-thaw Process

Xu Jian¹, Wang Zhangquan¹, Ren Jianwei¹, Yuan Jun^{2,3}

(1.School of Civil Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, P.R. China;
2. Northwest Electric Power Design Institute of Co. Ltd. of China Power Engineering Consulting Group, Xi'an 710075, P.R. China; 3. State Key Laboratory of Frozen Soil Engineering, Northwest Institute of Eco-Environment and Resources, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, P.R. China)

Abstract: Based on the electron microscope scanning and direct shear test of Q₃ undisturbed and remolded loess from Xi'an, the mechanism of shear strength deterioration during the freeze-thaw process was comparatively studied. The experimental data shows that the microstructure of undisturbed and remolded loess changes significantly during the freeze-thaw process, and the soil cementing property is weakened. Freezing-thawing makes the surface structure of undisturbed and remolded loess destroyed greatly, and has a bigger influence on the undisturbed loess. The cohesion of undisturbed and remolded loess all decreases exponentially with freezing and thawing times increasing. The cohesion of undisturbed loess is always greater than that of remolded in the same condition. However, the cohesion difference between undisturbed and remolded loess is smaller with the increase of freezing and thawing times. The cohesion of undisturbed loess has a larger attenuation amplitude and rate. With the increase of water content, the cohesion all decreases linearly, and has a approximately same variation after freezing and thawing. The internal friction angle has no obvious variation during the whole freezing-thawing process. The freezing-thawing damage coefficient of cohesion for undisturbed and remolded loess all increases exponentially with the increase of freezing-thawing times. The freezing-thawing damage coefficient of undisturbed loess is larger than that of remolded loess.

Keywords: remolded loess; undisturbed loess; freeze-thaw action; SEM; shear strength

* 收稿日期:2017-12-24(修改稿)
作者简介:许健(1980-),男,山东泰安人,博士,副教授,主要从事寒区岩土工程研究。E-mail:xujian@xauat.edu.cn
基金项目:国家自然科学基金(51478385, 51208409);陕西省教育厅专项科研项目(12JK0914);冻土工程国家重点实验室开放基金(SKLFSE201312);西北电力设计院技术创新科研项目(XB1-TM04-2013)

0 引言

黄土高原大部分地区均处于季节性冻土地区,黄土边坡等构筑物受反复冻融循环作用的影响显著^[1]。反复冻融循环作用使得岩土体物理力学性质发生显著变化,是导致黄土强度损伤的重要诱因。因而,我国著名岩土工程学者沈珠江^[2]指出,寒区工程建设过程中必须考虑季节性冻融作用对岩土体物理力学特性的影响。

冻融条件下土体基本物理力学特性变化规律相关研究文献资料较多,Viklander^[3]研究发现冻融作用使得密实土体变疏松,松散土体变密实,提出了冻融条件下土体残余孔隙比的概念。宋春霞等^[4]研究指出,冻融条件下兰州黄土存在一个临界干容重,此时试样经过冻融后前期固结压力和黏聚力不变。Chuvilin 等^[5]指出,反复冻融循环条件下土体的剪切强度表现出衰减的变化规律特征。Bondarenko 等^[6]发现冻融条件下土体的剪切强度变化不大。Yong 等^[7]认为,土体冻融过程抗剪强度表现出增加的特征。李国玉等^[8]对冻融后压实黄土的工程性质进行了试验研究。叶万军等^[9]研究了反复冻融循环作用对黄土体物理力学性质的影响规律,揭示了黄土高原地区边坡冻融剥落病害的机理。王铁行等^[10]开展了反复冻融循环作用对非饱和和原状黄土抗剪强度影响规律的试验研究工作。总结已有文献资料,冻融条件下土体力学性质变化规律的研究成果差异较大,有些研究结论甚至是相反的,分析其原因主要是由于土体性质的变异性及试验条件等的差异。

对于原状黄土体而言,因其长时间成岩作用,导致其具有较强的天然结构强度^[11],反复冻融循环会破坏原状黄土体内部的胶结强度。由于天然结构强度被扰动破坏,因而重塑黄土力学性质与原状黄土存在较大差异^[12-13]。因此,考察冻融作用对黄土体物理力学性质影响时,应当区分原状土和重塑土,并对比两者之间的差异^[14]。然而现有文献资料对于冻融后黄土体强度的研究大多集中在单一重塑黄土^[15]或原状黄土^[16-17],针对两者之间冻融过程强度劣化特性对比研究还相对较少,尚不能深入全面系统地揭示黄土体冻融过程抗剪强度劣化的机制。

基于此,本文将冻融循环作为外界诱因,开展冻融条件下原状和重塑黄土试样强度劣化规律对比试验研究,并进一步结合试样表观结构和 SEM 图像,深入全面地揭示反复冻融循环条件下原状和

重塑黄土抗剪强度劣化机理及规律,以期为黄土地区边坡、道路及堤坝等季节性冻融病害的防治提供科学依据。

1 试验材料与方法

1.1 试验材料

试验所采用的黄土试样取自西安市南郊航天城某工程基坑内,取样深度约为 5~6 m,属马兰黄土。试样的基本物理参数如表 1 所示,粒径累积特征如图 1。

表 1 试样基本物理参数

Table 1 Basic parameters of test soil				
干密度	含水量	液限	塑限	塑性指数
$\rho_d/(g \cdot cm^{-3})$	$w/\%$	$w_L/\%$	$w_p/\%$	I_p
1.7	17.5	33.86	18.65	15.21

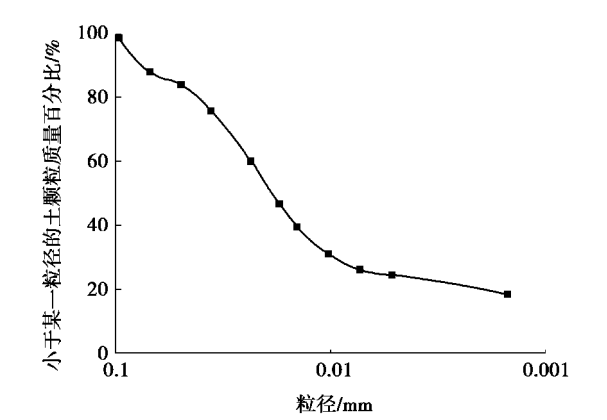


图 1 试样粒径累积曲线

Fig. 1 Sediment grading curve of test soil

1.2 试样制备

原状土样制备:削制尺寸为 70 mm×70 mm×60 mm 土样,对土样进行自然风干减湿或滴水增湿,控制其含水量分别为 15% 和 18%;然后将土样放入保湿缸中,保证水分均化不低于 96 h;待土样中的水分完全扩散均匀后,将土样加工成标准直剪试样。同时,对部分直剪试样进行饱和。

重塑土样制备:黄土样风干碾碎后过 2 mm 筛并放置在干燥器中备用。然后用蒸馏水分别配制含水量为 15% 和 18% 的土样,并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,压制成标准环刀试样;同时对部分含水量为 18% 试样进行抽气饱和。

试样制备控制标准为原状与重塑黄土试样干密度的差值不超过 0.01 g/cm³,实际含水量与控制含水的差值不超过 0.1%,以减小试验误差。试样

制备情况如表 2 所示。

表 2 试样种类				
Table 2 Sample type				
种类	干密度 /(g·cm ⁻³)	含水量 1 /%	含水量 2 /%	饱和含水量 3 /%
原状土	1.7	15	18	21
重塑土	1.7	15	18	21

1.3 冻融试验

将直剪环刀试样用保鲜膜包裹用于保湿,然后放置于温控箱进行封闭系统冻融循环试验。由于环刀试样尺寸较小,土样端部和侧面换热条件虽有所差异,但影响不大。

参照陕北黄土高原地区气候特征,以陕北黄土高原地区最低气温(约为-20℃)为冻结负温度,融化季节平均气温(约为20℃)为融化温度,进行冻融次数分别为0、2、5、10、12、17、20的冻融循环试验。此外,对于封闭系统来说,由于没有水源补给,所以冻融条件下黄土试样高度变化会逐渐趋于稳定,故本次冻融试验时间的确定以试样变形是否稳定作为标准。试样冻融变形测试数据表明:-20℃时冻结10h,冻胀变形基本稳定;20℃时融化10h,融沉变形基本稳定。因此,本次冻融循环试验时间为低温冻结12h然后升温融化12h,一个冻融循环周期为24h。

1.4 电镜扫描试验

将原状与重塑黄土试样分别加工成标准样品,并将该样品用塑料薄膜包裹用于保湿,然后置于冻融循环试验箱内进行封闭系统快速冻融循环试验。将经历不同冻融循环次数后的标准样品风干,并从样品中间获取一个标准扫描断面,最后利用场发射扫描电镜对试样内部微观结构进行测试分析。

1.5 直剪试验

反复冻融循环条件下原状与重塑黄土试样的直剪试验依据《土工试验方法标准》(GBT 50123—1999)的相关标准执行。直剪试验采用快剪法,试验时以100、200、300、400 kPa 作为标准垂直法向应力。

2 结果与分析

2.1 SEM 图像

图2和图3分别给出了不同冻融次数下原状与重塑黄土试样的微观结构SEM(×2000)图片。由图可见,相比重塑黄土,天然原状黄土试样内部土颗粒胶结连接的结构性特征更为显著,原状黄土

扰动重塑后其土颗粒胶结连结强度遭受破坏,因而重塑黄土试样内部骨架颗粒以单体颗粒为主,其骨架结构表现出密实的堆砌特征。

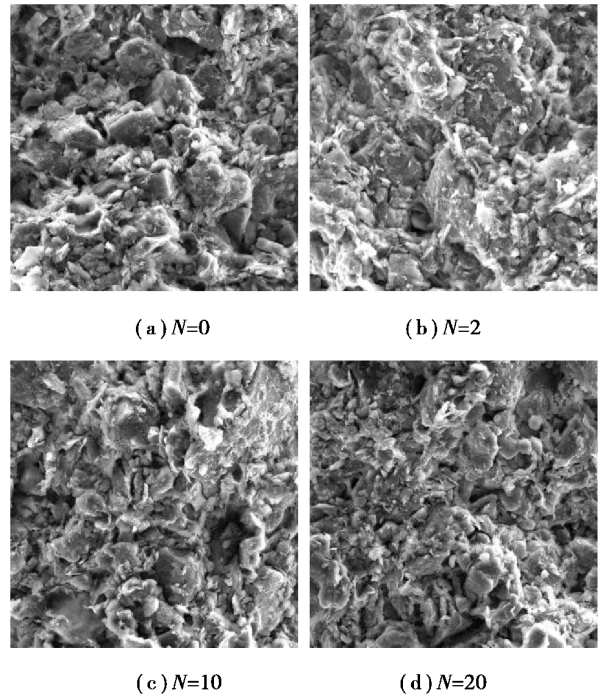


图 2 原状黄土冻融过程 SEM(×2000) 图像
Fig. 2 SEM images (×2000) of undisturbed loess under freezing-thawing conditions

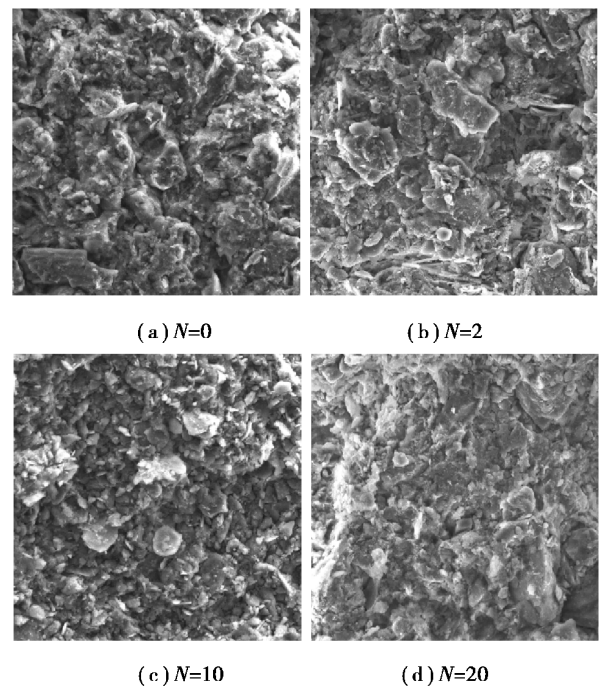


图 3 重塑黄土冻融过程 SEM(×2000) 图像
Fig. 3 SEM images (×2000) of remolded loess under freezing-thawing conditions

反复冻融条件下,原状与重塑黄土试样微结构形态均呈现出显著的变化规律,具体表现为随冻融

次数增加,试样内部较大土颗粒集合体数量显著减少,土颗粒胶结连结特性变差,黄土体结构整体变得较为疏松,从而导致其结构强度表现出一定的劣化特征。

2.2 表观结构特征

图 4 和图 5 所示分别为冻融条件下原状与重塑黄土试样表观结构变化特征。从图中可以看出,原状黄土试样表面具有典型的天然大孔隙结构特征。经历 5 次冻融循环后,原状黄土试样表观结构产生劣化现象,局部产生微裂隙,而重塑黄土试样表观结构特征无显著变化规律;经历 12 次冻融循环后,原状黄土试样表面表现出片状剥落特征,重塑黄土试样表层部分土颗粒开始松散脱落并出现微裂缝;冻融 17 次后,原状黄土表层冻融剥落破坏呈稳定状态,重塑黄土试样表面结构破坏程度表现出一定增加趋势,表面裂缝数量增多且开度增大。

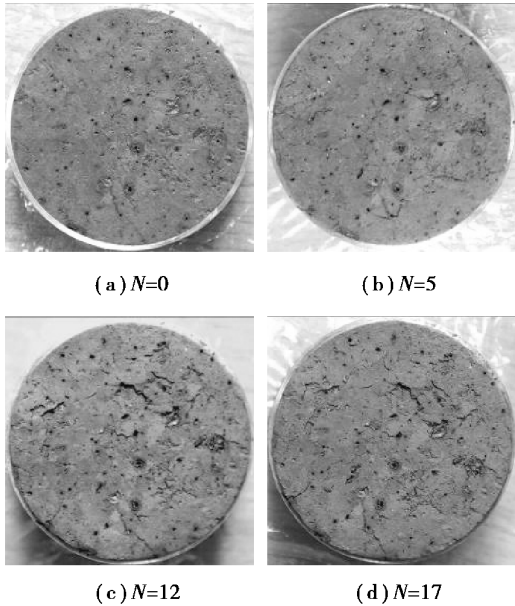


图 4 冻融条件下原状黄土试样表观特征

Fig. 4 Specimen surface characteristics of undisturbed loess during the freeze-thaw process

综上所述,可以得出反复冻融循环条件下原状与重塑黄土试样表观结构均产生劣化现象。分析其原因,主要是冻融条件下试样内部水分向表层迁移使得表层含水量变大,进而导致试样表观结构强度劣化。此外,相比重塑黄土,原状黄土试样表观结构破坏程度更为严重,产生冻融剥落破坏。

2.3 黏聚力

2.3.1 冻融循环次数对黏聚力的影响

图 6 给出了原状与重塑黄土黏聚力随冻融循环次数变化规律。由图 6 可见,反复冻融循环条件

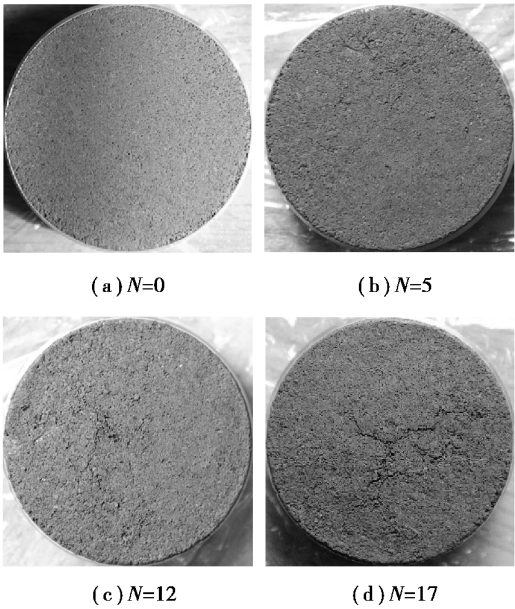


图 5 冻融条件下重塑黄土试样表观特征

Fig. 5 Specimen surface characteristics of remolded loess during the freeze-thaw process

下原状与重塑黄土的黏聚力具有相似的变化规律,都表现出逐渐趋于稳定的指数衰减特征。这主要是由于低温条件下土颗粒周围水膜冻结,孔隙内部冰晶体生长所产生的冻胀力使得土体结构强度劣化,黏聚力减小。反复冻融循环条件下黄土试样结构形态向新的平衡状态演化,黏聚力亦趋于一个稳定的数值。此外,由图可见,相同条件下原状黄土的黏聚力高于重塑黄土,但随冻融次数增加,两者差异逐渐减小。这主要是由于相比重塑黄土,原状黄土颗粒胶结连结的结构性特征更为显著(图 2、图 3),即原状黄土具有典型的天然结构强度,因而相同条件下原状黄土的黏聚力高于重塑黄土。但多次冻融后,无论原状或重塑黄土,其黏聚力均趋于稳定,因而两者差异逐渐减小。此外,相比重塑黄土,反复冻融循环条件下原状黄土试样黏聚力的劣化幅值及速率更大。分析其原因,如前所述,原状黄土颗粒胶结连结的结构性更为显著,因而冻结条件下冰晶体生长所产生的冻胀力对原状黄土试样结构强度的劣化作用更为明显,进而导致原状黄土黏聚力的衰减幅度及速率高于重塑黄土。

2.3.2 含水量对黏聚力的影响

图 7 给出原状与重塑黄土试样黏聚力随含水量变化规律关系曲线。从图中可以看出,原状与重塑黄土黏聚力随着含水量增加具有相似的变化特征,都表现出线性减小的变化规律。分析其原因,土颗粒之间结合水膜随含水量增加显著增厚,其润滑作用显著,进而使得土体黏聚力降低。此外,与

前述变化规律相同,相同条件下原状黄土黏聚力高于重塑黄土。值得注意的是,反复冻融循环条件下黄土体结构强度产生劣化现象,原状与重塑黄土试样结构形态随冻融次数增加趋于一个稳定的平衡状态(图6),进而使得黏聚力随含水量的变化规律分布特征出现交叉且近似重叠现象。

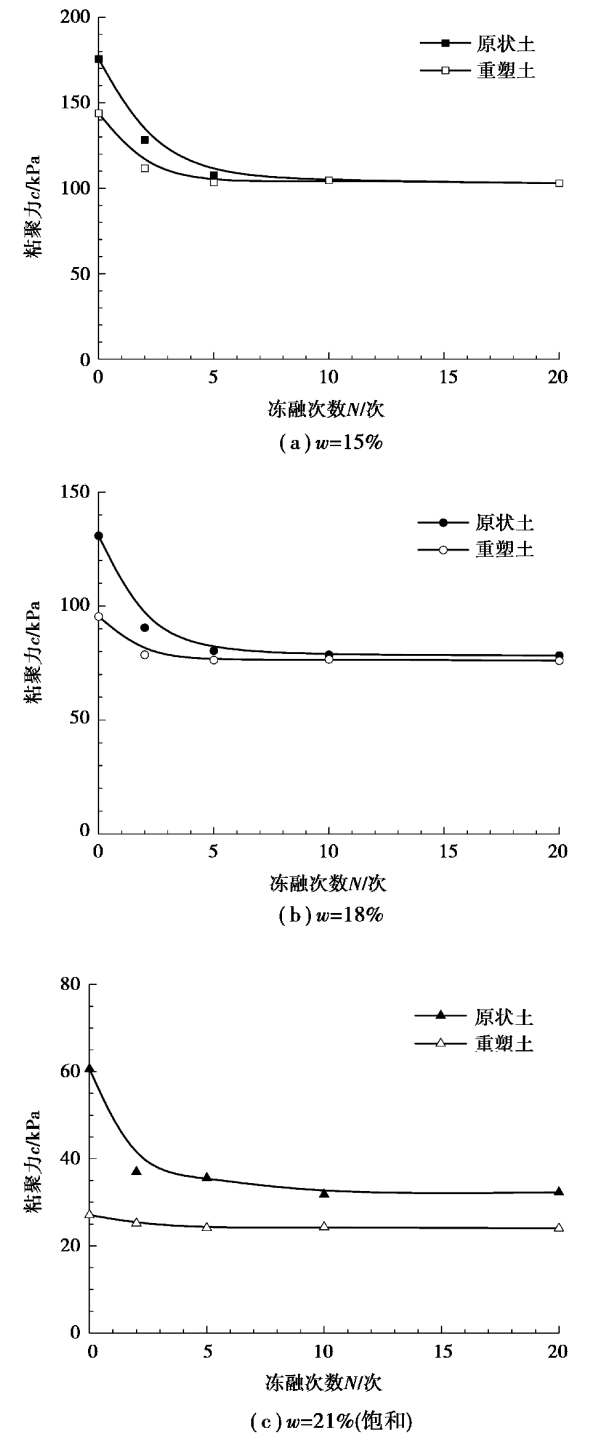


图6 冻融条件下黏聚力变化规律

Fig. 6 Variation of cohesion under freeze-thaw conditions

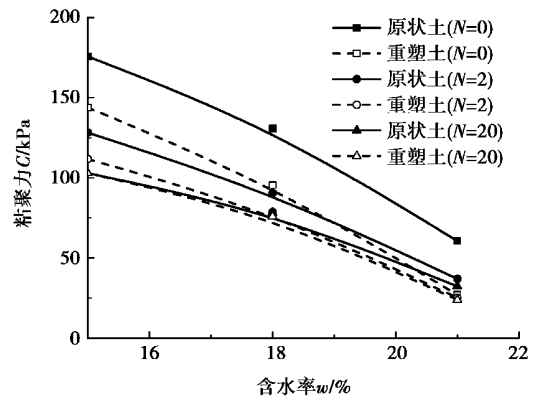


图7 黏聚力随含水量变化规律

Fig. 7 Variation of cohesion with water content

2.4 内摩擦角

图8给出了原状与重塑黄土试样内摩擦角随冻融循环次数变化规律曲线。由图可见,无论原状或重塑黄土试样,随冻融循环次数增加,内摩擦角基本表现出波浪形变化规律特征,因而可近似认为,反

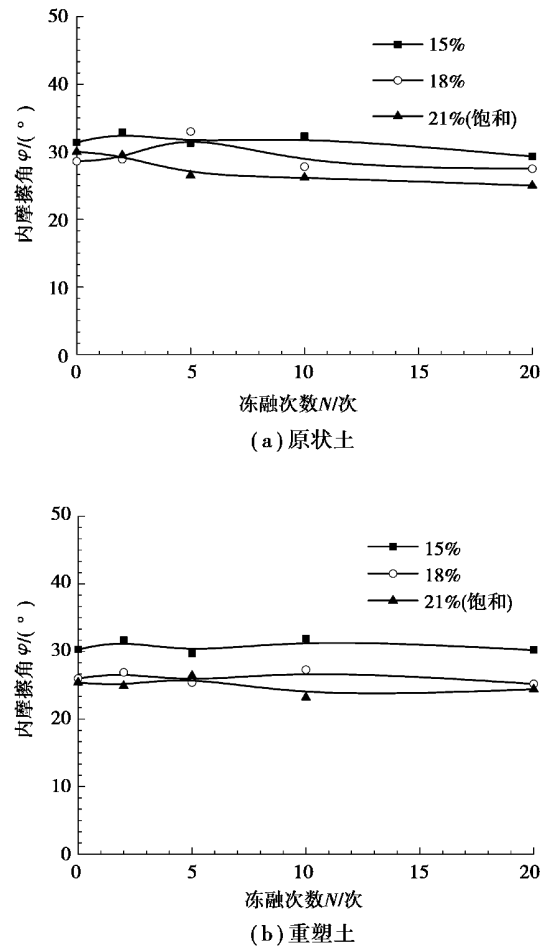


图8 冻融条件下内摩擦角变化规律

Fig. 8 Variation of internal friction angle under freeze-thaw conditions

复冻融循环条件下,黄土试样内摩擦角无规律性变化特征,这主要是因为试样内摩擦角主要由土颗粒接触面积和土颗粒形状等摩擦作用因素所决定,上述因素随冻融循环次数增加无规律性变化特征。

2.5 冻融损伤系数

如前所述,反复冻融循环条件下原状与重塑黄土试样黏聚力表现出显著的劣化特征,冻融作用对内摩擦角无显著影响。因此,本文定义冻融损伤系数 K_c ,用以表征黄土试样冻融过程黏聚力损伤劣化特征,其数学表达式如下:

$$K_c = \frac{C_0 - C_N}{C_0} \tag{1}$$

式中: K_c 的取值范围为 0~1,其值越大,表示劣化幅值越大; C_0 表示试样初始黏聚力; C_N 表示经历 N 次冻融循环后的黏聚力。

图 9 给出冻融条件下原状与重塑黄土试样黏聚力冻融损伤系数变化规律。从图中可以看出,反复冻融循环条件下,原状与重塑黄土黏聚力冻融损伤系数都表现出逐渐趋于稳定的指数增加特征,这与前述黏聚力随冻融次数指数减小的规律特征是相符的(图 6)。此外,相比重塑黄土,原状黄土试样黏聚力冻融损伤系数更大,即反复冻融循环条件下原状黄土黏聚力损伤幅度和速率高于重塑黄土,这与前述原状黄土黏聚力随冻融次数衰减幅度和速率高于重塑黄土的变化规律是一致的(图 6)。

3 结论

基于微宏观试验技术手段,对比分析了冻融条件下原状与重塑黄土抗剪强度劣化机理及规律,得到如下结论:

(1)反复冻融循环条件下,孔隙内部冰晶生长的冻胀力导致黄土体结构发生显著变化。黄土试样大颗粒集合体数量随冻融次数增加显著减少,土颗粒胶结连结特性变差。

(2)反复冻融循环条件下,原状与重塑黄土试样表观结构均产生劣化现象,原状黄土表观结构破坏程度较重塑黄土更为严重,产生冻融剥落现象。

(3)冻融条件下,原状与重塑黄土黏聚力都表现出指数衰减特征;相同条件下,原状黄土的黏聚力高于重塑黄土,但随冻融次数增加,两者差异逐渐减小;冻融过程中,原状黄土黏聚力衰减幅值及速率高于重塑黄土。冻融条件下原状与重塑黄土黏聚力随含水量增加呈线性减小特征,反复冻融后黏聚力随含水量的变化规律分布特征交叉且近似

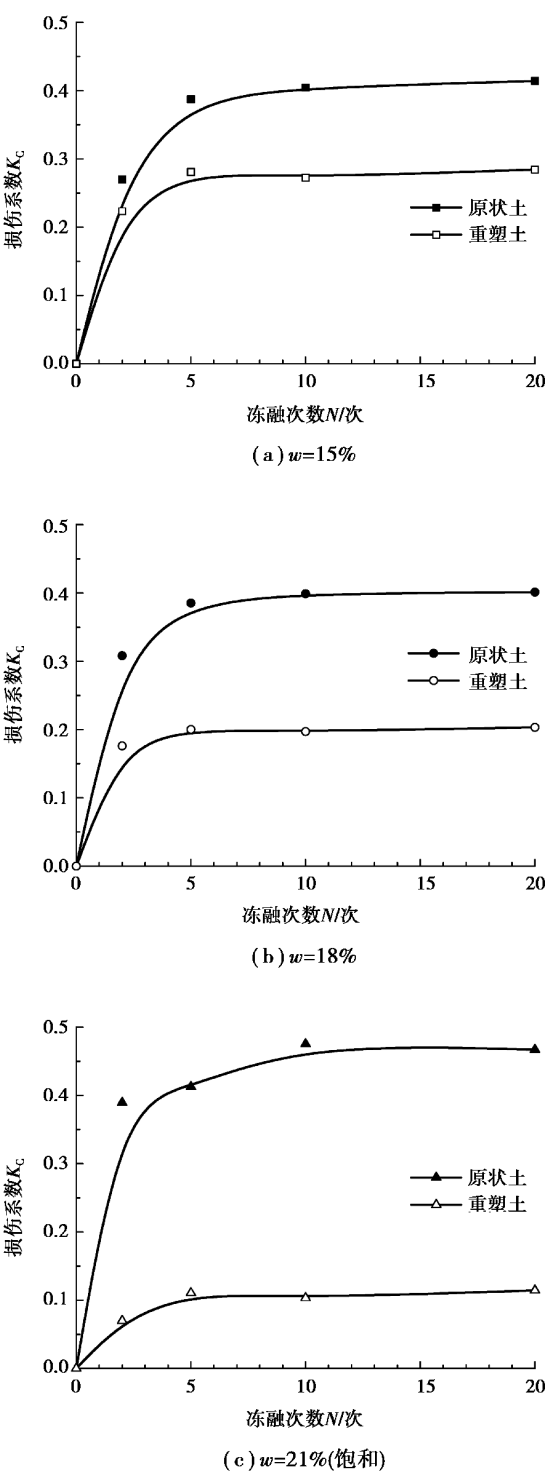


图 9 损伤系数 K_c 随冻融次数变化规律曲线

Fig. 9 Variation of damage coefficient with freezing-thawing times

重叠。冻融条件下原状与重塑黄土内摩擦角均表现出波浪形变化特征。

(4) 随冻融次数增加,原状与重塑黄土黏聚力冻融损伤系数都表现出指数增加特征;原状黄土黏聚力冻融损伤系数高于重塑黄土,即冻融过程原状

黄土粘聚强度损伤幅度和速率高于重塑黄土。

参考文献 (References)

- [1] 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 Agriculture and Forestry University, 2010. (in Chinese))
- [2] 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. (in Chinese))
- [3] Viklander P. Permeability and volume changes in till due to cyclic freeze/thaw[J]. Canadian Geotechnical journal, 1998, 35(3): 471-477.
- [4] 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. (in Chinese))
- [5] Chuvilin Y M, Yazynin O M. Frozen soil macro-and microtexture formation [A]// Proceedings of 5th International Conference on Permafrost. Trondheim[C]. Norway: Tapir Publishers, 1988: 320-323.
- [6] Bondarenko G I, Sadovsky A V. Water content effect of the thawing clay soils on shear strength [A]// Proceedings of the 6th International Symposium on Ground Freezing[C]. Rotterdam, Netherlands, 1991: 123 -127.
- [7] Yong R N, Boonsinuk P, Yin C W P. Alter nation of soil behavior after cyclic freezing and thawing [A]// Proceedings of 4th International Symposium on Ground Freezing[C]. Rotterdam, Netherlands,1985: 187-195.
- [8] 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. (in Chinese))
- [9] 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. (in Chinese))
- [10] 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. (in Chinese))
- [11] 刘祖典.黄土力学与工程[M].西安:陕西科学技术出版社,1997. (Liu Zudian. Loess mechanics and engineering [M]. Xi'an, Shanxi Science and Technology Press, 1997. (in Chinese))
- [12] 王泉,马巍,张泽,等.冻融循环对黄土二次湿陷特性的影响研究[J].冰川冻土,2013,35(2):376-382. (Wang Quan, Ma Wei, Zhang Ze, et al. Research on the secondary collapse properties of loess under freeze-thaw cycle[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2013, 35(2): 376-382. (in Chinese))
- [13] 李国玉,马巍,穆彦虎,等.冻融循环对压实黄土湿陷变形影响的过程和机制[J].中国公路学报,2011,24(5):1-6. (Li Guoyu, Ma Wei, Mu Yanhu, et al. Process and mechanism of impact of freezing and thawing cycle on collapse deformation of compacted loess[J]. China Journal of Highway and Transport, 2011, 24(5): 1-6. (in Chinese))
- [14] 齐吉琳,马巍.冻融作用对超固结土强度的影响[J].岩土工程学报,2006,28(12):2082-2086. (Qi Jilin, Ma Wei. Influence of freezing-thawing on strength of overconsolidated soils [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, 28(12): 2082-2086. (in Chinese))
- [15] 董晓宏,张爱军,连江波,等.反复冻融下黄土抗剪强度劣化的试验研究[J].冰川冻土,2010,32(4):767-772. (Dong Xiaohong, Zhang Aijun, Lian Jiangbo, et al. Study of shear strength deterioration of loess under repeated freezing-thawing cycles [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2010, 32(4): 767-772. (in Chinese))
- [16] 田俊峰,叶万军,杨更社.含水量及冻融循环对阳曲黄土压缩特性的影响分析[J].地下空间与工程学报,2015,11(4):933-939. (Tian Junfeng, Ye Wanjun, Yang Gengshe. Analysis on influence of moisture content and freeze-thaw cycle on compression characteristics of loess in Yangqu Region, Shanxi Province[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2015, 11(4): 933-939. (in Chinese))
- [17] 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):210-222. (Zhang Hui, Wang Tiehang, Luo Yang. Freezing-thawing strength of unsaturated undisturbed loess[J]. Northwest Agriculture and Forestry University (Natural Science Edition), 2015, 43(4): 210-222. (in Chinese))