

doi:10.11835/j.issn.1674-4764.2016.05.012



原状黄土冻融过程抗剪强度劣化机理试验分析

许健¹, 李诚钰², 王掌权¹, 任建威¹, 袁俊^{3,4}

(1. 西安建筑科技大学 土木工程学院, 西安 710055; 2. 西安市地下铁道有限责任公司, 西安 710018; 3. 中国电力工程顾问集团 西北电力设计院有限公司, 西安 710075; 4. 中国科学院 寒区旱区环境与工程研究所; 冻土工程国家重点实验室, 兰州 730000)

摘 要:通过对西安 Q₃ 原状黄土在封闭系统冻融作用下的电镜扫描和直剪试验, 研究了冻融作用对原状黄土微观结构和强度的影响。试验表明: 冻融过程中原状黄土微观结构发生显著变化, 大颗粒集粒数量明显减少, 小粒径土颗粒所占比重增加, 孔隙面积比增加。进一步基于损伤力学理论, 得到微观结构冻融损伤度随冻融次数增加呈指数增加趋势, 反映出冻融作用一定程度上破坏黄土体的结构强度, 但多次冻融后黄土体结构强度趋于稳定的残余强度。冻融过程土样表面结构发生破坏, 且含水率越高, 土体表面特征破坏越严重。粘聚力随冻融次数增加呈指数衰减趋势, 且含水率越高, 粘聚力衰减幅值和速率越小; 粘聚力随含水率增加表现出线性衰减特征, 且冻融后粘聚力与含水率的变化规律近似重合; 内摩擦角无明显规律性变化。粘聚强度冻融损伤系数随冻融次数增加呈指数增加趋势, 随含水率升高有增大趋势。基于试验数据规律性, 进一步提出了原状黄土粘聚强度劣化模型, 该模型经试验验证可较好描述原状黄土粘聚强度劣化规律。

关键词:原状黄土; 冻融作用; 电镜扫描; 微观结构; 抗剪强度

中图分类号: TU444 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-4764(2016)05-0090-09

Experimental analysis on the mechanism of shear strength deterioration of undisturbed loess during the freeze-thaw process

Xu Jian¹, Li Chengyu², Wang Zhangquan¹, Ren Jianwei¹, Yuan Jun^{3, 4}

(1. School of Civil Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an, 710055, P. R. China; 2. Xi'an Metro Ltd., Xi'an, 710018, P. R. China; 3. Northwest Electric Power Design Institute of Co. Ltd. of China Power Engineering Consulting Group, Xi'an, 710075, P. R. China; 4. Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou, 730000, P. R. China)

Abstract: SEM and direct shear tests were conducted to study the influence of freeze-thaw action on the microstructure and strength of xi'an Q₃ undisturbed loess under the closed system. The experimental

收稿日期: 2016-03-09

基金项目: 国家自然科学基金(51478385, 51208409); 陕西省教育厅专项科研计划(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)

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@lzb. ac. cn.
李诚钰(通信作者), 男, 高级工程师, (E-mail) 597888541@qq. com。

Received: 2016-03-09

Foundation item: Natural Science Foundation of China (No. 51478385, No. 51208409); Special Research Program of Shaanxi Province Education Department (No. 12JK0914); Open Foundation of state key Laboratory of Permafrost Engineering (No. SKLFSE201312); Technology Innovation Research Project of North West Electric Power Design Institute (No. XB1-TM04-2013)

Author brief: Xu Jian (1980-), PhD, associate professor, main research interests: the cold geotechnical engineering, (E-mail) xujian@lzb. ac. cn.
Li Chengyu (corresponding author), senior engineer, (E-mail) 597888541@qq. com.

results showed that the microstructure of loess changes significantly during the freeze-thaw process, with the number of large particles aggregate decreasing, the proportion of small particle size increasing, and the ratio of pore increasing. Based on the damage mechanics theory, the freezing-thawing damage degree versus freezing-thawing times was established. Analysis indicated that the freezing-thawing damage degree exponentially increased with the increase of freezing-thawing times, representing that the structural strength of loess can be destroyed by freezing-thawing. However, the structural strength eventually reached a residual strength value after repeated freezing and thawing. Freezing-thawing made the surface structure of soil destroyed, and had a bigger influence with the increase of water content. The cohesion exponentially decreased with freezing and thawing times increasing, and had a smaller attenuation amplitude and rate with the increase of water content. With the increase of water content, the cohesion linearly decreased, and had an approximately same variation after freezing and thawing. The internal friction angle had no obvious variation during the whole freezing-thawing process. The freezing-thawing damage coefficient of cohesion exponentially increased with the increase of freezing-thawing times, and also increased with water content increasing. A cohesion strength deterioration model was developed based on the laboratory test results, and the model can be used to well describe the strength deterioration regularity by the test verification.

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

黄土是中国分布较为广泛的土类之一,约占国土面积的 6.3%,其中大部分集中在西北与华北等季节冻土区。由于气温周期性波动作用,地表土层常常发生季节性冻融循环^[1]。因此,土坝、堤防、路基、边坡等黄土构筑物在运行期间都不可避免的要经受冻融循环作用^[2](图 1)。冻融循环作为一种特殊的强风化作用,对土的物理力学性质有着强烈影响,是导致黄土劣化的重要因素^[3]。在寒区进行路堑开挖、新削边坡和路基修建等工程活动时,会使土体新近暴露于冻融作用之下,在相关变形计算和稳定性分析中,必须考虑其物理力学性质的变化^[4]。

土体经过冻融后孔隙比减小,但土体的渗透性仍增强。张世民等^[7]以青藏粉质黏土为研究对象,探究了冻融作用对土体水分分布特征的影响。Chuvilin 等^[8]研究发现,土体经过冻融作用之后其抗剪强度有所降低;Bondarenko 等^[9]发现冻融作用前后土的强度变化不大;Yong 等^[10]研究得出,经过冻融作用之后土体的抗剪强度有所增加。宋春霞等^[11]对兰州黄土的试验研究结果表明,冻融作用对不同于容重土体产生强化和弱化双重作用,并由此导致其力学性质发生相应变化。董晓宏等^[12]针对重塑黄土冻融过程强度劣化规律开展了部分研究工作。

冻融循环可以改变土的力学性质,这种影响是通过改变土体微观结构而产生的^[13]。就冻融作用对土体微观结构影响问题,前人开展了针对性基础研究工作。倪万魁等^[14]对不同冻融次数的洛川黄土进行电镜扫描试验,并对试验结果进行了定性描述。穆彦虎等^[15]对经历不同冻融次数的压实重塑黄土进行电镜扫描,探讨其微观结构与宏观性质之间的关系,并揭示冻融循环作用对压实黄土结构影响的过程与机理。赵安平^[16]利用电镜扫描试验得到的结论解释季冻区路基冻胀的微观机理。张英等^[17]基于 SEM 和 MIP 试验,研究了冻融作用对青藏粉质黏土微观结构的影响。

综上所述,由于土的性质,初始状态以及试验条件等差异,冻融作用对土体力学性质影响的研究结论差异很大,有些结论甚至是完全相反的。此外,目



图 1 黄土边坡冻融剥落病害
Fig.1 loess slope spalling hazards
under freezing-thawing cycles

针对冻融作用对土体物理力学性质影响问题,国内外学者做了大量科学研究,积累了丰富科研成果。Viklander^[5]根据冻融对松散土体具有压密作用,对于密实土具有冻胀作用,提出基于冻融作用的残余孔隙比概念。Chamberlain 等^[6]研究发现,尽管

前针对原状黄土冻融过程电镜扫描试验研究相对较少,定量分析并用以解释黄土劣化特性的试验研究更少。基于此,本文以西安 Q_3 原状黄土为研究对象,结合电镜扫描试验和室内剪切试验来研究原状黄土冻融过程抗剪强度劣化机理。

1 试验材料与试样制备

1.1 试验材料

试验所用土样取自陕西省西安市长安区某基坑工程现场,取土深度 5~6 m,属于晚更新世 Q_3 黄土。试验用土的物理特性参数列于表 1,其颗粒级配曲线如图 2 所示。

表 1 试验用土物理特性参数

Table 1 The basic parameters of test loess

比重 G_s	干密度 $\rho_d/$ ($g \cdot cm^{-3}$)	含水量 $w/\%$	液限 $w_L/\%$	塑限 $w_p/\%$	塑性指 数 I_p
2.65	1.70	17.50	33.86	18.65	15.21

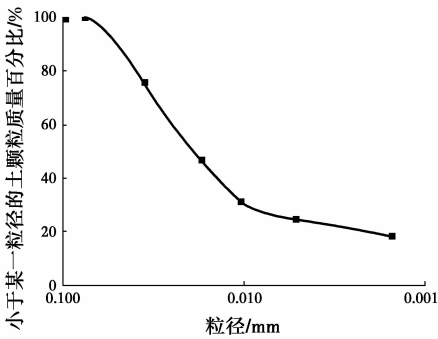


图 2 试验用土颗粒级配曲线

Fig. 2 Grading curve for test loess

1.2 试样制备

取出大块原状土样,将其削制成 7 cm×7 cm×6 cm(长×宽×高)小块土样。称取部分小块土样,对试样进行自然风干减湿或滴水增湿,使其平均含水率分别达到 15%和 18%;然后,把减湿和增湿后的小块土样放入不同保湿缸中,让水分均化不少于 96 h;按照《土工试验方法标准》,将土样削制成直径为 61.8 mm,高度为 20 mm 的环刀样。将剩余部分小块土样先削制成环刀样,然后利用抽气饱和法对环刀样进行饱和。试验含水率与要求含水率之差不大于 0.1%,以保证试验结果离散性较小。

2 试验方案

主要从两个方面研究冻融作用对原状黄土力学性质的影响。一方面,通过电镜扫描试验定量分析

冻融作用后黄土微观结构的劣化规律;另一方面,对经历不同冻融次数的黄土试样进行直剪试验,分析其宏观力学特性的劣化规律。

2.1 冻融试验

利用保鲜膜将制备好的直剪试样包裹,构造一个不补(散)水的密闭环境,随后置于恒温试验箱内进行冻融循环试验。本次冻融试验为封闭系统下的多向快速冻融循环试验,保证冻融时试样水分迁移较少。冻融循环试验方案为:低温-20℃条件下冻结 12 h,高温+20℃条件下融化 12 h;冻融循环试验次数为:0、2、5、10、12、17、20。

冻融循环试验采用杭州雪中炭恒温技术有限公司生产的 XT5402-TC400-R60 型高低温试验箱。仪器恒温范围-60℃~+100℃,恒温波动±0.5℃(图 3)。



图 3 高低温试验箱

Fig. 3 High and low temperature test chamber

2.2 电镜扫描试验

将含水率为 18%的原状黄土削制成 10 mm×10 mm×20 mm(长×宽×高)的长条形样品。将用保鲜膜包裹的长条形样品置于恒温试验箱内,进行冻融循环试验。取出经冻融后的样品并风干,在长条形样品中部刻一圈深约 1.5 mm 的槽,以便扫描时从中间掰开一个较为平整的新鲜断面。利用 Quanta 600 FEG 场发射扫描电镜(图 4)对试样进行微观结构测试。最后,利用图像处理软件对冻融后黄土体骨架颗粒形态、连接方式、孔隙形态及孔隙面积比等微观结构特征进行定量分析。

2.3 直剪试验

试验采用南京土壤仪器厂有限公司生产的 ZJ 型应变控制式四联直剪仪。参照《土工试验方法标准》,对冻融前后土样进行直剪试验,试验时施加垂



图4 Quanta 600 FEG 场发射扫描电镜

Fig. 4 The Quanta 600 FEG Field Emission Scanning Electron Microscope

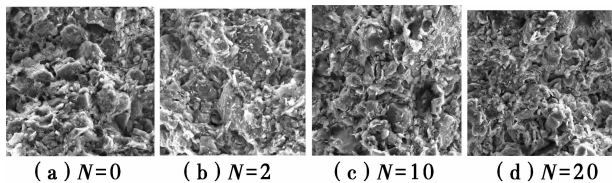
直压力分别为 100、200、300 及 400 kPa。

3 试验结果与分析

3.1 微观结构

土体微观结构可通过颗粒形态(颗粒大小、颗粒形状、表面起伏)、颗粒排列形式、孔隙特征(孔隙大小、孔隙分布情况)、颗粒接触关系等特性来描述。

图 5 给出不同冻融次数下放大倍数为 2 000 倍的微观 SEM 图片。从图中可以看出,冻融前,试验黄土的骨架颗粒以单体颗粒(部分为片状)和胶结而成的集粒为主,且颗粒间排列较为紧密。冻融过程中由于试样内部冰晶生长及冷生结构形成导致土样中孔隙体积增加,挤压黄土颗粒,使黄土体微观结构发生显著变化。多次冻融后,原状黄土大颗粒集粒数量明显减少,土体胶结性变差,颗粒间变的较为松散,小孔隙也随之增多,并且有潜在裂隙发展。

图5 不同冻融次数下 SEM($\times 2\,000$) 图像Fig. 5 SEM($\times 2\,000$) images of loess after different freeze-thaw cycles

土体微观结构量化指标较多,本文选取土粒等效直径、走向、圆形度和孔隙面积比 4 个典型指标,利用图像处理软件对不同冻融次数下放大倍数为 2 000 倍的微观 SEM 图片分别进行统计分析。土粒等效直径为与土颗粒面积相等的等效圆的直径;走向表示土颗粒最长弦所对应的方位角,取值范围为 $0^\circ \sim 180^\circ$;圆形度描述土颗粒形状接近圆形的程度;

孔隙面积比表示同一截面孔隙面积与土颗粒面积的比值。上述 4 个指标中的土颗粒走向是几何变量,无具体计算公式,其他指标的具体计算为

等效直径 d

$$d = (4S/\pi)^{1/2} \quad (1)$$

式中: S 为土颗粒面积。

圆形度 R

$$R = 4\pi S/L^2 \quad (2)$$

式中: S 为土颗粒面积; L 为土颗粒的周长; R 的取值范围为 $0 \sim 1$, R 值越大,则区域越接近标准圆。

孔隙面积比 λ

$$\lambda = A_v/A_s \quad (3)$$

式中: A_v 为统计区域内孔隙所占面积; A_s 为统计区域内土颗粒所占面积。

图 6(a) 给出土粒等效直径分析曲线图。由图可见,冻融前后粒径的总体分布趋势发生明显变化,随着冻融次数增加,较小粒径颗粒所占比例明显增多。图 6(b)、(c) 分别为土颗粒圆形度统计分析图和走向统计分析图。从图中可以看出,不同冻融次数作用后土颗粒圆形度分布曲线和颗粒走向分布曲线均出现交叉现象,说明冻融作用对原状黄土颗粒形状和走向影响不大。分析其原因,冻融作用主要表现为土体内部冰晶生长及冷生结构形成挤压黄土颗粒,使土体孔隙体积增加,胶结性变差,而对土颗粒本身的形状和走向并无明显影响。冻融后孔隙所占面积比变化规律如图 6(d) 所示。由图可见,冻融后孔隙面积比有增大趋势,反映出冻融作用一定程度上破坏原状黄土体的结构强度,使土体变疏松。

基于连续介质损伤力学概念,材料劣化的主要机制是缺陷导致有效承载面积的减少,由此提出连续度 φ 的概念。

$$\varphi = \tilde{A}/A \quad (4)$$

式中: A 为冻融前有效承载面积; \tilde{A} 为冻融损伤后有效承载面积。

基于连续度 φ 的概念,引入连续度 φ 的一个互补参量即损伤度 D ^[18]。

$$D = 1 - \varphi \quad (5)$$

式中: D 为标量, $D=0$ 为无损状态, $D=1$ 为理论上的极限冻融损伤状态,即完全冻融损伤。

基于前述扫描电镜冻融后孔隙面积比的概念,损伤度 D 可进一步表示为

$$D = \frac{\lambda - \lambda_0}{1 + \lambda} \quad (6)$$

式中： λ_0 表示某一截面冻融前孔隙面积比； λ 表示相同截面冻融损伤后土体孔隙面积比。

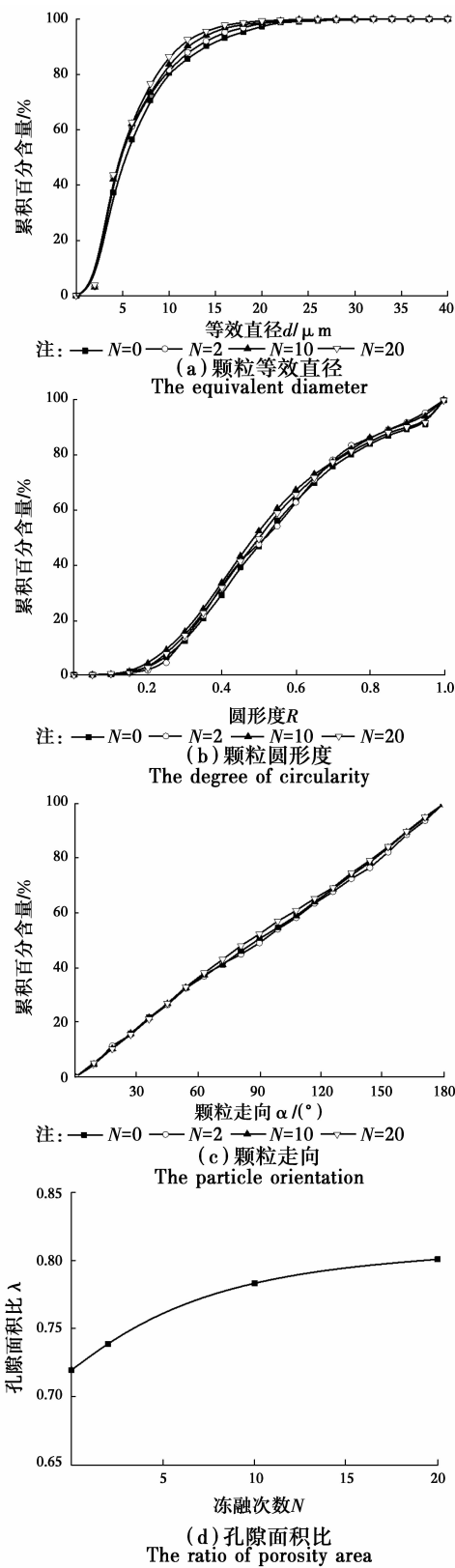


图 6 电镜扫描测试分析图
Fig. 6 Scanning analysis after different freeze-thaw cycles

依据式(6),结合图 6(d)冻融后孔隙面积比试验数据,可以得到损伤度和冻融次数之间的关系曲线,如图 7 所示。由图 7 可见,随冻融次数增加,冻融损伤度有显著增大趋势,但增幅逐渐减小,最终趋向于一个稳定数值。冻融损伤度 D 与冻融次数 N 之间的关系可用式(7)所示指数函数进行拟合分析。

$$D = (48.85 - 48.93e^{-0.131N}) \times 10^{-3} \quad (7)$$

冻融损伤度随冻融次数的变化规律反映出冻融作用一定程度上破坏原状黄土体的结构强度,使土体变疏松,但多次冻融后黄土体的结构强度趋于稳定的残余强度。

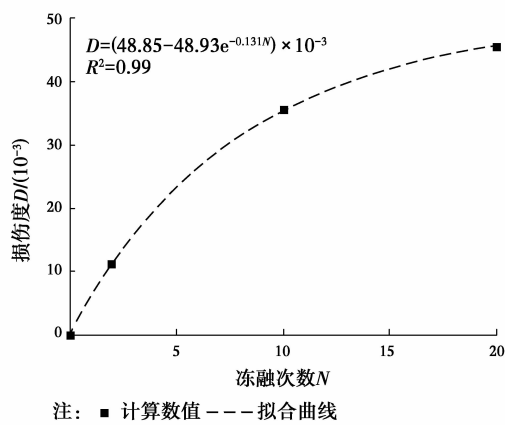


图 7 冻融损伤度变化曲线
Fig. 7 The variation of freezing-thawing damage degree

3.2 试样表面特征

冻融循环作为一种强风化作用,对黄土体具有强烈劣化作用。在黄土冻融试验过程中,笔者观察到土样表面结构特征有一定变化。图 8 所示为饱和(21%)土样冻融过程表面特征变化规律。由图可见,冻融前原状黄土试样表面可以观察到其天然大孔隙特征;冻融 5 次后,原状黄土试样表面结构特征发生变化,表层薄弱部位出现微裂缝;冻融 12 次后,原状黄土试样表面局部出现片状剥落现象,裂缝扩展且开度增加;冻融 17 次后,原状黄土表层冻融剥落破坏呈稳定状态。

图 9 给出非饱和试样冻融过程表面特征变化规律。由图可见,冻融前后,含水率为 15% 和 18% 试样表面结构特征没有明显变化。对比图 8 不难发现,原状黄土试样表面结构破坏程度与含水率关系密切。含水率较高时,土样上部冻融变形和形态破

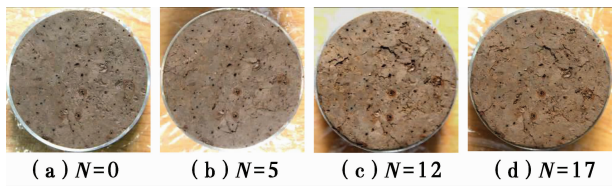


图 8 饱和试样(21%)冻融过程表面特征变化规律
Fig. 8 The surface feature of saturated specimen under freezing-thawing cycles

坏严重,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,因而试样表面结构破坏严重。

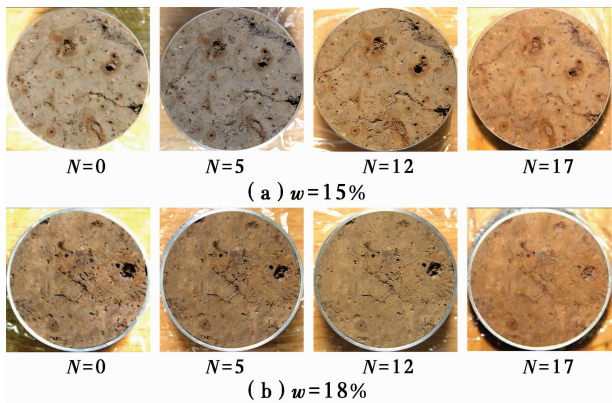


图 9 非饱和试样冻融过程表面特征变化规律
Fig. 9 The surface feature of unsaturated specimen under freezing-thawing cycles

3.3 粘聚力

3.3.1 冻融循环次数对粘聚力的影响 图 10 所示为粘聚力与冻融次数变化规律曲线。从图中可以看出,粘聚力随冻融次数增加逐渐减小,但降低幅度逐渐减小,最终维持在一个稳定数值,呈指数衰减趋势。分析其原因,主要是由于土颗粒周围水膜在低温下冻结,孔隙水结晶对土颗粒产生挤压作用力,破坏颗粒间联结作用,导致土体结构和强度逐渐弱化,粘聚力降低。此外,基于前述黄土体微观结构特征分析,冻融损伤度随冻融次数增加呈指数增加趋势(图 7),亦即多次冻融后黄土体结构强度趋于稳定的残余强度,因而粘聚力随冻融次数增加趋于一个稳定数值。从图中还可以看出,随着含水率增大,粘聚力劣化幅值和速率有减小趋势。这是由于含水率较大时,原状黄土体初始结构强度很低,因而冻融过程粘聚力衰减的绝对幅值和速率较小。

3.3.2 含水率对粘聚力的影响 图 11 给出粘聚力与含水率变化关系曲线。由图可见,随着含水率增加,粘聚力表现出相似的变化规律,都呈现出线性衰

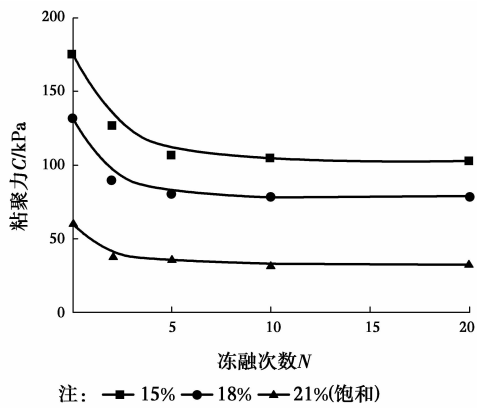


图 10 粘聚力与冻融次数关系曲线
Fig. 10 The relationship between cohesion and freeze-thaw cycles

减特征。分析其原因,含水率增加使得土颗粒之间结合水膜增厚,导致黄土体粘聚力降低。从图中还可以看出,由于冻融作用对黄土体结构强度造成损伤,随着冻融过程进行,土体强度趋于一个稳定的冻融残余强度数值(图 10),因而冻融后粘聚力与含水率的变化曲线近似重合。

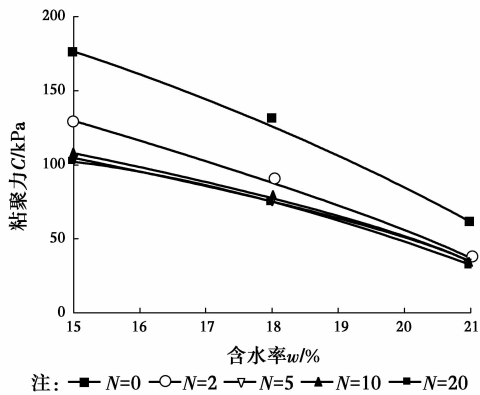


图 11 粘聚力与含水率关系曲线
Fig. 11 The relationship between cohesion and water content

3.4 内摩擦角

图 12 所示为黄土内摩擦角随冻融次数变化规律曲线。从图中可以看出,含水率为 15% 和 18% 试样内摩擦角随冻融次数变化呈现出波浪形变化趋势,且波动范围较小,波动幅度在 5° 以内,无明显规律性变化;饱和试样冻融过程中内摩擦角呈现出缓慢减小趋势,但衰减幅度不大,逐渐趋于一个稳定数值。

综上所述,可以认为内摩擦角随冻融次数的变

化规律并不明显。分析其原因,主要是因为影响黄土体内摩擦强度的主要因素是黄土颗粒之间的接触面积和土颗粒形状,而冻融作用对以上因素并无明显影响。

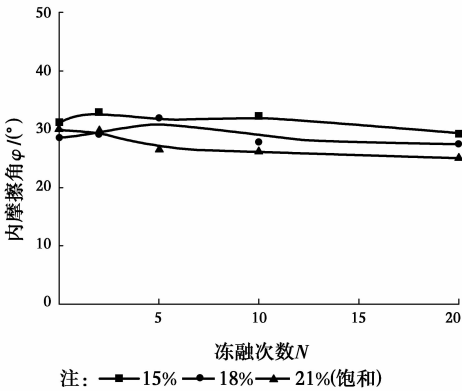


图 12 内摩擦角与冻融次数关系曲线

Fig. 12 The relationship between internal friction angle and freezing-thawing times

3.5 粘聚强度冻融损伤系数

由前述试验研究结果,冻融后原状黄土体粘聚力衰减规律比较明显,而内摩擦角与冻融次数并无明显变化规律。基于此,为进一步分析冻融过程粘聚强度劣化规律,从宏观角度定义粘聚强度 C 值冻融损伤系数 K_C 为

$$K_C = \frac{C_0 - C_N}{C_0} \tag{8}$$

式中: K_C 为标量, $K_C=0$ 为无损状态, $K_C=1$ 为完全冻融损伤状态; C_0 表示未冻融试样的粘聚强度值; C_N 表示 N 次冻融后试样的粘聚强度值。

原状黄土粘聚强度冻融损伤系数与冻融次数变化规律曲线如图 13 所示。由图可见,粘聚强度冻融损伤系数随冻融次数增加逐渐增大,但增幅逐渐减小,呈指数增加趋势,这与前述土体微观结构冻融损伤度的变化规律是一致的(图 7)。从图中还可以看出,随着含水率增大,粘聚强度冻融损伤系数有增大趋势,这表明含水率较高时粘聚强度损伤幅度和速率较大。分析其原因,随着含水率升高,孔隙水冻结成冰及冷生结构形成的冻结劈裂作用增强,对土颗粒联结破坏作用增大。

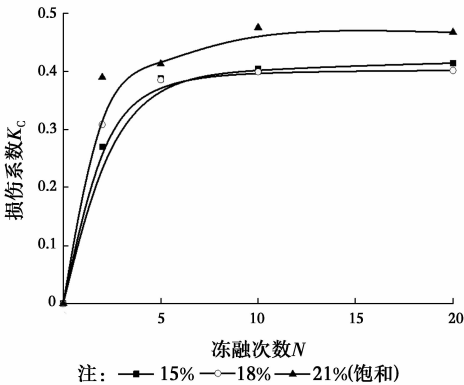


图 13 粘聚强度冻融损伤系数与冻融次数关系曲线
Fig. 13 The relationship between damage coefficient and freezing-thawing times

3.6 粘聚强度劣化模型

基于前述原状黄土体粘聚强度冻融过程变化规律,下文对粘聚强度进行多变量拟合分析,给出其劣化表达式。

试验研究结果发现,粘聚强度与冻融次数符合指数衰减关系,可用式(9)所示指数函数进行拟合分析。

$$C = ae^{bN} + c \tag{9}$$

式中: C 为粘聚力, kPa ; N 为冻融次数; a 、 b 、 c 为拟合参数。拟合结果见表 2。

表 2 拟合参数 1

含水率/%	参数 1			
	a	b	c	R^2
15	72.28	-0.539	103.37	0.999
18	52.17	-0.734	78.61	0.999
21(饱和)	27.53	-0.926	33.04	0.987

进一步考虑含水率的影响,以表 2 中的 a 、 b 、 c 为已知值,对其进行拟合分析。分析发现,对参数 a 、 b 和 c 进行线性拟合能取得较好结果。拟合公式如式(10)~(12)所示,拟合结果见表 3。

$$a = a_1\omega + a_2 \tag{10}$$

$$b = b_1\omega + b_2 \tag{11}$$

$$c = c_1\omega + c_2 \tag{12}$$

表 3 拟合参数 2

a_1	a_2	R_a^2	b_1	b_2	R_b^2	c_1	c_2	R_c^2
-754.8	184.9	0.997	-6.45	0.43	0.999	-1172.2	282.7	0.972

注: R_a^2 、 R_b^2 、 R_c^2 分别代表拟合参数 a 、 b 、 c 的相关系数。

将式(10)~(12)代入式(9),可得原状黄土粘聚强度与含水率和冻融循环次数的关系表达式。

$$C = (-754.8w + 184.9)e^{(-6.45w + 0.43)N} - 172.2w + 282.7 \tag{13}$$

利用独立试验数据(试样含水率 19.5 %)对模型进行验证,如图 14 所示。从图中可以看出,模型试验值和计算值相差较小,说明式(13)能够较好的描述西安 Q₃ 原状黄土的强度劣化特性。

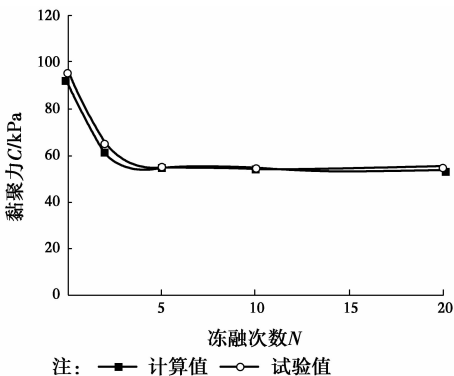


图 14 模型验证
Fig. 14 Model validation

4 结 论

基于宏观和微观两个方面分析原状黄土冻融过程抗剪强度劣化机理,得出如下结论:

- 1)冻融过程中原状黄土微观结构发生显著变化,主要表现在大颗粒集粒数量明显减少,小粒径土颗粒所占比重增加;孔隙面积比增加。但冻融作用对黄土颗粒形状和颗粒走向影响不大。
- 2)原状黄土微观结构冻融损伤度随冻融次数增加呈指数增加趋势,反映出冻融作用一定程度上破坏黄土体的结构强度,但多次冻融后黄土体结构强度趋于稳定的残余强度。
- 3)冻融过程中原状黄土表面结构发生破坏,其破坏程度与含水率关系密切,含水率较高时,土样上部冻融变形和形态破坏严重。
- 4)原状黄土粘聚力随冻融次数增加呈指数衰减趋势,且含水率越高,粘聚力衰减幅值和速率越小;粘聚力随含水率增加表现出线性衰减特征,且冻融后粘聚力与含水率的变化规律近似重合;内摩擦角无明显规律性变化。
- 5)原状黄土粘聚强度冻融损伤系数随冻融次数增加呈指数增加趋势;随含水率增大,粘聚强度冻融损伤系数有增大趋势,亦即含水率较高时粘聚强度损伤幅度和速率较大。

6)基于试验数据规律性,进一步得到了原状黄土粘聚强度劣化模型表达式。试验验证,该模型可较好描述原状黄土粘聚强度劣化规律。

参考文献:

[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 L, ZHAO G Z, HU W, 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. (in Chinese)

[2] 连江波. 冻融循环作用下黄土物理性质变化规律[D]. 陕西 杨凌: 西北农林科技大学, 2010.
LIAN J B. Study on the variation of physical properties of loess under freezing-thawing cycles [D]. Yangling, Shaanxi: Northwest A & F University, 2010. (in Chinese)

[3] 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 W J, YANG G S, PENG J B, 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)

[4] 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 Z J. 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)

[5] VIKLANDER P. Permeability and volume changes in till due to cyclic freeze/thaw [J]. Canadian Geotechnical Journal, 1998, 35(3): 471-477.

[6] CHAMBERLAIN E J, GOW A J. Effect of freezing and thawing on the permeability and structure of soils [J]. Engineering Geology, 1979, 13(14): 73-92.

[7] 张世民,李双洋. 青藏粉质黏土冻融循环试验研究[J]. 冰川冻土, 2012, 34(3): 625-631.
ZHANG S M, LI S Y. Experimental study of the Tibetan silty clay under freeze-thaw cycles [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2012, 34(3): 625-631. (in Chinese)

[8] CHUVILIN Y M, Yazynin O M. Frozen soil macro- and microtexture formation [C]//Proceedings of 5th International Conference on Permafrost. Trondheim,

- Norway: Tapir Publishers, 1988: 320-323.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] 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 C X, QI J L, LIU F Y. Influence of freeze-thaw on mechanical properties of Lanzhou loess [J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, 29(4): 1077-1086. (in Chinese)
- [12] 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.
- [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(Sup2): 2690-2694.
- QI J L, ZHANG J M, ZHU Y L. Influence of Freezing-thawing on soil structure and its soil mechanics significance [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22(Sup2): 2690-2694. (in Chinese)
- [14] 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)
- [15] 穆彦虎, 马巍, 李国玉, 等. 冻融作用对压实黄土结构影响的微观定量研究[J]. 岩土工程学报, 2011, 33(12): 1919-1925.
- MU Y H, MA W, LI G Y, et al. Quantitative analysis of impacts of freeze-thaw cycles upon microstructure of compacted loess [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, 33(12): 1919-1925. (in Chinese)
- [16] 赵安平. 季冻区路基冻胀的微观机理研究[D]. 长春: 吉林大学, 2008.
- ZHAO A P. A study on the mechanism of microstructure of frost heaving in subgrade soil in seasonal frost zone [D]. Changchun: Jilin University, 2008. (in Chinese)
- [17] 张英, 祁慧, 杨成松. 基于 SEM 和 MIP 的冻融循环对粉质黏土强度影响机制研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(Sup1): 3597-3603.
- ZHANG Y, BING H, YANG C S. Influences of freeze-thaw cycles on mechanical porperties of silty clay based on SEM and MIP test [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, 34(sup1): 3597-3603. (in Chinese)
- [18] 许玉娟, 周科平, 李杰林, 等. 冻融岩石核磁共振检测及冻融损伤机制分析[J]. 岩土力学, 2012, 33(10): 3001-3005.
- XU Y J, ZHOU K P, LI J L, et al. Study of rock NMR experiment and damage mechanism analysis under freeze-thaw condition [J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, 33(10): 3001-3005. (in Chinese)

(编辑 王秀玲)