

网络出版时间:2017-06-06 13:46

DOI:10.13207/j.cnki.jnwafu.2017.07.017

网络出版地址:http://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1390.S.20170606.1346.034.html

冻融条件下重塑黄土渗透规律试验分析

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】【目的】研究冻融作用对重塑黄土渗透特性的影响,为季节冻土区黄土边坡、道路及堤坝等工程的设计和施工提供参考。【方法】以 Q_3 黄土为研究对象,在封闭系统下进行快速冻融循环试验,每个循环为一 $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 冻结 12 h , $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 融化 12 h ,冻融循环次数分别为 $0, 2, 4, 5, 10, 14, 17$ 和 20 。将干密度为 1.7 g/cm^3 、含水率为 18.0% 的重塑黄土样制成长 $\times$ 宽 $\times$ 高为 $1\text{ cm} \times 1\text{ cm} \times 2\text{ cm}$ 的长条形样品,然后置于高低温试验箱进行冻融循环处理;将冻融后的样品风干后进行扫描电镜观察,并定量分析重塑黄土的骨架颗粒形态、连接方式、孔隙形态及孔隙面积比等微观结构特征。同时制作含水率分别为 $15.0\%, 18.0\%, 21.0\%, 28.0\%$ 及饱和含水率的土样,分 5 层压制成干密度分别为 $1.4, 1.5, 1.6$ 和 1.7 g/cm^3 的黄土三轴样,然后置于高低温试验箱进行冻融循环试验;最后在围压分别为 $100, 200, 300$ 和 400 kPa 条件下进行三轴黄土渗透试验,分析围压、含水率、干密度和冻融循环次数对黄土渗透特性的影响。【结果】冻融作用对土体表面结构破坏严重,有横向和纵向裂缝。冻融过程中,重塑黄土土体微观结构发生了明显变化,集团粒数量明显减少,土粒胶结性变差;随着冻融循环次数的增加,土样的孔隙面积比呈指数增大趋势,冻融循环 20 次后孔隙面积比由 0.76 增加到 0.79 。渗透系数随围压的增大表现出指数衰减特征,且围压为 400 kPa 时渗透系数差异较小;随着干密度和初始含水率的增加,渗透系数表现出抛物线变化特征,且干密度和含水率分别为 1.6 g/cm^3 和 21.0% 左右时,渗透系数较大;渗透系数随冻融循环次数增加表现出指数增大特征,冻融循环 20 次后渗透系数增加 $1\sim 2$ 个量级。【结论】经历冻融循环后,重塑黄土土体的结构强度遭受一定程度破坏,渗透性增强,冻融循环 20 次后黄土土体渗透特性趋于稳定;冻融过程中产生的裂缝是诱发黄土土体渗透性增强的主要原因;冻融过程中重塑黄土渗透特性与土的初始状态、冻融循环次数及围压密切相关。

【关键词】 重塑黄土;冻融循环;扫描电镜试验;微观结构;渗透系数

【中图分类号】 TU445

【文献标志码】 A

【文章编号】 1671-9387(2017)07-0134-09

Experimental analysis on permeability law of remolded loess under freezing-thawing condition

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

(1 School of Civil Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an, Shaanxi 710055, China;

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

3 State Key Laboratory of Frozen Soil Engineering, Northwest Institute of Eco-Environment and Resources,

Chinese Academy of Sciences, Lanzhou, Gansu 730000, China)

Abstract: 【Objective】The permeability of remolded loess during freezing-thawing process was investigated to provide reference for design and construction of loess slope, road and dam in seasonal frozen ground. 【Method】The impacts of freeze-thaw cycles on remolded loess (Q_3) were studied by rapid freezing-thawing test under closed system. The soil samples placed in the F-T chamber were subjected to $0, 2, 4,$

〔收稿日期〕 2016-05-20

〔基金项目〕 国家自然科学基金项目(51478385, 51208409);冻土工程国家重点实验室开放基金项目(SKLFSE201312)

〔作者简介〕 许 健(1980—),男,山东泰安人,副教授,博士,主要从事寒区岩土工程研究。E-mail: xujian@lzb.ac.cn

5,10,14,17 and 20 freezing-thawing times with constant temperature of $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ for 12 h and $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ for another 12 h. In order to quantitatively observe and analyze the microstructure of remolded loess under freezing-thawing cycles including particle morphology, connection mode, pore morphology and porous area ratio, the scanning electron microscope (SEM) test was conducted on dry samples with dry density, water content and size of 1.7 g/cm^3 , 18.0% and $1\text{ cm}\times 1\text{ cm}\times 2\text{ cm}$, respectively. Meanwhile, triaxial specimen with water contents of 15.0% , 18.0% , 21.0% , 28.0% and saturated water content were compacted to targeted dry densities of 1.4 , 1.5 , 1.6 and 1.7 g/cm^3 in five layers. The triaxial permeability test was also conducted with confining pressures of 100, 200 300 and 400 kPa to analyze the influence of confining pressure, water content, dry density and freezing-thawing times. 【Result】Freezing-thawing action destroyed the surface structure strength of soil greatly and transverse and longitudinal crack appeared on the surface. The microstructure of remolded loess changed significantly under freezing-thawing condition. The number of aggregate decreased obviously and the soil cementing property was weakened. Image processing software showed that the void area ratio exponentially increased from 0.76 to 0.79 with the increase of freezing-thawing time. The permeability coefficient of remolded loess exponentially decreased with the increase of confining pressure, and the difference under high confining pressure of 400 kPa was small. The permeability coefficient followed parabola law with the increase of dry density and water content and the permeability coefficient was greater with the dry density and water content of 1.6 g/cm^3 and 21.0% , respectively. With the increase of freezing-thawing time, the permeability coefficient exponentially increased by 1—2 order of magnitude after 20 freeze-thaw cycles. 【Conclusion】Freezing-thawing action can destroy structural strength of loess and enhance permeability of remolded loess. However, the permeability of remolded loess reached a stable state after 20 freezing-thawing times. Cracks caused by freezing-thawing action enhanced the permeability. The effect of freezing-thawing on loess permeability was closely related to initial condition of soil, freezing-thawing times, and confining pressure.

Key words: remolded loess; freezing and thawing cycle; SEM test; microstructure; permeability coefficient

渗透性是黄土工程力学特性的重要组成部分,而渗透系数是反映黄土渗透性的最重要参数,在黄土边坡、地基等工程设计和施工中具有重要的指导意义^[1-5]。梁燕等^[6]以 Q_3 原状黄土为对象,研究了黄土渗透性的各向异性规律及其机制。安鹏等^[7]用稀乙酸溶液作为渗透液加速劣化,通过长时间的常规渗透试验和不同围压下的三轴渗透试验,测量了渗透系数随时间的变化过程,探讨了重塑饱和黄土在长期渗流条件下的劣化机制。王红等^[8]利用瞬态剖面法测定重塑黄土试样的非饱和渗透系数,研究了不同饱和度下黄土的渗透特性。

但我国黄土高原地区处于季节冻土区,冻融循环作用对黄土工程性质影响显著。前人研究表明,冻融作用是导致黄土构筑物工程性质劣化的重要因素之一^[9]。冻融作用强烈改变了土体的结构性^[10-11],使土体物理力学性质^[12-13]发生了很大变化,进而导致地基发生冻胀和融沉等病害。冻融过程土体渗透规律的研究成果表明,经历冻融循环后渗透

系数会变动 1~2 个数量级^[14-15]。连江波等^[16]、肖东辉等^[17]研究了冻融作用对黄土土体孔隙比及渗透特性的影响规律。吕擎峰等^[18]研究了冻融过程中改性黄土的微观结构和渗透特性等物理力学指标的变化。穆彦虎等^[19]对冻融作用下压实黄土结构进行了定量分析,表明冻融作用后土颗粒之间的原有结构被破坏而形成新的结构,渗透性亦有所增强。邓友生等^[20]分析了非饱和黄土与饱和冻融黄土渗透系数的变化规律。但综观现有研究,针对冻融过程中黄土土体三轴渗透规律的研究成果还较少且不够系统深入。

基于此,本试验以西安 Q_3 重塑黄土为研究对象,基于冻融条件下的电镜扫描观测和三轴固结渗透试验,研究了冻融作用对重塑黄土渗透特性的影响,揭示冻融条件下重塑黄土渗透性的变化机理,以期为季节性冻土地区黄土边坡、道路及堤坝等工程的设计和施工提供参考。

1 材料与方法

1.1 供试黄土

试验黄土取自西安市航天城某基坑工程现场,属晚更新世 Q_3 黄土,土质比较均匀,取土深度为 5~6 m。基本物理参数:颗粒比重为 2.65,干密度(ρ_d)为 1.7 g/cm³,含水率(ω)17.5%,液限33.86%,塑限18.65%。其粒径级配曲线见图 1。

1.2 样品制备

将所取土样风干碾碎后过孔径 2 mm 筛,并放入干燥器中备用。然后称取足量蒸馏水,制作不同干密度(1.4, 1.5, 1.6, 1.7 g/cm³)及含水率(15.0%, 18.0%, 21.0%, 28.0%与饱和含水率)的土样。为了使土样的含水率比较均匀,将配制的土样在保湿缸中放置 24 h。根据试样的干密度称取足够湿土,分 5 层压制成直径为 39.1 mm、高度为 80 mm 的三轴样。在试样制备过程中,要求试样实际干

密度与要求干密度之差小于或等于 0.01 g/cm³,实际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。重塑黄土试样种类具体如表 1 所示。

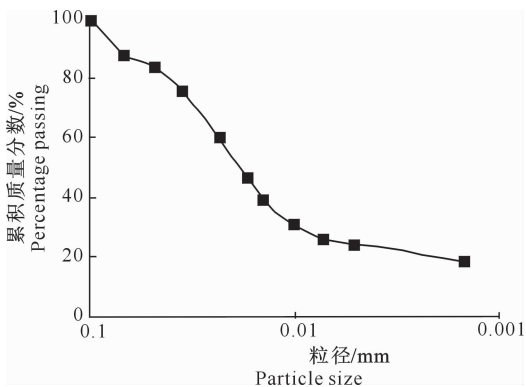


图 1 试验用黄土颗粒粒径级配曲线
Fig. 1 Grain size distribution of test soil

表 1 试验用黄土土样的含水率和干密度

Table 1 Water content and dry density of test loess

干密度/(g·cm ⁻³) Dry density	含水率 1/% Water content 1	含水率 2/% Water content 2	含水率 3/% Water content 3	含水率 4/% Water content 4	饱和含水率/% Saturated water content
1.4	15.0	18.0	21.0	28.0	33.6
1.5	15.0	18.0	21.0	—	28.9
1.6	15.0	18.0	21.0	—	24.7
1.7	15.0	18.0	—	—	21.0

注:表中符号“—”表示不存在此种试样。
Note: Symbol “—” indicates no sample.

1.3 试验方法

1.3.1 冻融循环试验 将制备好的试样用保鲜膜包裹以保持含水率不变,然后将土样放入可控式高低温试验箱进行冻融循环试验。本试验为封闭系统下快速冻融循环试验,可保证冻结时土样内部水分向表面迁移较少。单次冻融循环时间设置为 24 h,其中-20℃冻结 12 h,20℃融化 12 h;冻融循环次数(N)分别为 0, 2, 4, 5, 10, 14, 17 和 20。

1.3.2 扫描电镜试验 将干密度为 1.7 g/cm³、含水率为 18.0%的重塑黄土试样加工制成长×宽×高为 1 cm×1 cm×2 cm 的长条形样品,然后将其置于高低温试验箱进行冻融循环试验。取出经历冻融循环后的样品风干,并利用扫描电镜对试样进行微结构测试与分析。最后,对得到的 SEM 图像,进行冻融条件下土颗粒骨架形态及连接方式、土颗粒大小、孔隙形态及面积比等微观结构指标的量化分析。

本研究选取土颗粒等效直径、圆形度、走向和孔隙面积比 4 个微结构指标,基于图像处理软件对冻融过程 SEM 图像进行量化统计分析。其中土颗粒

等效直径定义为与土颗粒截面面积相等的等效圆直径;圆形度表示土颗粒平面几何形状与圆形的接近程度;走向描述土颗粒最长弦所指示方位角度;孔隙面积比表示孔隙面积与土颗粒面积比值。土颗粒走向是几何参量,无具体表达式,其他指标的计算公式如下。

1) 土颗粒等效直径(D)。

$$D=(4A/\pi)^{1/2}。 \tag{1}$$

式中: A 为土颗粒截面面积。

2) 土颗粒圆形度(C)。

$$C=4\pi A/L^2。 \tag{2}$$

式中: L 为土颗粒截面周长。 C 的数值区间为 0~1, C 值越大,表示区域越接近标准圆。

3) 孔隙面积比(m)。

$$m=A_n/A_s。 \tag{3}$$

式中: A_n 为截面统计区域内孔隙面积, A_s 为截面统计区域内土颗粒面积。

1.3.3 三轴固结渗透试验 将冻融后试样真空饱和后安装在三轴渗透仪上,分别施加不同围压(100,

200,300 和 400 kPa)进行三轴固结渗透试验。试验采用 GDS 三轴渗透仪,该设备由三轴压力室、围压控制器和进出水压力控制器等组成,通过采集软件控制试验并自动记录进出水数据,计算出相应试样的渗透系数,进而分析围压、含水率、干密度和冻融循环次数对重塑黄土渗透特性的影响。

2 结果与分析

2.1 冻融后重塑黄土试样的表面特征

图 2 所示为含水率(w)分别为 15.0%,18.0%,21.0%和 28.9%黄土试样在冻融作用下表面特征

的变化规律。由图 2 可见,冻融后试样表面出现横向与纵向裂缝,且高含水率试样表面裂缝开度与深度更为明显,横向裂缝较纵向裂缝明显;含水率饱和和试样表面结构破坏更加严重且表现出水流冲刷特征。分析其原因,是因为高含水率试样内部冰晶生长,使得试样表面裂缝开度与深度较大;重塑黄土试样分层压实界面为薄弱结构面,因而冻融过程中更容易产生横向裂缝;饱和试样冻结过程中水分迁移作用较明显,迁移出的水分在重力作用下沿试样表面与密封袋内表面向下流动,冲刷试样表面。

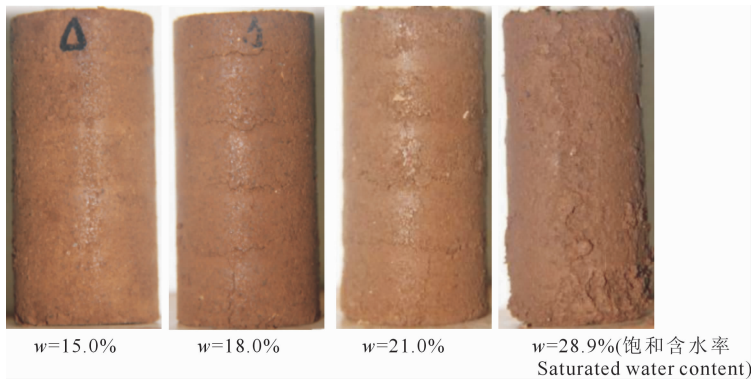


图 2 冻融作用下不同含水率黄土试样表面特征的变化($\rho_d=1.5\text{ g/cm}^3,N=17$)

Fig. 2 Surface characteristics of samples with different water contents under freezing-thawing cycles

图 3 为冻融循环次数(N)分别为 0,4,14,17 时黄土试样表面特征的变化规律。由图 3 可见,冻融前试样表面较为光滑;冻融 4 次后,试样首先在分层

界面处出现横向裂缝;冻融循环 14 次后,试样表面横向裂缝数量增多,开度增大,且产生纵向裂缝;冻融 17 次后,试样表面破坏基本呈稳定状态。

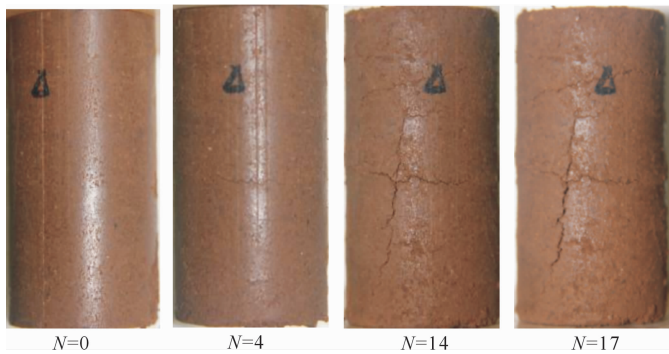


图 3 不同冻融循环次数下黄土试样表面特征的变化($\rho_d=1.7\text{ g/cm}^3,w=18.0\%$)

Fig. 3 Specimen surface characteristics with different freezing-thawing times

综合上述分析可知,冻融循环作用对重塑黄土体表面结构破坏严重,导致出现横向和纵向裂缝。分析其原因,主要是由于冻结过程中土样内部水分向土体表面迁移,使得土体表面含水率增加,因而导致试样表面结构破坏严重。冻融过程产生的横向和纵向裂缝是水分渗流和迁移的良好通道,使得冻融条件下重塑黄土渗透性显著增强。

2.2 冻融前后重塑黄土土体微观结构的扫描电镜观察

图 4 为冻融循环次数(N)分别为 0,2,10,20 时黄土试样放大 2 000 倍的 SEM 图片。从图 4 可以看出,冻融前($N=0$)重塑黄土骨架颗粒形态以单体颗粒(部分为集粒)为主,呈密实的堆砌状态。低温冻结条件下试样内部冰晶生长的冻胀力对土颗粒产

生挤压,破坏颗粒间联结强度,导致土体结构发生显著变化。多次冻融循环后,重塑黄土土体骨架颗粒形态发生明显变化,其中集团粒数量显著减少,土颗

粒胶结强度变差,土体结构整体变得较为松散,导致黄土土体渗透性增加。

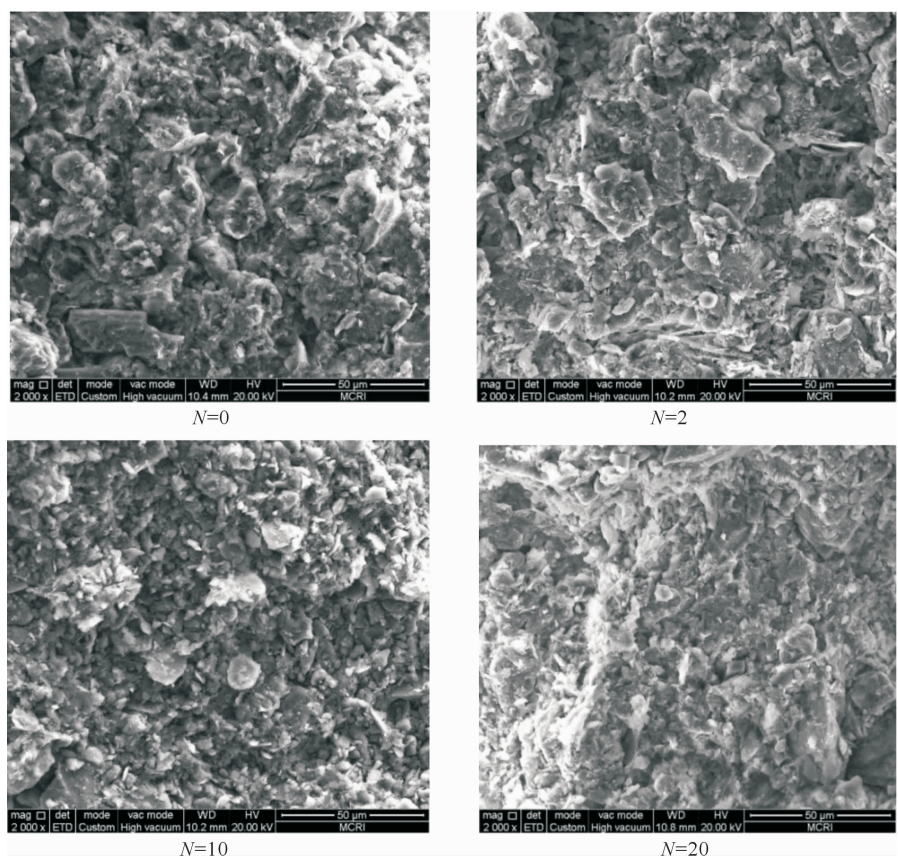


图 4 冻融前后重塑黄土土体微观结构的变化(×2 000)

Fig. 4 Remolded loess microstructure changes during freeze-thaw process (×2 000)

2.3 冻融前后重塑黄土土体微观结构的量化分析

2.3.1 土颗粒等效直径 从图 5-a 可以看出,冻融过程中重塑黄土颗粒粒径的分布特征发生显著变化,较小粒径颗粒所占比例随冻融循环次数增加明显增大。

2.3.2 土颗粒圆形度 由图 5-b 可见,冻融过程中重塑黄土颗粒圆形度分布曲线产生交叉现象,且各曲线分布特征近似重合,这表明重塑黄土颗粒形状在冻融过程中变化不大。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构造形成挤压黄土颗粒,使土体孔隙体积增加,胶结性变差,而对土颗粒本身的形状并无明显影响。

2.3.3 走向 由图 5-c 可见,冻融过程中重塑黄土颗粒走向分布曲线也产生交叉及近似重合现象,与冻融过程颗粒圆形度分布曲线的变化趋势基本相同,说明重塑黄土颗粒走向在冻融过程中的变化也不大,其原因与冻融对土颗粒形状的影响相同。

2.3.4 孔隙面积比 孔隙面积比随冻融循环次数

的变化如图 5-d 所示。从图 5-d 可以看出,随冻融循环次数的增加,孔隙面积比呈增大趋势,由 0.76 增加到 0.79,但增幅逐渐减小,冻融循环 20 次时基本趋于稳定。孔隙面积比(m)随冻融循环次数(N)总体呈指数变化规律,可用下述公式进行描述:

$$m=0.797-0.036e^{-0.1N}。 \tag{4}$$

冻融过程中孔隙面积比的指数变化规律表明,冻融条件下重塑黄土土体的结构强度在一定程度上遭受破坏,土体结构变疏松,因而渗透性增强。值得注意的是,冻融循环 20 次后重塑黄土土体结构强度和渗透特性趋于稳定。

2.4 冻融后重塑黄土试样渗透系数的变化

2.4.1 围压对重塑黄土渗透性的影响 图 6 所示为渗透系数与围压的关系。由图 6 可见,重塑黄土渗透系数随着围压增大呈指数下降趋势,衰减幅度逐渐减小,并最终趋于稳定。这是因为土体固结度和密实度随围压增大会越来越高,孔隙比减小,进而使得渗透系数减小。由于本次试验条件为三轴固结

渗透试验,导致高围压($\sigma_3=400$ kPa)条件下土体固结度和密实度较高,重塑黄土土体结构强度趋于稳

定,最终使得高围压时渗透系数差异较小,亦即渗透特性趋于稳定。

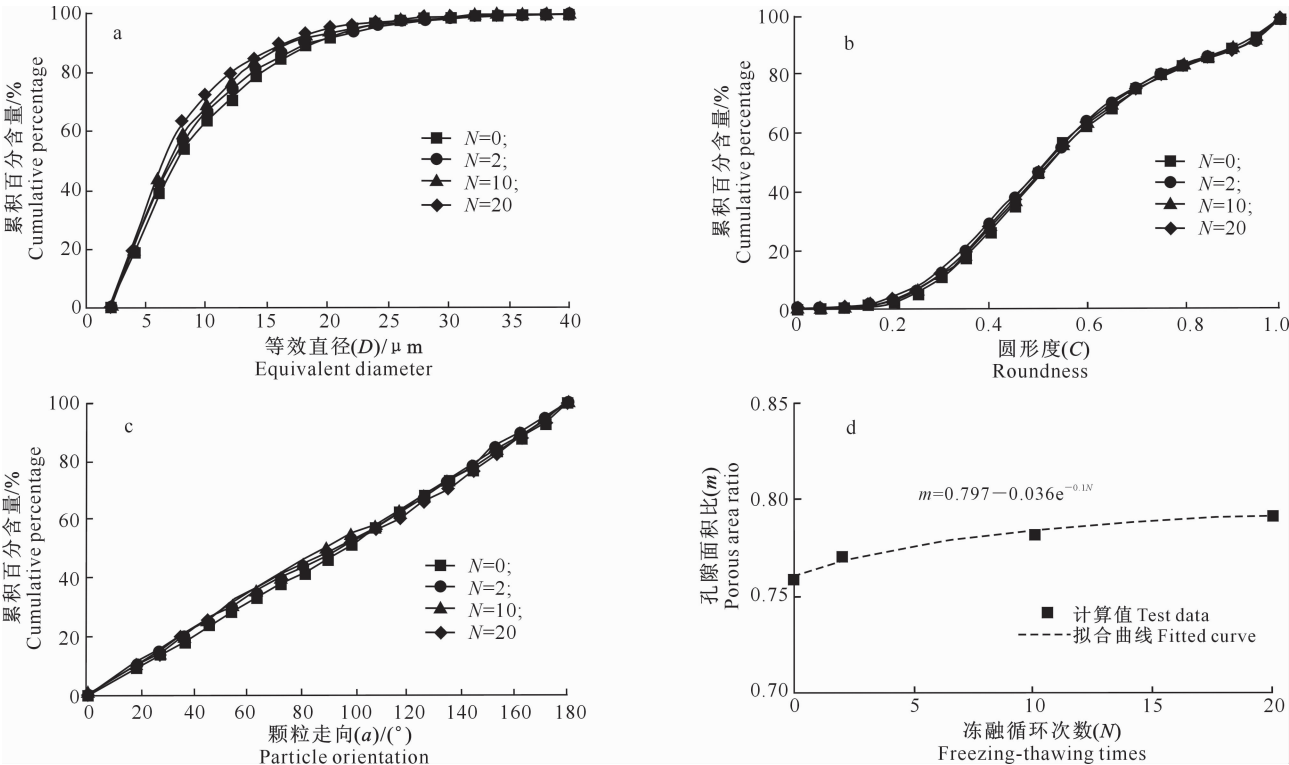


图 5 冻融黄土土体微观结构的扫描电镜观察结果的定量分析

Fig. 5 Quantitative analysis of SEM of loess microstructure during freezing-thawing

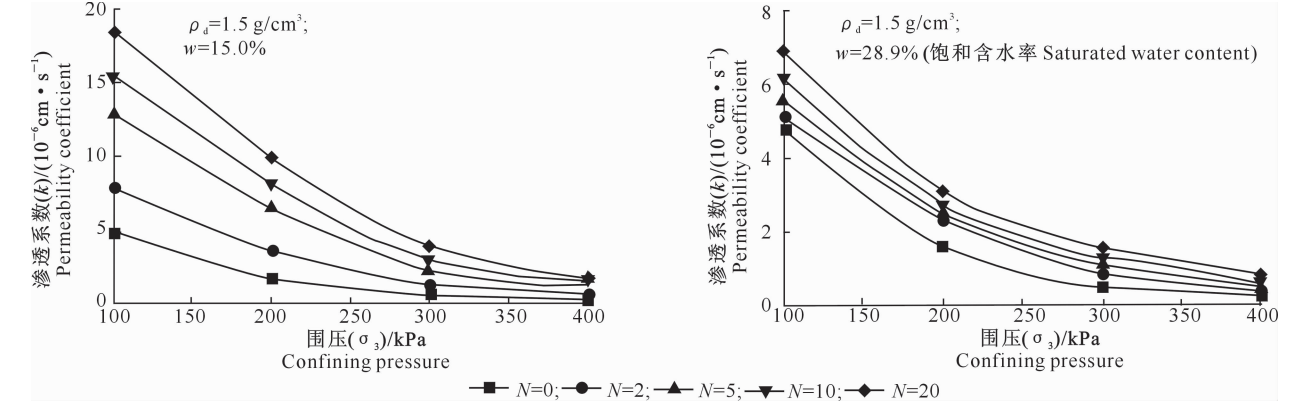


图 6 不同冻融循环次数下重塑黄土渗透系数与围压的关系

Fig. 6 Relation curves between permeability coefficient of remolded loess and confining pressure after different freeze-thaw cycles

2.4.2 干密度对重塑黄土渗透性的影响 图 7 为渗透系数随干密度增加而变化的曲线。由图 7 可知,与常规渗透试验不同的是,渗透系数并未随着干密度的增大而表现出单调减小特征,而是与干密度之间近似呈抛物线变化关系,且干密度约为 1.6 g/cm^3 时渗透系数较大。分析其原因,是因为随着干密度增大,黄土试样孔隙比变小,冻融过程土样内部冰晶生长和冷生结构形成所产生的冻结劈裂作用

较大,黄土土体结构破坏较严重,因而初始阶段随着干密度增大,黄土土体渗透系数增加;干密度很高时($\rho_d=1.7 \text{ g/cm}^3$),黄土土体初始孔隙比很小,其渗透系数也相应减小。

2.4.3 初始含水率对重塑黄土渗透性的影响 图 8-a 及 8-b 为不同冻融循环次数下,渗透系数与初始含水率的关系曲线;图 8-c 及 8-d 为不同围压条件下,渗透系数与初始含水率的关系曲线。

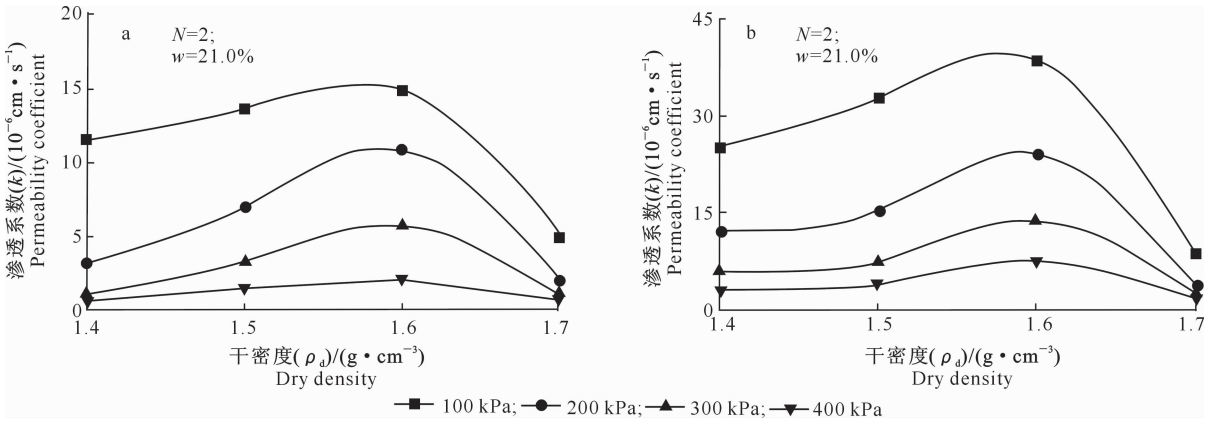


图 7 不同围压条件下重塑黄土渗透系数与干密度的关系

Fig. 7 Relation curves between permeability coefficient of remolded loess and dry density at different confining pressures

从图 8 可以看出,不同冻融循环次数及围压条件下,重塑黄土渗透系数随初始含水率的增加表现出相似的变化规律,即都随着初始含水率的增大先增加后减小,表现出抛物线形变化特征,且初始含水率约为 21.0% 时渗透系数最大。这是因为在开始阶段,随着初始含水率的增大,低温条件下孔隙水冻结成冰的冻胀力作用增强,对黄土土体结构强度破坏作用增大,从而使得孔隙比增加,渗透系数相应增

大;随着初始含水率的进一步增大,冻融条件下黄土土体颗粒联结被严重破坏,冻融后土体强度很低,因而在三轴固结渗透条件下固结度和密实度均很高,孔隙比大幅度减小,渗透系数相应降低。

从图 8-c 及 8-d 还可以看出,随着围压增大,重塑黄土渗透系数与初始含水率关系的抛物线形变化幅度减小,表明高围压条件下渗透系数差异较小,这与渗透系数在图 6 中的变化规律一致。

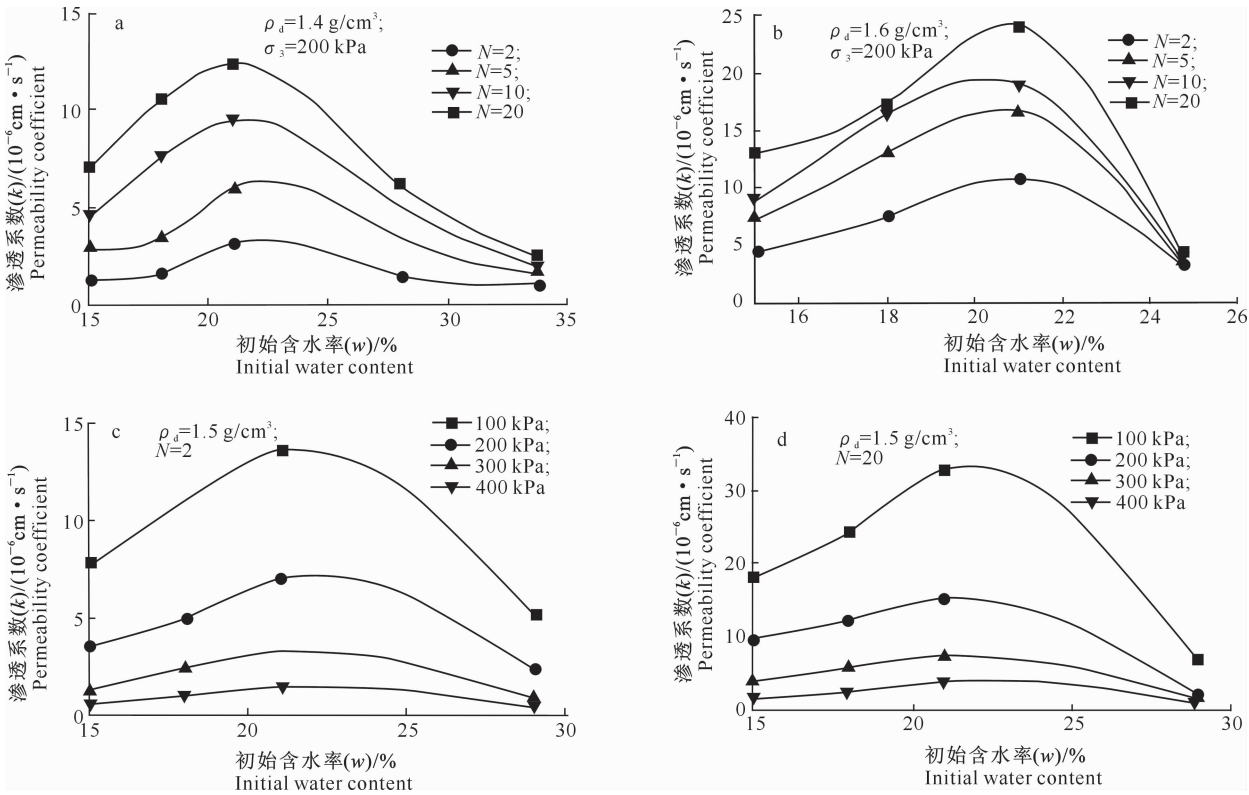


图 8 不同冻融循环次数和围压下重塑黄土渗透系数与初始含水率的关系

Fig. 8 Relation curves between permeability coefficient of remolded loess and initial water content under different freezing-thawing times and confining pressures

2.4.4 冻融循环次数对重塑黄土渗透性的影响

图 9 分别为不同围压及干密度条件下冻融循环次数对重塑黄土渗透系数影响的变化曲线。由图 9 可见,不同围压及干密度条件下,重塑黄土渗透系数随冻融循环次数的增加表现出相似的变化特征,即均呈指数增大趋势,冻融循环 20 次后渗透系数增加 1~2 个量级。这主要是由于低温条件下,孔隙水结晶的冻结劈裂作用破坏了土颗粒间的联结强度,导致土体内部结构损伤并产生微裂缝。长期冻融条件下,土样内部水分的周期性相变与迁移使得土体结

构强度逐渐劣化,微裂缝不断扩展,渗透系数相应增加。值得注意的是,由前述重塑黄土微观结构特征分析(图 5-d)可知,孔隙面积比随冻融循环次数增加呈指数增大趋势,因而多次冻融后渗透系数趋于一个稳定数值。从图 9 可以看出,随冻融循环次数的增加,干密度较小($\rho_d=1.4\text{ g/cm}^3$)或较高($\rho_d=1.7\text{ g/cm}^3$)试样的渗透系数曲线出现了交叉现象,且二者曲线均位于下方,表明冻融过程中干密度过小或过高试样渗透系数相应较小,这与其在图 7 中的变化规律一致。

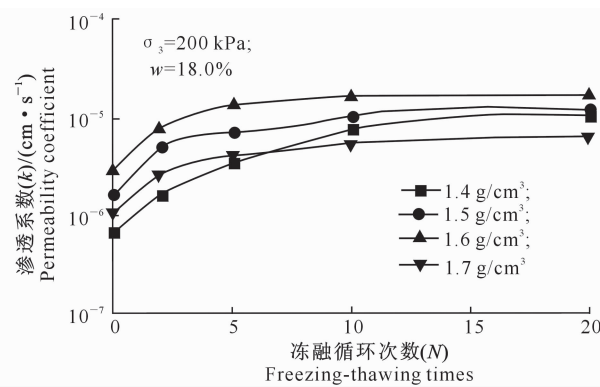
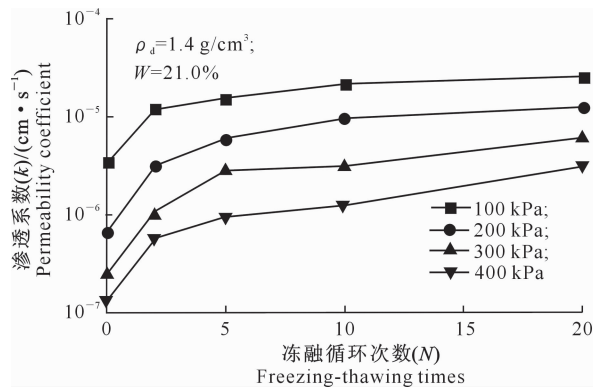


图 9 不同围压和干密度条件下重塑黄土渗透系数与冻融循环次数的关系

Fig. 9 Relation curves between permeability coefficient of remolded loess and freezing-thawing times under different confining pressures and dry densities

3 结 语

本研究从微观和宏观两个方面分析了冻融过程中重塑黄土渗透特性的变化,得出如下结论:

1)冻融作用对重塑黄土土体表面结构破坏严重,出现横向和纵向裂缝,导致冻融条件下重塑黄土渗透性增强。

2)冻融过程中重塑黄土土体微观结构发生了显著变化,土体骨架集团粒数量显著减少,土颗粒胶结强度变差,土体结构整体变得较为松散,从而增大了渗透性。

3)冻融过程中,随着冻融循环次数的增加,孔隙面积比呈指数增大趋势,表明冻融条件下重塑黄土土体结构强度一定程度上遭到破坏,渗透特性显著增强。冻融循环 20 次后,重塑黄土土体结构强度和渗透特性趋于稳定。

4)随着围压的增大,重塑黄土渗透系数呈指数衰减趋势,且高围压时差异较小;渗透系数随干密度和初始含水率的增加表现出抛物线变化特征;渗透系数随冻融循环次数增加呈指数增大趋势,这与微观结构孔隙面积比随冻融循环次数增加的变化规律

一致。

【参考文献】

[1] 简文星,许 强,吴 韩,等.三峡库区黄土坡滑坡非饱和水力参数研究[J].岩土力学,2014,35(12):3517-3522.
Jian W X,Xu Q,Wu H,et al. Study of unsaturated hydraulic parameters of Huangtupo landslide in Three Gorges Reservoir Area [J]. Rock and Soil Mechanics,2014,35(12):3517-3522.

[2] 黄雪峰,李 佳.渗透对非饱和原状黄土高边坡土压力和水平位移影响的试验研究[J].岩石力学与工程学报,2011,30(3):635-642.
Huang X F,Li J. Test study on influence of immersion on earth pressure and horizontal displacement of high slope of unsaturated intact loess [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2011,30(3):635-642.

[3] 王铁行.非饱和黄土路基水分场的数值分析[J].岩土工程学报,2008,30(1):41-45.
Wang T H. Moisture migration in unsaturated loess subgrade [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering,2008,30(1):41-45.

[4] 姚志华,陈正汉,黄雪峰,等.非饱和原状和重塑 Q₃ 渗水特性研究[J].岩土工程学报,2012,34(6):1020-1027.
Yao Z H,Chen Z H,Huang X F,et al. Hydraulic conductivity of unsaturated undisturbed and remolded Q₃ loess [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering,2012,34(6):1020-1027.

- [5] 赵彦旭,张虎元,吕擎峰,等. 压实黄土非饱和渗透系数试验研究 [J]. 岩土力学,2010,31(6):1809-1812.
Zhao Y X,Zhang H Y,Lü Q F,et al. Experimental study of unsaturated permeability coefficient of compacted loess [J]. Rock and Soil Mechanics,2010,31(6):1809-1812.
- [6] 梁 燕,邢鲜丽,李同录,等. 晚更新世黄土渗透性的各向异性及其机制研究 [J]. 岩土力学,2012,33(5):1313-1318.
Liang Y,Xing X L,Li T L,et al. Study of the anisotropic permeability and mechanism of Q_3 loess [J]. Rock and Soil Mechanics,2012,33(5):1313-1318.
- [7] 安 鹏,张爱军,刘宏泰,等. 重塑饱和黄土长期渗流劣化机制及其渗透性分析 [J]. 岩土力学,2013,34(7):1965-1971.
An P,Zhang A J,Liu H T,et al. Degradation mechanism of long-term seepage and permeability analysis of remolded saturated loess [J]. Rock and Soil Mechanics,2013,34(7):1965-1971.
- [8] 王 红,李同录,付显凯. 利用瞬态剖面法测定非饱和黄土的渗透性曲线 [J]. 水利学报,2014,45(8):997-1003.
Wang H,Li T L,Fu Y K. Determining permeability function of unsaturated loess by using instantaneous profile method [J]. Journal of Hydraulic Engineering,2014,45(8):997-1003.
- [9] 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.
- [10] 方丽莉,齐吉琳,马 巍. 冻融作用对土结构性的影响及其导致的强度变化 [J]. 冰川冻土,2012,34(2):435-440.
Fang L L,Qi J L,Ma W. Freeze-thaw induced changes in soil structure and its relationship with variations in strength [J]. Journal of Glaciology and Geocryology,2012,34(2):435-440.
- [11] Qi J L,Pieter A V,Cheng G D. A review of the influence of freeze-thaw cycles on soil geotechnical properties [J]. Permafrost and Periglacial Processes,2006,17:245-252.
- [12] 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.
- [13] 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.
Zhang H,Wang T H,Luo Y. Freezing-thawing strength of unsaturated undisturbed loess [J]. Journal of Northwest A&F University (Nat Sci Ed),2015,43(4):210-214.
- [14] Chamberlain E J,Iskandar I,Hunsikert S E. Effect of freeze-thaw cycles on the permeability and macrostructure of soils [C]//Proceedings of International Symposium on Frozen Soil Impacts on Agricultural,Range and Forest Lands,Spokane:Army Cold Regions Research and Engineering Laboratory,1990:145-155.
- [15] Peter V. Permeability and volume changes in till due to cyclic freeze/thaw [J]. Canadian Geotechnical Journal,1998,35(3):471-477.
- [16] 连江波,张爱军,郭敏霞,等. 反复冻融循环对黄土空隙比及渗透性的影响 [J]. 人民长江,2010,41(12):55-58.
Lian J B,Zhang A J,Guo M X,et al. Influence of iterative freezing-thawing on void ratio and permeability coefficient of loess [J]. Yangtze River,2010,41(12):55-58.
- [17] 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.
- [18] 吕擎峰,李晓媛,赵彦旭,等. 改性黄土的冻融特性 [J]. 中南大学学报(自然科学版),2014,45(3):819-825.
Lü Q F,Li X Y,Zhao Y X,et al. Properties of modified loess under freeze-thaw cycles [J]. Journal of Central South University (Science and Technology),2014,45(3):819-825.
- [19] 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.
- [20] 邓友生,徐学祖. 非饱和土与饱和冻融土导湿系数的变化特征 [J]. 冰川冻土,1991,13(1):51-59.
Deng Y S,Xu X Z. Hydraulic conductivity of unsaturated soil' and its changing regularity in saturated soil after freezing-thawing cycles [J]. Journal of Glaciology and Geocryology,1991,13(1):51-59.