

DOI:10.7522/j.issn.1000-0240.2020.0064

ZHAO Qian, SU Lijun, LIU Hua, et al. Investigation on the influence of freezing-thawing cycle on the permeability coefficient anisotropy of loess [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2020, 42(3):843–853. [赵茜, 苏立君, 刘华, 等. 冻融循环对黄土渗透系数各向异性影响的试验研究[J]. 冰川冻土, 2020, 42(3):843–853.]

冻融循环对黄土渗透系数各向异性影响的试验研究

赵 茜¹, 苏立君^{2,3,4}, 刘 华^{1,5}, 杨金熹¹

(1. 西安建筑科技大学 土木工程学院, 陕西 西安 710055; 2. 中国科学院 水利部 成都山地灾害与环境研究所, 四川 成都 610041;

3. 中国科学院 青藏高原地球科学卓越创新中心, 北京 100101; 4. 中国科学院大学, 北京 100049;

5. 陕西省岩土与地下空间工程重点实验室, 陕西 西安 710055)

摘 要: 为了反映冻融循环作用对原状黄土渗透各向异性及原状、重塑黄土渗透差异的影响, 以西安 Q₃ 黄土为研究对象, 通过三轴固结渗透试验对比分析了冻融前后水平、竖直向原状黄土及重塑黄土的渗透系数随初始含水率、围压、冻融循环次数变化的规律。结果表明: 未冻融时各级围压下竖直向原状黄土的渗透系数为 $2 \times 10^{-6} \sim 18 \times 10^{-6} \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$, 水平向原状黄土和重塑黄土的渗透系数为 $0 \sim 4 \times 10^{-6} \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$; 经历冻融循环后, 水平、竖直向原状黄土及重塑黄土的渗透系数与初始含水率的关系曲线分别呈现逐渐上升、抛物线形式与变化平缓的不同特征, 而三者的渗透系数均随冻融循环次数的增加呈现数量级增大的趋势; 原状黄土的竖直–水平渗透系数比(k_v/k_h)由冻融前的 4.38 逐渐减小到 0.90, 可见冻融循环作用在显著提高黄土渗透性能的同时, 可以强烈弱化其各向异性特征。通过建立围压、渗透系数与土体孔隙率的相关关系可知, 原状、重塑黄土的孔隙率与围压存在极强的负线性相关性, 渗透系数随围压的增大呈典型指数衰减特征, 渗透系数与孔隙率具有相似的变化趋势, 因此冻融循环过程中土体孔隙率的改变是导致其渗透性质变化的主要原因。

关键词: 原状黄土; 重塑黄土; 冻融循环; 渗透系数; 各向异性; 孔隙率

中图分类号: TU445 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-0240(2020)03-0843-11

0 引言

我国西北地区主要由季节性气候变化控制, 该地区广泛分布的宽厚黄土层受到气候变化的强烈影响, 年际周期往复的冻结、融化显著损坏了土体原有的结构性特征, 继而引起黄土工程特性(如强度、变形、稳定性)劣化并降低, 最终影响构(建)筑物的安全稳定^[1–3]。渗透系数既可以直观体现土体渗流性质的优劣, 还可以间接表明土体内部结构的改变。冻融作为一种强风化作用, 可以有效地弱化颗粒间的胶结作用, 破碎大中团粒, 提高小中孔隙含量, 强烈改变其结构组成, 究其原因主要是由于

土中水的固液相变以及水分迁移对土颗粒和孔隙反作用力的影响^[4–6]。众多研究结果^[7–10]均表明冻融循环条件下土体的渗透系数随其干密度的减小与孔隙率的增大而逐渐减小, 且从微观层面来看, 土体内部颗粒粒径与孔隙孔径的改变实际上是影响土体干密度与孔隙率变化的微观结构基础^[11]。压汞仪的广泛使用^[12–13], 以及固结渗透试验技术的快速提高^[14–15], 为研究土体的非线性孔隙分布以及不同应力路径固结过程对其渗透性质的影响提供了新的方法与思路。

黄土是干旱半干旱气候条件下层状沉积的多相非均质体, 埋藏越深固结程度越严重^[16]。Mair^[17]表

收稿日期: 2019-01-29; 修订日期: 2020-05-16

基金项目: 国家自然科学基金项目(51278397; 51608436); 陕西省自然科学基金基础研究计划项目(2018JQ5003); 陕西省教育厅自然科学专项研究计划项目(18JK0478)资助

作者简介: 赵茜(1993–), 女, 山西太原人, 2016年在山西农业大学获学士学位, 现为西安建筑科技大学在读硕士研究生, 从事黄土力学试验与理论研究. E-mail: zhaoqian7059@163.com

通信作者: 苏立君, 研究员, 从事岩土本构关系及数值分析、山地灾害形成机理与危险性评价理论、边坡岩土体物性参数和地质结构特征探测与分析技术等研究. E-mail: sulijun1976@163.com.

明地下浅层黏土的骨架颗粒排列具有随机性,深度越深,颗粒更趋于向垂直于固结应力加载的方向旋转。颗粒排列堆积的接触方式不同,必定使土体横纵断面的孔隙分布及其曲折程度有所改变,因此土体的渗透特征表现出明显的各向异性^[18]。Witt等^[19]也得到相同的结论,他们将影响黏土渗透各向异性的原因划分为宏观分层、微观分层和颗粒走向三个层次。为定量探讨土体的渗透各向异性,Chan等^[20]将土体水平渗透系数 k_h 与竖直渗透系数 k_v 的比值定义为渗透各向异性比 r_k ,Basak^[21]依据此方法得出重塑高岭土 r_k 在1.0~1.6之间变化;周建等^[22]认为软黏土 r_k 基本在1.0~1.9之间微小波动;Adams等^[23]表明随着波士顿蓝黏土孔隙比的减小,其 r_k 由1.2逐渐提高至1.9。上述文献中所得渗透各向异性比 r_k 均大于1,但其具体数值与土体经历的地质历史、气候变化以及取样时深度、扰动等因素密切相关,梁燕等^[24]通过变水头渗透试验表明原状黄土竖直向渗透系数普遍大于水平向,即渗透各向异性比 r_k 小于1。对于完全丧失结构性特征的扰动后重塑黄土而言,其物理力学特征与原状黄土存在显著差别。为了最大程度地防止基坑变形沉降、隧道渗漏坍塌、垃圾填埋场失稳等工程地质灾害的发生,需在设计计算阶段考虑土体存在刚度各向异性和渗透各向异性的本质特点,以便得到更为精确的预测结果^[25-27]。

综上所述,多数研究结果集中于探讨冻融循环条件下土体的单向渗流特性(多为垂直于地面的竖向渗流特性),以及非冻融条件下土体渗透各向异性的变化规律,着重从土力学角度解释外界环境变化对土体物理力学性质的影响,继而间接反映土体结构特征的改变。基于此,本文将冻融循环作为环境变化诱因,以各向异性显著的西安Q₃黄土作为研究对象,首先从土质学角度,结合粒度分析试验、电镜扫描试验研究冻融循环前后初始含水率、冻融循环次数及围压对原状黄土渗透系数各向异性及原状、重塑黄土渗透差异的影响;而后通过压汞实验,建立围压、渗透系数与土体孔隙率的相关关系,由土体形变规律进一步论证影响黄土渗透系数的主要原因。

1 试验方案

1.1 试验黄土物理性质

本试验用Q₃黄土取自西安市碑林区某建筑基坑7.0 m深的侧壁上,土体呈黄褐色,土质较均匀,孔隙较发育,基本物理指标平均值列于表1。采用Bettersize2000激光粒度分布仪对试验用黄土进行颗粒分析,仪器可测量粒径范围为0.02~2 000 μm,重复测量误差不大于1%,需进行多组平行试验以尽可能消除样品和试验误差。

表1 试验用黄土的物理指标平均值

Table 1 Mean values of physical parameters of Xi'an loess

干密度 $\rho_d/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	相对密度	含水率 $\omega/\%$	饱和度 $S_r/\%$	孔隙率 $n/\%$	塑限 $/\%$	液限 $/\%$	塑性指数 I_p
1.364	2.74	20.09	56.2	49.48	19.01	36.93	17.92

1.2 电镜扫描试验

进行电镜扫描试验的黄土试样需提前进行冷冻干燥处理,以消除土体内部水分和气泡对试验结果的影响。由于重力作用和地质历史时期的沉积作用,原状黄土骨架结构普遍呈现竖向排列紧密、横向排列疏松的结构特点,因此选择与沉积方向平行的水平向原状黄土试样的竖向断面进行扫描与观测,可更好地反映土体骨架的排列联结特征。由于重塑黄土在制备过程中经历了强烈的振捣,土体原有的结构性特征已被破坏,因此重塑黄土试样的选择可不考虑方向性。试验用水平向西安原状黄土和重塑黄土试样为长×宽×高分别为1.0 cm×0.5 cm×0.5 cm的长方体,试验前沿试样长边中部提前预留的凹槽掰开,露出新鲜断面。对于弱导电

性的土体,需在试验前选择较平整的断面进行真空镀金处理,提高微观结构图像中颗粒与孔隙之间的亮度对比。

1.3 试样制备

1.3.1 原状试样制备

从基坑侧壁凿取下大小适中的原状黄土试块后,及时用标签标注其上下面并用塑料袋完全密封,运输过程中车辆内部铺设海绵垫减震,带回实验室后妥善保存,随着试验的进行逐块拆封使用,选择完整的原状试块进行试样制备。依据GB/T 50123-1999“土工试验方法标准”^[28],将黄土试块沿平行于地面方向和垂直于地面方向分别削制水平向和竖直向的标准三轴圆柱试样,直径与高度分别为39.1 mm、80 mm。

文献[29]指出,我国湿陷性黄土大部分分布在黄河中游地区,其天然含水率在3.3%~25.3%之间变化,饱和度在15%~77%之间变化,即处于稍湿状态,经验表明自然条件下黄土湿陷性含水率的限值约为24%~25%。以此为试验设计依据,在试验用黄土的天然含水率左右两侧分别等差取值,设计初始含水率梯度为18%、20%、22%和24%。可通过水膜转移法或自然风干法对试样进行增湿、减湿处理,其间需严格控制加水速度及风干时间。当试样质量达到目标质量后,马上用保鲜膜包裹严密放入保湿缸内静置24 h以上,以保证试样内含水率分布均匀,经常称其质量确保调整后的试样含水率与目标含水率之差不大于0.1%。

1.3.2 重塑试样制备

重塑试样的制备依旧参照GB/T 50123-1999“土工试验方法标准”^[28],将风干过筛(孔径为2 mm)后的黄土用蒸馏水配制成与原状黄土含水率梯度相同的土样,即18%、20%、22%和24%,采用分层压样法制成标准三轴圆柱试样。要求重塑试样与原状试样的干密度之差小于 $0.01 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$,含水率与预期含水率之差小于0.1%,从两组平行试样中选择一组结果最为相近的进行后续试验。

1.4 冻融循环试验

将不同含水率的水平、竖直向原状试样和重塑试样用保鲜膜包裹严密,放入已设定好的冻融循环箱内,采取三向冻结或融化的方式模拟不进行补(散)水的封闭冻融环境(精度为 0.1°C),经历12 h的负温冻结(-20°C)和12 h的正温融化(20°C),且需保证试样完全冻透并完全融化,此为完成一个冻融循环周期,试验设计冻融循环周期(N)分别为1、2、5、10、20次。

1.5 压汞试验

将完成冻融循环的黄土试样进行自然风干处理,从风干试样内切取体积大约为 1 cm^3 的样品进行压汞试验,完成低压抽真空和高压注汞后,得到冻融条件下黄土的孔隙率。为确保试验结果的真实可靠与试验过程的经济有效,建议每组压汞试验样品数量为3个^[13]。

1.6 三轴渗透试验

由于GDS三轴渗透仪(图1)只能测定土样的饱和和渗透系数,因此需将完成一定冻融循环周期的黄土试样进行饱和预处理,尽可能消除试样内气体对渗透结果的影响,文中渗透系数均指饱和渗透系

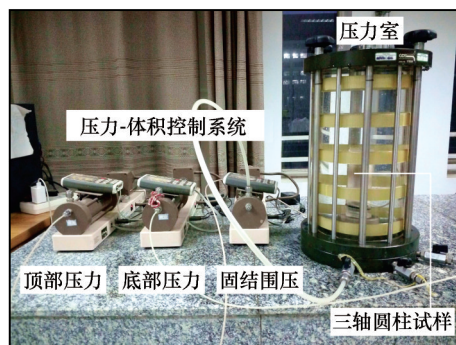


图1 GDS三轴渗透仪

Fig. 1 Photo of the GDS triaxial permeameter

数。该试验为恒定水头固结渗透试验,围压 σ_c 以100 kPa为梯度分别设置为100、200、300、400 kPa,试样需首先在各级围压下完成固结,直至每小时记录反压排水体积小于 50 mm^3 时即认为固结完成。而后将上水头压力设计为 $\sigma_c + \Delta u/2 (\text{kPa})$,下水头压力设计为 $\sigma_c - \Delta u/2 (\text{kPa})$,其中 Δu 为各围压条件下试样上、下水头压力差。水头差通过试验前期调试确定,以确保试样的渗透系数不会出现过小或过大的不利情况,因此各围压下水头差分别取值为10、15、20、25 kPa。试验系统主要由压力-体积控制系统、数据采集系统和GDSLAB软件系统组成,其中压力-体积控制系统是最具特色的部分,能够对试样施加多种复杂的荷载形式,通过软件控制可实现固结过程中压力加卸载与数据采集计算的自动化,最终得到丰富准确的试验结果。

2 试验结果与分析

2.1 黄土粒度组成特征

依据文献[30]中的粒度分级标准,对颗粒粒径从小到大按照4、16、32、63 μm 为界限划分区间,可将黄土颗粒划分为黏粒、细粉砂、中粉砂、粗粉砂及砂粒5个组分,西安黄土的粒度组成及粒组划分结果汇总于表2,粒度分布曲线如图2所示。由图2(a)及表2可知:西安黄土的粒度频率分布曲线存在两个明显的峰态,即为典型的“双峰”粒度分布特征。其中分选性较好的粗粒组分对应的第一峰值粒组($[4, 63) \mu\text{m}$)峰形较尖锐高耸,细粒组分对应的第二峰值粒组($<4 \mu\text{m}$)峰度较低、形态较平缓。由图2(b)可知:西安黄土的粒度分布曲线大致由两段斜率不同的光滑线段组成,其中第一峰值粒组对应的线段斜率较大,而第二峰值粒组对应的线段斜率较小,两线段通过一近水平的线段连接,明显可

表2 西安黄土的粒度组成及粒组划分

Table 2 Particle size composition and particle division of Xi'an loess					
黏粒 (粒径<4 μm)	细粉砂 (粒径为[4,16) μm)	中粉砂 (粒径为[16,32) μm)	粗粉砂 (粒径为[32,63) μm)	砂粒 (粒径>63 μm)	
23.64%	33.25%	26.92%	10.87%	5.32%	

第一峰值粒组	第二峰值粒组
71.04%(粉砂)	23.64%(黏粒)

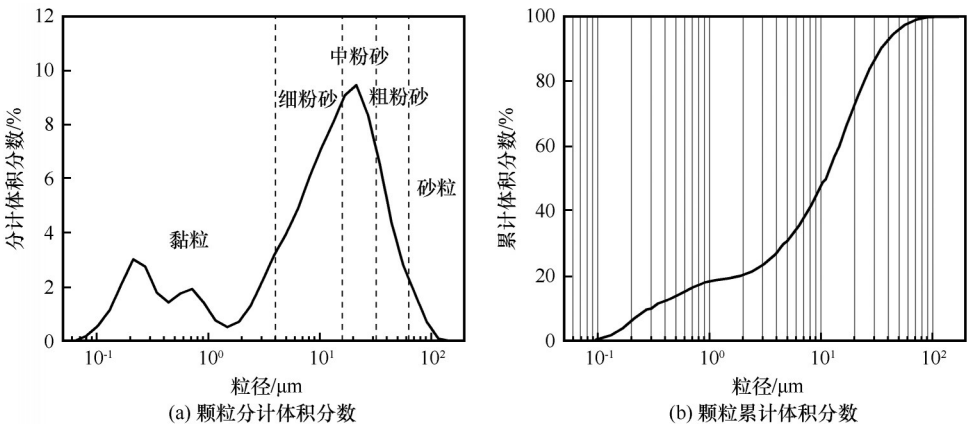


图2 西安黄土粒度分布曲线
Fig. 2 Particle size distribution curves of Xi'an loess

见在细粒范围内存在一个凸起的平台，这与其粒度分布“双峰”特征相吻合。由此可见西安黄土中黏粒含量较为丰富，黏粒的大量存在可显著影响黄土体在冻融循环条件下的变形、渗透性质。

2.2 未冻融时黄土渗透系数各向异性分析

西安黄土渗透系数及竖直-水平渗透系数比与围压的关系如图3所示。由图3可知，竖直向原状黄土的渗透系数变化范围为 $2\times10^{-6} \sim 18\times10^{-6} \text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$ ，水平向原状黄土和重塑黄土的渗透系数变化范围为 $0 \sim 4\times10^{-6} \text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$ ；相同围压下原状黄土渗透系数大于重塑黄土，竖直向原状黄土渗透系数大

于水平向渗透系数。借鉴 Chan 等^[20]提出的渗透各向异性比 r_k 含义(k_v/k_h)，本文将竖直向渗透系数与水平向渗透系数的比值定义为竖直-水平渗透系数比(k_v/k_h)，对西安黄土的渗透各向异性进行探讨。由图3亦可知，竖直-水平渗透系数比始终大于1，且随着围压增大，土体渗透系数与竖直-水平渗透系数比逐渐减小。从宏观尺度可直观看出，原状黄土内部遗留有植物根系生长形成的次生管状大孔隙(图4)，以垂直或近垂直发育为主，孔径约为0.5~1.0 mm，孔壁较为光滑紧实^[31]。由于竖向管状孔隙的存在，使得竖直渗流的过水断面相比于

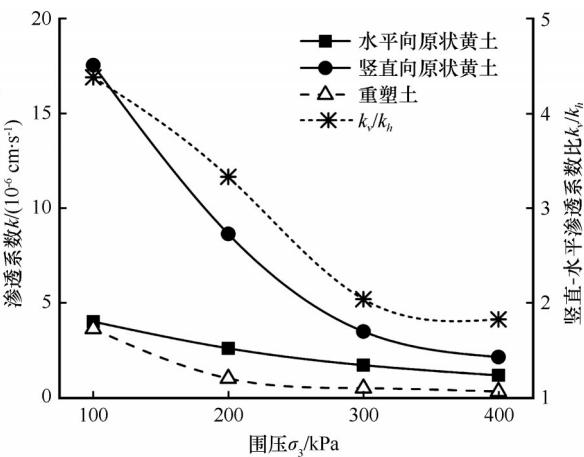


图3 渗透系数 k 及竖直-水平渗透系数比 k_v/k_h 与围压 σ_3 的关系
Fig. 3 k - σ_3 curves and k_v/k_h - σ_3 curves of Xi'an loess

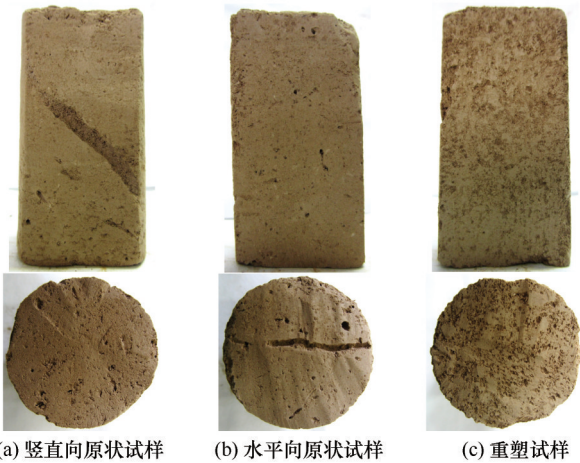


图4 风干后黄土试样典型剖面图
Fig. 4 Typical section diagrams of undisturbed loess [horizontal (a) and vertical (b)] and remolded loess (c) after drying

水平剖面更大,更有利于流体在土体内部的流动。而经过挤密振捣后的重塑黄土内部渗流通道细窄曲折,一定程度增大了渗流难度,使得重塑黄土的渗透性质与原状黄土相比明显减弱。

土体在长远的地质历史时期中受到自然条件塑造,与实验室内人工制备的重塑土,具有显著的结构差异,其物理力学性质(如孔隙率、渗透性、剪切变形等)也存在明显区别,分析土体渗透性质的变化必须考虑土体孔隙率的影响。固结渗透前后西安原状黄土和重塑黄土试样微观结构(放大1 000倍)如图5所示。由图5可知,西安原状黄土黏粒含量丰富,粗颗粒形态以棱角状和次棱角状最为普遍,结构单元体以粗颗粒与集粒(粗颗粒与其表面

吸附的外包黏粒)为主,在空间中以聚集状相互搭接支撑构成土体的骨架结构,粗粒之间由部分黏粒与碳酸钙构成胶结联结,土体呈现支架-镶嵌微孔半胶结结构。从微观表现上来看,土体内部存在孔壁较光滑的竖向缝隙状狭长孔隙与竖向尺度较大的支架孔隙,结合土体宏观尺度的孔隙特征,即黄土内部存在近垂直分布的管状大孔隙,可认为竖向管状大孔隙是缝隙状狭长孔隙的宏观体现,在外力作用下竖向孔隙可以实现宏-微观之间不同尺度的转化^[32]。而重塑黄土颗粒形态较为破碎、碎屑增多,边缘形状不规则的集粒与少数单体颗粒在空间中以定向镶嵌接触为主,呈现密实堆砌状态,支架孔隙三向尺度较为相近,孔径略小于集粒粒径。

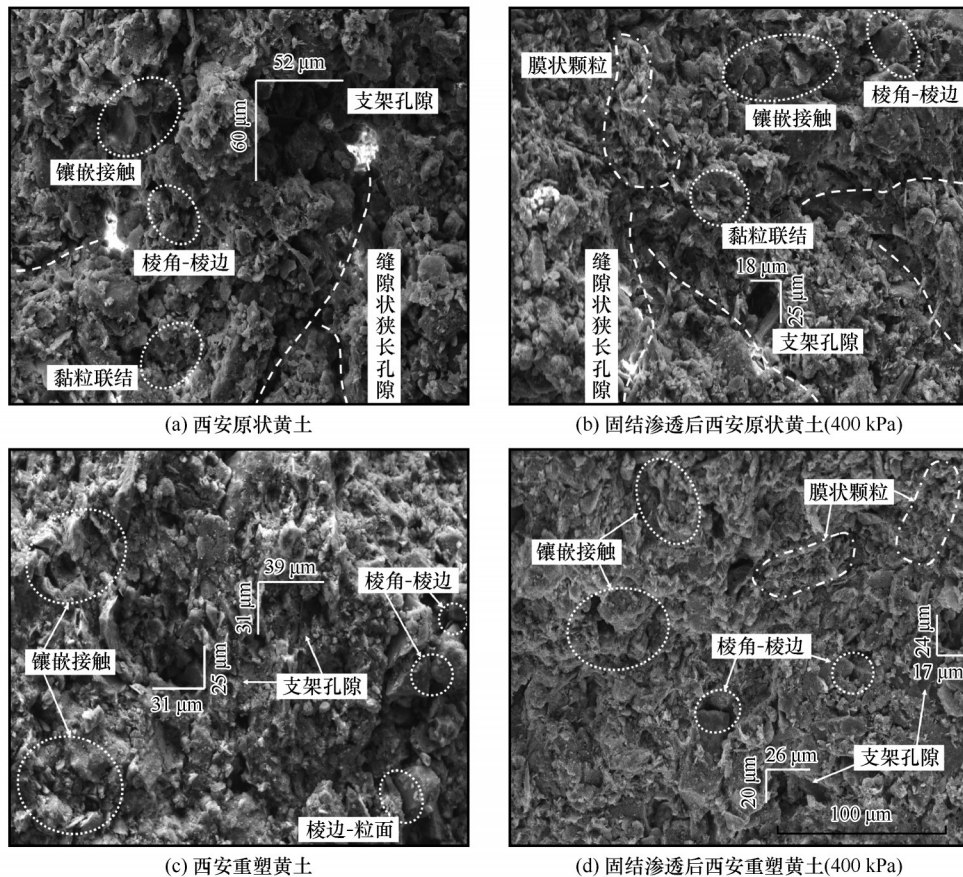


图5 固结渗透前后西安原状黄土与重塑黄土试样微观结构(放大1 000倍)

Fig. 5 Microstructures of undisturbed (a, b) and remolded (c, d) Xi'an loess specimens before (a, c) and after (b, d) consolidation and permeability tests (magnification 1 000 times)

经过固结渗透试验后,西安原状黄土和重塑黄土的骨架结构均以镶嵌接触为主,其中较大的单粒或集粒明显减少,颗粒粒径逐渐均匀,颗粒排列更加紧密,集粒表面的碎屑颗粒与膜状颗粒明显增多,支架孔隙的数量、尺度显著减小,原状黄土中

竖向狭长孔隙的曲折程度显著加深。由此可见,原状黄土作为在长期地质历史沉积过程中的产物,普遍具有颗粒竖向排列紧凑、横向排列疏松的结构特征,相比重塑黄土而言,具有更强的结构性。但随着固结压力的增大,水平向和竖直向原状黄土的渗

透各向异性特征逐渐减弱,原状和重塑黄土的结构性差异逐渐减小,渗透性能也呈现出逐渐趋于稳定的趋势。

2.3 冻融循环条件下黄土渗透系数各向异性分析

2.3.1 初始含水率对黄土渗透系数的影响

原状、重塑黄土的渗透系数与初始含水率的关系曲线如图6所示。由图6可知,随着初始含水率的增大,原状黄土水平向渗透系数呈曲线上升趋势,增长幅度为 $8 \times 10^{-6} \sim 12 \times 10^{-6} \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$;竖直向渗透系数呈抛物线变化特征,变化幅度为 $4 \times 10^{-6} \sim 10 \times 10^{-6} \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$;重塑黄土渗透系数的变化较为平缓,变化幅度为 $4 \times 10^{-6} \sim 7 \times 10^{-6} \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ 。初始含水率是土体产生冻胀性的基本因素之一,需要考虑不同初始含水率下胶结物质的黏性强弱以及颗粒外层结合水膜的厚度对土体冻胀性的影响。当外界环境温度低于 0°C 以下时,率先接触外界表层土体会首先发生冻结,并伴随有冰晶析出,这样就会在表层冻结土体与中心未冻区之间形成温度梯度。通常认为黏粒表面与冰晶表面总存在一层未冻水

膜,随着试样内部温度逐渐降低,未冻水膜逐渐冻结到冰晶中而变薄,变薄的未冻水膜会产生明显的吸力,吸收未冻水继续补充于变薄的未冻水膜,使得冰晶不断扩大,冻结范围逐步向内变化。西安黄土黏粒含量丰富,随着含水率的增大黏土矿物体积膨胀、黏性提高,土颗粒外围结合水膜变厚。高含水率土体冻结后,内部冰晶的发育劈裂作用较强,粒间孔隙的扩大态势也越发明显,加剧了土体结构及力学性质的弱化,一定程度增大了土体的渗流能力,这与水平向原状黄土的渗透系数变化规律较为符合。支架孔隙与粒间孔隙的竖向大尺度特征,易使破碎细小颗粒在融冰条件下下沉并填充原有孔隙,因此孔隙竖向压缩明显、尺度优势显著削弱,竖直向渗透系数明显减小,土体渗透各向异性特征逐渐消失[图4(a)]。由于重塑黄土的颗粒堆积结构相比于原状黄土内部结构而言密实很多,重塑黄土中孔隙冰的冻胀作用不甚明显,可见初始含水率的变化对于重塑黄土而言不是主要的影响因素。

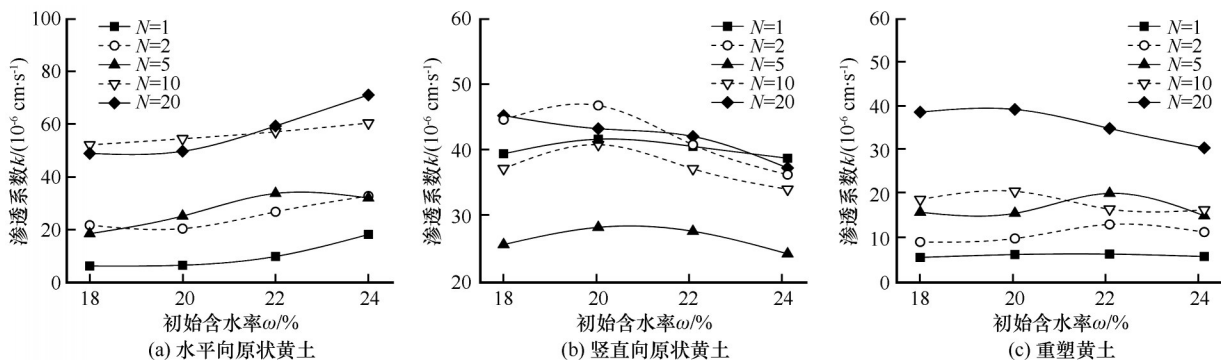


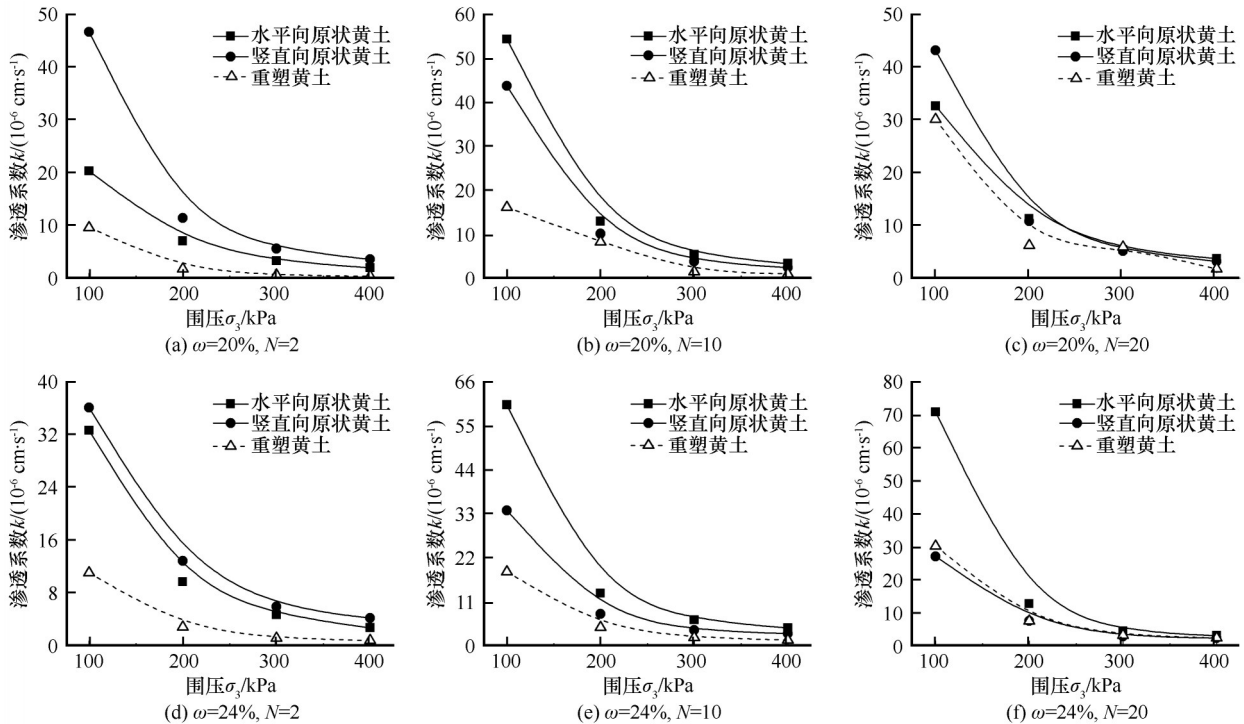
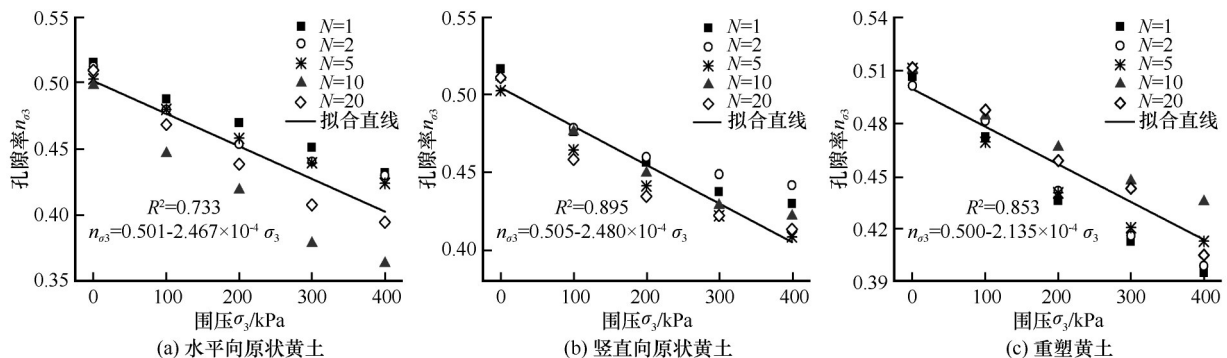
图6 初始含水率 ω 对原状和重塑黄土渗透系数 k 的影响($\sigma_3=100 \text{ kPa}$)

Fig. 6 k - ω curves of undisturbed loess [horizontal (a) and vertical (b)] and remolded loess (c)

2.3.2 围压对黄土渗透系数的影响

限于篇幅,图7仅展现初始含水率为20%、24%及冻融循环次数为2、10、20次的原状、重塑黄土渗透系数与围压的变化规律曲线。由图7可知,原状、重塑黄土的渗透系数随围压的增大而呈现数量级减小的趋势,原状黄土渗透系数的变化范围为 $1 \times 10^{-6} \sim 60 \times 10^{-6} \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$,重塑黄土渗透系数的变化范围为 $0.2 \times 10^{-6} \sim 40 \times 10^{-6} \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$,冻融后水平、竖直向原状黄土与重塑黄土的渗透系数相较于冻融前分别增大了1.3~15倍、1.3~3倍和1.3~10倍,且变化曲线的衰减幅度随着围压的增大逐渐减小,符合典型的指数衰减特征。通过建立围压与孔隙率的关系(图8,仅以初始含水率为20%

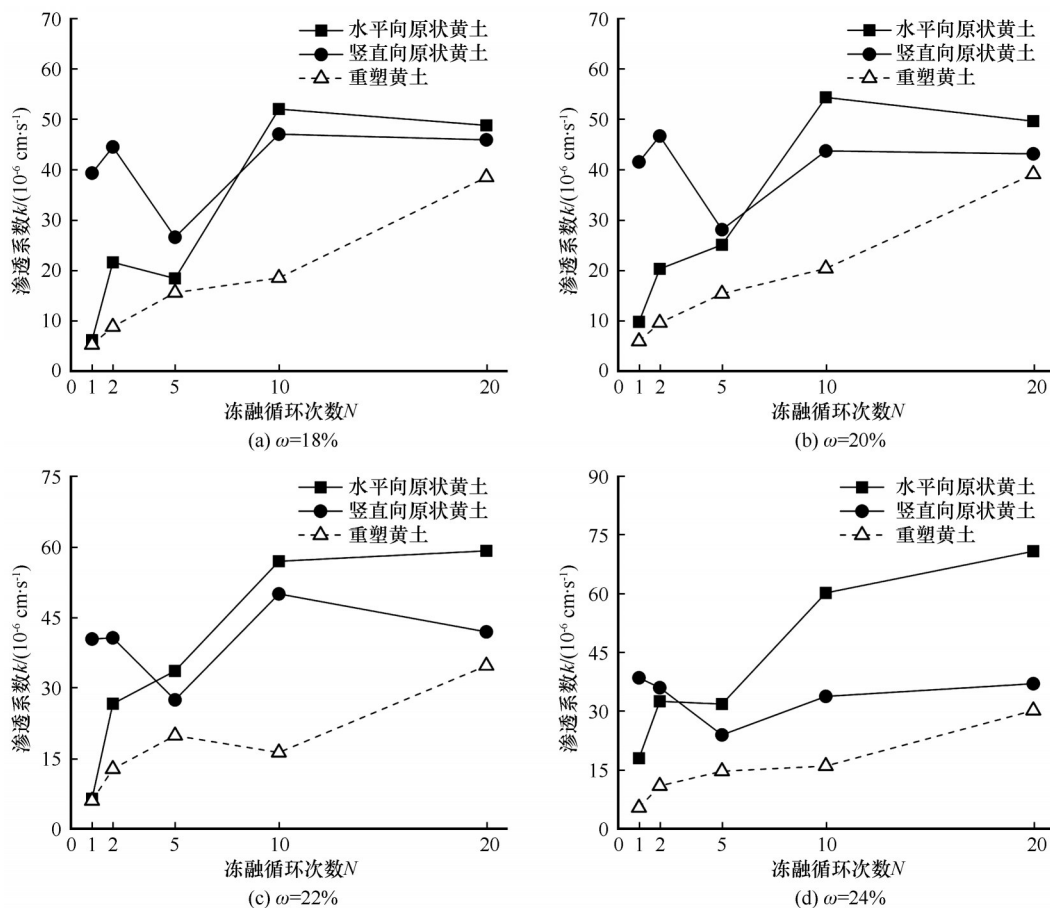
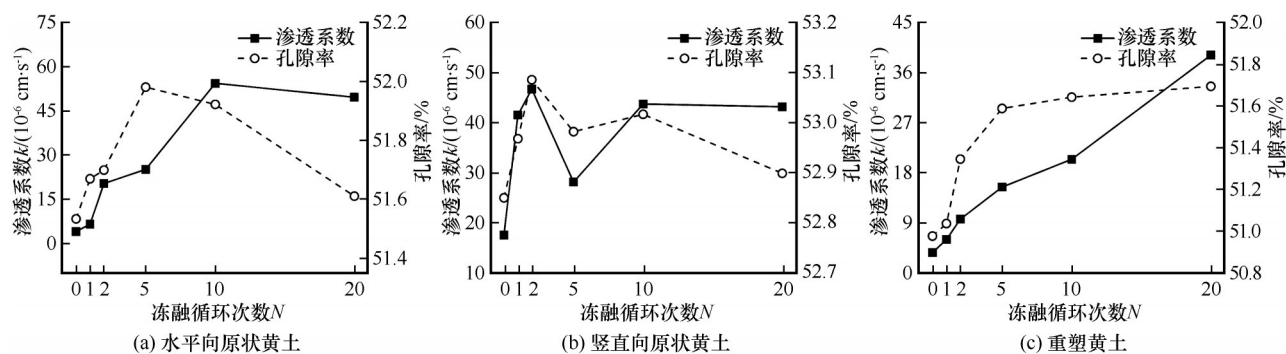
的原状、重塑黄土为例),可以看出围压与土体孔隙率的负线性相关性较强,即随着围压的增大,孔隙率按一定的比例逐渐减小,假设孔隙水是不可压缩流体,则可认为土体的压缩变形是伴随着孔隙水流出的内部孔隙压缩变化的累积结果。由此可见,随着固结围压的增大,土体结构单元体的排列逐渐紧密,胶结程度逐渐加深,内部孔隙被大幅度压缩,孔隙连通性显著降低,渗透能力明显减弱。当施加较大围压时,原状、重塑土体的结构强度均趋于稳定的残余强度,对渗透系数的变化幅度也产生了较为严重的限制,导致不同冻融次数及含水率条件下的原状和重塑黄土的渗透性质差异较小。

图7 围压 σ_3 对原状和重塑黄土渗透系数 k 的影响Fig. 7 k - σ_3 curves of undisturbed and remolded Xi'an loess under of freezing-thawing cycle number (N) of 2, 10 and 20图8 原状和重塑黄土围压 σ_3 与孔隙率 n_v 的关系($\omega=20\%$)Fig. 8 σ_3 - n_v curves of undisturbed loess [horizontal (a) and vertical (b)] and remolded loess (c)

2.3.3 冻融循环次数对黄土渗透系数的影响

原状、重塑黄土的渗透系数与冻融循环次数的关系曲线如图9所示。由图9可知,原状黄土渗透系数在前10次冻融过程中变化波动较大,水平向渗透系数呈数量级增大的阶梯上升趋势,渗透系数变化范围为 $5 \times 10^{-6} \sim 70 \times 10^{-6} \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$;竖直向渗透系数除了在冻融5次骤降外,其余冻融次数下渗透系数的变化幅度很小为 $25 \times 10^{-6} \sim 50 \times 10^{-6} \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ 。重塑黄土的渗透系数随冻融次数的增加逐渐增大,变化范围为 $5 \times 10^{-6} \sim 40 \times 10^{-6} \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$,但其始终小于原状黄土的渗透系数。土体经历冻融循环,最直接变化因素是土中水分经历了往复的相变过

程,影响着土体内水分的迁移分布和骨架结构的物质形态。随着冻融循环的持续进行,土体结构发生了不可恢复的改变,其中颗粒组构与排列、孔隙含量与分布逐步趋于稳定,新的孔隙联通道形成,为水分流动提供优势路径,使土体的渗透性能趋于新的平衡。通过绘制水平、竖直向原状黄土与重塑黄土的渗透系数及孔隙率与冻融循环次数的关系曲线(图10)可直观看出,黄土渗透系数的变化趋势与其孔隙率的变化趋势高度相似,两者的相似性说明了冻融循环作用下土体孔隙率的改变,是导致黄土渗透性质发生变化的主要原因。

图9 冻融循环次数 N 对原状和重塑黄土渗透系数 k 的影响 ($\sigma_3=100$ kPa)Fig. 9 k - N curves of undisturbed and remolded loess ($\sigma_3=100$ kPa)图10 原状和重塑黄土渗透系数 k 与孔隙率 n 的关系 ($\omega=20\%$)Fig. 10 k - n curves of undisturbed loess [horizontal (a) and vertical (b)] and remolded loess (c) ($\omega=20\%$)

冻融循环5次时竖直向原状黄土的渗透系数存在较大离散性,笔者认为可能削取该冻融批次竖向试样的原状试块内部存在一定程度的结构差异。在自然环境中原状黄土内部次生管状大孔隙(多为植物根洞)的含量、位置、延伸方向等不可能完全相同(图4),同时削取尺寸有限的黄土试样也不能保证其内部结构完全一致,因此极易出现离散性较大的试验结果。为确保试验结果的客观合理,应尽

量保证试验用土所处环境因素(如取土深度、周围植被情况、近期气温降水等)的统一性,同时还需多设几组平行试验,最大程度地减小由试验样品引起的试验误差。

2.3.4 各变量对黄土渗透系数各向异性的影响

限于篇幅,图11仅展现如下三幅原状黄土竖直-水平渗透系数比(k_v/k_h)与初始含水率、围压及冻融循环次数的变化曲线图。根据竖直-水平渗透系

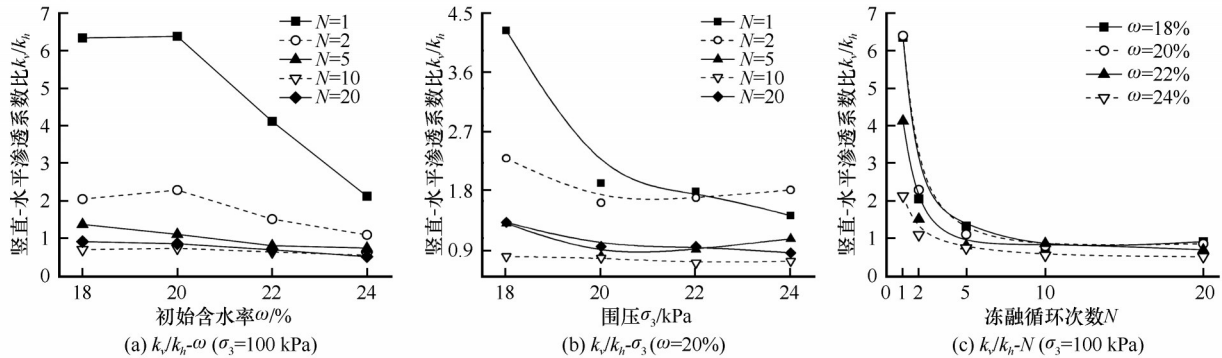


图 11 原状黄土竖直-水平渗透系数比与各变量的关系

Fig. 11 $k_v/k_h-\omega$, $k_v/k_h-\sigma_3$ and k_v/k_h-N curves of undisturbed loess

数比的定义可知,其数值越接近1,说明原状黄土纵横向的渗透差异越小;反之其数值越远离1,说明原状黄土纵横向的渗透差异越大。由图11可知,冻融循环1次时,原状黄土的竖直-水平渗透系数比均大于1,随着初始含水率和围压的逐渐增大,竖直-水平渗透系数比显著减小。冻融循环2次后,原状黄土的竖直-水平渗透系数比与各变量的变化关系曲线都较为平缓,最终经历20次冻融循环后竖直-水平渗透系数比稳定在0.9上下。由此可见,冻融循环作用通过改变黄土体颗粒排列与孔隙结构进而显著提高其渗透性能,并强烈弱化其各向异性特征,使得土体内部微观结构与外在力学表现逐渐趋于稳定,呈现出较为明显的各向同性特征。

3 结论

本文将冻融循环作用作为外界诱因,对比分析冻融前后初始含水率、冻融循环次数与围压对原状黄土渗透各项异性的影响以及原状、重塑黄土的渗透差异,同时得到围压、渗透系数与土体孔隙率的相关关系。结论如下:

(1) 未冻融时竖直向原状黄土的渗透系数为 $2 \times 10^{-6} \sim 18 \times 10^{-6} \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$, 水平向原状黄土和重塑黄土的渗透系数为 $0 \sim 4 \times 10^{-6} \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$; 经历冻融循环后水平、竖直向原状黄土及重塑黄土的渗透系数与初始含水率的关系曲线呈现逐渐上升、抛物线形式与变化平缓的不同特征,而三者的渗透系数均随冻融循环次数的增加呈现数量级增大的趋势;原状黄土的竖直-水平渗透系数比(k_v/k_h)由冻融前的4.38逐渐减小到0.90。

(2) 西安黄土黏粒含量丰富,骨架单元体以聚集状相互接触为主,原状试样内部竖向缝隙状狭长孔隙与竖向尺度较大的支架孔隙,可作为次生管状

大孔隙的微观结构基础;而重塑黄土结构骨架以集粒与单粒定向镶嵌接触为主,呈现密实堆砌状态。

(3) 初始含水率决定着胶结物质黏性的强弱以及结合水膜的厚度,是影响土体冻胀性强弱的基本因素之一,冻融循环过程中水分的固液相变及重分布会对土体骨架结构及孔隙状态造成不可逆的破坏,在显著提高黄土体渗透性能的同时,可以强烈弱化其各向异性特征。

(4) 通过建立围压、渗透系数与土体孔隙率的相关关系可知,原状、重塑黄土的孔隙率与围压存在极强的负线性相关性,渗透系数随围压的增大呈典型指数衰减特征,渗透系数与孔隙率具有相似的变化趋势,可见冻融循环过程中土体孔隙率的改变是导致其渗透性质变化的主要原因。

参考文献(References):

- [1] Fang Lili, Qi Jilin, Ma Wei. 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. [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.]
- [2] 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. [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.]
- [3] Zhao Qian, Yang Jinxi, Zhao Jinping. Experimental study on permeability of undisturbed loess under freezing-thawing and drying-wetting cycling conditions[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2020, 31(2): 119-126. [赵茜, 杨金熹, 赵晋萍. 冻融和干湿循环对原状黄土渗透系数的影响[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2020, 31(2): 119-126.]
- [4] Ni Wankui, Shi Huaqiang. Influence of freezing-thawing cycles on micro-structure and shear strength of loess[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2014, 36(4): 922 - 927. [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.]
- [5] Ye Wanjun, Li Changqing, Dong Xihao, et al. Study on damage identification of loess microstructure and macro mechanical response under freezing and thawing conditions[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2018, 40(3): 546 – 555. [叶万军, 李长清, 董西好, 等. 冻融环境下黄土微结构损伤识别与宏观力学响应规律研究[J]. 冰川冻土, 2018, 40(3): 546 – 555.]
- [6] Fang Jianhong, Chen Xin, Xu Anhua, et al. Experimental study of the influence of freezing-thawing cycles on physical and mechanical properties of Qinghai-Tibet red clay[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2018, 40(1): 62 – 69. [房建宏, 陈鑫, 徐安花, 等. 冻融循环对青藏红黏土物理力学性质影响试验研究[J]. 冰川冻土, 2018, 40(1): 62 – 69.]
- [7] Kozłowski T, Kurpiaswarianek K, Walaszczyk Ł. Application of SEM to analysis of permeability coefficient of cohesive soils[J]. Diabetes Care, 2011, 33(10): 2244 – 2249.
- [8] Xiao Donghui, Feng Wenjie, Zhang Ze. The changing rule of loess's porosity under freezing-thawing cycles[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2014, 36(4): 907 – 912. [肖东辉, 冯文杰, 张泽. 冻融循环作用下黄土孔隙率变化规律[J]. 冰川冻土, 2014, 36(4): 907 – 912.]
- [9] Wang Tiehang, Yang Tao, Lu Jie. Influence of dry density and freezing-thawing cycles on anisotropic permeability of loess[J]. Rock and Soil Mechanics, 2016, 37(Suppl 1): 72 – 78. [王铁行, 杨涛, 鲁洁. 干密度及冻融循环对黄土渗透性的各向异性影响[J]. 岩土力学, 2016, 37(增刊1): 72 – 78.]
- [10] Xu Jian, Wang Zhangquan, Ren Jianwei, et al. Comparative study on permeability characteristics of undisturbed and remolded loess under freezing-thawing condition[J]. Journal of Engineering Geology, 2017, 25(2): 292 – 299. [许健, 王掌权, 任建威, 等. 原状与重塑黄土冻融过程渗透特性对比试验研究[J]. 工程地质学报, 2017, 25(2): 292 – 299.]
- [11] Xiao Donghui, Feng Wenjie, Zhang Ze, et al. Research on the relationship between permeability and construction feature of loess under the freeze-thaw cycles[J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 2015, 42(4): 43 – 49. [肖东辉, 冯文杰, 张泽, 等. 冻融循环作用下黄土渗透性与其结构特征关系研究[J]. 水文地质工程地质, 2015, 42(4): 43 – 49.]
- [12] Kong Lingrong. Study on pore distribution and permeability under different vertical stress levels due to consolidation of soft clay[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2011, 7(Suppl 2): 1664 – 1666, 1682. [孔令荣. 不同固结压力软粘土的孔隙分布与渗透系数研究[J]. 地下空间与工程学报, 2011, 7(增刊2): 1664 – 1666, 1682.]
- [13] Tang Yongjin, Wang Pengfei, Shao Zhendong. Mercury intrusion porosimetry and error analysis[J]. Experimental Technology and Management, 2015, 32(5): 50 – 54. [汤永净, 汪鹏飞, 邵振东. 压汞实验和误差分析[J]. 实验技术与管理, 2015, 32(5): 50 – 54.]
- [14] Qi Tian. Theoretical and experimental studies on one-dimensional nonlinear consolidation of soft soil[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2008. [齐添. 软土一维非线性固结理论与试验对比研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2008.]
- [15] Zou Shengfeng, Li Jinzhu, Wang Zhongjin, et al. Seepage test and empirical models for soils based on GDS apparatus[J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2017, 51(5): 856 – 862. [邹圣峰, 李金柱, 王忠瑾, 等. 基于GDS渗透仪的渗透试验及经验模型[J]. 浙江大学学报(工学版), 2017, 51(5): 856 – 862.]
- [16] Zhao Qian. Investigation on the influence of freezing-thawing cycle and drying-wetting alternation on the permeability anisotropy and spatial variability of loess[D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2019. [赵茜. 冻融循环与干湿交替对黄土渗透各向异性及空间分异性的影响研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2019.]
- [17] Mair R J. Tunneling and geotechnics: new horizons[J]. Geotechnique, 2008, 58(9): 695 – 736.
- [18] Al-Sharraf M A, Gallipoli D, Wheeler S J. Experimental Investigation of evolving anisotropy in unsaturated soils[J]. Géotechnique, 2017, 67(12): 1033 – 1049.
- [19] Witt K J, Brauns J. Permeability-anisotropy due to particle shape[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1983, 109(9): 1181 – 1187.
- [20] Chan H T, Kenny T C. Laboratory investigation of permeability ratio of New Liskeard varved soil[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1973, 10(3): 453 – 472.
- [21] Basak P. Soil structure and its effects on hydraulic conductivity[J]. Soil Science, 1972, 114(6): 417 – 422.
- [22] Zhou Jian, Xu Jie, Yu Lianggui, et al. Study on microscopic mechanism regarding permeability anisotropy of Kaolin-Montmorillonite mixed clays[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2018, 39(1): 1 – 9. [周建, 徐杰, 余良贵, 等. 高岭-蒙脱混合黏土渗透各向异性的微观机理研究[J]. 岩土工程学报, 2018, 39(1): 1 – 9.]
- [23] Adams A L, Nordquist T J, Germaine J T, et al. Permeability anisotropy and resistivity anisotropy of mechanically compressed mudrocks[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2016, 53(9): 1474 – 1482.
- [24] Liang Yan, Xing Xianli, Li Tonglu, et al. Study of the anisotropic permeability and mechanism of Q₃ loess[J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, 33(5): 1313 – 1318. [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.]
- [25] Li Yuqi, Zhou Xuan. Study on the effect of anisotropic permeability on the behavior of an excavation[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2017, 13(5): 1250 – 1257. [李玉岐, 周旋. 渗透各向异性对基坑工程性状的影响研究[J]. 地下空间与工程学报, 2017, 13(5): 1250 – 1257.]
- [26] Zhang D M, Ma L X, Zhang J, et al. Ground and tunnel responses induced by partial leakage in saturated clay with anisotropic permeability[J]. Engineering Geology, 2015, 189: 104 – 115.
- [27] Ke Han, Wu Xiaowen, Zhang Jun, et al. Modeling saturated permeability of municipal solid waste based on compression change of its preferential flow and anisotropy[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2016, 38(11): 1957 – 1964. [柯瀚, 吴小雯, 张俊, 等. 基于优势流及各向异性随土覆压力变化的填埋体饱和渗流模型[J]. 岩土工程学报, 2016, 38(11): 1957 – 1964.]
- [28] Nanjing Hydraulic Research Institute. GB/T 50123-1999 standard for geotechnical test method[S]. Beijing: China Planning Press, 1999. [南京水利科学研究所. GB/T 50123-1999 土工试验方法标准[S]. 北京: 中国计划出版社, 1999.]
- [29] Qian Hongjin, Wang Jitang, Luo Yusheng. Collapsible loess foundation[M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 1985: 24 – 25. [钱鸿缙, 王继唐, 罗宇生. 湿陷性黄土地基[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1985: 24 – 25.]
- [30] Liu Dongsheng. Loess and environment[M]. Beijing: Science Press, 2007: 7 – 12. [刘东生. 黄土与环境[M]. 北京: 科学出版社, 1985: 7 – 12.]
- [31] Lei Xiangyi. Pore types and collapsibility of loess in China[J].

- Science in China (Series B), 1987, 12: 1309 – 1316. [雷祥义. 中国黄土的孔隙类型与湿陷性[J]. 中国科学(B辑), 1987, 12: 1309 – 1316.]
- [32] Zhao Qian, Su Lijun, Liu Hua, et al. Experimental study on influence of particle size composition on permeability coefficient anisotropy of loess [J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2020, 51(6): 1615-1626. [赵茜, 苏立君, 刘华, 等. 黄土粒度组成对其渗透系数各向异性影响的试验研究[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2020, 51(6): 1615-1626.]

Investigation on the influence of freezing-thawing cycle on the permeability coefficient anisotropy of loess

ZHAO Qian¹, SU Lijun^{2,3,4}, LIU Hua^{1,5}, YANG Jinxi¹

(1. School of Civil Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China; 2. Institute of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610041, China; 3. CAS Center for Excellence in Tibetan Plateau Earth Sciences, Beijing 100101, China; 4. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 5. Shaanxi Key Laboratory of Geotechnical and Underground Space Engineering, Xi'an 710055, China)

Abstract: In order to reflect the influence of freezing-thawing cycles on the permeability coefficient anisotropy of undisturbed loess and the permeability differences between undisturbed and remolded loess, Q₃ loess samples with obvious anisotropy were collected from Xi'an. Triaxial permeability tests were conducted to analyze the change law of permeability coefficient of horizontal and vertical undisturbed loess and remolded loess varying with initial water content, freezing-thawing cycles and cell pressure before and after freezing-thawing cycles. It can be obtained that before the freezing-thawing cycle, the vertical permeability coefficient of undisturbed loess is $2 \times 10^{-6} \sim 18 \times 10^{-6} \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$, while the horizontal permeability coefficient of undisturbed loess and the permeability coefficient of remolded loess is $0 \sim 4 \times 10^{-6} \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$. After the freezing-thawing cycles, the relationship curves between the permeability coefficient and the initial water content of the horizontal and the vertical undisturbed loess and remolded loess present different characteristics of gradual rise, parabola form and gentle change. However, with the increase of freezing-thawing cycles, the permeability coefficients of the horizontal and the vertical undisturbed loess and remolded loess shows an increasing trend of order of magnitude. Moreover, the ratio of vertical to horizontal permeability coefficient (k_v/k_h) of undisturbed loess decreases from 4.38 to 0.90 gradually, which can be seen that the freezing-thawing cycles can not only improve the permeability of loess significantly, but also strongly weaken the anisotropy of loess. By comparing the correlation between cell pressure, permeability coefficient and porosity, the results show that there is a negative linear relationship between the porosity and cell pressure of the undisturbed and remolded loess. It can be explained that the change of porosity is the main reason for the change of loess permeability by an exponential rule of permeability coefficient and the cell pressure, as well as the similar variation curves of the permeability coefficient and porosity.

Key words: undisturbed loess; remolded loess; freezing-thawing cycles; permeability coefficient; anisotropy; porosity

(责编委: 齐吉琳; 编辑: 周成林)