

冻融与浸泡下分散性黏土物化与压缩变形特性研究

韩啸¹, 贺睿¹, 王理想^{2,3}

(1. 中国电建集团贵阳勘测设计研究院有限公司, 贵州 贵阳 550081; 2. 黄山学院, 安徽 黄山 245021; 3. 安徽省(水利部淮河水利委员会)水利科学研究院, 安徽 合肥 233000)

摘要: 为了研究冻融循环和浸泡对分散性黏土的物化性质、变形特性和状态的影响, 通过分散性黏土室内物理、化学试验和压缩试验, 并基于试验结果提出一种符合冻融循环和浸泡条件下分散性黏土压缩变形公式。结果表明: 在经历了冻融循环和浸泡后, 黏土中的钠和钾离子减少了 91%~95%, pH 值从 9.24 降至 7.47; 颗粒尺寸 (0.075~0.005 mm 和 <0.005 mm) 增大, 液限和比重增加, 而塑限保持不变; 浸泡致使分散性黏土中钠离子交换流失, 压缩性高于非分散性黏土; 冻融循环和浸泡劣化了分散性黏土体, 加速了离子流失进程, 压缩曲线发生变化, 出现絮凝结构深度明显变深, 经过冻融循环和浸泡约 10 h 后, 分散性黏土呈完全絮凝结构。

关键词: 分散性黏土; 冻融循环; 可交换钠; 物化特性; 压缩性

中图分类号: TU452

文献标识码: A

Study on the Physicochemical and Compressive Deformation Characteristics of Dispersive Clay under the Coupling Effect of Freezing-thawing Cycles and Immersion

HAN Xiao¹, HE Rui¹, WANG Lixiang^{2,3}

(1. Guiyang Engineering Corporation Limited, Guiyang 550081, China; 2. Huangshan University, Huangshan 245021, China; 3. Anhui and Huaihe River Institute of Hydraulic Research, Hefei 233000, China)

Abstract: To investigate the impact of freeze-thaw cycles and immersion on the physicochemical properties, deformation characteristics, and state of the dispersive clay, indoor physical and chemical tests as well as compression tests on the dispersive clay were conducted. Based on the experimental results, a compression deformation formula for the dispersive clay under freeze-thaw cycles and immersion conditions was proposed. The research results show that after experiencing freeze-thaw cycles and immersion, the sodium and potassium ions in the clay decreased by 91% to 95%. The pH value dropped from 9.24 to 7.47. The particle size (0.075~0.005 mm and <0.005 mm) increased, the liquid limit and specific gravity increased, while the plastic limit remained unchanged. Immersion caused the loss of sodium ion exchange in the dispersive clay, leading to higher compressibility than the non-dispersive clay. Freeze-thaw cycles and immersion deteriorated the dispersive clay body, accelerated the process of ion loss, and changed the compression curve, depth of flocculation structure significantly increases. After about 10 hours of freeze-thaw cycles and immersion, the dispersive clay exhibits a fully flocculated structure.

Keywords: dispersive clay; freeze-thaw cycles; exchangeable sodium; physicochemical properties; compressibility

收稿日期: 2024-04-22

基金项目: 安徽省自然科学基金“水科学”联合基金项目(2202085US01); 国家自然科学基金项目(51378164)。

第一作者: 韩啸(1988—), 男, 高级工程师, 硕士, 从事工程地质水文地质方面的研究。
E-mail: hanxiaol124@sina.com

通信作者: 王理想(1987—), 男, 工程师, 博士(后), 从事特殊性土与堤防灾变方面的研究。
E-mail: wanglixiang19871025@gmail.com

分散性黏土是一种特殊土，其黏土颗粒在水中浸泡时会自发分离，并进入水中悬浮，所以水的上层往往含有大量黏土颗粒^[1-2]。此外，因为黏土颗粒中含有较多的可交换钠离子，也使分散性黏土的抗侵蚀性较低。分散性黏土分布广泛，包括美国、西班牙、澳大利亚、南非、伊朗和中国均有一定面积分布。目前，国外已经修建不少涉及到分散性黏土的水利和交通工程^[3-5]，在中国也有不少涉及到分散性黏土的水利和交通工程已修建或正在修建，如新疆额尔齐斯河引水工程、黑龙江尼尔基水库、嫩江引水工程和肇兰新河工程。这些工程大多位于季节性冻土地区的低洼地带（图1）。区域性气候与分布位置导致这些部位的分散性黏土易经历冻融循环和长期浸泡，引发了一些工程问题，如路基破损、坝体渗漏和山体滑坡等。

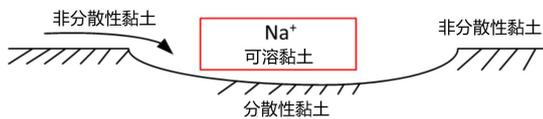


图1 分散性黏土形成地形示意图

以往的研究主要集中在分散性黏土的识别、改良和工程处理^[6-8]。以及物化特性方面包括的颗粒成分、矿物成分、分散性、液限和塑限、pH值、离子组成、可溶性盐和比重的相关研究^[9-11]。但是，针对有关冻融和浸泡等环境下，分散性黏土物化性质变化机理方面的研究还较为欠缺。同时，在冻融循环和浸泡条件下，对非分散性黏土的变形性能的研究也很有限。在这些有限的研究中，大多数研究侧重于分散性黏土单一工况下的压缩变形，如自由融化或浸泡^[11-14]。SHI X等^[15]对改性分散性黏土进行了真空饱和和单向压缩试验，研究了不同密实度的饱和分散性黏土样品的压缩变形特性，并提出了饱和分散性黏土的压缩变形特性是非线性的。此外，YIN Q X等^[16]研究了青藏高原的粉质黏土在不同含水量和冻结前的干密度条件下的双向冻结和单向解冻的压缩变形特性，并推导出压缩性、温度梯度、含水量和冻结前干密度之间的关系。YASUFUKU N

等^[17]进行了非饱和密实黏土的浸泡沉陷试验，考虑了初始含水量和正应力，讨论了黏土的压缩性，并提出一维压缩下的变形预测简化关系。由此看来，对于分散性黏土的压缩特性研究仍有待完善。

分散性黏土在中国东北分布广泛，受东北地区气候影响，每逢9月至次年6月，分散性黏土存在明显的冻融与浸泡情况，频繁发生边坡变形或路基破坏等工程问题。经现场调查发现，在相关工程中，以分散性黏土层出现沉降或裂缝等破坏现象尤为突出。所以开展针对分散性黏土在受冻融与浸泡影响后的物化性质变化与变形特性的研究十分必要。

经最新研究表明：分散性黏土含有大量可交换钠离子和可溶性盐，易在水中溶解^[18]。由于其水稳定性较差，水会破坏黏土结构^[19]。此外，分散性黏土的工程特性和失效模式已经得到深入研究^[20-23]。分散性黏土的工程特性包括颗粒大小、矿物组成、物化指标、分散性以及物理和力学特性。根据研究成果^[24-26]，确定了4种分散性黏土破坏类型，包括侵蚀破坏、渗透破坏、冻融循环破坏和滑坡破坏（如图2所示）。目前，冻融循环和浸泡失稳被定义成一种新型的分散性黏土破坏模式^[27-28]，其在冻融循环和浸泡下发生了大变形（如图3、图4所示），其中图3为依据试样破坏实际情况所绘制的破坏示意图。

本研究首先分析了在黑龙江省大庆市广泛分布的分散性黏土的性质，这些黏土代表着中国东北地区工程建设中涉及的分散性黏土的主要特征。在分析的基础上，为研究区域性气候影响下的分散性黏土的物化性质变化和变形特性，本研究开展了不同的初始含水量、干密度、冻融循环次数和浸泡条件下，分散性黏土的物化分析和压缩特性试验，并与非分散性黏土的压缩变形特性进行了比较。这些试验结果可用于解释分散性黏土地基的沉降机制，并揭示冻融循环和浸泡后物化性质的变化，形成了符合分散性黏土压缩特性的变形公式，为中国东北地区分散性黏土地基发生破坏后的修复提供了理论依据。



图2 东北地区分散性黏土经过冻融循环和浸泡作用后的滑坡破坏



图3 分散性黏土样品冻融循环3次后大变形破坏状态



图4 分散性黏土冻融循环和浸泡后大变形破坏状态

1 试验材料和方案

本文作者团队在水利工程建设实践中发现，分散性黏土边坡发生了比较严重的滑坡失稳现象（同样建设条件下非分散性黏土并不出现这种严重的失稳现象），作者前期研究发现：分散性黏土水稳性很差，这种特性与土中的化学成分的含量有着密切的关系，也会引起堤防和渠道形成较大的变形问题，引起路基出现沉陷破坏。本文通过研究分散性黏土在受到环境气候以及水文条件变化（冻融和浸泡）下理化性质和压缩性的变化规律，以图揭示出分散性黏土堤防和渠道产生滑坡失稳以及堤顶路基产生沉陷失稳的机制。

1.1 试验材料性质分析

1.1.1 物理性质

试验用土取自中国东北黑龙江省大庆市（坐标：45°31'13"N, 125°05'04"E），取土深度为0.5~1.5 m。根据中国国家标准 GB/T 50123—2019 对分散性黏土开展了基本性质研究，物理性质见表1。由表可知，分散性黏土具有低液限、低自由膨胀率、强碱性和有机物含量较低的特点。此外，为比较分散性黏土的物理、化学和压缩特性，同时在取土地点采集了具有类似特性的非分散性黏土进行测试。分散性黏土的最大干密度为1.65 g/cm³，根据压实试验，最佳含水量为19.6%。建筑填料的最小干密度为1.50 g/cm³（压实度：0.93），水分含量控制在20%±2%。

表 1 试验黏土的基本物理化学性质

试验黏土	比重Gs	液限/%	塑限/%	塑性指数/%	自由膨胀率FSR/%	颗粒含量/%			黏土矿物含量/%			有机物含量/%	pH值	阳离子交换容量/(meq/100g)	比表面积/(m ² /g)
						>0.075mm	0.075~0.005mm	<0.005mm	伊利石/蒙脱石混层	伊利石	高岭石				
分散性黏土	2.71	35	19	16	34	30	47	23	72	14	7	0.78	9.24	15.3	101
非分散性黏土	2.72	39	25	14	27	31	50	19	—	—	—	2.33	7.98	—	87

注：分散性黏土和非分散性黏土是从同一地点收集的。

1.1.2 分散性

基于碎屑试验、针孔试验、化学试验（可交换钠百分比和钠吸附比）以及双比重计试验（表 2）。测试结果显示，分散性黏土具有中等到高度分散的特点，碎屑试验和针孔试验结果显示，该黏土容易被侵蚀，并且是分散的。

表 2 分散性黏土的分散性

试验项目	指标	结果	分散性鉴定	参考规范标准
碎屑测试	水色	黑	高度分散性	
双比重计测试	分散率/%	96.6	一般分散性	
针孔测试	终了孔径/mm	50	中度分散性	ASTM D4647—1993
	针孔尺寸	×3		
	结束流量/(mL/s)	1.7		
	水色	黑		
可交换钠百分比	ESP/%	23.15	高度分散性	
钠吸附比	SAR	25.77	一般分散性	

鉴别标准：

1) 双重测浊器试验：分散率>50%，分散；分

散率=30%~50%，过渡土壤；分散率<30%，非分散。

$$2) SAR = Na^+ / \sqrt{(Ca^{2+} + Mg^{2+}) / 2} \quad , \quad \text{当 TDS}=5$$

meq/L 时, SAR>2.7 为一般分散性；当 TDS=10 meq/L 时,SAR>4.2 为一般分散性；当 TDS=100 meq/L,SAR>13.0 为一般分散性。

$$3) ESP = Na^+ / CEC \times 100 \quad , \quad \text{当 ESP}<7\% \text{ 无分散性；}$$

ESP=7%~15%，中度分散性；ESP≥15%，高度分散性。

1.1.3 离子含量分析

相关文献已经证明，分散性黏土含有大量可交换钠离子，会影响其物理和力学特性^[18]。本文侧重于研究分散性黏土中阳离子和阴离子在不同条件下的变化特征。为此，开展分散性黏土的相关离子含量变化检测试验。表 3 为分散性黏土中主要离子的含量。

表 3 分散性黏土及非分散性黏土主要离子含量

名称	阴离子				阳离子				mg/kg 可溶性盐
	CO ₃ ²⁻	HCO ₃	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	Na ⁺	
分散性黏土	9.5	110.1	243.2	464.0	89.8	54.4	40.1	1 131.8	3 815
非分散性黏土	9.2	114.3	257.6	459.1	91.3	59.8	47.9	97.2	2 10.2

1.2 试验方案

1.2.1 试验准备

试验装置如图 5 所示，试验步骤如下：

1) 黏土经烘箱干燥，粉碎后使用 2 mm 网格的岩土筛进行筛分。

2) 根据测试条件，将黏土与纯净蒸馏水按比例混合，并静置 24 h。

3) 根据试验方案中的初始干密实（表 4）进行击实制样。样品的直径和高度分别为 61.8 mm 和 19.0 mm。样品的高度设置为 19.0 mm 的目的是防

止在冻融-浸泡循环中超过 20.0 mm 的高度限制。

4) 将样品放入低温试验箱中，进行重复冻融以达到制定方案所需的冻融循环次数。冻结时间和解冻时间均为 24 h。在冻结过程中采用逐步缓慢冷却法，以防止由于温度梯度过大而导致样品内的水分迁移。试验箱内的温度逐渐降低至冻结温度（-20℃），冷却速率为 4℃/h。样品放入自动压缩试验装置中，底部放置透水岩石。对于不浸泡的试验，直接进行压缩试验。对于浸泡试验，样品在进行压缩试验前浸泡在蒸馏水中 12 h。浸泡 12 h 后，施加 2 kPa 的垂直压力以确保样品与试验装置接触。

表 4 试验方案

初始含水率 $w/\%$	初始干密度 $\rho_d(\text{g}/\text{cm}^3)$	饱和度 $S_r/\%$	冻融循环次数	是否浸泡	冻、融温度/ $^{\circ}\text{C}$
16、20、24、28	1.53、1.59、1.63	—	0	否	—
20	1.53、1.59、1.63	70.6、76.9、81.8	0	是	—
20	1.53、1.59、1.63	—	5	否	-20、20
16	1.53、1.59、1.63	56.5、61.7、65.4	1、5、10	是	-20、20
20	1.53、1.59、1.63	—	1、5、10	是	-20、20
24	1.53、1.59、1.63	84.7、92.3、98.1	1、5、10	是	-20、20
28	1.53、1.59、1.63	98.8、100、100	1、5、10	是	-20、20
20*	1.53	—	0	否	—
20*	1.53	—	0	是	—
20*	1.53	—	1、5、10	否	-20、20

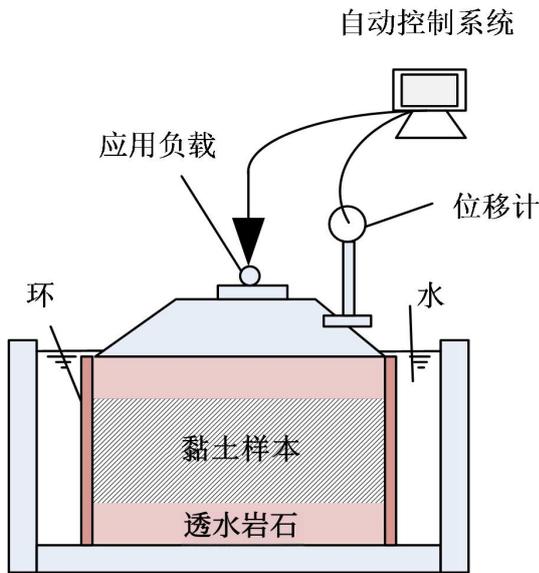


图 5 试验装置

1.2.2 物化特性分析试验

在经历了 10 个冻融循环和浸泡后，对分散性黏土的离子成分、pH 值、液限和塑性限、颗粒大小和比重进行测试。表 5 为测试项目、指标、测试方法和测试方法标准。

表 5 测试方案和方法标准

测试项目	指标	测试方法	测试方法标准
离子组成	阳离子	电感耦合等离子体质谱法	HJ 700—2014(China)
	阴离子	离子色谱法	HJ 84—2016(China)
可溶性盐	—	重量法	HJ/T 51—1999(China)
比重	G_s	比重瓶法	GB/T 50123—2019 (China)
液/塑限	LL/PL	液限和塑限联合测试	GB/T 50123—2019 (China)
颗粒成分	—	密度计法	ASTM D422-63/GB/T 50123—2019
pH	pH 值	电位法	GB/T 50123—2019 (China)
土壤的分散性	—	碎屑测试/针孔测试/化学测试/双比重计测试	ASTM D4647—1993

1.2.3 压缩试验

对样品进行逐级加载，压力分别为 50、100、200、400、800 kPa。在每个加载水平下记录变形量，若每小时的变形量小于 0.01 mm，则认为变形稳定，则施加更高一级的加载水平，压缩试验的整体流程如图 6 所示。为突出分散性黏土在冻融循环和浸泡下的压缩性特点，还对与分散性黏土具有相似颗粒级配的非分散性黏土进行了试验比较，非分散性黏土的物理特性见表 1。

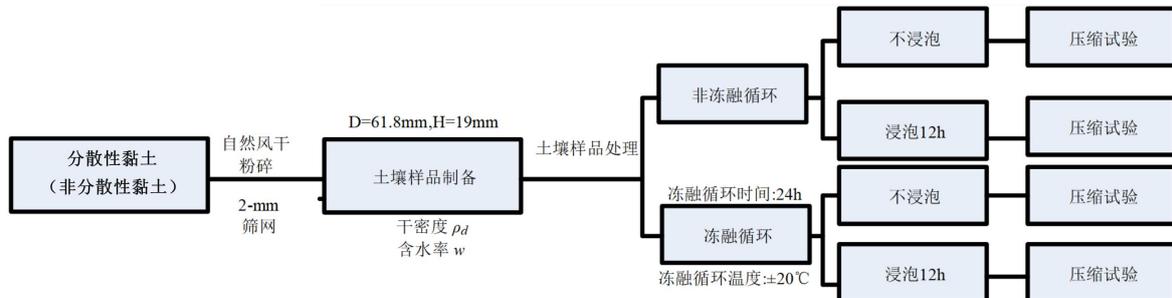


图 6 压缩试验流程

2 结果分析

2.1 冻融循环和浸泡条件下分散性黏土的物理化学性质

表6为冻融循环10次和浸泡前后分散性黏土中主要离子含量变化情况。由表可知，冻融循环和浸泡后的分散性黏土中的阳离子和阴离子明显降低。在浸泡12h后，未经冻融循环处理的分散性黏土的阳离子含量降低12%~32%，阴离子含量降低14%~27%。经过10次冻融循环和浸泡水12h后，钠和钾离子的含量降低91%~95%，阴离子含量降低64%~92%。分散性黏土中主要离子的含量显著减少，主要原因是冻融循环劣化黏土体，大量裂缝生成，加速了离子溶解于水中。

表6 冻融循环10次和浸泡前后分散性黏土中主要离子含量变化

离子	mg/kg		
	未经冻融循环和浸泡	浸泡	冻融循环和浸泡
CO ₃ ²⁻	9.5	6.9	3.4
HCO ₃ ⁻	110.1	82.5	15.4
CL ⁻	243.2	209.3	18.9
SO ₄ ²⁻	464.0	399.6	35.8
Ca ²⁺	89.8	76.6	34.6
Mg ²⁺	54.4	47.7	37.8
K ⁺	40.1	27.3	3.5
Na ⁺	1131.8	788.5	57.3

表7为分散性黏土冻融循环10次和浸泡前后物理性质参数表。由表可知，在经历了10次冻融循环和浸泡后，分散性黏土的物理性质发生了变化。主要有：pH值从9.24降至7.47，碱性被明显弱化。黏土体中的颗粒尺寸（0.075~0.005mm和<0.005mm）增大。液限和比重略微增大，但塑限保持不变。

表7 分散性黏土冻融循环10次和浸泡前后物理性质参数表

冻融和浸泡次数	比重Gs	液限/%	塑限/%	塑性指数/%	颗粒含量/%			pH值
					>0.075mm	0.075~0.005mm	0.075~0.005mm	
0	2.71	35	19	16	30	47	23	9.24
10	2.73	38	20	18	17	50	33	7.47

2.2 分散性黏土在冻融循环和浸泡条件下的压缩特性

图7—10为初始干密度为1.53g/cm³的分散性黏土在1次冻融循环下的孔隙比与垂直应力之间的关系曲线。由图可知，不同初始含水率情况下，黏土样品的孔隙比与垂直压力间存在明显的线性关系，表明对于分散性黏土样品，初始含水量对压缩性影响可以忽略。

图11为不同冻融循环次数条件下的分散性黏土的孔隙比与垂直应力之间的关系曲线。由图可知，随着冻融循环次数的增加，分散性黏土样品的压缩性变化不大。当初始含水量为20%时，冻融循环导致分散性黏土体恶化，更多的裂缝生成，加速了水侵蚀土体。图12为不同初始干密度情况下的分散性黏土的孔隙比与垂直应力之间的关系曲线。由图可知，对于相同的初始含水量，不同初始干密度样品的孔隙比与垂直应力之间有着明显的线性关系。此外，当垂直应力为800kPa时，样品的压实度相对较高，不同干密度样品的孔隙比大致相同。

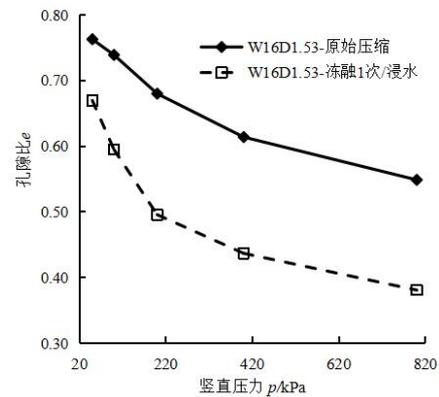


图7 分散性黏土冻融循环孔隙比与垂直应力之间的关系曲线 ($\rho_d=1.53 \text{ g/cm}^3, \omega_0=16\%$)

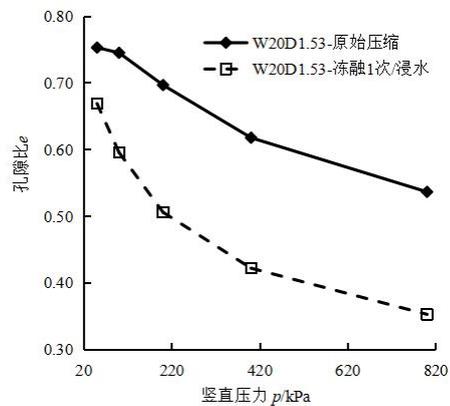


图8 分散性黏土冻融循环孔隙比与垂直应力之间的关系曲线 ($\rho_d=1.53 \text{ g/cm}^3, \omega_0=20\%$)

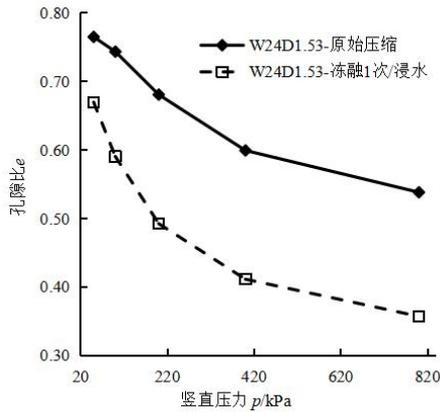


图9 分散性黏土冻融循环孔隙比与垂直应力之间的关系曲线 ($\rho_a=1.53 \text{ g/cm}^3, \omega_0=24\%$)

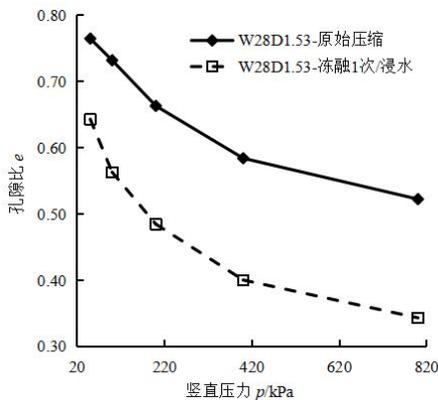


图10 分散性黏土冻融循环孔隙比与垂直应力之间的关系曲线 ($\rho_a=1.53 \text{ g/cm}^3, \omega_0=28\%$)

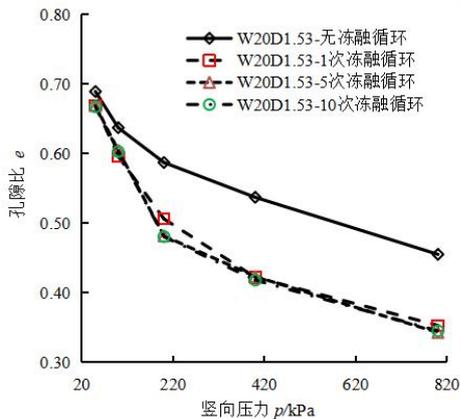


图11 冻融循环条件下不同冻融次数分散性黏土的孔隙比与垂直应力之间的关系曲线

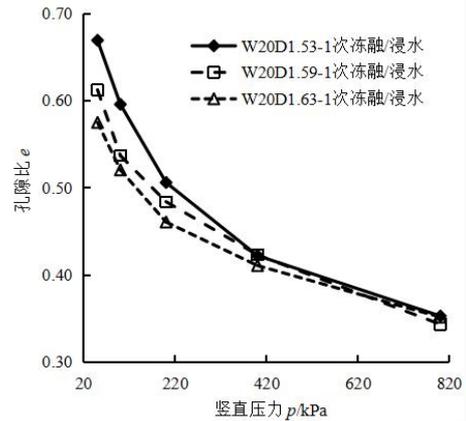


图12 冻融循环条件下不同初始干密度分散性黏土的孔隙比与垂直应力之间的关系曲线

2.3 分散性和非分散性黏土在冻融循环和浸泡条件下的压缩特性差异

图13为浸泡条件下(未经冻融循环)分散性黏土和非分散性黏土的压缩曲线,分散性黏土压缩性大于一般性黏土,主要原因是由于分散性黏土中可交换钠的沉淀,导致黏土颗粒分散,进而在相同垂直应力下,分散性黏土的孔隙比小于非分散性黏土,即分散性黏土的状态更加密实,压缩性更高。图14为冻融循环和浸泡条件下非分散性黏土的压缩曲线,随着冻融循环次数的增加,在浸泡条件下,非分散性黏土的孔隙比逐渐减小,压缩逐渐增加。

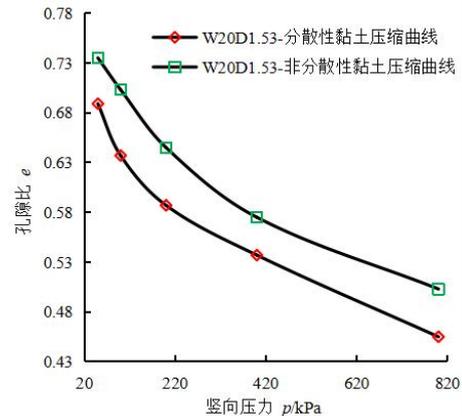


图13 浸泡下分散性黏土和非分散性黏土的 $e-p$ 曲线(无冻融循环)

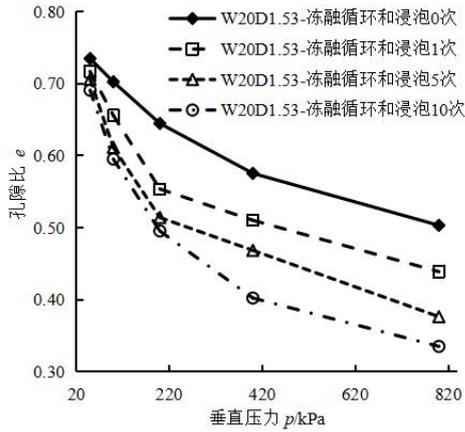


图 14 冻融循环和浸泡下非分散性黏土的 $e-p$ 曲线

由图 11 可知, 未经冻融循环的分散性黏土压缩性曲线与经过冻融循环的分散性黏土压缩曲线存在明显区别, 而经过不同次数冻融循环的分散性黏土压缩曲线之间无明显区别。由此可见, 分散性黏土的压缩性受冻融过程的影响较大, 而不是冻融循环次数。这与非分散性黏土的压缩性形成了一定的区别。对比图 11 和图 14 可知, 分散性和非分散性黏土的压缩性特点明显不同。非分散性黏土的压缩曲线受冻融循环次数的影响, 分散性黏土的压缩性受冻融过程的影响较大, 而不是冻融循环次数。

2.4 分散性黏土在冻融循环和浸泡条件下压缩变形的计算

由压缩试验结果可知, 分散性黏土的压缩孔隙比和垂直应力呈线性相关。因此, 分散性黏土在冻融循环和浸泡条件下的经验压缩方程如下所示:

$$v = N - \lambda \lg p_i \quad (1)$$

式中: v 为比容, $v=1+e_i$, e_i 为黏土的孔隙比; p_i 为垂直应力; N 为 $v-\lg p_i$ 曲线上 $\lg p_i=0$ 时的 v_0 值; λ 为黏土处于饱和浸泡状态时的压缩指数, 是 $v-\lg p_i$ 曲线斜率的绝对值。

此外, 一维压缩体积应变 ε_v (压缩为正) 可以表示如下:

$$\varepsilon_v = \int_{\varepsilon_{v,0}}^{\varepsilon_v} (d\varepsilon_v) = -\int_{v_0}^v (dv/v) = -\ln\left(\frac{v}{v_0}\right) \quad (2)$$

通过将公式 (1) 代入公式 (2), 我们得到:

$$\varepsilon_v = -\ln\left(\frac{1+e_i}{1+e_0}\right) = -\ln\left(\frac{N-\lambda \lg p_i}{N-\lambda \lg p_0}\right) \quad (3)$$

在确定了一维压缩体积应变 ε_v 的计算方法之外, 冻融循环和浸泡后垂直应力下的压缩变形量 Δh 也

是分散性黏土压缩性特征的重要指标。笔者在试验室进行了冻融循环和浸泡条件下分散性黏土样品压缩性试验, 根据测试结果得到了冻融循环和浸泡后垂直应力下的压缩变形量 Δh , 可按如下公式计算:

$$\Delta h = -H_0 \ln\left(\frac{N-\lambda \lg p_i}{1+e_0}\right) \quad (4)$$

式中: Δh 为冻融循环和浸泡下的压缩变形量; p_i 为垂直应力; e_0 为 $\lg p_i=0$ 时对应的孔隙比, 可以近似为初始孔隙比; H_0 为黏土样品的高度。

对于具有较大厚度的均匀分散性黏土层, 可以逐层进行计算以提高准确性。大厚度分散性黏土的压缩变形可以表示如下:

$$z = \sum_{i=1}^n \Delta h_i = \sum_{i=1}^n -H_0 \ln\left(\frac{N-\lambda \lg p_i}{1+e_0}\right) \quad (5)$$

式中: z 为总的压缩变形量; Δh_i 为每个层的压缩变形量; n 为层数; p_i 为在该层计算点处的外部荷载加上自重应力。

式 (4) 和式 (5) 仅为描述分散性黏土压缩性的特定性。在工程实践中, 需通过针对性研究来验证其可靠性。而经验性的压缩计算方程是根据试验数据推导出的, 因此不需要使用试验数据进行验证。

3 讨论

图 15 为未经冻融循环的分散性黏土的渗透系数^[19]。由图可知, 未经冻融循环的分散性黏土的渗透系数非常小, 渗透性较弱。在浸泡条件下, 分散性黏土侵蚀较慢, 并保持原始状态。然而, 在经历冻融循环后, 冻融循环导致分散性黏土产生内部和表面裂缝, 水迅速侵蚀到黏土中。分散性黏土中的大量可交换钠离子溶解在水中, 改变了黏土的结构, 絮状土样深度明显变深 (图 16)。

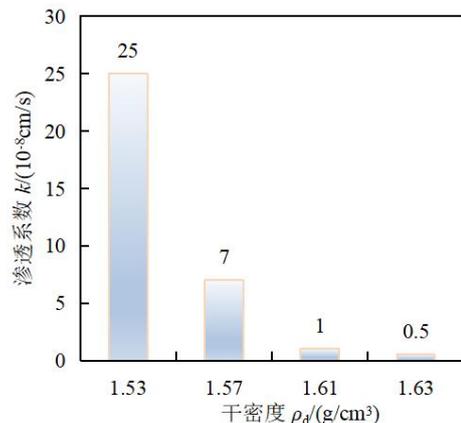


图 15 不同干密度分散性黏土的渗透系数

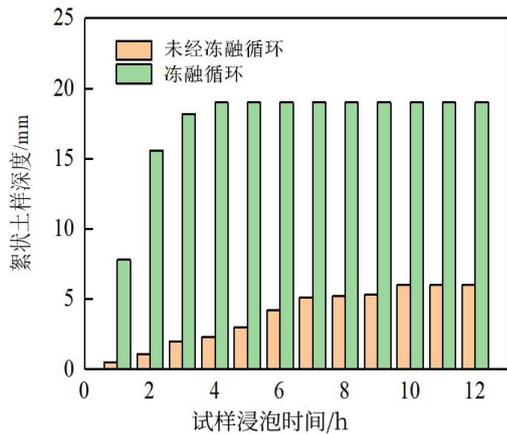


图 16 经冻融循环和未经冻融循环的分散性黏土絮状土样深度

分散性黏土经过一次冻融循环后，表面出现裂缝。在试验过程中，发现随着冻融循环次数的增加，裂缝数量迅速增加。分散性黏土经历了冻融循环和浸泡后，表层和内层形成了两个具有不同状态的层次。由于分散性黏土具有其独特的性质，土体中的胶体颗粒和可溶性盐物质溶解在水中，使土体呈絮凝结构。分散性黏土在冻融循环和浸泡条件下的絮凝结构状态呈泥浆状，使用注射器吸出了絮凝结构的泥浆，进行干燥并称重，通过分散性黏土的絮凝结构和非絮凝结构的质量比来确定厚度。发现大约浸泡 10 h 后，分散性黏土样品呈完全絮凝结构。

在国内外目前的研究中，主要是针对分散性黏土在常温和抽气饱和下的力学性质和压缩性质等常规性质的研究。理化性质也是常规下物理性质和化学成分的分析，较少考虑实际分散性黏土处于某些气候变化和水文地质变化的影响，而分散性黏土的性质受这方面的影响又非常巨大，工程上分散性黏土滑坡失稳主要由于气候变化，如冻融和长期浸泡引起分散性黏土理化性质和力学性质巨变和水文地质改变所引起^[24-28]，因此本文的研究成果可以指导工程建设和运行管理。目前的研究不足主要体现在研究成果的区域局限性，后期会进一步对国内其他地区分散性黏土进行验证分析。

4 结论

本文研究了冻融循环和浸泡对分散性黏土的物化性质、压缩性能和状态的影响，得到如下结论：

1) 冻融循环导致分散性黏土破坏，产生裂缝，加速了钠离子和阴离子的流失，引起物化性质发生改变。经过冻融循环和浸泡后，分散性黏土的钠和钾离子含量降低了 91%至 95%。pH 值从 9.24 降至 7.47，在区间 0.075~0.005 mm 和 <0.005 mm 的颗粒尺寸有所增加，

同时液限和比重略有增加，但塑限仍然不变。

2) 冻融循环和浸泡对分散性黏土的压缩性质产生显著影响。在冻融循环和浸泡条件下，分散性黏土样品的孔隙比和垂直应力呈线性相关，分散性和非分散性黏土的压缩性质明显不同。

3) 冻融循环和浸泡影响分散性黏土状态。分散性黏土样品在冻融循环和浸泡约 10 h 后表现出明显的絮凝结构。然而在没有冻融循环的情况下，絮凝只在样品的表面形成。

4) 基于试验测试结果，得出一种符合冻融循环和浸泡条件下的分散性黏土压缩变形公式。

参考文献

- [1] MOHAMED A E M. Study on the existence of dispersive clays in some scour regions in Assiut[J]. Journal of engineering sciences, Assiut University, 2008, 36(1): 61-71.
- [2] MORAVEJS, HABIBAGAH G, NIKOOEE E, et al. Stabilization of dispersive soils by means of biological calcite precipitation[J]. Geoderma an international journal of soil science, 2018, 315: 130-137.
- [3] MAHARAJ A, ROOY L, PAIGE-GREEN P. Revised test protocols for the identification of dispersive soils[J]. Journal of the South African institution of civil engineering, 2015, 57(1): 31-37.
- [4] CALERO N, VIDAL BARRÓN, JOSÉ TORRENT. Water dispersible clay in calcareous soils of southwestern Spain[J]. Catena, 2008, 74: 22-30.
- [5] PHILLIPS C P, ROBINSON D A. The impact of land use on the erodibility of dispersive clay soils in central and southern Italy[J]. Clay use and management, 1998, 14: 155-161.
- [6] OUHADI V R, GOODARZI A R. Assessment of the stability of a dispersive clay treated by alum[J]. Engineering geology, 2006, 85(1/2): 91-101.
- [7] BOURDEAUX G, IMAIZUMI H. Technological and design studies for Sobradinho earth dam concerning the dispersive characteristics of the clayey soils[C]//Proc. 5th Panamerican conf. on clay mech. and foundation eng, 1975, 2: 99-120.
- [8] SHERARD J L, DUNNIGAN L P, Decker R S. Identification and nature of dispersive soils[J]. Journal of geotechnical & geoenvironmental engineering, 1976, 102(4): 287-301.
- [9] TURKOZ M, SAVAS H, ACAZ A, et al. The effect of magnesium chloride solution on the engineering properties of clay soil with expansive and dispersive characteristics[J]. Applied clay science, 2014, 101: 1-9.

- [10] SAMADI, TABATABAI, MAJZADEH M R, et al. Effects of soil physico-chemical properties on stream bank erosion induced by seepage in northeastern Iran[J]. *Hydrological sciences journal*, 2017, 62(16): 2597-2613.
- [11] RENGASAMY P, TAVAKKOLI E, MCDONALDA G K. Exchangeable cations and clay dispersion: net dispersive charge, a new concept for dispersive soil[J]. *European journal of soil science*, 2016, 67(5): 659-665.
- [12] YANG Y, LAI Y, CHANG X. Laboratory and theoretical investigations on the deformation and strength behaviors of artificial frozen soil[J]. *Cold regions science & technology*, 2010, 64(1): 39-45.
- [13] ZHANG H, ZHANG J, ZHANG Z, et al. Variation behavior of pore-water pressure in warm frozen clay under load and its relation to deformation[J]. *Acta geotech*, 2020, 15(3): 603-614.
- [14] QI J, MA W, SONG C. Influence of freeze-thaw on engineering properties of a silty soil[J]. *Cold regions science & technology*, 2008, 53(3): 397-404.
- [15] SHI X, FAN H H, LIU G L. Deformation properties of saturated dispersive clay[J]. *Journal of Yangtze River scientific research institute*, 2016, 33(9): 87-92.
- [16] YIN Q X, ZHOU G Q. Experimental study of the water migration and compression of soils under double direction freezing-one direction thawing[J]. *Rock and soil mechanics*, 2015, 36(4): 1021-1034.
- [17] YASUFUKU N, OCHIAI H, HORMDEE D. An empirical relationship for predicting soil collapsibility due to soaking under compression and shear[J]. *Unsaturated soils*, 2006: 1037-1048.
- [18] WANG L X, SONG X J. Engineering geological characteristics and failures of dispersive clays in Northeast China[J]. *Bulletin of engineering geology and the environment*, 2022, 81(3): 1-18.
- [19] ZHANG J, WANG Q, WANG W H. The dispersion mechanism of dispersive seasonally frozen soil in western Jilin Province[J]. *Bulletin of engineering geology and the environment*, 2021, 80(7): 5493-5503.
- [20] WANG L, SONG X, HUANG M. Deformation characteristics and mechanism of dispersive soil under freeze-thaw cycles[J]. *Arabian journal of geosciences*, 2022, 15(10): 1-14.
- [21] WANG L X, YUAN X M, WANG M. Landslide failure mechanisms of dispersive soil slopes in seasonally frozen regions[J]. *Advances in civil engineering*, 2020(9): 1-13.
- [22] RENGASAMY P, MARCHUK A. Cation ratio of soil structural stability (CROSS)[J]. *Soil research*, 2010, 49(3): 280-285.
- [23] ZHANG S, LAI Y, SUN Z, GAO Z. Volumetric strain and strength behavior of frozen soils under confinement[J]. *Cold regions science & technology*, 2007, 47(3): 263-270.
- [24] WANG L X, SONG X J, HUANG M. Physicochemical and compressibility characteristics of dispersive clay under freeze-thaw cycles and soaking in northeastern China[J]. *Bulletin of engineering geology and the environment*, 2023, 82(6):1-14.
- [25] 王理想, 宋新江, 黄铭, 等. 分散性黏土导热系数试验与预测方法研究[J]. *水利学报*, 2023, 54(3): 311-322.
- [26] 王理想, 袁晓铭, 苏安双, 等. 非饱和分散性黏土多次冻融特性试验[J]. *哈尔滨工业大学学报*, 2021, 53(5): 141-147.
- [27] 王理想, 袁晓铭. 分散土工程破坏机理与治理研究现状[J]. *自然灾害学报*, 2021, 30(1): 1-9.
- [28] 何影, 王理想, 宋新江, 等. 季冻区分散性黏土抗剪强度特性研究[J]. *自然灾害学报*, 2023, 32(4): 229-238.