

DOI: 10.16285/j.rsm.2016.05.013

冻融循环对固化污泥力学及微观结构特性影响

胡学涛^{1,2}, 梁 冰¹, 陈亿军², 薛 强², 万 勇²

(1. 辽宁工程技术大学 力学与工程学院, 辽宁 阜新 123000;

2. 中国科学院武汉岩土力学研究所 岩土力学与工程国家重点实验室, 湖北 武汉 430071)

摘 要: 冻融循环作用会改变固化污泥工程特性, 影响固化污泥堆体稳定及安全。在封闭系统下对固化污泥进行冻融循环试验, 每经历一次冻融循环, 就测定固化体的无侧限抗压强度、渗透系数等工程指标, 并根据试验结果选取试样进行扫描电镜和压汞试验。研究表明: 第 1 次冻融循环作用使固化污泥强度衰减 30%, 渗透系数增大 80%, 随后变化幅度逐渐降低; 经过约 6 次冻融循环后, 固化污泥强度衰减幅度高达 50%, 渗透系数增加约 1 个数量级, 随后基本保持恒定, 渗透系数的变化较无侧限抗压强度变化表现出微弱的滞后性。随着冻融循环次数的增加, 固化污泥孔隙体积逐渐增大, 固化污泥强度逐渐降低, 渗透系数逐渐增大。在封闭系统下, 固化体内部水分结冰引起的总膨胀体积恒定, 固化污泥内部水分分布均匀。当冻融循环作用达到一定次数后, 孔隙体积不再持续增大, 只是在空间上重新融合分布, 使各参数逐渐达到恒定状态。研究成果对寒区污泥固化填埋的安全处理处置提供技术参数和指导。

关 键 词: 固化污泥; 冻融循环; 抗压强度; 渗透系数; 微观结构

中图分类号: TU 411

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 7598 (2016) 05 - 1317 - 07

Mechanical and microstructural properties changes of solidified sewage sludge due to cyclic freezing and thawing

HU Xue-tao^{1,2}, LIANG Bing¹, CHEN Yi-jun², XUE Qiang², WAN Yong²

(1. School of Mechanics and Engineering, Liaoning Technical University, Fuxin, Liaoning 123000, China; 2. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan, Hubei 430071, China)

Abstract: The stability and safety of the solidified sludge pile will be threatened when the engineering properties change due to freezing and thawing cycles (FTC). Laboratory FTC tests are conducted on the solidified municipal dewatered sludge in the closed system. Unconfined compressive strength and permeability coefficient of the solidified sludge are tested after each FTC. According to the results of tests, some samples subjected to cyclic freezing and thawing are selected to perform mercury intrusion porosimetry (MIP) tests and to analyze with the scanning electron microscope (SEM). The results show that the 1st FTC results in a decrease in the strength by 30% and an increase in the permeability by 80% of the the solidified sludge. Whereafter the change range gradually decreases. The strength decreases by 50% and the permeability coefficient increases by about one order of magnitude after about 6 FTC, thereafter they both almost keep constant. The variation of the permeability coefficient lags slightly behind that of the unconfined compressive strength. The pore volume and the permeability coefficient gradually increase while the strength decreases little by little with the increase of FTC. In the closed system, the total swelling volume induced by the frozen water in the solidified body is constant and the internal moisture is uniformly distributed, so the pore volume doesn't continue increasing any more while just the pores mix together and redistribute when reaching an certain number of FTC, then each parameter becomes constant. The investigation provides parameters and guiding for safe landfilling of the solidified sludge in the cold regions.

Keywords: solidified sludge; freezing and thawing cycle; compressive strength; permeability coefficient; microstructure

1 引 言

随着我国污水处理能力快速提高, 污水处理厂

污泥产量不断增加, 市政污泥的处理、处置问题日益严重, 而污泥卫生填埋由于投资少、容量大、处理快等优点^[1], 目前仍是我国污泥处理最为常用的

收稿日期: 2015-07-10

基金项目: 中科院院地合作项目(武管管科创[2014]2号), 中国科学院学科交叉与合作创新团队项目(人字(2013)47号)。

This work was supported by the Cooperation Program for Chinese Academy of Sciences and Region([2014]2), the Program for Interdisciplinarity and the Cooperative Innovation of Chinese Academy of Sciences((2013)47).

第一作者简介: 胡学涛, 男, 1986年生, 博士, 主要从事污泥固化处理处置。E-mail: hxt_cersm@163.com

通讯作者: 陈亿军, 男, 1984年生, 博士, 助理研究员, 主要从事污泥/淤泥安全处置研究。E-mail: chen-yijun2131@163.com

方法^[2]。脱水是污泥处理处置的关键,很多研究尝试了不同的方法对污泥进行脱水^[3-4],但到目前经过污水处理厂脱水处理后的污泥,其含水率仍然高达75%以上,无法达到直接填埋处置要求,须用水泥、石灰等无机胶凝材料对污泥进行固化处理^[5],以改善污泥的物理、力学特性。

固化填埋污泥在封场覆盖前会受到环境应力的影响,从而导致固化污泥的力学特性及渗透特性发生改变,对填埋固化污泥堆体的稳定性及安全性带来极大的隐患。作为一种强烈的风化作用,对土的结构及物理力学性质会产生很大的影响^[6-7]。冻融循环作用引起的固化污泥力学及渗透特性规律研究,对污泥的安全处理处置及填埋场的安全运行及长期稳定性控制及监测具有重要的指导作用。

冻融循环现象在世界上很多国家及我国北方地区广泛存在,在这些地区的污泥固化体处于冻融循环环境中^[8]。而冻融循环作用对工程体,如原状黏土^[9-10]、盐碱土^[11]、重塑土^[12-13]、软土^[14]及石灰改性土^[15]、水泥改性土^[16-17]、粉煤灰改性土^[18]等的物理力学特性有很大的影响。然而针对污泥受冻融循环作用的研究很少。Moo-Young等^[19-20]研究了冻融循环作用对利用造纸厂污泥做填埋场覆盖材料的渗透系数的影响规律,但其仅关注了污泥的渗透特性,且污泥是经压实处理而未经固化处理。李亚林^[21]将固化过程与脱水过程同步得到低含水率(50%)的污泥,参照《普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准》^[22]中的快冻法,将试样冰冻后浸于水中融化,进行了冻融循环作用研究,在冻融过程中有补水情况但没有研究固化污泥的渗透特性。

填埋场底部有防渗膜防渗,填埋处置的污泥固化体不会从地下水中获得补给水,因此,本文在无补水条件下对污水处理厂污泥(含水率为75%~80%)固化后进行冻融循环试验,分析冻融作用对固化污泥强度及渗透特性的影响规律,并从微观结构角度揭示其机制,为污泥固化填埋的安全处理处置提供技术参数。

2 试验材料和方法

2.1 试验材料

试验中进行固化处理的污泥为武汉市某污水处理厂经过脱水处理后的污泥,含水率为77.1%,有机质含量为41.5%,密度为1.12 g/cm³,pH值为7.8,干污泥固体颗粒中重金属含量如表1所示,其中限值标准依据是《城镇污水处理厂污泥泥质》^[23]及《城镇污水处理厂污泥处置混合填埋泥质》^[24]。

试验中选择的固化剂为自主配置的无机胶凝固化材料,主要成分有硫酸铝钙、硅酸二钙、硅酸三钙、氧化钙等。

表1 试验材料重金属含量(单位:mg/kg)
Table 1 Heavy metal contents in test material (unit: mg/kg)

金属元素	污泥检测值	限值
Pb	30.0	<1 000
Zn	3 002.0	<4 000
Cu	278.0	<1 500
Cr	186.0	<1 000
Cd	19.0	<20
As	23.0	<75
Ni	96.5	<200
Hg	13.8	<25

2.2 试验方法与步骤

污泥固化过程试样制备步骤为:首先按设计比例称量好污泥,然后向其中添加固化剂,手动搅拌均匀后,再用水泥胶砂搅拌机先慢搅2 min后,快搅2 min至均匀,然后将试样填入 ϕ 50 mm×50 mm的环刀,1 d后脱模,并置于温度为20±1、相对湿度为95%养护箱中进行标准养护,固化体用薄膜封闭保证固化体不会出现水分蒸发,与实际污泥固化情况相接近。

结合工程情况,选择脱水污泥与固化剂按质量比为100:20的配比进行固化。考虑到污泥以及固化污泥渗透系数都很低,待试样在标准养护箱中养护28 d后,将试样彼此间隔20 mm以上放入恒温试样箱体内,在封闭系统(无补水)情况下开始进行固化污泥的冻融循环试验。为保证固化体完全冰冻和融化,冰冻和融化的持续时间均为24 h,一个冻融循环周期为48 h。冰冻室温度稳定在-20,融化过程在温度为20±1的恒温养护箱环境中进行。

固化污泥养护28 d后,测试固化体的无侧限抗压强度和渗透系数作为参照。虽然是用无机胶凝材料固化污泥,但考虑到固化污泥强度较低,目前有关冻融循环对土及改性土作用的研究^[25-26]最多考虑12次循环试验,故在此基础上初步考察15次冻融循环作用(根据试验结果再确定后续试验方案),每完成一次冻融循环后就立刻进行固化污泥的无侧限抗压强度和渗透性试验,以考察其相关特性与冻融循环次数的关系。

根据试验结果,选取养护28 d、未经循环(0次循环)固化体以及经过不同冻融循环次数的固化体进行扫描电镜和压汞试验,从微观角度分析冻融循环作用对固化污泥影响机制。

固化污泥无侧限抗压强度采用无侧限抗压试验机，渗透系数用 PN3230M 环境土柔性壁渗透测试系统测得，微观特性采用美国 QUANTACHROME 公司生产的 Quanta 250 环境扫描电子显微镜和 Poremaster33 型压汞仪分别进行的扫描电镜试验和压汞试验测试得到。

3 试验结果与分析

3.1 冻融循环作用对固化污泥微观结构影响

为了方便比较，对经过不同冻融循环的固化体均选取放大 2 000 倍的 SEM 图进行分析，如图 1 所示。

从图 1(a)中可以看出，经过 28 d 养护未经冻融循环的固化体，结构紧密均一，整体性好，胶凝晶体与污泥颗粒黏结紧密规整，孔隙微小均匀，无明显大孔隙；图 1(b)中，经过 1 次冻融循环后的固化体，较未经冻融的固化体疏松一些，但整体均一性还好，较经过 5 次和 14 次冻融循环后的固化体结构紧密；图 1(c)中，经过 5 次冻融循环后的固化体，结构呈蜂窝状，明显疏松多孔，主要由水化胶凝颗粒形成空间骨架；图 1(d)中，经过 14 次冻融循环后的固化体，较经过 5 次冻融循环的固化体，出现了多个更大的孔隙，但孔隙数量明显减少。

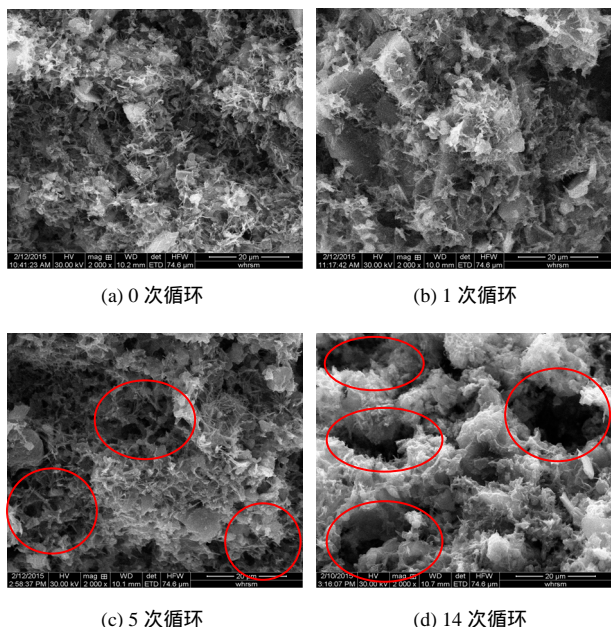


图 1 固化污泥不同冻融循环次数后 SEM 图
Fig.1 SEM images of solidified sludge after different freezing and thawing cycles

依据压汞数据得到孔隙分布密度曲线见图 2。由图可以看出，各工况下孔隙均分布在 0.01 ~ 200 μm 之间。为方便讨论起见，对孔隙大小进行分类：微

孔 (<0.1 μm)、介孔 (0.1 ~ 1.0 μm)、小孔 (1 ~ 10 μm)、中孔 (10 ~ 100 μm) 和大孔 (>100 μm)。对数据处理分析得到各工况下孔隙分布情况如表 2 所示。不少学者对土体孔隙的划分进行了大量探索^[27-28]，依据 Shear 的划分方法，微孔主要是颗粒内孔隙、介孔为颗粒间孔隙、小孔为团粒内孔隙、中孔和大孔为团粒间孔隙。

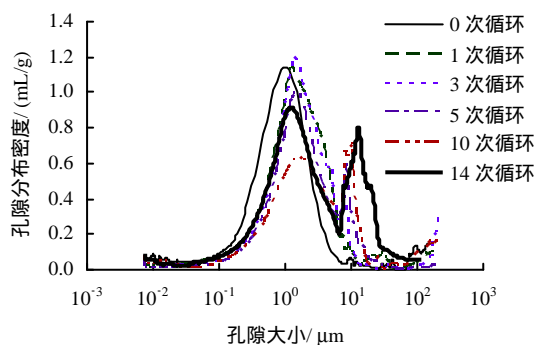


图 2 不同冻融循环次数后固化污泥孔径分布曲线
Fig.2 Pore size distribution of solidified sludge under different freezing and thawing cycles

表 2 不同冻融循环次数后固化污泥各类型孔隙体积百分含量

Table 2 Volume percentage of pore with different sizes after different freezing and thawing cycles

循环次数	体积百分含量/ %				
	大孔 >100 μm	中孔 10 ~ 100 μm	小孔 1 ~ 10 μm	介孔 0.1 ~ 1.0 μm	微孔 <0.1 μm
0 次循环	3	2	45	45	5
1 次循环	2	3	58	32	5
3 次循环	1	3	66	25	5
5 次循环	1	5	64	26	4
10 次循环	5	12	56	23	4
14 次循环	2	20	47	26	4

从表 2 可以看出，养护 28 d 的固化污泥中，主要是介孔和小孔，且含量相当；在 1 ~ 5 次冻融循环过程中，介孔的含量逐渐减少，小孔的含量逐渐增多，中孔微量增加，但在第 1 次冻融循环作用变化幅度最大；5 ~ 14 次冻融循环过程中，介孔含量基本不变，小孔含量逐渐减小，中孔和大孔含量逐渐增多。但 10 次与 14 次冻融循环后，虽然各孔隙有所变动，但大的团粒间孔隙 (>10 μm) 及小的团粒内 (包括颗粒间) 孔隙 (0.1 ~ 10 μm) 总量相差却很小，且孔隙总体积基本相同，可依据图 3 累积进汞量得到，见图 4。

结合图 1 和图 2 看出，在固化污泥冻融循环作用过程中，固化污泥内部孔隙数量和直径在逐渐发生变化，应该是在冻融循环过程中，固化污泥中的水结冰体积增大所致^[29]。由于冻融循环过程是在封

闭系统中进行的,没有外界补给水,固化体水分的总质量和体积不变,冻融循环过程主要是固化体内部自身水分冰冻融化迁移团聚的过程,当固化污泥内部孔隙空间与内部冰体积相当后,其结构就达到相对稳定状态,随着冻融循环作用次数的增加,只是固化体内部孔隙在空间上的重新分布,从而出现在10次与14次冻融循环后,其孔隙总体积基本相同的状况。

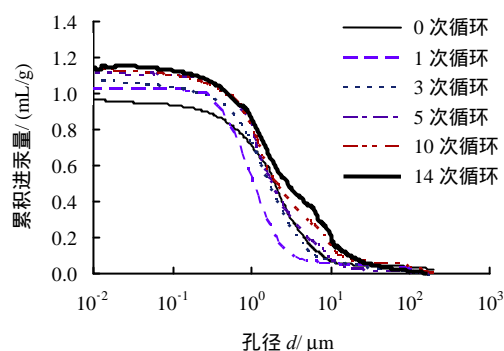


图3 不同冻融循环次数下累积进汞量

Fig.3 Accumulated intruded mercury volumes under different freezing and thawing cycles

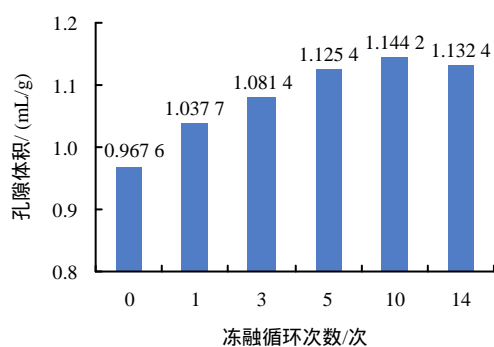


图4 不同冻融循环次数后固化污泥孔隙体积

Fig.4 Pore volumes of solidified sludge under different freezing and thawing cycles

3.2 冻融循环作用对固化污泥强度影响

如图5所示,固化污泥经过28d养护后无侧限抗压强度达到100kPa,经过1次冻融循环后,强度为73kPa,衰减了近30%,为最大衰减率;经过5次冻融循环后,强度衰减约50%,强度变为50.3kPa,尚满足大于50kPa的污泥强度填埋要求。但固化污泥经过6次冻融循环后,强度就无法达到填埋要求,而且随着冻融循环作用次数的增加,强度不再出现大幅衰减的现象,经过6次冻融循环后固化污泥强度在小范围内波动变化,表现出动态稳定性。这与黏土^[30-31]以及盐碱土^[32]冻融循环特性具有相似的规律,比较后发现,可能是以下两个共同特性使得

它们具有相似的规律:这些冻融试验都是在封闭系统下,没有外界水分的持续补给,当密实的初始结构在经过几次冻融循环后,形成的孔隙空间与试样内有限水分结冰后的体积相当,于是后续的冰冻过程不再对结构产生实质性的破坏;黏土和污泥颗粒及盐碱土离子的吸水能力比较强,使得冻融前后结构水分(冰晶)分布均匀。

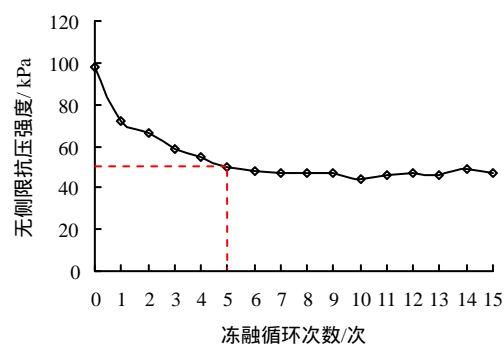


图5 固化污泥无侧限抗压强度与冻融循环次数的关系曲线

Fig.5 Curve of unconfined compressive strength and freezing and thawing cycle of solidified sludge

从冻融循环作用引起的固化污泥无侧限抗压强度的影响可以得出,冻融循环作用导致固化污泥强度衰减,但其对固化污泥的影响主要在前面5~6次,而在前5~6次冻融循环作用中,第1次冻融循环作用对固化污泥的影响最大,引起的衰减最大。

固化污泥的强度主要由水化胶凝材料提供,水化产物结构越致密,孔径越小,固化体强度越高。在第1次冻融循环作用后,介孔(颗粒间孔隙)含量大量减少,小孔(团粒内孔隙)含量大量增多,主要是水结冰破坏了大量水化产物晶体颗粒之间的黏结,从而导致1次冻融循环强度大幅降低,由于介孔和小孔直径均很小,故图1(b)(1次循环)与图1(a)(0次循环)形貌上差别较小。

随着冻融循环次数的增加,虽然小孔逐渐向中孔大孔发展,但介孔数量基本稳定,即固化污泥中部分水化产物晶体颗粒之间的黏结被破坏,为水发展成冰提供足够孔隙空间后,使得剩余水化产物晶体颗粒不再受冻融循环的破坏,使得固化污泥的强度不至于一直衰减,从而出现动态稳定状态。

3.3 冻融循环作用对固化污泥渗透性影响

如图6所示,养护28d后,固化污泥的渗透系数为 2.46×10^{-8} cm/s,经过一次冻融循环后,渗透系数增大了约80%,但仍然是 10^{-8} cm/s数量级,随着冻融循环作用次数的增加,渗透系数逐渐增大,经

5次冻融循环后渗透系数约为 1×10^{-7} cm/s, 能满足填埋场的防渗要求, 经过6次冻融循环作用后, 渗透系数较未经冻融循环作用的固化污泥增加了一个数量级, 6次冻融循环作用后, 固化污泥的渗透系数保持在一定稳定的水平, 不再随着冻融循环作用次数的增加而持续大幅增大。

从扫描电镜图(图1)及孔隙体积(图4)中可以看出, 冻融循环次数从0→1→5→14次的过程中, 固化污泥中孔隙是逐渐变大的, 而对应的渗透系数也逐渐增大, 表明冻融后的固化污泥渗透系数与孔隙大小有很强的相关性。

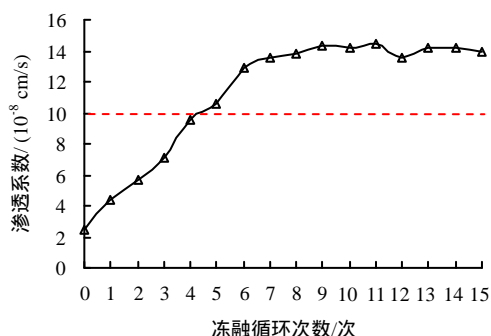


图6 固化污泥渗透系数与冻融循环次数的关系曲线

Fig.6 Curve of permeability coefficient and freezing and thawing cycle of solidified sludge

结合图5、6可以看出, 无侧限抗压强度曲线和渗透系数曲线转折点具有很好的一致性, 无侧限抗压强度曲线的转折点出现在第5~6次冻融循环作用处, 而渗透系数曲线转折点出现在6~7次, 渗透系数的变化较强度变化表现出微弱的滞后性, 可能是由于渗透系数除了与孔隙尺寸有关外, 还与孔隙的连通性有关系^[33-34]。在第1次冻融循环作用后, 固化污泥的渗透系数并没有像抗压强度出现大幅变化, 同样可能是由于渗透系数主要是受孔隙通道连通性影响, 而强度则主要受水化产物晶体颗粒黏结作用影响。在前5~6次冻融循环作用过程中, 随着冻融循环次数的增加, 由于水结冰体积膨胀, 孔隙逐渐增大, 增强了孔隙的整体连通性, 导致了渗透系数的增大; 之后, 随着孔隙空间基本稳定, 也使得固化污泥的渗透系数达到动态稳定状态。

从1~15次冻融循环情况来看, 介孔(颗粒间孔隙)对固化污泥强度在冻融循环过程中发展态势起决定作用, 而固化污泥渗透性在冻融循环过程中的变化情况则与总体孔隙空间有关。

4 结 论

(1) 随着冻融循环次数的增加, 固化污泥强度

逐渐降低, 经过5~6次后基本保持恒定; 渗透系数逐渐增大, 经过6~7次后基本保持恒定, 渗透系数的变化较无侧限抗压强度变化表现出微弱的滞后性。第1次冻融循环作用过程对固化污泥强度及渗透系数影响最大, 使强度衰减30%, 渗透系数增大80%。

(2) 随着冻融循环次数的增加, 固化污泥内部孔隙主要是颗粒间孔隙→团粒内孔隙→团粒间孔隙发展, 孔隙体积逐渐增大后基本保持恒定, 固化污泥结构逐渐由致密状态变为疏松状态。

(3) 水结冰体积膨胀, 使固化污泥孔隙变大, 部分颗粒间的孔隙发展成为团粒内孔隙, 导致强度降低, 渗透系数增大; 但在封闭系统下, 水结冰引起的总膨胀体积恒定, 且固化污泥体内部水分分布均匀, 故冻融循环到一定次数(6次左右)后, 随着冻融循环作用次数的继续增加, 只是固化体内部孔隙在空间上的重新融合分布, 孔隙连通性有所增强, 孔隙体积不再变化, 使得渗透系数的变化较抗压强度表现出微弱的滞后性, 同时出现参数恒定现象。

参 考 文 献

- [1] 马建立, 赵由才, 张华, 等. 城市污水处理厂不同性状污泥填埋工艺的试验研究[J]. 给水排水, 2007, 33(10): 50 - 53.
MA Jian-li, ZHAO You-cai, ZHANG Hua, et al. Research on methods of sludge disposal by landfill for urban wastewater treatment plants[J]. *Water & Wastewater Engineering*, 2007, 33(10): 50 - 53.
- [2] 崔广强, 常方强. 垃圾焚烧灰渣固化污水厂污泥的岩土工程性质实验[J]. 环境工程学报, 2013, 7(6): 2367 - 2370.
CUI Guang-qiang, CHANG Fang-qiang. Test of geotechnical engineering parameters of sewage sludge solidified by municipal solid waste incineration bottom ash[J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2013, 7(6): 2367 - 2370.
- [3] XUE QIANG, CHEN Y J. Experimental study on municipal sludge dewatering capacity by using quicklime and slag[J]. *Desalination and Water Treatment*, 2015, 54(6): 1499 - 1506.
- [4] XUE QIANG, CHEN Y J. Study on dewater ability of municipal sludge conditioning by physical conditioners with ultrasonic and magnetic field application[J]. *Desalination and Water Treatment*, 2014, 52(34 - 36):

- 6396 - 6402.
- [5] 曹永华, 闫澍旺, 赵乐军. 固化污泥的工程性质及微观结构特征[J]. 岩土力学, 2006, 27(5): 740 - 744.
CAO Yong-hua, YAN Shu-wang, ZHAO Le-jun. Engineering properties and microstructure feature of solidified sludge[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2006, 27(5): 740 - 744.
- [6] QI J L, VERMEER P A, CHENG G D. A review of the influence of freeze-thaw cycles on soil geotechnical properties[J]. **Permafrost and Periglacial Processes**, 2006, 17(3): 245 - 252.
- [7] 彭惠, 马巍, 穆彦虎, 等. 青藏公路普通填土路基长期变形特征与路基病害调查分析[J]. 岩土力学, 2015, 36(7): 2049 - 2056.
PENG Hui, MA Wei, MU Yan-hu, et al. Analysis of disease investigation and long-term deformation characteristics of common fill embankment of the Qinghai-Tibet Highway[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2015, 36(7): 2049 - 2056.
- [8] 齐吉琳, 马巍. 冻土的力学性质及研究现状[J]. 岩土力学, 2010, 31(1): 133 - 143.
QI Ji-lin, MA Wei. State-of-art of research on mechanical properties of frozen soils[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2010, 31(1): 133 - 143.
- [9] GRAHAM J, AU V. C S. Effects of freeze-thaw and softening on a natural clay at low stresses[J]. **Canadian Geotechnical Journal**, 1985, 22(1): 69 - 78.
- [10] 赵刚, 陶夏新, 刘兵. 原状土冻融过程中水分迁移试验研究[J]. 岩土工程学报, 2009, 31(12): 1952 - 1957.
ZHAO Gang, TAO Xia-xin, LIU Bing. Experimental study on water migration in undisturbed soil during freezing and thawing process[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2009, 31(12): 1952 - 1957.
- [11] ILKER ANGIN, EKREM L AKSAKAL, TASKIN OZTAS, et al. Effects of municipal solid waste compost (MSWC) application on certain physical properties of soils subjected to freeze-thaw[J]. **Soil & Tillage Research**, 2013, 130: 58 - 61.
- [12] 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 Ji-lin, MA Wei. Influence of freezing-thawing on strength of overconsolidated soils[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2009, 31(12): 1952 - 1957.
- [13] 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 Li-li, QI Ji-lin, 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.
- [14] TANG Y Q, YAN J J. Effect of freeze-thaw on hydraulic conductivity and microstructure of soft soil in Shanghai area[J]. **Environmental Earth Sciences**, 2015, 73: 7679 - 7690.
- [15] 马巍, 徐学祖, 张立新. 冻融循环对石灰粉土剪切强度特性的影响[J]. 岩土工程学报, 1999, 21(2): 158 - 160.
MA Wei, XU Xue-zu, ZHANG Li-xin. Influence of frost and thaw cycles on shear strength of lime silt[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 1999, 21(2): 158 - 160.
- [16] 王天亮, 刘建坤, 田亚护. 冻融作用下水泥及石灰改良土静力特性研究[J]. 岩土力学, 2011, 32(1): 193 - 198.
WANG Tian-liang, LIU Jian-kun, TIAN Ya-hu. Static properties of cement- and lime-modified soil subjected to freeze-thaw cycles[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2011, 32(1): 193 - 198.
- [17] 王天亮, 刘建坤, 田亚护. 水泥及石灰改良土冻融循环后的动力特性研究[J]. 岩土工程学报, 2010, 32(11): 1733 - 1737.
WANG Tian-liang, LIU Jian-kun, TIAN Ya-hu. Dynamic properties of cement- and lime-improved soil subjected to freeze-thaw cycles[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2010, 32(11): 1733 - 1737.
- [18] 王东星, 徐卫亚. 大掺量粉煤灰淤泥固化土的强度与耐久性研究[J]. 岩土力学, 2012, 33(12): 3659 - 3664.
WANG Dong-xing, XU Wei-ya. Research on strength and durability of sediments solidified with high volume fly ash[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2012, 33(12): 3659 - 3664.
- [19] MOO-YOUNG H K, ZIMMIE T F. Effects of freezing and thawing on the hydraulic conductivity of paper mill sludges used as landfill covers[J]. **Canadian Geotechnical Journal**, 1996, 33(5): 783 - 792.
- [20] MOO-YOUNG H K, ZIMMIE T F. Geotechnical properties of paper mill sludges for use in landfill covers[J]. **Journal of Geotechnical Engineering, ASCE**, 1996, 122(9): 768 - 774.
- [21] 李亚林. 基于骨架构建体污泥固化填埋及长期稳定性研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2013.

- LI Ya-lin. Study on landfill and durability of sewage sludge solidified with skeleton builders[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2013.
- [22] 中华人民共和国住房和城乡建设部. GB/T50082-2009 普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.
- Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. GB/T50082-2009 Standard for methods of long-term performance and durability of ordinary concrete[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2010.
- [23] 中华人民共和国住房和城乡建设部. GB 24188-2009 城镇污水处理厂污泥泥质[S]. 北京: 中国标准出版社, 2010.
- Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. GB 24188-2009 Quality of sludge from municipal wastewater treatment plant[S]. Beijing: Standards Press of China, 2010.
- [24] 中华人民共和国住房和城乡建设部. GB/T 23485-2009 城镇污水处理厂污泥处置-混合填埋用泥质[S]. 北京: 中国标准出版社, 2009.
- Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. GB/T 23485-2009 Disposal of sludge from municipal wastewater treatment plant-quality of sludge for co-landfilling[S]. Beijing: Standards Press of China, 2009.
- [25] ALDAOOD A, BOUASKER M, AL-MUKHTAR M. Impact of freeze-thaw cycles on mechanical behaviour of lime stabilized gypseous soils[J]. **Cold Regions Science and Technology**, 2014, 99: 38 - 45.
- [26] HOTINEANU A, BOUASKER M, ALDAOOD A, et al. Effect of freeze-thaw cycling on the mechanical properties of lime-stabilized expansive clays[J]. **Cold Regions Science and Technology**, 2015, 119: 151 - 157.
- [27] 孔全荣, 黄宏伟, 张冬梅, 等. 不同固结压力下饱和软黏土孔隙分布试验研究[J]. 地下空间与工程学报, 2007, 3(6): 1036 - 1040.
- KONG Ling-rong, HUANG Hong-wei, ZHANG Dong-mei, et al. Experiment study on relationship between pore distribution and different stress levels due to consolidation of soft clays[J]. **Chinese Journal of Underground Space and Engineering**, 2007, 3(6): 1036 - 1040.
- [28] SHEAR D L, OLSEN H W, NELSON K R. Effects of desiccation on the hydraulic conductivity versus void ratio relationship for natural clay[R]//Transportation research record, NRC. Washington D. C.: National Academy Press, 1993: 1365 - 1370.
- [29] 郑邠, 马巍, 邴慧. 冻融循环对土结构性影响的试验研究及影响机制分析[J]. 岩土力学, 2015, 36(5): 1282 - 1288.
- ZHENG Yun, MA Wei, BING Hui. Impact of freezing and thawing cycles on structure of soils and its mechanism analysis by laboratory testing[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2015, 36(5): 1282 - 1288.
- [30] 王大雁, 马巍, 常小晓, 等. 冻融循环作用对青藏黏土物理力学性质的影响[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(23): 4313 - 4319.
- WANG Da-yan, MA Wei, CHANG Xiao-xiao, et al. Physico-mechanical properties changes of Qinghai-Tibet clay due to cyclic freezing and thawing[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2005, 24(23): 4313 - 4319.
- [31] WANG D A, MA W, NIU Y H, et al. Effects of cyclic freezing and thawing on mechanical properties of Qinghai-Tibet clay[J]. **Cold Regions Science and Technology**, 2007, 48: 34 - 43.
- [32] BING H, HE P. Experimental investigations on the influence of cyclical freezing and thawing on physical and mechanical properties of saline soil[J]. **Environmental Earth Sciences**, 2011, 64: 431 - 436.
- [33] 万勇, 薛强, 赵立业, 等. 干湿循环对填埋场压实黏土盖层渗透系数影响研究[J]. 岩土力学, 2015, 36(3): 679 - 686.
- WAN Yong, XUE Qiang, ZHAO Li-ye, et al. Effects of wetting-drying cycles on permeability of compacted clay cover at landfill site[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2015, 36(3): 679 - 686.
- [34] WAN Y, XUE Q, LIU L. Study on the permeability evolution law and the micro-mechanism of CCL in a landfill final cover under the dry-wet cycle[J]. **Bulletin of Engineering Geology and the Environment**, 2014, 73(4): 1089 - 1103.