

# 上海冻融淤泥质软黏土孔隙结构特征分形研究

唐益群<sup>1,2</sup>, 严婧婧<sup>2</sup>

(1. 同济大学 岩土及地下工程教育部重点实验室, 上海 200092; 2. 同济大学 土木工程学院, 上海 200092)

**摘要:** 对上海第④土层淤泥质软黏土进行了冻融试验、压汞试验和渗透性试验,并结合分形理论,确定了冻融对土壤孔隙结构的影响.根据分形计算,将上海软黏土中的孔隙分为 3 类.结果表明,在冻融过程中,中孔和大孔的总分形维数和表面分形维数随渗透系数的增加而增大.最后,提出了由小孔隙和中、大孔隙组成的渗透系数与孔隙结构参数之间的关系,小孔隙的渗透系数比中、大孔隙低几个数量级.

**关键词:** 淤泥质软黏土; 人工冻结法; 分形维数; 孔隙结构; 渗透系数

**中图分类号:** TU411.92

**文献标志码:** A

## Fractals of Pore Structure Characteristic of Muddy Clay in Shanghai After Artificial Ground Freezing

TANG Yiqun<sup>1,2</sup>, YAN Jingjing<sup>2</sup>

(1. Key Laboratory of Geotechnical and Underground Engineering of the Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

**Abstract:** In this paper, the muddy clay that obtained from Shanghai 4th stratum has been selected to conduct a freezing-thawing test, MIP test, and permeability test to figure out the freezing-thawing effect on soil pore structure, especially on pore size distribution and surface fractal dimension. Combined with the fractal theory, the pores in remolded muddy clay have been divided into three categories. The results indicate that the total percentage and surface fractal dimension of medium and large pores increase after freezing-thawing, with the increase of permeability. Finally, a relationship between permeability and pore-structure parameters has been proposed, which consists of small pores, and medium and large pores. The permeability for small pores is several orders of magnitudes lower than that of medium and large pores.

**Key words:** muddy clay; artificial ground freezing; fractal dimension; pore structure; permeability

人工冻结法已广泛应用于我国的地下工程建设中,尤其是东南沿海地区,如天津、南京、上海、杭州、广州等.这些地区的海相沉积厚层软黏土具有含水率高、孔隙比大、压缩性高、强度低等特征<sup>[1]</sup>.人工冻结法是通过制冷技术将土壤温度降到 $-20\sim-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,地下水冻结形成冻土.冻土不仅具有很高的强度可以作为施工支撑结构,同时可以作为良好的防水屏障,便于地下建筑施工,如地铁联络通道、越江隧道、地下泵站和地下商业街的逃生通道等<sup>[2-3]</sup>.迄今为止,国内外许多学者都对冻融引起的土体物理力学性质变化进行了研究,发现冻融后土体的孔隙比、渗透性、回弹模量、抗剪强度、单轴抗压强度等都会发生改变.有研究表明,冻融会导致土体孔隙率降低,而渗透系数增大,目前研究人员比较认可的观点是经历冻融循环后,土体的渗透系数将增大 $1\sim 2$ 个数量级<sup>[4-5]</sup>.而在力学性质方面,查甫生等试验研究后发现冻融使得土体压缩性增大,即土体发生软化<sup>[6]</sup>;同样有试验表明,即使经历少量冻融循环后,土体的回弹模量也将显著减小<sup>[7-8]</sup>.这些研究均表明,冻融会对土体的工程性质产生不利的影 响,如引发隧道管片漏水、地铁隧道不均匀沉降以及地面由于不均匀沉降而产生开裂等问题.

冻融作用引起土体物理力学性质的改变.从根本上说是冻融过程导致了土体微观结构的改变.许多学者对此进行了探究,发现冻融后土中团粒会发生分裂和重新团聚,团粒粒径趋向均一化,冻融过程中土的三相比例与分布会不断地变化,从而导致土的结构随冻融循环发生改变<sup>[9]</sup>.

分形的概念最早由 Mandelbrot 于 1967 年提出,是研究复杂且无规则几何形态的一个行之有效

收稿日期: 2018-06-05

基金项目: 国家自然科学基金(41572285,41072204)

第一作者: 唐益群(1952—),男,教授,博士生导师,主要研究方向为城市工程地质与环境地质. E-mail: tangyiqun2@tongji.edu.cn

的手段。许多研究指出,大多数材料表面的几何不规则性或是粗糙程度在不同尺度下具有自相似性,即具有分形特性<sup>[10-11]</sup>。土作为一种多孔介质,其孔隙结构具有自相似性,即分形特性<sup>[12-14]</sup>。土样孔隙的表面分形维数能够描述土体结构的复杂程度,从而进一步体现土体的宏观物理力学性质,因此被诸多学者广泛应用于岩土工程的研究中,如土体渗透特性<sup>[15]</sup>、黏聚力<sup>[16]</sup>、压缩特性<sup>[17]</sup>、冻融黏土的裂缝形态<sup>[18]</sup>等。土壤的分形特征反映了孔隙的复杂性和连通性,较大的分形维数值表示更复杂的结构和更高的液体流动阻力。同时,分形维数不仅可以通过简单的计算来表达粒径分布,且可以反映大团聚体和微团聚体的含量。因此,分形维数与土壤的渗透性密切相关。

本文将通过系列室内试验,并结合分形理论,研究冻融作用对上海地区不同含水量淤泥质软黏土的孔隙结构的影响,进而探讨孔隙结构与渗透系数的关系。

## 1 试验方法

冻胀是土体冻结过程中表现出的一种宏观现象,可以引起土体结构的改变,并进一步导致诸如强度、渗透特性、压缩特性等土体工程性质的改变。本文对上海第④层淤泥质软黏土进行重塑,将不同含水率的重塑土样进行冻融试验,之后取土样进行渗透试验及压汞试验,并结合分形理论,获得冻融对土体微观结构的影响。

### 1.1 试验材料

本次试验所用材料取自上海市宝山区,为灰黑色淤泥质软黏土,具有高含水率、大孔隙比、高压缩性、低强度和低灵敏度,上海市地铁隧道绝大部分埋设于这一土层中。土层的含水率指标如表 1 所示。

表 1 取样土层含水率指标

Tab.1 Water content parameters of studied soil %				
土层	统计值	天然含水率	液限	塑限
淤泥质软黏土	平均值	50.2	43.4	23.2
	最大值	58.3	50.6	25.8
	最小值	44.5	38.8	20.4

试样制备严格按照国家标准《土工试验方法: GB/T50123-1999》进行。现场取得的土体经过烘干、粉碎、过筛后,得到干粉。通过计算按一定比例将干粉和水混合,搅拌均匀后,得到某一含水率的重塑土,之后将土体重塑成为直径 100 mm、高 80 mm 的土样。根据该土层的自然含水率以及土体的液塑限,

重塑土样的含水率设置为 20%、30%、40%、50%。每一含水率制备两个土样,一个进行冻融试验,另一个作为平行对照试样。为防止水分蒸发,试样制备好后用塑料膜包裹密封,静置 24 h,使得水分在土体内部能够分布更加均匀。

### 1.2 试验方法

冻融试验在自制的一维冻融仪中进行,试验过程中用 3 层保温材料包裹在仪器外部,防止冷量散失,如图 1 所示。一般而言,冻融试验可以为开放系统,也可以为封闭系统。对于低渗透性的土体而言,实际水分补给的速率要小于冻结锋面的前进速率,因此冻胀产生的主要原因为冻结影响范围内孔隙水的重分布,而不是更广范围内的水分迁移,因此一般采用封闭系统<sup>[19]</sup>。由于本次试验的研究对象渗透性差,故试验中不设补水装置,试验在封闭系统中进行。

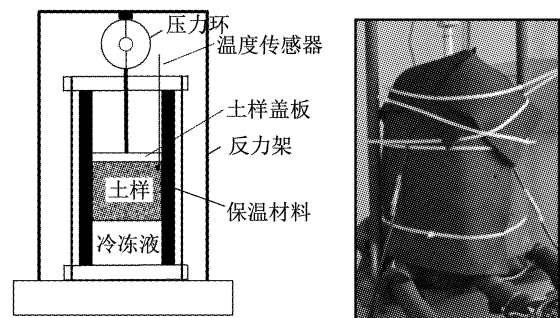


图 1 单向冻结试验示意图

Fig.1 Sketch of one dimensional test

根据实际工程中冻土帷幕的温度<sup>[20-21]</sup>,设置试验中的冷冻液温度为 $-20^{\circ}\text{C}$ ,而由于冷冻液循环过程中的冷量散失,由温度传感器测得土样底部的冷冻液温度为 $-17.7^{\circ}\text{C}$ 。本次试验采用自然解冻的方法,即使试样在 $18^{\circ}\text{C}$ 的室内解冻,这一温度与自然土层的温度一致。

在制备的对比土样中部切取两个环刀试样进行渗透试验,测量土样冻结前的渗透系数,取平均值作为冻融前土样的渗透系数;在冻融试验后,利用环刀在融后土样中部对应位置切取两个试样,同样进行渗透试验,取平均值作为冻融后土样的渗透系数。同样地,在对比土样和冻融土样上分别切取 4~5 条薄土样,冷冻干燥后进行压汞试验。

## 2 压汞试验与分形模型

压汞试验(mercury intrusion porosimetry test, MIP test)是一种通过外压将汞压入多孔介质孔隙

内,以测定其孔隙结构参数的试验方法.压汞试验的结果数据可以用于孔隙结构的分形研究.

### 2.1 压汞试验原理

1921年,Washburn给出了进汞压力  $p$  与孔隙等效直径  $d$  的关系式(1),公式有两个基本假定:①孔隙是圆柱形的;②所有的孔都向外延伸至试样的外表面.

$$d = -\frac{4T_s \cos \theta}{p} \quad (1)$$

式中: $p$  为进汞压力,  $N \cdot m^{-2}$ ;  $T_s$  为注入汞的表面张力,  $N \cdot m^{-1}$ ;  $\theta$  为汞的接触角, ( $^\circ$ );  $d$  为等效孔径,  $m$ .

式(1)表明,在  $\theta$  和  $T_s$  不变的前提下,进汞压力与孔径成反比,即随着压力的逐渐增大,汞将会逐渐进入孔径更小的孔.通过测定进汞压力  $p$ ,就可以求得相对应的孔径值,同时记录每一级压力下的进汞量,则最终可以得到样品的孔径分布.

由于系统表面能的增加等于进汞压力所做的功,则

$$\Delta S T_s \cos \theta = p \Delta V \quad (2)$$

式中: $\Delta V$ 、 $\Delta S$  分别为某一进汞压力  $p$  下对应的进汞体积和汞进入的孔隙的表面积.

对于汞来说,一般取  $T_s = 0.473 \sim 0.485 N \cdot m^{-1}$ ,  $\theta = 117^\circ \sim 141^\circ$ ,取值与汞的纯度有关.在单次试验中,汞的表面张力与接触角为常量,因此样品的表面积可以通过下式计算:

$$S = \frac{1}{T_s \cos \theta} \int_0^V p dV$$

通过一次完整的压汞退汞试验,可以得到样品的诸多孔隙参数.例如,孔径分布、表面积分布、孔隙率等.

### 2.2 分形维数计算

目前,依据压汞试验数据计算土样的表面分形维数有两种方法.

(1) 第一种计算方法最早由 Friesen 和 Mikula 提出<sup>[22]</sup>.他们假设孔隙体积与孔隙直径的三次方成正比,根据自相似准则有

$$V_p (> d) \propto d^{3-D_{s1}} \quad (4)$$

式中: $d$  是孔隙直径;  $D_{s1}$  是基于体积假设下的孔隙表面分形维数;  $V_p$  是孔径大于  $d$  的孔隙对应的总孔隙体积.

据式(1)可知,进汞压力  $p$  与相应的孔径  $d$  成反比,则可以得到下式:

$$V_p (< p) \propto d^{D_{s1}-3}$$

左右两边同时对  $p$  微分,则有

$$\frac{dV_p}{dp} \propto p^{D_{s1}-4}$$

左右两边同时取自然对数,则有

$$\ln\left(\frac{dV_p}{dp}\right) = (D_{s1} - 4) \ln p + C_1$$

根据压汞试验数据可以作  $\ln p \sim \ln(dV_p/dp)$  曲线,并拟合求得这一曲线的斜率  $A$ .则基于体积假设下的孔隙表面分形维数  $D_{s1}$  可以通过下式求得:

$$D_{s1} = A + 4 \quad (5)$$

(2) 第二种方法最早由 Zhang 和 Li 提出<sup>[23]</sup>.在压汞过程中,由式(2)可得

$$\int_0^V p dV = \int_0^S T_s \cos \theta dS$$

根据热力学原理,表面分形维数  $D_{s2}$  满足以下关系:

$$\sum_{i=1}^m \bar{p}_i \Delta V_i = k d_m^2 \left(\frac{V_m^{1/3}}{d_m}\right)^{D_{s2}} \quad (6)$$

式中: $p_i$  和  $\Delta V_i$  分别为第  $i$  级进汞压力和进汞量;  $k$  为分形系数;  $d_m$  和  $V_m$  分别为第  $m$  级进汞压力对应的孔径和累计进汞量.

令  $W_m = \sum_{i=1}^m \bar{p}_i \Delta V_i$  且  $Q_m = V_m^{1/3}/d$ , 则对式(6)

左右两侧同时取自然对数,可得

$$\ln\left(\frac{W_m}{r_m^2}\right) = D_{s2} \ln Q_m + C_2 \quad (7)$$

式中: $C_2$  为常数.由压汞试验数据可以作出  $Q_m$  与  $W_m/r_m^2$  关系曲线,曲线的斜率则为基于热力学原理的孔隙表面分形维数  $D_{s2}$ .

根据分形理论,表面分形维数的值应当在  $2 \leq D_s < 3$  之间<sup>[24]</sup>,其中,分形维数为 2 代表某一非常光滑的表面,分形维数为 3 表示极粗糙的表面.

## 3 试验结果与分析

### 3.1 试验结果

本次试验中,由于制样过程中水分以及干土粉的损失,实际土样的初始含水率不能够与预设初始含水率完全一致.因此,在进行冻融试验前,取土样进行了含水率试验,试验结果如表 2 所示.

表 2 实际初始含水率

Tab.2 Actual initial water content		%
预设初始含水率	实际初始含水率	
20	22.5	
30	32.1	
40	40.8	
50	51.6	

根据这一结果,将压汞试验土样按表 3 进行编号,以便于下文分析说明.表 3 中, $w$  表示含水率;U 表示未冻;F 表示冻融.

表 3 压汞试验样品编号

编号	说明	编号	说明
20U	未冻, $w=22.5\%$	40U	未冻, $w=40.8\%$
20F	冻融, $w=22.5\%$	40F	冻融, $w=40.8\%$
30U	未冻, $w=32.1\%$	50U	未冻, $w=51.6\%$
30F	冻融, $w=32.1\%$	50F	冻融, $w=51.6\%$

将由压汞试验所得到的不同含水率土样冻融前后的累积进汞体积、累积孔隙表面积、孔隙比,以及由渗透试验得到的渗透系数均列于表 4 中.可以看出,经冻融后,土样的孔隙比与孔隙表面积减小,而渗透系数增大.这一现象也被其他学者研究发现<sup>[19,25]</sup>,并从宏观角度解释为冻融过程中产生了收缩裂缝,及冰晶融化后遗留有大孔隙所致<sup>[26-27]</sup>.本文将从微观角度出发,利用压汞试验所得的孔隙分布,并结合分形理论对这一现象进行解释.

表 4 压汞试验及渗透试验结果

样品编号	单位累积进汞体积/ ( $\text{mL} \cdot \text{g}^{-1}$ )	单位累积孔隙表面积/ ( $\text{m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$ )	孔隙比	渗透系数/ ( $\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$ )
20U	0.173 7	20.532	0.498	$4.46 \times 10^{-5}$
20F	0.142 5	20.164	0.451	$4.76 \times 10^{-5}$
30U	0.159 8	19.694	0.536	$3.93 \times 10^{-6}$
30F	0.147 6	18.607	0.472	$1.11 \times 10^{-5}$
40U	0.170 8	20.787	0.606	$2.31 \times 10^{-7}$
40F	0.167 6	19.683	0.572	$1.37 \times 10^{-6}$
50U	0.181 0	21.193	0.662	$2.83 \times 10^{-7}$
50F	0.173 0	18.183	0.603	$1.52 \times 10^{-6}$

### 3.2 孔隙结构

土体的孔隙结构是指固体颗粒及孔隙的形状、尺寸和排列方式<sup>[28]</sup>.许多学者曾尝试根据孔径对土体中的孔隙进行分类,如表 5 所示.然而这些分类往往是经验性的,并没有一个规范的准则.本节将结合分形的概念,利用由压汞试验数据所得的分形曲线,对重塑的上海软黏土孔隙进行分类.

表 5 黏土中孔隙分类

文献	孔径/nm			
	大孔	中孔	小孔	微孔
文献[14]	$>4\ 000$	$400 \sim 4\ 000$	$40 \sim 400$	$<40$
文献[29]	$>50$	$20 \sim 50$	$<2$	—
文献[30]	$>500$	$200 \sim 500$	$5 \sim 200$	$<5$

前已述及,利用压汞试验数据可以采用两种不同的方法计算孔隙的表面积分形维数.以土样 40U

为例,两种不同的分形维数计算曲线如图 2 所示.可以看出,第一种基于体积假设得到的分形曲线由两个转折点截为 3 段,可得到 3 个不同的分形维数值;而基于热力学理论的方法可得到代表整体的一个分形维数值,说明土样整体孔隙表面具有自相似性.根据分形理论,表面积分形维数值应当在  $2 \leq D_s < 3$  之间,超出这个范围的分形维数值不具有物理意义.而基于体积假设的计算方法得到的中间一段的分形维数值大于 3,说明这一计算方法具有一定的缺陷,使计算结果与分形理论相悖.究其原因,这一方法假设土体中的孔隙均为圆柱体,而实际土体孔隙并非具有均匀的圆柱几何形态,仅有较大和较小孔径的孔隙可以满足这一假设.这说明,重塑软黏土中不同孔径的孔隙具有不同的特性,因此可以将第一种方法曲线上的转折点作为孔径划分的临界点,如表 6 所示.

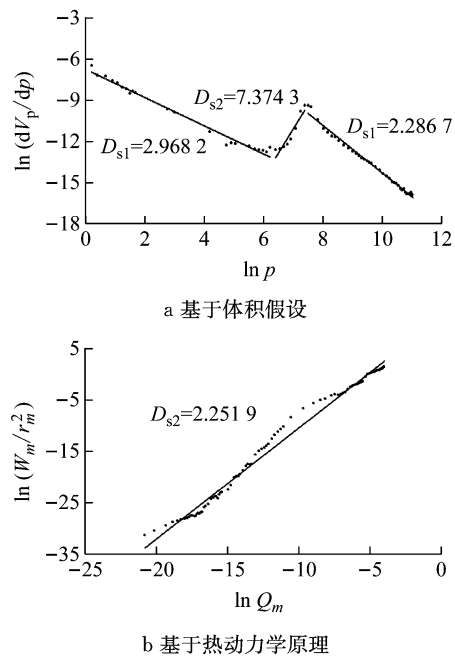


图 2 土样 40U 的分形维数计算曲线

Fig.2 Fractal calculating curves for sample 40U

表 6 孔隙划分的临界孔径

样品编号	大孔径	小孔径
20U	521.1	90.7
20F	457.0	100.8
30U	364.4	100.8
30F	405.6	113.4
40U	303.0	100.8
40F	521.8	113.4
50U	404.9	113.4
50F	523.1	119.6

可以发现,较大的临界孔径在  $300 \sim 500$  nm,较小的临界孔径在  $90 \sim 130$  nm.据此,可以将孔隙划

分为大孔、中孔、小孔 3 类。黏土的孔隙结构十分复杂,对其研究目前并未有明确的结论。Shear 等曾提出可以将黏土孔隙划分为颗粒内孔隙、颗粒间(团粒内)孔隙和团粒间孔隙,其中,团粒由黏土颗粒聚集而成<sup>[31]</sup>。参考这一概念,本文将孔径小于 110 nm 的孔隙划分为颗粒内孔隙,孔径在 110~400 nm 的为颗粒间(团粒内)孔隙,而孔径大于 400 nm 的孔隙为团粒间孔隙。这 3 种孔隙在各土样中所占的比例,可以反映土体的孔径分布特征,进而影响土体的宏观表现。不同含水率冻融土样的 3 种孔隙的百分比如图 3 所示。

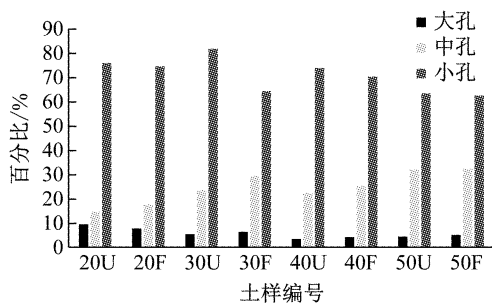


图 3 不同含水率土样 3 种孔径的百分比  
Fig.3 Percentage of three types of pores

不难发现,软黏土中,小孔隙的比例远大于中孔和大孔。在经历了一次冻融循环之后,小孔隙(即颗粒内孔隙)的百分含量减小,而中孔的百分含量增大,大孔隙则没有一致的规律性。前面已经提到,经过冻融后土样的孔隙比及比表面积减小,说明冻融作用会导致土样压缩。冻结过程中,未冻水往往会存在于颗粒内孔隙中,而中孔及大孔中的水分往往会凝结成冰而体积增大约 9%,同时产生冻胀力。在巨大的冻胀力的作用下,小孔隙被压缩,孔隙体积减小,而这种压缩很大一部分是不可逆的。冻结过程中,水分向冻结锋面迁移而重新分布,形成冰透镜体,同时使得土颗粒聚集形成新的团粒。融化时,冰融化成为孔隙水,虽然冻胀力消失,但冻结过程中形成的较大的孔隙保留了下来。因此,冻融后小孔隙减少而中孔与大孔增多,宏观则表现出虽然孔隙比减小,但渗透系数增大的现象。

通过绘图计算,将两种方法得到的不同含水率重塑土样的表面积分形维数值列于表 7 中,第一种方法计算得到的中间孔径的分形维数不具有物理意义,故在表中忽略。表面分形维数越大,代表多孔介质的各向异性越强。可以看出,经过一次冻融循环后,小孔隙的表面分形维数减小,因此冻融作用可以将多孔介质孔隙表面均匀化,尤其是对于小孔而言,

这一结果与周洁<sup>[30]</sup>、李珺<sup>[32]</sup>等人的研究相吻合。

在细颗粒土中,小孔隙中的孔隙水一般是结合水而很难流动,因此其渗透特性往往反映了中孔和大孔的特征。因此,利用第二种计算分析维数的方法,计算了中孔和大孔的总表面分形维数,同样列于表 7 中。可以看到,虽然冻融后整体的表面分形维数呈现出减小的趋势,但中孔与大孔的分形维数增大。

表 7 不同含水率土样表面积分形维数

Tab.7 Surface fractal dimension for soil samples with different water contents

样品编号	第一种方法		第二种方法	
	大孔	小孔	整体	中孔及大孔
20U	2.534	2.311	2.324	2.268
20F	2.927	2.221	2.231	2.341
30U	2.892	2.294	2.217	2.177
30F	2.795	2.079	2.231	2.459
40U	2.968	2.287	2.252	2.472
40F	2.807	2.272	2.232	2.506
50U	2.827	2.203	2.227	2.462
50F	2.784	2.336	2.221	2.498

### 3.3 冻融黏土的渗透性

对于岩土工程领域的研究人员来说,找到土体结构与渗透性之间的关系并不容易,许多学者尝试发掘了渗透系数与土体粒径、孔径分布、孔隙曲率、孔喉尺寸等参数之间的关系<sup>[33-36]</sup>,分形维数也被用来确定土体的渗透系数<sup>[15,37-38]</sup>。本文参考前人研究所采用的参数,并结合分形结果,考虑采用中孔与大孔的表面分形维数  $D_s$ 、含水率  $w$ 、孔隙率  $n$ 、小孔临界孔径  $d_s$ 、中孔与大孔的总百分比  $\alpha$  为计算参数,为保证量纲一致,同时引入重力加速度  $g = 9.8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ ,给出一种渗透系数  $K$  与土体孔隙结构之间的关系式,试验及计算所得参数列于表 8 中。

表 8 渗透系数计算式参数

Tab.8 Permeability calculation parameters

编号	$\lg K / (\text{cm} \cdot \text{s}^{-1})$	$w / \%$	$D_s$	$n$	$\alpha / \%$	$d_s / \text{nm}$
20U	-4.350	22.5	2.268	0.33	24.17	90.7
20F	-4.322	22.5	2.341	0.3	25.40	100.8
30U	-5.405	32.1	2.177	0.35	29.04	100.8
30F	-4.955	32.1	2.459	0.32	35.64	113.4
40U	-6.635	40.8	2.472	0.38	25.99	100.8
40F	-5.863	40.8	2.506	0.37	30.95	113.4
50U	-6.547	51.6	2.462	0.39	35.12	113.4
50F	-5.816	51.6	2.498	0.38	38.46	119.6

考虑到渗透系数跨越了 3 个数量级,因此对其取对数,即

$$\lg K = f(D_s, w, n, d_s, \alpha, g)$$

式中: $D_s$ 、 $w$  和  $n$  与渗透系数正相关,而  $\alpha$  则与渗透系数负相关,且  $d_s$  同样取对数,则有

$$\lg K: \frac{n\alpha \sqrt{D_s}}{w} \lg(\sqrt{d_s g} \times 10^{-5})$$

式中:系数  $10^{-5}$  是为了保持等式的量纲一致.令

$$f = \frac{n\alpha \sqrt{D_s}}{w} \lg(\sqrt{d_s g} \times 10^{-5})$$

利用 6 个土样(20U、20F、30U、30F、50U、50F)的数值对其进行拟合,得到线性关系如图 4 所示.

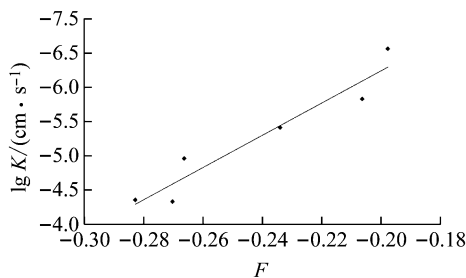


图 4 渗透系数与试验参数关系

Fig.4 Permeability versus experimental parameters

拟合关系曲线表达式为

$$\lg K = -23.481f + \lg(1.16 \times 10^{-11})$$

$$R^2 = 0.9222 \quad (8)$$

式中: $R^2$  为决定系数.

利用公式计算土样 40U 和 40F 的渗透系数,进而检验公式的准确性,结果如表 9 所示.可以看出,公式具有较高的精度.

表 9 公式(8)验证

Tab.9 Verification of formula (8)

土样编号	$K$ 计算值/( $\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$ )	$K$ 试验值/( $\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$ )
40U	$3.37 \times 10^{-7}$	$2.31 \times 10^{-7}$
40F	$1.30 \times 10^{-6}$	$1.37 \times 10^{-6}$

式(8)可以表示为  $\lg K = af + \lg b$  形式.这里参数  $a$  为量纲一的常数,与土体性质有关;参数  $b = 1.16 \times 10^{-11} \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ ,表示一个很小的渗透系数,考虑到孔隙的分类,可以认为它表示小孔隙部分的渗透系数.可见,土样的渗透系数主要由中孔和大孔隙部分的渗透系数决定.

## 4 结论

本文通过系列室内试验,并结合分形理论,研究冻融作用对上海地区不同含水率淤泥质软黏土的孔隙结构的影响,进而探讨孔隙结构与渗透系数的关系,主要结论如下:

(1) 分形理论可以应用于淤泥质软黏土孔隙结构的研究,基于孔隙体积假设的分形计算方法能够反映土体孔隙种类的分布情况,而基于动力学原理

的计算方法能够反映整体的孔隙特征.

(2) 提出根据分形维数划分孔隙种类的方法,针对重塑(扰动)的上海淤泥质软黏土,将 110 nm 和 400 nm 作为临界孔径,将孔隙划分为小孔、中孔和大孔.

(3) 根据孔隙划分,发现冻融后小孔隙减少,而中孔与大孔增多,宏观则表现出虽然孔隙比减小,但渗透系数增大;含水率越低,土体的渗透性越好;经一次冻融循环后,小孔隙的表面分形维数减小,表明冻融作用可以将多孔介质孔隙表面均匀化.

(4) 提出一种从微观角度计算土体渗透系数的方法,并根据拟合公式提出一个合理的假设,即土体内小孔部分的渗透系数非常小,因此土体宏观的渗透系数主要由中孔和大孔的渗透特性决定.

在地铁旁通道的冻结法施工过程中,由于水分迁移的存在,靠近地铁隧道管片位置的土体的含水率将大大降低,从而导致冻融之后这一部位的渗透性将大大增加.因此,必须在这一部位采取一定的防渗措施,来保证地铁的安全运营.

## 参考文献:

- [1] TANG Yiqun, YAN Jingjing. Effect of freezing-thawing on hydraulic conductivity and microstructure of soft soil in Shanghai area [J]. *Environmental Earth Sciences*, 2015, 73: 7679.
- [2] 肖朝响,胡向东,张庆贺. 四排局部冻结法在上海地铁修复工程中的应用[J]. *岩土力学*, 2006, 27(增刊 1): 300.  
XIAO Zhaoyun, HU Xiangdong, ZHANG Qinghe. Application of limited depth freezing method with four-row freeze-tubes to recovering collapse tunnel in Shanghai Metro[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2006, 27(S1): 300.
- [3] ZHOU Jie, TANG Yiqun. Artificial ground freezing of fully saturated mucky clay thawing problem [J]. *Cold Regions Science and Technology*, 2015, 117: 1.
- [4] CHAMBERLAIN E J, ISKANDAR I, HUNSICKER S E. Effect of freeze-thaw cycles on the permeability and macrostructure of soils[J]. *Cold Region Research and Engineering Laboratory*, 1990(1): 145.
- [5] KIM W H, DANIEL D E. Effects of freezing on hydraulic conductivity of compacted clay [J]. *Journal of Geotechnical Engineering*, 1992, 118(7): 1083.
- [6] 查甫生,崔可锐,吴燕开. 冻结法施工冻融作用对土的工程性质影响研究[J]. *路基工程*, 2008(6): 30.  
CHA Fusheng, CUI Kerui, WU Yankai. Study on freeze-thaw action impacts on engineering character of soil in freezing method construction[J]. *Subgrade Engineering*, 2008(6): 30.
- [7] LEE W, BOHRA N C, ALTSCHAEFFL A G, et al. Resilient modulus of cohesive soils and the effect of freeze-thaw [J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 1995, 32(4): 559.

- [8] SIMONSEN E, JANOO V C, ISACSSON U. Resilient properties of unbound road materials during seasonal frost conditions[J]. *Journal of Cold Regions Engineering*, 2002, 16(1): 28.
- [9] 郑郎, 马巍, 邴慧. 冻融循环对土结构性影响的机理与定量研究方法[J]. *冰川冻土*, 2015, 37(1): 132.  
ZHENG Yun, MA Wei, BING Hui. Impact of freezing and thawing cycles on the structures of soil and a quantitative approach[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2015, 37(1): 132.
- [10] PERFECT E, KAY B D. Applications of fractals in soil and tillage research: a review[J]. *Soil & Tillage Research*, 1995, 36(1/2): 1.
- [11] PERFECT E. Fractal models for the fragmentation of rocks and soils: a review [J]. *Engineering Geology*, 1997, 48 (3/4): 185.
- [12] RIEU M, SPOSITO G. Fractal fragmentation, soil porosity, and soil water properties; I theory[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1991, 55(5): 1231.
- [13] TURCOTTE D L. Fractals and fragmentation[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1986, 91(B2):1921.
- [14] 王清, 王剑平. 土孔隙的分形几何研究[J]. *岩土工程学报*, 2000, 22(4): 496.  
WANG Qing, WANG Jianping. A study on fractal of porosity in the soils [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2000, 22(4): 496.
- [15] XU Yongfu, SUN Dean. A fractal model for soil pores and its application to determination of water permeability[J]. *Physica A*, 2002, 316:56.
- [16] BONALA M V, REDDI L N. Fractal representation of soil cohesion[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 1999. DOI: 10.1061/(ASCE)1090-0241(1999)125:10(901)
- [17] XU Yongfu, XIA Xiaohe. Fractal model for virgin compression of pure clays[J]. *Mechanics Research Communications*, 2006, 33(2): 206.
- [18] LU Yang, LIU Sihong, WENG Liping, *et al.* Fractal analysis of cracking in a clayey soil under freeze-thaw cycles [J]. *Engineering Geology*, 2016, 208: 93.
- [19] QI Jilin, VERMEER P A, CHENG Guodong. A review of the influence of freeze - thaw cycles on soil geotechnical properties[J]. *Permafrost and Periglacial Processes*, 2006, 17(3): 245.
- [20] 余占奎, 黄宏伟, 王如路, 等. 人工冻结技术在上海地铁施工中的应用[J]. *冰川冻土*, 2005, 27(4):550.  
YU Zhankui, HUANG Hongwei, WANG Rulu, *et al.* Application of the artificially ground freezing method to shanghai metro engineering [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2005, 27(4):550.
- [21] 张志强, 何川. 用冻结法修建地铁联络通道施工力学研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2005, 24(18): 3211.  
ZHANG Zhiqiang, HE Chuan. Study on construction of cross connection on shield tunnel and connecting aisle by freezing method [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2005, 24(18): 3211.
- [22] FRIESEN W I, MIKULA R J. Fractal dimensions of coal particles[J]. *Journal of Colloid and Interface Science*, 1987, 120(1): 263.
- [23] ZHANG Baoquan, LI Shaofen. Determination of the surface fractal dimension for porous media by mercury porosimetry[J]. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 1995, 34(4):1383.
- [24] AVNIR D, FARIN D, PFEIFER P. Molecular fractal surfaces [J]. *Nature*, 1984, 308: 261.
- [25] CHAMBERLAIN E J, GOW A J. Effect of freezing and thawing on the permeability and structure of soils [J]. *Engineering Geology*, 1979, 13: 73.
- [26] EIGENBROD K D. Effects of cyclic freezing and thawing on volume changes and permeabilities of soft fine-grained soil[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 1996, 33: 529.
- [27] BENSON C H, OTHMAN M A. Hydraulic conductivity of compacted clay frozen and thawed in situ[J]. *ASCE Journal of Geotechnical Engineering*, 1993, 119: 276.
- [28] LAL R. Soil structure and sustainability [J]. *Journal of Sustainable Agriculture*, 1991, 1(4): 67.
- [29] YAN Chunling, TANG Yiqun, LIU Yuting. Study on fractal dimensions of the silty soil around the tunnel under the subway loading in Shanghai[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2013, 69:1529.
- [30] 周洁. 地铁隧道管片周围人工冻结软黏土融沉机理与动力变形特性研究[D]. 上海: 同济大学, 2015.  
ZHOU Jie. Thaw settlement mechanism and dynamic deformation of soft clay surrounding subway tunnel after artificial ground freezing [D]. Shanghai: Tongji University, 2015.
- [31] SHEAR D L, OLSEN H W, NELSON K R. Effects of desiccation on the hydraulic conductivity versus void ratio relationship for a natural clay [R]. Washington D C: Transportation Research Record, NRC, National Academy Press, 1993:1365-1370.
- [32] 李珺. 人工冻结饱和软黏土的变形特性及微观结构研究[D]. 上海: 同济大学, 2016.  
LI Jun. Deformation mechanism and microstructure behavior of artificial freezing-thawing soft clay [D]. Shanghai: Tongji University, 2016.
- [33] TAYLOR D W. Deformation mechanism and microstructure behavior of artificial freezing-thawing soft clay[M]. New York: John Wiley and Sons, 1948.
- [34] TERZAGHI K, PECK R B, MESRI G. Soil mechanics in engineering practice[M]. 3rd ed. New York: John Wiley and Sons, 1996.
- [35] RODRIGUEZ E, GIACOMELLI F, VAZQUEZ A. Permeability-porosity relationship in RTM for different fiberglass and natural reinforcements[J]. *Journal of Composite Materials*, 2004, 38(3):259.
- [36] JANG J, NARSILIO G A, SANTAMARINA J C. Hydraulic conductivity in spatially varying media—a pore-scale investigation[J]. *Geophysical Journal International*, 2015, 184(3):1167.
- [37] GIMENEZ D, PERFECT E, RAWLS W J, *et al.* Fractal models for predicting soil hydraulic properties; a review[J]. *Engineering Geology*, 1997, 48(3/4): 161.
- [38] XU Yongfu. Calculation of unsaturated hydraulic conductivity using a fractal model for the pore-size distribution [J]. *Computers & Geotechnics*, 2004, 31(7):549.