

文章编号: 1000-7598(2010)10-3075-06

动荷载作用下结构性软土微结构变化的分形研究

姜岩¹, 雷华阳^{1,2}, 郑刚¹, 杨雄建³

(1. 天津大学 建筑工程学院, 天津 300072; 2. 天津大学 滨海土木工程结构与安全教育部重点实验室, 天津 300072;
3. 天津市地质工程勘察院, 天津 300191)

摘要: 为探讨天津滨海新区典型结构性软土的动力特性, 采用动三轴试验和压汞试验, 对交通荷载作用下结构性软土微观结构变化进行了研究。取原状土和动荷载作用后的土样进行压汞测试, 用分形理论对压汞测试数据进行分析, 探讨孔隙分布特征, 提出孔径划分的方法, 给出了卓越频率与土体孔隙变化的规律。研究表明: 在动荷载作用下, 天津滨海新区典型软土的孔隙分布发生改变, 可分为3种类型; 利用 Menger 海绵模型研究交通荷载作用下结构性软土的孔隙分布特性是可行的; 用孔隙分维数可实现对卓越频率的预测以及路基土体变形行为的机制分析。

关键词: 结构性软土; 压汞试验; 交通荷载; Menger 海绵模型; 分形维数

中图分类号: TU 411

文献标识码: A

Fractal study of microstructure variation of structured clays under dynamic loading

JIANG Yan¹, LEI Hua-yang^{1,2}, ZHENG Gang¹, YANG Xiong-jian³

(1. School of Civil Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China; 2. Key Laboratory of Coast Civil Structure Safety of Education Ministry, Tianjin University, Tianjin 300072, China; 3. Tianjin Geo-Engineering Investigation Institute, Tianjin 300191, China)

Abstract: In order to understand the dynamic characteristics of the structured soft soil in Tianjin Binhai Area, dynamic triaxial test and mercury intrusion test are applied to measure microscopic features of structured clay. The microstructures of unloaded and loaded soft soils are studied by means of the mercury intrusion tests. The fractal theory is used and the fractal characteristics of pore distribution are studied through the data analysis. The method of pore classification is proposed; and the relationship between porosity feature and excellent frequency are formulated. The results indicate that the pore of structured clays under traffic loading is able to be divided into three types according to relation curve of pore diameter and volume of the structured clays. Menger sponge model can be applied to fractal research of the pore characteristics of structured clays under traffic loading. The porosity fractal dimension can be employed for predicting the excellent frequency and analyzing soil deformation mechanism under the embankment.

Key words: structured clays; mercury intrusion test; traffic loading; Menger sponge model; fractal dimension

1 引言

随着我国国民经济的飞速发展, 为解决城市交通拥挤的问题, 大力发展城市快速路、城市轻轨和城市地铁已成为每个城市的重点工程。与此同时, 交通荷载所引起的基础的变形问题也成了城市轨道交通建设中一个被岩土工程技术人员广泛关注的难点问题。

土中孔隙的分布及特征是土体变形的内因, 因此, 要研究路基在交通荷载作用下的变形问题, 土

体微观结构是研究的起点, 尤其是土体的孔隙特征。

目前, 国内外学者对于土体孔隙特征与宏观力学特性之间的关系进行了大量的研究, 取得了一些研究成果。如王梅和白晓红等^[1]对生石灰与粉煤灰桩加固软土地基进行了微观分析, 把加固前后不同土的微观结构进行分类, 从微观上解释了生石灰与粉煤灰桩加固软土的机制。孔令荣等^[2]分析了不同的固结压力作用下土体孔隙分布与固结压力的关系, 但在如何定量描述孔隙的结构特征方面, 由于

收稿日期: 2009-04-09

基金项目: 国家自然科学基金项目(No. 50508021); 天津市科技创新专项资金项目(No. 07FDZDSF02100-02); 天津市自然科学基金(No. 07JCZDJC09800)。
第一作者简介: 姜岩, 男, 1982年生, 博士研究生, 主要从事软土工程特性及本构关系的研究。E-mail: yan.jiang_geo@gmail.com

孔隙的复杂性和不确定性，其描述很难用传统的几何方法加以研究，因此，至今在这方面还没有达到实用的要求。

分形几何学^[3]作为当代数学的一种新理论，由美籍法国数学家 Mandelbrot 于 20 世纪 70 年代末、80 年代初提出创立的，主要用来研究一些具有自相似性的不规则曲线和图形。目前，国内外许多学者利用分形理论来研究多孔材料的孔隙结构，如 Tyler 和 Wheatcraft^[4]对土体的结构进行了研究，发现土的结构具有自相似性，可以用分形维数来描述；Vallejo^[5-6]对土体中的颗粒形状进行了分形研究；刘松玉等^[7]对土体的孔隙分布特征进行了研究，研究表明：介质的孔隙结构具有分形特征，可以用分形几何来研究，不同的分维值表征不同的孔隙产生机制；王清等^[8]利用压汞试验对黄土的孔隙进行了分形几何研究，确定了土体孔隙划分的界限；薛如等^[9]对软土加固过程中土体的微结构变化进行了分形研究，并且利用孔隙分维数对地基加固的程度进行了预测；毛灵涛等^[10]以珠江三角洲地区某高速

公路软土路基加固为例，用分形维数对土体扫描电镜（SEM）图像进行分析，表明软土中孔隙分布及形状具有分形特征，不同的分形维数可以从不同角度反映土体的加固效果及力学特性变化。

总结以上研究可以看出，研究多集中在静力条件下土体微观结构的变化规律方面，而对于循环振动荷载作用下结构性软土的孔隙变化特点，尚缺乏系统的研究。基于上述原因，本文采用原状土样和动三轴试验土样进行压汞试验，利用测试结果探讨土体在交通荷载作用前后的孔隙分布变化规律，从分形理论角度探讨动力条件下结构性软土的孔隙分布特征，提出相应的孔隙划分界限以及振动频率与孔隙变化的规律。

2 试验条件

试验选取天津滨海新区典型的淤泥质粉质黏土作为研究对象，取土深度为 10 m，其基本的物理力学指标如表 1 所示。利用室内固结试验确定土体的结构屈服应力为 128 kPa，具体方法见文献[11]。

表 1 试验用土的基本物理力学指标
Table 1 Main physio-mechanical parameters of test soil

重度 γ (kN/m ³)	含水率 w /%	相对密度 G_s	孔隙比 e	液限 w_L /%	塑限 w_p /%	塑性指标 I_p	压缩系数 a_{1-2} /MPa ⁻¹	压缩模量 E_s /MPa	快剪	
									凝聚力 c /kPa	摩擦角 φ /(°)
17.8	42.8	2.71	1.18	38.0	20.2	17.8	0.92	2.55	5.0	7.68

2.1 动三轴试验

本次试验采用 DDS-70 电磁式振动三轴仪，采用应力控制进行加载，每级动荷激振 10 个循环，量测每级动荷载作用下的平均动应力和动应变值，试验方案如表 2 所示。

表 2 试验方案
Table 2 Scheme of dynamic triaxial test

频率/Hz	围压/kPa	固结方式
1, 2, 5	80	等压、偏压， $k_0=1.4$
1, 2, 5	150	等压、偏压， $k_0=1.4$

为模拟交通荷载作用下的初始受力条件，试验分等压和偏压固结 2 组试样。围压的选取结合室内压缩试验所确定的结构屈服压力值，分别取小于结构屈服压力值和大于结构屈服压力值，即 80 kPa 和 150 kPa。对于偏压固结试样首先在一定静止土压力系数条件下偏压固结，再进行动三轴试验。本试验中偏压固结比 $k_0 = \sigma_1 / \sigma_3 = 1.4$ ，其中 σ_1 为轴向压力， σ_3 围压。

振动频率反映了车辆行驶速度的变化。根据现

场实测资料，其振动频率是不断变化的，结合测试仪器的范围，本次试验选择振动频率分别为 1、2、5 Hz。选用的振动波型为半正弦波。

由于交通荷载作用下饱和土体几乎不发生排水和体积变化，因此，采用不排水三轴试验来模拟。

2.2 压汞试验

前期样品制备采用中国科学院广州地球化学研究所研制的土微结构真空冷冻制样仪。首先，将原状土切成 2 mm×3 mm×7 mm 的土条；其次，把土条放入沸点为 -140℃ 的异戊烷中，再将装有样品的异戊烷容器放入液氮（沸点为 -190℃）中进行冷冻，使土中的液体成为不具膨胀性的非结晶冰态；最后，在 -50℃ 的状态下对其抽真空 15 h 以上，使土中的非结晶冰直接升华，从而达到土样既干燥又不变形的目的。

压汞试验所采用的设备为美国麦克公司生产的 9510 型压汞仪，测量范围为 360~0.003 μm。其原理为外力克服阻力而使液体浸入到孔隙中，所以充满一定孔隙所需要的压力便成为该孔径大小的一种度量，迫使不浸润液体汞进入其一尺寸的孔隙所需

要的压力的关系式满足 Washburn 方程:

$$P = -2\sigma \cos \theta / r \quad (1)$$

式中: P 为施加汞的附加压强 (MPa); r 为毛细孔半径 (μm); σ 为汞的表面张力系数 (N/m); θ 为汞对材料的浸润角, 一般为 130° 。

只要知道测孔压力, 就可以计算在此压力下汞所进入孔隙的最小半径, 从而得到孔隙分布的结果。

3 试验结果与分析

3.1 动三轴试验结果分析

图 1 为不同频率动荷载作用下动应力-应变关系曲线。从图中可以看出:

(1) 无论是偏压状态还是等压状态, 动应力-应变关系曲线均为应变硬化型, 具有明显的非线性特征, 曲线呈下凹型, 说明滨海新区结构性软土在交通荷载作用下的动应力-应变关系为双曲线型。

(2) 当围压小于结构屈服压力时, 无论是等压条件还是偏压条件下均表现为频率越低, 产生的应变幅值越大; 频率越高, 产生的应变幅值越小。随着频率的升高, 应变幅值逐渐减少, 表明淤泥质粉质黏土具有明显的频率作用效应。

(3) 当围压大于结构屈服压力时, 土体变形随动荷载的频率变化规律发生改变, 初始阶段表现为振动频率越低, 产生的应变幅值较大。随着动应力的逐渐增大, 振动频率的影响出现了相反的情况, 即基本上随着频率的升高, 土体的产生的应变幅值越小。

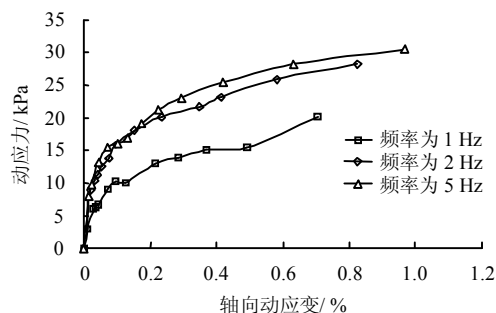
3.2 压汞试验结果分析

图 2 为原状样孔隙直径与孔隙体积百分含量双对数曲线。由图可知:

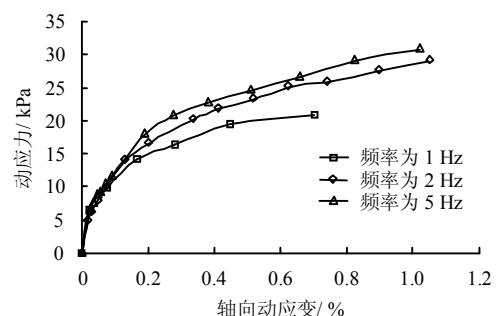
(1) 所得出的曲线为折线, 说明在一定的尺度范围内土体的孔隙是具有统计自相似特征的, 每个折点都可以作为划分孔径大小的标准。

(2) 从最大孔隙到 $2.5 \mu\text{m}$ 处为水平直线, 该部分孔隙含量很少; 从 $2.5 \sim 0.01 \mu\text{m}$ 为陡降段, 其中在 $0.35 \mu\text{m}$ 附近曲线有一拐点; 小于 $0.01 \mu\text{m}$ 部分为缓降段, 其中, 在 $0.35 \mu\text{m}$ 和 $0.01 \mu\text{m}$ 附近, 曲线上表现为有明显的转折点, 这样原状样孔隙分布曲线可由 4 段折线组成。

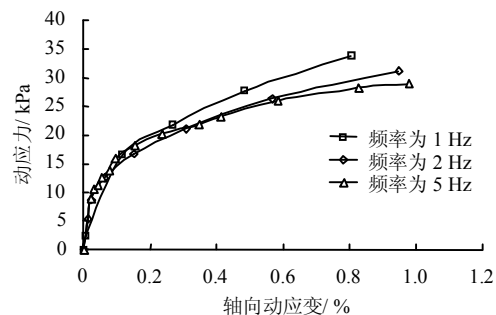
(3) 试验所得曲线分别在对应于孔径 2.5 、 0.35 、 $0.01 \mu\text{m}$ 附近处有明显拐点, 说明孔径 2.5 、 0.35 、 $0.01 \mu\text{m}$ 是土体孔隙性质变化的界限值。因此, 将所研究软土的孔隙直径划分为 4 种类型: 大孔隙, $d > 2.5 \mu\text{m}$; 中孔隙, $0.35 \mu\text{m} < d < 2.5 \mu\text{m}$; 小孔隙, $0.35 \mu\text{m} < d < 0.01 \mu\text{m}$; 微孔隙, $d < 0.01 \mu\text{m}$ 。



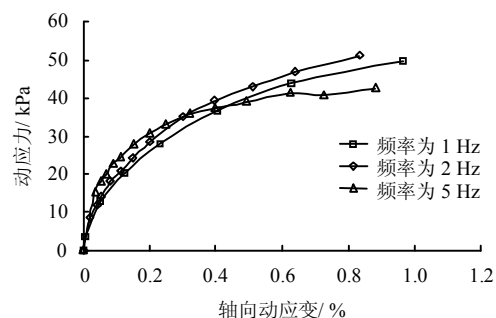
(a) 围压为 80 kPa, 偏压固结



(b) 围压为 80 kPa, 等压固结



(c) 围压为 150 kPa, 偏压固结



(d) 围压为 150 kPa, 等压固结

图 1 不同频率交通荷载动应力-应变关系曲线图
Fig.1 Relation curves of dynamic stress and strain

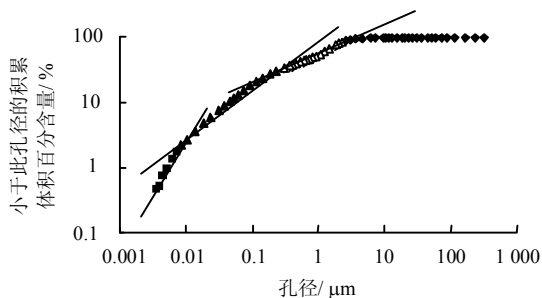
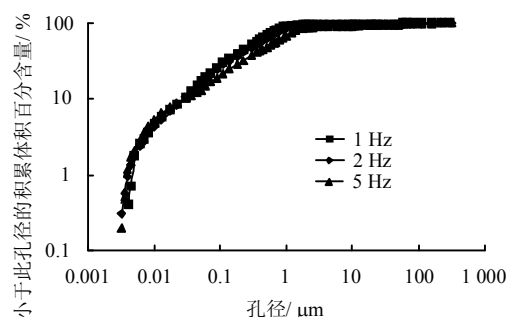


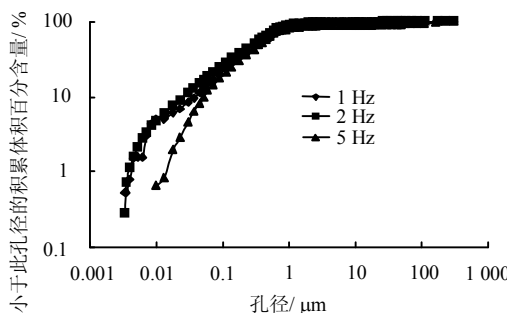
图 2 原状样孔隙直径与孔隙体积百分含量关系曲线
Fig.2 Relation curve of pore diameter and volume of intact structured clays

图 3 为偏压状态下经过不同振动频率作用后结构性软土孔隙体积百分含量曲线。与原状土样的孔隙分布曲线相比,交通荷载作用下土体孔隙的分布特征发生了很大的变化,具体表现如下:

(1) 与原状样 4 段折线组成的孔隙分布曲线相比,动荷载作用后土体的孔隙分布曲线由 3 段折线组成。根据这一特点将动荷载作用后土体的孔径大小进行了重新的划分:大孔隙, $d > 0.8 \mu\text{m}$; 中小孔隙, $0.01 \mu\text{m} < d < 0.8 \mu\text{m}$; 微孔隙, $d < 0.01 \mu\text{m}$ 。新划分的孔隙百分含量如表 3 所示。



(a) 围压 80 kPa 偏压固结



(b) 围压 150 kPa 偏压固结

图 3 不同频率交通荷载结构性软土孔隙体积百分含量曲线

Fig.3 Relation curves of pore diameter and volume of structural clays under different frequencies vibration

表 3 各类孔隙体积百分含量
Table 3 Percentage of pore of different size in total pore volume

围压 /kPa	固结 方式	频率 /Hz	孔隙百分含量/%		
			$> 0.8 \mu\text{m}$	$0.8 \sim 0.01 \mu\text{m}$	$< 0.01 \mu\text{m}$
0			50	47.3	2.7
80	偏压	1	16	79.0	5.0
80	偏压	2	23	72.0	5.0
80	偏压	5	41	54.0	5.0
150	偏压	1	22	71.0	5.0
150	偏压	2	13	82.0	5.0
150	偏压	5	22	77.0	1.0

(2) 动荷载作用后土体的孔隙以 $< 0.8 \mu\text{m}$ 为主,可占到总量的 80%左右,频率的改变对于微孔隙的数量几乎没有任何改变,即保持一个定量。

(3) 当围压低于结构屈服应力时,孔隙变化较为明显,其中大孔隙随着频率的增加而逐渐增加,相应的中小孔隙则逐渐减少。

(4) 当围压高于结构屈服应力时,土体的结构强度发生部分破坏,土体的孔隙百分含量不再随着频率的增大而单纯的增大或者减小,而是出现大孔隙随频率增大先减少后增加,中小孔隙随着频率增大先增大后减少的趋势。这是因为较大围压破坏了土体的结构性,使土体的变形对于荷载频率的敏感性增强。

(5) 从图 3 曲线中可以看出,土体有多个具有标度特性的区间,在任意一个区间内,采用关系 $N(r) \propto r^{-D}$, 其中 D 定义为孔隙分维数。从表 4 数据中可看出,大孔隙的孔隙分维数要大于中小孔隙和微孔隙,反映大孔隙均一化程度越差,孔隙间尺寸相差也越大。

表 4 多重分维计算结果

Table 4 The results of porous multi fractal

围压 /kPa	固结 方式	频率 /Hz	分维数		
			$> 0.8 \mu\text{m}$	$0.8 \sim 0.01 \mu\text{m}$	$< 0.01 \mu\text{m}$
80	偏压	1	2.996 3	2.337 7	0.515 3
		2	2.986 0	2.355 4	1.404 2
		5	2.965 3	2.451 7	1.361 5
150	偏压	1	2.974 5	2.322 3	2.000 0
		2	2.985 4	2.345 1	1.251 7
		5	2.967 9	1.985 2	

4 Menger 海绵模型分形维数计算

4.1 Menger 海绵模型简介

考虑一个边长为 R 的立方体作为初始元,将它分成 m^3 个等大小的小立方体。在选定一定的规则去掉部分这样的小立方体,剩下的小立方体边长为 R/m , 个数为 $N_{1(m)}$ 。以此不断操作,使剩下的立方体尺寸不断的减小,而数目不断增大。其中,空心部分代表了多孔介质的孔隙结构,实心部分即为多孔介质的骨架结构,采用上述规则产生的模型多孔介质称为 Menger 海绵模型^[13]。

在 k 次操作之后,剩余立方体尺寸为 $r_k = R/m^k$, 而立方体的总数为

$$N_k = (r_k / R)^{-D} \quad (2)$$

式中: $D = \lg N_1 / \lg m$ 。由式 (2) 可知,所导出的结构的体积为

$$V_k \sim r_k^{3-D} \quad (3)$$

显然,当 $k \rightarrow \infty$ 或 $r_k \rightarrow 0$, 有 $V_k = V_{(r)}$ 。这个

极限中有：

$$dV_{(r)} = dr \sim r^{2-D} \quad (4)$$

由于孔隙体积 $V = R^3 - V_{(r)}$ ，则

$$-(dV/dr) \sim r^{2-D} \quad (5)$$

结合式 (2) 和式 (5)，得出的分形维数满足以下关系式：

$$\lg(dV/dr) \sim (D-4)\lg P \quad (6)$$

这样材料的孔隙体积分形维数的测量转换为压入水银压力 P 和孔隙体积 V 的测量。根据 dV/dr 与 P 的双对数图的斜率，就可以求出孔隙体积的分维数^[13]。

4.2 分形维数计算

图 4 为原状样 $\lg(dV/dr)$ 与 $\lg P$ 的曲线图，图 5 为不同频率交通荷载作用后土体的 $\lg(dV/dr) - \lg P$ 的曲线图。结合前面分析所得在交通荷载作用后，

直径小于 $0.8 \mu\text{m}$ 的土体孔隙为土体孔隙变化的主要部分，计算孔隙直径小于 $0.8 \mu\text{m}$ 时（对应压入的水银压力大于 1.54 MPa ）土体孔隙的分形维数。在图 4~7 中，当压入水银压力大于 1.54 MPa 时， $\lg(dV/dr) - \lg P$ 曲线出现很好的线性关系，可以用线性关系拟合，其所拟合的直线斜率为 $(D-4)$ ，其具体的分形维数结果见表 5。

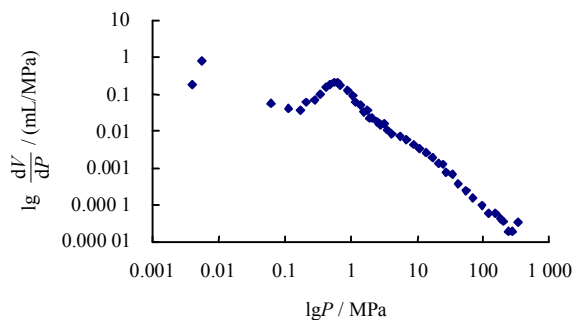


图 4 原状样分形维数计算曲线

Fig.4 Fractal dimension curves of intact structured clays

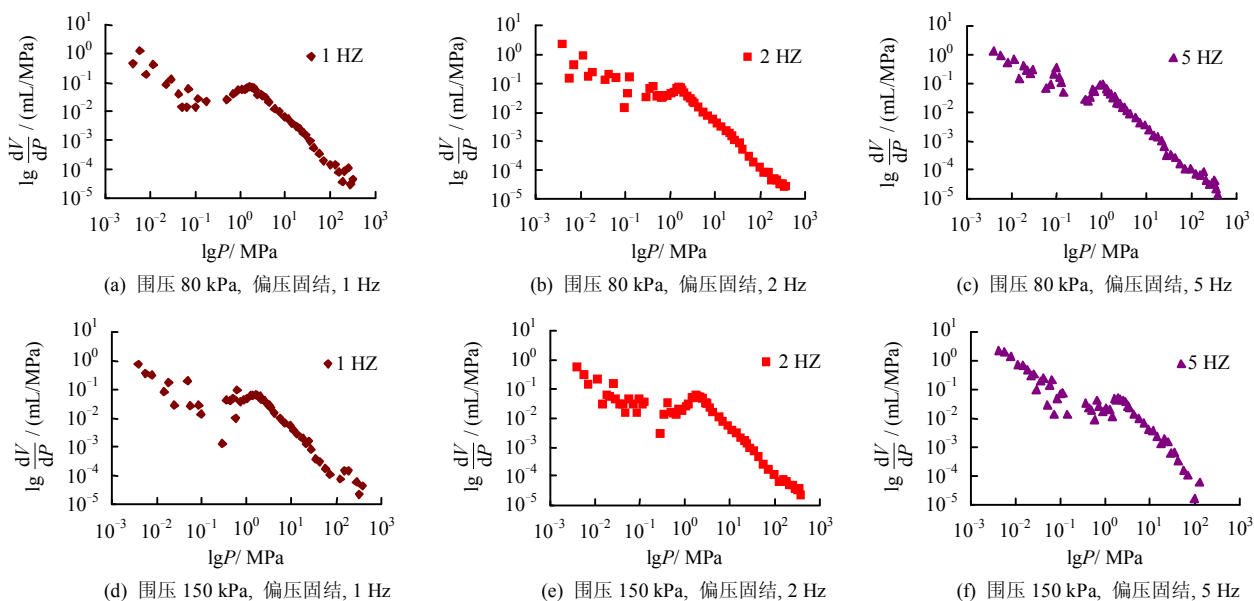


图 5 不同频率交通荷载作用下土体分形维数计算曲线

Fig.5 Fractal dimension curves of structural clays under different vibration frequencies traffic loading

表 5 分形维数计算表

Table 5 Fractal dimension

围压 / kPa	固结 方式	频率 / Hz	压入汞 压力 / MPa	孔隙直径 / μm	斜率	维数	相关性
0	原状样		>1.54	<0.8	-1.320 5	2.679 5	0.989 2
80	偏压	1	>1.54	<0.8	-1.569 9	2.430 1	0.992 0
80	偏压	2	>1.54	<0.8	-1.520 3	2.479 3	0.995 4
80	偏压	5	>1.54	<0.8	1.493 1	2.506 9	0.991 8
150	偏压	1	>1.54	<0.8	-1.645 9	2.354 1	0.988 3
150	偏压	2	>1.54	<0.8	-1.569 6	2.430 4	0.994 8
150	偏压	5	>1.54	<0.8	-1.691 1	2.308 9	0.968 0

从表 5 可以看出：

(1) 孔隙直径小于 $0.8 \mu\text{m}$ 时，通过 Menger 海绵模型计算出来的分形维数的变化范围在 2.308 9~2.679 5 之间，符合 Menger 海绵模型孔隙结构分形维数在 2~3 之间的变化范围，这说明用 Menger 海绵模型计算在交通荷载作用后土体的孔隙分形维数是合理的。

(2) 土体原状样的分形维数大于土体受到交通荷载作用后的分形维数，说明土体原状样的孔隙表

面在空间的形貌特性偏离光滑表面的程度最远,孔隙结构复杂程度最高^[14];而土体在交通荷载作用下,由于土体结构的影响,大孔隙受到破坏逐渐变成了中小孔隙,同时孔隙复杂程度降低。

(3) 对于动荷载条件下结构性软土的孔隙变化主要集中在大孔隙数量上的减少和中小孔隙分布形态上的变化两个方面,同时对于这种结构性土,振动频率和围压对于孔隙分布规律都有一定的影响,随着围压的增加,土体孔隙的分形维数均表现为减小,相应的孔隙复杂程度降低。出现这种规律,主要是因为:当围压大于结构屈服应力时,大孔隙均有很大程度减少,而中小孔隙表现出明显的增长趋势,这时土体的孔隙变得有规律性和定向性。

(4) 在相同围压作用下,土体孔隙分形维数都有一个最小值,这说明存在一个卓越频率,即在此频率作用下土体的孔隙分形维数的变化最为明显,宏观上与土体变形规律相一致。

4 结 论

(1) 根据统计自相似原理方法,给出天津滨海新区典型淤泥粉质黏土在动荷载作用后的孔隙界限划分方案:大孔隙, $d > 0.8 \mu\text{m}$; 中小孔隙, $0.01 \mu\text{m} < d < 0.8 \mu\text{m}$; 微孔隙, $d < 0.01 \mu\text{m}$ 。

(2) 交通荷载作用下,土体的孔隙分布特征表现出不同的规律:当围压低于结构屈服应力时,大孔隙随着频率的增加而逐渐增加,中小孔隙则逐渐减少;当围压高于结构屈服应力时,大孔隙随频率增大先减少后增加,中小孔隙随着频率增大呈先增加后减少的趋势。

(3) 通过 Menger 海绵模型计算出来的分形维数的变化范围在 2.190 7~2.599 6 之间,符合 Menger 海绵模型孔隙结构分形维数在 2~3 之间的变化范围,说明用 Menger 海绵模型计算交通荷载作用下土体的孔隙分形维数是合理的。

(4) 土体在卓越频率作用下土体的孔隙分形维数的变化最明显,宏观上与土体变形规律一致。

参 考 文 献

- [1] 王梅, 白晓红, 梁仁旺, 等. 生石灰与粉煤灰桩加固软土地基的微观分析[J]. 岩土力学, 2001, 22(1): 67—70. WANG Mei, BAI Xiao-hong, LIANG Ren-wang, et al. Microstudy on soft foundations reinforcement with lime-fly ash piles[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2001, 22(1): 67—70.
- [2] 孔令荣, 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, 2007, 3(6): 1036—1040. KONG Ling-rong, HUANG Hong-wei, ZHANG Dong-

- mei. Experiment study on relationship between pore distribution[J]. *Chinese Journal of Underground Space and Engineering*, 2007, 3(6): 1036—1040.
- [3] MANDELBROT B B. Fractal geometry of nature[M]. San Francisco: Freeman, 1982.
- [4] TYLER S W, WHEATCRAFT S W. Fractal scaling of soil particle size distribution: Analysis and limitations[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1992, 56: 362—369.
- [5] VALLEJO L E. Fractal analysis of granular materials[J]. *Geotechnique*, 1995, 45(1): 159—163.
- [6] VALLEJO L E. Fractal analysis of the fabric changes in a consolidating clay[J]. *Engineering Geology*, 1996, 43: 281—290.
- [7] 刘松玉, 张继文. 土中孔隙分布的分形特征研究[J]. 东南大学学报, 1997, 27(3): 127—130. LIU Song-yu, ZHANG Ji-wen. Fractal Approach to measuring soil porosity[J]. *Journal of Southeast University*, 1997, 27(3): 127—130.
- [8] 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—498. WANG Qing, WANG Jian-ping. A study on fractal of porosity in the soils[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2000, 22(4): 496—498.
- [9] 薛茹, 胡瑞林, 毛灵涛. 软土加固过程中微结构变化的分形研究[J]. 土木工程学报, 2006, 39(10): 87—91. XUE Ru, HU Rui-lin, MAO Ling-tao. Fractal study on the microstructure variation of soft soils in consolidation process[J]. *China Civil Engineering Journal*, 2006, 39(10): 87—91.
- [10] 毛灵涛, 薛茹, 袁则循. 软土路基微结构扫描电镜图像的分形[J]. 长安大学学报(自然科学版), 2007, 27(2): 30—33. MAO Ling-tao, XUE Ru, YUAN Ze-xun. Fractal approach on soft soil subgrade microstructure SEM image[J]. *Journal of Chang'an University (Natural Science Edition)*, 2007, 27(2): 30—33.
- [11] 王国欣, 周旺高. 原状结构性土先期固结压力与结构强度的确定[J]. 岩土工程学报, 2003, 25(2): 249—251. WANG Guo-xin, ZHOU Wang-gao. Determination of pre-consolidation pressure and structural strength of undisturbed structural soils[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2003, 25(2): 249—251.
- [12] FIESEN W I, MIKULA R J. Fractal dimension of coal particles[J]. *Journal of Colloid and Interface Science*, 1987, 20(1): 263—271.
- [13] 谢和平. 分形-岩石力学导论[M]. 北京: 科学出版社, 1996.
- [14] 唐益群, 张曦, 赵书凯, 等. 地铁振动荷载作用下隧道周围饱和软黏土分形研究[J]. 土木工程学报, 2007, 40(11): 86—91. TANG Yi-qun, ZHANG Xi, ZHAO Shu-kai. A study on the fractals of saturated soft clay surrounding subway tunnels under dynamic loads[J]. *China Civil Engineering Journal*, 2007, 40(11): 86—91.
- [15] 许勇, 张季超, 李伍平. 饱和软土微结构分形特征的试验研究[J]. 岩土力学, 2007, 28(增刊): 49—52. XU Yong, ZHANG Ji-chao, LI Wu-ping. Research on microstructure fractal features of the saturation soft soil[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2007, 28(Supp.): 49—52.