

DOI:10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.202302142024061970

文章编号:1674-599X(2024)03-0027-08

引用格式:梁志鑫,孙红,牛富俊,等.三轴加载条件下路基软土微观结构演化研究[J].交通科学与工程,2024,40(3):27-34.

Citation: LIANG Zhixin, SUN Hong, NIU Fujun, et al. Study on microstructure evolution of subgrade soft soil under triaxial loading[J]. J Transp Sci Eng, 2024, 40(3):27-34.

三轴加载条件下路基软土微观结构演化研究

梁志鑫^{1,2}, 孙红^{1,2}, 牛富俊³, 唐雪明⁴

(1.广州市中心区交通项目管理中心,广东 广州 510030;2.上海交通大学 船舶海洋与建筑工程学院,上海 200240;3.华南理工大学 广东省现代土木工程技术重点实验室,广东 广州 510641;4.国家管网集团西南油气管道有限责任公司 贵阳输油气分公司,贵州 贵阳 550081)

摘 要:为了从宏、微观角度研究受力全过程中土的微观结构演化及损伤机制,对武汉地区路基软土开展了一系列 K_0 (静止土压力系数)固结不排水三轴剪切试验、扫描电子显微镜试验和压汞试验。基于分维理论和图像处理技术,对微观结构参数进行了分析。研究表明:武汉地区路基软土的孔隙具有多重分形特征,并据此确定微孔隙、小孔隙、中孔隙和大孔隙的孔径分界点分别为0.03、0.50和7.00 μm 。其中孔径为0.50~7.00 μm 的孔隙整体上具有更强的自相似性,将其定义为特征区间,该区间的表面分形维数随着应变的增加而减小。软土损伤在微观上表现为团解体,并伴随着孔径分布与孔隙形态的演变,孔隙面积比与孔隙形状系数随着应变的增加分别非线性增大和非线性减小。微观结构演化全过程可分为结构微调、损伤发展和结构破坏3个阶段。提出的微观结构因子能够有效揭示软土宏观力学性质的变化。

关键词:路基软土;微观结构;损伤机制;三轴试验;压汞实验;分形维数;演化特征

中图分类号:P642

文献标志码:A

Study on microstructure evolution of subgrade soft soil under triaxial loading

LIANG Zhixin^{1,2}, SUN Hong^{1,2}, NIU Fujun³, TANG Xueming⁴

(1. Guangzhou City Center Transport Project Office, Guangzhou 510030, China;

2. School of Ocean and Civil Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China;

3. South China University of Technology, Guangdong Provincial Key Laboratory of Modern Civil Engineering Technology, Guangzhou 510641, China; 4. Guiyang Oil and Gas Transmission Branch, Southwest Oil and Gas Pipeline Co., Ltd., PipeChina Group, Guiyang 550081, China)

Abstract: A series of K_0 (coefficient of earth pressure at rest) consolidated undrained triaxial shear tests, scanning electron microscope, and mercury intrusion tests were conducted on subgrade soft soil in Wuhan region. It aims to study the microstructural evolution and damage mechanism during the loading process from macro and micro perspectives. Microstructure parameters were analyzed based on fractal theory and image processing technology. The results show that soft soil pores have multifractal characteristics, according to which the pore size boundary points of the micro, small, medium and large pores are determined to be 0.03, 0.50, and 7.00 μm , respectively. Pores with diameters from 0.50 to 7.00 μm exhibit stronger self-similarity overall. Therefore, 0.50-7.00 μm is defined as a characteristic interval, and the surface fractal dimension decreases with increasing strain in this

收稿日期:2023-02-14

基金项目:广东省现代土木工程技术重点实验室项目(2021B1212040003)

通信作者:孙红(1970—),女,副教授,主要从事土力学与基础工程方面的研究工作。E-mail:sunhong@sjtu.edu.cn

投稿网址:https://jtkxygc.csust.edu.cn/jtkxygc/home

interval. The microscopic damage of soft soil is characterized by aggregate disintegration, together with the evolution of pore size distribution and pore morphology. With increasing strain, the pore area ratio and shape factor manifest nonlinear increase and decrease, respectively. The microstructure evolution process can be divided into three phases: structural fine-tuning, damage development, and structural failure. The microstructure factor proposed in this study can effectively reveal changes in macro mechanical properties of soft soil.

Key words: subgrade soft soil; microstructure; damage mechanism; triaxial test; mercury intrusion test; fractal dimension; evolution characteristic

软土在我国分布广泛,尤其在长三角、珠三角等人口密度较大的发达地区广泛分布着第四系沉积软土层^[1]。在这些地区,公路不可避免地建造在深厚的软土层上。软土不良的物理力学特性,如高含水率、大孔隙比、高压缩性以及低渗透性等,在很大程度上增加了高速公路的建设与维护成本。因此,对软土的力学特性进行深入研究具有重要意义。微观结构控制着材料的宏观力学行为^[2],一些研究通过添加剂对土进行改良^[3],本质上也是改变其微观结构,所以从微观角度出发研究土的力学特性是一个有效途径。

近年来,学者们就土的微观结构开展了广泛的研究。包含等^[4]通过研究3种典型黄土层微观结构的各向异性等特征,揭示了抗剪强度参数和微观结构参数之间的关系。张先伟等^[5]利用压汞仪(mercury intrusion porosimetry, MIP)和扫描电子显微镜(scanning electron microscope, SEM)发现结构性对黏土压缩过程中的孔径分布产生了较大的影响,表现为在施加先期固结压力前后,孔径分布呈现出了不同的演化规律。LIAN等^[6]对黄土的微观结构进行了细致分析,结果表明,干湿循环后团聚体发生聚集,土骨架重新排列,从初始相对密实的结构转变为疏松结构。NAN等^[7]认为微观上土颗粒的移动和重新排列以及不同尺寸孔隙群含量的相互转化是土体宏观剪切特性变化的本质因素。GUGLIELMI等^[8]的研究表明,一维压缩过程中土颗粒的平均定向性逐渐增强,并趋近于一个稳定值,黏土团聚体之间孔隙率的减小速度取决于土的结构组成和加载历史。范文等^[9]认为对黄土高精度三维结构的研究是理解其湿陷机理的重要手段。NG等^[10]通过MIP试验,发现压实土样的黏土团聚体增强了土骨架的承载能力,相比于重塑土样,压实土样在冻融循环过程中产生了更小的塑性变形。综上所述,微观结构的研究对深入理解土的宏观物理

力学特性至关重要,而之前的研究大多集中在土的某一状态(如初始状态或终止状态)的微观结构上,对三轴加载条件下软土微观结构连续演化过程的研究还不够深入。因此,有必要更加详细地分析受力过程中土体微观结构演化及其结构损伤的发展机制。

本文以武汉地区路基原状软土为研究对象,开展了一系列 K_0 固结不排水三轴剪切试验。通过MIP试验和SEM试验研究受荷全过程软土微观结构的演化和损伤特征,并对宏、微观特征的关联性进行进一步深入的探索。

1 试验材料和方案

1.1 土样

土样取自武汉市东西湖区的某高速公路路基。土体为第四系软土下卧层,呈灰黑色、软塑状。软土层埋深-9.0~-5.8 m,层厚3.3~11.4 m。将钻孔薄壁取样器缓慢压入土层,获得未扰动土样,其物理力学指标见表1。

表1 软土的物理力学指标

Table 1 Physical and mechanical parameters of soft soil

含水率/%	密度/(g·cm ⁻³)	比重	天然孔隙比	塑限/%	液限/%	塑性指数
34.9	1.88	2.70	1.03	20.8	32.5	11.7

1.2 试验方案

采用全球数字系统(GDS)应力路径三轴仪对土样开展 K_0 (静止土压力系数)固结不排水三轴剪切试验,土样为高80.0 mm、直径39.1 mm的圆柱体。使用反压饱和法进行饱和,以孔压系数 B 值大于0.95作为饱和完成条件。加载方式为应力控制式,加载速率为0.2 kPa/min。通过应力路径三轴仪伺服系统控制围压大小,使得各时刻土样的体变与轴向应变及初始底面积的乘积相同,从而保证侧向不发

生变形。此时,侧向与轴向应力之比即为 K_0 (=0.59)。选取4组有效围压,即50、100、150、200 kPa进行试验,详细方案见表2。

微观试验设备为美国麦克公司生产的压汞仪(型号为Auto Pore V9600)和捷克TESCAN公司生产的扫描电子显微镜(型号为MIRA3)。选取围压为100 kPa,应变水平为0%、2%、4%、6%、8%和15%的土样进行微观测试。为了能够更容易地观察土体结构的变化,在土样中心部位变形最明显的位置切取微观测试子样。将切取下来的子样放入液氮中冷冻15 min,使得样品中的水变为非结晶冰。然后,将土样放入冷冻干燥机,在-40℃条件下抽真空24 h,使其完全干燥。对于SEM试验,首先将干燥的土样从中间掰断,形成一个新鲜的观察剖面,之后进行喷金处理以增大其导电率,然后放入SEM的真空仓中进行扫描。而对于MIP试验,直接将干燥的土样装载到压汞仪的膨胀计中进行逐级注汞即可。

表2 三轴试验和微观试验方案

Table 2 Triaxial and microscopic tests scheme

有效围压/kPa	K_0	固结后孔隙比	加载速率/(kPa·min ⁻¹)	加载终止应变/%	SEM试验	MIP试验
50	0.59	0.956	0.2	15		
100	0.59	0.906	0.2	0, 2, 4, 6, 8, 15	√	√
150	0.59	0.880	0.2	15		
200	0.59	0.855	0.2	15		

注:表中√表示开展了相应试验。

2 试验结果与分析

2.1 偏应力-应变关系和孔压特征

软土试样的偏应力-应变关系曲线如图1所示。由图1可知,在围压为50、100、150 kPa时,偏应力-应变关系为应变硬化型,曲线的拐点在应变为1%~2%处,该点之后偏应力的增加速率十分缓慢,然后逐渐趋于稳定。而当围压为200 kPa时,土样发生应变软化,出现剪切带。图2所示为土样的孔隙水压力-应变关系曲线。由图2可知,曲线的拐点在应变为2%~4%处。相对于偏应力而言,孔隙水压力出现滞后现象,即当偏应力达到最大值时,孔隙水压力并非最大,这可能与黏土复杂的孔隙结构有关。当围压为150 kPa时,随着轴向应变的增大,孔隙水压力先增大后减小而后趋于稳定,土样具有剪胀趋势。

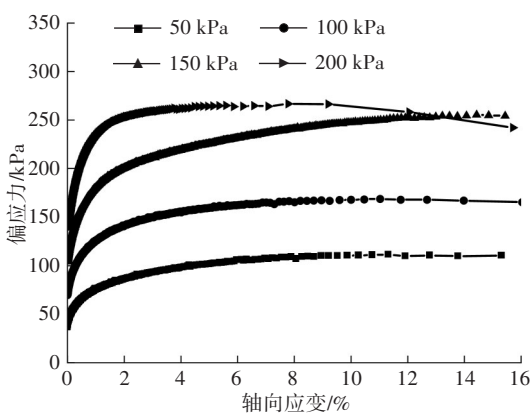


图1 偏应力-应变关系曲线

Fig. 1 Deviatoric stress-strain curves

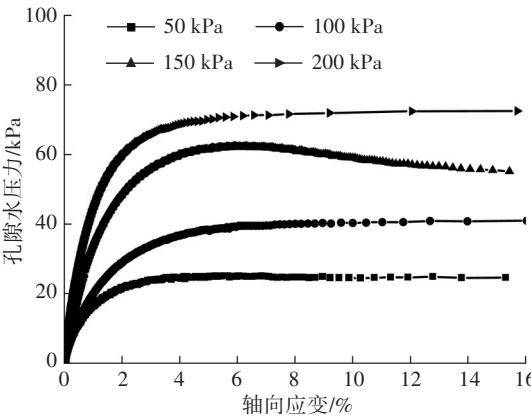


图2 孔隙水压力-应变关系曲线

Fig. 2 Pore water pressure-strain curves

2.2 加载过程中软土的微观结构特征

图3(a)为 K_0 固结后土样的微观结构图像,放大倍数为10 000倍。从图3(a)可以发现,土样总体上呈现出一种较为致密的絮凝状结构,土颗粒密集地凝聚在一起形成了较大粒径的团聚体。当应变达到6%时,可以明显看到很多薄片状且边缘形状很不规则的小颗粒,而且相比于应变0%的情况,孔隙也进一步发展,土颗粒排列更加疏松,如图3(b)所示。表明此时土的内部结构受到了一定程度的损伤,部分团聚体已经解体,同时伴随着颗粒破碎和孔隙发育。剪切破坏后土样的SEM图像如图3(c)所示,此时相比于应变6%的情况,其内部孔隙进一步发展并且相互贯通,颗粒尺寸大幅减小且颗粒之间的接触进一步被力学加载所削弱。综合图3中3个应变水平下的SEM图像可知,土的剪切破坏过程也是其内部结构逐渐损伤的过程,表现为团聚体的解体、颗粒破碎并伴随着土颗粒间胶结的破坏与孔隙的持续扩展。

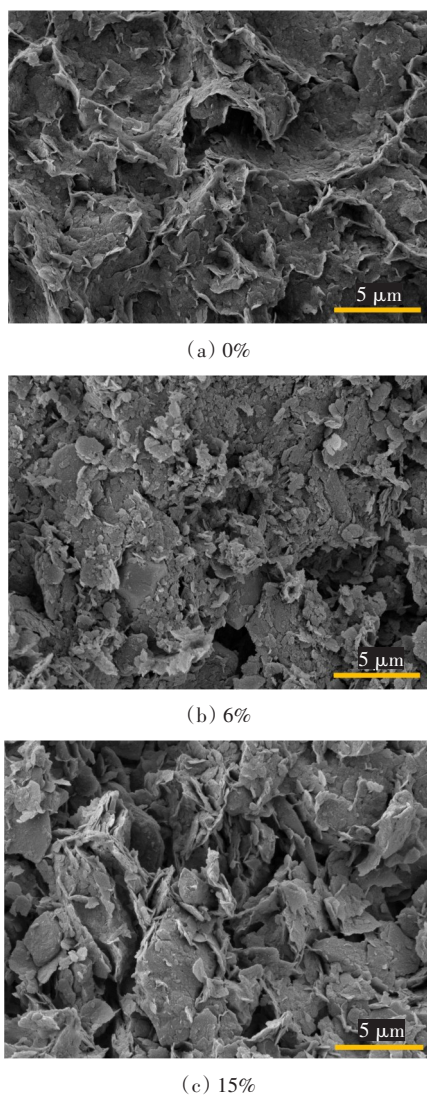


图3 不同应变下的SEM图像

Fig. 3 SEM images at different strain levels

2.3 微观结构参数的演化

采用PCAS图像处理软件对SEM图像进行二值分割以及数据提取等操作。通过多次与原始灰度图像进行对比,确定合适的阈值。对大量图片处理后发现,图像分割的最优阈值在峰值灰度的80%左右。本文分别对孔隙面积比和孔隙形状系数进行量化分析。对于孔隙面积比的获取,考虑使用2 000倍放大倍数的SEM图像,因为该参数的获取无需非常清楚的孔隙轮廓形态,而需要更充足的数据点使结果具有统计意义。对于孔隙的形状系数则采用放大倍数为5 000倍的SEM图像,因为此时的SEM图像既可以较清晰地显示出微孔形态,又包含了足够多的数据提取点。

2.3.1 孔隙面积比

定义孔隙面积比 w 为SEM图像中孔隙的面积

与孔隙和土颗粒总面积的比值。不同应变下孔隙面积比的变化如图4所示。从图4可以看出,孔隙面积比随着轴向应变的增加表现为先快后慢的增长趋势,从加载前的0.19到剪切破坏时的0.27,增长了42%。而且在应变较低时孔隙面积比的增长速度较快,当应变增加到大于6%时,孔隙面积比增长放缓。这表明在不排水三轴加载过程中孔隙面积比呈现出动态的演化特征,孔隙表现为持续的发育和扩展趋势。

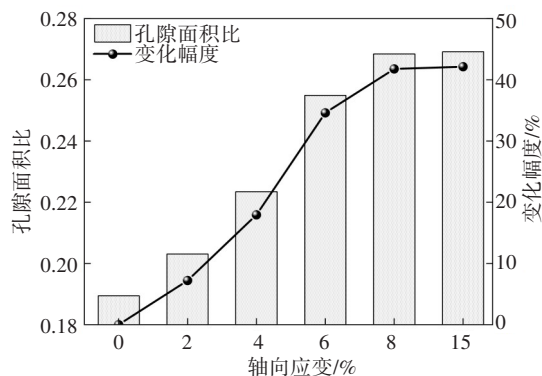


图4 不同应变下孔隙面积比的变化

Fig. 4 Pore area ratio variation at different strain levels

2.3.2 孔隙形状系数

孔隙形状系数 F 用于描述孔隙的形态特征^[11],表达如下:

$$F = \frac{4\pi S}{C^2} \quad (1)$$

式中: S 、 C 分别为SEM图像中孔隙的面积和周长。

通常情况下采用孔隙平均形状系数 \bar{F} 来研究孔隙的形态特征:

$$\bar{F} = \sum_{i=1}^n F_i / n \quad (2)$$

式中: n 为孔隙的总个数。

孔隙形状系数的值为0~1,从其表达式上也不难得出孔隙形状系数描述了孔隙的圆形度及其边缘轮廓的粗糙度。当孔隙为标准的圆形时, F 达到最大值1, F 值越小说明孔隙形态越复杂。

在加载过程中,孔隙平均形状系数的演化如图5所示。随着轴向应变的增加,孔隙的平均形状系数以近似幂函数的形式减小,表明孔隙形态在荷载作用下变得越来越复杂。因为荷载作用破坏了土颗粒间的胶结,使得团聚体发生解体,并且形状不规则的片状或棱角状颗粒的析出使孔隙形态变得更加复杂。综合比较孔隙面积比和孔隙形状系数的演化规律可以发现,两者有一定的相似之处,即

在加载前期和中期(应变较小时),两者的变化速率都较快。这说明土的结构损伤在应变不大时就已经得到了显著发展,相对小的变形就可能造成土体微观结构的严重劣化,在工程施工中应对此予以重视。

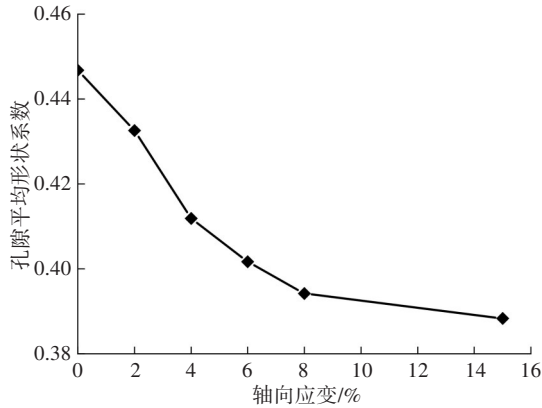


图5 孔隙平均形状系数的演化

Fig. 5 Evolution of average pore shape coefficient

2.4 土中孔隙分布及分形特征

土中孔隙的几何形态十分复杂,难以用传统的欧式几何方法全面而准确地进行描述。因此,分形几何方法常被用于对土中孔隙的几何特征进行定量化分析^[12]。根据分形理论^[13],有:

$$\lg(V(d)/V) \propto (3 - D_c) \lg d + C \quad (3)$$

式中: d 为孔径; $V(d)$ 为孔径小于 d 的孔隙体积; V 为孔隙的总体积; D_c 为容量维数; C 为常数。

据此做出不同应变水平下孔隙的分形曲线,如图6所示。从图6可以看出,孔隙的分形曲线由斜率不同的区段组成,表明武汉地区路基软土的孔隙结构具有多重分形特征。由此可根据曲线拐点所对应的孔径值将土中的孔隙分为4类:大孔隙($d \geq 7.00 \mu\text{m}$)、中孔隙($0.50 \mu\text{m} \leq d < 7.00 \mu\text{m}$)、小孔隙($0.03 \mu\text{m} \leq d < 0.50 \mu\text{m}$)和微孔隙($d < 0.03 \mu\text{m}$)。图6还表明,分形散点拟合线的斜率在中孔隙区间最大,且相比于其他孔隙区间,在此区间散点数据具有更好的线性关系,相关系数基本在0.96以上,说明在此区间孔隙结构具有更好的自相似性。因此,可以将中孔隙区间视为特征孔隙区间,并重点对此区间的孔隙特征进行研究,以揭示加载过程中土的微观结构的变化规律。

图7所示为各孔隙体积占比随轴向应变的变化情况。由图7可知,大孔隙的体积占比最小,在5%以下;小孔隙的体积占比最大,基本在50%以上。随着轴向应变的增加,小孔隙和大孔隙的体积占比

有增大趋势;中孔隙的体积占比减小;微孔隙的体积占比几乎不随着轴向应变的发展而变化,在各应变水平下基本维持在9%左右。以上特征表明,在加载过程中大粒径团聚体解体使得部分中孔隙被小颗粒填充,导致小孔隙的体积占比增大;此外,部分孔隙在荷载的作用下相互贯通,从而使得大孔隙的体积占比也有所增大;而微孔隙几乎不受荷载作用的影响,所以其体积占比基本保持不变。

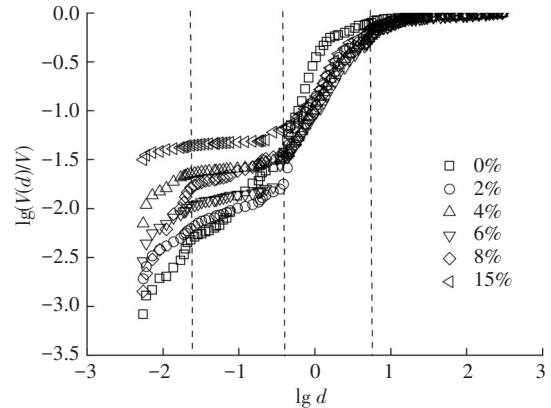


图6 不同应变水平下孔隙的分形曲线

Fig. 6 Fractal curves of pores at different strain levels

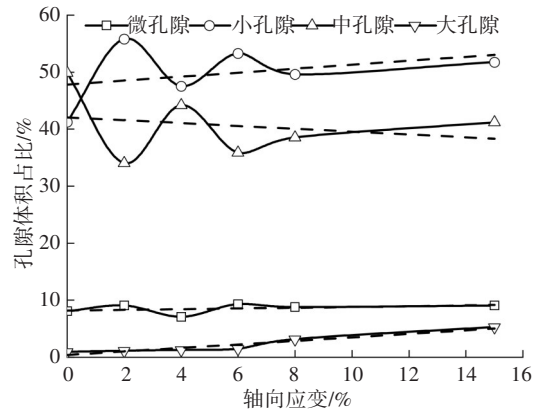


图7 各孔隙体积占比随轴向应变的变化

Fig. 7 Volume fractions variation of the pore with axial strain

另一个分形模型由ZHANG等^[14]依据热力学原理提出,可用以下方程描述:

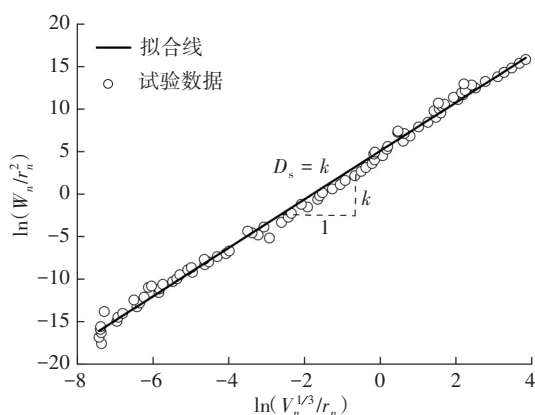
$$\ln(W_n/r_n^2) = D_s \ln(V_n^{1/3}/r_n) + C' \quad (4)$$

$$W_n = \sum_{i=1}^n \bar{p}_i \Delta V_i \quad (5)$$

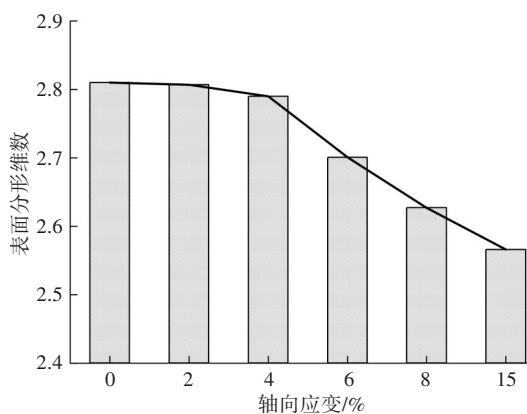
式中: D_s 为表面分形维数; \bar{p}_i 、 ΔV_i 分别为第 i 级进汞压力和进汞体积; r_n 和 V_n 分别为第 n 级进汞压力所对应的孔径和累积进汞量; C' 为常数。

表面分形维数取值为2~3,可用来描述土颗粒或者团聚体表面的粗糙度,其值越大意味着土颗粒表面越粗糙,且孔隙具有更明显的空间填充特征。

基于热力学原理的表面分形维数计算方法如图8(a)所示,表面分形维数即为拟合直线的斜率 k 。根据前面划分的特征孔隙区间,计算该区间内孔隙的表面分形维数,见图8(b)。由图8(b)可知,表面分形维数随着轴向应变的增大而非线性单调减小,在应变为0%和15%时分别为2.810和2.566,后者比前者减小了8.7%。这表明在荷载作用下,团聚体解体,结构重组后土颗粒表面的粗糙度下降。在应变为0%~2%时,表面分形维数没有明显降低,意味着在此应变范围内团聚体解体程度较小,即损伤程度不显著。



(a) 表面分形维数的计算方法



(b) 表面分形维数的演化

图8 孔隙的表面分形维数

Fig. 8 Surface fractal dimensions of pores

2.5 宏、微观的相关性分析

微观结构的差异是土体表现出不同力学行为的根本原因。图9所示为不同围压下土的不排水割线模量 E_u 与轴向应变的关系,其中 E_u 为偏应力增量与轴向应变增量的比值^[15]。由图9可知,围压越高,割线模量越大,且割线模量随着轴向应变的增加而快速减小,软土的力学性质也随之快速劣化。

由此可见,土的微观结构参数包括孔隙面积比

w 、孔隙形状系数 F 和表面分形维数 D_s ,它们从不同方面反映了微观结构的劣化特征。因此,可通过研究这3个参数与不排水割线模量之间的关系来探索土的微观结构与其宏观力学性质之间的关系。不难判断, w 与 E_u 呈负相关关系,而 D_s 、 F 与 E_u 呈正相关关系。由此提出微观结构因子 f :

$$\frac{E_u}{P_a} = kf^{n'} + m \quad (6)$$

$$f = \frac{FD_s}{w} \quad (7)$$

式(6)~(7)中: P_a 为大气压强,引入的目的是使等式的量纲一致; k 为斜率; m 为截距; n' 为幂次,本文取 $n'=1$ 。

将上述关系绘制于图10。由图10可知,在所有围压下宏、微观参数之间均呈良好的线性关系,相关系数 R^2 均在0.94以上,说明微观结构因子可以反映土的不排水割线模量的演化。

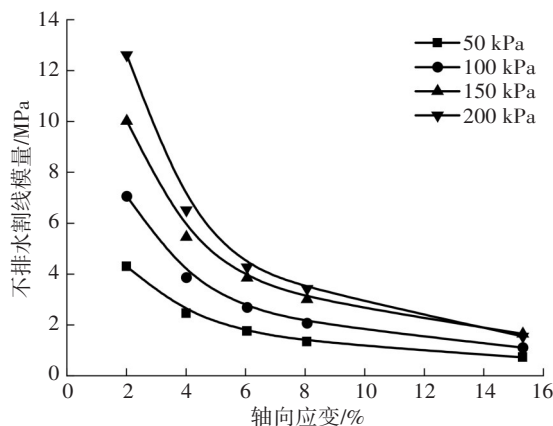


图9 不同围压下不排水割线模量与轴向应变的关系

Fig. 9 Undrained secant modulus versus axial strain under different confining pressures

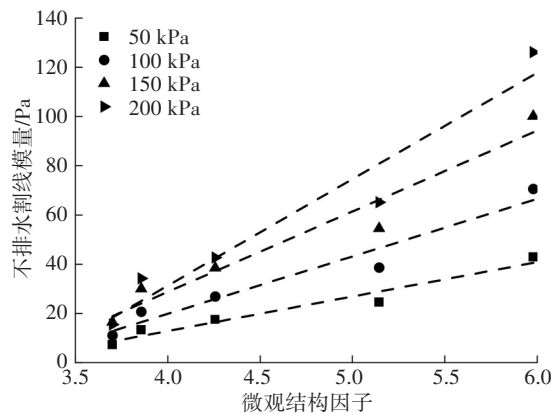


图10 不排水割线模量与微观结构因子的关系

Fig. 10 Undrained secant modulus versus microstructure factor

图11所示为微观结构因子与不排水割线模量关系拟合直线的斜率和截距随围压的变化情况。由图11可知,斜率、截距与围压之间都呈明显的线性关系,拟合直线的斜率 k 随着围压的增大而单调增加,截距 m 则单调减小,具体的表达式为:

$$k = 19.6 \frac{\sigma'_3}{P_a} + 4.1 \quad (8)$$

$$m = -65.5 \frac{\sigma'_3}{P_a} - 9.1 \quad (9)$$

式(8)~(9)中: σ'_3 为有效围压。

在图11中, k 、 m 与 σ'_3/P_a 拟合线的相关系数分别为0.999和0.992。因此,当围压确定之后,就可通过微观结构因子来获得不排水割线模量的估计值。

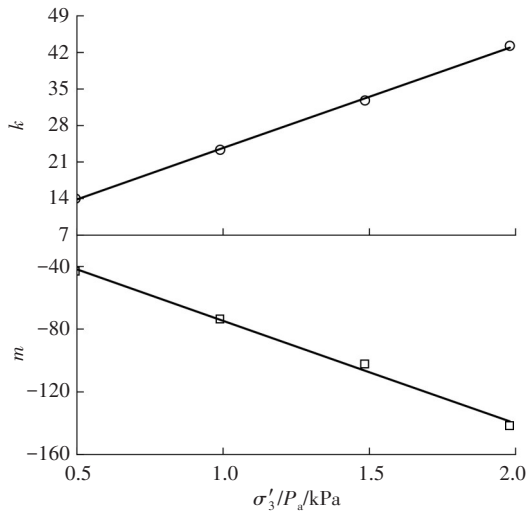


图11 拟合线的参数与围压的关系

Fig. 11 Relationship between fitting line parameters and confining pressure

3 结论

本文对武汉路基软土开展了一系列宏、微观试验,研究了不同应变水平下土的微观结构的演化规律,通过试验观测和理论分析得出以下结论:

1) 软土的孔隙面积比和孔隙形状系数随着应变的发展分别呈非线性增加和非线性减小。综合微观结构参数演化规律,可将三轴加载条件下土的结构演化分为3个阶段:当应变为0%~<2%时为结构微调阶段,此时孔隙略有发展而团聚体未显著解体;当应变为2%~<8%时为损伤发展阶段,此时团聚体解体,并伴随着细小的碎片状颗粒析出与孔隙的扩展贯通;当应变为8%~15%时为剪切破坏阶段,此时微观结构参数的变化幅度减小,并逐步趋

于稳定。

2) 武汉地区路基软土的孔隙具有多重分形特征,基于分形曲线拐点将土中孔隙划分为4类。定义中孔隙区间(孔径0.50~7.00 μm)为特征孔隙区间,该区间孔隙的表面分形维数随着应变的增大而减小。土样不排水剪切过程表现为中孔隙向小孔隙和大孔隙转化,而微孔隙的体积占比几乎不受荷载作用的影响。

3) 土的宏观力学性质与微观结构密切相关。软土的不排水割线模量与由孔隙面积比、孔隙形状系数和表面分形维数所表示的微观结构因子呈良好的线性关系。软土宏观力学行为的改变是其微观结构持续演化的结果。

参考文献(References):

- [1] 于俊杰, 许圣华, 冯启, 等. 宁德海相软黏土工程特性与沉积环境初探[J]. 工程地质学报, 2021, 29(4): 1207-1215. DOI: 10.13544/j.cnki.jeg.2019-550.
YU Junjie, XU Shenghua, FENG Qi, et al. Sedimentary environment and engineering properties of marine soft clay in Ningde [J]. Journal of Engineering Geology, 2021, 29(4): 1207-1215. DOI: 10.13544/j.cnki.jeg.2019-550.
- [2] 马艳霞, 聂思凡, 郭佳庆. 硫酸盐渍土地区粉煤灰混凝土力学性能试验研究[J]. 长沙理工大学学报(自然科学版), 2022, 19(1): 64-72. DOI: 10.19951/j.cnki.1672-9331.2022.01.008.
MA Yanxia, NIE Sifan, GUOJIA Qing. Experimental research on mechanical properties of fly ash concrete in sulfate saline soil area [J]. Journal of Changsha University of Science & Technology (Natural Science), 2022, 19(1): 64-72. DOI: 10.19951/j.cnki.1672-9331.2022.01.008.
- [3] 龚锦林, 柳厚祥, 王真. 石灰改良膨胀土压缩特性及力学特性研究[J]. 交通科学与工程, 2022, 38(4): 35-40. DOI: 10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.2022.04.009.
GONG Jinlin, LIU Houxiang, WANG Zhen. Study on compression characteristics and mechanical properties of lime modified expansive soil [J]. Journal of Transport Science and Engineering, 2022, 38(4): 35-40. DOI: 10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.2022.04.009.
- [4] 包含, 马扬帆, 兰恒星, 等. 基于微结构量化的含渐变带黄土各向异性特征研究[J]. 中国公路学报, 2022, 35(10): 88-99. DOI: 10.3969/j.issn.1001-7372.2022.10.009.
BAO Han, MA Yangfan, LAN Hengxing, et al. Anisotropic characteristics of loess with gradation zone based on microstructure quantification [J]. China Journal

- of Highway and Transport, 2022, 35(10): 88-99. DOI: 10.3969/j.issn.1001-7372.2022.10.009.
- [5] 张先伟, 孔令伟, 郭爱国, 等. 不同固结压力下强结构性黏土孔隙分布试验研究[J]. 岩土力学, 2014, 35(10): 2794-2800. DOI: 10.16285/j.rsm.2014.10.005.
- ZHANG Xianwei, KONG Lingwei, GUO Aiguo, et al. Experiment study of pore distribution of strong structural clay under different consolidation pressures[J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, 35(10): 2794-2800. DOI: 10.16285/j.rsm.2014.10.005.
- [6] LIAN B Q, WANG X G, ZHAN H B, et al. Creep mechanical and microstructural insights into the failure mechanism of loess landslides induced by dry-wet cycles in the Heifangtai platform, China [J]. Engineering Geology, 2022, 300: 106589. DOI: 10.1016/j.enggeo.2022.106589.
- [7] NAN J J, PENG J B, ZHU F J, et al. Shear behavior and microstructural variation in loess from the Yan'an Area, China [J]. Engineering Geology, 2021, 280: 105964. DOI: 10.1016/j.enggeo.2020.105964.
- [8] GUGLIELMI S, COTECCHIA F, CAFARO F, et al. Analysis of the micro to macro response of clays to compression[J]. Géotechnique, 2024, 74(2): 134-154. DOI: 10.1680/jgeot.21.00233.
- [9] 范文, 魏亚妮, 于渤, 等. 黄土湿陷微观机理研究现状及发展趋势[J]. 水文地质工程地质, 2022, 49(5): 144-156. DOI: 10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202108064.
- FAN Wen, WEI Yani, YU Bo, et al. Research progress and prospect of loess collapsible mechanism in micro-level[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2022, 49(5): 144-156. DOI: 10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202108064.
- [10] NG C W W, LI Z Y, ZHANG Q, et al. Effects of soil structure on cyclic freeze-thaw induced volumetric behaviour using a modified double-cell triaxial system [J]. Cold Regions Science and Technology, 2022, 203: 103648. DOI: 10.1016/j.coldregions.2022.103648.
- [11] SOROUSHIAN P, ELZAFRANEY M. Morphological operations, planar mathematical formulations, and stereological interpretations for automated image analysis of concrete microstructure [J]. Cement and Concrete Composites, 2005, 27(7/8): 823-833. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2004.07.008.
- [12] WANG H L, SUN H, HUANG Z X, et al. A microstructural investigation on hydraulic conductivity of soft clay [J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2021, 80(5): 4067-4078. DOI: 10.1007/s10064-021-02176-8.
- [13] 雷华阳, 姜岩, 陆培毅, 等. 交通荷载作用下结构性软土的孔径分布试验[J]. 中国公路学报, 2009, 22(2): 6-11, 25. DOI: 10.19721/j.cnki.1001-7372.2009.02.002.
- LEI Huayang, JIANG Yan, LU Peiyi, et al. Pore size distribution test of structural soft soil under traffic loading [J]. China Journal of Highway and Transport, 2009, 22(2): 6-11, 25. DOI: 10.19721/j.cnki.1001-7372.2009.02.002.
- [14] ZHANG B Q, LI S F. Determination of the surface fractal dimension for porous media by mercury porosimetry [J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 1995, 34(4): 1383-1386. DOI: 10.1021/ie00043a044.
- [15] BIAN X, ZENG L L, LI X Z, et al. Deformation modulus of reconstituted and naturally sedimented clays [J]. Engineering Geology, 2021, 295: 106450. DOI: 10.1016/j.enggeo.2021.106450.

(责任编辑:石月珍;英文编辑:陈成)