DOI: 10.11779/CJGE2021S1018

压实黄土在固结和剪切过程中的微结构演化

肖　涛[1],李　萍[*1,2],邵生俊[2]
(1. 西北大学大陆动力学国家重点试验室地质学系,陕西 西安 710069;2. 西安理工大学陕西省黄土力学与工程重点试验室,陕西 西安 710048)

摘　要:为了解压实黄土在固结和剪切过程中微结构的演化过程,运用三轴试验和 MIP 技术,得出不同应力应变状态的压实黄土试样的孔径分布曲线,通过分析压实土样的孔径分布特征,研究压实黄土在固结和剪切过程中的微结构演化规律。结果显示,该压实黄土在剪应力作用下表现为强烈的剪缩特性,固结和剪切阶段的孔径分布演化规律相似,粒内孔隙没有受到影响,只有粒间孔隙被压缩。另外,基于孔径分布曲线,利用分形理论计算得出的试样孔隙体积分形维数变化不大,表明在固结和剪切过程中,孔隙表面的粗糙程度变化不大,且试样的分形维数和孔隙比、轴向应变之间无明显相关关系。研究结果说明了压实黄土的力学响应是集粒间相互作用的结果,而非颗粒与颗粒之间相互作用的结果。

关键词:压实黄土;微结构演化;孔径分布曲线;力学响应;分形维数
中图分类号:TU43　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-4548(2021)S1-0099-06

作者简介:肖　涛(1994—),男,硕士研究生,从事黄土微结构与力学特性研究。Email: 672590412@qq.com。

Microstructural evolution of compacted loess during consolidation and shearing

XIAO Tao[1], LI Ping[1,2], SHAO Sheng-jun[2]
(1. State Key Laboratory of Continental Dynamics, Department of Geology, Northwest University, Xi'an 710069, China; 2. Shaanxi Key Laboratory of Loess Mechanics and Engineering, Xi'an 710048, China)

Abstract: To understand the microstructural evolution of compacted loess during consolidation and shearing, the triaxial tests and the MIP technology are used to acquire the pore-size distribution curve of compacted loess specimens with different stress and strain states. By analyzing the pore-size distribution characteristics of compacted loess specimens, the microstructural evolution of compacted loess during consolidation and shearing is studied. The results show that the compacted loess tested is strongly contractive during shearing, and the evolution of the pore-size distribution of compacted loess during consolidation is similar to that during shearing. The intra-aggregate pores are not affected, only the inter-aggregate pores are compressed. In addition, based on the pore-size distribution curve, the fractal dimension of each specimen is calculated by the fractal theory, which changes a little from specimen to specimen. It is indicated that the roughness of pore surface changes little during the process of consolidation and shearing, and there is no obvious correlation between fractal dimension, void ratio and axial strain. The research results indicate that the mechanical response of compacted loess is due to the interaction between aggregates, while not between particles.

Key words: compacted loess; evolution of microstructure; pore-size distribution curve; mechanical response; fractal dimension

0　引　　言

近年来,“削山填沟”已成为黄土高原地区拓展或新增建设用地的主要工程措施[1-2]。这一举措不仅产生了许多挖填方边坡,而且使得高填方地基成为主要的地基形式[3]。随着高填方工程在黄土地区普遍化,压实黄土的力学行为及其内在机理越来越受人们关注。通常认为,原状黄土具有结构性[4],结构性强弱由颗粒排列和粒间胶结决定,前者又由后者控制,原状黄土粒间胶结主要包含黏粒和碳酸钙胶结。重塑破坏了原状黄土颗粒间的碳酸钙胶结,致使其结构和物理性质发生变化。因此,研究加载过程中压实黄土的微结构变化规律具有十分重要的意义。

针对应力作用下黄土的微结构演化,利用 SEM 技术,胡再强等[5]、方祥位等[6]和 Li 等[7]分析了不同地区原状黄土湿陷前后的微结构,普遍得出湿陷导致原状黄土中大孔隙减少,小孔隙增多,平均孔径减小的结论。利用 SEM 和 MIP 技术,Jiang 等[8]比较了三轴试验前后饱和原状和重塑黄土的微结构,发现应力作用只改变了粒间孔隙的孔径分布;Ng 等[9]对比了侧限固结试验前后饱和原状和重塑黄土的微结构,得到了相

基金项目:黄土力学与工程陕西省重点试验室开放基金项目(LME201803);中国博士后基金项目(2019M653883XB)
收稿日期:2020-12-29
*通信作者(E-mail:lp19881028@163.com)

似的结果;但 Shao 等[10]对比了压实黄土试样侧限固结以及湿陷前后的孔径分布,发现固结和湿陷均会导致粒间孔隙和粒内孔隙变化。利用 CT 技术,蒲毅彬等[11]、雷胜友等[12]对原状黄土的浸水过程进行了观察,结果显示水的渗透相当缓慢,渗水造成可溶性土粒和水溶盐晶体的溶解,致使土结构破坏;此外,朱元青等[13]分析了原状黄土固结、剪切和湿陷前后的微结构,结果表明在固结或剪切过程中,大部分孔隙逐渐闭合,而小部分孔隙出现了先闭合后扩展再逐渐闭合的现象,在浸水至饱和时仍有大孔隙存在,大孔隙闭合与否取决于浸水时的应力状态。尽管目前通过观察分析湿陷、固结及剪切破坏前后黄土的微结构,对这些力学行为导致的微结构变化有了定性或定量的认识,但对土体变形过程中(如增湿至饱和过程中或剪应力增加至剪切破坏过程中)微结构的演化规律还不清楚。

因此,本文重点研究三轴应力状态下随着应力应变的发展压实黄土孔隙结构的演化。利用 SEM 和 MIP 技术测试土样的微结构,通过比较不同应力应变状态的土样的孔径分布曲线,分析压实黄土的微结构演化规律。本文将着重分析 MIP 试验结果,定量描述压实黄土孔隙结构的演化规律。

1 试验土样与方法

1.1 试验土样与制样方法

在西安某工地取原状和扰动黄土土样,原状土样用于测定土的基本物理指标,扰动土样用于制备压实土样。土的基本物理指标与颗粒分析结果如表 1 所示。采用静力压实的方法制备压实土样。首先,将扰动土风干、研磨,过 0.5 mm 筛、烘干。向干土中添加蒸馏水,配置特定的含水率(15%,接近天然含水率)。将湿土装入保鲜袋密封并在保湿器中放置 72 h,使土中水分均衡。最后,用专门的制样仪压制土样,压实土样的密度为 1.44 g/cm^3,接近原状黄土的天然密度。

表 1 土样基本物理指标

Table 1 Physical properties of soil specimens

含水率 /%	天然密度 /(g·cm^{-3})	孔隙比	土粒相对质量密度	液限 /%	塑限 /%
15.0~20.0	1.44~1.46	0.94~1.15	2.70	34.2	18.6

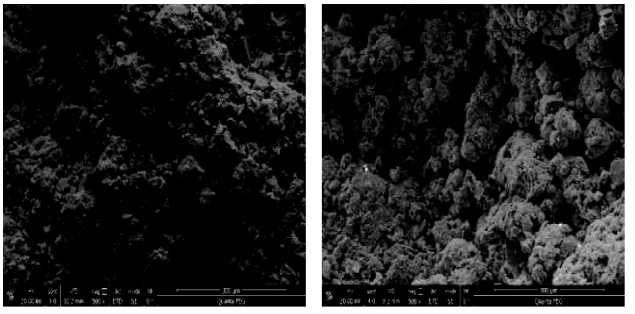
1.2 试验方案

开展压实土样的固结排水(CD)试验,非饱和试样高 80 mm、直径 31.9 mm。共开展 4 组试验,每组 5 个试样在相同的围压下固结,然后施加剪应力至轴向应变为 0%,5%,10%,15% 和 20% 时停止试验,拆除设备,将试样移出。用钢丝锯在试样高度的 1/3 处切取块状样品,利用冻干法干燥样品,用于 SEM 和 MIP 试验。其中用于 SEM 试验的样品尺寸为 2 cm×1 cm×1 cm,用于 MIP 试验的为 2.5 cm×1.5 cm×1.5 cm。

2 试验结果与分析

2.1 压实黄土的微结构

图 1 为原状和压实黄土的 SEM 图像,从图中可以看出,集粒是原状黄土和压实黄土微结构的基本单元,原状黄土中可见单独的粉粒和砂粒,而压实黄土中很少见到单独的粉粒和砂粒。无论是原状黄土还是压实黄土,黏粒都附着在粗颗粒的表面或者以集粒的形式存在。比较原状黄土和压实黄土的 SEM 图像,压实黄土中集粒的尺寸较原状黄土中的大;原状黄土中颗粒(粉粒、砂粒和集粒)分布较均匀,结构较为均一。这可能是因为压实黄土中的集粒是在短时间内形成的,而且土中黏粒含量稳定,粗颗粒没有在压力作用下排列稳定,因此形成的集粒尺寸较大。



(a) 原状黄土(500倍) (b) 压实黄土(500倍)

图 1 原状黄土与压实黄土的 SEM 图像

Fig. 1 SEM photographs of intact loess and compacted loess

本研究中黄土的黏粒含量为 15.9%,制样含水率为 15%,小于最优含水率 18%。前期研究[14]表明当土中含有一定量的黏粒,并且制样含水率小于最优含水率时,压实土中通常会形成尺寸不一的集粒。集粒由颗粒聚集而成,具有一定的微观结构,集粒之间相互连接构成压实土的结构。这种情况下,压实土具有双层孔隙结构,如图 2 所示,其孔径累积分布曲线可认为

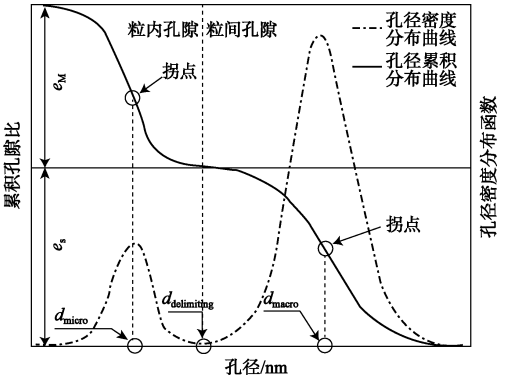


图 2 具有双层孔隙结构的土的理想孔径分布曲线

Fig. 2 Idealized pore-size distribution curve of soils with double-level structures

是由两条具有单层孔隙结构的土的孔径累积分布曲线(呈反 S 形)叠加而成,其孔径密度分布曲线表现出双峰特征,一个峰值对应粒内孔隙(即集粒内孔隙)的优势孔径(d_{micro}),另一个对应粒间孔隙(即集粒间孔隙)的优势孔径(d_{macro}),两个峰值之间的极小值是粒内孔隙和粒间孔隙的界限孔径($d_{delimiting}$)。界限孔径受土粒径组成和孔径测试方法的影响,分布范围是 0.1 ~ 1 μm[7,15-16]。累积孔隙比(e_{in})是粒内孔隙的孔隙比(e_s)与粒间孔隙的孔隙比(e_M)之和。

2.2　MIP 试验结果的定量分析

(1) 基于 MIP 的孔隙比

图 3 比较了 MIP 技术与传统方法测得的孔隙比。从图 3 中可看出 MIP 技术测得的土样孔隙比小于传统方法测得的孔隙比。原因不仅在于该方法无法测得非常大(>360 μm)和非常小(< 3 nm)的孔隙,而且封闭孔隙和收缩孔隙(即通过非常狭小的通道与其它孔隙连通)也无法测得。大多数情况下传统方法测得的孔隙比大于 MIP 测得的孔隙比,仅有 2 个样品的数据异常,可能是测试误差或者样品被扰动造成的。本文通过比较不同应力应变状态的土样的孔径分布特征来分析压实黄土孔隙结构的演化规律,关注的是相对值,而非绝对值,因此 MIP 技术能够满足要求。另外,三轴应力状态下土样变形稳定后,对部分土样进行了卸载试验。从卸载路径下的应力应变曲线来看,无论是等向固结还是剪切阶段,土样中发生的可恢复弹性变形非常小。因此试验结束后从仪器中移出土样,切取小尺寸样品用于微观测试,得到的孔径分布曲线能够代表土样变形状态下的微结构。

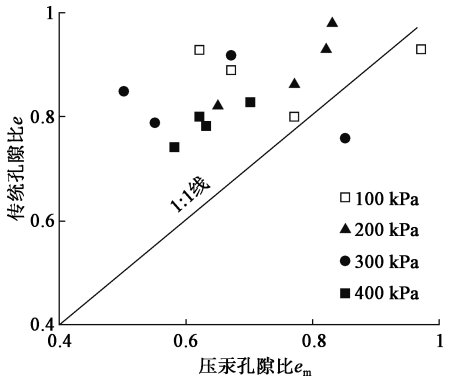


图 3　传统方法测得的孔隙比与 MIP 测得的孔隙比

Fig. 3　Comparison of void ratios measured by traditional method and MIP

(2) 等向固结过程中压实黄土 PSDD 的演化

图 4 为不同围压(0,100,200,400 kPa)下等向固结完成后土样的 PSDD 曲线。首先,所有 PSDD 曲线在孔径 3 ~ 7 μm 之间均出现急剧下降(图中箭头所指),这是试验中高、低压力段转化造成的。从图 4 中可以看出:①随着固结压力的增大,PSDD 的形态没有发生显著的变化,粒间孔隙部分的曲线横向上被压缩;②随着固结压力的增大,d_{micro}几乎没有变化,d_{macro}逐渐减小,对应固结压力 0,100,200,400 kPa,d_{macro}分别为 30.19,17.28,13.96,10.07μm;③d_{micro}对应的峰值无明显变化,d_{macro}对应的峰值则是先增大后减小。④当围压≤400 kPa 时,孔径≤6 μm 部分的曲线几乎是重合的。

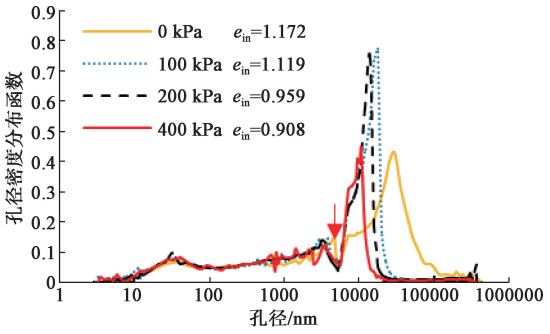


图 4　不同固结压力下的 PSDD

Fig. 4　PSDD under different consolidation pressures

分析以上现象可以得出:压实黄土的粒间孔隙对变形(固结)敏感,优势孔径随固结压力的增大而减小;集粒间的排列被改变之前,集粒的结构不会被破坏,粒内孔隙不会被压缩。通过比较发现压实黄土与黏土、膨胀土固结过程中 PSDD 的演化规律存在相似之处,即粒内孔隙不受影响,粒间孔隙被压缩,且在较大的孔隙被压缩之前较小的孔隙不会受到影响[17-18];也存在不同之处,如 Griffiths 等[18]的试验结果表明黏土在固结过程中 d_{macro}对应的峰值随着固结应力的增大而增大;胡冉等[19]认为黏土在固结过程中 d_{macro}对应的峰值随着固结应力的增大而减小。以胡冉等为代表的研究者们假设随着固结压力的增大,粒间孔隙的孔径密度分布曲线在半对数坐标系下横向上向左平移,纵向上压缩。这与本试验得出的曲线变化趋势不同。因此,他们建立的考虑初始孔隙比的土-水特征曲线模型,其基于土体孔径分布在应力作用下的变化规律,不适用于压实黄土。

(3) 剪切过程中压实黄土 PSDD 的演化

图 5 为部分压实土样的 CD 试验结果,从中可以看出在相同围压下剪切到不同轴向应变的试样的应力路径(图 5(a))和应力应变曲线(图 5(b))一致,这说明压实土样具有相似的初始微观结构,从而具有一致的力学反应。这为本研究采用间接方法研究压实黄土孔隙结构的演化规律提供了有力支撑,即在缺乏对土样变形过程中孔隙结构进行连续观察的试验手段的条件下,对具有相同初始状态的多个土样进行力学试验和微观测试,通过对比它们的孔隙特征,揭示压实黄土在固结和剪切过程中孔隙结构的演化规律是可能的。

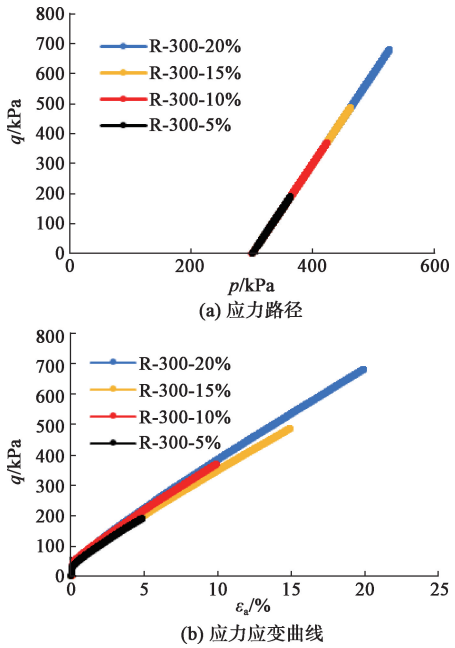


图 5 三轴试验结果

Fig. 5 Results of triaxial tests

图 6 分别为 100 和 200 kPa 围压下剪切至不同轴向应变的压实土样的 PSDD 曲线。从图 6 中能够看出:①不同围压下 PSDD 的形态没有显著变化;②随着轴向应变的增大,d_{micro} 几乎没有变化,约为 40.3nm,d_{macro} 则先增大后减小;③d_{micro} 对应的峰值无明显变化,d_{macro} 对应的峰值变化无规律。剪切过程中粒间孔隙被压缩的顺序与固结过程相似,即由大到小。粒间孔隙被彻底压缩之前,粒内孔隙不会受到影响。随着轴向应变的增大,粒间孔隙的优势孔径变化无明显规律。

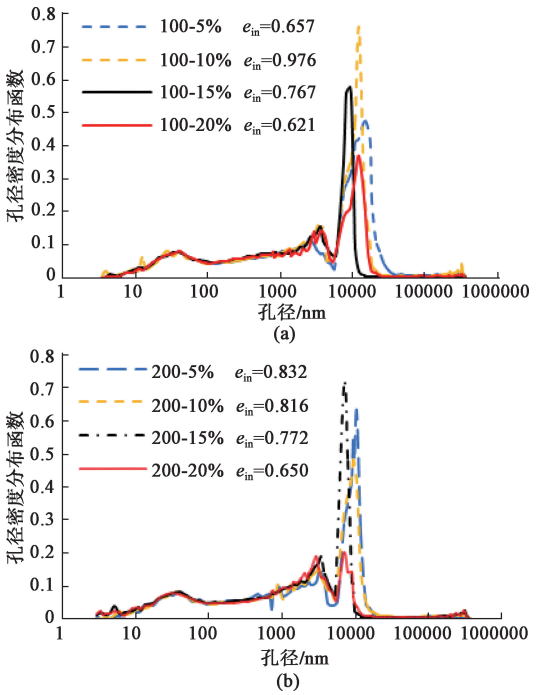


图 6 不同轴向应变下的 PSDD

Fig. 6 PSDD under different axial strains

(4) 压实黄土的孔隙体积分形维数

土体的孔隙结构具有一定的尺度特性和自相似性,在统计上遵循分形规律。因此,可以基于几何分形理论,引入分形维数对复杂的孔隙结构进行定性描述。本文采用 Friesen 等[20]提出的基于 Menger 海绵模型计算分形维数的方法,其对应的计算公式如下:

$$\lg \frac{\mathrm{d}V_m}{\mathrm{d}P} \propto (D-4)\lg P \quad , \tag{1}$$

式中,V_m 为孔隙的体积,P 为注汞压力,D 为分形维数。但由于实测的数据并不能简单地用一条直线拟合,即整个孔隙区间没有统一的分形维数。图中数据点可以用 3 ~ 4 条直线拟合,即每个土样存在 3 ~ 4 个分形区间,每个分形区间对应的分形维数如表 2 所示。可以发现只有 D_3 介于 2 和 3 之间,满足分形维数的定义。因此将 D_3 作为土样孔隙体积分形维数。

表 2 基于 Menger 模型方法得出的分形维数表

Table 2 Fractal dimensions based on Menger model method

试样	D_1	D_2	D_3	D_4
Remolded	3.3990	4.9880	2.6382	2.1776
100-0%	2.8176	7.1840	2.7800	2.0711
100-5%	2.4976	7.4127	2.0212	—
100-10%	2.2121	8.4766	2.7554	2.0197
100-15%	2.5802	10.6195	2.8180	1.2609
100-20%	2.5841	7.1734	2.6205	0.7869
200-0%	2.4513	6.8217	2.4318	0.1943
200-5%	2.6717	8.9774	2.7851	1.2439
200-10%	2.6678	7.3717	2.8752	1.9276
200-15%	2.4132	10.7486	2.6901	2.2662
200-20%	2.1522	7.1398	2.8394	2.2585
300-5%	2.5734	9.1076	2.8492	1.9301
300-10%	2.4648	8.9810	2.8211	1.3640
300-15%	2.5172	10.4048	2.8172	1.4712
300-20%	2.2914	6.2945	2.8790	2.4006
400-0%	2.6769	7.2853	2.8671	—
400-5%	2.4841	7.5416	2.8461	2.5499
400-10%	2.3108	6.1133	2.8823	2.7861
400-15%	2.7839	9.1771	2.8287	1.8220
400-20%	2.4452	8.7693	2.8017	2.0617

注:表中的横线表示无数据,即试样只有 3 个分形区间。

Sun 等[21]通过研究得出压实膨胀土的分形维数随着干密度和吸力的增大而稍有增大。然而,这一结论未必适用于所有压实土,如图 7 所示,压实黄土的分形维数随土样孔隙比的减小(即干密度的增加)没有明显变化。分形维数与剪切作用下轴向应变的关系如图 8 所示,同样,分形维数随轴向应变的变化较小,且无明显规律。

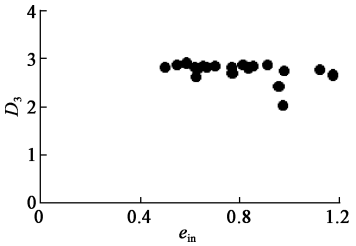


图 7　分形维数与孔隙比之间的关系

Fig. 7　Relationship between fractal dimension and e_{in}

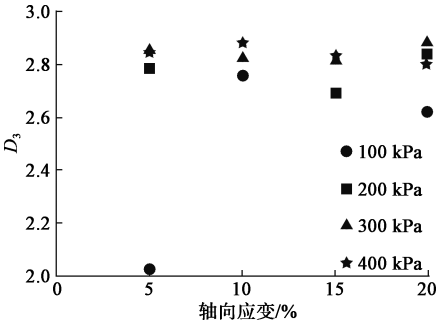


图 8　分形维数与轴向应变的关系

Fig. 8　Relationship between fractal dimension and axial strain

3　讨　　论

本次试验用的压实黄土试样疏松多孔,试验前的初始孔隙比都超过了 1.10,这些试样在应力作用下都表现出很高的压缩性。以上分析表明压实黄土在固结和剪切过程中的微结构演化规律相似,即在固结和剪切作用下,粒内孔隙基本不受影响,粒间孔隙被压缩,且在较大孔隙被压缩之前较小的孔隙不会受到影响。也就是说该压实黄土中集粒的形态和内部结构在应力作用前后没有变化,同时也说明在应力作用下,压实黄土产生的变形是由粒间孔隙压缩贡献的。与黄土湿陷过程中的孔径分布演化不同,雷胜友等[12]指出浸水使得黄土颗粒与颗粒之间的联结软化、破坏,最终使得粒内孔隙体积产生变化;Shao 等[10]的研究表明浸水过程会导致压实黄土中集粒不稳定,易使集粒出现分散的现象,进而导致粒内孔隙体积变化。造成不同演化规律的原因在于无论是原状黄土还是重塑黄土,集粒对浸水敏感而对加载不敏感,浸水会削弱粒间胶结,减小粒间引力,导致集粒结构破坏,颗粒发生重组和重新排列。但是在应力作用下,集粒的形态和结构不会发生明显改变。因此,压实黄土的力学响应是集粒之间相互作用的结果,而不是颗粒与颗粒之间相互作用导致的。根据以上分析得出压实黄土在应力作用下的微结构变化概念图,如图 9 所示。

4　结　　论

(1) 压实黄土在固结和剪切过程中的孔径分布演化规律相似,即粒内孔隙不受影响,粒间孔隙被压缩,且在较大孔隙被压缩之前较小孔隙不会被压缩。孔径分布演化规律与试样的宏观变形特性有关,受应力路径的影响较小。

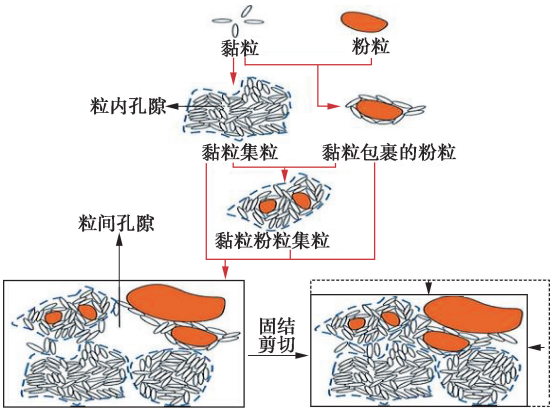


图 9　固结和剪切过程中土体微结构变化概念图

Fig. 9　Conceptual model for change of soil microstructure during consolidation and shearing

(2) 基于孔径分布曲线,利用分形理论计算得出压实黄土试样孔隙体积分形维数,发现大多数土样的分形维数约为 2.800,随土样应力应变状态的变化很小,说明孔隙结构的复杂程度不随试样的应力应变状态改变。

(3) 压实黄土的力学响应是集粒间相互作用的结果,而不是颗粒与颗粒之间相互作用的结果。

参考文献:

[1] JUANG C H, DIJKSTRA T, WASOWSKI J, et al. Loess geohazards research in China: Advances and challenges for mega engineering projects[J]. Engineering Geology, 2019, **251**:1 – 10.

[2] LI X, LI L C, SONG Y X, et al. Characterization of the mechanisms underlying loess collapsibility for land-creation project in Shaanxi Province, China—a study from a micro perspective[J]. Engineering Geology, 2019, **249**:77 – 88.

[3] 曹　杰,张继文,郑建国,等. 黄土地区平山造地岩土工程设计方法浅析[J]. 岩土工程学报,2019,**41**(S1):109 – 112. (CAO Jie, ZHANG Ji-wen, ZHENG Jian-guo, et al. Design of high fill reclamation projects in loess areas[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2019, **41**(S1): 109 – 112. (in Chinese))

[4] 谢定义,齐吉琳. 土结构性及其定量化参数研究的新途径[J]. 岩土工程学报, 1999, **21**(6): 651 – 656. (XIE Ding-yi, QI Ji-lin. Soil structure characteristics and new approach in research on its quantitative parameter[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1999, **21**(6): 651 – 656. (in Chinese))

[5] 胡再强, 沈珠江, 谢定义. 结构性黄土的变形特性[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, **23**(24): 4142 – 4146. (HU Zai-

qiang, SHEN Zhu-jiang, XIE Ding-yi. Deformation properties of structural loess[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, **23**(24): 4142 – 4146. (in Chinese))

[6]方祥位, 申春妮, 汪 龙, 等. Q_2黄土浸水前后微观结构变化研究[J]. 岩土力学, 2013, **34**(5): 1319 – 1324. (FANG Xiang-wei, SHEN Chun-ni, WANG Long, et al. Collapsible deformation properties of Q_2 loess[J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, **34**(5): 1319 – 1324. (in Chinese))

[7]LI P, XIE W L, PAK R Y S, et al. Microstructural evolution of loess soils from the Loess Plateau of China[J]. CATENA, 2019, **173**: 276 – 288.

[8]JIANG M J, SHEN Z J, ADACHI T, et al. Microscopic analysis on artificially-prepared structured collapsible loess. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1999, **21**(4): 486 – 491.

[9]NG C W W, SADEGHI H, HOSSEN S B, et al. Water retention and volumetric characteristics of intact and recompacted loess[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2016, **53**(8): 1258 – 1269.

[10]SHAO X X, ZHANG H Y, TAN Y. Collapse behavior and microstructural alteration of remolded loess under graded wetting tests[J]. Engineering Geology, 2018, **233**: 11 – 22.

[11]蒲毅彬, 陈万业, 廖全荣. 陇东黄土湿陷过程的 CT 结构变化研究[J]. 岩土工程学报, 2000, **22**(2): 49 – 54. (PU Yi-bin, CHEN Wan-ye, LIAO Quan-rong. Research on CT structure changing for damping process of loess in Longdong [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2000, **22**(2): 49 – 54. (in Chinese))

[12]雷胜友, 唐文栋. 黄土在受力和湿陷过程中微结构变化的 CT 扫描分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, **23**(24): 4166 – 4169. (LEI Sheng-you, TANG Wen-dong. Analysis of microstructure change for loess in the process of loading collapse with CT scanning[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, **23**(24): 4166 – 4169. (in Chinese))

[13]朱元青, 陈正汉. 原状 Q_3黄土在加载和湿陷过程中细观结构动态演化的 CT-三轴试验研究[J]. 岩土工程学报, 2009, **31**(8): 1219 – 1228. (ZHU Yuan-qing, CHEN Zheng-han. Experimental study on dynamic evolution of meso-structure of intact Q_3 loess during loading and collapse using CT and triaxial apparatus [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2009, **31**(8): 1219 – 1228. (in Chinese))

[14]CASINI F, VAUNAT J, ROMERO E, et al. Consequences on water retention properties of double-porosity features in a compacted silt[J]. Acta Geotechnica, 2012, **7**(2): 139 – 150.

[15]JIANG M J, ZHANG F G, HU H J, et al. Structural characterization of natural loess and remolded loess under triaxial tests[J]. Engineering Geology, 2014, **181**: 249 – 260.

[16]CHEN Z F, CHEN H E, LI J F, et al. Study on the changing rules of silty clay's pore structure under freeze-thaw cycles[J]. Advances in Civil Engineering, 2019, **2019**(1): 1 – 11.

[17]DELAGE P, LEFEBVRE G. Study of the structure of a sensitive Champlain clay and of its evolution during consolidation[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1984, **21**(1): 21 – 35.

[18]GRIFFITHS F J, JOSHI R C. Change in pore size distribution due to secondary consolidation of clays[J]. Géotechnique, 1989, **39**(1): 159 – 167.

[19]胡 冉, 陈益峰, 周创兵. 基于孔隙分布的变形土土水特征曲线模型[J]. 岩土工程学报, 2013, **35**(8): 1451 – 1462. (HU Ran, CHEN Yi-feng, ZHOU Chuang-bing. A water retention curve model for deformable soils based on pore size distribution[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, **35**(8): 1451 – 1462. (in Chinese))

[20]FRIESEN W I, MIKULA R J. Fractal dimensions of coal particles[J]. Journal of Colloid and Science, 1987, **120**(1): 263 – 271.

[21]SUN H Q, MAŠÍN D, NAJSER J, et al. Fractal characteristics of pore structure of compacted bentonite studied by ESEM and MIP methods[J]. Acta Geotechnica, 2020, **15**(6): 1655 – 1671.

(编校:明经平)