

DOI: 10.11779/CJGE202111020

非饱和 Q₃ 黄土微观结构特征及对强度特性影响机制

韦雅之¹, 姚志华^{*}, 种小雷¹, 张建华²

(1. 空军工程大学机场建筑工程教研室, 陕西 西安 710038; 2. 中国建筑西南勘察设计研究院有限公司, 四川 成都 610052)

摘要: 结构性是影响非饱和原状黄土力学变形特征的重要因素, 但鲜有从微观与宏观相结合的角度分析原状与重塑黄土结构性差异的相关报道。以同一物理力学条件下的非饱和原状 Q₃ 黄土及其重塑土为研究对象, 进行控制吸力和净围压为常数的非饱和三轴剪切试验, 并通过微观扫描以揭示两者结构差异对强度特性的影响机制。试验表明原状和重塑 Q₃ 黄土黏聚力 c 均随吸力增加呈线性增加趋势, 且原状土黏聚力大于重塑土; 内摩擦角受吸力影响较小, 两者差异不大。原状黄土颗粒棱角明显, 颗粒间为架空排列且具有良好胶结作用, 结构性强并稳定; 重塑黄土颗粒棱角浑圆, 颗粒间为镶嵌接触且胶结作用破坏, 土骨架作用不明显, 结构性弱, 形成的团粒结构易于压缩, 团粒和颗粒联结不稳固, 进而原状土具备更好的抵御外部剪切破坏的能力。同一物理条件下的原状和重塑黄土中孔径小于 50 μm 分别占试样总体积的 22.7% 和 16.3%, 50~200 μm 孔径分别为 71% 和 83.7%, 大于 200 μm 分别为 6.3% 和 0%。这表明支架大孔隙结构没有为原状土提供更大的变形空间, 而良好的胶结作用和结构性保证了原状黄土具备较高的强度特征。

关键词: 非饱和黄土; 微观; 结构性; 抗剪强度

中图分类号: TU43 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2021)11-2127-07

作者简介: 韦雅之(1994—), 女, 博士研究生, 主要从事机场规划及特殊土地基处理理论研究。E-mail: 2651742406@qq.com。

Microstructural properties of unsaturated Q₃ loess and their influence mechanisms on strength properties

WEI Ya-zhi¹, YAO Zhi-hua¹, CHONG Xiao-lei¹, ZHANG Jian-hua²

(1. Dept. of Airdrome Construction Engineering, Air Force Engineering University, Xi'an 710038, China; 2. China Southwest Geotechnical Investigation & Design Institute Co., Ltd., Chengdu 610052, China)

Abstract: Structure is the important factor affecting the mechanical deformation characteristics of unsaturated undisturbed loess, but there are few reports on the structural differences between undisturbed and remolded loesses from the perspective of combining micro and macroscopic views. Taking the unsaturated undisturbed Q₃ loess and its remolded soil under the same physical and mechanical conditions as the research objects, the unsaturated triaxial shear tests with the control suction and net confining pressure as constants are carried out, and the influence mechanism of the structural differences between the two on the strength characteristics is revealed by micro and meso-scopic scannings. The tests show that the cohesions of the undisturbed and remolded Q₃ loess increase linearly with the increase of matric suction, and the cohesion of the undisturbed soil is greater than that of the remolded soil. The angle of internal friction is basically constant and less affected by the matric suction, and the difference between the two is not significant. The undisturbed loess particles have obvious edges and corners, which are in bracket contact and have good cementation, and the structure of the undisturbed loess is strong. The remolded loess particles are close to round and in inlaid contact, and the cementation between them is destroyed. The soil skeleton function of the remolded loess is not obvious and the structure is weak, the formed aggregate structure is easy to compress, and the connection between aggregates and particles is not stable, thus forming the undisturbed soil with better resistance to the external shear failure. Under the same physical conditions, the pore sizes of undisturbed and remolded loesses less than 50 μm account for 22.7% and 16.3% of the total volume of the samples, respectively. The pore sizes between 50 μm and 200 μm are 71% and 83.7%, respectively, and those larger than 200 μm are 6.3% and 0%, respectively. The open structure composed of the bracket macro-void does not provide deformation space for the undisturbed soil, but the good cementation and structural properties ensure that the undisturbed loess has high strength characteristics.

Key words: unsaturated loess; micro- and meso-scopic scale;

基金项目: 国家自然科学基金项目(11972374, 51509257)

收稿日期: 2020-12-16

*通信作者(E-mail: lightbright@163.com)

structure property; shear strength

0 引言

天然状态下的土一般均具有结构性特征, Terzaghi^[1]最早开展了土微观结构的研究, Casagrand^[2]提出了土的书本结构, 进一步发展了土的结构性, 而 Mitchell^[3]认为土的结构性是颗粒间的排列以及胶结作用。谢定义等^[4]认为结构性揭示了土颗粒排列的几何特征以及土颗粒联结的力学特征, 起到保持土的原结构不被外力破坏的作用。非饱和原状黄土是一种形成于干旱和半干旱条件下的特殊沉积物, 具有垂直裂隙发育、颗粒随机排列、粒间孔隙多样等特性, 具有典型的结构性特征。深入研究黄土结构性有助于进一步揭示黄土力学特性和湿陷变形机理, 为工程建设提供理论指导。

原状黄土微观结构特征(高国瑞^[5-7]、雷祥义^[8]、Li 等^[9]、Deng 等^[10]、Wang 等^[11]以及 Wei 等^[12])对其力学变形特性有着较大影响。国内外学者对土的结构性开展诸多研究。Samoilich^[13]、Ng 等^[14-15]、Wang 等^[16]及 Nan 等^[17]分析了微观结构和结构变化对黄土强度和变形特性的影响。Li 等^[18]通过试验表明黄土的原状抗拉强度与扰动抗拉强度之间存在较大差异, 说明研究其结构的重要性。陈正汉等^[19]依据 CT 扫描, 为定量描述黄土结构性以及相关演化规律提出了途径。蒋明镜等^[20]建立了考虑颗粒间吸引力、胶结尺寸等因素的三维胶结接触模型, 反映了非饱和结构性黄土的相关力学特性。姚志华等^[21-22]及王腾等^[23]通过宏观数学试验研究了结构性对非饱和黄土抗剪特性的影响。Leroueil 等^[24]认为受结构性影响, 原状与重塑在力学特性方面有根本区别。然而以往研究鲜有从微观与宏观相结合的角度对于原状与重塑黄土的结构性进行比较, 未有关于结构性差异对强度特性的影响进行讨论。

本文以非饱和 Q₃ 黄土为研究对象, 通过微观和细观两条途径比较原状土和重塑土在颗粒尺寸、骨架、孔隙率等方面的结构特征差异, 并由此出发分析原状和重塑土在控制吸力和围压的宏观三轴试验中其抗剪强度之间存在差异的原因, 以期为揭示原状黄土结构性对其力学变形特性的影响规律提供一些依据和参考。

1 试验概况

1.1 宏观数学试验

试样取自陕西西安市北辰大道与凤城八路交汇处, 现场人工挖设探井, 在地表下 5 m 取得 30 cm×30 cm×30 cm 原状土样若干, 为防止水分散发用塑料薄

膜包裹后运回实验室。试验用土颗粒相对密度为 2.71, 初始含水率 w 为 13.45%, 干密度 ρ_d 为 1.35 g/cm³, 孔隙比 e 为 1.01, 饱和度 S_r 为 36.09%, 液限 w_L 为 27.32%, 塑限 w_p 为 16.94%。

使用削土器制成直径 39.1 mm, 高度 80 mm 的原状三轴试样。将原状土样碾碎过 1 mm 筛处理, 保证含水率与原状土相同; 控制重塑土样干密度与原状土相同, 利用重塑土制样设备, 分 5 层压实制备土样。

试样初始含水率为 13.45%, 采用水膜转移法统一将试样含水率提高到 20%。分若干次将水均匀滴在原状试样上, 每次滴水间隔 2~3 h。将调整含水率后的试样放置在保湿器中, 每 12 h 翻动一次, 并称量试样重量变化, 确保达到目标含水率。试样在保湿器中放置时间不低于 72 h。

试验采用同时控制吸力和净围压为常数的三轴固结排水剪切试验, 控制净围压分别是 50, 100, 200 kPa, 控制吸力为 50, 100, 200 kPa。原状样、重塑样各 9 个, 总共 18 个试样。试样吸力平衡和固结过程稳定标准为 2 h 内体变和排水量不超过 0.01 cm³, 三轴剪切速率为 0.016 mm/min。轴向应变达到 15%, 试样破坏, 停止剪切。

1.2 微观扫描

SEM 扫描前, 将制备好的三轴原状及重塑土样用小刀削成约 2 cm×1.5 cm×1.5 cm 的长条状, 并在中部刻一圈深约 2 mm 的凹槽, 而后沿凹槽掰开, 选取较为平整的断面并用橡皮球吹净扬尘, 而后将样品粘在观察室的底座上, 运用 VEGAIXMU 型扫描电镜进行扫描, 分辨率为 40.2 μm。在扫描过程中, 将样品在视野中移动, 避开奇异点选择有代表性的区域进行拍照, 每个区域均从高放大倍数到低放大倍数进行拍照, 主要选 50, 500, 5000, 10000 等倍数。

对于 CT 三维结构重建扫描, 首先制备原状和重塑环刀试样各 1 个, 试样直径约 61.8 mm, 高度约 20 mm。为避免金属对 CT 扫描影响, 环刀由具有高强度且易于加工为精密尺寸零部件的 Peek 材料(聚醚醚酮)制成。本次样品测试所用仪器为 nanoVoxel-2000 系列具有 3 μm(平板探测器)/500 nm(物镜耦合探测器)的空间分辨率工业 CT。利用此仪器进行数据采集, 基于 CT 数据结果, 定量分析样品内部的孔隙及其连通情况, 统计孔隙半径等数据。对样品进行高分辨扫描成像, 每 0.25° 采集一帧图像, 图像尺寸为 1920×1536, 为提高分辨率样品旋转两圈, 共采集 1440 帧图像。

2 试验结果及分析

2.1 基质吸力对强度的影响

图 1 为 18 个试样的应力应变曲线图。由图 1 可知, 吸力相同时, 随着净围压 ($\sigma_3 - u_a$) 的增大, 原状和重塑土试样偏应力呈上升趋势, 且轴向应变一定时, 原状黄土的偏应力要略高于重塑土。原状黄土与重塑黄土的应力-应变曲线均由弱硬化型向强硬化型发展, 原状黄土大致在轴应变 1%~1.5% 时, 偏应力增大较快; 而重塑黄土在轴应变达到 3%, 偏应力才增长到较大值。

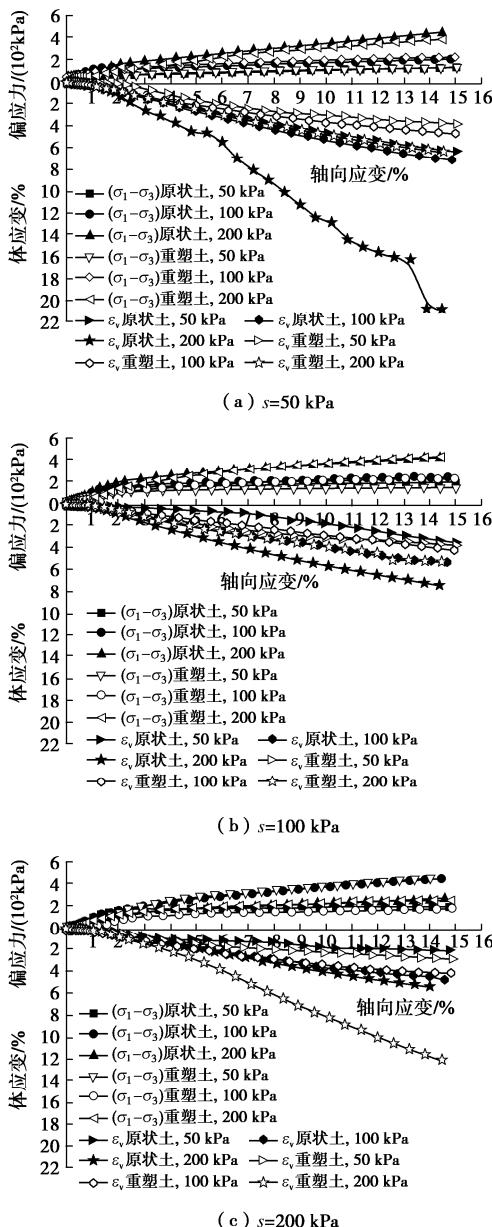


图 1 同一吸力不同净围压下非饱和 Q₃ 原状和重塑黄土偏应力、体应变和轴应变关系曲线

Fig. 1 Curves of deviatoric stress, volume strain and axial strain of unsaturated Q₃ undisturbed and remolded loesses under same suction and different net confining pressures

原状土在不同净围压下, 体应变 ε_v 随着轴向应变 ε_a 的增大而逐渐增大。在净围压较大时, 土颗粒间的结构被破坏, 内部微观结构无法承受外部荷载作用导致土样变形增大。重塑土试样变形与原状土主要区别在于吸力较大时, 相同条件下重塑土样的体变值要大于原状土样。重塑土样是由原状土样碾碎重组形成的, 即使颗粒间重新排列形成新的团粒结构, 但颗粒间的联结已被破坏, 从而结构强度以及结构稳定性均不如原状土样。

此外, 非饱和 Q₃ 原状和重塑黄土三轴剪切试验呈弱硬化和强硬化破坏, 取轴应变 $\varepsilon_a = 15\%$ 的偏应力为破坏应力。试样破坏时对应的偏应力 q_f 和净平均应力 p_f 可由下式得到:

$$q_f = \sigma_{1f} - \sigma_3 , \quad (1)$$

$$p_f = \frac{\sigma_{1f} + 2\sigma_3}{3} , \quad (2)$$

式中, σ_{1f} 为试样破坏时的大主应力 (kPa), σ_3 为试样受到的小主应力, 其值等于试验时施加的围压 (kPa)。

通过图 1 得到每个试样的破坏时的偏应力 q_f 和净平均应力 p_f , 并将两者关系汇于图 2 中, 形成 $p_f - q_f$ 平面内的强度包线。由图 2 可知, 吸力相同的一组试验点落在一条直线上, 可用下式表达:

$$q_f = \zeta + p_f \tan \omega , \quad (3)$$

式中, ζ , $\tan \omega$ 为直线的截距 (kPa) 和斜率, 其值用最小二乘法确定。

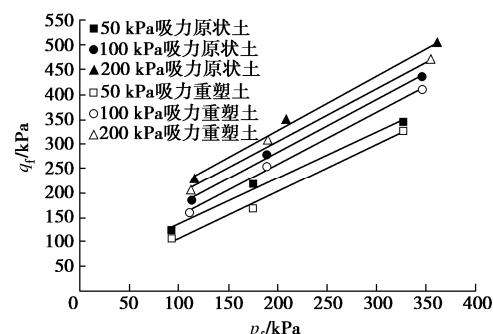


图 2 非饱和 Q₃ 黄土强度包线

Fig. 2 Strength criteria of unsaturated Q₃ loess

按照莫尔-库仑条件, 以压为正, 拉为负。土的抗剪强度公式用主应力 σ_{1f} , σ_3 表示为

$$\frac{1}{2}(\sigma_{1f} - \sigma_3) = c \cos \varphi + \frac{1}{2}(\sigma_{1f} + \sigma_3) \sin \varphi . \quad (4)$$

将式 (1), (2) 解得的 σ_{1f} , σ_3 代入抗剪强度公式 (4), 与式 (3) 对比可得土的黏聚力 c 和内摩擦角 φ :

$$\left. \begin{aligned} c &= \frac{3 - \sin \varphi}{6 \cos \varphi} \xi, \\ \sin \varphi &= \frac{3 \tan \omega}{6 + \tan \omega}. \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

由式(5)可计算出土的强度参数 c 和 φ , $c-s$, $\varphi-s$ 关系分别如图 3 所示。

由图 3 可知, 非饱和原状及重塑黄土的黏聚力 c 随吸力呈线性增加趋势, 内摩擦角 φ 受吸力的影响较小。在吸力为 50, 100, 200 kPa 时, 原状土与重塑土黏聚力 c 相差百分数分别为 103%, 39.55%, 12.87%; 内摩擦角 φ 相差百分数分别为 7.3%、5.3%, 3.2%, 由此可知原状土黏聚力、内摩擦角均大于重塑土, 而两者内摩擦角差异较黏聚力差异小。

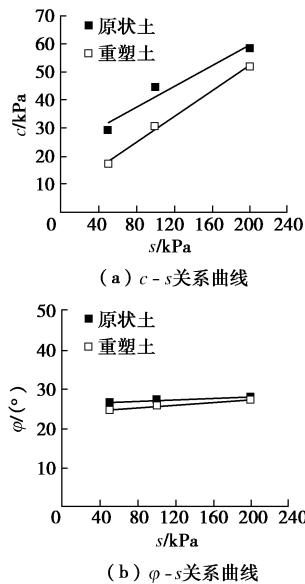


图 3 非饱和 Q₃ 黄土 $c-s$, $\varphi-s$ 关系曲线

Fig. 3 Relationship curves of $c-s$, $\varphi-s$ of unsaturated Q₃ loess

2.2 黄土微观结构特征对强度的影响

由前文三轴剪切试验结果可知, 原状黄土的结构较稳定, 能够较好地抵抗外力破坏, 重塑土样颗粒联结不稳固, 抵抗能力较差。由此说明同一试验条件下, 原状与重塑土结构性差异导致其强度指标方面的差异, 从而需对原状及重塑土的微细观结构特征进行深入研究, 进一步揭示结构性对黄土强度的影响机制。

通过电镜扫描, 放大 50 倍时, 原状土有明显的大孔洞(图 4(a)), 而重塑土不具有这一特征(图 5(a))。放大倍数为(500~5000)倍时(图 4(b), (c) 和图 5(b), (c)), 可以观察到十分清晰的黄土颗粒形态, 其中原状土的骨架颗粒以细粒状颗粒胶结而成的集粒为主, 并且颗粒具有明显的棱角; 重塑土由于扰动造成微结构破坏, 因此骨架颗粒中集粒较原状土减少, 单粒体较多, 且颗粒棱角形态接近浑圆。放大

倍数为 10000(图 4(d) 和图 5(d))时, 可以观察到黄土颗粒的排列形式及接触关系, 其中原状土的骨架颗粒排列形式主要为架空排列, 接触关系主要为点接触、面接触及胶结接触; 重塑土的骨架颗粒排列形式主要为镶嵌排列, 接触关系多为点接触及面接触。

原状土颗粒之间的胶结物使得颗粒间存在较强的胶结作用, 使得试样骨架在三轴剪切过程中能够承受较大的剪切作用。重塑土颗粒形态不具有明显的棱角接近浑圆, 骨架稳定性较差, 并且由于扰动过程破坏了大部分原始的胶结接触, 重塑后的胶结接触表现出了强度下降幅度较大。

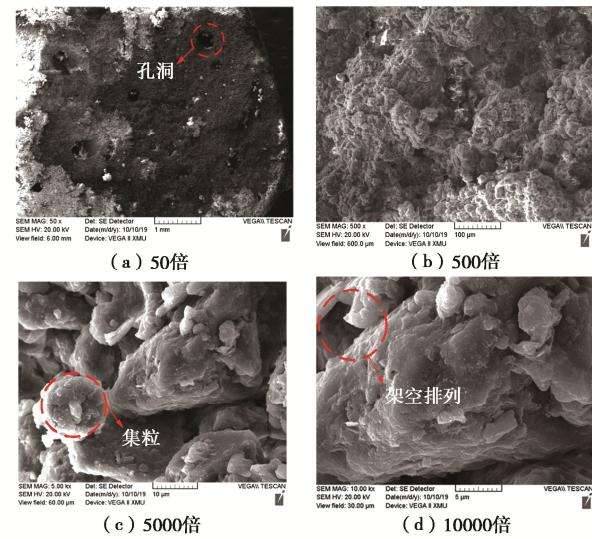


图 4 原状土 SEM 图片

Fig. 4 SEM image of undisturbed loess

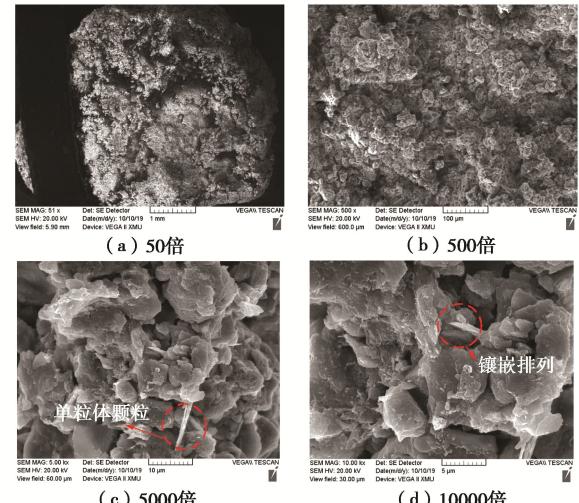


图 5 重塑土 SEM 图片

Fig. 5 SEM images of remolded loess

2.3 黄土孔隙结构与分布特征对强度的影响

将完整的原状及重塑土试样进行 CT 扫描并进行三维重建, 试样的三视图(俯视、左视、主视图)和三维重建图如图 6 所示。原状土具有十分明显的裂缝以及大孔隙; 而重塑土土样均匀, 无裂缝及大孔隙。

为进一步比较原状和重塑土样的细观结构, 从样品 CT 扫描结果中截取 $300 \times 300 \times 300$ 层的立方体 CT 数据 (边长= $300 \mu\text{m} \times 40.2 \mu\text{m}$), 并提取孔隙生成如图 7 所示的三维图像, 可以看出原状土试样孔隙多为连通孔隙, 且孔隙半径较大; 重塑土样无连通孔隙, 且孔隙半径普遍较小, 这与骨架颗粒的连接方式有关。运用数理统计方法可实现对孔隙形状因子 (代表孔隙形状的规则度, 形状因子的值越大, 代表其形状越规则)、半径等孔隙结构的定量提取, 绘制如图 8, 9 所示的概率分布及直方图。

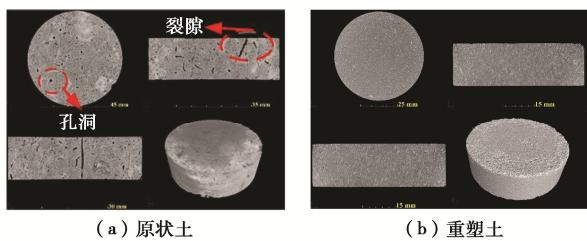


图 6 环刀试样三维重建及其三视图

Fig. 6 Three-dimensional reconstruction of ring cutter specimen and its three views

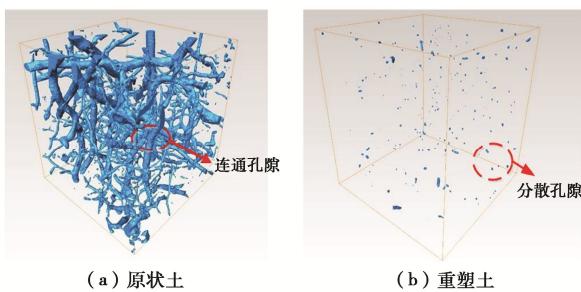


图 7 试样截取数据孔隙三维图

Fig. 7 Three-dimensional diagram of interception data pores of specimen

从图 8 中可得原状和重塑土试样孔隙形状因子分布均为正态分布, 其中原状土试样孔隙形状因子分布值主要集中在 0.024~0.050, 重塑土试样形状因子分布值为 0.022~0.044。原状土样与重塑土的孔隙形状规则程度较为相近。

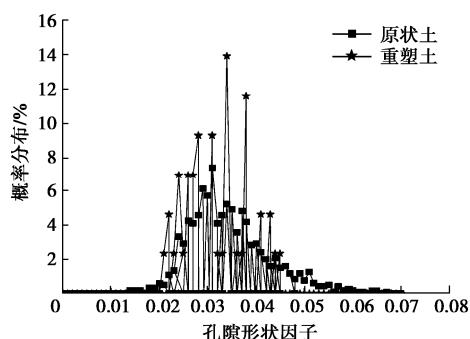


图 8 试样孔隙形状因子概率分布图

Fig. 8 Probability distribution diagram of pore shape factor of specimen

从图 9 中可看出原状和重塑土试样孔隙半径大小均成正态分布, 其中原状土试样中小于 $50 \mu\text{m}$ 的孔隙数量较少, 仅占 22.7%; 孔径在 $50\sim120 \mu\text{m}$ 的数量占比可达 59.1%; $120\sim200 \mu\text{m}$ 的孔隙数量占比为 11.9%; 大于 $200 \mu\text{m}$ 的孔隙数量则显著降低, 占总体积的 6.3%。重塑土试样中小于 $50 \mu\text{m}$ 的孔径含量较小, 仅占 16.3%; 大于 $50 \mu\text{m}$ 后孔隙数量明显增加, 孔径在 $50\sim120 \mu\text{m}$ 的数量占比可达 83.7%; 重塑土中没有大于 $200 \mu\text{m}$ 的孔隙。

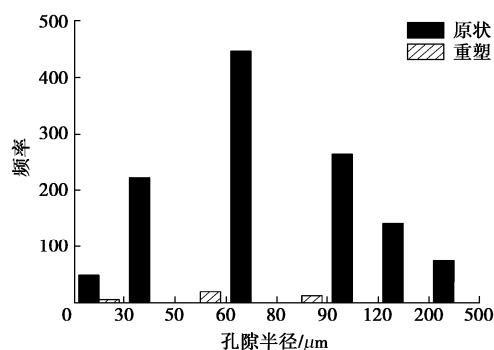


图 9 试样孔隙半径统计分布直方图

Fig. 9 Statistical distribution histogram of pore radius of specimen

根据王永焱等^[25]孔隙类型及孔径划分方法: 微孔隙 (小于等于 $50 \mu\text{m}$), 中孔隙 ($50\sim500 \mu\text{m}$) 及大孔隙 (大于等于 $500 \mu\text{m}$), 可以看出原状和重塑黄土存在孔隙差异, 具体表现为原状土样中存在少量微孔隙、大孔隙和大量中孔隙, 重塑土中存在少量微孔隙和大量中孔隙。由此可见, 原状黄土内部存在较大的孔洞和孔隙, 原生结构不均匀性很明显。经历人工压实后重新成型的黄土, 原生结构被逐渐破坏, 其土骨架之间的架空孔隙明显减少, 结构重塑的过程中土体趋于致密均匀, 以中、微孔隙为主。

与前文宏观剪切试验对比可知, 架空结构和大孔隙在剪切变形破坏过程中并没有为原状土提供更大的变形空间。由于原状土样与重塑土样孔隙形状因子较为相近, 使得孔隙周围颗粒间排列具有相似的散乱程度, 因此颗粒间的内摩擦角差异不大。此外, 在天然状态下, 土颗粒间接触的骨架位置存在胶结物, 使得原状土样具有稳定的结构性, 抵抗外界破坏能力比较强。重塑土由于颗粒结构被破坏, 胶结物质也随着骨架颗粒的滑动而分解, 并分布在颗粒孔隙之间, 土颗粒间的连接相对松散, 抵抗外界破坏的能力较差, 从而使得原状土的结构强度高于重塑土。

3 结 论

本文通过比较同一物理力学条件下的非饱和 Q₃

原状和重塑黄土结构差异,结合非饱和三轴剪切试验、电镜扫描以及 CT 扫描试验,从微细观结构和宏观力学等方面,旨在探讨结构性对黄土力学变形特征的作用机理。主要得到 4 点结论。

(1) 非饱和 Q₃ 原状和重塑土试样基质吸力对强度参数影响存在差异。两者黏聚力 c 随吸力呈线性增加趋势,内摩擦角 φ 受吸力的影响较小。在吸力分别为 50, 100, 200 kPa 时,原状土与重塑土黏聚力 c 相差百分数分别为 103%, 39.55%, 12.87%, 内摩擦角 φ 相差百分数分别为 7.3%, 5.3%, 3.2%, 由此可知原状土黏聚力、内摩擦角均大于重塑土,而两者内摩擦角差异较黏聚力差异小。

(2) 非饱和 Q₃ 原状与重塑土试样微观结构特征存在明显差异,主要表现在颗粒形态和颗粒接触两方面。原状土颗粒棱角较明显,颗粒间为架空接触并存在较强的胶结作用;重塑土颗粒形态接近浑圆,颗粒间为镶嵌接触形式并胶结接触被破坏,宏观表现在原状土所能承受的极限破坏力较大。

(3) 非饱和 Q₃ 原状与重塑土试样细观结构特征存在明显差异,主要表现在孔隙半径方面。原状土和重塑土中小于 50 μm 的孔隙占比分别为 22.7%, 16.3%, 50~120 μm 的占比分别为 59.1%, 83.7%。此外,原状土中还存在 120~200 μm 和大于 200 μm 的孔隙,占比分别为 11.9%, 6.3%。由此可见,重塑土中的架空孔隙明显减小,但由于原状土中架空孔隙数量较少且组成的架空结构没有提供较大的变形空间。

(4) 原状土和重塑土孔隙形状因子分布范围分别为 0.024~0.050, 0.022~0.044, 相近的孔隙形状因子使得孔隙周围颗粒间排列具有相似的散乱程度,因此颗粒间的内摩擦角差异相对较小,而原状土颗粒间完好的胶结物使其比胶结物破损的重塑土颗粒间具有更好的黏聚力,从而使得原状土结构强度高于重塑土。

参考文献:

- [1] TERZAGHI K. Theoretical Soil Mechanics[M]. Hoboken: John Wiley & Sons, Inc., 1943.
- [2] CASAGRANDE A. The stucture of clay and its importance in foundation engineering[J]. Journal of Boston Society of Civil Engineering, 1932, 19.
- [3] MITEHELL J K. Fundamentals or Soil Behavioy[M]. 2nd ed. New York: Wiley, 1993.
- [4] 谢定义, 邢义川. 黄土土力学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2016. (XIE Ding-yi, XING Yi-chuan. Soil Mechanics for Loess Soils[M]. Beijing: Higher Education Press, 2016. (in Chinese))
- [5] 高国瑞. 中国黄土的微结构[J]. 科学通报, 1980, 25(20): 945~948. (GAO Guo-rui. Microstructure of Chinese loess[J]. Chinese Science Bulletin, 1980, 25(20): 945 ~ 948. (in Chinese))
- [6] 高国瑞. 黄土显微结构分类与湿陷性[J]. 中国科学, 1980, 10(12): 1203 ~ 1208, 1237. (GAO Guo-rui. Microstructure classification and collapsibility of loess[J]. China Science, 1980, 10(12): 1203 ~ 1208, 1237. (in Chinese))
- [7] 高国瑞. 黄土湿陷变形的结构理论[J]. 岩土工程学报, 1990, 12(4): 1 ~ 10. GAO Guo-rui. A structure theory for collapsing deformation of loess soils[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1990, 12(4): 1 ~ 10. (in Chinese))
- [8] 雷祥义. 土显微结构类型与物理力学性质指标之间的关系[J]. 地质学报, 1989, 63(2): 182 ~ 191. (LEI Xiang-yi. Relationship between microstructure types and physical and mechanical properties of soil[J]. Acta Geologica Sinica, 1989, 63(2): 182 ~ 191. (in Chinese))
- [9] LI X J, HU C Z, LI F Y, et al. Determining soil water characteristic curve of lime treated loess using multiscale structure fractal characteristic[J]. Scientific Reports, 2020, 10: 21569.
- [10] DENG L S, FAN W, LIU S P, et al. Quantitative research and characterization of the loess microstructure in the bai Lu tableland, Shaanxi Province, China[J]. Advances in Civil Engineering, 2020: 1 ~ 14.
- [11] WANG Y, YANG H, JING X. Structural characteristics of natural loess in northwest China and its effect on shear behavior[J]. Geotechnical and Geological Engineering, 2021, 39(1): 65 ~ 78.
- [12] WEI Y N, FAN W, YU B, et al. Characterization and evolution of three-dimensional microstructure of Malan loess[J]. CATENA, 2020, 192: 104585.
- [13] SAMOILYCH K O. Determination of influence of the microstructure on the physical and mechanical properties of loess soils in Dnieper region[J]. Journal of Geology, Geography and Geoecology, 2016, 24(1): 125 ~ 132.
- [14] NG C W W, MU Q Y, ZHOU C. Effects of soil structure on the shear behaviour of an unsaturated loess at different suctions and temperatures[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2017, 54(2): 270 ~ 279.
- [15] NG C W W, SADEGHI H, JAFARZADEH F, et al. Effect of microstructure on shear strength and dilatancy of unsaturated loess at high suctions[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2020, 57(2): 221 ~ 235.

- [16] WANG J D, LI P, MA Y, et al. Evolution of pore-size distribution of intact loess and remolded loess due to consolidation[J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2019, **19**(3): 1226 – 1238.
- [17] 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.
- [18] LI Y R. A review of shear and tensile strengths of the Malan Loess in China[J]. *Engineering Geology*, 2018, **236**: 4 – 10.
- [19] 陈正汉, 郭楠. 非饱和土与特殊土力学及工程应用研究的新进展[J]. 岩土力学, 2019, **40**(1): 1 – 54. CHEN Zheng-han, GUO Nan. New developments of mechanics and application for unsaturated soils and special soils[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2019, **40**(1): 1 – 54. (in Chinese))
- [20] 蒋明镜, 孙若晗, 李涛, 等. 一个非饱和结构性黄土三维胶结接触模型[J]. 岩土工程学报, 2019, **41**(增刊 1): 213 – 216. (JIANG Ming-jing, SUN Ruo-han, LI Tao, et al. A three-dimensional cementation contact model for unsaturated structural loess[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2019, **41**(S1): 213 – 216. (in Chinese))
- [21] YAO Z H, CHEN Z H, FANG X W, et al. Elastoplastic damage seepage-consolidation coupled model of unsaturated undisturbed loess and its application[J]. *Acta Geotechnica*, 2020, **15**(6): 1637 – 1653.
- [22] 姚志华, 连杰, 陈正汉, 等. 考虑微观结构演化的非饱和和 Q₃ 原状黄土弹塑性本构模型[J]. 岩土力学, 2018, **39**(5): 1553 – 1563. (YAO Zhi-hua, LIAN Jie, CHEN Zheng-han, et al. An elastic-plastic constitutive model for unsaturated Q₃ undisturbed loess considering meso—structured evolution[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2018, **39**(5): 1553 – 1563. (in Chinese))
- [23] 王腾, 周茗如, 王晋伟, 等. 黄土塬地区非饱和结构性黄土的强度特性研究[J]. 岩土工程学报, 2018, **40**(增刊 1): 189 – 197. (WANG Teng, ZHOU Ming-ru, WANG Jin-wei, et al. Experimental study on strength properties of unsaturated intact loess in loess tableland regions[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2018, **40**(S1): 189 – 197. (in Chinese))
- [24] LEROUUDIL S, TAVENAS F, BRUCY F, et al. Behavior of destructured natural clay[J]. *Journal of the Geotechnical Engineering Division, American Society of Civil Engineers*, 1979, **105**(6): 759 – 778.
- [25] 王永焱, 滕志宏, 岳乐平. 黄土中石英颗粒表面结构与中国黄土的成因[J]. 地理学报, 1982, **37**(1): 35 – 40. (WANG Yong-yan, TENG Zhi-hong, YUE Le-ping. et al. Surface texture of quartz grains under the scanning electron microscope and the genesis of loess in China[J]. *Acta Geographica Sinica*, 1982, **37**(1): 35 – 40. (in Chinese))