干化-湿化路径下红黏土微观结构演化规律研究

蔡国庆^{1,2*}, 刘祎^{1,2}, 徐润泽³, 李舰^{1,2}, 赵成刚^{2,4}

1. 北京交通大学城市地下工程教育部重点实验室, 北京 100044;

2. 北京交通大学土木建筑工程学院, 北京 100044;

3. 济南高新控股集团有限公司, 济南 250101;

4. 桂林理工大学土木与建筑工程学院, 桂林 541004

* E-mail: guoqing.cai@bjtu.edu.cn

收稿日期: 2020-05-18; 接受日期: 2020-07-13; 网络版发表日期: 2020-12-03

国家自然科学基金(批准号: 51722802, 51678041, U1834206)和北京市自然科学基金(编号: 8202038)资助项目

摘要 以桂林红黏土为研究对象, 借助扫描电子显微镜法(SEM)和压汞法(MIP)对不同初始孔隙比的压实土样和泥浆土样在干化-湿化路径下微观结构演化规律开展研究. 扫描电子显微镜结果表明, 饱和压实土样的微观结构主要由集聚体、集聚体间大孔隙和集聚体内小孔隙(颗粒间孔隙)组成; 饱和泥浆土样的微观结构主要由片层状的黏土颗粒和较为均匀的颗粒间孔隙构成. 压汞试验结果表明, 压实土样和泥浆土样的孔径分布曲线(PSD)在干化-湿化路径下分别呈现双峰和单峰分布特征; 干化-湿化路径下压实土样主要是集聚体间大孔隙的变化, 泥浆土样仅需要考虑颗粒间孔隙的变化; 与压实土样相比, 初始孔隙比对泥浆土样的孔隙变化影响很小.

关键词 红黏土, 微观结构, 孔隙变化, 干化-湿化路径, 压汞法

1 引言

土体的抗剪强度、压缩性、渗透性和持水特性等性质在很大程度上取决于土体的微观结构^[1,2], 尤其是特殊土, 对其独特微观结构的研究能够为探寻和改善土的工程性质提供重要依据^[3-5]. 红黏土作为一种特殊土, 具有物理性能差、力学性能好的特殊工程性质^[6], 因此, 对其微观结构的研究是十分必要的.

综合国内外研究现状, 关于土的微观结构研究主要侧重于土的初始结构, 而对其演化规律研究相对较少. 对于重塑土来说, 土体的微观结构依赖于土体的

制备方法和变形历史. 基于此, 有必要深入理解土体的微观结构在土样制备过程、压缩固结、干湿循环条件下的演化规律. 其中, 针对干湿循环条件下土的微观结构国内外有学者开展了相应的研究工作. Cui等^[7]研究了侧限状态下非饱和土的土-水特征曲线, 并观察不同吸力下的土的微观结构. 研究发现, 在湿化过程中, 孔隙逐渐趋于均匀, 认为这是土样中集聚体发生了变形, 导致集聚体间孔隙缩小造成的. Chen等^[8]和Otalvaro等^[9]研究表明, 土样的持水特性与其微观结构之间有很大关系. Li等^[1]和Romero^[10]研究发现土样在应力加载过程中主要是集聚体间孔隙的变化, 而在干湿循

引用格式: 蔡国庆, 刘祎, 徐润泽, 等. 干化-湿化路径下红黏土微观结构演化规律研究. 中国科学: 技术科学, 2021, 51: 221-230

Cai G Q, Liu Y, Xu R Z, et al. Microstructural changes in red clay on drying-wetting paths (in Chinese). Sci Sin Tech, 2021, 51: 221-230, doi: 10.1360/SST-2020-0203

环下主要是集聚体内孔隙的变化。叶为民等^[11]利用压汞试验结果揭示了不同温度和不同侧限约束条件下的高压实膨润土微观结构在干湿循环作用下的演化规律。曾召田等^[12]借助压汞法对膨胀土在干湿循环下的微观结构演化规律进行了试验研究, 研究表明由于反复胀缩变形, 膨胀土的微孔隙和小孔隙在干湿循环下逐渐向中孔隙和大孔隙转化。蔡光华等^[13]利用压汞法和扫描电子显微镜法研究了湿干循环下压实黏土微观结构特性, 研究发现, 随湿干循环次数的增加, 黏土孔隙率在增加, 这主要是集聚体内孔隙的贡献。袁志辉^[14]研究了原状黄土和重塑黄土在干湿循环下的微观结构演化规律, 研究表明, 中孔隙所占比例随干湿循环逐渐减小, 大孔隙所占比例增大, 小孔隙变化不大, 微孔隙基本无变化。万勇等^[15]对密度不同的黏土实施3次干湿循环, 结果表明, 初始密度越大, 大孔隙和微裂隙体积增幅越大。刘毅^[16]研究发现含水量和密实状态对土的微观结构有较大影响。值得注意的是, 上述研究中很少涉及不同结构的重塑土在干湿循环下的微观结构演化规律研究。

土体内部孔隙特征及分布情况变化是土体微观结构演化规律的最直接体现。压汞法和扫描电子显微镜法是目前用于土体微观结构研究最主要的2种方法, 许多学者曾借助这2种方法研究土体的微观结构并得出有效结论。胡瑞林等^[17]利用微结构图像处理系统对通过扫描电子显微镜法获得的黄土微观结构图像进行了分析。赵永红等^[18]对压力作用下砂岩的扫描电子显微镜图像进行了处理并分析了其微裂纹的变形。何俊等^[19]利用扫描电子显微镜法探究了土的微观结构表观孔隙率与宏观孔隙率不一致的问题。陈正发等^[20]利用扫描电子显微镜揭示了软黏土持水特性随温度变化的主要微观机理。Romero等^[21]基于压汞试验结果, 发现土样孔径分布曲线(PSD)峰值数随密度的增大而减小。吕海波等^[22]利用压汞试验揭示了土样固结压缩过程中的孔隙演化规律。Koliji等^[23]基于压汞试验结果提出了结构性土在吸力增大时的孔隙分布修正数学模型。Sasanian等^[24]和张平等^[25]基于压汞试验结果分析了不同方法干燥后土体孔隙分布的差异性。叶为民等^[26]利用压汞试验分析了蒙脱石充分自由水化后的微观结构特征。孙德安等基于压汞试验研究了原状土样和压实土样微观结构的差异性^[27]以及制样方法对土样内部孔隙分布的影响^[28]。

现有文献极少涉及不同孔隙结构的重塑红黏土在广吸力范围内的微观结构演化规律。为此, 本文以桂林红黏土为研究对象, 在不同放大倍数下, 用扫描电子显微镜(SEM)直观地观测了饱和压实土样和饱和泥浆土样微观结构的差异性。采用压汞法(MIP)对3种不同初始孔隙比的压实土样和泥浆土样在不同吸力阶段的微观结构进行测试, 利用PSD揭示不同孔隙结构土样在干化(吸力为10 kPa→286.7 MP)-湿化(吸力为286.7 MP→50 kPa)路径下的微观结构演化规律。

2 材料与方法

2.1 试验材料与试样制备

本文试验用土为取自桂林理工大学雁山校区的红黏土, 采用筛分法和密度计法结合测得, 其黏粒(小于2 μm)成分约占49.6%。主要矿物成分及基本物理性质指标如表1所示。

将取来的土样调配至最优含水率26%, 利用分层击实法制成所需干密度的土样, 最后利用真空饱和法将土样进行饱和, 由此制成压实土样。利用自制的单孔结构泥浆土制样装置制备泥浆土样, 取相应质量的风干土, 与土样液限两倍的蒸馏水混合搅拌形成泥浆, 施加固结荷载达到所需干密度, 3~5天后, 即制成泥浆土样。谈云志等^[29]研究发现, 红黏土与其他黏土的土-水特征曲线有很大不同, 尤其是干密度较低时比较突出。本文设置了3种较低的干密度进行试验研究, 分别为1.0, 1.1和1.2 g/cm³, 对应的初始孔隙比为1.7, 1.5和1.3。

2.2 吸力控制与测量技术

本文将轴平移法、接触式滤纸法和饱和盐溶液蒸

表1 桂林红黏土的矿物成分及基本物理性质指标

Table 1 Mineral compositions and physical indices of Guilin red clay

矿物成分	数值(%)	物理性质指标	数值
三水铝石	43.4	土粒比重	2.74
针铁矿	22.3	液限	67.3%
石英	17.9	塑限	38.1%
高岭石	16.4	塑性指数	29.2
		天然含水率	34.52%
		最优含水率	26%
		最大干密度	1.48 g/cm ³

气平衡法相结合以实现“干化(吸力为10 kPa→286.7 MP)-湿化(吸力为286.7 MP→50 kPa)”吸力路径的控制. 具体吸力控制与测量技术及体变测试方法详见文献[30].

2.3 微观结构试验

微观结构试验方法为扫描电子显微镜法和压汞法. 在微观测试之前, 利用冻干法对土样进行干燥. 所使用的扫描电子显微镜为KYKYEM6900扫描电子显微镜, 分辨率为3 nm. 在不同放大倍数下(200, 1000, 2000和5000 $\times$), 用扫描电子显微镜直观地观测了初始孔隙比为1.5的饱和压实土样和饱和泥浆土样微观结构的差异性. 选用Autopore9500-压汞仪进行压汞试验, 在干化-湿化路径5种不同的吸力下(干化过程中吸力为50, 200和71120 kPa, 湿化过程中吸力为21820和100 kPa)对压实土样和泥浆土样进行测试. 当液态汞被压入孔隙中, 被汞侵入的孔隙孔径是侵入压力的函数, 基于此, 即可测出PSD. 利用PSD揭示了3种不同初始孔隙比的不同孔隙结构土样在干化-湿化路径下的微观结构演化规律.

3 结果与分析

3.1 扫描电子显微镜法测试土样的微观结构

不同放大倍数下(200, 1000, 2000和5000 $\times$)初始孔隙比为1.5的饱和压实土样的扫描电子显微镜图片如图1所示. 通过扫描电子显微镜可以清楚地观测到集聚体和集聚体间孔隙. 压实土样的微观结构主要由集聚体、集聚体间大孔隙和集聚体内小孔隙(颗粒间孔隙)组成.

不同放大倍数下(200, 1000, 2000和5000 $\times$)初始孔隙比为1.5的饱和泥浆土样的扫描电子显微镜图片如图2所示. 通过扫描电子显微镜可以清楚地观测到片层状的黏土颗粒, 很难观测到集聚体. 此外, 泥浆土样的孔隙更加均匀, 只能观测到颗粒间的孔隙.

3.2 干化-湿化路径下压实土样微观结构演化规律

图3为压实土样在干化-湿化路径5种不同的吸力下的MIP测试结果, 即PSD. 其中 d 为孔径, V 为孔隙体积, s 为吸力. 干化路径下点A~C代表的吸力值分别为50, 200和71120 kPa, 湿化路径下点D和E代表的吸力值分别为21820和100 kPa. 图3(a)~(c)分别表示压实土样初始孔隙比为1.7, 1.5, 1.3的情况, 由此可见压实土样

图1 (网络版彩图)不同放大倍数下(200, 1000, 2000和5000倍)饱和压实土样的扫描电子显微镜图片

Figure 1 (Color online) Scanning electron microscopy images of saturated compacted soil samples at various magnifications (200, 1000, 2000 and 5000 $\times$).

图2 (网络版彩图)不同放大倍数下(200, 1000, 2000和 5000倍)饱和泥浆土样的扫描电子显微镜图片

Figure 2 (Color online) Scanning electron microscopy images of saturated reconstituted soil samples at various magnifications (200, 1000, 2000 and 5000×).

在干化-湿化路径下呈现双峰分布特征, 这与扫描电子显微镜结果相照应, 表明压实土样内同时存在集聚体间孔隙和集聚体内孔隙两个尺度的孔隙。

PSD与横轴所围成的面积等于单位质量土体的孔隙体积, 其峰值对应孔径表示各类孔隙中出现概率最大的孔径。由PSD算出单位质量土体的孔隙体积 V_v/m_s , 并作如下规定:

$$e_{MIP} = (V_v / m_s) \times G_s \times \rho_w, \quad (1)$$

式中, V_v 为压汞试验得到的孔隙体积; m_s 为土颗粒质量; G_s 为土粒比重; ρ_w 为纯水在4°C时的密度; e_{MIP} 是由PSD计算得到的孔隙比。

图4给出了干化-湿化路径下不同初始孔隙比的压实土样孔隙比的变化。干化路径下点A~C代表的吸力值分别为50, 200和71120 kPa, 湿化路径下点D和E代表的吸力值分别为21820和100 kPa。所有土样的实际测量孔隙比 e 在干化过程中减小, 湿化过程中增大。由PSD计算出的孔隙比 e_{MIP} 有相同的趋势, 即干化过程中减小, 湿化过程中增大。此外, e_{MIP} 始终小于 e , 这是由于压汞试验具有局限性, 存在非侵入性孔隙, 如封闭孔

隙、极小孔隙等^[31]。如图4所示, 非侵入性孔隙的孔隙比 e_u ($e - e_{MIP} = e_u$)范围为0.16~0.25。对于压实土样, 其PSD呈现双峰分布特征, 需要同时考虑集聚体内小孔隙变化(以孔隙比 e_m 量化)和集聚体间大孔隙变化(以孔隙比 e_M 量化), 即 $e_{MIP} = e_m + e_M$ 。因此, 需要确定小孔隙和大孔隙之间的界限孔径 d_b 。Romero等^[32]提供了两种方法以估算双峰分布特征PSD大孔隙和小孔隙的界限孔径 d_b : (1) 集聚体内孔隙可以定义为初始孔隙比 e_0 对土-水特征曲线没有影响的区域。根据Young-Laplace方程, 由不同初始孔隙比的压实土样的土-水特征曲线(图5, 其中 s 为吸力, S_r 为饱和度)可以估算 d_b 的范围为0.06~0.1 μm (对应吸力范围为3000~5000 kPa):

$$d_b = \frac{4T_s \cos \alpha}{s}, \quad (2)$$

式中, T_s 为水的表面张力(温度为25°C时, $T_s = 0.072$ N/m); α 为水与土颗粒的表面接触角(为了方便计算, 取为0°)。

(2) 可以直接从双峰分布特征PSD估算 d_b 的范围为0.1~0.3 μm (图3)。为了简化, 定义界限孔径 d_b 为0.1 μm。如图4所示, 所有压实土样的小孔孔隙比 e_m 在干化-湿化路径下基本保持不变(0.02~0.05)。大孔孔隙

图 3 (网络版彩图)干化-湿化路径下压实土样的孔径分布曲线。(a) 初始孔隙比为1.7; (b) 初始孔隙比为1.5; (c) 初始孔隙比为1.3

Figure 3 (Color online) Pore size distribution curves of compacted soil samples on drying-wetting path. (a) The initial void ratio is equal to 1.7; (b) the initial void ratio is equal to 1.5; (c) the initial void ratio is equal to 1.3

图 4 干化-湿化路径下压实土样孔隙比的变化

Figure 4 Void ratio changes of compacted soil samples on drying-wetting path.

图 5 (网络版彩图)压实土样的土-水特征曲线

Figure 5 (Color online) Soil water characteristic curves of compacted soil samples.

比 e_M 在干化过程中减小, 湿化过程中增大. 此外, 压实土样的大孔孔隙比 e_M 变化幅度随初始孔隙比的减小而减小.

图6给出了干化-湿化路径下不同初始孔隙比的压实土样PSD峰值和峰值对应孔径的变化. 干化路径下点A~C代表的吸力值分别为50, 200和71120 kPa, 湿化路径下点D和E代表的吸力值分别为21820和100 kPa. 如图6(a)所示, 压实土样的小孔孔隙峰值对应孔径 d_m 为常数, 约为0.02 μm , 与初始孔隙比和吸力无关. 大孔孔隙峰值对应孔径 d_M 在干化过程中增大, 湿化过程中减小. 如图6(b)所示, 压实土小孔孔隙峰值 Y_m 与吸力无关, 随初始孔隙比的减小而减小. 大孔孔隙峰值 Y_M 在干化过程中增大, 湿化过程中减小. 尽管压实土样 e_M 在干化过程中减小, 但是 d_M 和 Y_M 的增大表明, 具有大孔孔隙峰值对应孔径的大孔隙在干化过程中增多. 湿化过程中孔隙变化呈现相反的趋势. 出现该现象的原因有两个: (1) 黏粒组成的集聚体及粉粒、砂粒共同形成土的骨架结构. 与粉粒和砂粒相比, 集聚体对失水过程更为敏感. 干化路径下, 低吸力范围内集聚体与集聚体之间的孔隙失水收缩, 高吸力范围内集聚体内孔隙失水收缩, 从而导致粉粒、砂粒与集聚体之间的孔隙增大. (2) 失水过程中集聚体内可能出现了一定数量的微裂隙. 此外, 在相同吸力下, Y_M 随初始孔隙比的减小而减小.

3.3 干化-湿化路径下泥浆土样微观结构演化规律

图7为泥浆土样在干化-湿化路径5种不同的吸力

下的MIP测试结果, 即PSD. 其中 d 为孔径, V 为孔隙体积, s 为吸力. 干化路径下点A~C代表的吸力值分别为50, 200和71120 kPa, 湿化路径下点D和E代表的吸力值分别为21820和100 kPa. 图7(a)~(c)分别表示泥浆土样初始孔隙比为1.7, 1.5, 1.3的情况, 由此可见, 泥浆土样在干化-湿化路径下呈现单峰分布特征, 这与扫描电子显微镜结果相对应, 表明泥浆土样内分布有较为均匀的颗粒间孔隙.

图8给出了干化-湿化路径下不同初始孔隙比的泥浆土样孔隙比的变化. 干化路径下点A~C代表的吸力值分别为50, 200和71120 kPa, 湿化路径下点D和E代表的吸力值分别为21820和100 kPa. 所有土样的实际测量孔隙比 e 在干化过程中减小, 湿化过程中增大. 由PSD计算出的孔隙比 e_{MIP} 有相同的趋势, 即干化过程中减小, 湿化过程中增大. 此外, 泥浆土样 e_{MIP} 始终小于 e , 这是由于压汞试验具有局限性, 存在非侵入性孔隙, 如封闭孔隙、极小孔隙等^[31]. 如图8所示, 非侵入性孔隙的孔隙比 e_u ($e - e_{MIP} = e_u$)范围为0.19~0.25. 对于泥浆土样, 其PSD呈现单峰分布特征, 仅需要考虑颗粒间孔隙变化(以孔隙比 e_m 量化). 换言之, 假设 $e_{MIP} \approx e_m$. 所有泥浆土样的颗粒间孔隙比 e_m 在干化过程中减小, 湿化过程中增大. 颗粒间孔隙比 e_m 变化幅度随初始孔隙比的减小而减小.

图9给出了干化-湿化路径下不同初始孔隙比的泥浆土样PSD峰值和峰值对应孔径的变化. 干化路径下点A~C代表的吸力值分别为50, 200和71120 kPa, 湿化路径下点D和E代表的吸力值分别为21820和100 kPa.

图6 (网络版彩图)干化-湿化路径下压实土样PSD峰值和峰值对应孔径的变化. (a) 压实土样峰值对应孔径的变化; (b) 压实土样峰值大小的变化

Figure 6 (Color online) Changes in peak magnitude and pore size of compacted soil samples on drying-wetting path. (a) Changes in pore size of compacted soil samples; (b) changes in peak magnitude of compacted soil samples.

图 7 (网络版彩图)干化-湿化路径下泥浆土样的孔径分布曲线。(a) 初始孔隙比为1.7; (b) 初始孔隙比为1.5; (c) 初始孔隙比为1.3

Figure 7 (Color online) Pore size distribution curves of reconstituted soil samples on drying-wetting path. (a) The initial void ratio is equal to 1.7; (b) the initial void ratio is equal to 1.5; (c) the initial void ratio is equal to 1.3.

图 8 干化-湿化路径下泥浆土样孔隙比的变化

Figure 8 Void ratio changes of reconstituted soil samples on drying-wetting path.

与压实土样相比(图6), 如图9所示, 泥浆土样峰值对应孔径 d_m 和孔隙峰值 Y_m 在干化过程中略减小, 在湿化过程中略增大. 初始孔隙比对 d_m 和 Y_m 影响很小.

4 结论

以桂林红黏土为研究对象, 借助SEM和MIP对不同初始孔隙比的压实土样和泥浆土样在干化-湿化路径下微观结构演化规律开展研究. 主要得出以下结论.

(1) 在不同放大倍数下, 用SEM直观地观测了饱和和压实土样和饱和泥浆土样微观结构的差异性. 压实土样的微观结构主要由集聚体、集聚体间大孔隙和集聚体内小孔隙(颗粒间孔隙)组成. 泥浆土样的微观结构主要由片层状的黏土颗粒和较为均匀的颗粒间孔隙构成.

(2) 不同初始孔隙比的压实土样的PSD在干化-湿

图 9 (网络版彩图)干化-湿化路径下泥浆土样PSD峰值和峰值对应孔径变化。(a) 泥浆土样峰值对应孔径的变化; (b) 泥浆土样峰值大小的变化

Figure 9 (Color online) Changes in peak magnitude and pore size of reconstituted soil samples on drying-wetting path. (a) Changes in pore size of reconstituted soil samples; (b) changes in peak magnitude of reconstituted soil samples.

化路径下均呈现双峰分布特征, 不同初始孔隙比的泥浆土样的PSD在干化-湿化路径下均呈现单峰分布特征。

(3) 所有土样的实际测量孔隙比 e 在干化过程中减小, 湿化过程中增大。由PSD计算出的孔隙比 e_{MIP} 具有相同的趋势。此外, e_{MIP} 始终小于 e , 这是由于压汞试验具有局限性, 存在非侵入性孔隙。

(4) 压实土样在干化-湿化路径下主要是大孔隙比的变化, 其变化幅度随初始孔隙比的减小而减小。小孔隙峰值对应孔径为常数, 与初始孔隙比和吸力无

关。小孔隙峰值与吸力无关, 随初始孔隙比的减小而减小。大孔隙峰值对应孔径和大孔隙峰值在干化过程中增大, 湿化过程中减小。在相同吸力下, 大孔隙峰值随初始孔隙比的减小而减小。

(5) 泥浆土样在干化-湿化路径下仅需要考虑颗粒间孔隙的变化。颗粒间孔隙比在干化过程中减小, 湿化过程中增大, 变化幅度随初始孔隙比的减小而减小。与压实土样相比, 泥浆土样孔隙峰值和峰值对应孔径在干化过程中略减小, 在湿化过程中略增大。初始孔隙比对孔隙峰值和峰值对应孔径的影响很小。

参考文献

- Li X, Zhang L M. Characterization of dual-structure pore-size distribution of soil. *Can Geotech J*, 2009, 46: 129–141
- Shi B, Wang B J, Jiang H T. Quantitative evaluation of microstructure characteristics of compacted cohesive soil (in Chinese). *Chin Sci Bull*, 1996, 41: 438–441 [施斌, 王宝军, 姜洪涛. 击实黏性土微结构特性的定量评价. 科学通报, 1996, 41: 438–441]
- Shi B. Review and prospect of research on microstructure of clayey soil (in Chinese). *J Eng Geol*, 1996, 4: 39–44 [施斌. 黏性土微结构研究回顾与展望. 工程地质学报, 1996, 4: 39–44]
- Zhang X W, Kong L W. Research on variability characteristics of micropore of Zhanjiang clay under ambient temperature and pressure, normal atmospheric (in Chinese). *Sci Sin-Tech*, 2014, 44: 189–200 [张先伟, 孔令伟. 常温、常压、常态的大气环境下黏性土微观孔隙的缓慢变异特征. 中国科学: 技术科学, 2014, 44: 189–200]
- Zhang X W, Kong L W, Chen C, et al. Experimental investigation on relative contribution of hot and humid weather and heavy rainfall in disintegration of basalt residual soil (in Chinese). *Sci Sin-Tech*, 2016, 46: 1175–1184 [张先伟, 孔令伟, 陈成, 等. 炎热多雨和突降暴雨气候影响下玄武岩残积土的崩解试验研究. 中国科学: 技术科学, 2016, 46: 1175–1184]
- Zhao Y W, Kong L W, Guo A G, et al. Strength properties and swelling-shrinkage behaviors of compacted lateritic clay in Guangxi (in Chinese). *Rock Soil Mech*, 2004, 25: 369–373 [赵颖文, 孔令伟, 郭爱国, 等. 广西红黏土击实样强度特性与胀缩性能. 岩土力学, 2004, 25: 369–373]
- Cui Y J, Oiseau C, Delag P. Microstructure changes of a confined swelling soil due to suction controlled hydration. In: *Unsaturated Soils: Proceedings of the Third International Conference on Unsaturated Soils. UNSAT 2002*, 10–13 March 2002. Recife: CRC Press, 2002. 593

- 8 Chen B, Qian L, Ye W M, et al. Soil-water characteristic curves of Gaomiaozi bentonite. *Chin J Rock Mech Geotech Eng*, 2006, 25: 788–793
- 9 Otalvaro I F, Neto M P C, Delage P, et al. Relationship between soil structure and water retention properties in a residual compacted soil. *EngGeol*, 2016, 205: 73–80
- 10 Romero E. A microstructural insight into compacted clayey soils and their hydraulic properties. *EngGeol*, 2013, 165: 3–19
- 11 Ye W M, Wan M, Chen B. Micro-structural behaviors of densely compacted GMZ01 bentonite under drying/wetting cycles (in Chinese). *Chin J Geotech Eng*, 2011, 33: 1173–1177 [叶为民, 万敏, 陈宝. 干湿循环条件下高压实膨润土的微观结构特征. *岩土工程学报*, 2011, 33: 1173–1177]
- 12 Zeng Z T, Lü H B, Zhao Y L, et al. Study of pore size distribution of expansive soil during wetting-drying cycle and its application (in Chinese). *Rock Soil Mech*, 2013, 34: 322–328 [曾召田, 吕海波, 赵艳林, 等. 膨胀土干湿循环过程孔径分布试验研究及其应用. *岩土力学*, 2013, 34: 322–328]
- 13 Cai G H, Xue Q, Liu S Y, et al. Influence of wetting-drying cycles on desiccation cracking of compacted clay (in Chinese). *J Eng Geol*, 2014, 22: 1046–1051 [蔡光华, 薛强, 刘松玉, 等. 湿干循环作用对压实黏土干裂特性的影响. *工程地质学报*, 2014, 22: 1046–1051]
- 14 Yuan Z H. Research on change mechanism of strength and microstructure of loess under wetting-drying cycle (in Chinese). Xi'an: Chang'an University, 2015 [袁志辉. 干湿循环下黄土的强度及微结构变化机理研究. 西安: 长安大学, 2015]
- 15 Wan Y, Xue Q, Wu Y, et al. Mechanical properties and micromechanisms of compacted clay during drying-wetting cycles (in Chinese). *Rock Soil Mech*, 2015, 36: 2815–2824 [万勇, 薛强, 吴彦, 等. 干湿循环作用下压实黏土力学特性与微观机制研究. *岩土力学*, 2015, 36: 2815–2824]
- 16 Liu Y. Investigation on the swelling properties and microstrure mechanism of compacted gaomiaozi bentonite (in Chinese). *J Eng Geol*, 2016, 24: 451–458 [刘毅. 高庙子膨润土水化膨胀特性及其微观机理研究. *工程地质学报*, 2016, 24: 451–458]
- 17 Hu R L, Li C F, Wang S J, et al. Approach to the strength behaviors and microstructural changes of loess under dynamic load (in Chinese). *Chin J Geotech Eng*, 2000, 22: 174–181 [胡瑞林, 李焯芬, 王思敬, 等. 动荷载作用下黄土的强度特征及结构变化机理研究. *岩土工程学报*, 2000, 22: 174–181]
- 18 Zhao Y H, Liang H H, Xiong C Y, et al. Deformation measurement of rock damage by digital image orrelation method (in Chinese). *Chin J Rock Mech Geotech Eng*, 2002, 21: 73–76 [赵永红, 梁海华, 熊春阳, 等. 用数字图像相关技术进行岩石损伤的变形分析. *岩石力学与工程学报*, 2002, 21: 73–76]
- 19 He J, Shi J Y. Calculation of saturated permeability coefficient of bentonite (in Chinese). *Chin J Rock Mech Geotech Eng*, 2007, 26: 3920–3925 [何俊, 施建勇. 膨润土中饱和和渗透系数的计算. *岩石力学与工程学报*, 2007, 26: 3920–3925]
- 20 Chen Z F, Zhu H H, Yan Z G. Experimental study on soil-water characteristics and micromechanism of Shanghai soft clay after high temperatures (in Chinese). *Chin J Geotech Eng*, 2019, 41: 1914–1920 [陈正发, 朱合华, 闫治国. 高温后上海软黏土的土-水特性及微观机理试验研究. *岩土工程学报*, 2019, 41: 1914–1920]
- 21 Romero E, Gens A, Lloret A. Water permeability, water retention and microstructure of unsaturated compacted Boom clay. *Eng Geol*, 1999, 54: 117–127
- 22 Lü H B, Wang R, Zhao Y L, et al. Study of structure characteristics evolution of soft clay by pore size distribution test (in Chinese). *Rock Soil Mech*, 2003, 24: 573–578 [吕海波, 汪稔, 赵艳林, 等. 软土结构性破损的孔径分布试验研究. *岩土力学*, 2003, 24: 573–578]
- 23 Koliji A, Laloui L, Cusinier O, et al. Suction induced effects on the fabric of a structured soil. *Transp Porous Media*, 2006, 64: 261–278
- 24 Sasanian S, Newson T A. Use of mercury intrusion porosimetry for microstructural investigation of reconstituted clays at high water contents. *Eng Geol*, 2013, 158: 15–22
- 25 Zhang P, Fang Y G, Yan X Q, et al. Study of different dry methods for drying remolded bentonite sample with mercury intrusion test (in Chinese). *Rock Soil Mech*, 2011, 32: 388–391 [张平, 房营光, 闫小庆, 等. 不同干燥方法对重塑膨润土压汞试验用土样的影响试验研究. *岩土力学*, 2011, 32: 388–391]
- 26 Ye W M, Huang Y. Microstructural changing characteristics of densely compacted bentonite with suction under unconfined hydrating conditions (in Chinese). *Chin J Rock Mech Geotech Eng*, 2015, 24: 4570–4575 [叶为民, 黄雨. 自由膨胀条件下高压密膨胀黏土微观结构随吸力变化特征. *岩石力学与工程学报*, 2015, 24: 4570–4575]
- 27 Sun D A, Gao Y, Liu W J, et al. Soil-water characteristics and pore-size distribution of lateritic clay (in Chinese). *Chin J Geotech Eng*, 2015, 37: 351–356 [孙德安, 高游, 刘文捷, 等. 红黏土的土水特性及其孔隙分布. *岩土工程学报*, 2015, 37: 351–356]
- 28 Sun D A, Gao Y. Water retention behaviour of soils with different preparations (in Chinese). *Chin J Geotech Eng*, 2015, 37: 91–97 [孙德安, 高游. 不同制样方法非饱和土的持水特性研究. *岩土工程学报*, 2015, 37: 91–97]

- 29 Tan Y Z, Kong L W, Guo A G, et al. Analysis of water holding capacity and mechanism of compacted laterite soil (in Chinese). *Rock Soil Mech*, 2011, 32: 334–338 [谈云志, 孔令伟, 郭爱国, 等. 压实红黏土的持水性能与机制分析. *岩土力学*, 2011, 32: 334–338]
- 30 Cai G Q, Liu Y, Xu R Z, et al. Experimental investigation for soil-water characteristic curve of red clay in full suction range (in Chinese). *Chin J Geotech Eng*, 2019, 41: 13–16 [蔡国庆, 刘伟, 徐润泽, 等. 全吸力范围红黏土干湿循环土-水特征曲线. *岩土工程学报*, 2019, 41: 13–16]
- 31 Romero E, Simms P H. Microstructure investigation in unsaturated soils: A review with special attention to contribution of mercury intrusion porosimetry and environmental scanning electron microscopy. *Geotech Geol Eng*, 2008, 26: 705–727
- 32 Romero E, Della Vecchia G, Jommi C. An insight into the water retention properties of compacted clayey soils. *Géotechnique*, 2011, 61: 313–328

Microstructural changes in red clay on drying-wetting paths

CAI GuoQing^{1,2}, LIU Yi^{1,2}, XU RunZe³, LI Jian^{1,2} & ZHAO ChengGang^{2,4}

¹ Key Laboratory of Urban Underground Engineering of Ministry of Education, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China;

² School of Civil Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China;

³ Jinan Hi-tech Holding Group, Jinan 250101, China;

⁴ School of Civil Engineering, Guilin University of Technology, Guilin 541004, China

Taking Guilin red clay as the research object, scanning electron microscopy (SEM) and mercury intrusion porosimetry (MIP) tests were conducted to study the microstructural evolution laws of compacted and reconstituted soils with different initial void ratios on drying-wetting paths. The SEM results show that the microstructure of the saturated compacted soils mainly comprises aggregates, interaggregate pores, and intraaggregate pores (interparticle pores). The microstructure of the saturated reconstituted soils mainly comprises layered clay particles and relatively uniform interparticle pores. The MIP results show that the pore size distribution curves of the compacted and reconstituted soils exhibit a bimodal and a unimodal distribution, respectively. On the drying-wetting paths, the changes in the interaggregate pores are the main factor for the compacted soils, while the changes in the interparticle pores are the only factor for the reconstituted soils. Compared with the compacted soils, the initial void ratio has less effect on the pore change of the reconstituted soils.

red clay, microstructure, pore change, drying-wetting paths, mercury intrusion porosimetry

doi: [10.1360/SST-2020-0203](https://doi.org/10.1360/SST-2020-0203)