

Rapid #: -19004250

CROSS REF ID: 7593555210005671

LENDER: DGU :: Lauinger Library

BORROWER: LT1 :: Blake Library

TYPE: Article CC:CCG

JOURNAL TITLE: Yantu lixue

USER JOURNAL TITLE: □□□□/#/□□□□ [[Yen T'U Li Hsueh]]

ARTICLE TITLE: □□□□/#/□□□□ [[Yen T'U Li Hsueh]]

ARTICLE AUTHOR:

VOLUME: 42

ISSUE: 9

MONTH:

YEAR: 2021

PAGES: 2437

ISSN: 1000-7598

OCLC #:

Processed by RapidX: 4/28/2022 8:20:50 AM

This material may be protected by copyright law (Title 17 U.S. Code)

**This material may be
protected by copyright law
(Title 17 U.S. Code).**

DOI: 10.16285/j.rsm.2020.1784

水力耦合作用下非饱和压实黄土 细观变形机制试验研究

葛苗苗^{1,2}, 李 宁², 盛岱超³, 朱才辉², PINEDA Jubert⁴

(1. 温州大学 建筑工程学院, 浙江 温州 325035; 2. 西安理工大学 岩土工程研究所, 陕西 西安 710048;
3. 悉尼科技大学 土木环境系, 悉尼, 澳大利亚; 4. 纽卡斯尔大学 土木工程系, 纽卡斯尔, 澳大利亚)

摘 要: 对两种状态的压实黄土进行了一维常含水率压缩试验及常应力增湿试验, 结合压汞法及扫描电镜等细观结构研究手段, 对压缩以及增湿作用下压实黄土的细观结构演化进行分析, 进一步对压实黄土在水力耦合作用下的细观变形机制进行探讨。研究表明: 常含水率压缩下, 压实黄土饱和度增大, 可以在进一步压缩下发展为饱和土的固结过程; 细观层面上非饱和压实黄土的压缩是其大孔隙在应力作用下塌陷减少的结果, 而小孔隙分布在压缩中不受影响; 常竖向应力下增湿, 压实黄土的湿化变形随着竖向应力的增大呈现先增大后减小的趋势, 最大湿化应变发生在压实应力附近。细观层面上, 湿化作用下, 颗粒及团聚体之间的黏结弱化, 发生崩塌滑移, 大孔隙塌陷减小而小孔隙增多, 湿化后土体结构趋于均匀稳定。而压实黄土的蠕变也是在恒定荷载作用下土颗粒或团聚体的蠕滑、大孔隙进一步压缩引起的。结合研究结果, 进一步从细观角度对黄土高填方施工期及工后期沉降进行总结阐述。

关 键 词: 压实黄土; 一维压缩及增湿试验; 细观试验; 孔隙分布; 湿化变形

中图分类号: TU411

文献标识码: A

文章编号: 1000-7598(2021)09-2437-12

Experimental investigation of microscopic deformation mechanism of unsaturated compacted loess under hydraulic coupling conditions

GE Miao-miao^{1,2}, LI Ning², SHENG Dai-chao³, ZHU Cai-hui², PINEDA Jubert⁴

(1. College of Civil Engineering and Architecture, Wenzhou University, Wenzhou, Zhejiang 325035, China; 2. Institute of Geotechnical Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an, Shaanxi 710048, China; 3. University of Technology Sydney, Sydney, Australia; 4. The University of Newcastle, Newcastle, Australia)

Abstract: In this paper, a large number of one-dimensional tests, including constant water content compression and soaking under constant stress, are conducted. The microstructure evolution and deformation mechanism of the compacted loess under loading and wetting conditions are investigated with mercury intrusion porosimetry (MIP) and scanning electron microscope (SEM) analysis. Experimental results show that, as the saturation of compacted loess increases at a constant moisture content, it will develop into a saturated consolidation process under further compression. At the microscopic level, the compression of the unsaturated compacted loess results from the collapse reduction of its macropores, while the distribution of micropores is unaffected in compression. During increasing wetting under the constant vertical stress, the wetting deformation of compacted loess shows a trend of increasing and then decreasing with the increase of vertical stress, and the maximum wetting strain occurs near the compaction stress. Under wetting conditions, the bonds between particles and aggregations are weakened, and the particles and agglomerates collapse and slip, resulting in the reduction of macropores and the increase of micropores. Also, the soil structure tends to be more uniform and stable after wetting. The creep of compacted loess is caused by the further slippage of particles under constant load and further compression of macropores. In addition, the settlement law of compacted loess fill is summarized from the construction and post-construction period according to testing results.

Keywords: compacted loess; one-dimensional compression and wetting test; microstructure analysis; pore size distribution; deformation upon wetting

收稿日期: 2020-11-28

修回日期: 2021-04-22

基金项目: 国家自然科学基金项目 (No.52008317); 陕西省岩土与地下空间工程重点实验室开放基金项目 (No.YT202006)。

This work was supported by the National Nature Science Foundation of China(52008317) and the Open Fund Projects of Shaanxi Key Laboratory of Geotechnical and Underground Space Engineering(YT202006).

第一作者简介: 葛苗苗, 女, 1988 年生, 博士, 讲师, 主要从事非饱和土水力耦合特性及细观结构试验研究。E-mail: gemiaomiaol63@163.com

通讯作者: 李宁, 男, 1959 年生, 博士, 教授, 主要从事岩体动力学特性的试验研究与裂隙动力学数值仿真模型分析、寒区冻土力学与工程研究的教学和科研工作。E-mail: ningli@xaut.edu.cn

1 引言

黄土是以粉粒为主,具有松散结构的第四纪风成沉积物。黄土的结构性使其具有遇水湿陷性,这也使得黄土作为一种特殊土而备受关注^[1-2]。近年来,我国黄土高原地区涌现了一大批黄土高填方工程^[3-4]。长期的工后沉降、不均匀沉降、高边坡稳定性等问题是这类工程关注的重点,而这些问题与复杂自然环境下压实黄土的变形密切相关。对此,已有文献通过现场监测^[4]及室内试验^[5-6]进行研究。然而,土体的宏观力学特性与其细观结构息息相关,例如,土的渗透性受联通的孔隙度的影响^[7],变形通常与大孔隙结构在外荷作用下的塌陷有关^[8-10],增湿会使颗粒黏结丧失,大孔隙塌陷,而减湿会使团聚体收缩,从而在土体内形成新的孔隙结构^[11-12],非饱和土土-水特征曲线还可通过压汞试验结果进行预测^[13-14]。因此,很有必要从细观结构对非饱和压实黄土在水力耦合作用下的宏观变形机制进行研究,从而进一步从细观角度理解黄土高填方沉降。

CT 技术最先用于黄土细观结构的研究,雷胜友等^[15]对原状黄土三轴剪切及增湿试验过程进行 CT 扫描,并结合损伤理论,对试验过程中黄土的细观结构变化进行分析。为了便于观察三轴试验过程中土的细观结构,陈正汉等^[16]研制了配套 CT 机的非饱和土三轴仪,采用该仪器,陈正汉^[17]、朱元清^[18]等对膨胀土及黄土不同应力路径下的细观结构演化规律进行了研究;李加贵等^[19]通过 CT 扫描技术,对 Q₃ 黄土侧向卸荷过程中的细观结构演化进行研究;郭楠等^[20]通过 CT 技术,对重塑黄土湿化

过程中的细观结构演化进行了研究。近年来,压汞 (mercury intrusion porosimetry, 简称 MIP) 试验技术也被用于分析黄土细观结构,蒋明镜等^[21]通过 MIP 技术对原状及重塑黄土在应力路径试验前后孔隙结构变化进行试验,分析了宏观力学特性与土体孔隙结构之间的联系;邵显显等^[9]对压实黄土加载及增减湿前后孔隙结构进行 MIP 试验并分析其变化规律;Wang 等^[22]对饱和原状黄土加载过程中孔隙结构进行 MIP 试验,并揭示加载过程中变形细观机制。

以上关于黄土细观结构的研究多针对原状黄土展开,而原状黄土的结构性使其具有与压实黄土十分不同的力学特性。此外,黄土高填方工程中填料多为非饱和的压实黄土,因此,研究压实黄土在加载及增减湿过程中细观结构演化,揭示其宏观变形机制对进一步理解黄土高填方沉降变形具有重要意义。基于此,本文对西安黄土进行一维压缩及常应力下增湿试验,结合 MIP 法及扫描电镜 (scanning electron microscope, 简称 SEM) 等细观研究手段,对压实黄土在一维压缩及湿化过程中的细观结构演化进行研究。在试验结果基础上,从细观角度进一步理解黄土高填方施工期及工后期沉降。

2 试验材料, 方案及仪器

2.1 试验材料

本文试验材料取自西安某露天原状黄土边坡,取土深度为 2 m,为粉质黏土,其基本物理性质及 XRD 测得主要矿物成分如表 1 所示,室内标准击实曲线如图 1 所示。

表 1 试验黄土基本物理性质及主要矿物成分

Table 1 Basic physical properties and main mineral components of the tested loess

相对密度 G_s	黏粒含量/% (<0.002 mm)	粉粒含量/% (<0.075 mm)	砂粒含量 /%	液限 w_L	塑性指数 I_p	最大干密度 $\rho_{dmax}/(g \cdot cm^{-3})$	最优含水率 $w_{op}/\%$	主要矿物成分/%			
								石英	白云母	钠长石	方解石
2.7	19.69	77.31	2	35.8	15.6	1.68	17.4	35.1	21.2	20.9	14.3

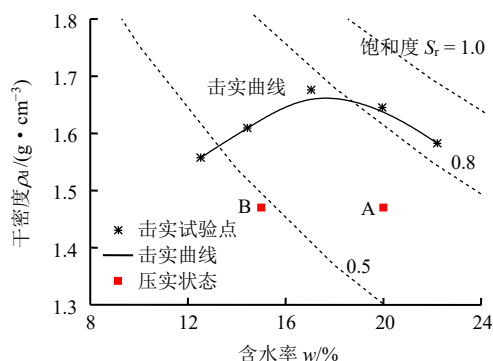


图 1 标准击实曲线

2.2 试验方案

填方工程的设计压实度一般不应低于 0.90^[23],但由于现场施工环境复杂,加之地形限制,造成部分填方实际压实度低于设计值^[24]。因此,本文选取 A、B 两种不同初始状态的压实黄土进行试验研究,其含水率为 $w_{op} \pm 2.5\%$,压实度控制为 0.88,两种压实状态在击实平面位置见图 1 所示,初始基本参数见表 2。压实黄土试样的制备通过配有应力传感器反力架,以 6 kPa/min 的速率将配置好的一定含水率、一定质量的松散土样缓慢压入置于不锈钢模具内的环刀中,通过监测压样过程中应力变化,分析

应力变化速率得到所需压实应力 σ_{ac} 。为使得试样的密度更加均匀，试样在压实应力下静置 20 min 后按照 30 kPa/min 速率卸载取出。初始吸力 s_{ac} 采用滤纸法测量，本文选用 Whatman 42 号滤纸。

表 2 初始状态下压实黄土的基本性质
Table 2 Basic parameters for the compacted loess in initial compacted state

编号	$\rho_d / (g \cdot m^{-3})$	e_0	S_{r0}	σ_{ac} / kPa	s_{ac} / kPa
A	1.47	0.83	0.63	512	98
B	1.47	0.83	0.49	920	280

注：压实应力为将土样压实至该状态下时所需的最大应力。 e_0 、 S_{r0} 分别为试验前试样的初始孔隙比，初始饱和度。

对以上两种压实黄土均进行了下述常含水率压缩试验、常含水率增湿试验两种一维压缩试验，并对状态 B 试样进行了一维蠕变试验。

(1) 常含水率压缩试验。对两种状态的黄土试样分别在初始含水率下加载至竖向应力 2 400 kPa 和 2 560 kPa。对状态 A 在竖向应力为 200、500、800、2 400 kPa 下的细观结构进行试验研究。对状态 B 在竖向应力 400、900、1 200、2 560 kPa 下的细观结构进行试验研究。细观试验所用试样通过进行相同的平行的试验获取。

(2) 常含水率增湿试验。采用单线法对压实黄土在不同竖向应力下进行增湿，并对增湿前后细观结构进行观察。两种状态下的增湿竖向应力如表 3 所示。对于表中 (M) 标记的竖向压力下湿陷后的黄土试样进行细观试验。为保证试样完全饱和，增湿通过在试样底部施加持续 3 d 的 10 kPa 反压实现。表 4 给出了不同应力水平下试验前后试样的孔隙比 e_0 、 e_f 及饱和度 S_{r0} 、 S_{rf} ，其中最终饱和度 S_{rf} 根据试样最终体积及含水率计算而来。表中数据表明，按照本文方法，试样增湿后饱和度均达到 0.98 以上，说明通过连续施加 3 d 下 10 kPa 反压可以使试样达到完全饱和。

(3) 蠕变试验。对饱和及非饱和状态 B 压实黄土在 1 200 kPa 下进行为期 80 d 的一维蠕变试验，并对蠕变 1 d 及蠕变 80 d 后的试样进行细观试验。

以上一维压缩试验均为分步加载，加载比为 1。为保证试样变形的充分发展，除增湿阶段 (3 d) 及蠕变试验 (80 d) 外，其余每级荷载均持续 1 d。

表 3 不同初始状态下的增湿饱和和竖向应力
Table 3 Soaking stresses at different initial compacted states

初始状态	竖向湿陷应力 σ_v / kPa
A	13.5(M), 50, 100, 200(M), 500(M), 800(M)
B	13.5(M), 50, 200, 400(M), 500, 900(M), 1 200(M)

表 4 不同应力水平下增湿前后试样状态参数
Table 4 Initial and final states for soil prior and after soaking at different stress levels

状态	应力 σ_v / kPa	初始状态		最终状态		备注
		e_0	S_{r0}	e_f	S_{rf}	
A	200	0.81	0.66	0.78	0.67	增湿前
A	200	0.81	0.66	0.76	0.98	增湿后
A	500	0.84	0.64	0.70	0.76	增湿前
A	500	0.84	0.66	0.71	0.99	增湿后
A	800	0.82	0.66	0.63	0.84	增湿前
A	800	0.83	0.65	0.66	0.98	增湿后
B	400	0.82	0.50	0.81	0.50	增湿前
B	400	0.82	0.50	0.80	0.99	增湿后
B	900	0.83	0.50	0.74	0.54	增湿前
B	900	0.82	0.50	0.68	0.99	增湿后
B	1 200	0.82	0.50	0.72	0.55	增湿前
B	1 200	0.82	0.49	0.67	0.99	增湿后

2.3 试验仪器及原理

为了避免长期压缩过程中试样的水分损失，将普通固结仪进行改进，具体如图 2 所示。该固结仪上下均设有进排水通道，在排水通道关闭时能够保证试样处于完全密封状态，从而减小试验过程中的水分损失。同时也可以对通道底部的排水通道施加反压，实现对试样的饱和。在本文常含水率压缩过程中，保持底部通道关闭，打开顶部通道排气/排水（仅发生在非饱和土压缩饱和后）。在通过从试样底部施加反压进行饱和时，同时打开上下阀门，使水在 10 kPa 反压下从底部通道进入试样，进一步从顶部通道排出。

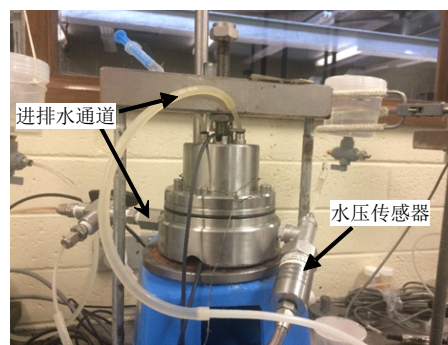


图 2 改进一维固结仪
Fig.2 Modified 1-D oedometer

细观研究通过定量分析方法 MIP 和定性分析方法 SEM 来实现。压汞法的原理是给不浸润液体汞施加压力 p ，使其进入土体孔隙。假设土体空隙为圆柱体，则可以通过 Washburn 方程^[25]推算孔隙大小：

$$p = - \frac{n \sigma_{Hg} \cos \theta_{nw}}{d} \quad (1)$$

式中： d 为孔径； n 为常数，不浸润液体取值为4； σ_{Hg} 为汞的表面张力，25℃时取值0.484 N/m； θ_{nw} 为土体孔隙壁与汞之间的接触角，对于黏土矿物，一般取139°~147°^[26]；对于方解石取146°，而石英则取132°~147°^[27]。由于本文试验黄土石英含量最高，因此取文献^[27]建议的石英接触角均值140°。

采用压汞法测定孔隙大小分布，主要是通过浸入孔隙的汞体积与汞浸入所需的压力之间的关系来获取。在已知一定压力下浸入汞体积后，可以通过下式^[12]计算土样的孔隙比 e_{MIP} ：

$$e_{MIP} = \frac{V_{mercury}}{V_s} \quad (2)$$

式中： $V_{mercury}$ 为某压力下压入土样孔隙内汞的体积； V_s 为土颗粒体积；在计算得不同压力下 e_{MIP} 后，孔径密度分布曲线（pore diameter distribution，简称PSD）可由下式获取^[12]：

$$f(\lg x_m) = \frac{\delta e_{MIP}}{\delta(\lg d)} \quad (3)$$

式中： x_m 为土中的孔隙中值。

本文的压汞试验选用美国麦克公司 AutoPore IV 9500 型压汞仪(Micromeritics®)，如图3所示。该仪器可以施加的最大压力为228 MPa，所测量的孔径范围为0.005 5~360 μm。扫描电镜选用场发射电子显微镜 Zeiss Sigma VP FESEM，其扫描精度可以达到放大100 000倍。



图3 AutoPore IV 9500 型压汞仪
Fig.3 AutoPore IV 9500 MIP apparatus

压汞试验和扫描电镜均要求试样完全干燥，为避免干燥过程对微观结构的影响，本文选取了快速（冷冻干燥法^[28]）。此外，由于压汞试验在边长为5mm

的小立方体试样上进行。为检查试样的代表性，在同一试样中部和边缘分别取样进行孔隙分布检测，结果发现同一试样不同位置处 PSD 基本一致，具体如图4所示。因此，本文细观试验在试样中部取样检测具有一定的代表性。

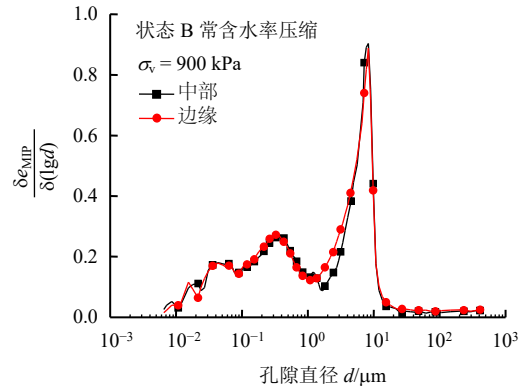


图4 同一试样不同位置处孔隙密度分布曲线
Fig.4 PSD for specimens taken at different positions in 1D specimen

3 试验结果分析

3.1 常含水率下压缩

3.1.1 e - $\lg \sigma_v$ 及饱和度

图5为压实黄土在常含水率压缩下的 e - $\lg \sigma_v$ 曲线及饱和度变化曲线。从图中可以看出，随着试样被逐步压缩，孔隙比减小，饱和度逐渐增大，且这种变化在试样屈服后加快。由于状态A的初始饱和度较大($S_{r0} = 0.63$)，当 $\sigma_v = 1.8$ MPa时，试样在常含水率压缩下达到饱和，此后进一步压缩，试样产生固结排水。而状态B下的压实黄土初始饱和度较低($S_{r0} = 0.49$)，在竖向应力达到2 560 kPa时，其饱和度仅增长至0.75，仍处于常含水率压缩状态。但若竖向应力持续增长，状态B试样也会在进一步压缩下饱和。这初步说明，在常含水率压缩下，如果应力水平足够高，非饱和土在应力作用下可以达到饱和，从而在进一步的压缩下产生饱和土固结变形。

3.1.2 细观结构演化规律

图6给出了不同应力水平下的累计入汞孔隙比 e_{MIP} 曲线。图中 $e_{M2\ 400}$ 表示竖向应力 $\sigma_v = 2\ 400$ kPa时试样的大孔隙比，以此类推。可以看出，随着竖向应力的增大，压实黄土的孔隙比减小，压汞试验所测累计入汞孔隙比 e_{MIP} 也逐渐减小。然而，不难发现不同应力水平下的 e_{MIP} 均小于图5中压缩试验所测最终孔隙比。造成这种结果的原因是：①压汞试验无法测量到部分被土颗粒包围的封闭孔隙；②压

汞设备所能达到的压力有限，在设备量测范围内，部分微小孔隙以及超大孔隙无法被压入汞，导致部分孔隙体积无法测量。但压汞试验为细观孔隙结构的定量表征提供了一个十分有用的方法，因此仍被广泛采用。

图 7 给出了对应竖向应力下 PSD 曲线。可以看出，压缩前，两种压实状态下的初始 PSD 均表现出大、小两个峰值，说明黄土在重塑过程中形成明显的大、小两种孔隙群。常含水率压缩下，随着应力水平的增大，试样中的大孔隙峰值及其密度逐渐

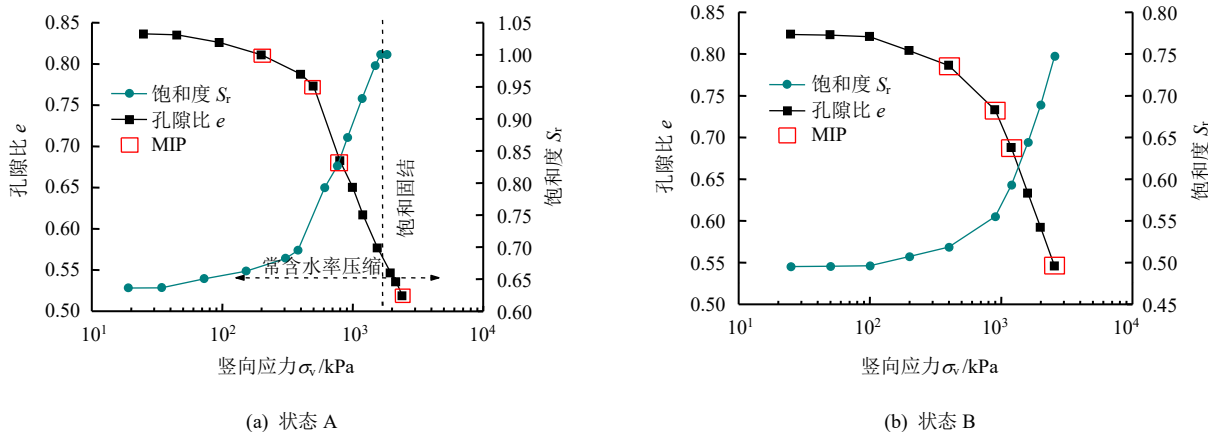


图 5 常含水率压缩下 e - $\lg \sigma_v$ 及饱和度变化曲线

Fig.5 e - $\lg \sigma_v$ curves and degree of saturation change in 1D compression under constant water content condition

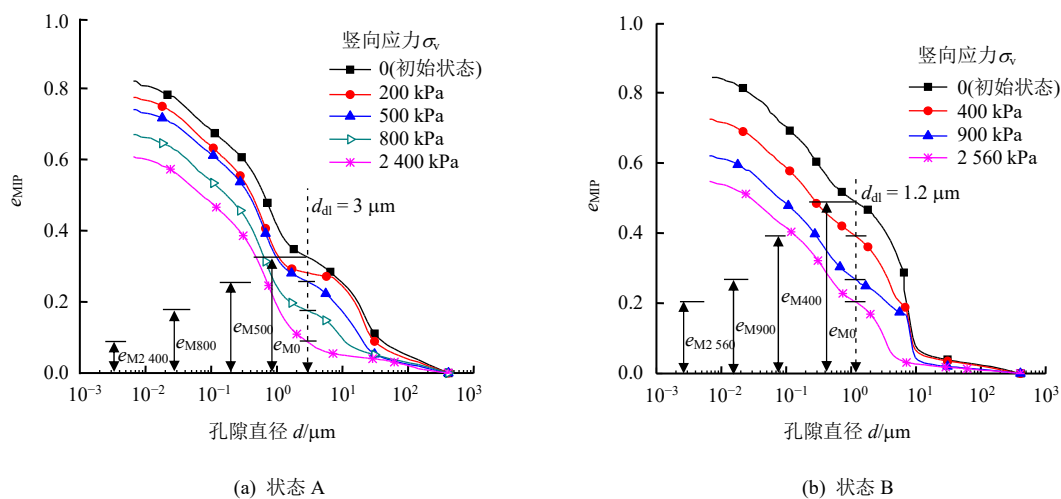


图 6 不同竖向应力下累计入汞孔隙比 e_{MIP} 曲线

Fig.6 Accumulated intrusion pore ratio e_{MIP} under different vertical stresses

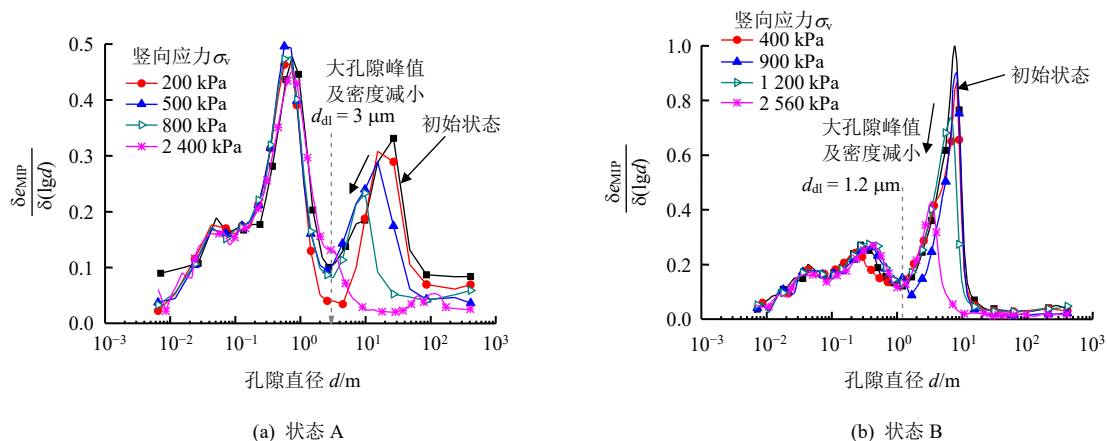


图 7 不同竖向应力下压实黄土的 PSD 曲线

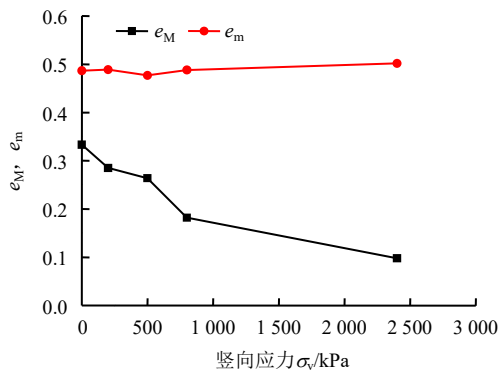
Fig.7 PSD curves for compacted loess under different vertical stresses

减小。相反的，小孔隙分布在压缩过程中并未发生明显变化。这说明，本文加载范围内，常含水率压缩仅对压实黄土中大孔隙分布有影响，而对其小孔隙分布基本不产生影响，大、小孔隙并未同时对压缩产生响应。为了更加清楚地观察这一现象，本文将不同应力水平下试样中的大、小孔的孔隙比 e_M 和 e_m 进行分离，分离方法及步骤如下：

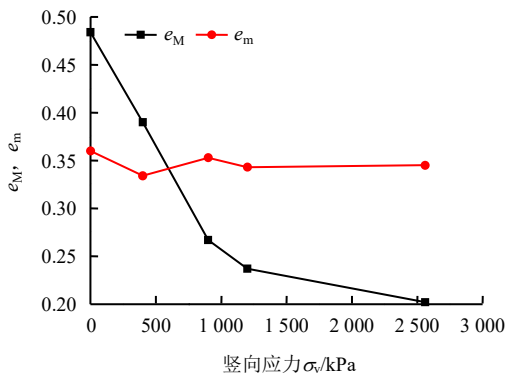
(1) 确定分界孔径 d_{dl} 。本文选取 PSD 曲线两峰值间的最低点所对应的孔径为分界孔径 d_{dl} ^[8]，如图 7 虚线所示。

(2) 在累计入汞孔隙比曲线上找到分界孔径，则大于分界孔隙的累计 e_{MIP} 即为大孔隙比 e_M ，而小孔隙比 $e_m = e_{MIP} - e_M$ ，如图 6 所示。

图 8 给出了两种状态下 e_M 和 e_m 随竖向应力的变化曲线。从图中可已看出，随着竖向应力的增大， e_M 逐渐减小，而 e_m 基本保持不变。进一步说明本文一维压缩下的孔隙比减小是由于大孔隙的压缩引起的。



(a) 状态 A

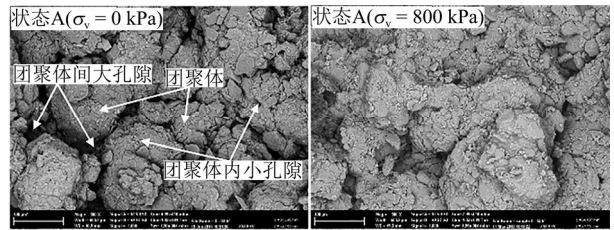


(b) 状态 B

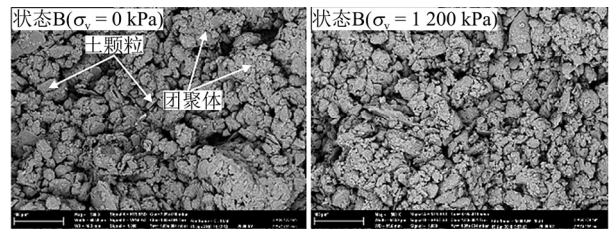
图 8 常含水率压缩下 e_M 和 e_m 随竖向应力的变化曲线
 Fig.8 Changes of e_M and e_m with vertical stress in 1D compression under constant water content condition

大孔隙在常含水率下的压缩也可以从图 9 中的 SEM 图片上观察到。图中显示，不同状态下压实黄

土试样均存在团聚体，这些团聚体是由碳酸钙胶结土中微细物质而成的集和体。此外，较小含水率状态 B 中可见明显的土颗粒。这些土颗粒/团聚体之间形成较大孔隙，而团聚体内还存在小孔隙。因此团聚体的存在为图 7 中压实黄土的双峰孔隙结构的形成提供必要条件。在竖向应力作用下，可以明显观察到土颗粒/团聚体间的大孔隙受挤压减小，这与 MIP 试验结果一致。



(a) 状态 A



(b) 状态 B

图 9 压实黄土一维加载前后 SEM 照片
 Fig.9 SEM photos for compacted loess before and after wetting

3.2 常应力水平下增湿

3.2.1 湿化应变发展规律

图 10 为常应力下增湿试验中压实黄土的 $e-lg\sigma_v$ 曲线。可以看出，尽管黄土在重塑过程中原有结构破坏，但在恒定竖向应力下增湿，孔隙比仍表现出大幅度减小，压实黄土发生显著湿化变形，且湿化应变随着应力水平大小而改变。图 11 为不同应力水平下湿化应变随时间的发展变化曲线，可以看出，压实黄土的湿化变形过程主要分为两个阶段。第一阶段：大孔隙塌陷变形阶段。在这一阶段，毛细效应随着液态水浸润峰的逐渐推进而消失，试样内团聚体间黏结弱化，发生崩塌滑移，大孔隙进一步塌陷，试样迅速发生变形。虽然这一阶段持续的时间较短，但应力水平对该阶段的湿化过程及湿化变形量有很大影响。应力水平越高，则试样增湿前孔隙比越小，渗透系数也就越低，相同反压力下，完成该阶段湿化变形消耗的时间就越久。第二阶段：土骨架蠕滑变形阶段。这一阶段是当毛细效应完全消除后，孔隙之间局部水分迁移，土体结构发生的“二

次”调整，土体结构进一步趋于均匀。如图 11 所示，应变速率变化前后两段曲线切线的交点即为第二阶

段的起点，与第一阶段相比，这一阶段的湿化应变率较小，高应力下应变率随时间有所增大。

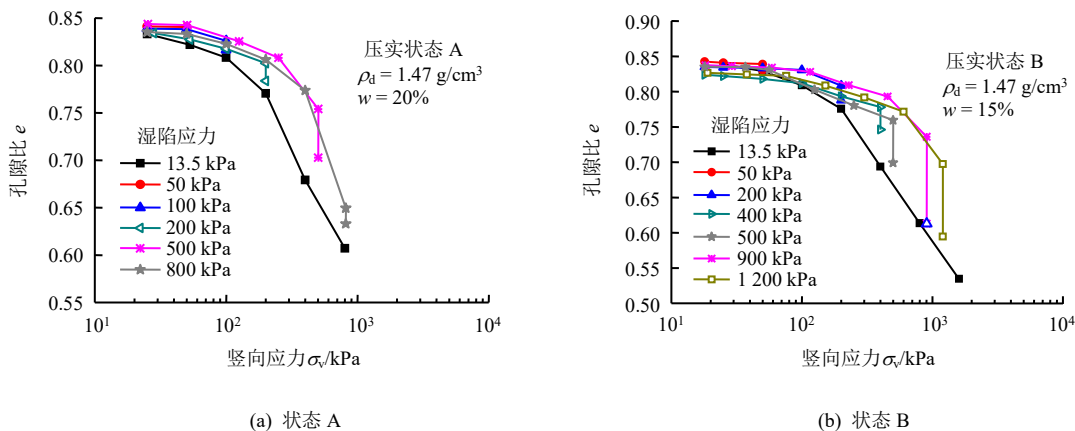


图 10 一维常含水率增湿试验中的 $e\text{-lg}\sigma_v$

Fig.10 $e\text{-lg}\sigma_v$ curves in 1D compression under constant water content condition for wetting test

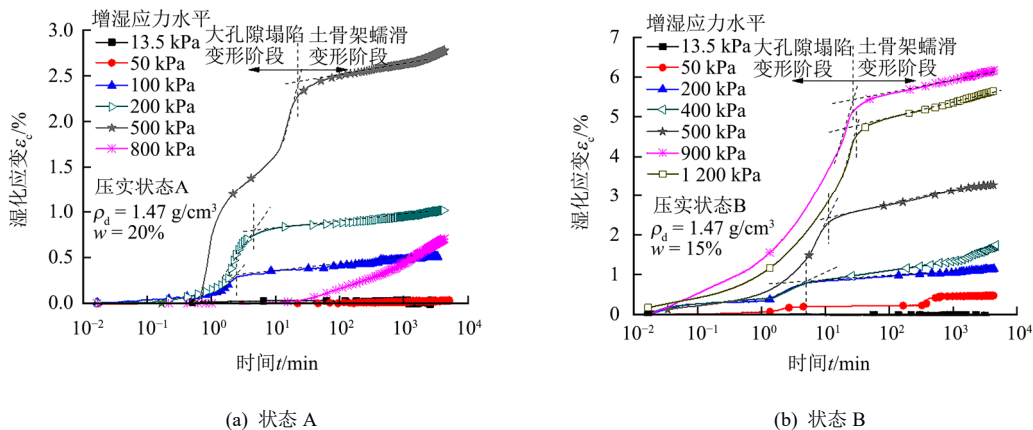


图 11 湿陷应变随增湿时间发展曲线

Fig.11 Developing curves of collapse strain with wetting time

图 12 给出了两种状态下压实黄土湿化应变随竖向应力的变化曲线。可以看出，湿化应变随着竖向应力的增大呈现先增大后减小的趋势。最大湿化应变发生在初始压实应力（屈服应力）附近。相同

压实度下，含水率较低的状态 B 表现出更大的湿化应变。这可能与吸力对土强度的增强作用有关，状态 B 较状态 A 有更强的初始吸力（见表 2），这使得吸力对于状态 B 强度的增强作用更大。在增湿饱和和情况下，吸力的消散对于状态 B 的结构破坏也就越强。

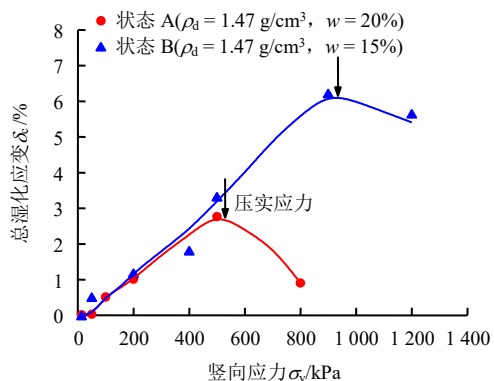


图 12 湿陷应变随竖向应力变化曲线

Fig.12 Change of collapse strain with vertical stress

从图 10 的 $e\text{-lg}\sigma_v$ 曲线还可以看出，增湿后试样的孔隙比并未落在饱和压缩曲线上（在 13.5 kPa 下的增湿饱和后的压缩曲线）。这说明压实黄土在恒定竖向应力下增湿，不能形成与同应力下饱和黄土相同的结构，即单线法与双线法所得到的湿化应变不相等，这与已有关于黄土湿陷变形的研究一致^[29-31]。图 13 比较了单线法和双线法下的湿陷应变。显然，双线法所得湿陷应变较单线法大。有研究认为这种差异与土的性质有关^[30]，另有研究认为单、双线法测量湿陷性的差异是由于加载，湿陷顺序不同引起

的[28-29]。由于这部分内容不是本文的讨论重点，因此不多做解释。

3.2.2 微观结构演化规律

图 14 给出了压实黄土在不同竖向应力下增湿前后的 PSD。从图中可以看出，增湿前压实黄土保留了初始状态下的双峰孔隙结构，图 7 已对此进行了详细解释。常应力增湿作用下，大峰值孔隙向左迁移而小峰值孔隙向右迁移，双峰孔隙结构转化成单峰形态。这种孔隙结构在增湿作用下的变化与初始状态与竖向应力水平无关。尽管在较小竖向应力 13.5 kPa 下增湿基本不引起湿化变形，但这种孔隙结构的转变仍十分显著。产生这种孔隙结构的转变是由于增湿作用下，压实黄土内土颗粒或团聚体间的黏结发生破坏，团聚体崩塌，产生滑移，大孔隙坍塌减少，而小孔隙增多造成的。

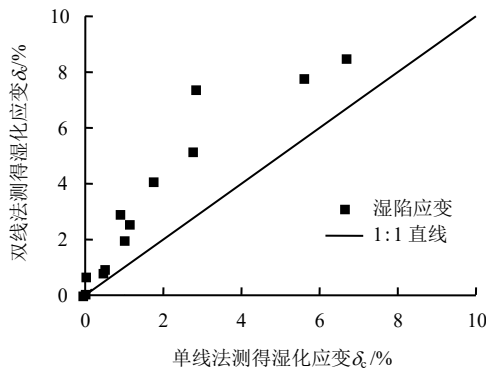


图 13 单、双线法下湿陷应变比较
Fig.13 Collapse strain obtained with single and double oedometer tests

图 15 给出了两种状态下压实黄土在增湿前后的 SEM 照片。从图中可以看出压实黄土增湿前存

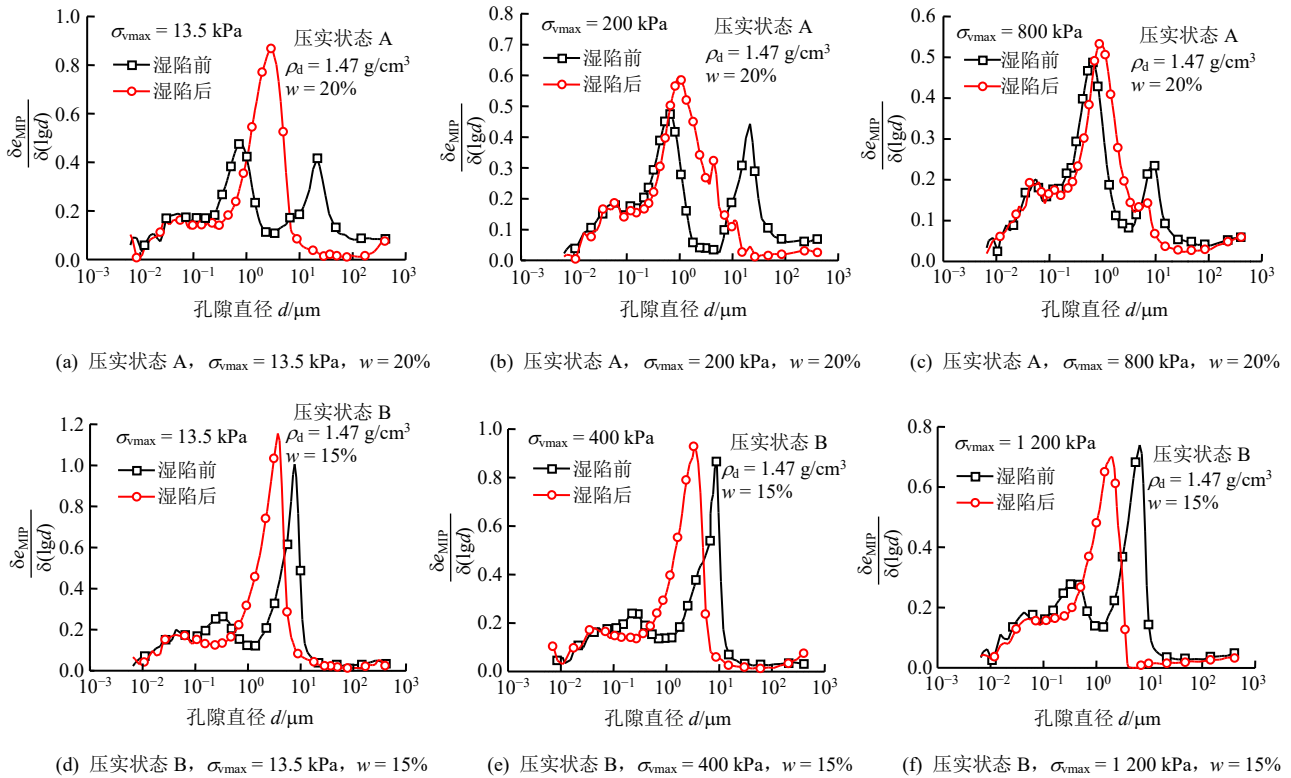
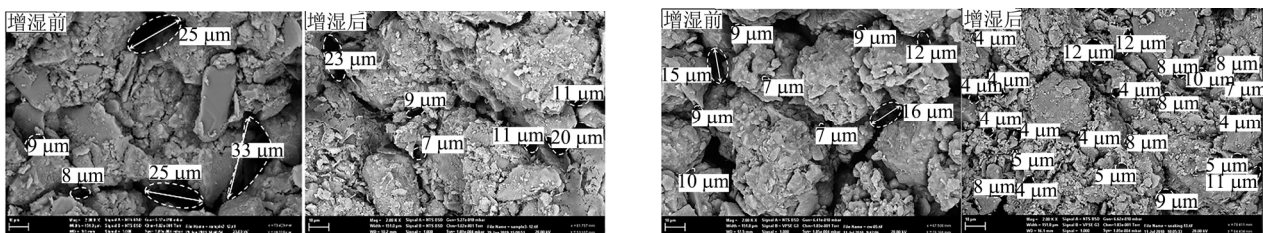


图 14 不同竖向应力下压实黄土湿陷前后 PSD 曲线

Fig.14 PSD curves of compacted loess before and after collapse under different vertical stresses



(a) 状态 A 加载至 $\sigma_v = 200$ kPa

(b) 状态 B 加载至 $\sigma_v = 400$ kPa

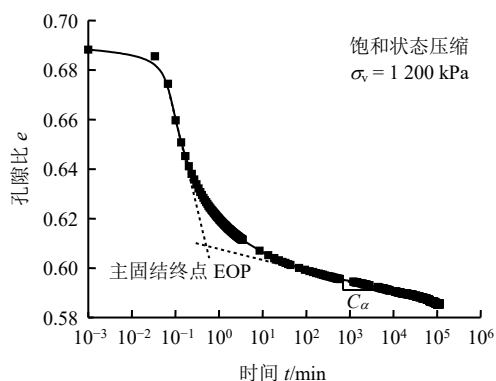
图 15 不同竖向应力下压实黄土增湿前后 SEM 照片

Fig.15 SEM photos before and after collapse under different vertical stresses

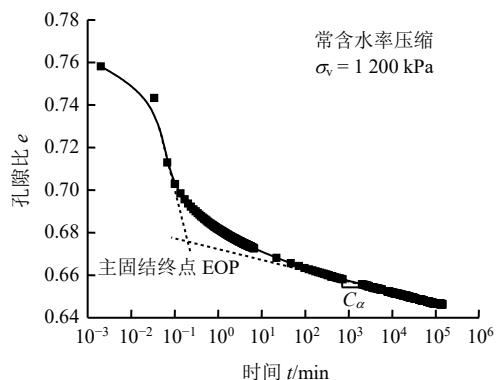
在大量的团聚体。图 15(a)显示，状态 A 的压实黄土在湿陷前仍可见 20~30 μm 的大孔隙。然而湿陷后，团聚体发生崩塌并滑移，团聚体间的大孔隙塌陷减小，而小孔隙有所增多，土体的整体结构趋于均一化和稳定化。同样的变化在状态 B 的压实黄土 SEM 照片中表现更为明显，见图 15(b)。

3.3 压实黄土蠕变机制

图 16 给出了蠕变 80 d 压实黄土在饱和状态及常含水率状态下的 $e-lgt$ 曲线。可见两种状态下， $e-lgt$ 曲线均呈现两个较为明显的转折点，压实黄土主固结发展迅速，在很短时间内即进入次固结阶段。



(a) 饱和试样

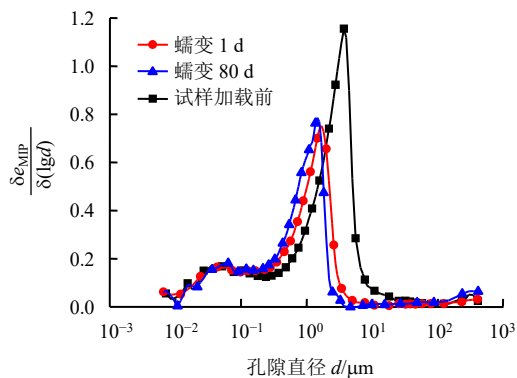


(b) 常含水率状态下的非饱和试样

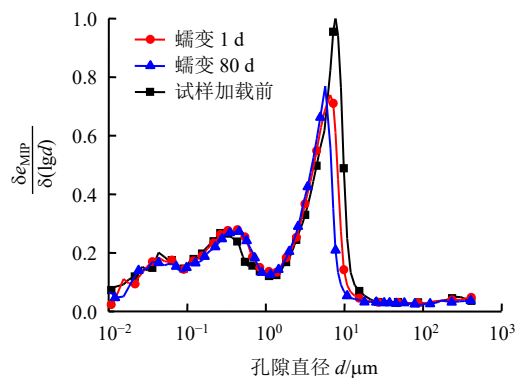
图 16 饱和及非饱和试样蠕变 80 d 的 $e-lgt$ 曲线
Fig.16 $e-lgt$ curves for saturated and unsaturated specimen creep for 80 days

图 17 为饱和及常含水率压缩两种状态下压实黄土在 $\sigma_v = 1200$ kPa 下蠕变不同时长的 PSD 曲线。为进行比较，图中还列出了两种试样加载前的 PSD。可以看出，两种状态下试样在蠕变 1 d 及蠕变 80 d 后呈现不同的 PSD。饱和试样在加载前表现为单峰孔隙分布，峰值孔隙为 3.7 μm，蠕变 1 d 后，其峰值孔径向左迁移至 1.7 μm，而在蠕变 80 d 后，其峰值孔径继续向左迁移至 1.4 μm。同样的，在常含水

率下，试样压缩前表现为双峰孔隙分布，大孔隙峰值为 7.8 μm，蠕变 1 d 后，试样大孔径峰值为 6.7 μm，而在蠕变 80 d 后，其大孔隙峰值孔隙向左迁移至 5.7 μm，而小孔隙分布在蠕变过程中并未发生变化。这说明压实黄土长期的蠕变，是其土颗粒及团聚体在长期的常应力作用下蠕滑，大孔隙进一步崩塌减小的结果，而小孔隙结构分布并未受蠕变影响。这与应力作用下细观孔隙结构结构演化规律类似，因此，蠕变变形可以等效为一定应力增量下的压缩变形。



(a) 饱和试样



(b) 常含水率状态下的非饱和试样

图 17 饱和及非饱和试样 $\sigma_v = 1200$ kPa 下蠕变 1 d 及 80 d 后 PSD 曲线

Fig.17 PSD curves for saturated and unsaturated specimen creep for 1day and 80 days under $\sigma_v = 1200$ kPa

4 讨论

4.1 常含水率压缩变形机制

根据毛细作用理论，非饱和土中小孔隙持水能力较强，因此水会先充满小孔隙，继而逐步充满部分大孔隙，这使得非饱和土大孔隙常处于充气状态。基于此，非饱和土在特定压实状态下存在分界孔径，当孔隙尺寸小于该分界孔径时，孔隙中充满水；而当孔隙尺寸大于该分界孔径时，孔隙中充满气体，

本文定义该分界孔径为饱和孔径 d_{sat} 。显然， d_{sat} 与试样的饱和度 S_r 有关，饱和试样的所有孔隙均充满水，而完全干样的所有孔隙中均充满气。在已知试样的饱和孔径 d_{sat} 时，可以进一步通过孔隙密度分布曲线确定充水孔隙分布和充气孔隙分布，饱和孔径 d_{sat} 的确定步骤如下：

(1) 根据压汞试验结果，绘制饱和度 S_r 随孔径变化曲线。由于压汞试验所得孔隙比 e_{MIP} 小于实际孔隙比，在此饱和度 S_r 定义为 $S_r = 1 - S_{mw}$ ，其中， S_{mw} 代表未被汞浸润的饱和度， $S_{mw} = n/n_0$ ，为压汞试验中当前汞液浸入孔隙度 n 与压汞试验所测最终总孔隙度 n_0 的比值^[7]。

(2) 找到 S_r 为试样初始饱和度时所对应的孔隙直径，则该孔隙直径即为饱和孔径 d_{sat} 。

在压实状态 A 下 ($S_{r0} = 0.63$)，如图 18(a)所示，按上述方法可得 $d_{sat} = 17.5 \mu\text{m}$ ，则小于 $17.5 \mu\text{m}$ 的孔隙中充满水(图 18(a)中阴影部分)，而大于 $17.5 \mu\text{m}$ 的孔隙中为自由空气。因此，在常含水率下，当试样内孔径大于 $17.5 \mu\text{m}$ 的大孔隙完全被压缩时，所有孔隙均充满水，试样饱和，继续压缩，试样将产生饱和土固结排水变形。同样的，对压实状态 B

($S_{r0} = 0.49$) 可得 $d_{sat} = 4.9 \mu\text{m}$ 。因此该状态下，充水及充气孔隙如图 18(b)所示，在常含水率压缩下，只有当大于 $4.9 \mu\text{m}$ 的大孔隙被压缩时，试样才能达到饱和。根据以上分析，状态 A 的压实黄土在 $\sigma_v = 2400 \text{ kPa}$ 下，大于 $17.5 \mu\text{m}$ 的大孔隙已被完全压缩(图 7(a))，因此试样在该应力水平下压缩至饱和。而尽管状态 B 加载至 $\sigma_v = 2560 \text{ kPa}$ ，但由于该荷载下还有孔径 $d > 4.9 \mu\text{m}$ 的非饱和大孔隙存在(图 7(b))，因此试样仍未压缩至饱和。而只有在两种状态下试样内所有孔隙被压缩至完全饱和后，小孔隙分布才会受应力变化的影响。根据以上试验结果分析，常含水率压缩下非饱和压实黄土的变形过程从宏观和细观层面可以总结如下：

(1) 宏观层面上，非饱和土的压缩过程是孔隙比减小、饱和度上升直至达到 1 (完全饱和)，进而转化为饱和土的固结过程。

(2) 细观层面上，压实黄土中的非饱和大孔隙会先被压缩，饱和孔隙比增大。只有当充气孔隙被完全压缩，所有孔隙充满水，小孔隙才会在进一步压缩下减小。

压缩过程中，气体一般更容易被挤压排出，因此，非饱和土中充气的大孔隙首先响应荷载作用。这也进一步说明，压缩及增湿对非饱和土的孔隙结构会产生不同影响。压缩作用下，大、小孔隙并不同时响应外界荷载，而是先大孔隙压缩后小孔隙压缩。相反的，增湿作用下，大、小孔隙结构同时对吸力的消散产生响应。

4.2 黄土高填方沉降的细观理解

高填方的沉降总体分为施工期沉降及工后期沉降。其中，施工期沉降为填土在施工荷载下大孔隙压缩引起，多为非饱和土的排气变形。上覆施工荷载越大，造成的大孔隙压缩越明显，因而施工期填方底部沉降较上部沉降大。本文室内细观试验表明，压实黄土的宏观变形表现为大孔隙结构的压缩和塌陷，因此填土中大孔隙的数量决定了高填方沉降量的大小。此外，压实土的蠕变是高填方工后沉降的重要组成部分，且蠕变持续时间久。本文细观试验结果表明，工后蠕变引起的沉降大小仍取决于土体内大孔隙在常应力作用下的压缩塌陷。而填土压实度越低，其大孔隙度越高，因此控制压实度不仅能够降低黄土高填方施工沉降，还能进一步减小长期工后沉降。

5 结论

本文对西安压实黄土进行一维常含水率压缩

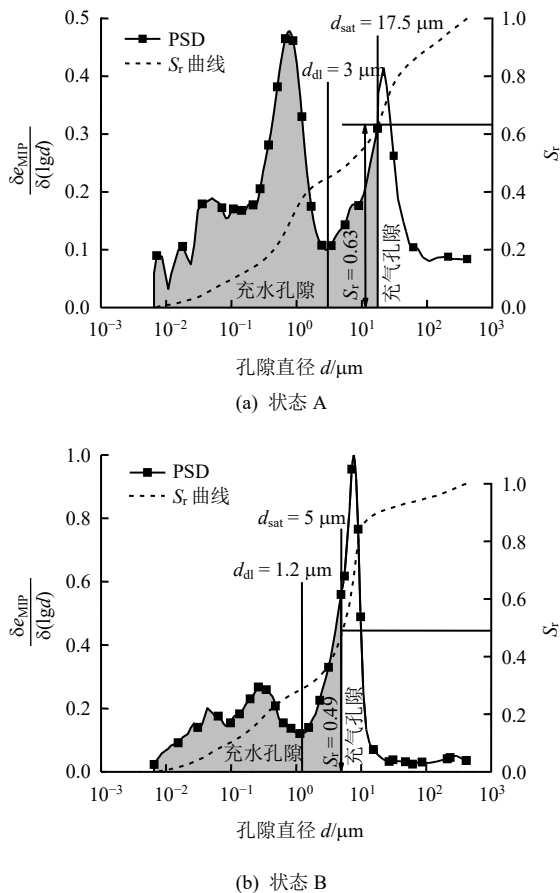


图 18 不同状态下压实黄土内孔隙水分布

Fig.18 Pore water distribution in loess under different compacted states

及增湿试验。结合压汞法及扫描电镜,对压缩及增湿作用下压实黄土的细观结构演化进行分析。初步总结了压实黄土压缩及湿化变形细观机制,得到以下主要结论:

(1) 一维状态下,压实黄土的湿化应变随增湿时间呈现出膨胀,大孔隙塌陷变形,土骨架蠕滑变形两个发展阶段。湿化应变随着竖向应力的增大呈现先增大后减小的发展趋势,最大湿化应变发生在压实应力附近。

(2) 宏观层面上,非饱和土压缩是孔隙比减小,饱和度增大直至饱和,进而转化为饱和土固结的过程。微观层面上,非饱和土压缩是大孔隙减小,直到所有孔隙饱和后,小孔隙才进一步减小的过程。

(3) 常应力下增湿饱和,压实黄土中的颗粒及聚集体间黏结破坏,发生崩塌滑移,大孔隙减小,而小孔隙增多,孔隙结构由双峰形态转化为单峰形态,土体结构趋于均匀稳定。

(4) 压缩及增湿对非饱和土的孔隙结构会产生不同影响。压缩作用下,大、小孔隙并不同时响应外界荷载,而是先大孔隙压缩后小孔隙压缩。增湿作用下,大、小孔隙结构则相反会同时对吸力的消散产生响应。

根据以上宏细观试验结论,进一步从细观角度理解施工期及工后期沉降黄土高填方沉降。

参考文献

- [1] 刘祖典. 黄土力学与工程[M]. 西安: 陕西科学技术出版社, 1997.
LIU Zu-dian. Loess mechanics and engineering[M]. Xi'an: Shaanxi Science & Technology Press, 1997.
- [2] 陈正汉. 非饱和土与特殊土力学的基本理论研究[J]. 岩土工程学报, 2014, 36(2): 201-272.
CHEN Zhen-han. On basic theories of unsaturated soils and special soils[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2014, 36(2): 201-272.
- [3] 朱才辉, 李宁, 刘明振, 等. 吕梁机场黄土高填方地基工后沉降时空规律分析[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(2): 293-301.
ZHU Cai-hui, LI Ning, LIU Ming-zhen et al. Spatiotemporal laws of post-construction settlement of loess-filled foundation of Lüliang airport[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2013, 35(2): 293-301.
- [4] 葛苗苗, 李宁, 张炜, 等. 黄土高填方沉降规律分析及工后沉降反演预测[J]. 岩石力学与工程学报, 2017, 36(3): 745-753.
GE Miao-miao, LI Ning, ZHANG Wei, et al. The settlement law and inversion prediction of the post-construction settlement of loess high filled embankment[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2017, 36(3): 745-753.
- [5] 葛苗苗, 李宁, 郑建国, 等. 基于一维固结试验的压实黄土蠕变模型[J]. 岩土力学, 2015, 36(11): 3164-3170, 3306.
GE Miao-miao, LI Ning, ZHENG Jian-guo, et al. A creep model for compacted loess based on one-dimensional oedometer test[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2015, 36(11): 3164-3170, 3306.
- [6] 黄雪峰, 孔洋, 李旭东, 等. 压实黄土变形特性研究与应用[J]. 岩土力学, 2014, 35(增刊 2): 37-44.
HUANG Xue-feng, KONG Yang, LI Xu-dong, et al. Study and application of deformation characteristics of compacted loess[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2014, 35(Suppl.2): 37-44.
- [7] ROMEROE, GENS A, LORET A. Water permeability, water retention and microstructure of unsaturated compacted Boom clay[J]. **Engineering Geology**, 1999, 54: 117-127.
- [8] YUAN S Y, LIU X F, SLOAN S W, et al. Multi-scale characterization of swelling behaviour of compacted Maryland clay[J]. **Acta Geotechnica**, 2016, 11(4): 789-804.
- [9] 邵显显, 张虎元, 何东进, 等. 压实黄土非饱和增湿变形过程及其微观机制[J]. 长江科学院院报, 2019, 36(4): 82-87, 92.
SHAO Xian-xian, ZHANG Hu-yuan, HE Dong-jin, et al. Unsaturated wetting deformation behavior and fabric change of compacted loess[J]. **Journal of Yangtze River Scientific Research Institute**, 2019, 36(4): 82-87, 92.
- [10] 沈扬, 沈雪, 俞演名, 等. 粒组含量对钙质砂压缩变形特性影响的宏细观研究[J]. 岩土力学, 2019, 40(10): 3733-3740.
SHEN Yang, SHEN Xue, YU Yan-ming, et al. Macro-micro study of compressive deformation properties of calcareous sand with different particle fraction contents[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2019, 40(10): 3733-3740.
- [11] CUISINIER O, LALOUI L. Fabric evolution during hydromechanical loading of a compacted silt[J]. **International Journal of for Numerical Analytical Methods in Geomechanics**, 2004, 28(6): 483-499.
- [12] BURTON J G, PINEDA A J, SHENG D C et al. Microstructural changes of an undisturbed, reconstituted and compacted high plasticity clay subjected to wetting and drying[J]. **Engineering Geology**, 2015, 193: 363-373.
- [13] ROMERO E, VECCHIA G and JOMMI G. An insight into the water retention properties of compacted clayey soils[J]. **Geotechnique**, 2011, 61(4): 313-328.

- [14] SIMMS P H, YANFUL E K. Predicting soil-water characteristic curves of compacted plastic soils from measured pore-size distributions[J]. *Geotechnique*, 2002, 52(4): 269-278.
- [15] 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 variation of loess's microstructure during loading and collapse from computed tomography scanning[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2004, 23(24): 4166-4169.
- [16] 陈正汉, 孙树国, 方祥位, 等. 土工多功能三轴仪的研制及其应用[J]. *后勤工程学院学报*, 2007, 23(4): 1-5.
CHEN Zheng-han, SUN Shu-guo, FANG Xiang-wei, et al. Development and application of multi-function geotechnical triaxial apparatus[J]. *Journal of Logistical Engineering University*, 2007, 23(4): 1-5.
- [17] 陈正汉, 方祥位, 朱元青, 等. 膨胀土和黄土的细观结构及其演化规律研究[J]. *岩土力学*, 2009, 30(1): 1-11.
CHEN Zheng-han, FANG Xiang-wei, ZHU Yuan-qing, et al. Research on meso-structures and their evolution laws of expansive soil and loess[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2009, 30(1): 1-11.
- [18] 朱元青, 陈正汉. 原状 Q₃ 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 Q₃ loess during loading and collapse using CT and triaxial apparatus[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2009, 31(8): 1219-1228.
- [19] 李加贵, 陈正汉, 黄雪峰, 等. Q₃ 黄土侧向卸荷时的细观结构演化及强度特性[J]. *岩土力学*, 2010, 31(4): 1084-1091.
LI Jia-gui, CHEN Zheng-han, HUANG Xue-feng, et al. CT-triaxial shear tests on the meso-structure evolution and strength of unsaturated loess Q₃ during unloading confining pressure[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2010, 31(4): 1084-1091.
- [20] 郭楠, 陈正汉, 杨校辉, 等. 重塑黄土的湿化变形规律及细观结构演化特性[J]. *西南交通大学学报*, 2019, 54(1): 73-80, 90.
GUO Nan, CHEN Zheng-han, YANG Xiao-hui, et al. Research on wetting-deformation regularity and microstructure evolution characteristics of remoulded loess in triaxial soaking tests[J]. *Journal of Southwest Jiaotong University*, 2019, 54(1): 73-80, 90.
- [21] 蒋明镜, 胡海军, 彭建兵, 等. 应力路径试验前后黄土孔隙变化及与力学特性的联系[J]. *岩土工程学报*, 2012, 34(8): 1369-1378.
JIANG Ming-jing, HU Hai-jun, PENG Jian-bing, et al. Pore changes of loess before and after stress path tests and their links with mechanical behaviors[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2012, 34(8): 1369-1378.
- [22] WANG J D, LI P, MA Y, et al. Change in pore-size distribution of collapsible loess due to loading and inundating[J]. *Acta Geotechnica*, 2020, 15(3): 1081-1094.
- [23] 王军, 王建业, 水伟厚, 等. 延安新区黄土丘陵沟壑区区域工程造地实践[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2019: 53-67.
WANG Jun, WANG Jian-ye, SHUI Wei-hou, et al. Engineering practice of land reclamation in loess hilly gully area in Yan'an new district[M]. Beijing: China Building Industry Press, 2019: 53-67.
- [24] 孔洋, 阮怀宁, 黄雪峰. 黄土丘陵沟壑区压实回填土地基沉降计算方法[J]. *岩土工程学报*, 2018, 40(增刊 1): 218-223.
KONG Yang, RUAN Huai-ning, HUANG Xue-feng. Method for calculating foundation settlement of compacted backfill in hilly and gully regions of loess[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2018, 40(Suppl.1): 218-223.
- [25] WASHBURN E W. The dynamics of capillary flow[J]. *Physics Review*, 1921, 17(3): 273-283.
- [26] DIAMOND S. Pore size distribution in clays[J]. *Clays Clay Miner*, 1970, 18: 7-23.
- [27] 滕新荣. 表面物理化学[M]. 北京: 化学工业出版社, 2009: 25-35.
TENG Xin-rong. Physical and chemistry of surfaces[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2009: 25-35.
- [28] DELAGE P, MARCIAL D, CUI Y J, et al. Ageing effects in a compacted bentonite: a microstructure approach[J]. *Geotechnique*, 2006, 56: 291-304.
- [29] 张茂花, 谢永利, 刘保健. 增(减)湿时黄土的湿陷系数曲线特征[J]. *岩土力学*, 2005, 26(9): 1363-1368.
ZHANG Mao-hua, XIE Yong-li, LIU Bao-jian. Characteristics of collapsibility coefficient curves of loess during moistening and demoiestening process[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2005, 26(9): 1363-1368.
- [30] 张利生. 湿陷性黄土试验方法探讨[J]. *岩土力学*, 2001, 22(1): 207-210.
ZHANG Li-sheng. Discussion on test method of collapsible loess[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2001, 22(1): 207-210.
- [31] LUTENEGGER A J, SABER R T. Determination of collapse potential of soils[J]. *Geotechnical Test Journal*, 1988, 11(3): 173-178.