

DOI: 10.16285/j.rsm.2016.3000

重塑黏土的高压次固结特性初探

商翔宇^{1,2}, 郝 飞², 顾建祥², 况联飞¹, 周国庆¹, 郑秀忠³

(1. 中国矿业大学 深部岩土与地下工程国家重点实验室, 江苏 徐州 221116; 2. 中国矿业大学 力学与土木工程学院, 江苏 徐州 221116;
3. 中设设计集团股份有限公司, 江苏 南京 210014)

摘 要: 利用自行研制的高压固结试验系统, 对重塑黏土试样进行了竖向压力从 0.25 MPa 到 12.00 MPa 的一维固结试验; 并利用三轴设备对该土样进行了 0.3~2.5 MPa 的等向固结试验。试验结果表明: 一维固结试验获得的各级压力固结曲线均有明显的次固结阶段, 重塑黏土的次固结系数随竖向压力增大而非线性变化; 具体而言, 当固结压力小于 2 MPa, 次固结系数随竖向压力增大而显著减小, 当固结压力大于 2 MPa 后, 次固结系数则几乎不变; 等向固结试验获得的次固结系数则远小于一维固结试验获得的相应值, 其随固结压力的变化规律也与一维固结不同。此外, 从微观角度对试验结果进行的分析表明, 高压下黏土次固结变形的物理机制不同于低压。即低压下黏土次固结变形的的主因是颗粒间的相对滑移, 而高压下则是结合水膜的蠕变; 而且低压下偏应力对次固结变形有控制性影响, 但高压下其影响很小。

关 键 词: 黏土; 高压; 次固结系数; 试验; 物理机制

中图分类号: TU 411

文献标识码: A

文章编号: 1000-7598 (2018) 07-2387-08

A preliminary study of characteristics of secondary consolidation of remolded clay at high pressure

SHANG Xiang-yu^{1,2}, HAO Fei², GU Jian-xiang², KUANG Lian-fei¹,
ZHOU Guo-qing¹, ZHENG Xiu-zhong³

(1. State Key Laboratory for Geomechanics and Deep Underground Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou, Jiangsu 221116, China;
2. School of Mechanics and Civil Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou, Jiangsu 221116, China;
3. China Design Group Co. Ltd., Nanjing, Jiangsu 210014, China)

Abstract: Using self-developed high-pressure oedometer system, we performed one-dimensional consolidation tests (OCT) on reconstituted clay samples at vertical pressures from 0.25 MPa to 12 MPa. In addition, we carried out isotropic consolidation tests (ICT) on the same samples with confining pressures from 0.3 MPa to 2.5 MPa using triaxial apparatus. The test results indicate that all the consolidation curves obtained from OCT have notable secondary consolidation portion, and the secondary consolidation coefficient of remolded clay changes nonlinearly with increasing consolidation pressure. Specifically, when the consolidation pressure is less than 2 MPa, secondary consolidation coefficient decreases significantly with increasing consolidation pressures. but it is almost unchanged for the case of consolidation pressure above 2 MPa. The secondary consolidation coefficients obtained from ICT are much less than those from OCT, and the change of secondary consolidation coefficient with confining pressure obtained from ICT is different from that from OCT. Moreover, the microscopic analyses of the test results show that the physical mechanism underlying secondary consolidation deformation of clay at high pressure is different from that at low pressure. At low pressure, the secondary consolidation deformation mainly results from the relative slip between clay particles while the creep of adsorbed pore water contributes much to the secondary consolidation deformation of clay at high pressure. Moreover, it seems that the deviatoric stress has a dominating influence on the secondary consolidation deformation of clay at low pressure while it has little effect at high pressure.

Keywords: clay; high pressure; secondary consolidation coefficient; test; physical mechanism

收稿日期: 2016-12-29

基金项目: 国家自然科学基金项目(No. 51009136, No. 51504245); 高等学校学科创新引智计划项目(No. B14021)。

This work was supported by the National Natural Science Foundation of China (51504245, 51009136) and the Program of Introducing Talents of Discipline to Universities (B14021).

第一作者简介: 商翔宇, 男, 1977 年生, 博士, 副教授, 主要从事深部土力学及地下工程的研究。E-mail: xyshang@cumt.edu.cn

1 引言

随着经济社会的不断发展,地下空间的利用由浅部拓展至深部。深部地下工程建设与研究实践表明,深部黏土的力学性质与浅部黏土不同^[1-3],同一黏性土高压状态下的力学性质与常规压力不同^[4]。不过,不同研究者确定的高低压状态分界点不同。Norihiko 等^[5]认为室内土工试验固结压力大于 1 MPa 为高压;马金荣等^[6]以 50 m (1 MPa) 深度为界划分深土(高压)、浅土(低压)。笔者前期研究^[7]发现,深部饱和黏土宜以 1.6 MPa 作为高低应力水平的分界点。

在高压固结方面,李文平等^[4]进行了最大竖向压力为 20 MPa 的高压单向固结试验,发现黏土侧压力系数随压力的变化曲线为指数函数型。王秀艳等^[8]对埋深为 500 m 以内的多个土样,进行了一维固结试验,发现深部黏土的静止侧压力系数并不总为常数。上述研究成果初步揭示了高压下黏土侧压力系数 K_0 与常规压力下 K_0 不同,但上述仅限于黏土主固结过程的研究。

事实上,次固结变形研究对于深部地下工程具有重要意义。华东地区黄淮一带的竖井破裂主要是由于深厚表土层的长期沉降对井壁施加较大附加力而造成的。因此,研究高压下黏土的次固结变形特性,对于竖井井壁破裂机制的研究十分重要^[9]。王衍森等^[10]探讨了深部土的高压一维固结试验研究的主要内容和研究方法,指出固结时间对于深部黏土的力学特性具有不可忽视的影响。然而,由于试验所需压力高、时间长,即便是对重塑黏土高压的次固结研究也非常有限。

相对而言,关于软土低压状态下的次固结变形研究成果较为丰富。殷宗泽等^[11]从超固结角度认为当压力小于先期固结压力时,随着压力增长,次固结系数逐渐增大。侯晓亮等^[12]通过分级加载的一维固结试验发现南京河西淤泥质粉质黏土原状样的次固结系数随压力先增大后减小。冯志刚等^[13]发现加载比为 1 时,次固结系数随着压力增大而呈现先增大后减小的趋势。相较于上述低压软土次固结研究,对于黏土高压次固结研究则还很少见。隋旺华等^[9]利用最大垂直固结压力为 3.2 MPa 的液压力高压固结仪对-150 m 左右的原状土样进行固结试验,得出次固结系数与固结压力的关系:当固结压力小于先期固结压力时,次固结系数与压力不相关;当固结压力大于先期固结压力时,次固结系数与压力正相关。总的来看,不论是低压还是高压下,黏土的次

固结系数都与压力密切相关。因此,展开数百米深地层相应的 10 MPa 压力量级下,黏土次固结变形特性的研究是必要的。

由于深部黏土原状土取样困难、离散性较大以及取样扰动大等使得系统研究原状深部黏土难度较大,因此,作为前期研究,本文对室内重塑黏土进行高压固结试验研究,以初步揭示高压下黏土的次固结响应特性。

2 试验方案与仪器

2.1 试验用土与仪器

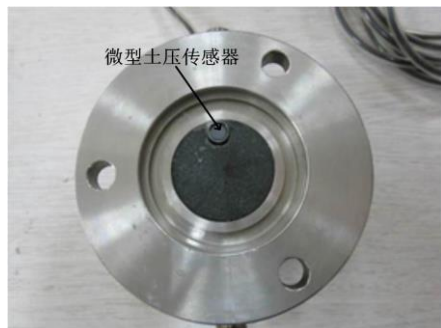
本文试验中所使用的黏土取自山东某矿区深厚表土层-525 m 处,与文献[14]所采用土样相同。黏土的相对密度为 2.72,初始含水率是 8.83%;颗粒级配分析表明,该黏性土为细粒土;利用液塑限测定仪测得塑限和液限含水率分别为 23.67% 和 51.88%,塑性指数 28.2。根据液限含水率、塑性指数可判定所研究土样为高液限黏土。

试验采用自行研制的高压固结仪,相较于常规固结仪,该仪器除了能施加最大为 12 MPa 的竖向固结压力之外,还可实现反压饱和以及侧壁摩擦、孔隙水压等量的实时监测,能够满足本文试验研究的需要。其中在该固结仪底部安装了如图 1(a)所示的微型土压力传感器,该传感器直径为 8 mm,长度为 10 mm,测量范围为 0~12 MPa,分辨率为 1 kPa;由该传感器测量出传递到土样底部的竖向压力,再根据已知的土体上部外加压力与其之差即可计算出固结土样所受的侧壁摩擦力。透水石下的底座与安装在固结仪外壁上的孔隙水压力传感器连通,孔隙水压力传感器的测量范围为 0~15 MPa,分辨率为 1 kPa。为了保证试样的饱和度,采用泥浆制样方法,保证试验设备中所有的通路均充满蒸馏水,并通过接入反压控制器来实现全固结过程的反压饱和。反压控制器按图 1(b)所示与高压单向固结仪的上部压头连通。该控制器在数据采集软件的控制下,能够实现固结过程中的压力伺服控制和排水时的体积自动测量。

2.2 试验方案

将过 0.1 mm 筛的风干黏土加蒸馏水配成 1.5 倍液限含水率的泥浆,抽气饱和后倒入制样桶,轴向加载 36.4 kPa 固结压力获得均匀饱和的试样。为了研究包括水平与竖向应力在内的应力状态的影响,在前述固结仪压力室的侧壁中下部位置也安装了微型土压力传感器。由于土样逐级加载到 12 MPa,压缩量较大,为了保证侧壁土压力传感器所测数值有

效, 必须保证足够初始样高。固结试样的直径为 39.1 mm、高度为 40.0 mm。装样前, 先将所设计的一维固结仪进行系统饱和, 固结圆筒内壁上涂上凡士林以减小侧壁摩擦力。



(a) 固结仪底座



(b) 反压控制器连通

图 1 单向高压固结系统

Fig.1 Unidirectional consolidation system for high pressure

单向固结试验采用逐级加载的方法, 固结压力分别为 0.25、0.50、1.00、2.00、4.00、8.00、12.00 MPa。试验过程中, 通过电子位移计实时测量每一级固结压力下试样的竖向位移, 底部和侧壁安装的微型土压力传感器实时测量固结时土压力值, 底部孔隙水压传感器实时测量土样的孔隙水压。

3 分析与讨论

3.1 试验结果

图 2 给出了每级压力固结过程中的孔隙水压消散情况。可以看到, 除了 12.00 MPa 外, 每一级荷载下孔隙水压力均完全消散稳定。图 3 给出了不同压力等级下的固结 e - $\lg t$ 曲线。需要指出的是, 整个试验持续超过 8 个月, 期间 4.00 MPa 试验由于停电等原因造成部分排水量数据丢失, 本文对其不作讨论; 另外 12.00 MPa 试验需要时间过长, 系统出现故障而提前终止试验, 未能出现明显的次固结阶段。

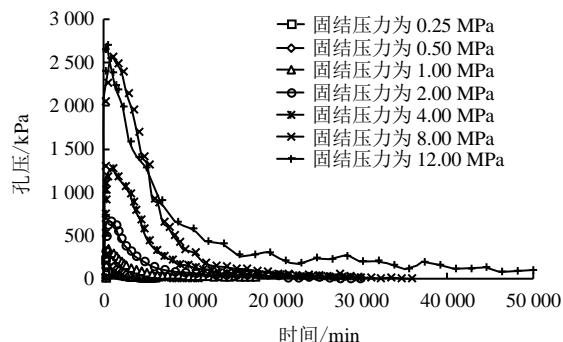


图 2 孔隙水压力消散曲线

Fig.2 Curves of pore pressure dissipation

对比图 2 和图 3 可见, 几乎所有压力等级的固结试验中, 孔隙水压力的完全消散要远滞后于 e - $\lg t$ 曲线上主固结完成点的出现, 且孔隙水压力消散稳定后次固结仍持续缓慢的发生。另外, 由图 3 可以看出, 无论高压还是低压, 黏土都有明显的次固结阶段。

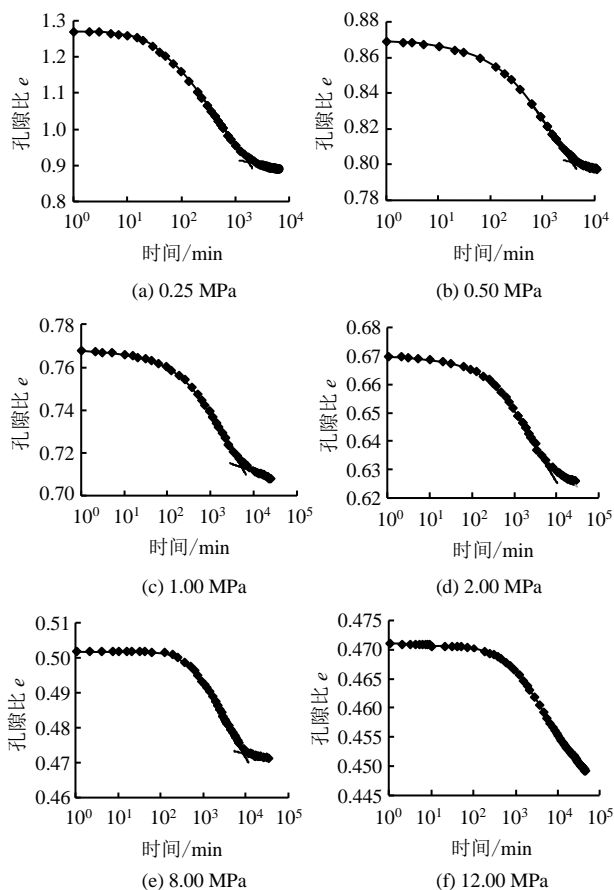


图 3 单向固结 e - $\lg t$ 曲线

Fig.3 Curves of e - $\lg t$ from unidirectional consolidation

3.2 试验结果分析

3.2.1 固结压力对次固结系数的影响

一般认为次固结发生在主固结完成后, 且通常用次固结系数 C_α 来描述土的次固结变形:

$$C_{\alpha} = \frac{e_2 - e_1}{\lg \frac{t_2}{t_1}} \quad (1)$$

式中： e_1 和 e_2 分别为对应于次固结阶段 t_1 和 t_2 时刻试样的孔隙比。

表 1 给出了由重塑黏土一维固结试验得到的次固结系数、固结时间等试验结果。从表中可以看到，随着固结压力增大，主固结完成的时间逐渐增加，次固结系数 C_{α} 逐渐减小，次固结系数 C_{α} 与压缩指数 C_c 的比值也逐渐减小。

表 1 单向固结次固结系数

Table 1 Coefficients of secondary consolidation from unidirectional consolidation

压力/MPa	主固结时间 /min	次固结系数 C_{α}	系数比 C_{α}/C_c
0.25	1 750	0.029 9	0.104
0.50	3 800	0.006 9	0.024
1.00	5 300	0.004 6	0.016
2.00	8 800	0.002 3	0.009
8.00	8 900	0.002 3	0.009

周秋娟等^[15]认为无预压荷载土样，低应力水平下主固结有明显的分界点，随着固结压力增大，分界点逐渐模糊，土样变形主要产生于次固结阶段。张先伟等^[16]也发现较大压力作用下主固结的分界不太明显，且将其归因于高压下主固结变形显著减小，土体变形以次固结变形为主。然而，本文研究的重塑深部黏土并非如此，从图 3 可以看出，高压下土体变形依然以主固结变形为主，各级压力下均有明显的次固结阶段。

将表 1 给出的次固结系数随固结压力的变化情况绘制在图 4 中。可以直观看出，0.25 MPa 到 2.00 MPa 区间内，次固结系数随着压力增大明显减小，超过 2.00 MPa 之后则趋于定值。周秋娟等^[15]利用广州南沙原状土进行一维固结试验，发现次固结系数在固结压力等于先期固结压力时，会达到其峰值。陈晓平等^[17]认为当压力小于先期固结压力时，随着压力增长次固结系数逐渐增大；当压力大于先期固结压力时，随着压力增长次固结系数逐渐减小。上述研究结论均是由低应力状态下土样的次固结试验获得的。余湘娟等^[18]通过最大固结压力为 3.20 MPa 的软土单向室内固结试验，得出了相似的结论。由于本文最小压力等级 0.25 MPa 也大于重塑样的先期固结压力，所以可认为本文所用试样为正常固结。本试验结果表明：小于 2.00 MPa 的低应力状态下的重塑深部黏土的次固结系数随固结压力增

大而减小，这与前人研究结论一致；然而当固结应力大于 2.00 MPa（与先期固结压力无关），则次固结系数几乎不变。

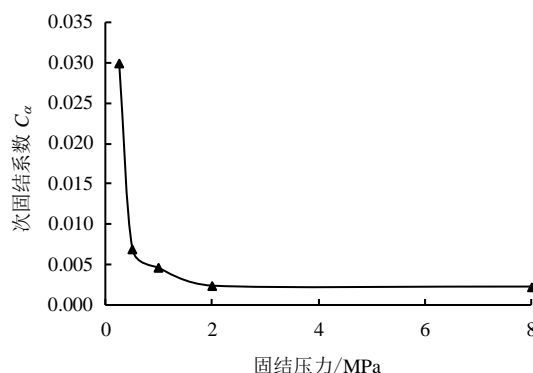


图 4 单向固结次固结系数随固结压力变化曲线

Fig.4 Secondary consolidation coefficient from unidirectional consolidation

3.2.2 相应的微观分析

如下从微观角度对上述试验结果可能的物理机制进行分析。研究表明，饱和黏土的次固结变形主要与颗粒之间的相对滑移（固体骨架相应调整至更稳定的结构状态）、结合水膜的蠕变（水溶液中离子位置的相应调整）等有关^[19-20]。对于正常固结黏土而言，在固结压力较小、孔隙比较大的情况下，黏土土样内部存在数量较多的大孔隙，这些孔隙的尺寸足以使其中绝大多数水分子不受黏粒表面电力的影响，也就是说，此时黏土内部中孔隙水以自由水为主，结合水数量占比相对较小。而当固结压力大、孔隙比小的情况下，黏土内部孔隙水中自由水分子和结合水的占比顺序则相反，即结合水占比更大。笔者关于重塑深部黏土的前期研究表明^[21]：固结压力大于 2.00 MPa 之后，该土中大部分水已经为结合水了。

基于上述分析，可以对图 4 所示的试验结果进行如下解释。当固结压力小于 2.00 MPa 时，土样内孔隙水中结合水相对较少，此时次固结变形以颗粒相对滑移调整至更稳定构型为主，而结合水膜的蠕变则作用甚小。这种情况下，随着固结压力的增大，黏土内部结构不断趋于稳定，可参与相对滑移的颗粒数量降低，因此，宏观上表现为次固结系数随固结压力增大而显著减小。而当固结压力大于 2.00 MPa 之后，黏土内部结构基本处于稳定状态，而孔隙水则以结合水为主，此种情况下次固结变形以结合水膜蠕变，或结合水中离子位置调整为主，颗粒相对滑移则作用甚微。研究表明，结合水膜中水分子的

层数对其中的离子可动性几乎无影响^[22], 本文试验的 2.00~8.00 MPa 压力作用下改变的主要是结合水膜的厚度, 即水分子的层数, 因此, 宏观上表现为次固结系数随固结压力增大而几乎不变。

为进一步论证上述分析, 这里引用文献[4]的试验结果。该研究进行了深部黏土的高压一维固结试验的同时, 还观测了黏土内部微观结构随固结压力的变化。该研究表明, 黏土的颗粒定向性等内部结构特征随固结压力的增大先是迅速变化, 而后趋于一定值, 而几乎不变^[4]。这与上述分析采用的颗粒内部结构随固结压力增大而趋于稳定的假设是一致的。

3.2.3 进一步的讨论和试验

定义平均应力 $p=(\sigma_z+2\sigma_r)/3$ 、偏应力 $q=\sigma_z-\sigma_r$ 和偏应力比 $q/p=3(1-\sigma_r/\sigma_z)/(1+2\sigma_r/\sigma_z)$, 其中 σ_z 、 σ_r 分别为轴向和径向应力。在复杂应力状态下, 常用偏应力比表示土体受偏应力的程度。本文实测土样所受摩擦力最大不超过 8.5%, 因此, 可以近似认为所测竖向和径向应力均为主应力。利用试验所得竖向和径向应力计算出应力比如图 5 所示。可见, 当固结压力小于 1.00 MPa 时应力比几乎为常数, 当固结压力大于 1.00 MPa 时应力比随着压力增大而减小。屈智炯^[23]认为在一维变形条件下, 正常固结土对应的偏应力比 q/p 为常数。但李文平等^[4]认为黏土在高压状态下竖向和径向应力比 σ_z/σ_r 随压力增大而增大, 由偏应力比 q/p 与 σ_z/σ_r 关系式易知, 高压状态下偏应力比 q/p 随压力增大而减小, 这与本文研究结论相似。

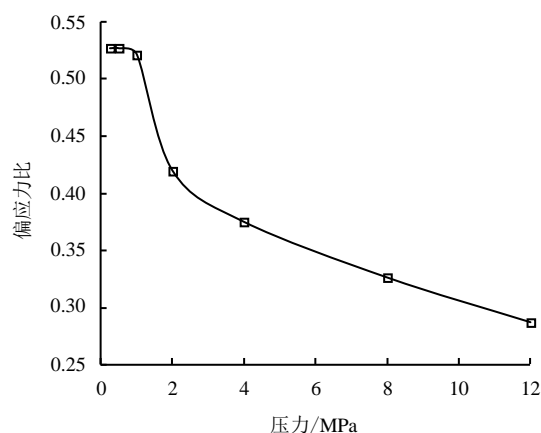


图 5 偏应力比随压力变化曲线

Fig.5 Deviatoric stress ratio along with pressure

由图 4 和图 5 可知, 在压力小于 1.00 MPa 情况下, 由一维正常固结试验获得的次固结系数与偏应

力比 q/p 相关性较弱。这与李国维等^[24]通过单向固结试验, 认为正常固结土的次固结系数与偏应力比无关的试验结论一致。在压力位于 1.00~2.00 MPa 的应力状态范围内, 次固结系数和偏应力比 q/p 随压力增大均呈现明显减小的趋势; 当压力高于 2.00 MPa 之后, 次固结系数几乎不变, 而应力比则不断减小, 只是相对于 1.00~2.00 MPa 阶段, 此减小趋势明显减缓。利用前述的微观分析结论, 也可以对上述试验现象进行合理解释。在小于 1.00 MPa 的低压情况下, 偏应力对颗粒滑移具有显著的控制性影响, 结果表现为次固结系数迅速减低; 在 1.00~2.00 MPa 压力情况下, 颗粒滑移和结合水膜蠕变对次固结变形均有贡献, 但偏应力比的减小可能意味着颗粒滑移的贡献相对减弱; 而在大于 2.00 MPa 的压力情况下, 次固结变形以结合水膜蠕变为主, 宏观上表现为次固结变形对固结压力和偏应力比均不再敏感。

为进一步论证上述分析, 特设计补充了等向固结试验。等向固结试验在英国 GDS 公司生产的三轴试验机上进行。试验采用瞬时加载的方式逐级进行不同应力水平的等向固结试验, 应力水平分别为 0.30、1.50、2.50 MPa。根据等向固结时试样的排水量换算试样体积变化, 3 组试验计算出的 $e-\lg t$ 曲线如图 6 所示。可以看出等向固结的次固结系数非常小。

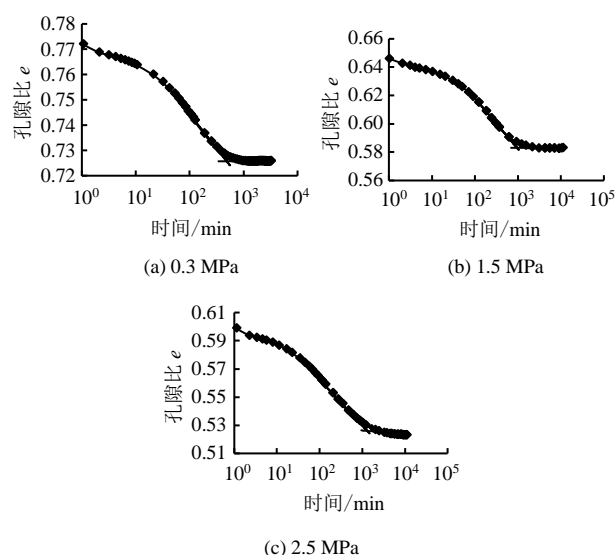


图 6 等向固结 $e-\lg t$ 曲线

Fig.6 Curves of $e-\lg t$ from isotropic consolidation tests

表 2 给出了等向固结次固结系数随固结压力的变化情况并将其绘制在图 7 中。由图可知, 相比于单向固结, 等向次固结系数明显偏小。陈宗基^[25]认

为次固结阶段主要受偏应力的影响, Mitchell 等^[19]也提到, 主固结对应于孔隙中水的排出, 而次固结则受控于颗粒微观结构调整引起, 而这种结构调整可能对偏应力更为敏感。理论上, 等向固结中偏应力为 0 即应力比为 0, 不发生剪切变形。因此其均没有明显次固结阶段。而单向固结中存在偏应力, 如前所述也均具有明显的次固结阶段。另外, 由图 7 可知, 随固结压力的增大, 等向固结次固结系数增大, 且等向固结与单向固结试验获得的次固结系数之间的差距逐步减小。

表 2 等向固结次固结系数
Table 2 Coefficients of secondary consolidation from isotropic consolidation

压力/MPa	主固结时间/min	次固结系数 C_α
0.30	490	0.000 08
1.50	950	0.000 20
2.50	1 400	0.000 90

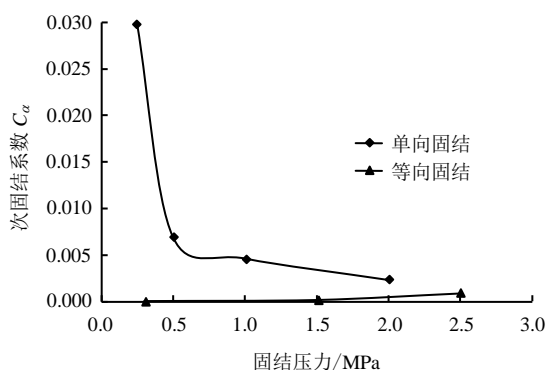


图 7 次固结系数随固结压力变化曲线

Fig.7 Secondary consolidation coefficient from isotropic consolidation

结合 3.2.2 节的微观分析, 可以进一步讨论上述试验结果的物理涵义。小于 2.00 MPa 压力情况下, 相比于单向固结, 等向固结试验获得的次固结系数明显偏小, 再次说明低压下导致次固结变形的颗粒相对滑移机制受控于偏应力; 随着固结压力的增大, 结合水膜的蠕变是次固结变形的主因, 因此, 随着结合水占比的增大, 等向固结获得的次固结系数也略有增大; 在超过 2.00 MPa 的高压下, 单向固结和等向固结的次固结系数接近, 表明本文试验范围内无论是压应力还是偏应力对结合水膜蠕变的贡献均比较小。

利用 GDS 三轴试验机进行了 0.30 MPa 单向固结试验, 但是由于无法像前述固结仪一样施加瞬间载荷, 选择线性加载方式, 相应速率为 10 kPa/h, 整个围压加载过程中, 孔隙水压力没有明显增长。

当围压达到 0.30 MPa 后, 利用 K_0 固结模块将围压目标值设为 0.30 MPa, 继续加载 3 d。

三轴线性加载单向固结试验的 e - $\lg t$ 曲线如图 8 所示, 次固结系数 $C_\alpha = 0.000\ 9$, 远小于前文的 0.25 MPa 单向固结试验获得的 $C_\alpha = 0.029\ 9$ 。可见次固结系数不仅与偏应力和固结压力有关, 而且也与加载方式相关。Crawford^[26]认为受荷之后土体便会立即产生次固结变形, 而不只是发生在主固结完成后。这里的试验采用足够缓慢的线性加载方式, 因此, 次固结可能伴随着主固结已经完成。即使缓慢的线性加载对次固结影响巨大, K_0 固结的次固结系数依然比 0.30 MPa 等向固结高一个量级。这个试验结果再次表明偏应力对低压下次固结系数具有控制性影响。

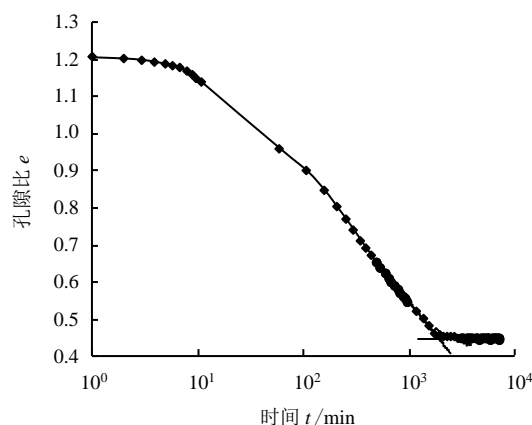


图 8 GDS 线性单向固结 e - $\lg t$ 曲线

Fig.8 Curve of e - $\lg t$ from GDS linear unidirectional consolidation

4 结 论

本文利用自行研制的高压固结仪和 GDS 三轴试验系统对重塑黏土进行了最大固结压力分别为 12.00 MPa 和 2.50 MPa 的一维固结试验和等向固结试验, 分析获得如下结论:

(1) 重塑黏土的一维固结试验表明, 无论固结压力高低, 所获得的压缩曲线均有明显的次固结阶段; 而且其一维次固结系数随竖向压力增大而呈阶段性变化: 当固结压力小于 2.00 MPa 时, 次固结系数随竖向压力增大而减小; 当固结压力大于 2.00 MPa 后, 次固结系数几乎不变。相同压力等级下, 等向固结试验获得的次固结系数要小得多, 而且其随固结压力增大的变化规律也不同于单向固结。

(2) 微观分析表明, 低压下黏土次固结变形以颗粒之间的相对滑移为主因, 高压下则以结合水膜

的蠕变为主因, 能够合理解释上述试验现象。

(3) 单向固结和无偏应力的等向固结试验表明, 低压情况下, 偏应力对于次固结变形具有控制性影响, 但高压下这种影响变得微弱。

参考文献

- [1] 张永双, 曲永新. 鲁西南地区上第三系硬黏土的工程特性及工程环境效应研究[J]. 岩土工程学报, 2000, 22(4): 446—449.
ZHANG Yong-shuang, QU Yong-xin. Study on the engineering properties and engineering environmental effects of Neogene hard clays in south-west of Shandong province[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2000, 22(4): 446—449.
- [2] 许延春. 深部饱和黏土的力学性质特征[J]. 煤炭学报, 2004, 29(1): 26—30.
XU Yan-chun. Mechanics characteristics of deep saturated clay[J]. **Journal of China Coal Society**, 2004, 29(1): 26—30.
- [3] 李文平. 饱水黏性土高压密实过程中孔压及体应变化试验研究[J]. 岩土工程学报, 1999, 21(6): 666—669.
LI Wen-ping. Variation of pore water pressure and volume strain of saturated clayey soil during high pressure compression test[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 1999, 21(6): 666—669.
- [4] 李文平, 张志勇, 孙如华, 等. 深部粘土高压 K_0 蠕变试验及其微观结构各向异性特点[J]. 岩土工程学报, 2006, 28(10): 1185—1190.
LI Wen-ping, ZHANG Zhi-yong, SUN Ru-hua, et al. High pressure K_0 creep experiment and the anisotropy of microstructure of deep buried clay[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2006, 28(10): 1185—1190.
- [5] NORIHIKO Miura, TETSURO Yamamoto. Crushing properties of sand grains during shear at high confining pressures[J]. **Memoirs of the Faculty of Engineering Yamaguchi University**, 1974, 24(3): 53—58.
- [6] 马金荣, 秦勇, 周国庆. 黏土的高压三轴剪切特性研究[J]. 中国矿业大学学报, 2008, 37(2): 176—179.
MA Jin-rong, QIN Yong, ZHOU Guo-qing. Research on tri-axial shear properties of clay under high pressures[J]. **Journal of China University of Mining & Technology**, 2008, 37(2): 176—179.
- [7] 商翔宇, 余海岁, 周国庆, 等. 高应力水平下深部粘土力学特性微观分析[J]. 岩土工程学报, 2012, 34(2): 363—368.
SHANG Xiang-yu, YU Hai-sui, ZHOU Guo-qing, et al. Micro analysis of mechanical characteristics of deep clay under high stress level[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2012, 34(2): 363—368.
- [8] 王秀艳, 唐益群, 臧逸中, 等. 深层土侧向应力的试验研究及新认识[J]. 岩土工程学报, 2007, 29(3): 430—435.
WANG Xiu-yan, TANG Yi-qun, ZANG Yi-zhong, et al. Experimental studies and new ideas on the lateral stress in soil[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2007, 29(3): 430—435.
- [9] 隋旺华, 张改玲, 沈文. 矿区深厚土层的高压固结与固结特性[J]. 煤田地质与勘探, 1994, 22(2): 37—40.
SUI Wang-hua, ZHANG Gai-ling, SHEN Wen. High pressure consolidation and secondary consolidation characteristics of deep soil layers in a coal mining area[J]. **Coal Geology & Exploration**, 1994, 22(2): 37—40.
- [10] 王衍森, 崔广心, 杨维好. 深部土的高压 K_0 固结试验研究展望[J]. 岩土力学, 2003, 24(增刊 2): 687—690.
WANG Yan-sen, CUI Guang-xin, YANG Wei-hao. Prospect of experimental studies of high-pressure consolidation tests of soils in thick alluvium[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2003, 24(Supp. 2): 687—690.
- [11] 殷宗泽, 张海波, 朱俊高, 等. 软土的次固结 [J]. 岩土工程学报, 2003, 25(3): 521—526.
YIN Zong-ze, ZHANG Hai-bo, ZHU Jun-gao, et al. Secondary consolidation of soft soils[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2003, 25(3): 521—526.
- [12] 侯晓亮, 赵晓豹, 李晓昭. 南京河西地区软土次固结特性试验研究[J]. 地下空间与工程学报, 2009, 5(5): 888—892.
HOU Xiao-liang, ZHAO Xiao-bao, LI Xiao-zhao. Study on secondary consolidation deformation characteristics of soft soil at Hexi region in Nanjing[J]. **Chinese Journal of Underground Space and Engineering**, 2009, 5(5): 888—892.
- [13] 冯志刚, 朱俊高. 软土次固结变形特性试验研究[J]. 水利学报, 2009, 40(5): 583—588.
FENG Zhi-gang, ZHU Jun-gao. Experimental study on secondary consolidation behavior of soft soils[J]. **Journal**

- of **Hydraulic Engineering**, 2009, 40(5): 583—588.
- [14] 商翔宇, 郑秀忠, 周国庆. 高压下饱和黏土 B 系数研究[J]. 岩土工程学报, 2015, 37(3): 532—536.
- SHANG Xiang-yu, ZHENG Xiu-zhong, ZHOU Guo-qing. Coefficient B of saturated clay under high pressure[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2015, 37(3): 532—536.
- [15] 周秋娟, 陈晓平. 软土次固结特性试验研究[J]. 岩土力学, 2006, 27(3): 404—408.
- ZHOU Qiu-juan, CHEN Xiao-ping. Test study on properties of secondary consolidation of soft soil[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2006, 27(3): 404—408.
- [16] 张先伟, 王常明. 软土结构性对次固结系数的影响[J]. 岩土力学, 2012, 33(2): 476—482.
- ZHANG Xian-wei, WANG Chang-ming. Effect of soft clay structure on secondary consolidation coefficient[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2012, 33(2): 476—482.
- [17] 陈晓平, 朱鸿鹄, 张芳枝, 等. 软土变形时效特性的实验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(12): 2142—2148.
- CHEN Xiao-ping, ZHU Hong-hu, ZHANG Fang-zhi, et al. Experimental study on time-dependent deformation of soft soil[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2005, 24(12): 2142—2148.
- [18] 余湘娟, 殷宗泽, 董卫军. 荷载对软土次固结影响的试验研究[J]. 岩土工程学报, 2007, 29(6): 913—916.
- YU Xiang-juan, YIN Zong-ze, DONG Wei-jun. Influence of load on secondary consolidation deformation of soft soils[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2007, 29(6): 913—916.
- [19] MITCHELL J K, SOGA K. Fundamentals of soil behaviors[M]. Blackburg: Wiley, 2005.
- [20] 李硕, 王常明, 吴谦, 等. 上海淤泥质黏土固结蠕变过程中结合水与微结构的变化[J]. 岩土力学, 2017, 38(10): 2809—2816.
- LI Shuo, WANG Chang-ming, WU Qian, et al. Variations of bound water and microstructure in consolidation-creep process of Shanghai mucky clay[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2017, 38(10): 2809—2816.
- [21] SHANG X Y, ZHOU G Q, KUANG L F, et al. Compressibility of deep clay in East China subjected to a wide range of consolidation stresses[J]. **Canadian Geotechnical Journal**, 2015, 52(2): 244—250.
- [22] PUSCH R, YONG R N. Microstructure of smectite clays and engineering performance[M]. London: Taylor & Francis, 2006.
- [23] 屈智炯. 土的塑性力学[M]. 成都: 成都科技大学出版社, 1987: 43—54.
- QU Zhi-jiong. Plastic mechanics of soil[M]. Chengdu: Chengdu Science and Technology University Press, 1987: 43—54.
- [24] 李国维, 胡坚, 陆晓岑, 等. 超固结软黏土一维蠕变次固结系数与侧压力系数[J]. 岩土工程学报, 2012, 34(12): 2198—2205.
- LI Guo-wei, HU Jian, LU Xiao-cen, et al. One-dimensional secondary consolidation coefficient and lateral pressure coefficient of over-consolidated soft clay[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2012, 34(12): 2198—2205.
- [25] 陈宗基. 固结及次时间效应的单向问题[J]. 土木工程学报, 1958, 5(1): 1—10.
- CHEN Zong-ji. One dimensional problems of consolidation and secondary time effects[J]. **Chinese Journal of Civil Engineering**, 1958, 5(1): 1—10.
- [26] CRAWFORD C B. State of the art: evaluation and interpretation of soil consolidation tests[C]//American Society for Testing and Materials. Philadelphia: [s. n.], 1986: 71—103.