

DOI: 10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.2017.01.15

海洋土取样应力释放三轴模拟试验研究

马永政¹ 蔡可键¹ 张荣堂² 王 勇³ 楼智伟¹

(1. 宁波工程学院 浙江 宁波 315016; 2. 伦敦南岸大学 英国;
3. 中国科学院武汉岩土力学研究所/岩土力学与工程国家重点实验室 湖北 武汉 430071)

摘要: 基于海底现场取土样,利用 GDS 高压三轴试验仪重塑不同压力条件下的海洋土,在此基础上通过三轴加卸载试验,模拟研究高压海洋土在非保真取样过程中的卸荷响应特性,即围压-土样体积变化规律。饱和土样总体积变化一般可用反压体积变化近似描述,本文进一步考虑了高压水可压缩性的影响。通过不同加卸载循环次数以及卸载时间等的试验,表明其对高压试验结果影响很小,不同初始围压与孔压土样的卸荷试验则表明了孔压越大土样体积变化越明显等特点。卸载试验总的特征为:高压卸载过程中土样体积膨胀开始慢,发展逐渐变快,至尾段变化最快;不同作用因素对卸载中间阶段影响明显,而对初始段和末尾段影响不明显,这与中低压卸载特性存在一定区别。

关键词: 海洋土; 高压; 孔隙水压; 取样; 三轴试验; 卸载

中图分类号: TU411.5

文献标识码: A

文章编号: 1000-3665(2017)01-0097-07

Using triaxial unloading tests to simulate the marine soil sampling process

MA Yongzheng¹, CAI Kejian¹, ZHANG Rongtang², WANG Yong³, LOU Zhiwei¹

(1. Ningbo University of Technology, Ningbo, Zhejiang 315016, China; 2. Britain London South Bank University, Britain; 3. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering/Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan, Hubei 430071, China)

Abstract: To simulate the unloading sampling process of marine soil, laboratory triaxial tests are carried out with the marine soil from the seabed, and the advanced GDS triaxial test instrument is employed to remold the marine soil sample under the same initial pressure conditions as those of the field soil, thus the properties of marine soil, e. g., cell pressure vs soil volume change, are investigated. In general, the saturated soil sample volume change is approximately measured by the volume change of the back pressure controller; the correction of volume change due to compressibility of high-pressed water is also taken into consideration in this study. The test results with different test conditions, such as different loading and unloading cycles, as well as different unloading times, show that the high-pressure test results are not sensitive to these conditions. The unloading tests on different initial confining and pore pressures show that soil volume change increases with the initial pore pressures, etc. The general test features of the unloading sampling process are concluded in this study. The high-pressed soil sample swells slowly in the early unloading process, and then becomes steadily quicker, and the quickest in the end. The results of all the test conditions only differ from each other in the middle stage of the unloading process, not at the beginning or at the end stages, which is somewhat different

收稿日期: 2016-10-18; 修订日期: 2016-11-10

基金项目: 浙江省自然科学基金项目资助(LY13E080009)

第一作者: 马永政(1975-),男,博士,副教授,主要从事岩土数值方法理论与物理试验研究。107723274@qq.com

from that of low-pressed soils.

Keywords: marine soil; high pressed; pore water pressure; sampling; triaxial test; unloading

近年来,随着深部工程的发展,如陆地上深部软土地层中煤矿开发,以及核废料深部储置采用膨润土的隔离措施等^[1],高压深土力学问题得到相关学者的研究关注。李文平等^[2-3]通过自制高压设备系统进行 K_0 固结和蠕变试验,以及对原状土与重塑土进行高压卸载对比试验,确定其结构参数并建立本构模型。Jiang^[4]研究发现软土孔隙水压力系数 B 值随深度增加而减少;商翔宇等^[5]利用GDS设备进行饱和黏土不同压力等向固结试验以及 B 检测分析,认为高压下有少量含气孔隙水的压缩性,是导致 B 值减少的主要原因。此外,马金荣等^[6]进行了软黏土重塑样的高压三轴剪切试验研究,比较了等压固结与 K_0 固结土样剪切强度以及 K_0 下降速率的差异,赵晓东等^[7]通过 K_0 固结试验分析了不同拉压应力路径下高压重塑土本构和强度特性。总之,通过陆上深土力学问题的研究,人们加深了对于高压环境下土力学特性以及与常压土区别的认识。

一般地,陆地深部土固结程度高,天然含水率低,液限指标较低甚至为负数。相比较而言,海洋土则饱和度高,且承受较高的海水压强,因此内部孔隙水压高^[8],具有高围压与高孔压的特点,其性质显然不同于低含水率的陆地深部土。海洋土勘探取样从百米级甚至千米级深的海底至水面,如果不采取保压措施,则是在较短时间内从高围压与高孔压逐渐卸荷为零的过程,高应力释放难免会带来扰动影响,尤其是“非饱和”的含生物气土,受扰动影响会更剧烈^[9]。即使有国内外大型勘探开发计划如国际大洋钻探计划(ODP)等研究海底保真取样技术,但运输、储藏、室内试验切割取样等各个环节中,仍难免存在土样的应力释放扰动影响^[10]。因此,利用先进的室内土工压力仪器设备,通过重塑海底高压条件并模拟其卸荷过程,成为研究评估海洋土工程特性的重要手段之一。

基于以上分析,本文利用取自海底现场的软黏土样进行室内高压固结与卸荷试验,以研究海洋土特性,与一般滨海软土固结特性试验研究^[11]的主要区别是,本文试验需要高压加卸载以及控制反压值。具体步骤是,先重塑海底土高围压与高孔压条件,再通过三轴等压卸载试验,近似模拟取样并提升至水面的应力释放过程,探讨不同条件下海底高

压饱和土卸荷响应特性,为海洋低扰动取样提供参考依据。

1 试验方案

1.1 试验仪器

本试验包括重塑高压海底土样和模拟取样卸荷两个过程。重塑土试验过程中,主要利用反压体积控制器控制特定反压值,通过维持围压与反压水平,直至高压固结渗透完成,使得孔压与反压趋于一致,由此得到高围压与高孔压的饱和软黏土重塑样。在模拟卸载过程中,控制不同的围压和反压卸载速率,并维持适当的内外压净压差。试验设备利用英国GDS的DYNTTS MINDYN动静三轴仪器,配置有容积为200 mL的16 MPa高压控制器、200 mL的4 MPa孔压传感器、40 kN荷重传感器和耐高压不锈钢压力室等,设备装样如图1所示。



图1 GTS 高压动静三轴试验仪及装样图

Fig. 1 GTS DYNTTS and loading the soil sample for high pressure tests

1.2 重塑土样制备与参数测定

本试验所采用的海底软黏土样来自浙江省舟山近海海底,由浙江省勘察设计院提供。试验重塑土样直径38 mm、高度76 mm。分2组,每组3个,土样制备遵循室内土工试验规程。为使重塑土样充分饱和,试验前土样先进行抽真空饱和,浸泡48 h以上;再将土样从三瓣膜中取出、装样,进行反压饱和处理;通过 B 参数检测,确认饱和度达到99%以上,即完成饱和土样制备。

按相应土工试验规程,测得土样基本参数如下:液限36.4%,塑限21.5%,土粒比重2.69。各土样具体参数如表1所示。

表 1 重塑土样物理参数指标

Table 1 Physical parameters of the remodeling soil sample

土样编号	土样干重/g	干密度 $\gamma_s / (g \cdot cm^{-3})$	初始孔隙率 $n_0 / \%$	饱和含水率 $w / \%$	初始饱和度 $S_0 / \%$
①	139.6	1.62	39.7	24.5	99.0
②	135.3	1.57	41.6	26.5	99.0
③	143.0	1.66	38.3	23.1	99.0
④	144.8	1.68	37.5	22.3	99.0
⑤	134.4	1.56	42.0	26.9	99.0
⑥	141.3	1.64	39.1	23.9	99.0

* 注: 初始饱和度为设备在初始较低压力下 B 检测的设定值。

1.3 试验步骤

首先对土样进行各向等压加载, 通过设定一定的围压、反压目标值, 逐步加载到不同的高压水平。在达到目标压力后, 维持相应压力水平, 使得渗透完成, 超孔压消散到与当前反压水平一致, 即形成不同高围压与高孔压水平的饱和土。试验应力水平设定如下: 围压(800 kPa) / 反压(400 kPa, 500 kPa, 600 kPa); 围压(1 600 kPa) / 反压(1 000 kPa, 1 200 kPa, 1 400 kPa); 围压(2 400 kPa) / 反压(2 000 kPa, 2 200 kPa, 2 300 kPa); 围压(3 600 kPa) / 反压(3 000 kPa, 3 200 kPa, 3 400 kPa)。为模拟取样卸载过程, 利用上述获得的高围压和高孔压三轴重塑土样继续进行各向等压卸载, 使得围压与反压同步卸荷至零。试验时设定不同的卸荷时长, 从 10 ~ 60 min 不等, 对应围压与反压卸载速率范围为 15 ~ 100 kPa/min, 相应的反压卸荷速率略低。

由上述可知, 本试验一次加卸载循环包括加载、恒压维持和卸载三个阶段。对于单个土样可以进行多次加卸载循环模拟试验, 只是围压与反压随循环次数增加而逐渐增大, 以避免形成超固结土。

2 试验结果与分析

2.1 围压-反压体积变化分析

试验过程中, 围压和反压及相应的体积变化、孔压变化等可以直接由传感器读出。典型的加卸载循环过程中, 围压、反压和孔压随时间变化关系如图 2 所示。

由图 2 可以看出, 在加载段, 围压 P_1 与反压 P_b 按一定比率增加, 其差值即为土样所受有效固结围压, 其值 $P_e = P_1 - P_b$, 显然 P_e 随加载时间增加而不断增加。在恒压维持段, 围压与反压不变, 受围压影响而形成的超孔压最开始高于反压, 但会逐渐消散而趋同于反压值。卸载段则围压与反压同时下降,

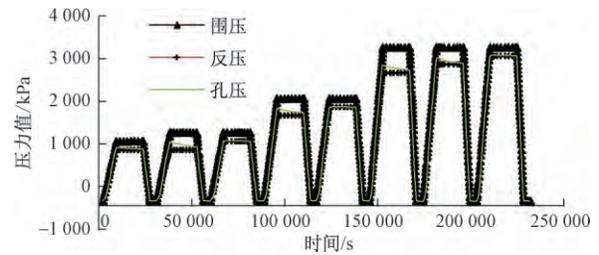


图 2 加卸载中各压力随时间关系曲线

Fig. 2 Curves of different pressure vs time in loading / unloading steps

P_e 逐渐下降为 0。土样体积变化 ΔV 可以通过反压控制器体积变化读数 ΔV_0 来近似计量。值得注意的是, 反压控制器向土样注水时, ΔV_0 读数为正, 反之为负。典型的围压 P_1 与 ΔV_0 关系曲线如图 3 所示。从图 3 中可以看出:

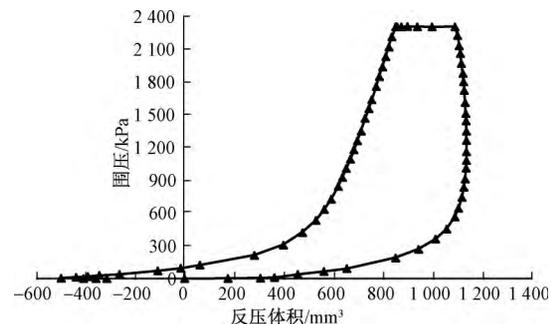


图 3 围压 (P_1) -反压体积 (ΔV_0) 关系曲线

Fig. 3 Relationship of confining pressure (P_1) vs volume of back pressure (ΔV_0)

(1) 在加载阶段(图示右侧上升段), 尽管随着 P_1 以及有效围压 P_e 的缓慢增加, 土样被注水膨胀且暂时未达平衡, 只是膨胀率逐渐降低, 当压力达到一定值后出现压缩排水的反转现象。

(2) 在恒压维持阶段(上侧水平段), 土样处于有效围压 P_e 最大值, 固结排水, 因而 ΔV_0 逐渐变小。

(3) 在卸载阶段(图示左侧下降段), 围压 P_1 和反压 P_b 都在逐渐变小, 对应的有效围压 P_e 尽管也在降低, 但由于 P_e 始终大于 0, 土样继续固结排水, 因而 ΔV_0 变小。值得注意的是, 当外压完全卸载后, 在一定时间内土样因继续回弹膨胀吸水, 体积变化发生反转, 出现由压缩变小到略微增大的现象。

2.2 围压-土样体积变化分析

对于绝大多数岩土介质材料, 其压缩系数 C_s 一般介于 $(1 \sim 3) \times 10^{-8} \text{ kPa}^{-1}$, 纯水的压缩系数 C_w 约为 $48 \times 10^{-8} \text{ kPa}^{-1}$ [5]。而常温下气体的压缩系数则相对

高得多,如空气压缩系数 C_a 约为 $1.0 \times 10^{-3} \text{ kPa}^{-1}$,显然相比气体介质,土颗粒和水的压缩性完全可以忽略。本试验模拟的是千米以内的水深,其压力水平在 10 MPa 以内,因此在完全饱和条件下土颗粒、水材料本身的体应变不足 1‰,可以忽略不计。但实际上,即使饱和海洋土的孔隙水中,往往聚集有机或无机的微气泡,以及溶于水的气体,由于气体的影响,高压下孔隙水的压缩性则不可忽视。

由于本试验为高压试验,土样总体积变化 ΔV 不仅包括反压体积变化 ΔV_0 ,还包含管路和反压控制器中的水体积总变化 ΔV_p ,即有:

$$\Delta V = \Delta V_0 + \Delta V_p \quad (1)$$

显然,对于饱和土样常压排水固结试验,往往忽略 ΔV_p 变化,则土样体积变化即为反压体积变,即 $\Delta V = \Delta V_0$ 。

为了估算 ΔV_p ,以对总体积变化 ΔV 进行修正,可以根据本文试验所用水的压缩性系数进行修正。本文测得所采用水在常温高压下的压缩性变化如图 4 所示。

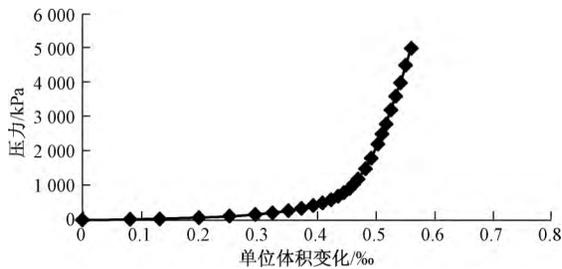


图 4 常温下自然水的压缩性曲线

Fig. 4 Compression curve of the natural water under normal temperature

已知饱和土样以及管路和反压容器中水的总体积约为 250 mL,则根据式(1)对 ΔV 进行修正,修正前后 $P_i-\Delta V$ 曲线如图 5 所示。 $P_i-\Delta V$ 曲线修正前即为图 3 的 $P_i-\Delta V_0$ 曲线,也即不考虑水压缩性体积变化;修正后曲线形状基本上不变,修正后土样总体积变化略有增大。

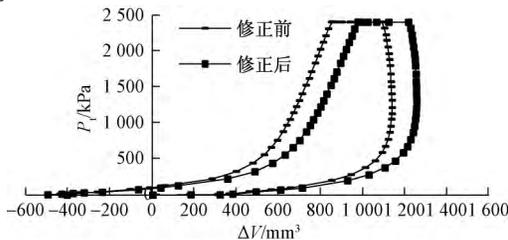


图 5 $P_i-\Delta V$ 关系曲线修正

Fig. 5 Curve of the correction of P_i vs ΔV

3 卸荷特性及影响因素分析

本文以研究围压与修正后土样体积变化之间关系规律为主,通过不同条件下的卸荷试验分析高压海洋土卸荷特性,并与中低压卸荷试验的结果进行比较。由于加载与恒压维持阶段是为制定特定饱和土样的准备阶段,则省略不予分析讨论。

3.1 不同土样的卸荷试验

图 6 列出 3 个不同土样在 2 组高围压/孔压下(即分别为 2 400 kPa/2 200 kPa, 3 600 kPa/3 000 kPa)的卸荷试验数据结果。可以看出,各土样卸荷试验曲线基本一致,说明只要初始卸荷条件一样,从不同土样卸荷试验得到的围压-体变规律是基本相同的,说明土样试验具备可重复性。

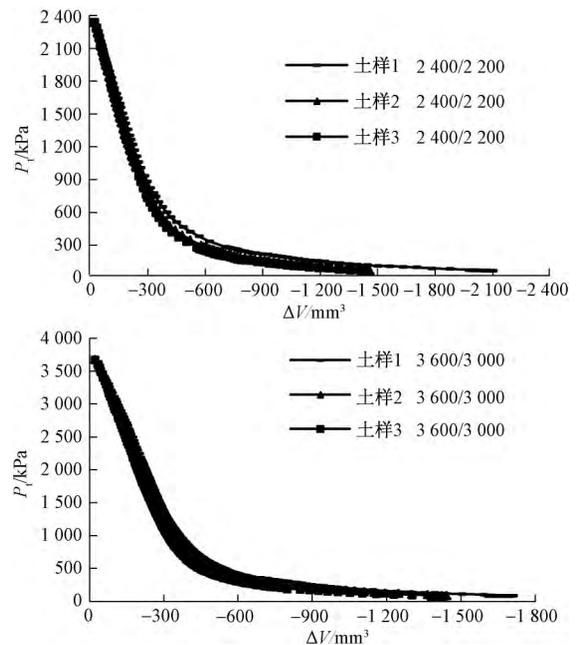


图 6 不同土样相同初始压力条件下的卸荷曲线

Fig. 6 Unloading curves of different samples with the same initial conditions

3.2 不同循环次数和卸载速率的影响分析

先进行中低压下的循环加卸载试验。设土样目标围压/反压为 800 kPa/600 kPa,进行反压饱和土样 6 h,然后在 30 min 内围压反压同步卸载为 0,卸荷完成 2 h 后,经测定残余孔压基本消散为 0,接着重复上述过程共 5 次,结果如图 7 所示。图 7 表明 5 次循环加卸载对应的卸载曲线总体上基本一致,随着循环次数增加,土样逐渐被压密实,卸荷压缩排水效果变差,曲线略微变陡但不明显。

为了与上述过程有效对比,接着进行更高围压/反

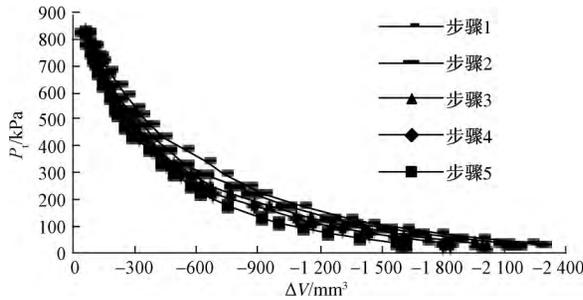


图 7 多次加卸载循环的卸载段曲线
(围压/反压 800 kPa/600kPa)

Fig. 7 Many times unloading curves of the loading/unloading circles (P_t/P_b : 800 kPa/600kPa)

压的加卸载试验。设目标围压/反压为 2 400 Pka/2 200 kPa,进行了 3 个重复循环加卸载步骤,对应的试验结果如图 8 所示,表明在高压下土样已压实密,卸荷曲线更趋一致性。

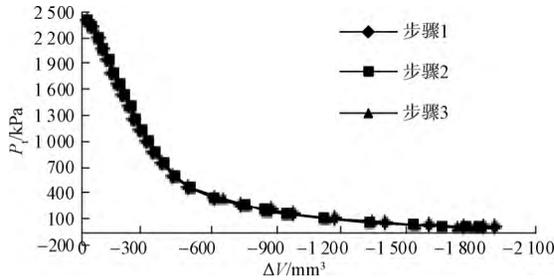


图 8 围压/反压为 2 400 kPa/2 200 kPa 时的多次卸载段曲线
Fig. 8 Many times unloading curves as P_t/P_b is 2 400 kPa/2 200 kPa

由图 9 可看出,在初始围压/孔压相同情况下,随着卸载时间增加,围压-体变关系曲线有明显逐渐变陡的趋势,总的体积变化量也逐渐变小。接着进行更高围压/反压水平下(分别为 2 400 kPa/2 200 kPa 3 600 kPa / 3 000 kPa)的三轴试验,其试验结果如图 10 所示。

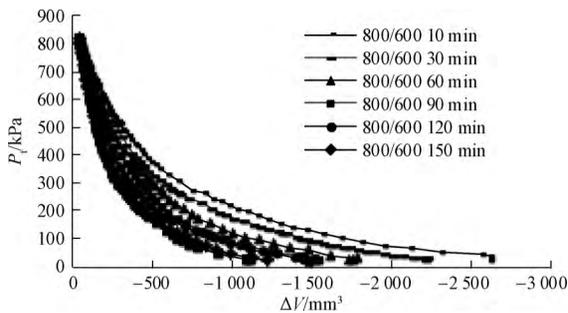


图 9 围压/反压为 800/600kPa 时的中低压卸载曲线
Fig. 9 Unloading curves of the normal or low pressed soil as P_t/P_b is 800 kPa/600 kPa

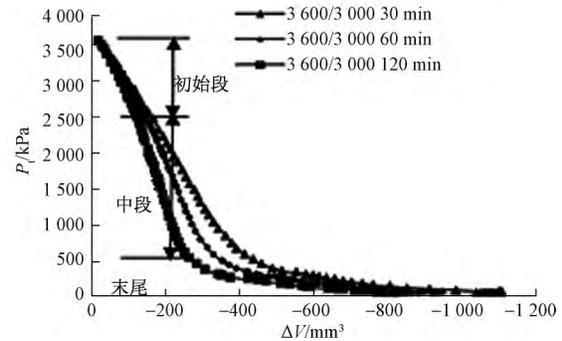
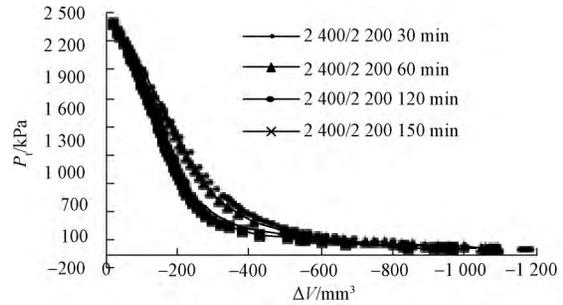


图 10 高压卸载曲线

Fig. 10 Unloading curves of the high pressed soil

图 10 表明,在初始围压/反压水平比较高的情况下,随着卸载时间增加,围压-体变曲线逐渐变陡。卸载曲线初始段重合度高,而中间段比较分散,这与图 9 中低压卸载结果是一致的,说明受卸载速率影响并不明显。但两图结果有区别的是:(1)在高压下各卸载曲线末尾段基本重合,中低压下卸载曲线却是分散的,且高压卸荷各条曲线之间贴紧度比中低压卸荷的更高。(2)高压卸载土样最终总体变明显小于中低压卸荷的总体变。上述两点说明中低压下受卸载速率的影响明显,卸载越慢则土样总体变越小,可解释为中低压下土样回弹膨胀吸水效应比较明显,且随卸载时间增加而增大,一定程度抵消有效围压固结排水作用;而高压下土样密实度相对高,总体积变化小,卸载末尾段回弹膨胀吸水效果不明显。

3.3 不同高围压/孔压卸载特性分析

首先比较围压相同但孔压不同条件下的卸载情况。由于设定初始围压为 2 400 kPa,3 600 kPa,4 200 kPa 的高压水平,根据上文中的试验规律,卸载时间长短对结果影响并不明显,在此设定每次按固定的 30 min 均匀卸载完成,初始孔压分别为 1 400 kPa,2 000 kPa,2 600 kPa,每新的循环开始仅增加反压 200 kPa 或 400 kPa,围压则维持不变,试验结果如图 11 所示。

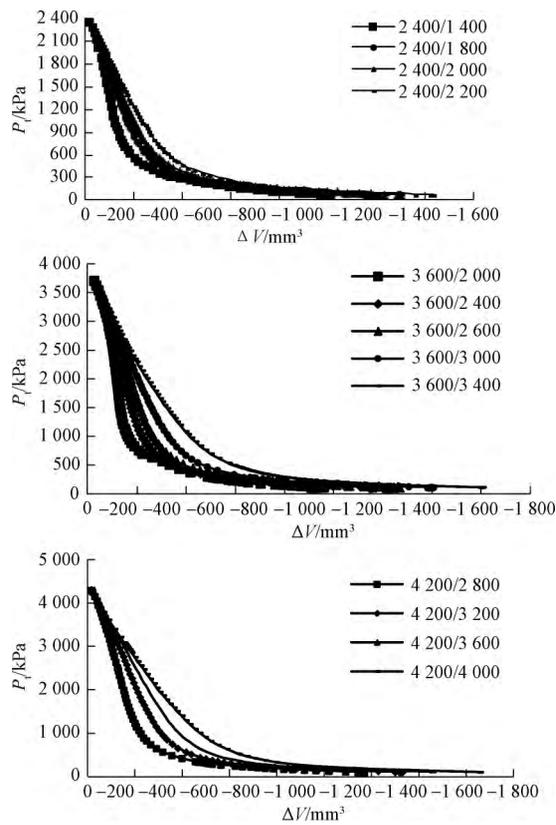


图 11 不同初始孔压下卸载结果

Fig. 11 Unloading results of different initial pore pressures

以上结果可看出,在卸载初始与末尾阶段,卸载曲线路径是趋于一致的。但在卸载中间阶段,卸载曲线随初始孔压增大而趋缓。对于上述卸载初始阶段曲线基本重合的现象,与上文中相同孔压试验结果比较类似,也可解释为高压下土样密实度高、含水量少,因此固结排水启动慢、不明显。对于卸载中间阶段曲线分离现象,说明初始孔压越大,则含水量越多,固结排水越快,对饱和土而言也即体积变化越大。对于卸载末尾段体积变化率加速的现象,还可以在在一定程度上归因于气相脱溶、减压膨胀作用的影响。

进一步进行孔压相同而围压不同情况下的试验。设初始围压和孔压分别为 2 400 kPa 和 2 200 kPa,初始围压随加卸载循环增加而增大。卸载曲线结果如图 12 所示,表明初始围压越大,卸载初始段曲线斜率越陡,这可解释为:随着初始围压增大,土样被压缩程度越高,相应的体积回弹模量越大,卸载时排水体积越少。但在卸载至围压低于 500 kPa 左右的阶段,各条曲线基本重合且渐趋水平,反映体积

变化率加速,显然与气相脱溶、减压膨胀的作用影响变大有关,500 kPa 可以大致看作高低压卸载的分界处。另值得注意的是,图 12(b)中,初始围压和孔压为 4 400 kPa 2 200 kPa 的结果有明显异常,排水体积过大,事后发现是试验时间过长,使得橡胶模漏水所导致。

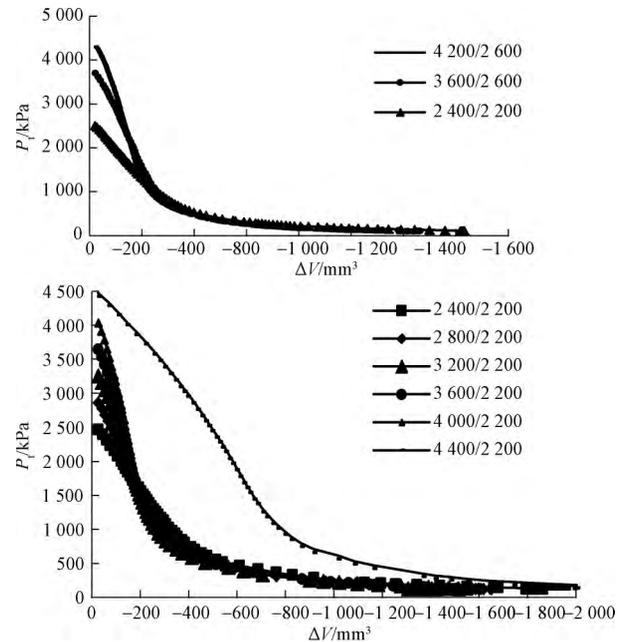


图 12 特定孔压和不同围压下的试验结果

Fig. 12 Test results of different confining pressures and the specific pore pressures

4 结论

(1) 在初始围压与孔压一致的情况下,循环加卸载次数对围压-体变关系曲线影响并不大,特别是高压下可以忽略,而卸载速率在中低压下对结果有一定的影响,但高压下影响小。

(2) 相同初始高围压下,初始孔压越大则体变越大,卸载围压-体变关系曲线越平缓。卸载中间阶段曲线分散表明受卸载作用因素影响明显,而初始段和末尾段曲线重合,受影响不明显,这与中低压卸载特性存在一定区别。相同初始孔压条件下,初始围压越大,围压-体变关系曲线越陡,但在卸载末段曲线路径趋向一致。

(3) 高压卸载过程中土样体积膨胀开始慢,发展逐渐变快,至尾段变化最快,在低于 500kPa 左右的围压值下,卸载曲线趋向重合一致,可以作为高低压水平的分界处。

上述高压饱和土卸荷规律的试验研究结果,可用

于卸载扰动特性的评估分析,可应用于海洋取样分析以及其他海洋土工程问题研究参考。

参考文献:

- [1] MARCIAL D , DELAGE P , CUI Y J . On the high stress compression of bentonites [J] . Canadian Geotechnical Journal 2002 , 39(4) : 812 - 820 .
- [2] 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 W P , ZHANG Z Y , SUN R H , *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 . (in Chinese)]
- [3] 李文平 , 孙如华 , 王维理 , 等 . 深部土高压卸载变形结构性量化参数确定及本构模型 [J] . 工程地质学报 , 2007 , 15(3) : 384 - 390 . [LI W P , SUN R H , WANG W L , *et al.* Constitutive model and structural parameter for unloading deformation of clay soils at high pressure from triaxial testing [J] . Chinese Journal of Engineering Geology , 2007 , 15(3) : 384 - 390 . (in Chinese)]
- [4] Jiang Ming-jing , Hongo T , Fukuda M , *et al.* Pre-failure behavior of deep-situated Osaka clay [J] . China Ocean Engineering , 1998 , 12(4) : 453-465 .
- [5] 商翔宇 , 郝秀忠 , 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 X Y , ZHENG X Z , ZHOU G Q . Coefficient B of saturated clay under high pressure [J] . Chinese Journal of Geotechnical Engineering 2015 , 37(3) : 532-536 . (in Chinese)]
- [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 J R , QIN Y , ZHOU G Q . Research on Tri-Axial Shear Properties of Clay Under High Pressures [J] . Journal of China University of Mining & Technology , 2008 , 37 (2) : 176 - 179 . (in Chinese)]
- [7] 赵晓东 , 周国庆 , 王博 . 深部重塑土高压应力路径试验研究 [J] . 中国矿业大学学报 , 2009 , 38(4) : 471 - 475 . [ZHAO X D , ZHOU G Q , WANG B . Study of the Stress Paths Tests for the Deep Reconstituted Soils at High Pressure [J] . Journal of China University of Mining & Technology , 2009 , 38 (4) : 471 - 475 . (in Chinese)]
- [8] 刘涛 , 崔逢 , 张美鑫 . 深海海床孔隙水压力原位观测技术研究进展 [J] . 水利学报 , 2015 , 46(增刊 1) : 111 - 116 . [LIU T , CUI F , ZHANG M X . Research progress of deep seabed pore pressure observation techniques in situ [J] . Chinese Journal of Hydraulic Engineering , 2015 , 46 (Sup 1) : 111 - 116 . (in Chinese)]
- [9] 孔令伟 , 郭爱国 , 陈守义 , 等 . 浅层天然气井喷对地层的损伤影响与桩基工程危害分析 [J] . 防灾减灾工程学报 , 2004 , 24(4) : 375 - 381 . [KONG L W , GUO A G , CHEN S Y , *et al.* Influence of shallow natural gas blowout on stratum damage and hazard analysis of pile foundation [J] . Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering , 2004 , 24(4) : 375 - 381 . (in Chinese)]
- [10] Zhang Rong-tang , Lunne T . Deepwater sample disturbance due to stress relief [J] . Chinese Journal of Geotechnical Engineering , 2003 , 25 (3) : 356 - 360 .
- [11] 李军霞 , 王常明 , 张先伟 , 等 . 两种滨海相软土固结特性的试验研究 [J] . 水文地质工程地质 , 2009 , 36(5) : 35 - 39 . [LI J X , WANG C M , ZHANG X W , *et al.* Experimental study on consolidation properties of two marine soft soils [J] . Hydrogeology & Engineering Geology , 2009 , 36(5) : 35 - 39 . (in Chinese)]

责任编辑: 张明霞

(上接第 96 页)

- [5] JGJ94—2008 建筑桩基技术规范 [S] . 北京: 中国建筑工业出版社 , 2008 . [JGJ94—2008 Technical code for building pile foundation [S] . Beijing: China Building Industry Press , 2008 . (in Chinese)]
- [6] 刘俊岩 . 《建筑基坑工程监测技术规范》GB50497—2009 研究与编制 [J] . 施工技术 , 2009 , 38(5) : 1 - 4 . [LIU J Y . “ Building foundation pit engineering monitoring technical specifications ” GB50497—2009 research and preparation [J] . Construction Technology , 2009 , 38 (5) : 1 - 4 . (in Chinese)]

责任编辑: 张明霞