

细粒含气土固结沉降特性试验研究

叶振波, 李洁如, 叶启扬, 陈晓轩, 周吾桐

(浙江大学 建筑工程学院, 浙江 杭州 310058)

摘要: 对于海洋沉积物, 气体通常是以封闭离散的大气泡形式存在的, 不同于孔隙水中或附着于骨架上的小气泡, 大气泡的存在推挤了土颗粒, 明显的改变了土骨架结构, 因此需要充分考虑大气泡存在对土体固结沉降特性的影响。为获得细粒含气土在瞬时荷载下的响应, 并确定细粒含气土的一维固结特性、孔压消散及沉降发展规律, 本文对重塑含气马来西亚高岭粉土开展了一系列瞬时加载下的一维固结试验, 得到如下结论: (1) 随着外部荷载的增加, 试样发生的瞬时沉降和瞬时孔压响应逐渐减小; 初始孔隙水压力增大, 瞬时沉降响应减小, 瞬时孔压响应增大, 而且对于同一外部荷载值, 随着饱和度的减小, 瞬时沉降有增加的趋势, 瞬时孔压响应有减小趋势。(2) 细粒含气土最终沉降量大于饱和土, 在饱和度相近时, 初始孔隙水压力小的最终沉降量大; 细粒含气土孔压消散时间快于饱和土。(3) 随着外部荷载增加, 孔隙比逐渐减小, 对于不同初始反压和不同初始饱和度的试样, 总孔隙比的压缩曲线不重合; 当仅考虑饱和基质的孔隙比时, 可以发现试样的压缩曲线基本重合。

关键词: 细粒含气土; 高级固结仪; 变反压; 固结特性; 沉降特性

中图分类号: TU411

文献标识码: A

文章编号: 2096-7195(2022)06-0472-07

Experimental study on consolidation and settlement characteristics of fine-grained gassy soil

YE Zhen-bo, LI Jie-ru, YE Qi-yang, CHEN Xiao-xuan, ZHOU Wu-tong

(Department of Architecture and Civil Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310058, Zhejiang, China)

Abstract: Gases in marine sediments usually exist in the form of closed and discrete large bubbles. It is different from small air bubbles in pore water or small air bubbles attached to the soil skeleton. The presence of large air bubbles pushes the soil particles and significantly changes the skeleton structure of soil. Therefore, it is necessary to fully consider the influence of the presence of large air bubbles on the consolidation and settlement characteristics of soil. In this work, a series of one-dimensional consolidation experiments under instantaneous loading were carried out on the remodeled aerated Malaysian kaolin silt. The responses of fine-grained gassy soil (FGS) under transient loads are obtained. And the one-dimensional consolidation characteristics, pore pressure dissipation and settlement development laws of FGS were determined. The results show that: (1) With the increase of external loading, the instantaneous settlement and instantaneous pore pressure response of the samples gradually decrease. With the increase of the initial pore water pressure, the transient subsidence response decreases and the transient pore pressure response increases. Under the same external loading, with the decrease of saturation, the instantaneous settlement has an increasing trend, and the instantaneous pore pressure response has a decreasing trend. (2) The final settlement of FGS is greater than the saturated soil. When the saturation is similar, as the initial pore water pressure decreases, the final settlement of FGS increases. The dissipation time of pore pressure of FGS is faster than the saturated soil. (3) As the external loading increases, the void ratio of FGS decreases gradually. For samples with different initial back pressures and different initial saturations, the compression curves of total void ratio are not the same. When only the void ratio of the saturated matrix is considered, the compressive curves of the samples are almost the same.

Key words: fine-grained gassy soil (FGS); advanced consolidation instrument; variable back pressure; consolidation characteristics; settlement characteristics

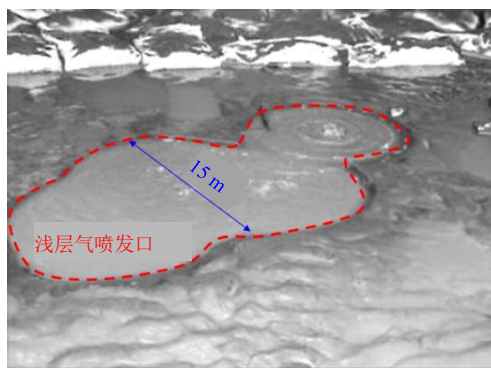
收稿日期: 2022-02-27

基金项目: 国家自然科学基金 (52122906; 52238008)。

作者简介: 叶振波 (1998—), 男, 浙江金华人, 硕士研究生, 主要从事含浅层气地层防灾减灾研究。E-mail: zhenboye@zju.edu.cn。

0 引言

对海洋含浅层气海床的认识需要长期以来的积累与研究, 先前由于对这方面的了解较为贫乏, 在一些海洋工程(如杭州湾大桥、海洋油气资源开采平台)的建设过程中, 存在事先估计不足或采取的防护措施不当等失误, 导致因浅层气存在引发了一些重大工程事故, 不仅贻误工期, 损害仪器设备财物, 而且给工作人员的生命安全带来了极大的威胁^[1], 如图1所示。比较典型的有: 前些年在杭州地铁勘探期间, 发生了严重的浅层气突涌灾变事故, 事后观察突涌泥沙量甚至有数十立方米; 杭州湾跨海大桥勘探过程中的天然气喷发, 致使钻探船只倾覆沉没, 损失巨大难以估量。在含浅层气地层中的地铁隧道, 土中气体的释放或回聚将使隧道产生附加变形与附加内力, 这对其整体稳定性的影响不容忽视, 易引起隧道产生差异沉降、管片环间出现错台或裂缝, 导致渗水、渗气, 甚至灾害事故的发生^[2]。随着工程领域的拓宽, 含气土地基的固结沉降问题将变得越来越常见^[3]。



(a) 杭州地铁1号线突涌灾变



(b) 杭州湾大桥勘探浅层气喷发

图1 浅层气工程灾害

Fig. 1 Engineering disasters induced by shallow gas

在非饱和的海洋沉积物中, 孔隙气大多为甲烷和氮气, 是由微生物厌氧发酵、热分解或者火山喷发等原因生成的, 起源于土体内部。国内外对含气黏土的研究主要集中在气泡影响下的黏土静力剪切响应。**WHEELER**^[4] 首先通过静力三轴压缩试验研究了不同初始孔压及有效应力情况下的含气黏土不排水剪切强度。试验表明, 气泡的存在可能会增强或减弱含气黏土的剪切强度, 这取决于有效固结应力和初始孔隙水压力。

PUZRIN 等^[5] 通过研究发现工程上利用微生物产生的气体能减少黏性土的主固结沉降时间, 黏性土固结持续时间长的两个主要原因是此类土体的低渗透性和孔隙水的不可压缩性。研究通过试验发现如下结论: (1) 气泡存在会使土体的初始沉降变大(可达总沉降量的50%), 不过对最终沉降量没有影响; (2) 气泡存在不影响最终沉降量, 而对固结过程影响较大, 但达到最终沉降量的时间不变。

HONG 等^[6] 在三轴中扩大初始孔隙水压力范围($u_{w0}=0\sim 1\,000\text{ kPa}$), 开展了不同初始孔压下的各向同性固结试验, 试验结果表明, 初始孔隙水压力增大会导致气泡更大的压缩量, 使气体占比降低, 土体整体的压缩性减小; 随着外部施加的有效应力的增大, 即使初始含气量有所不同, 最终的曲线仍会与饱和土的重合; 将气体孔隙比从总的孔隙比中剔除时, 观察水孔隙比(V_w/V_s)随有效应力变化曲线可以发现所有压缩曲线几近重合, 与含气土的初始状态无关。

尽管细粒含气土通常具有高饱和度($S_r > 85\%$), 其特性却难以用“饱和土+可压缩混合流体”理论来描述。因为大气泡的存在, 不仅仅增大了土体的压缩性, 还改变了土体的微观结构, 进而显著影响了土体的力学特性^[4] 和渗透特性^[7]。因此需要系统研究大气泡存在对海洋细粒含气土微观结构、固结压缩特性、渗透性等力学行为的影响。

为考虑气腔进水及气相回弹对细粒含气土固结特性的影响, 获得细粒含气土在瞬时荷载下的响应, 并确定细粒含气土的一维固结特性、孔压消散及沉降发展规律, 本文对重塑含气马来西亚高岭粉土开展了一系列瞬时加载下的一维固结试验。试验得到的瞬时孔压以及瞬时沉降响应对含气软黏土上的快速施工有一定的指导意义, 后续研究可以以试验结果为基础, 构建含气土固结模型, 为工程的沉降和固结完成时间提供理论支持, 也可预测施工后的变形和稳定性。

1 细粒含气土一维固结试验

1.1 试验设备与试样准备

所有一维固结试验都是在装备有 GDS 液压高级固结仪系统上开展的。该系统主要由轴压室、压力控制器、竖向位移计、孔压计、数据采集设备和电脑控制端组成,如图 2 所示。可以记录试验过程中每个含气土样竖向位移 d , 超孔隙水压力 Δu_w 、饱和度 S_r 随时间和外荷载的变化。压力控制器(围压)与施加竖向压力的水囊相连,为细粒含气土施加竖向应力。压力量测精度为 1 kPa,同时压力控制器还可用来量测压力室中水的体积变化,可以与位移控制器测量结果相互印证。反压控制器与反压阀门相连,阀门与土样之间有一连接通道,这样反压控制器中的水可以与土中水相互联通,土中水的进出体积可以由反压控制器量测,土样中的孔隙水压力也可以由压力控制器设置,通过统计压力控制器中的进出水量反算土样中孔隙水体积变化;对于细粒含气土,试样的总体积变化可由竖向位移计确定,土样中孔隙水体积的变化由反压控制器测得,通过二者计算即可得到气体体积的变化。各种传感器获取的数据都通过信号调节装置传递到电脑控制端,电脑通过 GDSLab 软件对数据进行监测的同时还可以对装置内部的竖向应力、反压进行控制。

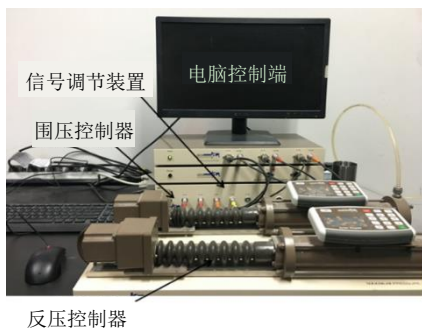


图 2 GDS 高级固结仪系统

Fig. 2 GDS advanced consolidation system

在深水取样过程中通常会面临这样一个问题:在深水中取到的样品在上升过程中由于水深变浅,相应的静水压力减小会导致土中的压力释放^[8],原先溶解于孔隙水中的气体会发生析出,已经存在的气泡因为周围压力减小而发生体积膨胀,气泡推挤土颗粒重新排列会扰动土体结构,如果取样时上升速度极快还会导致变化剧烈甚至会使土体中产生裂缝,因此基于现有的深水取样技术还很难取到未扰动原位细粒含气土样。根据 NAGESWARAN^[9] 的研究,多孔介质导入技术可以用来制备重塑细粒含气土样,多孔介质内的气体与水置换这一过程能够较为接近地模拟海洋环境中在微生物作用下大气泡的形成过程。

生物气泡一般存在于黏土和粉土中。本研究采用了马来西亚高岭粉土,其液塑限和力学参数如表 1 所示。根据 BSI5930 标准^[10],马来西亚高岭粉土属于高塑性粉土。本文采用氮气这一广泛存在于海洋沉积物中的生物气来制备含气土。利用多孔介质导入技术制备细粒含气土样步骤与张剑峰^[11]一致,图 3 为实验室制备的含气马来西亚高岭土样,与原状土含气土有类似的大气泡结构。

表 1 马来西亚高岭粉土土性指标和力学参数

Table 1 Properties and mechanical parameters of Malaysian kaolin silt

土性指标和力学参数	MK 粉土
液限 $W_L/\%$	65
塑限 $W_P/\%$	38
塑性指数 PI	27
代表颗粒粒径 $d_{50}/\mu\text{m}$	4.2
代表颗粒粒径 $d_{90}/\mu\text{m}$	14.0
摩擦角 $\varphi'/(^{\circ})$	25.5
静止土压力系数 K_0	0.57
临界状态应力比 M	1
归一化不排水抗剪强度 S_u/p'	0.3

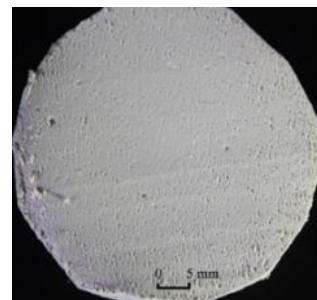


图 3 试验室制备的含气马来西亚高岭土样

Fig. 3 Gassy Malaysian kaolin samples prepared in the laboratory

1.2 试验列表

本研究一共开展了 3 个系列的应力控制的瞬时加载—维固结试验。3 个试验系列共包括 9 个含气土（用

G 代表）试验和 3 个饱和土（用 S 代表）试验（对照试验），试样初始状态如表 1 所示。试验考虑了初始孔隙水压力和初始饱和度的变化，试验列表如表 2 所示。

表 2 试验列表
Table 2 Test list

试验系列	试验编号	初始孔隙水压力 u_w/kPa	初始饱和度 $S_{r0}/\%$	初始水孔隙比 e_{w0}^*
I	G0_86.5	0	86.5	1.64
	G0_88.2		88.2	1.67
	G0_90.7		90.7	1.65
	S0_100		100.0	1.65
II	G100_87.4	100	87.4	1.65
	G100_88.9		88.9	1.69
	G100_90.3		90.3	1.67
	S100_100		100.0	1.64
III	G600_87.6	600	87.6	1.68
	G600_89.2		89.2	1.65
	G600_91.1		91.1	1.67
	S600_100		100.0	1.65

注：初始水孔隙比 e_{w0} ，在 60 kPa 竖向压力，0 m 水深，固结桶中固结完成时水的孔隙比（ V_w/V_s ）。

2 实验结果分析

2.1 不同初始孔压幅值下瞬时沉降变化规律

图 4 为不同初始孔压幅值下试样发生的瞬时沉降，（a）为初始反压为 0 kPa 的情况；（b）为初始反压为 100 kPa 的情况；（c）为初始反压为 600 kPa 的情况。从图中可知，随着外部荷载增加，试样发生的瞬时沉降逐渐减小，规律性较强；对应于同一外部荷载值，随着饱和度减小，瞬时沉降有增加的趋势，这可能是由于气泡瞬时压缩量差异所致，含气土的饱和度越小，则含气量越大，对于同一外部荷载，

含气量越大则气泡瞬时压缩导致的瞬时沉降越大。

2.2 不同初始孔压幅值下瞬时孔压变化规律

图 5 为不同初始孔压幅值下试样发生的瞬时孔压响应，（a）为初始孔压为 0 kPa 的情况；（b）为初始孔压为 100 kPa 的情况；（c）为初始孔压为 600 kPa 的情况。从图中可知，随着外部荷载增加，试样的瞬时孔压响应逐渐减小，规律性较强；而且对于同一外部荷载值，随着饱和度的减小，瞬时孔压响应也逐渐减小，这可能是气腔进水现象导致的，饱和度越小，含气量越大，气腔进水效应可能越明显，导致瞬时孔压的响应减小。

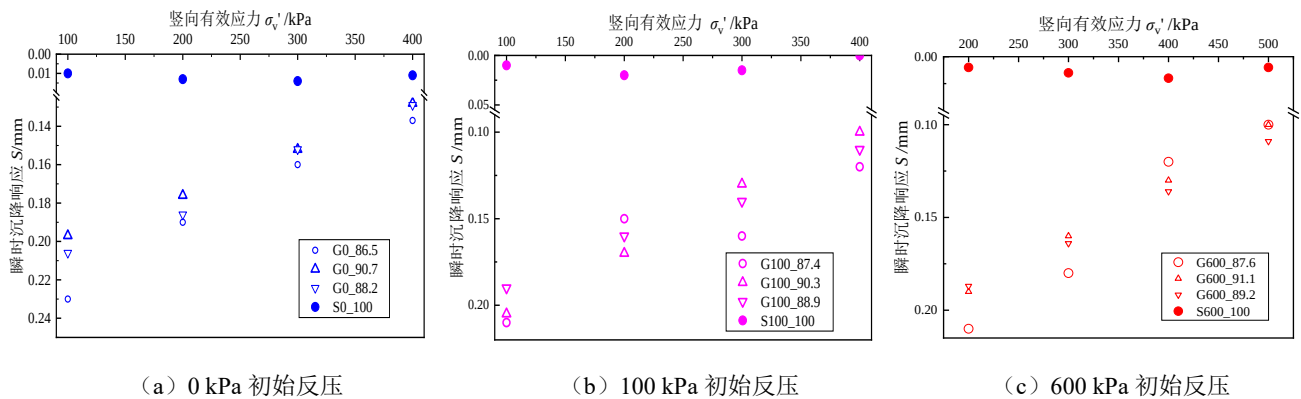
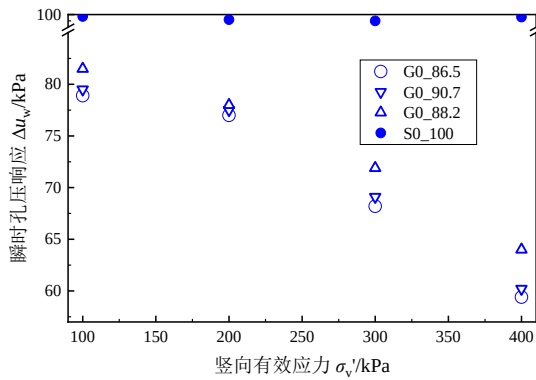
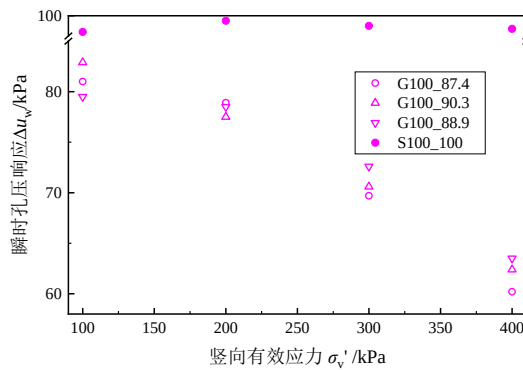


图 4 不同初始孔压幅值下瞬时沉降发展规律

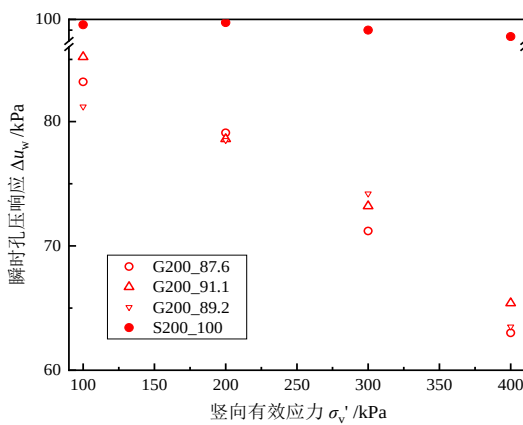
Fig. 4 Development of the instantaneous settlement under different initial pore pressure



(a) 0 kPa 初始反压



(b) 100 kPa 初始反压



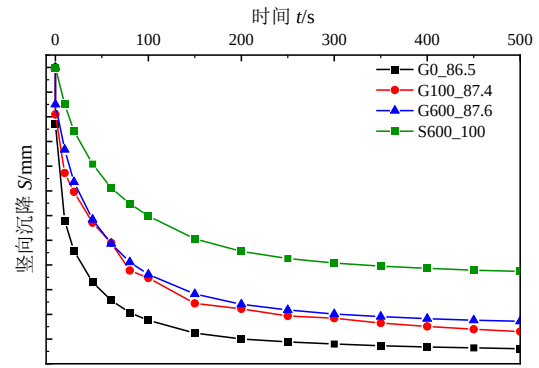
(c) 600 kPa 初始反压

图5 不同初始孔压幅值下瞬时孔压响应规律

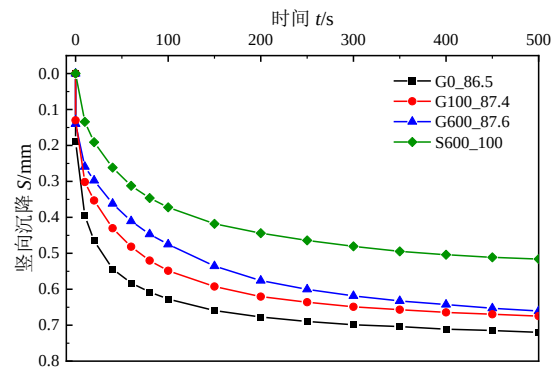
Fig. 5 Response of the instantaneous pore water pressure under different initial pore pressure

2.3 不同荷载幅值下沉降随时间发展规律

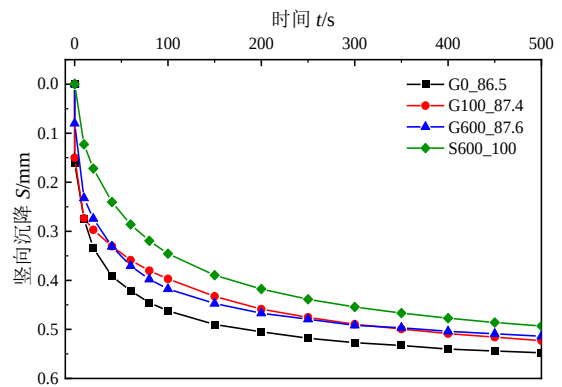
图6为不同荷载幅值下试样沉降随时间的发展规律, (a)为外部荷载从100 kPa增加至200 kPa的情况; (b)为外部荷载从200 kPa增加至300 kPa的情况; (c)为外部荷载从300 kPa增加至400 kPa的情况。从图6中可知, 随着时间变化, 试样沉降不断发展, 随着初始孔隙水压力增大, 竖向沉降有减小趋势。比较(a)、(b)、(c)三图可知, 随着外部荷载的增加, 试样的最终沉降逐渐减小。



(a) 外部荷载从100 kPa增加至200 kPa



(b) 外部荷载从200 kPa增加至300 kPa



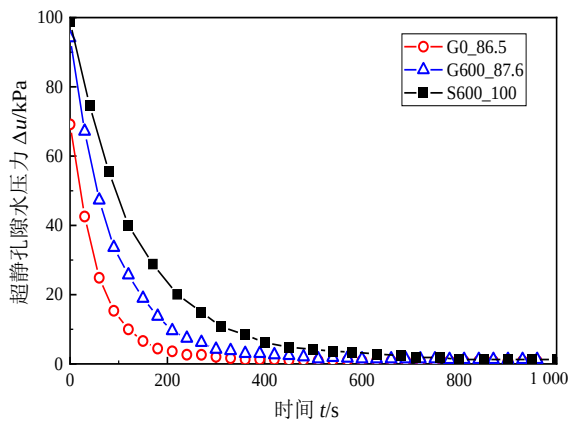
(c) 外部荷载从300 kPa增加至400 kPa

图6 不同荷载幅值下试样沉降随时间发展规律

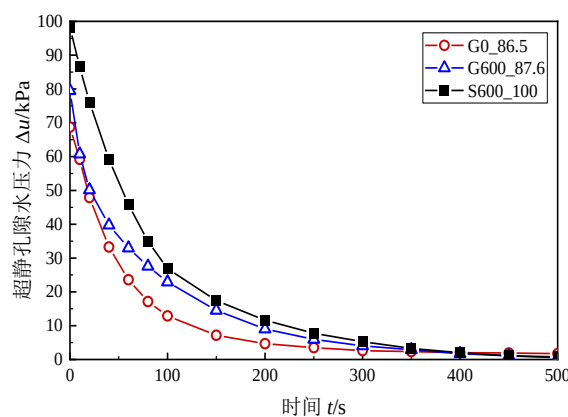
Fig. 6 Development of the sample settlement with time under different loads

2.4 不同荷载幅值下孔压随时间发展规律

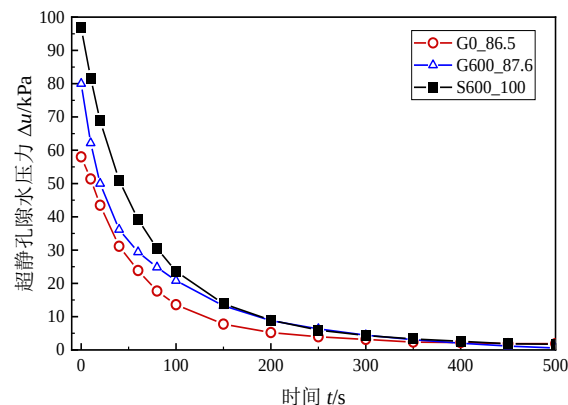
图7为不同荷载幅值下试样孔压随时间的发展规律, (a)为外部荷载从100 kPa增加至200 kPa的情况; (b)为外部荷载从200 kPa增加至300 kPa的情况; (c)为外部荷载从300 kPa增加至400 kPa的情况。从图中可知, 随着时间变化, 试样孔压不断消散, 不同初始反压作用下的孔压发展不尽相同, 这可能与试样初始含气量相关。比较(a)、(b)、(c)三图可知, 随着外部荷载的增加, 试样的初始孔压响应在逐渐减小。



(a) 外部荷载从 100 kPa 增加至 200 kPa



(b) 外部荷载从 200 kPa 增加至 300 kPa



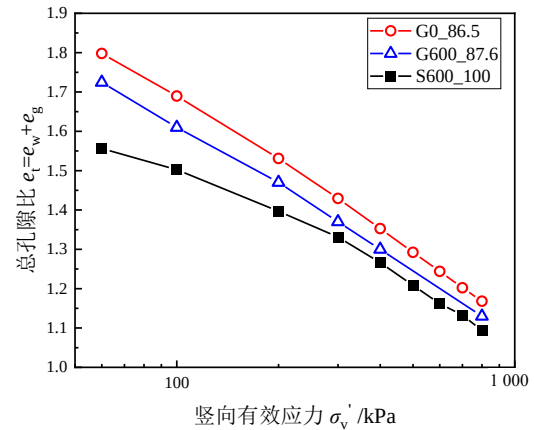
(c) 外部荷载从 300 kPa 增加至 400 kPa

图 7 不同荷载幅值下试样孔压随时间发展规律

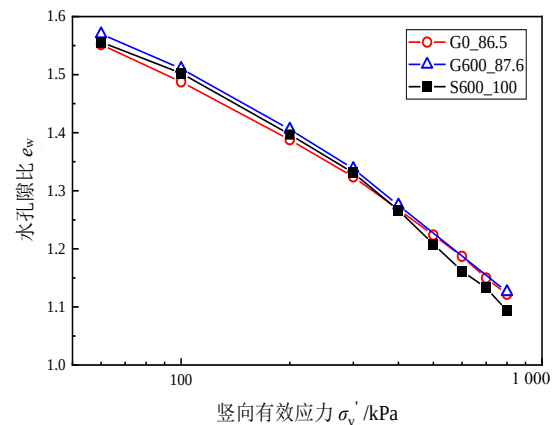
Fig. 7 Development of the sample pore pressure with time under different loads

2.5 不同荷载幅值下孔隙比变化规律

图 8 为不同荷载幅值下孔隙比的变化曲线, 主要包括 (a) 总孔隙比的变化 ($e_w = V_w/V_s$, $e_g = V_g/V_s$); (b) 饱和和基质孔隙比变化。随着外部荷载增加, 孔隙比逐渐减小, 对于不同初始反压和不同初始饱和度的试样, 总孔隙比的压缩曲线不重合; 当仅考虑饱和和基质的孔隙比时, 可以发现试样的压缩曲线基本重合。



(a) 总孔隙比的变化



(b) 饱和和基质孔隙比变化

图 8 不同荷载幅值下孔隙比的变化

Fig. 8 Variation of void ratio under different loads

3 结 论

本文介绍了含气土在一维不排水条件下的瞬时加载试验, 研究了不同初始孔隙水压力及竖向有效应力下含气土瞬时响应及孔压消散阶段的变化规律, 得到以下结论:

(1) 随着初始孔压增加, 试样发生的瞬时沉降和瞬时孔压响应逐渐减小, 初始孔隙水压力增大瞬时沉降响应减小, 瞬时孔压响应增大; 而且对于同一初始孔压值, 随着饱和度的减小, 瞬时沉降有增加的趋势, 瞬时孔压响应有减小趋势, 这可能是由于气泡瞬时压缩量差异导致的, 含气土的饱和度越小, 则含气量越大, 对于同一初始孔压, 含气量越大则气泡瞬时压缩导致的瞬时沉降越大; 而瞬时孔压响应逐渐减小可能是气腔进水现象导致的, 饱和度越小, 含气量越大, 气腔进水效应可能越明显, 导致瞬时孔压的响应减小。

(2) 含气土最终沉降量大于饱和土, 在饱和度相近时, 最终沉降量随初始孔隙水压力减小而增

大,这与 HONG 等^[6]的研究结果(初始孔隙水压力增大会导致气泡更大的压缩量使气体占比降低进而导致土体整体的压缩性减小)一致;并且含气土孔压消散时间快于饱和土,这可能是由于气腔进水效应造成的,流体进入气泡导致超孔压加快消散。

(3)随着外部荷载增加,孔隙比逐渐减小,对于不同初始反压和不同初始饱和度的试样,总孔隙比的压缩曲线不重合;当仅考虑饱和基质的孔隙比时,可以发现试样的压缩曲线基本重合。

参考文献

- [1] KORTEKAAS S, PEUCHEN J. Measured swabbing pressures and implications for shallow gas blow-out[C]//In Proceedings, Offshore Technology Conference. Houston, Texas, 2008, Paper OTC 19280.
- [2] 王勇, 孔令伟, 郭爱国, 等. 浅层气地层对地铁隧道稳定性影响模型试验研究[J]. 岩土力学, 2010, 31(11): 3423-3429.
WANG Yong, KONG Ling-wei, GUO Ai-guo, et al. Experimental study on the influence of shallow gas strata on the stability of subway tunnels[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(11): 3423-3429.
- [3] 丁智, 郑海洋, 冯丛烈, 等. 含气土工程特性研究现状综述及展望[J]. 隧道建设: 中英文, 2021, 41(4): 537-553.
DING Zhi, ZHENG Hai-yang, FENG Cong-lie, et al. A review and prospect of research on the characteristics of gaseous soil engineering[J]. Tunnel Construction: Chinese & English, 2021, 41(4): 537-553.
- [4] WHEELER S J. The undrained shear strength of soils containing large gas bubbles[J]. Geotechnique, 1988, 38(3): 399-413.
- [5] PUZRIN A M, TRONT J, SCHMID A, et al. Engineered use of microbial gas production to decrease primary consolidation settlement in clayey soils[J]. Geotechnique, 2011, 61(9): 785-794.
- [6] HONG Y, WANG L Z, NG C W W, et al. Effect of initial pore pressure on undrained shear behaviour of fine-grained gassy soil[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2017, 54(11): 1592-1600.
- [7] 梁爱民, 邵龙潭. 土壤中空气对土结构和入渗过程的影响[J]. 水科学进展, 2009, 20(4): 502-506.
LIANG Ai-min, SHAO Long-tan. Experimental study of the air entrapment effects on soil structure and infiltration[J]. Advances in Water Science, 2009, 20(4): 502-506.
- [8] SULTAN N, DE GENNARO V, PUECH A. Mechanical behaviour of gas-charged marine plastic sediments[J]. Geotechnique, 2012, 62(9): 751-766.
- [9] NAGESWARAN S. Effect of gas bubbles on the seabed behavior[D]. Oxford: Oxford University, 1983.
- [10] BSI. Code of practice for site investigations. British Standard BS 5930[S]. London: British Standards Institution, 1999.
- [11] 张剑峰. 滨海含生物气细粒土微观结构表征与宏观本构行为[D]. 杭州: 浙江大学, 2020.
ZHANG Jian-feng. Micro structure characterization and macro constitutive behavior of coastal biogas bearing fine-grained soil[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2020.