

水合物分解后沉积物的压缩固结变形试验研究

张良华*, 张旭辉⁺, 鲁晓兵⁺, 张岩⁺

* (中国地质学(北京)工程技术学院, 北京 100085) ⁺ (中国科学院力学研究所, 北京 100190)

摘要: 利用压缩固结试验设备, 以南海水合物区海底浅表层粉质黏土作为骨架, 制备含水合物沉积物试样, 进行了一维压缩固结变形试验, 获得了水合物分解后沉积物样品的应变-时间关系。试验结果表明, 在各级荷载作用下, 水合物分解后沉积物具有明显的阶段性变形特征, 可分为瞬时变形、固结变形、蠕变变形三个阶段; 获得了对于水合物沉积物在水合物分解后的变形参数, 其应变与时间呈非线性关系, 在双对数坐标中呈直线关系, 可用幂函数进行拟合。

关键词: 含水合物沉积物, 蠕变变形, 应变-时间, 黏土骨架

引言

天然气水合物俗称可燃冰, 是在低温和高压的条件下, 由甲烷等小分子气体和水形成的笼形冰状晶体^[1]。蕴含这种固态水合物的砂土、黏土以及混合土等土质的沉积物称为水合物沉积物。自然界中的天然气水合物广泛分布在海底陆坡、深水湖底以及陆地高纬度冻土带的环境中, 是一种储量巨大的新型非常规能源^[2-3]。

含水合物沉积物在水合物分解前后的力学性质, 对水合物的勘探与开发有重要指导意义, 是水合物开采的热点研究问题之一。但由于原状样成本高昂, 且温压条件难以控制, 扰动较大, 目前的含水合物沉积物力学性质研究主要通过室内合成进行。国内外学者对含水合物沉积物的静力学性质进行了大量的实验研究, 并取得了一定的进展。Winters^[4-5]和 Waite^[6]等人, 利用 Malik2L-38 钻井的水合物沉积物原状样品和渥太华砂为骨架室内合成的甲烷水合物样品进行了三轴压缩实验及声波测实验, 最早形成对水合物力学性质的初步认识。Hyodo^[7]等基于水合物合成与力学性质测量装置, 使用砂骨架在室内合成甲烷水合物进行三轴实验, 分析了温度、反压、有效围压及水合物饱和度对其力学性质的影响。Masui^[8]利用日本南海海槽的水合物原状样及室内合成的砂样进行三轴压缩实验, 试验结果表明输入两种样品的强度基本相同, 但由于初始孔隙比及颗粒级配的不同, 二者的应变特征明显不同。国内的张旭辉^[9]、鲁晓兵^[10-11]及王淑云^[12]等利用自行研制的水合物沉积物三轴实验一体化装置, 以砂土及黏土为骨架, 通过实验室合成四氢呋喃、甲烷和二氧化碳等不同类型的水合物, 分析了水合物沉积物的动静态力学性质。

水合物沉积层在水合物开采过程以及开采后, 相变与软化引起的土层变形是区别于常规土层的关键, 但也会经历瞬时变形、固结变形、蠕变变形等过程。然而, 目前国内外对含水合物沉积物分解前后的蠕变特性尚未研究清楚。早期, Stern LA^[13]等人工合成纯度高达 97% 的甲烷水合物, 通过大量的蠕变压缩实验研究其蠕变特性。王锐^[14-15]对甲烷水合物及其沉积物的蠕变特性进行了研究, 分析了围压、温度及孔隙度等对蠕变特性的影响。李洋辉^[16]等通过一系列的三轴蠕变实验, 研究了甲烷水合物沉积物的蠕变行为, 分析了偏应力、围压及温度等对蠕变特性的影响。

目前, 含水合物沉积物分解后的变形阶段尤其是蠕变特性等力学参数的实验数据还很缺乏。使用降压法等开采水合物, 由于水合物的分解, 土体结构发生变化, 为保证水合物开采后水合物层及上覆层的长期稳定性, 开展含水合物沉积物分解后的变形特性研究很有必要性。本文将针对南海黏土骨架水合物沉积物, 首先合成四氢呋喃水合物沉积物, 并利用固结压缩试验设备进行一维固结压缩试验, 获取其变形阶段特性参数。

1 试验材料与方法

水合物分解后沉积物的一维压缩固结变形特性试验主要分为两个步骤, 第一步是含水合物沉积物的制备, 第二步是进行一维压缩固结变形特性试验。考虑到甲烷水合物合成周期较长, 环境要求较高, 难以进行长期的蠕变实验, 而四氢呋喃水合物和甲烷水合物具有较相似的热、力学性质, 且易于合成, 因此, 本文利用四氢呋喃水合物沉积物探索水合物分解后沉积物的压缩固结变形特性。含水合物沉积物的合成需要

在稳定的低温环境下进行，将水合物合成与分解试验装置与单杠杆高压固结仪相结合，实现水合物合成、分解与一维压缩固结变形特性一体化，如图 1 所示。

首先是在室内合成含水合物沉积物，为了模拟水合物的实际环境，试验选用取自南海含水合物区的浅表层粉质黏土，比重为 $G_s=2.7$ ，粒径在 $0.005\sim 0.05\text{mm}$ 区间内的颗粒占 80% 左右，颗粒级配曲线如图 2 所示。将粉质粘土加定量蒸馏水配置成湿土，放入保鲜袋内限制水分蒸发保持 24 小时使其均匀，控制土样的干密度为 $1.2\text{g}/\text{cm}^3$ ，根据环刀体积称取所需的湿黏土质量，通过分层夯实保证样品均匀，放置于通风环境下自然晾干。以临界孔隙比为基本参考，按比例配置四氢呋喃溶液，将干土样抽真空 2 小时，饱和四氢呋喃溶液 24 小时，保持低温环境 ($0\sim 4^\circ\text{C}$) 2~3 天，制备完成饱和度为 40% 的含水合物沉积物环刀试样。



图 1 压缩固结试验设备

Fig.1 Compression consolidation test equipment

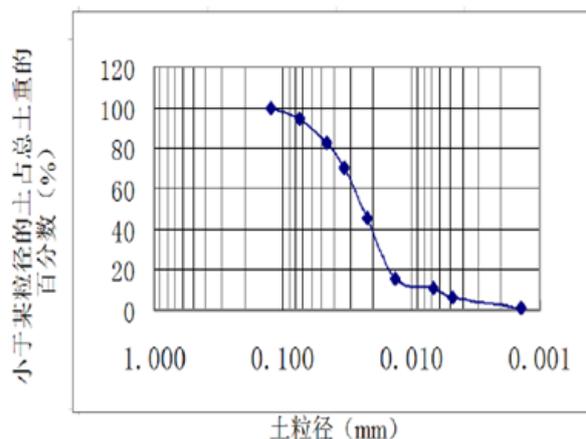


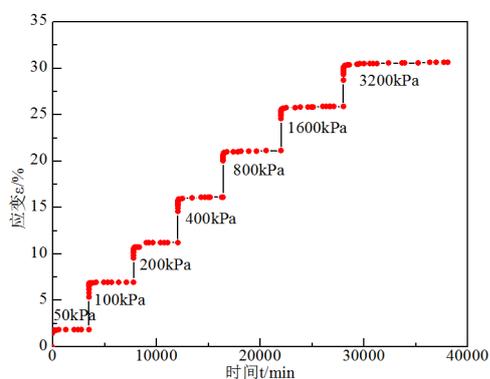
图 2 颗粒级配曲线

Fig.2 Grain distribution curve

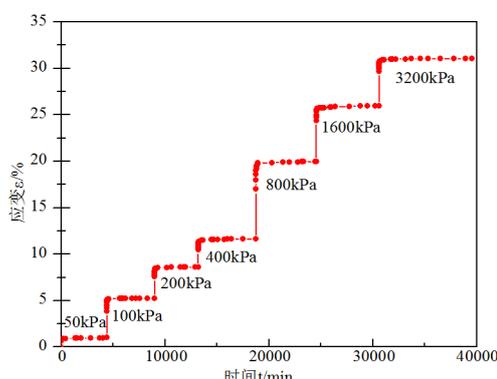
试验采用单杠杆高压固结仪，试验粘土样为横截面积 30cm^2 ，高 2cm 的环刀样。试验前，通过温度控制系统将温度升高至四氢呋喃水合物相平衡条件之上，使四氢呋喃水合物完全分解，然后在双面排水的压缩固结试验设备中进行加载，稳定标准为一天的变形量不超过 0.001mm 。试样过程中均采用逐级加载的方法，实验前保证加压系统与试样接触良好。由于篇幅有限，本文仅给出了 A、B 两个试样的试验数据，A 试样的加压等级为：50kPa、100kPa、200kPa、400kPa、800kPa、1600kPa、3200kPa，B 试样的加压等级为：50kPa、100kPa、200kPa、400kPa、800kPa、1600kPa、3200kPa。

2 试验结果与分析

2.1 变形全过程曲线



(a) A 试样



(b) B 试样

图 3 变形全过程曲线

Fig.3 Full-process deformation curves

通过对原始数据的整理，得到了采用分级加载方式下，含水合物沉积物分解后土样在不同加载等级下的全过程压缩固结变形试验曲线。图 3 (a) 和 (b) 分别为 A 试样和 B 试样的全过程变形试验曲线。由图中可以看出，含水合物沉积物分解后土样的变形随时间呈阶梯形变化，且各阶梯的变化规律基本相同。

2.2 固结压缩变形规律

试验得到的结果为分级加载全过程变形曲线，需要进行处理得到分别加载下的变形曲线，才能对各级荷载下的固结压缩变形规律进行分析，处理后得到水合物分解后沉积物在不同的恒定应力状态下竖向应变随时间的变形关系如图 4 所示。

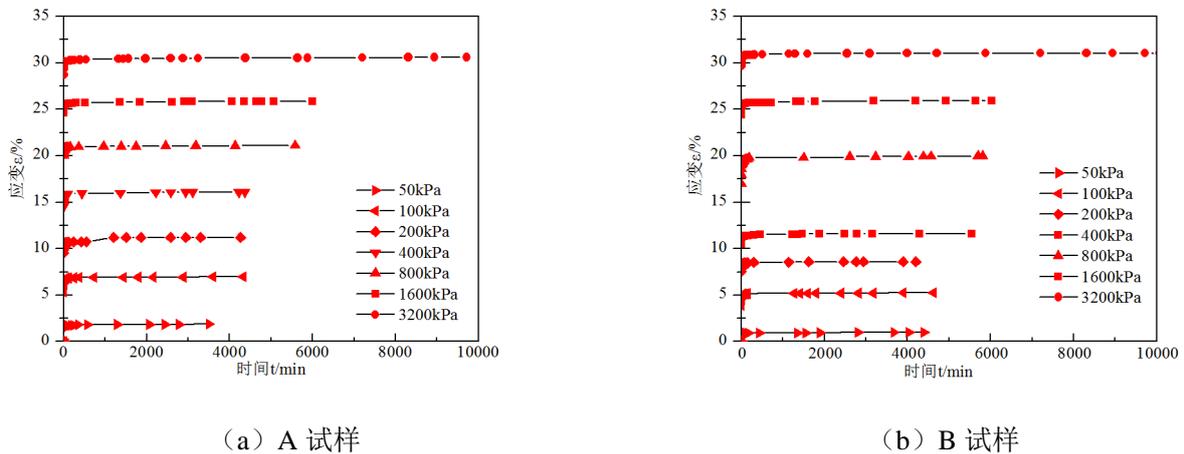


图 4 变形曲线簇

Fig.4 Deformation curves

从图中可以看出，在各级荷载条件下，土样的应变随时间的变化具有相似的规律，具有明显的衰减特征。恒定荷载越大，固结压缩达到稳定状态的时间越长。每级荷载加载的瞬间，均会产生较大的变形，试样的变形速率较快，随着加载时间逐渐减小，最后趋于稳定。应变-时间关系曲线具有两个明显的转折点，第一部分呈直线，第二部分呈曲线，第三部分呈斜率较小的直线。根据曲线的转折点将土体的变形分为三个部分：瞬时变形、固结变形、蠕变变形。

瞬时变形：在应力加载极短的时间内就发生的沉降，水合物分解后，会破坏土样原有的孔隙结构，使部分土颗粒呈散粒状存在，孔隙度较大，故在施加荷载的瞬间会发生较大的变形。**固结变形：**应力施加稳定后，孔隙水排出，由于含水合物沉积物的渗透性较小，孔隙水压力逐渐消散需要一段时间，该过程中发生的变形主要是由于固结导致的，同时还伴随着较小的蠕变变形。**蠕变变形：**固结完成后，在恒定应力的作用下，土体的应变随时间不断增长，应变速率趋于稳定的值，但总的变形量小。

2.3 应变-时间关系

将 A、B 试样的蠕变曲线表示在双对数坐标上，如图 5 所示。

由图中可以看出，在各级荷载条件下，土样的应变-时间的发展在双对数坐标中具有相似的规律，各试样曲线近似为直线，且各曲线基本平行。显然水合物分解后沉积物在恒定荷载作用下，其应变-时间关系可以表示为：

$$\lg \varepsilon(\sigma, t) - \lg \varepsilon(\sigma, t_0) = k(\lg t - \lg t_0) \quad (1)$$

或

$$\varepsilon(\sigma, t) = \varepsilon(\sigma, t_0) \left(\frac{t}{t_0} \right)^k \quad (2)$$

式中：t 为加载时间；t₀ 为参考时间，可取 t₀=1min；ε(σ, t) 为在恒定压力作用下，t 时刻的应变；ε(σ, t₀)

为在恒定压力作用下, t_0 时刻的应变; k 表示双对数坐标中各直线的斜率, 对于饱和度 40% 的水合物分解后的沉积物, 各直线基本平行, 可以认为 k 为常数。

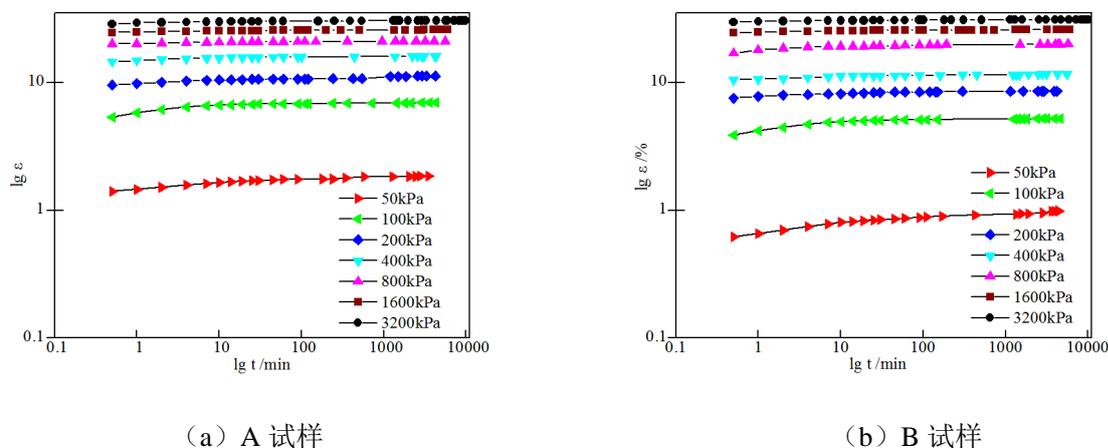


图 5 双对数坐标中的变形曲线
Fig.5 Deformation curves of log-log coordinates

3 结论

南海水合物区粉质粘土沉积物的变形与其经历的应力变化密切相关, 研究水合物分解后沉积物的变形特征对研究水合物开采区地层长期稳定性具有重要意义。本文以取自南海含水合物区的浅表层粉质黏土为骨架, 在含水合物沉积物合成、分解装置及压缩固结试验设备上合成了饱和度为 40% 的四氢呋喃水合物沉积物样品, 并进行了一维压缩固结变形特性试验, 研究表明:

(1) 水合物分解后沉积物具有明显的蠕变特性, 在较高的恒定应力作用下, 需要较长时间才达到变形稳定状态。

(2) 水合物分解后沉积物的一维压缩固结变形过程按照变形特征可分为瞬时变形、固结变形、蠕变变形三个阶段。

(3) 水合物分解后沉积物的一维压缩固结变形过程呈非线性特征, 但在双对数坐标中呈线性关系, 可用幂函数对其应变-时间的关系进行描述。

(4) 在水合物开采的过程中, 需密切关注储层及地表的沉降以保证施工安全。水合物分解后, 所受来自上覆地层及海水的应力不变, 会由于瞬时变形及固结变形两个阶段而产生较大的沉降。此外, 由于蠕变变形阶段的作用, 会发生持续的沉降变形, 应做好工后的监测工作, 保证水合物储区的长期稳定性。

致谢: 本文得到国家自然科学基金项目 (Nos.11872365, 51639008) 和地调项目 (DD20190218-2-1) 支持, 在此表示感谢!

参考文献

- 1 Koh C A. Towards a fundamental understanding of natural gas hydrates. Chemical Society Reviews, 2002, 31
- 2 Kvenvolden K A. The Global Occurrence of Natural Gas Hydrate[M]// Natural Gas Hydrates: Occurrence, Distribution, and Detection. American Geophysical Union, 2001
- 3 张洪涛, 张海启, 祝有海. 中国天然气水合物调查研究现状及进展. 中国地质, 2007, 34(6):953-961 (Zhang Hongtao, Zhang Haiqi, Zhu Youha. Gas hydrate investigation and research in China: Present status and progress. Geology in China, 2007, 34(6):953-961 (in Chinese))
- 4 Winters W. J., Pecher I. A., Booth J. S., et al. Properties of samples containing natural gas hydrate from the JAPEX/JNOC/GSC Maillik 2L-38 gas hydrate research well, determined using gas hydrate and sediment test laboratory instrument (GHASTLI). Geological survey of Canada Bulletin, 1999, 554: 241-250

- 5 Winters W. J., Waite W. F., Mason D. H., et al. Methane gas hydrate effect on sediment acoustic and strength properties. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2007,56: 127-135
- 6 Waite W. F., Santamarina J. C., Cortes D. D., et al. Physical properties of hydrate-bearing sediments. *Review of Geophysics*, 2009, 47(RG4003): 1-38
- 7 Hyodo M., Li Y. H., Yoneda, J., et al. Effects of dissociation on the shear strength and deformation behavior of methane hydrate-bearing sediments. *Marine and Petroleum Geology*, 2014, 51: 52-62
- 8 Masui A., Haneda H., Ogata Y., Aoki K. Mechanical properties of sandy sediment containing marine gas hydrates in deep sea offshore Japan. *Proceedings of the 17th International Offshore and Polar Engineers Conference, Ocean Mining Symposium, Lisbon, Portugal, 2007*, 53-56
- 9 Zhang X. H., Lu X. B., et al. Study on the mechanical properties of hydrate-bearing silty clay. *Marine and Petroleum Geology*, 2015, 67: 72-80
- 10 Lu X. B., Wang, L., Wang, S. Y., et al. Study on the mechanical properties of THF hydrate deposit. *Proceedings of the 1th International Offshore and Polar Engineers Conference*, 2008, 57-60.
- 11 鲁晓兵, 张旭辉, 石要红, 等. 黏土水合物沉积物力学特性及应力应变关系. *中国海洋大学学报(自然科学版)*, 2017, 47(10):9-13 (Lu Xiaobing, Zhnag Xuhui, Shi Yaohong, et al. Mechanical properties of hydrate-bearing silty-clay and stress strain relation. *Periodical of Ocean University of China*, 2017, 47 (10) :9-13 (in Chinese))
- 12 王淑云, 罗大双, 张旭辉, 等. 含水合物黏土的力学性质试验研究. *实验力学*, 2018,33(02):245-252 (Wang Shuyun, Luo Dashuang, Zhnag Xuhui, et al. Experimental study of mechanical properties of hydrate clay. *Journal of Experimental Mechanics* , 2018,33(02):245-252 (in Chinese))
- 13 Stern L A, Kirby S H. Polycrystalline Methane Hydrate: Synthesis from Superheated Ice, and Low-Temperature Mechanical Properties. *Energy & Fuels*, 1998, 12(2):201-211
- 14 王锐. 甲烷水合物及其沉积物的蠕变特性研究. [硕士论文].大连: 大连理工大学, 2012 (Wang Rui. Study on Creep properties of methane hydrate and sediments.[PhD Thesis]. Dalian :Dalian University of Technology,2012 (in Chinese))
- 15 Rui Wang, Weiguo Liu, Yanghui Li, et al. Effects of Porosity on the Creep Behavior of Hydrate-Bearing Sediments. *American Society of Mechanical Engineers*, 2012:703-708
- 16 Yanghui LI, Peng Wu, Xiang Sun, et al. Creep Behaviors of Methane Hydrate-Bearing Frozen Sediments. *Energies*, 2019, 1996-1073

EXPERIMENTAL STUDY ON COMPRESSION CONSOLIDATION DEFORMATION OF SEDIMENTAS AFTER HYDRATE DISSOCIATION¹⁾

Zhang Lianghua^{*}, Zhang Xuhui⁺, Lu Xiaobing⁺, Zhang Yan⁺

^{*}(*School of Engineering and Technology, China university of geosciences, Beijing 100083, China*)

⁺(*Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China*)

Abstract: By using an compression consolidation test equipment, a series of one-dimensional compression consolidation deformation tests are conducted on the tetrahydrofuran (THF) hydrate with the silty-clay obtained from the South China Sea where gas hydrate has been found. The strain-time relationship curves of the sediment sample after hydrate dissociation is obtained. The test results show that under the load of all levels, the sediments have obvious creep deformation after hydrate decomposition, which can be divided into three stages: instantaneous deformation, consolidation deformation and creep deformation, the deformation parameters of hydrate deposits after hydrate decomposition are obtained; The strain-time has a nonlinear relationship and is linear in the log-log coordinate, which can be fitted by a power function.

Key words: hydrate-bearing sediments, creep test, strain -time relationship, silty-clay