

文章编号: 1000-7598 (2011)增刊 1-0303-06

四氢呋喃水合物沉积物静动力学性质试验研究

张旭辉¹, 鲁晓兵¹, 王淑云¹, 李清平²

(1. 中国科学院力学研究所, 北京 100190; 2. 中海石油研究中心, 北京 100027)

摘 要: 利用研制的天然气水合物沉积物合成与力学性质测试一体化试验设备, 以粉细砂土和蒙古砂土作为沉积物骨架, 对四氢呋喃(THF)水合物沉积物进行了静动三轴试验, 获得了水合物分解前后沉积物样品的应力-应变关系、强度和液化特性, 对两种骨架的水合物沉积物的性质进行了对比, 同时将水合物分解后的沉积物与对应的饱和土的动三轴试验结果进行了对比。结果表明: 水合物沉积物均表现为塑性破坏; 围压越大, 水合物沉积物强度越高; 水合物分解导致沉积物的强度大幅降低; 水合物分解后沉积物液化所需的时间较饱和水沉积物缩短。

关 键 词: 水合物沉积物; 应力-应变关系; 抗剪强度; 液化

中图分类号: TU 411

文献标识码: A

Experimental study of static and dynamic properties of tetrahydrofuran hydrate-bearing sediments

ZHANG Xu-hui¹, LU Xiao-bing¹, WANG Shu-yun¹, LI Qing-ping²

(1. Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China; 2. Research Centre, China Ocean Oil Co., Beijing 100027, China)

Abstract: By using the integrated experimental apparatus for syntheses of gas hydrate sediment and triaxial tests, a series of static and dynamic tests are conducted on the tetrahydrofuran (THF) hydrate with fine sand and Mongolia sand as the skeleton. The stress-strain curves, strength and liquefaction characteristics of the sediments before and after hydrate dissociation are obtained. The mechanical properties of the two kinds of hydrate sediments with fine sand and Mongolia sand as the skeleton, as well as the liquefaction characteristics of the sediment after dissociation of hydrate and the corresponding saturated sand are compared. It is shown that the hydrate-bearing sediments all behave as plastic failure, strength of which the increases with the formation of hydrate and the confining pressure. The dissociation of hydrate can lead to the great decrease of the strength of the sediments. The liquefaction of the sediment after dissociation of hydrate needs shorter time relative to the corresponding saturated sand.

Key words: hydrate-bearing sediments; stress-strain relationship; shear strength; liquefaction

1 引 言

天然气水合物(简称水合物)是指在一定范围的高压和低温条件下, 由天然气和水形成的笼形冰状晶体^[1]。水合物沉积物则是指蕴含这种固态水合物的砂、黏土以及混和土等土质的沉积物质。水合物广泛分布在陆地高纬度冻土带、陆坡海底和一些深水湖底的深水环境中, 是一种储量巨大的新型能源^[2]。美国、日本和印度等国家均已制定了水合物商业开采的计划, 并投入巨资支持水合物的研究。我国近几年也加快了对水合物勘探和开发方面的研

究工作, 并取得了一定的成果^[3]。

水合物沉积物在水合物分解相变前后和分解过程中的弹性模量、阻尼、强度等力学参数是水合物沉积层中水合物分解相变后地层变形分析的基础, 也是水合物地层的海床中结构物的安全和稳定性评价的基础数据。目前, 国内外对水合物的室内试验研究工作主要集中在水合物沉积物合成与分解的热物理和化学性质、水合物室内模拟开采等方面, 针对水合物沉积物力学性质的试验研究工作还很少^[4-5]。

Winters 等^[6]对水合物沉积物原状样(Malik21—

收稿日期: 2010-12-07

基金项目: 国家自然科学基金项目(No. 1077218); 国家高技术研究发展专项 863 项目(No. 2006AA09A209-7)。

第一作者简介: 张旭辉, 男, 1982 年生, 博士, 助理研究员, 主要从事水合物开采相关关键力学问题研究工作。E-mail: zxh424@163.com

38 钻井所取原状岩心样)和室内制备样(渥太华砂土沉积物和含冰人工砂样)进行了三轴压缩和声波测试试验,但因原状和重塑水合物沉积物样品少和取样地区的局限,试验研究结果仅是对水合物沉积物的应力-应变关系和强度等力学特性的初步认识。已进行的三轴压缩试验结果表明:与未含天然气水合物的试样相比,原状和重塑水合物沉积物样品的强度增大,增大的比例取决于水合物的含量和分布、沉积物的性质。粗颗粒水合物沉积物中的孔压在剪切过程中降低而细颗粒水合物沉积物中的则相反。

Hyodo 等^[7]将三轴试验机改造成了水合物合成与强度测试试验装置,并对甲烷水合物砂样进行了室内压缩试验,测试了不同温度、有效围压和甲烷饱和度条件下的水合物沉积物的应力-应变关系,也分析了水合物分解过程中砂样体积应变的变化与有效围压、剪应力和临界孔隙比的关系。结果表明:温度越低、有效围压越高和甲烷水合物的饱和度越大,甲烷水合物砂样的强度越高,但水合物强度与温度、有效围压和甲烷水合物饱和度的定量关系还不清楚。在甲烷水合物分解过程中,当无剪应力施加时,不论有效应力是否减少,其体积应变有剪胀的趋势;当有剪应力施加时,其剪切变形的发展和变化趋势则根据是否达到临界孔隙比而变化,同时甲烷水合物的饱和度也会影响体积变化量。

Masui 等^[8]在对日本南海海槽(Nankai Trough)地区钻取的 4 个原状水合物岩芯样(原状样)和室内合成水合物 Toyoura 砂样(合成样)的三轴压缩试验结果表明:水合物沉积物的强度随着水合物孔隙饱和度的增加而增加;原状样与合成样的应力-应变和体积应变-应变关系明显不同,原状样的切线弹性模量 E_{50} 平均值明显低于合成样 200 MPa 以上;原状样的泊松比一般在 0.1~0.2 之间,合成样的泊松比在 0.05~0.22 之间,原状样和合成样的泊松比与水合物饱和度之间都没有明显的相关趋势,即泊松比与水合物饱和度关系不大;原状样和合成样的变形特性的不同主要是由于初始孔隙比和沉积物颗粒级配的不同造成的。

Clayton 等^[9]将共振柱仪器改造成了水合物合成与强度测试试验装置,合成甲烷水合物砂样并进行共振柱试验,着重考察了在 0.25~2 MPa 范围内甲烷水合物含量对砂样沉积物的剪切模量、体积模量以及阻尼比的影响,并与那些没有和水合物黏结的及分离后的甲烷水合物砂样进行了对比。试验结果表明:这种在试验过程中形成的围绕在砂粒间的水合物胶接对砂样的剪切模量具有很大的影响,而

对体积模量的影响则很小;饱和砂样的体积模量和剪切模量的比值从 15~30(取决于有效应力水平)到 2(当水合物含量为增加到充满 20%孔隙空间时);具有水合物胶接的砂样的阻尼比值高得多,当水合物含量为 3%~5%时,砂样的阻尼达到峰值。此试验结果为甲烷水合物沉积物的模型建立和地震波地球物理调查的解释提供了支持和参考。

目前,水合物沉积物的弹性常数、强度、水合物分解后沉积物的强度等力学参数的试验数据还很缺乏,国内对水合物沉积物力学性质的研究还在起步阶段,对水合物沉积物应力-应变关系和强度特性的认识亟待拓展和深入。考虑到四氢呋喃水合物与甲烷水合物具有相似的热物理性质,同时四氢呋喃水合物沉积物的人工合成相对容易、安全、经济^[10]。因此,本文利用四氢呋喃(THF)水合物沉积物(粉细砂和蒙古砂骨架)进行力学性质试验,探索水合物分解前后沉积物的静动力学性质,为工程实践提供参考。

2 试验介绍

2.1 试验设备与测试技术

图 1 为中国科学院力学研究所研制的水合物沉积物原位合成与力学性质测试一体化装置示意图。它将水合物反应室与高压三轴仪的压力室合二为一,并增设低温控制与计量系统,保持进水溶液管路、孔压和轴向剪切等系统不变。其主要技术参数如下:最大围压为 14 MPa,通过压力室内防冻液传递加载于试样上(试样与防冻液之间由橡皮膜隔开);温度范围为-20~20℃^[11]。需特别说明,本文中试验均采用四氢呋喃,其在常温下为液态,与水任意比例互溶,可以四氢呋喃水溶液的形式通过进水管路注入沉积物样品中。因此,试验中未使用气源提供系统和收集系统,在此不作介绍。

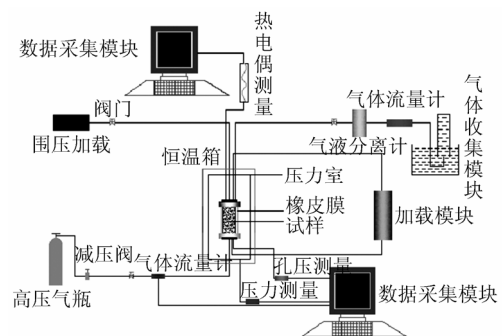


图 1 水合物沉积物合成分解及力学性质测试一体化装置简图

Fig.1 Sketch of the integrated apparatus for gas hydrate sediment syntheses and triaxial test

四氢呋喃与水在 0.1 MPa 的压力和温度 4 °C 条件下即可形成四氢呋喃水合物沉积物，且四氢呋喃水合物中四氢呋喃的质量分数为 19%，因此，试验中使用质量分数 19% 的四氢呋喃溶液，给定合成的温度-9°C 温度条件，认为四氢呋喃溶液可完全形成水合物。

试验步骤如下：①将制备好的沉积物砂样用橡皮膜包好并置于三轴压力室内，通过样品底部管路注入质量分数为 19% 的四氢呋喃水溶液(质量为 m) 使土样达到一定的饱和度；②缓慢施加围压至指定值，然后启动制冷机使恒温箱内降温至水合物合成所需要的温度值；③保持设定温度值 2 d，认为四氢呋喃水合物沉积物完全合成，样品由沉积物骨架和水合物组成；④调整至不同围压值，给定 0.9 mm/min 的剪切速率，对样品进行剪切试验，同时记录应力-应变数据，剪切试验在不排水情况下进行。若测试水合物分解后的应力-应变数据，则升高压力室内温度，使得水合物完全分解，然后进行不排水剪切试验。

这里水合物的饱和度 S_H ，是指水合物体积 V_H 与样品中总的孔隙体积 V 之比，即 $S_H = V_H/V$ ；水合物的体积 $V_H = m/\rho_H$ 。

2.2 沉积物骨架基本性质

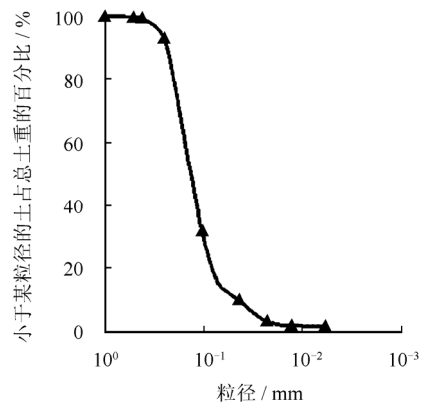
试验中选用粉细砂和颗粒较粗的蒙古砂土分别作为水合物沉积物的合成骨架，便于对比，根据筛分试验得到了两种砂土的颗粒级配曲线如图 2 所示。

试验用沉积物样品直径×高度为 3.91 cm×8 cm。样品按照干密度 $\rho_d = 1.6 \text{ g/cm}^3$ 分层均匀砸实成型。

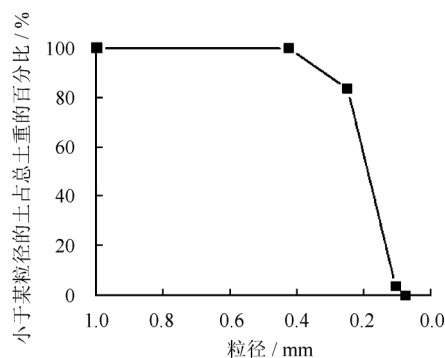
2.3 四氢呋喃水合物沉积物的剪切试验结果

剪切试验方面主要需考虑的是合成的水合物沉积物在不受扰动的情况下进行不同围压下的三轴剪切试验。测试相同水合物饱和度但围压不同的应力-应变曲线，其中每种条件做两次重复性试验取平均值，假设水合物沉积物满足摩尔-库仑强度准则，绘制出 3 个摩尔圆和它们的公切线，得到摩尔-库仑破坏理论中抗剪强度与破坏面上的法向应力 σ 间的线性关系： $\tau_f = \sigma \tan \varphi + c$ ，进而确定有效黏聚力 c 和内摩擦角度 φ ，最终获得某一水合物体积分数下水合物沉积物的力学强度。

以粉细砂为骨架的四氢呋喃水合物沉积物样品的饱和度分别为 86%、86.6% 和 83.4%，剪切时施加的围压分别为 2.5、5、10 MPa。图 3 是粉细砂为骨架时的四氢呋喃水合物沉积物的应力-应变曲线和摩尔圆。可以看出：四氢呋喃水合物沉积物表现



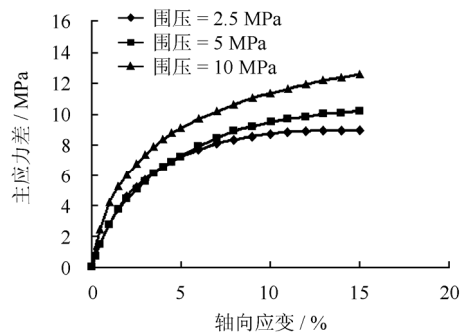
(a) 粉细砂颗粒级配



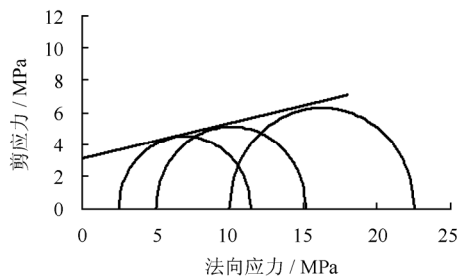
(b) 蒙古砂土颗粒级配

图 2 颗粒级配曲线

Fig.2 Gradation curves of grain sizes



(a) 应力-应变曲线



(b) 摩尔圆

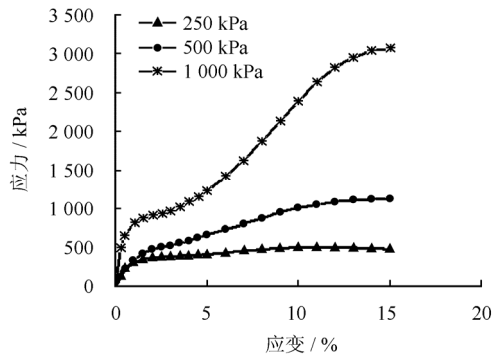
图 3 四氢呋喃水合物粉细砂沉积物的应力-应变曲线及摩尔圆

Fig.3 Stress-strain curves and Mohr circle of THF bearing fine sand deposit

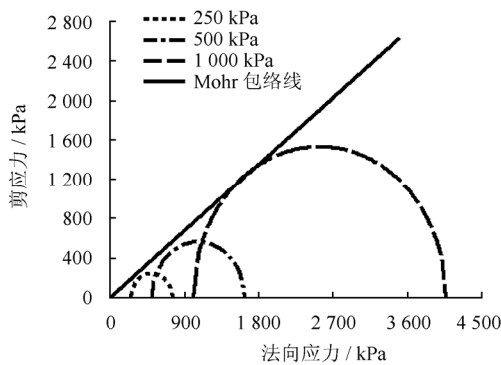
为塑性破坏；围压越大，强度越高；强度参数 c 和 φ 分别为 3.1 MPa 和 12.4°，而对应的饱和粉细砂没有

黏聚力^[12]。

以蒙古砂为骨架的四氢呋喃水合物沉积物样品的完全饱和,剪切时施加的围压分别为 250、500、1 000 kPa。图 4 为粉细砂为骨架时的四氢呋喃水合物沉积物的应力-应变曲线和摩尔圆。可以看到,蒙古砂为骨架时的水合物沉积物的内摩擦角为 36.9°,较蒙古砂的内摩擦角大^[13]。这是因为水合物对骨架有黏结强化作用。



(a) 应力-应变曲线

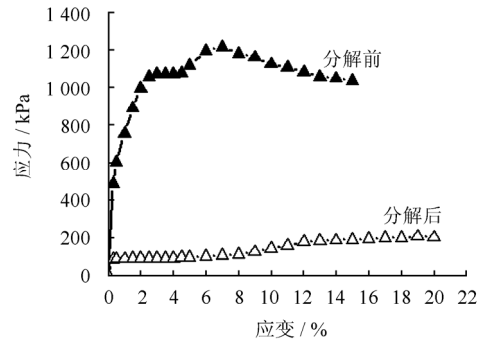


(b) 摩尔圆

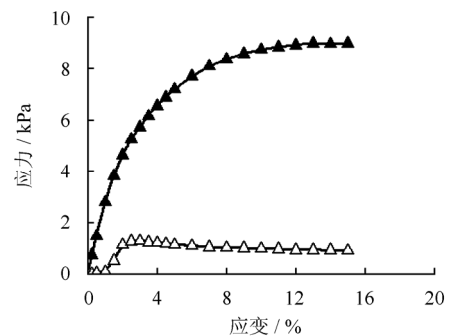
图 4 蒙古砂水合物沉积物的应力-应变曲线及摩尔圆
Fig.4 Stress-strain curves and Mohr-circle of hydrate with the skeleton of Mongolia sand ($c = 0, \varphi = 36.9^\circ$)

水合物分解后沉积物的力学性质测试是将合成的四氢呋喃水合物沉积物先分解,然后在不排水的情况下进行剪切试验。从图 5 可以看出,水合物沉积物在水合物分解前的强度(强度值取为应力-应变曲线中应变为 15%对应的应力值)显著低于分解后的强度。围压为 0.5 MPa 时,蒙古干砂作为骨架分解后的强度为分解前的 1/7;围压 2.5 MPa 时,粉细砂为骨架时强度降为初始值的 1/9。

从图 6~8 可以看出,在围压 180 kPa 时,不论是水合物分解后的粉细砂沉积物,还是骨架相同的饱和粉细砂土,发生液化(孔隙压力等于或超过围压,骨架的有效应力小于或等于 0)所需要的作用



(a) 蒙古砂(围压为 0.5 MPa)



(b) 粉细砂(围压为 2.5 MPa)

图 5 蒙古砂在水合物分解前后的应力-应变曲线
Fig.5 Stress-strain curves before and after dissociation of sand-hydrate

时间随轴向变形幅值的增加而减少。但是在同样轴向变形幅值的条件下,水合物分解后的沉积物液化所需要的作用时间较对应的饱和土的小,如饱和土在 1、2、3 mm 循环唯一幅值条件下发生液化的周次分别是 18、26、35,而水合物分解后的沉积物则分别为 3、8、20。这是因为水合物形成时膨胀导致骨架颗粒间接触松动,分解又引起骨架胶结性降低进一步软化的缘故^[14]。

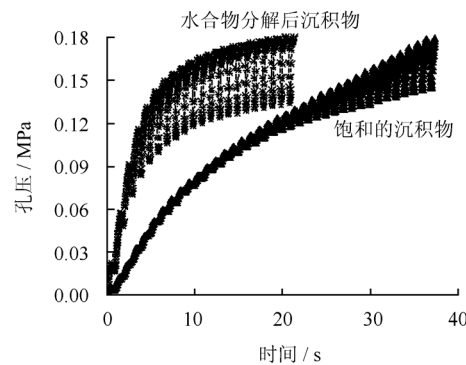


图 6 粉细砂在循环位移幅值 1 mm 时的孔压发展
Fig.6 Development of pore pressure under amplitude of cyclic displacement of 1 mm

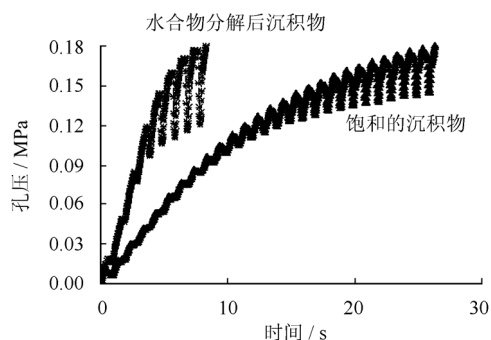


图 7 粉细砂在循环位移幅值 2 mm 的孔压发展
Fig.7 Development of pore pressure under amplitude of cyclic displacement of 2 mm

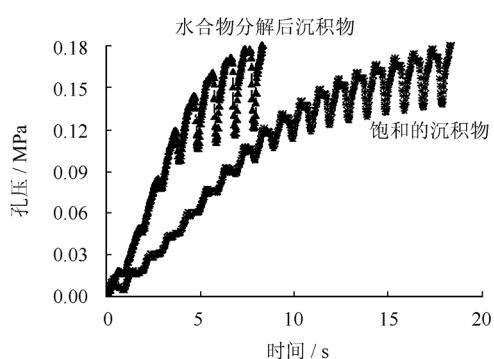


图 8 粉细砂在循环位移幅值 3 mm 的孔压发展
Fig.8 Development of pore pressure in fine sand under amplitude of cyclic displacement of 3 mm

3 结 论

在自行研制的水合物沉积物合成与力学性质测试一体化试验装置的基础上, 分别合成了以粉细砂和蒙古砂土为骨架的四氢呋喃水合物沉积物, 然后进行了系列的静动三轴力学性质试验, 获得了水合物沉积物的静应力-应变曲线、强度, 以及水合物分解后沉积物的强度, 同时进行了动三轴试验, 获得了水合物沉积物分解后液化发展的过程和特点。

(1) 从应力-应变曲线来看, 水合物沉积物表现为塑性破坏。

(2) 从摩尔圆来看, 对于粉细砂骨架, 水合物对骨架有胶结作用, 使得粉细砂水合物沉积物存在黏聚力; 而对于蒙古砂骨架, 水合物的存在增加了内摩擦角。

(3) 水合物分解后, 以蒙古砂和粉细砂为骨架的沉积物的强度分别降低到原来的 1/7 和 1/9, 从而使得沉积层的承载能力大大降低。

(4) 水合物分解后的沉积物与对应的饱和水沉积物相比更容易液化。这些数据可以为进行水合物分解引起的地层和海上结构物稳定性分析提供参考。

从目前的结果来看, 水合物的存在提高了沉积

物的强度, 水合物分解后沉积物强度大大降低, 但不同沉积物中水合物填充沉积物孔隙的方式不同, 因而所起作用大小不尽相同, 下一步研究工作将定量考察不同水合物饱和度和不同沉积物类型对水合物地层分解前后的沉积物力学参数(弹性常数和强度等)的影响。

参 考 文 献

- [1] KVENVOLDEN K A, LORENSON T D. The global occurrence of natural gas hydrate[J]. *Geophysical Monograph*, 2001, 124: 3—18.
- [2] KLAUDA J B, SANDLER S I. Global distribution of methane hydrate in ocean sediment[J]. *Energy and Fuels*, 2005, 19: 459—470.
- [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其进展[J]. *中国地质*, 2007, 34(6): 953—961.
ZHANG Hong-tao, ZHANG Hai-qi, ZHU You-hai. Gas hydrate investigation and research in China: Present status and progress[J]. *Geology in China*, 2007, 34(6): 953—961.
- [4] 王淑云, 鲁晓兵. 水合物沉积物合成与分解及力学性质试验的一体化装置[C]//第25届全国土工测试学术研讨会论文集. 杭州: 浙江大学出版社, 2008: 115—119.
- [5] 王淑云, 鲁晓兵. 水合物沉积物力学性质的研究现状[J]. *力学进展*, 2009, 39(2): 176—188.
WANG Shu-yun, LU Xiao-bing. Advances of research on mechanical properties of gas hydrate deposits[J]. *Advances in Mechanics*, 2009, 39(2): 176—188.
- [6] WINTERS W J, WAITE W F, MASON D H, et al. Methane gas hydrate effect on sediment acoustic and strength properties[J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2007, 56: 127—135.
- [7] HYODO M, NAKATA Y, YOSHIMOTO N, et al. Shear behaviour of methane hydrate-bearing sand[C]//Proc. 17th Int. Offshore and Polar Engng. Conference. Lisbon: The International Society of Offshore and Polar Engineers, Portugal, 2007: 1326—1333.
- [8] MASUI A, HANEDA H, OGATA Y, et al. Mechanical properties of sandy sediment containing marine gas hydrates in deep sea offshore Japan[C]//Proc. 17th Int. Offshore and Polar Engng. Conference. Lisbon: The International Society of Offshore and Polar Engineers,

- Ocean Mining Symposium, 2007: 53—56.
- [9] CLAYTON C R I, PRIEST J A, BEST A I. The effects of disseminated methane hydrate on the dynamic stiffness and damping of a sand[J]. **Geotechnique**, 2005, 55(6): 423—434.
- [10] ZHANG X H, LU X B, WANG S Y et al. Thermal conduction involving phase transformation in gas hydrate sediments[J]. **Science China, (Physics, Mechanics & Astronomy)**, 2010, 53(8): 1530—1535.
- [11] 张旭辉, 王淑云, 李清平, 等. 天然气水合物沉积物力学性质的试验研究[J]. 岩土力学, 2010, 31(10): 3069—3074.
- ZHANG Xu-hui, WANG Shu-yun, LI Qing-ping, et al. Experimental study of mechanical properties of gas hydrate deposits[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2010, 31(10): 3069—3074.
- [12] 王淑云, 鲁晓兵, 时忠民. 颗粒级配和结构对粉砂力学性质的影响[J]. 岩土力学, 2005, 26(7): 1029—1032.
- WANG Shu-yun, LU Xiao-bing, SHI Zhong-min. Effects of grain size distribution and structure on mechanical behavior of silty sands[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2005, 26(7): 1029—1032.
- [13] LU Xiao-bing, WANG Li, WANG Shu-yun, et al., Study on the Mechanical Properties of the tetrahydrofuran hydrate deposit[C]//18th Int. Offshore and Polar Engineering Conference. Vancouver: The International Society of Offshore and Polar Engineers, 2008: 57—60.
- [14] HYODO M, NAKATA Y, YOSHIMOTO N, et al. Shear behaviour of methane hydrate-bearing sand[C]//Proc. 17th Int. Offshore and Polar Eng. Conference. Lisbon: The International Society of Offshore and Polar Engineers, 2007: 1326—1333.

上接第 229 页

- [6] 村山朔郎, 柴田彻. 关于粘土的流变特性[M]. 石朝辉译. 南京: 南京水利科学研究所, 1956.
- [7] M.H. 戈尔什杰恩. 粘土的持久强度和斜坡的深层蠕动[C]//苏联第四届国际土力学及地基基础会议文集. 北京: 地质出版社, 1959.
- [8] 刘保健, 张晓荣, 程海涛. 应变控制下压实黄土的动三轴试验研究[J]. 岩土力学, 2007, 28(6): 1073—1076.
- LIU Bao-jian, ZHANG Xiao-rong, CHENG Hai-tao. Study on compacted loess under strain control at dynamic triaxial test[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2007, 28(6): 1073—1076.
- [9] LACERDA W A, HOUSTON W N. Stress relaxation in soils[C]//Proc., 8th ICSMFE. Moscow: [s. n.], 1973.
- [10] AKAI K, ADACHI T, ANDO N. Existence of a unique stress-strain-time relation of clays[J]. **Soils and Foundations**, 1975, 15(1): 1—16.
- [11] ARAI K. Representation of soft clay behavior based on minimization of dissipated energy[C]//Proc. 5th ICONMIG. Nagoya: [s. n.], 1985.
- [12] ODA Y, MITACHI T. Stress relaxation characteristics of saturated clays[J]. **Soils and Foundations**, 1988, 28(4): 69—80.
- [13] 王志俭, 殷坤龙, 简文星, 等. 万州安乐寺滑坡滑带土松弛试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(5): 931—937.
- WANG Zhi-jian, YIN Kun-long, JIAN Wen-xing, et al. Experimental research on stress relaxation of slip zone soils for anlesi landslide in Wanzhou city[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2008, 27(5): 931—937.
- [14] 杨春和, 殷建华, DAEMEN J J K. 盐岩应力松弛效应研究[J]. 岩石力学与工程学报, 1999, 18(3): 262—265.
- YANG Chun-he, YIN Jian-hua, DAEMEN J J K. The investigation of stress relaxation of salt rock[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 1999, 18(3): 262—265.
- [15] TAYLOR D W. Cylindrical compression research program on stress-deformation and strength characteristics of soils[C]//Proceedings of 9th Progress Report to U. S. Army Corps of Engineering Waterways Experiment Station. Cambridge: Massachusetts Institute of Technology, 1943: 1—20.
- [16] BJERRUM L. Engineering geology of Norwegian normally-consolidated marine clays as related to settlements of buildings[J]. **Geotechnique**, 1967, 49(5): 81.
- [17] CASAGRANDE A, WILSON S D. Effect of rate of loading on the strength of clays and shale's at constant water content[J]. **Geotechnique**, 1951, 2 (3): 251—263.