

文章编号:1001-4888(2012)03-0301-10

天然气水合物分解对地层稳定性影响的离心机实验模拟^{*}

张旭辉¹, 胡光海², 鲁晓兵¹

(1. 中国科学院力学研究所, 北京 100080; 2. 国家海洋局第一海洋研究所, 青岛 266061)

摘要: 水合物分解后将引起地层强度的降低, 可能造成海床沉陷、滑塌以及海洋结构物基础的破坏。针对该问题, 首先以南海浅层粉砂为沉积物骨架, 采用生物厌氧发酵技术合成水合物沉积物, 然后进行水合物热分解引起地层响应的离心机实验模拟, 获得了水合物分解引起地层变形与滑塌的特征以及孔隙压力发展的物理过程, 为研究水合物分解引起海床失稳的条件进行了新的尝试。

关键词: 天然气水合物; 海床稳定性; 离心机实验; 孔隙压力; 地层变形

中图分类号: TU **文献标识码:** A

0 引言

天然气水合物是在高压和低温条件下, 由水和天然气组成的类冰的笼形结晶化合物。自然界中水合物广泛分布在大陆、海洋和一些内陆湖的深水环境, 是一种重要的潜在能源^[1]。水合物沉积物是指蕴含这种固态水合物的砂、粘土以及混合土、岩石等土质的沉积物质。随着世界油气可开采量的减少和消耗量的增加, 深海水合物开采的迫切性日益显著。美国、日本、加拿大等国开展了大量的相平衡条件、勘探方法等方面的工作, 并进行了试采^[2,3]。

油气开采、水合物开采或自然条件变化会引起水合物沉积层中水合物分解。如果沉积层孔隙内的水合物分解产生的气体不能迅速消散, 那么孔隙内会产生很大的超静孔隙压力^[4,5], 使得骨架的有效应力减小, 沉积层的承载能力降低; 同时水合物的分解可降低沉积层的胶结, 使得沉积层中可能出现滑裂面而引起海床滑塌破坏。在深海油气田的开采以及水合物的开发时, 高温的油气或钻井液使得管道成为热源, 不断向水合物沉积层提供热量引起水合物分解, 分解范围会随时间不断推移。Briaud 等人^[6,7]的研究表明, 位于海床下 50 米处 1 米直径的导管中高温油引起的水合物分解前锋经过 15 年时间将扩展 20 米远, 40 年时间则扩展 30 米远, 这种扩展可能对海床中结构物构成威胁。研究表明, 水合物分解范围的扩展可能引起海底滑坡^[8-10]。目前为止发现的最大海底滑坡——挪威 Storegga 滑坡共滑动 2500~3200 立方公里沉积层, 大量的地质调查和分析表明, 产生该滑坡的原因是当时水温增加, 水合物发生分解, 在海底形成大面积的薄弱层。因此, 水合物分解引起地层稳定性问题是深海油气和将来的天然气水合物开发中海床安全性评估需要解决的关键问题之一。

目前, 针对水合物分解引起地层稳定性问题的研究主要集中在数值模拟上, 模型实验的数据资料还

* 收稿日期: 2011-06-14; 修订日期: 2011-11-30

基金项目: 国家自然科学基金项目(No. 1077218)、国家高技术发展研究专项(863)、中国科学院三期创新方向性项目"KJCX2-YW-L02"资助

通讯作者: 张旭辉(1982-), 博士, 助理研究员, 主要从事岩土工程和海洋水合物方面的研究工作。E-mail: zhangxuhui@imech.ac.cn

十分缺乏。土工离心模型实验是将原型实体按几何尺寸缩小制成模型,放在高加速度场中达到与原型相同的应力状态,从而使模型与原型的应力应变相等、变形相似、破坏机理相同,从而再现原型特性,是目前国际岩土工程界广为关注和大力研究发展的一项物理模拟技术,几乎已应用到岩土工程的所有领域。其优点是能以原材料模型在原型应力状态下显示出土体变形的全过程,可较真实地模拟土体的应力应变本构关系。将离心模拟实验技术应用到对含天然气水合物的沉积物的研究中,能够较好地克服海底被海水覆盖的局限,较为直观、准确地显示土体在自重应力作用下的变形状态和破坏过程,是研究海底斜坡稳定性的有效方法。

基于此,本文以南海北部陆坡区域浅表层沉积物为骨架合成水合物沉积物,利用离心机实验探索天然气水合物分解引起的地层稳定性问题。首先利用有机物厌氧发酵法以粉砂为骨架合成水合物沉积物,然后进行最大 150g 离心机实验,测试水合物分解过程孔隙压力、地层变形演化过程。

1 实验介绍

1.1 实验设备

实验是在中国水利水电科学研究院的 LXJ-4-450 大型土工离心试验机进行,其主要技术参数为:最大加速度 g 为 300,有效负荷为 450g-t,最大转臂半径为 5.03m,吊篮尺寸为长 \times 宽 \times 高=1.5m \times 1.0m \times 1.2m。



图1 土工离心机

Fig.1 Geotechnical centrifuge



图2 实验所用模型箱实物照片

Fig.2 The graphic of experimental model box

实验采用的模型箱如图 2 所示,长 \times 宽 \times 高=54cm \times 40cm \times 40cm,其中的一个侧壁为钢化玻璃,另外三个侧壁为钢板,外部利用钢板加固。实验过程中采用激光位移计测量土体表面沉陷、通过美国产 PDCR-81 微型孔隙压力计测量土体中孔压,并通过 2 套数字摄像头记录斜坡变形破坏的全过程。

水合物沉积物模型是将模型箱放在一个高 1450mm,内直径 900mm,壁厚 16cm,可承受最大压力为 5MPa 的压力罐中形成。压力罐的制冷在冷库中完成,冷库的内部尺寸为 2m \times 2m \times 2m,可以控制温度到 -16°C 以下,如图 3 所示。

1.2 模型制备和测试布置

模拟生物成因的水合物生成原理,用有机物厌氧发酵法以粉砂为骨架合成水合物沉积物。粉砂的颗粒级配曲线见图 4,比重为 2.71。首先在粉砂中发酵形成均匀分布的甲烷,然后把含气土体放进高压罐里,加上 4MPa 的气压,并将高压罐在冰柜里(最低温度 -14°C)冷冻 48 小时以上。当土体中孔压为零时,认为水合物已经形成。

实验中各个传感器位置以及实验前、后模型表面形态剖面见图 5。

在上述 4 种工况下的孔压计深度布置见表 1,模型初始参数见表 2。

表 1 孔压计深度

Tab.1 Depth of pore pressure tester

No.	PPT1	PPT2	PPT3	PPT4	PPT5	PPT6
工况 1	10.5	9	12	9.5	18.3	17.3
工况 2	28.1	9.8	14	9	10.4	2
工况 3	17	9.5	13	8	13.8	10.5
工况 4	15.5	7.3	13.5	24.9	10.9	10.9

表 2 模型初始参数

Tab.2 Initial model parameters

参数	工况 1	工况 2	工况 3	工况 4
含水量 %	33.0	33.9	32.3	34.1
密度	1.84	1.83	1.89	1.81
CH ₄ 含量	1.2	1.1	1.4	1.3
坡度(°)	7.1	8.5	9.2	10

注:CH₄ 含量单位为 mmol/kg, 密度单位为 g/cm³。



图 3 压力罐和冷库

Fig.3 Pressure tank and cold storage

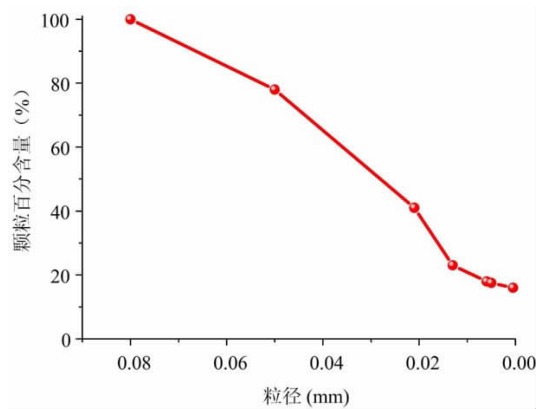


图 4 实验土的颗分曲线图

Fig.4 The grain size distribution curve of soil in experiments

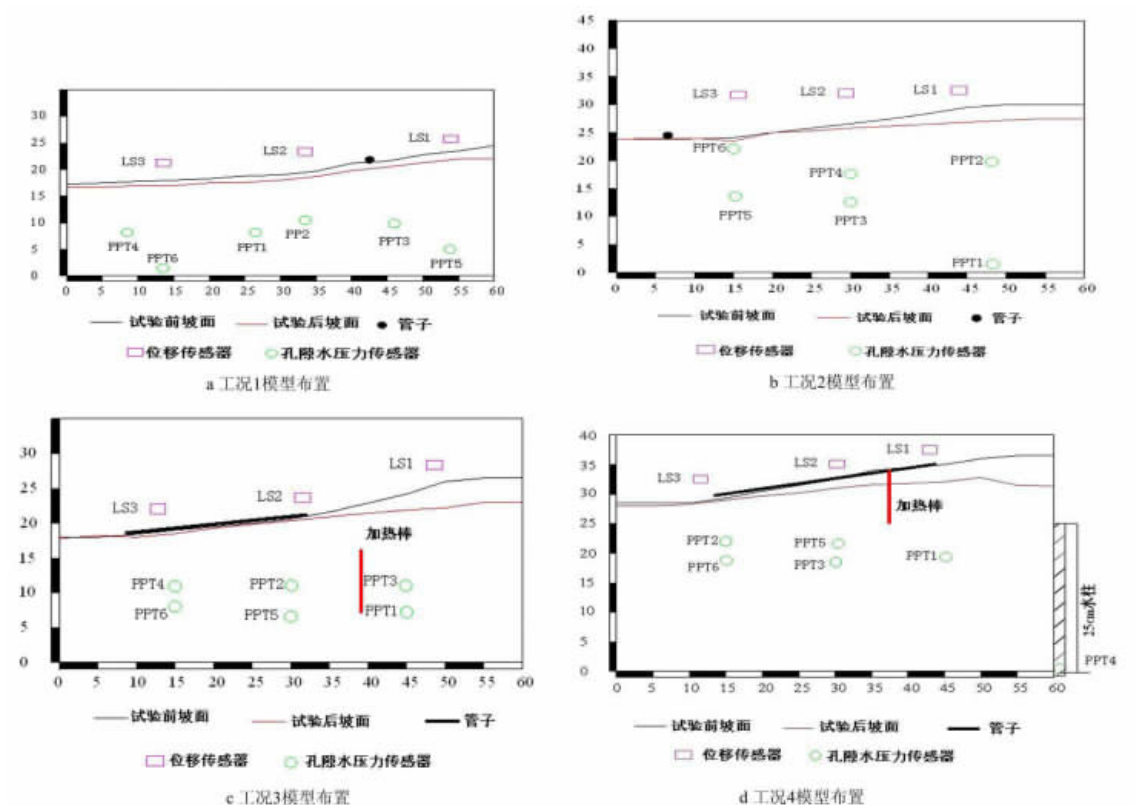


图 5 实验布置图

Fig.5 The layout of experiments

1.3 实验步骤

实验工况如下:

工况 1: 在模型表面斜坡上部平行于斜坡放置一根两头密封内装水的细钢管, 其外径为 10mm, 内径为 9mm, 长为 300mm, 密度为 $1.65\text{g}/\text{cm}^3$ 。在室温和常压下进行传感器布置和模型安装约 2 小时。在 0~2850s 逐渐将离心加速度增大到 150g, 保持 150g 运行 900s, 然后逐渐停机。

工况 2: 在制备好的模型表面覆盖一层厚度为 10mm 的粘土层。在模型表面斜坡下部垂直于斜坡放置一根如工况 1 的细钢管。在室温和常压下, 从 0~2670s 逐渐将离心加速度增大到 150g, 保持 150g 运行 840s, 然后逐渐停机。

工况 3: 模型布置如工况 2。在斜坡下部平行于斜坡放置一根两头密封内装水的细钢管。该管外径为 6mm, 内径为 4mm, 长为 300mm, 密度为 $4.77\text{g}/\text{cm}^3$ 。在 PPT1 附近安装一个加热棒。在 0~1790s 将离心机加速度增大到 150g, 这时打开加热棒的电源开关并保持 150g 运行 1800s, 然后逐渐停机。

工况 4: 模型布置如工况 3。细钢管垂直于斜坡放于下部。PPT4 附近放置一根充满水且不与坡体连通的铁管, 水深 25cm。0~600s 将离心机加速到 150g, 保持 150g 运行 3600s 后, 逐渐停机。在离心机开始加速时, 加热棒电源打开。

本实验涉及高压、加热和多个传感器的埋设且无先例可借鉴, 因此, 为了保证实验过程中的安全, 四个工况 1~4 按照时间顺序经验越来越丰富, 逐渐地减少加速阶段时间, 同时增加稳定运行时间。但总的时间在 1 个小时左右, 保证水合物的分解范围能够扩展到整个模型箱^[12]。

2 实验结果与分析

2.1 实验结果

2.1.1 地层变形与滑塌发展

对于工况 1~4, 随重力加速度的增加, 破坏从坡下部开始, 坡底部呈弧形明显地向斜坡下方移动, 坡顶面裂隙纹加大, 斜坡坍塌, 如图 6。

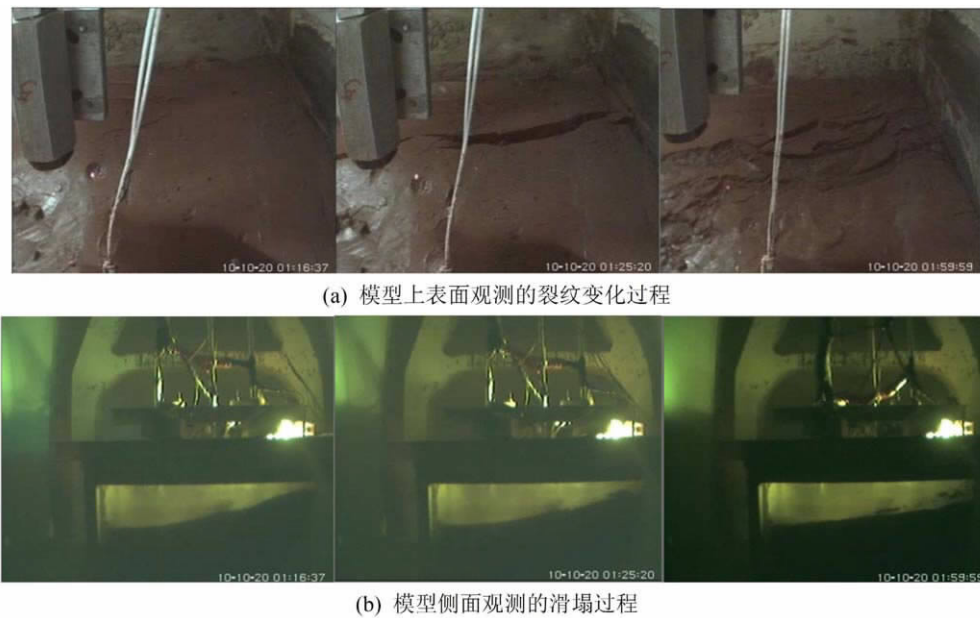


图 6 实验中观测的地层变形和滑塌(工况 3)

Fig. 6 Soil deformation and slide

工况 1 中斜坡在坡度为 6.7° 时重新稳定。实验结束后, 放在模型表面的钢管约下沉 2~3mm (见图 7)。

工况 2 中斜坡坡度为 5.1° (图 8)。在实验过程中 LS1 和 LS2 处最大沉降值分别为 29.6mm 和 13.0mm (正值表示模型表面降低, 负值表示抬升)。实验结束后, 观察到细钢管大部分被斜坡上部滑移

下来的沉积物覆盖。

工况 3 中实验进行到 2000s 左右坡底面出现积水,影响了 LS3 测量数据。在坡度为 5.3°时坡体重新稳定(图 9)。实验结束后,细钢管已经被沉积物覆盖。

工况 4 中斜坡上部土体滑动引起的沉降速度较快,而上部滑塌下来的沉积物在斜坡下部堆积减缓了沉降。在坡度为 4.2°时重新稳定(图 10)。实验结束后,细钢管约下沉了 3~4mm。

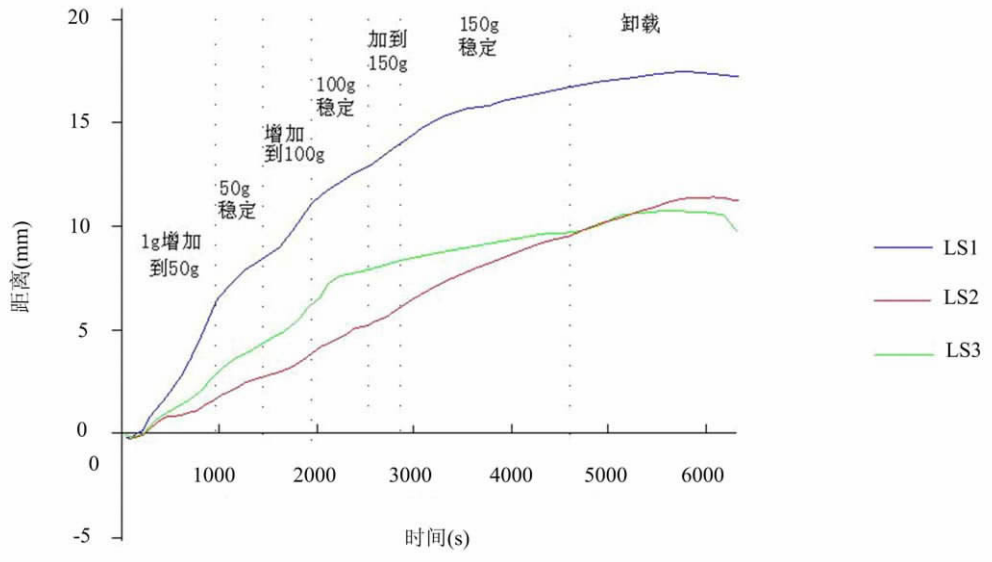


图 7 工况 1 的表面沉降变化曲线

Fig. 7 The development of settlement in case 1

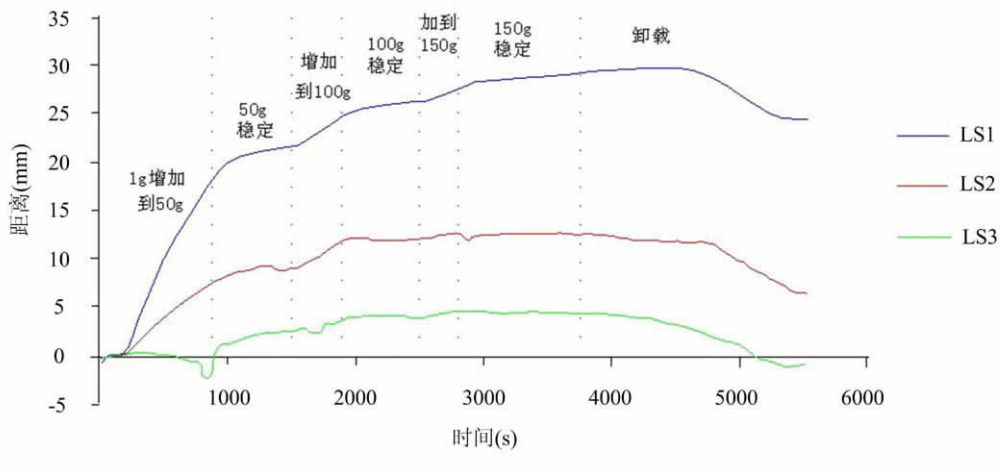


图 8 工况 2 的表面沉降变化曲线

Fig. 8 The development of settlement in case 2

2.1.2 孔隙水压力发展

对于工况 1, PPT1、PPT3~PPT6 等 5 传感器检测的数据变化情况见图 11。总体来看,在 1g 加速到 150g 的过程中,5 个传感器的测量值在逐渐增加,随着加速度的增加,记录到数据的传感器先后顺序为:PPT6、PPT5、PPT4、PPT3 和 PPT1。因此离边界(模型箱壁)越近处,孔隙水压力上升越早,即边界处水合物分解越快(图 11)。

对于工况 2,在加速度增加到 150g 值时,PPT1、PPT3、PPT5、PPT4 和 PPT6 的值分别为 68.5kPa、123.7kPa、152.8kPa、176.2kPa 和 373.4kPa。在 50g、100g 和 150g 稳定期内,5 个孔压传感器监测值多有小幅下降(图 12)。这表明在加速度值稳定期内孔隙水压力消散。

对于工况 3, PPT1、PPT4、PPT5 和 PPT6 在加速度值增加到 150g 时,这几个位置的孔压值分别是

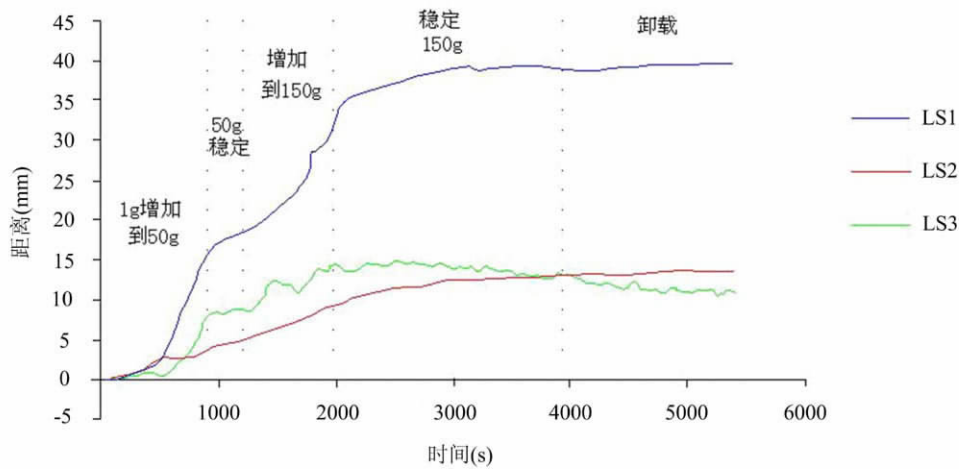


图9 工况3的表面沉降变化曲线

Fig.9 The development of settlement in case 3

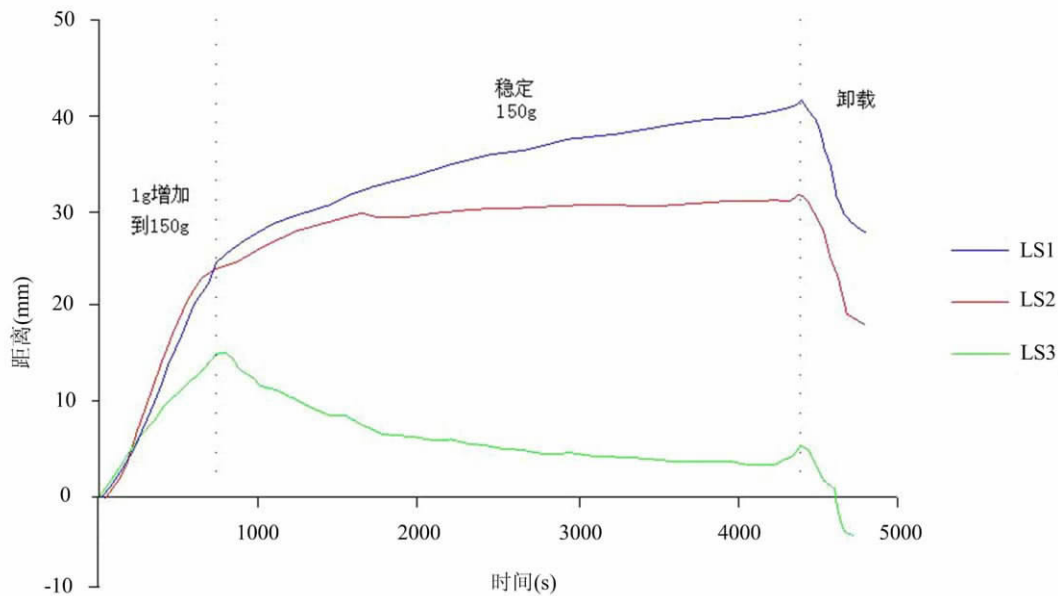


图10 工况4的表面沉降变化曲线

Fig.10 The development of settlement in case 4

248.9kPa、157.3kPa、205.7kPa 和 179.3kPa。在 150g 稳定期间,PPT1 传感器由于离热源很近,随着水合物热分解,孔压值出现一个较大的变化值,从 248.9kPa 增加至 457.5kPa,然后随着渗流而降低至 203.4kPa; PPT4、PPT5 和 PPT6 等 3 个传感器的测量值也有一些小的波动变化(图 13)。

对于工况 4, PPT4 安装在清水中,记录的孔压值与加速度呈好的线性关系。PPT1、PPT2 和 PPT3 测量值在 150g 值时,测量值分别为 249.6kPa、150.7kPa 和 225.3kPa。在 150g 值稳定期,3 个传感器记录的值出现波动,表明孔隙气在累积和消散(图 14)。

在工况 1~4 中,由于部分孔隙压力传感器的探头处可能被沉积物的细颗粒堵塞或者水合物的二次形成堵塞的原因,仅测试到图 11~14 中显示的数据,这也是相关测试中应引起重视的问题。

2.2 水合物分解范围和地层变形滑塌分析

2.2.1 水合物分解范围估算

水合物分解过程分为两个阶段:第一个阶段是实验准备阶段,常温常压条件下水合物的分解,时间

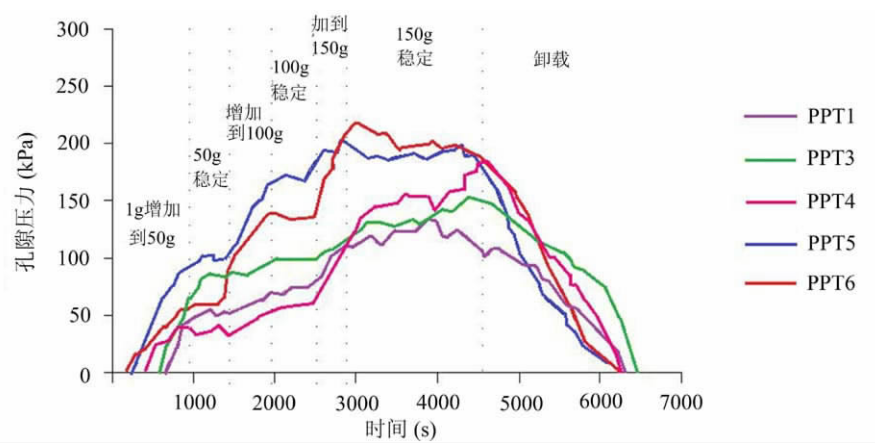


图 11 工况 1 实验过程中孔隙水压变化

Fig. 11 Development of pore water pressure in case 1

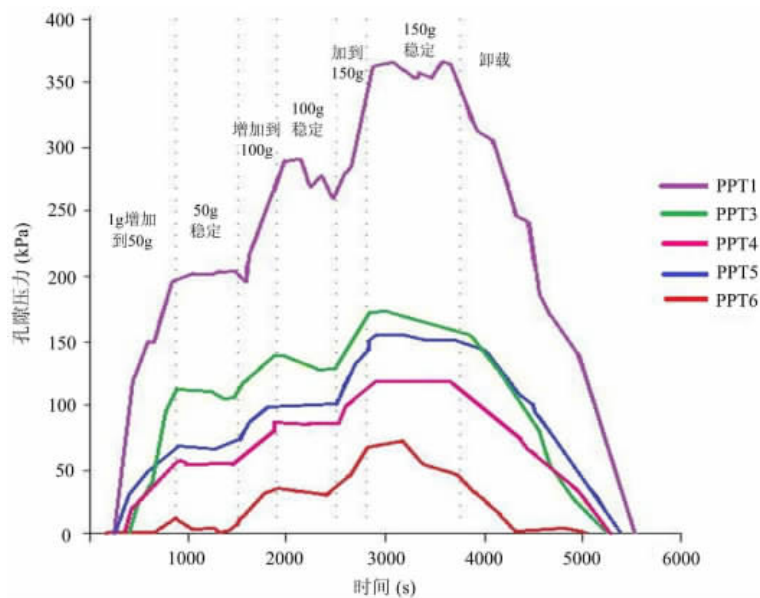


图 12 工况 2 实验过程中孔隙水压变化

Fig. 12 Development of pore water pressure in case 2

约 2 个小时,主要由模型壁向模型内部沉积物传热引起;第二个阶段是离心机实验阶段,时间约 1 个小时,主要由模型壁向模型内传热和内置加热棒加热引起。

水合物沉积物中水合物热分解时,内部分为冰和水合物分解区域及未分解区域,区域间由相变阵面分隔。各区域组成成分分别为:①水、气体、土骨架;②水合物、土骨架、冰。水合物沉积物中的温度 T 取决于①区的密度 ρ_1 、比热 C_1 、热传导系数 K_1 、加热温度 T_h 、初始温度 T_0 、相变潜热 ΔH 、相平衡温度 T_e 和②区的密度 ρ_2 、比热 C_2 、热传导系数 K_2 。

对于①区,选取混相的区域的平均密度、平均比热、平均热传导系数:

$$\rho_1 = \epsilon_g \rho_g + (1 - \epsilon_0) \rho_s + \epsilon_w \rho_w; C_1 = \epsilon_g C_g + (1 - \epsilon_0) C_s + \epsilon_w C_w; K_1 = \epsilon_g K_g + (1 - \epsilon_0) K_s + \epsilon_w K_w。$$

对于②区,选取混相的区域的平均密度、平均比热、平均热传导系数:

$$\rho_2 = \epsilon_h \rho_h + (1 - \epsilon_0) \rho_s + \epsilon_{ic} \rho_{ic}; C_2 = \epsilon_h C_h + (1 - \epsilon_0) C_s + \epsilon_{ic} C_{ic}; K_2 = \epsilon_h K_h + (1 - \epsilon_0) K_s + \epsilon_{ic} K_{ic}。$$

其中,下标识 h, s, g, w, ic 分别代表水合物相、骨架、气相、水相、冰相。

由于相变阵面的扩展前锋位置为 $x = \sqrt{\xi \kappa_1 t}$, κ_1 和 ξ 分别为①区的热扩散系数和自相似参数^[12]。

用表 2 的模型基本参数计算得到自相似参数 ξ ,得到以下两种情况的解:

1) 模型箱内水合物沉积物在上部环境温度 20℃ 的条件下分解,分解时间为 2 小时,分解范围为

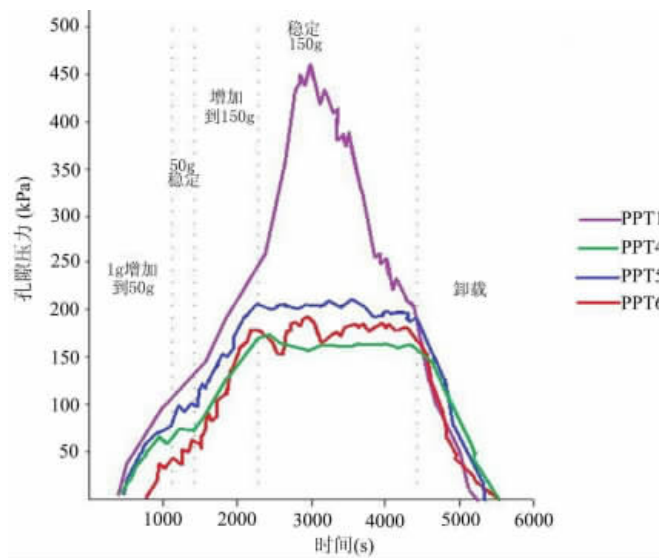


图 13 工况 3 实验过程中孔隙水压变化

Fig. 13 Development of pore water pressure in case 3

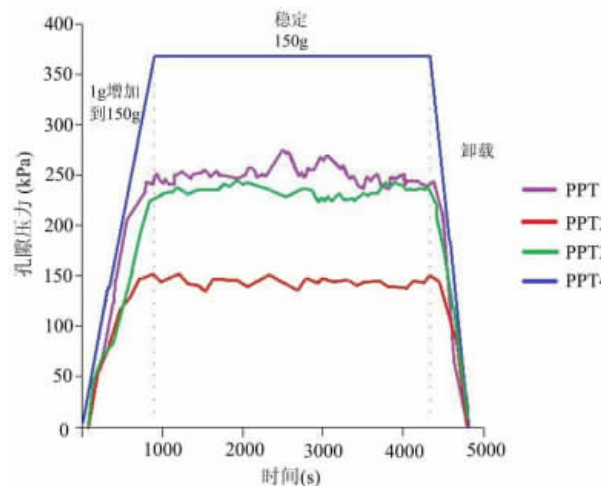


图 14 工况 4 实验过程中孔隙水压变化

Fig. 14 Development of pore water pressure in case 4

8.2cm;分解时间为3小时,分解范围为10cm;

2) 模型箱内布置加热棒,加热棒温度为 30°C 的条件下分解,分解时间为1小时,以棒为中心向四周分解半径为6cm。

从水合物分解范围来看,常温下离心机实验中,模型1的PPT6最接近下表面传热引起的水合物分解前锋,但测试的数据波动性较PPT5大(PPT5也比较接近下表面水合物分解前锋);模型2的PPT1接近下表面传热引起的水合物分解前锋;模型3和4的PPT1均接近加热棒,使得PPT1处的水合物分解,且分解速率较快。

2.2.2 地层变形滑塌分析

选择在离心实验过程中具有代表性的一个孔隙压力传感器监测数据,即模型1中的PPT5、模型2中的PPT1、模型3中的PPT1和模型4中的PPT1测量值和该传感器埋设深度处的土压力进行比较,如表3。

表 3 实验中的最大超静孔压 (kPa)

Tab. 3 Maximum excess pore pressure in experiments (kPa)

	模型 1	模型 2	模型 3	模型 4
最大超静孔隙压力(kPa)	64.1	119.6	333	155
土压力(kPa)	250	660	360	340
液化指数	0.26	0.18	0.93	0.46
高度(cm)	28.1	24	12.7	12.5
坡度(°)	7.1	8.5	9.2	10
时间(s)	3750	4510	3590	4200

在水合物沉积物深度 10cm 处,静水高度引起的压力值约为 1kPa,从表 3 中可以看出,离心机实验过程中,水合物的分解在水合物沉积物中形成了超静孔隙气体压力。一方面超静孔隙气体压力减小了土体的有效应力值,引起土体的膨胀变形,且在土体内形成易液化的区域;另一方面水合物的分解后水合物沉积物的强度大大降低^[13],引起上部土体的明显沉降,以及在土体内形成抗剪强度很弱的滑动面。这与离心机实验过程中观察到的具有坡度的土体沉降和下滑是一致的。

3 结论与建议

水合物分解后可能引起海底土体的沉降甚至滑塌,对海床及其结构物构成严重的威胁。为了模拟较大尺度的水合物分解对海底斜坡稳定性影响的物理机制,在室内合成水合物沉积物进行离心机实验,探索了水合物分解引起海底斜坡变形和滑塌的演化过程和破坏特征,得出如下认识:

(1) 土工离心模型实验能较为直观地模拟水合物分解后沉积物在自重应力和超静孔隙气体压力作用下的土力学响应,是模拟较大尺度水合物分解对海底斜坡稳定性影响物理机制的可行的新方法。

(2) 离心机实验结果显示:水合物分解过程中,土体内超静孔隙气体压力不断增大,斜坡土体不断向坡脚和坡底移动,造成下坡面和坡顶面抬升,同时坡体上管道等结构会下沉。初步解释为水合物分解产生的水和气体不能及时消散,引起超静孔隙气体压力,使得土体有效应力降低,同时水合物分解后沉积物强度的大大降低,导致土体沉降和滑动面的形成。

(3) 局部加热分解时,水合物在热源附近分解速度加快,分解形成的超静孔隙气体压力较室温条件下大,更易引起地层滑塌。

本文通过土工离心机实验获得了水合物分解引起海底稳定性影响的基本现象和初步解释,建议在此基础上可进一步深入分析水合物饱和度、水合物分解速度、沉积物坡度和强度以及超静孔隙气体压力消散程度对海底稳定性的影响。

参考文献:

- [1] Hisashi O K, Sridhar N, Song F, et al. Synthesis of methane gas hydrate in porous sediments and its dissociation by depressurizing[J]. Powder Technology, 2002, 122:239-246.
- [2] Gilles G, David G, Aleksandr M. Characterization of in situ elastic properties of gas hydrate-bearing sediments on the Blake Ridge[J]. Journal of Geophysical Research, 1999, 104(B8): 17781-17795.
- [3] Riedel M, Bellefleur G, Dallimore S R, et al. Amplitude and frequency anomalies in regional 3D seismic data surrounding the Mallik 5L-38 research site, Mackenzie Delta, Northwest Territories, Canada[J]. Geophysics, 2006, 71 (6): 183-191.
- [4] Xu W, Germanovich L N. Excess pore pressure resulting from methane hydrate dissociation in marine sediments: A theoretical approach[J]. Journal of Geophysical Research, 111, B01104, doi:10.1029/2004JB003600, 2006.
- [5] Sultan N. Comment on " Excess pore pressure resulting from methane hydrate dissociation in marine sediments: A theoretical approach" by Wenyue Xu and Leonid N. Germanovich[J]. Journal of Geophysical Research-Solid Earth, 2007, 112 (B2) NIL78-NIL84.

- [6] Briaud J L, Chaouch A J. Hydrate melting in hydrate soil around hot conductor[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 1997, 123(7):645-653.
- [7] Chaouch A, Briaud J L. Post melting behavior of gas hydrates in soft ocean sediments[C]. OTC8298, 1997, 1-11.
- [8] Jung W Y, Peter R V. Effects of bottom water warming and sea level rise on holocene hydrate dissociation and mass wasting along the Norwegian-Barents Continental Margin[J]. Journal of Geophysical Research, 2004, 109: B06104.
- [9] 宋海斌. 天然气水合物体系动态演化研究(II): 海底滑坡[J]. 地球物理学进展, 2003, 18(3): 503-511 (Song H B. Researches on dynamic evolution on gas hydrate system (II): Submarine slide[J]. Progress in Geophysics, 2003, 18(3): 503-511(in Chinese))
- [10] 甘阳华, 王家生, 胡高韦. 海洋沉积物中的天然气水合物和海底滑坡[J]. 防灾减灾工程学报, 2004, 24(2): 177-181 (Gan Y H, Wang J S, Hu G W. Submarine landslide related to natural gas hydrate within benthal deposit [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2004, 24(2): 177-181(in Chinese))
- [11] 刘锋, 吴时国, 孙运宝. 南海北部陆坡水合物分解引起海底不稳定性的定量分析[J]. 地球物理学报, 2010, 53(4): 946-953 (Liu F, Wu S G, Sun Y B. A quantitative analysis for submarine slope instability of the northern South China Sea due to gas hydrate dissociation[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2010, 53(4): 946-953(in Chinese))
- [12] 张旭辉, 鲁晓兵, 李清平等. 水合物沉积层中考虑相变的热传导分析[J]. 中国科学, 2010, 40(8): 1028-1034 (Zhang X H, Lu X B, Li Q P, et al. Thermally induced evolution of phase transformation in gas hydrate sediment [J]. SCIENCE CHINA-Physics, Mechanics & Astronomy, 2010, 53(8): 1530-1535(in Chinese))
- [13] 王淑云, 鲁晓兵, 张旭辉. 水合物沉积物力学性质的实验装置和研究进展[J]. 实验力学, 2009, 24(5): 413-420 (Wang S Y, Lu X B, Zhang X H. Advances in the laboratory apparatus and research on the mechanical properties of gas hydrate sediment[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2009, 24(5): 413-420(in Chinese))

Centrifuge Experimental Simulation of the Effect of Gas Hydrate Dissociation on the Seabed Stability

ZHANG Xu-hui¹, HU Guang-hai², LU Xiao-bing¹

(1. Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China;

2. The First Institute of Oceanography, SOA, Qingdao 266061, China)

Abstract: Dissociation of gas hydrate may cause the strength decrease in hydrate-bearing sediments and result in seabed sinking, slumping and destruction of marine structure foundation. To study this project, first, selecting silty sand from South China Sea as the skeletons, using biological anaerobic fermentation techniques, hydrate-bearing sediments were synthesized. Then centrifuge experimental simulation was conducted to investigate the seabed responses during and after the dissociation of gas hydrate. Characteristics of evolution of the seabed sinking and slumping and the pore water pressure were obtained. This work is expected to be beneficial to further study of the instability conditions of the seabed and the correspondent prevention methods.

Keywords: Gas hydrate; seabed stability; centrifuge experiment; pore pressure; seabed deformation