

# 水合物分解对海床稳定性影响的数值模拟\*

鲁力<sup>1,2</sup>, 张旭辉<sup>1</sup>, 鲁晓兵<sup>1</sup>

(1. 中国科学院力学研究所, 北京 100190; 2. 中国矿业大学(北京)理学院, 北京 100083)

**摘要:** 水合物分解引起地层强度降低并进而导致地层滑塌是人们关注的重点。本文采用数值模拟的方法, 分析水合物分解后, 水合物上覆层的变形特性, 从而分析上覆层从稳定变形到滑塌的过程。重点分析了随着水合物分解区域的扩大, 海床从较小变形到滑塌的过程。结果表明, 在给定上覆层厚度的情况下, 在水合物分解范围超过某临界值时, 海床发生滑动; 随着水合物分解长度的扩展, 海床变形具有突变性, 即当水合物区长度到某值时土体从稳定变形突然变为滑动。

**关键词:** 水合物; 分解长度; 海床稳定; 滑塌

中图分类号: TE38

文献标识码: A

文章编号: 1673-0836(2014)增2-1762-05

## Numerical Analysis on Seabed Stability with Dissociation of Hydrate

Lu Li<sup>1,2</sup>, Zhang Xuhui<sup>1</sup>, Lu Xiaobing<sup>1</sup>

(1. Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China; 2. School of Science, China University of Mining & Technology, Beijing 100083, China)

**Abstract:** Gas hydrate dissociation can induce the decrease of stratum's strength and cause landslide and settlement. Numerical method is used to analyze the deformation characteristics of the seabed over gas hydrate layer (over layer) with dissociation of gas hydrate, and the course of over layer from stable state to large deformation such as landslide. The main aim of the analysis is about the course of the over layer develops from small deformation to large deformation. It is shown that the over layer slides once the dissociation length is over some critical value under given thickness of over layer. The deformation of the over layer has characteristics of mutation with dissociation of gas hydrate. That means, once the length of dissociation zone is more than the critical value, the over layer deformation becomes from stable state to landslide.

**Keywords:** gas hydrate; dissociation length; seabed stability; landslide

## 1 引言

天然气水合物(简称水合物)是由水和甲烷分子在一定的温压条件下组成的结晶化合物,是二十一世纪的一种重要战略能源。在海底,水合物通常见于水深大于500 m的沉积物中。我国水合物分布广泛,南海、东海等海域以及青藏高原冻土带、东北冻土带均有水合物气藏分布<sup>[1]</sup>。

不论水合物开采,还是对水合物层下方油气藏

的开采都难免会对水合物所在地层产生扰动。扰动使得水合物相变分解,从而使其所在沉积物的力学强度和刚度极大降低即软化<sup>[2~4]</sup>。如果水合物分解引起的海底沉积物软化范围过大,有可能导致大规模的海底滑坡等灾害,毁坏海底电缆或海洋石油钻井平台等海底工程设置<sup>[5,6]</sup>。鲁晓兵、张旭辉等人对水合物分解引起的海床滑塌、层裂、喷发等现象进行了详细的研究<sup>[7~9]</sup>。Xu等人<sup>[10]</sup>的研究表明超孔压的形成是水合物分解后海底滑坡的原

\* 收稿日期: 2014-09-15(修改稿)

作者简介: 鲁力(1987-),湖北人,硕士生,主要从事岩土工程研究。E-mail: xblu@imech.ac.cn

基金项目: 国家自然科学基金(No. 41376078; No. 11272314)

因。目前对这种灾害的分析深度还不够,需要开展进一步的研究。

本文旨在通过数值模拟,针对水合物分解条件下,水合物上覆层变形和应力分布的变化进行分析,探讨水合物分解引起海底沉积层滑塌的机制。

### 2 模型建立

以南海地层为参考,模拟时取海底土层坡角为 15°,土层分为上下两层,上层是厚度 200 m 的盖层,下层是水合物沉积层,厚度 20 m。计算中采用的材料参数为:盖层土体密度 2 500 kg/m<sup>3</sup>,粘聚力和摩擦角分别为 0 和 20°,泊松比 0.2。水合物层与盖层层间为接触面,其中分解区域与盖层之间的接触面的摩擦角为 0,其它部分的摩擦角与水合物层内初始摩擦角相等。

分析时,首先进行地应力平衡计算,然后分析水合物分解区逐渐发展时上覆层变形和应力的发展。计算中假设水合物分解后由于地层渗透性小而不发生渗流,水合物层也没有体积变形发生,而只是在与盖层的界面处摩擦系数降为零。

模型左右侧面及底面法向位移固定,表面为自由面。使用摩尔库仑本构模型分析。计算过程中分解区长度采用从 100 m 到 3 000 m。在下面的结果中给出分解区长度分别为 300 m、480 m、490 m 等几种情况下的结果。

### 3 计算结果及分析

#### 3.1 分解区长度 300 m 时

图 1 给出了不同深度下沿坡面方向位移随着离开坡脚距离的变化。可以看出,除了靠近坡面处各点的位移几乎为 0,离坡面 160 m 深度以下区域其它各点位移约为 1 m ~ -1.5 m 之间,随着距分解区下端面距离的增加而缓慢增大。(图中水平方向 1 ~ 5 分别代表距离分解区下端面依次为 0 m、100 m、200 m、300 m、400 m 的位置,以下各图相同。)

图 2 给出了不同深度下垂直于坡面的位移(沉陷)随着离开坡脚距离的变化。结果表明,沉陷随深度逐渐减小。当分解区长度为 300 m 时分解区中垂直于坡面的位移极小,最大值仅为 15 cm。说明在这种工况下,海床稳定性较好。

图 3 给出了同一垂直面上沿坡面方向位移随离坡顶面距离(深度)的变化。可以看出,由于底部边界约束,靠近分解区底部的位移很小,距离坡面约 160 m 深度沿坡面方向位移最大且随着深度

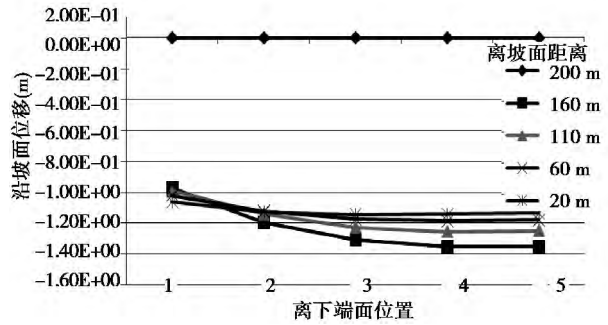


图 1 沿坡面位移随离坡脚距离的变化

Fig. 1 Displacement parallel to slope surface vs. its distance from slope toe

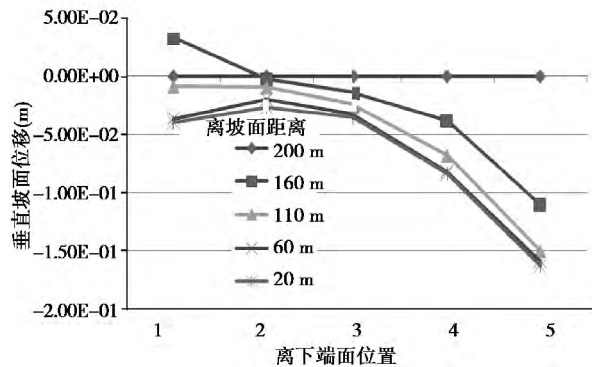


图 2 垂直坡面位移随离坡脚距离的变化

Fig. 2 Displacement vertical to slope surface vs. its distance from slope toe

的降低,位移慢慢减小,基本上在 1 m ~ 1.4 m 之间。

图 4 给出了同一垂直面上垂直于坡面方向位移随离坡顶面距离(深度)的变化。可以看出各个切面上该方向位移都很小,最大值约为 20 cm。

因此分解区长度为 300 m 时,土体中位移均较小,尚未发生剪切破坏,土体稳定性良好。

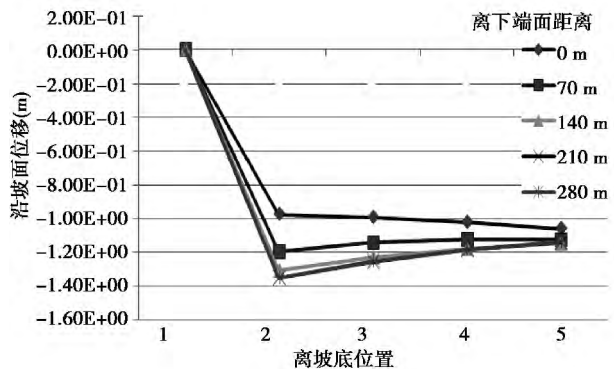


图 3 沿坡面位移随离坡面距离的变化

Fig. 3 Displacement parallel to slope surface vs. its distance from slope surface

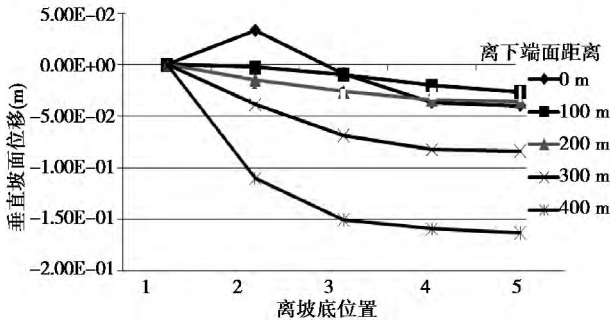


图4 垂直坡面位移随离坡面距离的变化

Fig. 4 Displacement vertical to slope surface vs. distance from slope surface

3.2 分解区长度 480 m 时

图5 给出了分解区长度 480 m 时沿坡面方向位移随离坡脚距离的变化,可以看出,160 m 深度以下位移在约为 5 m ~ 8 m。这时还没有发生持续的滑动。

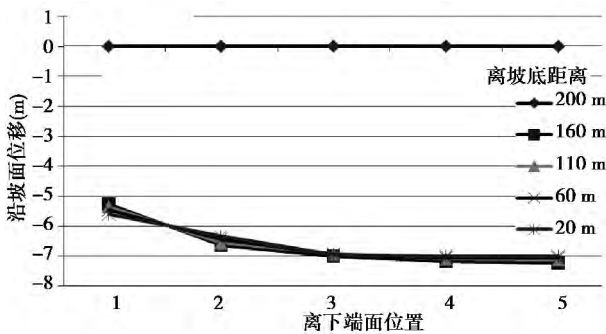


图5 沿坡面位移随离坡脚距离的变化

Fig. 5 Displacement parallel to slope surface vs. distance from slope toe

图6 给出了垂直坡面方向位移随离坡脚距离的变化。从图中可以看出,离坡脚越近的点,其垂直于坡面的位移越大,最大值约为 13 m 隆起,该位移随着距分解区下端面距离的增大而减小,并逐渐变为沉降。

图7 给出了沿坡面方向位移随离坡面距离的变化。靠近底部的各点沿坡面方向位移都很小。同一垂直面不同深度的沿坡面方向位移差别不大。

图8 给出了垂直坡面方向位移随离坡面距离的变化。可以看出,距离分解区下端面 0 m、100 m 的两个切面上发生了隆起,最大位移位置为分解区下端面靠近坡面位置。该位移随着距坡面深度的增加而减小,其余三个靠近坡顶的面上位移为沉降,且数值很小。

由以上结果可以看出,当分解区长度为 480 m 时,土体中不再是以沿坡面方向的位移为主,垂直

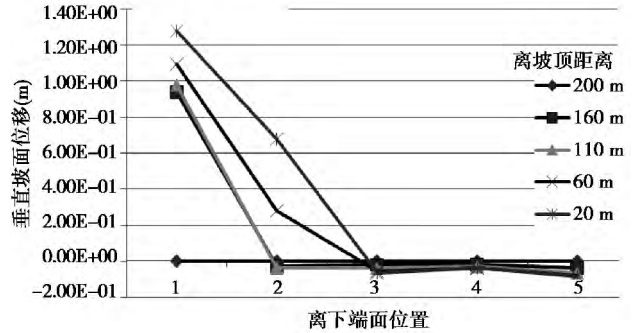


图6 垂直坡面位移随离坡脚距离的变化

Fig. 6 Displacement vertical to slope surface vs. distance from slope toe

坡面方向的位移也变得显著。但此时土体虽然已经有了剪切运动,但土体并未发生不可抑制的持续变形而仍能保持稳定。

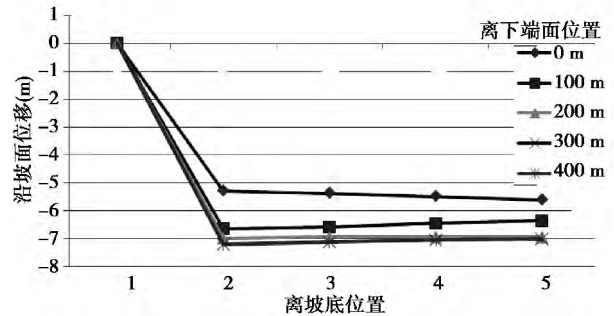


图7 沿坡面位移随离坡面距离的变化

Fig. 7 Displacement parallel to slope surface vs. distance from slope surface

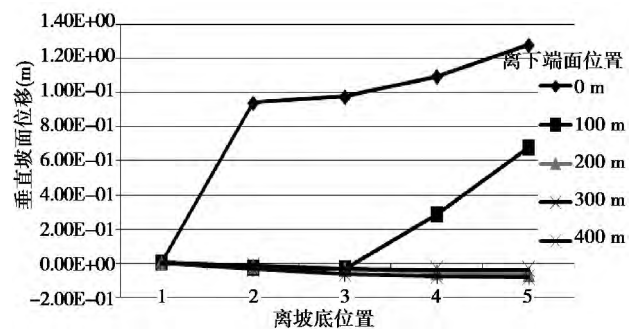


图8 垂直坡面位移随离坡面距离的变化

Fig. 8 Displacement vertical to slope surface vs. distance from slope surface

3.3 分解区长度 490 m 时

图9 给出了分解区长度为 490 m 时沿坡面方向位移随离坡面距离的变化。可以看到,除了由于边界法向约束限制使得接近坡底边界处的沿坡面方向位移基本为 0,其他深度下的各点均发生了较大位移,最大达到 50 m ~ 60 m,可以认为已发生了滑坡。

图10 给出了垂直坡面方向位移随离坡面距离

的变化。可以看出,垂直于坡面的位移较大的点均离分解区下端面较近,因为剪切破坏(剪出口)发生在下端面附近。

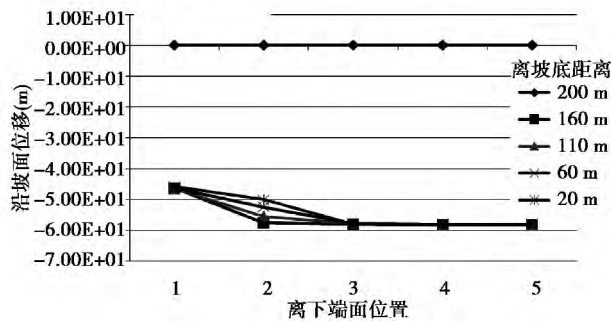


图 9 沿坡面位移随离坡脚距离的变化

Fig. 9 Displacement parallel to slope surface vs distance from slope toe

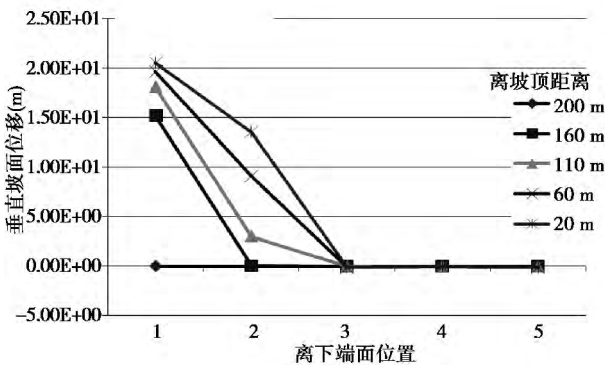


图 10 垂直坡面位移随离坡脚距离的变化

Fig. 10 Displacement vertical to slope surface vs distance from slope toe

图 11 给出了沿坡面方向位移随离坡面距离的变化。可以看出,除了靠近底部的区域,其它位置的位移基本上都在 40 m~60 m 之间,并且同垂线上不同深度的位移值差别不大。

图 12 给出了垂直坡面方向位移随离坡面距离的变化。可以看出,位移主要发生在距离分解区下端面较近处如距离 0 m、100 m 的两个位置上。距离分解区下端面远的位置上该方向位移基本为 0。

可以看出,分解区长度为 490 m 时,土体中靠近下端面位置的节点上有显著的位移。随着下端面附近土体剪切破坏的发生,其它位置的土体也随之产生了较大的沿坡面方向的位移,此时已不能认为土体处于稳定状态而是已经破坏。

通过上述计算,我们可以看出,随着水合物分解区长度的增加,上覆层的变形从稳定的较小的变形发展到大的不可抑制的持续变形即滑塌,即当覆

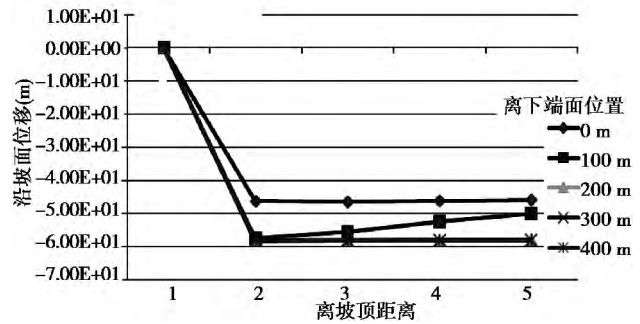


图 11 沿坡面位移随离坡面距离的变化

Fig. 11 Displacement parallel to slope surface vs from slope surface

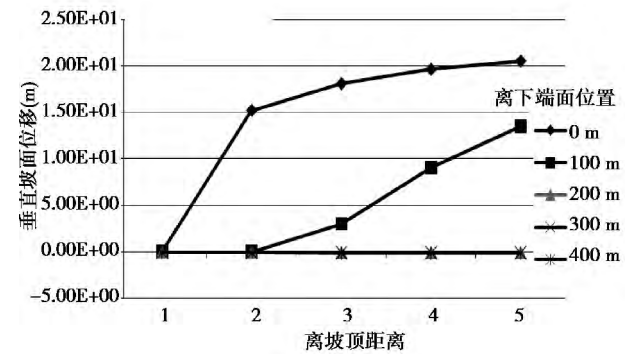


图 12 垂直坡面位移随离坡面距离的变化

Fig. 12 Displacement vertical to slope surface vs distance from slope surface

盖层厚度一定时,存在一个临界分解长度,超过这个长度,滑塌就会发生。从如下的上覆层速度矢量也可以看出,当水合物分解区长度较小时,速度基本为水平方向,但是分解长度在 480 m 以上时,靠近分解区下端的的上覆层速度变为向斜上方,即发生了剪出(图 13,14)。在本文给出的土体参数和几何条件下,海床发生滑塌的分解区临界长度为 480 m~490 m。超过了这个临界长度,盖层就会发生不可抑制的运动即滑塌。

### 3.4 验证

为了验证本文数值计算的可靠性,将计算结果与模型实验结果<sup>[11]</sup>进行了对比。计算中材料参数采用的是该模型实验中取样进行三轴实验获得的,即两者的材料参数是一致的。计算中几何参数改为与模型实验的相同,实验模型槽长 1.4 m,宽 0.4 m,高 0.5 m。制备的水合物土层的厚度为 25 cm,长 1.4 m,宽 40 cm,坡度分别为 3°、9°和 15°。水合物分解前地层的粘聚力、摩擦角和弹性模量分别为 35 kPa、5°和 4 MPa,分解后分别为 6 kPa、2.3°和 0.8 MPa。

表1给出了计算结果与实验结果的对比,可以看出两者的结果比较接近。故本文的计算还是可靠的。

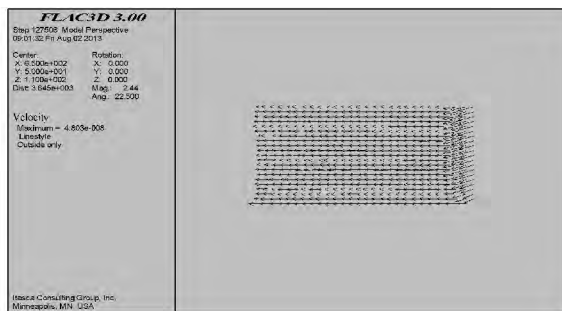


图13 分解区长300 m时地层速度矢量

Fig. 13 Velocity vector of soils at 300 m dissociation length

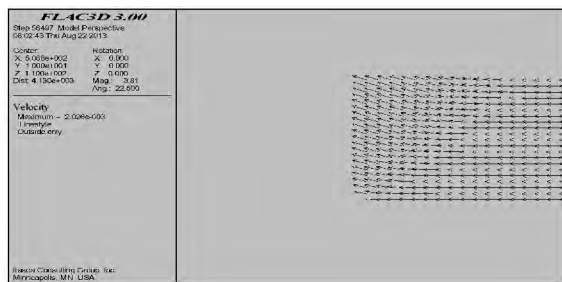


图14 分解区长480 m时地层速度矢量

Fig. 14 Velocity vector of soils at 480 m dissociation length

表1 水合物分解后土层变形计算与实验对比

Table 1 Comparison of experimental and computing results on the sediment's deformation

坡角(°)	实验值(mm)	计算值(mm)
3	5	3.9
9	10	12
15	15	16

## 4 结 论

对水合物分解后海床变形和应力变化的数值模拟,分析了随着水合物分解区域的扩大,海床从小变形到滑塌的发展过程,主要得到如下结论:

(1) 在水合物分解范围小于某临界值时,海床变形是有限的;当水合物分解范围超过某临界值时,海床发生滑动。

(2) 水合物分解区上部盖层中靠近坡体顶部的土体水平位移小,土体发生沉陷;离坡角近处水平位移大,土体发生隆起。

(3) 随着水合物分解区域的扩展,海床变形具有突变型,即当水合物区域到某值时土体从稳定变形突然变为滑动。

## 参考文献(References)

- [1] 郭平,刘士鑫,杜建芬. 天然气水合物气藏开发[M]. 北京:石油工业出版社,2006.
- [2] William, J W, Ingo, A P, William, F W et al. Physical properties and rock physics models of sediment containing natural and laboratory-formed methane NGH [J]. J American Mineralogist, 2004, 89: 1 221-1 227.
- [3] Lu X B, Wang L, Wang S Y, et al. Study on the mechanical properties of THF hydrate deposit [A]// Proc. 18th Int. Offshore and Polar Engng. Conf. [C]. Vancouver, 2008, 57-60.
- [4] Masui A, Haneda H, Ogata Y et al. Effect of methane hydrate formation on shear strength of synthetic methane hydrate sediment [A]//Proc. 15th Int. Offshore and Polar Engng. Conf. [C]. Seoul, Korea, 2005 364-369.
- [5] Kayer, R E, and Lee, H, Pleistocene slope instability of NGH-laden sediment on the Beaufort Sea Margin [J]. J Marine Geotechnology, 1991, 10(1-2): 125-141.
- [6] Sultan, N, Cochonat, P, Foucher, J P, et al, Effect of NGHs melting on seafloor slope instability [J]. J. Marine Geology, 2004, 213: 379-401.
- [7] Zhang X H, Lu X B, and Zheng Z M. Layered fracture and outburst due to dissociation of hydrate [J]. J. Petroleum Science and Engng., 2011, 76: 212-216.
- [8] Lu X B, Wang L, Wang S Y et al. Instability of seabed and pipes induced by NGH dissociation [A]//Proc. 20th Int. Offshore and Polar Engng. Conf. [C]. Beijing, 2010, 110-114.
- [9] Lu X B, Zhang X H. Centrifugal experiment on stratum instability and failure process due to gas hydrate dissociation [A]//In: Global View of Engineering Geology and the Environment [C]. Wu & Qi (eds), CRC Press, Taylor & Francis Group, London, 2013, 197-201
- [10] Xu, W., and Germanovich, L. N.. Excess pore pressure resulting from methane hydrate dissociation in marine sediments: A theoretical approach, J. Geophys. Res., 111: B01104, 2006.
- [11] 鲁晓兵. 南海水合物沉积物力学特性研究报告[R]. 中国科学院力学研究所, 2012.