DOI:10.16562/j.cnki.0256-1492.2018031602

# 水合物分解对海底边坡稳定影响的数值模拟分析

宋本健,程远方,李庆超,韩忠英,吕亚慧

中国石油大学(华东),青岛 266580

摘要:海底边坡失稳会给人类造成巨大危害,部分海底边坡失稳案例被证实与水合物分解有关。由于海底条件的复杂性,人 们很难直接观察水合物分解引起的海底边坡失稳过程。数值模拟可以相对准确地预测水合物分解可能引起的海底边坡失稳 状况。通过选用基于 ABAQUS 软件的有限元强度折减法,模拟海底边坡失稳的过程并得到相应结果,分析了水合物分解程 度、水合物带上覆厚度、边坡角度等因素对海底边坡稳定性的影响。结果表明,正常情况下,塑性区首先在坡脚区域出现并逐 渐向上发展至坡顶;当水合物分解达到一定程度后,塑性区首先出现在水合物带,随后自水合物带向上发展至坡顶,并和随后 在坡脚出现的塑性区形成贯通边坡的塑性带。水合物埋藏越深,越有可能造成大规模的滑坡;边坡角度高于 15°时,水合物分 解会急剧促进边坡失稳。

**关键词:**水合物分解;海底边坡;有限元;强度折减法;安全系数 中图分类号:P736,TE99 **文献标识码:**A

#### Simulation of submarine slope stability related to hydrate dissociation

SONG Benjian, CHENG Yuanfang, LI Qingchao, HAN Zhongying, LV Yahui China University of Petroleum (East China), Qingdao 266580, China

Abstract: Hydrate dissociation is a significant factor causing submarine slope slide, which is dangerous to human operation. Due to the complex condition of seabed, it is hard to observe the process of slope slide directly. Numerical simulation is an effective approach to acquire some important parameters such as the slide area, slide scale, sliding distance and safety factors etc. Choosing shear strength reduction technique of the finite element based on the software of ABAQUS, we could not only simulate both the process and result of a slope slide, but also evaluate the influence of hydrate dissociation. By changing the parameters of modeling, the characteristics of seafloor can be considered. Of course, the inducing factor is the interaction between the structure of slope and hydrate dissociation. It can guide the hydrate exploitation process and avoid some possible problems by integration of the theoretical and simulation results.

Key words: hydrate dissociation; marine slope; the finite element; shear strength reduction technique; factor of safety

天然气水合物是由水与天然气在高压低温条件 下形成的结晶物质<sup>[1]</sup>,直观上与冰相似,广泛分布于 海洋深水地层和高纬度极地冻土地层中<sup>[2]</sup>。目前普 遍认为水合物中所储存的能量是所有传统化石能源 的2倍<sup>[3]</sup>。同时由于其能量密度大、污染程度低等 因素<sup>[4]</sup>,被认为是石油等传统化石能源的接替能源。 目前水合物开发方向的研究主要包含3个方面:水 合物成藏机理,水合物勘探开采以及相关地质问题 研究。人们进行大量的水合物开采室内实验和数值 模拟研究之后(例如 Kurihara 采用 MH21-HYDRES<sup>[5]</sup>, White 和 McGrail 采用 STOMP-HYD<sup>[6]</sup>, Moridis 采用 TOUGH + HYDRATE<sup>[7,8]</sup> 等), 水合物分解所引起的地质问题开始逐渐得到各 界的重视。研究认为, 水合物开采分解所致的海底 地质风险不仅会作用在开采范围, 同时会诱发长期 的巨大的地质灾害及环境风险, 海底滑坡是其典型 表现形式<sup>[9,10]</sup>。目前关于水合物分解对海底边坡稳 定性影响的科学研究尚处于理论探索阶段。

作者简介:宋本健(1993—),男,硕士研究生,研究方向为水合物地层稳定评价及石油工程岩石力学,E-mail:songbenjianupc@163.com 通讯作者:程远方(1964—),男,教授,博导,从事石油工程岩石力学研究.

资助项目:国家重点研发计划"海洋水合物钻完井及安全监测技术"(2016YFC0304005);国家重点基础研究发展计划(973计划)"海洋深水油 气安全高效钻完井基础研究"(2015CB251201);青岛海洋科学与技术国家实验室开放基金"天然气水合物开发储层失稳机制及控制技术研究" (QNLM2016ORP0212)

**收稿日期:**2018-03-16; 改回日期:2018-05-15. 蔡秋蓉编辑

水合物分解会严重降低沉积层的强度[11,12],具 体表现在以下 2 点:(1)水合物分解后其自身在水合 物沉积层中的胶结、支撑作用的消失,其分布区域的 力学强度大大降低:(2)注热开采或地层流动性较差 的情况下,水合物分解产生的大量气体不能及时从 地层中排出,会在孔隙内部形成异常高压,进而破坏 储层结构,降低储层强度及承载能力。两方面作用 使得储集层强度严重降低,进而引起地质失稳问 题<sup>[13]</sup>。Sultana 研究认为已知规模最大的海底滑坡 Storgga 滑坡的主要诱因是水合物分解,同时采用 Comsol 软件进行的水合物分解多场耦合的数值分 析,进一步证实了水合物分解会引起大规模的海底 滑坡<sup>[14]</sup>。Gupta 等采用 C++编程建立了系统的耦 合热、化学、静水压力、岩石力学行为的水合物分解 模型,论证了岩石力学行为在水合物分解过程中的 重要性,并且结合数值模拟和实验得出结论:水合物 分解会导致海底地层出现大于 5%的体积应变[15]。 Li 等采用 Flac3D 建立了含水合物的海底边坡模 型,论证水合物分解对海底边坡失稳的影响的同时 分析了水合物分解时边坡各个位置向下运动的位 移<sup>[16]</sup>。周丹分析认为海底滑坡规模远大于陆地滑 坡且当边坡角度小于 10°时,由于内部水合物层强 度降低,仍有可能发生海底滑坡[17]。杨晓云等进一 步探讨了水合物分解对海底沉积层岩石力学参数的 影响机理及影响程度,并认为胶结强度的降低是海 底边坡失稳的主导因素<sup>[18]</sup>。马云<sup>[19]</sup>、于桂林<sup>[20]</sup>、张 振飞<sup>[21]</sup>分别采用 ABAQUS 软件建立了一系列含水 合物边坡的数值模型,并评估了边坡稳定性和失稳 范围及潜在的影响因素。

上述研究存在以下几方面的不足之处:(1)没有 考虑水合物实际开采过程,采取单一水合物饱和度 进行分析。水合物分解开采过程中,水合物自钻孔 向两侧逐渐分解,即沿井眼径向上水合物饱和度不 均匀:(2)本构模型及材料参数论证不足。不同水合 物饱和度下沉积层强度参数直接影响整个边坡的力 学行为,系统详实本构方程描述在相关分析中至关 重要;(3)人工迭代试算的计算方法。上述诸多分析 均采用人工计算的方式,使得所得结果不连续、非动 态,且计算过程繁琐。本文在前人研究的基础上,采 用基于 ABAQUS 的强度折减法,结合实际开采情 况,选取连续的水合物沉积层本构模型,实现自动迭 代折减计算,分析了开采过程中不同边坡角度、埋藏 深度条件下水合物分解程度对边坡稳定性的影响情 况。研究结果表明,水合物分解是边坡失稳的主导 因素,在20°边坡条件下,并眼附近水合物地层强度 低于沉积层强度时,会引起较大规模的海底滑坡;边 坡角度和水合物分解程度共同作用下边坡会急剧失 稳。同时,水合物带的位置及分解程度决定了边坡 的稳定性及滑坡的规模。

## 1 模型建立

## 1.1 水合物本构模型

水合物沉积层的本构模型建立是水合物分析中 的重点难点部分。其具体表现为水合物对沉积层特 有的3个作用:一是水合物对沉积物的胶结作用;二 是水合物分解对沉积层结构的破坏;三是由于水合 物强度高于单一沉积砂泥岩强度,使得含水合物的 沉积层强度(在水合物未分解或轻度分解条件下)普 遍高于不含水合物层[13,22]。大量分析认为,影响水 合物在地层中岩石力学行为特征的主要因素同样可 以概括为3类:岩土粒径分布和岩性分布[23,24];水 合物成藏原因[25-27];水合物饱和度分布[28]。因此, 本构模型的建立势必要引入水合物饱和度[29]。目 前人们对水合物本构模型进行了大量的三轴实验并 得到了一系列具有一定可信度的水合物沉积层本构 模型<sup>[30]</sup>。其中应用较多的分别是基于摩尔一库伦 模型和剑桥模型改进建立的水合物沉积层本构模 型[31,32]。综合分析各种已有模型,本文所选取的本 构模型是基于非线性理论和摩尔一库伦模型所建立 的,以水合物饱和度为基础变量,建模时离散沉积层 和水合物层,并最终得到综合的抗剪强度参数及杨 氏模量。该模型不仅可以较好地描述不同区块动态 水合物饱和度下的沉积层应力应变关系[33],同样与 Miyazaki 等进行的大量关于水合物的三轴实验结 果相吻合,因此,以该模型作为水合物沉积层力学特 征的本构模型<sup>[34]</sup>。关系式如下所示<sup>[32]</sup>:

$$c = c_s + c_h = c_1 \left(1 - e^{-\frac{\sigma_3}{\sigma_t}}\right) + c_2 s_h^{c_s}$$
  

$$\sin\varphi = \sin\varphi_s + \sin\varphi_h =$$
  

$$\sin\left[\delta_1 - \delta_2 \ln\left(\frac{\sigma_3}{1_{MPa}}\right)\right] + \delta_3 s_h \left(1 - e^{-\frac{\gamma}{\delta_4}}\right)$$
  

$$E = E_s + E_h = e_1 \left(\frac{\sigma_3}{1_{MPa}}\right)^{\theta_2} + e_3 s_h$$

式中,c, $c_s$ , $c_h$ 分别是水合物沉积层、砂和水合物的 内聚力(kPa); $\varphi$ , $\varphi_s$ , $\varphi_h$ 分别是水合物沉积层、砂和 水合物的摩擦角(°);E、 $E_s$ 、 $E_h$ 分别是水合物沉积 层、砂和水合物的弹性模量(kPa); $s_h$ 是水合物饱 和度。其他参数在具体某一区块为常数, $\sigma'_3$ 为有效 围压(kPa); $\gamma$ 是内部剪切应变; $\delta_1$ 和 $\delta_2$ 是与相对 密度和固体材料相关的常数, $\delta_3$  是与水合物的存在 而引起的膨胀增加相关的常数, $\delta_4$  是与脱粘/断裂 相关的剪切应变相关的常数。 $c_1$ 、 $c_2$  分别为所测沉 积层与水合物的粘聚力(kPa); $c_3$  为拟合所得的指 数参数; $e_1$ 、 $e_2$ 、 $e_3$  是 Pinkert 等建立模型时拟合得 出的常数。确定岩土强度的方法包括室内实验和现 场原位测试两大类方法<sup>[2]</sup>,结合我国南海神狐海域 水合物沉积层骨架强度,具体参数如表 1 所示。

**表1** 水合物沉积层骨架参数(据文献[33-35]) Table 1 Skeleton coefficient of hydrate sediment

物理量	数值	单位	物理量	数值	单位
<i>c</i> <sub>1</sub>	293	kPa	$\delta_3$	0.22	
C 2	1960	kPa	$\delta_4$	0.04	
с 3	1.7		е	2.72	
$\sigma'_3$	1962	kPa	<i>e</i> <sub>1</sub>	548000	kPa
$\sigma'_t$	382	kPa	e 2	265800	kPa
$\delta_1$	0.4		e 3	450000	kPa
$\delta_2$	0.2		γ		

## 1.2 基于 ABAQUS 的有限元强度折减法

传统的边坡稳定性分析方法主要包括极限分析、极限平衡和以有限元为主的数值计算方法<sup>[36]</sup>。随着计算机技术和有限元的发展,基于应力场的稳定分析方法和有限元强度折减法越来越得到普遍认可,并逐渐成为未来边坡稳定性分析的发展方向。陆上边坡稳定性分析方法同样适用于海底边坡稳定性分析<sup>[37,38]</sup>。本文即采取有限元强度折减法作为水合物分解导致的边坡稳定性分析的指导方法。强度折减法由 Zienkiewicz 于 1975 年提出<sup>[39]</sup>,该方法的核心是抗剪强度折减系数,其定义为:在外载荷保持不变的情况下,边坡内土体所提供的最大抗剪强度与外载荷在边坡内产生的实际剪应力之比。临界破坏时的强度折减系数 *F*,即为边坡的安全系数 *F*,。

折减后的抗剪强度参数可分别表达为[40]:

 $c_m = c/F_r$ 

 $\varphi_m = \arctan(\tan \varphi/F_r)$ 

式中:*c*<sub>m</sub>、*φ*<sub>m</sub> 是维持平衡所需要的或土体实际发挥的内聚力和摩擦角;*F*,是强度折减系数。

计算中需要假定不同的强度折减系数 F,,使用 折减后的强度参数进行有限元分析。在 ABAQUS 中,将折减系数定义为场变量,进而实现折减系数在 计算过程中自动增加,并最终得到计算中止时的折 减系数。在此基础上,根据下部分所选取的边坡失 稳准则,确定边坡失稳的安全系数,并根据所得的计 算结果进行分析。

## 1.3 边坡失稳准则

边坡失稳的判据同样直接影响对边坡稳定性的 认识情况及强度折减法的准确性。目前判断土坡达 到临界破坏的评价标准主要有如下 3 种<sup>[38,40]</sup>:①形 成连续的塑性贯通区;②边坡顶部拐点发生显著位 移;③计算因不收敛而终止。

在实际计算过程中,塑性区一般在边坡底部开 始形成,并逐渐向上发展。当塑性区最终发展形成 连续的贯通区时,会导致边坡顶部拐点位置产生位 移。随着岩土强度进一步折减,边坡顶部特征部位 会产生一个严重的拐点,即说明此时边坡发生失稳, 产生了较大变形。若再进一步折减岩土强度,就会 引起计算的不收敛。即这3种判断依据是存在一个 时间上的联系的。同时,根据数值模拟结果,发现这 3种判据所确定的安全系数是逐渐增大的,但自塑 性贯通区形成至计算中断,此过程折减系数变化范 围不超过其数值的5%。

在实际分析过程中,只有以统一评价标准进行 对比分析才可以得到可信的结果。而前2种评价标 准只能根据计算过程中的云图分布或顶部节点位移 变化曲线,人为地选取一折减系数作为安全系数,由 于缺乏定量标准,会给不同情况下的对比带来主观 误差。第3种判断方式具有统一的评价标准,如只 需固定两迭代步之间的最小增量,即可形成统一评 价标准。因此,本文以计算终止为边坡失稳的评价 标准,以利于在同一标准下评价不同情况下的边坡 稳定性问题。

# 2 水合物边坡模型

### 2.1 数值模型建立

本模型模拟由于开发过程中水合物分解引起的 水合物带强度特征变化对海底边坡稳定性的影响。 随着时间推移,以井眼为中心,水合物带分解程度及 分解范围逐渐扩大。通过模拟计算水合物特定分解 范围、程度、时间点下边坡的安全系数,评估由水合 物分解对边坡稳定性的影响。通过数值模拟塑性区 分布云图及位移云图,确定水合物分解引起的边坡 失稳规模及程度的变化。

对于理想的三维均质地层,通过基础弹塑性力

学理论,可以简化为二维平面模型。对基本模型进行网格划分。为了保证计算精度,网格结构选择结构化的四边形单元,网格属性确定为平面应变网格。模型的基本尺寸如图1所示。模型水平跨度1000m,总厚度400m,水合物埋深120m,边坡角度

20°,坡顶水平跨度 200m,1 区域对称轴位置为井眼 位置,将水合物带以井眼为中心,向两侧划分区域, 以模拟不同的分解程度和分解范围<sup>[41]</sup>。本模型为 基本模型,后续模型在本模型基础上进行适当修 改。



图 1 模型基本尺寸 Fig.1 Size of the numerical model

### 2.2 边界条件和初始状态

结合典型边坡失稳分析,限制边坡左右边界在 水平方向上的位移,限制边坡下部边界在各个方向 的位移。同时,结合我国南海神狐海域水合物实际 勘探情况,选取合适条件,确定数值模拟所需的基本 参数。实际勘探数据与模型采用数据如表2所示。

## 表 2 神狐海域水合物地层勘探数据及 数值模型选用数据(据文献[1,19,35,42])

Table 2Exploration data and numerical model selecteddata for hydrate formations in the Shenhu area

参数	神狐海域勘探数据	模型选用数据
水深/m	500~2000	1300~1650
水合物埋深/m	7~350	$50 \sim \! 150$
海底坡脚/(°)	最高达 30	$10 \sim 25$
颗粒密度/(g/cm <sup>3</sup> )	2.695~2.716	2.700
海水密度/(g/cm <sup>3</sup> )	1.040	1.040
水合物密度/(g/cm <sup>3</sup> )	0.980	0.980
水合物饱和度	0.45~0.92	0.8
沉积物孔隙度	0.27~0.63	0.4

整个模型只受来自海水的上覆压力及自身的重 力影响<sup>[42-44]</sup>。采用地应力平衡分析对施加初始载荷 的数值模型进行地应力平衡,在地应力平衡状态的 基础上进行数值分析模拟。对于不同的水合物分解 程度,可以计算出水合物残余饱和度,然后将其代入 本构模型,可计算该条件下的强度参数。根据设定 方案,计算所得各分解程度下材料强度如表 3 所示。

表 3 模型材料强度参数

Та	Table 3 Strength parameters of numerical model				model
材料		内聚力 /kPa	摩擦角 /(°)	杨氏模量 /MPa	密度 /(g/cm <sup>3</sup> )
沉	沉积层		18.6	56.3	2.200
	未分解	1562.9	26.0	206.0	1.844
水合物	分解 30%	504.2	22.7	89.7	1.794
层分解	分解 60%	308.6	19.4	41.2	1.745
程度	分解 80%	89.2	17.3	23.7	1.711
	分解 100%	35.4	15.2	10.28	1.688

# 3 模型计算分析

## 3.1 水合物分解程度对边坡稳定性影响

在如图1所示模型上,设计7种不同的计算方 案来分析水合物分解范围及程度逐渐扩大的过程。 方案设计基本依据为:钻孔引起的水合物分解,随时间推移,水合物分解范围及分解程度不断变大。方案简介如下:作为对比方案,首先对不含天然气水合物层的海底边坡进行稳定性分析;之后对含水合物但未分解的海底边坡进行稳定性分析;随后将1区域水合物分解程度设为30%,其他区域未分解;依次类推,具体计算方案如表4所示。

表 4	模拟方	案设计

	Table 4 Conceptual design of simulation
方案	方案描述
方案 1	不含水合物层的均质海底边坡模型
方案 2	含水合物且水合物未分解的海底边坡模型
方案 3	1区分解30%,其他区域未分解
方案 4	1区分解60%,2区分解30%,其他区域未分解
方案 5	1 区分解 80%,2 区分解 60%,3 区分解 30%,4 区未分解
方案 6	1区分解100%,2区分解80%,3区分解60%,4区分解30%
方案 7	1、2区分解100%,3、4区分解80%

部分方案数值模拟如图 2 所示。前 3 种方案下 塑性区域发展情况基本相同:塑性区域首先出现在 坡脚,逐渐发展至坡顶形成塑形贯通区,塑形贯通区 及其所包含的区域是滑坡发生的范围。在 ABAQUS中可以通过塑性区的位置以及边坡在水 平方向上的位移来判断边坡失稳的范围与规模。对 比方案 1、2、3,说明水合物带的存在不会降低边坡 的稳定程度,由于方案 3 下水合物带的强度是高于 沉积层的强度的,因此,可以说明局部的强度增加对 边坡整体的稳定性影响不显著。同样,对比方案 2、3, 可以认为局部强度的小幅度降低对边坡整体的稳定 性影响不显著。随着水合物分解程度的增加,自方案 4 开始出现贯穿水合物带的塑形区,如图 3 所示。

对比水合物带分解 60%之后的水合物带强度 与边坡均质土层强度,发现两者弹性模量、泊松比等 强度参数特征相似,可以认为 60%分解程度下的水 合物带强度略低于边坡均质土层强度,两者强度关 系对于分析塑性区发展过程十分重要。在此强度下 的方案 4 计算过程中塑性区发展过程与之前所述方 案明显不同。该方案下,如图 3a 所示,塑性区首先 在坡脚位置出现,紧接着在模型右侧和水合物带出 现,而不是自坡脚逐渐向上发展。随着分析的进行, 坡脚的塑性区逐渐向上发展至水合物带,水合物带 的塑性区同时向上发展至坡顶,形成贯通的塑性区, 如图 3b。此时塑形贯通区的形成并没有直接导致 计算中止,折减系数进一步增大时,一个新的塑性带 自坡脚发展至坡顶,并最终形成另一个较弱的塑性 贯通区,即形成了 2 个塑性贯通区。如图 3c 所示。 随着折减系数继续增加,2 个塑性区大部分合二为 一,但仍存在小部分的间隔区域。



图 2 部分方案计算终止时塑性区分布云图 Fig.2 Contours of plastic zone when ending calculation in several cases

通过位移云图可以更加直观地认识边坡最终状态和具体失稳程度,图 3c 与图 4c 为同一折减系数,同为计算终止时的状态,可以发现 2 种云图的对应





最后 3 种方案下,塑性区均是首先出现在水合 物带,然后出现在坡脚位置。水合物带塑性区向上 发展至坡顶,坡脚位置塑性区发展至水合物带,形成 塑性贯通区。由于此 3 种方案下,水合物带强度已 显著低于沉积层强度,因此,没有出现方案 4 相似的 二次滑坡问题。前 3 种方案下,边坡失稳规模取决 于其本身强度,后 4 种方案下,边坡失稳规模取决于 水合物带所处的位置。因此,水合物分解直接影响 边坡的稳定性及失稳规模。

各方案下安全系数如图 5 所示。由于塑性区 域总是发生在边坡强度最低或应力分布最集中的位 置,前 3 个方案下均质沉积层的强度低于水合物带 的强度,因此,安全系数保持不变。自方案 4 开始,









水合物带分解后的强度低于沉积层的强度,安全系数取决于水合物带的强度。安全系数随水合物带强度。安全系数随水合物带强度的不断降低而降低,并最终小于1,这意味着随着

水合物的分解,海底边坡会发生大规模滑坡。对比 方案6及方案7的安全系数可以发现,边坡的安全 系数不仅受边坡强度影响,还与边坡低强度带的规 模相关,即局部小规模水合物带的高度分解对整个 边坡的安全系数影响程度显著。与马云[19]、于桂 林<sup>[20]</sup>、张振飞<sup>[21]</sup>等模拟所得结果进行对比,虽然各 研究中地层强度参数、边坡模型尺寸、本构模型以及 失稳准则等均有差异,但水合物分解前后所得安全 系数不存在数量级之间的差异,且随水合物分解,安 全系数的变化呈相同趋势。

# 3.2 不同上覆厚度下水合物带分解对边坡稳定性 影响

在图1所示的基本模型的基础上,只改变图4 模型中水合物带的竖直方向的位置,调整水合物带 上覆沉积层的厚度,建立3个新模型,同时将基本模 型纳入分析,每个模型根据水合物分解程度分别进 行2次计算。具体计算方案如表5所示。

表 5 水合物层不同上覆厚度下计算方案

Table 5 Numerical procedure under different overlay thickness of hydrate

计算模型	上覆沉积层厚度/m		水合物分解程度
 模型1	50		
模型 2	80	未分解	1 区域分解 100%,2 区
模型 3	120	不力卅	60%,4区域分解30%
模型4	150		

当水合物带未分解时,水合物带相当于一个坚 硬的夹层,边坡失稳的程度、规模以及安全系数取决 于边坡自身的强度。但是其埋藏程度对边坡稳定性 仍有一定影响。图6反映了水合物未分解时的边坡 失稳特征。当水合物带埋深低于边坡自身可能失稳 时的滑坡深度时,具有较高强度的水合物带会限制 边坡失稳的规模,但是对安全系数几乎没有影响。 当水合物带埋深较深时,水合物带的存在对边坡自 身稳定性几乎没有影响,但对边坡抵抗地质灾害的 能力有所提升。

由图 7 可以看出,随着水合物带的分解,塑性区 域总是会贯通整个水合物带,水合物带上部区域都 是潜在的滑坡区域。边坡产生横向位移区域的下边 界与塑性贯通区下边界是同一个边界。因此,横向 位移云图不仅能反映边坡失稳的区域和规模,还能 反映失稳的强度。对比各方案发现,塑性区总是可 以贯通水合物带和坡脚坡顶,上覆沉积层厚度的不 同直接导致滑坡规模的不同。随着上覆沉积层厚度 的增加,边坡失稳区域随之增加。这种增加不仅仅 表现为厚度的增加,坡顶失稳的范围也逐渐向内部 发展。这是由于分解后的水合物带强度低于沉积土 层所致。



# 图 6 不同上覆厚度下水合物带未 分解计算终止时位移云图

Fig.6 Displacement contours of slope without hydrate dissociation under different overlay thickness

安全系数与水合物带埋深关系曲线如图 8 所 示,水合物未分解情况下,边坡的安全系数保持稳 定;水合物带分解至低于沉积层强度时,随着上覆岩 层厚度的增加,安全系数增加,且失稳的规模也增 加。可能的原因是:水合物带分解后强度大幅降低 后, 塑形区总是会贯穿整个水合物层。上覆岩层厚 度的增加,塑性贯通区以上所包含的均质沉积层的 规模增大,所需能量越多,抵抗由于下部水合物带强 度降低所引起的失稳的能力越大,导致安全系数逐 渐上升。其具体原因有待进一步分析论证。根据图 8 所示的两条曲线发展趋势,基本可以确定不同埋 深条件下,水合物分解与未分解情况所得安全系数 会存在交点。此时,水合物分解与否不会对边坡的 稳定性产生影响,对边坡稳定性产生影响的只能是 沉积层自身强度。同样,此规律尚无成型的数学预 测模型,有待于进一步研究。









## 3.3 水合物带分解对不同角度边坡稳定性影响

在如图1所示的基本模型的基础上,改变图3-1 模型中边坡角度,对应调整边坡左侧高度。本小节 中共采用4个模型,其边坡角度分别是10°、15°、 20°、25°,水合物带保持与边坡斜边平行,每个模型 根据水合物分解程度分别进行2次计算。具体计算 方案如表6所示。

表 6 不同边坡角度的模型计算方案

Table 6 Numerical procedure with different slope angel

计算模型	边坡角度/(°)		水合物分解程度
模型 5	10		
模型 6	15		1区域分解100%,2区域
模型 7	20	未分解	分解 80%,3 区域分解
模型 8	25		60%,4 区域分解 30%







图 9 不同上覆厚度下水合物带未分解 计算终止时位移云图

Fig.9 Displacement contours of slope under different slope angle without hydrate dissociation

水合物分解前后模拟结果如图 9、图 10 所示, 其中,边坡角度为 20°时,水合物分解前、后云图分 别见图 6c、图 7c。可以发现,边坡角度对边坡安全 系数影响很大,但是对边坡可能的失稳规模影响不 大。因为塑形区是连接整个水合物带和坡脚、坡顶的,在水合物带相对位置相同的情况下,塑形贯通区 以上的失稳区域也大致相当。图 11 所示为水合物 分解前后不同角度下边坡的安全系数,随着边坡角 度的增加,边坡的安全系数本身会有一个较大幅度 的变化,但总是大于 1(小于 1 意味着自然失稳)。 正是由于水合物的分解作用,分解后水合物安全系 数降至1以下,说明水合物分解对边坡稳定性影响显





Fig.10 Horizontal displacement contours when ending calculation under different slope angle



图 11 边坡角度和安全系数曲线 Fig.11 Curve of slope angel vs. safety factor

著,同时说明在较大角度的海底斜坡上开采水合物 风险很大,应充分评估其失稳可能性。

## 4 结论

(1) 塑性区域发展过程。正常情况下,塑性区 自坡脚区域向上发展,形成塑形贯通区;水合物分解 程度达到 60%后,塑性区会先后出现在水合物带和 坡脚区域,水合物带的塑性区向上发展至坡顶,坡脚 区域的塑性区向上发展至水合物带,最终形成塑形 贯通区。

(2)水合物分解程度达到 60%及以上,整个边 坡的安全系数会降低,并最终失稳。分解程度越高, 边坡失稳时的安全系数越小。

(3)水合物未分解情况下,水合物带的存在有 利于维持边坡稳定;水合物充分分解条件下,水合物 埋深越深,整个边坡的安全系数越高。大角度边坡 水合物开采风险较大。

#### 参考文献(References)

- [1] 何静,刘学伟,杨萌萌,等.海底未固结成岩地层体积密度的估算方法[J].海洋地质与第四纪地质,2011,31(5):155-161.
  [HE Jing, LIU Xuewei, YANG Mengmeng, et al. Estimate bulk density of unconsolidated sea-bottom sediments[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2011,31(5):155-161.]
- [2] 胡高伟,李彦龙,吴能友,等. 神狐海域 W18/19 站位天然气水 合物上覆层不排水抗剪强度预测[J]. 海洋地质与第四纪地 质,2017,37(5):151-158. [HU Gaowei, LI Yanlong, WU Nengyou, et al. Undrained shear strength estimation of the cover layer of hydrate at site W18/19 of Shenhu area[J]. Marine Geology & Quaternary Geology,2017,37(5):151-158.]
- [3] 叶黎明,罗鹏,杨克红.天然气水合物气候效应研究进展[J].地 球科学进展,2011,26(5):565-574. [YE Liming,LUO Peng, YANG Kehong. Advances in climatic effects study of gas hydrates[J]. Advances in Earth Science,2011,26(5): 565-574.]
- [4] Kvenvolden K A. Gas hydrates—geological perspective and global change[J]. Reviews of Geophysics, 1993, 31(2):173-187.
- [5] Kurihara M,Sato A,Ouchi H, et al. Prediction of gas productivity from eastern Nankai Trough methane hydrate reservoirs [C]//Offshore Technology Conference. Offshore Technology Conference,2008.
- [6] White M D. McGrail B P. A new numerical simulator for analysis of methane hydrate production from geologic formations [C]//Proceedings of 2nd International Symposium on Gas Hydrate Technology, 2006; 1-2.
- [7] Moridis G J. A code for the simulation of system behavior in hydrate-bearing geologic media[J]. Stereochemical & Stereo-

physical Behaviour of Macrocycles, 2014, 10(2): IV.

- [8] Moridis G J, Collett T S, Pooladi-Darvish M, et al. Challenges, uncertainties and issues facing gas production from gas hydrate deposits[J]. SPE Reservoir Evaluation & Engineering, 2011, 14(1):76-112.
- [9] 朱超祁,贾永刚,刘晓磊,等.海底滑坡分类及成因机制研究进展[J].海洋地质与第四纪地质,2015,35(6):145-155. [ZHU Chaoqi,JIA Yonggang,LIU Xiaolei, et al. Classification and genetic mechanism of submarine landslide: A review[J]. Marine Geology & Quaternary Geology,2015,35(6):145-155.]
- [10] 吴能友,黄丽,胡高伟,等. 海域天然气水合物开采的地质控制因素和科学挑战[J]. 海洋地质与第四纪地质,2017,37(5):
  1-11. [WU Nengyou, HUANG Li, HU Gaowei, et al. Geological controlling factors and scientific challenges for offshore gas hydrate gas hydrate exploitation[J]. Marine Geology & Quaternary Geology,2017,37(5):1-11.]
- Li S,Xu X,Zheng R, et al. Experimental investigation on dissociation driving force of methane hydrate in porous media
   [J]. Fuel, 2015, 160:117-122.
- [12] Kamath V A. A perspective on gas production from hydrate [C]// The JNOC's Methane Hydrate International Symposium. Chiba City: Japan National Oil Corporation, 1998, 87-92.
- [13] Gupta S, Deusner C, Haeckel M, et al. Testing a thermochemo-hydro-geomechanical model for gas hydrate-bearing sediments using triaxial compression laboratory experiments
   [J]. Geochemistry, Geophysics, Geosystems, 2015, 77(9): 229-250.
- [14] Sultan N, Cochonat P, Foucher J P, et al. Effect of gas hydrates melting on seafloor slope instability[J]. Marine Geology, 2004, 213(1):379-401.
- [15] Gupta S, Wohlmuth B, Helmig R. Multi-rate time stepping schemes for hydro-geomechanical model for subsurface methane hydrate reservoirs [J]. Advances in Water Resources, 2016,91: 78-87.
- [16] Lu L, Zhang X H, Lu X B. Numerical study on the stratum's responses due to natural gas hydrate dissociation [J]. Ships and Offshore Structures, 2017, 12(6): 775-780.
- [17] 周丹. 天然气水合物分解对海底结构物稳定性影响的研究 [D].大连理工大学,2012. [ZHOU Dan. Study on the influence of the seabed structure stability due to natural gas hydrate dissociation [D]. Dalian University of Technology, 2012.]
- [18] 杨晓云. 天然气水合物与海底滑坡研究[D]. 中国石油大学, 2010. [YANG Xiaoyun. Study of gas hydrate and submarine landslide[D]. China University of Petroleum, 2010.]
- [19] 马云. 南海北部陆坡区海底滑坡特征及触发机制研究[D]. 中 国海洋大学,2014. [MA Yun. Study of submarine landslides and trigger mechanism along the continental slope of the northern South China Sea[D]. Ocean University of China, 2014.]
- [20] 于桂林.考虑孔压影响的海底能源土斜坡稳定性分析[D].青 岛理工大学,2015. [YU Guilin. Stability analysis of submarine energy soil slope considering the influence of pore pres-

sure[D]. Qingdao University of Technology,2015.]

- [21] 张振飞.海底能源土斜坡稳定性影响因素的敏感性分析[D]. 青岛理工大学,2016. [ZHANG Zhenfei. Sensitivity analysis of influencing factors on stability of submarine energy soil slope[D]. Qingdao University of Technology,2016.]
- [22] 刘浩伽,李彦龙,刘昌岭,等.水合物分解区地层砂粒启动运移临界流速计算模型[J].海洋地质与第四纪地质,2017,37
  (5):166-173. [LIU Haojia,LI Yanlong,LIU Changling,et al. Calculation model for critical velocity of sand movement in decomposed hydrate cemented sediment[J]. Marine Geology & Quaternary Geology,2017,37 (5):166-173.]
- [23] Winters W J, Waite W F, Mason D H. Strength and Acoustic Properties of Ottawa Sand Containing Laboratory-Formed Methane Gas Hydrate[M]//Advances in the Study of Gas Hydrates, Springer, Boston, MA, 2004: 213-226.
- [24] Yun T S, Santamarina J C, Ruppel C. Mechanical properties of sand, silt, and clay containing tetrahydrofuran hydrate[J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 2007, 112: B04106.
- [25] Yun T S, Santamarina J C. Hydrate growth in granular materials: implication to hydrate bearing sediments[J]. Geosciences Journal, 2011, 15(3): 265.
- [26] Waite W F, Santamarina J C, Cortes D D, et al. Physical properties of hydrate-bearing sediments[J]. Reviews of Geophysics, 2009, 47(4), doi: 10.1029/2008RG000279.
- Ghiassian H, Grozic J L H. Methane hydrate formation under controlled pressure in conventional triaxial apparatus [C]// Proceedings of the 63rd Canadian Geotechnical Conference, Calgary, Alberta. 2010: 12-16.
- [28] Ghiassian H, Grozic J L H. Strength behavior of methane hydrate bearing sand in undrained triaxial testing [J]. Marine and Petroleum Geology, 2013, 43: 310-319.
- 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(1-3): 127-135.
- Lin J S, Seol Y, Choi J H. Geomechanical modeling of hydrate-bearing sediments during dissociation under shear[J]. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 2017, 41(14): 1523-1538.
- [31] You K, Flemings P B. Methane hydrate formation in thick sand reservoirs: 1. Short-range methane diffusion[J]. Marine and Petroleum Geology, 2018, 89: 428-442.
- [32] Pinkert S, Grozic J L H. Prediction of the mechanical response of hydrate-bearing sands[J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 2014, 119(6): 4695-4707.
- [33] Pinkert S.Grozic J L H. An analytical-experimental investigation of gas hydrate-bearing sediment properties[C]//Canadian Geotechnical Conference and the 11th Joint CGS/IAHCNC Ground Water Conference, 2013.
- [34] Miyazaki K, Masui A, Sakamoto Y, et al. Triaxial compressive properties of artificial methane-hydrate-bearing sediment
   [J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 2011, 116

(B6).

- [35] 邬黛黛,谢瑞,杨蓉,等. 南海北部神狐海域水合物钻探区沉积物地球化学特征[J]. 海洋地质与第四纪地质,2017,37(6):
  100-109. [WU Daidai,XIE Rui,YANG Rui,et al. Geochemistry of the sediments in Shenhu hydrate drilling area, South China Sea[J]. Marine Geology & Quaternary Geology,2017, 37(6):100-109.]
- [36] 李广信.高等土力学 [M].清华大学出版社有限公司,2004.
   [LI Guangxin. Advanced Soil Mechanical[M]. Tsinghua University Press Co,Ltd,2004.]
- [37] Coleman J M, Garrison L E. Geological aspects of marine slope stability, northwestern Gulf of Mexico[J]. Marine Georesources & Geotechnology, 1977, 2(1-4): 9-44.
- [38] Fredlund D G, Krahn J. Comparison of slope stability methods of analysis
   [J]. Canadian Geotechnical Journal, 1977, 14 (3): 429-439.
- [39] Zienkiewicz O C, Humpheson C, Lewis R W. Discussion: Associated and non-associated visco-plasticity and plasticity in soil mechanics[J]. Geotechnique, 1977, 27(1): 101-102.
- [40] 费康,张建伟. ABAQUS 在岩土工程中的应用[M].中国水利 水电出版社,2010.[FEI Kang,ZHANG Jianwei. Application of ABAQUS in Geotechnical Engineering[M]. China Water-

Power Press, 2010.]

- [41] Kim A R,Kim H S,Cho G C, et al. Estimation of model parameters and properties for numerical simulation on geomechanical stability of gas hydrate production in the Ulleung Basin,East Sea,Korea[J]. Quaternary International, 2017, 459: 55-68.
- [42] 杨涛,叶鸿,赖亦君. 南海北部陆坡天然气水合物的沉积物孔 隙水地球化学研究进展[J]. 海洋地质与第四纪地质,2017,37 (5):48-58. [YANG Tao,YE Hong,LAI Yijun. Pore water geochemistry of the gas hydrate bearing zone on northern slope of the South China Sea[J]. Marine Geology & Quaternary Geology,2017,37(5):48-58.]
- [43] Jin G, Xu T, Xin X, et al. Numerical evaluation of the methane production from unconfined gas hydrate-bearing sediment by thermal stimulation and depressurization in Shenhu area, South China Sea[J]. Journal of Natural Gas Science and Engineering, 2017, 33: 497-508.
- [44] Jin G,Lei H,Xu T,et al. Simulated geomechanical responses to marine methane hydrate recovery using horizontal wells in the Shenhu area,South China Sea[J]. Marine and Petroleum Geology,2017,92: 424-436.