

深海能源土含气储层边坡动力稳定性分析

高盟¹, 黄小龙¹, 李建端²

(1. 山东科技大学 土木工程与建筑学院, 山东 青岛 266590;

2. 江西水利职业学院 水利工程系, 江西 南昌 330013)

摘要:深海能源土对自身赋存环境十分敏感,在动荷载作用下极易造成海底滑坡、海床失稳等海洋灾害的发生,因此研究深海能源土含气储层边坡的动力响应特性具有重要的现实意义。以实际海底边坡为研究背景,依托海底含水合物边坡模型,基于混合离散法建立海底边坡有限差分模型。研究了低黏土含量下深海能源土含气储层边坡在波浪荷载和地震荷载作用下的位移发展规律、剪应变演变和动孔增长特性。研究表明:在波浪荷载作用下,边坡最大位移及剪应变均大于地震荷载作用下,且滑动面形成贯通状态,表现为应变破坏模式;在地震荷载作用下,含气储层各点的动孔压均大于波浪荷载作用下,且滑动面并未形成贯通状态,使边坡更倾向于液化破坏。因此,在分析深海能源土含气储层边坡的安全性及稳定性时,应根据不同的动荷载作用形式,选用相匹配的破坏准则。

关键词:深海能源土;含气储层边坡;混合离散法;动力响应特性;破坏准则

中图分类号:P744;TU411

文献标志码:A

Slope dynamic stability analysis of gas-bearing reservoirs in deep-sea energy soils

GAO Meng¹, HUANG Xiaolong¹, LI Jianduan²

(1. College of Civil Engineering and Architecture, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, China;

2. Department of Water Conservancy Engineering, Jiangxi Water Conservancy Vocational College, Nanchang 330013, China)

Abstract: Deep-sea energy soil is highly sensitive to its own environment and is prone to marine disasters such as submarine landslides and instability under dynamic loads. Therefore, studying the dynamic response characteristics of gas-bearing reservoir slopes in deep-sea energy soil has important practical significance. Taking the actual seabed slope as the research background and relying on the seabed hydrate slope model, this paper established a finite difference model of seabed slope based on the mixed discrete method. It studied the displacement development law, shear strain evolution process, and dynamic pore growth characteristics of deep-sea energy soil gas reservoir slopes under wave and seismic loads with low clay content. The research results indicate that under wave loads, the maximum displacement and shear strain of the slope are greater than those under seismic loads, and the sliding surface forms a through state, exhibiting a strain failure mode. Under seismic loads, the dynamic pore pressure at each point of the gas-bearing reservoir is greater than that under wave loads, and the sliding surface has not formed a through state, making the slope more prone to liquefaction failure. Therefore, when the safety and stability of deep-sea energy soil gas-bearing reservoir slopes are analyzed, matching failure criteria should be selected in accordance with the different forms of dynamic load.

Key words: deep-sea energy soil; slope of gas-bearing reservoir; mixed discrete method; dynamic response characteristics; failure criterion

收稿日期:2025-01-12

基金项目:山东省自然科学基金项目(ZR2023ME055)

作者简介:高盟(1974—),男,山东临沂人,教授,博士,从事土动力学及海洋动力学的研究和教学工作。

E-mail:gmxyz@sdu.edu.cn

深海能源土中的水合物是一种新型清洁能源,因其储量大、分布广、能量密度高、热值大、无污染等特点而受到广泛关注。中国深海能源土主要分布于南海北部海域^[1]。研究^[2]发现,南海北陆坡地区经历了不同地质时期的演变后,海底沉积地层逐渐具有坡度,当海底含气储层边坡受到动荷载作用时,坡体极易产生滑移使气体发生运移并大量聚集到盆底,从而对沉积地层的稳定性和开采时的安全性产生严重威胁。因此,研究深海能源土含气储层边坡的稳定性对新型能源的开发具有十分重要的指导意义。

随着对深海能源土含气储层边坡稳定性研究的不断深入,许多学者从影响海底边坡稳定性的内部因素进行了分析,如刘锋等^[3]通过对南海北陆坡中部神狐海域水合物赋存区的研究,得出能源土的分解是导致海底斜坡不稳定的最直接因素。洪隽天等^[4]基于三维快速拉格朗日分析程序(fast Lagrangian analysis of continua in three dimensions, FLAC^{3D})对水合物分解后海底边坡的稳定性进行模拟分析,发现水合物分解将导致沉积层中有效应力减小、超孔隙水压力上升,从而使得抗剪强度下降。林星宇等^[5]通过用户自定义场变量子程序(user-defined field, USDFLD)对降压开采条件下海底边坡的稳定性进行模拟研究,发现当水合物完全分解时,储层边坡的弹性模量降低,渗透率变大;并利用强度折减法对海底边坡稳定性进行了数值模拟分析,发现单井降压开采法对于海底边坡的稳定性影响较小。宋本健等^[6]基于有限元分析软件 ABAQUS 的有限元强度折减法,模拟了海底边坡的失稳过程,并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。Sun 等^[7]通过水合物分解的热-流固耦合-化学数学模型,并结合强度折减法,得出了降压开采过程中的动态地质力学响应以及水合物分解对海底沉降和边坡失稳的影响程度。

为降低外部因素(如波浪荷载和地震荷载等动荷载)对海底含气储层边坡稳定性的不利影响,国内外学者对其动力特性进行了研究。Mackillop 等^[8]采用确定性及概率性方法对海底斜坡稳定性进行了综合分析,结果表明,循环应力加载和土体预处理过程在斯科蒂安斜坡失稳机制中起关键作用。Nian 等^[9]基于极限分析的运动学方法,同时考虑波浪荷载作用对海底斜坡的影响,得出海底边坡的动力响应规律。Chu 等^[10]通过动力时程分析了曹妃甸海底斜坡在地震荷载作用下的变形特征,发现位移值可反映地震对海底斜坡的影响程度。年廷凯等^[11]以南海北部陆坡区神狐海域典型峡谷陡坡群为例,基于三维斜坡稳定性分析软件 Scoops3D 和地理信息系统(geographic information system, GIS)技术建立了三维计算模型,开展了海底陡坡群的地震稳定性研究,得出强震作用将会大幅削弱海底斜坡的稳定性。闫一彬^[12]通过建立极限平衡-概率分析-动力响应耦合评价模型,对南海北部陆坡海底边坡稳定性进行了多维度量化评估,研究获取了边坡可靠度指标、静力安全系数及地震作用下的时程安全系数等定量结果。欧阳敏等^[13]通过 FLAC^{3D} 强度折减法推导了海底边坡稳定性计算方法,并通过二维模型计算得到了海底边坡安全系数。现有对深海能源土含气储层边坡力学特性的研究大多聚焦于静力特性,而且大多聚焦于导致含气储层边坡失稳的内部因素,采用数值模拟对海底含气储层边坡在动荷载作用下的力学特性研究较少。

本研究基于前期室内固结不排水循环加载动三轴试验^[14]获取的深海能源土关键力学特性参数及相关结论,同时不考虑水合物自身分解所造成的影响,采用 FLAC^{3D} 有限差分软件,并基于混合离散法建立海底边坡有限差分模型,探究了低黏土含量下深海能源土含气储层边坡在不同动荷载作用下的动力响应特性。

1 计算模型及参数设置

1.1 模型建立

南海北陆坡珠江口盆地峡谷区及白云凹陷地区海底边坡的坡度可达 40°,陡坡在动荷载作用下更容易失去稳定而产生滑移^[15],因此以陡坡为例开展分析。在实际海底环境中,边坡跨度较大,对于海底边坡的流固耦合及动力计算,若完全按照实际地质条件建立模型,普通计算站难以完成计算过程。为此,参考谭琳等^[16]所建海底含水合物边坡模型,建立横跨长 80 m、高 40 m、宽 6 m、坡顶水深 200 m、坡底水深 240 m 的深海能源土含气储层边坡模型,以模拟南海北陆坡浅海水合物富集区的典型海底陡坡,模型平面如图 1 所示。

FLAC^{3D} 有限差分软件使用混合离散法来模拟材料的塑性流动和屈服特性,对岩土体和其他非连续介质材料的模拟更为合理,且 FLAC^{3D} 采用显式方法进行求解,使非线性本构与线性本构没有算法上的差别,

从而使岩土体材料在非线性计算中具有优越性。因此,采用 FLAC^{3D} 软件建立海底边坡有限差分模型,模型共有 2 250 个单元体,3 260 个节点。此次模拟仅对含气储层的动力参数进行监测。边坡模型及监测点见图 2。

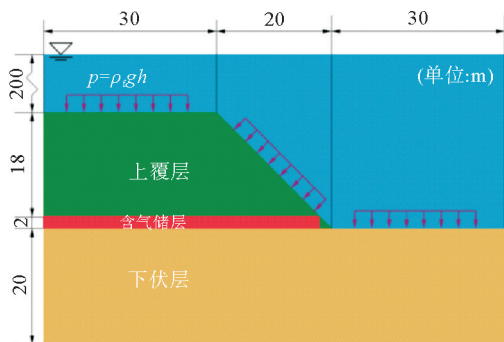


图 1 深海能源土含气储层边坡平面示意图

Fig. 1 Schematic diagram of deep sea energy soil gas reservoir slope

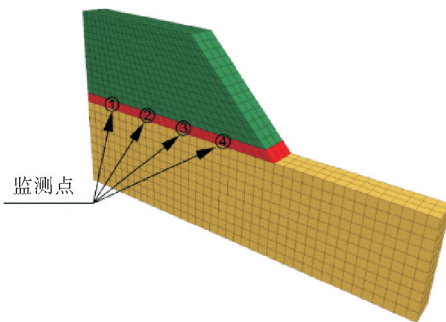


图 2 深海能源土含气储层边坡模型

Fig. 2 Slope model of deep sea energy soil gas reservoir

1.2 力学模型及参数设置

由于动荷载对处于低黏土含量下的含气土试样影响较为显著,因此选取黏土含量 10%、饱和度 94%,含气量为 6%的深海能源土含气储层边坡进行相关研究^[17]。土体本构采用 Mohr-Coulomb 模型,并基于前期室内固结不排水循环加载动三轴试验结果^[14],同时参考 Masuda 等^[18]对海槽原位开采的岩芯试样进行水合物分解试验的研究结论,设置各土层力学参数见表 1。

表 1 力学参数

Table 1 Mechanical parameters

土层类型	密度 $\rho/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	回弹模量 E/MPa	泊松比 ν	黏聚力 c/kPa	内摩擦角 $\varphi/(^{\circ})$
上覆层	1 550	200	0.30	60	18
含气储层	1 600	282	0.35	150	22
下伏层	1 550	480	0.30	90	28

1.3 流体模型及参数设置

在流体计算模式下,采用各向同性流体模型进行相关分析。其中,非含气层和含气储层的渗透系数分别取 6.5×10^{-4} 和 $1.0 \times 10^{-5} \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$,孔隙率 n 取 0.4。由于该计算问题中有重力存在,所以需要设置密度参数。各密度之间具有如下关系:

$$\rho_s = \rho_d + n S_r \rho_f. \quad (1)$$

式中: ρ_s 为土体饱和密度, ρ_d 为土体干密度, S_r 为饱和度, ρ_f 为流体密度。

流体体积模量 K_f 是表征流体压缩特性的重要物理参数,具体计算式如下:

$$K_f = \Delta P \cdot \left(\frac{\Delta V_f}{V_f} \right)^{-1}. \quad (2)$$

式中: ΔP 为流体压力增量, ΔV_f 与 V_f 的比值为流体体积应变。

当流体为常温下的纯水时, K_f 取 $2 \times 10^9 \text{ Pa}$ 。由于本研究对象为非饱和土体,孔隙中含有离散气泡,实际流体体积模量会有所降低。参考 Fredlund 等^[19]非饱和土体孔隙流体体积模量的计算方法,对所研究含气储层的流体体积模量进行计算。

$$E_f = \frac{K_f}{\frac{K_f}{K_a}(1-S_r) + S_r} \quad (3)$$

式中: E_f 为孔隙流体体积模量, K_a 为绝对孔压。从式(3)可以看出, 当饱和度 $S_r=1$ 时, 孔隙流体体积模量 E_f 等于流体模量 K_f 。通过式(3)可确定含气储存的孔隙流体体积模量为 8.5×10^8 Pa。

此外, 孔隙水压力增量 Δu 和塑性体积应变增量 $\Delta \epsilon_{vd}$ 有以下关系:

$$\Delta u = E_r \Delta \epsilon_{vd} \quad (4)$$

式中, E_r 为土体回弹模量。

数值计算的应变增长模型采用 Byrne^[20] 在 1991 年提出的计算塑性体积应变增量的方法, 计算式如下:

$$\frac{\Delta \epsilon_{vd}}{\gamma} = C_1 e^{-\frac{C_2 \epsilon_{vd}}{\gamma}} \quad (5)$$

式中: γ 为剪应变, ϵ_{vd} 为塑性体积应变, C_1 、 C_2 为参数。

2 边界条件及动荷载施加

2.1 静力边界条件

静力边界条件通过约束模型四周及底部的法向位移实现。取重力加速度 $g=10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ 以考虑模型自重, 并依据实际的海底环境, 对模型施加初始孔压, 同时在模型顶部施加海水压力 $P=\rho_f gh$, 其中流体密度 ρ_f 取 $1000 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$, 海水深度 h 依据模型不同顶面深度进行选取。

初始地应力场的获取可通过弹性求解法和分阶段弹塑性求解法。弹性求解法主要用于弹性模型的初始地应力场求解。分阶段弹塑性求解法首先对模型进行弹性条件下的求解, 再对其赋予塑性模型进行塑性求解。其中, 分阶段求解法对 Mohr-Coulomb 模型更为合理, 故采用分阶段弹塑性求解法对模型的初始地应力场进行求解。

2.2 动力边界条件

在动力计算中, 模型边界存在波的反射现象, 会对计算结果产生较大影响, 因此需对此加以限制。在动荷载及流固耦合的双重非线性条件下, 若通过加大模型尺寸限制波的反射, 普通计算站较难实现, 故通过施加边界条件来减少波的反射。

当采用静态边界时, 动荷载必须通过应力波施加, 若采用加速度或速度波则静态边界会失效。阻尼器提供的切向及法向黏性力计算式如下:

$$t_s = -\rho C_s v_s \quad (6)$$

$$t_n = -\rho C_n v_n \quad (7)$$

式中: t_s 、 t_n 分别表示模型边界上的切向黏性力及法向黏性力, ρ 代表下浮层土体密度, C_s 、 C_p 分别代表 S 波及 P 波波速, v_s 、 v_n 分别表示模型边界上的切向及法向速度分量。

对于底部基岩等高模量介质模型, 可采用自由场边界条件, 并在基底直接输入加速度。但该模型底部为土体, 直接施加加速度或速度波到模型底部, 会产生较大误差。因此, 同时对模型四周施加自由场边界, 并对模型底部施加静态边界, 将加速度和速度波转化为应力波形式, 施加到模型底部, 从而可以获取更精确的计算结果。模型动力边界见图 3。

2.3 阻尼及动荷载施加

动荷载作用下研究对象的动力响应很大程度上取决于阻尼特性, 包括三种阻尼形式: 滞后阻尼、局部阻尼和瑞利阻尼。滞后阻尼是一种与材料属性无关的阻尼形式, 且使用滞后阻尼计算的正确性与输入波的频

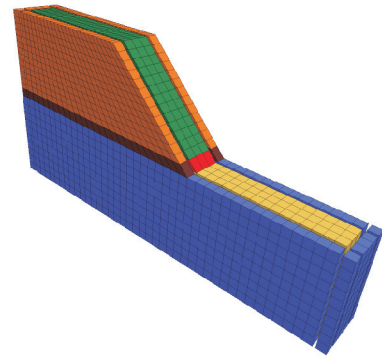


图 3 模型动力边界

Fig. 3 Model dynamic boundary

率相关,不利于实际地震荷载作用下的数值计算。局部阻尼主要应用于静力计算环境下,当应用于动力计算时局部阻尼仅能求解较简单问题,且局部阻尼对输入波高频部分的衰减较为困难,使得在地震波作用下计算结果会产生一定偏差。

瑞利阻尼是通过减弱系统自振振幅的形式达到衰减输入波的目的,且可近似反映岩土材料模型所具有的频率无关性,从而有利于地震荷载作用下的分析。瑞利阻尼具有两项主要参数:临界阻尼比 ξ_c 及中心频率 ω_c 。岩土材料临界阻尼比 ξ_c 一般取 2%~5%。当处于一定频率范围内时,瑞利阻尼基本与频率无关。对于动力问题,可以逐步调整最小频率 $f_{\min}$,使得输入能量的主要部分位于 $f_{\min}$ 到 $3f_{\min}$ 之间,此时的 $f_{\min}$ 为中心频率 ω_c 。

基于上述分析,采用瑞利阻尼作为阻尼形式,取临界阻尼比 ξ_c 为 5%,并利用自振的形式求得自振频率作为瑞利阻尼的中心频率,通过分析,取中心频率 ω_c 为 3.25 Hz。

模拟采用地震荷载作用与波浪荷载作用两种工况对深海能源土含气储层边坡进行分析。采用实际地震波记录,截取持时 20 s 的区段,峰值加速度调整为 0.12g;波浪荷载采用频率 0.1 Hz 的正弦波(模拟典型波浪周期),并采用与地震荷载相同的持时与峰值加速度。

3 数值计算结果分析

3.1 位移分析

图 4 为深海能源土含气储层边坡在不同动荷载作用下各监测点的侧移量变化曲线。由图 4 可知,在波浪荷载作用下,振动初期,模型会在正负向反复移动,并随动荷载作用逐渐向正向移动,侧移量逐步增大。在实际地震荷载的作用下,模型在振动初期会向反方向移动,随着时间增长,模型在某一时间节点后开始向正向移动,并随动荷载的持续作用,侧移量持续增长。

此外还可以看出,越靠近坡脚时,侧移量越大,在波浪荷载的作用下,从监测点 1 到监测点 4 的侧移增长量为 0.05 m,在实际地震荷载作用下侧移增长量为 0.04 m,即靠近坡脚时,波浪荷载作用下侧移量的增长率要大于实际地震荷载作用。各监测点下模型在波浪荷载作用时的侧移量均高于实际地震荷载作用,波浪荷载和实际地震荷载作用下最大侧移量 $d_{\max}$ 的差值分别为:监测点 1 为 0.069 m,监测点 2 为 0.079 m,监测点 3 为 0.085 m,监测点 4 为 0.079 m。可以看出,在监测点 3 靠近坡脚处两者相差最大。

图 5 为不同动荷载作用下深海能源土含气储层边坡的总位移云图。由图 5 可知,深海能源土含气储层边坡在不同动荷载作用下最大位移均出现于含气储层坡脚处,说明含气储层的存在使边坡抵抗动荷载的能力降低,从而使得总位移变大。深海能源土含气储层边坡在波浪荷载作用下的最大位移为 0.615 m,在实际地震荷载作用下最大位移为 0.524 m,两者差值为 0.091 m,表明在其他条件相同的情况下,深海能源土含气储层边坡在波浪荷载作用下会产生更大的位移。

3.2 剪应变分析

图 6 为深海能源土含气储层边坡的剪应变云图。从图 6 可以看出,波浪荷载作用下的最大剪应变为 6.57%,实际地震荷载作用下的最大剪应变为 5.49%,且最大应变均出现于坡脚处,表明在同等条件下,波浪荷载作用会造成更大的剪应变,且最大应变出现于含气储层中。在波浪荷载作用下边坡形成了贯穿滑动面,而实际地震荷载作用下边坡虽然出现了滑动面,但并未达到贯穿,表明在波浪荷载作用下深海能源土含气储层边坡最终发生了应变破坏,而实际地震荷载作用下并未发生应变破坏。

3.3 动孔压分析

图 7 为深海能源土含气储层边坡在不同动荷载作用下各监测点的动孔压变化曲线。从图 7 可以看出,含气储层各监测点在实际地震荷载作用下的峰值动孔压均大于波浪荷载作用,波浪荷载和实际地震荷载作用下最大动孔压 $u_{d,\max}$ 在监测点 1、2、3、4 的差值分别为 15.80、13.49、13.00 和 3.02 kPa,可以看出边坡在不同动荷载作用下监测点 1 处的差值最大,且越靠近坡脚这种差值越小。最大动孔压 $u_{d,\max}$ 发生在远离坡脚的监测点 1 处,其中波浪荷载作用下最大动孔压 $u_{d,\max}$ 为 93.24 kPa,实际地震荷载作用下 $u_{d,\max}$ 为 109.04 kPa,结合图 4~6 可以看出,坡脚处位移及剪应变最大,而最大动孔压则出现在远离坡脚

的位置,这说明对于深海能源土含气储层边坡发生破坏时,动孔压最大值可能会出现在远离应变及位移最大的部位。

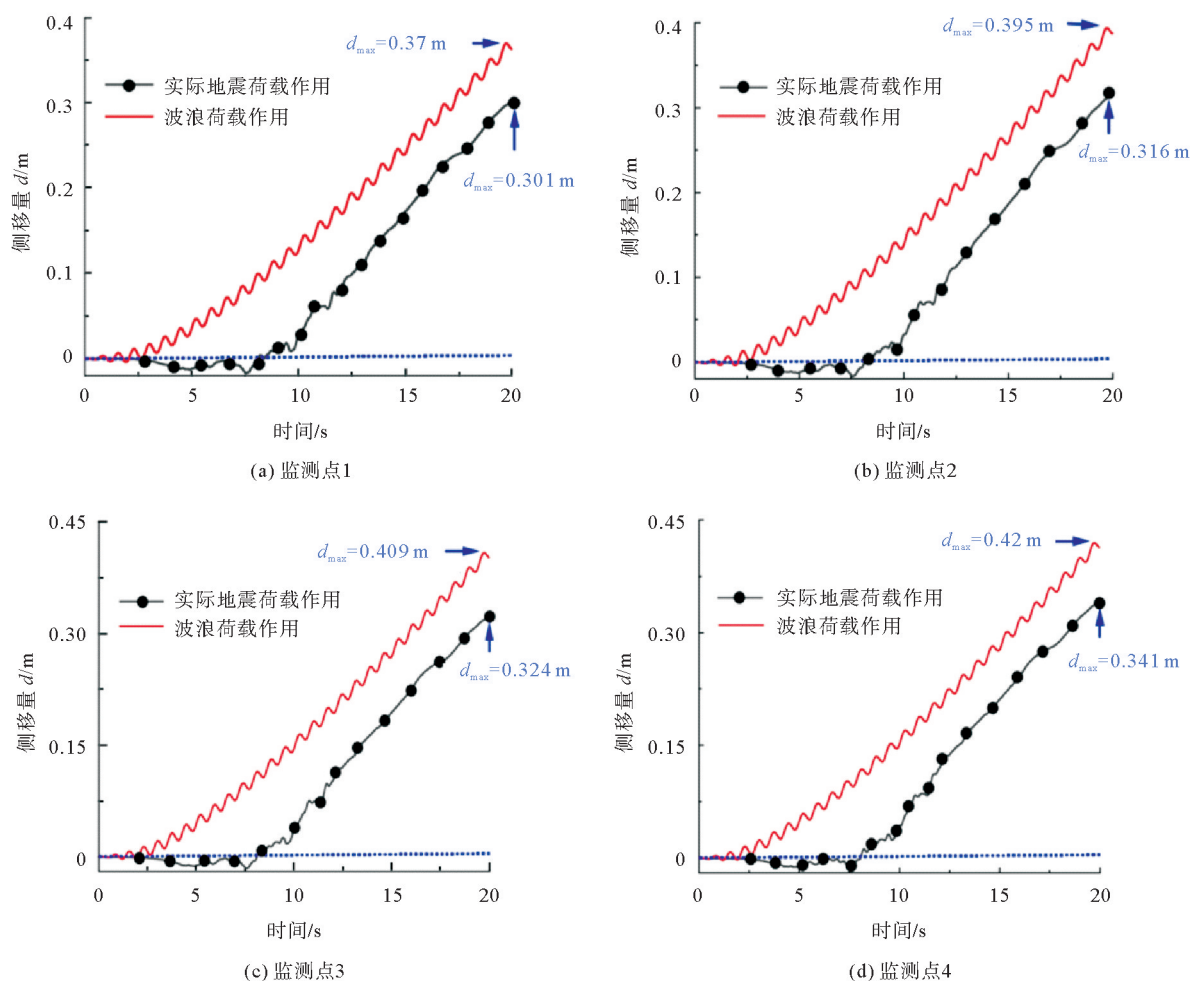


图 4 深海能源土含气储层侧移量变化

Fig. 4 Variation of lateral displacement in deep-sea energy soil gas reservoir

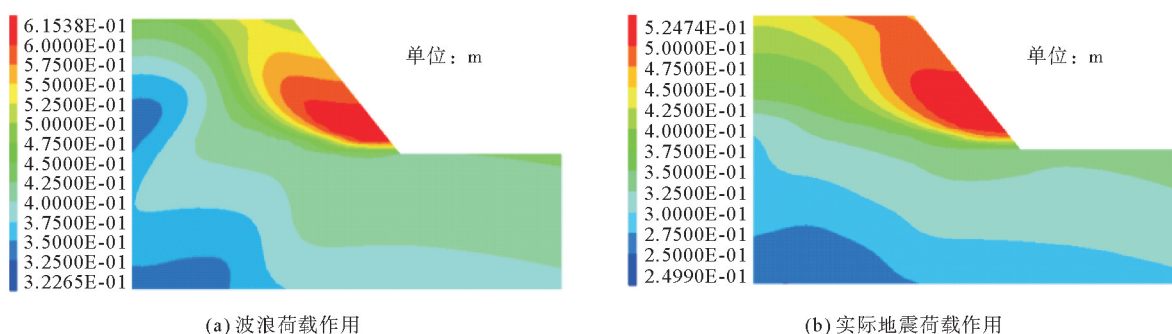


图 5 边坡总位移云图

Fig. 5 Nephogram of total slope displacement

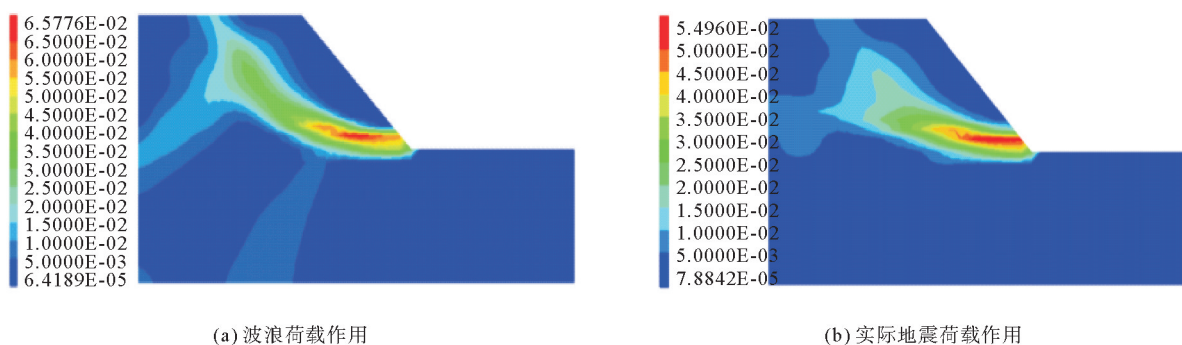


图6 边坡剪应变云图

Fig. 6 Nephogram of slope shear strain

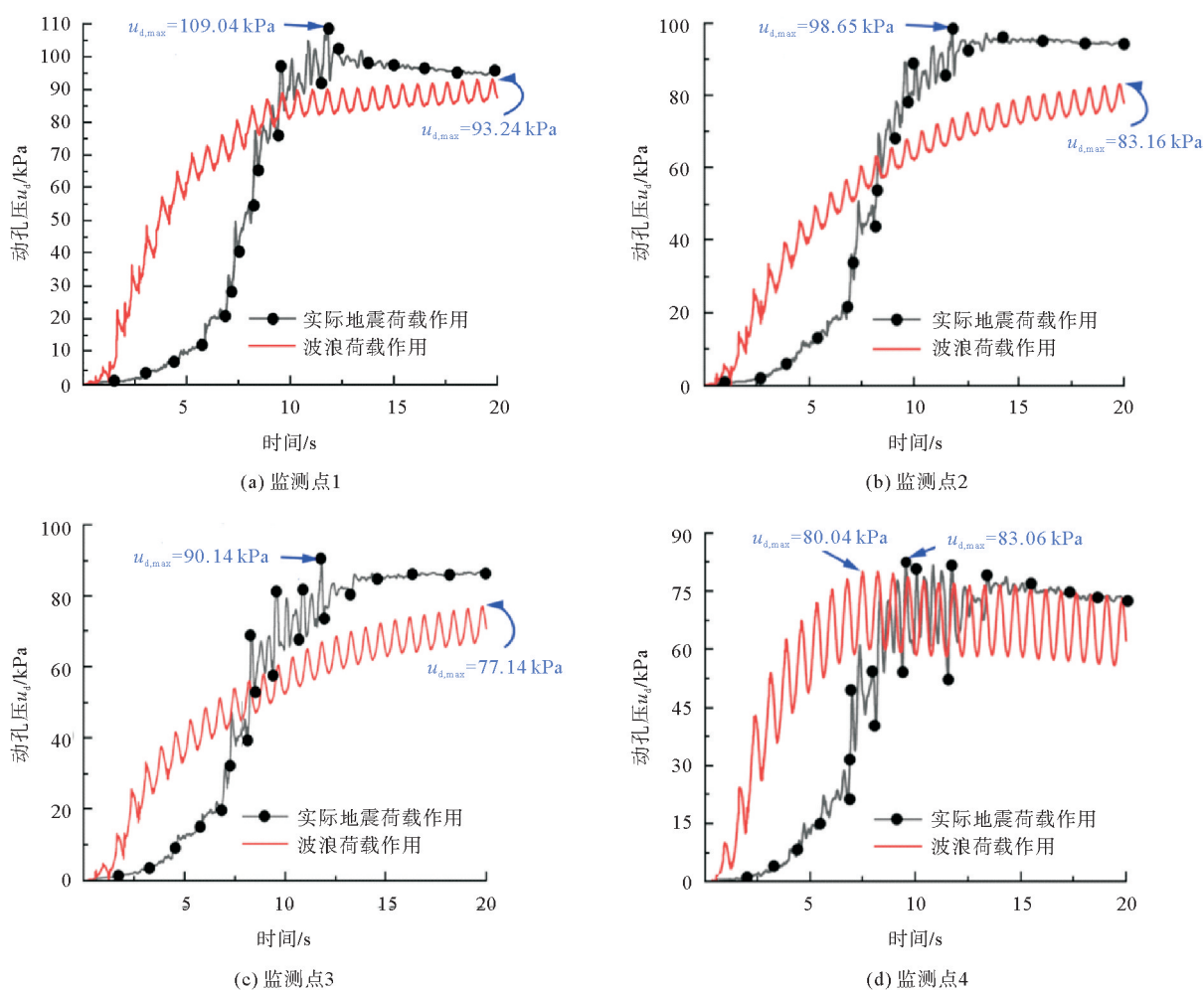


图7 深海能源土含气储层动孔压变化

Fig. 7 Dynamic pore pressure change of deep sea energy soil gas reservoir

综上所述,对于低黏土含量下的深海能源土含气储层边坡,在波浪荷载的作用下,最大位移及剪应变均大于实际地震荷载作用,当最终破坏时呈现出“应变破坏”模式;在实际地震荷载的作用下,各监测点的峰值动孔压均大于波浪荷载作用,边坡趋向于“液化破坏”。这与先前的试验结果^[14]一致,从而验证了此次模拟的合理性。

4 结论

以实际海底边坡为研究背景,依托海底含水合物边坡模型,探究了低黏土含量下深海能源土含气储层边坡在波浪荷载和地震荷载作用下的位移发展规律、剪应变演变过程和动孔压增长特性等动力响应特性,为中国南海海域能源土的保护和安全开采提供理论支持。主要结论如下:

1) 波浪荷载作用下含气储层各点的侧移量均大于实际地震荷载作用。含气储层的最大侧移量出现于靠近坡脚处,并且当靠近坡脚时,波浪荷载作用下含气储层的侧移增长率要大于实际地震荷载作用。

2) 最大剪应变出现于坡脚处,且边坡在波浪荷载作用下滑动面发生了贯穿,而实际地震荷载作用下,滑动面并未贯穿。表明在波浪荷载作用下,深海能源土含气储层边坡发生了应变破坏。

3) 在实际地震荷载作用下,含气储层各点处的动孔压均大于波浪荷载作用,且最大动孔压出现在远离最大位移及剪应变的位置,表明含气储层边坡在实际地震荷载的作用下,更倾向于液化破坏。所以,在分析低黏土含量下深海能源土含气储层边坡的稳定性及安全性时,应合理选择破坏准则。

4) 由于研究对象为含气土,采用摩尔库伦本构模型研究含气储层的动孔压增长特性会有一定局限性。为了进一步验证使用摩尔库伦本构模型模拟含气土的可靠性,将在后续研究中考考虑采用更为复杂的本构模型(如 Drucker-Prager 模型和修正剑桥模型或考虑流固耦合的模型)进行对比分析。

参考文献:

- [1] 何家雄,宁子杰,赵斌,等.南海天然气水合物资源勘查战略接替区初步分析与预测[J].地球科学,2022,47(5):1549-1568.
HE Jiaxiong, NING Zijie, ZHAO Bin, et al. Preliminary analysis and prediction of strategic replacement area for gas hydrate exploration in South China Sea[J]. Earth Science, 2022, 47(5): 1549-1568.
- [2] 夏少红,林江南,曹敬贺.南海北部沿海地区地震活动与发震构造[J].大地构造与成矿学,2022,46(3):455-470.
XIA Shaohong, LIN Jiangnan, CAO Jinghe. Seismicity and seismogenic structure in the northern coastal area of the South China Sea[J]. Geotectonica et Metallogenia, 2022, 46(3): 455-470.
- [3] 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 Feng, WU Shiguo, SUN Yunbao. 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.
- [4] 洪隽天,徐明.不排水条件下可燃冰分解对海底边坡稳定性的影响[J].天津大学学报(自然科学与工程技术版),2019,52(增1):49-55.
HONG Juntian, XU Ming. Influence of gas hydrate dissociation on submarine slope stability under the undrained condition [J]. Journal of Tianjin University (Science and Technology), 2019, 52(S1): 49-55.
- [5] 林星宇,李凯,孔亮.降压开采下深海能源土斜坡分解区的判定及其稳定性分析[J].科学技术与工程,2020,20(27):11233-11239.
LIN Xingyu, LI Kai, KONG Liang. Determination of decomposition zone and stability analysis of deep-sea energy soil slope under depressurization mining[J]. Science Technology and Engineering, 2020, 20(27): 11233-11239.
- [6] 宋本健,程远方,李庆超,等.水合物分解对海底边坡稳定影响的数值模拟分析[J].海洋地质与第四纪地质,2019,39(3):182-192.
SONG Benjian, CHENG Yuanfang, LI Qingchao, et al. Simulation of submarine slope stability related to hydrate dissociation[J]. Marine Geology and Quaternary Geology, 2019, 39(3): 182-192.
- [7] SUN T, WEN Z L, YANG J, et al. Analysis of factors influencing the stability of submarine hydrate-bearing slopes during depressurization production[J/OL]. Processes, 2024, 12(4). DOI: 10.3390/pr12040679.
- [8] MACKILLOP K, FENTON G, MOSHER D, et al. Assessing submarine slope stability through deterministic and probabilistic approaches: A case study on the west-central Scotia slope[J/OL]. Geosciences, 2018, 9(1). DOI: 10.3390/geosciences9010018.
- [9] NIAN T K, LIU B, YIN P. Seafloor slope stability under adverse conditions using energy approach[J]. Applied Mechanics and Materials, 2013, 405/406/407/408: 1445-1448.

- [10] CHU H X, FENG Y C, SHI H J, et al. Application of the Newmark analysis method in stability evaluation of submarine slope[J/OL]. Shock and Vibration, 2021. DOI:10.1155/2021/8747470.
- [11] 年廷凯, 王国栋, 郑德凤, 等. 南海北部陆坡区典型峡谷陡坡群地震稳定性[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2023, 53(6): 1785-1798.
- NIAN Tingkai, WANG Guodong, ZHENG Defeng, et al. Seismic stability of steep slope groups in typical canyons of northern South China Sea[J]. Journal of Jilin University(Earth Science Edition), 2023, 53(6): 1785-1798.
- [12] 闫一彬. 南海北部陆坡区海底边坡稳定性数值分析[D]. 大连: 大连理工大学, 2019.
- YAN Yibin. Numerical stability analysis of submarine slope along the continental slope in the Northern South China Sea [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2019.
- [13] 欧阳敏, 吴涛, 李列, 等. 琼东南陆坡区复杂地形深水井场海底稳定性评估[J]. 中国海上油气, 2020, 32(4): 179-189.
- OUYANG Min, WU Tao, LI Lie, et al. Seabed stability evaluation of deep water well site with complex topography in Qiongdongnan continental slope area[J]. China Offshore Oil and Gas, 2020, 32(4): 179-189.
- [14] 王莹, 李朋飞, 孔祥霄. 循环荷载下深海能源含气土动力特性试验研究[J]. 山东科技大学学报(自然科学版), 2024, 43(2): 30-39.
- WANG Ying, LI Pengfei, KONG Xiangxiao. Experimental study on dynamic characteristics of deep-sea energy gas-bearing soil under cyclic loading[J]. Journal of Shandong University of Science and Technology(Natural Science), 2024, 43(2): 30-39.
- [15] JIANG M J, SUN C, CROSTA B G, et al. A study of submarine steep slope failures triggered by thermal dissociation of methane hydrates using a coupled CFD-DEM approach[J/OL]. Engineering Geology, 2015, 190. DOI:10.1016/j.enggeo.2015.02.007.
- [16] 谭琳, 刘芳. 水平井降压法和热激法水合物开采对海底边坡稳定性的影响[J]. 力学学报, 2020, 52(2): 567-577.
- TAN Lin, LIU Fang. Submarineslope stability during depressurization and thermal stimulation hydrate production with horizontal wells[J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2020, 52(2): 567-577.
- [17] 王莹, 王妍妍, 高盟, 等. 深海能源土含气储层边坡稳定性研究[J]. 山东科技大学学报(自然科学版), 2024, 43(1): 32-40.
- WANG Ying, WANG Yanyan, GAO Meng, et al. Study on slope stability of deep-sea energy soil gas reservoir[J]. Journal of Shandong University of Science and Technology(Natural Science), 2024, 43(1): 32-40.
- [18] MASUDA Y, NAGANAWA S, ANDO S, et al. Numerical calculation of gas production performance from reservoirs containing natural gas hydrates[C]//SPE Asia Pacific Oil and Gas Conference and Exhibition. Kuala Lumpur, 1997: 416-437.
- [19] FREDLUND D G, RAHARDJO H. Soil mechanics for unsaturated soils[M]. New York: John Wiley & Sons, Inc. 1993.
- [20] BYRNE P M. A cyclic shear-volume coupling and pore pressure model for sand[C]//Second International Conference on Recent Advances in Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics. Amsterdam: Elsevier B.V., 1991: 47-55.

(责任编辑: 吕海亮)