

深海能源土含气储层边坡稳定性研究

王滢^{1,2}, 王妍妍^{1,2}, 高盟^{1,2}, 张粮^{1,2}

(1. 山东科技大学 山东省土木工程防灾减灾重点实验室, 山东 青岛 266590;

2. 山东科技大学 土木工程与建筑学院, 山东 青岛 266590)

摘要:深海能源土开采不当往往会造成含水合物储层的强度劣化,诱发海床失稳问题。为探究深海能源土开采对含气储层边坡稳定性的影响,以深海能源土采挖回填装置的开采工况为实际工程背景,针对 3 种工况下能源土采挖回填诱发的海底滑坡现象,基于有限元强度折减法建立数值模型,分析不同黏土含量、含气量及回填加固等因素引起的水合物含气储层稳定性问题,得到相应安全系数。研究表明:黏土含量越高,海底沉积物边坡的安全系数越低,边坡稳定性越差;含气量对深海能源土含气储层的边坡稳定性呈非线性影响,安全系数随含气量的增加呈先上升后下降的趋势;采用胶结性材料进行回填加固处理可提高海底边坡安全系数,边坡稳定性增强。

关键词:深海能源土;含气储层;强度折减法;边坡稳定性;安全系数

中图分类号:TU411;P744.4

文献标志码:A

Study on slope stability of deep-sea energy soil gas reservoir

WANG Ying^{1,2}, WANG Yanyan^{1,2}, GAO Meng^{1,2}, ZHANG Liang^{1,2}

(1. Shandong Provincial Key Laboratory of Civil Engineering Disaster Prevention and Mitigation, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, China; 2. College of Civil Engineering and Architecture, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, China)

Abstract: Improper exploitation of deep-sea energy soil often leads to the deterioration of the strength of hydrate-bearing reservoirs and the instability of the seabed. In order to explore the impact of deep-sea energy soil mining on the slope stability of gas-bearing reservoir, this study took the mining conditions of deep-sea energy soil mining and backfilling devices as the actual engineering background to address the submarine landslide phenomena induced by energy soil mining and backfilling under three working conditions. Based on the finite element strength reduction method, a numerical model was first established. Then, the stability of hydrate gas-bearing reservoir caused by such factors as different clay contents, gas contents and backfill reinforcement was analyzed. Finally, the corresponding safety factor was obtained. The results show that the higher the clay content is, the lower the safety factor of the seabed sediment slope and the worse the slope stability become. The gas content has a nonlinear effect on the slope stability of the deep-sea energy soil gas reservoir, and the safety factor increases first and then decreases with the increase of the gas content. After backfilling and strengthening with cementitious materials, the safety factor of the submarine slope is improved and the slope stability is enhanced.

Key words: deep-sea energy soil; gas-bearing reservoir; strength reduction method; slope stability; safety factor

深海能源土作为 21 世纪最具开发前景的新型战略性替代能源,其开采利用价值及开发前景极为广阔。然而能源土开采不当所引发的安全和生态环境问题仍是当前亟需解决的难题。现有对能源土含气储层的研

收稿日期:2023-03-16

基金项目:国家自然科学基金青年基金项目(51808324)

作者简介:王滢(1979—),女,山东临沂人,副教授,博士,从事海洋动力学及土动力学领域的研究和教学工作。

E-mail: hopeywwgy@hotmail.com

究大多为对固态水合物的分析,未考虑水合物分解形成的含气储层的影响。同时,能源土大多储存在海底沉积物边坡中,其开采过程会对海底边坡的稳定性造成重要影响。

随着海底边坡稳定性研究的持续深入,涌现出大量的研究成果。Mackillop 等^[1]通过确定性和概率性方法评估海底斜坡稳定性,得出循环荷载(地震)或预处理因素(孔隙压力的升高)是斯科蒂安斜坡失稳的关键。Cao 等^[2]基于有限元 Abaqus 对海底滑坡进行数值模拟,得出陆地边坡的安全系数是海底边坡的 5~10 倍,海底边坡滑带范围更宽、更深,滑带边界不明显。Nian 等^[3]采用极限分析的运动学方法考虑波浪诱导压力下的海底斜坡稳定性,得出波浪对边坡稳定性的影响规律。Chu 等^[4]计算了曹妃甸典型海底斜坡在发生类似唐山地震时的动力响应,得出位移值可定量反映地震对场地斜坡的影响。成玮等^[5]以淤泥质海底航道边坡为研究对象,开展了基于浅剖的边坡失稳滑塌模拟实验、边坡失稳演变过程分析等研究,得出淤泥质海底航道边坡稳定性变化规律。欧阳敏等^[6]基于 FLAC 3D 数值模拟方法并应用强度折减法进行海底边坡稳定性计算,得出土体强度是海底边坡稳定性评估的重要影响因素。

开采利用能源土将诱发长期的巨大的地质灾害及环境风险,海底滑坡为典型表现形式,国内外学者进行了大量的研究。Zhao 等^[7]提出了“两步折减法”用于评估初始地应力平衡和水合物分解对基底强度折减的影响,认为水合物分解可以触发海底滑坡,特别是沿着滑动面。其他研究也显示,水合物分解是诱发海底滑坡的主要影响因素^[8-9]。唐常锐等^[10]通过 Gassmann 方程计算出储层的孔隙度和饱和度,并反演出其他岩土物理参数,利用数值模拟方法得出水合物分解程度是影响海底边坡稳定性的主要因素。徐斌等^[11]采用时间变化参数的摩尔库伦本构模型及应力释放法,通过自写程序对海底边坡稳定性进行数值分析,得出水合物分解导致的强度衰化和模量软化是导致海底斜坡和位移发生变形和沉降的原因。以上研究大多针对导致能源土储层边坡失稳的外部因素,且没有考虑土体组分含量的影响。

本研究以深海能源土采挖回填装置^[12]为依托,基于前期实验室固结排水三轴压缩剪切试验^[13]得到的深海能源土相关力学参数,采用有限元强度折减法建立深海能源土含气储层边坡模型,探究深海能源土含气储层在勘察、开采及回填 3 种工况下,不同黏土含量、含气量及回填加固对深海能源土边坡稳定性的影响。

1 模型建立

我国南海北陆坡白云凹陷区和珠江口盆地的峡谷区存在陡坡,坡度达到 40°左右^[14]。陡坡稳定性差,对外界扰动更加敏感,更容易发生滑坡失稳。因此,以深海能源土采挖回填装置^[12]的开采工况为实际工程背景,该装置主要采用将深海能源土固态储层变为含气储层的方法进行开采,其开采全过程将遇到极为复杂的岩土工程问题。因此,依据开采形成的海底地质构造,将能源土开采工况大致分为以下 3 种:工况 1(装置勘探阶段)。勘探过程中的海底边坡不一定含有能源土,且大多为海底沉积物土体,此时的构造类型为不包含能源土的海底沉积物边坡;工况 2(装置开采阶段)。由于开采装置的影响,能源土固态储层变为含气储层,即深海能源含气土层的海底沉积物边坡;工况 3(装置开采后的回填阶段)。开采装置通过回填机构向采空后的土层灌入回填环保材料,此时能源土土层变为回填土层,构造类型设定为包含回填土层的海底沉积物边坡。

1.1 模型尺寸

参照刘芳等^[15]所建海底水合物边坡模型,模拟我国南海北陆坡水合物富集区的典型 45°陡坡,开采工况几何模型如图 1 所示。参考开采工况下边坡的构造情况,边坡模型尺寸设置为:横跨长度为 800 m,上、下坡面跨度为 300 m,坡顶水深 2 000 m,坡底水深 2 200 m,下坡面高 200 m,上坡面高 400 m。深海能源土含气夹层埋深设为 30 m,厚度为 30 m,夹层同坡面平行。

除探究深海能源土含气储层边坡稳定性外,还对勘探及回填阶段的海底边坡进行了稳定性分析。本研究所建边坡模型为简化模型,仅考虑海水压强、土体自重和开采引起的外部荷载 3 个因素,不考虑波浪、暗流等动荷载的影响。依据水深压强计算公式 $P = \rho gh$ 计算海水压强大小,使其均匀分布在海床表面。其中: ρ 为海水密度,取 $1.02 \times 10^3 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$; g 为重力加速度,取 $10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$; h 为海水深度。施加在能源土夹层正上方海床表层处的外部荷载采用点荷载(F),取值为 100 kN。

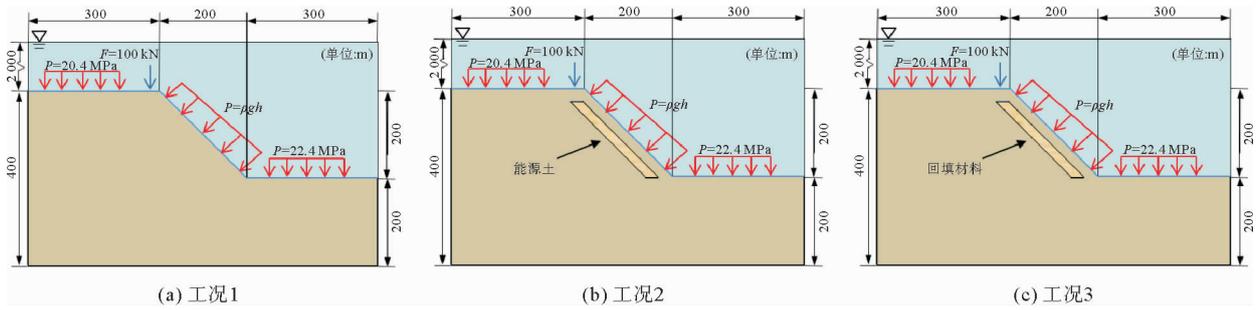


图 1 深海能源土含气储层边坡几何模型示意图

Fig. 1 Schematic diagram of geometric model of deep-sea energy soil gas-bearing reservoir slope

1.2 计算参数

参考 Masuda 等^[16]对南海海槽原位开采岩芯试样进行的水合物分解试验研究,并结合前期实验室三轴压缩固结排水剪切试验得出的相关理论^[13],根据《土工试验方法标准》^[17],取部分配比的海洋土试样进行物理参数指标测定,测定结果如表 1 所示。在回填工况下采用胶结性环保材料(聚氨酯泡沫胶黏剂)加固的土体参数由实验室测得,值得注意的是,开采阶段和回填阶段仅展示夹层参数,周围土体参数采用勘探阶段时黏土含量为 3%的海洋土沉积物参数,模型参数见表 2。

表 1 海洋土土样基本物理力学指标

Table 1 Basic physical and mechanical indexes of marine soil samples

海洋土类型	黏土含量/%	相对密度 d_s	初始孔隙比 e_0	塑限指数 I_p	泊松比 ν
1	3	2.65	0.48	1.59	0.28
2	10	2.66	0.43	4.64	0.29
3	20	2.66	0.35	6.51	0.31
4	30	2.68	0.28	8.96	0.32
5	35	2.68	0.24	9.85	0.32

表 2 模型参数表

Table 2 Model parameters

工况	黏土含量/%	含气量/%	密度 $\rho/(kg \cdot m^{-3})$	弹性模量 E/MPa	泊松比 ν	黏聚力 c/kPa	内摩擦角 $\varphi/(^\circ)$	破坏比 R_f
工况 1	3	0	2 150	2 180	0.28	16.12	44	0.75
	10	0	2 230	2 038	0.29	16.35	43	0.74
	20	0	2 337	1 883	0.31	15.71	39	0.72
	30	0	2 440	1 754	0.32	10.42	37	0.70
	35	0	2 500	1 709	0.32	10.51	35	0.70
工况 2	0	3	1 596	1 577	0.28	18.78	41	0.73
	0	6	1 553	1 552	0.29	32.18	48	0.80
	0	9	1 504	1 518	0.29	32.13	35	0.77
	0	12	1 483	1 488	0.30	13.17	36	0.72
	0	15	1 447	1 453	0.30	15.63	35	0.71
工况 3	3	—	2 270	2 458	0.25	40.67	35	0.83

1.3 边界条件

采用 ABAQUS 有限元软件,依据几何模型尺寸建立二维边坡有限元模型,对不同工况下海底边坡的稳定性进行数值模拟研究。为解决在实际海底环境中,海床跨度大使得有限元计算效率大大降低等问题,将海床视为一个半无限空间体,即将海床底部及其两侧视为无限土体,模型左右侧和底部边界条件均为无限边界,顶部和斜坡边界为海水压力和开采压力。安全系数可视为边坡失稳临界值,超过安全系数可视为边坡失稳。采用无限元人工边界模拟地基半无限空间,与有限元部分统一求解,不涉及解析表达式,不仅能缩小计算规模,还能保证计算精度。

基于有限元理论对几何模型进行网格划分,二维边坡计算模型如图 2 所示。红框包围部分为所设无限元人工边界,其余部分为边坡有限元模型,为得到海底边坡的安全系数,对坡顶夹角处的单元点进行监测,取其总位移同安全系数关系曲线的拐点作为边坡失稳点,所对应的折减系数^[18]即为边坡安全系数,超过这一系数则视为土体失稳。本研究主要探讨边坡的临界失稳状态,因此只对边坡失稳时瞬态的有效塑性应变及位移云图进行分析,对滑坡之后的土体演变过程暂不深究。

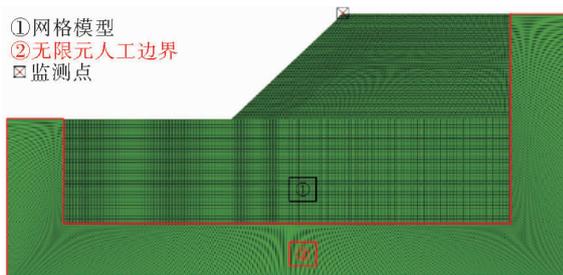


图 2 二维边坡计算模型

Fig. 2 2D slope calculation model



图 3 初始应力场

Fig. 3 Initial stress field

1.4 模型验证

为保证深海能源土二维边坡模型的准确性及有效性,需特别注意初始应力的平衡问题,而深海能源土在实际开采阶段,所受的应力主要来自土体自重、海水压强和开采引起的外部荷载。因此,针对深海能源土含气储层边坡模型进行相应的初始应力平衡,模拟海底边坡的真实开采环境。

采用自动平衡法实现深海能源土边坡的初始应力平衡,所施加的初始应力场如图 3 所示。一般认为,初始应力平衡后的土体位移数量级小于 1×10^{-4} m,即满足初始应力平衡要求。初始应力平衡后模型的最大位移为 5.622×10^{-10} m,远远小于规定的数量级,间接证明了模型的准确性及有效性。

2 不同工况下深海能源土含气储层边坡稳定性变化规律

2.1 不含能源土的海底沉积物边坡稳定性变化规律

图 4 为工况 1 边坡有效塑性应变云图。由图 4 可知,不同黏土含量下的海底沉积物边坡均出现应力失稳滑动面,且均从坡脚处开始,并在某一时间产生二次滑动。同时,各黏土含量下的最大有效塑性应变分别为 9.376%、12.07%、13.26%、13.98%和 17.65%,表明边坡的最大有效塑性应变随黏土含量的增大呈上升趋势,黏土含量对边坡失稳破坏的影响显著。

图 5 为工况 1 边坡总位移云图。由图 5 可知,海底沉积物边坡自坡脚处开始出现明显的位移滑动,并逐渐蔓延到边坡下部土体。同时,黏土含量越高边坡总位移云图的土体位移滑动范围越广,越容易影响到边坡下部土体的稳定性,严重时将引发地震等重大地质灾害。此外,各边坡的最大位移值受黏土含量的影响显著,各黏土含量的边坡最大位移值分别为 14.15、16.64、17.99、16.54 和 19.54 cm,黏土含量越高,所对应的最大位移值就越大。因此,在实际开采过程中应对海底沉积物进行勘探,并对其黏土含量进行分析,以制定不同的开采方案来保障深海能源土的安全开采。

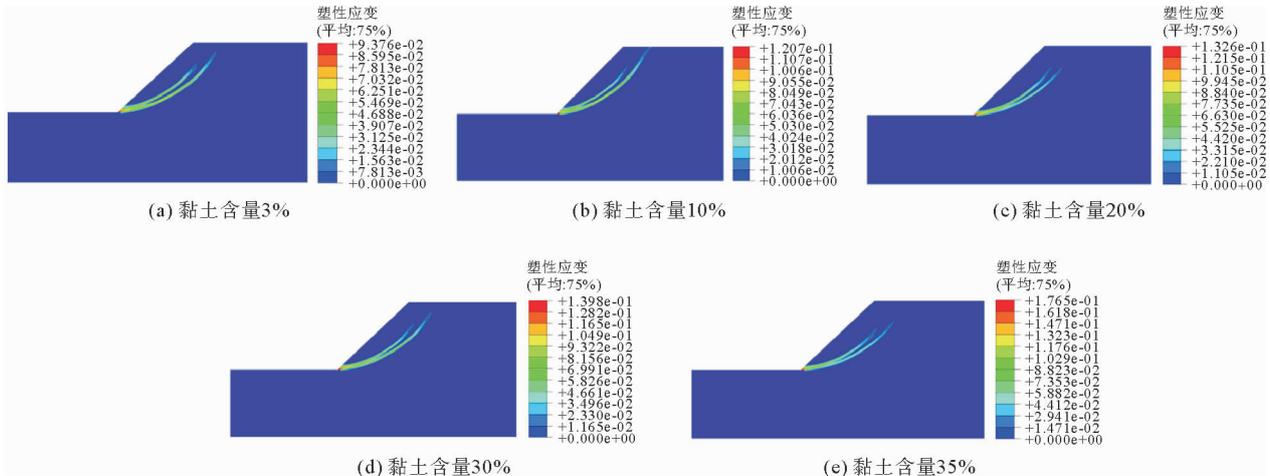


图 4 工况 1 边坡有效塑性应变云图

Fig. 4 Effective plastic strain nephogram of slope under condition 1

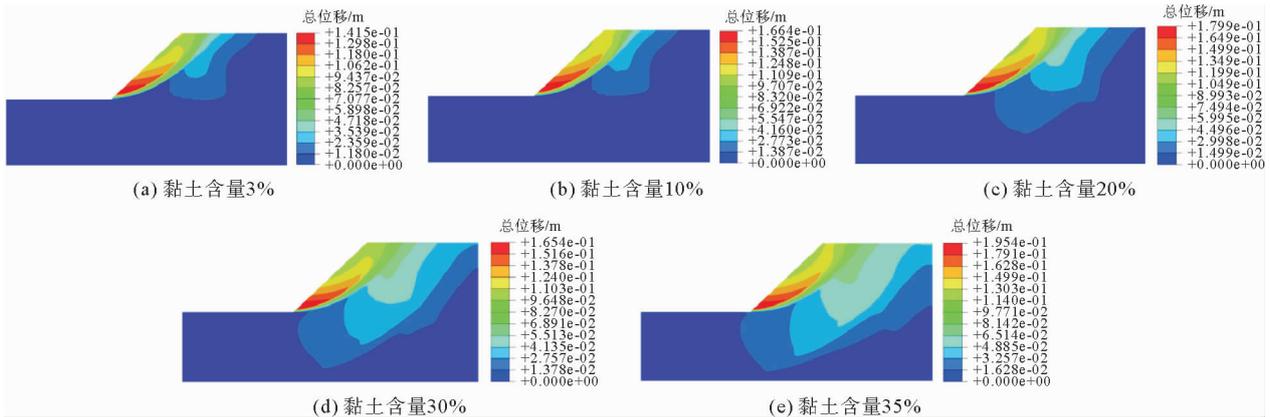


图 5 工况 1 边坡总位移云图

Fig. 5 Total slope displacement nephogram under condition 1

图 6 为工况 1 边坡安全系数同坡顶位移关系曲线。由图 6(a)~图 6(e)可知,在将两段曲线进行拟合时,其拟合线的交点即为曲线拐点,则各黏土含量的边坡安全系数 F_r 分别为 1.22、1.21、1.10、1.01 和 0.96,安全系数随黏土含量的增加呈逐渐下降的趋势,表明黏土含量越高土体边坡的承载能力越低,即安全系数越低,边坡的稳定性越差^[18],证明随着黏土含量的增加,深海能源土含气储层边坡稳定性越差。图 6(f) 为将边坡安全系数随黏土含量的变化进行线性拟合,得到的黏土含量-安全系数关系曲线,可为深海能源土的勘探及开采设计提供参考。

2.2 含气量对海底沉积物边坡稳定性的影响

采用负压法^[19-20]开采能源土时,固态能源土将变为含气土,储层原有的应力平衡状态发生改变。因此,需对赋存能源含气土的海底边坡进行稳定性分析,以探知开采装置在能源土开采过程中土体边坡的力学变化规律。

图 7 为工况 2 边坡有效塑性应变云图。由图可知,能源土含气储层的含气量对海底边坡稳定性的影响较为明显,由低到高各含气量下海底边坡所对应的最大有效塑性应变分别为 25.88%、17.45%、22.6%、27.81%和 32.37%,应变峰值随含气量的增加呈先下降后增大的趋势,这主要是因为 6%、9%含气量的能源含气土黏聚力较大,导致土体颗粒之间的胶结作用增强,进而降低了海底边坡的有效塑性应变。此外,能源土含气储层边坡失稳仅在赋有能源含气土的区域发生滑动,且滑动面主要以赋存区域与周围土体的接触面为主,这说明能源土赋存区域的强度变化对边坡稳定性的影响更为剧烈。因此,在进行开采设计时应特别注意对能源土赋存区域的稳定性处理。

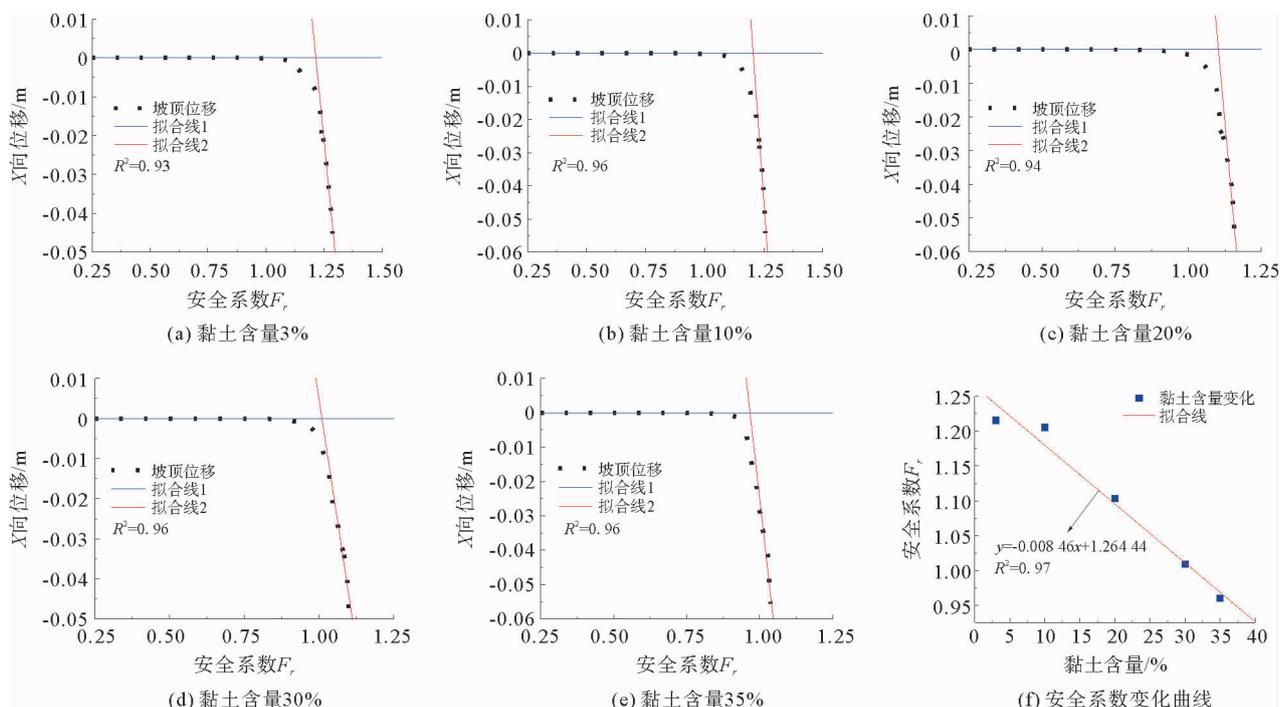


图 6 工况 1 边坡安全系数与坡顶位移关系曲线

Fig. 6 Relation curve between slope safety factor and slope top displacement under condition 1

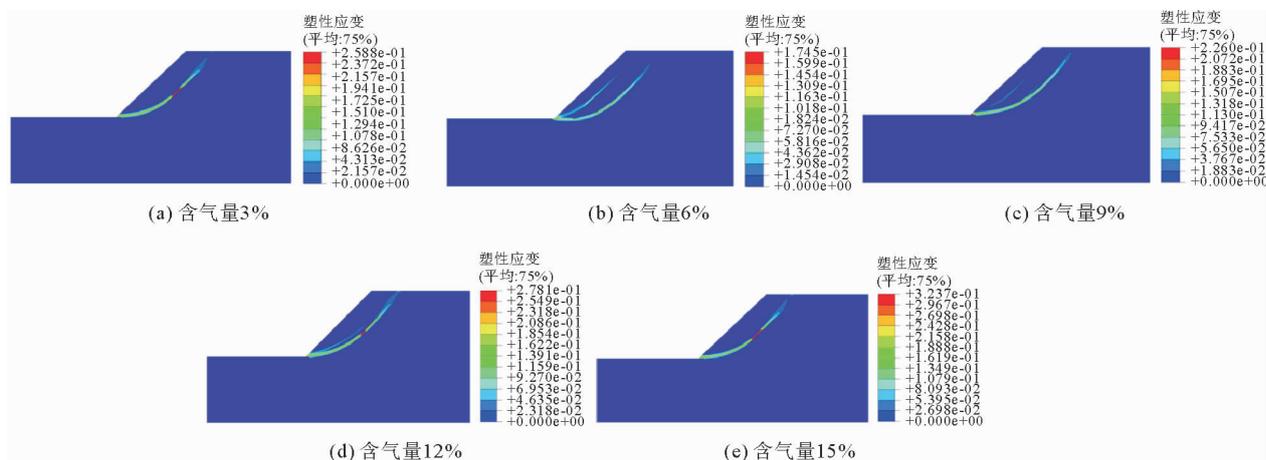


图 7 工况 2 边坡有效塑性应变云图

Fig. 7 Effective plastic strain nephogram of slope under condition 2

图 8 表示工况 2 边坡总位移云图。如图 8 所示,由低到高不同含气量下深海能源土含气储层边坡的总位移峰值分别为 19.40、15.96、18.12、22.35 和 24.74 cm,同有效塑性应变所得结论相同,均呈先减小后增大的变化规律。此外观察含气量 6%、9% 的边坡位移云图可以发现,同周围土体相比,其黏聚力的增大导致能源土位移更小,且土体位移主要以能源土上覆土体位移为主。

图 9 表示工况 2 边坡安全系数与坡顶位移关系曲线。由图 9 可知,含气量由低到高各边坡的安全系数分别为 1.20、1.31、1.29、1.01 和 0.99,安全系数随含气量的增加呈先上升后下降的变化趋势。这表明含气量 6%、9% 下能源土含气储层边坡的承载能力变强,但随着含气量的增加该现象逐渐消失,这一规律同有效塑性应变、总位移云图所得结论一致。由上述规律可知,含气量对深海能源土含气储层边坡安全系数的影响不再呈单一变化规律,对其关系曲线进行非线性拟合处理,可得拟合公式为:

$$F_r = 0.95043 + \frac{3.49613}{7.13513\sqrt{\pi/2}} e^{\frac{-2(x-6.27639)^2}{7.13513^2}} \quad (1)$$

其中: x 为含气量; e 为常数, 取 2.718; π 取 3.141。

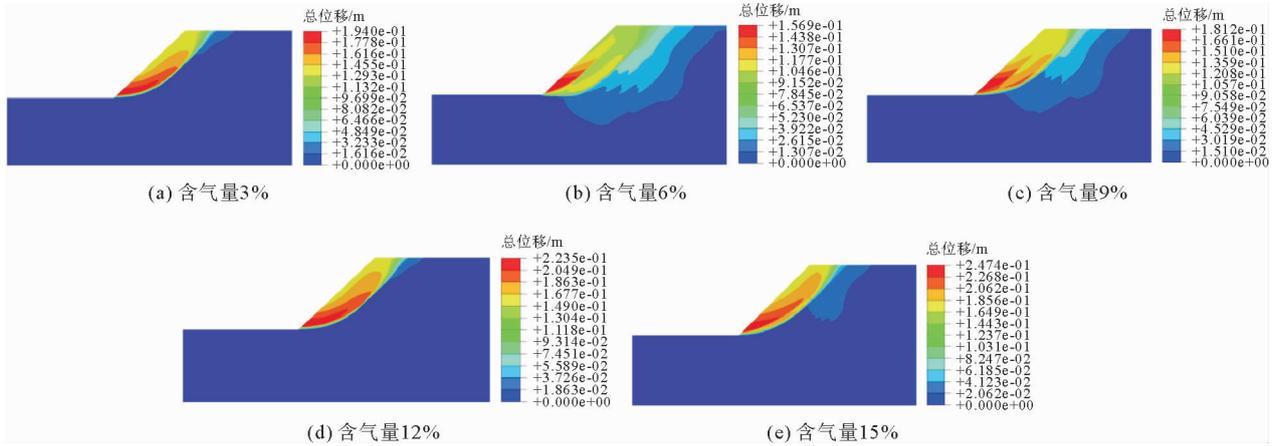


图 8 工况 2 边坡总位移云图

Fig. 8 Total slope displacement nephogram under condition 2

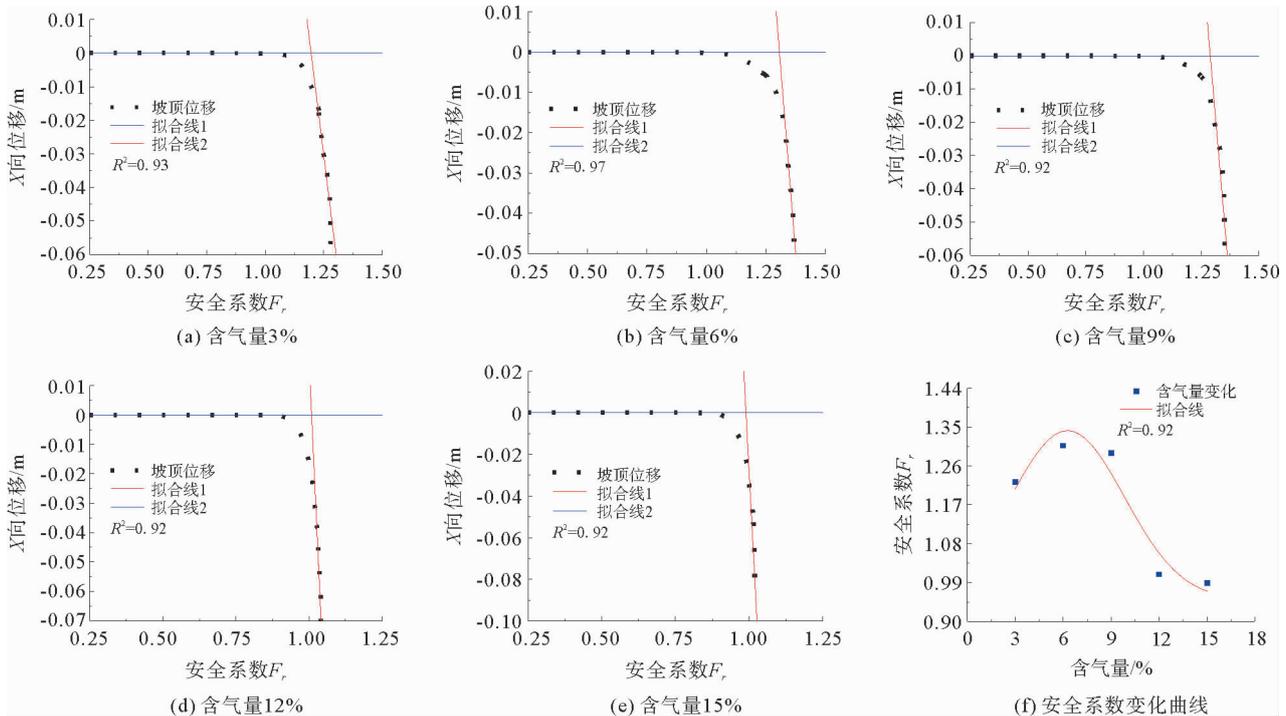


图 9 工况 2 边坡安全系数与坡顶位移关系曲线

Fig. 9 Relation curve between slope safety factor and slope top displacement under condition 2

2.3 回填加固处理对海底边坡稳定性的影响

深海能源土开挖回填装置中能源土开采后, 甲烷气体被收集, 原气体赋存区域的土体孔隙慢慢充入水或成为真空状态, 增加发生海底滑坡等地质灾害的几率。因此, 需对开采后的能源赋存区域充入回填材料, 以确保海底边坡维持原有的稳定性。

本研究采用胶结性环保材料对深海能源土储层进行回填处理, 图 10(a) 为工况 3 海底边坡有效塑性应变云图。由图 10(a) 可知, 土体沿能源土赋存区域边界产生滑动面, 坡脚处产生最大塑性应变, 约为 9.5%,

其有效塑性应变峰值均低于能源土含气储层边坡。此外,由图 10(b)工况 3 边坡总位移云图可知,边坡失稳后的位移主要发生在回填层上覆土体区域,对于回填层及下部土体的影响较小,且总位移峰值为 14.54 cm,远远小于能源土含气储层边坡位移峰值。

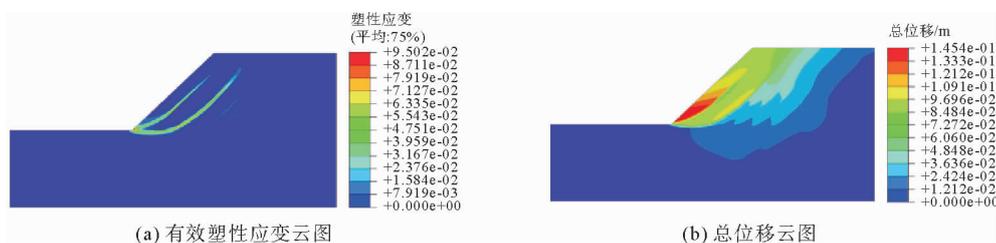


图 10 工况 3 边坡有效塑性应变云图和总位移云图

Fig. 10 Effective plastic strain nephogram and total displacement nephogram of slope under condition 3

图 11 为工况 3 边坡安全系数与坡顶位移关系曲线。由图 11 可知,回填处理后的海底边坡安全系数为 1.33,高于其他两种工况下海底边坡的安全系数,满足海底边坡的稳定性要求。综上所述,充入胶结性回填材料对能源土含气储层的边坡稳定性具有积极作用,直接证明了采用回填处理的方法加强海底边坡的稳定性是可行的。

3 结论

以深海能源土采挖回填装置所设的勘察、开采及回填 3 种工况为背景,基于强度折减法建立海底边坡模型,探究深海能源土边坡在不同黏土含量、含气量以及回填加固条件下的稳定性,得出结论如下。

- 1) 黏土含量变化对海底沉积物边坡稳定性的影响效果显著,边坡有效塑性应变峰值和总位移峰值随黏土含量的增加而逐渐增大,黏土含量越高的边坡安全系数越低,越容易发生海底滑坡等地质灾害。
- 2) 深海能源土含气储层边坡稳定性随含气量增加呈非线性变化规律,边坡有效塑性应变峰值和总位移峰值随含气量的增加呈先下降后上升的变化趋势;安全系数变化与之相反,呈先升高后下降的趋势,这表明一定储量范围的深海能源土含气储层对海底边坡的稳定性具有强化作用。
- 3) 采用胶结性环保材料对开采后的能源土含气储层进行回填处理能够有效提高海底边坡的稳定性,对能源土开采所带来的地质灾害及环境污染问题的防治具有重要意义。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] CAO J F, JIN X J, LI J G, et al. Submarine slope stability evaluation based on strength reduction finite element method[J]. *Applied Mechanics and Materials*, 2013, 2746(423/424/425/426): 1325-1329.
- [3] NIAN T K, LIU B, YIN P. Seafloor slope stability under adverse conditions using energy approach[J]. *Applied Mechanics and Materials*, 2013, 2685(405/406/407/408): 1445-1448.
- [4] 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.

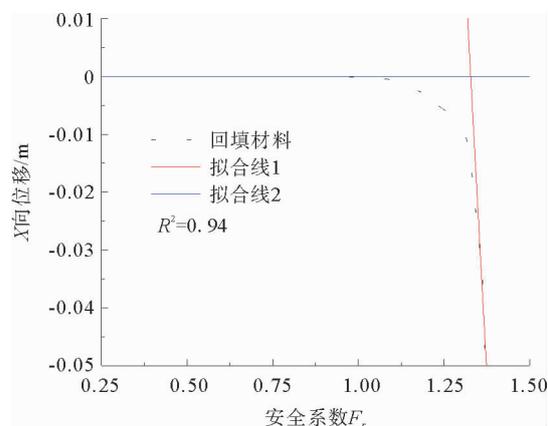


图 11 工况 3 边坡安全系数与坡顶位移关系曲线

Fig. 11 Relation curve between slope safety factor and slope top displacement under condition 3

- [5] 成玮. 淤泥质海底航道边坡失稳滑塌声纹识别研究[D]. 连云港: 江苏海洋大学, 2022: 14-19.
CHENG Wei. Research on sound print recognition of slope instability and collapse of muddy submarine channel[D]. Li-anyungang: Jiangsu Ocean University, 2022: 14-19.
- [6] 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 sites with complex topography in Qiongdongnan continental slope area[J]. China Offshore Oil and Gas, 2020, 32(4): 179-189.
- [7] ZHAO Y P, KONG L, LIU L L, et al. Influence of hydrate exploitation on stability of submarine slopes[J]. Natural Hazards, 2022, 113(1): 719-743.
- [8] SONG B J, CHENG Y F, YAN C L, et al. Influences of hydrate decomposition on submarine landslide[J]. Landslides, 2019, 16(11): 2127-2150.
- [9] SHI Y H, LIANG Q Y, YANG J P, et al. Stability analysis of submarine slopes in the area of the test production of gas hydrate in the South China Sea[J]. China Geology, 2019, 2(3): 276-286.
- [10] 唐常锐, 徐秀刚, 孙秉才, 等. 天然气水合物分解诱发海底滑坡影响因素分析及致灾风险评价[J]. 海洋地质前沿, 2021, 37(5): 14-21.
TANG Changrui, XU Xiugang, SUN Bingcai, et al. Influence factors and risk assessment for seabed landslides induced by natural gas hydrate decomposition[J]. Marine Geology Frontier, 2021, 37(5): 14-21.
- [11] 徐斌, 邹德高, 周丹, 等. 考虑水合物分解的海底斜坡稳定计算方法研究[J]. 土木工程学报, 2011, 44(增2): 207-211.
XU Bin, ZOU Degao, ZHOU Dan, et al. Analysis method on stability of the submarine slope due to methane hydrate dissociation[J]. China Civil Engineering Journal, 2011, 44(S2): 207-211.
- [12] 高盟, 张粮, 王滢. 一种海上可燃冰采挖回填装置及方法: 112360400B[P]. 2022-04-12.
- [13] 孔凡玲, 王滢, 张粮, 等. 深海能源土含气储层力学特性三轴试验研究[J]. 海洋工程, 2023, 41(6): 148-157.
KONG Fanling, WANG Ying, ZHANG Liang, et al. Triaxial test study on mechanical properties of deep-sea energy-bearing soil gas reservoir[J]. The Ocean Engineering, 2023, 41(6): 148-157.
- [14] SUN J X, NING F L, ZHANG L, et al. Numerical simulation on gas production from hydrate reservoir at the 1st offshore test site in the eastern Nankai Trough[J]. Journal of Natural Gas Science and Engineering, 2016, 30: 64-76.
- [15] 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. Submarine slope stability during depressurization and thermal stimulation hydrate production with horizontal wells[J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2020, 52(2): 567-577.
- [16] 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, Apr. 14-16, 1997: 416-437.
- [17] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 土工试验方法标准: GB 50123—2019[S]. 北京: 中国计划出版社, 2019.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Standard for soil test method: GB 50123—2019[S]. Beijing: China Planning Press, 2019.
- [18] 杨林青. 海底斜坡稳定性及滑移影响因素分析[D]. 大连: 大连理工大学, 2012: 10-13.
YANG Linqing. The stability evaluation and elements analysis of submarine landslides[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2012: 10-13.
- [19] 梁伟, 赵同彬, 陈中伟, 等. 天然气水合物分解-两相渗流数值模拟研究[J]. 山东科技大学学报(自然科学版), 2020, 39(2): 53-60.
LIANG Wei, ZHAO Tongbin, CHEN Zhongwei, et al. Numerical simulation study on natural gas hydrate decomposition-two phase flow[J]. Journal of Shandong University of Science and Technology(Natural Science), 2020, 39(2): 53-60.
- [20] 王祥阜, 邱月, 梁伟, 等. 损伤效应下天然气水合物产气规律模拟研究[J]. 山东科技大学学报(自然科学版), 2023, 42(4): 68-75.
WANG Xiangfu, QIU Yue, LIANG Wei, et al. Simulation study on gas production law of natural gas hydrate under damage effect[J]. Journal of Shandong University of Science and Technology(Natural Science), 2023, 42(4): 68-75.

(责任编辑: 吕海亮)