

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.20211007047

# 水合物分解中深水基础抗拔性能模型试验研究\*

刘芳<sup>1,2</sup>, 冯馨<sup>1,2</sup>, 孙皓宇<sup>1,2</sup>, 张旭辉<sup>3</sup>

(1. 同济大学土木工程防灾国家重点实验室, 上海 200092; 2. 同济大学土木工程学院地下建筑与工程系, 上海 200092; 3. 中国科学院力学研究所, 北京 100190)

**摘要:**我国正在推进天然气水合物开发的产业化进程, 海域水合物大规模开采可能影响临近深水设施的基础承载性能, 进而诱发工程事故和环境风险。采用室内缩尺物理模型试验, 模拟海域水合物的开采分解以及临近锚板基础的承载性能变化过程, 测试了基础在不同水合物分解程度下的抗拔性能。试验结果表明, 邻近锚板基础的抗拔性能在水合物分解过程中变化显著, 随着分解阵面的扩展, 分解程度提高, 基础的抗拔承载力急剧降低; 水合物完全分解后抗拔力下降为未分解时的2.89%, 水合物分解中抗拔力折减程度与分解锋面相对距离之间拟合呈现正相关函数关系, 拉拔破坏由脆性转为塑性破坏。

**关键词:**水合物开采; 深水基础; 抗拔承载力

**中图分类号:** TE37 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2023)02-0359-07

## Physical Model Tests on Uplift Capacity of a Deep-Water Foundation in Hydrate-Bearing Sediment During Hydrate Dissociation

LIU Fang<sup>1,2</sup>, FENG Xin<sup>1,2</sup>, SUN Haoyu<sup>1,2</sup>, ZHANG Xuhui<sup>3</sup>

(1. State Key Laboratory of Disaster Reduction in Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Department of Geotechnical Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 3. Institute of Mechanics, Chinese Academy of Science, Beijing 100190, China)

**Abstract:** China is accelerating the industrialization of natural gas hydrate exploitation. However, large-scale commercial exploitation of marine hydrate may affect the bearing capacity of deep-water foundations and in turn induce engineering accidents and environmental risks. Adopting the independent improved physical model test system, a physical simulation experiment was conducted to simulate the exploitation and dissociation process of hydrate, and the pullout performance of an anchor foundation under different degrees of dissociation was studied. The results show that with the expansion of the dissociation front, the degree of dissociation increases, and pull-out bearing capacity of the foundation reduces sharply. After complete dissociation of hydrate, the bearing capacity of the plate anchor decreases to 2.89% of that before dissociation. A positive correlation was found between the degree of the pullout capacity reduction and the relative distance of the dissociation fronts, while the pullout failure changes from brittle to plastic.

**Keywords:** hydrate exploitation; deep-water foundation; uplift bearing capacity

\* 收稿日期: 2021-10-07; 修回日期: 2021-11-08

基金项目: 深海能源土桩基承载特性的宏微观机理研究(41572267)资助

作者简介: 刘芳(1978—), 女, 教授, 博导, 博士。主要从事能源岩土工程研究。E-mail: liufang@tongji.edu.cn

## 0 引言

在全球能源转型的大背景下,天然气水合物已成为世界各国高度重视的战略接替能源,我国正加速推进海域水合物资源开发进程,以期在2030年前实现产业化开采的目标。研究表明,赋存于海底低温高压环境下的天然气水合物<sup>[1]</sup>,对环境温度和压力条件极为敏感,开采过程中打破其原有相平衡状态使其解离,水合物分解后产生大量 $\text{CH}_4$ 气体和水,导致所赋存土体孔隙压力升高和土粒间胶结结构改变,沉积物力学特性劣化<sup>[2-3]</sup>,由此可能引发既有临近深水基础承载力降低,进而诱发海洋平台失稳。因此,实现安全、连续的水合物商业化开采前,必须充分研究水合物分解对深水基础承载性能的影响规律。

作为常见的深水基础形式,吸力式平板锚因其定位准确、施工简便、对环境破坏小、竖向拉拔承载力高等优点广泛应用于浮式海洋平台<sup>[4]</sup>。目前,国内外学者对不同赋存土体条件下锚板基础抗拔性能开展了大量试验研究。郝冬雪等<sup>[5]</sup>、朱泳等<sup>[6]</sup>、Z.A. Pérez等<sup>[7]</sup>在砂土中进行一系列锚板拉拔模型试验,分别研究了密实度、埋深比及模型版式尺寸对极限承载力的影响;Z.R. Chen等<sup>[8]</sup>、D.S.K. Mana等<sup>[9]</sup>和B. Zhu等<sup>[10]</sup>通过离心机试验和小尺度模型试验深入分析了黏土中锚板的拉拔特征;贾富利<sup>[11]</sup>设计锚板在粉土中的上拔试验,确定其抗拔承载力;宦国文<sup>[12]</sup>和雒亿平<sup>[13]</sup>利用原位试验对黄土中锚板的上拔机理和承载力影响因素进行研究;张章明<sup>[14]</sup>和杜重阳<sup>[15]</sup>对冻土地基中的锚板拉拔特性也进行了深入研究。上述研究有助于提高对锚板基础抗拔性能的认识,但是针对含水合物沉积物中锚板基础抗拔承载力的研究还鲜有涉及。

鉴于生成甲烷水合物所需试验条件要求高,设备操作难度大,考虑到四氢呋喃(Tetrahydrofuran, THF)水合物人工合成条件要求低(常压 $4\text{ }^{\circ}\text{C}$ 左右生成)且与甲烷水合物有类似的性质<sup>[16]</sup>,在实验室内常用来替代甲烷水合物沉积物进行力学特性试验<sup>[17]</sup>。曾采用THF水合物替代天然气水合物,试验研究方形锚板在含水合物沉积物中抗拔能力随锚板宽度和埋深的变化规律<sup>[18]</sup>。但现阶段尚缺少针对水合物开采过程中,所赋存土体因水合物分解对深水基础抗拔性能影响方面的研究。作者也基于

TOUGH+HYDRATE和ABAQUS程序的交互模块,数值模拟了水合物开采过程中水合物储层—深水基础相互作用影响机制<sup>[19]</sup>,可与本文试验研究结论进行相互验证。

本文以浮式海洋平台常用的锚板基础为例,采用THF水合物替代天然气水合物,通过缩尺物理模型试验研究水合物开采过程中水合物分解对深水基础抗拔性能的影响,可为我国未来水合物大规模开发提供相关的基础理论参考。

## 1 试验介绍

### 1.1 试验模型与设备

如图1所示,在中科院力学所已有土层滑塌模拟试验土槽基础上进行设备改造,自主研发模拟水合物分解锋面在不同位置处时,进行拉拔试验并测量基础抗拔承载力变化以及含水合物沉积土的温度场和孔压场变化的设备系统。该试验设备由三部分组成,分别是低温模型箱、动力加载系统和测温测量系统。模型箱体尺寸为 $1\ 400\ \text{mm}\times 390\ \text{mm}\times 400\ \text{mm}$ ,通过箱体侧壁循环冷浴装置,可在内部制备含水合物模拟海床。试验模型采用尺寸为 $30\ \text{mm}\times 30\ \text{mm}\times 5\ \text{mm}$ 的方形锚板,与加载杆上的长锚杆螺纹连接。

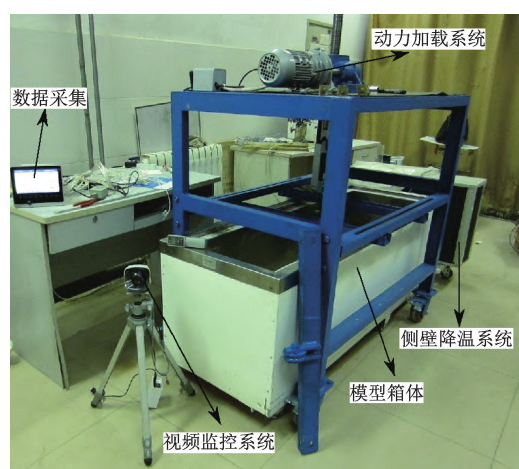


图1 模型试验设备实物图

Fig.1 Physical arrangement of test equipment

### 1.2 试验土体

为模拟南海海域水合物赋存土体特征<sup>[20]</sup>,沿用中科院已开展相关水合物试验所采用的粉细砂土

材料<sup>[21-22]</sup>。试验前测试土体材料的基本物性指标,包括比重试验及颗粒分析试验。测得土体材料天然密度为1.6 g/cm<sup>3</sup>,相对密度为0.54,土体骨架比重为2.69。同时,试验前选取存土槽内不同深度、不同平面位置三点测得土体材料平均含水率为7.42%。

通过不固结不排水三轴压缩试验,对与模拟海床相同密实度的含THF水合物土样,测定基本物理力学特性,以标定后续物理模型试验的地基力学参数。同时设置2组对照组,土样条件分别为含85%THF溶液和THF水合物全分解。含THF水合物土样在不同围压下,达到峰值强度前的上升段斜率相近,破坏后强度衰减相似,表现为应变软化,峰值应力和对应的轴向应变均随围压增大而增大,土样破坏均表现为塑性破坏。根据图2绘制的摩尔-库伦强度包线,得到含THF水合物土样的内摩擦角 $\varphi_u=15.64^\circ$ ,黏聚力 $c_u=510$  kPa,对比张旭辉等<sup>[23-25]</sup>的三轴试验结果,测得含THF水合物强度参数满足典型天然气水合物沉积物的力学特性。

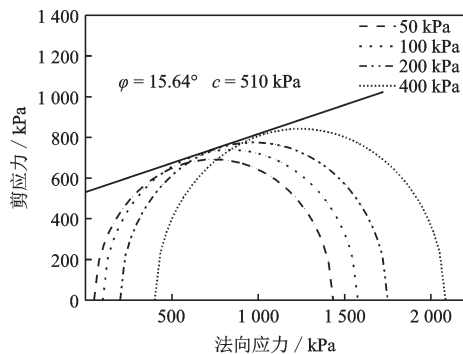


图2 三轴土样破坏摩尔圆和强度包线

Fig.2 Mohr's circle and strength envelope of samples

## 2 试验方案与步骤

本文开展3组模拟水合物开采过程的拉拔试验,水合物分解锋面位置分别设置为距锚板60 mm(T1)、30 mm(T5)和0 mm(T10)处,同时设置2组对照组,模拟海床条件为水合物未分解和全分解。

### 2.1 水合物富集的模拟海床制备

采用中密砂作为土体材料,模拟地基孔隙比控制为0.681。对晾晒并铺水处理后的土样材料分四层铺设击实,总厚度为125 mm。土层铺设完成后开挖,按照2.2节所述布置方案埋设锚板模型、传感

器和加热元件,分五层回填并拉毛处理,以减小土体不均匀性。土层制备完成后,喷淋四氢呋喃溶液至预设饱和度(85%),慢速浇注保证土体表面无积液,浇注完成后密封静置12 h。开启模型箱侧壁降温系统,控温达-7℃维持24 h,认为含THF水合物模拟海床制备完成。

### 2.2 温压传感器布设

图3为锚板模型及传感器布置示意图。THF水合物模拟海床铺填总厚度为125 mm,沿长度方向同时埋设3个锚板模型,间隔475 mm,埋深均为65 mm。为了监测全过程模拟海床中的温度场和孔压场变化,在铺填土层中埋设微型温度传感器(T1~T12)、微型孔隙水压力(P1~P11)和气压力传感器(U1)。水合物分解采用预埋条形加热棒控制加热时间,当控制测点(分别距锚板60 mm、30 mm和0 mm)达到指定温度4℃,即认为分解锋面到达相应位置。

### 2.3 水合物开采分解过程模拟

目前天然气水合物开采技术主要包括降压法、热激发法、抑制剂注入法和CO<sub>2</sub>置换法。降压开采操作简单、成本低,但由于水合物藏渗透率低,并不利于气体流动,无法维持较大的降压<sup>[26]</sup>;注化学试剂法长期开采成本高,对环境也有一定的破坏;置换法安全环保,但置换速度慢效率低,不利于商业化开采。注热开采一方面可以补充水合物分解吸收的热量,防止水合物二次生成,另一方面热水的流动可以在水合物藏中形成优势通道,因此是目前公认的有效开采方法之一<sup>[27]</sup>,故本文采用热分解模拟水合物开采过程。

水合物热分解模拟通过预埋加热装置升温,可实现控制热源温度,配备手持红外测温设备监控分解阵面扩散情况。试验开始控制热源温度为60℃,观察到控制测点温度达到4℃后,认为分解阵面扩散至该位置,再将热源温度调整至此时距加热棒10 mm测点处的温度值,进行锚板拉拔试验。模拟海床条件为水合物全分解的对照组使用加热板升温使水合物完全分解后再开展锚板拉拔试验;模拟海床条件为水合物未分解的对照组在室温下进行拉拔试验。

### 2.4 锚板拉拔试验

在室温条件下,对不同水合物分解程度的模拟

海床,进行锚板拉拔试验。抗拔性能测试由动力加载系统辅助完成,数据采集系统生成拉拔力-位移关系曲线,并对数据结果进行修正,去除前期空程阶

段,并扣除锚板重力影响,修正后得到净抗拔强度。试验全部结束后,描述破坏形态,并进行土体基本物性(孔隙比和含水率)测试。

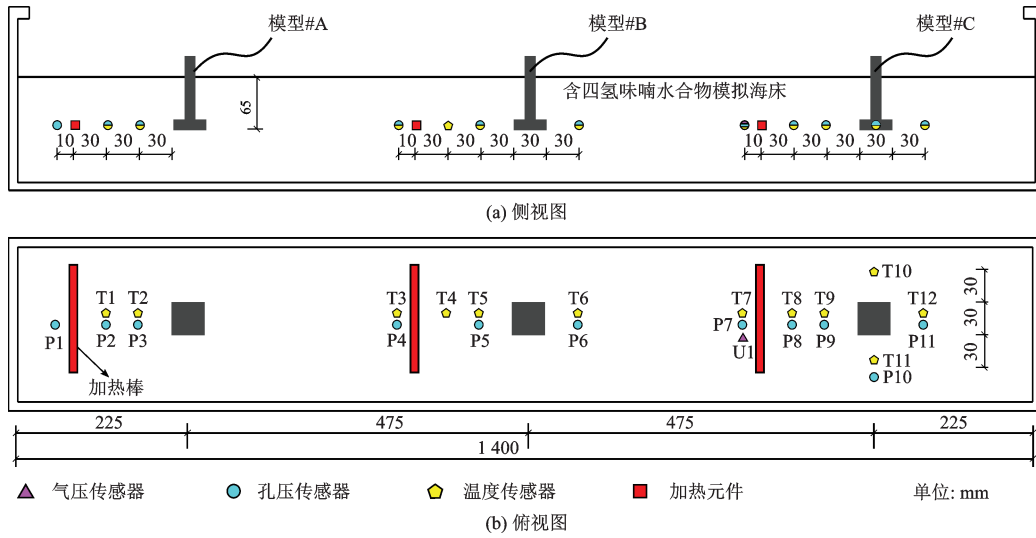


图3 模型及传感器布置示意  
Fig.3 Schematic diagram of model components and sensors arrangement

### 3 试验结果及分析

图4~6为3组拉拔全过程试验数据曲线,如图4所示,第一组试验水合物分解锋面在T1测点处。拉拔过程中,距离锚板100 mm(P1)位置处测点孔压数据波动较大,期间有2次突降随后缓慢上升。第一次是由于随着温度升高土体中水合物逐渐分解,直至孔隙与外界流通导致气体自由逸散;第二次突降则可能是由于拉拔过程破坏了土体完整性,导致气体自由逸散。距离锚板60 mm(P2)位置处,测点在整个加热过程孔压几乎无变化,是由于水合物空间分布不均导

致,在加热前无过量水合物生成挤压受力组件,而在分解后孔隙传感器所在位置与外界空气联通,分解产生气体自由排出。距离锚板30 mm(P3)位置处测点孔隙压力在整个加热过程几乎无变化,是由于传感器附近温度不够高,水合物分解缓慢,分解后自由气体积聚较少,孔隙传感器所在位置与外界空气联通,因此整个过程孔压数据几乎无变化。抗拔力时间曲线显示出了显著的脆性破坏特征,与对照组水合物未分解模拟海床的拉拔破坏模式相似,即破坏前无明显征兆,破坏后快速整体拉出。

第二组试验(图5)水合物分解锋面在T5测点处,拉拔过程中,距离锚板100 mm(P4)位置孔压测点数据随时间逐渐上升,这是由于水合物分解需要一定时间,有延时性,在拉拔过程中水合物分解状况依然存在,气体持续积聚引起孔隙压力上升。距离锚板左侧30 mm(P5)水合物分解较少或土体孔隙与外界联通,未产生明显气体积聚现象,距离锚板右侧30 mm(P6)未在水合物分解范围以内,不存在水合物分解状况,因此P5、P6测点孔压数据均无明显变化。抗拔力曲线与第一组试验出现差别,达到峰值后其破坏逐渐发生,变形仍可提供较大反力,更趋向于塑性破坏。

图6所示的第三组试验水合物分解锋面距锚板0 mm(T10测点处),孔隙压力随时间变化均表现出

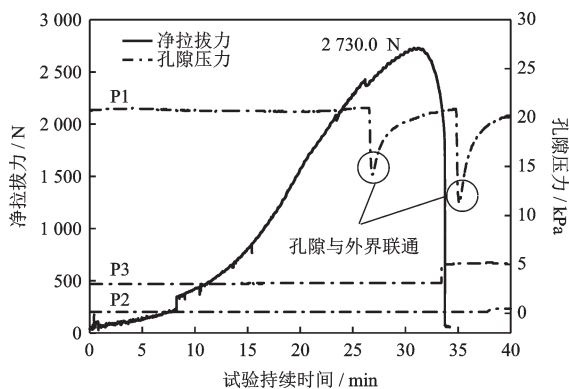


图4 第一组试验拉拔过程孔压及抗拔力的时间曲线  
Fig.4 The time curve of pore pressure and force in test 1

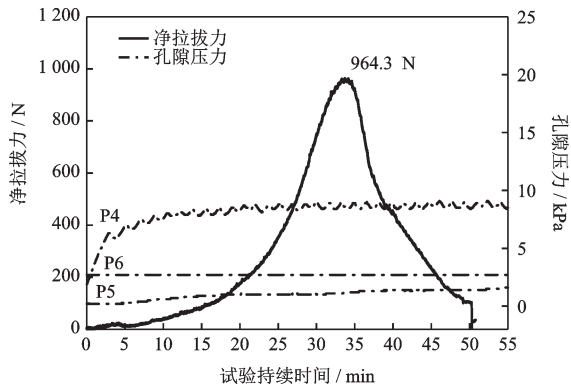


图5 第二组试验拉拔过程孔压及抗拔力的时间曲线  
Fig.5 The time curve of pore pressure and force in test 2

无明显变化,这是因为水合物分解过程土体孔隙与外界始终连通。抗拔力时间曲线与前两组试验差别较大,在初始即有较大拉力作用,是由于开始阶段锚板桩附近水合物未分解,但周围水合物已经分解,则破坏面无法正常扩展,因此拉力几乎在很长一段时间没有较大变化。抗拔力突降点是由于锚板桩上表面附近水合物分解,失去其原有强度,无法提供反力,因此拉力骤降至接近0。之后锚板桩在荷载作用下逐渐上移,分解水合物逐步受到荷载变形,上部未分解水合物提供荷载,拉力逐步增加,直到达到破坏峰值发生破坏。

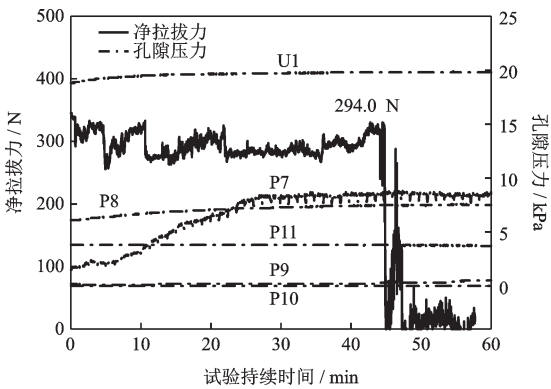


图6 第三组试验拉拔过程孔压及抗拔力的时间曲线  
Fig.6 The time curve of pore pressure and force in test 3

图7对比不同水合物分解程度的锚板基础的位移-荷载曲线,其中水合物未分解时承载力最大为3 286.9 N,水合物全分解后承载力大幅降低,峰值强度仅为9.5 N,为分解前强度3 286.9 N的2.89%。拉拔试验中,随着分解锋面距锚板位置越近,水合物分解程度加深,锚板抗拔承载力逐渐降低。

如图8所示,对比不同条件下锚板桩拉拔试验剪

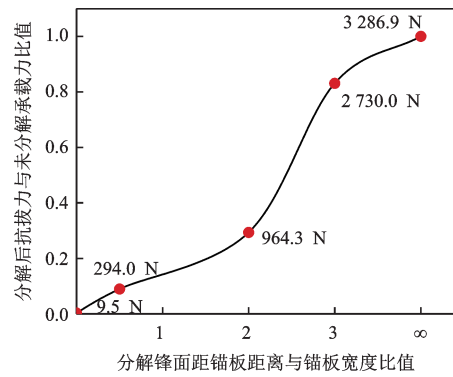


图7 不同水合物分解程度锚板位移-荷载曲线  
Fig.7 Displacement-force curves at different hydrate dissociation degrees

切破坏面,水合物分解锋面较远时,锚板拉拔破坏时会出现完整的块体,表面形成以锚桩为中心的圆形趋近于椭圆区域,剪切破坏面以底部正方形锚桩为起始,延伸至土层表面,剪切破坏面近似可看成线性,与竖直方向夹角均在 $60^\circ$ 左右,与已有锚板垂直上拔的研究结论一致<sup>[28-29]</sup>。随着水合物分解锋面进一步临近锚板基础,基础破坏模式由脆性破坏逐渐趋向于塑性破坏,第二组和第三组拉拔试验由于水合物分解程度较高,土体含水率较低,沿深度方向破坏面与竖直方向夹角较大,土层破坏影响范围较广(图9)。

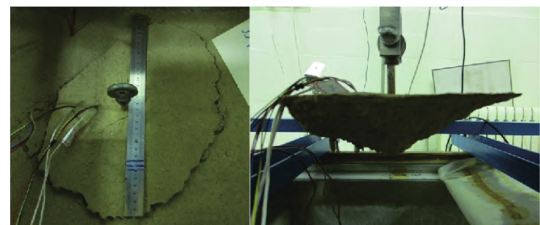


图8 第一组试验拉拔破坏形态  
Fig.8 Foundation failure pattern in test 1

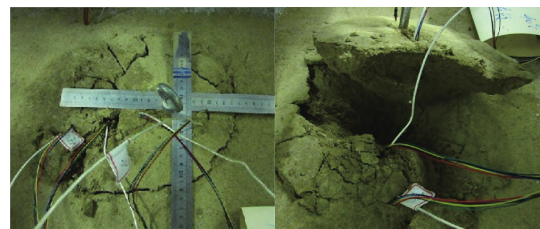


图9 第二组试验拉拔破坏形态  
Fig.9 Foundation failure pattern in test 2

## 4 结论

(1) 沉积物层中水合物开采过程中,随着分解

阵面的扩展,分解程度提高,基础极限抗拔力急剧降低。抗拔力折减程度与分解锋面相对距离之间拟合呈现正相关函数关系,拉拔破坏由脆性转为塑性破坏。

(2)水合物分解的发生对锚板基础拉拔破坏面有较大改变,导致破坏面上产生明显断口,引起破坏面不完整现象。对比不同条件下锚板基础沿深度方向破坏面与竖直方向夹角,其值相近,未发生较大改变,即水合物分解仅在局部造成破坏面不完整。

### 参考文献:

[1] 宫智武,张亮,程海清,等.海底天然气水合物分解对海洋钻井安全的影响[J].石油钻探技术,2015,43(4):19-24.  
Gong Z W, Zhang L, Cheng H Q, et al. The influence of subsea natural gas hydrate dissociation on the safety of offshore drilling[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2015, 43(4): 19-24. (in Chinese)

[2] Madhusudhan B N, Clayton C R I, Priest J A. The effects of hydrate on the strength and stiffness of some sands [J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 2019, 124(1): 65-75.

[3] 赵亚鹏,刘乐乐,孔亮,等.含天然气水合物土微观力学特性研究进展[J].力学学报,2021,53(8):2119-2140.  
Zhao Y P, Liu L L, Kong L, et al. Advances in micro-mechanical properties of hydrate bearing soils[J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied, 2021, 53(8): 2119-2140. (in Chinese)

[4] 国振,王立忠,李玲玲.新型深水系泊基础研究进展[J].岩土力学,2011,32(2):469-477.  
Guo Z, Wang L Z, Li L L. Recent advances in research of new deepwater anchor foundations[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(2): 469-477. (in Chinese)

[5] 郝冬雪,符胜男,陈榕,等.砂土中锚板拉拔模型试验及其抗拔力计算[J].岩土工程学报,2015,37(11):2101-2106.  
Hao D X, Fu S N, Chen R, et al. Experimental investigation of uplift behavior of anchors and estimation of uplift capacity in sands[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2015, 37(11): 2101-2106. (in Chinese)

[6] 朱泳,朱鸿鹄,李飞,等.砂土中水平锚板抗拔特性试验研究[J].中南大学学报(自然科学版),2018,49

(7): 1768-1774.  
Zhu Y, Zhu H H, Li F, et al. Experimental study on uplift behavior of anchor plate in sand [J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2018, 49(7): 1768-1774. (in Chinese)

[7] Pérez Z A, Schiavon J A, Tsuha C D H C, et al. Numerical and experimental study on influence of installation effects on behaviour of helical anchors in very dense sand[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2018, 55(8): 1067-1080.

[8] Chen Z R, Tho K K, Leung C F, et al. Influence of overburden pressure and soil rigidity on uplift behavior of square plate anchor in uniform clay [J]. Computers and Geotechnics, 2013, 52: 71-81.

[9] Mana D S K, Tech B, Tech M. An experimental investigation of reverse end bearing of offshore shallow foundations [J]. Canadian Geotechnical Journal, 2013, 50(10): 1022-1033.

[10] Zhu B, Dai J L, Kong D Q, et al. Centrifuge modelling of uplift response of suction caisson groups in soft clay [J]. Canadian Geotechnical Journal, 2020, 57(9): 1294-1303.

[11] 贾富利.基于PIV技术锚板在粉土与砂土中的变形破坏机理的对比模型试验[D].郑州:华北水利水电大学,2018.  
Jia F L. Deformation and failure mechanism of anchor plate in silt and sand based on PIV technology comparative model test study[D]. Zhengzhou: North China University of Water Resources and Electric Power, 2018. (in Chinese)

[12] 宦国文.黄土中锚板抗拔机理及理论分析[D].兰州:兰州大学,2015.  
Huan G W. Theoretical analysis of the anchor plate drawing mechanism in loess [D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2015. (in Chinese)

[13] 雒亿平.黄土地基联合板索基础抗拔机理研究[D].兰州:兰州大学,2017.  
Luo Y P. Study on uplift mechanism of composite foundation of plate and anchor cable in loess ground [D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2017. (in Chinese)

[14] 张章明.多年冻土区架空输电线路基础抗拔承载性能研究[D].西安西安建筑科技大学,2017.  
Zhang Z M. Study on uplift bearing capacity of overhead transmission line foundation in permafrost regions [D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2017. (in Chinese)

[15] 杜重阳.多年冻土地基输电塔索联板球基础抗拔研究[D].淮南:安徽理工大学,2018.

- Du C Y. Study on the uplift of cable joint cricket foundation for transmission tower with permafrost base [D]. Huainan: Anhui University of Science & Technology, 2018. (in Chinese)
- [16] Nagashima K, Suzuki T, Nagamoto M, et al. Formation of periodic layered pattern of tetrahydrofuran clathrate hydrates in porous media [J]. *Journal of Physical Chemistry B*, 2008, 112(32): 9876-9882.
- [17] 王淑云, 罗大双, 张旭辉, 等. 含水合物黏土的力学性质试验研究[J]. *实验力学*, 2018, 33(2): 245-252.  
Wang S Y, Luo D S, Zhang X H, et al. Experimental study of mechanical properties of hydrate clay [J]. *Journal of Experimental Mechanics*, 2018, 33(2): 245-252. (in Chinese)
- [18] Liu F, Sun H Y, Jung J W, et al. Experimental study of pullout capacity of plate anchors shallowly embedded in hydrate bearing sediments [J]. *Ocean Engineering*, 2019, 173: 548-555.
- [19] 黄翔, 刘芳, 巨鑫. 水合物开采对深水锚板基础承载性能影响的 THMC 数值模拟研究[J]. *石油科学通报*, 2020, 5(2): 229-238.  
Huang X, Liu F, Ju X. Impact of oceanic hydrate production on the uplift bearing capacity of a nearby plate anchor: THMC coupled simulation [J]. *Petroleum Science Bulletin*, 2020, 5(2): 229-238. (in Chinese)
- [20] 宁伏龙, 梁金强, 吴能友, 等. 中国天然气水合物赋存特征[J]. *天然气工业*, 2020, 40(8): 1-24.  
Ning F L, Liang J Q, Wu N Y, et al. Reservoir characteristics of natural gas hydrates in China [J]. *Natural Gas Industry*, 2020, 40(8): 1-24. (in Chinese)
- [21] 石要红, 张旭辉, 鲁晓兵, 等. 南海水合物黏土沉积物力学特性试验模拟研究[J]. *力学学报*, 2015, 47(3): 521-528.  
Shi Y H, Zhang X H, Lu X B, et al. Experimental study on the static mechanical properties of hydrate-bearing silty-clay in the South China Sea [J]. *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 2015, 47(3): 521-528. (in Chinese)
- [22] 刘乐乐, 张旭辉, 刘昌岭, 等. 含水合物沉积物三轴剪切试验与损伤统计分析[J]. *力学学报*, 2016, 48(3): 720-729.  
Liu L L, Zhang X H, Liu C L, et al. Triaxial shear tests and statistical analyses of damage for methane hydrate-bearing sediments [J]. *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 2016, 48(3): 720-729. (in Chinese)
- [23] 张旭辉, 王淑云, 李清平, 等. 天然气水合物沉积物力学性质的试验研究[J]. *岩土力学*, 2010, 31(10): 3069-3074.  
Zhang X H, Wang S Y, Li Q P, et al. Experimental study of mechanical properties of gas hydrate deposits [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2010, 31(10): 3069-3074. (in Chinese)
- [24] 李彦龙, 刘昌岭, 刘乐乐, 等. 含甲烷水合物松散沉积物的力学特性[J]. *中国石油大学学报(自然科学版)*, 2017, 41(3): 105-113.  
Li Y L, Liu C L, Liu L L, et al. Mechanical properties of methane hydrate-bearing unconsolidated sediments [J]. *Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science)*, 2017, 41(3): 105-113. (in Chinese)
- [25] 刘莉, 马慧龙, 蒋平, 等. 含水合物细粒土的强度和变形特性[J]. *科学技术与工程*, 2021, 21(22): 9496-9502.  
Liu L, Ma H L, Jiang P, et al. Strength and deformation properties of hydrate-bearing fine-grained soil [J]. *Science Technology and Engineering*, 2021, 21(22): 9496-9502. (in Chinese)
- [26] 陈强, 胡高伟, 李彦龙, 等. 海域天然气水合物资源开采新技术展望[J]. *海洋地质前沿*, 2020, 36(9): 44-55.  
Chen Q, Hu G W, Li Y L, et al. A prospect review of new technology for development of marine gas hydrate resources [J]. *Marine Geology Frontiers*, 2020, 36(9): 44-55. (in Chinese)
- [27] Liang Y P, Tan Y T, Luo Y J, et al. Progress and challenges on gas production from natural gas hydrate-bearing sediment [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 261: 1-23.
- [28] 张昕, 乐金朝, 刘明亮, 等. 砂土中锚板的抗拔机理与承载力计算模型研究[J]. *岩土工程学报*, 2012, 34(9): 1734-1739.  
Zhang X, Yue J C, Liu M L, et al. Uplifting behavior and bearing capacity of plate anchors in sand [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2012, 34(9): 1734-1739. (in Chinese)
- [29] Consoli N C, Ruvic C A, Schnaid F. Uplift performance of anchor plates embedded in cement-stabilized backfill [J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2013, 139(3): 511-517.

(本文编辑:周小潭)