

海底饱和软黏土沉积物低扰动取样过程数值模拟分析

邴新国^{1,2,3}, 郭威^{1,2,3*}, 张鹏宇^{1,2,3}, 王元^{1,2,3}

(1. 吉林大学建设工程学院, 吉林 长春 130026; 2. 自然资源部复杂条件钻采技术重点实验室, 吉林 长春 130026;
3. 吉林大学深部探测与成像全国重点实验室, 吉林 长春 130026)

摘要:海底沉积物作为海洋信息载体,准确获取其原状数据对资源开发至关重要。取样是获取沉积物的关键手段,取样的精准度对资源勘探与分析有着极大影响,获取低扰动土体样品是取样工作的核心要点。本文针对海底饱和软黏土钻进取样过程中土体扰动问题,基于Abaqus软件,采用耦合欧拉-拉格朗日(CEL)算法,建立取样器-软黏土相互作用三维数值模型,探究取样管切削角和贯入速度对土体扰动的影响规律,先采用刃口角度为5°、10°、15°、20°、25°的取样器模型,分析刃口角度对土体扰动的影响,确定最优刃口角度,随后设置不同取样管贯入沉积物的速度,进一步研究不同贯入速度下土体的扰动程度。结果表明:随刃口角度增加,取样管外部土体扰动范围逐步增大,管内样品整体扰动范围也随角度增加而增大,刃口角度为5°时相比于25°,样品采取率提升了约4%;贯入速度越高,土体扰动程度越低,45 mm/s相比20 mm/s,管内壁土体应变影响范围缩小34%,管内壁最大应变值降低11.2%;小刃口角度与高贯入速度的组合可有效抑制土体塑性流动与结构破坏。研究成果为海底饱和软黏土沉积物低扰动取样器设计与施工参数选取提供了理论支撑。

关键词:海底沉积物;饱和软黏土;低扰动取样;取样器;贯入速度;管靴切削角;数值模拟

中图分类号:P634 **文献标识码:**A **文章编号:**2096-9686(2026)02-0077-11

Numerical simulation analysis of low-disturbance sampling process for saturated soft clay sediments on the seabed

BING Xinguo^{1,2,3}, GUO Wei^{1,2,3*}, ZHANG Pengyu^{1,2,3}, WANG Yuan^{1,2,3}

(1. College of Construction Engineering, Jilin University, Changchun Jilin 130026, China; 2. Key Laboratory of Complex Condition Drilling and Exploitation Technology, Ministry of Natural Resources, Changchun Jilin 130026, China; 3. State Key Laboratory of Deep Earth Exploration and Imaging, Jilin University, Changchun Jilin 130026, China)

Abstract: Marine sediments serve as crucial repositories of oceanic information, and the accurate acquisition of undisturbed samples is essential for marine resource exploitation. Sampling is the primary method to obtain sediment samples, and its precision exerts a significant influence on resource exploration and analysis. Thus, acquiring low-disturbance soil samples constitutes the core objective of sampling operations. This study addresses the issue of soil disturbance during the drilling and sampling of submarine saturated soft clay. A three-dimensional numerical model of the sampler-soft clay interaction was established using Abaqus software with the Coupled Eulerian-Lagrangian (CEL) algorithm to systematically investigate the influence of the cutting shoe angle and penetration velocity on soil disturbance. Initially, sampler models with cutting edge angles of 5°, 10°, 15°, 20°, and 25° were adopted to analyze

收稿日期:2026-01-13; 修回日期:2026-02-13 DOI:10.12143/j.ztgc.2026.02.008

基金项目:吉林省自然科学基金项目“含挥发性污染物土体高保真采样技术及设备”(编号:YDZJ202401331ZYTS);海南省重点研发联合项目“基于海底钻机的天然气水合物原位精细探测技术”(编号:ZDYF2025GXJS133)

第一作者:邴新国,男,汉族,2001年生,硕士研究生,地质工程专业,研究方向为复杂环境保真取样技术,吉林省长春市西民主大街938号,1183166449@qq.com。

通信作者:郭威,男,汉族,1979年生,教授,博士生导师,地质工程专业,博士,主要从事非常规地质能源钻采理论与技术装备研发工作,吉林省长春市西民主大街938号,guowei6981@jlu.edu.cn。

引用格式:邴新国,郭威,张鹏宇,等.海底饱和软黏土沉积物低扰动取样过程数值模拟分析[J].钻探工程,2026,53(2):77-87.

BING Xinguo, GUO Wei, ZHANG Pengyu, et al. Numerical simulation analysis of low-disturbance sampling process for saturated soft clay sediments on the seabed[J]. Drilling Engineering, 2026,53(2):77-87.

the effect of the cutting edge angle on soil disturbance and determine the optimal angle. Subsequently, various penetration velocities were simulated to further study the degree of soil disturbance under different velocity conditions. The results indicate that as the cutting edge angle increases, the disturbance range of the soil outside the sampling tube expands gradually, and the overall disturbance range of the samples inside the tube increases accordingly; compared with the 25° cutting edge angle, the 5° angle improves the sample recovery rate by approximately 4%. Furthermore, a higher penetration velocity results in a lower degree of soil disturbance: in comparison with 20 mm/s, a penetration velocity of 45 mm/s reduces the strain influence range of the soil on the inner tube wall by 34% and the maximum strain value by 11.2%. The combination of a small cutting edge angle and a high penetration velocity can effectively inhibit the plastic flow and structural damage of the soil. These findings provide a solid theoretical basis for the design of low-disturbance samplers and the selection of operational parameters for the sampling of submarine saturated soft clay sediments.

Key words: marine sediment; saturated soft clay; low-disturbance sampling; sampler; penetration velocity; cutting shoe angle; numerical simulation

0 引言

海洋覆盖了地球表面的71%,总面积达到 $3.61 \times 10^8 \text{ km}^2$,蕴藏着丰富的自然资源,包括多金属结核、钴结壳、热液硫化物、海洋生物资源、石油、天然气、天然气水合物及稀土矿物等,这些资源具有极高的经济价值,尤其是天然气水合物等非常规能源,被认为是最有远景的新型能源。海洋资源的研究与开发是目前各国竞争的焦点。海底沉积物作为海洋环境变化的关键记录载体^[1],分析其物质组成、地层结构等信息,对海洋资源评估与开发至关重要。海底沉积物取样技术应用广泛,是推动海洋科研与资源利用的关键手段,主要用于矿产勘探、生物样品获取、工程地质勘察、气候环境研究、海洋地质学研究及地质填图等^[2-3]。

海洋区域饱和软黏土沉积物作为海床地基的主要组成部分之一,具有高含水量^[4]、高孔隙度、高压缩性、低强度、低渗透性^[5]及低固结度的特性^[6-7]。土体孔隙度反映土体中孔隙体积占总体积的比例,直接决定土体的疏松程度、渗透性、压缩性等关键工程性质。随着海洋工程向更深水域和更复杂地质环境拓展,传统重力贯入取样和旋转钻探取样在此地质条件下进行低扰动取样存在明显局限^[8-10],具体表现为取样质量受限,取样过程中样品边界易产生压缩变形及沉积层序错乱等问题,难以满足精准取样需求。因此,建立适用于海洋环境饱和软黏土沉积物低扰动取样技术,确保沉积物信息原状性,是海洋开发与资源勘查的关键,为后续物化分析、地质评价及风险评估提供可靠的数据与理论支撑^[11-12]。

现有取样技术研究主要针对管壁与地层间摩

擦减阻、取样器内样品中负压消除及取样装备的智能化。邵帅等^[13]研究了一种智能化深海取样岩心填充率监测系统,具有自动化程度高、精度高、稳定性好、运行时间长等特点;李光诚等^[14]提出一种获取武汉长江I级阶地原状土样技术,在取样时采用回转钻进与重锤少击的方式减少土体扰动;潘永坚等^[15]分析了不同取样直径下软土物理力学特性,认为大直径取土器获取样品扰动更低。而对于取样器刃口物理结构及钻进参数选取往往依靠经验,尤其是关于取样器刃口角度及贯入速度等关键参数对样品扰动效应及结构破坏机制的研究尚显不足^[16-17]。为了研究取样器刃口角度与贯入速度对饱和软黏土沉积物的扰动效果,本文利用有限元模拟软件,基于土力学计算理论,针对取样器刃口贯入饱和软黏土沉积物过程进行数值模拟分析,研究取样器不同角度刀头在贯入过程对土样扰动的影响;在得到最优角度后,进而选取最优角度刃口模拟不同贯入速度下对沉积物地层的扰动规律,深入探究刃口角度与推进速度等关键参数对沉积物扰动的影响机制,为优化海底饱和软黏土沉积物低扰动取样技术提供理论支撑。

1 仿真模型建立及评价体系

1.1 几何模型

几何模型包含取样器模型和软黏土沉积物模型,使用三维建模软件创建取样器的几何模型,选取取样器的外径为70 mm,内径为60 mm,高为100 mm,壁厚为5 mm,取样器刃口最大外径76 mm,刃角为5°、10°、15°、20°、25°,刃口圆角为R1,如图1所示;软黏土沉积物模型使用Abaqus软件建立,为三维耦合模型,

软黏土沉积物模型外径为500 mm,高为400 mm,如图2所示。为了简化计算,采用四分之一模型进行计算,装配如图3所示,整个取样过程如图4所示。

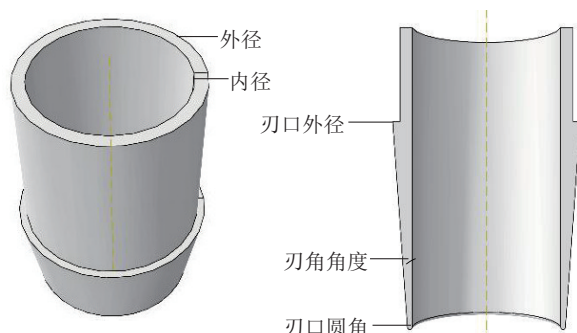


图1 取样器模型

Fig.1 Sampling device

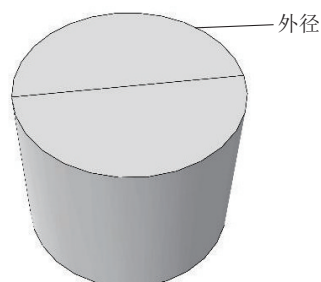


图2 软黏土沉积物模型

Fig.2 Soft clay sediment model

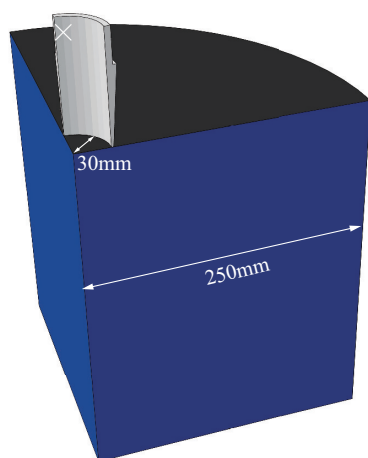


图3 四分之一模型装配

Fig.3 Assembly drawing of quarter model

1.2 仿真模型计算设置

1.2.1 计算方法

有限元模拟采用CEL算法(Coupled Eulerian-Lagrangian),即耦合欧拉-拉格朗日算法。该算法

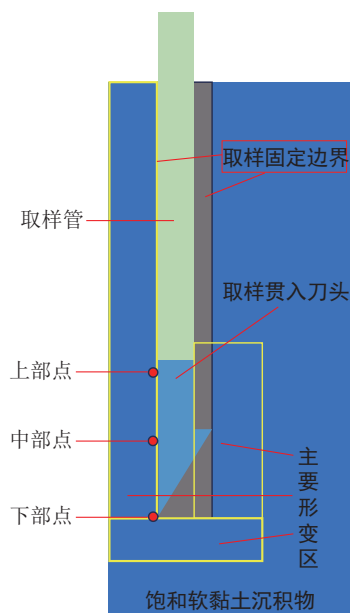


图4 取样过程示意

Fig.4 Schematic diagram of the sampling process

融合欧拉法与拉格朗日法的长处,既能避免网格扭曲,又能精准计算材料边界,在处理大变形冲击、碰撞等复杂问题时有核心优势。其网格点具备灵活运动特性,可随物质点同步运动、在空间中固定不动,或在单方向固定而另一方向随物质运动。CEL算法的控制方程涵盖连续方程、动量守恒方程及能量守恒方程,需在欧拉坐标系下完成时间积分^[18]。Abaqus/Explicit模块通过中心差分格式对时间项直接积分,无需复杂迭代即可求解未知量,但显式计算的条件稳定性需通过临界时间步 Δt_{crit} 保障。 Δt_{crit} 由单元特征尺寸 L_e 与波速 C_d 决定,每个时间步下 $\Delta t_{crit} = L_e / C_d$ 。

CEL算法通过欧拉体积分数EVF(Eulerian Volume Fraction)跟踪欧拉材料在网格中的分布状态,所有分割后的欧拉单元需通过EVF值明确填充材料的类型与比例。当 $EVF=1$ 时,代表该欧拉单元被对应欧拉材料完全占据;当 $EVF=0$ 时,单元自动填充无实际材料参数的“空”虚拟材料,即视为空域^[19]。

1.2.2 仿真模型设置

为了简化模拟计算,模拟中所有材料属性均设定为各向同性。取样器为不锈钢材料,弹性模量为206 GPa,泊松比为0.3;软黏土沉积物模型采用欧拉模型,正常状态下,软黏土弹性模量范围为2~15

MPa,摩擦角为 $5^{\circ}\sim 10^{\circ}$,饱和状态下,软黏土弹性模量数值较低,摩擦角低于正常范围,故选定软黏土沉积物模型具体参数为弹性模量为3 MPa,泊松比为0.41,内摩擦角为 3° ,黏聚力为0.005 MPa。

本模拟中,设置内部加密区半径为80 mm,装配件总网格数量为48904,计算结点数量为56292,总单元数为49608。取样器单元网格采用六面体结构,使用sweep网格,类型为C3D8R,其长度近似为10 mm,网格数量为1600,计算结点数量为2484个;软黏土沉积物模型单元网格采用六面体结构,使用sweep网格,类型为EC3D8R,长度近似为110 mm,土体近刀头区域加密区长度近似2.5 mm,网格数量为47304个,结点数量为53808个。

模拟采用显式动力学算法分析。边界条件中,取样刀头设置完全刚体约束,施加竖直方向匀速贯入条件,在研究不同刃口角度时,以50 mm/s贯入土体总深度250 mm;在研究贯入速度影响时,采用最优刃口角度条件,在相同时间下进行阶梯式速度取样。土体模型四周边界无约束条件,土体底部施加完全固定约束,土体施加竖直方向自然重力载荷,以考虑实际工况中土体挤压自然变化的状态。

在切向接触行为设置中,取样管采用钢与土体的常规接触属性,其接触参数参考《建筑地基基础设计规范》^[20]及《建筑边坡工程技术规范》^[21]设定,在合理区间范围内设定其摩擦系数 $\mu=0.30$,以匹配不锈钢表面与土壤接触时表面黏附性能。相关参数设置见表1。

1.2.3 当前取样评价体系

样品采取率是评价土体取样扰动的核心间接指标,直接反映取样过程中土样的完整保留程度,目前多数研究使用样品采取率作为评价钻探取样质量、土体取样质量的重要指标。

$$R_s = L_1 / l \times 100\% \quad (1)$$

式中: R_s ——样品采取率; L_1 ——本次提取的完整样品总长; l ——本次贯入总长度。

2 取样刀头贯入角度对土体扰动的影响

取样器刃口角度,一般指岩土工程中原状取土器管靴刃口角度,通常依据经验值或相关规范在特定范围内选取。刃口角度是一个极其重要但又常被忽视的因素,不仅影响取样过程中的土体变形模式,还决定了土样的扰动程度和受力情况,不同的

表1 数值模拟参数

Table 1 Parameter table of numerical simulation		
参数分类	参 数 项	参 数 值
模型概况	模型类型	三维耦合模型
	刃口角度/ $^{\circ}$	5,10,15,20,25
几何参数	取样管外径/mm	70
	取样管内径/mm	60
	取样管长度/mm	100
	取样管壁厚/mm	5
网格划分参数	网格类型	C3D8R,EC3D8R
	取样管最大网格尺寸/mm	10
	土体区域网格最小尺寸/mm	2.5
	总单元数	49608
	取样管模型类型	刚体
材料本构参数	取样管弹性模量/GPa	206
	取样管泊松比	0.3
	土体本构模型	摩尔-库伦模型
	土体弹性模量/MPa	3
	土体泊松比	0.41
	土体有效内摩擦角/ $^{\circ}$	3
	黏聚力/MPa	0.005
边界条件	取样管约束与贯入参数	刚体约束,定速贯入土体250 mm深度;刚体约束,不同速度定时贯入土体深度
	土体约束条件	四周无约束,底部完全固定约束
	重力加速度/($\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$)	9.8
分析设置	算法	显式动力学算法
	分析类型	几何非线性分析

刃口角度会导致不同土体在取样过程中经历不同的应力应变路径,从而产生显著不同的扰动效果,尤其对软黏土地层的影响更为明显。本次模拟实验针对不同刃口角度贯入时的应力应变情况进行研究,选取 5° 、 10° 、 15° 、 20° 、 25° 的刃口,以50 mm/s匀速贯入饱和软黏土样品中250 mm^[22]。土体挤压变形示意图如图5所示。

取样过程中土体应变云图如图6所示,应力云图如图7所示,根据模拟结果,可将取样过程中应力

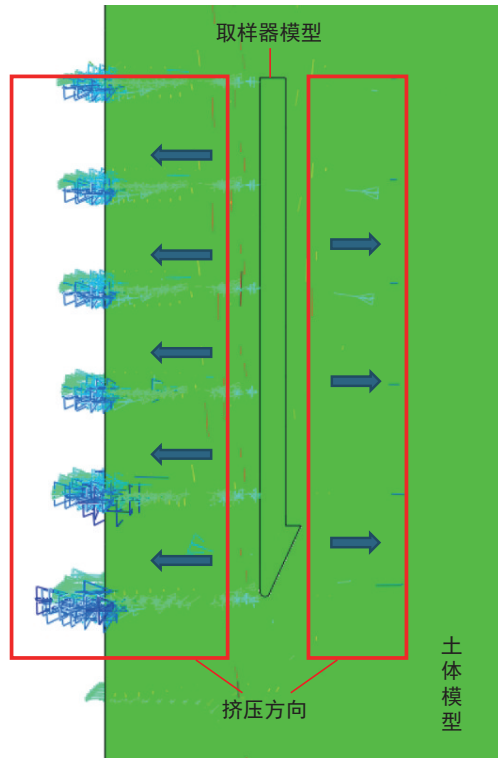


图5 土体挤压变形示意

Fig.5 Schematic Diagram of Soil Compression Deformation

应变变化情况分为管壁外侧和管壁内壁两个区域进行描述。

模拟结果表明,随着取样刀头与土体接触,管

内外壁区域的应力应变会同时急剧上升。在管外壁区域,当刀头刃口角度为 5° 时,刀头刃口曲率半径极小^[23],接触材料时将外力集中于刃口尖端,形成远高于材料屈服强度的局部压应力和剪应力,这种局部几何小突变会形成远高于土体屈服强度的压应力与剪应力,二者叠加使刃口正下方土体瞬时进入塑性屈服状态,其应力分布区域相对集中,最大主应力集中在刀头圆角正下方,最大应力值约为75 kPa。应变影响范围主要集中在切削刃下侧及外部台阶周围5~7 mm的土体区域内。云图显示,该区域应变影响范围小,局部应变极高,且该区域内土体以剪切变形为主,无明显大范围径向位移,表明土体颗粒仅在刃口直接作用区发生局部剪切破坏,未破坏周围土体的原始结构联结。随着刀头刃口角度增大,管外壁的应力集中程度逐渐分散^[21]。当刃口角度增至 15° 时(中间过渡工况),刃口与土体接触面积不断增大,应力集中程度显著分散,影响区域范围逐渐扩大,最大主应力相较于 5° 时下降5%左右,土体影响半径增至10~15 mm,开始出现轻微的径向挤压变形,挤压应变区域面积增加,土体结构完整性初步受损,样品采取率略下降。而当刃口角度进一步增加到 25° 时,刀头刃口接触材料时,破坏方式发生改变,管土接触区域先产生显著压应力挤压材料,法向压力分量占比显著提升,刃口接触土体

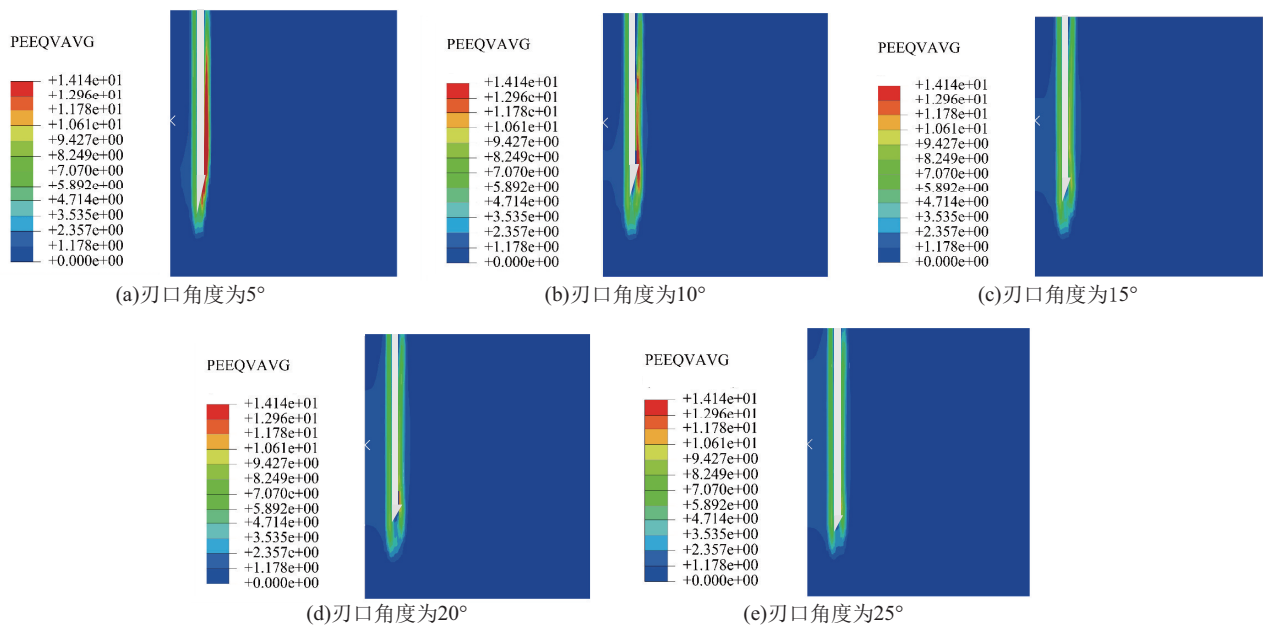


图6 不同取样刃口角度的应变云图

Fig.6 Strain contour plots at different sampling head angles

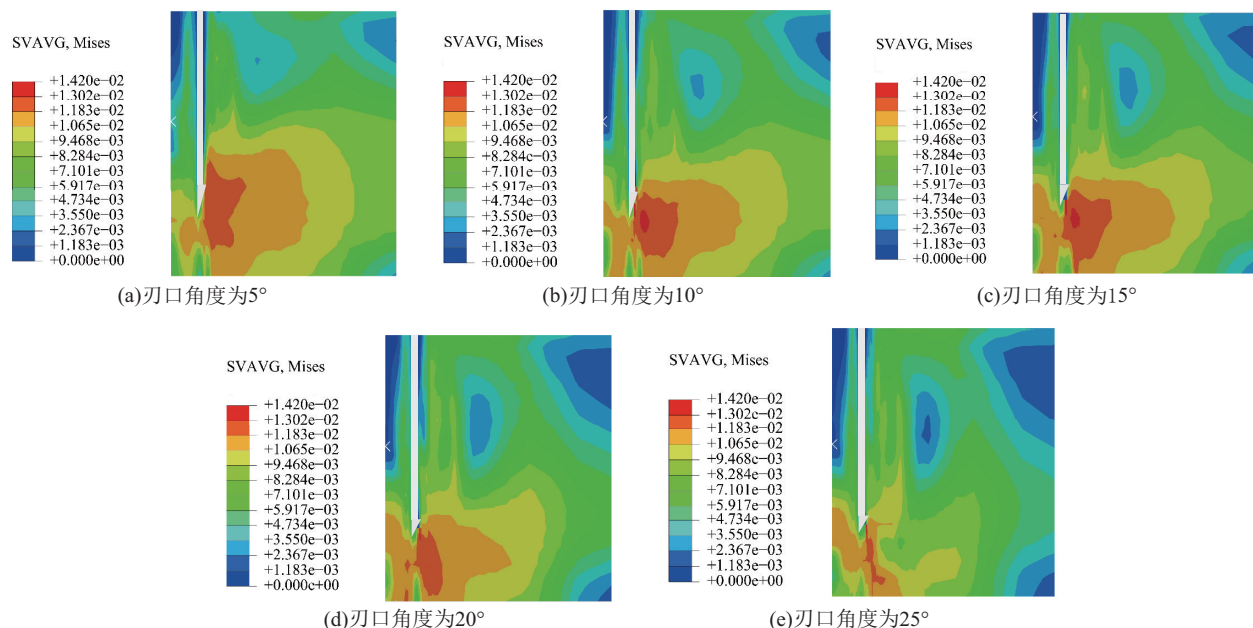


图7 不同取样刃口角度的应力云图

Fig.7 Stress contour plots at different sampling head angles

时先以压应力主导挤压材料,使刃口前方土体发生塑性流动(位移矢量方向由径向转为斜向上),使刃口前方材料发生塑性变形,出现明显的径向压缩变形,主要应变影响半径扩大至15~20 mm,最大应力值降低至59 kPa,下降22%,剪切破碎土体边界的能力变差,挤压土体径向结构能力增强,大角度下切削主应力需克服土体颗粒黏聚力与内摩擦力,导致颗粒联结破坏程度增加,最终引发样品层序失稳,显著增强管外壁土体的扰动程度,破坏土体原有的结构完整性。

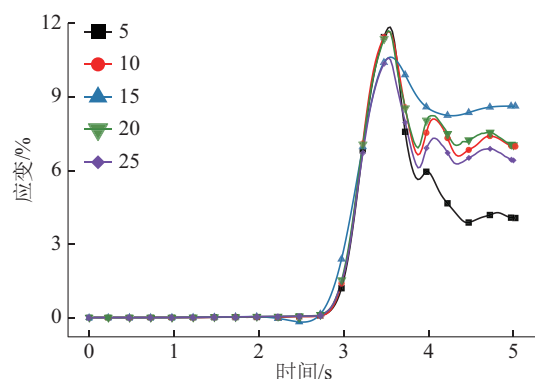
考虑到取样管贯入时,内壁与土体的接触应力沿管长存在梯度差异(下部为刀头切削力直接传递区,中部为稳定接触区,上部为土体入口过渡区),按“下-中-上”三段式分析。当刃口角度为5°时,管内壁土体的应力分布相对均匀,最大应力值约为39 kPa,主要应变区域集中在靠近刀头及土体与内管壁之间,下部土体受刀头切削力作用较早,上部土体随取样管贯入逐步接触管壁,应力加载存在时间滞后,随着取样管的贯入,土体应变沿管长方向呈现“下小上大”的分布特征;土体以边界弯曲变形为主,云图显示样品两侧层序位移较小,应变区域为5~10 mm范围内,无层间错动或缺失,层序完整性良好。随着刃口角度增加,管内壁的应力分布逐渐呈现出不均匀性。当刃口角度增至15°时,应变范围

扩大至8~15 mm,出现轻微层间混合;当角度达到25°时,最大应力值升至43.5 kPa,主要应变区域下部因刀头切削力增强形成局部应力集中,中部因管壁挤压力增大导致应力平缓,上部因管内行程限制产生累积应变,主要应变影响范围进一步扩大至15~20 mm,管内壁土体的边界弯曲加剧,管内壁土体压缩现象进一步加剧。随着刃口角度增加,刀头对管内壁土体的切削影响范围与作用强度均有所增强,切削主应力增大,导致土体颗粒之间的联结受破坏程度增强,管内壁土体产生压缩变形,边界处土体颗粒排列由正常密度状态转变为密实状态,且密实区范围随角度增大而扩展,进而影响了样品的层序稳定性,不同位置土体应变随取样时间的变化如图8~10所示。

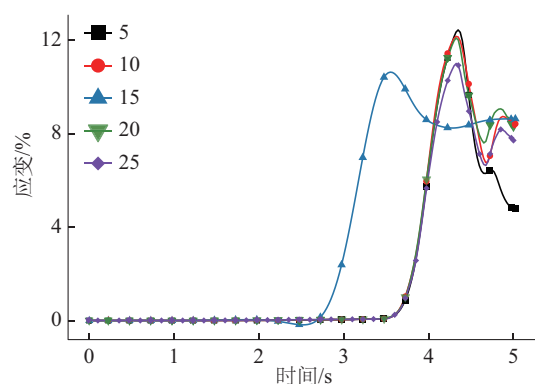
综合以上各项指标的分析,在本次模拟实验所选取的5°~25°刃口角度范围^[24]内,刃口角度为5°时抗扰动性能最优。以5°刀头进行匀速剪切破坏时,其应力集中较小、应变范围小、层序破坏小,能够在保证较高样品质量的同时,有效控制土体的扰动程度,因此初步确定5°为最优的刃口角度。

3 取样刀头贯入速度对土体扰动的影响

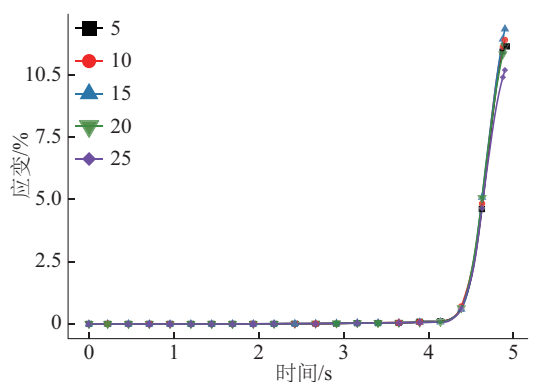
在确定5°为最优刃口角度的基础上,进一步研究不同贯入速度对土体扰动的影响。本次模拟实



(a)上部样品



(b)中部样品



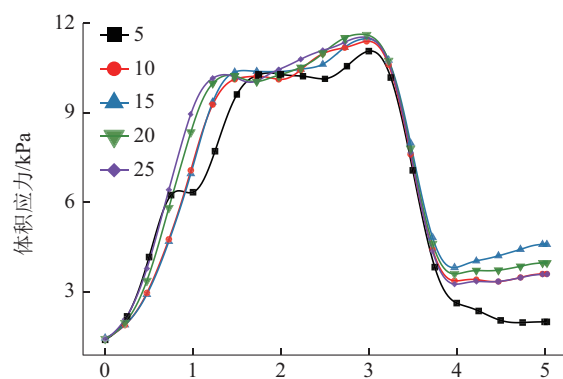
(c)下部样品

图8 不同位置土体应变-时间变化

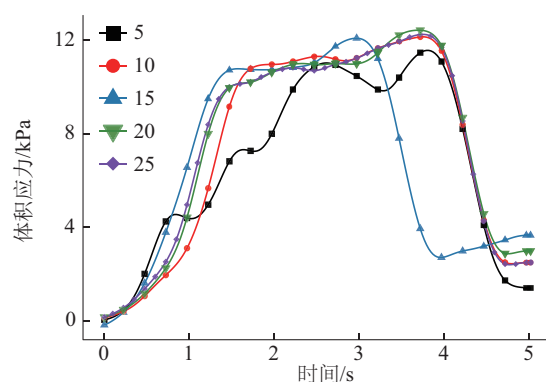
Fig.8 Strain-time variation diagram of soil at different locations

验选取了20、25、30、35、40、45 mm/s这6种不同的贯入速度,在饱和软黏土样品中以刃口角度为 5° 的刀头进行匀速贯入模拟,应变云图如图11所示。

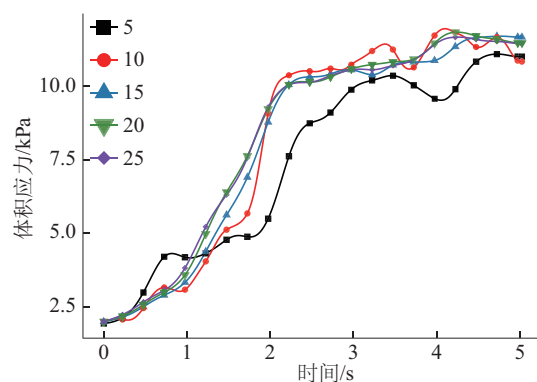
按“低速-中速-高速”将贯入速度划分为3个区间(20~25 mm/s为低速、30~35 mm/s为中速、40~45 mm/s为高速),结合数值模拟结果分阶段解析,结果表明,相同土体类型下,取样推进速度由20 mm/s增至45 mm/s时,所取样品的土体应变呈减



(a)上部样品



(b)中部样品



(c)下部样品

图9 不同位置土体体积应力-时间变化

Fig.9 Diagram of soil volume stress-time variation at different locations

小趋势^[25],如图12所示。从应变分布来看,当贯入速度为20 mm/s时,管内壁土体的应力应变变化较为缓慢,应力传递相对充分,未出现明显的应力集中现象,管内壁最大应变值约为10.56%,应变影响范围为15~17 mm。低速下管内壁-土界面作用的特征时间尺度长,土体有足够的时间进行变形调整,土体在取样过程中受到的挤压和剪切作用时间较长,颗粒排列发生较大改变,有充分时间完成从

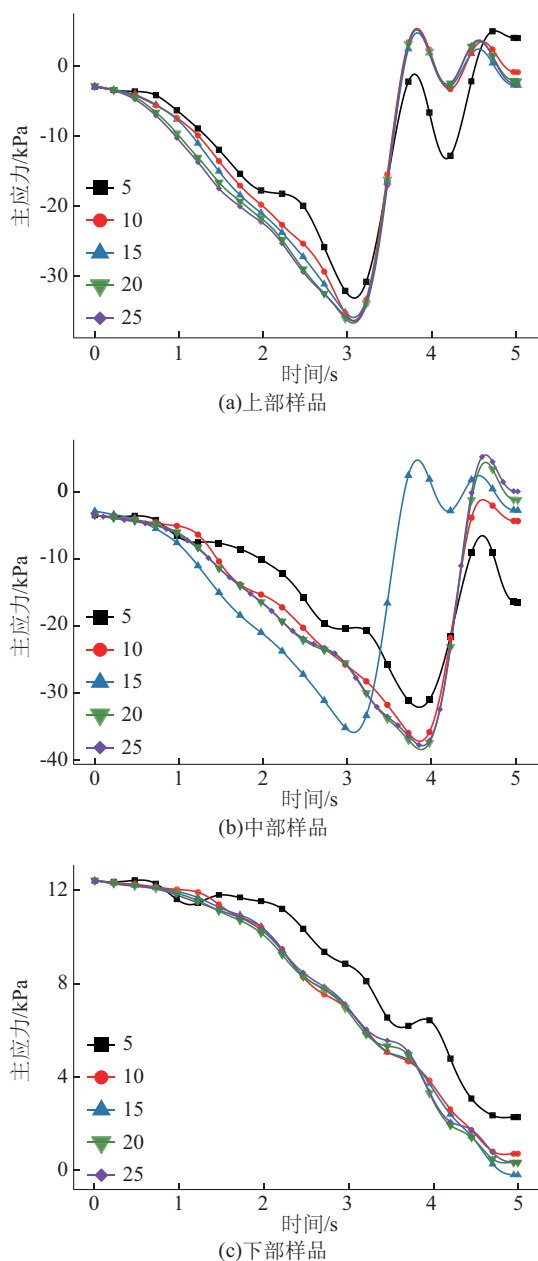


图10 不同位置土体主应力-时间变化
Fig.10 Diagram of principal stress-time variation in soil at different locations

初始结构解体到颗粒摩擦滑动再到新密实结构重组的全过程,累计应变影响范围相对较大,表明低速贯入会削弱小刃口角度在降低扰动方面的优势。当贯入速度为30 mm/s时,最大应变降至9.87%,应变影响范围缩至12~14 mm,管壁运动产生的惯性力开始影响土体结构,管壁周边土体的颗粒尚未完成滑动便被快速切削,应力传递缓慢且不充分,应力集中现象增强,土体从“准静态挤压变形”向“动

态剪切破坏”过渡,颗粒累积应变效应被简单抑制,应力应变与扰动范围呈现过渡特征。当贯入速度为45 mm/s时,管内壁最大应变值下降到9.38%,应变影响范围降低至5~10 mm,缩小34%,应变相比20 mm/s时下降11.2%,此时应力集中现象明显,惯性力影响大,累计剪应力显著减小,应变影响范围显著减小^[26],土体在快速贯入的作用下,管内壁-土界面作用的特征时间尺度短,颗粒来不及发生较大的相对运动,较高的贯入速度使土体未能充分变形便产生剪切破坏^[27],应力向内部传递时间短,累计应变影响范围的传播受到限制,从而有效降低了土体的扰动程度。

相同土体、相同管壁与土体黏附摩擦系数条件下,在低速推进工况下,取样管穿越同等土体空间的特征时间尺度显著延长,导致管内壁-土界面相互作用进入充分发育阶段,管壁法向压力持续作用于土体颗粒,导致颗粒间摩擦阻力增大同时逐步提升有效应力,径向土体累计应力应变逐步发育,加剧土体颗粒的摩擦位移与结构压缩;颗粒被持续压缩产生塑性变形^[28],进一步推高局部应变水平,最终形成大范围应变区。同时,低速条件下土体颗粒有充足的累积力学响应时间,使其能够完成从初始自然结构到扰动后重组压缩结构的完整演化,最终叠加表现为显著的边界宏观应变区域,导致显著的宏观应变影响区域输出。

高速推进工况下,管内壁-土界面相互作用的特征时间尺度被大幅压缩,土体扰动过程瞬间发生,有效应力变化微小,同时管壁快速贯入产生的惯性力使颗粒瞬间剪切破坏,抑制了管壁法向运动与界面颗粒间的黏结作用,管内壁-土界面相互作用尚未完全发育,颗粒所受累积效应显著弱化。高速作用过程中,土体颗粒短时间内难以累积大面积的扰动^[29],累积位移显著减小,应变仅集中于管内壁-土接触界面,土体颗粒运动被局限于管壁与土体边界接触的极小空间范围内,最终使整体应变水平被有效抑制,土体压缩与层序扰动程度大幅降低。

4 结论

本文基于Abaqus仿真软件,通过改变刀头刃口角度及刀头贯入土体的速度探究其对土体扰动的影

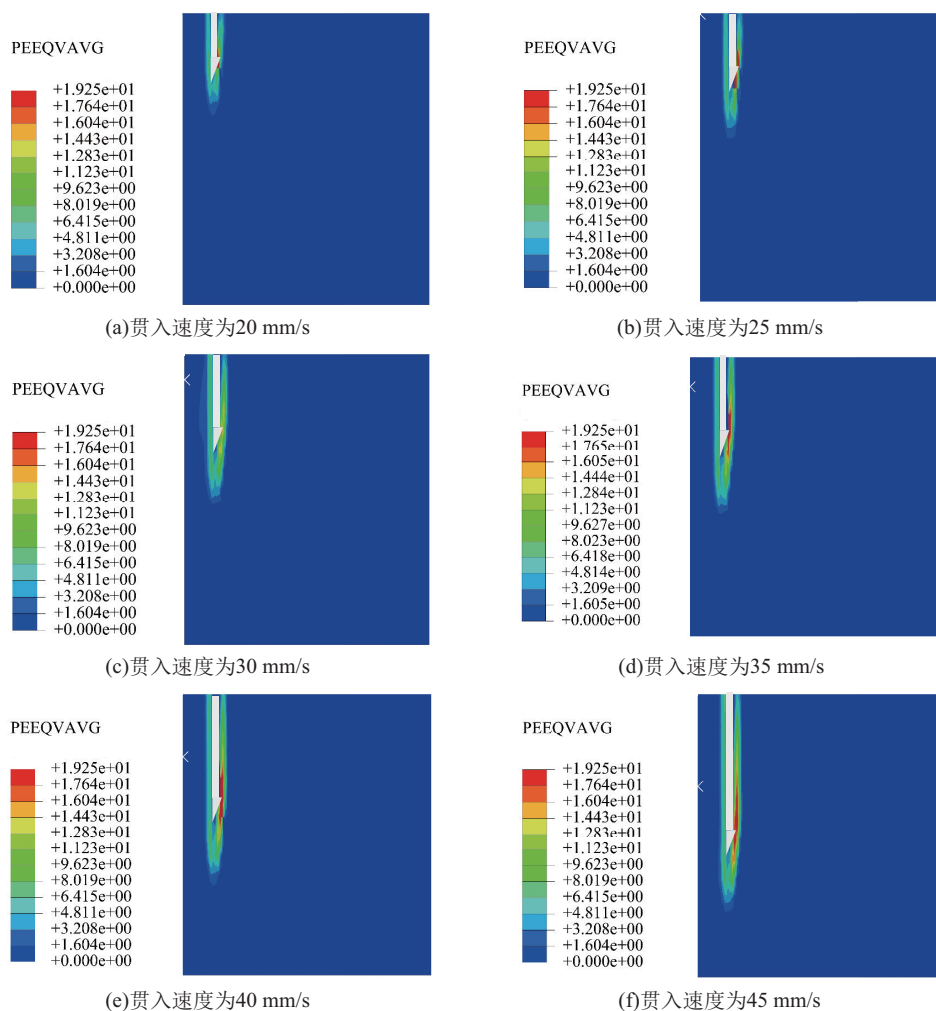


图11 不同贯入速度对土体扰动影响应变云图

Fig.11 Strain contour plot of the impact of different sampling speeds on soil disturbance

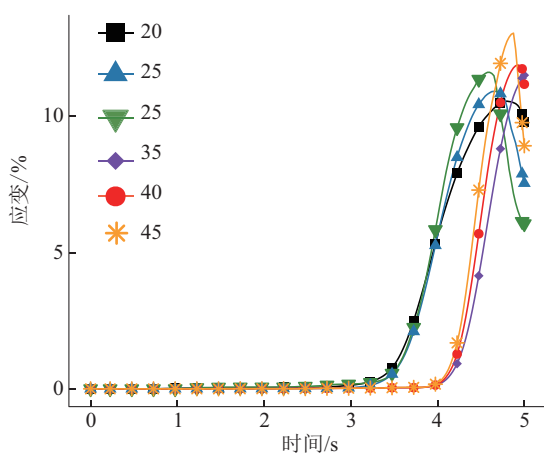


图12 不同贯入速度下应变-时间曲线

Fig.12 Strain-time curves under different sampling speeds

(1) 刀头刃口角度对土体扰动影响显著。在 5° ~ 25° 范围内,随刃口角度减小,管内壁土体扰动逐渐降低,刃口角度为 5° 时,相比于刃口角度为 25° ,样品采取率提升了约4%,是该范围内能获得最高样品采取率的最优刃口角度。

(2) 贯入速度对土体扰动影响显著,贯入速度与整体扰动情况呈负相关。在20~45 mm/s范围内,随贯入速度增加,土体扰动程度整体降低,45 mm/s的扰动效果最小,可满足低扰动取样要求。

(3) 研究总体区间范围内,随着刃口角度减小、贯入速度增大,取样管内侧土体扰动区域呈减小趋势。

以上结论说明,不同的钻头参数及贯入速度会对土体样品造成不同的扰动。该研究可为海底软黏土沉积物低扰动取样技术优化提供理论依据。

在实际工程中,沉积物取样器设计与参数选择需符合现场情况,如过低刃角极易发生卷刃破坏,过高的速度现场装备能力不足等,应结合地层复杂程度及设备性能进行参数优化,兼顾取样质量与工程可行性,实现低扰动取样。

参考文献(References):

- [1] 刘德顺,金永平,万步炎,等.深海矿产资源岩芯探测取样技术与装备发展历程与趋势[J].中国机械工程,2014,25(23):3255-3265.
LIU Deshun, JIN Yongping, WAN Buyan, et al. Review and development trends of deep-sea mineral resource core sampling technology and equipment[J]. China Mechanical Engineering, 2014, 25(23): 3255-3265.
- [2] 鄢泰宁,补家武,李邵军.浅析国外海底取样技术的现状及发展趋势——海底取样技术介绍之一[J].地质科技情报,2000,19(2):67-70.
YAN Taining, BU Jiawu, LI Shaojun. Brief study on the international present condition and developing tendency of the technology of sea floor sample drilling[J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 2000, 19(2): 67-70.
- [3] A.L.英德比岑.深海沉积物——物理及工程性质[M].北京:海洋出版社,1981.
Yingde Bicen A L. Deep-sea Sediments-physical and Engineering Properties[M]. Beijing: China Ocean Press, 1981.
- [4] Jiang Y M, Chapman N R. Estimating marine sediment properties in a temporally varying water column environment[J]. AIP Conference Proceedings, 2010, 1272(1): 226-233.
- [5] 孙华强,庄丹丹,宋春霞,等.东太平洋多金属结核研究区海底沉积物土工特性研究[J].宁波工程学院学报,2021,33(1):8-12.
SUN Huaqiang, ZHUANG Dandan, SONG Chunxia, et al. Geotechnical characteristics of seabed sediments in the study area of polymetallic nodules in the East Pacific Ocean[J]. Journal of Ningbo University of Technology, 2021, 33(1): 8-12.
- [6] Ruan D R, Chen J W, Jiang J Q. Research on sampling system for abyssal sediment based on image recognition technology[J]. Marine Technology Society Journal, 2022, 4: 21-29.
- [7] 周乐,陈沈良,陈晴,等.海南四更沙海域沉积物分布及其受控机制[J].沉积学报,2016,34(3):506-515.
ZHOU Le, CHEN Shenliang, CHEN Qing, et al. Sediment distribution and its controlling mechanism in the littoral zone of Sigengsha, Hainan, China [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2016, 34(3): 506-515.
- [8] 孙志文,孙蕾,李官保,等.菲律宾深海海底沉积物声学特性与物理性质相关关系[J].海洋科学,2018,42(5):12-22.
SUN Zhiwen, SUN Lei, LI Guanbao, et al. The relationship between the acoustic characteristics and physical properties of deep-sea sediments in the Philippine Sea [J]. Marine Sciences, 2018, 42(5): 12-22.
- [9] 李民刚,王廷和,程振波,等.深海重力活塞取样器贯入深度影响因素分析[J].中国海洋大学学报(自然科学版),2013,43(7):94-98.
LI Mingang, WANG Tinghe, CHENG Zhenbo, et al. Analysis influencing factors of deep-sea gravity piston corer penetration depth[J]. Periodical of Ocean University of China, 2013, 43(7): 94-98.
- [10] 杜星,孙永福,宋玉鹏,等.重力活塞取样器贯入模型研究[J].海洋科学进展,2018,36(1):88-97.
DU Xing, SUN Yongfu, SONG Yupeng, et al. Study of penetration depth from a model of gravity piston corer[J]. Advances in Marine Science, 2018, 36(1): 88-97.
- [11] Liao S M, Shen M L, Zhou L, et al. In situ experimental study on SDC grouting in Shanghai saturated soft clay [M]// Geo-Frontiers 2011: Advances in Geotechnical Engineering. Reston: ASCE, 2012: 2504-2513.
- [12] Lv X F, Zhou H Y. Quantitative detection of in-service strength of underground space strata considering soil-water interaction[J]. Advances in Civil Engineering, 2020, 2020(1): 2604503.
- [13] 邵帅,苏波,王荣璟,等.深海取样岩心填充率自动监测系统研制及应用[J].钻探工程,2024,51(6):106-110.
SHAO Shuai, SU Bo, WANG Rongjing, et al. Development and application of automatic monitoring system for core filling rate in deep-sea coring[J]. Drilling Engineering, 2024, 51(6): 106-110.
- [14] 李光诚,邵勇,伊盼盼,等.武汉长江I级阶地原状土样获取技术研究[J].钻探工程,2024,51(4):163-171.
LI Guangcheng, SHAO Yong, YI Panpan, et al. Research on technology of obtaining undisturbed soil samples from Wuhan first stage terrace of the Yangtze River [J]. Drilling Engineering, 2024, 51(4): 163-171.
- [15] 潘永坚,李高山,何强,等.不同取样直径下软土物理力学特性室内对比试验分析[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2019,46(1):67-72.
PAN Yongjian, LI Gaoshan, HE Qiang, et al. Comparative lab-testing of physical and mechanical properties of soft soil at different sampling diameter[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2019, 46(1): 67-72.
- [16] 秦华伟.海底表层样品低扰动取样原理及保真技术研究[D].杭州:浙江大学,2005.
QIN Huawei. Research on low-disturbing sampling theory and truth-preserving technique of deep-sea surface layer sediment [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2005.
- [17] 吴小建,荣耀,殷琨.海底液动冲击取样器的研究[J].同济大学学报(自然科学版),2005,33(10):1418-1422.
WU Xiaojian, RONG Yao, YIN Kun. Research on hydro-percussion seabed sampler[J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2005, 33(10): 1418-1422.
- [18] 姜逢源,殷齐麟,董胜.基于CEL法的埋深海底管道受坠物撞击损伤分析[J].海洋湖沼通报,2018(6):159-165.
JIANG Fengyuan, YIN Qilin, DONG Sheng. Analysis of submarine pipeline with a certain buried depth impacted by dropped objects based on coupled euler-lagrange method [J]. Transactions of Oceanology and Limnology, 2018(6): 159-165.
- [19] 胡奇,王明振,张家旭,等.基于耦合欧拉-拉格朗日方法的浮筒着水数值仿真[J].系统仿真技术,2019,15(1):18-22,40.
HU Qi, WANG Mingzhen, ZHANG Jiaxu, et al. Numerical

- simulation on water impact of float based on coupled eulerian-lagrangian method[J]. System Simulation Technology, 2019, 15(1): 18-22, 40.
- [20] 中华人民共和国建设部, 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 建筑地基基础设计规范: GB 50007—2002[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2004.
- Ministry of Construction of the People's Republic of China, General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. Code for design of building foundation: GB 50007—2002[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2004.
- [21] 中华人民共和国建设部. 建筑边坡工程技术规范: GB 50330—2002[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2002.
- Ministry of Construction of the People's Republic of China. Technical code for building slope engineering: GB 50330—2002[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2002.
- [22] 李大佛, 雷艳, 许少宁. 月球钻探取心特种钻头研制与试验[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2013, 40(2): 1-6.
- LI Dafo, LEI Yan, XU Shaoning. Study on particular coring bit for lunar soil drilling[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2013, 40(2): 1-6.
- [23] 刘贝, 熊禾根. 基于Pro/Mechanica的铣挖机铣刀最优切削角研究[J]. 机床与液压, 2013, 41(1): 70-72, 75.
- LIU Bei, XIONG Hegen. Study on optimal cutting angle of drum cutter's milling cutter based on pro/mechanica[J]. Machine Tool & Hydraulics, 2013, 41(1): 70-72, 75.
- [24] 谢立全, 梁鑫, 李晓波, 等. 刀齿切削角对绞刀生产效能影响的数值分析[J]. 水电能源科学, 2018, 36(7): 153-155, 152.
- XIE Liqian, LIANG Xin, LI Xiaobo, et al. Numerical simulation on effect of cutting angle on efficiency of cutter teeth[J]. Water Resources and Power, 2018, 36(7): 153-155, 152.
- [25] 罗如平, 吴跃东, 刘坚, 等. 取土器贯入扰动变形规律透明土试验研究[J]. 岩土工程学报, 2017, 39(S1): 64-68.
- LUO Ruping, WU Yuedong, LIU Jian, et al. Tests on transparent soil for soil disturbance deformation induced by sampler penetration[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2017, 39(S1): 64-68.
- [26] 吴跃东, 罗如平, 刘坚, 等. 基于透明土的取土管贯入扰动变形试验研究[J]. 岩土工程学报, 2016, 38(8): 1507-1512.
- WU Yuedong, LUO Ruping, LIU Jian, et al. Soil disturbance deformation induced by penetration of sampler tube based on transparent soils[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2016, 38(8): 1507-1512.
- [27] 左文荣, 吴跃东, 李治国, 等. 取土器贯入土体引起土体扰动的理论分析[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2009, 37(6): 702-706.
- ZUO Wenrong, WU Yuedong, LI Zhiguo, et al. Theoretical analysis of disturbance of soils caused by penetration of soil samplers[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2009, 37(6): 702-706.
- [28] 魏汝龙, 王年香. 赤湾港软土取土质量的研究[J]. 港口工程, 1989(6): 1-6.
- WEI Rulong, WANG Nianxiang. Study on the quality of soft soil borrowed from Chiwan Port[J]. Port Engineering, 1989(6): 1-6.
- [29] Yang Y, Zhang L, Zhang B, et al. Low disturbance sampling design of the cutter head in soft sediment of the Yellow River reservoir[C]//Proceedings of the 2013 International Conference on Advanced Mechatronic Systems, Luoyang, China: IEEE, 2013: 79-83.

(编辑 王跃伟)