

徐兴雨, 齐静静, 徐继尚, 等. 随机波作用下海底管道振动对土体液化的影响[J]. 海洋地质前沿, 2023, 39(10): 93-100.

XU Xingyu, QI Jingjing, XU Jishang, et al. Influence of submarine pipeline vibration on soil liquefaction under random wave[J]. Marine Geology Frontiers, 2023, 39(10): 93-100.

随机波作用下海底管道振动对土体液化的影响

徐兴雨^{1,2}, 齐静静¹, 徐继尚³, 刘福兴⁴, 李家宁⁴, 王伟斌¹, 徐涛¹, 张亚欣⁴

(1 中国石油化工股份有限公司胜利油田分公司技术检测中心, 东营 257000; 2 中国石化胜利石油管理局有限公司博士后科研工作站, 东营 257000; 3 中国海洋大学海洋地球科学学院, 青岛 266100; 4 中国石化胜利油田检测评价研究有限公司, 东营 257000)

摘要:海底管道-土体-水体相互作用对土体和管道的稳定性具有重要影响,但波浪作用下海底管道对其周围土体性质的影响仍有待深入研究。通过一系列室内波浪水槽试验,研究了波浪荷载和管道振动作用下海床土体内部的超孔隙水压力响应。实验结果表明,管道的铺设会增大海底土体超孔隙水压力累积程度,当管道发生振动时,海床土体超孔隙水压力累积程度进一步增大,从而增加了土体液化势。此外,波高增加也会导致海床土体的超孔隙水压力累积程度增大。本文研究成果对管道-土体相互作用研究和海底管道维护具有指导意义。

关键词:水槽实验; 粉质海床; 随机波浪; 管道振动; 孔压响应

中图分类号: P736

文献标识码: A

DOI: 10.16028/j.1009-2722.2022.170

0 引言

随着海洋油气资源的开发,海底管道作为海洋油气储运系统的重要组成部分,被誉为海洋油气田的“生命线”^[1],海底管道的安全问题一直广受关注。由于沉积环境、土体成分及天然固结状态等条件的不同,使得海床土体的物理特性及其工程特性存在较大的各向异性。海床土体经受自重、波浪以及风暴潮等复杂环境的荷载作用,使得海底管道或海床土体处于复杂的应力状态,其在海床冲刷、地形起伏、人为扰动等作用下,可能造成管道悬跨。悬跨管道在波浪或洋流作用下可能会发生涡激振动,这已被广泛认为是导致管道疲劳损坏的关键因素^[2-3]。因此,研究波浪作用下管道与土体相互作用对海底管道安全运行具有重要的意义。

悬空管道的稳定性主要受其跨肩土体性质的影响^[4-5],而波浪作用下粉砂质海床内部会产生超孔隙水压力,破坏原始固结海床土体颗粒骨架,削弱

海床强度,甚至导致土体液化^[6-7],这是影响管道安全的主要因素之一^[8-9]。因此,国内外学者广泛研究了波浪荷载下海底管道周围海底土体液化潜力^[6,10-15],以及土体液化后海底管道的稳定性^[16-21]。值得注意的研究包括波浪^[6,10-15]和地震^[22-24]影响下海底管道周围的孔隙水压力累积和土体液化潜力,以及海底管道在液化土上的稳定性^[7,16,25-26]。然而,目前对于管道振动与其周围土壤之间的相互作用研究较少。当管道振动时,与海底接触的管段会对土体施加波动压力,这可能会导致超孔隙压力累积,甚至可能导致粉质海床液化,这一过程可能会显著加速跨肩处海床的侵蚀^[27-30],并影响管道的稳定性^[4]。

SUMER等^[19]和XU等^[5]进一步研究了超孔隙水压力的发展和悬跨段土体液化对管道失稳的影响。首先,土体液化削弱了土骨架对管道的支撑作用,使得悬跨管道的有效支撑区域向悬跨段的两侧移动,增大了实际悬跨长度。管道在液化土体中可能上浮或下沉,甚至出现位置偏移。其次,根据CLUKEY等^[27]和ZHANG等^[29]的研究发现,海床液化也会降低泥沙运动的临界速度,因此,悬跨管道两端起支撑作用的土体冲刷速度加快,悬跨长度在短时间内增大,对于连续悬跨的管道来说,一旦管道发生振动,悬跨段两端的土体可能短时间内被快速冲刷,导致管道的悬跨长度迅速增大,严重威胁管道安全。此外,悬跨管道两端与土体接触处

收稿日期: 2022-05-30

资助项目: 国家自然科学基金(41976198); 山东省自然科学基金(ZR2022QD074); 中国石化胜利油田科技攻关项目(YKB2113, YKD2303)

作者简介: 徐兴雨(1987—),男,博士,工程师,主要从事海洋地质与灾害地质方面的研究工作。E-mail: x.xy1220@163.com

的边界条件可能会从最初的弹性支撑变为塑性支撑,因此,悬跨系统的固有频率可能会发生变化^[31],导致管道的振动状态和悬空状态发生改变^[32-33],甚至悬跨管道的弯曲挠度可能会增大,增加管道损坏的风险。

由此可见,国内外学者对海床土体的超孔隙水压力响应问题进行了较多的试验研究,并对海底管道的稳定性问题进行了探索。然而,过去的研究未能深入研究管道振动对粉土质海床超孔隙水压力累积的贡献,且在实际工作中,管道常处于悬跨状态,悬跨管道发生涡激振动后与海床土体接触的管道部分对海床施加周期性载荷作用^[34],这一过程可以显著影响沉积物性质以及海底管道的稳定性^[4,11]。本研究通过进行一系列室内水槽试验,在管道上安装振动装置,模拟海底悬空管道传导至入泥管段处的振动,研究不同波浪荷载下管道周围海床超孔隙

水压力响应规律,这对海底管道的稳定性研究具有重要参考价值。

1 实验方法

1.1 实验水槽及仪器

在中国海洋大学海洋工程重点实验室的宽断面波流水槽中进行实验,实验水槽尺寸为长 60 m,宽 3 m,高 1.5 m。水槽一端为液压驱动的活塞式造波机,另一端为坡比为 1:3 的多孔塑料型消波区,为一倾斜面,由消能网格、碎石、仿生草坪等组成,这些设施可减少反射波浪对实验的影响。距造波机 30 m 处有一坡度比为 1:25 的斜坡。距造波机 38 m 处有一长 3 m、宽 3 m、深 0.5 m 的嵌入式土槽(图 1),用于模拟试验海床。

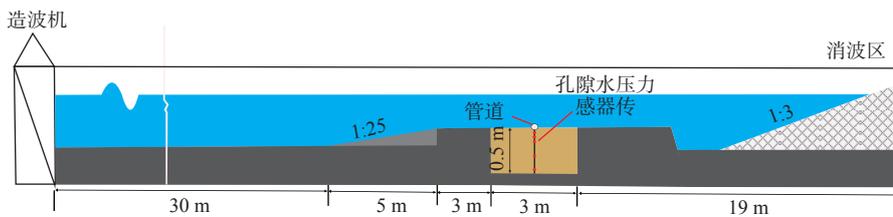


图 1 室内模拟试验的宽断面波流水槽布局图

Fig.1 The layout of the wide wave-flume in the experiment

管道周围土体的孔隙水压力测定采用 YY-2B 型压阻式孔隙水压力传感器,孔隙水压力传感器分别安装在土槽中线处固定支架的 5 个深度,即在 z 为 5、10、15、30、45 cm 处各放置一个,其中 z 为从泥面向下的垂直距离。

管道的管径为 5 cm,长 2.9 m,管道处于半埋状态,固定安装在土槽中线。因实验条件所限,管道难以在水槽内自振,故使用偏心轮振动器(长 10 cm,直径 4 cm)对管道施加振动。在振动器安装时,用防水膜将振动器密封起来,用胶带固定安装在管道外壁,安装位置如图 2 所示。

实验用土取自黄河口附近潮滩。收集的沉积物经晾晒、粉碎、过筛去除土中杂质制成实验用土。实验时将实验用土加水搅拌,并将水土混合体转移至土槽中使其自由固结 48 h。图 3 为实验用土的粒径累积分布曲线,本次试验用土的平均粒径 d_{50} 为 45.6 μm ,黏粒含量为 7.75%,塑性指数 I_p 为 9。

1.2 实验设计与流程

实验利用常规 JONSWAP 谱(Joint North Sea

Wave Project, J 谱)^[35]产生了一系列不同有效波高和平均周期的随机波,试验波况条件见表 1。每次试验中,波浪持续作用 1200 s,共 4 个试验波况(Test 1、Test 2、Test 3、Test 4),总计 13 组试验。同组波况中的相邻 2 次试验间隔 30 min,以保证试验水槽中的悬浮泥沙完全沉降。波况 Test1 用来研究未铺设管道的海床土体超孔隙水压力响应特征,

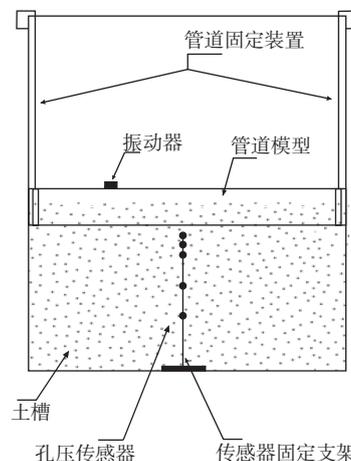


图 2 室内模拟试验的宽断面波流水槽侧视图

Fig.2 The layout of the wide wave-flume in the experiment

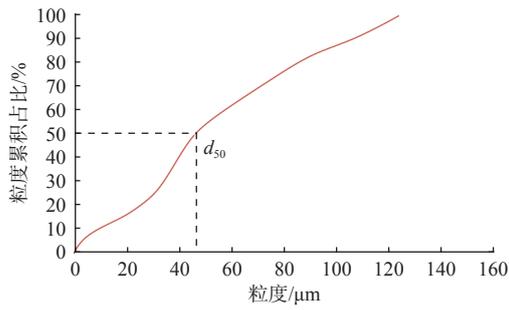


图 3 试验用土的粒径累积分布曲线

Fig.3 The cumulative distribution curve of particle size of the test soil

波况 Test 2 用来研究静止管道周围海床土体超孔隙水压力响应特征, 波况 Test 3、Test 4 设立的目的是研究振动管道在不同波浪参数下的海床土体超孔隙水压力响应特征。

表 1 试验条件简表

Table 1 Summary of the experimental conditions

实验序号	水深 D/cm	有效波高 H/cm	平均周期 T/s	振动荷载
Test1-1		10		
Test1-2	50	14	2	无管道
Test1-3		16		
Test2-1		10		
Test2-2	50	14	2	否
Test2-3		16		
Test3-1		10		
Test3-2	50	14	2	是
Test3-3		16		
Test4-1			1.5	
Test4-2			2	
Test4-3	50	14	2.2	是
Test4-4			2.5	

1.3 实验数据处理方法

1.3.1 累积孔隙水压力的计算

在波浪荷载作用下, 超孔隙水压力和土体有效应力的变化是反映土体状态变化的重要指标, 累积孔隙压力的变化可以用来判断土体是否发生液化^[36]。

计算某一深度处的超孔隙水压力为:

$$P_e = P_m - P_0 \quad (1)$$

式中: P_e 为超孔隙水压力, Pa;

P_m 为实测孔隙水压力, Pa;

P_0 为静水孔隙水压力, Pa。

累积孔隙水压力的定义为波动引起的超孔隙水压力的平均发展, 表示为^[9]:

$$\bar{P} = \frac{1}{T} \int_t^{t+T} P_e dt \quad (2)$$

式中: \bar{P} 为累积孔隙水压力(通过计算周期平均孔隙水压力得到), Pa;

T 为周期, s;

t 为波浪作用时间, s。

静水条件下土体初始平均法向有效应力 σ'_0 为^[6,9]:

$$\sigma'_0 = (\gamma_{\text{sat}} - \gamma_w) z \frac{1 + 2k_0}{3} \quad (3)$$

式中: k_0 为侧向静压力系数, 本文通过取样测试得出 $k_0=0.57$;

z 为海床深度;

$\gamma_{\text{sat}} - \gamma_w$ 表示土的有效重度, 通过实验前取样测得, 对于非液化海床取 8.46 kN/m^3 。

根据式(2)、(3)可知, 当最大累积孔隙水压力(\bar{P}_{max})达到相应深度的上覆土层初始平均法向有效应力 σ'_0 时, 该深度土层则处于液化破坏临界状态; 当 $\bar{P}_{\text{max}} < \sigma'_0$, 则该深度土层稳定, 当 $\bar{P}_{\text{max}} > \sigma'_0$ 时, 土层则发生液化破坏, 土体的稳定程度与被破坏程度均与 $\bar{P}_{\text{max}}/\sigma'_0$ 的比值有关^[18,37-39]。

为了使土体液化结果更加直观, 采用液化度 Y 来衡量土体液化度, Y 定义为^[37-38]:

$$Y = \frac{\bar{P}}{\sigma'_0} \times 100\% \quad (4)$$

式中: \bar{P} 为累积孔隙水压力, Pa。

Y 值在 $0 \sim 100$ 之间变化, Y 值越大, 土体越接近液化状态, 越容易发生移动和坍塌。

1.3.2 皮尔逊相关系数

本文利用皮尔逊相关系数(Pearson correlation coefficient, r)来度量孔隙水压力幅值与管道状态、不同波浪参数之间的相关性, 其值介于 -1 与 1 之间^[39]。

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2}} \quad (5)$$

式中: r 为样本 X 和 Y 之间的皮尔逊相关系数;

\bar{X} 和 \bar{Y} 分别为样本 X 和 Y 的样本平均值。

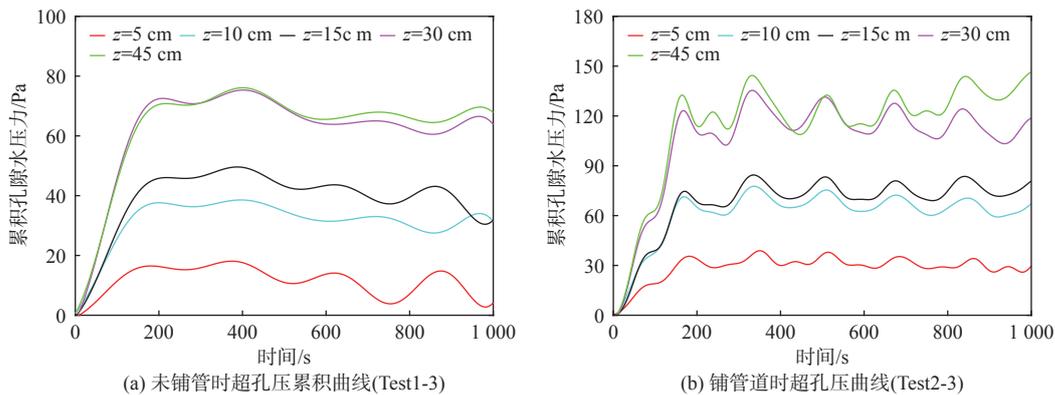
$r > 0$ 代表两样本之间为正相关, 且值越大相关性越强; $r < 0$ 代表两样本之间为负相关, 且值越小负相关性越强。本文认为 $|r| > 0.5$ 代表两样本之间强相关; $0.3 < |r| < 0.5$ 代表两样本之间中等程度相关; $0.1 < |r| < 0.3$ 代表两样本之间弱相关; $|r| < 0.1$ 代表两样本之间无相关。

2 实验结果

2.1 静止管道对海床土体超孔隙水压力的影响

通过 Tests 1-3 和 Tests 2-3, 反映了未铺管(图 4a)与铺管(图 4b)的海床土体累积孔隙水压力响应特征, 其中不同颜色代表不同海床深度, 图 4a 中虚线表示各深度累积孔隙水压力达到最大值的时间。通过对比图 4a 与图 4b 表明, 在 2 种管道条件下海床各深度处土体都出现了超孔隙水压力的累积现象, 且随着土体深度的增加累积孔隙水压力越大。在未铺设管道条件下, 波浪作用初期, 海床土体各深度超孔隙水压力开始迅速累积, $z=5$ cm 深度处的累积孔隙水压力最先($t=375$ s)达到峰值(18 Pa), 随

后海床 z 为 10、15、30、45 cm 处的累积孔隙水压力依次达到最大值(时间 t 分别为 388、392、409、419 s), 各层累积孔隙水压力最大值分别为 39、50、76、78 Pa(图 4a 虚线), 且各深度达到最大值的时间存在明显的时间滞后现象, 这是由于海床为流固两相介质, 波压力在海床内部传播需要时间。各深度海床土体累积孔隙水压力在达到最大值后开始发生缓慢的消散(图 4a)。对于铺设静止管道的土体内部累积孔压随着波浪的加载逐步上升直到波浪作用结束, 且累积孔压上下波动较大(图 4b)。因此, 管道的铺设将导致海床土体超孔隙水压力响应更加强烈, 铺设管道条件下海床土体超孔隙水压力累积程度明显高于未铺设管道条件下的累积程度, 这说明管道铺设更容易导致海床土体的超孔隙水压力的累积, 导致土体具有更高的液化势。



波况: 水深 $D=50$ cm, 有效波高 $H=16$ cm, 平均周期 $T=2$ s

图 4 随机波作用下未铺管与铺管的土体累积孔隙水压力响应特征

Fig. 4 Accumulative pore water pressure in test soil with and without pipeline under random wave

2.2 振动管道对海床土体超孔隙水压力的影响

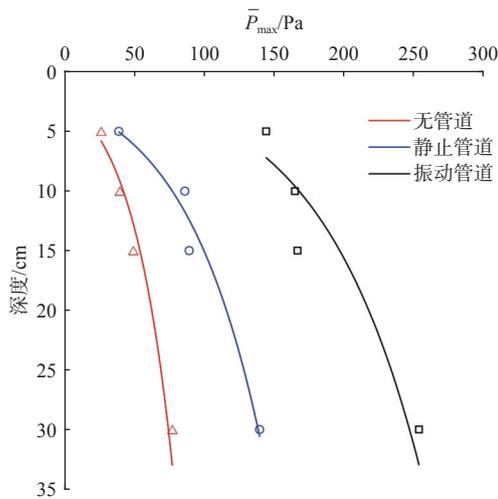
为了研究管道发生振动以后对土体的影响, 通过 Test 3, 反映了未铺管、铺静止管和对管道施加振动 3 种情况下海床土体的最大累积孔隙水压力随海床深度的变化(图 5)。从图 5 可以看出, 在无管道、管道静止和管道振动 3 种状态下海床土的最大累积孔隙水压力均随着海床深度的增加而增大。管道振动时各深度海床累积孔隙水压力最大值要明显高于未铺设和铺设静止管道的情况, $z=10$ cm 时, 管道振动状态下累积孔隙水压力最大值($\bar{P}_{\max}=163.97$ Pa)为无管道情况($\bar{P}_{\max}=39.01$ Pa)的 4 倍和静止管道情况下($\bar{P}_{\max}=85.45$ Pa)的 2 倍。说明管道在振动状态下对海床土体超孔隙水压力的累积贡献较大, 产生这种现象的主要原因是管道振动进一

步导致土体压缩, 土体中孔隙水来不及排出, 超孔隙水压力可能瞬时达到峰值, 使海床土体发生液化的可能性增大。以上分析表明, 管道发生振动以后对海底土体的稳定性有重要影响, 波浪条件相近的情况下, 振动管道周围海床孔隙水压力累积程度更高, 对海床土体的液化起促进作用。

2.3 波浪参数对振动管道周围土体超孔隙水压力的影响

2.3.1 波高对振动管道周围土体孔压响应的影响

为了更直观地获得波浪波高对振动管道情况下海床土体累积孔隙水压力的影响, 绘制了周期和水深相近而波高不同情况下最大累积孔隙水压力随海床深度的分布, 对于波高 H 分别为 10、14、16 cm 的实验结果如图 6 所示。从图中可以看出,



波况: 水深 $D=50$ cm, 有效波高 $H=16$ cm, 平均周期 $T=2$ s

图 5 相同波浪荷载不同管道状态条件下土体累积孔隙水压力随深度的变化

Fig.5 Variation in the maximum accumulated pore water pressure with soil depth under the same wave load condition and different pipeline states

随机波浪引起的最大累积孔隙水压力随海床深度的增加而增加。此外, 在相同海床深度下, 随着波高的增大, 振动管道海床土体最大累积孔隙水压力也随之增大, 这是因为作用于海床表面的波能 E 越来越大 ($E \approx H^2 \times L$, L 为波长), 从而增强了管道周围的海床超孔隙水压力响应。特别是海床近表层时, 这种影响更为显著。由此表明, 累积孔隙水压力与波浪的波高成正比例关系, 越大的波高作用于海床时, 海床的超孔隙水压力累积程度越高, 更有利于海床发生液化。

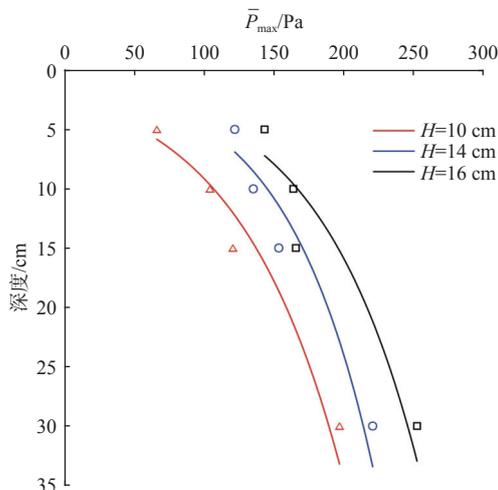


图 6 不同波高条件下振动管道周围土体累积孔隙水压力随深度的变化 (Test 3)

Fig.6 Variation of the maximum accumulated pore water pressure with soil depth around vibrating pipe under different wave heights (Test 3)

2.3.2 波浪周期对振动管道周围土体孔压响应的影响

图 7 绘制了随机波的周期 T 对振动管道条件下海床超孔隙水压力的影响, 给出了 T 分别为 1.5、2.0、2.2 和 2.5 s 的实验结果。由图 7 可以看出, 最大累积孔隙水压力也随着海床深度的增加而增加。在管道振动状态下, 波浪周期越大, 振动管道海床土体的最大累积孔隙水压力越小; 波浪周期越小, 振动管道海床土体的最大累积孔隙水压力越大。这可能是因为, 在振动管道状态下, 短周期波浪对土体的周期性荷载作用频率较高, 使土体超孔隙水压力来不及消散, 从而导致超孔隙水压力累积程度较高。

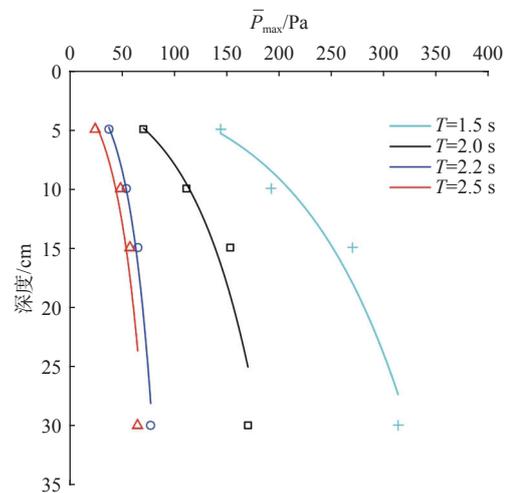


图 7 不同周期条件下振动管道周围土体累积孔隙水压力随深度的变化 (Test 4)

Fig.7 Variation of the maximum accumulated pore water pressure with soil depth under different period conditions (Test 4)

3 讨论

波浪的强度以及管道振动状态是影响海床土体内部超孔隙水压力的重要因素, 超孔隙水压力和土体有效应力的变化是反映土体状态变化的重要指标, 累积孔隙压力的变化可以用来判断土体是否发生液化。然而, 在海床发生液化的过程中, 波浪荷载和管土耦合作用发生复杂的变化, 通过前面的实验结果已知在海床发生液化的过程中, 海床土体内部的累积孔隙水压力与波浪的波高、周期以及存在管道和管道发生振动等影响因子关系密切。本文利用 Pearson 相关系数定量分析累积孔隙水压力与各影响因子之间的相关性^[39-40]。

从表 2 可以看出, \bar{P}_{max} 与管道是否存在的相关

性为中等程度相关($r=0.486$),说明海床铺设管道后会加剧超孔隙水压力的累积,从而影响海床土体的稳定性。 \bar{P}_{max} 与振动管道的相关性最高,为强相关($r=0.557$),表明管道振动对海床土体超孔隙水压力的累积贡献较大,管道发生振动后会加大土体的液化度,进而破坏海床土体稳定性。 \bar{P}_{max} 与波浪有效

波高的相关性相对较弱($r=0.267$), \bar{P}_{max} 与波浪周期呈负相关关系($r=-0.158$),表明波浪荷载条件的改变也会影响超孔隙水压力的累积。相关分析结果进一步定量验证了累积孔隙水压力与各影响因子之间是相互关联的,且管道振动对累积孔隙水压力的贡献较大。

表 2 最大累积孔隙水压力 (\bar{P}_{max}) 与波浪和管道条件之间的皮尔逊相关系数

Table 2 Pearson correlation coefficient between the maximum cumulative pore water pressure (\bar{P}_{max}) and wave/pipeline conditions

	波高	平均周期	管道存在	管道振动
最大累积孔隙水压力 \bar{P}_{max}	0.267*	-0.158	0.486**	0.557**

注: * \bar{P}_{max} 受某变量影响的置信区间在95%以上; ** \bar{P}_{max} 受某变量影响的置信区间在99%以上; 相关性分析样本数量 $N=84$ 。

为了进一步探究累积孔隙水压力对海床液化度的影响,根据式(4)对海床土体的液化度进行量化。当累积孔隙水压力达到最大值时,土体稳定状态最具有代表性,因此,采用最大累积孔隙水压力 \bar{P}_{max} 来计算最大液化度 Y_{max} 值及各管道状态下各海床深度处平均最大液化度 \bar{Y}_{max} ^[37]。表3为不同管道状态下不同海床深度的最大累积孔隙水压力 \bar{P}_{max} 与液化度 Y 统计表。根据最大液化度 Y_{max} 可以看出,

相同管道状态下随着土体深度的加深, Y_{max} 减小,这说明波浪及管道振动对土体的影响随海床深度的加深逐渐减小;相同波浪荷载作用下,振动管道状态下海床土体的最大液化度在深度 $z=5$ cm时最大($Y_{max}=47.56$),接近半液化状态($Y_{max}=50$)。根据平均最大液化度 \bar{Y}_{max} 可知,管道振动时的平均液化度($\bar{Y}_{max}=26.75$)要明显大于无管道($\bar{Y}_{max}=6.14$)和管道静止($\bar{Y}_{max}=11.07$)情况下的平均液化度。

表 3 不同管道状态下不同深度处海床累积孔压 \bar{P}_{max} 与液化度 Y 统计

Table 3 Statistics of accumulated pore pressure and liquefaction degree at different depths under different pipeline conditions

管道状态	孔压测量深度 z/cm	最大累积孔隙水压力 \bar{P}_{max}/Pa	有效应力 σ'_0/Pa	最大液化度 $Y_{max}/%$	最大液化度平均值 \bar{Y}_{max}
无管道(Test1-3)	5	25.59	301.74	8.48	6.14
	10	39.019	603.48	6.46	
	15	48.74	905.22	5.38	
	30	76.41	1 810.44	4.22	
静止管道(Test2-3)	5	38.27	301.74	12.68	11.07
	10	85.45	603.48	14.16	
	15	88.43	905.22	9.77	
	30	138.80	1 810.44	7.67	
振动管道(Test3-3)	5	143.50	301.74	47.56	26.75
	10	163.97	603.48	27.17	
	15	165.97	905.22	18.33	
	30	252.57	1 810.44	13.95	

注: 波况条件为水深 $D=50$ cm, 波高 $H=16$ cm, 周期 $T=2.0$ s。

从表3中可以看出,在本次实验中所有管道状态下,最大液化度均没有达到100%,即土体并未发生液化现象,这可能是由于实验波浪远比自然条件下的波浪弱,但由表中数据可以看出管道振动确实会导致超孔隙水压力的累积。这是因为管道存在并发生振动后会增大超孔隙水压力的累积,由波浪引起的海底压力以及管道振动转移到土体中孔压能量会通过土颗粒、管道外围传播到海床深层,进

而增大孔压累积程度,使土体具有更高的液化度,说明管道发生振动更加有利于液化现象的发生,从而破坏管道稳定性。2021年,XU等^[36]监测了黄河三角洲在波浪作用下不同深度的孔隙压力响应,并量化了不同波浪条件下的液化深度,发现海床液化首先发生在表层土壤中,然后向下发展,平均发展速度约为0.17 m/min。由此说明在野外条件下,由于波浪与管道、海床土体的共同作用要远大于实验

条件,因此在真实海洋环境中的液化现象更加显著。

4 结论

本文通过一系列大型室内水槽实验,对随机波作用下海床土体的超孔隙水压力进行同步观测,研究随机波作用下管道周围海床土体超孔隙水压力的响应特征,并利用皮尔逊相关系数探讨超孔隙水压力幅值与各影响因子之间的相关性,研究结果表明:

(1)管道的存在会增大海底土体超孔隙水压力累积程度,从而使土体液化潜力增大,增加土体液化发生的可能;当管道发生振动时,海床土体超孔隙水压力累积程度进一步增大,使土体具有更高的液化势。

(2)波浪条件的变化对海床土体的超孔隙水压力响应也有重要影响,波高增加会导致海床土体的超孔隙水压力累积程度增大,更有利于海床发生液化;波浪周期增大,超孔隙水压力的累积程度减小。

(3)根据皮尔逊相关系数,实验中最大累积孔隙水压力 \bar{P}_{\max} 与存在管道的相关性为中等程度相关; \bar{P}_{\max} 与振动管道的相关性最高,为强相关。结果表明管道振动对土体孔隙水压力累积有重要影响。

参考文献:

- [1] 邓海峰. 随机波浪作用下海底管线和海床相互作用研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2014.
- [2] BLEVINS R D, SAUNDERS H. Flow induced vibration[J]. *Journal of Mechanical Design*, 1979, 101(1): 6.
- [3] MANAN A, KAMAL K, RATLAMWALA T A H, et al. Failure classification in natural gas pipe-lines using artificial intelligence: a case study[J]. *Energy Reports*, 2021, 7: 7640-7647.
- [4] FORAY P, BONJEAN D, MICHALLET H, et al. Fluid-soil-structure interaction in liquefaction around a cyclically moving cylinder[J]. *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, 2006, 132(4): 289-299.
- [5] XU J S, XU X Y, ZHANG Y Q, et al. Experimental study on the influence of pipeline vibration on silty seabed liquefaction[J]. *Water*, 2022, 14(11): 1782.
- [6] SUMER B M, HATIPOGLU F, FREDSE J, et al. The sequence of sediment behaviour during wave-induced liquefaction[J]. *Sedimentology*, 2006, 53(3): 611-629.
- [7] MÖRZ T, KARLIK E A, KREITER S, et al. An experimental setup for fluid venting in unconsolidated sediments: new insights to fluid mechanics and structures[J]. *Sedimentary Geology*, 2007, 196(1/4): 251-267.
- [8] Pipeline Flotation Research Council. ASCE preliminary research on pipeline flotation[J]. *Journal of the Pipeline Division*, 1966, 92(1): 27-74.
- [9] CHRISTIAN J T, TAYLOR P K, YEN J K C, et al. Large diameter underwater pipe line for nuclear power plant designed against soil liquefaction[C]//Proceedings of the Sixth Annual Offshore Technology Conference. Houston: Offshore Technology Conference, 1974: 597-606.
- [10] SUMER B M, TRUELSEN C, FREDSE J. Liquefaction around pipelines under waves[J]. *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, 2006, 132(4): 266-275.
- [11] DUNN S L, VUN P L, CHAN A H C, et al. Numerical modeling of wave-induced liquefaction around pipelines[J]. *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, 2006, 132(4): 276-288.
- [12] ZHOU X L, ZHANG J, GUO J J, et al. Cnoidal wave induced seabed response around a buried pipeline[J]. *Ocean Engineering*, 2015, 101: 118-130.
- [13] ZHAO H Y, JENG D S, LIAO C C. Parametric study of the wave-induced residual liquefaction around an embedded pipeline[J]. *Applied Ocean Research*, 2016, 55: 163-180.
- [14] LIANG Z D, JENG D S, LIU J W. Combined wave-current induced seabed liquefaction around buried pipelines: design of a trench layer[J]. *Ocean Engineering*, 2020, 212: 107764.
- [15] ZHAO H Y, LIU X L, JENG D S, et al. Numerical investigation into the vulnerability to liquefaction of an embedded pipeline exposed to ocean storms[J]. *Coastal Engineering*, 2022, 172: 104056.
- [16] DAMGAARD J, PALMER A. Pipeline stability on a mobile and liquefied seabed: a discussion of magnitudes and engineering implications[C]//Proceedings of the 20th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering. Rio de Janeiro, 2001.
- [17] TEH T C, PALMER A C, BOLTON M D, et al. Stability of submarine pipelines on liquefied seabeds[J]. *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, 2006, 132(4): 244-251.
- [18] SUMER B M, FREDSE J, CHRISTENSEN S, et al. Sinking/floatation of pipelines and other objects in liquefied soil under waves[J]. *Coastal Engineering*, 1999, 38(2): 53-90.
- [19] SUMER B M, HATIPOGLU F, FREDSE J, et al. Critical flotation density of pipelines in soils liquefied by waves and density of liquefied soils[J]. *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, 2006, 132(4): 252-265.
- [20] TIAN Y H, YOUSSEF B, CASSIDY M J. Assessment of pipeline stability in the Gulf of Mexico during hurricanes using dynamic analysis[J]. *Theoretical and Applied Mechanics Letters*, 2015, 5(2): 74-79.
- [21] ZHAO K, WANG Q Z, CHEN S, et al. Dynamic response of pipelines in liquefiable seabed under nature loadings: waves and currents[J]. *Ocean Engineering*, 2021, 230: 109051.
- [22] REIMNITZ E, MARSHALL N F. Effects of the Alaska earthquake and tsunami on recent deltaic sediments[J]. *Journal of*

- [Geophysical Research](#), 1965, 70(10): 2363-2376.
- [23] LUAN M T, ZHANG X L, YANG Q, et al. Numerical analysis of liquefaction of porous seabed around pipeline fixed in space under seismic loading[J]. [Soil Dynamics and Earthquake Engineering](#), 2009, 29(5): 855-864.
- [24] SAEEDZADEH R, HATAF N. Uplift response of buried pipelines in saturated sand deposit under earthquake loading[J]. [Soil Dynamics and Earthquake Engineering](#), 2011, 31(10): 1378-1384.
- [25] DAMGAARD J S, SUMER B M, TEH T C, et al. Guidelines for pipeline on-bottom stability on liquefied noncohesive seabeds[J]. [Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering](#), 2006, 132(4): 300-309.
- [26] TEH T C, PALMER A C, DAMGAARD J S. Experimental study of marine pipelines on unstable and liquefied seabed[J]. [Coastal Engineering](#), 2003, 50(1/2): 1-17.
- [27] CLUKEY E C, KULHAWY F H, LIU P L F, et al. The impact of wave loads and pore-water pressure generation on initiation of sediment transport[J]. [Geo-Marine Letters](#), 1985, 5(3): 177-183.
- [28] ZHANG S T, JIA Y G, WANG Z, et al. Wave flume experiments on the contribution of seabed fluidization to sediment re-suspension[J]. [Acta Oceanologica Sinica](#), 2018, 37(3): 80-87.
- [29] ZHANG S T, JIA Y G, ZHANG Y Q, et al. Influence of seepage flows on the erodibility of fluidized silty sediments: parameterization and mechanisms[J]. [Journal of Geophysical Research: Oceans](#), 2018, 123(5): 3307-3321.
- [30] SASSA S, TAKAYAMA T, MIZUTANI M, et al. Field observations of the build-up and dissipation of residual pore water pressures in seabed sands under the passage of storm waves[J]. [Journal of Coastal Research](#), 2006(39): 410-414.
- [31] PU J J, XU J S, LI G X. Experimental study on damping characteristics of pipe vibration in liquefied silt[C]//Proceedings of the 23rd International Offshore and Polar Engineering Conference. Anchorage: International Society of Offshore and Polar Engineers, 2013: 266-271.
- [32] Det Norske Veritas, DNV. Free spanning pipelines[Z]. DNV-RP-F105, Høvik, Norway, 2006.
- [33] YAGHOUBI M, MAZAHERI S, JABBARI E. Determining natural frequency of free spanning offshore pipelines by considering the seabed soil characteristics[J]. [Journal of the Persian Gulf \(Marine Science\)](#), 2012, 3(8): 25-34.
- [34] TZANG S Y, OU S H. Laboratory flume studies on monochromatic wave-fine sandy bed interactions: part 1. soil fluidization[J]. [Coastal Engineering](#), 2006, 53(11): 965-982.
- [35] GODA Y. A comparative review on the functional forms of directional wave spectrum[J]. [Coastal Engineering Journal](#), 1999, 41(1): 1-20.
- [36] XU X B, XU G H, YANG J J, et al. Field observation of the wave-induced pore pressure response in a silty soil seabed[J]. [Geo-Marine Letters](#), 2021, 41(1): 13.
- [37] 张丽萍. 黄河口沉积物液化度与再悬浮关系研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2013.
- [38] 徐兴雨, 齐静静, 陈凯, 等. 埕岛油田海底管道悬空特征及其影响因素[J]. [海洋地质前沿](#), 2023, 39(1): 77-84.
- [39] JIA Y G, ZHANG L P, ZHENG J W, et al. Effects of wave-induced seabed liquefaction on sediment re-suspension in the Yellow River Delta[J]. [Ocean Engineering](#), 2014, 89: 146-156.
- [40] 张河苇. 基于大数据分析的管道缺陷评估及预测方法研究[D]. 北京: 中国石油大学(北京), 2020.

Influence of submarine pipeline vibration on soil liquefaction under random wave

XU Xingyu^{1,2}, QI Jingjing¹, XU Jishang³, LIU Fuxing⁴, LI Jianing⁴, WANG Weibin¹, XU Tao¹, ZHANG Yaxin⁴

(1 Technology Inspection Center of Shengli Oilfield, SINOPEC, Dongying 257062, China; 2 Shengli Oil Field Postdoctoral Research Station,

SINOPEC, Dongying 257062, China; 3 College of Marine Geosciences, Ocean University of China, Qingdao 266100, China;

4 Shengli Oilfield Inspection and Evaluation Co., Ltd., SINOPEC, Dongying 257062, China)

Abstract: The interaction of submarine pipeline, soil, and water strongly affects the stability of submarine pipeline. However, the research on the change of soil properties around submarine pipeline under wave action is insufficient. The response of excess pore water pressure under wave load and pipeline vibration was studied in a series of laboratory wave flume tests. Results show that the existence of pipeline increased the accumulative pore water pressure of soil, thus enhancing the liquefaction potential of seabed. The pipeline vibration increased the accumulation degree of excess pore water pressure. In addition, wave conditions alter the response of seabed to the excess pore water pressure, namely, the increase of wave height intensify the accumulative pore water pressure. This study provided a guide to studying the pipe-soil-mass interaction and the submarine pipeline maintenance.

Key words: water tank experiment; silty seabed; random waves; pipeline vibration; pore pressure response