

DOI: 10.16562/j.cnki.0256-1492.2018.02.021

波浪作用下海底粉土孔隙水压力响应过程监测研究

宋玉鹏^{1,2}, 孙永福², 杜星², 曹成林², 李淑玲²

1. 中国海洋大学海洋地球科学学院, 青岛 266010

2. 国家海洋局第一海洋研究所, 青岛 266061

摘要:波浪引起的海底土体内部孔压累积是导致液化发生的主要原因, 研究波浪作用下土体内部孔压响应过程对于明确液化机理、预测液化发生具有重要作用。在黄河口使用自行研发的孔压监测设备对海底粉土孔隙水压力进行了有效监测。监测结果显示, 海底粉土的孔压变化主要受波浪影响且存在一定的影响范围, 超出该范围则波浪对海底粉土的孔压无影响。同时, 基于监测过程内的孔压变化对海底粉土进行了液化评判, 并对波浪作用效果和液化影响因素进行了探讨。波浪对海底粉土内部孔压影响效果主要有3种: (1)有孔压振荡但不发生累积; (2)有孔压振荡且发生累积; (3)无孔压振荡且不发生累积。

关键词:孔压响应; 波致孔压; 海底粉土; 孔压监测

中图分类号: P714

文献标识码: A

Monitoring of silt pore pressure responding process to wave action

SONG Yupeng^{1,2}, SUN Yongfu², DU Xing², CAO Chenglin², LI Shuling²

1. College of Marine Geosciences, Ocean University of China, Qingdao 266010, China

2. First Institute of Oceanography, SOA, Qingdao 266061, China

Abstract: Liquefaction under wave action is mainly caused by the pore pressure of seabed sediment. The mechanism of responding process of soil pore pressure to wave action is critical important to the understanding and prediction of liquefaction. The seabed silt pore pressure has been monitored for a long time in the Yellow River delta using the self developed pore pressure monitoring equipment. Monitoring results show that the change in pore water pressure is mainly determined by wave. And wave acts in a certain range, and there is no influence out of the range. Whether liquefaction was judged based on the change in pore water pressure in the monitoring process. Upon the above, the effect of wave action and the influence factors of liquefaction are discussed. There are three kinds of wave effects on pore pressures of seabed silt: a. there is pore pressure oscillation but no accumulation; b. there is pore pressure oscillation as well as accumulation; c. there is no pore pressure oscillation and accumulation.

Key words: pore pressure response; wave induced pore pressure; seabed silt; pore pressure monitoring

海底土液化是一种常见的地质灾害现象。液化后土体失去承载力, 对海底管道、海底光缆、海洋平台等工程设施构成显著影响。孔隙水压力在海底土液化过程中起着重要的作用。波浪的周期加载作用在砂土、粉土中产生超孔隙水压力, 其幅值是影响海床液化的主要控制因素^[1]。粉土性质介于砂土及黏性土之间, 其在波浪荷载作用下易于液化, 且孔隙水压力响应过程与砂土具有明显差异^[2]。

从20世纪40年代起, 波浪作用下海底土响应问题引起了国内外学者的广泛关注。Putnam^[3]、

Yamamoto^[4]、Sleath^[5]等对波浪-海床相互作用的理论进行了研究; Yamada^[6]、Yasuhara^[7]、郭莹^[8]等通过土工试验对波浪-海床相互作用进行了研究; Demars^[9]、Maeno^[10]、Tzang^[11]、Sumer^[12]、李安龙^[13]等开展了水槽模型试验来研究波浪对海底土的作用; Henkel^[14]、Clukey^[15]、Zen^[16]、Okusa^[17]等对波浪作用下海床液化过程与机理进行了探究。真实风浪作用下海底土的孔压监测工作也有所开展, 但进行的较少。Bennett^[18]早期在Mississippi三角洲地区监测了孔压, Okusa^[19]比较了监测值与理论

资助项目:国家海洋公益性行业科研专项“近海海底地质灾害预测评价及防控关键技术研究”(201005005); 青岛海洋科学与技术国家实验室鳌山科技创新计划项目“亚洲大陆边缘地质过程与资源环境效应”(2015ASKJ03); 山东省自然科学基金“细粒土侵蚀强度与冲刷深度量化研究”(ZR2014DP002)

作者简介:宋玉鹏(1979—), 男, 博士生, 主要从事海洋工程地质及灾害地质研究, E-mail: songyupeng@fio.org.cn

通讯作者:孙永福, 研究员, E-mail: sunyongfu@fio.org.cn

收稿日期:2016-04-21; **改回日期:**2016-07-11. 文凤英编辑

值的区别,Zen^[20]监测了日本 Hazaki 地区的孔压和有效应力,冯秀丽^[1]对波浪载荷下海底土孔压做了一定时间的现场监测。由于观测技术手段限制及真实海况复杂,目前仍然缺少大风浪作用下海底土的孔压变化监测数据。本文利用自行研发的监测设备,对黄河三角洲海域粉土海床进行了大风浪作用下长期、连续的孔压监测,通过有效数据的获取,分析真实风浪作用下海底粉土的孔压变化,进而更好地探究波致液化的相关问题。

1 监测设备及方法

1.1 监测设备

孔压监测设备为自行设计研发,主要由控制箱、孔压监测探杆及贯入机具组成。孔压监测探杆总长4.2m,内置4个压力传感器,完全贯入海底后各传感器距离海底面分别为0.5、1.5、2.5和3.5m。进行孔压监测时,先将监测探杆与贯入机具连接后吊放至海底,通过控制箱操控贯入机具将孔压监测探杆缓慢贯入海底,可精确控制贯入机具行程,待探杆完全贯入后即可回收贯入机具,数据采集频率为0.5Hz,存储方式为自容式。

1.2 监测区域及监测方法

监测区域为黄河三角洲埕岛油田海域,该区域为黄河多期次改道形成的复杂沉积体系,表层沉积物多为粉土沉积,在波浪作用下易于液化,伴生着发育多种灾害地质现象,该区域同时为胜利油田海上油气生产的主阵地,选取此区域开展监测工作具有较强的理论研究与实际应用价值。

根据监测区域的天气状况,选择该海域冬、春季多发大风时间段进行监测。监测设备布放前首先对监测区域进行地球物理调查及沉积物取样,查明监测区域的水深地形、地貌、浅层结构及工程地质特征,进而确定监测站位,随后精确布放监测探杆,并同时布放浊度计和波潮仪同步监测测站的悬沙浓度、水深、波浪以及潮位特征,待大风多发月份结束后回收探杆,对监测数据进行分析研究。探杆贯入海底时通过控制箱精确控制贯入步长,可将探杆完全贯入至海底泥面以下,仅保留上部数据舱在泥面以上,从而保证探杆与海底土紧密接触无空隙。数据舱长度为0.7m,其在泥面以上受波浪作用对探杆整体稳定性的影响很小,探杆完成贯入后及回收时均派潜水员检查探杆状态,结果表明探杆完全贯入至预定位置,状态稳定。监测区域及站位如图1

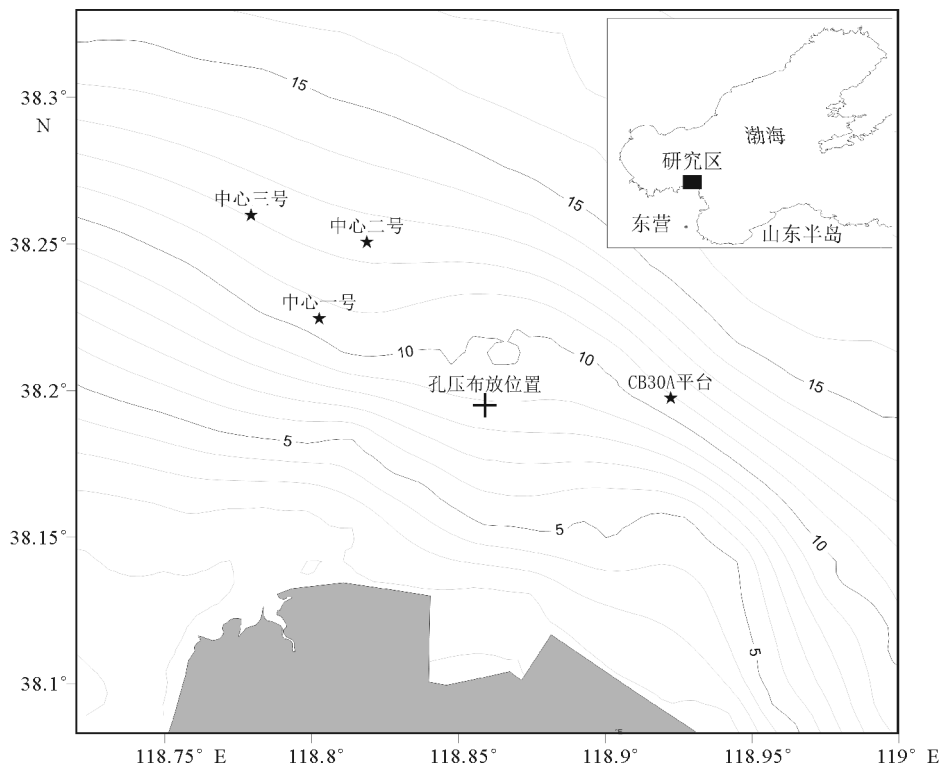


图1 监测站位图

Fig.1 Monitoring Location

所示,监测站位水深为 9.5m。

2 数据分析

2.1 海底土质参数

通过对监测站位进行地质取样及土工测试,海底 5m 以浅沉积物为粉土,其力学参数见表 1。

表 1 监测站位海底粉土力学参数统计

Table 1 Statics parameter of silt of monitoring location

参数	范围值	平均值
含水量/%	19.8~26.6	23.7
天然重度/(kN/m ³)	19.4~20.7	19.8
塑性指数/%	6.2~8.7	7.3
液性指数	0.21~0.85	0.60
黏聚力/kPa	15.3~23.6	19.0
内摩擦角/(°)	22.9~25.2	24.3
中值粒径/mm	0.062~0.065	0.063

2.2 波浪参数

监测期间共有多个大风浪过程,监测到的孔压数据形态特征类似。选取其中 1 个典型风浪过程进行具体分析,波浪参数为同步监测所得。大风浪过程为 3 月 2 日 22 时—3 月 4 日 20 时,其波高、周期参数见表 2,波高随时间变化见图 2。整个大风过程持续约 40h,最大波高可达 4.0m。

表 2 波浪参数统计

Table 2 Parametric statistics of wave

参数	范围值	平均值
最大波高/cm	36~395	201
有效波高/cm	21~227	126
周期/s	2.97~6.44	5.45

2.3 潮位参数

研究区主要潮汐类型为不规则半日潮,其主流向几乎与岸线平行,显示出往复流的性质。在此次大风过程内,具体潮位变化见图 3。研究过程内潮位共经历了约 3 次周期性变化,最大潮位可达 2.9m。

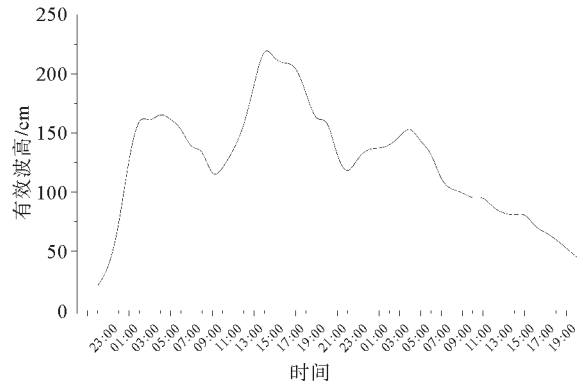


图 2 波高随时间变化

Fig.2 Wave height vary with time

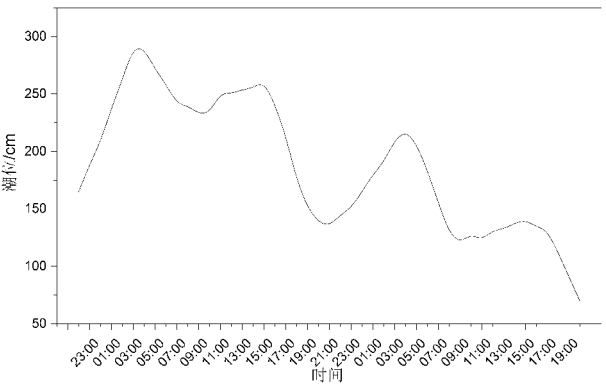


图 3 潮位随时间变化

Fig.3 Tide vary with time

2.4 海底孔压响应分析

风浪过程中总孔压随时间变化的趋势见图 4,各孔压传感器距海床距离分别为 0.5、1.5、2.5 及 3.5m。观察可发现 4 个深度位置的总孔压均呈周期性的波动变化,且变化趋势相同。对比图 3 与图 4 可发现总孔压变化趋势与潮位呈正相关,说明其受潮位变化影响较大,故进一步分析波浪对孔压影响时需剔除潮位的影响。将总孔压减去潮位变化产生的压力值,得到波浪变化对总孔压的影响见图 5。其中,1.5、2.5 和 3.5m 位置处孔压变化幅度较小,在大风过程内孔压数值只有较小的波动,说明该波浪条件下不足以对 1.5m 以深海底粉土的孔压形成较大的影响。0.5m 深度处孔压在 1:00 至次日 8:00 有较为明显的变化,表现为上下剧烈振荡的形式。这表明在该时间段内波浪对海底面以下 0.5m 深度内的粉土内部的孔压有着较大的影响,在波浪的作用下孔压不断上升、下降并反复循环,这与波浪的周期波动对应良好。将总孔压变化与图 2 波高变化相比较可发现,孔压剧烈振荡的时间段正是波高较大的时间,说明波高大小与影响到的海床深度存

在一定对应关系,波高大于一定值后才能够影响到相应的海床深度。

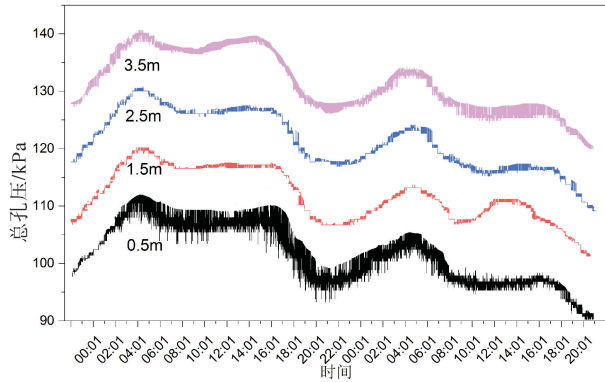


图 4 总孔压随时间变化

Fig.4 Total pore pressure vary with time

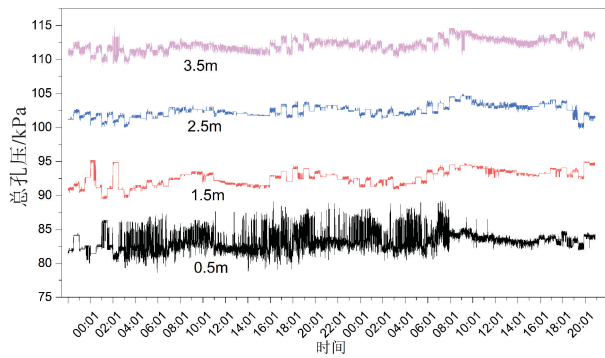


图 5 总孔压随时间变化(剔除潮位影响)

图中 0.5~3.5m 为传感器到海床的距离

Fig.5 Total pore pressure vary with time(without tide effect)

将总孔隙水压力减去静水压力即可得到超孔隙水压力。由于 1.5m 以深位置孔压并未发生明显的变化,故超孔压变化也不明显,现主要研究 0.5m 深度处的超孔压,见图 6 中的实线。在 3 月 3 日 2:00 之后超孔压迅速增大,随后迅速减小并如此反复。超孔压的变化受波高影响较为明显,波高小于 50cm 时超孔压一般不超过 2kPa;波高大于 100cm 小于 150cm 时超孔压不超过 4kPa;波高大于 150cm 时超孔压大于 4kPa。另外,超孔压在增大后并没有继续累积而是迅速减小,说明该波浪和土质条件下不足以产生明显的孔压累积现象。

3 液化评判

室内试验和现场测试的研究表明,波浪荷载作用下海床孔压响应的机理根据超静孔隙水压力增长

方式的不同可以分为两类,即与瞬时体积应变趋势有关的振荡孔压响应和由永久压密趋势引起的累积孔压增长^[16]。前者是由振荡波压力直接产生,在波浪作用过程中没有累积;后者会引起海床土体内部有效应力的逐步减少^[21]。相应地,由瞬时孔压增长导致的液化为瞬时液化,由累积孔压增长导致的液化称为累积液化,也叫残余液化。

由图 5 孔压监测数据可知,监测周期内孔压未发生明显累积,而以振荡响应为主。因此本次只开展波浪作用下海底土的瞬时液化判别,即为比较土体颗粒间超孔隙水压力与上覆土体有效应力的。当波浪在土层中产生的最大超孔隙水压力 $U_{\max}$ 与相应土层的上覆有效自重应力 σ' 相等时,土层处于极限平衡状态, $U_{\max} \leq \sigma'$ 时,则土体稳定,当 $U_{\max} > \sigma'$ 时,土层则发生液化现象。

假定海底为刚性,海底波浪压力为 P_b ,表达式为:

$$P_b = P_0 \sin(\lambda x - \omega t) \quad (1)$$

$$P_0 = \frac{\gamma_w H}{2 \cosh(\lambda d)} \quad (2)$$

$$\lambda = \frac{2\pi}{L} \quad (3)$$

式中, P_0 为海床表面波浪压力的峰值(kPa); λ 为波数(m^{-1}); ω 为圆频率; t 为时间(s); γ_w 为海水重度(kN/m^3); H 为有效波高(m); d 为水深(m); L 为波长(m)。

这里需要波高 H 和波长 L 两个关键参数,通过实测资料可以换算出有效波高 H 与周期 T ,浅水波长 L 则可以通过下式推算出:

$$L = L_0 \tanh\left(\frac{2\pi d}{L}\right) \quad (4)$$

$$L_0 = \frac{gT^2}{2\pi} \quad (5)$$

式中, L_0 为深水波长。

假定土骨架为弹性,孔隙水不可压缩,水在孔隙中呈层流的条件下,分析了无限土层受谐振波浪荷载的瞬态反应,对于无限土层,据 Yamamoto T^[3] 得到超孔隙水压力幅值随深度衰减的简单表达式:

$$U_{\max} = \frac{\gamma_w H}{2 \cosh(\lambda d)} e^{-\lambda z} \quad (6)$$

式中, z 为土层厚度(m)。

而相应土层的上覆有效自重应力 σ'

$$\sigma' = \gamma' z \quad (7)$$

式中, γ' 为土体浮容重(kN/m^3)。通过将最大超孔隙水压力 $U_{\max}$ 与相应土层的上覆有效自重应力 σ' 进行对比,便能判断在深度 z 下的液化可能性。

Jeng^[22]考虑侧向压力系数的影响后,表达式为:

$$\frac{\gamma_w H}{2 \cosh(\lambda d)} e^{-\lambda z} = \frac{1+2K_0}{3} \gamma' z \quad (8)$$

考虑到土体的各向异性,本文选取公式(8)作为液化判别标准,即采用三维准则,取土体的平均有效应力与最大超孔隙水压力进行比较,公式(8)中 K_0 为土体侧向压力系数,通过泊松比计算,取 0.538。

监测站位粉土平均有效容重为 9.8 kN/m^3 , 4 个传感器埋设深度分别为 0.5、1.5、2.5、3.5m, 所处位置处的有效自重应力分别为 3.36、10.07、16.79、23.5kPa。当超孔压达到土层上覆有效自重应力时,即发生瞬时液化。经分析得知 1.5m 以深土体超孔压均未达到液化标准,0.5m 位置在部分时间达到液化标准。现做出风浪过程 0.5m 深处的液化判别线(图 6 中的虚线),由此可对 0.5m 深度处的海底粉土进行液化评判,当超孔压数值大于该位置土层上覆有效自重应力时,即虚线以上部分,判断该深度处可能发生瞬时液化。

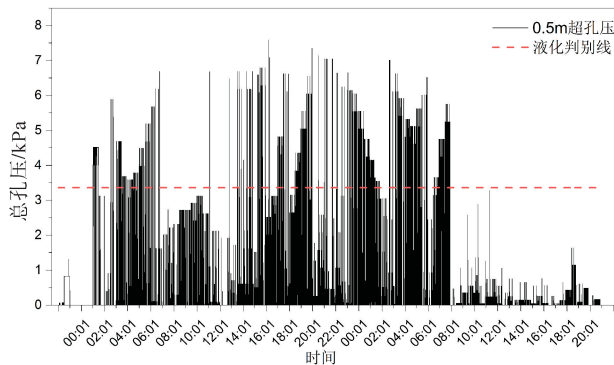


图 6 超孔压时程曲线及瞬时液化判别
(虚线为 0.5m 深度土层上覆有效自重应力 3.36kPa)

Fig.6 Time history curve of excess pore pressure and instantaneous liquefaction judgement

4 讨论

4.1 波浪作用效果

波浪上下波动会带来垂向上压力的变化,进而对海底沉积物内部孔压产生影响。波浪对沉积物内部孔压产生影响时,需要将波浪引起的压力通过孔隙水逐渐传递到海底沉积物中。一方面波浪引起的循环应力会使沉积物内部孔压增大,另一方面土体内部孔压又会不断通过孔隙渗透而减小。故总体上孔压变化要看波致孔压与孔隙渗透量的差值。随着

海底深度的加大,波浪引起的孔压累积作用越来越小,孔隙渗透值也越来越小,故总体上波致孔压值先逐渐增加再逐渐减小,当海床深度超过波浪作用影响范围后则无孔压变化。可认为不同等级的波浪在不同的土质条件下都存在某一最大作用深度,小于该深度则孔压会产生较大的变化,大于该深度则孔压受波浪影响不明显。

根据波浪作用范围以及孔压累积与孔隙渗透的差值,波浪作用下土体内部孔压响应效果可分为 3 种,详见图 7。情况(1):在波浪作用范围内且波致振荡孔压小于土体孔压消散速度,有孔压振荡但不发生累积;情况(2):在作用范围内且波致振荡孔压大于土体孔压消散速度,有孔压振荡且发生累积;情况(3):超出波浪作用范围,无孔压振荡且不发生累积。图中两条虚线分别代表较小波浪和较大波浪条件下带来的孔压响应效果,与 x 轴交点即为最大作用深度,波浪越大则最大作用深度也越大。

监测周期内 1.5m 以深粉土孔压未发生明显变化,说明其深度超过了当时波浪条件下的最大作用深度,与情况(3)相对应。0.5m 深度位置孔压在一段时间内产生剧烈振荡,但无明显累积情况出现,说明其处于波浪作用范围内,但总体上波浪引起的孔压增加速率小于土体孔压消散速率,与情况(1)相对应。只有波浪足够大且埋藏深度适宜时,才会出现情况(2)的孔压累积现象,随着深度加深累积孔压先增加后减小直至为零。实际上当海上大风过程来临后往往不会马上产生液化现象,而是在较大波浪条件下作用一段时间后海底土随着孔压累积而逐渐产生液化,这与孔压在颗粒间的传导速率有关。

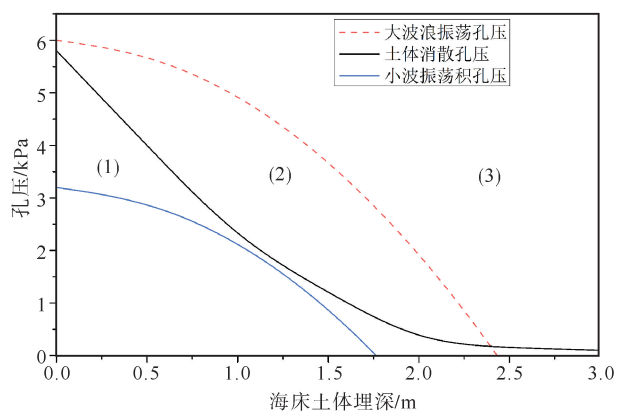


图 7 波致孔压作用效果

Fig.7 Effect of wave-induced pore pressure

4.2 液化判别结果

液化按照孔压发展过程可大致分为瞬时液化和

累积液化。瞬时液化为海底土受到瞬时的作用力即达到液化标准,累积液化(残余液化)为海底土受波浪循环作用孔压逐渐累积增大导致的液化。波浪作用下瞬时液化与残余液化有着密切的联系,波浪较大时可能先发生瞬时液化,待孔压累积一定时间后再发生影响更深的残余液化。达到瞬时液化标准只能代表某一时刻土体发生液化的趋势,并非土体真正发生液化。

监测时间内存在部分时间段达到瞬时液化标准,该时间段内波高较大,可认为具有发生液化的趋势。但由于孔压累积速率小于土体颗粒间孔压消散速率,故孔压难以有效累积,增大后迅速减小,即处于图7的情况(1)。若波高继续增加,可能会出现情况(2)的现象,即孔压可以产生有效的累积现象。但由于此监测周期内大风过程波高有限,在此波浪条件下未能导致明显的累积液化发生。

4.3 液化影响因素

液化影响因素可以简单地分为内因和外因:内因即为沉积物类型、沉积物物理状态及力学性质,外因为波浪大小、水深、土体埋深等因素。不同的沉积物类型决定了土体颗粒间孔隙大小不同、土体颗粒成分含量不同。沉积物颗粒间孔隙适宜才容易产生液化,土体颗粒间孔隙过大则孔压无法累积且易于消散,土体颗粒间孔隙过小则对应着黏粒含量较多,颗粒间黏聚力很大不易发生液化现象。沉积物组分相同但不同的物理状态会导致不同的力学参数,进而对液化的产生形成影响。研究表明,已液化土体重新固结后与未液化土体相比,已液化土体重度较大、孔隙比较小、含水量较低、强度有一定程度的提高,且已液化土体与未液化土体相比更难以发生二次液化^[23]。这说明土体重度变大、强度提高有利于抵抗液化现象的产生,故沉积物不同的物理状态对液化也有较大的影响。

波浪大小、水深及土体埋深三者对于液化现象的产生都有影响且相互关联。波浪越大对海底沉积物的循环波致应力自然越大,更容易造成土体内部孔压的累积增加。相同的波浪条件下水深越浅,则波浪的能量传递到海底时损失越小,更容易对孔压产生影响。波浪大小和水深相同时,随着土体埋深的增加,超孔压先增加后减小且上覆土体有效应力越来越大,故二者的差值先增加后减小,即易液化程度先增加后减小。因此,当保持另外两个参数不变时,波浪越大越易导致液化;水深越浅越易导致液化;随着埋深增加,液化难易程度先减小后增加。

5 结论

(1)总孔压变化趋势受潮位影响显著,研究波浪作用下的海底粉土孔压响应,需要剔除潮位的影响。波浪影响超孔压的幅值大小,波高越大,孔压响应越剧烈,随着土层深度增加,波浪影响逐渐减弱,超孔压幅值随之减小。超出波浪影响范围则孔压无明显变化。

(2)监测周期内超孔压以震荡响应为主,液化判别结果表明,海底面以下0.5m范围内粉土在某些时刻发生瞬时液化,但超孔压未发生明显累积,表明监测周期内的波浪条件不能使海底粉土发生残余液化。波浪较大时海底粉土先发生瞬时液化,待孔压累积一定时间后再发生影响更深的残余液化。达到瞬时液化标准只能代表某一时刻土体发生液化的趋势,并非土体真正发生液化。

(3)波浪对海底沉积物内部孔压作用效果主要有3种情况:情况(1):在作用范围内且波致振荡孔压小于土体孔压消散速度,有孔压振荡但不发生累积;情况(2):在作用范围内且波致振荡孔压大于土体孔压消散速度,有孔压振荡且发生累积;情况(3):超出波浪作用范围,无孔压振荡且不发生累积。

参考文献 (References)

- [1] 刘涛,冯秀丽,林霖.海底孔压对波浪响应试验研究及数值模拟[J].海洋学报,2006,28(3):173-176. [LIU Tao, FENG Xiuli, LIN Lin. Study of seabed pore water pressure based on in-situ test and numerical simulation[J]. Acta Oceanologica Sinica, 2006, 28(3): 173-176.]
- [2] 李安龙,李广雪,林霖,等.波浪作用下粉土海床中的孔压响应试验研究[J].海洋通报,2012,31(1):15-20. [LI Anlong, LI Guangxue, LIN Lin, et al. Experiment study on pore pressure responses to wave action on silt seabed[J]. Marine Science Bulletin, 2012, 31(1): 15-20.]
- [3] Putnam J A. Loss of wave energy due to percolation in a permeable sea bottom[J]. EOS, 1949, 30(3): 349-356.
- [4] Yamamoto T, Koning H L, Sellmeijer H, et al. On the response of a poro-elastic bed to water waves[J]. Journal of Fluid Mechanics, 1978, 87: 193-206.
- [5] Sleath F A. Wave induced pressures in beds of sand[J]. Journal of the Hydraulics Division, 1970, 96(2): 367-378.
- [6] Yamada Y, Ishihara K. Undrained deformation characteristics of loose sand under three-dimensional stress conditions[J]. Soils and Foundations, 1981, 21(1): 97-107.
- [7] Yasuhara K, Hirao K, Hyde A F. Effects of cyclic loading on undrained strength and compressibility of clay[J]. Soils and

- Foundations, 1992, 32(1): 100-116.
- [8] 郭莹, 栾茂田, 董秀竹, 等. 不同应力条件下砂土动模量特性的试验对比研究[J]. 水利学报, 2003, 34(5): 41-45. [GUO Ying, LUAN Maotian, DONG Xiuzhu, et al. Experimental study on dynamic modulus characteristics of sand under different stress conditions[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2003, 34(5): 41-45.]
- [9] Demars K R, Vanover E A. Measurement of wave - induced pressures and stresses in a sandbed[J]. Marine Geotechnology, 1985, 6(1): 29-59.
- [10] Maeno Y, Hasegawa T. Evaluation of wave-induced pore pressure in saturated sand bed: coastal hydrodynamics[C]. 2011.
- [11] Tzang S Y. Water wave-induced soil fluidization in a cohesionless fine-grained seabed[D]. Berkeley: University of California, 1992.
- [12] Sumer B M, Hatipoglu F, Fredsøe J, et al. The sequence of sediment behaviour during wave-induced liquefaction[J]. Sedimentology, 2006, 53(3): 611-629.
- [13] 李安龙, 杨荣民, 林霖, 等. 波浪加载下海底土质特性变化的研究[J]. 青岛海洋大学学报: 自然科学版, 2003, 33(1): 101-106. [LI Anlong Yang Rongmin LIN Lin, et al. Study on the geotechnical behavior of seabottom sediments under wave-loading[J]. Journal of Ocean University of Qingdao, 2003, 33(1): 101-106.]
- [14] Henkel D J. Geology, geomorphology and geotechnics: Geotechnique, V32, N3, Sept 1982, P175-194[J]. International Journal of Rock Mechanics and mining Sciences & Geomechanics Abstracts, 1983, 20(1): A1.
- [15] Clukey E, Cacchione D A, Nelson C H. Liquefaction potential of the Yukon Prodelta, Bering Sea[C]//Offshore Technology Conference. Houston, Texas: Offshore Technology Conference, 1980.
- [16] Zen K, Yamazaki H. Mechanism of wave-induced liquefaction and densification in seabed[J]. Soils and Foundations, 1990, 30(4): 90-104.
- [17] Okusa S, Nakamura T, Fukue M. Measurements of wave-induced pore pressure and coefficients of permeability of submarine sediments during reversing flow [M]//Denness B. Seabed Mechanics. Netherlands: Springer, 1984: 113-122.
- [18] Bennett R H. Pore - water pressure measurements: Mississippi delta submarine sediments[J]. Marine Geotechnology, 1977, 2(1-4): 177-189.
- [19] Okusa S, Uchida A. Pore - water pressure change in submarine sediments due to waves [J]. Marine Geotechnology, 1980, 4(2): 145-161.
- [20] Zen K, Yamazaki H. Field observation and analysis of wave-induced liquefaction in seabed [J]. Soils and Foundations, 1991, 31(4): 161-179.
- [21] Bjerrum L. Geotechnical problems involved in foundation of structures in the North Sea[J]. Geotechnique, 1973, 23(3): 319-358.
- [22] Jeng Dongsheng, Seymour B, 高福平, 等. 波浪载荷下海床土体孔隙水压的瞬态与累积响应机理[J]. 中国科学(E 辑: 技术科学), 2007, 37(1): 91-98. [Jeng DongSheng, Seymour B, GAO Fuping. Transient and cumulative response mechanism of pore pressure in seabed under wave loading[J]. Science in China Series E, 2007, 37(1): 91-98.]
- [23] 孙永福, 董立峰, 宋玉鹏. 黄河水下三角洲粉质土扰动土层特征及成因探析[J]. 岩土力学, 2008, 29(6): 1494-1499. [SUN Yongfu Dong Lifeng, SONG Yupeng. Analysis of characteristics and formation of disturbed soil on subaqueous delta of Yellow River[J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, 29(6): 1494-1499.]