

杜星, 孙永福, 宋玉鹏, 等. 黄河口埕岛海域粉土波致孔压现场监测[J]. 海洋学报, 2019, 41(7): 116–122, doi:10.3969/j.issn.0253-4193.2019.07.010

Du Xing, Sun Yongfu, Song Yupeng, et al. In site monitoring of wave-induced pore pressure of silt in Chengdao sea area of Yellow River Estuary[J]. Haiyang Xuebao, 2019, 41(7): 116–122, doi:10.3969/j.issn.0253-4193.2019.07.010

黄河口埕岛海域粉土波致孔压现场监测

杜星^{1,2}, 孙永福^{1,2*}, 宋玉鹏^{1,2}, 赵晓龙^{1,2}, 周其坤^{1,2}

(1. 自然资源部第一海洋研究所, 山东 青岛 266061; 2. 青岛海洋科学与技术试点国家实验室 海洋地质过程与环境功能实验室, 山东 青岛 266235)

摘要: 波浪会对海床产生反复的作用力, 由此引起的土体颗粒间孔隙水压力变化是造成土体液化的主要原因。使用自行研发的孔压监测设备, 对黄河口埕岛海域易液化区海底孔压进行了长时间、高精度的观测, 并对孔隙水压力、波高以及潮位间的关系进行分析。监测结果显示, 本次监测条件下波浪最大作用深度介于 0.5~1.5 m 之间, 超过该作用深度后孔压无明显变化。土体内部孔隙水压力的变化主要由潮位和波高决定, 潮位的作用可使孔压缓慢平滑的变化且对超孔压无影响; 波高的作用可使孔压快速、剧烈地振荡并导致超孔压的出现。

关键词: 埕岛海域; 波致孔压; 孔压监测; 粉土液化

中图分类号: P75; TU43

文献标志码: A

文章编号: 0253-4193(2019)07-0116-07

1 引言

海底土体液化是一种多发于近岸的常见地质灾害现象。液化后会导致土体失去承载力进而造成采油平台倾倒、海底电缆短路、海底管道断裂等一系列后果。研究土体液化形成机理、过程, 对灾害进行预测, 成为海洋工程安全防护的迫切需求。波浪对海底沉积物的作用力能够引起土体颗粒间孔隙水压力变化。当波浪较大时, 孔隙水压力来不及完全消散便再次累积直至与上覆土体有效应力相等, 此时土体发生液化。因此探究波浪作用下的土体内部孔隙水压力的响应机理、过程和规律对于预防液化带来的危害具有重要的理论价值和工程意义。

在过去的几十年里, 国内外学者从理论推导、室内模拟试验和原位测试 3 个方面开展了大量的工作。Putnam^[1]、Sleath^[2] 使用拉普拉斯方程, Moshagen 和 Torum^[3] 使用热扩散方程, Yamaoto 等^[4] 使用

Biot 多孔弹性介质固结理论分别对波浪引起的海床动力响应进行了分析。Biot^[5] 提出的三维固结理论得到了广泛认可, 成为了研究海床动力响应的基础理论。Thomas^[6]、Jeng 等^[7]、Zhang 等^[8]、Liao 等^[9]、Liu 等^[10] 均针对波浪作用下海底土孔压的累积进行了研究, 给出了一系列解析解或数值解。Ye 等^[11-14] 构建了 FSSI 模型, 开展了一系列的波浪、海流作用下的海床稳定性研究及液化过程模拟。Sleath^[2]、Yamamoto 等^[4]、Tzang^[15] 通过水槽试验研究了波浪作用下孔压的变化规律, Zen 和 Yamazaki^[16] 通过圆柱形波-土相互作用装置探讨了海底土的液化和固结过程, 刘红军等^[17]、Xu 等^[18] 和许国辉等^[19] 基于水槽试验对黄河口粉土海床的动态响应机制进行了探讨。Bennett^[20]、Okusa 和 Uchida^[21]、Zen 和 Yamazaki^[22] 进行了一系列原位测试通过布放孔压探杆研究孔压变化。通过原位测试可探究孔压变化与波浪、潮位、沉积物物理力学性质等各种影响因素的关系。然而总

收稿日期: 2018-07-02; 修订日期: 2018-08-31。

基金项目: 国家海洋公益性行业科研专项(201005005); 国家重点研发计划项目(2017YFC0307305)。

作者简介: 杜星(1991—), 男, 辽宁省大连市人, 助理工程师, 主要从事海洋工程地质与灾害地质方面研究。

* 通信作者: 孙永福, 研究员, 主要从事海洋工程地质与灾害地质方面研究。E-mail: sunyongfu@fio.org.cn

体来看, 国外学者对孔隙水压力的原位测试研究进行较多, 国内学者研究较少。因此, 国内亟需进行相关的极端海况条件下孔压实时监测研究。

本文通过使用自行研发的孔压监测设备在黄河口埕岛海域布放孔压监测探杆, 对研究区进行了长时间、高精度的实时观测, 通过分析孔压随波浪、潮位变化数据, 总结在波浪作用下的变化规律和影响因素。

2 研究区概况

研究位置位于黄河口埕岛海域(图1)。埕岛海域主要液化区域水深位于3~15 m之间, 海底表层沉积物类型主要为粉土夹杂少量粉砂, 厚度一般不超过6 m; 第二层沉积物为粉质黏土, 通常情况下不会发生液化, 因此研究区液化情况主要发生在表层粉土沉积层中。研究区波浪类型为风浪, 受潮海风场变化制约, 本海域波浪具有明显的季节和年际变化, 大浪多出现在10月至翌年4月。

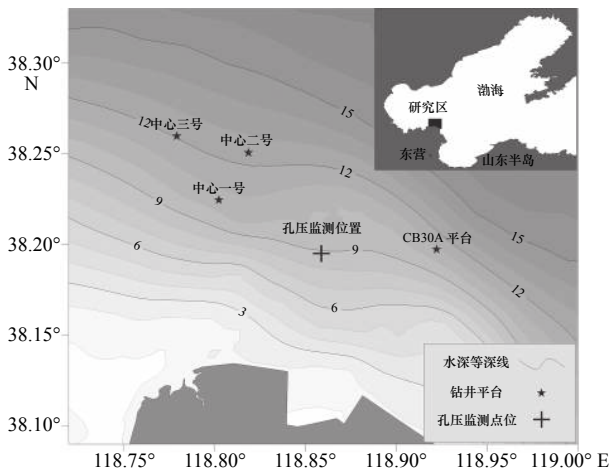


图1 研究区位置

Fig. 1 Location of studying area

孔压监测时间为大浪多发的2月, 探杆布放点具体坐标为38.195°N, 118.859°E, 该位置位于埕岛海域中部的8~9 m等深线之间, 表层沉积物为粉土。物探调查显示, 该区域既是液化现象的多发区, 同时探杆布放位置又为发生液化区。因此, 本次监测选择的时间和位置有利于获取较大风浪条件下的孔压响应数据。

3 设备与方法

3.1 监测设备

孔压监测设备由自然资源部第一海洋研究所自行研发, 主要由孔压监测探杆(图2)、土力学贯入机

具(图3)、贯入机具水上控制箱(图4)组成, 整体结构见图5。孔压监测探杆直径为4 cm, 内置4个孔隙水压力探头, 探头间距为1 m。贯入机具由贯入机具底座、探杆压贯与提升机具(压贯机构承台、探杆压贯数字油缸、探杆间歇卡具)、液压站及其油路器件、配套的直流供电、机电控制部件及数据控制电缆等组成。控制箱上的液晶显示器作为人机交互界面, 用来显示系统工作状态及发出控制指令。操作人员通过按动人机界的按键, 实现对水下机构的控制。水下控制箱负责系统工作状态的采集转化、控制液压执行机构的动作。



图2 孔压监测探杆

Fig. 2 Pore pressure monitoring probes



图3 孔压探杆贯入机具

Fig. 3 Pore pressure probe penetration equipment



图 4 贯入机具控制箱

Fig. 4 Control box of penetration equipment

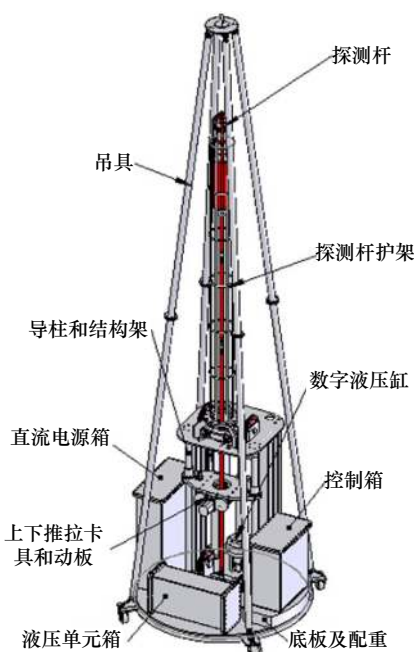


图 5 贯入设备整体结构

Fig. 5 Overall structure of penetration equipment

另外,在孔压监测点附近同时对水深、波高和潮位进行了实时监测。水深由浊度计(OBS-3A型)测得,采集频率为每半小时1次;波浪和潮位由波潮仪(RBRsolo D Wave, TGR-2050型)实时测得,采集频率同样为每半小时1次。通过布放浊度计和波潮仪,可以获得监测时间段内水深、波高以及潮位随时间变化的数据。

3.2 孔压监测、分析方法

- (1) 选择研究区海域多发大风时间,确定监测时间;
- (2) 确定监测位置,精确布放监测探杆;
- (3) 同时布放 OBS 和波潮仪监测研究区水深、波浪和潮位;
- (4) 回收探杆,导出监测数据;

(5) 分析大风浪过程中总孔压、波浪作用下孔压及超孔压的变化情况;

(6) 结合数值模型进行参数分析;

(7) 总结波浪作用下孔隙水压力形成、消散的影响因素及变化规律。

4 结果

监测前在室内进行了孔压传感器标定试验,确定了4个传感器电压值与孔压值的转换关系。数据记录设置为每半小时测量1次,即每天整点及半点开始测量,每次测量时长为3 min。数据采集频率为0.5 Hz,即每2 s获取1组数据。

选择监测期间的一个大风过程(2015年2月21日23时至23日1时)进行具体分析,该大风过程持续时间约为30 h,经历了波浪从平缓迅速增大,持续一段时间后又逐渐减小的过程。现分别从总孔隙水压力、无潮位孔隙水压力和超孔隙水压力3个方面来说明波致孔压变化规律。同时,通过对研究区沉积物进行土工试验,得到海底粉土部分工程参数统计结果(表1)。

表 1 参数统计结果

Tab. 1 Statistics result of parameters

	黏粒含量/%	含水量/%	容重/ $\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$	孔隙比
平均	10.94	25.74	19.72	15.70
数据个数	108	156	151	147
标准差	4.01	3.15	0.55	0.81
	液限/%	塑限/%	黏聚力/kPa	内摩擦角/(°)
平均	0.71	27.75	20.00	16.11
数据个数	147	152	152	131
标准差	0.08	2.97	2.15	5.06

4.1 总孔隙水压力变化情况

总孔隙水压力即为沉积物受到各种环境因素影响形成的综合孔隙水压力,由静水压力、波浪引起的动压力和潮位引起的动压力共同组成。大风过程总孔隙水压力、波高以及潮位随时间的变化情况见图6,4个不同深度的孔压整体变化趋势一致,且孔隙水压力随着传感器埋藏深度的增加而变大。从0.5 m到3.5 m位置孔压依次增大,相同时刻相邻传感器孔压值相差10 kPa左右。1.5~3.5 m位置孔压变化幅度较小,只有0.5 m位置孔压在23:00至次日16:00时间段内上下振动明显强烈。研究海域的潮位为半日潮,

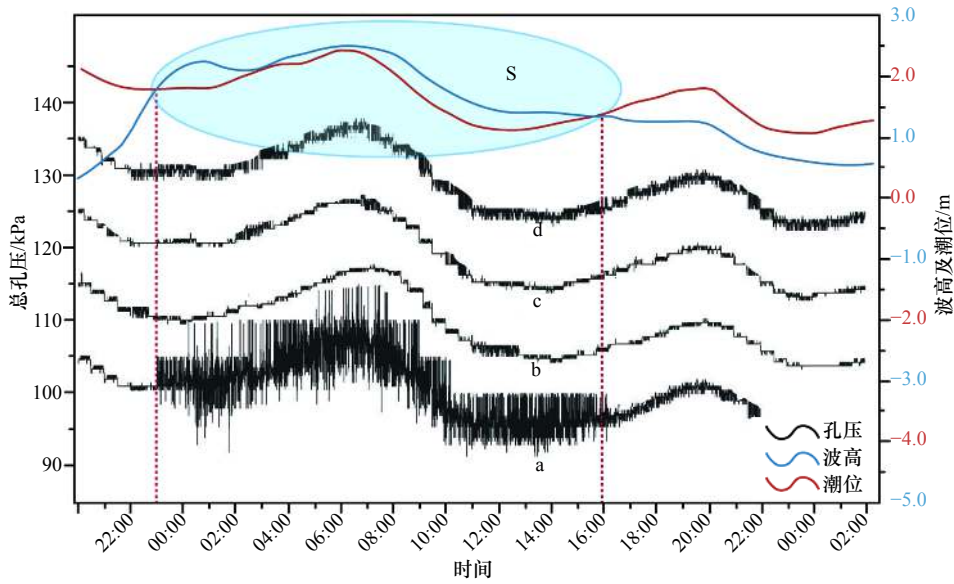


图6 总孔隙水压力、波高及潮位随时间的变化

Fig. 6 Total pore pressure, wave height and tide level vary with time

a-d 曲线分别代表海床以下 0.5 m、1.5 m、2.5 m 和 3.5 m 位置孔压变化, S 表示有明显孔压响应条件的区域

a-d represent pore pressure variation in 0.5 m、1.5 m、2.5 m and 3.5 m depth under the seabed. S represents the area that pore pressure response obviously

周期约为 12 h, 本大风过程内包含 2 个潮位周期。

通过观察可发现总孔压的变化趋势与潮位极为相似, 均呈现出 2 个波动周期, 这表明了总孔压的整体变化趋势是由潮位决定的。波高从 21:00 开始迅速增大, 最大可达 2.5 m 以上。当波浪条件位于 S 区域内时, 波高大于 1.5 m, 此时间段与 0.5 m 位置总孔压上下振动时间相重合, 只是孔压变化起始时间相对于波高迅速增大有所滞后。而在波高小于 1.5 m 的时间段内, 0.5 m 深度孔压并未出现明显的振荡现象。这表明波浪对海底土体内部孔压也有明显的影响, 产生的效果为使孔压短时间内上下剧烈振荡。

监测过程中水深变化如图 7 所示。实时监测的水深受到潮位变化影响, 在 10 m 左右呈周期性变化。进行潮位改正后的水深稳定在 8 m 左右。

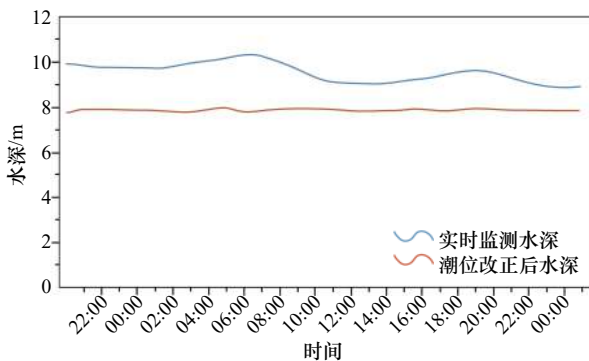


图7 水深变化

Fig. 7 Variation of water depth

4.2 无潮位孔隙水压力变化情况

总孔压减去潮位变化引起的孔压变化值即为无潮位影响的孔压值(图 8)。4 个位置孔压整体趋势基本保持恒定, 0.5 m 位置孔压在 23:00 至次日 16:00 产生剧烈的上下振荡, 与图 7 的波高变化对照后可以确定该变化是由波浪作用引起的。通过观察可知, 监测时间内波浪条件下不足以引起 1.5 m 以深的粉土层孔压明显变化, 此波浪条件下最大作用深度介于 0.5~1.5 m 之间。

4.3 超孔隙水压力变化情况

将总孔压减去静水压力带来的孔压即为超孔隙水压力。由于 1.5 m 以深位置孔压受波浪作用不明显, 故未产生有效的超孔压。0.5 m 深度超孔压变化如图 9 所示, 总体上超孔压为瞬时增加瞬时减小, 无明显累积现象。从 23:00 至翌日 16:00 超孔压变化较为明显, 此振荡超孔压的形成与该位置孔压剧烈振荡、波高的变化有直接的联系。故认为在此波浪条件下, 超孔压变化主要是由波浪振荡引起的。

5 讨论

5.1 孔压监测结果

黄河口长期以来的物探资料显示, 监测点附近有大量液化现象的产生, 故将监测点选在液化多发但此时并未液化的区域。波浪作用对海床作用力不会无限延伸, 不同的波浪参数对应着不同的最大影响深

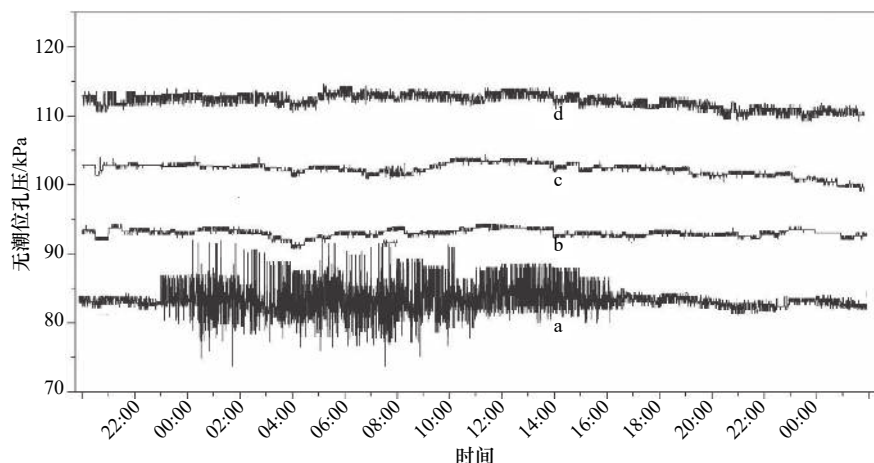


图 8 无潮位孔隙水压力(即为总孔隙水压力减去潮位变换引起的水压力)

Fig. 8 Total pore pressure without tide level's affection (obtained by total pore pressure minus pore pressure induced by tide)

a-d 曲线分别代表海床以下 0.5 m、1.5 m、2.5 m 和 3.5 m 位置孔压变化

a-d represent pore pressure variation in 0.5 m、1.5 m、2.5 m and 3.5 m depth under the seabed

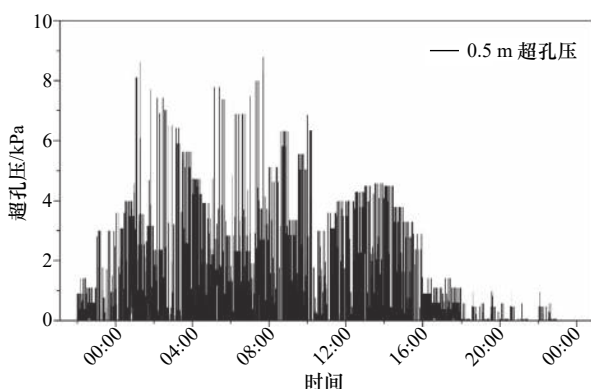


图 9 超孔隙水压力随时间变化

Fig. 9 Excess pore pressure vary with time

度。只有位于波浪作用有效深度内的海底土孔压才会发生明显的变化,大于该有效作用深度的位置孔压不会受到明显的影响。本次大风过程持续约 30 h,最大有效波高可达 2.5 m,监测结果表明,最大作用深度位于 0.5~1.5 m 之间,未能对更深处海底土产生影响。黄河口历史工程资料表明,风暴潮来临时该区域最大波高可达 5~6 m,而在此次大风过程中波高远小于历史最大值,故没有发生明显的累积液化现象。为了能够监测到更明显的波致孔压变化情况,在今后的液化研究和孔压监测过程中应对孔压监测探杆进行升级改造。适当减小孔压探头间隔距离、增加孔压探头的精度并重点在埋深浅的位置多设置监测点。

5.2 孔压变化影响因素

海底土体中孔隙水压力的变化归根结底就是其上覆水体水位的变化。潮位的变化会引起水位周期性变化,带来的作用力可以作用至较深的土层中,表

现为 4 个位置孔压变化趋势一致。但由于潮位周期长,孔压会缓慢地变化难以有效地累积,同时在短时间内研究孔压可忽略潮位变化所带来的影响。因此,潮位的变化会导致土体间孔隙水压力的变化但不会导致液化。

与潮位变化相比,波浪具有周期短、振幅大等特点。因此波浪可以在短时间内带来剧烈的振荡效果,引起土体内孔压剧烈振荡,表现效果为 0.5 m 深度孔压在波高较大的时间段内剧烈上下振荡。但是波浪作用在海床的作用力随着海床的加深存在衰减作用,因此土体埋藏越深波浪作用力的影响越小。因此存在波浪作用的极限深度,大于此深度后波浪影响效果可以忽略。在数值计算中,由于对沉积物模型的简化往往会造成波浪载荷影响过深的情况。即实际监测 1.5 m 以深位置孔压基本无变化,但使用线弹性模型计算结果可能显示很深层的沉积物仍然有明显的孔压振荡变化。在进行具体的波致孔压变化和液化分析时,应注意沉积物本构模型中对孔压消散和响应问题的简化情况。

通过本次监测可认为,在此次监测位置的水深、波浪条件下,波浪瞬时作用影响的最大深度介于 0.5~1.5 m 之间。当波高继续增大时,1.5 m 以深位置的孔压才会有明显的振荡作用。

5.3 波浪作用效果

波浪的波动能够对海底土体产生一定的作用力,主要分为瞬时振荡作用和累积增大作用。瞬时振荡作用是由于波浪的瞬时波动直接作用在海床表面上,再逐渐向海底沉积物深处传递。其变化完全取决于

波浪的瞬时波动, 可以引起海底土体内部孔压剧烈振荡, 且产生快消散快。并且波浪产生的作用力随着土体埋深的增加而减小, 所以达到一定深度后作用力减小为 0。瞬时振荡作用效果可见图 6 和图 8 的 0.5 m 位置孔压振荡部分。

只有当单位时间内孔压受波浪循环载荷作用增加的量大于孔压消散的量, 海底沉积物内部孔压才能产生有效的累积作用。而为了能够产生有效的累积作用, 则需要沉积物参数和波浪条件参数共同作用下满足条件。海底沉积物发生液化并再次固结后会变得更加密实且抗液化能力增强, 在每年都存在的风浪条件下或许难以发生大幅度的液化。而只有在台风、风暴潮来临等突发极端海况条件下才会打破原有沉积物液化平衡再次产生大幅度的液化。本次监测时间内波高相对较小, 并未发生风暴潮等极端海况, 波浪影响深度未能超过 1.5 m, 因此未发生明显的孔压累积效果, 只在一定时间内造成了孔压剧烈振荡。为了能够进一步地监测到孔压累积直至液化的过程, 今后在对现有设备进行升级改造的基础上, 可尝试在突发极端海况条件下进行海底沉积物内部孔

压监测。

6 结论

本文使用孔压监测设备, 实时监测了较大风浪条件下黄河口埕岛海域粉土内部孔隙水压力在波浪作用下的响应过程, 比较分析了波高及潮位对孔压的影响, 探究了孔压在波浪作用下的影响因素。主要结论如下:

(1) 潮位和波高的变化均可以改变土体内部孔隙水压力的大小。潮位变化使孔压缓慢、平缓地变化, 孔压变化周期即为潮位周期; 波高变化使土体内孔压快速剧烈地振荡, 振荡周期即为波浪周期。

(2) 海底沉积物一定时, 不同波浪大小对应着不同波致孔压影响深度, 且该深度随着波浪条件的增大而增加, 超过该影响深度后沉积物的孔压不会产生明显变化。

(3) 海底沉积物液化后增强的物理力学性质会对相同的波浪条件产生抗液化性, 只有在大于原有波浪条件的作用下才会再次产生明显的液化现象。

参考文献:

- [1] Putnam A P J. Loss of wave energy due to percolation in a permeable sea bottom[J]. *Transactions, American Geophysical Union*, 1949, 30(3): 349–356.
- [2] Sleath J F A. Wave induced pressures in beds of sand[J]. *Journal of the Hydraulics Division*, 1970, 96: 367–378.
- [3] Moshagen H, Torum A. Wave induced pressures in permeable seabeds[J]. *Journal of the Waterways, Harbors and Coastal Engineering Division*, 2010, 101(1): 49–57.
- [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] Biot M A. General theory of three-dimensional consolidation[J]. *Journal of Applied Physics*, 1941, 12(2): 155–164.
- [6] Thomas S D. A finite element model for the analysis of wave induced stresses, displacements and pore pressure in an unsaturated seabed II: model verification[J]. *Computers and Geotechnics*, 1995, 17(1): 107–132.
- [7] Jeng D S, Seymour B R, Li J. A new approximation for pore pressure accumulation in marine sediment due to water waves[J]. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 2007, 31(1): 53–69.
- [8] Zhang J S, Zhang Y, Zhang C, et al. Numerical modeling of seabed response to combined wave-current loading[J]. *Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering*, 2013, 135(3): 031102.
- [9] Liao C C, Jeng D S, Zhang L L. An analytical approximation for dynamic soil response of a porous seabed due to combined wave and current loading[J]. *Journal of Coastal Research*, 2015, 31(5): 1120–1128.
- [10] Liu B, Jeng D S, Ye G L, et al. Laboratory study for pore pressures in sandy deposit under wave loading[J]. *Ocean Engineering*, 2015, 106: 207–219.
- [11] Ye Jianhong, Jeng D S. Response of porous seabed to nature loadings: waves and currents[J]. *Journal of Engineering Mechanics*, 2012, 138(6): 601–613.
- [12] Ye Jianhong, Wang Gang. Numerical simulation of the seismic liquefaction mechanism in an offshore loosely deposited seabed[J]. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 2016, 73(3): 1183–1197.
- [13] Ye Jianhong, Huang Duruo, Wang Gang. Nonlinear dynamic simulation of offshore breakwater on sloping liquefied seabed[J]. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 2016, 73(3): 1215–1225.
- [14] Ye Jianhong, Jeng D S, Chan A H C, et al. 3D integrated numerical model for fluid-structures-seabed interaction (FSSI): elastic dense seabed foundation[J]. *Ocean Engineering*, 2016, 115: 107–122.
- [15] Tzang S Y. Water wave-induced soil fluidization in a cohesionless fine-grained seabed[D]. Berkeley: University of California, 1992.

- [16] Zen K, Yamazaki H. Mechanism of wave-induced liquefaction and densification in seabed[J]. *Soils and Foundations*, 1990, 30(4): 90–104.
- [17] 刘红军, 刘莹, 张民生. 波浪作用下黄河口粉土液化与振荡层形成试验研究[J]. *中国海洋大学学报*, 2009, 39(5): 1013–1018.
Liu Hongjun, Liu Ying, Zhang Minsheng. Study on liquefaction of silty soil and the development of surging layer under wave actions at Yellow River estuary[J]. *Periodical of Ocean University of China*, 2009, 39(5): 1013–1018.
- [18] Xu Guohui, Sun Yongfu, Wang Xin, et al. Wave-induced shallow slides and their features on the subaqueous Yellow River delta[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2009, 46(12): 1406–1417.
- [19] 许国辉, 贾永刚, 郑建国, 等. 黄河水下三角洲塌陷凹坑构造形成的水槽试验研究[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2004, 24(3): 37–40.
Xu Guohui, Jia Yonggang, Zheng Jianguo, et al. Flume test formed by collapse in the Yellow River subaqueous delta[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2004, 24(3): 37–40.
- [20] Bennett R H. Pore-water pressure measurements: Mississippi delta submarine sediments[J]. *Marine Geotechnology*, 1977, 2(1/4): 177–189.
- [21] Okusa S, Uchida A. Pore-water pressure change in submarine sediments due to waves[J]. *Marine Geotechnology*, 1980, 4(2): 145–161.
- [22] Zen K, Yamazaki H. Field observation and analysis of wave-induced liquefaction in seabed[J]. *Soils and Foundations*, 1991, 31(4): 161–179.

In site monitoring of wave-induced pore pressure of silt in Chengdao sea area of Yellow River Estuary

Du Xing^{1,2}, Sun Yongfu^{1,2}, Song Yupeng^{1,2}, Zhao Xiaolong^{1,2}, Zhou Qikun^{1,2}

(1. *First Institute of Oceanography, Ministry of Natural Resources, Qingdao 266061, China*; 2. *Laboratory for Marine Geology and Environment, Pilot National Laboratory for Marine Science and Technology (Qingdao), Qingdao 266235, China*)

Abstract: Variation of pore pressure between soil particles, which caused by the cyclic loading from waves to seabed, is the main reason for soil liquefaction. By using a self-designed pore pressure monitoring equipment, we monitored pore pressure with a long-period, high-precision way in the easy-liquefied zone in Chengdao sea area of Yellow River Estuary. The monitoring results show that the maximum wave-affected depth is between 0.5 m to 1.5 m and no obvious pore pressure response in the deeper sediment during this period. Pore pressure variation in soil is mainly determined by tide level and wave height. Tide level changes can result in smooth change in pore pressure but can not cause the emergence of excess pore pressure while wave height changes can result in severe oscillation in pore pressure and lead to the appearance of excess pore pressure.

Key words: Chengdao sea area; wave-induced pore pressure; pore pressure monitoring; silt liquefaction