

波浪荷载下非均质海床响应的实验研究

刘 博,刘晋超,何小华,元国凯,毕明君,林敬华

(中国能源建设集团 广东省电力设计研究院有限公司,广东 广州 510663)

摘 要:在海洋环境中,海床土体由于地质成因通常是非均质的。由于非均质海床在波浪荷载下的海床响应与均质海床相比存在较大差异因此大批学者通过数值法和解析法对波浪荷载下非均质海床响应问题做了全面研究,但相关室内试验尚处于起步阶段。通过一维圆筒实验对不同类型非均质海床在波浪荷载下的响应情况做了详细的实验研究,不仅探明了非均质海床在波浪荷载下的响应及液化规律,也为相关理论及数值研究提供了实验依据。对实验结果的参数分析和液化分析可知,非均质海床的渗透系数对实验结果影响明显,渗透系数较大的非均质海床将产生更大的孔隙水压力响应及更小的海床液化。

关键词:非均质海床;波浪荷载;海床响应;实验研究

中图分类号:P753

文献标识码:A

文章编号:1002-3682(2018)01-0056-10

doi:10.3969/j.issn.1002-3682.2018.01.006

在海洋环境中,海床土体由于地质成因通常是分层和非均质的,如长江入海口附近的海床就由十二层土体构成^[1]。非均质海床在波浪荷载下的响应与均质海床相比存在较大差异,在实际工程中也普遍存在,因而有深入分析和研究的必要。

事实上,大量学者已采用数值法和解析法对波浪荷载下非均质海床的响应情况做了探究。Yamamoto^[2]在 20 世纪 80 年代初就采用分层法给出了非均质海床在波浪荷载下响应的解析解。在此基础上,Jeng 和 Seymour^[3]、Kitano 和 Mase^[4]给出了波浪荷载下非均质海床孔隙水压力响应的解析解。

与此同时,许多学者也采用数值法对波浪荷载下非均质海床的响应问题做了研究。Jeng 和 Lin^[5-6],Lin 和 Jeng^[7-8]采用有限单元法对波浪作用下非均质海床的响应情况做了一系列相关研究,其数值计算结果和解析解吻合良好。此后,Wen 和 Wang^[9]采用有限元法对波流荷载下两层土海床的响应问题进行了相关研究。

除解析法和数值法以外,有关波浪荷载下非均质海床响应的实验研究尚处于起步阶段。其主要原因在于常用的试验设备(如水槽试验、离心机试验)由于土体模型在深度方向上的限制,很难模拟非均质海床情况。

一维圆筒实验也称为压缩实验,最早是由 Zen 和 Yamazaki^[10-12]于 20 世纪 90 年代研制的。为解决波浪荷载往复作用下震荡孔隙水压力造成海床瞬态液化的问题,Zen 和 Yamazaki^[10-12]设计了一套高 2.1 m,内径 0.2 m 的试验设备,通过水压的往复变化将动荷载施加到设备顶部来模拟波浪荷载。该实验的特点是只能模拟海床深度方向上波浪荷载引起的孔隙水压力响应情况,因而其可以模拟的海床厚度比水槽实验和离心机实验深得多,非常适于模拟非均质海床情况。综上,本文拟采用一维圆筒试验设备对非均质海床在波浪荷载下的响应问题进行实验研究。

1 实验设备介绍

从图 1 中可知,一维圆筒设备由主体圆筒部分(A),荷载施加部分(B),荷载控制部分(C),数据采集部分

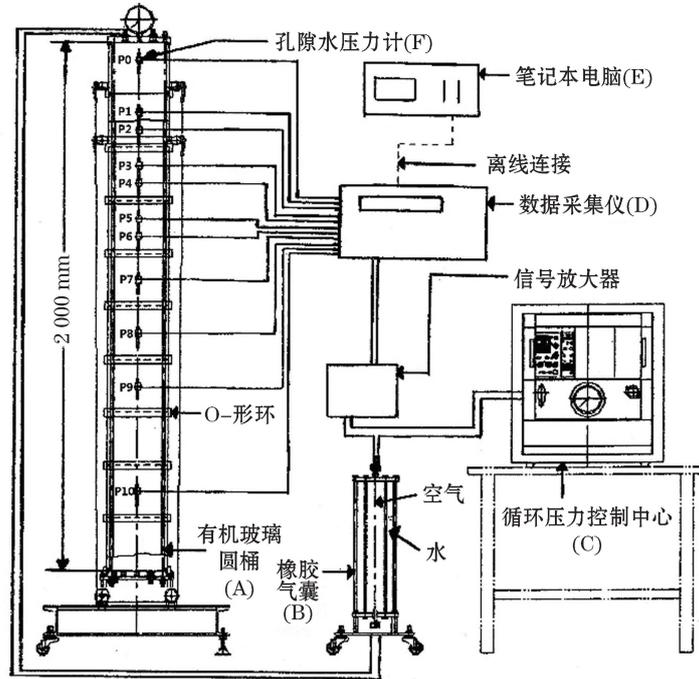
收稿日期:2017-09-05

资助项目:国家自然科学基金项目——波流-海床—结构物相互作用及海床失稳机理研究(41176073)

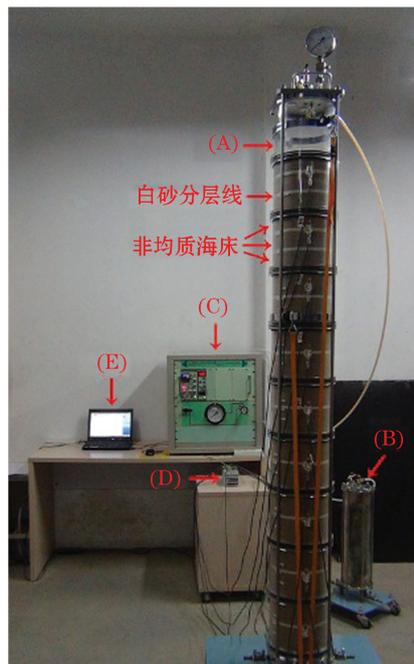
作者简介:刘 博(1989-),男,博士,主要从事水动力荷载下海床破坏机理、流固土耦合分析方面研究. E-mail: liubo2@gedi.com.cn

(王佳实 编辑)

(D、E)和孔隙水压力计(F)五个部分组成,设备中的主体圆筒部分由 10 个有机玻璃圆筒构成,每个有机玻璃圆筒的尺寸为:直径 205 mm,高 200 mm。有关试验设备的详细介绍可参考作者论文[13]。为更好地记录孔隙水压力沿深度方向的分布趋势,本实验共使用 11 支孔隙水压力计(用于测量海床中不同位置的孔隙水压力 p),其中 10 支孔隙水压力计安装在海床内部,1 支安装在海床上部,具体位置如图 1a 所示。



(a)设备关系图



(b)设备照片

图 1 一维圆筒实验设备关系及实物

Fig.1 Photograph of the instruments used for the one-dimensional cylinder experiment

2 非均质土样准备

2.1 实验中所用土样的基本性质

本实验采用两种不同类型砂土并通过它们之间不同比例的混配来完成非均质海床的土样准备过程。本实验采用的两种砂土均为长江下游的河砂,其中平均粒径较大的称为粗砂;平均粒径较小的称为细砂。

实验中所用粗砂和细砂的级配曲线如图 2 所示,本实验采用筛分法测得这两种砂土的颗粒级配曲线(图 2)。由表 1 可见成层土实验中所用粗砂和细砂的基本性质,其中最大孔隙比(e_{max})和最小孔隙比(e_{min})由国际上的 ASTM 标准方法测得;相对密度(D_r)由土力学公式求得;渗透系数(K)由常水头实验测得;剪切模量(G)由常规固结实验先测得弹性模量(E),再由土力学公式求得;海床饱和床(S)由土力学实验测得。

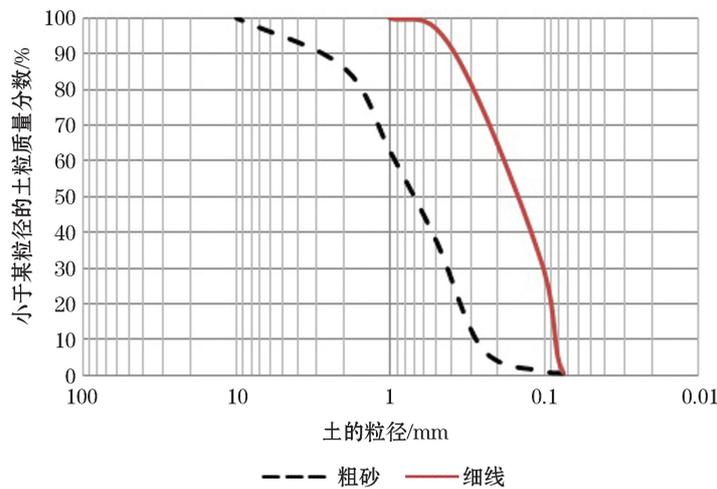


图 2 实验中所用粗砂和细砂的级配曲线

Fig.2 Grain size distribution curve of the coarse and the fine sands used in the experiment

表 1 实验所用粗砂和细砂的基本性质

Table 1 Basic properties of the coarse and the fine sands used in the experiments

土体性质	土体重度	平均粒径/mm	最大孔隙比	最小孔隙比	初始孔隙比	相对密度	渗透系数/ $m \cdot s^{-1}$	剪切模量/ $N \cdot m^{-2}$
粗砂	2.66	0.709	0.85	0.41	0.635	48.8%	8.4×10^{-4}	1.35×10^7
细砂	2.67	0.158	0.92	0.53	0.635	73.8%	8.4×10^{-5}	1.43×10^7

2.2 非均质土样准备

本实验通过粗砂和细砂间不同比例的混配来完成非均质海床的准备过程。这里将粗砂和细砂在每层海床中的混配比例分别用 m_c 和 m_f 来表示,其计算式为

$$m_c = \frac{W_c}{W_m}, m_f = \frac{W_f}{W_m}, \quad (1)$$

式中, W_c 和 W_f 分别为每层海床土体中粗砂和细砂的质量; W_m 为该层海床土体的总质量。

由表 2 可知,实验中需要准备的非均质海床是由纯粗砂层、纯细砂层和粗砂细砂混配层(包含各种不同

的混配比例)组成的。非均质海床共由 20 层海床土组成,其中下面 14 层海床土的高度为 0.1 m/层,而上面 6 层海床土的高度为 0.067 m/层。另外,实验中的非均质海床类型共分为 2 类,其差别在于初始孔隙比(e)不同,不同的初始孔隙比反映了不同的渗透系数和剪切模量等土体参数。由图 3 可见 2 种不同类型非均质海床中测得的海床土体性质随海床深度(z)的分布趋势。

表 2 非均质海床的基本情况

Table 2 Basic situation of the inhomogenous seabed

土层编号	土层区域/m	土层基本情况	初始孔隙比(类型 1)	初始孔隙比(类型 2)
1	-0.067~0.000	纯粗砂, $m_c=1.0$	0.666 0	0.666 0
2	-0.133~-0.067	纯粗砂, $m_c=1.0$	0.635 0	0.649 7
3	-0.200~-0.133	粗砂细砂混配, $m_c=0.9$	0.635 0	0.653 0
4	-0.267~-0.200	粗砂细砂混配, $m_c=0.85$	0.635 0	0.673 5
5	-0.333~-0.267	粗砂细砂混配, $m_c=0.8$	0.635 0	0.682 0
6	-0.400~-0.333	粗砂细砂混配, $m_c=0.75$	0.635 0	0.683 5
7	-0.500~-0.400	粗砂细砂混配, $m_c=0.7$	0.635 0	0.687 0
8	-0.600~-0.500	粗砂细砂混配, $m_c=0.65$	0.635 0	0.684 7
9	-0.700~-0.600	粗砂细砂混配, $m_c=0.6$	0.635 0	0.678 7
10	-0.800~-0.700	粗砂细砂混配, $m_c=0.55$	0.635 0	0.653 0
11	-0.900~-0.800	粗砂细砂混配, $m_c=0.5$	0.635 0	0.668 6
12	-1.000~-0.900	粗砂细砂混配, $m_c=0.45$	0.635 0	0.665 8
13	-1.100~-1.000	粗砂细砂混配, $m_c=0.4$	0.635 0	0.685 8
14	-1.200~-1.100	粗砂细砂混配, $m_c=0.35$	0.635 0	0.688 3
15	-1.300~-1.200	粗砂细砂混配, $m_c=0.3$	0.635 0	0.692 0
16	-1.400~-1.300	粗砂细砂混配, $m_c=0.25$	0.635 0	0.652 0
17	-1.500~-1.400	粗砂细砂混配, $m_c=0.2$	0.635 0	0.647 6
18	-1.600~-1.500	粗砂细砂混配, $m_c=0.15$	0.635 0	0.643 4
19	-1.700~-1.600	粗砂细砂混配, $m_c=0.1$	0.635 0	0.644 9
20	-1.800~-1.700	纯细砂, $m_c=0$	0.635 0	0.635 0

在非均质海床的准备过程中,为保证粗砂和细砂能够均匀混合,需采用高速搅拌机将粗砂和细砂均匀混配。实验中所采用的搅拌机型号为恒联 B20-G。具体混配过程:首先,将粗砂和细砂均做风干处理,这是为了保证粗砂和细砂的干质量能准确称取;其次,称取一定质量的细砂放入搅拌机料筒内并启动搅拌机以低速运转;接着,按照给定的混配比例称取规定质量的粗砂,保持搅拌机继续低速运转,将粗砂逐渐加入到料筒中;最后,待所有规定质量的粗砂全部加入到料筒中后,提高搅拌机转速并连续搅拌 5 min 左右,使粗砂和细砂均匀混合。

待非均质海床中所需的每层土样均准备完成后,开始进行实验装样过程。实验的加样过程伴随着主体

圆筒部分的安装过程进行。当装样过程完成后,非均质海床的总高度为 1.8 m。此外,实验中在非均质海床的各土层交界处需加入一层薄的白砂,从而更为直观地分辨出非均质海床不同土层间的界限。

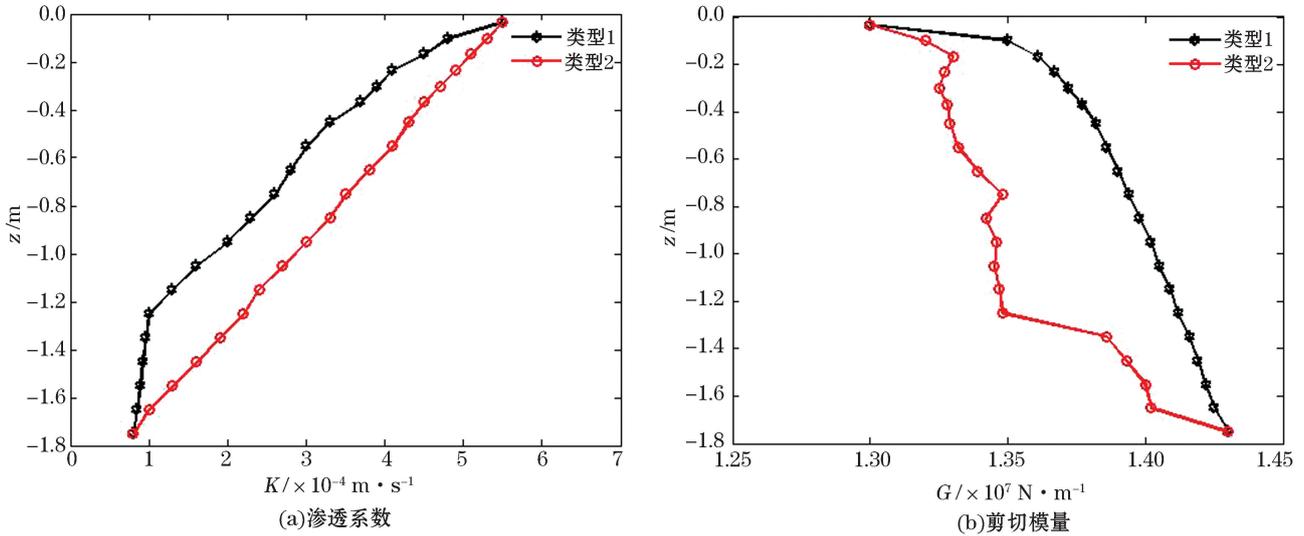


图3 不同类型非均质海床中测得的土体参数(渗透系数、剪切模量)随海床深度分布趋势

Fig.3 The soil parameters (permeability coefficient, shear modulus) versus the seabed depth measured in different types of inhomogenous seabed

3 试验加载介绍

本研究共进行 6 组非均质海床实验(表 3):第 1~3 组为类型 1 非均质海床;第 4~6 组为类型 2 非均质海床。实验中海床总高度(h)和水深(d)分别为 1.8 m 和 0.2 m。此外,在所有实验中均会施加 50 kPa 静水压力,用以模拟 5.0 m 水深。考虑试验设备中尚存的 0.2 m 水深,实验中的总水深为 5.2 m。

根据线性波理论,由表 3 中的波浪最大振幅值($|P_m|$)可推出对应工况的波浪高度。例如,当输入压力振幅($|2P_m|$)为 12.103 kPa 时,计算得到的波浪高度(H)为 1.23 m。表 3 中所有实验组中所用的波浪加载条件均符合不碎波条件^[14]。此外,每一组实验的波浪循环次数(N_c),均为 3 000 次。

表 3 非均质海床实验基本情况

Table 3 Details of loadings used in the experiment

实验组序号	非均质海床类型	输入压力振幅/kPa	波浪周期/s	水深/m	海床高度/m	海床饱和度/%
1	类型 1	12.103	9	0.2	1.8	95.8
2	类型 1	34.32	9	0.2	1.8	95.8
3	类型 1	34.32	3	0.2	1.8	95.8
4	类型 2	12.103	9	0.2	1.8	95.8
5	类型 2	34.32	9	0.2	1.8	95.8
6	类型 2	34.32	3	0.2	1.8	95.8

4 实验结果分析及讨论

4.1 波浪参数对孔隙水压力响应的影响情况

波浪参数的变化将改变波浪压力大小,进而对海床内孔隙水压力产生影响。因此研究波浪参数对海床内孔隙水压力响应的影响是必要的。

4.1.1 波浪周期影响

波浪周期对非均质海床响应的影响十分重要。由图 4 可见,2 种不同类型非均质海床中波浪周期(T)对孔隙水压力最大振幅值($|p|/P_{ws}$)随海床相对深度(z/h)分布趋势的影响情况:图 4a 为在类型 1 非均质海床中第 2,3 组实验的孔隙水压力数据;图 4b 为类型 2 非均质海床中第 5,6 组实验的孔隙水压力数据。图 4 中的孔隙水压力最大振幅值由海床表面的静水压力(P_{ws})进行无量纲化处理。

从图 4 中可知,对于任何类型的非均质海床来说,随着波浪周期增加,海床内孔隙水压力最大振幅值将随之增加,其原因是在相同水深条件下,波浪周期的增加会导致相对水深减小,从而导致孔隙水压力最大振幅值增加。

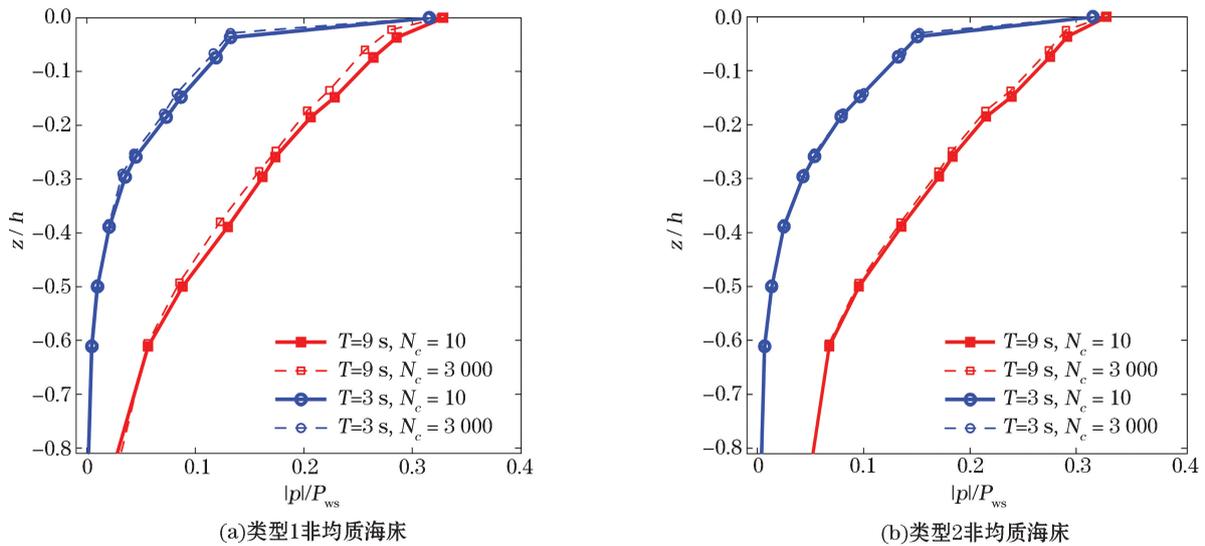


图 4 不同类型的非均质海床中波浪周期对孔隙水压力沿海床深度方向分布趋势的影响

Fig.4 Effect of the wave period on the vertical distribution of pore water pressure in different types of inhomogenous seabed

4.1.2 波浪高度影响

波浪高度对非均质海床响应的影响也是十分显著的。由图 5 可见,2 种不同类型的非均质海床中波浪高度(H)对孔隙水压力最大振幅值($|p|/P_{ws}$)随海床相对深度(z/h)分布趋势的影响情况:图 5a 为在类型 1 非均质海床中第 1,2 组实验的孔隙水压力数据;图 5b 为在类型 2 非均质海床中第 4,5 组实验的孔隙水压力数据。图 5 中的孔隙水压力最大振幅值由海床表面的静水压力(P_{ws})进行无量纲化处理。

从图 5 可知,在任何类型的非均质海床中,海床内孔隙水压力最大振幅值会随着波浪高度的降低而减小,这是因为较低的波浪高度会产生较小的压力振幅及较小的波浪陡度(即波浪高度和波浪长度之比),从而导致孔隙水压力最大振幅值减小。

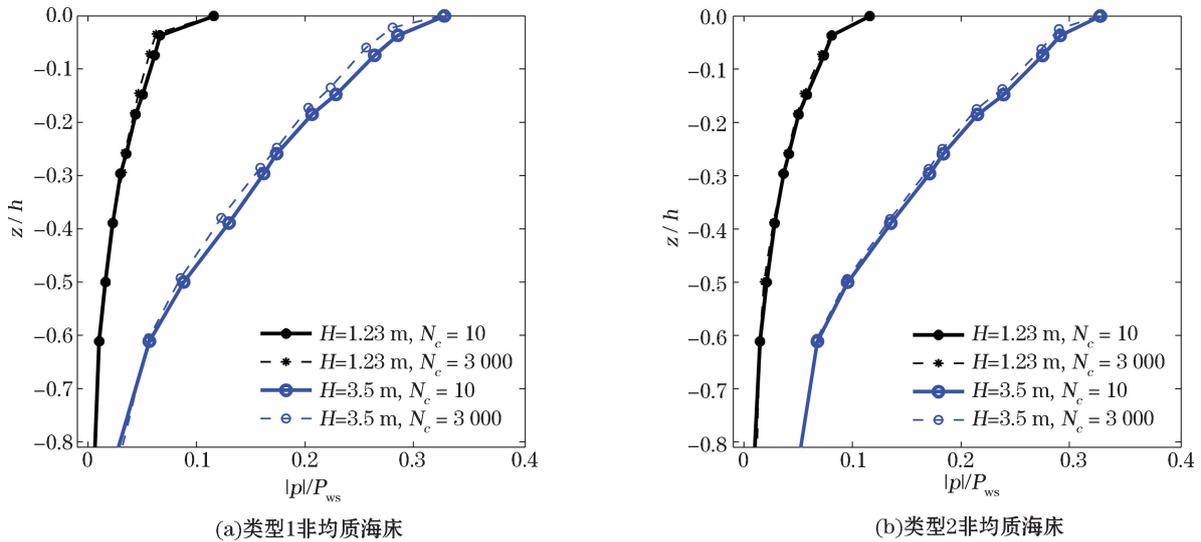


图5 不同类型的非均质海床中波浪高度对孔隙水压力沿海床深度方向分布趋势的影响

Fig.5 Effects of the wave height on the vertical distribution of pore water pressure in different types of inhomogenous seabed

4.1.3 波浪循环次数影响

波浪循环次数对非均质海床响应的影响往往被忽略,实际上波浪循环次数对非均质海床的响应也会有一定影响。本实验中对所有实验组均进行了3 000次的波浪循环,从而能够更好地研究海床响应与波浪循环次数之间的关系。

从图4和图5中可知,随着波浪循环次数的增加,海床内孔隙水压力最大振幅值均会出现轻微降低。这是实验过程中观测到了海床沉降现象,即随着波浪循环次数的增加,海床将逐步产生沉降,这将导致海床相对高度减小,继而造成孔隙水压力最大振幅的减小^[15]。

4.2 海床土体参数对孔隙水压力响应的影响情况

不同类型非均质海床的差别主要体现在海床渗透系数不同(图3a)。图6给出了不同波浪条件下2种不同类型的非均质海床中孔隙水压力最大振幅值($|p|/P_{ws}$)随海床相对深度(z/h)的分布趋势:图6a中给出第2,5组实验中的孔隙水压力数据;图6b中给出第3,6组实验中的孔隙水压力数据;而图6c中给出第1,4组实验中的孔隙水压力数据。图6中的孔隙水压力最大振幅值也由海床表面的静水压力(P_{ws})进行无量纲化处理。

从图6中可知:无论在何种波浪条件下,虽然2种类型非均质海床的孔隙水压力响应较为接近(由于2种类型非均质海床的渗透系数差别有限(图3a)),但是整体来看,类型2非均质海床的孔隙水压力最大振幅值>类型1非均质海床。其原因在于2种不同类型非均质海床间渗透系数的大小关系为:类型2>类型1(图3a),由于海床内孔隙水压力值会随着渗透系数的增大而增大,因此类型2非均质海床的孔隙水压力响应较大。另外,通过将图6a和6b及图6a和6c对比可知,波浪周期和波浪高度的增加会进一步扩大渗透系数对非均质海床响应的影响。

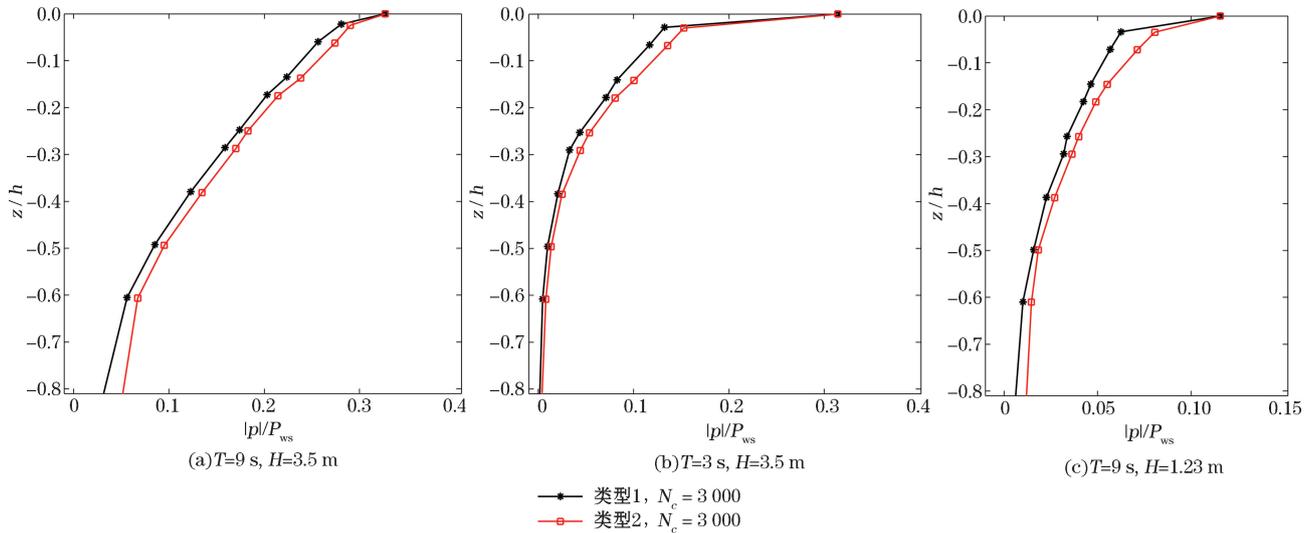


图 6 不同波浪条件下不同类型非均质海床中孔隙水压力沿海床深度方向的分布趋势
 Fig.6 The vertical distributions of pore water pressure in different types of inhomogenous seabed under different wave conditions

4.3 海床液化分析

通过 Zen 和 Yamazaki^[10-11] 提出的液化准则对不同类型非均质海床中波浪引起的海床液化情况进行分析。由图 7 可见,2 种不同类型非均质海床中垂向有效应力(σ'_z)沿海床深度的分布趋势图,图中的垂向有效应力数据由第 1,4 组实验中的孔隙水压力数据计算得到。

从图 7 中可知,对于不同类型的非均质海床来说,类型 1 非均质海床的最大液化深度较深,而类型 2 非均质海床的最大液化深度较浅。由于类型 2 非均质海床的渗透系数大于类型 1 非均质海床(图 3a),因而上述规律可以总结为:海床的最大液化深度将随着海床渗透系数的减小而增加,即密实海床的抗液化性更差。

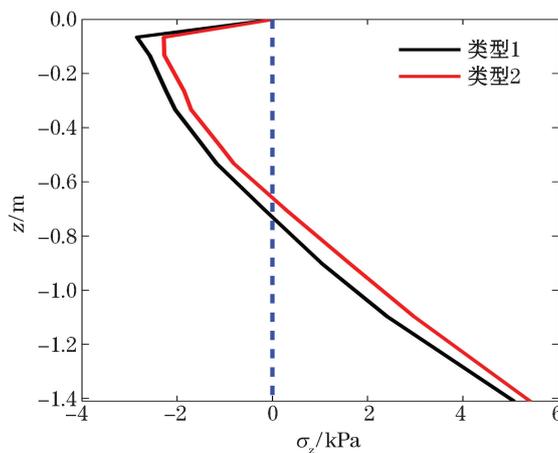


图 7 非均质海床中波浪引起的海床液化情况
 Fig.7 Wave-induced seabed liquefaction in the inhomogenous seabed

试验过程中同时观测到了海床液化现象。在海床表面,可以看到当在波谷附近时,海床土体呈液化,且部分土颗粒会进入水中,这将导致海床在试验结束后会存在一定沉降。同时,海床液化深度范围内的海床土体会随着波浪荷载的施加而往复变动,而液化深度以下的海床土体则不会有此现象。

5 结 论

本文采用一维圆筒实验对非均质海床在波浪荷载下的海床响应和海床液化问题进行了详细的实验研究,不仅探明了非均质海床在波浪荷载下的响应及液化规律,也为相关理论及数值研究提供了实验依据。根据实验结果可以得出结论:

1)波浪参数对非均质海床内孔隙水压力响应有重要影响,孔隙水压力最大振幅值会随波浪循环次数的增加而减小,会随着波浪周期和波浪高度的增加而增加;

2)渗透系数对非均质海床孔隙水压力响应有重要影响。随着非均质海床渗透系数的增加,孔隙水压力最大振幅值也会随之增加。另外,波浪周期和波浪高度的增加会扩大渗透系数对非均质海床孔隙水压力响应的影响;

3)海床的最大液化深度将随着海床渗透系数的减小而增加,即密实海床的抗液化性更差。

参考文献(References):

- [1] XIE J L, WANG H M, HE Z F, et al. Present situation and prospect of geological survey of Changjiang estuary and its adjacent sea area in Shanghai[J]. Shanghai Land Resources, 2008(4): 16-23. 谢建磊, 王寒梅, 何中发, 等. 上海市长江口及邻近海域地质调查现状及展望[J]. 上海国土资源, 2008(4): 16-23.
- [2] YAMAMOTO T. Wave-induced pore pressures and effective stresses in inhomogenous seabed foundations[J]. Ocean Engineering, 1981, 8(1): 1-16.
- [3] JENG D S, SEYMOUR B R. Response in seabed of finite depth with variable permeability[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, 1997, 123(10): 902-911.
- [4] KITANO T, MASE H. Wave-induced porewater pressure in a seabed with inhomogeneous permeability[J]. Ocean Engineering, 2001, 28(3): 279-296.
- [5] JENG D S, LIN Y S. Finite element modelling for water waves-soil interaction[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 1996, 15(5): 283-300.
- [6] JENG D S, LIN Y S. Non-linear waves-induced response of porous seabed: A finite element analysis[J]. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 1997, 21(1): 15-42.
- [7] LIN Y S, JENG D S. Response of poro-elastic seabed in front of a breakwater: A finite element analysis[J]. Coastal Engineering in Japan, 1996, 39(2): 165-183.
- [8] LIN Y S, JENG D S. The effect of variable permeability on the wave-induced seabed response[J]. Ocean Engineering, 1997, 24(7): 623-643.
- [9] WEN F, WANG J H. Response of layered seabed under wave and current loading[J]. Journal of Coastal Research, 2015, 31(4): 907-919.
- [10] ZEN K, YAMAZAKI H. Mechanism of wave-induced liquefaction and densification in seabed[J]. Soils and Foundations, 1990a, 30(4): 90-104.
- [11] ZEN K, YAMAZAKI H. Oscillatory pore pressure and liquefaction in seabed induced by ocean waves[J]. Soils and Foundations, 1990b, 30(4): 147-161.
- [12] ZEN K, YAMAZAKI H. Wave-induced liquefaction in a permeable seabed[R]. Japan: Report of Port and Harbor Research Institute, 1993: 155-192.
- [13] LIU B, LIU J C, MA Z R, et al. Laboratory research on sandy deposit liquefaction suppression under wave loading[J]. Southern Energy Construction, 2017(4): 100-107. 刘博, 刘晋超, 马兆荣, 等. 波浪荷载下砂质海床液化抑制的试验研究[J]. 南方能源建设, 2017(4): 100-107.

- [14] MEI C C. The Applied dynamics of ocean surface Waves[M]. New Jersey: World Scientific, 1983: 740.
- [15] 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.

Experimental Study on Response of Inhomogenous Seabed to Wave Loading

LIU Bo, LIU Jin-chao, HE Xiao-hua, YUAN Guo-kai, BI Ming-jun, LIN Jing-hua
(Guangdong Electric Power Design Research Institute Co., Ltd., China Energy Construction Group,
Guangzhou 510663, China)

Abstract: In marine environment, the seabed is often inhomogenous due to geological origin. The response of inhomogenous seabed to wave loading differs a lot from that of the homogeneous seabed. A large number of scholars have studied the response of the inhomogenous seabed to the wave loading in detail by means of numerical and analytical methods, but relevant laboratory experiments are still in infancy. In this paper, an experimental study on the response of different types of inhomogenous seabed to the wave loading is experimentally studied by using a one-dimensional cylinder experiment. This study provides an experimental basis not only for the determination of the response and the liquefaction law of the inhomogenous seabed under the wave loading, but also for the related theoretical and numerical studies. The analysis of the experimental results indicates that the experimental results are significantly influenced by the permeability coefficient of the inhomogeneous seabed. The inhomogeneous seabed with a larger permeability coefficient can produce higher pore water pressure response and smaller seabed liquefaction.

Key words: inhomogenous seabed; wave loading; seabed response; experimental study

Received: September 5, 2017