

DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2017.04.019

# 波浪荷载下砂质海床液化抑制的试验研究

刘博, 刘晋超, 马兆荣, 何小华, 元国凯

(中国能源建设集团广东省电力设计研究院有限公司, 广州 510663)

**摘要:** 在波浪荷载作用下, 砂质海床往往会由于海床液化最终导致海床的整体失稳, 而海床整体失稳的发生将对其上部承载结构物(近海风机、石油平台等)的稳定性产生严重影响。为控制海床液化的影响, 大量学者采用解析、数值和现场试验方法对分层海床的海床响应及液化抑制问题进行了研究, 但相关的室内试验研究仍处于起步阶段。为进一步完善海床液化相关试验规律及数据, 本文采用一维圆筒试验设备对波浪荷载下砂质海床的响应和液化抑制问题进行了试验研究, 发现当替换一部分海床为液化保护层后, 海床的液化会被极大地抑制, 而当替换的液化保护层厚度达到海床总高度的10%以后, 海床将完全不发生液化现象。

**关键词:** 波浪荷载; 砂质海床; 海床响应; 液化抑制; 试验研究

中图分类号: TU4

文献标志码: A

文章编号: 2095-8676(2017)04-0100-07

## Laboratory Research on Sandy Deposit Liquefaction Suppression Under Wave Loading

LIU Bo, LIU Jinchao, MA Zhaorong, HE Xiaohua, YUAN Guokai

(China Energy Engineering Group Guangdong Electric Power Design Institute Co., Ltd., Guangzhou 510663, China)

**Abstract:** For sandy seabed, seabed overall instability are always caused by the wave-induced seabed liquefaction, which will have serious impact on the stability of the structures (offshore wind turbines, oil platforms) upper the seabed. To control the influence of seabed liquefaction, large number of scholars have investigated the wave-induced layered seabed response and liquefaction suppression with analytical and numerical methods, while related experimental research are still in its infancy. To further improve the related test rule and data, the study used one-dimensional cylinder experimental equipment to study the sandy deposit response and liquefaction suppression under wave loading, and found that when replace part of the seabed as liquefied protective layer, seabed liquefaction would greatly suppressed; when the thickness of liquefied protective layer reach 10%, seabed liquefaction phenomenon would not occur.

**Key words:** wave loading; sandy deposit; seabed response; liquefaction suppression; experimental study

随着人类对海洋开发力度的逐步增大, 越来越多的近海结构物(如近海风电场、石油平台、防波堤等)不断地被建设并投入使用。由于海洋环境与陆地环境存在较大差异, 因此上述提到的近海结构

物往往处在较为复杂的波浪荷载环境下。上述波浪荷载通常不能直接造成近海结构物结构强度或是刚度的破坏, 但它们会对承载结构物的海床土体产生较大影响, 继而造成近海结构物的整体倾覆等破坏<sup>[1-2]</sup>。

事实上, 国内外均发生过因海床失稳而造成近海结构物破坏的事故。图1给出了发生在日本境港市的防波堤破坏事故<sup>[3]</sup>, 该防波堤在投入使用不到两年的时间内, 由于受到波浪荷载的持续作用, 造成承载该防波堤的海床土体因孔隙水压力的持续累积导致海床液化现象发生, 继而造成防波堤不均匀

收稿日期: 2017-05-15

基金项目: 中国能建广东院科技项目: 波浪能发电技术应用研究 (EV00951W0)

作者简介: 刘博(1989), 男, 河南三门峡人, 工程师, 博士, 主要从事水动力荷载下的海床及海床结构物失稳机理研究 (e-mail) liubo2@gedi.com.cn。

沉降(如红圈内所示), 最终导致该防波堤功效大幅降低。因此保证近海结构物海床基础的稳定性, 是保证近海结构物稳定性的关键。



图1 防波堤在波浪荷载下的破坏图

Fig. 1 Breakwater damaged under wave loading

对砂质海床来说, 海床液化是最常见的海床失稳形式<sup>[4]</sup>。海床液化的发生通常是由于波浪压力向海床土体扩散过程中出现的压力衰减及相位滞后造成的。由于波浪压力的衰减和相位滞后, 造成了波浪压力和孔隙水压力间存在差值, 将导致超孔隙水压力的产生。而波浪的往复作用将引起超孔隙水压力不断累积, 当海床内某一深度处超孔隙水压力大于其上覆土层压力时, 海床内土体颗粒间的有效应力为零, 此时海床土体颗粒处于游离状态, 且其行为同液体相似, 此即为海床的液化现象<sup>[5]</sup>。

海床液化的发生对近海结构物的稳定性有较大影响。当海床液化深度达到一定规模时, 近海结构物将存在不均匀沉降或是整体倾覆的危险, 因此许多学者针对海床的液化抑制问题做了大量研究。常见的抑制海床液化的方法主要有液化保护层替换法和堆积法<sup>[4]</sup>, 不论是采用替换法或是堆积法, 其本质均为将均质海床进行分层(分层海床), 即在均质海床上部加入或替换一层渗透系数较大的液化保护层。早在20世纪80年代初, Yamamoto<sup>[6]</sup>就采用半解析方法给出了分层海床在波浪荷载下响应的解析解。在此基础上, Hsu等<sup>[7]</sup>研究了分层粉砂海床在波浪作用下的响应及稳定性问题, 包括海床液化和海床剪切破坏问题。此后, Jeng和Lin<sup>[8-11]</sup>采用数值方法对波浪荷载下分层海床的液化问题进行了详细研究, 并探讨了海床的保护问题; Wen<sup>[12]</sup>、Wen和Wang<sup>[13]</sup>也采用数值方法对波流荷载下分层海床的液化及液化防护问题进行了相关研究。

上述提到的所有文献均采用解析或数值方法对波浪荷载下分层海床的海床响应和海床防护问题进

行了研究, 而已有的试验研究尚处于起步阶段<sup>[14-16]</sup>, 相关试验数据并不完善。基于此, 本文采用一维圆筒试验对二层海床在波浪荷载下的海床响应和液化防护问题进行了详细的试验研究, 以丰富相关研究的试验规律及数据。具体来看, 本文首先研究了海床内孔隙水压力的衰减和相位滞后现象, 其次对波浪荷载下二层海床内的孔隙水压力响应情况做了参数分析, 最后对海床的液化防护规律进行了探讨。

## 1 试验设备介绍、试验中海床准备过程及波浪荷载施加情况

本文采用一维圆筒试验设备, 对波浪荷载下二层海床的海床响应和液化抑制问题进行了详细的试验研究。为了能够更好地理解具体的试验过程, 本节将依次对试验所用设备、试验中二层海床的准备过程以及试验中的波浪荷载施加情况进行详细介绍。

### 1.1 一维圆筒试验设备介绍

本文所用的一维圆筒试验设备是在Zen和Yamazaki<sup>[17-18]</sup>于20世纪90年代研制的一维圆筒设备的基础上改进而成的。图2为本文所用一维圆筒设备照片, 从图中可知本试验设备共有五个部分组成, 分别为: 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(D、E)和孔隙水压力计(F)。

具体来看, 主体圆筒部分主要由十个有机玻璃圆筒(直径205 mm, 高200 mm)组装而成的, 其作用为试验土样和水样的载体及试验具体进行过程的载体; 荷载施加部分由气液压转换装置组成, 其作用为将气压转换为水压, 实现波浪荷载的施加; 荷载控制部分由波浪荷载控制中心组成, 其作用为控制波浪荷载的波浪循环次数、波浪周期、波浪高度等条件; 数据采集部分由数据采集器(DC31-201A)和电脑组成, 其作用为记录孔隙水压力计采集到的数据; 为更好地记录孔隙水压力沿深度方向的分布趋势, 试验中共使用11支孔隙水压力计, 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。有关试验设备的更详细介绍可参照作者之前的论文(Liu等<sup>[19]</sup>)。

### 1.2 试验中海床准备过程

试验中采用长江下游的河砂(细砂)作为砂质海

床的土样,采用粗砾石作为海床的液化保护层。试验中所用的粗砾石较为均匀,其平均粒径为 10.3 mm,初始孔隙比为 0.588。对于试验中所用的细砂来说,图 3 给出了其级配曲线,表 1 列出了其基本性质。图 3 中的级配曲线是由筛分试验测出。

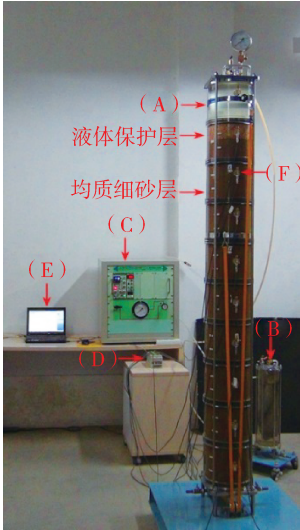


图 2 一维圆筒试验设备设计图及照片

Fig. 2 Schematic diagram and photo of one-dimensional cylinder equipment

表 1 列出了其基本性质。图 3 中的级配曲线是由筛分试验测出。表 1 中的最大孔隙比  $e_{\max}$  和最小孔隙比  $e_{\min}$  由国际上的 ASTM 标准方法测得;饱和度  $S$  是在试验后结束由烘干法测得;渗透系数  $K$  是由常水头试验测得;剪切模量  $G$  是由常规固结试验先测得细砂的弹性模量  $E$ ,再由公式(1)中的对应关系计算得到。

$$G = \frac{E}{2(1 + \mu)} \quad (1)$$

式中:  $\mu$  为细砂的泊松比,试验中取 0.3。

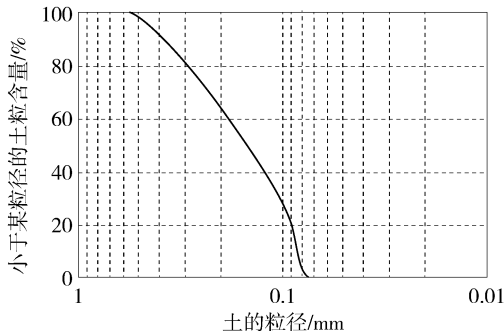


图 3 试验中所用细砂的级配曲线

Fig. 3 Grain size distribution curve of fine sand used in the experiment

表 1 试验中所用细砂的基本性质

Tab. 1 Basic properties of fine sand used in the experiment

参数	数值
土体重度 $G_s$	2.67
最大孔隙比 $e_{\max}$	0.92
最小孔隙比 $e_{\min}$	0.53
平均粒径 $D_{50}/\text{mm}$	0.157
渗透系数 $K/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$ ( $D_r=73.8\%$ , $e=0.63$ )	$0.8 \times 10^{-4}$
剪切模量 $G/(\text{N} \cdot \text{m}^{-2})$ ( $D_r=73.8\%$ , $e=0.63$ )	$1.43 \times 10^7$
饱和度 $S$ (使用脱气水)/%	99.6

相对密度  $D_r$  反映了海床的松散程度,可通过海床的最大孔隙比  $e_{\max}$ 、最小孔隙比  $e_{\min}$  和初始孔隙比  $e$  求得,具体算式如下:

$$D_r = \frac{e_{\max} - e}{e_{\max} - e_{\min}} \quad (2)$$

为了考察液化防护层对海床响应和海床液化的影响情况,因而本试验共准备了三种不同的海床类型,表 2 为试验中不同海床类型的基本情况。从该表中可知,试验中不同的海床类型主要是由液化保护层的厚度决定的,第一种类型的海床没有液化保护层;第二种类型海床的液化保护层厚度为 0.1 m;第三种类型海床的液化保护层厚度为 0.2 m。试验中的装样过程是自下而上进行的,在装样时需按质量控制原则及均匀压实原则以保证各层海床的初始孔隙比。当装样完成后,各类型海床的总高度均为 1.8 m。

### 1.3 试验中的波浪荷载情况

在本试验中,共需进行 9 组试验,这 9 组试验的波浪荷载情况均在表 3 中列出。在这 9 组试验中,第 1 至 3 组为类型 1 海床,即海床无液化保护层;第 4 至 6 组为类型 2 海床,即海床的液化保护层厚度为 0.1 m;第 7 至 9 组为类型 3 海床,即海床的液化保护层厚度为 0.2 m。试验中成层土海床和水的高度均为 1.8 m 和 0.2 m。需要注意的是,所有成层土试验均会施加 50 kPa 的静水压力在海床上,该静水压力实际上模拟了 5.0 m 水深,加上实际存在的 0.2 m 水深,因而试验中的总体水深为 5.2 m。

表 3 中提到的  $|P_m|$  表示了波浪压力控制中心设定的波浪最大的振幅值,可按照线性波理论求得对应的波浪高度。例如,当  $2|P_m|$  为 34.32 kPa 时,对应的波浪高度为 3.5 m。另外,上述所有的波浪

荷载条件均符合不碎波条件<sup>[20]</sup> (具体见公式3), 即试验中所用的波浪加载条件均为合理的。

$$\frac{H}{L} \leq 0.142 \tanh(kd)$$

$$\frac{H}{d} \leq 0.78 \quad (3)$$

式中:  $H$  为波高, m;  $d$  为水深, m;  $L$  为波长,  $k = 2\pi/L$  为波数。

## 2 试验结果分析及讨论

本节将对试验结果进行分析及讨论。具体来看, 本节首先将试验结果与已有理论进行对比, 验证试验结果的正确性, 其次研究了海床内孔隙水压力的衰减和相位滞后现象, 接着对波浪荷载下二层海床内的孔隙水压力响应情况做了相关的参数分析, 最后对海床的液化防护效果进行了研究。

### 2.1 试验结果与理论对比

为了验证试验结果的正确性, 本试验结果将首先与波浪荷载下均质海床响应的解析解<sup>[4]</sup> 进行对

比。这里选取第2组试验的试验数据与Jeng的解析解进行对比。图4给出了不同波浪循环次数下( $N_c = 10$ ,  $N_c = 3000$ ) 均匀土试验结果与Jeng的解析解<sup>[4]</sup> 求得的孔隙水压力最大振幅值( $|p|/P_0$ ) 随海床相对深度( $z/h$ ) 变化趋势的对比情况。该组对比所用的波浪和海床土体参数均在图中列出。图中采用 $P_0$  进行无量纲化处理,  $P_0$  表示海床表面波压力的振幅值。

从图4中可知, 不论是试验开始阶段或是试验结束阶段, 本试验结果和前人解析解<sup>[4]</sup> 均能够吻合良好, 尤其是在海床上部区域。但是在海床下部区域, 本试验结果和前人解析解<sup>[4]</sup> 出现了一定的偏差, 主要原因是因为海床相对密度会随着波浪荷载的施加而变化, 这将影响到海床土体参数大小, 如海床渗透系数、剪切模量等参数。但采用Jeng的解析解<sup>[4]</sup> 进行解析计算时, 所用海床土体参数均为定值, 这也会导致试验结果与前人解析解<sup>[4]</sup> 出现一定偏差。总体来说, 试验结果与理论计算结果吻合较好, 基本能够验证试验结果的正确性。

表2 试验中不同海床类型的基本情况

Tab. 2 Basic situation of seabed types in the experiment

编号	海床类型	土层编号	土层区域	土层基本情况	初始孔隙比 $e$
类型1	均质细砂海床, 液化保护层厚度为0m	1	-1.8 ~ 0 m	纯细砂层	0.63
类型2	细砂海床中替换液化保护层, 厚度为0.1 m	1	-0.1 ~ 0 m	液化保护层, 粗砾石	0.588
		2	-1.8 ~ -0.1 m	纯细砂层	0.63
类型3	细砂海床中替换液化保护层, 厚度为0.2 m	1	-0.1 ~ 0 m	液化保护层, 粗砾石	0.588
		2	-1.8 ~ -0.1 m	纯细砂层	0.63

表3 试验中具体试验组的荷载情况

Tab. 3 Details of test conditions used in the experiment

试验组序号	砂质海床类型	输入压力振幅 $2 P_m /\text{kPa}$	波浪周期 $T/\text{s}$	水深 $d/\text{m}$	海床高度 $h/\text{m}$	海床饱和度 $S/\%$
1	细砂海床, 无液化保护层	12.103	9	0.2	1.8	99.6
2	细砂海床, 无液化保护层	34.32	9	0.2	1.8	99.6
3	细砂海床, 无液化保护层	34.32	3	0.2	1.8	99.6
4	两层海床, 液化保护层厚度0.1 m, 细砂厚度1.7 m	12.103	9	0.2	1.8	97.1
5	两层海床, 液化保护层厚度0.1 m, 细砂厚度1.7 m	34.32	9	0.2	1.8	97.1
6	两层海床, 液化保护层厚度0.1 m, 细砂厚度1.7 m	34.32	3	0.2	1.8	97.1
7	两层海床, 液化保护层厚度0.2 m, 细砂厚度1.8 m	12.103	9	0.2	1.8	97.1
8	两层海床, 液化保护层厚度0.2 m, 细砂厚度1.8 m	34.32	9	0.2	1.8	97.1
9	两层海床, 液化保护层厚度0.2 m, 细砂厚度1.8 m	34.32	3	0.2	1.8	97.1

备注: 1. 每一组试验的波浪循环次数( $N_c$ ), 都是3 000次;

2.  $|P_m|$  表示波浪压力控制中心部分设定的波浪最大振幅值。

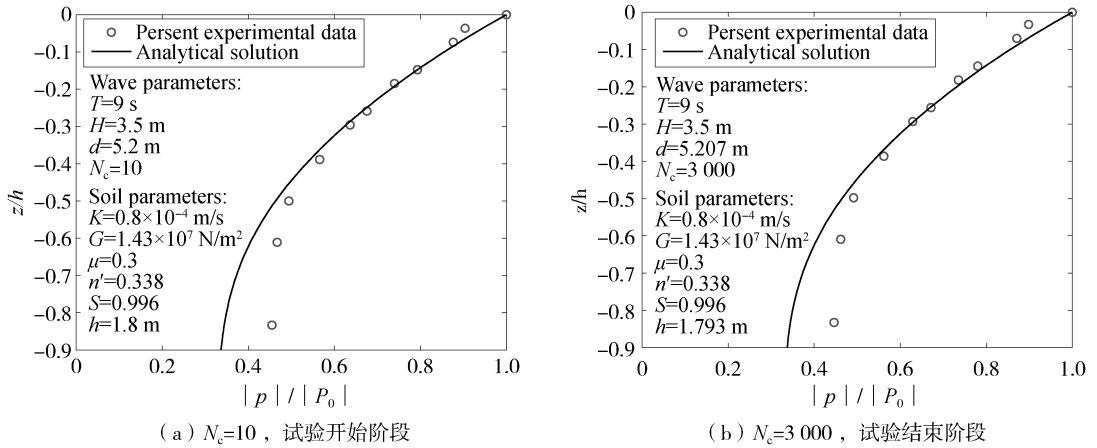


图4 不同波浪循环次数下本试验数据(红色圆点)和前人解析解(黑色实线)求得孔隙水压力最大振幅值随海床相对深度变化趋势的对比情况

Fig. 4 Vertical distributions of maximum amplitude of wave-induced pore pressure versus seabed relative depth for comparison between the present experiment data (red points) and analytical solution (black line) with different wave cycles

### 2.2 孔隙水压力衰减和相位滞后现象

前文已经提到过, 孔隙水压力的衰减和相位滞后是导致海床液化发生的重要原因, 本试验中也记录到了海床内孔隙水压力的衰减和相位滞后现象。图5给出了第8组试验中孔隙水压力随时间的变化趋势图, 该图中各个不同高度分别对应于孔隙水压力计  $P_1, P_2, P_3, P_5, P_7$  的位置(上述孔隙水压力计的具体位置在图2(a)中列出), 其中  $P_1, P_2$  孔压计埋设在液化保护层中,  $P_3, P_5, P_7$  孔压计埋设在细砂层中。

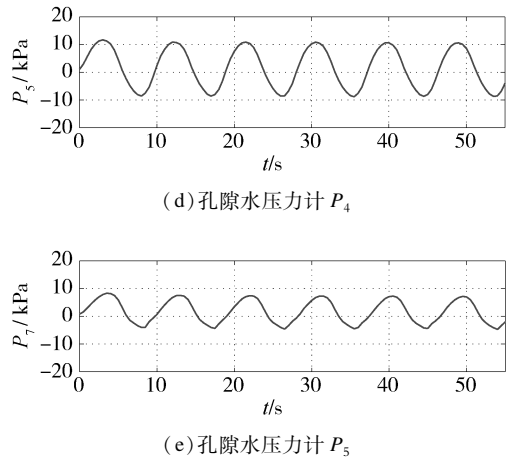
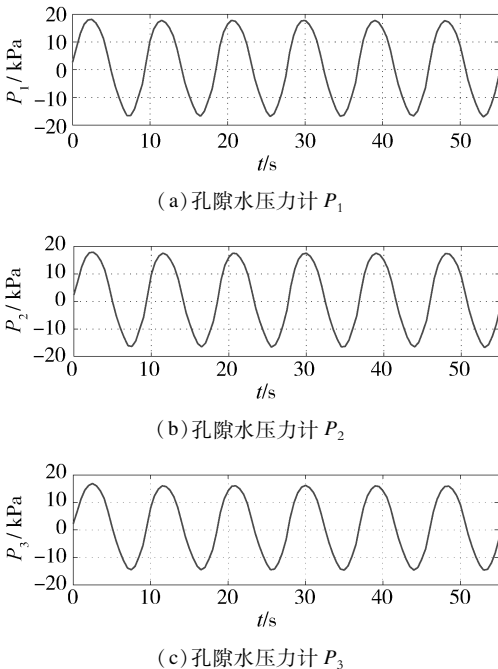


图5 试验中孔隙水压力响应的衰减和相位滞后现象  
Fig. 5 Attenuation and phase lag of pore pressure response in the experiment

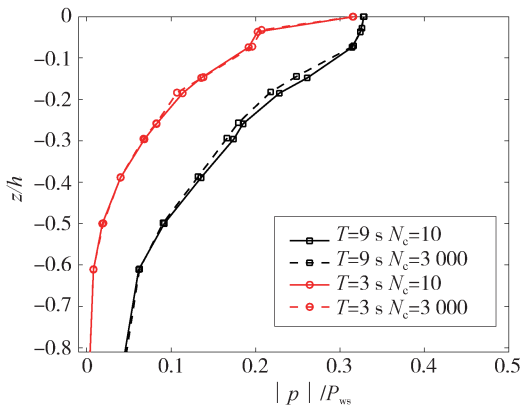
从该图中可知, 在渗透系数较大的液化保护层中( $P_1$  和  $P_2$  孔压计), 几乎不存在孔隙水压力的衰减和相位滞后; 而在渗透系数较小的细砂层中( $P_3, P_5, P_7$  孔压计), 有明显的孔隙水压力衰减和相位滞后现象。由孔隙水压力计  $P_7$  记录的孔隙水压力最大振幅值只有孔隙水压力计  $P_1$  记录的孔隙水压力最大振幅值的 35%, 这说明孔隙水压力存在很大的衰减; 由孔隙水压力计  $P_7$  记录的孔隙水压力大约滞后于孔隙水压力计  $P_1$  记录的孔隙水压力 1.6 s, 考虑到波浪周期是 9 s, 则 1.6 s 的延迟反映了  $64^\circ$  的相位滞后, 这说明孔隙水压力存在很大的相位滞后。

### 2.3 波浪参数对孔隙水压力响应的影响

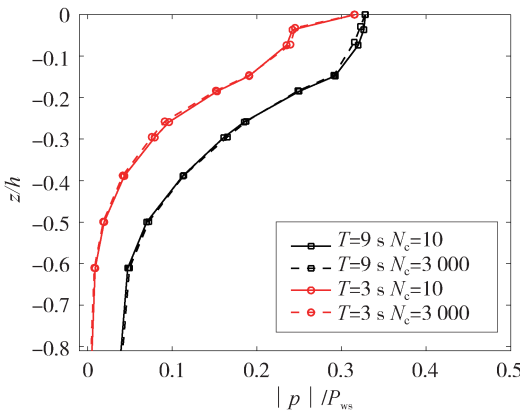
波浪参数的变化将改变海床上部的波压力大小, 继而对海床土体内的孔隙水压力产生影响, 因此研究波浪参数对海床内孔隙水压力响应的影响是必要的。

#### 2.3.1 波浪周期的影响

图 6 给出了不同液化防护层厚度的两层土海床中波浪周期( $T$ )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。其中图 6 (a)中给出第 5-6 组试验中的孔隙水压力数据; 而 6 (b)中给出第 8-9 组实验中的孔隙水压力数据。图中的孔隙水压力最大振幅值均由海床表面的静水压力( $P_{ws}$ )进行无量纲化处理。从图中可知, 随着波浪周期的增加, 不同类型海床内孔隙水压力的最大振幅值均会随之增加, 这是由于波浪周期的增加将导致波压力的增加, 继而造成孔隙水压力的增大。



(a) 类型 2 海床, 液化防护层厚度 0.1 m



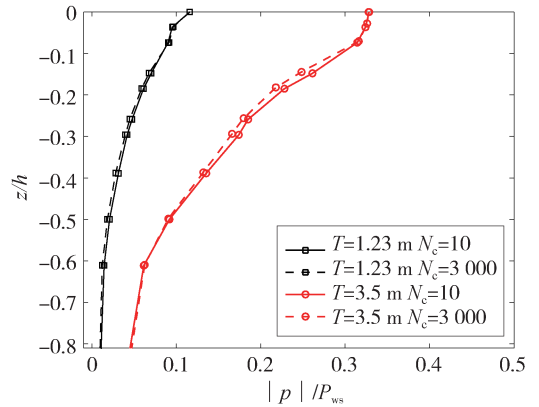
(b) 类型 3 海床, 液化防护层厚度 0.2 m

图 6 不同类型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

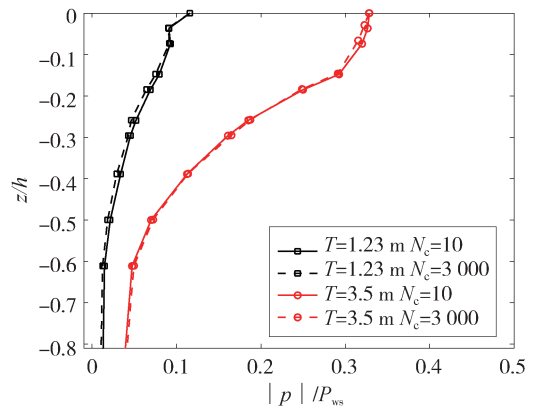
Fig. 6 Effects of wave period on vertical distributions of wave-induced pore pressure in different types of sandy seabed

#### 2.3.2 波浪高度的影响

本节将考虑波浪高度的影响。图 7 给出了不同液化防护层厚度的两层土海床中波浪高度( $H$ )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。具体来看, 图 7 (a)中给出第 4-5 组试验中的孔隙水压力数据; 而 7 (b)中给出第 7-8 组试验中的孔隙水压力数据。图中采用海床表面的静水压力( $P_{ws}$ )进行无量纲化处理。从图中可知, 随着波浪周期的降低, 不同类型海床内孔隙水压力的最大振幅值均会随之减小, 这是由于波浪高度的降低将导致波压力的大幅减小, 继而造成孔隙水压力随之减小。



(a) 类型 2 海床, 液化防护层厚度 0.1 m



(b) 类型 3 海床, 液化防护层厚度 0.2 m

图 7 不同类型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. 7 Effects of wave height on vertical distributions of wave-induced pore pressure in different types of sandy seabed

#### 2.3.3 波浪循环次数的影响

由于前人的试验研究中对同一种波浪荷载进行的波浪循环次数有限(最多 500 次), 而本试验中对所有试验组均进行了 3 000 次的波浪循环, 因此本

节考虑波浪循环次数对海床响应的影响情况。从图6和图7中可知,随着波浪循环次数的增加,海床内孔隙水压力的最大振幅值均会出现略微的降低。其主要原因为随着波浪荷载的增加,海床将会出现一定的沉降,这会造成海床相对高度的降低,继而造成孔隙水压力最大振幅的减小<sup>[19]</sup>。

## 2.4 海床土体类型对孔隙水压力响应的影响

为探讨液化保护层的加入对海床响应的影响情况,本节主要考虑海床土体类型对孔隙水压力响应的影响情况。图8给出了不同类型海床中孔隙水压力沿海床深度方向的分布趋势图,图中的孔隙水压力最大振幅值由海床表面的波压力( $P_0$ )进行无量纲化处理。

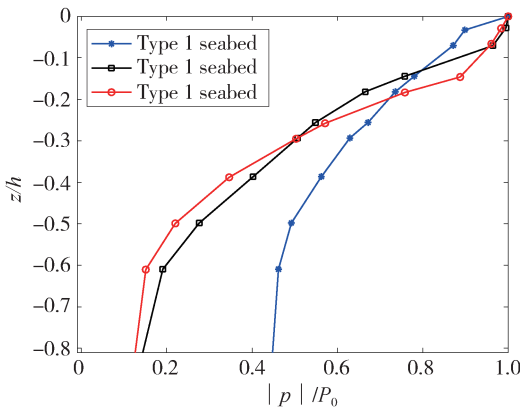


图8 不同类型海床中孔隙水压力沿海床深度方向分布趋势的影响

Fig. 8 Vertical distributions of wave-induced pore pressure in different types of sandy seabed

通过对比图8中类型1海床和类型2-3海床的孔隙水压力分布趋势可知,当海床内加入液化保护层后,虽然在海床下部区域孔隙水压力的最大振幅值会有所下降,但是在海床上部区域孔隙水压力的最大振幅值会有较大的增加,这会导致海床内超孔隙水压力的减小,继而大大降低海床的液化现象;进一步对比该图中类型2和类型3海床的孔隙水压力分布趋势可知,当海床内的液化保护层厚度增加后,海床内孔隙水压力的增加区域会进一步的增加,从而进一步扩大海床的液化抑制范围。

## 2.5 海床液化分析

为探讨海床内替换液化防护层后对海床液化的抑制情况,本节将对波浪荷载下的海床液化问题进行分析。本文主要采用Zen和Yamazaki<sup>[17-18]</sup>提出

的液化判定准则进行海床的液化计算,即当海床内超孔隙水压力( $u_e$ )超过其上覆土层压力(海床的总应力 $\sigma'_0$ )时,海床的有效应力( $\sigma'_z$ )就会消失,继而造成海床液化。其计算式如下:

$$\sigma'_0 = -(\gamma_s - \gamma_w)z, u_e = -(P_0 - p) \quad (4)$$

$$\sigma'_z = \sigma'_0 - u_e \leq 0 \quad (5)$$

式中: $\gamma_s$ 和 $\gamma_w$ 分别为海床土体和水的重度。

图9给出了不同类型海床中垂向有效应力( $\sigma'_z$ )沿海床深度( $z$ )的分布趋势图。该图中的垂向有效应力数据由第1,4,7组试验中的孔隙水压力数据计算得到的。从图9中可知,当海床由均匀细砂组成时,海床的最大液化深度为0.67 m;当替换0.1 m海床为粗砾石组成的液化防护层时,海床的最大液化深度降低至0.295 m;而当液化防护层的厚度增至0.2 m时,海床则完全不发生液化现象。按牛顿插值法可算出当液化防护层厚度为0.178 m时,海床最大液化深度刚好为0 m。

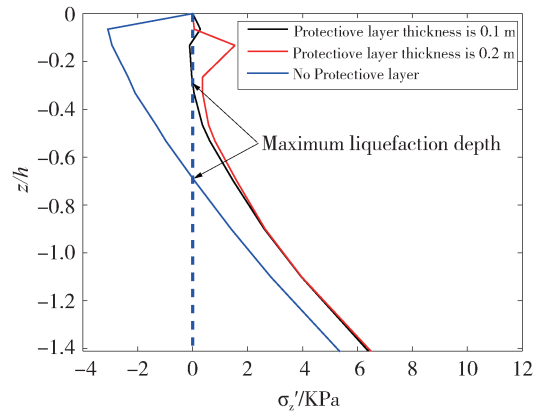


图9 不同类型海床中波浪引起的海床液化情况

Fig. 9 Wave-induced seabed liquefaction in different types of sandy seabed

事实上,替换的液化防护层厚度占海床总高度的比例( $\Delta h$ )和液化深度降低量( $\Delta z$ )有紧密联系。对本试验所采用的波浪条件和海床土体条件来说,图10给出了二者之间的变化关系。从图中可知,当替换的液化保护层厚度比( $\Delta h$ )增加时,海床的液化深度降低量( $\Delta z$ )将呈现线性增长( $\Delta z = 10.077\Delta h$ );而当替换的液化保护层厚度比 $\Delta h$ 增长到10%后,海床将完全不发生液化现象,海床的液化深度降低量 $\Delta z$ 将不随 $\Delta h$ 的增加而继续增加。

在实际的工程应用中,由于替换法有一定成本,因而替换适当厚度的液化防护层从而保证海床

液化的影响在可接受范围内即可。

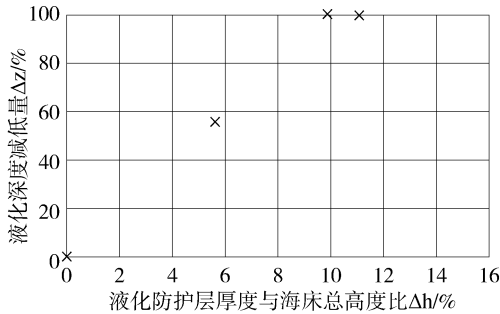


图10 液化深度降低量( $\Delta z$ )随替换的液化防护层厚度比( $\Delta h$ )变化图

Fig. 10 The ratio of the liquefaction depth ( $\Delta z$ ) varies with the ratio of the liquefied protective layer to the total height of the seabed ( $\Delta h$ ).

### 3 结论

本文采用一维圆筒试验对二层海床在波浪荷载下的海床响应和液化防护问题进行了详细的试验研究。具体来看, 本文首先研究了海床内孔隙水压力的衰减和相位滞后现象, 其次对波浪荷载下二层海床内的孔隙水压力响应情况做了相关的参数分析, 最后对海床的液化防护问题进行了探讨。根据试验结果可以得出以下结论:

1) 通过与前人解析解<sup>[4]</sup>的对比可以基本验证本试验结果的正确性;

2) 在渗透系数较大的液化保护层中, 几乎不存在孔隙水压力的衰减和相位滞后; 而在渗透系数较小的细砂层中, 有明显的孔隙水压力衰减和相位滞后现象;

3) 波浪参数对二层海床孔隙水压力的响应有较大影响, 随着波浪周期和波浪高度的增加, 孔隙水压力最大振幅值也会随之增加; 随着波浪循环次数的增加, 孔隙水压力最大振幅值会随之减小;

4) 当海床内加入液化保护层后, 海床上部区域内的孔隙水压力会有较大的增加, 这会导致海床内超孔隙水压力的减小, 继而大大降低海床的液化现象;

5) 采用替换法对海床液化的抑制效果明显。当替换的液化保护层厚度比增加时, 海床的液化深度降低量将呈现线性增长, 而当替换的液化保护层厚度比增长到10%后, 海床则完全不发生液化现象, 海床的液化深度降低量将不随的增加而继续增加。

### 参考文献:

- [1] FRANCO L. Vertical breakwaters: the Italian experience [J]. Coastal Engineering, 1994, 22(1-2): 31-55.
- [2] SILVESTER R, HSU J R C. Sines revisited [J]. Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering, 1989, 115(3): 327-343.
- [3] SUMER B M, FREDSØE J. The mechanism of scour in the marine environment [M]. New Jersey: World Scientific, 2002: 536-539.
- [4] JENG D S. Porous models for wave-seabed interactions [M]. Heidelberg: Springer, 2013: 33-76.
- [5] Rahman M S. Instability and movement of oceanfloor sediments: a review [J]. International Journal for Offshore and Polar Engineering, 1997, 7(3): 220-225.
- [6] YAMAMOTO T. Wave-induced pore pressures and effective stresses in inhomogenous seabed foundations [J]. Ocean Engineering, 1981, 8(1): 1-16.
- [7] HSU J R C, JENG D S, LEE C P. Oscillatory soil response and liquefaction in an unsaturated layered seabed [J]. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 1995, 19(12): 825-849.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] 文峰. 波浪-流作用下饱和和砂质海床响应及稳定性分析[D]. 上海: 上海交通大学, 2015.  
WEN F. Response and stability analysis of saturated sandy seabed under wave flow [D]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University, 2015.
- [13] WEN F, WANG J H. Response of layered seabed under wave and current loading [J]. Journal of Coastal Research, 2015, 31(4): 907-919.
- [14] SLEATH J F A. Wave-induced pressures in beds of sand [J]. Journal of the Hydraulics Division, 1970, 96(2): 367-378.
- [15] TZANG S Y. Water wave-induced soil fluidization in a cohesionless fine-grained seabed [D]. California: University of California at Berkeley, 1992.
- [16] 王立忠, 潘冬子, 潘存鸿, 等. 波浪对海床作用的试验研究 [J]. 土木工程学报, 2007, 40(9): 101-109.  
WANG L Z, PAN D Z, PAN C H, et al. Experimental study of wave action on the seabed [J]. China Civil Engineering Journal, 2007, 40(9): 101-109.



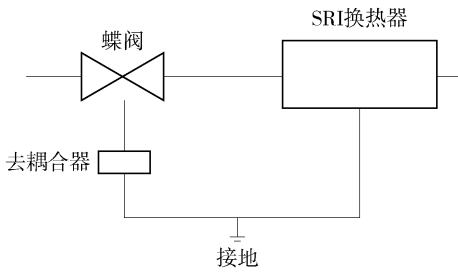


图 10 固态去耦合器安装示意图

Fig. 10 Installation drawing of solid-state decouples



图 13 固态去耦合器

Fig. 13 The solid-state decouplers

### 3 结论

根据上述措施改进后的蝶板，在海水系统使用取得了较好的效果，减少后期设备维修成本。

核电站阀门设备防腐问题是一项长期的工作，本文通过对蝶板所处的工况、腐蚀原因、防腐措施等方面对蝶板腐蚀情况进行论述，为后续阀门设备防腐提供参考。

(责任编辑 郑文棠)

### 参考文献:

- [1] 广东核电培训中心. 900 MW 压水堆核电站系统与设备下册 [M]. 北京: 原子能出版社, 2004: 497.
- [2] 马普东. 核电站海水系统蝶阀蝶板腐蚀原因分析及处理 [J]. 阀门, 2008(5): 37-40.  
MA P D. The research of the corrosion reasons and some effective methods to solve the problem for the discs of seawater butterfly valves NPP [J]. Valve, 2008(5): 37-40.
- [3] 吴玖. 双相不锈钢 [M]. 北京: 冶金工业出版社, 2002: 100-232.
- [4] 李杰, 王景成, 赵芳欣, 等. 双相不锈钢铸件裂纹的形成原因及对策 [J]. 铸造, 2015, 64(6): 590-593.  
LI J, WANG J C, ZHAO F X, et al. Solving measures and forming reasons of duplex stainless steel crack [J]. Foundry, 2015, 64(6): 590-593.
- [5] 吴剑. 不锈钢的腐蚀破坏与防锈技术: (一)点腐蚀的形成条件、形貌特征及其预防 [J]. 腐蚀与防护, 1998, 18(1): 38-42.
- [6] 鲍其鼎. 氯离子与冷却水系统中不锈钢的腐蚀 [J]. 工业水处理, 2007, 27(9): 1-6.  
BAO Q N. The relationship between chlorideion and the corrosion of stainless steel in cooling water system [J]. Industrial Water Treatment, 2007, 27(9): 1-6.
- [7] 腾延平, 张永盛, 王禹钦, 等. 杂散电流排流设施有效性评价研究 [J]. 管道技术与设备, 2012(4): 40-42 +54.  
TENG Y P, ZHAGN Y S, WANG Y X, et al. Research on the evaluation of stray current drainage method [J]. Pipeline Technique and Equipment, 2012(4): 40-42 +54.

(责任编辑 郑文棠)

(上接第 107 页 Continued from Page 107)

- [17] ZEN K, YAMAZAKI H. Mechanism of wave-induced liquefaction and densification in seabed [J]. Soils and Foundations, 1990a, 30(4): 90-104.
- [18] ZEN K, YAMAZAKI H. Oscillatory pore pressure and liquefaction in seabed induced by ocean waves [J]. Soils and Foundations, 1990b, 30(4): 147-161.
- [19] 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.

- [20] MEI C C. The Applied Dynamics of Ocean Surface Waves [M]. New Jersey: World Scientific, 2003: 740-741.

(责任编辑 郑文棠)