

## · 综合 ·



# 砂质海床特性对单桩所受波浪荷载的影响\*

蒋正施, 汪承志, 冯冬颖

(重庆交通大学 河海学院, 重庆 400074)

**摘要:** 砂质海床特性极大地影响波浪与海工单桩基础结构的相互作用, 而将多孔介质海床简化为刚性、不可渗透固体海床, 忽视了多孔介质海床对波浪能量的影响。研究砂质海床孔隙率、介质颗粒平均粒径对单桩所受波浪荷载的影响, 设计5种不同海床特性的波浪水槽试验。研究结果表明: 在相同波浪条件下, 砂质海床结构内部的孔隙流对波浪能量产生衰减作用, 随着颗粒直径的增大, 波浪能量衰减愈加明显, 单桩所受波浪荷载越小。当海床孔隙率较小, 海床结构内部水流运动微弱, 多孔结构对波浪消能作用不明显。当海床孔隙率进一步增加, 海床结构内部水流运动增强, 多孔结构对波浪消能作用显著, 单桩所受波浪荷载明显减弱。

**关键词:** 海床特性; 单桩; 海床孔隙率; 介质颗粒平均粒径; 波浪荷载

中图分类号: TV 14; U 6

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2021)04-0001-07

## Effect of sandy seabed's characteristics on wave force of a single pile

JIANG Zheng-shi, WANG Cheng-zhi, FENG Dong-ying

(College of River and Ocean Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China)

**Abstract:** The characteristics of the sandy seabed greatly affect the interaction between waves and single-pile foundation structures, while simplifying the porous medium seabed into a rigid and impermeable solid seabed ignores the effect of the porous medium seabed on wave energy. This study investigates the effects of the porosity of the sandy seabed and the average particle size of the medium particles on the wave load on a single pile, and five wave channel experiments with different seabed characteristics are designed. The results show that under the same wave condition, the pore flow inside the sandy seabed structure has an attenuation effect on the wave energy. As the particle diameter increases, the wave energy attenuation becomes more obvious, and the wave load on the single pile is smaller. When the porosity of the seabed is small, the water flow inside the seabed structure is weak, and the porous structure has no obvious effect on wave energy dissipation. When the seabed porosity is further increased, the water flow within the seabed structure is enhanced, the porous structure has a significant effect on the energy dissipation of the wave, and the wave load on the single pile is significantly weakened.

**Keywords:** seabed characteristics; single pile; seabed porosity; average particle size of medium particles; wave load

单桩基础海工结构在我国东南水深小于30 m的近海水域得到广泛应用。波浪荷载作为主要单桩基础作用力之一, 由深水水域传播至近海水域

后, 随着水深变小, 波高增大, 波长变小, 结构所受波浪荷载可增大至8~9倍<sup>[1]</sup>, 严重威胁近海海工结构的可靠性。因此, 海工结构所受波浪荷

收稿日期: 2020-06-26

\*基金项目: 国家自然科学基金项目(51979017、51579021); 重庆市教委重大项目(KJZD-M201900702)

作者简介: 蒋正施(1996—), 女, 硕士研究生, 研究方向为港口、海岸及近海工程。

载一直是学术界和工程界研究的热点问题。与此同时,实际波浪、海床特性以及海工结构之间存在动力响应<sup>[2-3]</sup>。Khayyer 等<sup>[4]</sup>基于投影的光滑粒子流体力学(SPH)方法,提出一种拉格朗日孔隙率多孔介质数值波浪水槽计算方法,能够准确地再现空间变化多孔介质中流体流动的相互作用。Losada 等<sup>[5]</sup>基于位势理论的线性解、深度积分分解以及欧拉和拉格朗日框架,讨论了多孔介质的湍流模型。LARA 等<sup>[6]</sup>基于相关参数的经验公式确定了多孔介质的诱导阻尼,研究波阻尼对孤子分裂和演化的影响。陈林雅等<sup>[7-8]</sup>在单一波浪条件下提出海床颗粒直径与波浪荷载的三阶多项式。刘振宇等<sup>[9]</sup>通过建立斜坡海床可渗透性的孤立波数值模拟,研究竖直单桩上破碎波浪力的特性与单桩建立位置、海床特性的关系。

当前,对于介质颗粒组成的多孔海床对波浪传播的影响研究尚不深入,且针对波浪-海床-结构相互作用(WSSI)的理论分析不充分。基于此,本文设计 5 种海床进行波浪-海床-单桩相互作用的水槽试验,分析砂质海床特性对单桩所受波浪荷载的影响。

## 1 试验方案

### 1.1 试验材料

为了研究砂质海床特性对单桩所受波浪荷载的影响,采用 4 种不同介质颗粒和光滑木板,作为 5 种不同的砂质海床,其材料主要参数见表 1。其中一种海床采用光滑木板进行覆盖,假设其为不透水、光滑海床条件,模拟刚性海床,与其他 4 组砂质海床进行比较。试验材料见图 1。

表 1 试验材料主要参数

样本	介质颗粒平均粒径 $D_{50}$ /mm	孔隙率/%
PRef	0	0
P1	1	0.375
P2	8	0.439
P3	16	0.459
P4	22	0.475

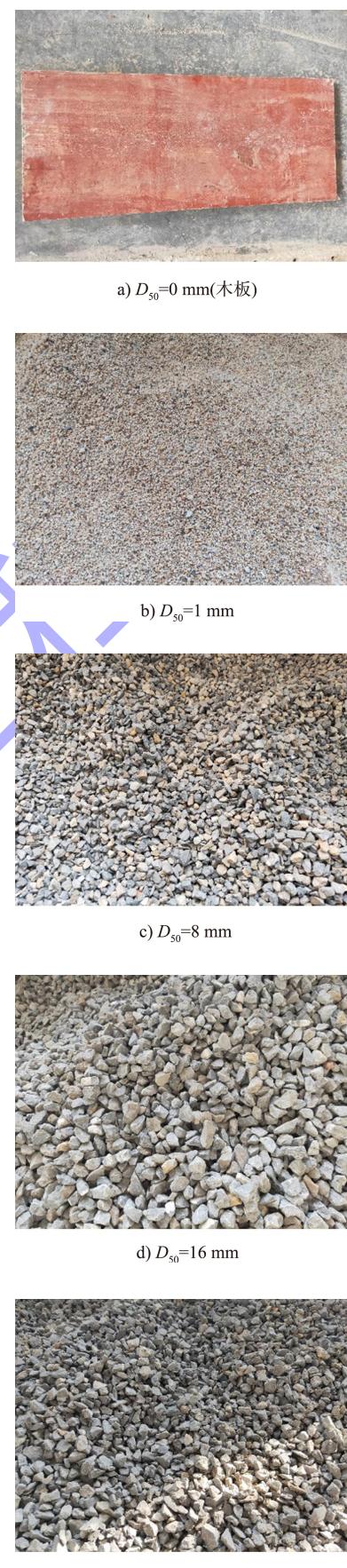


图 1 试验材料

## 1.2 试验设备

试验设备为  $30\text{ m} \times 1\text{ m} \times 0.5\text{ m}$  (长×宽×高) 的波浪水槽, 采用常用的推板式造波方式。试验通过改变设备转速来驱动造波板进行造波, 通过浪高仪量测相应波浪的波高和周期。

## 1.3 模型设计

试验采用光滑、直径为  $11\text{ cm}$ 、高  $100\text{ cm}$  的圆柱模拟单桩, 设计试验海床厚度为  $20\text{ cm}$ , 水深  $45\text{ cm}$ 。由于近海水域条件的特殊性, 波浪条件呈年周期性变化。为更全面地研究在不同波浪条件下砂质海床特性对单桩所受波浪荷载的影响, 设计 20 种波浪条件(表 2)进行试验, 取其 4 种波浪条件进行海床特性分析。同时, 为保证研究成果的普遍适用性, 取  $H/(gT^2)$  无量纲量表示波高  $H$  与周期  $T$  关系, 其中  $g$  为重力加速度。

表 2 设计波浪条件参数

周期 $T/\text{s}$	波高 $H/\text{cm}$	$H/(gT^2)$
3.14	2.14	0.000 2
2.85	2.47	0.000 3
2.57	2.72	0.000 4
2.41	3.10	0.000 5
2.26	3.43	0.000 7
2.05	3.55	0.000 9
2.02	3.95	0.001 0

续表 2

周期 $T/\text{s}$	波高 $H/\text{cm}$	$H/(gT^2)$
1.80	4.00	0.001 3
1.72	4.24	0.001 5
1.68	4.75	0.001 7
1.50	5.60	0.002 5
1.45	6.37	0.003 1
1.41	7.06	0.003 6
1.40	7.40	0.003 9
1.29	7.48	0.004 6
1.21	8.07	0.005 6
1.20	8.30	0.005 9
1.13	8.61	0.006 9
1.11	9.02	0.007 5
1.06	9.03	0.008 2

试验海床由 3 部分组成: 前坡保护段, 多孔介质海床和后坡保护段。前斜坡保护段和后斜坡保护段用于过渡波, 避免试验海床破坏, 增强模型的稳定性。试验海床被铺设在前斜坡和后斜坡保护部分之间的凹槽中。两端的刚性保护段可固定介质颗粒, 以避免波动引起的颗粒运动。此外, 为避免在试验过程中单桩发生倾斜, 试验前期将单桩固定在试验海床中心后再铺设介质颗粒。试验海床的尺寸见图 2。

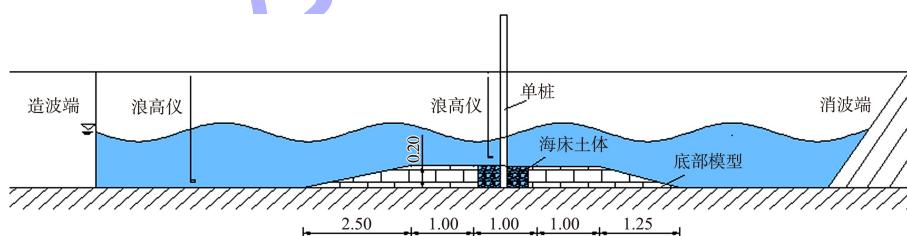


图 2 试验海床 (尺寸: m)

## 1.4 测点布置

为测得单桩在正向水流方向所受波浪荷载, 于桩迎水面中心、桩底上方  $25\text{ cm}$  处布置 1 号测量点, 桩底上方  $30\text{ cm}$  处布置 0 号测量点, 可满足测量要求(图 3)。



图 3 单桩测点布置 (单位: cm)

## 1.5 数据采集

1) 荷载变送器及多功能动态信号采集系统。

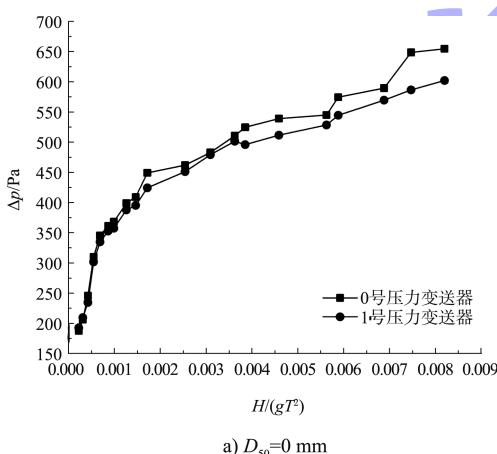
采用型号为 CYG1145，测量范围为  $(0 \pm 10)$  kPa 的荷载变送器，并将荷载变送器与多功能动态信号采集系统连接来测量作用在单桩上的荷载。

2) 浪高仪及多点过程跟踪流速仪。波高、周期通过多点过程跟踪流速仪和浪高仪进行测量。通过将浪高仪、多点过程跟踪流速仪进行连接，设置放大增益为 1，采样频率为 100 次/s，采集时间设为 20 s。

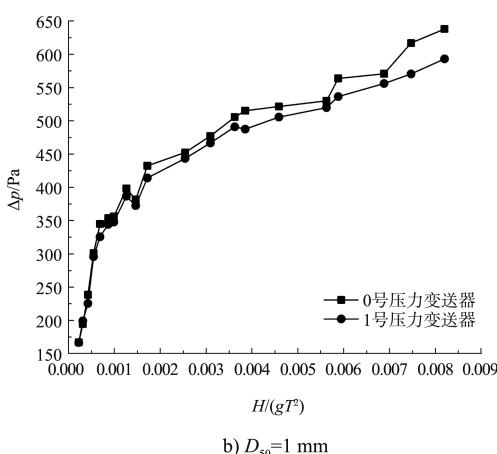
## 2 试验结果分析

### 2.1 单桩所受最大波浪荷载 $\Delta p-H/(gT^2)$

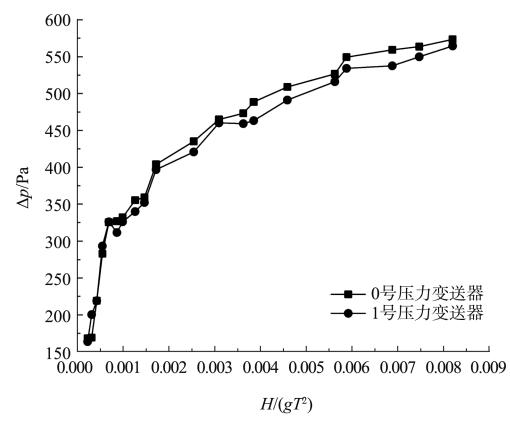
由图 4 可知：在任何海床条件下， $H/(gT^2)$  显著影响单桩所受沿波浪传播方向的最大波浪荷载  $\Delta p$ 。在相同的砂质海床条件下，随着  $H/(gT^2)$  的增大，单桩沿水流运动方向所受波浪最大荷载呈逐渐增大，5 种海床均展现出相似的发展规律。同时，位于水深较浅处的 0 号传感器所受波浪荷载大于 1 号传感器位置。



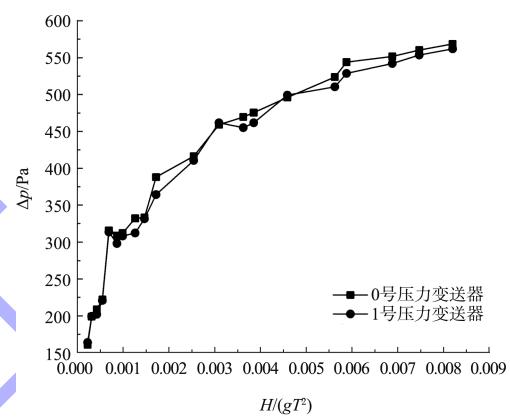
a)  $D_{50}=0$  mm



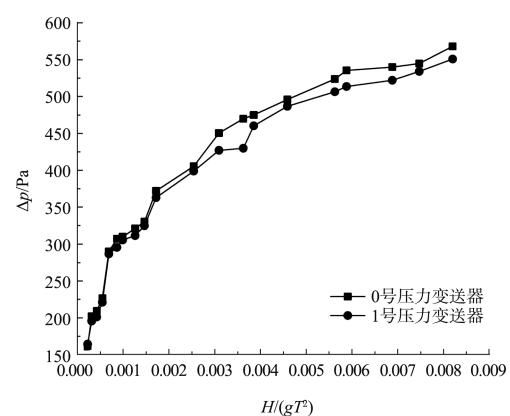
b)  $D_{50}=1$  mm



c)  $D_{50}=8$  mm



d)  $D_{50}=16$  mm



e)  $D_{50}=22$  mm

图 4 单桩所受最大波浪荷载  $\Delta p$  与  $H/gT^2$  关系曲线

因此，在近海特殊水域条件下，波浪由深海水域传播至近海水域后，随着水深变小，波高增大，波长变小，结构所受波浪荷载不容忽视。介质颗粒平均粒径对单桩所受波浪荷载也有不同程度的影响作用，当介质颗粒平均粒径  $D_{50} = 0$  时，单桩所受波浪荷载最大；随着介质颗粒平均粒径的增大，单桩所受波浪荷载呈明显降低的趋势。

## 2.2 单桩所受最大波浪荷载 $\Delta p$ -海床介质颗粒平均粒径 $D_{50}$

为研究海床介质颗粒平均粒径对波浪载荷的影响, 保持海床孔隙率和海床厚度不变, 调整介质颗粒平均粒径进行试验分析。

由图 5 可知: 海床介质颗粒平均粒径  $D_{50}$  显著影响单桩所受沿波浪传播方向的最大波浪荷载  $\Delta p$ 。在相同波浪条件下, 海床为刚性、不透水 ( $D_{50}=0 \text{ mm}$ ), 单桩所受波浪荷载最大。随着介质颗粒粒径的增大, 单桩所受最大波浪荷载逐渐减小, 且 4 种波浪  $H/(gT^2)$  条件下单桩所受波浪荷载减小趋势相似。其中,  $H/(gT^2)=0.001$  时, 海床介质颗粒平均粒径对单桩所受波浪荷载影响效果最为显著, 海床介质颗粒平均粒径  $D_{50}=0 \text{ mm}$  与  $D_{50}=22 \text{ mm}$  时, 0、1 号传感器所测最大波浪荷载差值分别为 77.64 和 76.28 Pa。随着  $H/(gT^2)$  的增大, 海床介质颗粒平均粒径对单桩所受波浪荷载影响效果逐渐减弱。

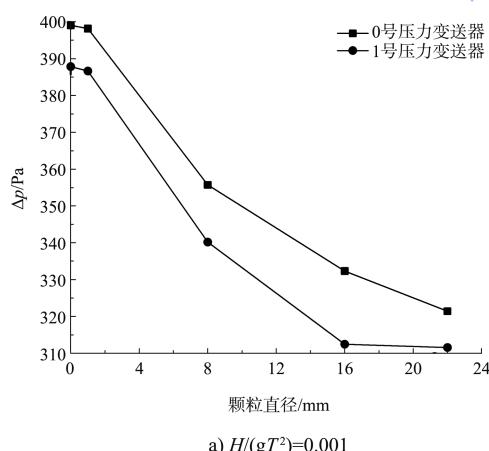
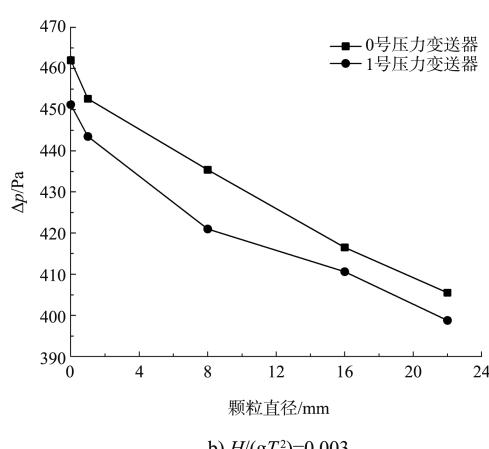
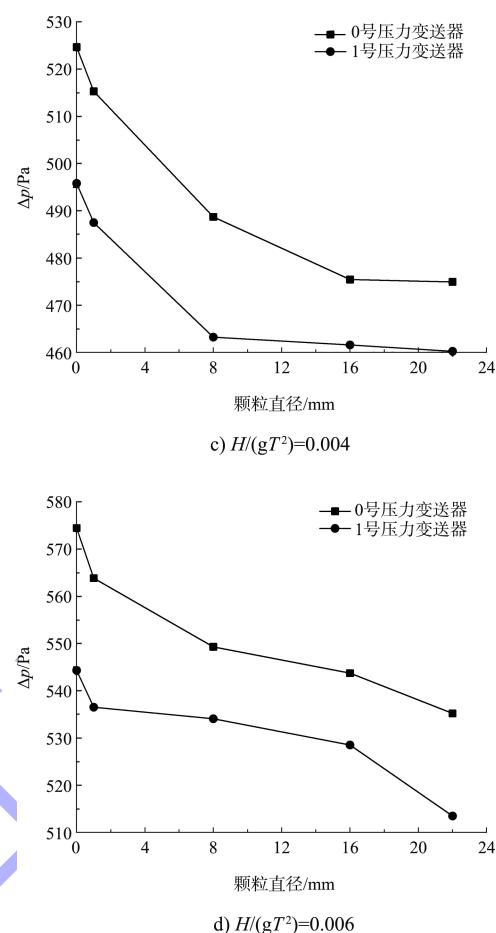
a)  $H/(gT^2)=0.001$ b)  $H/(gT^2)=0.003$ 

图 5 单桩所受最大波浪荷载  $\Delta p$  与  
介质颗粒平均粒径  $D_{50}$  关系曲线

试验结果表明, 介质颗粒平均粒径决定了海床孔隙结构: 随着介质颗粒平均粒径的增大, 海床孔隙结构内部孔隙流作用愈加明显, 波能损失显著, 单桩所受波浪荷载减弱。此外, 在不同波浪条件下, 当周期较大、波高较小时, 0 号传感器和 1 号传感器所测波浪荷载数值相差较小; 当周期较小、波高较大时, 0 号传感器所测波浪荷载明显比 1 号传感器所测数值大, 表明近海结构距水面越近的位置所受到的波浪荷载作用越显著, 结构破坏程度越严重。 $H/(gT^2)$  越小, 介质颗粒平均粒径对单桩所受波浪荷载的影响越大。

试验过程中, 当介质颗粒平均粒径较小时 ( $D_{50}=1 \text{ mm}$ ), 海床表面波浪运动和海床孔隙流的作用将造成海床表面介质颗粒出现局部冲刷, 形成波纹。因局部冲刷面积较小, 当前不考虑因介质颗粒冲刷对结果的影响。

### 2.3 单桩所受最大波浪荷载 $\Delta p$ -海床孔隙率

为研究海床孔隙率对波浪载荷的影响,保持海床介质颗粒平均粒径和海床厚度不变,调整海床孔隙率进行试验分析。

由图 6 可以看出:海床孔隙率显著影响单桩所受沿波浪传播方向的最大波浪荷载  $\Delta p$ 。当海床孔隙率较小时( $0 \sim 0.375$ ),海床孔隙率的存在对单桩所受最大波浪荷载影响作用较小,0、1号传感器所测最大波浪荷载差值约为 11 Pa;随着海床孔隙率增大( $0.375 \sim 0.439$ ),海床孔隙率对单桩所受最大波浪荷载影响作用增强,0、1号传感器所测最大波浪荷载差值增加至 46.46 Pa;随着海床孔隙率进一步增大( $0.439 \sim 0.475$ ),海床孔隙率对单桩所受最大波浪荷载影响作用呈现减弱的趋势。此外,在不同波浪条件下单桩所受波浪荷载变化趋势与 2.2 节相似,  $H/(gT^2)$  越小, 海床孔隙率对单桩所受波浪荷载的影响越大。

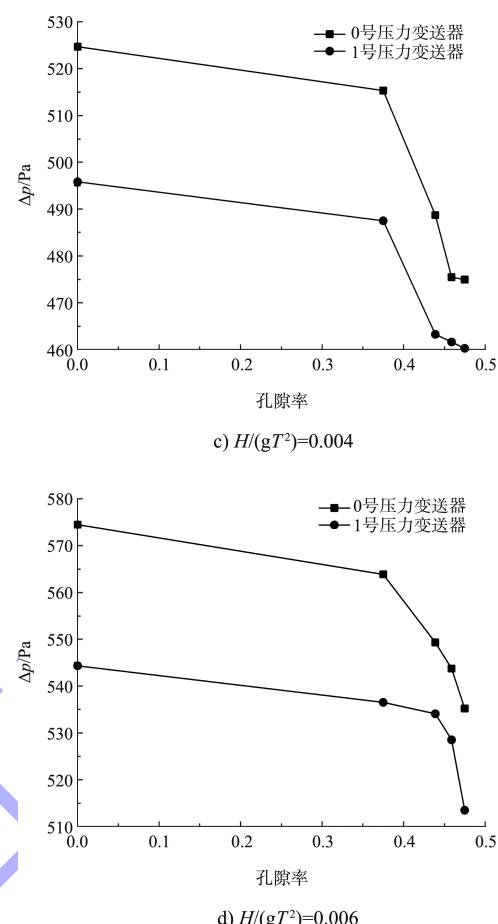
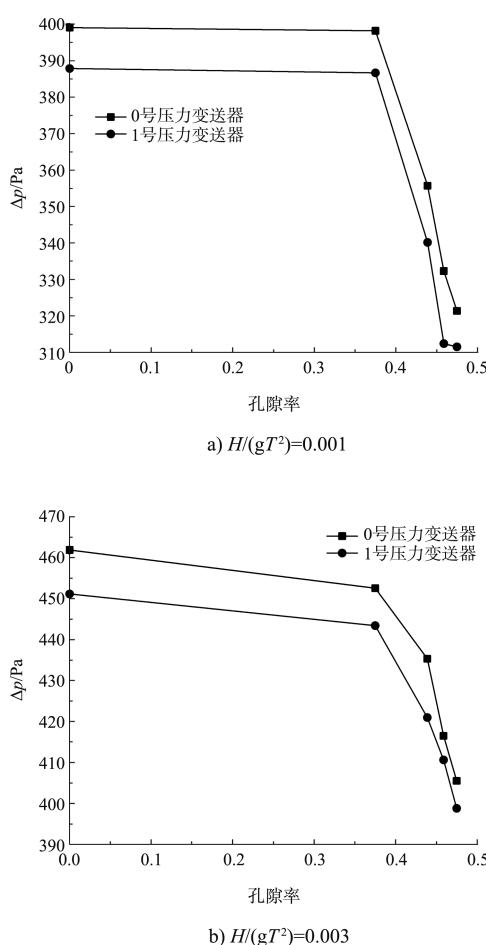


图 6 单桩所受最大波浪荷载  $\Delta p$  与海床孔隙率关系曲线

试验结果表明,在相同水深、波高与周期的情况下,随着海床孔隙率的增加,作用在单桩上的波浪载荷趋于减小,且 4 种波浪  $H/(gT^2)$  条件下单桩所受最大波浪荷载影响趋势相似。当海床孔隙率在  $0 \sim 0.375$  时,海床孔隙率较小,海床多孔结构内部水流运动微弱,多孔结构对波浪消能作用不明显;当海床孔隙率进一步增加到  $0.375 \sim 0.475$  时,海床多孔结构内部水流运动增强,多孔结构对波浪消能作用显著,单桩所受波浪荷载明显减弱。

### 3 结语

1) 试验采用无因次独立参数  $H/(gT^2)$  来表示波高与周期的关系,在相同的砂质海床中,随着  $H/(gT^2)$  的不断增大,单桩所受波浪荷载呈增大的趋势。

2) 在相同波浪条件下, 由于颗粒之间的孔隙流对作用在单桩上的波浪能量产生衰减作用, 随着颗粒粒径的增大, 单桩上所受到的波浪荷载呈减小趋势。

3) 在相同波浪条件下, 当海床孔隙率较小时, 海床多孔结构内部水流运动微弱, 多孔结构对波浪消能作用不明显。随着海床孔隙率的进一步增大, 海床多孔结构内部水流运动增强, 多孔结构对波浪消能作用显著, 单桩所受波浪荷载明显减弱。

## 参考文献:

- [1] YANG C B, WANG R, ZHANG J M. Numerical method for calculating system fundamental frequencies of offshore wind turbines with mono-pile foundations[J]. Engineering mechanics, 2018, 35(4) : 219-225.
- [2] 蔡子龙.海洋环境中桩—承台复合基础波浪荷载研究[D].成都: 西南交通大学, 2017.
- [3] STANISŁAW R M. Wave-induced pressure and flow in a porous bottom[M]. Ocean surface waves: their physics and

prediction, 2015.

- [4] KHAYYER A, GOTOH H, SHIMIZU Y, et al. Development of a projection-based SPH method for numerical wave flume with porous media of variable porosity[J]. Coastal Engineering, 2018, 140( 10) : 1-22.
- [5] LOSADA I J, LARA J L, JESUS M D. Modeling the interaction of water waves with porous coastal structures[J]. Journal of waterway, port, coastal, and ocean engineering, 2016, 142( 6) : 1-18.
- [6] LARA J L, LOSADA I J, MAZA M, et al. Breaking solitary wave evolution over a porous underwater step[J]. Coastal engineering, 2011, 58( 9) : 837-850.
- [7] 陈林雅, 廖晨聪, 段伦良, 等. 多孔介质海床对单桩所受波浪力的影响分析[J]. 西南交通大学学报, 2019, 54( 2) : 328-335.
- [8] 陈林雅, 郑东生, 王盼娣, 等. 基于波浪-多孔介质海床-结构物耦合模型的单桩基础波浪力分析[J]. 工程力学, 2019, 36( 11) : 72-82.
- [9] 刘振宇, 王立忠, 国振, 等. 可渗透海床单桩孤立波破碎波浪力数值研究[J]. 海洋工程, 2019, 37( 5) : 57-67.

(本文编辑 郭雪珍)

## · 消息 ·

### 世界在建最大水中沉井封底混凝土浇筑完成

3月9日, 二航局承建的世界在建最大水中沉井基础江苏常泰长江大桥5号墩钢沉井封底混凝土浇筑完成。

5号墩作为常泰长江大桥主航道桥两个主墩之一, 此次钢沉井封底施工共分5次开展, 累计浇筑混凝土4.2万m<sup>3</sup>。沉井搭载了二航局首次研发的沉井施工全过程智能监控系统, 在沉井内部安装有200余个监控元器件, 可自动采集、实时监测相关数据, 实现施工全过程可测、可视、可控。今年春节期间, 项目部600多名施工人员积极响应就地过年号召, 坚持留守一线, 抢抓进度。

常泰长江大桥是长江上首座集高速公路、城际铁路、一级公路“三位一体”的过江通道, 连接江苏省常州市与泰兴市, 全长约37.3 km, 上层为双向六车道高速公路, 下层为双线城际铁路和双向四车道一级公路, 跨江大桥长约5.3 km, 主航道桥为主跨1176 m的双层钢桁梁斜拉桥, 专用航道桥为主跨388 m的双层钢桁拱桥, 均为同类型桥梁规模世界第一。

此次浇筑的顺利完成, 沉井总重突破32万t, 可满足托起主跨超千米的大桥荷载的需求。目前, 现场正在陆续拆除吸泥设备和浇筑平台, 为下一步盖板和承台施工做准备。