

# 波流作用下单桩冲刷 MICP 防护试验研究

华鑫, 李雨杰, 刘海江, 国振\*

(浙江省海洋岩土工程与材料重点实验室 / 浙江大学 建筑工程学院, 浙江 杭州 310058)

**摘要:** 波浪掀沙, 潮流输沙, 波流耦合作用下单桩基础可能出现显著的局部冲刷, 严重威胁结构物稳定性, 必须进行合理的冲刷防护设计。鉴于此, 本文开展了大断面水槽试验, 对比抛石、翼板等传统防护措施与 MICP 防护措施的实际效果, 分析了不同处理措施下桩周冲深的发展过程及极限平衡冲深, 得到以下结论: MICP 处理可以延缓砂床的冲刷启动, 其防护效果优于抛石、翼板等传统防护措施; MICP 防护效果与处理次数、处理范围有明显相关性; 浅层 MICP 固化海床承担了更大的渗透力, 其超孔压衰减梯度随 MICP 处理次数的增加逐渐增大。MICP 生成的碳酸钙结晶在海床中主要起到颗粒包裹、粒间桥接及孔隙填充三种作用, 一定程度上提高了颗粒重度和砂土强度, 从而增强了海床抗冲刷能力。

**关键词:** 单桩基础; 波流耦合; 极限平衡冲深; 冲刷防护; MICP; 超孔压

中图分类号: TU41

文献标识码: A

文章编号: 2096-7195(2022)03-0190-11

## Experimental study on scour protection of MICP around monopile in waves and current action

HUA Xin, LI Yu-jie, LIU Hai-jiang, GUO Zhen\*

(Research Center of Coastal and Urban Geotechnical Engineering/

College of Civil Engineering and Architecture, Zhejiang University, Hangzhou 310058, Zhejiang, China)

**Abstract:** The local scour around monopile will be significantly aggravated under the combined action of waves and current, which threatens the stability of the structure seriously. It is necessary to establish a reasonable protection design. Therefore, a series of large-section flume tests were carried out to compare the effective of traditional protective measures (ripraps and wing panels) with Microbially Induced Calcite Precipitation (MICP) measure. Besides the scour development around the monopile and the ultimate equilibrium scour depth under different treatment measures were analyzed. The research found that MICP treatment can delay the development of scour around monopile, and its protecting effect is better than ripples and wing panels. At the same time, the protecting effect of MICP is obviously related to the number of times and scope of MICP treatments. The shallow MICP cemented seabed bears greater permeability, and the super pore pressure gradient increases with the increase of MICP treatment times. The calcium carbonate crystals generated by MICP mainly play three roles in the seabed, i.e, particle wrapping, particle cementation and pore filling, which improve particle weight and sand strength to a certain extent, thus enhancing the anti-scouring ability of the seabed.

**Key words:** monopile foundation; combined wave and current; ultimate equilibrium scour depth; scour protection; MICP; excess pore pressure

## 0 引言

大直径单桩基础是当前海上风机建设常用的基础型式。桩柱结构的存在会扰动周围流场, 形成

桩前下降流、马蹄涡、桩侧流线压缩及桩后尾涡脱落等结构, 导致桩周发生局部冲刷。当同时存在波浪作用时, 如图 1 所示波浪在床面产生周期性的表面波压力, 诱导土体内部产生相应的超孔压。在波

收稿日期: 2021-12-19

基金项目: 海南省重大科技计划项目 (ZDKJ202019); 浙江省自然科学基金项目 (LR22E080005; LHZ19E090003)。

作者简介: 华鑫 (1994—), 男, 河南南阳人, 硕士研究生, 主要从事桩基冲刷、微生物加固方面的研究工作。E-mail: 21912013@zju.edu.cn。

\*通信作者: 国振 (1982—), 男, 山东淄博人, 博士, 教授, 主要从事海洋岩土工程方面的研究工作。E-mail: nehzoug@163.com。

谷区域, 海床形成向上的渗流梯度, 当砂土有效应力为 0 时出现瞬态液化, 极大地促进冲刷发展<sup>[1-3]</sup>。针对波流耦合作用下的单桩冲刷问题, 国内外学者已开展了大量研究。EADIE 等<sup>[4]</sup> 的试验结果表明, 波流共同作用下的冲刷发展速率和最终冲深都要比水流单独作用时大, 冲刷坑的尺寸和形状主要与流速比相关; SUMER 等<sup>[5]</sup> 进行了一系列随机波与水流共同作用下的单桩冲刷试验, 研究发现波流耦合作用时, 桩周冲深主要受  $KC$  数和流速比控制, 当流速比大于 0.7 时, 冲刷深度不随流速比改变; RUDOLPH 等<sup>[6]</sup> 针对  $1 < KC < 10$  的条件, 提出了波流耦合作用下改进的极限平衡冲刷深度预测公式; 漆文刚<sup>[3]</sup> 通过水槽试验对波流耦合作用下的桩基冲刷进行了系统的研究, 基于量纲分析和对冲刷动力过程的机理分析, 得到了极限平衡冲刷深度的变化规律。

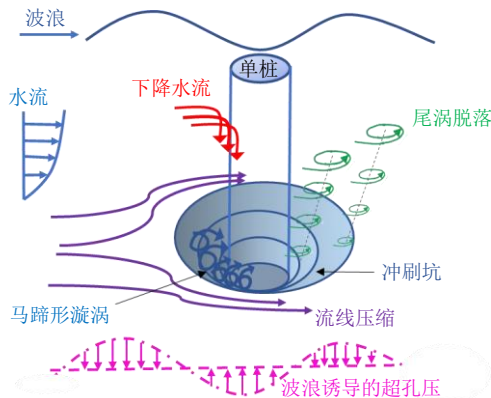


图1 波流耦合作用下单桩冲刷机理图

Fig. 1 Scour mechanism diagram of monopile under the combined waves and current

局部冲刷会造成桩基埋深减小, 水平荷载偏心距增加, 导致结构物失稳。针对结构物冲刷问题, 主要有以下两类防护措施: 一类是主动防护, 通过控制冲刷水流以减小冲刷原动力, 常见的有翼板、扩展基础、减冲桩等; 另一类是被动防护, 通过改变冲刷对象和泥沙特性以提高河床抗冲刷性能, 常见的包括抛石、沉排、石笼等。海上环境恶劣, 抛石、沉排等工艺技术难度大、成本高、且存在边缘冲刷等问题, 采用翼板、减冲桩等措施也存在长期有效防护问题<sup>[7-8]</sup>。

微生物诱导碳酸钙沉积 (MICP) 是近年来提出的一种新型地基处理技术。MICP 利用微生物的新陈代谢活动, 促进碳酸钙结晶在颗粒之间形成胶结结构, 从而提高砂土强度和抗冲刷能力<sup>[9-10]</sup>。相比于传统的防护手段, MICP 技术具有环保无污染的特点, 并且在改善土体性能同时, 还能维持较好的透

气性和透水性。如今, MICP 技术已被广泛应用于地基加固、液化防治、减小沉降、渗蚀控制等岩土工程中<sup>[11-12]</sup>。

基于此, 本文开展了波流作用下单桩冲刷及防护试验, 研究了不同波流条件下桩周冲刷发展过程及极限平衡冲深。同时, 对比了抛石、翼板及 MICP 防护的效果, 结果表明 MICP 防护效果优于抛石、翼板防护, 相关研究结果可为实际工程提供依据和指导。

## 1 试验布设与方案

### 1.1 水槽模型与测试技术

试验水槽长 69.0 m, 宽 1.2 m, 高 1.6 m, 试验水深为 0.5 m。水槽前端设有造波造流系统, 末端设有尼龙丝网消波。试验区域位于水槽中部, 为长 3.0 m, 宽 0.8 m, 深 0.4 m 的沉砂池。试验用砂采用中值粒径为 0.16 mm 的福建标准砂, 采用落砂法分层填筑, 控制相对密实度约 65%。为保证冲刷过程中有充足的砂源, 在沉砂池距来流侧 2 m 位置处埋设桩径  $D=0.11$  m 的圆柱形模型桩, 桩高 1.06 m, 固定于沉砂池底部, 出床面部分桩长  $L=0.66$  m, 试验过程中始终露出水面。

试验设置 4 支波高仪, 采样频率为 100 Hz, 1 号波高仪位于水槽前端距造波板 11.5 m 处, 用于测量入射波高; 2, 3, 4 号波高仪分别置于桩周 0.5 倍桩径处, 用于监测桩周不同方向的波高。桩前 1 m 处布设多普勒流速仪 (ADV), 用于采集入射流速。同时, 在桩身及桩周土体内共布设 16 个孔压传感器, 用于测量试验过程中桩体及桩周土体内的超孔压变化情况, 具体试验布置如图 2 所示。

为了在试验过程中实时监测桩周冲深, 采用马丽丽<sup>[2]</sup> 提出的非接触式冲深监测技术捕捉桩周冲深发展, 具体布设如图 3 (a) 所示。摄像头置于桩体内部, 使摄像头中心与桩体中心重合。用实际间距为 1 cm 的条纹纸紧密包裹在模型桩外侧进行拍摄, 将拍摄照片的像素间距与实际距离进行标定, 得到像素距离与实际距离的拟合关系, 如图 3 (b) 所示。试验过程中捕获任意时刻的冲刷边界图像, 进行黑白二值化处理, 获取图像边界, 计算图像边界到图像中心的像素距离, 再根据拟合曲线, 反算出实际距离, 从而得到实际冲深数据, 具体处理示意图如图 3 (c) 所示。另外, 由于试验过程中摄像头始终处于水下, 为避免监测过程中光线折射的影响, 前期摄像头也应置于水下标定。

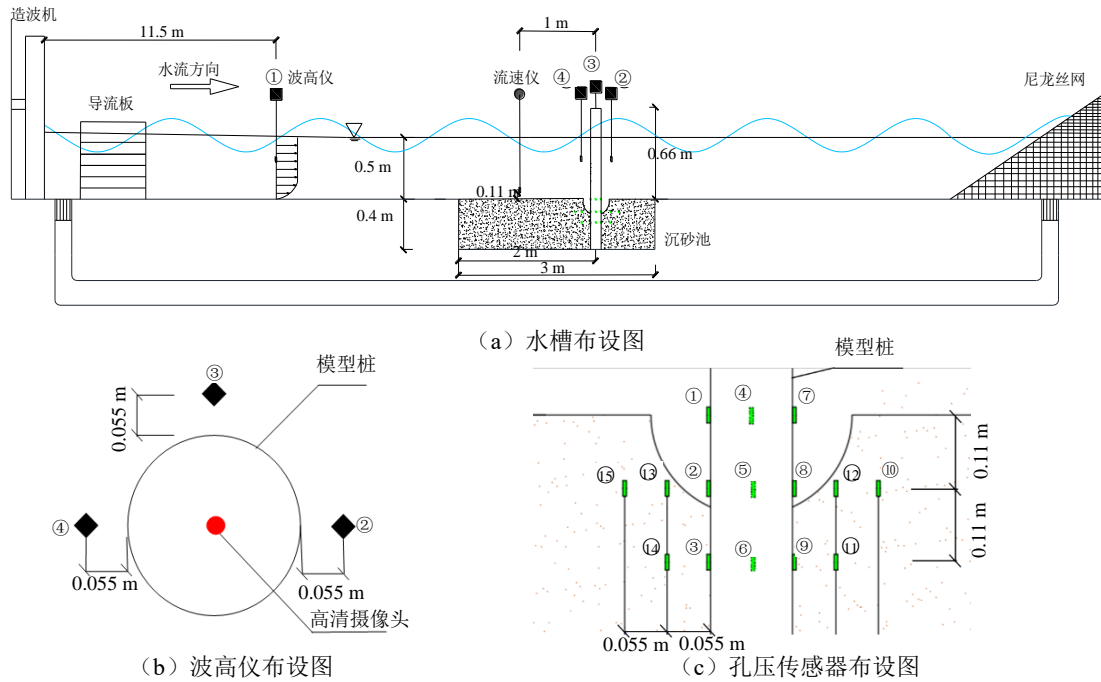


图2 试验布置图

Fig. 2 Layout of the test

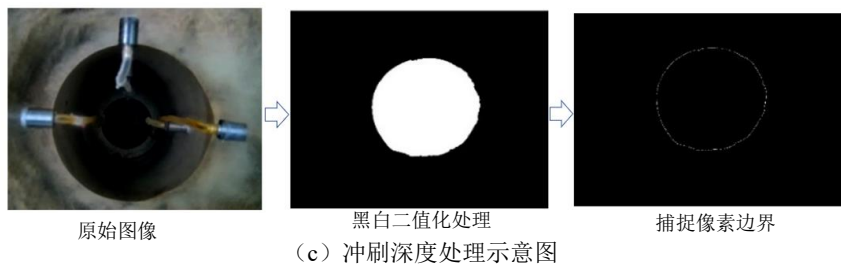
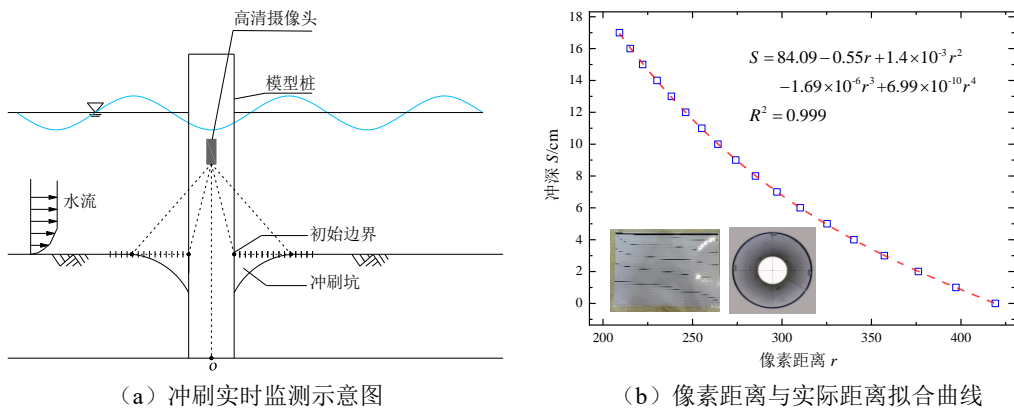


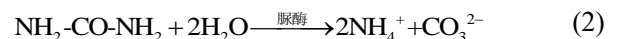
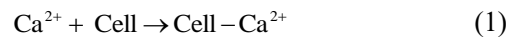
图3 非接触式冲深监测示意图

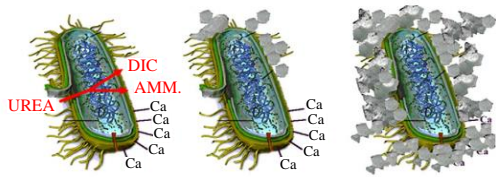
Fig. 3 Schematic diagram of non-contact scour depth monitoring

1.2 MICP 技术原理及处理方式

近年来，基于微生物诱导碳酸钙沉淀（MICP）的土体改性技术在岩土工程领域引起了广泛关注，该技术利用自然界中具有矿化作用的细菌诱导生成碳酸钙，填充土体孔隙，改善土体性质。其中产脲酶细菌由于使用成本低、固化效果好、反应过程可控等优势而被广泛应用。其基本原理是细菌分泌的脲酶水解尿素，生成  $\text{CO}_3^{2-}$  和  $\text{NH}_4^+$ ，当环境中存

在  $\text{Ca}^{2+}$  且溶液离子活度积超过溶解常数时，碳酸钙以晶体形式沉积。具体原理如图 4 所示，主要反应方程式如下<sup>[13-14]</sup>。





(a) 尿素分解作用 (b)  $\text{Ca}^{2+}$  吸附作用 (c)  $\text{CaCO}_3$  沉淀作用

图 4 MICP 作用原理图<sup>[13]</sup>

Fig. 4 Schematic diagram of MICP process<sup>[13]</sup>

试验所采用的细菌为巴氏芽孢杆菌, 采用 ATCC 1376  $\text{NH}_4\text{-YE}$  液体培养基活化及培养。胶结液为 0.5 mol/L  $\text{CaCl}_2$ 、1 mol/L 尿素、10 g/L 胰蛋白酶和 3 g/L 牛肉浸膏混合制成。采用菌液和胶结液等体积交替喷洒方式, 单次处理步骤如下:

(1) 在桩周待处理范围内, 以 10 ml/cm<sup>2</sup> 密度喷洒 1.5 倍孔隙体积菌液, 静置 2 h, 保证细菌充分吸附于海床砂颗粒;

(2) 以 10 ml/cm<sup>2</sup> 密度喷洒相同体积胶结液, 静置 22 h, 同时在胶结液中添加蓝色染剂以便于观测胶结范围;

(3) 每次冲刷前使用微型贯入仪测试桩周胶结体表面强度。

其中, 防护范围及微型贯入仪测试点位选取如图 5 所示。

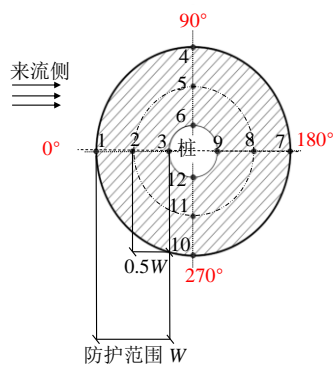


图 5 微型贯入仪测试点位示意图

Fig. 5 Schematic diagram of micro penetrometer location

### 1.3 试验方案与流程

开展了不同波流条件下的单桩局部冲刷试验, 针对波流耦合典型工况 ( $U=0.3\text{ m/s}$ ,  $H=10\text{ cm}$ ,  $T=1.4\text{ s}$ ) 进行了抛石防护、翼板防护和 MICP 防护下的冲刷试验。其中抛石防护根据美国高速公路管理局推荐的 RICHARDSON 等<sup>[15]</sup> 的抛石中值粒径规定:

$$\frac{U^2}{(s-1)gD_{50}} = \frac{2.890}{K} \quad (4)$$

式中:  $D_{50}$  为抛石中值粒径;  $U$  为流速;  $s$  为模型砂比重, 2.65;  $K$  为墩形系数, 圆柱体取 1.5。根据 0.3 m/s 的流速, 计算选取中值粒径为 3 mm 的均匀石子, 布设在桩周待处理范围内, 铺设厚度为 1 cm。翼板防护采用厚度为 1 cm 的有机玻璃板, 试验过程中使用玻璃胶固定于桩身底床面处。

具体试验流程如下:

(1) 相机固定于模型桩内部, 使镜头中心与桩中心重合, 进行水下标定;

(2) 模型桩固定于沉砂池底部, 在预设位置安装孔压传感器、ADV 和波高仪;

(3) 利用落砂法分四层填筑砂子, 通过质量体积控制法保证每层相对密实度约 65%。而后向水槽中缓慢注水至所需水位, 静置 3 d, 使砂土饱和;

(4) 缓慢排干水槽中的水, 根据试验方案对桩周砂土进行处理;

(5) 向水槽中缓慢注水至所需水位, 调整至试验所需波流条件, 开启摄像机进行实时录制, 打开数据采集仪器, 开始试验;

(6) 冲刷试验结束后, 关闭造波和造流设备, 缓慢排干水槽中的水, 对冲刷坑进行测量拍照, 而后整理试验仪器, 准备下一组试验, 具体工况设置如表 1 所示。

表 1 试验工况

Table 1 Experimental conditions

防护措施	流速 $U$ /(m/s)	波高 $H$ /cm	周期 $T$ /s	防护范围 $W$ /cm	处理次数	试验时间/h
未防护	0.2/0.3	0	0.0	—	—	6
未防护	0.0	5/7.5/10	1/1.4/1.8/2.2	—	—	1
未防护	0.3	10	1/1.4/1.8/2.2	—	—	6
翼板防护	0.3	10	1.4	5.5/11	—	6
抛石防护	0.3	10	1.4	5.5/11	—	6
MICP 防护	0.3	10	1.4	5.5/11	1/2/4	6



## 2 结果分析

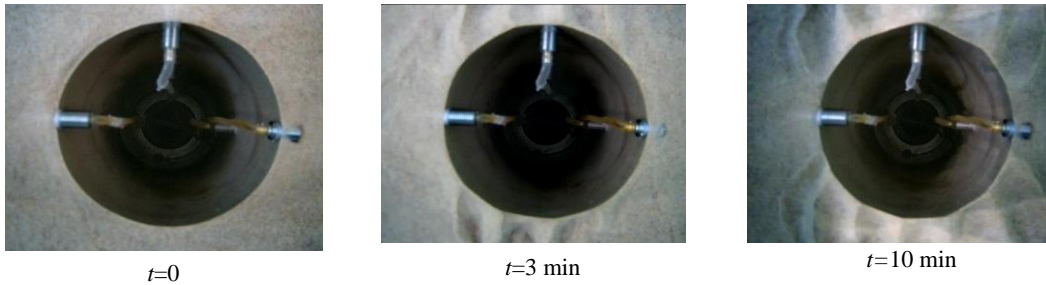
### 2.1 桩周冲刷深度发展情况分析

桩基极限平衡冲深是工程界关注的核心问题,同时对于冲深随时间发展的过程研究也至关重要,SUMER等<sup>[6]</sup>提出了冲深随时间发展的经验公式,描述了任意时刻的冲深  $S$  与极限平衡冲深的关系:

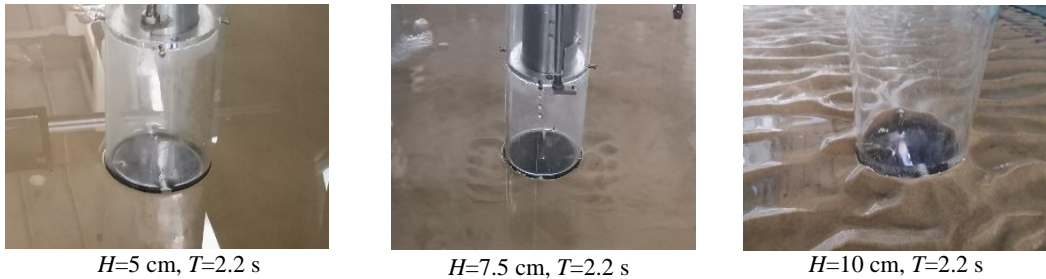
$$S(t) = S_e \left[ 1 - \exp\left(-\frac{t}{T_0}\right) \right] \quad (5)$$

式中:  $S_e$  是极限平衡冲深; 参数  $T_0$  是关于时间尺度的常数。本试验利用非接触式单桩冲刷监测技术,可获取任意时刻冲刷深度,对桩周冲刷起动和发展过程有更为准确的把握。

#### (1) 未防护下桩周冲深发展



(a)  $H=10$  cm,  $T=2.2$  s 桩周冲刷形态时程图



(b) 桩周最终冲刷形态

图6 波浪单独作用下桩周冲刷形态图

Fig. 6 Scour shape around monopile under single action of wave

图7展示了波浪单独作用下各个工况的流速幅值,可以看出,  $U_{wm}$  随波高和波浪周期的增加而变大。选取  $T=2.2$  s,  $H=10$  cm 的最大的波浪条件,其流速幅值  $U_{wm}=0.216$ ,该工况下  $KC_{max}=4.32 < 6$ ,因此波浪单独作用下桩周均未产生明显冲刷坑。

图8展示了单向流及波流耦合下桩周冲深发展时程。在  $0.2$  m/s 的单向流作用下,此时尚未达到砂床临界流速,桩侧有细微砂粒运输,冲刷现象并不明显,整体发展较慢,且在试验时间内未达到极限冲深,最大冲深约为  $1D$ 。当流速增至  $0.3$  m/s 时,

在波浪单独作用下,可以看到随着波高的增加,砂纹首先出现在桩侧,并逐步向桩前后发展,图6(a)以  $H=10$  cm,  $T=2.2$  s 工况为例,展示了桩周砂纹发展情况。

图6(b)给出了最大周期  $T=2.2$  s 时不同波高下桩周最终冲刷形态,可以看出,波高为  $5$  cm 时,桩周砂土无任何变化;当波高增至  $7.5$  cm 时,桩侧开始出现砂纹;当波高增至  $10$  cm 时,砂纹扩展至整个床面,所有工况桩周均无明显冲刷坑形成。

波浪作用下桩基周围的流场结构由  $KC$  数控制<sup>[7]</sup>,  $KC$  数定义如下:

$$KC = \frac{U_{wm} T}{D} \quad (6)$$

式中:  $U_{wm}$  为波浪诱导的床面附近水质点流速幅值;  $T$  为波浪周期;  $D$  为桩径。一般  $KC > 6$  时,桩周会形成涡结构。 $KC$  数较小时,涡结构的影响逐渐减小<sup>[17-18]</sup>。

可以观察到,冲刷发展迅速,约  $1$  h 左右冲深即发展到最大冲深的  $90\%$ ,最终极限平衡冲刷深度约为  $1.1D$ 。单向流作用下的冲刷主要由 Shields 数  $\theta$  控制,Shields 数反映了水流促使床沙运动的力和床沙抗运动的力的比值,计算公式如下:

$$\theta = \frac{u_f^2}{(s-1)gd_{50}} \quad (7)$$

临界 Shields 数,  $\theta_{cr}$ :

$$\theta_{cr} = \frac{0.30}{1+1.2D^*} + 0.055 \left[ 1 - \exp(-0.02D^*) \right] \quad (8)$$

$$D^* = [g(s-1)v^2]^{1/3} d_{50} \quad (9)$$

式中:  $s$  为模型砂比重;  $u_f$  为摩阻流速, 通过对实测剖面流速进行对数拟合得到;  $\nu$  是水的运动黏滞系数;  $d_{50}$  为砂颗粒中值粒径。计算可得  $\theta_{cr} = 0.055$ , 流速为  $0.2 \text{ m/s}$  时,  $\theta = 0.035 < \theta_{cr}$ , 为静床冲刷, 流速为  $0.3 \text{ m/s}$  时,  $\theta = 0.073 > \theta_{cr}$ , 为动床冲刷。

在波流耦合作用下, 冲刷发展更为迅速, 约在  $1.5 \text{ h}$  时即发展到极限平衡冲深, 同时由于有砂粒补充, 后期冲刷基本处于动态平衡状态。另外可以看出, 在波高和流速一定时, 随着波浪周期的增加, 极限平衡冲深也随之增加。在周期  $T=2.2 \text{ s}$  时, 极限平衡冲深达到了  $1.5D$ , 比单向流作用时增加了约  $36.4\%$ 。同时, 通过拟合曲线也能明显看出, 随着水动力条件的增强, 前期冲刷发展速率明显变大。

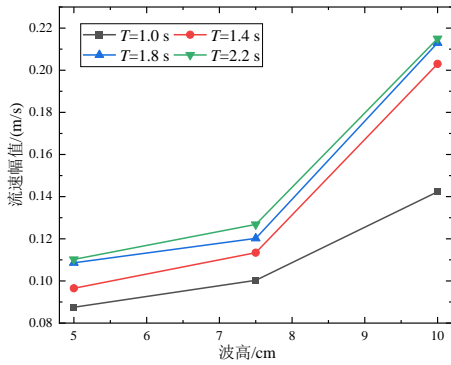


图 7 波浪单独作用下流速幅值

Fig. 7 Velocity amplitude under single action of wave

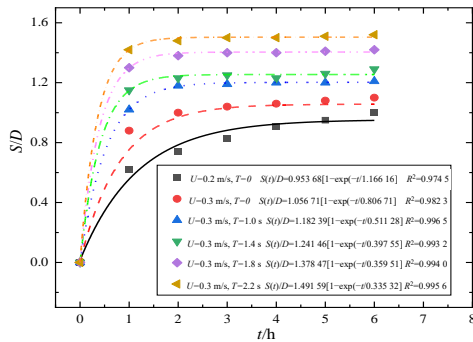


图 8 桩周最大冲深发展时程曲线

Fig. 8 Development of maximum scour depth around monopile with time

### (2) 传统防护后桩周冲深发展

针对波流耦合作用下典型工况 ( $U=0.3 \text{ m/s}$ ,  $H=10 \text{ cm}$ ,  $T=1.4 \text{ s}$ ) 对桩周进行抛石防护和翼板防护处理, 对比不同处理措施的防护效果, 图 9 展示了两种措施处理后的桩周冲深发展时程曲线。可以发现, 翼板及抛石防护均改变了桩周冲刷发展模式。在未防护条件下, 冲刷在  $1 \text{ h}$  内即发展到极限

平衡冲深的  $90\%$ ; 采取防护措施后, 冲深随时间均匀发展, 且在  $6 \text{ h}$  时并未达到极限平衡状态。并且随着防护面积增加, 无论何种防护方式, 均显著减小了极限平衡冲深。

对于翼板防护, 当防护范围增大至  $D$  时, 最大冲刷深度为  $0.73D$ , 相比未防护状态, 相同时间内最大冲深减小了约  $43.4\%$ 。对于抛石防护, 当防护范围扩大至  $D$  时, 最大冲深约为  $0.36D$ , 相比未防护状态, 最大冲深减小了  $72.1\%$ 。相比而言, 抛石防护效果显著优于翼板防护。

同时, 两种传统防护措施在试验时间内均未达到极限平衡冲深, 可以观察到冲深随时间仍在发展, 因此其防护效果的长期有效性并不能保证。

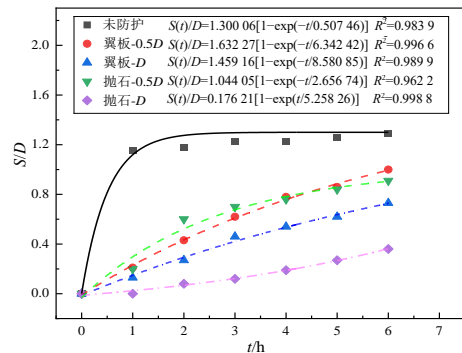


图 9 传统防护下桩周冲深发展时程曲线

Fig. 9 Development of scour depth around monopile with traditional protection

### (3) MICP 处理后桩周冲深发展

通过试验对比了 MICP 不同处理范围和不同处理次数的防护效果。

图 10 展示了 MICP 处理后桩周最大冲深发展时程曲线 (其中  $0.5D-1$  表示防护范围为  $0.5D$ , 处理次数为一次), 可以看出对于  $0.5D-1$  的工况, MICP 几乎没有起到防护效果, 此时冲刷发展仍遵循传统冲刷模式, 冲刷结束后桩周也无明显胶结块体。而其他几个工况中, MICP 处理显著延缓了冲刷启动时刻。图 11 展示了 MICP 不同处理工况的最终冲刷形态。可以看出, 在  $0.5D-4$ ,  $D-2$ ,  $D-4$  工况中, 桩周一定范围内形成胶结块体, 此时桩周无冲坑形成, 且胶结块体随着处理范围的增大而增大。通过最终冲刷形态可以看出, 对于  $0.5D-2$  的工况, 桩周胶结体侧后方部分被拍碎。主要原因是 MICP 胶结的不均匀性导致侧后方强度较低, 胶结体在波浪拍击作用下发生破碎失效。对于  $D-1$  的工况, 桩周也形成了胶结体, 但由于胶结强度不高, 胶结块体与桩体脱落, 导致胶结体脱落失效。

同时, MICP 处理后, 桩周形成圆台形胶结体, 从而导致流场向外扩散, 引起胶结体外侧发生边缘

冲刷。表 2 展示了 MICP 处理后桩周胶结体及边缘冲刷的发展情况，其中  $W_{cmax}$ ,  $S_{cmax}$  代表了胶结体的最大宽度和深度， $W_{emax}$ ,  $S_{emax}$  代表了边缘冲刷的最大宽度和深度，具体定义如图 12 所示。可以观察到，当处理次数相同时，随着防护范围的扩大，边缘冲刷也显著减小，主要原因是 MICP 形成的胶结体仍具有一定的渗透性，流场在向外扩散的过程中不断消耗，因此防护范围越大，流场在向外扩散的过程中消耗越多，最终边缘冲刷也就越小。

利用微型贯入仪测试冲刷前桩周胶结体表面强度  $q$ ，点位选择如图 5 所示。图 13 展示了处理范围为  $0.5D$  时不同处理次数测量的表面强度的分布情况，其结果与未处理的砂土表面强度  $q_0$  做归一化处理。可以看出，处理次数越多，桩周胶结体表面强度越高。当处理一次时，桩周不同位置处表面强度有较大差别，越靠近桩体位置处强度越高。在桩体后侧 ( $270^\circ$ ) 最外侧，表面强度只有最内侧的 49.1%，这主要是 MICP 胶结的不均匀性导致的，使

得胶结体强度差异较大。当处理次数为两次时，桩体后侧的强度差异仍然比较明显，随着处理次数的增加，同一方向上不同位置处表面强度差异逐渐减小，这主要是因为随着处理次数增加，桩周菌液和胶结液能够充分反应，效果不断加强，胶结体的强度整体也随之提高。综合比较几种防护措施，MICP 防护在选择合适的处理范围和次数后，效果优于传统防护。

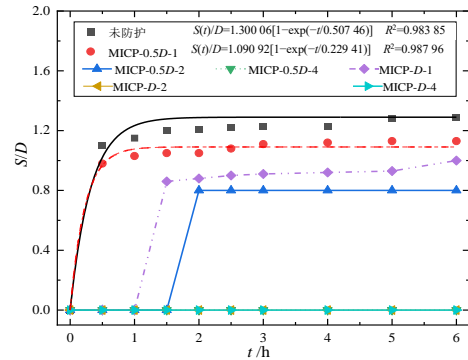


图 10 MICP 处理后桩周最大冲深发展时程曲线  
Fig. 10 Maximum scour depth with MICP treatment

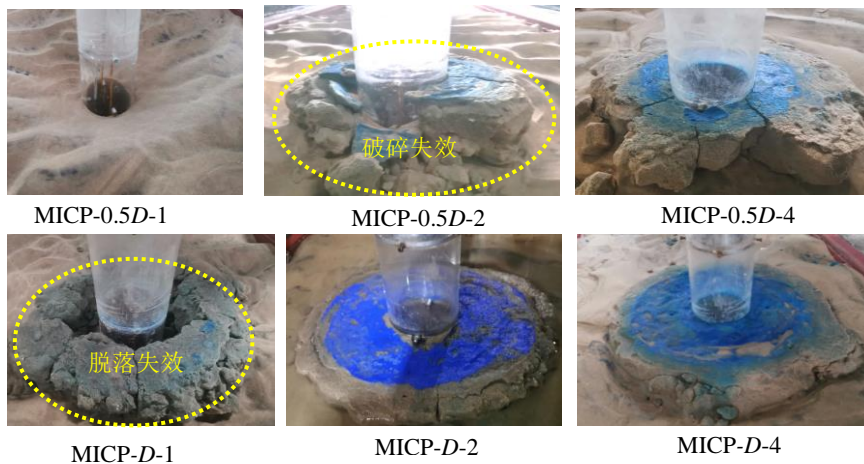


图 11 MICP 防护最终冲刷形态  
Fig. 11 Final scour form of MICP protection

表 2 边缘冲刷发展情况  
Table 2 Development of edge erosion

工况	$W_{cmax}/D$	$S_{cmax}/D$	$W_{emax}/D$	$S_{emax}/D$
0.5D-1	0	0	1.232	1.031
0.5D-2	2.432	0.983	1.360	0.972
0.5D-4	2.896	1.126	1.386	1.080
D-1	2.063	0.632	0.363	0.430
D-2	3.271	1.084	0.382	0.632
D-4	3.553	1.291	0.132	0.273

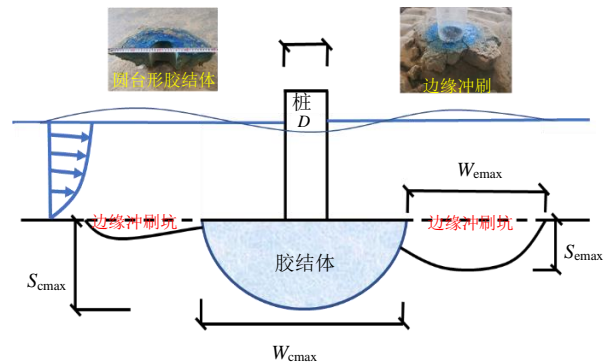


图 12 边缘冲刷示意图  
Fig. 12 Schematic diagram of edge erosion



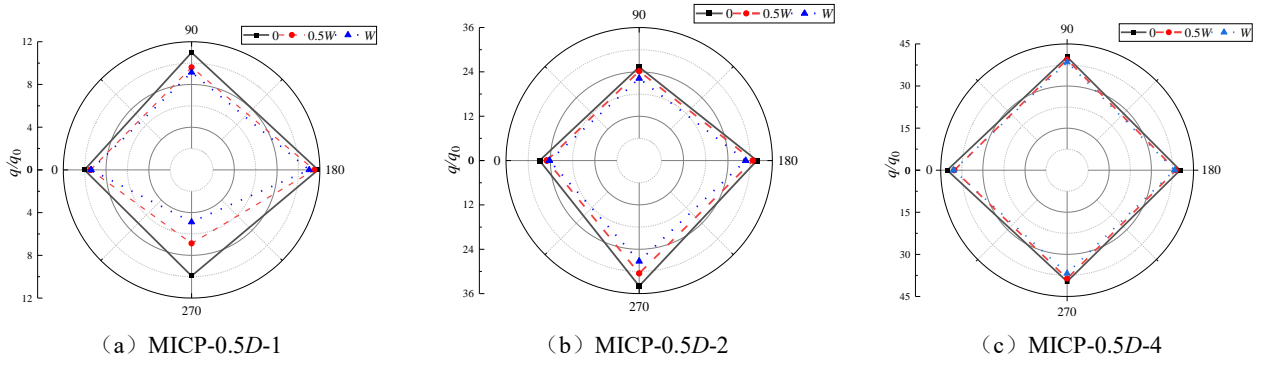


图 13 MICP 处理不同次数桩周表面强度分布示意图

Fig. 13 Surface strength distribution around monopile in different times of MICP treatment

当处理次数为两次时, 桩体后侧的强度差异仍然比较明显, 随着处理次数的增加, 同一方向上不同位置处表面强度差异逐渐减小, 这主要是因为随着处理次数增加, 桩周菌液和胶结液能够充分反应, 效果不断加强, 胶结体的强度整体也随之提高。综合比较几种防护措施, MICP 防护在选择合适的处理范围和处理次数后, 效果优于传统防护。

### 2.2 超孔压响应分析

由于桩周不同位置的超孔压发展及分布基本

类似, 本文选取桩前位置处超孔压进行分析。图 14 展示了桩前竖直面内 (点 1, 2, 3) 未防护及 MICP 防护的超孔压时程曲线。相比于未防护状态, 采取防护措施后, 一倍桩径深度处的超孔压幅值明显减小, 且随着处理次数增加, 孔压幅值减小程度越大。主要是因为碳酸钙的孔隙填充作用, 使得海床渗透性减小, 进而减小了孔压向下传递。同时, 可以观察到, 采取防护措施后, 桩前超孔压的相位迟滞效应也明显减小。

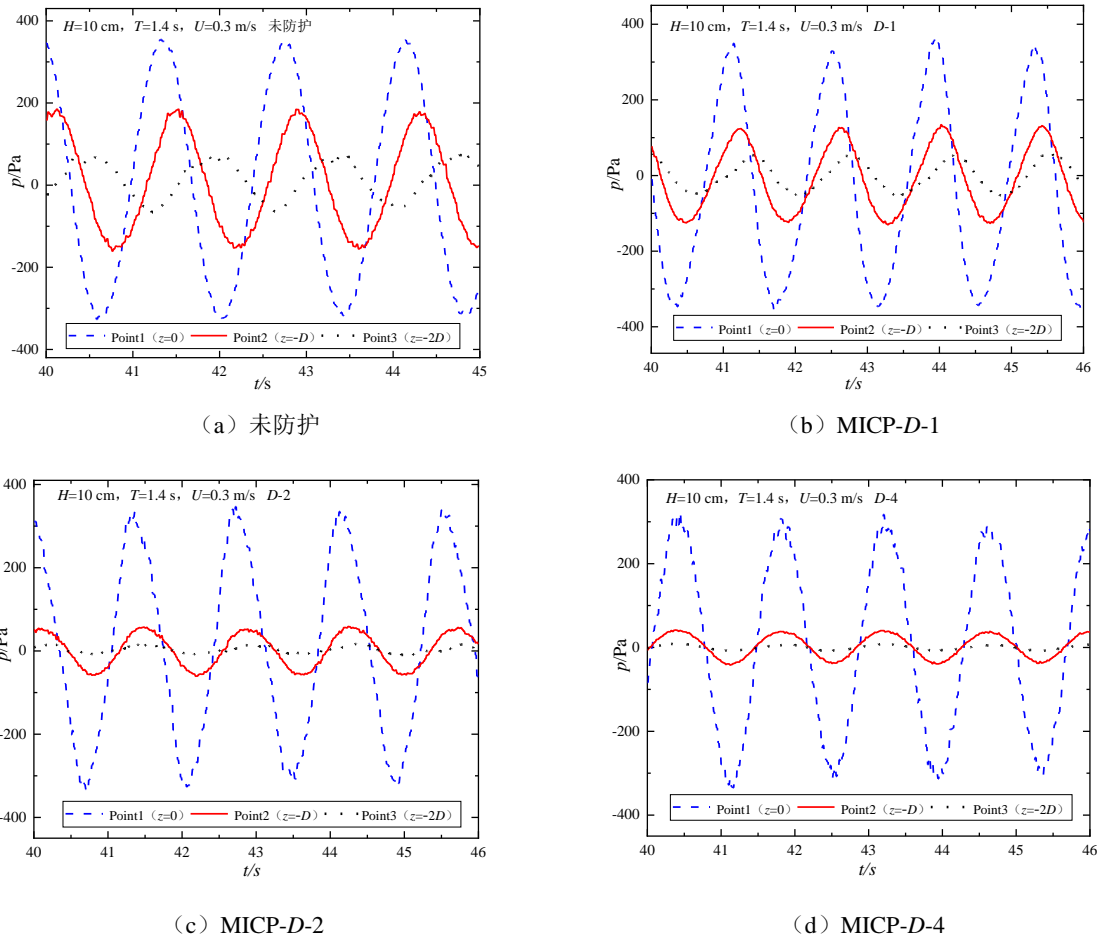
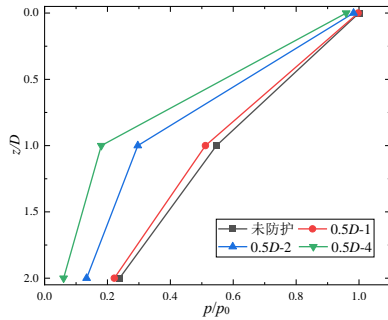


图 14 不同工况下桩前竖直面内孔压响应时程图

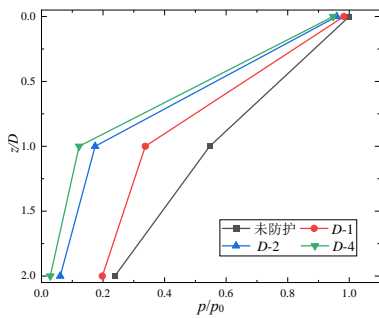
Fig. 14 Excess pressure response in front vertical plane of monopile under different working conditions



取未防护状态下,床面表层超孔压幅值为 $p_0$ ,图15提取了MICP防护后桩前各点位归一化超孔压幅值 $p/p_0$ 沿深度的分布。可以发现,床面以下同一深度处,MICP处理后的超孔压幅值明显减小,且一倍桩径深度内,超孔压衰减梯度增加。随着MICP处理次数的增加,超孔压衰减梯度越大,这表明MICP处理后表层海床承担了更大的渗透力。采用酸洗法对MICP处理后桩周形成的胶结体进行碳酸钙含量测量,所用HCL浓度为1 mol/L。



(a) MICP-0.5D



(b) MICP-1D

图15 桩前竖直面内归一化超孔压幅值分布

Fig. 15 Distribution of normalized excess pore pressure in front vertical plane of monopile

图16展示了碳酸钙含量沿深度分布情况,可以看出,同一深度处,碳酸钙含量随着MICP处理次数的增加而增加。由于砂床对细菌及胶结液的滤过效应,碳酸钙含量随深度逐渐减小,表层碳酸钙较多,因此表层海床承担了更大的渗透力。

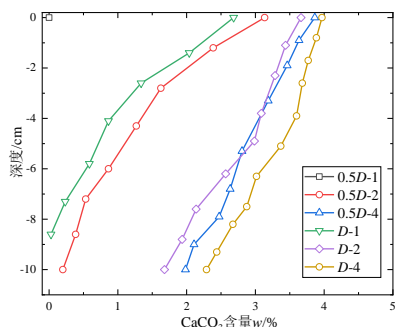
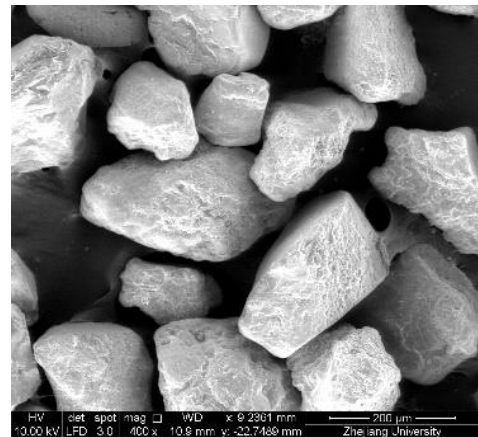


图16 碳酸钙随深度分布图

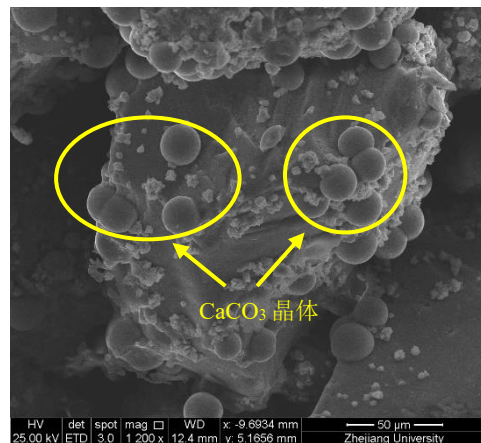
Fig. 16 CaCO<sub>3</sub> distribution map with depth

图17(a)给出了未处理海床砂颗粒的电镜图像,可以发现,此时砂颗粒棱角分明,形状规则且较为统一,表面光滑且颗粒间存在明显孔隙。图17

(b)展示了MICP处理后砂颗粒电镜图像,明显看出此时颗粒表面生成了较多的球状碳酸钙结晶。图18结合MICP处理后的砂颗粒电镜图像,分析了MICP的作用机理,可以看到碳酸钙晶体在海床砂中主要起到3个作用:(1)颗粒包裹,增加颗粒粒径及表面粗糙度;(2)粒间桥接,增加海床强度,提高海床颗粒冲刷起动流速;(3)孔隙填充,减小海床渗透性,浅层胶结体消耗了更多的渗透力。未处理海床在波流耦合作用下为冲刷和液化联合破坏模式,波谷区域的瞬态液化致使海床砂的有效应力减小至0,在来流的作用下,冲刷更易启动。MICP处理之后,颗粒之间形成了有效桥接与孔隙填充,一定程度上提高了海床颗粒重度,增加了床面颗粒冲刷起动流速,同时MICP作用形成的胶结体提高了海床强度及抗液化能力,从而提高了海床的抗冲刷能力。



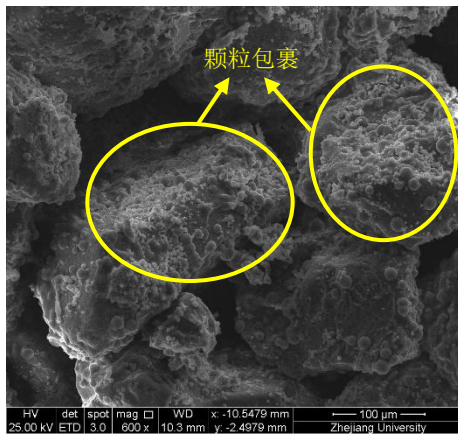
(a) 未处理砂颗粒电镜图



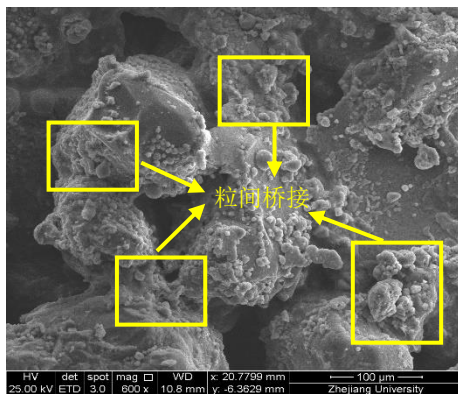
(b) MICP处理后砂颗粒电镜图

图17 MICP处理前后电镜对比图

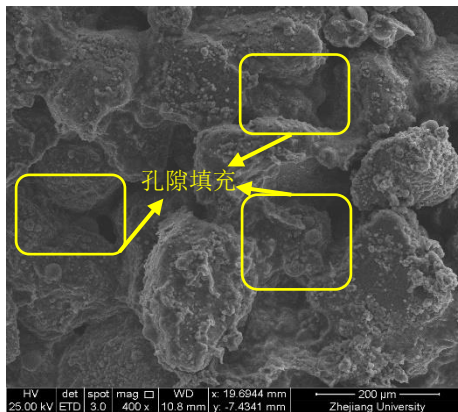
Fig. 17 Comparison of SEM images before and after MICP treatment



(a) 颗粒包裹效应



(b) 粒间桥接效应



(c) 孔隙填充效应

图 18 碳酸钙结晶作用机理图

Fig. 18 Illustration of calcium carbonate crystallization

### 3 结论

利用大断面水槽, 开展了单桩基础的 MICP 防护及传统防护冲刷试验研究, 比较了不同防护措施的防护效果, 并对 MICP 作用后的海床进行了强度测试、碳酸钙含量测量以及电镜扫描试验, 结合海床超孔压响应, 得出以下结论:

(1) 传统防护措施(翼板及抛石防护)均改变了桩周冲刷发展模式。在未防护状态时, 冲刷在 1 h

内即发展到极限平衡冲深的 90%, 采取防护措施后, 冲刷随时间均匀发展, 且在 6 h 后并未达到极限平衡状态, 抛石防护效果优于翼板防护。

(2) MICP 处理可以延缓冲刷启动时间。其防护效果与处理次数和处理范围有明显的相关性, 当处理范围较小, 处理次数较低时, MICP 胶结的不均匀性易导致胶结体强度较小, 在波浪拍击作用下发生胶结体破碎失效或脱落失效。随着处理次数和范围的增加, 桩周形成强度较高的胶结体, 无冲坑形成, 且胶结块体随着处理范围的增大而增大。

(3) MICP 处理后, 桩前超孔压的相位迟滞效应明显减小, 床面强度随处理次数的增加而增加, 同时海床沿深度方向的孔压衰减梯度也随着处理次数的增加而增大; 由于海床的筛滤作用, 生成的碳酸钙含量随深度逐渐降低, 碳酸钙填充降低了海床的渗透系数, 致使浅层海床承担了更大的渗透力。碳酸钙晶体在海床砂中主要起到 3 个作用: a) 颗粒包裹, 增加颗粒粒径及表面粗糙度; b) 粒间桥接, 增加海床强度, 提高海床颗粒冲刷起流速; c) 孔隙填充, 减小海床渗透性, 使浅层胶结体消耗了更多的渗透力。整体而言, MICP 的胶结作用极大提高了海床的抗冲蚀能力。

### 参考文献

- [1] 程永舟, 吕行, 王文森, 等. 波浪作用下大直径淹没圆柱局部冲刷试验研究[J]. 水科学进展, 2019, 30(6): 872-881.  
CHENG Yong-zhou, LV Xing, WANG Wen-sen, et al. Experimental study on local scour around large-diameter submerged cylinders under combined waves and current action[J]. Advances in Water Science, 2019, 30(6): 872-881.
- [2] 马丽丽. 跨海桥梁桩基础局部冲刷演化特征试验研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2018.  
MA Li-li. Experimental investigation on scour development around the pile foundation of the sea-crossing bridge[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2018.
- [3] 漆文刚. 大直径单桩基础的冲刷与液化机理及承载力研究[D]. 北京: 中国科学院力学研究所, 2015.  
QI Wen-gang. Scour and liquefaction around a large-diameter monopile and their effects on bearing capacity[D]. Beijing: Chinese Academy of Sciences Institute of Mechanics, 2015.
- [4] EADIE R W, HERBICH J B. Scour about a single, cylindrical pile due to combined random waves and

- current[C]//Proceedings of the 20th Coastal Engineering Conference. Taipei, 1986: 1858–1870.
- [5] SUMER B M, FREDSØE J. Scour around pile in combined waves and current[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2001, 127(5): 403–411.
- [6] RUDOLPH D, BOS K. Scour around a monopile under combined wave-current conditions and low KC numbers[C]//Proceedings of the Sixth International Conference on Scour and Erosion. 2006: 582–588.
- [7] CHIEW Y M. Scour protection at bridge piers[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 1992, 118(9): 1260–1269.
- [8] 梁发云, 王琛. 桥墩基础局部冲刷防护技术的对比分析[J]. *结构工程师*, 2014, 30(5): 130–138.  
LIANG Fa-yun, WANG Chen. Review on countermeasures to bridge piers from local scour[J]. *Structural Engineers*, 2014, 30(5): 130–138.
- [9] 尹黎阳, 唐朝生, 谢约翰, 等. 微生物矿化作用改善岩土材料性能的影响因素[J]. *岩土力学*, 2019, 40(7): 2525–2546.  
YIN Li-yang, TANG Chao-sheng, XIE Yue-han, et al. Factors affecting improvement in engineering properties of geomaterials by microbial-induced calcite precipitation[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2019, 40(7): 2525–2546.
- [10] LIU L, LIU H L, XIAO Y, et al. Biocementation of calcareous sand using soluble calcium derived from calcareous sand[J]. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 2018, 77(4): 1781–1791.
- [11] CHU J, STABNIKOV V, IVANOV V. Microbially induced calcium carbonate precipitation on surface or in the bulk of soil[J]. *Geomicrobiology*, 2012, 29(6): 544–549.
- [12] MITCHELL J K, SANTAMARINA J C. Biological considerations in geotechnical engineering[J]. *Journal of Geotechnical & Geoenvironmental Engineering*, 2005, 131(10): 1222–1233.
- [13] DEJONG J T, FRITZGES M B, NÜSSLEIN K. Microbially induced cementation to control sand response to undrained shear[J]. *Journal of Geotechnical & Geoenvironmental Engineering*, 2006, 132(11): 1381–1392.
- [14] LI Y J, GUO Z, WANG L Z, et al. Interface shear behaviour between micp-treated calcareous sand and steel[J]. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2021, 33(2): 04020455.
- [15] RICHARDSON K J, DAVIS S R. Evaluating scour at bridges[R]. Washington D C: Federal Hwy Administration, 1993: 363–372.
- [16] SUMER B M, CHRISTIANSEN N, FREDSOE J. Time scale of scour around a vertical pile[C]//Proceedings of the Second International Offshore and Polar Engineering Conference. San Francisco, 1992: 308–315.
- [17] KOBAYASHI T, ODA K. Experimental study on developing process of local scour around a vertical cylinder[C]//Proceedings of the 24th International Conference on Coastal Engineering, 1994, 2(93): 1284–1297.
- [18] SUMER B M, FREDSØE J, CHRISTIANSEN N. Scour around a vertical pile in waves[J]. *Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering*, 1992, 118(1): 15–31.
- [19] SUMER B M, FREDSØE J. *The Mechanics of Scour In the Marine Environment*[M]. Singapore: World Scientific, 2002.