

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2416151

基于压电纤维复合材料的波浪冲击压力传感器研究*

黄禾艺¹ 李正农^{1,2,3} 任志刚² 范楠贵¹(1.海南大学南海海洋资源利用国家重点实验室 海口 570228; 2.武汉理工大学三亚科教创新园 三亚 572025;
3.湖南大学土木工程学院 长沙 410083)

摘要: 波浪冲击压力是海洋工程中重要的物理量之一,采用压力传感器测量波浪冲击压力的传统方法测量结果单一、稳定性差,因此需要寻找一种代替压力传感器的新测量元件。本文针对波浪对直立板的冲击模型,利用MFC对该模型的波浪冲击压力进行测量。为了验证该测量方法的可行性和准确性,将MFC测量波浪冲击压力的实测值与海洋工程中常用的经验公式的计算值进行对比。实验结果表明,MFC的测量结果与我国规范的计算结果较吻合;与我国规范相比,5种入射波高产生的所有有效数据中,仅5 cm入射波高平均误差超过10%,为18.25%,12 cm入射波高平均误差最小,最小为2.56%。

关键词: 波浪冲击压力;压电纤维复合材料;经验公式;水滴标定

中图分类号: TN98 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.1050

Research on wave impact pressure sensor based on piezoelectric fiber composites

Huang Heyi¹ Li Zhengnong^{1,2,3} Ren Zhigang² Fan Nangui¹(1. State Key Laboratory of Marine Resource Utilization in South China Sea, Hainan University, Haikou 570228, China;
2. Sanya Science and Education Innovation Park, Wuhan University of Technology, Sanya 572025, China;
3. College of Civil Engineering, Hunan University, Changsha 410083, China)

Abstract: Wave impact pressure is one of the important physical quantities in ocean engineering. The traditional method of measuring wave impact pressure using pressure sensors has single measurement results and poor stability. Therefore, it is necessary to find a new measuring element to replace pressure sensors. In this paper, MFC is used to measure the wave impact pressure of the model for a wave impact on a vertical plate. In order to verify the feasibility and accuracy of this measurement method, the measured values of wave impact pressure measured by MFC were compared with the calculated values of empirical formulas commonly used in ocean engineering. The experimental results show that the measurement results of MFC are in good agreement with the calculation results of our country's specifications; compared with our country's specifications, among all the effective data generated by the five incident wave heights, only the average error of the incident wave height of 5 cm exceeds 10%, which is 18.25%. The average error of the incident wave height of 12 cm is the smallest, with the smallest being 2.56%.

Keywords: wave impact pressure; piezoelectric fiber composites; empirical formula; droplet calibration

0 引言

波浪冲击是波浪与各种结构的物体发生剧烈碰撞的现象,涵盖了固体、流体、气体3种介质复杂的作用关系,小的波浪冲击并不会对各种结构物造成明显破坏,而大型波浪冲击会造成结构物明显损坏与坍塌。由于海上的波浪是由风产生的,而海面附近的风场结构十分复杂,风速风向多

变,同时波面对风场还具有一定的反作用,再加上波浪内部紊动、波面破碎等等因素,使得海上波浪成为一种高度不规则的和不可重复的物理现象,实际上是一种不规则的波浪即为随机波浪。由于随机波浪本身研究十分困难,学者们只能根据不同波况,建立不同的波浪冲击力计算方法。而国内外当前在波浪冲击压力的研究,无论是理论还是数值模拟,都是在物理模型上的实验结果上总结规律,对实际压

收稿日期:2024-05-31

* 基金项目:武汉理工大学三亚科教创新园开放基金(2022KF0032)项目资助

力大小基本都是用压力传感器来测量^[1-3]。在某些既需要具体的波浪冲击压力数值,又需要测量其他物理量的情况下,理论计算和数值模拟也难以考虑所有情况,得出的结果也并不准确,实验只用压力传感器的测量又测不出其他物理量,所以要准备其他传感元件对其余物理量进行测量。目前压力传感器普遍应用于波浪冲击压力的测量和液压回路控制系统^[4],在海上建筑上布置大量压力传感器成本巨大,且压力传感器测量物理量单一且稳定性差^[5],不适合在海上工程中使用,海上建筑结构健康监测参数有复数个,因此需要寻找一种既能测量波浪冲击压力,又能测量其他结构健康参数的多用途传感器。

压电材料是一种可以将机械能与电能相互转化的材料,其传感性能优良,国内外诸多学者利用其在冲击传感方面做了许多研究^[6]。目前比较流行的压电材料有 3 类,第 1 类是压电陶瓷,其虽灵敏度高响应快,但硬度高易破损,在粘合处理过程中也容易损坏;第 2 类是偏聚二氟乙烯为代表的压电薄膜材料,其虽有一定柔性,但测量精度低;第 3 类是压电复合材料,其由压电陶瓷相和聚合物相按照一定的空间结构复合制成,其中最具代表性的材料是宏纤维复合材料(macro fiber composite, MFC)。MFC 具有良好的顺应性和稳健性、高驱动能量密度、各向异性驱动和可定制的机械性能,这些能力使压电纤维复合材料在航空、航天、声学等领域已经得到发展运用。与传统方法测量相比,压电纤维材料在使用过程中稳定安全,驱动能力强,大大提高测量精度和稳定性,这也使其能得到更广泛应用。目前压电纤维复合材料在诸多工程领域上都有着出色的表现,例如:损伤诊断、声发射法信号监测、能量收集和结构阻抗监测等领域。蒋川等^[7]用压电纤维传感器测量了应力波方向的监测;贾宏宇^[8]对 MFC 的振动能量收集进行研究;Park 等^[9]用 MFC 监测碳纤维复合板受外界冲击破坏过程,其不仅能识别损伤信号,也能分辨分层情况;Park 等^[10]使用 MFC 测量了铁轨在上翼缘、下翼缘和腹板损坏的情况下,各自阻抗的变化,利用一种新的马氏平方距离(mahalanobis square distance,简称 MSD)的损伤识别方法,有效识别不同工况下的损坏,说明具有很好的环境适应性。基于以上 MFC 的多功能性,本文选取 MFC 作为测量波浪冲击压力的传感器进行研究。

1 MFC 标定试验

1.1 试验仪器

标定试验装置如图 1 所示,滴管被固定于高度可调的架台上,水滴落下冲击至 MFC 传感器使其电极上产生电荷信号。MFC 传感器以电木板为基底,传感器电极两端连接至动态信号测试分析系统上。本次试验信号采集设备选取的是 DH5906 超动态信号测试分析系统,共 2 个信号通道,电荷测量范围 $\pm 1 \times 10^5$ pC,电压测量范围 $\pm 1 \times 10^4$ mV,最高采样频率为 20 MHz,能够很好的满足试验需求。第

一个通道测量的为电荷信号,与 MFC 连接时还需接上 DH5857-8 电荷适调器。第二个通道测量的为电压信号,使用时 MFC 与一大电阻串联,测量大电阻两端电压。经检验,由于第一个电荷通道最大为 100 000 pC,试验时最大电荷以及超过其量程,故用通道二进行试验。

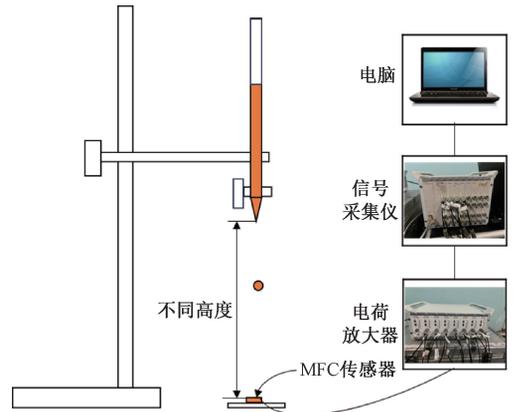


图 1 试验装置
Fig. 1 Test device

1.2 试验对象和方法

选取的型号为 P3-M2814 的 MFC 作为冲击压传感器进行标定试验。该型号 MFC 在图 2 所示的结构之外还包裹了一层聚酰亚胺薄膜,这种薄膜具有良好的绝缘和耐热性能,能够有效保护内部压电材料不受静电干扰。

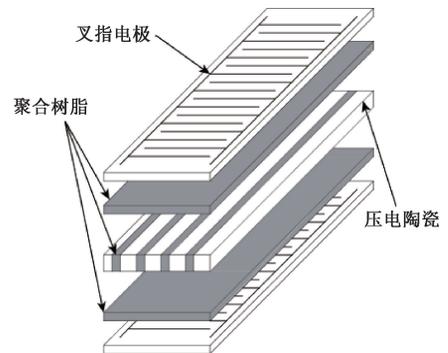


图 2 MFC 结构示意图

Fig. 2 Structural schematic diagram of MFC

标定试验在室内无风环境中进行,控制水滴从不同高度下落在传感器上施加不同大小的冲击荷载,同时采集传感器电压信号。通过分析水滴的运动过程,建立水滴在空气中自由落体的运动模型,根据高度计算出水滴对传感器产生的冲击力。之后从采集到的电压时程信号中提取出小球的碰撞信号。将二者进行线性拟合建立水滴冲击压力与传感器电压信号之间的数学模型。本次试验选定十个水滴下落高度分别从 0.05~0.5 m,间隔 0.05 m。

1.3 水滴运动模型建立

假设水滴在下落过程中为均匀球体,下落过程如图 3 所示。

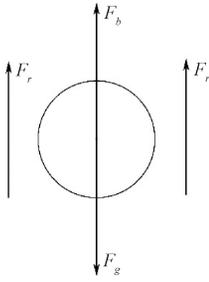


图 3 水滴受力分析

Fig. 3 Analysis of force on water droplets

水滴在自由落体过程中受到自身重力 F_g ，空气摩擦阻力 F_r ，空气浮力 F_w 。

$$F_g = mg \quad (1)$$

$$F_w = \frac{1}{6} \rho_a g \pi D^3 \quad (2)$$

$$F_r = \frac{1}{2} C_D \rho_a A V^2 \quad (3)$$

式中： m 为水滴质量，取值为 0.0005 kg ； ρ_a 为空气密度，取值为 1.29 kg/m^3 ； g 为重力加速度，取值 $9.8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$ ； D 为水滴直径，取标定时所用的水滴直径 0.005 m ； $A/(\text{m}^2)$ 为水滴在与运动方向垂直平面内的投影面积； $V/(\text{m/s})$ 为水滴下落速度； C_D 为空气阻力系数，计算方式：

$$C_D = \begin{cases} (24/R_e)(1 + 0.15R_e^{0.687}), & R_e \leq 1000 \\ 0.44, & R_e > 1000 \end{cases} \quad (4)$$

式中： R_e 为雷诺数，计算方式： $R_e = VD/\nu$ ，其中 ν 为空气黏性系数，查表取值为 $1.5 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$ 。

水滴在空气中下落运动分为两个阶段，第一阶段水滴从静止开始做变加速直线运动，随着速度的增加，其受到的空气阻力逐渐增大，当受到的空气阻力和浮力的合力与其自身重力大小相等方向相反时，水滴的下落运动进入第二阶段，即匀速直线运动阶段。这两个阶段的受力情况分别为：

$$m \frac{dV}{dt} = F_g - F_w - F_r \quad (5)$$

$$F_g = F_w + F_r \quad (6)$$

式中： $m/(\text{kg})$ 为水滴质量； $t/(\text{s})$ 为时间。式(5)与式(1)~(3)联立后得到水滴下落第一阶段速度与时间之间的关系：

$$t = \frac{\ln \frac{A + BV}{A - BV}}{2AB} \quad (7)$$

式中：

$$A = \left[\left(1 - \frac{\pi D^3 \rho_a}{6m} \right) g \right]^{\frac{1}{2}}; B = \left(\frac{\pi D^2 \rho_a C_D}{8m} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (8)$$

将式(7)中速度 V 对时间 t 进行积分得到下落高度 h 与时间 t 的关系：

$$h = \frac{At}{B} - \frac{1}{B^2} [2ABt - \ln(1 + e^{2ABt}) + \ln 2] \quad (9)$$

由式(6)得到水滴匀速运动阶段的速度 v_t 为：

$$v_t = \left[\frac{4gD}{3C_D} \left(\frac{6m}{\pi \rho_a D^3} - 1 \right) \right]^{\frac{1}{2}} \quad (10)$$

当水滴速度达到 v_t 时，即 $V = v_t$ 时，水滴开始做匀速直线运动。经验证，试验中所设高度水滴均达不到速度 v_t ，所以水滴下落全程为变加速直线运动。

1.4 水滴与 MFC 碰撞模型建立

水滴自有下落接触到 MFC 传感器到完全附着在 MFC 传感器上要经历 3 个阶段，详细碰撞过程如图 4 所示。首先水滴与 MFC 刚接触时，水滴保持之前原有的下落状态，此时水滴接触 MFC 传感器的速度也是水滴下落达到的最大速度，记为 v_t 。

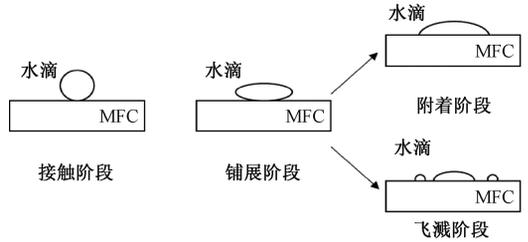


图 4 水滴撞击 MFC 传感器示意图

Fig. 4 Schematic diagram of water droplets impacting MFC sensor

第 2 个阶段水滴碰撞 MFC 并发生形变，此阶段铺展水滴直径记为 $D(t)$ 。根据冲量定理，此时水滴的动量会转化成 MFC 传感元件的电冲击力，MFC 传感器会受到的冲击力而产生弯曲，并转化为电压信号的形式输出，输出电压在水滴撞击 MFC 后速度为 0 时达到最大，峰值电压为^[6]：

$$U_m = cmv_t = \frac{1}{6} \pi \rho_w c v_t D^3 \quad (11)$$

式中： c 是压电传感器灵敏度，由 MFC 传感器的压电系数所决定。从此公式可以看出，峰值电压的大小与接触速度、接触物质量和压电灵敏度有关，与接触面积无关。

在水滴由铺展阶段向下一个阶段发展时，会有两种可能：第一种是整滴附着在物体表面，另一种是发生飞溅，即一滴水滴发生分裂，分散于不同位置。Stow 等^[11] 和 Mundo 等^[12] 从实验中发现并总结了如下经验关系式：

$$K = W_e^{\frac{1}{2}} \times R_e^{\frac{1}{4}} \quad (12)$$

式中： R_e' 表示雷诺数，是一个惯性力与粘性力之比的无量纲数， W_e 表示韦伯数，是一个流体惯性相对于表面张力的相对重要性的无量纲数， K 是取决于固体表面的粗糙度和层厚度的常数， R_e' 和 W_e 可由以下公式计算：

$$R_e' = \frac{\rho_w v D}{\mu_a}, W_e = \frac{\rho_w v D}{\sigma} \quad (13)$$

式中： μ_a 表示粘度， σ 表示流体表面张力。通过式(12)可以判断水滴铺展后到底是附着还是飞溅。当计算值 K 大于特定阈值 K_c 时，水滴飞溅；反之则沉积附着。文中水滴标称过程不会发生飞溅^[13]。

1.5 单位时间最大冲击力的计算

由于水滴与 MFC 碰撞时间极短,因此使用狄拉克 δ 函数的形式来描述水滴对 MFC 传感器的冲击力。

$$\delta(x - x_0) = 0, x \neq x_0 \quad (14)$$

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \delta_{x_0}(x) dx = 1 \quad (15)$$

水滴碰撞 MFC 的时间很短,需要用狄拉克 δ 函数来描述其对 MFC 传感器的冲击力。如图 5 所示,考虑水滴对 MFC 传感器的冲击过程。

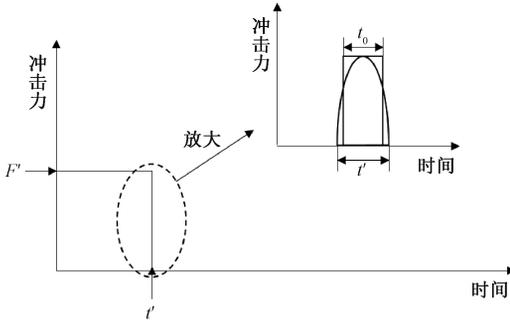


图 5 水滴冲击力变化图

Fig. 5 Change chart of water drop impact force

水滴对 MFC 传感器产生的冲击力 $F(t)$ 则有:

$$F(t) = \begin{cases} 0, & t \neq t' \\ F', & t = t' \end{cases} \quad (16)$$

式中: $F'/(N)$ 为水滴在碰撞 MFC 过程所产生的最大冲击力; $t'/(s)$ 为水滴与传感器产生碰撞的时刻。假设水滴与 MFC 冲击作用按正(余)弦规律变化^[14],按冲量相等的原则可以将冲击过程的冲击时间等效为最大冲击力在 t_0 内作用,则有:

$$I = F't_0 = \int_0^{\frac{\pi}{\omega}} F' \sin \omega t dt = F' \left[\frac{-\cos \omega t}{\omega} \right]_0^{\frac{\pi}{\omega}} = \frac{2F'}{\omega} = \frac{2F't'}{\pi} \quad (17)$$

式中: $I/(N \cdot s)$ 为碰撞中水滴所受力的冲量; $F'/(N)$ 为水滴在碰撞过程中的最大冲击力; $t'/(s)$ 为水滴碰撞过程的时间; $\omega/(rad/s)$ 为正(余)弦函数的频率。由式(17)可得:

$$t_0 = \frac{2t'}{\pi} \quad (18)$$

由式(11)和动量定理可得:

$$U_m = cmv_t = cF't_0 = \frac{2cF't'}{\pi} \quad (19)$$

式中: $m/(kg)$ 为水滴的质量; $v_t/(m/s)$ 为水滴碰撞 MFC 传感器前的运动速度。

根据钟声^[15]研究可得:

$$t' = \frac{D}{v_t} \quad (20)$$

因此,整合式(19)和(20)可得:

$$F' = \frac{mv_t}{t_0} = \frac{mv_t^2}{D} = \frac{1}{12} \rho_w \pi^2 v_t^2 D^2 \quad (21)$$

由此式(21)可以得到 MFC 单位时间内受到水滴的最大冲击力 F' 的变化仅跟水滴的碰撞速度和直径有关。

1.6 峰值电压的处理和获取

根据压电效应^[16]可知,当 MFC 受到水滴冲击后,会产生与其成正比的电荷,电荷在传入电荷放大器转化成电压输出,然后信号采集仪采集到这些电压信号并记录,二者的关系为 $q \propto U$, 式(19)、(21)可得:

$$F' = \frac{\pi U_m^2}{2c^2 m D} \quad (22)$$

式中: F' 表示 MFC 单位时间内受到水滴冲击的最大冲击力; U_m 表示信号采集仪采集到的峰值电压。根据式(22)可知 MFC 由于水滴冲击力产生的电压与水滴跟 MFC 的接触面积无关,所以就可以将水滴对 MFC 冲击力的作用面积视为是平均作用于整个 MFC 测量区域的,由冲击压力与冲击力的关系可得:

$$P = \frac{F'}{S} = \frac{\pi U_m^2}{2c^2 m D S} \quad (23)$$

式中: S 表示 MFC 使用时的有效测量面积, P 表示单位时间内 MFC 受水滴冲击的最大冲击压力。这样可以消除 MFC 面积在后续的影响,方便后续波浪冲击压力的测量与试验单位的统一。

MFC 受水滴冲击所产生的电压值也可用狄拉克 δ 函数来进行描述:

$$U(t) = \begin{cases} 0, & t \neq t' \\ U', & t = t' \end{cases} \quad (24)$$

式中: $U'/(N)$ 为受水滴冲击力所产生的电压信号峰值; $t'/(s)$ 为水滴与传感器发生碰撞的时刻。水滴与 MFC 碰撞产生的电压与时间的关系如图 6 所示。电压随时间输出曲线经滤波平滑处理后,再获取峰值电压 U' 。试验时,每个高度测量 5 次,再取其平均值作为该高度的最终输出电压。

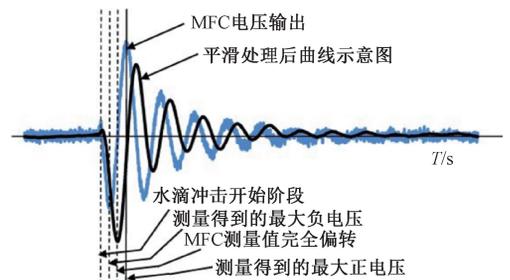


图 6 水滴冲击的输出电压随时间的变化曲线

Fig. 6 Curve of output voltage of water droplet impact versus time

1.7 MFC 传感器标定试验结果

如表 1 所示,本次试验选定 10 个水滴下落高度,分别为分别是 0.05、0.1、0.15、0.2、0.25、0.3、0.35、0.4、0.45、0.5 m, 标定试验水滴直径 D 取 5 mm, 密度 ρ_w 取

1 000 kg/m³, S 取 MFC 传感器的致动面积 3.94 × 10⁻⁴ m²。根据之前计算得出的变加速运动极限距离可知,水滴在选取的 5 个高度自由下落始终处于变加速运动阶段。

表 1 MFC 传感器标定试验参数

Table 1 MFC calibration test parameters

高度/ m	接触速度/ (m·s ⁻¹)	峰值 电压/mV	最大 冲击力/N	最大冲击 压力/kPa
0.05	0.98	411.53	0.013	0.032
0.1	1.39	553.25	0.025	0.064
0.15	1.7	642.33	0.038	0.097
0.2	1.96	722.54	0.05	0.128
0.25	2.18	815.4	0.062	0.159
0.3	2.39	901.42	0.075	0.19
0.35	2.57	1 004.35	0.087	0.221
0.4	2.74	1 080.53	0.099	0.252
0.45	2.91	1 153.32	0.111	0.283
0.5	3.05	1 201.21	0.122	0.311

将最大冲击压力和峰值电压进行拟合,结果如图 7 所示。得到 P3-M2814 型 MFC 传感器所受水滴最大冲击力与其输出峰值电压的数学关系:

$$P = 0.000\ 000\ 219\ 5U^2 \quad (25)$$

二者拟合优度 R² 达到 0.991 2,说明水滴最大冲击力与 MFC 输出峰值电压的平方存在良好的线性相关关系。

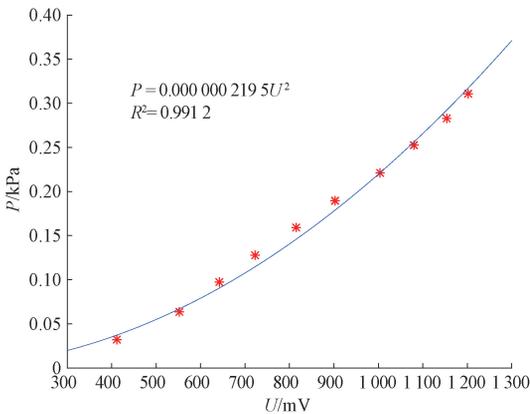


图 7 水滴最大冲击压力与峰值电压拟合曲线

Fig. 7 Fitting curve between maximum impact pressure and peak voltage of water droplets

2 波浪冲击试验

2.1 试验概况

为了验证 MFC 传感器标定的准确性开展了波浪冲击测量试验,在试验中用 MFC 测量波浪冲击压力并与海洋工程中常用的 3 个经验公式对比,分析二者的结果和误差。

本次波浪冲击试验在湖南大学土木工程学院风工程试验研究中心的浪槽实验室进行,浪槽全长 31.08 m,其中试验区段长 21.07 m,水槽高 1.08~1.42 m,宽 3 m,最低工作水深 0.2 m,最高工作水深 0.8 m。

本次试验在规则波(正弦波)选取了 5 种波高,分别是 H=0.03、0.06、0.09、0.12、0.15 m,周期 T 选择都是 1 s,波长 L 均为 1.4 m,试验水深 d 为 0.7 m。测量时,直立板所置方向与波浪运行方向相垂直,既正向入射。

2.2 试验设备与方案

本次试验测量波浪波高的仪器为浪高仪,该浪高仪的测量长度为 0.5 m。试验选取的模型为直立板模型,模型长 2.8 m,高 1 m,厚 2 cm,迎浪面尺寸为 2.8 m × 1 m。为了方便研究波浪冲击力分布的情况,MFC 传感器自上而下分别标号 1~7,为了试验测量方便,将传感器布在平板中央,试验时左右两侧靠近浪槽壁面,测量值容易受其他因素影响,因此不将传感器安装在边缘。具体 MFC 传感器布置图如图 8 所示。其中 4 号 MFC 传感器测量时位于静水面,1~3 号位于静水面以上,5~7 号位于静水面以下。试验过程图如图 9 所示。

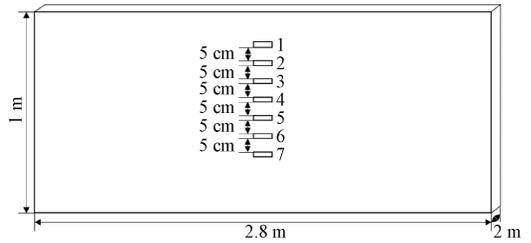


图 8 直立板模型及 MFC 编号

Fig. 8 Vertical plate model and MFC number



图 9 试验设备连接图

Fig. 9 Test equipment connection diagram

2.3 试验结果

本次波浪冲击试验 5 个不同入射波高分别进行测量。在读取电压数据时,不同入射波高下每个传感器的电压测量值在稳态区随机取 5 个峰值,将其平均值作为在该传感器处的最终电压,1~7 号 MFC 分别距静水面 0.15、0.1、0.05、0、-0.05、-0.1 和 -0.15 m(一代表静水面以下),

并将其标号分别代表测量时其位置的测量大小,通过标定试验的转化关系将该处测量得出的峰值电压转化为该处单位时间内波浪冲击压力,得到的数据如表2和图10所示。

表2 不同波高各传感器处所测得的单位时间内波浪冲击压力汇总

Table 2 Summary of wave impact pressures per unit time measured at various sensors at different wave heights

波高/cm	3	6	9	12	15
1-MFC	0	0	0	0.05	0.14
2-MFC	0	0.01	0.09	0.2	0.54
3-MFC	0.02	0.12	0.38	0.64	0.82
4-MFC	0.32	0.57	0.86	1.2	1.34
5-MFC	0.26	0.46	0.72	0.96	1.18
6-MFC	0.23	0.41	0.62	0.73	0.85
7-MFC	0.2	0.33	0.48	0.61	0.75

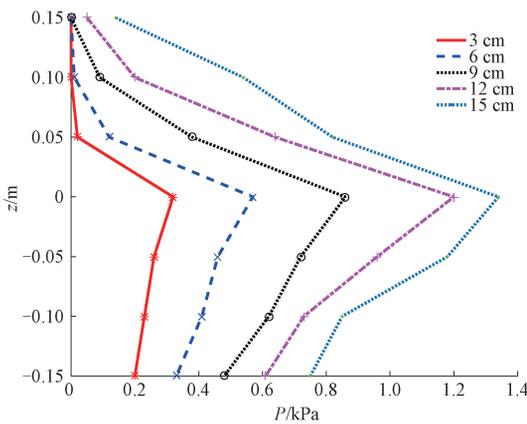


图10 不同入射波高直立板上波浪冲击压力分布
Fig. 10 Wave impact pressure distribution on a vertical plate with different incident wave heights

2.4 三个经验公式

1) Sainflou 公式

法国学者 Sainflou 根据拉格朗日坐标系,求计算出浅水有限振幅波的一次近似解,该方法简单易理解,各国工程界频繁使用^[17]。

根据椭圆余摆线波理论得出立波高于静水位:

$$h_s = \frac{\pi H^2}{L} \coth kd \quad (26)$$

式中: H 为所设波高, L 为波长, k 为波数, d 为水深。立波波峰最高处($H + h_s$)的压力为零。波峰作用时水底压力为:

$$P_d = \frac{\gamma H}{\cosh kd} \quad (27)$$

式中: γ 表示水的重度。将波浪压力通过直线分布计算,可

算出静水面处压力为:

$$P_s = (P_d + \gamma d) \left(\frac{H + h_s}{d + H + h_s} \right) \quad (28)$$

2) Goda 公式

合田良实将规则波与不规则波在直立墙上的波浪压力合并,用统一的公式进行计算。该公式既可以计算立波压力,也能计算破碎波压力。计算结果为连续的数值,称为合田良实(Goda)公式,并纳入日本港口的技术标准中^[17]。该公式由以下几个公式组成:

$$\eta = 1.5H \quad (29)$$

$$P_s = (P_d + \gamma d) \left(\frac{H + h_s}{d + H + h_s} \right) \quad (30)$$

$$P_s = (P_d + \gamma d) \left(\frac{H + h_s}{d + H + h_s} \right) \quad (31)$$

$$P_s = (P_d + \gamma d) \left(\frac{H + h_s}{d + H + h_s} \right) \quad (32)$$

$$P_s = (P_d + \gamma d) \left(\frac{H + h_s}{d + H + h_s} \right) \quad (33)$$

式中: η 为静水面以上压力为 0 处; P_s 、 P_d 分别表示静水面处和水底处压力; d_1 表示静水面到基床距离, d_2 表示静水面到护层距离, d_3 表示墙前水深,若无护层和基床时, $d_1 = d_2 = d_3$ 。

3) 我国《海港水文规范》

依照本文所试验的参数为背景,我国《海港水文规范》^[18]对此时的波浪在直墙上的作用力按以下几条规则确定:

(1) 静水面以上高度 H 位置压力为 0。

(2) 静水面处波压力计算公式为:

$$P_s = \gamma H \quad (34)$$

(3) 静水面以上波浪压力按直线分布。

(4) 静水面以下波浪压力计算式为:

$$P_z = \gamma H \frac{ch \frac{2\pi(d-Z)}{L}}{ch \frac{2\pi d}{L}} \quad (35)$$

式中: L 表示波长, P_z 表示静水面下 Z 处的波浪压力。

(5) 本文水下墙底处压力根据规范取为 0。

2.5 结果对比与分析

将本文模型的计算参量 $d = 0.7$, $L = 1.4$, $H = 0.03$, 0.06 , 0.09 , 0.12 , 0.15 m, $\gamma = 9.8$ kN/m³, $z = -0.15$, -0.1 , -0.05 , 0 , 0.05 , 0.1 , 0.15 m 分别代入上述公式,把计算出的结果与本文 MFC 所测量得出的结果进行对比,如表 3~7 所示,表中 z 所表示的是该位置与静水面的差值。

为了更直观看出各公式计算结果和试验结果的差异,将以表 3~7 的结果绘制成沿 z 的压力分布折线图,结果如图 11~15 所示。

根据表 3~7 可知,试验结果总体与我国规范计算结果相接近;与 Sainflou 公式计算值相比,随着入射波波高的增

表 3 入射波高 0.03 m 波峰作用下各公式计算值与试验结果对比

Table 3 Comparison between calculated values of various formulas and experimental results under the action of a wave peak with an incident wave height of 0.03 m kPa

z/m	Sainflou	Goda	我国规范	试验结果
0.15	0	0	0	0
0.1	0	0	0	0
0.05	0	0	0	0.02
0	0.3	0.18	0.29	0.32
-0.05	0.28	0.17	0.24	0.26
-0.1	0.26	0.15	0.19	0.23
-0.15	0.24	0.14	0.15	0.2

表 4 入射波高 0.06 m 波峰作用下各公式计算值与试验结果对比

Table 4 Comparison between calculated values of various formulas and experimental results under the action of a wave peak with an incident wave height of 0.06 m kPa

z/m	Sainflou	Goda	我国规范	试验结果
0.15	0	0	0	0
0.1	0	0	0	0.01
0.05	0.16	0.16	0.1	0.12
0	0.61	0.35	0.59	0.57
-0.05	0.57	0.33	0.47	0.46
-0.1	0.53	0.31	0.38	0.41
-0.15	0.49	0.28	0.3	0.33

表 5 入射波高 0.09 m 波峰作用下各公式计算值与试验结果对比

Table 5 Comparison between calculated values of various formulas and experimental results under the action of a wave peak with an incident wave height of 0.09 m kPa

z/m	Sainflou	Goda	我国规范	试验结果
0.15	0	0	0	0
0.1	0.07	0.14	0	0.09
0.05	0.5	0.33	0.39	0.38
0	0.93	0.53	0.88	0.86
-0.05	0.87	0.5	0.71	0.72
-0.1	0.81	0.46	0.56	0.62
-0.15	0.75	0.43	0.45	0.48

表 6 入射波高 0.12 m 波峰作用下各公式计算值与试验结果对比

Table 6 Comparison between calculated values of various formulas and experimental results under the action of a wave peak with an incident wave height of 0.12 m kPa

z/m	Sainflou	Goda	我国规范	试验结果
0.15	0.02	0.12	0	0.05
0.1	0.43	0.31	0.2	0.2
0.05	0.84	0.51	0.69	0.64
0	1.24	0.71	1.18	1.2
-0.05	1.16	0.66	0.94	0.96
-0.1	1.08	0.61	0.75	0.73
-0.15	1.0	0.57	0.6	0.61

表 7 入射波高 0.15 m 波峰作用下各公式计算值与试验结果对比

Table 7 Comparison between calculated values of various formulas and experimental results under the action of a wave peak with an incident wave height of 0.15 m kPa

z/m	Sainflou	Goda	我国规范	试验结果
0.15	0.39	0.29	0	0.14
0.1	0.78	0.49	0.49	0.54
0.05	1.17	0.69	0.98	0.82
0	1.56	0.88	1.47	1.34
-0.05	1.45	0.82	1.18	1.18
-0.1	1.35	0.77	0.94	0.85
-0.15	1.25	0.71	0.75	0.75

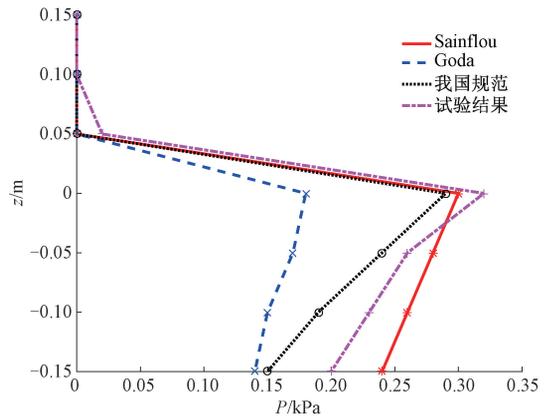


图 11 0.03 m 入射波高各公式计算结果与试验结果对比
Fig. 11 Comparison between calculated results of various formulas and experimental results for incident wave height of 0.03 m

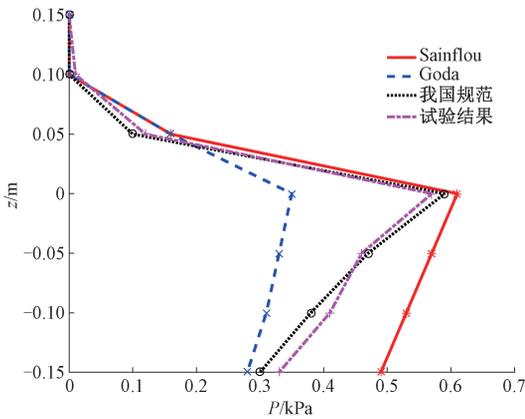


图 12 0.06 m 入射波高各公式计算结果与试验结果对比
Fig. 12 Comparison between calculated results of various formulas and experimental results for incident wave height of 0.06 m

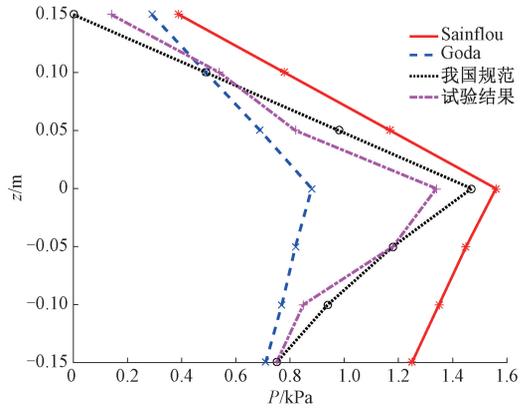


图 15 0.15 m 入射波高各公式计算结果与试验结果对比
Fig. 15 Comparison between calculated results of various formulas and experimental results for incident wave height of 0.15 m

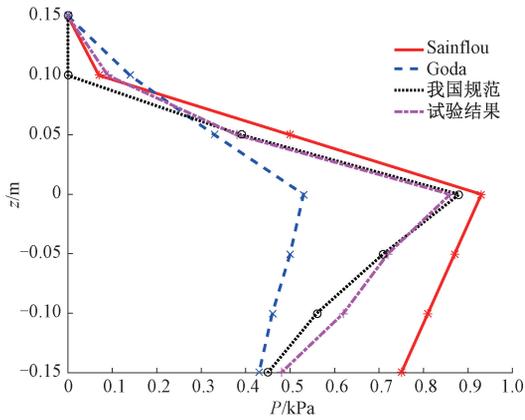


图 13 0.09 m 入射波高各公式计算结果与试验结果对比
Fig. 13 Comparison between calculated results of various formulas and experimental results for incident wave height of 0.09 m

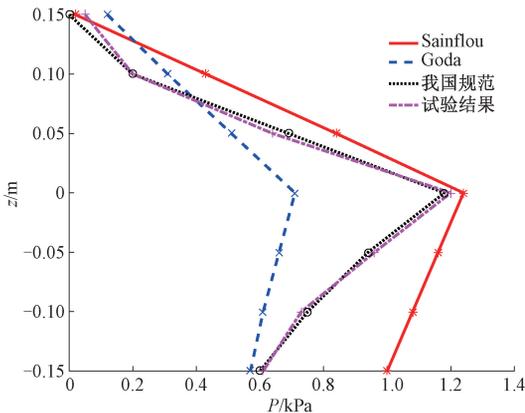


图 14 0.12 m 入射波高各公式计算结果与试验结果对比
Fig. 14 Comparison between calculated results of various formulas and experimental results for incident wave height of 0.12 m

0.15 m 处,其余位置基本偏移了公式计算值;与我国规范计算值相比,绝大多数位置试验值与计算值基本吻合;出于本文条件下的工程安全考虑,应该用 Sainflou 或我国规范来作为标准更合理。无论是试验测量值还是理论计算值,静水面处的冲击压力都是最大的,再沿水面往上或往下逐渐减小。

若以我国规范视为标准值,试验值与标准值误差平均值最大出现在入射波高 5 cm,为 18.25%,误差平均值最小出现在入射波高 12 cm,为 2.56%,整体平均误差为 7.71%,说明该测量方法是较为准确的。

导致波浪冲击压力试验值与各经验公式的误差原因主要有以下几个方面:各经验公式都是特定条件下的总结结果,实测条件一变,计算值即与测量值存在偏差;标定试验理论分析过程作出了一定假设条件,可能会影响实际测量结果的数值;波浪冲击过程是复杂的,结果曲线会有一定噪声干扰,特别是水下测量曲线,直立板也会随着波浪冲击出现一定程度的振动,影响测量结果。

3 结 论

本文采用新型压电材料 MFC 作为波浪冲击压力传感器,建立了 MFC 传感器所受水滴冲击压力与其产生峰值电压的数学关系,通过波浪冲击试验得出的测量值与 3 个海洋工程中的经验公式的理论计算值对比,得出以下结论: MFC 传感器受水滴冲击压力与其产生峰值电压的平方存在良好的线性关系,并可以用标定试验建立二者的数学模型;本次试验结果与我国规范计算结果较吻合,整体平均误差为 7.71%,说明本试验条件与我国规范适用范围近似,进一步说明按照我国规范,MFC 传感器测量波浪冲击压力是较为可行适用的,其可以作为压力传感器的代替传感器且用途广;从试验测量值和经验公式计算值来看,直立板上波浪冲击压力分布大小都是静水面处最大,沿着水面往上或往下逐渐减小。

大,误差基本随之增大,静水面以上随着高度增加误差逐渐增大;与 Goda 公式计算值相比,除了静水面下 0.1 m 和

参考文献

- [1] EDWIN V D B, JOCCO D, JULS S, et al. Applying force panels for wave impact measurements[J]. *Ocean Engineering*, 2021, 232: 108857.
- [2] GUO Y, XIAO L, KOU Y, et al. A method to measure wave impact force and its validation [C]. *ISOPE International Ocean and Polar Engineering Conference*, ISOPE, 2017.
- [3] 张嘉铭. 波浪冲击压力动态测试技术研究[D]. 太原: 中北大学, 2022.
- ZHANG J M. Research on dynamic measurement technology of wave impact pressure abstract [D]. Taiyuan: North University of China, 2022.
- [4] 李鹏程, 田嘉伟, 李晓旭, 等. 压力传感器寿命考核电液脉冲试验台水锤波仿真分析[J]. *仪表技术与传感器*, 2021(3): 117-119.
- LI P CH, TIAN J W, LI X X, et al. Simulation analysis of water hammer wave in electro-hydraulic pulse test machine for life assessment of pressure sensor[J]. *Instrument Technology and Sensors*, 2021(3): 117-119.
- [5] 汪康, 何壮, 喻研. 柔性压阻式压力传感器的制备与性能优化[J]. *电子元件与材料*, 2022, 41(8): 781-793.
- WANG K, HE ZH, YU Y, et al. Preparation and performance optimization of flexible piezoresistive pressure sensor [J]. *Electronic Components and Materials*, 2022, 41(8): 781-793.
- [6] 蒯潇. 基于压电技术的降雨测量方法研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2020.
- LIN X. Research on rainfall measurement method based on piezoelectric technology[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2020.
- [7] 蒋帅, 沈意平, 王送来, 等. 基于压电纤维传感器应力波方向检测的结构冲击定位研究[J]. *仪器仪表学报*, 2023, 44(1): 27-37.
- JIANG SH, SHEN Y P, WANG S L, et al. Research on structural impact source location based on sensing of stress wave direction by the piezoelectric fiber sensor [J]. *Journal of Instrumentation*, 2023, 44(1): 27-37.
- [8] 贾宏宇. MFC 压电纤维复合材料的制备与振动能量收集研究[D]. 济南: 济南大学, 2021.
- JIA H Y. Preparation and research on vibration energy harvesting of macro fiber composite [D]. Jinan: University of Jinan, 2021.
- [9] PARK B, SOHN H. Localization of crack initiation in a pipe structure using a laser based acoustic emission technique [C]. *8th International Workshop on Structural Health Monitoring 2011: Condition-Based Maintenance and Intelligent Structures*, 2011.
- [10] PARK S, INMAN D J, YUN C B. An outlier analysis of MFC-based impedance sensing data for wireless structural health monitoring of railroad tracks [J]. *Engineering Structures*, 2008, 30(10): 2792-2799.
- [11] STOW C D, HADFIELD M G. An experimental investigation of fluid flow resulting from the impact of a water drop with an unyielding dry surface[J]. *Proceedings of the Royal Society of London. A. Mathematical and Physical Sciences*, 1981, 373(1755): 419-441.
- [12] MUNDO C H R, SOMMERFELD M, TROPEA C. Droplet-wall collisions: Experimental studies of the deformation and breakup process [J]. *International journal of multiphase flow*, 1995, 21(2): 151-173.
- [13] ILYAS M A, SWINGLER J. Piezoelectric energy harvesting from raindrop impacts[J]. *Energy*, 2015, 90: 796-806.
- [14] 雷旭. 大跨度桥梁柔细构件风(雨)作用及其振动控制研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2017.
- LEI X. Study about wind (rain) effects and vibration control of flexible structural members in long-span bridge[D]. Changsha: Hunan University, 2017.
- [15] 钟声. 雨滴冲击压电悬臂梁发电系统的动力学分析[D]. 西安: 西安理工大学, 2019.
- ZHONG SH. Dynamic analysis of raindrops impacted piezoelectric cantilever power generation system [D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2019.
- [16] SEZER N, KOC M. A comprehensive review on the state-of-the-art of piezoelectric energy harvesting [J]. *Nano Energy*, 2021, 80: 105567.
- [17] 海港工程设计手册[J]. *港工技术*, 2021, 58(3): 121.
- Port works design manual [J]. *Port Engineering Technology*, 2021, 58(3): 121.
- [18] 海港水文规范 JTS 145-2-2013[S]. 北京: 人民交通出版社, 2013.
- Harbor hydrology code JTS 145-2-2013[S]. Beijing: People's Communications Press, 2013.

作者简介

黄禾艺, 硕士研究生, 主要研究方向为波浪能利用。

E-mail: 812210637@qq.com

李正农(通信作者), 博士, 教授, 主要研究方向为结构抗震抗风等。

E-mail: zhengnong88@qq.com

任志刚, 博士, 教授, 主要研究方向为钢管混凝土材料与结构、纤维混凝土材料与结构、绿色建筑与建筑工业化等。

E-mail: renzg@whut.edu.cn

范楠贵, 硕士研究生, 主要研究方向为波浪能利用。

E-mail: 1039461651@qq.com