



大越浪下堤后建筑单体波浪冲击力计算方法

方 波，薛丁源，杨小龙，杨晓婷，覃 杰，朱 峰
(中交第四航务工程勘察设计院有限公司，广东 广州 510230)

摘要：针对越浪水体对防波堤后方建筑单体冲击力缺乏理论计算公式的问题，结合地中海某油气港改扩建工程的二维物理模型试验结果，提出4种基于压力传感器测量数据的堤后单体平均波压力计算方法，并结合总力传感器结果与各种方法的计算结果进行对比分析。结果表明：越浪水体具有较高的动能，导致单个压力传感器的测量结果偏高，明显高于总力传感器结果；当试验设备受限时，可以通过均匀分布压力传感器，取同一时刻下波压(不含负值)平均值的方式近似计算建筑单体迎浪面受到的总水平力；不同的波压平均值计算策略对总水平力的大小有影响，遍历全部测量结果计算得到的波压平均值较为合理，采取此计算策略得到的总水平力与总力传感器结果最为接近。

关键词：堤后单体；大越浪量；越浪冲击力；总水平力

中图分类号：U652.7+4

文献标志码：A

文章编号：1002-4972(2024)02-0060-06

Calculation methods for impact force on building behind breakwater under massive wave overtopping condition

FANG Bo, XUE Dingyuan, YANG Xiaolong, YANG Xiaoting, QIN Jie, ZHU Feng
(CCCC-FHDI Engineering Co., Ltd., Guangzhou 510230, China)

Abstract: In response to the problem of the lack of theoretical formulae for calculating the wave overtopping impact force on a building behind the breakwater, combining with the two-dimensional physical model test results of a Mediterranean petroleum jetty expansion project, we propose four calculation methods of average wave pressure acting on the buildings behind the breakwater based on the pressure sensors' data, and compare and analyze the results of the total force sensor with the calculation results of various methods. The results show that the high kinetic energy of the wave overtopping drops causes the measurement results of individual pressure sensors to be higher than those of the total force sensor. When the test equipment is limited, the total wave pressure on the building can be approximately calculated by taking the average positive wave pressure value based on synchronous data from uniformly distributing pressure sensors. Different strategies for calculating the average wave pressure have an impact on the magnitude of the total horizontal force, the average wave pressure calculated based on all measurement data is more reasonable, and the total horizontal force obtained by adopting this calculation strategy is closest to the total force sensor's results.

Keywords: building behind breakwater; massive wave overtopping; overtopping impact force; total horizontal force

防波堤的功能主要是防御外海波浪对港口水域的侵袭，为船舶系泊提供相对平稳的水域。一般来说，防波堤上不设置除灯桩外的其他建筑单体。在实际工程应用中，为提高水域利用率，一些防波堤的内侧也会布置泊位，相关功能配套的

建筑单体布置也考虑通过措施尽可能避开越浪冲击影响的区域，如拉开单体与防波堤的距离、防波堤顶高程满足不越浪的要求等。但当条件有限，建筑单体须布置在防波堤上且越浪量较大时，就需要考虑单体所受到的越浪冲击力。防波堤挡浪

收稿日期：2023-05-19

作者简介：方波（1984—），男，硕士，高级工程师，从事港口工程设计。

墙受到的波浪力可以通过试验数据拟合的经验公式^[1]进行计算, Molines 等^[2]以越浪量为自变量, 采用神经网络计算挡墙上的波浪力。针对防波堤后方建筑单体所受越浪冲击力的研究较少, Watson 等^[3]通过断面物理模型试验总结多波况下斜坡堤挡浪墙后方不同距离、不同高度的波压力分布情况。目前尚无相关理论公式可以用于计算防波堤后方建筑单体所受越浪冲击力, 主要以物理模型试验为主, 对波压力进行测量。

本文以地中海某油气港改扩建工程为例, 介绍地中海长周期强浪条件下油泊位的设计方案,

并基于二维断面物理模型试验的结果, 提出有限条件下防波堤墙后单体所受越浪冲击力的计算方法。

1 工程概况

地中海南岸某油气港改扩建工程中拟新建油泊位, 其选址在既有北防波堤内侧。由于该泊位紧邻老港区的进港航道, 业主不允许在水域范围内设置水工平台用以布置辅建单体, 故变电房、泡沫间等单体只能布置在既有北防波堤上。泊位及辅建单体平面布置见图 1。

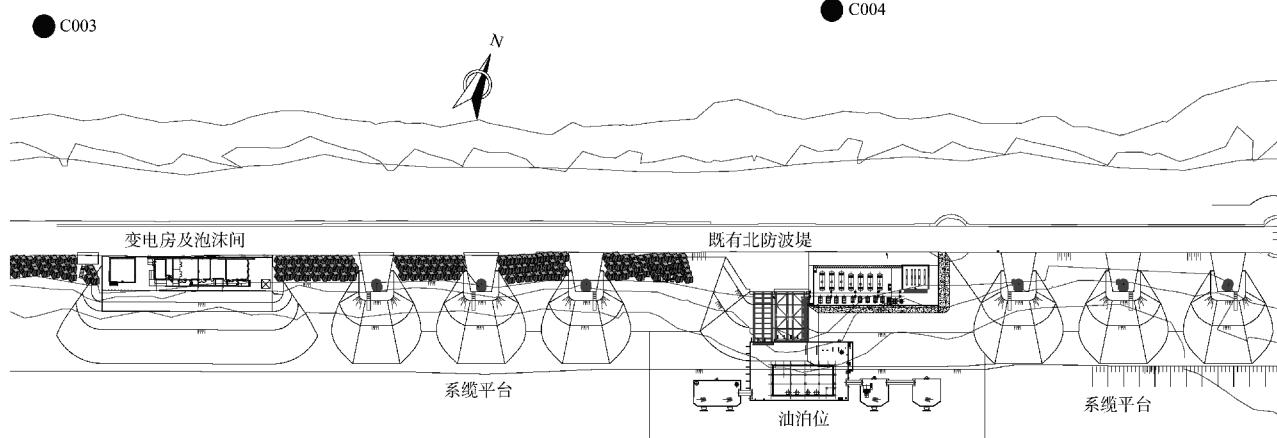


图 1 油泊位及辅建单体平面布置

既有北防波堤为抛石斜坡堤的结构形式, 堤心为开山石(0~500 kg), 护面块体为 16 m³ 四角锥块体, 其设计顶高程为 8.16 m。堤顶设置钢筋混凝土 L 形挡浪墙, 兼作行车维修通道, 其设计

顶高程为 7.56 m。既有北防波堤及辅建单体断面见图 2。为保障油泊位的运营, 要求辅建单体在设计使用年限内设计波浪超越概率不高于 20%, 因此, 针对单体的设计波浪重现期的要求为 250 a。

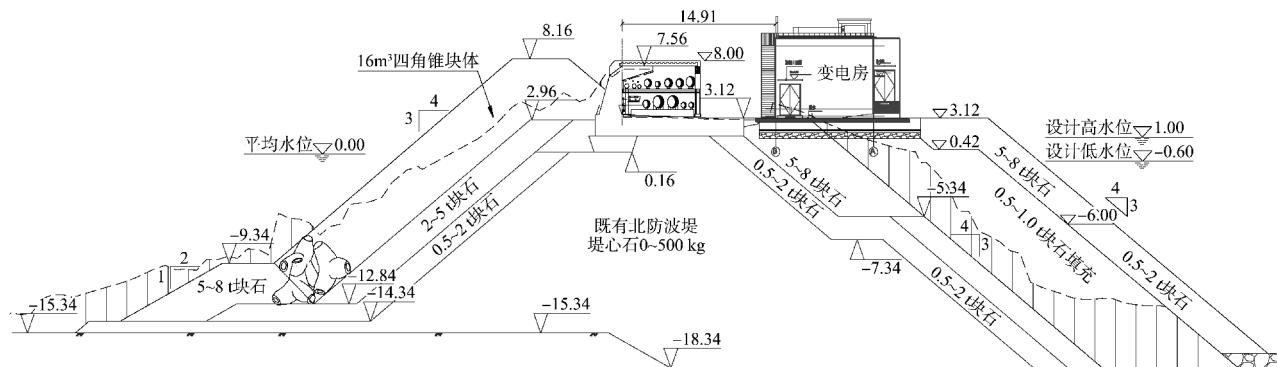


图 2 既有北防波堤及辅建单体断面 (单位: m)

本工程位于地中海南岸, 受季风的影响, 波浪作用强烈, 主要体现在: 1) 工程所在位置 1 a 重现期的平均波高达 4.5 m, 而 250 a 重新期的有

效波高更是达到 9.0 m; 2) 1 a 重现期的谱峰周期为 10.5~13.5 s, 而 250 a 重新期的谱峰周期则达 14.5~17.5 s。根据本工程的波浪数值模拟结

果^[4]，新建油泊位的设计波浪方向为 NNW，其余波要素见表 1。

表 1 油泊位海侧设计波要素

| 重现期/ a | C003 点 | | C004 点 | | 水位/ m |
|-----------|--------------------|-----------------|--------------------|-----------------|----------|
| | 平均波高 H_{m0}/m | 谱峰周期 T_p/s | 平均波高 H_{m0}/m | 谱峰周期 T_p/s | |
| 1 | 4.3 | 13.5 | 4.4 | 13.5 | 0.55 |
| 10 | 6.0 | 14.5 | 6.2 | 14.5 | 0.55 |
| 100 | 7.5 | 15.5 | 7.8 | 15.5 | 1.00 |
| 250 | 8.2 | 16.0 | 8.5 | 16.0 | 1.00 |
| 100 | 7.5 | 15.5 | 7.8 | 15.5 | -0.60 |
| 250 | 8.2 | 16.0 | 8.5 | 16.0 | -0.60 |
| 500 | 8.6 | 16.5 | 9.0 | 16.5 | 1.00 |

2 试验概况

2.1 试验设备

针对堤后单体所受越浪冲击力测定和设计的合理性，在阿尔及利亚国家海洋工程实验室(LEM)开展了二维物理模型试验。试验水槽长 40 m、宽 0.6 m、深 1 m，水槽内布置 1 台造波机，模拟波浪要素的生成由计算机自动控制。

由于 LEM 设备有限，开展正式试验之前，在南京水利科学研究院开展二维物理模型预试验，以便大致了解试验结果范围，提前开展相关设计。试验水槽长 70 m、宽 1.8 m、深 1.8 m，其中进行模型试验的水槽部分宽 0.8 m，水槽内布置 1 台造波机，由计算机自动控制模拟波浪要素的生成。

2.2 模型设计

模型试验依据 Froude 数的相似原理设计。考虑到结构的尺寸、构件元素的尺寸、结构物深度和造波深度等因素，LEM 二维断面物模试验采用的比尺为 1:54.09。根据相关的模型试验导则^[5]建议，防波堤二维稳定性试验的几何比尺为 1:30~1:60，上述所选比尺满足试验要求。南京水利科学研究院试验选用的比尺则为 1:39.6。

2.3 试验方法

二维断面物理模型试验主要研究波浪作用下防波堤后建筑单体所受越浪冲击力。模型包含既有北防波堤断面和变电房。

断面物理模型试验均采用 JONSWAP 谱生成不

规则波，根据地中海海域情况，谱峰因子 γ 取 1.5。每组试验工况的测试波数为 1 000。

对于波压力的数据收集，LEM 采用传统的压强传感器，采样频率为 32 Hz，且数量有限。南科院试验除采用压强传感器外，还采用了总力传感器。总力传感器可测量单个构件所受的波浪总水平力^[6]，单体模型除了在波浪作用下与总力传感器接触外，不受其他外力的影响。试验时总力测量的采样频率为 100 Hz，并采用上跨零点法对力的时间序列结果进行处理分析，得到作用在单体模型上的最大总水平力 F_{max} 。

2.4 试验工况

试验水位涵盖高水位、设计高水位和设计低水位，波浪重现期分别为 1、10、100、250 和 500 a。预试验的波要素取自数据点 C004。在 LEM 开展正式试验之前，确定了试验波要素参考数据点 C003，并取消了设计低水位的 250 a 重现期及高水位的 500 a 重现期和 120% 波浪作用。试验工况见表 2。

表 2 C004 和 C003 点试验波要素

| 数据点 | 工况 编号 | 水位/ m | 重现期/ a | 平均波高 H_{m0}/m | 谱峰周期 T_p/s | 试验 波数 |
|------|----------------|----------|--------------|--------------------|-----------------|----------|
| C004 | T ₁ | 0.55 | 1 | 4.4 | 13.5 | 1 000 |
| | T ₂ | 0.55 | 10 | 6.2 | 14.5 | 1 000 |
| | T ₃ | 1.00 | 100 | 7.8 | 15.5 | 1 000 |
| | T ₄ | 1.00 | 250 | 8.5 | 16.0 | 1 000 |
| | T ₅ | -0.60 | 100 | 7.8 | 15.5 | 1 000 |
| | T ₆ | -0.60 | 250 | 8.5 | 16.0 | 1 000 |
| | T ₇ | 1.00 | 500 | 9.0 | 16.5 | 1 000 |
| | T ₈ | 1.00 | 120% 波浪作用 | 9.4 | 17.0 | 1 000 |
| C003 | T ₁ | 0.55 | 1 | 4.3 | 13.5 | 1 000 |
| | T ₂ | 0.55 | 10 | 6.0 | 14.5 | 1 000 |
| | T ₃ | 1.00 | 100 | 7.5 | 15.5 | 1 000 |
| | T ₄ | 1.00 | 250 | 8.2 | 16.0 | 1 000 |
| | T ₅ | -0.60 | 100 | 7.5 | 15.5 | 1 000 |

3 越浪冲击试验结果

3.1 压力传感器预试验结果

单体模型上共布置 4 个压力测点，墙前布置 3 个，房顶布置 1 个，其编号为 5#~8#，每个测点根据位置不同，分别测量水平和竖向压力。测点布置如图 3 所示。进行预试验时，尚未进行输气

管廊盖板的设计, 故此时模型中未在管廊上设置盖板。传感器测压结果见表 3。

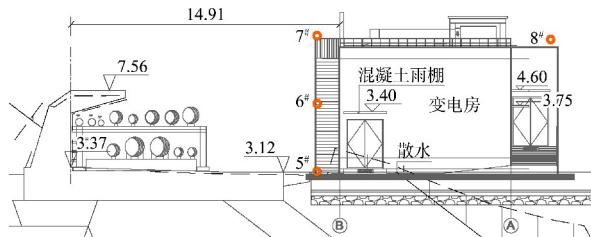


图 3 预试验变电房压力传感器布置 (单位: m)

表 3 预试验变电房压力传感器测压结果

| 测点 编号 | 方向 | 最大波压 p_{max} /kPa | |
|----------|----|--|--|
| | | 100 a 重现期(越浪量 $201.2 \text{ L} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$) | 250 a 重现期(越浪量 $274.3 \text{ L} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$) |
| 5# | 水平 | 193.8 | 281.2 |
| | 竖直 | - | - |
| 6# | 水平 | 123.2 | 167.2 |
| | 竖直 | - | - |
| 7# | 水平 | 86.7 | 124.8 |
| | 竖直 | 21.1 | 32.1 |
| 8# | 水平 | 7.5 | 9.5 |
| | 竖直 | 6.4 | 7.3 |

注: 水位为 1.0 m。

由表 3 可以看出, 堤后单体上波压力的分布从上到下逐渐增大, 且基本分布在前墙上。这主要是因为越浪水体越过挡浪墙后大部分落在道路及变电房根部, 因此 5# 测点的压力最大。但同时也注意到, 越浪越过护面块体和挡浪墙后成为破碎水体, 掺杂着空气, 而传统压力传感器只能捕捉到飞溅水滴的压力数据; 另一方面, 由于越浪水体有较高的动能, 传感器测得的数据较大。如果按此波压结果进行设计, 单体迎浪面的波压力将超过挡浪墙顶部的波压力(重现期 100 a 的波压为 112.7 kPa, 重现期 250 a 的为 131.6 kPa)。为更加准确地了解单体受力情况, 改用总力传感器测量波浪总水平力。

3.2 总力传感器预试验结果

变电站高度 6.9 m, 距离挡浪墙前沿线 14.91 m。波浪总水平力试验情况见图 4, 测量结果见表 4。根据合力数值及合力作用点高度, 将波浪总水平力等效为水平梯形荷载, 见图 5。结合表 3 和图 5 可以看出, 等效的波压结果不到测量结果的一半,

且比挡浪墙顶部波压力小, 基本符合结构受力的预期。

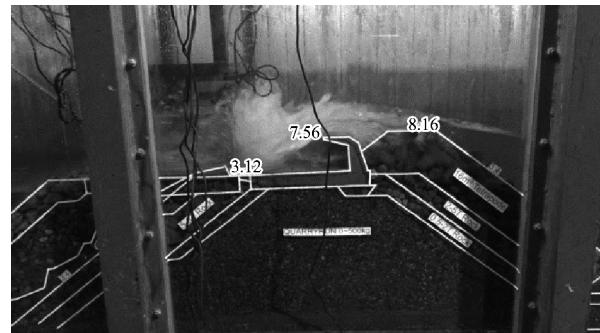


图 4 越浪水体冲击变电房模型瞬间

表 4 变电房总力传感器测量结果

| 水位/ m | 重现期/ a | 沿防波堤纵向单宽最大 总力 F_{max} /(kN·m ⁻¹) | 作用点 高度/m |
|----------|-----------|---|-------------|
| 1.0 | 100 | 369.1 | 2.93 |
| 1.0 | 250 | 563.1 | 3.16 |

注: 作用点高度从变电房底部(高程 3.12 m)起算。

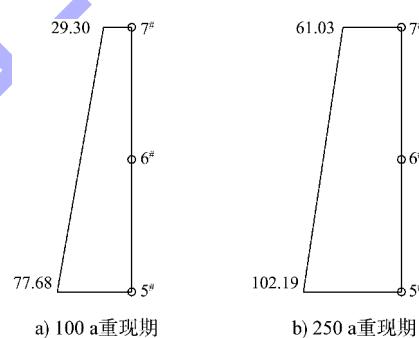


图 5 总水平力等效结果 (单位: kPa)

3.3 LEM 正式试验结果

变电房模型上共布置 11 个水平压力测点, 前墙布置 9 个, 编号为 1#~9#; 房顶布置 2 个, 编号分别为 10#、11#。断面测点布置如图 6 所示。变电房迎浪面测点布置为 3×3 形式, 沿模型高度方向均匀布置 3 个测点, 沿防波堤轴线方向均匀布置 3 个测点, 如图 7 所示。

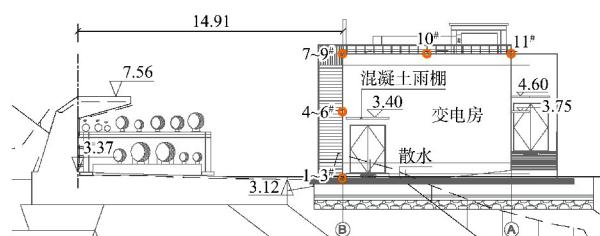


图 6 LEM 试验变电房压力传感器布置 (单位: m)

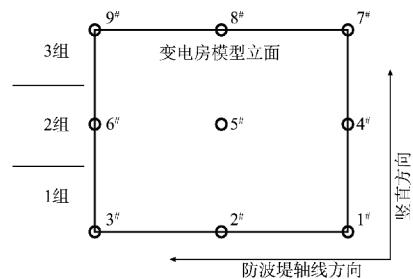


图 7 变电房外墙迎浪面压力传感器布置

将前墙上 9 个测点按高程分为 3 组, 底部 1[#]~3[#]测点为第 1 组, 中部 4[#]~6[#]测点为第 2 组, 上部 7[#]~9[#]测点为第 3 组, 顶部 10[#]、11[#]测点不分组。LEM 在报告中给出各组压力传感器最大测压结果, 以及各组波压最大值出现时, 同时刻下各压力传感器结果。见表 5。

表 5 LEM 试验变电房压力传感器测压结果

| 分组 | 测点 编号 | 最大波压 p_{\max} /kPa | 最大波压对应 时刻 t_{\max} /s | 同时刻下压力传感器结果(某组波压最大值出现时) p_m /kPa | | | |
|-----|-----------------|-------------------------|----------------------------|--|--|--|---------------------------------------|
| | | | | 第 1 组(1 [#] ~3 [#]) | 第 2 组(4 [#] ~6 [#]) | 第 3 组(7 [#] ~9 [#]) | 顶部(10 [#] ~11 [#]) |
| 1 组 | 1 [#] | 106.19 | 1 485.59 | 3.76 | 3.15 | 4.28 | 14.87 |
| | 2 [#] | 95.68 | 425.81 | 0.88 | -0.05 | 0.81 | 12.69 |
| | 3 [#] | 110.51 | 257.47 | 110.51 | 0.45 | 0.49 | 27.76 |
| 2 组 | 4 [#] | 160.85 | 1 360.84 | -15.90 | 160.85 | 13.50 | 10.73 |
| | 5 [#] | 155.58 | 1 033.41 | 0.61 | 23.45 | 95.50 | -3.18 |
| | 6 [#] | 155.40 | 372.44 | -1.98 | -1.02 | -1.03 | 2.09 |
| 3 组 | 7 [#] | 94.57 | 1 553.97 | 3.71 | 4.40 | 4.74 | 5.73 |
| | 8 [#] | 101.39 | 775.22 | 1.76 | -2.75 | 101.39 | -1.27 |
| | 9 [#] | 98.42 | 480.44 | -3.44 | -2.63 | -3.74 | -1.15 |
| — | 10 [#] | 28.80 | 1 501.09 | 1.53 | 3.48 | 10.79 | 28.80 |
| | 11 [#] | 13.07 | 1 611.06 | 2.26 | 3.17 | 3.14 | 4.64 |

注: 重现期 250 a, 越浪量 208.6 L/(m·s)。

3.4 堤后越浪冲击力计算方法及结果对比

总体上, 总力传感器测得的越浪冲击总力结果更加合理。但如果失去总力传感器时, 需要基于压力传感器的测压结果计算防波堤后方建筑单体所受到的越浪冲击力。其基本思路是求得单体前墙所受到的平均冲击波压, 再乘以单体高度, 得到沿防波堤轴向单位宽度受到的总水平力。结合 LEM 做法、咨询要求以及对原始数列的分析, 计算平均波压主要考虑以下 4 种方法。

方法 1 按测点高程分组(图 7), 3 个测点为一组, 当分组 3 个测点中波压最大值出现时, 计算该时刻下 9 个测点的波压平均值(剔除测点负压值), 共得到 3 组波压平均值。

方法 2 不考虑分组, 当任一测点出现波压最大值时, 分别计算该时刻下 9 个测点的波压平均值(剔除测点负压值), 共得到 9 组波压平均值(其中有 3 组平均值与方法 1 一致)。

方法 3 按测点高程分组(图 7), 当某组 3 个测点中波压最大值出现时, 计算该时刻下各组 3 个测点中波压最大值的算术平均值, 共得到 3 组波压平均值。

方法 4 基于全部波压测量数据, 剔除测点负压值后, 计算所有时刻下 9 个测点波压平均值, 并找出其最大值。

各方法计算得到的波压平均值对比结果见表 6。由于器材敏感性问题, 压力传感器可能测得负压数据。若这些数据直接参与平均波压值计算, 其结果将会偏小, 故考虑剔除测点负压数据。结合表 5 和 6 的结果可以看出: 1) LEM 试验报告提供的数据结果, 是考虑分组 3 个测点出现波压最大值时, 同一时刻下 9 个测点的波压数值。基于此思路计算波压平均值即为方法 1, 但有可能无法找出波压平均值的最大值; 方法 2 则是方法 1 的延伸, 不考虑分组, 得到 9 组波压平均值。

表 6 平均波压结果整理及对比

| 方法 | 分组 | 平均波压 \bar{p} /kPa | 最大波压 (对应点)/kPa | 最大波压对应 时刻 t_{\max} /s |
|--------------------------|-----|------------------------|-------------------|----------------------------|
| 方法 1(各组 测点中出现 最大值) | 1 组 | 20.20 | 110.51(3#) | 257.47 |
| | 2 组 | 38.46 | 160.85(4#) | 1 360.84 |
| | 3 组 | 31.53 | 101.39(8#) | 775.22 |
| | | 31.48 | 106.19(1#) | 1 485.59 |
| | | 48.84 | 95.68(2#) | 425.81 |
| | | 20.20 | 110.51(3#) | 257.47 |
| 方法 2(单测 点波压出现 最大值) | | 38.46 | 160.85(4#) | 1 360.84 |
| | - | 36.65 | 155.58(5#) | 1 033.41 |
| | | 45.42 | 155.40(6#) | 372.44 |
| | | 56.41 | 94.57(7#) | 1 553.97 |
| | | 31.53 | 101.39(8#) | 775.22 |
| | | 21.76 | 98.42(9#) | 480.44 |
| 方法 3(各组 波压大值的 平均值) | 1 组 | 38.37 | 110.51(3#) | 257.47 |
| | 2 组 | 56.13 | 160.85(4#) | 1 360.84 |
| | 3 组 | 67.06 | 101.39(8#) | 775.22 |
| 方法 4 | - | 56.41 | 94.57(7#) | 1 553.97 |

注: 重现期 250 a。

2) 方法 3 考虑同一时刻下, 3 个分组中波压大值的平均值, 得到的结果比总力传感器的结果大。实际设计过程中, 如果采用该方法计算结果作为条件输入, 设计偏于保守, 有一定的安全储备。3) 方法 4 堤后单体单位宽度所受的总水平力为 389.2 kN/m, 与表 4 中重现期 100 a 的结果接近; 从越浪量角度考虑, LEM 试验中重现期 250 a 的越浪量 208.6 L/(m·s) 与预试验中重现期 100 a 的越浪量 201.2 L/(m·s) 相近, 故可认为方法 4 的结果更接近总力传感器的结果。4) 方法 2 和 4 需要获得完整的波压数列才可分析计算波压平均值。本案例中, 单体所受到的波压最大平均值恰好出现在 7# 测点测得最大值的时刻。虽然方法 2 也能得到此结果, 但可能存在一定的偶然性, 遍历全部数据寻找波压最大平均值更为稳妥。

4 结语

1) 当越浪量较大时, 越浪水体的能量较高, 对防波堤后建筑单体的冲击作用较大。目前国内学者鲜有对堤后建筑单体受到的越浪冲击力进行研究, 暂无理论公式可用于计算。现阶段只能通过物理模型试验获取数据。

2) 由于越浪水体中掺杂空气, 堤后建筑单体受到的越浪冲击力与挡浪墙所受的波浪力有较大不同, 而传统压力传感器只能捕捉到飞溅水滴的压力数据; 同时, 采样频率越高的压力传感器, 能够获取到的瞬时波压最大值越大。若直接按传感器测得的波压结果进行设计, 单体迎浪面的波压力将超过挡浪墙顶部的波压力, 造成过度设计, 偏于保守。

3) 总力传感器能够测量单体或构件受到的总水平力。当试验条件所限无总力传感器可用时, 可以通过均匀布设压力传感器、取同时刻下非负波压的平均值的方式近似计算建筑单体迎浪面受到的总水平力。采取不同的波压平均值计算策略对最终计算结果有影响, 经比对, 遍历全部测量结果计算得到的波压平均值较为合理, 采取此计算策略得到的总水平力与总力传感器结果最为接近。由于试验过程中可能存在的偶然性或仪器的偏差, 可以考虑一定的措施提升结构的安全储备。

参考文献:

- [1] CIRIA, CUR, CETMEF. The rock manual—the use of rock in hydraulic engineering [M]. 2nd ed. London: CIRIA, 2007.
- [2] MOLINES J, HERRERA M P, MEDINA J R. Estimations of wave forces on crown walls based on wave overtopping rates[J]. Coastal engineering, 2018, 132: 50-62.
- [3] WATSON P, NUYTS S, MURPHY J, et al. Wave overtopping pressures on a building behind a rubble mound breakwater: an experimental study [C]//Coastlab. Proceedings of the 7th International Conference on the Application of Physical Modelling in Coastal and Port Engineering and Science. Santander: Coastlab, 2018: 1-10.
- [4] ARTELIA Eau & Environnement. Etude numérique de Houle: Rapport-R1-V11 [R]. Paris: ARTELIA Eau & Environnement, 2020.
- [5] FROSTICK L E, MCLELLAND S J, MERCER T G. Users guide to physical modelling and experimentation: experience of the hydralab network[M]. London: CRC Press, 2011.
- [6] 沈雨生, 孙忠滨, 周益人. 斜向波浪对斜坡堤胸墙作用力的试验研究[J]. 水运工程, 2018(1): 35-40.

(本文编辑 王璁)