



悬挑框架式海堤不规则波浪力特性研究

季鑫鑫¹, 杨志勇², 纪道斌¹

(1. 三峡大学 水利与环境学院, 湖北 宜昌 443002;
2. 中国电建集团华东勘测设计研究院有限公司, 浙江 杭州 311122)

摘要: 以浙江温州浅滩二期生态堤为例, 在波浪港池中开展物理模型试验, 探究悬挑框架式海堤在不规则波作用下的受力特性。测量不同入射波条件下海堤直立墙和悬挑的波压强值并分析其随时间变化特性, 得到各工况下海堤结构上波压强的分布特征, 并探讨结构受力的主要影响因素, 对结构所受波浪总力及其影响因素进行冗余分析(RDA)。结果表明: 海堤直立墙在波峰作用下, 水平方向不同位置受力存在相位差, 且潮位以上、以下部分受力过程差异较大; 极端工况下海堤直立墙与悬挑连接处所受压强最大; 结构整体所受最大竖向总力为 5 653. 125 kN, 约为最大水平总力的 70%; 有效波高相较于潮位与结构受力的相关性更大。在悬挑框架式海堤设计中, 应保证直立墙与悬挑连接处的强度, 充分考虑波浪竖向荷载以及最大波高出现情况对整体稳定的影响。

关键词: 框架式海堤; 悬挑结构; 不规则波; 波浪力; 冗余分析

中图分类号: U656. 2; TV32+1

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2024)06-0018-06

Irregular wave force characteristics of cantilever framed seawall

JI Xinxin¹, YANG Zhiyong², JI Daobin¹

(1. College of Hydraulic and Environmental Engineering, China Three Gorges University, Yichang 443002, China;
2. PowerChina Huadong Engineering Co., Ltd., Hangzhou 311122, China)

Abstract: Taking the second phase ecological seawall of Wenzhou in Zhejiang Province as an example, we conduct physical model tests in a wave harbor pool to explore the mechanical characteristics of a cantilever framed seawall under irregular wave action. We measure the wave pressure values of the vertical wall and cantilever of the seawall under different incident wave conditions, and analyze their time-varying characteristics. Then we obtain the distribution characteristics of wave pressure on the seawall structure under various working conditions, explore the main influencing factors of structural stress, and carry out a redundancy analysis (RDA) on the total wave force and its influencing factors on the structure. The results show that under the action of wave peaks, there is a phase difference in the force acting on the vertical wall of the seawall at different positions in the horizontal direction, and there is a significant difference in the force process above and below the tide level. Under extreme working conditions, the connection between the vertical wall of the seawall and the cantilever is subjected to the maximum pressure. The maximum vertical total force on the entire structure is 5 653. 125 kN, which is approximately 70% of the maximum horizontal total force. The correlation between significant wave height and structural stress is greater compared to tide level. In the design of cantilever framed seawalls, it is necessary to ensure the strength of the connection between the vertical wall and the cantilever, and fully consider the impact of vertical wave loads and the occurrence of maximum wave height on overall stability.

Keywords: framed seawall; cantilever structure; irregular wave; wave force; redundancy analysis

收稿日期: 2023-10-11

作者简介: 季鑫鑫 (1998—), 男, 硕士研究生, 研究方向为港口、海岸及近海工程。

随着沿海城市规模不断扩大, 更大的用地需求促使新建海堤范围开始向中低滩延伸。为解决传统海堤土石用料增加、工期显著延长等问题, 汤德意^[1]参考已有码头技术, 运用水力插板技术、板桩结构研发出一种新型板桩框架海堤结构。结合对于新建海堤堤顶宽度的要求, 悬挑框架式海堤结构形式出现并投入使用。框架式海堤主要依靠桩基承受荷载, 且外海潮位及波浪荷载变化对结构影响显著。因此, 明确悬挑框架式海堤在波浪作用的受力特性对工程投资与结构安全有重要意义。

框架结构迎浪面为直立形式, 国内外学者对直立堤已做了大量研究。徐宇航等^[2]通过物理模型试验分析板桩承台式直立堤在不规则波作用下的压强, 发现入射波浪在破碎后, 结构上压强显著增大; Xie 等^[3]通过室内试验在不同涌浪条件下重复测量垂直面上用浪压力与参数, 发现建立的冲击力随机模型与其他学者的试验数据吻合较好, 可用于垂直面涌浪问题的预测; 王浩霖等^[4]通过构建三维数值波浪水池, 分析波向与迎浪面夹角在小范围内变化时波浪力变化, 发现波浪力基本在夹角为 90° 时最大; 王艺之等^[5]分别利用 XFLOW 与 FLOW-3D 软件模拟直立堤与波浪相互作用, 发现后者误差更小, 当波周期增大时, 波峰压力增大, 增幅逐渐减小; 张华昌等^[6]通过物理模型试验发现, 斜向波浪沿直立堤传播时会出现波高增大及壅水现象, 在入射波与堤防轴线夹角在 5°~24° 范围内, 提前最大波高为原始波高的 2.05 倍、最大壅水幅度为 2.17 倍。对于框架式海堤, 郑安兴等^[7]运用 ABAQUS 有限元强度折减法分析密排桩基参数及周围淘刷对框架海堤的稳定性的影响, 发现桩身水平位移随着桩长的增大而减小, 当桩排间距为 2.1 m 时, 海堤整体稳定安全系数最低; Wu 等^[8]研究某框架海堤背水侧堆砂对框架结构整体稳定的影响, 结果表明背水侧堆砂至少使整体安全系数降低 30.8%; 詹敏杰^[9]通过监测以及数值模拟, 发现框架结构与桩基的变形主要由填土产生的水平荷载引起。

综上所述, 已有研究主要针对桩基、填土等结构自身部分对于框架式海堤整体稳定的影响,

但对于外海侧波浪对悬挑框架海堤影响的研究较为缺乏。为此, 本文以浙江省温州市瓯江口浅滩二期生态堤为例, 通过物理模型试验, 探究不规则波作用下悬挑框架式海堤的受力特性, 厘清海堤框架结构水平及竖向波浪力分布规律及其影响因素, 为其他类似近海工程的设计提供参考。

1 研究内容和方法

1.1 试验内容

以浅滩二期生态堤闸堤衔接段为试验对象, 在波浪港池中放置试验堤段模型, 造波机在不同潮位下模拟产生不同周期、波高的波浪, 得到各工况下堤身不同位置波浪力情况。

1.2 试验装置

试验在河海大学波浪港池中进行, 其尺寸为 60 m×40 m×1.5 m(长×宽×深), 港池一端布置多向不规则波造波机系统, 可按要求模拟规则波和各种谱型的不规则波, 港池四周设有消浪设施以减弱波浪反射对试验的影响, 波高、波压强数据采用 DJ-800 型多功能数据采集系统处理及分析。

1.3 试验条件

试验参照 JTS 145—2015《港口与航道水文规范》^[10]及 JTS/T 231—2021《水运工程模拟试验技术规范》^[11]。模型按照弗劳德数相似律设计, 结合港池尺寸确定模型比尺为 1:36, 主要物理量比尺为: 长度比尺 $\lambda_l = 36$ 、时间比尺 $\lambda_t = 6$ 、速度比尺 $\lambda_v = 6$ 、体积比尺 $\lambda_v = 46\,656$ 、流量比尺 $\lambda_Q = 7\,776$ 、单宽流量比尺 $\lambda_{Qn} = 216$ 。

波浪模拟按照重力相似准则, 采用不规则波进行, 波谱选取 JONSWAP 谱, 其谱密度函数为:

$$S(f) = \alpha H_s^2 T_p^{-4} f^{-5} \exp \left[-\frac{5}{4} (T_p f)^{-4} \right] \gamma^{\exp[-(T_p f)^2 / (2\sigma^2)]} \quad (1)$$

$$\alpha = \frac{0.0624}{0.230 + 0.0336\gamma - 0.185(1.9 + \gamma)^{-1}} \quad (2)$$

$$\sigma = \begin{cases} 0.07 & (f < f_p) \\ 0.09 & (f \geq f_p) \end{cases} \quad (3)$$

式中: $S(f)$ 为谱密度, $\text{m}^2 \cdot \text{s}$; α 为能量尺度参数;

H_s 为有效波高, m; T_p 为谱峰周期, s; f_p 为谱峰频率, Hz; f 为频率, Hz; γ 为谱峰值参数, 取 3.3; σ 为峰形参数。

试验堤段测点布置位置、断面形式及尺寸见图 1。

试验堤段基本正对 SSE 向波浪, SSW 向波浪入射波高大, 因此试验采用 SSW 及 SSE 向波浪。考虑长周期波可能会对结构造成不利影响, 试验中增设了周期 $T_m = 14.90$ s 的 SE-SSE 向长周期波。各工况试验波浪要素见表 1。

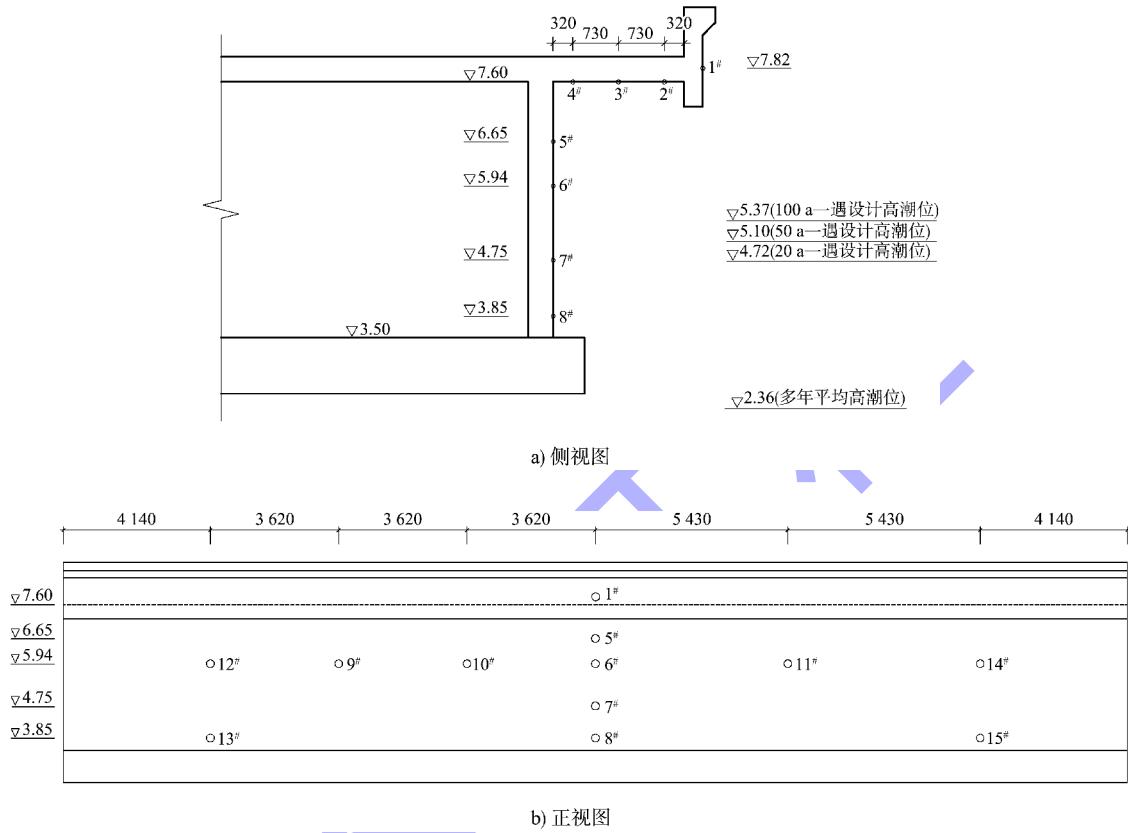


图 1 试验结构段测点布置位置、断面形式及尺寸 (尺寸: mm; 高程: m)

表 1 试验工况

工况	波向/(°)	潮位/m	有效波高/m	周期/s	工况	波向/(°)	潮位/m	有效波高/m	周期/s
1	153	2.36	1.60	7.33	9	153	5.10	2.00	9.00
2	153	2.36	1.60	14.90	10	153	5.37	2.40	5.50
3	153	4.72	1.50	4.50	11	153	5.37	2.40	10.00
4	153	4.72	1.50	7.60	12	153	5.37	2.00	9.00
5	153	4.72	1.80	4.80	13	153	5.37	3.49	7.72
6	153	4.72	1.80	8.50	14	153	5.37	3.49	14.90
7	153	5.10	1.80	8.50	15	185	2.36	1.53	5.13
8	153	5.10	2.00	5.00	16	185	5.37	3.00	8.38

1.4 试验方法

在波浪试验前, 将特征波浪要素输入计算机, 控制造波机产生相应的不规则波序列, 使之在模型放置处满足所要求的波浪要素。每一波况原型持续时间不小于 3 h, 每组试验重复 3 次, 保证可靠性, 如 3 次试验结果相差较大, 则增加重复次

数。模型试验中有效波高、有效波周期的偏差不大于 2%。

1.5 数据处理

试验数据收集后, 先进行可靠性检查, 剔除异常值, 再采用高斯滤波法进行滤波, 减小高频噪声对后续分析中峰值出现时刻的影响。在直立墙、悬

挑下用测点压强值进行梯形积分, 求得结构段所受波浪总力。取布置高程相同的测点: 在 3.85 m 高程取 13[#]、8[#]、15[#]测点, 在 5.94 m 高程取 12[#]、9[#]、10[#]、6[#]、11[#]、14[#]测点。每个测点取前 13% 波压强峰值, 对比峰值出现时刻, 得到相邻测点之间受力相位差。12[#]、9[#]、10[#]、6[#]测点相邻相位差取均值得到测点水平分布范围内 6 等分相位差, 6[#]、11[#]、14[#]测点相邻相位差取均值得到测点水平分布范围内 4 等分相位差, 13[#]、8[#]、15[#]测点相邻相位差取均值得到测点水平分布范围内 2 等分相位差。

利用 Canoco5.0 软件对结构所受总力及影响因素进行分析。首先对各工况不同频率总力进行趋势对应分析 (detrended correspondence analysis, DCA), 再根据 DCA 分析结果选择合适的分析方法。如因变量最大梯度值小于 3, 则适合采用冗余分析 (redundancy analysis, RDA); 梯度值大于 3, 则采用典范对应分析 (canonical correspondence analysis, CCA) 较合适; 梯度值介于 3~4, 则两种方法皆可行。经分析, 各频率总力试验结果梯度值

小于 3, 因此选择冗余分析方法。利用前向选择法确定重要且有独立影响的关键因素^[12-13]。

2 不规则波浪力特性

2.1 作用于直立墙的波压强水平分布特性

作用于框架式海堤直墙同一高度不同水平位置测点的典型波压强时间变化曲线见图 2。可以看出, 在一个周期内作用于直立墙的波压强变化趋势基本一致, 直立墙所受到波压强过程分为瞬时冲击部分与缓变部分, 瞬时冲击部分压强较大, 作用时间较短, 相邻测点之间压强峰值变化明显且出现时刻存在相位差, 可见波浪斜向入射的最大波浪力不同时作用在单元结构段上^[14], 而水体壅高产生的缓变部分压强较小、作用时间较长。

波浪斜向入射情况下, 各工况条件下作用于框架直立墙不同水平位置的波压强峰值到达的相位差见图 3。可以看出, 6 等分点相位差在 29.6~38.6 ms, 4 等分点相位差在 31.6~39.9 ms, 2 等分点相位差在 63.1~82.2 ms。结构段上相位差整体随测点间距增大而增大。

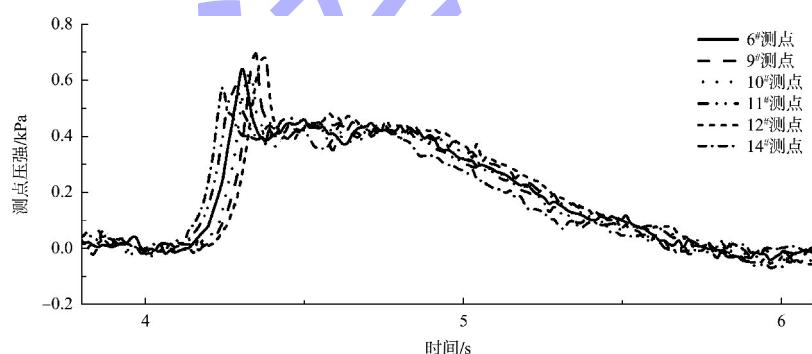


图 2 同一高程不同水平位置测点典型波压强时间变化曲线

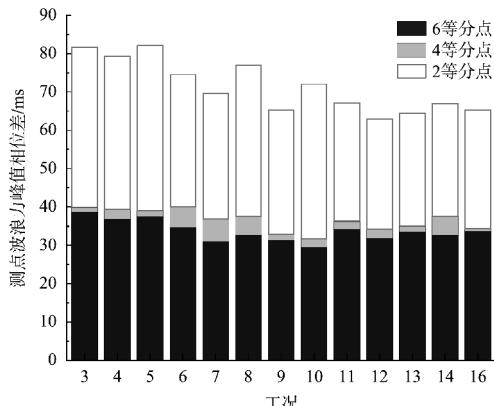


图 3 水平向测点受力相位差

2.2 作用于直立墙的波浪力竖向分布

不同潮位的典型工况条件下作用于直立墙的竖向波浪力变化见图 4。测点压强值变化基本呈双峰形态, 水面以上、以下测点压强值变化过程不同。在工况 6、9、14 下, 潮位分别为 4.72、5.10、5.37 m, 7[#]、8[#]测点基本处于水面以下, 在波谷作用下出现负压强值, 波峰作用时, 双峰前后峰值差异较小; 5[#]、6[#]测点处于水面以上, 未受波谷影响出现负压强值, 只在波峰作用下呈现双峰值, 且首个峰值明显大于后者。

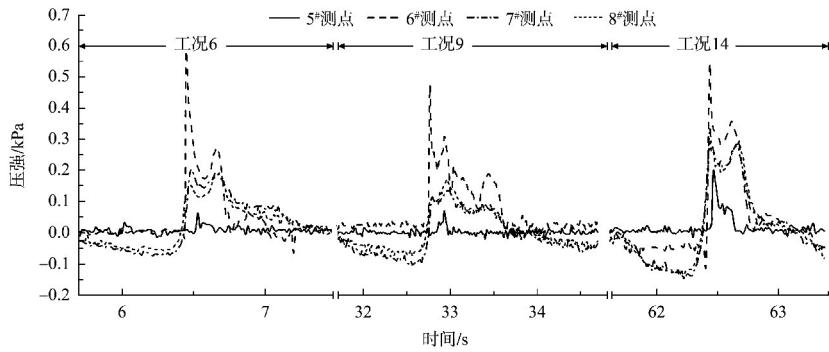
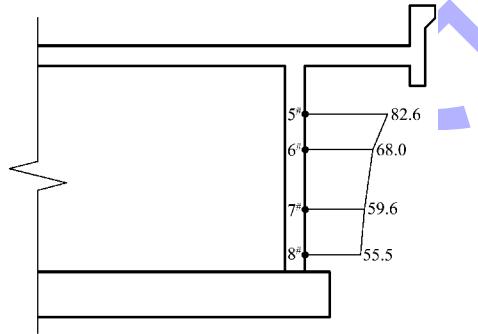


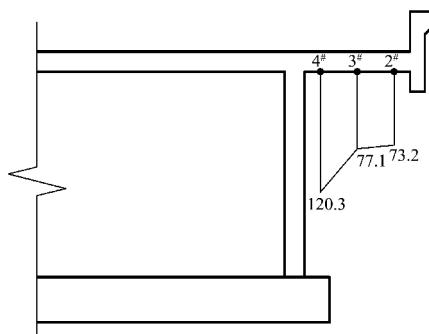
图 4 不同潮位工况波浪力竖向作用过程

3 作用于框架海堤波浪力及其影响因素

各工况下结构各测点最大压强值分布见图 5。由图 5a) 可看出, 结构所受水平总力最大时的测点压强值随高程增加而增加; 由图 5b) 可看出, 所受竖向总力最大时的测点与直立墙的距离越大, 压强值越小。波浪在冲击直立墙后向上爬升, 受悬挑阻挡, 因此在二者连接处压强最大, 可考虑采用加腋等其他措施进行加固。经计算, 各工况中结构段水平总力最大值为 7 932.17 kN, 而竖向总力最大值为 5 653.125 kN。最大竖向力占最大水平力的约 70%, 对结构安全与整体稳定影响显著。



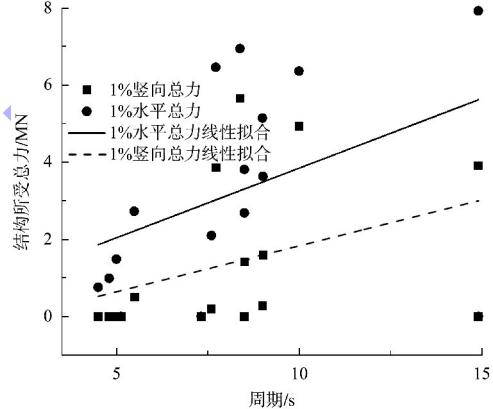
a) 水平力最大时压强分布



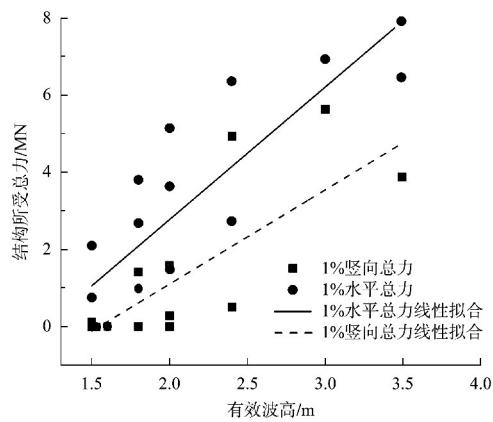
b) 竖向力最大时压强分布

图 5 水平力、竖向力最大时压强分布 (单位: kPa)

结构所受波浪总力受单一要素变化曲线见图 6。可以看出, 结构所受竖向波浪力与水平波浪力趋势总体上相同, 随着波浪周期、潮位、有效波高的增加而增加。当各变量较小时出现结构只受水平力的情况, 可见波浪在周期、潮位、有效波高达到一定阈值后, 波浪爬高至悬挑, 波浪同时作用于直立墙与悬挑。



a) 总力随周期变化曲线



b) 总力随有效波高变化曲线

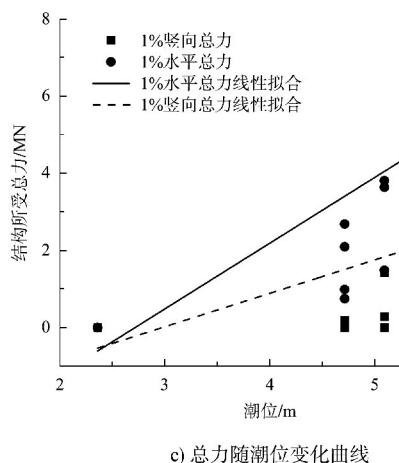


图 6 结构所受波浪总力随周期、有效波高、潮位变化

4 波浪力影响因素 RDA 分析

对各试验工况下结构所受不同频率总力及影响因素进行 RDA 分析, 结果见图 7。可以看出, 轴 1、轴 2 的解释率分别为 80.71%、1.23%, 说明波浪要素对结构受力情况的解释率较高(81.94%)。有效波高在各频率总力向量上的投影长度最大, 周期投影长度最小。结构所受总力与影响因素相关性由大到小分别为有效波高(频率 $p=0.002$)、潮位(频率 $p=0.01$)、周期。有效波高、潮位单独解释率分别为 72.3%、42.2%, 且显著性水平较高。可见在本文试验条件下, 有效波高相较于潮位与结构所受波浪力的相关性更大, 工程设计过程中应尽可能考虑各工况下最大波高的出现情况。

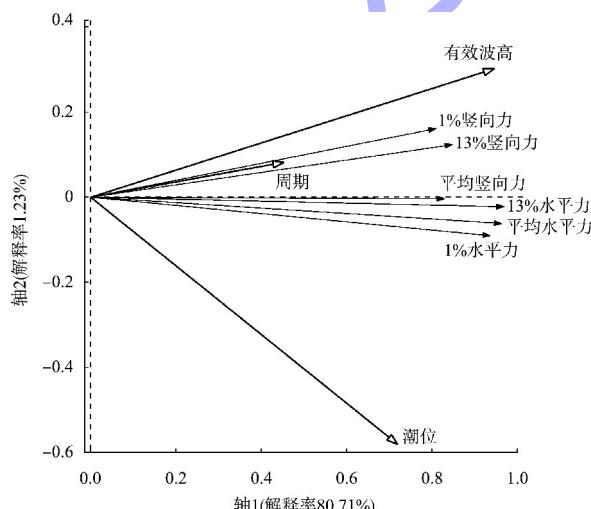


图 7 RDA 分析结果

5 结论

1) 框架式海堤直立墙受到的波压强在一个周期内分为瞬时冲击压和缓变波压作用两个部分, 前者波压强峰值大于后者, 但作用时间小于后者。在斜向不规则波入射条件下, 作用于直立墙水平方向不同位置处的波压峰值存在相位差, 且随着测点间距增大而增大。

2) 框架式海堤在不规则波作用下, 直立墙与悬挑连接处所受压强最大。结构所受波浪竖向力和水平力随着波浪周期、潮位、有效波高的增加, 变化趋势大致相同。本文试验中结构所受竖向力最高达到约 70% 的水平力。

3) RDA 分析结果表明, 在本文的潮波组合工况条件下, 有效波高、潮位对结构受总力分布的解释率分别为 72.3%、42.2%, 有效波高较潮位与结构受力相关性更大。

4) 综上, 在极端潮波组合情况下, 悬挑框架海堤直立墙与悬挑连接处可能受到加大的波浪作用, 在结构设计中需采取加腋等结构加固措施。波浪竖向荷载是悬挑框架海堤整体稳定的主要不利因素之一。悬挑框架海堤设计过程中应尽可能考虑各工况下最大波高的出现情况。

参考文献:

- [1] 汤德意. 新型板桩框架海堤特性研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2012.
- [2] 徐宇航, 陈国平, 严士常, 等. 新型板桩承台式直立堤波压强试验研究[J]. 水道港口, 2018, 39(3): 281-287.
- [3] XIE W, SHIMOZONO T. Water surge impingement onto a vertical wall: laboratory experiments and stochastic analysis on impact pressure[J]. Ocean engineering, 2022, 248: 110422.
- [4] 王浩霖, 张月, 赵晶. 直立堤迎浪面小角度变化的波浪力分析[J]. 水运工程, 2022(7): 29-38, 44.
- [5] 王艺之, 韩新宇, 董胜. 规则波与直立堤相互作用的数值模拟[J]. 海洋湖沼通报, 2022, 44(3): 1-6.

(下转第 50 页)