



基于正交试验的弧形胸墙波浪载荷 对波要素的敏感性分析

徐 斌¹, 刘建华¹, 贾 晓²

(1. 江苏科技大学 船舶与海洋工程学院, 江苏 镇江 212003; 2. 上海河口海岸科学研究中心, 上海 201201)

摘要: 以复合式海堤弧形胸墙为研究对象, 选择 3 个因素——水深、波高、波周期, 每个因素取 4 个水平, 按照正交表 $L_{16}(4^3)$ 设计相关试验组次研究上述因素对复合式海堤弧形胸墙波浪载荷的影响显著性。同时研究弧形胸墙波压力分布规律和波浪载荷时程变化规律。结果表明: 对于弧形胸墙压力即时分布, 点位与点位之间没有固定的大小关系, 但整体上来说, 胸墙迎浪面下半部分的波压力普遍大于上部分; 在单个波浪周期作用过程中, 水平波浪力存在 2 个峰值, 垂向波浪力存在 1 个峰值 2 个谷值, 垂向波浪力峰值与水平波浪力第 1 个峰值几乎同时达到, 此时对胸墙的稳定性最为不利; 水深对波浪载荷的影响最为显著, 波高其次, 波周期的影响相对最小。

关键词: 复合式海堤; 弧形胸墙; 敏感性分析; 正交试验; 压力分布; 波浪载荷; 波要素

中图分类号: U 656.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-4972(2015)12-0047-05

Sensitivity of wave loads on arc crown wall to wave parameters based on orthogonal test
XU Bin¹, LIU Jian-hua¹, JIA Xiao²
(1. School of Naval Architecture and Ocean Engineering, Jiangsu University of Science and Technology, Zhenjiang 212003, China;
2. Shanghai Estuarine & Coastal Science Research Center, Shanghai 201201, China)

Abstract: Taking the composite sea embankment arc crown wall as the research object, three main factors, including water depth, wave period and wave height, were chosen to carry out the orthogonal test. Sixteen test schemes were designed by choosing four levels to each parameter stated above by $L_{16}(4^3)$ orthogonal table to study the influencing significance of the wave loads on composite sea embankment arc crown wall. Meanwhile, the wave pressure distribution and schedule change rule of wave loads are studied. The results show that there's no fixed relationship between each two point pressures for the wave pressure distribution. However, the wave pressure on the lower part of the arc crown wall surface is generally greater than that of the upper part as a whole; In the process of a single wave cycle, the horizontal wave force has two peaks, while there are three peaks of the vertical force. The second peak of vertical wave load and the first peak of horizontal wave load appear almost simultaneously, which is the worst moment for the stability of the arc crown wall; The effect of water depth on arc crown wall wave loads is the most significant, that of wave height secondly, and the impact of wave period is relatively minimal.

Keywords: composite sea embankment; arc crown wall; sensitivity analysis; orthogonal test; wave pressure distribution; wave load; wave parameter

海堤、防波堤等海岸工程对于陆域安全及港区安全有十分重要的意义。在设计海堤、护岸等斜坡式防浪建筑物时, 为减小堤身断面、降低造价, 通常会在堤顶设置特定形式的胸墙结构。圆弧形胸墙可以有效地反卷波浪, 大幅减少越浪量, 从而降低堤顶高程, 故近年来被广泛使用^[1-2]。

但是弧形胸墙弧形部位承受的波浪作用力较大, 对整体稳定性不利^[3], 这也引起设计者的关注。国内外关于胸墙受力的研究很多^[4-11], 物理模型试验是最被接受的研究手段, 这其中广泛采用的是单因素轮换法, 即在其它因素固定不变的情况下改变一种因素, 研究其对研究对象的影响规律。然而, 多个因素共存时的影响规律并不等于各因素单独存在时影响的线性叠加, 故其不能指明各因素的变动对胸墙稳定性的影响的显著性。正交试验设计 (也称正交设计) 是科学设计多因素的一种方法^[12], 它利用一套规格化的正交表安排正交试验, 对试验得到的结果采用数理统计方法进行分析处理, 使之得出科学结论。

本文的主要研究目标是波要素对弧形胸墙波浪载荷的影响显著性, 由于浮托力采集过程中不确定性因素很多, 堤心石材料和尺寸对波压力的采集均有较大影响, 但其往往随着水平波浪力的增大而增大^[13]。故本文仅对迎浪面的波压力进行采集和统计分析, 以水平波浪力为指标探究波要素对弧形胸墙波浪载荷的影响规律和显著性, 同时研究弧形胸墙的波压力分布以及迎浪面上的波浪作用产生的水平波浪力、垂向波浪力和波浪力矩的变化特性。

1 试验方案设计

1.1 试验设备

本次试验水槽长 100 m, 净宽 1.0 m, 深 1.2 m, 一端配有消浪装置, 另一端为带有主动反射吸收装置的造波机。该造波机可满足最大工作水深 0.8 m、最大波高 0.45 m、试验周期 0.5 ~ 5 s 的试验要求。使用 DH3820 静态应变测试系统对压力探头信号进行采集, 信号采集频率 100 Hz。本试验比尺为 1:15, 模型布置见图 1。

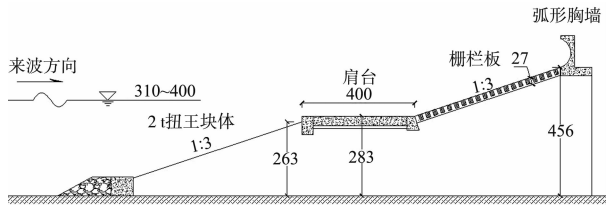


图 1 模型布置 (单位: mm)

弧形胸墙内侧沿高度方向均匀开设 9 个孔布置压力探头 (其中弧段开孔方向为弧面的法线方向), 从上到下依次为 1[#] ~ 9[#], 为避免同一截面上开孔过密影响探头布置和测试结果, 探头开孔采用交错布置方式。

胸墙相关尺寸及迎浪面压力探头布置见图 2。

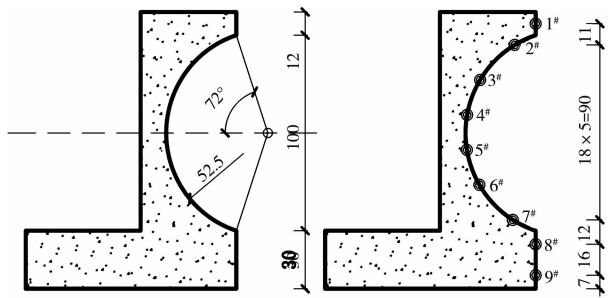


图 2 胸墙尺寸及其压力探头布置 (单位: mm)

1.2 试验组次安排

本次研究采用规则波进行试验, 考虑水深、波高、波周期 3 个因素, 每个因素取 4 个水平, 利用正交表设计 3 因素 4 水平试验, 相关试验参数及组次安排见表 1 和表 2。

表 1 因素水平

水平	水深/cm	波周期/s	波高/cm
1	31	1.75	0.15
2	34	2.00	0.17
3	37	2.25	0.20
4	40	2.50	0.13

表 2 正交试验组次安排

试验组合	水深/cm	波周期/s	波高/cm
ORW1	1	1	1
ORW2	1	2	2
ORW3	1	3	3
ORW4	1	4	4
ORW5	2	1	2
ORW6	2	2	1
ORW7	2	3	4
ORW8	2	4	3
ORW9	3	1	3
ORW10	3	2	4
ORW11	3	3	1
ORW12	3	4	2
ORW13	4	1	4
ORW14	4	2	3
ORW15	4	3	2
ORW16	4	4	1

试验方案采用 $L_{16}(4^3)$ 进行设计, 试验组次安排如表 2 所示。对于正交表 $L_{16}(4^3)$, 下标 16 表示本次正交试验包含的组合数(ORW1 ~ ORW16), 括号中上标 3 表示本试验所涉及到因素有 3 个(水深、波周期和波高), 括号中 4 表示这 3 个因素各取 4 个水平。

通过表 2 可以看出, 每个因素的每个水平均安排 4 次试验, 各因素水平的搭配是“均衡”的。试验次数不多, 却能很好地反映各因素水平情况对指标的影响, 可以得到与全面试验设计几乎同样好的效果。

2 试验结果分析

2.1 点压强时程和压力分布

以试验组次 ORW3 为例, 1 个波浪周期内弧形胸墙迎浪面 1[#] ~ 9[#] 探头波压力时程曲线如图 3 所示。

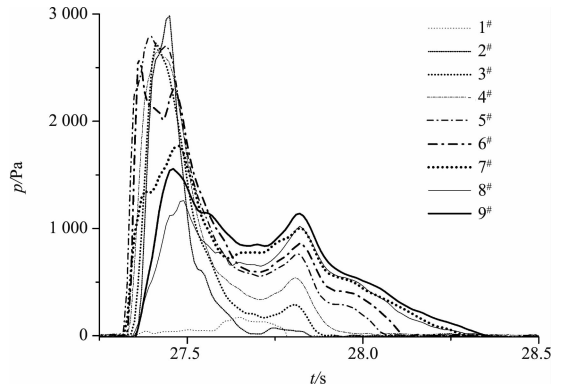


图 3 各点位点压强一个周期内的信号曲线

从图 3 可知, 在 ORW3 工况下, 1[#] 和 2[#] 探头有 1 个峰值, 3[#] ~ 9[#] 探头均有 2 个峰值——第 1 个峰值为波浪水体高速上爬在弧形内反射时产生的冲击作用, 第 2 个峰值为水体跌落时墙前产生的雍水效应。由于该工况下雍水高度有限, 所以 1[#] 和 2[#] 探头不存在明显的第 2 峰值。

弧形胸墙迎浪面压力分布如图 4 所示, 为波浪作用周期范围内两个不同时刻的压力分布。

通过对比 2 个时刻的压力分布可以发现, 弧形胸墙上波压力分布在一个波浪周期范围内是在不断变化着的, 点位与点位之间没有固定的大小关系, 从整体上来说, 胸墙迎浪面下半部分的波压力普遍大于上部分。

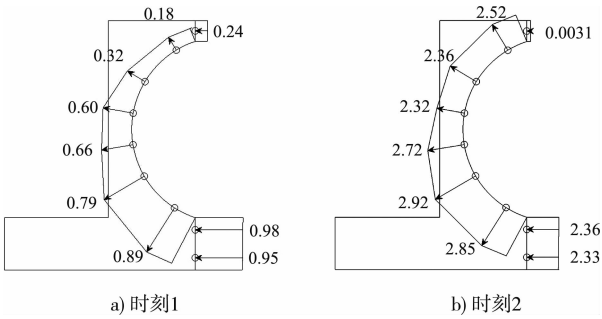


图 4 迎浪面压力分布 (单位: kPa)

2.2 波浪载荷变化规律

通过积分的方法计算每延米弧形胸墙模型上的波浪载荷, 包括水平波浪力、垂向波浪力和波浪力矩。仍然以 ORW3 为例, 数据处理结果如图 5 所示, 水平波浪力向左为正, 垂向波浪力向上为正, 波浪力矩以向墙后倾覆的力矩为正。

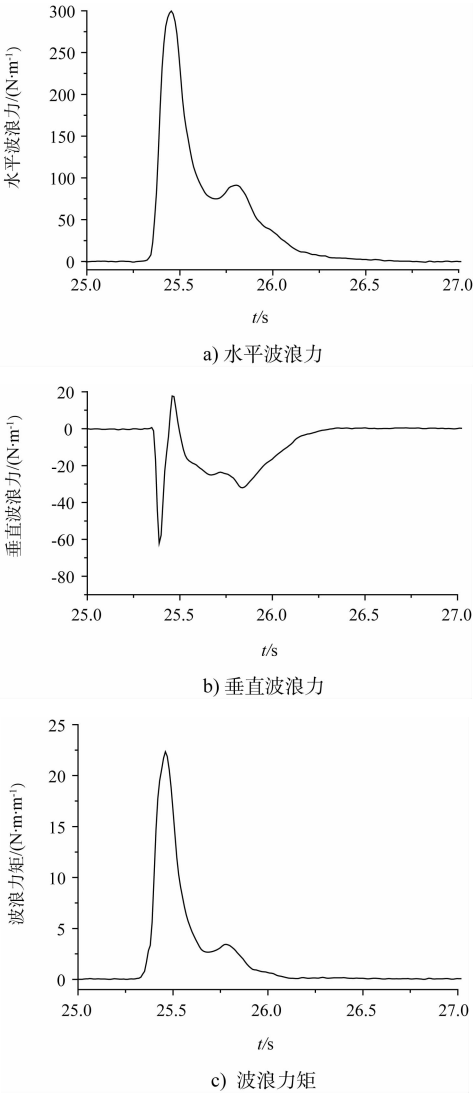


图 5 波浪载荷时程曲线

弧形胸墙在 1 个波浪周期内所受到的水平波浪力和力矩存在 2 个峰值且同步发生,垂向波浪力存在 1 个峰值 2 个谷值。垂向波浪力第 1 个谷值出现较早,峰值出现时间与水平波浪力的第 1 个峰值几乎一致,第 2 个谷值出现时间与水平波浪力第 2 个峰值几乎一致。

垂向波浪力第 1 个谷值表示波浪水体上爬至弧形中部左右时由于水体重力和离心力共同作用产生的向下的垂向力;垂向波浪力的峰值,以及水平波浪力的第 1 个峰值表示波浪水体上爬至弧形顶部时,高速水体的离心作用产生的挑流作用导致的垂向波浪力急剧减小甚至出现向上的波浪力,同时产生的水平波浪力达到最大;垂向波浪力的第 2 个谷值,以及水平波浪力出现的第 2 个峰值为水体跌落时墙前时产生的雍水作用。

水平波浪力出现第 1 个峰值,也即垂向波浪力出现峰值时在挑流作用下向下的垂向波浪力减小至零点甚至出现向上的波浪力,对胸墙的稳定性最为不利,最易导致胸墙滑移和倾覆失稳,另外由于本文重点放在影响规律上,没有对浮托力进行测定和积分,故垂向峰值偏小。设计时应引起重视,同时需要考虑浮托力的影响。

2.3 弧形胸墙波浪载荷敏感性

对于正交试验结果的处理通常采用直观分析和方差分析 2 种方法,直观分析可以得到各影响因素对试验结果的影响相对大小,方差分析可以对影响因素进行显著性检验。

1) 正交试验结果的直观分析。
直观分析法,简单易懂,实用性强,可以轻松根据试验结果计算极差,从而确定因素的主次顺序。本文针对波浪水文要素的正交试验结果及直观分析结果如表 3 所示。

试验结果如表 3 所示,分析过程及分析结果如表 4 所示。表中,大写字母 K_1 、 K_2 、 K_3 和 K_4 分别表示任一因素列上水平号为 1、2、3 和 4 时所对应的工况试验结果之和。小写字母 k_1 、 k_2 、 k_3 和 k_4 分别为任一因素列水平为 1、2、3 和 4 时所得试验结果的算术平均值。 R 为极差,极差值越大表

示该列因素的数值在试验范围内的变化会导致试验指标在数值上有更大的变化,所以极差最大的那一列所对应的因素就是对试验结果影响最大的因素,也就是最主要因素。在任一因素列上 $R = \max \{ k_1, k_2, k_3, k_4 \} - \min \{ k_1, k_2, k_3, k_4 \}$ 。

表 3 试验结果

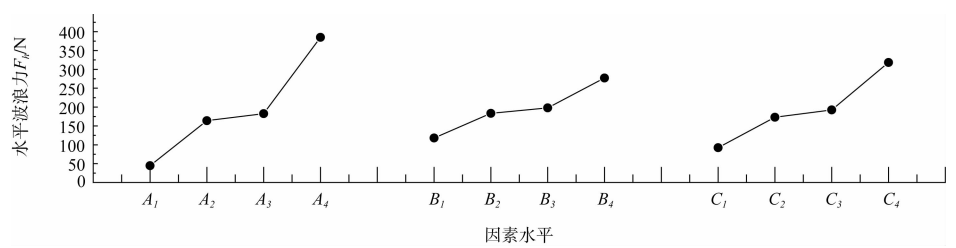
试验组合	水深/cm	波周期/s	波高/cm	水平波浪力/N
ORW1	31	1.75	0.15	27.332 1
ORW2	31	2.00	0.17	28.322 4
ORW3	31	2.25	0.20	108.003 2
ORW4	31	2.50	0.13	15.324 6
ORW5	34	1.75	0.17	95.763 3
ORW6	34	2.00	0.15	47.294 1
ORW7	34	2.25	0.13	76.884 6
ORW8	34	2.50	0.20	435.554 1
ORW9	37	1.75	0.20	177.627 1
ORW10	37	2.00	0.13	105.892 5
ORW11	37	2.25	0.15	203.974 1
ORW12	37	2.50	0.17	243.657 3
ORW13	40	1.75	0.13	171.288 3
ORW14	40	2.00	0.20	552.309 8
ORW15	40	2.25	0.17	402.621 1
ORW16	40	2.50	0.15	413.734 6

表 4 直观分析

系数	水深/cm	波周期/s	波高/cm
K_1	178.982 3	472.010 8	692.334 9
K_2	655.496 1	733.818 8	770.364 1
K_3	731.151 0	791.483 0	1 273.494 0
K_4	1 539.954 0	1 108.271 0	369.390 0
k_1	44.745 6	118.002 7	173.083 7
k_2	163.874 0	183.454 7	192.591 0
k_3	182.787 8	197.870 8	318.373 6
k_4	384.988 5	277.067 7	92.347 5
极差 R_i	340.242 9	159.065 0	226.026 1
主次顺序	水深→波高→波周期		

根据上述分析结果绘制波浪水文要素与水平表波浪力的关系趋势图(图 6)。

从水平波浪力的角度对弧形胸墙波浪载荷对波浪水文要素敏感性进行分析,通过上述极差分析结果 R 值和因素与指标趋势图可以看出:弧形胸墙波浪载荷随水深、波周期和波高的增大而增大,各影响因素的主次关系为,水深影响最显著,波高影响效果次之,波浪周期影响效果相对最小。因此,设计时应该着重考虑水深对弧形胸墙稳定性的影响。



注: A 代表水深, B 代表波浪周期, C 代表波高, 下标 1、2、3 和 4 为各因素由小到大大排序的 4 个水平。

图 6 因素与指标趋势

2) 正交试验结果的方差分析。

上文对本次试验结果进行了直观分析, 直观分析法具有一目了然、计算工作量少等优点。但直观分析不能估计误差的大小, 也不能精确地估计各因素对指标影响的重要程度。通过对结果进行方差分析 (表 5), 可以弥补直观分析的不足^[12]。

表 5 方差分析

方差来源	偏差平方和 S	自由度 f	平均偏差平方和 V	F 值
A (水深/cm)	239 146.9	3	79 715.628 23	14.163 91
B (波周期/s)	51 207.9	3	17 069.294 64	3.032 88
C (波高/cm)	104 965.8	3	34 988.596 40	6.216 79
误差 e	33 768.5	6	5 628.080 94	
总和 T	429 089.1	15		

通过查 F 分布表, 可以得到 $F_{0.1}(3,6) = 3.29$, $F_{0.05}(3,6) = 4.76$, $F_{0.01}(3,6) = 9.78$, 可以发现从水平波浪力 $F_A \geq F_{0.01}(3,6)$, $F_B \leq F_{0.1}(3,6)$, $F_C \geq F_{0.05}(3,6)$, 为此可以得出结论, 弧形胸墙波浪载荷受水深影响最为显著, 显著性水平为 0.01; 受波高的影响也比较显著, 显著性水平为 0.05; 受波浪周期的影响相对最小, 显著性水平低于 0.1。对于各因素对弧形胸墙波浪载荷影响的显著性, 通过方差分析得出的结论与直观分析法一致。

3 结论

1) 弧形胸墙内侧波压力分布在波浪作用过程中是在不断变化着的, 点位与点位之间没有固定的大小关系, 整体上胸墙迎浪面下半部分的波压力普遍大于上部分的波压力。

2) 在单个波浪周期作用过程中, 水平波浪力和波浪力矩存在两个峰值, 垂向波浪力存在 1 个峰值 2 个谷值, 垂向波浪力出现峰值时对胸墙的稳定性的最为不利, 最易导致胸墙滑移和倾覆失稳, 设计时应引起重视。

3) 弧形胸墙波浪载荷随水深、波周期和波高的增大而增大。波浪载荷受水深影响最为显著, 显著性水平为 0.01; 受波高的影响也比较显著, 显著性水平为 0.05; 受波浪周期的影响相对最小, 显著性水平低于 0.1。

参考文献:

[1] Owen M W, Steele A J J. Effectiveness of recurved wave return walls[R]. Wallingford: Hydraulics Research, 1991.

[2] 程禹平. 卷波式弧形台阶海岸防浪墙[J]. 海洋工程, 1995(3): 69-74.

[3] 王登婷. 弧形防浪墙模型试验[J]. 水运工程, 2004(7): 1-5.

[4] 吴苏舒, 张玮. 引导式弧形胸墙返浪效果研究[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2008, 29(7): 668-672.

[5] 高占学, 王芳. 深弧型防浪墙在堤防工程中的应用[J]. 水运工程, 2010(3): 77-80.

[6] Murakami K, Irie I, Kamikubo Y. Experiments on a non-wave overtopping type seawall[C]//ASCE, 1996: 1 840-1 851.

[7] 据烈红. 斜坡堤防浪墙形式合理性试验研究[J]. 水运工程, 2006(5): 1-3.

[8] 陈国平, 乔树梁. 永兴海堤风浪模型试验研究[J]. 水利水运科学研究, 1999(4): 361-367.

[9] 李玉龙. 不同掩护程度弧形胸墙波压力及越浪量试验研究[J]. 海岸工程, 2010, 29(2): 17-22.

[10] 王颖. 弧形防浪墙波浪力的试验研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2007.

[11] 刘子琪, 曲淑媛, 王振呈. 大连大窑湾一期防波堤工程曲线型防浪墙防浪效果的试验研究[J]. 中国港湾建设, 2005(1): 16-20.

[12] 邱铁兵. 试验设计与数据处理[M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 2008.

[13] 王海峰, 柳玉良, 夏运强. 有护面块体掩护的斜坡堤弧形胸墙波压力研究[J]. 水运工程, 2013(6): 16-19.

(本文编辑 郭雪珍)