

波浪作用下陡坡和缓坡地形 对护岸工程的影响*

姜云鹏¹, 刘昌兴², 彭程¹

(1. 交通运输部天津水运工程科学研究所 工程泥沙交通行业重点实验室, 天津 300456;
2. 中海石油气电集团有限责任公司, 北京 100027)

摘要:波浪是护岸工程设计的主要动力因素, 实际工程建设中, 港区内航道、港池的开挖形成陡峭边坡, 会使作用在护岸上的波浪形态发生显著变化, 从而对护岸结构产生不同影响。为探寻不同波浪形态下护岸越浪量及波压力等变化规律, 通过波浪水槽断面试验, 测量了斜坡式护岸堤前波高、胸墙越浪量和波压力, 研究陡坡和缓坡地形对护岸的影响。结果表明, 护岸前存在陡坡和缓坡地形时, 波浪对护岸的作用有明显差别。在陡坡段护岸, 波浪主要在护岸中部破碎; 缓坡段护岸, 波浪主要在护岸上部破碎。相对而言, 陡坡段护岸的堤前波高较小, 越浪量较少, 胸墙水平力变大, 浮托力变小。由于反浪弧的影响, 胸墙水平力试验值远大于规范计算值, 浮托力与规范值较为接近。

关键词:陡坡; 波浪形态; 堤前波高; 越浪量; 波压力

中图分类号: U 656.3

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2015)04-0061-05

Influence of steep slope and mild slope on revetment under wave action

JIANG Yun-peng¹, LIU Chang-xing², PENG Cheng¹

(1. Key Laboratory of Engineering Sediment, Ministry of Transport, Tianjin Research Institute for Water Transport Engineering, Tianjin 300456, China; 2. CNOOC Gas & Power Group, Beijing 100027, China)

Abstract: The wave is the main dynamic factor in design of revetment engineering. In practical projects, the steep slope is formed by dredging and it makes a significant change in the wave form, which produces a different impact on the revetment structure. In order to explore the regularity of wave overtopping and wave pressure under forces of different wave forms, we measure the wave height, overtopping and wave pressure of slope revetment in a wave flume to study the influence of steep slope and mild slope on the revetment. The results indicate that the impacts of wave on the revetment differs a lot with the steep slope and mild slope. For the steep slope, waves are mainly broken on the middle of the revetment. While for the mild slope, waves are mainly broken on the upper of the revetment. The wave height, overtopping and uplift wave force of steep slope are relatively smaller than those of the mild slope. But the horizontal wave force is larger than that of the mild slope. The measured horizontal force is much larger than the calculated result by the design code because of the influence of arc section while the uplift force from the test is close to that calculated by the code.

Keywords: steep slope; wave form; wave height; overtopping rate; wave pressure

波浪是护岸工程设计的主要动力因素, 波浪作用下护岸各部位的稳定性、胸墙波压力和堤顶

越浪量等与波浪条件有直接关系。在工程设计阶段, 围绕设计关心的主要问题, 往往通过模型试

收稿日期: 2014-07-11

*基金项目: 交通运输部建设科技项目 (2013328224070)

作者简介: 姜云鹏 (1981—), 男, 硕士, 副研究员, 从事港口海岸工程研究。

2 试验概况

2.1 试验条件

试验水位为 5.88 m, 为便于对比, 采用相同的波浪条件: 波浪要素为 50 a 一遇不规则波, $H_{1\%}=2.35\text{ m}$, $H_{13\%}=1.75\text{ m}$, $T=4.94\text{ s}$ 。

2.2 试验设备

试验在交通运输部天津水运工程科学研究所波浪水槽中进行, 水槽长 68 m, 宽 1.0 m, 高 1.5 m。水槽一端安有电机伺服驱动推板吸收式造波机, 可以产生规则波与不规则波。

2.3 试验比尺

为提高试验精度, 更直观真实地反映护岸与波浪的相互作用, 试验比尺宜大不宜小。根据试验场地和试验要求, 模型选用几何比尺 20, 即水深比尺、波高比尺和波长比尺均为 20, 周期比尺为 4.472, 力比尺为 8 000。

2.4 试验方法

模型制作依据 JTJ/T 234—2001《波浪模型试验规程》要求进行。

波高测量方法: 在护岸堤脚处设置 3 个波高传感器, 间距 0.2 m, 取 3 个传感器测试结果的平均值作为波高测量结果。试验前所测波高为入射波高, 护岸架设后所测波高为堤前波高。

波压力测量方法: 在胸墙顶部、反弧段、迎浪面和底部共布设 9 个波压力测点, 测点布置见图 2。

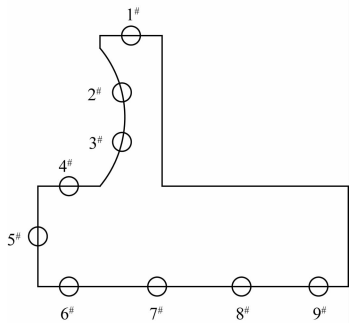


图 2 波压力测点布置

越浪量测量方法: 在胸墙上方用接水装置接取越浪水体, 通过测量质量或体积得到模型的越

浪量。不规则波接取一个完整波列的总越浪水体作为相应历时的总越浪量, 然后计算单宽平均越浪量。按相似准则, 将模型越浪量换算成原体越浪量。

3 试验结果分析

试验选取相同的护岸断面方案, 分别对陡坡段和缓坡段护岸的堤前波高、堤顶越浪量和胸墙波压力进行量测, 并作对比分析。

3.1 堤前波高

1) 陡坡段护岸。由于护岸前方港池边坡坡度较陡, 波浪传播至边坡处水深急剧变浅, 波列中大部分波浪在护岸中部戗台处破碎 (图 3), 大波胸墙前形成卷破波, 能量局部耗散明显。



图 3 陡坡护岸波浪在戗台处破碎

2) 缓坡段护岸。由于护岸前水深变化缓慢, 波列中大部分波浪不破碎, 水体沿斜坡面爬高至胸墙处, 在胸墙反弧段回卷至海侧 (图 4)。仅大波在斜坡及胸墙附近破碎。



图 4 缓坡护岸波浪在胸墙附近破碎

堤前波高试验结果见表 1, 结果表明, 堤前波高陡坡段小于缓坡段, 反映出陡坡段护岸的反射作用相对较弱。

表 1 堤前波高试验结果

反射波高	护岸位置	波高/cm			平均值
		第 1 组	第 2 组	第 3 组	
$H_{13\%}$	陡坡段	1.66	1.69	1.68	1.67
	缓坡段	1.88	1.87	1.88	1.88
$H_{1\%}$	陡坡段	2.41	2.42	2.39	2.41
	缓坡段	2.54	2.50	2.55	2.53

3.2 堤顶越浪量

通过测量，陡坡段护岸的平均越浪量为 $0.018\text{ m}^3/(\text{m}\cdot\text{s})$ ，缓坡段为 $0.021\text{ m}^3/(\text{m}\cdot\text{s})$ ，陡坡段越浪量小于缓坡段。原因主要在于：港池不开挖时，大部分波浪不破碎，爬高较大，形成了流速较快、流态顺畅的越堤平流，弧形胸墙的回卷作用减弱，因此越浪量更大。海港水文规范中斜坡堤堤顶越浪量公式为：

$$Q=0.07^{H'_c/H_{13\%}}\exp\left(0.5-\frac{b_1}{2H_{13\%}}\right)BK_A\cdot\frac{H_{13\%}^2}{T_p}\cdot$$

(1)

$\left[\frac{0.3}{\sqrt{m}}+\text{th}\left(\frac{d}{H_{13\%}}-2.8\right)\right]\ln\sqrt{\frac{gT_p^2m}{2\pi H_{13\%}}}$
式中： Q 为单位时间单位堤宽的越浪量 ($\text{m}^3\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$)； H'_c 为胸墙墙顶在静水面以上的高度 (m)； $H_{13\%}$ 为有效波高 (m)； b_1 为胸墙前肩宽 (m)； B 为经验系数，本次试验斜坡坡度为 1:2，根据经验系数表取 $B=0.45$ ； K_A 为护面结构影响系数，本次试验护面结构为混凝土板，根据影响系数表取 $K_A=1.0$ ； T_p 为谱峰周期 (s)； m 为斜坡坡度系数，斜坡坡度为 1: m ； d 为建筑物前水深 (m)； g 为重力加速度 (m/s^2)。

计算得到护岸平均越浪量为 $0.019\text{ m}^3/(\text{m}\cdot\text{s})$ ，与试验结果较为接近。但计算公式中未考虑护岸前海底地形坡度因素，因此无法体现陡坡和缓坡对护岸越浪量的影响，需要模型试验进行验证。

3.3 胸墙波压力

一个波列过程 (100 个波) 各测点压强极值见图 5。从图 5 可知，1#~4#测点压强极值，陡坡段护岸大于缓坡段；5#~9#测点，陡坡段略小于缓坡段。说明陡坡段护岸的波浪力更集中体现在胸墙上部，这与陡坡段护岸大浪形成卷破波、对胸墙形成向下的冲击作用的试验现象是一致的。

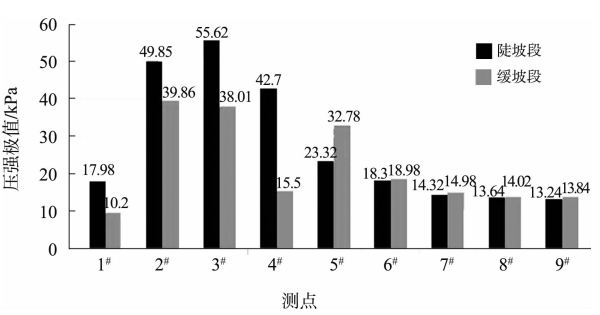


图 5 一个波列过程各测点压强极值

从两段护岸的水平波压力分布来看，胸墙迎浪侧点压强较大，胸墙顶面和底部点压强较小，总水平力主要集中在 2#、3#和 5#测点 (图 6)。具体分析如下：

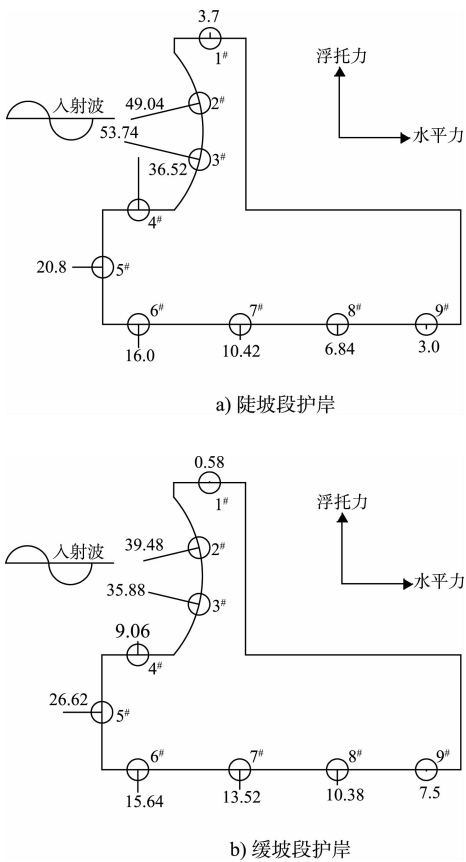


图 6 胸墙各测点压强分布 (单位: kPa)

- 1) 爬坡水体受胸墙反弧作用向海侧回卷，因此，反弧段的局部压强 (2#、3#测点) 明显大于其他测点。
- 2) 2#、3#测点压强，陡坡段略大于缓坡段，数量级上较为接近；而 4#测点的压强陡坡段明显大于缓坡段。可以看出，波浪在陡坡段护岸形成

卷破波, 破碎水体对反弧段前方水平面拍击作用较为明显, 因此 4[#]测点压强较大; 而缓坡段护岸大部分波浪不破碎, 爬高水体在斜坡上形成流态顺畅的越堤平流, 对水平面基本无拍击作用, 因此 4[#]测点压强较小。试验结果表明, 波浪形态不同引起胸墙迎浪侧的波压力分布发生相应的变化。

3) 陡坡段护岸波浪破碎后胸墙前水体聚集不明显, 而缓坡段护岸大部分波浪未破碎, 爬高水体沿斜坡上冲在胸墙前聚集, 从而产生了较大的浮托力, 表现为缓坡段护岸的 6[#]、7[#]、8[#]、9[#]测点波压强较大。

根据 JTS 145-2—2013《海港水文规范》中 8.2.11 的公式计算斜坡式建筑物顶部胸墙波浪力, 并与试验结果进行对比, 见表 2。试验结果表明, 陡坡段护岸的最大水平力大于缓坡段护岸, 最大浮托力则小于缓坡段。

两段护岸最大水平力的试验值远大于计算值, 原因主要在于胸墙反弧的存在使局部压强大幅增加。最大浮托力的试验值与计算值较为接近。

表 2 胸墙最大总水平力、总浮托力
试验结果及规范计算值对比

力的种类	位置	第 1 组	第 2 组	第 3 组	平均值	规范计算值
最大总水平力	陡坡段	70.49	72.70	76.46	73.22	
	缓坡段	63.49	65.16	66.18	64.94	44.57
最大总浮托力	陡坡段	20.97	24.93	24.39	23.43	
	缓坡段	27.77	29.19	28.04	28.33	23.27

4 结语

研究表明, 在同等波浪条件作用下, 护岸堤前波高、越浪量、波浪力与波浪形态有着密切关系。护岸前存在陡坡和缓坡地形时, 波浪对护岸的作用有明显差别。

1) 陡坡段护岸波浪主要在护岸中部破碎, 局部能量耗散明显, 反射作用相对较弱; 缓坡段护岸波浪主要在护岸上部破碎, 并通过胸墙回卷至海侧。

2) 缓坡段护岸波浪爬高较大, 形成了流速较

快、流态顺畅的越堤平流, 弧形胸墙的回卷作用减弱, 因此越浪量大于陡坡段。

3) 陡坡段护岸的波浪力更集中体现在胸墙上部, 这与陡坡段护岸大浪形成卷破波、对胸墙形成向下的冲击作用的试验现象是一致的。

4) 陡坡段护岸胸墙水平力大于缓坡段, 且两者均远大于计算值。陡坡段护岸的胸墙浮托力小于缓坡段, 且两者与计算值较为接近。

5) 现行海港水文规范中, 越浪量的计算公式未考虑护岸前海底地形坡度因素, 因此无法体现陡坡和缓坡对护岸越浪量的影响, 需要模型试验进行验证。

6) 波浪对护岸的作用, 不仅与护岸高程、护面形式、块体质量等护岸自身因素有关, 还与护岸前海底地形有密切联系, 需考虑海底坡度变化对护岸的影响。护岸前因港池开挖形成陡坡, 改变了波浪形态, 波浪在护岸上的破碎位置发生明显变化, 从而对堤前波高、越浪量、波浪力等产生直接影响。

参考文献:

[1] JTS 145-2—2013 海港水文规范[S].
[2] 于忠涛, 张文杰, 赵凯. 护面块体掩护下胸墙波浪力分析[J]. 水运工程, 2012(9): 51-54.
[3] 于定勇, 苏耀. 深水斜坡堤胸墙波浪力计算方法研究[J]. 中国海洋大学学报, 2012(1): 136-140.
[4] 俞聿修, 赵凤亚, 李晓亮, 等. 斜向和多向不规则波对直立堤平均越浪量研究[J]. 海洋工程, 2007(3): 32-39.
[5] 王珍, 吉红香, 邱静. 斜坡式防波堤护岸工程优化试验研究[J]. 广东水利水电, 2013(9): 22-26.
[6] 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(2): 17-22.
[7] 姜云鹏, 张烨, 郑子龙. 波浪作用下护岸三维稳定试验研究[J]. 水道港口, 2014(1): 15-18.
[8] JTS 154-1—2011 防波堤设计与施工规范[S].
[9] 李玉成. 波浪对海上建筑物的作用[M]. 北京: 北京海洋出版社, 2002: 11-13.

(本文编辑 武亚庆)