



斜向浪作用下斜坡堤顶部挡浪墙受力分析

张丽珍, 刘海欣, 覃 杰

(中交第四航务工程勘察设计院有限公司, 广东 广州 510290)

摘要: 将某斜坡式引堤工程的挡浪墙断面物理模型试验结果与国标、Jensen & Bradbury 方法、Pedersen 方法以及 Martin 方法理论计算结果进行比较。结果表明, Martin 方法计算冲击、脉动压强公式的合力数值以及分布形态都与断面物理模型结果较为吻合, 推荐用于计算挡浪墙水平波压力、浮托力。挡浪墙水平波压力在掩护棱体上方达到最大值, 在掩护棱体上方和掩护棱体内都减少, L 形挡浪墙结构可以使水平波压力在挡浪墙底部迅速减小, 从而减小整个挡浪墙底部受到的浮托力合力。浮托力沿着挡浪墙底部线性减小, 在挡浪墙后沿根部并不为 0。通过比较断面物理模型和整体三维物理模型试验结果, 挡浪墙对未掩护区域的折减效果显著, 对掩护区域的折减效果较差, 而对浮托力基本没有折减; 波向角越大, 折减系数越小; 折减后的波浪形态基本不变。

关键词: 挡浪墙; 斜向浪; Jensen & Bradbury 方法; Pedersen 方法; Martin 方法

中图分类号: U656

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2024)01-0042-08

Force of wave wall on top of slope embankment under oblique wave action

ZHANG Lizhen, LIU Haixin, QIN Jie

(CCCC-FHDI Engineering Co., Ltd., Guangzhou 510290, China)

Abstract: We compare the results of the section physical model test of a sloping embankment project with the theoretical calculation results of the national standard, Jensen & Bradbury method, Pedersen method, and Martin method. The results show that the combined force values and distribution patterns of Martin method's impact and pulsation pressure formulas are in good agreement with the section physical model result, so it is recommended for calculating the horizontal wave pressure and buoyancy of the wave wall. The distribution pattern of wave force on the wave wall is that the horizontal wave pressure on the wave wall reaches its maximum value above the cover prism, and decreases both above and within the cover prism. The L-shaped wave wall structure can quickly reduce the horizontal wave pressure at the bottom, thereby reducing the buoyancy force on the entire bottom of the wave wall. The buoyancy force decreases linearly along the bottom of the wave wall, and is not zero at the root behind the wall. By comparing the results of sectional and overall 3D model tests, it is found that the wave pressure has a significant reduction on the uncovered area, but has a poor reduction on the covered area, while there is basically no reduction in buoyancy. The larger the wave direction angle, the smaller the reduction coefficient. The reduced wave shape remains basically unchanged.

Keywords: wave wall; oblique wave; Jensen & Bradbury method; Pedersen method; Martin method

斜坡式引堤通常用于外海码头浅水区域接岸通道, 且引堤结构的堤顶常兼作道路、铺设管道等, 因此引堤外海侧顶部通常需要设置挡浪墙。

挡浪墙的稳定性与波浪力有关, 波浪力的合理计算对挡浪墙稳定性的评估至关重要。目前国内大量学者对斜坡堤挡浪墙的波浪力计算方法

收稿日期: 2023-05-05

作者简介: 张丽珍 (1985—), 女, 硕士, 高级工程师, 从事港口海岸工程设计及管理。

进行研究验算, 提出多个理论公式。JTS 145—2015《港口与航道水文规范》^[1](简称“国标”)中的挡浪墙波浪力计算公式是根据河海大学的研究成果制定的; 而 *The Rock Manual*^[2] 中介绍了 3 种计算方法, 分别为 Jensen & Bradbury 公式、Pedersen 公式以及 Martin 公式。

本文通过总结、分析某引堤工程挡浪墙的断面物模波浪荷载特点,并采用国标、*The Rock Manual* 中的方法进行理论计算和结果对比,分析挡浪墙的波浪力分布规律,并通过分析对比断面、整体物理模型试验结果,研究斜向波浪对挡浪墙作用力的影响。

1 工程概况

某工程引堤为斜坡堤结构,总长 700 m。平面布置为直线形,东南侧接岸,北端与外海防波堤相接,平面布置如图 1 所示。引堤外侧采用典型的斜坡式结构,扭王字块体护面,堤顶高程按允许

越浪设计,挡浪墙顶高程为 13.0 m,外坡坡肩顶高程为 8.0 m,断面 1、2 护面分别采用 15、10 t 扭王字块体,堤心采用 300 kg 以内开山混合料,护面坡比为 1:1.5,护坡在 -1.0 m 高程处设置平台,断面 1、2 宽度分别为 12、9 m。坡顶设置 L 形挡墙,挡墙外侧肩宽满足安装 3 件扭王字块体要求。斜坡堤坡脚水平放置 2 件扭王字块体,外侧抛填护底块石。典型断面如图 2 所示。

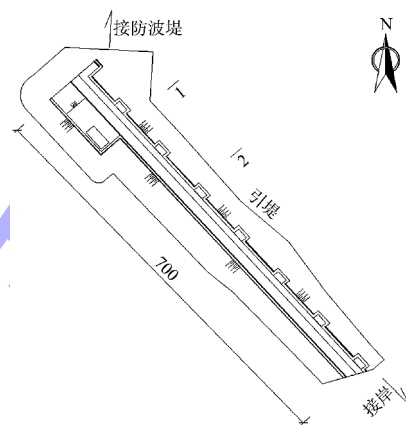


图 1 引堤平面布置 (单位: m)

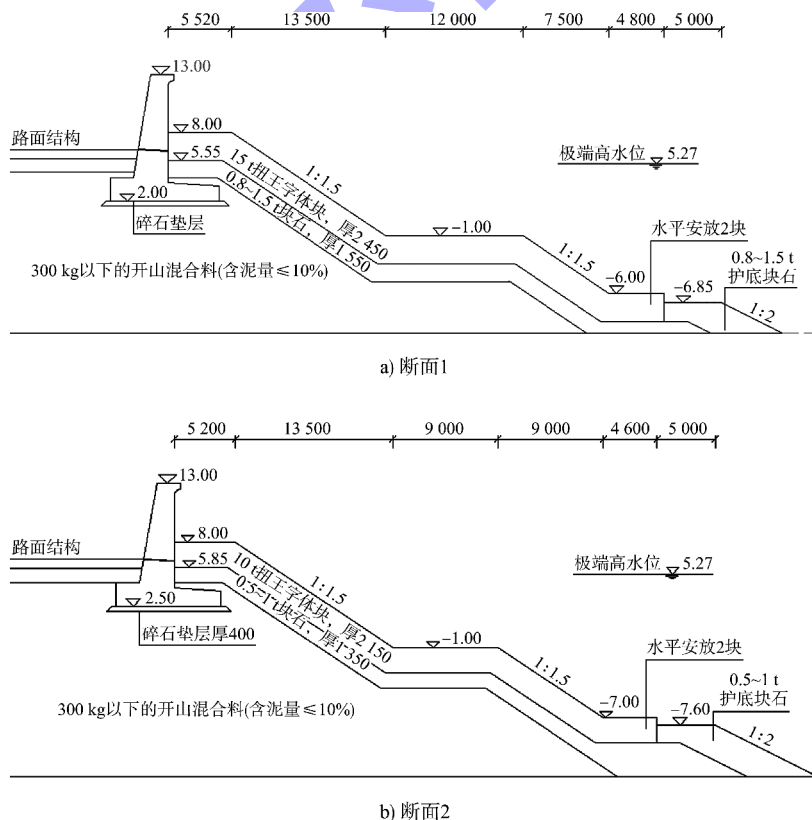


图 2 典型断面 (尺寸: mm; 高程: m)

波浪力为挡浪墙结构承受的主要外荷载。本工程极端高水位、50 a 一遇的 2 个断面波要素见表 1。

表 1 波浪要素

断面	波浪方向	$H_{1\%}/\text{m}$	$H_{13\%}/\text{m}$	平均波周期/s
1	垂直断面方向	6.99	5.19	9.1
	N 向	6.96	5.12	9.1
	NNW 向	7.45	5.49	9.1
	NW 向	7.46	5.47	9.1
2	垂直断面方向	5.76	4.13	9.1
	N 向	5.99	4.22	9.1
	NNW 向	6.39	4.55	9.1
	NW 向	6.58	4.72	9.1

2 物理模型试验结果

本工程首先根据数值模型计算波浪要素，而

后进行断面波浪物理模型试验，波浪垂直断面方向。波浪按重力相似准则模拟，比尺为 1:29，不规则波谱取 JONSWAP 谱。在建造模型前，在波浪率定点布置波高仪，率定试验波浪要素，试验时将按模型比尺换算后的特征波要素输入计算机，产生造波讯号，控制造波机产生相应的不规则波序列。此外，考虑到实际入射波为斜向波，为了更真实反映实际波压力情况，补充了整体物理模型，模型比尺为 1:57。整体物理模型分别模拟 N、NNW、NW 向波浪。在物理模型试验中对各段挡浪墙的波压力进行测量，物理模型试验以及挡浪墙的波压力测点布置见图 3。根据波浪物理模型试验报告，得到的挡浪墙在极端高水位作用时的实测波压力和浮托力分布见图 4。

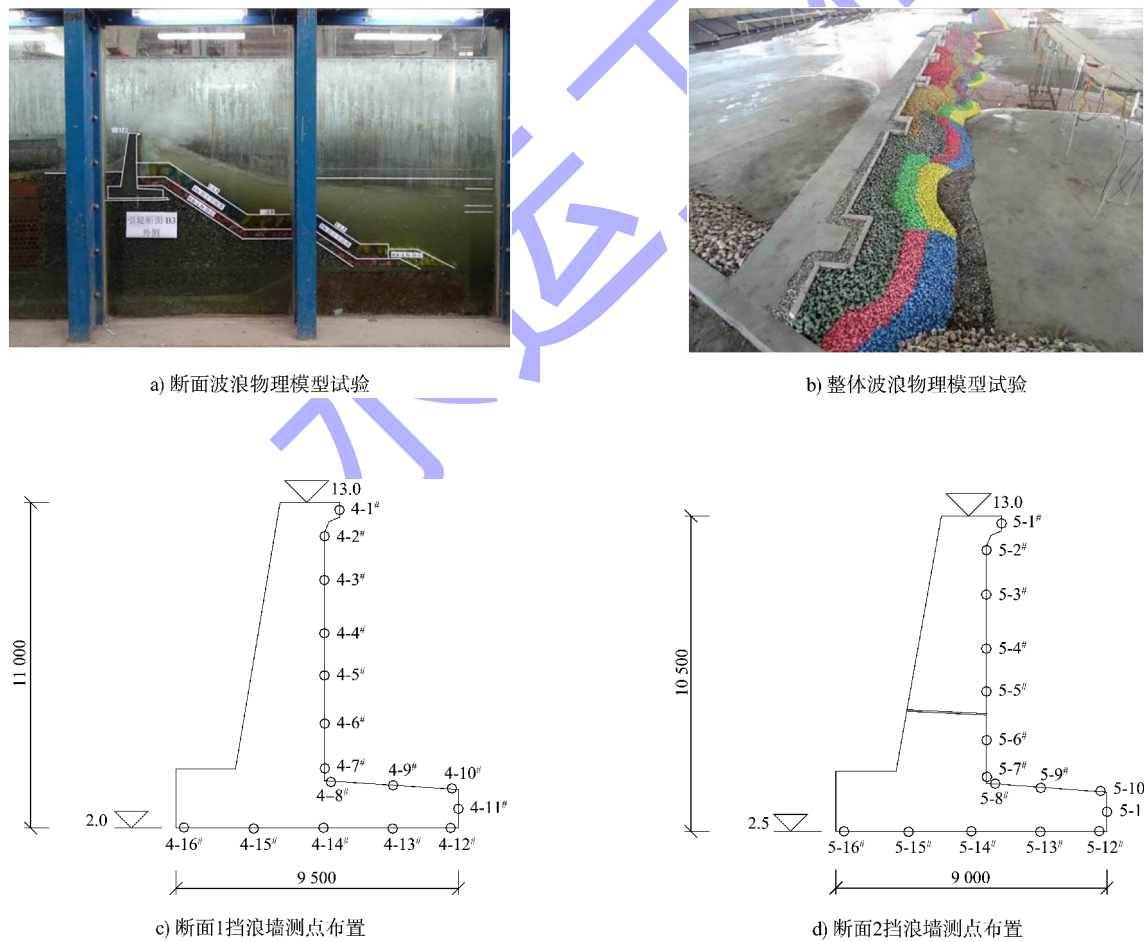
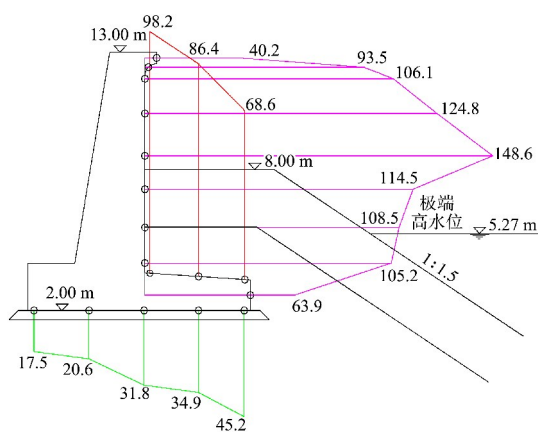
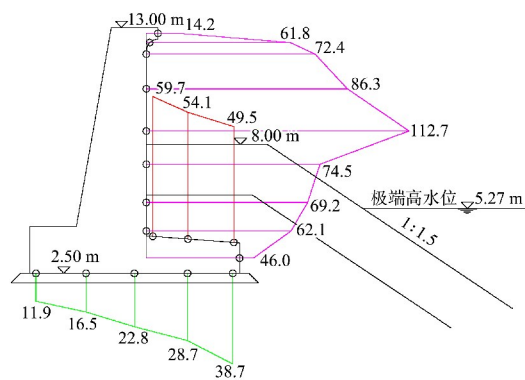


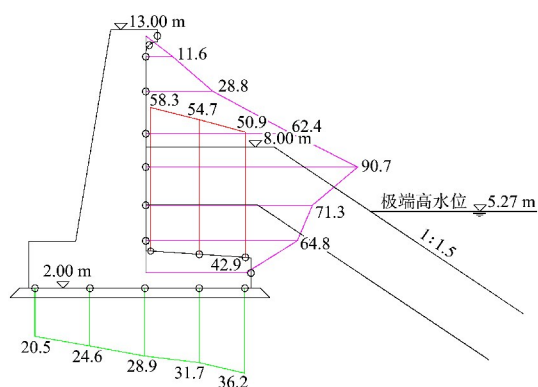
图 3 物理模型试验以及挡浪墙波压力测点布置（尺寸：mm；高程：m）



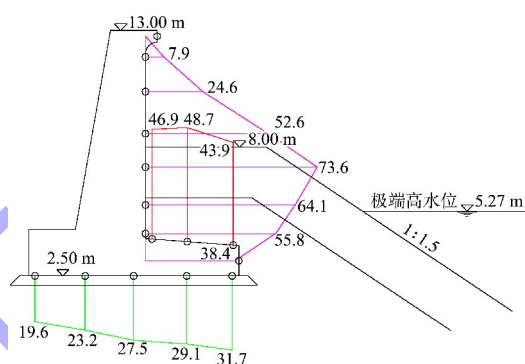
a) 断面1断面物理模型结果(波向垂直断面)



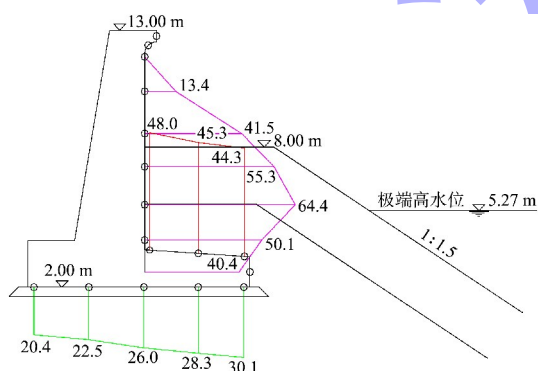
e) 断面2断面物理模型结果(波向垂直断面)



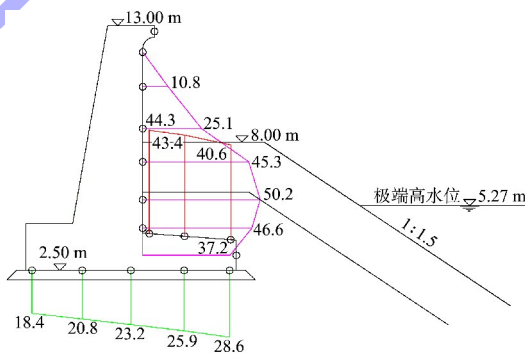
b) 断面1整体物理模型N向结果



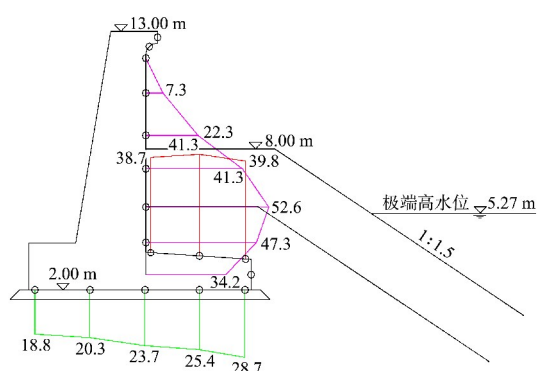
f) 断面2整体物理模型N向结果



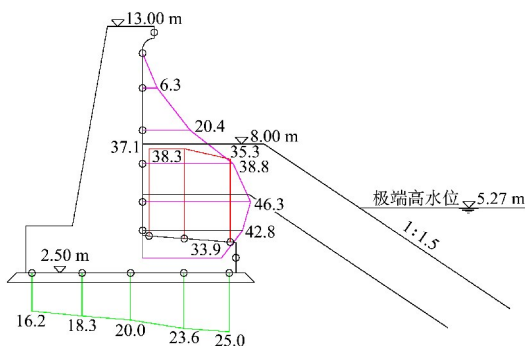
c) 断面1整体物理模型NNW向结果



g) 断面2整体物理模型NNW向结果



d) 断面1整体物理模型NW向结果



h) 断面2整体物理模型NW向结果

图4 极端高水位波峰作用下的波压力和浮托力分布
(单位: kPa)

3 挡浪墙波浪力的计算方法

3.1 国标方法

国标中的挡浪墙计算公式适用于前面无掩护棱体的情况,挡浪墙迎浪面上产生的压强按沿高度均匀分布。具体计算方法为:当 $(d_1/d)(d/H)^{2H/L} \leq 3.29(H/L+0.043)$ 时,通过查图得出平均压强系数 K_p 和波压力作用高度系数 K_z 。平均压强 p 和波浪作用高度 d_1+z_0 可由以下公式确定:

$$p=0.24\rho_w gHK_p \quad (1)$$

$$d_1+z_0=H \operatorname{th}\left(\frac{2\pi d}{L}\right)K_z \quad (2)$$

式中: ρ_w 为水的密度, kg/m^3 ; H 为行进波波高, m ; d 为堤前水深, m ; L 为波长, m ; d_1 为挡浪墙前水深,静水面在墙底面以下时为负值, m ; z_0 为挡浪墙前波浪压强分布范围的顶部距静水面的高度, m 。挡浪墙底部浮托力折减系数为0.7。

3.2 Jensen & Bradbury 公式

Jensen & Bradbury 等针对5种类型的断面进行模型试验,从而提出基于有效波高的最大波压力 F_H 、浮托力 F_U 的计算公式,为:

$$F_H=(\rho_w g d_c L_{op})(aH_s/R_{ca}-b) \quad (3)$$

$$F_U=(\rho_w g B_c L_{op}/2)(aH_s/R_{ca}-b) \quad (4)$$

式中: d_c 为挡浪墙总高度, m ; L_{op} 为与谱峰周期对应的深水波长, m ; a 、 b 为经验系数; H_s 为有效波高, m ; R_{ca} 为斜坡堤顶在水面以上的高度, m ; B_c 为挡浪墙底宽, m 。

3.3 Pedersen 公式

Pedersen 假设冲击压力的大小取决于斜坡顶部边沿的上冲速度,即水体以与坡顶边缘处的向上冲击速度相等的速度垂直地撞击墙面。波浪力在坡顶以上均匀分布,棱体掩护区域折减系数为0.5。波压力分布如图5所示。其中波浪力在坡顶以上均匀分布, p_i 为冲击压强, Pa ; 棱体掩护区域折减系数为0.5,故波压力强度为 $0.5p_i$; p_u 为墙底部最大浮托力强度, Pa ; y_{eff} 为坡顶以上受波浪力的高度, m 。

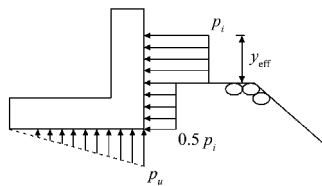


图5 Pedersen 公式波压力和浮托力分布

波压力的大小与冲击水体的体积有关,坡顶以上冲击压强的计算公式为:

$$p_i=\rho_w g(R_{u,0.1\%}-R_{ca}) \quad (5)$$

式中: $R_{u,0.1\%}$ 为0.1%保证率的波浪爬高, m 。

3.4 Martin 公式

Martin 等在1999年通过大量试验,提出当远破波撞击墙体时,随时间变化的波压力分布具有2个峰值,第1个峰值为冲击压力,是由于波浪作用到墙面后方向突变而产生的,而第2个峰值是脉动压力,发生在爬高波浪到达墙面时,并且与冲击墙体的水量有关。两种波压力分别进行计算。Martin 公式波压力和浮托力分布见图6。其中 z 为计算点距离墙底面的高度, m ; B_a 为墙前棱体顶宽, m ; p_{re} 、 p_{ra} 分别为墙底部前沿、后沿的浮托力, Pa 。

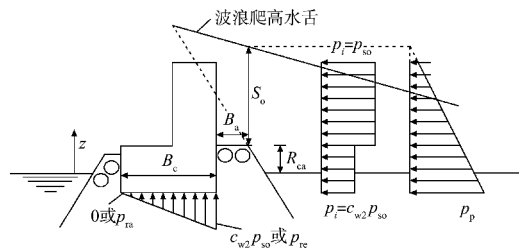


图6 Martin 公式波压力和浮托力分布

对于 R_{ca} 面以上的墙面,冲击压强峰值 p_1 的计算公式为:

$$p_1(z)=c_{w1}\rho_w gS_0 \quad (6)$$

对于 R_{ca} 面以下的墙面,冲击压强峰值 p'_1 的计算公式为:

$$p'_1(z)=c_{w2}c_{w1}\rho_w gS_0 \quad (7)$$

脉动压强峰值 p_p 的计算公式为:

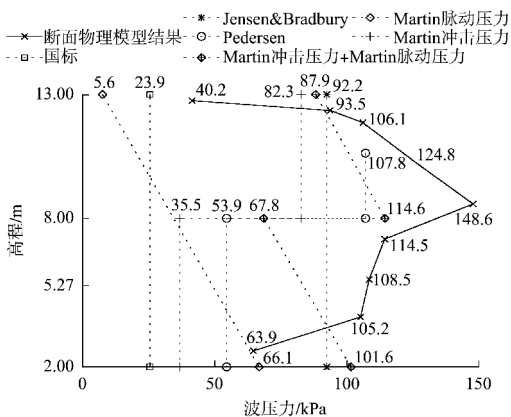
$$p_p(z)=c_{w3}\rho_w g(S_0+R_{ca}-z) \quad (8)$$

式中: c_{w1} 、 c_{w2} 、 c_{w3} 为经验系数; S_0 为最大爬高, m 。

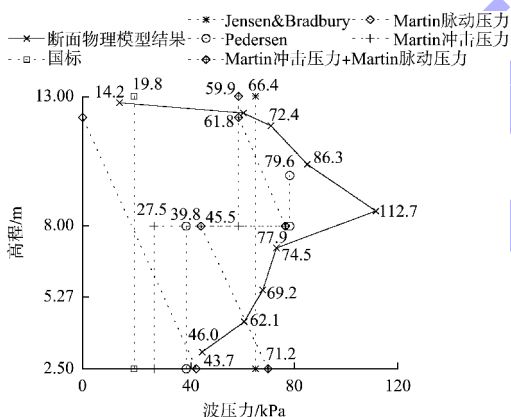
4 计算结果对比和分析

4.1 计算结果

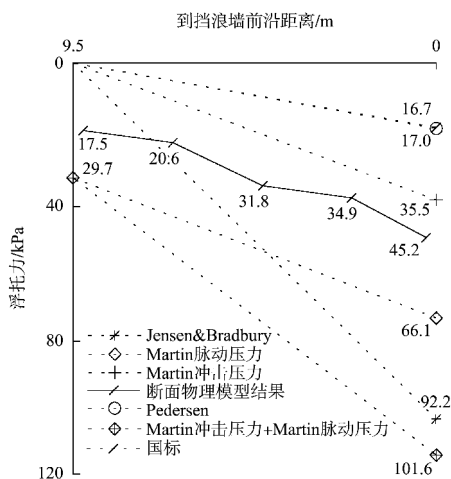
上述波浪力理论计算方法均假设为正向入射波浪。以引堤工程的典型断面 1、2 的断面物理模型试验波要素代入计算, 并与断面物理模型结果对比如图 7 所示。各方法理论计算和断面物理模型水平波压力、浮托力结果对比见表 2。



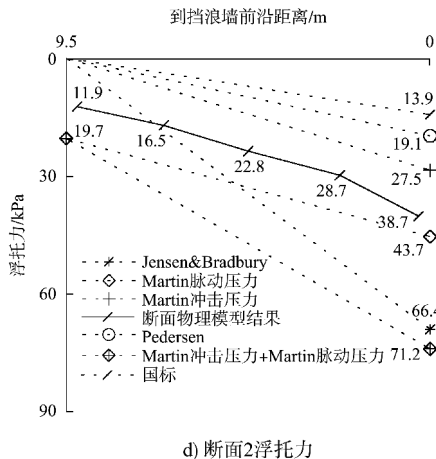
a) 断面1水平波压力



b) 断面2水平波压力



c) 断面1浮托力



d) 断面2浮托力

图 7 各方法理论计算结果和断面物理模型水平波压力、浮托力分布

表 2 波浪力计算结果对比

断面	方法	平均波压力/强度/kPa	总波压力/(kN·m ⁻¹)	总浮托力/(kN·m ⁻¹)
1	国标方法	23.9	262.7	79.5
	Jensen & Bradbury 方法	92.2	1013.7	854.1
	Pedersen 方法	46.2	508.6	80.5
	Martin 冲击压力	56.7	624.2	168.5
	Martin 脉动压力	35.8	394.2	454.9
	断面物理模型试验	108.2	1 190.1	278.4
2	国标方法	19.8	208.0	62.4
	Jensen & Bradbury 方法	66.4	697.6	729.2
	Pedersen 方法	30.0	315.1	85.8
	Martin 冲击压力	42.9	450.7	123.7
	Martin 脉动压力	20.2	211.9	285.4
	断面物理模型试验	73.1	767.2	209.7

注: 根据 JTS 154—2018《防波堤与护岸设计规范》^[3], 当挡浪墙前面有两层块体或块石掩护, 且高度范围形成全掩护时, 水平波浪力和浮托力可以折减 0.6~0.7。但本项目挡浪墙前面扭王字块体只有一层, 且高度方向为部分掩护情况, 不符合规范条件, 因此表中国标方法计算未考虑掩护棱体的折减效应。

4.2 水平波压力结果分析

4.2.1 波压力大小比较

由 4.1 节的计算结果对比可看出, 国标、Pedersen 公式的水平波压力结果都远小于断面物理模型结果; Jensen & Bradbury 方法的水平波压力结果与断面物理模型结果比较接近; Martin 方法的冲击、脉动水平波压力均小于断面物理模型结果, 但二者的水平波压力合力与断面物模结果比较接近。

4.2.2 波浪力分布形态比较

根据断面物理模型结果,水平波压力在外侧护面块体表面处达到最大值,在掩护棱体上方和掩护棱体内都减少,呈三角形分布,在掩护棱体上方未掩护区域的衰减斜率较大,而在棱体掩护区域斜率较小,趋近于均匀分布。值得注意的是,水平波压力在挡浪墙底部迅速减小,11[#]测点(4-11[#]、5-11[#])的波压力比7[#]测点(4-7[#]、5-7[#])减小很多,断面1、2折减系数分别为0.607、0.741,主要原因可能是L形挡墙有一段水平结构,对波浪力有一定的缓冲作用,属于特殊情况。而各个理论计算方法中,其他各方法均假定波浪力沿着挡浪墙高度方向均匀分布,只有Martin脉动压力为三角形分布。

综上所述,Martin方法的冲击、脉动压力公式的合力数值以及分布形态都与断面物理模型结果较为吻合,推荐用于计算挡浪墙水平波压力。

关于单层扭王字护面块体对水平波压力的折减效应,目前没有统一的规范,众多学者进行过专门的研究,如孙大鹏等^[4]通过试验研究发现,护面结构的折减系数受波浪要素、堤型结构和护面块体等因素影响,折减系数分布范围较大;柳玉良等^[5]将某防波堤胸墙波浪力试验实测值与规范计算值相比,得到胸墙在墙前半掩护条件下、全掩护条件下的水平力折减系数分别为0.801、0.606。将本工程棱体掩护区的5[#]、6[#]、7[#]测点(断面1、2)平均波压强度与未掩护区的最大波压强度比较,得到断面1、2的折减系数分别为0.736、0.609。

4.3 浮托力结果分析

4.3.1 浮托力大小比较

与水平波压力的结果类似,国标、Pedersen公式的浮托力结果都远小于断面物理模型结果;Jensen & Bradbury方法的浮托力结果远大于断面物理模型结果;Martin冲击、脉动压力产生的浮托

力和断面物理模型结果比较接近,二者合力远大于断面物理模型结果。

本工程的浮托力结果和常规直立式挡浪墙不同,由于挡墙采用L形结构,水平波压力在挡浪墙底部迅速减小,因此挡浪墙根部位置的浮托力也相应减小,从而导致整个挡浪墙底部受到的浮托力合力偏小。根据表2的对比结果,断面1、2的断面物理模型结果与Martin冲击、脉动二者合力的比值分别为0.446、0.512。

4.3.2 浮托力分布形态比较

根据断面物理模型结果,浮托力从挡浪墙前沿根部为最大值,沿着挡浪墙底部线性减小,在挡浪墙后沿根部并不为0。各个理论计算方法浮托力均沿着挡浪墙底部线性减小,但只有Martin脉动压力公式计算挡浪墙后沿根部浮托力不为0,与断面物理模型的结果更为吻合。

因此,对于常规直立式挡浪墙,推荐采用Martin冲击、脉动二者合力的计算方法。而对于L形挡墙结构,浮托力可以进行一定的折减,结合4.2节水平波压力挡浪墙底部折减分析,建议折减系数可取0.5~0.7。

5 斜向浪波压力强度分析

目前国内外对斜向浪作用在挡浪墙上的波压力研究较少,沈雨生等^[6]通过研究不同水位斜向浪对斜坡堤胸墙的作用力,认为水位越低、波浪入射角度越小,斜坡堤单个胸墙所受斜向波浪总力的折减系数越小。

本工程整体物理模型分别模拟了N、NNW、NW向波浪,与引堤断面法向夹角(简称“波向角”)分别为48°、70.5°、93°。不同方向整体物模的各测点波压力与断面物理模型结果的比值见表3,反映了斜向浪作用在挡浪墙上的波压力以及浮托力的折减系数。根据表1,整体物模各个方向的波高与断面物理模型有少量偏差,在计算折减系数前,先对整体物模各波浪力进行了线性调整。

表 3 斜向浪波压力折减系数

作用位置	测点	N 向波浪力/ 断面物理 模型波浪力	NNW 向波浪力/ 断面物理 模型波浪力	NW 向波浪力/ 断面物理 模型波浪力
挡浪墙侧面水平力	4-1 [#]	0.00	0.00	0.00
	4-2 [#]	0.11	0.00	0.00
	4-3 [#]	0.23	0.10	0.05
	4-4 [#]	0.42	0.26	0.14
	未掩护区水平力合力	0.27	0.14	0.08
	4-5 [#]	0.80	0.45	0.34
	4-6 [#]	0.66	0.56	0.45
	4-7 [#]	0.62	0.45	0.42
	4-11 [#]	0.67	0.59	0.50
	掩护区水平力合力	0.67	0.49	0.40
挡浪墙 L 形顶部下压力	4-8 [#]	0.60	0.46	0.37
	4-9 [#]	0.64	0.49	0.45
	4-10 [#]	0.75	0.61	0.54
挡浪墙底部浮托力	4-12 [#]	0.80	0.62	0.59
	4-13 [#]	0.91	0.76	0.68
	4-14 [#]	0.91	0.77	0.70
	4-15 [#]	1.20	1.02	0.92
	4-16 [#]	1.18	1.09	1.01
挡浪墙侧面水平力	浮托力合力	0.96	0.81	0.74
	5-1 [#]	0.00	0.00	0.00
	5-2 [#]	0.10	0.00	0.00
	5-3 [#]	0.27	0.11	0.06
	5-4 [#]	0.45	0.20	0.16
	未掩护区水平力合力	0.31	0.13	0.09
	5-5 [#]	0.95	0.55	0.46
	5-6 [#]	0.89	0.65	0.59
	5-7 [#]	0.86	0.68	0.60
	5-11 [#]	0.80	0.73	0.65
挡浪墙 L 形顶部下压力	掩护区水平力合力	0.86	0.61	0.53
	总水平力合力	0.57	0.35	0.30
挡浪墙底部浮托力	5-8 [#]	0.76	0.67	0.54
	5-9 [#]	0.87	0.72	0.62
	5-10 [#]	0.85	0.74	0.62
挡浪墙底部浮托力	5-12 [#]	0.79	0.67	0.57
	5-13 [#]	0.98	0.81	0.72
	5-14 [#]	1.16	0.92	0.77
	5-15 [#]	1.35	1.14	0.97
	5-16 [#]	1.58	1.39	1.19
挡浪墙 L 形顶部下压力	浮托力合力	1.08	0.90	0.77

5.1 未掩护区域水平波浪力斜向浪折减规律

1[#]~4[#]断面测点位于挡浪墙前掩护棱体以上未掩护区域,折减系数为 0~0.45。由表 3、图 5 分析可知:1) 高程越高,波向角越大,折减系数越小;总水平合力折减系数为 0.31~0.08,折减效果非常明显。2) 折减后挡浪墙顶部的波压力均为 0,折减后的波压力基本呈三角形分布形态。3) 在最靠近斜坡堤顶高程位置的 4[#]测点,其折减系数基本和波向角成反比;当 NW 向波沿引堤走向时,波浪力已近似折减为 0。

5.2 掩护区域水平波浪力斜向浪折减规律

5[#]~7[#]、11[#]测点位于挡浪墙前掩护棱体以下掩护区域,由表 3、图 5 分析可知:1) 波向角越大,各测点以及平均折减系数均越小,但与未掩护区域相比,掩护区域的折减效果不明显,折减系数为 0.34~0.95,总水平力折减系数为 0.40~0.86,在 NW 向,波向基本沿着引堤走向时,断面 1 和 2 的合力折减系数仍分别高达 0.40 和 0.53。而在高度方向,对于各测点并没有呈现明显的规律,例如 N 向波浪力最大折减系数出现在上部的 5[#]测点,而 NW 向则出现在下部的 11[#]测点,这可能是因为波浪传播进入块体掩护区后,在护面块体、块石等表面反射、绕射等,变成极不规则的紊流,作用力的大小可能和掩护棱体的特性,例如孔隙率、块体大小、块体的堆放形式、坡顶肩宽等有关。2) 根据图 5,折减后的最大波压力出现在静水面以上;静水面以下随沿着墙面高程越小,波压力越小,基本与高度呈线性关系。

5.3 墙底浮托力斜向浪折减规律

12[#]~16[#]测点位于挡浪墙底部,受波浪浮托力,折减系数为 0.57~1.58。由表 3、图 5 分析可知:1) 波向角越大,折减系数均越小,但与水平波压力相比,折减效果不明显,断面 2 在 N 向的浮托力折减系数大于 1;2) 挡浪墙底部靠海侧的折减系数较小,靠岸侧的折减系数较大;折减后的浮托力沿着挡浪墙底部仍为线性分布,但斜率更小。