

DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdkj.2019.0022

曹婷,王平义,何鹏超,等.滑坡涌浪下斜坡波压力经验估算方法对比[J].南水北调与水利科技,2019,17(1):157-163,192.
CAO T, WANG P Y, HE P C, et al. Comparison and analysis of empirical estimation methods for slope wave pressure under landslide-generated impulse wave[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2019, 17(1): 157-163, 192. (in Chinese)

滑坡涌浪下斜坡波压力经验估算方法的对比

曹婷,王平义,何鹏超,田野

(重庆交通大学 国家内河航道整治工程技术研究中心,重庆 400074)

摘要:斜坡波压力计算公式经验性较强,计算公式种类繁多。为了探讨经验公式在预测滑坡涌浪对斜坡作用力的适用性问题,构建几何比尺为1:70的滑坡涌浪三维物理模型,试验研究了不同工况时滑坡涌浪最大波与有效波下斜坡作用力的变化规律,采用3种常用的斜坡波压力经验公式,对比分析了滑坡涌浪下滑坡入水点正对岸斜坡波压力大小、作用点位置及分布特性。结果表明:3种经验公式计算结果有较大的差异,基于试验结果,路基公式经修正后可用于预测滑坡涌浪下斜坡波压力大小;向金公式经修正后可用于预测滑坡涌浪破碎作用点位置;波压力在斜坡上的分布趋势与苏联公式是一致的。

关键词:滑坡涌浪;波压力;模型试验;经验公式

中图分类号:TV131 文献标志码:A 开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Comparison and analysis of empirical estimation methods for slope wave pressure under landslide-generated impulse wave

CAO Ting, WANG Pingyi, HE Pengchao, TIAN Ye

(National Engineering Technology Research Center for Inland Waterway Regulation, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China)

Abstract: The slope wave pressure calculation is highly empirical and has a wide variety of calculation formulas. In order to explore the applicability of empirical formulas in predicting the pressure of landslide-generated impulse wave on the slope, we constructed a three-dimensional physical model of landslide-generated impulse wave with a geometric scale of 1:70. We studied the variation law of slope wave pressure under the maximum and the effective landslide-generated impulse waves under different working conditions. Three commonly used empirical formulas for slope wave pressure were used for comparison and analysis of the magnitude, action point position, and distribution characteristics of the pressure of landslide-generated impulse wave on the slope that was directly opposite the water entry point of the landslide. The results showed that: the results of the three empirical formulas were quite different. According to the test results, the modified Subgrade Formula can be used to predict the magnitude of the slope wave pressure under landslide-generated impulse wave; the modified ШАНКИН Formula can be used to predict the breaking point position of landslide-generated impulse wave; the distribution trend of the wave pressure on the slope is consistent with the Soviet Standard Formula.

Key words: landslide-generated impulse wave; wave pressure; model test; empirical formula

收稿日期:2018-08-24 修回日期:2018-10-12 网络出版时间:2018-10-22

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20181018.1533.010.html>

基金项目:国家自然科学基金(51479015);重庆市基础研究与前沿探索(重点)项目(cstc2017jcyjBX0070)

作者简介:曹婷(1988—),女,湖南益阳人,实验师,博士研究生,主要从事水沙动力学方面研究。E-mail:1214433724@qq.com

通信作者:王平义(1964—),男,河南周口人,教授,博士生导师,主要从事水沙动力学、航道整治方面研究。

三峡库岸除受常年风浪作用外,还受到滑坡涌浪等突发极端波浪的作用,在极端波浪作用下,岸坡受到超高波浪的冲击拍打,可能威胁岸坡的局部或整体稳定性,甚至会比常年风浪影响更为严重。潘宝雄^[1]通过调查港口斜坡堤,指出应重视斜坡上波压力问题及其护面范围,库区岸坡(天然岸坡、公路路基、斜坡护面等)在滑坡涌浪和常年风浪的威胁下同样也应注重波浪压力,以期在滑坡涌浪发生时,对库岸的影响程度及范围提供科学的预测预报方法。

国内外学者在不规则波浪对斜坡波压力方面上有一定的研究及见解,P A BLACKMORE 等^[2]通过对英格兰南部和西部进行原型波浪压力测量,结果与现有波压力半经验公式相关性不好,并以此提出了波压力的估算公式。Rita Fernandes de Carvalho^[3-5]通过不同质量钙质块体模拟滑坡,用模型试验和数值模拟的方法探讨了滑坡涌浪作用下库岸及大坝波压力的变化规律。冯卫兵^[6,7]结合莆田站现场实测资料与物理模型试验,拟合出在不同相对水深、坡度、波坦下波压力大小及分布的计算公式,拟合出了最大波压力相对位置与相对水深的计算公式。

目前滑坡涌浪对岸坡波压力的研究开展得较少,无统一的估算方法。规则波对斜坡波压力的经验公式众多,我国常用的有苏联规范(СНП II 57-75)公式(简称苏联公式)^[8]、国内《铁路工程技术手册(路基)》推荐的公式(简称路规公式)^[9]、向金公式等,学者们对经验公式适用情况有不同见解,黄碧珊等^[10]、蒋宗燕等^[11]认为向金公式与试验结果较为吻合,但其公式适用范围仅限于试验所提及的小范围条件内;徐继青^[12]、张惠等^[13]认为苏联公式具有重要的指导意义;王鉴义等^[14]认为不规则波有效波波高计算的波压力及分布与苏联公式较为符合;许光祥等^[15]认为苏联公式并不适用于库区小波高波压力计算;李建习^[16]对比试验结果与经验公式计算值,认为苏联公式最为保守,路规公式与试验值较为接近。

本文针对三峡库区某河段开展滑坡涌浪对斜坡波压力研究,通过物理模型试验结果对比分析最大波和有效波作用下,几种常用的规则波斜坡波压力经验公式计算结果的差异性,判断其在滑坡涌浪波压力估算中的适用性,提出滑坡涌浪下斜坡波压力估算时公式选用的推荐意见。

1 常用斜坡波压力经验公式

1.1 苏联公式

苏联规范(СНП II 57-75)推荐的公式,假定斜

坡坡面为光滑整体,波浪垂直入射,忽略波浪破碎在斜面上产生的水平侧向作用力,分析波浪破碎后水质点的运动方程,得出斜坡作用力的大小及分布,水质点作用于斜坡的过程见图 1。

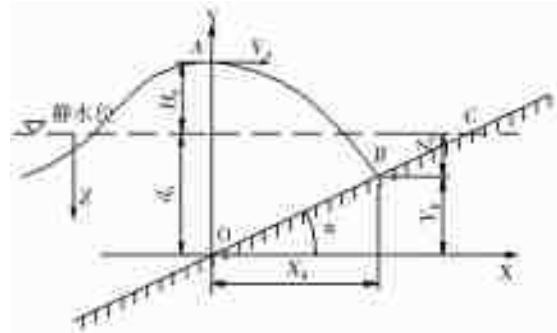


图 1 波浪破碎对斜面的冲击

Fig. 1 Impact of wave breaking on the slope

(1)最大波压力 P_B 由式(1)确定

$$P_B = c_1 c_2 \bar{p}_B \gamma H \quad (1)$$

式中: P_B 为最大波压力; $c_1 = 0.85 + 4.8 H/L + m(0.028 - 1.15 H/L)$; c_2 为与波坦有关的系数,由表 1 确定; \bar{p}_B 为作用于斜坡上的最大相对波压力,由表 2 确定; H 为波高; L 为波长; $m = \cot\alpha$, α 为斜坡坡面与水平面的交角。

表 1 系数 c_2

Tab. 1 Coefficient c_2

波浪坦度 L/H	10	15	20	25	35
c_2	1.00	1.15	1.30	1.35	1.48

表 2 最大相对波压力 \bar{p}_B

Tab. 2 Maximum relative wave pressure \bar{p}_B

波高 H/m	0.5	1	1.5	2	2.5	3	3.5	≥ 4
\bar{p}_B	3.7	2.8	2.3	2.1	1.9	1.8	1.75	1.7

(2)最大波压力 P_B 作用点 B 的坐标可由式(2)、(3)确定

$$Z_B = d_0 - Y_B \quad (2)$$

$$Y_B = \left[-\frac{V_A^2}{m} + V_A \sqrt{\frac{V_A^2}{m^2} + 2g(d_0 + H_0)} \right] / gm \quad (3)$$

式中: V_A 为波浪破碎时波峰处水质点 A 的流速,用式(4)计算

$$V_A = n \sqrt{\frac{gL}{2\pi} \operatorname{th} \frac{2\pi d}{L}} + H \sqrt{\frac{\pi g}{2L} \operatorname{cth} \frac{2\pi d}{L}} \quad (4)$$

$$n = 4.7 \frac{H}{L} + 3.4 \left(\frac{m}{\sqrt{1+m^2}} - 0.85 \right) \quad (5)$$

式中: $d_0 = H(0.47 + 0.023H/L)(1+m^2)/m^2$,为波浪在斜坡上破碎时的临界水深; $H_0 = [0.95 - (0.84m - 0.25) H/L]H$,为波峰高出静水位的高

程; H 、 L 、 m , 意义同上。

(3) 沿斜坡在最大作用力点 B 点上下各点的位置及波压力大小如式(6), 具体见图 2。

$$\left. \begin{aligned} L_1 &= 0.0125D & P &= 0.4P_B \\ L_2 &= 0.0325D & P &= 0.1P_B \\ L_3 &= 0.0265D & P &= 0.4P_B \\ L_4 &= 0.0675D & P &= 0.1P_B \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

式中: L_1 、 L_2 、 L_3 、 L_4 为沿斜坡的距离,

$D = mL / \sqrt{m^2 - 1}$, m 意义同上。

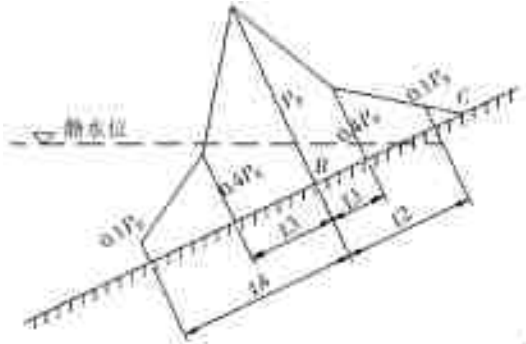


图 2 斜坡上的最大波压力分布

Fig. 2 Maximum wave pressure distribution on the slope

1.2 路规公式

路规公式将破波冲击点流速水头转化为压能, 得出最大波压力计算公式, 适用于边坡与水平面倾斜角小于 45° , 堤前水深 $d = 1.5 \sim 5.0H$, 路堤前水底坡度 $i \leq 1/25$, 如图 3 所示, 波浪在斜坡上的最大局部压力 P_B 由式(7)确定

$$P_B = 1.7 \left[V_A^2 + \left(g \frac{x_B}{V_A} \right)^2 \right] \cos^2 \theta \cdot \gamma_w / 2g \quad (7)$$

式中: V_A 为波浪破碎时波峰处水质点 A 的流速, 用式(4)计算; n 由式(5)计算; x_B 为最大波压力作用点位置, 由式(8)确定

$$x_B = \left(-V_A^2 \tan \alpha \pm V_A \sqrt{V_A^2 \tan^2 \alpha + 2gy_0} \right) / g \quad (8)$$

$$y_0 = 1.5H + h_s = 1.5H + \left(\frac{\pi H^2}{4L} \operatorname{cth} \frac{2\pi d}{L} \right) \quad (9)$$

式中: H 为波高; L 为波长; d 为水深; g 为重力加速度; th 、 cth 为双曲线函数; β 为射流与水平面的夹角, $\tan \beta = -gx_B / V_A^2$; θ 为射流与坡面法向的夹角, $\theta = 90 - (\alpha + \beta)$; h_s 为波峰高出静水位的高程。

许光祥等^[15]将式(7)加以改进, 写为

$$P_B = 1.7\gamma V_A^2 [1 + (X^*)^2] \cos^2 \theta / 2g \quad (10)$$

其中: $X^* = \sqrt{\frac{1}{m^2} + \frac{2gy_0}{V_A^2}} - \frac{1}{m}$, 其余参数意义同上。

文中所涉及到的路规公式计算结果均采用式(10)。

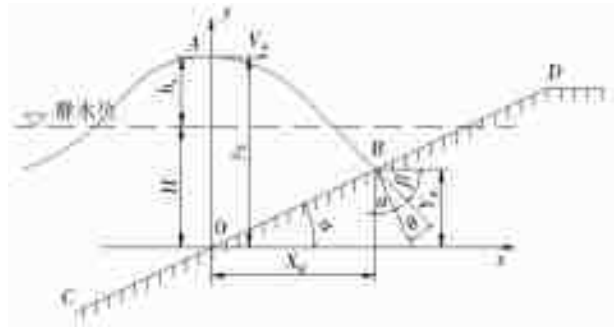


图 3 波浪破碎在斜坡上的最大压力

Fig. 3 Maximum pressure of wave breaking on the slope

1.3 向金公式

向金公式的提出基于运河护坡现场测试及室内试验成果, 其最大压强 p_m 及其作用点位置 e_0 分别由式(11)、式(12)确定, 适用于 $m = 2 \sim 5$, $L/H = 5 \sim 10$ 。

$$p_m = 0.11(8-m)\sqrt{LH} \quad (11)$$

$$e_0 = 0.55\sqrt{LH/2(m+2)} \quad (12)$$

式中: m 为边坡坡率; H 为波高; L 为波长。

2 概化物理模型试验

本文概化对象为三峡万州江南沱口码头段, 模型比尺取为 $1:70$ 。航道里程为 $336 \sim 330$ km, 长约 6 km, 为直线段与 90° 角弯道段连接的弯曲型河道, 其中直线段长约 2 km, 通过对地形数据的统计得出原型河道河底高程为 93.55 m, 河底宽度为 183.4 m, 滑坡侧岸坡坡度为 30° , 滑坡对岸坡度为 20° 。经模型比尺缩放后, 河段尺寸见图 4。

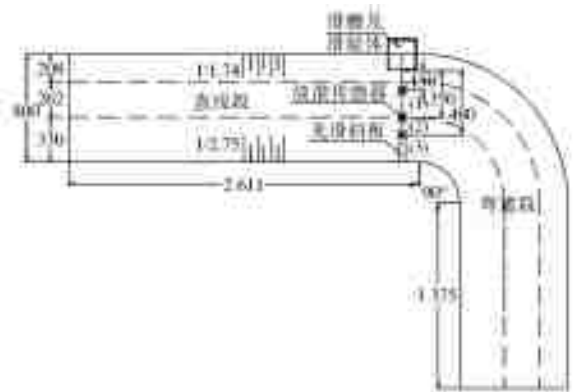


图 4 概化河段平面图

Fig. 4 Generalized river section plan

试验模拟岩质滑坡下涌浪对斜坡波压力的影响, 因岩质边坡具有裂隙发育等地质构造, 在下滑和入水时多表现为散体, 重庆交通大学研究表明, 岩质滑坡体模型可依据密度相似原理, 由 5 种不同形状水泥小块体按相应配比组成^[17], 如图 5 所示; 滑坡体入水处河床坡度取最不利情况 90° ; 滑坡体临水

状态为滑坡体前缘刚好与水面接触。滑坡体的形状参数、滑面倾角、河道水深等是影响涌浪大小和传播的重要因素,依据三峡常年运行水位有 145、155、175 m,选取涌浪发生时的最不利水位 145 m,相应模型河道水深 0.74 m,试验选取不同的滑坡体宽度、厚度、长度来控制滑体方量,因河道的限制,滑坡发生时部分滑体会堆积在水面以上,本试验固定滑坡体长度为 1 m^[17]。综上,试验基于 3 个不同滑坡体宽度、厚度、滑面倾角因素水平,采用单因子试验方案设计,共 27 组工况,见表 3。



图 5 滑坡体模型
Fig. 5 Model of landslide

表 3 各因素水平值
Tab. 3 Level of each factor

因素水平	滑坡体宽度/m	滑坡体厚度/m	滑面倾角/°
1	1.5	0.6	60
2	1.0	0.4	40
3	0.5	0.2	20

滑坡入水点正对岸采用 50 cm 宽光滑塑料斜板,不考虑岸坡角度的变化,保持为 20°,不考虑岸坡糙率的变化。光滑斜板上设置有 9 个压力传感器,因波浪对斜板最大作用力位置位于在水边下以下一定深度内,为能测到波浪下最大作用力,在水边线以下相应范围内加密布置传感器,0 到 6 号测点间间隔 5 cm,其余测点布置见图 6。



图 6 岸坡模型
Fig. 6 Model of slope

试验波高、周期测量采用重庆西南水运工程科学研究所自主研发的超声波浪采集分析仪,在滑块入水点和坡面之间布置 3 个传感器,见图 4。光滑斜板上波浪作用力的测量采用重庆交通大学自主研发的水压力传感器,采集系统精度为 100 HZ,利用计算机采集处理数据。

3 滑坡涌浪物理模型试验成果对比分析

3.1 最大与有效相对波压力

在研究不规则波浪对工程的作用时,代表波法较为常用,取某一特征波,依此作为单一的规则波进行计算^[18],可快速简洁地预测波浪作用力。试验成果从两个代表波入手:最大波和有效波,利用 matlab 统计得出最大波压力和有效波压力,为更方便地分析力的变化,采用无量纲参数相对最大波压力 $P_{max}/\gamma H_{max}$ 和相对有效波压力 $P_s/\gamma H_s$,在利用经验公式进行计算时,相对最大波压最大波 H_{max} 及其对应的周期,相对有效波压力采用有效波 H_s 和平均周期 \bar{T} ,对比分析规则波经验公式计算值与试验成果,主要包括相对波浪压力、相对波压力作用点位置、波浪沿岸坡分布。

3.2 相对波浪压力

3.2.1 试验值与经验公式计算值对比

从图 7 中可以看出,向金公式得出的相对波压力值远小于试验结果,因公式提出基于运河护坡现场测试及室内试验成果,其适用的条件是处于一般的风浪条件下,对于涌浪这种具有大波高、长波长等特征的极端波浪具有一定的局限性;路规公式计算值较为集中的分布在直线附近位置,与试验值最为接近,因路规公式从国内工程调查,参考国外有关资料得出,结合了国内的实际情况,且在公式中考虑了波浪的入射角度,较为贴切地反应了实际情况;苏联公式计算值最大,大致分布在直线上方一定距离内,因苏联公式假定斜坡坡面为光滑整体,波浪垂直入射,是一种较为理想的状况,又或因试验中实验环境的影响或存在漏测冲击压力等情况导致波峰减小,基于苏联公式以现场实测为基础,具有相当的合理性,在估算涌浪下斜坡波压力大小时应给予考虑。

由图 7 分析可知,苏联公式在计算波浪对斜坡波压力时相对保守,但具有参考价值,向金公式计算值远小于试验值,路规公式与试验值最为接近,在众多经验公式中,路规公式可较为贴切的反应滑坡涌浪下斜坡作用力大小,可对路规公式进行一定的修正计算滑坡涌浪下斜坡波压力的大小。

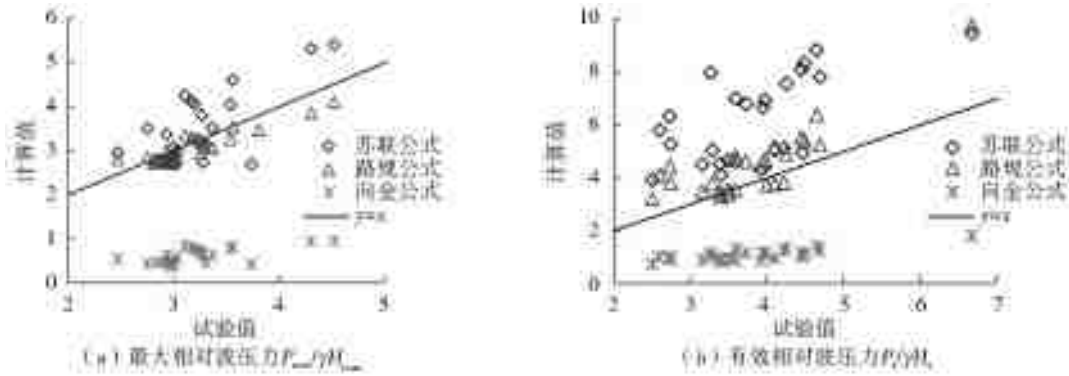


图7 试验与经验公式相对波压力对比

Fig. 7 Contrast diagrams of relative wave pressure between test and empirical formulas

3.2.2 波压力估算公式的修正

由图7分析得出,在最大波和有效波作用下,路规公式与试验值最为接近,经将试验值与计算值进行拟合,在最大波作用下,两者呈线性关系, R^2 为0.82,试验值与计算值较为吻合,其关系式如式(13)所示;在有效波作用下,两者呈多项式关系, R^2 为0.84,试验值与计算值较为吻合,其关系式见式(14)。 P'_B 为修正后波压力,式中参数同式(10)。

$$P'_B/H_{\max}=aP_B+b \quad (13)$$

式中:系数 $a=0.737$;系数 $b=0.704$;

$$P'_B/H_s=a_1P_B^2-b_1P_B+c_1 \quad (14)$$

式中:系数 $a_1=0.362$;系数 $b_1=-1.791$;系数 $c_1=5.816$ 。

3.3 相对作用点位置

3.3.1 试验值与经验公式计算值对比

图8中,相对位置负值代表位于水边线以上,正值代表水边线以下,从图中可以看出,试验中波压力

作用点的位置大致可以分为两个部分,Y轴上的点表示试验值为0点,位于静水面,其他位置的点表示波浪破碎时作用点,试验结果与钟瑚蕙^[19]的试验结论是一致的。经验公式从波浪破碎水质点运动过程出发,只能反映波浪破碎点位置,不能反映波浪不破碎情况下作用点位置。判断最大波压力作用点位置,需利用估算公式并结合波浪的形态来判别。

从图8中可以看出,路规公式得出的作用点位置虽与试验值较为接近,但部分计算点出现负值,存在作用点位于水边线以上的情况,不符合试验现象与波浪分布特征;向金公式结果较为均匀的分布在直线以上一定距离,破碎点分布在水下某个区域内;苏联公式计算值与试验值相比浮动幅度最大,大部分位于直线以上较大区域,作用点位置与试验值相比水深较大。试验中滑坡涌浪为大波坦波浪,向金公式与苏联公式给出的波坦适用条件均较小,可能导致作用点位置与滑坡涌浪大波坦条件下的不一致。

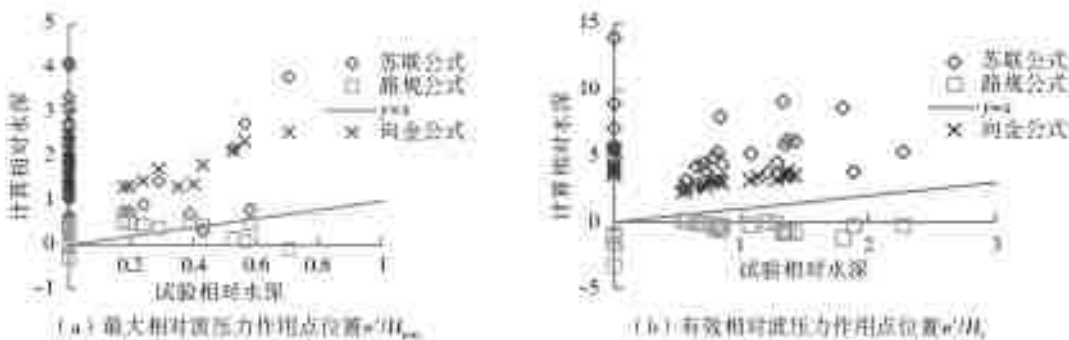


图8 试验与经验公式相对作用点位置对比

Fig. 8 Contrast diagrams of relative action point position between test and empirical formulas

规则波经验公式无法得出波浪不破碎时其作用点的位置,必须结合试验现象或计算破波参数判别波浪形态后确定;苏联公式得出的不规则破碎波作用点位置与试验值相差较大,路规公式部分计算结果不符合波浪分布特征,向金公式与试验值较为接近且相关度较好,可对向金公式进行适当的修正求

得滑坡涌浪下破碎作用点的位置。

3.3.2 作用点估算公式的修正

由图8分析得出,当只考虑波浪破碎作用点时,向金公式计算值与试验值最为接近,经将试验值与计算值进行拟合,在最大波作用下,两者符合多项式关系, R^2 为0.84,试验值与计算值较为吻合,其关

系式如式(15)所示;在有效波作用下,两者呈多项式关系, R^2 为 0.86,试验值与计算值较为吻合,其关系式如式(16)所示。式中参数同式(12),其中 e' 为修正后的作用点位置。

$$e'/H_{\max} = ae_0^2 - be_0 + c \quad (15)$$

式中:系数 $a = 3.2$;系数 $b = -0.264$;系数 $c = 1.285$;

$$e'/H_s = a_1 e_0^2 + b_1 e_0 + c_1 \quad (16)$$

式中:系数 $a_1 = -1.235$;系数 $b_1 = 3.674$;系数 $c_1 = 0.841$ 。

3.4 波浪沿岸坡分布

因经验公式中,只有苏联公式给出了其分布规律,现主要结合苏联公式计算结果与试验成果进行对比。图 9 中,斜坡相对位置负值代表水边线以下,正值代表水边线以上,选取滑体长宽厚为 $1.0 \text{ m} \times 1.5 \text{ m} \times 0.6 \text{ m}$,滑面倾角为 60° 及滑体长宽厚为 $1.0 \text{ m} \times 0.5 \text{ m} \times 0.4 \text{ m}$,滑面倾角为 20° 下最大相对作用力与有效相对作用力分布曲线进行对比分析。

由图 9 可以看出,苏联公式相对作用力在破碎

点上下迅速衰减,破碎点以上衰减较快,以下相对衰减较慢,试验波浪作用力在斜坡上整体衰减趋势与之是基本一致的,但衰减程度不一致,一般以上衰减更快,以下衰减更慢,部分有效相对作用力分布曲线出现了两个峰值,分别位于静水面和某个相对水深下,结合波浪的形态,分析可能因为波浪未破碎,在静水面和破碎的集中消能区出现了最大作用力。部分最大相对作用力在破碎点上下一定距离内出现了平缓地衰减,出现此现象的原因可能是漏测了冲击力或受到实验环境等的影响,导致出现曲线峰值平缓的现象。

苏联公式可较为准确地描述波压力在岸坡上的分布趋势,但无法准确地反应滑坡涌浪下波压力曲线变化程度;有效相对波压力分布曲线基本能反应在不同波浪形态下出现不同波浪作用点的曲线特征;最大相对波压力在模型试验时可能存在漏测冲击力的现象或受空气阻力等影响,使得其峰值不够明显,涌浪下斜坡波压力的分布曲线需进一步的试验研究。

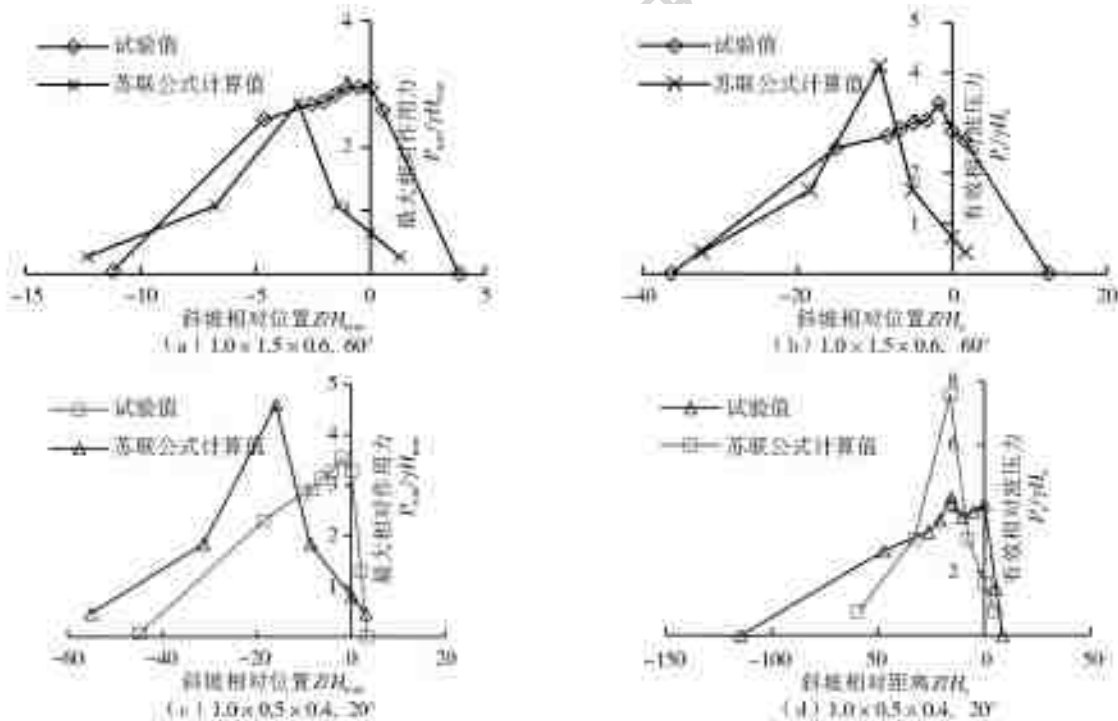


图 9 试验与经验公式相对波压分布对比

Fig. 9 Contrast diagrams of the relative wave pressure distribution between test and empirical formulas

4 结论

本文结合概化模型试验对滑坡涌浪下斜坡作用力进行了研究,对比分析了常用规则波斜坡作用力经验公式结果的差异,得出了如下成果。

(1)路规公式得出的斜坡波压力与试验值相差不大;波浪作用点的位置与波浪形态密切相关,向金

公式得出的波浪破碎点位置与试验值最为接近;苏联公式得出分布曲线可反映滑坡涌浪下斜坡上波压力的变化趋势,但不能较为准确地反应其变化程度。

(2)路规公式经修正后可用于预测滑坡涌浪下斜坡波压力大小;向金公式修正后可用于预测滑坡涌浪破碎作用点位置。修正公式适合库区或类似环境下岩质滑坡涌浪,在有效水深,大波坦情况下,滑

坡入水点正对岸,光滑斜坡上波浪作用力的估算,但因试验中涉及到的因素不够完善,修正公式具有一定的局限性,需进一步深入研究。

参考文献(References):

- [1] 潘宝雄.“波浪对斜坡堤作用”的现场调查研究[J].重庆交通学院学报,1986(3):68-99.(PAN B X. Field investigation of wave action for rubble-mound breakwater[J]. Journal of Chongqing Jiaotong Institute, 1986(3):68-99. (in Chinese))
- [2] BLACKMORE P A, HEWSON P J. Experiments on full-scale wave impact pressures[J]. Coastal Engineering, 1984, 8: 331-346.
- [3] DE CARVALHO R F, ANTUNES DO CARMO J S, PESTANA A. Waves caused by landslides into reservoirs and their impacts on dams[M]. Hydraulic Structures: a Challenge to Engineers and Researchers, Brisbane, Australia: The University of Queensland, 2006, 125-134.
- [4] DE CARVALHO R F, ANTUNES DO CARMO J S. Numerical and experimental modelling of the generation and propagation of waves caused by landslides into reservoirs and their effects on dams[M]. River Flow 2006, BALKEMA, 2006, 483-492.
- [5] DE CARVALHO R F, ANTUNES DO CARMO J S. Landslides into reservoirs and their impacts on banks [J]. Environmental Fluid Mechanics, 2007, 7(6): 481-493.
- [6] 冯卫兵,张惠,郝青玲.斜坡面波浪冲击力试验研究及现场资料分析[J].海洋工程,2012(4):97-102.(FENG W B, ZHANG H, HAO Q L. Experimental study of wave impact pressure on the protection slab of uniform slope and field data analysis[J]. The Ocean Engineering, 2012(4):97-102. (in Chinese)) DOI:10.16483/j.issn.1005-9865.2012.04.007.
- [7] 冯卫兵,崔磊,仲南艳,等.斜坡堤护面板上最大波压力研究[J].水运工程,2013(1):12-15.(FENG W B, CUI L, ZHONG N Y et al. On peak wave impact pressure on protection slab of uniform slope[J]. Port & Waterway Engineering, 2013(1):12-15. (in Chinese)) DOI:10.16233/j.cnki.issn1002-4972.2013.01.004.
- [8] 潘少华译.波浪、冰凌和船舶对水工建筑物的荷载作用.苏联规范(СНИП II)[M].北京:海洋出版社,1986.(PAN S H translation, Waves, ice and ships on hydraulic structures load effect. Soviet norms(СНИП II)[M]. Beijing: Ocean Press, 1986. (in Chinese))
- [9] 铁道部第一勘测设计院.铁路工程设计技术手册[路基][M].北京:中国铁道出版社,1992.(First Survey Design Institute China Railways. Railway engineering technical manual[Subgrade][M]. Beijing: China Railway Publishing House, 1992. (in Chinese))
- [10] 黄碧珊.板护面的斜坡上波浪打击压力特性的研究[J].重庆交通学院学报.1991(2):84-93.(HUANG B S. Study on impulsive pressure of wave on water-proof slope surface[J]. Journal of Chongqing Jiaotong Institute. 1991(2):84-93. (in Chinese))
- [11] 蒋宗燕,潘宝雄,黄碧珊.斜坡护面上波浪打击压力的试验研究[J].港口工程,1998(1):22-27.(JIANG Z Y, PAN B X, HUANG B S. Experimental investigation on impacting pressure of waves on slope pavement[J]. Port engineering. 1998(1):22-27. (in Chinese))
- [12] 徐绩青.波浪对斜坡作用力的研究[D].重庆:重庆交通学院,2005.(XU J Q. Study on the wave force on the slope[D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2005. (in Chinese))
- [13] 张惠,杨尧.规则波对斜坡堤护面板冲击波压力公式比较[EB/OL].北京:中国科技论文在线[2010-04-07].http://www.paper.edu.cn/releasepaper/content/201004-253.(ZHANG H, YANG Y. Comparison of computation formular for wave impact pressure on the protection slab[EB/OL]. Beijing: Chinese Scientific Papers Online [2010-04-07]. http://www.paper.edu.cn/releasepaper/content/201004-253. (in Chinese))
- [14] 王鉴义,章家昌,周家宝,等.不规则波对平板护面单坡堤的波压力试验研究[J].海洋工程,1996(4):23-30.(WANG J Y, ZHANG J C, ZHOU J B et al. Experimental investigation of irregular wave pressure on single slope dykes[J]. The Ocean Engineering, 1996(4):23-30. (in Chinese))
- [15] 许光祥.平面斜坡小波高各向破波压力试验研究[J].水动力学研究与进展 A 辑,2007(1):129-134.(XU G X. Experiment study on multidirectional breaking wave pressure of small wave on bank slope[J]. Journal of Hydrodyn Amics Series A, 2007(1):129-134. (in Chinese)) DOI:10.16076/j.cnki.cjhd.2007.01.018.
- [16] 李建习.风浪作用下库岸动力响应及稳定分析[D].长沙:长沙理工大学,2008.(LI J X. The wind wave-induced dynamic response in bank of reservoir and its analysis on stability[D]. Changsha: Changsha University of Science & Technology, 2008. (in Chinese))
- [17] 陈里.山区河道型水库岩体滑坡涌浪特性及对航道的影晌试验研究[D].重庆:重庆交通大学,2014.(CHEN L. Experimental study on characteristics of rock-type landslide surge and impact for navigable conditions of the river-channel type reservoir in mountainous area[D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2014. (in Chinese))

(下转第 192 页)

- 社, 2011. (GUAN X F. Modern pump theory and design[M]. China Aerospace Publishing House, 2011. (in Chinese))
- [9] 泵站设计规范. GB 50265-2010[S]. (Pump station design specification. GB 50265-2010[S]. (in Chinese))
- [10] 刘超, 周庆连, 钱均, 等. 双向流道立轴潜水泵系统流动特性研究[J]. 农业机械学报, 2016, 47(10): 59-65. (LIU C, ZHOU Q L, QIAN J, et al. Flow characteristics of two-way passage vertical submersible pump system[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(10): 59-65. (in Chinese)) DOI: 10. 6041 / j. issn. 1000-1298. 2016. 10. 008
- [11] 杨帆, 谢传流, 刘超, 等. 轴流泵装置运行工况对肘形进水水道水力性能的影响[J]. 农业机械学报, 2016, (2): 15-21. (YANG F, XIE C L, LIU C, et al. Influence of axial-flow pumping system operating conditions on hydraulic performance of elbow inlet conduit [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016(2): 15-21. (in Chinese)) DOI: 10. 6041/j. issn. 1000-1298. 2016. 02. 002.
- [12] 汤方平, 袁家博, 周济人. 轴流泵站进出水流道水力损失的试验研究[J]. 排灌机械工程学报, 1995(3): 13-14. (TANG F P, YUAN J B, ZHOU J R. Experimental study on hydraulic loss of inlet and outflow channels of axial flow pumping station[J]. Drainage and Irrigation Machinery, 1995(3): 13-14. (in Chinese))
- [13] 刘超. 南水北调低扬程水泵装置水力性能考核指标探讨[J]. 排灌机械工程学报, 2003, 21(6): 2-5. (LIU C. Discussion on the evaluation index of hydraulic performance of low lift pump unit in South-to-North Water Transfer Project[J]. Drainage and Irrigation Machinery, 2003, 21(6): 2-5. (in Chinese))
- [14] 陆林广, 冷豫, 吴开平, 等. 泵站进水水道内部流态模型试验方法研究[J]. 排灌机械工程学报, 2005, 23(3): 17-19. (LU L G, LENG Y, WU K P, et al. Study on method for model test of flow pattern in suction box of pumping station[J]. Drainage and Irrigation Machinery, 2005, 23(3): 17-19. (in Chinese))
- [15] 陈松山, 王林锁, 陆伟刚, 等. 大型轴流泵站双向流道设计及泵装置特性试验[J]. 江苏大学学报(自然科学版), 2001, 22(3): 45-49. (CHEN S S, WANG L S, LU W G, et al. Design of reversible passage in large axial pumping stations and experimental research on the characteristics of pump sets[J]. Journal of Jiangsu University of Science and Technology, 2001, 22(3): 45-49. (in Chinese))

.....

(上接第 163 页)

- [18] 俞聿修. 随机波浪及其工程应用[M]. 大连: 大连理工大学出版社, 2011. (YU Y X. Random wave and its applications to engineering[M]. Dalian: Dalian University of Technology Press, 2011. (in Chinese))
- [19] 钟瑚穗. 斜面坡度对波浪最大压力的影响[J]. 华东水利学院学报, 1985(1): 142-154. (ZHONG H S. The effect of slope on the maximum wave pressure[J]. Journal of East China Institute of Water Conservancy, 1985(1): 142-154. (in Chinese))