



不规则波作用下波浪爬高计算方法

陈国平¹, 王 铮¹, 袁文喜², 陈 佳¹

(1. 河海大学交通学院 海岸灾害与防护教育部重点实验室, 江苏南京 210098;

2. 浙江省水利水电勘察设计研究院, 浙江杭州 310002)

摘要: 通过物理模型试验, 研究了不规则波作用下光滑不透水单坡和复坡上的波浪爬高, 分析了主要影响因素波陡、坡度、波浪入射角、平台宽度和高程对波浪爬高的影响规律, 得到了海堤结构波浪爬高的计算公式及其不同累积率换算关系, 并提出了多级平台海堤断面波浪爬高计算方法, 适用于复杂海堤断面的爬高计算, 与40多个实际工程的模型试验结果对比, 具有较好的计算精度, 可供工程设计参考。

关键词: 波浪爬高; 斜向波; 复坡

中图分类号: TV 139.275

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972 (2013) S1-0151-09

Calculation of wave run-up under the irregular wave action

CHEN Guo-ping¹, WANG Zheng¹, YUAN Wen-xi², CHEN Jia¹

(1. Key Laboratory of Department of Education for Coastal Disaster and Protection, Traffic College, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. Water Resources and Hydropower Design and Research Institute, Hangzhou 310002, China)

Abstract: Based on the physical model experiment, this paper studies the wave run-up of the single sloping and composite sloping seawall under the irregular wave action, analyzes the influence of main factors such as wave steepness, slope, wave incident angle, as well as the width and elevation of the platform on the wave run-up, and obtains the calculation formula for the wave run-up of multi-platform seawall and accumulative frequency function. Comparing with the results of more than forty model experiments, this method has a better calculation accuracy, thus may serve as a reference for the engineering design.

Key words: wave run-up; oblique wave; multi-slope

波浪行进堤岸时, 水体沿堤坡斜面上爬高程与静水高程之差称为波浪爬高。在海塘、防波堤以及护岸工程设计中均由波浪爬高来确定堤顶高程, 它直接影响着工程的安全和造价, 因此研究波浪的爬高具有重要的实用价值。从20世纪30年代开始研究波浪爬高问题以来, 国内外对爬高的试验研究非常多, 相应计算爬高的公式不下数十种^[1-8]。目前我国常用的爬高计算公式有: 《海港水文规范》^[1]、《堤防工程技术规范》^[2]、《浙江省海塘工程技术规定》^[3], 欧美国家采用荷兰学

者J.W. van der meer^[4]的方法。由于海堤结构的多样性, 波浪与建筑物相互作用过程十分复杂, 因此, 现有计算方法存在着诸多不足, 提供的经验公式使用条件比较局限, 各家公式计算结果差异较大, 其计算值与实际值偏差甚远, 造成了海堤堤顶高程设计较大偏差。因此, 进一步研究单坡上不规则波浪爬高仍是十分必要的。

1 仪器设备与试验方法

正向波试验在河海大学的不规则波浪水槽中

收稿日期: 2011-03-30

作者简介: 陈国平(1965—), 男, 硕士, 教授, 主要从事港口海岸及近海工程的研究。

进行,水槽长80 m,宽1.0 m,高1.5 m,有效试验段宽0.5 m。有效试验段用以铺设断面,另外部分用以减少二次反射。水槽一端安装了推板式不规则生波机。斜向波试验在波浪港池中进行,港池长45 m,宽30 m,高1.2 m。港池的两端设置消浪缓坡,两侧设置直立式消波网格,以消除波浪二次反射影响,港池一端为多向不规则造波机。试验采用的不规则波浪谱为JONSWAP谱,波浪爬高数据采用电容式爬高仪量测,最大量程150 cm,量测信号均通过计算机采集、记录和分析,采样时间间隔为0.05 s。试验断面堤心采用砂石铺设,堤面采用光滑水泥板。

2 单坡上波浪爬高

试验参数与组合:堤前水深 d 为40, 50, 60 cm,有效波高 H_s 为5, 8, 10, 12, 16, 20 cm,平均波周期 T 为1.0, 1.5, 2.0, 2.5, 3.0, 3.5 s,坡度 m 分别取0.4, 1.0, 1.5, 2.0, 2.5, 3.0, 4.0, 5.0, 6.0。总计试验组次约700组。

波浪爬高是波浪动力条件和海堤结构形式综合作用的反映,所以本文主要研究水深、波坦和坡度对不规则波爬高的影响。由于不规则波浪的随机性,本文采用爬高的统计特征值进行分析。用 $R_0=R_{1\%}/H_{1\%}$ 来表示波浪的相对爬高,波坦采用 $L/H_{1\%}$ (其中 L 为堤前平均波长),坡度由 $m=\cot\alpha$ (α 为斜坡坡角)表示。

2.1 坡度对不规则波爬高的影响

图1为不同波周期时坡度对相对爬高的影响规律,从图中可以看出, R_0-m 曲线为一单峰曲线,爬高随坡度先增大后减小。曲线反映了不同波浪形态下的波浪爬高规律。

当直墙逐渐地向陡坡变化时,来波完全反射,基本不发生破碎,波浪在堤前由完全立波变为不完全立波,坡度变缓后,波浪反射程度有所减小,有较多的波能转化为势能,故爬高起初增加较快。随着坡度的变缓,到某个坡度时,来波在堤前出现轻微的破碎,这时来波峰前的少量破碎还没有影响到来波波峰部分,爬高仍在增加,

但增加速度稍微变慢,直至达到最大值。

随着 m 逐渐增加,回流的作用逐渐强烈起来,破碎程度逐渐扩大,来波波态为破碎立波,反射程度继续减弱,而破碎不断加剧,破碎损耗能量的增加值大于反射能量的减少值,所以爬高开始缓慢减小。

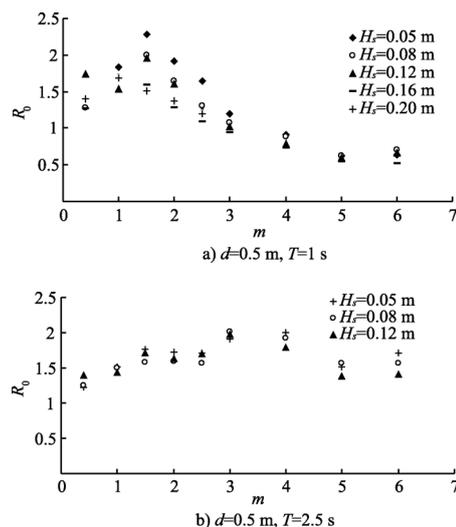


图1 不同波周期 R_0 随坡度 m 变化趋势

当 m 继续增加,来波发展成为整体破碎,此时波浪为卷破波态,波浪破碎消耗了大部分的波能,同时由于斜坡变缓使得水流在斜坡上爬升的距离增大,沿程的摩阻作用和上爬水流的紊动损失都增加,故爬高加速降低。爬高开始加速下降。

当 m 增加到一定值时,只是沿程摩阻作用继续增大,波浪破碎引起的波能消耗趋于平衡。因此,爬高下降趋势变缓。

从图中可以看出,坡度较陡($m < 1.5$)时,不同周期情况下的 R_0-m 变化规律基本一致,相对爬高随坡度增大较明显。坡度 $m > 1.5$ 后,当周期较小($T=1$ s和2 s)时,相对爬高随坡度逐渐减小,当周期较大($T=2.5 \sim 3.5$ s)时,相对爬高减小相对缓慢。

2.2 波坦对不规则波爬高的影响

图2为坡度较陡时的 $R_0-L/H_{1\%}$ 关系曲线。从图中可以看出,当坡度 $m=0.4$ 和 $m=1$ 时, R_0 基本不随 $L/H_{1\%}$ 变化。这主要是因为坡度较陡时,波浪完

全反射, 基本不发生破碎, 爬高的大小主要是反射波高与入射波高的叠加, 而波坦对反射波高大小的影响较小, 故坡坦对爬高影响亦较小。按照 Miche 破波理论计算, 当 $m < 1.25$ 时, 波浪不发生破碎, 直接转化为波浪势能的波能较少, 波浪爬高主要是反射波与入射波叠加的结果, 爬高的计算可忽略波陡的影响, 而只由坡度确定。

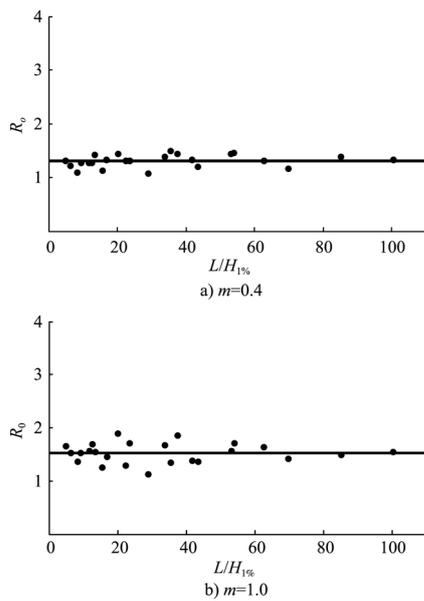


图2 R_0 随 $L/H_{1\%}$ 变化趋势

图3为坡度较缓情况下实测数据点绘的 $R_0 \sim L/H_{1\%}$ 关系曲线。由图可知, 当坡度 $m > 1.5$ 时, R_0 随着波坦由小到大变化, 波坦较小时, R_0 随 $L/H_{1\%}$ 增大较快, 当波坦增大到某个值以后, R_0 随 $L/H_{1\%}$ 缓慢增大, 而且拐点的位置随着坡度的变缓而增大。这是由于当坡度变缓, 波坦较小时, 波浪在斜面上完全破碎, 破碎的剧烈程度随波坦的增大而迅速变小, 所以水体因破碎而损耗的能量也随之减少, 波浪爬高也就随之迅速增大; 而当波坦增大到某个值以后, 波浪系列中只有部分波浪发生破碎, 水体的紊动损耗减少, 但是波浪反射逐渐加剧, 反射波能逐渐增大, 所以转化为波浪爬高的能量缓慢增加, 故爬高呈缓慢增大趋势。而且坡度越缓, 波浪破碎的极限波陡越小, 也就是极限波坦越大, 故爬高变缓的拐点位置也就越大。

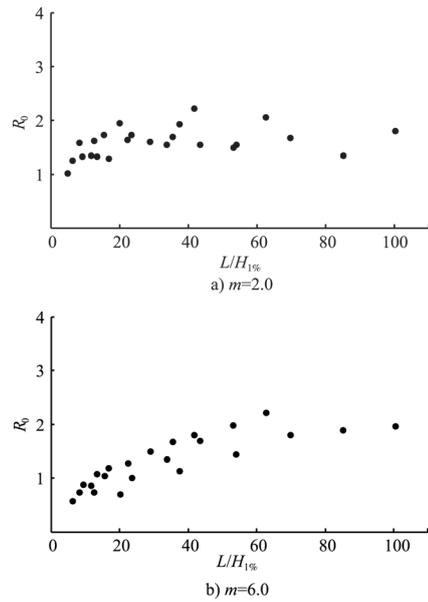


图3 R_0 随 $L/H_{1\%}$ 变化趋势

试验中可以发现, 当坡度 $m \geq 1.5$ 时, 随着波坦从小到大依次变化, 堤前的波浪形态都经历了卷波——破碎立波的变化过程。

2.3 破波参数与爬高的关系

Irribarren 与 Nigolas^[5] 考虑了入射波高、波长、边坡坡度的综合影响, 引入一个综合系数 $\zeta_0 = \frac{1}{m \sqrt{H_0 / (\frac{gT^2}{2\pi})}}$ 反映波浪的破碎形态。这个数

后来被广泛引用并定义为 Irribarren 数, 也称为破波参数。由于破波参数包含了坡度与波陡这两个影响爬高的最主要的因素, 故国内外许多学者都采用破波参数来确定波浪爬高曲线。

本文认为, 当坡度大于 1.5 时, 爬高主要受波浪反射和波浪破碎的共同影响。结合了坡度与波陡两方面因素的破波参数, 能够很好地反映波浪反射和破碎的变化规律, 对于坡度大于 1.5 的情况, 本文选用破波参数 $\zeta_{1\%} = \frac{1}{n} \sqrt{L/H_{1\%}}$ 来描述波浪爬高。本文实测的相对爬高 R_0 与破波参数 $\zeta_{1\%}$ 的关系如图 4 所示。

从图 4 可看出, 当波浪破碎参数 $\zeta_{1\%} \leq 1.25$ 时, 相对爬高随破波参数线性增大, 爬高可表示为:

$$R_0 = K_0 \zeta_{1\%} \quad (1)$$

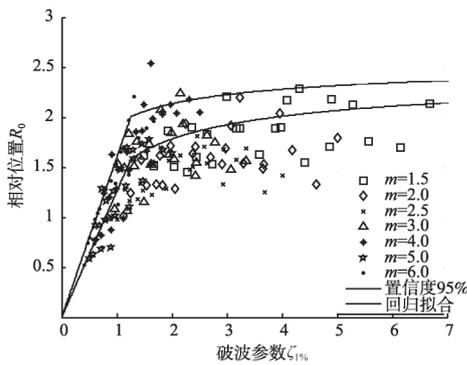


图4 破波参数与相对爬高的关系

当 $\zeta_{1\%} > 1.25$ 时，相对爬高随破波参数呈缓慢增大趋势。

这是由于当 $\zeta_{1\%} \leq 1.25$ 时，波浪在斜坡上基本上为卷波波态，即波浪完全破碎，波浪反射较少，爬高与破波参数之间存在着较好的线性关系；当 $\zeta_{1\%} > 1.25$ 时，受波浪破碎与波浪反射的共同影响，波浪在斜坡上为破碎立波波态，也就是激破波波态，爬高与破波参数之间是一种非线性的缓慢变化关系。

2.4 单坡不规则波爬高计算

本试验未考虑海堤外形、护面糙度以及风速的影响，在此情况下，影响波浪爬高的因素主要有波高、波周期以及坡度。因此，由 π 定理，单坡不规则波的相对爬高可表示为：

$$R/H = f(L/H, m) \quad (2)$$

如上节所述，从相对爬高与坡度的关系可以看出，当坡度 $m < 1.25$ 时， $R_0 = R_{1\%}/H_{1\%}$ 基本不随 $L/H_{1\%}$ 变化，故此时可以忽略波坦的影响。在直墙($m=0$)情况下，波浪爬高即为波高，考虑到波浪增水的影响，当 $m=0$ 时 R_0 的值取为1.24。出于实际工程中的安全考虑，得到置信度为95%，将实测数据及边界点按最小二乘回归方法拟合，得到置信度为95%计算公式：

当 $m < 1.25$ 时，爬高可用如下公式表示：

$$R_0 = 1.34\sqrt{m^2 + 1} \quad m < 1.25 \quad (3)$$

坡度 $m > 1.5$ 后，当波浪破碎参数 $\zeta_{1\%} \leq 1.25$ 时，相对爬高随破波参数线性增大，当 $\zeta_{1\%} > 1.25$ 时，相对爬高随破波参数呈缓慢增大趋势。

$$R_0 = 1.6\zeta_{1\%} \quad \zeta_{1\%} < 1.25 \quad m > 1.5 \quad (4)$$

$$R_0 = 2.63 - 0.7 \times \frac{1}{\sqrt{\zeta_{1\%}}} \quad m > 1.5 \quad (5)$$

当 $1.25 < m < 1.5$ 时：由 $m=1.25$ 和 $m=1.5$ 的计算值按内插法确定。

图5为波浪相对爬高 R_0 回归拟合计算值与试验值的对比图，从图中可以看出，本文的计算值与试验值的误差基本都在20%以内，二者具有较好的相关性，本文拟合公式具有较好的精度。

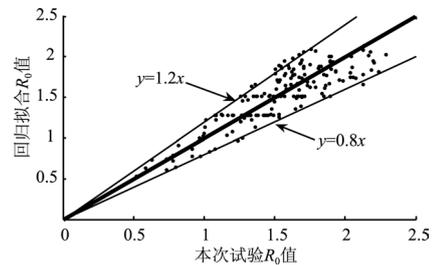


图5 相对爬高 R_0 计算值与试验值对比

2.5 不规则波爬高统计分布

由于天然海浪的随机性，它在堤坡上的爬高也是大小不等的随机系列，为了表征海面上的不规则波浪的爬高，通常采用它的统计特征值。大量研究成果表明，波浪爬高符合韦伯（Weibull）分布。

运用K-S法对韦伯分布和瑞利分布进行了检验，通过率95%。图6为试验中的一组分别按韦伯分布和瑞利分布优化的超值累积概率曲线和相应的实测数据点。可以看出，实测点较好地满足韦伯分布。

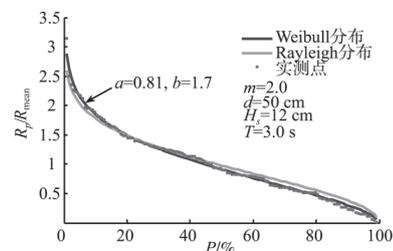


图6 爬高分布曲线

根据韦伯分布计算所有组次的分布参数，求其均值，计算得到不同累积率的爬高换算系数如表1所示。

表1 波浪爬高累积频率换算系数

$P/\%$	0.1	1	2	3	4	5	10	13	50
$R_p/R_{1\%}$	1.21	1.00	0.93	0.88	0.85	0.82	0.73	0.69	0.42

3 斜向波作用下单坡上波浪爬高

试验参数与组合: 堤前水深 d 为 40, 50 cm, 有效波高 H_s 为 6, 8, 12 cm, 平均波周期 T 为 1.0, 1.5, 2.0 s, 坡度 m 分别取 0, 1.5, 3.0, 入射角度 $\beta=0^\circ, 10^\circ, 20^\circ, 30^\circ, 40^\circ, 50^\circ, 60^\circ, 70^\circ, 80^\circ$ 。试验段海堤长 18 m, 设置在离造波机 35 m 处, 试验段中部布置 3 台爬高仪, 间隔为 1 m, 取 3 个波高仪测量值的平均值作为试验数据进行处理。总计试验组次约 250 组。

3.1 波浪入射角度对波浪爬高的影响

波浪的入射角度 β 如图 7 所示, β 为波浪斜向作用于建筑物时波峰线与防波堤法线的交角。当正向波作用于建筑物时, 即 $\beta=0$ 的情况。

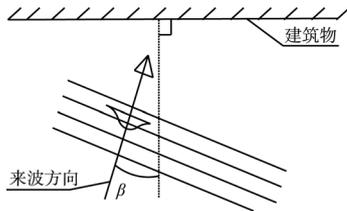


图7 波浪入射角定义

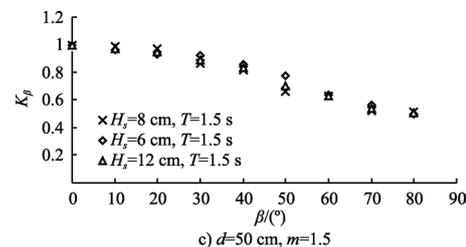
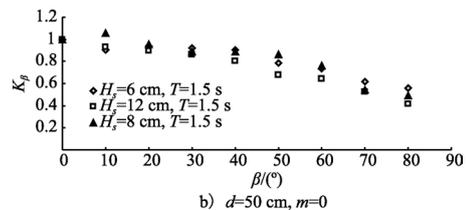
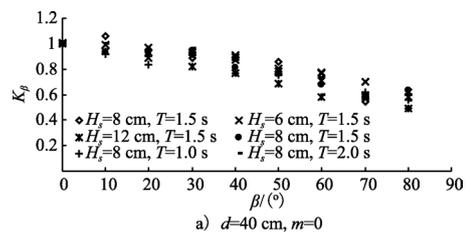
不规则波的波浪爬高可用累积频率为 1% 的爬高值 $R_{u1\%}$ 来表征。即入射波在建筑物表面上爬超过静水面的垂直距离即波浪的爬高, 如爬高值中大于等于某一爬高值的出现频率为 1%, 则该爬高就是 $R_{u1\%}$, 具有统计意义。因此, 有关波浪入射角对波浪爬高的影响, 本文用 K_β 来表示因入射角度的变化而引起波浪爬高的折减系数。

$$K_\beta = \frac{(R_{u1\%})_\beta}{(R_{u1\%})_0} \quad (6)$$

图 8 为波浪入射角度与折减系数 K_β 的变化关系, 试验结果表明, 当 $\beta < 30^\circ$, 波浪发生规则反射, 即反射角等于入射角, 波浪入射角对爬高影响很小, 反射能量减少不多的同时, 压能变化基本上不大, 所以转化为波浪上爬的势能也变化不大, 波浪爬高减小程度很小, 折减系数 K_β 在 0.9 左右, 但随着 β 值的增加, 将产生类似于声学中所

谓“马赫 (Mach) 反射”的现象, 此时除入射波和反射波外, 在墙前还出现波峰线与墙轴线相垂直的马赫干涉波, 马赫干涉波的波高大于入射波高, 反射波的波高则小于入射波高, 波浪爬高随着 β 值的变大而明显减小, 到了 $\beta=60^\circ$ 时, 爬高折减系数降至 0.60 左右, 达到了一个临界值, 当 $\beta > 60^\circ$, 入射波的波峰线在墙前转折为与墙轴线相垂直的马赫干涉波, 而不产生反射波, 波浪爬高随波浪入射角度变化的折减系数变化不大, 趋于平缓。

波浪在与建筑物相互作用的过程中, 波浪的能量中其中一部分被反射波带走, 另一部分被底摩阻所消耗, 还有一部分产生爬高转化为势能。波浪能量正比于速度的平方, 而速度是一个矢量, 因此可以将它分解为与建筑物平行与垂直两部分。平行部分与建筑物相切, 而与这部分速度相关的能量不发生传递; 对于垂直部分的来波, 可看成正向来波处理, 显而易见: 当波浪斜向传播至建筑物堤脚时将发生相互作用的那部分能量随角度的变大而减小。另外, 当波浪斜向入射, 波浪要上爬到同一高度, 所经过的距离变长了, 沿程的波浪紊动能能量损耗也变多, 所以波浪上爬的波浪爬高也就随着入射角度 β 的增大而减小。



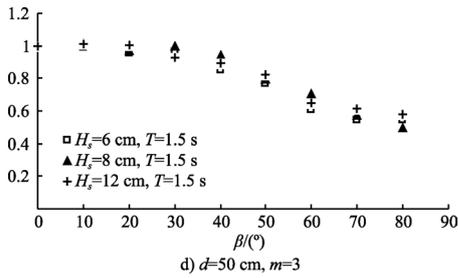


图8 波浪入射角度与折减系数 K_β 的变化关系

试验结果表明，斜坡堤坡度 m 对波浪爬高入射角的折减系数 K_β 的影响很小，波陡对波浪入射角度的折减系数 K_β 有一定影响，随着波陡 H_s/L_p 变大，折减系数有减小趋势，但变化很小。

3.2 波浪入射角度对爬高影响折减系数计算

根据上述分析可知，爬高折减系数与波浪入射角密切相关，波浪要素、堤坡深度和水深对折减系数影响很小，因此，爬高折减系数仅考虑波浪入射角的影响，将实测数据最小二乘回归方法拟合，得到如下表达式：

$$K_\beta = \cos^{0.5}\beta, \quad K_\beta \geq 0.6 \quad (7)$$

图9为本文公式与试验数据及其他公式的比较，可以看出，本文公式与J.W.van der meer计算结果基本相同，与试验数据吻合良好，合田良实公式在波陡较大时偏差较大。

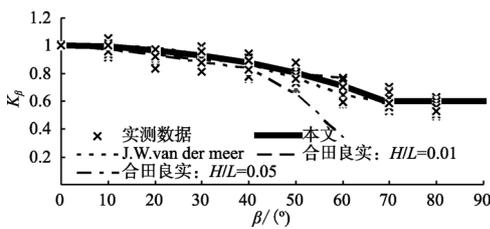


图9 爬高折减系数计算公式比较

4 复坡上波浪爬高

试验参数及组合：有效波高 H_s 为10, 12.5, 15 cm；平均周期 T 为1.2, 1.7, 2.0 s；平台相对宽度： $B/H_s=1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12$ ；平台相对高程： $d_b/H_s=-2.0, -1.5, -1.0, -0.5, -0.25, 0, 0.25, 0.5, 1.0, 1.5, 2.0$ ；坡度 m 为0, 0.4, 1.0, 1.5, 2.5, 3, 4, 6；堤前水深 D 为45 cm。共计600组试验。

平台对波浪爬高的影响通常采用假想坡度法

或折减系数法表示，本文采用折减系数法 K_b 表示平台对波浪爬高的影响， $K_b=R_{u2\%}/R_{02\%}$ 为复坡上波浪爬高与单坡上波浪爬高的比值。用 B 表示平台的宽度， d_b 表示平台上水深，当平台位于静水位以下时， d_b 为正（图10）。 d_b/H_s 来反映平台上的相对水深对爬高的影响， B/H_s 来反映平台相对宽度对爬高的影响。

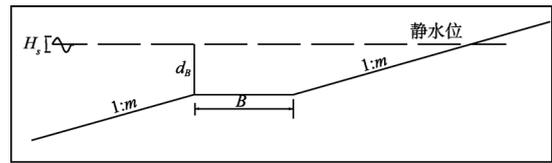


图10 复坡断面

4.1 平台上水深对波浪爬高的影响

图11为波浪爬高折减系数与平台上水深的关系。由图可以看出，平台上水深对波浪爬高有较大影响。当平台上相对水深 $-0.5 < d_b/H_s < 0.5$ 时，平台的消浪效果较好，最大可减小60%左右，因为波浪的强作用区就在静水位上下半倍波高范围，受平台的影响，加剧了波浪的破碎，水体的剧烈紊动损耗大量能量，转化为势能能量迅速减少，波浪爬高明显减小。尤其在平台上相对水深为 $-0.5 < d_b/H_s < 0$ 时，平台的消浪效果最好，在此范围内，波浪爬高折减系数几乎为一水平线。

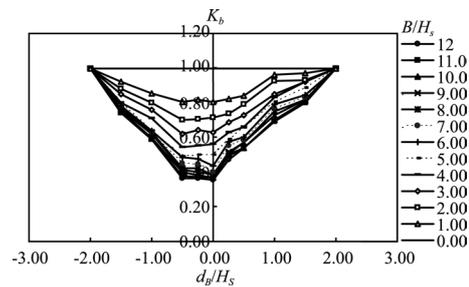


图11 爬高折减系数与平台上相对水深的关系

当平台上相对水深 $d_b/H_s > 0$ 时，随着平台上相对水深的增大，平台的消浪作用逐渐减弱，波浪爬高折减系数与相对水深接近线性递减关系，当 $d_b/H_s=2$ 时，波浪爬高接近单坡值，平台上相对水深进一步增加，平台对波浪的反射和破碎几乎没有影响。

当平台上相对水深 $d_b/H_s < 0.5$ 时，随着平台

上相对水深的增大, 平台的消浪作用逐渐减弱, 波浪爬高折减系数与相对水深也接近线性递减关系, 波浪爬高逐渐接近单坡值, 从理论上讲, 当平台位于波浪爬高最高点以上时, 平台对波浪爬高就没有影响, 但从试验中发现, 当 $d_B/H_S = -2$ 时, 平台对波浪爬高的影响就很小了, 几乎可以忽略。

4.2 平台宽度对爬高的影响

图12为平台上不同水深时, 波浪爬高折减系数与平台宽度的关系, 由图可以看出, 平台宽度对波浪爬高有较大影响, 当相对平台宽度 $0 < B/H_S < 4$ 时, 由于平台宽度的增加, 波浪在平台上的破碎程度加剧, 水体紊动损耗动能增大, 波浪爬行距离增长, 波浪爬高随平台宽度的增大而迅速减小。

当相对平台宽度 $B/H_S > 4$ 时, 随着平台宽度的增大, 波浪爬高的减小趋于平缓, 因为当平台宽度继续增大时, 波浪受平台影响破碎损耗的紊动能趋于饱和, 爬高的减小, 主要由底坡摩阻和相对爬行距离增加引起的。

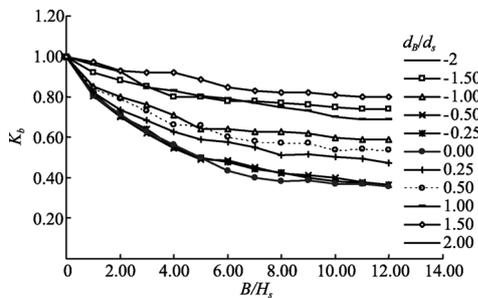


图12 爬高折减系数与平台宽度的关系

由图12可以看出, 当平台上相对水深不同时, 平台宽度对波浪爬高的影响也不同。当平台位于静水位附近时, 平台宽度对波浪爬高的影响最明显, 随着平台上相对水深的增大或减小, 波浪爬高折减系数的变化越平缓。

4.3 上下坡坡度对波浪爬高的影响

图13为波浪折减系数与坡度的关系, 由图可以看出, 堤坡坡度对波浪爬高的折减系数有一定的影响, 坡度越陡消浪作用越大, 这与波浪的破碎形态有关。

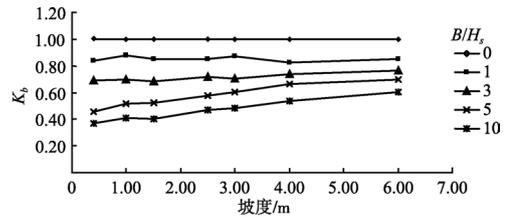


图13 爬高折减系数与坡度的关系

当坡度较陡时, 波浪作用在单坡上不发生破碎, 而当设置平台后, 波浪在堤坡上发生破碎, 降低波浪爬高的作用相对较明显; 当坡度较缓时, 波浪作用在单坡上也将发生破碎, 因此平台的消浪作用相对减弱。

4.4 波浪爬高折减系数

影响波浪爬高折减系数 K_b 的主要因素为平台上相对水深 d_B/H_S , 平台相对宽度 B/H_S 和堤坡坡度 m , 因此:

$$K_b = f(B/H_S, d_B/H_S, m) \quad (8)$$

假设当 $d_B/H_S = 0$ 时, K_{b0} 与平台宽度的关系有如下关系式:

$$K_{b0} = 1 - B/L_b \quad (9)$$

式中: L_b 为波浪在堤坡上强作用的综合宽度, 波浪在堤坡上的强作用区为静水位上下半倍波浪范围内, 因此假设

$$L_b = B + mH_S + B' \quad (10)$$

从波浪爬高折减系数与平台宽度的关系知道, 平台宽度大于4倍入射波高时, 波浪爬高折减系数 K_b 变化趋于平缓, 当 $d_B/H_S = 0$, $B/H_S = 4$, $m = 0$ 时, $K_{b0} = 0.6$, 即:

$$K_{b0} = 1 - B/L_b = 0.6 \quad (11)$$

因此 $B' = 6H_S$

当 $-0.5 \leq d_B/H_S \leq 0$ 时

$$K_b = K_{b0} = 1 - \frac{B}{B + mH_S + 6H_S} = 1 - \frac{B/H_S}{B/H_S + m + 6} \quad (12)$$

当 $0 < d_B/H_S < 2$ 时, K_b 随 d_B/H_S 为线性递减至1, 即

$$K_b = \frac{1 - K_{b0}}{2} \frac{d_B}{H_S} + K_{b0} \quad (13)$$

当 $d_B/H_S < -0.5$ 至最大爬高 $R_{2\%}$ 之间时, 折减系数 K_b 由 K_{b0} 线性递减至1, 即

$$K_b = \frac{1 - K_{b0}}{0.5 - R_{2\%}/H_S} \cdot \frac{d_B}{H_S} + \frac{1 - K_{b0}}{1 - 2R_{2\%}/H_S} \quad (14)$$

式中： $R_{2\%}$ 为波浪在单坡上的累积频率2%的爬高。当 $d_B/H_S < -R_{u2\%}/H_S$ 时

$$K_b = 1 \quad (15)$$

4.5 复式断面波浪爬高计算方法

首先计算该断面的折算坡度 m ，然后按坡度为 m 的单坡，即按照式(3)~(5)计算爬高

$$R_{u1\%} = KK_\beta K_V K_F K_b R_0 H_{1\%} \quad (16)$$

然后乘上平台折减系数 K_b 得出复式斜坡堤的波浪爬高。

折算坡度 m 按下列方法确定：

当 $m_{上} = m_{下}$ 时， $m = m_{上} = m_{下}$ ；当 $m_{上} \neq m_{下}$ 时，计算单坡波浪爬高时的 m 值按图14计算，即：作一条与上坡平行的线与平台前沿相交，在静水位以下一倍波高(H_S)处的下坡找一点，在静水位以上一倍波高(H_S)处的上坡平行线上找一点，连接两点的一坡度角，此角即为计算单坡波浪爬高的斜坡角 $m = \cot\alpha$ 。

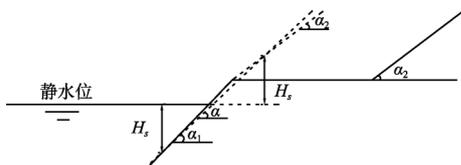


图14 折算坡度 m 计算

平台折减系数 K_b 按(12)~(15)式计算。

4.6 多级平台爬高计算

如图15断面为3级平台，平台宽度分别为 B_1, B_2, B_3 ，平台上水深分别为 d_{B1}, d_{B2}, d_{B3} ，坡度分别为 m_1, m_2, m_3, m_4 ，仍按图15的方法计算折算坡度 m ，然后按坡度为 m 的单坡计算爬高，平台折减系数按下法计算：

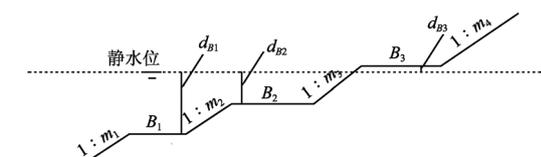


图15 多级平台断面示意

平台宽度取 $B = B_1 + B_2 + B_3$ ，按公式(12)~(15)分别计算出不同平台上水深 d_{B1}, d_{B2}, d_{B3} 时对应的折减系数 K_{b1}, K_{b2}, K_{b3} ，然后取三者的加权平均值作为多级平台的折减系数，即

$$K_b = \frac{B_1}{B_1 + B_2 + B_3} K_{b1} + \frac{B_2}{B_1 + B_2 + B_3} K_{b2} + \frac{B_3}{B_1 + B_2 + B_3} K_{b3} \quad (17)$$

5 实际工程试验值与计算值比较

图16为实际工程海堤断面波浪物理模型试验结果与本文方法计算结果比较，在比较中选择了40多个海堤断面结构，覆盖了国内常用的海堤结构形式，有宽平台、窄平台、双平台，有上下均为缓坡、上坡为陡墙下坡为缓坡的，有扭王字块、扭工字块、四脚空心方块、栅栏板、抛石、浆砌块石、灌砌块石护面，有直立式挡浪墙、反弧形挡浪墙等。本文计算方法确定的爬高值总体上略大于物理模型试验结果，大部分误差小于10%，具有较高的精度。

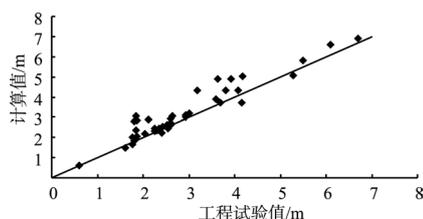


图16 波浪爬高工程试验值与本文计算值的对比

6 结论

1) 单坡上不规则波爬高与破波参数密切相关，坡度 m 大于1.5后，当波浪破碎参数 $\zeta \leq 1.25$ 时，相对爬高随破波参数线性增大，当 $\zeta_{1\%} > 1.25$ 时，相对爬高随破波参数呈缓慢增大趋势。

2) 斜向不规则波作用下波浪爬高可用折减系数表示，折减系数主要受波浪入射角的影响，波浪要素、堤坡坡度和水深对波浪爬高和越浪量折减系数影响很小。折减系数随波浪入射角增大而呈减小趋势，当 $\beta < 30^\circ$ 时，折减系数变化不大；当 $30^\circ < \beta < 60^\circ$ 时折减系数减小趋势较为明显；当 $\beta > 60^\circ$ 折减系数变化趋于平缓。

3) 复坡平台对波浪爬高具有较好的消减作用，平台位于净水面附近时，平台的消浪效果最好，随着平台上相对水深的增大或减小，平台的消浪作用也逐渐减弱，波浪爬高折减系数与相对水深接近线性递减关系，波浪爬高逐渐接近单坡值。

4) 平台宽度对波浪爬高也有较大影响，由于平台宽度的增加，波浪在平台上的破碎程度加

剧, 水体紊动损耗动能增大, 波浪爬行距离增长, 波浪爬高随平台宽度的增大而迅速减小, 当相对平台宽度 $B/H_s > 4$ 时, 随着平台宽度的增大, 波浪爬高的减小趋于平缓, 因为当平台宽度继续增大时, 波浪受平台影响破碎损耗的紊动能量趋于饱和, 爬高的减小, 主要由底坡摩阻和相对爬行距离增加引起的。

5) 堤坡坡度对波浪爬高的折减系数有一定的影响, 坡度越陡消浪作用越大, 这与波浪的破碎形态有关, 当坡度较陡时, 波浪作用在单坡上不发生破碎, 而当设置平台后, 波浪在堤坡上发生破碎, 降低波浪爬高的作用相对较明显; 当坡度较缓时, 波浪作用在单坡上也将发生破碎, 因此平台的消浪作用相对减弱。

6) 波浪爬高分布符合 Weibull 分布。

参考文献:

- [1] JTJ 213—1998 海港水文规范[S].
- [2] GB 50286—1998 堤防工程设计规范[S].
- [3] 浙江省海塘工程技术规定[S].
- [4] Van der Meer J W. Wave run-up and wave overtopping at dikes[R]. Delft Netherlands: J W Van der Meer, 2002.
- [5] Irribarren C R, Nogales C. Protection des ports, Sect. 2, Comm. 4[C]. Lisbon: 17th Int Nav Cong., 1949.
- [6] de Waal J P, van der Meer J W. Wave runup and overtopping on coastal structures[J]. Venice: Proc. Coastal Engineering Conference, 1992.
- [7] Chen guoping. Effect of berm width and elevation on irregular wave run up[J]. China ocean engineering, 1991, 5(4): 441-452.
- [8] Van der Meer J W, Janssen J P F M. Wave run-up and wave overtopping at dikes[J]. ASCE, 1995(1): 1-27.

(本文编辑 武亚庆)

《水运工程》优秀论文评选

评委点评:

波浪爬高是海岸防护工程的重要设计因素之一, 它直接影响其顶高程和结构断面形式。由于计算条件的限制, 现行规范中波浪爬高公式对某些工况的计算适应性不强, 与实际情况常有所偏差。

文章以此为论点, 采用模型试验和理论分析相结合的方法, 对影响波浪爬高的主要因素: 坡度、波坦度、破波参数、波向、岸坡戗台和断面形式进行了大量的波浪模型试验, 并对试验数据进行单因子对比分析, 结合波浪理论和已有的研究成果, 得出各因素和波浪爬高之间的变化趋势。作者采用数值分析总结其变化规律, 推导出综合各种因素的半经验公式。通过验证, 与实际工程的试验结果符合性良好。

文章选题前沿、逻辑清晰、内容全面翔实、图文并茂、论述充分准确、可信度高, 在一定程度上弥补了现行规范的缺陷, 对海岸工程的规划设计及科研有很好的指导意义。

丁七成

2012年12月

评委简介:

丁七成, 工程技术应用研究员, 山东省交通规划设计院副总工程师。

多年来从事沿海及内河港口、航道, 公路桥梁的设计工作, 主持参加了几十个工程项目的设计、研究, 获优秀工程设计奖、咨询成果奖5项, 交流及发表论文10余篇。