

浅水破碎波对直立圆柱作用力的试验研究*

李炎保

(天津大学水资源与港湾工程系, 300072)

提要 分析了桩柱破波力的构成特性, 认为破碎波与桩柱作用过程中在不完全绕流区将出现由于附连质量迅速变化引起的冲击力和柱前后波面高度差引起的附加压差力; 影响破碎波对直立圆柱作用力的因素应该包括确定破波特性的水底坡度 i 、入射深水波陡 H_0/L_0 及代表圆柱对破波作用影响的相对柱径 D/H_0 。通过从 $i = 1/100$ 到 $1/15$ 五种底坡上桩柱破波力的系统试验, 探索了桩柱破波力的作用特性, 归纳了计算桩柱破波力的经验公式。

关键词 破碎波 浅水破碎波 圆柱波浪力

破碎波对基桩、墩柱和其它透空结构的作用力是海岸和港口工程中尚待解决的问题。同进行波相比, 破碎波对桩柱的作用力显著加大, 成为结构安全度的主要控制因素, 引起工程界的关注。本文从分析破碎波对桩柱作用力的特点着手, 通过系统的试验, 寻求破碎波作用力与其影响参数的经验关系。

一、波浪的破碎形态及桩柱破波力的构成

波浪由深水向浅水传播, 由于水深减小、波能集中, 加之水底摩擦, 波形不断发生变化, 最后因波陡变大或前坡变陡甚至发生卷曲而破碎。波浪的破碎特性可以用破碎形态和破波指标来描述。破碎形态表示破碎过程中波面形状的变化特点, 破波指标包括破碎水深、波高、波峰在静水面以上高度等特征尺度。破碎形态和破波指标这些外部几何特征同破波流场和动力特性等内部特征密切相关, 决定了破碎波与建筑物的作用方式、作用力大小。已有的研究工作表明, 波浪破碎形态及破波指标主要由水底坡度 i 及入射深水波陡 H_0/L_0 确定。分析破碎波对直立圆柱的作用力, 可直接从 i 和 H_0/L_0 着手。

确定破碎波对直立圆柱的作用力, 应该分析其构成特性。根据波面与圆柱间的相对位置, 破碎波与圆柱的相互作用可分成两个区域: 在波谷以下, 柱体始终淹没于水中, 属于完全绕流, 这同非破碎波与圆柱的作用没有本质区别, 其所受波浪力包括速度力与惯性力两部分。波谷以上为不完全绕流区域, 由于波峰变陡, 破波波峰通过时圆柱将经历拍击接触—部分淹没—完全淹没—逐步脱离接触的过程; 这一区域内破波作用力从形成机理上可分为两种: 一是由于波峰通过时圆柱附连质量变化造成动量迅速变化引起的冲击力, 一是由于柱前、后波面高度差引起的附加压差力, 这两种作用力的大小除受到波浪特性影响外, 还与圆柱直径 D 大小有关, 且与 D 不成线性关系。本文旨在通过试验建立破波

* 国家自然科学基金资助, 918700303号。宋昶、赵耀南教授对本课题给予建议和帮助, 唐松龄、张兴无、陈妙福、李荣庆参加本课题工作, 特致谢忱。
接受日期: 1991年5月30日。

作用力与确定破波特性的参数 i , H_0/L_0 以及反映圆柱对这种作用的影响的无量纲参数 D/H_0 之间的关系。

二、破波作用力的试验

试验在长 30m, 宽 1m, 高 1.3m 的波浪水槽进行, 采用悬挂板式规则波造波机。水槽布置如图 1 所示。试验圆柱安装于测力悬臂末端, 利用悬臂上两组应变片的弯矩推算作用于圆柱的总力大小和作用点。试验在 1/15—1/100 五种不同底坡上进行, 五种底坡的试验条件变化范围如表 1。

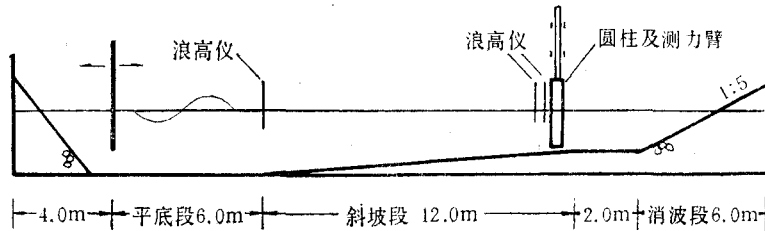


图 1 试验水槽布置

Fig. 1 Wave flume and location of experimental cylinder

表 1 试验条件变化范围

Tab. 1 Experimental conditions

底坡	试验圆柱柱径 (cm)		柱水深范围 (cm)	入射波陡变化范围	相对柱径变化范围	测力系统自振频率变化范围 (Hz)
	种数	变化范围				
1/15	4	3.73—14	8—20	0.005—0.095	0.27—1.4	19.6—39
1/20	3	7—14	10—25	0.046—0.112	0.37—1.97	15.4—42
1/33	5	3.2—14	15—20	0.012—0.088	0.28—1.47	6.8—17
1/50	8	2—14	10—25	0.0037—0.111	0.11—2.46	15.5—45
1/100	3	4.25—14	10—30	0.012—0.13	0.24—1.8	13.2—33

对试验现象的观测和结果的分析可发现破波作用力的下述特点。

1. 破波作用力的时间过程

破波作用力从柱前波面到达波谷底以前开始增长。随着波面增高, 即波浪通过圆柱的过程中, 波浪力迅速增大。波力的增长过程包括平缓增长和骤然增长两个阶段。平缓增长阶段波浪力增长速度即波力过程线的陡度随入射波陡变小而加大。波力骤然增长阶段时间过程很短, 是典型的冲击荷载。冲击力在破波作用总力中所占比例也与波陡密切相关。波陡小的卷破波可达总力的 50—60%, 而波陡较大的崩破波情况有时不足 15%。

2. 破波作用力的随机波动

作用在圆柱上的破波力具有明显的随机特征。规则原始波浪条件下得到的破波力是波动的。现有关于桩柱破波力的试验资料的分析都是以统计特征值来进行。本文的分析以 F_{\max} , $F_{1/3}$ 为特征值; F_{\max} 为同一试验条件下, 各次重复试验所得波力系列中最大值的平均; $F_{1/3}$ 为波力系列三分之一大值的平均。

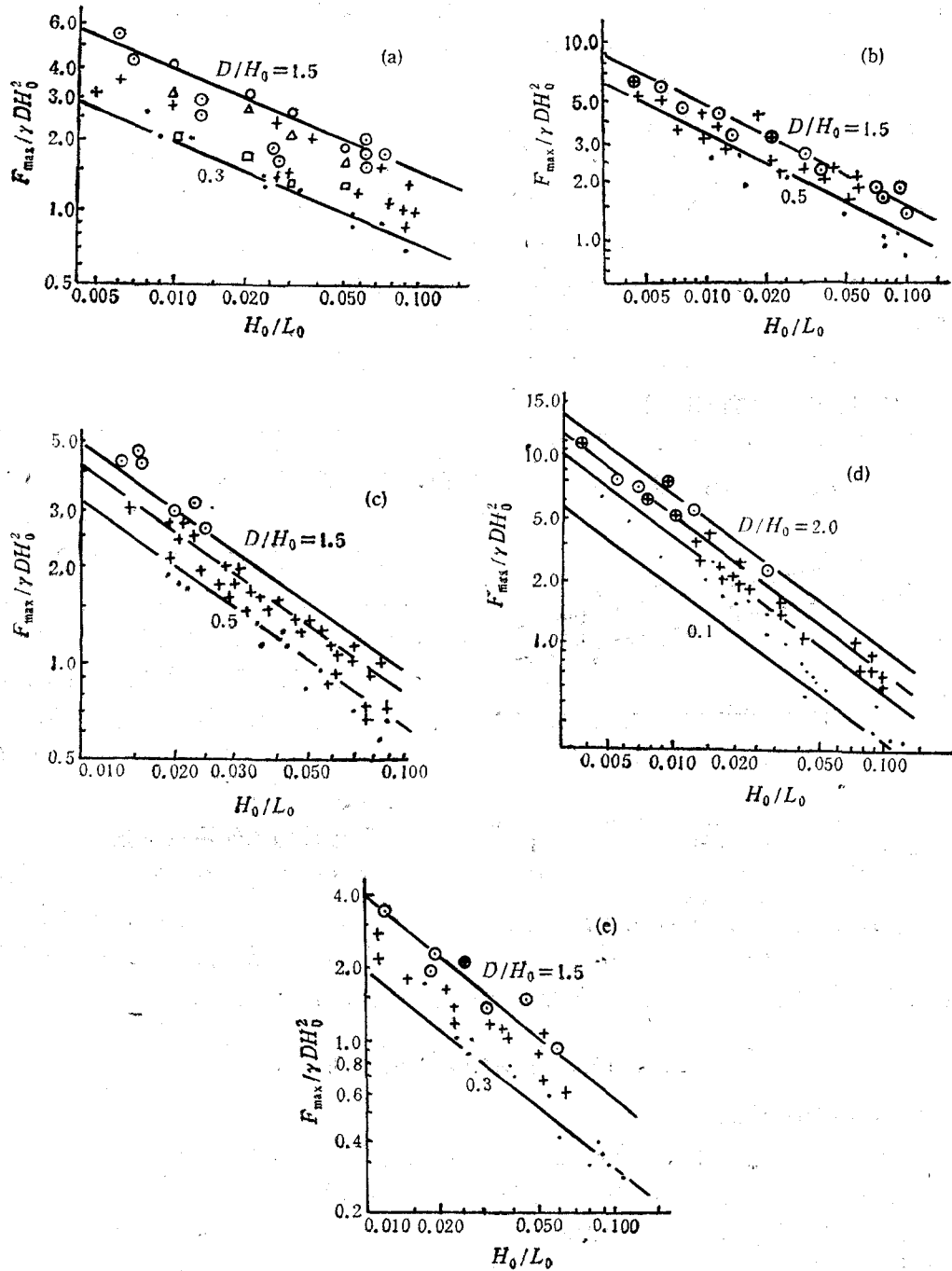


图2 破波力的试验结果

Fig. 2 Results of experiments of relative breaking wave forces

(a) $i = 1/15$; (b) $i = 1/20$; (c) $i = 1/33$; (d) $i = 1/50$; (e) $i = 1/100$.

\oplus \odot \triangle \square 本文试验结果, 分别代表: $D/H_0 \leq 0.5$, $0.5 < D/H_0 \leq 1.0$, $D/H_0 > 1.5$; \odot \triangle \square Apelt 试验结果, D/H_0 分别为 1.5, 1.0, 0.5; — 本文试验回归结果。

1/33 底坡试验时曾对破波力随机波动的原因进行探讨。用电影摄影逐波记录波浪

破碎位置、破碎波形,与同步记录的波力作分析对比。可以看到在同一试验条件下,同一试验波列中,虽然目测破碎点位置基本固定,但电影记录的每一波浪破碎位置、破碎波形并不固定,因而造成波浪力发生波动。

3. 最大波浪力出现的位置

破波力随破碎点相对于圆柱位置的变化而改变。试验中由目测控制破碎点位置,根据记录的波力确定最大波浪力出现的位置后再正式试验。在 1/50 底坡上曾就破波力随破碎点相对于圆柱位置变化而改变的规律进行分析试验,结果表明改变破碎位置所引起的波浪力变化十分明显,在波陡较小的情况,即卷破波下尤为突出。出现最大破波力的破碎点位置位于柱前,与柱中心距离为 0.5—5 倍破碎水深。这一距离因波陡加大而变小。该距离的变化反映了破碎形态的变化对破波力构成特性的影响。

4. 影响破波作用力的因素

为了比较破波力的大小,以 $F/\gamma DH_0^2$ 的形式将破波力无因次化,资料分析过程曾采用破碎波高 H_b 代替 H_0 作为无因次化基本量纲,但回归效果不理想。

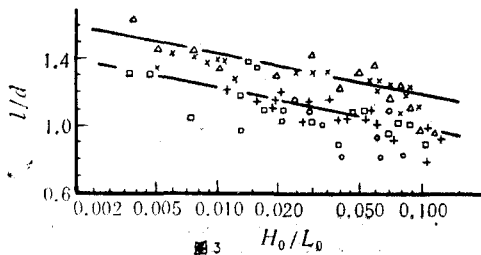


图3 破波力作用点在水底以上高度的试验结果
Fig. 3 Results of experiments of the height of breaking wave forces acting point from the bottom

×示 $i = 1/15$; Δ 示 $i = 1/20$; O 示 $i = 1/33$;
 \square 示 $i = 1/50$; $+$ 示 $i = 1/100$ 。

可清楚看到合力作用点离水底高度随底坡变陡,入射波陡变小而提高的变化趋势。

三、试验结果的分析和应用

1. 动力影响的修正

破碎波作用力包含冲击成分,为了正确反映破波力的大小,并对自振频率不同的各种测力系统所测结果进行比较,应对实验资料进行动力反应的修正。

结构的动力反应特性与结构和荷载的作用特性有关,本实验采用的测力装置可按单自由度系统处理。荷载作用特性取决于冲击力历时长短和变化过程。冲击力历时根据谷本^[2]的实测结果取 $\tau = 1/4(D/C_b)$,即波峰通过圆柱历时的 1/4。关于荷载过程的影响,根据结构动力计算结果,当自振频率 f 与荷载作用历时 τ 乘积较小时动力反应值与其关系不密切。笔者对上升时段不同的三角形荷载过程的动力反应系数计算结果表明,对于单自由度系统,在 $f \cdot \tau < 1.2$ 的条件下,动力反应系数仅与 $f \cdot \tau$ 有关,而不受荷载过程影响。本试验测力系统的动力反应特性在此条件范围内,据此对实测波力中冲击力部

图2为五种底坡上的试验结果,该图以 D/H_0 为参数给出 $F/\gamma DH_0^2$ 与 H_0/L_0 的关系。试验结果集中于一个向下倾斜的带状区域,清楚表明无因次破波力 $F/\gamma DH_0^2$ 随入射波陡 H_0/L_0 减小而加大。在带状区域内,同一入射波陡条件下无因次破波力随相对柱径 D/H_0 的加大而加大。

5. 破波力的作用点位置

图3为五种底坡上破波力作用点在水底以上高度 l 与柱水深 d 之比随波陡变化的试验结果。虽数据比较分散,但

分作了修正。

2. 试验结果的回归分析

图 2 表明,在双对数坐标下无因次破波力随 H_0/L_0 呈线性变化, D/H_0 也有类似的规律。根据这一特征,对试验资料进行双因素线性回归,可得到下式关系

$$F/\gamma DH_0^3 = A(H_0/L_0)^{B_1}(D/H_0)^{B_2} \quad (1)$$

中 A, B_1, B_2 三个参数。五种底坡上回归计算所得 R 值都在 0.9 以上,表明相关关系密切。 F_0 值满足接受式(1)所示关系假设检验的要求。五种底坡上 A, B_1 的变化规律相近,有随底坡变陡而增加的趋势, A 为式(1)右端的系数,它随底坡加大表示破波力随底坡变陡而增加。 B_1 是 H_0/L_0 项的负指数, B_1 表示入射波陡小的坦坡要比陡波的破波力大。底坡变陡时 B_1 值加大说明陡坡上破波力随波陡变化的幅度在减少, A, B_1 在底坡坡度从 1/50 到 1/20 底坡增长较快,这两个底坡以外,1/100 底坡与 1/50 接近,1/15 底坡与 1/20 接近。 A, B_1 两个参数在这一范围变化很快,与破碎形态及破波指标从缓坡到陡坡的变化密切相关。文献[2]关于破波力的试验结果也有类似的变化规律。五种底坡上 B_2 值变化不大,没有随底坡单调变化的规律。 B_2 为 D/H_0 项的指数, B_2 随底坡变化不大说明柱径对破波力的贡献不依底坡条件而明显改变。

3. 试验结果与他人试验资料的对比

Apelt 等^[4]在 1/15 底坡的试验,得到积累频率为 1% 以式(1)的关系表达的破波力, $A = 0.41, B_1 = -0.45, B_2 = 0.5$ 与本文按 F_{\max} 回归的结果接近。图 2 中给出了他的试验点子。

堀川清司等^[3]曾在 1/30 底坡测定破波作用力的垂直分布。根据堀川提供的压力分布图式,计算了作用于圆柱的破波总力。本文与其结果是接近的。

美国奥本大学曾经进行 1/50 底坡上崩破波作用下圆柱压强分布的试验,谢世楞^[5]对其压强分布图进行分析得到 $F = 0.64\gamma DH_0^3$ 的结果,并将这一结果与现场实测资料进行比较,认为这一关系可作为现场资料的外包线。将本文 1/50 底坡资料以 γDH_0^3 无因次化,整理结果表明当 H_0/L_0 大于 0.05,即破碎形态属于崩破波后,试验点子落在 $F = 0.64\gamma DH_0^3$ 线上下。

4. 试验结果的应用

浅水破碎波对直立圆柱的作用总力可按式(1)计算。相应于最大破波力的 A, B_1 值可根据底坡由图 4 查得, B_2 取五种底坡试验结果的平均值 0.35。

破波力作用点在水底以上高度 l 试验结果比较分散,参照他人试验得到的 1/50 和

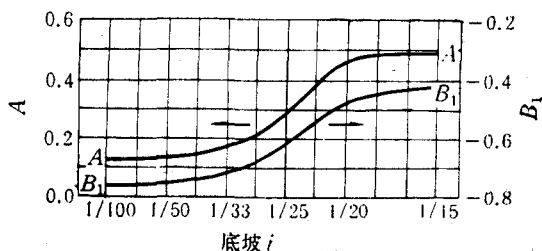


图 4 计算最大破波力用的参数 A, B_1 值
Fig. 4 Parameters A and B_1 for maximum breaking wave forces

1) 谢世楞,破碎波对垂直柱状建筑物的作用,港工技术通讯,1974.5。

1/15^[4]底坡上 l/d 值(分别为 1.06 和 1.37) 及本试验结果变化趋势(图 3) 建议按下式计算。

$$l/d = C - 0.2[\lg(H_0/L_0) + 2] \quad (2)$$

当 $i \geq 1/20$ 时 $C = 1.4$, $i \leq 1/33$ 时 $C = 1.2$; 当 $1/20 > i > 1/33$ 可在 1.4 和 1.2 之间线性内插。工程应用时应考虑破碎点位置和冲击成分的动力效应。

四、破波力垂直分布试验结果

在 1/33 底坡上测量了不同入射波陡下波力分布^[1], 实测结果说明, 当波陡较小即卷破波条件下静水位以上波力远大于静水位以下, 最大波压出现于静水位以上波峰高度的一半附近。随着波陡变小最大波压出现位置逐渐移到静水位, 静水位以上波力接近三角形分布, 静水位以下接近倒梯形分布。1/20 底坡上的试验也有类似结果。

五、结 语

1. 破碎波对直立圆柱作用与非破碎波的主要区别是波谷以上出现不完全绕流区。这一区域的波浪力包括因动量变化引起的冲击力和柱前后波面高度差形成的附加压差力。

2. 影响破波作用力的主要因素是底坡、入射波陡、相对柱径。底坡和入射波陡改变破碎形态和破波指标, 由于压差力和绕流中惯性力等成分的存在, 破波力与柱径不成线性关系。

3. 破波作用力的随机波动主要是破碎位置、破波形状的随机变化引起的。

4. 破波作用力随桩柱与破碎点相对位置的变化而改变, 当破碎点位于柱前深水一侧与柱轴距离 0.5—5 倍破碎水深时波力最大。

5. 根据本文试验资料, 可采用式(1), (2)和图 4 的参数计算浅水破碎波对直立圆柱的最大作用力。

6. 破波力的垂直分布随波陡而改变。波陡较小, 破碎形态为卷破波时最大波压出现在静水面以上波峰高度的 1/2, 随着波陡变小, 最大波压出现于静水面附近。

参 考 文 献

- [1] 李炎保, 1985, 桩柱破波力的垂向分布和构成特性的初步分析, 海洋通报, 4(6): 48—54.
- [2] 谷本勝利, 高橋重雄, 金子忠男, 1986, 円柱に働く衝撃破波力に関する実験的研究, 港湾技术研究所报告, 25(2): 29—86.
- [3] 堀川清司, 渡边晃, 勝井秀博, 1973, 円柱に作用する破波力に関する研究, 第 20 回海岸工学学会论文集, 日本土木学会, 37—42.
- [4] Apelt, C. J., Piorewica J., 1987, Laboratory studies of breaking wave forces on vertical cylinder in shallow water, *Coastal Eng.*, 11: 263—282.

LABORATORY STUDIES OF SHALLOW BREAKING WAVE FORCES ACTING ON VERTICAL CIRCULAR CYLINDER

Li Yanbao

(Department of Water Resources and Port Engineering, Tianjin University, 300072)

ABSTRACT

Analysis of breaking waves forces on vertical circular cylinder showed that the forces resulting from the breaking wave passing through a cylinder are composed of an impact force caused by the rapid variation of momentum with the change of virtual mass of cylinder and an additional pressure force due to the difference of water levels between the lee and stoss sides of the cylinder and that the factors determining breaking wave forces on vertical cylinder should be the steepness (H_0/L_0) of the deep water wave, the bottom slope (i), and the relative cylinder diameter (D/H_0). The first two determine the characteristics of the breaking wave while the third represents the effect of the cylinder itself on the breaking wave forces. The analysis and experiments with 5 bottom slopes from $i=1/100$ to $1/15$ yielded an empirical formula for the forces.

Key words Breaking Wave, Shallow breaking wave, Wave forces on a circular cylinder.