

直立式防波堤水平波浪力的概率分布

陈 伟

(河海大学交通与海洋工程学院,江苏 南京 210098)

摘要 试验研究表明,不规则波对直立式防波堤作用力的概率分布类型因波浪作用性质而变化,脉动力符合双参数的韦伯分布,冲击力偏离韦伯分布.经过统计分析,得出了每一种试验情况下韦伯分布的形状参数和比例参数,并研究了参数的变化规律,提出了直立式防波堤在不同波浪情况和水位条件下确定分布参数的方法.

关键词 不规则波 直立式防波堤 水平波浪力 概率分布

中图分类号 U656.2⁺2 **文献标识码** A **文章编号** 1000-1980(2001)03-0037-05

波浪对直立式防波堤的作用力具有随机特性,而国内外现有的直立式防波堤的设计方法仍然是一种确定性的设计方法,设计荷载、抗力和现有的设计公式都没有真正考虑其中包含的随机特性^[1~4].正因为如此,无法计算结构的可靠度,无法真正进行结构优化设计.可靠度设计方法是建立在概率论基础之上的,是现今公认的更能反映客观实际的一种设计方法.引入可靠度方法,改进直立式防波堤的设计需要进行大量的研究工作,其中确定荷载的随机分布是一个关键问题.只有确定了波浪对直立式防波堤作用力的概率分布,才可能引入可靠度的设计方法.

波浪荷载的概率分布比波高的概率分布问题要复杂.它与波高分布、波长(周期)分布、堤前波态、基床高度、堤身形状、越浪程度及波谱型式等因素有关.日本运输省港湾技术研究所研究了由于基床高度不同而引起波浪力的变化.试验采用的基床上水深 d_1 和堤前水深 d 的比值分别为 0.85, 0.60, 0.475, 0.35. 根据试验发现当 $d_1/d = 0.6$ 时,压力分布与瑞利分布比较接近;当 d_1/d 为 0.85 和 0.475 时,两者差别不大;当 $d_1/d = 0.35$ 时,即高基床情况,两者完全不符合.意大利 MANFREDONIA 港直立式防波堤属暗基床的,堤前水深 11.0 m,水位 0.0 m,在荷兰 DELFT 水力实验室的不规则波水槽中进行了实验,有效波高 $H_s = 4.75$ m,谱峰周期 $T_p = 9 \sim 10$ s,波浪对直立式防波堤作用力的实际分布和瑞利分布以及对数-正态分布均有较大差别.意大利 CIVITAVECCHIA 港直立式防波堤属中基床,平均水位高程 0.0 m,抛石基床高程 -1.5 m,堤前水深 30 m,设计条件是:有效波高 $H_s = 8.0$ m,平均周期 10.5 s,设计水位高程 +0.5 m.波浪对直立式防波堤作用力的实际分布和瑞利分布以及格鲁霍夫斯基分布均有较大差别.国内对波浪力概率分布型式也做了一些研究工作^{①②}.

1 不规则波浪对直立式防波堤作用的模型试验

本文的工作是建立在模型试验基础之上的,该试验是在西班牙港口、航道及海岸工程试验与研究中心实验室的不规则波水槽中进行的,水槽长 45 m,宽 6.5 m,推板处水深 1.5 m.宽度为 2 m 的模型位于水槽中轴线上,两边各留 2.25 m 的通道.

试验中模型前的底坡都是一致的.在推板处为深水,底部水平,然后底坡由 14% 逐步过渡到 2%,试验模型位于变坡后的水平平台上.在水槽中布置了两个测波仪,一个位于推板前,记录深水波要素;另一个位于模

收稿日期 2000-04-25

基金项目 欧盟基金 MAST contract MAST3-CT95-0041

作者简介 陈伟(1967—),男,福建莆田人,讲师,主要从事港口、航道和海岸工程的研究和设计.

①谢世楞等.直立式防波堤可靠度分析.第五届全国海岸工程学术讨论会论文集,1989.

②谢世楞.关于防波堤可靠度分析的初步探讨.见:全国水运工程标准技术委员会主编.港口工程技术规范学术论文,1988.

型侧面的通道中,记录浅水波要素.把测波仪放在模型旁的通道中,这样既可测得入射波,又可使试验不受模型反射波浪的影响.

试验研究了 3 种水深和 6 种结构的组合情况.3 种水深 d 分别是 0.55 m,0.60 m,0.65 m.6 种结构分别是两种墙前基床高度 h_b 和三种基肩宽度 B_b 的组合. h_b 分别采用了 0.218 m,0.318 m, B_b 分别采用了 0.20 m, 0.25 m 和 0.30 m,基床的坡比均为 $\cot\alpha = 2.0$,所以等效基床宽度 $B_{eq} = B_b + (h_b/2\tan\alpha) = B_b + h_b$. 传感器布置了 18 个,分别位于模型的正面和底面不同的位置,在水位变动区传感器布置较密,这样保证在 3 种水位情况下,总有一个传感器位于静水位置,以保证测量的精确性.图 1 所示为模型结构断面和传感器的位置示意图.作用于直墙面的总波压力是采用梯形法对测得的同步波压强求和得到的.

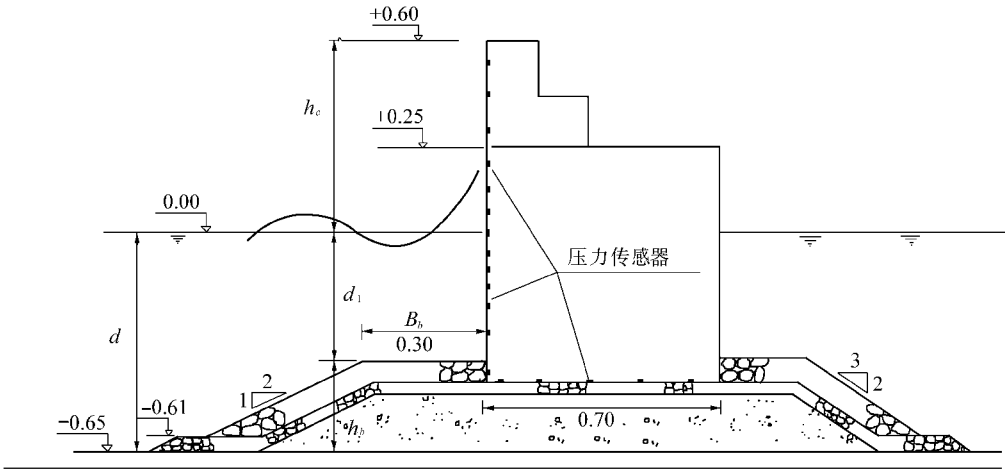


图 1 模型结构断面和传感器位置 ($d = 0.65\text{ m}$, $B_b = 0.3\text{ m}$)

Fig.1 Cross-section of the model and position of pressure transducers

在防波堤模型放入水槽前,对堤前测波仪不同的波浪条件进行了校正.本次试验采用的是 JONSWAP 谱,峰值增强因子 $\gamma = 3.3$. 这些信息记录在 Racal 磁带中,以此来控制生波机推板的运动.

不同的谱峰波周期 T_p 和不同的深水波陡参数 S_p (相对于 T_p) 下的深水有效波高见表 1,在这些波高和 3 种水位组合下,防波堤将受破波和非破波作用,即受波浪的冲击和脉动力作用.

表 1 在不同的 T_p 和 S_p 下的深水有效波高

Table 1 Significant wave height at different T_p and S_p

m

T_p/s	S_p				
	0.015	0.020	0.025	0.030	0.040
1.82	0.077	0.103	0.129	0.155	0.206
2.10	0.103	0.137	0.172	0.206	0.275
2.37	0.131	0.175	0.219	0.263	0.350
2.64	0.163	0.218	0.273	0.327	

2 波浪力分布形式及分类

根据试验结果,研究了波浪对直墙作用力的分布形式,发现波浪作用力的概率分布不是杂乱无章的,而是有一定规律性的.波浪作用力的概率分布是受波浪形态影响的,波浪力性质不同,其概率分布的形式是不同的.

双参数的韦伯分布是一种用途广泛的概率分布形式,它随着形状参数 m 的变化而具有很大的变化范围.当 $m = 1$,双参数的韦伯分布转化为标准的指数分布.当 $m = 2$,其分布即为瑞利分布^[5].

双参数韦伯分布的分布函数和密度函数一般形式是：

$$P(F_i) = 1 - \exp[-(F_i/c)^m]$$
 (1)

$$f(F_i) = (m/F_i)(F_i/c)^m \exp[-(F_i/c)^m]$$
 (2)

式中： F_i ——波浪对直墙作用力； m ——形状参数； c ——比例参数，其期望值 $E(F_i)$ 和标准差 $\sigma(F_i)$ 分别为

$$E(F_i) = c\Gamma(1 + 1/m)$$

(3)

$$\sigma^2(F_i) = c^2\Gamma(1 + 2/m) - [c\Gamma(1 + 1/m)]^2$$

(4)

其中 $\Gamma(x)$ 是伽马函数.

为了便于直观地分析,将式(1)改为

$$m(\ln F_i - \ln c) = \ln \{-\ln[1 - P(F_i)]\}$$

(5)

由此可以看出,如果波浪作用力服从双参数的韦伯分布,则该组试验的 $\ln F_i$ 和 $\ln \{-\ln[1 - P(F_i)]\}$ 应该呈线性关系.如果两者不是呈线性关系,说明波浪作用力不服从韦伯分布.

按上述方法,对所有试验数据进行了检验.通过分析比较,发现大部分试验组的数据符合双参数的韦伯分布,见图 2.同时也发现在一些试验组中,虽然绝大部分数据符合韦伯分布,但是在其作用力分布的顶端发生偏离现象,见图 3.将偏离韦伯分布的和服从韦伯分布的力分别取出,研究其作用力随时间的变化关系,见图 4 和图 5.

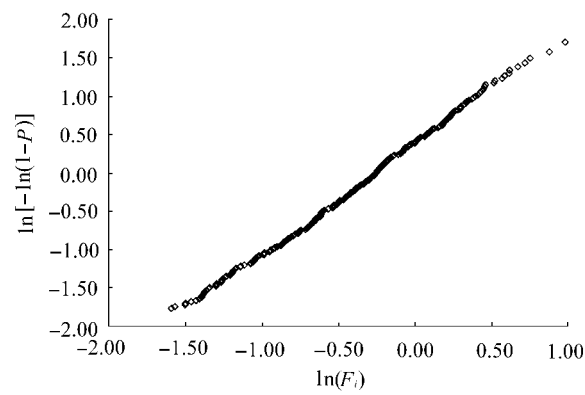


图 2 符合韦伯分布试验组数据

Fig.2 Weibull distribution of impulse forces

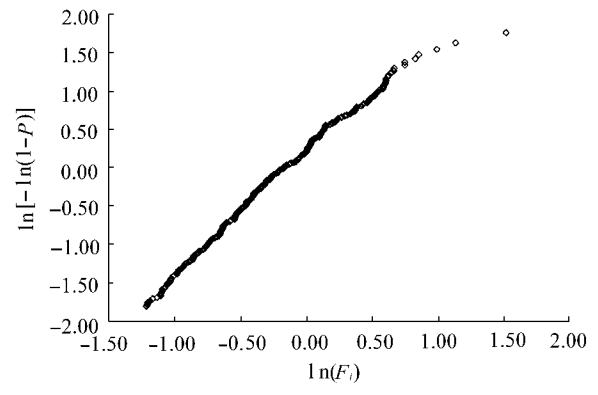


图 3 试验组数据在上部偏离韦伯分布

Fig.3 Weibull distribution of horizontal forces with impact forces

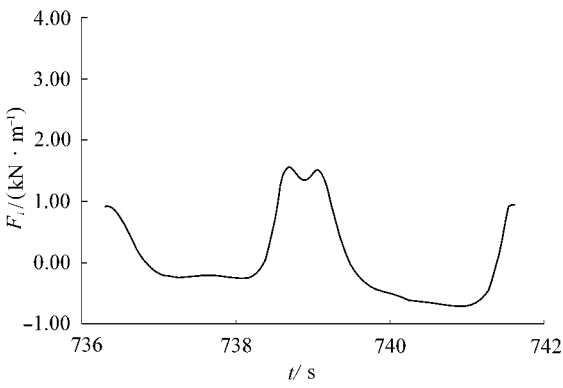


图 4 脉动的力随时间变化关系

Fig.4 History of impulse force

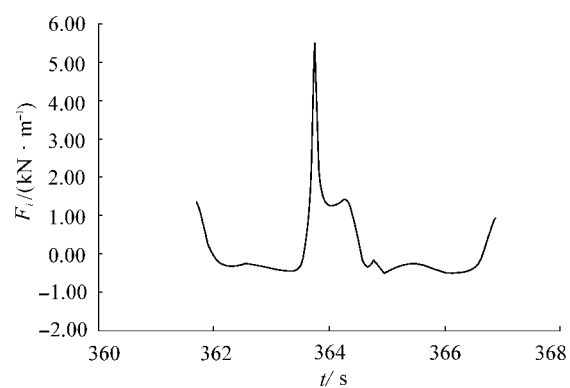


图 5 冲击力随时间变化关系

Fig.5 History of impact force

从图 4,5 可以发现:(a)发生偏离的力的数值比未发生偏离的力的数值大很多;(b)发生偏离的力的增长速度比未发生偏离的力的增长速度快得多,发生偏离的力具有明显的破波冲击作用的特性.因此波浪力性质不同,其概率分布的形式是不同的.虽然脉动力和冲击力产生条件还有待进一步研究,但是仍然可以根据波浪力概率分布的形式不同,判断波浪作用力的特性并进行力的分类.即在一组试验中,如果波浪作用力完全服从韦伯分布,则在该波浪和直立堤条件下,波浪对直立堤的作用力是脉动力,未发生破波冲击作用.如果波浪作用力有偏离韦伯分布的情况发生,则表明在该种波浪、直立堤等条件下,发生了破波冲击作用,即偏离韦伯分布的是冲击力,服从韦伯分布是脉动力.这和文献[6]的结论是一致的.计算表明,脉动力各试验组 $\ln F_i$ 和 $\ln \{-\ln[1 - P(F_i)]\}$ 的相关系数大于 0.99.

根据数据计算可以发现,在一定条件下形状系数 $m = 2$,即波浪力概率分布符合瑞利分布.但 m 值并不

都是 2.0,而是有一定变化范围的.这说明以往的一些研究发现波浪力的概率分布为瑞利分布是有合理的成分,但是并不全面.

3 波浪力分布参数

波浪对直墙式建筑物的作用力如果是脉动力则服从韦伯分布,韦伯分布是由两个参数最终确定的,即当形状参数和比例参数确定后,韦伯分布也就唯一确定了.

观察各组试验的数据,可以发现对于不同的情况,分布参数并不是固定不变的.如果简单地采用形状参数和比例参数的平均值来确定分布,显然是不准确的.根据试验结果,对脉动力分布参数进行了进一步的研究,发现形状参数和比例参数的变化是有一定规律的.在直立堤和水深条件一定的情况下,比例参数与入射波浪条件 $(H_s/d) T_p \cdot \sqrt{(g/d_1)}$ 呈线性关系,见图 6. 如果改变基床形状和水深条件,相关曲线的斜率 K_c 和在纵轴上的截距 B_c 随 h_b/d 的改变而改变,见图 7,8. 形状参数也有类似的变化规律(图从略).

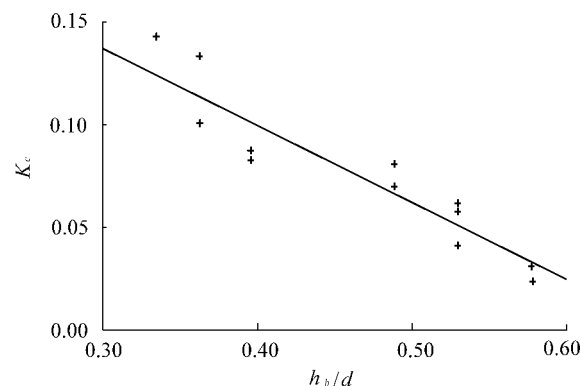


图 7 $K_c \sim h_b/d$ 的关系

Fig.7 Relation between K_c and h_b/d

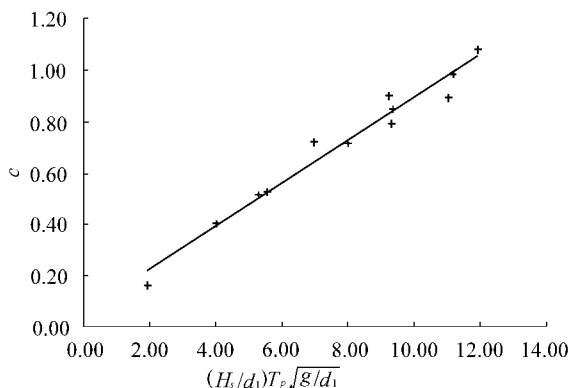


图 6 比例参数 c 与 $(H_s/d) T_p \sqrt{(g/d_1)}$ 关系示例

Fig.6 Relation between c and $(H_s/d) T_p \sqrt{(g/d_1)}$

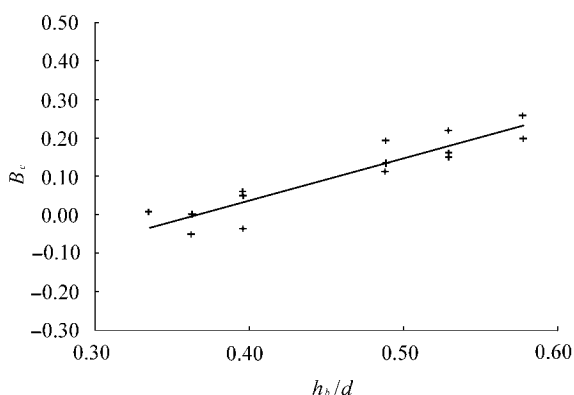


图 8 $B_c \sim h_b/d$ 的关系

Fig.8 Relation between B_c and h_b/d

一般地,参数 m, c 可以表示为

$$m = K_m [(H_s/d_1) T_p \sqrt{(g/d_1)}] + B_m \quad (6)$$

$$c = K_c [(H_s/d_1) T_p \sqrt{(g/d_1)}] + B_c \quad (7)$$

采用最小二乘法,根据试验资料拟合得

$$B_c = 1.083 h_b/d - 0.400 \quad (8)$$

$$B_m = 0.356 h_b/d + 2.210 \quad (9)$$

$$K_c = -0.380 h_b/d + 0.251 \quad (10)$$

$$K_m = 0.113 h_b/d - 0.113 \quad (11)$$

根据这些关系,可以由 h_b/d 的值即基床高度与堤前静水水深的比值,确定形状参数与比例参数随 $(H_s/d_1) T_p \sqrt{(g/d_1)}$ 的关系,再由设计波浪条件,确定 m, c 的值,从而确定作用于直墙上的脉动力的概率分布.

4 结 语

在直立式防波堤设计中引入可靠度设计方法是一次重要的进步,波浪对直立式防波堤作用力的概率分

布问题是需要解决的关键问题之一. 根据试验发现不同性质的作用力其概率分布是不同的. 脉动力符合双参数的韦伯分布,冲击力偏离韦伯分布. 通过进一步研究发现双参数韦伯分布的参数是变化的,而且变化是有规律的. 在已知波浪要素、墙前水深和基床条件之后,可以确定形状参数和比例参数,从而确定脉动力的分布.

参考文献：

[1] JTJ213—1998,海港水文规范[S].
[2] Goda Y. Random seas and design of maritime structures[M]. University of Tokyo Press,1985. 107,144.
[3] British standard code of practice for maritime structures[S]. 1984.
[4] Shore Protection Manual[S]. U.S. Army Corps of Engineers, Coastal Engineering Research Center,1984.
[5] Tobias Paul A. Applied reliability[M]. New York :Van Nostrand Reinhold Company,1986. 63 ~ 81.
[6] Vicinanza D. Probabilistic analysis of horizontal wave forces on composite and vertical breakwaters[A]. Proceedings 1st Overall Project Workshop PROVERBS[C]. Las Palmas :1997.

Probabilistic Distribution of Horizontal
Wave Forces on Vertical Breakwaters

CHEN Wei

(College of Communication and Ocean Engineering, Hohai Univ., Nanjing 210098, China)

Abstract On the basis of physical model tests,studied is a probabilistic distribution of horizontal wave forces of irregular waves on vertical breakwaters. Through analysis,it is concluded that the horizontal wave force distribution is determined by the characteristics of wave forces. Impulse wave forces fit the double-parameter Weibull distribution,and impact forces deviate from the Weibull distribution. The calculation of the shape parameter and scale parameter shows that the two parameters are not fixed and that they are affected by sea state, breakwater geometry and water depth. According to the results,a formula is developed to determine the parameters.

Key words irregular waves ;vertical breakwater ;horizontal wave force ;probabilistic distribution