

斜坡上封闭水平板波浪总上托力试验研究

周益人, 陈国平, 王登婷

(南京水利科学研究院河港研究所, 江苏 南京 210024)

摘要 波浪对平板的总上托力是海岸码头结构设计的重要依据. 为此, 通过系列模型试验对斜坡上封闭水平板下波浪总上托力进行了研究. 结果表明, 平板下最大总上托力并不总是与最大冲击压强同步发生. 因此, 依据这一试验结果对波浪总上托力产生机理和影响因素进行了详细分析, 提出了斜坡封闭水平板波浪最大总上托力的计算公式. 大量试验资料表明, 该公式与试验值有着较好的一致性.

关键词 斜坡; 封闭水平板; 波浪; 总上托力

中图分类号 P753 **文献标识码** A **文章编号** 1000-1980(2004)04-0442-05

建在斜坡上且尾部与海岸连接的透空建筑物是海岸地区一种比较常见的结构形式, 设计中的首要问题就是要估算出各种波况及结构物边界条件下面板的波浪上托力. 国内外学者^①[1~3]为此做了相当多的理论和试验研究, 并提出了许多波浪冲击压强和总上托力计算公式. 然而, 由于影响因素非常复杂, 而试验数据通常又存在着一定的局限性和离散性, 各研究者通常认为最大总上托力应该对应于最大冲击压强, 由此, 通过对最大冲击压强的研究得到经验公式, 然后通过假定其为某种分布算得最大总上托力. 该结果缺乏必要的论证和说明. 笔者对斜坡封闭平板下波浪总上托力进行了系列试验. 结果表明, 对于斜坡上封闭水平板, 最大总上托力与最大冲击压强并不总是同步发生, 而且有着自身的变化规律. 因此, 应对最大总上托力进行专门的分析研究.

1 上托力试验概况

试验在波浪水槽内进行. 水槽宽 1.8 m, 高 1.8 m, 长 62 m. 水槽工作段在纵向被分隔成两个部分, 一部分宽 0.6 m, 另一部分宽 1.2 m. 试验段设在宽 0.6 m 的这一部分. 另一部分用以扩散二次反射波能. 试验段的中部预先用水泥砂浆做好斜坡, 坡度分别为 1:2 和 1:3 两种. 在斜坡上方放置一块聚氯乙烯试验平板, 尾部封闭. 平板宽度与水槽试验段宽度相等, 为 60 cm, 其厚度为 1 cm. 纵向长度分别为 100 cm 和 50 cm 两种(为了与工程上的称谓一致, 后文称作平板宽度 B), 见图 1.

试验平板底部安装有传感器探头. 其布置形式为: 平板两侧布置成两排, 每排沿平板纵向按 5 cm 等间距排列. 试验采用规则波, 坡脚水深为 70 cm, 入射波高 H 为 5~30 cm, 周期为 1.0~3.0 s. 平板底面与静水面之间的距离 Δh 为 0~8 cm, 每组试验变化幅度为 2 cm. 为消除波浪的多次反射, 试验采用间歇式生波方式, 生波时间为 30~45 s. 考虑到冲击压强作用时间很短, 采样时间间隔选为 1/125 s. 压强分析采用中国水利水电科学研究院 DJ800 数据采集和处理系统.

由于平板下波浪运动的复杂性以及被封存在板下空气层的影响, 在同样规则波条件下, 每个周期的冲击压强并不相等. 但重复试验所统计到的各周期压强峰值的平均值却比较稳定, 而且基本相等, 因此取这种平均值作为冲击压力的测量值.

收稿日期 2003-12-03

基金项目 交通部规范基金资助项目

作者简介 周益人(1964—), 男, 浙江宁波人, 高级工程师, 博士研究生, 主要从事海岸工程研究.

① 合田良实. 构造物に働く波力. 1967 年度水工学に関する夏期研修会講義集. 土木學會水理委員會, 1967. 1—34.

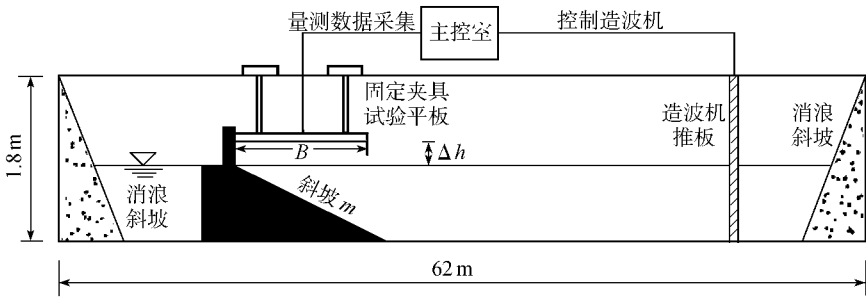


图 1 波浪水槽布置

Fig.1 Layout of wave flume

2 试验结果和分析

2.1 平板底部波浪总上托力特征

图 2 为一个波浪周期内平板下总上托力随时间的变化过程.

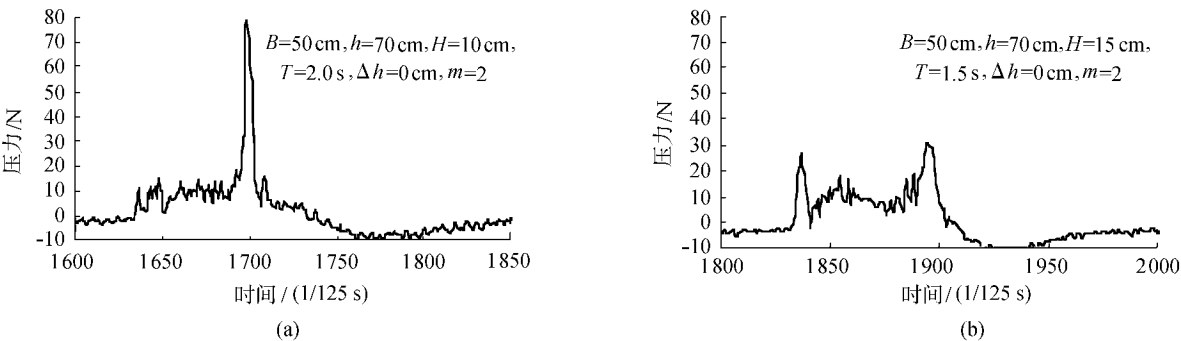


图 2 平板下总上托力随时间变化过程

Fig.2 Variation of the total uplift force on plate with time

由于受到板下空气层和斜坡的影响,斜坡上封闭式平板总上托力随时间的变化比透空式平板^[5]复杂得多.这种变化大致可分为两种类型:一种是在上托力缓变过程中,有一个迅速上升的瞬时冲击压力,该变化形式称为单峰型.但这种单峰型较透空式情况复杂,当波浪周期较小时,类似于透空式平板,瞬时冲击压力后紧随着一个缓变压力,而当波浪周期较大时,这个冲击压力却出现在一个周期的中后部,见图 2(a).这主要是由于平板尾部封闭,波面雍起时板下封存的空气无法从板后排出,而只能从板前波面与平板间的缝隙逸出,空气层使冲击滞后所致.另一种开始时是一个瞬时冲击压力,但在随后的缓变压力变化过程中,又出现一个或多个迅速上升的冲击压力,即在一个周期内出现两次或多次冲击,该变化形式称为双峰型或多峰型,见图 2(b).这主要是由于波浪在第 1 次冲击平板后,向岸传播并反射形成二次冲击所致.

平板波浪总上托力由同一时刻板下各点的压强构成,压强分布对其影响很大.图 3 为不同超高条件下一个周期内不同时刻平板下出现较大总上托力时波浪的压强分布.图中压强分布编号时间间隔为 1/125 s.

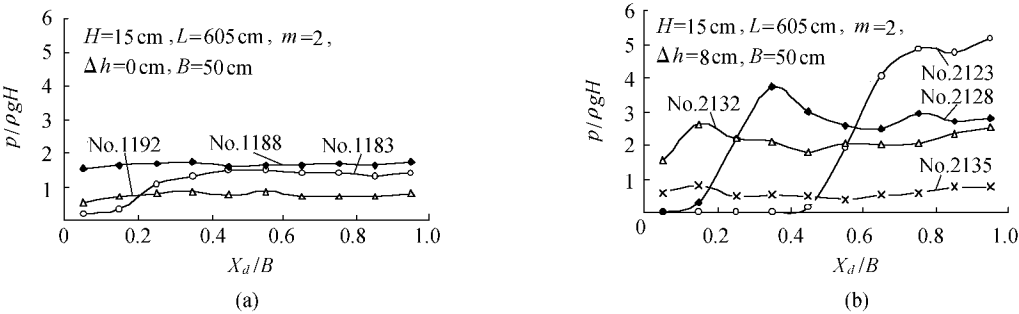


图 3 一个周期内不同时刻板下发生较大总上托力时压强分布

Fig.3 Distribution of pressure intensity along the plate corresponding to relatively large total uplift forces in a period

由图3可见,较大总上托力的发生大致可分为两种情形:一种是在波浪开始冲击平板前部的瞬间产生,此时,由于平板尾部封闭,板下封存的空气形成一片遍布整块平板的有压空气层并对平板产生上托力,该上托力分布非常均匀,且通常对应于较小相对超高($\Delta h/H$),见图3(a)。另一种是波浪传播到岸壁并反射回来后对平板冲击而产生的,此时,由于斜坡的影响,传播至平板尾部的波浪波高将增大很多,从而对平板尾部产生很大的冲击压力,这种压力由板后向板前传播并随着波浪冲击压前锋不断向板前推进,波浪压力覆盖的范围越来越大,平均压强越来越小,但总上托力并不减小,这种压力通常对应于较大相对超高,见图3(b)。由此可见,当平板底部局部发生最大冲击压强时,平板最大总上托力并不一定同步出现,它们所对应的压强分布形式也不一致,最大总上托力的压强分布通常为均匀型。由于平板底部局部最大冲击压强和最大总上托力都是码头结构设计的重要参数,而以往对平板底部局部最大冲击压强的研究相对较多,所以本文研究将重点讨论波浪最大总上托力。

2.2 平板底部发生最大总上托力的分析

文献[4]曾对平底透空水平板底部波浪冲击压强产生机理进行过详细分析,并认为:冲击压强主要受到几何因素(波浪冲击角)、动力因素(波高、波速等)和空气垫层因素的影响;尽管最大总上托力并不完全对应于最大冲击压强,但构成总上托力的均布压强值也同样应该与上述3个因素密切相关,同时,最大总上托力还应与压强的分布宽度有关。

2.2.1 相对超高 $\Delta h/H$ 的影响

图4为板宽 $B=50\text{ cm}$ 、入射波高 $H=15\text{ cm}$ 、坡度 $m=2$ 条件下,不同周期波浪相对总上托力随相对超高的变化。图中横坐标为平板相对总上托力 $P/\rho gHB$ 。

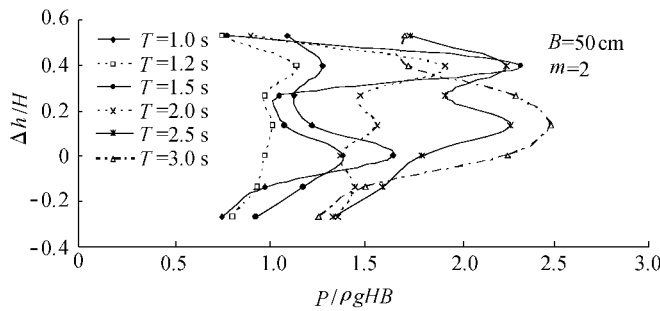


图4 相对总上托力随相对超高的变化
Fig.4 Variation of relative uplift force with relative clearance

由图4可见,总上托力随相对超高的变化明显地形成了上下两个峰,上下两部分的分界在相对超高0.3附近。上下两部分曲线变化规律并不完全一致,上部最大相对总上托力发生在周期1.5 s,而下部发生在3.0 s。因为总上托力不仅与冲击压强有关,还与压强分布宽度成正比,波浪对平板的冲击范围减小,总上托力也会减小。因此,在考虑平板最大上托力计算公式时,应以相对超高0.3为界分别进行考虑。

2.2.2 板宽 B 的影响

板宽不仅会对冲击压强产生影响,而且会对冲击压强的分布宽度产生影响,从而影响到平板最大总上托力。图5为入射波高 $H=15\text{ cm}$ 、坡度 $m=2$ 、相对超高 $\Delta h/H \leq 0.3$ 时,不同板宽和波长的相对总上托力与相对板宽的关系。图中横坐标为板宽与入射波波长之比 B/L 。

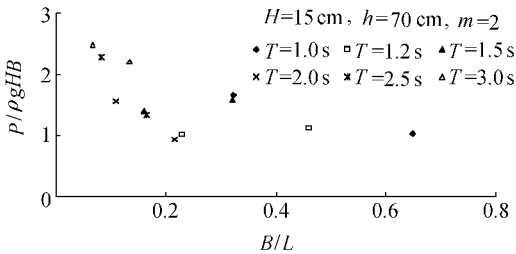


图5 相对总上托力随相对板宽的变化
Fig.5 Variation of relative uplift force with relative width of plate

由图5可见,相对总上托力虽然在局部有所反复,但总体上随相对板宽 B/L 的增大而减小,当其超过某一值时,这种影响将会减小。

2.2.3 入射波波陡和斜坡坡度的影响

事实上,对于斜坡封闭平板最大总上托力,各种因子的影响是相互交融的。本文引入反映斜坡波浪破碎相似的参数 ξ ,即 Iribarren 数^[5]。其表达式为

$$\xi = \frac{\tan\beta}{(H/L)^{1/2}} \tag{1}$$

式中 β 为斜坡坡角, $\tan\beta = 1/m$ 。图6和图7分别为波高 $H=15\text{ cm}$ 时最大相对总上托力随波陡和 Iribarren 数的变化。图中板宽 $B=50\text{ cm}$ 的最大上托力分为大超高和小超高两种情况。

由图 6 可见,在板宽 $B = 50\text{ cm}$ 且相对超高较小时,周期 $T = 1.0\text{ s}$ 的总上托力较大,而板宽 $B = 100\text{ cm}$ 、周期 $T = 2.0\text{ s}$ 时的总上托力较小。由图 7 可见,当横坐标采用 Iribarren 数的倒数时,同样坡度条件下的相对总上托力变化规律与图 6 一样,而对于斜坡坡度 $m = 3$ 的情况,相对总上托力在 Iribarren 数较小时变化较缓,在 Iribarren 数较大时变化较大,但这种变化似乎并没有显示出与其他坡度情况相衔接的迹象,这可能是由于相对超高较小时板宽对不同坡度上的波浪影响程度不同所致。因此,在对不同坡度下相对超高较小时的最大总上托力进行分析时,还应从波浪、斜坡、平板的最基本条件出发,采用入射波波陡因子。

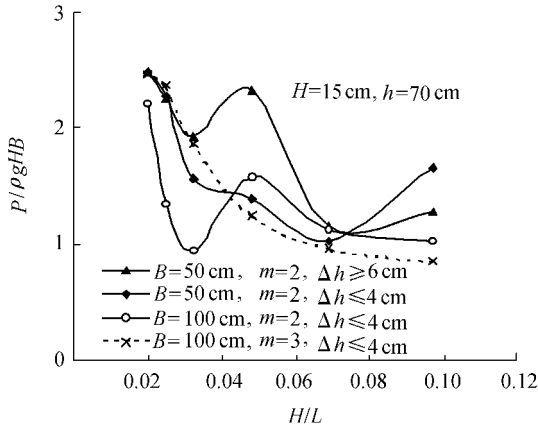


图 6 最大相对总上托力随入射波陡的变化

Fig.6 Variation of relative uplift force with wave steepness

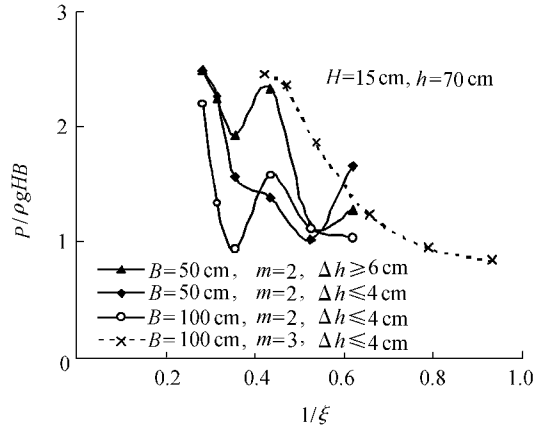


图 7 最大相对总上托力随入射波 Iribarren 数的变化

Fig.7 Variation of relative uplift force with Iribarren coefficient of incident waves

3 计算公式的提出

由以上讨论可知,平板下最大波浪上托力主要受冲击压强和压强分布宽度的影响,应用因次分析法可得

$$f\left(\frac{P}{\rho g H B}, \frac{H}{L}, \frac{B}{L}, \frac{\eta - \Delta h}{H}, \frac{\Delta h}{H}, m\right) = 0 \quad (2)$$

由于板下波浪受斜坡影响而发生变形,式中波面升高高度可用波浪破碎时的值,即

$$\eta = 1.2 H \quad (3)$$

由于波浪在斜坡推进过程中,波面形状沿程变化很大,平板对其影响也因相对超高的不同而发生变化,加上封闭空气层的影响,使得最大总上托力的压强分布类型也发生了变化。因此,本文按波浪总上托力变化规律的不同,将平板总上托力计算公式分成三部分分别进行考虑。根据试验资料,运用多元线性回归方法确定各物理参数项的系数,可得反映各种影响因素的斜坡封闭式水平板单位长度最大波浪上托力计算公式。

当深水 Iribarren 数 $\xi_0 \geq 4.5$ 时,通常波长远大于平板宽度,板宽的影响较小,冲击压强沿板宽分布趋于均匀,相对总上托力为

$$\frac{P}{\rho g H B} = 1.4 \left(\frac{L}{B}\right)^{1/5} \left(1.2 - \frac{\Delta h}{H}\right)^{0.8} \exp\left[-4\left(\frac{\Delta h}{H} - 0.25\right)^2\right] \quad (4)$$

当深水 Iribarren 数 $\xi_0 < 4.5$ 时,最大相对总上托力按相对超高的不同分为上下两部分。当相对超高小于或等于 0.3 时,最大总上托力峰值出现在相对超高 0.1 附近,平板和斜坡对总上托力的影响都较大,并且随坡度、超高和波浪特征等因素发生变化,此时,斜坡坡度和波陡因子应分别予以考虑。当相对超高大于 0.3 时,最大总上托力峰值出现在相对超高 0.4 附近,平板对总上托力的影响较小,斜坡影响起主导作用。相对总上托力为:

a. 当相对超高 $\Delta h/H \leq 0.3$ 时,

$$\frac{P}{\rho g H B} = K \left(\frac{L}{B}\right)^{1/5} \left(1.2 - \frac{\Delta h}{H}\right)^{0.6} \exp\left[-2K\left(\frac{\Delta h}{H} - 0.15\right)^2\right] \quad (5)$$

$$K = \frac{1}{4 \tan \beta} \exp\left[-100 \tan \beta \left|\frac{H}{L} - 0.022\right|\right] + 1.4 \tan \beta \quad (6)$$

式中: K ——冲击角影响系数; β ——斜坡角度,本文 $\tan \beta = 1/m$; H/L ——入射波波陡。

b. 当相对超高 $\Delta h/H > 0.3$ 时,

$$\frac{P}{\rho g H B} = K \left(1.2 - \frac{\Delta h}{H} \right)^{0.8} \exp \left[-12 \left(\frac{\Delta h}{H} - 0.4 \right)^2 \right] \quad (7)$$

$$K = 2.4 \exp \left[-4.5 \left(\frac{1}{\xi} - 0.2 \right)^2 \right] \quad (8)$$

其中 ξ 为入射波 Iribarren 数.

4 结 语

通过系列试验研究,对斜坡上尾部封闭水平板下较大波浪总上托力进行了分析.结果表明:板下发生较大波浪总上托力时的压强分布形式主要有两种,并且形成机理各不相同,最大波浪总上托力与最大冲击压强通常不会同步发生,前者有其自身的变化规律.由于总上托力的大小不仅与板下冲击压强有关,而且与压强的分布宽度成正比,而冲击压强和分布宽度又都是变量,并且变化规律各不相同,因此,通过对反映上述影响因素的波陡、波高、波长、水深、超高和板宽等因子的详细分析,按总上托力形成机理的不同,分段提出了计算斜坡封闭式平板波浪总上托力的经验公式.试验资料表明,经验公式与实测值之间有着较好的一致性.

需要指出的是:由于试验中斜坡坡度只有两种,因此在定量给出斜坡对总上托力影响程度上还有所欠缺,采用本文经验公式对码头面板进行设计时,还应了解发生最大总上托力时的压强沿板宽分布宽度及位置,以及板下结构物(如纵横梁、桩帽、桩基等)的影响等.

参考文献:

- [1] 交通部第一航务工程勘测设计院. 海港工程设计手册(中)[M]. 北京:人民交通出版社,1994. 52.
- [2] 过达,蔡保华. 透空式建筑物面板波浪上托力计算[J]. 华东水利学院学报,1980(1):14—33.
- [3] 刘海青,杨鹏,李炎保. 斜坡接岸码头面板波浪上托力出现类型和统计分布[J]. 港工技术,1998(3):5—9.
- [4] ZHOU Yi-ren, CHEN Guo-ping. Uplift pressure of wave on a horizontal plate[J]. China Ocean Engineering 2003, 17(3):355—368.
- [5] BATTJES J A. Surf similarity[A]. In: Proc 14th Coastal Engineering Conf[C]. Copenhagen:ASCE,1974. 466—480.

Experimental study on total uplift forces of waves on a closed horizontal plate on a slope

ZHOU Yi-ren, CHEN Guo-ping, WANG Deng-ting

(River and Harbor Engineering Department, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210024, China)

Abstract: The total uplift force of waves on horizontal plates is the important basis for design of coastal wharf structures. In this paper, a series of experiments were performed for study of the total uplift force of waves on a closed horizontal plate on a slope. The result indicated that the maximal total uplift force did not always occur with the maximal impact pressure intensity synchronously. Based on the test result, the mechanism of the formation of the total uplift force of waves and some influencing factors were analyzed in detail, and a formula for calculation of the maximal uplift forces on a closed horizontal plate on a slope was presented. A great deal of experimental data shows that the formula is in good agreement with the test result.

Key words: slope; closed horizontal plate; wave; total uplift force