

# 防護建築物上 波浪作用的計算

M. Д. 勃拉基達著  
南京水利實驗處譯

人民交通出版社

# 防護建築物上 波浪作用的計算

M. Θ. 勃拉基達著  
南京水利實驗處譯



人民交通出版社

本書淺顯地敘述了目前海上防護建築物在波浪作用下的計算方法。對於如何確定建築物前的底流速、建築物表面的流速以及波浪在建築物上的滾躍高度等問題，也作了扼要的說明，可作海港工程人員及水工專業學生的參考書籍。

本書係南京水利實驗處余廣明同志翻譯。

書號：3012-京

## 防護建築物上波浪作用的計算

М. Э. ПЛАКИДА

РАСЧЁТЫ ДЕЙСТВИЯ ВОЛНЫ НА  
ОГРАДИТЕЛЬНЫЕ СООРУЖЕНИЯ  
ИЗДАТЕЛЬСТВО "МОРСКОЙ ТРАНСПОРТ"  
МОСКВА 1947 ЛЕНИНГРАД

本書根據蘇聯海運出版社1947年莫斯科-列寧格勒俄文版本譯出

南京水利實驗處譯

人民交通出版社出版

(北京北兵馬司一號)

新華書店發行

機械工業出版社印刷廠印刷

初編者：石道全 複審者：徐澄清

1955年6月北京第一版 1955年6月北京第一次印刷

開本：31"×43"  $\frac{1}{32}$  印張：1 $\frac{11}{16}$  張

全書：37,000字 印數：1~1650冊

定價(9)：0.37元

(北京市書刊出版業營業許可證出字第〇〇六號)

## 目 錄

|                                                                                       |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 序一.....                                                                               | 1  |
| 序二.....                                                                               | 2  |
| 一 波動產生的原因及波浪的類型.....                                                                  | 3  |
| 二 波浪要素.....                                                                           | 5  |
| 三 波浪理論的概念.....                                                                        | 8  |
| 四 臨界水深.....                                                                           | 15 |
| 五 波浪荷載.....                                                                           | 16 |
| 六 底流速及沿建築物外坡的流速.....                                                                  | 38 |
| 附錄一 雙曲線函數表.....                                                                       | 47 |
| 附錄二 $\operatorname{ch}\frac{\pi H}{L}$ , $\operatorname{cth}\frac{\pi H}{L}$ 值圖解..... | 48 |
| 參考文獻目錄.....                                                                           | 50 |

## 序 一

在設計海上水工建築物時，正確計算海浪對建築物的作用，有着重大的意義。雖然最近以來，我國及國外許多學者對這個問題非常注意，但在我們的文獻中，對這個問題仍說明得不够詳盡。

工程師 M. Э. 勃拉基達的著作可以部分地彌補這個缺陷。工程師勃拉基達扼要地敘述了目前公認的海上防護建築物在波浪作用下的計算方法。作者完全執行了規定的任務。作者以通俗而又十分科學的方式說明了波浪計算的基本方法，給計算的情況分了類，這種分類在原則上是正確的，對設計者來說是方便的。對高等工業學校水工專業的學生來說，書中的數例及圖表，使它更便於應用，並成爲一本良好的參考書籍。

除了確定建築物上的“波浪荷載”以外，作者也恰當地注意到了與波浪在水工建築物上的作用有關的其他問題，即確定建築物前的底流速，建築物表面的流速以及波浪在建築物上的滾躍高度。

在波浪對海岸及海上建築物作用的領域內，我們的知識還遠感不足。需要進一步研究的問題，首先是：破波的結構和特性以及破波對建築物作用的研究；波浪在斜牆上以及在平面尺寸不大的孤立建築物上作用的研究（在該建築物前水深很大，且係立牆，但如所周知，並不形成立波）和波浪在透水及飄浮結構上的作用等等。

所有這些問題的研究，應當同時用各種方法——用觀察天

然現象的特徵、試驗室的模型試驗以及最後用理論研究——來進行。

可以指望，以現代波浪計算的原理介紹給我們廣大的海港工程師們的本書，將刺激這個海上水力工程最重要的部門進一步地向前發展。

技術科學博士 H. H. 德榮柯夫斯基教授

## 序 二

本書簡略地說明目前公認的外海防護建築物上波壓力的計算方法。

以建築物外坡與水平面的相對位置、建築物前的水深以及波高為條件的最主要的計算情況，綜合為四種基本計算圖解。這樣，在解決波壓力計算的實際問題時，使波動理論的應用容易領會。

本書最後一節是關於決定底流速，以及沿建築物外坡產生的流速的問題。在設計海上防護建築物時，波浪計算的總體以此告終。

本書擬作為海上建築專業學生學習“海港”課程有關部分時的教材。它對於從事海港建築物設計的設計工程師也會有所補益。

最後對德榮柯夫斯基教授表示深切的感謝。在完成本書的過程中，他給了我一系列寶貴的指示。

M. Э. 勃拉基達

## 一 波動產生的原因及波浪的類型

按照波浪產生原因的特徵，海浪可區分為風浪、潮波、船舶波及地震波。

就決定作用於外海防護建築物上的荷載來說，上述各種波浪中祇有風浪及地震波具有意義。

由火山活動的災難現象所產生的地震波具有一種偶然性質。它們的計算方法目前還沒有確立。因此，在設計外海防護建築物及位於大海與湖泊沿岸的碼頭時，上述各種波浪中，祇需考慮風浪。

許多學者很早以前就在研究海浪。十五世紀時遼奧納多·達·芬奇(1452~1519)發現海浪在海面上的傳播速度遠大於水點速度，因為通常水點僅在作很小的位移。

芬奇將海浪運動與起風時田畝表面出現的波浪運動相比。其時各穗僅作微小的振動。

德榮柯夫斯基教授在他的著作“風浪對於水工建築物的作用”中指出，在研究流體的波狀運動時，我們遇到各種形態的波浪。他指出，根據波浪要素的比值及波浪傳播區域的水深，波浪可為“長波”或“短波”。

根據外形是否移動，波浪可分為推進波和立波；根據波形及波浪傳播方向，波浪可分為兩向波和三向波；根據作用於波動水點上的主要外力，波浪可分為重力波和漣波。最後，根據在何處傳播，波浪可分為表面波和內在波。

我們所感到興趣的是在風力作用下產生於水區表面的波

浪。這種波浪是短波及重力波。除了在特殊情況需要處理立波問題外，通常它們是推進波。

在風直接作用區域，水區表面波浪的形態對於垂直及水平軸而言，是不對稱的（圖 1）。這種不對稱的波浪，迎風面的坡度較平坦，背風面的坡度較陡峭。

當風停止或離開風作用區域後，波浪具有規則形態。並且變為對稱於垂直軸，但仍然不對稱於水平軸。這種波浪稱為“餘波”（圖 2）。



圖 1 風浪斷面圖

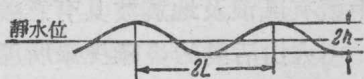


圖 2 餘波斷面圖

在深水中行近立牆式障礙物時，波浪自牆上反射。循相反方向運動的新的反射波與來波相碰撞，可能產生“激浪”現象或“立波”現象。

在立波現象時，波浪振幅與來波相比，顯著加大。波峯與波谷輪流出現，形成所謂“波腹”及靜止“波節”（圖 3），並保持固定位置。由於這個原因，這種波浪又稱為“立波”，以區別於“波形”在同一方向運動的推進波。

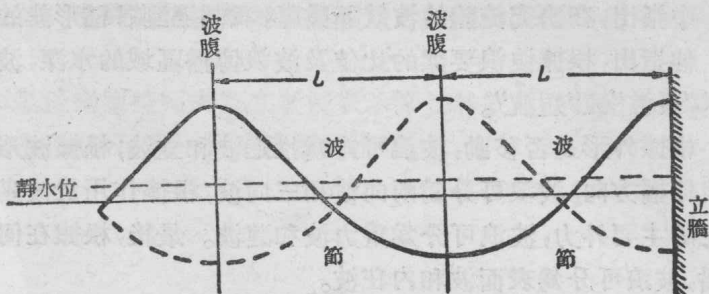


圖 3 立波形成圖解



振幅(“波腹”)可能達到來波波高的二倍。

在水力學中，風浪的產生及發展有理論上的基礎；可以證明，在密度不同及相對運動的兩種介質——例如水與空氣——的分界面上，必然產生波浪。

根據觀測資料，初期風浪在風速為 110 公分/秒時出現。當傳播速度為 30 公分/秒時，波長為 6~8 公分。這些波浪以平行系列傳播，它們可稱為兩向波。當風速增大時，隨着波浪的加大，迎風面及背風面波壓的差別也加大。結果波浪失去平衡，破碎成為各個小丘，風在其間衝過，兩向波消失而代之以不規則性質的三向小丘。

三向波浪形成後，風作用的進一步加強，將重新引起尺度更大的兩向波浪。當風的作用停止後，又轉變為“餘波”亦即外形對於垂直軸對稱、表面光滑、以平行系列傳播的規則兩向波浪。

此種規則餘波，其作用易進行數學計算。通常把它們作為防護建築物的計算基礎。風可以微微影響波浪對建築物的作用特性。

## 二 波浪要素

研究及觀測證明“餘波”波形與餘擺線形態最為近似。試驗室水槽中的試驗很好的證實了這一點(圖 4)。

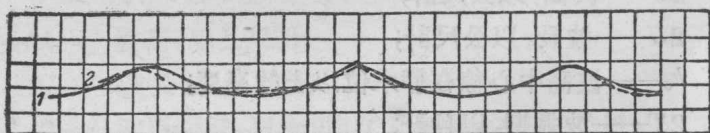


圖 4 風浪表面形態：

1—理論的(餘擺綫)；2—實驗的。

在圖 5 中繪出由波峯及波谷組成的“餘波”斷面。波浪的最高點  $A$  稱為峯頂，最低點  $B$  稱為谷底。

波峯與波谷間的垂直距離稱為波高。

波峯與波谷組成一個波浪。相隣兩波峯或相隣兩波谷間的水平距離稱為波長。

波峯沿水平方向的外表上的移動速度，稱為波浪傳播速度；波峯沿水平線移動一個波長距離的時間間隔稱為波週期。

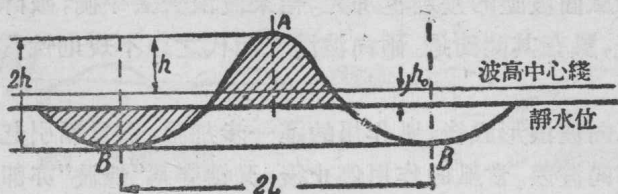


圖 5 波浪要素

波浪傳播速度及波週期，僅表示振動位相的更替；理想流體波動時，水點在水平方向的前進位移應等於零<sup>①</sup>。

如前所述，“餘波”波形對稱於通過波峯（或波谷）的垂直軸，但並不對稱於通過波高中心線的水平軸，亦即波峯較波谷為陡。由於波峯所佔的面積應等於波谷所佔的面積，因此，通過波浪中心的水平線應在靜水位以上。這種形態上的不對稱性是接近於餘擺線的餘波所特有的。

我們採用下列的波浪要素符號：

$2h$ ——波高，以公尺計；

$2L$ ——波長，以公尺計；

$h_0$ ——波高中心線在靜水位以上的高度；

$2T$ ——波週期，以秒計；

① 更精確的水力研究證明，餘波波動時，流體有少許的前進位移。就實用目的而言，此種位移可以略而不計。——原著編者

$c$ ——波浪傳播速度，以公尺/秒計。

波高、波長及波週期或者根據直接觀測決定，或者根據各個學者的經驗公式決定。

波浪傳播速度決定於關係式：

$$c = 2L:2T. \quad (1)$$

波浪傳播速度差別很大；海洋中曾觀測到速度為18公尺/秒的風暴波。

下面引述最常用的決定波浪要素的公式。

### 1. 斯蒂文生公式：

迎風距離較大，超過40海里時：

$$2h = 0.45\sqrt{D}; \quad (2)$$

迎風距離小於40海里時：

$$2h = 0.45\sqrt{D} + 0.75 - 0.34\sqrt{D}. \quad (3)$$

### 2. 貝爾根公式：

$$2h = \frac{\frac{1}{3}W}{\left(1 + \frac{3.62W}{D}\right)\left(1 + \frac{1.86}{t}\right)}; \quad (4)$$

$$2L = \frac{12.34W}{\left(1 + \frac{25.83W}{D}\right)\left(1 + \frac{13.31}{t}\right)}; \quad (5)$$

式中： $2h$ ——波高，以公尺計；

$2L$ ——波長，以公尺計；

$D$ ——迎風距離，以海里計（1海里=1.852公里）；

$W$ ——最大風速，以公尺/秒計；

$t$ ——風作用的延續時間，以小時計。

在比較不深的水池中，波高與波長的比值  $2h : 2L$  變動於 1:10 至 1:15 之間，海洋中自 1:15 至 1:35，在特殊情況下可達 1:50 甚至 1:60。

天然中波高及波長的數值，差別甚大。例如，在大西洋南部波長達 400 公尺；大西洋通常的風暴波波長為 150 公尺，波高為 7~8 公尺。尺寸最大的波浪是在大西洋見到的，波長為 824 公尺，波高為 15 公尺。印度洋風暴波的波長達 112 公尺。

必須注意沿岸地區的極限波高：海洋，15 公尺；地中海，9 公尺；黑海，5~6 公尺；波羅的海，5 公尺；芬蘭灣，3 公尺；裏海，3.5~4.0 公尺。

波週期各不相同，變動於 6 至 10 秒之間，有時可達 15 秒。

### 三 波浪理論的概念

波浪理論方面的第一部巨著，出現於 19 世紀之初，為布拉格大學蓋司納教授所著。

蓋司納自下列假設出發：當流體波動時，質點在垂直及水平方向作振動運動。蓋氏假定流體質點在振動運動時所描繪的軌跡是一個圓周。此外，蓋氏認為波高與水深相比是很小的（圖 6）。

採用上述假設，蓋氏證明水點所作圓形軌道的直徑根據下列規律，隨水深的增加而減小：

$$r = he^{-\frac{\pi z_0}{L}} \quad (6)$$

式中：  $r$  —— 已知質點所作圓形軌道的半徑；

$e = 2.71828 \dots$

$z_0$  —— 質點離開水平表面的位置的座標（ $z$  軸以自靜水

位向下爲正)。

當  $z_0 = \infty$ , 亦即當水深爲無限時,  $r = 0$ ——質點停止運動。  
蓋司納氏根據自己的結論得出波面爲餘擺線。

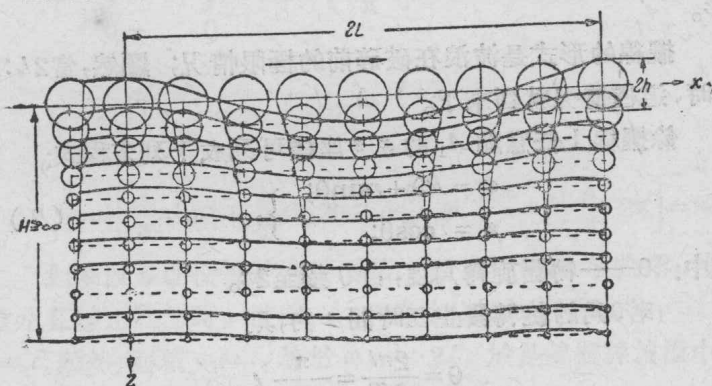


圖 6 蓋司納氏波浪運動圖解

圓沿直線滾動而無滑動時, 圓內一點所描繪的數學曲線稱爲餘擺線。

餘擺綫的外形見圖 7。

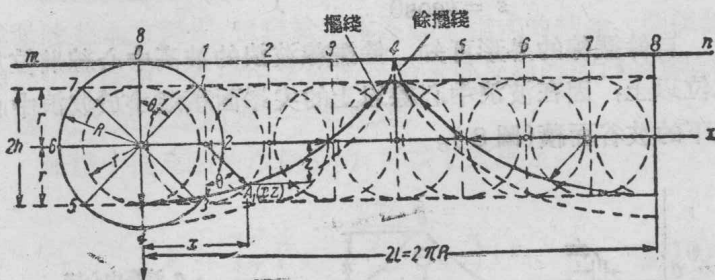


圖 7 擺綫及餘擺綫的形成

半徑爲  $R$  的圓沿直線  $mn$  自左向右滾動時, 在圓內離圓心距離爲  $r$  的  $A$  點畫出餘擺綫。每轉動一周, 圓前進一個波長  $2L = 2\pi R$  的距離; 波高等於  $2h = 2r$ ; 知道  $2h$  及  $2L$  值, 即可作餘擺綫。

如果圓在  $2T$  時間內轉動一整圈, 則波浪傳播速度將爲  $c =$

$2L:2T$ 。在  $r=R$  的極限情況下，將畫出在波峯點 4 處有銳緣的曲線，名曰擺線。

擺線是轉圓內曲線描繪點到達轉圓時的餘擺線的特殊情形。

擺線的形式是波浪在破碎前的極限情況；顯然，當  $2L:2h = \pi$  時，這種情況就到來了。

餘擺線上任意點  $A_1$  的  $x, z$  座標可列成下列方程式：

$$\left. \begin{aligned} x &= R\theta + r\sin\theta; \\ z &= r\cos\theta; \end{aligned} \right\}, \quad (7)$$

式中： $\theta$ ——轉圓旋轉角度，自 0 變至  $2\pi$ 。

若  $\theta$  角的旋轉發生在時間  $t$  內，則

$$\theta = \frac{2\pi t}{2T} = \frac{\pi}{T} t.$$

表面質點振動的餘擺線方程式形式為：

$$\left. \begin{aligned} x &= \frac{L}{\pi}\theta + h\sin\theta \\ z &= h\cos\theta \end{aligned} \right\}. \quad (8)$$

自餘擺線的外形可知，餘擺線波浪的波高中心線將位於靜水位以上，因在波浪中心線以上的尖峯面積遠小於波浪中心線以下的波谷面積（圖 8）。

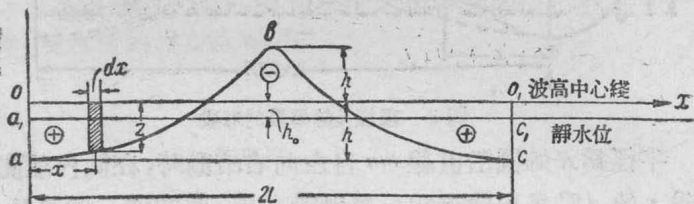


圖 8 波高中心綫位置(無限水深)

事實上，當  $x$  軸與波高中心線重合時，可求出靜水位以上的



波峯面積與靜水位以下的波谷面積間的差額：

$$\begin{aligned}\omega &= \int_0^{2L} z dx = \int_0^{2\pi} h \cdot \cos\theta \cdot \left( \frac{L}{\pi} + h \cos\theta \right) d\theta \\ &= h \int_0^{2\pi} \left( \frac{L}{\pi} \cos\theta + h \cos^2\theta \right) d\theta \\ &= h \left[ \frac{L}{\pi} \sin\theta + \frac{h}{4} \sin 2\theta + \frac{h}{2} \theta \right]_0^{2\pi} = h \left[ \frac{h}{2} \cdot 2\pi \right] = \pi h^2.\end{aligned}$$

如果波峯面積等於波谷面積，則差額  $\omega$  將等於零。因此，當水在靜止狀態時，波浪  $abc$  下落並佔據矩形面積  $aa_1c_1c$ ，小於  $aa_0c_1$ ；顯然，面積  $aa_0c_1$  等於  $\omega = h_0 \cdot 2L$ ，於是餘擺線波浪中心線在靜水位以上的上昇高度  $h_0$  等於：

$$h_0 = \frac{\omega}{2L} = \frac{\pi h^2}{2L}. \quad (9)$$

流體波動的餘擺綫理論，雖然並不適合流體力學的無旋渦運動的基本方程式，但鑒於基本運動方程式的結論，關係簡單，因此仍被採用。水槽中試驗所得的未經反射的波浪的實際斷面形態，近似於理論曲線——餘擺綫。

流體中任意點的水動壓力，可按下式決定：

$$p = \frac{\pi h^2}{2L} \left( e^{-\frac{2\pi z_0}{L}} - 1 \right) + z_0. \quad (10)$$

以上引述了水深無限時的餘擺綫波浪方程式。

布心耐斯克氏於1869年提出了有限水深的餘擺綫波浪方程式。此等方程式確定水點作橢圓運動，與水深無限時的圓周運動不同。

法拉蒙氏考慮無限水深時重複波的情況，繼續對餘擺綫波

動理論作了進一步的發展。

1928年法國工程師森弗羅氏提出與法拉蒙氏結論相似的當水深有限時重複波的方程式。

以下引述森弗羅基本公式的簡短結論。

森弗羅氏將水深無限及有限時通常的餘擺線波浪方程式與水深無限時重複波方程式相比較，藉相似方法求出水深有限時的水點運動方程式。

在水深有限的條件下，森弗羅氏重複波方程式的形式如下：

$$\left. \begin{aligned} x' &= x_0 + 2r \cdot \cos kx_0 \cdot \sin \sigma t \\ z' &= z_0 - 2r' \cdot \sin kx_0 \cdot \sin \sigma t - \frac{2\pi r r'}{L} \cdot \sin^2 \sigma t \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

式中：  $x_0, z_0$  —— 靜止狀態下的質點座標

(並非質點作軌道運動時所環繞的中心的座標)，  $z$  軸以向下為正；

$2r'$  —— 質點運動的橢圓軌道短軸的一半(圖 9)；

$2r$  —— 長軸的一半；



圖 9 重複波質點橢圓運動的半軸

$$k = \frac{\pi}{L}, \sigma = \frac{\pi}{T}.$$

為求得各個質點的軌跡，森弗羅氏自(11)式消去  $t$  並得出下列方程式：

$$\begin{aligned} & \frac{2r}{kr'} \cdot \cos^2 kx_0 \left( z' - z_0 - \frac{r'}{2kr} \cdot \sin kx_0 \right) \\ & + \left( x_0 - x + \frac{1}{2k} \cdot \sin 2kx_0 \right)^2 = 0. \end{aligned} \quad (12)$$

上式為具有垂直軸並向下凸出的拋物線方程式。

半軸數值仍與水深有限時通常(未受干擾)餘擺線波浪方程



式所給數值相同，亦即

$$\left. \begin{aligned} r &= h \frac{\operatorname{ch} k(H-z_0)}{\operatorname{sh}(kH)} \\ r' &= h \frac{\operatorname{sh} k(H-z_0)}{\operatorname{sh}(kH)} \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

式中：H——水深。

週期  $2T$  亦維持不變，其公式與通常波浪同：

$$2T = 2\sqrt{\frac{\pi L}{g} \operatorname{cth} \frac{\pi H}{L}}. \quad (14)$$

方程式(11)及(12)中， $z'$  自靜水位算起；第二方程式最後一項表示波高中心線在靜水位以上的上昇高度，亦即(圖 10)：

$$h_0 = \frac{2\pi r r'}{L} = \frac{\pi h^2}{L} \times \frac{\operatorname{sh} 2k(H-z_0)}{\operatorname{sh}^2(kH)}$$

或(當  $z_0 = 0$  時)

$$\begin{aligned} h_0 &= \frac{\pi h^2}{L} \times \frac{\operatorname{sh}(2kH)}{\operatorname{sh}^2(kH)} = \frac{2\pi h^2}{L} \times \operatorname{cth}(kH) \\ &= \frac{2\pi h^2}{L} \operatorname{cth} \frac{\pi H}{L}. \end{aligned} \quad (15)$$

最大及最小水動壓力以下列兩式決定：

$$\left. \begin{aligned} p_{\text{最大}} &= z_0 + 2h \left( \frac{\operatorname{ch} \frac{\pi(H-z_0)}{L}}{\operatorname{ch} \frac{\pi H}{L}} - \frac{\operatorname{sh} \frac{\pi(H-z_0)}{L}}{\operatorname{sh} \frac{\pi H}{L}} \right) \\ p_{\text{最小}} &= z_0 - 2h \left( \frac{\operatorname{ch} \frac{\pi(H-z_0)}{L}}{\operatorname{ch} \frac{\pi H}{L}} - \frac{\operatorname{sh} \frac{\pi(H-z_0)}{L}}{\operatorname{sh} \frac{\pi H}{L}} \right) \end{aligned} \right\} \quad (16)$$

$z_0$ ——靜止時質點座標；在(16)式中令  $z_0 = 0$ ，我們可根據公式第二項前面的符號求得自由表面波峯或波谷處的波壓力。顯然，該