

---

水工結構应力分析丛書之六

---

# 重力坝

潘家铮編著

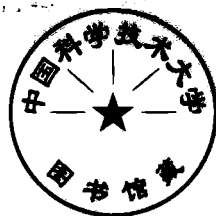
---

科技卫生出版社

水工結構应力分析叢書之六

# 重 力 壩

潘家鏗編著



科技衛生出版社

## 內 容 提 要

本書內容專述有關重力壩之理論和計算方法，並附有計算表格及實例。其中也特別介紹了重力壩應力的非線性分析——擬板法的原理，可供水利工程人員及大中水利學院學生參考之用。

水工結構應力分析叢書之六

## 重 力 壩

編著者 潘家鈞

\*

科技衛生出版社出版

(上海南京西路 2004 號)

上海市書刊出版業營業許可証出 093 號

上海市印刷四廠印刷 新華書店上海發行所總經售

\*

統一書號：15 · 1018

開本 850×1168 1/32 · 印張 3 15/16 · 字數 96,000

1958 年 11 月第 1 版

1958 年 11 月第 1 次印刷 · 印數 1—2,200

定價：(10) 0.60 元

## 目 录

第一章	总論	1
第二章	計算假定和荷載	8
第三章	荷載組合及穩定計算	16
第四章	水平断面上的正应力、剪应力和壩面主应力的計算	21
第五章	垂直断面上正应力的計算	27
第六章	剪应力和垂直面正应力的几何解法	35
第七章	主应力的計算和成果表示	43
第八章	求 $\sigma_y$ 公式的导演	47
第九章	計算表格及实例	58
第十章	用基本因素法計算重力壩	82
第十一章	重力壩应力的非綫性分析——拟板法的原理	93
第十二章	边界值的确定	99
第十三章	拟板計算	115
参考文献		122

## 第一章 總 論

重力壩是堤壩的一種，借其本身重量維持穩定，其應用範圍至為廣大。遠在兩千年前，人們就用石塊堆築起攔水的重力壩來，以達到蓄水，導水或沖動水輪等作用。到今天，重力壩更為廣泛的被採用于水力發電和水利工程中，它的高度可以達到 250 ~ 300 公尺，長度達到幾公里，而且這些紀錄還在繼續不斷的被打破。

重力壩比其他各種壩型更早和更廣泛的被人採用並不是偶然的，它具有許多優點：例如結構作用清楚，和拱壩等相比較對基礎要求較低（蘇聯已有了極豐富的在軟弱地基上造重力壩的經驗），設計施工簡易，溢流問題較易解決等等；當然它也有缺點，主要是它既然要借重力來維持穩定，則體積就不可避免的較大，耗用材料較多，其中絕大部分材料的強度是未能充分利用的。體積既大，施工期也將較長，故在適當條件下，拱壩、垛壩、土壩和堆石壩常為和重力壩相比較的對象。但即使如此，重力壩仍為一極重要的有代表性的壩型，它的計算方法將為我們首先所應詳細研究。

重力壩被人類採用的歷史，雖可上溯到千年以前，但首次計算其應力的嘗試，恐要推諸 1898 年法人 M. Levy，他得出一個表面上受水壓力的楔形體的應力公式。1913 年 S. D. Carothers 用彈性力學方法研究了同一課題。以後各國彈性學者都研究過重力壩的數學分析法，特別可以指出的是 J. H. A. Brahtz 氏用角緣本征函數計算基礎影響，Галеркин 氏得出計算梯形截面及壩內有大孔口存在時的答案，以及各種數值解法（有限差分法等）的發展。

用彈性理論計算重力壩應力，可以得出在理論上為絕對“準確”的數學解答，不幸彈性力學的公式通常只限于幾種極簡單的情

况,当边界条件较复杂时,弹性力学的公式将繁复无比,甚至不能以有限的数学式子表达出来,而须改用数值解法,诸如有限差法或拟板法等。因此,在中等高度的壩体,我们常放弃弹性力学的途径,而采取几条近似而合理的假定,使重力壩在任何荷载作用下的应力都能迅速计算出来——这便是本书第四至第十章所介绍的“重力分析法”。至于重力壩应力的精确分析,其困难尚多,本书在第十一至十三章中扼要介绍了一种在实际上较为适用的“拟板法”,其他的弹性理论分析方法很多,本书不再详予叙述,读者可参考有关专著(参考文献6)。

## 第二章 計算假定和荷載

在本書的計算中，我們採用下列假定：

(1) 全部荷載均由重力作用負擔。這個假定在普通重力壩中是準確的，特別是重力壩垂直縫中不進行灌漿時為然。如果垂直縫中進行灌漿，則重力壩在水平面上將起一根梁的作用，準確的計算，必須象拱壩一樣採用試載法進行。根據某些重力壩的精確計算結果表明，如峽谷較寬（即  $L/H$  之比值較大），梁的作用一般是不顯著的。在垂直縫未灌漿前，並設縫內沒有樺槽，當然全部荷載都由重力負擔。

(2) 在壩中任意取一水平截面，該截面上的正向應力（垂直應力） $\sigma_x$  呈直線變化。這個假定是重力分析中最基本和為眾熟知的一條。實際上，如上章所述，重力壩的應力計算是一個彈性力學上的問題， $\sigma_x$  的分布方式不能任意假定；但根據精確理論計算的成果，可以得到如下的結論：在重力壩的上部（約占全高的  $2/3$ ）， $\sigma_x$  的分布非常接近直線變化，在下部（約占全高的  $1/3$ ） $\sigma_x$  的分布不再完全呈直線變化，而在上下游表面處有顯著的應力集中現象。特別在接近基礎處，這些現象更為突出。在設計中等高度或低的重力壩時，我們一般不考慮這些影響，只把它當作局部的應力集中問題來看待，而得應用近似的理論進行計算，但當壩的高度甚大（例如 100 公尺以上）或壩的等級極為重要時，我們必須更好的考慮非線性應力分布問題，將在第十一至十三章中略加敘述。

(3) 水平斷面上的剪應力（ $\tau$ ）呈拋物綫變化，垂直斷面上正應力  $\sigma_y$  呈三次方變化。前一假定和普通材料力學中對梁的假定相同。注意，若我們承認假定(2)，則由平衡條件，不難證明本條也必

然成立。

(4) 計算中考虑地震影响时,我們假定地震方向为水平且垂直于壩軸。如地震方向为垂直(上下震动)时,其影响等于將壩体及水重增加一个比数(或减少一个比数);因此壩体在垂直地震下的計算,和无地震时相同,只要把壩体及水的容重改变一下即可。这种情况一般不是控制情况,以下我們將不再詳細叙述它了。

在本書中,我們將考虑以下几种荷載。

(1) 壩体自重 这个荷重比較最肯定,在壩体容重确定后,即可相当精确的計算出来。对于混凝土壩,其容重常取为  $\omega_0 = 2.4$  公吨/公方,重要的工程  $\omega_0$  須通过工地試驗測定。

(2) 水压力 水压力有上游水压力及下游水压力,如壩面有坡度,則水压力可分解为两部分,① 水平压力,以公式  $p = \omega h$  計算,② 水重,即壩坡以上到水面間的水的重量。当水面高程及壩坡确定后,水压力可以精确的計算出来。水的容重  $\omega = 1$  公吨/公方得視為不变值。

(3) 上托力(揚压力) 上托力包括浮力及渗透压力。設上游水头为  $h_u$ ,下游水头为  $h_D$ ,則浮力沿壩底均匀分布,其强度即  $h_D$ ,渗透压力在上游面处可假定等于  $h_u - h_D$ ,以后均匀变化,到排水管处減为  $\beta'(h_u - h_D)$ , $\beta'$  之值視基础种类,壩基灌浆及排水设备如何而定,一般选用  $\beta' = 0.2 \sim 0.3$  ①,排水管以后,再均匀变化到下游面为 0。上托力作用的面积,一般假定 100% 有效;但也可以視各工程实际情况,取为 70% 或其他。

上托力是重力壩設計中的一个重要数据。对于具有重大意义的堤壩, $\beta'$  之值應該通过数学計算或用电似試驗求得設計数据。

当排水系統全部失效时,上托力可假定沿全截面为直綫变化,

①  $\beta'$  值的選擇,理論上可通过渗透計算来决定,可参考有关專著。实际上这种計算难期精确,故多根据工程具体情况,并参考类似建筑物的实测成果,予以估計决定。



上游水头为  $h_u$ ，下游为  $h_D$ ，只是这个情况应该认为是一种非常情况（图1）。

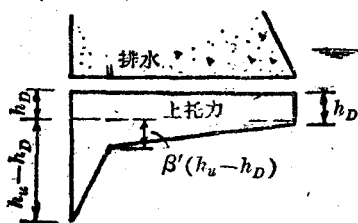


图1

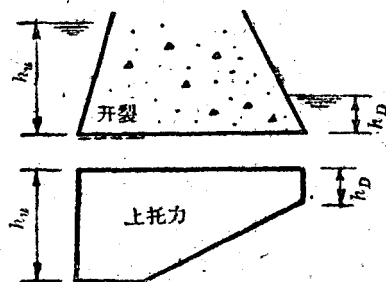


图2

如果壩体有一部分受拉力而开裂时，则该部分内应该用100%水头和面积，如图2所示。

在壩基断面，帷幕灌浆线上游部分的上托力也常常假定用100%的水头。

(4) 地震力 地震时，壩体的惯性力为

$$\beta \alpha K_e W = \lambda W (\lambda = \alpha \beta K_e) \quad (1)$$

式中  $W$  为壩体重量， $K_e$  为地震系数，视地震级数而定，7级地震区  $K_e$  取为  $\frac{1}{40}$ ，八级为  $\frac{1}{20}$ ，九级为  $\frac{1}{10}$ ，（6级以下可以不考虑地震影响）。 $\alpha$  为一系数，视高程而变。在壩底处  $\alpha=1$ ，在壩顶处  $\alpha=2$ ，在离壩顶为  $h$  处  $\alpha=1+\frac{h}{H}$ （ $H$  为壩全高）。 $\beta$  为基础校正系数。一般重力壩多筑在良好的岩石基础上，这时  $\beta$  可取为  $\frac{1}{2}$ （以上均参见地震区建筑物规范）。

地震时，壩上下游有水的激荡力，可按下列式计算：

$$q_r = K_e \rho \dot{H} \left( 0.3 + 0.5 \frac{h}{H} \right) \quad (2)$$

这是一个近似的计算式子，但能给出相当准确的数值，而且式子简单，故多引用之，但只适用于垂直壩面。

一般壩的上游面常有坡度，如图 3 所示，若垂直段長度  $h \geq \frac{H}{2}$ 。

計算水的激蕩力时，可忽略斜坡影响，选用式(2)計算。若  $h < \frac{H}{2}$ ，

则不妨視作斜面計算，如图中虛綫所示。

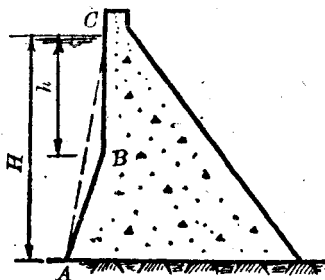


图 3

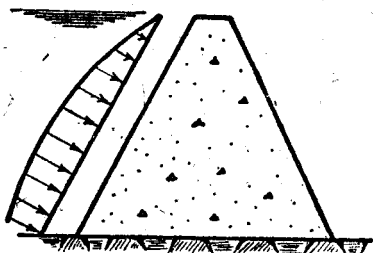


图 4

当壩面为斜坡时，在地震中水的激蕩压力极难由理論精确計算。国外曾有用电似法測定其影响，其成果一般如图 4 所示，水的激蕩力呈曲綫分布，最大压力并不在底部而在約 1/3 高度处。

在斜面上的水地震激蕩力，可以近似的这样計算，令

$H$ ——壩全高（公尺，即水庫深度）；

$N$ ——地震周期（秒，一般取  $N=1$ ）。

从下式計算系数  $C$

$$C = \frac{0.818}{\sqrt{1 - 0.0832 \left( \frac{H}{100N} \right)^2}} \quad (3)$$

则在深度为  $h$  处的激蕩力为

$$p_E = \alpha' K_c C \sqrt{Hh} \quad (4)$$

式中  $K_c$  仍为地震系数（0.1, 0.05 等）， $\alpha'$  为~坡度校正系数，可由图 5 中得之，当壩面垂直时， $\alpha'=1$ ， $p_E = K_c C \sqrt{Hh}$ ，此为美国通用的計算激蕩力的公式（已化为公制），取  $N=1$ ， $H=50$ （平均壩高，因  $H$  对  $C$  的影响不大）， $C=0.827$ ，因而

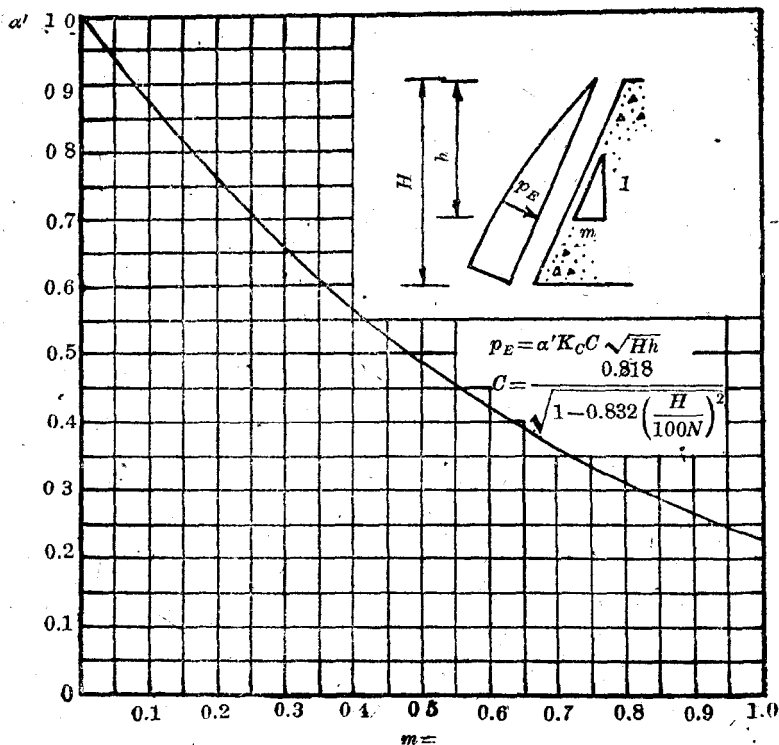


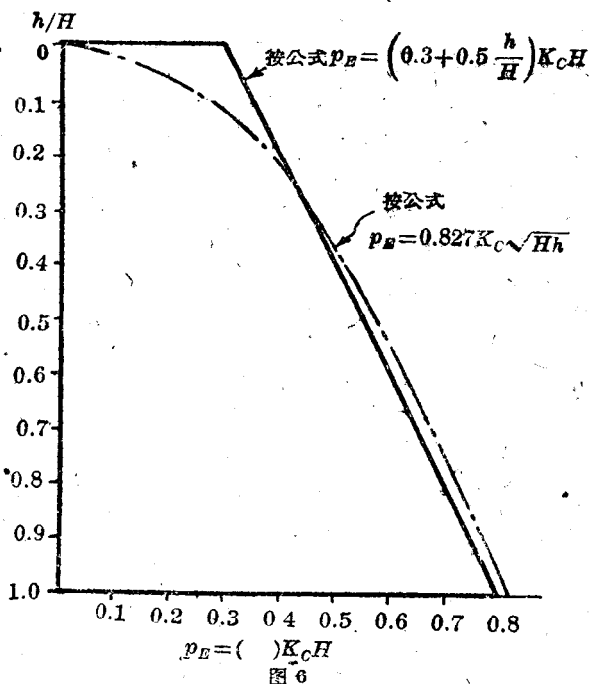
图 5

$$p_E = 0.827 K_c \sqrt{Hh} = 0.827 K_c H \sqrt{\frac{h}{H}}$$

因地震规范上公式

$$p_E = K_c \left(0.3 + 0.5 \frac{h}{H}\right) H$$

当  $\frac{h}{H} = 0.1, 0.2, \dots, 1$  时, 由两式计算出的  $p_E$  值, 绘在图 6 上以供比较。由图可见两者基本上相接近。由于地震时水的激荡力本身是很复杂的问题, 应用式 (4) 也不一定比用式 (2) 精确多少。因此, 在计算垂直的坝面上的激荡力时, 可用式 (2), 计算倾斜坝面



上的激蕩力时可用式(2)乘以图5中的系数 $\alpha'$ ,或用式(4)亦可,如用式(4),则以下几个公式有些用处:

(1) 任何一点 $h$ 处的激蕩力

$$p_E = \alpha' K_c C \sqrt{Hh} \quad (4)$$

(2) 任何一点 $h$ 以上全部激蕩力

$$p_E = \frac{2}{3} \alpha' K_c C h \sqrt{Hh} \quad (5)$$

(3) 任何一点 $h$ 以上全部激蕩力对此点之力矩

$$= \frac{4}{15} \alpha' K_c C h^2 \sqrt{hH} \quad (6)$$

(4) 若 $h=H$ (壩底),则以上三值各

$$= \alpha' K_c C H, \quad \frac{2}{3} \alpha' K_c C H^2, \quad \text{及} \quad \frac{4}{15} \alpha' K_c C H^3 \quad (7)$$

激蕩力和水壓力一樣，必垂直于壩面，故當壩面傾斜時，激蕩力  $p_E$  可分為水平及垂直兩分力。設壩坡傾角為  $\theta$ ，則斜面上的壓力  $p_E d_S$  可分為  $p_E d_S \cos \theta = p_E d_S$  及  $p_E d_S \sin \theta = p_E \cdot d_v$ ，詳見圖 7 所示：

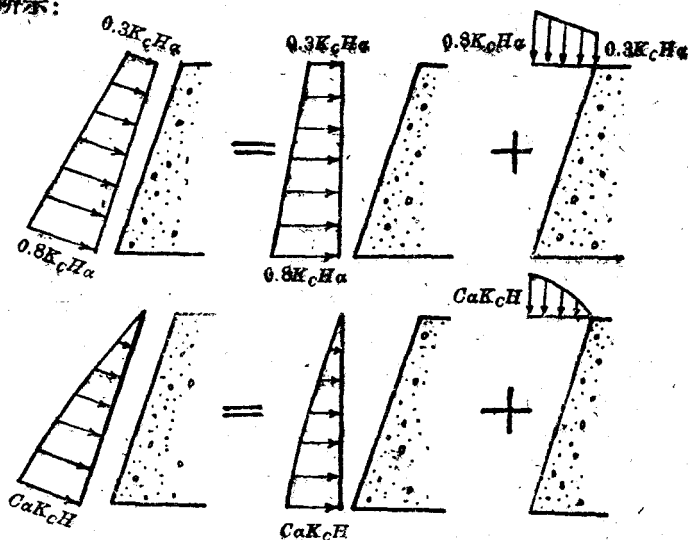


圖 7

上圖指地震時加速度指向水庫，若加速度方向相反，則激蕩力方向當然也相反。

(5) 淤沙壓力 當水庫逐漸淤積時，壩上游面除水壓力外，尚存在淤沙壓力。如果水庫較大，固體逕流又較小時，則水庫淤積將很緩慢，淤沙壓力就不一定需要考慮。

淤沙壓力常按土壓力公式計算，其水平壓力用下式求之：

$$p = w'h' \frac{1 - \sin \phi}{1 + \sin \phi} \quad (8)$$

式中  $w'$  為淤沙在水中浮重， $\phi$  為其內摩擦角，應根據勘測資料決定。如無可靠資料， $w'$  可近似取為 1.35~1.45 噸/立方公尺， $\phi$  取為  $30^\circ$ 。

淤沙压力的垂直分力即为淤沙重量,和水重同样计算。

长期淤积在壩前的泥砂,底部会逐渐固结,固结后压力会减少。因此用上述公式计算是偏大一些的。

(6) 冰压力 在寒冷地带造壩,水庫表面常结冰。其厚度可自数公分至1公尺余不等。当气温渐高时,冰会膨胀,因而发生冰的挤压力。此项压力,当然不会超过冰的压碎强度。但冰的瞬时压碎强度可以大至70.0公斤/平方公分,若冰层较厚,这样算出来的冰压力会大得可观。据一些学者意见,当温度渐高冰渐膨胀而发生的压力,与温度上升的速率有关。图8中为一张曲线图,可用以较合理的计算冰压力。其步骤是设冰层的温度在 $t$ 小时内上升 $\theta^\circ$ ,则上升率为 $\frac{\theta}{t}$ ( $^\circ\text{C}/\text{小时}$ ),由此值在图中查出压力率,乘以 $t$ 即得每单位面积上的冰压力。兹举一例以说明之,例如某壩水庫面冰厚50公分,温度在16小时内上升 $29^\circ\text{C}$ ,则上升率为 $\frac{29}{16}=1.81^\circ\text{C}/\text{小时}$ ,由图中查得压力率为1公吨/平方公尺/小时,乘以16得16公吨/平方公尺,乘以冰厚得8吨/公尺,换言之,在壩頂每公尺有8吨的冰压力作用。

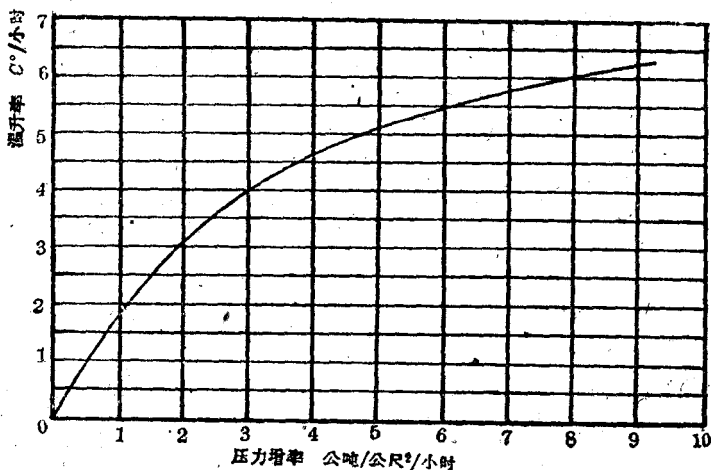


图8

按照苏联国家标准,冰压力应用以下公式计算:

1. 壩前冰冻面长度(垂直壩轴量起)小于50公尺者按罗依恩公式(这情况在重力壩中少见)。

$$P_T = 0.9 h (t_0 + 1) \sqrt[3]{\frac{t_0}{s} (t_0 + 1)^2} \quad (9)$$

式中:  $h$ ——冰的厚度,公尺,采用当地长期观测的最大值;

$s$ ——气温连续上升的持续时间,小时(采用最不利的数值)

如无资料,取  $\frac{t_0}{s} = \frac{6}{t}$ ;

$t_0$ ——在  $s$  小时内,冰的温度的最大可能连续升高值,采用  $0.35 t$ ;

$t$ ——在  $s$  小时内,气温升高值。

例如上述例题中,  $h = 0.5$ ,  $t = 29^\circ$ ,  $t_0 = 0.35 \times 29 = 10.15$ ,

$$\frac{t_0}{s} = \frac{6}{29} = 0.2065$$

故

$$P_T = 0.9 \times 0.5 \times (10.15 + 1) \sqrt[3]{0.2065 \times 11.15^2} = 14.8 \text{ 吨/公尺}$$

2. 如冰面长度  $L_n$  在 50~150 公尺或更大时,冰压力  $P_T$  按下表采用:

冰层厚度 $h$ (公尺)	$L_n \geq 150$ 公尺	100	75	50
1.5	28	39	47	55
1.2	20	25	30	36
1.0	15	19	23	27
0.7	10	13	17	20
0.5	7	8	10	13

冰层对壩面除有膨胀推力外,尚有浮冰冲动的撞击压力,和水面涨落时对壩面的磨蚀力,及壩内渗透水的冰冻上托力等。这些在重力壩设计中不重要(除非在极冷地区),故不详述。

如果重力壩是作为海塘用,海水的冰冻作用一般是不计的。

(7) 波浪超高及压力 重力壩设计中,波浪超高及压力通常

不起重要作用,我們可应用以下公式进行估計。

茲先說明公式中所用的符号于下(參見圖 9a):

- $a$ ——壩底处的剩余压力(超过静水压力部分),單位公尺;
- $C$ ——渐进波的波速,以公尺/秒計;
- $g$ ——重力加速度,= $9.81$  公尺/秒<sup>2</sup>計;
- $H$ ——水庫水深(静水位),以公尺計;
- $H_{xp}$ ——临界水深(波浪碎裂之水深),以公尺計;
- $2h$ ——微波的高度,以公尺計;
- $4h$ ——駐波的高度,以公尺計;
- $h_0$ ——水波中心綫超出静水面的高度,以公尺計;
- $2L$ ——微波或駐波的波長,以公尺計;
- $P$ ——已知点上的水压力,以吨/平方公尺計;
- $R_e$ ——波峰来近时,波浪加在壩面上的全部剩余压力(一公尺長計),吨/公尺;
- $R_v$ ——波谷来近时,波浪加在壩面上的全部剩余压力(一公尺長計),吨/公尺;
- $M_e$ —— $R_e$  引起的对壩底力矩,以吨-公尺/公尺計;
- $M_v$ —— $R_v$  引起的对壩底力矩,以吨-公尺/公尺計;
- $2T$ ——波浪周期,即波浪傳播  $2L$  長时所需時間,以秒計;
- $W_e$ ——波峰来近时的剩余上托力;
- $W_v$ ——波谷来近时的剩余上托力;

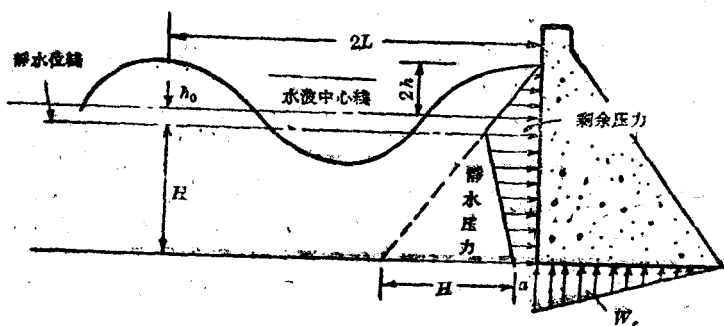


圖 9a (a)



首先我們要算出波高,波長等要素,这主要根据风速 $W$ (公尺/秒)及吹程 $D$ (即水庫沿风向的長度以公里計)計算。

1.  $D > 1500$  公里时 (这情况在水庫中几乎不可能遇到), 用庫茲涅佐夫公式:

$$2h = (\log D)^2 - \frac{1}{\log D} \quad (10)$$

2.  $1500 > D > 60$ , 用貝尔格公式:

$$2h = \frac{0.33 W}{\left(1 + \frac{6.7 W}{D}\right) \left(1 + \frac{1.86}{t}\right)} \quad (11)$$

$$2L = \frac{12.34 W}{\left(1 + \frac{47.9 W}{D}\right) \left(1 + \frac{13.3}{t}\right)} \quad (12)$$

式中 $t$ 为风的延續時間,以小时計。

3.  $D < 60$ , 用史蒂文生公式:

$$2h = 0.34 \sqrt{D} + 0.76 - 0.26 \sqrt[4]{D} \quad (13)$$

4. 在 $3 < D < 30$  情况中或可按安得烈雅諾夫公式計算

$$2h = 0.0208 W^{5.4} D^{1/3} \quad (14)$$

在水庫中,  $\frac{2L}{2h}$  一般在 $8 \sim 12$  範圍中。

求出 $2h, 2L$ 等后,可进而計算波浪压力,首先考虑壩面垂直,波峰来近情况(图9a)。

$$\hat{R}_e = \left[ \frac{(H + h_0 + 2h)(H + a)}{2} - \frac{H^2}{2} \right] \gamma \quad (15)$$

式中

$$h_0 = \frac{4\pi h^2}{2L} \operatorname{cth} \frac{\pi H}{L} \quad (16)$$

$$a = \frac{2h}{\operatorname{ch} \frac{\pi H}{L}} \quad (17)$$

$$M_e = \left[ \frac{(H + h_0 + 2h)^2 (H + a)}{6} - \frac{H^3}{6} \right] \gamma \quad (18)$$