



第六次国际大坝会议论文选集之五

混凝土坝性能的观测

И·А·普列奥布拉仁斯基等著
水利水电科学研究院译

中国工业出版社

目 录

| | |
|---------------------------------|-----|
| 大坝水流脉动压力和振动的試驗室和实地观测研究 | 2 |
| 混凝土坝毁坏后修建工程中的灌浆、排水和变形观测 工作 | 22 |
| 坝体观测成果的定量解析法 | 46 |
| 应用视准仪量测爱迪生公司坝的位移 | 67 |
| 垂线坐标仪观测分析研究 | 89 |
| 采用埋设内部的垂线坐标仪量测和分析坝体变形的 方法 | 101 |
| 用大地测量法确定瑪尔卡巴左坝位移的实测和 计算工作 | 119 |
| 利奥佛莱多坝变形观测所建立的大地三角网 | 135 |
| 派夫狄卡杜尔坝初期三角网测量的地球物理说明 | 146 |
| 固定测站上的基准仪在用大地测量方法测定 坝体位移中的应用 | 165 |
| 提高大坝变形观测中三角网大地测量精度的基本 研究 | 181 |
| 拱坝性能的分析方法 | 192 |
| 日本大坝结构性能观测现状 | 215 |
| 須田貝坝性能的观测 | 267 |
| 日本上椎叶拱坝的实测与计算成果的比较 | 271 |
| 地基处理过的支墩坝观测 | 298 |
| 卡別列尔混凝土坝的实测结果 | 315 |
| 美国垦务局大型混凝土坝结构性能的观测 | 362 |

大壩水流脈動壓力和振動的 試驗室和實地觀測研究^①

(蘇聯)H.A.普列奧布拉仁斯基

摘 要

本文提出了水工結構物上水流壓力和水力脈動荷載的試驗室和實地觀測的成果，作為在實地情況下由於這種荷載而發生的壩體振動的研究記錄。所獲得的脈動壓力與水流水力參數，結構物尺寸和設計特征等之間的关系，有助於設計水工結構物時的附加動荷載的確定。

在岩基和半岩基上以及在軟基上實地觀測壩體振動的結果表明，振動的大小與動力荷載的強度及其特性、地基的類型以及決定壩體自振的壩身動力特征有關。

水工結構物由於動水荷載而產生的振動，具有不規則的特性，因而不大可能發展成為共振。

引 言

為了更加精密地確定結構的設計方法，可以降低設計的安全系數，亦即使結構物在運用過程中承受較高的允許應力，從而可以給出更為合理和經濟的結構物。然而，應力的增高和構件斷面的減小，必須保持在某種限度之內，因為斷面減小可能引起結構物的剛度減弱，而剛度的不足又可能是產生危險性振動的原因。

水工結構物實地觀測的某些數據表明，在宣洩大流量時，整個結構物或單獨構件都會發生劇烈的振動。

① 本文只討論由於脈動水力荷載引起的結構振動問題，並不考慮地震的問題。

振动的結果就发生裂縫，由此导致結構物的破坏。基础土壤由于振动而另外产生了一巨大的动应力，它能使結構物发生不均匀沉陷和位移。

由于土壤受到連續的振动，土壤的物理性质便有所改变，因而降低了結構的稳定性。

軟基上結構物的振动尤其危險。結構物的振动显然是由于一些单独构件部分上所受的脉动水力荷載而造成的。水流脉动的原因可能是由于流速随時間而改变，真空泡的破灭，通气以及随之发生的掺气，水流連續性受到破坏，漩渦的形成和其分离等。例如在溢流工程中，当水面有水跃衔接現象时，也能发生水流脉动現象。

水流和流量越大，結構物的振动也越劇烈。

进入下游消能工的水流，具有大量的动能，而且运动极不規則，水流特点是在全部水深底面积上有强烈的脉动流速和脉动压力。

当作用在护坦板上的水力荷載的脉动相当强烈时，板便引起振动；此种振动傳到板下的土壤，再經過土壤向各个方向扩散开来，使得整块基础发生振动。

当結構物振动的自然頻率与强迫振动的頻率重合时，結構物的振动可能变得十分劇烈。

为了保証合理的設計和保証加强稳定性与强度的計算，以及为了防止結構物的振动，多年来苏联的一些研究所和高等院校，曾对脉动水力荷載和結構振动进行了全面的室内和实地的观测研究。

作者在1948年对于結構物整个下游长度中各点的脉动压力，进行了第一次观测，并且获得了宏观脉动特性的数值分布。这些研究結果特別指出，在某一点所测得的脉动压力数值，可以引伸到点子附近較为有限范围的表面上去。因此，在此以后曾进行了一些研究，以建立构件上点子的脉动压力与全部水力脉动荷載之間的关系。

水流脉动效应与结构振动的一些问题。曾由以下各机构进行研究：全苏水工研究所(A.C.阿別列夫、Л.И.庫明、Н.А.普列奧布拉仁斯基、Г.А.尤底斯基)，苏联科学院的各研究所(Л.И.基尔諾斯、B.Г.提希申科、M.C.法米契夫、Л.А.哈林、И.А.卡尔尼、С.С.朱金諾夫)，水电设计院(Л.М.高帕林、B.Ф.考若洛夫)，莫斯科土木工程学院(M.M.格里申、Г.А.泡希金、Н.И.罗贊諾夫)，等等。

曾在許多水利樞紐中进行了脉动压力和坝体振动的实地观测。

在試驗室和实地进行試驗取决于設計和改善电测仪器方面的大量工作，以及在观测方法方面的进一步发展。

I. 压力和脉动荷載

A. 試驗室研究

1. 研究方法和仪器

試驗室研究脉动压力和作用于结构物上水力荷載所用的方法，一般是相同的。

問題在于确定脉动特性，亦即为确定结构物在各种运用条件下水流参数的振幅 A' 和頻率 n ，即为求解下列一般关系式：

$$A' = f(T_0, q, h, l_0, x, ed, dc, b),$$

$$n = f(T_0, q, h, l_0, x, ed, dc, b),$$

式中 A' ——脉动的最大幅度；

n ——脉动的主頻率；

T_0 ——水流的总能量；

q ——单寬流量；

h ——下游水深；

l_0 ——护坦长度；

ed ——消能工；

dc ——几何条件；

b——上游水流波动；

x——坝趾到下游距离。

由于变数过多，問題的求解有很大的困难。因此，只能將問題簡化來求解，首先求解一个水面銜接为临界形式，并无消能工的二元水流体系，此时，

$$A' = f(T_0, q, x),$$

$$n = f(T_0, q, x).$$

为了研究这两个关系式，曾对在稳定流条件下，水面銜接为底部水跃的情形进行了基本試驗。水流从閘門下流出，或經由一个具有实用断面形式的无鼻坎的溢流坝流出。試驗曾在明槽中和压力管道中进行，对流量、水头、坝高以及模型比例尺作了广泛的变化。

只有研究了这种簡單关系以后，才能够确定其它因素对脉动的影响，这些因素包括下游水深变化，各种消能工的有效性，三元模型以及水工結構的其他設計特点等。

为了量测脉动压力和脉动荷載，曾用电阻絲量测了因外力而引起的应变，并由此而求得外力的方法。

这种方法的优点在于电阻絲很小，足以用来量测水流底部各单独点的脉动。量测时量测器上的作为接收部分的隔膜，应安装平整，使之与水工結構物表面一致。仪器与电阻絲作为一体的振动頻率為每秒 180 次，或者还要高。为了增加低頻率情况时量测脉动的精度，仪器中的压缩空气的压力全部或部分抵消了等于常数的靜压力。

模型装置以及单独点子脉动压力的量测并不复杂，但量测作用在一个构件上的全部水力脉动荷載，即使在試驗室試驗的条件下，也有一些困难。困难地方在于必須保証充分高的自然頻率。可用悬挂彈簧量测結構部件，而且水流的自然頻率应較强迫振动的最高頻率為高。如果这些要求不能滿足，則水流系統中可能发生共振，或者慣性力开始作用。

曾对自由水流和压力水流进行脉动压力的量测。压力水流即

为装有閘門的压力管道模型，在閘門附近的断面上曾观测到巨大的脉动压力，而自由水流则为装在明槽中的坝后式护坦底板的模型。

图1示明了明槽中的模型装置，用来研究脉动压力对悬挂弹簧的护坦板所产生的影响(参考文献15)。由于护坦板上有着大量的水流，因此所用的弹簧是薄鋼条的拉力弹簧。鋼条的拉力数值约为0.7米/公斤，应变則用直接胶贴在鋼条上的电阻絲来量测。每一块1米长、50厘米寬的护坦板，利用可以調节长度的垂直的悬挂鉸鏈，悬挂在四个鋼条上。今用两个水平电阻絲来量测板所承受的纵向水平应力。护坦板的死荷重和水流作用，使得鋼条适当地伸长和消除鉸中所产生的作用。在板子周圍的縫隙处紧貼一层不变形的薄橡皮条。护坦板加上最大水重后在垂直方向的自然頻率是110次/秒，而在水平方向的自然頻率則是150次/秒。水流系統的自然頻率远高于量测的脉动頻率，这个事实可以用来对仪器进行靜力率定。所得率定的特性具有緩性关系，而且很稳定。

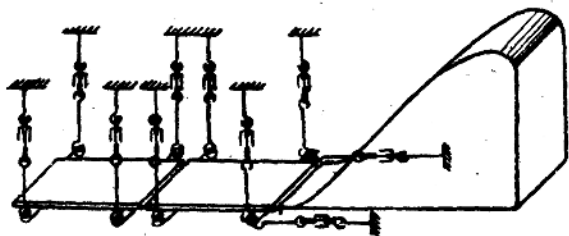


图1 模型装置略图

研究成果的分析工作即用示波仪所得的数值来确定最大脉动幅度(最大脉动幅度为在长期間观察到的最大压力与最小压力的差值和脉动頻率)。主頻率画出机率分布周期曲綫，这样就给出了頻率特征曲綫。

2. 研究成果

单独点子的脉动压力——法米契夫所作的溢流坝面上脉动压

力的量测实验指明,由于水流运动平行流线的均匀变化,且不受任何障碍物的干扰,因而即使流速很大,水流中仍只有很小的脉动。

脉动幅度不超过收缩断面处的流速头的5%。

在水跃衔接的情况中,水流运动极不规则,护坦板上同一点的脉动压力历时记录,显示出了具有各种极不规则的形状、大小和周期的非周期振动。

最大的脉动压力幅度发生在水跃的开始处,其值达到收缩断面处流速头的40~50%。下游脉动逐渐减小到等于水面波动的频率。

根据在临界状态 $D=1$ 及 $F=20$ 到60的水跃进行实验的结果(此处 $D=h_2/h_1$ 系下游水深对第二衔接水深的比值, $F=v_1^2/g h_1$ 系收缩断面处的福氏数),曾经建立了脉动压力幅度 A' 与水流基本参数的关系式:

$$\frac{A'}{h_{kr}} = 1.6 F^{0.07} \left(\frac{x}{h_{kr}} \right)^{-\frac{4}{3}}$$

此处 $x=3-40h_{kr}$, x 为坝趾到下游距离, h_{kr} 为临界水深。

图2示明了在上述条件下脉动压力与落差 $Z=T_0-h_1$ 的关系曲线(其中 h_1 为收缩断面处水深)。试验点子十分理想地分布在唯一的曲线附近。

曲线表明在临界状态下水跃波的底流中,在护坦起点 ($x=$

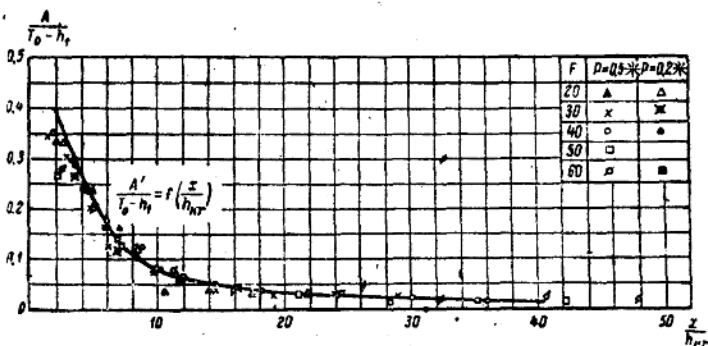


图2 脉动压力幅度与水力参数的关系曲线

$3h_{kr}$)的脉动压力幅度达到落差的30~40%;在护坦的末端($x=8\sim 10h_{kr}$)脉动约为8~10%;而在 $30\sim 35h_{kr}$ 以外处, $\frac{A'}{T_0 - h_1}$ 值约为0.02。因此基本消能区的长度约为 $30\sim 35h_{kr}$ 。

当闸门开度为 $0.4h_g$ 时,压力管道中闸门后面的脉动压力达到收缩断面处流速头的60~70%,在管道底部的脉动压力为顶部脉动压力的两倍,管道壁的曲度随着振动幅度而加大。

脉动組成了一支寬的頻率譜,其中主頻率約由5~25次/秒,頻率隨着閘門開啟度的加大而減小;當開啟度不變時,頻率則流量的增多而加大。

水跃淹沒度的影响——脉动压力随着水跃淹沒程度的增加而减小。相当小的水跃淹沒度即 $D=1.1\sim 1.15$,就可降低脉动压力幅度20%。当水跃淹沒度增加,需要下游水深很深时,則造成

脉动幅度降低很少的后果。

消能工的效果——护坦上采用消能工,可以减小水跃的淹沒深度,因而可以提高护坦高程。在这种情形下消能工起了增加能量消耗及降低消能工后面底部的脉动强度的作用。这是因为消能工使底下的水流翻到上面来,把整个漩渦分散成无数不同方向、不同速度和相互撞击的小漩渦,

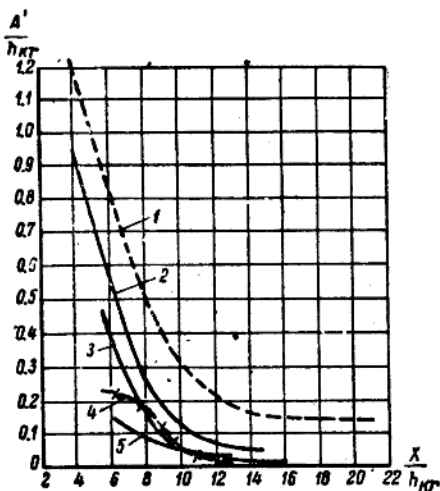


图3 消能工后面的脉动压力

1—水跃; 2—消力塘; 3—消力墩; 4—齿槛;
5—消能物。

促使能量損耗,减小脉动幅度,增加脉动頻率。图3是各种

消能工后面的脉动幅度大小的比較曲綫。

总水力荷载的脉动——一定面积上的水力荷载脉动，是与該面积上各个点子的脉动压力密切有关的。但是在大面积上却有很大的平均脉动荷载，这是由于大面积上各个点子的脉动，不論相位和幅度都不相同的结果。今同时观测装在断面起点和終点的仪器，观测成果表明是不很相同的。这表明脉动荷载的合力可以沿着纵軸移动。莫斯科土木工程研究所的保希金，証实了护坦板的前半部和后半部脉动荷载的时间有着相反的相位趋势。

根据在临界水跃 $D=1$ 的状态下，护坦表面光滑，在护坦上实测的脉动荷载结果，烏狄斯基[参考文獻15]已經获得了最大脉动荷载幅度 A 用长度单位

$\left(\frac{A'}{\gamma S} \right)$ 式中 S 是护坦的面积

表示的关系式:

$$\frac{A}{h_{kp}} = f \left(\frac{T_0}{h_{kr}}, \frac{l_0}{l} \right)$$

式中 $\frac{l_0}{l}$ 是护坦长度 l_0 和水跃长度 l 的比例，按照庫明的数据，即为 $l_0 = 5.67(h_2 - h_1)$ 。此关系式如图 4 所示。

今作出脉动在各个时期的分布曲綫，就可以分析脉动荷载的頻率特性。分布曲綫有一个表示主頻率 n 的最大标志。当坝高一定时，随着流量的增加，主頻率反而减少。

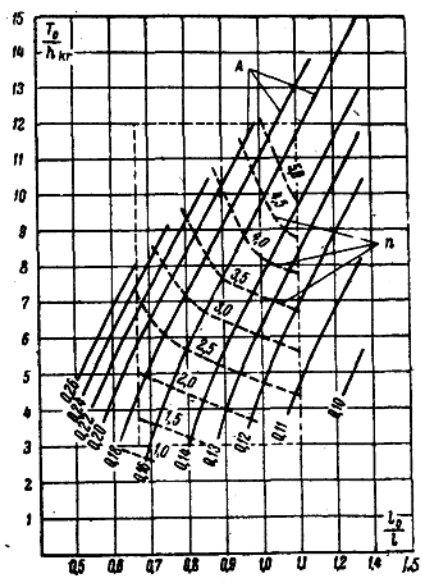


图 4 脉动荷载幅度和頻率与水力参数的关系曲綫

主频率和收缩断面流速成线性关系。这表明频率有一个按照史德路卡相似律比拟的自动模拟区。

在同图(图4)中示明了用无因次单位表示的主频率:

$$\frac{V_1}{h_1 n} = f\left(\frac{T_0}{h_{cr}}, \frac{l_0}{l}\right).$$

频率谱的上界约为主频率的两倍,而其下界则比主频率小10~20倍。脉动最大幅度的特点是周期长,振动频率低。

最大脉动荷载和平均脉动荷载的比值随着高坝的流量和紊流紊动而增加。在实验中比值是0.25~0.09。

根据各个点子的对于整个护坦断面的脉动荷载实际数值而言的脉动压力,就可求得脉动荷载的水流紊动系数,水流紊动系数是随流量而增加的,其值等于0.10~0.15。

水跃淹没度的影响——水跃淹没度到1.10时,淹没水跃对于幅度和脉动荷载频率的影响可以忽略不计,但是如果水跃继续淹没到达 $D=1.50$ 时,脉动幅度降低到11%,脉动幅度降低的原因是低坝宣泄大流量。

频率脉动和频率谱的下界所形成的较低的频率,可以移动到整个漩涡区摆动。非水跃紊流的脉动远比衔接的临界相期要小,大约是0.02~0.07A。

上游波浪的影响——当上游有波浪时,坝面溢流使得护坦上的脉动有所增加,在水面平静时,上游周期振动也要增加脉动。随着水跃淹没度的增加,将会降低护坦上的水流对于脉动的影响[参考文献15]。

消能工的影响——当护坦上没有消能工时,除掉垂直脉动分量以外,还有水平脉动分量。当采用分散的消能工时,则垂直脉动分量要比表面光滑的护坦上的垂直脉动分量为小。消能工愈有效,则淹没水跃的下游水深相应减小愈多,脉动也愈加降低。使用消能工时的主频率大致上和光滑护坦的相同。水平脉动分量是很小的,但却显著地增加了实际剪力的平均荷载(可达20~30%)。

不是連續分散的消能工(如障礙板等),和光滑的护坦比較起来,有时垂直脉动分量不是較小,而是較大。

B. 現場研究和仪器

1. 量測的方法和仪器

在現場情况下,脉动压力是在个别点子上測得的。所用的全部电測仪器中有光电管,或感应式和遙控式的电測仪器;感应膜需要裝得与結構物相平。采用感应式仪器,通过示波仪无需放大器,就可直接記錄讀数。

分析現場研究成果的方法,一般和實驗室研究的方法相同。

2. 現場量測成果

溢流面上的脉动压力——在1938~1940年苏联科学院动力工程研究所在60米高的坝的溢流面上的鼻坎处最大流速的地点(图5),进行了最早的脉动压力量測工作。确定了动水脉动压力无規則的特性,并符合于随机值分布而变的正則規律。

脉动是由河床的形状、糙率、障碍物、掺气和水流的不連續性而决定的。对于掺气水流 (F 由40到90, $\frac{A'}{H} = F_0$ 为1到2) 和連續性遭到破坏的水流 (F 在90以上, $F_0 = \frac{A'}{H}$ ● 則大

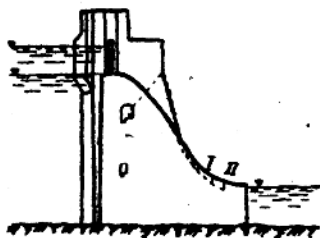


图5 坝体图
I和II——脉动压力的測点。

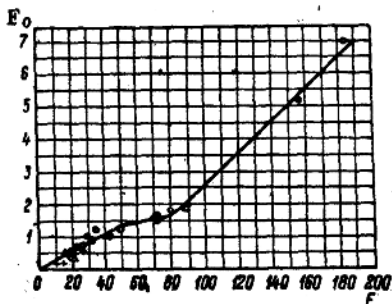


图6 脉动压力 F_0 和 F 的关系曲线

● 式中 H 是上游水深。

于3)(图6)以及带有不平静的扰动和泡沫的特性的水流,脉动压力是非常不稳定的,具有强烈的明显的点脉动。

最大脉动压力的幅度与流速的平方成正比例,在沒有障碍物的均匀断面的水流中,脉动幅度甚小,不超过全部水流能量的5~6%,最大振幅的低频率约为15~30次/秒,而最小振幅的高频率则为50~100次/秒。查努教授认为动水脉动压力仅取决于断面上平均流速的变化,即由流量而决定的。查努求得确定单宽坝体水舌压力分布的分析关系式为(图5,第I、II点):

$$R_x = \left(\rho Q_2 v_2 + \frac{\gamma}{2} h_2^2 \right) \cos \alpha_2 - \left(\rho Q_1 v_1 + \frac{\gamma}{2} h_1^2 \right) \cos \alpha_1;$$

$$R_y = \left(\rho Q_1 v_1 + \frac{\gamma}{2} h_1^2 \right) \sin \alpha_1 - \left(\rho Q_2 v_2 + \frac{\gamma}{2} h_2^2 \right) \sin \alpha_2;$$

$$M_o(\bar{R}) = \left(\rho Q_2 v_2 + \frac{\gamma}{2} h_2^2 \right) (y_2 \cos \alpha_2 + x_2 \sin \alpha_2) \\ - \left(\rho Q_1 v_1 + \frac{\gamma}{2} h_1^2 \right) (y_1 \cos \alpha_1 + x_1 \sin \alpha_1).$$

查努认为,应当假设脉动频率与结构物的自振频率相同。

在用水跃衔接水流的护坦上的脉动压力——法米契夫在研究了护坦上脉动压力之后认为,脉动幅度的大小大体上决定于流量的情况[参考文献12]。今在宽顶堰上溢流,则在护坦开始地方的脉动幅度为 $0.27 \frac{v^2}{2g}$, 在护坦末端则为 $0.17 \frac{v^2}{2g}$ 。而当水流经薄壁堰上溢流时,水流狭窄,流量降低,在护坦开始地方的脉动幅度为 $0.2 \frac{v^2}{2g}$, 在护坦末端则为 $0.11 \frac{v^2}{2g}$, 至于在水舌跌落处的脉动幅度,则为流速水头的40%。

脉动频率在2.7~3.4次/秒之间变化。

图7列出了在溢流坝护坦上面和护坦下面脉动压力的成果。实测平均水流比能为 $T_o = 21.4$ 米,单宽流量 $q = 23.8$ 平方米/秒,水跃淹没度 $D = 1.5$, 福氏数 $F = 23.4$ 。

坝身以一小型的鼻坎和护坦相联,并以3米高的溢水墙作为

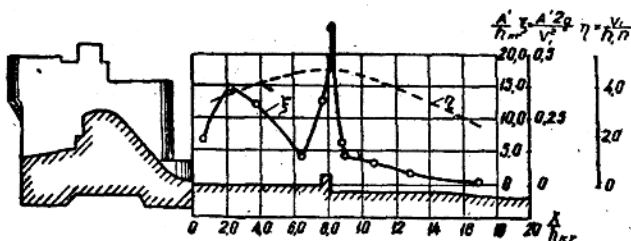


图7 坝下游的脉动压力

消能工。

附图表明在护坦收缩断面上的脉动压力幅度，从相当于流速水头的35%左右起逐渐降至9%，在消力槛前又增加到 $0.30 \frac{v_i^2}{2g}$ 左右。

在消能工墙面上的脉动压力幅度达 $0.54 \frac{v_i^2}{2g}$ ，在墙背上约为 $0.10 \frac{v_i^2}{2g}$ ，逐渐减小到 $0.01 \frac{v_i^2}{2g}$ 。

现场研究成果一般和试验室内的试验资料十分符合。

该坝护坦底板上的总动水荷载在30米长度内约为20吨，在消能工面墙上单宽动水荷载为3吨。

脉动主频率为3至6次/秒，频率谱则高达25次/秒。

C. 动水脉动压力的模型律

在运动相似的紊流中，不但要运动相似，而平均压力场应该相似，并且在相同点上的脉动压力特性亦应相似。按照最大幅度和最佳频率的相似，可以求得脉动压力相似律如下。

因为，假定液体的密度不变，压力幅度的相似性由下列关系式表示：

$$\alpha_{\Delta A'} = \alpha_v^2,$$

式中 $\alpha_{\Delta A'}$ —— 压力幅度的比例系数；

α_v —— 速度比例系数。

今因 $\alpha_v = \alpha_i^{\frac{1}{2}}$ ，则

$$\alpha_{AA'} = \alpha_1 \quad (1)$$

頻率的比例尺，則隨同步時間的准數而定，亦可直接假定個別振動的周期等于特征漩渦与其中中心平均流速的比值而求得頻率的比例尺：

$$\alpha_i = \frac{\alpha_1}{\alpha_v}$$

頻率 n 是周期 $\alpha_n = \frac{\alpha_v}{\alpha_1}$ 的倒數，則由等式 $\alpha_v = \alpha_1^{\frac{1}{2}}$ 得

$$\alpha_n = \alpha_1^{-\frac{1}{2}} \quad (2)$$

(1)、(2) 兩式代表按重力相似律模擬的現象。脈動壓力模型律問題的試驗研究是在縮尺不同而幾何相似的模型中進行的。

圖 8 示明了在 1:1、1:2、1:3 三種比例尺的相似模型上，關下泄流時實測脈動壓力的成果。在 a 圖中脈動壓力幅度是按 (1) 式關係換算，而應用到大比例模型中去。流量的平方值亦按此式換算。

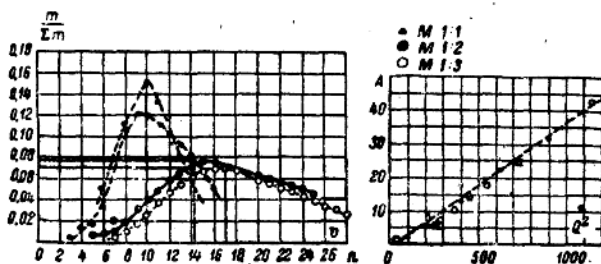


圖 8 脈動壓力和模型比例的關係曲線
(關門開度: 0.2)

圖中表明試驗測點都落在同一直線上，偏差微不足道，這說明脈動壓力幅度與模型比例尺成正比。

在 b 圖中表明上述按 1:1、1:2、1:3 制成的三種模型，在一定的關門開度下，其主頻率（最優頻率）的各個比例是 $\sqrt{1}$ 、 $\sqrt{2}$ 、 $\sqrt{3}$ ，即各個模型脈動壓力的主頻率與模型比例的平方根成反比。

法米契夫在現場觀測中測得了脈動壓力的幅度和頻率，並在 1:5 和 1:10 模型中進行相同的試驗，可用下列無量綱關係式表示：

$$\xi = \frac{A'2g}{V_1^2} \text{ 和 } \eta = \frac{nh}{\nu_1}$$

以上兩式的曲綫如圖 9 所示。這些資料亦顯示了動水壓力的幅度和頻率亦符合重力相似的一般規律。

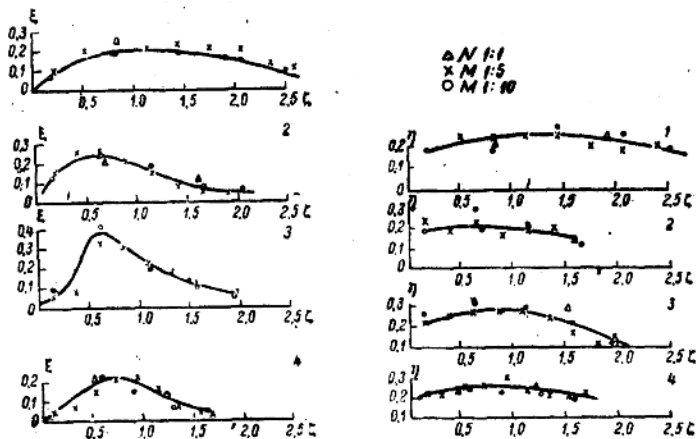


圖 9 壩下游的脈動壓力的現場量測和室內進行的 4 組試驗

$$\left(\xi = \frac{x}{H}, H \text{ 為上游水深} \right)$$

II. 大壩的振動

1. 量測方法和儀器

大壩的振動問題，從 1934 年起至 1954 年在蘇聯一些水電站上已經進行過研究，這些水電站的水工結構物是建造在岩基和半岩基以及軟基上的。

上述研究包括：

(1) 三種相互垂直方向的振動波形、幅度、振動加速度以及

流量增加时的振动过程：

(2) 结构物空间断面上的位移特性；

(3) 坝上振动传播的速度和各个断面振动之间的关系。

为了量测振动，采用了将机械振动转换到电测的各种记录仪器。

同时记录振动的仪器有3个到9个。通常在每点设有3个记录仪器，用来研究和量测垂直方向和水平方向的振动（即为横贯水流和沿着水流运动的方向）。为了确定坝体断面运动状态起见，量测时采用了相同频率特性的各组仪器与一个电流计串联的方法。

2. 量测成果

对在岩基上的混凝土重力坝上面全部溢流、每个溢流坝顶泄流达 375 立方米/秒时的振动进行了研究，以后并研究了通过四个溢流段泄流3,000立方米/秒时的振动情况。

振动的基本原因是溢流水舌对下游面的冲击，水流能量和质量愈大，则其振动也愈大。坝体部分振动的特性是不规则的谱和振动。振动的大小，与各个高度的测点位置有关。测点离坝基愈高，振动愈大。振动幅度还与坝体构件的结构位置以及所测的振动方向有关。最大的振动发生在最小刚度的方向。幅度较大的振动具有较低的频率。实心坝的坝顶最大振动幅度达 50μ ，其频率约17次/秒。在1955年测量到沿水流方向的振幅为 10μ ，其频率为7~17次/秒。坝墩顶面横贯水流方向的振幅为 50μ ，其频率为8~20次/秒。电站引水管的最大支墩振动的幅度达 10μ ，其频率为40~80次/秒。

1954年全苏水工研究院与列宁格勒大学物理研究所合作量测了混凝土溢流坝顶部的振动。坝是修建在半岩基上面的，通过4个 0.5×3 米的临时底孔泄流。当压力水头为40米时，流量为300公方/秒。溢流坝的下游部分承受上游部分土坝的荷载。量测仪器设在闸门操作廊道的地板上，闸门位于基础以上15米处，溢流坝具有40次/秒以上的高振动频率，振谱高达400次/秒，而其振