

导墙动水压力特性研究

张声鸣 陈 建

(水工研究所)

摘 要 介绍三峡水利枢纽溢流坝段与厂房坝段之间导墙的动水压力试验研究情况。给出了不同库水位泄洪工况下,水流作用在导墙上的时均压强、脉动压强及他们的分布规律、脉动频率的统计特性等试验成果。认为:时均压力的分布基本符合静水压力分布的规律;脉动压力的幅值在漩滚区较大,沿水深的分布是近表和近底较小、中间较大;导墙边壁上水流的压力脉动是一种窄带低频脉动。

关键词 导墙;时均压力;脉动压力;脉动频率

0 前 言

在设计泄水建筑物时,不仅要知道静荷载,还必须知道动荷载。水流作用在过流边壁上的动荷载包括平均量和脉动分量两部分。如研究结构的强度、空化、振动等,都必须考虑壁压脉动的幅域特性和频域特性。溢流坝面和消力池底板的脉动压力已有大量的研究成果和原型观测资料可资参考。但导墙上的动水压力,尤其是脉动分量至今研究不多,详细系统的资料极少。而大中型水利枢纽中常常布置有导墙或隔墙,且国内外均有失事的例子,所以必须引起高度重视。特别是三峡水利枢纽这样举世瞩目的特大型工程,其每一个永久建筑物都必须安全可靠。为此,对三峡大坝下游泄洪坝段与厂房坝段之间导墙(简称厂坝导墙)的动水压力,进行了各种典型泄洪工况下时均压力和脉动压力的量测、分析。其成果不仅对该工程设计提供了依据,对今后研究此类问题和类似工程设计均有参考价值。

1 枢纽及模型布置简况

三峡水利枢纽总体布置为:厂房布置在主河槽两侧,左边装机14台、右边装机12台,电厂总装机容量1820万kW;左岸为通航建筑物;溢流坝位于中央主河床,设表孔、深孔、导流底孔。表

孔和导流底孔的中心线在同一纵剖面上与深孔呈相间布置。采用挑流消能。表孔共22孔,每孔净宽8m,堰顶高程158m,鼻坎高程90m,挑角 20° ,反弧半径35m;深孔23孔,每孔净宽7m,高9m,进口底部高程90m,鼻坎高程80m,挑角 27° ,反弧半径40m;导流底孔22孔,每孔净宽6m,高8m,进口底部高程56.5m,鼻坎高程55m,挑角 40° ,反弧半径30m。溢流坝段和厂房坝段用导墙相隔,导墙右侧距表孔左侧边墙为25m,距深孔左侧边墙14m。导墙长265.75m(末端桩号20+380.75),顶部高程首端为83.3m、末端为77.98m,其上为左排漂孔泄槽。

模型为局部整体,上游河段长450m,下游河

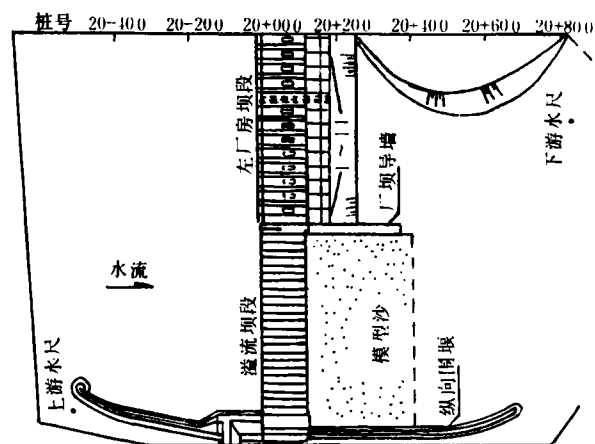


图1 三峡枢纽水工模型布置图

收稿日期:1995-09-12

* 本文为长江科学院基金项目(水基94-2)的一部分内容。

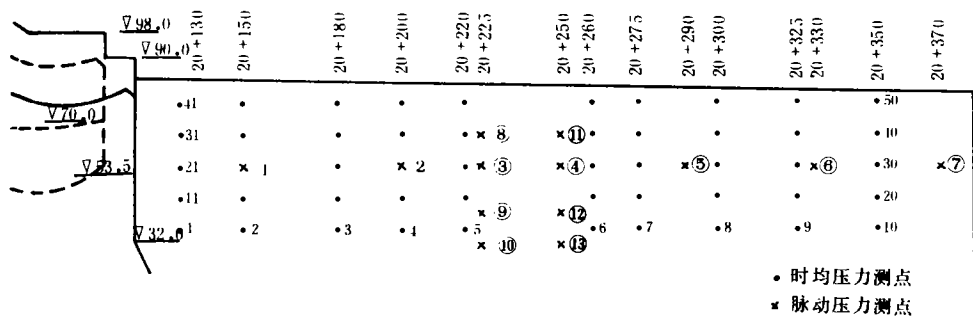


图 2 测点布置图

段长 1 050m, 左边包括 12 台机组, 右边包括砾纵向围堰, 见图 1。模型比尺为 81, 按重力相似准则设计。为量测大坝泄洪时导墙上的动水压力, 在导墙右侧(泄洪侧)分别在高程 35m, 45m, 55m, 65m 和 75m 沿水流方向各布置了 10 个时均压力测点, 共 50 个。在 30m, 40m, 55m 和 65m 高程共安装了 13 只脉动压力传感器。导墙左侧的 55m 高程布置了 4 个时均压力测点。详见图 2。

2 试验设备和试验条件

流量、水位、时均压力采用传统的常规试验设备和量测方法, 脉动压力传感器采用宝鸡秦岭晶体管厂生产的 CYG13 型固态压阻式传感器。脉动压力信号经 YD-21 型应变仪放大后, 由英国生产的 V-store8 线磁带机记录。数据处理采用日本生产的 CF-920FFT 动态分析仪。试验的水流条件见表 1。

表 1 试验条件

组次	库水位 H_1/m	流量 $Q/\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$	下游水位 H_2/m	启用的泄洪设备
1	135.00	70 000	76.55	23 个深孔加 22 个底孔
2	145.00	56 700	73.80	23 个深孔加右排漂孔
3	166.90	56 700	73.80	19 个深孔(关“4,”“6,” “8,”“20)加右排漂孔
4	175.00	69 800	76.40	23 个深孔加 6 个表孔 (“1,”“3,”“5,”“18,”“20,” “22)和右排漂孔
5	180.00	102 500	83.10	23 个深孔加 17 个表孔 (关“10,”“11,”“12,”“13,” “14)和右排漂孔

3 试验成果与分析

试验中除获得了导墙上各测点的时均压力外, 还记录了各测点的脉动压力信号。时均压力采用常

规方法处理。脉动压力采用以随机函数理论为基础的数据统计分析和频谱分析的方法, 对 65 个试验记录进行了数据处理和分析。采样间隔为 $\Delta t=0.01\text{ s}$, 相应于截止频率 $f_c=50\text{ Hz}$, 每个样本容量 $N=1\,024$ 。为使成果具有适当的分析精度, 对每一个试验记录均取 16 次平均(覆盖为 0)。以获得脉动压力均方根(标准差) σ 和优势频率(对应于功率谱密度 $G(f)$ 峰值的频率) f 为分析导墙脉动压力特性的主要参数。同时给出了相应于概率 95% 和 99% 的幅值 p_{95} 和 p_{99} 作为参考。插图中的编号 No. 1~No. 5 与表 1 中的组次 1~5 相对应。

3.1 时均压力特性

从试验的数值可以分析各组次时均压力沿水流方向和沿水深方向的分布规律。现将高程 55m 各组次沿水流方向的时均压力点绘于图 3, 并将相应组次的水面线点绘于同一图上。从图 3 可以看出, 在挑流水舌内缘上, 测压管水头与水面线基本一致; 在水舌外缘下游, 测压管水头低于水面线, 两者之差随着泄洪水头的增加而增大。这一规律与水流现象一致。因为在水舌内缘上游水体掺气很少, 水体的密度、重度改变甚微。而在水舌外缘下游水体大量掺气, 使水体密度、重度变小, 加之逆向漩涡、气泡上升, 产生浮力效应, 所以测压管水头低于水面高程。泄洪水头愈高, 掺气愈充分, 两者之差就愈大。

图 4 为 20+150 断面和 20+260 断面, 第 2, 3, 4, 5 组试验时均压力沿水深的分布。从图 4 可以看出, 导墙上的时均压力沿水深的分布基本上是一条直线, 其图形与静水压力相似, 是一个三角形。只是由于水体掺气后重度减小, 各高程的实测压力均小于该点的水深。所以导墙设计中计算水压力时, 不宜取两侧的水面差, 应考虑泄洪侧水体掺气后时均压力减小这一因素。表 2 为以高程 55m 处

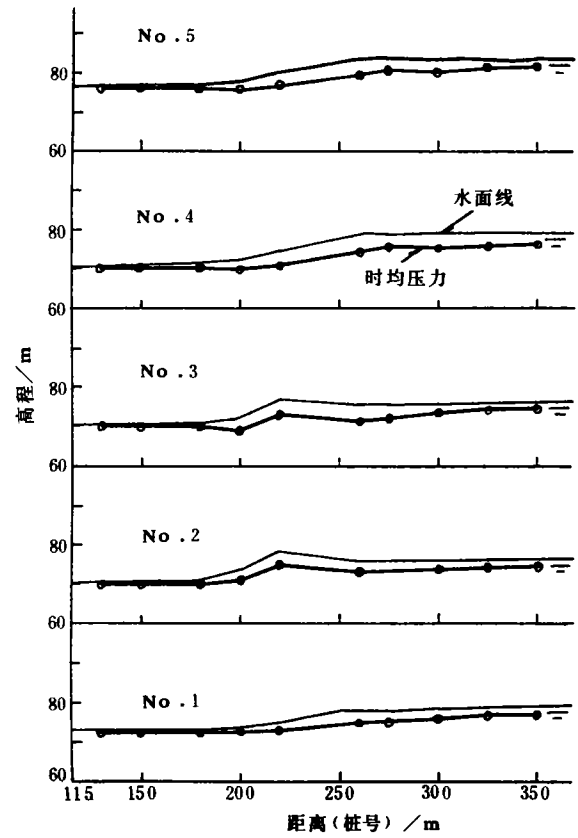


图 3 时均压力和水面线

的时均压力为例，列出了导墙两侧的压力差和水面差(均为左侧减右侧的差值)。从表 2 可以看出，两者的差值完全不同，且其数值和规律又随泄洪工况不同而不同。

表 2 压力差与水面差的比较

组次	测点位置 距离(桩号)/m	压力差/kPa	水面差/m
2	20+200	34	-0.6
	20+250	12	-0.5
	20+300	6	-1.4
	20+350	0	-2.0
3	20+200	57	4.2
	20+250	38	0.4
	20+300	9	-2.2
	20+350	0	-2.4
4	20+200	75	4.7
	20+250	46	-1.8
	20+300	31	-2.8
	20+350	22	-3.6
5	20+200	87	6.6
	20+250	57	0.6
	20+300	35	0.7
	20+350	29	-1.0

注：表中差值为导墙左侧减右侧之值。

3.2 脉动压力特性

导墙上脉动压力的波形、功率谱、概率分布和概率密度如图 5 所示。经过处理后的试验成果见表 3。测点位置与挑流水舌入水范围的关系见图 6。下面从幅域和频域两个方面进行分析。

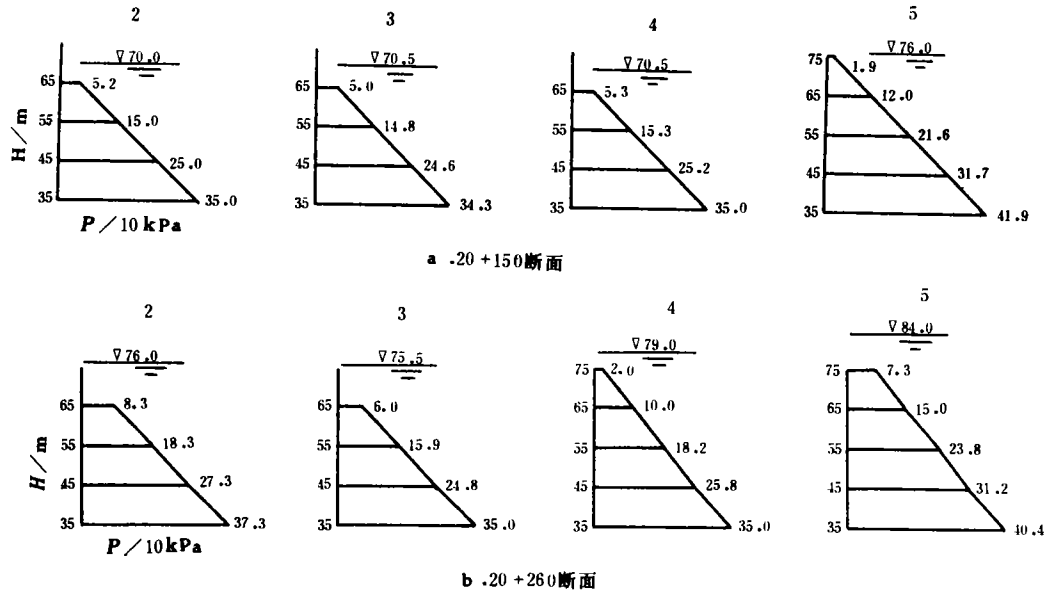


图 4 沿水深的时均压力

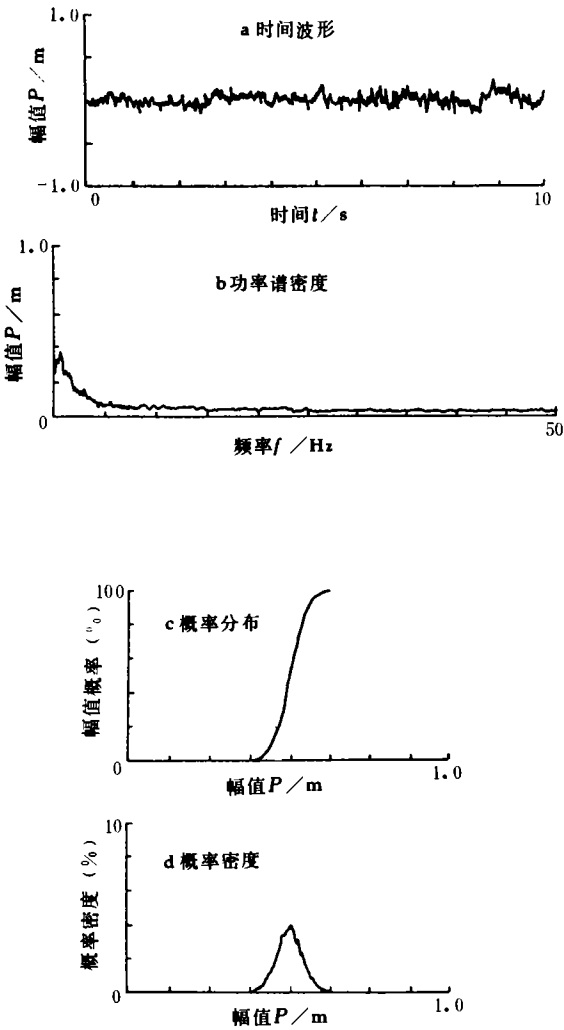


图 5 脉动压力特性曲线

3. 2. 1 幅域特性

脉动压力的幅值及其分布规律是设计建筑物时

计算动荷载的依据之一。现取脉动压力的均方根值 σ 来描述。

(1) 沿水流方向的分布

在导墙高程 55m 处(约为水深的 1/2 处)沿水流方向安装了 7 个脉动压力传感器,分布在挑流水舌冲击区、水舌内缘上游和水舌外缘下游。各试验组次的脉动压力均方根值点绘于图 7。将图 7 和图 6 结合起来看,可以看出脉动压力与泄洪条件(即水流流态)有密切的关系。如第 1 组(图中曲线 1)底孔参于泄洪,①号测点位于底孔水舌区,脉动压力相对较大。而其余 4 组底孔均未过流,①号测点距水舌内缘较远,其脉动压力相对较小。5 组试验中总的规律是水舌冲击区的脉动压力较大,水舌内缘往上游,随着距离的增加逐渐减小,水舌外缘下游开始略有减小,随后又渐渐增大。这种分布规律与水流形态一致。因为水舌未贴着导墙壁入水,而是有一个间距,水舌入水后形成横向漩滚。水舌内缘上游,因水舌入水角较小,水舌内缘的反漩滚很弱,越往上游紊动越小。水舌外缘下游的纵向漩滚强烈。所以凡是水流动强度大的区域脉动压力就大。

(2) 沿水深方向的分布

为了了解导墙上脉动压力沿水深的变化情况,在挑流水舌入水区安装了两排测点。将这 2 个断面 5 组试验的脉动压力绘于图 8,从图中可以看出,导墙上脉动压力沿水深的分布也是与水舌入水后在水体中的运动结构有关。如第 1 组试验中,20+225

表 3 脉动压力特征值

距高 离程 /m /m	No. 1				No. 2				No. 3				No. 4				No. 5			
	σ / 10kPa	p_{95}' / 10kPa	p_{99}' / 10kPa	f /Hz	σ / 10kPa	p_{95}' / 10kPa	p_{99}' / 10kPa	f /Hz	σ / 10kPa	p_{95}' / 10kPa	p_{99}' / 10kPa	f /Hz	σ / 10kPa	p_{95}' / 10kPa	p_{99}' / 10kPa	f /Hz	σ / 10kPa	p_{95}' / 10kPa	p_{99}' / 10kPa	f /Hz
150 55	0.91	1.44	2.15	0.88	0.19	0.31	0.45	1.00	0.20	0.31	0.45	1.00	0.25	0.36	0.58	0.88	0.25			0.88
200 55	0.55	0.88	1.28	1.38	1.95	3.21	4.81	1.12	1.35	2.11	4.21	4.12	1.53	2.41	3.81	4.12	1.45	2.51	3.71	3.62
225 55	1.28	1.82	3.04	1.75	2.47	4.05	6.28	0.75	1.48	2.33	4.36	3.00	1.80	2.74	4.46	3.25	1.61	2.74	4.61	3.12
250 55	0.90	1.28	2.13	1.38	1.86	2.98	4.47	0.62	1.70	2.77	4.89	3.88	1.80	2.98	4.47	3.38	1.58	2.13	3.19	3.25
290 55	0.79	1.20	1.89	0.88	1.56	2.40	3.60	0.88	1.40	2.23	3.86	1.25	1.46	2.32	3.69	1.25	1.62	3.26	5.06	1.25
330 55	0.85	1.37	2.03	0.72	1.83	2.97	4.45	1.12	1.49	2.33	3.92	1.50	1.78	2.86	4.45	0.62	1.84	3.08	4.88	0.88
370 55	1.06	1.72	2.58	0.62	2.38	3.89	6.11	1.12	1.89	2.29	4.86	1.25	2.19	3.47	5.69	4.12	2.17	3.61	5.69	0.75
225 65	0.75	1.24	1.90	2.66	2.05	3.31	4.96	1.00	1.72	2.79	4.86	2.88	1.78	2.79	4.24	4.12	1.65	2.79	4.24	3.62
225 40	0.38	0.58	0.91	0.50	2.63	4.14	6.90	0.75	1.81	2.76	5.52	4.50	2.02	3.17	5.38	3.25	1.87	3.17	4.83	3.12
225 30	0.28	0.44	0.65	0.50	0.41	0.65	0.95	1.13	0.46	0.71	1.18	3.80	0.16	0.24	0.36	0.25	0.16			0.25
250 65	0.59	0.77	1.11	1.00	2.04	3.52	4.97	0.62	1.49	2.07	3.42	2.88	1.60	2.49	3.83	3.38	1.51	2.38	3.62	3.00
250 40	1.35	2.11	3.11	0.88	2.84	4.22	6.63	0.88	2.50	3.92	6.63	3.25	2.77	4.52	7.23	1.25	2.47	3.77	5.42	3.88
250 30	0.51	0.81	1.27	0.38	0.50	0.78	1.13	0.75	0.48	0.78	1.13	1.25	0.82	1.34	2.05	0.75	0.82			0.75

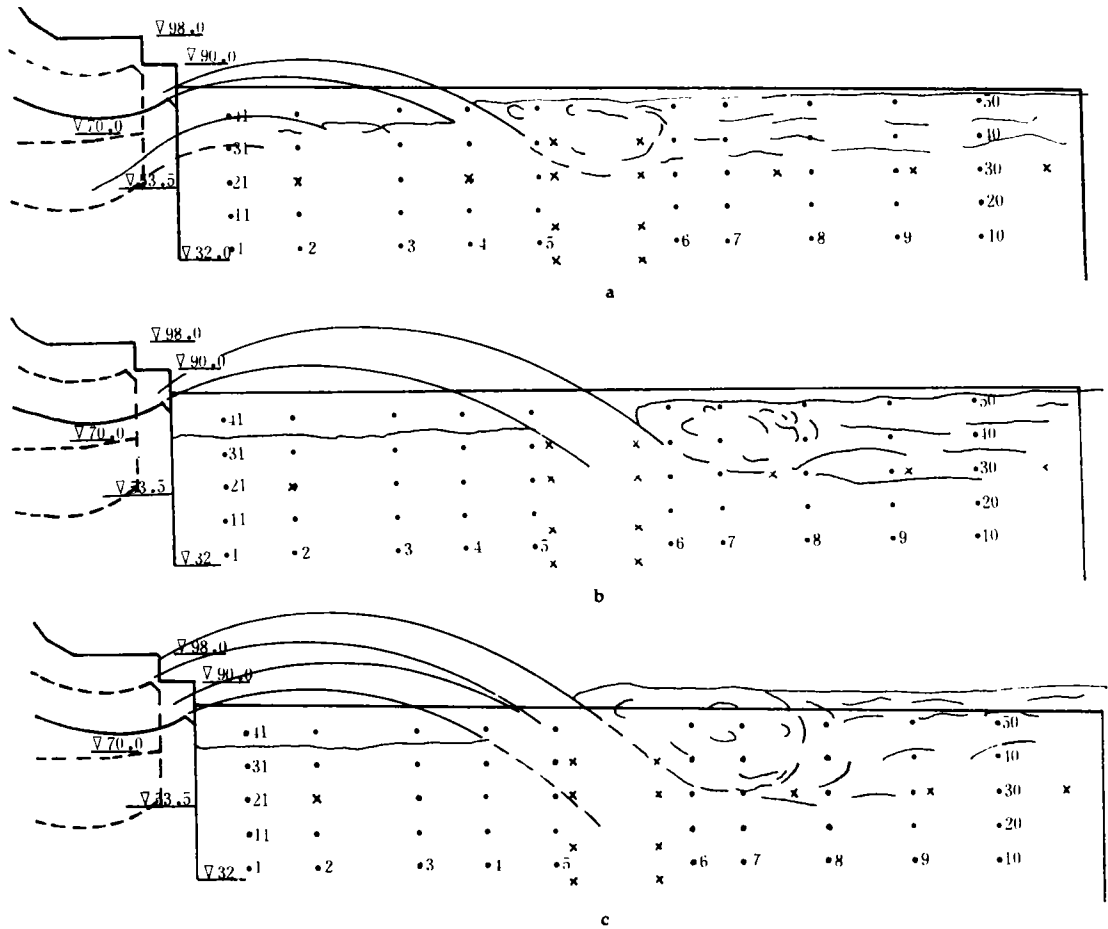


图 6 流态图

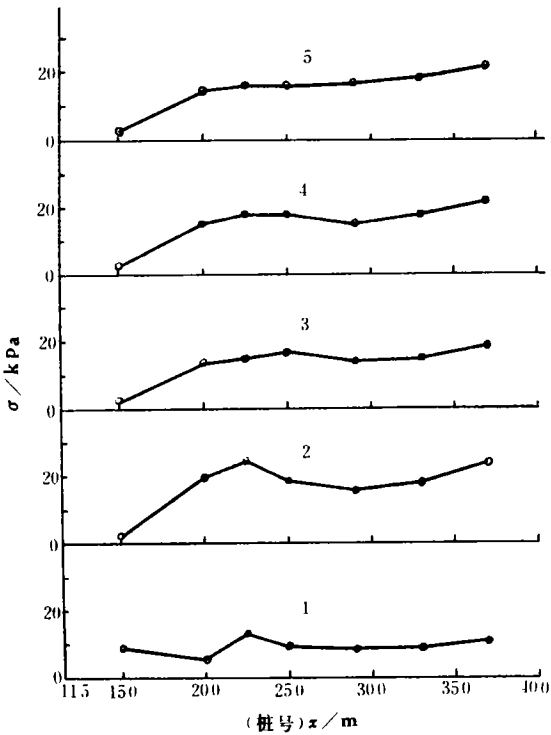


图 7 脉动压力沿水流方向的分布

断面的③号测点, 20+250 断面的⑫号测点都在水舌范围内, 脉动压力较大; 其他各点由于泄洪水头较低, 水舌入水后产生的漩滚较弱, 其脉动压力均较小。其余 4 组试验中, 测点都在水舌冲击区, 或接近水舌内、外缘的漩滚区, 所以脉动压力都较大, 共同点是靠近底部一点的脉动压力都较小。这说明水垫深度较大, 射流水舌未直接冲至底部。将图 8 与图 4 相比较, 可以看出脉动压力沿水深的分布与时均压力完全不同。尽管水流强烈紊动, 但时均压力仍接近静水压力分布, 是一个三角形, 合力作用点在 2/3 水深处。而脉动压力与水流紊动强度密切相关, 哪里的紊动强度大, 哪里的脉动压力就大。如第 2 组 20+225 断面, 上面 3 个点均在水舌范围内, 其脉动压力比其他各组都大。同时, 其分布图形也没有固定的规律, 既不是上小下大, 也不是直线分布, 而是随断面位置、水流条件而变。其合力作用点明显比时均压力的合力作用点高, 这是对导墙工作很不利的动力。

另外, 脉动压力也不完全符合正态概率分布,

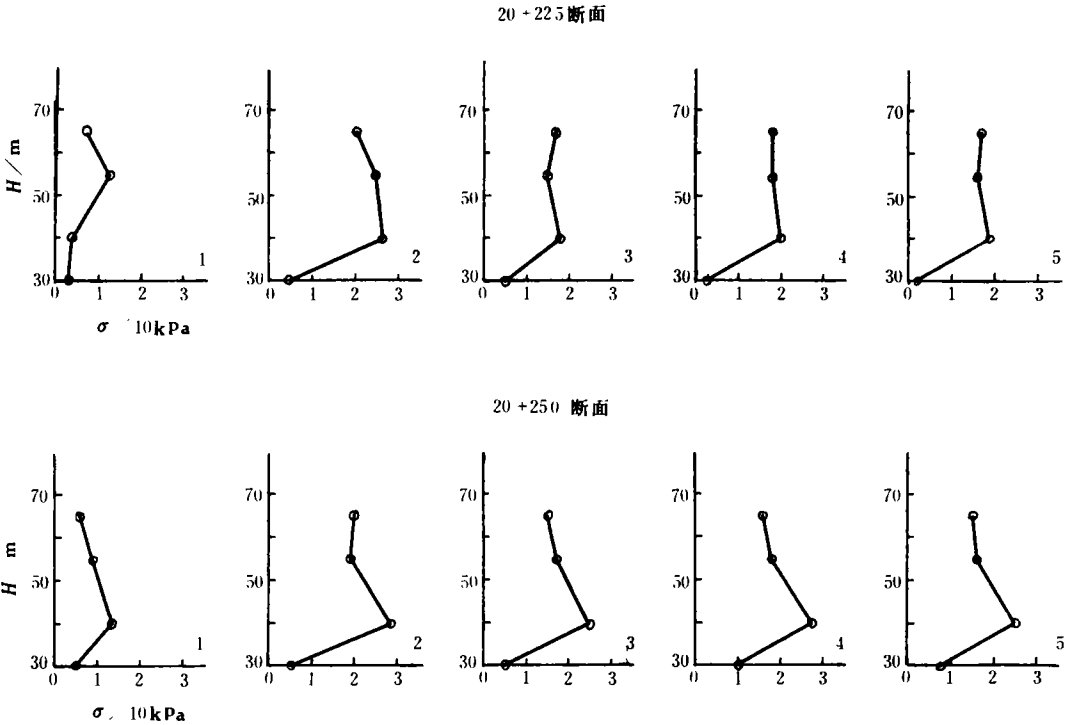


图 8 脉动压力沿水深方向的分布

建议脉动压力的最大振幅 A_{max} ，取 4σ 为宜。

3.2.2 频域特性

由频谱分析获得导墙上 65 个功率谱密度分布曲线，从中可以看出，导墙上的脉动压力是窄带低频脉动。其优势频率从表 3 可以知道在 0.25~4.50 Hz 之间。如将所有测点各组次的优势频率点绘于座标图上，不论是沿水流方向还是沿水深方向，点子都比较分散，无明显的函数关系。这是因为各点的位置在每组水流条件下相应的水流运动状态不一样，水舌入水后的水流结构十分复杂紊乱，综合各种运行条件是无序运动的缘故。但对优势频率进行统计分析，则 $f < 1\text{Hz}$ 的占 38.5%， $1\text{Hz} \leq f < 2\text{Hz}$ 的占 27.7%， $2\text{Hz} \leq f \leq 4\text{Hz}$ 的占 26.1%， $f > 4\text{Hz}$ 的占 7.7%。可见小于 2Hz 的占 66.2%，小于 4Hz 的占 92%，可以作为考虑导墙振动的主要频率范

围。若各组分别取平均值，则在相同运行条件下，导墙上的脉动压力优势频率随着泄洪水头的增加而增大(见表 4)。

4 结 语

通过对 5 种泄洪方式下导墙上时均压力和脉动压力的量测、分析，可以对导墙上的动水压力得出下面几点认识。

(1) 时均压力无论是沿水流方向还是沿水深方向的分布都基本上符合静水压力分布的规律。只是在水体大量掺气后，水体重度减小，压力水头小于该点的水深。计算结构强度和稳定时应考虑这一因素，即应考虑两侧的压力差，不宜单用两侧的水面差。

(2) 脉动压力的幅值在漩滚区较大。如水舌不贴墙壁，入水后有横向扩散产生横向漩滚，则横向漩滚区比纵向漩滚区的脉动压力更大。

(3) 脉动压力沿水深的分布远不同于静水压力分布，也不是直线分布，而是近表近底较小，中间较大。合力作用点比静水压力的低。漩滚中心区比漩滚边缘的脉动压力大。

(4) 导墙边壁上水流的压力脉动是一种窄带低

表 4 各组优势频率的平均值

组次	平均值 \bar{f}/Hz	泄 洪 工 况
1	1.04	深孔加底孔, $H_{\text{上}}-H_{\text{下}}=58.45\text{m}$
2	0.90	深孔加右排漂孔, $H_{\text{上}}-H_{\text{下}}=71.2\text{m}$
3	2.40	深孔加右排漂孔, $H_{\text{上}}-H_{\text{下}}=93.1\text{m}$
4	2.35	深孔加表孔加右排漂孔, $H_{\text{上}}-H_{\text{下}}=98.6\text{m}$
5	2.12	深孔加表孔加右排漂孔, $H_{\text{上}}-H_{\text{下}}=96.9\text{m}$
总平均	1.76	

频脉动。对 65 组资料进行统计, 优势频率小于 2Hz 的占 66%, 小于 4Hz 的占 92%。

参 考 文 献

- 1 张声鸣. 挑流消能导墙动水压力特性试验研究报告. 长江科学院, 1995. 6
- 2 丁灼仪. 随机分析方法基础及在水工水力学的应用. 长江科学院水工所, 1994. 6
- 3 梁在潮. 紊流力学. 郑州: 河南科学技术出版社, 1988. 10
- 4 崔广涛. 关于急流脉动压力振幅取值问题的探讨. 见: 高速水流情报网第二届全国大会论文集. 1986. 10
- 5 陈红霞. 三峡枢纽 1/81 水工局部整体模型试验报告. 长江科学院, 1995. 1

Studies on Characteristics of Hydrodynamic Pressure Acting on Guide Wall

Zhang Shengming, Chen Jian

(Yangtze River Scientific Research Institute, Wuhan 430010)

Abstract The research results of hydrodynamic pressure acting on the guide wall between the power station and spillway of the Three Gorges Project are presented. In the paper, mean pressures, fluctuation pressures and its distribution law, and statistic properties of fluctuation frequency, etc., under different water level conditions, are provided. The results show that the distributions of mean pressure are principally corresponding with those of static pressure; the amplitudes of fluctuation pressure are the largest at rotational zone, and, in the water depth direction, the values near the water surface and bottom are smaller than those of middle section; the flow pressure fluctuation on the guide wall is narrow-band and low-frequency one.

Keywords guide wall; mean pressure; fluctuating pressure; fluctuation frequency