

江新联围除险加固应急项目大洞口水闸工程水工模型试验

罗岸，陈灿辉，陆汉柱，麦栋玲
(广东省水利水电科学研究院，广州，510610)

摘要：大洞口水闸位于经济发达的珠江三角洲的新会市，是一宗集防洪、防台风暴潮、通航等功能为一体的综合性水闸。要求水闸设计既满足防洪防潮通航要求，又要兼顾城市的景观要求。设计的水闸通航孔是目前亚洲最大的通航孔，正常情况下要求通航孔闸门平卧于闸室底，遇台风暴潮时提升闸门挡潮。大洞口水闸水工模型试验是一项集水工、河工和潮汐一体的综合性研究项目，通过模型试验研究，对水闸的设计方案进行了修改，并提出了通航孔冲沙防淤设计和维护措施，使水闸既满足防洪、防台风暴潮要求，又满足安全通航要求。

关键词：水闸；通航孔；防洪；消能防冲；冲沙防淤；安全通航

1 试验研究任务的由来

江新联围位于西、北江三角洲西部西江干流下游右岸，属珠江三角洲西部网河区。目前，江新联围大部分江堤段未达到防御 50 年一遇洪水的标准，感潮堤段防御台风暴潮的能力约 5 年~10 年一遇，工程存在不少隐患，不利于江门市社会经济的可持续发展，难以保障联围内人民生命财产安全，迫切需要进行全面的除险加固，同时，要求加固后的大洞口水闸要成为联围内规划建设四座挡潮闸之一，大洞口水闸的重建对实现联围的防洪、防潮至关重要。

大洞口水闸枢纽工程布置为：常规水闸共 8 孔，每孔净宽 16m，闸孔溢流堰型采用开敞式平底宽顶堰。两岸各布 4 孔水闸，中间设 2 孔通航孔，每孔净宽 55m。受江门市新会水利局的委托，我院开展了江新联围除险加固应急项目大洞口水闸工程水工模型试验研究。

2 试验研究的目的

试验研究目的：论证水闸枢纽工程布置方案的合理性，研究水闸、通航孔等建筑物运行的水力特性；优化水闸消能工的设计方案，妥善解决水闸下游消能防冲的问题；改善工程的通航条件，提出工程的防淤减淤措施，为工程设计和运行提供科学依据。

3 模型试验的技术路线

根据《江新联围除险加固应急项目大洞口水闸工程水工模型试验任务书》的要求及试验内容，试验建立三个模型：建立水工整体模型，论证水闸枢纽工程布置方案的合理性、优化消能工的体型和尺寸、对闸门运行进行科学调度等内容；建立潮流悬沙模型，进行潮流悬沙试验，模拟河道的泥沙淤积情况，并测试通航孔运行流态、淤积形态，为通航孔单体试验提供边界条件；建立通航孔单体模型，主要是测试和分析通航孔闸孔靠底板处设置的冲沙水管的水力参数和冲淤效果，优化冲淤水管的布置和尺寸，提出通航孔闸门区域防淤减淤的措施。

4 水闸枢纽整体水工模型试验

4.1 模型的建立

根据试验任务内容，试验把水工整体模型与潮流悬沙合为一模型，在进行模型设计时，要求模型既要满足水工整体试验的要求，又要满足潮流悬沙试验的要求。综合了潮流悬沙模型试验和水工整体试验的要求后，确定正态模型比尺为 $L_r=60$ ，模型的截取范围为：上游边界截取至大洞

口大桥，长约 1000m，下游截取至闸下游 2000m（见附图 1）。模型按佛劳德重力相似律建立比尺为 $L_r=60$ 的正态模型。模型各物理量的比尺为：

几何比尺	$L_r=60$
流速比尺	$V_r=L_r^{1/2}=7.746$
流量比尺	$Q_r=L_r^{5/2}=27885.5$
糙率比尺	$n_r=L_r^{1/6}=1.9786$
时间比尺	$t_r=L_r^{1/2}=7.746$

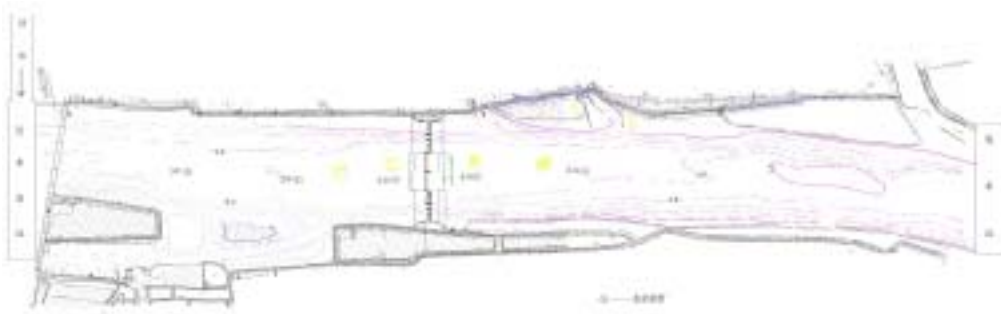


图1 大闸口水闸水工模型平面布置图

4.2 设计方案试验成果

原设计水闸两侧各布置 5 孔 \times 16m 常规水闸，闸室底高程为-4.50m；2 孔 \times 55m 通航孔居中-3.50m，闸室底高程为-8.90m。

在设计方案布置下，进行闸门全开泄流能力试验，结果显示：泄放校核和设计洪水流量时，水面线比较平稳，上下游的水流衔接过渡较顺畅，闸上游水位均低于设计值，表明设计方案满足泄洪要求。

观察各组次试验的流态，测试工程河段的流速平面分布，结果显示：闸前水流集中于通航孔及通航孔两侧的常规水闸泄流，边孔的泄流较小，尤其在低潮位（-0.9m）泄洪时，左右两岸闸前出现回流区，2 孔边孔泄流较小甚至不过流，需对原设计方案进行修改。

4.3 修改方案试验成果

4.3.1 修改方案的比较试验及方案的推荐

基于原设计方案出现边孔泄流过小甚至不过流的现象，设计对原方案进行了修改，提出了两个基本的修改方案：方案 1：维持通航孔不变，两侧仍各布置 5 孔 \times 16 m 常规水闸，闸底高程改为-3.50m；方案 2：维持通航孔不变，两侧各布置 4 孔 \times 16 m 常规水闸，闸底高程改为-3.50m。

对两修改方案进行闸门全开泄洪试验，试验显示当下游处于高潮位（1.98m）时，泄放校核流量 $2166.94\text{m}^3/\text{s}$ ，两方案的闸前水位分别为 2.06m、2.08m（设计值 2.08m），表明两方案均能满足泄洪要求；当下游处于低潮位（-0.90m）泄放校核流量，方案 2 的闸前水位比方案 1 升高约 0.05m，升幅不大，可见减少两边孔的方案 2 布置对防洪影响不大。

方案 2 比方案 1 减少两孔边孔，在高潮位时泄洪的流态与方案 1 基本相同，右岸上游近岸发生的回流区范围较方案 1 略有增大，但回流流速依然较弱。当下游水位 $Z < -0.50\text{m}$ 时，左岸边孔闸前出现回流区范围比方案 1 小，常规水闸泄流较均匀；低水位泄放各组流量，边孔不过流的现象消失。下游河段的水流较顺畅，流速分布较均匀。在下游水位 $Z=-0.50\text{m}$ 、渲泄 100 年一遇洪水运行时，闸孔出口及下游防冲槽的底流速较大值分别约 2.52m/s 和 1.91m/s ，水闸下游的护坦及海漫不会出现冲刷破坏现象。由于方案 1、方案 2 两种布置都存在水流较集中通航孔泄流，方案 2 比方案 1 虽然减少了两边孔，但过闸水流比方案 1 更趋向均匀。

方案的对比试验表明，方案 2 布置满足设计的泄洪要求，上下游的水流衔接过渡较顺畅，各

断面的流速分布均匀，并且工程投资省。试验及设计均推荐方案 2 为大洞口水闸加固工程方案。

4.3.2 常规水闸及通航孔消能工试验

经与设计部门协商，对方案 2 进行消能工试验时，各组次试验的下游水位均设定为低潮位 -1.0m，上游按 1.77m、1.0m、0.50m、0.0m、-0.50m 等 5 种水位组合。上游 5 种水位与下游低潮位 -1.0m 组合的试验组次列于表 4-1。

表 4-1 常规水闸及通航孔消能工试验组次

试验组次	闸前水位 Z1 (m)	下游潮位 Z2 (m)	上、下游水位差 (m)
1	1.77	-1.0	2.77
2	1.0		2.0
3	0.50		1.50
4	0.0		1.0
5	-0.50		0.50

消能工试验的主要成果见表 4-2、表 4-3。

表 4-2 各试验组次的常规水闸消能工水力参数

试验组次	闸门开度 e (m)	总泄流量 Q(m ³ /s)	单宽流量 q(m ³ /s·m)	闸下护坦流速 (m/s)(0+020)	水闸下游防冲槽底流速 (m/s)(0+055)
1A	0.60	400	3.13	3.50 ~ 4.30	0.30 ~ 1.36
1B	0.65	553	4.32	3.94 ~ 5.10	0.37 ~ 2.26
2A	0.60	406	3.17	3.34 ~ 4.02	0.34 ~ 1.95
2B	0.80	560	4.38	4.06 ~ 5.07	0.38 ~ 2.15
3A	0.65	408	3.19	3.15 ~ 4.0	0.26 ~ 1.70
3B	1.0	609	4.76	4.04 ~ 5.17	0.37 ~ 2.19
4A	0.90	466	3.64	3.68 ~ 4.27	0.73 ~ 1.69
4B	1.25	639	4.99	3.72 ~ 5.24	0.89 ~ 2.22
5A	1.45	540	4.22	3.21 ~ 3.91	0.60 ~ 1.79
5B	1.95	731	5.71	3.50 ~ 5.18	0.42 ~ 2.18

注：各组次试验的水文条件与表 4-1 对应。

表 4-3 各试验组次的通航孔消能工水力参数

试验组次	上游水位 (m)	总泄流量 Q(m ³ /s)	单宽流量 q(m ³ /s·m)	闸门开度 α (°)	上游水位与闸门顶的高差 Z (m)	通航孔下游防冲槽底流速 (m/s)(0+055)
1	1.77	1287	11.70	65°	3.10	3.85 ~ 4.48
2	1.0	1371	11.46	70°	3.05	4.02 ~ 4.03
3	0.50	1451	13.19	75°	3.30	3.16 ~ 3.56
4	0.0	1453	13.21	79°	3.42	3.38 ~ 3.65
5	-0.50	1470	13.36	90°(全开)	4.67	3.62 ~ 4.06

注：各组次试验的水文条件与表 4-1 对应。通航孔闸门关闭时开度为 0°，全开时开度为 90°。

表 4-1 显示,在上、下游水位差相同的条件下,随着闸门开度增大,过闸流量也相应增大,常规水闸或通航孔闸下护坦的底流速也相应增大。按 1B、2B、3B、4B、5B 组次运行常规水闸,闸下游(0+020)护坦的底流速 $V > 5\text{m/s}$,护坦易受水力冲刷破坏,应避免这种运行方式;按 1A、2A、3A、4A、5A 组次运行常规水闸,闸下游(0+020)护坦的底流速约为 $3.2\text{ m/s} \sim 4.3\text{ m/s}$,水闸运行安全;从表 4-3 表明,按组次 1 运行通航孔,闸下游防冲槽(0+055)的底流速较大值达 4.48m/s ,流速偏大(设计的防冲槽抗冲流速为 4.0m/s)。按其余组次运行通航孔时,闸下游防冲槽(0+055)的底流速较大值为 4.06m/s ,略超设计的抗冲流速。

4.4 挡潮闸运行管理

设计提出的挡潮闸调度运行原则为:(1)台风暴潮:预测有台风暴潮发生时,在水位 $Z=0.0\text{m}$ 时关闸,在闸内水位高于外江潮位 0.1m 时开闸泄流,满足水闸的挡潮功能;(2)非台风暴潮:水闸开闸运行,恢复天然情况,满足排洪涝、通航等要求。从以上的常规水闸及通航孔的消能试验可知,大口水闸上、下游水位差 $Z \leq 0.5\text{m}$ 时,常规水闸开度 $e \leq 1.45\text{m}$ 、通航孔全开,下游不会出现明显的冲刷破坏。

挡潮闸的运行,既要防止泄流对下游的冲刷破坏,又要尽可能减少通航孔的泥沙淤积,确保通航孔的安全运行。为此,试验提出以下的挡潮闸运行管理原则:

(1) 正常情况(闸上、下游水位差 $Z \leq 0.5\text{m}$)

1) 挡潮闸闸门开启顺序为:先开启通航孔闸门,后开启常规水闸闸门。先开启近通航孔的常规水闸闸门,后开启近两岸的边孔闸门。

2) 通航孔及常规水闸的闸门开启均分三挡。通航孔闸门的起始挡为 70° (闸门板顶高程 -2.05m),第二挡为 80° (闸门板顶高程 -3.58m),第三挡为 90° (闸门全开);常规水闸闸门的起始挡为 $e=0.8\text{m}$,第二挡为 $e=1.6\text{m}$,第三挡为全开。

3) 常规水闸闸门的开启必须遵循对称、均匀的原则,防止集中开启。每开一挡后,必须待下游水位稳定才允许开启下一挡闸门。

4) 挡潮闸闸门关闭顺序为:先关通航孔闸门,后关常规水闸闸门。先关近通航孔的常规水闸闸门,后关近两岸的边孔闸门。通航孔及常规水闸闸门的关闭都是一次性完成。

(2) 非正常情况(闸上、下游水位差 $Z > 0.5\text{m}$)

除遵循以上的闸门运行原则外,还须按表 4-4 的要求,严格控制闸门的开度,防止泄流对下游的冲刷破坏。

表 4-4 非正常情况下大洞口常规水闸及通航孔闸门运行原则

内江与外江水位差 (m)	常规水闸闸门开启原则	通航孔闸门开启原则
2.5 ~ 2.0	分挡开启 ($e=0.2\text{m}$), 闸门起始开度 $e=0.4\text{m}$ 待该开度泄流的下游水位稳定后,再逐级开启增加开度。	以上游水位与闸门顶高差 (H) 2.5m 作为闸门起始开度,并以降低闸门 0.5m 为档,待该开度泄流的下游水位稳定后,再逐级开启增加开度。
2.0 ~ 1.5	分挡开启 ($e=0.2\text{m}$), 闸门起始开度 $e=0.6\text{m}$ 待该开度泄流的下游水位稳定后,再逐级开启增加开度。	以上游水位与闸门顶高差 (H) 3.0m 作为闸门起始开度,并以降低闸门 0.5m 为档,待该开度泄流的下游水位稳定后,再逐级开启增加开度。
1.5 ~ 1.0	分挡开启 ($e=0.2\text{m}$), 闸门起始开度 $e=0.8\text{m}$ 待该开度泄流的下游水位稳定后,再逐级开启增加开度。	以上游水位与闸门顶高差 (H) 3.0m 作为闸门起始开度,并以降低闸门 0.5m 为档,待该开度泄流的下游水位稳定后,再逐级开启增加开度。
0.5 ~ 0.1	分挡开启 ($e=0.4\text{m}$), 闸门起始开度 $e=1.0\text{m}$ 待该开度泄流的下游水位稳定后,再逐级开启增加开度。	以上游水位与闸门顶高差 (H) 3.5m 作为闸门起始开度,并以降低闸门 0.5m 为档,待该开度泄流的下游水位稳定后,再逐级开启增加开度。

5 潮流悬沙试验及成果分析

大洞口水闸工程河段处于感潮河段，水深大、流速弱，上游从西江进入江门水道的沙量稀少，河段的泥沙主要来源于潮流挟沙，以悬移质的运动方式随潮流进入工程河段。通常情况下大洞口的通航孔闸门平卧于水底，只有遭遇暴风潮时，才关闸挡潮。对计算的潮流流速进行统计，大洞口水闸工程河段，涨潮的平均流速为 0.4m/s ~ 0.5m/s，落潮的平均流速为 0.3m/s，工程河段河水深较大、流速弱，尤其是从闸址至桩号 0+077 之间的航道，因闸室要放置闸门而不影响通航安全，需要降低闸室及护坦的底板高程至-8.90m，从而使得闸室和护坦段的水深较大、流速较弱，水流悬沙易于在该区域沉积。大洞口通航孔闸门的泥沙淤积问题，是本工程设计及试验研究要解决的难题。

由于缺乏工程河段的全潮（同步）水文观测资料，为此，根据设计单位提供的工程河段的水文、地型等资料，按设计单位提供的典型潮型，进行潮流的数学模型计算。从设计单位提供的大洞口工程地质分析报告可知：工程河段的含沙量为 0.25kg/m^3 ，闸址区淤泥层厚度大，为高压缩性土（大部份为粒径 $0.05\text{mm} \sim 0.1\text{mm}$ 的淤泥）。根据水流运动相似、泥沙沉降相似、悬移质运动相似选用粒径 $d=0.198\text{mm}$ 、容重 $r=1.46\text{kg/m}^3$ 的木粉作为试验用沙，以数值计算的典型潮为试验潮型，进行潮流悬沙试验。

潮流悬沙试验成果分析：潮流悬沙试验时，按 0.49kg/m^3 的木粉量进行施放（原体含沙量为 0.25kg/m^3 ），分别测试运行连续潮型 15 潮周、30 潮周、60 潮周后工程河段各断面的淤积情况。为了了解工程河段不同含沙量河段淤积的变化情况，模型还进行了加大一倍含沙量的试验，潮型运行分 15 潮周、30 潮周两种组次。各组次试验测试的各断面的平均淤积厚度列于表 5-1。

表 5-1 潮流悬沙试验组次

原体含沙量 (kg/m^3)	潮周	各桩号断面平均淤积厚度 (m)								
		0-180	0-120	0-060	0-035	0-003	0+020	0+055	0+120	0+180
0.25	15	0.12	0.13	0.10	0.12	0.13	0.28	0.17	0.16	0.17
	30	0.20	0.26	0.26	0.28	0.26	0.27	0.25	0.32	0.35
	60	0.25	0.33	0.34	0.49	0.35	0.40	0.37	0.50	0.54
0.50	15	0.13	0.13	0.13	0.15	0.26	0.26	0.20	0.25	0.30
	30	0.28	0.24	0.28	0.29	0.31	0.37	0.35	0.42	0.52

从横断面的淤积分布形态可以看出，断面中间较两岸边的淤积量大。从淤积的平面分布形态来看，淤积沙面分布均匀、平坦，在近闸航道处淤积量最大。试验发现，工程河段的泥沙淤积基本上与含沙量成正比，由 30 天与 60 天的淤积量对比可见，60 天后河床的淤积增量放缓，河床泥沙淤积趋于稳定。

工程河段的泥沙主要来源于潮流挟沙，而试验是在典型潮型（且是连续潮型）作用下进行的，与工程实际的潮型难以一致，试验只能对工程河段的泥沙淤积情况作定性分析，对其淤积量只能作粗略的估算。

6 通航孔单体模型的冲沙试验

6.1 模型的建立及试验用沙的确定

按佛劳德重力相似律建立 $L_r=20$ 的正态断面模型。我院曾开展中山市大涌口原体床质抗冲流速水槽试验，试验得出该河床的抗冲流速为 $0.8\text{m/s} \sim 1.0\text{m/s}$ ，由于大洞口和大涌口的河床质基本相同，因此，大洞口水闸河床质也按 $0.8\text{m/s} \sim 1.0\text{m/s}$ 抗冲流速选择 $d_{50}=0.16\text{mm}$ 的细沙作为模型试验用沙。

6.2 试验条件的确定

在通航孔闸室段内,在闸室周边的立墙上布设冲沙孔,其中在两闸墩侧面上,各布置 12 孔(直径 80mm)冲沙孔,而在平行于闸门转轴的立面上布置 54 孔(直径 80mm),各孔管心离底板 50cm,管心间距 100cm;每道闸门门槽缝处也布设垂向排列的冲沙孔,各孔管心间距为 100cm。闸室周边的冲沙孔(直径 80mm)出口流速为 8m/s,道坎上冲沙孔的出口流速为 3m/s

为了验证冲沙孔布置的合理性,试验时,通航孔的泄流量按典型潮落潮时段的平均流速(0.3m/s)计算,算得 0.0m 潮位时,每孔通航孔的泄流量为 84.3m³/s。根据上面的悬沙试验成果(含沙量为 0.25kg/m³、60 潮周,闸室内最大淤积厚度为 60cm,闸门底最大厚度 30cm),于闸门底铺设 30cm 厚淤沙,闸门后铺 60cm 厚淤沙,按表 6-1 的组次进行冲沙试验。

表 6-1 冲沙孔冲沙试验组次

冲沙孔开启孔数	冲沙孔出口流速 (m/s)				
	4	6	8	10	12
全开	4	6	8	10	12
隔孔开	4	6	8	10	12

6.3 冲沙方案的确定及试验成果

通航孔闸门安全运行需要解决的两大问题:一是如何把板结于闸门边缘的淤泥冲散,以确保闸门能转动(提升)、关闭闸门;二是确保闸门能回复平卧位置,不影响航运的安全。

经多方案的尝试并与设计人员进行了技术交流,形成了以下的冲沙孔布置方案:在通航孔闸室段内,在闸室周边的立墙上布设(直径 80mm)冲沙孔,出口流速为 8m/s。其中在两闸墩侧面上,各布置 12 孔冲沙孔,而在平行于闸门转轴的立面上布置 54 孔,各孔管心离底板 50cm,管心间距 100cm。每道闸门门槽缝处也布设垂向排列的冲沙孔,各孔管心间距为 100cm;在闸室和护坦底部设呈网格状的冲沙梁格,冲沙道梁格 23cm、宽 40cm,梁格内埋设有供水管,梁格的正面及侧面按 1m 的间距设置直径为 3cm 的冲沙孔,设计冲沙孔出口流速为 3m/s。通航孔闸门平卧于闸室底板时,闸门底部的结构桁条与冲沙梁格形成了密封的箱体,冲沙梁格与两闸墩闸室间形成了一个输沙通道,闸墩末端为输沙道的出口(见附图 2)。

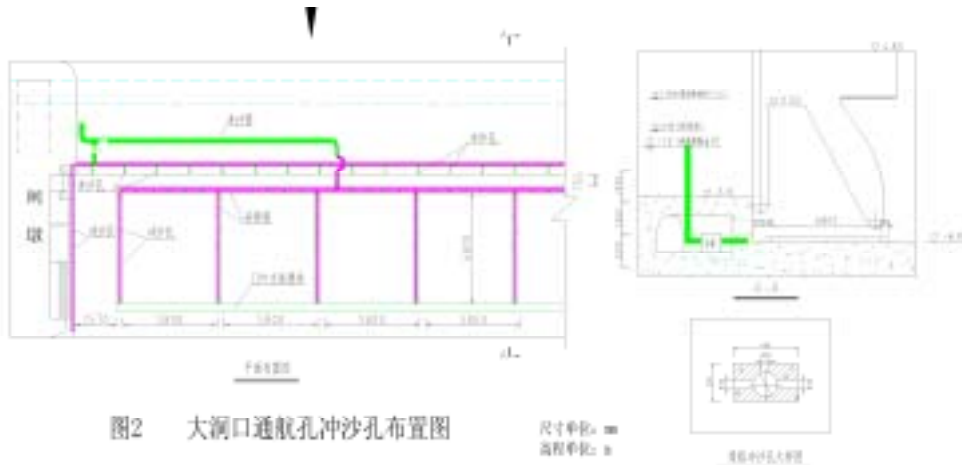


图2 大门口通航孔冲沙孔布置图

尺寸单位: mm
高程单位: m

通航孔的泄流量按典型潮落潮时段的平均流速(0.3m/s)计算,算得 0.0m 潮位时,每孔通航孔的泄流量为 84.3m³/s。模型是按 0.0m 潮位,通航孔过流流速 0.3m/s 的条件进行冲沙试验。试验观察到,布置于闸室周边的冲沙孔扬沙剧烈,水沙流沿输沙通道向两侧输沙出口移动,经 2 小时(原体)冲沙后,闸室前缘输沙通道的淤沙基本被冲刷干净,靠闸墩两侧的输沙道的淤沙大部分已被送至出口处,仍有少部分沙停留在通道内。试验成果基本达到了设计的目的。

6.4 通航孔冲沙维护的建议

(1) 建议于通航孔的闸室段,设置测量泥沙淤积的仪器设备,随时方便监测通航孔闸室段的

淤积情况。

(2) 每隔 15 天，选择落潮时段启动冲沙水泵，对闸门进行冲沙排淤，冲沙时间不少于 1 小时，以 2 小时为宜。

(3) 对于闸门后的淤泥，初步建议于每年汛期前一个月进行一次人工清淤。并视淤积闸室的情况调整清淤次数，建议淤积厚度超过 60cm 时，需及时进行人工清淤。

(4) 由于通航孔闸室段低于河床 4.4m，沙石及其它杂物一旦落至闸室段，就难以通过水力冲走。经长时段运行后，闸门底部沉积物的累积会对闸门的安全运行造成影响。建议通航孔闸门运行到一定年限后，结合检修闸门，对闸室段进行一次较彻底的清淤。

7 结语

(1) 大洞口水闸工程布置方案 1、方案 2 均满足泄洪要求，方案可行。方案 2 比方案 1 的运行流态稍优，工程投资较省，试验推荐方案 2 为大洞口水闸的布置方案。

(2) 在遭遇暴风潮时，按设计的闸门调度原则运行闸门，不会出现水流冲刷破坏的现象，水闸运行是安全的。挡潮闸的运行，既要防止泄流对下游的冲刷破坏，又要尽可能减少通航孔的泥沙淤积，确保通航孔的安全运行，试验提出的挡潮闸运行管理原则可供工程管理部门参考。

(3) 试验显示大洞口通航孔的下游护坦，易出现泥沙淤积，必须按试验提出的要求定期运行冲沙孔冲淤，防止淤泥板结，并视闸室的淤积情况，配合人工清淤，确保挡潮闸的运行安全。

(4) 大洞口水闸的工程布置在我省乃至全国都是一种较新型的水闸布置型式，无论是设计还是模型试验都是一项新的课题，在工作中有可能存在一些考虑欠周全的地方，建议工程建成后，对闸下泥沙淤积情况及冲淤效果进行观测，为工程设计和试验研究提供宝贵的资料。