

北江大堤加固达标工程西南水闸(补充方案)水工模型试验研究

赖冠文 练伟航 张广传

(广东省水利水电科学研究院, 广州, 510610)

摘要: 通过进行西南水闸(补充方案)水工模型试验, 研究水闸全开及局部开启的水位流量关系, 验证水闸的过流能力; 研究在不同运用条件下, 进出水闸的水流流态及流速分布; 研究水闸消能工设计及水闸布置的合理性, 为工程的设计及审批提供科学依据。

关键词: 西南水闸 过流能力 流态及流速分布 消能 水闸布置

1 问题的提出

在 2003 年 7 月召开的《广东省北江大堤 2003 年应急除险加固达标实施项目西南水闸初步设计报告》审查会上, 专家们提出了西南水闸的功能及规模论证等问题, 认为西南水闸除具备分洪的功能外, 还要兼顾中枯水时改善佛山、广州两市水环境的作用。为此, 设计单位补充设计了二个方案, 同时要求进行水工模型试验研究。广东省水利水电科学研究院承担了该试验研究任务, 为工程的设计及审批提供科学依据。

2 补充方案简介

2.1 补充方案

补充方案 是在原设计推荐方案的基础上, 水闸轴线和闸中心线不变, 沿闸中心线两侧对称布置 3 孔水闸, 单孔净宽为 20m, 闸底板高程为 0.0m (珠基高程, 下同), 胸墙底高程为 3.5m, 闸墩宽度为 5.0m。水闸以 1 : 4.44 斜坡与消力池底板连接, 消力池底板高程为 -1.8m, 池长 43m, 消力池尾坎高程为 -0.3m, 坎后接 20m 的混凝土海漫, 然后按 4% 的坡度接 50m 长的干砌石海漫, 再接 10m 块石防冲槽, 槽后按 1 : 2 反坡与下游河床连接。水闸上游左、右翼墙在 9.0 m 高程以下, 分别采用半径为 20m 和 30m 的直墙与两岸连接, 在 9.0m 高程设 3.4m 宽平台, 然后按 1 : 2 坡度与 11.2m 高程路面连接。闸前两侧边墩采用半径为 7.8m 的 1/4 圆直墙把水闸与岸坡连接。下游左、右翼墙采用直立墙设计, 翼墙出消力池后按 120° 扩散角向两侧扩散, 左墙扩散段长为 55.68m, 再以半径为 20m 与左岸连接, 右墙扩散段长为 137.8m, 以半径为 30m 与右岸连接, 见图 1。

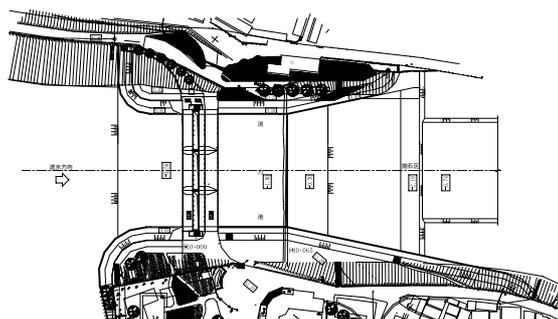


图 1 补充方案 平面布置

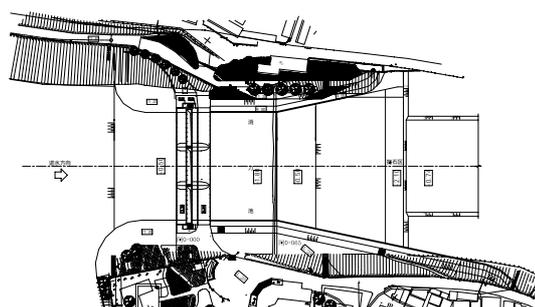


图 2 补充方案 平面布置

2.2 补充方案

补充方案 是在补充方案 的基础上, 将水闸底板高程降低到 -0.5m, 胸墙底高程降为 3.0m, 下游海漫高程降为 -0.5m, 干砌石海漫坡度由 4% 改为 3.5%, 其他尺寸与补充方案 相同, 见图 2。

3 试验研究的内容

- 3.1 通过模型试验对补充方案的水闸布置合理性进行评价；
- 3.2 通过模型试验，研究水闸全开，及局部开启的水位流量关系，验证水闸的过流能力（最大下泄量为 1100m³/s）；
- 3.3 通过模型试验，研究水闸在较不利的上、下游水位情况下，闸门不同开度时，进出水闸的流态及流速分布；
- 3.4 通过模型试验，研究水闸消能工设计布置是否合理。

4 模型设计

模型设计主要根据研究的内容，既要模拟北江 100 年一遇的洪水流态，又要模拟通过西南水闸及西南涌的水流流态，故截取北江新沙洲左汊上下游 2km，西南涌约 3km 的范围进行制模，按重力相似的原则，将模型设计为正态水工模型，根据相似率的要求，模型各项比尺分别为：

$$\begin{aligned}
 L &= h = 80 \\
 v &= \frac{h^{1/2}}{h} = 8.944 \\
 Q &= \frac{h^{5/2}}{L} = 57243.34 \\
 n &= \frac{L^{1/6}}{L} = 2.076 \\
 t &= \frac{L}{v} = 8.944
 \end{aligned}$$

式中：L—平面比尺；h—垂直比尺；v—流速比尺；Q—流量比尺；n—糙率比尺；t—时间比尺

5 试验研究水文组次

表 1 试验水文组次

试验研究的水文组次确定，按照研究的内容，采用不同的水文组次。反映水闸过流能力的试验研究，则采用设计单位提供的西南水闸下游水位流量关系曲线的高线；反映水闸消能效果的试验研究，则采用设计院提供水位流量关系的中线；反映中枯水期引水流量的研究，则采用水位流量关系的下线，详见表 1。

项目	控制水位、流量、开度										
	流量(m ³ /s)	50	100	200	300	400	500	600	800	1000	1200
过流能力	水位	枯水	1.0	1.7	2.7	3.4	3.92	4.4			
	(m)	洪水	3.11	3.21	3.55	3.9	4.3	4.7	5.1	5.87	6.65
消能防冲	闸前水位 11.13(m)										
	开度(m)	0.2	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0			
	闸下水位(m)	0.79	1.43	2.21	2.88	1.85	5.86	6.79			
		2.60	3.06	4.65	5.45	6.47	7.38	8.12			

6 试验成果分析

6.1 过流能力

6.1.1 分洪流量

补充方案 在闸门全开时，闸前北江水位 7.80m，水闸即可分洪 1100m³/s 流量；闸前北江水位为 11.13m 时，水闸分洪流量可达 1733m³/s。因此，当北江发生百年一遇洪水时，西南水闸分洪 1100m³/s 流量，必须利用闸门控泄。当闸门开度在 2.5m 时，水闸可分洪 1223m³/s，当闸门开度在 2.3m 时，水闸分洪 1128m³/s，即可满足分洪流量要求，当闸前北江水位为 9.0m 时，闸门控泄约需开 2.6m 开度即可分洪 1100m³/s。详细的过流能力按下式计算及参见表 2~3。

$$\begin{cases}
 \text{闸门全开: } Q_{\text{西}} = -2.255Z_{\text{北}}^2 + 232.85 Z_{\text{北}} - 579.33 \\
 e = 0.5\text{m}, Q_{\text{西}} = -1.9573Z_{\text{北}}^2 + 60.764 Z_{\text{北}} - 121.99 \\
 e = 1.0\text{m}, Q_{\text{西}} = -4.4103Z_{\text{北}}^2 + 117.94 Z_{\text{北}} - 248.73 \\
 e = 1.5\text{m}, Q_{\text{西}} = -4.9547Z_{\text{北}}^2 + 153.88 Z_{\text{北}} - 322.94 \\
 e = 2.0\text{m}, Q_{\text{西}} = -5.3892Z_{\text{北}}^2 + 179.72 Z_{\text{北}} - 359.70 \\
 e = 2.5\text{m}, Q_{\text{西}} = -5.8006Z_{\text{北}}^2 + 217.04 Z_{\text{北}} - 473.76 \\
 e = 3.0\text{m}, Q_{\text{西}} = -6.4465Z_{\text{北}}^2 + 264.16 Z_{\text{北}} - 632.70
 \end{cases}$$

补充方案 在闸门全开运行，闸前北江水位为 7.78m 时，水闸可分洪 1100m³/s；闸前北江水位为 11.13m 时，水闸可分洪 1737m³/s。也就是说，当北江发生百年一遇洪水时，西南水闸分洪 1100m³/s，方案 同样也需要采用控泄的闸门运行方式泄流分洪。闸门开度控制在 2.5m 时，水闸可分洪泄流 1206m³/s，限制分洪流量为 1100m³/s，闸门开度只需开启 2.3m 即可满足分洪要求，当闸前北江水位为 9.0m 时，闸门控泄 1100m³/s，闸门开度只需开启 2.5m 即可满足分洪要求。其他的开度相应的过流能力按下式计算及表 2~3。

$$\begin{cases}
 \text{闸门全开: } Q_{\text{西}} = -2.4909Z_{\text{北}}^2 + 2336.95 Z_{\text{北}} - 591.90 \\
 e = 0.5\text{m}, Q_{\text{西}} = -1.8823Z_{\text{北}}^2 + 58.489 Z_{\text{北}} - 117.20 \\
 e = 1.0\text{m}, Q_{\text{西}} = -4.1027Z_{\text{北}}^2 + 112.35 Z_{\text{北}} - 230.92 \\
 e = 1.5\text{m}, Q_{\text{西}} = -5.2232Z_{\text{北}}^2 + 158.34 Z_{\text{北}} - 345.33 \\
 e = 2.0\text{m}, Q_{\text{西}} = -6.1563Z_{\text{北}}^2 + 192.95 Z_{\text{北}} - 406.74 \\
 e = 2.5\text{m}, Q_{\text{西}} = -6.3736Z_{\text{北}}^2 + 223.90 Z_{\text{北}} - 496.42 \\
 e = 3.0\text{m}, Q_{\text{西}} = -6.6116Z_{\text{北}}^2 + 266.30 Z_{\text{北}} - 644.10
 \end{cases}$$

可见，补充方案 与补充方案 的过流能力相差不大，闸门全开时，补充方案 略大，闸门控泄局部开启时，补充方案 略大。闸门控泄开度只需要 2.3m，均可满足设计分洪流量 1100m³/s 的要求。

表 2 闸门全开水位流量

方案	水位(m)	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
	流量	99	316	529	737	940	1139	1334	1524	1709	1890
	(m ³ /s)	97	316	539	740	945	1144	1339	1529	1717	1893
Q -0	(m ³ /s)	-2	0	10	3	5	5	5	5	8	3

6.1.2 中枯水位引水流量

补充方案 在中枯水位时，闸门全开引水改善西南涌及广州、佛山两市的水环境，其引水流量随着北江水位的升高而增大。当闸前北江水位在 1~4.5m 时，水闸的引水流量为 40~486m³/s，可按下式计算及参见表 4。

表 3 闸门控泄水位流量

方案	水位(m)	闸前水位 11.13					
	开度(m)	0.5	1	1.5	2	2.5	3
	流量	312	518	776	985	1223	1509
	(m ³ /s)	301	511	770	978	1206	1501
Q -Q	(m ³ /s)	-11	-7	-6	-7	-17	-8

$$Q_{\text{西}} = 39.599Z_{\text{北}}^{1.6667}$$

补充方案 闸底板高程 (-0.5m) 虽比补充方案 低 0.5m，但两方案下游疏浚河道的范围及高程是一样的，补充方案 在中枯水位引水时，其引水流量的大小及规律与补充方案

表 4 中枯水引水流量

水位(m)	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0	4.5
流量(m ³ /s)	40	78	126	182	247	320	399	486

基本一致，故两方案的测点可回归为一个公式计算，见表 4。但补充方案 闸底板略低，引水的保证率稍高，亦即引水的天数及小时数略大，引水的总量大些。这在水工模型中无法反映，可参考数模计算及水文分析成果决定。

6.2 过闸水流流态及流速分布

6.2.1 补充方案 流态及流速分布

洪水期，西南水闸必须利用闸门进行控泄运行，不同水位控泄的开度及泄放的流量不同，组合较多，下面介绍北江在遭遇百年一遇洪水时，闸前北江水位为 11.13m 时，闸门在 0.2~3.0m 开度时，水流进出水闸的流态及流速分布。当闸门开度在 0.2~1.0m 开度控泄时，水流在闸前左翼墙前出现一回流区，回流流速随开度的增大而减小，范围也减小，最大回流流速为 -0.54m/s。当闸门开度在 1.5~3.0m 控泄时，闸前回流消失。水流进入闸前断面，呈左小右大的流速分布，与原设计推荐的五孔方案相比，其均匀性要好。闸前断面水流最大流速在 0.45~2.41m/s 之间，

开度越大，流速越大。

水流过闸后，在消力池均能产生淹没水跃的底流消能流态，在开度为 0.2m 时，由于下游水位较低，水流受中墩的影响，在消力池出现回流流态，但回流流速不大，不致影响出池的流速分布。随着开度的增大，下游水位抬高，回流消失。水流出池后，与下游河床连接较为平顺，未见出现回流现象，呈中间小两侧边滩略大的流速分布，下游河床的面流速一般小于 2.05m/s，底流速小于 1.76m/s，不会出现严重冲刷河床的不良流态。

6.2.2 补充方案 流态及流速分布

补充方案 的流态及流速分布与补充方案 较为接近，闸门控泄时，闸前断面流速在 0.61~2.23m/s，随着开度的增大出闸流速增大，消力池的流态及流速分布与补充方案 相近，均能产生淹没水跃的底流消能流态，出池流速同样呈中间小两侧略大的分布规律。下游河床最大面流速小于 2.03m/s，底流速小于 1.78m/s，流速大小与补充方案 相近，不会对河床产生严重的冲刷。

6.2.3 中枯水引水流态及流速分布

中枯水引水改善水环境时，水闸全开引流，引水流量小于 100m³/s 时，水流基本归槽，流态较为平顺，水闸闸前后为水流缓流连接，流速分布较对称，流速较小，一般小于 0.75m/s，补充方案 与补充方案 没有实质的差别；引水流量在 200~500m³/s 时，水流漫滩，但主流集中在深槽上，闸前后水流连接平缓。补充方案 与 闸下游各断面流速相近，一般差别在 0.05m/s 左右，两补充方案海漫最大流速小于 2.14m/s，下游河床最大流速小于 1.53m/s。

6.3 消能效果分析

6.3.1 补充方案 消能效果

如前所述，当北江发生百年一遇洪水时，闸前水位为 11.13m，此时，水闸控制分洪，过闸水流为孔口出流，在此条件下消能的要求最高，若设计的消力池能满足此消能要求，在其他水位条件下的消能要求均能满足。试验表明，水闸在 0.2~3.0m 开度控泄时，水流均能在消力池内产生淹没水跃，消能效果较好，在小开度时，水跃在闸室内完成，水跃出闸室后，流速较小，在海漫段最大底流速为 1.32m/s，开度大于 1.0m 时，水流消能更充分，出池流速均匀对称，海漫及河床流速均小于 2.79m/s，小于不冲流速。

6.3.2 补充方案 消能效果

补充方案 消能效果略比补充方案 为好，原因是闸底板高程降低，出闸水流淹没深度增大，出流量减小，表现为出池流速较补充方案 均匀，海漫流速及河床流速减小，均小于 2.47m/s。综上所述，补充方案 与补充方案 均能满足消能防冲的要求，即使闸下水位流量关系曲线有所降低，仍可满足消能防冲要求。

6.4 水闸的管理运用

6.4.1 闸门的开启方式

西南水闸由单一的分洪功能变为兼分洪及引水改善水环境功能的节制闸，因此闸门的开启方式也随之发生变化。在枯水期，当闸前北江水位低于 4.5m 时，闸门可以全开引流，恢复自由引水功能，当闸前北江水位大于 4.5m 或在洪水期，需要下闸控泄，建议采用三孔闸门均匀同步开启的运用方式，控泄的流量大小可按 6.1.1 所列公式计算控制。

6.4.2 闸门开启的控制条件

闸门在不同的开度时，水流都能在消力池内产生稳定的淹没水跃消能，但由于下游水位受开闸流量大小而变化，水流在消力池产生的水跃也会前后推移，但当下游水位低于某一开度的下游临界水位时，出池流速增大，对下游河床及岸坡防冲不利。试验表明，闸门局部开启的开度与下游临界水位关系如下：

$$Z_{北} = 11.13\text{m}, e = 0.2\text{m}, Z_{西} = 1.85\text{m}$$

$Z_{北} = 11.13\text{m}$	$e = 0.5\text{m}$	$Z_{西} = 2.60\text{m}$
$Z_{北} = 11.13\text{m}$	$e = 1.0\text{m}$	$Z_{西} = 3.08\text{m}$
$Z_{北} = 11.13\text{m}$	$e = 1.5\text{m}$	$Z_{西} = 3.81\text{m}$
$Z_{北} = 11.13\text{m}$	$e = 2.0\text{m}$	$Z_{西} = 4.65\text{m}$
$Z_{北} = 11.13\text{m}$	$e = 2.5\text{m}$	$Z_{西} = 5.86\text{m}$
$Z_{北} = 11.13\text{m}$	$e = 3.0\text{m}$	$Z_{西} = 6.79\text{m}$

建议采用闸门 3 孔均匀开启的运用方式，开度由 0.2m 开始，过渡到 2.3m 开度，特别是在设计洪水位，闸下游水位较低时，为避免出现集中冲刷破坏下游消力池及海漫，不宜突然把闸门开度开得过大。

7 结论

7.1 补充设计的方案 及方案 均具备能满足分洪 $1100\text{m}^3/\text{s}$ 流量要求的过流能力，在设计洪水位时，只需开启 2.3m 闸门开度控泄。在中枯水位 1.0~4.5m 时，水闸的引水流量达 $40 \sim 486\text{m}^3/\text{s}$ ，可使佛山、广州两市的水环境得到改善。

7.2 补充设计方案 及方案 的平面布置较合理，闸前后的流态较原初步设计推荐的方案好，流速分布较均匀，左右基本对称。闸前两岸翼墙的形式对水流流态及流速分布差别不大，均可采用，视结构稳定及工程量而定。下游左右翼墙的扩散角合理，水流出池后迅速扩散，上、下游水流连接平顺。

7.3 补充设计的方案 及方案 的消能工设计基本合理，消能效果较好，可满足消能防冲的要求。由于中墩较宽，出池后河床采用开挖的复式断面，水流在消能出池后，呈主槽两边略大于中间的流速分布。虽然不会影响下游的冲刷，但在技施设计阶段建议深入研究，在消力池适当增加消力墩，调整消力池长度，达到减小工程量，优化出池后主槽边大中小的流速分布规律，对滩槽的稳定更有利。

参考文献

- [1] 《水力学》，武汉水利电力学院水力学教研室编，人民教育出版社，1974 年；
- [2] 《北江大堤加固达标工程西南水闸水工模型试验研究》，广东水利水电，2003 年第 4 期。