

高等学校教材

水工建筑物

(供水利水电工程建筑专业用)

下 册

天津大学 主编



水利电力出版社

目 录

第六章 土基上的水闸	1
第一节 概述	1
第二节 水闸的孔口尺寸和泄流能力	3
第三节 水闸的消能防冲与防护	7
第四节 闸基防渗排水与渗流计算	17
第五节 闸室的布置和构造	29
第六节 闸门及启闭机	37
第七节 闸室稳定计算	66
第八节 闸室结构计算	73
第九节 闸与两岸的联接建筑物	85
第十节 其它闸型	90
第七章 溢洪道	95
第一节 概述	95
第二节 正槽溢洪道	95
第三节 其他型式的溢洪道	108
第四节 非常泄洪设施	115
第八章 水工隧洞	119
第一节 概述	119
第二节 泄水隧洞的布置和构造	120
第三节 深孔闸门	139
第四节 作用在水工隧洞衬砌上的荷载	143
第五节 隧洞的衬砌计算	148
第六节 隧洞的喷锚支护	168
第九章 过坝建筑物、渠系建筑物	175
第一节 通航建筑物	175
第二节 过木建筑物	183
第三节 过鱼建筑物	187
第四节 渠系建筑物	192
第十章 水利枢纽	200
第一节 水利枢纽设计的任务与内容	200
第二节 水库及水利枢纽对当地自然条件的影响	201
第三节 水利枢纽布置	205
第十一章 水工建筑物的管理	213
第一节 概述	213
第二节 水工建筑物的检查观测	214
第三节 水工建筑物的养护与修理	230

第六章 土 基 上 的 水 闸

第一节 概 述

水闸是一种低水头的水工建筑物。它具有挡水和泄水的双重作用，在农田水利工程中应用极为广泛。

解放以后，随着我国水利事业的蓬勃发展，为了防洪、灌溉、排涝、航运以及挡潮等目的，在黄河、长江、淮河、海河等流域及其它许多地区兴建了数以千计的大中型水闸和难以胜数的小型涵闸。大大地增强了这些地区的抗旱和排涝能力，促进了工农业生产的不断发展，给国民经济带来了很大的效益。

一、水闸的类型

按照水闸担负任务的不同，主要可分为以下五种：

（一）进水闸（或称取水闸）

为了满足农田灌溉、水力发电或其它用水的需要，在河道、水库或湖泊的岸边，建闸引水，并控制入渠流量，谓之进水闸。因其通常建在渠道的首部，故又叫渠首闸。这类水闸有开敞式及涵洞式两种。

（二）节制闸

节制闸一般拦河建造，故又叫拦河闸。枯水期借以截断河道抬高水位，以利上游航运和进水闸取水；洪水期用以控制下泄流量。此外，在灌溉渠系上位于干、支渠分水口附近的水闸，也叫节制闸。

（三）排水闸

排水闸常位于江河沿岸。外河水位上涨时可以关闸以防江河洪水倒灌；河水退落时即行开闸排除渍水。这类水闸对保证农业丰收具有重大意义。由于它既要排除洼地积水，又要挡住较高的外河水位，所以其特点是闸底板高程较低而闸身较高，并受有双向水头的作用。

（四）挡潮闸

在滨海地区，潮水沿入海河道上溯，两岸受潮水影响，土地卤化，造成危害；在汛期受潮水顶托，排洪能力降低，造成内涝；平时则内河淡水流失盐化。为了挡潮、御卤、排水、蓄淡，在入海口附近所建的水闸称为挡潮闸。其特点亦是受有双向水头作用，且操作频繁。为了沟通内河与内海交通，挡潮闸通常设有通航孔或船闸，如江苏苏北沿海地区兴建的挡潮闸。

（五）分洪闸

分洪闸常建于河道的一侧，用以分泄天然河道所不能容纳的多余洪水进入湖泊、洼地，及时削减洪峰，保证下游河道安全。待外河水位降落时，再由洼地或湖泊下游的排水

闸泄出，流回原河道。这类水闸的特点是，泄水能力要大，以利及时分洪。如1952年建成的湖北省荆江分洪工程，就是防止长江水患保障江汉平原安全的分洪闸。

二、水闸的组成部分及其作用

在平原地区，水闸通常需在土基上修建。这种水闸除了有用以控制水流的闸室段外，还有上游联接段及下游联接段，如图6-1所示，以保证闸室正常工作。

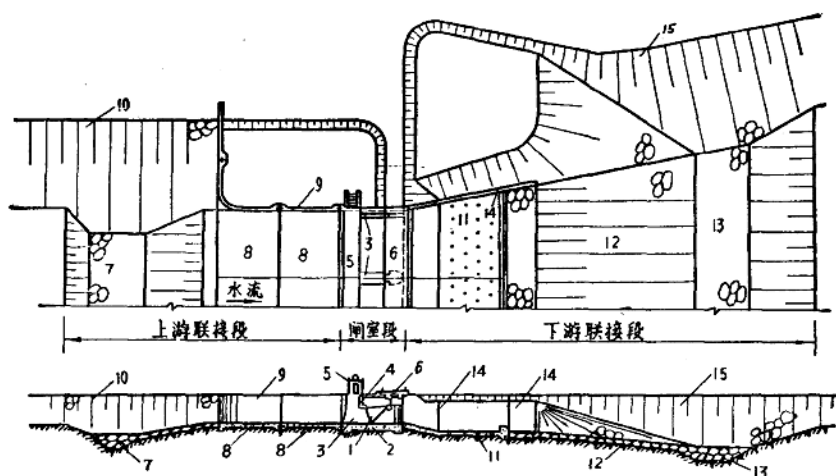


图 6-1 水闸的组成部分

1—闸门；2—底板；3—闸墩；4—胸墙；5—工作桥；6—交通桥；7—上游防冲槽；8—上游防冲段（铺盖）；9—上游翼墙；10—上游两岸护坡；11—护坦（消力池）；12—海漫；13—下游防冲槽；14—下游翼墙；15—下游两岸护坡

（一）闸室段

闸室段包括闸门、闸墩、底板、工作桥、交通桥等。闸门安置于底板上，由闸墩支撑。闸门所承受的水压力通过闸墩传给底板，然后由底板将其连同上部结构的全部重量及底板上的水重较均匀地传给地基。闸门、闸墩及底板是闸室段的三个主要组成部分。底板是闸室段的基础，闸室的稳定主要由底板与地基间的摩擦力来维持，底板还具有防冲、防渗等作用。闸门则用于控制水流。闸墩的作用主要是分隔闸孔、支承闸门。在闸墩上建有装置闸门启闭设备的工作桥和满足交通需要的交通桥。闸室段通常为混凝土或钢筋混凝土结构，小型水闸有时部分采用浆砌石结构。

（二）上游联接段

上游联接段处于水流行近区，其主要作用是引导水流平稳地进入闸室，保护上游河床及河岸免于冲刷变形，并有防渗作用。一般包括有上游防冲槽、铺盖、上游翼墙及两岸护坡等。上游翼墙的作用主要是使水流平顺地进入闸孔，并可借以侧向防渗。铺盖主要起防渗作用，但其表面应满足防冲的要求。上游防冲槽主要是保护铺盖头部不致损坏。

（三）下游联接段

下游联接段具有消能和扩散水流的特性。在一般情况下，首先促成水跃，然后引水出闸，尽快使水流平顺地扩散，防止闸后发生危害性的冲刷。通常包括护坦、海漫、下游防

冲槽、下游翼墙及两岸护坡等。下游翼墙导引水流均匀扩散，并有防冲、防渗等作用。消力池具有消能防冲的作用。海漫则是继续消除水流余能，并防止水流冲刷河床。下游防冲槽主要防止海漫末端遭受冲刷，避免向上游延伸。

此外，在临近水闸的上、下游河段，水流流速较大，为了保护河岸不受冲刷，通常用砌石加以保护，叫做护坡。

水闸的组成部分及其位置见图6-1。

三、水闸的工作特点

如上所述，水闸是一种低水头“既能挡水，又能泄水”的水工建筑物，多建于平原地区软土地基上，它具有如下的工作特点：

（一）水流方面

水闸主要靠闸门挡水。在水头差作用下渗流通过闸基及两岸，对闸室及两岸联接建筑物的稳定不利，并可能产生有害的渗流变形而危及建筑物的安全。水闸的稳定及渗流都是水闸设计中需要解决的重要问题。

水闸初始泄流时，闸下无水或水深很浅，随着闸门开度增大和开启门数加多，下游水深急剧变化，给闸下消能带来了困难。水闸上下游水位差较小，容易产生波状水跃，消能效果差，水面波动向下游延伸很长，对河床及建筑物不利。再有，水流由护坦流入下游宽而浅的河槽，特别是当闸孔数目较多，开启个别闸孔容易形成折冲水流，淘刷两岸。基于上述原因，在设计水闸时，除应保证具有要求的过水能力外，尚需对出闸水流有妥善的消能及扩散措施，否则容易在闸下产生危害性冲刷。

（二）地基方面

平原地区岩层埋藏很深，水闸常建在土基上。由于地基土壤抗滑能力差，所以闸的稳定是设计中的一个重要问题。另外，表层土壤常夹有压缩性大、承载能力低的软土；或是松散、易于液化、抗冲能力甚低的细砂。对闸的稳定性、不均匀沉降、闸下冲刷、闸基渗流等的影响均较复杂。故设计水闸时，应控制渗流，保证闸室及闸基的稳定，而且要求闸室结构能适应地基变形。

第二节 水闸的孔口尺寸和泄流能力

水闸闸孔总宽应有足够的尺寸，以满足引水或泄水的要求，可根据规划设计流量和闸孔的泄流能力来决定。闸孔的泄流能力和上下游水位、闸孔型式和底板高程有关。一般拦河闸的上游水位及设计流量是由规划决定的。建闸后上游水位抬高多少，涉及上游河岸堤防增修、两岸地下水位的抬高，是一个比较复杂的问题。必须根据具体情况作专门比较后确定。在平原地区，如我国江、浙一带通常允许抬高的数值较小，有的在20厘米左右。抬高过大，对闸下消能亦不利。下游水位可以从原河道水位流量关系曲线查得，但还要考虑下游河床可能发生冲刷或淤积会使水位相应降低或抬高的现象。在感潮河段建闸，情况尤为复杂。闸下淤积是一个普遍存在的严重问题。另外，闸下水位不仅受原来潮汐变化的影响，而且还要考虑建闸后闸下高潮位抬高、低潮位下降等情况。在圩网地区建闸，其上游

挡水位的推算也是一个比较复杂的问题，必须根据专门的水文水利计算来确定。

一、闸孔型式的选择

(一) 平底板孔口

平底板孔口属于宽顶堰型(图6-2, a), 为水闸中最常用的孔口型式, 其主要优点是利于泄洪、冲砂、排污、泄冰、通航, 泄流稳定, 而且结构简单, 施工方便。

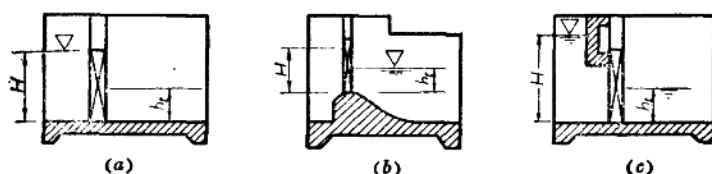


图 6-2 闸孔型式

(a)平底板孔口; (b)低堰孔口; (c)胸墙孔口

(二) 低堰孔口

低堰孔口近于实用堰, 如图6-2(b)所示。在非淹没出流情况下, 其流量系数比平底板孔口约高20%, 对缩短水闸宽度有利。但其泄流能力受尾水位变化的影响较为显著。一般情况下, 当下游堰顶水深 $h_t \geq 0.35H_0$ (H_0 为上游堰顶水头)时, 即开始受到淹没影响; 当 $h_t \geq 0.6H_0$ 以后, 泄流能力急剧下降, 不如平底板孔口泄流稳定。当闸前水深很大, 要求限制过闸单宽流量, 或要求拦截上游泥沙进入下游渠道时, 则采用低堰孔口的型式比较适宜。

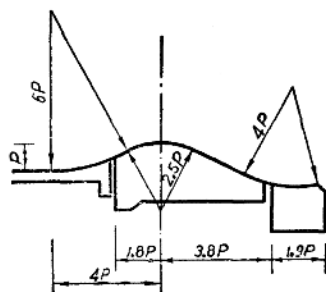


图 6-3 驼峰形堰

低实用堰, 有梯形的、曲线形的及驼峰形的。图6-3所示为广西总江口水利枢纽拦河闸采用的驼峰堰, 其剖面形态与水头的关系如图示。堰的下游面形态与消能形式有关, 图6-3所示为面流式。这种堰型有许多优点: (a) 堰的上游不淤泥沙, 经模型试验证实, 粒径2.5厘米以下的砾石、砂子可以通畅地从堰顶排至下游; (b) 流量系数较大, 在非淹没情况下可达0.43以上, 一般选用0.40左右, 壅水小, 可减小上游淹没损失。这种堰型有的建在水库溢洪道上, 有的建在泄水渠道上。

(三) 胸墙孔口

如上游水位变幅较大, 而过闸流量有限制, 高水位时, 要求控制泄流, 则常于孔口顶部设固定挡水板, 称为胸墙(图6-2, c)。采用胸墙可以减小闸门的高度。

二、闸底板高程和孔口尺寸

(一) 闸底板高程

确定闸底板高程涉及许多因素; 要满足水闸所承担任务的要求; 要考虑过闸单宽流量和地基的地质条件; 施工时基坑开挖是否困难; 工程总投资是否经济等等。闸底板高程

过低,势必增大过闸单宽流量,造成闸下消能防冲困难。我国一般采用的过闸单宽流量为 $10\sim 30\text{米}^3/\text{秒}\cdot\text{米}$,有的甚至小于 $10\text{米}^3/\text{秒}\cdot\text{米}$ 。江苏的经验为:在粉土、粉砂地基上建闸,取单宽流量为 $5\sim 16\text{米}^3/\text{秒}\cdot\text{米}$;在淤土上为 $9.0\text{米}^3/\text{秒}\cdot\text{米}$;在细砂土上为 $4\sim 9\text{米}^3/\text{秒}\cdot\text{米}$;在粉质壤土及粉质壤土夹砂壤土上为 $9\sim 21\text{米}^3/\text{秒}\cdot\text{米}$;在粘土及粘土夹砂壤土上为 $12\sim 24\text{米}^3/\text{秒}\cdot\text{米}$ 。

闸底板应尽可能建筑在比较坚实的土层上。根据经验,对粘土地层的标准贯入击数大于5击、砂土地层大于8击时,就可以利用天然地层作为水闸的地基,不再进行处理。当地基强度能满足要求时,对于小型水闸,若将底板高程定得高些,则两岸联接建筑物的高度就会低些,又因两岸联接建筑物占整个工程量比重较大,虽然闸孔总宽度增加了,但总的投资可能是经济的。反之,在大中型水闸中,如果抬高底板高程,闸门及两岸联接建筑物高度固然减小了。但闸前水深减小,闸孔总宽度增加,闸室结构工程量增加,而且防渗及防冲的保护范围也相应增大,总的工程投资可能是不经济的,而降低高程,常常是有利的。但底板高程不宜过低,否则不仅地基开挖困难,闸门高度也要增高,启闭设备也随之加大,并给闸下消能防冲带来困难。

由此可见,闸底板高程是由多方面因素决定的。在实际工程中,都要通过技术经济比较确定。在一般情况下,拦河闸底板顶部高程可与河底同高。

(二) 孔口尺寸的拟定

孔口尺寸的拟定,可根据已知的设计流量、上下游水位、初步选定的闸孔型式和底板高程,利用水力学公式计算闸孔总宽,大致拟定孔数及孔口尺寸。

闸孔数愈多,闸墩也愈多。由于闸墩妨碍水流,从水力条件来说,以孔数少些为好。显然,孔数决定于单孔宽度的大小,而单孔宽度的确定常取决于闸门型式及其材料、启闭设备条件和闸孔的运用要求(如有否宣泄漂浮物、泄冰、过船等要求)。加大单孔宽度,孔数可以减少,但要求较强的启闭设备,未必经济。弧形钢闸门单孔的高宽比若小于 $\frac{1}{2}\sim\frac{1}{2.5}$ 时,闸门刚度将显著降低。但若宽度过小,对钢闸门也是不经济的,且闸墩增多,闸身总宽及工程量也因此增多。我国常用的单孔宽度一般为 $8\sim 12$ 米,尤其常用者为10米。目前江苏采用的钢丝网水泥薄壳闸门(或平面闸门)单孔宽度常取 $6\sim 8$ 米。最近山东所建大型水闸,最大孔宽30米。单孔宽度决定后,闸孔数即为闸孔总宽与单孔宽度之比值,应当选取整数。

必须指出,在计算闸孔总宽时,所用的流量系数、淹没系数及侧收缩系数等,均随闸型、水头、闸门开度和进口形状及枢纽布置的不同而变化,对于重要的大型水闸,应通过水工模型试验进行修正。

三、闸孔泄流能力

(一) 宽顶堰

在平原地区修建的水闸,大多采用平底的宽顶堰,如图6-2(a)所示。过闸流量按下式计算:

$$Q = \sigma \epsilon m B \sqrt{2g} H_0^{\frac{3}{2}} \quad (6-1)$$

式中 Q ——过闸流量（米³/秒）；

m ——流量系数，对于单孔或多孔闸应采用不同的数值，可查阅水力学手册确定；

H_0 ——包括行近流速水头在内的堰顶水头（米）；

ε ——侧收缩系数，一般为0.85~0.95；

B ——闸孔总宽（米）；

σ ——淹没系数，可由水力学手册查定；

g ——重力加速度。

（二）低实用堰

低实用堰的过闸流量，可近似地按实用堰公式计算：

$$Q = \sigma m \varepsilon B \sqrt{2g} H_0^{\frac{3}{2}}$$

（三）闸孔出流

对于底槛为宽顶堰的闸孔，当闸门局部开启（或具有胸墙）时，若闸门开度（或胸墙下孔口高度） a 和堰顶水头 H 的比值 $\frac{a}{H} \leq 0.65$ 时，即为闸孔出流（即孔流）。

闸孔出流根据下游水位是否影响过流量，又分为自由出流和淹没出流两种情况：

①当下游水深 $t < h''$ （ h'' 为相应于闸孔出流收缩水深 h_c 的第二共轭水深）时，为自由出流的情况，如图6-5所示。过闸流量按下式计算：

$$Q = \varphi \varepsilon' a B \sqrt{2g (H_0 - h_c)} \quad (6-2)$$

式中 a ——闸门开启高度（米）；

ε' ——垂直收缩系数；

h_c ——收缩断面水深（米）， $h_c = \varepsilon' a$ ；

φ ——流速系数，对宽顶堰闸孔，通常采用 $\varphi = 0.90 \sim 0.95$ ；

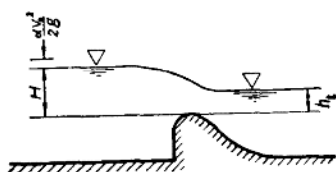


图 6-4 低实用堰出流

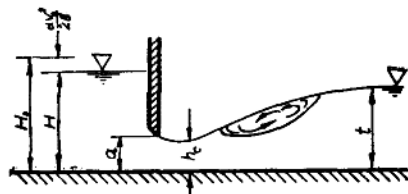


图 6-5 自由孔口出流 $t < h''$

其它符号意义同式（6-1）、（6-2）。

②当下游水深 $t > h''$ 时，为淹没式孔口出流。过闸流量应按下式计算：

$$Q = \varphi \varepsilon' a B \sqrt{2g (H_0 - h_z)} \quad (6-3)$$

$$h_z = \sqrt{t^2 - M \left(H_0 - \frac{M}{4} \right) + \frac{M}{2}} \quad (6-4)$$

$$M = 4\mu^2 a^2 \frac{t - h_c}{th_c}$$

$$\mu = \varphi \varepsilon'$$

式中 h_z ——收缩断面处淹没水深（米）；

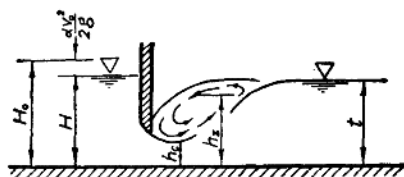


图 6-6 淹没式孔口出流 $t > h_0$

t ——下游水深(米);

其它符号意义同前。

对弧形闸门, ϵ' 与闸门开度基本无关, $\epsilon' = 0.7$ 。对于平面闸门, 则 ϵ' 与闸门开度有关。

第三节 水闸的消能防冲与防护

水闸泄水时水流具有较大的能量, 而且水头和单宽流量愈大, 能量也愈大。由于土质河床抗冲能力很低, 因此闸下冲刷是一种普遍的现象。对于有害的冲刷, 必须采取措施加以防止。有的冲刷并不危害建筑物的安全, 一般说来是允许的。

闸下发生冲刷的原因是多方面的, 有的是设计不当造成的, 有的是由于运用管理不善产生的。为了保证水闸的安全使用, 防止对河床的有害冲刷, 一要尽可能消除水流的多余能量, 二要保护河床及河岸能抵抗冲刷。两方面的措施同时并举, 而以前者为主, 防冲措施为辅。

一、闸下泄流的特点

水闸初始泄流时, 闸下水深很浅甚至无水, 水流联接条件不利。随着闸门开度的增大, 下游水位逐渐抬高, 形成水跃。水跃有一定程度的淹没, 对消能有利, 但当淹没较大时, 下游水流强烈脉动, 延续的距离增大, 淹没更大时, 急流沿底部前进, 对消能反而不利。

由于水闸上下游水位差较小, 其福氏数 Fr_1 ($Fr_1 = \sqrt{V_1^2 / gh_1}$, h_1 为第一共轭水深, V_1 为 h_1 处的断面平均流速) 也小, 特别在平底板的情况下容易产生波状水跃。试验证明, 当下游河床与底板高程齐平时, 在共轭水深比 $\frac{h_2}{h_1} \leq 2$ 的时候, 即在 $Fr = 1.0 \sim 1.7$ 时就会出现波状水跃, 此时无强烈的水跃漩滚, 水面波动前进。由于缺少水跃漩滚间的强烈紊动, 消能效果甚微, 具有较大的冲刷能力, 水流保持急流前进, 与翼墙分离而不向两侧扩散, 致使两侧产生回流, 缩小河槽有效宽度, 局部单宽流量增大, 严重地冲刷河床及河岸, 见图 6-7。

一般水闸的宽度均较原河道为窄。水流过闸时先行收缩, 出闸后再行扩散。如布置不当, 消能措施不力, 出闸水流往往不能均匀扩散, 形成集中急溜, 左冲右撞, 蜿蜒蛇行, 冲向下游, 淘刷河岸及河床。这种水流叫做折冲水流, 见图 6-8。当折冲水流将河床冲成深槽时, 主流更加集中, 局部单宽流量增加。用下式表示为:

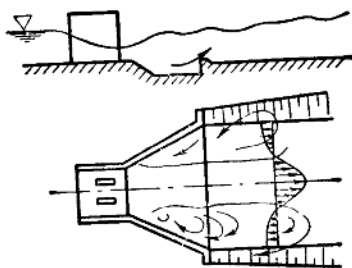


图 6-7 波状水跃冲刷示意图

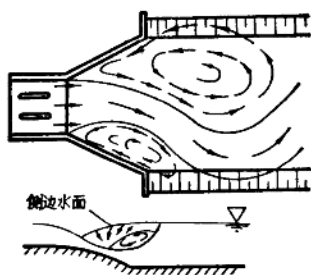


图 6-8 闸下折冲水流

$$\alpha = \frac{q_{max}}{q_0} = K \left(\frac{H_2}{H_1} \right)^{0.65} \quad (6-5)$$

式中 α ——单宽流量集中系数；

q_{max} ——冲刷坑最大单宽流量（米³/秒·米）；

q_0 ——海漫末端单宽流量（米³/秒·米）；

H_1 ——海漫末端水深（米）；

H_2 ——冲刷坑水深（米）；

K ——与出海漫之后水流扩散有关的系数，一般取 $K=1.0 \sim 2.3$ 。

二、闸下联接及消能方式

（一）闸下水流一般联接方式

平原地区的水闸，由于水头低，下游水深大，加之河床土壤抗冲能力较小，所以无法采用挑流式消能。又因水闸下游水深变化大，在一般情况下，难以产生面流式水跃。因此，一般都采用底流式水跃消能。虽然底流消能效果因水头差过小而受到限制，但这种水流联接方式，可以适应过闸流量与下游水位在较大范围内变动；同时，在平面上也易于扩散。所以底流消能在水闸工程中应用较广，是一种基本的消能方式。

（二）消力池的布置

通常将护坦高程降低，使其形成消力池，以增加水深，促使水跃在消力池中发生，从而达到消能的目的。水跃应有一定程度的淹没，对于稳定水跃位置和消能均有好处。

促使闸下产生底流式水跃主要靠消力池。对土基上的水闸而言，若下游水深不足，可开挖闸下河床作消力池，一般不单独采用消力墙。因为较高的消力墙常仍需在墙后设置护坦或需再设一道消力墙，工程量增大，且墙后水流波动对岸坡不利，甚至影响下游航运，这是我国已建水闸工程绝大多数采用消力池的原因。但如地下水位较高、开挖困难，或消力池深挖后会影响到闸室的稳定时，则可采用浅消力池辅以低消力墙的形式。

水闸的运行经验和试验资料都表明，闸门全开、通过最大流量的情况，不一定是上下游联接最不利的控制条件。为保证水闸既能安全运行，又不增加工程造价，在进行闸下水流联接设计时，应选定几个泄流量，结合考虑合理的闸门操作方案进行计算，通过分析比较后确定。

消力池底高程可按各种水流联接条件下形成水跃淹没5~7%确定,当其高程低于闸底板时,在底板与消力池之间常用不陡于1:3~1:4的斜坡段联接。消力池的池底高程通常取决于闸门初始开启的泄流状态。一般应在最低泄流尾水位时,使底流水跃的起点恰好位于消力池斜坡段的坡脚处。消力池底的水平段长度,通常取决于大流量的泄流状态,一般取比水跃长度稍长些。平底段上扩散水跃长度的计算可参阅我国南科所的公式●。

$$\text{当 } 3 < Fr_1^2 < 6 \text{ 时, } L_t = (1 + 0.6 Fr_1^2) h'' \quad (6-6)$$

$$6 < Fr_1^2 < 17 \text{ 时, } L_t = 4.6 h'' \quad (6-7)$$

式中 L_t ——水跃长度(米);

Fr_1 ——福氏数;

h'' ——第二共轭水深。

消力池末端应布置尾槛,借以调整断面流速分布,减小出池水流的底部流速,如图6-9所示,以防池后淘刷,并加强平面扩散和削减下游边侧回流。图6-10为若干不同型式的尾槛,当尾水较浅时,型式不同,效果也不同。当尾槛淹没较深时,则其功效无甚差异,一般采用连续式的尾槛较多。

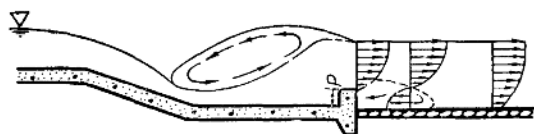


图 6-9 消力池尾槛后水流流速分布

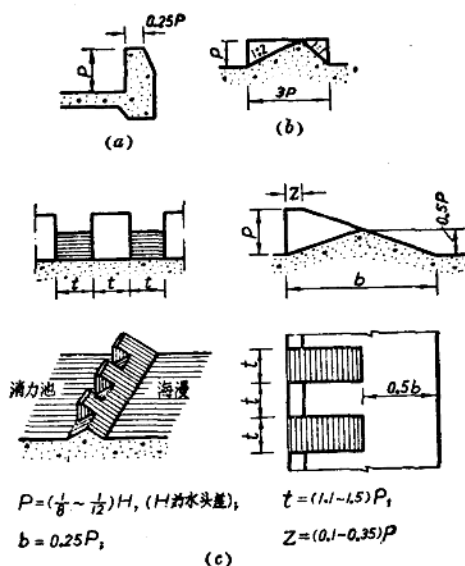


图 6-10 尾槛型式示例

(三) 辅助消能工

在水闸的消力池中,除尾槛外,有时设有齿坎、消力墩等辅助消能工,用来提高消能效率,使消能结构更为经济合理。辅助消能工具有以下作用:

①在消力池中的辅助消能工,使水流受阻,给水流以很大的反力,达到加强消能减小消力池开挖深度的效果。

②由于消力池中消力墩后,水流分散成细股,促成水流弯曲、互相撞击、形成涡流,以及与消能工的表面摩擦等,造成了强烈紊动,如图6-11所示。紊动愈强烈,消能效果愈好。

③辅助消能工还可以在各种流量情况下,起到稳定水跃、扩散水流和缩短跃长的作用。

④规定合理的闸门操作方式,可以改善闸下消能防冲条件,但闸门操作不能过于复杂,否则造成管理上的不便。此时,设有辅助消能工便起到了某种改善消能条件的配合作用。

●1955年水工试验研究会议学术讨论文件选集《水工建筑物》《下游消能问题》,水利出版社。

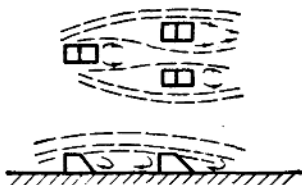


图 6-11 消力墩对水流的紊动作用



图 6-12 池首齿槛的挑流作用

必须指出，以上几种作用都是互相联系，或同时存在的。而且，辅助消能工的作用与它的型式、尺寸及布置有直接关系。例如，齿形尾槛主要起扩散水流、调整流速分布的作用。而如图6-12所示，布置在消力池前端的齿槛，其主要作用是改善闸门开始放水时的泄流条件。齿槛将水流挑起，然后跌落到池内，形成不完全水跃，避免射流冲击尾槛，淘刷河床。尤其是在下游无水的闸孔泄流情况下，这种齿槛更有良好作用。但是，因其所受水冲击力较大，齿不宜做得太高，约可取为尾水深的 $1/6 \sim 1/4$ 或取0.5米。又如，江苏的几个闸，在消力池中部的消力墩因水头较小，效果并不显著，有的反而使下游水流紊乱，冲刷岸坡；有的因下游水深大，修理较困难，目前已很少采用。

还需指出，即使采用同样布置的辅助消能工，其消能效果还将因池水深浅、泄量变化等而有所不同，所以对具体工程应通过水工模型试验来鉴定其效果。辅助消能工既受有水流的直接冲击，又可能遭受真空负压的作用而发生振动空蚀现象，还可能受到漂浮物及泥沙的撞击、磨损，受力比较复杂，因而在外形、构造、衬护等方面均需予以研究。通常以墩体上游面倾斜而带圆角者较为适宜。

三、波状水跃及折冲水流的防止措施

(一) 波状水跃的防止

在平底板孔口情况下，将底板延长预留平台，既利于闸孔出流的扩散，又可在其末端设置一道小槛(图6-13)，使水流越槛入池，促成底流水跃。槛的适宜高度 c 约为第一共轭水深的 $1/4$ ，上游面削成斜坡，以减弱水流的冲击作用。但在出流福氏数较低时，该槛对水闸的泄流能力略有影响，这是我国建闸实践中创造出来且应用较广的措施。如将该小槛改为一些齿形槛、分水墩或分水槛等(图6-14)，对分散水流会有更大的作用。低堰孔口中的堰顶高出上游河床，起着与上述小槛类似的作用，所以一般不需另加措施。

(二) 折冲水流的防止

消除折冲水流首先应从控制下游翼墙扩散角及促使出闸水流扩散入手，只图在折冲水



图 6-13 防止波状水跃的平台小槛

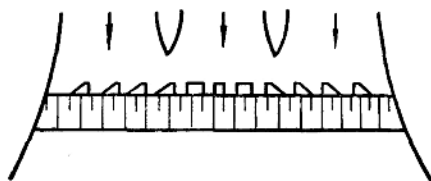


图 6-14 防止波状水跃的分水墩

流发生范围处加强防冲设施是不经济的。一般扩散度采用1:6~1:4,消力池中设有辅助消能工时,可偏大些,而且要求翼墙平顺光滑,墙顶宜高出下游最高水位,以免下游回流由墙顶漫回消力池,如安徽某闸由于翼墙太低,在滩地的宽广范围内形成严重回流,其单宽流量集中系数达1.44。一般由于消力池后的水流流速已逐渐变缓,扩散较易,所以通常无需将翼墙延伸到海漫末端。

其次,亦可以采取专门措施防止折冲水流。如图6-15所示,在消力池前端采用散流墩,效果显著,它还具有改善初始泄流条件和加强消能等作用。

最后应该指出,闸门的合理开启方式也有助于消除折冲水流,如低泄量时隔孔交替开启,使水流均匀出闸;又如开启过程中先开中间,继则渐开两边,关闭时则相反操作,以使在较短启闭过程中主流尽量居中。

四、闸下防冲加固措施

(一) 护坦

护坦的长度由水跃计算来确定。

消力池首部的斜坡段亦属护坦段范围,其长度系根据闸底与消力池的联接需要而决定。护坦是用来保护水跃

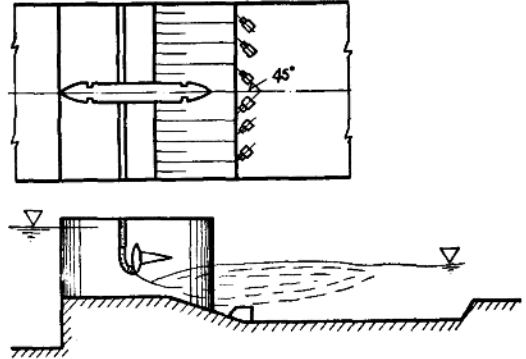


图 6-15 防止折冲水流的散流墩

范围内河床不受水流冲刷保证闸室安全的主要结构。泄水时,护坦上水流情况非常紊乱,受力情况复杂,不仅遭受水流冲击,还有脉动压力和渗透压力的作用,特别是受到带有漂浮物的水流撞击,一旦破坏,就会失去整体稳定。土基上的护坦主要靠其自重来维持稳定。由于影响护坦厚度的因素很多,直至目前为止,护坦厚度的计算大都采用已建水闸的经验,并用较大的安全系数。一般大中型水闸的护坦厚度为0.5~1.0米,个别则更厚;对小型水闸可以减薄到0.3~0.5米。护坦在顺水流方向可做成连续等厚的。当护坦过长,地基过于软弱时,为了防止因地基不均沉陷、温度胀缩、构件受力情况不良等引起断裂,可在顺水流方向将其分成前后两段,采用不同的厚度,下游段可比上游段薄些,或可以自上游到下游逐渐减薄。

如果单独考虑护坦底部渗透压力的作用,护坦厚度可根据护坦不浮起的原则计算,详见第二章。

为了改善护坦的稳定性,可在护坦上设置排水孔,以降低其底部渗透压力。但应设在护坦的后部,以防前端高流速局部负压将基土吸出,并应在其孔下设反滤层,以防止地基土壤被渗水带走。排水孔的孔径一般为0.07~0.25米,间距为1.5~3.0米,呈梅花形排列。

当护坦上设有辅助消能工时,由于消能工承受有水平冲击力,必须进行抗滑稳定校核。消能工上受到的冲击力 F 为:

$$F = \xi \gamma_s \omega \frac{V^2}{2g} \quad (6-8)$$

式中 ξ ——绕流系数, 与消能工外形有关, 消力墩取0.6~0.8, 尾槛取1.0;

γ_0 ——水的容重;

ω ——消能工的受力断面积;

V ——消能工前的平均流速;

g ——重力加速度。

护坦常采用100#或150#混凝土建成。一般情况下只需布置构造钢筋, 但在消能工底部与护坦连接处, 则要特别加强, 见图6-16。

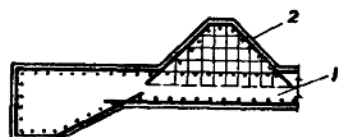


图 6-16 护坦与消能工钢筋布置
1—护坦, 2—消能工

闸底板与消力池之间, 一般做成1:3~1:4的斜坡过渡, 使水流平顺地进入消力池。坡度过陡可能在坡面上造成真空区和形成振动, 应当避免。

当闸门设在底板的上游部分时, 可将下游部分的底板降低到与护坦同一高程, 利用它作为消力池的一部分, 以缩短护坦长度, 节省工程量, 但底板的受力条件较为复杂。

(二) 海漫

闸下水流产生水跃后, 虽已消除大部分能量, 但仍有较大的余能, 底部流速还较大, 且脉动剧烈, 仍会造成对河床及河岸的冲刷。此外, 由于过闸水流前缘比天然河道窄, 流量集中, 所以对下游河床的冲刷是不可避免的。因此, 除了在水跃范围内设置护坦外, 在紧接护坦之后, 仍要采取防冲加固措施。通常都需设置海漫和防冲槽。

海漫的作用主要是进一步消除水流余能, 保证护坦安全和后面河床免受冲刷。但与护坦不同, 它不是依靠形成水流滚来消能, 而是促使水流速度逐渐衰减, 并改变流速分布, 使海漫末端的流速沿水深的分布接近天然河道, 不致再有过的冲刷能力。

1. 海漫长度及其布置

海漫长度的拟定, 至今尚无成熟的方法。原则上应根据消力池出口的单宽流量及水流扩散情况、上下游水位差、地质条件、尾水深度、末端加固程度以及海漫本身的粗糙程度等因素加以确定。虽有许多经验公式, 但都有局限性, 相互间结果差异甚大。我国南京水利科学研究所根据淮河、苏北、长江、山东等处共31座水闸的水工模型试验研究提出的经验公式, 可供参考使用:

$$L = K \sqrt{q \sqrt{\Delta H}} \quad (6-9)$$

式中 L ——海漫长度(米);

q ——护坦末端的单宽流量(米³/秒·米);

ΔH ——上下游水位差(米);

K ——河床土质系数, 当河床为细砂及壤土时, 可取 $K = 10 \sim 12$; 粗砂及粘性土, 用 $K = 8 \sim 9$; 硬粘土则 $K = 6 \sim 7$ 。

该公式适用于 $\sqrt{q \sqrt{\Delta H}} = 1 \sim 9$ 的范围, 比较符合我国实际情况, 是目前国内常用的公式。不过根据对江苏一些水闸运用情况的统计研究, 对于粉砂、细砂地基, 按该公式所得海漫长度尚嫌不足。又如在北京北运河粉细砂地基上的一些水闸按上式计算亦感不

够。因此，务需注意使用。

海漫往往在其起始段处先做小部分水平段，其后大部分则做成缓坡段，或全长均做成缓坡。因很长的水平海漫对于改善垂直断面流速分布的作用不大，而向下游倾斜的缓坡海漫，因其后水深逐渐加大，水流在垂直方向扩散，平均流速及脉动流速迅速降低，如图6-17所示。据华北地区的实践证明，海漫全长均做成缓坡效果甚好，但考虑到海漫首部处于消力池出口，水流平均流速及紊动较大，要求海漫具有更大的坚实稳固性，所以现在一般都还是先在海漫首部做一小水平段，这样与消力池的联接及施工等亦较方便。海漫斜坡通常应缓于1:5~1:6，常用1:6~1:10，甚至更缓，应结合地基条件、海漫长度、防冲槽布置等具体情况考虑。

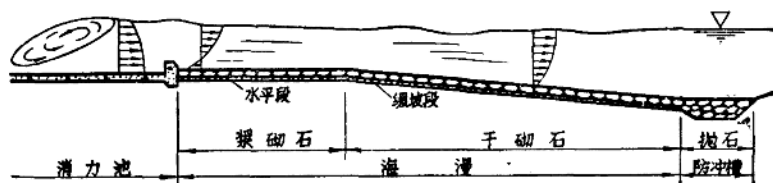


图 6-17 海漫布置及其流速分布示意图

海漫顶面的起点高程，可与护坦相同，或可在消力池尾槛以下0.5米左右。其末端高程则决定于海漫末端的出口允许流速，一般按河床不冲流速为设计条件。相应于不冲流速有个要求的不冲水深，或称可能的冲刷深度，见图6-19中的 h 和 t_p 。实践证明，降低海漫末端高程、增加水深，防冲效果颇为显著。但是海漫末端高程如过分低于下游河床，反而会造成单宽流量集中的现象，不利于防冲，亦不利于施工。另外注意加强平面扩散，则能获得更好的效果。

关于不冲水深，目前还没有精确的计算公式，这里介绍的一些经验公式，可能相差较大，仅供参考。不冲水深 h 的确定应考虑建闸后水流冲刷能力的变化，所以要区别两种情况：

- ①建闸后河道输沙情况基本不变，则不冲水深 h 为：

$$h = \frac{q}{\alpha V} \quad (6-10)$$

式中 q —— 海漫末端的单宽流量；

V —— 河道的正常流速；

α —— 系数， $\alpha = 0.8 \sim 0.9$ ，取决于河床流速分布情况。

- ②如果过闸水流不再输沙，基本上是清水过闸，则不冲水深 h 为：

$$h = \sqrt[1.2]{\frac{q}{V_1}} \quad (6-11)$$

式中 V_1 —— 清水条件下水深1米时，河床的平均不冲流速，可查有关资料。

其它符号意义同上。

在砂性土质河床中，可按南京水利科学研究所的公式计算冲刷深度：

$$t_p = \frac{0.164q'K}{\sqrt{d}\left(\frac{t}{d}\right)^{\frac{1}{6}}} \quad (6-12)$$

$$t'' = t_p - t$$

式中 t_p ——可能冲刷深度(米), 如图6-19所示;

q' ——海漫末端最大单宽流量。 $q' = \alpha q$, q 为海漫末端平均单宽流量, α 为单宽流量集中系数;

K ——系数, 有倾斜海漫者 $K = 1.05 \sim 1.22$; 有较长的水平海漫时 $K = 1.10 \sim 1.26$; 没有海漫、尾槛前有水跃, 取 $K = 1.30 \sim 1.61$;

d ——河床砂粒直径(d_{50} , 厘米), 当无资料时, 建议近似取下表6-1所列数值;

t ——可取为海漫末端水深, 即下游河道水深。

2. 海漫的构造

除了要求海漫坚固耐冲之外, 为了适应下游河床可能的冲刷变形, 海漫材料(特别是在海漫的下游段)应具有一定的柔性; 同时, 为了使渗水自由排出, 减低可能存在的扬压力, 以增强海漫的稳定性, 海漫应具有一定的透水性, 其下并应设反滤层或垫层。另外海漫表面要求粗糙, 以进一步消除余能。海漫的材料可根据其上水流流速的大小进行选择, 常用的有以下几种:

(1) 干砌块石海漫 这是最常用的海漫结构(图6-18, a), 块石直径应大于30厘米, 厚0.3~0.5米, 一般为0.4米, 在砌石下通常铺有卵石及毛砂垫层, 各厚10厘米。块石直径大小对防冲关系很大, 干砌块石海漫的抗冲流速约为3米/秒

表 6-1

土 质	d_{50} (厘米)	土 质	d_{50} (厘米)
粉 细 砂	0.015	粗 砾	1.5
细 砂	0.035	中 砾	0.7
中 砂	0.075	细 砾	0.3
粗 砂	0.15		

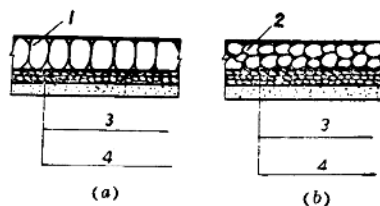


图 6-18 干砌及浆砌块石海漫

1—干砌石海漫; 2—浆砌石海漫; 3—卵石层厚10厘米; 4—毛砂厚10厘米

(2) 浆砌块石海漫 这种海漫结构通常用在距消力池末端10米左右的范围内, 因为该处水流的流速和紊动较大, 要求海漫具有较高的抗冲能力。浆砌块石海漫的抗冲流速为3~6米/秒, 其厚度亦为0.3~0.5米。浆砌块石内应设排水孔, 下设反滤层, 如图6-18, b所示。其缺点是柔性、透水性差。

(3) 抛石海漫 这种海漫简单而且柔性好, 选用的石块直径随流速而定, 可按下述经验公式估算:

$$V = (4.2 \sim 6.5) \sqrt{d} \quad (6-13)$$

式中 d ——抛石直径(米);

V ——水流速度(米/秒)。

其厚度一般为0.5米,河床为砂质土壤时,在抛石海漫底下有时设有碎石垫层或用梢捆柴排作为垫层,若为粘性土壤则可简化。

(4) 埽捆海漫 埽捆系用树梢捆扎起来的材料,既可作为海漫的垫层,也可包扎石块单独用作海漫,其柔性最好,一般允许流速为3.0米/秒左右。虽然结构简单,但由于取材困难,且维修费用较大,现已很少采用。

(5) 混凝土板、钢筋混凝土板海漫 整个海漫由板块拼铺而成,每块板的边长2~5米,混凝土板的厚度在海漫始端处取0.5~1.0米,其余部分取0.2~0.3米;钢筋混凝土板则较薄。为了增强其稳定性,常用钢筋联系起来。若板件尺寸不大,则可预制,否则需就地浇筑。应注意在顺水流方向板间不宜有通缝。为了加大海漫的粗糙度,有时采用不同板厚交错拼排,或将板的下游端稍微隆起。其抗冲能力特强,允许流速达6~10米/秒,但造价昂贵。此外,近年来因河道污染,由于酸性、碱性的腐蚀作用,使钢筋寿命缩短,损坏快,因此只有在当地确实缺乏石料或流速过大并确有条件时才考虑采用。

此外,还有石笼海漫等其它结构型式的海漫。应该指出,采用上述不同材料、型式的组合海漫,常能获得较好的技术、经济效果。

(三) 末端加固(防冲槽)

设计海漫时,虽以海漫出口水流不冲河床为设计条件,但其末端实际上难以完全避免冲刷。企图完全避免冲刷既不经济,也无必要,应当限制冲刷的扩展,使其不致向上延伸、危害海漫安全。所以不论在海漫降到或未降到可能冲刷深度,均需在末端采取措施。但后者要求更加坚强。末端加固型式及采用的材料,应结合地质条件和当地材料供应情况来考虑。一般有两种基本方式:

(1) 防冲槽 在海漫末端预留足够的堆石,当水流冲刷河床,冲刷坑向预计的深度逐渐发展时,预留在海漫末端的堆石体将沿冲刷坑的斜坡陆续滚下,铺列在冲刷坑的上游斜坡上,以保护河床,使冲刷坑不向上蔓延,趋于稳定,形成防冲槽。这是我国水闸工程中最常采用的末端加固方式。堆石体的体积及布置要能体现上述作用,所需槽顶总宽 L 视可能冲刷的实际深度 t'' 及冲刷后的安全坡1: m 而定,如图6-19所示。槽底宽 L_1 可取 $(2\sim3)t''$,通常取 $t''=3\sim4$ 米。六十年代我国在根治海河工程兴建的大中型涵闸,其防冲槽均采用宽而浅的形式,顶宽 L 绝大多数均在10米以上,且有不少水闸槽顶宽达15~17米,槽深1.5~2.0米。北四河吴村枢纽的赶水坝节制闸防冲槽顶宽20米,槽深仍为2米。显然,宽浅式的防冲槽便于施工,故常被采用。

(2) 截断防冲 把冲刷坑与海漫隔断,使冲刷坑不能向上游扩展,如图6-20所示。在易被冲刷的河床上,距地表不深处有较坚固耐冲的土层时,采用截断防冲,做齿墙或将板桩打入坚固土层中去。或虽没有坚固土层,而做齿墙或将板桩打到可能冲刷的深度以下,可能较为经济。这种布置在我国采用较少。五十年代初期江苏兴建的一些水闸很多均采用打桩的方式加固末端。

任何一种末端加固方式,其尺寸和布置,主要根据可能冲刷深度决定。当海漫末端高程已降到可能冲刷深度时,防冲槽或齿墙、板桩深度还应有一定的要求,视海漫上水流扩散