



陡坡跌水的水力计算和设计

西 北 省 水 利 科 学 研 究 所 著
陕 西



22
122

陕 西 人 民 出 版 社

目 录

一	引言.....	(1)
二	灌溉渠道上陡坡跌水工程中存在的問題.....	(2)
	甲、一般情况簡介.....	(2)
	乙、陡坡跌水下游产生冲刷的原因和消能工的特点.....	(9)
三	陡坡跌水上游控制缺口的水力計算和布置形式.....	(14)
	甲、梯形控制缺口的水力計算.....	(14)
	乙、跌水控制缺口的布置形式.....	(20)
四	陡坡水流扩散特性和陡坡段人工加糙消能的研究.....	(24)
	甲、陡坡水流扩散特性的研究.....	(25)
	乙、陡坡跌水陡坡段底部比降問題.....	(32)
	丙、陡坡段人工加糙消能工措施.....	(37)
五	陡坡跌水下游連接水力計算和 消能防冲問題的研究.....	(49)
	甲、陡坡跌水下游梯形断面水跃問題的研究和消力塘、 护砌段尺度的确定.....	(50)
	乙、陡坡跌水下游消力塘布置形式和有效的輔助消 能工措施.....	(65)
	丙、几种新型消力防冲工程布置措施的介紹.....	(66)
六	灌溉渠道上陡坡跌水工程設計和布置的原則.....	(73)
附 录		(78)
参考文献		(81)

一 引 言

在高原丘陵地形陡峻地区的灌溉渠道上，采用最广泛的調節比降、連接輸水的水工建築物，便是陡坡跌水工程。这类工程在渠道总工程量中，往往占的比重很大，而实际管理运用过程中，存在的問題也比較多。根据我們实际調查了解，在西北地区的泾惠、渭惠、洛惠、梅惠、清惠、临惠、褒惠、澧惠、冷惠、溇济、黄羊、河东与河西的昌馬河总干等典型渠道，以及在引黄济卫干渠和白沙灌溉总干渠等大型渠道上，原有的各式各样的陡坡跌水工程中，存在最普遍而极需要解決的問題，是下游消能防冲工程措施問題，特别是消力塘以下渠道兩堤岸边坡塌陷的現象最为显著，成为各渠道养护管理工作中一大負担。其次为上游控制缺口的設計，陡坡段的布置形式和人工加糙消能以及消力塘加設輔助消能工等問題，也都没有从理論和实践中得到完滿的解決。为了提高灌溉渠道行水效率，扩大灌溉面积，增加单位面积产量，并尽可能节省人力物力，降低渠道养护管理成本，我所遵照国家布置的任务，进行陡坡跌水工程的專題研究工作。几年来由于人力、時間等条件限制，我們开展这项專題研究工作的方式，主要是結合西北地区有关工程管理部门提出的具体委託任务进行的。

关于灌溉渠道陡坡跌水下消能防冲問題，我們曾于1955年进行了部分成果的总结，曾于1955年11月举行的全国水工試驗研究會議上提出报告，并已刊印在1956年水利出版社出版的“水工建築物下游消能問題”一书中。

針對陡坡跌水工程存在的問題和特点，我們曾結合三十三个

这类实际工程具体问题，进行了有关陡坡跌水上游控制缺口形式、陡坡水流扩散特性、陡坡人工加糙、陡坡下游梯形渠槽断面水跃共轭水深、消力塘尺度、水跃长度、护砌段长度以及辅助消能工措施等问题的试验研究工作。通过大量的资料分析研究，对于上述各问题，已获得了一定的成果，同时为了反映梯形渠槽水跃跃后水流能量变化情况，并对于水流动能系数（断面流速分布不均匀系数） α 值和正确反映消能作用的新的试验观测方法，作了较深入的分析和研究工作。这些研究成果，对于我们更进一步研究和设计灌溉渠道上陡坡跌水工程有很大的帮助。

自从1957年后半年以来，在我国水利建设大跃进运动中，各地有关水利工程设计单位，先后提出了关于灌溉渠系水工建筑物定型设计规范草案。其中有关陡坡跌水工程设计计算部分，有的过于简略，有的论据不够充分，也有的在推荐苏联先进科学技术经验时，密切结合我国实际不够（註1）。为了贯彻科学研究工作密切为生产服务的方针，我们希望这本册子能对进一步修正已有的定型设计草案中陡坡跌水工程的设计计算，提供一些依据和方法。

二 灌溉渠道上陡坡跌水 工程中存在的問題

甲、一般情况简介：

在我国西北陕西、甘肃、青海、宁夏等省（区）的大型灌溉渠道上，最常见的陡坡跌水结构形式有（图1、2、3、4）等几种，其中尤以（图1）所示布置形式较为普遍。

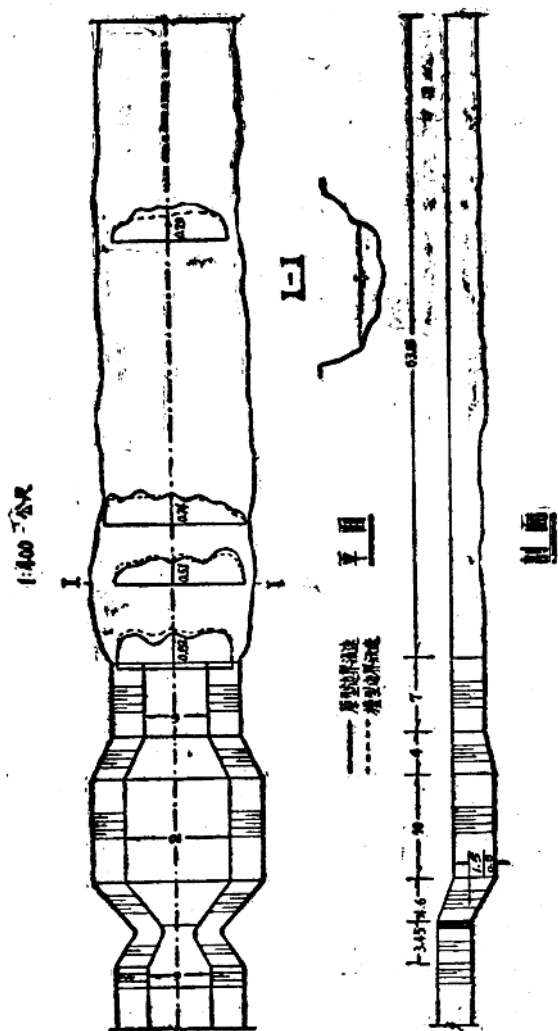


图1 泾惠南干渠4号陡坡布置及下游冲刷情况

(图1)所示的古老的陡坡跌水结构布置特点是: (1)上游控制断面为一渐变的收缩梯形缺口(缺口个数1~3)宽顶堰; (2)陡坡比降较陡, 一般 $tg\delta = 1/1.5 \sim 1/2.5$; (3)陡坡段边墙平面扩散角 $tg\theta$ 很大, θ 一般约为 $15^\circ \sim 40^\circ$, 且边墙形式, 为由上游缺口和下游消力塘两个不同梯形断面的边坡所连接而成的扭曲面; (4)消力塘横断面为梯形, 且较下游渠道横断面为大, 如以底宽比为标准, 则消力塘底宽 B_0 与渠道底宽 B 的底宽比, 一般为 $B_0/B = 1.5 \sim 2.0$; 塘边坡约为 $m_0 = 1.0 \sim 1.5$, 一般等于或小于渠道边坡 m ; (5)陡坡及消力塘段没有加设适当的辅助消能措施, 仅藉塘内产生水跃消能; 塘后与渠道连接的护砌段长度 L_0 较短, 且断面收缩较剧, L_0 与消力塘长 L_s 的比值, 约为 $L_0/L_s = 0.2 \sim 0.5$ 。

这种布置形式, 在实际运用中, 形成陡坡跌水下游消能问题的复杂性, 水流情况不符合实际要求。它主要表现在: 水流由缺口下泄时, 在陡坡段扩散不均匀, 水舌横断面成近似抛物线形剖面, 主溜集中下泄。水流在消力塘两侧产生极不稳定和不对称的立轴漩涡; 漩涡纵向长度有时竟伸展到塘下护砌段和土渠中; 出塘水流波动不稳定, 流速分布极不均匀, 一般在护砌段后相当长距离内(最长可达200公尺)的渠道断面上, 流速值均呈两侧偏大。这样便造成了护砌段以下土渠两边堤岸冲刷坍塌现象, 如(图1)所示, 便是一个典型例子。

(图2)(图3)所示陡坡布置形式, 其特点为: (1)陡坡段没有平面扩散, 即陡坡段横断面固定不变; (2)消力塘为矩形或梯形断面, 其底宽和边坡多与渠道相同, 且塘的长度、深度多不符合水流产生水跃消能的需要, 即或有的在塘内加设辅助消能工, 但也多因布置不当, 不能达到预期消能效果; (3)塘后

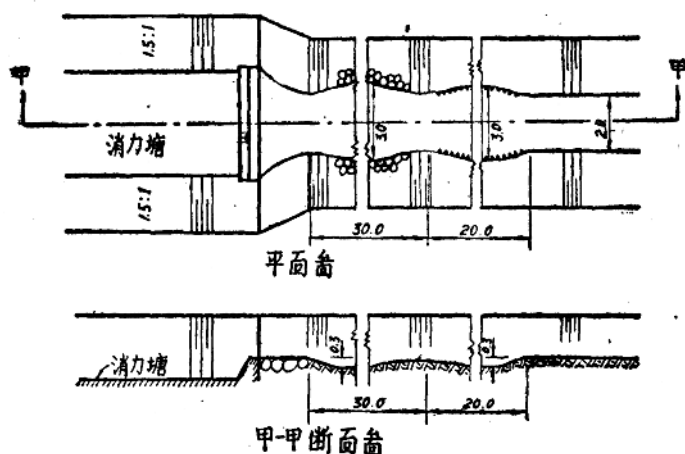


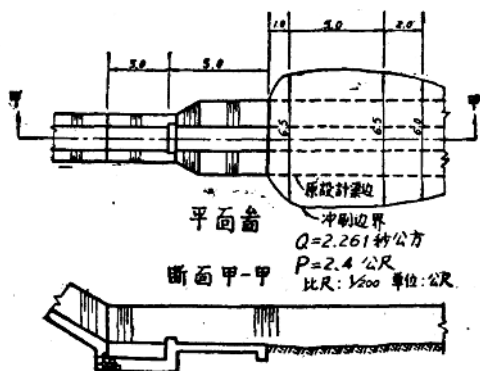
图2 襄惠渠现有陡坡跌水下游冲刷情况

$Q=8.0$ 秒公方 $P=2.4$ 公尺 比例尺 1:200 单位 公尺

与土渠砌接的护砌段，长度较短或甚至没有护砌段。

由于布置上的欠妥当，这种陡坡中水流集中下洩，在消力塘內极易产生不对称的顛跃流态和立軸旋渦，出塘水流折冲波动不稳，在断面上兩边流速偏大，披岸波湧而下，造成下游土渠兩堤岸的严重冲刷，影响范围长达150~200公尺以上，如陝南襄惠渠总干渠上的这类陡坡跌水（见图2），在下游渠道兩側岸堤坡冲垮后，虽将被冲部分用块石砌护，但水流又繼續向下游兩側岸浸蝕，致在其下游又造成另一新的冲刷范围。又如(图3)所示为黑惠渠西干渠八号陡坡跌水下游，实测的渠道断面边界流速分布，由图可以看出在150公尺长一段渠道內，水流仍然呈現兩边流速偏大現象，这种情况造成了該渠道管理工作中很大負担。

这种陡坡，消力塘断面不变(即与渠道断面相同)的陡坡跌水，



壩後護坦末端水位流速之分佈

距護坦末端150公尺處之水位流速分佈

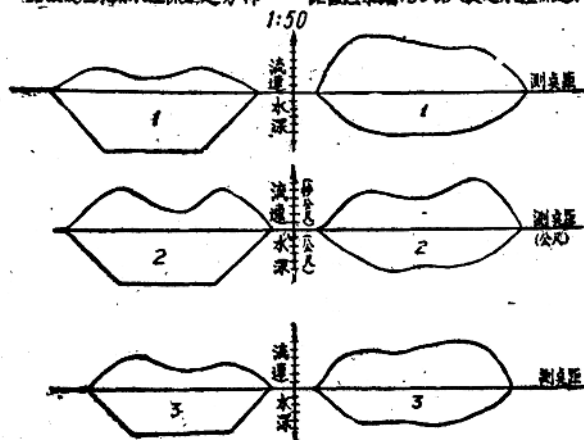


图3 黑惠渠西一支渠第8号跌水下游冲刷情况

在河南白沙灌溉干渠的退水渠上也曾广泛采用，但是在实际运用中，消能效果很难令人满意，在跌差较大时，水流折冲而下，有些陡坡的坡面和消力塘的护砌工程都被冲毁，下游渠道更遭到严重的冲刷。如照片插图（图4）所示，为白沙灌溉干渠三号退水陡坡下端被水流冲塌的情况，其最大流量为4.0/秒公方，跌差约5.0公尺。原工程布置见（图5）。

此外在陕西洛惠渠上还有墩几式陡坡跌水，其形式近似陡坡，惟坡面较陡（一般由1:1~1:0.75），系按水流抛射线形设计，在坡面下的土质坚实时，工程范围小，比较经济，但在

照片插图



剖面图

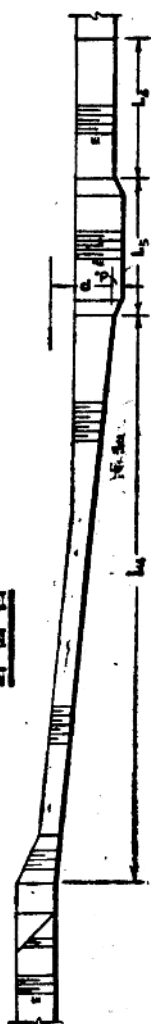


图5 白沙总干渠陡坡布置形式 $Q=4.0$ 秒公方 $P=5.0$ 公尺

消力塘未加其他輔助消能工
時，下游消能情况較差。

除过陡坡跌水外，在西北
各大型灌溉渠道上，还有大量的
直落式跌水和台阶式跌水作
为渠道調整比降的連接建筑
物，如果消力塘布置合理，直落
式跌水較陡坡式跌水的下游消
能情况为好。洛惠渠干渠上对
直落式跌水下作成剖葫芦式消
力塘。经过实际行水运用，消能
效果良好。但直落式跌水需有
坚固的跌水胸墙，工程費用比
陡坡跌水为高，且不能适应因
地制宜、就地取材的原則。因
而近年来，大規模的灌溉工程
建設中，直落式跌水不如陡坡
式跌水被采用的广泛。台阶式
跌水虽可适应地形条件，也能
就地取材修建，但根据实际觀
測結果，往往由于台阶布置不
当，消能情况恶劣，下游渠道
有严重的冲刷現象。如渭惠渠
三渠三号台阶式跌水(图6)，
由于台阶和消力塘布置欠妥
当，致下游渠道遭受严重的冲

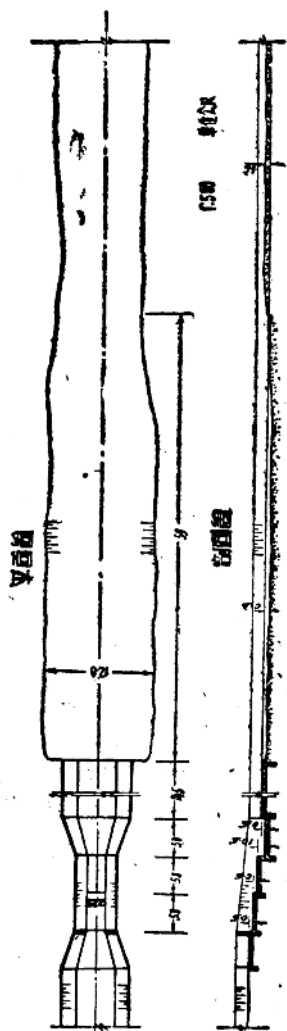


图6 渭惠渠台阶式跌水布置形式

刷，特别是兩堤岸的冲刷最为剧烈。虽在出塘后35公尺一段土渠內兩岸拋石护砌，但在行水时沿兩堤岸仍繼續向下伸长坍塌，达100公尺以上。这也說明在台阶式跌水中，由于消能不佳，出塘水流仍然兩側流速偏大，与上述陡坡跌水有同样的缺点。

陡坡段用不同底坡比降，并在陡坡上人工加糙，改善下游消能作用的陡坡跌水，在甘肃河西昌馬河灌溉总干渠上，已有广泛的应用（图7）。这种陡坡布置形式，如果消力塘和輔助消能工設置适宜，消能防冲效果还是可靠的。

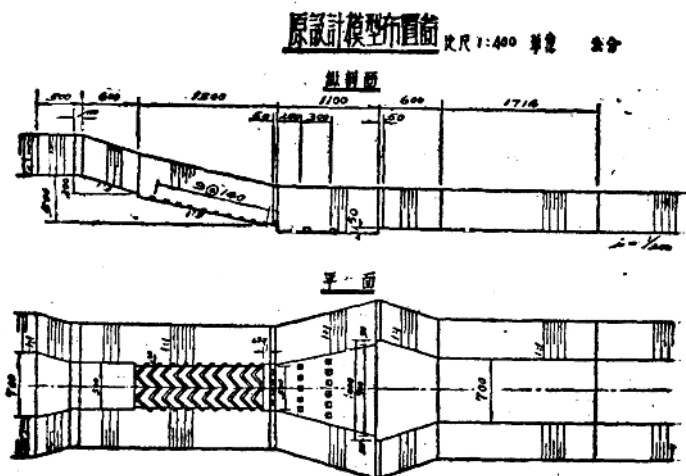


图7 昌馬河总干渠陡坡布置形式

$Q=65$ 秒公方

乙、陡坡跌水下产生冲刷的原因和消能工的特点：

陡坡跌水下渠道兩岸普遍遭受冲刷的原因，主要有以下几

点:

1. 一般灌溉渠道陡坡跌水的下游连接, 都采用消力塘为主要消能措施, 消力塘多为梯形断面, 其水流属于空间水流性质。在梯形断面消力塘中水跃后水面高于跃前水面, 由于这一水面差在两边坡上前后断面静压力无法平衡, 所以很容易在两侧产生一系列立轴漩涡, 造成塘内颤跃流态, 虽塘深可以保证淹没水跃, 但是横轴水棍因受立轴漩涡的两侧压缩, 却减低了消能作用。由于两侧急流潜行于塘底或两边坡, 倘若消力塘内未加辅助消能工, 或塘后整流护砌段过短, 则出塘紊流, 流入土渠后, 不但在断面上两侧流速偏大, 而且水面波动剧烈。这种两侧流速偏大和产生披岸波湧的现象, 乃是陡坡跌水下游渠道两侧岸遭受冲刷的主要因素。

2. 陡坡跌水跌落急流, 对边界感应灵敏, 如果陡坡及消力塘的形状、尺寸和所加的辅助消能工的形式、位置等稍不合适, 即将降低消力塘的作用。而过去已建成的这类工程, 对于消力塘和消能工的计算、设计多不完善; 且绝大部分未加设辅助消能工, 即或加设了一些辅助消能工措施, 也多是凭主观经验办事, 效果不好。如渭惠渠二支渠四号陡坡跌水(图8), 虽在消力塘内加有齿槛消能工, 但下游渠道冲刷坑的底宽竟达渠道设计底宽的3.0倍, 冲刷剧烈的范围蔓延过30公尺以上。

3. 陡坡跌水水流在水跃前扩散情况的好坏, 对消力塘中产生侧翼漩涡有密切关系。水流沿陡坡面是否有良好扩散, 与缺口形状、落差大小及陡坡的比降等有关。如缺口形状一定, 一般说来, 落差大的或陡坡比降小的扩散较好, 消力塘内的立轴漩涡可以消除或减小范围, 但进入消力塘的水流, 常由于两边坡部分跃后水深不易达成共轭水深条件(较应有的跃后共轭水深 h_2 小), 波湧

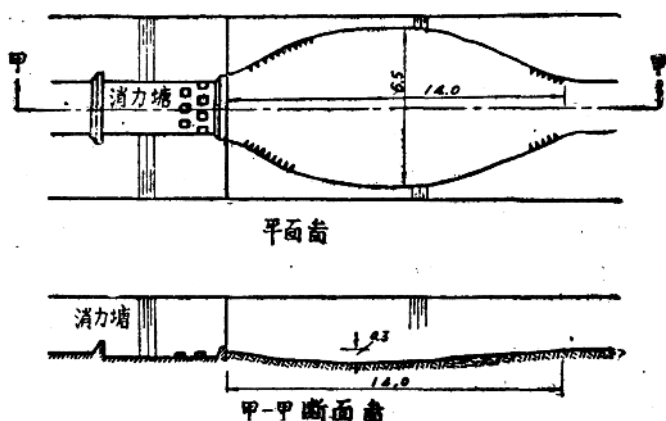


图8 消力渠現有陡坡跌水下游冲刷情况

$Q=16$ 秒公方

$P=2.5$ 公尺

比例尺 1:200

單位 公尺

而下，促使兩側流速偏大。反之，則扩散較差，急流集中下洩，在消力塘內兩側产生显著的立軸漩渦，降低水跃消能功效，出塘水流兩側流速仍然偏大；而且立軸漩渦在梯形断面的消力塘中极难免除，单凭消力塘的作用，要使出塘水流在下游很短一段渠道断面上的流速分布均匀，更是极不容易实现的了。因此消力塘內如不加設适当的輔助消能工，以調整出塘后的流速分布，下游渠道势必将要遭受冲刷。

綜合上述的几个主要原因，可以看出陡坡跌水下游消能防冲問題，是比較复杂的一个問題，对于这类水工建筑物的水力計算設計，截止目前，还缺乏完滿的理論方法和試驗研究成果。

苏联的E.A. 札馬林院士和И.А. 馬什可維奇工程师等，对于

陡坡加糙消能工和梯形断面渠槽内水跃等问题，曾分别提出过研究成果，如菱形陡坡跌水，经过实践证明，消能效果是良好的〔註2〕。

結合我国具体情况，我們曾于历年所举行的三十三个陡坡跌水模型試驗和一部分实际工程的調查資料中，初步分析，綜合得出陡坡跌水下游消能防冲問題，具有下列几个特点和要求：

1. 陡坡跌水工程在高原丘陵等地形陡峻地区的灌溉渠道上应用最广泛，在渠道总工程量中占很大比重。它的下游消能防冲措施，宜以結構簡單、易于修建、就地取材、工程范围小为原则，并要求在所設消能工范围内，大量消杀能量，以便使水流在经过护砌段整流后，流入土渠时，流速分布均匀，流态平稳。陡坡跌水的消能防冲措施，主要在于保护陡坡下游土渠的兩堤岸免遭冲刷和塌陷，危及渠道行水安全。至于下游土渠底部，一般遭受冲刷情况，不如兩堤岸严重〔註3〕。

2. 陡坡跌水水流，属于高速水流，一般都是自由跌落，在灌溉渠道上最常用的跌差在1.0~10.0公尺間(过高的跌差，采用陡坡跌水反不经济实用)。設单位水体的消能量为 $P_r = 9.8Q\Delta E/V$ 瓩/公方；消力塘的消能率为 $\eta = \Delta E/P\%$ ($\Delta E = E_1 - E_2 = \varphi^3 P - \alpha V_2^2/2g$ ； P = 跌差； V = 消力塘水体总容积； E_1 、 E_2 为消力塘前后总能量； φ = 流速系数； V_2 、 α 为消力塘后断面的平均流速和动能系数； Q = 渠道常流量秒公方)。用消力塘消能，一般 P_r 值不高，約为1.5~5.0瓩/公方；但为了防止下游渠道不被冲刷，要求 η 值愈大愈好。当消力塘和护砌段尺寸合宜时，对于水流因跌落而产生的消能率 η ，可以达到80~90%以上〔註3〕。但是根据实际天然和模型中观测，如以消力塘下游渠道的流速分布和流态等来判断，虽然消力塘的 η 值可能很高，但并未彻底解决下游防冲

問題，除非消力塘的容積是很大的。但過大的消力塘，將使工程費用增加很多，不符合社會主義多快好省的建設方針。根據我們試驗研究的成果指出，在消力塘內布置適宜的輔助消能工，是解決下游防沖問題的主要措施之一。

3. 現在實際工程上常採用的陡坡跌水下游啣接的消力塘斷面形式，大體可分為三種（圖9）。第一種，消力塘橫斷面上部為

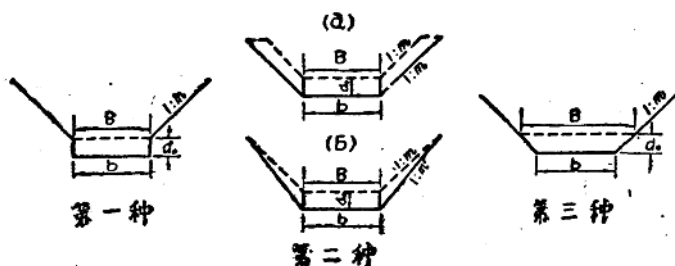


圖9 消力塘斷面形式

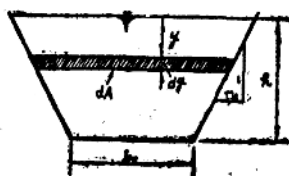
梯形，低於渠底之挖深部分為矩形；第二種，消力塘底寬較渠道為大，塘的容積很大，產生立軸渦流，單位水體耗能量很低；第三種，消力塘边坡與下游渠道边坡保持在同一平面上，橫斷面為梯形，塘底寬較渠道為小，塘中流狀惡劣，消能情況最不好。另外，還有一種，為綜合式消力塘，塘的布置比較複雜，如蘇聯馬什可維奇工程師所提出的菱形陡坡跌水等。這些類型的消力塘從總的橫斷面來看，基本上均為梯形，這就增加了塘中水流運動的複雜性。

三 陡坡跌水上游控制缺口的 水力計算和布置形式

陡坡跌水上游控制缺口之良好水力設計，主要在保證上游水流的均匀性，尽可能地遭到最小的破坏。这在渠道流量固定情况下，很容易达到；在流量变差很大时，按理論只有拋物綫形缺口形式，才能达到这个目的。但这种曲綫缺口在实际工程中，应用是很困难的，因此为保持上游水流的均匀性，在渠道流量有很大变化情况下，現在普遍采用梯形控制缺口。

甲、梯形控制缺口的水力計算：

一般渠道陡坡跌水上游多屬緩坡，水流平均流速較小，在进行缺口水力計算时，行进流速影响較微，一般可忽畧。則梯形缺口自由流計算公式推求如下：



設 b_c = 缺口底寬；

n_c = 缺口边坡系数；

h = 上游渠道正常水深；

φ_o = 流速系数；

ε = 边界收縮系数；

图10 梯形缺口計算图形 dA 、 dy 等符号見（图10）所示。

則
$$dQ = \varepsilon \varphi_o \sqrt{2gy} [b_c + 2n_c(h-y)] dy \quad \dots\dots(1)$$

將（1）式兩边积分得：

$$Q = \varepsilon \varphi_o \sqrt{2g} \int_0^h y^{\frac{1}{2}} [b_c + 2n_c(h-y)] dy$$

积分化简后故得 $Q = \frac{2}{3} \varepsilon \varphi_0 \sqrt{2g} [b_c + \frac{4}{5} n_c h] h^{3/2} \dots\dots\dots (2)$

如令 $\frac{2}{3} \varphi_0 \sqrt{2g} = M$, 流量系数, 代入 (2) 式,

则得 $Q = \varepsilon M [b_c + 0.8 n_c h] h^{3/2} \dots\dots\dots (3)$

(3) 式为有侧面收缩的梯形宽顶堰流量公式, 也是陡坡跌水控制缺口计算的基本公式。(3) 式中方括弧内因子为当水流厚度为 $0.8h$ 时梯形缺口平面中缺口的平均宽度 T 。设 $T = b_c + 0.8 n_c h$, 如已知渠道二特性流量及其相应水深为:

Q_1, h_1 ——一般可采用渠道设计正常流量和水深;

Q_2, h'_2 ——一般可采用渠道正常引用的较小流量和水深。

则将这些值代入 (3) 式可得:

$$\left. \begin{aligned} Q_1 &= \varepsilon M_1 T_1 h_1^{3/2} \\ Q_2 &= \varepsilon M_2 T_2 h_2'^{3/2} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (4)$$

联解 (4) 式即可得梯形缺口 b_c, n_c 的算式如下:

$$\left. \begin{aligned} b_c &= \frac{1}{\varepsilon} \cdot \frac{h_1 T_2 - h'_2 T_1}{h_1 - h'_2} \\ n_c &= \frac{1.25}{\varepsilon} \cdot \frac{T_1 - T_2}{h_1 - h'_2} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (5)$$

(5) 式中

$$\left. \begin{aligned} T_1 &= \frac{Q}{M_1 h_1^{3/2}} \\ T_2 &= \frac{Q}{M_2 h_2'^{3/2}} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (6)$$

(6) 式中的 M_1, M_2 值, 由于 $h_1 > h'_2$, 故 $M_1 > M_2$ 。但在缺口边界条件一定时, M 值随着 h 值的变化很小, 在实际设计中可以采用相同的数值, 即 $M_1 \div M_2 = M$, 对于缺口洩流影