

高等学校試用教科书



水 力 学

SHUILIXUE

中 册

清华大学水利工程系水力学教研组編

人 民 教 育 出 版 社

高等学校试用教科书



水 力 学

SHUILIXUE

中 册

清华大学水利工程系水力学教研组编

人 民 教 育 出 版 社

本书是清华大学水力学教研组编写的。全书分上、中、下三册，上册系清华大学原编的“工程水力学”上册（1959年由原高等教育出版社出版），中、下册系新稿。全书于1961年4月间经过华东水利学院、清华大学、武汉水利电力学院、大连工学院、成都工学院、天津大学、华中工学院及南京工学院等校水力学教研组的有关教师略加补充修改后而出版的。

上册内容包括：液体的主要物理性质，水流运动概论，液体静止的原理，液体运动的原理，水流阻力与水头损失，输水管道的水力计算，明槽水流及明槽的输水能力，泄水建筑物的过水能力。

中册内容包括：水工建筑物下游的水流衔接与消能，连接建筑物的水力计算，渗流。

下册内容包括：有压输水道中的不定流，明槽不定流，水利工程中的泥沙问题，水工建筑物的高速水流问题，船闸水力计算，波浪理论基础。

本书可作为高等工业学校水利类专业“水力学”课程的试用教科书，也可供其他有关专业师生和工程技术人员参考。

水 力 学

中 册

清华大学水利工程系水力学教研组编

人民教育出版社出版

高等学校教学用书编辑组
北京宣武门内永恩寺7号

（北京市书刊出版业营业许可登记证出字第2号）

京 华 印 书 局 印 装

新华书店科技发行所发行

各 地 新 华 书 店 经 售

统一书号 15010·1064 开本 850×1168 1/32 印张 8 3/16 插页 2

字数 207,000 印数 3,001—6,500 定价（7）¥1.00

1961年7月第1版 1961年8月北京第2次印刷

中 册 目 录

第九章 水工建筑物下游的水流衔接与消能	1
§ 9-1. 概述	1
§ 9-2. 水流衔接和消能的一般过程	10
§ 9-3. 底流消能的特点及适用条件	14
§ 9-4. 底流衔接的形式及水力计算	22
§ 9-5. 消能结构的水力计算	26
§ 9-6. 下游河床加固的水力计算	49
§ 9-7. 面流消能的特点和型式	58
§ 9-8. 面流衔接的水力计算	67
§ 9-9. 面流消能的水力设计	77
§ 9-10. 挑流消能的特点	84
§ 9-11. 挑流消能的水力设计	88
§ 9-12. 挑射水流对下游河床的冲刷	97
§ 9-13. 枢纽下游水流的平面问题	101
§ 9-14. 水流平面问题的近似解法	103
§ 9-15. 折冲水流的成因及其防止措施	108
第十章 连接建筑物的水力计算	112
§ 10-1. 概述	112
§ 10-2. 跌水	115
§ 10-3. 陡槽	127
§ 10-4. 渡槽	136
§ 10-5. 倒虹吸	137
第十一章 渗流	139
§ 11-1. 概述	139
§ 11-2. 渗流的物理过程	142
§ 11-3. 渗流的一般规律	146
§ 11-4. 土壤在渗流作用下的稳定性	154
§ 11-5. 渗流的基本方程式	162
§ 11-6. 渗流计算的任务和方法	169
§ 11-7. 渐变渗流	179
§ 11-8. 井的渗流计算	184
§ 11-9. 井群的渗流计算	192

§ 11-10. 水平集水建筑物——集水廊道中的渗流	195
§ 11-11. 透水地基中渗流的概述	196
§ 11-12. 透水地基中的渗流计算	198
§ 11-13. 空间渗流及其在边墩绕流问题上的应用	210
§ 11-14. 土壩渗流概述	216
§ 11-15. 均质土壩的渗流计算	219
§ 11-16. 有防渗及排水设备的土壩渗流计算	226
§ 11-17. 水庫的渗漏	233
§ 11-18. 河渠渗流	237
§ 11-19. 与农业有关的一些渗流问题简介	245
附录 X 矩形出水河槽收缩断面水深、 共轭水深以及静水牆高度求解图	插頁
附录 XI 矩形河槽静水池深度求解图	1

第九章 水工建筑物下游的水流 衔接与消能

§ 9-1. 概述

在河床上修建水工建筑物后,往往会彻底改变了天然的水流特性。挡水建筑物大大地提高了上游水位;水库运转的需要又要求宣泄多余的洪水;建筑物的经济造价和枢纽布置的需要往往要求减短泄水前沿,这就使下游水流集中,且具有很大的能量。这样,原有河床与下泄的水流不再相适应,使河床发生剧烈的冲刷,水流条件也与天然情况大不相同。因此,天然河床与挟带强大动能下泄的人工集中起来的水流特性不相适应,是衔接消能过程中的基本矛盾。

若这个矛盾解决不善,就可能引起下列的两个主要后果:

1. 集中下泄的水流对河床造成严重冲刷,威胁建筑物本身的安全。奥地利列伯令(Lebring)壩的落差为 11.35 米,砂卵石基础,冲刷深度 12 米;瑞士波次諾(Botznau)壩的落差为 5 米,石灰岩基础,十八年内河床冲深达 12.7 米,约为落差的 2.6 倍。这一问题对于高壩更为重要,有一高壩,溢流壩高 96 米,最大落差 92.5 米,河床为花岗岩及片麻岩,有水平混凝土护坦,宣泄了两次洪水后(最大泄流量 12204 秒立方米),护坦遭严重破坏,被水冲走的护坦达原浇筑体积的 $\frac{1}{3}$,基岩亦遭冲深达 4.8 米(图 9-1)。

由此可见,消能与建筑物安全密切相关,为了多快好省的进行建设,为了人民的安全都要求正确地解决这个问题。

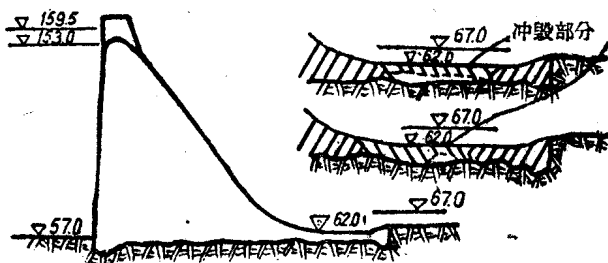


图 9-1. 高壩护坦冲刷实例。

2. 流量集中使下游水流在平面上的分布变得复杂。图 9-2 所示为一水力枢纽的平面布置,溢流壩下泄高速水流迫使电站出流偏向一边,在右岸造成巨大漩涡。它压缩了水流有效过水断面并使主流偏向左岸,该处流速因而大增,超过河中天然流速甚多,冲刷岸坡及河床。

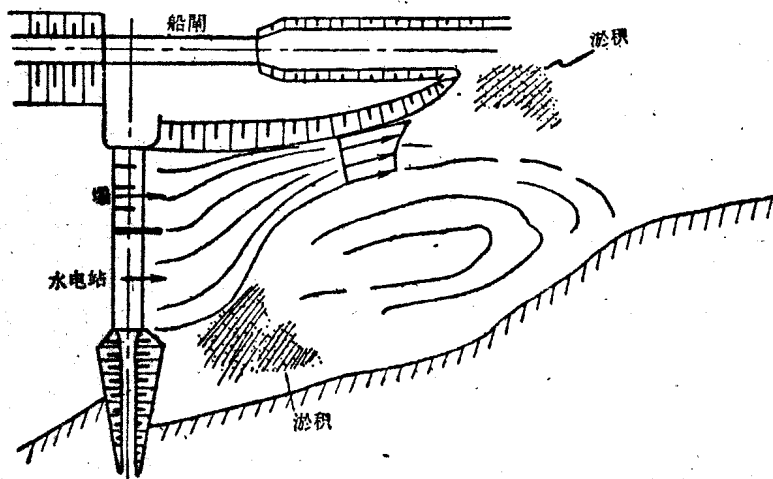


图 9-2. 枢纽下游的折冲水流。

冲走的河砂到通航河道入口处,因过水断面增加流速减小,就可能沉积下来,影响通航。右岸的漩涡往往把泥砂又带回,在电站下游淤积,影响电站出力。

主流偏轉而不能順利扩散的水流叫折冲水流,折冲水流的现象是应该避免的。

因此,水流衔接和消能的任务是用最有效的措施控制水流消杀宣泄的集中水流的余能,改善水流在平面上及过水断面上的扩散状况,减少对河床及岸坡的冲刷,以保证建筑物本身安全,以及避免泄流对枢纽其他组成部分(电站、船閘等)运用时的不利影响。

上述任务与目前水工技术状况密切相关。

近代水利工程发展的趋势是最大限度地利用溢流段,以减少投资,故采用越来越大的单宽流量。

目前采用的在设计单宽流量在非岩基可到 $60 \sim 70$ 立方米/秒-米,岩基可到 $120 \sim 150$ 立方米/秒-米。大的单宽流量包含着巨大的能量,我国南方各河水量丰沛,泄流时所需的单宽流量将十分巨大,消能要求也更迫切。

仅是单宽流量还不能充分说明水流余能状况,挡水高度也具有重大的意义。

我国河流多发源于高山峻岭之上,蜿蜒于雄峰伟峡之间;西南地区形势陡峭,水利资源极为丰富,高水头建筑物将为数不少。水流由高而低,挟带巨大的动能疾驱直下,如无有效措施,则其危害将很巨大。例如在壅高为 100 米和单宽流量为 100 立方米/秒-米时,则单宽上水流所具功率约为 10 万瓩,溢流壅宽 100 米,则其总功率达 1000 万瓩左右,此数相当可观,也说明了消能问题亟宜注意。

高壅消能固然重要,中、小型建筑物消能也不可忽视。前述的波次诺壅冲刷深度达落差的 2.6 倍,不可谓不巨。又如,埃及阿尔休德水閘(图 9-3),最大单宽流量约 12.3 立方米/秒-米,汛期落差约为 3.8 米。

由于下游护坦不够长，闸下冲积河床在过水后遭到冲刷，深达 13 米以上，这是相当可观的。如不加长护坦，则闸身安全就会受到威胁。

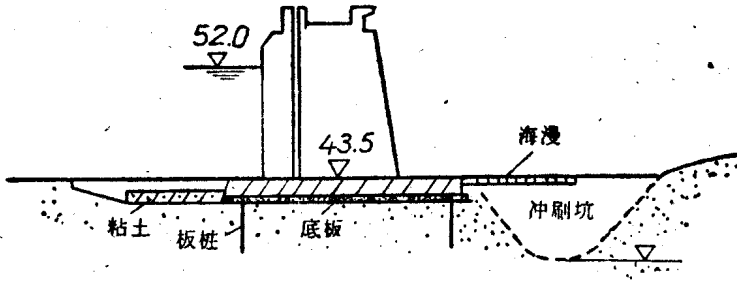


图 9-3. 闸下游海漫冲毁之一例。

然而，由于人类长期的实践，已积累了相当丰富的控制下泄水流的经验。只要继续不断地钻研总结，完全可以设计出有效的消能设备，保障建筑物的安全和运转。

消能设备是为了改变下泄水流的特性，使之与天然河床相适应的技术措施。显然，下泄水流条件的不同，天然河床的地质地形条件的差别以及各个工程运转要求的不同，都会影响到消能结构具体型式的选择。它是综合了上述各种因素之后才能确定的，故其型式很多。目前，可归纳为三种基本型式，即：底流、面流和挑流三种型式。而其他型式，这里亦将选择有代表性的介绍一二。

人类修建的水工建筑是由小型、中型，再建造大型及高水头建筑的。对于水流的运动规律的掌握也是由表及里，逐步深入的过程。水跃是早已发现的现象，利用水跃来消能也早已为人所采用。由于水跃中主流在下部，因此又叫做底流消能。它对中、低水头建筑比较合适。我国自解放以来，从 1950 年开始的治淮工程，在毛主席“一定要把淮河修好”的号召下，大力开展了滞洪、分洪工程，并修建大量水闸控制洪水。这些都是中、低水头的建筑，它们大都应用底流消能。当时修建了许多水库，枢纽布置中的输水隧洞的出口也大多采用底流消能。图 9-4

表示閘下泄流时下游銜接及消能的情况。



图 9-4. 某河分洪閘閘下泄流。

随着水利建设的开展，中、高水头的建筑物逐步兴建。目前，世界上已有 250 米以上的高坝。我国在治淮工程中兴建的连拱坝高已达 70 米以上。而近年来正在兴建的高坝也都在百米以上。我国水工建筑多位于河流峡谷地带，高水头、大流量是我国水工建筑物的特点，单纯依靠底流消能往往不能经济地解决问题。

因此，人们采用了挑流消能。它利用高速水流将溢下水股射入空中消能，水流动能在空气中消耗掉一部分，然后在离坝较远地点落到河中，此时虽有一定冲刷作用，但对坝身影响则较小。具有高动能的水流对于底流消能说来是一种不利的因素，但当采用了挑流型式的消能后，条件改变了，矛盾得到转化，不利因素变成有利因素，动能越大，挑得越远，它的危害作用就相应地减小了。

我国挑流型式最初在少数工程中得到采用，而近来设计和施工中

的中高水头建筑中，很多采用挑流型消能。图 9-5 所示即为表示挑流消能的情况。



图 9-5. 挑流消能。

面流型消能是苏联創造的型式，它利用壩址处做成的垂直跌坎将泄下的水流送到下游水流的上层，底部維持巨大的漩滾，使河床临底流速大大降低，它的脉动也較底流小一些，因而減低了水流的冲刷能力。图9-6是苏联第一个用面流消能的德涅泊水电站。但这种型式的消能要

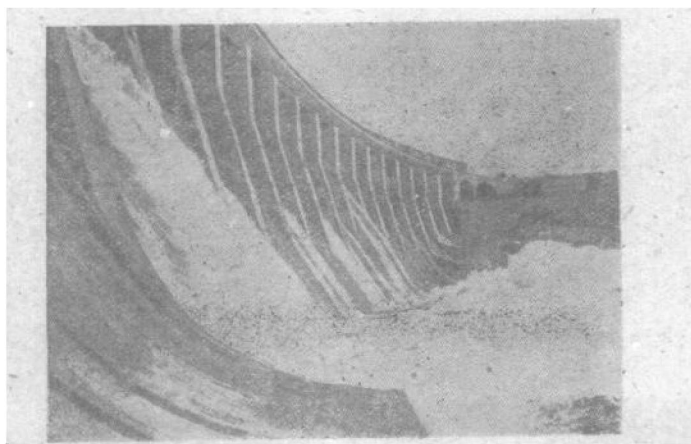


图 9-6. 面流消能。

求下游具有較高和变动較小的水位，而这却不是每个樞紐都能具有的条件。对于苏联來說，面流排冰的优越性能，使它更加的吸引人們的注意。苏联的水文气象条件和平原樞紐的客观条件，都有助于获得比較高和比較稳定的下游水位，所以苏联創造了这种型式，并大大地加以推广和发展，这些經驗是值得我們学习的。

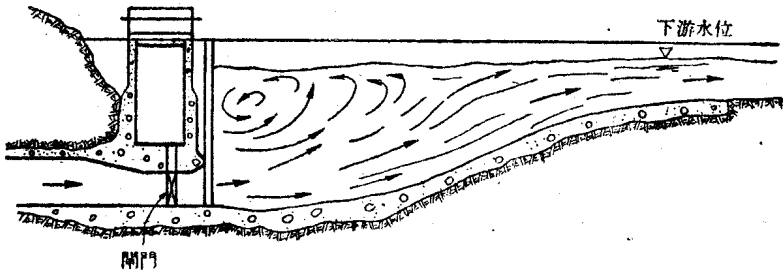


图 9-7. 开敞式突然放大。

消能型式基本上虽可分为以上介紹的三大类，但新型消能方法不断出現，也值得注意。我国曾經研究过的輸水道出口突然放大(压力式的和开敞式的)式消能設備(图 9-7)，系利用突然放大局部損失来进行消能。苏联工程师們提出的逆流撞击消能，是用外加注入的水流与泄流撞击消能的一种类型(图 9-8)。还有利用建筑物本身加强粗糙連續消能的方式，代表加强沿程阻力消能的类型(图 9-9)。此外在水流中加設消能工消能是常見的方法，消能工种类极其繁多，图 9-10 所示，只是說明它分散消能作用的二个例子。上述的各种消能方式各有其优点，也有它限制的条件和缺点(如突然放大式須有适当的地形，逆流撞击式結構复杂，沿程連續消能会使結構本身增加不利荷載等)，但都可帮助我們从更广泛的角度来解决消能問題。在靜水池中加設消能工可以减小水流脉动，改善水流分布，且作用显著。近来，在消能工的利用方面有相当发展，值得我們注意。

关于消能的研究工作近来有极大开展。在苏联是巴甫洛夫斯基院

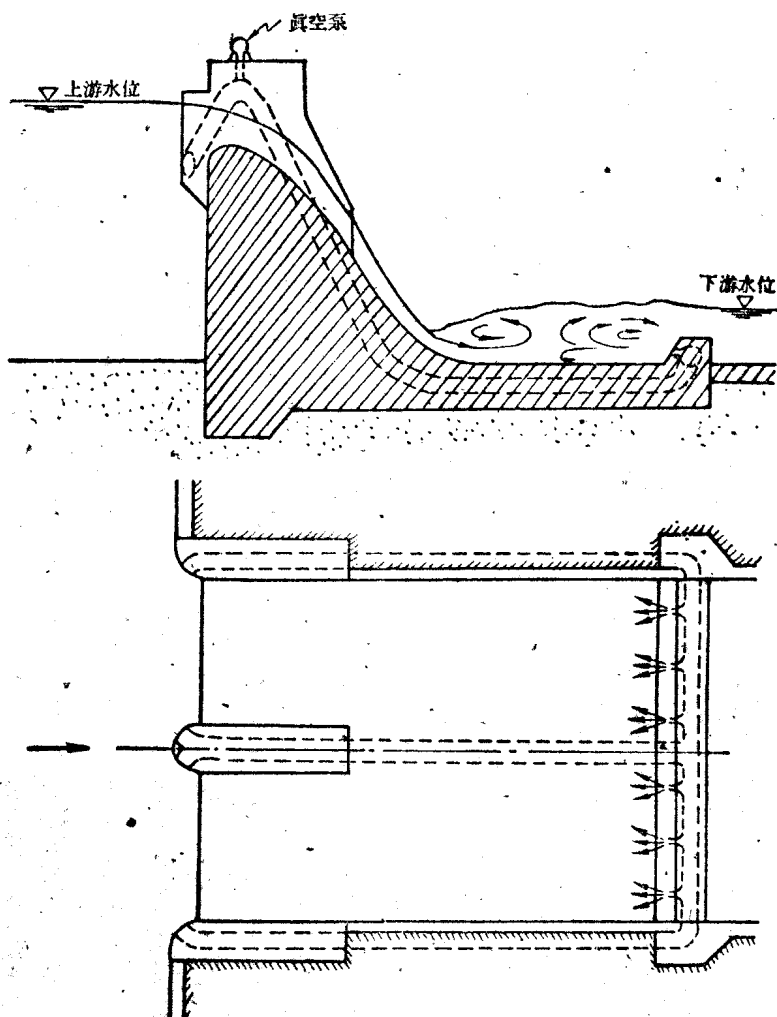


图 9-3. 逆流撞击消能。

士首肇其端，他建立了最基本的衔接理论，以后屡经发展，形成了一套有系统的消能理论，特别是在底流和面流方面，不仅确定其衔接形式和条件，而且近来还深入到水流内部机构，利用近代紊流理论提供的知识

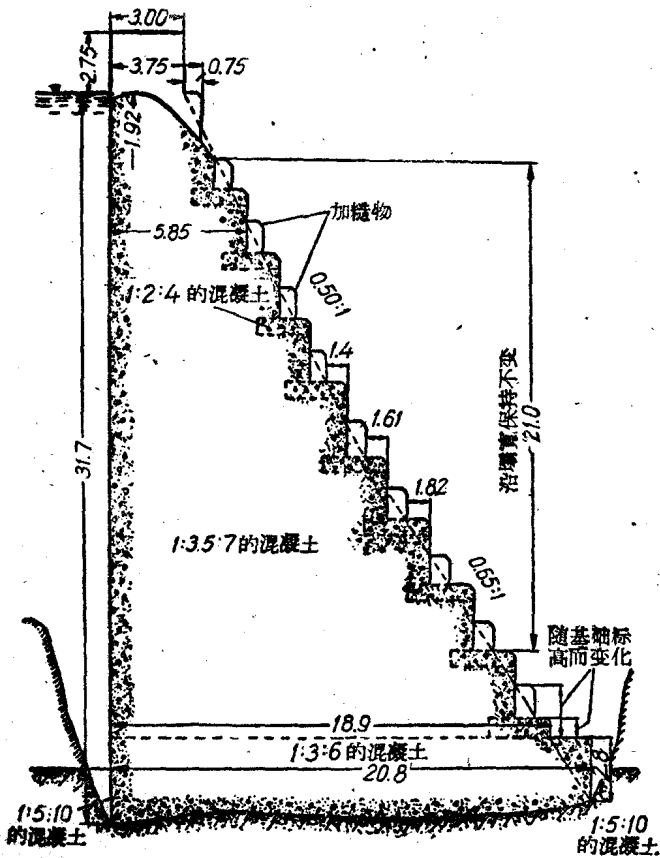


图 9-9 沿程粗糙連續消能。

和电测技术,研究和初步阐明了消能过程的本质,这对进一步发展消能有极大的作用。

我国在学习苏联先进经验的基础上,在规模广阔的水利建设高潮推动下,取得了前面提到的许多独特成就。同时也给消能提出了许多新的任务。围绕高坝消能问题,现在正对高速水流的消能形式,掺气对消能影响,消能过程中水流的脉动以及消能建筑物上的气蚀等方面进行研究。相信在党的领导下,在不久的将来通

过我们辛勤的劳动,一定能建立适合我国情况的消能技术,在推动水利建设方面起更大的作用。

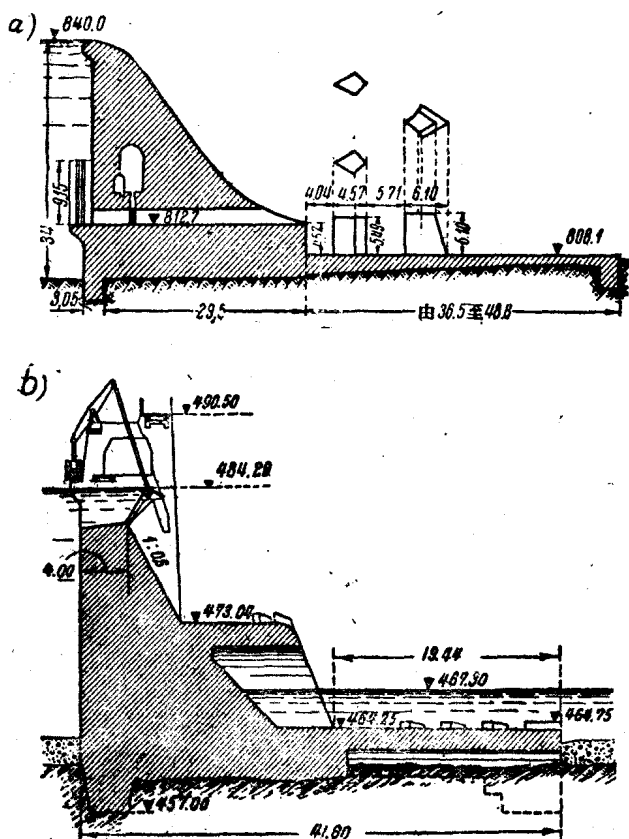


图 9-10. 消能工的消能。

§ 9-2. 水流衔接和消能的一般过程

了解上述的底流、面流、挑流或其他水流衔接及消能过程后,就其水力现象本质而言,具有以下三个特点。

1. 溢流剩余能量(包括脉动动能)的消散

如前所述, 水流集中起来的能量远远超出天然状态下水流所能挟带的能量。若不加任何消能措施, 则水流必然冲刷在天然状态原属稳定的河床, 形成冲坑, 带走泥砂, 这样来消耗所挟带的余能。当然, 这是很不适宜的。但是无论何种消能型式都要通过水流强烈紊动引起的阻力来实现消能, 所以在消能措施后的水流却又不得不受到这种紊动的影响而增加了自身的脉动。第五章曾指出脉动水流质点所具有之动能较时均水流者为大, 而消能物引起的脉动又较天然状态下水流脉动更为强烈, 因此消能不仅要消毁由于落差形成的余能, 而且还要包括剩余脉动动能(即指比正常状态水流增加的脉动动能), 后者在许多情况下具有重要意义。如水头较小的建筑, 溢流水头及流速不一定十分巨大, 但相对说来脉动却可能相当大, 则水流仍将具有相当大的冲刷能力。

2. 过水断面铅垂线上流速分布沿程的调整

天然水流流速一般是按对数曲线分布的。对数型分布时, 高速水股位于水流表层, 河床所受直接作用的流速较小, 而溢下水股是高速的薄片水体, 可能冲向河床底部(图 9-11)。若消能措施愈能使高速部分水流迅速转向水流表层, 则流速分布调整所需的距离愈可缩短。

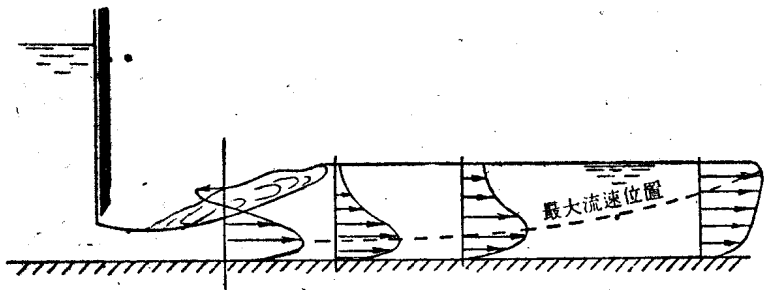


图 9-11. 水流在铅垂线上流速分布的沿程变化。

3. 平面流速分布的调整

在局部宣泄的水流流速大而集中, 但天然状态水流流速较低而且以较均匀分布的流速充满河槽运动, 这种銜接可以说是在平面上的突然

放大现象。水流可能与边界严重地脱离,并且形成漩涡(它的成因在第五章已有说明)。消能措施的任务便是依据这些原理造成水流沿边界很好的扩散,以消除主流的严重偏转及脱离等不良现象。图 9-12 即为这种工程措施的例子。

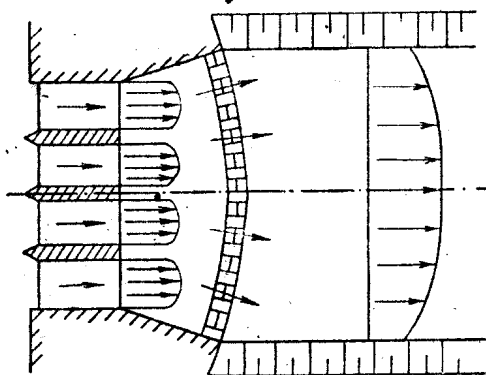


图 9-12. 水流平面的扩散。

不加任何人工的消能工,即可取得相当大的消能效果。因此,现代消能措施大多从加强水流质点间相互摩擦与撞击的作用着手,发展了许多消能方式。当然,固体边界和气体边界也是能起一定的消能作用的。

为了解决上面三个问题,消能措施应具有下列三方面的作用:

1. 固体边界对水流的消散作用

从第五章知道,水流质点间的阻力可分粘滞阻力和混掺阻力两种。在紊流中混掺阻力占主要地位,因此要增加消能作用,就是要增加质点间的阻力(主要是混掺阻力)。我们知道,无论粘滞阻力或混掺阻力都与流速梯度有关,流速梯度愈大,液层之间阻力愈大,增加液层流速梯度是增加消能的有效方法。如果水流分散愈细,水团分裂愈小,质点间摩擦和撞击的作用愈大,于是阻力就会愈大。如图 9-13, a 所示,为一种具有一定分散程度的流动;图 9-13, b 为一种较图 9-13, a 分散更为细小的运动。图 9-13 中波动线表示水流质点瞬时流速的分布,可

应该指出,工程中所采用的各式各样消能措施是外加于水流的,它必须借助于水流自身质点间相互作用,才能最有效地发挥其消能作用。水跃一般是很有力的措施,仅仅依靠水流自身的作用,不