

高速水流 论文译丛

第 一 輯
第 一 冊

科学出版社

中国科学院水工研究室译丛

高速水流论文译丛

第一辑

第一册



科学出版社

1958年

高速水流論文譯叢

第一輯 第一冊

編輯者 中国科学院水工研究室

出版者 科 学 出 版 社

北京朝陽門大街 117 号

北京市書刊出版業營業許可証出字第 061 号

印刷者 中国科学院印刷厂

总經售 新 华 書 店

1958 年 3 月第 一 版

書号: 1005

字數: 632,000

1958 年 3 月第一次印刷

開本: 787×1092 1/16

(京) 0001—850

印張: 33 5/8

插頁: 5

定价: (11) 6.50 元

內 容 提 要

隨着高壩和高水頭洩水結構物的建設而有高速水流問題的發生；和這問題有關的資料，目前還很貧乏；本譯叢的出版，初步蒐集了一些基本的文獻。本書分兩輯，第一輯（分二冊）包括了有關高速水流的世界各國論文 44 篇，對於高速水流攪氣、氣蝕及波動等問題都介紹了一些重要的著作，其中有一部分是近年出版而在國內還不易獲得的論文。就論文的性質而言，有純理論性的，亦有偏重應用的，對於從事和高速水流有關的水利工程研究人員、設計工程師和教學人員，本書是一部材料豐富的參考書。

每篇論文的著者、譯者、校者都已隨文註明。除此之外，中國科學院水工研究室方面參加本譯叢出版工作的有下列各人：

校閱譯文：林秉南，楊秀英，錢 甯，馮啓德，朱忠德。

校對及聯系：中國科學院水工研究室水力學組全體同志。

序

关于进行研究所需要的資料，往往存在着兩個問題：（一）資料缺乏，不易蒐集；（二）外文資料，即能获得，亦未必都能暢覽。因此，去年五月，在北京、天津兩地的水利研究單位所参加的高速水流座談会上，提出了編譯資料的工作。責成中国科学院水工研究室組織人力，出版譯叢。

本譯叢分为兩輯，共約一百萬字。它收集了世界各國有关高速水流的一些重要文獻。每輯獨立編排，並無联系。第一輯包括了一些我們認為比較急需而又能在較短期間譯成的論文，其余則在第二輯內出版。

這部譯叢是合作的产品。在翻譯、校审和編輯的过程中，得到了各研究單位、高等學校及產業部門的大力協助和支持，才使出版工作能如期完成。因此，如果這本譯叢對讀者能有一點貢獻的話，首先應該感謝他們。

目前，不但水利名詞、人名和地名的中文譯名還未統一，甚至有不少名詞，從無譯名；因此，本譯叢所用的名詞譯名可能有很多是讀者所不能同意的，這尚有待於將來的改進。此外，限于人力和時間，我們只能盡量使重要的譯名統一，至于人名和地名只能做到在同一篇文章中一致；附圖有一部分已重繪，將圖中的說明文字譯成中文，但大部分附圖因來不及重繪就只在圖下把原文和譯文對照並列，希讀者見諒。

整個譯編和校對的重點目標是：譯文忠實，不失原意。限于水平，謬誤之處，在所難免，希望讀者多提意見。

中国科学院水工研究室 1957 年

目 录

第一部分 攪 气 問 題

高速水流攪气問題論叢

第一篇 高速明渠水流的攪气…………… 美国 L. S. 霍尔 (1)

第二篇 封閉管流中的攪气問題…………… 美国 A. A. 卡連斯基; J. M. 罗勃遜 (39)

第三篇 討論部分

討論一…………… 美国 W. 底勒普 (48)

討論二…………… 美国 K. R. 坎尼遜 (51)

討論三…………… 美国 R. T. 克納普 (55)

討論四…………… 美国 C. E. 金斯华特 (58)

討論五…………… 美国 J. H. 杜馬 (61)

討論六…………… 美国 J. W. 約翰遜 (72)

討論七…………… 美国 J. C. 斯蒂文斯 (73)

討論八…………… 美国 D. C. 麦康諾海 (82)

討論九…………… 美国 T. J. 可耳文 (91)

作者的答复 (一) …………… 美国 L. S. 霍尔 (92)

作者的答复 (二) …………… 美国 A. A. 卡連斯基; J. M. 罗勃遜 (108)

水流攪气和有关的技术問題…………… 南斯拉夫 V. 傑維傑維奇; L. 李維因 (115)

明渠水流攪气的試驗研究…………… 美国 L. G. 斯特劳; O. P. 朗恩勃 (129)

高速水流中的攪气現象…………… 美国 E. W. 萊茵 (142)

攪气水流的均匀运动…………… 苏联 И. A. 伏依諾維奇; A. И. 舒华茲 (148)

陡槽中的攪气…………… 法国 G. 哈尔勃朗; R. 裘朗; G. 柯亨迪拉萊 (162)

陡槽水流攪气…………… 奥地利 R. 依倫伯格 (176)

陡坡上的紊流边界層…………… 美国 W. J. 鮑叶 (186)

豎井洩流的攪气…………… 美国 L. M. 劳舍; F. T. 馬維斯 (214)

1:1 坡度水槽內的水流…………… 意大利 M. 維帕萊 (222)

裝有閘門洩水建筑物的需气量…………… 美国 F. B. 康拜尔; B. 盖頓 (234)

若干攪气水流的原型观察…………… 澳大利亞 V. 米切尔斯; M. 勒夫烈 (241)

在溢水式水电站模型上的水流攪气的研究…………… 苏联 B. Г. 沙柯洛夫 (254)

高速水流中攪气对导牆和靜水池設計的影响…………… 美国 D. B. 古明斯基 (264)

第二部分 气穴和气蝕

水工建筑物中气穴問題論叢

第一篇	气穴現象的本質	美国 J. K. 范納德 (271)
第二篇	美国陆軍工程队的經驗	美国 J. C. 哈勞德 (284)
第三篇	美国垦务局的經驗	美国 J. E. 文諾克 (307)
第四篇	美国田納西流域管理局的經驗	美国 G. H. 希可克斯 (320)
第五篇	討論部分	
	討論一	美国 G. A. 麦克摩尔 (328)
	討論二	美国 J. N. 勃勒德里 (329)
	討論三	美国 J. M. 罗勃遜 (332)
	討論四	美国 F. W. 勃雷斯台尔 (333)
	討論五	美国 J. S. 麦克南 (335)
	討論六	美国 J. W. 波尔 (339)
	討論七	美国 F. 洛赫耳 (347)
	討論八	美国 C. E. 金斯华特 (348)
	討論九	美国 E. R. 范特萊斯脫 (355)
	討論十	美国 D. A. 阿伯拉姆斯 (358)
	討論十一	美国 J. K. 范納德 (362)
	討論十二	美国 J. C. 哈勞德 (364)
	討論十三	美国 J. E. 文諾克 (367)
	討論十四	美国 G. H. 希可克斯 (370)
	关于气穴的結構和防范	美国 P. 艾森堡 (376)
	气穴区的結構	苏联 K. K. 沙里涅夫 (425)
	气蝕强度的情况	苏联 K. K. 沙里涅夫 (457)
	气穴生成原理及有关縮尺影响的問題	
		美国 R. W. 吉尔明; J. T. 麦克格罗; B. R. 巴尔金 (481)
	攪气对于气蝕的影响	美国 A. J. 彼得卡 (499)
	圓形断面后發生分离气穴的准則	苏联 K. K. 沙里涅夫 (515)
	圓形断面后分离气穴区的压力和侵蝕	苏联 K. K. 沙里涅夫 (519)
	不平整表面的气穴及其所引起的气蝕	苏联 K. K. 沙里涅夫 (529)

第一部分 攪氣問題

高速水流攪氣問題論叢

第一篇 高速明渠水流的攪氣*

美國 L. S. 霍尔 著

蕭 世 澤 譯

(長江水利規劃委員會)

中國科學院水工研究室 校

一、提 要

高速陡坡及陡坡溢洪道設計上存在的問題之一，是如何正確地估計因水流攪氣所需的超高。因為水流攪氣的緣故，渠道摩阻力亦有所改變，設計渠道尺寸時，亦必需考慮到這個問題。當水流在陡坡渠槽內流動，如在充分長的距離內任其加速，則空氣將被攪入到水中，形成所謂“白水”(white water)現象。在瀑布及天然急流中，如果流速高到能使空氣吸入水內，同樣地也可以看到空氣和水的混合情形。

關於在這些情形下空氣混入水內的體積的測量，很少有完整的觀測資料。模型試驗的困難在於不能產生足夠的高速水流以發生攪氣現象。因此，為了蒐集有關陡槽內水流情況的知識及測量水體積的增長，在 1936 及 1937 年對一些陡槽進行了實際觀測，太平洋煤氣及電力公司允許在該公司的三個槽中進行量測。在試驗期間都維持均勻流量。

觀測水流體積增長的時候，順便也觀測了溢洪道內，沿豎曲綫或平面曲綫的水流情況。本文收集了有關該項試驗的資料，並作了一些理論分析，以推導計算攪氣體積的公式，並對其應用作了一些結論。

二、野外觀測步驟

普通野外觀測的方法不能用於測定每秒 35 至 80 呎的流速。試驗起初是在西部的帽溪(Hat Creek)第二號槽上進行的。1936 年 7 月 11 日在溢洪道上進行觀測準備，次日即行施測，1937 年 4 月 17 日又在此槽進行第二組觀測，借以獲得更週全的數字。

第二次試驗系於 1936 年 7 月 20 及 21 日在瑞比特(Rapid)槽上進行的。第三次試驗則系在另一河道工程的南渠(South Canal)槽上進行。此項測量，系在 1937 年 4 月 22 至 24 日佈置測尺及作水平測量，而於 5 月 5 日進行試驗。

* Hall, L. S., Open Channel Flow at High Velocities, Trans. ASCE, 108 (1943), p. 1394.

野外觀測的第一步是安設測尺以測驗流速及断面面积。沿渠側每 25 呎或 50 呎用油漆作一記号並标明站程。距離的計算系沿水槽底面，而不是沿水平方向。如系混凝土陡槽，可在渠道兩邊牆上沿槽底法綫方向用油漆画成水尺。在木制渡槽內，則不用油漆水尺，而在槽頂設一量測准点，測量从准点到水面的距離。隨而进行水平測量，測出各測站的槽頂高度。同时，校核渠槽的尺寸。以上准备工作做好后，即可进行实际觀測。觀測程序如下：

在試驗前后，測定陡槽段上游电站明渠中的流量，一般在測桥用杯式及旋槳式流速仪进行四次測量。試驗开始前兩次，試驗结束后兩次。

在試驗中不时測讀按置于电站明渠中水尺的水位，注意有無水面波动的情況。随后放水进入陡槽，当水流已趋稳定后，測讀沿槽各站水尺讀数。当水流攪帶了空气以高速度前进时，有些水珠飞离水体，水面波濤洶湧，上下跳动。所以，各站測量水位时必须在較長時間內將其最大值及最小值讀出，以确定其極限范围。最大及最小的讀数的平均值則作为平均水位。如果因为曲率或进口形狀的关系，水流發生斜向波 (cross waves)，則需加測断面的橫向水面綫，測法系以木板鋪于槽頂，自木板向下測到水面。

最后，測出沿渠道各站的流速。在測驗流速之前，先准备好顏色水，顏色水用过錳酸鉀或螢光素 (fluorescein)¹⁾ 加水拌和而成。我們就用市場上出售的螢光素，在水中先攪拌了石灰，来促成結晶物的充分溶解。大約每 240 立方呎/秒的流量需用一茶匙的螢光素，和以一品脫 (pint) 的水，如用过錳酸鉀，則同样流量需用 10 茶匙和以一品脫水。在沒有注入水槽以前，先把顏色水倒入一个半品脫的紙板制的容器中。在試驗开始时，先將觀測員們佈置在沿渠各个測站上。持顏色水的人則站在渠首或測量段首部。另一人持信号槍站在起始站，記时員数人持馬錶立于下一站。一切准备就緒，在一定信号下，將裝顏色水的容器从渠首丢入水內，上游站觀測員俟顏色水通过該站便發出信号槍，記时員聞信号槍开始記时，直到顏色水的中心通过下一測站就停止記时。一次觀測約需記时員四至六人。以他們觀測結果的平均数来决定平均时距。

三、試驗时情况

帽溪 (Hat Creek) 陡槽觀測

帽溪第二号电站附近的陡槽位于电站輸水管上游不远处。这是一个直的混凝土陡槽，沿槽距离 409.5 呎中共下降 189 呎。槽身並包括一豎曲綫。在干流的兩側設有側面溢洪道，可將廢水溢出。水自側堰溢出后，集中到四个集水渠，此四渠相会于陡槽首部。

¹⁾ 螢光素系由 phthalic anhydride 及 resorcinol 制成的顏料，能放藍綠色光，通常溶在鹼性溶剂中——校者註。

陡槽的混凝土面頗为粗糙，並有显著的模板印子，混凝土面上尚有建筑模板时余存的鉄絲，未經剪除，使表面更为粗糙。槽寬一律为 5.75 呎，边牆高为 5 呎，而在进口及出口部分高度有少許增加。

由于有兩個集水渠进入陡槽的方向与水流方向正交，因此發生斜向波，在进口处水流頗为混乱；同时加大了此地的含气百分数。不过，此項斜向波，及一部分攪入的空气，在大約 100 呎的距离內業已消失。圖 1 示陡槽的縱剖面。陡槽的首段 275 呎系由短的豎曲綫及与曲綫相切的直綫所組成。紧靠 2+75 站以下有一段短的凸形豎曲綫，下接一段陡坡，傾斜度为 $34^{\circ}45'$ 。曲綫下端，从 3+60 站起为凹形豎曲綫，組成出口戽斗。

在陡槽中的水流直至 2+75 站均系加速流。在这一个断面上沿着渠道边牆产生移动波 (running wave)，兩边水面綫看上去好像比中心高。但实測結

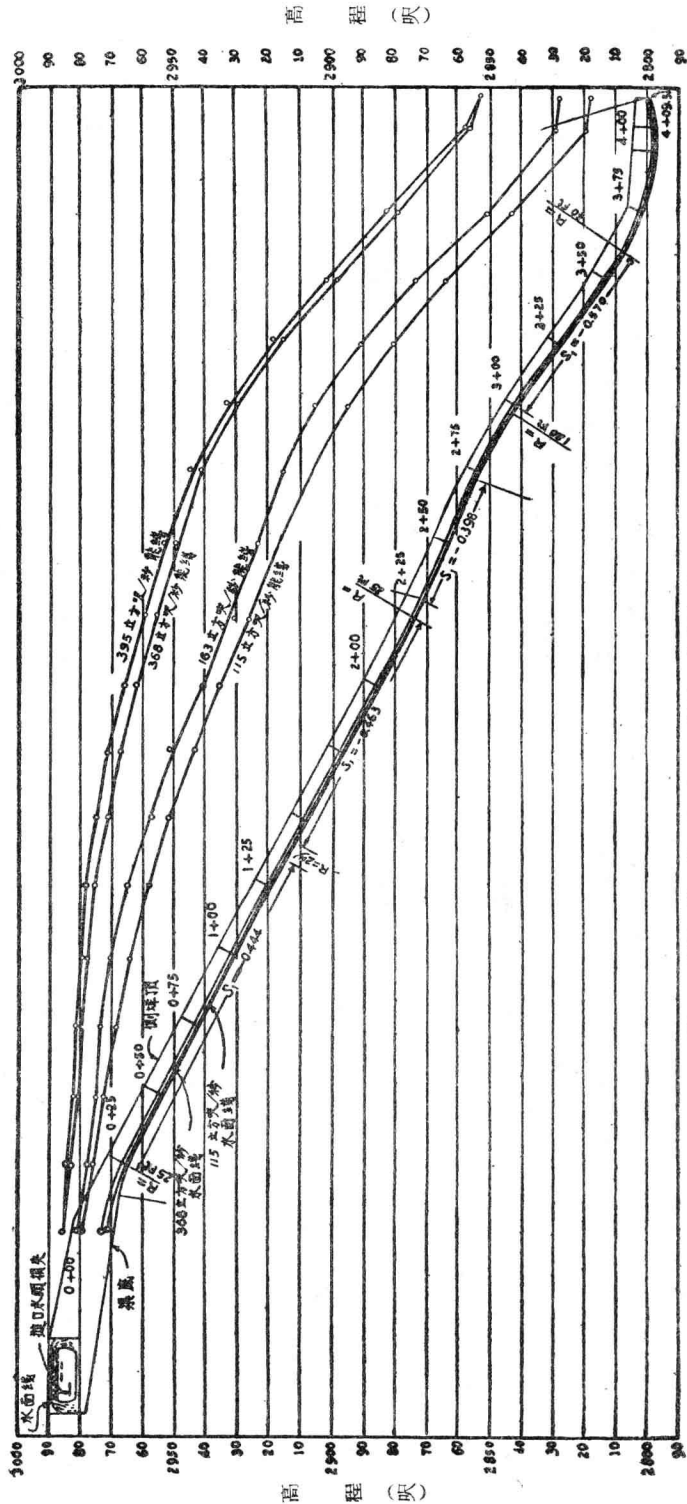


圖 1. 帽溪 (Hat Creek) 第二号陡槽观察流速、水面綫及能綫

果証明中間部分水所達到的最大高度和兩邊所觀察到的一樣。水流表面非常紊亂，水面上有水珠以高速度脫離水体跳起，飛行一個短距離又下落到含氣的水內。整個水流表面都是這樣的小波或小漩渦（rollers），在水流的主体上波高的範圍在 0.4 呎至 0.6 呎之間。



圖 2. 帽溪陡槽, 當 $Q=395$ 立方呎/秒, 自 1+25 站向上游觀察的情況



圖 3. 在坡度突變處, 水流離開槽底 (帽溪陡槽, $Q=395$ 立方呎/秒)

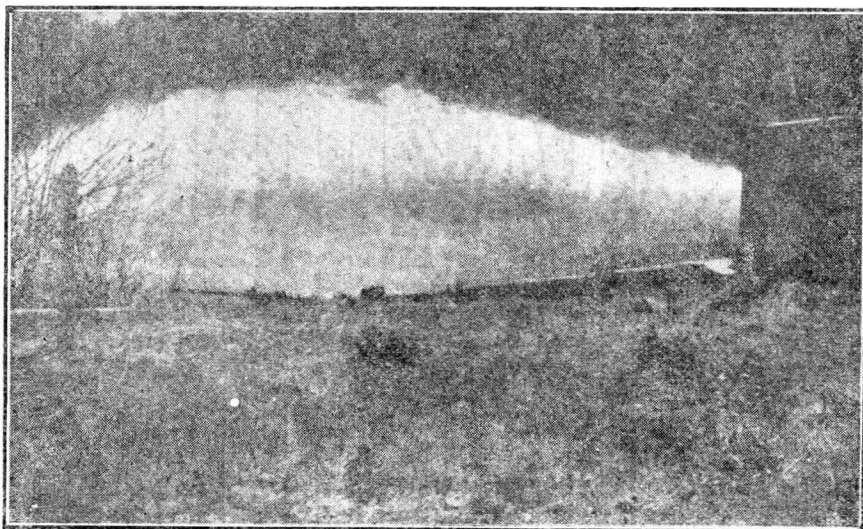


圖 4. 自帽溪陡槽末端, 放出 395 立方呎/秒的流量, 最終流速等於 58 呎/秒

在 2+75 站的曲率過陡, 水流不及作相應的變向, 結果上層水体與槽底分離, 在最大流量時, 有些噴沫越過了陡坡段的邊牆。混凝土表面有氣蝕性損壞現象。分離水体

大約在 3+25 站到 3+75 站之間回歸槽底貼流, 這一點的位置隨流量大小而異. 在這一個斷面上, 因為水流擴散通過一個較大的斷面面積, 流速有顯著的減小. 結果, 在陡槽下端水流離開戽斗時的速度反較 2+75 站為低. 從戽斗射出的水流以高於下游河槽正常水位的高程下洩, 在靜水池中形成亂流及漩渦來消耗能量. 圖 2, 3, 4 是陡槽的一般佈置及試驗時的水流情況. 圖 2 為流量達 395 立方呎/秒時的水流情況. 在這站上流速從 28 呎/秒增加到 55 呎/秒. 在 2+70 站處, 由於沿邊牆的阻滯發生波浪, 邊側水面較中心稍高. 在這一點的流速為 75 呎/秒.

瑞比特(Rapid)渡槽的觀測

這一陡槽位於高水頭電廠壓力水管的首部. 渡槽的作用是把水流從上標準運河(Upper Standard Canal)導向一天然河流, 此河下游與特碧湖(Tabeaud)連通, 在那里又有一個低水頭的電站. 這是一個木制的陡槽, 上首有一向右的平面曲綫(horizontal curve), 下游末端則呈凹豎曲綫. 沿槽距離 667 呎中垂直落差為 145 呎. 自上標準運河進入陡槽的流量由進水閘加以控制. 水流從運河經過一節涵管, 進入槽首的收縮進口, 進口水流非常紊亂. 除進口收縮段外, 渠道呈平面曲綫, 彎向右方, 到 2+00 站為止. 從 1+00 處開始(圖 5), 渠道進入陡坡, 陡坡下游和具有變曲率的長凹豎曲綫徐徐相接, 曲綫的

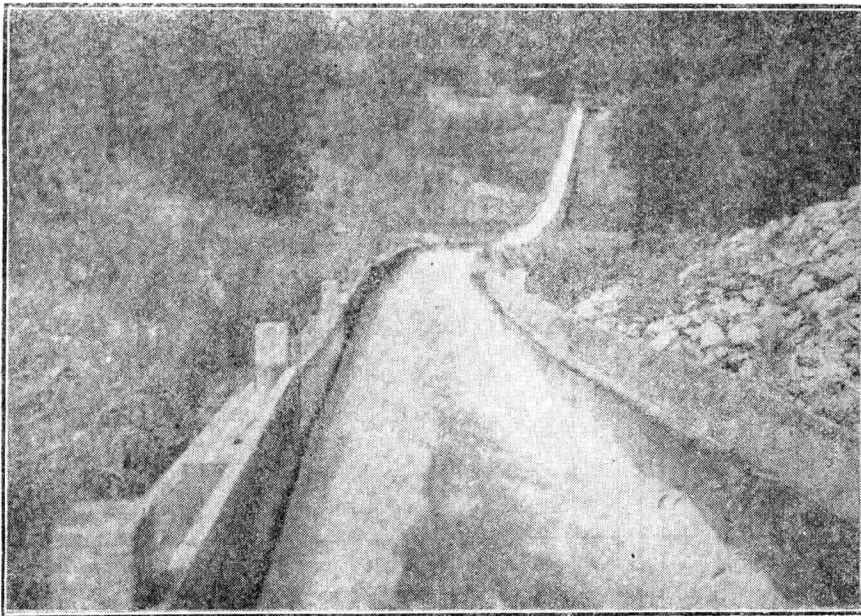


圖 5. 瑞比特渡槽, 自 1+00 站面向下游; 流速為 35 呎/秒

範圍從 2+75 站延伸直到 5+25 站. 從 5+25 站起, 渡槽坡度轉平, 向下進入消能箱(baffle box), 借以減低流速. 水流從消能箱中注入前面說過的天然排水渠內.

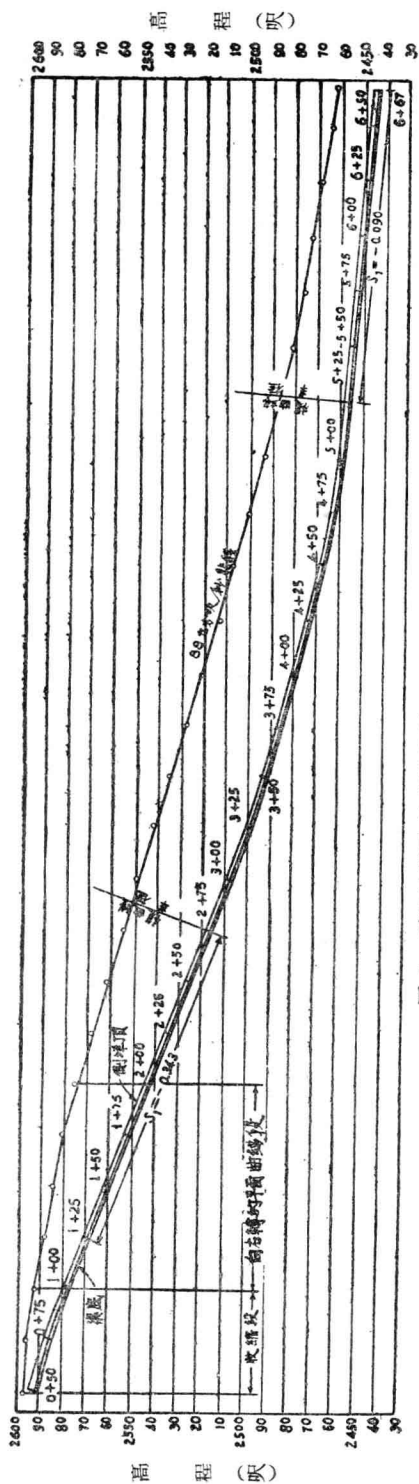


圖 6. 瑞比特渡槽、特碧湖蓄水池觀察流速、水面綫及能綫

渠槽为木制，自收縮段以下，平均宽度为 6.4 呎，边牆平均高度 2.4 呎。由于水流通过平面曲綫的緣故，在渡槽前部产生了斜向波。在陡坡的一段，由于流速加快，斜向波消失。因进水紊乱在渡槽进口处帶入的空气，至此已部分消失；同时空气又再被吸入水中。这种吸入作用沿渡槽边牆开始，到 1+50 站以下，全部断面上都呈充气状态。1936 年萊茵(E. W. Lane)^[1]曾經指出，在紊动的进口情况不再存在的地方，攪气作用沿边牆开始。

瑞比特 (Rapid) 渡槽的流速在 3+75 站处加速到最大値 52 呎/秒。以后坡度变緩，速度亦徐徐减低。当水流进入消力箱时，其流速为 33 呎/秒，圖 6 为渡槽的縱剖面。

南渠 (South Canal) 陡槽的观测

此陡槽位于南福克 (South Fork) 运河的末端，运河中的水来自电站，将来准备利用这一部分水在第六号电站发电，目前只用以灌溉。水流自陡槽流入天然河道。陡槽全長 3,535.25 呎 (順坡度方向)，总落差为 140 呎。用一个弧形閘門控制来自南渠末端的流量。在此控制閘以下 100 呎处有一側堰，可以溢水入陡槽。从側堰溢入陡槽的水，增加了陡槽首端的攪气百分数。如果没有水流自側堰入槽，则水流需要經過一个更远的距离，然后全断面才能进入攪气状态。

陡槽系混凝土制成，表面頗为粗糙且有剝蝕，此項剝蝕可能系高速水流所帶砂子磨蝕的結果。特別是在槽底，砂漿均被剝去，骨料暴露了出来。从渠首到 23+00 站处断面宽度为 10 呎。从 23+00 站到 23+50 站是一收縮段，自 23+50 站起到陡槽末尾宽度为 7 呎。边牆高度

在 10 呎寬断面处系从 3.5 呎变到 4.5 呎, 而在 7 呎寬断面的一段, 边牆高度为 3.5 呎到 5.25 呎。

陡槽具有 13 种平面曲线, 曲率半径的变化范围从 100 呎到 300 呎, 弯曲最大处的内夾角为 98° , 曲率半径为 142 呎。弯道的靠外面一边槽底並未加高。因此在这里我們有机会可以看到弯道水流的情况。整个渠槽的折角是 $422^\circ 32'$ 。前面已經說过, 渠道全長为 3,535.25 呎, 其中有 1,328.8 呎位于弯道以上。陡槽的坡度有多次变化, 包括三段凹形渠坡。这些凹坡都按置在陡峻的断面的下游, 以之減低水流速度。除了进口处最陡一段外, 最陡的坡度为 0.100, 約長 300 呎。其他主要坡度为: 0.055 長 700 呎, 0.030 長 600 呎, 0.022 長 200 呎, 0.011 長 600 呎, 0.025 長 715 呎。另外还有三个短段, 共長 170 呎, 平均坡度为 0.08。

流量为 334 立方呎/秒时, 从槽首到出口水流通过所需时间为 2 分 20 秒, 平均流速为 25 呎/秒。因为坡度变化很多, 在不同断面上速度的变化范围自 17 到 35 呎/秒。因为渠道太長, 我們沒有在这里画出它的縱剖面。

除了到处都可以看到正常的陡槽水流所独具的汹涌起伏的漩渦及表面波以外, 由于弯曲段的槽底在外側沒有加高, 在每一个弯道的外側水面逼高凸起, 在曲线段下游的直綫段断面上形成斜向駐波 (圖 7)。因为我們只讀出了按置在槽边的水尺的水位,

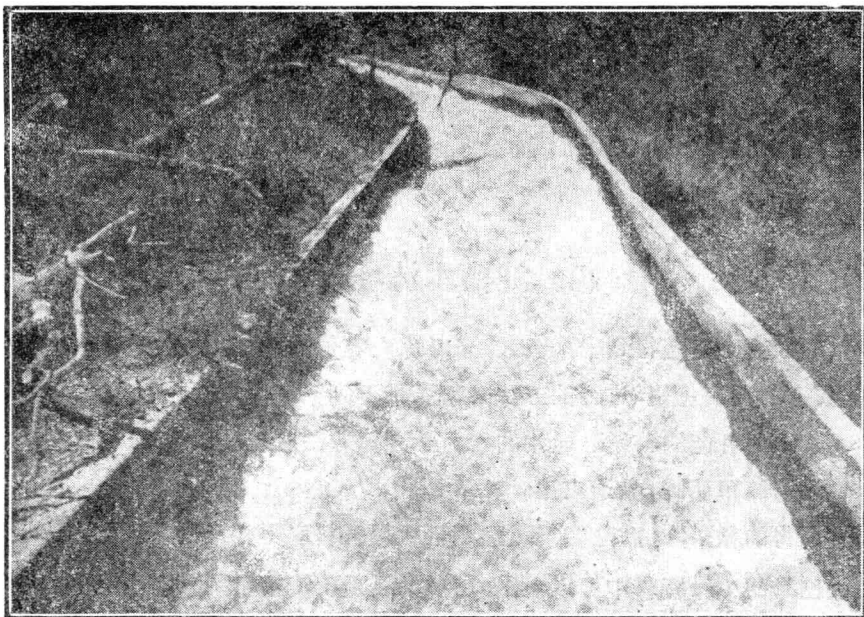


圖 7. 南渠陡槽, 自 7+75 站面向上游

在某些断面上, 这些斜向波將使浸水面积的計算發生誤差. 这样的誤差尚不致影响整个計算的結果. 在寬度为 10 呎的槽段上, 因为較多的水都沿外牆流过, 弯道外側的水面超高, 並不橫穿断面形成一个均匀的坡度. 不过, 在寬度为 7 呎的槽段上, 水流橫断面的表面坡度或多或少是均匀的, 所以渠道外側边牆水位和內側边牆水位的差数就可以代表橫向水面坡度. 在 7 呎寬、曲率半徑为 142 呎、坡度为 10% 的一个弯段上, 水流非常紊乱 (見圖 8). 在这一段上水流以一系列折綫前进, 結果水流壅集在弯道外边的某些点上, 水花超越牆頂外濺, 但是在这些点子之間, 水面却比牆頂低得很多.

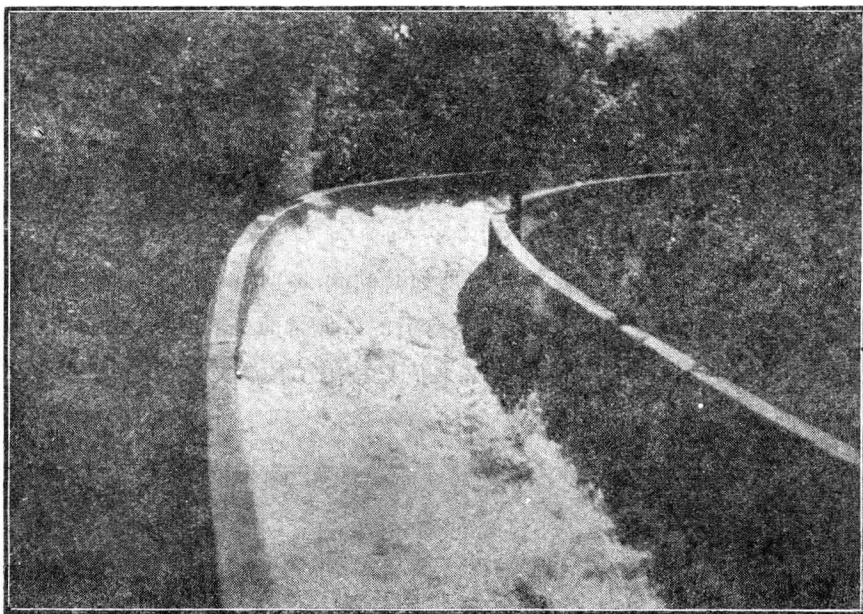


圖 8. 南渠陡槽, 自 25+50 站面向下游, 流速 35 呎/秒

四、陡槽水流理論

上述試驗的目的是想得到一个公式, 来計算大容量的、傾斜較厉害的溢流槽的攪气量, 为了能具有实用的价值, 进行的方法必需滿足下列三个要求:

- (1) 它必須尽可能的与業已通用的水力学計算方法取得一致;
- (2) 它必需簡單明瞭, 易于应用;
- (3) 它所得的結果, 必需与攪气試驗測量所得資料取得合理的一致。

从过去已有的少量資料中可以看出, 在小型混凝土陡槽中, 当速度达到 15 呎/秒 到 40 呎/秒 的范围以內时, 断面攪气量約为 15% 到 35%^[2]. 在奥地利一个圪工抹面的陡槽中测出的攪气量为 60%~80%^[3]. 採用这样大的攪气百分数来进行設計, 將使

採用大型溢流陡槽來排洩河道洪水變得非常不經濟。

事實證明，水流速度、水運行的距離、及渠道表面糙度均影響攪氣量。根據個人的觀察使作者得出結論：如過水斷面和流量加大，攪氣體積則會減少。

在導引陡槽水流理論時，先作下列假定：

1) 曼寧(Manning)或克特(Kutter)公式中的糙率係數 n ，對於一定的渠槽材料說它為常數；

2) 不致因水內及水上有空氣存在而造成更多的能量損失，面積的增加為比重的減少所補償；

3) 計算時，水力半徑採用

$$R_c = \frac{Q}{VP_c}, \quad (1)$$

n 採用比正常值較小的值；

4) 採用平均流速來計算流速水頭(h_v)，當不致引起過大的誤差。

在式(1)中：

Q = 流量，以立方呎/秒計；

V = 觀測所得斷面中的平均流速，呎/秒；

P_c = 計算所得斷面的濕周；

$A_c = Q/V$ 。

實際的流速水頭 h_v 較用平均流速所算出的流速水頭要大。因為實際的動能值是各面積單元 a 上的流速水頭和水重的乘積的總和，則

$$\alpha = \frac{\int v^3 da}{V^3 A}, \quad (2a)$$

$$h_v = \frac{\alpha V^2}{2g}, \quad (2b)$$

式中 v = 單元面積上的流速； A = 渠道斷面面積； g = 重力加速度。

式(2b)中 h_v 是每秒鐘流過1磅水的平均能頭， α 為大於1的係數，範圍從1.02到1.20，因為在本試驗所觀測的渠道中，沒有測出流速分佈，因此我們假定校正係數不大，可以忽略不計。採用這一假定後，能頭損失可能較實際為大。在設計大型溢流陡槽時，就應考慮 α 值，此值習慣上取從1.07到1.10。

當水中攪入空氣以後，基本公式應改寫成：

$$Q = \rho AV, \quad (3)$$

式中 ρ = 在空氣與水的混合體中水所佔的比例，亦即混合體的相對密度 ($1 - \rho$ = 空

气所佔的比例)。假定在渠槽內的水流已达均匀流速状态, 不計水的內摩擦阻力, 則在一个單元長度的断面面积上, 水的重量所代表的力量, 与渠壁的摩擦阻力 (f) 間的关系可以写成:

$$\rho A \omega \sin \theta dl = f P dl$$

或

$$f = \frac{\rho A \omega \sin \theta}{P}, \quad (4)$$

式中 l = 沿渠槽的長度; ω = 1 立方呎水的重量 (= 62.5 磅); θ = 渠槽坡度, 度数; P = 水与空气混合体的湿周。

当空气攪入水內, 由于攪入空气后混合体密度减少, 摩擦力亦随之减少, 普通教科書內所假定的在等速流中摩擦力与流速間的关系有加以修正的必要^[4],

$$f = k \rho V^2, \quad (5)$$

式中 k 为一系数, 以 $R = A/P$ 和 $S_1 = \sin \theta$ 代入 (4) 式, 得

$$k \rho V^2 = \rho R \omega S_1$$

及

$$V = \sqrt{\frac{\omega}{k} R S_1},$$

而 $\sqrt{\frac{\omega}{k}}$ = 謝才 (Chezy) 公式中的 C , 所以

$$V = C \sqrt{R S_1}. \quad (6)$$

上式中应用了观测所得的水力半径 R_0 , 此值系从观测所得的 A_0 及水和空气混合体的湿周 P_0 計算而得。这样, 正常的謝才公式就可以应用。

引用这公式的困难是在必須先知道空气在水中所含的比例 $(1 - \rho)$ 之值, 这一比例不是一个常数, 它随速度、渠道尺寸、边牆糙度等值而变。所以, 以 R_c 值来代替 R_0 , 則可較為簡單, 其中 $R_c = \frac{A_c}{P_c}$, $A_c = \frac{Q}{V}$ 。

从陡槽試驗的資料来决定变速流动中的阻滯因数 (retardation factor) 时, 克特糙率 n 的計算, 可以很容易的引用曼宁公式, 从能綫坡度 S 得出:

$$S = \frac{n^2 V_0^2}{2.2082 (R_0)^{4/3}}. \quad (7)$$

如果需要的話, 克特公式中相应的 n 值, 可以从不同的 R 值下曼宁 n 与克特 n 間的关系来决定。

如以 R_c 代替 R_0 , 則 (7) 式的 n 不能用通常的 n 值, 而应加以換算如下式: