

中国科学院水工研究室專刊

动床变态河工模型律

錢 宁

科学出版社



中国科学院水工研究室專刊

动床变态河工模型律

錢 宁



科学出版社

1957年

內 容 提 要

本書根据說明泥沙和河道水流运动的理論和半經驗性公式,提供了一个設計动床变态河工模型的方法。这样設計出来的模型,能够滿足下面一系列的相似要求:(1)阻力的相似;(2)福氏定律;(3)推移質运动的相似;(4)泥沙起动情形的相似;(5)沙粒雷诺数的相似;(6)悬沙相对分佈的相似;(7)河床冲淤变化的相似;(8)水流連續条件;及(9)模型坡降不任意加陡放平。

在全面滿足了水流和泥沙运动的相似以后,这个方法又进一步容許模型設計者可以根据具体的情况,适当地容許某一些次要的相似条件可以有所偏差,来解决模型設計中所不可避免的实际的困难和限制。由此所發生的偏差,在定量上可以加以控制。这样的做法,大大加强了这个方法在实用上应有的彈性。

动床变态河工模型律

著 者 錢 宁

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 北 京 西 四 印 刷 厂

总經售 新 华 書 店

1957 年 4 月 第 一 版 書号: 0749 字数: 54,000
1957 年 4 月 第一次印刷 開本: 787×1092 1/16
(京) 0001-2,643 印张: 3 1.8 插頁: 1

定价: (11) 0.70 元

目 录

一. 緒言.....	1
二. 河工模型变态的必要性.....	4
三. 方法的由来.....	6
四. 命名和变态.....	8
五. 决定冲积水流特性的关系式.....	10
(一) 阻力条件.....	10
(二) 福氏条件.....	14
(三) 輸沙条件.....	15
推移質.....	15
悬移質相对分佈.....	18
总輸沙率.....	21
(四) 水流連續条件.....	23
(五) 河槽冲淤变化相似条件.....	23
(六) 不任意改变模型坡降条件.....	24
六. 模型相似律的解.....	25
七. 动床变态河工模型設計实例.....	29
八. 結論.....	42
参考文献.....	44
外文摘要.....	46

一. 緒 言

在水利工程中有許多問題，因为水流几何形态特別复杂，既非已有的理論所能說明，也不是根据以往的經驗就得以解决。許多像这样的問題，目前只能利用模型試驗来获得必需的知識，寻求解决的方案。在模型里，我們把原体中复杂的边界情形縮小尺度复制出来，然后对水流流态直接进行观察。

要进行模型試驗，首先必須知道如何建造模型，使之可靠地重演原体水流的特性。換言之，只有在完全掌握了模型相似律以后，我們才能根据模型試驗的結果，定量地預示相应的原体水流的情况。

在沒有說明保證相似所必須具备的条件以前，讓我們先把相似的定义解釋一下。我們說，原体和模型是相似的，如果

(1) 對於原体中任何一点、一个時間和一个过程，都可以在模型中找到与之相应的而且独一无二的一个点、時間和过程。

(2) 對於每一种物理数量，其在原体和模型中相应值之比是一个常数。

这意思是說，在原体中連系各不同变值、参变数、和常数的定律應該同时也能在模型中应用；所有具有同一量綱的数值，必須遵循相同的尺度比例。能够同时滿足这两个条件的模型，我們称之为正态模型。从这样的模型中所得出的試驗結果，就可以根据这些尺度比例換算到原体上去。

在最近一二十年內，工程师們日益依賴模型試驗来解决实际水利問題。特别是有关水工結構以及若干和摩阻力关系不大的水流現象的模型，各方面做得比較多，也取得了一定的成績。这一类的問題所涉及的因素比較少，水流的周界不因水流不同而变形，因此在模型律中存在的困难不多。

在另一方面，河道水流和一般水流現象不同，自具一定的特点。首先是河流無不挟帶泥沙，研究相似条件的对象，不但包括水流，而且还要牽涉泥沙。其次，由於泥沙的易冲易淤，河床的断面形狀也就無法維持固定，进行模型試驗时，需要滿足水流周界可以随水流而变这样一个基本条件。因此，要做好河工模型，必須先对控制泥沙运动的規律有所認識。也正是在这方面，我們目前所知道的还是十分有限。

在这样的情况下，过去做河工模型，依賴經驗的成分極大。不是把河工模型做成定床，避免由於河床变形而引起的各种困难，便是憑借証实試驗，嘗試决定动床模型的尺

度比例。

在定床模型中，我們按照預先选定的几何尺度，用水泥仿原体做出一定的水流周界。这时試驗的目的，在研究由此所形成的水流流态和水力因素大小；在長時間以內，河床的冲淤是受制於这两个因素的。这一类的模型要求水流相似，其中既不包括泥沙，就没有泥沙运动相似的問題，因此模型的設計比較容易。有时我們也在水流中放入細粒泥沙或輕質材料，其目的並不在重演原体中的真正泥沙运动，而只是用以作为指示剂，指出河底水流的方向，或者可能發生淤积的地区。定床河工模型的成败，其關鍵在於泥沙运动和水力因素間的相关关系，也就是从定床上的水流流态和水力因素大小，是否足以預示动床中泥沙冲淤的問題。在一个相当大的程度上，这有賴於从事模型試驗的人的經驗和智慧。

研究泥沙运动以及由此而引起的河床的改变，最好做成动床模型。河床的材料不用水泥或混凝土，而用沙子、煤粉、松香、木屑、或者其他成顆粒狀可以在水流中运动的物体。过去設計这样的模型时，基本上有賴於所謂模型的証实試驗，其手續的繁复，可引用一个做模型試驗的人的話來說明^[1]：

“遇到像这样的情形，从事模型試驗的人所能做的，就是要把泥沙运动做到相似，其他的后果只好听其自然。……他把模型的动床做成和实测地形一样，再找出另一个为較晚的测量，作为模型試驗所要重演的目标。在这样的模型里，通过了在这兩次测量期間所真正發生的流量过程線，然后开始他的嘗試过程。他改变時間尺度，把某一些水位下的時間尺度加長，把另一些水位下的縮短；更換在模型上游的加沙率；改正一下洪水平原上的糙率；略略变动水面的坡降；很微小地重新校正一下底坡；更換一种仿制卵石或石塊的方法；消除显然有錯誤的冲淤現象；作为一个最后的补救，甚至改变了所用床沙的种类。最后，快乐的巧合終於找到了，按照前一次测量所仿制出来的模型，足够精确地重演了河床的改变，得到一个和第二次测量几乎相同的地形。”

在进行如此錯綜复杂的調整校驗过程时，模型試驗者無疑地作了許多妥协，特别是將来在模型上研究各种河工措施的有效程度时；因为对天然河道加了许多人工的改变，水流流态可能和做驗證試驗时的情形有所不同。在这样的情形下，如果我們對於相似律並無徹底的了解，只是假定根据驗證試驗所定出来的模型尺度还可以在改变了的水流中应用，不免就含有若干冒險的成分，而有引起錯誤的可能。應該說，河工模型的証实試驗是一个極有用的工具，可以用来檢驗根据相似律所設計出来的模型的可靠性，可是如果忽略了这些相似律，証实試驗本身却並不能保證給出一个圓滿的模型。

目前一般的河工模型往往只能做到定性的地步,尚不能滿足定量的要求,因此进行河工模型相似律的研究,来改善这样的情况是十分必要的。由於河工模型不但包括动床,而且需要变态,牽涉的因素殊多,只从量綱分析出發来考虑模型尺度不能解决問題。我們必須遵循一个不同的途徑,首先徹底了解了所要研究的物理現象,然后再从控制这些現象的各种理論或半經驗性的定律出發,找出一整套彼此相消相成的模型比例尺和变态率。本文的目的,就在說明这样一个方法。首先指出河工模型採取变态的必要性,以及这里所採用的方法的由来及其演变过程。然后根据挟沙河道水流的各种物理現象,定出它們的模型律,並从一系列的模型律中在不同的条件下求解。最后並以实例說明設計动床变态河工模型的具体步驟。

應該說明的,就是这里所提供的方法,虽然是建立在近代河流动力学的理論基础上,可是它的可靠程度,尚有待於进行实际河工模型試驗加以考驗。所以在这时候把方法提出来,一方面是因为随着祖国水利資源的全面开发,天然河道將日益因人为的控制而尽改前貌;在今天,治河方案的決定主要仍有賴於模型試驗,从事这方面工作的人,迫切需要一个适当可行的河工模型律,使試驗的进行有所依据;另一方面也是希望通过这样不断的校核,在實踐中發現方法的缺陷所在,再作必要的补充和修正,使之日趋完善。

二. 河工模型变态的必要性

在前一节中,我們說過正态模型是指具有同一量綱的变值,其尺度比例也完全相同的模型。相反地,如果兩種或兩種以上具有同一量綱,但在物理上互不相关的变值,各具不同的尺度比例,那么这样的模型在物理意义上說来存在着变态。模型的变态可以採取各种不同的方式,比較普通一点的,像長度的尺度比例在垂直方向可以和水平方向不同,模型可以加陡或是放平而任意改变其坡降,水流的比重尺度比例可以和泥沙的比重尺度比例不同等。所以这样做,是为了要在某些情形下避免建造过大的模型,但是同时又要保持基本的相似条件。这些情形可以列举如次:

1. 模型的动力相似要求原体和模型的水流情形相同。如果原体中的水流屬於紊流,模型中的水流也必須屬於紊流。为經濟条件所許可的正态模型,一般水深都很小,水流进入層流范围,因此,也就失去了水流的基本相似。

2. 天然河流一般既寬且淺,坡降也比較小。如果模型的几何形态做成和原体完全相似,水深和糙率过小,以致在水力学上河床的性能一如光滑的周界,和原体中的粗糙周界不同,前者的阻力因水流粘滯性而决定,后者的阻力則受制於河床粗糙不平的程度。除此以外,水深和坡降过小,在模型的建造和測量上也会帶來很多的困难。

3. 如果我們严格地遵守几何相似的原理,原体中的沙子在模型中变成了粉末。沙子的冲刷、运动和沉降完全决定於其物理性能,但在粉末中,还要牽涉到粉末的化学性能。也就是說,粉末在运动时,因为膠結作用的关系,其有效粒徑常比实际粒徑为巨,而在沉降以后,复因粘附力的作用,水流極难使之再冲刷下移。在这样的情形下,即使泥沙的大小是按一定正态尺度比例选择,它們的运动却不复相似。

4. 重演河床床面形狀所需的时间,在正态模型中一般过長,引起很多操作上的困难。要縮短操作時間,我們必須把表示某一个特殊水流持久性的時間尺度比例,做成和流速尺度比例中所包括的时间尺度比例不同。要了解這兩者間的區別,我們可以把天然水流的过程,看成是一連串的穩定流。前者的時間尺度比例关系於个别穩定流的久暫,而后者的時間尺度比例則和每一个穩定流中的水流情形有关。關於这一点,我們在以后还要再作詳細的說明。

凡是挾帶細粒泥沙的巨川大河的模型,要能克服上面这几种困难,所需尺度一般过大,为時間和經濟所不容許,迫使我們非採取变态模型不可。事实上,变态的应用對於

工程师說並不陌生。我們在繪制寬淺的断面或和緩的縱剖面時，為了節省圖紙，使圖形突出起見，經常都把縱橫兩軸採用不同的尺度。就是在天然河系中大小不同河流的河槽特性和坡降的變化上，似乎也指出存在着有如我們在模型中所採用的變態的情形。

在天然河系中，有的河寬，有的河狹，有的水深，有的水淺，乍看起來好像沒有規律可循。根據美國利奧普及麥道克研究的結果^[2]，其實只要以同一頻率的流量作為標準，考慮在這樣的流量下沿河各點河槽特性的變化，我們就會發現河寬、水深和流量間自成一定的關係；這樣的關係，不論是在上游的小支流上還是將入海處的大幹流上，都沒有什麼不同。這意思是說，如果我們在比較上游的小支流和下游的大幹流時，以同一頻率的流量作為比較的標準，前者就可以看成是後者的一個模型。按諸美國西部大量河流的資料，沿河方向各断面間河寬、水深和流量的關係如次：

$$W = a Q^b, \quad (1)$$

$$d = c Q^f, \quad (2)$$

此中 W = 河寬； d = 水深； Q = 流量； a, c, b, f 為常數。在地文背景迥然不同的河系中， b 及 f 值的變化範圍不大，可以看成為常數，其平均值如次：

$$b = 0.5, \quad f = 0.4.$$

因此，河流的寬深比為

$$\frac{W}{d} = \frac{a}{c} Q^{b-f} = \frac{a}{c} Q^{0.10}. \quad (3)$$

方程(3)中流量的頻率，雖然在全河系中各點完全相同，但是其數值的大小自因断面在河系中的位置而有極大的差異。同一頻率的流量在小支流中不過是一壑之水，到了下游大幹流中，便成了浩瀚巨河。因此，如果上游的小支流果真可以看成是下游大幹流的模型，那麼根據方程(3)，在天然河系中，模型是比原體狹而深的。同樣的，我們知道，天然河道的縱剖面絕無例外都是向天空凹進，也就是說，在上游的坡降必比下游的坡降為陡。根據以上的推論，不难看出河工模型不但有變態的必要性，而且也是符合天然情況的。蘇聯維里堪諾夫教授^[3]在他所提供的自然河工模型法中，也認為採用變態河工模型，是合乎河流本性，及河床形態相關律的。

三. 方法的由来

在这里,將簡略地說明本文中所引用的方法的由来及其演变的經過.

在欧洲康斯坦斯湖上游的萊茵河上,其中近湖 30 千米的一段,因为上游泥沙来量超过当地河槽輸沙容量,殊以淤塞为苦.断面減小的結果,使洪水越槽泛濫的危机大大增加,因此瑞士政府責成左立克联邦工艺学院水利及土工試驗室进行萊茵河段的模型試驗,研究採取何种工程措施,可以不变河流坡降,而能增加河槽輸沙容量.模型的兴建完全根据以前所說过的原体验証法,几何形态並無变态,不过模型沙用的是煤屑,較天然泥沙略小而輕.經過多次的嘗試修正,最后模型能够完全重演原体中河床演变的情形.

1939 年爱因斯坦及摩勒^[4]在模型已經試制成功以后,再反过来研究何以採用这样的尺度,模型中就会重演出萊茵河上的情形.他們發現如果不用福氏定律作为比較的标准,而另用一系列經驗性或半經驗性的說明河道水流及泥沙运动的公式,就可以很圓滿地定出模型应採的尺度来,和根据原体验証法反复嘗試决定的模型尺度十分相近,这两者間的比較可見表 1^[5],表中还列举了如果純粹按照福氏定律,所应採取的正态模型尺度.應該指出的是爱因斯坦和摩勒的工作,在某种程度上,可能是受了卡萊在 1936 年所發表的一篇論文^[6]的影响.

表 1 萊茵河模型根据計算及原体验証法嘗試决定的模型尺度的比較

尺 度	选 定 值	根据原体验証法 决 定 值	根据公式計算值	根据 福 氏 定 律 計 算 值
寬度	100	—	—	—
泥沙容重	7.7	—	—	—
流量	10^3	—	—	—
長度	—	100—130	110	100
高度	—	95—104	100	100
坡降	—	0.6—0.65	0.645	1
時間(水流)	—	9.3—13.7	11.0	10
單位河寬輸沙量	—	250	236	$10^{3/2}$
水流質量	—	$(0.95-1.35) \times 10^6$	1.1×10^6	10^6
泥沙粒徑	—	6.8—7.2	7.0	100
時間(河床演变)	—	360	—	10

萊茵河上的泥沙顆粒比較粗,泥沙的輸移基本上以推移質為主,河床的糙率也決定於個別沙粒的大小,床面並無沙紋沙壟的存在而引起額外的形狀阻力。因此,愛因斯坦及摩勒在他們引用的公式中,只考慮了推移質的輸沙公式,河床糙率就用曼寧系數 n 代表, n 和床沙粒徑的關係則採用史推克^[7]的經驗關係。在另一方面,世界上極大多數的巨川大河其所挾帶的泥沙比較細,懸移質常為輸沙的主體,而且因輸沙強度的不同,河床床面有各種形式大小的沙紋沙壟,通過沙紋沙壟而產生的形狀阻力,往往超過個別泥沙顆粒所產生的摩擦阻力。在這種情形下,愛因斯坦及摩勒所提供的方法即不再適用。此所以他們雖然在將近二十年以前已經找出了一個決定模型尺度的更合理的方法,却並沒有引起廣泛的注意,在河工模型的試驗中,大家還是沿襲應用原體驗證的方法。

1954年愛因斯坦及作者^[8]根據近十餘年來在河道水力學及輸沙理論中所累積的知識,把愛因斯坦及摩勒在1939年所提供的方法作了徹底的修正。這樣,不但應用的範圍大大擴大,在理論上也更趨精密,而且所得結果有很多部分和其他各試驗室根據長時期的經驗得出的河工模型規律也不謀而合。本文中我們將對這個方法作更詳盡的說明,而且還考慮了懸沙相對分佈的相似問題,以及床面粗糙情形下(床沙代表粒徑和近壁層流層的厚度之比大於6)的模型設計方法,這是在1954年愛因斯坦及作者所發表的文章里所不曾論及的。

四. 命名和变态

在以下的討論中,角标 p 及 M 分別代表原体和模型中的数值。原体和模型中相当值之比則用符号 λ 表示,以相应变数作为角标。举一个例來說,深度的比例可以写成 $\lambda_h = h_p/h_M$ 。同样地,我們引用了如下的各种尺度比例:

λ_L 为水平長度的比例;

λ_h 为垂直長度的比例;

λ_D 为泥沙粒徑的比例;

λ_s 为坡降,特别是能坡的比例;

λ_v 为水平方向流速的比例;

$\lambda(\rho_s - \rho_f)$ 为泥沙在水下密度的比例,在原体和模型中我們假定用同样的液体,

因此 $\rho_{fp} = \rho_{fM}$;

λ_{t_1} 为和水流流速有关的时间比例;

λ_{t_2} 为水流持久性的时间比例;

λ_{q_B} 为推移質輸沙率的比例(推移質輸沙率以單位時間內通过單位河寬的推移質水下重量計);

λ_{q_T} 为总輸沙率的比例(总輸沙率的單位同推移質輸沙率);

λ_{v_s} 为泥沙沉速的比例;

λ_C 为在普遍化的曼宁公式中常数 C 的比例。

在上面,我們採用了:

三种不同的長度比例(2):

$\lambda_L, \lambda_h, \lambda_D$

坡降比例(1):

λ_s

兩种密度比例(1):

$\lambda_{\rho_s}, \lambda_{\rho_f}$

兩种速度比例(1):

λ_v, λ_{v_s}

兩种时间比例(1):

$\lambda_{t_1}, \lambda_{t_2}$

兩种輸沙率比例(1):

$\lambda_{q_B}, \lambda_{q_T}$

括弧里的数值代表变态的数目,例如同是速度尺度,却採用了兩种不同的比例,因此在速度尺度上存在着一个变态,其余以此类推。在水平方向和垂直方向的長度尺度比例决定以后,再自由选择坡降的尺度比例,因此在模型的坡降上也存在着一个变态。总的

說起来,在模型律的推求中,我們將要考虑到七种可能的变态。

需要特別注意的是任何一种变态本身,决不能滿足正态尺度比例所能滿足的相似条件,不过我們希望可以希望找出一整套的变态体系来,使得它們的作用在物理公式中能够互相补偿抵銷;也就是說,作为整个系統看,它們能够滿足相似条件。在下一节中,我們就要討論这些尺度比例需要遵循的物理公式。

五. 決定冲積水流特性的关系式

決定冲积河段泥沙及水流特性的关系式,在原型和模型中應該沒有不同,这些方程可以用来換算为各种尺度比例間的关系。本文中,我們爰引爰因斯坦的理論^{[9]①}來說明冲积水流的各种特性。我們相信,这样做並無伤於这里所提供的方法的普遍性。在水力学和輸沙力学的知識日趨丰富以后,我們自然可以找到更趨完整的理論,不过在应用这些理論來決定动床变态河工模型律时,方法上恐怕不会有过多的出入。讀者們可以採用任何其他理論,不过要想全面解决某一問題所需要滿足的公式的数目,却並不能任意改变。因此,他会得出同样数目的条件,也就是同样数目的選擇尺度比例的自由度。他会發現他所得出的模型規律公式,基本上还是包含着类似的变值,所不同的,只在於变值的指数会有另外一套,和我們这里所用的略有差異。需要注意的是所選擇的理論,不但要能够說明天然泥沙的运动,而且还能同样应用在輕質材料上;因为以后將要指出,变态河工模型的模型沙,一般都需要採用輕質材料。作者曾經用过比重小到1.05的塑性顆粒(均匀質及混合物两种),証明我們这里所採用的理論足以說明輕質材料的运动过程^[10]。

动床河工模型的尺度比例,決定於下列各种条件:

(一)阻力条件

水流的磨阻現象可以看成是使水流机械能轉变为紊动或热量的工具。水流內各点所損失的能量,除了一小部分就地散失为热量以外,大部分則通过水流剪力,傳遞集中水流周界。如此集中的能量,在周界面上轉化为紊动,产生大量漩渦,漩渦在上升的过程中,紊动动能最后又在流区内散失为热量^[11]。

冲积水流和周界固定的水流不同,其床面形狀时随水流而变。在水淺流緩的时候,床面遍佈沙紋或沙壟,这些沙壟随流速的增加而逐漸加長,到流速高达一定程度后而消失不見。在流量特大时,床面再度發生起伏極急的沙波,或逆水上溯,或逐流下行。冲积水流的阻力,因此除了来自床面沙粒的阻力以外,更有来自沙紋沙壟所引起的形狀阻力。

① 为了节省篇幅起見,在爰引爰因斯坦的公式时,不再詳細解釋其由來及意义。在閱讀本节以前,讀者們最好先參閱爰因斯坦的原著:“明渠水流的挟沙能力”,科学院水工研究室譯叢第一种,水利出版社出版,1956年7月。

床沙沙粒和沙壠对水流产生阻力的方式完全不一。床沙沙粒之造成表面阻力,正像任何固体周界对水流所产生的磨面磨擦一样。尼可拉茲^[12]曾建議用相当沙徑来代表水管管壁的糙率。在冲积水流中,河床的糙率相当沙徑在床沙均匀时即为床沙的粒徑,当床沙由不同粒徑組成时,則为床沙的代表粒徑 K_s 。我們知道,水流机械能通过水流的剪力,傳遞集中河床周界面而产生紊动。由於磨面磨擦而引起的能量的轉換,其所产生的漩渦,發源於床沙沙粒附近,對於床沙在床面的輸移自然有相当的作用。在另一方面,床面一旦發生沙壠后,水流沿壠峯分离,由於迎水面和背水面上压力的差異,造成形狀阻力。和沙壠形狀阻力相关的这一部分能量,則在水流的分离面上轉換为紊动的动能,由此所产生的漩渦和大部分的床沙沙粒相离殊远,對於推移質的輸移所起影响自然也不若沙粒表面阻力之巨。根据同样的推論,通过河岸阻力所产生的漩渦淵源於河岸兩壁,對於床面泥沙的輸移也不可能有直接的影响。此所以决定推移質輸沙的时候,我們只考虑沙粒阻力一个因素的作用。

床沙沙粒阻力、沙壠阻力和河岸阻力各循不同的規律:

沙粒阻力 床沙沙粒阻力可以根据对数流速公式决定,对数流速公式則建立在卡門的紊流相似定律上^[13]:

$$\frac{V}{\sqrt{R_b' S_e g}} = 5.75 \log_{10} \left(12.27 \frac{R_b'}{x K_s} \right). \quad (4)$$

沙壠阻力 沙壠的形狀和大小因輸沙强度而異,后者是作用於床沙沙粒上的剪力 T_b' 和床沙代表粒徑 D_{35} 的函数。写成無量綱的形式,沙壠阻力可以用下式表示:

$$\frac{V}{\sqrt{R_b'' S_e g}} = f_1(\psi'), \quad (5)$$

此中

$$\psi' = \frac{\rho_s - \rho_f}{\rho_f} \frac{D_{35}}{R_b' S_e}. \quad (6)$$

河岸阻力 河岸阻力可以根据曼宁公式决定:

$$V = \frac{1}{n_w} R_w^{\frac{2}{3}} S_e^{\frac{1}{2}}. \quad (7)$$

在公式(4)–(7)中, V = 平均流速; S_e = 能坡; g = 重力加速度; K_s = 糙率粒徑; x = 指示周界糙率自光滑至粗糙的过渡区的参变数,其本身是 K_s/δ 的函数, δ 为近壁層流層的厚度; ψ' = 作用於代表粒徑上的剪力强度; f_1 = 一个函数,函数的形式則根据河流实测資料决定^[14]; ρ_s, ρ_f = 泥沙及水的密度; D_{35} = 床沙混合物中百分之三十五比之小的粒徑; n_w = 河岸曼宁糙率系数; R_b' = 沙粒阻力水力半徑; R_b'' = 沙壠阻力水力半徑; R_w = 河岸阻力水力半徑。

在这里,我們把水力半徑按諸河槽各部分糙率的不同而分成若干相当部分。因此,在物理意义上,我們並不是把水力半徑孤立地看成是代表河槽断面的一个尺度,等於断面面积除以断面潤周,却是根据水流势能轉化为紊动动能;最后又散失为热量的过程,把水力半徑 R 的意义看成是:^[15]

在單位水流周界面积上所产生的紊动,其能量来自水流容积 R 內的势能;由此产生的紊动动能,最后复在同容积的水流中散失为热量。此中水流容积 R 称为水力半徑。

因此,水力半徑之按阻力不同而分开,意思就是說,通过水流周界上各种不同糙率部分而产生的紊动,其能量来自水流中不同部分的势能。

从整个摩阻現象中,把个别不同的阻力的作用分开,或者根据个别的阻力的作用,反求摩阻現象对水流总的影响,我們所用的方法的理論根据是明渠水流的摩阻作用的可加性:^[16]

如果两种或两种以上的不同的糙率在水流中作用,其中各部分糙率的作用面或則完全分开,或則相重而有相当的高低的間隔,則这些糙率對於水流的綜合摩阻作用可以看成各部分糙率作用的代数和。

这个理論在一定範圍內的可靠性業經多次实验証明^[16 17]。事实上,摩阻作用的可加性,在許多水利問題上都習用已久。譬如在水管流中,管壁糙率对水流的阻力,以及水流經過管曲、閘門、和管徑急遽变化部分所遭受的损失,可以个别单独計算,然后相加而得水流总損失。又如船舶在航行时所受的阻力,一般也以船舶膚面摩擦和形狀及海浪的阻力的代数和表示。

在我們所要研究的冲积水流里,水流的阻力 T , 由沙粒阻力 T'_b 、沙壠阻力 T''_b 及河岸阻力 T_w 三部分組成。根据摩阻作用的可加性,

$$T = T'_b + T''_b + T_w. \quad (8)$$

因此,我們可以設想:

通过沙粒阻力 T'_b , 水流中 A'_b 部分的势能將在周界 p_b 上轉化为紊动的动能;

通过沙壠阻力 T''_b , 水流中 A''_b 部分的势能將在周界 p_b 上轉化为紊动的动能;

通过河岸阻力 T_w , 水流中 A_w 部分的势能將在周界 p_w 上轉化为紊动的动能。

其中 p_b 为河床的寬度 (可取河槽水面寬度); p_w 是兩岸浸水的深度 (可取二倍平均水深)。这样,方程(8)可以写成

$$A_T \gamma_f S_e = A'_b \gamma_f S_e + A''_b \gamma_f S_e + A_w \gamma_f S_e, \quad (9)$$

γ_f 为水流單位容重, A_T 則显然为断面总面积。方程(9)左右各項除以 $p_b \rho_f$ 后,得

$$\frac{A_T}{p_b} S_e g = \frac{A'_b}{p_b} S_e g + \frac{A''_b}{p_b} S_e g + \frac{A_w}{p_w} \frac{p_w}{p_b} S_e g. \quad (10)$$

按諸水力半徑的定义,

$$\frac{A'_b}{p_b} = R'_b, \quad (11)$$

$$\frac{A''_b}{p_b} = R''_b, \quad (12)$$

$$\frac{A_w}{p_w} = R_w. \quad (13)$$

如果我們把 $\frac{A_T}{p_b}$ 也写成水力半徑的形式,

$$\frac{A_T}{p_b} = R_T, \quad (14)$$

則

$$R_T = R'_b + R''_b + R_w \frac{p_w}{p_b}, \quad (15)$$

$$R_T S_e g = R'_b S_e g + R''_b S_e g + R_w \frac{p_w}{p_b} S_e g. \quad (16)$$

从方程(11)——(14), 不难看出 R_T , R'_b , R''_b 的尺度比例为垂直方向的長度尺度比例 (λ_h), R_w 的尺度比例則为水平方向的長度尺度比例 (λ_L).

其次, 在已知河槽中, 我們可以首先假定一系列的 R'_b 值, 从公式(4)中算出流速 V , 再根据公式(5)及(6)算出 R''_b 及 R_w . 然后利用試算法求出相当於每一 R'_b 的水位, 再从河槽断面形状, 查出不同水位下的 p_b 及 p_w , 最后根据公式(15)算出 R_T . 在第七节中, 將以实例詳細說明这样的計算步驟. 知道了 R_T 以后, 就可以分別算出 R_T/K_s 及

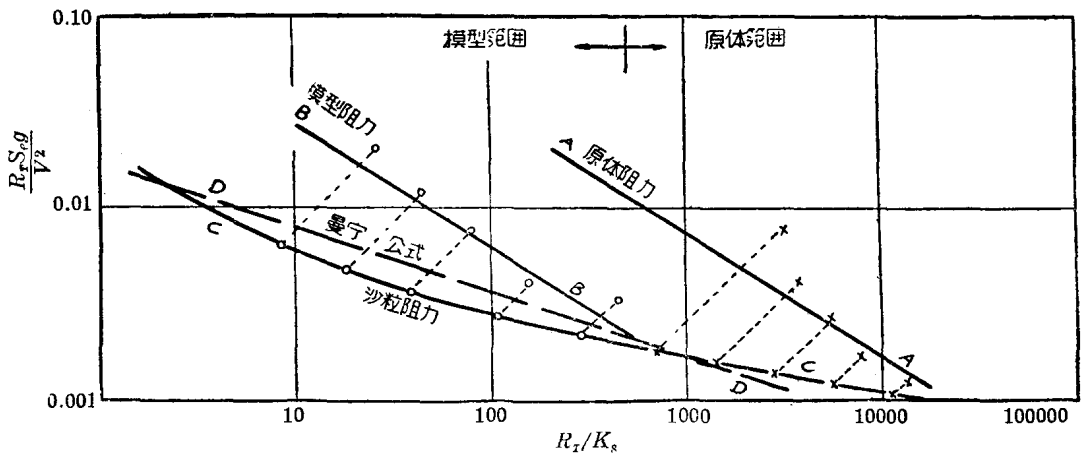


圖 1. 說明原体和模型阻力的普遍化曼宁公式