

林親義*

摘要

欲瞭解水在天然河川裡流動狀況，應對渠道之形態，渠道糙度，沈滓輸送率，水流阻抗等，先有基本認識；然後才能探討其與流速、水深、水之密度、水之動粘滯性，河床坡度，河床質大小分布，沈滓密度、重力加速度、滲流力等之關係；俾進一步瞭解天然河川之冲淤變化，以利尋求構造物在堆積河床之上之穩定性。在穩定等速流裡，水流阻抗之三個參數為 f 、 c 、 n ， f 為達西摩擦係數， c 為喬居阻力係數， n 為滿寧粗糙係數；其關係式為：

$$f = \frac{8 S_E}{Fr^2}、f = \frac{8g}{c^2}、n = \frac{R^{1/6}}{c}、n = f(Re)；式中 S_E 為能量線$$

坡度、 Fr 為福祿數、 g 為重力加速度、 R 為水力半徑、 Re 為雷諾數。

在天然河川裡，影響渠道糙度形態及水流阻抗之因素很複雜，雖然渠道糙度僅是影響水流阻抗之部分因素；但欲尋求渠道糙度形態對水流阻抗影響之簡單關係式，相當困難。因此本文僅就渠道糙度之形態與水流阻抗之關係作分析探討。

一、前言

為瞭解天然河川中之泥砂移動狀況，應先對渠道糙度之形態與水流阻抗作充分之認識；亦即對影響水流阻抗及渠道糙度之因素，具有充分之瞭解；俾經由探討，以尋求其相關性及適用性。

影響渠道糙度形態之主要因素，包括渠道表面糙度、渠道裡植生狀況、渠道蜿蜒、渠道組合、渠道冲淤情形、渠道阻礙物、渠道之大小和形狀、時期與流量、季節變化、渠道河床質與懸浮質等。

影響水流阻抗之主要因素，有流速、水深、能量線坡度、水之密度、水之動粘滯性、重力速度、河床質相關粒徑、河床質大小分布之標準偏差、沈滓密度、顆粒形狀係數、渠道伸展之形狀係數、渠道斷面形狀係數、渠床之滲流力等。

由於渠道之形狀係水流、流體和河床質相互作用之結果，此種水流阻抗和沈滓輸送為河床坡度、水深、流體粘滯性及河床質大小分布之函數。本文擬就渠道糙度之形態與水流阻抗作分析及初步探討，並以穩定等速流之水流阻抗之三個參數之關係式列出；俾供進一步推論天然河川水流阻抗及糙度形態之用。

二、渠道糙度之型態

1. 河床形態包括：①河床幾何性質，②河床糙度形態，③河床形態，④河制 (bed regime)，⑤河勢 (bed phase)，⑥河床不規則，⑦沙波，⑧河床質形狀，⑨河床形狀等。

2. 在天然渠道裡影響糙度形態的因素很複雜，最主要的因素有：①渠道表面糙度，②渠道植物生長狀

* 山地農牧局技士，國立中興大學水土保持研究所研究生。

況，③渠道不規則，④渠道組合，⑤渠道沖淤情形，⑥渠道阻礙物，⑦渠道的大小和形狀，⑧時期與流量，⑨季節變化，⑩渠道河床質與懸浮質等；茲將渠道糙度形態簡述如下：

①渠道表面糙度係表示河床質顆粒大小和形狀；其糙度由於河床質之顆粒如砂、粘土、壤土、淤泥、碎石、圓石等不同而異。通常光滑的顆粒粗糙係數小，粗糙顆粒粗糙係數大。表面相關糙度係粗糙高與水力半徑之比，即 $\frac{k}{R}$ 。其摩擦速度 $V_f = \sqrt{g R S}$ ，式中 g 為重力加速度， R 為水力半徑， S 為能量線坡度；以Chezy公式表示，則 $k_s = \frac{5 C}{\sqrt{g}} \cdot \frac{V}{V}$ ，式中 k_s 為臨界糙度， C 為Chezys係數， v 為動粘滯性， V 為平均流速；砂的糙度係數 $C = 113.5$ ， $\therefore k_c = 100 \frac{V}{V}$ 。水流經過粗糙表面有3種狀況即①絕對糙度流動，②餘波干涉流動，③幾乎光滑流動等。其中絕對糙度流動之糙度最大，幾乎光滑流動糙度最小。

②渠道植物生長狀況顯着地減少渠道流量，並減低水流，其糙度受植物的高矮、疏密、分佈、種類、位置等影響。亦即植物的生長情形愈良好，糙度愈大，愈能減低流速，對水流阻抗愈大；因此河道植物少，河岸有雜草而非灌木者，則糙度小，因為高大濃密分布寬廣之灌木類，對水流阻抗甚大。

③渠道不規則顯着影響糙度，如潤周不規則、渠道斷面變化、大小、形狀、長短、彎曲情形等；即愈不規則的潤周，斷面變化愈大，形狀愈凹凸不平渠道愈長，彎曲愈多，對水流的阻抗愈大；因為不規則的潤周糙度大，降低水流速度愈大，亦即對水流阻抗愈大；在相同的流量、坡度狀況，渠床斷面變化愈大，糙度愈大，對水流阻抗愈大，以致流速降低，渠床形狀高低不平，彎曲角度愈大（曲率半徑愈小），渠道愈長，則水流速度便愈慢，即水流受阻抗愈大。

④渠道組合受渠道蜿蜒情形、坡度陡緩、渠床斷面大小等組合影響，即渠道彎曲愈多，坡度愈平坦，渠床斷面愈大，則其糙度愈大，水流速度愈緩，對水流阻抗愈大；換言之，水流接觸粗糙河床面愈大，則水流速度減緩，亦即表示水流阻抗愈大。

⑤渠道沖淤情形產生沙洲、沙波、沙丘、沙紋、沙凹、沙鏈等，通常渠道沖淤情形嚴重者，即表示沙洲、沙波、沙丘、沙紋、沙凹、沙鏈等，出現機會增大，水流受渠床粗度之影響愈大，以致水流阻抗愈大；此係水流受渠床摩擦加大產生阻抗增加之故。

⑥渠道阻礙物有圓木材之阻塞、橋柱、防砂壩、潛壩、丁壩、固床工等阻礙，其阻礙妨礙水流，增加水流接觸面，摩擦自然增加，以致增大水流之阻抗。

⑦渠道的大小和形狀，渠道愈寬廣則水流與河床接觸面愈大，水深減小，流速減緩，對水流阻抗便愈大，其形狀有半圓形、梯形、V字型、U字型、橢圓形等，其與水流接觸面愈大、水深愈小，則對水流阻抗愈大。

⑧期間與流量乃表示水流期間流量大小對渠道糙度之影響，流量愈小，水深愈小，水流速度愈慢，對水流阻抗愈大；若流量愈大，水深愈高，流速愈快，則對水流阻抗愈小；此乃洪水期間由於流量大，流速快，水流沖刷能量大，易沖刷河岸或構造物產生洪水氾濫，沖毀堤防、丁壩、橋樑、淹沒田園、房舍、造成交通中斷，人畜流失。

⑨季節變化，如春、夏、秋、冬等季節之不同，渠道流量亦異，在雨季由於渠道流量大，水位高，流速快，水流阻抗小，因此沖刷能力特強，在乾旱季節，渠道流量小，水深小，流速緩，水流阻抗大。

⑩渠道河床質與懸浮質乃表示河床質之多寡、移動情形、顆粒大小、河床質分佈情形等，即河床質顆粒大小分佈愈均勻，渠床糙度愈小，對水流阻抗愈小；流速愈大，沖刷能力愈大；河床質顆粒大小分佈不均匀，其糙度愈大，對水流阻抗愈大。至於懸浮質濃度愈高愈能阻抗水流，減緩流速。

2. 茲將天然渠道之粗糙係數 n 值列如下表：

粗糙係數 n 值表

渠 道 型 式 及 說 明	最小值	一般值	最大值
1. 小溪 (洪水期河床頂寬 < 100ft)			
a、平原溪流			
(1) 清潔、直線、滿水位、無裂開或深潭	0.025	0.030	0.033
(2) 同上，但多石頭和水草	0.030	0.035	0.040
(3) 清潔、彎曲、有深潭及沙洲	0.033	0.040	0.045
(4) 同上，但有水草及石頭	0.035	0.045	0.050
(5) 同上、低水位，許多無影響的坡度和斷面	0.040	0.048	0.055
(6) 同(4)，但有許多石頭	0.045	0.050	0.060
(7) 緩慢伸展，有水草、深潭	0.050	0.070	0.080
(8) 很多水草伸展，深潭或洪水路有許多直立樹幹和下垂樹枝	0.075	0.100	0.150
b、山溪，渠道無植物，河岸陡峻，高水位樹枝沿河岸浸於水中			
(1) 底部：多砂礫，圓石子，少許轉石	0.030	0.040	0.050
(2) 底部：圓石子夾大轉石	0.040	0.050	0.070
2. 洪水平原			
a、牧草、無叢林			
(1) 短草	0.025	0.030	0.035
(2) 高草	0.030	0.035	0.050
b、耕地			
(1) 無作物	0.020	0.030	0.040
(2) 成熟或排作物	0.025	0.035	0.045
(3) 成熟原野作物	0.030	0.040	0.050
c、叢林			
(1) 遍地叢林，雜草叢生	0.035	0.050	0.070
(2) 冬季稀疏灌木及樹木生長	0.035	0.050	0.060
(3) 夏季稀疏灌木及樹木生長	0.040	0.060	0.080
(4) 冬季中等到濃密灌木生長	0.045	0.070	0.110
(5) 夏季中等到濃密灌木生長	0.070	0.100	0.160
d、樹木			
(1) 濃密垂柳、夏季、直線	0.110	0.150	0.200
(2) 清潔地面夾有殘枝，未發芽	0.030	0.040	0.050
(3) 同上，但樹芽很多	0.050	0.060	0.080
(4) 甚多直立樹木，少許下垂，些許矮樹，洪水期分枝未伸入水中	0.080	0.100	0.120
(5) 同上，洪水期分枝伸入水中	0.100	0.120	0.160
3. 大溪 (洪水期河床頂寬 > 100ft) ， n 值較小，溪小、河岸對水流阻力影響小			
a、規則斷面無圓石頭或灌木	0.025		0.060
b、不規則粗糙斷面	0.035		0.100

由上表得知，在天然渠道裡粗糙係數 n 值，隨渠道內植物的良好生長情形而增大，亦即在渠道中濃密高大直立的樹木妨礙水流阻抗較大，粗糙係數 n 值愈大，流速便減低，其關係式 $V = \frac{1}{n} R^{2/3} S^{1/2}$ ，以公制表示，式中 V 為流速， R 為水力半徑， S 為能量線坡度， n 為粗糙係數，此關係式為滿寧公式；在穩定等流流經常被使用。在天然渠道穩定等速流裡，經常以喬居 (Chezys) 公式確定流速，其關係式為 $V = C R^{1/2} S^{1/2}$ ，式中 C 為喬居阻力係數， V 為流速， R 為水力半徑， S 為渠底坡度。若進一步欲求 $C \cdot n \cdot R$ 之關係式，在公制時為 $C = \frac{1}{n} R^{1/6}$ ，式中 C 為喬居阻力係數， n 為滿寧粗糙係數， R 為水力半徑。

4. 雖然渠道糙度之形態很多，影響的因素也很複雜，但歸納起來主要因素為植物生長情形，河床質顆粒分布狀況，渠道斷面規則情形，渠道阻礙物以及彎曲情形等。這些因素都影響渠道糙度，並直接對水流產生阻抗。

5. 在渠道穩定等速流裡亦可用達西公式表示對水流阻抗關係，其公式為 $h_f = f \cdot \frac{L}{4R} \frac{V^2}{2g}$ ，式中 h_f

為摩擦損失， f 為摩擦係數， L 為渠道長度， R 為水力半徑， V 為平均流速， g 為重力加速度。亦可變為

$$\frac{V}{V_x} = \sqrt{\frac{8}{f}}$$

式中 V 為平均流速， V_x 為摩擦流速， f 為阻力係數，此即平均流速與摩擦流速以及阻力係數

間之關係式。

三、水流之阻抗

1. 在天然渠道裡阻抗水流的因素很多，一般而言，最主要的因素為：①流速，②水深，③能量線坡度，④水的密度，⑤水的動粘滯性，⑥重力加速度，⑦河床質代表粒徑，⑧河床質大小分布的標準偏差，⑨沈滓密度，⑩顆粒的形狀係數，⑪渠道伸展的形狀係數，⑫渠道斷面形狀係數，⑬渠床滲流力等。茲將上述因素簡述如下：

①水深與糙度關係非常顯著，且影響亂流流速；若在天然溪流裡，坡度與河床質固定，則河床形狀隨水深改變。如果河床形態不變；限制流量與水深變動，則水流阻抗隨水深係改變，即水深愈深水流阻抗愈小。在平坦河床，沈滓移動不隨水深增加，水流阻抗減小而改變；此乃相關糙度減少之故。在沙紋河床受相關糙度影響，其水深增加，水流阻抗減少。在沙洲河床水流阻抗由於其較沙粗糙 0.3 mm 因此隨水深增加而增加；水深超過 0.3 mm 以後則水流阻抗隨水流增加而減少。總之在天然渠道中在水深超過沙洲、沙丘、沙紋、沙凹、沙鏈等高度後，則水深增加水流阻抗減少。

②坡度乃促進顆粒移動最重要的易變因素，陡坡水流方向沈滓沈重之重力分力，隨坡度增大而增加；水深固定，河床質中值下降速度約為 0.22 fps。若河床形態不改變，則水流阻抗為坡度的函數，在水深淺的沙紋渠床形態，水流阻抗隨坡度增大而增加；在水深較大的，水流阻抗無顯著改變。在沙丘渠床形態，則坡度增大，水流阻抗增加，其在河床質下降速度 > 0.20 fps；若河床質下降速度 < 0.20 fps，水深淺而坡度增大，其水流阻抗減少，但水深較大的水流阻抗稍微增加。在沙凹水流阻抗隨坡度增大而增加，水流阻抗增加量與坡度增大視河床質下降速度而定；下降速度小，則水流阻抗隨坡度增大而增加較大。

③密度係指沈滓與水混合密度，其關係式為 $r = \frac{r_s r_s}{r_s - c_s (r_s - r)}$ ，式中 c_s 為懸浮沈滓濃度，以 % 表示， r 為水的密度， r_s 為沈滓密度。混合密度愈大對水流阻抗愈大，其流體密度隨沈滓濃度增加而增大，且流體密度與河床質顆粒能確定沈滓重和上浮力及曳引力。

④河床質大小影響河床形態及水流阻抗，因其影響下降速度，此係河床形態形成之流體和顆粒交互作用；且影響顆粒糙度和亂流結構之水流速度。最主要的先影響水流和流體的特性；此因素大大地確定了不同的河床形狀。

⑤河床質漸變顯著影響河床形狀，河床形狀佈滿均勻砂其多角者對水流阻抗較圓滑者為大。沙丘河床

隨 $\frac{D_{3.5}}{D_{6.5}}$ 值增加而增大阻抗；沙紋河床則反之。

⑥下降速度為最先確定河床質與流體交互作用之變化者，由已知的水深和坡度顯着地影響河床形狀；增加顆粒糙度以阻抗水流。增加下降速度即增加水深與坡度乘積，此係河床由靜態平坦變為沙紋或沙丘或沙丘變為平坦河床及沙凹之原因。有關下降速度之關係式為 $W = \frac{v R_w}{D}$ ，式中 W 為不降速度， v 為動粘滯性， R_w 為顆粒的雷諾數， D 為河床質代表粒徑。在平坦渠底 $\frac{W D}{v}$ 增加則移動阻抗減少。觀測天然溪流顯示在流量與河床質固定時河床形態和水流阻抗隨下降速度改變。

⑦渠道伸展和斷面形狀係數：渠道伸展形狀係數影響能量損失，由於彎曲河岸影響速度分布的形狀係數，界面應剪力和補充循環。斷面形狀係數引起速度、河寬、水深、界面應剪力的變化。這些變化引起渠道斷面增加河床糙度；無論如何，斷面形狀係數加強寬淺渠道增加糙度以阻抗水流。

⑧滲流發生在入流或出流經過河床質和沖淤渠岸時，入流或出流受水和渠岸干擾。在入流時滲流力作用減少有效重及河床質的穩定。出流時滲流力作用增加有效重及河床質穩定。改變有效重直接引起滲流，並影響河床糙度形態及渠道坡度、形狀、河床質和流量以阻抗水流。如淺流河床質中徑 0.5 mm 剪應力增加，則崩解或沙紋、沙丘，輸送不流動沙和水波及沙凹。

2. 由於影響水流阻抗的因素很複雜，要尋求簡單的關係式表示相當困難，僅就已知關係式表示如下：

$$\frac{U}{U_*} = \phi \left(Re, \frac{D}{d}, \frac{1}{R_w}, \frac{c}{r_s D} \right), \text{ 式中 } \frac{U}{U_*} \text{ 為阻抗} = \frac{U}{\sqrt{g R S}}, Re \text{ 為雷諾數} = \frac{W R}{v}, \frac{D}{d} \text{ 為相關糙度},$$

$$R_w \text{ 為顆粒雷諾數} = \frac{W D}{v}, \frac{c}{r_s D} \text{ 為福祿數與顆粒關係。若下降速度為無限大，則 } \frac{c}{r_s D} \text{ 及 } \frac{1}{R_w} \text{ 為 } 0, \text{ 簡化上}$$

$$\text{式為 } \frac{U}{U_*} = \phi \left(Re, \frac{D}{d} \right) \quad \therefore \frac{U}{U_*} = \frac{Fr}{\sqrt{s}} \quad \text{或 } s = Fr^2 f_2 \left(Re \right) \left(\frac{D}{d} \right)^n.$$

3. 通常在穩定等速流裡水流阻抗的三個參數為 f, c, n ， f 為達西摩擦係數， c 為喬居阻力係數， n 為滿寧粗糙係數；其關係式為：

$$f = \frac{8 S_E}{Fr^2}, \quad f = \frac{8 g}{c^2}, \quad n = \frac{R^{1/6}}{c} \quad n = f (Re)$$

式中 S_E 為能量線坡度， Fr 為福祿數， g 為重力加速度， R 為水力半徑， Re 為雷諾數。

由上列式中可知，達西摩擦係數與能量線坡度成正比與福祿數平方成反比，達西摩擦係數與重力加速度成正比與喬居阻力係數平方成反比。滿寧粗糙係數與水力半徑 $\frac{1}{6}$ 次方成正比與喬居阻力係數成反比。滿寧粗糙係數為達西摩擦係數及雷諾數乘積。

4. 在動床渠道界面層和渠床形狀之阻抗水流更為複雜，有愛因斯坦氏處理方法 (Einstein's approach) 之公式， $\frac{U}{U_*} = 5.75 \log \left(12.27 \frac{R'}{k_s} x \right)$ ；沈氏處理方法 (Shen's approach) 之公式，

$$\frac{U_*''}{U} = 0.03 + 0.11 \log \frac{\phi'}{7.12}; \text{ 英吉男和韓仙氏處理方法 (Engelund and Hansen's approach) 之}$$

公式， $S'' = \frac{U^2}{2 g L} \left(\frac{Am}{d} \right)^3$ ；阿倫和甘乃迪氏處理方法 (Alan and Kennedy's approach) 之公

式， $f'' = \theta \left(\frac{V}{\sqrt{g D_{50}}}, \frac{D_{50}}{R} \right)$ ；巴柔路納氏處理方法 (Bajorunas' approach) 之公式， $n = n' +$

n'' ；西蒙和理查遜氏處理方法 (Simons and Richardson's approach) 之公式， $\frac{c}{\sqrt{g}} = 5.9 \log \frac{d}{D_{85}}$

+ 5.44。在平坦河床無沈滓輸送狀況時，山杜理克氏處理方法 (Sentürk's approach) 之公式， $\frac{\tau c}{r_s D_{85}}$

= $k + g \theta$ 等。因此要獲取簡單而適用的動床界面層和渠床形狀對水流阻抗之關係式迄今仍無法獲得。

四、結論

1. 渠道糙度之形態僅是影響水流阻抗之部分因素，亦即水流阻抗之因素除渠道糙度之形態外，尚包括流速、水深、坡度，水的密度重力加速度及滲流力等。

2. 評估動床水流阻抗問題相當複雜，事實上，幾乎不可能找到天然沙床渠道的水流狀況，僅一種渠床糙度形態，如沙紋或溪床之沙丘形態者。由於不同渠床形態同時發生對水流阻抗亦異，要完全區別阻抗，需用許多阻力公式計算。

在沖淤渠道裡，估計水流阻抗已有許多方法，但乃有許多不確知的重大因素，以致這些方法不能被接受。無論如何，愛因斯坦和巴巴樂沙氏 (Einstein and Barbarossa's)，西蒙和理查遜氏 (Simons and Richardson's)，阿倫和甘乃迪氏 (Alan and Kennedy's)，以及山杜理克氏 (Sentürk's) 等處理方法，用於分析實驗資料和一些現場資料很有效。如果現場資料屬於特別問題是則這些方法能試用，並應修正其應用。許多公式比較結果顯示，愛因斯坦和山杜理氏處理方法 (Einstein and Sentürk's approaches)，應用於溪流有近似的相同標準偏差；在人工沙床渠道山杜理克氏處理方法和西蒙及理查遜氏處理方法 (Sentürk's approach and Simons and Richardson's approach)，有很好的結果。

3. 動床覆蓋着植物時，要細心分析每一狀況的植物種類對動床之影響，甚為困難。因此周 (Chow) 列出一些雜草渠道和植生渠道的滿寧氏 (Manning's) n 值。近年來荷蘭 Kloassen and Van der Zwaard 研究植物影響在相當的沙糙度值等於 0.07。他們也發表萊茵河 (Rhine River) 洪水平原糙度估計公式。但洪水平原糙度確定數目的一般過程仍然缺乏。近年來西蒙 (Simons) 對密西西比河 (Mississippi River) 研究指出，僅約 3—6% 的洪水流會發生於洪水平原。

4. 天然動床渠道由於河床形態變化較穩定等速流渠道複雜，因此欲尋求渠道糙度形態與水流阻抗之關係更為不易，雖然水流阻抗受渠道糙度形態所影響，但迄今仍無簡單適用的關係式。因為各渠道之輸砂率、河床坡度、寬度、流量、河床質顆粒、植物生長情形、河道蜿蜒狀況、滲透力、水深、流速等皆不相同，欲建立天然動床渠道糙度之形態對水流阻抗之關係式極為困難，有待積極研究，俾供治理河川之依據。

參考文獻

1. Ven Te Chow. Open Channel Hydraulics 1969.
2. Daryl B. Simons and Fuat Sentürk, Sediment Transport Technology 1977.