

# 集水區水流流速的物理觀

◎林業試驗所集水區經營組·盧惠生

## 流速瞬時變化的力學觀念

以力學的觀點而論，集水區的水流在坡面、土壤、紋溝、蝕溝、野溪及河川流動時，若要了解水流的流動狀態、行為及對環境的衝擊，必須考量水流力學因子間的互動。其一為水流的重力作用( $F_w$ )「單位為牛頓，nt」：即水流因重力加速度作用引起的狀態與改變，此力的計算方式：水流的質量( $M$ )「單位為公斤，kg」乘以重力加速度( $g$ )「單位為公尺/秒<sup>2</sup>，m/sec<sup>2</sup>」乘以溪床坡度( $S_0$ )「單位為無因次」。其二為水流的壓力作用( $F_p$ )「單位為牛頓，nt」：即水流因壓力引起的狀態與改變，此力的計算方式：水流單位體積的質量( $\rho$ )「單位為公斤/公尺<sup>3</sup>，kg/m<sup>3</sup>」乘以重力加速度( $g$ )乘以水深( $D$ )「單位為公尺，m」乘以橫斷面積( $A_c$ )「單位為公尺<sup>2</sup>，m<sup>2</sup>」。其三為水流的剪力作用( $F_s$ )「單位為牛頓，nt」：即水流因摩擦力引起的狀態與改變，此力的計算方式：水流單位體積的質量( $\rho$ )乘以重力加速度( $g$ )乘以水深( $D$ )乘以能量坡降( $S_f$ )「單位為無因次」乘以溼潤面積( $A_w$ )「單位為公尺<sup>2</sup>，m<sup>2</sup>」。依牛頓第二定律，此三種力的總和引起的反應是怎麼？即造成單位時間水流動量的改變，亦可稱為慣性力( $F_i$ )「單位為牛頓，nt」，此力的計算方式：水流的質量( $M$ )乘以水流的加速度( $a$ )「單位為公尺/秒<sup>2</sup>，m/sec<sup>2</sup>」。故水流在坡面、土壤、紋溝、蝕溝、野溪及河川中流動時，主要的4個力學成份為重力、壓力、剪力及慣性力，且重力、壓力及剪力3種力的總和作用等於慣性

力，而這4種力計算時分別需使用重力加速度( $g$ )或水流的加速度( $a$ )。

重力加速度( $g$ )是多少？如果不需要很精確的數值，只要學過中學物理的學生都知道，水流在地球上的重力加速度( $g$ )為9.81m/sec<sup>2</sup>。如果需精確計算水流在地球上的重力加速度( $g$ )，也是不難，其與水流所在的星球質量( $M_e$ )「單位為公斤，kg」成正比，與所在的星球地心距離平方( $r^2$ )「單位為公尺<sup>2</sup>，m<sup>2</sup>」成反比，然後再乘以重力常數( $G$ )，重力常數為固定值，等於 $6.67 \times 10^{-11} \text{m}^3/\text{kg}^1 \text{sec}^2$ ，而地球質量為 $5.98 \times 10^{24} \text{kg}$ ，故由此可計算地球不同海拔高度的水流重力加速度，海拔高度愈高，水流重力加速度愈小。

至於水流的加速度( $a$ )是多少？同樣的可由中學物理的知識得知，加速度( $a$ )是速度( $v$ )「單位為公尺/秒，m/sec」的瞬時變化。如果以算數法計算，只要知道前後兩個極短時間的流速，將後面時間的流速減去前面時間的流速，再除以時間間隔。如果以微積分法計算，只要將流速對時間進行微分即可。由於水流的加速度( $a$ )是由前後時間的流速計算而來，流速愈大，且後面的流速比前面流速愈快，水流的加速度( $a$ )愈大。由此觀之，水流的流速，尤其流速瞬時變化，在力學觀點而言，影響水流的流動狀態、行為及對環境的衝擊力核心所在。

## 流速的量測

野溪及河川的平均水流流速比較容易量測，只要使用流速儀，對於水深較淺的野溪

及河川，由水面往下0.6水深處，量測水流流速，由於野溪及河川的寬度大小不一致，只要將河寬平均劃分成幾個相等的寬度，照樣的由水面往下0.6水深處，量測水流流速，計算平均值，即可獲得各河溪斷面平均水流流速。對於水深較深的野溪及河川，由水面往下0.2及0.8水深處，量測水流流速，計算平均值，獲得河溪平均水流流速，再計算各河溪斷面平均水流流速。

由於流速儀旋轉槳片，必須浸泡於水流中，俾便受到水流帶動而旋轉，由水流流速與流速儀槳片的旋轉速度成正比關係，計算水流流速，但流速儀旋轉槳片即使做的極精小，都有最小尺度限制，致使用流速儀量測水流流速時，水深最淺也需3cm。

至於小於3cm水深的蝕溝與野溪水流流速，可用浮標法量測，即利用比重比水輕的材料，如木製浮標、塑膠製浮標、保麗龍製

浮標等，於平直無彎曲的河段，將比水輕的浮標投於河段，浮標漂浮一段距離後，量測所需時間，以漂浮距離除以所需時間，即可獲得水流流速。

然而坡面與紋溝的水流深度經常僅0.1cm，由於水深過淺，即使比重極小的保麗龍製浮標，亦無法量測流速，則採用溶解於水中的鹽類替代浮標，於平直無彎曲的坡面與紋溝，施以無二次公害的溶解鹽類，經過一段距離後，使用高靈敏的電導度儀偵測溶解鹽，量測所需時間，以溶解鹽類行經距離除以所需時間，即可得水流流速。

### 流速的大小

由水動力分析，僅考量水流流動時最重要的重力與摩擦力，導出坡面或溪床坡度( $S_0$ )等於能量坡降( $S_f$ )。當水流在坡面、土壤或紋溝中流動時，由於水流的深度通常極淺，呈薄膜狀流動，因此水流與坡面、土壤或紋溝的摩擦作用極大，致坡面水流流速通常緩慢，在每秒數公分至每秒數十公分間，呈層流狀流動，層流狀的流速採用達西-魏斯巴赫氏的摩擦公式求解，導出水流流速( $v$ )與重力加速度( $g$ )、坡面能量坡降( $S_f$ )及水深 $^2(D^2)$ 成正比，與坡面的粗糙度係數( $K$ )「單位為無因次」及運動黏滯係數( $\nu$ )「單位為公尺<sup>2</sup>/秒， $m^2/sec$ 」成反比。至於水流在蝕溝、野溪及河川流動時，水流的深度通常比坡面水流深很多，流速較快，水流流速在每秒數十公分至每秒數公尺間，呈紊流狀流動，紊流狀的流速採用曼寧氏公式求解，獲悉水流流速( $v$ )與河溪的能量坡降 $^{1/2}(S_f^{1/2})$ 及水深 $^{2/3}(D^{2/3})$ 成正比，與溪床的粗糙係數( $n$ )「單位為秒/公尺 $^{1/3}$ ，

表1 自然河溪的曼寧公式粗糙係數n值

河溪特性及組成材料	粗糙係數n
平地河溪：	
淨潔平整之直段河溪	0.025-0.030
淨潔平整之直段河溪有石礫與雜草	0.030-0.040
淨潔彎曲河溪有深潭及淺灘	0.033-0.045
淨潔彎曲河溪有深潭淺灘及石礫雜草	0.035-0.050
淨潔彎曲河溪有深潭淺灘石礫雜草但水位低	0.040-0.055
淨潔彎曲河溪有深潭淺灘石礫雜草但水位低且石礫多	0.045-0.060
水流緩慢河溪有深潭及雜草	0.050-0.080
河溪有深潭石礫雜草兩旁有灌叢樹木	0.075-0.150
山地河溪：溪床為礫石卵石及少量石塊	0.030-0.050
山地河溪：溪床為卵石及大石塊	0.040-0.070

sec/m<sup>1/3</sup>」成反比。

由於坡面、土壤或紋溝的流速不易量測，故現有坡面、土壤或紋溝的實測流速資料太少，無法系統的反推不同特性的坡面、土壤或紋溝粗糙度係數(K)，所以至今還不能憑公式推算坡面、土壤或紋溝的流速。至於蝕溝、野溪及河川，具有足夠水深，適於流速儀的施用，已獲得較多的野外現場水流流速量測數據，依據曼寧氏的公式反推不同蝕溝、野溪及河川的粗糙係數n(單位為公尺<sup>-1/3</sup>秒，m<sup>-1/3</sup>s)值如表1。由表1之不同溪床的粗糙係數n值來看，最大相差7倍，也就是說單以粗糙度係數的差異，野溪及河川水流流速即相差7倍，何況再加上坡度(S<sub>0</sub>)與水深(D)的差異，可以想像雨季陡坡洪水時與旱季緩坡枯水時，河溪水流流速相差多大。

### 河溪斷面的流速變化

基本上水流與溪床接觸點處，由於受到溪床摩擦阻力的作用，水流是靜止不流動，也就是此點流速為零，水流垂直朝上離開溪床，溪床摩擦阻力漸減，流速隨之增加，流速增加的速度，在水流剛剛離開溪床接觸點時最大，但流速最大的位置，不在離開溪床最遠處的溪流表面，由於溪流表面與空氣接觸，受到空氣摩擦阻力的作用，且空氣摩擦阻力遠小於溪床摩擦阻力，故水流流速最大的位置比溪流表面稍低，因而平均流速大約在溪流表面下方的0.6水深處。

至於溪流橫斷面流速變化，由於溪流兩岸與床底摩擦阻力的影響，如果溪流為平直斷面，最大流速接近平直斷面的中心處，最低流速接近平直斷面的兩岸處。如果溪流

為彎曲斷面，最大流速接近彎曲斷面的最深凹岸處，最低流速接近彎曲斷面凹岸的對面處，同時凹岸表面水流向深處下沉渦狀流動，再上升迴流至對岸，致凹岸向深處淘刷產生的泥砂，亦隨著上升迴流至對岸。

### 流速對溪床泥砂粒徑的影響

自然河川與野溪呈不規則的深、寬與彎曲度，於山谷低處蛇行向下流動，溪床散佈著大小不一的石礫，似乎亂無章法，事實上具有水利經驗的專業人士，經過長期的田野觀查，可獲得溪床粒徑基本法則，即坡度大流速快的上游溪床，停留在溪床的石礫，多屬大粒徑，而較小的中粒徑與小粒徑石礫被沖至下游，坡度小流速慢的上游溪床，停留在溪床的石礫，有大粒徑與中粒徑，只有小粒徑石礫被沖至下游。

然而由輸砂力學(圖1)觀點來探討，亦獲得相同的結果，當河溪坡度為 $\alpha$ 時，河溪水流對泥砂顆粒的作用力，為推移力(F<sub>D</sub>)「單位為牛頓，nt」與上揚力(F<sub>L</sub>)「單位為牛頓，nt」，泥砂顆粒於水中的重量或稱重力(W<sub>S</sub>)「單位為牛頓，nt」，此泥砂顆粒於水中的重力(W<sub>S</sub>)可分解為垂直於溪床坡面的成份(W<sub>S</sub>cosa)，與平行於溪床坡面的成份(W<sub>S</sub>sina)。因而促使泥砂顆粒移動之力，為泥砂顆粒於水中的重量所產生平行於溪床坡面的成份(W<sub>S</sub>sina)，加上水流對泥砂顆粒的推移力(F<sub>D</sub>)。抵抗泥砂顆粒移動之力，為泥砂顆粒於水中的重量所產生垂直於溪床坡面的成份(W<sub>S</sub>cosa)，減掉上揚力(F<sub>L</sub>)。只有促使泥砂顆粒移動之力大於抵抗泥砂顆粒移動之力時，泥砂顆粒才能由上游往下游移動。

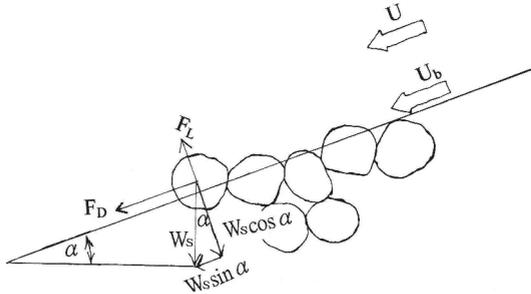


圖1 溪床泥砂顆粒(無黏性且鬆散)的力平衡圖解

推移力( $F_D$ )與上揚力( $F_L$ )如何計算?由流體力學的水動力原理,可知 $F_D = C_D k_1 d_s^2 \frac{\rho u_b^2}{2}$ 與 $F_L = C_L k_2 d_s^2 \frac{\rho u_b^2}{2}$ ,這2個式子中 $C_D$ 「單位為無因次」為推移力係數, $C_L$ 「單位為無因次」為上揚力係數, $k_1$ 「單位為無因次」為泥砂顆粒於垂直推移力 $F_D$ 的平面的形狀係數, $k_2$ 「單位為無因次」為泥砂顆粒於垂直上揚力 $F_L$ 的平面的形狀係數, $d_s$ 「單位為公尺,m」為泥砂顆粒的粒徑, $\rho$ 為水流密度「單位為公斤/公尺<sup>3</sup>,kg/m<sup>3</sup>」, $u_b$ 「單位為公尺/秒,m/sec」為溪床底層的水流流速。至於泥砂顆粒於水中的重力( $W_s$ )如何計算?由泥砂顆粒於水中的密度乘以體積再乘以重力加速度即可獲得, $W_s = k_3(\rho_s - \rho)gd_s^3$ ,這個式子中 $d_s$ 為泥砂顆粒的粒徑, $\rho_s$ 「單位為公斤/公尺<sup>3</sup>,kg/m<sup>3</sup>」為泥砂顆粒的密度, $\rho$ 為水流密度, $g$ 為重力加速度, $k_3$ 「單位為無因次」為泥砂顆粒的體積形狀係數。

將推移力( $F_D$ )與上揚力( $F_L$ ),泥砂顆粒於水中的重力( $W_s$ )合併,經過數學整理,可得泥砂顆粒起動式子, $(u_b^2)_{cr} / (((\rho_s / \rho) - 1)gd_s) = A'$ 。該式中 $A'$ 「單位為無因次」為泥砂係數, $(u_b)_{cr}$ 「單位為公尺/秒,m/sec」為泥砂顆粒啟動時的溪床底部臨界流速, $d_s$ 為泥砂顆粒的粒徑, $\rho_s$ 為泥砂顆粒的密度, $\rho$ 為水流密度, $g$ 為

重力加速度。這個式子明顯的說明當泥砂顆粒的粒徑( $d_s$ )愈大時,需要愈大的促使泥砂顆粒啟動之溪床底部臨界流速( $u_b)_{cr}$ 。從這裡也說明坡度陡流速快的上游溪床,水流可以將較大粒徑的石礫沖至下游,致停留在陡坡溪床的石礫屬於大粒徑石礫,坡度緩流速慢的上游溪床,水流只能將較小粒徑的石礫沖至下游,致停留在緩坡溪床的石礫包含大及中粒徑石礫。

### 流速對溪床生物的影響

水對任何物體的推移力可由 $F_D = C_D A \frac{\rho u^2}{2}$ ,這個式子中 $F_D$ 為推移力, $C_D$ 為推移力係數, $A$ 「單位為公尺<sup>2</sup>,m<sup>2</sup>」為物體垂直推移力 $F_D$ 的投影面積, $\rho$ 為水流密度, $u$ 「單位為公尺/秒,m/sec」為溪流不同深度的水流流速,由此可知物體垂直推移力 $F_D$ 的投影面積愈大,水對物體的推移力愈大,溪流在物體所在水深之流速愈快,水對物體的推移力愈大。流速快的河溪水流,水中生存的植物為了減少水對植物的推移力,呈匍匐狀或倒伏狀,以減低植物在水中高度,使植物接近溪床,由於貼近溪床流速較低,因而減少水的推移力,無脊椎動物形狀呈流線形或扁平狀,以減少垂直推移力 $F_D$ 的投影面積,同時推移力係數 $C_D$ 也較小,因而減水的推移力,為適應較高速的水流環境,有些無脊椎動物具有吸磬附著於水中岩石上,以抵擋水流的沖擊,水中的魚類,體型則呈流線形,使推移力係數 $C_D$ 減小,以適應生存於急流的環境。流速慢的河溪水流,由於水的推移力較小,水中生存的植物可呈直立狀生長,水中魚類體型可成長至較寬廣的程度。⊗