

集水區溪流坡度陡緩的劃分

◎盧惠生／農委會林業試驗所集水區經營系研究員

一、前言

假日期間不少民衆前往國家公園或森林遊樂區旅遊，這些旅遊地區吸引民衆的主要景點，不外乎是令人心曠神怡的山水及自然植被景觀，尤其遇到清澈的溪流，更是感到不由自主的歡愉。此時溪床坡度較為平緩，一些民衆會有漫步溪緣且戲水於溪畔的慾望，反之溪床坡度較為陡峻，民衆可能會抑止親水的行為，轉為驚嘆造物者之神奇。然而溪床坡度平緩與陡峻的標準是什麼？一般大眾多僅憑個人感覺判定，這條溪流較陡或很陡，而那條溪流較平緩，並沒有一個明確的標準來區分，譬如溪床坡度是多少以上時，或者河溪的水流狀態是如何時，這條溪流才算是陡，因而造成見人見智，引起爭執。

溪床坡度平緩與陡峻的標準，如以人類的感覺來判定，顯然失之過於主觀，且每個人的感覺多多少少有些不同。如以科技人員的觀點思考，一個直覺的反應可能是盤算坡度多少以上時，溪流才算是陡，這是一個頗為不錯的思

考起步，問題是到底坡度事多少以上時，溪流才算是陡？成為一個極易引起爭議的話題，你認為坡度5度時很陡，他認為坡度10度時才算是陡，而我可能認為坡度2度時已經很陡，因而顯然又回復到以人的感覺觀點思考模式，似乎是有些行不通。然而不要忘記溪床是水流的流徑，如果以水流的狀態來思考溪床陡緩，可能要比以人的觀點來判定溪床陡緩為佳。

二、測溪水理觀念

以物理學的觀點而論，水在河溪中流動時，倘若要改變水在河溪中流動狀態與行為，必須討論水的力學因子間的互動，一為水的重力作用：即水因重力加速度作用引起的狀態與改變，此力為物體的質量乘以重力加速度乘以溪床坡度。一為水的壓力作用：即水因壓力引起的狀態與改變，此力為水的單位體積的質量乘以重力加速度乘以水深乘以橫斷面積。一為水的剪力作用：即水因摩擦力引起的狀態與改變，此力為水的單位體積的質量乘以重力加速度乘以水深乘以

水力坡度乘以溼潤面積。依牛頓第二定律，此三種力的總和造成單位時間物體動量的改變，亦可稱為慣性力，即質量乘以加速度。水在河溪中流動時，將重力、壓力、剪力及慣性力全部考量進行分析，極為複雜，以現代的數學方法與電腦計算速度而言，仍然感覺不易求解。但是如引用因次分析的技術與水力學的原理探討，溪流中的水流動時，僅考量重力與慣性力，一般而言亦不失真，如果將水在河溪中流動時受到的慣性力與重力間的比率，定為一個數值，在水力學上稱為福祿係數(Froude number)，是沒有因次的。如果福祿係數等於1，也就是水在河溪中流動時，水的慣性力與重力作用相等，這時水流的狀態與行為，稱為臨界狀態，事實上河溪水流的臨界狀態是不穩定的，且不易見到的。比較易見到水流的狀態與行為，是水的慣性力小於重力作用或水的慣性力大於重力作用。當水的慣性力小於重力作用時，福祿係數小於1，這時水流的狀態與行為，稱為亞臨界狀態，重力對溪流之影響比溪流的慣性力大，水流的速度較緩慢且平穩，此時溪流可稱為緩流河川。當水的慣性力大於重力作用時，福祿係數大於1，這時水流的狀態與行為，稱為超臨界狀態，慣性力對溪流之影響比重力對溪流的影响為大，水流的速度較快且湍急，此時溪流可稱急流河川。

三、溪流陡緩之坡度計算

如果採用河西溪的福祿係數大於或

小於1，來判定河溪坡度的陡峻與平緩，即河溪的福祿係數大於1，河溪坡度算是陡峻，河溪的福祿係數小於1，河溪坡度算是平緩，則與河溪流速的湍急及緩慢連上關係，也就是說河溪坡度的陡峻與平緩，由河溪水流的狀態與行為來判定。福祿係數如何計算呢？將慣性力與重力間的關係整理，以數學表示，則福祿係數(F)等於溪流流速(V)除以重力加速度(g)與水深(D)相乘的平方根，如下式(Henderson, 1966);

$$F = V / (gD)^{\frac{1}{2}} \quad (1)$$

式(1)中的F為福祿係數(無因次)，g為重力加速度(9.8m/sec²)，D為水深(m)，可採用刻劃較為精細的標桿測量水深，v為溪流速度(m/sec)，必須使用流速儀測量，由於該儀器屬於專業人士所用的，並非每一個野外現場均有，頗成問題。但如引用歐美及台灣水利工程界廣泛採用以計算河溪流速的公式，即曼寧公式(Manning formula)來計算如下;

$$V = D^{\frac{2}{3}} S^{\frac{1}{2}} / n \quad (2)$$

式(2)中的V為溪流流速(m/sec)，S為坡度(垂直距離/水平距離，無因次)，n為曼寧公式的粗糙係數(m^{1/3} sec)。將式(2)代入式(1)中，經整理，則式(1)可改寫為下式：

$$F = n^{-1} g^{-\frac{1}{2}} D^{\frac{1}{6}} S^{\frac{1}{2}} \quad (3)$$

由式(3)可知，福祿係數(F)係由曼寧公式的粗糙係數(n)、重力加速度(g)、水深(D)及坡度(S)來計算。由於一般大眾直

覺概念是希望知道多少坡度為何溪陡峻與平緩的分界線，因而將上式的福祿係數(F)設為1，經整則式(3)可改寫為下式；

$$S=n^2 \cdot gD^{-\frac{2}{3}} \quad (4)$$

由式(4)可知，此時河溪陡峻與平緩的坡度(S)劃分標準，可由粗糙係數(n)、重力加速度(g)及水深(D)計算。重力加速度(g)為已知即9.8m/sec²，粗糙係數(n)由河渠水力學的粗糙係數表查出，如表1(Chow,1959)，水深(D)則可用標桿或垂繩測量得到。

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
平池河溪：	
淨潔平整之直段河溪	0.025-0.030
淨潔平整之直段河溪有石灘與雜草	0.030-0.040
潔淨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灘雜草	0.035-0.050
淨潔彎曲河溪有深潭淺灘石灘雜草但水位低	0.040-0.055
淨潔彎曲河溪有深潭淺灘石灘雜草但水位低且石灘多	0.045-0.060
水流緩慢河溪有深潭及雜草	0.050-0.080
河溪有深潭石灘雜草兩旁有濃密樹木	0.075-0.150
山地河溪：	
溪床無樹木，溪岸較陡峻，溪岸兩旁樹木僅限於高水位時會被淹沒	
溪床為礫石卵石及少量石塊	0.030-0.050
溪床為礫石及大石塊	0.040-0.070

台灣坡度河溪多為曲流，河床卵石甚多，且溪畔散佈雜草灌叢，粗糙係數(n)如選擇為0.05，溪流水深(D)：以不下雨季節時低水位估計為平均水深0.5m；平水位估計為平均水深1-1.5m，如將以上數

字代入 $S=n^2gD^{-1/3}$ ，如表2。

表2、河溪不同水位的坡度劃分(粗糙係數n為0.05)

水深(公尺)	比降(%)	坡度(度數)
0.5	3.09	1.8
1	2.45	1.4
1.5	2.14	1.2

由表2可知大約河溪坡度1.5度左右時為坡地河溪陡峻與平緩的分界線，然以台灣的自然環境而言，1.5度的坡度為坡地河溪陡峻與平緩的分界線，是否合理？由台灣地區60條較大的河溪平均坡度分佈，有42條河溪坡度小於2.5%，亦即坡度大約小於1.5度，也就是70%的河溪坡度屬於陡峻，由於河溪坡度陡，可稱急流河溪。所以一般自然科學如水土保持、水利及森林有關報告與書刊，論及台灣地區河溪特性，多謂台灣地區河溪陡峻或稱河床比降大。然而1.5度的坡度是否為台灣坡地河溪陡峻與平緩的絕對分界線？我們由式4之 $S=n^2gD^{-1/3}$ 可知，如果當地的溪床環境特性變化時，也就是粗糙係數n值不是我們假設的0.05時，當地河溪陡峻與平緩的分界坡度也就改變，這是非常重要的且必須的認知。再者，雖然台灣60條較大的河溪平均坡度分佈，有70%的河溪坡度屬於陡峻，但河溪的特性，每條河溪的坡度並不是保持固定的，愈往上游河溪愈陡，愈往下游河溪愈緩，因而台灣上游河溪屬於陡峻河溪的百分率，應該超過以河溪平均坡度分佈而論，故當我們論及台灣上游

河溪坡度陡緩的問題時，述說台灣上游河溪陡緩應該算是合理。

至此，以河溪水流的狀態而論，大約台灣坡地溪流坡度在1.5度以上時，此溪流可算是溪流陡緩，溪流坡度在1.5度以下時，此溪流可以算是溪流平緩。但是一般民眾可能會再提出問題，我不是地形、水文、水利、水土保持或森林等專家，我無法憑肉眼及經驗來判斷這條溪流坡度是否為1.5度以上或以下，我也沒有坡度計來量測溪流坡度，我還是無法判定溪流陡緩與平緩。還好，在河溪水理學上，溪流重力波的坡速(C)計算，有一個簡化的計算如下式：

$$C=(gD)^{\frac{1}{2}} \quad (5)$$

式(5)中的g為重力加速度(9.8m/sec²)，D為水深(m)，重力波的波速(m/sec)。

這個式子代入式(1)計算福祿係數的公式中，則可改寫為下式，

$$F=V/C \quad (6)$$

式(6)乃說明福祿係數(F)為河溪流速(V)與重力波的波速(C)的比值。當福祿係數小於1，重力波波速大於水流流速。重力波是怎麼樣的東西呢？如果我們投入一粒石子於溪流中，將會產生一個孤立的重力波，這個重力波的形狀就像投入一粒石子於不流動的池塘中，即會產生一圈一圈的水波，向四周不停的擴散而去。由於溪流的水是由上游向下游流動

的，當重力波的波速大於水的流速時，重力波可以向上游傳播。反之，福祿係數大於1，重力波波速小於水流流速，重力波無法向上游傳播。因而當我們走到溪邊，也可以採用投石子於水中，觀看水波是否向上游傳播，如果向上游傳播，溪流為緩坡，如果不向上游傳播，溪流為陡坡。

四、結語

河溪坡度的陡緩是一個常用的與詞，但是我們經常憑個人感覺來判定一條溪流是陡緩或平緩，並沒有一個較為明晰的劃分原則，因而本文將現有的溪流水理原理，予以解說，並依福祿係數的計算公式，以台灣坡地河溪特性，大略的估計河溪坡度1.5度時為陡緩或平緩的分界，當然每條河溪陡緩的坡度分界線各不相同，受到河溪水深與粗糙係數之影響而改變。但是我們由此可知，以溪流水理原理定出的河溪陡緩的坡度分界線，明顯的要比山坡地陡緩的坡度分界線為緩。

參考文獻

1. Chow, V.T. ; 1959, Open-channel hydraulics. Mc Graw-Hill Book Co., New York, 680p.
2. Henderson, F.M. 1966, Open channel flow. Macmillan Company ,New York, 522p. ■