

重啓溪流生命力

河相學與溪流治理與復育

文、圖／楊佳寧（通訊作者 | 中興工程顧問股份有限公司水利部組長）
林孟穎（中興工程顧問股份有限公司水利部規劃師）

從約束到共生

山區溪流常讓人覺得變幻莫測，時而乾涸見底，時而澎湃洶湧，甚至挾帶著大量土石衝擊下游。為了控管災害，有時治理單位需替鬧事的溪流穿上「約束衣」，但當災修工程告一段落，人們的生活重獲平靜，縱橫向的水泥構造物卻往往成為眾多山林生命移動的阻礙，使溪流難以在事件後恢復自然律動與生態功能。

這樣的結果絕非治理人員所樂見，但治山防災工作的難處，很大原因是在於工具的不足。正因為山區溪流個性難掌握，學術界的理論發展規律是從下而上。下游平原河川水流和

緩，河床不易變動，泥砂均質性高，只需做好水位控制即完成防災工作。反觀山區溪流的治理，需面對各式各樣的渦流、大小混雜的顆粒、迭蕩起伏的溪床，連流體都可以瞬間從牛頓變成非牛頓……這些水文水理與產砂輸砂機制，是流體力學、泥砂運動力學的前沿課題，使得治理策略難以依循標準模式制定。

河相學是一門描述河川不同尺度的形貌生成與變動機制的學問，源自地形、地質、水文、泥砂運動、棲地生態學等多種跨領域學門。本文總結林業及自然保育署（簡稱林業保育署）「應用河相學於國有林溪流治理與復育」自2021-2025年二期的計畫成果，



嘗試在防災與生態之間，尋找更有韌性與共生可能的治理途徑，恢復溪流生命力。

溪流河相的基本法則

臺灣島的造山運動已持續數百萬年，山體抬升率與剝蝕率之間也達動態平衡，稱為平衡山脈。由於大部分的山體都在經歷風化、崩塌、土壤生成的循環，因此土壤厚度局部變異大，這是崩塌區位難以掌握的主要原因。然而溪流有既定的造型法則，並非無法預測。水流最基本的形態是波動，從而生成階潭（step-pool）及不同形態的砂洲（bars）。安定的溪床具有階梯、石組等特徵。

在谷壁侷限又多塊石的溪流，石頭會在洪水作用下隨機碰撞或卡合，自然淘汰的結果，只有符合力學原理的形態能留存。當石頭與石頭的咬合點連成拱或其他可傳力的形態，且兩端有大石或岸壁，便可形成安定的階梯。階梯處的跌水會形成小型潭區，一系列的階梯與潭區便構成階潭地形。

如果來砂多使溪谷淤高，大石的粒徑也不及河寬的 1/10，此時石頭無法卡成階梯，但會發展出砂洲。溪谷埋積越高，溪床越寬，砂洲也從單列發展成雙列、多列。這樣的溪床也有一些形態特徵顯示河床質經過洪水作用，已相對安定。如個別石頭會先朝上游傾斜「叩首」，再堆疊成形狀類

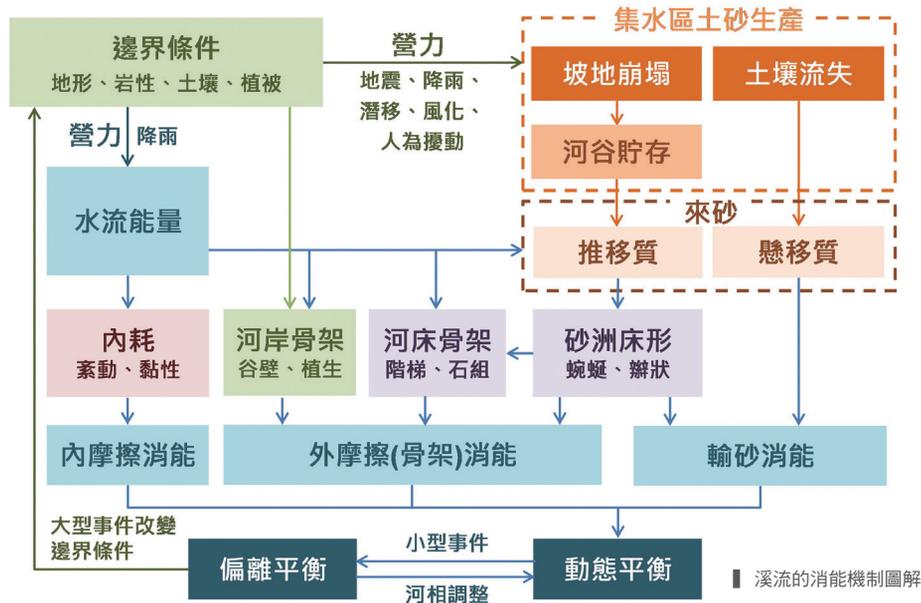
似覆瓦的群組。這些石組若有一半以上的量體深埋於河床，代表溪床相當穩定。

溪流的消能機制：最小內耗率原理

溪流的能量來自本身的流量與坡度。流量取決於降雨，坡度則是地表長期演化的結果，因此溪流能量是與生俱來的。這能量必須透過 3 種方式來消耗：1. 搬運土砂作功（輸砂消能）；2. 與水流以外的東西碰撞（外摩擦消能）；3. 水流內部透過黏性、紊動而變成熱能消散（內摩擦消能）。近年基於熱力學的河相研究已經證實，溪流的能量法則是讓內摩擦的損耗率朝向最小，可稱為「最小內耗率原理」。基於這個原理，山區溪流的消能機制可用圖解說明。

在給定的地形地質與降雨條件下，溪流會盡可能地搬運土砂，但碰到搬不走的東西，像岩壁、岸壁植生、卡好的階梯石組等（統稱為「骨架」），就變成外摩擦或骨架消能。輸砂的同時，河床順應波動法則發育成蜿蜒或辮狀的形態，此過程兼有輸砂與骨架消能，有時稱為「擺盪消能」。剩餘的能量才以黏性、紊動的方式耗散。當內摩擦能耗率達到最小，即達到所謂的動態平衡。

最小內耗率原理雖然簡單，但已包含了山區溪流完整的河相演變機制。例如大崩塌或土石流事件後，河道淤



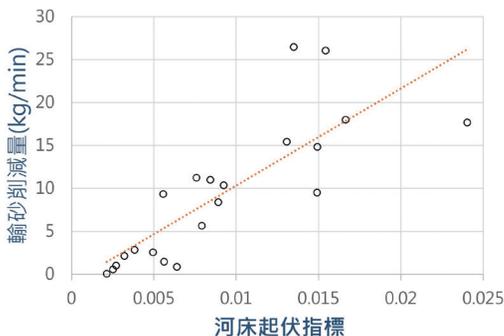
高，之後很長一段時間，來砂都不虞匱乏，因此輸砂率維持在最大值（稱為飽和輸砂量）。此時為達最小內耗率，河流會發育出多列砂洲以減少流速，也會透過蜿蜒擺盪來增加外摩擦，因而形成埋積河道常見的瓣狀流路。

若水流有夠長時間消化埋積，溪床會在流路較窄處卡出階梯或石組，使床面呈波狀起伏。床面起伏越劇烈，消能效果越好。水槽實驗證實，在條

件允許形成階梯之處，階梯骨架是終極的消能機制，溪流最終是透過外摩擦最大化、輸砂最小化來達成最小內耗率。骨架形成後，在清水流冲刷下，最終底床的侵蝕量均接近零，說明階梯骨架確實為天然固床工。

山區溪流的河相分類

我們所見的溪流樣貌，是水流能量與消能機制交互作用的結果。規劃工作通常始於集水區尺度，這個階段雖然還沒去現地調查，也沒做水文水理分析，但可以先利用簡單的河相指標，初步掌握溪流的個性。若說山區溪流變化多，或許對治理而言最需要的分類方法，就是評估溪流易變的程度。計畫成果的一部分，是整理全島尺度的圖資數據，製作出 4 個可用的河相指標。



■ 水槽實驗中床形發育程度與輸砂削減量的關係

- 逕流功率指標 ω_n ：由水土保持常用的降雨沖蝕指數 R、坡降 S 組合而成，代表水流能量。
- 坡地崩塌指標 L_n ：山崩分布圖的崩塌面積可轉換成平均崩塌深度，代表產砂量。
- 塊石生產指標 B_n ：以山崩類型中的落石占比代表粗料的生產。
- 細料生產指標 F_n ：土壤沖蝕指數 K 與降雨沖蝕指數 R、坡降 S 可組成土壤流失量，代表細料的生產。

這些指標轉化為 0-10 的數值後，可以直觀地比較與操作。逕流功率指標 ω_n 與坡地崩塌指標 L_n 構成水砂平衡判定：當 $\omega_n - L_n > 2$ ，表示具沖刷趨勢；當 $L_n - \omega_n > 2$ ，具埋積趨勢；當 $|\omega_n - L_n| \leq 2$ ，具有時沖時淤的變換趨勢。塊石生產指標 B_n 與細料生產指標 F_n 構成粒徑分布判定：當 $B_n - F_n > 2$ ，表示塊石相對較多，當 $F_n - B_n > 2$ ，表示細料多而塊石少；當 $|B_n - F_n| \leq 2$ ，代表粗細料的量相當。

這樣的分類法則如何使用呢？首先，溪流河相可能具有區域性的共通點。若將水文與地形、地質條件近似的相鄰流域整併為「流域區」，並只看 500 公尺以上山區，可以歸納各區的平均類型。右圖中 10 個流域區的山區平均值，僅臺北盆地為沖刷趨勢，竹苗丘陵及臺中盆地周邊平均為粗料埋積型，再往南的嘉南平原山區地質更軟弱，細料比例增加，為粗細埋積型。屏東平原山區屬細料變換型，恆春半島及蘭陽平

原山區平均為粗細變換型。變換型溪流沒有長期的沖刷或淤積趨勢，且細料越多越不易卡合成骨架，使此類溪流的沖淤變化劇烈。東部的花東縱谷、海岸山脈、蘇花海岸平均為粗料變換型，進入河道的崩塌物質容易卡合成骨架，沖淤變化相對緩和。

到集水區尺度，可發現同一流域區內，溪流個性也可能截然不同。水砂平衡（沖刷、埋積、變換）以及粒徑分布（粗料、細料、粗細兼具）的組合，理論上可歸納出 9 種河相分類，但檢視了 25 個代表性集水區，計算指標，發現唯獨沒有細料沖刷型的溪流。這也合理，因為如果集水區的細料多而塊石少，表示它不可能維持險峻的地勢，產砂量也一定大，所以不會是沖刷型。

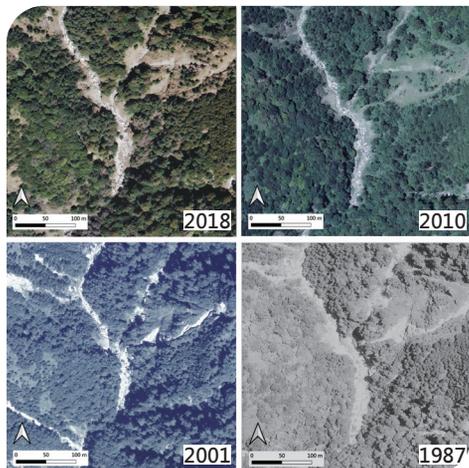
由於 4 個河相指標本身具統計意義，因此可以描述河相變化。它們所



流域區山區與代表性集水區的溪流河相分類

構成的 8 種類型，填補了過往山區溪流缺乏描述與分類的問題。使用者必須認知到，分類結果相當程度取決於落石量、崩塌量、面積體積公式、K 值與 R 值這些原始資料的精度。然而目前基於這些圖資產出的消能指標，已經可與經驗觀察比對校核。觀察不同年代的航照影像，會發現這些分類結果相當準確也直觀。

例如臺中盆地周邊山區的萬大北溪為粗料埋積型，即便已經接近源流，因坡地的崩塌土砂供應充足，溪床處於長期埋積的狀態，河道中可見塊石堆積，但不一定有夠窄的溪床來卡成骨架。嘉南平原山區的草蘭溪為細料埋積型，集水區多頁岩或泥岩，河道粗細顆粒混雜，塊石並沒有形成骨架。雖然也是埋積型，但溪床寬度變化大，在莫拉克颱風後的 2010 年，溪寬可達 200 公尺，約是 1993 年的 10 倍。

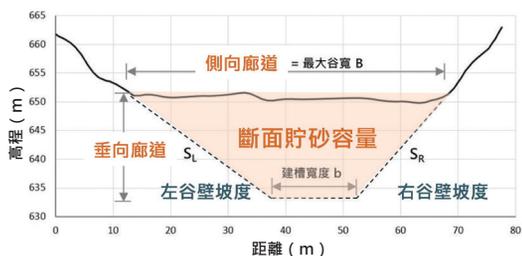


■ 臺中盆地周邊的萬大北溪歷年正射影像（粗料埋積型）

從水系指認沖淤潛勢河段

雖然溪流朝向動態平衡演化，但局部河段會因為地形地質的差異及崩塌事件，而有不同的沖淤潛勢。為了瞭解沖淤潛勢的沿程變化，本計畫發展出「溪流指標」，也就是在河道內評估水流能量與土砂量的方法。在這裡，水流能量用極端事件（50 年重現期洪水）的總溪流功率 Ω 來表達，為水的比重量、流量與河床坡度之乘積。河道土砂量則從航照影像與數值高程模型（DEM），求取斷面貯砂容量 V_s 。從歷年埋積最嚴重的影像及骨架最顯著的影像，可得到 B 與 b，從 DEM 則可量得兩岸谷壁的坡度。梯形所對應的空間，也描述了該斷面在側向與垂向可能的變動範圍，稱為「沖淤廊道」。

Ω 與 V_s 每 100 公尺計算一次，並標示在同一張圖上，便可判斷一條溪流沿途的沖淤潛勢。但上述指標的數值需先經過匹配，才容易直觀判斷，我們假設河道的「平衡庫容」是以 Q50 清水流沖刷 2-10 倍集流時間，能帶走的土砂量。用此匹配原則所產出的 2

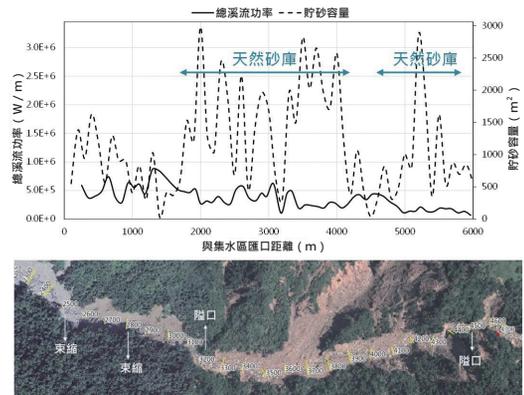


■ 斷面貯砂容量 (V_s) 的定義

指標沿程變化圖稱為 Ω -Vs 圖，其判釋方法與例子如下表與圖。

選擇代表性集水區的主流河段來計算溪流指標，並從航照影像對照橫向構造物所在位置，可以發現大型構造物容易使 Ω 出現劇烈振盪，下游為高點，上游為低點，代表溪流集中於構造物下方消能。Vs 則容易在構造物上游出現局部高點，不過當構造物淘空破損，振盪就減緩了。

觀察影像的同時，也發現某些特定的地質、地形條件，會構成「天然砂庫」。例如山區常見的砂頁岩互層，使岩壁或溪床岩石每隔一段距離即出露，形成隘口；又例如掘鑿曲流急彎的地形條件，使得來砂自然落淤。這些砂庫溪段常呈現寬窄互現的囚砂口袋，其本身即具有讓土砂平緩釋放的調節功能。



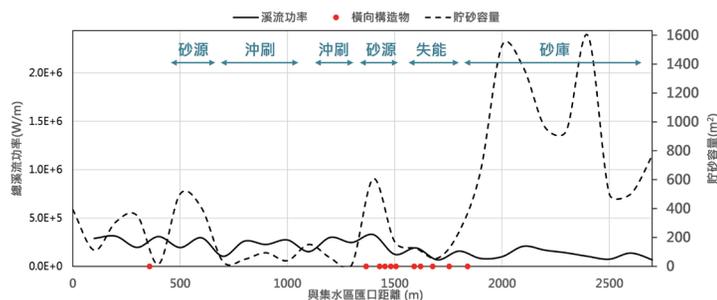
塔乃庫溪砂、頁岩差異侵蝕形成系列貯砂口袋。

分析河段風險與健康

進入河段尺度，為能掌握特定規模的洪水及土砂事件的可能影響，就需要水文分析與水理模擬。過往在只考量防災的前提下，面臨自然因素種種的不確定，水文水理分析趨於保守。舉例而言，常用的「合理化公式」容

從沿程溪流功率與沿程貯砂容量判斷河段特性

| 消能機制 | 水流能量 | | 溪流功率 Ω | |
|---------|------|---|---------------|-----|
| | 低 | 高 | 低 | 高 |
| 貯砂容量 Vs | 低 | 高 | 失能段 | 沖刷段 |
| | 高 | 低 | 砂庫區 | 砂源區 |



土場溪 Ω -Vs 圖及指認的潛在沖淤河段

易高估流量；常用的曼寧 n 值會高估流速；而常見輸砂公式並未考量溪流骨架安定溪床的效果，以致高估輸砂量。最後的結果是，工程被過度設計，溪流背離自然平衡的樣貌。

估算代表流量

為滿足國有林溪流治理與復育的需求，建議選擇至少 3 種代表流量：50 年重現期洪峰時流量 (Q50)、2 年重現期洪峰時流量 (Q2)、90% 超越機率日流量 (Q90%)。

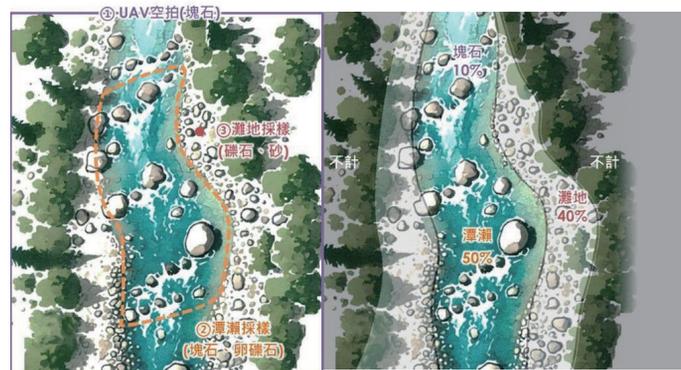
- Q50：這是規範要求的設計流量，可選擇鄰近有 40 年以上觀測紀錄的流量站或雨量站，直接從紀錄中取最大值，再用面積比法轉換。如果流量站紀錄年分不夠，選擇有 40 年以上觀測紀錄的雨量站，取最大降雨，如果這個時間有對應的流量紀錄則取用，否則要用比例法轉換（假設流量與雨量成正比）。
- Q2：即所謂的建槽流量或造床流量，溪床表面大部分的河床質都能啟動，因此 Q2 左右了溪流平時的樣貌及棲地環境。日本一級河川的統計結果顯示，如果有 10 年以上的流量紀錄，取每年最大時流量加以平均，即相當接近頻率分析所得之 Q2。經實際操作比較，可以發現這個簡便的原則亦適用於臺灣河川。
- Q90%：這是低於旱季平均值的流量，此時水域生物可能需要移動來避旱。經過實際測試，如果有 10 年

以上的流量紀錄，可以使用年最小日流量的平均值，來概估 Q90%。

河床質調查

河床質的顆粒大小及組成比例，對判釋溪床變動特性十分重要，也是二維動床模擬的基本輸入資料，需透過現地調查取得。山區溪流的河床質粒徑範圍大，調查方法也不同於中下游，可視情況選擇以下的調查方法，再給予不同權重，得到合成的粒徑分布。

- UAV 空拍：溪床若有許多露出水面的大塊石，不易直接在溪床量測，此時可用空拍機拍攝正射影像，影像範圍需包括數個潭瀨區間，再用影像分析軟體判釋各塊石之中軸粒徑，得到粒徑分布。可設定 250 公釐以上之塊石為分析對象，並排除不可動的崩積岩塊。
- 潭瀨採樣：主要調查水面下塊石及卵礫石的粒徑分布，露出水面但未達空拍判釋閾值的石頭也要採樣。調查範圍需包含至少一個潭



■ 河床質調查方法（左）及分析權重（右）示意圖

瀨區間，使用隨機撿拾法 (pebble count)，採取材料 100 顆以上，採樣點盡可能均布於整個調查區間。以固定步距每移動一步，即用手指特定部位接觸床底（避免視覺選擇），撿拾或直接量測觸碰的顆粒，量取中軸粒徑。直徑 1 公尺以上的大塊石排除不量，2 公釐以下材料不量測但紀錄。

- 灘地採樣：一般分為「表面法」與「體積法」。灘地表層經水流作用帶走細顆粒後，會形成粗顆粒的護甲層。如果目的是模擬 Q2 規模的小洪水，可假設僅啟動護甲層，調查表面粒徑分布即可。但更大的洪水可能破壞護甲層，捲起整個河床，此時需用體積法採樣。

1. 表面法：選擇高於平時水面、無植生的裸灘為採樣點，放置標尺照相，再用粒徑分析軟體自動判釋顆粒。也可使用潭瀨採樣所用的隨機撿拾法。
2. 體積法：在表面法的相同採樣點，移除護甲層的大顆粒後，挖小型坑取樣，將樣本攜回曬乾後再過篩分析。

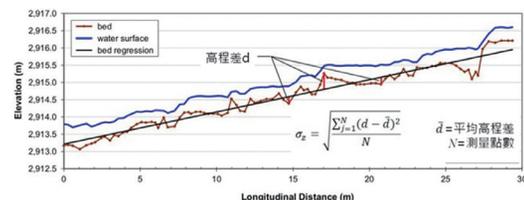
曼寧 n 值的估算

外摩擦消能常透過曼寧粗糙係數 n 來量化。一般常用水深與代表粒徑（如 D_{50} 、 D_{84} ）的比值來表達曼寧 n 值，但應用於山區溪流時，成效常不理想。美國農業部於 2014 年出版了一本曼寧

n 值參考圖冊，收錄美國華盛頓州、科羅拉多州、智利、阿根廷、紐西蘭、義大利等地的山區溪流野外調查的實測 n 值，可比對照片判斷 n 值。這些資料的河床坡降界於 0.02-0.2，適用於臺灣的山區溪流。此外，圖冊中也包含一個相當實用的公式：

$$n = 0.41 \left(\frac{h_m}{\sigma_z} \right)^{-0.69}$$

式中 h_m 為河段平均水深； σ_z 為河床測量高程與縱剖面線性回歸值之間的標準差，代表床形發育的程度，稱為河床起伏指標。調查成果指出，垂直向發育出床形的山區河道，曼寧 n 值普遍大於 0.1，而且階梯床形發育越成熟， n 值越大，表示消能效果越好，有瀑階的溪流 n 值甚至高達 0.5。相比之下，經典教科書（Chow 1959 年的明渠水力學）所列的山區溪流曼寧 n 值僅 0.03-0.07，大幅低估了階潭床形的消能效果。



資料來源：https://www.fs.usda.gov/biology/nsaec/assets/yechumetal_2014_gtr-323.pdf

河床起伏指標的定義

山區溪流的動床模擬

山區溪流可用的輸砂公式不多。以常用的免費水理模擬軟體 HEC-RAS

為例，收錄的輸砂公式中，Wu et al. (2000) 及 Wilcock & Crowe (2003) 的推移質公式都考慮大小粒徑互相堆疊覆蓋的「遮蔽效應」，比較適合山區溪流。後者除考慮遮蔽，也強調含砂量對整體輸砂的影響，適合岩質較弱、含砂量偏高的河川。當整個河床的含砂量 >10%，卵礫石不容易接觸卡合，輸砂量會大幅上升。

這 2 個公式雖沒有考慮床形發育，但都包含水流阻力係數。若使用河床起伏指標正確估算 n 值，並用斷面貯砂容量 (V_s) 的定義推估骨架所在高程，將卡好的階梯骨架視為不可動，那麼過往輸砂公式大幅高估卵礫石輸砂量的問題，似乎就能得到解決。

有了上述的調查方法與計算工具，才能進一步分析河段尺度的河相。本計畫選擇的河段尺度河相指標如下表所示。

各類型溪流治理原則與適用工法

從河相法則，可以大致推出不同類型溪流的治理原則。要兼顧防災與

生物多樣性，工法是重中之重。如果不使用混凝土，還有哪些選擇呢？其實世界各地在前混凝土時代，約 20 世紀之前，就發展出不少因地制宜的傳統工法，1980 年代環境意識高漲後，德國、瑞士、美國、日本等地，也各自研發出許多順應河相的護岸及防砂工法，在本文通稱為近自然工法。

沖刷型及變換型的沖刷期，重點是維護或重建溪流骨架，適用工法依據不同溪流環境（坡度、寬度）與用途來設置。

埋積型及變換型的埋積期，治理重點為防止土石流災害，以及事件後讓溪流恢復常態。土砂事件後的搶險重點是疏濬及導正流心，接著必須評估現況溪床在側向廊道、垂向廊道的位置，以掌握保全對象的風險。建議的工法有透過型壩、木工沉床、聖牛（橋樑）、竹蛇籠等等。

不論是埋積型或變換型，多細料溪流的變化非常劇烈，因此必須同時納入沖刷型及埋積型的原則。除此之外，沖刷期的重點是促淤及邊坡植生保護，以避免土砂流失，建議之工法

河段尺度指標分析架構

| 代表流量 | 水流能量 | 消能機制 |
|-------------|-------------------------------------|---------------------------------|
| 設計流量 (Q50) | 洪峰水深、洪峰流速、 洪峰單位溪流功率、 寬深比 (Q2) | 貯砂率、河床起伏指標 飽和輸砂量、卡合比 (Q2) |
| 建槽流量 (Q2) | | |
| 早期流量 (Q90%) | 其他健康河相指標 | |
| | 水域縱向連續度、潭區尺寸、瀨區間距、自然河岸長度比 | |

不同河相溪流之建議治理原則

| 溪流河相 | 溪流治理與復育原則 |
|----------------------------|--|
| 沖刷型 粗料沖刷 粗細沖刷 | <ol style="list-style-type: none"> 1. 維持溪流天然骨架。 2. 避免施作連續、光滑的縱向構造物。 3. 避免施作混凝土材質的橫向構造物。 4. 避免疏濬及土砂採取。 5. 若溪流天然骨架已破壞，可視需要以自然材料建構丁壩、固床工等骨架。 |
| 變換型 粗料變換 粗細變換 | <ol style="list-style-type: none"> 1. 辦理工程前，需先評估側向、垂向廊道範圍；若溪床骨架出露，表示現況已不再有疏濬需求。 2. 構造物基礎需深於垂向廊道下限。若施做橋梁，橋面須高於垂向廊道上限。 3. 施做通透且可調整或自然分解的防砂設施，只攔截大事件的土砂，事件後引導土砂無害下移。 |
| 埋積型 粗料埋積 粗細埋積 | <ol style="list-style-type: none"> 4. 善用地質或地形條件形成的天然砂庫。 5. 視需要在大規模埋積後疏濬河道，整理流路，形成流心。 6. 避免施作連續、光滑的縱向構造物及混凝土材質的橫向構造物。 7. 於流路迫近岸邊保全對象之處，可施做粗糙且可透水的護岸或丁壩。 |
| 多細料 細料變換 細料埋積 | 除採變換型與埋積型的管理原則外，另建議： <ol style="list-style-type: none"> 1. 維護溪床、溪岸自然骨架（包括植生）。 2. 採柔性護坡植生工法。 3. 避免不透水或低糙度的表面。 4. 採柔性防砂工程，事件後土砂無害下移。 5. 泥質環境避免使用混凝土，以免快速淘空。 |

如打樁編柵結合稻草蓆、麻網/椰纖網護坡、透過型丁壩與植生護岸、柔性防砂工程（如殘材壩）。

掌握河相，順應自然

國有林位於流域的最上游，直接面對水砂營力，溪流的治理方式對下游的來水來砂有深遠的影響。目前常見的作法，是在淤積階段興建橫向構造物攔阻上游土砂，或建護岸阻擋邊坡土砂；在沖刷階段則會碰到既有構造物破損，需要修復。掌握河段的沖淤變化並採取因時、因地制宜的策略，

發展及應用可調整、可融入環境的工法，是目前溪流治理的重要課題。

在此前提下，我們的計畫任務是發展實用的河相指標，提供可操作的分類方法，希望幫助治理人員掌握各地溪流的個性。河相學近數十年來的研究進展，已經在理論、規劃工具等各方面，為山區溪流的治理與復育工作提供了逐漸完整的指引。與生態共融的近自然工法數十年來也在世界各地持續發展，並逐漸累積實務案例。相信隨著本土案例的增加，臺灣的溪流治理可以累積更多與自然共好的經驗，進而調整規範，逐步朝向自然解方前進。♻️