

河川防洪工程復建設計要點

梁文盛 博士

中華民國九十六年四月二十七日

內容大綱

- 壹、防洪工程破壞原因探討
- 貳、復建工程設計應注意事項
- 參、生態工程設計流程
- 肆、生態工程設計要點
- 伍、生態工程設計步驟
- 陸、參考公式及文獻
- 柒、案例演算

壹、防洪工程破壞原因探討

壹、防洪工程破壞原因探討

一、河岸破壞原因



未設護岸



凹岸沖刷



橫向沖刷

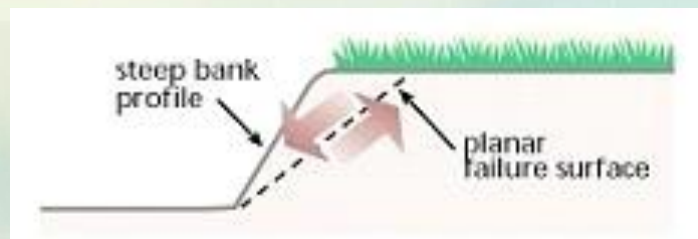


基礎淘刷

壹、防洪工程破壞原因探討

一、河岸破壞原因

■ 裸露邊坡



A、平面破壞

A1：陡坡之均勻黏性土層

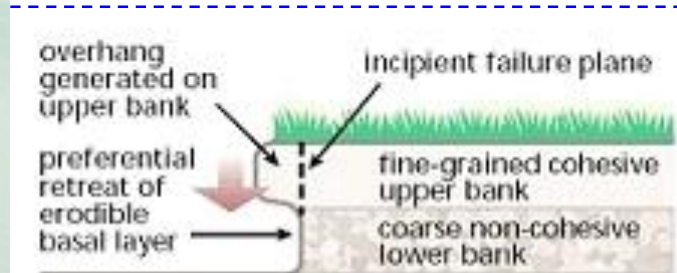
A2：發生張力裂縫，造成平面滑動



B、弧形破壞

B1：緩坡之均勻黏性土層

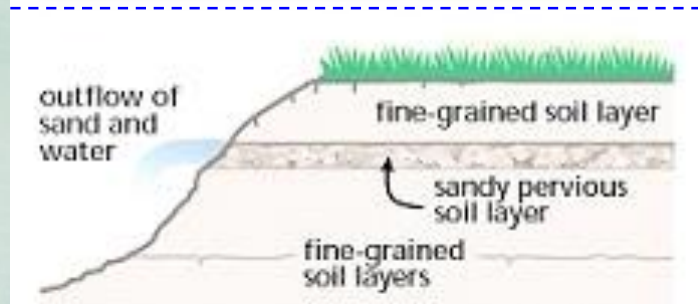
B2：發生張力裂縫，造成弧形滑動



C、上層土塊破壞

C1：底層非黏性土層遭淘刷

C2：上層土層失去支撐造成崩落



D、土層流失破壞

D1：砂質土層被水帶出

D2：砂質土層上層崩落

D3：上層土壤以塊狀傾倒或滑落

壹、防洪工程破壞原因探討

一、河岸破壞原因

■ 植生坡面

● 植物根系抗力不足

- ◆ 根系未深入至破壞面以下

- ◆ 根系無法抵抗水流曳引力而遭拔除

● 坡趾淘刷降低坡面穩定性

- ◆ 常浸水之坡趾植生不易存活

- ◆ 遭水流淘刷之坡趾坡面穩定性降低，產生坡面滑動或崩落

● 河岸坡面覆土不足或坡度太陡

- ◆ 根系無法深入岩層或混凝土鋪面，造成植生坡面不穩定

- ◆ 土壤摩擦角約 33° ，坡面植生應較1 (V) : 1.5 (H) 為緩

壹、防洪工程破壞原因探討

一、河岸破壞原因

■ 鋪石坡面

● 土壓與水壓作用力

- ◆ 常發生於較1 (V) : 1.5 (H) 為陡之坡面
- ◆ 主要破壞型態為滑動與傾倒
- ◆ 不透水鋪石坡面（排水設施不良），作用力為背土壓及飽和水壓
- ◆ 透水鋪石坡面僅承受背土壓，但需有濾層防止細顆粒土壤由間隙流出

● 水流作用力

- ◆ 拖曳：鋪石粒徑無法抵抗水流拖曳力
- ◆ 滑動：鋪石受水流沖擊而滑動或滾動
- ◆ 捲起：鋪石受水流上揚力與紊流而捲起
- ◆ 坡趾保護深度不足

壹、防洪工程破壞原因探討

一、河岸破壞原因

■ 籠工坡面

- 籠工坡面破壞原因與鋪石坡面相同，即受土壓、水壓及水流作用力之影響
- 籠工材料之壽命
- 籠工材料受石材撞擊
- 土籠工之壓密與夯實
- 基礎承载力不足導致不均勻沉陷



壹、防洪工程破壞原因探討

二、河床保護工破壞原因

■ 丁壩工

- 壩頭處河床刷深，壩頭下沉而致壩身斷裂流失
- 籠工丁壩可能因河床質碰撞而損毀
- 壩身撓度不夠，無法承受局部沉陷而破壞
- 壩根與河岸銜接介面破壞，致水流集中加速破壞



壹、防洪工程破壞原因探討

二、河床保護工破壞原因

■ 固床工

- 固床工下游基礎因水流淘刷，造成傾斜或抵抗力不足而遭流失
- 與河岸銜接面因水流沖刷而破壞
- 基礎承载力不足或本身撓度不夠，造成不均勻沉陷
- 混凝土塊間隙填料遭水流吸出造成混凝土塊傾斜而後破壞



貳、復建工程設計應注意事項

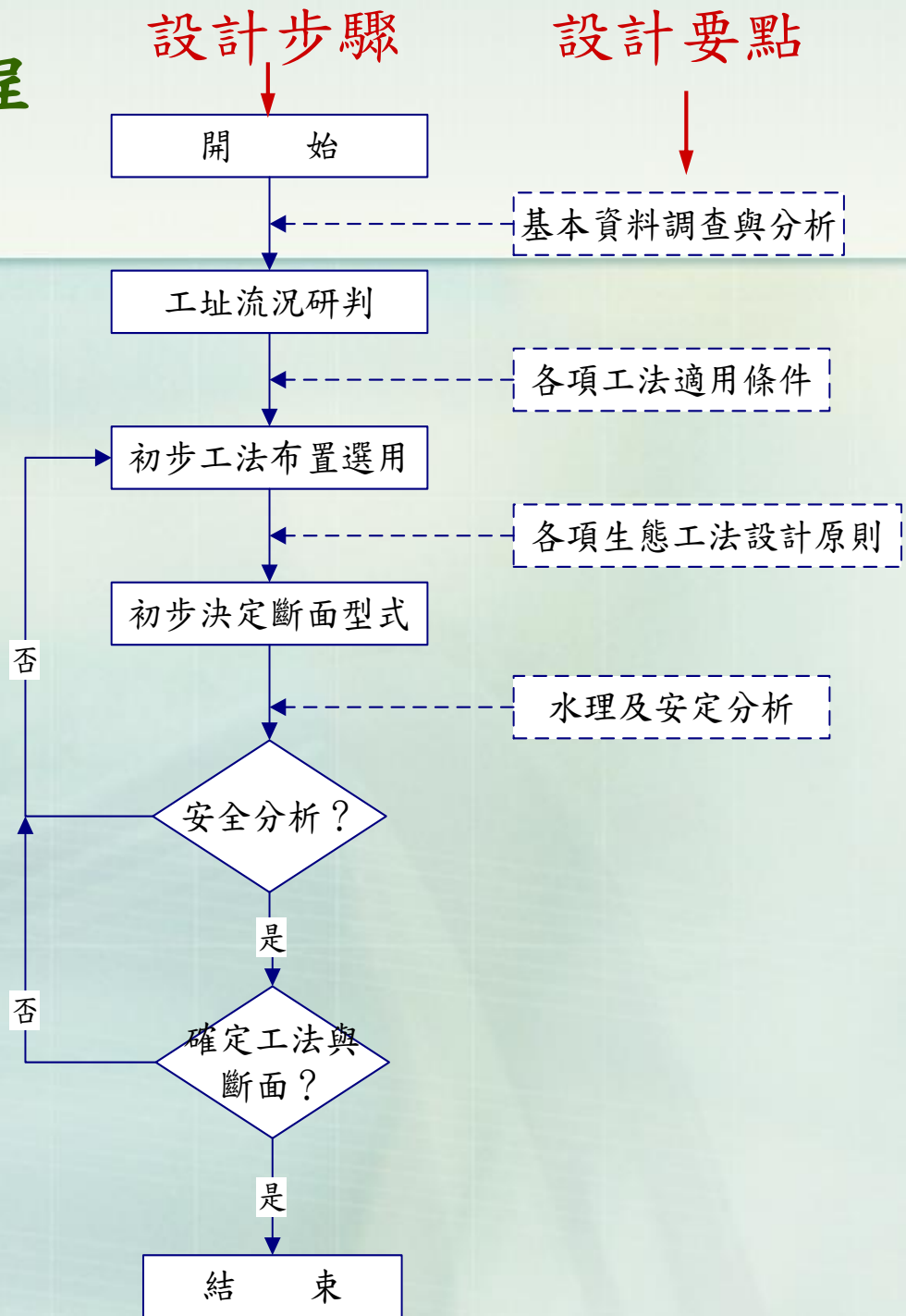
貳、復建工程設計應注意事項

- 一、災害前河道狀況，含河道縱橫斷面
- 二、災害發生原因及結構物損壞程度
- 三、災害時洪峰流量、洪水延時
- 四、災害程度研判：整體性破壞或局部性破壞
- 五、設計水理計算書：含設計流量、平均流速、水面線等
- 六、構造物安定分析及局部沖刷分析
- 七、儘量採用生態工程工法技術

參、生態工程設計流程

參、生態工程設計流程

● 設計流程圖



肆、生態工程設計要點

肆、生態工程設計要點

一、生態工程調查資料

調查項目	調查內容	可能資料來源
河道基本特性調查	<ol style="list-style-type: none"> 1.河段平均流速 2.歷年河床的變動 3.河床質分佈及代表粒徑(d_{50}) 4.河岸的土壤性質 5.河道平面型態(如蜿蜒度) 6.河道的變遷 	<ol style="list-style-type: none"> 1.河川治理規劃報告 2.區域排水規劃報告 3.歷年航拍圖
安定計算條件蒐集	<ol style="list-style-type: none"> 1.計畫洪水量、建槽流量 2.計畫洪水位與坡降 3.河道斷面 4.計畫河床高 5.構造物處之地質條件 6.既有構造物的計算條件 7.地下水位 	<ol style="list-style-type: none"> 1.河川治理規劃報告 2.河川低水治理規劃 3.區域排水規劃報告 4.河床演變分析報告 5.既有構造物設計圖
河川生態環境資源調查	<ol style="list-style-type: none"> 1.特有種/保育種 2.水域生態特性 3.水域物理棲地型態 4.植生調查 5.景觀資源調查 6.河岸的土壤性質 	<ol style="list-style-type: none"> 1.河川情勢調查 2.河川治理規劃報告 3.區域排水規劃報告 4.工務單位 5.環保單位
設計參考調查	<ol style="list-style-type: none"> 1.歷年河岸破壞記錄 2.植栽規定 3.地形測量圖 4.土地權屬 5.環境可用資源調查 6.水域水質特性 	<ol style="list-style-type: none"> 1.災害調查報告 2.河川區域種植規定 3.管理單位 4.規劃單位
施工調查	<ol style="list-style-type: none"> 1.既有構造物施工事例 2.施工道路可及性 3.水文特性調查 	<ol style="list-style-type: none"> 1.相片基本圖或航拍圖 2.工務單位 3.水文年報

■ 河道基本特性調查

● 河床坡降及歷年河床變動

- ◆ 河段可能的最大沖刷深度、河道沖淤分析及現階段的河床坡降等

● 河床質及代表粒徑(d_{50})

- ◆ 河床粗糙度研判及護甲層厚度推估與工法選擇之參據

● 河道平面型態

- ◆ 河段可能的水流衝擊點及推估蜿蜒度，以進行流速、剪力的修正、水面超高及保護長度推估

● 河道的變遷

- ◆ 兩岸堤防大部份皆已完成之際，河道變遷應著重於主深槽的特性
- ◆ 為保有河川動態蜿蜒之特性，建議護岸之施設位置應考量主深槽擺動之特性，亦即預留空間維持主深槽河道自然擺動

■ 安定計算條件蒐集

- 計畫洪水量、建槽流量
 - ◆ 計畫洪水量為工程的設計條件
 - ◆ 建槽流量為穩定斷面型態設計之參考
- 計畫洪水位及平均流速
 - ◆ 提供工程保護的初步布置，平均流速可協助工法初步選擇
- 河道斷面與計畫河床高
 - ◆ 協助流速計算，配合計畫河床高可協助基礎保護工佈置初步研判
- 構造物處之地質條件
 - ◆ 可協助承載力推估、地質改良及開挖難易度之研判
- 既有構造物之計算條件
 - ◆ 蒐集計畫河段類似既有構造的計算條件及過程，以為施設工程計算之參考

■ 設計參考調查

● 歷年河岸破壞記錄

- ◆ 調查歷年河岸破壞的原因與範圍，供後續設計參考，如土石流常發生之河段須考量採用能承受較大撞擊之工法

● 植栽規定

- ◆ 物種選擇及密度與位置應依河川區域種植規定辦理

● 地形測量圖

- ◆ 進行工程構造物位置之地形測量調查，以進行工程佈置與開挖之參考

● 土地權屬

- ◆ 工程構造物施設處土地權屬調查，以利徵收作業，避免造成日後糾紛

● 環境可用資源調查

- ◆ 調查設計與施工時可用之土石資源與植物，俾便工法與工料之選擇。

● 水域水質特性

- ◆ 水質是否呈現酸化或高鹽份，影響工程壽命，如箱籠或蛇籠應避免使用於該河段

■ 施工調查

一、生態工程調查資料

- 既有構造物施工事例
 - ◆ 蒐集既有構造物施工事例做為後續施工參考，可避免不當施工
- 施工道路可及性
 - ◆ 避免過當設計造成工程機具無法進駐施作
- 水文特性調查
 - ◆ 調查計畫河段豐枯水期，避免於豐水期施工及瞭解可施工天數，掌握工期

二、工法適用流速、條件彙整

工法類別	工料類別	適用流速範圍(m/s)						適用條件	注意事項	可能破壞原因
		2	3	4	5	6	7			
植生護坡工	植草皮							1.常水位以上且成活前不受水流浸泡之地區。 2.兩側無住宅或重要設施地區。 3.坡度緩於1(V):2(H)。	1.常水位以下之邊坡，需坡合施作保護基腳護坦工。 2.若有灌木或喬木應進行維護管理避免影響防洪。	1.植生尚未長成，即遭洪水破壞
木排樁護岸工	木樁、草皮或填石料							1.人工挖掘河道。 2.兩側無住宅或重要設施地區。 3.低推移載河段。 4.坡度緩於1(V):2(H)。	1.若有植生應進行維護管理，避免影響防洪。 2.高推移載河段基腳須進行保護。	1.植生尚未長成，即遭洪水破壞。
鋪石護岸工	砌石	乾砌						1.石料豐富之河段。 2.坡度陡於1(V):1.5(H)應進行傾倒、滑動等安定檢核。	1.避免減少河道通水斷面。 2.避免細粒料吸出。 3.漿砌須注意排水問題。	1.細粒料遭吸出。 2.排水不良。 3.基礎遭淘空。
		漿砌								
	拋石							1.搶修河段。 2.坡度緩於1(V):2(H)。	1.避免細粒料吸出 2.拋石厚度至少大於2.5倍 d_{50} 。	1.細粒料遭吸出。 2.基礎遭淘空。
籠工護岸工	箱籠							1.避免使用於強酸及高鹽分之水域使用。 2.低推移載河段。 3.坡度陡於1(1:1.5)應進行傾、滑動等安定檢核。	1.避免減少河道通水斷面。 2.避免細粒料吸出。 3.承载力不佳應進行加強。	1.細粒料遭吸出。 2.鐵絲遭破壞。 3.承载力不佳。 4.基礎遭淘空。
	蛇籠							1.避免使用於強酸或高鹽分之水域。 2.低推移載河段。 3.坡度緩於1(V):2(H)。	1.避免減少河道通水斷面。 2.避免細粒料吸出。 3.承载力不佳應進行加強。	5.鐵線年久生銹而斷裂。 6.不均勻沉陷。
固床工	混凝土塊固床工							1.沖刷型河段。 2.穩定流心。 3.降低局部水流能量。	1.下游沖刷坑的保護。 2.左右兩翼嵌入河岸並於上下游河岸做適度保護。 3.避免細粒料吸出。 4.承载力不佳時應進行加強。 5.生物廊道機能之維持。	1.下游端遭淘空。 2.河岸側向侵蝕。 3.細粒料遭吸出。 4.不均勻沉陷。
丁壩工	木排樁							1.保護河岸。 2.修復河岸線(掛淤)。 3.主深槽淤積型河段。 4.穩定流心。	1.壩頭沖刷坑的保護。 2.壩根嵌入河岸。 3.承载力不佳時應進行加強。 4.應系列布置效果較佳。	1.壩頭沖刷流失。 2.河岸側向侵蝕。 3.細粒料遭吸出。 4.不均勻沉陷。
	橋樑									
	籠工									
	拋石									
	混凝土塊									

參考資料: 河川護岸工法の手引き, 財團法人先端建設技術センター編, 2001

三、生態工程設計原則

安全為工程基本思維

■ 一般通則

- 符合法規要求
- 滿足防洪需求
- 滿足安全需求
- 維持河相穩定
- 工程經濟最佳化
- 營運維護最小化
- 配合生態需求
- 創造多樣化環境

■ 工法設計原則

- 基腳沖刷保護
- 石材水流剪力檢核
- 護岸工穩定檢核
- 固床工、丁壩工應避免側向侵蝕
- 基礎承载力檢核
- 避免背填細粒料遭吸出

四、水理及安定分析

■水理分析

- 需完成流速水深等參數
- 為設計參考依據
- 所需參數
 - ◆ 設計流量(上游邊界)
 - ◆ 斷面
 - ◆ 曼寧n值
 - ◆ 起算水位(下游邊界)
 - ◆ 地形資料(二維水理模式,非必需)

■安定分析

- 抗水流剪力之檢核
- 構造物穩定性之檢核
- 河床沖刷深度推估
 - ◆ 一般沖刷與局部沖刷
 - ◆ 輸砂模式(視情況採用)
- 所需參數
 - ◆ 水理分析成果
 - ◆ 安定分析條件
 - ◆ 相關沖刷經驗公式
 - ◆ 土壤參數
 - ◆ 河床質特性

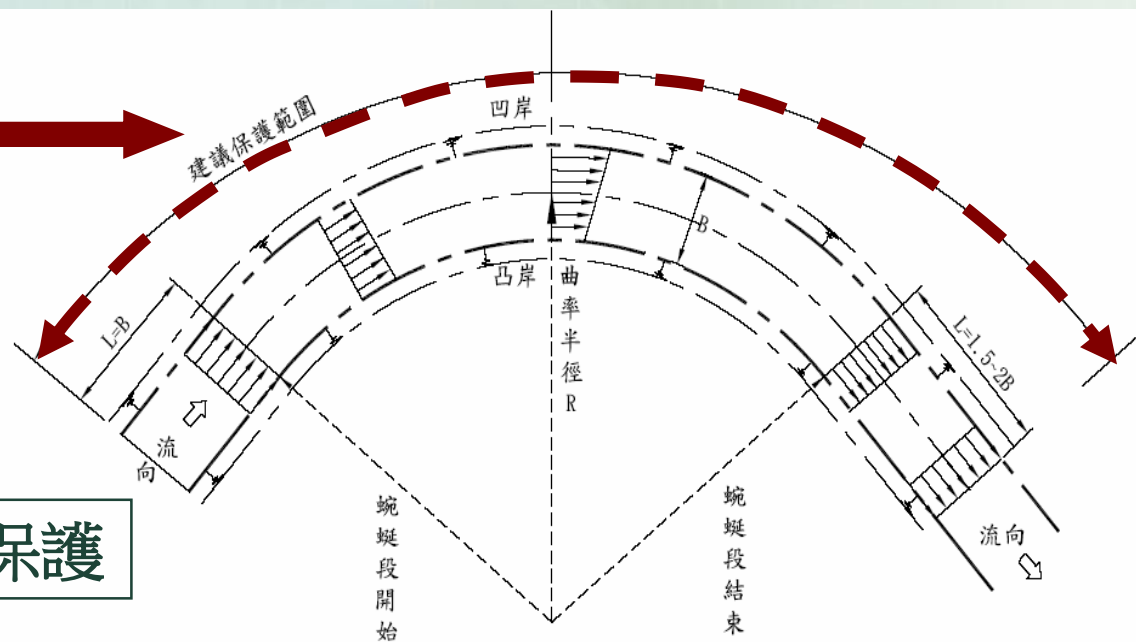
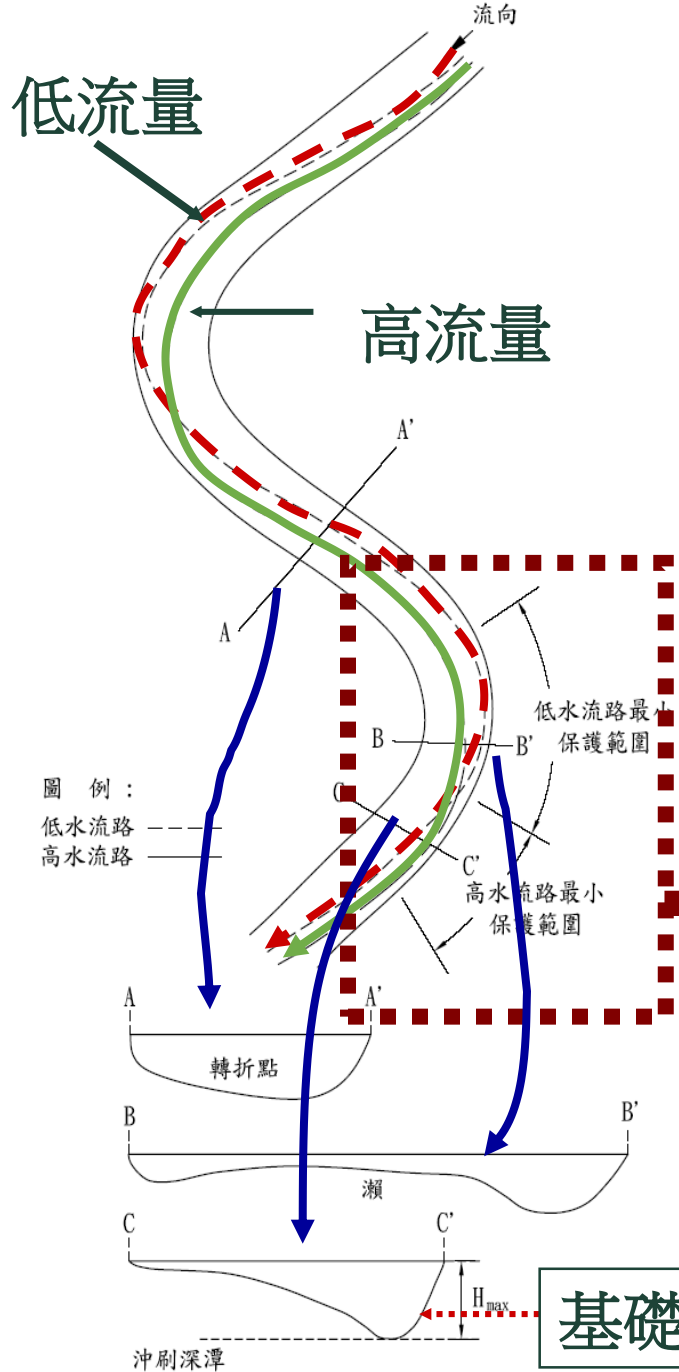
伍、生態工程設計步驟

伍、生態工程設計步驟

一、工址流況研判

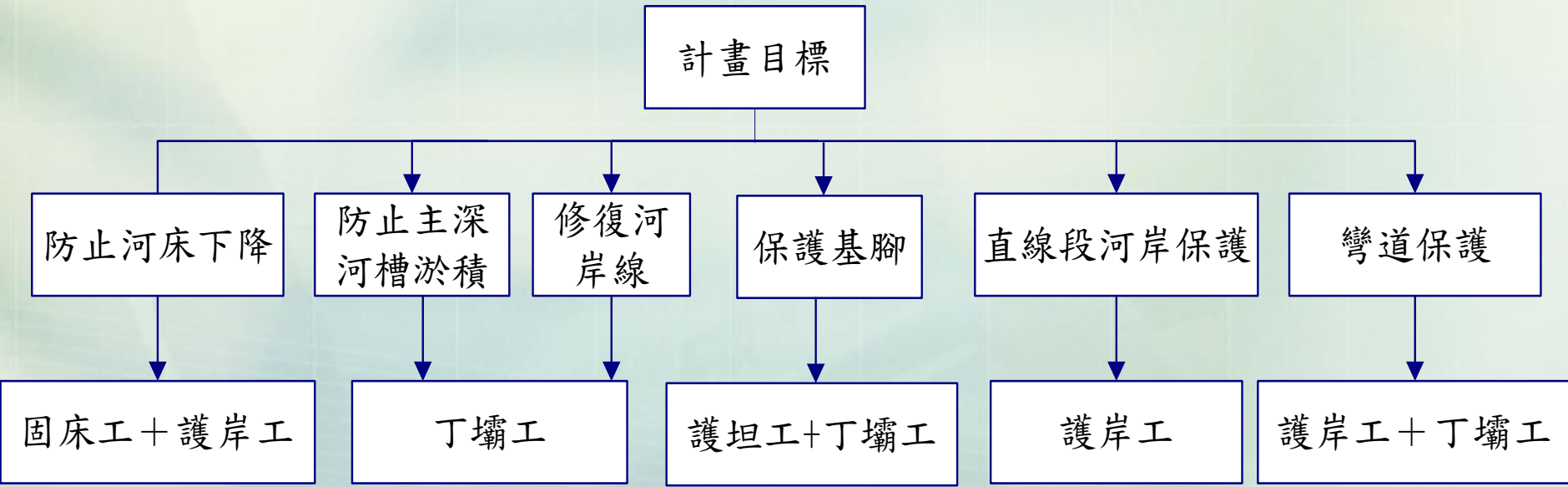
- 流路研判
- 斷面型態預測
- 攻擊點預測

● 彎道局部保護範圍示意圖



註：依台灣現況，低水流路可視為主深槽，高水流路可視為全河幅寬

二、初步工法布置與選用



護岸工為固床
工附屬工程

■ 護岸工法組成單元圖

● 岸頂工與護岸工

- ◆ 植生護岸工
- ◆ 木排樁護岸工
- ◆ 鋪石護岸工
 - 乾砌石及漿砌石
 - 拋石
- ◆ 籠工護岸工
 - 箱籠
 - 蛇籠

● 基腳工

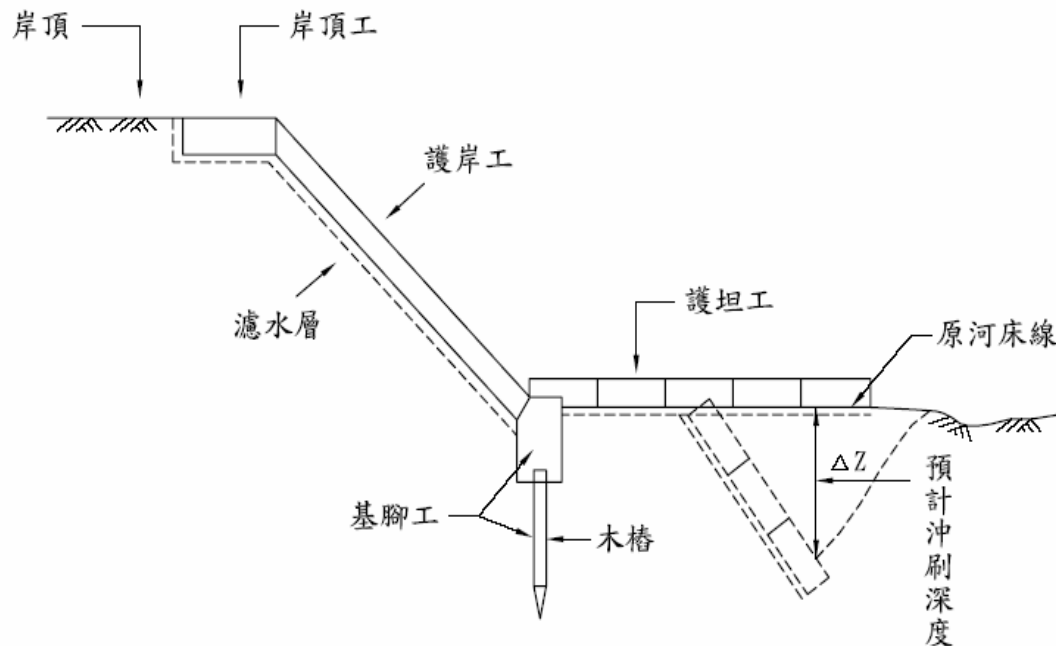
- ◆ 原護岸工延伸
- ◆ 箱籠或箱籠+木樁
- ◆ 混凝土塊

● 護坦工

- ◆ 拋石
- ◆ 箱籠或蛇籠
- ◆ 木工(梢)沉床
- ◆ 混凝土塊

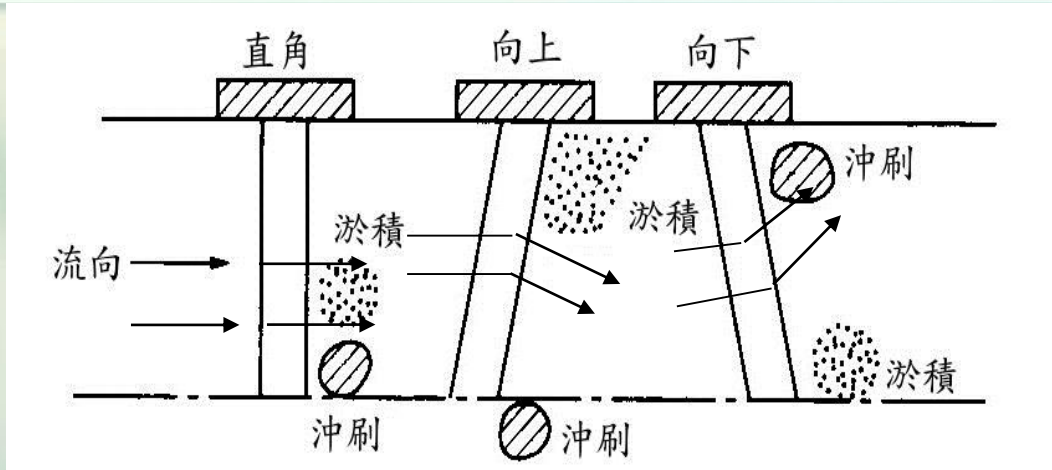
● 濾水層

- ◆ 礫石級配
- ◆ 人工織布(透水)



■ 丁壩工

● 丁壩方向與流心關係



◆ 直角丁壩工

➢ 適用於感潮段

◆ 向上丁壩工

➢ 大部分工法

◆ 向下丁壩工

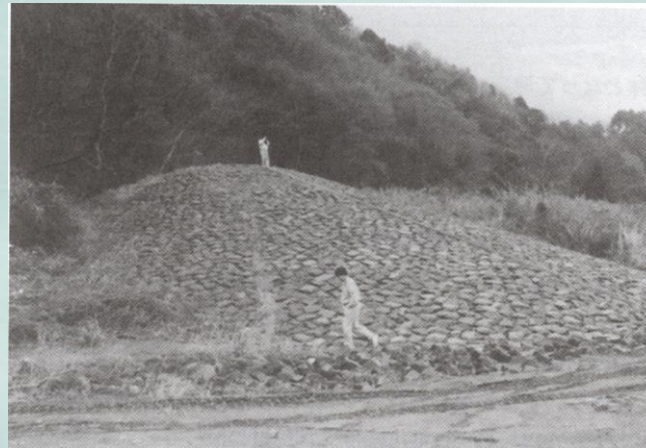
➢ 適用於高水丁壩

◆ 高水丁壩工

➢ 保護河岸

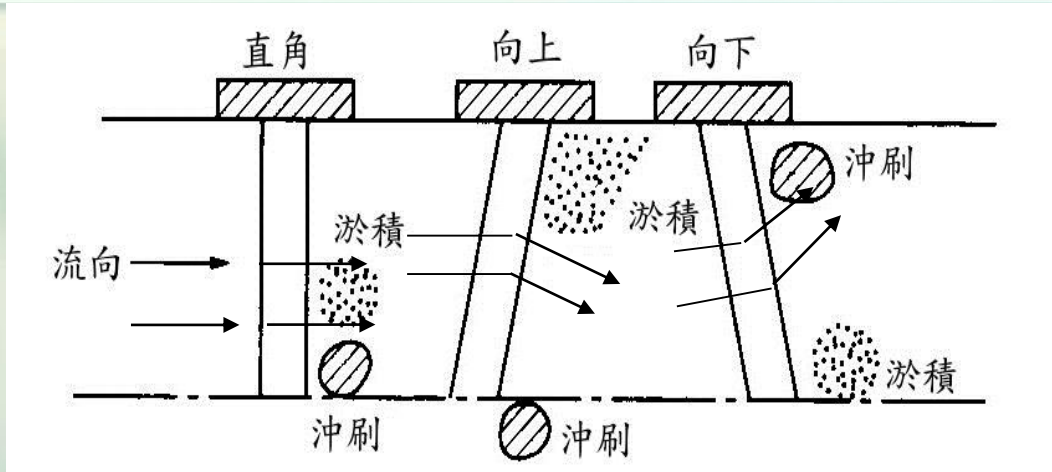
◆ 低水丁壩工

➢ 保護基腳



丁壩工

● 丁壩方向與流心關係



◆ 高水丁壩工

➢ 保護河岸

◆ 低水丁壩工

➢ 保護基腳

◆ 直角丁壩工

➢ 適用於感潮段

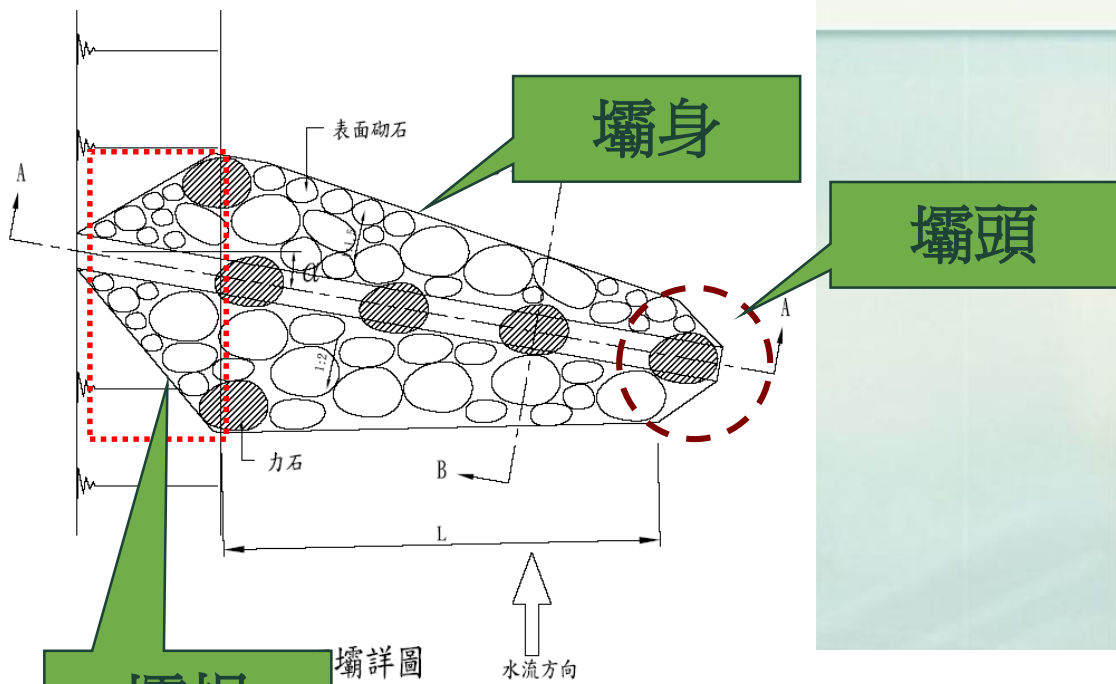
◆ 向上丁壩工

➢ 大部分工法

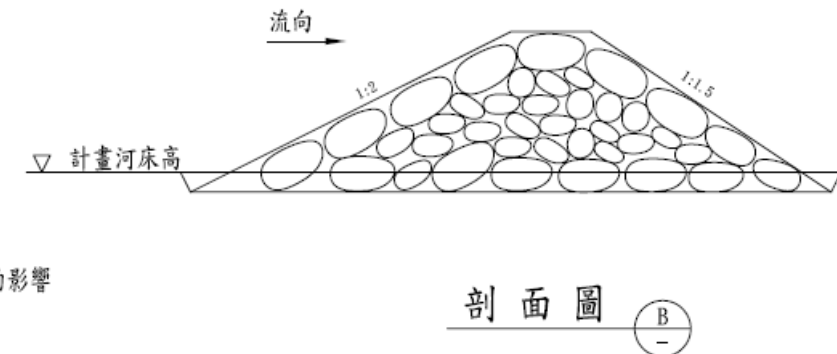
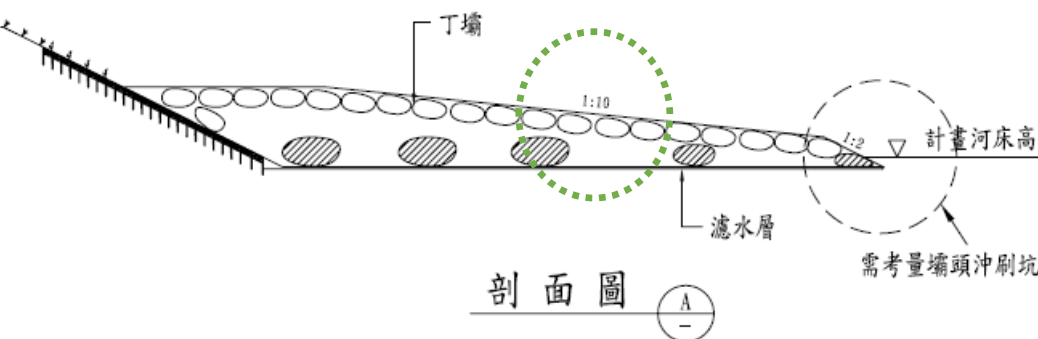
◆ 向下丁壩工

➢ 適用於高水丁壩

● 丁壩工組成單元



壩根 壩詳圖



● 丁壩工布置

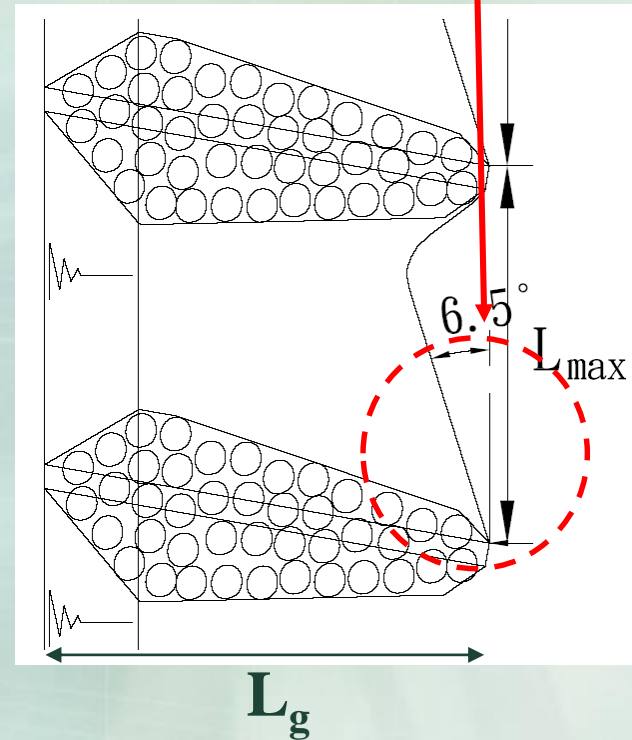
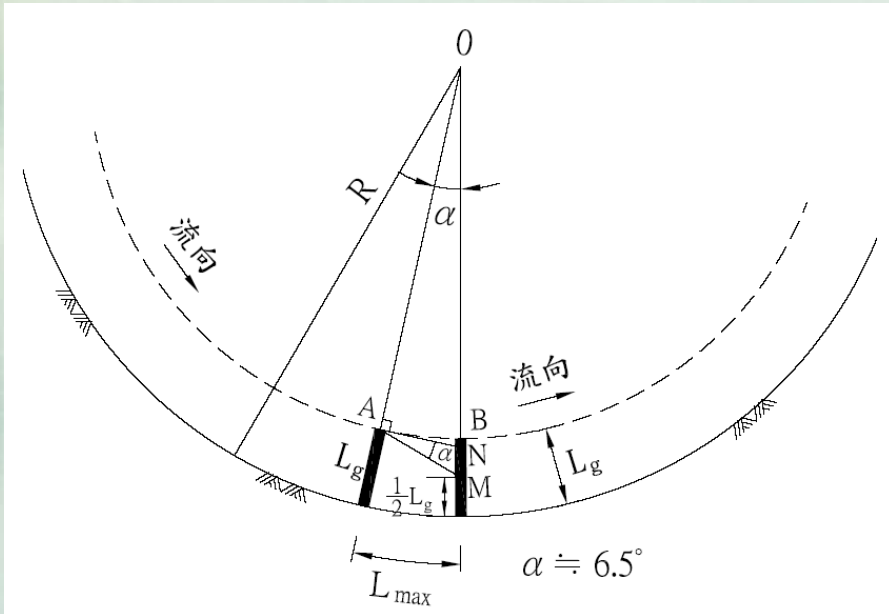
◆ 彎道布置

◆ 直線布置

$$L_{mzx} = R \cdot \frac{\pi}{180} \cdot \alpha$$

$$\alpha = \left[83.5^\circ - \sin^{-1} \frac{1.987(R - L_g)}{2R - L_g} \right]$$

$$L_{\max} = \left(\frac{L_g}{2} \sim \frac{L_g}{3} \right) \cdot \cot 6.5^\circ = (4.39 \sim 2.93) l_g$$



■ 固床工

- 固床工線型與流路關係

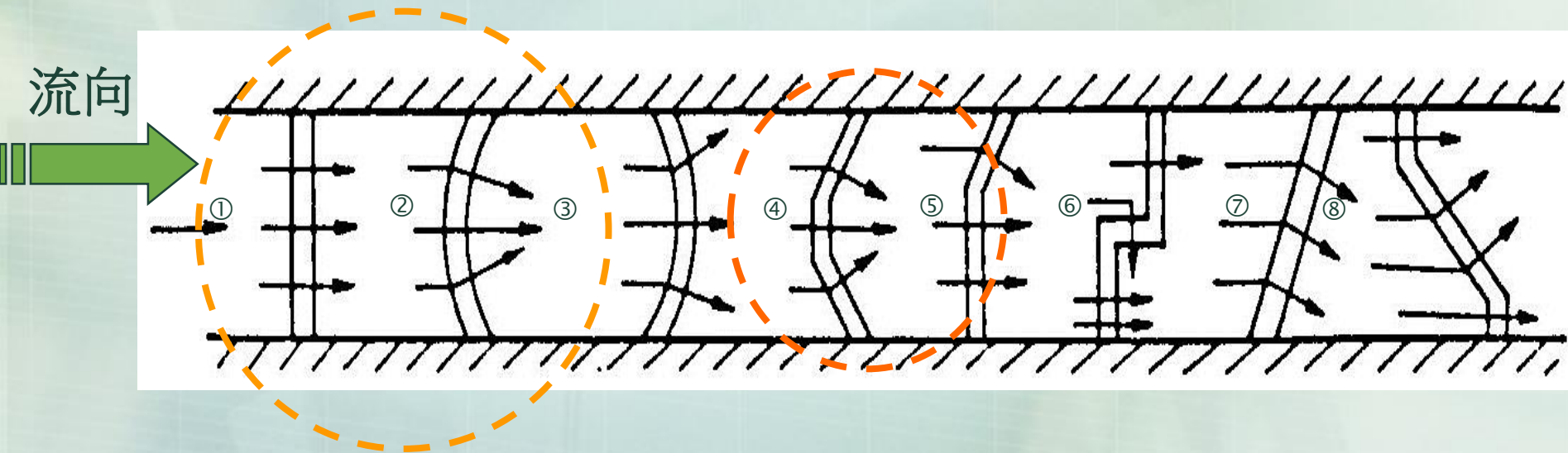
- 控制流心

- 避免衝擊河岸

- 1、2、4、5線型為佳

 - ◆ 水流經過固床工後集中於河槽

 - ◆ 魚類棲地營造為附加價值

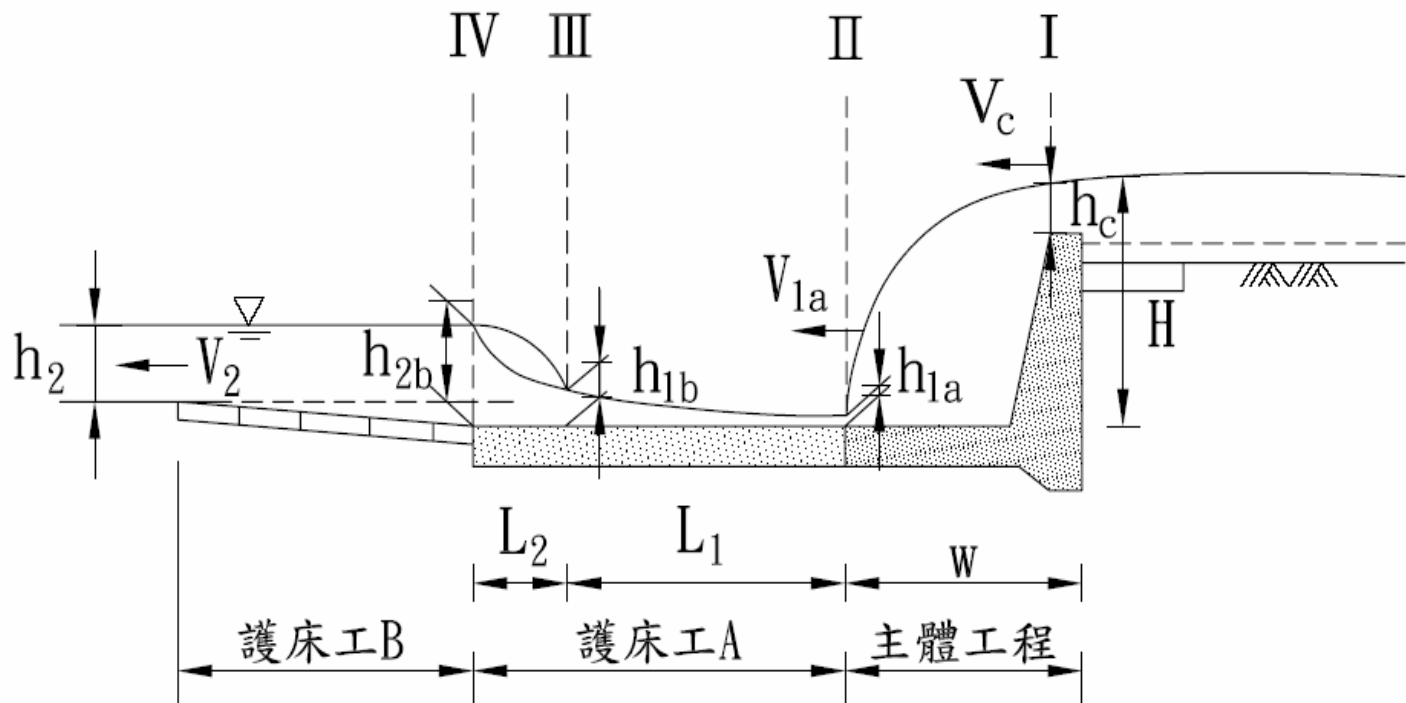


● 標準固床工組成單元

- ◆ 主體工程: 承受水體落下
- ◆ 護床工A: 足夠水流水躍消能
- ◆ 護床工B: 銜接至原河床高
- ◆ 經驗公式

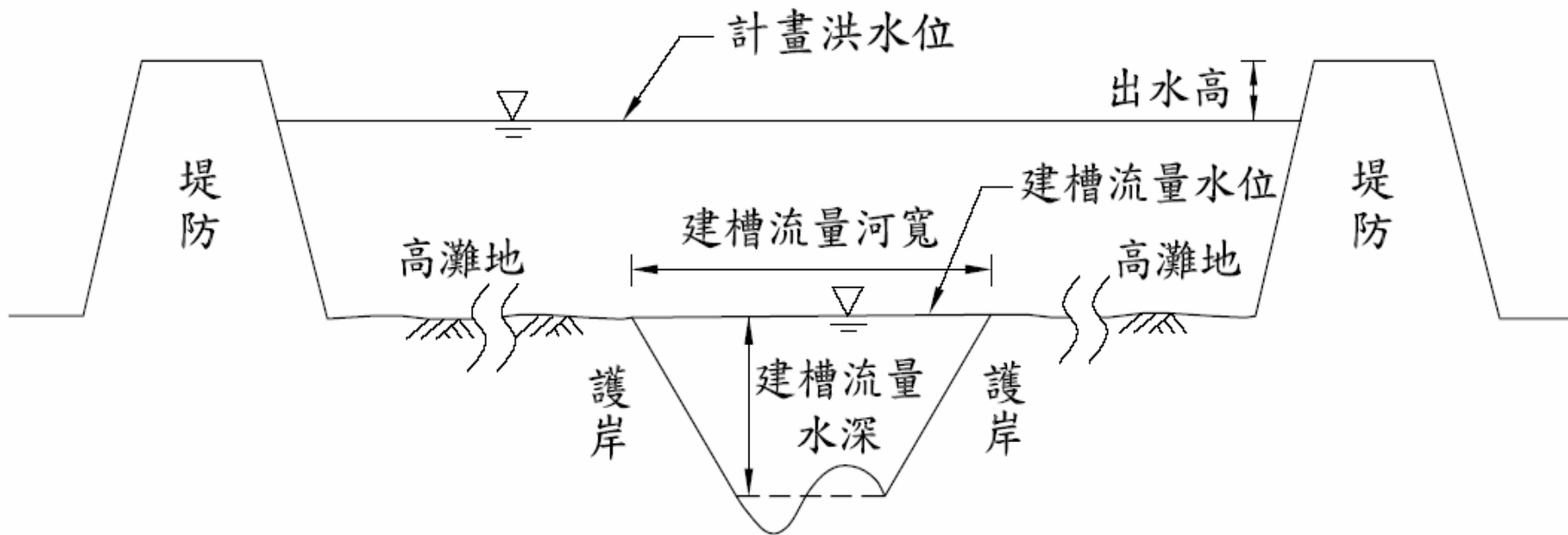
➤ 1. $W = 0.6C_o\sqrt{H}$

➤ 2. $L = 0.67C_o\sqrt{H-q} = W + L_1 + L_2$

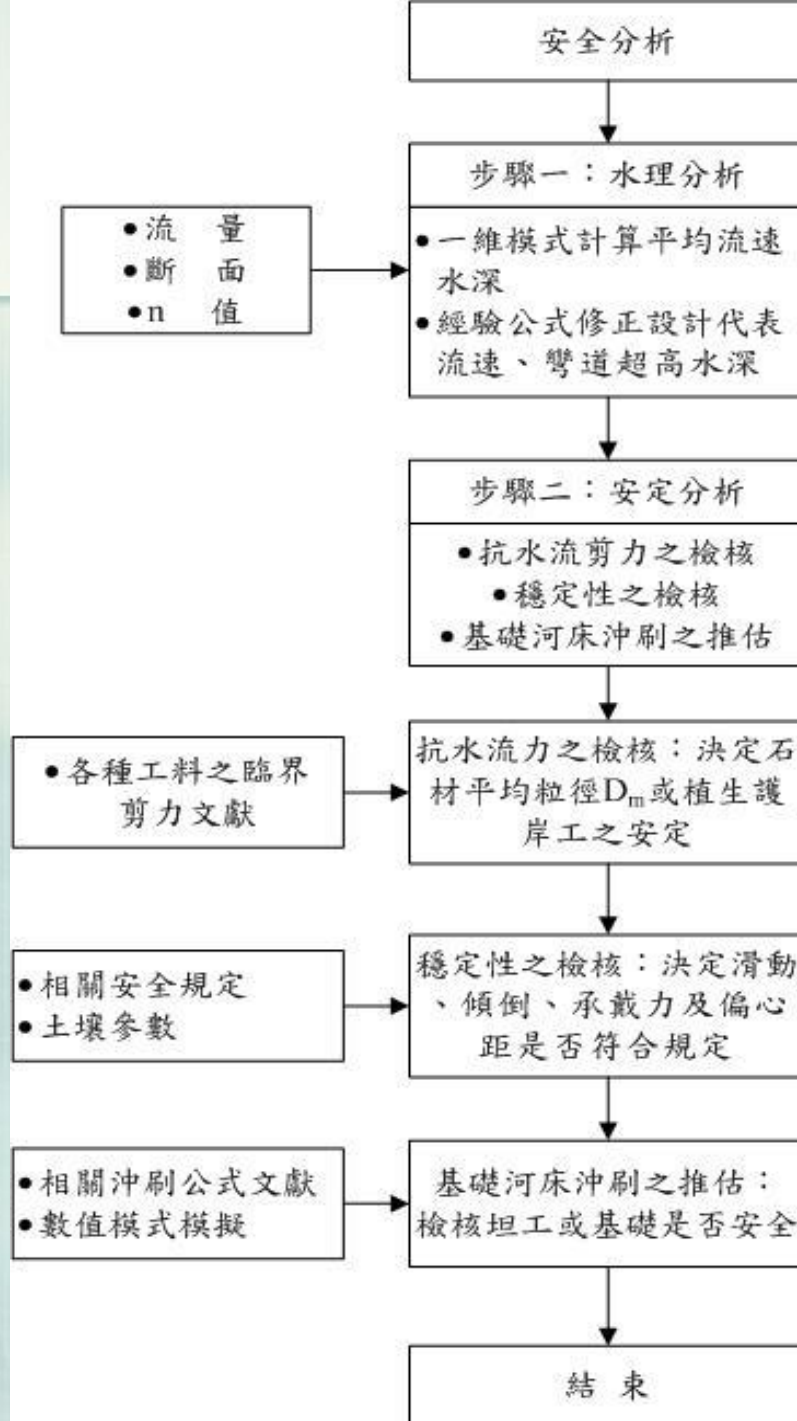


三、初步決定斷面型式

- ◆高流量：滿足計畫流量通洪能力
- ◆低流量：滿足建槽流量之河道穩定
 - 施作護岸工避免降低或擴大建槽河寬



四、安全性分析流程圖



陸、參考公式及文獻

陸、參考公式及文獻

■ 水理參數修正

1. 流速修正(以平均流速推估設計流速)

$$V_o = \alpha V_m \dots\dots\dots (1-1)$$

$$\text{順直動床河段} : \alpha = 1 + \Delta Z / 2H_d \dots\dots\dots (1-2)$$

$$\text{蜿蜒動床河段凸岸} : \alpha = 1 + B / 2R \dots\dots\dots (1-3)$$

$$\text{蜿蜒動床河段凹岸} : \alpha = 1 + B / 2R + \Delta Z / 2H_d \dots\dots\dots (1-4)$$

$$\text{蜿蜒動床河段下游影響區} : \alpha = 1 + B / 2R + \Delta Z / 2H_d \dots\dots\dots (1-5)$$

其中， V_o (m/s)：設計代表流速， V_m (m/s)：一維平均流速， B (m)：河寬， R (m)：曲率半徑， H_d (m)：設計水深， ΔZ (m)：預計沖刷深度。根據Maynard(1989)建議蜿蜒段 $\alpha = 1.5$ ，最大值 $\alpha = 2$ 。

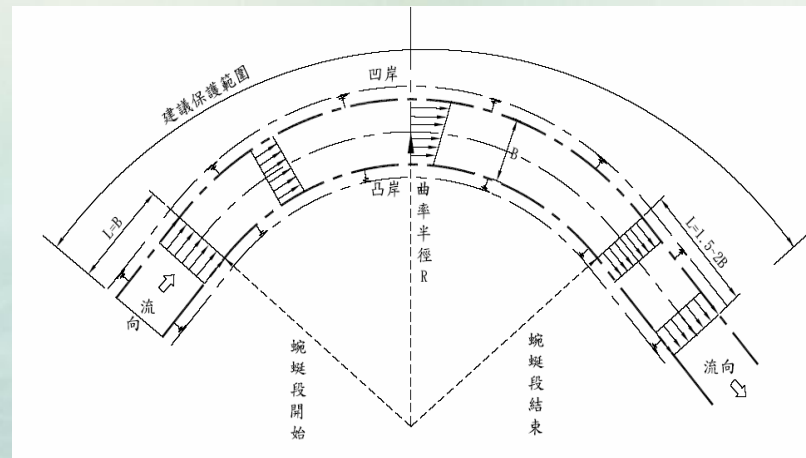
2. 水位修正

$$\Delta h = \frac{V_m^2}{g} \times \frac{B}{R} \dots\dots\dots (2-1)$$

其中， Δh (m)：超高水深，其餘定義如同上述。亦即位於蜿蜒河段凹岸之水深應修正為 $H_d + \Delta h$ 。

3. 剪力修正

剪力之修正並無相關經驗式，根據相關文獻研究指出，在局部處最大剪力可達平均剪力之4倍，而彎道處之剪力可達上游順直河道平均剪力之2~2.5倍。



■ 抗水流剪力文獻

施工材料	臨界剪力 (N/m ²)	
	剛完成	3-4季後
草皮	10	100
蘆葦	5	30
蘆葦叢	30	60
枝條籬笆	10	50
活柴捆	60	80
柳樹枝層	20	140
柳樹毯	50	300
落葉木	20	120
枝條層	100	300
粗碎石覆蓋活枝	50	250
砌石內扦插活枝	200	300
砌大碎石	—	250
乾砌塊石	—	600

■ 無因次剪力

無因次臨界剪力適用於石材受到約束的情況下，產生啟動的臨界條件，其理論為籠工本體之臨界無因次剪力等於水流之無因次剪力示為臨界安定條件。工法如木排樁內拋石或蛇籠，示如圖6.5-3。適用相關工法研究成果如下：

$$\tau_* \leq \tau_{*d} \text{ 或 } \frac{u_*^2}{s \times g \times D_m} \leq \tau_{*d} \dots\dots(3-1)$$

$$u_* = \frac{V_0}{\phi_0} \dots\dots(3-2)$$

$$\phi_0 = 6 + 5.75 \log_{10}(H_d / K_s) \dots(3-3)$$

式中： $s = \left(\frac{\rho_s}{\rho_w}\right) - 1$ 、 ρ_s ：石材密度、 ρ_w ：水體密度；

K_s ：河岸粗糙高度，可假設為 D_m ，最大可假設 $2.5D_m$ ；

H_d ：設計水深； D_m 籠工內平均粒徑； V_0 設計代表流速；

ϕ_0 ：流速係數。

另外，若石材單體位於河岸斜面上， τ_{*d} 應修正為 τ_{*sd} 如下所示。

$$\tau_{*sd} = \tau_{*d} \times \frac{1}{K} = \tau_{*d} \times \cos \theta \sqrt{1 - \left(\frac{\tan \theta}{\tan \phi}\right)^2} \dots\dots(3-4)$$

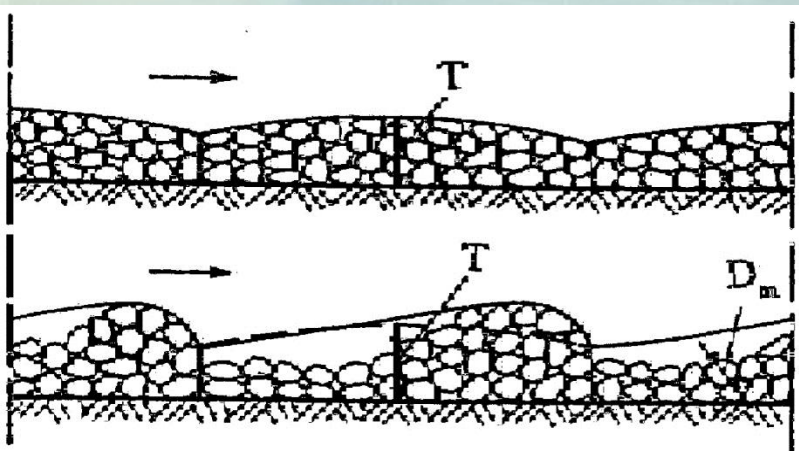
式中， ϕ 為石材水中安息角， θ 為河岸傾斜角度。

A. 結構物內拋石： $\tau_{*sd} = 0.05 \dots\dots(3-5)$

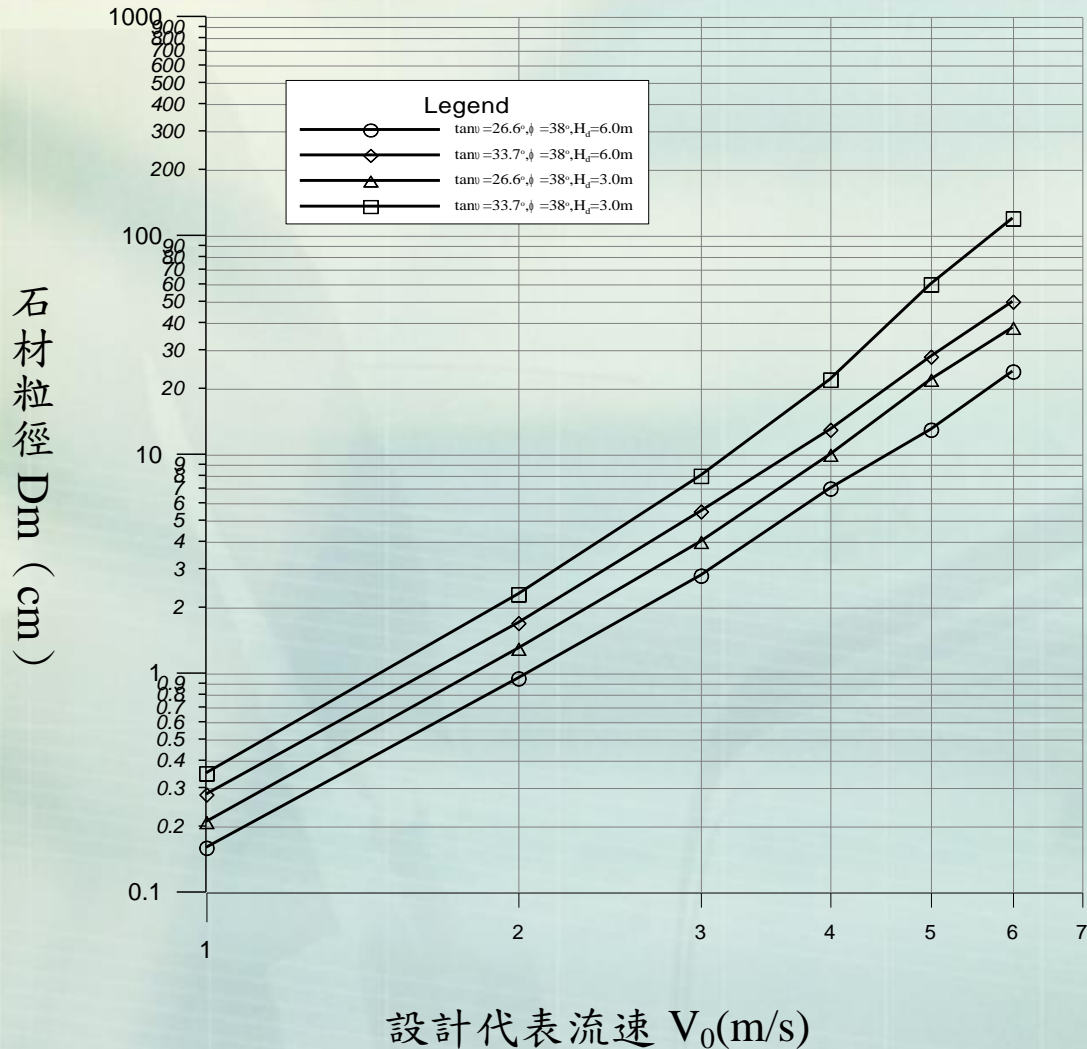
B. 乾砌石護岸工： $\tau_{*sd} = 0.05 \dots\dots(3-6)$

C. 籠工容許變形： $\tau_{*sd} = 0.10 \dots\dots(3-7)$

D. 籠工不容許變形： $\tau_{*sd} = 0.12 \dots\dots(3-8)$



■ 箱籠工法石徑與流速關係圖



$$\tau_{*d} = 0.10, \quad u_s = 2.50\text{m}$$

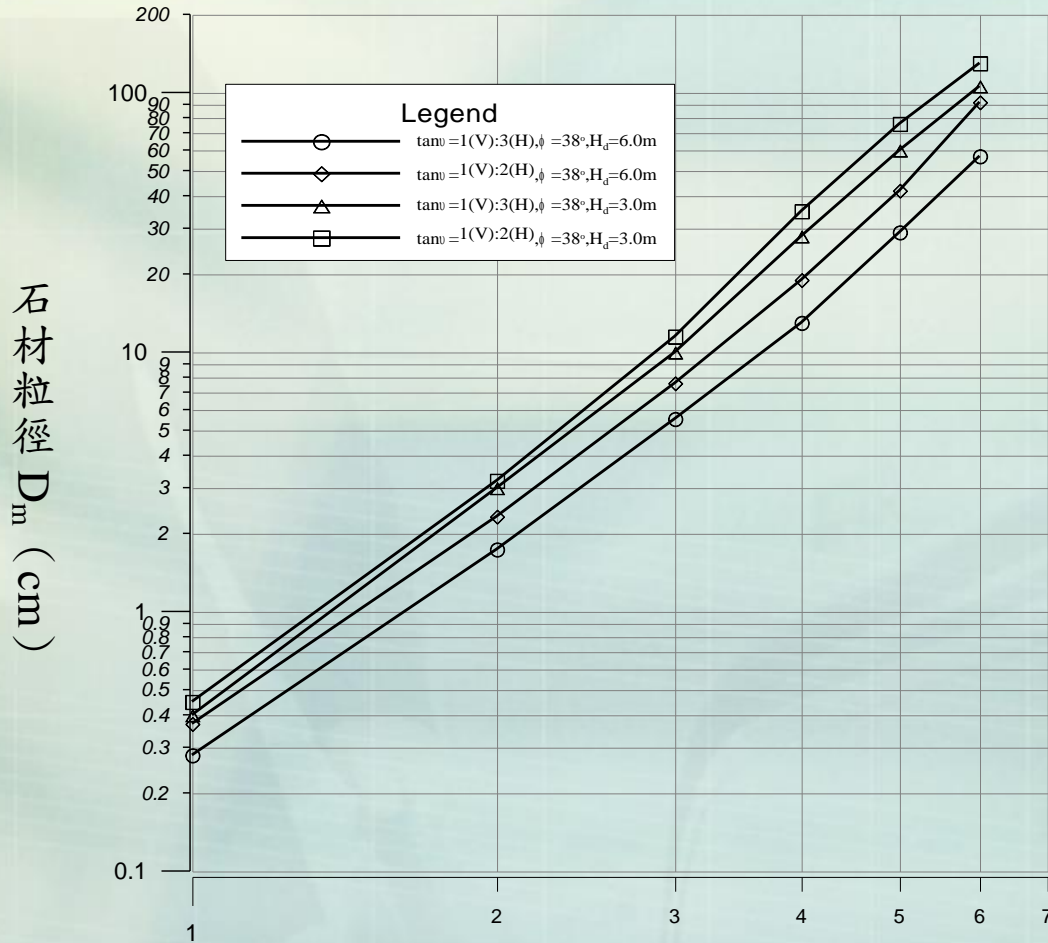
$$\tau_* \leq \tau_{*d} \text{ 或 } \frac{u_*^2}{s \times g \times D_m} \leq \tau_{*d} \quad \dots(3-1)$$

$$u_* = \frac{V_0}{\phi_0} \quad \dots\dots\dots(3-2)$$

$$\phi_0 = 6 + 5.75 \log_{10} (H_d / K_s) \quad \dots\dots(3-3)$$

$$\tau_{*sd} = \tau_{*d} \times \frac{1}{K} = \tau_{*d} \times \cos \theta \sqrt{1 - \left(\frac{\tan \theta}{\tan \phi}\right)^2} \quad \dots\dots(3-4)$$

箱籠工法石徑與流速關係圖



設計代表流速 V_0 (m/s)

$$\tau_{*d} = 0.05, u_s = 2.50m$$

$$\tau_* \leq \tau_{*d} \text{ 或 } \frac{u_*^2}{s \times g \times D_m} \leq \tau_{*d} \dots\dots\dots(3-1)$$

$$u_* = \frac{V_0}{\phi_0} \dots\dots\dots(3-2)$$

$$\phi_0 = 6 + 5.75 \log_{10} (H_d / K_s) \dots\dots\dots(3-3)$$

$$\tau_{*sd} = \tau_{*d} \times \frac{1}{K} = \tau_{*d} \times \cos \theta \sqrt{1 - \left(\frac{\tan \theta}{\tan \phi}\right)^2} \dots(3-4)$$

■ 啟動最小流速

適用於河岸拋石工法。

A. 利用水流拖曳力檢核

$$D_m = \left\{ \frac{1}{E_1^2 \times 2g \times \left[\frac{\rho_s}{\rho_w} - 1 \right]} V_0^2 \right\} \times K \dots\dots\dots (4-1)$$

$$K = \frac{1}{\cos \theta \sqrt{1 - \left(\frac{\tan \theta}{\tan \phi} \right)^2}} \dots\dots\dots (4-2)$$

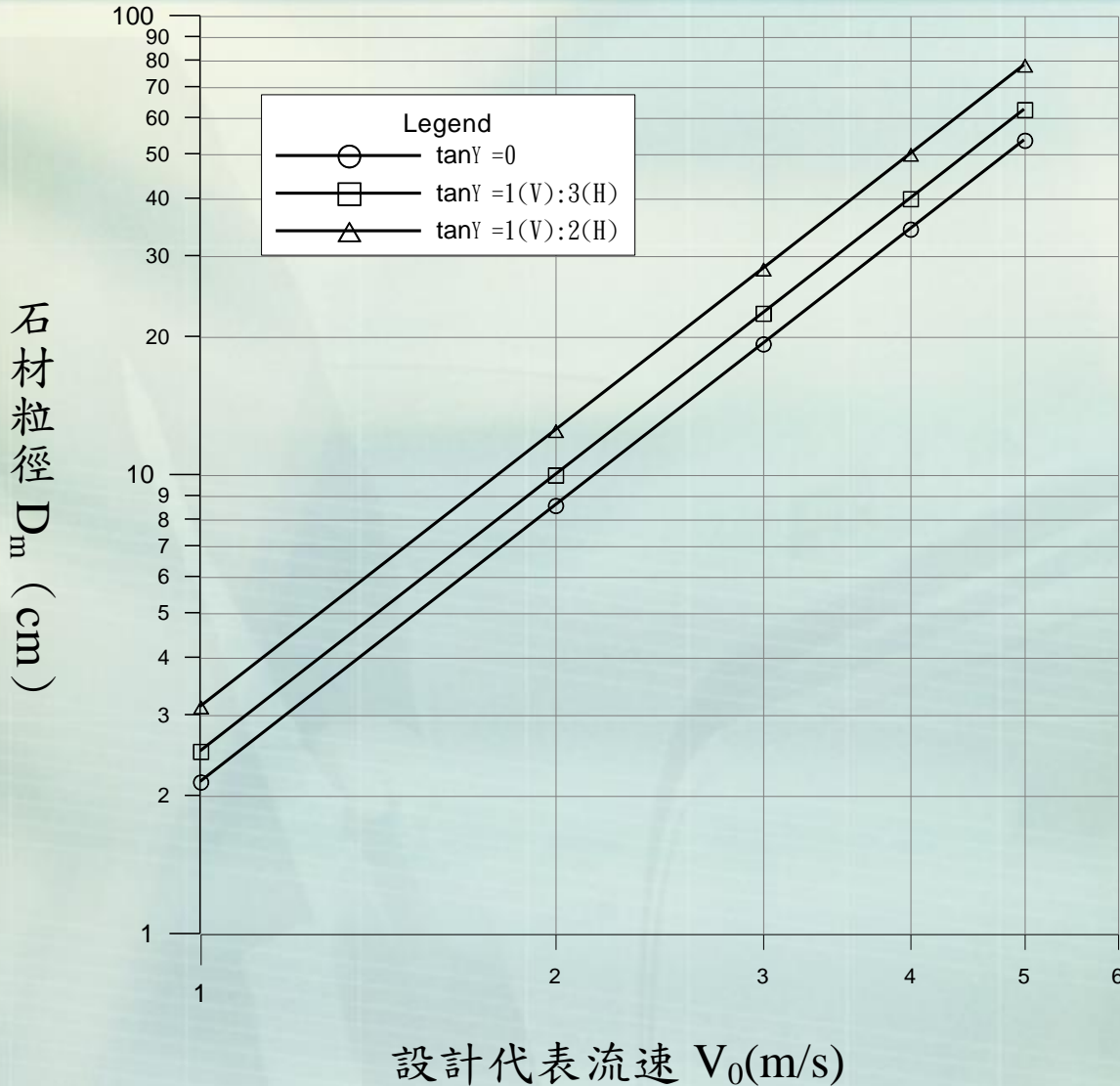
B. 利用起動流速法

Mavis and Laushey (1948)根據實驗結果之關係式如下：

$$V_c = 0.155d_c^{1/2} \dots\dots\dots (4-3)$$

其中， V_c (m/s)：泥砂起動臨界流速， d_c (mm)：石材起動臨界粒徑。設計時可以之平均流速 V_m (m/s)代入上式，即可求出石材粒徑。

■ 拋石工法流速與粒徑關係圖

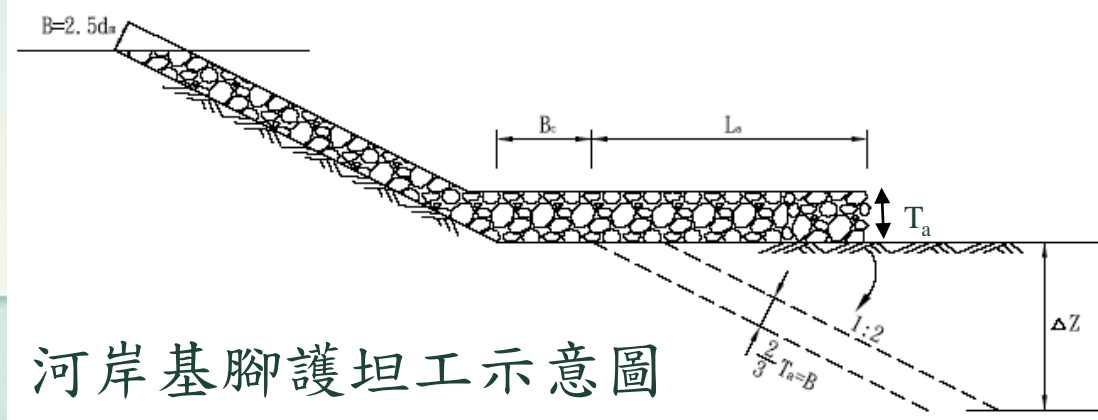


$$D_m = \left\{ \frac{1}{E_1^2 \times 2g \times \left[\frac{\rho_s}{\rho_w} - 1 \right]} V_0^2 \right\} \times K \quad \dots(4-1)$$

$$K = \frac{1}{\cos\theta \sqrt{1 - \left(\frac{\tan\theta}{\tan\phi} \right)^2}} \quad \dots\dots\dots(4-2)$$

$$E_1 = 1.2$$

■ 護坦工



假設河岸保護厚度為 B ，護坦保護工厚度為 T_a ，當護坦保護工因河床沖刷而自動填補沖刷坑之厚度為 $\frac{2}{3}T_a$ 且要與河岸保護工等寬($\frac{2}{3}T_a=B$)，若河床沖刷後河岸穩定坡度為 $1(V):2(H)$ ，則護坦工長(L)計算方式如下：

$$L = B_c + L_a \dots\dots\dots (5-1)$$

$$L_a = \frac{2}{3} \Delta z \sqrt{1+2^2} = 1.5 \Delta z \dots\dots\dots (5-2)$$

$$T_a = \frac{3}{2} B \dots\dots\dots (5-3)$$

其中， $B_c(m)$ ：為基腳前之水平保護工，一般為 $0\sim 2m$ ，大型河溪則視情形增加， $L_a(m)$ ：預計補充沖刷坑長度， $T_a(m)$ ：護坦工厚度， $\Delta Z(m)$ ：預計沖刷深度， $B(m)$ ：河岸保護工厚度。

■ 局部沖刷經驗公式

● 束縮沖刷深度經驗式(Komura,1971)

$$\frac{\Delta z}{h} = (1 + 1.2F_r^2) \left[\left(\frac{B}{B_1} \right)^{2/3} - 1 \right], \quad F_r = \frac{V}{\sqrt{gh}} \dots\dots (6-1)$$

其中， $\Delta Z(m)$ ：沖刷深度

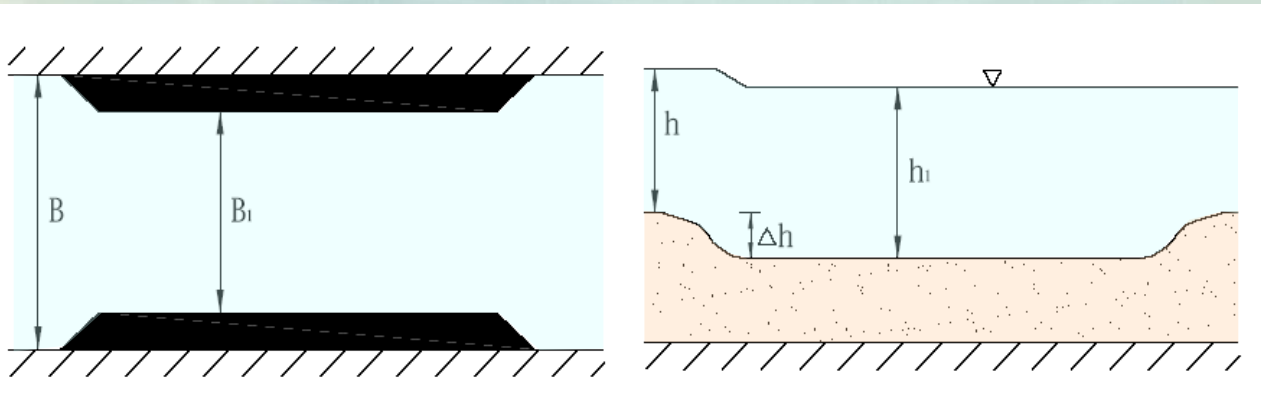
$h(m)$ ：上游水深

F_r ：福祿數

$B(m)$ ：上游河寬

$B_1(m)$ ：束縮河寬

$V(m/s)$ ：上游流速



● 壩頭沖刷經驗公式(Neill,1980)

$$\diamond H' = \frac{\alpha}{h} \left(\frac{2.5q^2}{d_{50}^{0.318}} \right)^{0.333} \dots (6-2)$$

$$\diamond H' = \frac{\Delta Z + h}{h} \dots \dots \dots (6-3)$$

$$\diamond \alpha = 2.1 \sim 2.75 \dots \dots \dots (6-4)$$

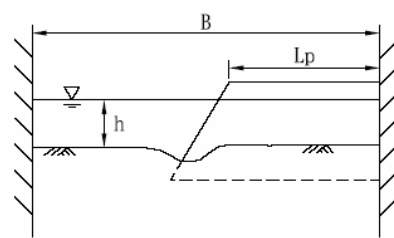
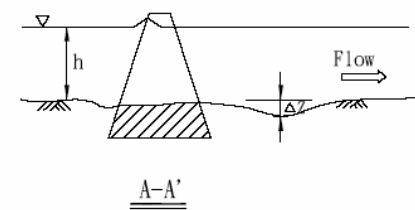
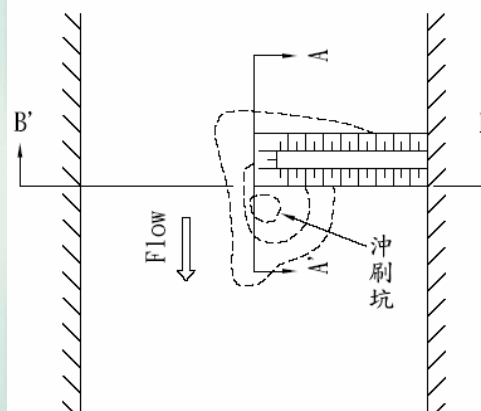
其中， $\Delta Z(m)$ ：沖刷深度

$h(m)$ ：上游水深

$q(\text{cms/m})$ ：單寬流量

$d_{50}(\text{mm})$ ：河床質通過50%時之粒徑

α ：2.1~2.75



● 低水頭固床工沖刷深度經驗公式(Schoklitsch, 1932)

$$d_s = 4.75H^{0.2}q^{0.57}d_{90}^{-0.32} - y_2 \dots (6-5)$$

其中， d_s (m)：沖刷深度

y_1 (m)：上游河道水深

y_2 (m)：下游河道水深

V_1 、 V_2 (m/s)：上下游流速

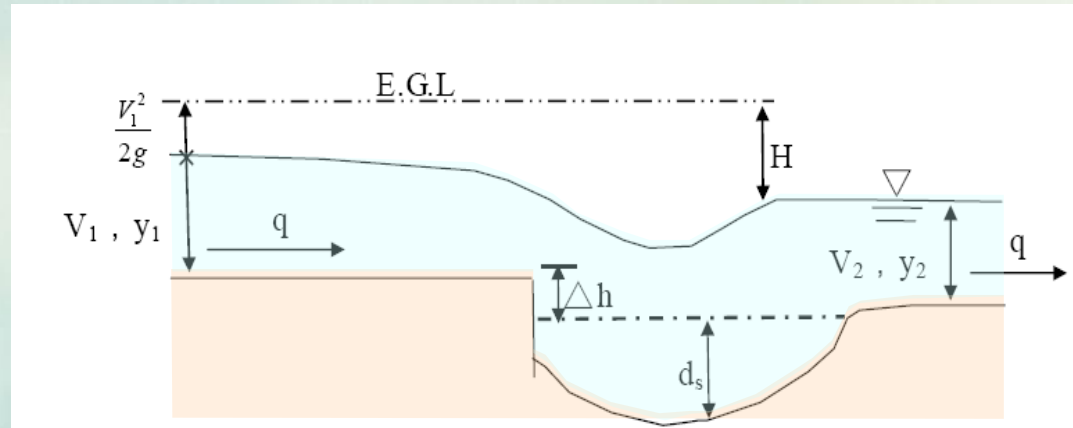
q (cms/m)：單位寬度流量

d_{90} (mm)：河床質通過90%時之粒徑

H (m)：上游能量線與下游水位高程差

g (m/s²)≡重力加速度

E.G.L.=上游河床高程+水深+流速水頭(m)



● 適用範圍： $d_{90} < 300$ mm

● 彎道沖刷經驗公式 (Thorne, 1993)

$$Y_{m,e}/h_0 = 1.07 - \text{Log}(R/B - 2), \quad 2 < R/B < 14 \dots (6-6)$$

其中， $Y_{m,e}$ (m)：沖刷深度

h_0 (m)：上游直線段水深

R (m)：河道曲率半徑

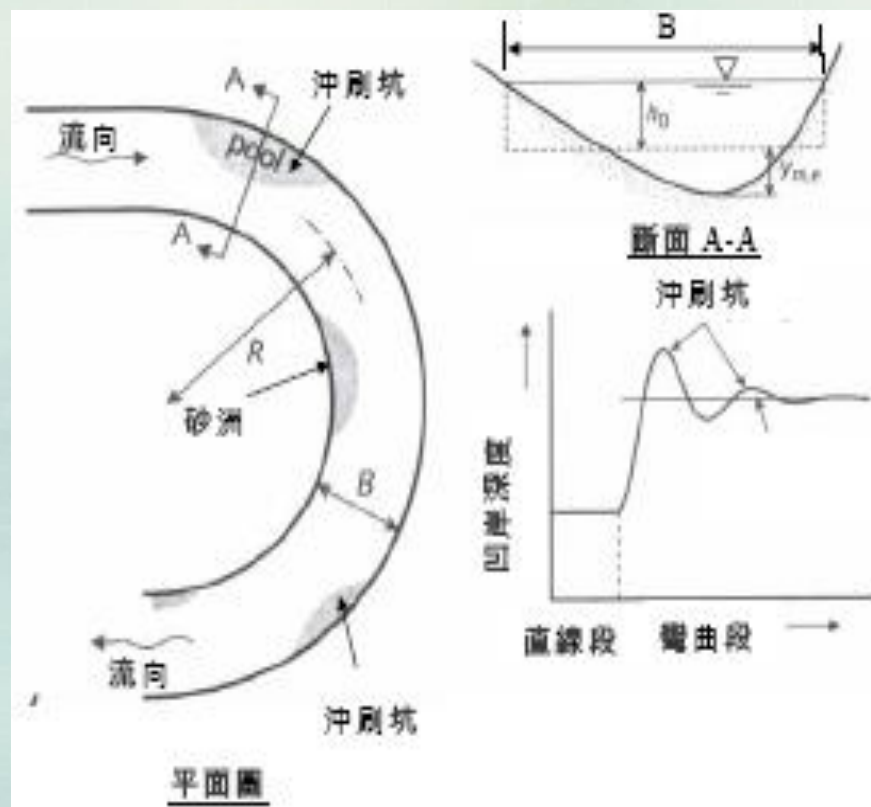
B (m)：河道寬度

當 $R/B > 14$ 時， $Y_{m,e} \approx h_0$

● 適用範圍

◆ $h_0 < 17.0\text{m}$

◆ $0.3\text{mm} < d_m < 63\text{mm}$



■ 一般沖刷經驗公式

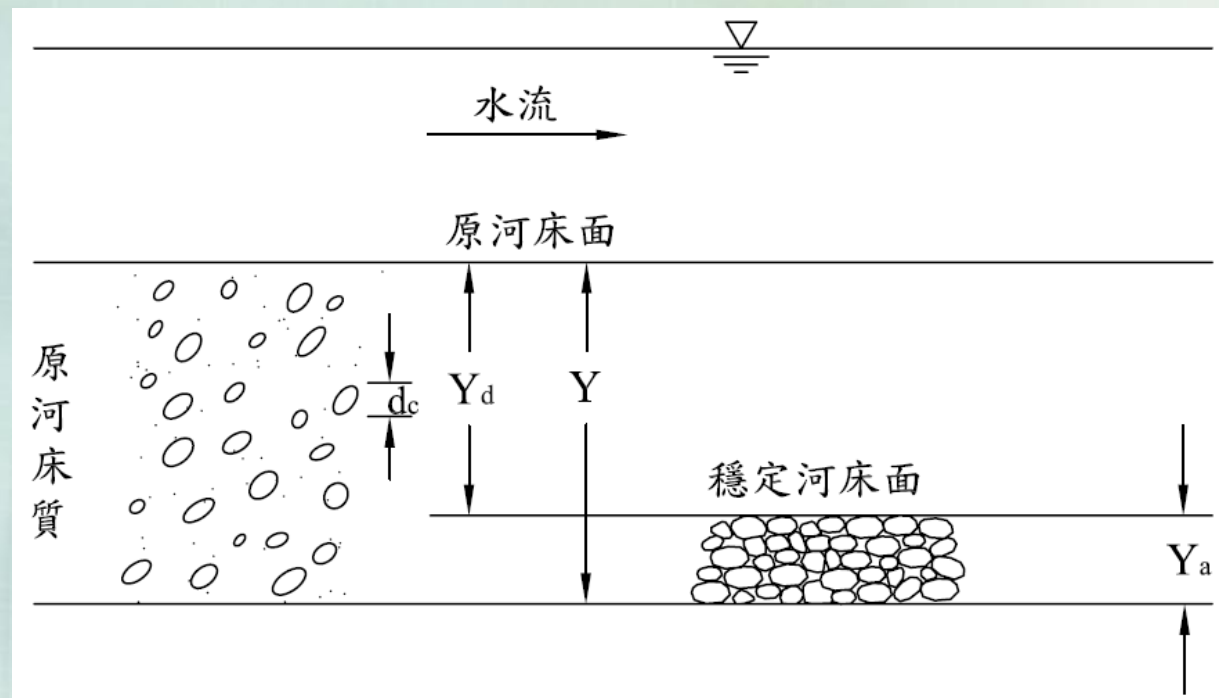
$$d_s = 3.66m, d_{50} \leq 0.0015m \dots\dots\dots (7-1)$$

$$d_s = 1.74d_{50}^{-0.11}, d_{50} > 0.0015m \dots\dots (7-2)$$

■ 護甲層作用

$$Y_a = (\Delta P)Y \dots\dots\dots (8-1)$$

$$Y_d = Y_a \left(\frac{1}{\Delta P} - 1 \right) \dots\dots\dots (8-2)$$



柒、案例演算

柒、案例演算

■ 木排樁護岸

假設某一直線段護岸緩流河岸中，以木排樁內填卵石粒料，上鋪10cm植生沃土並植草，護岸高3m，設計水深2.5m，平均流速 $V_m = 2\text{m/s}$ ，河岸坡度1(V):2(H)，河床質 $d_{50} = 0.20\text{mm}$ ，能量坡降0.0074，曼寧 $n = 0.02$ 。

請設計符合該條件下的內填卵石粒徑及可能破壞之流速。



步驟一：設計條件

一、一維平均流速 $V_m=2\text{m/s}$ ，設計水深 $H_d=2.5\text{m}$ ， $d_{50}=0.2\text{mm}$

二、河岸坡度 1(V)：2(H)

步驟二：水理分析

一、 $\Delta Z=3.66\text{m}$ ， $d_{50}\leq 0.0015\text{m}$ ，詳式(7-1)

二、 $\alpha=1+\frac{3.66}{2\times 2.5}=1.732$ ，詳式(1-2)

三、 $V_o=\alpha V_m=1.732\times 2=3.46\text{m/s}$ ，詳式(1-1)

最大沖刷深度設計研判
可以最大設計水深視之

步驟三：石材平均粒徑 (D_m)

假設 $D_m=20\text{cm}=0.2\text{m}$ ，木排樁內拋石之無因剪力 $\tau_{*d}=0.05$ ，詳式(3-5)

一、 $\phi_0=6+5.75\log\left(\frac{2.5}{0.5}\right)=10.52$ ，假設 $K_s=2.5D_m$ ，詳式(3-3)

二、 $u_*=\frac{V_o}{\phi_0}=\frac{3.46}{10.52}=0.32$ ，詳式(3-2)

三、 $\tau_{*sd}=\tau_{*d}\times\cos\theta\sqrt{1-\left(\frac{\tan\theta}{\tan\phi}\right)^2}=0.05\times 0.63=0.031$ ($\theta=26.57^\circ$ ， $\phi=35^\circ$)，詳式(3-4，3-5)

四、 $D'_m\geq\frac{U_*^2}{S\times g\times\tau_{*sd}}=\frac{0.32^2}{1.65\times 9.81\times 0.031}=0.20\text{m}=20\text{cm}\leq D_m$ (0k)

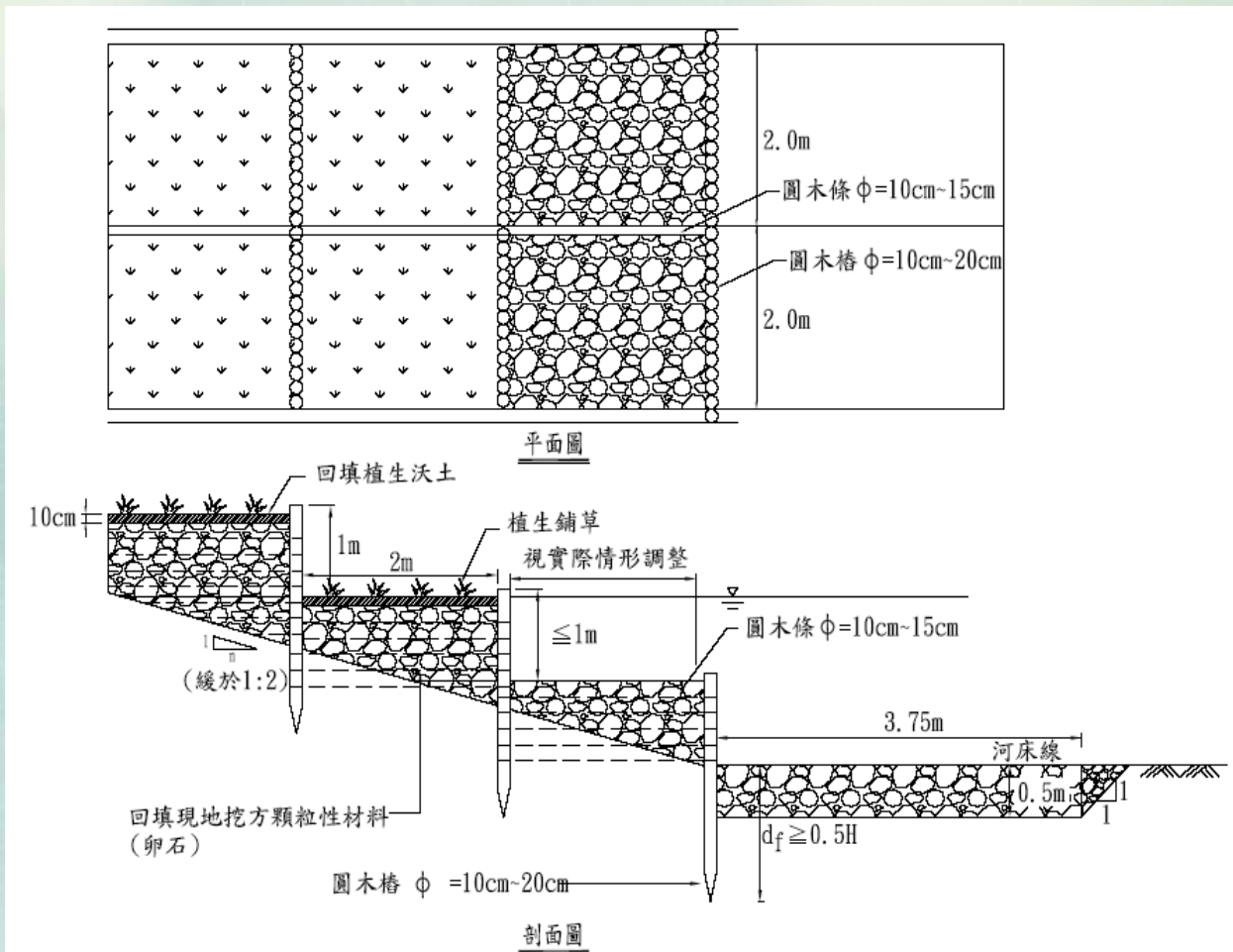
步驟四：剪力檢核

一、 $\tau=rRS_f=9.81\times 1000\times 2.5\times 0.00074=18.1(\text{N/m}^2)$

由P.32各種材料臨界水流剪力顯示，本工法於發生設計洪水時坡面植草可能遭受破壞，但木排樁內拋石可穩定。

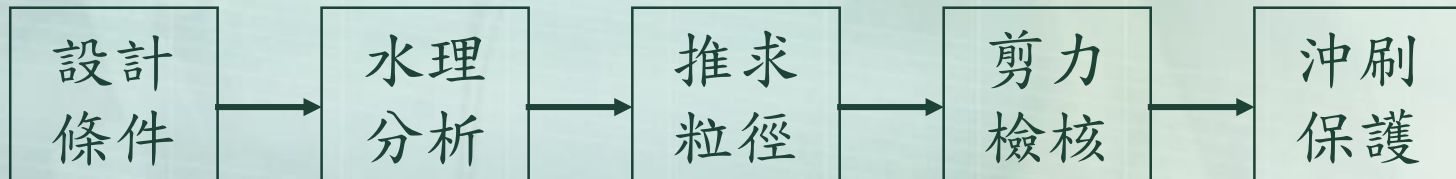
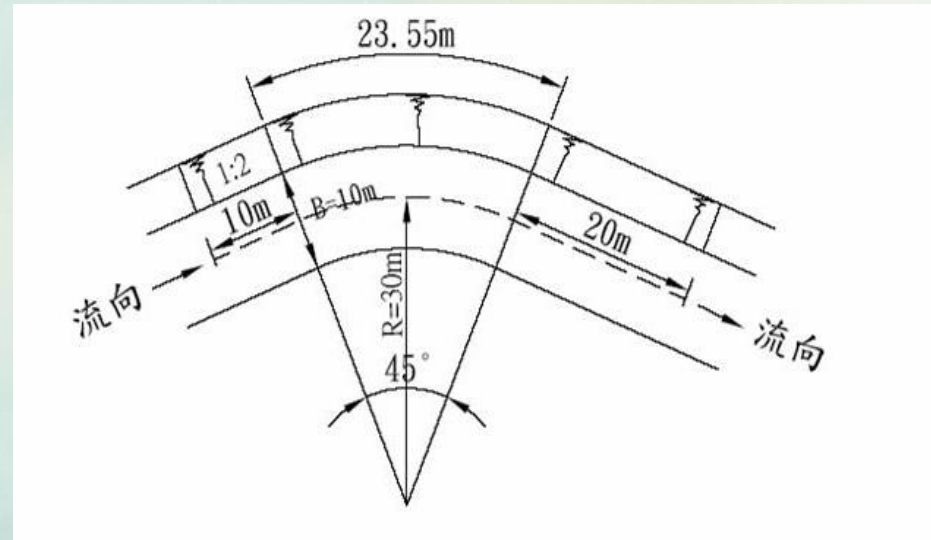
步驟五：護坦工長度推估

- ▶ 建議以拋石為護坦工，河床拋石粒徑以(式4-1)推算得 $D_m=13\text{cm}$
- ▶ 假設沖刷後護坦工坡度1(V):2(H)，且沖刷後護坦厚度約 $2.5D_m$ ，亦即原護坦工厚度 $T_a=1.5\times 2.5D_m=3.75D_m\cong 50\text{cm}$ ，詳式(5-3)
- ▶ 護坦工長度 $=1.5\triangle Z=1.5\times 2.5=3.75\text{m}$ ，詳式(5-2)



■ 拋石護岸

假設某一災修工程，以拋石護岸工法進行彎道之保護。護岸高 3.5m，設計水深 3m，平均流速 $V_m=3\text{m/s}$ ，河床質 $d_{50}=5\text{cm}$ ，河岸坡度為 1(V):2(H)，河寬 10m，曲率半徑 $R=30\text{m}$ 請設計符合該條件下的拋石平均粒徑 D_m 及應保護範圍。



步驟一：設計條件

- 一、一維平均流速 $V_m=3\text{m/s}$ ，設計水深 $H_d=3\text{m}$ ， $d_{50}=5\text{cm}$
- 二、河寬 $B=10\text{m}$ ，曲率半徑 $R=30\text{m}$
- 三、河岸傾斜角 $\theta=26.6^\circ$ ，拋石安息角 $\phi=38^\circ$

步驟二：水理分析

- 一、 $\Delta Z=H_d \cdot (1.07-0)=3.21\text{m}$ 。詳式(6-6)， $R/B=3$ ，並假設無一般沖刷
- 二、 $\alpha=1+\frac{10}{2 \times 30}+\frac{3.2}{2 \times 3}=1.70$ ，詳式(1-4)
- 三、 $V_o=\alpha V_m=1.7 \times 3=5.1\text{m/s}$ ，詳式(1-1)
- 四、水位超高： $\Delta h=\frac{3^2}{9.8} \times \frac{10}{30}=0.31\text{m}$ ，詳式(2-1)。護岸高 $3\text{m} > H_d: 2.5\text{m} + \text{超高}: 0.31\text{m} = 2.81\text{m}(\text{OK})$

步驟三：石材平均粒徑(D_m)

- 一、亂流強度 $E_1=1.2$

二、 $K = \frac{1}{\cos \theta \sqrt{1 - \left(\frac{\tan \theta}{\tan \phi}\right)^2}} = 1.457$ ，詳式(4-2)

三、 $D_m = \left\{ \frac{1}{E_1^2 \times 2g \left[\frac{\rho_s}{\rho_w} - 1 \right]} V_o^2 \right\} \times K = 82\text{cm}$

步驟四：護岸工厚度及拋石級配

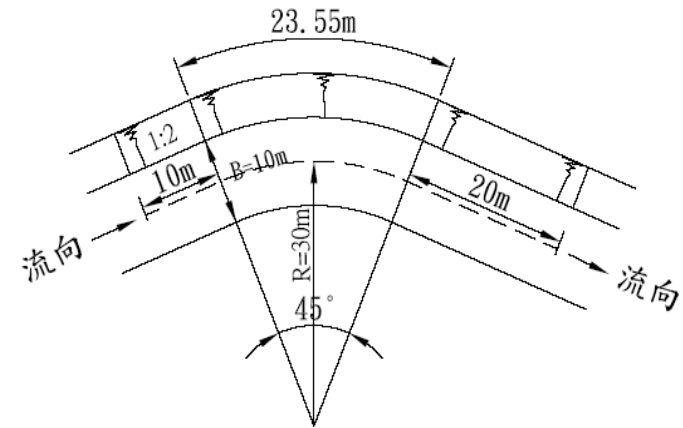
- 一、護岸工厚度至少應為 $2.5D_m=2.05(\text{m})$
- 二、拋石級配應介約 $0.75W \sim 0.25W$ (W 為 D_m 之重量)，但其中應有 75% 之拋石重量應大於 W

步驟五：護坦工長度推估

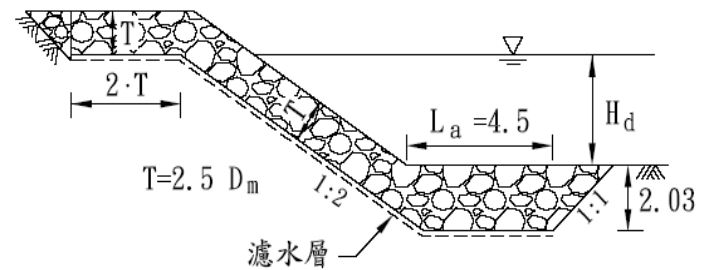
- 一、建議以拋石為護坦工，河床拋石粒徑以(式 6.5-7a)推算得 $D_m=54\text{cm}$ ，亦即可將臨界粒徑視為拋石平均粒徑 D_m
- 二、假設沖刷後護坦工坡度 1(V):2(H)，且沖刷後護坦厚度約 $2.5D_m$ ，亦即原護坦工厚度 $Ta=1.5 \times 2.5D_m=3.75D_m \doteq 203\text{cm}$ ，詳式(5-3)

步驟五：工程佈置

由計算結果顯示，該案例之設計代表流速顯然大於拋石適用範圍，但搶修工程旨在施工快速，且可收暫時之效，故若無 $D_m=82\text{cm}$ 之石材，亦可選擇較小代替(如以 $V_m=3\text{m/s}$ 設計)，但需有被破壞之預期，保護長度建議總長度為 53.55m 。



平面圖



剖面圖

拋石工案例布置圖

■ 籠工護岸

假設某一直線河段護岸工程中，以卵石填充材製成之箱籠，單位體積重 1.8t/m^3 ，布置於壓實鬆細砂基礎上，背填土以壓實普通砂填充，背填土坡面上有一均佈載重 $q=1.47\text{t/m}^2$ 存在，河床質 $d_{50}=0.25\text{mm}$ ，一維平均流速 3m/s ，設計水深 3m ，請設計符合該流速之平均粒徑(D_m)，請檢核整體結構是否安全與可能沖刷深度

步驟一：設計條件

- 一、箱籠單位重：卵石填充材成之箱籠單位體積重 $\gamma_q=1.8t/m^3$
- 二、背填土單位重：壓實普通砂之土壤單位體積重 $\gamma_s=2.0t/m^3$ ，土壤內摩擦角 $\phi=40^\circ$
- 三、背填土坡面均佈載重 $q=1.47t/m^2$ 。
- 四、基礎最大承载力：普通粘土允許承载力 $q_a=20t/m^2$
- 五、一維平均流速 $V_m=3m/s$ ，設計水深 $H_d=3m$ ， $d_{50}=0.25mm$
- 六、箱籠護岸坡度1(V)：0.5(H)

步驟二：水理分析

- 一、 $\Delta Z=3.66m$ ， $d_{50}\leq 0.0015m$ ，詳式(7-1)
- 二、 $\alpha=1+\frac{3.66}{2\times 3}=1.61$ ，詳式(1-2)
- 三、 $V_o=\alpha V_m=1.61\times 3=4.83m/s$ ，詳式(1-1)

步驟三：石材平均粒徑(D_m)

假設 $D_m=25cm=0.25m$ ，箱籠臨界無因次剪力 $\tau_{*d}=0.12$ ，詳式(3-8)

- 一、 $\phi_0=6+5.75\log_{10}\left(\frac{3}{0.625}\right)=9.92$ ，假設 $K_s=2.5D_m$ ，詳式(3-3)
- 二、 $u_*=\frac{4.83}{9.92}=0.49$ ，詳式(3-2)
- 三、 $\tau_{*sd}=\tau_{*d}=0.12$ ，因 $\theta\geq\phi$ ，詳式(3-4)及(3-8)
- 四、 $D_m\geq\frac{u_*^2}{S\times g\times\tau_{*d}}=\frac{0.49^2}{1.65\times 981\times 0.12}=0.12(m)=12cm < 25cm(OK)$ ，詳式(3-1)
- 五、根據工程會石籠(第02374章)規定，籠工石材直徑22cm~35cm者應占80%以上，所以本案例箱籠石材平均粒徑 $D_m=25cm$ 可抗水流剪力，並符合工程會要求

步驟四：護坦工厚度

一、建議以拋石為護坦工，河床拋石粒徑以式(4-1)推算得 $D_m=28\text{cm}$ ，亦即可將臨界粒徑視為拋石平均粒徑 D_m

二、假設沖刷後護坦工坡度 $1(V):2(H)$ ，且沖刷後護坦厚度約 $2.5D_m$ ，亦即原護坦工厚度 $T_a=1.5 \times 2.5D_m=3.75D_m \doteq 105\text{cm}$ ，詳式(5-3)

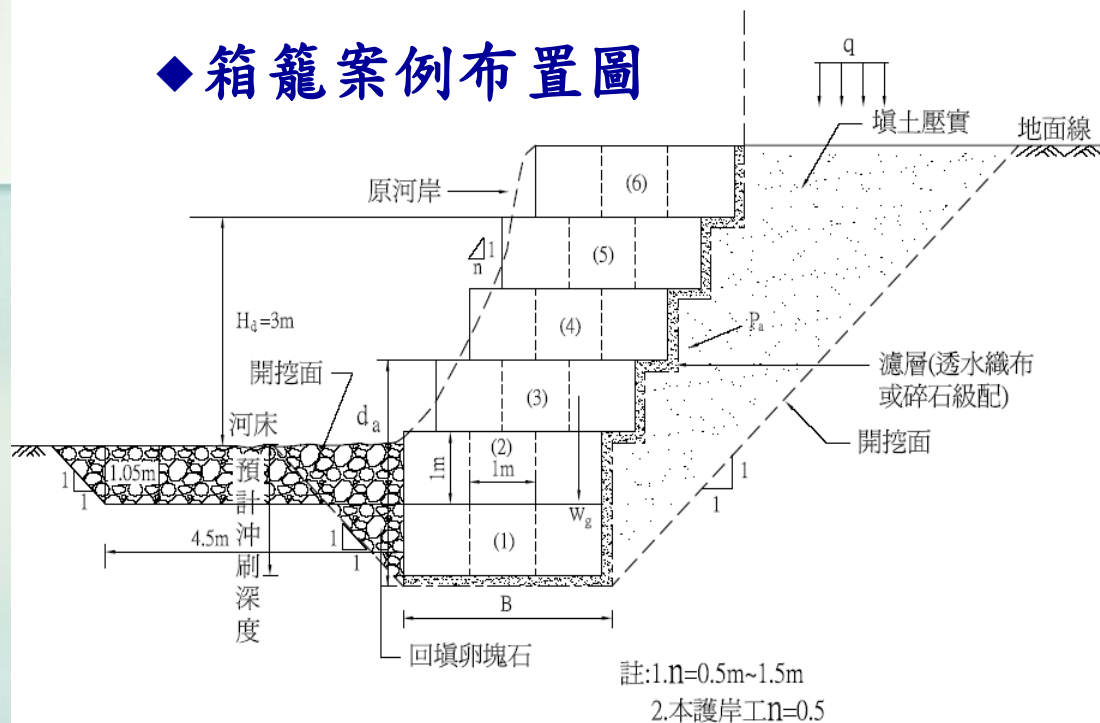
三、護坦工長度 $= 1.5 \Delta Z = 1.5 \times 3 = 4.5\text{m}$ ，(詳式5-2)

四、增加箱籠結構與背填土之濾水層設計，由於碎石級配甚難施工，建議以人工織布為主

五、詳細布置詳圖所示

步驟五：安定分析

◆箱籠案例布置圖



符號說明: P_a :主動土壓力

H :箱籠護岸高度

β :箱籠傾斜角度,逆時針為正,順時針為負(一般 $\beta=-6^\circ$)

α :坡面回填角度

δ :箱籠摩擦角度

d_a :主動土壓力至基礎趾部距離

d_g :整體結構重心至基礎趾部距離

W_g :整體結構重

q :坡面載重

B :箱籠基礎寬

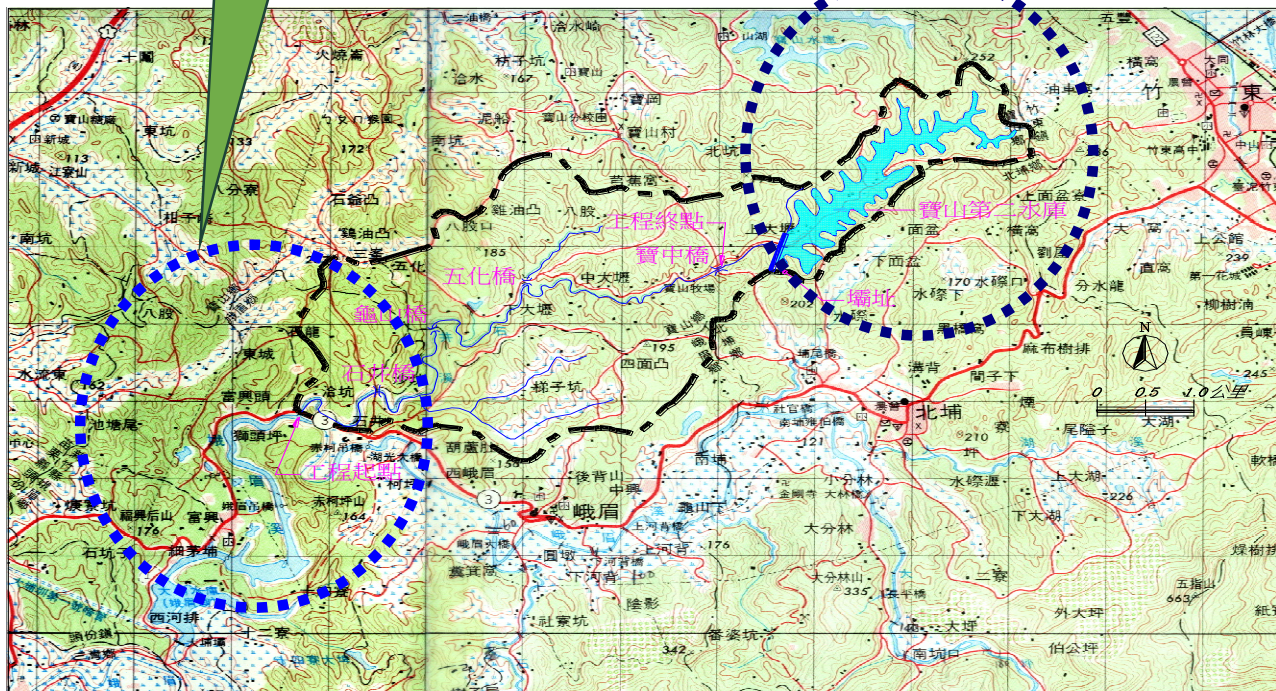
■ 固床工

新竹石井溪整治考量

上游寶二水庫完工後將因砂源減少導致河道不穩定，整治時須考量穩定坡度，以減少因河床不穩定而導致工程破壞。請規劃其穩定坡度與相應之固床工佈置。

大埔水庫

寶二水庫



現況
條件

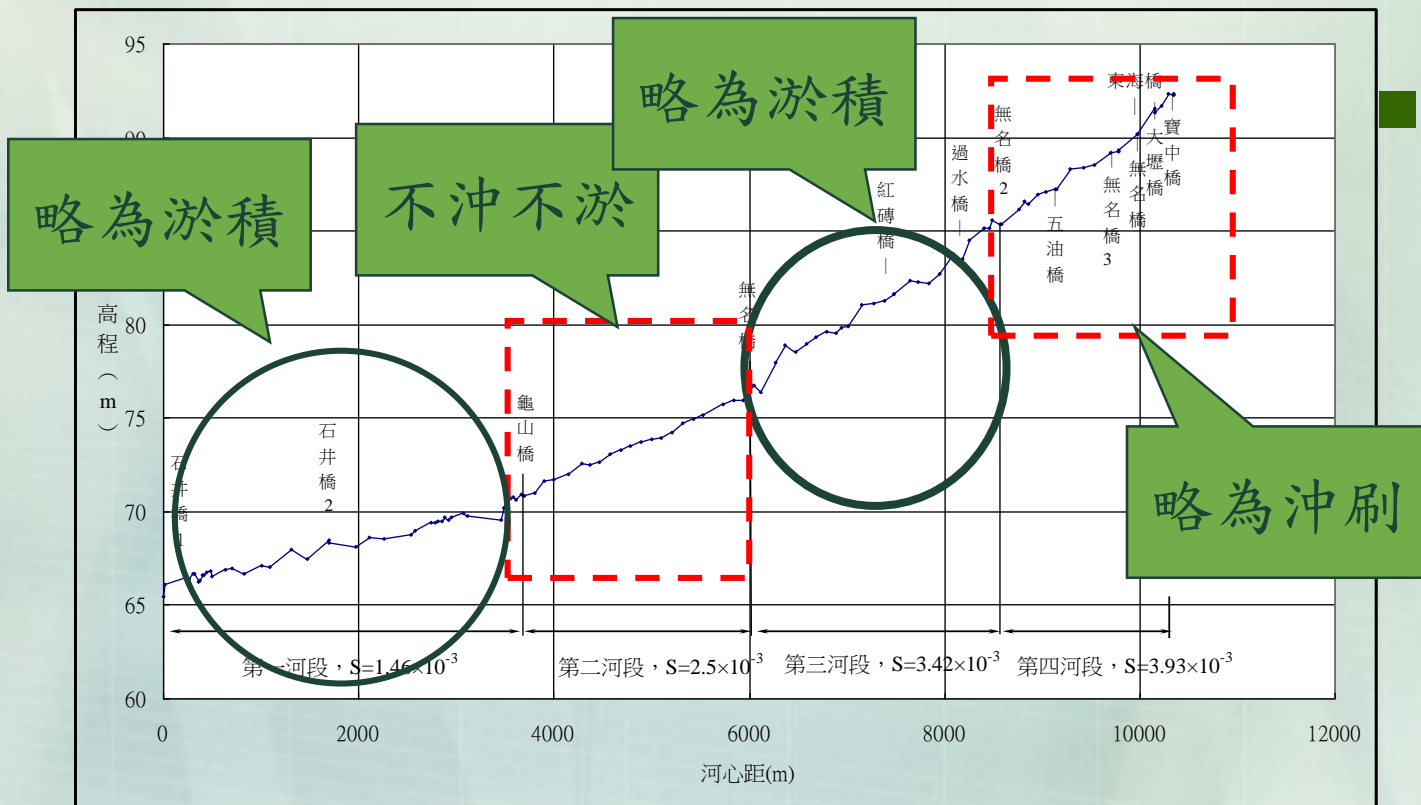
影響
條件

穩定坡
度分析

固床工數量及高
度研擬

■ 現況及影響條件

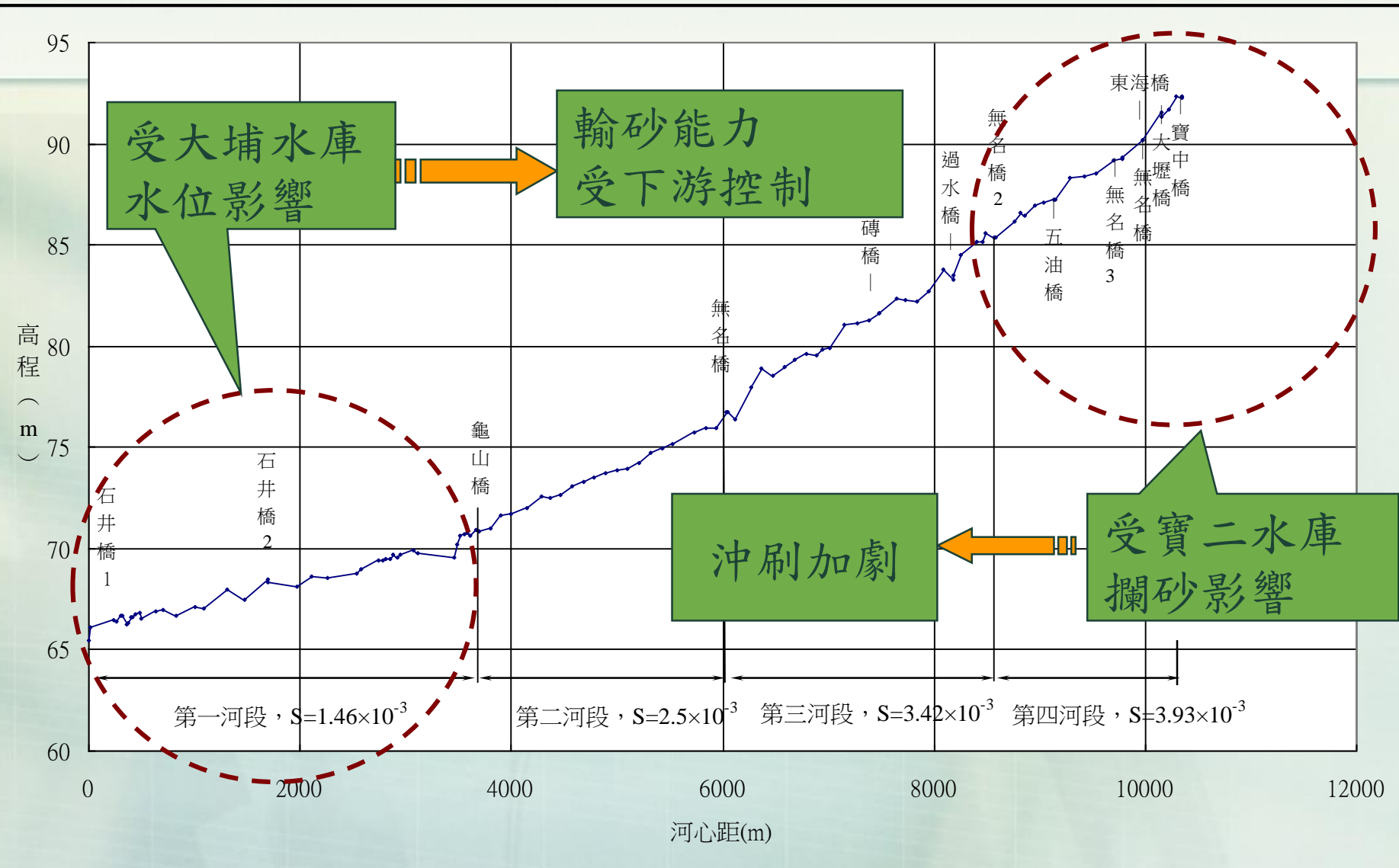
河段編號	里程(m)	83 年施測坡度	91 年施測坡度	說明
1	0~3,693	1.54×10^{-3}	1.46×10^{-3}	石井橋 1~龜山橋
2	3,693~6,039	2.53×10^{-3}	2.52×10^{-3}	龜山橋~無名橋 1
3	6,039~8,573	3.56×10^{-3}	3.42×10^{-3}	無名橋 1~無名橋 2
4	8,573~10,349	3.62×10^{-3}	3.93×10^{-3}	無名橋 2~寶中橋



■ 河床質組成

- $D_{50}=.3\text{mm}$
- $D_{90}=4\text{mm}$
- 砂礫質河床

■ 現況及影響條件

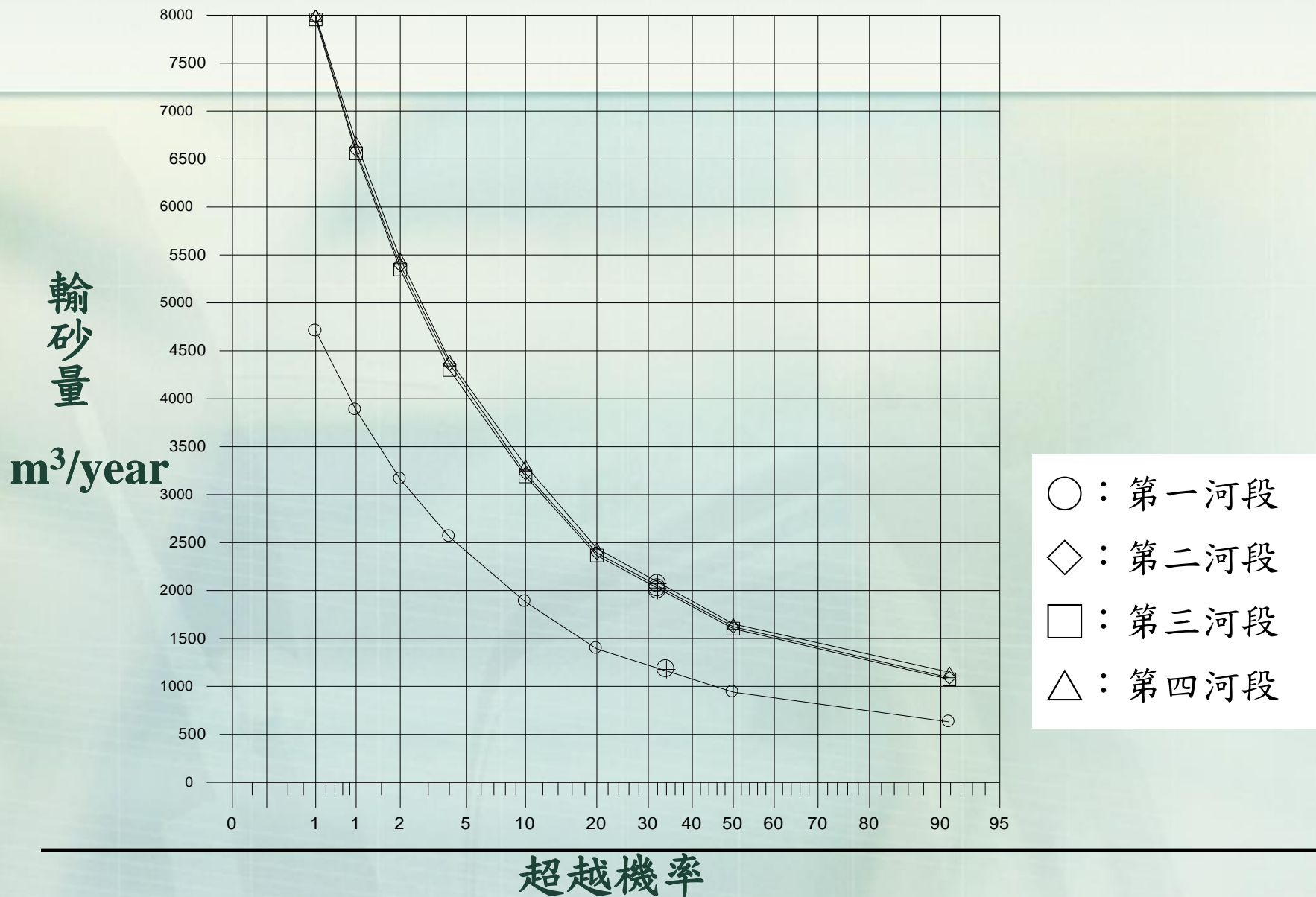


■ 穩定坡度分析

- 以MPM (Bed Load)及Einstein (Suspended Load)公式依各河段之河床質粒徑分佈，分別計算不同坡度及單位寬度流量下之推移載輸砂量(Bed load)與懸浮載(Suspended Load)輸砂量，經概率加總後得河床質載輸砂量
- 維持2~4段輸砂能力一致

河段	頻 率 年								年平均 (m ³ /yr)
	200	100	50	25	10	5	2	1.1	
1	4710	3880	3160	2557	1879	1391	940	629	1177
2	7984	6593	5392	4365	3221	2391	1624	1090	2026
3	7956	6561	5349	4301	3190	2365	1602	1073	2002
4	7797	6675	5460	4401	3304	2439	1651	1147	2070

輸砂機率曲線圖



■ 固床工數量及高度

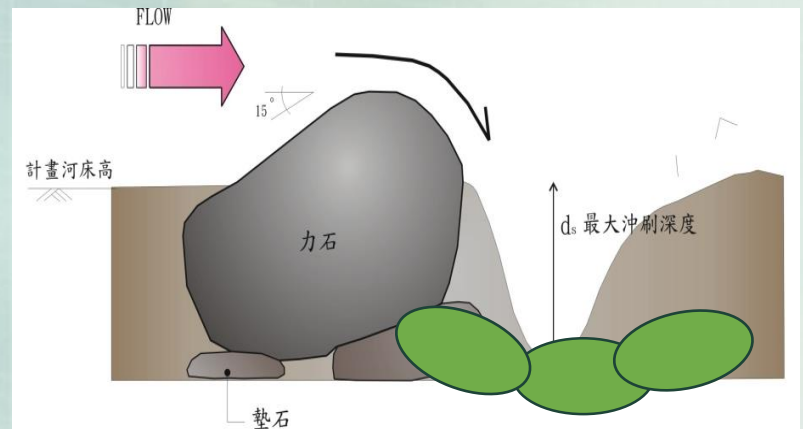
河段	現況坡度	計畫坡度	河段長 (m)	高差 (m)	固床工高度 (m)	固床工數量
二	2.52×10^{-3}	1.19×10^{-3}	2,350	3.12	0.5	$6.24 \div 7$
三	3.42×10^{-3}	1.30×10^{-3}	2,534	5.37	0.5	$10.74 \div 11$
四	3.93×10^{-3}	1.90×10^{-3}	1,776	3.60	0.5	$7.2 \div 8$

■ 固床工設計條件

- 設計流速約 2m/s
- 單寬流量 3.5cms/m
- 河床質 $d_{90}=4.0\text{mm}$
- 水頭差 $H=0.2\text{m}$
- 下游水深 $y_2=3.7\text{m}$

■ 固床工設計參數

- 石材粒徑約 18cm
- 預計沖刷深度約 80cm 式 (6-5)





■ The End ■

WERC

WERC

Water Environment Research Center
國立台北科技大學水環境研究中心