



生態工法之安全性及工法探討

洪勇善

淡江大學土木系

陳榮河

台灣大學土木系

■ 傳統整治工法

- 考量結構之安全性及耐久性
- 鋼筋、混凝土材料
- 不透水、單調



■ 生態工法(近自然工法)

- 考量工程與環境、生態之諧合關係
- 以生態系統之自我調適能力為基礎
- 環境之永續發展

工法之生態考量

■ 施工材料

- 多使用自然材料
(石材、木材、天然植栽...)

■ 施工過程

- 避免使用大型機具；降低空氣、水及噪音污染；多使用現地材料...

■ 工程設計

- 滿足生態環境多樣性需求，適於動植物生存。

➤ 常用工法簡介

於自然穩定地區，通常植生良好，可見植物具水土保持功效。且良好而豐富之植被也提供生物一個適當之棲息環境。因此，植物是生態工法中不可或缺之重要部分。而根據工法中植物使用情況之不同，可將其分為工程方法、植生方法與植生混合方法三類，各方法中常用之工法如下表所示。

方法分類	常用工法
工程方法	砌石牆、石籠牆、格框擋土牆、加勁擋土牆、石樑固床工、河床拋石、潛壩
植生方法	修坡植栽、切枝壓條法、打樁編柵法
植生混和方法	土工合成材配合植生工法、格框噴植法、土釘混合噴植法、土工防蝕模袋

➤ 擋土結構物之穩定分析

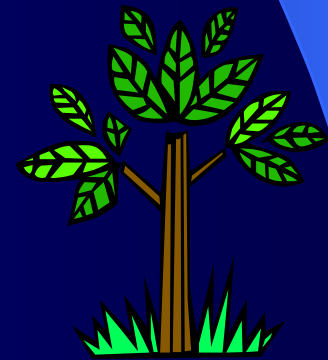
- 砌石牆、石籠牆、格框擋土牆
- 加勁擋土牆

➤ 護岸結構物之穩定分析

- 地工合成材之抗沖蝕及抗淘空設計

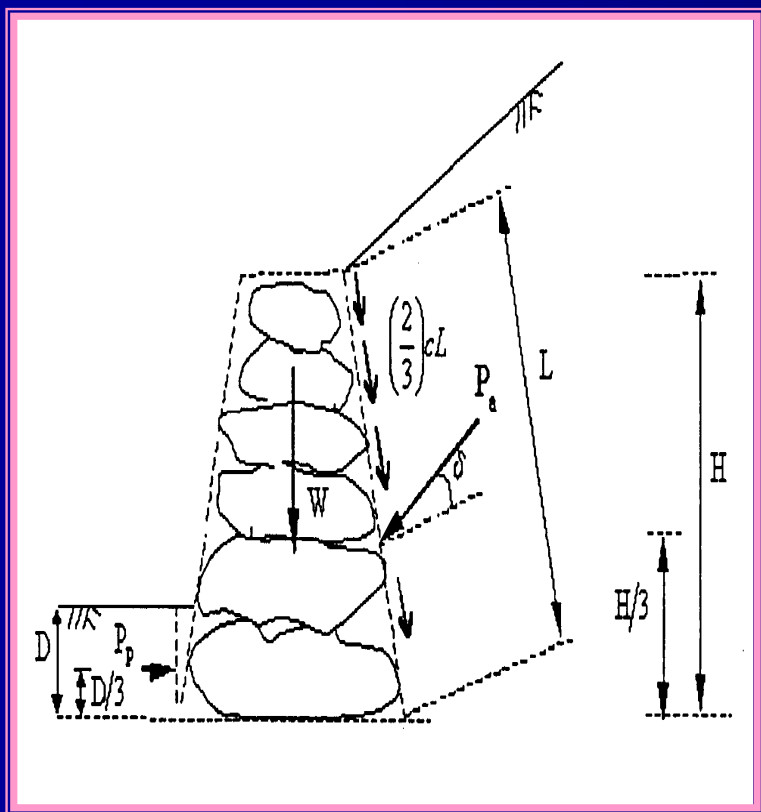
➤ 邊坡整治工

- 土釘混合植噴法
- 地工防蝕模袋



擋土工

➤ 擋土結構物穩定分析

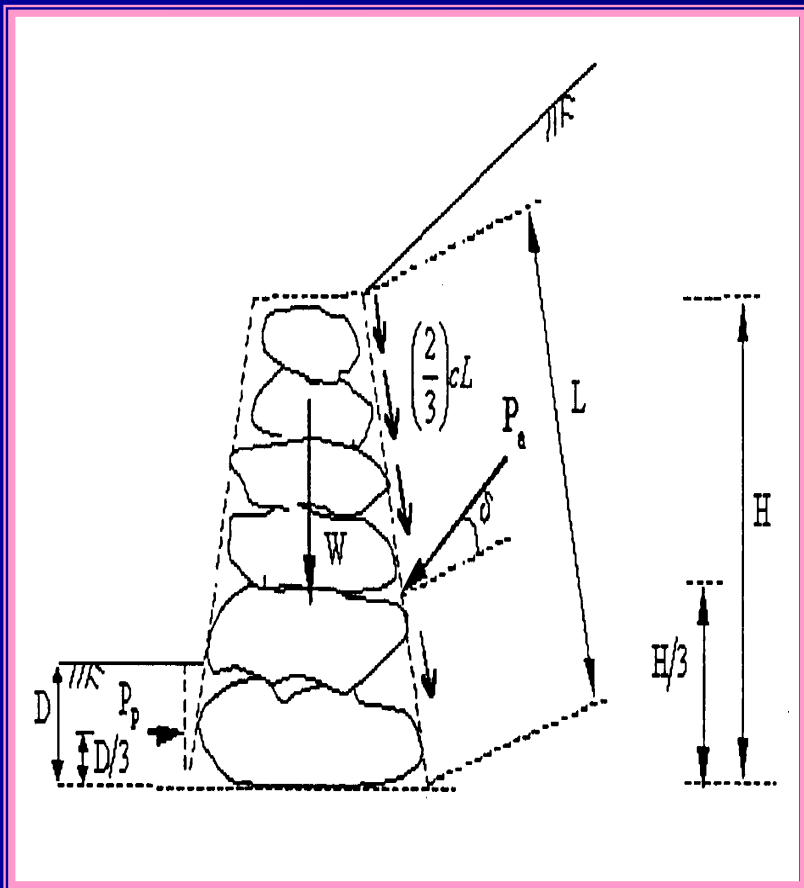


【擋土牆上各項作用力示意圖】

- 主動土壓力(P_a)
根據「wedge theory」來考慮各項參數，對擋土牆之影響。
- 被動土壓力(P_p)
常時與震時均依Rankine土壓力公式計算：

$$P_p = \frac{1}{2} \gamma D^2 \left(\frac{1 + \sin \phi}{1 - \sin \phi} \right)$$

➤ 擋土結構物穩定分析



- 凝聚力 (c)
通常折減至 $\frac{2}{3} c$ 。

- 地震力
採擬靜態分析方式。

➤ 擋土結構物穩定分析

- 計算傾倒之穩定安全係數

$$F_s = \frac{\sum M_r}{\sum M_d} \quad ; \quad \sum M_r \text{ 爲抵抗力矩和、} \sum M_d \text{ 爲傾倒力矩和。}$$

- 計算滑動穩定性之安全係數

$$F_s = \frac{\left(\frac{2}{3}c\right)B + \sum V \tan\left(\frac{2}{3}\phi\right) + p_p}{\sum H} \quad ; \quad \begin{aligned} B &= \text{底版寬} \\ p_p &= \text{被動土壓力} \\ \sum V &= \text{垂直力之和} \\ \sum H &= \text{水平力之和} \end{aligned}$$

➤ 擋土結構物穩定分析

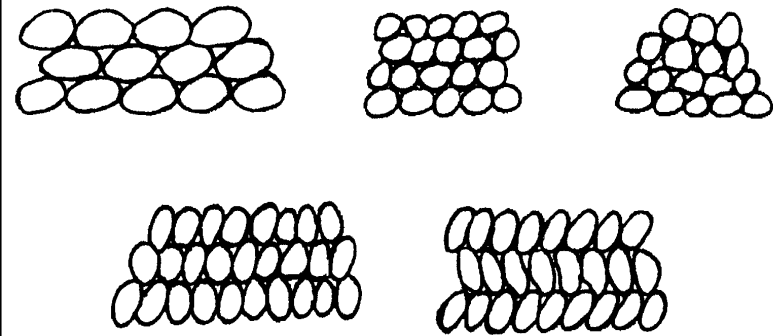
- 計算支承力之穩定性安全係數

$$F_s = \frac{q_{ult}}{q_{max}} \quad ; \quad q_{ult} \text{ 爲基礎土壤之極限支承力}$$

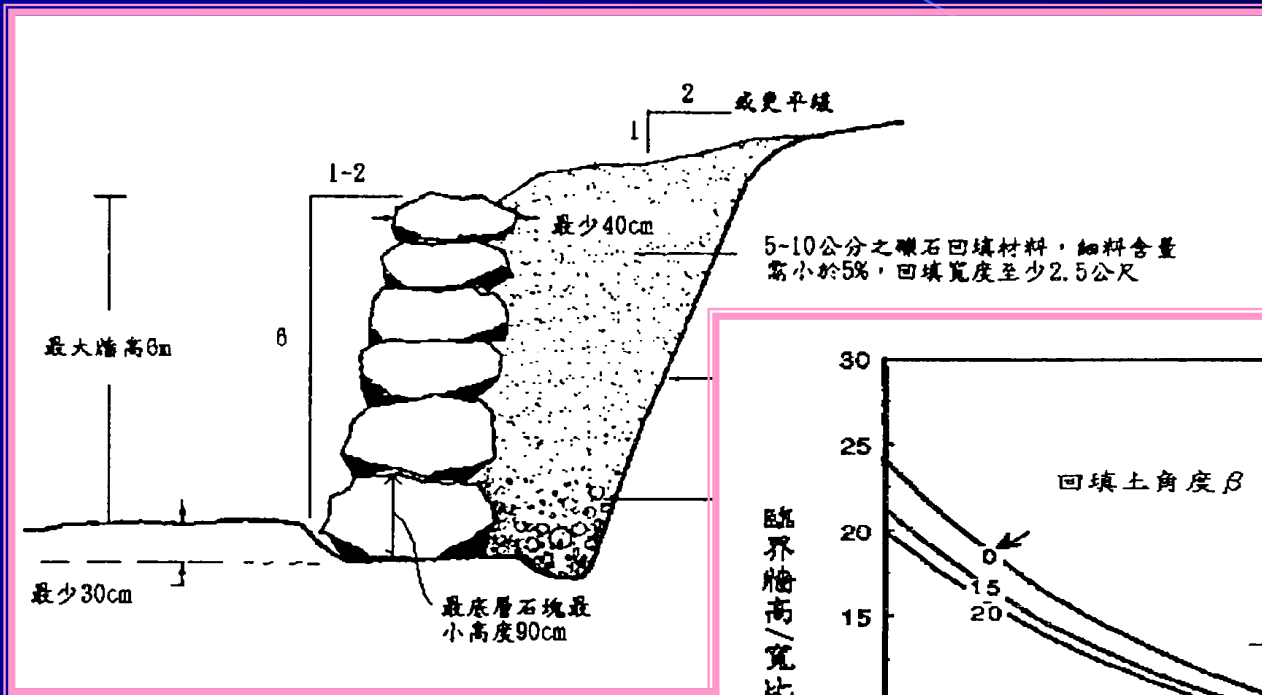
q_{max} 爲地盤反力之最大值

擋土工 (1) – 砌石牆

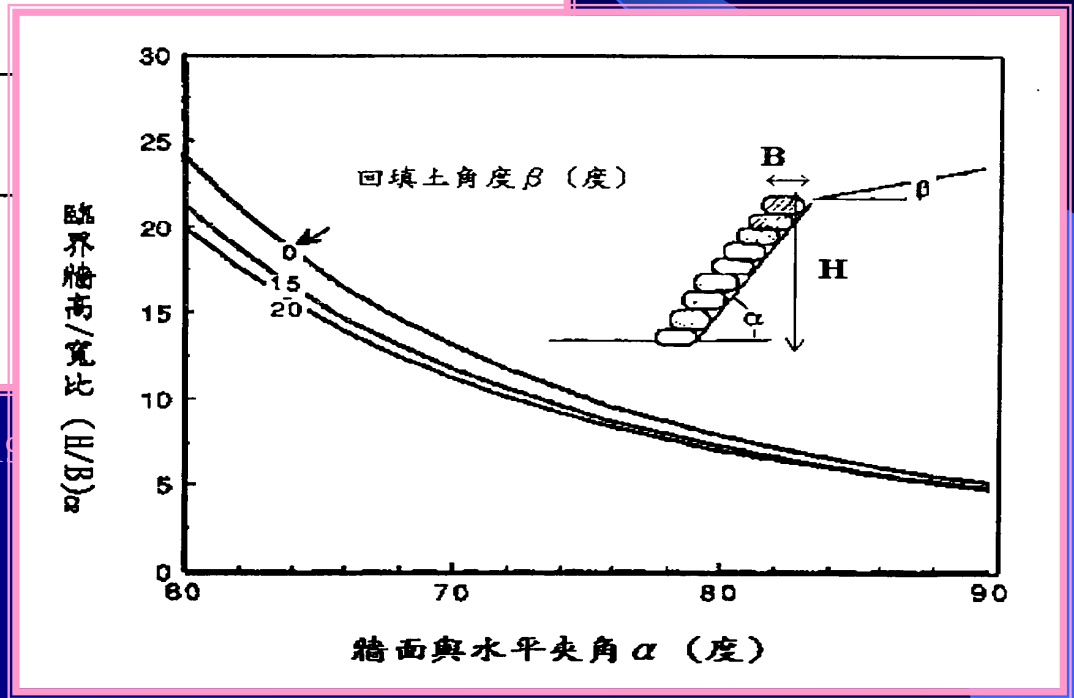
當河岸邊坡坡度大時，於斜坡底以石塊堆疊而成之矮牆，如圖所示。目的在於防止填土或開挖面之崩塌及穩定邊坡。



➤ 擋土工(1)—砌石牆

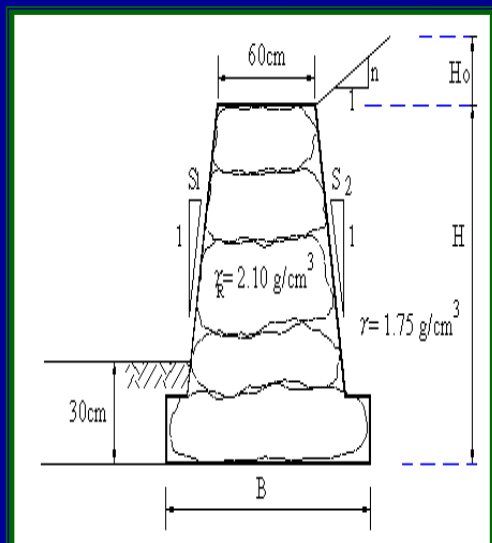


【砌石牆示意圖 (Gray and Sotir, 1996)】



【砌石牆之臨界寬高比 (Gray and Sotir, 1996)】

- 將砌石牆視為一等面積重力式擋土牆，依其設計準則及基本尺寸要求，並分別變更砌石牆後被填土坡之坡度(n)及摩擦角(ϕ)，分析其斷面尺寸要求，其詳圖及詳表如下。



背填土坡度 (n)		0		背填土坡度 (n)		0	
背填土參數		C=0	$\phi = 28^\circ$	背填土參數		C=0	$\phi = 38^\circ$
H	H _o	S1	B	H	H _o	S1	B
2	0	0.13	0.96	2	0	0.10	0.76
2	0	0.17	0.82	2	0	0.12	0.66
3	0	0.14	1.81	3	0	0.13	1.18
3	0	0.17	1.63	3	0	0.15	1.07
4	0	0.16	2.74	4	0	0.14	1.68
4	0	0.18	2.50	4	0	0.17	1.44

生態上之配合度：

牆之材料及外觀具天然型態，石縫中又利於動、植物生存，極符合生態工法之精神。

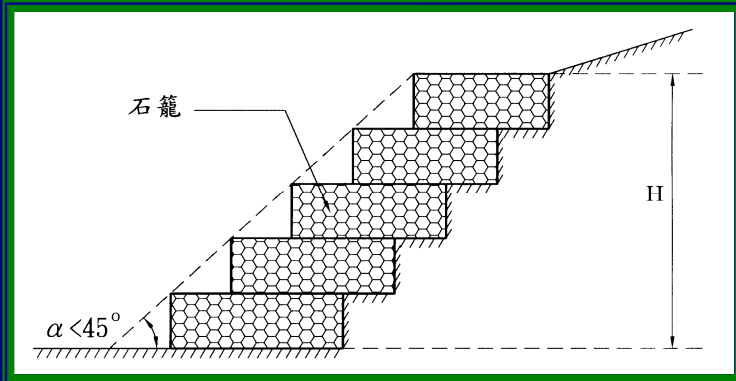
擋土工(2)－石籠牆



圖

文

石籠擋土牆係以六角狀之鉛絲編成長方型空盒子，並填入10~30cm大小之卵塊石堆築而成之堆疊式擋土牆。最簡單之石籠為1公尺高之石籠牆，僅用一層石籠，石籠規格可依所需情況加以設計，並無一定尺寸。



設計準則

欲增加石籠高度，可於第一層石籠上再堆疊石籠，每層石籠堆疊時些許向後退。一般而言，高度超過2公尺之石籠即必須另外加以設計。愈高的牆需要愈大之基礎寬度，或是使用護牆來抵抗背填土之傾倒彎矩。至於石籠牆之設計法，根據不同之應用有不同之考量，石籠之數量及排列方式與牆高、回填土料等有密切關係，可採用重力式擋土牆的設計分析原則來做初步設計，不過通常都採用石籠製造商所提供之設計規範。

生態上之配合度：

石籠牆為具有孔隙之結構物，因此可種植發根植物於其內，用以美化景觀，亦可做為生物棲息之所。

擋土工 (3) – 格框擋土牆



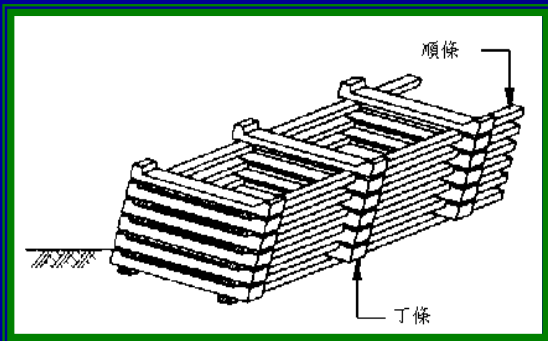
圖

文

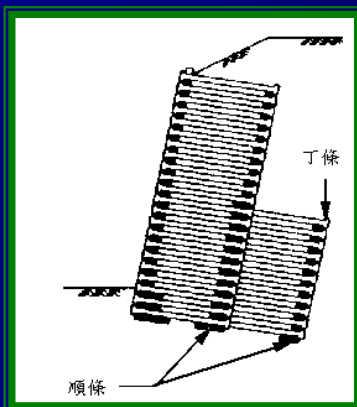
設計準則

格框擋土牆是指由樑組合而成之盒子狀結構，內部填充土壤或石塊，以構成重力式擋土結構。格框擋土牆可分為木格框及混凝土格框，木格框由於較為柔性，對差異沉陷及單一格梁之破壞或弱化較不敏感，而混凝土格框則是具有較高之剛性、力學性質及耐久性。

設計分析採用重力式擋土牆的設計原則。構造上要求坡面斜率至少 $1/6$ ，牆底寬度約為坡高的 $H/2 \sim H$ 。



(平面圖)



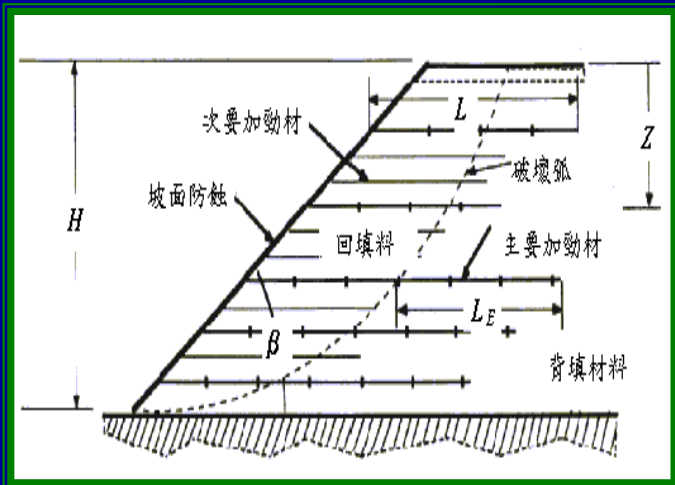
(立面圖)

生態上之配合度：
木格框則因具自然的感覺，較易與環境配合。

擋土工 (4) – 加勁擋土牆

圖 文

加勁擋土牆係利用加勁材料如：鋼片、鋼筋網、土工織物、土工格網等地工合成材，埋置於土壤內，形成加勁之擋土結構以抵抗土壓力之作用。



設計 準 則

在設計土工格網擋土結構時，最主要的考量便是加勁層垂直間距(d)及加勁層長度(L)，或破壞區外加勁材有效長度(L_E)。

生態上之配合度：

土工合成物具網眼者，可噴植草種；且於施工時，層間可塞植具發根、芽能力之活枝條，待植物成長，綠化效果極佳，更可提供生物之棲息。

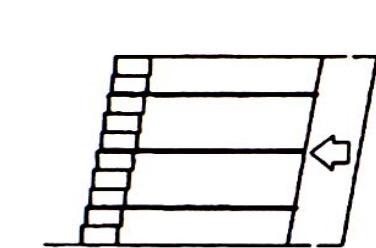
➤ 擋土工⁽⁴⁾—加勁擋土牆

- 施工案例

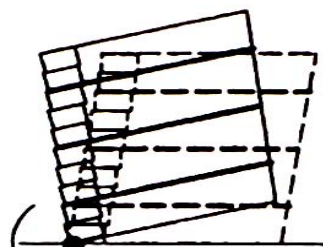


➤ 擋土工(4)—加勁擋土牆

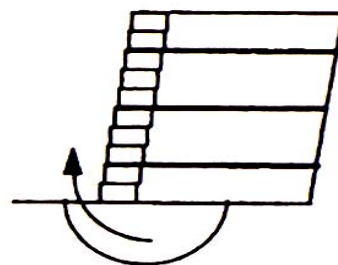
• 破壞模式



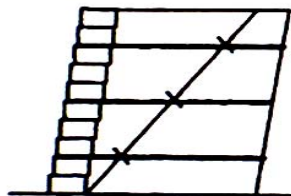
a) 牆體滑動



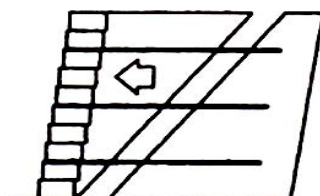
b) 傾覆



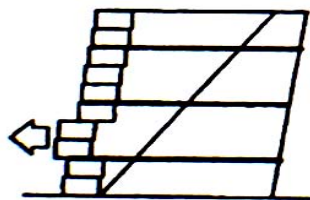
c) 承载力破壞



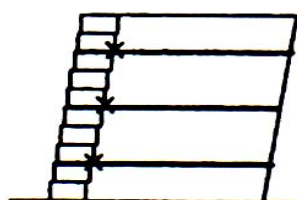
d) 拉斷



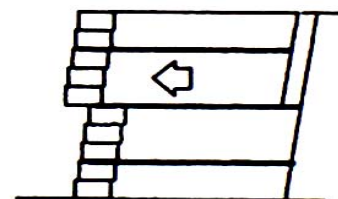
e) 拉出



g) 剪力破壞

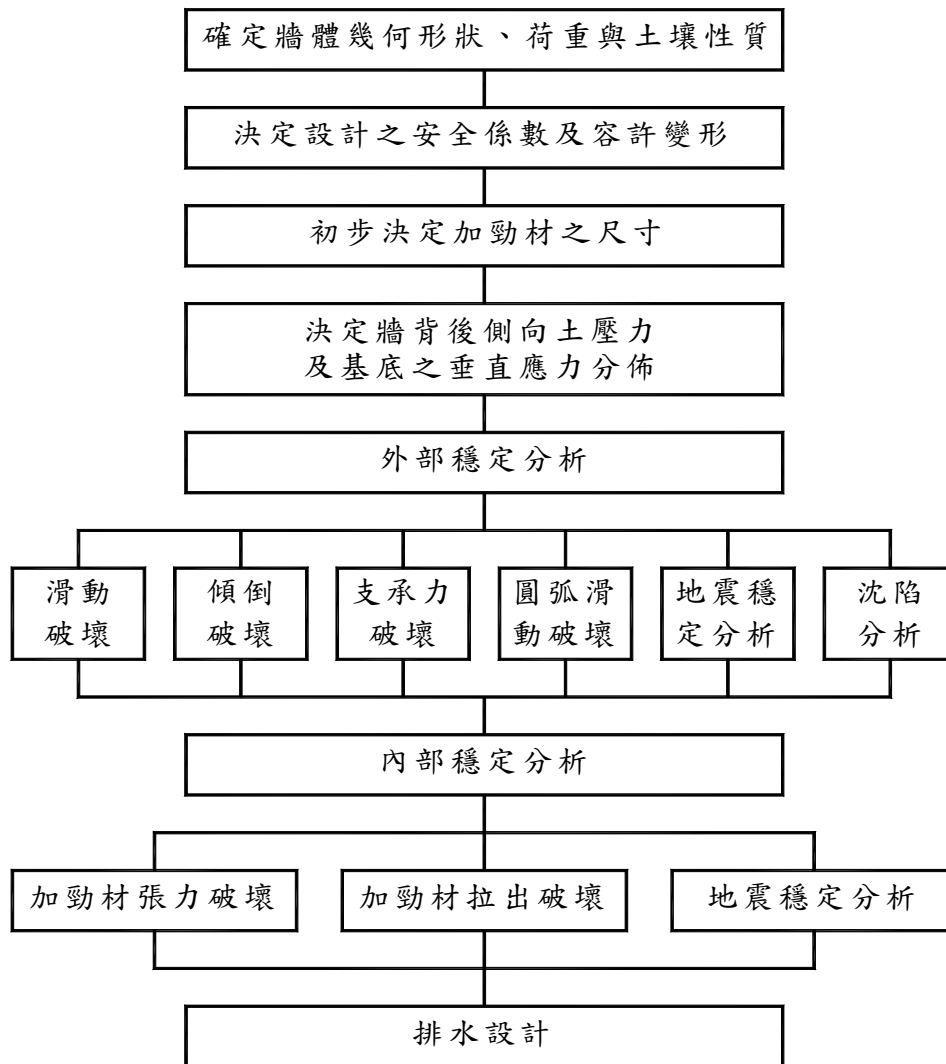


h) 接點破壞



f) 層間滑動

➤ 擋土工(4)——加勁擋土牆



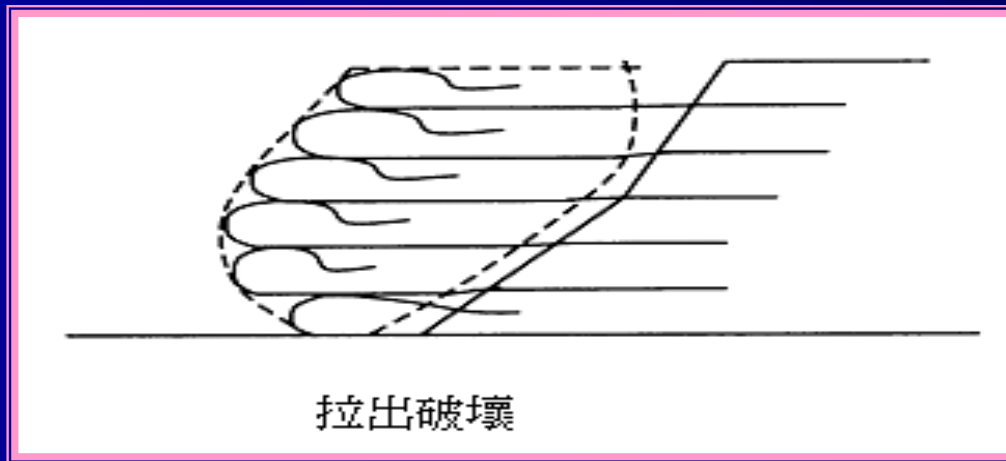
【加勁擋土牆之設計流程圖】

➤ 擋土工⁽⁴⁾—加勁擋土牆

• 加勁材內部穩定分析

於加勁材之錨定力考量部分，需注意加勁材與土壤間需提供足夠的摩擦力，以避免發生拉出破壞。兩者間之摩差阻力可經由下式計算：

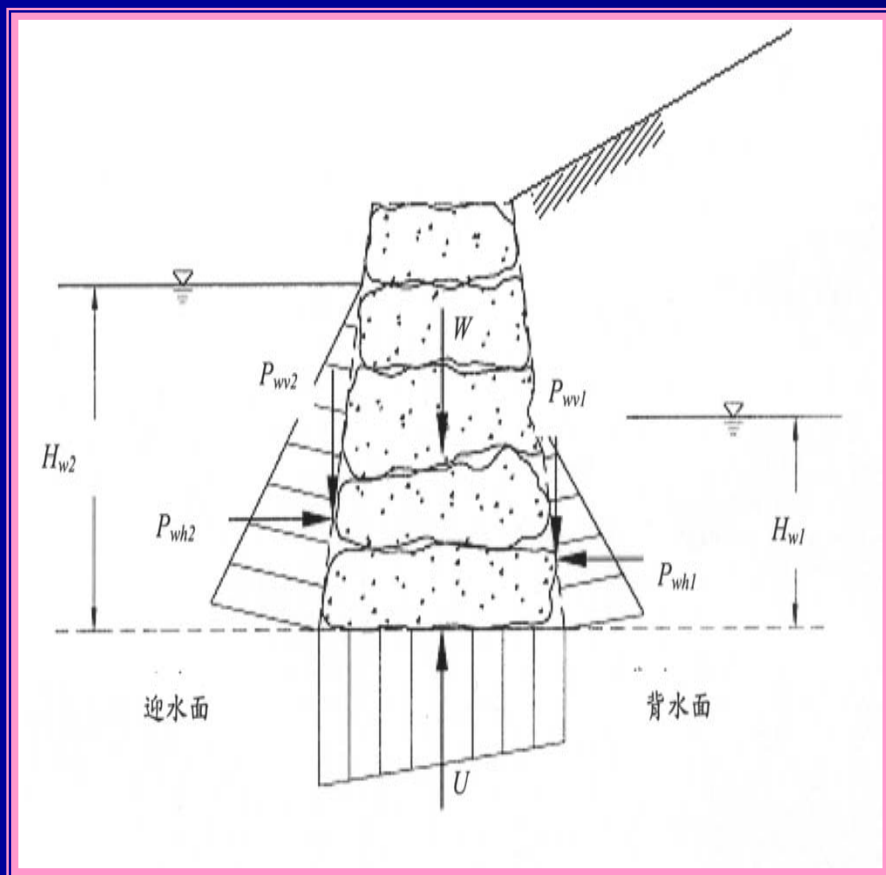
$$P_i = 2 \left[\mu L (\gamma h_i + w) + \alpha c L \right]$$



【加勁擋土牆拉出破壞示意圖】

護岸工

➤ 護岸結構物穩定分析



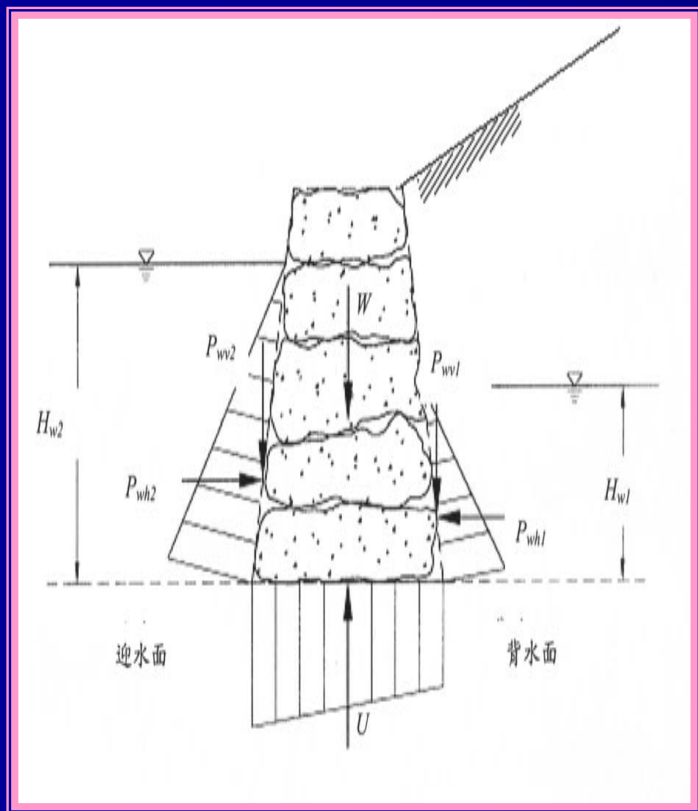
【作用於護岸上之水壓力及上舉力示意圖】

- 護岸之各項設計與穩定性分析，基本上與檢核擋土工類似，除了考慮牆本身自重及土壤作用力外，只需再考量水作用力之影響即可。

主要水作用力包括：

- 作用於迎水面與背水面之水壓力
- 地下水之上舉力

➤ 護岸結構物穩定分析



• 靜水壓力

靜水壓力作用於護岸之迎水面及背水面，兩面之壓力計算方式相同。且其可分為水平及垂直方向的靜水壓力。

$$P_{wh} = \frac{\gamma_w H_w^2}{2} \quad ; \quad P_{wv} = \gamma_w \int dV$$

其中， P_{wh} ：水平方向的單位寬度靜水壓力之合力

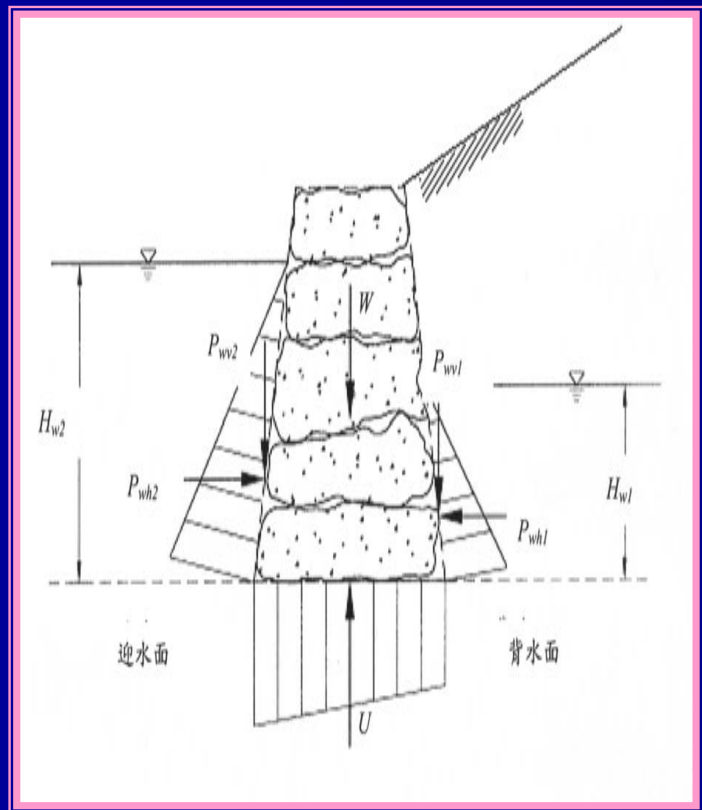
γ_w ：水之單位重

H_w ：水深

P_{wv} ：垂直方向的單位寬度靜水壓力之合力

$\int dV$ ：護岸表面鉛直以上水體積

➤ 護岸結構物穩定分析



• 上舉力

護岸基礎下方之水受到壓力差之緣故，而產生一上舉力。假設上舉力之壓力變化為線性分佈，則單位寬度之上舉力為：

$$U = \gamma_w \frac{H_{w1} + H_{w2}}{2} B$$

其中， U ：單位寬度上舉力

H_{w1} 、 H_{w2} ：分別為護岸兩側之水深

B ：基礎的寬度

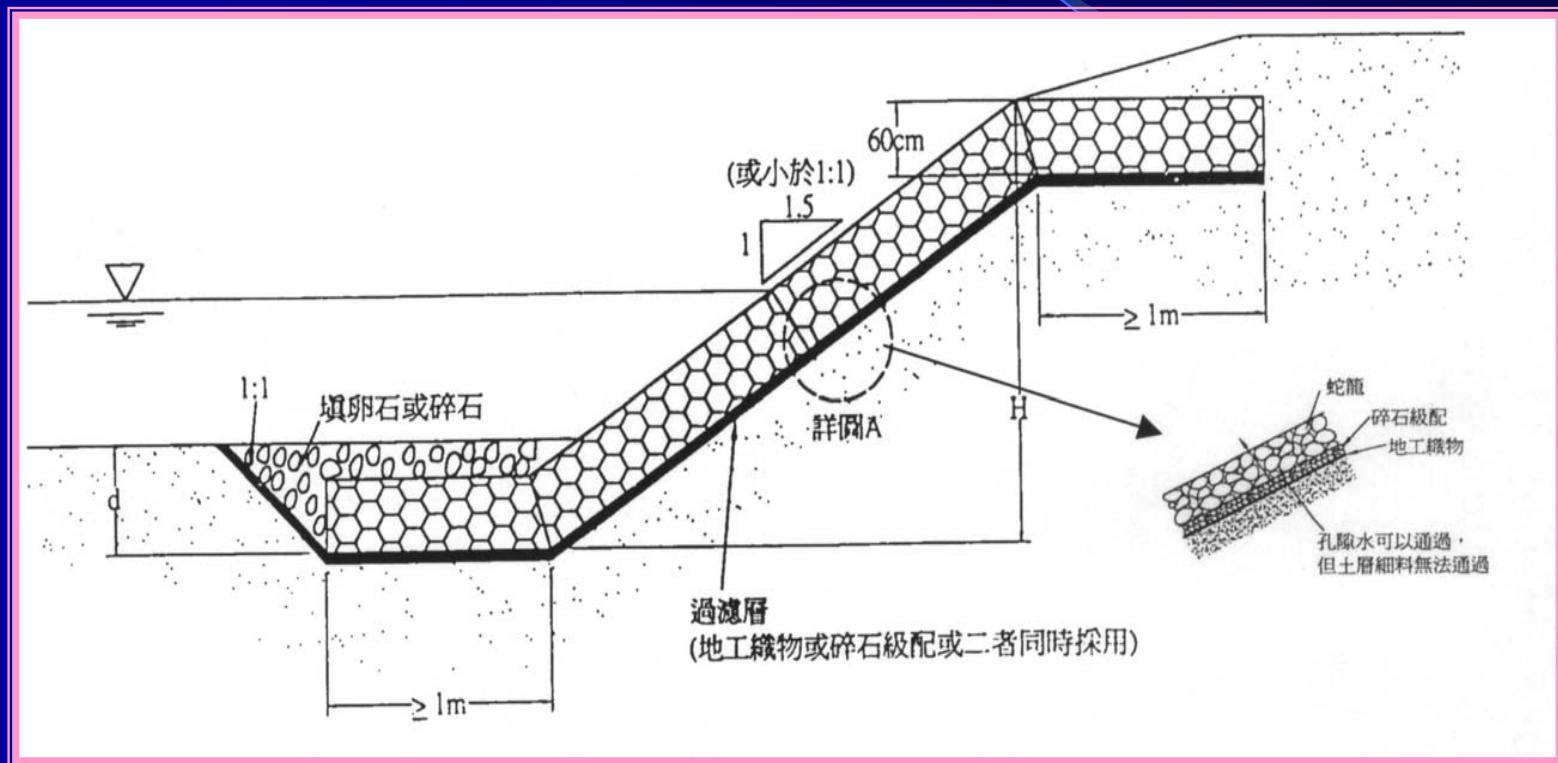
➤ 護岸結構物穩定分析

- 護岸之各項穩定性分析，基本與檢核擋土牆之穩定性安全分析類似，但是需將水作用力的影響加入考量。其詳細考量如下表所述：

計算穩定性安全係數		考量之項目
傾倒	抵抗力矩	(1) 於擋土牆計算此項之各項抵抗力矩和所需之力。 (2) 迎水面之水平與垂直水壓力。 (3) 背水面之垂直水壓力。
	傾倒力矩	(1) 於擋土牆計算此項之各項傾倒力矩和所需之力。 (2) 背水面之水平水壓力。 (3) 上舉力。
滑動	垂直力之和	(1) 於擋土牆計算此項之各項垂直力。 (2) 迎水面之垂直水壓力。 (3) 牆底之上舉力。
	水平力之和	(1) 於擋土牆計算此項之各項水平力。 (2) 迎水面與背水面之水平水壓力。
支承力		同擋土牆之計算。

➤ 護岸結構物穩定分析

• 施工案例

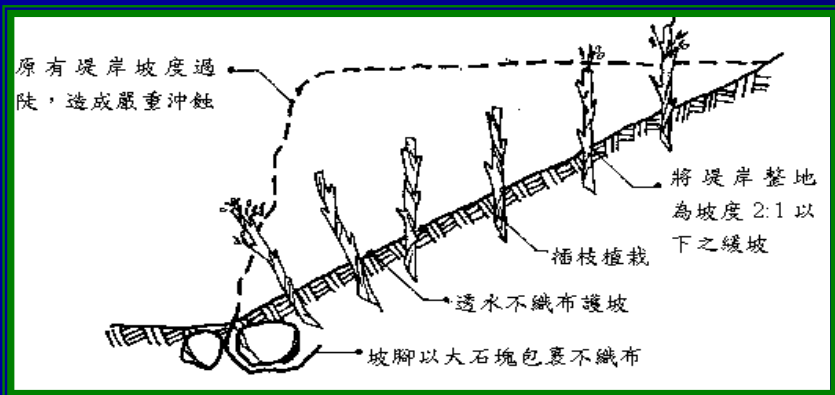


【蓆式蛇籠護岸斷面圖（中興大學，2001）】

護岸工(1) – 修坡植栽

圖 文

坡度過陡之河岸，若無工程構造物將無法自立時，可將原有過陡之堤岸整地為坡度 2:1 (H:V) 以下之緩坡，並在坡腳置放大石塊，另以不織布覆蓋坡面並延伸至坡腳之大石塊，以固持土壤；在護坡上種植數層具萌芽力之插枝，及耐濕性之地被與草本植物。



設計準則

坡面植栽係以基本植物根系之固土能力以補強土壤之抗剪力，並憑藉植物根系之柔韌性與土壤本身具有之剪力強度相結合而控制坡面之沖刷與滑動。

生態上之配合度：

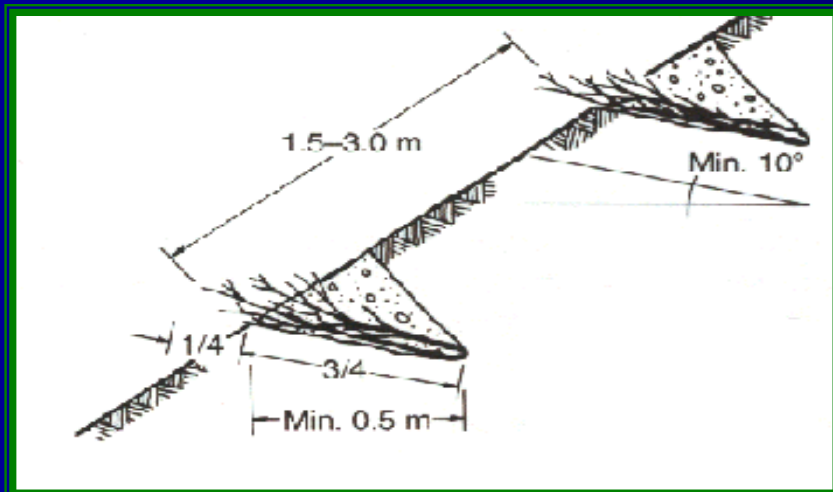
施工後立即可增添河岸綠意，且待插枝植栽萌發長成後，有助於河岸整體生態之恢復。

護岸工(2) – 切枝壓條法



圖 文

在有足夠空間之狀況下，先將過陡之堤岸整地為較平緩之坡面，在冬季時將切下的楊柳枝條壓條，待來年春季發芽後即能遍佈岸邊，而成為一土壤保護層。



設 計 準 則

每一層的垂直間距大約是1.5-3公尺，邊坡底部由於受到的侵蝕勢能較大，所以間距可以更小；枝條放置方法如圖所示。

生態上之配合度：
純粹使用植物材料。

護岸工(3)－打樁編柵法

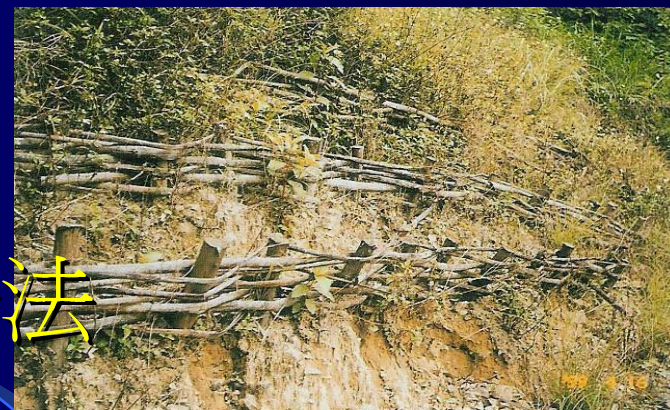
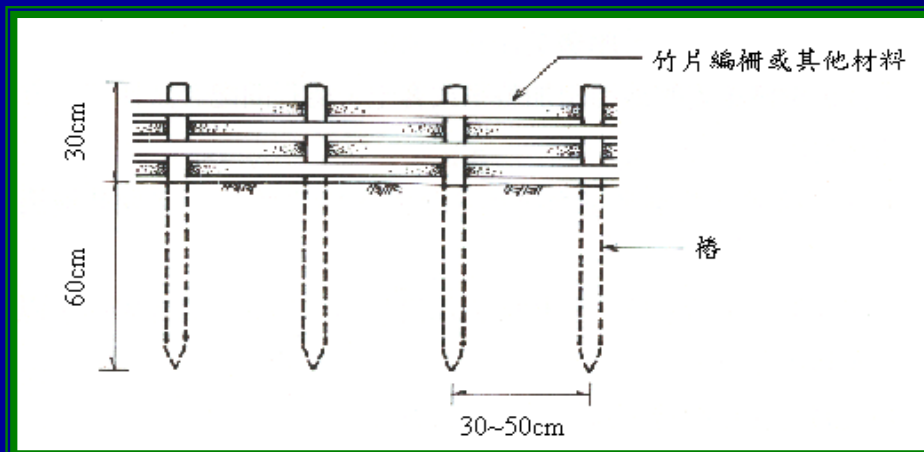


圖 文

使用萌芽、不萌芽之木樁或其他材料製成之樁，依適當距離打入土中，並採用竹片、PE網、鐵絲網等材料編織成柵的方法，以改善坡度、防止沖刷。



設 計 準 則

- (1) 樁之距離與間隔視坡度與地質條件而異。一般每排樁之距離為1~3m，樁距以30~50cm為原則。
- (2) 使用之竹木樁末端直徑5~8cm，長度90~120cm。樁應打入土中2/3以上，地表上預留15~30cm。樁間以竹片、薄木板或其他材料編柵，以攔阻砂石防止沖蝕的惡化。
- (3) 打樁編柵後需將地面稍加整平或客土，

樁行間配合其他植生方法。

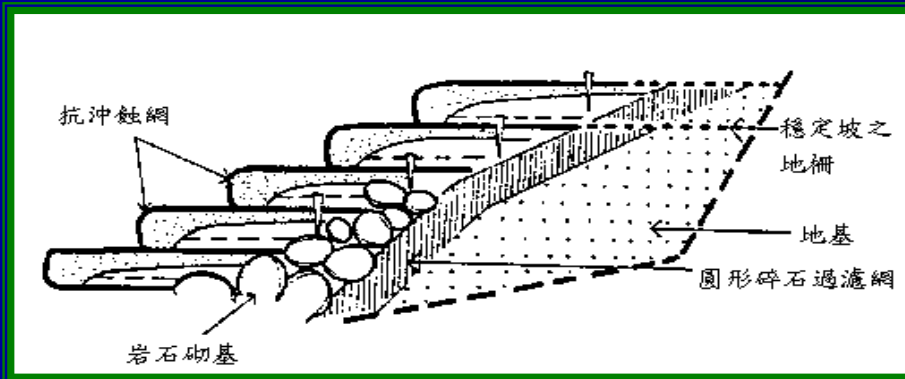
生態上之配合度：

可固定不安定之土石，造成有利植物生長之環境。

護岸工(4) – 地工合成材配合植生

圖 文

為彌補純粹使用植物材料於穩定邊坡時，無法立即抑制坡地之沖蝕狀況之遺憾，若能配合地工合成材料鋪設於坡面後加入回填材料，並於其上加以植生，則可立即發揮邊坡防蝕功用，亦可促進景觀之美化。目前所常用之地工合成材包括地工蜂巢(Geocell)及抗沖蝕網等。



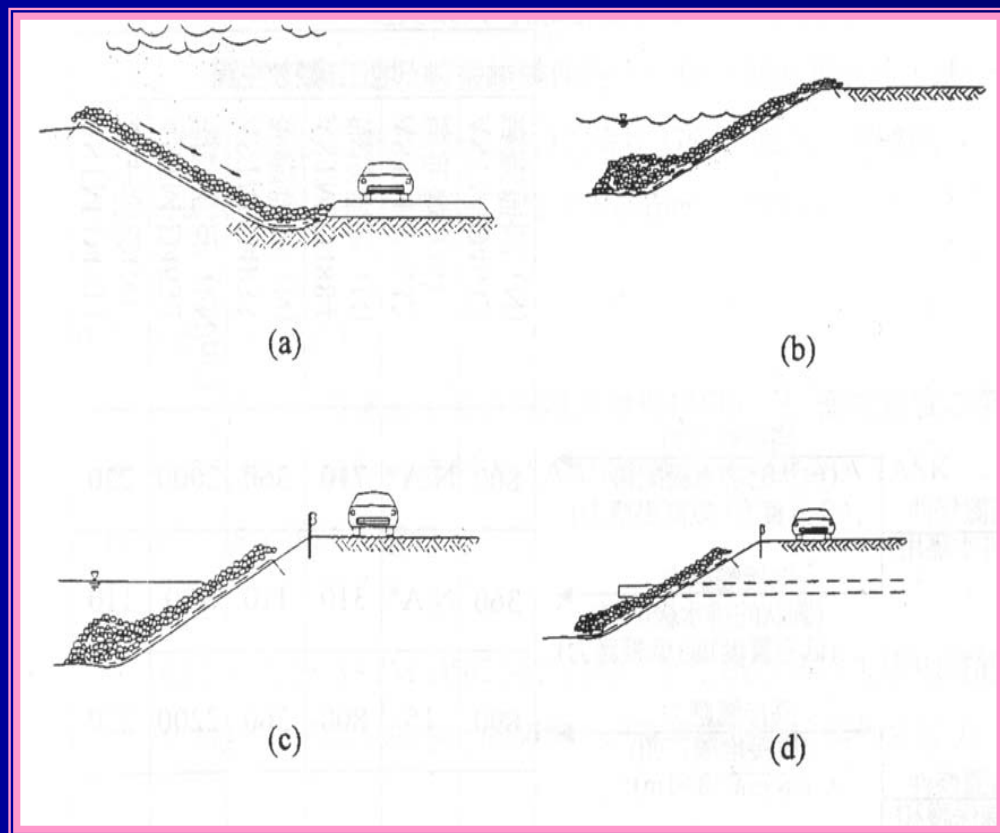
設計準則

設計抗沖蝕網時，可依河岸坡度及水流情況不同加以考量，如：於緩流緩坡岸，使用捲成臘腸狀之抗沖蝕網。於緩流陡坡岸：以抗沖蝕網包裹卵石作為基礎。

生態上之配合度：

地工蜂巢內填土料表面可加植生，除發揮水土保持功能外，亦可促進景觀美化之效用。

➤ 護岸工—土工合成材之抗沖蝕及抗淘空設計



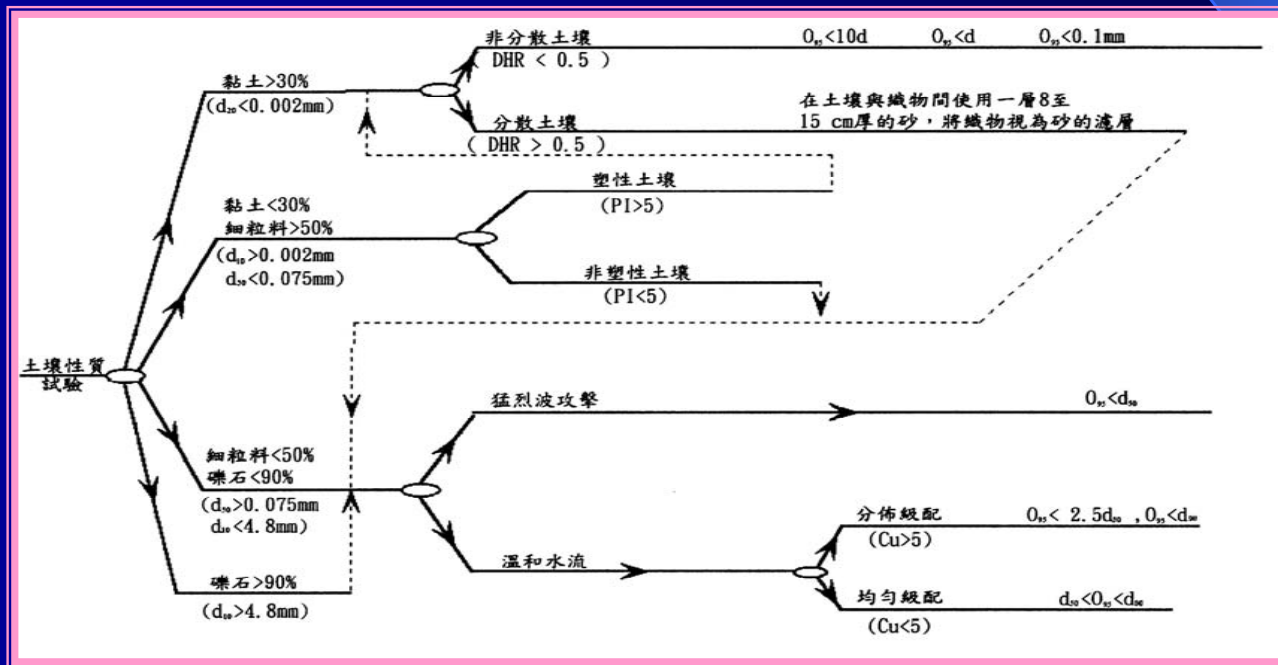
- 抗沖蝕及淘空之考慮狀況如左圖所示。主要是以土工織物作為護岸、護坡結構，保護海、河岸，或是保護邊坡防止暴雨之沖刷等。

【 土工織物於抗沖蝕之應用。（FHWA，1998） 】

（a、d為護坡，b、c為護岸結構）

➤ 護岸工—土工合成材之抗沖蝕及抗淘空設計

- 為符合抗沖蝕及抗淘空之功能，土工織物需具備（1）保留土壤之能力。（2）足夠滲透性，使水流可迅速排除。（3）長期穩定性。（4）足夠強度，以維持護岸、坡面之穩定。。
- 阻留需求



【動態、循環性水流條件之阻留設計流程（Luettich，1992）】

➤ 護岸工—土工合成材之抗沖蝕及抗淘空設計

• 滲透性需求

滲透性需求之設計方法依據土壤滲透性 (k_s)、水力坡降 (i_s)，決定織物之滲透係數之最低要求。Giroud (1998) 建議織物之滲透係數應大於土壤滲透係數與水力坡降之乘積 ($k_g > k_s \cdot i_s$)。

【典型水力坡降值表 (Luettich et al., 1992)】

應用工程	水力坡降值
標準排水溝	1.0
擋土牆排水	1.5
道路排水邊溝	1.0*
填土工程排水設施	1.5
壩趾排水	2
黏土壩心	3至 $>10^*$
河岸保護	1.0*
海岸保護	10*
黏土襯墊	$>10^*$

*：指重要工程結構、可能發生管湧之土壤、與高水力坡降之水力環境等較嚴峻條件時，設計需高於此值。

➤ 護岸工—地工合成材之抗沖蝕及抗淘空設計

- 抗阻塞需求

應進行抗阻塞試驗，以求得較佳之抗阻塞能力之地工織物。於砂質土壤（ $k \geq 10^{-7} \text{m/s}$ ）者，可採用水力坡降試驗（GR testing），黏質土壤則可採水力傳導比（HCR）試驗。

➤ 護岸工—地工合成材之抗沖蝕及抗淘空設計

- 耐久性需求

【地工織物強度之需求（AASHTO-AGC-ARTBA Task Force，1989）】

		地工織物性質											
		抓握強度 (N)	ASTM D4632	延伸度 (%)	ASTM D4632	接縫強度 (N)	ASTM D4884	穿透強度 (N)	ASTM D4833	進裂強度 (kN/m ²)	ASTM D4632	梯形強度(N)	ASTM D4533
一般裝置條件 (典型排水應用)	高接觸應力 (角狀的排水級配料) (高夯實度)或(高壓應力)	800	N/A*	710	360	2000	220						
	低接觸應力 (圓狀的排水級配料) (低夯實度)或(低壓應力)	360	N/A*	310	110	900	110						
嚴峻裝置條件 (海岸線保護和 護衛系統應用)	高接觸應力 (直接堆置石頭) (落石高度>1m)	890	15	800	360	2200	220						
	低接觸應力 (有砂或織布墊物) (落石高度<1m)	400	15	360	180	960	130						

註：1.N/A 表示此試驗之標準對此應用條件並無說明

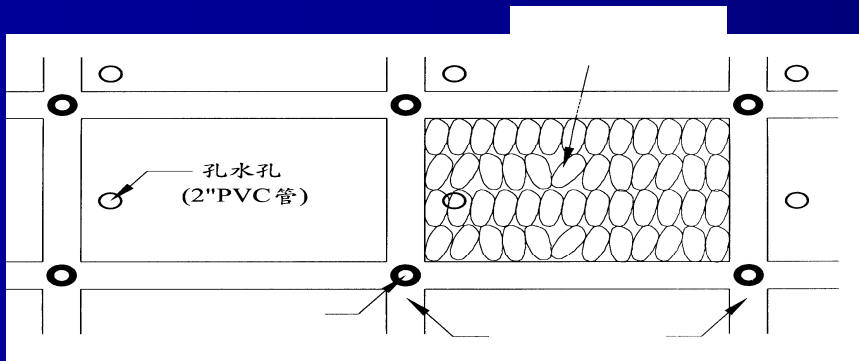
2.高夯實度指>95%(AASHTO T99)

邊坡整治工(1)－格框噴植法



圖 文

格框噴植法為採用立體鋼絲網，結合格框鋼筋與水泥砂漿，並於格框內噴植草種或植生基材，形成連貫性坡面，為一種現地坡面保護之工法。近年於國內常使用於有潛在坍方危險的邊坡，以減緩坡面之風化作用。



設計 準 則

一般而言，混凝土格樑可以採用預鑄混凝土(預鑄格樑)及現場澆置混凝土(自由格樑)。預鑄格樑標準斷面如文中，而自由格樑係於現場澆置鋼筋混凝土，隨坡面起伏凹凸構築於坡面，並每隔1.2m設置錨釘一排，錨碇深度約60cm，並可依坡面狀況及實際需要調整之。

生態上之配合度：

於格框內噴植草種或植生基材，除可減緩坡面風化作用外，亦可於短時間內達到綠化效果。

邊坡整治工(2) – 土釘混和噴植法

圖 文

土釘工法(soil nailing)為現場土壤加勁技術，其方法係利用鋼棒貫入土壤，與地層結合成一連貫之結構實體。而土釘結合格框噴植法(在此稱為土釘混合噴植法)，可克服格框噴植法無法適用於潛在深層滑動之缺點，又可避免噴凝土造成環境景觀的破壞，不失為一穩定護岸邊坡之良好方法。



設 計 準 則

初步設計參數值 (Bruce and Jewell, 1987)

土釘 類型	地質 材料	設計參數		
		L/H	DL/S	$d^2/S(10^{-3})$
重力 灌漿式	砂質 土壤	0.5~0.8	0.3~0.6	0.4~0.8
	堅硬 黏土層	0.5~1.0	0.15~0.20	0.10~0.25
灌入式	砂質 土層	0.5~0.6	0.6~1.1	1.3~1.9

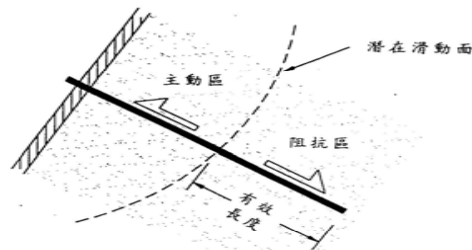
L：土釘長度。H：牆高。D：鑽孔直徑。d：土釘鋼棒直徑。

S：每根土釘平均支撐面積＝水平間距×垂直間距

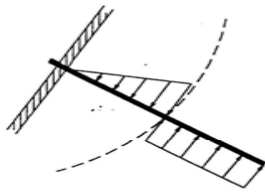
生態上之配合度：

採用格框內植生之方法，復育時間約3個月。

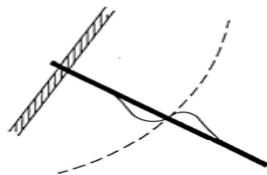
➤ 邊坡整治工(2)—土釘混和噴植法



(a) 張力



(b) 剪力



(c) 彎矩

• 土釘結構可能之破壞機制 (Schlosser, 1982)

- 加勁材受力超過本身強度
- 側向土壓力造成加勁材超額彎矩破壞
- 側向土壓力超過土壤極限承载力
- 土壤與加勁材間之摩擦力不足造成拉出破壞

【土釘受力模式示意圖】

邊坡整治工(3)－土工防蝕模袋

圖文

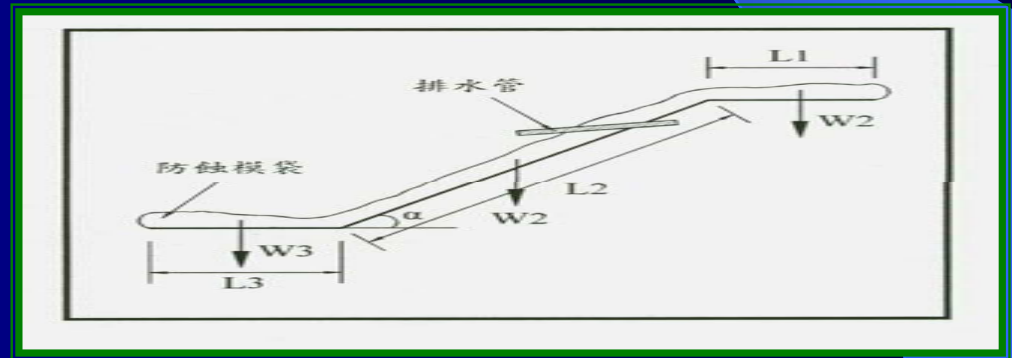
土工防蝕模袋為一種柔性，能配合崎嶇不平坡面，貼地性佳之護坡方式。其類似土工織物，內充填水泥砂漿，並能於格框內植生，達到景觀上綠化效果。模袋係織布編織成袋狀，織布之設計需具有足夠的透水性、適當的孔徑，以避免水泥及砂之流失，織布之車縫處需具足夠強度以免破裂。

設計準則

護坡坡度不得陡於1：1。抗滑安全係數(FS)可用以下公式計算

$$FS = (L_3 + L_2 \cos \alpha) \times f_{cs} / (L_2 \sin \alpha)$$

模袋底部之滲水應及時排出，若模袋本身濾點之排滲能力不足，則可順坡方向，設置排水孔。



生態上之配合度：

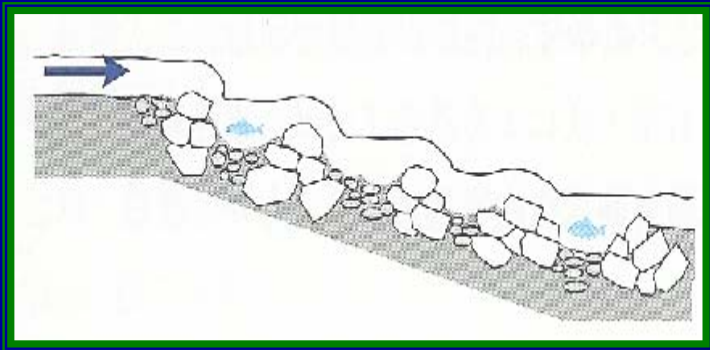
模袋為織布編織成袋狀，具有足夠之透水性、適當之孔徑，亦有利於植物自然生長。

固床工 (1) – 石樑固床工



圖 文

以大型天然石塊構築於河床中之橫向構造物，石樑與護岸連接處，應嵌入護岸，另亦應嵌入河床之中，以抵抗水流沖擊力量。於水流平緩，水位低處，基於生態考量，應避免使用漿砌，埋設時力求穩固，以創造多孔隙之環境。



設 計 準 則

設計時應考慮最高水位及最低水位之情形，於最低水位時，石材允許露出水位面，然石樑不能完全阻斷水路，應保有部份之流路供生物自由活動。於最高水位時，水流可允許溢流過石材，然應審慎評估其水流沖擊能力，除避免石材被沖失之外，更應發揮減低水流沖刷能量之功效，避免對下游造成災害。

生態上之配合度：

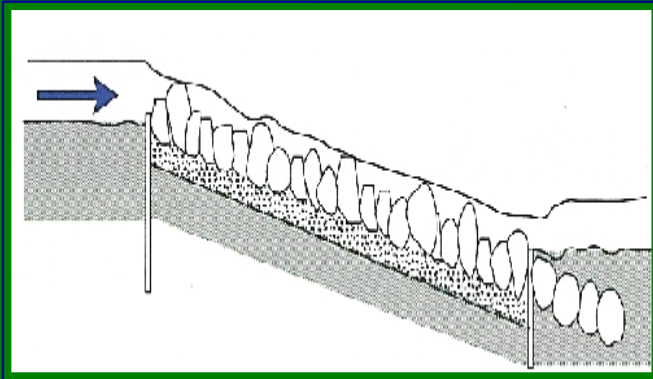
除創造多孔隙環境外，於低流量時，可保有一定水位，在高流量時可形成保護魚類之避難所。

固床工(2)－河床拋石



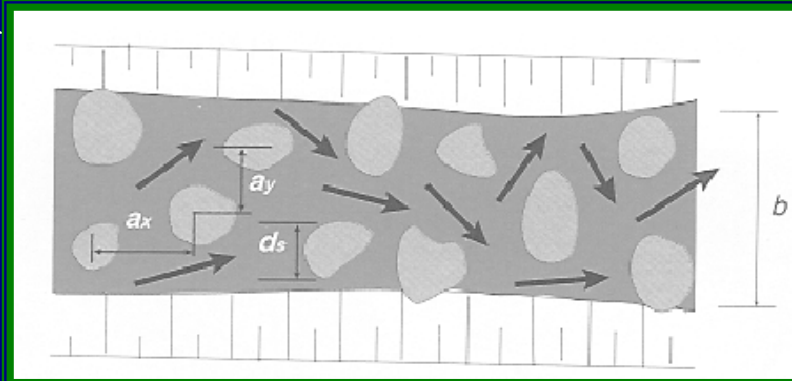
圖文

於河道中將阻流石不規則分佈於河床，使水流流向改變，以減低水流速度，避免河道過分沖刷。河床拋石亦應將部分石塊嵌入河床中，以提供本身及其他石塊之阻抗能力。



設計準則

河床拋石石材大小之選擇及石材間距之設計，除應考慮降低水流之沖刷力之外，亦應考量當地物種之特性，儘可能提供一個多孔隙的空間，使其具有隱密之避難場所或繁殖的棲地，方能使當地物種延續，達到生態工法之基本要求。依據DVWK(1998)之建議，河床拋石所選用之石材大小至少0.3m~0.4m，且石材排列之間距至少2~3倍的石材直徑



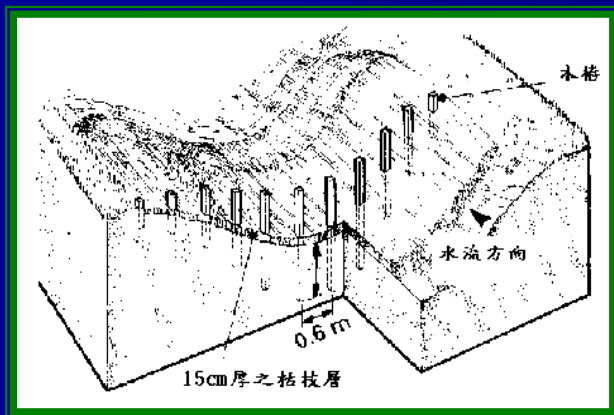
$$D_s = 0.3\text{m} \sim 0.4\text{m}$$
$$a_x = a_y = 2 \sim 3 D_s$$

固床工 (3) – 潛壩

圖

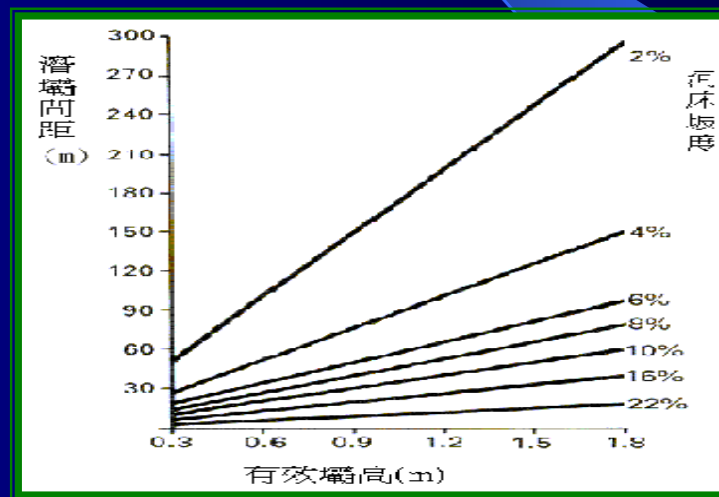
文

潛壩之目的在於安定河道，防止縱橫向侵蝕，以及保護護岸等構造物之基礎。其中以木柵潛壩及圓木潛壩等，使用自然材料築壩，故較為符合生態工法之精神。



設計準則

由Heede and Mufich(1973)建議潛壩的間距

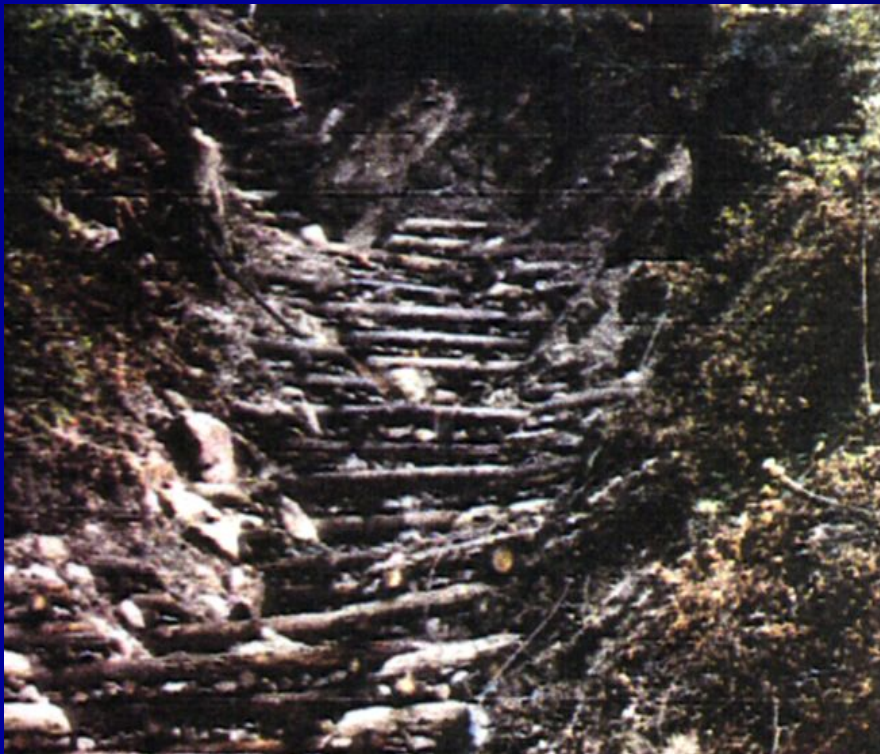


生態上之配合度：

於淺壩之間可產生淤積，有利生態之環境。另將易發根枝條插入兩岸或上游坡面中，亦可增加環境與生態的復育。

固床工 (3) – 潛壩

- 圓木潛壩



結語

- 生態工法並非一成不變、照本宣科，而是因地置宜，研擬適當方法加以設計、施工。
- 利用創造力創造豐富而多樣之生態環境且兼顧安全需求是使工法更臻成熟的原動力。

簡報結束

敬請指教

