

傳統砌石技術於生態工法之應用

顧承宇 譚志豪

中興工程顧問社 大地工程研究中心

前言

台灣因受造山運動之影響，自然環境特性多為山高坡陡，河短水急，再加上降雨集中於5月至10月，水量豐枯懸殊，雨季及颱風季節易泛濫成災。過去因減災與防洪之目的，利用混凝土建造許多攔砂壩、護岸、固床工及堤防等等水利構造物，尤其是溪流之整治，把兩岸及溪底都用混凝土封起來，成為俗稱「三面光」之U形渠道。這種將溪流渠道化之現象，在台灣十分普遍並造成許多問題，如：

- (1) 阻隔河川之地表水入滲而無法形成地下水補注，
- (2) 混凝土之表面平滑，使流速加快而增大洪峰流量，
- (3) 混凝土構造物幾無孔隙，動植物不易生長棲息等不利於生態景觀之問題。

由於經濟之持續發展與生活品質之提昇，一般民眾對於山坡地及河川整治之要求超過往昔單純的防災目的，提升為能同時考量環境與景觀生態之多樣化功能，因此如何改變前述溪流渠道化之現象，回復原充滿生命力之自然河川以達到自然環境的永續

利用，已經成為時勢潮流。行政院公共工程委員會(2002年8月)對維護生態環境的施工技術，或稱生態工法加以定義為「生態工法便是指基於對生態系統之深切認知與落實生物多樣性保育及永續發展，而採取以生態為基礎、安全為導向的工程方法，以減少對自然環境造成傷害」。本文僅以生態工法中常用之砌石構造物於生態工法之應用為例，說明其實際之應用案例與發展。

生態工法砌石構造物

生態工法之概念最早源自德國及瑞士，在1938年德國 Seifert 首先提出近自然河溪整治的概念，能夠以接近自然、廉價並保持景觀的治理方法，來完成河川治理的任務。1989年生態學家 Mitsch 提出生態工程觀念，強調透過人為環境與自然環境間之互動達到互利共生的目的。在日本，生態工法稱為「近自然的工法」或「多自然型建設工法」。生態工法基本上是遵循自然法則，把屬於自然的地方還給自然，讓自然與人類共存共榮。

一般整治河川之生態工法，需兼顧防洪與生態的施工方式，捨棄不透水的混凝土，利用原形的塊石材料設立親水河谷、小水道、親水步道、砌石護岸、親水平台、魚梯等多項設施，塊石與塊石間有透水的縫隙，為自然環境創造較多生機。因此砌石構造物之多孔透水、材質重及塊體不連續體之特性便相當符合生態工法實施之原則。目前砌石構造物於生態工法之應用多以砌石護岸與砌石固床工為主，因此本文針對砌石護岸與砌石固床工構造物之特性、類型及其相關運用進行說明。

砌石構造物材料

砌石構造物使用之材料主要以塊石為主，惟為考量現地之配置與結構物之穩定性，常與混凝土、石材、土壤及少數之合成材料與生物等材料搭配使用。茲針對各材料之特性分述如下：

(一) 混凝土

混凝土構造物經妥善設計施工其安全性頗佳，但對生態環境造成負面之影響，在構造物安全性無虞且容易移除之處，可拆除而以其他生態工法工程技術替代；在安全性有所顧慮之處，最好以其他多孔隙之軟性材料覆蓋，使其恢復植生，提供生物多樣性

環境，並可改善視覺景觀，至於混凝土之產品，如消波塊，在難以其他材料替代之情況(如大塊石缺乏)，已設置者可以覆土植生。

(二) 石材

1. 卵石

卵石一般存在於河溪之中上游，河床較陡流速較快之河段，常見之卵石粒徑約 10~30 公分。卵石常用於河溪與湖泊池塘之護岸及固床工等構造物，因其可就地取材，除可減低工程費外，亦可與周邊環境融合。但當地既有之卵石應無法承受該處之水流沖刷，必須將單一顆粒以工程技術或配合其他工程材料施作始能安定，最常使用之方法包括漿砌、蛇籠、箱籠等，將卵石以水泥砂漿連結固定或以網狀之材料將其填置。

2. 塊石

天然之塊石一般存在於河溪之上游段，因上游段之坡度陡峭，較細顆粒卵石已被沖刷至中游段。天然塊石一般顆粒甚大，且未經隨水流移動及撞擊與磨損，常呈角狀，塊石亦可由巨石經人工碎解而成。塊石常用於河溪整治之護岸、固床工等構造物，因其可就地取材，除可減低工程費外，亦可與周邊環境融合，塊石之施作常以乾砌方式排列，因其具角狀，可相互產生安定作用，並產生孔隙供植物

之生長。塊石亦可供蛇籠、箱籠或土壤護坡工基腳保護之材料，因其可耐撞擊及沖刷，惟必須由上游段採取。

(三) 土壤

土壤為現成之材料，惟最易受水流沖蝕，土壤因穩定性與耐沖刷性較差，一般適用於較緩之邊坡及流速較緩之河溪。土壤亦可配合其他合成材料使用，使其具有高度安定性，且經表面處理亦可耐水流之沖蝕，因其可就地取材、減少工程施作時之棄方量、植生容易，在適當之地點應盡量使用。

(四) 生物材料

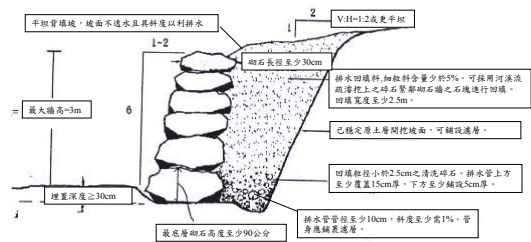
生物材料主要之考量為其來源、耐久性及安全性，若使用木樁為材料，木材之使用年限約 5 年，而經過耐水處理之木材則較昂貴，在生態工法工程技術之使用宜考量生態需求、環境配合需求及其他材料安定需求等，局部性使用。

砌石護岸

1. 相關運用

護岸工係保護河岸避免受水流衝擊而產生侵蝕之構造物，或為保護河岸而直接構築於岸坡之構造物。砌石護岸可依不同施作方式分為混凝土基礎單階砌石護岸、混凝土多階砌石護

岸、混凝土蓆墊砌石護岸及石板砌石護岸等，如表一所摘示。施工良好之砌石護岸可作為擋土工，抵擋河岸坡面後方之土壓力並防止坡面之局部崩塌破壞。依 Gray & Sotir (1995)之建議，一般砌石構造各單元採用之尺寸及幾何配置如圖一所示。



圖一 砌石結構各單元尺寸及幾何配置(Gray and Sotir, 1995)

砌石護岸使用之石材及其完工表面具有自然的景觀，而砌石縫隙之空間則利於動物棲息及植物生長，此工法在設計考量上很符合生態的需求。

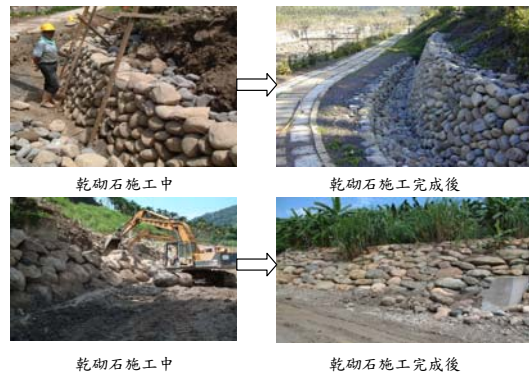
2. 砌石護岸工法

考慮台灣河溪流況，砌石護岸之岸趾可能因沖蝕掏刷造成最底層砌石之基礎掏空並導致整體砌石護岸崩壞。因此，有必要於岸趾施築混凝土連續基座，並應將基座埋置於計劃溪床線下，以避免其周圍溪床受溪流沖蝕刷深而外露。另者，依台灣地區砌石護岸構築狀況，岸高最高可達 4.2m 而岸面斜度大多緩於 1:0.3(即岸面傾角約 73.3°)，同時砌石與河岸坡面間較

少使用回填料填充。一般施作方式為直接沿著完成整坡之河岸岸坡線砌築塊石。

3. 乾砌施作

乾砌施作之定義為堆砌之砌石與砌石交界面間無任何材料作為膠結，僅依靠砌石與砌石交界面之摩擦力作為滑動之抵抗，如圖二所示。



圖二 乾砌石施工現場作業照片



4. 漿砌施作


漿砌施作乃於堆疊之砌石與砌石間之交界面，以混凝土作為膠結材料將相鄰間之砌石加以結合之砌石施作方法，如圖三所示。



圖三 漿砌石施工現場作業照片

表一 國內常見生態工法砌石構造物(砌石護岸)一覽表

項次	工法名稱	砌石護岸工法圖示	用途/適用性
1	混凝土基礎單階或多階砌石護岸		(1)防護河岸坡趾免受沖蝕破壞。(2)河床質小，或流速小於6m/sec之河道。(3)避免於土石流潛勢溪流之曲線段施作。(4)洪水位高，岸高較大，岸背腹地大，且考量親水功能時，可採用多階施作。(5)岸高較大，常水位高之情況為利於兩棲生物遷移，可採用多階施作。(6)水平台階除具親水功能外亦可提供兩棲生物棲息所需空間。
2	混凝土蓆墊砌石護岸		(1)於流速大、沖蝕嚴重、土質較差且崎嶇不平之河岸岸坡。(2)鋼筋混凝土蓆墊作用猶如筏式基礎，可提供上方砌石層相當之承載力。(3)漿砌石對河流水之抗沖蝕力較佳，砌石下部半埋於混凝土中，而上部外露於砌石間之縫隙則利於動物之棲息。

3	石板砌石護岸		<p>(1)採用天然石板堆砌構築護岸，形成自然美觀之岸面。(2)可使用於較平緩岸坡之趾部，高度以不超過 2m 為宜，否則可考慮搭配加勁材施作。</p>
---	--------	---	---

砌石固床工

1. 固床工型態

固床工為避免溪床因水流之侵蝕、沖刷而設計之溪床保護工，可降低水流速度，減少河床及河岸受侵蝕的程度，並使河岸也可受到穩固之構造物。現階段常用固床工可分為二種型態，一為基礎以混凝土構築後表面漿砌卵塊石，另一純以天然塊石堆砌而成。前者屬較傳統成熟之工法，只要注意固床工下游端之沖刷即可，惟較不符合生態工法之原則。而後者之技術屬較柔性之工法於安全上則需有較多的考量。

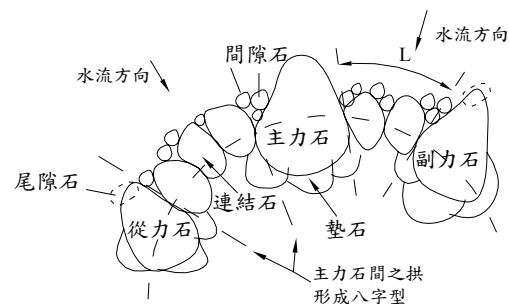
2. 固床工種類

固床工因設計需求不同而有變化，目前依據水保局 2001，2002 及 2003 相關生態工法圖冊所整理的種類有：跌水式混凝土基座鑲石固床工、單斜式混凝土鋪石固床工、嵌石踏步式固床工及嵌石踏步臺式固床工等四種，如表二所示。

3. 工法檢討

砌石固床工在 1980 年代於美國

大量被運用於控制河床高程、改善魚類棲地及防止河岸沖刷。Rosgen 自 1986 年起復育及監測各種型態之河川共計超過 48km 之河段，並於主要洪水過後評估其功能，並將監測結果作為固床工改善及評價之依據。砌石固床工目前已被成功應用於 9m~150m 河寬、河床坡度介於 0.05~0.003 及卵礫石及砂質之河床質。砌石固床工依其所用塊石之功能性及塊石間之互制作用(如圖四所示)，可加以區分並給予不同命名如力石、墊石、連結石、間隙石及尾隙石。



圖四 砌石固床工各類不同功能塊石配置圖

表二 國內常見生態工法砌石構造物(固床工)一覽表

項次	工法名稱	固床工工法圖示	用途/適用性
1	跌水式混凝土基座鑲石固床工		(1)於中低流速(流速 $\leq 4\text{m/sec}$)河流。(2)河床質小，無拖曳滾石粒衝擊破壞之顧慮。
2	單斜式混凝土鋪石固床工		(1)降低河水流速防止河床掏刷及穩定流心，使河道保持穩定不致偏移。(2)完工鋪石表面具有自然景觀。(3)採用鋼筋混凝土蓆墊可抵抗高流速形成之沖蝕刷深。
3	嵌石踏步式固床工		(1)降低河水流速防止河床掏刷及穩定流心，使河道保持穩定不致偏移。(2)採用混凝土蓆墊固定鋪石，於流速大或沖蝕嚴重之河段具有消能效果。
4	嵌石踏步臺式固床工		(1)降低河水流速防止河床掏刷及穩定流心，使河道保持穩定不致偏移。(2)完工嵌石具有自然景觀並可配合兩岸親水設施設計。

資料來源：行政院農委會水土保持局 2001，2002 及 2003 生態工法圖冊

案例介紹

台灣地區已實施之自然生態工法地點已超過至少三十四處(民國 91 年)，大部分多是溪溝與野溪之整治。本文僅就台北市近期完成之內湖內溝溪應用案例進行介紹。

內溝溪為基隆河支流之一，發源於標高 450 公尺的內湖坑頭山，向東

南流經內溝溪後，轉向南湖大橋上游約 500 公尺處流入基隆河，全長 6817 公尺，流域面積約 422 公頃，集水區平均坡度約為 41%，是台北市內少數具山林景觀之區域。由於地區內住宅區與工商業活動日漸熱絡，內溝溪流域的地形地貌有了完全不同的轉變。因為流域內地勢平緩，水路蜿蜒，每逢颱風暴雨，易發生水患。為有效解決水患，保障當地居民安全，遂逐步

進行規劃治理。工程規劃時亦考量以恢復溪溝水域及兩岸生態環境為主，因此，溪溝護岸計劃採用以砌石疊砌，以營造多孔隙之環境提供植物生長之基盤及動物躲藏、隱蔽之場所，另為兼顧兩岸整體環境營造，規劃親水步道、階梯、休憩長廊等設施，提供休閒親水之自然景緻以帶動區域遊憩休閒之功能。

圖五顯示本案例完成後之景象，其中圖五(a)與(b)為砌石固床工與親水設施完成之風貌，溪底均以砌石取代水泥面，風貌自然且具透水性，同時保留孔隙易於滋養各種小生物，目

前已有大量水生動植物繁衍，也可見白鷺鷥等多種鳥類棲息。而圖五(c)則為小橋涼亭之興建，環境清幽成為新的休閒景點。圖五(d)則為混凝土基礎單階砌石護岸設施完成之情形，砌石護岸駁嵌凹凸不平，保留孔隙提供水生動物棲息空間，也增加民眾親近溪水的機會，同時亦具鞏固道路之護坡功能。

圖五(e)與(f)則為於台北市信義區象山野溪所完成之跌水式混凝土基座鑲石固床工與混凝土基礎單階砌石護岸設施完成後之風貌。



(a) 砌石固床工(台北市內溝溪上游)



(b) 砌石固床工與親水設施(台北市內溝溪上游)



(c) 小橋涼亭之興建(台北市內溝溪上游)



(d) 混凝土基礎單階砌石護岸(台北市內溝溪上游)



(e) 跌水式混凝土基座鑲石固床工(台北市信義區象山野溪)



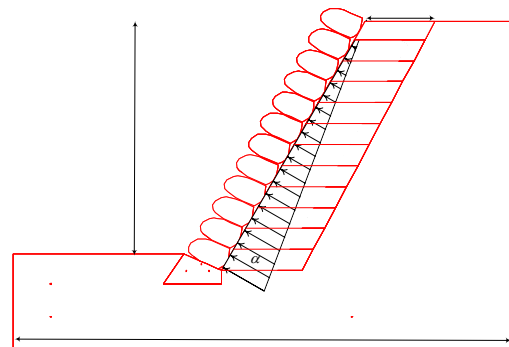
(f) 混凝土基礎單階砌石護岸(台北市信義區象山野溪)

圖五 生態工法砌石構造物應用案例 (2006 年攝)

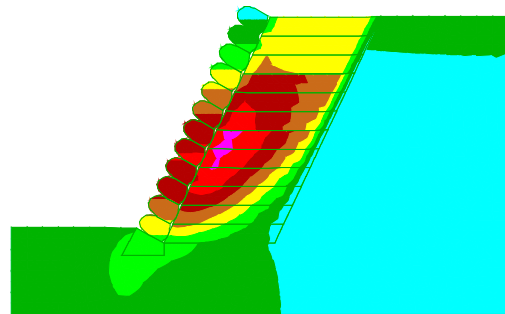
砌石構造物安全性檢核

生態工法所採用之構造物特徵為塊體堆疊、材料不連續、及多孔透水。上述特性為土木工程傳統設計方法與分析模式不易進行分析的主要原因。由於砌石構造物不如傳統鋼筋混凝土構造物設計已有行之多年之設計與工程經驗，工程師在面對抉擇時，對採用砌石構造物不免有所猶豫，自然會偏好熟悉的傳統工法而使用混凝土為材料，尤其河川整治工程負有防災重責，更加深對砌石構造物安全性的顧慮。

由於各種生態工法運用構造物之設計方法與分析模式尚無標準可循，因此，目前政府相關主管機構已著手透過研究計畫之推動，以各種既有之理論基礎及分析技巧，發展出常用生態工法構造物之分析模式及設計圖表，供相關設計及施工人員參考使用。



圖六 砌石護岸堆疊後穩定性分析 (UDEC 非連續體分析)



圖七 砌石護岸堆疊後位移分析圖 (UDEC 非連續體分析)

圖六至圖九為水土保持局於民國95年之研究計畫部分成果，其整合國內外不連續體分析之相關理論與技術，針對生態工法砌石構造物在各類

型載重狀態下完成之穩定性分析與檢核方法。

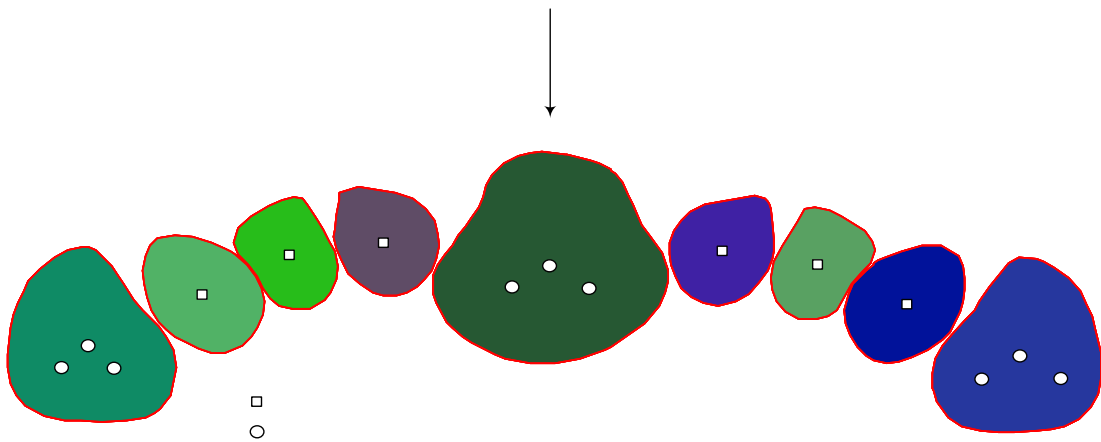
結語

採用生態工法砌石構造物之溪流整治可避免形成鋼筋水泥叢林，以原形塊石取代水泥面，風貌自然，並使溪流恢復未曾過度開發前的山林水鄉景象。目前台灣已有許多溪流成功的採行生態工法進行整治，雖有少數失敗之案例，但無論如何，以生態工法砌石構造物進行工程整治，是一個值得期望的新方向。

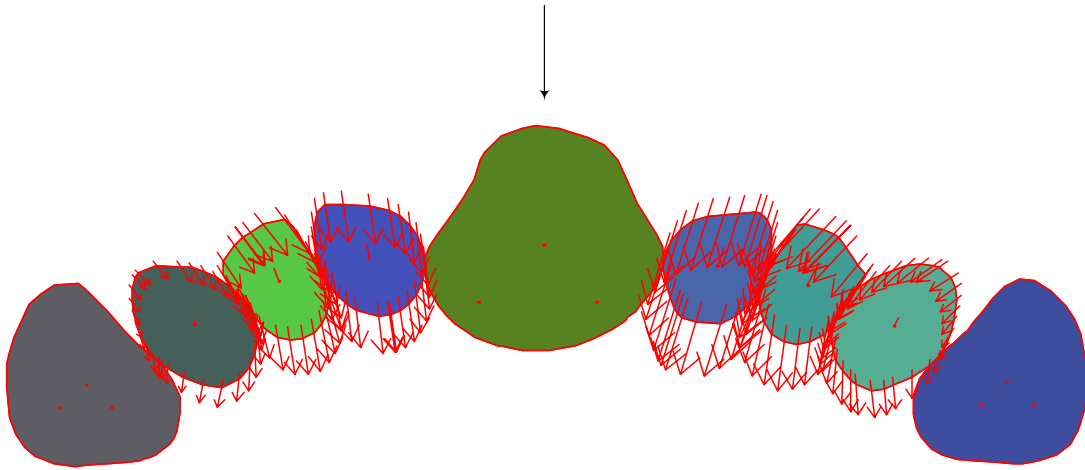
惟台灣河川與溪流的坡度與水流湍急程度均遠大過日本與歐美等國家，土木工程傳統方法應用於生態工法砌石構造物之設計仍需「因地制宜，並建立適合於台灣本土化之設計與分析經驗」，尤其河川整治工程多負有防災重責，故如何兼顧防災與環境景觀生態多樣化功能之生態工法砌石構造物設計仍是必須面對與解決之迫切課題。

參考文獻

1. 日本財團法人國土開發技術研究中心 (1999),「護岸的力學設計法」, 山海堂。
2. 建設省河川局治水課 (1994),「多自然型河川工法設計施工要領」, 財團法人 河川環境管理財團。
3. 福留修文 (2003),「進自然工法之石組技術」, 行政院農委會特有生物研究保育中心編譯。
4. 「生態工法砌石及預鑄塊堆疊構造物穩定分析」, (2006), 行政院農委會水土保持局。
5. 中華民國環境綠化協會, (2002), 「台灣地區自然生態工法個案圖說彙編」, 行政院農委會水土保持局。
6. 財團法人中興工程顧問社 (1998),「不連續變形分析法於岩石工程上之應用」, 工研基金研究報告。
7. 「2006 生態工程國際研討會論文集」, 行政院公共工程委員會。
8. Cundall, P. A. and Strack, O. D. L. (1979), "A Discrete Numerical Model for Granular Assemblies," *Geotechnique* 29, 1979, pp. 47-65.
9. Shi, G. H. and Goodman, R. E. (1989), "Generalization of Two-Dimensional Discontinuous Deformation Analysis for Forward Modeling." *International Journal for Numerical and Analytical*



圖八 砌石固床工不連續體分析(DDA 非連續體分析)



圖九 砌石固床工不連續體位移分析圖(DDA 非連續體分析)