

順天應人 — 綠色大地工程之發展

Harmony between Man and Earth — Development of Green Geotechnical Engineering

周南山／中國土木水利工程學會常務監事

鄭恆志／盟鑫工業股份有限公司總經理

摘要

受到全球暖化的衝擊，全球氣候越趨極端，改變了全球的生態，造成超越以往經驗之大規模災難。面對極端氣候的嚴重課題，講究安全、經濟、生態、減碳之綠色工法成為全球土木營建工程之新趨勢，大地工程也不例外。台灣綠色工程之發展是將綠建築、綠土木、生態工法、低衝擊開發以及屬於永續類的幾個核心概念互相結合而成為綠色／永續工程。而綠色大地工程屬於綠色／永續土木工程中重要之一環，尤其在綠色邊坡、土工合成材料及透水鋪面等領域，發揮之空間甚大。在環境永續發展之前提下，傳統工程人定勝天觀念，僅著重於結構強化的抵抗性作法已無法因應當今環境之快速變遷。因此，符合綠色內涵、節能減碳的綠色／永續工程乃成了這困局的一道解藥。本文探討綠色大地工程近年來的幾項發展，包括綠色邊坡、加勁擋土結構及土工合成材料應用等，並以歐美及台灣之案例加以佐証。大地工程需能兼顧安全耐久、經濟、生態環境、節能減碳、景觀（甚至人文、藝術）等面向，才能稱之綠色／永續的工程，而目前因方興未艾，類似綠建築之各項指標尚待建立。從事綠色大地工程者之理念與環保人士逢建設必反之極端態度有所不同，而亦著重人之需求，屬於儒家中庸之道。此與孟子「斧斤以時入山林，柴木不可勝用也」的順天應人哲學不謀而合。作者認為，以老祖宗所揭示的順天應人哲學，配合最新地工技術與材料，兼顧環境、生態、景觀、節能減碳之設計施工乃是綠色大地工程未來發展之趨勢。

Abstract

Due to the impact of global warming, extreme weather has caused many catastrophic damages in the world, including Taiwan. To face them, civil engineers tend to pay more attentions to ecology, environmental protection, energy saving, carbon reduction and landscape than ever. Geotechnical engineers are no exception. Green and sustainable concepts are especially important in the areas in slopes, geosynthetics-reinforced structures, etc. Traditional geotechnical structures should also accommodate ecology, environmental protection, energy saving, carbon reduction and landscape to meet challenges due to impacts of global warming. This paper demonstrates the development of green geotechnical engineering and introduces foreign and domestic examples in the areas of slope, geosynthetics-reinforced walls, tunnels, anchors, etc. Based on these examples, the Chinese philosophy of “Harmony between Man and Earth” may be concluded as the future trend of green geotechnical engineering.

全球氣候變遷趨勢

氣候變遷原本是一種自然現象，以不同形式及規模在地球上不斷持續發生。但自工業革命以後，因人類社會經濟驟然起飛、物質生活豐富度提升，各項需求接踵而至，大量開發自然資源以因應社會發展的步調以及

森林野地的過度開發利用，影響氣候變遷的因子。受到全球暖化的衝擊，全球氣候越趨極端，改變了全球的生態，造成超越以往經驗之大規模災難，依據聯合國國際減災策略組織、災害流行病學研究中心統計，全球天然災害造成的經濟損失急遽增加（如圖 1 所示），尤其在 2011 年造成創紀錄之 3,660 億美元之經濟損失。

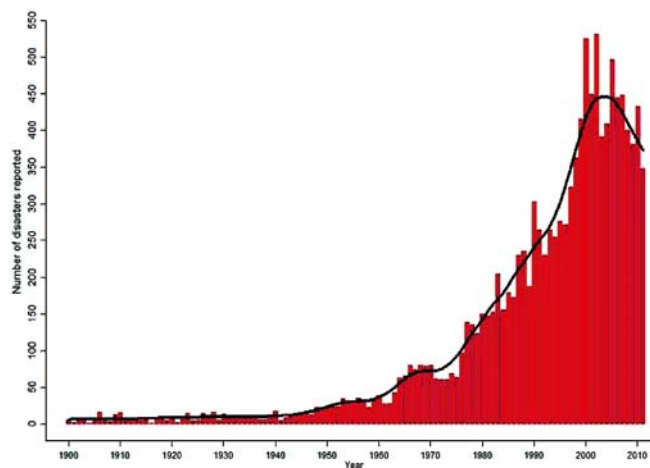


圖 1 1900~2011 年全球天然災害數量統計圖

台灣地處於菲律賓與歐亞板塊的交界帶，地質年代較輕，造山運動至今仍在持續進行。地殼因受造山運動的擠壓而褶皺斷裂，以致地表岩體破碎。由於臺灣土地狹小，山區佔全島面積 70% 以上，地理位置位處環太平洋地震帶，地震頻繁，且夏、秋兩季易受颱風暴雨侵襲。依照世界銀行發佈的全球風險分析，臺灣被列入未來的第一批氣候難民名單之列，是全球最容易受災的地區之一。

永續／綠色工程之發展

面對極端氣候的嚴重課題，講究安全、經濟、生態、減碳之綠色生態工法為全球土木／營建工程之新趨勢。傳統工程人定勝天觀念，僅著重於結構強化的抵抗性作法無視於對環境生態景觀之破壞（見圖 2 及圖 3），已無法因應當今環境之快速變遷（如表 1 所示）。

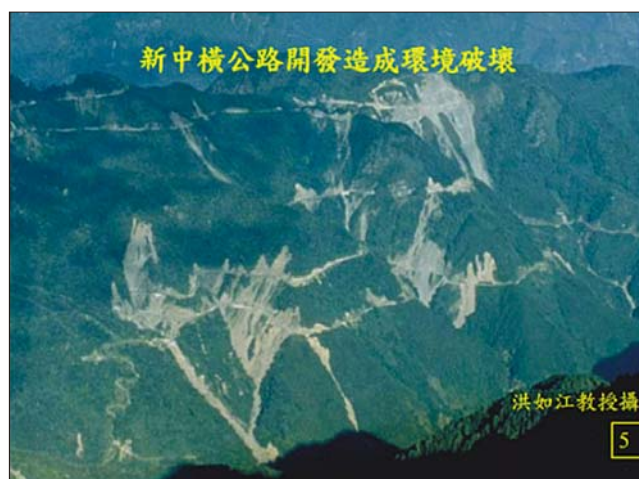
圖 2 公路開發造成環境之破壞^[1]

圖 3 台北市信義快速道路隧道洞口充斥了混凝土格梁結構（周南山攝）

表 1 國土保育政策新思維之比較表

	舊思維	→	新思維
人與自然的關係	人定勝天	→	尊重及順應自然
政策考量	當前性	→	永續性
經濟發展	不考慮環境及生態資源成本	→	綠色經濟
資源利用	無限制開發利用	→	依環境特性， 規範開發及保育措施
國土規劃	劃設保護區 開發 ≥ 保育	→	劃設環境敏感區 開發 ≤ 保育
區域環境管理	片斷式 各機關各自為政	→	整體性 自然區域考量
工程理念 與技術手段	重型硬式 工程「阻」、「擋」	→	輕軟性生態工法 「疏」、「導」並納入 工程綠色內涵
天然災害處理	強化工程反覆修復	→	還地於自然 管理重於治理

台灣在 921 大地震後大力推廣生態工程，近年來擴大推動永續工程，而在建築領域，則推廣綠建築已廿餘年。台灣近年來綠色工程之發展，如圖 4 所示：綠色／永續工程是將綠建築（含機電）、綠土木、生態工法、低衝擊開發（Low Impact Development）、以及屬於永續類的幾個核心概念互相結合而成為綠色／永續工程。

嚴格來說，綠色工程與永續工程之定義並不完全一樣。所謂永續發展（Sustainable Development），係指滿足當代人的需求而不損及後代子孫滿足其需求的發展。中國大陸譯成“可持續發展”，著重於耐久性與未來性：吃了祖先的糧，不要斷了子孫的路。綠色工程目前國際上還沒有明確定義，本文建議可比照美國環保署對綠建築之定義，稱之為對環境友善、在生命

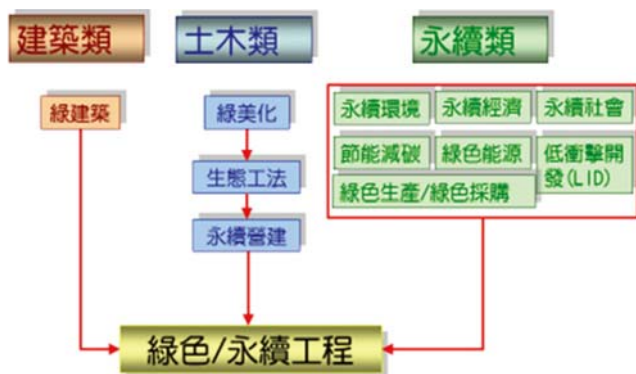


圖 4 台灣綠色工程之發展架構^[2]

週期中對環境破壞最小的工程。綠色與永續工程的目標、理念、方法一致，甚至成效也差異不大，因此，此二名詞一般均互相通用。

2009 年行政院核定的「振興經濟擴大公共建設投資計畫」即規定各項公共建設之設計應採用符合環保、節能減碳概念之綠色工法、綠色材料、綠色設計及綠色能源之「綠色內涵」，並指出「綠色內涵」原則（表 1）不低於預算 10%（如圖 5 所示），使綠色工法有了更明確的使用規範。

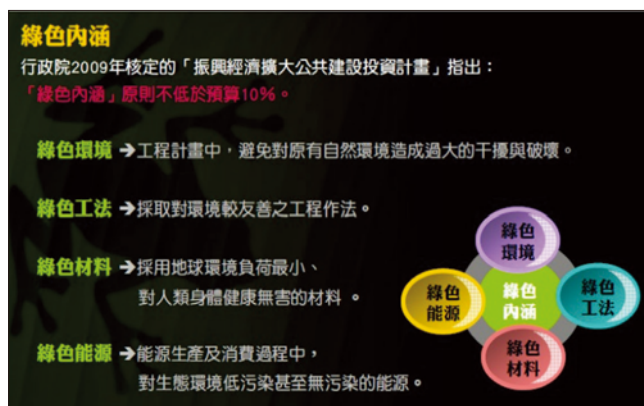


圖 5 公共工程委員會推廣之綠色內涵
（資料來源：行政院公共工程委員會，2011）



圖 6 玉門關的漢長城 — 古代的加勁土壤結構（周南山攝）

綠色大地工程之發展

綠色大地工程其實在中外歷史上屢見不鮮。例如：漢代的加勁長城（圖 6）、坎兒井（圖 7）、都江堰等；日本大阪古城的護城牆（圖 8）；莫斯科深達六十公尺的地鐵藝術車站（圖 9）等。

歐美諸國（如美國、瑞士、奧地利等國）其山坡地的設計與構築對環境保護的要求極高，大多數的山區公路不但對週遭環境的衝擊低，甚至部份公路的構築與環境融合成一體，形成公共藝術，此種設計與觀念上的創意亟待吾輩工程師努力去開創。

本文第一作者在美國科羅拉多州公路局服務時，曾參與以環保與景觀著稱的 I-70 Glenwood Canyon 段之設計施工。以下特就該案例之大地相關綠色工程做一介紹。

科羅拉多的 Glenwood Spring 位於丹佛之西部約 160 英哩處，是羅斯福總統的夏宮，以溫泉、峽谷與滑雪勝地聞名。該峽谷長約為二十公里，雄偉與秀麗兼

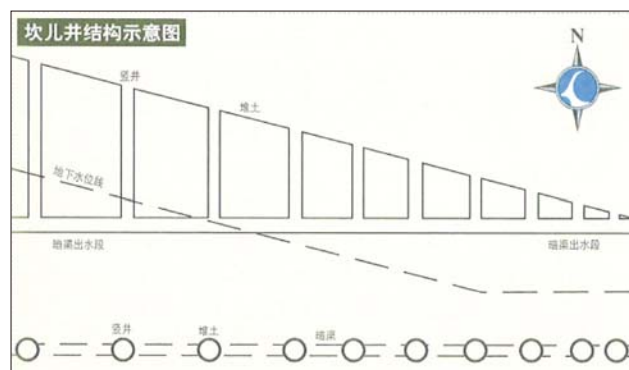


圖 7(a) 天山坎兒井之結構配置（取材自網路）



圖 7(b) 天山坎兒井之配置（取材自網路，三藏法師的絲路）



圖 8 日本大阪古城的護城牆（周南山攝）



圖 9 莫斯科深達六十公尺的地鐵藝術車站（周南山攝）

備，峽谷與河流共存，稱之為 Glenwood Canyon（葛蘭姆峽谷），是美國高速公路系統中最後完成的一段，也是全美聞名的景觀生態道路。

I-70 Glenwood Canyon 段採取了多項與環境、生態與景觀相融合的新技術，包括：雙階棧橋、加勁擋土牆、雙 T 型預鑄擋土牆、預力懸臂式橋面版、預鑄節塊橋樑、隱藏式地錨錨頭、落石防護系統、低碳休息區、智慧型隧道系統、假隧道、生態廊道與環境相容的岩面染色等，對環境、景觀與生態之助益頗大，值得吾人借鏡。

I-70 在 1970 年代規劃之初，亦曾遭部份環保人士與沿線居民之質疑與反對。由於 Glenwood Canyon 為兼具雄壯與秀麗的峽谷，為免草率規劃、設計可能對環境、生態與景觀造成無可彌補的損傷，故短短二十餘公里的高速公路可行性研究、環評、規劃、設計，就花費長達十餘年的時間，且施工期間與細部設計部份重疊，

亦長達十年之久。為配合規劃設計，進行多項研究計劃，期間更數度透過研發與實驗之結果，變更設計，精雕細琢反覆研究討論，務必做到精益求精、天人合一的境界，其審慎態度可見一斑。I-70 Glenwood Canyon 榮獲 1993 年全美土木工程成就獎（Outstanding Civil Engineering Achievement Award）。以下是該公路的一些與地工相關的特色：

以高架橋與棧橋通過環境敏感地區

由於峽谷地區空間有限，為避免開挖造成環境破壞及落石問題，多以高架橋及雙階棧橋（Terrace Viaduct）方式通過。採取雙階棧橋可以減少開挖量，並增加線型的優美。此外，所有的橋墩和擋土牆皆漆上與其峽谷岩石背景（多為黃褐色砂、頁岩互層）相仿的顏色，以降低結構物對周遭環境的衝擊。

生態與環境的保護措施

為避免橋墩施工破壞周遭環境，在規劃時特就預定路線詳細調查其植被，在設計時盡量避免將橋墩之位置座落於樹叢中。此外，懸臂式橋台較傳統式垂直面牆所造成的擾動要少很多，亦可減低施工範圍對植物的損害程度。尤有甚者，業主並將每一顆樹加以登記並予以標價，若包商因施工不當而損壞時，將依價碼賠償。例如：一顆木棉樹的價碼為美金 22,000 元。

雖然全線盡量避免開挖，但隧道口與部份落石區之開炸仍難避免。此時，爆炸雷管之位置及用藥量均經仔細規劃，以避免造成不必要之岩體開裂。經過開炸後的岩壁亦經染成黃褐色，與背景之風化砂岩顏色相仿，期與周遭環境相吻合。

為免公路之興築阻隔了本路段動物的行經路線，並在適當地點設計動物（如牛、鹿、羊）專用涵洞。此外，施工結束的地段，要求承商立即植生，並移種 315 萬顆樹苗及設置噴灑系統，按時灑水以利植生。由於濕地對於動植物之生態助益甚大，復原工作尚包括新增數十個濕地，以利野生動植物之棲息。

擋土結構

本路段之擋土系統可分填方與挖方兩大類：在填方部份，多採用下列二種擋土結構：

- (1) 雙 T 型預鑄、預力擋土牆：此種預力牆類似扶臂式 RC 牆，唯以預力鋼鍵穿過扶臂部份，連至基礎，並施以預力，使整體結構較為穩定，而預鑄面版之施工，亦達到快速、美觀、干擾交通較少等優點。
- (2) 加勁式擋土牆，科州以加勁牆來代替傳統的 RC 擋土牆，以避免醜陋的場鑄 RC 面版破壞了峽谷的天然美景，並節省鉅額經費。

科州是美國最早採用加勁擋土牆的數州之一。曾在 1970 年代，興建 I-70 穿越 Vail Pass 時，採用了造型優美的拱形面板式加勁擋土牆（圖 10）。

科州公路局曾早在 1980 年在 Glenwood Canyon 進行大規模的地工合成物加勁擋土牆現場試驗，經證明可行，即大量推行於該州公路建設中。在 Glenwood

Canyon 採用過的加勁系統，包括 Geogrid、Geofabric、VSL 及 Reinforced Earth 等不同系統。

在 I-70 Glenwood Canyon 加勁擋土牆之面版方面，則以預鑄式直條紋混凝土面版為主，線條簡單，適合於高速通過時之視覺焦點。此外，在次要公路邊坡則採用經過防腐處理後的原木面版，配合不織布或織布，造價低廉。

在挖方方面，以階梯式自上而下的地錨工法（與巴西地錨工法相似）較為常見。台灣地錨之設計，錨頭突出牆面，且常因施工品質差而補加地錨，零散座落於牆面上，導致視覺污染而影響環境景觀的美感（圖 11）。Glenwood Canyon 採用的地錨，乃經特殊設計，將錨頭隱藏於預鑄面版中（圖 12），且在階梯段中廣植白樺，與擋土牆之背景植被相符。每際秋天，形成一片金黃色燦爛的秋景（圖 12(a)），「停車坐愛楓林晚，霜葉紅於二月花」的美景再現，不但能與自然融合，並可軟化牆面，又可降低牆高的感覺。



圖 10 I-70 造型優美的拱形面板式加勁擋土牆
（取材自科羅拉多州公路局）



圖 12(a) Glenwood Canyon 地錨隱藏在預鑄面版內



圖 11 台北市萬芳路地錨錨頭凌亂且出水



圖 12(b) 地錨之錨頭隱藏於面版中

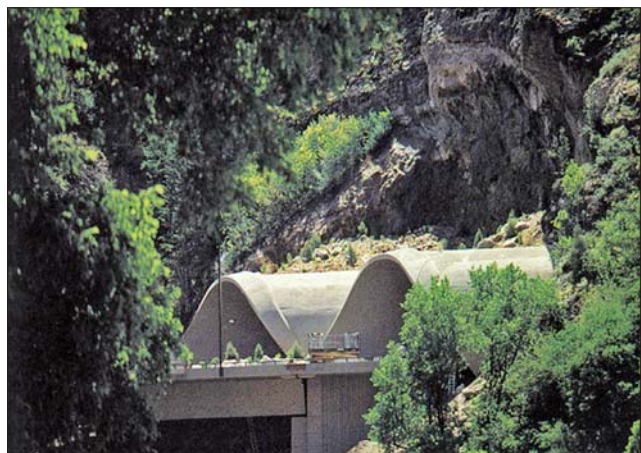


圖 13 I-70 Glenwood Canyon 隧道洞口沿伸為假隧道以保護落石並形成公共藝術

在隧道洞口方面，採用假隧道之方式將洞口沿伸（圖 13），不僅可防止落石，避免洞口不必要的地錨設計，形成雜亂的景觀（見圖 3），且因洞口的特殊設計形成公共藝術。

綠色加勁擋土結構與土工合成材料之發展

古代羅馬人為解決土石氾濫以及道路穩定問題，數千年前就懂得利用天然纖維、布料或植物等材料與土壤相互混合，以提昇道路穩定性與品質。翻開中國建築史，使用天然植物作為加勁土壤結構之案例者，遠在新石器時代仰韶文化時期即已存在；又在玉門關一帶利用紅柳、蘆葦混合砂礫構築而成的漢長城，雖歷經了二千年之風沙，某些地段卻仍高達數米（如圖 6 和圖 14 所示）。

直至 1963 年，法國工程師兼建築師 Henri Vidal，因觀察鳥類利用泥和草築巢的過程中，啟發了加勁土



圖 14 漢長城的加勁材料：蘆葦、紅柳、樹枝（周南山攝）

壤結構的概念，乃提出以鋼片及砂質土壤結合混凝土面版建造加勁式擋土牆，正式將加勁土壤系統推展至全世界。

加勁材料從古代的蘆葦、紅柳、樹枝、岩塊等天然材料，至近代的鋼片、鋼筋網、土工織布、土工格網等人工材料，材料之進化與時俱進，但原理、目的則相同，都是去彌補土壤中張力強度不足，形成一種複合土壤結構。類似 RC 結構中鋼筋承受拉力，混凝土承受壓力；在加勁土壤結構中，加勁材料承受拉力，土壤承受壓力。而土壤與加勁材料之間因土重提供了摩擦力，卻可抵抗了側向土壓力，減少土體的側向變形。甚至漢長城和懸臂長城的加勁材料並不連續，卻也一樣達到加勁之功能（如圖 6 和圖 15 所示）。

近代土工合成材料（Geosynthetics）之發展更是快速，除了加勁的土工格網（Geogrid）外，還包括：織布與不織布、止水膜、蜂巢格網、沙腸袋、織物模版、土包袋等（圖 16）。

土工合成材料雖是高分子材料，乍看並非綠色材料，但因其耐久性，或其特殊之透空性質（如加勁格網容許草在其中生長），形成了永續且綠色工程的載體，例如台灣流行的回包式加勁擋土牆提供了邊坡綠化的典範（圖 17 和圖 18）。

此外利用土工合成材料加勁土壤結構取代傳統 RC 結構，因應土方平衡，減少混凝土用量，可以減少碳排放量，甚至在生命週期中因為加勁牆面之植生進行光合作用釋放出氧氣，可以平衡生產過程中排放的二氧化碳，而達到零排放的目標（即碳中和），因此是永續且綠色的工法。



圖 15 以黑色岩片夾入黃土中之加勁懸臂長城（周南山攝）

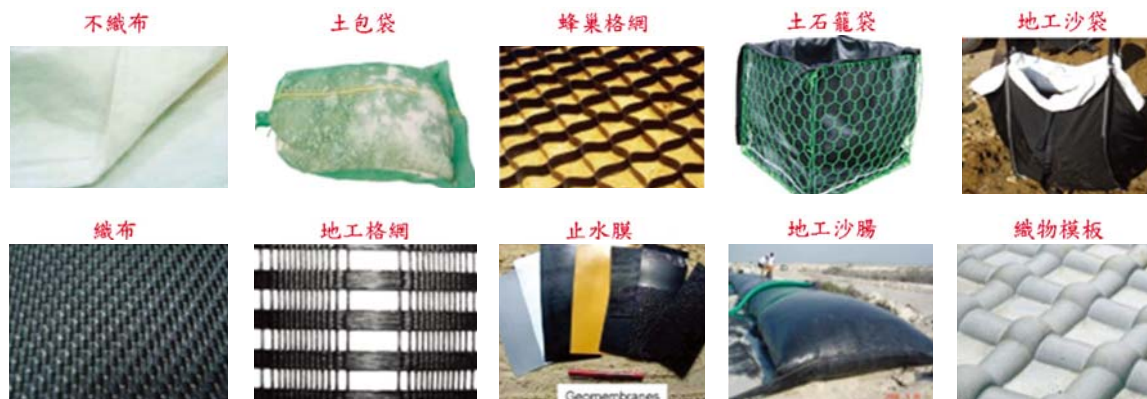


圖 16 不同類型的土工合成材料（取材自盟鑫公司）



圖 17 暨南大學邊坡於九二一地震後重建，採用回包式加勁擋土牆（周南山攝）

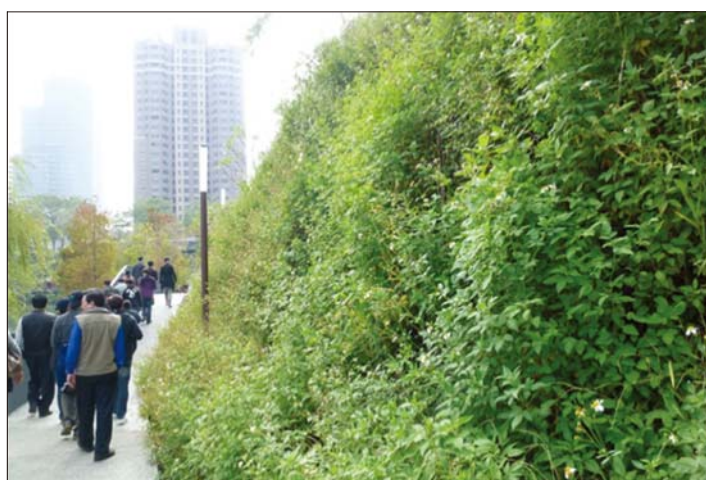


圖 18 台中秋紅谷四周加勁擋土牆植生茂密（周南山攝）

以亞洲首張實體工程的碳足跡盤查驗證聲明書——盟鑫教育園區之加勁路堤為例（圖 19～圖 21），採用 PAS2050 為依據進行碳盤查，經評估分析後，得知功能單位「一座加勁路堤工程（路堤總長 209 公尺、平均寬度 5.23 公尺、平均高度 2.54 公尺）」之碳足跡約為 101.22tonCO₂e。

如將相同之盤查標的結構形式與尺寸數量採用傳統 RC 構造來比較，其中 RC 構造方案僅採原料階段來做計算，尚不考慮製造（施工）、使用（維護）及廢棄階段，即高達約 340.06tonCO₂e，約為加勁方案的 3.5 倍左右（圖 22），此結果與德國 Georg Heerten（2009）、成大研究發展基金會（2009）所得成果：「同樣尺寸之 RC 擋土結構與景觀加勁擋土結構，於結構安全無虞之前提下，生命週期 CO₂ 排放量 RC 擋土結構較加勁擋土結構高出 5～8 倍。」之趨勢符合，足見加勁工法對於減碳效益上的貢獻相當顯著，確實符合工程綠色內涵之低碳設計要求。



圖 19 亞洲首張工程碳足跡盤查證明書（盟鑫公司提供）



圖 20 盟鑫綠色工程教育園區 (1) (盟鑫公司提供)



圖 21 盟鑫綠色工程教育園區 (2) (盟鑫公司提供)

考慮臺灣特殊立地條件，現今加勁擋土結構通常會與不同傳統工法複合設計使用，整體結構主要考量包含：基礎形式、加勁材料及填築土料、排水系統及面版系統等所構築而成的複合式結構物，藉由其本身的重量，抵抗來自牆體背後的土壓力或其它應力（圖 23）。目前加勁擋土結構之應用已經非常廣泛，包含：

- (1) 邊坡工程之應用：加勁擋土牆、加勁邊坡落石防護牆、土石流導流堤、落石防護牆、隧道洞口保護等。
- (2) 交通工程之應用：路堤、橋台、橋墩、隔音牆。
- (3) 水利工程之應用：河岸護坡、防（攔）砂壩、水庫淤泥處理、堤壩。
- (4) 垃圾及土石掩埋場之應用。

台灣成功之加勁擋土牆案例甚多，且以回包式植生牆面者佔九成以上。而國際上有關加勁結構之使用，如美國因地處乾旱，多採用 Keystone 或 Reinforced Earth 之類的混凝土面牆，植生式加勁牆較少見。而大陸的濕度因地而異，大多介乎台灣和美國之間，綠色的

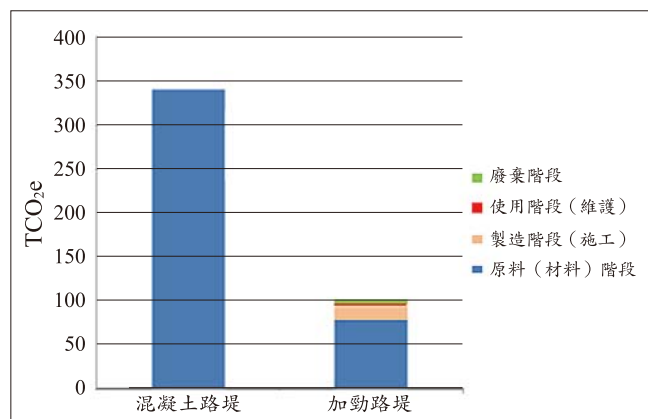


圖 22 加勁結構及傳統結構碳排比較圖

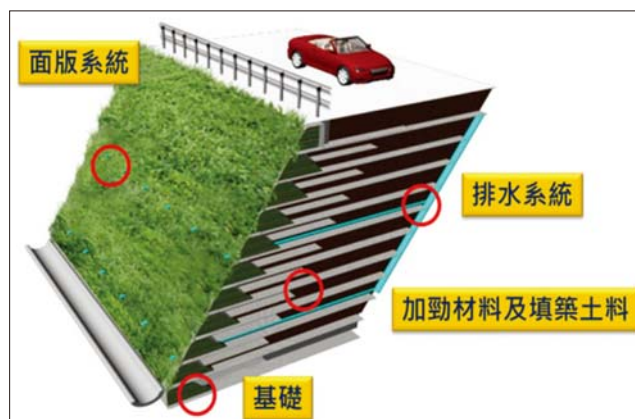


圖 23 加勁結構配置示意圖 (盟鑫公司提供)

邊坡或可期待。至於日本，原也適合回包式加勁牆，但因推廣 3R 工法（混凝土加勁面版），反而喪失了植生綠化和節能減碳的契機。

就加勁擋土牆與 RC 牆之工程效益比較如表 2 所示另外就各式加勁面版加以比較，如表 3 所示。作者認為不同面版形式之加勁擋土結構，以目前台灣大力推廣的回包式加勁擋土牆是最符合經濟、安全、生態、減碳等多目標的首選。

台灣綠色大地工程案例

案例一：台中市某崩場地整治修復工程

本工區自 921 地震後即開始鬆動，且因既有排水設施損壞，上邊坡匯集之水流直接沖刷邊坡坡面，導致邊坡土石流失造成向源侵蝕及 40 公尺高之崩塌，危及上邊坡房舍結構安全（圖 24），故需針對邊坡崩塌部分進行崩場地處理及坡頂與坡面安全排水處理。本工

表 2 傳統式剛性 RC 重力牆與柔性加勁牆之比較 [3]

比較項目	傳統鋼筋混凝土牆	加勁擋土牆
建造成本	台幣 5,000~8,000 元／平方米，隨牆之高度昇高，單價上漲頗鉅。	台幣 5,000~6,000 元／平方米，單價不因牆高而有太大變化。
外觀	混凝土場鑄一般變化甚少。	牆面可就幾何形狀、顏色、紋理及材料上做靈活的變化，而能與其所在環境配合。提昇美感。亦可採用植生牆面。
施工方式	傳統施工方式，需要開挖基礎，施工較慢。	施工簡易快速，惟精確度要求較高。
設計理念	外穩定－需要橋面與基礎聯結成一體，提供穩定力矩。	內穩定－藉加勁材料提供穩定的來源，牆面僅提供部分支撐力量。
耐震性	地震時因背填土無抗張性，而牆面較背填土堅硬，應力集中，易生裂縫。	牆面之柔軟提供了阻尼效應（DAMPING），可吸附地震所釋出的大量能源，且加勁材料抗張性強，應力分配均勻，耐震性較佳。
容忍沉陷之能力	一般以 2.5 公分為設計標準，以 5.0 公分為最大容許之沉陷量。	容許沉陷量達 30 公分以上。常用預壓法或二次施工法（牆頂部之結構物在主要壓密完成後再裝置），以消除施工後可能之沉陷。
排水系統	排水層緊貼於牆後，並設置排水管。	排水層置於背填土與原狀土之間，並設置透水性土工織布及排水管排水。
耐久性	一般約有 30~50 年壽命。	耐久性依使用之加勁材料而異，一般約有 75 年。
減碳效益	主要材料為混凝土，混凝土本身為高碳排放材料之一，整體碳排放量通常較高。	主要材料為現地土石及輕質土工格網，整體碳排放量低，除此之外可搭配綠化植生，有減碳及固探之效益。

表 3 各種加勁擋土牆面版比較表 [4]

Comparison of Facades

Factor \ Facing	Wrapped Around Facing	Keystone or Other Segmental Block	Reinforced Earth or Full Height Panel
Cost	1	2	3
Ecology	1	2	3
Reduction of CO ₂	1	3	3
Landscape	1	1	2
Construction Speed	1	2	3
Maintenance	1	1	1
Use of on-site Material as Backfill	1	3	3
Avg.	1.0	2.0	2.6
Popular Area	Taiwan Japan Europe	USA Europe Korea	USA

1. Best 2. Med. 3. worse



圖 24 台中案例一 施工前（2008/02）（盟鑫公司提供）

區多年來歷經多次整治，但均告失敗，最後依據工程綠色內涵之指標，採用複合式綠色工程設計（圖 25），終告成功。以下並按照安全、經濟、生態及減碳等各層面加以分析。

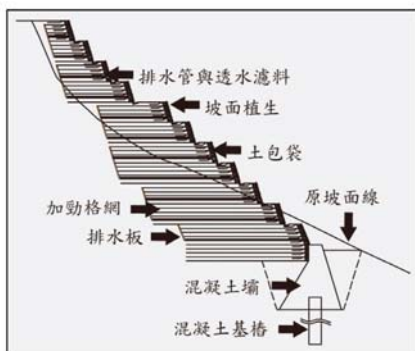


圖 25 台中案例一斷面示意圖（盟鑫公司提供）



圖 27 台中案例一現況（2014/08）（盟鑫公司提供）

安全層面

本案主體結構採用結合基樁、重力式擋土牆及排水系統之複合式加勁擋土結構，以極限平衡法針對加勁結構物總體穩定性（包含內穩定與外穩定）進行分析。其分析結果均符合建築技術規範規定之長期載重安全要求。加勁工法屬於柔性工法，耐震能力佳，完工後歷經莫拉克等多次颱風及地震侵襲，目前結構穩定，成功保護民眾生命財產安全。完工後見圖 26 及 27。

經濟層面

本案規模極大，且地質條件惡劣，就地取材並將以結構化，不但增加結構安全，亦能節省龐大經費開支。

生態層面

本案工法減少開挖面及現地擾動，另加勁工法可於坡面植生綠化，完工後回復 1,200 m² 之植生面積，減少工程對原有生態環境的衝擊，兼具保水功能，並融入當地自然景觀及恢復原有地貌，且供生物棲息及遷徙之場所。（圖 26 和圖 27）



圖 26 台中案例一施工後（2009/08）（盟鑫公司提供）

減碳層面

本案大幅減少約 50% 以上之混凝土用量，且加勁工法所運用的材料均屬低碳、質輕、易於施工，減低運送及施工時機具所產生的污染。另增加約 1,200 m² 植生面積，可大幅降低碳排放量，此植生綠化的部份另可吸收 82,500 kg 之碳排放量，此為傳統混凝土擋土牆所不及之處。

案例二：暨南大學校門口邊坡整治工程

九二一集集大地震規模 7.3 級，埔里暨南國際大學校門口高 80 公尺之邊坡崩塌，損壞嚴重，警衛亭亦遭衝下之格樑撞毀。上邊坡之人行步道及共同管溝發生張力裂縫、岌岌可危。暨大邊坡於 1994 年曾發生順向坡坍塌，傷及行人。1999 年九二一地震後，此邊坡大規模下滑，範圍長達 180 m。

邊坡復建工程設計涵蓋：邊坡穩定分析、土釘、加勁擋土牆、修坡、排樁、排水工程及植生綠化^[5]。

規劃設計時為避免再次崩塌，特將聯外道路內移三十餘公尺，以緩和斜坡，並以大規模之自然斜坡配合植生綠化與排水，兼顧景觀與生態。

原有造成順向坡滑動之虞的硬粘土層，亦予以挖除。在下邊坡並以加勁擋土牆配合土釘，予以增厚坡趾，不但增加整體穩定性，亦可消化部份開挖之土方（如圖 28）。

加勁材料之設計強度（Tallow）為 50 kN/m，垂直間距為 0.5 m，採回包式施工方式。其施工順序為：(1) 自上至下逐階開挖（每階 5 m），隨即施打土釘，直至開挖面為止。(2) 自底部逐階施作加勁擋土結構，並將加勁材料與土釘聯結，以增加介面之穩定性。(3) 加勁結構填築至預定高程，並予植生綠化。

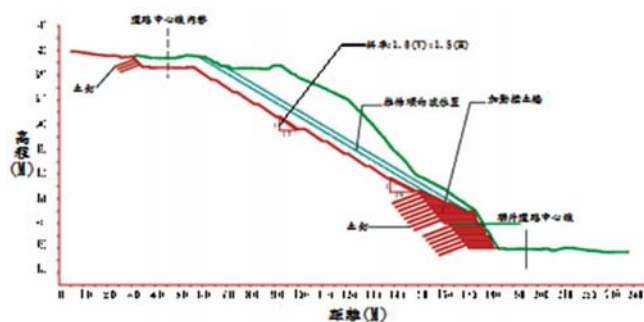


圖 28 暨大邊坡復建設計 [5]

完工後之暨大自然邊坡見圖 29，加勁邊坡見圖 18。暨大邊坡之設計，未採用一般大地工程常用之地錨與格框，而係考慮較為永續的道路退縮、挖除順向坡肇因之硬化粘土薄層和較為生態之土釘、加勁擋土牆與自然邊坡等工法，不僅安全與經濟可以確保，環境生態景觀亦均可兼顧。由於加勁格網提供了動植物攀爬之平台，益增生物之多樣性。(見圖 30)



圖 29 暨大邊坡復建完工後植生茂密 (周南山攝)



圖 30 暨大邊坡加勁擋土牆完工後生態豐富，加勁格網提供了動植物攀爬之平台 (周南山攝)

省思

由於氣候變遷，災害不斷，傳統土木工程人定勝天的思維，經過無數次大地反撲之後已經有很大的變化。在環境永續發展之前提下，傳統人定勝天之思維已經轉念。然而從事綠色工程與環保人士逢建設必反之態度有所不同，而與孟子「斧斤以時入山林，柴木不可勝用也」的順天應人哲學不謀而合。(圖 31)

傳統的土木工程教育一般均以安全係數符合要求為設計的準則，而對於安全係數外的環境、景觀與生態等問題則甚為忽略。在學校裡我們看重的是力學，

但土木工程原意即是民生工程（Civil Engineering），可惜土木工程師與大地工程師欠缺美學、生態的訓練，若有機會赴歐美、蘇俄旅遊，就會發現我們在這一方面的素養的確有所欠缺。台灣經濟的成長已使國民轉而對自然景觀與環境生態的重視，因此，土木及大地工程師在進行工程設計時，除安全與經濟上的考量外，應再對美學與環境生態上略下功夫。國內大學土木系所亦應加強開設綠色（永續）土木工程、工程美學與生態工程等課程。

對於新開發的技術，如何引進國內，亦需國內工程單位集思廣益。筆者建議工程會（未來之交通建設部）對新工法、新材料、新技術之使用，應訂立鼓勵公家機關採用創新工法之制度，並大力推動統包制。此外，亦建議透過價值工程方式，容許在原設計之外，由施工廠商提出替代方案，只需在「相同或更佳」的條件下，主辦單位應盡量鼓勵新工法、新技術的提出。審計單位、政風單位亦應以平常心視之，瞭解工程技術之推陳出新是提昇國家競爭力的主要原動力，而不要以懷疑的眼光看待工程師。

較諸國內電子資訊業的飛速進展、日新月異，為國家爭取數以億計的外匯，國內土木工程新技術之引進與研發相對而言甚為緩慢，彷彿蝸牛學步。此與電子業的輝煌成績相較，我輩土木工程師能不汗顏？其實土木工程師並非不長進，研發或引進新科技之最大障礙恐怕是法令規章之不足、承辦人員的保守心態和審計、政風單位的不當干預。

嘗聞審計單位對於價值工程之心態是：既有更佳設計，何以原設計單位未能洞燭機先，顯有失職之處。殊不知新技術之發展日新月異，在國內設計單位之作業時間與經費均被壓縮之情況下，很可能無暇他顧，且亦可能資訊不足，故只得抱殘守闕，習用舊章。因此國內工程設計有欠創新動機，不重環保與景觀，更遑論生態保育。偶有佳作，反而需擔心專利、綁標、規範等帶來的困擾。故整個創新的大環境亟待制度面的通盤檢討。



圖 31 土木工程開發觀念之改變^[2]

結語

1. 面對極端氣候的嚴重課題，講究安全、經濟、生態、減碳之綠色生態工法成為全球土木營建工程之新趨勢，大地工程也不例外。台灣綠色工程之發展是將綠建築、綠土木、生態工法、低衝擊開發以及屬於永續類的幾個核心概念互相結合而成為綠色／永續工程。而綠色大地工程屬於綠色／永續土木工程中重要之一環，尤其在綠色邊坡、地工合成材料及透水鋪面等領域，發揮之空間甚大。在環境永續發展之前提下，傳統工程人定勝天觀念，僅著重於結構強化的抵抗性作法已無法因應當今環境之快速變遷。因此，符合綠色內涵、節能減碳的綠色／永續工程乃成了這困局的一道解藥。
2. 本文探討綠色大地工程近年來的幾項發展，包括綠色邊坡、加勁擋土結構及地工合成材料應用等，並以歐美及台灣近年來之案例佐証。綠色大地工程需能兼顧安全耐久、經濟、生態環境、節能減碳、景觀（甚至人文、藝術）等面向，才能稱之永續的工程。而目前類似綠建築之各項綠色土木（含大地）指標則尚待建立。
3. 傳統土木工程人定勝天的思維，經過無數次大地反撲之後已經有很大的變化。從事綠色工程者與環保人士逢建設必反之態度有所不同，而與孟子「斧斤以時入山林，柴木不可勝用也」的順天應人哲學不謀而合。以老祖宗所揭示的順天應人哲學，配合最新地工技術與材料，兼顧環境、生態、景觀、節能減碳之設計乃是綠色大地工程發展之趨勢。
4. 吾輩工程師應認同一個觀念，即工程本身不是目的，只是手段，其目的在改善社會環境和生活水準，故工程的設計應有景觀保護和環境永續發展的觀念，否則我們只是工程「匠」，而非工程「師」。

參考文獻

1. 洪如江（2006），「天、地、人與大地工程」。
2. 周南山（2015），台大土木系「永續土木工程」講義。
3. 周南山（1993），「地工合成物加勁牆分析設計之探討與評估」，地下技術第 43 期。
4. 周南山（2015），「樹上有天，天上有月 — 地工合成材料應用於永續工程之展望」，GESM，永續綠色工程資訊網創刊號。
5. 堅尼士工程顧問有限公司（2000），「暨南國際大學台 21 線聯外道路崩塌復建計劃及震災損害調查報告書」。

6. 周南山 (2004), 「地工技術與環境景觀之融合 — 美國科羅拉多州環境敏感公路 I-70 Glenwood Canyon 之經驗與省思」, 技師報第 388 期。
7. 周南山 (2004), 「見證中國古代的土木水利奇蹟 — 2012 年蘭州兩岸土木工程研討會及絲路記行」, 土木水利第 39 卷第 5 期。
8. 交通部運輸研究所 (2013), 「交通運輸工程節能減碳規劃設計手冊研究與編訂」。
9. 交通部運輸研究所 (2012), 「交通運輸工程碳排放量推估模式建立與效益分析之研究」。
10. 行政院公共工程委員會 (2012), 「研訂公共工程計畫相關審議基準及綠色減碳指標計算規則」委託研究案 — 成果報告 減碳規則篇。
11. 行政院公共工程委員會 (2010), 「公共建設之永續性思維與作法 — 從綠色內涵到節能減碳」。
12. 台北市土木技師公會 (2004), 「結合生態與景觀之加勁擋土結構設計及施工規範」。
13. 台北市政府 (2009), 「台北市災害防救白皮書」。
14. 財團法人成大研究發展基金會 (2009), 「混凝土、RC 及景觀加勁擋土牆生命週期減碳之研究」。
15. 張珮真、鄭恆志、吳嘉文 (2011), 「從綠色工程新思維探討崩塌地整治」, 農林學報第 60 卷第 2 期, 頁 147 ~ 157。
16. 盟鑫工業股份有限公司 (2015 ~ 2016), 「綠色工程實績手冊」。
17. 盟鑫工業股份有限公司 (2012), 「產品碳足跡研究報告書 — 盟鑫永續綠色工程教育園區加勁路堤工程」。
18. 鄭恆志、陳衍舜、黃品萱、蔡維哲、鄒萬祥 (2014), 「工程碳足跡評估及盤查實務 — 以加勁路堤為例」, 土木水利, 第四十一卷第一期, 頁 29-39。(土木水利會刊之一例)。
19. IPCC 2006 國家溫室氣體清冊準則。
20. IPCC 2007 氣候變遷之科學基礎報告。
21. PAS 2050: 2011 Specification for the Assessment of the Life Cycle Greenhouse Gas Emissions of Goods and Services.
22. Heerten, G. (2009). "Reduction of Climate-Damaging Gases in Geotechnical Engineering by Use of Geosynthetics," Proc. Int. Symp. On Geotechnical Engineering, Ground Improvement and Geosynthetics for Sustainable Mitigation and Adaptation to Climate Change Including Global Warming, Bangkok, Thailand. 



經濟部水利署南區水資源局廣告

積極清淤 水庫延壽。

透過陸挖、抽泥及水力排砂...等方式辦理清淤工作。

