

## 樹上有天，天上有月 - 土工合成材料應用於永續工程之展望

Author：周南山 中華地工材料協會理事長暨台大土木系、中大營管所兼任教授

(GESM 2015-01-27) 在全球暖化日趨嚴重之際，節能減碳的綠色/永續工程乃成了這困局的一道解藥，何況它在生態、環境、景觀方面均有顯著的貢獻。而土工合成材料是永續工程中重要的一環，尤其是在邊坡、河川、廢棄物及水庫淤泥處理和海岸工程等領域，未來將扮演著舉足輕重的角色。

### 1. 永續工程的發展

永續工程(Sustainable Engineering)與綠色工程(Green Engineering)、生態工程(Ecological Engineering) 這幾年在台灣、大陸乃至全球都大行其道。台灣在十幾年前(921 大地震後)工程會大力推廣生態工法(後來改稱生態工程)，近五年來改推永續工程。而在建築領域，則推廣綠建築已廿餘年。我嘗試把台灣近年來綠色工程之發展以下圖(圖 1)加以歸納：

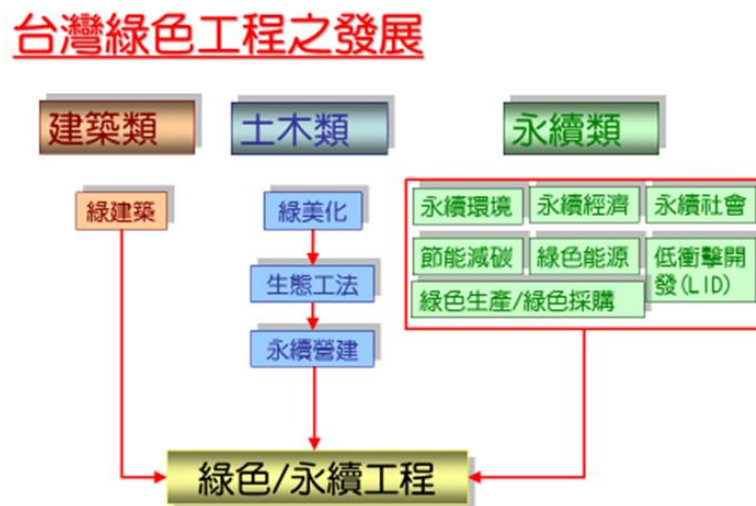


圖 1. 台灣綠色工程之發展架構

由圖 1 可以看出，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(WCED, 1987)。在中國大陸，Sustainable Development 翻譯成“可持續發展”著重於耐久性與未來性。他們的解釋也很傳神(有點柯文哲的味道):吃了祖先的糧，不要斷了子孫的路。綠色工程似乎還沒有定義，筆者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、在生命週期中對環境破壞最小的工程。

例如台灣近年來在都市工地旁規定以盆栽方式進行綠化，可稱之綠色工程，但非永續工程。又許多河岸的混凝土護岸，也許安定且永續，卻非綠色工程。但大部份的情況，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。

## 2. 中國古代的加勁土壤

其實永續工程在中國歷史上源遠流長。包括長城、都江堰、坎兒井、大運河、靈渠等都是代表作。茲以加勁土壤為例，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(圖 2、圖 3)。筆者於 2012 年絲路之旅親睹此工程，內心震撼之餘，也不禁對中國古代偉大的發明，竟然未能繼續發揚光大而遺憾，否則加勁土壤應是中國人的專利才是。

有趣的是，加勁土壤其實是鳥發明的(圖 4)。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開來，而逐漸被大地工程界所重視。



圖 2. 玉門關的漢長城-古代的加勁土壤結構



圖 3. 漢長城的加勁材料：蘆葦、紅柳、樹枝



圖 4. 鳥是加勁土壤的發明者



圖 5: 懸臂長城位於嘉峪關城北 8 公里北側的黑山，以黑色之岩片夾入黃土中加以夯實，成為加勁擋土牆

加勁材料從古代漢長城的蘆葦、紅柳、樹枝，懸臂長城的岩塊等天然材料(圖 5)，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。

由古代長城一座座壯闊而滄桑的遺跡，訴說著加勁土壤二千年的古老故事，可證明即便是缺乏面版且加勁材料不連續的加勁土壤結構，也能夠千年永續！

### 3. 近代的地工合成材與加勁牆

近代地工合成材料 (Geosynthetics) 之發展更是快速，除了加勁的地工格網(Geogrid)外，還包括：織布與不織布、止水膜、蜂巢格網、砂腸袋、織物模版、土包袋等(圖 6)。

地工合成材料雖是塑化材料，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 7、圖 8)。

#### 地工合成材料於土木水利工程應用

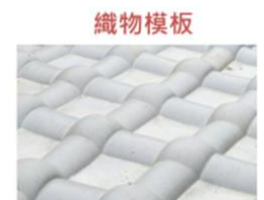
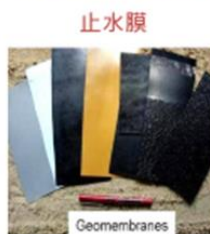
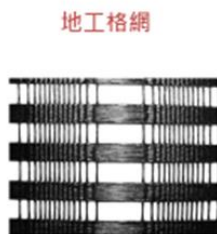
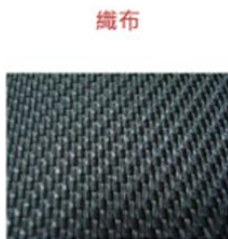
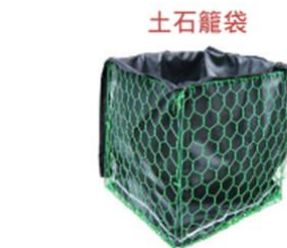
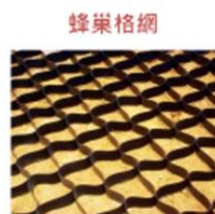


圖 6. 不同類型的地工合成材料在土木水利工程之應用

利用土工合成材料加勁土壤結構以取代傳統 RC 結構，可以減少碳排放量，甚至在生命週期中因植物光合作用釋放的氧氣，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。

大陸在十二五之後大力推廣生態工法。筆者最近有機會接待北京的同行，他們在參觀完暨南大學(圖 7)、秋紅谷(圖 8)、和佛光山等邊坡後，對台灣回包式加勁擋土牆之邊坡穩定及綠化功能印象深刻，咸認是大陸亟需學習的對象。

的確，台灣的潮濕氣候與政府的大力推廣生態工法提供了綠色邊坡的優異環境，正如同歐洲意大利一樣。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。而大陸的濕度介乎台灣和美國之間，綠色的邊坡或可期待。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。



圖 7. 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

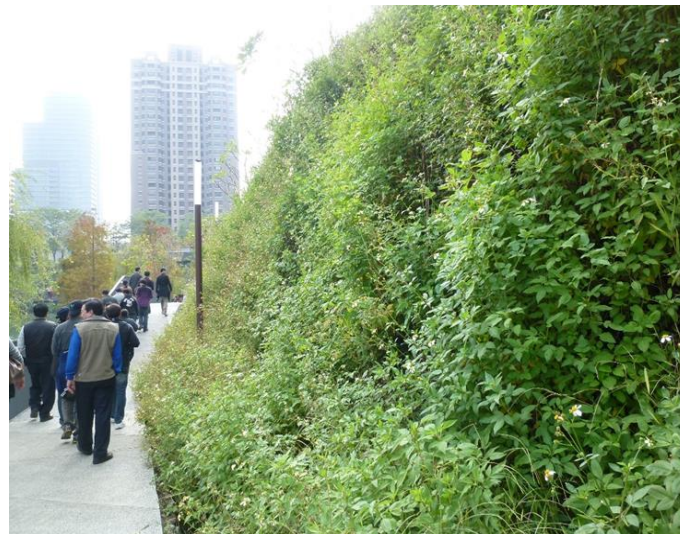


圖 8. 台中秋紅谷四周加勁擋土牆植生茂密，讓都會區民眾能近距離瞭解加勁牆的功能

筆者曾在十餘年前曾就加勁擋土牆與 RC 牆做一比較(前幾年大地技師還考過這一題)，最近自行修正如表 1，另外也就各式加勁面版加以比較，如表 2。個人認為，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、綠化、減碳等多目標的擋土牆首選。筆者曾在數個國際加勁擋土結構會議中提出此觀點，迄今尚未接到各國學者專家反對的意見。

表 1. 傳統式剛性 RC 重力牆與柔性加勁牆之比較  
(修改自”土工合成物加勁牆分析設計之探討與評估”，土工技術第 43 期，周南山(1993))

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。

表 2. 各種加勁擋土牆面版比較表

**Comparison of Facades**

Facing	Wrapped Around Facing	Keystone or Other Segmental Block	Reinforced Earth or Full Height Panel
Factor			
Cost	1	2	3
Ecology	1	2	3
Reduction of CO <sub>2</sub>	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



#### 4. 結論:地工合成材是永續工程的契機

地工合成材之應用不止加勁一端，其實範圍頗廣。在台灣的主要應用除了邊坡植生網毯之外，海岸工程的沙腸管(Geotube)也是未來之星。此外，適合淤泥處理的砂袋及土包袋也有相當潛力。

今明兩天，正舉行全國能源會議。在全球暖化日趨嚴重之際，水災、旱災、土石流層出不窮。台灣反核聲浪高漲，為討好人民又需維持低電價，火力發電之比例勢必要增加，而更汙染環境。因此，節能減碳的綠色/永續工程乃成了這困局的一道解藥，何況它在生態、環境、景觀方面均有顯著的貢獻。而地工合成材料是永續工程中重要的一環，尤其是在邊坡、河川、廢棄物及水庫淤泥處理和海岸工程等領域，未來將扮演著舉足輕重的角色。

林語堂在幽居陽明山時描述他的優質生活環境：“宅中有園，園中有屋，屋中有院，院中有樹，樹上有天，天上有月，不亦快哉！”

我們擔心，持續惡化的霾害環境恐怕讓樹上有天、天上有月的日子亦不可得。但危機也是轉機，若國家大量採用節能減碳的永續工程，地工材料的前景也將如樹上之天與天上之月。邁向永續的設計與施工，這是我們工程師的責無旁貸的社會責任，願以此與讀者諸君互勉！

#### ★作者介紹:

##### ◆ 學歷

美國科羅拉多大學  
美國南卡羅萊納大學  
國立成功大學

土木工程系博士  
土木工程系碩士  
土木工程系畢業

##### ◆ 經歷

社團法人中華地工材料協會  
國立台灣大學土木工程學系  
國立中央大學營建管理研究所  
環興科技股份有限公司  
中興工程顧問股份有限公司  
堅尼士工程顧問公司  
美國科羅拉多州公路局  
美國丹佛 Geotek 顧問工程公司  
中華顧問工程司  
中國土木水利工程學會  
中國工程師學會

理事長  
兼任教授  
兼任教授  
董事長  
總經理  
總經理  
正工程師兼地工組長  
計劃經理  
大地工程師  
常務監事  
監事



##### ◆ 專長

永續工程、生態工程、大地工程、邊坡工程、加勁擋土結構、專案管理、地工合成材料

##### ◆ 瀏覽作者其他著作

[中國時報廣場\(2014/12/5\)](#)

[中國時報廣場\(2014/12/22\)](#)