



# 土木工程與環境

洪如江／國立臺灣大學土木工程學系 名譽教授、中國土木水利工程學會 會士

## 導 論

### 自然環境所面臨危機

面對自然環境危機，早在幾十年前就受到國內朝野的注意，例如：虞兆中（民國 70 年），施正鋒主編（2004，民 93 年），中國土木水利工程學會（民國 94 年），洪如江（民國 95 年），齊柏林（2013，民 102 年），行政院經濟建設委員會（民國 94 年），行政院國家永續發展委員會（民國 107 年起）。

聯合國於 1972 年成立環境署（UNEP）。美國環保署（EPA，USA）列舉出重大生態危機與健康危機。歐盟在其「環境 2010：我們的未來，我們的選擇」，宣示歐盟的環境政策。聯合國於 2015 年公布的永續發展目標（United Nations Sustainable Development Summit 2015）。聯合國 195 成員國，2015 年 12 月通過巴黎協議（Paris Agreement）。聯合國近 200 國家於 2018 年 12 月初在波蘭 Katowice 召開氣候變遷峰會，鑑於冰川融化、海面上升、熱浪引發山林火災、與豪雨災害，日趨嚴重，巴黎協議所擬定的目標已不夠用，而須要訂定更高目標。世界衛生組織（2016）報告，室內外空氣污染造成 700 萬人死亡。Mote Jr. 等氏（2016）文中提出「Major challenges confronting the world」，非常值得參考。

海面上升，海嘯暴潮曾經有高達 30.6 m 的高度（圖 1），造成大量人命傷亡。

自然環境危機的嚴重性，受到全球的高度關切。氣候變遷（Climate change）、全球暖化（Global Warming），空氣污染、天然棲地與生物多樣性，面臨最大危機。

台灣，開路上山，引發濫墾、濫伐、濫建、濫種淺根作物。超抽地下水，濫排污毒之廢水，部分是法治（Rule of Law）不彰。另根據民國 94 年行政院經濟建設委員會胡勝正主任委員在悲歌美麗島一書（齊柏林攝影）之序：「配合經濟發展需要而造成過度開發」。齊柏林的看見台灣、鳥目台灣與島嶼奏鳴曲等攝影文集，顯示許多是明知故犯的人禍。



圖 1 1993 年日本北海道地震海嘯，奧尻島西岸之藻內，漁船被海嘯暴潮沖上公路坡面，高達 30.6 m（洪如江攝）

### 人口爆炸對環境的影響

目前，全球人口約 75 億人，2050 的全球人口可能將達 95 億人。一個地球的陸地面積與資源，已經難以供應人類逐日增加的需求。

世界上，有不少富翁，卻更多貧民（每天收入少於美金 1 ~ 1.5 元）。目前，全球貧民將接近 8 億人。2050 的貧民，可能多達 10 億人以上。

而貧窮國家外溢大量難民，為追求美國夢或歐洲夢，冒生命之險，設法偷渡美國或歐洲。但美國與歐洲國家的土地與資源並非無限大，不可能來者不拒。

人口爆炸，自然環境與國內外社會環境，都有越來越難以應對的困境；若不尋求解決或舒緩，可能爆發貧富衝突。但是台灣，空屋 80 多萬宅，年青人因為買不起房屋而不敢結婚生子，而有少子化的社會危機與國安危機。

### 人口向城市集中對環境 ( 尤其是空氣污染 ) 的影響

全球人口的 50%，台灣人口的 80%，已居住在城鎮之中。

根據 Andrew Ka-Ching Chan (2016)，城市消耗全球飲用水的 60%、能量的 75%，排放 80% 的溫室氣體 (Greenhouse Gas)。2050 年，概估全球人口的 70% 以上，居住在城市之中。許多大城市，興建大量摩天大樓，以混凝土叢林取代天然叢林，縮小公共綠地。因此，導致日益嚴重的熱島效應 (Heat Island Effect)、全球暖化 (Global Warming)、廢棄物 (waste) 暴增、擠車、空氣污染。

2010 年代表城市因空氣污染而死亡人數 (根據 Lelieveld, et al, 2015)，與公共綠地百分比 (根據 Mayor of London, 2012, *World Cities Culture Report*)、國家經濟成長指標 (根據 *The Economist, The World in 2019*，National GDP growth)，有某種程度的相關性：

城市	因空氣污染而死亡人數	公共綠地百分比 (%)	每年國家經濟成長 (National GDP growth)
上海	14,900 人	2.6%	6.2% (China)
孟買	10,200 人	2.5%	7.6% (India)
莫斯科	8,600 人		1.8% (Russia)
東京	6,000 人	3.4%	1.4% (Japan)
巴黎	3,100 人	9.4%	1.6% (France)
紐約	3,200 人	14%	2.2% (US)
倫敦	2,800 人	38.4%	1.5% (UK)
新加坡		47%	2.9% (Singapore)
雪梨		46%	2.3% (Australia)

台北市的公共綠地，根據 Global leadership on culture in cities，為 3.6%。

更嚴重的是，在尖峰時段，台灣首善之都的台北市，汽、機車（部分二行程機車）密集且爭道（圖 2），也排放污染性廢氣。

筆者多次前往北歐旅行，特別感受到自然環境及人造環境的優美、社會的祥和、物價高但品質好。也多次向當地學者請教：「為何北海油田的開發不夠積極？」得到的答案是：「若經濟成長率超過 3%，社會及環境來不及反應」。北歐各國的每年國家經濟成長 (National GDP growth) 為：丹麥 2.0%，芬蘭 1.6%，挪威 1.8%，瑞典 2.1%。



圖 2 台北市街頭的汽機車景觀 (洪如江攝)

### 土木工程對氣候變遷 (Climate Change) 的影響與對策

大規模的土木工程作業 (operations)，例如公路、鐵路、海港、隧道、機場、水庫大壩、城市、等等基礎結構 (infrastructures) 的施工，都必須動用大型施工機械，也使用大量工程材料 (例如鋼鐵、水泥、木材)。

大型施工機械的製造與使用，工程材料之原始物質 (例如鐵礦、石灰石、原木) 的採取、搬運、加工、與安裝，都需要動用重型機器，都必須燃燒龐大化石能源。這些基礎結構完工後的使用與除役 (拆除及廢棄物的處理)，也都直接或間接耗費化石能源，而成為引發暖化與氣候變遷的重要因素之一。因此，土木工程應該：

- 長壽，可以大幅度降低新建與拆除的頻率、減少材料與能源消耗。
- 在滿足功能及安全的前提下，採用最小量體。
- 採用可再生利用的材料：日本阪神大地震之後，不少鋼筋混凝土橋倒塌，拆除的廢料無法再生利用；因此在重建時，盡量多用鋼結構。

自然森林或人造林，都能夠：(1) 儲存大量水分而為天然水庫。(2) 樹根所及的地下水，經由樹根、樹皮、樹枝、至樹葉，以水蒸汽的方式散發至空氣中，調適周圍環境的微氣候，也發揮對抗暖化的部分功能。(3) 阻擋土石流：圖 3 顯示台灣大學溪頭實驗林的林樹，受到土石流的攻擊，即使樹根已經裸露，甚至於已經被土石流的先鋒巨石所剝皮，卻依然緊緊抓住土地，擋住土石流。可見森林保護國土的重大功能。

森林，尤其是雨林 (rain forest)，若因土木工程而加以鏟除，或因開路上山而引起大規模林地崩塌，或因山火，必然導致重大氣候變遷。中國幾千年的歷史之中，書生們對暴君大興土木（尤其指皇宮、陵墓、邪神之廟）的惡行加以討伐，先見之明。因此，即使土木工程非經過森林不可，也要盡力減小工程用地面積，減少對森林的傷害（圖 4）。在土木工程計畫之中，也可以嚴格規定：砍伐多少樹林就必須補種多少樹林。

新加坡，人口密度約 7,800 人 / 平方公里，其公共綠地高達 47%，是因為主政者具有遠見 (Vision)、從事長期規劃、妥善設計。政府官員清廉且依法行政。

倫敦，除了市區的公共綠地 38.4% 之外，其外圍邊界外保留寬約 20 公里的永久綠帶。受益者不只是倫敦，也是大面積的外圍腹地城鄉。

香港，已開發土地面僅約 25%，筆者多次搭乘纜車上山欣賞廣闊綠色山林。

台灣蘇花改（台 9 線）公路，已經在規劃案提出工程作業全程的碳足跡 (Carbon Footprint) 數據，供討論審查。

## 土木工程對生物多樣性的影響與對策

人類在地球，有大量的其他生物物種，才能生存。

生物多樣性，是人類必須而且最重要的維生系統。它供應人類在食、衣、住、行、育、樂、衛、等等民生需求的均衡分配。麻雀吃蝗蟲，保護麥、稻幼苗。綠色植物，吸收二氧化碳而排放新鮮氧氣及水蒸汽。

許多研究物種滅絕的學者（例如 Thomas *et al.*, 2004；Pounds, J. Alan and Puschendorf, Robert, 2004）常引用 Rosenzweig (1995) 關於物種數量與棲地面積的關係式：

$$S = cA^z \quad (1)$$

式中， $S$  為物種數量， $A$  為生物棲地面積， $c$  與  $z$  為常數。(1) 式顯示生物棲地面積變小則物種數量變少。

台灣西部山麓及平原，在古代，遍野都是梅花鹿與樟樹；其他物種之豐富，不在話下。

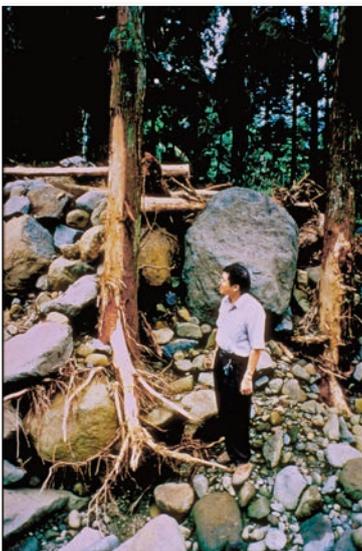


圖 3 森林阻擋土石流的證據  
(洪如江攝於國立台灣大學溪頭實驗林)



圖 4 橋梁經過林區，盡力減少量體，減少對森林的傷害 (credit ARUP)

台灣的西部平原，佔台灣本島土地面積的四分之一左右；用來容納絕大部分的城鎮、農田、與工廠，已經顯得非常擁擠。偏偏我們的運輸工程系統，採用超級大陸國家（尤其指美國）的公路規格，不厭其多，不厭其寬。包括縱貫公路、中山高速公路、第二高速公路、西濱快速道路、台3線公路、12條東西向快速道路，另有數量很多的省道、縣道、與鄉道，再加上縱貫鐵路與高速鐵路，不但佔用龐大面積，生物棲地（及農業用地）被切割得支離破碎（圖5和圖6）而且都變得非常之小。(1)式中生物棲地面積A變小，物種數量S必然減少，造成部分物種的滅絕。支離破碎的農業用地，無法集約使用，效率低，成本高，很難在國際上有競爭力。近幾十年來，開放農地上建築「農舍」（圖7），部分變為民宿，生物棲地與農地受到擠壓或

切割。匈牙利國土開發的集約，社區開發集中一邊，保持農地的完整（圖8）。

許多生物學家、生態學家、與環境學家，早已注意到生物多樣性的減少，將禍延人類。面對這種遠慮，我們土木工程界應該多推動用地較小的軌道系統，而不要再推動用地寬廣的高速公路。跨越公路或鐵路，建設適當數量的**生物廊道**或**生物通道**，或在路側建設適當數量的**生態濕地**，參見洪如江106年12月「土木工程與自然」說明及圖片。在大片草地鋪設石塊步道時，應留下小型野生動物通行的綠草帶（圖9），以免阻斷小型野生動物的通行。台灣國道六號高速公路的生態池及架空的棧橋結構（圖10），讓野生動物自由通行，提供生物多樣性的環境。

北歐芬蘭拉普蘭（Lapland）地區公路的規劃、設計、與使用，保留野生動物上路面的權利（圖11），是一種眾生平等文明的土木工程。

同理，建壩切斷河川生物（以魚類為主）溯源產卵的機會，應建魚梯（或魚道）加以補救。



圖5 許多道路將生物棲地切斷得支離破碎  
(連永旺先生攝)

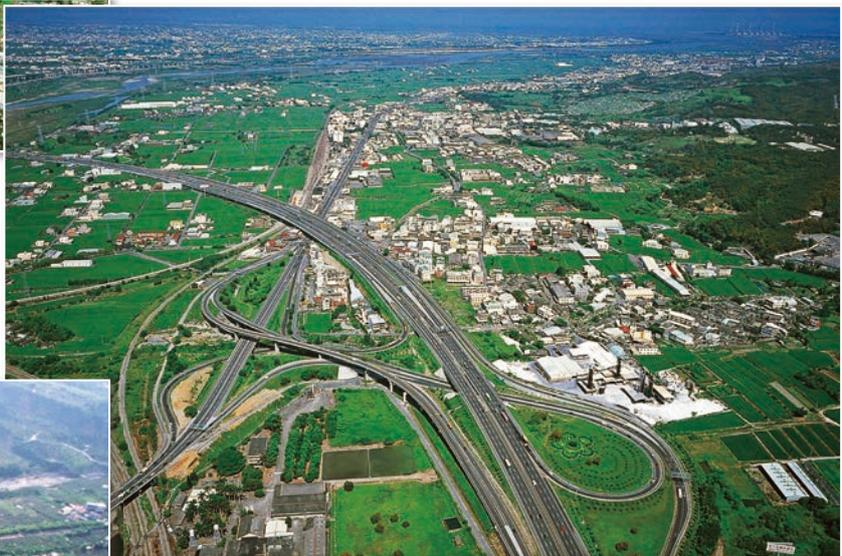


圖6 交流道將生物棲地切割得支離破碎  
(連永旺先生攝)



圖7 農田中零散的農舍 (洪如江攝)



圖 8 國土開發的集約，社區開發集中一邊，保持農地的完整，匈牙利（洪如江攝）



圖 9 生態步道，保留小型野生動物通行草地，維持棲地完整（洪如江攝）



圖 10 國道六號高速公路生態池，提供生物多樣性的環境（洪如江攝）



圖 11 眾生平等文明的土木工程：北歐芬蘭的地區公路的規劃、設計、與使用，保留野生動物上路面的權利（洪如江攝）

## 土木工程對人口爆炸的對策

地球陸地面積，約佔全球表面積的 30% 弱；海洋面積，約佔全球表面積的 70% 多。

英國經濟學人週刊（*The Economist*，主題 *Technology Quarterly*）2011 年 12 月 3 日這期，以封面、p12 - p14，提出「*Cities on the ocean*」（海洋城市）概念。

土木工程，除了採用北海油田採油架的方法（巨大支柱，向下鑽入海床，向上支撐採油平臺），也可以用預力混凝土（或其他新發明的工程材料）製造類似超巨大油輪或航空母艦的巨大土木工程結構。

土木工程，面對人口爆炸，利用海域建設海上城市，比利用火星更切合實際。

### 土木工程對空氣污染的對策

瑞士，不願意增闢用地寬大的高速公路，以免空氣污染、噪音、油污、破壞景觀，積極建設電氣為動力的纜車系統（圖 12）及軌道系統（圖 13）。為改善法、德兩國與義大利之間的交通及貨物運輸，瑞士經過公投，耗費龐大人力及財力，1997 動工，開鑿哥德哈基線隧道（Gotthard Base Tunnel，全長 57 km），2016 年完工，貫穿阿爾卑斯山脈。維持瑞士為世界公園的地位。筆者與地質學家謝敬義先生，於民國 86 年 7 月 22 日至 7 月 31 日，經由聯合大地工程顧問公司之委託及安排，前往瑞士考察參訪其新哥德哈基線鐵路隧道計畫及進行中的導坑工程作業、舊聖哥德哈公路隧道現況。瑞士重視環境保護，在陸地交通方面，盡力採用軌道系統及隧道。但其在於全球經濟論壇 (WEF) 的全球競爭力排行榜 (Global Competitiveness Index) 中，2015 至 2017 年皆名列第 1，2018 年名列第 4。



圖 12 纜車系統替代開闢高山公路，瑞士（洪如江攝）



圖 13 瑞士在阿爾卑斯山區採用電氣化鐵路（加鐵鍊拉力），用地小，污染少（倪勝火教授攝）

### 開路上山對山地環境的影響與對策

根據美國西北部 Oregon Siskiyou NF Klamath 山脈 1556 至 1976 年現場的觀察與研究，Doug Heilen, 1997, Landslides and Clearcut: What Does The Science Really Say? 一文指出：

相 對 坍 方 數 量		
(自然森林 / 砍伐森林 / 開路上山)		
1	19	138

相 對 坍 方 體 積		
(自然森林 / 砍伐森林 / 開路上山)		
1	7	112

上表顯示，不受人力干擾的自然森林，發生坍方的數量設為 1；

砍伐森林，其所引發的坍方數量或體積約為 10  
開路上山，其所引發的坍方數量或體積約為 100

在台灣，開路上山，進一步引領農業上山，並經常發生超限利用與山地四濫（濫墾、濫伐、濫開產業道路、濫建），其所增加的坍方，不止自然坍方的 100 倍；而山嶺的坍方處，通常就是土石流的源頭。

新中橫公路水里玉山線，在開闢之期間，就邊挖邊坍，並將棄方倒向河岸或河床，提供土石流的材料來源；通車之後，每在颱風豪雨或強烈地震之時，坍方不斷，斷的是路（圖 14 至圖 16）。神木村出水溪多次土石流，其源頭，其實就在該公路夫妻樹旁一條山溝中的棄方區。



圖 14 開路上山的後果，新中橫公路水里玉山線大回頭彎（洪如江攝）

石門水庫上游集水區的桃 113 線公路，沿順向坡開挖，引起許多滑動；再加大量種植淺根竹林（圖 17），稍有豪雨或地震，表土沖蝕與坍方不斷，成為下游水庫淤泥的最大來源（圖 18，榮華壩後水庫之例）。

台灣本島，山地佔總面積的 74%，生態豐富但脆弱，若善加保育，避免砍伐森林，可成為永續利用的天然水庫。

如非在山區開路不可，宜採用「棧橋」（圖 19）、「棧橋串連隧道」（圖 20），可以大幅度減少坍方災害。



圖 15 新中橫公路水里玉山線東埔段大迴頭彎路坡崩坍（洪如江攝）



圖 16 台灣中部橫貫公路谷關德基段在民國 88 年 921 地震全面崩坍（林銘郎教授攝）



圖 17 石門水庫集水區開闢公路（桃 113 線）之後，在邊坡搶種淺根作物竹子，極易因豪雨或地震而坍塌（洪如江攝）



圖 19 北宜高速公路採用棧橋，避免大挖大填，對環境衝擊小（洪如江攝）



圖 18 榮華壩後水庫區，淤泥已近壩頂（洪如江攝）



圖 20 瑞士山區道路多採棧橋與隧道以避免大挖大填（洪如江攝）

## 土木工程與斷層交會的影響與對策

一個地層或包含幾個地層的地盤，其所受到的大地應力 (tectonic stress) 超過其強度，產生一個破裂面，沿此破裂面曾經發生永久變形，大至數公里，小者數公分，稱為斷層 (fault)。斷層的產生，有的是高速度的脆性破裂 (brittle fracture)，錯動在幾秒鐘到幾十秒鐘內完成；有的是非常緩慢的程序，稱為潛變 (creep) 或蠕動的位移可以長達數百年甚至數萬年還不停止。斷層常使兩側岩石產生破裂、強度降低、壓縮性變大、透水性增高與加速風化等等惡果。

但工程更怕與活動斷層交會。活動斷層的定義與分類準則，請參考經濟部中央地質調查所特刊第十三號，林啟文等氏 (2000) 所編著之臺灣活動斷層概論，第二版。根據該特刊，台灣本島中，第一類活動斷層共 12 條，第二類活動斷層 11 條，存疑性活動斷層 19 條。脆性破裂型態的活動斷層錯動，其所釋放的應變能，一部分使斷層及斷層周圍的岩石更加破碎，一部分轉變成熱能而消散，一部分用於產生地震。

1999 年的 921 集集大地震事件中，全長約 100 公里的車籠埔斷層向西逆衝，最大水平位移與最大垂直位移皆達 10 公尺之多，是全球百年來的最大地殼變動之一。車籠埔斷層在霧峰鄉光復國中操場逆衝，造成百年難得一見的奇觀 (圖 21)，故被保留成為博物館項目之一。大甲溪的石岡壩 (圖 22) 是世界上第一座被斷層錯動所破壞的壩工。橫跨大甲溪的埤豐橋也因斷層錯動及震動而破壞 (圖 23)。中部地區的台 3 線公路，其沿線的十多座橋梁，在 921 集集大地震之時，全被震毀面對可能的地震損壞，土木工程，宜採用韌性 (Resilience) 結構。日本在阪神大地震之後，許多損壞橋梁的改建，多採用鋼結構。

土木工程避開斷層，上上之策；如無法避開，寧可正交，不要同行。

台 21 線公路的水里玉山部分，有稱之為水里玉山線公路或水里玉山公路。全線公路分南北兩段。北段沿陳有蘭溪東岸開闢，南段沿陳有蘭溪西岸開闢，其間以橋梁跨越。



圖 21 九二一地震時，車籠埔斷層在光復國中操場逆衝所造成的奇觀 (洪如江攝)



圖 23 車籠埔斷層在大甲溪逆衝隆起，埤豐橋塌落中 (洪如江攝)



圖 22 九二一大地震石岡壩破壞 (連永旺先生攝)

台灣陸地最值得注意的斷層（帶），「屈尺—陳有蘭溪—旗山溪斷層」（圖 24 中的 ⑤），簡稱陳有蘭溪斷層；其西為年紀幾百萬年至兩千五百萬年沉積岩，其東為年紀較老的幾千萬年亞變質岩。陳有蘭溪斷層材料脆弱，強度遠低於其兩側岩石者。地表水就在這一斷層帶之中沖刷出陳有蘭溪。陳有蘭溪寬度遠比陳有蘭溪斷層狹窄，因此，陳有蘭溪斷層還在繼續被沖刷之中，使陳有蘭溪變得越來越寬。陳有蘭溪水里玉山段在桃芝颱風豪雨之前，溪道較為狹窄（圖 25）；在桃芝颱風豪雨災後，溪谷擴張變寬，兩岸土石流坑溝（正交陳有蘭溪水里玉山段）密佈（圖 26）。

陳有蘭溪北段（東岸）公路及其臨溪所有房屋，在莫拉克颱風豪雨（民國 98 年 8 月 2 日至 13 日）災變後全面崩坍失蹤，公路內側（山側）殘留房屋搖搖欲墜（圖 27）。原因莫拉克颱風豪雨期間，洪水及豪雨強力沖刷溪岸，溪道變寬許多。陳有蘭溪西岸公路，也因溪道變寬，發生災害，但災情略有不同，不加贅述。

就地形演化及地質觀點，台 21 線公路之水里玉山線，強行在陳有蘭溪大斷層帶開闢，決策錯誤，後患無窮。

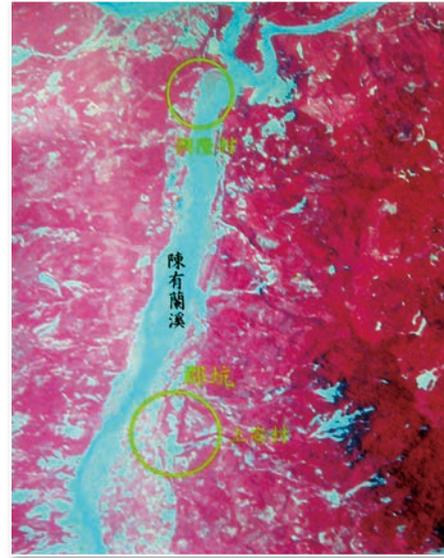


圖 25 陳有蘭溪在桃芝颱風豪雨之前，溪道較為狹窄（農委會提供空載多譜掃瞄影像）

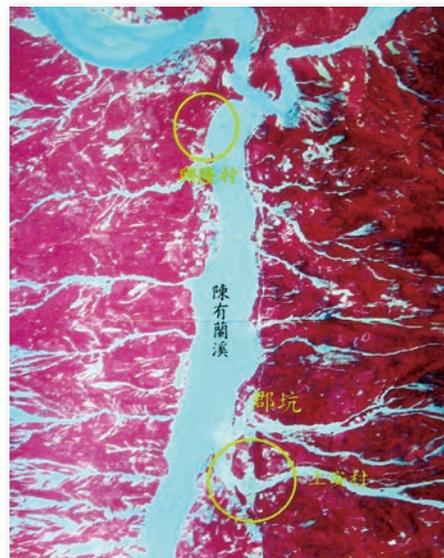


圖 26 陳有蘭溪桃芝颱風在豪雨災後，溪谷擴張變寬，兩岸土石流坑溝密佈（農委會提供空載多譜掃瞄影像）

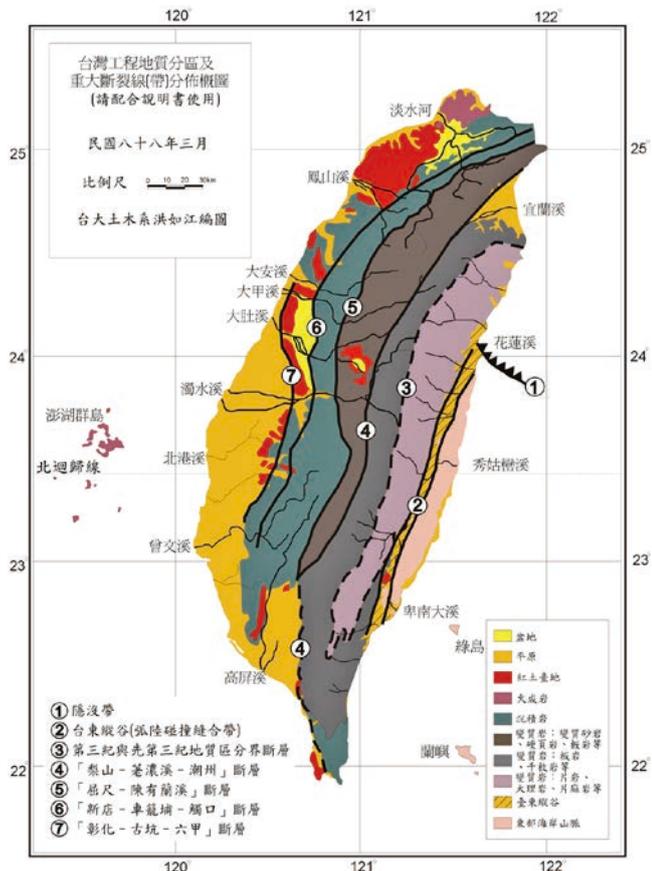


圖 24 台灣重大斷裂線（帶）分佈概圖（洪如江編繪）



圖 27 陳有蘭溪東岸公路及其臨溪所有房屋，在莫拉克颱風豪雨災害全面崩坍失蹤（洪如江攝）

## 土木工程與河川洪水、土石流交會的影響與對策

在汐止下游的基隆河狹窄河道中，橋墩密集（圖 28），妨害上游河段及其兩側陸地的排水。

河道，原是洪水或土石流的主要通道。以目前土木工程的技術，橋梁的一個跨度，已近 2 公里，實在沒有必要在河道中建立許多橋墩。

北橫公路的復興吊橋（圖 29），跨越整個河道，從未受到洪水或土石流之破壞。陽明山國家公園內的舊馬槽橋，橋面低，且多橋墩，被土石流沖失。重建的新馬槽橋（圖 30），高且跨越整個河道，完工後從未受到洪水或土石流破壞。



圖 29 北部橫貫公路復興吊橋（洪如江攝）



圖 28 汐止下游的基隆河狹窄河道塞入許多橋墩（洪如江攝）



圖 30 新馬槽橋之橋孔夠高夠寬不妨礙土石流通過（中華顧問工程司提供）

## 水庫泥沙淤積的影響與對策

在河川主流建設高壩形成水庫，若未對水庫兩岸邊坡加以適當保護而濫開道路，就有人以生活為由，在道路邊坡種植淺根作物，例如竹子、檳榔、水果，必然經常因地震或豪雨而發生邊坡沖刷或坍方，土石及泥沙滑落水庫之中淤積，例如石門水庫、曾文水庫、榮華壩水庫（圖 18）、集集攔河堰（圖 31）。水庫淤積大量泥沙，不但減少水庫蓄水容量，減少水庫功能；而且，下游河道及河口，因泥沙補充大幅度減少，河床、河岸、堤防、及河口海岸，受到沖刷，跨河大橋的橋墩基礎及河岸護堤，常常因而破壞。

埃及 Aswan 水庫建成之後，尼羅河三角洲再無肥沃的泥沙充作農耕所需要的天然肥料；三角洲的海岸線也因泥沙供應減少而後退。

在大水庫挖走淤泥，完全不切實際。挖掘含水淤泥相當困難，成本也高。其次，搬運淤泥需要大量車次，難有足夠的道路可以承擔。沿途居民也不堪其擾。大量的淤泥也無處可供丟棄。

最好的對策，建離槽水庫，例如烏山頭水庫、鯉魚潭水庫，可以減少對河川主流生物環境的衝擊，減少水庫的泥沙淤積。參見洪如江，民國 106 年「土木工程與自然」圖文說明。

另一種對策為：引河水至中大池塘，補注「地下水庫」。地下水經地下土層的過濾作用，若不含過濾性病毒，已經可以直接使用；但為安全起見，常抽送自來水廠略加處理，即可使用。



圖 31 集集攔河堰淤積大量泥沙，減少下游泥沙供應（洪如江攝）

## 水庫潰潭的災害與預防對策

義大利的 Vajont 拱壩建成不久，因水庫水位上升以及豪雨的影響，邊坡坍方（1963 年），二億多立方公尺的土石滑落水庫之中，庫水湧出，下游村莊 Longarone 浪高 70 公尺，村民 1909 人遇難。圖 32 攝於 2002 年夏天，拱壩尚健在，但壩後河道只見土石，已無存水。圖 33 顯示水庫坍方後之殘坡（殘留滑動面）及部分坍方材料。

法國 Malpasset 拱壩破壞（1959 年），美國 Teton 土石壩崩潰（1976 年），都曾經造成下游眾多居民的死亡。潰潭，除了人命傷亡及財產損失之外，對環境也造成重大傷害，包括：地景的破壞，水文條件的異動，等等。

上述水庫大壩的災害，顯然是因為在規劃及設計階段，對自然環境（尤其是地形演化及地質環境）欠缺了解。

最好的對策是：在土木工程作業的各階段，對相關地區的自然環境（尤其是天候、水文、地形及地質的靜態現象及動態演化），從事適當比例尺的調查、研究、與判斷（以下簡稱調研）。

環境影響評估階段，從事小比例尺的調研。在規劃階段，從事中比例尺的調研。設計階段，從事大比例尺的調研。必要時，還要從事模型試驗。



圖 32 義大利 Vajont 壩頂及坍落水庫內之土石（洪如江攝）



圖 33 義大利 Vajont 水庫坍方殘坡照片（洪如江攝）

## 填海造地對環境的影響與對策

日本，在其四國淡路島開採大量土方（石料遠比泥土多）（圖 34 顯示山坡地被開挖之後的裸露狀態），運往大阪灣海域填土造地，建設關西機場。淡路島大片山坡地被開挖裸露之後，迅速加以造林綠化（圖 35）；但利用小部分坡地建設室內植物園、國際會議中心、觀光飯店、及效法美索不達米亞文明中巴比倫城的「空中花園」（圖 36 和圖 37）。筆者於民國 99 年 9 月 11 日在此參訪一整天。

但有些國家，為填土造地，常盜採其他島嶼沙灘的沙石，填海造地，引發國際糾紛。但弱肉強食，許多弱者的沙灘，逐漸消失。傷害的，不只是自然環境，更嚴重的是人文社會的衝突。

記錄片 **Sand Wars**（劇本及導演 **Denis Delestrac**，製片公司 **ARTE France**），道盡某些鄰海國家（或島國），因為土地不夠使用，盜採其他島嶼沙灘的沙石，填海造地，引發國際糾紛。但弱肉強食，許多弱者的



圖 34 日本四國淡路島開山採取土石，用於大阪灣填海造地建設關西機場（洪如江攝於現場看版）



圖 35 日本四國淡路島開山採取土石之後，造林綠化，並利用小部分土地，從事文化建設（洪如江攝）

沙灘，逐漸消失。傷害的，不只是自然環境，更嚴重的是人文社會的衝突。

對應之道，在於建立「沙石銀行」，互通有無。



圖 36 日本四國淡路島明石公園中的一片模擬巴比倫空中花園（洪如江攝）



圖 37 日本四國淡路島明石公園中的一片模擬巴比倫空中花園局部近照（洪如江攝）

## 動、植物在土木工程中的功能

台灣使用「蛇籠」作為重力式擋土牆或河道護岸，已近百年；當初所了解的主要優點為：就地取材（卵石或石塊）、透水性極佳、只使用極少量的人造材料（鐵線），不必從平地搬運許多材料上山。當生物多樣性受到全球普遍注意之後，蛇籠的多孔特性，提供野生動物藏身之地；蛇籠更加受到重用。但蛇籠的缺點為，鐵線生鏽爛之後，籠中卵石可能趨於潰散。為了解決這種缺點，有請藤類植物幫忙。大甲溪台電谷關訓練中心後山道路外側檔土工，採用由鐵線捆綁之方形石籠，也種植藤類植物（圖 38），希望在鐵線鏽爛之前由藤條替代鐵線的功能。

彰化海邊的磊石矮牆，種植藤類植物捆綁之，越久越強（圖 39）。



圖 38 蛇籠在鐵線腐爛之前，藤類植物接力保護，蛇籠隨時間而變得更粗更強壯（洪如江攝）



圖 40 台三線公路崩坍之路坡以植物修復保護之，時間越久路坡越穩定（洪如江攝）

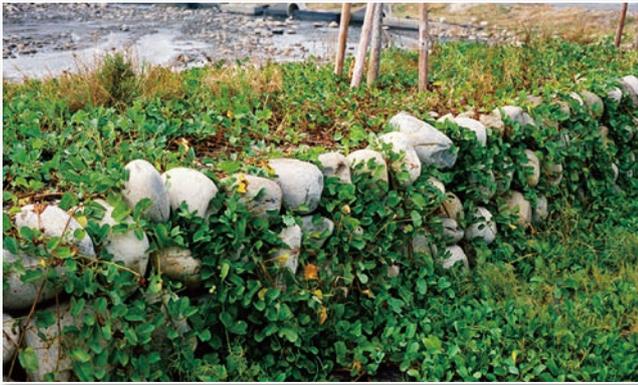


圖 39 彰化海邊的磊石矮牆，種植藤類植物捆綁之，越久越強（洪如江攝）

台三線公路崩坍之路坡以植物修復保護之，時間越久路坡越穩定（圖 40）。美國加州桔郡的一條渠道，以植物護岸（圖 41）。

宋代蔡襄（西曆 1012 ~ 1067）在泉州建洛陽橋（西曆 1053 ~ 1059）。當時並無深橋基技術，蔡襄令船夫收集帶殼牡蠣混合花崗石塊，堆積橋墩周圍。牡蠣帶殼隨時間成長，將石塊膠固。進一步閱讀，參考：『宋史蔡襄傳』：「種蠣於礎以為固」；『福建通誌』：「會蔡襄守郡，踵而成之，以蠣房散置石基，益膠固焉。」；明『王慎中記』記萬安橋：「址石所壘，蠣輒封之。」；茅以昇主編（民國 83 年）『中國古橋技術史』（明文書局出版，台北市）。這是請動物幫忙的工程案例。

幾年前，在台灣東部大武港北側海邊的防坡塊表面，看到許多牡蠣殼牢牢地膠固在混凝土面上（圖 42）；因此，個人相信利用牡蠣殼把海濱岩塊或混凝土塊膠固起來，應該可行。此外，培養珊瑚，然後以珊瑚礁膠固岩塊或混凝土塊，也值得研究。



圖 41 美國加州桔郡的一條渠道，以植物護岸（洪如江攝）



圖 42 帶殼牡蠣可以是好的膠結材料（洪如江攝）

## 綜合討論（代結論）

自然環境、社會環境及國際環境的現況及未來的動態演化，使人類面臨最大有史以來最大的危機：

- 氣候變遷 (Climate Change)
- 全球暖化 (Global Warming)
- 生物 (包括人種) 多樣性的消滅
- 人口爆炸
- 人口、人才、財富、科技創新、基礎建設、天然及人造資源消費、等等，集中在城市之中，像是一種微型黑洞效應。
- 文明的衝突 (Clash of Civilizations)
- 貧富的衝突

氣候變遷與全球暖化已經受到聯合國、世界衛生組織、全球絕大多數國家的重視，力求「適應」(Adaptation) 與「減緩」(Mitigation) (陳嘉正語)。在這一方面，土木工程應該有用武之地。

生物 (包括人種) 多樣性的問題，有些國家，有意或無意之中，基於眾生平等的意念，善待野生動物 (圖 9 至圖 11)，這是土木工程可以辦到的。反而，種族歧視的言行，時有所聞；希特勒種族滅絕的惡行，居然還有崇拜者。

文明的衝突，見之恐怖攻擊。個人認為「冤家宜解不宜結」，強國應該比較有能力求仁得仁，設法和解。貧富衝突的解決，筆者認為北歐國家及瑞士是理想國。

人口爆炸問題，新加坡有能力留下 47% 的公共綠地，還能夠做到「住者有其屋」，社會和諧，值得效法。遠期目標，**海洋城市 (Cities on the ocean)**，參見本文第四節) 的概念，應該是我們土木工程加以研究、從事創新的領域。

台灣國土受到嚴重傷害的原因，主要在：**配合經濟發展與法治 (Rule of Law) 不彰**。參見本文 1.1 節末段詳細說明。

## 誌謝

陳嘉正博士及 ARUP 提供撰寫本文意見、圖 4 照片及「Tackling Global Challenges in Our Cities」、「The Power of an Idea: The International Impacts of the Grand Challenges for Engineering」二篇論文 (完整標題示於參考文獻)。

連永旺先生提供圖 5、圖 6、圖 22 照片。倪勝火教授提供圖 13 照片。林銘郎教授提供圖 16 照片。行政院農委會提供圖 25、圖 26 照片。中華顧問工程司提供圖 30 照片。皆一併在此誌謝。

## 參考文獻

1. 虞兆中 (民國 70 年)，*工程環境面面觀*，圖文技術服務公司出版。
2. 施正鋒主編 (2004，民 93)，*生態環保*；「第一章 總論」，由筆者撰寫。出版者國家展望文教基金會、台灣心會。
3. 中國土木水利工程學會 (民國 94 年)，*土木與環境*。
4. 洪如江 (民國 95 年 6 月)，「土木工程與環境」，*土木水利雙月刊*，33 卷 3 期，中國土木水利工程學會。
5. 齊柏林 (2013，民 102)，*看見台灣*。
6. 行政院經濟建設委員會，民國 94 年，*悲歌美麗島*。
7. 行政院國家永續發展委員會 (民國 107 年，討論) 所擬定的「**我國永續發展目標草案**」，並決定以 2030 年為期程，研訂「**我國永續發展目標**」。
8. 聯合國於 1972 年成立環境署 (UNEP)，定出六項關注的重點。
9. 美國環保署 (EPA, USA) 列舉重大出生態危機與健康危機。
10. 歐盟在其「**環境 2010：我們的未來，我們的選擇**」，宣示歐盟的環境政策。
11. 聯合國於 2015 年公布的**永續發展目標**。
12. 聯合國 195 成員國，2015 年 12 月通過**巴黎協議 (Paris Agreement)**。
13. 聯合國近 200 國家於 2018 年 12 月初在波蘭 Katowice 召開**氣候變遷峰會**。
14. 林啟文、張徽正、盧詩丁、石同生、黃文正 (2000)，*臺灣活動斷層概論*，第二版：五十萬分之一臺灣活動斷層分布說明書，經濟部中央地質調查所特刊第十三號。
15. 謝潮儀與林孟立 (2004)，「道路工程生態工法推動策略之芻議」，*2004 生態工法國際研討會論文集*，2004 年 2 月 13-14 日，台北市。
16. Chan, Andrew Ka-Chin (2016), "Tackling Global Challenges in Our Cities", *Engineering 2* (2016) 10-15. Published by Elsevier LTD on behalf of Chinese Academy of Engineering and Higher Education Press Limited Company.
17. De Vries, Hans J.G. (2004), "Eco-Road: Safe and Sound for People and Nature", Paper & PPT Files, *Proc. 2004 Intl. Conf. on Eco-Technology*, Feb. 13-14, 2004, Taipei.
18. Huntington, Samuel P. (1996), *The Clash of Civilizations and the Remaking of World Order*, Simon & Schuster.
19. Mayne, Roger, Margolis, Stephen (1982), *Introduction to Engineering (McGraw-Hill, N.Y.)*
20. Mitsch, William J. (2004), *PPT Files, Proc. 2004 Intl. Conf. on Eco-Technology, Feb. 13-14, 2004*, Taipei.
21. Mote Jr., C.D., Dame Ann Dowling, Zhou, Ji (2016), "The Power of an Idea: The International Impacts of the Grand Challenges for Engineering", *Engineering 2* (2016) 4-7. Published by Elsevier LTD on behalf of Chinese Academy of Engineering and Higher Education Press Limited Company.
22. Pounds, J. Alan, Puschendorf, Robert (2004), "Clouded futures", *Nature 427*, 107-109.
23. Rosenzweig, M.L. (1995), *Species Diversity in Space and Time*, Cambridge University Press.
24. Thomas, Chris D. et al. (2004), "Extinction risk from climate change", *Nature 427*, 145-148. 