

中華民國一〇六年十二月・第四十四卷第六期

土木水利

The Magazine of The Chinese Institute of Civil and Hydraulic Engineering

December
2017



ISSN 0253-3804



NT\$350



Volume 44, No. 6

社團法人
中國土木水利工程學會 發行
CIVIL AND HYDRAULIC ENGINEERING

第23屆
理事長的話

王炤烈

專輯

環境工程

土木工程與自然

木鐸集

鋼筋混凝土建築物耐震能力 詳細評估SERCB — 理論背景與系統操作

宋裕祺教授、蔡益超教授 最新著作

如何準確評估出 RC 建築物的耐震能力是否足夠，攸關人民的生命財產安全，是結構安全的首要議題。宋裕祺教授與蔡益超教授繼「鋼筋混凝土建築物耐震能力初步評估 PSERCB — 理論背景與系統操作」廣受好評後，再接再厲推出「鋼筋混凝土建築物耐震能力評估系統 SERCB — 理論背景與系統操作」。

SERCB 為鋼筋混凝土建築物耐震能力評估系統 (Seismic Evaluation of RC Buildings) 之簡稱，於 2008 年經內政部營建署公告採用作為 RC 建築物耐震能力詳細評估之分析程式，在近十年的期間，感謝產官學研各界就系統之使用性與擴展性提出諸多寶貴建議，研究團隊持續更新，使系統功能更能符合工程界之需求。

系統定期於每年 1 月 1 日更新，本操作手冊之出版，按系統操作程序分別詳加解說，冀使使用者能夠藉由 SERCB 正確有效地進行建築物耐震能力詳細評估。

鋼筋混凝土建築物耐震能力 初步評估PSERCB — 理論背景與系統操作

價格表

~~ 歡迎訂購，一次訂購本數越多，單價越便宜，限寄送同一地址 ~~

本數	發票稅金	運費 (掛號)	總價	每本單價	備註
1 本	含稅金	含運費	700 元	700 元	約七七折
2 本	含稅金	含運費	1,230 元	615 元	
3 本	含稅金	含運費	1,800 元	600 元	
4 本	含稅金	含運費	2,360 元	590 元	
5 本	含稅金	含運費	2,925 元	585 元	
6 本	含稅金	含運費	3,480 元	580 元	
7 本	含稅金	含運費	4,025 元	575 元	
8 本	含稅金	含運費	4,560 元	570 元	
9 本	含稅金	含運費	5,085 元	565 元	約六二折
10 ~ 49 本	含稅金	運費另計		535 元	運費 直接 支付 貨運 公司
50 ~ 99 本	含稅金	運費另計		500 元	
100 本 及以上	含稅金	運費另計		460 元	

本數	發票 稅金	運費 (掛號)	總價	每本單價	備註
1 本	含稅金	含運費	530 元	530 元	約七七折
2 本	含稅金	含運費	920 元	460 元	
3 本	含稅金	含運費	1,350 元	450 元	
4 本	含稅金	含運費	1,760 元	440 元	
5 本	含稅金	含運費	2,180 元	436 元	
6 本	含稅金	含運費	2,604 元	434 元	
7 本	含稅金	含運費	3,024 元	432 元	
8 本	含稅金	含運費	3,440 元	430 元	
9 本	含稅金	含運費	3,860 元	429 元	約六二折
10 ~ 49 本	含稅金	運費另計		400 元	運費 直接 支付 貨運 公司
50 ~ 99 本	含稅金	運費另計		380 元	
100 本 及以上	含稅金	運費另計		350 元	



一律採用 網路訂購
<http://goo.gl/NY2Qh2>

購書聯絡人：社團法人中國土木水利工程學會

程苡榕小姐 電話：(02) 2392-6325 #21

傳真：(02) 2396-4260 E-mail：public@ciche.org.tw

一律採用 網路訂購
<http://goo.gl/i6E12T>



付款說明：訂購後請於五日內付款，以便儘快出書，謝謝！

1. 歐付寶：請至付款網頁 <https://p.opay.tw/QsmBj> (SERCB) <https://p.allpay.com.tw/ApnGD> (PSERCB)

2. 信用卡：請下載信用卡授權書 <http://goo.gl/hiHcps> (SERCB) <http://goo.gl/6HA7ua> (PSERCB)

請將「授權書」傳回學會，並請來電確認！

3. 郵局劃撥：帳號 00030678 戶名：社團法人中國土木水利工程學會

請將「收執聯 + 請加註姓名」傳回學會，並請來電確認！

4. 匯款：上海商業儲蓄銀行 仁愛分行 帳號：24203000030838 戶名：社團法人中國土木水利工程學會

土木水利

社團法人中國土木工程學會會刊



南投縣仁愛鄉清境農場民宿超限利用，表土嚴重流失，進入霧社水庫（齊柏林攝贈，民國97年11月）

土木水利半月集

先進工程

- 混凝土工程
- 鋼結構
- 運輸工程
- 鋪面工程
- 資訊工程
- 工程管理
- 非破壞檢測
- 先進工程

永續發展

- 永續發展
- 國土發展
- 水資源工程
- 大地工程
- 海洋工程
- 環境工程
- 景觀工程
- 綠營建工程
- 能源工程
- 天然災害防治工程
- 工程美化
- 營建材料再生利用

國際兩岸

- 國際活動及亞洲土木工程聯盟
- 兩岸活動
- 亞太工程師

教育學習

- 工程教育
- 終身學習
- 土木史
- 工程教育認證
- 大學教育
- 技專院校
- 學生活動

學會活動

- 學會選舉
- 學術活動
- 土水法規
- 介紹新會員
- 專業服務
- 學會評獎
- 學會財務
- 年會籌備
- 會務發展
- 會士審查
- 公共關係 [工程倫理]

出版活動

- 中國土木工程學會會刊
- 土木水利半月集

分會

- 土水學會
- 土水南部分會
- 土水部分會
- 土水東部分會

發行人：王炤烈

出版人：社團法人中國土木工程學會

主任委員：劉格非（國立臺灣大學土木學系教授、編輯出版委員會主任委員兼總編輯）

定價：每本新台幣350元、每年六期共新台幣1,800元（航郵另計）

繳費：郵政劃撥00030678號 社團法人中國土木工程學會

會址：10055台北市中正區仁愛路二段一號四樓

電話：(02) 2392-6325 傳真：(02) 2396-4260

網址：<http://www.ciche.org.tw>

電子郵件信箱：service@ciche.org.tw

美編印刷：中禾實業股份有限公司

地址：22161新北市汐止區中興路98號4樓之1

電話：(02) 2221-3160

社團法人中國土木工程學會第二十三屆理監事

(依姓氏筆劃排序)

理事長：王炤烈

常務理事：陳仲賢 楊偉甫 歐來成 歐善惠

理事：朱旭 余信遠 吳瑞賢 宋裕祺 沈景鵬 林呈 林其璋

胡宣德 倪惠妹 高宗正 張荻薇 許泰文 陳彥伯 黃兆龍

廖學瑞 劉沈榮 劉恒昌 謝啟萬

常務監事：呂良正

監事：李元唐 李建中 周功台 陳清泉 楊永斌 薛春明

中國土木工程學會任務

1. 研究土木水利工程學術。
2. 提倡土木水利最新技術。
3. 促進土木水利工程建設。
4. 提供土木水利技術服務。
5. 出版土木水利工程書刊。
6. 培育土木水利技術人才。

土木水利雙月刊已列為技師執業執照換發辦法之國內外專業期刊，土木工程、水利工程、結構工程、大地工程、測量、環境工程、都市計畫、水土保持、應用地質及交通工程科技師適用。

中國土木工程學會和您一起成長！

中華郵政北台字第518號 執照登記為雜誌 行政院新聞局出版事業登記証 局版臺誌字第0248號



理事長的話

📖 持續紮根 邁向未來、整合服務 接軌國際、團結合作 共創榮盛

王昭烈 4

永續發展

📖 土木工程師的養成教育與人格特質

李建中 6

環境工程專輯 (客座主編：曾昭衡教授)

- 📖 專輯序言：環境工程 曾昭衡 9
- 📖 臺灣空氣品質監測／監督系統之公民參與實踐 袁明豪／陳宥羽 10
- 📖 氣候變遷與空氣品質對健康之衝擊 陳伶伶 15
- 📖 從節能減碳到INDC 陳律言 19
- 📖 室內空氣品質改善策略 — 通風換氣 劉肇昫／曾昭衡 24
- 📖 環境中新興污染物之檢測與探索 周佩欣 27
- 📖 水中爆破破碎法於城市採礦之應用 王立邦 30
- 📖 應用循環經濟評估臺灣水泥製造業協同處理一般廢棄物之發展 陳映竹 33
- 📖 應用活性覆蓋法針對污染底泥中有害物質溶出抑制介紹 丁昱／席行正 36

木鐸集：土木與文明

📖 土木工程與自然

洪如江 43

專業品牌代言人
林若玲
Ching

laya 大雅廚具
TAYA KITCHEN UTENSIL

客服專線：0800-434-888
<http://www.tayakitchen.com.tw/>
大雅廚具國內首創APP客服系統正式上線

台灣總代理：
ARMANI Dada pronorm NASLUCK | rustelli | laya

研究發展

📖 近景攝影測量應用於渠槽試驗底床量測之探討

邱永芳／賴瑞應／胡啟文 59

學會資訊看板

📖 10/27 海綿城市技術論壇研討會

69

📖 10/17 106年能源論壇研討會

70

📖 10/26.27 第十屆公共工程非破壞檢測技術研討會

70

📖 11/2 電源開發與歷史文化研討會

70

廣告特搜

SERCB、PSERCB 購書資訊

封面裡

福清營造股份有限公司 — 誠信、品質 服務、創新

封底裡

台灣世曦工程顧問股份有限公司 — 用心 做好每一件事情

封底

大雅廚具 — 國內首創APP客服系統正式上線

目錄



臺北市和平國小暨籃球運動館新建工程
106年工程環境與美化獎／特優工程／台灣世曦工程顧問股份有限公司設計監造



中國土木水利工程學會
台北市中正區100仁愛路二段1號4樓
電話：(02)2392-6325 傳真：(02)2396-4260
<http://www.ciche.org.tw>



第23屆理事長  暨全體理監事 敬賀



持續紮根 邁向未來 整合服務 接軌國際 團結合作 共創榮盛

王昭烈／第23屆社團法人中國土木水利工程學會 理事長

一元復始、萬象更新！首先向各位會員恭賀新年，祝福大家心想事成！身體健康！萬事如意！

1973年「中國土木學會」與「中國水利學會」合併成立「中國土木水利工程學會」，迄今已邁進第45年，第23屆理監事亦順利於2017年11月產生，統計至今(106)年12月為止，學會有團體會員151個單位、榮譽會員20位、會士81位。有效會員，包括一般會員、長期會員及初級會員，總計2,851位，會員跨越產、官、學、研各界，遍布全國。

本學會兩本指標性刊物，《中國土木水利雙月刊》、《中國土木水利工程學刊》，在歷屆理事長及主任委員及委員們長期耕耘下，雙月刊已成為台灣土木水利工程類最主要的綜合知識性刊物，工程學刊亦成為發表土木、水利工程學術與應用科學原創性論文最重要的學刊，廣受各界推崇。除此之外，本學會41個服務、技術與教育委員會對土木、水利工程之貢獻，更是不可抹滅，他們不僅凝聚全體會員的向心力，更在研究、應用、政策與制度上，發揮專業人士最大的責任，回饋社會與國家，培育我們的下一代。

土木水利工程具悠久歷史，牽動人類文明發展與進步，例如：埃及金字塔在4,500年前就已建築完成，中國的成都都江堰、廣西靈渠、南北大運河，完成於2,000多年以前。然而，隨著知識經驗的累積、設計工具的演進，土木水利工程在學術與實務上的成長，一日千里。現代各項建設工程不僅要與生活環境融合、更要納入人文社會；不僅要與景觀美學結合、更要學習溝通協調。其所牽涉問題之廣度與深度，已非當日可與比擬，我們『土水人』必需重新思考我們的定位、重新思考我們的未來。以下僅就本人所擬學會未來工作重點說明如下：

持續紮根 邁向未來

持續強化學會知名度及影響力

學會會員橫跨產、官、學界，俱皆為國內土木水利工程界的翹楚，其非營利事業色彩、專業技術本位，應本為社會大眾福祉，貢獻最大心力，故除學會已默默在進行之各項榮譽頒授，如土木水利工程獎章、程禹傑出工程師獎、論文獎、獎學金、工程環境與美化獎、BIM技術優良獎等獎項之評選與頒發之外，今後或許可以設置特別的土木、水利工程文化資產獎，或新技術、工法與材料創新與應用獎、工程永續創新獎、工程延壽創新獎…等等獎項，鼓勵社會大眾之參與，強化學會知名度及社會影響力。

加強新技術、工法、材料等知識之引進與授受

土木水利工程項目大都屬國家的重大建設計畫，也是國家經濟成長的火車頭。由於多年來受到政府採購法的限制，在工程採用最低標及設計所採用的施工方法必須是多家廠商皆可施工的限制下，台灣引進專利新工法、技術、機具皆受到限制。本學會會員跨越產、官、學界，並有20個技術委員會，希望未來各技術委員會能多多利用研討會及各項活動，共同推廣國內外新技術、工法、材料與新知識，以增廣會員專業新知、進而提升國家工程競爭力。

融入智慧科技、營造成長環境

20世紀的科技產物，電腦可以說是最重者，進入21世紀，AI人工智慧將會是影響所有人類生活的關鍵。舉例來說：金融財務投資，過去藉由財務理專人員替客戶分析投資市場，建議投資標的，但隨著大數

據資料庫的建立漸趨完整、多元化的分析程式建置完成，金融機構降低了理專人員的需求，讓客戶藉由電腦或移動裝置自行分析最適投資標的；同樣的土木、水利工程界亦開始在建立大數據資料，例如：全國土壤地質資料庫、地形地貌資料庫、斷層資料庫、橋梁資料庫、河川水文資料庫、敏感地區資料庫、全國公共工程預算與決算資料庫、… 等等，一旦這些大數據資料庫建置起來，學界及工程界可藉由各類的分析軟體，串聯進行設計自動化，或許有朝一日，我們亦可發展出 AI 人工智慧協助設計。由於本學會的會員人數最多，技術委員會也最廣最專業，我們應該盡社會責任，協助土木水利界制定各項大數據資料庫的標準，加速資料庫之建置，使工程產業智慧化能進步的更快、更遠。

融合文化、美學與環境景觀

隨著工業文明的極致發展，人們逐漸省思所要的生活環境與人文美學，非常感謝國土發展委員會、永續發展委員會、環境景觀暨工程美化委員會、綠建築委員會各主任委員及委員過去的努力成果，在未來我們希望這些委員會能夠結合其他委員會進行更多的案例推廣，將文化、美學與環境景觀融入工程中，提升國民生活品質。

向下紮根、展望未來

教育是國家的百年大計，人才培育則更是一切建設與發展之基礎，本學會為國內土木水利之最大學會，更需要為國家肩負起這重任，有幸的是本學會會員來自產、官、學界，希望多為年輕人辦理交流活動，讓有志進入土木及水利的學子，能夠清楚的認識學會與土木水利工程及未來潛在的發展，使更多各領域人才加入我們的行列。

整合服務 接軌國際

跨界整合、創新服務、提昇綜效

由於公共工程的規模都越來越大，所涉及的領域也越來越廣，執行計畫已非單一領域就可完成，且執

行的方式亦非單純的傳統規劃、設計、發包施工及營運。未來本學會除專業技術領域之研討會外，更將舉辦跨界整合研討會，結合其他學、協、工會團體，共同辦理相關訓練或研討會，希望能夠激盪出更大的火花，來創新國內的工程產業與服務模式。

強化學術出版與研討會活動

出版是文化傳遞的重要媒介，研討會則是激盪眾人知識、產生創意構想最佳的活動。學會是國內土木水利的專業團體，宜就自身的優勢條件，強化學術刊物的出版，讓專業知識得以傳播於所有會員，並藉由研討會活動來交換專業心得，凝聚向心力。

擴大海內外交流活動、接軌國際

更重要的是，在過去歷任理事長與相關委員會的領導下，本學會已加入國際土木及建築計算學會（ISCCBE）、亞洲土木工程聯盟（ACECC）及亞太工程師組織（APEC），更與中國「茅以昇科技教育基金會」、美國（ASCE）、日本（JSCE）、韓國（KSCE）、蒙古（MACE）、及菲律賓（PICE）、印尼（HAKI）、澳洲（EA）、… 等等友會，每年都互訪交流或共同辦理研討會及工作坊（workshop），期望未來我們能更擴大海內外的交流活動，強化與國際專業團體關係，共享最新土水新知。

團結合作、共享榮盛

學會長久以來就是國內土木、水利專業人士分享知識與交流的重要平台，然隨著網際網路的發展，各項資訊在網路上的普及，人與人之間的疏離也增加了，因此，期許本屆可結合各委員會的推動、國內研討會的擴大參與、獎勵優質學術成果與工程創新、海外友會活動交流，用心為會員提供更多更好服務、凝聚會員向心力，在研究、實務、培育、回饋各方面能承先啟後，團結合作、共享榮盛。

在這理念支持下，焯烈及所有委員會主任委員很榮幸這有機會為本學會提供服務，也期望所有會員共同努力，打造一個『土水人』能夠永續經營的志業。 



土木工程師的養成教育與人格特質

李建中／國立中央大學 榮譽教授

土木工程是一個在性質上非常多元的產業，自上游到下游需要諸多不同專業的人才，亦需要各種不同人格特質的人才。面對新時代的挑戰，土木工程人才需要具有專業的知識為基礎，更要有良好的人格特質。我在過去數十年的生涯之中，歷經教職、營造、官員及工程顧問公司等角色，得以有機會從各面向觀察體會此一行業，特此就個人心得分享，希望給各位同道及同學們參考。

我看土木工程教育

多年來，傳統的工程教育在開始時較為集中在以力學為基礎的科學知識傳授。為教學的方便，將這些以力學為基礎的學科分為結構力學、土壤力學、流體力學等。在這些基礎建立後緊跟著教授的就是工程相關的課目如鋼結構工程、基礎工程、水利工程等。再進一步，工程系統課目登場，如：公路工程，橋梁工程、軌道工程、港灣工程等。下一個階段的課程就是施工方法、機具等。最後進入商業面如合約、規範、估價、期程等。在如此漸進的規劃下，期待提供給學生完整而制式的訓練。

在大學乃至研究所的教育過程中所有的課業仍多半重視以數學及力學為基礎的內容。在工程相關課程及系統工程的課程中也著重前端的分析、演算等範疇。這些課程多半有公式，有範例，也有答案，其目的是建立工程師對工程的直覺及敏銳度。而且這些課程的確不容易在課堂以外學到。

隨著時代的進步與工程規模的擴充，工程師必須面對更多的課題與挑戰。諸如：人性的訴求、生態的劣化、環境的保護、結構的美觀、自然的融合、王安的考量、地方的期待、政治的糾葛、民眾的抗爭等等。在面對這些挑戰時，工程師常須作更深入的考量或直接的論證，這種規劃面的訓練在傳統的土木工程教育中是欠缺的，也鮮少培養挑戰性的思維及創新性的構想。從事於土木工程教育的同道們也許該作一些探討與調整，強化學生思考及辯證的能力。

施工相關的課程在傳統的土木工程教育中是未受重視的。能講授施工方法的師資非常有限，工程材料的知識多半從實驗課中體會，工程機械課程則著重設備的功能，畢業後從事施工的也常是課業較差的學生。這已嚴重扭曲了學生的價值觀及生涯規劃。其實，就任何一項工程而言，絕大部分的經費都在施工團隊的掌握之中，最終的品質及功能也有待施工團隊來實現，規劃設計過程中的疏漏或瑕疵也只有靠施工來彌補或矯正。施工的教育是很重要的，不應輕忽。優秀的學子實在應該選擇走施工的生涯。

工程的可行與否取決於其經濟上是否可以福國利民，實際執行上則涉及其經費是否可以支撐，運營時就要考慮其財務是否可以周轉。這一連串評估的基礎就是估價。在可行性評估、規劃、設計、招標、投標、施工、營運各個階段都要不斷評估成本及收益並預估其變化及風險。這些課題在工程經濟及工程管理科目中多少有講授，但受重視的程度也是不足的。

工程的執行中動員的人力、物力及財力都很可觀。所有的動員都要依賴大大小小的合約來落實。合約內容的公平性及對風險的掌控就非常重要，合約的執行也有賴圓融的溝通及尊重，否則就會導致期程與經費的爭議。所以，合約、規範、工期、管理及爭議處理等也不容忽視。

有這麼多的領域對於工程的執行都有很大的影響，但是時間畢竟有限。所以，學生的選課及人格特質就很重要。作為土木工程的教師已不能再以制式課

程為滿足，需要懂得因材施教，輔導學生認識自己，生涯規劃。一般而言，從事分析設計工作的就需要有較強的數理基礎；從事規劃的工作需要見多識廣，靈活思維；從事施工需要在心智及體能上能有較大的餘裕來承擔風險；從事合約管理需要心思細膩，字斟句酌；從事工程管理需要圓融大度，掌握重點。

傳統上，我們在職場上也常延續學校的分類，把土木工程分為結構、地工、交通、水利等專業。進入職場時，學生也會面臨從事規劃、設計、監造、施工等生命週期上的選擇。而後，隨著接觸到不同的業務，也會發展出專精於公路、軌道、港灣、水壩、建築等系統工程。如果再加上個人的人格特質及其他自我考量，這可能形成一個多維的決策矩陣。一個土木工程師應該自我思索，在這多元空間中尋找定位，持之以恆，必能成為一個專家。

對新一代土木工程師的期待

土木工程是大格局、大氣魄的行業，肩負有為人群創造更好的生活環境的重責大任。土木工程的學子畢業後絕大部分都會進入職場。經過數十年，這些青澀的年輕人可能會一輩子都是專業的工程師，可能會變成主管，也有可能變成大老闆；不論站在那個角色，都要懂得認識自己，選擇適性的工作；同時更要操練自己，追求成長，面對未來。我以自己的經驗歸納出以下幾點給大家參考。

企圖心與創造力 (Ambition & Creative)

任何土木工程設施尺度及規模都很大，面對的困難及動員的資源都很多，若沒有必勝的企圖心，事事保守，墨守成規，偉大的工程就難以完成了。而且，每項工程都是獨一無二的專案，它是無中生有、嘔心瀝血的作品而非可以大量複製的工業產品。因此，從事這個行業必須具有新穎、獨特的觀點及創造力，才能克服困難、達成要求。更重要的是這些創新的理念必須具有可被執行的特性，不致流於空泛。因此在創造力之外更必須能夠整合各方的資訊，運用不同的工具，創造出具有特色的傑作。

具責任感、能快速回應 (Responsible & Responsive)

責任感是邁向成功最重要的驅動力。責任感會令人產生主動、積極負責的態度；積極的工作態度能令

人樂在工作，敬業精神油然而生；因此，對於工作的認知不應該在工作量的計較，而是對於工作成效的自我要求。從事建設工作應有積極的態度，不僅具責任感更須具有超越昨天的挑戰精神，若欠缺自我挑戰的勇氣，自然會停滯不前，難成大器。

在一個處處講求效率的時代，快速回應是最基本的要求。對於客戶的需求要快速回應，否則就可能失去客戶的信任；工作的進度也當適時提報，以免客戶懸念。對於主管的任務交付也要快速回應；無法對於主管的任務交付快速回應，可能反映出個人於工作上之專業不足，更直接反映出個人對身為部屬基本態度的忽視。自知可以達成，就該按時提報進度；自知無法達成，更該適時求援以免誤事。

團隊合作 (teamwork)

團隊合作之目的是為了能結合不同人才的專業，能各自發揮所長，且能適切的搭配，達到相乘的效果，在建設產業中團隊合作尤顯其重要。土木工程的專案，不論是道路橋樑建設、住宅廠房建築，都需要結合來自設計、施工、管理等各方面的專業人員，絕無可能由一人獨力完成，因此參與其中之人員，是否具備團隊合作之人格特質相對重要。在團隊中若具有整合能力、領導魅力的人將更是產業發展中之重點人才。

終身學習 (lifelong learning)

世界變化的速度愈來愈快，不會因任何人、企業或國家的阻擋而歇息，你想躲也躲不掉，唯一的方法就是加入，提昇自我、充實自我，不要被逐出潮流。前面已經點出土木工程所需要的多元知識，這些斷不可能都在學校裡學習到，只有自己在工作中學習。能夠自我督促學習的人通常能瞭解終身學習對個人生涯發展的重要性，並能主動尋覓終身學習的途徑與方法及關注終身學習的發展趨勢。一個成熟的工程師需要涉獵的知識及累積的經驗很多，大概需要十年以上才能成熟。這些知識與經驗也不可能都在學校期間得到，所以，一定要懂得終身學習。

具國際觀 (international perspectives)

當資訊的發展縮短了世界的距離，國與國之間有如毗鄰，交流往來頻繁，具備良好之外語能力已是基本。但是，具有外語能力並不代表具備國際化之能力。當來自不同國家的人士共事之時，除了專業之外，文

化背景對於處理事務的觀點與態度具有重大的影響，因此談到國際化、國際觀，除了語文能力還必須瞭解不同國家之國情、文化背景，如何懂得尊重彼此的差異才是步向國際化之重點。

擁有健康的身體 (healthy)

土木工程是一個需要腦力、體能兼備的工作，有健康的體魄才有清晰的頭腦思考策略與解決困難，有充沛的體能才能將創意與方案付諸施行。尤其是第一線現場施工的工作人員，每天都必須付出龐大的體力以完成工作，又必須保持清醒的頭腦以維持品質與安全，沒有健康是難以負荷的。

結論

近日因某企業集團董事長宣告即將退休引發關於企業接班人之議題的熱烈討論。事實上，不僅是企業領導人需要接班人計畫以培育足以擔負傳承重任之企業接班人，任何行業中各項職務都需要有接班人計畫，否則都將影響專業銜接之順暢；培育下一代的人才實在是我們的責任。在過去，只要具備專業已足矣，但現今面對環境快速變遷，對於「人才」所要求之條件更多、素質更高。要能歸類於所謂「人才」，除了該有的學識及人格特質之外，上述之具企圖心與創造力 (Ambition & Creative)、具責任感、能快速回應 (Responsible & Responsive)、擁有健康的身體 (healthy)、具國際觀 (international perspectives)、具

團隊合作的精神 (teamwork)、能以終身學習為目標 (lifelong learning) 各項條件皆不可或缺。面對全球產業環境日益艱困與競爭，若非如是又如何能在複雜的環境中走出一條成功之路！

這些構思希望與土木界師生及同道們分享，也歡迎討論。我們都有責任把下一代教得更好，願與大家共勉之！加油！



李建中

現任

- 國立中央大學榮譽教授

學、經歷

- 國立成功大學土木工程學系畢業 (1971)
- 美國密西根州立大學土木工程碩士、博士 (1979)
- 國密西根州立韋恩大學土木工程學系助理教授
- 國立中央大學土木系副教授、教授、系主任
- 榮民工程處企劃部主任
- 行政院公共建設督導會報副執行秘書
- 行政院公共工程委員會副主任委員
- 國立中央大學工學院院長
- 台灣世職工程顧問股份有限公司董事長



中國土木水利工程學會
CIVIL AND HYDRAULIC ENGINEERING

電話：(02) 2392-6325
傳真：(02) 2396-4260
e-mail: service@ciche.org.tw

一個凝聚產官學土木專業知識的團體
一個土木人務必加入的專業學術團體
一個國際土木組織最認同的代表團體
一個最具歷史且正轉型蛻變中的團體



<http://www.ciche.org.tw>
請上網下載入會申請表

歡迎加入學會



環境工程

專輯序言

專輯客座主編 曾昭衡／國立台北科技大學環境工程與管理研究所 教授兼所長

本環工專輯在許多年輕一代的環境工程領域教授的心血貢獻下應運而生。感謝土木水利雙月刊的大力支持，才使得本環工專輯得以出版。環境工程從早期的土木項下的衛生工程，至今發展為跨化工、材料、土木、生物、機電資訊、公衛、職安、管理的綜合性學門。從民國五十年代成立國內第一個環境工程研究所，至今全國已有近 50 個與環境工程、環境科學、環境管理、職業安全衛生相關的大

專系所。從傳統環境污染的監測、控制與整治，發展至今含括的熱門主題如氣候變遷議題、生質能及替代能源、綠色永續整治、新興污染物，循環經濟等，環境工程關注的領域不斷與時俱進。由本環工專輯的八篇文章即可看出，環境工程最新而多樣的跨領域整合成果。在此讓我們一同期盼，土木水利工程師與環境工程師們攜手合作，共同朝全環境的永續發展目標前進！



臺灣空氣品質

監測／監督系統之公民參與實踐

袁明豪／中國醫藥大學公共衛生學院職業安全與衛生學系 助理教授

陳宥羽／中國醫藥大學公共衛生學院職業安全與衛生學系 專題生

近年每當 11 月進入秋冬季節以後，臺灣中南部民眾在生活上最有感的變化就是必須戴上口罩，以面對 PM_{2.5} 紫爆空污季。為此，臺灣公民社會群策群力，展開一系列之監測／監督系統之創新計畫，包括提供民間空氣品質監測數據之環境感測器網路系統 (LASS) / 空氣盒子、整合民間 LASS / 空氣盒子及官方空氣品質測站數據之 g0v 零時空污觀測網及利用官方固定污染源 CEMS 公開數據之綠盟透明足跡等。本文將介紹臺灣公民社會近期這些空氣污染監測與監督系統之實踐，分析其核心目標、數據資料來源及其對臺灣空污環境治理之影響。

前言

臺灣於 1975 年公告實施《空氣污染防治法》，目標為改善空氣品質，維護人民健康、生活環境，更進一步於 2011 年制定《室內空氣品質管理法》，以提高室內空氣品質。然而，40 多年空氣品質管理，民眾仍是對生活區域惡化的空氣品質感到不滿。根據遠見雜誌於 2016 年進行的全臺民眾空污認知調查，結果顯示，54.6% 的臺灣民眾不滿意目前居住環境的空氣品質，且一般民眾不但對於每天必須呼吸的空氣品質不滿，更認為現有制度或策略很難改善空氣品質^[1]。因此改善空氣污染是政府當務之急，民眾期待政府能提出更積極的改善策略與手段。

空氣污染不僅影響生活品質，對人體健康的負面影響已經無庸置疑，包括誘發呼吸道疾病、心血管疾病，甚至增加罹癌率及死亡率等。根據世界衛生組織 (World Health Organization, WHO) 在 2009 年發表的《全球健康風險》報告，都市室外空氣污染已被列為 2004 年全球死亡人口的第十四大大風險因素^[2]。2013 年世界衛生組織國際癌症研究署 (International

Agency for Research on Cancer, IARC) 公布，室外空氣污染是癌症死亡的首要環境因子，是第一級致癌物質。Lelieveld 等人^[3]分析因室外空氣污染造成的早死 (Premature death)，全球前三名國家為中國、印度與巴基斯坦，且依照基準 (Business as Usual) 情境全球在 2050 年因空氣污染造成的早死發生率將倍增。Di 等人^[4]以美國國家環境空氣品質標準 (National Ambient Air Quality Standard) 中 PM_{2.5} 與 O₃ 濃度標準 12 μg/m³ 及 50 ppm 作為基準，以美國聯邦醫療保險 (Medicare) 受益人為標的，總計追蹤六千一百多萬人，如果接觸量在標準以上，PM_{2.5} 濃度每增加 10 μg/m³ 則死亡率將增加 7.3%；臭氧濃度每增加 10 ppb 則死亡率增加 1.1%。

目前環保署針對空氣品質改善之方向為降低境內原生性 PM_{2.5} 及衍生性 PM_{2.5} 前驅物，如硫氧化物、氮氧化物及揮發性有機物排放。目標在 2019 年底將 PM_{2.5} 年平均濃度由 22 μg/m³ 降到 18 μg/m³ (目前國內空氣品質標準為 15 μg/m³)、全年紅色警戒站日數則由 997 站 / 日 (2015 年) 降至 528 站 / 日，改善比率 47%^[5]。

然而，這樣的目標設定與執行成效仍待時間檢驗。另一方面，臺灣公民社會從解嚴後的幾波環保運動，已儼然發展出符合當代科技民主治理思潮之公民認識論（Civic Epistemology）基礎^[6]。民眾不僅不再對空污問題視若無睹，許多地方公民團體更是群策群力，以草根公民參與行動來監督政府，使得政治決策程序變成一個競爭的社會創新過程。例如，高雄地球公民基金會拍攝「高雄的天空」與推動升「空污旗」行動、中部學界之「找藍天聯盟」、彰化醫療界之「台灣健康空氣行動聯盟」以及嘉義社區醫療發展協會之「嘉義市365天空氣品質年曆」等行動倡議，致力喚起社會大眾及政府重視。在此發展脈絡下，本文將介紹臺灣公民社會近期三個主要針對空氣品質監測與監督系統之創新實踐計畫，包括 LASS/ 空氣盒子、gOv 零時空污觀測網與綠盟透明足跡，並分析比較其計畫目標、數據資料來源及其對臺灣空污環境治理之影響。

LASS 空品微型監測

LASS (Location Aware Sensor System) 是一套以開源和公益定位的「環境感測器網路系統」。2013 年由中研院副研究員陳伶志研究團隊提出「參與式感測」的構想，製造低成本空氣感測裝置，並招募志願者參與感測，透過收集大量資料，進行時空資料分析。於 2015 年 10 月和 LASS 環境感測網路系統合作，LASS 創辦人許武龍以手作的方式組裝微型監測器 (LASS FT)，並將硬軟體資料全部公開，鼓勵社群參與者一稱為創客 (Maker)，自行架設微型監測器進行空品監測。2016 年訊舟科技以企業角度，協助開發微型空品監測器 (訊舟空氣盒子 EdiGreen AirBox)，並捐贈、佈點於台北、新北、桃園、台中、台南及高雄市政府學校，推廣環境教育。隨後，LASS 亦開發 LASS4U 微型空品監測器給公民認養，以擴大空品數據佈點範圍。目前 EdiGreen AirBox 已在全世界建立了 2,500 多個空

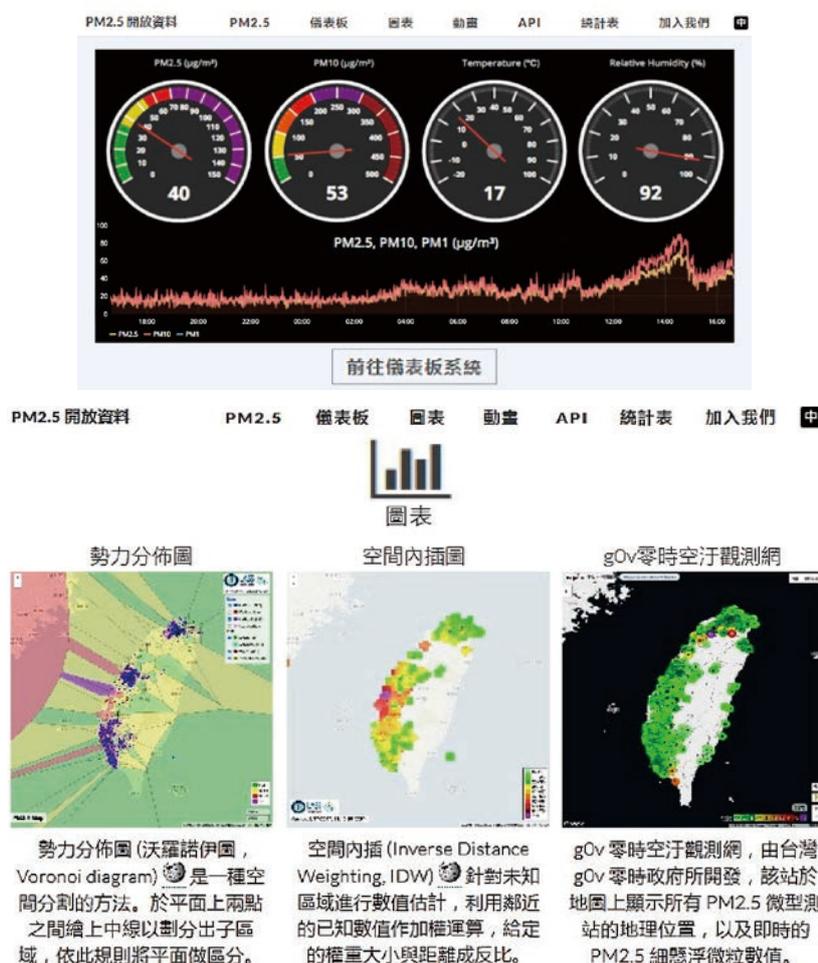


圖 1 LASS 微型環境感測器網路系統之即時空品監測數據 (https://pm25.lass-net.org/zh_tw/)

氣盒子，遍及台灣等共 29 個國家。LASS 系統亦包括超過 4,700 個微型監測器（含空氣盒子），在全臺各地提供即時空品監測數據。

LASS 微型監測項目包括 PM_{2.5}、CO₂、溫溼度等，其數據並非要取代環保署的測站或是挑戰環保署的數據。由於環保署及地方環保局所設置空氣品質監測站多放置於工廠或非人口密集處，並無法確切體現民眾生活區的空氣品質與其實際需求，加上發佈頻率低，比起以大區域的平均濃度為數據，民眾更想知道「當下」所在的「區域」，「現在」的空氣品質如何，以自行評估是否需要戴口罩、是否適合進行室外活動等。因此，LASS 微型監測數據可以提供一個區域的即時變化趨勢，讓民眾瞭解所處環境之空氣品質狀況，並可作為政府空氣品質管理的輔助參考。

由 LASS 官方網站或 APP 平台，可以針對每一台上線中的 PM_{2.5} 微型感測器或相關測站，提供其專屬的儀表板頁面。儀表板中將呈現即時感測值、一天當中的歷史資料、以及在地圖上呈現感測器的地理位置；

亦可透過勢力分布圖、空間內插圖或 g0v 即時空污觀測網得到各局部地區的濃度範圍變化，如圖 1 所示。雖然微型感測器所得之數據精準度，仍無法與標準方法儀器相比，但是在公民和企業參與下，越來越密集的微型監測器，其揭露的空品大數據能被環工與公衛的空污專家賦予知識價值與力量，提高了公民關注。

g0v 零時空污觀測網

g0v 零時政府是一個臺灣在地推動資訊透明化的社群，以致力開放原始碼的精神為基底，關心言論自由、資訊開放，寫程式提供公民容易使用的資訊服務。g0v 零時空污觀測網為零時政府的專案之一，計畫目標是整合官方與民間各方之空污監測站的觀測資料，結合即時氣象資料及固定污染源位置，以 Google Map 視覺化呈現，讓民眾更清楚能瞭解所關心區域之即時空品監測數據及可能污染排放來源。

圖 2 為 2017 年 7 月 28 日之 g0v 零時空污觀測網之台中市空品狀況。左側的群組可選數據來源、量測



圖 2 g0v 零時空污觀測網之整合官方與民間空品監測數據 (<http://airmap.g0v.asper.tw/>)

類別、固定污染源站點及氣象雲圖。此外，g0v 配合衛星檢視，將網頁右下角的小人拉至所選的街道，亦可出現街道樣貌。

綠盟透明足跡

透明足跡為 2017 年綠色公民行動聯盟發起監督企業污染排放與環境表現的一個專案計畫。數據主要擷取各縣市環保局針對空氣固定污染源煙道連續監測系統（Continuous Emission Monitoring Systems 簡稱 CEMS）及水污染連續監測系統之公開即時監測資料。使用者可以用「環境地圖」或是「企業單位列表」兩種方式搜尋，如圖 3 所示。使用者可選擇依企業所在地或類型選定所設之煙囪數據，系統可呈現即時與過

去長時間累積之空氣污染物排放數據，與企業空污裁罰紀錄。目前透明足跡已將企業廢氣、廢水即時監測數據，以及部分企業違規裁處事由的紀錄匯入資料庫，未來的目標為含括更多環安、職安等裁罰紀錄及企業獲得租稅優惠補貼之政府公開資訊。

透明足跡團隊於 2017 年 1 月檢視六輕工業區固定污染源 CEMS 排放資料，發現有許多違規事實但無裁罰紀錄之異常現象。進一步檢討現行制度，發現廠商可自行將「固定污染源暫停運轉」等非正常運轉的理由，註記於超標數據以規避違規事實。因此，促使環保署修法擴大管制範圍、提高連線數據有效時數，受到國內外媒體關注，特別是公民科技、開放政府社群之國際媒體 Civicist [7]。



圖 3 綠盟透明足跡網站監督企業環境表現 (<https://thaubing.gca.org.tw/facility/P5801728#P201> 煙道)

透明足跡的平台建置是透過公眾募資而成立，利用官方公開環境數據成為民眾檢視企業是否善盡社會責任的關鍵第三方平台，亦希望讓公民以公開數據化被動為主動，健全環境治理之公民參與，包括：

- (1) 強化政府管制機制：從數據找出政府環境治理的漏洞，提出修法及政策倡議。
- (2) 企業環境社會責任：呈現企業環境污染情況，從數據進一步分析應用，找出讓企業負起環境社會責任的動力，要求取消重大違規企業的租稅優惠。
- (3) 公民參與監督：落實公眾環境知情權，透過這個網站的視覺化，讓民眾清楚看到哪些工廠是污染源、現在的排放情況、以及過去的違法記錄等，捲動民眾參與監督及串連。

公私協力開創環境治理新想像

本文介紹臺灣公民社會近期三個主要針對空氣品質監測與監督系統之創新實踐計畫，包括 LASS/ 空氣盒子、g0v 零時空污觀測網與綠盟透明足跡。三個計畫主要透過民間創客、企業自行參與建立微型監測網或結合官方、民間公開數據建立資訊呈現平台，以喚起公民意識，培養民眾對在地環境品質的覺察能力，並且藉此發展與官方空氣品質資訊及空污管制策略之對話空間。

雖然微型監測器不比官方測站的標準儀器設備，其準確性仍被質疑。中研院陳伶志副研究員提出一個新觀點：「我們要學的，是和稍微有一點不準的 data 共存，設法從這些數據之中，找出一些價值」，只要微型監測器具備一定程度的準確性及一致性，透過大數據分析，資料所呈現的污染變化趨勢，仍具有參考價值。

微型空品監測數據並非要取代環保署的測站或是挑戰環保署的數據，而是提供民眾所關切區域的即時空品變化趨勢，是一種更直觀、更切身且草根的環境資訊。微型監測的優點是包括公私部門、公民皆能以低成本進入參與，並分享訊息於開放資訊平台。公民亦從單方面接收官方資訊到主動參與、實際操作、交換資訊、議題倡議，其中的轉換象徵著「公民科學」的抬頭。可預期未來這些長時間累積的公開大數據，將繼續被臺灣公民社會創造價值使用，開創一種公民參與式的環境治理之新可能。

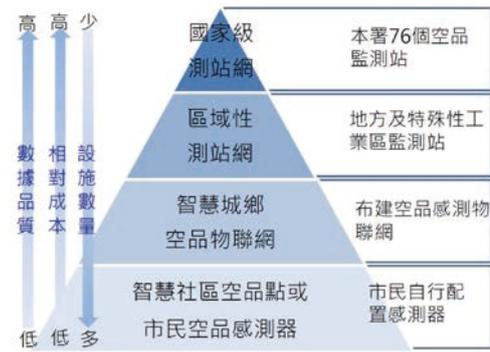


圖 4 多階層的全國空氣品質監測體系（環保署，2016）

事實上，環保署已於 2016 年「環境品質感測物聯網發展布建及執法應用計畫」^[8] 中認可公民參與監測之優點。由於具公信力的國家級空氣品質監測站網體系，其價格昂貴且體積龐大，無法大規模建置。因此，未來結合國內產業創新及活力，善用感測技術及資通訊等新科技，建構感測物聯網，同時整合地方及大型公營事業機構監測站網，善用各類監測設施特性差異，將可形成多階層的空氣品質監測體系，如圖 4 所示，將可使民眾得以隨時、隨地且容易取得更多、更新生活周遭的空氣品質資訊。

參考資料

1. 林佳誼，《遠見》國人空污觀念大調查，遠見雜誌，臺北，臺灣，2016。https://www.gvm.com.tw/article.html?id=21381
2. World Health Organization (WHO), Global Health Risks: Mortality and burden of disease attributable to selected major risks, WHO, Geneva, Switzerland, 2009.
3. Lelieveld, J., J.S. Evans, M. Fnais, D. Giannadaki & A. Pozzer, The contribution of outdoor air pollution sources to premature mortality on a global scale. Nature 525, 367–371 (2015).
4. Di, Q., Y. Wang, A. Zanobetti, Y. Wang, P. Koutrakis, C. Choirat, F. Dominici & J.D. Schwartz, Air Pollution and mortality in the Medicare population. N Engl J Med 376, 2513–2522 (2017).
5. 蔡鴻德、楊鏗行、黃星富，空氣污染防治新作為，國土與公共治理季刊，第五卷第三期，頁 105–113 (2016)。
6. Chou, K.T., From anti-pollution to climate change risk movement: Reshaping civic epistemology. Sustainability 7, 14574–14596 (2015).
7. Wilson, A.W., In Taiwan, using open data to expose rampant pollution, Civicist, 2017. https://civichall.org/civicist/taiwan-using-open-data-expose-rampant-unchecked-pollution/
8. 環保署，環境品質感測物聯網發展布建及執法應用計畫，環保署，臺北，臺灣，2016。https://lci.ly.gov.tw/LyLCEW/agenda1/02/pdf/09/02/13/LCEWA01_090213_00065.pdf



氣候變遷與空氣品質對健康之衝擊

陳伶伶／國立臺北科技大學環境工程與管理研究所 研究助理教授

全球暖化與氣候變遷議題，伴隨著科技文明興起、生態環境改變、極端氣候加劇，已是全世界不得不面對的現象，對人類的生存環境造成嚴重衝擊。世界氣象組織（World Meteorological Organization，簡稱 WMO）與世界衛生組織（World Health Organization，簡稱 WHO）在 2012 年召開特別大會時，共同發表「圖解健康與氣候（Atlas of Health and Climate）」^[1]指出，如果我們為因應全球暖化與氣候變遷的問題，各國政府需建立有助於預測疾病與照顧弱勢及高齡族群的服務；2014 年聯合國氣候高峰會議結論提到，未來希望能夠透過全球各方面的共同協助與合作，以減緩氣候變遷可能帶來的影響與衝擊，WHO 亦將氣候變遷對健康的影響列為首要課題之一；WHO 與 WMO 後續於 2015 年共同推出「熱浪與健康預警系統指引（Heatwaves and Health: Guidance on Warning-System Development）」^[2]，持續的結合氣候相關的議題與資訊，提供更多的健康服務。

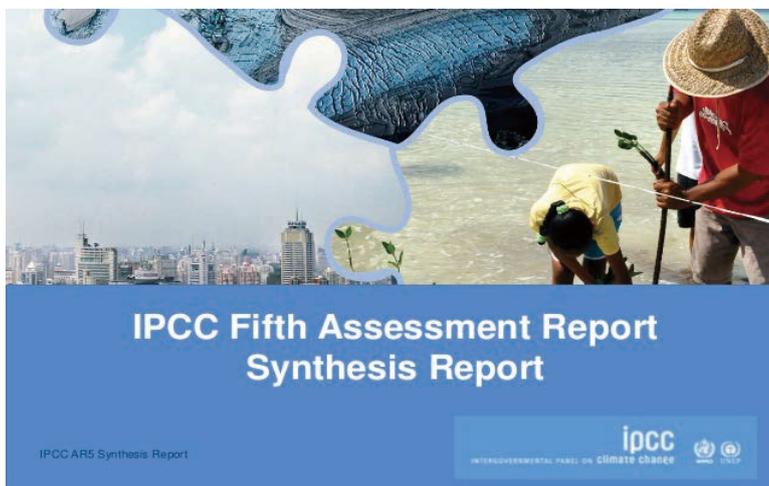
簡介

Anthony Costello 等人^[3]研究指出，氣候變遷是 21 世紀對人類健康最大的衝擊；政府間氣候變化專門委員會（Intergovernmental Panel on Climate Change，簡稱 IPCC）於 2014 年提出第五次氣候變遷評估報告（The Fifth Assessment Report，簡稱 AR5）^[4]，將氣候變遷對人類的衝擊分為「直接衝擊」與「間接衝擊」，前者定義為溫度變化造成冷／熱傷害及乾旱、水災、暴雨等極端事件造成之意外傷害（如：死亡率與致病率增加），依據 WHO 於 2012 年提出「氣候變遷與健康的十個事

實」(10 facts on climate change and health)^[5]報告指出，推估在 90 年代，氣候變遷造成的熱浪、暴雨、洪水等極端氣候事件，可能造成全球大約 60 萬人死亡，且依據國際災害資料庫（International Disaster Database, EM-DAT）統計 2000 年至 2009 年的天然災害造成的經濟損失高達 8,900 美元^[6]；後者主要是因為溫度與雨量改變，影響生物的生長與分布，或是溫度上生造成二次空氣污然物（如：臭氧與懸浮微粒）的生成，影響呼吸道及心臟血管疾病的盛行率增加，依據華盛頓大學健康與指標評估研究所（Institute for Health Metrics

and Evaluation）於 2017 年 10 月 29 日在 The Lancet 刊登的研究結果指出，2015 年約有 900 萬人死於空氣污染的問題，即全世界每 6 名死者中，就有一人因空氣、水、土壤及工作環境污染引起的疾病死亡，且空氣污染對全球經濟造成沉重負擔，估計每年因空氣污染造成的經濟損失達 4.6 兆美元，佔全球經濟 6.2%^[7]。

由此可知，氣候變遷與空氣污染底卻會對健康造成衝擊與危害，因為兩者間具有關係性，氣候變遷使地方氣候、降雨模式、日照時數等產生變化，因此間接影響空氣中有



害人體健康的物質濃度，本文將介紹氣候變遷與空氣品質對於健康的衝擊，提供環工（環管）跨領域研究者參考。

氣候變遷對空氣品質之衝擊

氣候變遷造成的健康衝擊可能包括極端溫度（高溫或低溫）、空氣污染、水災、乾旱及傳染病^[8]，對於兒童、少年、身心障礙者及年長者等脆弱族群（fragile populations），因氣候變遷引發的極端天氣事件，可用資源、認知與危機意識不足，因應環境變化較脆弱，健康危害風險較高，如以患有心血管疾病或面性病的年長者來說，因應氣候變化的能力較差，容易生病或使原有疾病惡化，相對增加患病率及死亡率。另如溫度上升會使二次空氣污染物（如臭氧與懸浮微粒）生成，會影響呼吸道與心血管疾病的就診和死亡增加。

研究指出氣候變遷對於空氣污染物最顯著之影響是臭氧^[9,10]，臭氧的濃度會受到經濟發展、能源使用和當地氣候條件等的影響^[11]。美國環保署研究指出^[12]，美國多數地區因氣候變遷衝擊，高度可能會造成地表臭氧濃度上升，夏季每日最大臭氧連續監測 8 小時後，臭氧值會增加 2 ~ 8ppb，極端氣候條件下，臭氧濃度大幅上升的機會增加，然報告也指出，這樣的研究結果仍是會受到假設及排放物空間及濃度的影響。此外，溫度上升使氣象條件改變，對空氣中的懸浮微粒行程機制也產生變化，因為溫度會間接促成二次微粒的產生，可能造成區域性的懸浮微粒污染濃度增加或降低^[13]。歐洲就氣候變遷與當地污染排放對葡萄牙婆爾圖程式的衝擊進行研究，研究指出在 2046 至 2065 年間，因氣候變遷衝擊，使得都市氣溫上升，空氣變得乾燥，進而使的臭氧與懸浮微粒的濃度提升，進而導致空氣品質不佳^[14]。

氣候變遷與空氣品質對健康之衝擊

國家衛生研究院整理 2010 年至 2016 年國內外極端溫度與健康衝擊 14 篇相關研究文獻發現，年長者確實為臺灣高溫情境下之高風險族群，心血管及呼吸道等疾病會與大氣溫度具顯著風險相關性^[15]。如極端高溫（大於 31°C 以上）對於患有心血管疾病的患者，一般最有可能在溫度最高的那天，死亡風險最高^[16]；日夜溫差對 65 歲以上年長者心血管與呼吸道疾病有顯著影響，且會隨著地理位置與溫度的變化，影響健康的情況也不同^[17]。

Kjellstrom 等人^[18]研究指出，氣候變遷與氣候變化對於慢性疾病有負面的影響，簡而言之，即氣候變遷的影響，會使環境條件改變，產生相對應的事件發生，進而對健康造成衝擊。如：人類暴露於熱浪環境中，可能產生缺水、心血管疾病、呼吸道疾病和腎臟疾病等現象，致病或致死情況增加；人類暴露於空氣污染環境中，可能產生心血管疾病、呼吸道疾病和氣喘發作等現象，致病或致死情況增加。此外，慢性病死具有季節性^[19]，尤其是心血管疾病^[20]。由此可知，氣候變遷衝擊下，溫度上升與極端溫度事件（如熱浪），以及氣候變遷與空氣污染的交互影響，會影響人類的心血管及呼吸道疾病。

心血管系統疾病

全球溫度上升，會影響人類身體的健康效益，如：心肌梗塞、缺血性中風住院、心臟病等，最嚴重則會導致總心血管疾病死亡^[21-23]。

另全球極端溫度事件發生頻率日益增加，如極端高溫/低溫，國際間也開始逐漸探討有關極端溫度事件與健康的衝擊評估，然目前尚未有統一的標準或方法進行健康衝擊評估，多以溫度百分比為分類準則，如：極端高溫定義範圍有 99.5、99、97、95 及 90 百分位溫度值，極端低溫定義範圍則 1、5 及 10 百分位溫度值^[24]。Chung 等人（2015）研究 1994 年至 2007 年臺灣極端溫度事件（極端高溫與極端低溫）對總心血管系統疾病的相關性，研究發現極端高溫對人類身體健康衝擊為立即性，另極端低溫對人類身體健康衝擊為延遲性。國外研究多以討論熱浪事件對總心血管系統疾病的相關性，如：紐西蘭 1979 年至 1997 年熱浪事件導致總心血管疾病死亡的風險增加 1.86%^[25]；美國 1999 年至 2010 年熱浪事件導致熱中風就醫的相關風險為 2.54^[26]；東亞四國 1979 年至 2010 年溫差在 6.4 度至 12.6 度將可能會導致總心血管疾病死亡，溫度增加 1 度，導致總心血管疾病死亡風險增加 0.81%^[17]。

此外，溫度升高會使得二次空氣污染物（如：臭氧與懸浮微粒）等生成，且人類暴露於空氣污染物下會對其健康產生衝擊，即氣候變遷（如：溫度）與空氣污染（如：臭氧與懸浮微粒）對健康疾病（如：心血管疾病死亡）交互影響，會造成健康衝擊（如：增加死亡風險），相關研究結果已知與心血管系統疾病死亡率增加有關。如：Li 等人（2011）研究中國 2007 年至 2009 年間，氣溫與懸浮微粒對總心血管疾病死亡的

交互影響，研究結果發現，在高溫下，懸浮微粒暴露會增加總心血管疾病風險 0.92%，溫度與空氣污染間具有交互作用；Sario 等人（2013）研究歐洲 1990 年至 2004 年間，熱浪／高溫與臭氧／懸浮微粒對心血管疾病死亡的交互影響，研究結果發現，熱浪／高溫與臭氧／懸浮微粒對心血管疾病死亡具正向交互作用。國內也有相關研究運用次級資料（如：全民健保資料、死亡登記、中央氣象局氣象因子監測資料、環保署空氣污染物監測資料）分析氣候與健康的相關性。如：Lin 等人^[27]研究臺灣北部、中部及南部都會區 2000 年至 2008 年間，極端高溫／低溫對總心血管疾病死亡的交互影響，研究結果發現，在極端高溫下，導致總心血管疾病死亡之相對風險 1.08，另在極端低溫下，導致總心血管疾病死亡之相對風險 1.20。

呼吸系統疾病

全球溫度上升、極端氣候事件頻率增加、氣象條件與空氣污染的交互作用，如心血管系統疾病一樣，也會影響人類的呼吸系統疾病。如：溫度上升導致總呼吸系統疾病死亡及總呼吸系統疾病就醫的增加，Chung 等人^[21]研究指出，1994 年至 2003 年臺北市總呼吸系統疾病死亡，溫度每上升 1 度，總呼吸系統疾病死亡的風險增加 9.3%；Lin 等人^[22]研究美國紐約 1991 年至 2004 年間總呼吸系統疾病就醫情況，溫度每上升 1 度，總呼吸系統疾病就醫的風險增加 2.7%；Ostro 等人^[23]研究美國加州 1999 年至 2005 年總呼吸道疾病的情況，溫度每上升 1 度，總呼吸道疾病住院的風險增加 0.50%。另極端溫度事件及溫差也會導致總呼吸系統疾病就醫與死亡情況增加。如：Huynen 等人^[25]研究 1979 年至 1997 年熱浪事件對總呼吸系統疾病死亡的影響，研究結果發現，熱浪頻率增加，導致總呼吸系統疾病死亡的風險增加 12.82%；Chung 等人^[21]研究 1992 年至 2006 年美國極端高溫對總呼吸系統疾病就醫的影響，研究結果發現，在極端高溫下，導致人類總呼吸系統疾病就醫的風險增加 4.3%；Kim 等人^[17]研究 1979 年至 2010 年間東亞四國在溫差 6.4 度至 12.6 度間對總呼吸系統疾病死亡的影響，研究結果發現，溫差增加 1 度，導致人類總呼吸系統疾病死亡的風險增加 0.90%。

氣候因子與空氣污染物的暴露具交互影響，除增加心血管系統疾病就醫與死亡的風險外，對於氣喘與呼吸系統疾病死亡也有所衝擊。如：Sheffield 等人^[28]研究

1990 年至 2020 年間美國在氣候變遷變化之下，氣喘急診情形，研究結果預測未來 30 年間因環境變遷導致臭氧會增加 2.7 ~ 5.3ppb，氣喘急診頻率因而增加 7.3%；De Sario 等人^[29]研究 1990 年至 2004 年歐洲熱浪事件與懸浮微粒交互作用，對人類呼吸系統疾病死亡的相關性，研究結果發現，熱浪與懸浮微粒具正向交互作用。

國內研究亦顯示溫度上升、極端高溫／低溫、氣象因子與空氣污染對呼吸系統疾病之交互影響，會導致總呼吸系統疾病、肺阻塞、氣喘等死亡及就醫頻率增加。如：Lin 等人^[16]研究臺灣北部、中部及南部都會區 2000 年至 2008 年間，極端低溫對總呼吸系統疾病門診的影響，研究結果發現，極端低溫對總呼吸系統疾病門診的累積相對風險為 18% 至 31%；Tseng 等人（2013）研究全臺灣 1999 年至 2009 年氣溫變化對肺阻塞的影響，研究結果發現，溫度每降 5 度，風險增加 10.6%；Lin 等人^[16]研究 2000 年至 2009 年台北氣溫與臭氧的交互作用下，總呼吸系統疾病就醫及氣喘就醫的影響，研究結果發現，總呼吸道就醫在低溫度下，臭氧暴露之相對風險 1.10，氣喘就醫在低溫度下，臭氧暴露之相對風險 1.18；Hwang 等人^[30]研究臺灣溪南部 2008 年至 2010 年冬春季與細懸浮微粒對肺阻塞的影響，研究結果發現，細懸浮微粒每增加 10 mg/m³，相對風險增加 25%。

結論

國內外針對氣候變遷對心血管系統疾病及呼吸系統疾病影響的研究，可以得知溫度上升、極端氣候事件（如：高溫、低溫及熱浪）頻率增加，導致心血管系統疾病及呼吸系統疾病的發病、就醫及死亡具有相關性。另氣象條件與空氣污染物的交互影響，會增加人類心血管系統疾病及呼吸系統疾病的風險。

近年臺灣地方縣市整府因應氣候變遷議題，逐漸重視因應氣候變遷之健康調適作為。2010 年至 2015 年臺灣各縣市政府因應氣候變遷之健康調適擬定調適能力計畫，包括：增溫、降雨不均、劇烈降雨、颱風強度、海平面上升及空氣污染等六項氣候因子，其中，增溫與劇烈降雨兩項氣候因子為各縣市政府調適能力計畫的主要兩項氣候因子，颱風強度及空氣污染則兩項氣候因子尚未受到多數縣市政府的考量。根據 IPCC 發佈 AR5 報告提到，未來空氣品質（近地表的臭氧與細懸浮微粒濃度）的推估，具高可信度是因全球暖化

造成全球地表臭氧濃度背景下降，使地面臭氧濃度背景直在 21 世紀末平均大約上升 8ppb，局部地表高溫的化學反應與局部區域性回饋作用，將可能使臭氧與細懸浮微粒濃度質升高 (IPCC, 2014)。從目前各縣市政府的調適能力計畫來看，較著重於道路粉塵及室內外空氣品質改善設計，然氣候變遷對空氣品質之衝擊，會受到環境變遷、環境政策、經濟發展及社會活動等影響，未來需要更多研究科學證據支持。

最後，氣候變遷議題，僅評估單領域的衝擊與健康風險，往往會低估氣候變遷衝擊的影響層面，特別是大部分的研究者專精於本身所擅長的領域，往往會讓跨領域研究變成多領域研究，較少進一步在評估過程當中，考慮領域間之交互影響作用^[31]。如本文介紹氣候變遷與空氣品質對健康之衝擊，即屬於跨領域議題，透過本文的了解，可以知道氣候變遷、空氣品質或健康各領域之間已有重疊的部分，然各領域間仍需要持續透過各領域原有的基礎，再加以透過資訊與知識交流，相互討論與探討，循序漸進的衍生新型態領域，是一種科學研究整合結果與創新突破。期許同身為環工（環管）領域的研究者／學者，共同持續努力，持續強化各領域的合作與研究，著重因應氣候變遷之調適能量，以降低衝擊對人類造成的健康危害。

參考文獻

- World Health Organization (2012), Atlas of Health and Climate, <http://www.who.int/globalchange/publications/atlas/report/en/>.
- World Health Organization (2015), Heatwaves and Health: Guidance on Warning-System Development, http://www.who.int/globalchange/publications/WMO_WHO_Heat_Health_Guidance_2015.pdf.
- Anthony Costello *et al.* (2009), Managing the health effects of climate change, *The Lancet Commissions*, Vol. 373, No. 9676, pp. 1693-1733.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (2014), The Fifth Assessment Report.
- World Health Organization (2012), 10 facts on climate change and health, http://www.who.int/features/factfiles/climate_change/en/.
- 行政院 (2011)·民國 100 年災害防救白皮書。
- Landrigan, P. J. *et al.* (2017), Pollution and health, *The Lancet Commissions*, [http://www.thelancet.com/journals/lancet/article/PIIS0140-6736\(17\)32345-0/abstract](http://www.thelancet.com/journals/lancet/article/PIIS0140-6736(17)32345-0/abstract).
- 衛生福利部 (2014)·因應氣候變遷之健康衝擊政策白皮書。
- Langmer, J. *et al.* (2005), Impact of climate change on surface ozone and deposition of Sulphur and nitrogen in Europe, *Atmospheric Environment*, Vol. 39, No. 6, pp. 1129-1141.
- Racherla, P. N. and Adams, P. J. (2008), The response of surface ozone to climate change over the Eastern United States, *Atmospheric chemistry and physics*, No. 8, pp. 871-885.
- Syri, *et al.* (2002), Modeling the impacts of the Finnish Climate Strategy on air pollution, *Atmospheric Environment*, No. 36, pp. 3059-3069.
- EPA, U. S. (2009), Environmental Protection Agency Assessment of the impacts of global change on regional U.S. air quality: A Synthesis of Climate Change Impacts on Ground-Level Ozone, an Interim Report of the U.S. EPA Global Change Research Program, Washington, D.C.
- EPA, U. S. (2003), Environmental Protection Agency: Guidelines for developing an air quality (Ozone and PM2.5) Forecasting Program. EPA-456/R-03-002.
- Sa, *et al.* (2016), Climate change and pollutant emissions impacts on air quality in 2050 over Portugal, *Atmospheric Environment*, No. 131, pp. 209-224.
- 國家衛生研究院 (2017)·氣候變遷與健康。
- Lin, Y. K. *et al.* (2013), Temperature effects on hospital admissions for kidney morbidity in Taiwan, *Sci Total Environ*, Vol. 443, pp. 812-820.
- Kim, J. *et al.* (2016), Comprehensive approach to understand the association between diurnal temperature range and mortality in East Asia, *Sci Total Environ*, Vol. 1, No. 539, pp. 313-321.
- Kjellstrom, T. *et al.* (2010), Public health impact of global heating due to climate change: Potential effects on chronic non-communicable diseases, *Int J Public Health*, Vol. 5, No. 2, pp. 97-103.
- Vilkman, *et al.* (1996), Seasonal variation in hospital admissions for chronic obstructive pulmonary disease in Finland, *Arctic Medical Research*, Vol. 55, No. 4, pp. 182-186.
- Nhulien, *et al.* (2016), Seasonal Influenza Infections and Cardiovascular Disease Mortality, *JAMA Cardiol*, Vol. 1, No. 3, pp. 274-281.
- Chung, J. Y. *et al.* (2009), Ambient temperature and mortality: An international study in for capital cities of east Asia, *Science of The Total Environment*, Vol. 408, No. 2, pp. 390-396.
- Lin, S. *et al.* (2009), Extreme high temperatures and hospital admissions for respiratory and cardiovascular diseases, *Epidemiology*, Vol. 20, No. 5, pp. 738-746.
- Ostro, B. *et al.* (2010), The effects of temperature and use of air conditioning on hospitalizations, *Am J Epidemiol*, Vol. 172, No. 5, pp. 1053-1061.
- Chung, Y. *et al.* (2015), Mortality related to extreme temperature for 15 cities in northeast Asia, *Epidemiology*, Vol. 26, No. 2, pp. 255-262.
- Huynen, M. *et al.* (2001), The impact of heat waves and cold spells on mortality rates in the Dutch population, *Environ Health Perspect*, Vol. 109, No. 5, pp. 463-470.
- Bobb, J. F. *et al.* (2014), Cause-specific risk of hospital admission related to extreme heat in older adults, *JAMA*, Vol. 312, No. 24, pp. 2659-2667.
- Lin, Y. K. *et al.* (2011), Mortality risk associated with temperature and prolonged temperature extremes in elderly populations in Taiwan, *Environ Res*, Vol. 111, No. 8, pp. 1156-1163.
- Sheffield, P. E. *et al.* (2011), Modeling of Regional Climate Change Effects on Ground-Level Ozone and Childhood Asthma, *Am J Prev Med*, Vol. 41, No. 3, pp. 251-257.
- De Sario, M. *et al.* (2013), Climate change, extreme weather events, air pollution and respiratory health in Europe, *Eur Respir J*, Vol. 42, No. 3, pp. 826-843.
- Hwang, S. L. *et al.* (2016), Association between Atmospheric Fine Particulate Matter and Hospital Admissions for Chronic Obstructive Pulmonary Disease in Southwestern Taiwan: A Population-Based Study, *Int J Environ Res Public Health*, Vol. 13, No. 4, pp. 1-9.
- Klein, J. T. (2008), Evaluation of interdisciplinary and transdisciplinary research: A literature review, *Am J Prev Med.*, Vol. 35, (2 Suppl), pp. 116-123. 



從節能減碳到 INDC

陳律言 / 國立聯合大學能源與工程學系 副教授

我國由政府部門主導推動的各項節能減碳措施雖甚早開始，但其主要形之於書面的政策指導方向源自於民國 97 年所提出的「永續能源政策綱領」^[1]。該綱領所設定之永續能源政策目標為：兼顧「能源安全」、「經濟發展」與「環境保護」，以滿足未來世代發展的需要。並設定「效率」、「潔淨」、與「穩定」這三個能源願景的關鍵字。在建構「高效率」、「高價值」、「低排放」及「低依賴」二高二低的能源消費型態與能源供應系統的政策原則下，該政策推動綱領，由能源供應面的「淨源」與能源需求面的「節流」構成。節能減碳則設定為體現「節流」的各部門實質措施。無論是產業部門、住商部門、政府部門、以及社會大眾，在永續能源政策綱領中都有節能減碳措施，其中部分措施甚至設定具體量化目標。綜前所述，我國政府推動各項節能減碳措施的政策規劃理念基礎，基本上是在獨立於能源供應面淨源理念所貢獻的減碳之外，在節流方面亦以減少不必要的能源浪費來創造減碳績效。有鑒於此，節能減碳本身的措施範疇，基本上仍然以避免不必要的能源浪費、提高能源使用效率、選擇較低碳排放之能源使用等能源需求端的行為改變為主要設想。我國相關政策推動實務上則配合相應的能源基礎設施之更新、建置、運作，如此才能有效藉由以各項基礎設施「鎖定」^[2]各部門之能源使用行為，藉以確實達成節能減碳之推動目標。

若將視野由國內拓展至國際，聯合國氣候變化綱要公約（UNFCCC）各屆締約國大會可謂重要之國際節能減碳政策觀察焦點之一。依我國之「國家自定預期貢獻」（Intended Nationally Determined Contribution, INDC）（核定本）^[3]，我國本諸國情、現況與自身條件，以此文件說明：「我國致力承擔 UNFCCC 第三條共同但差異的減量責任，且將努力實踐 INDC 來參與落實 UNFCCC 第二條所揭示的目標；亦即將大氣中溫室氣體的含量，維持在防止氣候系統受到危險人為干擾的水準。」並設定減量目標為「將以全國為範疇，透過國內相關部門別減量的努力，於 2030 年溫室氣體排放量為 BAU（business as usual）減量 50%（214 百萬公噸二氧化碳當量）」綜觀我國之國家自定預期貢獻，其中可望貢獻減碳成效者，非僅來自於前述能源需求面「節流」所對應的節能減碳，而是對國內所有部門，以及可能藉由國際市場機制所獲得的境外減量成績。因此，從節能減碳到 INDC 不僅顯示我國在承擔因應全球氣候變遷責任的政策及措施演進歷程，更可顯示我

國在此過程中設計導入的各項政策助推（nudging）工具^[4]，是如何持續與國內各部門的活動交互影響演進。

我國節能減碳政策推動回顧

自永續能源政策綱領提出後，國內與其呼應的各項節能減碳具體作為，毫無疑問地是以落實各項成本近乎可以忽略的無悔方案為第一優先，逐漸進展到需要一定程度的資金投入以及一定期間的回收時程的「投資—回報」型態方案，甚至是以社會典範轉移^[5]為目標的複雜社會體系重塑過程。泰勒·科文（Tyler Cowen）在其著作《經濟大停滯》（The Great Stagnation）一書中所提到的「科技高原上的低垂果實」。^[6]科文論述美國自十七世紀以來所擁有的廣闊土地、大量移民、強大高科技等猶如「低垂果實」的條件，故其得以輕易摘取，獲得相應的經濟發展成果。但美國近四十年來已幾乎將前述低垂果實採收殆盡，使得其後續追求經濟成長所需付出的成本變得越來越高，就好像已經走到滿是光禿果樹的「科技高原」上，

卻仍假想果樹上仍有大量的低垂果實。若將我國推動節能減碳政策進程對照前述的美國經濟發展歷程，我們不難發現諸如普遍較低能源效率的老舊基礎設施、大量可供投入節能減碳的公部門預算、以及持續面市的需求端節約能源解決方案等，恰可一定程度地視為追求節能減碳成就的「低垂果實」。我國多年來推動節能減碳，已經累積相當的實際成果，而且這些成果不僅具有可觀的量化產出，同時也顯示出這些成果所相應的節能減碳作為在質性上逐漸展現的改變。這樣的改變是：從各方案投入成本低、方案標的為較無爭議的老舊設施、以及政策推動初期「先求有，再求好」思維下較寬鬆的資金效率容許程度，逐漸轉向各方案投入成本較高、方案標的為仁智互見的使用中設施、以及政策成熟期「最高效善用資源」思維下較嚴謹的資金效率容許程度。

我國以往即有針對節能減碳政策進行之檢討與規劃工作，以 2008 年之檢討報告 [7] 為例，雖其內容所界定的節能減碳與永續能源政策綱領設定者有所出入（包含能源供給面的低碳化），但其內容直接指出：「我國過去 10 年節能減碳績效不彰」、「我國過去 10 年節能減碳管考機制失靈」此二項嚴峻課題，並提出「我國現階段部門採行技術與政策措施」與「我國節

能減碳決策層級與法律位階提升」等兩項具體建議。該報告提出的節能減碳政策成效評估、檢討與建議列表，分別就基本能源政策、溫室氣體減量政策、法規基礎、能源部門節減碳政策、運輸部門節減碳政策、住商部門節減碳政策、產業部門節減碳政策等，分別就能力建構與實際減量這兩個方面定性論述其減碳成效。對照永續能源政策綱領中考慮的節流層面節能減碳措施，該報告所指出的優先推動項目有：建構大眾運輸系統、推廣省能運具、電器能源效率、節能照明、能源技術服務業、自願性減量、盤查 → 登錄 → 查驗 → 認證 → 核配碳排放額度、發展綠色能源產業等。這些項目基本上都出現在其後 2010 年的國家節能減碳總計畫（核定本）[8] 的十大標竿方案 / 35 標竿型計畫中（如下圖），當然也伴隨其他原先可望有助節能減碳的其他項目。

2010 年國家節能減碳總計畫推動後所獲得之節能減碳成果，可從爾後各年度執行成效及後續重點工作之簡報資訊試行檢視。[9] 本文僅就其中涉及需求面節流的節能減碳措施相應的標竿型計畫 / 工作項目，彙總整理如下表。在「打造低碳社區與社會」標竿方案所屬，從節能標章及能源效率標示，進展至推動用電器具最低容許耗能基準，此為針對用電需求端之設備



圖 1 國家節能減碳總計畫的十大標竿方案 / 35 標竿型計畫 [取自國家節能減碳總計畫 (核定本)]

能源效率提升的推動，配合我國相應時期的公、私部門資源投入，已獲得相當成效。在「營造低碳產業結構」標竿方案所屬，除持續進行製造業節能減碳，也導入產業溫室氣體自願減量，顯示不僅設定政府主控的宣導及輔導推動方式，也朝向爾後可能在溫室氣體管制架構下的民間參與方向推動。「建構綠色運輸網絡」標竿方案所屬，則由補助民眾購買低污染車輛進展至執行車輛耗能標準，以及推動建置電動車相關相關基礎建設及配套推動，惟對於運輸部門的溫室氣體總量管制，則在 2012 年推出的各部會推動公共工程維護營運階段節能減碳相關措施，相較於以往針對公私部門的補助措施而言，更彰顯從行為面設定節能減碳的努力。「強化節能減碳宣導與溝通」標竿方案所屬中，納入辦理政府機關及學校四省專案計畫是比較令人費解者。政府機關及學校四省專案計畫本是兼具滾動式優化政府機關及學校之能源基礎設施，以及持續實施節能行為的積極性節能減碳計畫，但此前行政院

將其列入宣導與溝通，似乎與其被期待的定位與發揮的功能有所出入。

檢視 2012 年國家節能減碳總計畫之後續重點工作之簡報資訊，其中涉及需求面節流的節能減碳措施包括：導入節能技術服務業、營造低碳產業結構、擴大區域能資源整合應用、積極推廣低碳車輛、提升公共運輸使用率、強化能源效率管理與節能規範、推動水銀路燈汰換、推動節能列車，引領節能減碳新生活、及推動低碳永續家園等工作。

2015 年我國「溫室氣體減量及管理法」^[10] 三讀通過，自該法施行後，我國之溫室氣體減量及管理應依循該法相關規定辦理，並排除空氣污染防治法之管制（2012 年時二氧化碳、甲烷、氧化亞氮、氫氟碳化物、六氟化硫及全氟化碳等溫室氣體被公告為空氣污染物）。自此我國減碳相關政策，即應回歸溫室氣體減量及管理法及相關規定加以推動。而以往「節能減碳」之陳述，在此法條文中則僅出現兩次，分別是在第

表 1 2010 至 2013 年國家節能減碳總計畫各年度主要節能減碳工作項目

標竿方案	標竿型計畫／工作項目			
	2010 年	2011 年	2012 年	2013 年
打造低碳社區與社會	推廣節能標章及能源效率標示 補助設置 LED 路燈	推動用電器具 最低容許耗能 基準	推動用電器具 最低容許耗能 基準	推動地方政府低碳城市建構措施 建設澎湖及金門為低碳島相關措施 推動商業節能減碳輔導計畫
營造低碳產業結構	製造業節能減碳措施 工業區資源整合示範 鍋爐效率及節能之檢測 住商能源管理與節能技術服務 公部門節能示範推廣專案 LED 交通號誌燈節能 補助並推廣民眾使用電動機車	推動產業溫室 氣體自願減量 製造業節能減 碳輔導	推動產業溫室 氣體自願減量 製造業節能減 碳輔導	推動產業溫室氣體自願減量 推動製造業節能減碳駐廠輔導
建構綠色運輸網絡	補助民眾購買低污染車輛	執行車輛耗能 標準	車輛耗能標準 提升高鐵運量	推動高雄、台北、台中都會區暨機 場捷運建置計畫 市區道路入本環境建設計畫 推動建置電動車相關相關基礎建設 及配套推動
推動節能減碳公共工程				各部會推動節能減碳相關試辦或示 範工程 台 9 線蘇花公路山區路段改善計畫 工程碳管理工作 各部會推動公共工程維護營運階段 節能減碳相關措施
深化節能減碳教育	推動全面學校節能減碳措施			推動「校園節能減碳輔導團」計畫 辦理「永續校園推廣計畫」 利用多元宣傳方式，鼓勵全民落實 節能減碳行動
強化節能減碳宣導與溝通	強化節能減碳宣導與溝通			辦理政府機關及學校四省專案計畫 強化各產業節能減碳認識與作為 推動加入聯合國氣候變化綱要公約

二條第十項中「低碳綠色成長」之定義，及第五條所述政府相關法律與政策因應氣候變遷之規劃管理原則中，「積極協助傳統產業節能減碳或轉型，發展綠色技術與綠色產業，創造新的就業機會與綠色經濟體制，並推動國家基礎建設之低碳綠色成長方案。」。雖然節能措施多半能有助於減碳，但因溫室氣體減量及管理法在第一條即明敘其立法目的為：「為因應全球氣候變遷，制定氣候變遷調適策略，降低與管理溫室氣體排放，落實環境正義，善盡共同保護地球環境之責任，並確保國家永續發展。」以減碳為主要標的之立法，自然不再捆綁節能與減碳，而是尋求更多可能有助我國減碳的具體作法。是故，2017年核定之「能源發展綱領」^[11]中，雖然「環境永續」為其綱要方針中的重要部分，且溫室氣體減量及低碳均多次出現（如下圖），但節能減碳一詞亦僅出現三次，再次呼應減碳與節能間並非總是需要綑綁，而是可以用更有利於國計民生的方式在節能與減碳的分進與協作下，都依其強項發揮而加以善用。在「環境永續」綱要方針下之「建構低碳環境」，述及「推動全民節能減碳生活運動」。在「政策配套」下之「全面低碳施政」述及「中央與地方施政計畫、基礎建設、區域規劃、產業發展規劃應納入節能減碳思維」，以及在「深化能源風險溝通與教育」述及「建立以節能減碳為核心之生活文化」。由此觀察，節能減碳似以由政策及措施推動早期的具有眾多實施要項，逐漸朝向內化於施政規劃思維及民眾生活文化之精神標竿。

我國國家自定預期貢獻與減碳路徑

自我國於 2015 年提出國家自定預期貢獻後，後續實質減碳工作雖持續有各政府部會的投入及成效，細節上如何追求最佳之投入資源配置，以獲致最佳減碳成果，仍有不斷自我提升及持續精進之空間。自巴黎氣候協定於 2016 年 11 月 4 日生效後，我國後續於 2017 年 3 月 28 日依溫室氣體減量及管理法授權訂定之「溫室氣體階段管制目標及管制方式作業準則」^[12]，即明定階段管制目標之規畫及訂定方式。誠如前述，我國以往迄今有多項已完成及推動中之具體節能減碳及其他減碳措施及計畫，雖然這些措施及計畫已取得相當成果，然而從細節檢討目前及未來可能之推動方式，仍存在值得精進優化之空間。考量「溫室氣體減量及管理法」規定：我國於 2050 年之溫室氣體排放量應降至 2005 年排放量之半以下，為達成此一目標需要具體作為以型塑我國未來之溫室氣體排放行為。面對我國社會持續發展之各面向需求，不論是在能源結構、經濟發展、產業競爭力、稅收、公共收支、民眾負擔等面向，都有眾多尚待審慎規劃，以及滾動式修正之政策實踐作為。筆者要特別指出，政策的推動並不相同個人的決策與行動，各個政府部門基於其職能，本就有其依法設定之優先任務，雖然彼此之間有分工整合的空間，也存在著潛在的衝突和資源配置課題。我國能源、運輸、住商、農業、工業等五大部門都在排碳量上有其貢獻，然而隨著社會發展的進程，各部門因著活動量而致的排碳活動及總量改變，不僅關係到減碳政策，更是深受相關社會運作機制的影響。

依「溫室氣體階段管制目標及管制方式作業準則」第六條規定：「中央主管機關得會商各部門之中央目的事業主管機關訂定國家及部門別評量指標，並分別納入推動方案及行動方案，以利評估及檢視階段管制目標及部門溫室氣體排放管制目標執行情形。」以國家及部門別評量指標的格式及相應的標竿值，藉由政府機關間的會商合作，形成推動方案及行動方案，藉以影響公私部門的

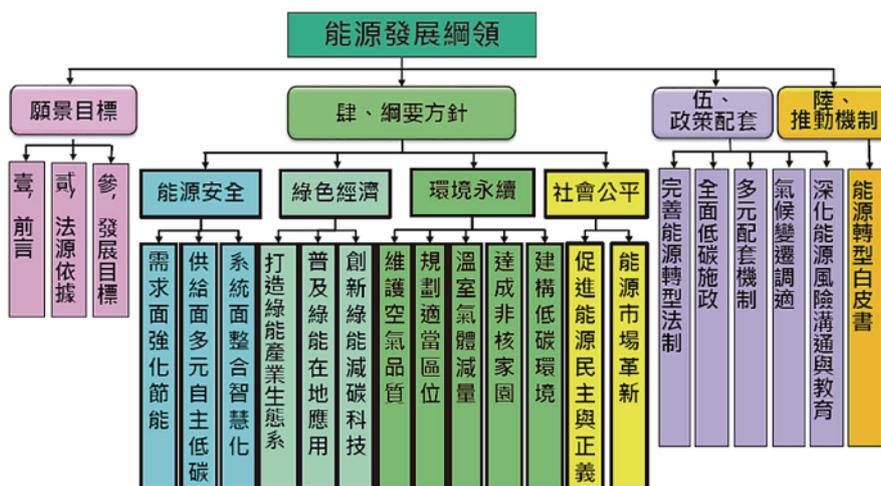


圖 2 能源發展政策綱領 [取自^[11]]

未來排碳行為樣態及總量，當是爾後我國政府在減碳推動上的具體作法。惟此過程相關的各項專業工作，涉及科技、社會、經濟、行政等諸多面向之縝密評估及整體擘畫，政府機關可以倚重的官方及民間智庫組織，也在這個課題上需要投入更多的自我培力與精進努力。再進一步檢視該準則之第七條：「中央主管機關應會商中央目的事業主管機關考量第三條所列因素，訂定國家溫室氣體排放趨勢推估原則及參數，並進行溫室氣體排放趨勢推估及情境分析。各部門之中央目的事業主管機關應配合階段管制目標之訂修，邀集各目的事業主管機關研商及提出各部門溫室氣體減量情境、減量貢獻及減量成本之估算。」考量成本估算往往涉及價值觀點的設定，而社會大眾的價值觀點極可能反映個人條件的差異而相當多元，是以除了前述之智庫量能與時俱進之外，更有效地凝聚民眾共識，抑或是設定長期有利大多數民眾的政策且強化公共溝通，亦有其發展之必須性。考量該準則第八條：「各部門之中央目的事業主管機關應依所屬部門進行部門別階段管制目標對於經濟、能源、環境、社會等面向及其因應作為之衝擊影響評估，提送中央主管機關彙整及綜合評估。」這樣可望納入最熟悉該部門業務的主管機關的法規設計實屬優秀規劃，惟以往各部門業務相關的智庫及民間協力團隊，對於減碳理念及實務未必能高度掌握，這點不僅將影響各部門目的事業主管機關所得到的知識顧問及工作協力水準，也可能影響中央主管機關後續進行彙整及綜合評估時之工作推動。

綜前所述，不論此前環保署對國際宣示的國家自訂預期貢獻是否在短期之內全數置入溫室氣體階段管制目標及管制方式作業準則，以往環保署及其他伙伴團隊努力研擬國家自訂預期貢獻的過程，實則早已為我國更清晰地檢視溫室氣體排放管制的政策推動，不僅是在方向上，更是在各項的潛在政策可著力處。而展望未來，前述之智庫知能精進、優質公共溝通、以及整合並提升不同專業領域團隊量能，都是追求更佳減碳績效的務實努力重點。

結語

在以往節能減碳成果低垂的年代，「政府會有很多的實質資源可利用，也會有很多的方法讓人民感到快樂—例如給人民更多利多政策。」^[6]然而，隨著我國

與國際社會、科技的不斷前行，當前我們面對的世局已經今非昔比，如果我們仍然無視周圍環境的變化，假裝減碳成果仍然低垂易取，結果極可能是因為未能正視減碳課題本身亦可能帶動社會優質發展的事實，陷入輕則浪擲政府資源，重則錯失國家發展時機的格局。在以往減碳成果低垂的年代，公私部門只要願意投入資源，就可能因為將舊的耗能或高碳行為轉型而取得減碳成果，但是展望未來，我國是否還有低垂的減碳成果呢？或許人們長期習慣於伸手可及的低垂果實，是源自於人類傾向短視和不勞而獲的天性。但是如果我們能嘗試培植可望產出新生減碳成果的發展機會，當可能有機會源源不斷地朝向我國的中長期減碳目標邁進。或許我們能培植的標的不僅是社會運作與減碳科技的發展，還有更多讓體現 INDC 的過程成為提升國家競爭力的多贏策略。在未來的減碳道路上，用戰略上的精明，來加成戰術上勤奮所能收獲的戰果，當是我們對未來的期許。

參考文獻

1. http://ghgrule.epa.gov.tw/organization/division_4.asp，2017/11/5 查找。
2. Erickson, P. and Tempest, K. (2015) Keeping Cities Green: Avoiding Carbon Lock-in due to Urban Development, Stockholm Environment Institute Working Paper No. 2015-11.
3. http://enews.epa.gov.tw/enews/enews_ftp/104/1117/174044/ 中華民國（臺灣）「國家自定預期貢獻」（INDC）（核定本）.pdf，2017/11/5 查找。
4. 理查·塞勒、凱斯·桑思坦（2014）推出你的影響力：每個人都可以影響別人、改善決策，做人生的選擇設計師，時報出版。
5. 唐內拉·梅多斯（2016）系統思考，經濟新潮社。
6. 泰勒·科文（2012）大停滯：全球經濟陷入漸凍，如何擺脫困局？早安財經。
7. 行政院研究發展考核委員會究發展考核委員會（2008）我國節能減碳政策檢討與規劃，REDCREDC-RES-097-022（政策建議書）。
8. 行政院節能減碳推動會秘書處（經濟部）（2010）國家節能減碳總計畫（核定本）。
9. http://web3.moeaboe.gov.tw/ecw/reduceco21/content/ContentLink.aspx?menu_id=2469，2017/11/5 查找。
10. http://enews.epa.gov.tw/enews/fact_Newsdetail.asp?InputTime=1040615163027，2017/11/5 查找。
11. http://web3.moeaboe.gov.tw/ecw/populace/news/News.aspx?kind=2&menu_id=56&news_id=2565，2017/11/5 查找。
12. <https://www.epa.gov.tw/public/Data/732814335571.pdf>，2017/11/5 查找。



室內空氣品質改善策略 — 通風換氣

劉肇昫／國立台北科技大學環境工程與管理研究所 博士候選人

曾昭衡／國立台北科技大學環境工程與管理研究所 教授

有鑑於每人每天約 90% 的時間處於室內，室內空氣品質之良窳，直接影響國民工作品質及健康。一般而言，造成室內空氣品質不良主因之一為室內通風效率不佳。通風 (Ventilation) 與換氣 (Air Exchange)，是藉著機械或自然的方法將室外新鮮空氣送入室內，同時排除室內的溼氣、異味、熱及污染物等，以維護室內空氣品質及衛生舒適的要求。通風換氣之關鍵不僅為室內外空氣的置換率，還包含室內空氣的流動性，是維持良好室內空氣品質的重要手法之一。

室內通風換氣之重要性

當建築室內通風效率不佳，以致無法有效移除室內空氣中的污染物質，長時間下來會對室內人員的呼吸系統與心血管等系統造成嚴重的損害。眾多研究發現，對空氣品質較敏感的人，需要更高的空氣換氣量，不當的實施節約能源措施而減少引入室外新鮮空氣，恐誘發過敏和病態建築症候群。增加室外空氣量和長時間供應新鮮空氣，可稀釋室內累積之污染物濃度，有效減少病態建築症候群的發生 (Seppanen *et al.*, 1999)。

通風換氣設計通則

通風換氣基本原則應達到下列幾點：(1) 供給充分外氣、(2) 稀釋污染物質、(3) 除去污染源、(4) 調整空間壓力控制氣流進出、(5) 削減部分熱負荷、(6) 排除臭氣等目的 (內政部建築研究所，2007)。通風換氣量 (Air Changes per Hour, ACH) 與空氣交換效率 (Air Exchange Efficiency, AEE) 共同考量下所得之有效通風換氣量，與室內污染物濃度具有高度相關性 (李彥頤，2004)。

室內通風換氣的方式分為全面通風和局部通風兩種，全面通風又稱稀釋通風，為整個空間進行換氣達到稀釋污染源，改善室內空氣品質。局部通風則是在污染物的產生地點，將污染空氣收集而排至室外，或直接向局部空間供給新鮮空氣。針對污染源位置進行通風時，常設置小型抽風設備，局部通風具通風效果佳，風量節省等優點。

室內通風設計原則

依促成空氣流動的方式區分，通風可分為自然通風和機械通風。所謂自然通風的動力是室內外空氣溫度差或壓力差所產生的，機械通風則是藉由風扇裝置引入送回風空氣或排氣管線之空調系統所形成的空氣流動。

自然通風

自然通風基礎理念

自然通風是透過外部風產生之壓力差，或室內外溫度差產生之浮力作為驅動力，促使建築內部氣流的自然流動，進而達到調節溫溼度和換氣的目的。裝設紗網於窗戶及通風處，可降低引入室內之粉塵量。易產生污染物的空間，如：廚房、廁所，盡可能避免設立於迎風面。減少室內不必要的隔間，避免空間中有死角的產生。此外，室內可搭配風扇，有效增加空氣的循環，保持氣流的流動性及增加體感的舒適性。對於自然通風的室內環境中，一般以 1.0 m/s 以下的氣流速度讓居住者感到最舒適。

建築設計與運用自然通風，需考量季節氣候特性，再評估風口的設計方向。在臺灣一年之中通常有數個月可利用自然通風 (周伯丞，2000)，這些時機主要分佈於春、秋兩季，夏季因外部氣溫較高，自然通風時機要更審慎考慮，以免造成空調耗能增加，必要時可結合機械式空調系統進行通風換氣。風向不利於自然通風時，開口部可搭配水平或垂直導風板等裝置增加自然通風效率。

空氣入口、出口與路徑

建築開口部的型態、位置、面積大小等，深深影響自然通風之效益。平面或剖面上不同開口部之配置，皆影響房間換氣效率及換氣路徑。如將進氣口與排氣口設置距離過近，易造成空氣短路（Short Circuiting）現象，而其他區域則形成死域（dead zone），空氣滯留不利換氣。為使空氣均一循環，開口位置最好位於相對側，並錯開配置（江哲銘，1997）。

通風路徑為增進室內自然通風效率之最佳方法，通風路徑可分成單側、相鄰側、相對側及多側（圖1）。前兩者（a、b）較難使新鮮外氣進入室內遠端而排除遠端污染，單側通風時可設計上下開口，兩者間的距離與換氣效果成正比；後兩者（c、d）可使氣流似活塞流的方式，將室內髒空氣擠出，有較佳空氣置換率，而當室內形成貫流通風路徑時，迎風面之開口設計於低處，背風面設計於高處，會有較佳的換氣效率。

通風路徑會受到室內空間尺寸影響（圖2），單側或相鄰側通風路徑開窗之空間，室間深度在2.5倍室內淨高以內者，且其中屬於相鄰側通風路徑者，其室內窗戶所連接之空間需能與外在空氣直接流通；相對側或多側通風路徑開窗之空間，室間深度在5倍室內淨高以內者，且至少有一扇室內窗戶所連接之空間能與外在空氣直接流通。

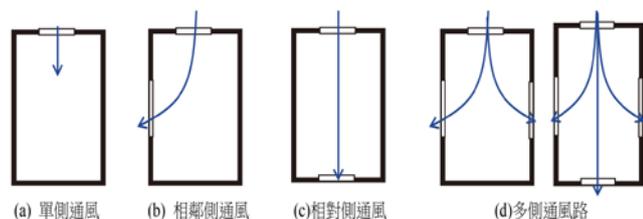


圖1 不同類型之通風路徑（內政部建築研究所，2007）

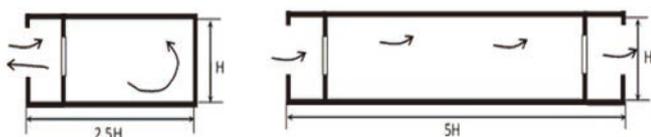


圖2 建築尺寸與通風效果之相關性

提升自然通風效率

國內的相關研究（陳念祖，2007）亦指出，冬季為避免冷風直入室內，可選用高架地板置換式自然通風方式。於高架地板適當的位置設置沖孔地板（通氣

口），由地板下引入自然風，再由沖孔地板的開口進入室內。適當的高架地板換氣方式，可使空氣交換效率比氣窗的方式增加約10%。

適當的導風板輔助，亦有助於自然通風。水平導風板具有：(1) 隔絕熱輻射減少室內熱負荷量、(2) 可自然採光、(3) 隔音、(4) 防風擋雨等功能。導風板構造對氣流有顯著的影響性，導風板之寬（深）度、密度及傾斜角度皆為影響因子（江永哲及梁大慶，1996）。相關研究（江哲銘等，2008）指出裝設水平導風板有助於提升室內換氣率，且導風板深度越大，換氣效果越好，但綜合考慮換氣次數、風擊不滿意度（Draft Rate, DR）及室內熱移除效益，建議水平導風板深度範圍介於18~48 cm。強調「健康性（換氣性）」時，導風板深度可設為36~48 cm；強調「舒適性」時，導風板深度可設為18~36 cm。而裝設垂直導風板較利於平行窗面之氣流引入（陳念祖等，2007），於特定風向時，可使室內氣流變得較均勻，不易有風擊產生。

機械通風

機械通風基礎理念

機械通風不受自然條件的限制，可依需求進風和排風，獲得穩定的通風效果。機械通風之外氣入口應設於空氣清潔的地方，例如引入高樓層頂樓之外氣，需避免任何污染源頭接近外氣入口。而室外空氣供給至室內前，應先過濾除去塵埃、細菌、花粉等污染物。某些場合常兼用機械通風和自然通風，室外空氣經淨化過濾網和溫溼度調節的空調設備後，由風管輸送到各房間內。回風則經排風口吸入回風管道，部分排出室外，部分再與室外新鮮空氣混合後繼續使用。回風系統應確保不是放置於污染物產生源的空間內或鄰近區域，同時須配適當過濾系統，確保循環空氣不會含有大量污染物，並僅以室外空氣便足夠稀釋。

機械通風之設置可設計為正壓換氣及負壓換氣（表1），正壓換氣場所如出入口大廳或停車場電梯廳內配送冷氣（空間內呈現正壓），可阻擋車輛廢氣；負壓換氣場所如吸菸區（室）、高感染性病房或廁所，利用氣流抽引（空間內呈現負壓），將空間內污染物、病毒或異味抽離並收集處理，避免污染擴散。如此藉由正、負壓控制能更有效地控制室內外的空氣污染物，當室

內維持正壓時能避免受污染之空氣流入室內，當室內維持負壓時則可補進新鮮空氣來降低室內空氣污染物濃度，維持室內空氣的品質。

表 1 常見機械換氣形式

	第一種機械換氣	第二種機械換氣	第三種機械換氣
室內／外壓力	等壓	正壓	負壓
風機放置處	外氣進氣口及排氣口	外氣進氣口	排氣口
圖例			

風扇 (Fan) 為常見的機械通風設備，負責供給系統中空氣流動所需的能量。風扇形式有離心式 (Centrifugal type) 和軸流式 (Axial type) 兩種，離心式風扇之靜壓高且噪音小，其中以機翼形 (Air Foil) 葉片的後傾式 (Backward) 風扇，為一低噪音且高效風扇。軸流式風扇在葉輪直徑、轉速相同的情況下，風壓比離心式低，噪音則較高，主要用於系統阻力小的通風系統。軸流式風扇優點為體積小、安裝簡便。

空調系統

建築物常依其室內空間規模設計空調系統型式，不同空調系統型式之系統維護管理原則及室內空氣污染特徵相關，可區分為中央空調系統及個別空調系統，常見之空調系統設計如圖 3 所示。特定空調系統除具有冷房功能外，同時兼具外氣引入的能力，因此，宜優先挑選能引入外氣空調系統作為建築機械換氣設備。

常見中央空調系統種類可分為：(1) 全氣式中央空調箱 (Air Handling Unit, AHU)、(2) 全水式送風盤管單元 (Fan Coil Unit, FCU)。其中，全水式空調系統不具外氣引入功能，因此常搭配外氣引入系統同時使用。空調系統引入室外新鮮空氣之方法，可歸納為以下幾種類型；(1) 自然通風、(2) 中央空調箱機房、(3) 獨立外氣風管、(4) 外氣預冷空調箱、(5) 全熱交換器。全熱交換氣可提供室內大量新鮮空氣，換氣效果佳，且於換氣過程中可進行室內、外空氣熱交換。藉由室內抽引至室外的低溫空氣與室外較高溫之新鮮外氣進行溫度轉換，使引入之外氣溫度降低，減少室內空調運轉負荷，達到提供新鮮空氣及環保節能之效用，避免夏季時用電量增加。

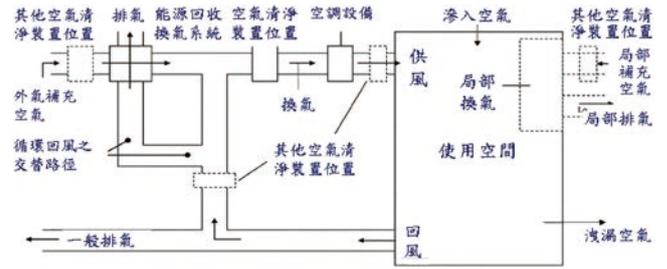


圖 3 機械通風系統示意圖 (勤益科技大學王輔仁老師提供)

個別空調系統型式可分為窗型、分離式及箱型冷氣機等，其中分離式冷氣機與小型送風盤管單元之型式相似，無法引入外氣；箱型冷氣機如採風管型式設計，則其型式與小型中央空調箱相似。箱型冷氣機可配合使用區域需求，運用出入銜接風管型式，將處理後之空氣送入空調使用區，並將空調使用區之空氣送回箱型冷氣機。

結語

全球追求節能減碳的趨勢下，應優先考慮自然通風為主，機械通風為輔。規劃設計通風設施時，需評估建築物特性、氣候環境及地理位置。於新建建築或裝修時，應考量規畫室內格局，設計為可進行自然通風之空間，以達通風換氣時也可兼顧節能之效果。進行通風換氣時，需注意室外污染物濃度及溫度影響，位於街道馬路旁側之建築物，於交通尖峰時段間應避免將門窗開啟，以減少室外汽、機車廢氣流入室內，必要時可於通風系統中增加過濾設備。

參考文獻

- 2015 年綠建築評估與解說手冊 (2015)，內政部建築研究所。
- Seppanen, O.A, W.J. Fisk, and M.J. Mendell (1999), Association of ventilation rates and CO₂ concentrations with health and other responses in commercial and institutional buildings, *Indoor Air*, vol. 9, pp. 226-252.
- 江永哲、梁大慶 (1996)，導風板防風柵防風效果之風洞試驗，中華水土保持學報，第 27 卷，第 2 期，第 85-96 頁。
- 江哲銘 (1997)，建築技術規則有關通風條文增修訂之研究，內政部建築研究所。
- 江哲銘、陳念祖、周伯丞、李彥頤、連憶菁 (2008)，水平導風板對室內自然通風之效益研究，中華民國建築學會建築學報，第 64 期，第 83-102 頁。
- 周伯丞 (2000)，建築軀殼開口部自然通風效果之研究，國立成功大學建築研究所博士論文。
- 陳念祖 (2001)，高架地板置換式自然通風對室內通風效率之影響，國立成功大學建築研究所碩士論文。
- 行政院環保署室內空氣品質資訊網，<http://iaq.epa.gov.tw/indoorair/>。



環境中新興污染物之檢測與探索

周佩欣／國立成功大學環境工程學系 副教授

自古至今，化學物質是人類日常生活中不可或缺的一部分，例如用於治療疾病的藥物，或是添加在商品中的防腐劑、抗菌劑、防火阻燃劑等人工合成物質，不僅能保護人類健康，也提升了生活的便利程度。然而，廣泛且大量使用化學物質的生活方式，使得人類活動產生之各式廢水組成成分複雜。若污水未經妥善處理即排放至環境中，不僅會造成天然水體污染，也可能進而威脅飲用水水源之水質安全。

近年來，經由人類污水排放之新興污染物（Emerging contaminants）逐漸受到重視。新興污染物，另名為新興關切污染物（Contaminants of emerging concern），係指未受管制標準列管，但可能具有危害性的物質。其包羅萬象，如藥物與個人保健用品、管制藥品、工業用奈米物質與化學物質、抗藥性基因等皆可能被納入新興污染物的範疇^[1]。這些物質在過去可能較少於自然水體中測得，或是毒理特性尚未明朗，因此其污染問題未獲關注。然而，隨著微量分析技術的進步與毒性試驗的開發，新興污染物的環境流布與健康風險也引起注意，部分污染物也陸續被增列為法規管制對象。本文將以新興污染物中的內分泌干擾物質（Endocrine disrupting chemicals）為例，說明檢測內分泌干擾物質的分析手法，與探索環境中內分泌干擾物質的未來研究趨勢。

內分泌干擾物質的種類與環境流布

內分泌干擾物質為可藉由影響體內荷爾蒙合成、分泌、傳輸、結合、代謝等功能來擾亂生物體內分泌系統之化合物^[2]。天然的內分泌干擾物質，如動物性雌激素雌酮（Estrone, E1）與雌二醇（17 β -Estradiol, E2）若大量進入環境，則可能對其他生物造成危害^[3]。合成的內分泌干擾物質包括類（抗）荷爾蒙藥物、農藥、塑膠添加劑、界面活性劑、殺菌劑等日常生活中經常接觸的化合物，其中有部分物質已因其毒性問題而被禁用或以其他物質取代，例如早期曾用來預防流產之合成類雌激素己烯雌酚，已因為具致癌性而被禁止使用^[4]。E1、E2、及口服避孕藥乙炔雌二醇（17 α -Ethinylestradiol, EE2）、塑膠添加劑雙酚 A（Bisphenol A, BPA）、界面活性劑壬基酚（Nonylphenol, NP）、抗菌劑三氯沙（Triclosan, TCS）、防腐劑對羥基苯甲酸甲酯（Methyl paraben, MeP）等具內分泌干擾活性之物質為常於環境中測得之內分泌干

擾物質，其於污水處理廠出流水及表面水中的濃度範圍介於數奈克至數十微克／升之間^[5-14]。雖然濃度極其微量，但已具影響水中生物健康的風險。此外，E2、EE2、BPA、NP 等物質亦曾於飲用水水源中被檢出，因此已分別被美國環保署及日本厚生勞動省列為飲用水污染物候選清單（Contaminant candidate list）與要檢討項目（Items for further study）之中^[15, 16]。

內分泌干擾物質的檢測

常見的內分泌干擾物質檢測法分為定性與定量兩種。定性法為將生物、微生物或細胞暴露於環境樣本中進行毒性測試，可量測污染物混合存在下之複合內分泌干擾活性。舉例來說，將魚體暴露於環境樣本中時，可藉由觀察存活率、第二性徵變化、產卵數、生殖腺指數、卵黃前質生成等數值變化，來評估其內分泌系統功能是否有受到干擾^[17]。然而，以活體生物進行實驗耗時長且成本高，相較之下使用微生物或細胞



之體外毒性試驗具有操作簡單並迅速之優點，故較常應用於環境樣本內分泌干擾活性之篩檢^[18, 19]。例如使用細胞株或酵母菌為載體之報導基因試驗法，其中轉殖入特定之激素受體基因、受體反應元件以及含有報導基因序列之質體，試驗機制為當內分泌干擾物質進入細胞與受體結合後，會再與質體上的反應元件反應誘發下游基因表現，分析其生成之報導基因蛋白量可推估樣本之內分泌干擾活性。常用之報導基因包括會產生 β -半乳糖苷酶之 Lac Z 報導基因、冷光酶報導基因、與綠螢光蛋白報導基因等^[20-22]。

定量法為使用高靈敏度的分析儀器量測樣本中目標內分泌干擾物質之濃度。由於環境樣本成分複雜，為降低基質效應影響並提高分析精確度，在偵測儀器前端通常會再加上層析儀器，以依據物化特性分離環境樣本中的不同污染物。液相層析儀或氣相層析儀搭配質譜偵測器為常用於環境檢測的分析利器，其分別適用於非揮發性／半揮發性物質與半揮發性／揮發性物質。層析之機制為藉由固定相管柱滯留與移動相（溶劑或氣體）帶動待測物質的能力差異來分離樣本中的複雜成分。質譜之原理則是將待測物質離子化後，使用質量分析器以電場或磁場篩選不同質量／電荷比的離子，並於質量偵測器進行分析。環境檢測上常使用串聯式質譜儀，亦即以第一個質量分析器篩選目標物質離子，並以第二個質量分析器來分離離性氣體碰撞後產生之碎片離子，可大幅降低偵測下限^[23]。

新興內分泌干擾物質的未來研究趨勢

使用前述之毒性測試法與質譜技術來分析環境樣本中的內分泌干擾物質時，常發現質譜儀測得之已知污染物無法完整解釋樣本中的內分泌干擾活性，顯示環境中尚存有未鑑定之內分泌干擾物質。新興內分泌



干擾物質可能是毒性尚未被確認之新興污染物，也可能是來自於已知內分泌干擾物質在污水處理流程或環境中生成之衍生產物。以 BPA 為例，於硝化生物處理單元中生成之硝化 BPA 的類雌激素活性雖較 BPA 低，然而卻具有對魚體較強之基因毒性及致突變性^[24-26]。此外，研究指出暴露於 BPA 氯化衍生物中會使得雌鼠子宮重量明顯增加，活體外毒性試驗亦證實單氯與雙氯 BPA 較 BPA 有更強之類雌激素活性^[27]。

未來隨著法規的日趨嚴格與新穎處理技術的開發，經由污水排放之內分泌干擾物質或許能得到良好的控制，然而若不同時考量這些污染物於淨水、污水處理流程中，尤其是末端消毒程序中生成之衍生產物的毒性影響，將無法完整評估其可能造成之環境風險。因此，檢測內分泌干擾物質衍生產物之環境流布與宿命實為往後研究之重要課題。期待未來毒性試驗法的持續開發搭配分析儀器靈敏度之提升，能協助研究者更加完整評估與鑑定環境樣本中的主要內分泌干擾物質，以保護環境及人類健康。

參考文獻

1. Noguera-Oviedo, K. and Aga, D. S. (2016), "Lessons learned from more than two decades of research on emerging contaminants in the environment," *Journal of Hazardous Materials*, Vol. 316, pp. 242-251.
2. Kavlock, R. J., Daston, G. P., DeRosa, C., Fenner-Crisp, P., Gray, L. E., Kaattari, S., Tilson, H. A. (1996), "Research needs for the risk assessment of health and environmental effects of endocrine disruptors: a report of the U.S. EPA-sponsored workshop," *Environmental Health Perspectives*, Vol. 104 (Supplement 4), pp. 715-740.
3. Chang, H. S., Choo, K. H., Lee, B., Choi, S. J. (2009), "The methods of identification, analysis, and removal of endocrine disrupting compounds (EDCs) in water," *Journal of Hazardous Materials*, Vol. 172, pp. 1-12.
4. Birnbaum, L. S. and Fenton, S. E. (2003), "Cancer and devel-

- opmental exposure to endocrine disruptors,” *Environmental Health Perspectives*, Vol. 111, pp. 389-394.
5. Servos, M., Bennie, D. T., Burnison, B. K., Jurkovic, A., McInnis, R., Neheli, T., Schnell, A., Seto, P., Smyth, S. A., Ternes, T. A. (2005), “Distribution of estrogens, 17 β -estradiol and estrone in Canadian municipal wastewater treatment plants,” *Science of the Total Environment*, Vol. 336, pp. 144-170.
 6. Viglino, L., Aboufadel, K., Prevost, M., Sauve, S. (2008), “Analysis of natural and synthetic estrogenic endocrine disruptors in environmental waters using online preconcentration coupled with LC-APPI-MS/MS,” *Talanta*, Vol. 76, pp. 1088-1096.
 7. Cargouet, M., Perdiz, D., Mouatassim-Souali, A., Tamisier-Karolak, S., Levi Y. (2004), “Assessment of river contamination by estrogenic compounds in Paris area (France),” *Science of the Total Environment*, Vol. 324, pp. 55-66.
 8. Vulliet, E., Wiest, L., Baudot, R., Grenier-Loustalot, M.-F. (2008), “Multi-residue analysis of steroids at sub-ng/L levels in surface and ground-waters using liquid chromatography coupled to tandem mass spectrometry,” *Journal of Chromatography A*, Vol. 1210, pp. 84-91.
 9. Gorga, M., Petrovic, M., Barcelo, D. (2013), “Multi-residue analytical method for the determination of endocrine disruptors and related compounds in river and waste water using dual column liquid chromatography switching system coupled to mass spectrometry. *Journal of Chromatography A*, Vol. 1295, pp. 57-66.
 10. Yu, Y., Wu, L. S., Chang, A. C. (2013), “Seasonal variation of endocrine disrupting compounds, pharmaceuticals and personal care products in wastewater treatment plants,” *Science of the Total Environment*, Vol. 442, pp. 310-316
 11. Bertanza, G., Pedrazzani, R., Dal Grande, M., Papa, M., Zambarda, V., Montani, C., Steimberg, N., Mazzoleni, G., Di Lorenzo, D. (2011), “Effect of biological and chemical oxidation on the removal of estrogenic compounds (NP and BPA) from wastewater: an integrated assessment procedure,” *Water Research*, Vol. 45, pp. 2473-2484
 12. Lishman, L., Smyth, S. A., Sarafin, K., Kleywegt, S., Toito, J., Peart, T., Lee, B., Servos, M., Beland, M., Seto, P. (2006), “Occurrence and reductions of pharmaceuticals and personal care products and estrogens by municipal wastewater treatment plants in Ontario, Canada,” *Science of the Total Environment*, Vol. 367, pp. 544-558.
 13. Yu, Y., Huang, Q., Wang, Z., Zhang, K., Tang, C., Cui, J., Feng, J., Peng, X. (2011), “Occurrence and behavior of pharmaceuticals, steroid hormones, and endocrine-disrupting personal care products in wastewater and the recipient river water of the Pearl River Delta, South China,” *Journal of Environmental Monitoring*, Vol. 13, pp. 871-878.
 14. Kasprzyk-Hordern, B., Dinsdale, R. M., Guwy, A. J. (2009), “The removal of pharmaceuticals, personal care products, endocrine disruptors and illicit drugs during wastewater treatment and its impact on the quality of receiving waters,” *Water Research*, Vol. 43, pp. 363-380.
 15. United States Environmental Protection Agency (USEPA), <http://water.epa.gov/drink/contaminants/>
 16. Ministry of Health, Labour and Welfare, Japan, <http://www.mhlw.go.jp/>
 17. Naderi, M., Wong, M. Y., Gholami, F. (2014), “Developmental exposure of zebrafish (*Danio rerio*) to bisphenol-S impairs subsequent reproduction potential and hormonal balance in adults,” *Aquatic Toxicology*, Vol. 148, pp. 195-203.
 18. Kawanishi, M., Takamura-Enya, T., Ermawati, R., Shimohara, C., Sakamoto, M., Matsukawa, K., Matsuda, T., Murahashi, T., Matsui, S., Wakabayashi, K., Watanabe, T., Tashiro, Y., Yagi, T. (2004), “Detection of genistein as an estrogenic contaminant of river water in Osaka,” *Environmental Science & Technology*, Vol. 38, pp. 6424-6429.
 19. Giesy, J. P., Hilscherova, K., Jones, P. D., Kannan, K., Machala, M. (2002), “Cell bioassays for detection of aryl hydrocarbon receptor (AhR) and estrogen receptor (ER) mediated activity in environmental samples,” *Marine Pollution Bulletin*, Vol. 45, pp. 3-16.
 20. Legler, J., van de Brink, C. E., Brouwer, A., Murk, A. J., van de Saag, P. T., Vethaak, A. D., van de Burg, B. (1999), “Development of a stably transfected estrogen receptor-mediated luciferase reporter gene assay in the human T47D breast cancer cell line,” *Toxicological Science*, Vol. 48, pp. 55-66.
 21. Houtman, C. J., Sterk, S. S., van de Heijning, M. P. M., Brouwer, A., Stephany, R. W., van der Burg, B., Sonneveld, E. (2009), “Detection of anabolic androgenic steroid abuse in doping control using mammalian reporter gene bioassays,” *Analytica Chimica Acta*, Vol. 637, pp. 247-258.
 22. Nagy, S. R., Sanborn, J. R., Hammock, B. D., Denison, M. S. (2001), “Development of a green fluorescent protein-based cell bioassay for the rapid and inexpensive detection and characterization of ah receptor agonists,” *Toxicological Science*, Vol. 65, pp. 200-210.
 23. 台灣質譜學會 (2016) · 「質譜分析技術原理與應用」 · 全華圖書 · 台北。
 24. Masuda, S., Terashima, Y., Sano, A., Kuruto, R., Sugiyama, Y., Shimoi, K., Tanji, K., Yoshioka, H., Terao, Y., Kinae, N. (2005), “Changes in the mutagenic and estrogenic activities of bisphenol A upon treatment with nitrite,” *Mutation Research-Genetic Toxicology and Environmental Mutagenesis*, Vol. 585, pp. 137-146.
 25. Toyozumi, T., Deguchi, Y., Masuda, S., Kinae, N. (2008), “Genotoxicity and estrogenic activity of 3,3'-dinitrobisphenol A in goldfish,” *Bioscience, Biotechnology, and Biochemistry*, Vol. 72, pp. 2118-2123.
 26. Sun, Q., Li, Y., Chou, P.-H., Peng, P.-Y., Yu, C.-P. (2012), “Transformation of bisphenol A and alkylphenols by ammonia-oxidizing bacteria through nitration,” *Environmental Science & Technology*, Vol. 46, pp. 4442-4448.
 27. Takemura, H., Ma, J., Sayama, K., Terao, Y., Zhu, B. T., Shimoi, K. (2005), “In vitro and in vivo estrogenic activity of chlorinated derivatives of bisphenol A,” *Toxicology*, Vol. 207, pp. 215-221. 



水中爆破破碎法於城市採礦之應用

王立邦／國立台北科技大學環境工程與管理研究所 助理教授

資源處理技術中破碎及粉碎之目的為提高回收對象物的單體分離度，以利後續的物理選別及化學冶金程序。傳統的機械破碎法係針對破碎對象物進行均一性的破碎，對於組成及構造皆複雜化的人工廢棄物較難適用，亦或需投入更多的破碎能量。本文介紹一嶄新的破碎方法—水中爆破破碎法，其可對破碎對象物進行零組件別的選擇性破碎，有效率地達成單體分離。本文介紹水中爆破破碎法的原理、於城市採礦之應用時機、以及從馬達轉子中分解回收鈦鐵硼磁鐵的破碎應用實例。

前言

隨著科技的發展，智慧型手機、平板電腦等各類 3C 電子產品不斷推陳出新，使生活更為便利。而各種電子產品的生產製造，都需要使用貴金屬或稀有金屬等各種金屬作為原料。而地球上金屬礦物資源的產地集中於少數國家地區，且由於經濟快速成長，資源物質被大量開發，致使資源逐漸枯竭。另一方面，各種電子產品使用壽命終了後，形成大量人工廢棄物，排放至環境中，亦增加地球環境之負荷與污染。為邁向永續發展之社會，促進資源物質之循環利用，減輕地球環境之污染負荷，從廢電子產品等人工廢棄物中回收有價金屬，亦即城市採礦（Urban mining），在近年來逐漸受到重視。

從人工廢棄物中回收金屬的程序，與從礦物中生產金屬的過程類似，亦即：破碎 → 選別 → 冶煉，其中破碎的目的為減少礦物或人工廢棄物的大小與體積，使其中的對象金屬與雜質解離，提高回收對象金屬的單體分離度。於破碎階段如能使回收對象金屬盡可能地分離獨立出來，將有助於提升後續的物理選別及化學冶煉等程序的效果，並節省處理成本。

傳統針對礦物的破碎設備，如碎礦機、磨礦機等，係利用機械破碎方法，減少礦物的大小與體積，破碎後得到的礦物粒子大小較為均一，但獲得的破碎

物中含有各種成分，屬於非選擇性破碎，如圖 1(a) 所示。此類破碎方式對於組成、材質、構造皆複雜的人工廢棄物，較難適用，亦或需投入更多的破碎能量。對於人工廢棄物，依其不同材質進行破碎，亦即選擇性破碎，使破碎物中含有單一材質，如圖 1(b) 所示，更為重要。本文所介紹的水中爆破破碎法，可對於人工廢棄物進行選擇性破碎，達到零組件別分離的效果。

水中爆破破碎法原理

水中爆破破碎法顧名思義，於水中進行爆破。將炸藥和破碎對象物置於水中，利用炸藥的爆轟產生的衝擊波和爆炸生成氣體，對破碎對象物進行破碎的方法。藉由改變炸藥量及炸藥與破碎對象物的距離，可容易調節爆破威力。較常應用於如港灣、河海的水下工程施作，或軍事上的彈藥試爆等。水中爆破破碎法的炸藥和破碎對象物的配置方式如圖 2 所示，炸藥可

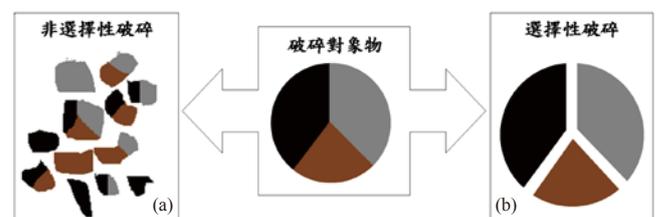


圖 1 (a) 非選擇性破碎與 (b) 選擇性破碎示意圖

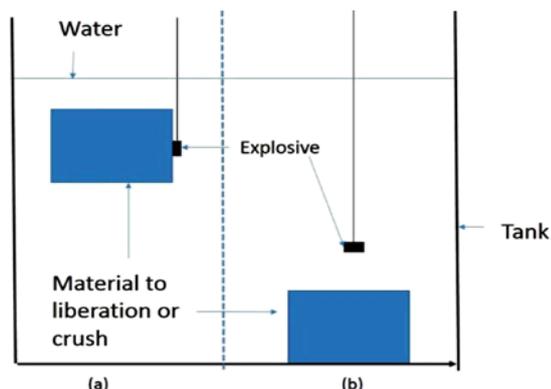


圖 2 炸藥與破碎對象物配置方式示意圖

與破碎對象物直接接觸連接 (a)，或與破碎對象物相隔一定距離 (b)，進行爆破。一般而言，前者適用於堅硬材質的破碎，後者適用較易破碎的材質。

與於空氣中進行的爆破相比，因水的密度比空氣大，壓縮性比空氣低，故爆炸的能量傳遞在水中較空氣中為有效。此外，爆炸產生的噪音及震動等可局限於水中，對環境的衝擊影響較低。將此破碎方法應用於人工廢棄物的破碎時，衝擊波於所作用的對象物的界面產生反射，並產生拉應力。當不同密度的材料複合接着時，可於不同密度的材料界面產生剝離，因而具有機械破碎所沒有的選擇性破碎效果。

水中爆破破碎法應用於廢棄手機的破碎實例如圖 3 所示。手機係由金屬及塑膠等各種不同零件材料所組合而成，如利用傳統的機械破碎方法，將無法達成零組件別的選擇性破碎。利用水中爆破破碎法，可沿著不同材料的接合處進行破碎，使金屬與塑膠等不同材質有效分離，而達到零組件別的破碎分離效果，有利於後續的選別及冶煉等分離回收程序。例如利用酸進行金屬的浸出溶解時，可減少酸的使用量，提高處理效果，並減少成本。

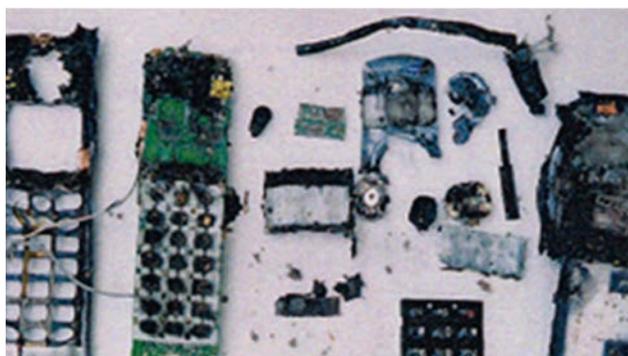


圖 3 水中爆破破碎後的手機

水中爆破破碎法的應用時機

水中爆破破碎法可適用於以下幾類人工廢棄物的破碎：

1. 機械破碎困難的超硬材料的破碎：

如碳化鎢 (WC) 等廢棄超硬合金的破碎。

2. 需大量處理的人工廢棄物的解體分解：

如廢棄電子機械製品、廢棄鋼筋混凝土、塑膠和金屬、電路板和組裝零件等的大量解體分解。藉由調整炸藥量及與破碎對象物的距離，可避免造成過度破碎、粉碎。

3. 危險物質的破碎和分解：

如電池類等以機械方式進行破碎時，會發生爆炸或產生有害物質者，可將爆炸或有害物質的衝擊危害侷限於水中。

應用水中爆破破碎法進行馬達轉子中鈹鐵硼磁鐵的分解回收

以下介紹筆者實際從事，利用水中爆破破碎法從馬達轉子中分解回收鈹鐵硼磁鐵的破碎應用實例。

含有稀土金屬的鈹鐵硼磁鐵，已廣泛使用於油電混合車和電動車用的馬達、大型空調和冷凍庫的壓縮機用的馬達中。當這些汽車空調家電等使用壽命終了後，從其馬達轉子中回收鈹鐵硼磁鐵，做為稀土金屬的二次資源，甚為重要。惟馬達轉子甚為堅硬，構造複雜，利用傳統的機械破碎方法進行破碎非常困難，目前僅能利用人工進行拆解，費工費時。利用水中爆破破碎法，可有效地從馬達轉子中瞬間且大量分解回收鈹鐵硼磁鐵，其流程如圖 4 所示。

將分離式冷氣機的室外壓縮機的外殼切開 (a)，並將和壓縮機連結的回轉軸以機械式切斷後，取出馬達轉子 (b)。轉子內部構造為在回轉軸方向為積層式的鋼片，鈹鐵硼磁鐵嵌入內部貫通其中。於馬達的中心，塞入約 10 g 炸藥後 (c)，裝上電氣式雷管 (d)。將破碎對象物的馬達轉子、炸藥和雷管所形成的整套實驗物，吊於圓筒形不銹鋼水槽 (直徑 1.8 m、水深 1.5 m)，並置於其中心部 (e)。於水槽下部配置回收網，爆破後將其拉起回收破碎物。炸藥的起爆為使用瞬間啟動爆發的電氣式雷管，以遠隔通電起爆。

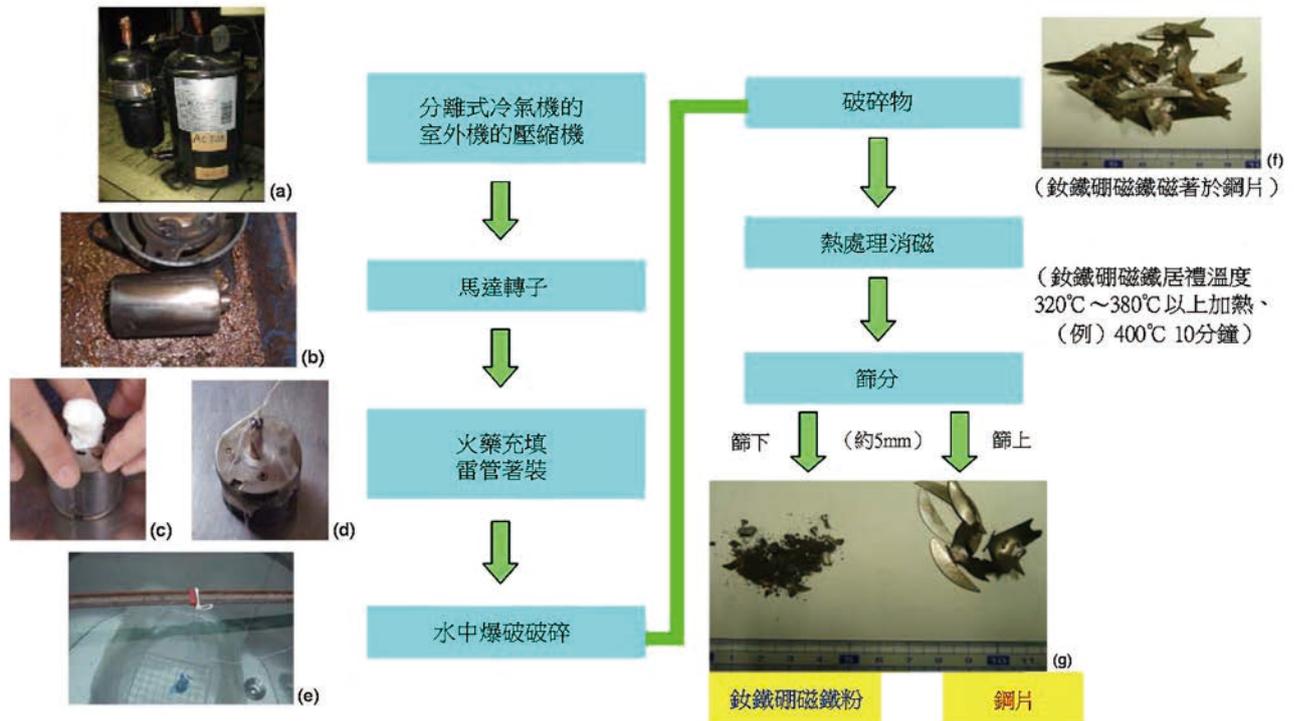


圖 4 利用水中爆破破碎法從馬達轉子中分解回收鈹鐵硼磁鐵的流程

水中爆破破碎後，轉子的積層鋼片一片片地分離，因鈹鐵硼磁鐵破碎後仍具有磁性，故磁著於鋼片 (f)。鈹鐵硼磁鐵的居禮溫度 (Curie temperature，亦即消磁溫度) 約 320°C ~ 380°C，故將磁著在一起的鈹鐵硼磁鐵粉和鋼片的破碎物放入 400°C 的電氣爐中 10 分鐘，將鈹鐵硼磁鐵粉消磁。待冷卻後，將破碎物過 5 mm 篩，篩下物 (g 左) 為鈹鐵硼磁鐵粉、篩上物 (g 右) 為鋼片，而將鈹鐵硼磁鐵粉和鋼片分別回收。鈹鐵硼磁鐵粉可進行後續冶煉程序回收鈹等稀土金屬。

以上確認應用水中爆破破碎法從馬達轉子中分解回收鈹鐵硼磁鐵的可行性。藉由調整水中爆破破碎的條件，將可以處理更大型更大量的馬達轉子。

結語

水中爆破破碎法可對破碎對象物進行選擇性破碎，對於組成、構造皆複雜的人工廢棄物，可達到零組件別破碎分離的效果。對於今後日亦增加且組成構造更為複雜的人工廢棄物，做為從人工廢棄物中進行資源回收的程序的一環，水中爆破破碎法於破碎的應用值得期待。

惟需特別留意的是，水中爆破破碎法應用於人工廢棄物破碎的實際操作具有危險性，需由擁有操作炸

藥經驗的專業技術人員，於特定設施場所進行，以確保安全性。

誌謝

本文部分圖片由日本東京大學工學系研究科藤田豐久教授及日本工機株式會社村田健司博士提供，特此致謝。

參考文獻

1. 村田健司、加藤幸夫、柴山敦、藤田豐久，「リサイクルのための水中での爆破粉碎法」環境資源工学会シンポジウム「リサイクル設計と分離精製技術」第 12 回建設廢材リサイクル促進のための分離精製技術、2006、pp. 18-21。
2. 藤田豐久，「水中爆破を用いたリサイクル前処理のための各種廢棄物の剝離による単体分離」ケミカルエンジニアリング、2010、Vol. 55、No. 10、pp. 764-769。
3. 王立邦、Gjergj Dodbibba、岡屋克則、藤田豐久、村田健司、川野誠、藤垣雄一，「モーター中の希土類含有永久磁石の水中爆破破碎による分離」資源・素材 Vol. 2011、No. B/C/S、pp. 199-200、2011.9.26-29 (大阪府立大学)。
4. Li Pang Wang, Wei Sheng Chen, Chih Mei Chou, Kenji Murata, Toyohisa Fujita: Applying Underwater Explosion for the Liberation of Neodymium Magnet Rotor Followed by Thermal Treatment for Recycling, Materials Transactions, Vol. 57, No. 9, pp.1664-1666 (2016).



應用循環經濟評估臺灣水泥製造業 協同處理一般廢棄物之發展

陳映竹／國立臺北大學自然資源與環境管理研究所 副教授

臺灣地狹人稠且能資源有限，積極創造再生能源已列為國家重點發展政策。目前國內部分縣市面臨垃圾去化管道之問題。水泥製造業之窯體高溫環境特別適合發展協同處理技術，本初步研究結果發現，水泥製造業協同處理一般廢棄物有 4.23 kg CO₂-eq/kg 的溫室氣體減量成果，總節省成本可達美金 26.98 百萬元。

依據臺灣廢棄物清理法定義，廢棄物可分為「一般廢棄物」與「事業廢棄物」兩類，其中「一般廢棄物」俗稱為「生活垃圾」，國際常稱為「都市固體廢棄物」(municipal solid waste, MSW)。臺灣一般廢棄物年產量自 1988 年近 900 萬公噸逐年降低至今 2016 年近 750 萬公噸(環保署, 2017)，可見相關廢棄物源頭減量及再利用之政策成效。臺灣現有營運中 24 座垃圾焚化廠，其每座設計容量介於 50 ~ 1,800 公噸/天，總設計容量為 24,650 公噸/天，足夠處理國內產生之一般廢棄物量。其中，設計容量大於 1,000 公噸/天之焚化廠大多座落於五都及人口密集之縣市，其他縣市恐面臨垃圾去化管道之問題，原因包括經濟成本考量、政治因素、市場機制等因素。臺灣一般廢棄物之含水率約 50% 且濕基低位發熱量 (lower heating value, LHV) 高於 2,000 kcal/kg (環保署, 2017)，其性質屬適合以熱處理之原料。

歐盟建議之廢棄物管理層級，依序優先為源頭減量 (avoidance)、再使用 (reuse)、再利用 (recycle)、能源回收

(energy recovery) 以及最終處置 (disposal) 5 個層級 (圖 1)。廢棄物轉製能源 (waste-to-energy, WTE) 層級介於「源頭減量」及「最終處置」之間，為廢棄物無法「源頭減量」時建議之處理技術。歐盟定義之廢棄物轉製能源 (waste-to-energy, WTE) 包含「協同處理 (co-processing)」、「焚化具備能源回收 (R1)」以及「焚化不具備能源回收 (disposal; D10)」3 類 (ECOFYS, 2016)。上述 24 座垃圾焚化廠皆具備能源回收設備，總設計值可年產 558.5 百萬瓦之能源，發電量高達 31 億度電，除可提供廠內利用，還可返售台灣電力公司賺取利潤。然而，臺灣「協同處理」之發

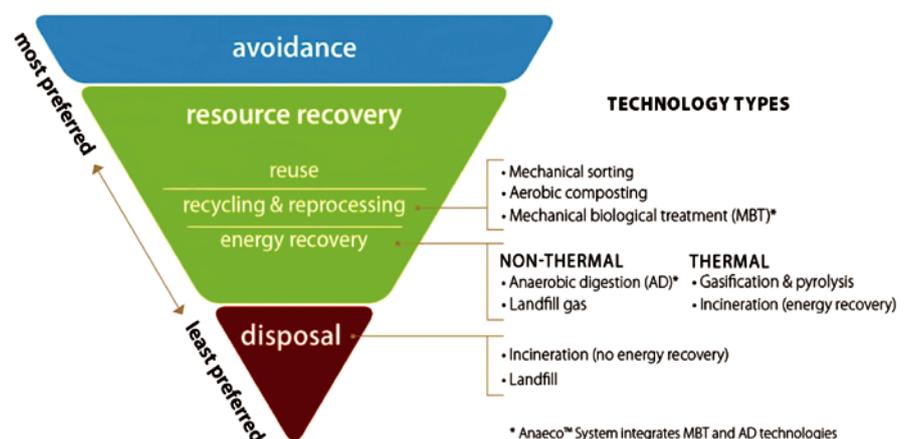


圖 1 歐盟廢棄物管理層級

展卻仍處於試驗階段，國際上水泥製造業協同處理一般廢棄物已實施多年，且成效評估多屬對環境具正面效益。舉例來說，紐西蘭和瑞士應用水泥窯協同處理一般廢棄物的替代率已高達 83% 和 43% (Murray and Price, 2008)，鄰近臺灣之日本及北京的替代率也分別為 15.5% 和 60%。臺灣應順應此國際趨勢，著手研究並提出適合我國國情之水泥製造業協同處理一般廢棄物之處理方法，提供相關策略建議。

協同處理定義為應用廢棄物替代原生(燃)料，減少資源及非再生化石能源之使用 (Stafford *et al.*, 2015)。水泥製造業屬於高耗能、資源之產業，其窯體之高溫環境特別適合發展協同處理技術。水泥製造業常使用煤炭、石油焦以及天然氣等化石燃料，提供熱能給窯體升溫 (Rahman *et al.*, 2015)。面臨化石燃料之非再生性、成本高漲等問題，迫使國際水泥製造業者趨向於應用替代燃料 (alternative fuel, AF) 替代部分化石燃料，以達循環經濟並兼顧環境保護之目標。目前一般廢棄物 (MSW)、肉骨粉 (meat and bone animal meal, MBM)、下水污泥 (sewage sludge, SS)、生質能 (biomass)、廢棄輪胎 (end-of-life tyres, ELT) 於水泥窯中協同處理之發展已相當普遍 (Kara, 2012)，其中部分學者提出一般廢棄物作為替代燃料於水泥窯中協同處理仍具相當多元且可期待之發展 (Rahman *et al.*, 2015)。

臺灣水泥製造業歸屬於「非金屬礦物製造業」的水泥及水泥製品製造業中。2015 年營運中家數為 32 家，提供 2,468 人就業機會 (工業技術研究院, 2017)。2016 年臺灣水泥產量僅 1,213 萬公噸 (占全球不到 0.3%)，其中台灣水泥公司年產量 6,300 萬公噸，全球排名第 8 名 (含國內外產量) (工業技術研究院, 2017)，可見台灣水泥製造業位居全球水泥市場之重要性。然而，水泥製造業面臨之挑戰包括「減緩氣候變遷 (abate climate change)」、「改善廢棄物管理 (improved waste management)」以及「實現循環經濟 (achieve a circular economy)」 (ECOFYS, 2016)。鑑此，本研究團隊收集相關文獻，以臺灣某水泥廠之公開資料為例，評估一般廢棄物於 5 種替代率之情境下作為替代燃料之「溫室氣體減量」及「節省成本」成果 (表 1)：(1) 文獻回顧得知煤炭的熱值為 26.75 MJ/kg，一般廢棄物

之熱值為 13.15 MJ/kg (Wagland *et al.*, 2011)。因此一般廢棄物作為替代燃料率愈高，其溫室氣體排放量愈少，最高溫室氣體減量 4.23 kg CO₂-eq/kg，假設以 2016 年通過之「溫室氣體減量與管理法」罰則中最高每公噸新台幣 1,500 元之價格估算溫室氣體減量效益，節省金額高達美金 18.13 百萬元。(2) 一般替代燃料可接受的價格為美金 24 元 (Kara, 2012)。案例水泥製造業每年花費約新台幣 11.54 億元於採購煤炭作為燃料，若替代部分為一般廢棄物，其可節省高達美金 8.85 百萬元之成本。加總節省之燃料成本及碳稅成本，總節省成本可高達美金 26.98 百萬元。

表 1 本研究評估一般廢棄物作為替代燃料之「溫室氣體減量」及「節省成本」成果

替代燃料	替代率 (%)	溫室氣體排放量 (kg CO ₂ -eq/kg fuel)	節省燃料成本 (USD)	節省碳稅成本 (USD)	總節省成本 (USD)
一般廢棄物	0	8.14	0	0	0
	35	5.88	3,259,842	6,679,650	9,939,492
	50	5.24	4,656,907	9,542,400	14,199,307
	75	4.42	6,985,367	14,313,650	21,299,017
	95	3.91	8,848,130	18,130,600	26,978,730

依據上述研究初步成果，發現水泥製造業可謂為落實「以循環經濟落實溫室氣體減量」之示範產業。全球水泥製造業排放的溫室氣體量占人為排放溫室氣體量之 5~6%，主要來自燃燒過程及石灰石鍛燒過程 (Benhelal *et al.*, 2013; Garcia Gusano *et al.*, 2015)，其導致 4% 的全球暖化現象加劇 (Wall *et al.*, 2009)。IPCC 建議之排放係數為製造每噸水泥熟料 (clinker) 會產生 520 公斤溫室氣體 (IPCC, 2006)。減少水泥製造業的溫室氣體排放可從「改變使用化石燃料種類」、「應用替代燃料」或「改善窯體運作管理」3 個方向著手 (Kajaste and Hurme, 2016)。使用一般廢棄物取代化石燃料可有效減少溫室氣體排放 (Mokrzyckia *et al.*, 2003; Genon and Brizio, 2008; Hashimoto *et al.*, 2010; Cheung *et al.*, 2006)，本研究計算結果也有 4.23 kg CO₂-eq/kg 的「溫室氣體減量」成果。相關研究預估從水泥製造業著手減量 10% 之溫室氣體排放，2050 年可減少 0.4 千兆公噸的溫室氣體排

放，減緩全球暖化效應 (Kara, 2012)。

2015 年歐盟執行委員會接受一項循環經濟之行動計畫，其指出產品的生命週期需要納入更多的循環經濟思維與行動，如製造二次再生的產品。在協同處理製造水泥之過程中，結合替代燃料與傳統化石燃料以獲得所需之能量，可減少成本支出並降低環境衝擊，如英國每年製造 100 萬公噸水泥熟料的成本約 213.1 百萬歐元 (García-Gusano, 2015)，本研究以一般廢棄物作為替代燃料也有高達美金 26.98 百萬元的「節省成本」成果。此外，二氧化碳捕捉與貯存技術 (CO₂ capture and storage) 之建設成本約為 300 百萬歐元，每捕捉 1 公噸的二氧化碳約再支出 24~75 歐元的成本 (Benhelal *et al.*, 2013)。國際預估 2020 年每 1 公噸碳稅價錢介於 20~47 歐元 (van den Broek *et al.*, 2011)，本研究引用 2016 年通過之「溫室氣體減量與管理法」罰則中最高每公噸新台幣 1,500 元之價格估算溫室氣體減量效益，其略高於國際預估價格。然而，水泥廠之建設成本變動彈性不大的情況下，從營運與維護 (operational and maintenance, O&M) 成本著手降低經濟衝擊，是比較容易執行且具顯著效果的。

本報導及初步研究成果，試以循環經濟角度評估臺灣水泥製造業協同處理一般廢棄物之發展，其不僅有助於「溫室氣體減量」及「節省成本」，也可解決廢棄物去化管道之問題，減緩臺灣目前面臨之環境挑戰與困境。然而，相關技術發展及潛在之環境成本、污染仍須更進一步之研究確立，以達兼具環境保護與經濟發展之雙贏局勢。

參考文獻

- 工業技術研究院 (2017)。水泥業在循環經濟角色的探討，2017 水泥業提升能源效率研討會，台北。
- 行政院環境保護署 (2017)。環保統計年報。行政院環境保護署，台北。
- Benhelal, E., Zahedi, G., Shamsaei, E., Bahadori, A. (2013), Global strategies and potentials to curb CO₂ emissions in cement industry. *J. Clean. Prod.* 51, 142-161.
- Cheung, W.H., Choy, K.K.H., Hui, D.C.W., Porter, J.F., McKay, G. (2006), Use of municipal solid waste for integrated cement production. *Dev. Chem. Eng. Mineral Process* 14, 193-202.
- ECOFYS (2016), Market opportunities for use of alternative fuels in cement plants across the EU. ECOFYS, Netherlands.
- García-Gusano, D., Cabal, H., Lechon, Y. (2015), Long-term behavior of CO₂ emissions from cement production in Spain: scenario analysis using an energy optimization model. *J. Clean. Prod.* 99, 101-111.
- Genon, G., Brizio, E. (2008), Perspectives and limits for cement kilns as a destination for RDF. *Waste Manage.* 28, 2375-2385.
- Hashimoto, S., Fujita, T., Geng, Y., Nagasawa, E. (2010), Realizing CO₂ emission reduction through industrial symbiosis: a cement production case study for Kawasaki. *Resour. Conserv. Recycl.* 54, 704-710.
- IPCC (2006), 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Cambridge University Press, Cambridge, UK and NY, NY.
- Kajaste, R., Hurme, M. (2016), Cement industry greenhouse gas emissions – management options and abatement cost. *J. Clean. Prod.* 112, 4041-4052.
- Kara, M. (2012), Environmental and economic advantages associated with the use of RDF in cement kilns. *Resour. Conserv. Recycl.* 68, 21-28.
- Mokrzyckia, E., Uliasz-Boche czyk, A., Sarna, M. (2003), Use of alternative fuels in the polish cement industry. *Appl. Energy* 74, 101-111.
- Murray, A., Price, L. (2008), Use of Alternative Fuels in Cement Manufacture: Analysis of Fuel Characteristics and Feasibility for Use in the Chinese Cement Sector. Ernest Orlando Lawrence Berkeley National Laboratory Report No: LBNL-525E.
- Rahman, A., Rasul, M.G., Khan, M.M.K., Sharma, K.S. (2015), Recent development on the uses of alternative fuels in cement manufacturing process. *Fuel* 145, 84-99.
- Stafford, F.N., Viquez, M.D., Labrincha, J., Hotza, D. (2015), Advances and challenges for the co-processing in Latin American cement industry. *Procedia Mater. Sci.* 9, 571-577.
- van den Broek, M., Veenendaal, P., Koutstaal, P., Turkenburg, W., Faaij, A. (2011), Impact of international climate policies on CO capture and storage deployment illustrated in the Dutch energy system. *Energy Policy* 39, 2000-2019.
- Wagland, S.T., Kilgallon, P., Coveney, R., Garg, A., Smith, R., Longhurst, P.J., Pollard S.J.T., Simms, N. (2011), Comparison of coal/solid recovered fuel (SRF) with coal/refuse derived fuel (RDF) in a fluidised bed reactor. *Waste Manage.* 31, 1176-1183.
- Wall, T., Liu, Y., Spero, C., Elliott, L., Khare, S., Rathnam, R. et al. (2009), An overview on oxyfuel coal combustion – state of the art research and technology development. *Chem. Eng. Res. Des.* 87, 1003-1016. 



應用 活性覆蓋法 針對 污染底泥中 有害物質溶出 抑制介紹

丁 昱／國立臺灣大學環境工程學研究所 碩士生
席行正／國立臺灣大學環境工程學研究所 教授

人類活動造成大量廢水排放至自河川中，並藉由沉降或逕流污染土壤、底泥，及地下水體。底泥環境因而為有害污染物之最終匯聚地，造成嚴重生態環境與人體健康之風險。傳統整治工法中，以疏浚法、傳統覆蓋法，及生物監測復育法較為可行，但每種方法皆有許多限制，使整治作業相當困難。活性覆蓋法為較新型之整治工法，能有效降低污染物是出於水體中之潛勢，且兼具成本較低廉、環境破壞小等特點。國內目前尚無相關整治案例，因此本文整理近十年來活性覆蓋法於國外研究之實績，探討不同活性材料與施工方法之異同，最後討論未來尚需產、官、學、研等單位共同努力之方向，以期此技術能應用於我國底泥整治技術之列。

底泥污染問題簡介

近數十年來，人類活動造成大量工業、農業，及都市廢水排放至河川，並在全球各地造成嚴重的底泥污染問題。由於底泥為複雜有機物之結合物，能與重金屬（e.g. Pb, Cr, Hg）和有機污染物（e.g. PCBs, PAHs, DDT）等有害物質有相當強之吸附能力，因此當此有害物質由廢水排放至河川時，底泥環境如河川、湖泊，出海口等便成為這些物質之最終匯聚地。然而，經由底泥環境中物理化學作用，部分底泥中之有害物質可能釋出至水體中，造成環境生態風險，以及當人類食用受污染之魚類或是飲用水源時，便容易造成健康危害之風險。除了危害人體健康，受污染之底泥亦有可能危害濕地之生態功能，包括自淨作用等，並危害底棲生態系。

在美國，約有 70% 底泥環境因為污染造成對人類使用該區水源造成健康之威脅^[1]。而在台灣，行政院環保署自民國 86 年起便陸續整合水質保護處、環境監測

及資訊處、環境衛生及毒物管理處及環境檢驗所等相關部門進行跨部門河川底泥污染物調查^[2]，並發現在調查之 27 條中央縣市河川中，其中約有 1/3 達到嚴重污染之層級。在其中認定之 11 條重點河川中，有 7 條河川（包括淡水河、南崁溪、老街溪、濁水溪、新虎尾溪、北港溪、急水溪、鹽水溪二仁溪、阿公店溪及愛河）之底泥有不同程度之 Pb, Cr, Cd, Cu, Zn, Hg, Ni, Mn 等重金屬超過底泥品質管制標準上限值，另外，淡水河與二仁溪亦有偵測到部分區段多環芳香烴超標^[2]。

底泥問題具有迫切性並應立即採取控制措施，但由於許多困難點，使污染底泥之管理與整治遲遲無法有效進行。傳統整治工法利用疏浚法挖除底泥可將有害物質永久挖除，但由於：(1) 鉅額之整治成本；(2) 挖除作業使底泥污染物的再懸浮；(3) 底泥整治作為後可能產生的二次污染；(4) 底泥棲地破壞，此四項因素使疏浚法令人卻步，而對環境傷害較少且成本較低之現地整治方法，又由於：(1) 法規的完善性；(2) 長期風險控制之不確定性尚無法有效施行。

目前全球針對底泥議題之典範為以風險為基礎之底泥管理策略，因而延伸出底泥品質指標（Sediment Quality Guideline, SQGs）作為底泥風險之判定與整治目標。底泥品質指標可以定義為有害物質於底泥環境中影響生態健康之風險閾值^[3]，其污染濃度之制定可藉由毒性實驗之數值回歸或藉由污染物理論分配係數，或結合二者^[4]，除此之外，亦須綜合整治時之經濟面^[5]制定可行之指標。我國目前土壤及地下水污染整治法（以下簡稱土污法）已涵蓋底泥管理，並將底泥污染指標物分為四類：重金屬（8項）、有機化合物（19項）、農藥（8項），其他有機化合物（6種）並制定品質指標之上限值及下限值^[5]，並根據土污法建立管理架構（圖1），惟目前尚無相關整治措施之指引。底泥整治相關法規目前以歐美國家以及日本發展較為完善，而其中美國、加拿大、德國、荷蘭、比利時，及日本等國家對於底泥管理已經具備完整系統架構，多種整治手段（例如：疏濬法、覆蓋法、固化法等）皆有完整之規範或指引^[6]，可供我國參考。

底泥整治技術之發展

底泥整治之議題日益為政府、學界與研究單位重視，因而有許多底泥整治方法逐漸被開發並驗證，但多數工法皆存在一些限制或缺點。另外，在選用工法時除了該工法對整治污染物之成效外，尚需考量其他相關影響包括整治過程對於環境之影響。又底泥環境之特殊性使整治效用因地而異，種種挑戰使底泥整治在實務操作上相當困難，目前在經濟上、政策上，環境上皆具可行性且較為泛用之整治工法相當缺乏。

底泥整治技術可由是否挖除底泥區分為現地處理法（in-situ）與離地處理（ex-situ）。離地處理（ex-situ）為常見之底泥處理技術，其優勢為能將污染物一次性移除，但必須負擔挖除底泥之龐大成本^[7]，而一些水深較深之底泥環境因為操作困難，可行性低。離地處理需先以疏浚工法將底泥挖除，再配合其他處理工法。一些積極之處理方法能將污染物從底泥中分離，例如使用化學淋洗法或熱處理法能有機污染物或汞分離出底泥，但其成本較高且另外將製造大量廢氣或廢

水需要額外處理。另外，固定化法利用水泥等膠結劑將底泥中污染物穩定化而不致釋出，但其缺點為製造大量固體廢棄物，且處理後之廢棄物需長期監測溶出風險^[8]。玻璃化法將底泥高溫熔融成玻璃化產物，對比固化法其產生廢棄物較少且產物較穩定^[9]，但其鉅額的成本通常為業者所無法負擔。除此之外，另有其他成本較低之消極作為例如海拋或封閉性掩埋，但此作法對環境破壞大，於今日高漲之環保意識下較無可行性。

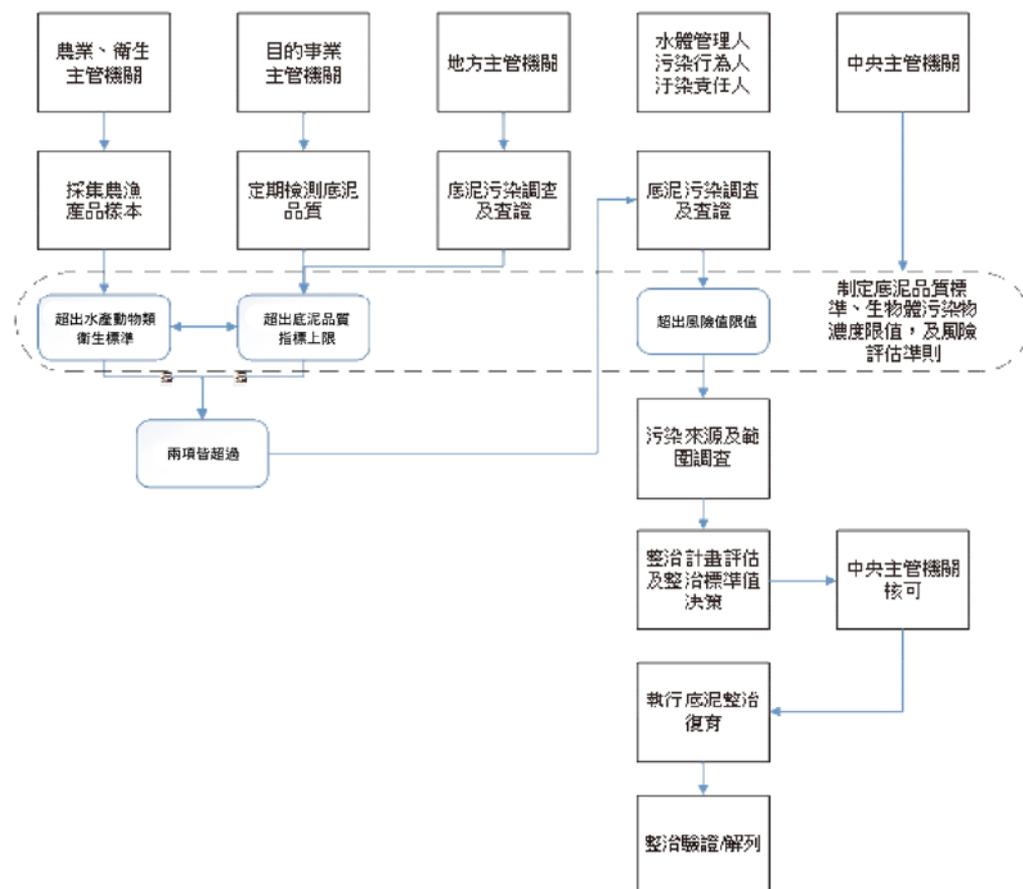


圖1 我國土污法中規範之底泥管理架構

現地處理技術相較於離地處理技術，因不需挖除底泥而節省大量整治支出，但也因為不挖除底泥，整治期間需考量到對於周圍環境之影響及考量整治後之控制以避免二次污染。現地監測復育是較為消極之現地處理方法，利用微生物本身之自淨作用降低污染物於底泥之生物可及性，其優點為整治經費極低，但僅適用於低污染無立即風險之地區。微生物復育利用添加微生物菌劑或營養液促進微生物生長，目前國內外均有許多研究探討微生物降解多氯聯苯、多環芳香烴等有機污染物^[10]，惟目前較少實場化研究，其降解成效有待後續研究驗證。傳統覆蓋法利用鋪設砂層隔絕污染底泥與水體，能有效減低污染物釋出至水體之風險，為較成熟之現地整治工法，具有實場規模研究，其優勢為整治高污染濃度之底泥場址具可行性，且比起離地整治方法成本較低又於水深較深之污染地區較具可行性，但缺點是在鋪灑砂石時仍需大量成本，且並非所有案例皆能達到降低風險之整治目標^[11]。

在台灣，底泥整治尚處於起步階段。美國目前針對成熟之底泥整治技術已有詳盡之規範與指引。美國 EPA 發布之 Contaminated Sediment Remediation Guidance for Hazardous Waste Sites 指引中，列舉疏浚法、現地監測復育，及現地覆蓋法為較為成熟之整治工法。目前底泥整治工作仍然是耗時且高成本之作業，使底泥整治工作困難重重，未來仍仰賴各界開發更有效且省錢之整治工法。而活性覆蓋法為近年有望達成此目的之新型整治工法。

活性覆蓋法簡介

活性覆蓋法跟傳統覆蓋法不同之處，在於利用活性吸附材料而非傳統覆蓋法之砂石作為覆蓋層鋪設於底泥表層。當 PCB、PAH、DDT 或 Hg 等有害物質從底泥中釋出時，便會吸附於底泥表層之活性材料中，藉由物理化學吸附機制將污染物穩定化以達到減低有害物質生物有效性，進而降低危害風險，而傳統覆蓋法利用砂土吸附能力較低，多以延遲機制減緩有害物質釋出。活性材料具有較強吸附能力使覆蓋層厚度需求降低，進而節省大量成本，理論上活性覆蓋層之厚度僅需傳統覆蓋法之 1%（約 12 mm）之覆蓋層即可取得相當好之成效^[12,13]。實場研究也逐漸證實活性覆蓋法

能有效隔離並降低表層水中之有害物質通量達 5 年之久^[14]，活性覆蓋法應用於底泥整治相當具備潛力。

活性覆蓋法之概念最初由 1999 年的 Jacob 與 Froster^[15] 提出，將活性阻絕層與傳統式覆蓋法結合，提出利用沸石鋪設於汞污染底泥表層已達到阻絕重金屬汞進入水體。爾後，Zimmerman *et al.*^[16] 發現活性碳能有效降低底泥中 PCBs 和 PAH 之生物有效性。由於 PCBs 與 PAH 為底泥中常見且具有高毒性之有害物質，因此許多學者開始從事研究活性碳材以整治 PCBs、PAH，及 DDT 等有機物污染底泥，並從實驗室規模之研究逐步延伸至實場研究^[12]，目前全球已有超過 25 個相關實場研究案例^[17]。相關實場研究案例如表 1 所示。

覆蓋材料與施作工法

在選用可供活性覆蓋法之吸附材料時，需考量材料之整治效果與應用在實場時成本可接受者。材料的比表面積、顆粒大小、孔徑大小分布、孔隙率，還有表面的官能基群等為其重要之基本參數，皆與其吸附污染物之能力、選擇性、穩定性有相當大之關聯。材料成本與環境外部成本亦為選用吸附材料時之重要考量，利用生質廢棄物無氧燒結之生物炭可做為良好之吸附材料^[26]，並除了節省成本外，具有廢棄物再利用之意義。以下簡介幾種可行性較高之活性材料。

活性碳是一種經過熱解碳化再經過活化反應，形成高比表面積碳材，一般高品質之活性碳比表面積約 500 ~ 1500 m²/g。活性碳因為高比表面積、高孔隙體積、多樣的孔徑大小、多樣的官能基、廢棄物再利用及價格便宜等等特點，使活性碳成為深具吸引力的吸附材料，並常應用在去除廢水中有機污染物和臭味以及淨化空氣^[11]。活性碳材料的製作逐漸發展成熟且商業化，廠商可因應顧客需求製作不同孔徑特性，使活性碳在實場應用更具有彈性。除了活性碳本身的吸附能力，也可藉由材料改質改變其表面特性，例如藉由高溫硫化增加活性碳表面硫官能基，硫官能基能與汞形成化學吸附而增加活性碳對重金屬汞的吸附效果^[27]。另外，利用氧化鐵含浸方法可使活性碳增加磁性，可讓材料在吸附污染物後回收利用^[28,29]。近年來，底泥污染與整治議題越來越迫切，利用活性碳整治底泥與一般土壤的想法也逐漸在許多實驗中印證，活性

表 1 活性覆蓋法應用於實場研究案例

地點	目標污染物	施工方法	整治成效簡述	文獻
Hunters Point Shipyard, 美國	PCBs	將 (~3.7%) 活性碳混入底泥深度達一英尺	施作七個月後, PCB 於蛤蠣體內減少 62%。	[18]
South Basin, 美國	PCBs	將 (2.0 ~ 3.2%) 活性碳混入底泥深度達約 30 ~ 40 cm	施作 18 個月後 PCB 於表層水之濃度減少 90%	[19]
Hunters Point Shipyard, 美國	PCBs	將 (~3.7%) 活性碳混入底泥深度達一英尺	被動式採樣器之 PCB 濃度減少 73%	[14]
Trondheim Harbor, 挪威	PAHs、PCBs	以活性碳與黏土、細沙不同組合, 預拌成漿狀 (slurry) 後直接施加於底泥	活性碳與黏土之覆蓋層在 9 ~ 12 個月之間污染物通量降低最多。生物多樣性並無顯著影響	[20]
Eidangerfjord and Ormerfjord, 挪威	dioxin、呔喃	以 (2%) 活性碳與黏土混合, 預拌成漿狀 (slurry) 後直接施加於底泥	20 個月施作期間, 孔隙水中減少低氯數 PCB 至 > 90%, 八氯數 PCB 則減少 60 ~ 70%	[21]
Eidangerfjord and Ormerfjord, 挪威	PCBs、呔喃	以 (2%) 活性碳與黏土混合, 預拌成漿狀 (slurry) 後直接施加於底泥	2 年施作期後, 無活性覆蓋層污染物通量減少 70 ~ 90% 而活性覆蓋層減少 50 ~ 60%。3 ~ 5 年後, 活性覆蓋層污染物通量減少 80 ~ 90%, 無活性覆蓋層則減少 20 ~ 60%	[22]
St. Lawrence River, 美國	PCBs	將 2 種活性碳以噴灑、混和、注射三種方式覆蓋於底泥表面。	3 年操作期間, 底棲生物之 PCB 生物累積量下降 69 ~ 93%, 孔隙水中濃度則減少 93%。	[23]
Lower Canal Creek, 馬里蘭, 美國	汞、PCBs、DDT	將活性碳 (SediMite®) 以噴灑器直接噴灑	10 個月操作期間, PCBs 與 DDT 生物累積量顯著下降, 甲基汞下降約 50%。	[24]
Grenland fjords, 挪威	汞、戴奧辛	以活性碳與黏土、萊姆石混和不同比例製備之活性覆蓋層, 直接施加於底泥中	活性碳覆蓋層將生物多樣性於 14 個月中減少 90%。無活性碳之覆蓋層則影響較低。	[25]

碳除了能用來整治底泥中持續性有機污染物 (persistent organic pollutant, POPs) [20,30], 對於重金屬汞的吸附能力也相當高 [31]。雖然活性碳是一項價格低廉, 吸附效果顯著的吸附材料, 但對環境生物也可能產生一些環境壓力, Janssen and Beckingham [32] 發現活性碳應用在底泥中可能會對底泥生物產生環境壓力, 但此現象只在小於 20% 實驗樣本中發現。

除了活性碳, 還有許多材料都被研究在汞污染底泥整治上具有潛力, 生物炭 (biochar) 即是其中之一。製造活性碳的過程中, 將生物質經過碳化但尚未經過活化, 即會產生生物炭。生物炭承襲了活性碳的優點, 擁有高吸附面積和吸附容量, 且可藉由廢棄物利用達到減廢和整治的目的。另外, 生物炭會在土壤中釋出營養鹽, 也能增加土壤的保水力, 以及減少溫室氣體甲烷的釋出 [33]。Gomez-Eyles *et al.* [34] 使用了 13 種生物炭和 4 種活性碳吸附多氯聯苯及重金屬汞, 發現生物炭與活性碳皆有良好的吸附效率, 其中又以活性碳效果較佳。

黏土是小於 2 mm 粒徑無機礦物的通稱, 是另一項具有潛力的吸附材料。天然黏土多由層狀矽酸鹽組

成, 其主要成分有矽、鋁、鐵、鈣、鎂等等。良好的熱穩定性和離子吸附能力讓黏土也有成為吸附材料的潛力 [35]。另外, 也有人將黏土進行改質變成有機黏土 (organoclay)。有機黏土被報導出可能吸附能力比改質前的黏土增加 10 ~ 30 倍, 對鉻、砷、鉛、鎘、鋅都有吸附效果 [36-38]。

在實務施作上, 將活性覆蓋材料施加於底泥表層, 可藉由兩種工法執行: (1) 噴灑式薄層覆蓋法 (thin layer capping); 及 (2) 機械式混和覆蓋法 (mechanical mixing amendment)。噴灑式薄層覆蓋法即利用各式噴灑機具將活性材料預拌後直接噴灑於水體中, 待活性材料沉降至底泥表層時即形成薄層之覆蓋層, 再藉由底棲生物擾動作用活性覆蓋層即可混入底泥達到降低孔隙水中有害物質之目的 [20]。噴灑式工法於實務上具有較高之彈性, 在淺水區域及深水區域皆為適用, 且比起機械式混和覆蓋法因不需要底泥中之攪拌裝置而成本較低。Menzie *et al.* [24] 在淺水濕地進行噴灑式工法時使用自製之噴灑器, 由 250 磅進料斗與柴油噴灑裝置組成 (圖 2)。Cornelissen *et al.* [21] 在海灣之深水域 (約 100 公尺) 進行噴灑作業時, 使用船隻備有 275



圖 2 Menzie *et al.* [24] 進行噴灑式薄層覆蓋工法之設備 (Vortex TR Aquatic system)



圖 3 Cornelissen *et al.* [21] 將活性碳、黏土與海水預拌後使用船隻噴灑作業情形

立方米水槽及 500 馬力疏浚幫浦使漿狀活性覆蓋材料預拌，並使用 204 馬力之幫浦搭配彈性管材深入水中 10 公尺進行噴灑 (圖 3)。

過去實驗室研究及模場研究 [23,39] 皆發現無混和之覆蓋層與機械混和之覆蓋層效果差異不大。但若考量其他現地因素，例如要將覆蓋層混入生物作用較為旺盛之底泥深度 (15 ~ 30 cm) 或避免水流造成覆蓋層流失，則可藉由機械式混和覆蓋法增加混和強度。另外，機械式混和覆蓋法雖然會在整治期間造成底泥擾動，但同時也使覆蓋材料分散均勻，可能降低因為施加覆蓋層對於底泥生態之影響 [19,20]。Cho *et al.* [19] 利用機械式混和覆蓋法進行底泥整治，並設計兩套施工系統 (圖 4)。第一種為挖土機裝備轉軸式鬆土機，原為清除沼澤區之水草用，經人工鋪設活性覆蓋層後以此系統混入底泥中。第二種為挖土機裝備注射系統，原用途為注射水泥使底泥固化之裝置，漿狀覆蓋層經預拌後由此設備注射入底泥。

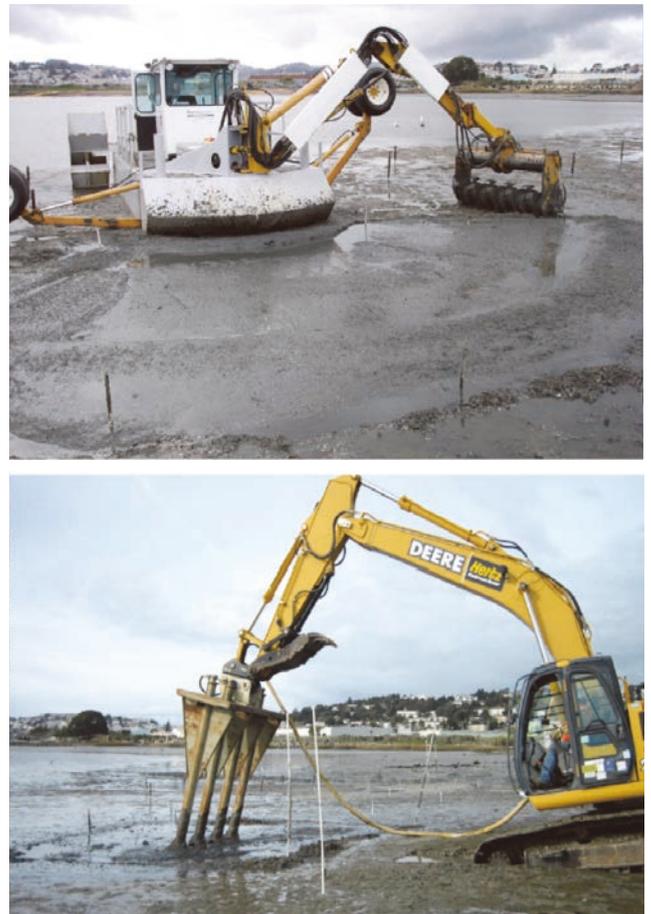


圖 4 Cho *et al.* [19] 利用兩種機具進行機械式混和覆蓋法，(左) 轉軸式鬆土機 (Aquatic Environments, Inc.) 及 (右) 注射式系統 (Compass Environmental, Inc., GA)

挑戰與機會

本文整理近年來以活性覆蓋法進行底泥整治之研究，並由許多實場研究中，證實此工法能有效降低底泥中有害物質釋出與生物累積。底泥整治為相當高成本之整治工作，藉由活性覆蓋法此種具成本可行性、有效性之整治工法，未來應用於實場底泥整治作業將具有相當高的潛力。但同時，由於底泥環境相當複雜，不同場址間的變異性相當大，許多知識鴻溝仍尚需要許多學術及實務方面的努力，甚至法律方面之配套，以期完善活性覆蓋法之整治理論與實務。未來需要完善之工作與挑戰仍多，在此從幾個方面探討：

- 基礎學理方面，有害物質與活性材料之吸附機制理論上需要更深入研究；雖然目前於活性材料，尤其活性碳材吸附有機污染物已有許多研究，但活性材料吸附其他污染物，例如重金屬或新興污染物，尚有於底泥中吸附、穩定化及生物毒性之進一步探討。微生物對於底泥中污染物之行為與降解扮演重要角色，活性覆蓋法對於底泥微生物相之影響至今少有探討，亦需要未來進一步研究。此外，相關底泥質傳模式也漸漸開始發展，模式之持續發展與因應不同環境之調整亦為重要之研究項目。
- 水文地質方面，多數底泥環境受地下水流或橫向水流之影響而侵蝕活性覆蓋層。台灣地勢陡峭河川流速快，如何在橫向水流較大中維持活性覆蓋層穩定，或判斷是否適合使用活性覆蓋法，皆需相對應之研究。
- 施作工法方面，如何降低機械混和式覆蓋法造成之底泥擾動作用，或使噴灑式活性覆蓋法鋪設覆蓋層時更均勻，皆是在實務上之挑戰。另外，以活性碳材為主之活性覆蓋層可能因為比重較低而有沉降性差之問題，如何藉由混和不同材料增加覆蓋層穩定度亦是在實場時容易遇到之問題。
- 生態功能方面，在不同水域中施加活性覆蓋法對於當地生態影響亦會不同，相關研究顯示有些場址整治後並無觀察對生態之不良影響，有些研究則發現活性覆蓋法將大幅減少生物多樣性^[25]。對於活性覆蓋法之施加材料、方式，對於不同生態系之短期影響及長期影響目前皆需要更多實場研究驗證。
- 成本計算方面，除了考量整治操作費用與材料費用，亦需要考慮整治期間之外部成本。近年來，綠色整治^[40]的聲浪逐漸興起，強調以生命週期評估及碳足跡作為整治最佳方案（Best Management

Practice, BMP) 之重要評估工具，使整治工作除了考慮危害風險之降低外，同時亦需考量整治全期是否會造成二次污染，或其他外部影響。

- 法規方面，活性覆蓋法等現地底泥整治工法多以降低人體健康與生態風險為主要目的，而非以降低總量污染。因此土水相關法規需要引入風險管理之工具才能使活性覆蓋法得以應用。我國目前對於污染底泥整治可藉由提出風險管理計畫而得以實現，惟我國於底泥整治方面尚處於發展階段，底泥管理計畫原則、配套措施，以及整治終點設定等等相關規範與指引，皆還有許多進步之空間。

誌謝

本文資料來源與整理經「106 年度土壤及地下水污染整治基金會補助研究與模場試驗專案」(研究編號：PG10605-0106)之研究經費補助始得以完成，特此致謝。

參考文獻

1. Palermo, M.R., Hinchee, R., Porta, A., and Pelli, M. (2001), A state of the art overview of contaminated sediment remediation in the United States. in Proceedings of the International Conference on Remediation of Contaminated Sediments.
2. 行政院環保署 (2013) “底泥污染來源及傳輸模式調查計畫—以重點河川為例”。計畫編號：EPA-100-GA-102-02-A232。
3. Kwok, K.W., Batley, G.E., Wenning, R.J., Zhu, L., Vangheluwe, M., and Lee, S. (2014), “Sediment quality guidelines: Challenges and opportunities for improving sediment management”. *Environmental Science and Pollution Research*, 21(1), pp. 17-27.
4. Wenning, R.J. (2005), Use of sediment quality guidelines and related tools for the assessment of contaminated sediments, SETAC.
5. 行政院環保署 (2012) “底泥品質指標之分類管理及用途辦法限制”。土字第 1000116349。
6. Spadaro, P.A. (2011), “Remediation of contaminated sediment: a worldwide status survey of regulation and technology”. *Terra et Aqua*, 123, pp. 14-23.
7. Council, N.R. (2007), *Sediment dredging at Superfund megasites: Assessing the effectiveness*. National Academies Press.
8. Dermont, G., Bergeron, M., Mercier, G., and Richer-Lafleche, M. (2008), “Soil washing for metal removal: a review of physical/chemical technologies and field applications”. *Journal of Hazardous Materials*, 152(1), pp. 1-31.
9. Wang, J., Feng, X., Anderson, C.W., Xing, Y., and Shang, L. (2012), “Remediation of mercury contaminated sites—a review”. *Journal of Hazardous Materials*, 221, pp. 1-18.
10. Tabak, H.H., Lazorchak, J.M., Lei, L., Khodadoust, A.P., Antia, J.E., Bagchi, R., and Suidan, M.T. (2003), “Studies on bioremediation of polycyclic aromatic hydrocarbon-contaminated sediments: Bioavailability, biodegradability, and toxicity issues”. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 22(3), pp. 473-482.
11. Zhang, C., Zhu, M.Y., Zeng, G.M., Yu, Z.G., Cui, F., Yang, Z.Z., and Shen, L.Q. (2016), “Active capping technology: A new environmental remediation of contaminated sediment”. *Environmental Science and Pollution Research*, 23(5), pp. 4370-4386.

12. Ghosh, U., Luthy, R.G., Cornelissen, G., Werner, D., and Menzie, C.A. (2011), "In-situ sorbent amendments: A new direction in contaminated sediment management". *Environmental Science & Technology*, 45(4), pp. 1163-1168.
13. Olsta, J. (2007), In-Situ Capping of Contaminated Sediments with Reactive Materials, in *Ports 2007: 30 Years of Sharing Ideas: 1977-2007*, pp. 1-9.
14. Cho, Y.M., Werner, D., Choi, Y., and Luthy, R.G. (2012), "Long-term monitoring and modeling of the mass transfer of polychlorinated biphenyls in sediment following pilot-scale in-situ amendment with activated carbon". *Journal of Contaminant Hydrology*, 129, pp. 25-37.
15. Jacobs, P.H., and Förstner, U. (1999), "Concept of subaqueous capping of contaminated sediments with active barrier systems (ABS) using natural and modified zeolites". *Water Research*, 33(9), pp. 2083-2087.
16. Zimmerman, J.R., Ghosh, U., Millward, R.N., Bridges, T.S., and Luthy, R.G. (2004), "Addition of carbon sorbents to reduce PCB and PAH bioavailability in marine sediments: Physicochemical tests". *Environmental Science & Technology*, 38(20), pp. 5458-5464.
17. Patmont, C.R., Ghosh, U., LaRosa, P., Menzie, C.A., Luthy, R.G., Greenberg, M.S., Cornelissen, G., Eek, E., Collins, J., and Hull, J. (2015), "In situ sediment treatment using activated carbon: A demonstrated sediment cleanup technology". *Integrated Environmental Assessment and Management*, 11(2), pp. 195-207.
18. Cho, Y.M., Smithenry, D.W., Ghosh, U., Kennedy, A.J., Millward, R.N., Bridges, T.S., and Luthy, R.G. (2007), "Field methods for amending marine sediment with activated carbon and assessing treatment effectiveness". *Marine Environmental Research*, 64(5), pp. 541-555.
19. Cho, Y.M., Ghosh, U., Kennedy, A.J., Grossman, A., Ray, G., Tomaszewski, J.E., Smithenry, D.W., Bridges, T.S., and Luthy, R.G. (2009), "Field application of activated carbon amendment for in-situ stabilization of polychlorinated biphenyls in marine sediment". *Environmental Science & Technology*, 43(10), pp. 3815-3823.
20. Cornelissen, G., Elmquist Kruså, M., Breedveld, G.D., Eek, E., Oen, A.M., Arp, H.P.H., Raymond, C., Samuelsson, G.R., Hedman, J.E., and Stokland, Ø. (2011), "Remediation of contaminated marine sediment using thin-layer capping with activated carbon: A field experiment in Trondheim Harbor, Norway". *Environmental Science & Technology*, 45(14), pp. 6110-6116.
21. Cornelissen, G., Amstaetter, K., Hauge, A., Schaanning, M., Beylich, B., Gunnarsson, J.S., Breedveld, G.D., Oen, A.M., and Eek, E. (2012), "Large-scale field study on thin-layer capping of marine PCDD/F-contaminated sediments in Grenlandfjords, Norway: Physicochemical effects". *Environmental Science & Technology*, 46(21), pp. 12030-12037.
22. Cornelissen, G., Schaanning, M., Gunnarsson, J.S., and Eek, E. (2016), "A large - scale field trial of thin-layer capping of PCDD/F - contaminated sediments: Sediment - to - water fluxes up to 5 years post - amendment". *Integrated Environmental Assessment and Management*, 12(2), pp. 216-221.
23. Beckingham, B., and Ghosh, U. (2011), "Field-scale reduction of PCB bioavailability with activated carbon amendment to river sediments". *Environmental Science & Technology*, 45(24), pp. 10567-10574.
24. Menzie, C., Amos, B., Driscoll, S.K., Ghosh, U., and Gilmour, C. (2016), "Evaluating the efficacy of a low-impact delivery system for in situ treatment of sediments contaminated with methylmercury and other hydrophobic chemicals". ESTCP Environmental Restoration Project ER-200835. Available from: <http://www.dtic.mil/get-tr-doc/pdf?AD=AD1029719>.
25. Samuelsson, G.S., Raymond, C., Agrenius, S., Schaanning, M., Cornelissen, G., and Gunnarsson, J.S. (2017), "Response of marine benthic fauna to thin-layer capping with activated carbon in a large- scale field experiment in the Grenland fjords, Norway". *Environmental Science and Pollution Research*, 24(16), pp. 14218-14233.
26. Yu, J.G., Yue, B.Y., Wu, X.W., Liu, Q., Jiao, F.P., Jiang, X.Y., and Chen, X.Q. (2016), "Removal of mercury by adsorption: A review". *Environmental Science and Pollution Research*, 23(6), pp. 5056-5076.
27. Li, Z., Wu, L., Liu, H., Lan, H., and Qu, J. (2013), "Improvement of aqueous mercury adsorption on activated coke by thiol-functionalization". *Chemical Engineering Journal*, 228, pp. 925-934.
28. Faulconer, E.K., von Reitzenstein, N.V.H., and Mazyck, D.W. (2012), "Optimization of magnetic powdered activated carbon for aqueous Hg (II) removal and magnetic recovery". *Journal of Hazardous Materials*, 199, pp. 9-14.
29. Miura, O., and Tachibana, S. (2014), "Mercury removal from solution by high gradient magnetic separation with functional group modified magnetic activated carbon". *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 24(3), pp. 1-4.
30. Cornelissen, G., Gustafsson, Ö., Bucheli, T.D., Jonker, M.T., Koelmans, A.A., and van Noort, P.C. (2005), "Extensive sorption of organic compounds to black carbon, coal, and kerogen in sediments and soils: Mechanisms and consequences for distribution, bioaccumulation, and biodegradation". *Environmental Science & Technology*, 39(18), pp. 6881-6895.
31. Gilmour, C.C., Riedel, G.S., Riedel, G., Kwon, S., Landis, R., Brown, S.S., Menzie, C.A., and Ghosh, U. (2013), "Activated carbon mitigates mercury and methylmercury bioavailability in contaminated sediments". *Environmental Science & Technology*, 47(22), pp. 13001-13010.
32. Janssen, E.M.L., and Beckingham, B.A. (2013), "Biological responses to activated carbon amendments in sediment remediation". *Environmental Science & Technology*, 47(14), pp. 7595-7607.
33. Zhang, A., Cui, L., Pan, G., Li, L., Hussain, Q., Zhang, X., Zheng, J., and Crowley, D. (2010), "Effect of biochar amendment on yield and methane and nitrous oxide emissions from a rice paddy from Tai Lake plain, China". *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 139(4), pp. 469-475.
34. Gomez-Eyles, J.L., Yupanqui, C., Beckingham, B., Riedel, G., Gilmour, C., and Ghosh, U. (2013), "Evaluation of biochars and activated carbons for in situ remediation of sediments impacted with organics, mercury, and methylmercury". *Environmental Science & Technology*, 47(23), pp. 13721-13729.
35. Kumar, A.S.K., Kalidhasan, S., Rajesh, V., and Rajesh, N. (2012), "A meticulous study on the adsorption of mercury as tetrachloromercurate (II) anion with trioctylamine modified sodium montmorillonite and its application to a coal fly ash sample". *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 51(35), pp. 11312-11327.
36. Sarkar, B., Xi, Y., Megharaj, M., Krishnamurti, G.S., Rajarathnam, D., and Naidu, R. (2010), "Remediation of hexavalent chromium through adsorption by bentonite based Arquad® 2HT-75 organoclays". *Journal of Hazardous Materials*, 183(1), pp. 87-97.
37. Sarkar, B., Naidu, R., Rahman, M.M., Megharaj, M., and Xi, Y. (2012), "Organoclays reduce arsenic bioavailability and bioaccessibility in contaminated soils". *Journal of Soils and Sediments*, 12(5), pp. 704-712.
38. Oyanedel-Craver, V.A., and Smith, J.A. (2006), "Effect of quaternary ammonium cation loading and pH on heavy metal sorption to Ca bentonite and two organobentonites". *Journal of Hazardous Materials*, 137(2), pp. 1102-1114.
39. Sun, X., and Ghosh, U. (2007), "PCB bioavailability control in *Lumbriculus variegatus* through different modes of activated carbon addition to sediments". *Environmental Science & Technology*, 41(13), pp. 4774-4780.
40. Petruzzelli, G., Pedron, F., Grifoni, M., Barbaferi, M., Rosellini, I., and Pezzarossa, B. (2016), "Soil Remediation Technologies towards Green Remediation Strategies". *World Academy of Science, Engineering and Technology, International Journal of Environmental, Chemical, Ecological, Geological and Geophysical Engineering*, 10(6), pp. 654-658. 



土木工程與自然

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

兩千多年前老子（604BC-531BC）**道德經**（二十五章）遺訓：

「人法地，地法天，天法道，道法自然。」

這段文字之中，**道**這個字，最難有簡單而明確的定義。老子也說：「有物混成，先天地生。寂兮寥兮，獨立而不改，周行而不殆，可以為天下母，吾不知其名，字之曰道。」

這段文字之中的「有物混成」及「先天地生」，就可以判斷所謂的「道」，應該就是「宇宙」（Universe）。宇宙這一名詞，在老子時代還沒出現，所以老子才會說「吾不知其名，字之曰道。」

因此，前面所引用的老子遺訓，試譯如下：

「人遵循地球的法則，地球遵循天的法則，天遵循宇宙的法則，宇宙遵循自然的法則。」

但必須指出，**道**這個字，筆者在**道德經**之中找到 67 次之多，用途廣泛，不只限於定義宇宙。在**林語堂中英對照 — 老子的智慧**（2009 正中書局出版）一書之中，就有英譯為：truth、path、road、art、way、等多種。

天文物理學家對自然界的觀察，大到以**哈伯天文望遠鏡**（Hubble Space Telescope）所觀察的**宇宙內星系**；小到以**大哈得龍對撞機**（Large Hadron Collider，重約 30,000 噸）找到的所謂**上帝的粒子**（The God's Particle）**Higgs bosson**。在法則研究方面，出現**牛頓重力定律**、**愛因斯坦相對論定律**、**量子定律**、**量子重力定律**、等等**自然法則**，（Law of Nature）。

土木工程與自然的交會，主要在**地球表層**（陸地地層、水域、岩漿活動帶、噴泉、生物）及**空域**（引力，陽光，空氣中的雲、雨、雪、風、懸浮微粒）。

但不少人，尤其是握有權力的人，以為人可勝天，在地球上胡作非為，危害眾生（包括人類）。杜牧**阿房宮賦**（825AD）：「蜀山兀，阿房出」，揭露秦皇島為建阿房宮而砍光蜀山樹木的惡行。埃及、馬雅、等等古文明，多因迷信、建設雄偉的**金字塔**、**神廟**、消耗龐大天然資源，走上滅亡之途。目前，更有不少國家，以建設為名，過度開發，上山破壞國土，在平地傾力建造數以十萬戶，甚至於百萬戶的**摩天大樓空屋**（一般稱之謂**混凝土叢林**，筆者稱之謂**現代金字塔**），消耗國土資源，以年青人買不起住宅而不敢結婚生子為代價；更嚴重的是：以毒霾害人。

西方學者，例如 Ian L. McHarg（1992），在 *Design With Nature* 一書（244 頁），除了一再呼籲重視環境保護的必要，多次推崇東方人“Tao, Shinto or Zen”（道家、神道、禪宗）的思想；並認為 18 世紀以來英國景觀（landscape）設計，受到這種思想的影響。該書並以大篇幅，就各類別的開發提出理論及個案分析，值得參考。

胡勝正（國 94 年）在行政院經濟建設委員會發行的**悲歌美麗島**一書（齊柏林攝影，陳慧屏撰文）的序中第一段文字：

「台灣經濟快速發展的背後，由於長期對自然資源保護的不足及配合經濟發展需要而造成過度開發，國土資源遭受到難以復原的傷害。」

該書的封面照片，顯示南投縣仁愛鄉清境農場地區民宿超限利用。圖 1 及圖 2 的照片，為齊柏林先生乘坐小型飛機冒險拍攝，贈予筆者，顯示表土裸露及泥沙淤積霧社水庫的慘狀。

中國土木水利工程學會（民國 94 年會）編著出版的

《土木與環境》（700 多頁），從全球環境變遷、土城開發、各類土木工程與環境、到環境問題的人文社會層面，深入的討論。其中，第十章大地工程與環境，由筆者撰寫。

洪如江（國 95 年）《天、地、人與大地工程》一書（153 頁），127 張圖片（大多為實景照片；範圍最大



圖 1 南投縣仁愛鄉清境農場民宿超限利用，表土嚴重流失，進入霧社水庫（齊柏林攝贈，民國 97 年 11 月）

者為空拍照片；範圍最小者為偏光顯微鏡所拍攝的岩相，約 $0.7 \text{ mm} \times 0.5 \text{ mm}$ ），以增進土木工程師對大地巨觀與微觀特徵的了解。

本文，簡要陳述土木工程與自然的衝突與和諧之道。



道路工程與自然

引言

人類為了克服自然界空間（距離、地形、等等）與時間的障礙，因此需要建造道路、機場、與海港；但是當這些工程的數量及規模擴充到某一個程度之後，工程本身（包括施工過程與完工後的工程結構物）以及人類使用工程的結果，與自然的衝突也就顯現，而且日益加劇。選擇幾項最重大的衝突，加以討論。

道路工程與自然生物多樣性

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，在遠古時代，遍野都是梅花鹿與樟樹；其他物種之豐富，不在話下。

圖 2 清境農場民宿超限利用，表土嚴重流失，導致霧社水庫嚴重泥沙淤積（齊柏林攝贈，民國 97 年 11 月）

今天台灣的西部平原，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；偏偏我們的交通運輸系統，採用超級大陸國家（尤其指美國）的公路系統，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、省道、縣道、與鄉道。這許多公路系統，再加上縱貫鐵路與高速鐵路，不但佔用龐大面積，更

重要的是：西部平原的生物棲地（以及農業用地）被切割得支離破碎（圖3），每一塊生物棲地都變得非常之小。根據式(1)，生物棲地面積 A 變小，必然導致物種數量 S 的減少，意即造成部分物種的滅絕。

針對道路切割生物棲地的問題，建適當數量的生物通道，例如跨越道路的高架橋（圖4）或貫穿道路的生物廊道（圖5），讓野生動物不受公路切割；或在路側補建適當數量的生態濕地或生態池（圖6）。



圖3 道路將生物棲地切斷得支離破碎（連永旺攝）



圖4 跨越公路之頂建立一個野生動物高架橋通道，使公路兩側之生物棲地相連



圖5 台78（台西古坑）線公路之排水涵洞兼生物廊道（謝潮儀與林孟立，2004）→



圖6 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）

北歐芬蘭的拉普蘭地區，公路的規劃、設計、與使用，野生動物（尤其是馴鹿，reindeer）也有權上公路。汽車駕駛在遠距離發現時，立刻降低車速；在近距離相遇，停車等待（或下車商量）馴鹿離開車道（圖7）。

山區道路工程與自然

Doug Helken (1997) 根據美國在其西北部太平洋海岸山脈歷時四百多年 (1556-1976) 的調查發現：砍伐森林所引發的坍方（數量、體積）約為森林自然坍方的10倍，而開路上山所引發的坍方（數量、體積）約為森林自然坍方的100倍。



圖7 眾生平等文明的土木工程：北歐拉普蘭（Lapland）地區公路的規劃、設計、與使用，都保留野生動物上路面的權利（洪如江攝）

台灣山區公路開通之後，隨之而起的是：濫墾、濫伐、濫開產業道路、濫建。而執政黨為了選票，多視若無睹。《大自然雜誌》第79期（潘富俊，2003.04.29）報導了中部橫貫公路開通之後所發生的慘狀以及種種生態浩劫，並且發出「中華民國的治權不及於大陸也不及於中橫公路？」的感嘆。圖8示中部橫貫公路開通之後梨山地區的慘狀。圖9示中部橫貫公路梨山段下邊坡果園與受害的德基水庫。

圖10示台21線公路水里玉山線開路之後的慘狀。類似的案例非常之多。而且，山區公路多開闢雙車道，每一車道的路幅多比照平地的3.5公尺或更寬。

台灣的大地，因板塊運動的活躍，地形又還在幼年期，各主要河川兩岸的解壓節理（裂縫）都非常發



圖8 中橫公路開通之後梨山地區遭受濫墾的慘狀（洪如江攝）



圖9 中部橫貫公路梨山段下邊坡因濫墾種植果樹致表土流入德基水庫的慘狀（洪如江攝）

達，以至於河道一直再變寬，沿河岸開闢的公路經常在地震或豪雨時崩塌。

圖 11 為中部橫貫公路谷關德基段馬陵三號隧道東口在 921 地震（民國 88 年 9 月 21 日）前的照片，多位中外學者正在外側隧道口會勘。其內側隧道口外的落石棚（俗稱明隧道）列柱隱約可見。圖 12 示該隧道東口在 921 地震之後的景象。由二圖都可以看到大致平行河岸的許多大小解壓節理（裂縫）。中部橫貫公路谷關德基段中斷至今已經 18 年，尚難修復至 921 地震前的制式公路。

義大利山區公路（圖 13），路幅只有 1.5 車道，而在定距離設路幅較寬的會車道或休息站。山地風景區，只有步道（圖 14），兩頭距離足夠一日遊；上午登山利用纜車，傍晚下山後乘坐遊覽車會回旅館。

瑞士，因為公路不足，影響法、德兩國與義大利之間的貨運，而備受三國批評。但瑞士人民，為避免破壞自然環境（景觀、空氣污染、土地污染），一致反對增闢公路，而以龐大財力與人力建設長隧道（總長度 150 多公里，最長的 Gotthard Base Tunnel 長達 57 公里，次長的 Lotschberg Base Tunnel 長 34.6 公里，最短



圖 10 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）

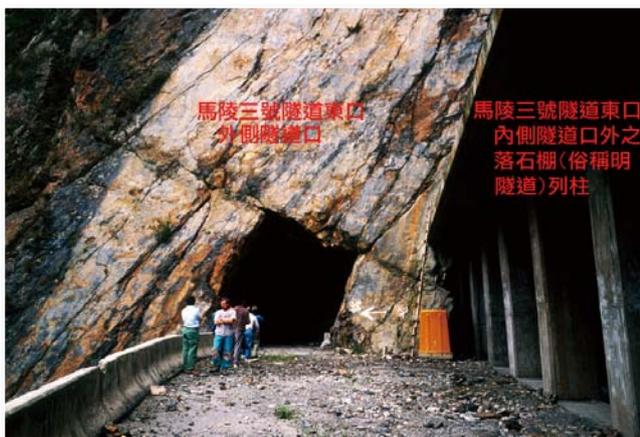


圖 11 馬陵三號隧道東口外側岩坡之解壓節理，921 大地震之前（洪如江攝）

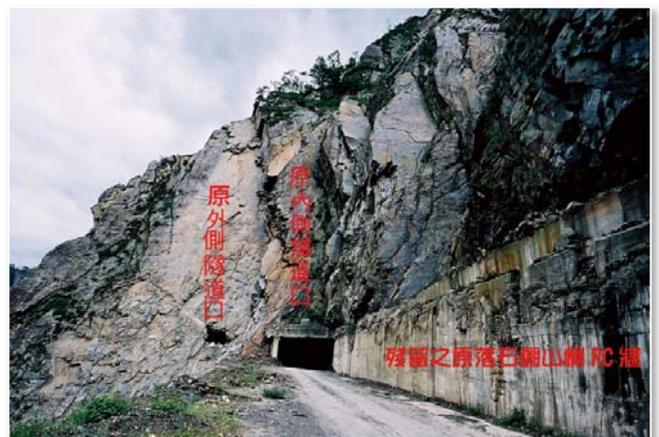


圖 12 馬陵三號隧道西口岩坡之解壓節理，921 地震後（洪如江攝）



圖 13 義大利山區公路，路幅只 1.5 車道，定距離設會車道或休息區，減少對自然的破壞（洪如江攝）



圖 15 纜車系統替代開闢高山公路，瑞士（洪如江攝）



圖 14 義大利山區風景區只有碎石步道，反而可以吸引許多觀光客（洪如江攝）



圖 16 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（倪勝火先生攝）

的 Ceneri Base Tunnel 長 15.4 公里）貫穿阿爾卑斯山，供高速鐵路使用。其山區道路，多採用纜車（圖 15）及電氣化鐵路（車道路幅遠小於公路）登山（圖 16）。少數山區公路，也多採用棧橋連接隧道的方式（圖 17），避免開挖山坡。台灣北宜高速公路某一段，通過坡地，採用棧橋（圖 18），是與自然和諧的好例子。

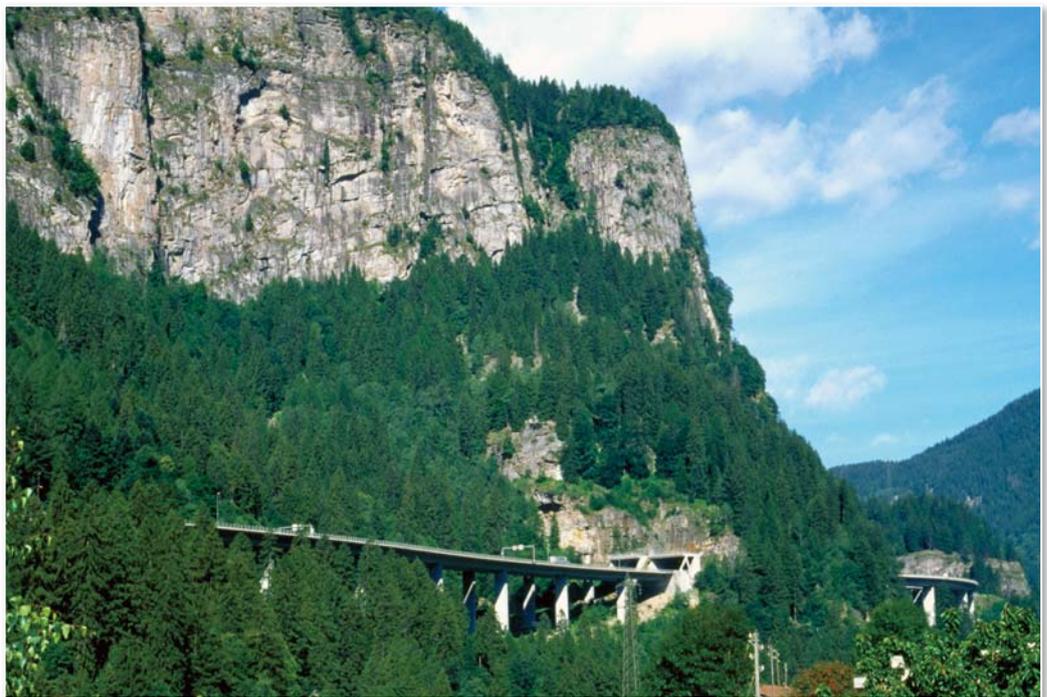


圖 17 瑞士山區道路多採棧橋與隧道以避免大挖大填（洪如江攝）



圖 18 北宜高速公路採用棧橋，避免大挖大填，與自然和諧（洪如江攝）



圖 19 汐止下游的基隆河狹窄河道塞入許多橋墩（洪如江攝）

道路橋樑工程與自然

不少河川，橋樑密集，橋墩太多（圖 19），建在河道狹窄處且橋面太低，其橋孔面積難以讓颱風豪雨所引起的洪流通過，更無法允許土石流的通過。橋樑，宜建橋孔高且寬大的拱橋（圖 20）或吊橋（圖 21），避免橋面太低，避免（或減少）在河道之中樹立橋墩，以免阻礙洪水或土石流。日本明石海峽大橋（圖 22），兩個主橋墩之間的距離已經長達 1991 公尺。避免或減少河道中建立橋墩在工程技術上已經不是問題。



圖 20 馬槽橋之橋孔夠高夠寬不妨礙土石流通過（洪如江攝）



圖 21 北部橫貫公路復興吊橋（陳文奇老師設計，學生洪如江攝）



圖 22 日本明石大橋，主跨 1991 公尺，避免在水域中多建橋墩（洪如江攝）

道路工程與環境

在台灣，每人利用道路每一公里所消耗的能源，換算成費用，以元 / 人公里計，大致相對如下：

高速鐵路	約 0.10 元 / 人公里
台北捷運系統	約 0.25 元 / 人公里
公路（大型客運車）	約 1 元 / 人公里
公路（小型客車）	約 4-6 元 / 人公里

不同道路每公里長度所使用地面土地面積，以公頃 / 公里計，大致相對如下：

高速鐵路	
台北捷運系統	1.75 公頃 / 公里
公路，國道 3 號	9.37 公頃 / 公里
公路，國道 5 號南港蘇澳段	5.42 公頃 / 公里

工程施工，類似人體開刀，對環境污染嚴重；完工使用期間，車輛的噪音，影響範圍寬廣。汽車所排放的廢氣及固體微粒，污染公路兩側之空氣、土壤、與動植物。寬廣的混凝土與瀝青面積，在陽光照射之下，溫度升高且持久難以消退，令人難耐，甚至於危害野生動物的生命。工程壽命終結之後，拆除作業與廢棄物的堆放，也經常造成環境的污染。

由上列數據可知，公路系統消耗能源與需要使用（開挖）地面土地面積，遠高於軌道系統者。因此，公路系統對自然環境的傷害，對空氣污染的程度，也遠高於軌道系統者。燃燒柴油的大型汽車，其動力機器常未妥善維修；其廢氣污染的嚴重性，在公車道混凝土路面留下顯而易見的證據（圖 23）。

台北捷運系統，提供一個友善、安全、而潔淨的空間，讓台灣居民，自然而然地顯現善良的人性（圖 24 至圖 26）。而因為節省能源、不排放污染環境的廢氣、減少空氣與土地污染；讓台北的天空，只要沒有外來霾害，常見湛藍。



圖 23 燃燒柴油的大型汽車，在公車道混凝土路面留下顯而易見的證據（洪如江攝）



圖 24 台北捷運系統，提供安全及友善的人造環境，使用者自然流露出善良的人性（洪如江攝）



圖 25 台北捷運系統電車的博愛座：永遠虛位以待老弱婦孺（洪如江攝）



圖 26 乘坐輪椅的殘障人士，可以從地表人行道經無障礙系統直達地下捷運車廂（洪如江攝）

但長遠之計，應向瑞士、新加坡、丹麥、等等國學習，規定燃燒化石能源的汽、機車總量，甚至於預定終結日期，而鼓勵利用大眾捷運系統、電力推動的汽、機車，讓我們的天、地，更加清淨，也減少人命傷亡。

台灣東部海岸公路與自然環境

蘇花公路台灣島東海岸與太平洋海床的交界，是台灣島最大的斷崖。大斷崖西方是中央山脈或海岸山脈陡峭的東坡，東方是幾千公尺深的太平洋海床（圖 27）。由南向北遠距離拍攝清水斷崖的景觀示如圖 28；近觀其臨海的峭壁，可以見到高度發達的解壓節理（裂縫，圖 29）；已放棄的舊蘇花公路，改為步道，原意是希望遊客沿步道散步，可以觀賞太平洋波光，但因落石不斷（圖 30），空留遺憾。古蘇花公路內移且改鑿清水隧道（圖 31），不意清水隧道向東移動而且開裂，只好放棄內移，另鑿匯德隧道應用。

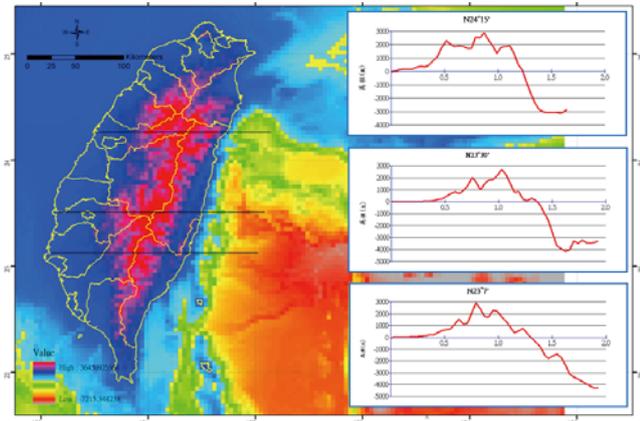


圖 27 台灣東海岸與太平洋海床的大斷崖。斷崖之西是山脈陡峭的東坡，斷崖之東是幾千公尺深的太平洋海床（根據美國 USGS TOPO 30 資料繪製）



圖 28 台灣東部清水斷崖（洪如江攝）

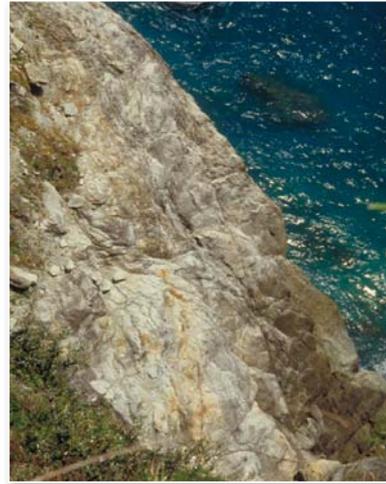


圖 29 解壓節理發達之蘇花公路海側峭壁（洪如江攝）



圖 30 蘇花公路臨海已棄用之車道（洪如江攝）



圖 31 已棄用之清水隧道的北口（洪如江攝）

民國 99 年 10 月 21 日，梅姬颱風（Typhoon Maggie）豪雨，台灣東海岸的蘇花公路 112K-116K 路段上邊坡坍塌（圖 32），公路多處被高速度的土石沖斷，20 多人連同車輛墜落太平洋而告失蹤，判斷已經遇難。

與蘇花公路平行的東部鐵路，每公里長度所使用地表土地面積與開挖體積，都遠遠小於公路者，所以相對穩定，極少發生坍塌災難。因此，筆者強烈建議多利用鐵路，以減少開挖陡峭坡地，而減少崩塌災害與旅客傷亡，並提高運輸功能。



圖 32 梅姬颱風豪雨（民國 99 年 10 月 21 日），蘇花公路 112K~116K 多處發生嚴重災害，20 多人連同遊覽車墜落海域失蹤（資料來源：國家災害防救科技中心，太空中心）

水庫及大壩工程與自然

壩體攔阻大量泥沙（圖 33），除了縮短水庫壽命之外，更使得河道下游、河口與海岸泥沙供應不足而致使自然環境失去平衡，例如：

- 橋樑基礎或堤防基礎裸露，造成落橋或堤防崩塌事件
- 海岸線後退

中國大陸新建大壩，多建排沙道，效果甚佳。

台灣石門水庫（民國 53 年建成）與曾文水庫（民國 62 年建成），泥沙淤積非常嚴重。曾文水庫正在積極建設排沙道。台北的翡翠水庫（請見參考文獻(3)圖 16），因禁止在水庫集水區開發，沒有泥沙淤積問題。

民國 19 年（1930）年建成的烏山頭水庫，曾文溪的離漕水庫（圖 34）；民國 81 年建成的鯉魚潭水庫，大安溪的離漕水庫（圖 35）；都沒聽說有泥沙淤積問題。



圖 33 集集攔河堰攔截大量泥沙於水庫之中（洪如江攝）



圖 34 烏山頭水庫（民國 19 年~），為曾文溪的離漕水庫，沒有嚴重泥沙淤積問題（經濟部水利處，2001；今之水利署）



圖 35 鯉魚潭水庫（民國 81 年~），為大安溪之離漕水庫，沒有嚴重泥沙淤積問題（經濟部水利處，2001；今之水利署）

城市工程與自然

人類文明誕生最重要的一個必須條件為文字的發明於城市之中。目前，全世界人口的 50% 以上，已經居住在城市之中。台灣人口的 80% 以上，已經居住在城鎮之中。

根據 Mayor of London（2012）World Cities Culture Report 的資料，世界上 11 個代表性城市的公共綠色空間百分比（% of public green space）如下：

- 新加坡（Singapore）47%
- 雪梨（Sydney）46%
- 倫敦（London）38.4%
- 約翰尼斯堡（Johannesburg）24%
- 柏林（Berlin）14.4%
- 紐約（New York）14%
- 巴黎（Paris）9.4%
- 東京（Tokyo）3.4%

- 上海 (Shanghai) 2.6%
- 孟買 (Mumbai) 2.5%
- 伊斯坦堡 (Istanbul) 1.5%

新加坡，公共綠色空間百分比高達 47%。在其「住者有其屋」政策下，建立 17 個英國式新市鎮 (New Town)，都有方便的聯外軌道式捷運系統及市鎮內接駁公車。市鎮之內有寬廣的公共綠色空間；市鎮外圍的快速車道，以多層次綠帶 (圖 36)，與住宅社區隔離，互相看不到，各安其境，一種非常高明的設計。參考公視製作，林盛豐教授採訪講解的「城市的遠見」影集 3. 花園城市：新加坡。

新加坡在 WEF 經濟競爭力排行榜之中，一直名列第二或第三。

倫敦，公共綠色空間百分比也高達 38%；其中，包括一個原始森林。市區中的多個公園，即使有步道，只鋪設粗砂 (圖 37)，既自然也透水。此外，倫敦外圍保留一個寬約 20 公里的永久綠帶，永久不得開發。



圖 36 新加坡快速車道側面，以多層次綠帶與住宅社區隔離，互相看不到，各安其境，是一種非常高明的設計 (周南山博士攝)

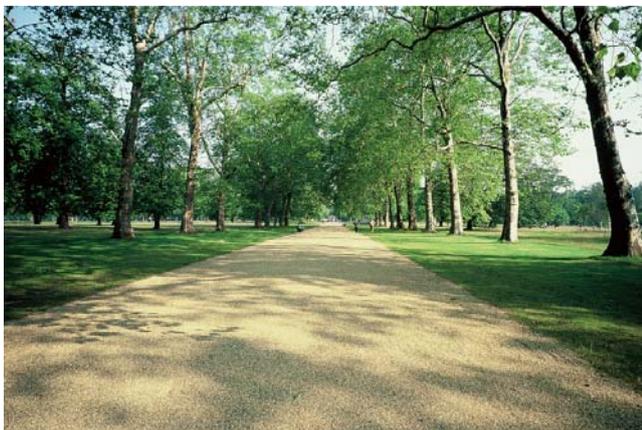


圖 37 倫敦海德公園步道，只鋪粗砂，既自然也透水 (洪如江攝)

香港 (圖 38)，土地面積近 1106 平方公里；已開發建設的土地約 270 平方公里，約佔全香港土地面積的 25%，集中在香港本島北部中環及新界的九龍 (圖 39)。土地的集約使用，75% 土地保留自然狀態給後代子孫。



圖 38 香港全部衛星影像。其已開發土地面積約 25% (Credit Google earth)



圖 39 香港極高密度開發地區：香港島中環，及新界的九龍 (Credit Google earth)

根據 Lelieveld, *et al.*, (2015)，2010 年一些大城市因室外空氣污染而喪生的人數如下：

- 德里 19,700 人，上海 14,900 人，
- 北京 13,700 人，雅加達 10,400 人，
- 孟買 10,200 人，莫斯科 8,600 人，
- 開羅 6,000 人，東京 6,000 人，
- 洛杉磯 4,100 人，紐約 3,200 人，

倫敦 2,800 人，巴黎 3,100 人，
香港 2,600 人，墨西哥市 1,600 人

城市公共綠色空間百分低的大城市，常因燃煤工廠（包括燃煤發電廠）與燃燒煤油或汽油的汽機車，噴灑有毒霧霾（尤其是 PM2.5），導致大量市民喪生。

台灣，面積 36,000 平方公里，人口 2,3002 多萬人，每平方公里人口密度近 650 人。各大城市的市區，公共綠色空間稀少，汽機車卻密集街道（圖 40）。

不但如此，台北市有三條河川（新店溪、基隆河、淡水河）環繞，是天賜美景。但是，卻到處建立防洪牆及高架橋（圖 41，圖 42），其惡果有：

- 阻擋居民親水活動的機會
- 高而龐大的高架橋也對居民及行人造成壓迫感，構成圍城效應
- 台北市變得醜陋不堪，消滅外國觀光客再來觀光的意願

巴黎賽納河畔，美而浪漫（圖 43）。

倫敦泰晤士河北岸「堤防，Embankment」開放而親水（圖 44）。

劍橋大學背景（The Backs）之一，康河（圖 45）及其兩岸寬廣的綠色草坪（圖 46），引發徐志摩的文思。



圖 40 台北市街頭的汽機車密集而且豪毫無秩序（洪如江攝）



圖 41 台北市新店溪岸防洪牆及高架橋，阻擋市民親水活動，而且造成壓迫感，構成圍城效應（洪如江攝）



圖 42 台北市基隆河岸防洪牆及高架橋，阻擋市民親水活動，而且造成壓迫感，構成圍城效應（洪如江攝）

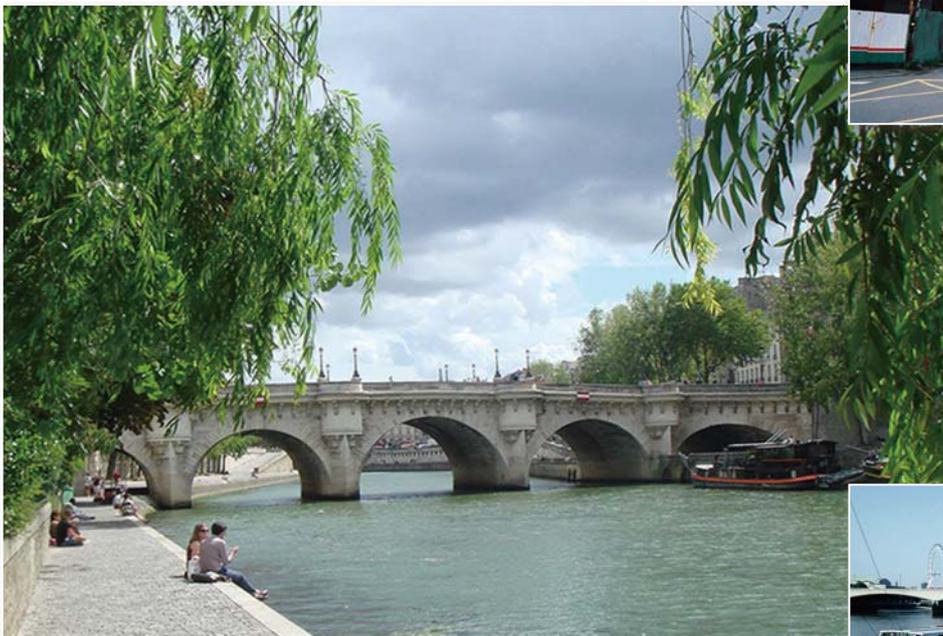


圖 43 美而浪漫的巴黎賽納河畔（王鶴翔攝）

圖 44 倫敦泰晤士河北岸「堤防，Embanlment」親水環境（洪如江攝）→





圖 45 英國劍橋大學康河的優美景緻 (洪如江攝)



圖 46 英國劍橋大學康河兩側寬廣的草坪 (洪如江攝)

鄉村景觀與自然

鄉村，在鄰里範圍之內，只應該有步道，不應該建設汽機車通行的街道。鄉村，以大面積的樹林、草坪、與農地，構成綠色大地，吸收二氧化碳，排放新鮮氧氣，調節微氣候，而且顯現自然之美。

台灣的鄉村景觀設計，除了中興新村(圖 47)與宜蘭(圖 48)等少數個案之外，很少因妥善規劃與設計而顯現與自然和諧之美。但也有一些鄉村，因農耕(尤其是種植稻米)而出現的美景(圖 49)，百姓皆謂自然。金門古厝(圖 50)聚落，足以列入文化遺產而加以永久保存。

奧地利多瑙河側鄉村農家與其背後坡地葡萄園(圖 51)，共同構築一幅不單調的立體風景畫。

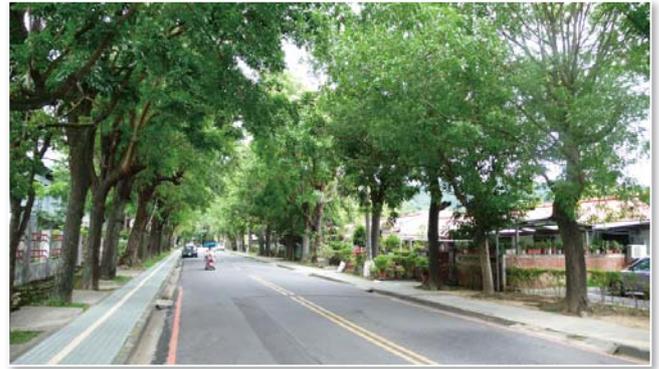


圖 47 中興新村住宅區 (洪如江攝)



圖 48 宜蘭鄉村風景 (洪如江攝)



圖 49 花東縱谷的農舍與水稻田的美景 (洪如江攝)



圖 50 金門古厝聚落，足以列入文化遺產而加以永久保存 (洪如江攝)



圖 51 奧地利多瑙河側鄉村農家及其背後坡地葡萄園，自然之美（洪如江攝）

英國傳統鄉村景觀設計，在 18 世紀開始受到中國道家思想及佛教禪宗思想的影響（參考 McHarg, 1992, *Design with Nature* 一書），趨向與自然和諧。Cotswolds 小村落（圖 52）、與湖區鄉村局部（圖 53），以大片植物展現村屋與自然和諧之美。圖 54 示英國 Anglesey 鄉村牧地，沒有工程構造物，也可以由羊群與寬廣的草地，發揮綠色大地的景觀之美及供應大量新鮮氧氣的功能。



圖 52 英國柯茲窩（Cotswolds）小村落一景（王義雄攝）



圖 53 英國湖區鄉村一景（莊世隆攝）



圖 54 英國 Anglesey 鄉村牧地一景（洪如江攝）

道法自然的土木工程

民國 88 年 921 地震，光復國中校舍幾乎全倒，椰子樹不倒（圖 55）。

Zhong 等 4 位學者（2017），發表在英國土木工程師學會會刊（*Proceedings of the Institution of Civil Engineers*）的論文，分析中國千年木塔，認為是效法竹子剛柔並濟的結構，得以經歷許多地震、雷擊及戰火，屹立至今。同一論文也認為台北 101 大樓之所以能夠承受 10 次地震及 17 次颱風風力作用而安然無恙，也是基於同一道理。

台北 101 大樓的結構設計，面對自然外力作用，了解其安全關鍵在於風力。因此，特別裝置一個風力控震器（圖 56），以平衡（消滅）風力的作用。

許多高樓結構設計，若了解其安全關鍵在於地震，則裝設含有多個隔震墊的隔震層，以隔絕地基上傳的地震波動。圖 57 示台灣大學土木工程學系新研究大樓的隔震層，一方面為大樓的結構安全，另一方面也為教學及研究。

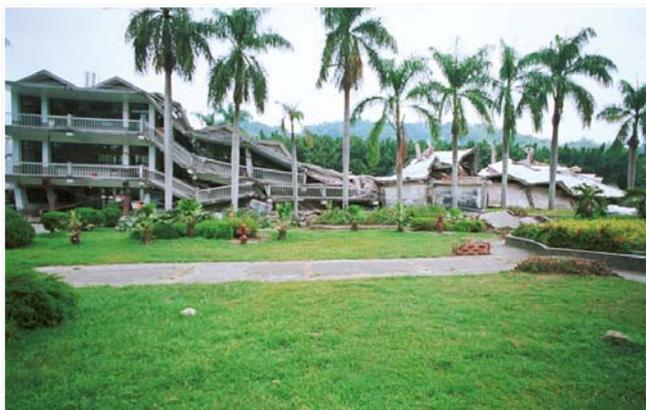


圖 55 民國 88 年 921 地震，光復國中校舍幾乎全倒，椰子樹不倒（洪如江攝）



圖 56 台北 101 大樓的風力控震器（洪如江攝）



圖 57 高樓隔震層，裝設多個隔震墊，以隔絕地基上傳的地震波動（洪如江攝於台灣大學新研究大樓）

道法自然的土木工程，應先了解地球表層（尤其是地形，地質，動、植物）及空域的靜態環境與動態演化，遵循其所有的自然法則，並多向自然學習；進而善用科技及作業，以基礎建設增益眾生福祉及人類和平且永續生存的理想。

誌謝

陳嘉正博士（Dr. Andrew Chan）提供最新參考資料，謹致謝意。

參考文獻

1. 洪如江（民國 94 年），大地工程與環境，土木與環境第十章，中國土木水利工程學會編著、出版，台北市。
2. 洪如江（民國 100 年 9 月），台灣大地重大斷裂帶的特性及演化與災難性岩土災害，*土工技術* 129 期，台北市。
3. 洪如江，民國 106 年 10 月，土木工程在世界文明演進的貢獻，中國土木水利工程學會會刊*土木水利*雙月刊第 44 卷第 5 期。
4. 齊柏林攝影，陳慧屏撰（民國 94 年），*悲歌美麗島*，行政院經濟建設委員會發行。
5. 經濟部水利處（2001，今之水利署），*台灣水之源：台澎金馬水庫壩堰簡介*，發行人黃金山，總編輯吳憲雄，編輯田巧玲、江明郎、謝文元。
6. Helken, Doug (1997), *Landslides and Clearcut: What Does the Science Really Say?*
7. Lelieveld, *et al* (2015), "The contribution of outdoor air pollution sources to premature mortality on a global scale", *Nature* **525**, 367-371.
8. Mayor of London (2012), *World Cities Culture Report*.
9. McHarg, Ian L., 1992, *Design With Nature*, John Wiley, New York. 漢文譯本為：芮經緯譯，2006，*設計結合自然*，天津大學出版社，天津市。
10. Zhong, Jitao; Wang, Lai; Li, Yunfeng; Zhou, Man, 2017, Solving the mystery of China's thousand-year-old wooden pagoda, *Civil Engineering* Volume 170 issue CE4, Institute of Civil Engineering, London. 



近景攝影測量 應用於 渠槽試驗底床量測之探討

邱永芳／交通部運輸研究所港灣技術研究中心 主任

賴瑞應／交通部運輸研究所港灣技術研究中心 研究員

胡啟文／交通部運輸研究所港灣技術研究中心 副研究員

水工模型試驗係將原型 (Prototype) 以一定幾何比例縮小成模型 (Model) 來進行試驗，主要模擬水中構造物周邊之水流現象，底床質在水中運移之水理特性，相較於數值模擬之方法，水工模型試驗較容易掌握實際之水理條件、流況與輸砂狀況等物理現象，因此常應用於水利工程規劃設計及河道維護之決策參考使用。

從事水工模型試驗以了解河道沖淤或海岸漂砂等問題時，需於動床試驗過程中或試驗結束後，量測模型水理變化或底床地形之變化，傳統之地形量測方式是以經緯儀配合規標以等之點量測或控制水位做等深線方式逐點進行量測，隨著科技的進步，開發以光學式砂面測定儀 (雷射測距)、超音波砂面測定儀及連續式地形測定儀 (電壓差) 之儀器設備用於底床地形量測，而從點的量測進展到線的量測，但尚皆以逐點或逐線的量測方式間接地構成面的底床高程資料，高程資料雖可取得相當精度之量測結果，但在平面試驗上多變的地形特性，仍無法詳細得描述，同時相對地費時、費力且需投入相當設備之建置成本，實需進一步改善量測方式。

有鑑於此，本研究嘗試以一般非量測型之普通數位相機 (圖元 1,000 萬畫素以上)，對模型觀測區進行多視點拍攝，並藉由攝影測量軟體獲取三維表面點雲模型，進而生成數值高程模型 (Digital Elevation Mode, DEM)，因點雲為大量空間點資料的集合，其每點均含有三維座標點資料，具有可完整精準保存目標物不規則表面變化的實際尺寸與影像空間資訊之特性，可直接地構成面的底床高程資料，因此相較於以往之量測方式，具有低成本、高機動性、高精度及微觀記錄之優點，惟以相機拍攝方式存在著光線折射問題及不具有穿透性等限制因素，因此無法量取水面波浪及水深高程資料。由於量測所得皆為數位化資料，如此亦可進行相關之加值應用，如：不同試驗條件下退水後底床的 DEM 資料進行套疊比對、取得任一縱橫剖面資料、等高線圖...等，可直覺地清楚瞭解底床地形之變化及差異值。

基此，本研究將以國道 1 號中沙大橋之渠槽水工模型試驗為案例，進行近景攝影量測技術及傳統量測兩種方式之精度分析，探討其可行性。

多視立體視覺近景測量技術

多視立體視覺中三維重建技術，以從運動恢復結構 (Structure from Motion, SfM) 演算法重建場景，透過記錄相機行進路線，並求得相機姿態參數，接著運用三角測量進一步重建三維場景。隨著時代改變，

SfM 演算法場景重建流程，以重建相機的位置與場景為三維重建之關鍵，藉由多視角所拍攝的多張序列影像，進行影像匹配，再經由匹配後所得之影像特徵點，以核線幾何 (Epipolar Geometry)^[1] 關係進行場景重建，求取相機相對應位置，並探討其與基礎矩陣

(Fundamental Matrix) ^[2,3] 之關係，以及基礎矩陣之解算方法，進而求得場景空間之具體座標進行三維重建。

多視立體視覺演算法理論之簡述

多視立體視覺理論是基於核線幾何所衍伸的方法，所謂核線幾何是指三維空間中的物體，與二維平面影像間相互轉換之空間幾何對應關係，如圖 1 所示， O_1 和 O_2 分別是兩個相機的投影中心，獲取的影像分別為影像 A 和 B， O_1 和 O_2 連線（基線）與 A、B 影像的交點 e_1 和 e_2 為核點。假設空間點 M 至相機投影中心位置由 O_1 到 O_2 的平移向量為 t ，旋轉矩陣為 R ，而在兩位置時對應的相機內方位參數分別為 K_1 及 K_2 ，空間點 M 在 A 及 B 影像上的特徵點集合分別為 $m(x, y)$ （左影像）及 $m'(x', y')$ （右影像）。

假設空間點 M 到像點 m 的轉換矩陣（即投影矩陣）為 P_1 ，到像點 m' 的投影矩陣為 P_2 ，則：

$$m = P_1 M \tag{1}$$

$$m' = P_2 M \tag{2}$$

假設 O_1 為三維空間坐標系的參考原點，且過 O_1 的相機主光軸為 Z 軸，則投影矩陣 P_1 和 P_2 可分別表達為：

$$P_1 = K_1 [I | 0] \tag{3}$$

$$P_2 = K_2 [R | t] \tag{4}$$

其中 K_1 、 K_2 為相機內方位參數， I 為單位矩陣、 R 為旋轉矩陣及 t 為平移矩陣。

利用場景空間與影像之核線幾何關係，可導出像點 m 和 m' 之關係為

$$m'^T F m = 0 \tag{5}$$

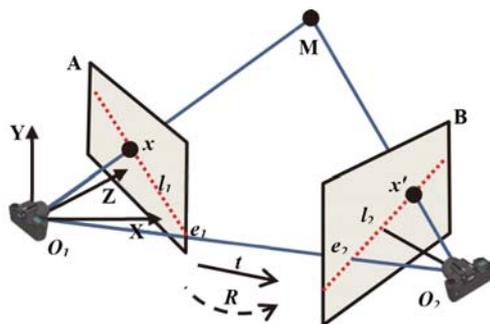


圖 1 場景空間與影像之核線幾何關係圖

其中矩陣 F 被稱為基礎矩陣 (Fundamental Matrix)，基礎矩陣為兩張影像間投影核線幾何關係之轉換（即影像 A 上的 m 轉換到影像 B 上的 m' ），當這兩張影像所對應的內部參數矩陣分別為 K_1 和 K_2 ，則它們之間的本質矩陣 E (Essential Matrix) 可定義為：

$$E = K_2^T F K_1 \tag{6}$$

欲推估兩張影像間的基礎矩陣可由式 (5) 求得，其兩張影像中的特徵點集合 $m(x, y)$ 與 $m'(x', y')$ 必滿足式 (5) 之關係，則每一組特徵點可以產生一個線性方程式，由於基礎矩陣扣除一個尺度常數之後，還有八個未知數。而推求基礎矩陣的方法有很多種，最常被使用的有八點法、七點法、RANSAC (RANDOM Sample Consensus)、LMeds (Least Median squares) 等方法。較為簡單且最廣為使用的為八點法 ^[4]，即就是在兩張影像間找到 8 組特徵點方能解算出基礎矩陣 F ，再求得本質矩陣 E ，藉由分解本質矩陣 E 可得到旋轉矩陣 R 及平移向量 t ，再得到投影矩陣 P_1 及 P_2 ，最後可計算出每一個特徵點所相對應之場景空間點 M 之具體坐標，藉由上述原理可知欲推算三維空間坐標，旋轉矩陣及平移矩陣皆可為任意值，即說明不用要求影像拍攝之位置及方向，以透過多視立體影像中稠密點雲之匹配方式來獲取大量 DEM 資料。

拍攝距離與測量精度

如圖 2 所示，由於每一像素之寬度 (Pixel Size) 與焦距長 (Focal Length)，相對於地面解析度 (Ground Sample Distance, GSD) 與拍攝距離為相似三角形，其

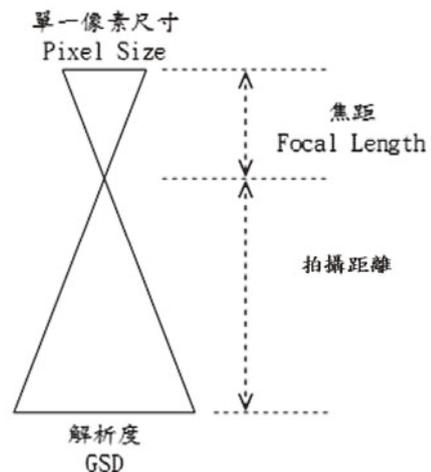


圖 2 相機感光元件與地面解析度之幾何關係

幾何關係可表示為式 (7)，可按每次工作所需之精度需求，並配合拍攝相機焦距、感光元件規格及解析度，代入式 (7) 關係式，可決定每次工作所需最大拍攝距離。

$$\frac{\text{Pixel Size}}{\text{Focal Length}} = \frac{\text{GSD}}{\text{拍攝距離}} \quad (7)$$

試驗規劃

中沙大橋橋基沖刷對策探討

依據交通部臺灣區國道高速公路局中區工程處（以下簡稱中工處）委託臺灣大學於 102 年完成之「國道 1 號中沙大橋墩基沖刷治理計畫委託技術服務工作」^[10] 研究報告成果顯示，目前影響中沙大橋橋基沖刷主要因素有 3 點，包括：(1) 橋基上游面河中形成沙洲，導致河道改變，沖刷南北岸之高灘地，造成橋基裸露。(2) 中沙大橋固床保護工護坦消能工長度不足，造成固床保護工破壞，影響上游橋基安全。(3) 受中油管架橋墩保護工影響，造成下游固床保護工的沖刷破壞，其上游及兩岸高灘地沖刷狀況如圖 3 所示，本試驗將探討以不同橋基保護工對於橋基沖刷之成效。

試驗渠槽

渠槽為全長 15 m、寬 0.8 m、深 0.8 m 之水平水槽，如圖 4 所示，渠槽側壁之材質為強化透明玻璃，以利於試驗進行時之觀測。渠槽尾端有一小型沉砂池用以避免試驗砂流入尾水池，後設尾水閘門（tailwater gate），用以控制試驗水深，如圖 5 所示。

橋墩模型

本試驗模型忽略原墩柱之 24 支群樁，僅考慮耐震補強後之橋梁實際尺寸（如圖 6）以縮尺（1/100）製作模型，如圖 7 所示；橋墩模型規格如表 1 所示。



圖 3 中沙大橋上游及兩岸高灘地沖刷狀況（資料來源：國道高速公路局中工處斗南工務段）



圖 4 渠槽斷面圖



圖 5 渠槽尾水控制閘門

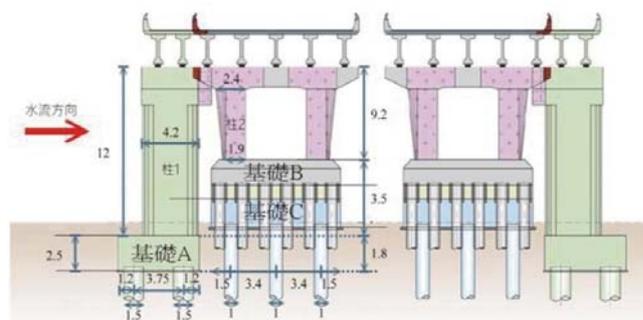


圖 6 橋梁相關尺寸



圖 7 試驗橋墩模型照片

表 1 試驗橋墩模型規格表

構件	長 (CM)	寬 (CM)	高 (CM)
柱 1	4.2	1.6	12
柱 2	上底 2.4 下底 1.9	1.6	9.2
基礎 A	10.5	6.15	2.5
基礎 B	11.8	9.8	1.8
基礎 C	5.8	9.8	3.5
樁 (直徑 = 1.5 cm)	20		
樁 (直徑 = 1.0 cm)	20		

渠槽試驗條件

(1) 水流深度

定義為水深 (y) 和橋墩寬度 (a_p) 的比值，當此值越小，水深改變會影響沖刷深度。當此值越大，則橋

墩迎水面寬度會影響沖刷深度，而與水深較無關係。Raudkivi 和 Ettema (1983) [6] 認為 y/a_p 大於 3 ~ 4 時，水深變化對沖刷的影響可以忽略，此為深水狀態；反之則為淺水狀態。

因此，為避免水深影響試驗之沖刷深度，本試驗之橋墩寬度 (a_p) 為 1.6 cm (模型縮尺採 1/100)，試驗水深 (y) 取 8.6 cm， y/a_p 大於 5 可避免水深影響試驗之沖刷深度。

(2) 底床質粗糙度

當底床質粒徑越大，其抵抗水流沖刷的能力增加，使得最大局部沖刷深度越小。反之，底床質粒徑越小，最大沖刷深度會增加。當中值粒徑 D_{50} 小於 0.6 mm 時，在底床會產生沙漣現象，而影響沖刷坑的深度。底床質粗糙度及水流條件會影響臨界速度 (V_c)，Raudkivi 和 Ettema (1977) [5] 認為當 $a_p / D_{50} > 50$ 時為細顆粒，沖刷深度與深度隨 a_p / D_{50} 之減少而變小。因此，本試驗中值粒徑 D_{50} 取 1.2 mm，大於 0.6 mm 且 $a_p / D_{50} > 133$ 。

(3) 底床質均勻性

底床質粒徑分配不均勻時，會在底床質表面形成護甲層現象 (armoring)，使得底床質的臨界速度增加，而造成橋墩局部沖刷深度會比底床質粒徑分佈均勻時小。Raudkivi and Ettema (1977) [5] 指出在清水沖刷時，橋墩周圍局部沖刷深度隨底床質均勻性 (σ_g) 增大而明顯降低，因為在 σ_g 大於 1.3 時會有護甲現象產生，其會減少沖刷深度。因此，本試驗透過人工篩選，得到中值粒徑 d_{50} 為 1.2 mm，粒徑標準偏差等於 1.3 試驗砂，篩分析結果如圖 8 所示。

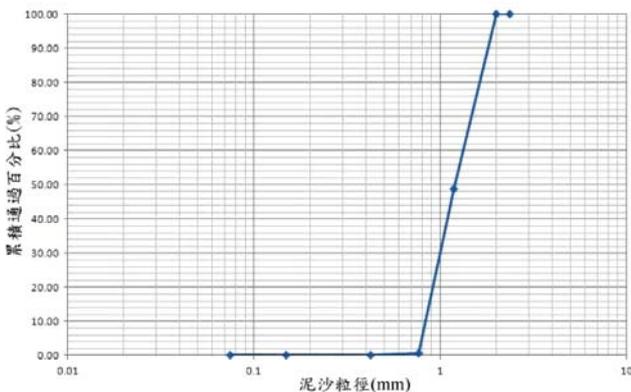


圖 8 試驗底床質粒徑分布曲線圖

(4) 水流流速

橋墩局部沖刷依流速大小的不同可以分為清水沖刷及濁水沖刷兩種情況，Melville (1999) [7] 指出在臨界速度時有最大之沖刷深度，因此本研究將以臨界速度來進行沖刷試驗。

目前計算臨界流速之公式有很多，參考過去相關文獻並依試驗室條件評估結果，採用 Melville (1999) [7] 回歸臨界啟動試驗數據所獲得之公式，如式 (8)，推求試驗臨界速度。本研究試驗水深為 86 mm，中值粒徑為 1.2 mm，式 (8) 得到試驗臨界速度為 0.4182 m/s，乘上試驗渠槽寬 (0.8 m) 及水位高 (0.086 m) 換算流量為 0.02877 cms。

$$\frac{V_c}{u_c} = 5.75 \log \left(5.53 \frac{y}{D_{50}} \right) \tag{8}$$

上式中，

$$u_c = 0.0155 + 0.0125 D_{50}^{1.4}, \quad 0.1 \text{ mm} < D_{50} < 1 \text{ mm}$$

$$u_c = 0.0155 D_{50}^{0.5} - 0.065 D_{50}^{-1}, \quad 1 \text{ mm} < D_{50} < 100 \text{ mm}$$

其中， V_c 為臨界速度， y 為試驗水深， D_{50} 為試驗砂之中值粒徑， u_c 與 V_c 之單位為 m/s。

(5) 水工模型配置位置

速度分佈方程式之基本假設為均勻流，而在流況尚未完全發展的情況下所量測的資料，並不適用於分析。故在選定試驗段位置之前，須先確認試驗區段之流況為完全發展 (fully development) 流況。

因本研究之試驗水深較低，若以流速剖面決定完全發展段較為困難，故利用試驗區各段水深來決定完全發展段。完全發展段選定之範圍是利用平均流速 V 與泥沙臨界啟動速度 V_c 之比值，即 V/V_c 為 1.0 的情況下量測水深。經試驗觀察結果，本試驗之完全發展區段位於距入口口約 7.0 m ~ 9.3 m 之間，因此本研究設計距入口 7.5 m 至 9.5 m 之區段為試驗區，其餘為定床區，橋墩落墩於距入口 8.5 m 處，定床區鋪設 1.5 公分之砂以保持與試驗段相同之河床粗糙度，詳如圖 9 所示。

(6) 橋墩排列方式

對於各種形狀的橋墩而言 (除了圓形橋墩)，橋墩縱軸和水流方向所夾的角度定義為水流攻角。水流攻角改變，橋墩寬度與水流在垂直方向的投影面積 (橋墩迎水面寬度) 會隨之改變，且渦流的形式也會不

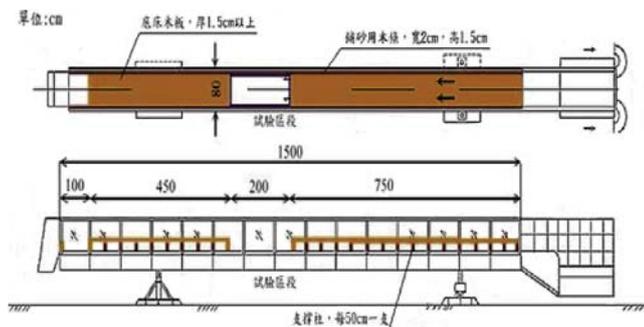


圖 9 渠槽試驗段佈設示意圖

同。當水流攻角變大時，局部最大沖刷深度會增加，本試驗橋墩佈設盡量與水流方向平行，所以不考慮攻角效應。

底床量測設備及誤差探討

本試驗規劃垂直式標尺量測底床沖刷深度（如圖 10 所示），並與近景攝影量測結果進行比較，做為精度探討之基準。

然而，量測設備通常存在著人為、系統及偶然誤差，為消除上述誤差之影響，各點量測時是以增加觀測次數（多餘觀測）方式求取最或是值，亦即為實測之沖刷深度，並經實際量測結果進行誤差分析顯示，藉由垂直式標尺之量測中誤差（Mean Square Error）介於 1.0 ~ 1.2 mm 之間。

多視立體影像拍攝方式

由於多視立體視覺中三維重建技術，是以 SfM 演算法進行場景重建，利用多視角拍攝的多張序列影像，進行影像匹配解算後，求得場景空間之具體座標，因此照片拍攝方式之規劃，以俯視試驗區並平行



圖 10 垂直式標尺量測設備

移動相機方式進行拍攝，若需取得橋梁基樁裸露之資訊可再加以側拍方式進行，拍攝軌跡如圖 11 所示，以達場景三維重建之目的。

尺度率定

由於重建後之三維模型內各物件之空間關係僅為相對座標，需透過真實尺寸之比例尺（物）將影像尺度轉換為實際尺度，藉此將影像尺寸轉為絕對座標，以達場景空間具體座標三維重建之目的。

基此，本研究於試驗渠槽內兩側佈設量尺，藉此量尺來定出實體空間座標系統，做為實體與影像間之轉換率定，以量得重建後三維模型空間內各物件真實尺寸。

為探討多視立體視覺近景量測技術之精度，以相同試驗渠槽進行兩次不同條件沖刷試驗拍攝，以兩側量尺處佈設控制點，於橋墩沖刷位置佈設檢核點（如圖 12，控制點編號為 C，檢核點編號為 T），以驗證利

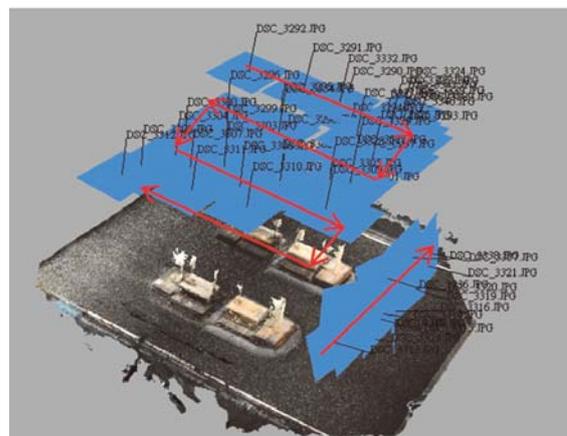


圖 11 拍攝軌跡示意圖

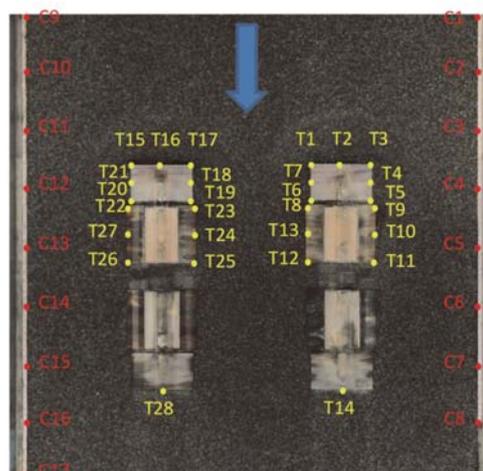


圖 12 控制點及檢核點位置佈設示意圖

用本研究量測方式之精度及穩定度，並使用前述之假定座標系統取得真實控制點及檢核點座標位置，藉以與重建後三維模型內相對應之座標位置進行比對。

相機率定

相機率定步驟為攝影測量中最高關鍵之問題之一，現今演算法可透過自率定方式，可於移動相機拍攝影像序列時一併進行相機率定，率定方式為固定焦距下，對一距離目標進行至少 80% 以上覆蓋率進行拍攝，利用大量重疊的方式進行率定參數之求解，簡速地完成相機率定。

成果分析

因光線折射問題及不具有穿透性等限制因素，使得近景攝影測量方法無法量取水下床底高程資料，需至試驗完成水退後床底表面無水狀況下進行拍攝，並與實際測量數據進行比對，藉以探討本研究量測方式之精度及可行性。

點精度分析探討 (RMSE)

(1) 試驗組 1

使用相機為 NIKON D300S，拍攝焦距為 26 mm 定焦鏡頭，拍攝距離約 70 cm，藉由移動相機以多視角拍攝多張序列影像方式進行三維模型場景重建，相關試驗數據說明如下。

控制點部分試驗結果如表 2 所示，檢核點試驗結果如表 3 所示，控制點及檢核點均方根誤差 (RMSE) 如表 4 所示。

(2) 試驗組 2

同樣使用相機為 NIKON D300S，拍攝焦距為 18

表 2 試驗組 1 控制點誤差分析表

Label	實測座標			誤差分析			近景量測座標			
	X	Y	Z	Error(cm)	X error	Y error	Z error	X	Y	Z
C1	100	100	100	0.59922033	-0.018	0.279	0.53	99.982	100.279	100.53
C2	100	110	100	0.26066645	0.083	-0.007	0.247	100.083	109.993	100.247
C3	100	120	100	0.22345917	-0.115	-0.078	0.175	99.885	119.922	100.175
C4	100	130	100	0.19335546	-0.085	-0.169	0.04	99.915	129.831	100.04
C5	100	140	100	0.21416115	-0.144	-0.045	0.152	99.856	139.955	100.152
C6	100	150	100	0.2384848	-0.141	-0.045	0.187	99.859	149.955	100.187
C7	100	160	100	0.21483482	-0.143	-0.064	0.147	99.857	159.936	100.147
C8	100	170	100	0.303661	-0.103	-0.176	0.225	99.897	169.824	100.225
C9	176	100	100	0.45126267	0.147	0.173	-0.39	176.147	100.173	99.61
C10	176	110	100	0.14242893	0.106	0.073	-0.061	176.106	110.073	99.939
C11	176	120	100	0.11196428	0.102	-0.004	-0.046	176.102	119.996	99.954
C12	176	130	100	0.16537533	0.032	-0.135	-0.09	176.032	129.865	99.91
C13	176	140	100	0.17596875	0.015	-0.094	-0.148	176.015	139.906	99.852
C14	176	150	100	0.29814258	0.057	-0.266	0.122	176.057	149.734	100.122
C15	176	160	100	0.40847766	0.047	-0.398	0.079	176.047	159.602	100.079
C16	176	170	100	0.39405076	0.026	-0.342	0.194	176.026	169.658	100.194
C17	176	179.5	100	0.46506021	0.118	-0.386	0.231	176.118	179.114	100.231

表 3 試驗組 1 檢核點誤差分析表

Label	實測座標			誤差分析			近景量測座標			
	X	Y	Z	Error(cm)	X error	Y error	Z error	X	Y	Z
T1	128.5	126	104.9	0.2889256	-0.25	-0.023	0.143	128.25	125.977	105.043
T2	123.2	126	106.1	0.17369226	0.01	-0.138	-0.105	123.21	125.862	105.995
T3	118	126	104.9	0.19108898	-0.075	0.031	0.173	117.925	126.031	105.073
T4	118	129	103.4	0.54214574	-0.087	-0.087	-0.528	117.913	128.913	102.872
T5	118	132.2	103.4	0.45326703	-0.149	-0.369	0.217	117.851	131.831	103.617
T6	128.5	132.2	102.5	0.68080981	-0.217	-0.378	-0.523	128.283	131.822	101.977
T7	128.5	129	103.1	0.26310644	-0.211	0.04	-0.152	128.289	129.04	102.948
T8	129	132.8	102.3	0.1723978	-0.058	-0.071	-0.146	128.942	132.729	102.154
T9	117.3	132.8	103.3	0.24086511	0.032	0.124	0.204	117.332	132.924	103.504
T10	117.3	137.8	101	0.04370355	-0.026	-0.035	-0.003	117.274	137.765	100.997
T11	117.3	142.8	100.4	0.24123847	0.084	-0.176	0.142	117.384	142.624	100.542
T12	129	142.8	100.8	0.27015921	-0.08	-0.231	0.115	128.92	142.569	100.915
T13	129	137.8	101.2	0.12976132	-0.011	-0.029	-0.126	128.989	137.771	101.074
T14	123	164.5	99.2	0.53251197	0.023	-0.388	0.364	123.023	164.112	99.564
T15	158.8	126	105.4	0.27373893	-0.244	0.094	0.081	158.556	126.094	105.481
T16	153.4	126	105.9	0.17350792	-0.084	-0.093	-0.12	153.316	125.907	105.78
T17	148.3	126	105	0.45444472	-0.05	0.118	0.436	148.25	126.118	105.436
T18	148.3	129	103.5	0.19547378	-0.087	0.16	-0.071	148.213	129.16	103.429
T19	148.3	132.2	102.9	0.12298374	-0.01	-0.092	0.081	148.29	132.108	102.981
T20	158.8	132.2	102.9	0.19815146	-0.152	-0.116	0.052	158.648	132.084	102.952
T21	158.8	129	103.3	0.34219731	-0.175	-0.025	0.293	158.625	128.975	103.593
T22	159.5	132.8	102.9	0.3389233	-0.212	0.255	-0.07	159.288	133.055	102.83
T23	147.5	132.8	103	0.48584051	0.221	0.24	0.36	147.721	133.04	103.36
T24	147.5	138.2	100.7	0.3191567	0.19	-0.256	-0.015	147.69	137.944	100.685
T25	147.5	142.5	100.5	0.26767331	0.188	0.188	-0.031	147.688	142.688	100.469
T26	159.5	142.5	100.6	0.29364775	-0.175	0.23	0.052	159.325	142.73	100.652
T27	159.5	138.2	100.8	0.45461522	-0.139	-0.415	-0.123	159.361	137.785	100.677
T28	153.5	164.5	99	0.24042047	-0.079	-0.219	-0.06	153.421	164.281	98.94

mm 定焦鏡頭，拍攝距離約 60 cm，藉由移動相機以多視角拍攝多張序列影像方式進行三維模型場景重建，相關試驗數據說明如下。

控制點部分試驗結果如表 5 所示，檢核點試驗結果如表 6 所示，控制點及檢核點均方根誤差 (RMSE) 如表 7 所示。

(3) 成果比較分析

試驗組 1，控制點均方根誤差 (RMSE) 為 0.181 cm、檢核點均方根誤差 (RMSE) 為 0.192 cm，相差

表 4 試驗組 1 控制點及檢核點之 RMSE

控制點(cm)				檢核點(cm)			
DX _{max}	DY _{max}	DZ _{max}	D _{max}	DX _{max}	DY _{max}	DZ _{max}	D _{max}
0.147	0.398	0.53	0.599	0.25	0.415	0.528	0.681
DX _{min}	DY _{min}	DZ _{min}	D _{min}	DX _{min}	DY _{min}	DZ _{min}	D _{min}
0.015	0.004	0.04	0.112	0.01	0.023	0.003	0.044
Σ VxVx	Σ VyVy	Σ VzVz	Σ VV	Σ VxVx	Σ VyVy	Σ VzVz	Σ VV
0.164	0.709	0.805	1.678	0.561	1.142	1.397	3.100
RMSE X	RMSE Y	RMSE Z	Total RMSE	RMSE X	RMSE Y	RMSE Z	Total RMSE
0.098	0.204	0.218	0.181	0.142	0.202	0.223	0.192

表 5 試驗組 2 控制點誤差分析表

Label	實測座標			誤差分析			近景量測座標			
	X	Y	Z	Error(cm)	X error	Y error	Z error	X	Y	Z
C1	100	100	100	0.65113823	-0.33	0.555	0.084	99.67	100.555	100.084
C2	100	110	100	0.69870308	0.412	0.561	0.061	100.412	110.561	100.061
C3	100	120	100	0.53670849	0.31	0.43	0.084	100.31	120.43	100.084
C4	100	130	100	0.51752681	0.307	0.416	0.023	100.307	130.416	100.023
C5	100	140	100	0.33550708	0.233	0.224	0.09	100.233	140.224	100.09
C6	100	150	100	0.14553007	0.133	0.003	0.059	100.133	150.003	100.059
C7	100	160	100	0.09360556	0.065	-0.044	0.051	100.065	159.956	100.051
C8	100	170	100	0.11011358	0.045	-0.068	0.074	100.045	169.932	100.074
C9	176	100	100	0.5562041	-0.539	0.131	0.041	175.461	100.131	100.041
C10	176	110	100	0.52452741	-0.522	-0.046	0.023	175.478	109.954	100.023
C11	176	120	100	0.5114235	-0.507	-0.061	0.028	175.493	119.939	100.028
C12	176	130	100	0.56990701	-0.569	0.032	0.003	175.431	130.032	100.003
C13	176	140	100	0.46230401	-0.46	0.045	0.01	175.54	140.045	100.01
C14	176	150	100	0.47800418	-0.45	-0.032	0.158	175.55	149.968	100.158
C15	176	160	100	0.43460097	-0.426	-0.029	0.081	175.574	159.971	100.081
C16	176	170	100	0.57429087	-0.365	-0.429	0.112	175.635	169.571	100.112
C17	176	179	100	0.39575118	-0.159	-0.343	0.117	175.841	178.657	100.117

表 6 試驗組 2 檢核點誤差分析表

Label	實測座標			誤差分析			近景量測座標			
	X	Y	Z	Error(cm)	X error	Y error	Z error	X	Y	Z
T1	130	126	101	0.5658922	-0.565	-0.015	-0.028	129.435	125.985	100.972
T2	122.8	124	101.5	0.4902499	-0.446	-0.025	-0.202	122.354	123.975	101.298
T3	117.7	124.6	101.5	0.5213799	-0.413	-0.318	0.012	117.287	124.282	101.512
T4	115.4	129	101.4	0.6052718	-0.477	-0.372	-0.021	114.923	128.628	101.379
T5	114.8	132.2	101.8	0.4767767	-0.424	-0.218	-0.004	114.376	131.982	101.796
T6	131.4	132.2	101.4	0.5572378	-0.543	-0.121	-0.032	130.857	132.079	101.368
T7	130.9	129	101	0.5093584	-0.499	0.029	-0.098	130.401	129.029	100.902
T8	131.5	132.8	101.5	0.1514001	-0.127	-0.048	0.067	131.373	132.752	101.567
T9	114.7	132.8	101.9	0.2327638	-0.135	0.075	0.073	114.565	132.975	101.973
T10	115.3	137.8	101.5	0.2274115	-0.156	-0.022	-0.164	115.144	137.778	101.336
T11	115.1	142.8	101.3	0.2049219	-0.188	-0.068	0.045	114.912	142.732	101.345
T12	131.2	142.8	101.3	0.1789246	-0.102	-0.001	0.147	131.098	142.799	101.447
T13	131.2	137.8	101.3	0.2490181	-0.113	0.22	0.029	131.087	138.02	101.329
T14	123	164.5	99.5	0.1754451	-0.1	-0.141	-0.03	122.9	164.359	99.47
T15	158.7	123.7	101.6	0.6357059	-0.561	-0.115	0.276	158.139	123.585	101.876
T16	153.8	123	102.4	0.5770277	-0.538	0.149	-0.146	153.262	123.149	102.254
T17	148.4	124	102.2	0.5049604	-0.472	-0.149	0.1	147.928	123.851	102.3
T18	145.6	129	101.7	0.6001816	-0.592	0.027	0.095	145.008	129.027	101.795
T19	145.1	132.2	101.9	0.5171305	-0.492	0.144	0.068	144.608	132.344	101.968
T20	161.5	132.5	102.1	0.4631566	0.103	-0.449	0.048	161.603	132.051	102.148
T21	161.5	129	101.9	0.1909503	-0.163	-0.098	0.017	161.337	128.902	101.917
T22	161.7	133	102.2	0.2614135	-0.062	-0.253	-0.022	161.638	132.747	102.178
T23	145	132.8	102.1	0.4354986	-0.355	0.205	-0.147	144.645	133.005	101.953
T24	144.9	138.2	101.5	0.3638873	-0.358	-0.043	0.049	144.542	138.157	101.549
T25	144.3	142.8	101.4	0.3302272	-0.319	0.083	-0.02	143.981	142.883	101.38
T26	162.7	143	101.4	0.4427381	-0.4	-0.176	0.071	162.3	142.824	101.471
T27	162.4	138	101.6	0.5807581	-0.488	-0.28	0.144	161.912	137.72	101.744
T28	153.5	164.5	99.4	0.312378	-0.258	-0.17	-0.046	153.242	164.33	99.354

0.01 cm，如表 4 所示；試驗組 2，控制點均方根誤差（RMSE）為 0.277 cm、檢核點均方根誤差（RMSE）為 0.251 cm，相差 0.02 cm，如表 7 所示。

因影像匹配於執行上仍會受到若干條件之限制，如相鄰影像中比例尺的差異、旋轉、光照反射不均及影像中的均調區或紋理重複區，均會造成局部區域之影像匹配失敗、錯誤或不可靠，而直接影響計算之精度。本研究進行底床拍攝時會因橋墩基礎遮蔽產生陰影，以及底床砂在影像分佈上較為均調，造成局部區域像元灰度值差異不大使得點位匹配不可靠，而產生較大之誤差，因此於兩試驗組控制點及檢核點誤差分析表中呈現出部分區域量測誤差較大之現象。

綜上所述，運用近景攝影測量於水工模型試驗底床量測上，雖然有局部誤差較大之現象，但最大誤差不超過 0.7 cm，仍可達 mm 級精度，且兩試驗組中控制點與檢核點均方根誤差值差異不大（試驗組 1，0.01 cm；試驗組 2，0.02 cm），顯示整體具相當之精度及穩定性。

表 7 試驗組 2 控制點及檢核點之 RMSE

DX _{max}	DY _{max}	DZ _{max}	D _{max}	DX _{min}	DY _{min}	DZ _{min}	D _{min}
0.569	0.561	0.158	0.699	0.592	0.449	0.276	0.636
DX _{min}	DY _{min}	DZ _{min}	D _{min}	DX _{min}	DY _{min}	DZ _{min}	D _{min}
0.045	0.003	0.003	0.094	0.062	0.001	0.004	0.151
Σ VxVx	Σ VyVy	Σ VzVz	Σ VV	Σ VxVx	Σ VyVy	Σ VzVz	Σ VV
2.445	1.367	0.099	3.911	4.048	0.953	0.291	5.293
RMSE X	RMSE Y	RMSE Z	Total RMSE	RMSE X	RMSE Y	RMSE Z	Total RMSE
0.379	0.284	0.076	0.277	0.380	0.184	0.102	0.251

而在兩試驗組別中因選用不同之拍攝距離及焦距，依式 (7) 關係式所得之，試驗組 1 為 0.151 mm/pix，試驗組 2 為 0.181 mm/pix，代表每個圖像所能解析之精度試驗組 1 優於試驗組 2，因此成果亦顯示均方根誤差（RMSE）試驗組 1 小於試驗組 2，所得之精度結果亦較為高。由上述試驗結果可知，整體量測之精度取決於地面解析度之選擇（如圖 2 及式 7），因此建議應於試驗前依現場環境與相機條件（感光元件大小與焦距選用）及所需之精度，進行拍攝距離之規劃。

保護工鋪設方案規劃及試驗結果展示

於前述成果確立近景攝影技術運用於水工模型試驗底床量測，具相當之精度及穩定性之基礎下，依據周憲德教授於 88 年發表於中國土木水利工程學刊之「蛇籠保護方式對橋墩局部沖刷之影響」^[8] 論文顯示，蛇籠保護工低於沖刷坑則較無保護之功效，但若高於試驗底床則會加深最大沖刷深度，故其蛇籠保護工頂層高程應位於沖刷坑內較適當，因此，本試驗著手規劃不同保護工鋪設方案（如表 8），並利用渠槽水工模型試驗結果比較不同保護工方案對於橋梁沖刷之保護深度及範圍，藉由近景攝影量測技術可快速且完整地以 DEM 之方式呈現沖刷範圍、深度、橋墩裸露深度及底床沖淤情形，並可由 DEM 資料製作等高線圖及縱橫剖面圖，以瞭解底床及特定剖面沖淤之趨勢，如此以客觀性的量化數據分析不同保護工方案之具體成效，據以提出相關建議供相關養護管理單位參採，本研究以不同鋪設方案沖刷後所重建之三維模型、等高線圖及縱橫剖面圖如表 9 內容所示。

表 8 不同鋪設方案最大沖刷深度與範圍綜整比較表

編號	鋪設方案	最大沖刷深度	沖刷範圍
1	無保護	7.4 cm	26.6 cm
2	一層砂腸袋（試驗底床下 0.5 cm）	5.5 cm	26 cm
3	一層砂腸袋（試驗底床下 1.5 cm）	4.5 cm	23 cm
4	二層直立砂腸袋	5.6 cm	25.1 cm
5	二層斜坡砂腸袋	3.4 cm	27.1 cm
6	三層直立砂腸袋	6.2 cm	26.2 cm
7	三層斜坡砂腸袋	3.2 cm	26.7 cm
8	一層砂腸袋（試驗底床下 1.5 cm）+ 織物模板	2.2 cm	19.2 cm

註：上述數據為一次之試驗結果

表 9 不同鋪設方案沖刷後所重建之成果一覽表(下續)

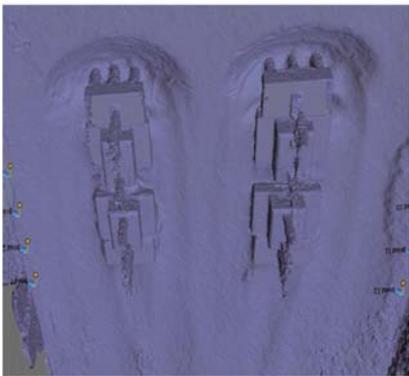
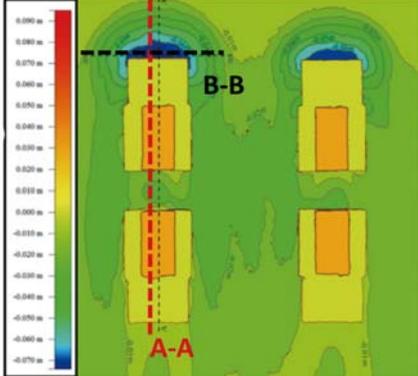
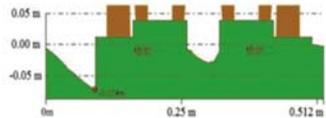
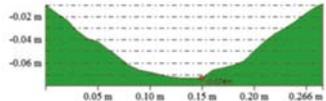
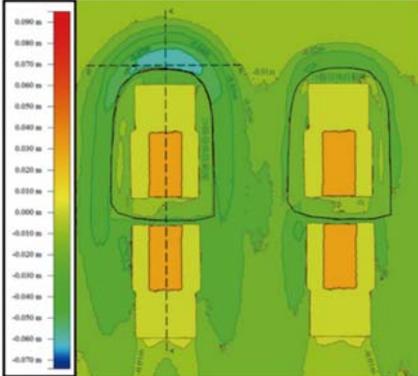
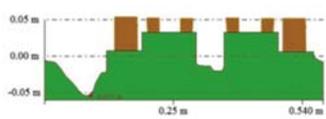
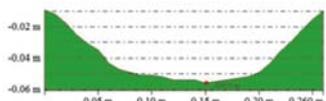
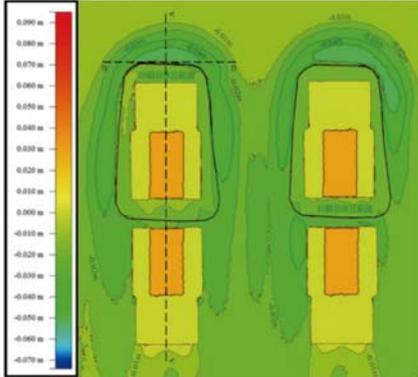
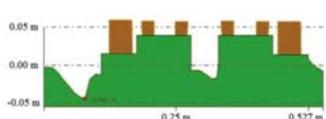
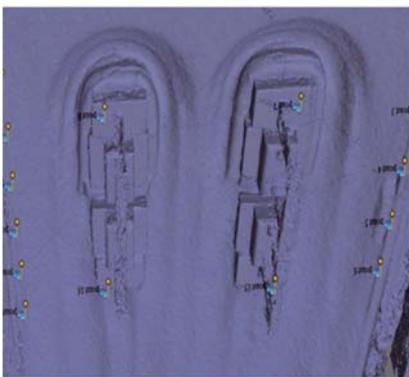
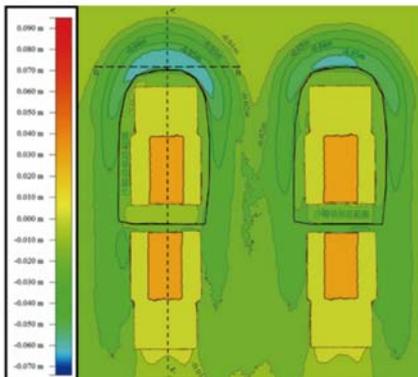
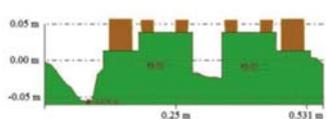
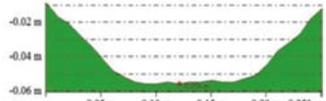
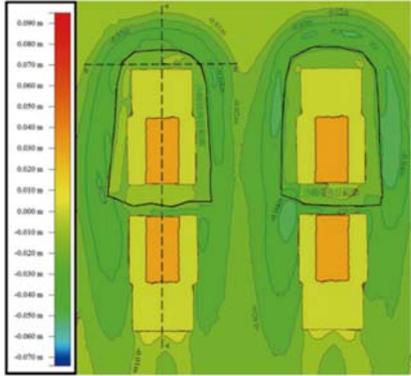
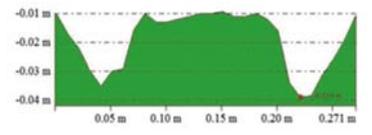
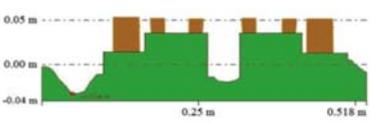
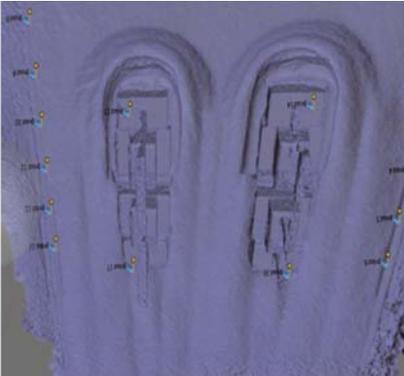
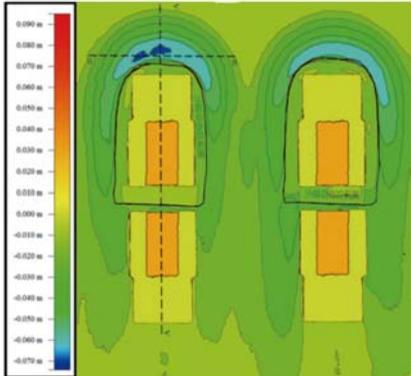
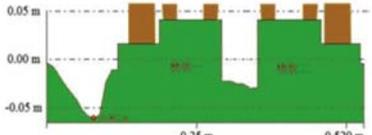
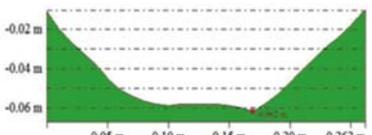
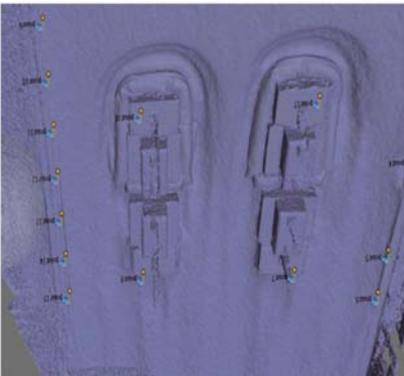
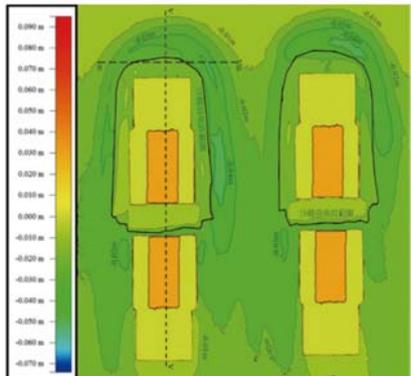
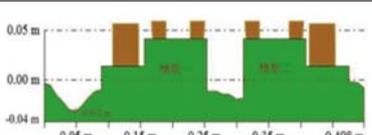
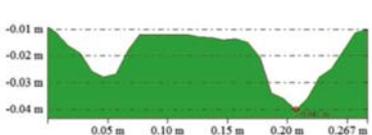
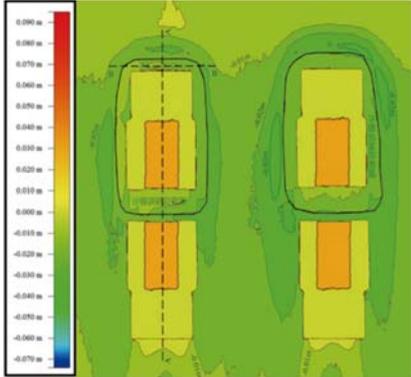
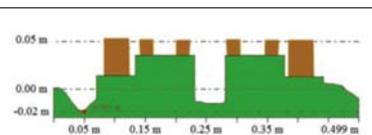
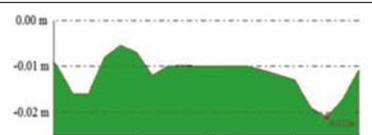
	三維模型呈現底床沖刷情形	等高線圖	基礎沖刷縱橫剖面圖
1			<p>A-A 剖面</p>  <p>B-B 剖面</p> 
2			<p>A-A 剖面</p>  <p>B-B 剖面</p> 
3			<p>A-A 剖面</p>  <p>B-B 剖面</p> 
4			<p>A-A 剖面</p>  <p>B-B 剖面</p> 

表 8 不同鋪設方案沖刷後所重建之成果一覽表

5			<p>A-A 剖面</p>  <p>B-B 剖面</p> 
6			<p>A-A 剖面</p>  <p>B-B 剖面</p> 
7			<p>A-A 剖面</p>  <p>B-B 剖面</p> 
8			<p>A-A 剖面</p>  <p>B-B 剖面</p> 

不同保護工方案試驗結果 DEM 比較

因 DEM 為具有數位化三維座標點資料之特性，而可藉由套疊比對，以滿足視覺及量化數據分析之方式瞭解不同保護工方案下對於橋墩沖刷深度及範圍之影響程度，據以得知該鋪設方案之保護成效。

以鋪設方案 3 及方案 8 做為案例說明，將兩方案套疊後之距離差異分析結果以不同顏色之等位圖呈現如圖 13 所示，其是以鋪設方案 3 做為基準進行比較，正值代表淤積，負值代表沖刷，為方便辨識，可再將距離差異分析等位圖與鋪設方案 3 點雲圖進行再次套疊如圖 14 所示，可得知在增加設置織物模板之條件下橋墩周圍及尾流區域皆呈現淤積之情形，並由等位圖之顏色及數值可知在增設織物模板後，對於橋墩前沖刷保護甚為明顯。

另可藉由調整距離差異分析等位圖之顏色分佈，瞭解最大影響位置及數值，如圖 15 所示（灰色處），在增

設織物模板後，可造成右邊橋墩前位置淤積約 2.3 cm，而由圖 16 所示，造成左邊橋墩前位置淤積約 1.6 cm，如此可以清楚瞭解不同保護工方案之具體成效。

結論

本研究對整體點雲的重建精度，依選用之地面解析度之不同平均可達 2 mm 或 3 mm，該數值與底床量測設備之人為、系統及偶然誤差（1.0 ~ 1.2 mm）亦為相近，若選用較高畫素數位相機將可提高整體點雲重建精度至與上述設備量測誤差相同或甚至更佳，因此運用近景攝影測量為可滿足水工模型試驗於量測上之精度需求。

透過本研究方法重建所得之 DEM 資料，因其具數位化之特性，可快速且完整地呈現沖刷範圍、深度、橋墩裸露深度及底床沖淤情形，並可利用圖層套疊與製作等高線圖及縱橫剖面圖，一次滿足視覺及量測精度之需求，方

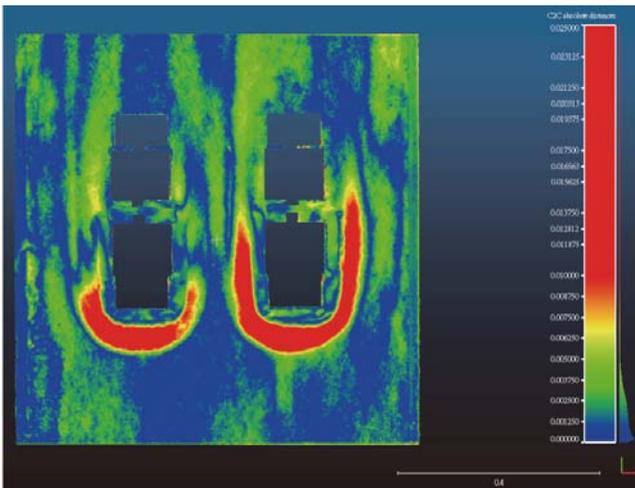


圖 13 方案 3 與方案 8 套疊後之距離差異分析結果之等位圖

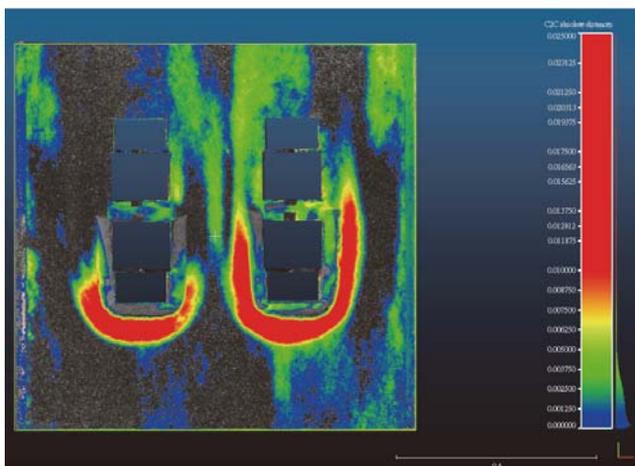


圖 14 距離差異分析結果等位圖與方案 3 點雲圖套疊

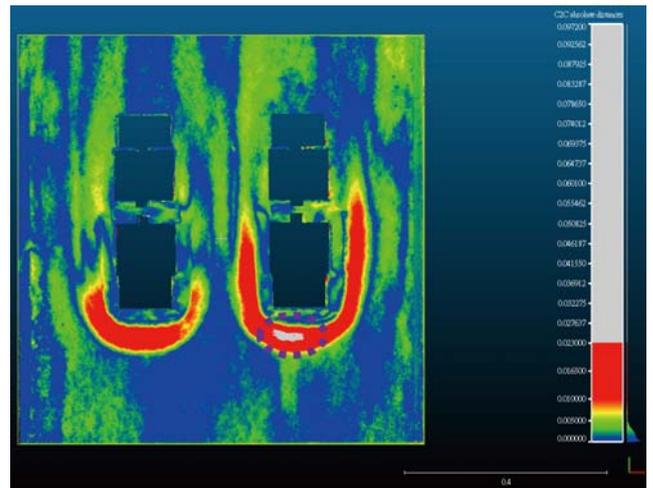


圖 15 增設織物模板後對不同橋墩保護最大影響位置（右橋墩前，淤積約 2.3 cm）

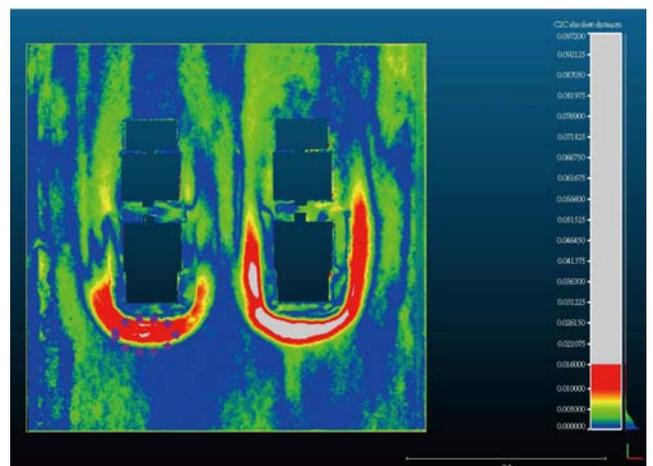


圖 16 增設織物模板後對不同橋墩保護最大影響位置（左橋墩前，淤積約 1.6 cm）

便地以客觀性量化方式分析比較不同保護工方案之具體成效，據以建議可擇用之保護方案。

本研究雖以近景攝影測量技術為基礎，探討用於水工模型試驗退水後量測底床之可行性，更可大量應用於其它工程領域上，將影像資訊量化為工程可使用之三維數值模型，惟於戶外條件下，光線充足與否及通視程度為構成影像之主要因素，必須克服夜晚、雨天、霧霾、植被遮蔽…等自然條件不佳之因素，始能進行有效之攝影測量，相較於此，沖刷試驗一般皆於室內施作，無上述影響影像構成之阻礙因素，僅需搭配簡易輔助光源或相機閃光燈來改善室內照度不足之問題，相對於傳統底床量測設備，擁有精度高、建置與養護成本低、量測快速及機動性高…等優勢及其多樣性的開發應用潛能，具開發應用之可行性，可方便輔助操作人員快速地量測並完整記錄試驗現況。

參考文獻

1. Charles Loop, Zhengyou Zhang (1999), Computing Rectifying Homographies for Stereo Vision, Microsoft Research.
2. Olivier D. Faugeras (1992), What can be seen in three dimensions with an uncalibrated stereo rig?, Proceedings of European Conference on Computer Vision.
3. Olivier D. Faugeras, Quang-Tuan Luong, Steven Maybank (1992), Camera self-calibration: Theory and experiments, Proceedings of European Conference on Computer Vision.
4. Hartley R., Zisserman A. (2004), Multiple View Geometry in Computer Vision, Cambridge University Press.
5. Raudkivi, A.J. and Ettema, R. (1977), Effects of sediment gradation on clear water scour, Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, Vol. 103, No. 10, pp. 1209-1212.
6. Raudkivi, A. J. and Ettema, R. (1983), Clear-Water Scour at Cylindrical Piers, Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, Vol. 111, No. 4, pp. 713-731.
7. Melville, B. W. and Chiew, Y. M. (1999), Time scale for local scour at bridge piers, Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, Vol. 125, No. 1, pp. 59-65.
8. 周憲德、戴華鏞、陳世清 (1999)，蛇籠保護方式對橋墩局部沖刷之影響，中國土木水利工程學刊，第十一卷，第二期，第 311-316 頁。
9. 張庭榮 (2008)，SIFT 演算法於立體對影像匹配與影像檢索應用之研究，國立高雄應用科技大學碩士論文。
10. 國立臺灣大學 (2013)，「國道 1 號中沙大橋墩基沖刷治理計畫委託技術服務工作」，交通部臺灣區國道高速公路局中區工程處報告。
11. 邱永芳、呂良輝、胡啟文 (2015)，道路邊坡滑動自動攝影監測系統之研究，交通部運輸研究所報告。
12. 賴瑞應、謝明志、胡啟文、曾文傑 (2016)，跨河橋梁固床工水工模型試驗－以中沙大橋為例 (1/2)，交通部運輸研究所報告。



10/27 海綿城市技術論壇研討會

地點：集思北科大會議中心 本次活動共 116 人參加，圓滿成功。



呂良正理事長致詞



邱琳濱理事長致詞



陳仲賢執行長



周南山教授



謝啟萬教授



何嘉浚教授



10/17 106 年能源論壇研討會

地點：台灣電力公司【204 會議室】 本次活動共有 60 人參加，感謝台灣電力公司合辦！



感謝台電陳蒼賢副總於任內對學會的貢獻



會中座談互動熱烈



學員們踴躍發問

10/26.27 第十屆公共工程非破壞檢測技術研討會

地點：台大應力所 本次研討會共 125 人參加，感謝非破壞檢測研委員會 主辦！



鄭家齊主委



宋裕祺教授演講

11/2 電源開發與歷史文化研討會

地點：台大應力所 本次活動共 132 位學員參加，活動圓滿成功。
感謝台電公司、台大土木系、日月光文教基金會合辦！



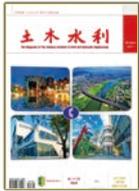
感謝民視新聞台報導！



陳清泉名譽教授



曾元一董事長



茲附上廣告式樣一則
請按下列地位刊登於貴會出版之「土木水利」雙月刊

此致
社團法人中國土木水利工程學會

「土木水利」雙月刊
廣告價目表

(費率單位：新台幣元)

刊登位置	金額 (新台幣元)	敬請勾選
封面全頁 彩色	60,000	
內頁中間跨頁 彩色	80,000	
封底全頁 彩色	50,000	
封面裏/封底裏 全頁彩色	40,000	
內頁全頁 彩色 (直式)	30,000	
內頁半頁 彩色 (橫式)	15,000	
內頁 1/4 頁 彩色 (直式)	8,000	
折扣	3期9折， 4期以上8.5折	

刊登月份：

45.1 45.2 45.3 45.4 45.5 45.6 共 次
(2月) (4月) (6月) (8月) (10月) (12月)

註：稿件請提供設計完稿之廣告稿；
相片、圖片等請提供清楚原件或電腦檔。

上項廣告費計新台幣 元整

隨單繳送請查收摺據
請於刊登後檢據洽收

機構名稱： (請蓋公司印)
商號

負責人：

地 址：

廣告聯絡人：

電 話：

廣告訂單聯絡：社團法人中國土木水利工程學會 電話：(02) 2392-6325 email: mandy@ciche.org.tw

98-04-43-04

郵政劃撥儲金存款單

收款 帳號	0	0	0	3	0	6	7	8	金 額 新台幣 (小寫)	仟	佰	萬	拾	萬	仟	佰	拾	元
----------	---	---	---	---	---	---	---	---	--------------------	---	---	---	---	---	---	---	---	---

通訊欄 (限與本次存款有關事項)

報名費

繳納 _____ 研討會

報名費 _____ 元

繳納會費

常年會員年費1,200元

初級會員年費300元

訂閱土木水利雙月刊，一年六期

國內·會員 新台幣350元

國內·非會員及機關團體 新台幣1,800元

自第 _____ 卷第 _____ 期起， _____ 年期雙月刊 _____ 份

訂閱中國土木水利工程學刊，一年四期

國內·會員 新台幣800元

國內·非會員及機關團體 新台幣1,800元

國外·個人 美金40元

國外·機關團體 美金100元

自第 _____ 卷第 _____ 期起 _____ 年期學刊 _____ 份

收款戶名 社團法人中國土木水利工程學會

寄 款 人

主管：

姓名

地

址

電話

經辦局收款戳

◎ 寄款人請注意背面說明

◎ 本收據由電腦印錄請勿填寫

郵政劃撥儲金存款收據

收款 帳號戶名	
存款 金額	
電腦 紀錄	
經辦 局收款戳	

虛線內備供機器印錄用請勿填寫

社團法人中國土木工程學會

信用卡繳納通知書

姓名		款別 註：入會時請先填入會申請書，傳真學會審查，我們會立即通知您，資格符合時請繳費，入會費一人僅需繳交一次	報名費 <input type="checkbox"/> 繳納_____研討會 報名費_____元
會員證號碼			繳納會費 <input type="checkbox"/> 常年會員年費 1,200元 <input type="checkbox"/> 初級會員年費 300元
身分證號碼			訂閱土木水利雙月刊，一年六期 <input type="checkbox"/> 國內·會員 新台幣 350元 <input type="checkbox"/> 國內·非會員及機關團體 新台幣 1,800元 自第__卷第__期起，__年期雙月刊__份
卡別	<input type="checkbox"/> VISA <input type="checkbox"/> MASTER CARD <input type="checkbox"/> JCB		訂閱中國土木水利工程學刊，一年四期 <input type="checkbox"/> 國內·會員 新台幣 800元 <input type="checkbox"/> 國內·非會員及機關團體 新台幣 1,800元 <input type="checkbox"/> 國外·個人 美金 40元 <input type="checkbox"/> 國外·機關團體 美金 100元 自第__卷第__期起__年期學刊__份
信用卡卡號			白天聯絡電話
信用卡簽名欄最後三碼			通信地址
信用卡有效期限	(月/年)		
信用卡簽名			
繳費金額			

回覆請利用傳真：(02) 2396-4260 或 email：service@ciche.org.tw

回覆後請務必電話：(02) 2392-6325 確認，謝謝！

郵政劃撥存款收據

注意事項

- 一、本收據請詳加核對並妥為保管，以便日後查考。
- 二、如欲查詢存款入帳詳情時，請檢附本收據及已填妥之查詢函向各連線郵局辦理。
- 三、本收據各項金額、數字係機器印製，如非機器列印或經塗改或無收款郵局收訖章者無效。

請寄款人注意

- 一、帳號、戶名及寄款人姓名地址各欄請詳細填明，以免誤寄；抵付票據之存款，務請於交換前一天存入。
- 二、每筆存款至少須在新台幣十五元以上，且限填至元位為止。
- 三、倘金額塗改時請更換存款單重新填寫。
- 四、本存款單不得黏貼或附寄任何文件。
- 五、本存款金額業經電腦登帳後，不得申請撤回。
- 六、本存款單備供電腦影像處理，請以正楷工整書寫並請勿摺疊。帳戶如需自印存款單，各欄文字及規格必須與本單完全相符；如有不符，各局應婉請寄款人更換郵局印製之存款單填寫，以利處理。
- 七、本存款單帳號與金額欄請以阿拉伯數字書寫。
- 八、帳戶本人在「付款局」所在直轄市或縣(市)以外之行政區域存款，需由帳戶內扣收手續費。

交易代號：0501、0502現金存款 0503票據存款 2212劃撥票據託收

本聯由儲匯處存查 600,000 束 (100 張) 94.1.210 × 110mm (80g/m² 模) 保管五年 (拾大)

誠信、品質
服務、創新

蘇花改



台9線蘇花公路東澳隧道新建工程

64年創立至今，四十多年來秉持著基本專業，建立完善品質制度，早於1995年即引進ISO 9002認證，並於2010年升級為ISO 9008品質保證系統。

榮獲多次公共工程優良營造廠商，2004年第五屆公共工程金質獎。



臺北市南港區東明公共住宅統包工程



CL113 標鳳林站至光復站路段土建工程



福清營造股份有限公司

FORTUNE CONSTRUCTION CO., LTD

地址：11490 臺北市內湖區民權東路六段160號10樓
10F., NO.160, Sec. 6, Mincyuan E. Rd., Neihu District, Taipei City 11490, Taiwan (R.O.C.)

電話：(02)2796-3949 / 傳真：(02)2791-4241 / 網址：<http://www.for-tune.com.tw>

CECI



台灣世曦

工程顧問股份有限公司

www.ceci.com.tw



桃園國際機場捷運·A1車站竹林流瀑



Creativity · Excellence · Conservation · Integrity

台北市11491內湖區陽光街323號
No. 323 Yangguang Street, Neihu District, Taipei City 11491, TAIWAN
Tel:(02) 8797-3567 Fax:(02) 8797-3568
http://www.ceci.com.tw E-mail:pr@ceci.com.tw

用心
做好每一件事情

匠心，才得以淬煉「專業」品質
誠心，才足以貫徹「人本」信念
悉心，才可以恢宏「關懷」情操
台灣世曦永遠以「心」為出發
持續履行對土地、對人民不變的承諾
一個環境永續的生態樂園
一個幸福溫馨的生活家園