



低衝擊開發技術之綠色基礎設施 — 灰燼添加於透水鋪面之應用

羅方辰／國立臺灣大學環境工程學研究所 博士生

駱尚廉／國立臺灣大學環境工程學研究所 特聘教授

隨著全球之快速都市化發展與經濟型態之轉變，為追求更好的生活品質，人類紛紛前往高都市化地區謀生，加速都會區之發展。在大量工程設施與住宅興建下綠地愈來愈少，不透水面積增加，造成地表保水能力降低，地表逕流量增加，都市熱島效應也隨都市之擴大而日益嚴重。利用雨水下水道系統雖可以迅速排水，但氣候變遷所造成的暴雨逕流常使原雨水下水道系統無法負荷，加上降雨前五至十分鐘的前期逕流污染濃度高，若沒妥善處理，不僅發生淹水現象，亦會導致懸浮微粒、重金屬、碳氫化合物、營養物和病原體的水污染，同時也浪費許多寶貴的水資源。透過低衝擊開發（Low Impact Development, LID）技術中綠色基礎設施（Green Infrastructure, GI）可以改善土地利用狀況，減少都市中水資源損失。本文整理綠色基礎設施之資料，針對透水鋪面作介紹，並透過回收灰燼添加於鋪面中以去除都市逕流污染物案例，說明其未來的研究與應用潛力。

低衝擊開發技術

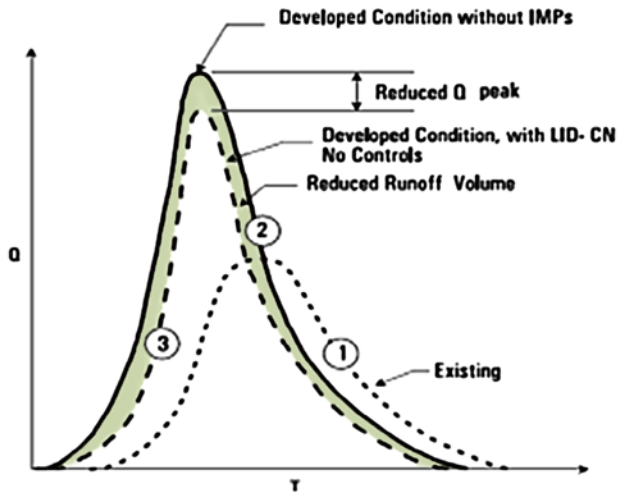
經濟的快速發展下人口至都市地區去發展，致使綠地逐漸被不透水層之建築物與路面給取代，造成不透水面積大幅增加，進而導致都市逕流與入滲型態改變，造成逕流總量增加、洪峰流量增加及污染物的擴散等負面效應。

低衝擊開發技術的初始概念為最佳管理措施（Best Management Practices, BMPs）針對可能發生或已發生之污染的狀況採取管制、削減或處理的措施，即以控制污染源頭、減少污染物傳輸進入河川及處理逕流三種控制方式來進行，以不改變原始型態之治理方式^[1]。

低衝擊開發技術（Low Impact Development, LID）名詞及概念最早來自美國於 1990 年代，美國馬里蘭州 Prince George 區發展出來^[2]，其概念主要是透過生態工法，如：土壤和植被的入滲、蓄流和蒸發等等大自然

本身的功能來降低暴雨所產生的逕流量。與傳統污水下水道的管末處理方法不同之處，使用源頭管理和其他設計來控制暴雨所產生的逕流量和污染，其設計必須因地制宜，如考慮土壤性質、面積大小、交通狀態等其他開發型態^[3]。低衝擊開發策略的三大原則包括：(1) 盡量減少開發地區之不透水表面的面積；(2) 盡量保持原有的水文狀態；(3) 盡量充分利用入滲能力、增加集流時間，以達到降低開發行為對水質水量衝擊的目標。圖 1 為低衝擊開發前後逕流歷線圖^[2]。

低衝擊開發方法常見綠色基礎設施（Green Infrastructure）包含：植生屋頂覆蓋（Vegetated roof covers）、雨水儲集（Rainwater Harvesting）、透水性鋪面（Permeable Pavement）、雨水花園（Rain Garden）、植物草溝（Vegetated Swales）、花槽（Planter）以及生態滯留池（Bio-retention）、窪地濕地（Swale Systems）等^[4]。這些生態工法技術可使減緩逕流量、減少不透水



資料來源：[2]

圖 1 低衝擊開發前後逕流歷線

面積、增加地表蓄洪、入滲及過濾等能力，並維持或恢復流域或區域之水文平衡與生態功能。

目前都市雨水管理模式已實施於各國包含：美國、英國、澳洲、日本等國家，各國對於低衝擊開發技術之名稱也略不同。如：美國稱之為低衝擊開發 LID (Low Impact Development)，英國稱為永續排水系統 SuDS (Sustainable Drainage Systems)，澳洲使用水敏感都市設計 WSUD (Water Sensitive Urban Design)，紐西蘭則稱低衝擊城市設計與發展 LIUDD (Low Impact Urban Design and Development)，都是運用各種現地、自然的方式，尋找都市與水共存的方法。所有概念皆從「源頭管理」水資源，強調多部門的整合，尤其結合水利與都市計畫、建築設計等部門。下列表 1 為各國對於低衝擊開發之名稱與定義。

表 1 各國對於低衝擊開發之名稱與定義

項次	國家	名稱
1	美國、加拿大、歐洲、台灣	低衝擊開發 (Low Impact Development)
2	英國、蘇格蘭、瑞典	永續城市排水系統 (Sustainable Urban Drainage System, SUDS)
3	澳洲	水資源敏感都市設計 (Water Sensitive Urban Design, WSUD)
4	日本	雨水貯留；浸透設施
5	中國	海綿城市；城市低影響開發
6	紐西蘭	低衝擊城市設計與發展 (Low Impact Urban Design and Development, LIUDD)
7	新加坡	活躍，美麗，乾淨的水源 (Active Beautiful Clean Waters)

資料來源：本研究整理

綠色基礎設施

綠色基礎設施為低衝擊開發技術非常重要的工法，常見綠色基礎設施為生態滯留單元、植生屋頂覆蓋（綠屋頂）、透水性鋪面及植生溝。國內「水環境低衝擊開發設施手冊與案例評估計畫書」則對於低衝擊開發之綠色基礎設施分為以七種，分別是透水鋪面、生態滯留單元、滲透側溝、雨水桶、植生溝、綠屋頂和樹箱設施^[5]。表 2 為綠色基礎設施效益^[6]。以下針對常見四種綠色基礎設施作介紹：

生態滯留單元 (Bio-retention Cell)

生態滯留單元為現地綠化暴雨逕流處理系統，以小面積、小區塊形式設計及適合當地氣候的植物所造景淺窪地方。其機制包含物理性的入滲及吸附，以及滯留槽中生物性的反應。生態滯留單元可設置於停車場分隔島、道路分隔島或易積水之區域，屬小型貯留形式 LID 技術及 GI 設施。

植生屋頂覆蓋 (Vegetated roof covers)

植生屋頂覆蓋又稱為綠屋頂 (Green roof) 指在平面或斜面屋頂上進行薄層綠化，以土壤種植植物，強調以品質輕、成本低、維護容易之人工地盤技術。綠屋頂一般分為三種：(1) 粗放型 (extensive) (2) 半精養型 (semi-intensive) (3) 精養型 (intensive)，型態上的選擇取決於預算、植物種類所需水分、土壤選擇、雨水儲存及載重能力等需求。

植生溝 (Grass swales and channels)

植生溝或稱草溝、草渠為自然排水系統的一項技術，既是排水系統並兼具滲透功用。利用樹木及草類等植生來控制雨水之逕流速率或吸附過濾來改善水質，植生溝雖然需要後續定期的維護費用，但相對而言為自然且低成本之方法。一般植生溝可分為乾式溝 (dry swale) 及草溝渠 (grassed channel) 兩類。

透水性鋪面 (Permeable pavements)

地面鋪面常見於都市人行道、車輛道路或是停車場等用途。傳統的鋪面就是將原本具有滲透能力的土壤變成不透水層鋪面。而透水性鋪面具有將雨水滲透至地下之功能，不會導致土壤中缺氧缺水等現象產生，同時也可降地低表逕流之產生。常見三種透水性鋪面技術為：(1) 透水混凝土磚 (permeable concrete blocks) (2) 透水混凝土鋪面 (permeable concrete pavement) (3)

表 2 綠色基礎設施效益

Benefit	Reduces Stormwater Runoff				Increases Available Water Supply	Increases Groundwater Recharge	Reduces Salt Use	Reduces Energy Use	Improves Air Quality	Reduces Atmospheric CO ₂	Reduces Urban Heat Island	Improves Community Livability					Improves Habitat	Cultivates Public Education Opportunities
	Reduces Water Treatment Needs	Improves Water Quality	Reduces Grey Infrastructure Needs	Reduces Flooding								Improves Aesthetics	Increases Recreational Opportunity	Reduces Noise Pollution	Improves Community Cohesion	Urban Agriculture		
Practice																		
Green Roofs	●	●	●	●	○	○	○	●	●	●	●	●	○	○	○	○	○	○
Tree Planting	●	●	●	●	○	○	○	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
Bioretention & Infiltration	●	●	●	●	○	○	○	●	●	●	●	●	●	●	○	○	○	○
Permeable Pavement	●	●	●	●	○	○	○	●	●	●	●	○	○	○	○	○	○	○
Water Harvesting	●	●	●	●	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○

Yes
 Maybe
 No

資料來源：[5]

多孔隙瀝青鋪面 (porous asphalt pavement)。接下來針對透水鋪面種類與效益作介紹。

透水鋪面種類與效益

傳統性鋪面不具有滲透性常因都市逕流而延伸許多污染物如：懸浮固體、營養鹽、致病菌、有機物與重金屬^[7]。透水性鋪面可以減緩都市逕流與污染物也可以用作鋪面表面的替代品，如道路，停車場，人行道和行人專用區域^[8]。相對於其他綠色基礎設施，透水性鋪面不需再進一步徵用土地。透水性鋪面專門設計用於促進雨水滲透通過鋪面及結構，通過各種鋪面層過濾

與污染物運輸與去除，可達到雨水管理和環境效益，為源頭控管設施之技術。圖 2 為常見綠色基礎設。表 3 為傳統性鋪面與透水性鋪面優缺點分析。

透水性鋪面種類依照其外觀、功能與應用可分為透水性混凝土 (Pervious concrete, PC)，多孔隙瀝青鋪面 (Porous asphalt, PA)，植草磚之混凝土格框鋪面 (Concrete and plastic grid pavers (CGP and PGP))，非連續拼接或鏤空鋪面 (Permeable interlocking concrete pavements, PICP)，透水性混凝土磚 (Permeable clay brick pavements, PCB)。透水性鋪面材質可分為一般混凝土、瀝青混凝土、與混凝土磚。以下對透水性鋪面種類作介紹：



生態滯留單元



植生屋頂覆蓋 (綠屋頂)



透水性鋪面



植生溝

圖 2 常見綠色基礎設

資料來源：[6]

表 3 傳統性鋪面與透水性鋪面優缺點分析

	傳統性鋪面	透水性鋪面
優點	<ol style="list-style-type: none"> 1. 相較於透水性鋪面所承受的重量、壓力與強度較高。 2. 較不易受氣候影響。 3. 較不需長期維護。 	<ol style="list-style-type: none"> 1. 減少路面的逕流量，減少過量雨水排放系統度，並儲存水量，可以大大節省整成本。 2. 避免下游地區淹水，減輕道路排水系統負荷。 3. 捕獲污染地下水或排水系統的污染物。 4. 降低灰色基礎設施 (Grey Infrastructure) 5. 降低熱島效應與噪音污染。 6. 透水性鋪面具有高滲透性與透氣性。
缺點	<ol style="list-style-type: none"> 1. 傳統性鋪面不具有高滲透性與透氣性。 2. 導致熱島效應與噪音污染。 3. 易造成污染源擴散與增加。 4. 暴雨逕流量導致道路排水系統負荷增加，使用雨水下水道處理暴雨逕流量其成本較高。 	<ol style="list-style-type: none"> 1. 透水性鋪面不適合設置於具有污染物負重的地區，如：回收場、加油站等。 2. 透水性鋪面所承受的載重與交通車輛較傳統鋪面低。 3. 面臨氣候變化的挑戰 4. 需要定期維護。

資料來源：[9-11]

透水性混凝土 Pervious concrete (PC)

透水混凝土藉由粗粒料骨材、水泥與水攪拌而成，使粒料表面接觸互相固結而發揮強度，同時形成多孔隙的結構體，提供透水功能，有時會在透水混凝土上方另外鋪設其他透水性材料，增加耐損性及美觀。

多孔隙瀝青鋪面 Porous asphalt (PA)

多孔隙瀝青混凝土，為將傳統密級配瀝青混合料中之中，其粗粒骨材間的空隙率約提高，能使降於鋪面上的水可由大量的孔隙迅速滲透至路基。

植草磚之混凝土格框鋪面 Concrete and plastic grid pavers (CGP and PGP)

鏤空的鋪面則直接提供植被生長的環境及水流入滲，使人車行走上面不至造成植物壞死。

非連續拼接鋪面 Permeable interlocking concrete pavements (PICP)

鋪面與鋪面間間隙填入細砂，鋪面下採用透水性底層如無細骨材混凝土、砂土層。

透水性混凝土磚 Permeable clay brick pavements (PCB)

使用水泥、骨料、摻和物、水及其他無機添加物等原料製作之透水性地磚，水流可進入高透水性空間及鋪面接縫，再向下入滲進入碎石鋪層以進行貯水。圖 3 為各類透水鋪面種類。

灰燼添加於透水性鋪面之可能性研究

如今在人類對於能源的需求與廢棄物的製造產生

下，火力發電廠燃燒後產生的煤炭的飛灰、底灰；中鋼煉鋼廠所製鋼而產生的飛灰（空氣污染防治設備捕捉下來）、底灰（爐床燒）；焚化爐燃燒垃圾後所產生的飛灰、底灰與農業廢棄焚燒灰燼（稻殼灰，稻稈灰），如未妥善處置將會污染環境。

灰燼之再利用用途相當多，包涵土木建材、水泥及骨材等。灰燼的物化特性與水泥相當，其中以灰燼應用於水泥價值為最高。現今各國都有訂定各類灰燼應用於波特蘭水泥混凝土使用（火力發電廠飛灰 — 卜作嵐）之品質規範標準，以確保飛灰添加於混凝土後，於工程使用上不致嚴重影響飛灰混凝土早期及晚期強度與相關品質要求。國內環保署對於焚化再生粒料應用於道路鋪面標準規範。表 4 灰燼資源化再利用途徑。表 5 為各類灰燼化學特性。

灰燼主要化學成份為 SiO_2 、 Al_2O_3 、 CaO 。灰燼中含有各類雜質，當中焚化爐飛灰變異性最大，雜質多，重金屬含量高，為有害廢棄物，且含有氯鹽， $\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O}$ 含量亦高。因此需透過前處理技術使灰燼更穩定並且做成可再生資源。常見灰燼再利用前處理方式有：直接再利用法、燒結法、熔融法、固化／穩定法、化學處理法（酸萃取等）及玻璃化法^[17-19]。各類灰燼加於鋪面案例於表 6 所示。

結語

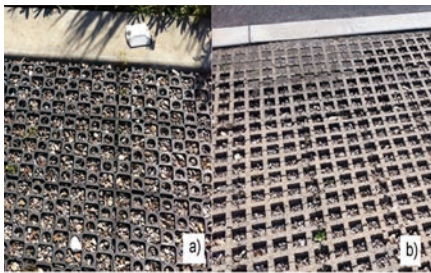
傳統的管末處理已無法解決都市化發展下所導致不透水面積增加而致使發生暴雨逕流的現象，憂慮會有更多污染物的產生及後續維護問題，低衝擊開發技術可解決此辦法，因此低衝擊開發中綠色基礎設施佔重要角色。本文整理低衝擊開發技術與綠色基礎設施之原理與發展並列舉各類灰燼廢棄物再利用於鋪面之



透水性混凝土
Pervious concrete (PC)



多孔瀝青鋪面
Porous asphalt (PA)



植草磚之混凝土格框鋪面
Concrete and plastic grid pavers (CGP and PGP)



非連續拼接鋪面
Permeable interlocking concrete pavements (PICP)



透水性混凝土磚
Permeable clay brick pavements (PCB)

圖 3 透水性鋪面種類

資料來源：[10-12]

表 4 灰爐資源化再利用途徑

灰爐種類	資源再利用
飛灰	1. 水泥業：作為波特蘭水泥原料，混合材料，作為飛灰水泥。 2. 土木材料：路面路基等鋪築材料、水壩、填地、瀝青混凝土。 3. 建築材料：磁磚、空心磚、隔熱板、陶瓷製品。 4. 骨材類：混凝土骨材、人工輕質骨材、碎石、砂之替代品。 5. 農業利用：土壤改良，矽酸鉀肥料、有機肥料。 6. 其它：油漆及塑膠之填料，消波塊、人工魚礁及有價金屬回收等。
底灰	1. 建築材料：以底灰取代部份骨材製造面磚、磁磚、空心磚、隔熱磚等製品。 2. 土木材料：以底灰摻入水泥混凝土或瀝青混凝土中，取代部份膠結粒料；或當成路基路底鋪築材料；或當成新生地回填材料等用途。 3. 農業利用：利用底灰當作土壤改良劑以改造土壤之結構，使其更具有經濟利益。

資料來源：[13]

表 5 各類灰爐化學特性

種類 wt %	焚化爐 底灰	焚化爐 飛灰	火力發電廠 底灰	火力發電廠 飛灰	稻殼灰	水泥
SiO ₂	4.99-56.57	11.80-31.81	46.9	54.9	99.4	20.60
Al ₂ O ₃	6.98-14.48	8.89-17.39	20.6	25.8	-	5.37
Fe ₂ O ₃	5.63-19.09	1.44-15.70	7.2	6.9	0.0078	3.33
CaO	11.85-21.63	20.05-25.80	5.57	8.7	0.268	64.20
MgO	1.35-1.82	1.61-3.53	2.23	1.8	0.0477	1.53
Na ₂ O	5.79	-	-	-	-	-
Cl-	-	2-10	-	-	-	0.50
TiO ₂	-	-	-	1-1.5	-	-
SO ₃	-	-	-	0.6	0.254	2.19
K ₂ O + Na ₂ O	-	-	-	2-3	0.0153	-

資料來源：[14-16]

表 6 灰爐添加於鋪面研究案例

編號	論文名稱	研究目的	灰爐前處理
1	Asphalt concrete and permeable brick produced from incineration ash using thermal plasma technology	1. 透過玻璃化方法 1,400 至 1,600°C 前處理 MSWI 灰爐 (飛灰與底灰), 添加於瀝青混凝土和透水性磚塊其再利用。 2. 透水率 (滲透指數 > 0.01 cm/s), 抗壓強度 (30.6 MPa) 和彎曲強度 (8.6 MPa) 符合標準。TCLP 結果顯示, 重金屬濃度遠低於法規定限度。	玻璃化方法
2	Study on use of MSWI fly ash in ceramic tile	1. 將 MSWI 灰爐再利用與陶瓷磚混和 2. 飛灰添加 20%, 並且燒結 960 度後具有 18.6 MPa 的抗壓強度和 7.4% 的吸水率。TCLP 試驗重金屬濃度低於法規值。	高溫燒結
3	Leaching behavior of heavy metals from municipal solid wastes incineration (MSWI) fly ash used in concrete	添加焚化爐飛灰於水泥中水泥對於 MSWI 飛灰的固化效果非常好。水泥最不會溶出有害物質。	固化處理
4	A novel eco-friendly porous concrete fabricated with coal ash and geopolymeric binder Heavy metal leaching characteristics and compressive strength	透過一系列測試來研究火力發電廠底灰與地質聚合物粘結劑添加於多孔混凝土, 並測試其重金屬溶出特性和抗壓強度, 並與一般底灰添加於多孔性混凝土做比較。	固化處理
5	Strength, porosity and corrosion resistance of ternary blend Portland cement, rice husk ash and fly ash mortar	添加稻殼灰於水泥砂漿中探討其強度, 孔隙率和耐腐蝕性之研究。	高溫燒結

資料來源: [17-22]

技術案例作介紹, 並說明此研究於污染物去除及廢棄物再利用之各種未來研究潛力。

透過添加不同種類的灰爐於綠色基礎設施中的透水性鋪面材質取代經濟較高的水泥不但達到廢棄物再利用也可降低成本與都市中減少地表逕流量及增加區域土地的保水能力。未來亦可對透水性鋪面材料的強度、保水率, 透水率與毒性物質溶出產生之環境生態與人體健康之影響之結果進行比較分析找出最適的模式。

參考文獻

- Perez-Pedini, C., Limbrunner, J. F. and Vogel, R. M. (2005), "Optimal location of infiltration-based best management practices for storm water management", *Journal of Water Resources Planning and Management*, 131(6), 441-448.
- Low-Impact Development Design Atrategies: An Integrated Design Approach*, Prince George's County (1999).
- EPA, U.S.E.P. A. (2000), *Low-Impact Development (LID): A Literature Review*, Document No. EPA-841-B-00-005, Washington, DC.
- Ahiablame, L. M., Engel, B. A. and Chaubey, I. (2012), "Effectiveness of low impact development practices: literature review and suggestions for future research", *Water, Air, and Soil Pollution*, 223(7), 4253-4273.
- 內政部營建署 (2015), 水環境低衝擊開發設施操作手冊編制與案例評估計畫。
- Gallet, D. (2011), "The value of green infrastructure: A guide to recognizing its economic, environmental and social benefits", *Proceedings of the Water Environment Federation*, 17, 924-928.
- Tota Maharaj, K. and Scholz, M. (2010), "Efficiency of permeable pavement systems for the removal of urban runoff pollutants under varying environmental conditions", *Environmental Progress and Sustainable Energy*, 29(3), 358-369.
- Beecham, S. C., Lucke, T. and Myers, B. (2010), *Designing Porous and Permeable Pavements for Stormwater Harvesting and Reuse*, International Association for Hydro-Environment Engineering and

Research.

- Shackel, B. (2010), "The design, construction and evaluation of permeable pavements in Australia", *ARRB Conference, 24th*, Melbourne, Victoria, Australia.
- Scholz, M. and Grabowiecki, P. (2007), "Review of permeable pavement systems", *Building and Environment*, 42(11), 3830-3836.
- Mullaney, J. and Lucke, T. (2014), "Practical review of pervious pavement designs", *CLEAN-Soil, Air, Water*, 42(2), 111-124.
- 內政部營建署 (2015), 水環境低衝擊開發設施操作手冊編制與案例評估計畫, 委託技術服務案。
- 陳盈中 (2005), 吸附於燃煤飛灰表面銅離子之鍵結型態與溶出特性。
- 高思懷 (1996), 垃圾焚化灰渣利用之研發建制及推廣計畫。
- 張正源 (2006), 焚化灰渣物理化學特性之探討與研究。
- Patel, M., Karera, A. and Prasanna, P. (1987), "Effect of thermal and chemical treatments on carbon and silica contents in rice husk", *Journal of Materials Science*, 22(7), 2457-2464.
- Yang, S.-F., Chiu, W.-T., Wang, T.-M., Lee, W.-C., Chen, C.-L. and Tzeng, C.-C. (2009), "Asphalt concrete and permeable brick produced from incineration ash using thermal plasma technology", *J. Environ. Eng. Manage*, 19(4), 221-226.
- Shi, H.-S. and Kan, L.-L. (2009), "Leaching behavior of heavy metals from municipal solid wastes incineration (MSWI) fly ash used in concrete", *Journal of Hazardous Materials*, 164(2), 750-754.
- 柴希文 (2006), 「垃圾焚化飛灰處理方法及其通路研究」, 台灣環境資源永續發展研討會論文集。
- Haiying, Z., Youcai, Z. and Jingyu, Q. (2007), "Study on use of MSWI fly ash in ceramic tile", *Journal of Hazardous Materials*, 141(1), 106-114.
- Jang, J. G., Ahn, Y. B., Souri, H. and Lee, H. K. (2015), "A novel eco-friendly porous concrete fabricated with coal ash and geopolymeric binder: Heavy metal leaching characteristics and compressive strength", *Construction and Building Materials*, 79, 173-181.
- Chindaprasirt, P. and Rukzon, S. (2008), "Strength, porosity and corrosion resistance of ternary blend Portland cement, rice husk ash and fly ash mortar", *Construction and Building Materials*, 22(8), 1601-1606.