

結構性透水鋪面與永續地下水資源及生態環境保育

Structural Pervious Pavement to Sustainable Groundwater Resources and Eco-environmental Conservation

陳瑞文

臺灣永續生態工法發展協會 理事長

吳銘志

經濟部水利署暨國立成功大學 水利產業知識化育成中心 主任

摘要：透水性鋪面對於環境、生態及都會區的永續發展具有重大影響。隨著經濟建設的高度發展，生態環境破壞愈形嚴重，透水性鋪面也被賦於更多的期許，例如：防洪抗旱、氣候調節、土壤涵養、污染防治、雨水回收等，本研究的主要目的是為了提高透水性鋪面的承載力，擴大適用範圍；提高透水率、保水率、空調循環效果，提升透水性鋪面的效能。

關鍵詞：永續發展、生態工法、雨水回收、透水性鋪面

ABSTRACT： The influence of pervious pavement is very important to sustainable development of environment, ecology and urban area. As a result of the highly development of economic, ecological environment was destroyed seriously more and more, the pervious pavement get more expectations, such as prevent flood, combat drought, the climate is regulated, conserve soil moisture, pollution prevention and rainwater catchment. The main purpose of this research is to increase the bearing capacity of pervious pavement and expand application coverage. Especially, the efficiency of pervious pavement is improved for infiltration rate, water retention rate and air cycle.

Keywords： Structural Pervious Pavement, Sustainable Groundwater Resources, Eco-Tech method, Environmental Conservation

1. 引言

透排水性鋪面始於歐洲，1970 年代歐洲許多國家、美國以及日本就積極投入透水性鋪面的研究與建設，目前並已大量使用，這個階段透排水道路主要目的是為了降低噪音、加速路面排水與抗滑，使用的工法則以多孔性瀝青鋪面為主。

隨著 1987 年聯合國世界環境與發展委員會在《我們共同的未來》報告中提出永續發展的概念，以及經濟發展都會建設不透水地表密度愈來愈高，熱島效應、水災、旱災、空氣污染...等問題不斷呈現，透水性鋪面的

重要性與需求也不斷增加，並且被賦予調節溫溼度、防災、污染防治與水資源回收...等，更多改善生態環境功能的要求。

透水性鋪面發展 30 幾年來，由於透水率〔孔隙率...等〕與耐用性〔抗壓強度...等〕無法兼顧，發展進程緩慢，目前基本上以低交通量道路及人行道使用透水性鋪面，重交通量道路使用排水性鋪面，來因應技術及材料強度上限制。也因此重交通量透水道路就成為近年來各先進國家研究發展的重點。

2. 透水性與排水性鋪面定義

由於透水性鋪面常因抗壓強度不足等因素的限制，目前大多使用於人行道、停車場及輕交通量道路，重交通量道路則退而求其次使用排水性鋪面。

「透水性鋪面」的定義為：道路的面層、底層、基層均可透水，雨水可從道路表面直接滲透進入土壤層，然後經由植物吸收、蒸散或回補地下水等形式，成為自然生態循環的一部份（圖 2.1.a）。

「排水性鋪面」的定義為：道路面層為可透水鋪面，但基底層無法透水，雨水滲透入道路面層後，再由底層表面流入道路兩旁的排水溝或下水道，主要功能是降低噪音、加速路面排水與抗滑，對於生態環境則較無貢獻（圖 2.1.b）。

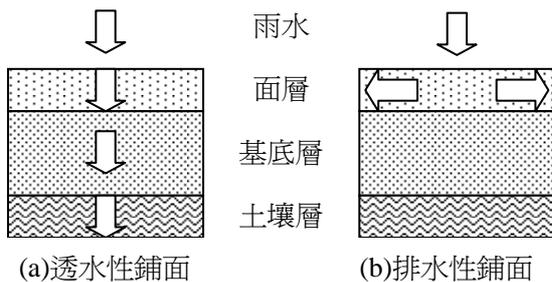


圖 2.1 透排水鋪面示意圖

3. 現有透水性鋪面二大分類

3.1 第一類「材料性透水鋪面」

利用級配粒料的調整，提高孔隙率，使雨水可透過鋪面材料孔隙滲透，此類透水鋪面材料主要分為：(1) 多孔性瀝青 (2) 多孔性水泥混凝土，其中則以多孔性瀝青運用歷史最久，也最為普遍。

多孔性透水鋪面材料由於粒料堆積狀態呈現較多的孔隙，造成鋪面結構抗剪及抗變形能力不足，經過多年來各國專家學者的研究改良，多孔性瀝青的穩定值已由一般規

範的 350Kgf，提升至最高約 480Kgf〔室內實驗數值〕，多孔性水泥混凝土抗壓強度也從 125Kgf/cm² 提高到約 350Kgf/cm²，然而距離能夠直接運用於中、重交通量鋪面還是有一段差距。

3.2 第二類「拼接性透水鋪面」

利用塊狀鋪面拼接的間隙滲透雨水，此類透水鋪面工法自古以來即已大量使用，材料選擇性甚為多樣化，石塊、混凝土板、連鎖磚、透水磚、植草磚等，均屬於拼接性透水鋪面。

由於非連續性拼接的特性，為了保持表面平整，必須在面層與級配層中間加一層墊沙層，因此影響其透水、保水性能並且降低耐用性，除了極少數特殊案例運用於慢速車道以外，絕大部分使用於人行道、廣場及停車場。

4. 第三分類「結構性透水鋪面」

由於該類透水性鋪面既不屬於材料性透水，亦不屬於拼接性透水，而是運用「空調導水管架構」結合一般不透水混凝土，形成的「結構性透水鋪面」，故單獨列為第三大類（圖 4.1）。其結合了上述兩類透水鋪面之優點，更擁有上述兩類透水鋪面所不具有之高強度、高透水性，及主動式空調功能。

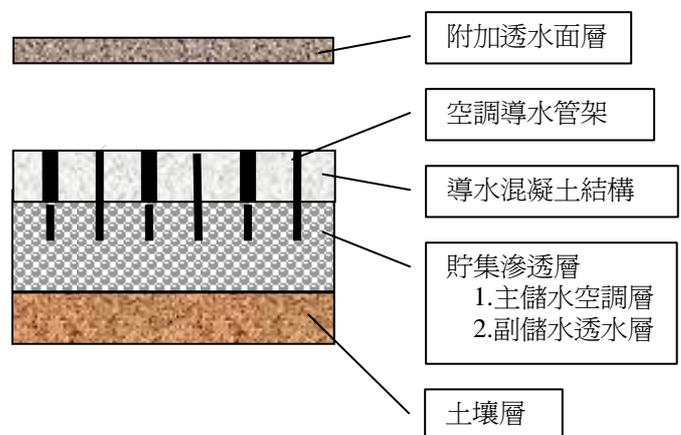


圖 4.1 結構性透水鋪面基本結構

結構性透水鋪面抗壓強度可高達 510 kgf/cm² ~1980kgf/cm²，透水率每分鐘超過 200mm，而主動式空調功能，更可有效減緩都市熱島效應，足以滿足永續生態工法上對於透水性鋪面不斷提高的效能要求。

4.1 基本結構

結構性透水鋪面主要由埋設有「空調導水管架構」的「導水混凝土結構層」以及「貯水滲透層」組合而成。如圖 4.1。

1. 主結構「導水混凝土結構層」使用一般不透水混凝土一體成形，不使用多孔性
2. 鋪面材料，也非拼接式鋪面，抗壓強度等同於剛性道路。
3. 以回收塑膠所製造的「空調導水管架構」透水透氣，同時為加勁材，可增加鋪面的抗彎及抗拉強度。
4. 由於鋪面强度高「貯水滲透層」可鋪設較大粒徑的礫石，並且無需鋪設墊砂層，較大的孔隙率可增加基地保水量。
5. 「導水混凝土結構層」表面直接施以硬化色料，就是美輪美奐的透水人行道或廣場，「附加透水面層」鋪上透水瀝青，即為透水道路，鋪上透水橡膠則可成為透水跑道運動場。

5. 結構性透水鋪面功能與特色

5.1 防洪 --- 基地保水

基地保水就是建築基地貯集及滲透雨水的功能，可分散吸收部份洪水量，減輕溝渠、河川或下水道的負擔，達到防洪的目的。

基地保水主要是透過「直接滲透」及「貯集滲透」二種方式來達成。直接滲透一般指的是綠地、草溝及透水性鋪面；貯集滲透則分為屋頂、陽台等人工地盤貯集、地面貯集及地下礫石貯集。

結構性透水鋪面透水率每分鐘達 200mm，足以吸納任何瞬間最大雨量，「貯

水滲透層」礫石級配的高孔隙率可儲存大量雨水，同時具有「直接滲透」及「貯集滲透」雙重功能。

5.2 空調 --- 降低熱島效應

都會區地表不透水面積每增加 10% 氣溫就會升高 0.14°C~0.46°C，地表上薄薄覆蓋一層水，即能有效的降低環境溫度，如同在馬路上灑水降溫一樣，然而只要水分蒸發殆盡，就馬上喪失了氣候調節功能，甚至裸露的土地，若是沒有植被，壓實乾燥後亦會失去氣候調節的功能。

結構性透水鋪面保水性能佳，能提供土壤充分的水分涵養，主儲水空調層較大的孔隙率，可提供冷空氣自由的流動空間，再透過下寬上窄、如同煙囪的空調導水管，主動導出地下冷空氣〔白努力原理〕，形成空氣循環系統，可有效降低路面溫度及環境溫度（圖 5.1）。

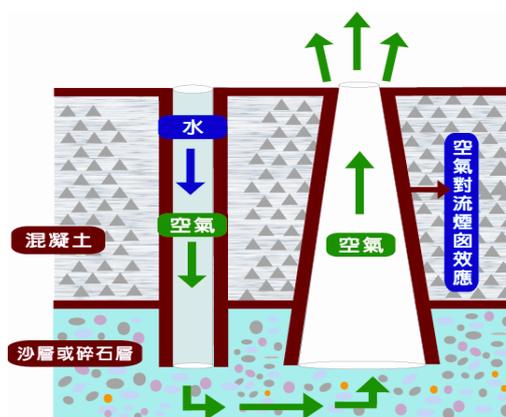


圖 5.1 主動式空調循環示意圖

5.3 抗旱 --- 雨水回收系統

從 1900 年到 1995 年，全世界耗水量整整增加了 6 倍，目前全球有 40% 的人口缺少淡水資源，到 2025 年，這個數字將增加到 66%。除了節約用水，世界各國都積極規劃推動廢水回收、雨水貯留、海水淡化及平原水庫等，多元化之水源經營，而這其中以雨水回收再利用成本最低。

結構性透水鋪面只要在貯水滲透層內加上排透水管及儲水槽，即成為成本最低的

雨水貯留設備，連結儲水槽後更可以成為地下水庫，收集到的雨水，均已經過級配的初步過濾，即可使用於馬桶用水、植物灌溉、洗車等次級民生用水（圖 5.2）。

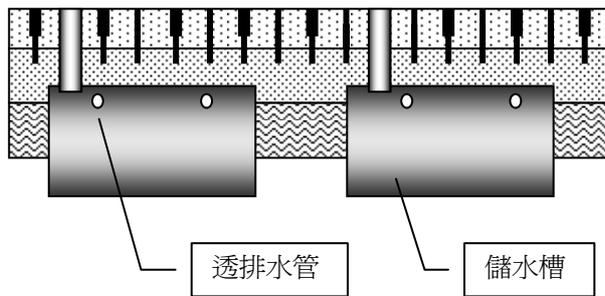


圖 5.2 雨水貯留系統圖

5.4 入滲 --- 回補地下水

養殖漁業，高樓建築地下室的開挖，甚至抽取地下水灌溉或飲用，都嚴重的影響地下水位，如果無法適量補充，將造成地層下陷，沿海及島嶼地區還會有海水入侵的危險。

土壤自然滲透率大約介於 $10^{-5} \sim 10^{-9}$ m/sec 之間，瞬間的豪大雨，土壤難以完全吸收滲透，經由本結構性透水鋪面的高保水率，可以讓土壤有時間慢慢的吸收、入滲、回補地下水

表 5.1 土壤自然滲透率

	粒徑 mm	滲透係數(m/s)
沙土	0.1	10-5
粉土	0.01	10-7
黏土	0.001	10-9

5.5 涵養 --- 防治河川污染

基地保水性能愈佳，土壤涵養雨水的能力愈好，愈有益於土壤微生物的活動，進而改善土壤有機品質，並滋養植物，對於土壤自然滲濾功能的提升，有很大的幫助。

在生態工法中對於非點污染的防治，有許多方式，如：生態池、滯留池、人工濕地等，然而在寸土寸金的都會地區，這些需要運用大量地表面積的工法，並不容易普遍推行。

結構性透水鋪面直接利用路面下基地，同樣可達成涵養土壤，利用土壤自然滲濾功能過濾沖刷路面的污染源，防治河川污染的目的（圖 5.3）。

年雨量少於 700mm 地區，宜盡量避免滲透入路面下的雨水直接蒸發，可利用本鋪面貯水滲透層高流動性的特性，引導雨水以「地面下灌溉」的方式滋養花草樹木再間接蒸發〔必要時可在貯水滲透層下鋪設防水布，以完全回收雨水〕，如此不僅可調節環境溫溼度，並且有固定 CO_2 製造氧氣，以及美化環境的效果。

5.6 安全 ---

1. 不會脫落、凹陷，保護行人安全。
2. 避免揚霧、漫光，增加行車安全。

5.7 環保 ---

1. 主要架構使用廢塑膠再生製造。
2. 不需使用鋼筋，減少製程中二氧化碳產生。
3. 部分級配可使用回收營建廢棄物。
4. 堅固耐用，減少維修重複耗材。
5. 降低車道溫度，減少輪胎磨損。
6. 降低車輛高速行駛氣爆聲，減少噪音。
7. 平衡溼度，加速落塵，清淨空氣。

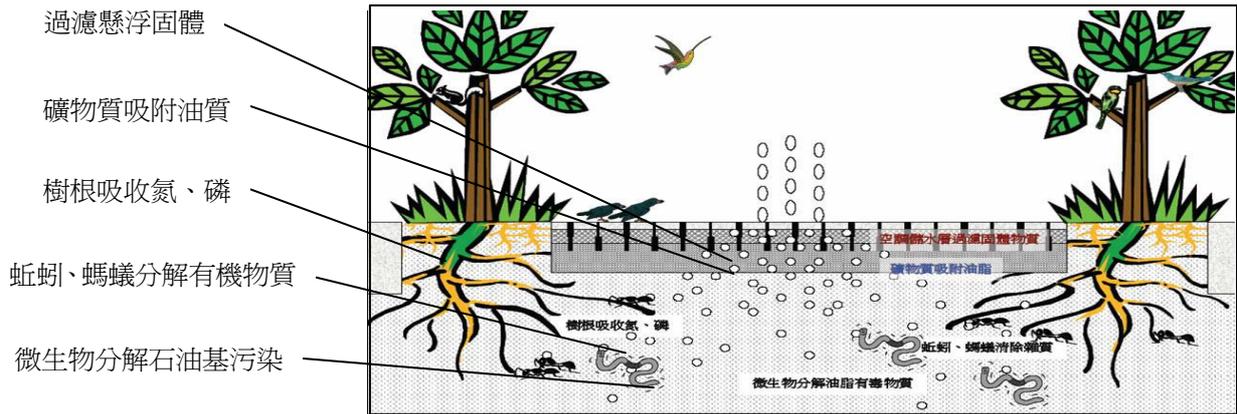


圖 5.3 結構性透水鋪面土壤自然滲濾示意圖

6. 高承載結構性透水鋪面施工步驟

6.1 人行道、廣場、停車場鋪設

1. 依預計完成路面高度挖地整平。
2. 依保水量計算厚度，鋪上副儲水透水層及主儲水空調層。
3. 鋪設空調導水管架構，導水管下方開口須插入主儲水空調層。如圖 6.1 所示。
4. 澆注所需強度的水泥混凝土。如圖 6.2 所示。
5. 在混凝土未完全乾固前施灑色粉硬化料，使用鏟刀或機具抹平，使與混凝土完全結合成一體。如圖 6.3 所示。
6. 待混凝土與色粉硬化料完全結合凝固後，拆除「空調導水管架構」上蓋，如圖 6.4 所示。
7. 使用吸塵器清除碎屑殘渣。如圖 6.5 所示。
8. 於表面清潔完成後噴灑養護劑即完成。

6.2 剛性車行道路鋪設

- 1.~4 步驟同 6.1
5. 在混凝土未乾固前使用拍漿機確實拍漿抹平。
6. 待混凝土完全凝固後，拆除「空調導水管架構」上蓋。

7. 使用吸塵器清除表面碎屑殘渣即完成。

6.3 半剛性高等級道路鋪設

- 1.~4 步驟同 6.1
5. 在混凝土未乾固前使用拍漿機確實拍漿抹平。
6. 待混凝土完全凝固後，拆除「空調導水管架構」上蓋。
7. 使用吸塵器清除表面碎屑殘渣。
8. 噴灑黏層。〔視需要可加鋪加勁格網〕
9. 鋪設多孔性瀝青。
10. 經滾壓、養生...等一般程瀝青鋪面程序即完成。



圖 6.1 鋪設空調導水管架構



圖 6.2 澆注混凝土



圖 6.3 施灑色粉硬化料



圖 6.4 拆除「空調導水管架構」上蓋



圖 6.5 清除碎屑殘渣



圖 6.6 噴灑養護劑後完工圖

7. 高承載結構性透水鋪面性能實驗

7.1 承載力

7.1.1 抗壓強度與抗拉強度

道路承載力一般以抗壓強度、抗彎強度及抗拉強度三者來表示，因為本工法係以一般混凝土澆注，抗壓強度與抗拉強度隨著混凝土psi值的不同而不同，如實驗中 3000psi 混凝土加防裂纖維絲及硬化色料抗壓強度為 510 kgf/cm^2 ，使用RPC高強水泥抗壓強度更高達 1980 kgf/cm^2 、抗拉強度也高達 74 kgf/cm^2 。

7.1.2 抗彎強度

以空調導水管架構為骨架，3000psi 混凝土澆注製作厚度 75mm、100mm、150mm 三種 60cm×60cm 混凝土板，經養生後進行測試（圖 7.1）。



圖 7.1 75mm 加導水管架構混凝土板抗彎試驗

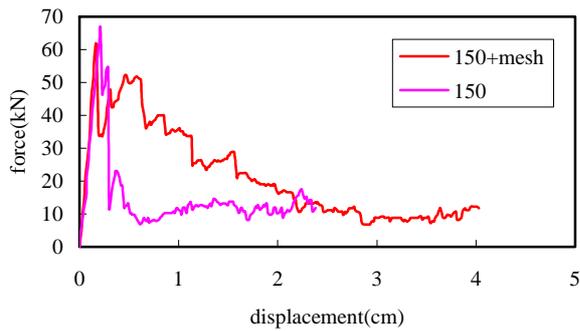


圖 7.2 150mm 加架構及未加架構混凝土板受力與變位歷程圖

實驗結果（圖 7.2、表 7.1）100 mm 加空調導水管架構的混凝土板，可承受 25~35 kg/cm²（約 350~ 500 psi）的垂直點荷載，此強度已足以承載一般重型車輛。

表 7.1 不同厚度加架構混凝土板抗彎強度

混凝土板厚 mm	75	100	150
垂直點荷載 kg/cm ²	15~20	25~35	50~60

7.2 透水效益

以圖 7.3 之模型測試結構性透水鋪面，新設階段、受到大量落葉及砂土堵塞階段（圖 7.4），及以吸塵器進行清潔維護後之透水率（表 7.2），平均透水率高達 12000mm/hr 即 34×10^{-2} cm/sec 以上，亦即每分鐘可完全吸納 200mm 的降雨量。

表 7.2 透水率試驗結果

透水率 (mm/hr)	試驗一	試驗二	試驗三	平均
新設階段	12,821	12,255	12,594	12,557
堵塞階段	1,992	1,372	1,098	1,487
恢復後階段	12,468	12,064	12,583	12,372



圖 7.3 透水率測試模型，及吸塵器清潔維護



圖 7.4 模擬堵塞情形

7.3 溫差控制

本項試驗以現場製作試體方式（圖 7.5），於鋪面之氣孔出口、混凝土鋪面上以及環境大氣中設置溫度熱耦計，持續量測達 8 天（192 小時），並使用 TDS 資料量測系統，每半小時量測乙次，量測溫度之變化趨勢，計算溫度差異，評估降低「熱島效應」的潛能。

由圖 7.6 中可觀察出結構性透水鋪面的溫度不論在混凝土鋪面上、氣孔出口，或是環境大氣中其溫差均維持在 2~3°C 之間，且氣孔出口溫度曲線有緩升緩降的現象，具控制環境溫度效果。

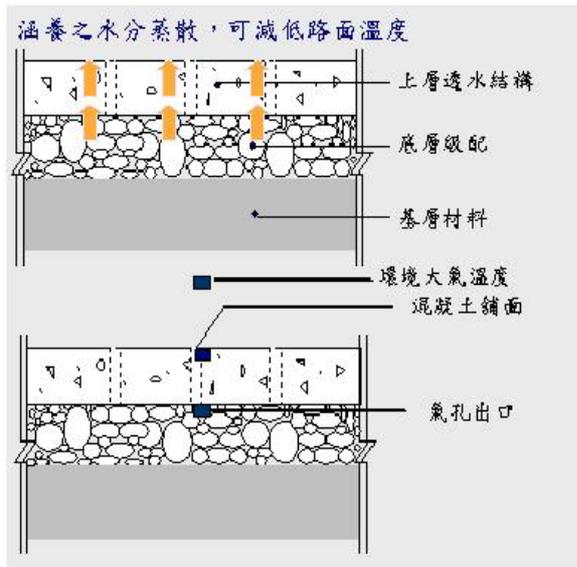


圖 7.5 結構性透水鋪面溫差控制效益試驗模型

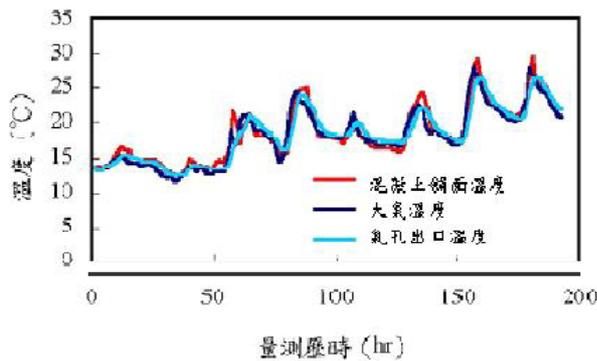


圖 7.6 鋪面溫度歷程曲線圖

8. 結構性透水鋪面的設計

利用有限元素分析方法完成了鋪面承受大型車輛（卡車、貨櫃車）、小客車及輕型機車等載重時，道路斷面之應力影響程度與範圍（圖 8.1）。

8.1 鋪面及基底層〔貯水滲透層〕承載設計

以道路行走大型車輛為例，鋪面所需要之混凝土抗彎強度（MOR）約為 90 psi；若安全係數（S.F.）取 3 時，則需求之抗彎強度約為 270 psi，比對表 7.1，鋪面厚度可採用 100mm〔4in〕或 150mm〔6in〕。

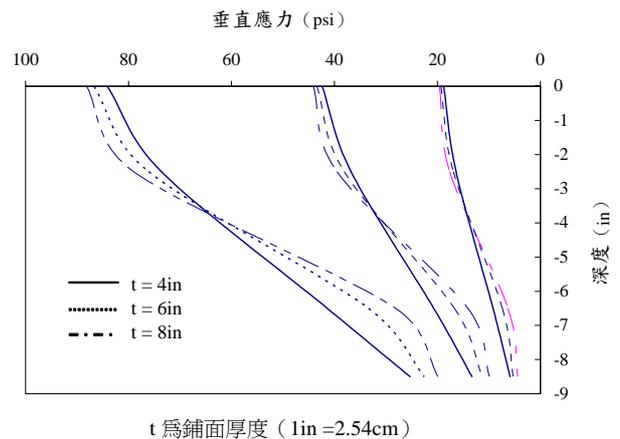


圖 8.1 鋪面受垂直應力與深度影響之關係

若採用鋪面厚度 4in，基底層承載最大垂直應力約為 60 psi；若採用鋪面厚度 6in，基底層承載最大垂直應力約為 50 psi，如此可以得到基底層所需的要求壓實密度。

另外路基土壤之 CBR 值及交通量，亦是影響基底層及鋪面厚度設計的重要因素之一，CBR 值愈低或交通量越大，鋪面總厚度就需要愈厚。

8.2 貯水滲透層保水設計

貯水滲透層同時也是基底層，設計上除了考慮承載力以外，也要計算其保水能力。

保水能力設計的重要依據有：工程地點附近的降雨強度〔i：mm/hr〕、降雨延時〔t：min〕、貯集滲透層平均孔隙率〔n：%〕以及土壤層的自然滲透率〔q：cm/sec〕，取得以上資訊後，依據下列公式，即可計算出貯水滲透層保水所需的厚度〔H：cm〕。

$$H = (0.1i - 3600q) \frac{100t}{60n}$$

9. 結論

結構性透水鋪面國際上的研究仍少，在本計畫研究過程中亦曾遇到不容易取得歷史文獻資料的困擾，然而根據各項實驗報告，以及 10 餘個工程案例的實際成果，證明本工法實用性甚高，許多材料性及拼接性透水鋪面無法克服的問題，均可在結構性透水鋪面中找到滿意的答案。

隨著研發進程，研究小組不斷發現結構性透水鋪面新的優點與應用方式，最後我們得到一個結論：地表土壤原本就是會透水透氣、呼吸循環，是人為的破壞使得這些功能喪失，進而引發生態環境連鎖性的惡化，結構性透水鋪面最大的貢獻就是把大地原有的功能找回來。

本報告乃介紹結構性透水鋪面的可行性，並且可能成為未來透水性鋪面的主流之

一，歡迎各界專家學者踴躍投入研究，一起為地球的永續發展貢獻心力。

10. 參考文獻

1. 陳瑞文「第八屆世界島嶼會議暨學術研討會」論文集
2. 品岱股份有限公司 www.jweco.com.tw 2004.6.08
3. 林憲德教授, Evaluation Manual FOR Green Buildings in Taiwan. 2003 New Edition
4. 香港教育城 www.hkedcity.net 2004.3.20
5. 林志棟教授, 台灣內政部建築研究所「透水鋪面工法性能試驗解析」2004.1
6. 李維峰博士, 台灣營建研究院「JW 防災空調導水鋪面研究報告」2004.4