

透水鋪面成效評估— 以「高雄橋頭新市鎮綜合示範 社區 14 條低衝擊開發人行步道 示範工程」為例

邱昱嘉 國立台灣大學水工試驗所 / 副研究員
 林昱德 國立台灣大學水工試驗所 / 研究助理
 蘇崇哲 营建署新市鎮組 / 組長
 游家懿 臺北市政府消防局 / 副局長
 銘傳大學都市規劃與防災學系 / 助理教授
 張博瑋 銘美工程技術顧問有限公司 / 大地技師

一、前言

為因應氣候變遷所導致的極端氣候及高速都市化下不透水面積增加的雙重衝擊，內政部營建署於民國 102 年起推動水環境低衝擊開發（Low Impact Development, LID）設施相關計畫，係以強化都市韌性承洪能力觀點討論 LID 設施，並冀逐步整備將 LID 設施導入臺灣城市開發建設的基礎。

為驗證 LID 設施設計方法，使其得以落實並推廣至國內工程界，於高雄橋頭新市鎮區域辦理「高雄新市鎮綜合示範社區 14 條低衝擊開發人行步道示範工程」（以下簡稱本工程），施作各類透水鋪面，以達展示、推動、工程經驗回饋等目標。本工程同時建置監測設備，長期觀察 LID 設施使用狀況，並適時地維護與管理，進而確保公共安全。長期監測累積資料除了可定量分析各項 LID 設施降低基地開發造成環境衝擊程度，同時作為後續改進與推動重要參考數據。

二、透水鋪面佈設與配置說明

2.1 示範區說明

本案位於橋頭新市鎮範圍內，高雄都會公園北側，如圖 1 所示。各步道皆屬於在既有區劃中之人行聯絡道，位置如圖 2 所示。為了解各種常用之透水鋪面類型，在施工、保水效果以及耐久性等特性之不同，本案 14 條步道共分為 3 類鋪面層，3 類底層級配料與 3 種深度之不同搭配。面層共分透水磚鋪面、JW 生態工法鋪面（管式透水鋪面）與透水瀝青鋪面，詳細參數如表 1 所示。

2.2 鋪面材料規格

一般道路底層為滿足其相應使用承載力，級配料須有良好的篩分析結果，且填築後最大乾密度需達到 95%。如此一來滲透性及雨水涵容能力大幅下降，即無法滿足透水鋪面性能要求。



圖 1 示範區位置圖



圖 2 透水鋪面人行步道分布圖

為驗證適合透水鋪面之底層級配料效益及施工可行性，14 條人行步道分別使用三類特殊底層級配料。其中 R02、R03、R06、R07 參考「美規 ASTM #57」；R01、R04、R08、R09、R12、R13、R14 參考「日規 JIS A5001 C40」；R05、R10 則參考「工程會 02726 章級配粒料第一類 B 型（以下稱 I-B 級配）」。

表 1 各人行步道設計規格表

項目	鋪面形式	級配形式	保水層 (cm)	施作面積 (m ²)
R01	B-1	C40	70	400
R02	B-1	#57	70	245
R03	B-2	#57	70	465
R04	A	C40	30	460
R05	B-1	I-B	70	250
R06	B-1	#57	30	325
R07	B-1	#57	50	295
R08	A	C40	50	755
R09	B-2	C40	70	285
R10	B-2	I-B	70	290
R11				暫不實施
R12	B-1	C40	30	200
R13	B-1	C40	50	270
R14	C	C40	50	1425

* 鋪面形式：

A : JW 生態工法鋪面

B-1 : 透水磚墊砂

B-2 : 透水磚墊透水混凝土

C : 多孔隙瀝青混凝土鋪面

「ASTM #57」（以下簡稱「#57」）為不含砂之碎石級配，亦可應用於混凝土粗骨材級配，在營建署出版之「水環境低衝擊開發設施操作手冊」（以下簡稱「LID 手冊」）中建議可使用於透水鋪面底層，一般認為孔隙率超過 25%，應用於混凝土粗骨材時則高達 39.6%。

「C40」為日本道路用碎石級配，C40 表示最大粒徑為 40 mm。在 2007 年日本道路協會出版之「透水性鋪裝技術指南」的施工案例中，該類鋪面多應用於底層下部（譯自日文），孔隙率為 8%。而在國內 2015 年由內政部營建署出版之「市區道路透水性鋪面使用手冊」（以下簡稱「透水鋪面手冊」）該類級配建議使用在車道透水鋪面，若用於人行道透水鋪面則用粒徑較小的 C30 與 C20 級配，其設計孔隙率在 6 ~ 18% 之間。本案配合 LID 手冊之推展，在 C40 級配規定範圍內，除去大部分細粒料，得到一類似粗骨材級配之碎石級配。

「I-B 級配」為國內既有之底層級配規範，一般並未直接使用在透水鋪面，在本案作為一般路面底層入滲與透水性之參考。本工程各類級配外觀參見圖 3，施工後現地採樣之級配曲線詳圖 4 ~ 圖 7。



圖 3 現場級配料外觀

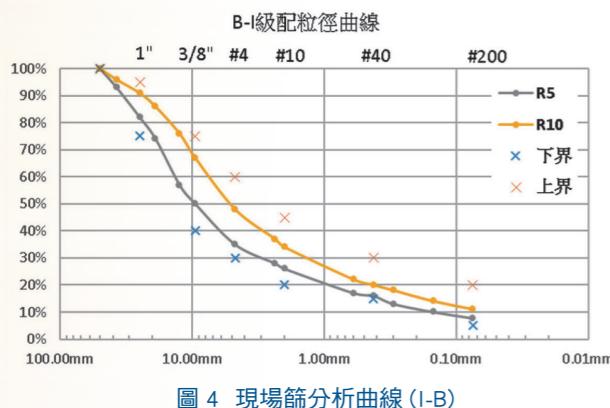


圖 4 現場篩分析曲線 (I-B)

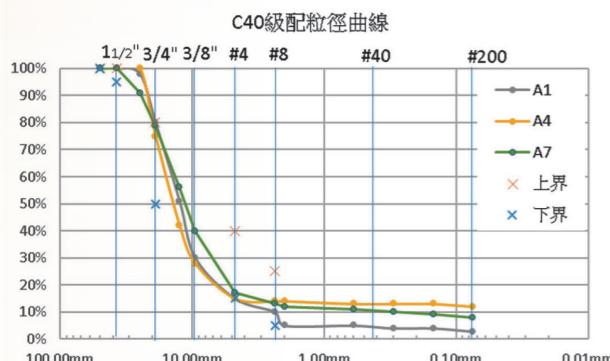


圖 5 現場篩分析曲線 (C40)

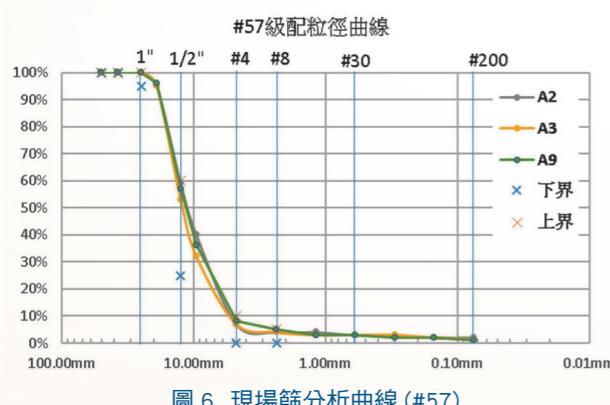


圖 6 現場篩分析曲線 (#57)

2.3 級配層深度

深度配置分別使用 30 cm、50 cm 與 70 cm 三種底層深度，用以了解在人行步道使用時是否能提供足夠強度與耐久性，以及該區降雨情境與級配層貯水空間是否匹配。

2.4 其他設計注意事項

鋪面其它設計主要參考來自 LID 手冊，包含縱向坡度控制，橫向坡度控制，分層使用地工織布，級配底層排水管等，結構如圖 8 所示。另於道路兩側施作混凝土擋土邊界，作為與周邊土體、水體之區隔，也避免兩側因不同材料引起之側向壓力差異破壞，施工現場照片如圖 9 所示。

道路設計之完成面高於周邊既有地面 5 cm，使鋪面盡可能成為單一的集水範圍，只單純反應降雨與級配層水位之行為；同時也降低周邊土壤隨表面逕流通過鋪面造成堵塞。

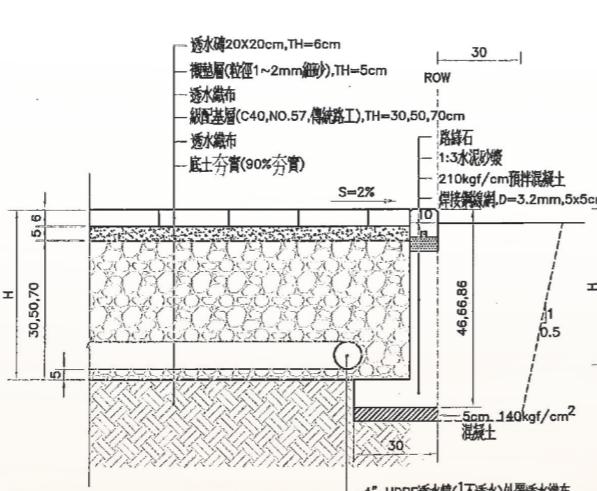


圖 8 透水鋪面剖面結構圖 (本案竣工圖)

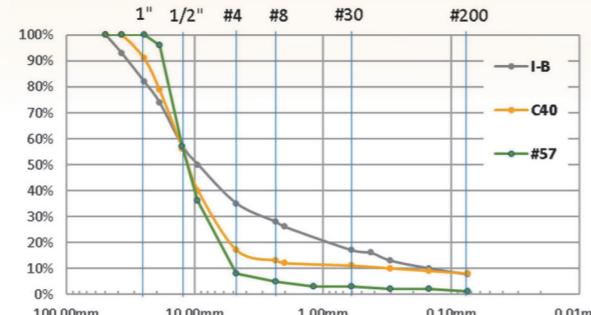


圖 7 I-B, C40, #57 級配篩分析曲線比較圖



圖 9 透水鋪面施工照片

三、級配層水位監測結果與分析

3.1 水位監測設備安裝

透過鋪面層垂直深入級配層底部之多孔網管，將壓力式水位計設置在管底。級配層蓄水時，透過多孔網管之孔隙滲入監測管內，由壓力式水位計測得蓄水深，藉此觀察水位變化情形。

3.2 挑選降雨事件樣本

本案完工至今三年中，共記錄 164 場降雨，日雨量統計觀察結果顯示，高雄市降雨主要集中在 5 ~ 9 月間。總降雨量以小於 30 mm 的降雨事件為主，少有超過 100 mm 的事件；最大時雨量以 15 mm 內為主，偶有大於 35 mm 的降雨事件。而就水位計反應而言，大部分降雨事件均無法錄得水位反應，推測在降雨量小之事件，水量並不足以產生足夠之入滲壓力，或是不足以充滿各層材料之表面吸附量，所以沒有產生自由水位。

因此，依據降雨延時長、降雨強度高且總雨量高等條件，挑選 8 場次降雨事件，進行水位紀錄觀測分析，如表 2 所示。

表 2 降雨場次表

場次	日期	總雨量 (mm)	延時 (hr)	最大時雨量 (mm/hr)
1	107/08/26	500.5	49	77
2	108/07/19	184.8	11	86.6
3	108/08/17	118	20	24.4
4	109/05/22	445	29	54.4
5	109/08/24	39.5	5	33.8
6	109/08/26	259.6	20	30.2
7	110/06/06	269.2	20	47.8
8	110/06/28	124.8	23	22.2

3.3 鋪面保水能力分析方法

本案水位記錄分析，配合鋪面形狀、貯水層深度與底床縱向坡度資料，建立水位—容積曲線關係。因自由水面以下之體積尚包含級配料之土壤體積，各鋪面之水位—容積關係之推算須配合各類級配料之孔隙率 (Porosity) 進行，以下舉人行步道 R3 級配層水位於 110/06/07 降雨事件的觀測資料為例。

在算得貯水量變化歷時曲線後，貯水量前後兩筆資料之差值，即為單位時距 (5 min) 內之水量變化，如圖 10 所示，降雨時蓄水量曲線明顯上揚，雨勢減弱或放晴後蓄水量曲線平緩下降，此即為觀察鋪面透水保水性能之基礎。

貯水量變化速度圖呈現貯水量變化與降雨強度之關係，如圖 11 所示。觀察貯水變化得知最大入流速度超過 $3 \text{ m}^3/5 \text{ min}$ ，排出速度則不到 $0.5 \text{ m}^3/5 \text{ min}$ ，保守估計排出速度僅入流

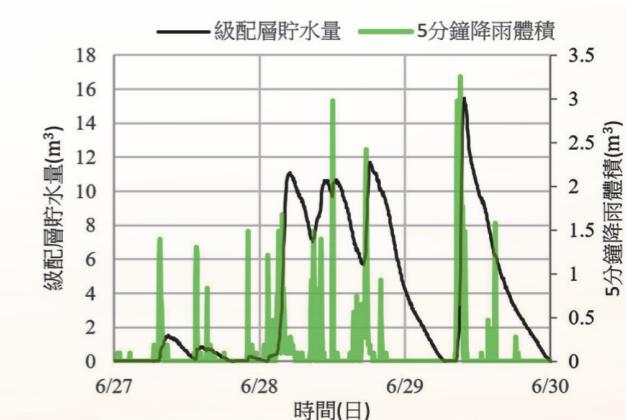


圖 10 降雨與級配層貯水量曲線 (以 R3 站為例)

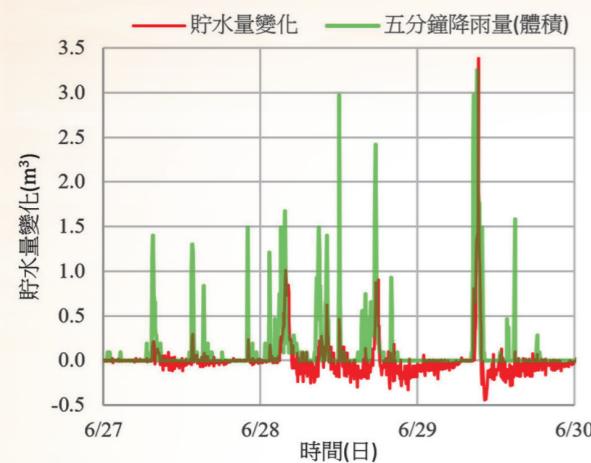


圖 11 降雨與貯水量變化速度曲線（以 R3 站為例）

速度的六分之一，具有快儲緩排的效果。進一步將水量變化速度曲線正值部分進行積分，可算出受到透水鋪面影響產生滯留效果的水體總量（不含排出速度大於入滲速度時刻之雨水進入量）。本場次降雨事件之總入水量為 44.1 m^3 （貯集量）。本場次降雨在鋪面上總計有 103.6 m^3 ，估算約有 $44.1/103.6 = 42.5\%$ （貯集比）雨水經過透水鋪面產生貯集、緩排、過濾淨化等功能。

3.4 各類鋪面性能差異分析

觀察降雨期間，級配層水位隨時間的變化，以 R1 ~ R6 六條人行步道為例，如圖 12 所示。可以看出其對驟雨反應明顯，整體上符合快速收納降雨，緩慢排出的微型滯洪與生態需求目的。

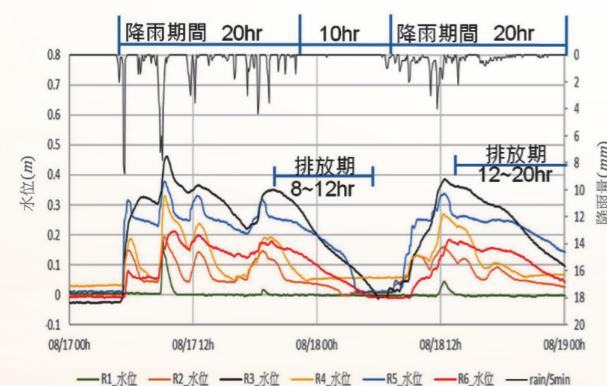


圖 12 降雨期間水位隨時間變化圖

表 3 鋪面貯集量表			
步道編號	平均	步道編號	平均
R1-B1-C40-70	貯集量 5.08	R8-JW-#57-50	貯集量 24.95
	貯集比 4.3%		貯集比 19.4%
R2-B1-#57-50	貯集量 8.13	R9-B2-C40-70	貯集量 11.32
	貯集比 13.8%		貯集比 11.8%
R3-B2-#57-70	貯集量 39.78	R10-B2-T-70	貯集量 20.43
	貯集比 31.4%		貯集比 8.2%
R4-JW-#57-30	貯集量 17.79	R12-B1-C40-30	貯集量 59.64
	貯集比 11.8%		貯集比 148.1%
R5-B1-T-70	貯集量 11.07	R13-B1-C40-50	貯集量 43.46
	貯集比 14.7%		貯集比 52.6%
R6-B1-#57-30	貯集量 17.39	R14-C-C40-50	貯集量 235.35
	貯集比 15.1%		貯集比 47.9%
R7-B1-#57-70	貯集量 16.90	單位：貯集量 (m^3)	貯集比 20.4%

單位：貯集量 (m^3)

整理 13 條人行步道於各降雨事件的監測結果如表 3，以透水瀝青鋪面平均貯集比 47.9% 為最高；2 處 JW 鋪面之貯集比分別在 11.8% 與 19.4%；2 處使用 I-B 級配者之貯集比為 14.7% 與 8.2%；其餘透水磚鋪面使用碎石級配 (#57、C40) 之貯集比由 3% ~ 31.4% 不等 (R12, R13 因工程設計，外水容易倒灌，故不論)。另外，本計畫未發現級配層深度對入滲能力或貯集比的影響，後續可針對級配層貯滿水後的情境加以研究。

進一步觀察各鋪面貯水量變化速度，可以更為理解各類鋪面性能表現之差異。以雨水入滲之能力而言，瀝青鋪面最易讓雨水進入，其次為 JW 鋪面，最末是透水磚鋪面，透水磚鋪面中，又以使用 I-B 級配者入滲力最低。然而 JW 鋪面因為通透性高，排放速度也高；同樣地，入滲率較差的 I-B 級配，排出速率也低，由於貯集量為入滲與排出速度之差異所構成，所以造成瀝青鋪面以外之各鋪面貯集比差異不如預期，整理所有人行道透水鋪面性能如圖 13 所示 (由於 R12 下游未設置出口，且有邊溝水流溢入問題，以致監測結果無明確特徵，故排除)。

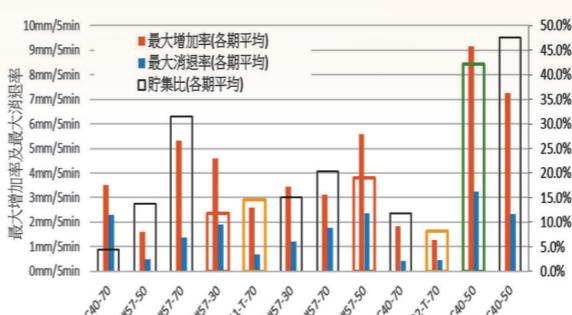


圖 13 各人行道貯水性能圖

四、鋪面區域溫度觀測結果

4.1 溫度監測設備安裝

於各人行步道設置溫度計，量測地面以上 30 公分的溫度，採樣週期為五分鐘一筆。同時於工務所設置溫度計作為一般鋪面對照組。

4.2 溫度監測結果分析

部分監測結果呈現，透水鋪面對環境溫度如熱島效應等具有改善成效，結果與建研所「建築基地保水滲透技術設計規範與法制化之研究子計畫二：透水鋪面技術規範與法制化之研擬 (94 年)」相互應證。

以人行步道 R9 在 108 年 7 月 18 日至 25 日，於地面上 30 公分處的溫度監測記錄為例，比較在有無透水鋪面兩種狀況下的溫度隨時間變化，並考慮降雨情境，如圖 14 所示。

逐時將工務所測站溫度減去人行步道 R9 溫度即為透水鋪面降溫效益，並比對該效益與降雨的關係，如圖 15 所示。在 7 月 19 日午後至 21 日中午的降雨期間，兩處氣溫紀錄趨於

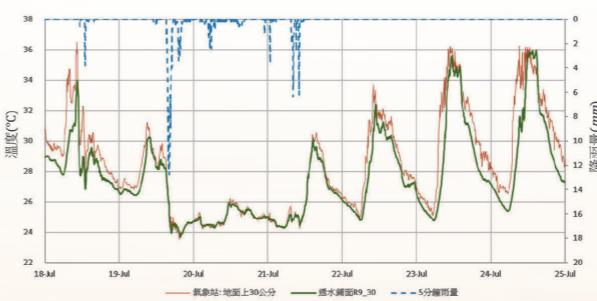


圖 14 氣溫與降雨紀錄圖（以 R9 站為例）

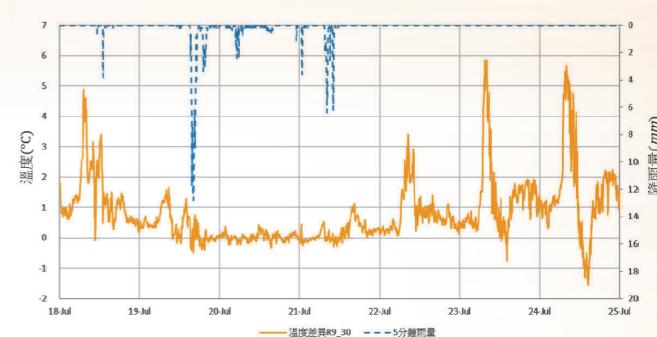


圖 15 降溫效益歷時圖（以 R9 站為例）

一致。在其他未降雨的時間裡，入夜至清晨透水鋪面降溫效果為 $1 \sim 2^\circ\text{C}$ ，日出後隨日照加溫，透水鋪面則約有 $4 \sim 5^\circ\text{C}$ 的降溫效果。

五、夯實度控制及試驗

5.1 透水鋪面與一般鋪面的差異

對於本案各透水鋪面而言，一重要課題在於各層的夯實。在基層夯實方面，依照一般要求夯壓至最大乾密度 95%，CBR 值 (加州承載比) 8% 以上，其要求及施作與一般鋪面相同。底層級配料夯實，規定每 30 公分厚度內必須分層夯實。對於使用 I-B 級配料之道路，亦屬於傳統之工項與工法，先以夯實試驗了解級配料最佳含水量與最大夯實密度，現場施工時則控制級配料在最佳含水量附近進行夯壓，最後以現地砂錐法試驗檢查夯實密度是否達到設計要求，通常可夯實至最大乾密度之 95% 左右，視道路設計與施工規範要求有所增減。

本案 #57 與 C40 兩種級配料的人行道，由於此類級配料並不包含細粒料，與一般道路鋪面略有不同。本案工程以試驗為目的，在缺乏此類無含砂碎石級配料之施工性參考資料之際，並未先在施工規範中規定所需達到之夯實度，而改依照 LID 手冊說明「以 10 噸鋼輪震動壓路機至少進行 4 次夯實 (前 2 次採震動式，後 2 次採靜態壓實)」進行規定，期望在施工後獲得數據與經驗作為參考。

5.2 透水鋪面夯實度試驗方式

本案的廠商於施工中，曾反應夯實試驗與現地密度試驗無法進行，因原契約仍規定以夯實試驗(CNS11777)、砂錐法試驗(CNS14733)等試驗方式進行，實際執行時發現夯實試驗無法進行、砂錐法試驗砂從碎石縫中洩漏等情事。建議施工單位改以相對密度試驗(ASTM D4253，圖 16)與橡皮球法(ASTM D2167)進行。

從統一土壤分類法細粒料(通過#200篩)含量在5%~12%之間之土壤必須要同時考量粗粒料與細粒料之力學特性，而本案使用之不含砂級配，細粒料普遍在2%附近，砂(#4~#200號篩)含量也控制在15%(C40)或更低(#57, 7%)，故主要為粗粒料之力學行為控制。由於缺乏細粒料，含水量與夯實壓密行為較無關，因此須採用相對密度試驗，透過對樣本施加固定之載重並至於振動台上震動一定之時間，使樣本逐漸壓密至最大密度，如圖16所示。而橡皮球法則利用可變型之橡皮模，阻絕測量用水外滲至礫石之問題。

依照ASTM說明，本試驗法在高孔隙土壤、無法保持側面穩定之非黏性土壤等情實需



圖 16 相對密度試驗 (ASTM D4253)

照片來源：成功大學土木系，倪勝火，土壤力學實驗手冊

特別注意，主要考量為以壓力注水時會引起試坑變形，由於本案試驗對象為已夯壓之碎石層，應可施作，即便試坑有變形等情事，所得之結果亦趨向保守(體積大，密度小)，不至於有應用上之問題。

5.3 本案例試驗結果

本案以相對密度試驗(ASTM D4253)與橡皮球法(ASTM D2167)進行夯實度相關檢核，#57級配2次試驗達到相對密度90%、87%；C40級配2次試驗達到相對密度89%、87%，均達到85%(VERY DENSE)等級，若執行最大乾密度試驗，結果須達到97%。進一步以工地密度計算孔隙率，發現兩類級配均有約33.5%之孔隙率(Porosity)，I-B類級配則有約15%之孔隙率。

六、鋪面維護管理及耐久度檢討

本案人行步道使用率不高，主要為居民散步、遛狗使用。加上管理單位於入口設置車阻，機車闖入的狀況很少發生，因此並未發生超載或其他原因產生之嚴重不均勻沉陷問題。

14條步道中有3條透水磚鋪面，分別各於道路路口處出現小規模破損，車阻有擦撞痕跡，推測其破壞原因為機車闖入引起，亦可能因在入口處並未如兩側一般施作底層擋土牆，使粒料在入口處發生流失，致使面層強度降低，容易受到外力破壞。而透水瀝青鋪面部分，則出現車輛違規進入使用，留下輪胎印，如圖17。



圖 17 R14 輪胎痕

七、結論與建議

- 由觀測分析結果證實，透水鋪面順利地實現在強降雨時快速收納水體，並且大約在降雨結束後4~12小時將大部分的自由水體排出。其中以瀝青鋪面入滲能力與貯集比最佳，JW鋪面及透水磚鋪面雖然稍遜於瀝青鋪面，但仍具備快儲緩排功能。
- 透水鋪面對環境溫度如熱島效應等具有改善成效，夜間降溫1~2°C，日間降溫4~5°C，降雨期間則沒有影響。
- 在透水磚鋪面道路入口處曾發生的破壞，以及透水瀝青鋪面面層強度較低，容易出現車轍，粒料脫離等情事，顯示透水鋪面之整體施工法與耐久性仍有改善之空間與必要。
- 透水性鋪面應用在人行步道使用並無太大問題，但路緣處不論面層或底層，均需要建立可靠之邊界，並配合適當的使用管理，以延長鋪面之耐久性。
- 建議透水鋪面之底層四周，設置擋土設施，避免粒料移動，如道路周邊無重要設施，建議可以採用透水砂漿與紅磚漿砌完成，以利級配層之水體順利滲透至周邊土壤，回到自然環境中。
- 為提高鋪面之雨水入滲效率、提高貯水效能，本工程基於營建署LID手冊中所推展之重要精神與工法試驗，使用不含砂之碎石級配作為底層配料，並與一般含細粒料之鋪面底層進行比較。
- 使用不含砂之碎石級配作為道路底層，在人行道應用上應無虞，然而須注意輔導設計監造、施工等單位採用適當之試驗方法，以確實檢查夯施之程度，初步建議夯實應至少達到相對密度試驗法所得之相對密度85%以上。
- 不含砂碎石級配缺少設計規範及範例，CBR試驗等常用強度試驗也遇到困難，無法確保承載力，故不宜直接應用於車道，後續仍需進行相關研究，並討論該類級配在重覆載重下排水效果的衰減。目前仍建議車行鋪面使用含砂級配，並建議控制孔隙率在10%~20%之間，在提供透水、保水、排水功能的狀態下，確保土層承載力且得以配合現有的設計方法試驗規範。

參考文獻

- 透水性舗裝ガイドブック 2007/社団法人日本道路協会，舗装委員会舗装設計施工小委員会著/2007
- 市區道路透水性鋪面使用手冊，營建署，2015
- 水環境低衝擊開發手冊，營建署，2015
- 施工綱要規範第02726章V9級配粒料底層，行政院公共工程委員會，2017
- 施工綱要規範第02794章V4透水性鋪面之一般要求，行政院公共工程委員會，2013
- Effect of Continuous (Well-Graded) Combined Aggregate Grading on Concrete Performance, Phase A: Aggregate Voids Content (Packing Density), Karthik Obla& Haejin Kim& Colin Lobo, NRMCA Research Laboratory, 2007
- ASTM D2167 Standard Test Method for Density and Unit Weight of Soil in Place by the Rubber Balloon Method, ASTM
- ASTM D4253 Standard Test Methods for Maximum Index Density and Unit Weight of Soils Using a Vibratory Table.