



無機塗封材料對綠色混凝土性能影響之研究

陳松靖^{1*} 黃然² 吳朝琴³

1. 國立海洋大學材料工程研究所博士生
2. 國立海洋大學材料工程研究所教授
3. 國立宜蘭大學建築與永續規劃研究所研究生

摘要

在臺灣製造的太陽能板占了全球 25% 的產量，也使臺灣成為世界上第二大生產國，因此亦製造了大量的事業廢棄物。故在未來持續發展太陽能此環保能源的趨勢下，廢棄物勢必會逐年增加，目前臺灣每年生產多達 1000 噸的廢棄電池玻璃，針對廢棄太陽能板破碎後研磨成光電矽晶粉進行成分分析，其中 SiO_2 比例高達 75%，且重金屬含量皆符合國內環保署規範，顯示光電矽晶粉有潛能應用於水泥基質複合材料作為膠結材、微細之填充材料或卜作嵐材料使用。

基於「永續發展」的精神，將廢棄材料永續利用以及降低廢棄材料對於自然環境污染等因素，亦即所謂綠色混凝土之推展，更為本研究之首要目標。再者，考量綠色混凝土實用性，重要考量為阻止有害物質侵入面層破壞，塗封材料為優質方法，塗覆於表面產生阻絕效果，延長結構物使用年；然而塗封材料種類眾多，但多數採有機質塗封，形成物理屏障薄膜於混凝土表面，有機塗封材料可能對環境或人體造成危害，隨時間累積，塗膜受環境因素老化或剝離，導致混凝土喪失保護功能。而若改用無機塗封材料，是否可避免上述缺點，達到永續保護能力仍值得探討，則為本研究之另項目標。利用 EDS、XRF 及 TGA 分析，可驗證塗封材料可滲入表面下約 10mm 並發生結晶反應。

關鍵字：綠色混凝土、再生粒料、太陽能板、塗封材料

通訊作者：jaosn314@gmail.com



The Use of Inorganic Sealer Materials on Green Concrete

Sung-Ching Chen^{1*}, Ran Huang², Chao-Chin Wu³

1. Postgraduate Student, Graduate Institute of Architecture and Sustainable Planning, National Ilan University
2. Professor, Department of Harbor and River Engineering, National Taiwan Ocean University
3. Graduate Student, Graduate Institute of Architecture and Sustainable Planning, National Ilan University

Abstract

Solar panels made in Taiwan accounted for 25% of global production, but also to make Taiwan become the world's second largest producer, thus also created a large number of industrial waste. Therefore, in the trend of the future sustainable development of this environmentally friendly solar energy, waste is bound to increase year by year, the current Taiwan produce up to 1,000 tons of solar glass waste annually. Considering grounded photovoltaic solar panel silicon powder, in which SiO₂ ratio of up to 75%, and the heavy metal contents are in compliance with domestic EPA specification, have the potential to be used in the cement-based composite material as a binder material, the fine filler material or a pozzolanic materials.

Based on the spirit of sustainable development, the sustainable use of waste materials and the less pollution to the natural environment, this study presents the so-called development of green concrete, namely the major goal of this research. Next, the practical use of green concrete in market needs to prevent various unlike materials into the cracks and porosities and to reduce the strength and durability. Use inorganic sealer material in order to prevent intrusion of hazardous material and repair concrete. Coating in the surface may reduce permeability and increase concrete durability. But there are too many types of coating and most of them are organic which will become physical barrier of concrete surface treatment. Such organic coating materials have the decisive shortcoming of being air-polluting during manufacturing process as well as during coating works. Surface coatings aging and peeling caused by environmental factors, which could cause concrete loss of protection and degradation again. Inorganic sealer material is adopted to compensate this disadvantage, and it becomes the other goal of this study. Depth of penetration capability by EDS, XRF and TGA shows sealer layer at 0 - 10mm under the concrete surface has been affected by the penetration of CSM.

Keywords: Green concrete, Recycled aggregates, Photovoltaic (PV), Sealer

***Corresponding author E-mail: jaosn314@gmail.com**

一、前言

在都市化高速發展下，營建廢棄物的產量也隨之增加，而現今營建廢棄物轉用性持續增加，但卻缺乏有效的管理，造成營建廢棄物所具備的附加價值無法被有效的利用，且若營建廢棄物無妥善的處理方式，恐造成嚴重之環境汙染，因此，有效利用資源並兼顧環境之永續發展，建立完善的營建廢棄物資源化再利用機制，透過節能、廢棄物資源化及生態工程等方式，滿足營建工程上需求，並達到與永續環境共生的目標就成為十分重要的課題。

臺灣太陽能電池製造商的數目自 2010 年起大幅增加。Solarbuzz 總裁 Craig Steven 在「全球太陽光電市場商機大佈局」論壇中指出，2010 年中國與台灣的在太陽光電 (Photovoltaic, PV) 電池的產量將囊括全球 62.2% (中國 45.2%；台灣 17%)，太陽能製造重心轉移到亞洲市場的態勢抵定，台灣躍升成為全球第二大太陽能電池製造產地 (經濟部能源局，2012)。而太陽能電池在製造的過程中，由於需要經過切割、磨邊、倒角以及可能產生的破損、破片亦或是良率不佳等問題，以及舊式太陽能電池轉換效率不佳需汰換更新，因此產生了大量的太陽能電池廢棄物。故未來在世界持續發展太陽能此環保能源的趨勢下，廢棄物勢必會逐年增加，若不盡早妥善規劃相關廢棄物處理辦法，廢棄太陽能電池將成為新的環境負擔。地球上任何資源都是有限的，透過資源的再利用以及正確的廢棄物處理將可使資源永續利用，更可降低製造成本的支出以及無謂的浪費 (V. M. Malhotra, 1999; D. M. Roy, 1999)。

各種廢棄材料永續利用以及降低廢棄材料對於自然環境汙染等因素，亦即所謂綠色混凝土之推展，更為本計畫之首要發展目標。再者，綠色混凝土具實用性之重要考量為阻止有害物質侵入面層破壞，塗封材料為達到修復混凝土品質方法之一，塗覆於表面產生阻絕效果，延長結構物使用年限；然而塗封材料種類眾多，但多數採有機質塗封，形成物理屏障薄膜於混凝土表面，有機塗封材料可能對環境或人體造成危害，隨時間累積，塗膜受環境因素老化或剝離，導致混凝土喪失保護功能。而若改用無機塗封材料，是否

可避免上述缺點，達到永續保護能力仍值得探討，亦為為研究之另一目標。

二、研究方法與步驟

本研究將以再生混凝土、綠色混凝土、無機塗封材料作為討論對象，探討無機塗封材料對綠色混凝土性能之影響，本研究共分為三階段進行試驗，各階段研究方式如圖 1 所示：

第一階段優先探討再生混凝土特性，以了解影響再生粒料表觀密度的原因很多，主要包括混凝土粒料的密度、砂率和水膠比，它們在很大程度上決定著混凝土的強度。

第二階段選擇綠色混凝土最佳之配比進行試驗、探討新拌性質、物理性質、耐久性質及微觀性質。

第三階段水泥質系塗封材料成品配製，藉由試驗驗證其防護效能，試驗項目包含電阻率試驗、吸水率試驗、透水試驗、快速氯離子滲透試驗(RCPT)、X 光能譜散佈分析(EDS)、X 光螢光光譜分析(XRF)、熱重量分析(TGA)及掃描式電子顯微鏡(SEM)，以了解水泥質系塗封材料防護之效果，做為後續研製材料之參考。

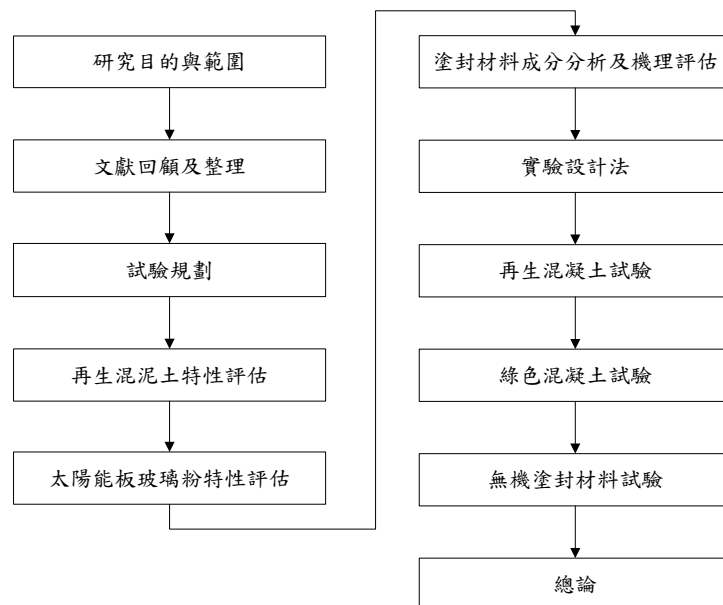


圖 1. 研究流程圖

三、綠色混凝土

3.1 綠色混凝土定義

綠色混凝土又稱為高性能混凝土，在節能、節料、工程經濟、勞動保護以及環境等方面都具有重要意義，是一種環保型、集約型的新型材料，可稱為「綠色混凝土」。綠色混凝土的概念是已故中國工程院院士、混凝土專家吳中偉教授提出的，他主要針對混凝土的生態功能協調和環境保護意義而倡導研究並廣泛應用高性能混凝土。

綠色混凝土應包含三層含義：

- (1) 對自然資源應是低消耗的，並且儘可能利用廢棄的工業殘渣（如各種礦渣、粉煤灰、煤矸石等）和城市垃圾。
- (2) 使混凝土本身在施工和使用過程中對環境無污染或低污染，有益於生態的良性循環。
- (3) 提高混凝土的耐久性，並且使混凝土本身可循環再利用。

3.2 再生粒料之特性

再生粒料之粒徑界於 16~32mm 者，其吸水率約為 3.7% 左右；而粒徑界於 4~8mm 者，吸水率約為 8.7% 左右。結果顯示粒徑減小則吸水率增高。日本經由大批廢棄混凝土塊碎化之再生粗粒料的乾搗單位重加以研究，其研究指出 S.S.D 比重為 2.29~2.51 乾搗單位重大約介於 1,120~1,430kgf/m³ 之間至於再生細粒料其 S.S.D 比重為 2.19~2.32。再生粒料比重較天然粒料低之原因為再生粒料中含有比重較低的水泥砂漿所致。

再生粒料的密度較天然粒料的密度低 10%；再生粗粒料的吸水率範圍為 3.5%~9%，再生細粒料的吸水率範圍為 5.5%~13%，這些值均遠高於天然粒料的吸水率範圍 0.5%~1.0%；耐磨損性能（洛杉磯試驗）再生粒料為天然粒料的 70%。

以混凝土碎塊所製成之再生粒料，其比重低於天然粒料，國內再生粗粒料的 S.S.D.容積比重約為 2.26~2.43，再生細粒料的 S.S.D.容積比重約為 2.27~2.29，再生粒料比重會較低的原因是因為中含有比重較低的水泥砂漿所致。國內再生粗粒料吸水率約 5.04%~7.52%，再生細粒料吸水率約 7.92%~10.37%，相較之下，天然粒料吸水率只有 0.8~3.7%，可見再生粒料的吸水率的確有偏高之趨勢。基於再生粒料之高吸水性，一般建議在拌製再生混凝土前，先將粒料預濕（處理成 S.S.D.狀態）以保持再生混凝土品質之穩定。

再生粒料往往被砂漿包裹，內部通常存在大量微細裂縫，導致再生粒料孔隙率較大，表觀密度較低，當其值 $\leq 2,250\text{kN/m}^3$ 時，不得用於配制再生混凝土。影響再生粒料表觀密度的原因很多，主要包括混凝土粒料的密度、砂率和水膠比，它們在很大程度上決定著混凝土的強度。

3.3 太陽能板玻璃粉

本研究所使用之再生太陽能板玻璃材料係由立順興資源科技股份有限公司所提供。其太陽能板破碎前外觀如圖 2 所示。太陽能板玻璃粉製程主要先以鐵鎚初步破碎後如圖 3 所示，再使用破碎設備進行第二次破碎如圖 4 所示，並進行過篩後，利用球磨機進行研磨，並再一次進行過篩等重複上述步驟製成實驗所需之粒徑如圖 5 所示，破碎設備與研磨設備如圖 6~7 所示，顆粒外觀顏色呈透明但夾雜些許白色塗層與黑色的不反光層，而外觀形狀基本上與一般天然河砂類似，但沒有固定形狀且外圍稜角部分較多。



圖 2. 太陽能板外觀

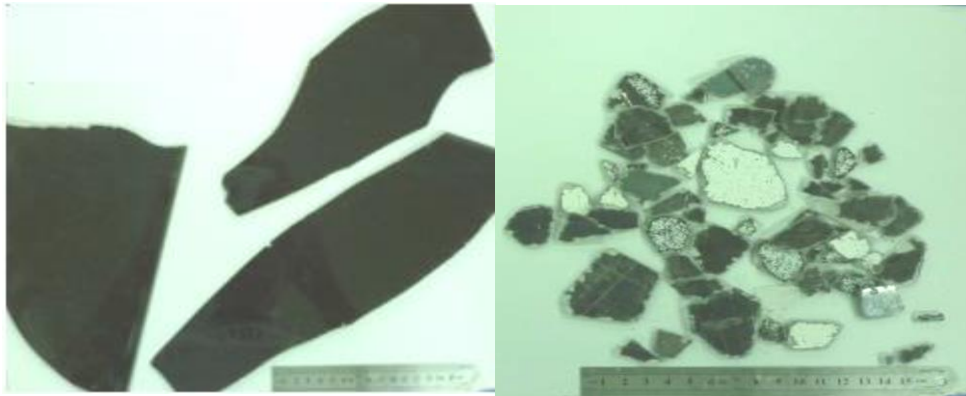


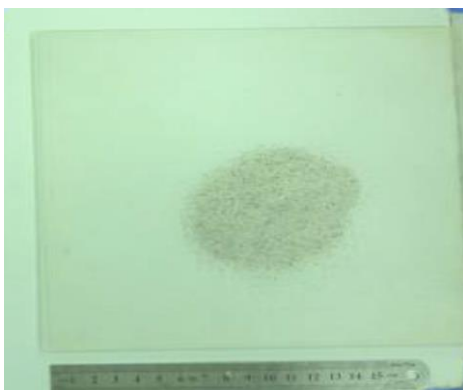
圖 3. 太陽能板破碎後顆粒外觀



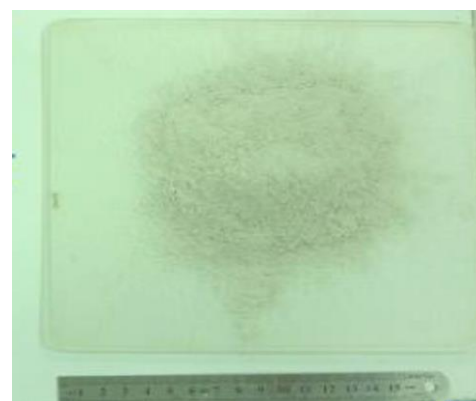
(e) 顆粒粒徑#4 ~ #8



(f) 顆粒粒徑#8 ~ #16

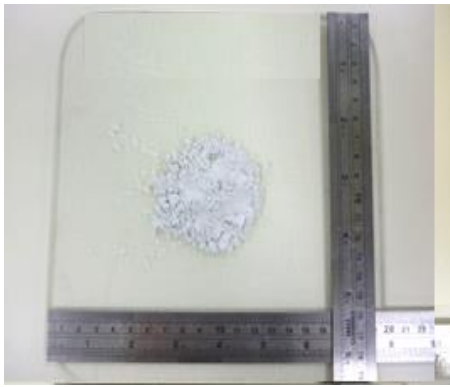


(g) 顆粒粒徑#30 ~ #50

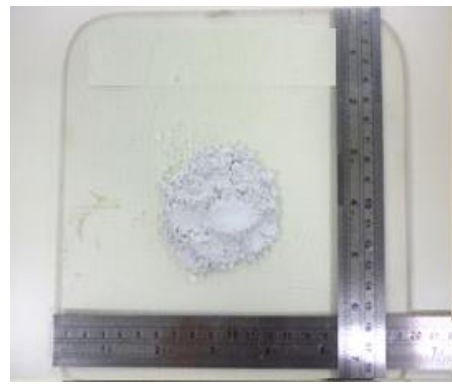


(h) 顆粒粒徑#100 ~ #200

圖 4. 太陽能板玻璃粉研磨前



(I) 停留在 #325 篩



(j) 通過#325篩以下

圖 5. 太陽能板研磨後顆粒外觀



圖 6. 破碎設備



圖 7. 研磨設備

3.4 塗封

塗封常於混凝土表面產生一層連續的薄膜，塗料之乾膜厚度約為 100-300 μm ，具有良好附著能力，甚至部分可能滲入混凝土之毛細孔隙，待其溶劑或揮發後，所殘留的固態物質會堵塞孔隙，若覆蓋兩層或更多層之塗料於同一基材上，可增強保護之屏障阻擋 H_2O 或 CO_2 之入侵。然而當水氣存在於塗層背面時將會失去防護效果，其因水氣可在膜層的內產生聚集效果，造成膜層與基材間之破壞，原來塗封層預設要達到防止外界水氣侵入之目的就此喪失。

四、試驗計劃及階段成果

4.1 試驗材料

製作各項試驗之試體所需水泥採用市售臺灣水泥公司之卜特蘭 I 型水泥，其特性符合 CNS 61【卜特蘭水泥】標準，其物理性質如表 1 所示。

表 1. I 型水泥物理性質

| Item | TCC Results(%) | CNS 61-R2001(%) |
|--|------------------|---------------------|
| Physical Properties | | |
| 攪料空氣含量 (Air Content of Mortar) % | 7.2 | Max. 12.0 |
| 細度：Fineness (Blaine) m^2/kg | 345 | Min. 280 |
| 熱壓膨脹 (Autoclave Expansion) % | 0.10 | Max. 0.8 |
| Compressive Strength | (MPa),psi | |
| 3 days | 3290 | (12),Min. 1800 |
| 7 days | 4380 | (19),Min. 2800 |
| 28 days | 5700 | (28),Min. 4000 |
| Setting Time(Vicat) | Minutes | |
| 初凝(Initial) | 155 | $\geq 45; \leq 375$ |
| 終凝(Final) | 260 | -- |

矽灰使用寧遠科技有限公司所購置之矽灰，外觀如圖 2 所示，其二氧化矽含量約 94%，比重為 2.3，其物理性質如表 2 所示。

表 2. 矽灰的氧化物成分

| | | |
|--------|--------------------------------|------|
| 含水量(%) | | 2.8 |
| 成分(%) | SiO ₂ | 94.0 |
| | Al ₂ O ₃ | 0.06 |
| | Fe ₂ O ₃ | 0.03 |
| | CaO | 0.5 |
| | MgO | 1.1 |
| | Na ₂ O | 0.3 |
| | SO ₃ | 0.8 |
| pH 值 | | 13 |

再生細粒料：本研究所使用的再生細粒料，係由榮民工程股份有限公司羅東砂石廠的設備所生產，由於目前砂石廠規定只能處理天然河床土石料，不能進用營建廢棄物來加工，因此本研究於砂石廠內自製混凝土塊，並於養護 56 天後進行碎解製作再生粒料，再生粒料的基本性質、粒徑分布如表 3 所示。

表 3. 再生細粒料物理性質

| 試驗項目 | 規範 | 試驗值 |
|-----------|---------|------|
| 比重(S.S.D) | CNS 487 | 2.36 |
| 吸水率(%) | CNS 487 | 9.43 |

太陽能光電矽晶粉經化學成分分析結果顯示，主要成分為 SiO₂，佔 76%，CaO 約佔 6%，化合物成分如表 4 所示。

表 4. 飛灰的氧化物成分

| | | |
|---------------|--------------------------------|-------|
| 含水量(%) | | 0.13 |
| 灼熱減量(%) | | 2.76 |
| 成分(%) | Al ₂ O ₃ | 20.34 |
| | CaO | 2.82 |
| | Fe ₂ O ₃ | 6.61 |
| | MgO | 0.93 |
| | SiO ₂ | 56.48 |
| | CuO | 0.11 |
| | SO ₃ | 0.25 |
| pH 值(水：灰=1：1) | | 11.05 |
| 325 號篩殘留量(%) | | 11.9 |

資料來源：台電興達火力發電廠

本階段採用兩種水泥質系塗封材料(CSM1 及 CSM2)，外觀如表 5 及圖 8 所示。其組合成分含有水泥、矽砂及其他化合物所組成的灰色粉末狀材料，使用方法是將 CSM 與水混合後(CSM：水，重量比)，均勻塗刷於基材表層上，待各塗層表面乾燥後，依照其設定控制因子進行後續處理。

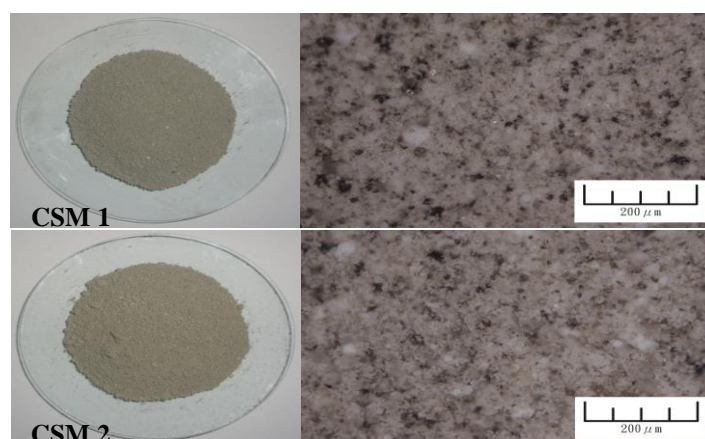


圖 8. 水泥質系塗封材料(CSM)外

表 5. 水泥質系塗封材料(CSM)氧化物成分

| 化學成分 (%) | 水泥質系塗封材料 | |
|--------------------------------|----------|-------|
| | CSM 1 | CSM 2 |
| CaO | 60.90 | 64.80 |
| SiO ₂ | 15.30 | 15.40 |
| Al ₂ O ₃ | 3.31 | 3.26 |
| Fe ₂ O ₃ | 2.53 | 3.74 |
| SO ₃ | 2.46 | 2.16 |
| Na ₂ O | 3.56 | 3.33 |
| K ₂ O | 0.28 | 0.25 |
| MgO | 11.50 | 6.51 |
| Other | 0.16 | 0.55 |

4.2 毒性特性溶出程序(TCLP)檢測

太陽能板玻璃粉的化學組成與事業廢棄物毒性特性溶出程序(toxicity characteristic

leaching procedure, TCLP) 實驗結果如表 6 所示，TCLP 實驗結果顯示可以看出無任何有害重金屬成分析出，亦即此廢棄太陽能電池破碎製成之顆粒及粉末則不需經過額外特殊處理便可使用。

表 6. 太陽能板玻璃粉 TCLP 溶出檢測結果

| 項目 \ 元素 | Pb (mg/L) | Cr (mg/L) | Cd (mg/L) | Zn (mg/L) | Cu (mg/L) | Ni (mg/L) |
|---------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| 太陽能板玻璃粉 | N.D. | N.D. | N.D. | N.D. | N.D. | N.D. |

4.3 太陽能板玻璃粉化學性質

利用 XRF(X-ray fluorescence, XRF) 針對五個樣本進行分析得到化合物平均值分別為二氧化矽(SiO_2)75.9%、氧化鈉(Na_2O)8.84%、氧化鈣(CaO)6.06%、氧化鎂(MgO)2.74%，詳如表 7 所示。

表 7. 太陽能板玻璃粉化學成分

| 化學成分(%) | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | Mean |
|-----------------------------|------|------|------|------|------|--------------|
| SiO_2 (%) | 76.2 | 76.0 | 75.7 | 75.9 | 75.8 | 75.92 |
| Na_2O (%) | 9.2 | 8.8 | 8.7 | 8.5 | 9.0 | 8.84 |
| CaO (%) | 5.8 | 6.0 | 5.9 | 6.2 | 6.4 | 6.06 |
| Fe_2O_3 (%) | 0.28 | 0.28 | 0.3 | 0.30 | 0.29 | 0.29 |
| Al_2O_3 (%) | 0.12 | 0.11 | 0.11 | 0.10 | 0.10 | 0.11 |
| MgO (%) | 2.5 | 2.6 | 2.9 | 2.9 | 2.8 | 2.74 |
| SO_3 (%) | 2.4 | 2.2 | 2.2 | 2.4 | 2.3 | 2.3 |
| K_2O (%) | N.D | N.D | N.D | N.D | N.D | - |

4.4 田口方法計算

本研究依據其試驗品質特性，望大特性以抗壓強度試驗及電阻率試驗為討論對象，望小特性則以吸水率試驗及透水試驗做為討論。為減少實驗過程所產生之誤差而影響結果分析，並提高試驗因子及水準之準確度，每次試驗將取 5 組數據計算平均值(Mean)、標準差(S)及信號雜訊比(S/N 比)，並依其各別 S/N 比計算因子反應情形。

本研究試驗結果之最佳因子水準及貢獻程度如表 8 所示，綜觀言之，在各單一品質

特性中均以第 1 組的因子水準為最佳之試驗結果，而第 9 組則為最差之試驗結果。在因子貢獻度中則略有差異，主要以 B 因子(水膠比)及 F 因子(鹼溶液)為最重要的控制因子，反之，A 因子(細度)在本實驗當中則貢獻度最小，未能達到影響試驗之程度。而從直交表設計試驗過程當中，可以得出最佳因子及水準，然而本次試驗所得到之結果略不一致，主要為 A 因子(細度)及 D 因子(摻料種類)，當中 D 因子(摻料種類)則較難判定出最佳之水準。

表 8. 各試驗之最佳因子水準及貢獻程度

| 試驗項目 | 最佳試驗組別 | 因子貢獻度 | 最佳因子及水準 |
|------|---|---------------|----------------|
| 抗壓強度 | Exp.1 A ₁ B ₁ C ₁ D ₁ E ₁ F ₁ G ₁ | B>F>E>C>G>D>A | A2B1C1D1E1F1G3 |
| 電阻率 | | B>F>E>D>C>G>A | A1B1C1D2E1F1G3 |
| 吸水率 | | B>F>E>D>C>G>A | A2B1C1D1E1F1G3 |
| 透水量 | | B>F>C>E>D>G>A | A2B1C1D2E1F1G3 |

五、結論與建議

5-1 結論

- (1) 本次研究所探討之再生太陽能板，其破碎後之顆粒外觀顏色呈透明，且夾雜些許白色塗層與黑色的不反光層，太陽能玻璃粉的比重約在 2.48，吸水率約為 0.2%，經 XRF 成分分析其主要成分為二氧化矽約 75.9%、氧化鈉約 8.5%及氧化鈣約 6.2%，且經 TCLP 分析結果顯示無任何有害重金屬成分析出。
- (2) 利用田口方法分別對抗壓強度試驗、電阻率試驗、吸水率試驗及透水試驗求其個別單一品質特性，並得出因子及水準反應程度與因子貢獻度，綜觀而論，四種品質特性主要以 B 因子(水膠比)及 F 因子(鹼溶液)為最重要的控制因子，然而其他因子因各試驗而有不同之排序。

5-2 建議

- (1) 本研究相關試驗僅考慮至 56 天之成果，建議後續可延長試驗時間，探討晚期強度發展及確認其耐久性能。

- (2) 掌握碎解後再生粗細粒料取代部分粗細料骨材之再生粒料混凝土變數組合及其物化特性。
- (3) 研究再生粒料混凝土、矽晶混凝土及二者結合之綜合型再生混凝土等三種型式之綠色混凝土總體物化效應之分析比較。
- (4) 探討無機塗封材料之可能滲透結晶機理與配製以建立其適用於三種型式之綠色混凝土之分析及市場應用性。

參考文獻

經濟部能源局，2012，能源發展綱要核定本

V. M.Malhotra, 1999, Making Concrete “Greener” with Fly Ash –supplementary cementing materials can reduce greenhouse gas into the environment, Concrete International, Vol. 19, No. 5, pp. 61-66.

D.M. Roy, 1999, Alkali-activated Cements: Opportunities and Challenges, Cement and Concrete Research, Vol. 29, No. 2, pp. 249-254.