

環境管理規劃類

漿紙產業無機副產物低碳排資源化之研究

蔡志達*、李昂軒**

摘 要

農林業是自然界最早的碳循環生態建構者，而華紙公司係台灣唯一林漿紙—即從造林到造紙一貫作業的企業，其產出之無機副產物大致有綠泥、飛灰、底渣，及少量性質屬非水硬性水泥的爐壁灰，已成功透過冷壓資源化技術將其開發作為低水泥系建材（再生粗粒料與符合 CNS 382 性能要求的普通磚）。雖然目前水泥仍是全世界最普遍使用的建材，惟它卻兼具高耗能與高 CO₂ 排放的缺點，為逐步實現 2050 淨零排放之永續社會，須提前布局淨零轉型：本研究採用無機聚合（Geopolymer）技術資源化漿紙產業無機副產物達成短期（~ 2030）低碳目標；再利用性質屬非水硬性水泥的爐壁灰達成長期（~ 2050）朝零碳發展之願景。研究結果顯示低水泥系資源化產品 - 冷壓型普通磚中漿紙產業無機副產物再生資材可達 85 % 以上，而綠建材評定基準中普通磚僅要求：「回收材料乾重比率 40 % 以上」。採用無機聚合或非水硬性水泥技術所開發的冷壓型普通磚中漿紙產業無機副產物則可達 100 %。於齡期 28 天時，相關性能亦均可符合 CNS 382 普通磚之要求。其中低水泥系冷壓型資源化產品，更於華紙公司花蓮廠完成圍牆試砌與鋪面試鋪，不僅獲得 2023 金點設計標章的肯定，且安全挺過 2024 年 0403 花蓮強震。故採用無機聚合技術或屬非水硬性水泥的爐壁灰，來取代高耗能與高 CO₂ 排放的燒結技術或卜特蘭水泥，並透過冷壓技術資源化漿紙產業無機副產物作為綠建材，相較於原生產品，或許可被稱為低碳甚至零碳綠建材，如此不

僅可增加漿紙產業無機副產物的經濟價值，亦朝「2050 淨零排放之永續社會」的願景邁進。

【關鍵字】 漿紙產業無機副產物、冷壓資源化、無機聚合、非水硬性水泥、綠建材

* 國立成功大學永續環境實驗所

副研究員

** 中華紙漿股份有限公司

專案經理

一、前言

為減緩溫室效應所造成的氣候變遷，聯合國於 2015 年通過巴黎協定，戮力控制全球升溫不超過 1.5°C。為達成此目標，世界各國近年來紛紛宣示淨零碳排（碳中和）行動並推動淨零排放立法，包含美國、日本、韓國、歐盟等皆以 2050 年達淨零碳排為目標。針對推動 2050 淨零轉型，我國亦提出「十二項關鍵戰略」，藉以落實淨零轉型之長期願景目標，逐步實現 2050 淨零排放之永續社會，以共同承擔全球目標（國家發展委員會等，2022）。十二項關鍵戰略中第八項 - 「資源循環零廢棄」提及：廢棄資源物質能資源化，強化資源永續循環利用，投入技術研發與制度革新，提升資源循環效率。從產品設計、資源再生、產業鏈結及技術創新四大面向，打造零廢棄的資源永續循環世代。

華紙公司係台灣唯一林漿紙一即從造林到造紙一貫作業的企業，其關注資源循環再利用的發展，致力於材料生命週期的循環運用，以一棵樹木創造的循環經濟：努力尋求各種方法將木頭中的纖維衍生出跨足許多產業的產品和應用，來減少對天然資源的需求。並以搖籃到搖籃的思維模式研發，為這些來自漿紙產業製程的副產物創造出嶄新的價值（中華紙漿股份有限公司，2020）。造紙原料的樹木是固定二氧化碳最佳捕手，紙張纖維透過回收再造可重複使用；製程中的副產物容易回收再利用，或資源化成為新產品，漿紙產業副產物主要分為二類：有機質經過回收再利用可做作為生質燃料與肥料；其產出之無機副產物大致有綠泥、飛灰、底渣（其產出比例約為 7:6:1），及少量性質屬非水硬性水泥的爐壁灰，目前業已成功透過冷壓資源化技術將其開發作為低水泥系建材，即再生粗粒料（水泥用量 100 kg/m³）（蔡志達等，2020），與符合 CNS 382 性能要求的普通磚（水泥用量 200 kg/m³）（蔡志達等，2020），如圖 1 所示，其中普通磚相關性能（見圖 2）並完成模廠試量產，低水泥系冷壓型資源化產品，更於華紙公司花蓮廠完成圍牆試砌與鋪面試鋪（見圖 3），不僅獲得 2023 金點設計標章的肯定，且安全挺過 2024 年 0403 花蓮強震。

雖然目前水泥仍是全世界最普遍使用的建材，惟它卻是高耗能且高 CO₂ 排放的材料，而上述水泥係指屬水硬性水泥的卜特蘭水泥，回顧水泥發展史係以歐洲為主流，可區分為「非水硬性水泥」，「水硬性石灰」及「卜特蘭水泥系」(Mindess, 1981 and Mehta, 1986)。為逐步實現 2050 淨零排放之永續社會，須提前布局淨零轉型：本研究採用無機聚合 (Geopolymer) (Xu, 2000, Schmücker, 2005, and Hajimohammadi, 2008) 技術 (簡稱無機聚合系，GP) 資源化漿紙產業無機副產物達成短期 (~ 2030) 低碳目標；再利用性質屬非水硬性水泥的爐壁灰 (簡稱無水泥系，NC) 達成長期 (~ 2050) 朝零碳發展之願景。而非水硬性水泥即指不能在水中水化硬固的材料，屬於氣硬性粘結料，包括石膏及石灰二種。其中石灰漿在很早以前即被開始和黏土混合用於建築物中。石灰的原料係靠石灰岩燒結而得，石灰加水即會形成「氫氧化鈣」而硬固，暴露空氣中會吸取「二氧化碳」而形成「碳酸鈣」，復原為原始之形態 (黃兆龍, 2002)，故此反應亦可視為一種「碳捕捉技術」。故透過冷壓技術與無機聚合或非水硬性水泥，來取代高耗能與高 CO₂ 排放的燒結技術或卜特蘭水泥，資源化漿紙產業無機副產物作為綠建材，相較於原生產品，或許可被稱為低碳甚至零碳綠建材，如此不僅可增加漿紙產業無機副產物的經濟價值，亦朝「2050 淨零排放之永續社會」的願景邁進。



(1) 再生粗粒料



(2) 普通磚

圖 1 低水泥系漿紙產業無機副產物冷壓型綠色建材

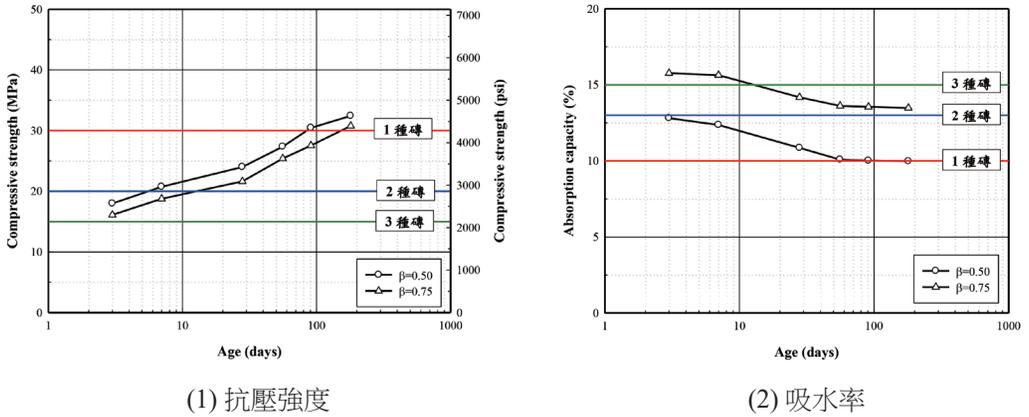


圖 2 低水泥系漿紙產業無機副產物冷壓型普通磚相關性能

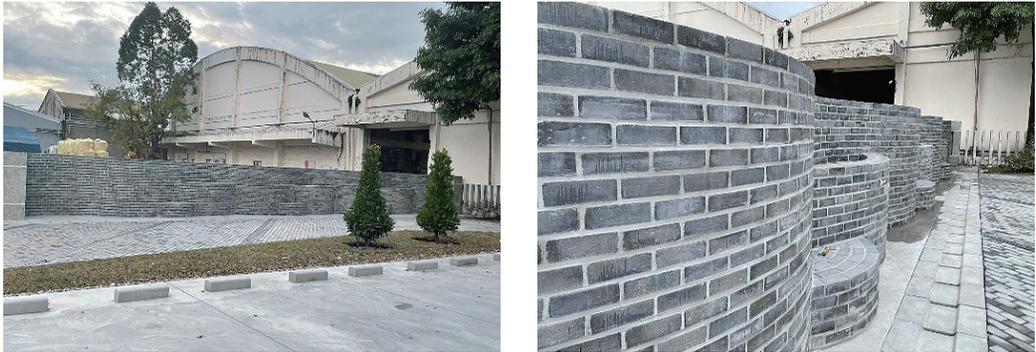


圖 3 華紙公司花蓮廠圍牆試砌與鋪面試鋪照片

二、實驗方法

2.1 實驗材料

1. 綠液：係漿紙產業製漿程序中的白液（主要成份為氫氧化鈉與硫化鈉）添加於蒸解釜中蒸解木片，蒸煮後由木材溶出黑液，透過回收鍋爐燃燒發電後（見圖 4），剩餘熔融物的無機物，成份主要為碳酸鈉、硫化鈉，並含有少量的氫氧化鈉和硫酸鈉等。溶解在水

中可用石灰苛化，回收氫氧化鈉。因成分中有少量的氫氧化鐵，呈墨綠色，故稱為綠液。綠液的比重約為 1.05，含水率為 83.0%，固含率為 17.0%，由組成成分 XRF(見表 1) 與 XRD(見圖 5-(1)) 分析結果顯示，綠液主要成分為 Na_2CO_3 與 CaCO_3 。

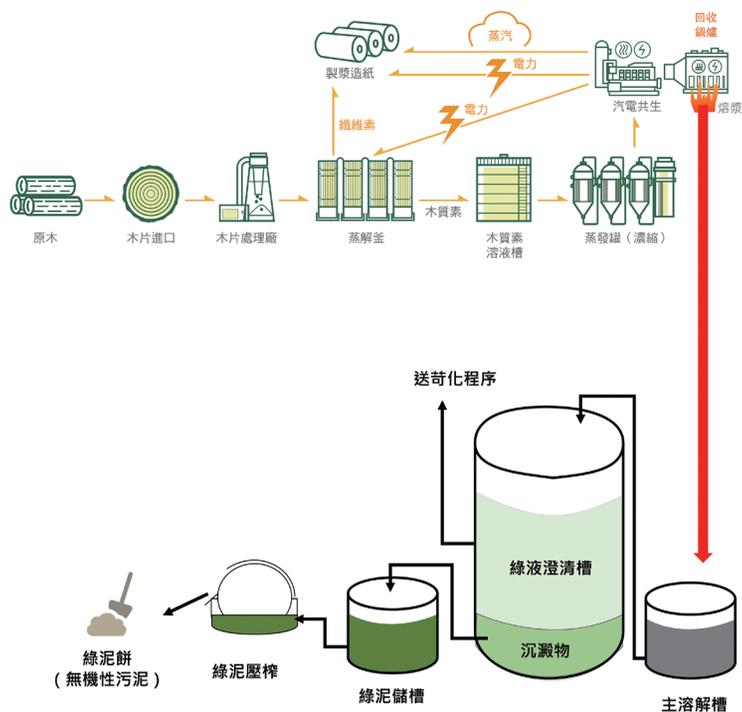


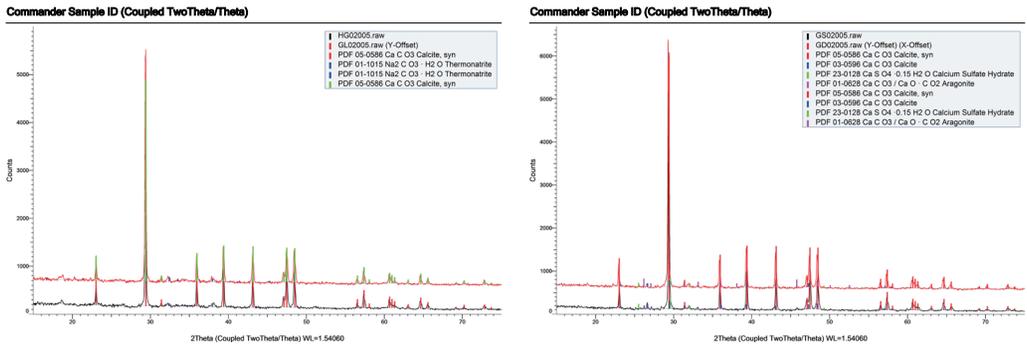
圖 4 綠液與綠泥產出製程

表 1 漿紙產業無機副產物 XRF 分析結果

| 元素 | 綠液 | 綠泥 | 飛灰 | 底碴 | 爐壁灰 | 元素 | 綠液 | 綠泥 | 飛灰 | 底碴 | 爐壁灰 |
|----|--------|--------|--------|--------|-------|----|-------|-----|-----|-----|-----|
| Mg | 59,532 | 46,042 | ND | ND | 2,310 | Se | ND | ND | ND | ND | ND |
| Al | 11,505 | 2,173 | 45,041 | 25,236 | 140 | Rb | 22 | ND | 22 | 46 | ND |
| Si | 14,239 | 8,965 | 28,049 | 46,441 | 530 | Sr | 1,406 | 891 | 286 | 275 | ND |
| P | 2,002 | 2,909 | 1,512 | 1,571 | 1,570 | Y | ND | ND | ND | 21 | ND |
| S | 13,042 | 4,218 | 2,942 | 5,555 | 400 | Zr | ND | ND | 355 | 122 | ND |

| 元素 | 綠液 | 綠泥 | 飛灰 | 底渣 | 爐壁灰 | 元素 | 綠液 | 綠泥 | 飛灰 | 底渣 | 爐壁灰 |
|----|---------|---------|---------|---------|--------|----|-----|-----|-----|-----|-----|
| Cl | 906 | ND | 5,037 | 5,545 | 40 | Nb | ND | ND | 8 | 10 | ND |
| Ca | 264,742 | 348,440 | 297,551 | 176,980 | 61,760 | Mo | ND | ND | ND | ND | ND |
| Ti | ND | ND | ND | 5,252 | ND | Ag | ND | ND | ND | ND | ND |
| V | ND | ND | ND | ND | ND | Cd | ND | ND | ND | ND | ND |
| Cr | ND | ND | ND | ND | ND | Sn | 352 | ND | 34 | 35 | ND |
| Mn | 4,035 | ND | ND | ND | 160 | Sb | ND | ND | ND | ND | ND |
| Fe | 9,534 | 9,700 | 30,153 | 36,979 | 1,130 | Ba | ND | 364 | 782 | 474 | ND |
| Co | ND | ND | ND | 558 | ND | Ce | ND | 392 | ND | ND | ND |
| Ni | ND | ND | ND | ND | ND | W | 28 | ND | ND | ND | ND |
| Cu | ND | ND | 309 | 190 | ND | Hg | ND | ND | ND | ND | ND |
| Zn | 338 | 118 | 647 | 325 | ND | Pb | ND | ND | 53 | ND | ND |
| As | ND | ND | 53 | ND | ND | | | | | | |

註：元素濃度 (PPM)



(1) 綠液

(2) 綠泥

圖 5 綠液與綠泥 XRD 分析結果

2. 綠泥：綠液回收至水消機與石灰進行苛性化反應後，而綠液中顆粒部分經洗滌、沉澱後的墨綠色底泥，再與石灰廢渣經壓濾脫水後（含水率約 50-55 %）所產出之漿紙產業無機副產物，簡稱為綠泥，如圖 6 所示。綠泥比重約為 2.44，由組成成分 XRF(見表 1) 與 XRD(見圖 5-(2)) 分析結果顯示，綠泥主要成分為 CaCO_3 。



(1) 烘乾後



(2) 烘乾破碎後

圖 6 綠泥照片

3. 飛灰：採用華紙公司台東廠流體化床鍋爐所衍生之無機副產物。為配合減少燃燒生煤，由回收紙分離的紙渣廢料製成固態廢棄物衍生燃料 (RDF) 作為替代燃料，取代部分煤作為燃料混燒，因此所衍生之飛灰係屬混燒煤灰，如圖 7 所示。其比重約為 2.31，由組成成分 XRF(見表 1) 與 XRD(見圖 8-(1)) 分析結果顯示，飛灰主要成分為 CaO 、 SiO_2 ，及 CaCO_3 。



(1) 烘乾後



(2) 烘乾後

圖 7 華紙公司台東廠飛灰照片

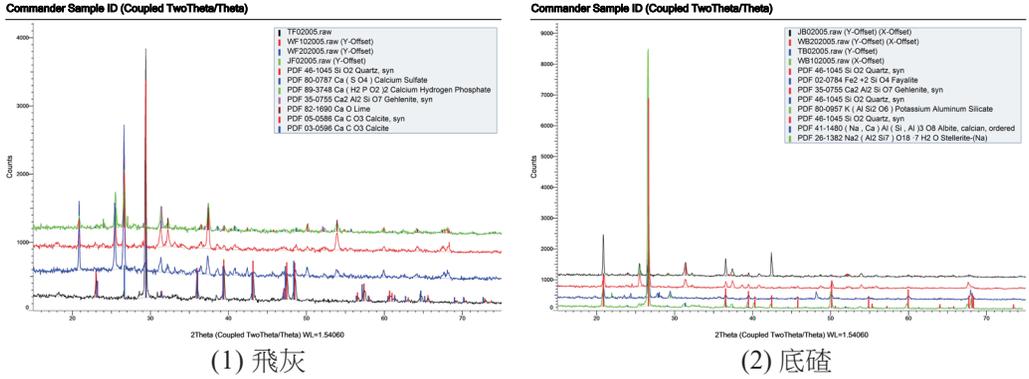


圖 8 華紙公司台東廠飛灰與底碴 XRD 分析結果

4. 底碴：同採華紙公司台東廠流體化床鍋爐所衍生之無機副產物 (見圖 9)，其比重約為 2.62，吸水率為 7.28 %，粒徑分佈符合 CNS 1240 之規定。由組成成分 XRF(見表 1) 與 XRD(見圖 8-(2)) 分析結果顯示，底碴組成成分則較為複雜，主要成分為 SiO₂。



(1) 烘乾後 (2) 烘乾後

圖 9 華紙公司台東廠底碴照片

5. 爐壁灰：又稱為石灰窯泥渣，係漿紙產業製程中石灰回收再利用時，需經過石灰窯加熱烘乾，進窯時石灰泥漿易沾黏於窯壁上，於長時間加熱下，CaCO₃ 被分解為 CaO 與 CO₂，而 CaO 則附著於窯壁上，因此簡稱為爐壁灰 (見圖 10)，其組成成分 XRF 分析結果，如表 1 所示。



圖 10 華紙公司爐壁灰照片

6. 鹼性溶液 (鹼液)：購自由國立臺北科技大學鄭大偉特聘教授研究團隊所技術移轉之欣得實業股份有限公司，NaOH 濃度為 10M； $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$ 為 1.28； $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ 為 50，其比重約為 1.35。
7. 強塑劑 (SP)：本研究採用羧酸系列之高性能減水劑，係購自優積企業有限公司，其物化性質均符合相關 CNS 與 ASTM 規範要求。

2.2 冷壓資源化製磚技術

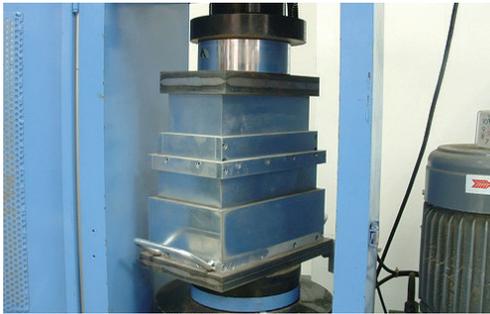
1. 實驗室：冷壓資源化技術 (Tsai, 2012) 乃基於材料基本原理 (愈緻密其強度等相關性質愈佳) (Dowling, 1993) 與複合材料 (Gibson, 1994) 的觀念，導入水泥化學及卜作嵐材料間互制特性 (Mindess, 1981 and Mehta, 1986)，並依據再生資材的材料特性，藉以改善其界面性質，所開發出兼具低耗能、低 CO_2 排放的資源化技術。於實驗室製磚方式係利用自行開發的冷壓型製磚模具 (見圖 11)，經簡單的填料、加壓成型、退模等程序，即可成功完成冷壓型砌塊、普通磚，或高壓地磚製作，如圖 11 所示。本研究採用無機聚合 (Geopolymer) 技術資源化漿紙產業無機副產物作為低碳綠建材係於實驗室進行。



(1)Step 1：填料



(2)Step 2：安裝加壓模



(3)Step 3：加壓成型



(4)Step 4：退模

圖 11 冷壓資源化技術於實驗室製磚程序

2. 試驗模廠：另本研究採用爐壁灰取代卜特蘭水泥，綠液取代拌合水，開發漿紙產業無機副產物零碳綠建材，則是直接於華紙公司花蓮廠所設置的試驗模廠(見圖 12)進行。



(1)外觀



(2)內部設施



(3)製磚設備

圖 12 華紙公司花蓮廠冷壓型製磚試驗模廠照片

三、結果與討論

3.1 配比設計

本研究採用緻密配比邏輯 (黃兆龍, 2002) 設計漿紙產業無機副產物淨零碳排資源化產品的配比, 由於緻密配比邏輯係根據水泥系材料所發展, 因此無機聚合系 (GP) 的資源化低碳綠建材配比, 係根據組成材料再演繹後的緻密配比邏輯 (蔡志達, 2020) 所設計, 而漿紙產業無機副產物低水泥系、無機聚合系 (GP), 及無水泥系 (NC) 普通磚組成材料之差異如表 2 所示。為增加無機聚合系冷壓型普通磚配比中綠泥的使用率, 本研究參考低水泥系漿紙產業無機副產物冷壓型普通磚研究成果 (蔡志達等, 2020), 於骨材系統中, 選擇綠泥填塞飛灰的比例 (a) = 0.50; 綠泥與飛灰混合料填塞底渣的比例 (b) = 0.80, 如公式 (1) 與 (2) 所示。於漿體系統中選用參數為: 綠泥: 飛灰 = 9: 1, 其配比如表 3 所示。

表 2 漿紙產業無機副產物冷壓型普通磚組成材料之差異

| | 骨材系統 | 漿體系統 |
|-------|----------|---------------------|
| 低水泥系 | 綠泥、飛灰、底渣 | 水泥、綠泥、強塑劑、水、綠泥含水量 |
| 無機聚合系 | 綠泥、飛灰、底渣 | 鹼液、綠泥、飛灰、綠泥含水量 |
| 無水泥系 | 綠泥、飛灰、底渣 | 爐壁灰、綠泥、強塑劑、綠液、綠泥含水量 |

$$\alpha = W_{\text{綠泥}} / (W_{\text{綠泥}} + W_{\text{飛灰}}) \dots\dots\dots \text{式 (1)}$$

$$\beta = (W_{\text{綠泥}} + W_{\text{飛灰}}) / [(W_{\text{綠泥}} + W_{\text{飛灰}}) + W_{\text{底渣}}] \dots\dots\dots \text{式 (2)}$$

表 3 GP 系與 NC 系漿紙產業無機副產物冷壓型普通磚配比

| 配比編號 | 10M 鹼液 (kg/m ³) | 飛灰 (kg/m ³) | 綠泥最適含水率調整 | | | 底渣 (kg/m ³) |
|-----------|-----------------------------|-------------------------|-----------|-------------------------|----------------------------|-------------------------|
| | | | 綠泥含水率 (%) | 綠泥 (kg/m ³) | 綠泥含水量 (kg/m ³) | |
| β=0.80_GP | 167.38 | 659.90 (42.96 %) | 19.13 | 560.34 (36.47 %) | 66.75 | 316.00 (20.57 %) |

| 配比編號 | 爐壁灰 (kg/m ³) | 飛灰 (kg/m ³) | 綠泥最適含水率調整 | | | 底渣 (kg/m ³) | 綠液 (kg/m ³) | SP (kg/m ³) |
|------------------|-----------------------------|----------------------------|------------------|----------------------------|-----------------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|
| | | | 綠泥 含水率 (%) | 綠泥 (kg/m ³) | 綠泥 含水量 (kg/m ³) | | | |
| $\beta=0.50_NC$ | 210.80 (11.78%) | 495.06 (27.67%) | 20.00 | 258.43 (14.44%) | 64.61 | 825.10 (46.11%) | 162.59 | 1.31 |
| $\beta=0.65_NC$ | 210.80 (12.57%) | 611.35 (36.44%) | 20.00 | 306.62 (18.28%) | 76.66 | 548.64 (32.71%) | 187.53 | 0.81 |
| $\beta=0.75_NC$ | 210.80 (13.10%) | 682.61 (42.43%) | 20.00 | 336.15 (20.90%) | 84.04 | 379.23 (23.57%) | 202.66 | 0.65 |

註：() 中係指各組成固體材料之重量百分率

無水泥系 (NC) 漿紙產業無機副產物冷壓型普通磚配比，則採用低水泥系漿紙產業無機副產物冷壓型普通磚配比 (蔡志達等, 2020)，根據體積法，利用爐壁灰取代卜特蘭水泥，綠液取代拌合水，另為增加綠泥的使用率，選擇 3 種不同綠泥與飛灰混合料填塞底渣的比例 (β) = 0.50、0.65，及 0.75，如公式 (2) 所示，其配比見表 3。表 3 中顯示本研究採用漿紙產業無機副產物所開發的 GP 與 NC 系低碳排綠建材，其固體組成材料中綠泥、飛灰、底渣，及爐壁灰等再生資材均可達 100%，而綠建材評定基準 (何明錦等, 2015) 中對普通磚僅要求：「回收材料乾重比率 40% 以上」。另由於 NC 系冷壓型普通磚中採用爐壁灰取代高耗能且高 CO₂ 排放的卜特蘭水泥，並使用綠液取代有碳足跡的拌合水 (自來水)，相較於原生產品，或許可被稱為零碳綠建材，如此不僅可增加漿紙產業無機副產物的經濟價值，並藉以落實淨零轉型之長期願景目標，朝向 2050 淨零排放之永續社會邁進。

3.2 漿紙產業無機副產物冷壓型普通磚製作

由於冷壓資源化技術其成型應力與組成材料含水率之相互關係，影響資源化產品性質甚鉅 (Tsai, 2012)：因為當加壓成型時，若組成材料含水率太低，則不易成型，即使採用較高的成型應力，於解壓過程，將因毛細孔隙吸水產生張力作用，使得資源化產品產生裂縫；反之當加壓成型時，若組成材料含水率過高，於加壓成型過程容易產生壓密排水現象 (Holitz, 1986)，所排出的水將形成弱面，進而影響資源化產品相關性

質。配合華紙公司試驗模廠的製磚設備，故本研究成型應力為 12.5 MPa，惟本研究採用漿紙產業無機副產物所開發的 GP 系冷壓型普通磚，於無機聚合物系統中，並未直接使用水，係使用鹼液與液灰比 (L/S) 來控制工作性，且綠泥係具水份的再生資材，根據低水泥系漿紙產業無機副產物冷壓型普通磚研究成果 (蔡志達等, 2020)，骨材系統中綠泥含水率係採用 35.0%，而漿體系統中綠泥含水率則為 0.0%，經計算後整體綠泥的最適含水率為 19.13% (見表 3)；液灰比 (L/S) 則選擇 0.60，進行 GP 系漿紙產業無機副產物冷壓型普通磚試拌與試壓，試壓結果顯示，本研究採用漿紙產業無機副產物與無機聚合技術，及經再演繹後的緻密配比邏輯所設計的配比，可成功壓製 GP 系漿紙產業無機副產物冷壓型普通磚，如圖 13 所示。



圖 13 GP 系漿紙產業無機副產物冷壓型普通磚試壓結果

而 NC 系漿紙產業無機副產物冷壓型普通磚，係直接於華紙公司花蓮廠所設置的試驗模廠進行壓製，由於低水泥系冷壓型普通磚已成功於試驗模廠製作生產 (蔡志達等, 2020)，因此本研究團隊已累積相當豐富的模廠壓製經驗，並掌握相關生產參數。由於本研究係根據體積法，採用爐壁灰取代卜特蘭水泥，綠液取代拌合水，而爐壁灰比重較卜特蘭水泥小，故取代後整體比表面積變大；而綠液的含水率為 83.0%，固含率為 17.0%，故整體水量較拌合水低，因此先將綠泥最適含水率調高至 20.0% 後 (原低水泥系為 15.0%)，見表 3。再進行 NC 系漿紙產業無機副產物冷壓型普通磚壓製，結果顯示，NC 系所有配比均可於試驗模廠成功壓製，如圖 14 所示。

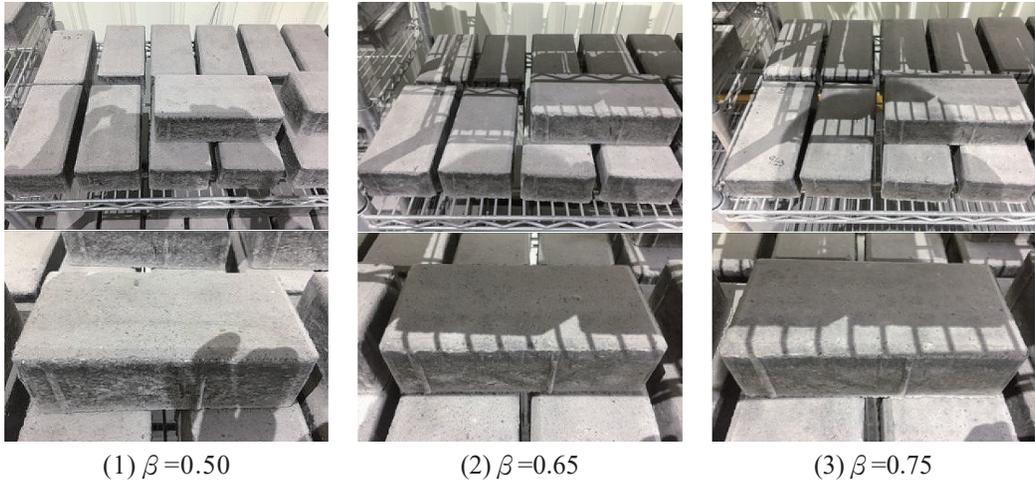


圖 14 NC 系漿紙產業無機副產物冷壓型普通磚試壓結果

3.3 漿紙產業無機副產物冷壓型普通磚抗壓強度

本研究依據 CNS 382 進行 GP 系與 NC 系漿紙產業無機副產物冷壓型普通磚抗壓強度試驗，試驗結果如圖 15 所示。圖中顯示 GP 系冷壓型普通磚抗壓強度隨著齡期持續成長，係由於隨著齡期成長，無機聚合反應持續進行，且由於配比中添加大量卜作嵐材料（飛灰），配合卜作嵐反應（李韋皞，2017），藉以填塞內部孔隙，使其更緻密化，並改善其介面性質，進而使得 GP 系冷壓型普通磚抗壓強度隨齡期的增長而持續成長。另圖中亦顯示於齡期 28 天時，無機聚合系冷壓型普通磚即可符合 CNS 382 中 3 種磚抗壓強度性能要求；於齡期 365 天（1 年），可滿足 CNS 382 中 2 種磚之抗壓強度要求。

NC 系漿紙產業無機副產物冷壓型普通磚抗壓強度亦隨著齡期持續成長，係由於隨著齡期成長（見圖 15），屬非水硬性水泥的爐壁灰碳酸化反應持續進行，配合卜作嵐反應（Mindess, 1981, Mehta, 1986, and 黃兆龍，2002），使內部孔隙更緻密化，並改善其介面性質，進而使得 NC 系冷壓型普通磚抗壓強度隨齡期的增長而持續成長。於齡期 28 天時， $b=0.50$ 與 0.65 的 NC 系冷壓型普通磚可符合 CNS 382 中 3 種磚抗壓強度性能要求。由於 GP 系與 NC 系漿紙產業無機副產物冷壓型普通磚抗壓強度均隨著齡期持續成長，由此亦可研判，本研究採用漿紙產業無機副產物與冷壓資源化技術所開發之低碳排綠建材，其內部應無因收縮或膨脹作用而產生微裂縫，進而影響其抗壓強度之狀況發生。

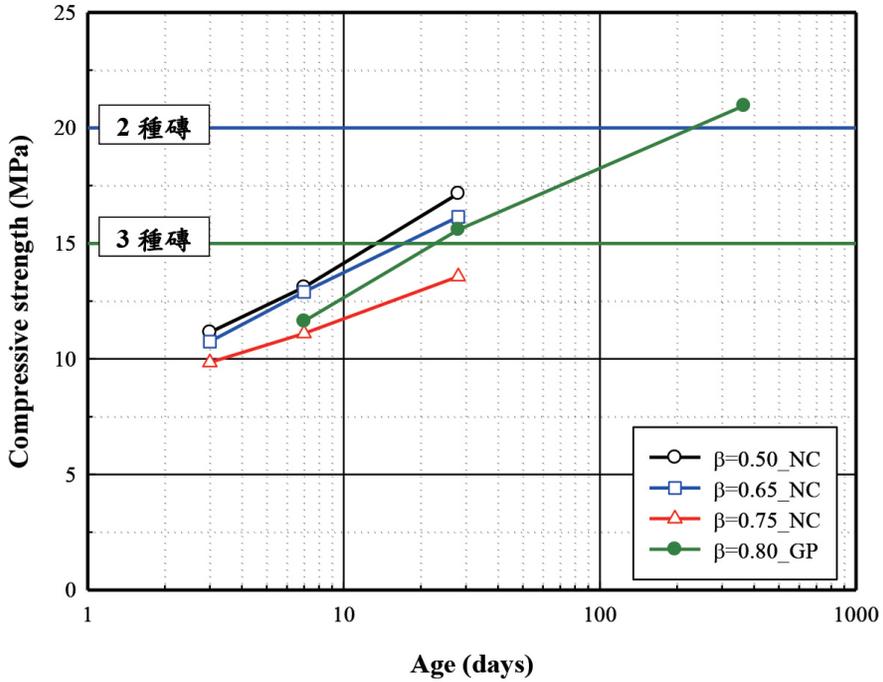


圖 15 GP 系與 NC 系冷壓型普通磚抗壓強度成長關係圖

3.4 漿紙產業無機副產物冷壓型普通磚吸水率

本研究依據 CNS 382，分別於齡期 7 與 28 天進行 NC 系漿紙產業無機副產物冷壓型普通磚吸水率試驗，試驗結果如圖 16 所示。圖中顯示 NC 系冷壓型普通磚的吸水率隨齡期增長而持續下降，係由於其中添加大量卜作嵐材料（飛灰），配合卜作嵐反應，可轉換屬非水硬性水泥的爐壁灰其碳酸化反應產物，形成較低密度之 C-S-H 膠體，藉以填塞內部孔隙，使其更緻密化，並改善其介面性質 (Mindess, 1981, Mehta, 1986, and 黃兆龍, 2002) 所致。其中 $b=0.50$ 與 0.65 的 NC 系冷壓型普通磚，於齡期 7 天時，吸水率即可符合 CNS 382 中 3 種磚，於齡期 28 天則可滿足 2 種磚的要求；而 $b=0.75$ 的 NC 系漿紙產業無機副產物冷壓型普通磚，於齡期 28 天時，吸水率亦可符合 3 種磚之性能要求。

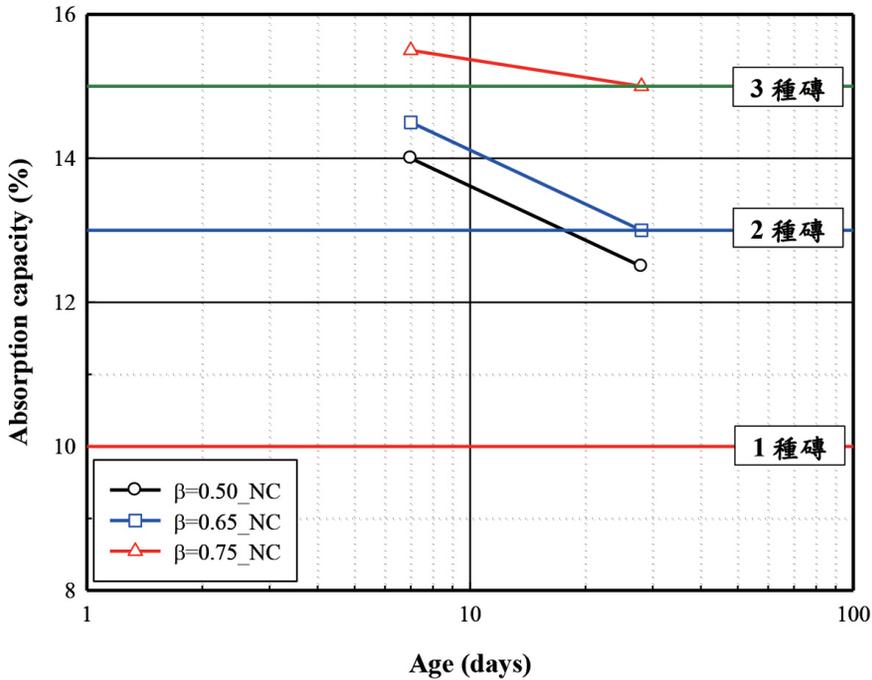


圖 16 NC 系漿紙產業無機副產物冷壓型普通磚吸水率變化關係圖

四、結論與建議

1. 本研究採用漿紙產業無機副產物所開發的 GP 與 NC 系低碳排綠建材，其固體組成材料中綠泥、飛灰、底渣，及爐壁灰等再生資材均可達 100%，而綠建材評定基準中對普通磚僅要求：「回收材料乾重比率 40% 以上」。故本研究可有效增加漿紙產業無機副產物再生資材之使用率。
2. GP 系漿紙產業無機副產物冷壓型普通磚抗壓強度試驗結果顯示，抗壓強度隨著齡期持續成長，於齡期 28 天時可符合 CNS 382 中 3 種磚抗壓強度性能要求；於齡期 365 天 (1 年) 則可滿足 2 種磚之抗壓強度要求。由此亦可研判漿紙產業無機副產物中的綠泥與飛灰，具備作為無機聚合物材料原料的潛力，惟係屬活性或惰性添加物，應進一步研究探討，如此方能更適材適所地採用無機聚合技術資源化漿紙產業無機副產物。

3. NC 系漿紙產業無機副產物冷壓型普通磚性能測試結果顯示，於齡期 28 天時， $b=0.50$ 與 0.65 的普通磚可符合 CNS 382 中 3 種磚抗壓強度性能要求；吸水率方面，於齡期 7 天時， $b=0.50$ 與 0.65 的普通磚，即可符合 CNS 382 中 3 種磚性能要求，於齡期 28 天則可滿足 2 種磚；而 $b=0.75$ 的普通磚，於齡期 28 天時，亦可符合 3 種磚之性能要求。目前其相關性質僅量測至齡期 28 天，未來將持續觀測，以作為耐久性評估分析之參據。
4. 本研究所開發的 GP 系漿紙產業無機副產物冷壓型普通磚，因為使用的鹼液仍有一定之碳排放量，相較於使用高耗能與高 CO_2 排放的燒結技術或水泥所製成的產品，或許可視為低碳綠建材，達成短期 (~ 2030) 低碳目標；而 NC 系漿紙產業無機副產物冷壓型普通磚，係利用屬非水硬性水泥的爐壁灰取代高耗能且高 CO_2 排放的卜特蘭水泥，並使用綠液取代有碳足跡的拌合水 (自來水)，另非水硬性水泥可視為一種「碳捕捉技術」，相較於使用高耗能與高 CO_2 排放的燒結技術或水泥所製成的產品，或許可視為零碳綠建材，達成長期 (~ 2050) 朝零碳發展之願景。故本研究採用冷壓資源化技術與漿紙產業無機副產物所開發之 GP 系與 NC 系冷壓型普通磚，不僅可增加漿紙產業無機副產物的經濟價值，並藉以落實淨零轉型之長期願景目標，朝向 2050 淨零排放之永續社會邁進。

參考文獻

中華紙漿股份有限公司 (2020), 中華紙漿股份有限公司 2019 永續報告書。

何明錦等人 (2015), 綠建材解說與評估手冊 2015 年更新版, 內政部建築研究所。

李韋皞 (2017), 微結構發展對於無機聚合物材料性質的影響研究, 國立臺北科技大學工程學院工程科技博士論文。

國家發展委員會、行政院環境保護署、經濟部、科技部、交通部、內政部、行政院農業委員會、金融監督管理委員會 (2022), 淨零排放路徑及策略總說明。

黃兆龍 (2020), 混凝土性質與行為, 詹氏書局。

蔡志達、李昂軒、施承璋、戴佳雄、羅嚮盛、張祖恩 (2020), 利用冷壓技術開發紙廠無機副產物作為再生粗粒料之可行性研究, 2020 資源與環境學術研討會論文集, 大漢技術學院, p 237-250。

蔡志達、李昂軒、施承璋、戴佳雄、羅嚮盛、張祖恩 (2020), 透過冷壓技術資源化紙廠無機副產物作為普通磚, 2020 資源與環境學術研討會論文集, 大漢技術學院, p 251-264。

蔡志達 (2020), 無機聚合物材料配比設計方法推演與應用, 土木水利, 第四十七卷, 第二期, p 50-56。

Dowling, N. E. (1993), *Mechanical behavior of materials: engineering methods for deformation, fracture, and fatigue*, Englewood Cliffs.

Gibson, R. F. (1994), *Principles of composite material mechanics*, CRC Press.

Hajimohammadi A., Provis J. L., Van Deventer J. S. J. (2008), One-Part geopolymer mixes from geothermal silica and sodium aluminate, *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 47, p 9396-9405.

Holitz, R. D. and W. D. Kovacs (1986), *An introduction to geotechnical engineering*, Prentice Hall.

Mindess, S. and J. F. Young (1981), Concrete, Englewood Cliffs.

Mehta, P. K. (1986), Concrete-structure, properties and materials, Englewood Cliffs.

Schmücker M. and Mackenzie K. J. D. (2005), Microstructure of sodium polysialatesiloxo geopolymer, Ceramics International, 31, p 433-437.

Tsai, C. T. (2012), Chapter 5 Cold-Bonding Technique – A new approach to recycle innocuous construction residual soil, sludge, and sediment as coarse aggregates, Sintering of Ceramics - New Emerging Techniques, InTech, p 95-120.

Xu H. and Van Deventer J. S. J. (2000), The geopolymerisation of alumini-silicate minerals, International Journal Minerals Process, 59, p 247-266.