

OAC-NKUST-111-010（研究報告）

# 添加廢棄PE材料與爐石粉之水泥砂漿提升海洋 結構工程耐久性之研究

（正式報告）

海洋委員會補助研究

中華民國 111年 10月

「本研究報告僅供海洋委員會施政參考，並不代表該會政策，該會保留採用與否之權利。」

OAC-NKUST-111-010（研究報告）

# 添加廢棄PE材料與爐石粉之水泥砂漿提升海洋 結構工程耐久性之研究

（正式報告）

學校：國立高雄科技大學

指導教授：王和源

學生：溫富霖

研究期程：中華民國111年5月至111年12月

研究經費：新臺幣七萬元

海洋委員會補助研究

中華民國 111年 10月

「本研究報告僅供海洋委員會施政參考，並不代表該會政策，該會保留採用與

否之權利。」

# 目 次

表次 .....	P6
圖次 .....	P7
第一章 研究內容說明.....	P9
第二章 研究計畫動機與內容.....	P10
2.1 研究動機 .....	P10
2.2 研究目的 .....	P11
2.2 研究內容 .....	P11
第三章 文獻回顧.....	P12
3.1 塑膠材料種類 .....	P12
3.2 纖維材料之種類 .....	P13
3.3 纖維材料之性質 .....	P14
3.4 爐石粉基本性質 .....	P16
3.5 爐石粉反應過程 .....	P16
第四章 試驗材料.....	P19
第五章 研究方法及步驟.....	P21
5.1 研究方法 .....	P21

5.2 研究步驟 .....	P23
第六章 結果與討論 .....	P24
6.1 新拌性質 .....	P24
6.1.1 坍度 .....	P24
6.2 硬固性質 .....	P24
6.2.1 抗壓強度 .....	P24
6.2.2 抗彎強度 .....	P26
6.2.3 超音波波速 .....	P27
6.3 耐久性質 .....	P28
6.3.1 四極式電阻 .....	P28
6.3.2 耐硫酸鹽試驗 .....	P28
6.4 微觀性質 .....	P29
6.4.1 SEM分析 .....	P29
6.4.2 EDX分析 .....	P29
第七章 結論 .....	P37
第八章 預期結果 .....	P38
8.1 進度說明(期末) .....	P38

8.2 預期進度(甘特圖) .....	P38
第九章 參考文獻 .....	P39

## 表 次

表1 常見纖維及水泥漿體基本性質 .....	P14
------------------------	-----

## 圖 次

圖1 纖維混凝土示意圖.....	P15
圖2 纖維與混凝土間之應力傳遞情形.....	P15
圖3 纖維於混凝土中之破壞機構.....	P16
圖4 試驗材料 .....	P20
圖5 研究流程圖 .....	P23
圖6 添加廢棄PE材料與爐石粉取代水泥之坍度 .....	P30
圖8 添加廢棄PE材料之抗壓強度 .....	P30
圖9 爐石粉取代水泥之抗壓強度 .....	P31
圖10 添加廢棄PE材料之抗彎強度.....	P31
圖11 爐石粉取代水泥之抗彎強度 .....	P32
圖12 添加廢棄PE材料之超音波波速 .....	P32
圖13 爐石粉取代水泥之超音波波速 .....	P33
圖14 添加廢棄PE材料之電阻值 .....	P33
圖15 爐石粉取代水泥之電阻值 .....	P34
圖16 添加廢棄PE材料之硫酸鹽侵蝕 .....	P34

圖17 爐石粉取代水泥之硫酸鹽侵蝕 .....P35

圖18添加廢棄PE材料之微觀性質分析(x1000)(齡期7天) .....P35

圖19 爐石粉取代量10、20%之微觀性質分析(x1000)(齡期7天) .....P36



## 一、研究內容說明

### 摘要：

為能提昇海洋結構工程之耐久性，且達到節能減碳及有效利用資源材料，並解決大量廢棄物消耗問題已是全世界的主要課題。本研究計畫內容包括，「添加廢棄 PE 材料與爐石粉製成水泥砂漿應用於海洋工程材料新拌性質之影響」，探討以不同水膠比、齡期、添加量及取代量進行新拌性質之驗證，進而評估提昇海洋工程結構之性質，達到節能減碳、安全與永續的目標理想。研究採用額外添加廢棄 PE 材料0%、1%、2%、3%、4%，和水淬高爐石粉取代水泥0%、10%、20%及水膠比 0.4，進行新拌性質及測定其工作性，並製作成試體，進而分析添加廢棄 PE 材料與取代水泥之水淬爐石粉製成水泥砂漿之工程性質優劣，探討水泥砂漿性質之影響因素，評估添加廢棄 PE 材料和水淬爐石粉取代水泥之可行性，不但可探討此海洋工程結構材料之工作性及提升節能減碳與資源再利用之研究。其次探討硬固性質(抗壓強度、抗彎強度、超音波波速、微觀分析)及耐久性質(電阻、耐硫酸鹽侵蝕)，同樣採用上述變數，於齡期3、7、28、56及91天時進行硬固及耐久性質之研究，了解其試體強度和緻密性和齡期增長時之趨勢，更能有效瞭解水泥砂漿之硬固性質優劣和可行性，增進海洋結構工程

的硬固及耐久性，並達到節能、減碳、安全與永續的理想目標。

研究結果顯示，添加廢棄 PE 纖維材料於3%內能達到廢棄物有效去化之目標，並提升其廢棄物之經濟價值，隨爐石粉之取代量增加，其整體強度及耐久性也都有所提升，能更好運用在海洋工程之結構中，超音波波速與電阻值皆有通過標準規範之4500m/s 與20 kΩ-cm，表示其內部有較佳之緻密性。

計畫之執行，研究成果可發表於國際期刊，提升學術量能；用於解決大量工業副產品之問題，達到循環經濟之節能減碳與環境永續的理想目標。此外，計畫進行中所提供學生之參與，可對本國科技發展人才培育，有所助益。

關鍵字：廢棄 PE 材料、水淬高爐石粉、資源利用、工程性質。

## 二、研究計畫目的與內容

### 2.1研究動機

近年來永續發展的觀念日漸重視，經濟發展需建立在保護地球自然生態體系與環境的基礎上，如何節能減碳及有效利用資源材料已成為各國努力的目標。本研究利用添加廢棄 PE 材料與水淬爐石粉取代部分水泥製成環保水泥砂漿，探討以不同齡期、水膠比、添加量及取代量之環保水泥進行新拌及硬固性質之驗證，進而評估添加廢棄 PE 材料與取代部分水泥之水淬爐石製成環保水泥砂漿用

於海洋結構工程之可行性，因廢棄 PE 塑膠中的纖維，可控制塑性收縮裂縫且有效減少乾縮裂縫，並隨著纖維含量愈高，乾縮裂縫可更進一步地減少，可改善水泥砂漿之韌性，使海洋工程結構更加結實及耐用，再者透過爐石含量增加，除可使海洋工程結構物的緻密性和強度再提升外，添加爐石粉也能更有效抵抗硫酸鹽(海洋)侵蝕之效應，大幅且有效提升海洋工程結構物之耐久性，又能達到節能減碳、安全與廢棄物永續循環利用的目標理想。

## 2.2研究目的

1. 探討廢棄 PE 纖維材料之最佳添加量及有效去化量。
2. 探討最佳爐石粉取代量以提升海洋工程結構物之耐久性。
3. 探討不同添加量之廢棄 PE 纖維材料與爐石粉取代量之相互工程性質關係。
4. 探討廢棄 PE 纖維材料與爐石粉之最佳使用量。

## 2.3研究內容

本研究計畫內容包括「添加廢棄 PE 材料與爐石粉之水泥砂漿應用於海洋工程材料新拌性質之影響」以及「添加廢棄 PE 材料與爐石粉之水泥砂漿提升海洋工程材料硬固及耐久性質之研究」。

### 三、文獻回顧

溫室效應及全球暖化已是人類需共同面對的問題，本研究針對將廢棄物資源化再利用，並且全面增進海洋結構工程之耐久性質，而廢棄物以廢棄 PE 材料及煉鋼之工業副產品，如爐石等為主要材料。

#### 3.1 塑膠材料種類

廢棄塑膠材料總分為六類[1]；和沒有回收辨識碼的塑分類為第七類（其他塑膠）。分別為 PE、PP、PET、PVC、PS、PLA、PC。

1. PET 是「聚對苯二甲酸乙二酯」的英文簡稱，為聚酯的一種，寶特瓶的原料，是我們生活周圍最常見的塑膠之一。
2. 聚乙烯（PE）與聚丙烯（PP）是直接由乙烯/丙烯聚合而成的塑膠[3]，為最單純、最安全的塑膠。PE 與 PP 是非高分子，與鄰苯二甲酸酯類的塑化劑並不相容[4]，而 PE 可透過不同的聚合過程，又可分為透明的低密度聚乙烯（LDPE）和不透明的高密度聚乙烯（HDPE）[5]。
3. PVC（聚氯乙烯）因為其生產與燃燒時都會產生戴奧辛，因此為所有塑膠中對環境危害最大的塑膠，且其單體氯乙烯製造過程會牽涉到許多毒性物質，可能致癌物，而其中的氯乙烯單體（VCM）更是為對人類危害之一級致癌物[6]。

4. PS 是聚苯乙烯的英文簡稱為俗稱的保麗龍。與 PP 一樣，PS 上的苯環在主鏈上的規整性會影響其結晶度[7]，但商業用途的 PS 均為不規則、不結晶的 PS 其質地硬而脆，無色透明，著色性佳。
5. PC 與 PLA 是目前為標示7號回收辨識碼的塑膠。PC 是聚碳酸酯的縮寫。是一種無透明（無結晶）、耐熱、的熱可塑性塑膠，性能接近 PMMA（聚甲基丙烯酸甲酯）[8]，折射率高，不需要添加劑就具有 UL94 V-0級阻燃性能。

### 3.2纖維材料之種類

目前可使用於混凝土或砂漿的纖維材料，依照材料主要可分為下列幾類[9-11]:

1. 鋼纖維:包括普通鋼及不銹鋼材質。
2. 玻璃纖維:包括鈉玻璃纖維、硼玻璃纖維、鋯玻璃纖維、高強力玻璃纖維等等[10]。
3. 合成纖維:包括聚丙烯(PP)、聚乙烯(PE)、聚酯、尼龍等材質塑膠纖維。
4. 天然纖維:包括纖維素、甲基纖維素、木材纖維等。

常見纖維與水泥漿體之基本性質，如表1所示。在表中所列纖維依照機械性質來區分，又可分為一類如鋼、玻璃、碳等纖維，其楊氏係數高於水泥漿體另一類如聚乙烯、聚丙烯、木材等纖維，其楊氏係數與水泥漿體相近[12]。

表1 常見纖維及水泥漿體基本性質[13]

材料種類	直徑 ( $\mu\text{m}$ )	比重	楊氏係數 (GPa)	抗張力強度 (GPa)	斷裂時伸長量 (%)
銅纖維	5-500	7.84	200	0.5-2.0	0.5-3.5
玻璃纖維	9-15	2.60	70-80	2-4	2.0-3.5
石墨纖維					
PAN <sup>*</sup>	7-9	1.6-1.7	230-380	2.5-4.0	0.5-1.5
Pitch	9-18	1.6-2.1	28-480	0.5-3.0	0.5-2.4
		5			
聚乙烯纖維	25-1000	0.95	0.3	0.08-0.6	3-80
聚丙烯纖維	6-200	0.91	5-77	0.15-0.75	15
尼龍	20-200	1.1	4.0	0.9	13-15
Aramid(Kevlar)	10	1.45	65-133	3.6	2.1-4.0
纖維素	—	1.2	10	0.3-0.5	—
瓊麻	10-50	1.5	13-26	0.3-0.6	3-5
木材纖維	25-75	1.5	71	0.7-0.9	—
水泥漿體	—	2.5	10-45	0.004	0.02

### 3.3纖維材料之性質

當纖維摻入混凝土中，纖維分佈均勻分散於基材中，如圖1所示。纖維混凝土遭受外力時，在混凝土裂開前應力將由纖維、骨材與漿體共同承擔，其中之應力方式皆由剪應力與纖維拉應力傳遞，如圖2所示。當內部局部應力集中而產生裂縫時，承載外力的傳遞方式改變，由基材將剪力傳遞至鄰近的纖維上，此時纖維於混凝土的破壞模式可分為三種，分別為拉脫破壞、拉斷破壞及剪力破壞[14]。

當纖維所承受之拉應力大於其纖維表面之容許剪應力時，纖維會產生剝落現象，若纖維剝落情形持續，纖維受拉過長，會產生蒲松比作用使纖維側向體積收縮，使纖維和試體間之握裹力和摩擦力減少，則纖維最終被拉脫破壞。另

一破壞機構為當試體裂縫生成後，由於纖維含量少於纖維總體積，當外力作用大於纖維能承受之容許應力時，而發生拉斷破壞。此時雖然纖維之拉應力低於纖維與試體界面之容許剪應力，但卻超過纖維之抗拉強度。除上述兩種破壞機構，由於纖維之長徑比過大，抗剪面積小，無法承受混凝土內部之剪應力，導致纖維因剪力作用而破壞，如圖3所示[15]。

因此，藉由纖維在混凝土中的加勁作用，除可大幅提升混凝土抗拉與抗彎等強度外，纖維亦可抑制裂縫增長，使混凝土內因局部應力集中所產生之裂縫或預存之裂縫，其成長受到抑制且減緩，而可提高混凝土之韌性[16-17]。

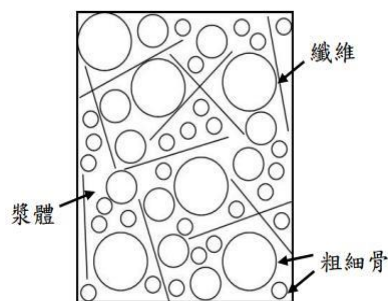


圖1 纖維混凝土示意圖

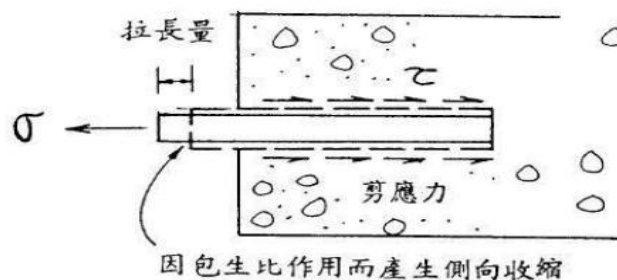


圖2 纖維與混凝土間之應力傳遞情形

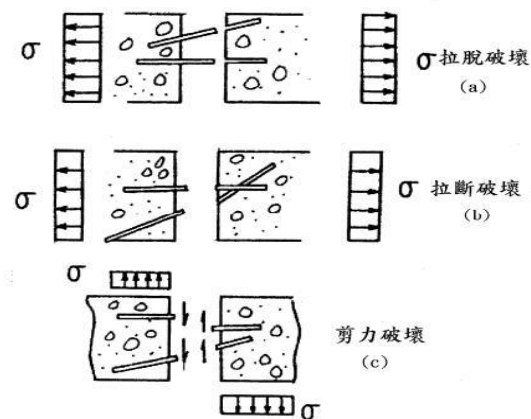


圖3 纖維於混凝土中之破壞機構

### 3.4 爐石粉基本性質

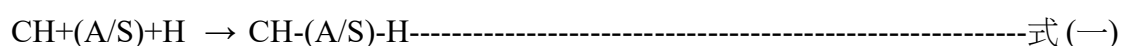
爐石粉的主要成分為和  $\text{SiO}_2$ 、 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{CaO}$ 、 $\text{Fe}_2\text{O}_3$ 、 $\text{SO}_3$ 和  $\text{MgO}$  氧化物組成，具有潛在的水硬性膠結能力，因此爐石同時具有膠結性及卜作嵐反應二種特性。但是活性高的水淬爐石直接與水作用是不會產生膠結作用，需要利用鹼激發才能產生水化作用[18]，酸膜為水淬爐石為防止水份通過而生成的表面薄膜，而外來的無機觸媒會將酸膜侵蝕而破壞，並產生具膠結性質的水化產物並於水進行卜作嵐反應[19]，爐石粉之物理性質應符合 CNS 12549 之規定，其比重以2.80以上為宜。

### 3.5 爐石粉反應過程

#### (1) 水化作用及卜作嵐反應



活性高的高爐熟料直接與水作用是不會產生膠結作用的，必須利用氫氧化鈣、石膏等觸媒的激發才能產生水化作用，高爐熟料在水中表面會產生一層酸膜阻隔水分的進入，外界侵入的無機觸媒(鹼鹽及石膏)會將酸膜侵蝕而破壞，促進高爐熟料粒子的水化作用而產生具膠結性質的熟料並與水進行一般的卜作嵐反應(Pozzolanic-Reaction) [20-21]，可以簡略為式(一)所示：



(鋁酸鹽或矽酸鹽膠體)

卜作嵐反應較為緩慢，對早期強度沒有影響，但反應過程中不斷的消耗鹼離子，使其增加抗硫化物及鹼粒料反應的能力，直接或間接降低透水性及增加耐久性。卜作嵐反應的產物，會填充漿體的毛細孔隙，或取代  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  之孔隙，因此有較佳的晚期強度及不透水性。

## (2)顆粒堆積效應

爐石粉之顆粒較水泥顆粒細小，故將爐石粉適量摻用於混凝土中，可使其原有的顆粒堆積程度更加緻密化。一般水泥之細度 約在  $3,000 \text{ cm}^2/\text{g}$  (Blaine)左右，而爐石粉則可依需要而提高研磨細度，可達  $4,000$ 、 $6,000 \text{ cm}^2/\text{g}$  或更高。故爐石粉之顆粒可填充於水泥顆粒之間，使漿體微觀結構更加緻密[22-24]。

## (3)漿體體積效應

高爐石粉比重略小於水泥(水泥比重約為3.15；高爐石粉約為2.90)，故高爐石粉以相等重量替代部分水泥時，膠結料總重量不變，但漿體實質佔有體積會增加，亦即漿體對骨材之體積比會因而提高，有助於混凝土之工作性。

爐石粉之水化作用較水泥慢，藉由水泥在水化作用期間，所釋放出的氫氧離子，使爐石的玻璃質結構破裂及溶解，消耗氫氧化鈣，生成水化產物 C-S-H 膠體[19]，可增加混凝土的緻密性，逐漸強化混凝土的硬固性質[25-27]，適當以爐石粉取代水泥可得下列多項優點：

1. 減少水泥用量，可降低成本，且有利生態性。
2. 降低水化熱，減少乾縮體積變化。
3. 可抑制鹼骨材反應。
4. 增加其耐久性。
5. 增加混凝土之緻密性
6. 改善其工作性。

## 四、試驗材料

### 試驗材料

#### 1.水泥(Cement):

採用台灣水泥所生產之卜特蘭第 I 型水泥，外觀如圖4(a)所示，並符合 CNS 61 (ASTM C150)，比重為 3.15，細度為  $3450 \text{ cm}^2/\text{g}$ 。

#### 2.廢棄 PE 纖維材料(Waste Polyethylene):

外觀為球型顆粒，材料比重為0.92、含水率為8.2%，使用攪拌切割機分解後，呈棉絮狀長短不一之塑膠纖維，其外觀如圖4(b)所示。

#### 3.水淬爐石粉 (GGBFS):

為中鋼所生產之水淬爐石粉，經由中聯公司後製加工，研磨成粉狀，材料比重為2.90，細度為 $4000 \text{ cm}^2/\text{g}$ ，其外觀如圖4(c)。

#### 4.細骨材 (Fine Aggregate):

取自高雄里港溪之河砂，SSD 之比重依據 CNS 487 規範。比重為 2.65、吸水率為 2.0%，其外觀如圖4(d)所示。

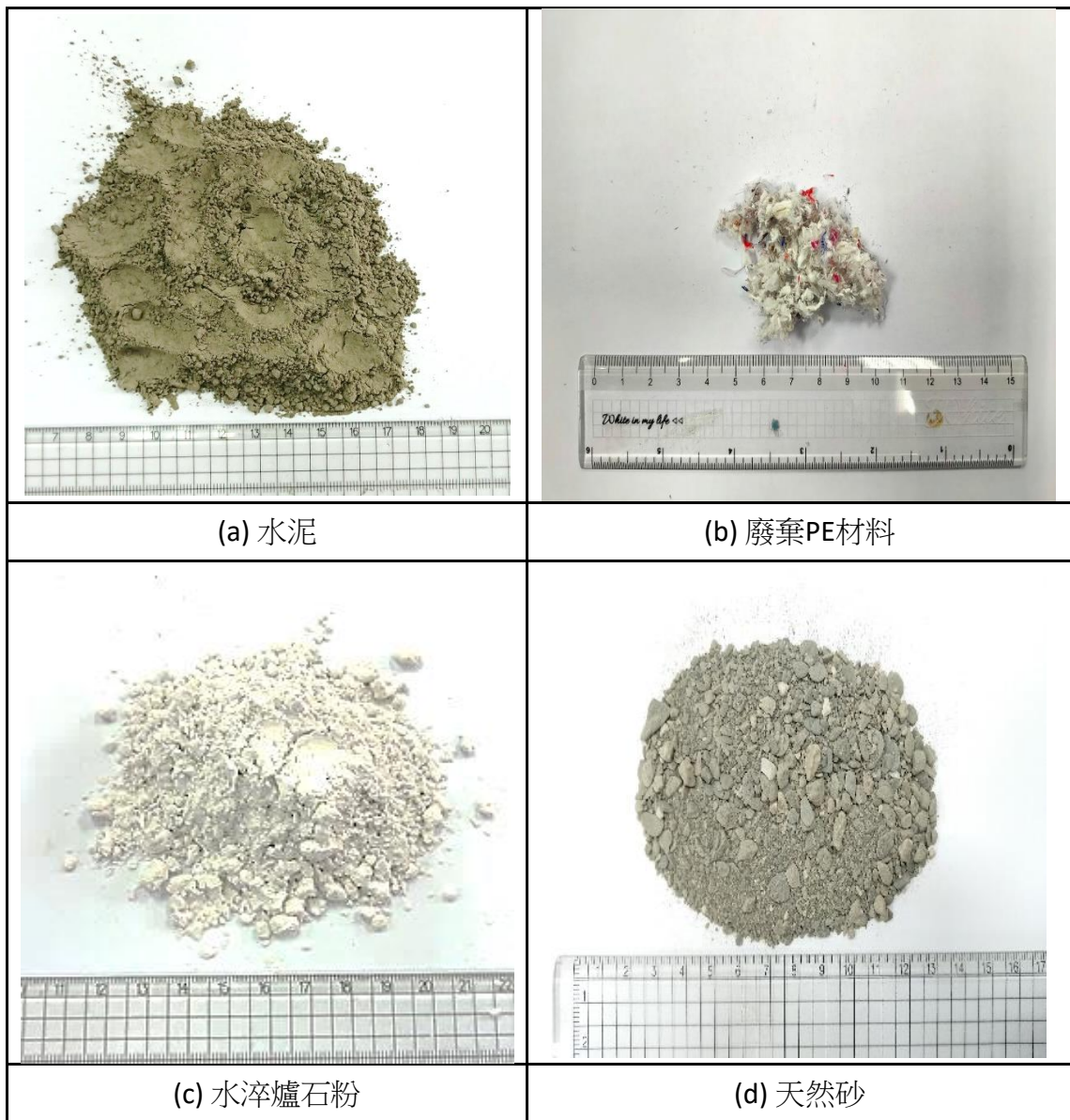


圖 4 試驗材料

## 五、研究方法及步驟

### 5.1 研究方法

#### 1. 坍度

依據 ASTM C109 規範之規定，利用小型坍度錐進行測試，其方法是以坍度法測定水泥砂漿之稠度，用以判斷其工作性。

#### 2. 抗壓強度

依照 ASTM C109 規範之規定，使用混凝土抗壓試驗機進行抗壓強度之試驗，並設定合適之加壓速率，作為抗壓強度數據之參考依據。

#### 4. 抗彎強度

依照 ASTM C348 規範之規定，測定水泥砂漿試體之彎曲應力和性質，檢測其使用材料與水泥砂漿契合度之數據參考。

#### 5. 超音波波速

依據 ASTM C597 規範規定，透過兩個不同之探頭，放置於試體之雙方對面測，量測其超音波波速於試體內通過之時間，以便了解試體內部之情況。

#### 6. 四極式電阻

本試驗參考 ASTM C876 規範之規定，藉由量測出的電阻值，可視為混凝土內

部孔隙多寡與聯通性的間接指標，當電阻值越大經過試體的電流越少，代表其試體越緻密，耐久性較佳。

#### 7. 耐硫酸鹽侵蝕

依據ASTM C1012規定，將試體浸泡於硫酸鈉溶液中，進行5次循環，觀察其重量損失，計算出重量損失率。

## 5.2研究步驟

本試驗之研究步驟如圖5所示

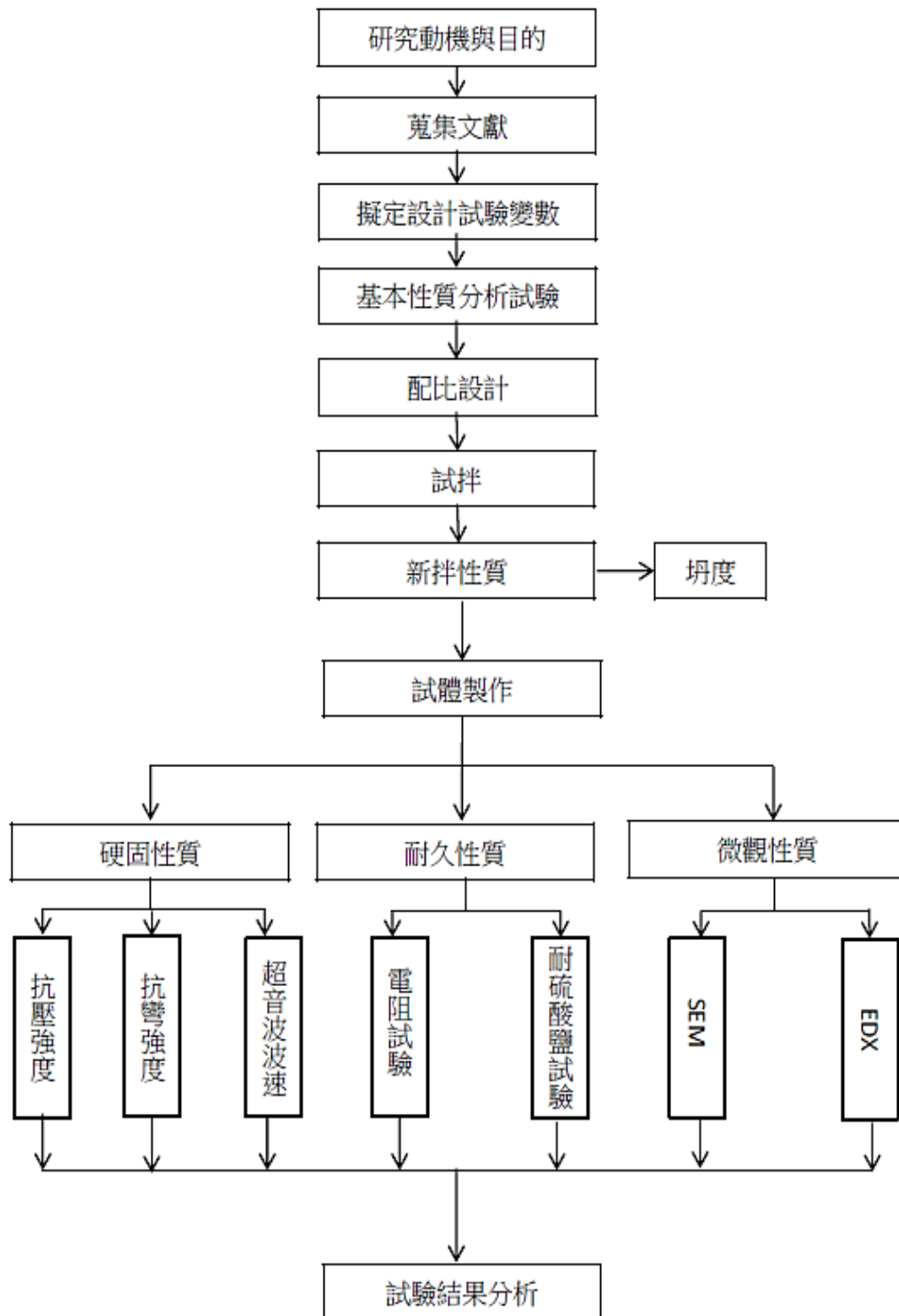


圖5 研究流程圖

## 六、結果與討論

### 6.1新拌性質

本試驗為針對額外添加廢棄 PE 材料與爐石粉取代水泥製成水泥砂漿之新拌性質(坍度)，可作為未來施工上參考之指標。

#### 6.1.1坍度

##### 1.廢棄 PE 纖維材料添加量之影響:

圖6所示，添加1~4%廢棄 PE 材料和未添加爐石粉之坍度分別為0.5~0.3cm，顯示隨廢棄 PE 材料添加量上升，坍度有下降之趨勢，其原因為廢棄 PE 材料本身具吸水性，會吸收漿體中之游離水，使坍度下降。

##### 2.爐石粉取代量之影響:

圖6所示，未添加廢棄 PE 材料之爐石粉取代量0~20%之坍度分別0.5、1和1.9cm可以看出坍度隨爐石粉取代量增加，有上升之趨勢，其原因為爐石粉本身具斥水性，會增加漿體中之游離水，使整體坍度增加。

### 6.2硬固性質

本章節硬固性質主要是由添加廢棄 PE 材料及爐石粉取代量之影響，探討製成水泥砂漿，對抗壓強度、抗彎強度、超音波波速試驗之結果進行分析討論。



## 6.2.1 抗壓強度

### 1.廢棄 PE 材料添加量之影響:

圖7所示，於齡期28天，添加廢棄 PE 纖維材料0~4%與未添加爐石粉之抗壓強度分別為51.1、48.3、47.7、47.4、46.0 Mpa，可知隨廢棄 PE 材料添加量增加，強度有下降之趨勢，因廢棄 PE 材料於搗實過程中，會形成團塊於試體內部，使試體內部孔隙增加，強度下降。

但也可由上述得知，齡期28天，添加廢棄 PE 材料1~3%與控制組相比，強度分別下降5.5~7.2%，而添加4%之廢棄 PE 材料則會下降10%；齡期56天時，添加廢棄 PE 纖維材料1%~3%與控制組相比，強度降低約1.3~8.3%，而添加4%強度則降低超過10%，由上述可知，添加廢棄 PE 材料3%以內，能最有效去化該廢棄物，達到減少廢棄物生成，並使該廢棄物經濟性上升。

### 2. 爐石粉取代量之影響:

圖8所示，於齡期7天，未添加廢棄 PE 材料，爐石粉取代量0、10、20%之強度分別為40.1、37.7、36.3 MPa，可發現隨爐石粉取代量增加而強度下降，因爐石粉之卜作嵐反應速度較水泥慢，所以於早齡期時，強度會隨取代量增加而下降；而於齡期28天，爐石粉取代量0、10、20%之強度分別為51.1、52.6、54.1 MPa，因爐石粉發生卜作嵐反應，生成水化產物填充試體孔隙，會使試體越加

緻密，因而強度上升。

## 6.2.2 抗彎強度

### 1.廢棄 PE 材料添加量之影響:

圖9所示，於齡期56天，添加廢棄 PE 材料0~4%與未添加爐石粉之抗壓強度為21.5~17.7Mpa，可知隨廢棄 PE 材料添加量增加，強度有下降之趨勢，因廢棄 PE 材料於搗實過程中，會形成團塊於試體內部，使試體內部孔隙增加，而廢棄 PE 本身柔軟，也無法提供有效之抗彎強度，因而強度下降。

但也可由上述得知，添加廢棄 PE 材料1~3%與控制組相比，強度分別下降4.1~9.4%，而添加4%之廢棄 PE 材料強度下降超過10%(17.7%)；而齡期91天時，添加廢棄 PE 材料1~3%與控制組相比，強度降低約2.3~9.7%，添加4%強度下降超過10%(16.1%)，可知添加廢棄 PE 材料於3%內，能最有效將廢棄物運用進混凝土中，達到減少廢棄物生成，改善環境汙染。

### 2. 爐石粉取代量之影響:

圖10所示，於齡期91天，爐石粉取代量0、10、20%與未添加廢棄 PE 材料之控制組抗彎強度分別為24.9、27.1、29.4MPa，由此可知，爐石粉取代量10及20%，其抗彎強度皆優於控制組，代表爐石粉於晚齡期時，皆持續發生卜作嵐反應，生成水化物，增加試體之緻密度。

### 6.2.3 超音波波速

#### 1.廢棄 PE 材料添加量之影響:

圖11所示，於齡期56天，未添加爐石粉與添加廢棄 PE 材料1~4%之超音波波速為4783~4437m/s，其中添加廢棄 PE 材料1~3%之超音波波速皆有大於4500m/s，表示其內部有良好之緻密性；而於齡期91天，添加廢棄 PE 材料1~4%之超音波波速為4559~4896m/s，也皆有大於4500m/s，表示其內部也有良好之緻密性。

#### 2. 爐石粉取代量之影響:

圖12所示，於齡期28天，爐石粉取代量0~20%與未添加廢棄 PE 材料之超音波波速分別為4504、4629、4720m/s，於齡期91天，爐石粉取代量0~20%與未添加廢棄 PE 材料之超音波波速分別為4896、5042、5172m/s，可觀察出，隨爐石粉持續發生卜作嵐反應，生成水化物填充孔隙，會使其超音波波速持續增加，並使試體都有良好之緻密性。

## 6.3耐久性質

本章節耐久性質主要由探討添加廢棄 PE 材料與爐石粉取代量之影響，對四極式電阻、耐硫酸鹽侵蝕試驗之結果進行分析討論。

### 6.3.1四極式電阻

#### 1.廢棄 PE 材料添加量之影響:

圖13所示，於齡期28天，控制組能達到較佳之電阻值26.9 k $\Omega$ -cm，並隨廢棄 PE 材料添加量增加，電阻值有略為降低之趨勢，0~4%(26.9~24.1 k $\Omega$ -cm)，齡期56天0~4%電阻值為33.7~30.8 k $\Omega$ -cm，可觀察出隨著齡期的增長，電阻值也有隨之上升之趨勢。

#### 2. 爐石粉取代量之影響:

圖14所示，於齡期56天，添加廢棄 PE 材料4%之爐石粉取代量0、10、20%之電阻值分別為30.8、33.9及33.3 k $\Omega$ -cm，皆有大於20 k $\Omega$ -cm，表示其內部都皆有較好之緻密性，其原因為爐石粉於晚齡期時持續生成水化物來填充試體孔隙，能補足廢棄 PE 材料對電阻值下降之影響，提升整體的耐久性。

### 6.3.2耐硫酸鹽試驗

#### 1.廢棄 PE 材料添加量之影響:

圖15所示，於齡期28天，添加廢棄 PE 纖維材料0~4%，經5次硫酸鹽浸泡循環後，控制組損失率為4.7%，添加2%廢棄 PE 材料損失率為4.8%，4%損失率為4.9%，顯示隨廢棄 PE 材料添加量增加，其重量損失率也有上升之趨勢，主要原因為內部孔隙增加，使硫酸鹽溶液更容易侵蝕試體內部。

## 2. 爐石粉取代量之影響:

圖16所示，於齡期56天，未添加爐石粉之重量損失率為3.4~4.1%，爐石粉取代量10%之重量損失率為2.7~3.1%，爐石粉取代量20%時為2.3~2.7%，顯示出爐石粉取代量越高，其試體內部孔隙越少，重量損失率越低。

## 6.4微觀性質

本試驗主要是以電子顯微鏡觀察廢棄 PE 材料和爐石粉於試體內部之水化生成物晶像變化，再以能量散佈光譜分析儀進行元素分析。

### 6.4.1SEM 分析

由圖17、圖18觀察出隨廢棄 PE 材料添加量增加，內部纖維量也隨之增加，並會產生許多孔隙於試體內部，而隨著爐石粉取代量增加，試體內部生成片狀和晶狀水化物也隨之增加，用以填充試體內部孔隙。

### 6.4.2 EDX 分析

由圖18，未廢棄 PE 材料以爐石粉取代量10、20%可觀察出，主要是以

鈣(Ca)元素、矽(Si)元素、鋁(Al)元素、碳(C)元素居多，而單純添加廢棄 PE 材料2、4%可觀察出主要是以氧(O)、鈣(Ca)、矽(Si)等元素居多。

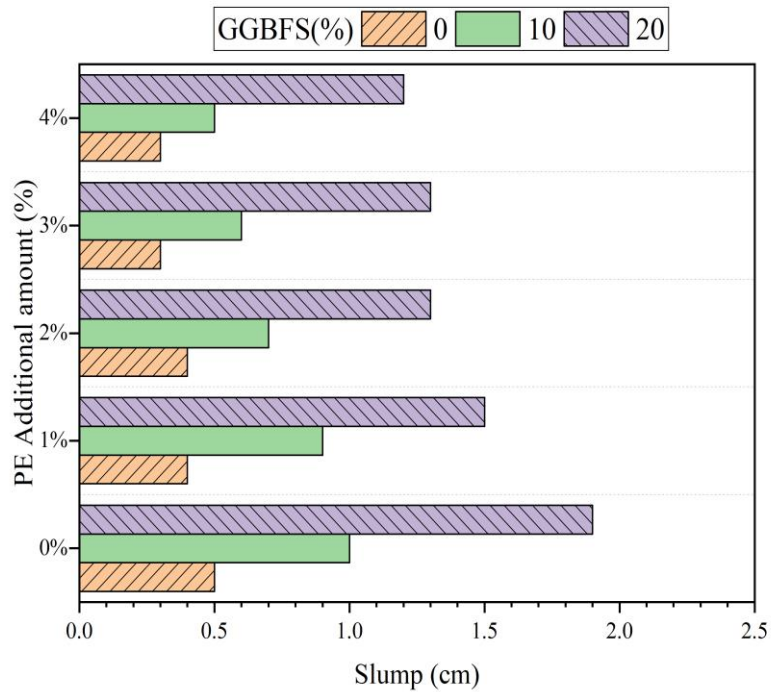


圖6 添加廢棄 PE 材料與爐石粉取代水泥之坍度

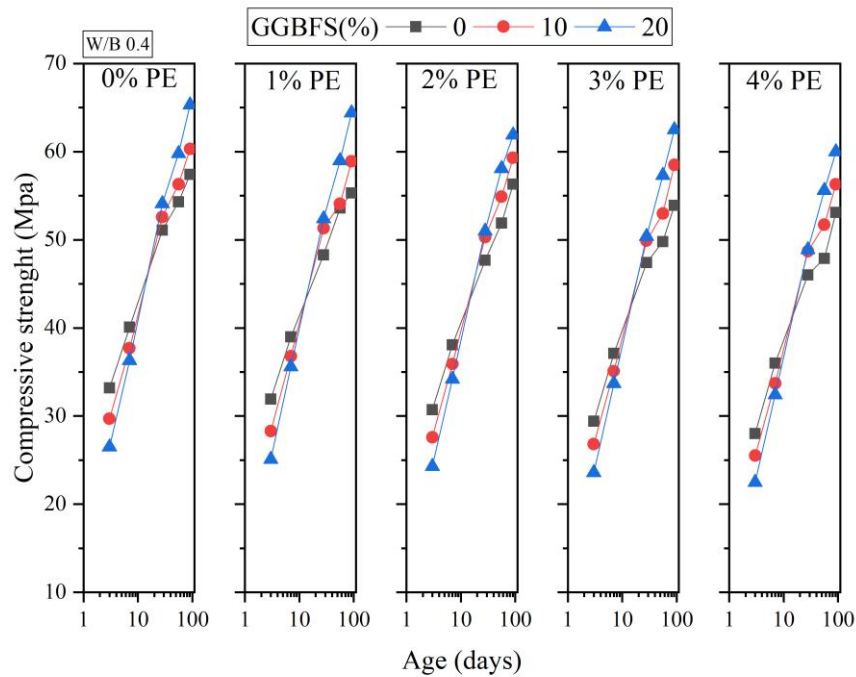


圖7 添加廢棄 PE 材料之抗壓強度

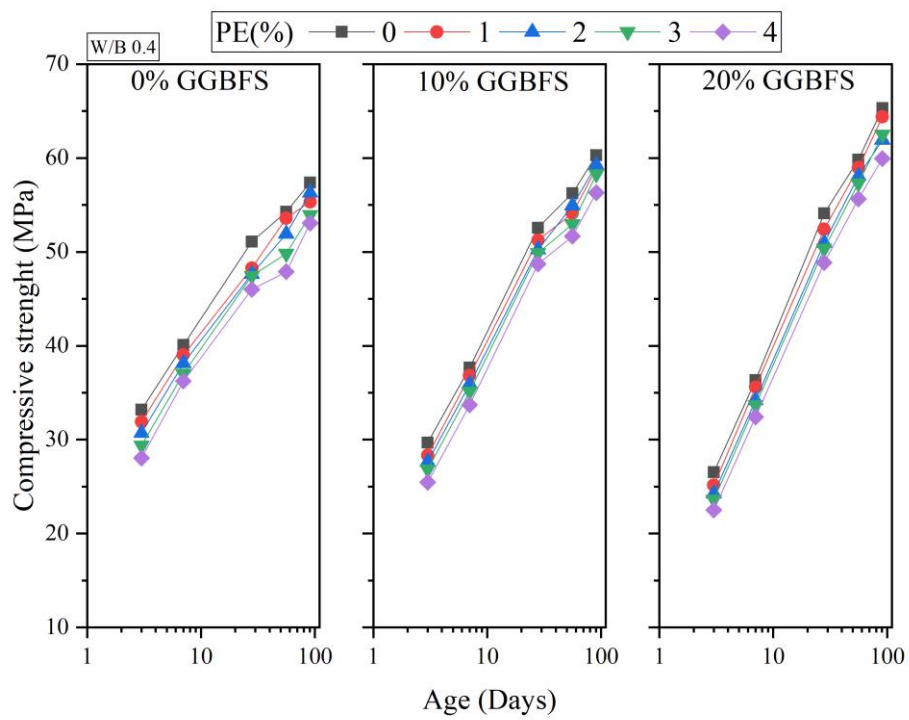


圖8 爐石粉取代水泥之抗壓強度

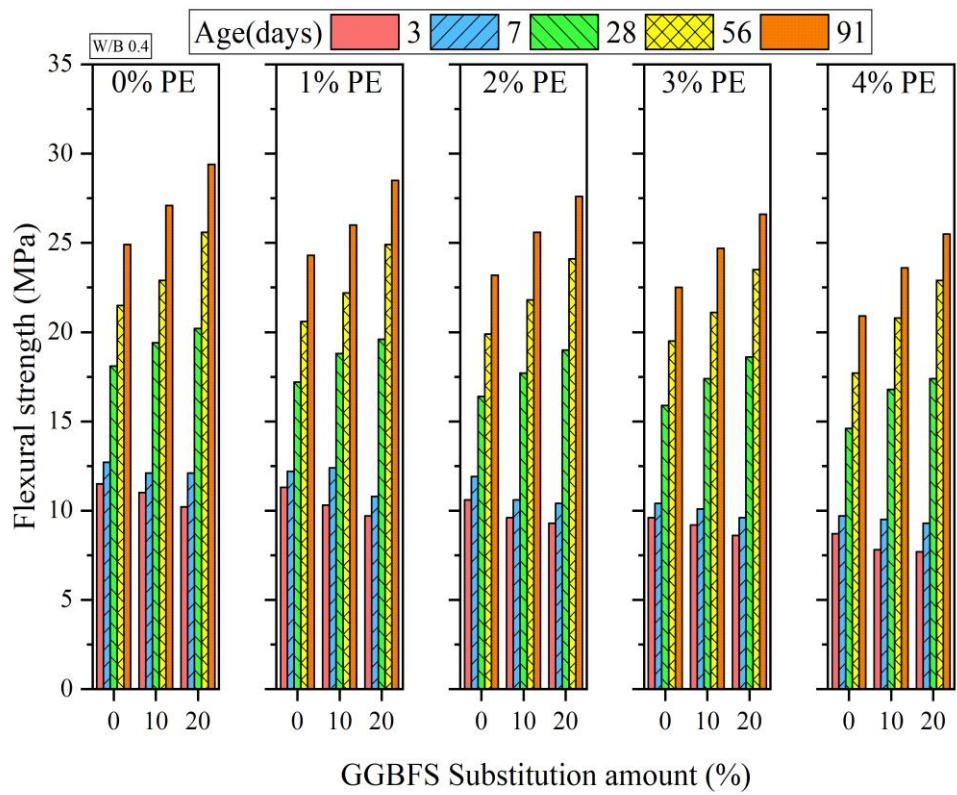


圖9 添加廢棄 PE 材料之抗彎強度

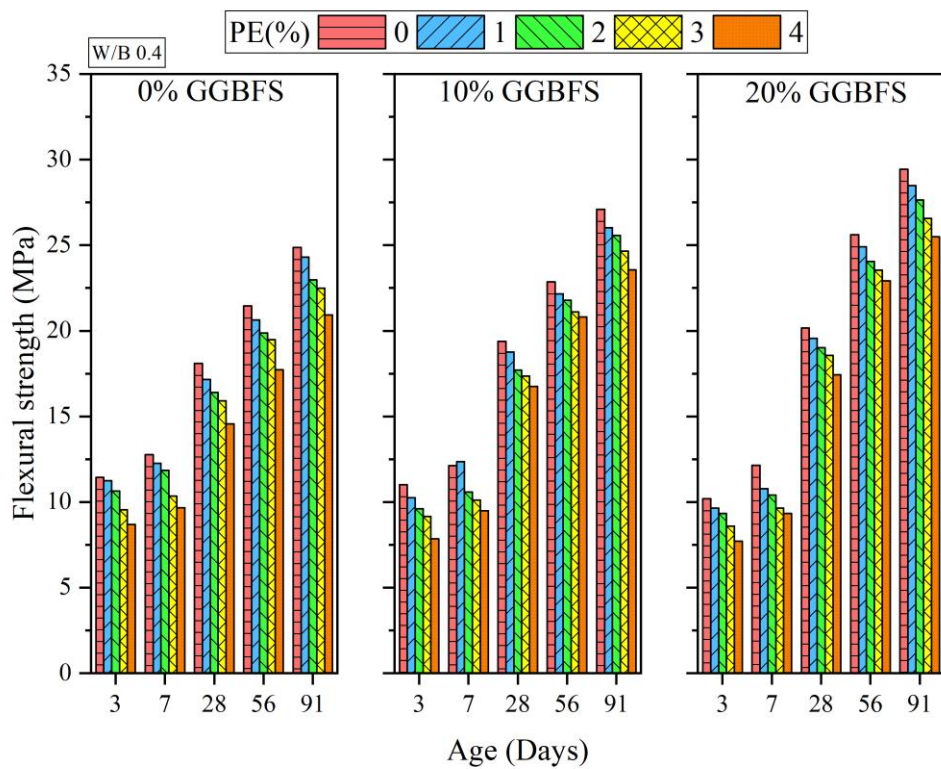


圖10 爐石粉取代水泥之抗彎強度

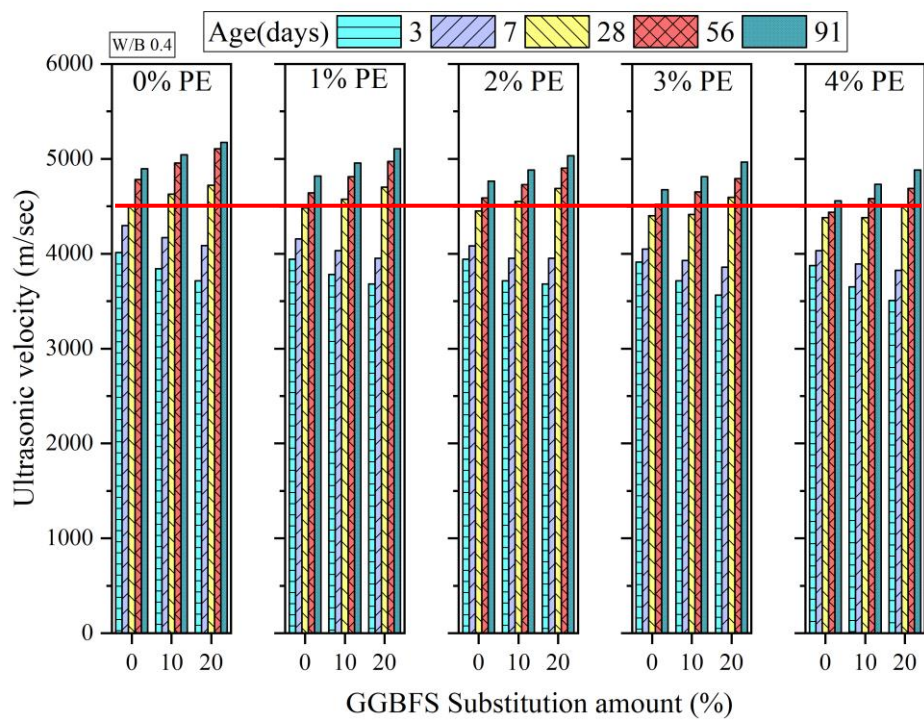


圖11 添加廢棄 PE 材料之超音波波速



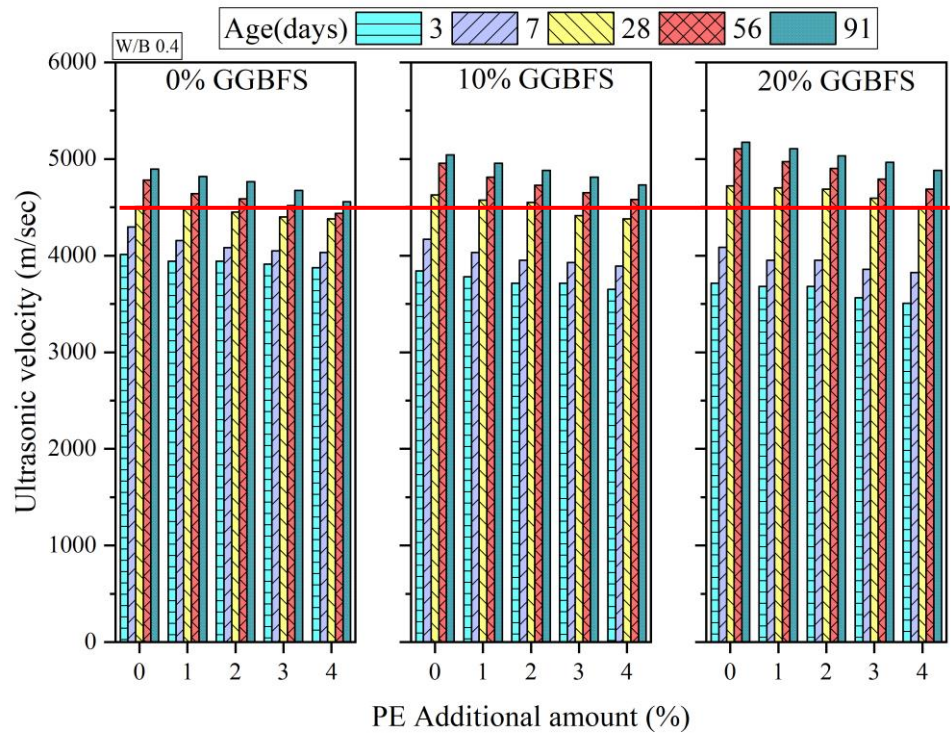


圖12 爐石粉取代水泥之超音波波速

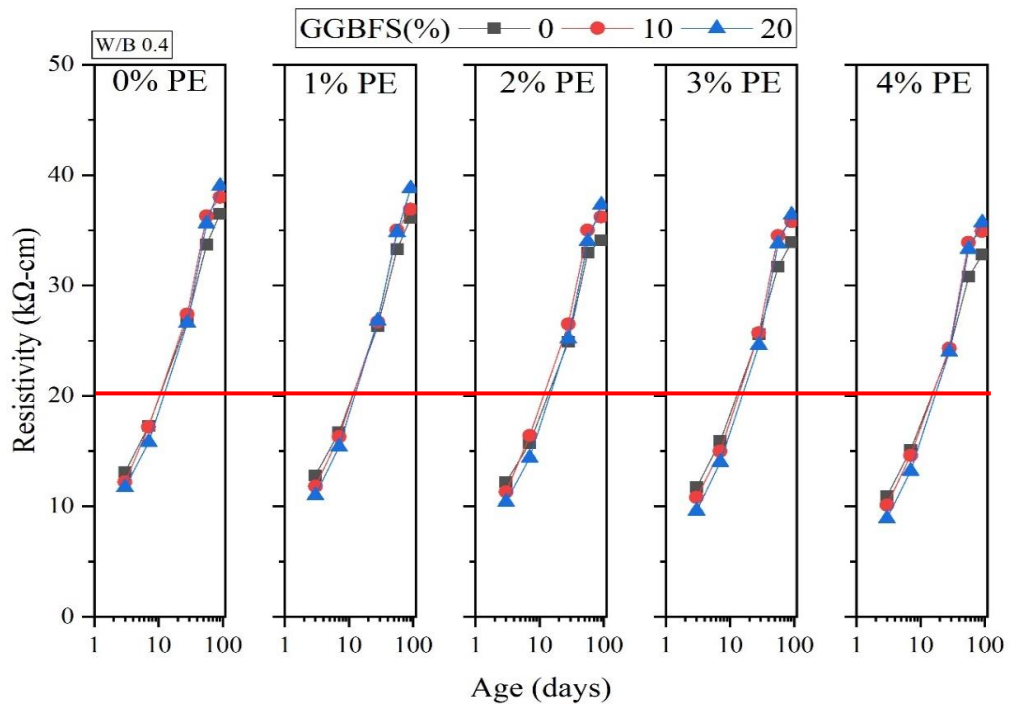


圖13 添加廢棄 PE 材料之電阻值

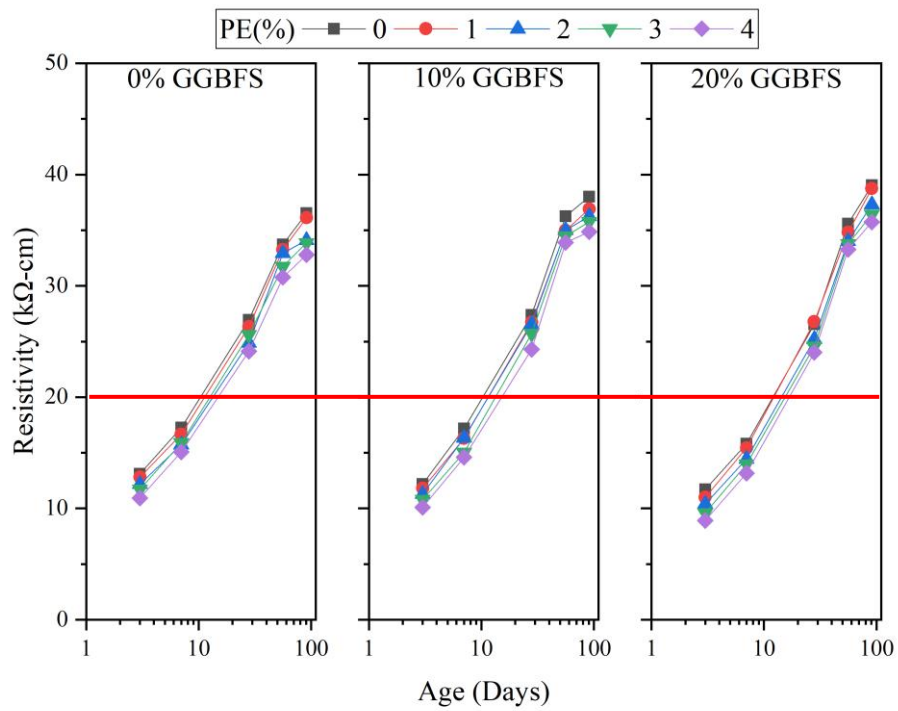


圖14 爐石粉取代水泥之電阻值

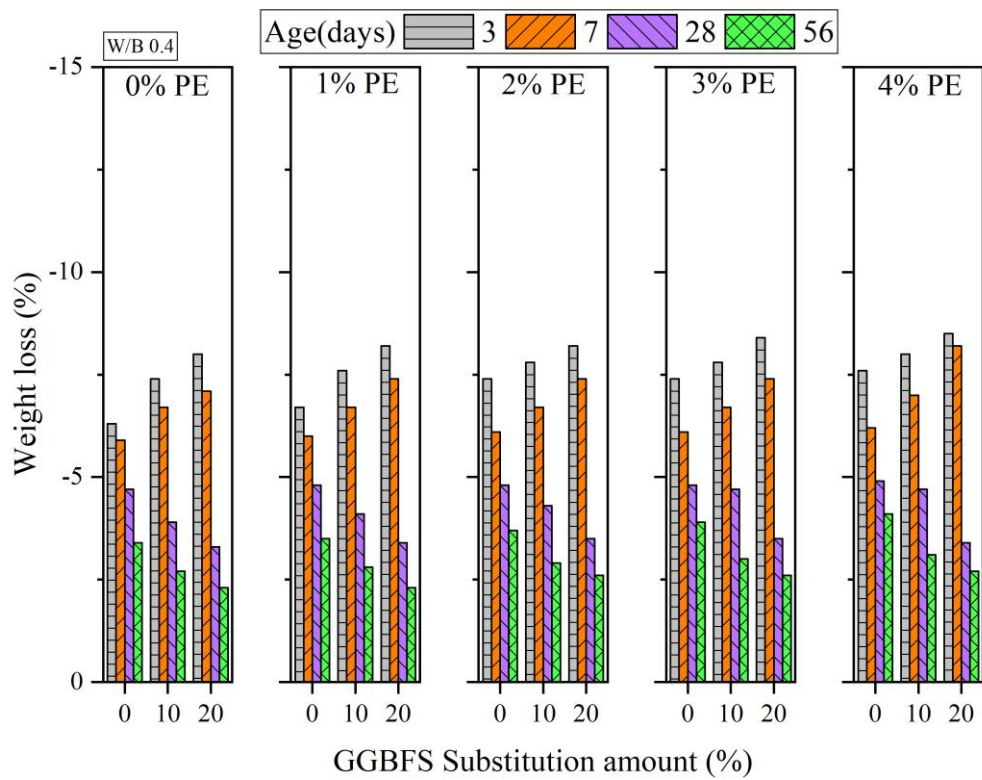


圖15 添加廢棄 PE 材料之硫酸鹽侵蝕

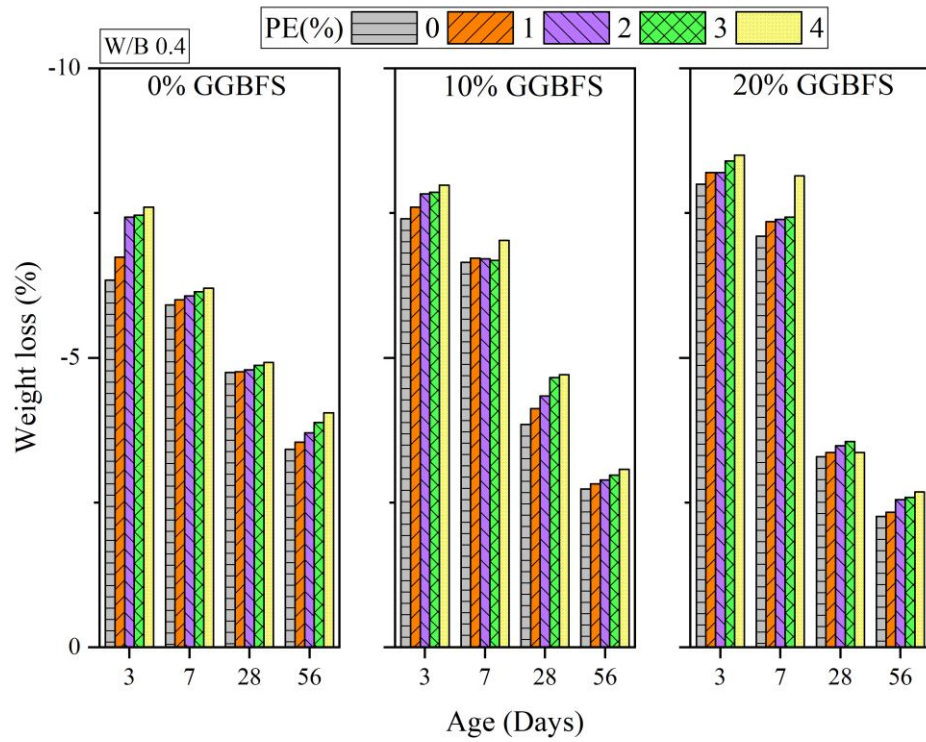


圖16 爐石粉取代水泥之硫酸鹽侵蝕

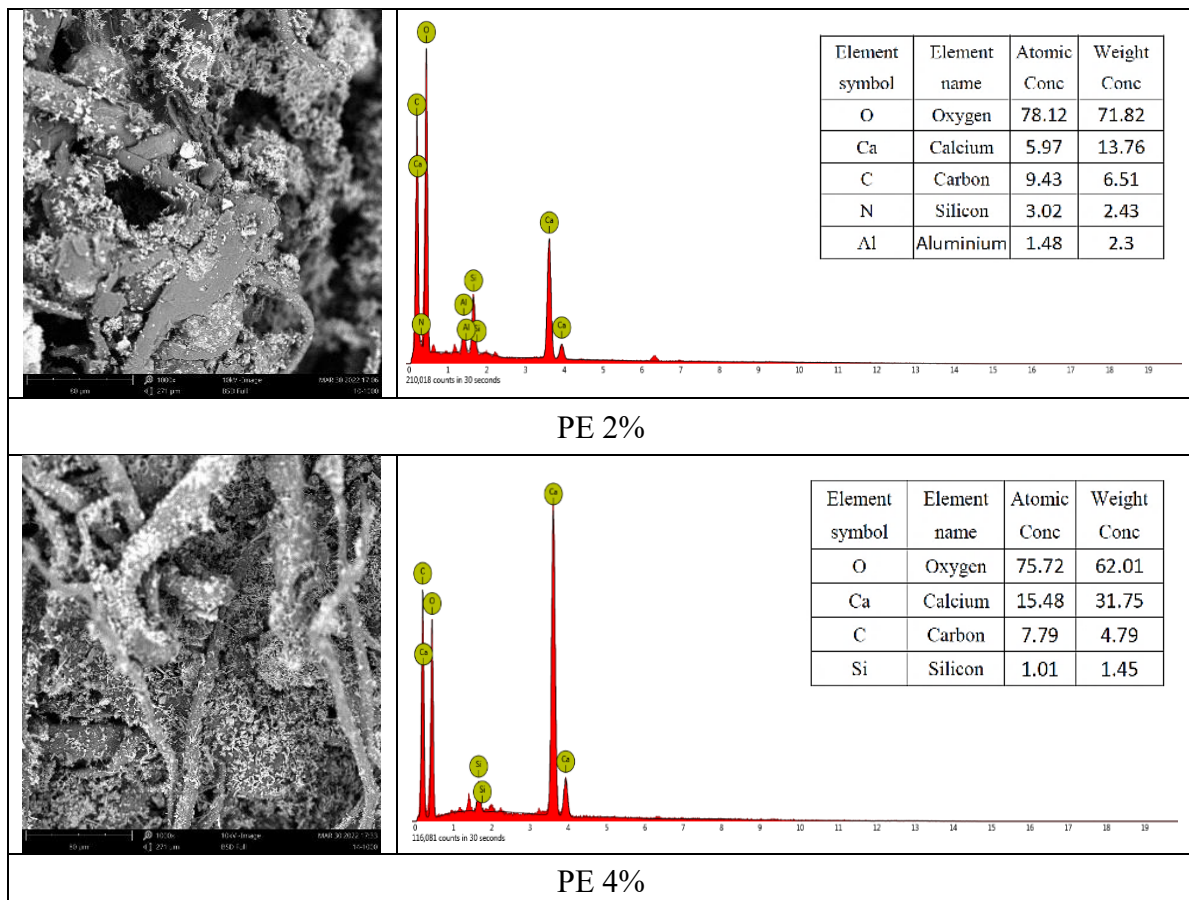


圖17 添加廢棄 PE 材料之微觀性質分析(x1000)(齡期7天)

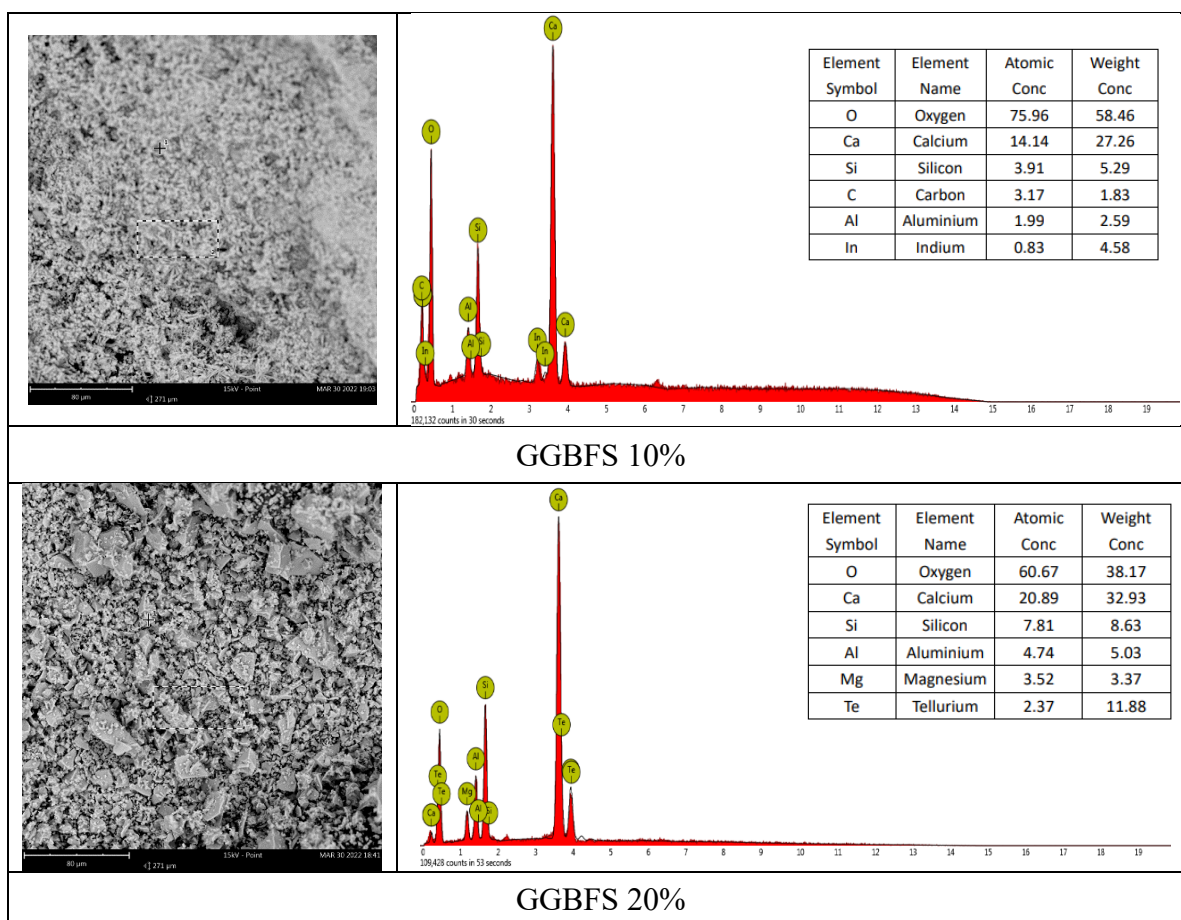


圖18 爐石粉取代量10、20%之微觀性質分析(x1000)(齡期7天)

## 七、結論

1. 坍度隨爐石粉取代量增加而有上升之趨勢，提升整體工作性，並隨廢棄 PE 材料添加量增加而下降。
2. 抗壓、抗彎強度均隨廢棄 PE 材料添加量增加而有下降之趨勢，並以添加量於3%以內，能最有效達到廢棄物去化之成效，並以爐石粉取代量增加，於晚齡期強度有明顯上升之趨勢。
3. 超音波波速隨爐石粉取代量增加而有上升之趨勢，並隨廢棄 PE 材料添加量增加，而有略微下降。
4. 電阻隨廢棄 PE 材料添加量增加，電阻值略微下降，並都於添加量3%以內電阻值皆有大於20 k $\Omega$ -cm，表示試體內部較為緻密。
5. 硫酸鹽侵蝕隨爐石粉取代量增加而降低，添加廢棄 PE 材料反之。
6. 透過 SEM 分析，可以觀察出爐石粉取代量10、20%內部皆有鈣矽石及 C-S-H 膠體，也可看出隨廢棄 PE 添加量增加，試體內部纖維也隨之增加。
7. 透過 EDX 分析，爐石粉主要是以鈣(Ca)元素、矽(Si)元素、鋁(Al)元素、碳(C)等元素居多；廢棄 PE 材料是以氧(O)、鈣(Ca)、矽(Si)等元素居多。

## 八、預期結果

### 8.1 進度說明(正式)

1. 於該預定齡期進行不同廢棄 PE 材料添加量和爐石粉取代量之新拌性質(坍度)、  
硬固性質(抗壓強度、抗彎強度、超音波波速、微觀分析) 及耐久性質(電阻、  
耐硫酸鹽侵蝕)之試驗。
2. 進行數據匯整。
3. 進行數據繪圖。
4. 進行微觀分析。
5. 正式報告撰寫。

### 8.2 預期進度(甘特圖)

工作項目 \ 月次	111年度												備註
	第1月	第2月	第3月	第4月	第5月	第6月	第7月	第8月	第9月	第10月	第11月	第12月	
文獻回顧	■	■											
材料準備	■	■											
配比設計及試拌		■	■										
新拌試驗與試體製作			■	■	■								
硬固及耐久性質試驗					■	■	■						
整理數據							■	■	■	■			
預定進度累計百分比	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	



## 九、參考文獻

1. "PET bottle use patterns and antimony migration into bottled water and soft drinks: the case of British and Nigerian bottles." , Tukur A1, Sharp L, Stern B, Tizaoui C, Benkreira H.; J Environ Monit;14(4):1237-47,2012.
2. "Bottled drinking water: water contamination from bottle materials (glass, hard PET, soft PET), the influence of colour and acidification", Clemens Reimann, Manfred Birke, Peter Filzmoser; Applied Geochemistry, Volume 25, Issue 7, Pages 1030–1046, July 2010.
3. "Leaching of styrene and other aromatic compounds in drinking water from PS bottles", Ahmad M1, Bajahlan AS., J Environ Sci (China).;19(4):421-6,2007.
4. "Global styrene oligomers monitoring as new chemical contamination from polystyrene plastic marine pollution", Kwon BG, etc., J Hazard Mater. 30; 300:359-67, 2015.
5. "An experimental study and sustainability assessment of plastic waste as a binding material for producing economical cement-less paver block” Karma Tempa,Nimesh Chettri,Gautam Thapa,Phurba,Cheki Gyeltshen,Dawa

Norbu,Dikshika Gurung,Ugyne Wangchuk. Available online 5 June 2021.

6. 阮俊凱，鋼-聚乙烯混合纖維爐石混凝土中抗剪及抗彎特性改善之研究，國立中山大學海洋環境及工程學系，碩士論文，2013。
7. 翁翊傑，參入不同長度聚丙烯纖維混凝土之張力強度研究，國立台北科技大學，碩士論文，2007。
8. "Ultra-lightweight high ductility cement composite incorporated with low PE fiber and rubber powder"ZhenyuHuang, TingtingLiang, BoHuang, YingwuZhou, JianqiaoYe, Construction and Building Materials, Volume 312, 20 December 2021.
9. 楊錦懷、陳旭良，纖維加強混凝土應用於預鑄構件接頭之剪力行為，中國土木水利工程學刊，第10期，第205-214頁，1998。
10. 洪志武，纖維直徑分布對混凝土強度之影響，碩士論文，國立成功大學土木工程研究所，2002。
11. 宋佩宣，纖維材料及纖維混凝土加強原理，現代營建，第110期，第61-66頁，1989。
12. 李智強，纖維材料對汙泥灰渣砂漿工程性質之研究，碩士論文，國立中央大學環境工程研究所，2006。
13. 陳建良，應用廢棄纖維、爐石和灰渣等再生材料於水泥砂漿之研究，碩士



論文，國立中央大學，2007。

14. Wen, S. and D.D.L. Chung, "Piezoresistivity in Continuous Carbon Fiber Cement-Matrix Composite," *Cement and Concrete Research*, Vol.29, pp.445-449,1999.
15. Toledo, R.D. and M.A. Sanjuan, "Effect of Low Modulus Sisal and Polypropylene Fiber on the Free and Restrained Shrinkage of Mortar at Early Age," *Cement and Concrete Research*, Vol.29, pp.1597-1604 ,1999.
16. Sun, W., H. Chen, X. Lou, and H. Qian, "The Effect of Hybrid Fibers and Expansive Agent on the Shrinkage and Permeability of High-Performance Concrete," *Cement and Concrete Research*, Vol.31, pp.595-601,2001.
17. Shao, Y. and S.P. Shah, "Mechanical Properties of PVA Fiber Reinforced Cement Composites Fabricated by Extrusion Processing," *ACI Materials Journal*, Vol.94, pp.555-564 ,1997.
18. 黃兆龍，卜作嵐混凝土使用手冊，財團法人中興工程顧問社，2007。
19. 陳靜婷，脫硫渣與爐石粉對水泥砂漿性質之影響，國立高雄應用科技大學土木工程與防災科技研究所，碩士論文，2016。
20. 曾玲群，爐石及飛灰應用於水泥砂漿耐久性與建築減碳之探討，中華科技大學土木研究所，碩士論文，2011。

21. 黃兆龍，混凝土性質與行為，詹氏書局，2016。
22. B.K. Marsh, R.L.Day, “ Pozzlamic and cementitious reactions of fly ash in blended cement pastes ” ,Cement and Concrete Research 18(3) ,pp.301-310,1987.
23. "Polyethylene Terephthalate May Yield Endocrine Disruptors" , Leonard Sax; Environ Health Perspect; 118(4): 445–448 ， 2010.
24. 黃盈峰，爐石取代水泥對預拌土壤材料工程性質之影響，國立高雄應用科技大學土木工程防災科技研究所，碩士論文，2011。
25. 羅永麟，添加爐石及飛灰之混凝土微結構與性質研究，國立中興大學土木工程學系，碩士論文，2008。
26. 沈永年，孫德和，黃盈峰“添加爐石對預拌土壤材料工作性質之影響”中華道路，頁61-71，2012。
27. 林柏彰，還原爐渣取代水泥性質之研究，國立台北科技大學土木與防災研究所，碩士論文，2012。