



國立臺北科技大學

土木工程系土木與防災碩士班

碩士學位論文

**丙酮溶解地工泡棉應用於
高壓混凝土磚之減碳效益分析**

**Analysis of the Carbon Reduction Benefits of Using
Acetone-Dissolved Geofoam in High-Pressure
Concrete Bricks**

研究生：李栢瀧

指導教授：林利國 博士

紀乃文 博士

中華民國一百一十三年六月

(預留空白頁)



國立臺北科技大學

土木工程系土木與防災碩士班

碩士學位論文

**丙酮溶解地工泡棉應用於
高壓混凝土磚之減碳效益分析**

**Analysis of the Carbon Reduction Benefits of Using
Acetone-Dissolved Geofoam in High-Pressure
Concrete Bricks**

研究生：李栢瀧

指導教授：林利國 博士

紀乃文 博士

中華民國一百一十三年六月

國立臺北科技大學
研究所碩士學位論文口試委員會審定書

本校 土木工程系土木與防災碩士班 研究所 李栢瀧 君

所提論文，經本委員會審定通過，合於碩士資格，特此證明。

學位考試委員會

委

員：

黃兆龍
李東興
紀乃文
許利明

指導教授：

紀乃文

共同指導教授：

許利明

所

長：

林祐正

中華民國 一百一十三年 六月 廿八 日

摘要

論文名稱：丙酮溶解地工泡棉應用於高壓混凝土磚之減碳效益分析

頁數：72 頁

校所別：國立臺北科技大學 土木工程系土木與防災碩士班

畢業時間：一百一十二學年度 第二學期

學位：碩士

研究生：李栢瀧

指導教授：紀乃文 博士、林利國 博士

關鍵詞：高壓混凝土磚、發泡聚苯乙烯、丙酮、碳排放、永續發展

隨著時代發展，人們追求更高效與高品質的生活，同時也面臨環境破壞、天然資源濫用和空氣汙染等問題，因此，節能減碳永續發展成為當前社會追求的目標。混凝土磚種類繁多，尤其是高壓混凝土磚，因其施工簡便、耐用和環保等優點，被廣泛運用於各場所，不過其主要成分水泥製造生產出的二氧化碳量極為龐大，在營造建築產業中二氧化碳排放量佔所有產業的 38%，而水泥亦佔了全球的 7%，目前全球都以淨零碳排作為目標，期盼在 2050 年能達成此目標，因此找到取代水泥的材料是各界共同目標；EPS 發泡聚苯乙烯具有質量輕、防潮防水且可回收，具有環保特性，為了減少水泥使用量，本研究探討利用發泡聚苯乙烯作為替代材料，透過丙酮溶解後，製作不同比例之稠狀 EPS 替代水泥的試體，並進行性能測試，再評估其減碳效益，期望在減少水泥使用量的同時，也能維持建築材料的性能。而經研究分析發現隨著稠狀 EPS 添加比例增加，其工作性、抗壓強度及抗彎強度均會相對降低，砂漿試體內部的孔隙亦會增多且變大，導致其吸水率提高；然而，取代後之經濟效益比較其成本雖會增加，但在碳排放上會有明顯的減少，對環境可有達到環保與永續發展的目標。

ABSTRACT

Title: Analysis of the Carbon Reduction Benefits of Using Acetone-Dissolved Geofoam in High-Pressure Concrete Bricks

Pages: 72

School: National Taipei University of Technology

Department: Graduate Institute of Civil and Disaster Prevention Engineering

Time: June, 2023

Degree: Master

Researcher: Po-Lung, Lee

Advisor: Nai-Wen, Ji, Ph.D. Lee-Kuo Lin, Ph.D.

Keywords: High-pressure concrete bricks, Expanded Polystyrene (EPS), acetone, carbon emissions, sustainable development

With the development of the times, people pursue a more efficient and high-quality life, but they also face issues such as environmental destruction, misuse of natural resources, and air pollution. Therefore, energy conservation and carbon reduction for sustainable development have become goals for today's society. There are many types of concrete bricks, especially high-pressure concrete bricks, which are widely used in various places due to their advantages of easy construction, durability, and environmental protection. However, the main component of these bricks, cement, produces a significant amount of carbon dioxide during its manufacturing process. The construction industry accounts for 38% of all industrial carbon dioxide emissions, with cement alone accounting for 7% globally. Currently, achieving net-zero carbon emissions by 2050 is a global target, making the search for cement alternatives a common goal. Expanded polystyrene (EPS) has properties such as being lightweight, moisture-resistant, waterproof, and recyclable, making it environmentally friendly. To reduce the amount of cement used, this study

explores the use of EPS as a replacement material. After dissolving it in acetone, different proportions of paste-like EPS are made to replace cement, and performance tests are conducted to evaluate its carbon reduction benefits. The aim is to maintain the performance of building materials while reducing cement usage. Research analysis reveals that as the proportion of paste-like EPS increases, workability, compressive strength, and flexural strength decrease. Additionally, the internal pores of the mortar specimens increase in number and size, leading to higher water absorption rates. However, although the economic benefits show an increase in costs after substitution, there is a significant reduction in carbon emissions, achieving environmental protection and sustainable development goals.



誌謝

研究所兩年其實很快就過去了，這兩年的我獲益良多。先謝謝指導教授林利國教授對我的用心栽培，給我許多機會能夠表現自己，也在各個場合中提拔我，從老師身上學到不僅是學術上的知識，更多的是做人處事的方式及管理，即便老師在我碩二上時退休，仍將我們帶到畢業，能夠在利國老師的研究指導下是我的榮幸，再次感謝我的指導教授 林利國教授。

感謝在初試時，林祐正教授、林正平教授及紀乃文教授，針對學生的論文初稿提出指點並給予更多建議及方向；感謝在口試時，指導教授林利國教授、紀乃文教授、臺灣科技大學黃兆龍教授及臺灣大學曾惠斌教授對於學生的論文不吝辛勞，無私地給予指正。

特別感謝我的爸媽及妹妹，感謝你們在我研究論文時，給我滿滿的支持及鼓勵，在我遇到困難時，總是給我許多建議及幫助。有你們陪伴在我身後，做我最堅強的後盾，是我可以一直堅持不懈的最大動力。

我要感謝所有在研究所期間與我一同打拚、學習的各位，謝謝在遇到各種困難時候總是像曙光一樣能解決所有問題的傑鯉學長、竹鈞學長，在我碩一生活中細心指導我的冠辰學長、宇傑學長、育儒學長、峙叡學長、承諭學長及婕霖學姊，還有在我碩二時幫忙我分擔許多事情的瑞旂及以倩，以及這兩年跟我一同共患難，面對各種棘手問題都一起絞盡腦汁，在我低潮時給我幫助及鼓勵的婉婷，若沒有你們的幫助，這兩年碩士生活不會如此豐富，你們永遠是我 212 的家人。

最後要感謝在我製作實驗時給我幫助的鎮宇學長、偉任、凱毓及沛紳，無私地給予我各種資源幫助及協助。謝謝詩蔓、王維、鶴凌及奕豪在口試當天友情支援，讓我們在口試時可以盡情表現自己，無後顧之憂。最後也謝謝在我生活中的各個朋友，在我寫論文時陪伴我，給我力量，因為有你們，造就了更完美的我，感謝各位。

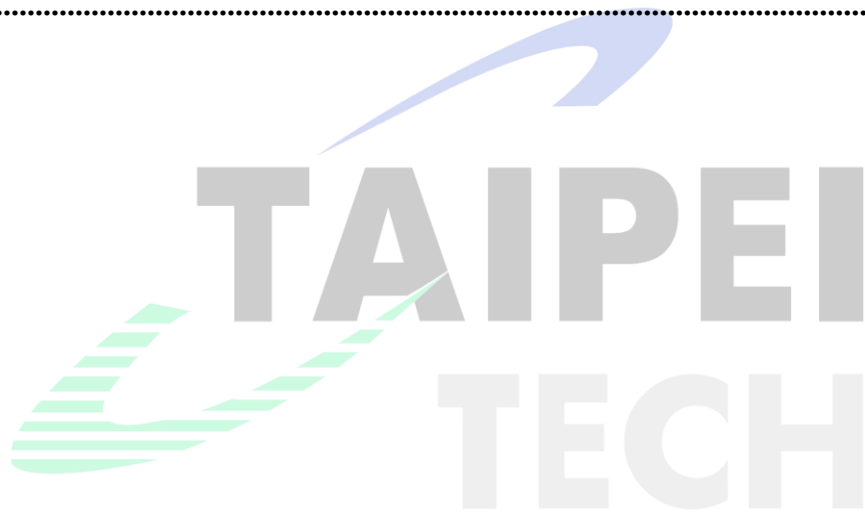
李栢瀧 謹誌 2024.07

目錄

摘要.....	i
ABSTRACT	ii
誌謝.....	iv
目錄.....	v
表目錄.....	viii
圖目錄.....	x
第一章 緒論.....	1
1.1 研究背景與動機.....	1
1.2 研究目的.....	2
1.3 研究範圍.....	2
1.4 研究限制.....	3
1.5 研究方法與流程.....	3
第二章 文獻回顧.....	5
2.1 發泡聚苯乙烯成份性質.....	5
2.2 EPS 製程.....	6
2.2.1 EPS 樹脂.....	6
2.2.2 EPS 發泡與圓熟.....	9
2.2.3 EPS 灌模與脫模.....	10
2.2.4 EPS 成型品.....	10
2.3 EPS 國內外之應用.....	11
2.3.1 EPS 應用於國外.....	11
2.3.2 EPS 應用於國內.....	16
2.4 丙酮成份性質.....	20
2.5 丙酮的製造方式.....	20

2.6 丙酮之用途	20
2.7 丙酮與 EPS 反應作用	20
2.8 混凝土磚	21
2.8.1 混凝土磚之特性及應用	22
2.8.2 混凝土磚之特性及應用	22
2.8.3 高壓混凝土磚施工	22
2.9 樹脂混凝土	25
2.10 環保議題	25
2.10.1 巴黎氣候協定	25
2.10.2 水泥產生的溫室氣體及影響	26
第三章 研究方法	28
3.1 實驗計畫	28
3.2 實驗材料	30
3.3 實驗設備	33
3.3.1 試體製作	33
3.3.2 稠狀 EPS 密度試驗	38
3.3.3 流度試驗	38
3.3.4 吸水率試驗	39
3.3.5 抗壓強度試驗	41
3.3.6 抗彎強度試驗	43
3.3.7 耐磨試驗	45
第四章 研究成果	48
4.1 稠狀 EPS 密度比重試驗	48
4.1.1 不同狀態之 EPS 與丙酮溶解所需時間	49
4.2 流度試驗	50
4.3 吸水率試驗	51

4.4 抗壓強度試驗.....	56
4.5 抗彎強度試驗.....	60
4.6 耐磨試驗.....	63
4.7 碳排量.....	65
4.8 成本比較.....	66
4.9 經濟效益.....	67
第五章 結論與建議.....	68
5.1 結論.....	68
5.2 建議.....	69
參考文獻.....	70



表目錄

表 2.1 發泡聚苯乙烯粒徑規格表	8
表 2.2 發泡聚苯乙烯品級之特性及應用	8
表 2.3 混凝土磚、陶瓷磚及紅磚之差異比較	21
表 2.4 高壓混凝土磚之強度限制與規範	23
表 2.5 高壓混凝土磚、高壓路緣石磚、透水磚之比較	23
表 2.6 高壓混凝土磚規範	24
表 2.7 高壓混凝土磚之試驗數與抽樣規定數值	24
表 3.1 高壓混凝土磚之實驗變數	28
表 3.2 試體配比	28
表 4.1 密度比重試驗數據表	48
表 4.2 不同狀態下固定 EPS 質量數據表	49
表 4.3 不同狀態下固定 EPS 體積數據表	49
表 4.4 流度試驗數據表	50
表 4.5 取代水泥 10%之吸水率數據表	51
表 4.6 取代水泥 20%之吸水率數據表	52
表 4.7 取代水泥 30%之吸水率數據表	53
表 4.8 取代水泥 40%之吸水率數據表	55
表 4.9 抗壓強度試驗 7 天數據表	56
表 4.10 抗壓強度試驗 14 天數據表	57
表 4.11 抗壓強度試驗 28 天數據表	58
表 4.12 抗彎強度試驗 7 天數據表	60
表 4.13 抗彎強度試驗 14 天數據表	61
表 4.14 抗彎強度試驗 28 天數據表	62
表 4.15 取代 10%水泥之耐磨試驗數據表	63

表 4.16 取代 20%水泥之耐磨試驗數據表.....	63
表 4.17 取代 30%水泥之耐磨試驗數據表.....	64
表 4.18 取代 40%水泥之耐磨試驗數據表.....	64
表 4.19 每公斤水泥及 EPS 取代後之碳排放量計算	65
表 4.20 每年水泥及 EPS 取代後之碳排放量計算	66
表 4.21 成本價目表	66



圖目錄

圖 1.1 研究流程圖	4
圖 2.1 EPS 製造流程圖	6
圖 2.2 原油煉製過程及產物示意圖	7
圖 2.3 預發泡之 EPS 顆粒	9
圖 2.4 EPS 灌模與脫模作業流程圖	10
圖 2.5 EPS 成型品作業流程圖	10
圖 2.6 猶他州鹽湖城 I-15 州際公路重建工程.....	12
圖 2.7 紐約州厄特縣 23A 道路工程	12
圖 2.8 華盛頓州 Renton City Hall 新建工程.....	13
圖 2.9 馬里斯維爾州斯諾霍涵洞工程.....	13
圖 2.10 新奧爾良機場東西向跑道整建工程.....	14
圖 2.11 北海道札幌市橋梁橋台之背填工程.....	15
圖 2.12 印尼 Cisumdawu 高速公路填土工程.....	16
圖 2.13 臺北市中山大直橋.....	17
圖 2.14 洲美快速道路第二期新建工程示意圖.....	17
圖 2.15 國立臺北科技大學圖書館屋頂太陽能設備暨休憩空間整建工程.....	18
圖 2.16 EPS 應用於東眼山工程之案例	19
圖 2.17 EPS 應用於台中市石岡區中 91 線道路復建工程之案例	19
圖 2.18 乾式施工法示意圖	24
圖 2.19 濕式施工法示意圖	25
圖 2.20 大氣中 CO ₂ 、N ₂ O 及 CH ₄ 濃度成長趨勢.....	26
圖 3.1 實驗流程圖.....	29
圖 3.2 砂.....	30
圖 3.3 水泥.....	31

圖 3.4 顆粒狀 EPS.....	31
圖 3.5 塊體狀 EPS.....	32
圖 3.6 丙酮.....	32
圖 3.7 材料秤取.....	33
圖 3.8 拌合機.....	34
圖 3.9 拌合過程.....	34
圖 3.10 正方形模具.....	35
圖 3.11 長方形模具.....	35
圖 3.12 試體澆置.....	36
圖 3.13 正方形試體.....	36
圖 3.14 長方形試體.....	37
圖 3.15 試體養護.....	37
圖 3.16 流度台、流度模.....	38
圖 3.17 游標卡尺.....	39
圖 3.18 磅秤.....	40
圖 3.19 烘乾.....	40
圖 3.20 放入水槽養護.....	41
圖 3.21 HT-9501 Series 萬能試驗儀.....	42
圖 3.22 抗壓強度試驗.....	42
圖 3.23 儀器操作.....	43
圖 3.24 WM-10EUTM 萬能試驗機.....	44
圖 3.25 抗彎強度試驗.....	44
圖 3.26 儀器操作.....	45
圖 3.27 TM-RR 滾筒式自動噴砂機.....	46
圖 3.28 儀器操作.....	46
圖 3.29 超音波振盪機.....	47

圖 4.1 流度試驗線性迴歸分析圖	50
圖 4.2 取代水泥 10%之吸水率折線圖	51
圖 4.3 取代水泥 20%之吸水率折線圖	52
圖 4.4 取代水泥 30%之吸水率折線圖	53
圖 4.5 取代水泥 40%之吸水率折線圖	54
圖 4.6 吸水率之線性迴歸分析圖	55
圖 4.7 抗壓強度 7 天折線圖	57
圖 4.8 抗壓強度 14 天折線圖	58
圖 4.9 抗壓強度 28 天折線圖	59
圖 4.10 抗彎強度 7 天折線圖	60
圖 4.11 抗彎強度 14 天折線圖	61
圖 4.12 抗彎強度 28 天折線圖	62
圖 4.13 耐磨磨耗值折線圖	65



第一章 緒論

1.1 研究背景與動機

隨著時代的發展與科技的進步，民眾更迫切的追求品質與效率，在更有效的時間內達成更佳品質是大家共同追求的目標；但是近年來，為了生活舒適而破壞人們居住的地球環境，導致天然的自然資源遭到濫墾濫伐、空氣汙染等問題日益嚴重，因此如何在保護地球的生活環境，同時達成原先預設的生活目標是現今相當重要且棘手的難題。

台灣的傳統建築最常見的就是以紅磚興建的紅磚牆建築，因其隔熱效果佳，又具有耐磨性質，但由於傳統紅磚建築施工時需要大量的勞力成本，也會花費較多時間在製作上，且要把其外觀砌到完整好看，建造的成本更相對增加；此外，因純磚造建築的耐震效果不佳，台灣位在歐亞板塊及菲律賓海板塊交界帶上，是經常發生地震的地方，故在經過了時代的變遷，面臨建築材料資源以及防震的需求，再加上環保意識的抬頭（洪儷容，2014），使得紅磚建築漸漸地被混凝土磚取代。

在臺灣，混凝土磚有分很多種類，包括高壓透水磚、高壓混凝土磚、高壓路緣磚等；其中，高壓混凝土磚是被使用率最高的一種，台灣有許多地方使用高壓混凝土磚做為道路材料，例如：停車場、寺廟廣場、學校、人行道、觀光景點、車道、文化中心、公園及步道等，高壓混凝土磚因施工簡便、不易碎裂、不易龜裂、硬度高、耐磨擦、耐壓、環保、不影響交通、迅速、耐滑、美觀、維護修理費用低等特性（葉育儒，2023）；然而高壓混凝土磚的主要成份材料是水泥，而水泥產業因為其製成的特性，需要消耗大量的能源以及二氧化碳。據統計，建築產業及營建產業所產生的二氧化碳排放量佔全球產業的 38%，台灣生產水泥所產生的二氧化碳量占整個水泥生產的 60%（李堅明、周宜雄、周麗芳，2021），雖然目前無法達到完全不使用水泥，但是可以透過減少水泥的使用量來達成對環境的改善，進而保護地球。

發泡聚苯乙烯（Expanded Poly-Styrene；簡稱為 EPS），是一種土方替代材料，國內

外已將其應用於土木工程之砂土回填材料，故又稱為地工泡棉（Geofoam），此材料因具有質量輕、耐熱、防潮防水及施工性佳等優點，而且 EPS 是可回收的材料，故具有環保特性。本研究主要目的為透過丙酮將 EPS 地工泡棉溶解，進而探討其取代混凝土中的水泥減少其使用量，將其模擬製作成高壓混凝土磚來進行性質測試，進而探討其中達到的減碳效益。

1.2 研究目的

根據 Amrita Milling, Abrahams Mwasha, Hector Martin 研究中指出當 EPS 與丙酮溶解取代水泥之實驗，以五種混合比例進行實驗發現在取代水泥 5%及 10%的效果最佳。因此，本研究將顆粒及塊體之 EPS 透過丙酮溶解後，分別藉由 10%、20%、30%、40%取代高壓混凝土磚內的水泥材料，製作 5 cm * 5 cm * 5 cm 之（正方形試體）及 4 cm * 4 cm * 16 cm 之（長方形試體），研究其抗壓強度、坍流度試驗、吸水率、抗彎強度以及耐磨性質進行探討，進而分析其應用之減碳效益。

本研究執行項目如下：

- 一、探討 EPS 於塊體及顆粒不同狀態下，對於丙酮反應及使用量之差異性。
- 二、探討塊體及顆粒狀 EPS 被丙酮溶解後以 10%、20%、30%、40%取代水泥，將其拌入試體內經由 7 天、14 天及 28 天養護，檢測其抗壓強度及抗彎強度是否符合適當範圍。
- 三、探討塊體及顆粒狀 EPS 被丙酮溶解後以 10%、20%、30%、40%取代水泥，檢測其吸水率及耐磨性是否符合適當範圍。
- 四、依不同取代比率探討其減碳效益。

1.3 研究範圍

本研究僅針對高壓混凝土中的水泥進行取代探討，丙酮溶解後之 EPS 稠狀液體取代水泥拌合砂漿後是否能對環境的保護及提升能有貢獻。

1.4 研究限制

因為 EPS 發泡聚苯乙烯是可以被多種有機溶劑分解，可能導致被溶解後之 EPS 成份有差異，故本研究僅針對丙酮有機溶劑進行探討，並未針對其他有機溶劑進行測試與探討。

1.5 研究方法與流程

本研究採取以下兩種研究方法進行探討以達成預期目標

- 一、文獻回顧法：蒐集國內外 EPS 發泡聚苯乙烯被丙酮溶解以及混凝土磚之相關資料與文獻，並參考各種添加材料灌入混凝土磚之技術及應用，透過所有資料彙整統整及其實驗方法，而作為本研究之執行參考。
- 二、模擬實驗法：使用丙酮溶解顆粒及塊體 EPS，取代高壓混凝土磚之部份水泥材料，測試其不同齡期之抗壓強度、抗彎強度、吸水率及耐磨性。

本研究依據以上說明，依照圖 1.1 之研究流程來執行。

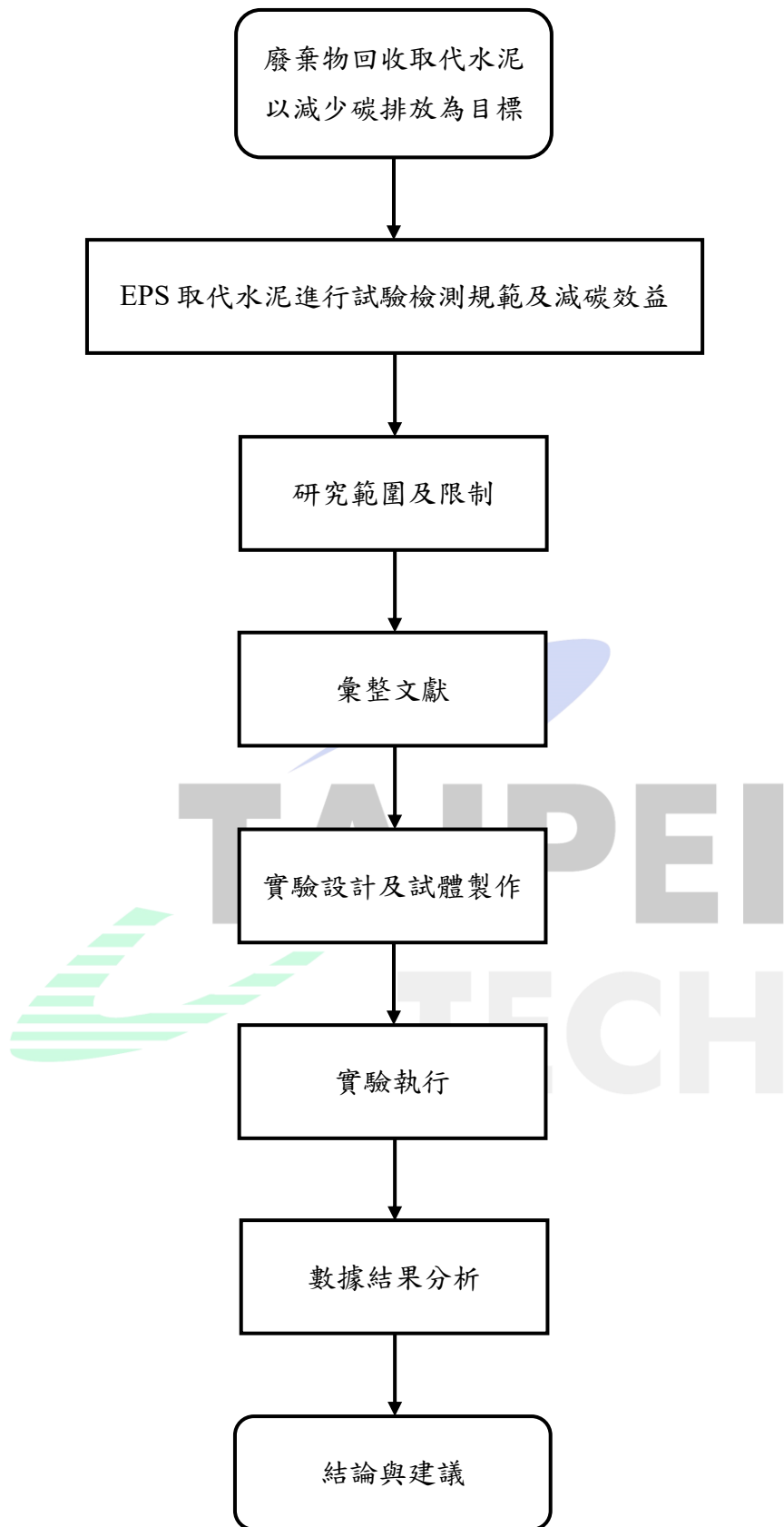
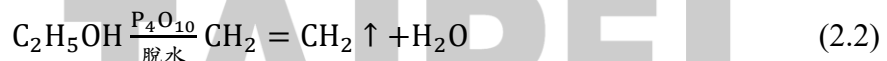


圖 1.1 研究流程圖

第二章 文獻回顧

2.1 發泡聚苯乙烯成份性質

發泡聚苯乙烯 (Expanded Poly-Styrene; 簡稱 EPS)。EPS 主要是由乙烯 (C_2H_4) 與苯 (C_6H_6) 兩個化合物聚合而成的。乙烯是石油工業中，最基本的原料之一，其主要存在於天然氣及煉油氣中，製造過程包括將碘乙烷與氧化鉀之酒精液體共熱，其反應方程式如方程式 (2.1) 所示，亦或是使用濃硫酸和五氧化二磷來促使酒精脫水，反應方程式如方程式 (2.2) 所示；苯亦是石油工業中最基本的原料之一，可從煤焦油及石油中提取而出。而苯及乙烯先經由烷化反應形成乙苯，再藉由脫氫反應後而生成苯乙烯 (C_8H_8)，再藉由聚合反應轉化成固體塑膠質 (黃柏維，2004)。



EPS 之基本特性包括質量輕、經濟性、耐水性、施工簡便、自立性、緩衝性、電絕緣性及隔音隔熱，其基本特性與應用，茲敘述如下 (何泰源，2006)：

- 一、質量輕：EPS 之密度為 $0.012 \sim 0.035 t/m^3$ ，約為一般砂土的 $1/100$ ，使軟弱地盤不須改良承载力，無沉陷之可能性。
- 二、經濟性佳：EPS 施工便捷，工期短，挖方少及維修費低，可作為背填材料。
- 三、耐水性佳：單獨孔隙不易吸水，材料不易發生變化、變形及產生化學反應等優點。
- 四、施工便利：不需要大型機械，以勞力即可迅速工作，其重量輕，可解決缺少技術工人之窘境。
- 五、自立性佳：其松柏比小，可有效降低側向土壓力，可適用於擋土結構中的背填材料。
- 六、緩衝性佳：氣泡發揮極佳緩衝性，具減少衝擊及震動效果。

七、電絕緣性佳：溫度在可容許之操作範圍內，其電絕緣性質及抗靜電性質效果良好。

八、隔音隔熱佳：EPS 組成約 98%為空氣，2%為實體物質，故具有隔音隔熱之效能。

2.2 EPS 製程

EPS 之製造流程分為原料發泡、灌模、脫模及 EPS 成型品等步驟（林利國，2000），如圖 2.1 參考所示。

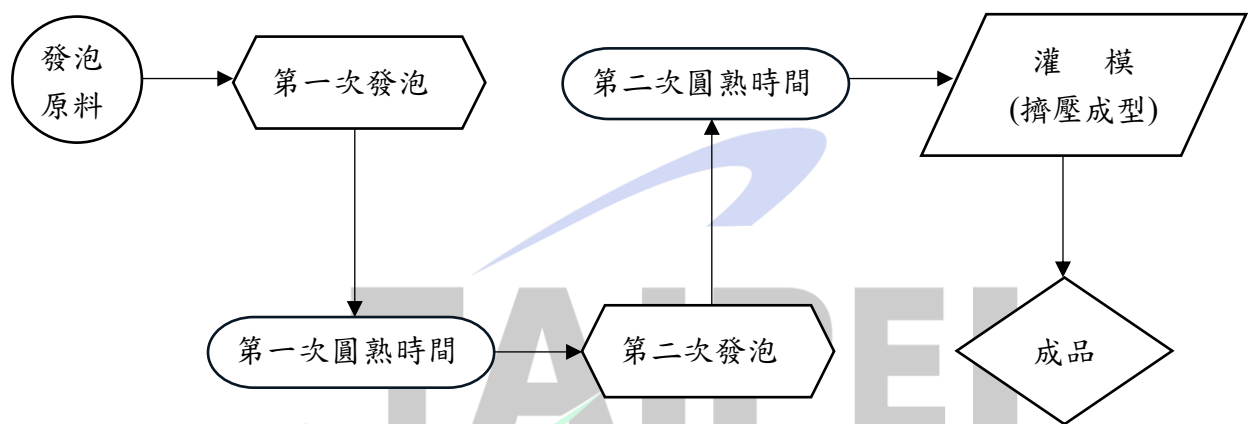


圖 2.1 EPS 製造流程圖（林利國，2000）

2.2.1 EPS 樹脂

塑化聚合物的主要原料源自原油提煉過程，通過蒸餾和分離油氣等步驟，可以獲得汽油、瀝青、石蠟和乙烷等衍生產品，而 EPS 則是從這些衍生物中發展出來的產品之一。其原油提煉過程所產生之產品 96%主要是非燃料之車輛及機械用油，4%約為塑化物，其中 EPS 比例僅約 0.1%（鄭卓仁，2010），如圖 2.2 參考所示。

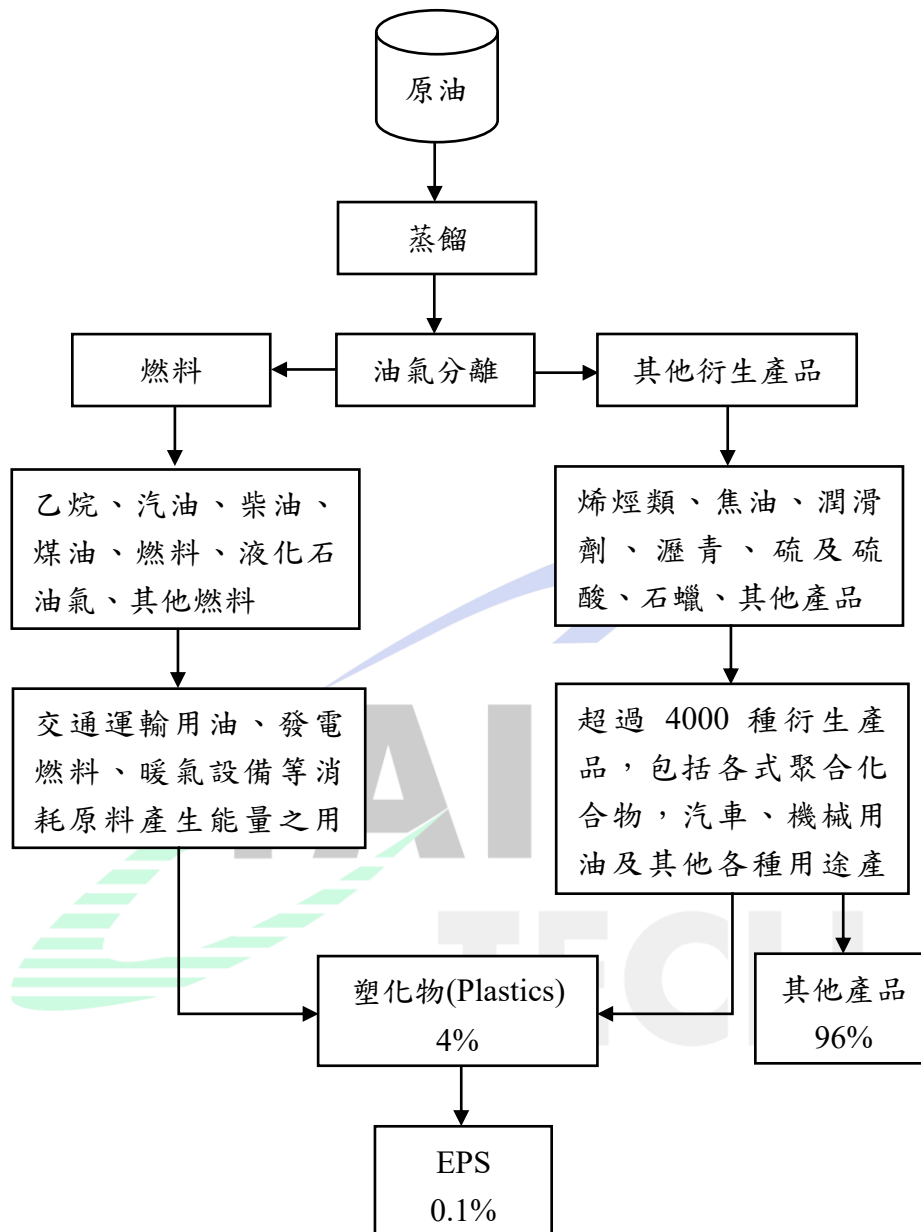


圖 2.2 原油煉製過程及產物示意圖（英國塑膠協會，2005）

國內許多產業使用苯乙烯作為發泡材料，經過懸浮聚合反應後，形成不同粒徑的樹脂塑膠顆粒。這些聚苯乙烯珠顆粒添加了戊烷發泡劑後進行冷卻，藉由各層規格不同之篩網過濾出各粒徑大小之 EPS 樹脂，其粒徑大小規格分為六種，粒徑小發泡倍率

越小，反之，粒徑大則發泡倍率越大（台達化學工業股份有限公司，2020），如下表

2.1、2.2 所示。

表 2.1 發泡聚苯乙烯粒徑規格表

粒徑規格	MM	T	S	SS	F	H
單位(mm)	1.2~1.8	1.0~1.4	0.8~1.1	0.65~0.9	0.45~0.75	0.3~0.5
發泡倍率	70~95	65~85	60~80	60~80	50~70	20~50

表 2.2 發泡聚苯乙烯品級之特性及應用

品級	特性	應用
一般級	- 成型需要加熱溫度之範圍較廣。 - 抗壓性佳。 - 蒸氣消耗性低，可減少支出成本，亦可節省能源使用。	保護、降低衝擊破壞，如：玻璃、陶瓷相關；保溫材料，如：食品包裝及保溫板；建築美工材料，如：裝飾布置。
快速成型級	- 成型時間快速，能縮短週期，降低成本。 - 其他特性與一般級相似。	保護、降低衝擊破壞，如：玻璃、陶瓷相關；保溫材料，如：生鮮冷凍食品包裝及保溫板。
難燃級	耐火性佳。	保溫材料，如：保溫板及保溫管；建築材料，如：隔間材、複合板；輕質土材料。
非 HBCD 難燃級	通過 SGS 測試，難燃性佳，且不含 HBCD 支持久性有機汙染物。	保溫材料，如：保溫板及保溫管；建築材料，如：隔間材、複合板；輕質土材料。
食品級	含較低成分之聚苯乙烯殘留物，符合國家衛生標準。	市面販售相關食品包裝，如：保冰盒、餐盤杯具等。
抗靜電級	抗電能力佳。	保護、降低衝擊破壞，且不受灰塵之吸附，如：精密電子零件包裝

2.2.2 EPS 發泡與圓熟

將第一階段製得的 EPS 樹脂顆粒放入發泡器中，加入發泡劑，然後通過加熱進行預發泡程序。這會讓顆粒內部的熱量擴散，使其膨脹成泡沫狀。發泡倍數和顆粒大小由多種因素控制，例如蒸氣量、加熱時間和進料速度。這些發泡顆粒的倍數通常在 15 到 70 倍之間，其中大部分是空氣，佔材料總體積的 90%至 95%，因此，它們具有出色的抗壓和緩衝能力。聚苯乙烯依照不同的發泡方式，可分為以下種類：

- 一、押出發泡平板成型（Polystyrene，簡稱 PSP）：押出發泡平板成型將聚苯乙烯和丁烷混合作為發泡劑，放入押出機進行發泡，使其膨脹 10 至 20 倍，形成厚度在 2mm 到 5mm 之間的保麗龍板。這些板材經過加熱後，在真空成型機中成型，最後用於製造免洗餐具和托盤等產品。
- 二、發泡顆粒成型（Expanded Poly-Styrene，簡稱 EPS）：發泡聚苯乙烯有兩種主要方法：模內發泡法和擠出發泡法。首先，將聚苯乙烯原料放入加壓發泡桶，加熱和加壓使原料膨脹，形成預發泡顆粒，膨脹倍數通常為 30 倍至 50 倍。如果要成型，需要進行第二次發泡。將預發泡顆粒放入模具中，施加高溫高壓作用，讓其達到一定熔點並成型，然後根據不同的需求進行裁切，以滿足不同領域的應用。



圖 2.3 預發泡之 EPS 顆粒（蘭陽開發工業股份有限公司，2020）

2.2.3 EPS 灌模與脫模

在灌模之前，需要先對成型模具進行預熱。待預熱完成後，將第二次發泡製造出的 EPS 顆粒從通風儲存槽引入成型機模具中，接著再進行脫模步驟。在確保 EPS 原料完全灌入模具後，開始鎖模並以高溫高壓施加，以使模具內的 EPS 原料在高溫高壓的環境下擠壓成型，擠壓成型後之成品經由適當冷卻後，即開始進行開模與脫模（林利國，2000），如下圖 2.4 所示。

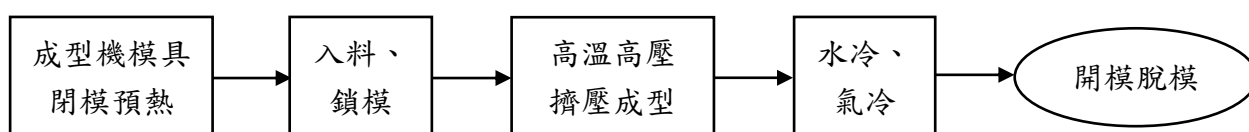


圖 2.4 EPS 灌模與脫模作業流程圖（林利國，2000）

將 EPS 原料放入模具後，模具的尺寸固定，經過蒸氣高溫高壓的加工，製成的產品應該具有相同的密度。然而，若因為壓力或溫度等因素導致產品擠壓不完全，可能會造成產品邊角出現剝落現象。

2.2.4 EPS 成型品

將脫模後之 EPS 成品置於陰涼處使成品自然乾燥，並以目視檢查 EPS 成型品是否合格，如一切都達到所要求之標準便可進行包裝、入庫及出貨等相關工作（黃柏維，2004），如下圖 2.5 所示。

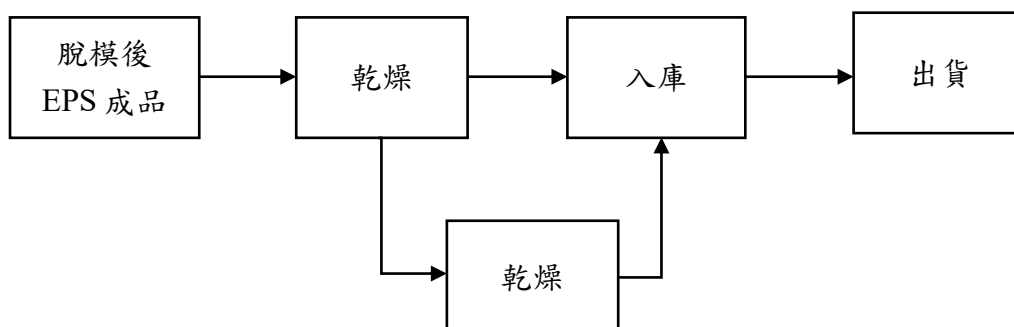


圖 2.5 EPS 成型品作業流程圖（黃柏維，2004）

2.3 EPS 國內外之應用

2.3.1 EPS 應用於國外

一、美國

在美國 1974 年的一項營建工程中，首次將 EPS 作為回填材料，這項工程位於密西根州附近，涉及一座雙橋連續樑結構。該橋使用鋼筋混凝土樁作為基礎支撐，並將橋引道的回填高度增加了 1.5 公尺，這項創新的使用方式開啟了 EPS 在營建工程中的應用先河。於回填階段近於完工時，發現非預期之水平向快速位移，因此必須考慮其它代替材料解決，最後選擇 EPS 材料作為回填材料，該工程使用輕質 EPS 為 977 立方公尺，至今至 40 餘年，仍未發生任何重大位移狀況（鄭永欽及林利國，1998）。

除了密西根州的工程案例，目前在美國，EPS 在工程應用方面已逐漸擴展到其他各州。越來越多的建築和基礎工程選擇使用 EPS，這種趨勢在不同地區和州份得到了廣泛的應用和採納。EPS 作為回填材料或其他工程用途的選擇，已經成為美國各地營建項目的常見選擇之一，分別敘述如下：

- I. 猶他州鹽湖城 I-15 州際公路重建工程：為了因應 2002 年冬季奧運，猶他州鹽湖城重新規劃了其主要的 I-15 州際公路，進行了長約 24 公里的拓寬和重建工程。在這個計畫中，部分區域採用了 EPS 作為回填材料，並採用加載工法（Surcharge method）進行施工。這種方法旨在通過在特定區域施加壓力來減輕地基沉陷，同時加快沉陷速度，以實現快速施工和縮短工期的目標。此工程所使用之 EPS 回填材料總計約 95,000 立方公尺，如下圖 2.6 所示，在當時候已打破文獻記載於馬來西亞單一工程所使用的 80,000 立方公尺最大 EPS 使用量的記錄（鄭永欽，2000）。



圖 2.6 猶他州鹽湖城 I-15 州際公路重建工程

- II. 紐約州厄特縣（Jewett County）23A 道路工程：由於厄特縣 23A 道路經常受到地下水側向壓力的影響，且該路段位於坡地，這導致路堤每年約側向滑移 1 英寸。在 1979 年至 1992 年間，該路段的側向位移累計達到 8 英寸；為解決此問題，於 1995 年開始進行坡地穩定改善工程，此工程使用之 EPS 回填材料總計為 2,800 立方公尺，如下圖 2.7 所示（Geofoam Research Center，2000），以減輕原有土體易於滑動之問題，並達到施工簡便及節省工期之效果。



圖 2.7 紐約州厄特縣 23A 道路工程（Geofoam Research Center，2000）

- III. 華盛頓州蘭頓市政廳（Renton City Hall）新建工程：蘭頓市政廳是一座由地上五層樓和地下三層樓組成的鋼結構玻璃帷幕建築。其地基地層包括鬆散的沖積沙和一層約 12 英呎可壓縮的泥煤，這些軟弱的土層總計約 34 英呎厚，覆蓋在砂礫石層之上。建築物的地下車道正好位於這軟弱土層中，因此該工程

採用 EPS 填充來解決軟弱土層可能引起的沉陷問題。EPS 填充的使用旨在補強地基，防止因土壤沉陷而影響建築物的穩定性；此工程因使用 EPS 而節省約 60 萬美元之工程成本，亦達到施工快速與節省成本之目的，如下圖 2.8 所示（Geofoam Research Center，2000）。



圖 2.8 華盛頓州 Renton City Hall 新建工程（Geofoam Research Center，2000）

IV. 馬里斯維爾州斯諾霍涵洞工程（Snohomish Culvert）：在 2008 年，位於馬里斯維爾州斯諾霍的涵洞工程中，為了預防區域排水幹管涵洞的沉陷和損壞，使用了輕量的 EPS 填充物來覆蓋在涵洞上方，以起到保護作用。這個工程總計使用了 1,883 立方公尺的 EPS 塊體。EPS 填充物的運用有助於增加涵洞的穩定性，避免了排水幹管涵洞可能出現的問題，如下圖 2.9 所示（ACH Foam Technologies，2008）。



圖 2.9 馬里斯維爾州斯諾霍涵洞工程（ACH Foam Technologies，2008）

V. 新奧爾良（New Orleans）機場東西向跑道整建工程：這個工程主要目標是拆除現有的路面、修復和更換損壞的跑道，並重新鋪設新的混凝土路面。在進

行整修過程中，施工團隊發現跑道底下的土壤不均勻地沉陷，因此決定使用較輕的 16PSI 的 EPS 作為填土材料，取代原先導致不均勻沉陷且損壞的土壤。這樣的做法有助於避免新舊跑道之間出現不均勻的沉陷情況。這個工程有其特殊之處，因為機場跑道原先的地下土壤中有很多樹枝和樹根，並有白蟻問題。為了防止蟲害，施工團隊在使用的 EPS 塊體中添加了經核准的特殊添加劑，以防止潛在的重大蟲害問題。這個工程的總成本達到了 6,400 萬美元，並於 2005 年完工，如下圖 2.10 所示。



圖 2.10 新奧爾良機場東西向跑道整建工程（ACH Foam Technologies，2008）

二、日本

日本為目前採用 EPS 施工法最成功的國家之一，這主要是因為日本有大量的軟土地基，EPS 的良好自立性使其成為在陡坡山區建設路基的理想選擇。另外，日本位於地震頻繁的板塊交界處，這種地理位置使得 EPS 施工方法在該國得到廣泛應用。EPS 在耐震方面的特性已得到充分的發揮和利用，因此在日本，這種施工方法已經變得相當成熟。

EPS 輕質填土工法最早應用為 1972 年於挪威佛洛姆橋引道回填工程之案例成功後，日本將 EPS 材料及相關工法引進國內，於 1985 年 8 月首次將此工法應用於北海道札幌市橋梁橋台之背填工程，作為地層下沉之對策（積水化成品工業株式會社，2010），如下圖 2.11 所示。



圖 2.11 北海道札幌市橋梁橋台之背填工程（積水化成品工業株式會社，2010）

三、挪威

EPS 最早於 1950 年被發明，並於 1960 年代首次在斯堪地那維亞國家被用於地層，作為住宅基礎的絕緣材料。同時期，斯堪地那維亞半島、加拿大和美國等國家也開始將 EPS 應用於道路鋪面下，以防止凍結的發生。EPS 的應用範疇在當時逐漸擴大，並被廣泛運用於不同領域以提供特定的功能。1970 年於美國和挪威同時進行 EPS 輕質填土工法應用於公路工程（Horvath，1995），而最重要之里程碑為 1972 年，挪威之道路研究實驗室（Norwegian Road Research Laboratory；簡稱為 NRRL）將 EPS 成功應用於佛洛姆（Flom）橋引道回填（Aaboe，2000）；在該工程進行時，工程師發現橋台地盤屬於軟弱地盤，每年會產生高達 10 公分的地盤沉陷。為了解決這個問題，他們成功地使用 EPS 塊體來替代橋台的背填土，並獲得了良好的效果。從 1972 年到 1991 年間，挪威進行了約 120 個道路工程，共使用了約 250,000m³的 EPS。這些應用包括橋梁引道的回填、擋土回填以及路堤等不同的 EPS 應用。長達 40 多年的使用經驗及效果評估表明，EPS 作為回填材料可以降低道路維護費用，並且不會降低工程品質。時至今日，挪威道路研究實驗室於 EPS 應用於輕質回填材料之研究仍位居領先地位，世界各國普遍採用 NRRL 之研究，作為輕質回填材料之參考（NRRL，1992；鄭永欽及林利國，1998）。

四、印尼

Cisumdawu 高速公路在印尼城市間扮演重要角色，連接了 Cileunyi、Sumedang

和 Dawuan。在穿越複雜的地質形態時，建設過程中遇到了多處邊坡失敗問題。在高速公路 40 公里與 200 公尺的位置處，使用當地土壤建造了 20 米高的路堤。在達到最終高程之前，觀察到了顯著的土地移動。為了修復路堤，進行了填土挖掘，以減少對滑動面的行車載荷，並使用 EPS 作為輕質材料來取代土壤填充，以降低對土壤的行車力，如下圖 2.12 所示。



圖 2.12 印尼 Cisumdawu 高速公路填土工程（P P Rahardjo，2023）

2.3.2 EPS 應用於國內

一、臺灣

在 1995 年，臺灣將 EPS 應用於一個工程案例。臺灣省公路局在西部濱海公路的建造過程中，於一處建造了一座試驗堤。這個工程使用了密度約為 25 kg/m^3 的 EPS 塊體，並配合了 10 公分厚的 RC 板和 H 型鋼側牆，成功地建造了一座長 30 公尺、寬 3 公尺、高 1.5 公尺的試驗路堤，於當年 12 月完工通車至今，皆無發生任何損壞（黃景川，1999）；此工程總工期為 10 天，如扣除天候及其他因素之影響，則實際施工約為 6 天，符合預期施工規劃進度（黃景川，1997）。

臺北市中山大直橋為全世界第一座釣竿式斜張橋，如圖 2.13 所示，在 1999 年 10 月進行的改建工程中，該計畫運用了 EPS 填土工法。主橋的建造採用了節塊推進的方式進行。隨後在 2000 年 9 月，繼續進行推進構台的建造。為了減少構台底部回填所可能引起的沉陷，使用了密度為 25 kg/m^3 的 EPS 塊體，分三層進行推進

中山大直橋長 29.92 公尺，寬 20.4 公尺，高 4 公尺之回填，共使用 2,440 立方公尺之 EPS 塊體，總重量與傳統重 $2,300 \text{ kg/m}^3$ 之回填相比較，減輕約 555 噸之重量（黃柏維，2004）。



圖 2.13 臺北市中山大直橋

2002 年，臺灣首次大規模使用 EPS 工法之工程為「臺北市洲美快速道路第二期新建工程」，如下圖 2.14 所示，此工程之 EPS 塊體總計使用約 12,105 立方公尺，EPS 材料採用 D-20（模內發泡法），密度為 20 kg/m^3 ，抗壓強度為 1.0 kgf/cm^2 以上。此工程完工後，達耐水性佳及節省經費又不影響工期等目標（何泰源，2006）。

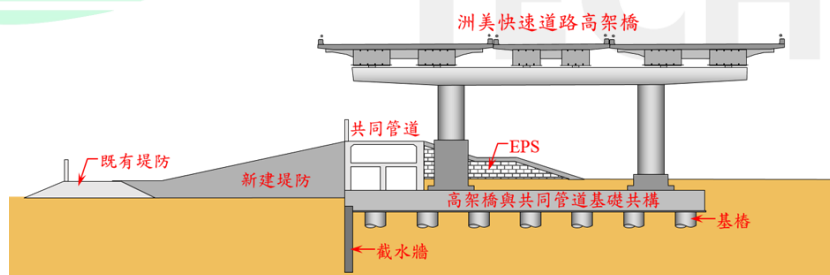


圖 2.14 洲美快速道路第二期新建工程示意圖（何泰源，2006）

國立臺北科技大學於 2020 年底完成的「圖書館屋頂太陽能設備暨休憩空間整建工程」，涵蓋了多項主要施工項目，包括太陽能板工程、室內大廳工程、機電照明工程、鋼構工程、屋頂板夾具工程、防水與隔熱、吸音地坪工程等。其中，吸音隔熱工法使用了厚度 4cm、密度為 15 kg/m^3 的 EPS，總計使用了 866 立方公尺。

為防止在澆置過程中移動，EPS 塊體皆固定使用雙層點焊鋼絲網，如下圖 2.15 所示。此工程總造價為 1795 萬元，吸音隔熱工程佔了 276 萬元。

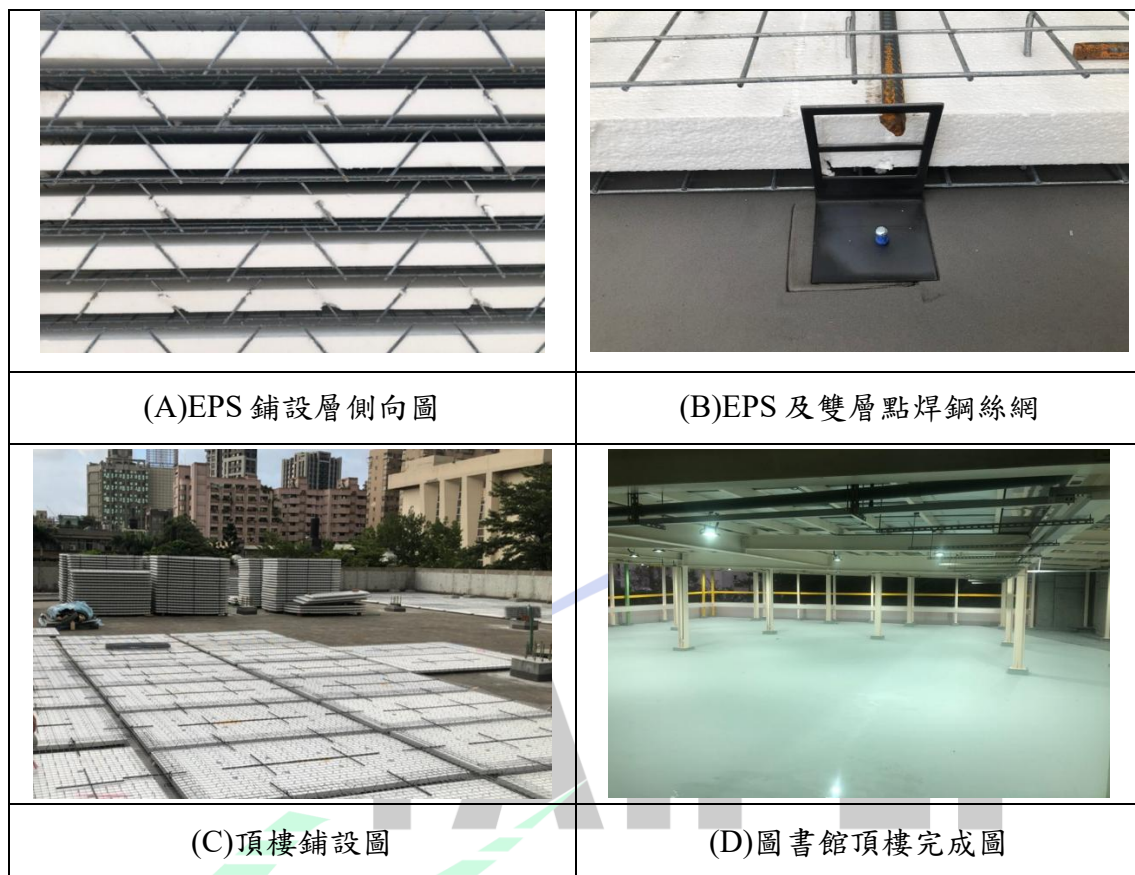


圖 2.15 國立臺北科技大學圖書館屋頂太陽能設備暨休憩空間整建工程

新北市三峽區因為連日暴雨，在東眼山附近的北 113 線道，距離東眼橋約 6 百公尺處，出現了大約 100 公尺長的路面塌陷情況，於施工期間以臨時通行便道維持居民通行、複層臨時擋土支撐維持邊坡穩定並施加坡面噴凝土、帆布及臨時導排設施避免雨水入滲狀況發生，此工程於 2022 年 7 月中旬完工（新北市政府養護工程處，2022），如下圖 2.16 所示。



圖 2.16 EPS 應用於東眼山工程之案例

民國 96 年，台中市石岡區中 91 線道路被柯羅莎颱風沖擊，導致因坡腳持續遭沖刷造成裸露，抵抗力降低，加上降雨造成驅動力增加，導致崩積層滑動。原先的道路區域皆已山崩沖刷滑落而無法通行，時隔至今也已 15、16 年過去，人民若要經過都須繞道而行，台中市政府為了降低民眾的交通時間，決定進行線路的復建工程，而因為原有的道路被中斷，須考量大型機具施工的可行性，再加上邊坡陡峭，且上游坡頂處仍有民房居住，因此要減低坡量的開發，且注重環保減少碳排放，而選用以 EPS 輕質土方回填施工法的方式來填土，如下圖 2.17 所示。

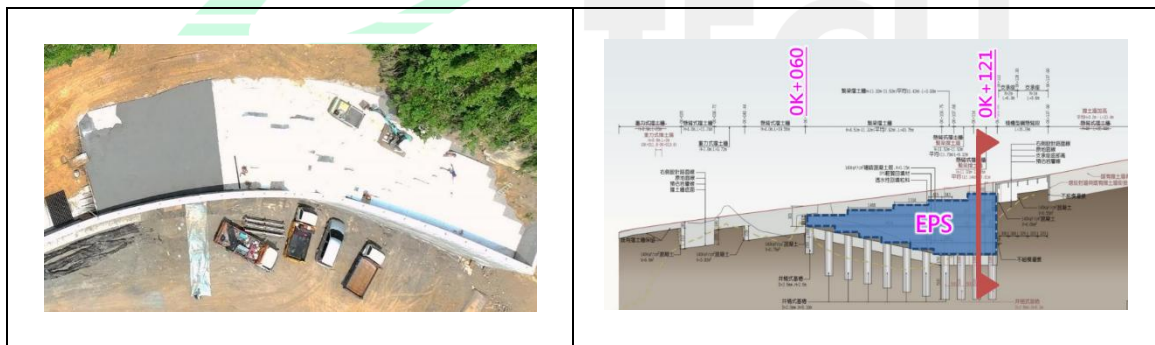


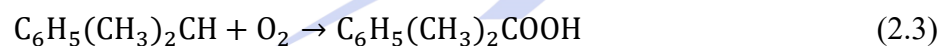
圖 2.17 EPS 應用於台中市石岡區中 91 線道路復建工程之案例

2.4 丙酮成份性質

丙酮 (Acetone)，又稱為二甲基酮、醋酮或是木酮，其化學式 ($\text{CH}_3\text{CH}_2\text{CO}$)，是一種無色、揮發性高的液體，帶有特殊甜香味及薄荷味，亦具有易燃之特性，因此在使用時須在通風良好之處使用，並且避免接觸火源。

2.5 丙酮的製造方式

丙酮目前的生產方法共分為兩大類，第一大類是以植物作為原料進行發酵的發酵法，第二大類則是以石油作為原料的合成法，而當今最常使用生成丙酮的方式則為合成法中的異丙苯法，其方式可以同時生成苯酚及丙酮，且生產成本相當低，是目前最經濟實惠的方法，其異丙苯法之反應方程式如方程式 (2.3) 所示。



2.6 丙酮之用途

丙酮常被使用於工業溶劑及化學之產物，且廣泛的運用於皮革、醫藥、纖維、油漆、塑料、亮光漆、火藥、樹脂、清潔劑、橡膠、外衣衣料、殺蟲劑等等 (ORAL, 2014)，在工業用途上用於溶解、稀釋及清潔為主，而丙酮亦是一種強效溶劑，常常被當作是去除油漆、澆水等較難清除的清潔劑；也在醫療及藥品製作中，被當作醫療儀器及器具的消毒清潔劑；丙酮在塑料及橡膠製造中，也被用作溶劑，也可用於清潔塑膠表面；而日常生活中最常見的丙酮其實是被用作在化妝品清潔的部分，也是去除指甲油的去光水。

2.7 丙酮與 EPS 反應作用

發泡聚苯乙烯的化學結構上，其分子鏈有許多苯環，且沒有親水性的官能基，不會溶於水，而丙酮和 EPS 溶解後會將聚苯乙烯化學式中的氫原子拉走，並結合成氫鍵結構，將 EPS 之間的結構打散而使其固體結構被破壞，但丙酮無法完全切斷苯與苯環

間的作用力，因此 EPS 和丙酮作用，會有白色糊狀物體殘留（林如章、楊秀霞，2000）。

2.8 混凝土磚

製造混凝土磚的過程涉及壓密固結技術，這包括對混凝土進行壓力和震動處理。混凝土磚有多種類型，例如高壓透水磚、平板磚、車道磚、連鎖磚、植草磚、空心磚、高壓路緣石磚等等。這些磚類型的製造過程中，需要透過壓力和震動來確保混凝土產品的穩定性和品質。

普通磚通常是用黏土燒結製成的，包括陶瓷磚和紅磚等。隨著政府針對再生材料的政策，燒結磚的原料不僅限於金屬和陶瓷粉末，還包括塑料和聚合物粉末、水庫淤泥、淨水廠污泥、燃煤飛灰、石材廢料、廢玻璃、工地剩餘土石等多種來源的原料。這些材料都可以被用來製造磚塊，符合環保且適應了再生材料的使用趨勢。而混凝土磚的成本比一般經高溫燒成的普通磚低，相對上也較為環保，需使用的人力低，所以兩者相較之下混凝土磚較陶瓷磚更具優勢（余嫻如，2009），如下表 2.3 所示，混凝土磚、陶瓷磚及紅磚之差異比較。

表 2.3 混凝土磚、陶瓷磚及紅磚之差異比較

項目	混凝土磚	陶瓷磚	紅磚
製作過程	破碎→篩分→混拌→高壓成形→養護	破碎→球磨→篩分→噴霧乾燥→高壓成形→窯燒→切邊	練土→切割→成形→疊坯→乾燥→入窯→預熱→窯燒→冷卻→出窯
原料要求	水泥、砂石級配料	高嶺土、長石及黏土等	黏土(紅土、黑土)
能源耗損	水泥	高溫窯燒	高溫窯燒，木柴、煤、甘蔗渣等燃料
人力問題	製作過程簡單，人力問題少	製作過程複雜，人力問題多	製作過程複雜，人力問題多
環保資源	僅水泥部份問題較多	空氣汙染問題	空氣汙染問題

2.8.1 混凝土磚之組成

混凝土的組成材料主要是由卜特蘭材料、水泥、水、粗骨材、細骨材及化學材料等經由比例計算後，拌合而成，水泥和水會隨著時間進行水化作用而形成混凝土。滿足設計強度的配比是以考量工作性、耐久性、經濟性決定而組成材料的用量（黃兆龍，2001）。

水泥在混凝土中扮演膠結之角色，將所有材料結合在一起，依據台泥的卜特蘭水泥分類用途共分為五種，第 I 型為普通水泥，通常為未設定特定用途之水泥，第 II 型為平熱水泥，其齡期 28 天之強度會較普通水泥低，但超過 28 天後之齡期強度會比水泥高，且具抗硫酸鹽之特性。第 III 型為早強水泥，在齡期 1～3 天下強度較高。第 IV 型為低水熱水泥，其用途多用於須減少水化熱量之處，且常使用於巨積混凝土。第 V 型則為抗硫酸鹽水泥，對於硫酸鹽含量較高之土壤，具有較佳的抵抗特性。

卜特蘭材料則是含有氧化矽和氧化鋁，且能夠與水泥進行水化反應後，生成氫氧化鈣之物質，具有膠結性複合物的材料。而卜特蘭水泥可分為天然材料及人造材料，天然材料以火山岩、頁岩為主，人造材料則是以飛灰、矽灰等成份以氧化矽、氧化鋁、氧化鐵、氧化鈣為主之材料。而添加卜特蘭材料通常前其之強度會比未添加之混凝土來的低，不過晚期之強度會相等甚至超過未添加之混凝土，並且製造出更具耐久性之混凝土。

2.8.2 高壓混凝土磚之特性及應用

混凝土磚的製造根據特定的使用需求，需要使用不同的材料、配方和生產方法。這些磚塊的製作過程會因應結構強度、耐久性、外觀特性以及其他特定功能性需求而有所調整，以確保其在不同場景下能夠發揮最佳效用。如下表 2.4 所示混凝土磚之強度限制及規範，及下表 2.5 所示混凝土磚各種不同磚型之特性及應用進行介紹。

表 2.4 混凝土磚之強度限制與規範

磚型類別	抗壓強度 (kgf/cm ²)	規範
高壓混凝土磚	450	CNS13295
高壓路緣石磚	210	CNS13295
透水磚	280	CNS14995

表 2.5 高壓混凝土磚、高壓路緣石磚、透水磚之比較

	高壓混凝土磚	高壓路緣石磚	透水磚
施工便利	V	V	
維修費用低	V		V
硬度高、不易碎裂	V	V	
透氣、透水性佳			V
止滑性	V	V	V
環保	V	V	
美觀	V	V	V
樣式多變	V	V	V

根據中華民國國家標準 CNS13295 針對高壓混凝土磚、CNS6919 焊接鋼線網、CNS1240 混凝土粒料等規範要求，對高壓混凝土磚進行規範及限制，如下表 2.6 高壓混凝土磚之規範所示。而在高壓混凝土磚之試驗數量及抽樣數量也分別有其相關規定，如下表 2.7 所示。

表 2.6 高壓混凝土磚規範

CNS13295	抗壓強度(kgf/cm ²)		吸水率(%)		耐磨性(cm ³ /50cm ²)		抗彎強度(kgf)
	平均值	個體	平均值	個體	體積 損失量	厚度磨耗 平均值	平均值
A 級	> 650	> 590	≤ 5.0	< 7.0	$\leq \frac{15\text{cm}^3}{50\text{cm}^2}$	≤ 3mm	≥ 1200 kgf
B 級	> 500	> 450	≤ 6.0	< 8.0			
C 級	> 450	> 400	≤ 7.0	< 9.0			

表 2.7 高壓混凝土磚之試驗數與抽樣規定數值

批量（個）	抽樣數	各項檢驗試驗數（個）			
		外觀	尺度	抗壓強度	耐磨性
10,000 以上	6	6	3	3	2
10,001~100,000	12	12	6	6	4
100,000 以上	18	18	9	9	6

2.8.3 高壓混凝土磚施工

高壓混凝土磚之施工方式可分成濕式施工法及乾式施工法兩種，如下圖 2.17、2.18 所示；乾式施工法及濕式施工法之差異僅在乾式施工法的中間層是使用襯墊砂層及土工織物所鋪設，而濕式施工法則是使用黏結材料、混凝土墊層及焊接鋼線網所組成。

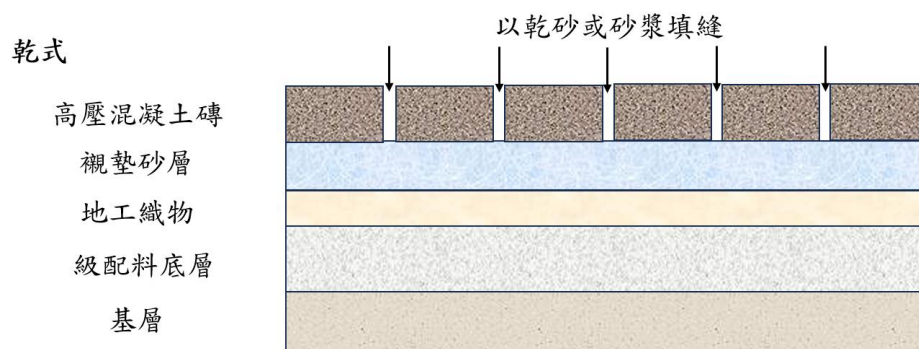


圖 2.18 乾式施工法示意圖（葉育儒，2023）

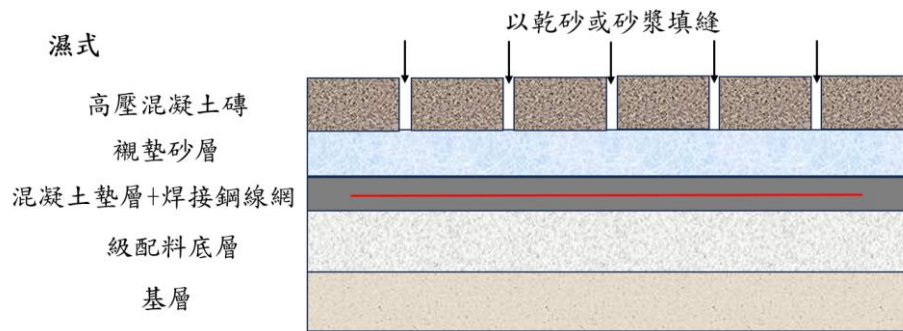


圖 2.19 濕式施工法示意圖（葉育儒，2023）

2.9 樹脂混凝土

樹脂混凝土(Polymer Concrete；簡稱為 PC)是以合成樹脂取代水泥作為其混凝土的黏結材料，再加入粗細骨材、水及其他材料組成，並在混合時加入硬化劑及加速劑，不須經過長時間養護(2011，蔡宗鑫)。混凝土聚合物複合材料是由樹脂取代傳統砂漿或混凝土中部份或全部水泥黏結材料，以及使用樹脂加強水泥的黏結能力，不過樹脂混凝土的成本通常較為昂貴，在固化的過程中也可能釋放出揮發性有機化合物會對環境造成影響，而樹脂混凝土的施工環境條件要求也較嚴格，其溫度應控制在 $10^{\circ}\text{C}\sim 30^{\circ}\text{C}$ 之間，濕度則通常要求在 85%以下，樹脂的流動性和固化速度才能夠得到最佳控制。

2.10 環保議題

2.10.1 巴黎氣候協定

由於生態失衡對人類生存構成了極大威脅，世界各國於 2016 年在聯合國總部簽署了《巴黎氣候協定》，取代了 1998 年的《京都議定書》。該協定承諾了明確的溫室氣體減排目標，致力於將全球平均氣溫上升控制在工業革命前水準以上不超過 2°C ，並努力將溫度上升幅度限制在工業化前水準以上不超過 1.5°C 。2021 年底在蘇格蘭格拉斯哥舉行的全球氣候變遷會議（COP26）被視為《巴黎氣候協定》後最重要的首次評估。會議首次將逐步淘汰化石燃料的目標納入官方文件，並且達成 2050 年實現淨零碳排放

的共識，象徵著化石燃料時代的終結，而永續發展也已經成為全球各國一致追求的目標。

2.10.2 水泥產生的溫室氣體及影響

水泥應用於混凝土已具有非常悠久的歷史，但水泥工業化實際量產是由 19 世紀中葉開始，隨著時代進步與技術改良造成需求與產量大增，而今全球水泥生產量每年約 25.4 億噸，預估於 2030 及 2050 年可能介於 33.4 ~ 38.6、36.8 ~ 43.8 億噸 (M. Schneider, 2011)。水泥生產過程中會排放大量的二氧化碳 (CO_2)，而 CO_2 是造成當前全球暖化與氣候變遷的一項主要原因，如下圖 2.20 所示地球自 1800 年開始到 2005 年，大氣中 CO_2 的濃度由最初的 280 ppm 逐年提升到 380 ppm 並且還持續增加 (Australia, 2010)。據統計，目前水泥生產過程中所排放 CO_2 約佔全球總 CO_2 排放量的 7%，所以必須盡早找出適當的方案來降低水泥的產量。另外，水泥生產過程中除了會產生 CO_2 還有懸浮微粒、氮氧化物 (NO_x) 二氧化硫 (SO_2)、一氧化碳 (CO) 和揮發性有機污染物 (volatile organic pollutants) 等對於環境所造成的環保問題。

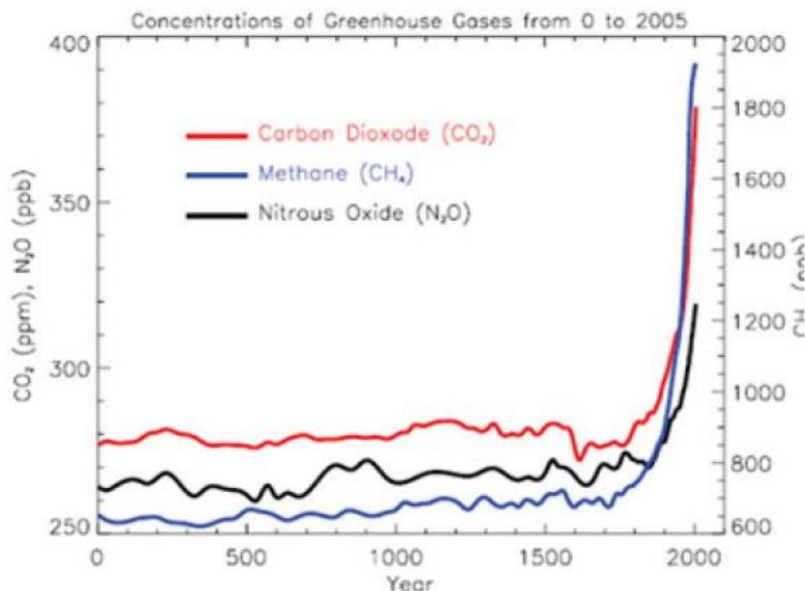


圖 2.20 大氣中 CO_2 、 N_2O 及 CH_4 濃度成長趨勢 (Australia, 2010)

建築之永續考量已經成為各國之重要發展政策目標，其主要考量點在於減少營建活

動對地球環境的破壞，並減少資源的耗費。人為溫室氣體（GHGs）排放對全球氣候的長期影響，受到國際關注愈來愈增加，這些溫室氣體中最重要的是 CO₂，不是因為它是溫室氣體中具有最高單位的貯熱能力（heat retention），而是因為它的排放量非常大，以至於主導整個溫室氣體對全球氣候的影響。卜特蘭水泥製造程序中排放 CO₂，與大多數的高溫能源密集型工業相似，由燃燒燃料產生能量而釋放出大量 CO₂。在卜特蘭水泥生產中大量的 CO₂，是在煅燒石灰石或其他鈣質材料時產生。煅燒程序是指將 CaCO₃ 熱分解為 CaO 和 CO₂。通常卜特蘭水泥中含有相當於約 63.5% 左右的 CaO，因此生產 1 噸的卜特蘭水泥需要 1.135 噸的 CaCO₃。所以生產每公噸的熟料，煅燒過程中釋放出的 CO₂ 排放量約在 0.85 ~ 1.35 公噸（Environmental Protection Agency，1995）。在實務上，聯合國氣候變遷政府間專家委員認為生產 1 噸熟料約產生 0.51 噸的 CO₂ 排放係數（IPPC，2013）。

目前國內水泥產業正積極邁向綠色水泥工業製程。它的主要特點為採用新技術設備，全面實行高效率低耗能製程，並綜合利用各項資源及循環利用為處理其他工業廢棄物、生活垃圾等，為改善環境品質作出重大的貢獻。發展綠色、低碳、友善環境技術已成為目前水泥產業的新趨勢。故提升水泥製程技術，使水泥生產具有高效、優質、節能、資源利用，符合環保和可持續發展目標，是水泥業朝向發展高效率、低耗能產業的不二目標。發展低碳經濟是當前世界經濟發展中的熱門議題，低碳經濟是讓大氣中的溫室氣體含量穩定在一個適當水準上，避免全球氣候劇烈改變，減少極端氣候給地球與人類造成傷害。水泥行業是一個溫室氣體排放量大的產業，正好與所謂的低碳經濟是衝突的，這也正是水泥行業未來所面臨轉型的最大課題。

第三章 研究方法

3.1 實驗計畫

本研究主要針對台達化學工業有限公司提供之顆粒及塊狀之發泡聚苯乙烯，在被丙酮溶解後，以不同的比例之稠狀聚苯乙烯液體取代高壓混凝土磚之水泥進行探討，故本實驗計畫以不同比例之稠狀聚苯乙烯液體作為本實驗之變數，如下表 3.1 所示；根據文獻其混凝土磚常見的配比是以水灰比 0.485 進行試驗，固本試驗之配比則以水灰比 0.485 計算，如下表 3.2 所示。

表 3.1 高壓混凝土磚之實驗變數

項目	變數內容
吸水率試驗	0%、10%、20%、30%、40%之稠狀聚苯乙烯
抗壓強度試驗	0%、10%、20%、30%、40%之稠狀聚苯乙烯
抗彎強度試驗	0%、10%、20%、30%、40%之稠狀聚苯乙烯
耐磨性試驗	0%、10%、20%、30%、40%之稠狀聚苯乙烯

表 3.2 試體配比

W/B	取代比例%	水 (kg)	水泥 (kg)	稠狀聚苯乙烯 (kg)	標準砂 (kg)
0.485	0%	1.297	2.675	0	7.6
	10%		2.407	0.267	
	20%		2.140	0.535	
	30%		1.872	0.802	
	40%		1.605	1.070	

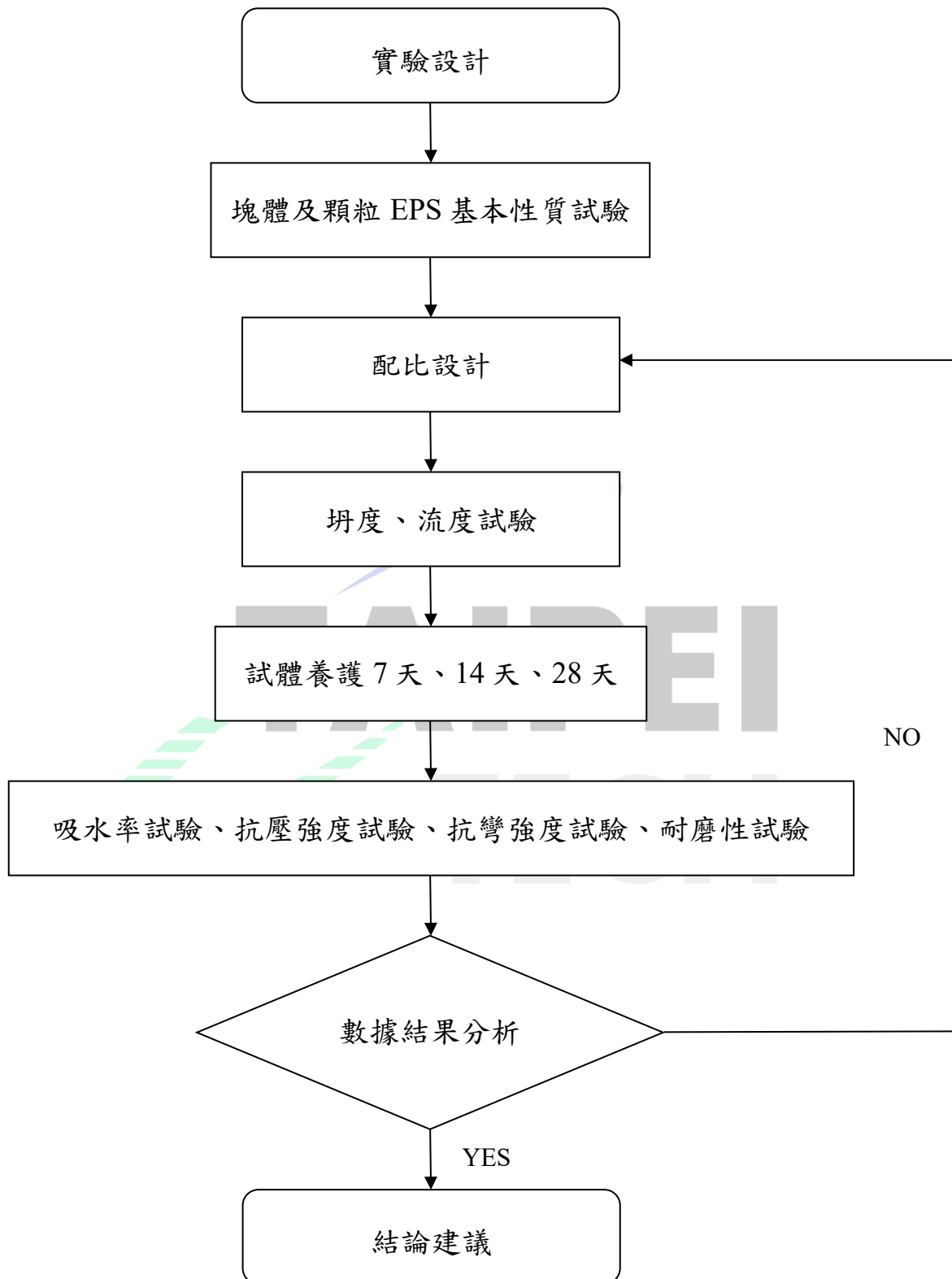


圖 3.1 實驗流程圖

3.2 實驗材料

1. 細骨材

本研究實驗所使用之砂為力泰建設企業股份有限公司所提供的細骨材，其符合 ASTM C109 及 C778 之規定，如下圖 3.2 所示。



圖 3.2 砂

2. 水泥

本研究實驗所使用之水泥為晉瑜企業股份有限公司所生產的水泥，其符合 CNS61 規定的第 I 型卜特蘭水泥，如下圖 3.3 所示。



圖 3.3 水泥

3. EPS 材料

本研究實驗所使用之 EPS 為台達化學工業股份有限公司所生產的發泡聚苯乙烯，包含顆粒圓球形狀及塊狀，是以尺寸 1.5~3.0 mm 之顆粒大小，密度 25 K 之圓球狀顆粒，以及密度 15 K 及 20 K 之塊體狀發泡聚苯乙烯，如下圖 3.4、3.5 所示。

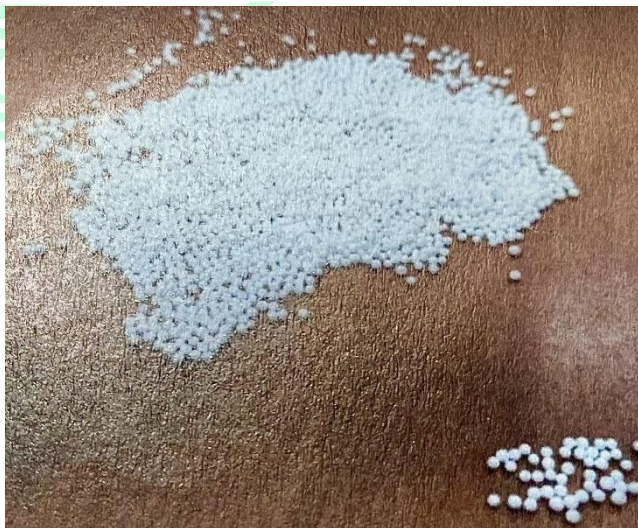


圖 3.4 顆粒狀 EPS



圖 3.5 塊體狀 EPS

4. 丙酮

本實驗研究所使用之丙酮為瑞龍化工原料行所生產的丙酮，如下圖 3.6 所示。



圖 3.6 丙酮

3.3 實驗設備

3.3.1 試體製作

本研究根據 CNS13295 針對高壓混凝土磚之規範，研究將地工泡棉結合丙酮後對於高壓混凝土磚製作之可行性，採用的是（5 cm * 5 cm * 5 cm 的正方形試體以及 4 cm * 4 cm * 16 cm 的長方形試體），無添加任何色料及強化劑於試體。

以下為試體製作之四大步驟：

1. 材料準備、秤重：依據水灰比 0.485 所需之水泥、細骨材、水及稠狀 EPS，秤取所需用量，如下圖 3.7 所示。

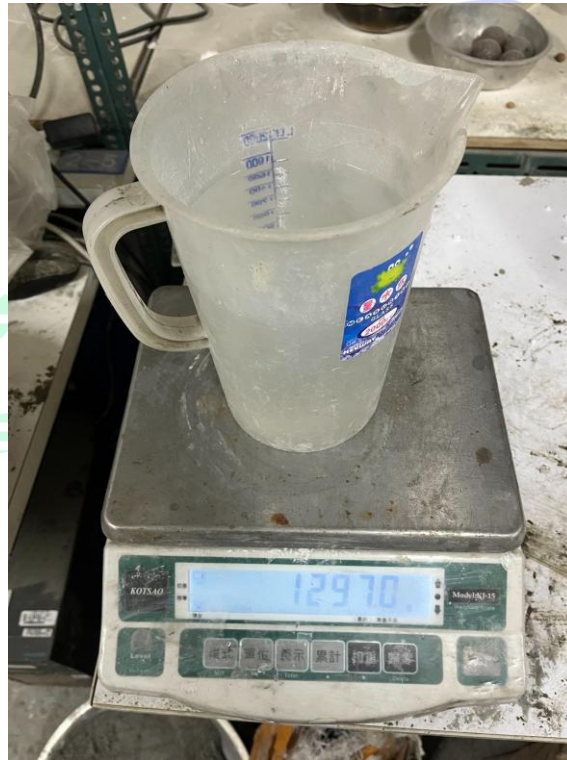


圖 3.7 材料秤取

2. 材料拌合：經過準備秤重後，將材料水泥、稠狀 EPS 及 2/3 的水倒入拌合機，如下圖 3.8 所示，開啟拌合機以一倍的速度開始拌合，再緩緩將砂倒入，最後將 1/3 的水加入拌合機中，並且將速度提升至兩倍速拌合 1 分鐘即可，如下圖 3.9 所示。



圖 3.8 拌合機



圖 3.9 拌合過程

3. 試體灌模澆置：將拌合好的水泥砂漿分三層灌入 5 cm * 5 cm * 5 cm 正方形模具及 4 cm * 4 cm * 16 cm 長方形模具中，如圖 3.10、圖 3.11 所示，每層搗實 20 下 ~ 25 下，再使用刮刀將凸出模具表面的多餘水泥砂漿鏟平，如圖 3.12 所示。



圖 3.10 正方形模具



圖 3.11 長方形模具



圖 3.12 試體澆置

4. 試體脫模養護：待 20~24 小時，試體成型後即可脫模，將模具內殘留硬化之水泥清潔後再上油保養，脫模後的試體則放入養護池中養護，等到養護齡期 7 天、14 天、28 天後，即可進行混凝土試驗。



圖 3.13 正方形試體



圖 3.14 長方形試體



圖 3.15 試體養護

3.3.2 稠狀 EPS 密度試驗

本試驗是先取顆粒及 15K、20K 三種不同型態、K 值之 EPS，秤取固定重量 M1，以丙酮與 EPS 進行溶解，再秤取其稠狀 EPS 重量 M2，以水量取至記號處秤取其重量，又因為水的密度為 1，因此其重量即為體積而求得其稠狀 EPS 之體積 V，取得其重量 M2 及體積 V 後，即可求得其密度比重 D。

$$\text{比重 } D = \text{試樣重量 } M \text{ (g)} / \text{容器內求得之體積 } V \text{ (mm}^3\text{)} \quad (3.1)$$

3.3.3 流度試驗

本試驗是依據 CNS 1012 之規範，將模具放置流度台中央，經拌合後的水泥砂漿以兩層分別裝入錐形模具內，以搗棒槌落 20 次，再用刮刀將流度模表面多餘水泥砂漿刮平，於搗實完 1 分鐘內取走模具後，將流度台於 15 秒內震落 25 次，用尺以每 45 度量測其震動後水泥砂漿，以流瀉完漿體直徑總和取百分率表示即為流度值，如下圖 3.16、圖 3.17 所示。

$$\text{流度值}\% = \frac{(\text{量測之平均值} - \text{模殼底面之內直徑})}{\text{模殼底面之內直徑}} \times 100\% \quad (3.2)$$



圖 3.16 流度台、流度模



圖 3.17 游標卡尺

3.3.4 吸水率試驗

本試驗是依據 CNS13295 之規範，將試體置入烘箱內並於 24 小時取出冷卻至室溫後秤重為 (W1)，然後再將試體置入水槽內 48 小時，再以毛巾將表面擦乾，使試體達面乾內飽和狀態，再秤重量直至重量差低於 5 %，面乾內飽和重為 (W2)，如下圖 3.18、3.19、3.20 所示。

$$\text{試體吸水率 (\%)} = \frac{W2 - W1}{W1} \times 100\% \quad (3.3)$$



圖 3.18 磅秤



圖 3.19 烘乾

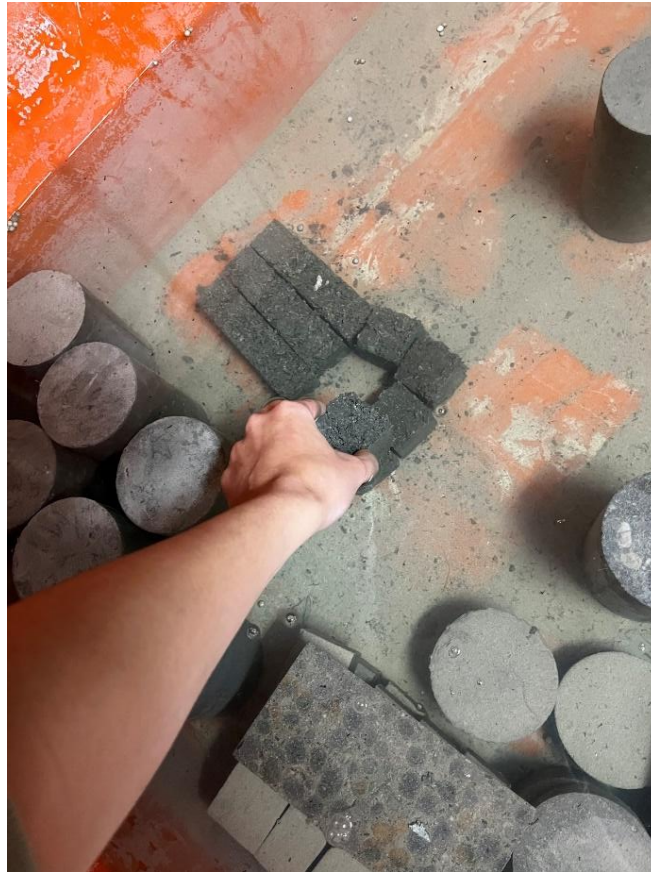


圖 3.20 放入水槽養護

3.3.5 抗壓強度試驗

本試驗是依據 CNS13295 之規範，於養護齡期 7 天、14 天與 28 天之試體取出後，擦乾試體表面，檢查試體承受壓力面是否黏著任何砂粒或雜物，用直尺檢驗是否平整，將試體放置於抗壓試驗機中央，確認球座可自由傾動，試體在前期加壓速率按照加重最大負荷的 1/2，其速度應在 20~80 秒內加至 3000 磅，達此崩壞之最大荷重，最後記錄其最大荷重值，如下圖 3.21、圖 3.22、圖 3.23 所示。

$$\text{抗壓強度 } p \text{ (kg/cm}^2\text{)} = \text{最大荷重 } P \text{ (kg)} / \text{試體承力面積 } A \text{ (cm}^2\text{)} \quad (3.4)$$



圖 3.21 HT-9501 Series 萬能試驗儀



圖 3.22 抗壓強度試驗



圖 3.23 儀器操作

3.3.6 抗彎強度試驗

本試驗是依據 CNS13295 之規範，將水泥砂漿灌注到抗彎模後，在 20 ~ 24 小時內將模具拆除，試體在濕置養護條件下經過齡期 7 天、14 天與 28 天取出試體，在試體上標記三個抗彎點，中間線與儀器接觸面垂直，並將其放置在萬能試驗機上進行抗彎試驗，如下圖 3.24、圖 3.25、圖 3.26 所示。

$$\text{抗彎強度 } (\sigma) = (3 P \times L) / (2 b \times d^2) \quad (3.5)$$

σ ：抗彎強度 (kgf/cm²)

P：試體承载力 (kgf)

L：跨距 (cm)

b：寬度 (cm)

d：厚度 (cm)



圖 3.24 WM-10EUTM 萬能試驗機

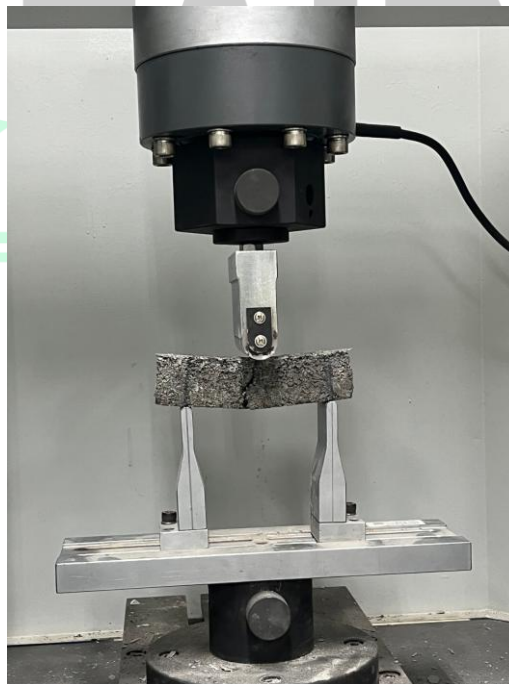


圖 3.25 抗彎強度試驗



圖 3.26 儀器操作

3.3.7 耐磨試驗

本試驗是依據 CNS13295 之規範，透過噴砂磨耗試驗儀對高壓混凝土磚進行噴砂增加表面粗糙度，接著浸泡在丙酮內，透過超音波振盪機去除表面砂礫或污漬，最後由量測其磨耗程度，磨耗體積損失量不得超過 $15 \text{ cm}^3 / 50 \text{ cm}^2$ ，且磨耗厚度平均不得超過 3 mm，如下圖 3.27、圖 3.28、圖 3.29 所示。

$$\text{磨耗係數 } AC (\text{cm}^3 / \text{cm}^2) = \text{截面積 } A / \text{體積 } V \quad (3.6)$$



圖 3.27 TM-RR 滾筒式自動噴砂機

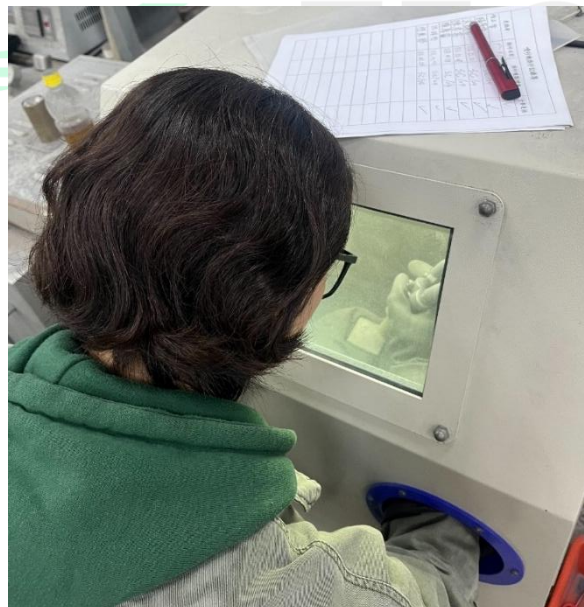


圖 3.28 儀器操作



圖 3.29 超音波振盪機

第四章 研究成果

本研究主要針對 EPS 與丙酮進行溶解後，將其以 10%、20%、30%、40% 之用量取代水泥。先將丙酮溶解不同狀態之 EPS，包括顆粒及 15K、20K 之塊體，進而測試稠狀 EPS 密度比重試驗，接著依據 0.485 之水灰比製作 5 cm * 5 cm * 5 cm 之正方形試體及 4 cm * 4 cm * 16 cm 之長方形試體，為符合 CNS13295 高壓混凝土磚之規範，進行高壓混凝土磚之流度、抗壓強度、抗彎強度、吸水率及耐磨性，並針對其碳排放量及成本進行分析。

4.1 稠狀 EPS 密度比重試驗

將 EPS 顆粒及 15K、20K 之塊體固定質量 40g，與丙酮進行溶解反應，經多次實驗後發現每 40g 的 EPS 與 44g 的丙酮會完全溶解，因此本實驗取 EPS 顆粒及 15K、20K 之塊體固定 40g 與丙酮固定 44g 各試驗 3 次計算其密度比重如表 4.1 所示。

表 4.1 密度比重試驗數據表

材料	丙酮(g)	質量(g)	體積(cm ³)	密度(g/cm ³)	平均值
EPS 顆粒 40g	44	76	85	0.894	0.9
		77	84.6	0.910	
		76	84.7	0.897	
EPS 塊體 15K 40g		78	86	0.906	0.901
		76	84.9	0.895	
		77	85.1	0.904	
EPS 塊體 20K 40g		78	87.1	0.895	0.896
		77	86.3	0.892	
		78	86.5	0.901	

4.1.1 不同狀態之 EPS 與丙酮溶解所需時間

將 EPS 顆粒及 15K、20K 之塊體分別以固定質量及固定體積計算 EPS 於不同狀態下被丙酮溶解所需耗費之時間，如下表 4.2、4.3 所示。

表 4.2 不同狀態下固定 EPS 質量數據表

材料	平均時間(s)
EPS 顆粒 40g	91
EPS 塊體 15K 40g	109
EPS 塊體 20K 40g	82

表 4.3 不同狀態下固定 EPS 體積數據表

材料	長(cm)	寬(cm)	高(cm)	平均時間(s)
EPS 顆粒 6g	30	30	2	19
EPS 塊體 15K 40g	30	30	2	112
EPS 塊體 20K 51g	30	30	2	115

4.2 流度試驗

混凝土的流動性是評估其施工性能與品質最重要指標之一，透過流度試驗可以測試其混凝土的品質及其耐久性。本實驗是透過電動振動台，將新拌合好的 0%、10%、20%、30%、40% 稠狀 EPS 取代水泥之砂漿藉由其震動使其流動擴散，透過游標卡尺測量其擴散之數據判定其流動性，如下表 4.4 所示。隨著取代率的變化，可以得知其稠狀 EPS 取代水泥後，其流動性較低，且隨著取代率越高，其流動率逐漸降低，如下圖 4.1。

表 4.4 流度試驗數據表

EPS 取代率	數據 1	數據 2	數據 3	數據 4	平均	流度值
0%	16.1	16.2	16.4	16.1	16.2	62%
10%	13.6	13.2	13.6	13.5	13.475	34.75%
20%	11.8	12.1	11.9	12.1	11.975	19.75%
30%	11.4	11.7	11.3	10.9	11.325	13.25%
40%	10.3	10.5	10.5	10.5	10.45	4.5%

流度值線性迴歸

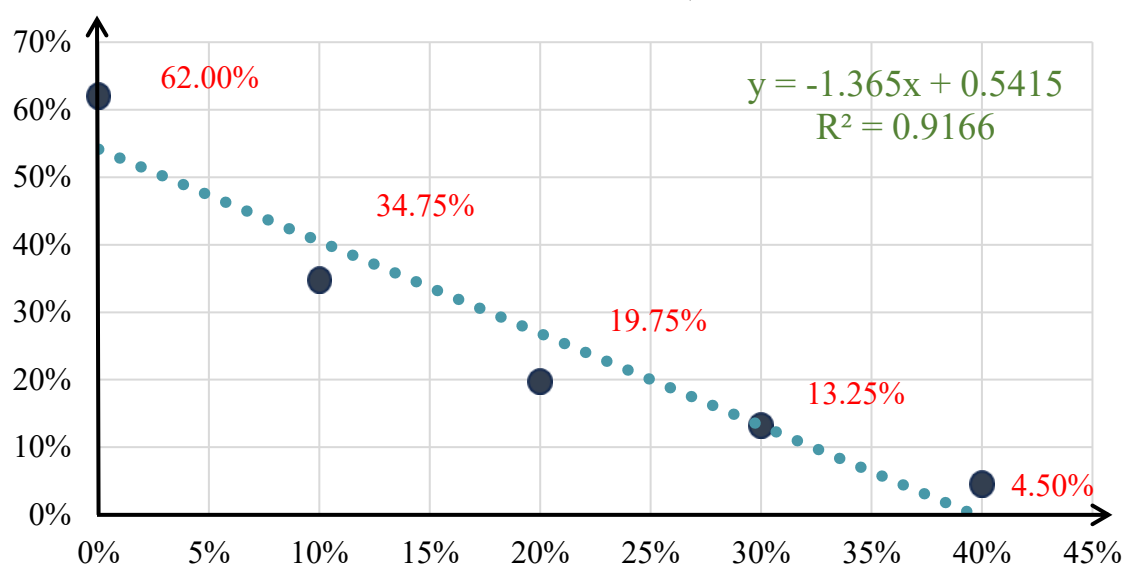


圖 4.1 流度試驗線性迴歸分析圖

4.3 吸水率試驗

以 0.485 的水灰比製作 5 cm * 5 cm * 5 cm 的正方形試體，並以 10%、20%、30%、40% 的稠狀 EPS 取代水泥，進行吸水率試驗，以下是試驗所求得的数据，如下表 4.5 ~ 表 4.8、圖 4.2 ~ 圖 4.5 所示。

表 4.5 取代水泥 10% 之吸水率数据表

水灰比	数据 1	試體	吸水前 W1 (g)	吸水後 W2 (g)	吸水率 (%)
0.485	10%	試體 1	254	283	11.4
		試體 2	265	294	10.9
		試體 3	252	281	11.5

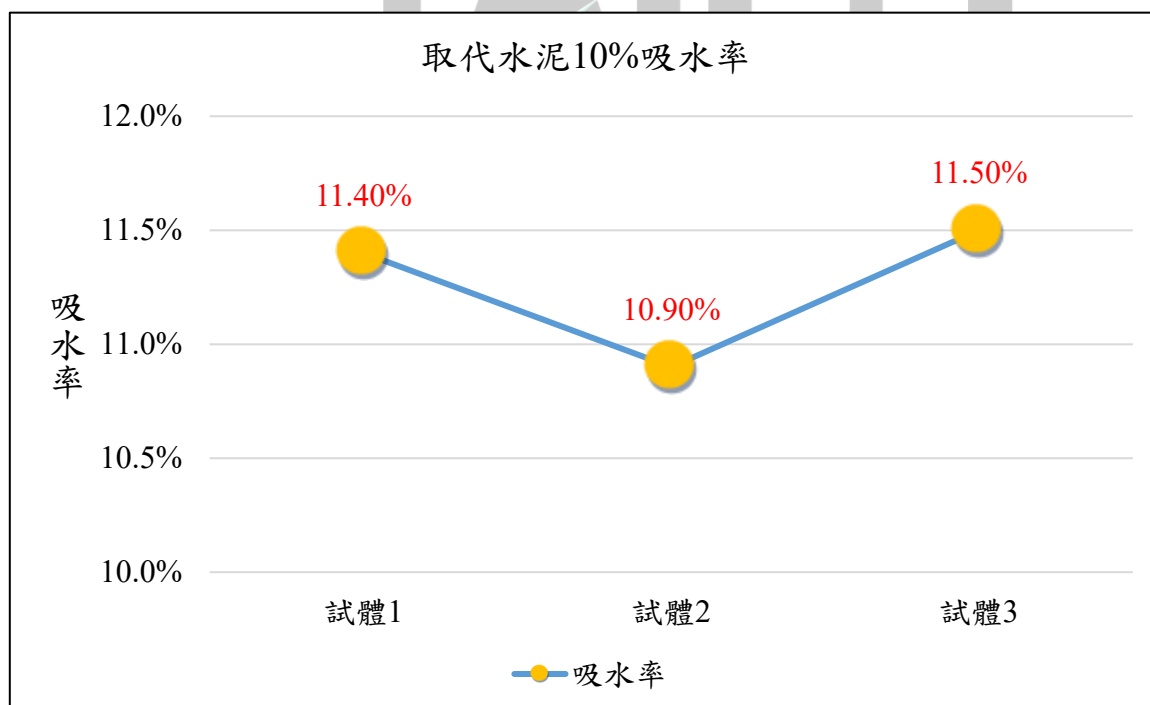


圖 4.2 取代水泥 10% 吸水率折线图

表 4.6 取代水泥 20%之吸水率數據表

水灰比	數據 1	試體	吸水前 W1 (g)	吸水後 W2 (g)	吸水率 (%)
0.485	20%	試體 1	248	279	12.5
		試體 2	244	276	13.1
		試體 3	252	280	11.1

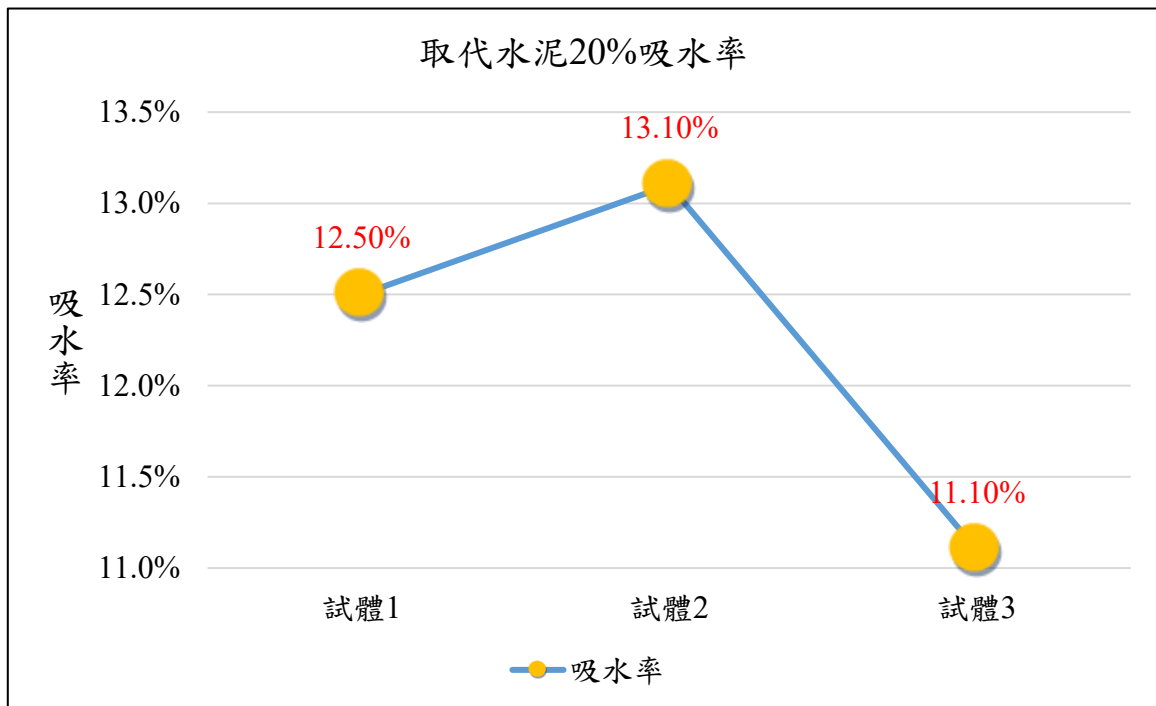


圖 4.3 取代水泥 20%吸水率折線圖

表 4.7 取代水泥 30%之吸水率數據表

水灰比	數據 1	試體	吸水前 W1 (g)	吸水後 W2 (g)	吸水率 (%)
0.485	30%	試體 1	206	238	15.5
		試體 2	206	239	16.0
		試體 3	207	241	16.4

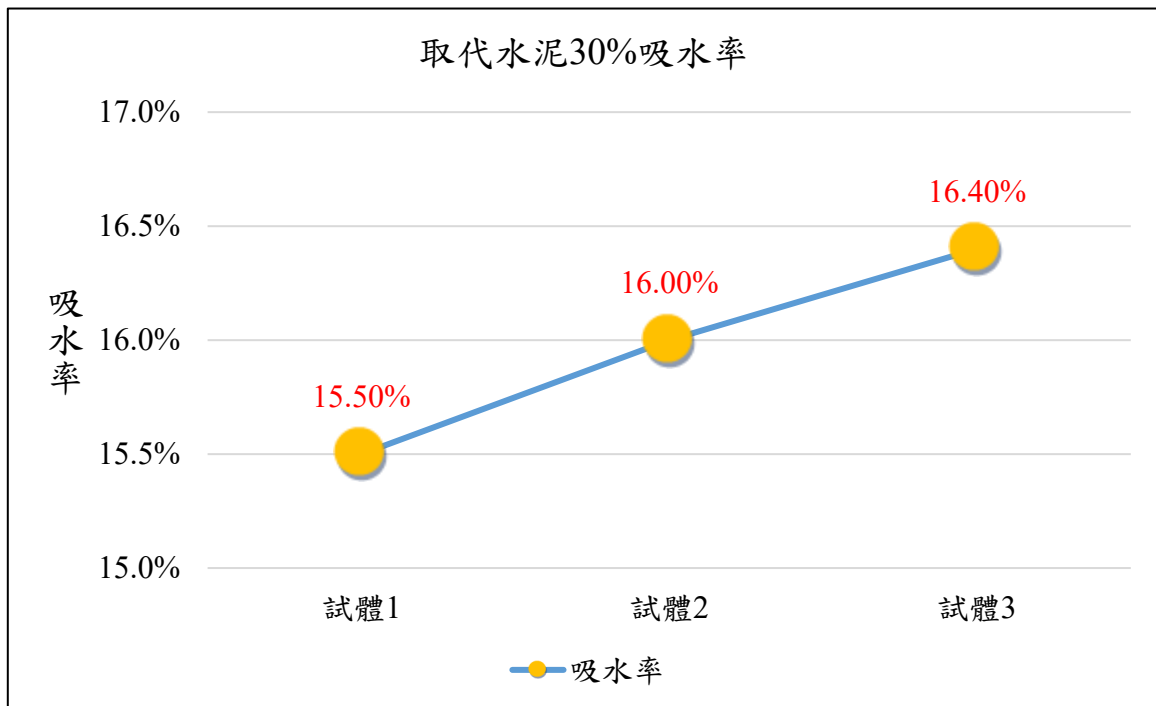


圖 4.4 取代水泥 30%吸水率折線圖

表 4.8 取代水泥 40%之吸水率數據表

水灰比	數據 1	試體	吸水前 W1 (g)	吸水後 W2 (g)	吸水率 (%)
0.485	40%	試體 1	194	228	17.5
		試體 2	202	237	17.3
		試體 3	203	236	16.3

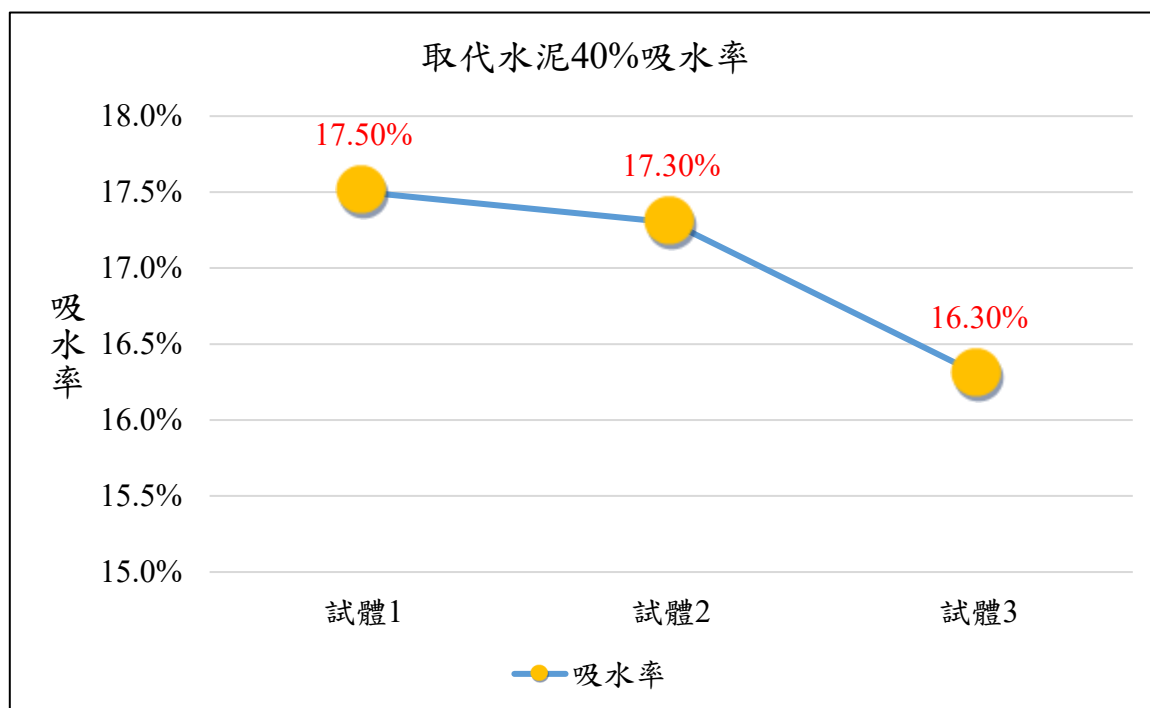


圖 4.5 取代水泥 40%吸水率折線圖

將取代水泥 10%、20%、30%、40%的吸水率試驗結果取各取平均值進行迴歸分析試驗，並且求得 $y = 0.2099x + 0.0889$ ， $R^2 = 0.9355$ 呈高度相關，如下圖 4.6 所示。

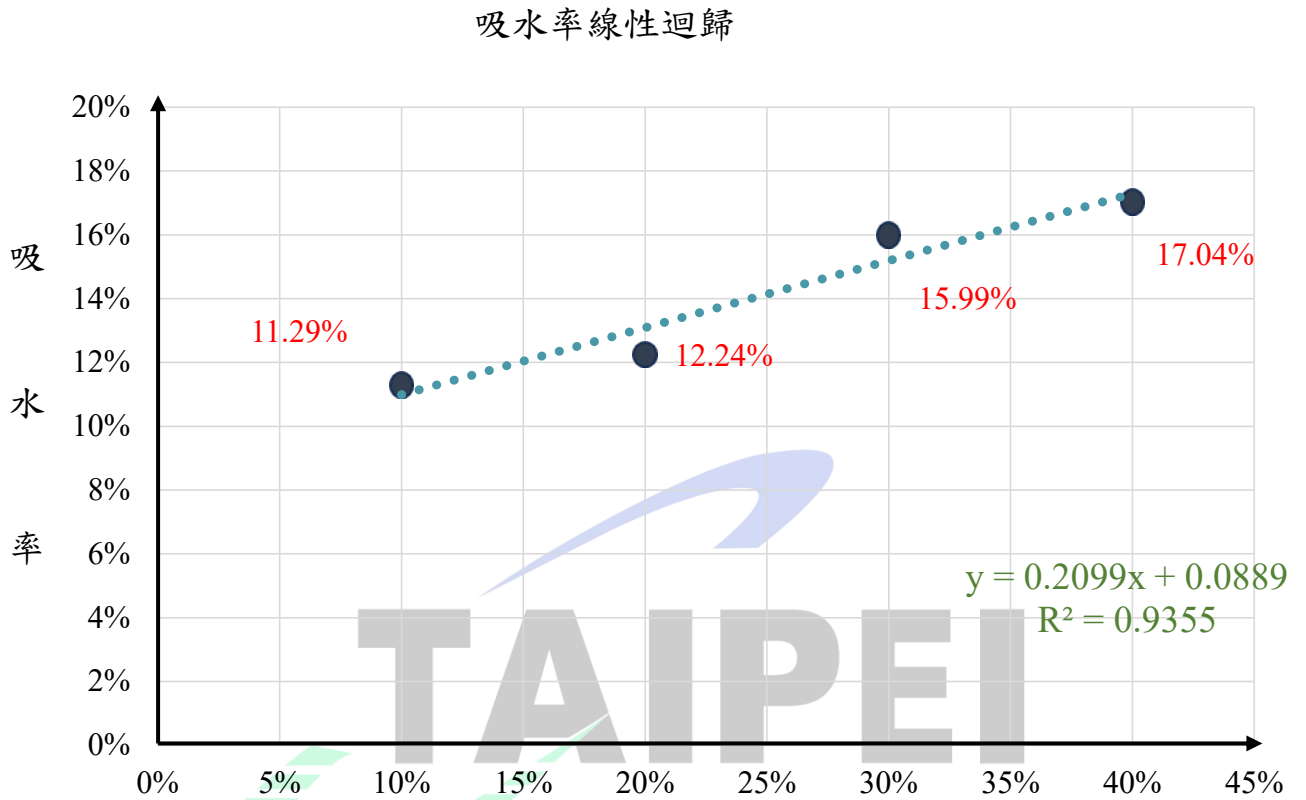


圖 4.6 吸水率之線性迴歸分析圖

4.4 抗壓強度試驗

本試驗主要是以 0.485 的水灰比，以稠狀 EPS 取代水泥 10%、20%、30%、40%，製作 5 cm * 5 cm * 5 cm 的正方形試體，分別以 7 天、14 天及 28 天的齡期，進行抗壓強度試驗，如下表 4.9 ~ 表 4.11，圖 4.7 ~ 圖 4.9 所示。

表 4.9 抗壓強度試驗 7 天數據表

抗壓強度試驗 7 天				
水灰比	EPS 取代水泥比率	測量值	試驗值	平均值
0.485	0%	9356.7	374.268	374.2152
		9348.9	373.956	
		9359.5	374.38	
		9357.3	374.292	
		9354.5	374.18	
	10%	6715.9	268.636	269.3928
		6598.6	263.944	
		6773.3	270.932	
		6783.1	271.324	
		6803.2	272.128	
	20%	5039.2	201.568	215.0336
		5489.3	219.572	
		5477.2	219.088	
		5428.5	217.14	
		5445	217.8	
	30%	2096.6	83.864	82.1752
		2050.7	82.028	
		2004.8	80.192	
		2061.1	82.444	
		2058.7	82.348	
	40%	1236.8	49.472	38.7264
		1004.4	40.176	
		869	34.76	
		833.5	33.34	
		897.1	35.884	

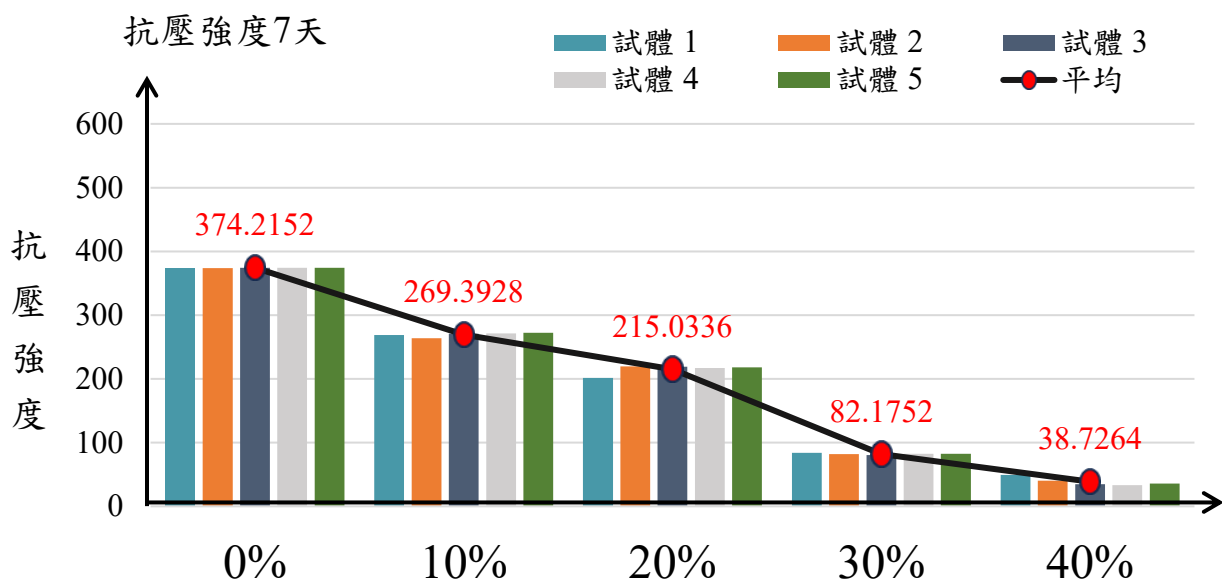


圖 4.7 抗壓強度 7 天折線圖

表 4.10 抗壓強度試驗 14 天數據表

抗壓強度試驗 14 天				
水灰比	EPS 取代水泥比率	測量值	試驗值	平均值
0.485	0%	12501.5	500.1	503.976
		12492.2	499.7	
		12445.8	497.8	
		12864.2	514.6	
		12693.3	507.7	
	10%	7797.4	311.9	310.368
		7903.1	316.1	
		7197.4	287.9	
		7946.8	317.9	
		7951.3	318.1	
	20%	5489.2	219.6	220.5752
		5497.5	219.9	
		5601.7	224.1	
		5480	219.2	
		5503.5	220.1	

(續下頁)

續表 4.10 抗壓強度試驗 14 天數據表

	30%	2605	104.2	100.612
		2514.6	100.6	
		2511.4	100.5	
		2438.4	97.5	
		2507.1	100.3	
	40%	1289.2	51.6	43.7688
		1050.9	42.0	
		1085.4	43.4	
		939.7	37.6	
		1105.9	44.2	

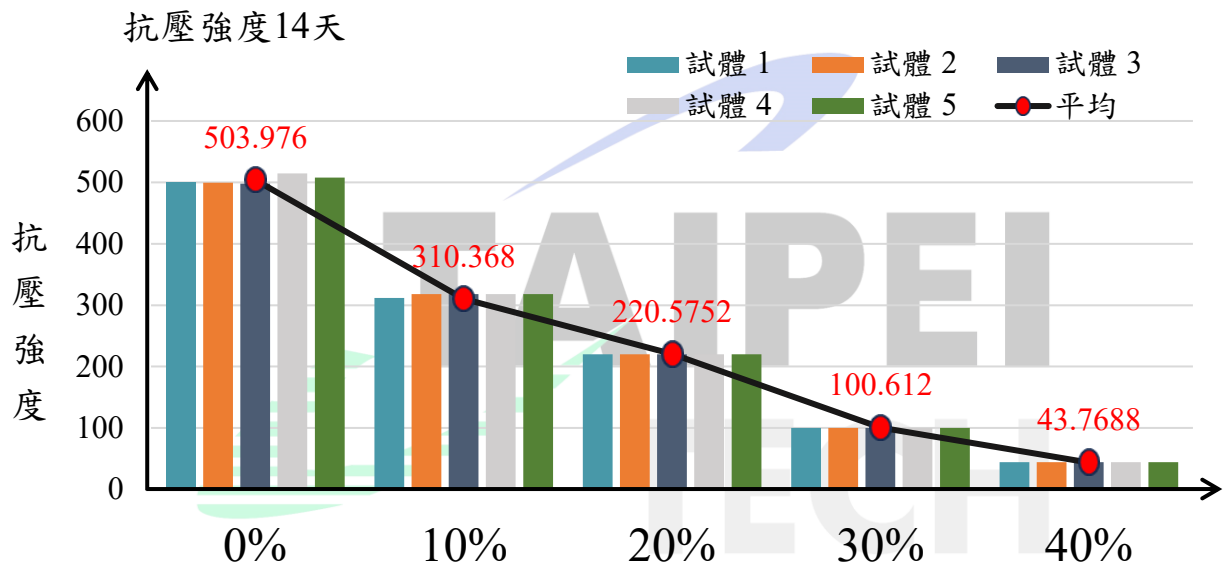


圖 4.8 抗壓強度 14 天折線圖

表 4.11 抗壓強度試驗 28 天數據表

抗壓強度試驗 28 天				
水灰比	EPS 取代水泥比率	測量值	試驗值	平均值
0.485	0%	14035.5	561.4	568.46
		14187	567.5	
		14095.7	563.8	
		14331.2	573.2	
		14408.1	576.3	

(續下頁)

續表 4.11 抗壓強度試驗 28 天數據表

	10%	7577.8	303.1	311.89
		7887.8	315.5	
		7512.8	300.5	
		7994.2	319.8	
		8013.6	320.5	
	20%	5379.7	215.2	225.674
		5563.7	222.5	
		6140.1	245.6	
		5571.9	222.9	
		5553.9	222.2	
	30%	2492.1	99.7	114.797
		2842.1	113.7	
		2993.9	119.8	
		3172.8	126.9	
		2848.7	113.9	
	40%	1513.2	60.5	63.8168
		1697.9	67.9	
		1552.1	62.1	
		1583.9	63.4	
		1630	65.2	

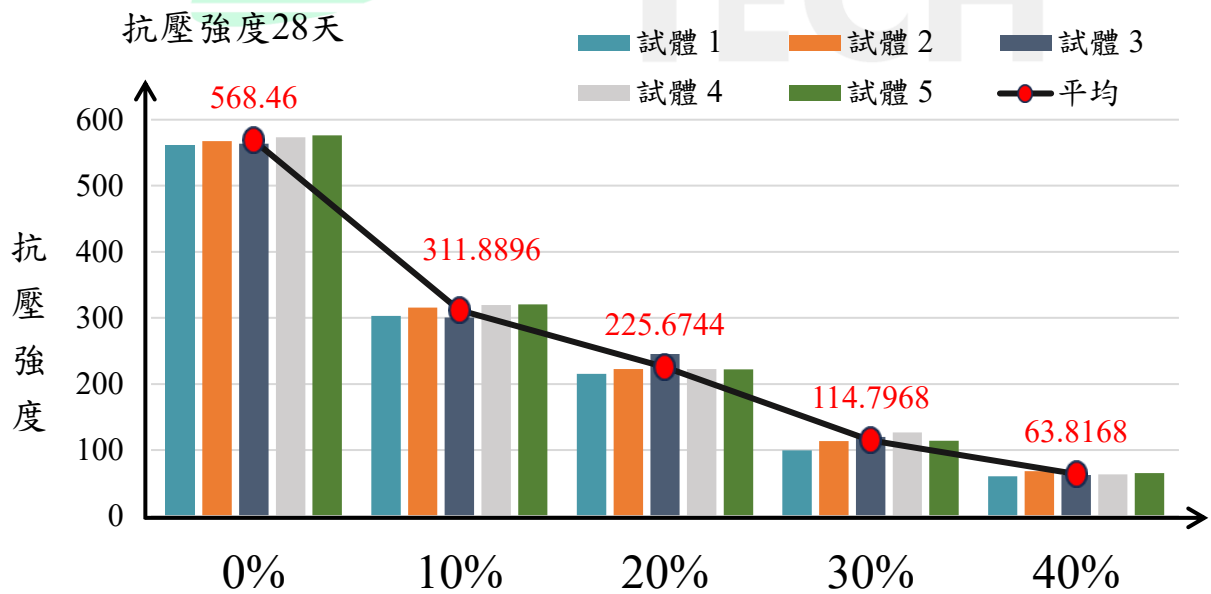


圖 4.9 抗壓強度 28 天折線圖

4.5 抗彎強度試驗

本試驗主要是以 0.485 的水灰比，以稠狀 EPS 取代水泥 10%、20%、30%、40%，製作 4 cm * 4 cm * 16 cm 的長方形試體，分別以 7 天、14 天及 28 天的齡期，進行抗彎強度試驗，如下表 4.12 ~ 表 4.14，圖 4.10 ~ 圖 4.12 所示。

表 4.12 抗彎強度試驗 7 天數據表

抗彎強度試驗 7 天				
水灰比	EPS 取代水泥比率	測量值	試驗值	平均值
0.485	0%	370.5	86.8	88.45
		378.2	88.6	
		383.4	89.9	
	10%	323.4	75.8	82.19
		398.7	93.5	
		329.9	77.3	
	20%	275.5	64.6	65.34
		281.6	66.0	
		279.3	65.5	
	30%	174.3	40.9	42.34
		188.8	44.3	
		178.9	41.9	
	40%	97.4	22.8	22.41
		93.9	22.0	
		95.6	22.4	

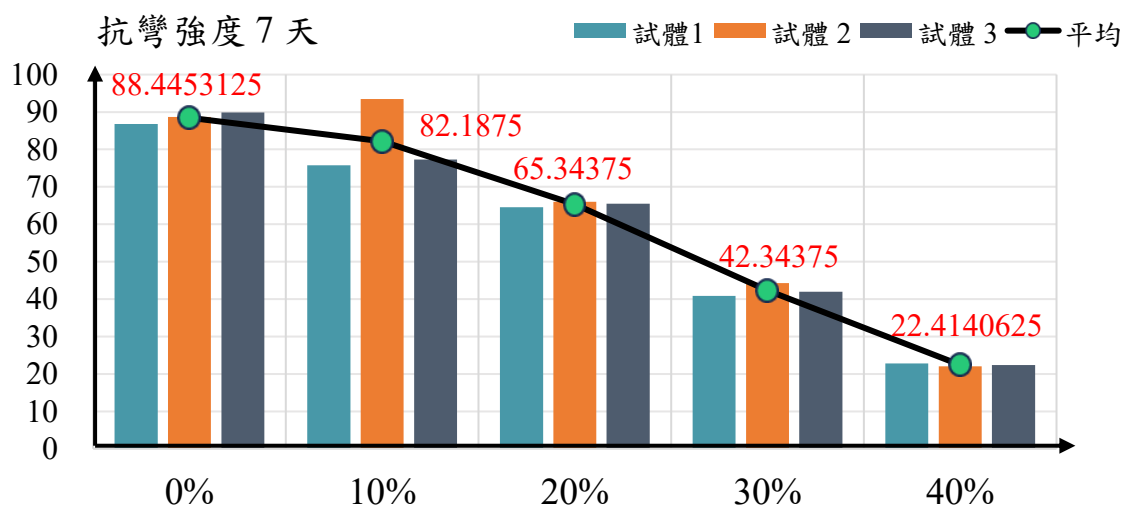


圖 4.10 抗彎強度 7 天折線圖

表 4.13 抗彎強度試驗 14 天數據表

抗彎強度試驗 14 天				
水灰比	EPS 取代水泥比率	測量值	試驗值	平均值
0.485	0%	385.2	90.3	91.38
		391.1	91.7	
		393.3	92.2	
	10%	407.6	95.5	92.16
		383.2	89.8	
		388.9	91.2	
	20%	301.1	70.6	70.00
		295.5	69.3	
		299.4	70.2	
	30%	236.6	55.5	57.80
		266.9	62.6	
		236.3	55.4	
	40%	118.2	27.7	26.50
		109.3	25.6	
		111.7	26.2	

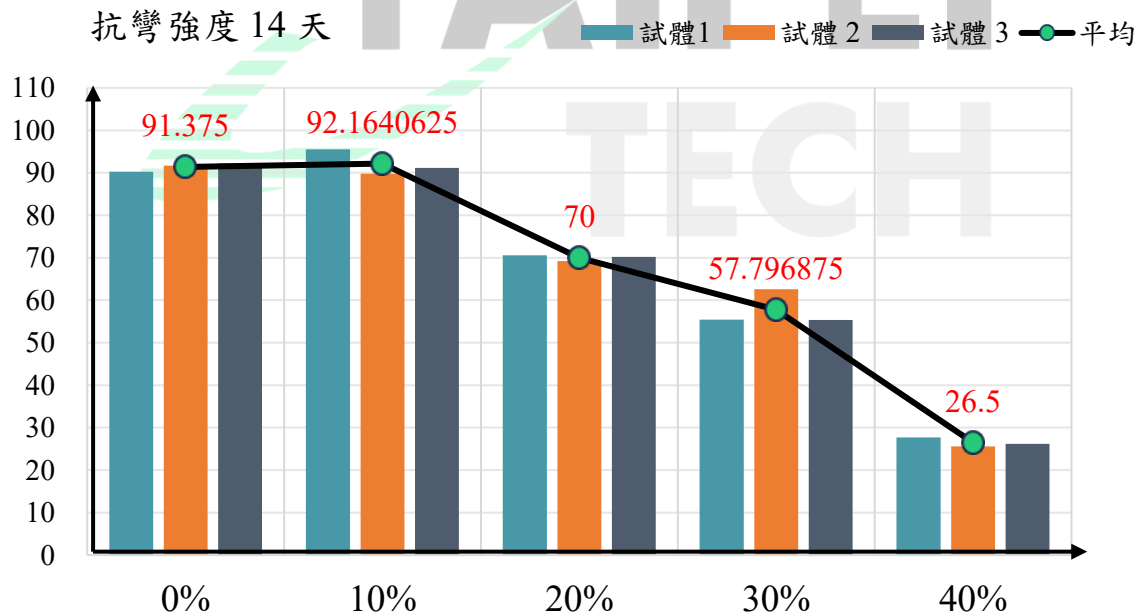


圖 4.11 抗彎強度 14 天折線圖

表 4.14 抗彎強度試驗 28 天數據表

抗彎強度試驗 28 天				
水灰比	EPS 取代水泥比率	測量值	試驗值	平均值
0.485	0%	471.2	110.4	112.49
		477.6	111.9	
		491.1	115.1	
	10%	481.9	113.0	115.88
		507.3	118.9	
		494.1	115.8	
	20%	325.6	76.3	77.09
		337.2	79.0	
		323.9	75.9	
	30%	273.7	64.2	64.42
		285.7	67.0	
		265.2	62.2	
	40%	124.6	29.2	30.87
		129.2	30.3	
		141.3	33.1	

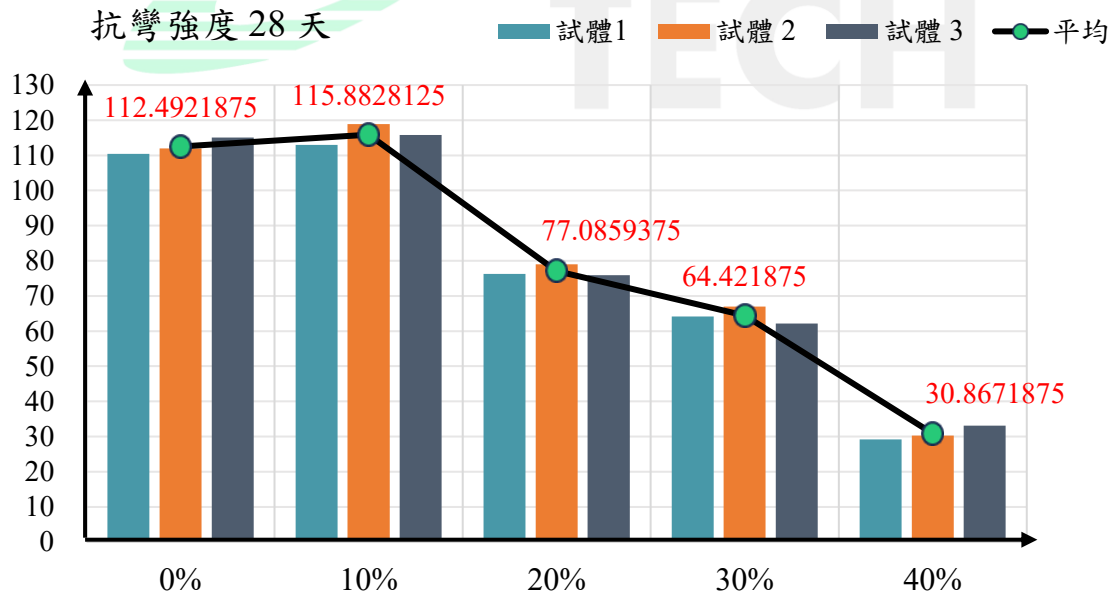


圖 4.12 抗彎強度 28 天折線圖

4.6 耐磨性試驗

本試驗主要是以 0.485 的水灰比，以稠狀 EPS 取代水泥 10%、20%、30%、40%，製作 5 cm * 5 cm * 5 cm 的正方形試體，使用噴砂磨耗試驗儀針對 7 天、14 天、28 天養護的方塊試體進行磨耗試驗，試驗後以超音波振盪儀將雜質消除，最後測量試體減少之厚度，其厚度平均不得超過 3 mm，如下表 4.15～表 4.18。

表 4.15 取代 10%水泥之耐磨試驗數據表

水灰比	取代水泥%	齡期	試體	磨耗厚度	平均
0.485	10%	7 天	試體 1	1.61	1.555
			試體 2	1.5	
		14 天	試體 1	1.5	1.515
			試體 2	1.53	
		28 天	試體 1	1.54	1.535
			試體 2	1.53	

表 4.16 取代 20%水泥之耐磨試驗數據表

水灰比	取代水泥%	齡期	試體	磨耗厚度	平均
0.485	20%	7 天	試體 1	1.91	1.915
			試體 2	1.92	
		14 天	試體 1	1.89	1.9
			試體 2	1.91	
		28 天	試體 1	1.87	1.88
			試體 2	1.89	

表 4.17 取代 30%水泥之耐磨試驗數據表

水灰比	取代水泥%	齡期	試體	磨耗厚度	平均
0.485	30%	7 天	試體 1	2.8	2.725
			試體 2	2.65	
		14 天	試體 1	2.81	2.725
			試體 2	2.64	
		28 天	試體 1	2.71	2.68
			試體 2	2.65	

表 4.18 取代 40%水泥之耐磨試驗數據表

水灰比	取代水泥%	齡期	試體	磨耗厚度	平均
0.485	40%	7 天	試體 1	2.73	2.765
			試體 2	2.8	
		14 天	試體 1	2.71	2.73
			試體 2	2.75	
		28 天	試體 1	2.56	2.63
			試體 2	2.7	

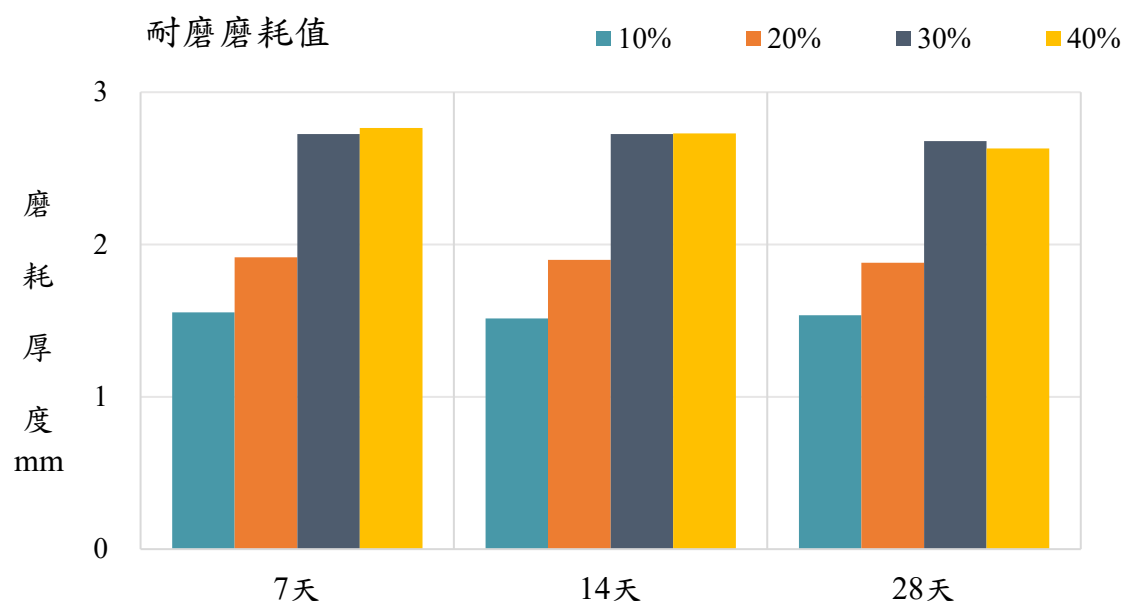


圖 4.13 耐磨磨耗值折線圖

4.7 碳排量

本試驗根據每公斤之水泥及每公斤 EPS 所需耗費之二氧化碳排放量，計算以稠狀 EPS 10%、20%、30%、40%取代水泥後，所耗費之總碳排放量以及減少的碳排放量，再根據水泥工業所統計出全臺灣每年會使用多少水泥，進行計算每年能減少多少碳排放量，如下表 4.19、表 4.20 所示。依據統計，每 kg 水泥產生 0.85 kg 二氧化碳；每 kg EPS 產生 0.064674 kg 二氧化碳。

表 4.19 每公斤水泥及 EPS 取代後之碳排放量計算

EPS 取代率	水泥	EPS	總碳排放量 (kg)	減少碳排放量 (kg)
	質 量(kg)			
0%	2.675	0	2.2738	0
10%	2.407	0.268	2.0633	0.2105
20%	2.140	0.535	1.8536	0.4202
30%	1.873	0.802	1.6439	0.6299
40%	1.605	0.1070	1.4334	0.8404

根據文獻統計，全臺高壓混凝土磚每年產生 756 萬公噸之水泥，以此作為基準，計算 EPS 取代水泥後全台灣每年高壓混凝土磚能減少碳排放量。

表 4.20 每年水泥及 EPS 取代後之碳排放量計算

EPS 取代率	水泥	EPS	減少碳排放量 (T)
	質量(T)		
0%	7.56*10 ⁶	0	0
10%	6.804*10 ⁶	7.56*10 ⁵	5.93*10 ⁵
20%	6.048*10 ⁶	1.512*10 ⁶	1.187*10 ⁶
30%	5.292*10 ⁶	2.268*10 ⁶	1.781*10 ⁶
40%	4.536*10 ⁶	3.024*10 ⁶	2.375*10 ⁶

4.8 成本比較

本研究主要針對 EPS、天然粒料進行成本比較分析。其 EPS 為臺達化學工業股份有限公司所提供之物料及價格，丙酮則為瑞龍化工原料行提供之價格；骨材則為 113 年中華民國經濟部礦物局於各縣市統計之砂石產量及價格；水泥則為晉瑜卜特蘭水泥第 I 型，其生產成本亦由晉瑜企業股份有限公司所提供。而其相關成本價格如下表 4.21 所示。

表 4.21 成本價目表

種類	價格
發泡聚苯乙烯	43,708 元/噸
水泥	4,400 元/噸
石	344 元/噸 ~ 429 元/噸
砂	285 元/噸 ~ 404 元/噸
丙酮	36,036 元/噸

4.9 經濟效益

水泥：4,400 元 / 噸

發泡聚苯乙烯：43,708 元 / 噸

根據文獻指出全台高壓混凝土磚年產量約 756 萬噸水泥

若以 EPS10%取代水泥

水泥 90%、EPS10%：756 萬噸 x 4400 x 0.9 + 756 萬噸 x 43,708 元 x 0.1 x $\frac{10}{21}$ + 756

萬噸 x 36,036 元 x 0.1 x $\frac{11}{21}$ = 59,942,736,000 元

費用：59,942,736,000 元 - 33,264,000,000 元 = 26,678,736,000 元

碳費費用=排放量(噸) x 收費費率，目前國內之主管機關並未訂定碳費之收費費率，但依先前環境部公開談及起徵可能 1 噸 300 元來計算可求得：

$(6.804 \times 10^6 \times 0.85) + (7.56 \times 10^5 \times 0.064674) = 5.83 \times 10^6$

5.83×10^6 噸 x 300 元 = 1,749,688,063 元

26,678,736,000 元 - 1,749,688,063 元 = 24,929,047,937 元

若以 10%稠狀 EPS 取代水泥，年成本雖會增加 24,929,047,937 元，但其年碳排放量則會減少約 593,000 公噸。

第五章 結論與建議

本研究主要透過實驗將丙酮溶解 EPS 後進行測試稠狀 EPS 密度比重試驗，再分別以 0%、10%、20%、30%、40% 取代水泥於高壓混凝土磚之應用性，並針對試體進行流度、抗壓強度、抗彎強度、吸水率、耐磨性試驗，並探討與其他材料之成本與碳排放效益比較分析，自研究結果得出以下結論。

5.1 結論

- 一、EPS 以 10%、20%、30%、40% 取代水泥皆未達到高壓混凝土磚規範之抗壓強度標準 C 級 $450 \text{ kgf} / \text{cm}^2$ ；而抗彎強度僅以 EPS 10% 取代水泥在 14 天及 28 天有達到高壓混凝土磚規範 $85 \text{ kgf} / \text{cm}^2$ 。
- 二、隨著添加比率的增加，流度會相對降低，亦可得出迴歸分析方程式： $y = -1.365x + 0.5415$ ， $R^2 = 0.9166$ ，呈高度相關。在吸水率試驗中，取代量越高，試體吸水率也會提高，並可得出迴歸分析方程式 $y = 0.2099x + 0.0889$ ， $R^2 = 0.9355$ ，呈高度相關。
- 三、耐磨性試驗中得出，EPS 取代 10%、20%、30%、40% 水泥之耐磨性值皆達到規定範圍 3mm 內。
- 四、材料成本與經濟效益比較中可以發現，稠狀 EPS 取代水泥雖會增加成本費用，但同時在碳排放量上能明顯的減少；以稠狀 EPS 取代水泥 10% 來說，年成本會增加 24,929,047,937 元，但同時年碳排放亦減少約 593,000 公噸。

5.2 建議

- 一、本研究以高壓混凝土之規範，將稠狀 EPS 取代水泥 10%、20%、30%、40% 進行研究，但成效未達理想狀態，後續研究可以嘗試往 CLSM 或低壓混凝土進行探討分析。
- 二、本研究採用之試體水灰比為 0.485，稠狀 EPS 取代量以 10%、20%、30%、40% 進行試驗，導致其吸水率增加及流度降低，後續研究可以針對水灰比與取代量進行調整，以不同配比計算後再分析研究，目標以提升強度及縮小孔隙降低吸水率及增加流度為實驗方向。
- 三、本研究僅以丙酮溶解 EPS 後進行試驗，後續研究可以以不同的有機溶劑材料針對 EPS 進行溶解測試。
- 四、本研究經計算後發現其 EPS 成本費用昂貴，後續研究可以針對廢棄回收之 EPS 作為實驗之材料，進而降低其成本且達到循環經濟之效益。



參考文獻

1. CNS13295 高壓混凝土磚。
2. CNS6919 銲接鋼線網。
3. CNS1240 混凝土粒料。
4. 洪儷容 (2014)，紅磚歲月~臺南地區紅磚產業變遷之研究，國立台南大學台灣文化研究所碩士論文。
5. 葉育儒 (2023)，香灰應用於高壓混凝土磚之可行性研究，國立台北科技大學土木工程系土木與防災研究所碩士論文。
6. 李堅明、周宜雄、周麗芳 (2021)，水泥業邁向淨零排放技術研析-以碳捕獲與利用技術為例，臺灣能源期刊第八卷第四期，第 391 - 410 頁。
7. 黃柏維 (2004)，EPS 之防災應用性探討，國立台北科技大學土木工程系土木與防災研究所碩士論文。
8. 何泰源 (2006)，EPS 輕質填土工法之特性及應用案例，中華技術季刊第三十二卷第十一期，第 22 - 42 頁。
9. 林利國、李文勳 (2000)，EPS 輕質填土工法之研究，中華顧問工程司研究報告。
10. 鄭卓仁 (2010)，地工泡棉運用於落石防護之模擬測試研究，國立台北科技大學土木工程系土木與防災研究所碩士論文。
11. 台達化學工業股份有限公司 (2000)，台達發泡性聚苯乙烯之特性與應用。
12. 林利國、鄭永欽 (1998)，道路工程的創新技術-地工泡綿 GEOFOAM 回填，臺灣省住都雙月刊第一百三十六期，第 34 - 41 頁。
13. 鄭永欽 (2000)，美國猶他州 I-15 州際公路重建工程概述及 EPS 之應用，輕質填土工法技術研討會論文集。
14. 積水化成品工業株式會社 (2010)，EPS 土木施工法。
15. 黃景川 (1999)，台灣第一座超輕質(EPS)公路試驗路堤之設計施工與長期觀測，地工新工法、新技術研討會。

16. 新北市政府養護工程處 (2022), 三峽區北 113 縣 (0K+650) 災害復建工程。
17. 台中市養護工程處 (2023), 石岡區中 91 線道路復建工程, 第二屆台中市政府公共工程獎。
18. 黃兆龍 (2001), 混凝土性質與行為, 詹氏書局。
19. 蔡宗鑫 (2011), 透水樹脂混凝土之工程特性, 國立屏東科技大學土木工程研究所碩士論文。
20. 余颯如 (2009), 磚製品中摻配鈦砂之較佳配比研究, 國立中央大學土木工程研究所碩士論文。
21. 林如章、楊秀霞 (2000), 環保小尖兵-保麗龍的回收再利用, 科學教育月刊第二百二十六期, 第 30 - 33 頁。
22. 林冠宏 (2024), 提高高爐水泥早期抗壓強度方法及節能減碳效益分析, 國立臺灣海洋工程學系研究所博士論文。
23. Geofoam Research Center (2000), Route 23A, Jewett County, New York.
24. ACH Foam Technologies (2008), Snohomish Culvert.
25. ACH Foam Technologies (2017), Geofoam Projects & Case Studies.
26. Horvath, J.S. (1995), EPS Geofoam : New Products and Marketing Trends, GFR, Vol. 13, No.6, IFIA, St. Paul, MN, pp.22-26.
27. Aaboe, R. (2000), Evidence of EPS long term performance and durability as a light weight fill. Vegteknisk avdeling.
28. National Road Research Laboratory (NRRL) (1992), Expanded Polystyrene Used in Road Embankments ; Design, Construction and Quality Assurance. Form 582E, Oslo, Norway, pp.40.
29. P.P.Rahardjo and M.Wijaya. (2023), EPS-Geofoam as Lightweight material for Replacement of Embankment Fill to Overcome Landslide Problems at STA40+200 of Cisumdawu Toll Road, West Java, IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science.

GEOCASE-2023,.

30. Oak Ridge National Laboratory (ORNL) (2014) , The Risk Assessment Information System (RAIS). Toxicity Profiles for Acetone.
31. M. Schneider, M. Romer, M. Tschudin, and H. Bolio. (2011) , Sustainable cement production present and future” Cement and Concrete Research 41(7), pp.642–650.
32. Amrita Milling, Abrahams Mwasha, Hector Martin. (2020) , Exploring the full replacement of cement with expanded polystyrene (EPS) waste in mortars used for masonry construction
33. International Energy Agency. (2020) , Cement roadmap targets.
34. Australia. (2010) , Global Greenhouse Warming .
35. Environmental Protection Agency (1995) , Compilation of air pollutant emissions factors, volume 1: stationary point and area sources AP-42 section 11.6 Portland cement manufacturing, USA.
36. IPCC (2013) , Climate change 2013: the physical science basis” Intergovernmental panel on climate change, Cambridge University Press, Cambridge, UK.



