



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

泡棉顆粒應用於 CLSM 粒料之可行性研究

Feasibility study on the application of EPS

Beads to CLSM



研 究 生：劉宇傑

指導教授：林利國 博士

中華民國一百一十一年七月

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研究所碩士班 研究所 劉宇傑 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

張 寬 勇

扨 利 剛

指導教授：

扨 利 剛

所

長：

廖 文 義

中 華 民 國 一 百 一 十 一 年 七 月 二 十 一 日

摘要

論文名稱：泡棉顆粒應用於 CLSM 粒料之可行性研究

頁數：60 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：一百一十學年度第二學期

學位：碩士

研究生：劉宇傑

指導教授：林利國 博士

關鍵詞：泡棉顆粒、控制性低強度回填材料、成本比較

台灣近年來日益重視道路之平整度，有關於道路不平整、下陷或是龜裂等問題更是層出不窮，本研究透過物理性實驗將控制性低強度材料 (Controlled-Low-Strength-Materials; 簡稱為 CLSM) 分別拌入三種不同粒徑之發泡聚苯乙烯 (Expanded Poly Styrene; 簡稱為 EPS) 顆粒探討其工程性質，並與其他再生粒料之成本進行比較。

研究結果顯示，拌入三種不同粒徑 1.5mm、2.5mm 及 3mm 泡棉顆粒之方塊試體，綜合比較後得出拌合 1.5mm 及 3mm 泡棉顆粒之方塊試體於 28 天之抗壓強度皆符合規範；拌合 2.5mm 泡棉顆粒之試體於 28 天之抗壓強度則未符合規範值。針對三種不同粒徑大小泡棉顆粒之單位重及拌入後之方塊試體吸水率進行迴歸分析皆呈現呈高度相關性。將三種不同粒徑大小之泡棉顆粒、天然粒料及再生粒料以每立方公尺進行成本比較，其成本由低至高依序為，天然粒料、泡棉顆粒、焚化底渣再生粒料及咖啡渣；依據本論文之研究成果，可提供泡棉顆粒及 CLSM 粒料等工程應用之參考。

ABSTRACT

Title: Feasibility study on the application of EPS foam to CLSM

Pages: 60 Page

School: National Taipei University of Technology

Department: Graduate Institute of Civil and Disaster Prevention Engineering

Time: Jan, 2022

Degree: Master

Researcher: Yu-Chieh, Liu

Advisor: Lee-Kuo, Lin Ph.D.

Keywords: EPS beads, CLSM, Cost Comparison

Taiwan has paid increasing attention to road flatness in recent years. There are problems with uneven, sagging or cracked roads. This study investigates the engineering properties of CLSM by mixing it with EPS beads of three different particle sizes. Finally, the cost was compared with that of other recycled pellets.

In this study, CLSM was mixed into three kinds of EPS beads with different sizes of 1.5mm, 2.5mm and 3mm in cube. Based on the comparison of experimental data, it was found that cube strength which mixed with 1.5mm and 3mm EPS beads was in accordance with the standard at 28 days. Cube strength which mixed with 2.5mm EPS beads didn't meet the standard value at 28 days. The regression analysis for the unit weight of the three kinds of EPS beads and the water absorption of the mixed cube showed a high correlation. Comparing the cost per cubic meter of three different sizes of EPS beads, aggregate and recycled pellets. The cost sequence from low to high is aggregate, EPS beads, Incineration Bottom Ash and coffee grounds. According to the results of this thesis, reference can be provided for the engineering application of EPS beads and CLSM beads.

誌謝

時光冉冉，一轉眼兩年就過去了。當初對未來依舊感到徬徨的我，在大學畢業後選擇繼續進修，就讀研究所的日子裡雖然忙碌，但每天過得充實且令我成長許多，一路上遇到許多困難，幸虧有大家的幫助，才能使我順利完成學業。

在全力衝刺論文的這年間發生了許多事，有喜有悲，期間新冠確診隔離使實驗被迫停擺，家人身體欠恙開刀更使我灰心了一陣子，亦不確定自己是否能順利畢業，首先，感謝恩師 林利國老師不懈的關心及指導使我最終選擇咬牙撐過去；其次感謝研究室的大家協助我完成學業，感謝傑鯉學長、竹鈞學長、蕭湘學姊及宏博學長提供我許多論文上的建議及實驗操作上的要點，使我規避許多錯誤；謝謝同期的冠辰，因為他的幫助及相互勉勵，使我在論文遇到挫折時能再接再厲；謝謝峙叡、育儒、婕霖及承諭在我實驗時從旁協助，因為學弟妹們的幫助使實驗得以順利進行；當然也不能忘記品管班的承辦人晏婷，因為她的協助使我這個兼任助理能專心致志的投入論文。再則感謝 黃兆龍博士與 張寬勇博士於百忙之中撥冗參與論文口試，並給予我的論文研究許多寶貴的提點及意見，使本篇論文更加充實。

最後再次感謝 212 研究室全體、我的家人及所有給予幫助的貴人，因為有這堅強溫暖的後盾，讓我於求學階段無後顧之憂且找到未來目標。祝大家接下來也能如自己所規劃般平安順遂。

劉宇傑 謹誌

民國 111 年 07 月

目錄

摘要.....	i
ABSTRACT.....	ii
目錄.....	iv
表目錄.....	vi
圖目錄.....	viii
第一章 緒論.....	1
1.1 研究背景與動機.....	1
1.2 研究目的.....	1
1.3 研究範圍.....	2
1.4 研究限制.....	2
1.5 研究方法與流程.....	2
第二章 文獻回顧.....	4
2.1 CLSM 之定義.....	4
2.2 CLSM 之國內應用.....	5
2.3 EPS 之成分.....	6
2.4 EPS 製程.....	8
2.4.1 EPS 樹脂.....	8
2.4.2 EPS 發泡與圓熟.....	11
2.4.3 EPS 灌模與脫模.....	13
2.4.4 EPS 成型品.....	13
2.5 EPS 國內外之應用狀況.....	14
2.5.1 EPS 於臺灣之工程應用.....	14
2.5.2 EPS 於美國之工程應用.....	19
2.5.3 EPS 於日本之工程應用.....	22

2.5.4 EPS 於挪威之工程應用	23
2.6 EPS 性質及試驗	24
2.6.1 耐熱及耐燃性	25
2.6.2 隔熱性質	25
2.6.3 耐久性	26
2.6.4 吸水性	27
2.7 CLSM 之相關規範	28
2.7.1 公共工程施工綱要規範	28
2.7.2 中華民國國家標準之相關規定	29
第三章 研究方法	31
3.1 實驗計畫	31
3.2 EPS 顆粒材料	33
3.3 實驗設備	35
第四章 研究成果	42
4.1 單位重試驗	42
4.2 坍流度試驗	44
4.3 吸水率試驗	44
4.4 抗壓強度試驗	47
4.5 成本比較	54
第五章 結論與建議	56
5.1 結論	56
5.2 建議	57
第六章 參考文獻	58

表目錄

表 2.1 CLSM 與一般混凝土之比較(李昌憲，2010)	4
表 2.2 CLSM 之抗壓強度試驗結果（任怡賓，2014）	5
表 2.3 不同材料管溝回填工法之優劣比較（廖洪鈞、蔡宜穎、吳思宜，2020）	6
表 2.4 發泡聚苯乙烯粒徑規格分類表	10
表 2.5 本研究整理發泡聚苯乙烯品級分類表	11
表 2.6 臺灣 EPS 應用於工程上之實例	17
表 2.7 試驗項目及試驗方法（蔡曜謙，2017）	24
表 2.8 各密度 EPS 於常溫下之熱傳導係數	26
表 2.9 EPS 之耐化學性	27
表 2.10 CLSM 之性質要求	28
表 2.11 控制性低強度回填材料國家標準	29
表 2.12 控制性低強度回填材料試驗方法	30
表 3.1 實驗變數分類表	31
表 3.2 EPS 顆粒試體尺寸	34
表 4.1 泡棉顆粒數量表	42
表 4.2 泡棉顆粒單位重計算表	43
表 4.3 坍流度試驗表	44
表 4.4 吸水量計算表	45
表 4.5 吸水率計算表	46
表 4.6 水灰比 0.8 之 7 天抗壓強度試驗數據表	48
表 4.7 水灰比 0.9 之 7 天抗壓強度試驗數據表	49
表 4.8 水灰比 0.8 之 14 天抗壓強度試驗數據表	50
表 4.9 水灰比 0.9 之 14 天抗壓強度試驗數據表	51

表 4.10 水灰比 0.8 之 28 天抗壓強度試驗數據表	52
表 4.11 水灰比 0.9 之 28 天抗壓強度試驗數據表	53
表 4.12 再生粒料成本價目表	55



圖目錄

圖 1.1 研究流程圖	3
圖 2.1 苯乙烯經聚合反應為聚苯乙烯反應圖（鄭卓仁，2010）	7
圖 2.2 EPS 製造流程圖（林利國，2000）	8
圖 2.3 原油煉製過程及產物示意圖（英國塑膠協會，2005）	9
圖 2.4 樹脂塑膠顆粒（茂森商業有限公司，2020）	10
圖 2.5 EPS 預發泡（蘭陽開發工業股份有限公司，2020）	12
圖 2.6 EPS 灌模與脫模作業流程圖（林利國等，2000）	13
圖 2.7 EPS 成型產品作業相關流程圖（黃柏維，2004）	13
圖 2.8 臺北市中山大直橋（莊士賢，2008）	14
圖 2.9 洲美快速道路第二期新建工程示意圖（何泰源，2001）	15
圖 2.10 EPS 及雙層點焊鋼絲網	16
圖 2.11 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	16
圖 2.12 EPS 工法使用區塊示意圖	18
圖 2.13 三峽區北 113 縣(0K+650)災害復建工程	18
圖 2.19 猶他州鹽湖城 I-15 州際公路重建工程	19
圖 2.20 紐約州厄特縣 23A 道路工程	20
圖 2.21 華盛頓州 Renton City Hall 新建工程	21
圖 2.22 馬里斯維爾州斯諾霍涵洞工程	21
圖 2.23 新奧爾良機場東西向跑道整建工程（ACH Foam Technologies，2006）	22
圖 2.24 北海道札幌市橋梁橋台之背填工程	22
圖 2.25 溫度與尺寸收縮率關係圖（BASF，1990）	25
圖 2.26 EPS 密度與熱傳導係數之關係圖	26
圖 2.27 EPS 密度和吸水量之關係圖（JEPSA，2016）	28

圖 3.1 實驗流程圖	32
圖 3.2 塑膠碗	35
圖 3.3 泡棉顆粒	35
圖 3.4 音叉式天平磅秤	36
圖 3.5 坍流度試驗儀器	37
圖 3.6 高爐水泥及檢驗證書	38
圖 3.7 砂	38
圖 3.8 1.2 分宜蘭石	38
圖 3.9 Murenking MK-36 攪拌機	39
圖 3.10 方塊試體模	39
圖 3.11 方塊試體澆置	39
圖 3.12 音叉式天平磅秤	40
圖 3.13 電子游標卡尺	41
圖 3.14 HT-9501 series 萬能試驗儀	41
圖 3.15 抗壓強度試驗作業	41
圖 4.1 單位重之線性迴歸圖	43
圖 4.2 吸水率之線性迴歸圖	47
圖 4.3 水灰比 0.8 之 7 天抗壓強度試驗直方圖	48
圖 4.4 水灰比 0.9 之 7 天抗壓強度試驗直方圖	49
圖 4.5 水灰比 0.8 之 14 天抗壓強度試驗直方圖	50
圖 4.6 水灰比 0.9 之 14 天抗壓強度試驗直方圖	51
圖 4.7 水灰比 0.8 之 28 天抗壓強度試驗直方圖	52
圖 4.8 水灰比 0.9 之 28 天抗壓強度試驗直方圖	53
圖 4.9 28 天抗壓強度成長折線圖	54



第一章 緒論

1.1 研究背景與動機

隨著科技的進步，人類為了追求更高生活品質的理想，地下維生及工業管線也因生活水平的提升而日益增加；台灣近年來日益重視道路之平整度，長期專注於提升道路之品質，惟因都市發展較早之市區下方往往佈滿各式各樣之管線，為了維持管線之服務品質，定期更新或是緊急搶救管線乃屬難以避免之重要工程，然而相關管溝開挖必然多少會影響道路之品質，有關於不平整、下陷或是龜裂等問題更是層出不窮。

控制性低強度回填材料(Controlled-Low-Strength-Materials；簡稱為 CLSM)通常應用於回填、橋樑引道或作為臨時建築材料，使用於管線施工或是道路回填時具有良好的自我流動及填充性能，使需要填滿之空隙可以穩固的進行回填，並具有不須搗實與震動之特性，快速方便及施工性佳，視工程目的之需要，CLSM 已經逐漸有成為除了傳統回填之外之主要回填方式之一。

發泡聚苯乙烯 (Expanded Poly Styrene；簡稱為 EPS)，歐美等國家之土木工程多採用 EPS 做為道路回填工程材料，故又稱為地工泡棉 (Geofoam)。因 EPS 具有質量輕、施工快速、經濟性、隔熱性、緩衝性佳及耐水性優等優點 (何泰源，2006)，且臺灣也於近年應用於在道路邊坡修復、堤防填築材料及明隧道落石防護等工程應用，故本研究將探討將 CLSM 中加入 EPS 顆粒，並加以測試及分析，以探討其物理特性。

1.2 研究目的

常見的 CLSM 混合物多由水泥、細骨材、水和其他化學添加劑組合而成。本研究擬透過物理性實驗，將各種 EPS 顆粒添加進 CLSM 探討其工程性質，並其他再生粒料之成本進行比較。本研究執行之目的如下：

- 一、 探討 EPS 顆粒之物理性質、拌入後試體之工程性質，並探討與其他再生粒料之成本比較。

二、利用 EPS 之材料特性，控制其 28 天之抗壓強度處於適當範圍。

1.3 研究範圍

控制性低強度回填材料 (Controlled-Low-Strength-Materials；簡稱為 CLSM) 多用於管線埋設之回填、擋土牆背側回填等道路工程及輕隔間牆、園藝圍籬等裝潢工程，本研究僅針對道路工程進行分析探討。

1.4 研究限制

本研究僅針對 CLSM 常用之天然粒料及三種不同粒徑大小之泡棉顆粒作探討，並未針對其他再生粒料進行探討。

1.5 研究方法與流程

本研究主要係透過以下二種研究方法進行執行及分析，相關研究流程如圖 1.1 所示：

- 一、文獻回顧法：蒐集國內外 EPS 相關文獻及資料，並了解國內外 EPS 應用於工程之現況。
- 二、模擬試驗法：模擬 EPS 粒料取代天然粒料，並經由測試結果進行分析比較，探討其用於 CLSM 粒料之成本及物理性質。

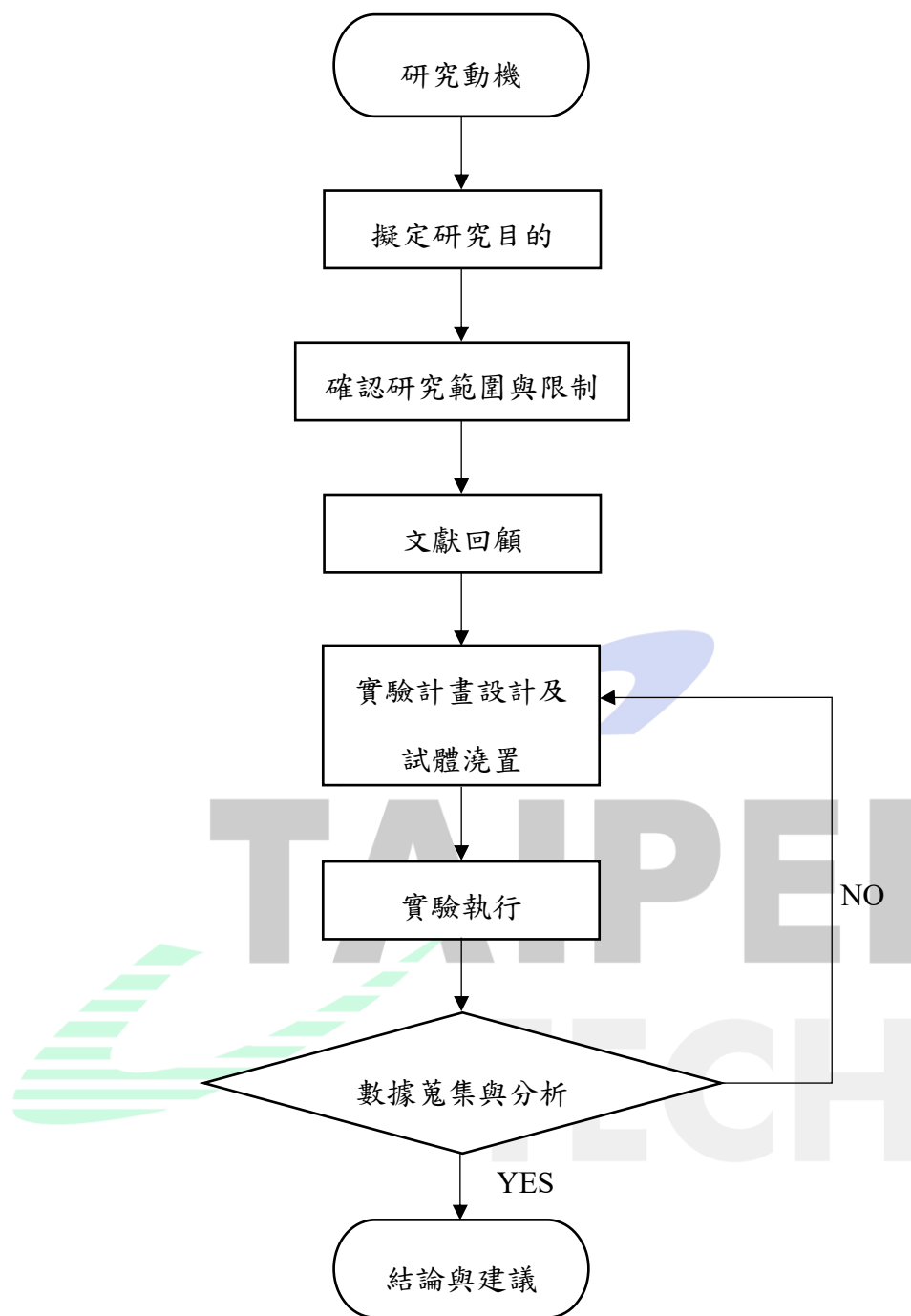


圖 1.1 研究流程圖

第二章 文獻回顧

2.1 CLSM 之定義

據美國混凝土協會(ACI)之定義，CLSM 為一種具自我充填性能之材料，具有高坍度、高流動、自充填性、免夯實、強度可調整及易於再開挖性等多重優點，其組成與混凝土材料類似，以膠結料、水、粒料組成，主要作為傳統回填工法之替代材料。(ACI, 1999, Pierce and Blackwell, 2003; Wu and Tsai, 2009)。爐石、水泥窯灰(Cement Kiln Dust)、玻璃屑、輪胎屑、脫硫淤泥(FGD)、廢鑄件砂料，水庫淤泥、以及剩餘土石等均可作為流填料之替代粒料並具有良好之物理與工程性質(江奇成、黃兆龍，2004；李維峰等人，2002；沈永年、鍾文豪，2007；林義堅，2009；Dingrando, et al., 2004；Lachemi et al., 2007) 控制性低強度材料所使用之配比材料與一般混凝土，除材料組合比例外無明顯不同，如：控制性低強度材料之水灰比較高，介於 1.0~1.25 之間。粗粒料用量僅有 200~400kg/m³，而細粒料則為 1280~1480 kg/m³ (潘昌林、鄭瑞濱，控制性低強度材料 CLSM 之工程應用，台灣營建研究院)。制式骨材產製之標準 CLSM、現場土壤拌製 CLSM 及一般混凝土及所需材料之比較，如表 2.1 所示，現場土壤拌製 CLSM 不需天然之粗細骨材，直接使用現地之土石，可減少剩餘土石造成環境之危害，既經濟且環保(李昌憲，2010)。

表 2.1 CLSM 與一般混凝土之比較(李昌憲，2010)

組成材料 (kgf/m ³)	CLSM 現場土壤拌製	CLSM	一般混凝土
水泥	100 ~ 200	100 ~ 200	250 ~ 450
卜作嵐材料	50 ~ 100	-	0 ~ 100
拌合水	180 ~ 220	200 ~ 500	180 ~ 220

續表 2.1 CLSM 與一般混凝土之比較(李昌憲，2010)

水膠比	1 ~ 1.5	2 ~ 4	0.4 ~ 0.55
粗粒料	200 ~ 400	-	700 ~ 1100
細粒料	1280 ~ 1480	-	700 ~ 1000
土石方	-	1300 ~ 1700	-
摻料	速凝劑、發泡劑	早強劑、減水劑	減水劑、強塑劑

2.2 CLSM 之國內應用

中央大學任怡賓於臺北市之路平專案及零星挖掘案件中隨機抽查四處工地之 CLSM 並分別進行試體製作，依 7 天、28 天之抗壓強度試驗及凝結時間測定，以評估其試體性質；試驗結果顯示各處 CLSM 之 28 天強度皆未達臺北市施工規範品質要求，且凝結時間皆大於 4 小時，如表 2.2 所示（任怡賓，2014）。

表 2.2 CLSM 之抗壓強度試驗結果（任怡賓，2014）

項目	CLSM 案件 I	CLSM 案件 II	CLSM 案件 III	CLSM 案件 IV
7 天平均抗壓強度(kg/cm ²)	30	22	28	32
28 天平均抗壓強度(kg/cm ²)	38	31	36	38
凝結時間(hr)	>4	>4	>4	>4

以不同比例混合後之 CLSM 與碎石、刨除料等材料，製成 CBR 試體與圓柱單壓試體並進行 CBR 試驗及單壓強度試驗，得出以下結論（廖洪鈞、蔡宜穎、吳思宜，2020）：

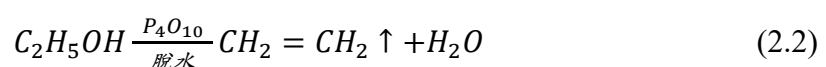
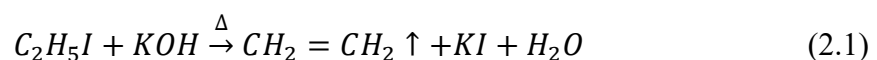
- 一、將碎石級配摺入 CLSM 中，利用顆粒級配間之接觸力，使上層 CLSM 加上碎石之 CBR 值大為增加，解決傳統管溝回填工法 CLSM 初期強度不足之問題，並保持下層 CLSM 良好的坍流度和管線包覆能力。
- 二、比較各工法之優缺點，快速回填工法結合級配回填工法的高初期強度與 CLSM 工法優良的施工性和包覆管線能力，為適用於都會區之良好管溝回填工法。

表 2.3 不同材料管溝回填工法之優劣比較（廖洪鈞、蔡宜穎、吳思宜，2020）

	級配回填	CLSM (現有工法)	快速回填工法
恢復通車花費時間	長	中	短
立即承载力	高	低	高
工程費	中	低	低
施工方便性	低	高	中
後續可開挖性	容易	容易	容易
包覆管線能力	低	高	高

2.3 EPS 之成分

EPS 其主要材料係由乙烯（化學式： C_2H_4 ）及苯（化學式： C_6H_6 ）經聚合作用而製成，乙烯為天然氣與石油之製品，為烯類中最簡單且重要之分子，大多存於天然氣、煤氣及煉油氣中，並藉碘乙烷與氧化鉀之酒精液體共熱而製成，其反應式如方程式(2.1)所示，或以濃硫酸與五氧化二磷，促使酒精經脫水而製成，其反應式如方程式(2.2)所示。



苯為煉焦爐之副產品，透過適當之觸媒反應，迫使乙烯通過苯即得乙苯；此乙苯

合成物劈裂分子內之氫原子，即轉化為苯乙烯（ C_8H_8 ），再藉由聚合反應轉化成固體塑膠質（黃柏維，2004）；聚苯乙烯之單體即為乙烯，其聚合反應如圖 2.1 所示（鄭卓仁，2010）。

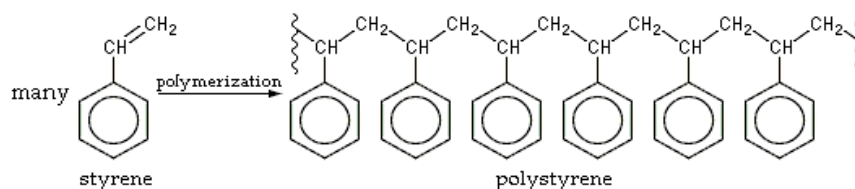


圖 2.1 苯乙烯經聚合反應為聚苯乙烯反應圖（鄭卓仁，2010）

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、耐水性、電絕緣性及隔熱隔音，其基本特性與應用，茲敘述如下（何泰源，2006）。

- 一、質量輕：密度僅約一般砂土之 1/100，使軟弱地盤不須改良承载力即無沉陷之虞。
- 二、經濟性佳：工期短、用地省、挖方少及維修費低，工程總造價經濟。
- 三、耐水性佳：單獨孔隙不易吸水，材質不致產生變化。
- 四、施工簡便：迅速且不需大型機械及特殊技術，以人力即可輕便迅速施工，可解決技術工難求之困擾。
- 五、自立性佳：柏松比小且自立性佳，可減低側向土壓，適用於擋土結構物之背填材料。
- 六、緩衝性優：單獨氣泡體能發揮優越緩衝性，具減少衝擊及震動效果。
- 七、耐水性佳：材料不易吸水、變形及產生化學反應等優點。
- 八、電絕緣性佳：在可容許之操作溫度範圍內，具有良好的電絕緣性質及抗靜電性。
- 九、隔熱隔音佳：EPS 之組成約有 98% 為空氣，僅 2% 為實體物質，故具有隔熱隔音之效果。

2.4 EPS 製程

EPS 之製造流程分為原料發泡、灌模與脫模及 EPS 成型品等步驟（林利國，2000）

參考圖 2.2。

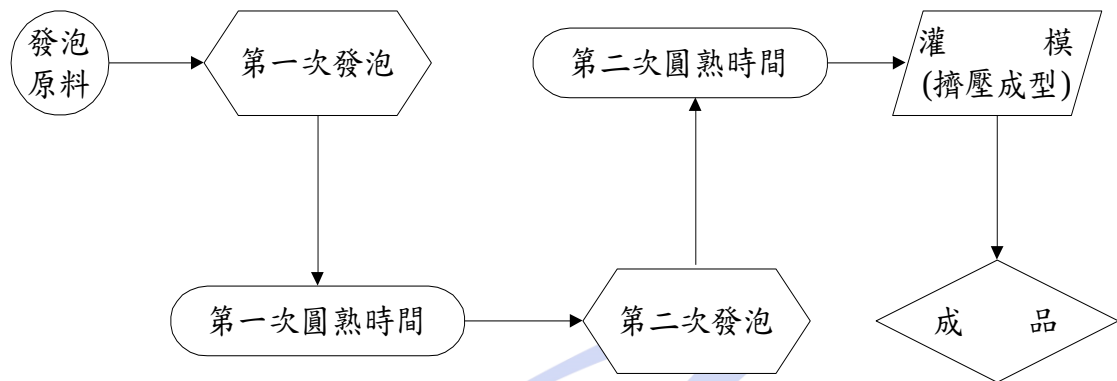


圖 2.2 EPS 製造流程圖（林利國，2000）

2.4.1 EPS 樹脂

塑化聚合物之主要原料由原油中提煉，原油經蒸餾及油氣分離等程序後，即可取得燃料、瀝青及潤滑劑等其他衍生之產品，EPS 屬其衍生產品之一。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）參考圖 2.3。

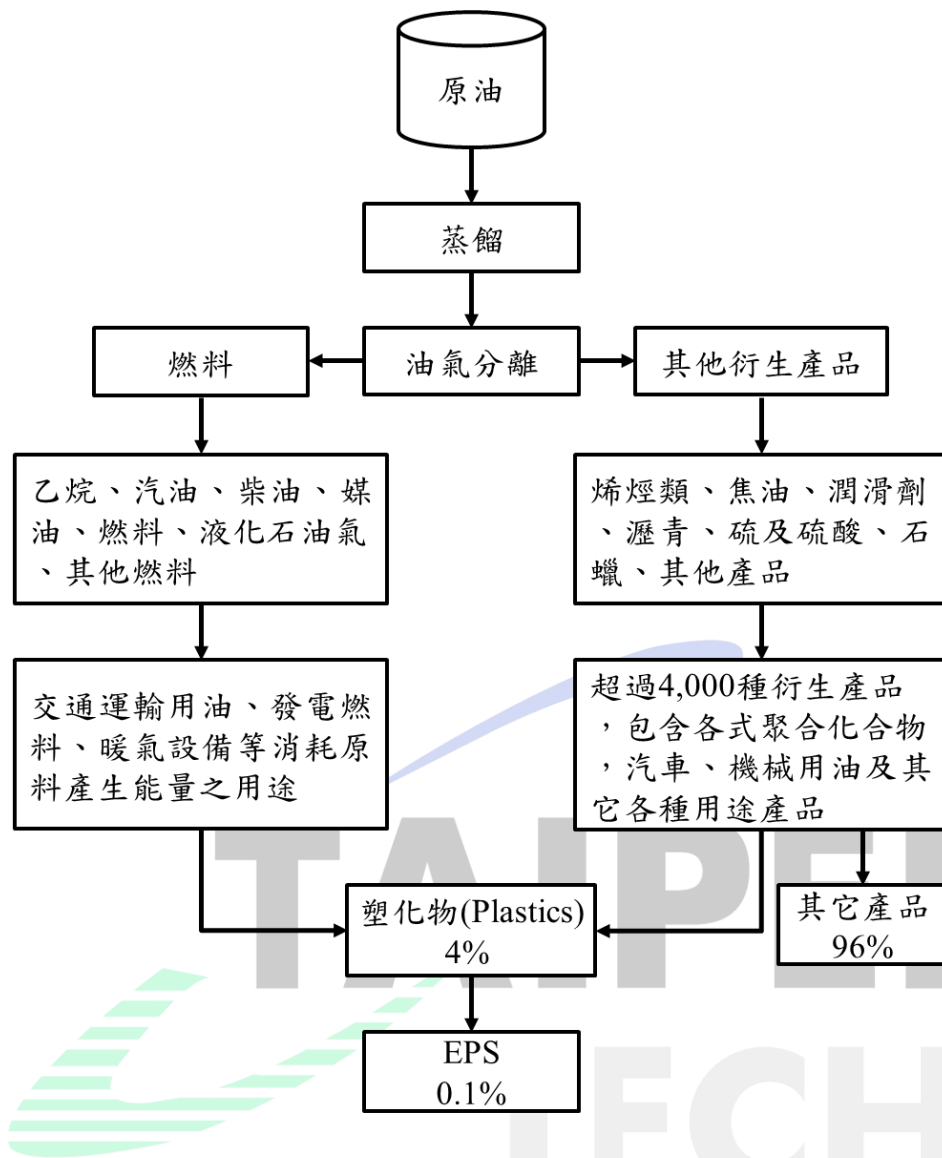


圖 2.3 原油煉製過程及產物示意圖（英國塑膠協會，2005）

EPS 製造需經歷兩個主要階段，第一階段先製成微小的合成樹脂塑膠顆粒，以作為第二階段在方塊模具內加熱發泡之用。國內多數產業將苯乙烯作為發泡原料，經懸浮聚合反應而產生不同粒徑大小之樹脂塑膠顆粒，將添加戊烷發泡劑之聚苯乙烯珠顆粒進行冷卻，藉由各層規格不同篩網過濾出各粒徑大小之 EPS 樹脂如圖 2.4 所示，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），如表 2.2 所示。



圖 2.4 樹脂塑膠顆粒（茂森商業有限公司，2020）

表 2.4 發泡聚苯乙烯粒徑規格分類表

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 (倍)	70-95	65-85	60-80	60-80	50-70	20-50

表 2.5 本研究整理發泡聚苯乙烯品級分類表

品級	特性	應用
一般級	● 其成型所需加熱溫度範圍較廣。 ● 抗壓性較優。 ● 蒸氣消耗性小，能減少成本支出，亦可節省能源之使用。	保護產品，降低衝擊、撞擊之破壞，如：玻璃、陶瓷相關易碎品；保溫材料，如：保溫板及食品包裝；建築材料；美工材料，如：布置裝飾材。
快速成型級	● 成型所需時間短，故能縮短生產週期，降低製造成本。 ● 其他特性與一般級相同。	保護產品，降低衝擊、撞擊之破壞，如：玻璃、陶瓷相關易碎品及電子產品；保溫材料，如：生鮮冷凍食品包裝、保溫板及保溫管。
難燃級	● 具優越耐火性。	保溫材料，如：保溫板、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，具優良難燃性，且不含 HBCD 之持久性有機汙染物。	保溫材料，如：保溫板、保溫管；建築材料，如：隔間材、複合板；輕質土材料。
抗靜電級	● 成型之成品具良好抗靜電效果。	保護產品，降低衝擊、撞擊之破壞，並不受灰塵吸附，如：精密電子零件包裝。
食品級	● 成型之成品含較低苯乙烯殘留，符合國家衛生標準。	市售相關食品之包裝，如：保冰盒、杯子及盤具等。

2.4.2 EPS 發泡與圓熟

將第一階段所得之 EPS 樹脂顆粒置入發泡爐內添加發泡劑，並加熱進行預發泡程序，使蒸氣中熱含量擴及粒子內部而膨脹發泡，因不同蒸氣供應量、加熱時間、進料速

度等相關因素控制其發泡顆粒之發泡倍數及粒徑大小，其發泡倍數約為 15 倍至 70 倍之間，而主要成分為空氣，佔材料總體積 90%至 95%，故具良好抗壓性及緩衝能力如圖 2.5 所示。聚苯乙烯依發泡方法的不同，可分為以下：

- 一、押出發泡平板成型 (PSP)：押出發泡平板成型係將聚苯乙烯添加丁烷作為發泡劑，送入押出機發泡 10 至 20 倍製成保麗龍平板。通常這些厚度為 2mm 至 5mm 的平板經加熱真空成型後，就成為免洗餐具及生鮮托盤等產品。
- 二、發泡粒成型 (EPS)：又可再細分兩種發泡方式，分別為模內發泡法及擠出發泡法，主要將聚苯乙烯原料置入加壓發泡桶內，進行加壓加熱，待原料膨脹至 30 至 50 倍之預發泡顆粒；若要成型則需進行第二次發泡，將預發泡顆粒置入成型之模具中進行高溫高壓作用，達至一定熔點而形成成型品，可因不同領域需求進行裁切。



圖 2.5 EPS 預發泡（蘭陽開發工業股份有限公司，2020）

依使用者需求不同，可調整發泡倍率控制其密度（單位： kg/m^3 ），發泡倍數 X 與密度 D 之關係式為 $X=1000/D$ ，係指發泡倍數與發泡粒密度成反比關係，舉例相關計算說明之，EPS 發泡粒密度 $0.025 \text{ g/cm}^3=25 \text{ kg/m}^3$ ，則發泡倍數為 $X=1000/25=40$ 倍；EPS 發泡粒密度 $0.02 \text{ g/cm}^3=20 \text{ kg/m}^3$ ，則發泡倍數為 $X=1000/20=50$ 倍，依此類推。故發泡粒之發泡倍數越低則密度越高，亦具優越之強度（樺正實業股份有限公司，2012）。

2.4.3 EPS 灌模與脫模

灌模前首先需將成型機模具閉模預熱，待預熱完畢後，再將第二次圓熟時間所獲之 EPS 顆粒適量的由通風儲存槽中導入成型機模具中進行灌模之步驟，待 EPS 原料皆灌入成型機之模具後，便鎖模且開始予以加壓加溫，以高壓高溫將所灌入之 EPS 原料在模具中擠壓成型。擠壓成型後之成品經由適當冷卻後，即進行開模與脫模(林利國等，2000)，參考圖 2.6。

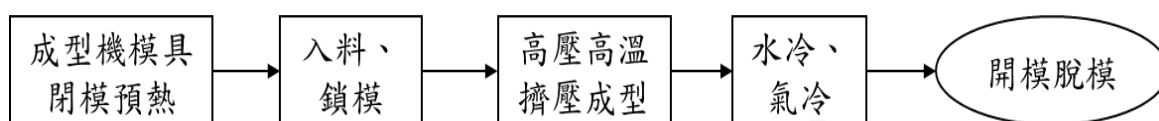


圖 2.6 EPS 灌模與脫模作業流程圖 (林利國等，2000)

由 EPS 原料置入之模具大小規格固定，經蒸氣高溫高壓擠壓成型，其成型之產品應為相同密度。此外，如因壓力、溫度等因素而使得成型品擠壓不完全的話，將造成成型之產品角邊有剝落之現象。

2.4.4 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、入庫及出貨等相關後續工作(黃柏維，2004)，參考圖 2.7。

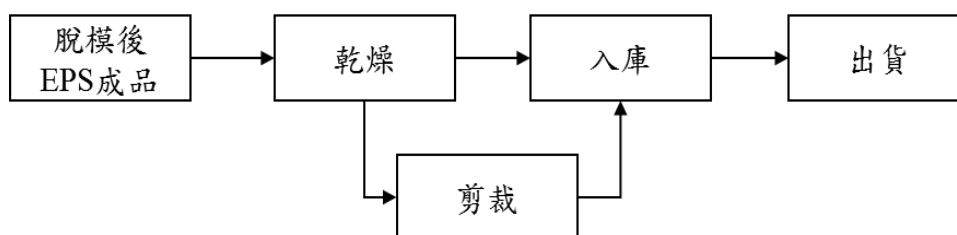


圖 2.7 EPS 成型產品作業相關流程圖 (黃柏維，2004)

2.5 EPS 國內外之應用狀況

2.5.1 EPS 於臺灣之工程應用

臺灣於 1995 年將 EPS 應用於工程案例，臺灣省公路局於西部濱海公路建造試驗堤一處，此工程使用密度約 25kg/m^3 之 EPS 塊體，並搭配 10cm 之 RC 板及 H 型鋼側牆，順利搭建一座長 30 公尺，寬 3 公尺，高 1.5 公尺之試驗路堤，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）。

全世界第一座釣竿式斜張橋臺北市中山大直橋，如圖 2.8 所示，於 1999 年 10 月進行改建工程，其將 EPS 填土工法應用於此計畫，主橋利用節塊推進之方式施作；並於 2000 年 9 月接續進行推進構台之興建，施作中為減少構台底部回填所造成之沉陷，故使用密度為 25kg/m^3 之 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 2.8 臺北市中山大直橋（莊士賢，2008）

臺灣於 2002 年首次大規模使用 EPS 工法之工程為「臺北市洲美快速道路第二期新建工程」，此工程所使用之 EPS 塊體總計約 12,105 立方公尺，如圖 2.9 所示；EPS 材料採用 D-20（模內發泡法），密度為 20kg/m^3 ，抗壓強度為 1.0kgf/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）。

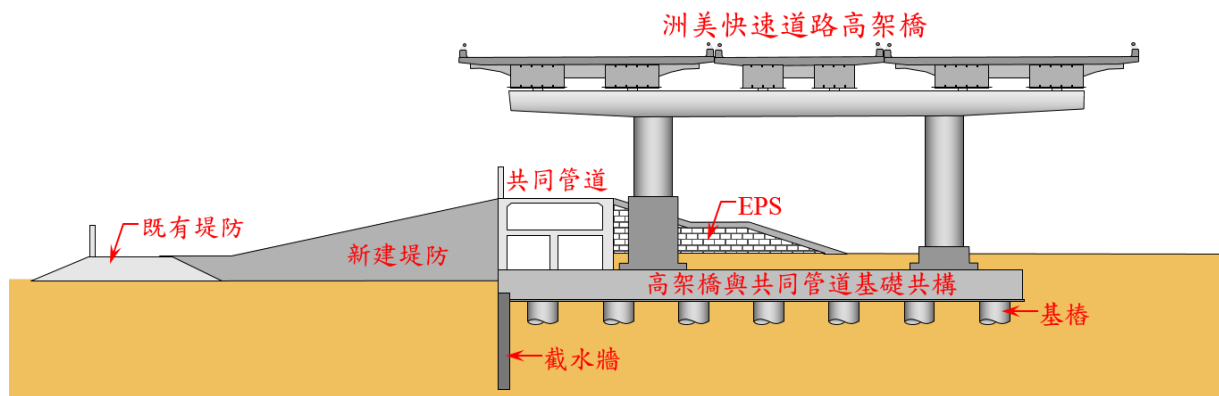


圖 2.9 洲美快速道路第二期新建工程示意圖（何泰源，2001）

國立臺北科技大學於 2020 年底完工的「圖書館屋頂太陽能設備暨休憩空間整建工程」，此工程主要施工項目有，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、防水與隔熱及吸音地坪工程。其吸音隔熱工法為使用厚度 4cm 之 EPS，密度為 15kg/m^3 ，共使用 866 立方公尺之 EPS 塊體，EPS 塊體皆使用雙層點焊鋼絲網固定以防止澆置過程中移動，最下層鋪設 1.5cm PE 吸音層如圖 2.10 及圖 2.11 所示，接著進行水泥砂漿澆置。此工程總金額達 1795 萬，其中吸音隔熱工程占 276 萬。

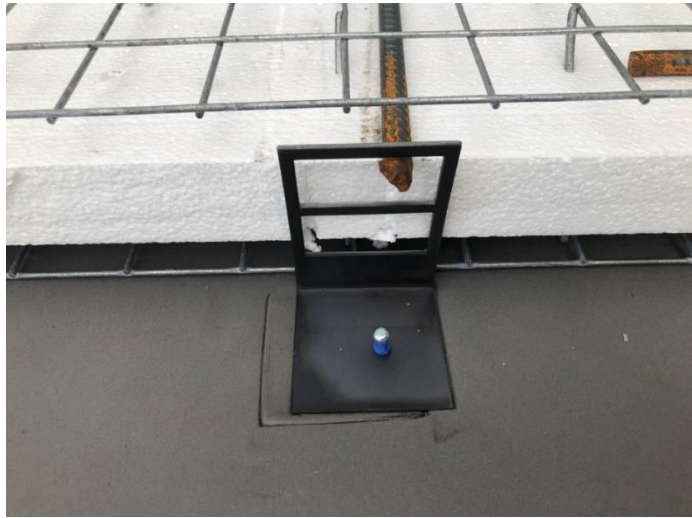


圖 2.10 EPS 及雙層點焊鋼絲網

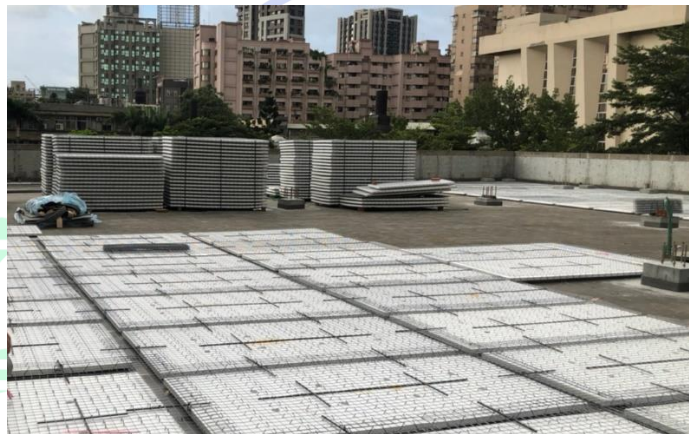
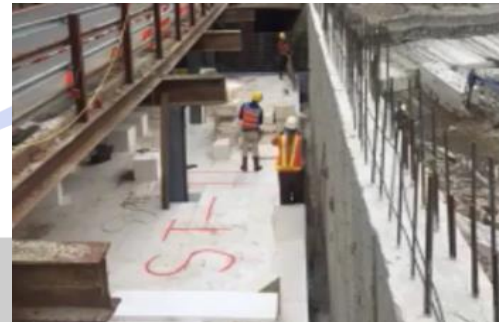


圖 2.11 國立臺北科技大學圖書館屋頂太陽能設備暨休憩空間整建工程

國內將 EPS 應用於工程上的案例顯少，如南投鹿谷小半天明隧道、南投竹山大鞍山路基、臺東太麻里大溪明隧道、三峽區大豹溪北 114 線（6K+200）處道路邊坡修復及 2018 年已完工之九曲洞景觀明隧道工程等都為我國成功將 EPS 應用於工程上之實例，如表 2.4 所示。

表 2.6 臺灣 EPS 應用於工程上之實例

	
南投鹿谷小半天明隧道	南投竹山大鞍山路基
	
台東太麻里大溪明隧道	三峽區北 114 線(6K+200)處道路
	
花蓮九曲洞景觀明隧道	

新北市三峽區連日豪雨，造成插角里通往東眼山的北 113 線道、距東眼橋 6 百公尺處產生長約 100 公尺的路面向下塌陷，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，圈選部分為 EPS 工法所使用之區塊，此工程於 2022 年 7 月中旬完工，如圖 2.12 及圖 2.13 所示（新北市政府養護工程處，2022）。

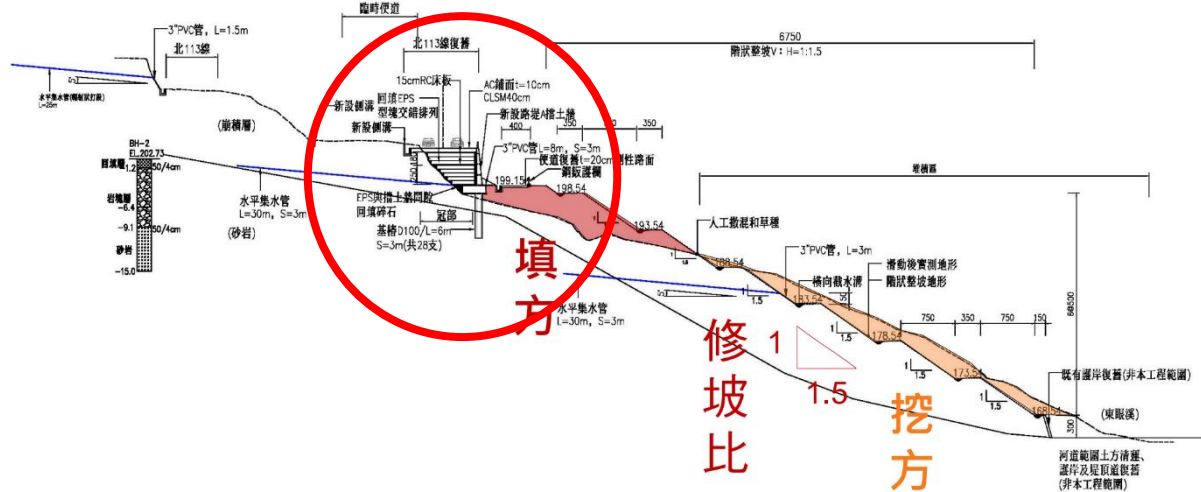


圖 2.12 EPS 工法使用區塊示意圖



圖 2.13 三峽區北 113 縣(0K+650)災害復建工程

2.5.2 EPS 於美國之工程應用

美國營建工程中初次使用 EPS 作為回填材料之工程，於 1974 年於密西根州附近的一座鋼構橋樑工程，該座雙橋跨距連續樑之橋樑係使用鋼筋混凝土樁為基礎，橋樑引道回填高度較舊橋高出 1.5 公尺。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）。

除密西根州之工程案例，目前美國也陸續將 EPS 於工程應用擴及其他各州，分述如下：

一、猶他州鹽湖城 I-15 州際公路重建工程：猶他州鹽湖城因舉辦 2002 年冬季奧運，故重新規劃該州最重要的 I-15 州際公路予以拓寬重建，此工程總長約為 24 公里；在部份地區特別採用 EPS 作為回填材料，並搭配加載工法（Surcharge method）同時進行施工，藉由一面減輕沈陷量一面加速沈陷，進而達到快速施工且縮短工期之目的。此工程所使用之 EPS 回填材料總計約 95,000 立方公尺，如圖 2.19 所示，在當時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 2.19 猶他州鹽湖城 I-15 州際公路重建工程

二、紐約州厄特縣（Jewett County）23A 道路工程：厄特縣 23A 道路因常遭受地下水側向壓力之影響，且位於順向坡地，而使得該路段之路堤每年產生約 1 英寸側向滑動，從 1979 年至 1992 年間其位移量達到 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，如圖 2.20 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 2.20 紐約州厄特縣 23A 道路工程

三、華盛頓州蘭頓市政廳（Renton City Hall）新建工程：蘭頓市政廳為地上五層樓地下三層樓之鋼結構玻璃帷幕建築。其地層包含鬆散的沖積沙和約 12 英尺可壓縮之泥煤，總計約 34 英尺軟弱土層覆蓋於砂礫石層上；而建築物的地下車道剛好位於該軟弱土層中，故本工程採用 EPS 進行填築以解決軟弱土層之沉陷問題；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，如圖 2.21 所示（Geofoam Research Center，2000）。



圖 2.21 華盛頓州 Renton City Hall 新建工程

四、馬里斯維爾州斯諾霍涵洞工程 (Snohomish Culvert)：2008 年於馬里斯維爾州斯諾霍涵洞工程中，為了避免該區域排水幹管之涵洞發生沉陷破壞，故藉由 EPS 質量輕之特性填築於涵洞上方達到保護作用，此工程總計使用 EPS 塊體為 1,883 立方公尺，如圖 2.22 所示 (ACH Foam Technologies, 2008)。



圖 2.22 馬里斯維爾州斯諾霍涵洞工程

五、新奧爾良 (New Orleans) 機場東西向跑道整建工程：此工程主要目的為拆除現有路面及整修和更換損壞之跑道，並重新澆置新的混凝土鋪面；整修過程中，施工單位發現跑道之地下土壤有不均勻沉陷，故選擇質量較輕的 EPS (16PSI) 做為填土材料，以代替原有出現不均勻沉陷而破壞的現有跑道下方填土，且避免新舊跑道間產生不均勻的沉陷。此工程較特別的是，機場跑道原有的地下土壤中充滿了樹枝和樹根，也產生許多的白蟻，為防止蟲害，施工單位於此工程所使用之 EPS 塊體中加入經核准的添加劑，進而防止潛在重大蟲害，此工程總金額達 6,400 萬美元並於 2005

年完工，如圖 2.23 所示。



圖 2.23 新奧爾良機場東西向跑道整建工程（ACH Foam Technologies，2006）

2.5.3 EPS 於日本之工程應用

日本為目前最普遍採用 EPS 施工方法的國家之一，其主要原因為：日本軟土地基較多，故利用其良好自立性，於山區的陡坡上建設路基發揮 EPS 工法專長；且日本位處於地震頻繁之板塊交界處，恰巧此設計工法已趨於成熟，故 EPS 之耐震得到充分利用。

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），如圖 2.24 所示。



圖 2.24 北海道札幌市橋梁橋台之背填工程

EPS 於營建工程界應用已超過 50 年之歷史，而在日本亦累積超過 30 年之工程經驗（塚本英樹等，2008），截至 2018 年，日本已超過 6,718 件工程案例應用此工法，總用量共計 800 萬立方公尺。

2.5.4 EPS 於挪威之工程應用

EPS 發明於 1950 年，最早於 1960 年斯堪地那維亞國家將此材料應用於地層作為住宅的絕緣基礎，而在同一時期於斯堪地那維亞半島、加拿大及美國等國家也將此材料應用於道路鋪面下方作為防凍結之功用。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）；該工程施作時，工程師發現橋台地盤下為軟弱地盤，每年將產生高達 10cm 之地盤沉陷，故以 EPS 塊體取代橋台之背填土且成功應用。1972 年至 1991 年之間，挪威進行之 120 件道路工程中使用 EPS 總量共計約為 250,000 立方公尺，包括：橋梁引道回填、擋土回填及路堤等不同 EPS 應用；此材料應用已長達 40 餘年，根據使用經驗及效果評估顯示，EPS 作為回填材料之道路維護費用較傳統工法低，且未降低工程品質。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）。

2.6 EPS 性質及試驗

國內外對於 EPS 材料在設計及施工上各種性質之試驗項目與試驗結果，如表 2.6 所示（蔡曜謙，2017）。

表 2.7 試驗項目及試驗方法（蔡曜謙，2017）

試驗項目	試驗方法	相關規範
單位體積重 (密度)	遵循硬質發泡塑膠之密度測定方法	JIS-K7222 ASTM-D1622 CNS 2536
抗壓強度	遵循硬質發泡塑膠之壓縮測定方法	JIS-K7220 ASTM-D1621 CNS 2536
徐變特性	由日本「EPS 開發機構」施作	美、日及本國皆無規範
摩擦特性	由日本「EPS 開發機構」施作	美、日及本國皆無規範
變形模量	遵循抗壓強度試驗之壓縮彈性率計算	僅日本施作試驗
柏松比	由日本「EPS 開發機構」施作	僅日本施作試驗
耐熱及 燃燒性	遵循燃燒試驗	JIS-A9511 CNS 2536
耐久性	由日本「EPS 開發機構」施作	僅日本施作試驗
吸水性	遵循硬質發泡塑膠之吸水率測定方法	ASTM-C272 CNS 2536
反覆壓縮 特性	由日本「EPS 開發機構」施作	僅日本施作試驗
熱傳導係數	絕熱材料熱導率測定方法	JIS-A1412 EN 12667 EN 12939

2.6.1 耐熱及耐燃性

EPS 之原料為聚苯乙烯樹脂係熱塑性樹脂，於高溫時會產生軟化或膨脹及收縮變形，一般耐熱溫度為 80°C。EPS 耐熱性試驗之曲線如圖 2.25 所示，當溫度超過 80°C 時體積將產生膨脹變形，而當溫度超過 150°C 時 EPS 將會融化（BASF，1990）。

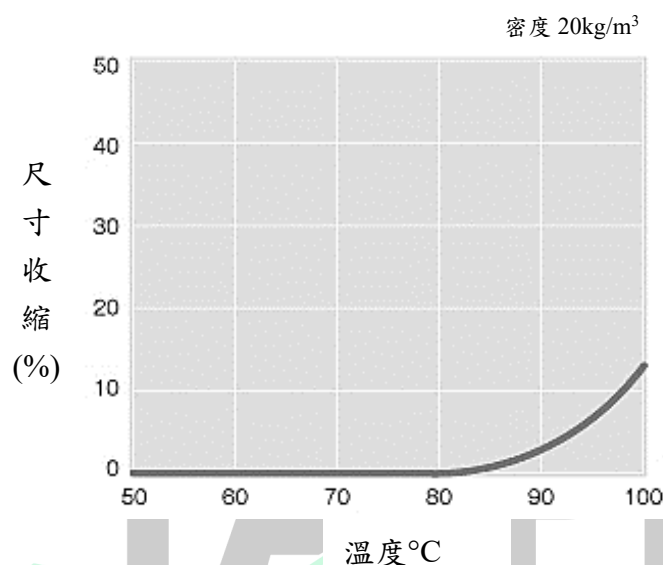


圖 2.25 溫度與尺寸收縮率關係圖（BASF，1990）

2.6.2 隔熱性質

EPS 具有良好之隔熱性質，材料內部係由完全獨立之顆粒組成，擁有優越的保溫及隔熱性能，密度和熱導率之間關係如表 2.7 及圖 2.26 所示。液態水的存在亦會影響熱傳導係數，EPS 含水量越高其導熱係數隨著越高，即使含水率小於 1%（體積）也將導致熱傳導係數增加 5%；當含水率介於 3%至 5%之間時，影響熱傳導係數增加 15%至 25%；若使 EPS 長期浸泡於水中使含水率達到 9%時，將會影響熱傳導係數增加 50%；在設計階段中通常允許含水率高達 10%至 15%，這將導致熱傳導係數應加 50%至 75%（Horvath，1993）

表 2.8 各密度 EPS 於常溫下之熱傳導係數

密度 (kg/m^3)		15K	20K	25K	30K
熱傳導係數	($\text{kcal/mh}^\circ\text{C}$)	0.033	0.031	0.030	0.029
	(W/mK)	0.038	0.036	0.035	0.034

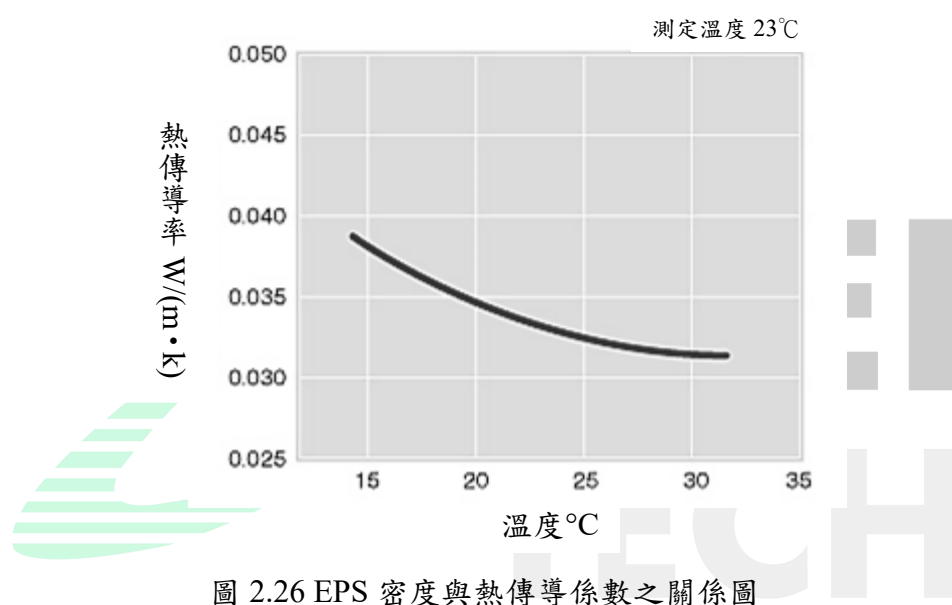


圖 2.26 EPS 密度與熱傳導係數之關係圖

2.6.3 耐久性

EPS 本質上與其原料聚苯乙烯樹脂的性質相同。一般來說，它具有抗酸、抗鹼及抗油的特性，但 EPS 易溶解於芳烴鹵化烴成品、酮類、酯類及礦物油類物質中。日本 EPS 開發機構將 EPS 與其具有抵抗反應之化學物質整理，如表 2.8 所示。

表 2.9 EPS 之耐化學性

藥品種類	反應	藥品種類	反應
鹽酸	○	醚類	○
硫酸	○	無機鹽	○
硝酸	○	水泥	○
苛性鈉	○	海水	○
氫氧化鈣	○	瀝青	×
動植物油	○	LPG	○
汽油	×	LNG	○
重油	▲	水性塗料	○
黃油	○	油性塗料	×
脂肪族碳化水素	▲	消毒液	○
鹵碳氫化合物	×	肥料	○
芳香族碳化水素	×	除草劑	○
酮類	×	殺蟲劑	○
脂類	×	殺菌劑	○
註：○：安定；▲：膨潤；×：溶解			

2.6.4 吸水性

EPS 之原材料塑膠其耐水性非常優異，同時其獨立氣泡之結構體亦有著良好之耐水性，其優良之特性亦合用於下水道工程，EPS 密度越高時吸水量越低，參考圖 2.27，尤其當密度高於 20kg/m^3 時吸水量有明顯下降（JEPSA，2016）。

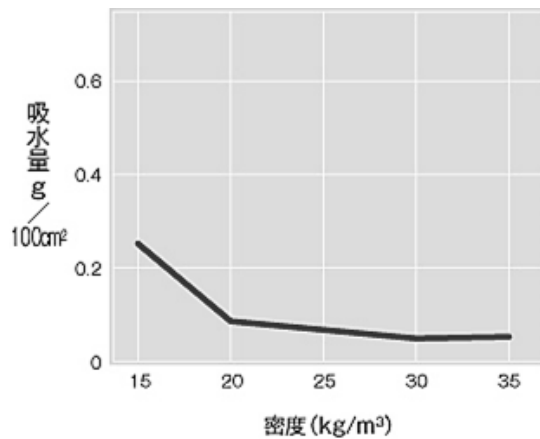


圖 2.27 EPS 密度和吸水量之關係圖（JEPSA，2016）

2.7 CLSM 之相關規範

2.7.1 公共工程施工綱要規範

公共工程施工綱要規範係由公共工程委員會修訂發布，為本國營建工程重要法規之一，委員會施工綱要規範 03377 章為「控制性低強度回填材料」，其定義之控制性低強度回填材料係由水泥(含水泥系處理劑)、卜作嵐摻料、粒料及水按設定比例拌和而成，必要時得依規定使用化學摻料。其規範如表 2.9 所示。

表 2.10 CLSM 之性質要求

項目	試驗方法	要求
*管流度 (cm)	CNS 15462	15-30
*坍流度 (cm)	CNS 14842	40-60
落沉強度試驗	CNS 15862	一般型：24 小時 早強型：4 小時
28 天抗壓強度 (kgf/cm ²)	CNS 15865	40-80
氯離子含量	CNS 13465	如使用於金屬管線埋設物之回填 時，須符合 CNS 3090 之規定，如 使用於非金屬管線埋設物 之回填 時，可免辦理本項試驗

2.7.2 中華民國國家標準之相關規定

目前中華民國國家標準 (Chinese National Standards ; 簡稱為 CNS) 控制性低強度回填材料有關的標準包括 CNS 61 (卜特蘭水泥)、CNS 1240 (混凝土粒料) 及 CNS 3036 (混凝土用飛灰及天然或煅燒卜作嵐攪和物) 等, 而相關的檢測方法包括 CNS 14842 (高流動性混凝土坍流度試驗法)、CNS 15462 (控制性低強度材料流動稠度試驗法) 及 CNS 15865 (控制性低強度材料圓柱試體之製備及試驗法), 如表 2.10 及 2.11 所示, 本研究實驗材料主要即係參考 CNS 15865 (控制性低強度材料圓柱試體之製備及試驗法) 來進行實驗。

表 2.11 控制性低強度回填材料國家標準

名稱	名稱
CNS 61	卜特蘭水泥
CNS 1240	混凝土粒料
CNS 3036	混凝土用飛灰及天然或煅燒卜作嵐攪和物
CNS 3090	預拌混凝土
CNS 3091	混凝土用輸氣附加劑
CNS 12283	混凝土用化學摻料
CNS 12549	混凝土及水泥砂漿用水淬高爐爐渣粉
CNS 12833	流動化混凝土用化學摻料
CNS 13961	混凝土拌和用水
CNS 15286	水硬性混合水泥

表 2.12 控制性低強度回填材料試驗方法

名稱	名稱
CNS 12387	工程用土壤分類試驗法
CNS 13465	新拌混凝土中水溶性氯離子含量試驗法
CNS 15462	控制性低強度材料流動稠度試驗法
CNS 15862	測定控制性低強度材料施加荷重時機之落球試驗法
CNS 15863	控制性低強度材料密度(單位重)、拌成物體積水泥含量及含氣量(比重計法)試驗法
CNS 14842	高流動性混凝土坍流度試驗法
CNS 15864	新拌控制性低強度材料取樣法
CNS 15865	控制性低強度材料圓柱試體之製備及試驗法

第三章 研究方法

3.1 實驗計畫

本研究主要係針對台達化學工業股份有限公司所提供之不同厚度之 EPS 泡棉顆粒以不同配比進行探討，故本實驗計畫以不同厚度之 EPS 顆粒作為本實驗之變數，如下表所示。

表 3.1 實驗變數分類表

項目	變數內容
抗壓試驗及彈性模數	1.5mm、2.5mm、3mm 之 EPS 顆粒
流動性	1.5mm、2.5mm、3mm 之 EPS 顆粒
吸水率	1.5mm、2.5mm、3mm 之 EPS 顆粒
單位重	1.5mm、2.5mm、3mm 之 EPS 顆粒

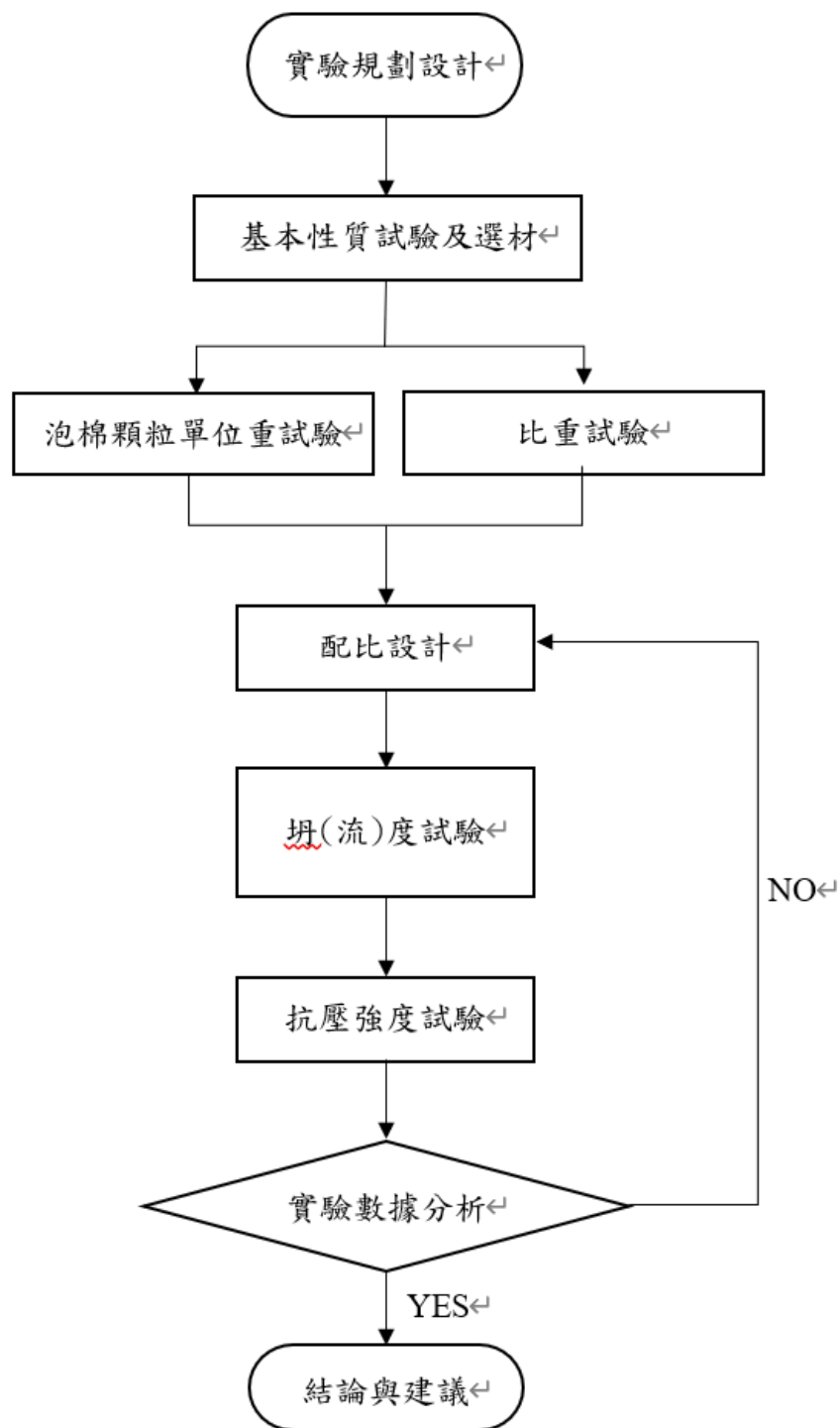


圖 3.1 實驗流程圖

3.2 EPS 顆粒材料

本研究實驗擬透將 EPS 作為輕質骨材，以降低 CLSM 之密度及長期強度，本研究採用之 EPS 顆粒呈圓球形，單一尺寸直徑為 1.5 mm~3.0mm，密度則為 25 kg/m³，主要成分為 93-97%的聚苯乙烯，其餘則為 3-7%的發泡劑。EPS 顆粒製造過程簡要說明如下所示，其本研究實驗使用之 EPS 顆粒試體尺寸如表 3.2 所示。

一、原料製作

本研究實驗所使用之 EPS 顆粒原料，係由苯乙烯單體經懸浮聚合反應及加壓灌入發泡劑而成的圓形小顆粒。

二、預發泡階段

將聚苯乙烯原料置入加壓發料機內進行發泡，一般高密度之 EPS 材料只需一次發泡即可製成；而低密度之 EPS 材料則需要二次發泡的步驟，發泡完之後即形成 EPS 顆粒。

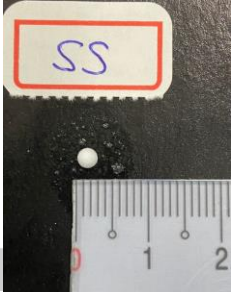
三、中間置存階段

EPS 於成型前必須有中間置存階段來讓空氣擴散到粒子內部讓預發泡顆粒子水份的乾燥，並將過剩的發泡劑在成型前擴散掉。

四、EPS 發泡顆粒成型

放置完成之 EPS 顆粒置入成型機內，透過燃燒重油之鍋爐加以壓力及溫度，經過加熱軟化過程，使預發泡顆粒再膨脹。

表 3.2 EPS 顆粒試體尺寸

規格	未發泡 粒徑範圍 (mm)	發泡後粒徑範圍(mm)		發泡倍率 (倍)	單位重 (g/cm ³)
321F	0.45-0.75		1.5	40	0.0783
321SS	0.65-0.9		2.5	40	0.0441
321T	1.0-1.4		3	40	0.0462

3.3 實驗設備

3.3.1 單位重試驗

以三種不同粒徑大小之泡棉顆粒，進行 10 次 0.1g 之顆數計算，並將顆粒總數乘以單粒之泡棉顆粒體積，得出總體積後再進行單位重之換算。本試驗所使用之儀器如圖 3.2、圖 3.3、圖 3.4 所示。。

一、塑膠碗：使用市售直徑 11cm 及高度 5.5cm 之 PP 塑膠碗。

二、泡棉顆粒：使用之泡棉顆粒粒徑分別為 1.5mm、2.5mm 及 3mm。

三、天平磅秤：使用之傳感器感量為 0.01g，採用數位輸出，穩定性高開機歸零後即可秤重無需熱機，最大秤量可達 300g。



圖 3.2 塑膠碗



圖 3.3 泡棉顆粒



圖 3.4 音叉式天平磅秤

3.3.2 坍流度試驗

本試驗參考之準則依 CNS 14842 高流動性混凝土坍流度試驗法，藉以判斷拌入不同粒徑泡棉顆粒之高流動性混凝土是否符合規範範圍，本試驗所使用之儀器如圖 3.5 所示。

- 一、坍度錐模具：使用符合 CNS 1176 混凝土坍度試驗法所規定之坍度試驗用平截圓錐體模具。
- 二、搗棒：直徑 1.6 cm 長約 60 cm 之圓形直鋼棒，棒端為直徑 16 mm 之半球體形。
- 三、鋼製平板：使用表面平滑且具良好鋼性之平板，尺寸為 80×80 cm，厚度為 3mm。
- 四、鋁合金手鏟：使用之泡棉顆粒粒徑分別為 1.5mm、2.5mm 及 3mm。



圖 3.5 坍流度試驗儀器

3.3.3 試體澆置及養護

本試驗以水泥 200g、砂 400g、1.2 分宜蘭石 200g、水 180g 及三種不同粒徑大小之泡棉顆粒 4g 製成，並澆置於方塊試體模中。CLSM 澆置完成後以灑水進行養護，並使用塑膠布覆蓋，本試驗所使用之儀器及澆置如圖 3.4 至圖 3.11 所示。

一、高爐水泥：使用晉瑜企業所生產之符合 CNS 12681 規範之高爐水泥。。

二、砂：使用之泡棉顆粒粒徑分別為 1.5mm、2.5mm 及 3mm。

三、宜蘭石：使用 1.2 分之宜蘭石。

四、泡棉顆粒：使用之泡棉顆粒粒徑分別為 1.5mm、2.5mm 及 3mm。

五、攪拌機：使用 Murenking MK-36 攪拌機，容量 5L 功率 500W。

六、方塊試體模：使用組合式之方塊試體模具。



圖 3.6 高爐水泥及檢驗證書



圖 3.7 砂



圖 3.8 1.2 分宜蘭石



圖 3.9 Murenking MK-36 攪拌機



圖 3.10 方塊試體模



圖 3.11 方塊試體澆置

3.3.4 吸水率試驗

以乾燥之方塊試體測定重量(W_1)，放入水槽中於 24 小時後取出，以乾燥潔淨之紗布拭清，在 1 分鐘內測定重量(W_2)，代入公式求得吸水率 $A(\%)$ 。公式表如 $A = (W_2 - W_1 / W_1) \times 100$ 。試驗所使用之儀器如圖 3.4 所示。

- 一、天平磅秤：使用之傳感器感量為 0.01g，採用數位輸出，穩定性高開機歸零後即可秤重無需熱機，最大秤量可達 300g。
- 二、方塊試體：使用水灰比 0.8 之方塊試體、水灰比 0.9 之方塊試體及水灰比 0.9 且分別伴入粒徑 1.5mm、2.5mm 及 3mm 泡棉顆粒之方塊試體。

3.3.5 抗壓試驗組

本試驗參考之準則依 CNS 15865 控制性低強度材料圓柱試體之製備及試驗法試驗，藉以判斷 EPS 材料之性質，本試驗所使用之儀器如圖 3.12 至圖 3.15 所示。

- 一、音叉式天平磅秤：使用音叉震動式傳感器感量為 0.001g，採用數位輸出，穩定性高開機歸零後即可秤重無需熱機，最大秤量可達 620g。
- 二、電子游標卡尺：數位螢幕顯示數字，測定範圍為 0-100mm，解析度為 0.01mm。
- 三、HT-9501 series 萬能試驗機：採用輪幅式高精度荷重元，感測靈敏、穩定，誤差低，最大容量可達 1000kN，夾具模組化替換方便、快速。



圖 3.12 音叉式天平磅秤



圖 3.13 電子游標卡尺

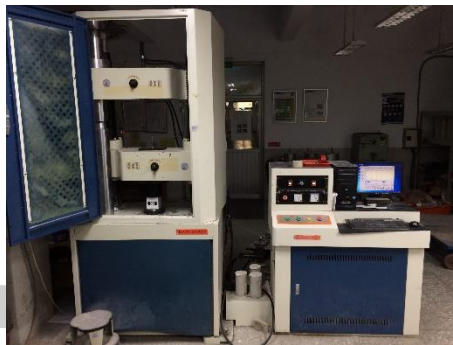


圖 3.14 HT-9501 series 萬能試驗儀



圖 3.15 抗壓強度試驗作業

第四章 研究成果

本研究主要係針對不同粒徑之 EPS 泡棉顆粒拌入控制性低強度材料，以水泥 200g、砂 400g、1.2 分及宜蘭石 200g 充分攪拌均勻，再將水 180g 及泡棉顆粒 4g 分次加入後完成澆置。先以三種不同粒徑之泡棉顆粒 1.5mm、2.5mm 及 3mm 作單位重試驗，再依配比製成 5cm*5cm*5cm 之方塊試體進行抗壓強度試驗、吸水率試驗、抗壓強度試驗及再生粒料之成本比較，其中抗壓強度試驗為 4 顆 5cm*5cm*5cm 之方塊試體進行抗壓後取平均值。

4.1 單位重試驗

分別針對三種不同粒徑之泡棉顆粒，進行 10 次 0.1g 之顆數計算，1.5mm、2.5mm 及 3mm 之泡棉顆粒分別為 7225 顆、2771 顆及 1530 顆，如表 4.1 所示。

表 4.1 泡棉顆粒數量表

0.1g 粒徑	第一次(顆)	第二次(顆)	第三次(顆)	第四次(顆)	第五次(顆)	第六次(顆)
1.5mm	733	702	709	717	722	717
2.5mm	290	266	248	305	253	279
3mm	173	148	142	153	166	137
0.1g 粒徑	第七次(顆)	第八次(顆)	第九次(顆)	第十次(顆)	累計顆數	
1.5mm	698	749	731	747	7225	
2.5mm	270	293	282	285	2771	
3mm	144	155	152	160	1530	

針對三種不同粒徑之泡棉顆粒以球體體積公式 $V_{\text{球}} = (4/3)\pi r^3$ 計算，得出 1g 之 1.5mm、2.5mm 及 3mm 之泡棉顆粒體積分別為 12.77 cm³、22.67 cm³ 及 21.63 cm³，單位重分別為 0.0783 g/cm³、0.0441 g/cm³ 及 0.0462 g/cm³，並將單位重進行迴歸分析， $y = -0.0232x + 0.1104$ ， $R^2 = 0.8567$ 呈高度相關，詳如表 4.2、圖 4.1 所示。

表 4.2 泡棉顆粒單位重計算表

泡棉顆粒體積公式： $V_{\text{球}} = (4/3)\pi r^3$				
粒徑	泡棉顆粒體積	1g 之泡棉顆粒數量	1g 之泡棉顆粒體積	單位重(g/cm ³)
1.5mm	0.00177 cm ³	7225 顆	12.77 cm ³	0.0783
2.5mm	0.00818 cm ³	2771 顆	22.67 cm ³	0.0441
3mm	0.01414 cm ³	1530 顆	21.63 cm ³	0.0462

單位重線性迴歸

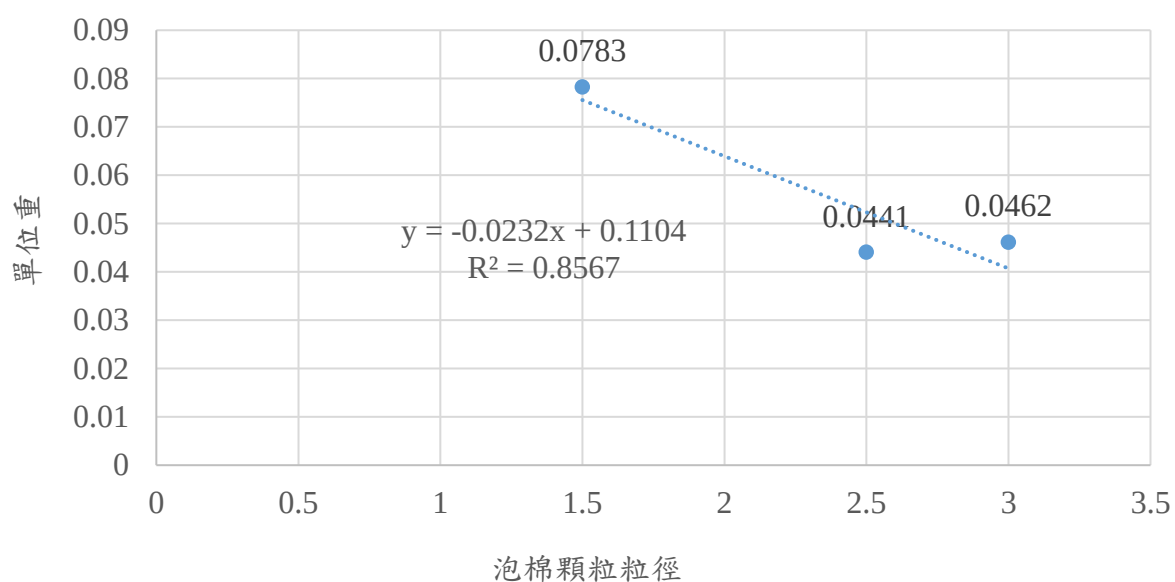


圖 4.1 單位重之線性迴歸圖

4.2 坍流度試驗

以水灰比 0.8 之 CLSM、水灰比 0.9 之 CLSM 及水灰比 0.9 且拌入不同粒徑 1.5mm、2.5mm 及 3mm 泡棉顆粒之 CLSM 進行坍流度試驗，所測得數據皆大於規範之 40cm，如表 4.3 所示。

表 4.3 坍流度試驗表

種類 坍流度	未加泡棉 (水灰比 0.8)	未加泡棉 (水灰比 0.9)	1.5mm	2.5mm	3mm
X 軸	42cm	48cm	43cm	45cm	48cm
Y 軸	45cm	46cm	46cm	44cm	43cm

4.3 吸水率試驗

以水灰比 0.8 之 CLSM、水灰比 0.9 之 CLSM 及水灰比 0.9 且拌入不同粒徑 1.5mm、2.5mm 及 3mm 泡棉顆粒之 5cm*5cm*5cm 之方塊試體進行吸水率試驗所測得之數據，並以吸水率進行迴歸分析，得出 $y = 0.002x + 0.0561$ ， $R^2 = 0.999$ 呈高度相關，如表 4.4、表 4.5 及圖 4.2 所示。

表 4.4 吸水量計算表

吸水 粒徑	吸水前(g)	吸水後(g)	吸水重(g)
未加泡棉 (水灰比 0.8)			11.88
未加泡棉 (水灰比 0.9)			13.11
1.5mm			13.27
2.5mm			14.67

續表 4.4 吸水量計算表

吸水 粒徑	吸水前(g)	吸水後(g)	吸水重(g)
3mm			13.77

表 4.5 吸水率計算表

吸水 粒徑	吸水前(g)	吸水後(g)	吸水率(%)
未加泡棉 (水灰比 0.8)	278.95	290.83	4.259
未加泡棉 (水灰比 0.9)	263.63	276.74	4.973
1.5mm	224.70	237.97	5.906
2.5mm	240.67	255.34	6.095
3mm	222.00	235.77	6.203

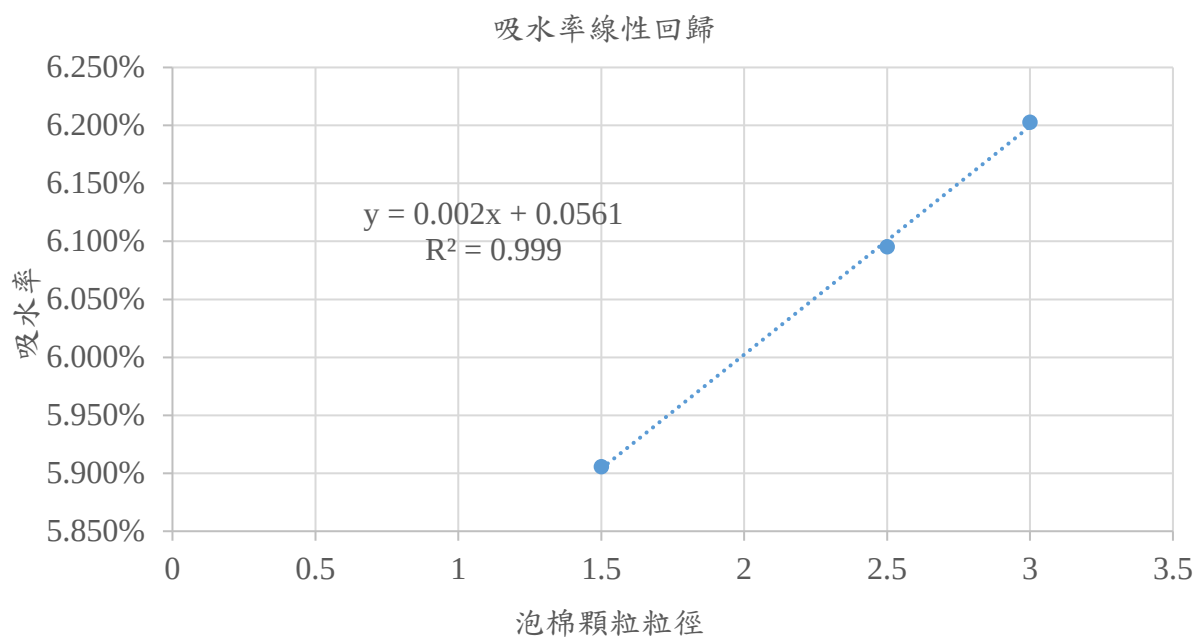


圖 4.2 吸水率之線性迴歸圖

4.4 抗壓強度試驗

本試驗主要係針對水灰比 0.8 及 0.9 之 CLSM 依配比設計拌入三種不同粒徑泡棉顆粒之 5cm*5cm*5cm 方塊試體，分別進行 7 天、14 天及 28 天抗壓強度試驗，並測試其抗壓強度之成長情況；由測試結果可得知水灰比 0.8 之 CLSM 拌合 1.5mm 及 3mm 泡棉顆粒之方塊試體於 28 天之抗壓強度皆未符合規範值；而水灰比 0.9 之 CLSM 拌合 1.5mm 及 3mm 泡棉顆粒之方塊試體於 28 天之抗壓強度皆符合規範，且成長幅度分別為最大 58%及最小 21%；拌合 2.5mm 泡棉顆粒之試體於 28 天之抗壓強度則超出規範值，其成長幅度為 43%，如表 4.6 至 4.11 及圖 4.3 至 4.9 所示。

表 4.6 水灰比 0.8 之 7 天抗壓強度試驗數據表

試壓 粒徑	第一次 (kgf/cm ²)	第二次 (kgf/cm ²)	第三次 (kgf/cm ²)	第四次 (kgf/cm ²)	平均 (kgf/cm ²)
1.5mm	61.8	60.5	66	54.9	60.8
2.5mm	104.3	95.7	94.6	100.6	98.8
3mm	68	66.7	69.4	69.4	68.4

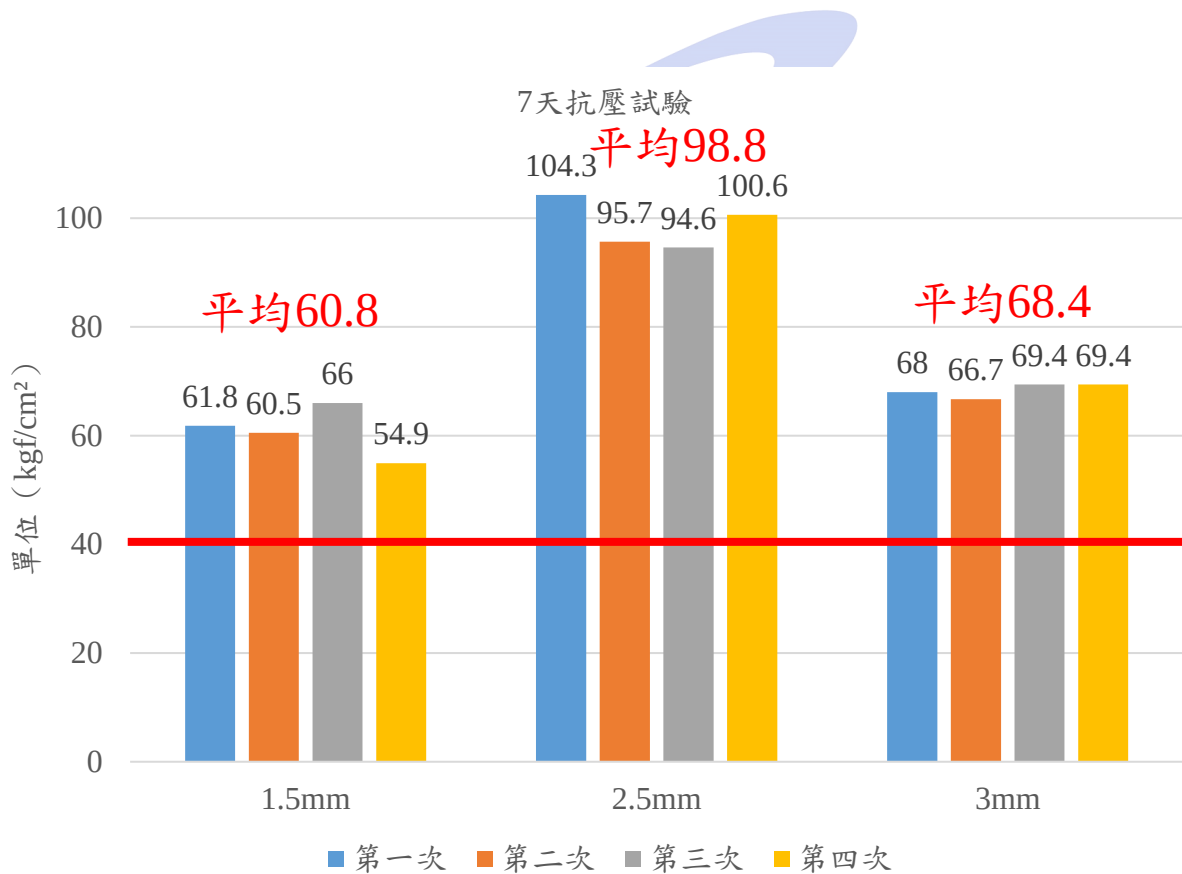


圖 4.3 水灰比 0.8 之 7 天抗壓強度試驗直方圖

表 4.7 水灰比 0.9 之 7 天抗壓強度試驗數據表

試壓 粒徑	第一次 (kgf/cm ²)	第二次 (kgf/cm ²)	第三次 (kgf/cm ²)	第四次 (kgf/cm ²)	平均 (kgf/cm ²)
1.5mm	48.8	46.5	49.0	49.3	48.4
2.5mm	57.8	54.7	58.0	57.9	57.1
3mm	42.7	39.9	42.2	43.1	42

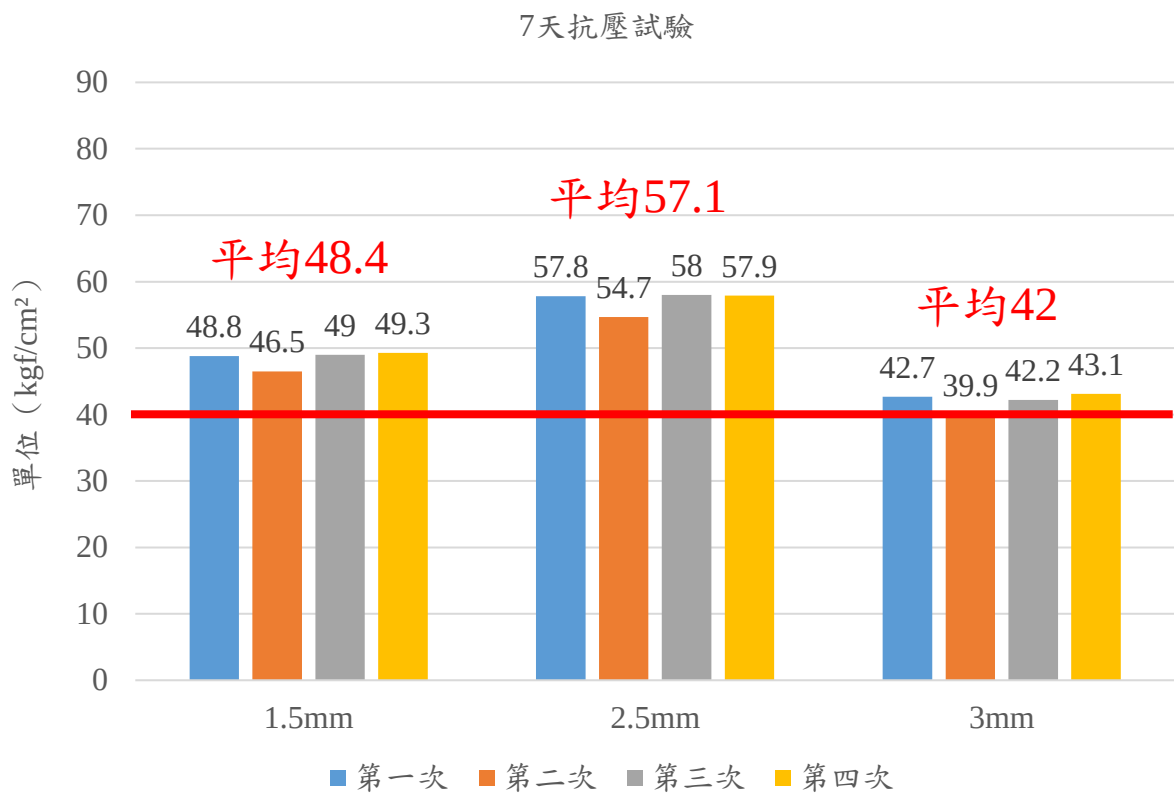


圖 4.4 水灰比 0.9 之 7 天抗壓強度試驗直方圖

表 4.8 水灰比 0.8 之 14 天抗壓強度試驗數據表

試壓 粒徑	第一次 (kgf/cm ²)	第二次 (kgf/cm ²)	第三次 (kgf/cm ²)	第四次 (kgf/cm ²)	平均 (kgf/cm ²)
1.5mm	68	65.3	66.4	62.3	65.8
2.5mm	102.8	102.9	107.5	110	105.8
3mm	76.7	83.5	78.3	79.8	79.6

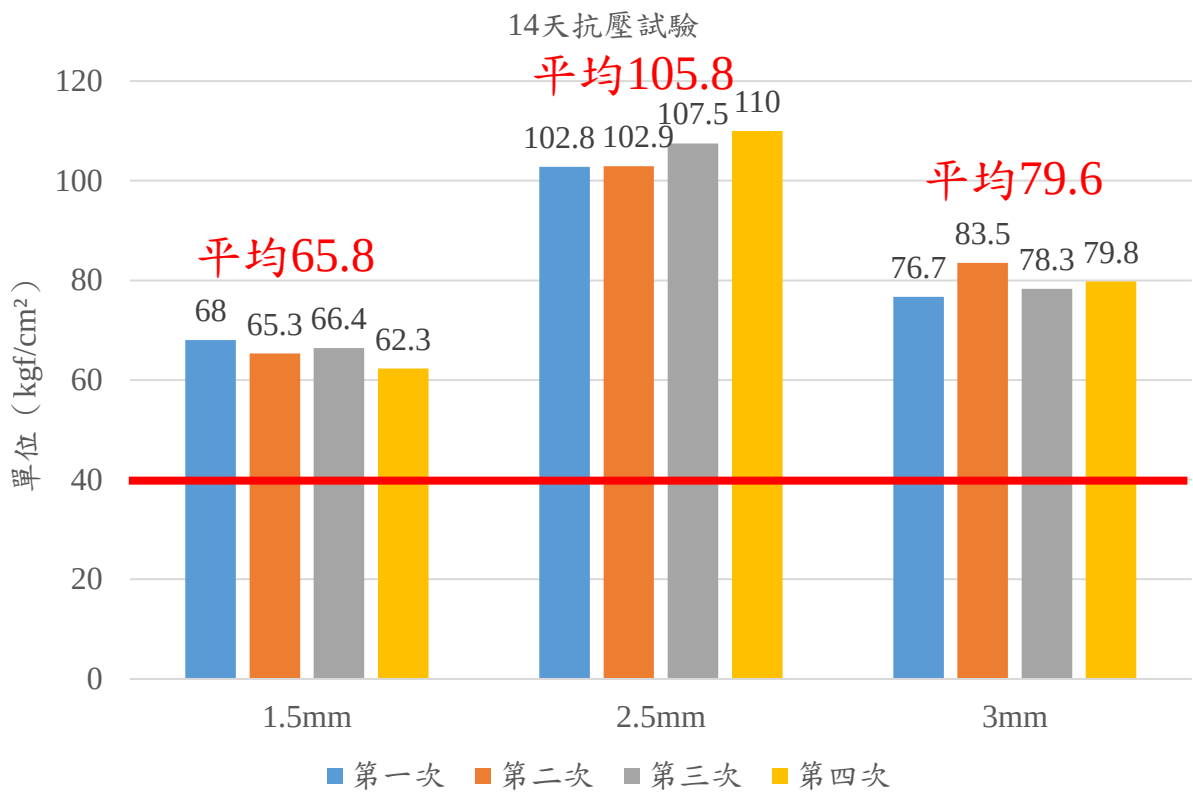


圖 4.5 水灰比 0.8 之 14 天抗壓強度試驗直方圖

表 4.9 水灰比 0.9 之 14 天抗壓強度試驗數據表

試壓 粒徑	第一次 (kgf/cm ²)	第二次 (kgf/cm ²)	第三次 (kgf/cm ²)	第四次 (kgf/cm ²)	平均 (kgf/cm ²)
1.5mm	50.9	49.5	51.7	51.5	50.9
2.5mm	60.6	58.3	59.4	66.6	61.2
3mm	49.1	48.2	51.6	47.5	49.1

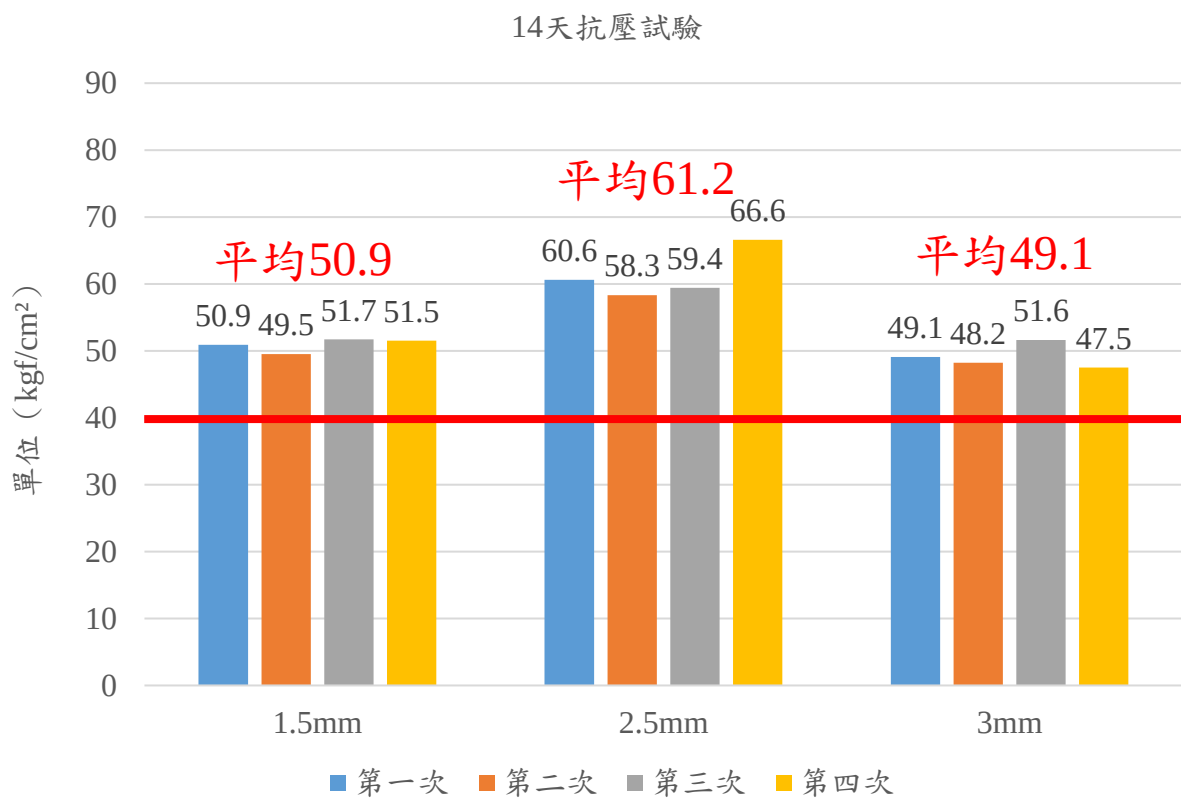


圖 4.6 水灰比 0.9 之 14 天抗壓強度試驗直方圖

表 4.10 水灰比 0.8 之 28 天抗壓強度試驗數據表

試壓 粒徑	第一次 (kgf/cm ²)	第二次 (kgf/cm ²)	第三次 (kgf/cm ²)	第四次 (kgf/cm ²)	平均 (kgf/cm ²)
1.5mm	91.2	95.3	104.5	94.4	96.4
2.5mm	119.8	124.8	132.9	125.3	125.7
3mm	84.5	83.5	79.9	87.8	83.9

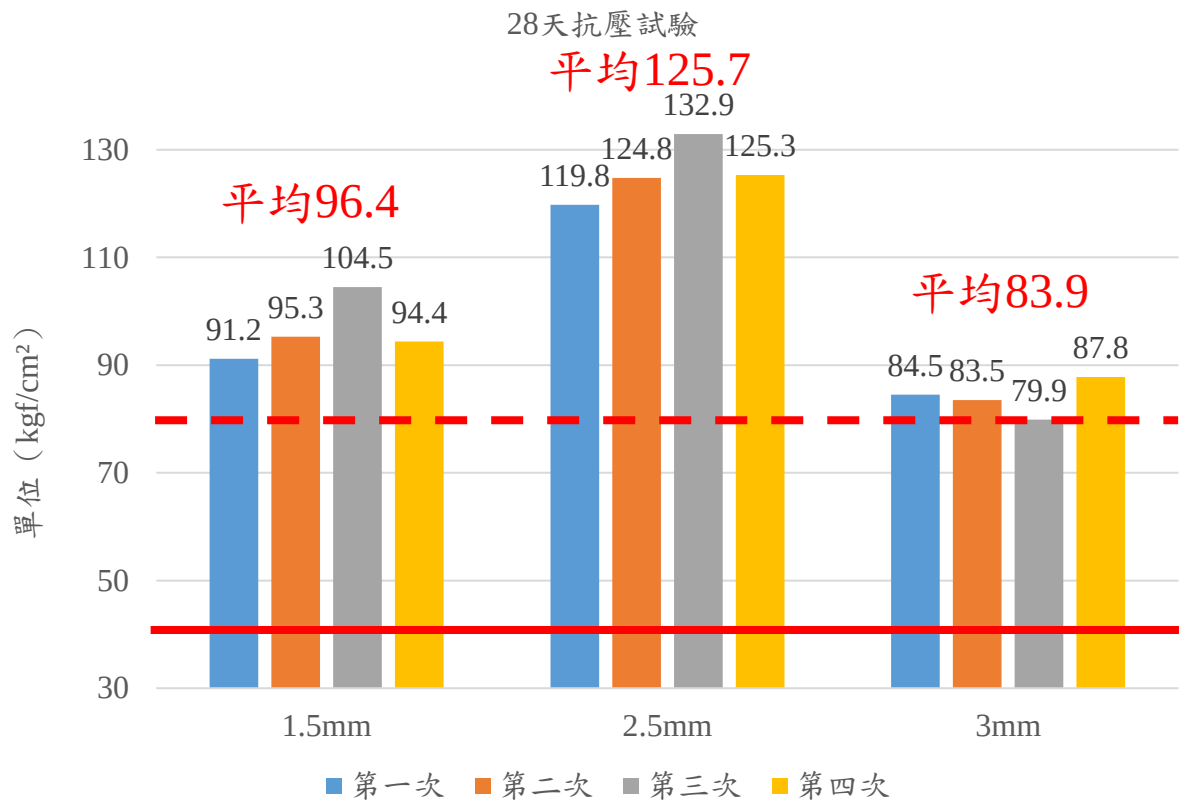


圖 4.7 水灰比 0.8 之 28 天抗壓強度試驗直方圖

表 4.11 水灰比 0.9 之 28 天抗壓強度試驗數據表

試壓 粒徑	第一次 (kgf/cm ²)	第二次 (kgf/cm ²)	第三次 (kgf/cm ²)	第四次 (kgf/cm ²)	平均 (kgf/cm ²)
1.5mm	78.7	75.3	75.4	76.8	76.6
2.5mm	87.0	79.1	79.7	81.9	81.9
3mm	48.7	52.5	51.0	50.4	50.7

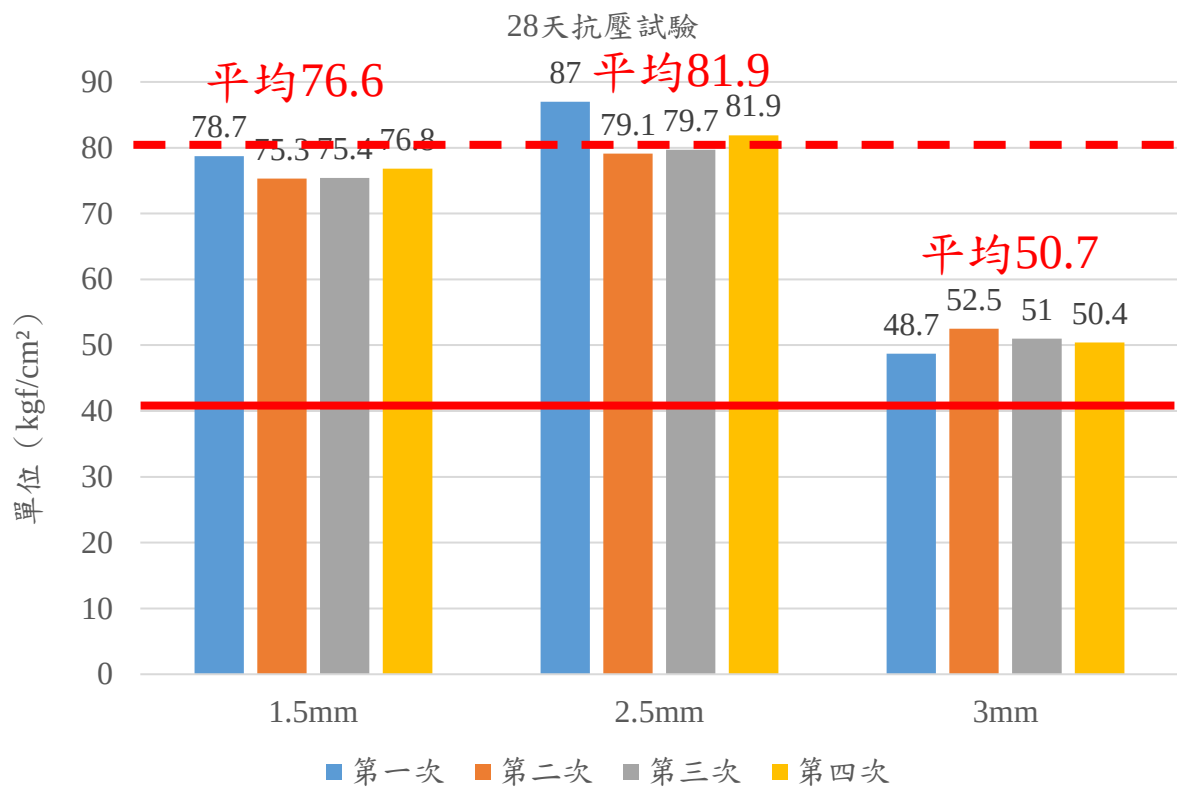


圖 4.8 水灰比 0.9 之 28 天抗壓強度試驗直方圖

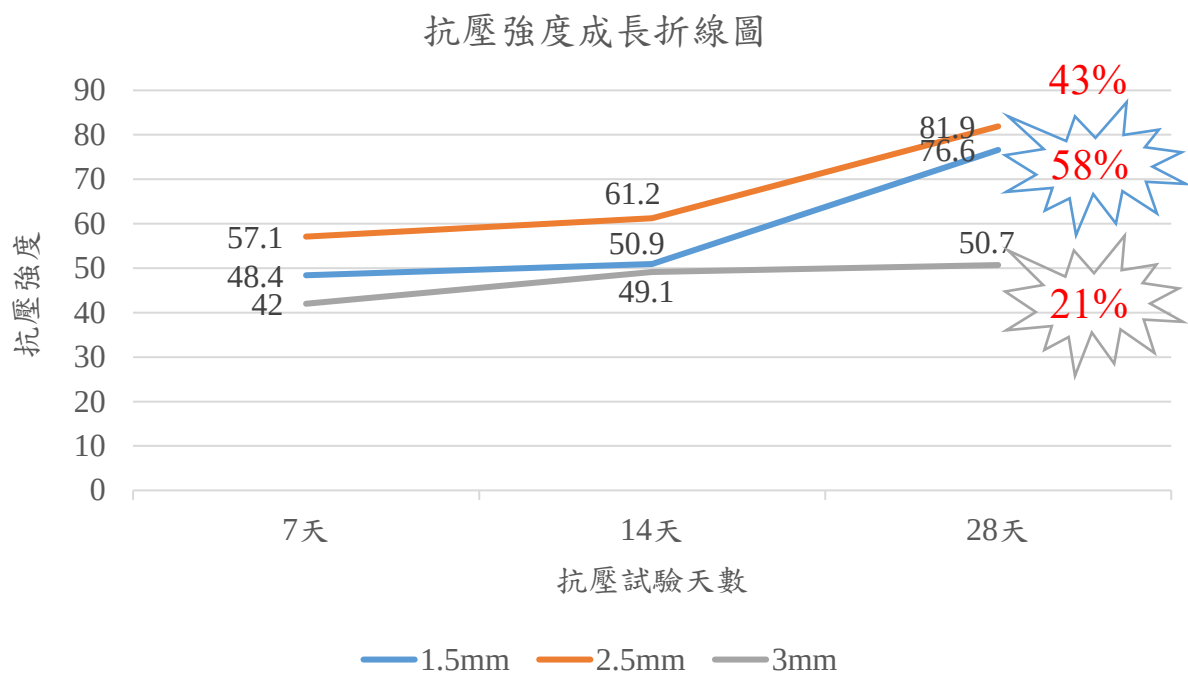


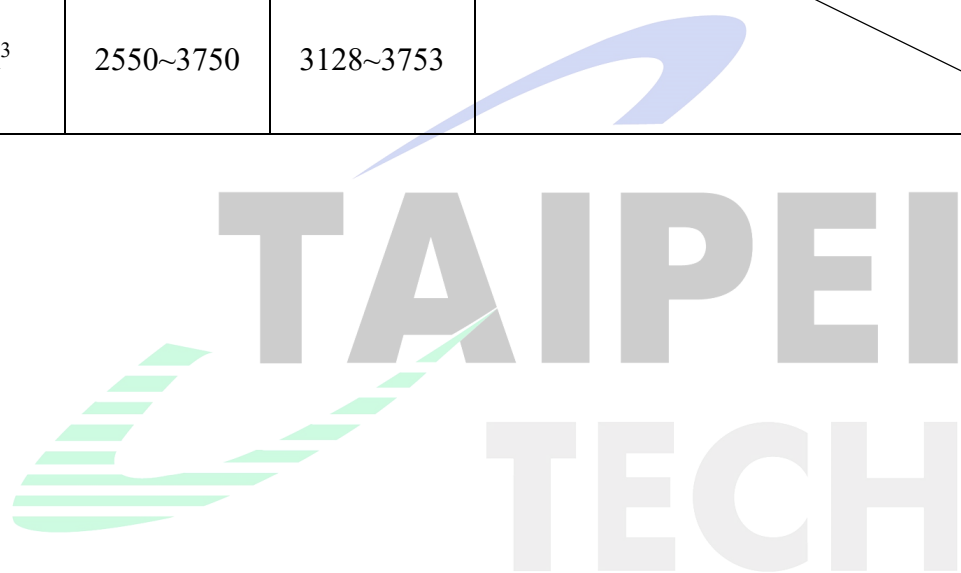
圖 4.9 28 天抗壓強度成長折線圖

4.5 成本比較

本研究主要係針對不同粒徑大小之泡棉顆粒、天然粒料及再生粒料進行成本的比較，其中泡棉顆粒之成本為台達化學工業股份有限公司提供，成本浮動取決於原油的價格，因苯乙烯為石油所提煉；砂、石價格為中華民國經濟部礦物局於 111 年 07 月 05 日所更新公布之 111 年 5 月份各縣市砂石產量及價格；焚化底渣再生粒料之生產成本由力優勢環保股份有限公司所提供；咖啡渣則因未有特定之生產廠商，故以現行之市價做參考。相關之價目統整，如表 4.12 所示。

表 4.12 再生粒料成本價目表

種類 價格	1.5mm 泡棉顆粒	2.5mm 泡棉顆粒	3mm 泡棉顆粒	砂	石
元/ m ³	3132~3680	1764~2073	1848~2171	407~684	383~633
種類 價格	焚化底渣 再生粒料	咖啡渣			
元/m ³	2550~3750	3128~3753			



第五章 結論與建議

5.1 結論

本研究擬透過物理性實驗將控制性低強度材料(CLSM)以水灰比 0.8 及 0.9 分別拌入三種不同粒徑之泡棉顆粒 1.5mm、2.5mm 及 3mm 之方塊試體，探討其工程性質，並探討與其他再生粒料之成本比較，所得之結論如下：

- 一、以 CLSM 水灰比 0.8 分別拌入三種不同粒徑之泡棉顆粒 1.5mm、2.5mm 及 3mm 之方塊試體，其 28 天之抗壓強度皆未符合規範值。
- 二、將三種不同粒徑大小之泡棉顆粒進行量測計算，得出 1.5mm 之泡棉顆粒密度為 0.0783、2.5mm 之泡棉顆粒密度為 0.0441 及 3mm 之泡棉顆粒密度為 0.0462。
- 三、將三種不同粒徑大小泡棉顆粒之單位重及拌入三種不同粒徑大小泡棉顆粒之方塊試體吸水率進行迴歸分析， R^2 分別為 0.8567 及 0.999，皆呈高度相關。
- 四、綜合比較三種拌合不同粒徑之方塊試體，拌合 1.5mm 及 3mm 泡棉顆粒之方塊試體於 28 天之抗壓強度皆符合規範，且成長幅度分別為最大 58%及最小 21%；拌合 2.5mm 泡棉顆粒之試體於 28 天之抗壓強度則未符合規範值，其成長幅度為 43%。
- 五、強度最高為拌入 2.5mm 泡棉顆粒之方塊試體，後續可針對此探討是否為最佳強度顆粒。
- 六、將三種不同粒徑大小之泡棉顆粒、天然粒料及再生粒料以每立方公尺進行成本的比較，其中天然粒料價格最為低廉為 383~684 元；泡棉顆粒次之，為 1764~3680 元；再者為焚化底渣再生粒料，價格為 2550~3750 元；咖啡渣價格最高為 3128~3753 元。

5.2 建議

- 一、後續可針對其他不同粒徑之泡棉顆粒拌入 CLSM 進行研究。
- 二、後續研究可針對圓柱試體進行抗壓試驗，並以泡棉顆粒之細粒料取代量進行試體之價格換算。
- 三、本實驗採用之方塊試體水灰比為 0.9，拌入 1.5mm 及 3mm 泡棉顆粒之 CLSM 於 28 天抗壓試驗符合規範值，而拌入 2.5mm 泡棉顆粒之試體則高於規範值，後續研究可針對水灰比進行調整以作探討。
- 四、因焚化再生粒料為政府管制品，需經環保局同意方能出廠，後續研究可提前向環保局申請出料，並以焚化底渣再生粒料及咖啡渣等作為實驗變數。



第六章 參考文獻

1. 林宗毅 (2015)。輕質 CLSM 路基材料工程性質之探討。中華大學碩士論文，新竹市。
2. 林家均 (2018)。無機聚合物骨材 CLSM 之開發研究。國立臺北科技大學土木工程系土木與防災碩士班碩士論文，台北市。
3. 潘昌林、鄭瑞濱，控制性低強度材料 CLSM 之工程應用，台灣營建研究院。
4. 黃柏維 (2004)。EPS 之防災應用性探討。國立臺北科技大學土木與防災技術研究所碩士論文，台北市。
5. 鄭卓仁 (2010)。地工泡棉運用於落石防護之模擬測試研究。國立臺北科技大學土木與防災研究所碩士論文，台北市。
6. 台達化學工業股份有限公司，台達發泡性聚苯乙烯之特性與應用，2020。
7. 樺正實業股份有限公司，樺正牌發泡性聚苯乙烯之介紹，2012。
8. 何泰源，EPS 輕質填土工法之特性及應用案例，中華技術季刊，第 32 卷，11 期，2006，第 22-42 頁。
9. 林利國、李文勳，「EPS 輕質填土工法之研究」，中華顧問工程司研究報告，2000。
10. 積水化成品工業株式會社，EPS 土木施工法，2010。
11. 塚本英樹等，「EPS 工法の新たな展開」，発泡スチロール土木工法開発機構，2008。
12. 鄭永欽、林利國，「道路工程的創新技術—Geofoam 回填材料」，臺灣省住都雙月刊，Vol. 136，1998。
13. 鄭永欽，「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，2000。
14. 新北市政府養護工程處，三峽區北 113 縣(0K+650)災害復建工程，2022
15. 中華民國經濟部礦務局，111 年 5 月份各縣市砂石產量及價格，2022

16. 廖洪鈞、蔡宜穎、吳思宜 (2020)。CLSM 管溝回填工法之改良研究。國立臺灣科技大學，台北市。
17. 任怡賓 (2014)。提升管線工程與路平施工整合機制之研究-以臺北市市區道路為例。國立中央大學土木工程學系碩士班碩士論文，桃園縣。
18. 曾偉原 (2016)。冷拌再生瀝青混凝土應用於管線挖掘回填層之可行性研究。國立中央大學土木工程學系碩士班碩士論文，桃園縣。
19. ACI, 1999, Pierce and Blackwell, 2003; Wu and Tsai, 2009
20. Route 23A, Jewett County, New York, Geofoam Research Center, 2000.
21. ACH Foam Technologies, "Snohomish Culvert", 2008.
22. ACH Foam Technologies, "Geofoam Projects & Case Studies", 2017.
23. Horvath, J.S. "EPS Geofoam : New Products and Marketing Trends," GFR, Vol. 13, No.6, IFIA, St. Paul, MN, pp. 22-26, 1995.
24. Aaboe, R. (2000). Evidence of EPS long term performance and durability as a light weight fill. Vegteknisk avdeling.
25. 黃景川，「臺灣第一座超輕質(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，1999。
26. 蔡曜謙 (2017)。地工泡棉 (EPS) 應用於建築物 外牆飾材之性質研究。國立臺北科技大學土木工程系土木與防災碩士班碩士論文，台北市。
27. BASF, Guidelines for use of EPS board products in building construction, Technical Bulletin E-I, Parsippany, N J, USA, 1990.
28. Horvath, J. S. (1993, February). Geofoam applications in residential construction. In National Association of Home Builders 49th Annual Convention & Exposition, Las Vegas, Nevada, USA (Vol. 20).
29. Japan Expanded Polystyrene Association(<http://www.jepsa.jp/index.html>), 2016.

30. National Road Research Laboratory (NRRL), "Expanded Polystyrene Used in Road Embankments; Design, Construction and Quality Assurance, " Form 582E, Oslo, Norway, pp. 40, 1992.
31. MacDonald, D. K. C. (2006). Thermoelectricity: an introduction to the principles. Courier Corporation.
32. Bhatti, A. Q. (2016). Application of dynamic analysis and modelling of structural concrete insulated panels (SCIP) for energy efficient buildings in seismic prone areas. Energy and Buildings, 128, 164-177.
33. Ekrami, N., Garat, A., & Fung, A. S. (2015). Thermal Analysis of Insulated Concrete Form (ICF) Walls. Energy Procedia, 75, 2150-2156.

