



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

地工泡棉(EPS)結合樓板表層材
於地坪工程之隔音性能研究

The Impact Sound Insulation Research of
EPS Combined with Floor Covering In Flooring
Engineering

研究生：蔡瑞旂

指導教授：林利國 博士

紀乃文 博士

中華民國一百一十四年六月

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 研究所 蔡瑞旂 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：

柯利明

李連錫

紀乃文

黃兆龍

指導教授：

紀乃文

柯利明

所長：

林祐正

中華民國 一百一十四 年 六 月 二十 日

摘要

關鍵詞：地工泡棉、EPS、樓板衝擊音、樓板表層材

隨著國人對居住品質重視程度的提升，噪音干擾已成為民眾選擇住宅環境時的重要考量因素，尤以集合住宅型態居多，其中又以樓板衝擊音問題更加嚴重。有別於過去僅著重於外部噪音防治，住宅內部噪音控制逐漸成為改善居住環境品質之關鍵。故本研究旨在探討地工泡棉（EPS）結合樓板表層材料之衝擊音隔音效能，藉由 EPS 材料所具備之輕質、施工便利、成本低廉、緩衝性及耐水性佳等特性，進行實驗分析其於樓板隔音應用之性能。另本研究在現地實驗以國立臺北科技大學「圖書館屋頂太陽能設備暨休憩空間整建工程」為對象，測試其隔音成效。研究結果顯示整建後樓板之降噪效果符合法規要求，最高可達 41.8 dB。研究再採模擬實驗分析不同單位重（K）值之 40 mm 厚 EPS 材料結合橡膠隔音墊、PE 隔音墊及樓板表層材料之衝擊音隔音效能，並導入線性迴歸分析，結果顯示 K 值介於 15~25 (kg/m³) 時與噪音降低值 (Δ dB) 呈正相關。單一材料中以 25K EPS 表現最佳，隔音量達 40.8 dB；在複合材料方面，25K EPS + PE 隔音墊 + 巧拼之組合可達最高隔音量 42.9 dB。研究成果可作為樓板隔音工程設計與材料選擇之參考。

ABSTRACT

Keywords: Geofoam, EPS, Floor Impact Sound, Floor Surface Material

As public awareness of residential quality continues to rise in Taiwan, noise disturbances have become a critical factor in selecting living environments. This issue is particularly prominent in multi-unit housing, where floor impact noise has become increasingly serious. Unlike the traditional emphasis on external noise control, interior noise reduction is now recognized as essential for improving living conditions. This study aims to investigate the impact sound insulation performance of expanded polystyrene (EPS) combined with various flooring surface materials. EPS was selected for its advantages, including light weight, ease of installation, cost-effectiveness, cushioning properties, and water resistance. A field experiment was conducted at National Taipei University of Technology's "Library Rooftop Solar Facility and Recreation Space Renovation Project" to assess the post-construction acoustic performance. The results showed compliance with regulatory requirements, with a maximum reduction of 41.8 dB. Additionally, a simulation experiment was performed to analyze the impact sound insulation performance of 40 mm EPS with varying densities (K-values), combined with rubber and PE insulation pads and different surface materials. A linear regression analysis indicated a positive correlation between K-values (ranging from 15 to 25) and noise reduction (Δ dB). Among single materials, 25K EPS demonstrated the best performance with a reduction of 40.8 dB. For composite materials, the combination of 25K EPS, PE insulation pad, and EVA puzzle mat achieved the highest reduction of 42.9 dB. The findings of this study may serve as a reference for the design and material selection of floor sound insulation in building construction.

致謝

感謝從大學一路使我成長至今的北科大，更由衷的感謝曾幫助過我的貴人們。能夠完成學位跟論文，本人在此獻上最大的敬意。

首先要先感謝我這兩年的最大貴人林利國教授，先透過不平凡的教學手法再到被動式的主動思考。這一路上的成長都是因為利國老師的悉心教導才能夠使我成長茁壯，也更加臨機應變。兩年來利國老師雖然喜歡透過反面對話的方式讓我們理解事情處理上的利弊，但好在我能夠耐心學習一切事務並闖出舒適圈。這些時日的教導使我受益無窮，並刻骨銘心。

接著感謝口試委員紀乃文教授、黃兆龍教授及曾惠斌教授於百忙之中抽空參與我的口試並提供寶貴的意見及建議供學生將論文更臻完善。

212 研究室大家庭是我求學時期最有記憶的一段時日，更想到當初選擇進入這個大家庭時就是因為感受到 212 的凝聚力、向心力及溫暖，即使很多學長姊已離開校園十餘年，但依舊不離不棄的幫助身為學弟妹的我們。感謝峙睿、傑鯉、曜謙、思宇、育儒、宇傑、栢瀧、婉婷、婕霖學長姐們的協助並幫我了解研究室大大小小的事物；也感謝 NICK、昀倉、依萱、玉瑩、彥伯、世明、宗翰、明坤在職班學長姊的幫忙，我們完成了身為最後一屆的閉門弟子任務並圓滿進入下一階段；最後 212 要感謝我的同窗以倩，我們兩個從碩二開始相依為命的相輔相成至今，學習如何完善老師的退休並兼任助理的職責將品管班及工地班結束，這一切開始彷彿我們才剛進入 212 一樣。

北科六年的時光也要感謝柏呈、以恩、彥廷、家育、翊呈、芝蕙、DONA、泰立、貴武、如珮、新翰、芳妃、姿儀、詩茵、語婕、宥安、佳仟伴我北漂的 6 年。

最後要感謝我最重要的家人，在一路上無怨無悔的支持我的決定，並擔任我的後盾，能夠順利畢業並無後顧之憂。

蔡瑞旂 謹誌

目錄

摘要.....	i
ABSTRACT.....	ii
致謝.....	iii
目錄.....	iv
表目錄.....	vi
圖目錄.....	viii
1 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 研究範圍與限制.....	3
1.4 方法與流程.....	3
2 第二章 文獻回顧.....	5
2.1 EPS 之概述.....	5
2.2 國內外 EPS 之相關規範.....	12
2.3 EPS 之國內外應用現況.....	17
2.3.1 EPS 之應用現況.....	17
2.3.2 EPS 應用於挪威工程.....	19
2.3.3 EPS 應用於日本工程.....	20
2.3.4 EPS 應用於美國工程.....	21
2.3.5 EPS 應用於臺灣工程.....	24
2.4 基礎聲學.....	28
2.4.1 噪音起因與管制.....	28
2.4.2 樓板衝擊音之理論分析.....	30
2.4.3 衝擊源之種類.....	31
2.5 隔音原理.....	32
2.5.1 隔音.....	32
2.5.2 吸音.....	33
2.5.3 隔音之相關法規.....	34
2.6 精湛防衝擊音隔音樓板.....	36
2.7 樓板緩衝材及表面材之隔音效能相關研究.....	37
3 第三章 研究方法.....	39
3.1 實驗計畫.....	39
3.1.1 現地實驗量測計畫.....	39
3.1.2 模擬實驗量測計畫.....	41

3.2	實驗測定架構.....	44
3.2.1	現地實驗測定架構.....	44
3.2.2	模擬實驗測定架構.....	45
3.3	實驗材料.....	47
3.4	實驗設備.....	49
3.5	實驗程序.....	52
3.5.1	現地實驗程序.....	52
3.5.2	模擬實驗程序.....	53
4	第四章 研究結果.....	54
4.1	實驗背景.....	54
4.2	現地實驗數據及隔音效能分析.....	61
4.2.1	承德陽光活力廣場樓板.....	61
4.2.2	圖書館三樓樓板.....	79
4.2.3	現地實驗量測結果分析.....	85
4.3	模擬實驗數據及隔音效能分析.....	88
4.3.1	單一材料.....	88
4.3.2	第一類複合材料.....	90
4.3.3	第二類複合材料.....	92
4.3.4	第三類複合材料.....	95
4.3.5	模擬實驗量測結果分析.....	98
4.4	EPS 單一材料分析.....	99
4.5	成本分析.....	101
4.5.1	緩衝材料及表面材料價格.....	101
4.5.2	材料隔絕 1dB 花費成本.....	102
5	第五章 結論與建議.....	106
5.1	結論.....	106
5.2	建議.....	107
	參考文獻.....	109

表目錄

表 2.1 發泡聚苯乙烯粒徑規格分類表	7
表 2.2 發泡聚苯乙烯品級分類表	8
表 2.3 工程常見材料之密度	12
表 2.4 日本 EPS 之設計規範	13
表 2.5 美國 EPS 材料設計規範	14
表 2.6 試驗項目及試驗方法	14
表 2.7 臺灣 EPS 設計規範	16
表 2.8 發泡聚苯乙烯類材料之分類	17
表 2.9 EPS 材料特性之適用工程對照	18
表 2.10 臺灣 EPS 應用於工程上之實例	26
表 2.11 環境中常見之噪音	29
表 2.12 樓板鋪設表面材與緩衝材構造規定	35
表 2.13 樓板隔音相關研究文獻彙整表	38
表 3.1 實驗變數分類表	39
表 3.2 模擬實驗變數分類表	41
表 3.3 落球試驗儀	51
表 4.1 測量音量修正表	54
表 4.2 現地實驗對象分類表	55
表 4.3 模擬實驗試體分類表	55
表 4.4 現地實驗示意圖	57
表 4.5 模擬實驗試體示意圖	58
表 4.6 落距 50cm 及鋼球 0.5kg 測得之分貝數	62
表 4.7 落距 50cm 及鋼球 0.5kg 降低之分貝數	62
表 4.8 落距 50cm 及鋼球 1kg 測得之分貝數	64
表 4.9 落距 50cm 及鋼球 1kg 降低之分貝數	64
表 4.10 落距 50cm 及鋼球 2kg 測得之分貝數	66
表 4.11 落距 50cm 及鋼球 2kg 降低之分貝數	66
表 4.12 落距 150cm 及鋼球 0.5kg 測得之分貝數	68
表 4.13 落距 150cm 及鋼球 0.5kg 降低之分貝數	68
表 4.14 落距 150cm 及鋼球 1kg 測得之分貝數	70
表 4.15 落距 150cm 及鋼球 1kg 降低之分貝數	70
表 4.16 落距 150cm 及鋼球 2kg 測得之分貝數	72
表 4.17 落距 150cm 及鋼球 2kg 降低之分貝數	72
表 4.18 落距 210cm 及鋼球 0.5kg 測得之分貝數	74

表 4.19 落距 210cm 及鋼球 0.5kg 降低之分貝數.....	74
表 4.20 落距 210cm 及鋼球 1kg 測得之分貝數.....	76
表 4.21 落距 210cm 及鋼球 1kg 降低之分貝數.....	76
表 4.22 落距 210cm 及鋼球 2kg 測得之分貝數.....	78
表 4.23 落距 210cm 及鋼球 2kg 降低之分貝數.....	78
表 4.24 落距 50cm 及鋼球 0.5kg、1kg、2kg 測得之分貝數.....	80
表 4.25 落距 50cm 及鋼球 0.5kg、1kg、2kg 降低之分貝數.....	80
表 4.26 落距 150cm 及鋼球 0.5kg、1kg、2kg 測得之分貝數.....	82
表 4.27 落距 150cm 及鋼球 0.5kg、1kg、2kg 降低之分貝數.....	82
表 4.28 落距 210cm 及鋼球 0.5kg、1kg、2kg 測得之分貝數.....	84
表 4.29 落距 210cm 及鋼球 0.5kg、1kg、2kg 降低之分貝數.....	84
表 4.30 單一材料實驗數據.....	89
表 4.31 40mm EPS 線性迴歸方程式及判定係數 R^2	90
表 4.32 第一類複合材料實驗數據.....	91
表 4.33 第二類複合材料實驗數據.....	93
表 4.34 第三類複合材料實驗數據.....	96
表 4.35 隔音效果優劣排序表.....	98
表 4.36 40mm EPS 三次多項式迴歸分析.....	100
表 4.37 緩衝材料及表面材料價格.....	101
表 4.38 試體材料之成本.....	102
表 4.39 實驗試體隔絕 1dB 之價格.....	104

圖目錄

圖 1.1 2023 年度全國環境公害陳情案件總數.....	1
圖 1.2 研究流程圖.....	4
圖 2.1 聚苯乙烯反應圖（鄭卓仁，2010）.....	6
圖 2.2 原油煉製過程及產物示意圖（英國塑膠協會，2005）.....	6
圖 2.3 樹脂塑膠顆粒（茂森商業有限公司，2014）.....	7
圖 2.4 EPS 合成樹脂塑膠預發泡（Pre-foaming）後之顆粒.....	9
圖 2.5 EPS 成型（Molding）塊體.....	10
圖 2.6 EPS 製造流程圖（林利國，2000）.....	10
圖 2.7 EPS 成型流程（黃柏維 2003）.....	11
圖 2.8 EPS 成型品後續相關作業流程圖（黃柏維 2003）.....	11
圖 2.9 北海道札幌市橋梁橋台之背填工程.....	20
圖 2.10 猶他州鹽湖城 I-15 州際公路重建工程.....	21
圖 2.11 紐約州厄特縣 23A 道路工程.....	22
圖 2.12 華盛頓州 Renton City Hall 新建工程.....	22
圖 2.13 馬里斯維爾州斯諾霍涵洞工程.....	23
圖 2.14 新奧爾良機場東西向跑道整建工程（ACH Foam Technologies，2006）.....	24
圖 2.15 臺北市中山大直橋（莊士賢，2008）.....	25
圖 2.16 洲美快速道路第二期新建工程示意圖（何泰源，2001）.....	25
圖 2.17 EPS 及雙層點焊鋼絲網.....	27
圖 2.18 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.....	27
圖 2.19 樓版衝擊音發生機制與影響音子（江哲銘 1993）.....	30
圖 2.20 精湛防衝擊音隔音樓板（興吉發科技建材有限公司，2018）.....	37
圖 3.1 現地實驗流程圖.....	40
圖 3.2 模擬實驗流程圖.....	43
圖 3.3 現地實驗測定架構示意圖.....	44
圖 3.4 圖書館三樓樓板示意圖.....	45
圖 3.5 承德陽光活力廣場樓板示意圖.....	45
圖 3.6 承德陽光活力廣場樓板結合表面材示意圖.....	45
圖 3.7 模擬實驗測定架構示意圖.....	46
圖 3.8 單一材料示意圖.....	46
圖 3.9 複合材料示意圖.....	46
圖 3.10 厚度 40mm EPS.....	47
圖 3.11 厚度 5mm 橡膠隔音墊.....	47
圖 3.12 厚度 15mm PE 隔音墊.....	48

圖 3.13 厚度 10mm 巧拼.....	48
圖 3.14 厚度 25mm 橡膠地磚.....	49
圖 3.15 落球試驗儀圖例.....	50
圖 3.16 數位式噪音計.....	52
圖 3.17 北科大圖書館三樓平面圖及承德陽光活力廣場區域.....	53
圖 4.1 落距 50cm 及鋼球 0.5kg 之隔音效果.....	63
圖 4.2 落距 50cm 及鋼球 1kg 之隔音效果.....	65
圖 4.3 落距 50cm 及鋼球 2kg 之隔音效果.....	67
圖 4.4 落距 150cm 及鋼球 0.5kg 之隔音效果.....	69
圖 4.5 落距 150cm 及鋼球 1kg 之隔音效果.....	71
圖 4.6 落距 150cm 及鋼球 2kg 之隔音效果.....	73
圖 4.7 落距 210cm 及鋼球 0.5kg 之隔音效果.....	75
圖 4.8 落距 210cm 及鋼球 1kg 之隔音效果.....	77
圖 4.9 落距 210cm 及鋼球 2kg 之隔音效果.....	79
圖 4.10 落距 50cm 及鋼球 0.5kg、1kg、2kg 之隔音效果.....	81
圖 4.11 落距 150cm 及鋼球 0.5kg、1kg、2kg 之隔音效果.....	83
圖 4.12 落距 210cm 及鋼球 0.5kg、1kg、2kg 之隔音效果.....	85
圖 4.13 落距 50cm 及鋼球 0.5kg、1kg、2kg 之隔音效果.....	86
圖 4.14 落距 150cm 及鋼球 0.5kg、1kg、2kg 之隔音效果.....	86
圖 4.15 落距 210cm 及鋼球 0.5kg、1kg、2kg 之隔音效果.....	87
圖 4.16 落距 50cm、150cm、210cm 及鋼球 0.5kg、1kg、2kg 之隔音效果.....	87
圖 4.17 單一材料隔音效果.....	89
圖 4.18 第一類複合材料隔音效果.....	91
圖 4.19 第二類複合材料隔音效果.....	94
圖 4.20 第三類複合材料隔音效.....	97
圖 4.21 40mm EPS 三次多項式迴歸分析.....	100
圖 4.22 最佳效益之單一緩衝材.....	103
圖 4.23 最佳效益之單一表面材.....	103
圖 4.24 最佳效益之試體.....	105

第一章 緒論

1.1 研究背景與動機

隨著人類文明之發展與生活型態之演進，現代社會除追求基本物質需求外，亦更加重視生活環境之品質與效能。台灣民眾在選擇居住環境時，除考量價格、空間面積與生活機能等傳統因素外，亦日益將建築之隔音性能作為購屋與居住品質之重要評估指標。有別於過往僅著重於室外交通或環境噪音之防制，現階段民眾對於建築物內部噪音，尤其是樓板衝擊音及設備運轉聲等之防治需求更為明確，期望打造舒適安寧的居家環境並提升生活品質。本研究根據我國行政院環保署 2023 年的統計資料顯示，在全年受理之公害陳情案件中，以噪音污染所占比例 35% 為最高，依此可知在人口密度日益升高之居住環境下，噪音公害問題會愈加嚴重（參考圖 1.1）。

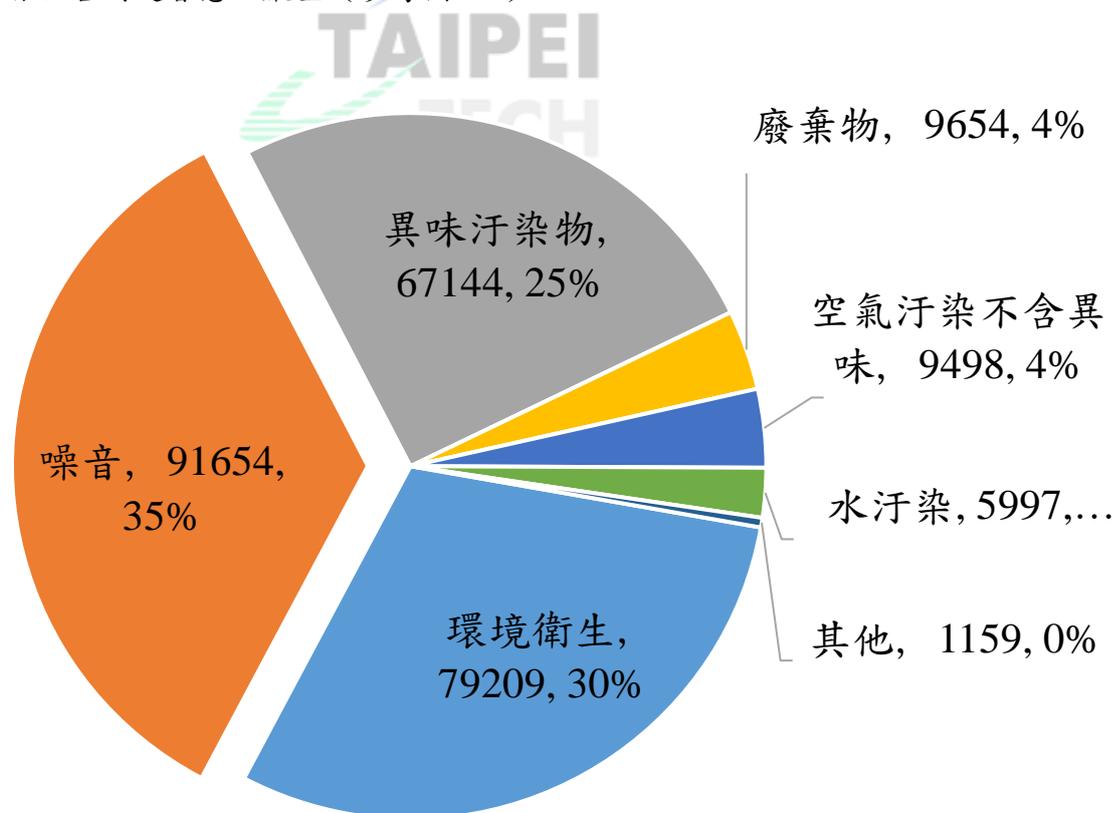


圖 1.1 2023 年度全國環境公害陳情案件總數

2018年4月11日起，我國政府因配合都市發展及建築技術提升，將「開發行為應實施環境影響評估細目及範圍認定標準」第二十六條放寬為高樓建築應實施環境影響評估之高度為一百二十公尺，且不再以使用用途及樓層數予以認定。但因居住人口高密度化之現象，使多數民眾居住於公寓、大廈等集合住宅中；因此，樓板衝擊音問題尤為顯著，亦使得居家樓板之隔音性能成為住戶普遍關注之議題。針對此一現象，台灣自2020年針對樓板之音構造規定執行《建築技術規則》相關法規，藉由規範樓板應具備之隔音標準，並鼓勵於建築構造中增設緩衝材等吸振層，作為強化隔音效能之施工對策，以創造寧靜建築改善居住品質。

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」，於完工後，並命名為「承德陽光活力廣場」，此廣場為半戶外空間，挑高平均4.3公尺，面積達270坪，可供做為展覽、社團活動、師生休憩集會使用。為了不影響下方圖書館之安寧，地板採用吸音隔震的中空樓板。開放至今，吸引北科大各大社團舉辦各類活動及成果發表，但近期遭圖書館內使用者頻頻投訴噪音過大導致各大社團不敢前往。

由此可知，透過緩衝材隔音運用已日漸受到我國營建產業之器重，雖國內樓板隔音相關研究繁多且緩衝材種類多樣，但發泡聚苯乙烯(Expanded Poly Styrene; 簡稱為EPS)結合室外裝修材實施量測隔音效能之相關研究鮮少，對此，本研究旨在探討地工泡棉(EPS)結合表面裝修材料後對樓板衝擊音之隔音性能影響。藉由EPS材料具備輕質性、成本低廉、施工快速便利、緩衝效果良好及優異耐水性等特性，進一步分析其與裝修材結合後之隔音效益；並透過實驗方式驗證不同材料組合對衝擊音的抑制效果，以期達成有效降低噪音之目標，進而提供未來建築樓板隔音設計與施工實務之參考。

1.2 研究目的

本研究主要目的將實測「承德陽光活力廣場」與原圖書館之樓板衝擊音之隔音性能測試，並增加表面材加以分析；再透過模擬實驗研究不同密度(K值)之EPS塊體結合

樓板表層材進行輕量衝擊音之隔音效能研究，並透過量測及分析，進而運用於地坪工程之樓板隔音。故本研究之執行目的如下：

- 一、探討並分析地工泡棉（EPS）於隔音減噪上之應用及效益分析。
- 二、經由現地實驗結果分析，探討將 EPS 材料在施工實務上應用於樓板隔音及增設樓板表層材料之可行性。
- 三、經由模擬實驗結果分析，探討不同樓板複合材料對於衝擊音隔音性能之表現，並依據各材料組合之實測數據進行比較與評估，以期達成有效抑制衝擊噪音之目的，進而提升室內聲環境品質，作為未來建築噪音防治規劃之參考依據。

1.3 研究範圍與限制

本研究係針對地工泡棉（EPS）結合樓板表層材之輕量衝擊音隔音性能進行研究，故本研究之範圍分別如下：

- 一、本研究以針對北科大圖書館屋頂整建工程之樓板及同於 1992 年建造使用的圖書館地上三樓樓板衝擊音隔音之差異作探討。
- 二、本研究僅針對不同密度（K 值）之 EPS 及不同隔音墊結合樓板表層材於輕量衝擊音隔音之差異作探討。
- 三、室外活動場地之地面種類眾多，故本研究僅針對常見之巧拼及橡膠地面進行探討。

1.4 方法與流程

本研究將採取下列各種研究方法進行探討以達到預期之目標：

- 一、文獻回顧法：蒐集並彙整國內外 EPS 相關之文獻與資料，並了解國內外 EPS 應用於工程之概況。

二、現地實驗法：藉由測試結果之分析與比較，探討 EPS 隔音材料單獨應用及其與樓板表層材結合後之隔音效能差異。

三、模擬實驗法：模擬不同單位重（K 值）之 EPS 材料結合橡膠隔音墊與樓板表層材之實驗設計，進一步分析其對樓板衝擊音之隔音表現。將試體數據進行比較評估，旨在釐清 EPS 材料密度變化及複合構造對樓板衝擊音隔音效果之影響，提供實務應用上之設計依據與優化建議。

本研究依據所欲達成之研究目的，配合相關的研究方法，並依圖 1.2 所示之研究流程來執行。

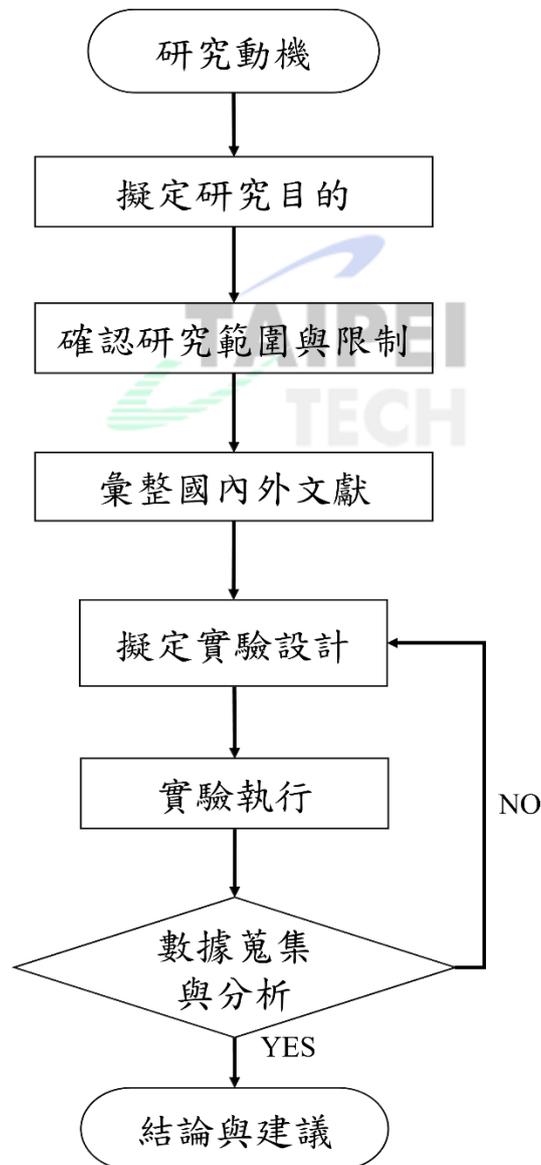


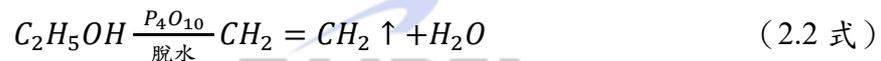
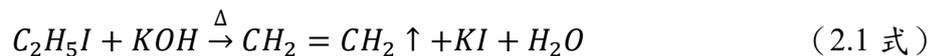
圖 1.2 研究流程圖

第二章 文獻回顧

2.1 EPS 之概述

EPS (Expanded Poly-Styrene; 簡稱為 EPS) 其正式學名為發泡性聚苯乙烯，而聚苯乙烯為一種「聚摻合」(Polyblends) 的材料，將乙烯(化學式： C_2H_4)與苯(化學式： C_6H_6)藉由聚合程序製作而成，於土木工程應用上又稱為地工泡棉 (Geofoam)。

乙烯係為烯類中最為單純且重要之分子，可由天然氣、煤氣與煉油氣中取得。並藉由碘乙烷與氫氧化鉀之酒精溶液共熱而成，其反應式如方程式 2.1 所示，或以濃硫酸、五氧化二磷使酒精脫水而製得如方程式 2.2 所示 (黃柏維，2003)。



烯類屬於不飽和之脂肪烴，含有雙鍵之碳鏈，因碳鏈上所結合之飽和烴較氫原子數多，故稱之為不飽和烴(化學式： C_nH_{2n})；烯類之沸點及熔點皆和其所對應之烷類相似，當 $n \leq 4$ 時為氣體， $n=5\sim 17$ 時為液體，而 $n \geq 17$ 時為固體。且烯類含有不飽和之雙鍵，故烯類較烷活潑，若加入另外一個小分子時易變成飽和之單鍵，此化學反應亦稱為加成反應 (Additional Reaction) (須本一郎，1989；章裕民，1995)；其中容易與氫溴酸、氯氣、溴氣及氫氣等分子合成而產生加成物。

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)，之後藉由聚合反應轉化成固體塑膠物質 (黃柏維，2003)；而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)。

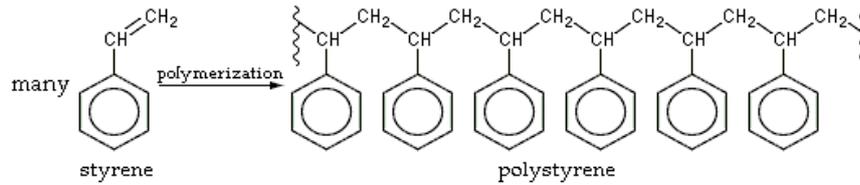


圖 2.1 聚苯乙烯反應圖 (鄭卓仁, 2010)

塑化聚合物之主要原料多由原油(Crude Oil)中提煉而成,原油經由蒸餾(Distillation)以及油氣分離(Hydrocarbon Separation)等各項過程後取得燃料、瀝青、潤滑劑、石蠟及其它衍生產品,而 EPS 即為其衍生產品之一。煉油過程中會產生超過 4000 萬種衍生性產品,而衍生性產品中 96%多為非燃料的車輛、機械用油及其他各種用途產品,且塑化物約佔煉油過程中衍生性產品的 4%,當中 EPS 的比例卻僅約 0.1% (鄭卓仁, 2010),如圖 2.2 所示,因此 EPS 為人類在煉油生產主要燃料的過程中所產生之非主要用途的副產品,若將其運用於各領域中亦可視為石油資源發揮其最大的利用價值。

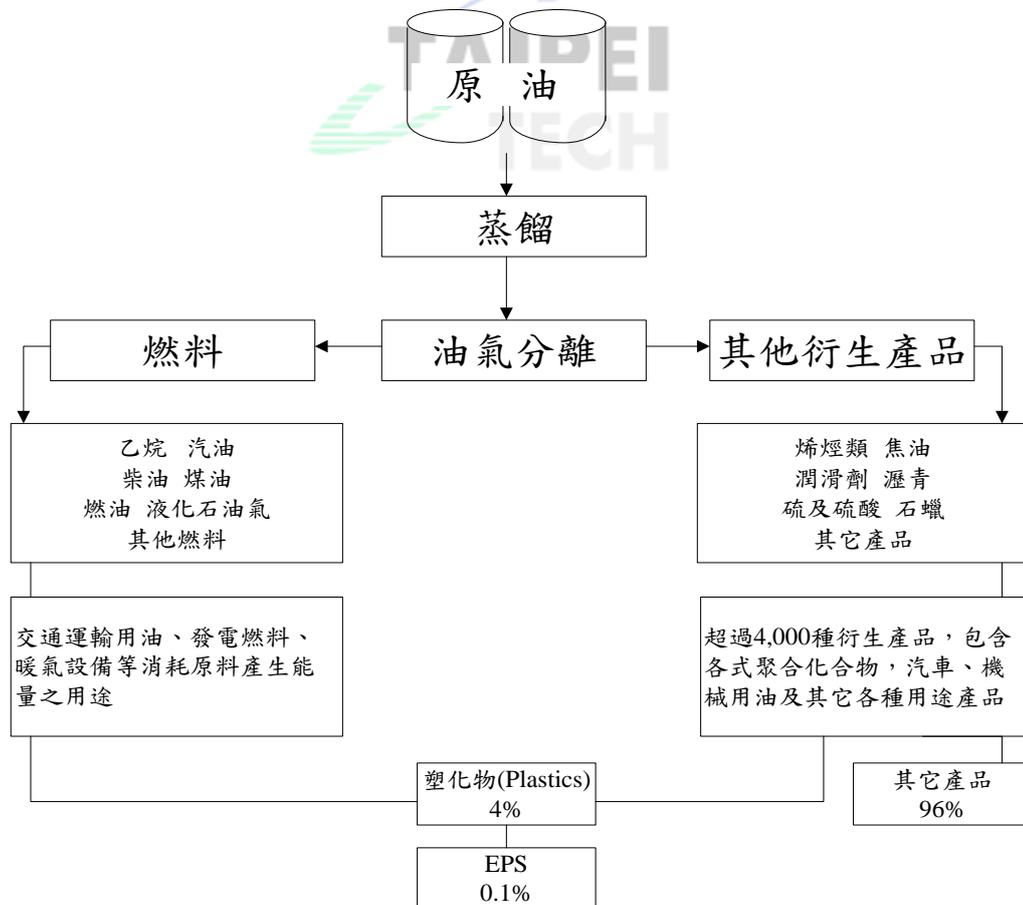


圖 2.2 原油煉製過程及產物示意圖 (英國塑膠協會, 2005)

國內多數產業已將苯乙烯作為發泡原料，透過懸浮聚合反應而產生不同粒徑大小之樹脂塑膠顆粒，並添加戊烷發泡劑使聚苯乙烯珠粒進行冷卻，藉由不同篩網過濾出各粒徑大小之 EPS 樹脂，如圖 2.3 所示，其粒徑大小分為六種規格，粒徑小則發泡倍率越小，反之粒徑大則發泡倍率越大（台達化學工業股份有限公司，2021），最高水份含量則固定，如表 2.2 所示，而國內製造商依據發泡聚苯乙烯之材料特性，將品級歸類為以下六種，並依據不同材料性廣泛應用於各領域（台達化學工業股份有限公司，2021），如表 2.3 所示。



圖 2.3 樹脂塑膠顆粒（茂森商業有限公司，2014）

表 2.1 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 2.2 發泡聚苯乙烯品級分類表

品級	特性	應用
一般級	<ul style="list-style-type: none"> ● 其加工成型所適用溫度範圍較廣。 ● 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。 	<p>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；頭盔襯等。</p>
快速成型級	<ul style="list-style-type: none"> ● 發泡粒成熟時間短，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。 	<p>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：冷凍食品包裝、保溫板及保溫管。</p>
難燃級	<ul style="list-style-type: none"> ● 具優越耐火性。 ● 其他特性與一般級相同。 	<p>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；電氣產品襯墊。</p>
非 HBCD 難燃級	<ul style="list-style-type: none"> ● 通過 SGS 測試，具優良難燃性，且不含 HBCD 之持久性有機汙染物。 ● 其他特性與難燃級相同。 	<p>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；電氣產品襯墊。</p>
抗靜電級	<ul style="list-style-type: none"> ● 成型之成品具良好抗靜電效果。 ● 其他特性與一般級相同。 	<p>保護產品，降低衝擊、撞擊之破壞，並不受空氣灰塵吸附，如：精密電子零件包裝。</p>
食品級	<ul style="list-style-type: none"> ● 成型之成品殘留苯乙烯單體含量低，符合國家衛生標準。 ● 其他特性與一般級相同。 	<p>市售相關食品之包裝，如：蛋糕盒、漁箱、杯子及盤具等。</p>

EPS 根據發泡方式的不同，可分為押出發泡平板成型 (PSP) 及發泡粒成型 (EPS) 等兩種方式：

- 一、押出發泡平板成型 (PSP)：其主要是利用聚苯乙烯添加丁烷來作為發泡劑，送入押出機發泡 10~20 倍製成 EPS 平板。材料藉由加熱真空成型至厚度 2mm~5mm 的平板，通常用於生產食品類餐具，如免洗餐具、保溫盒及生鮮托盤等 EPS 產品。
- 二、聚苯乙烯發泡粒成型 (EPS)：發泡方式又可區分為模內發泡及擠出發泡，其製程是將聚苯乙烯原料裝入加壓發泡筒後，進行加壓或加熱，等待原料達揮發狀態後即為 30~50 倍的預發泡顆粒，如圖 2.4 所示；若欲需成型則將再進行二次發泡，將預發泡泡珠送入成型鑄模內進行高壓高溫至熔點而製成成品，如圖 2.5 所示。EPS 之製造程序，如圖 2.6 所示。成品可依各項工程的不同需求進行形狀及尺寸的裁切。

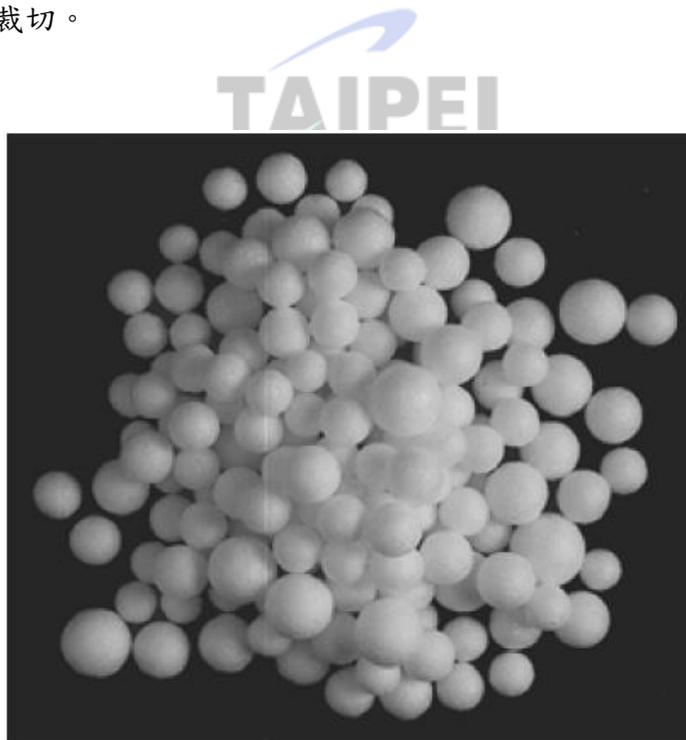


圖 2.4 EPS 合成樹脂塑膠預發泡 (Pre-foaming) 後之顆粒



圖 2.5 EPS 成型 (Molding) 塊體

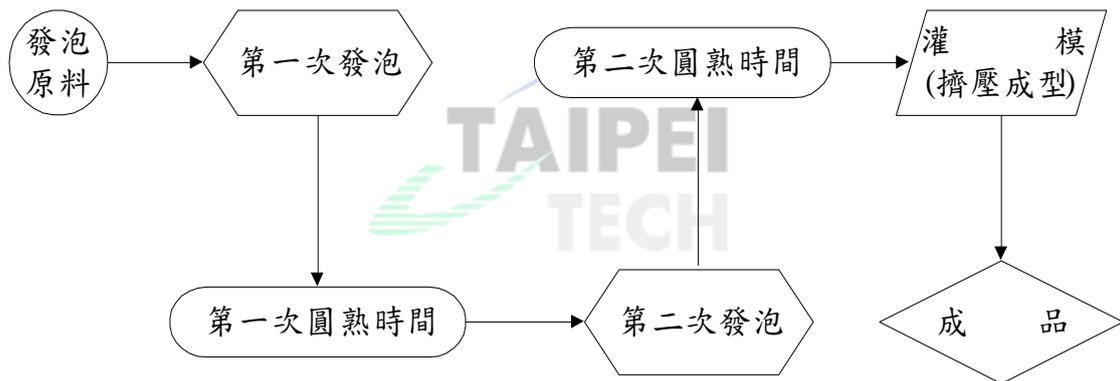


圖 2.6 EPS 製造流程圖 (林利國, 2000)

EPS 依使用需求不同，可調整發泡之倍率以控制其密度（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，以下舉例並計算說明之，當 EPS 發泡顆粒密度為 $0.025\text{g/cm}^3=25\text{kg/m}^3$ ，則發泡倍數為 $X=1000/25=40$ 倍；當 EPS 發泡顆粒密度為 $0.02\text{g/cm}^3=20\text{kg/m}^3$ ，則發泡倍數為 $X=1000/20=50$ 倍，依此類推。故發泡顆粒之發泡倍數越低時則密度越高，亦具有較佳強度（樺正實業股份有限公司，2012）。EPS 進行灌模前須將成型機模具閉模預熱，待預熱完成後，再進行第二次圓熟時所生產之 EPS 顆粒適量的由通風儲存槽中導入成型機模

具內進行灌模之步驟，待 EPS 原料均灌入成型機模具後，便透過鎖模使蒸氣加溫加壓到熔點將 EPS 原料在模具中擠壓成型。擠壓成型之成品經由適當冷卻完畢後，即進行開模與脫模，相關流程，如圖 2.7 所示。由於 EPS 顆粒在固定大小空間內被擠壓並透過蒸汽高溫而融接聚合成型，其擠壓之成型產品密度應相同。此外，若因壓力及溫度等因素而造成成型品擠壓不完全，將導致產品的邊角部份會有脫落缺角之瑕疵現象。

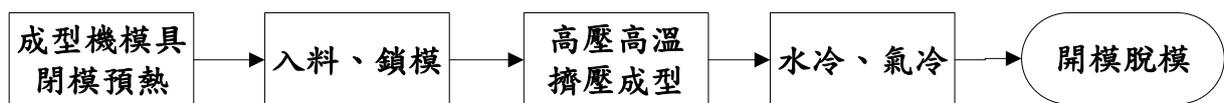


圖 2.7 EPS 成型流程（黃柏維 2003）

EPS 成型品：將脫模後之 EPS 成品靜置於通風良好的場所使其自然乾燥，並透過目測檢查 EPS 成品是否符合標準，若品質皆達到要求之標準即可依需求進行裁切、包裝、入庫及出貨等相關後續作業，相關流程，如圖 2.8 所示。

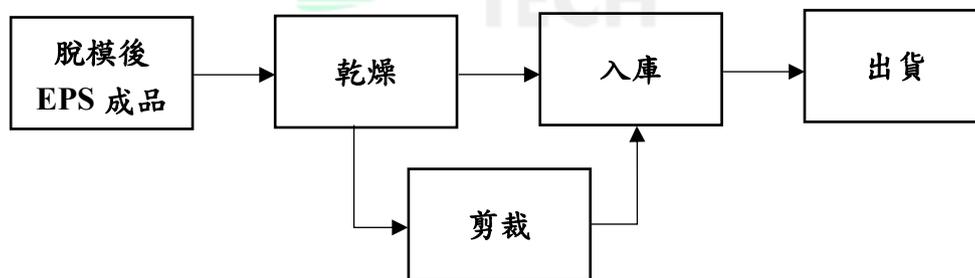


圖 2.8 EPS 成型品後續相關作業流程圖（黃柏維 2003）

EPS 的基本特性包含質量輕、經濟性、耐水性、施工便利、自立性、緩衝性、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：密度僅約一般砂土的 1/100，使較軟弱的地盤不須改良承载力即可以達到無沉陷之虞，如表 2.3 所示。

表 2.3 工程常見材料之密度

材料種類		密度 (t/m ³)
一般砂土		1.4~2.2
輕質材料	火山灰	1.2~1.6
	水淬爐渣	1.2~1.3
	煤灰	1.2~1.3
	氣泡砂漿	0.5~0.9
輕質骨材		0.35~0.8
EPS 材料		0.012~0.035

- 二、經濟性：施工期短、用地較省、挖方較少及維護修繕費用低，工程總造價經濟。
- 三、耐水性：單獨氣泡孔隙不易吸水且材質不易產生變化。
- 四、施工便利：不需透過大型機具及特殊技術，以人力即可輕便迅速施工，可解決技術工難求之窘境。
- 五、自立性：柏松比較小且自立性佳，可減少側向土壓，適用於擋土結構物之背填材料。
- 六、緩衝性：單獨氣泡體可發揮優越緩衝性，能夠減少衝擊及震動的效果。
- 七、電絕緣性：在容許的操作溫度範圍內，具有良好的電絕緣性質及抗靜電性。
- 八、隔熱隔音：EPS 的組成體積中約有 98% 為空氣，僅有 2% 為實體物質，故具有優良的隔熱隔音之效果。

2.2 國內外 EPS 之相關規範

目前國際間以日本及美國為較常使用 EPS 於土木工程中，因此將以日本及美國之設計規範進行介紹：

一、日本設計規範

日本 EPS 材料試驗方法於日本工業標準 (Japanese Industrial Standards ; 簡稱為 JIS) 中計有單位體積重量及壓縮應力等性質之相關規範 (EPS 開發機構, 2007), 如表 2.4 所示。

表 2.4 日本 EPS 之設計規範

項目	分類	單位體積重量	壓縮應力	
單位		kN/m ³	kN/m ³	
試驗方法		JIS-K7222	JIS-K7220	
製造方法	模內發泡法 (D)	D-30	0.30±0.02	180 以上
		D-25	0.25±0.015	140 以上
		D-20	0.20+0.015 / -0.01	100 以上
		D-16	0.16 ±0.01	70 以上
		D-12	0.12 +0.015 / -0.01	40 以上
	擠出發泡法 (DX)	DX-35	0.35 ±0.03	400 以上
		DX-29	0.29 ±0.02	280 以上
		DX-24H (註 1)	0.24 ±0.02	200 以上
		DX-24	0.24 ±0.02	120 以上
備註			(註 2)	
註 1：單位體積重量雖然與 DX-24 相同，但是通過改進生產方法，可以增加材料的抗壓強度。				
註 2：模內發泡法是以 10%應變時的壓應力作為品質管制時之壓應力，但是擠出發泡法在到達 10%應變時有的試體已達到屈服點，此時以屈服時的壓應力作為品質管制時之壓應力。				

二、美國設計規範：

美國在 EPS 材料試驗中，塊體須符合 ASTM C-578 所規定之型號及單位，測試其密度、抗壓強度、彎曲強度抗拉強度及吸水性等之物理性質，如表 2.5 所示。

表 2.5 美國 EPS 材料設計規範

物理性質	ASTM 測試程序	容許值		
		Type VIII	Type VII	單位
密度	D1622	196(1.25)	236(1.50)	N/m ³ (pcf)
抗壓強度	D1621	90(13)	103(15)	KN/m ³ (psi)
抗彎強度	C203	207(30)	276(40)	KN/m ³ (psi)
抗拉強度	D1623	124(18)	152(22)	KN/m ³ (psi)
吸水性	C272	3	3	小於體積%

三、臺灣、日本及美國 EPS 材料性質

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，並於表中逐項介紹其相關規範（蔡曜謙，2017）。

表 2.6 試驗項目及試驗方法

試驗項目	試驗方法	規範
單位體積重	遵循硬質發泡塑膠之密度 測定方法	JIS-K7222 ASTM-D1622 CNS2536
抗壓強度	遵循硬質發泡塑膠之壓縮 測定方法	JIS-K7220 ASTM-D1621 CNS2536
吸水特性	遵循硬質發泡塑膠之吸水 率測定方法	ASTM-C272 CNS2536

(續)

表 2.6 試驗項目及試驗方法 (續)

試驗項目	試驗方法	規範
耐熱特性	遵循燃燒試驗	JISA-9511 CNS2536
潛變特性	由日本 EPS 開發機構施作	美、日皆無規範
摩擦特性	由日本 EPS 開發機構施作	美、日皆無規範
變形係數	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
反覆壓縮特性	由日本 EPS 開發機構施作	僅日本施作試驗
耐久性	由日本 EPS 開發機構施作	僅日本施作試驗

資料來源：蔡曜謙 (2017)

台灣 EPS 土木施工法協會 (Taiwan Expanded Poly Styrene Civil Construction Method Association; 簡稱為 TEPSA) 向行政院公共工程委員會提送 EPS 土木施工法施工綱要規範，並於 2015 年 5 月 8 日通過審查，成為國內首部 EPS 應用於營建工程之正式規範，其規範 EPS 材料須符合之性質，如表 2.7 所示。(蔡曜謙，2017)

表 2.7 臺灣 EPS 設計規範

項目	實驗方法	單位	製造方法					
			模內發泡法					擠出發泡法
			D-30	D-25	D-20	D-16	D-12	DX-29
密度	CNS 2536	kg/m ³	30±2.0	25±1.5	20 +1.5/-1.0 (19.0~21.5)	16±1.0	12±1.0	29±2.0
抗壓強度 1		kgf/cm ²	0.9 以上	0.7 以上	0.5 以上	0.35 以上	0.2 以上	1.4 以上
抗壓強度 2		kgf/cm ²	1.8 以上	1.4 以上	1.0 以上	0.7 以上	0.4 以上	2.8 以上
燃燒性		難燃	難燃	難燃	難燃	難燃	—	難燃
吸水性		g/100cm ²	1.0 以下	1.0 以下	1.5 以下	1.5 以下	—	1.0 以下

註：1.參考型號 D-20 代表其密度為 20kg/m³，DX-29 亦同。

2.抗壓強度 1 為採用方塊試體進行單軸壓縮試驗於彈性範圍時之強度。

3.抗壓強度 2 為採用方塊試體進行單軸壓縮至 5%壓縮應變時之強度。

資料來源：蔡曜謙 (2017)

EPS 相關試驗方法參考中國國家標準 (CNS) 之相關規範共計有下列七項，而臺灣現行規範係以前兩項為主要準則：

- 一、CNS 2535 K3014 泡沫聚苯乙烯隔熱材料
- 二、CNS 2536 K6224 泡沫聚苯乙烯隔熱材料檢驗法
- 三、CNS 4013 K6395 聚苯乙烯成型材料檢驗法

- 四、CNS 7406 K6666 硬質泡沫塑膠尺度測定法
- 五、CNS 7407 K6667 泡沫橡膠及泡沫塑膠視密度測定法
- 六、CNS 7408 K6668 硬質泡沫塑膠抗壓強度測定法
- 七、CNS 10132 Z5124 包裝用發泡聚苯乙烯緩衝材

2.3 EPS 之國內外應用現況

2.3.1 EPS 之應用現況

發泡性聚乙烯類材料之主要類型分為三種，如表 2.8 所示，三種類型皆為發泡性之聚合材料，亦具有熱可塑性或是被融熔結合成型，且具有良好的封閉蜂窩空隙結構。EPS, EPE, EPO 皆可經由蒸汽式自動化模具成型機加工而製成眾多不同種類之模具成型產品，製成後的成型產品之特性為質量輕、抗震性佳、自立性高、保溫性及降低性。

表 2.8 發泡聚乙烯類材料之分類

英文名稱	縮寫	中文名稱	俗稱
Expanded Poly-Styrene	EPS	發泡聚苯乙烯	保麗龍
Expanded Poly-ethylene	EPE	發泡聚乙烯	伊比龍
Expanded Piocelan	EPO	發泡乙烯聚合物	匹歐龍

資料來源：中華民國保麗龍回收再生協會（1995）

目前國內對於發泡聚苯乙烯材料之應用，主要用途為保溫、防震、隔熱、隔音、輕質及填充材料等之項目（林利國，1998），其中又以食品包裝及防撞填充材料等占為大宗，而作為土木工程之用途則較少；國內將 EPS 應用於工程中，大多為民生工業，而在土木工程中較常見之應用如下（黃柏維，2003）。

- 一、包覆材料：保溫、防震及防衝擊。

二、模板製造：通常應用於圓形、半圓形及拱形等特殊之形狀模板，以作為傳統木模或鋼模的替代品，具有施工快速且簡便之優點，但此材料之側向抵抗力較差，於澆置混凝土時易產生爆模等情形。

三、輕質混凝土：將 EPS 顆粒與混凝土拌合，可應用於輕質隔間牆以減少載重，亦有隔音之效果，但目前其拌合技術及力學強度為發展之瓶頸。

四、造型材料：裝修上的景觀造型及娛樂用途的衝浪板等應用。

五、地基回填材料及伸縮縫材料。

EPS 經由發泡及聚合等生產過程後，即可製成塊狀成品，而 EPS 具有輕質化且高空隙率亦具強度的材料，在工程應用上可作為道路、橋樑、堤防、停車場或擋土牆等結構體之填土材料，進而達到減少土壤垂直壓力或側向壓力之功能，以避免建物結構體產生壓密沉陷及側向位移；國際間於大地工程中又將 EPS 稱為「地工泡棉」(Geofoam)，採用 EPS 取代土壤所進行的施工方法，此工法稱為「EPS 輕質填土工法」(The EPS Embankment Method)；美國及日本等國家亦於西元 1980 年代陸續使用並逐漸普及化 (Miki, 1996)；由於 EPS 材料在傳統應用當中使用於包裝用途而俗稱發泡塑脂或保麗龍材料，因此 EPS 輕質填土工法可稱作是一種「舊材料新工法」(林利國, 1996)；國外學者針對 EPS 特有的五項性質，分別為：低密度性、可壓縮性、絕緣性、阻尼性及凝聚性在工程應用之合適性 (Ahmed Fouad Elragi, 2006)，如表 2.9 所示：

表 2.9 EPS 材料特性之適用工程對照

應用	密度	壓縮	阻尼	絕緣	凝聚
邊坡穩定	●		●		●
堤防工程	●		●	●	●
橋梁接續	●		●	●	●

(續)

表 2.9 EPS 材料特性之適用工程對照 (續)

應用	密度	壓縮	阻尼	絕緣	凝聚
擋土結構	●	●	●	●	●
橋墩	●	●	●		●
地下管道		●	●	●	
防洪壩堤	●				●
景觀建築	●				●
露天廣場	●				●
地下絕緣				●	
鐵路			●		●

註：●代表適合

2.3.2 EPS 應用於挪威工程

EPS 的發明可追溯至 1950 年，而最早於 1960 年斯堪地那維亞國家將此材料應用於地下層作為房屋的絕緣基礎，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 EPS 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較軟弱的地盤，每年將產生高達 10cm 的地盤沉陷，因此以 EPS 塊體取代橋台之背填土且成功應用。

1972 年至 1991 年之間，挪威於道路工程中使用 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 之應用；EPS 應用已長達 40 餘年，根據長年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相較傳統工法低，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

之研究在國際間仍位居領先地位，目前世界各國普遍採用 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）。

2.3.3 EPS 應用於日本工程

日本為目前世界最為普遍採用 EPS 施工方法的國家之一，因 EPS 有自立性佳之特質，容易於陡峭且嚴峻山區上建設路基，其主要原因為日本之軟土地基甚多，且日本位於地震頻繁之板塊交界處，配合 EPS 工法已趨於成熟，故利用其良好自立性，於山區之陡坡上建設路基發揮 EPS 工法專長，使 EPS 之耐震得到充分利用。

日本同步引進 EPS 材料與相關工法之觀念；1985 年 8 月日本於境內首次將 EPS 工法運用於北海道札幌市橋梁橋台的背填工程，作為地層下沉之對策（積水化成品工業株式會社，2010）如圖 2.9 所示。EPS 於營建工程界應用已超過 50 年之歷史，而在日本透過累積超過 30 年之工程經驗（塚本英樹等，2008），日本已超過 6,000 餘件工程案例應用 EPS 工法，EPS 總量突破 800 萬立方公尺，每年更持續增加至少 20 萬立方公尺。日本為了推廣該材料及相關工法，於 1986 年召集了相關產業的產官學合作，並共同設立了「EPS 施工法發展組織」（EPS Construction Method Development Organization），進行 EPS 材料試驗、研發與推廣等。



圖 2.9 北海道札幌市橋梁橋台之背填工程

2.3.4 EPS 應用於美國工程

美國於 1974 年於密西根州附近的一座鋼構橋樑工程中初次使用 EPS 作為回填材料，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原始橋高出 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，因此必須考慮其它替代材料解決，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，此工程總長度約為 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，透過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 2.10 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）。

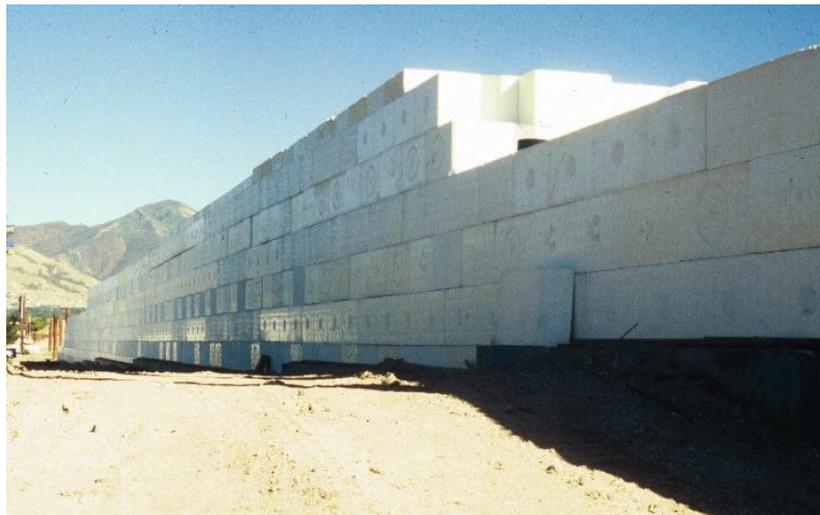


圖 2.10 猶他州鹽湖城 I-15 州際公路重建工程

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 年間其位移量總計達到 8 英寸；為解決此問題，於 1995 年開始進行坡地穩定改善工程，當時工程使用之 EPS 回填材料總計為 2,800 立方公尺，如圖 2.11 所示（Geofoam Research Center，2000），以減輕原有地層易於滑動之問題，並達到施工迅速及節省工期之效果。



圖 2.11 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及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 英尺深的可壓縮之泥煤，總計約 34 英尺深之軟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 進行填方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 2.12 所示（Geofoam Research Center，2000）。



圖 2.12 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，為避免該區域排水主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以達到保護作用，此工程總計使用 1,883 立方公尺之 EPS 塊體為，如圖 2.13 所示 (ACH Foam Technologies, 2008)。



圖 2.13 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：此工程主要目的之一為拆除現有路面及整修損壞之跑道，並重新澆置新的混凝土鋪面；整修過程中，施工單位發現跑道下方土壤有不均勻沉陷，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遭破壞的現有跑道下方進行填土，並且避免了新舊跑道間產生不均勻的沉陷。此工程較特殊的是，機場跑道原有的地下土壤中充滿了樹枝和樹根，也因此產生許多的白蟻，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 2.14 所示。



圖 2.14 新奧爾良機場東西向跑道整建工程（ACH Foam Technologies，2006）

2.3.5 EPS 應用於臺灣工程

根據文獻調查，國內目前將 EPS 應用於土木工程上之數量屈指可數，且大多用於食品及電子產品的保溫、防震、隔熱及輕質填充材料等用途。

臺灣將 EPS 應用於工程案例最早要追溯到 1995 年，臺灣省公路局於西部濱海公路建造試驗堤一處，此工程使用密度為 25kg/m^3 之 EPS 塊體，並搭配 10cm 之 RC 板及 H 型鋼側牆，成功搭建一座長 30 公尺，寬 3 公尺，高 1.5 公尺之試驗路堤，於當年 12 月完工並通車至今，期間皆無發生任何損壞（黃景川，1999）；此工程總工期為 10 天，若扣除天候及其他因素之影響，則實際施工為 6 天，符合規劃施工進度（黃景川，1999）。

臺灣省交通處公路局第二區工程處於 1999 年時進行梨山地滑整治計畫之台七甲線 72K+500 公路復舊工程中，此工程所使用之 EPS 塊體總計為 4,740 立方公尺以改善地滑之缺失，可惜該年 9 月時因 921 大地震，使得原先計畫路段之地形發生重大改變，故此計畫因而暫停進行（林利國等，2000）。

臺北市中山大直橋於 1999 年 10 月進行改建工程，如圖 2.15 所示；此座橋梁為全世界第一座釣竿式斜張橋並將 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，分三層進行長為 29.92 公尺，寬 20.4 公尺，

高 4 公尺之回填，此工程總計使用 2,440 立方公尺之 EPS 塊體，總重量與傳統重 2,300kg/m³ 之土方回填相比較，減輕約 555 噸之重量（黃柏維，2003）。



圖 2.15 臺北市中山大直橋（莊士賢，2008）

臺灣首次大規模使用 EPS 工法之工程為 2002 年「臺北市洲美快速道路第二期新建工程」，此工程所使用之 EPS 塊體總計為 12,105 立方公尺，如圖 2.16 所示；EPS 材料採用 D-20（模內發泡法），密度為 20kg/m³，抗壓強度為 1.0kgf/cm² 以上。施工範圍跨越基隆河段、洲美堤防段及磺港溪至大業路第三路段之洲美堤防段。此工程因土壤壓密沉陷量過大須使用 EPS 塊體作為與橋梁共構堤防之填築材料，以解決土壤壓密沉陷量過大、橋梁基樁長期承受龐大之覆土載重及不平衡之側向土壓力等問題。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）。

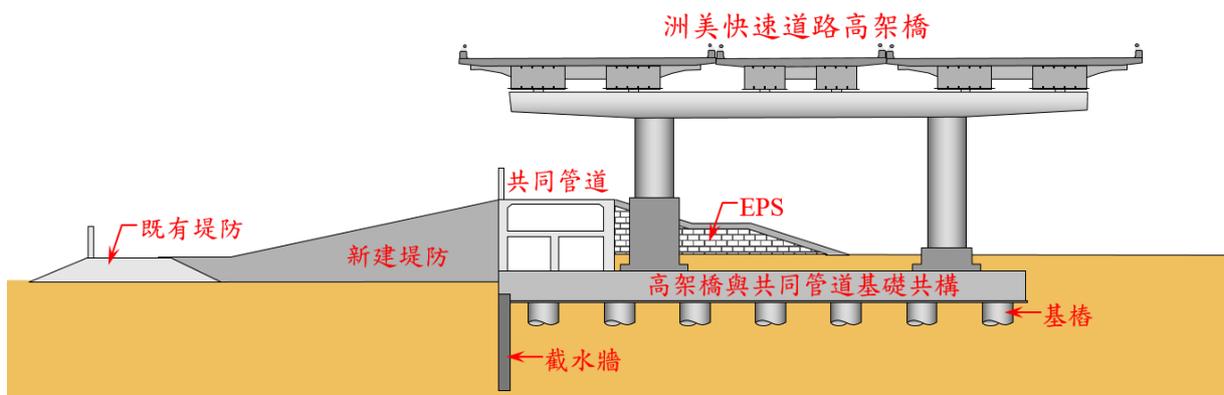


圖 2.16 洲美快速道路第二期新建工程示意圖（何泰源，2001）

除了上述兩項較初期的代表工程外，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、台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 2.10 所示。

表 2.10 臺灣 EPS 應用於工程上之實例

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

本研究案例國立臺北科技大學於 2020 年 12 月底完工的「圖書館屋頂太陽能設備暨休憩空間整建工程」，此工程主要為提升綠色能源使用，並達到綠色能源教學作用，協助校內師生了解太陽能光電運作。因施作區域為圖書館頂樓，為不影響圖書館安寧，地板採用吸音隔震的 EPS 工法施工，其吸音隔熱工法為使用厚度 4cm 之 EPS，密度為 15kg/m³，並使用 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，且在最下層鋪設 1.5cm PE 吸音層如圖 2.17 及圖 2.18 所示，最後進行水泥砂漿澆置抗壓層。此工程總金額達 1795 萬，其中吸音隔熱工程占 276 萬。

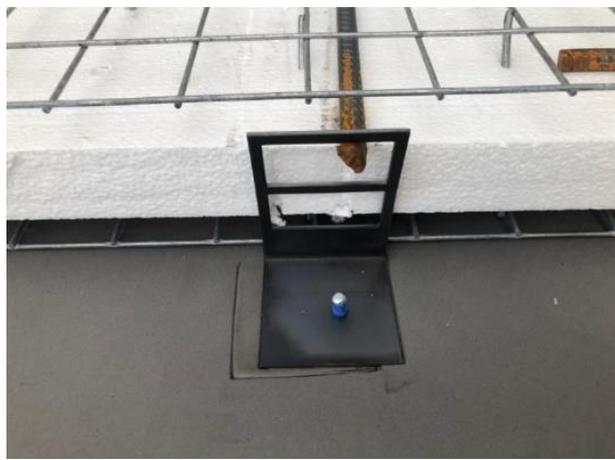


圖 2.17 EPS 及雙層點焊鋼絲網



圖 2.18 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

2.4 基礎聲學

2.4.1 噪音起因與管制

聲音之產生係為空氣粒子於靜態大氣壓力環境中，因受到振動而引起之波動所致。此種波動即聲波，經由不同種類的傳播介質（如氣體、液體及固體）以不同速率進行傳遞，最終以特定速度傳達至人耳，形成聽覺反應。若此類聲音超出人們可接受之範圍或引起不適感，即稱為噪音。例如，交通運輸工具（如汽車、機車、火車、飛機等）及機械設備在運轉時所產生的聲響皆屬此類。隨著國內都市化發展迅速，噪音問題逐漸成為造成生活環境品質下降的重要因素之一，其產生原因分述如下。(蔡國隆、王國賢、涂聰賢，2008)：

- 一、建築外噪音：此類噪音目前我國政府已有實施相關法規進行管制，如：《噪音管制法》、《噪音管制標準》及《噪音管制法施行細則》等，涵蓋範圍包含交通運輸、航空活動、營業場所、工廠作業、集會活動、鐵路運行、娛樂場所以及營建施工等多種噪音來源，藉此建立噪音防治法制基礎，以維護民眾生活環境品質。
- 二、建築內噪音：包括室內裝修工程、演奏樂器或高聲演唱、音響及擴音設備使用、飼養寵物、運動器材與娛樂設施操作、空氣調節設備運轉、家用機械設備（如洗衣機、吸塵器）以及給排水系統所引發之振動聲響等，造成鄰房之噪音汙染，且嚴重造成社區噪音，此現象可稱為「近鄰噪音」。

噪音的定義往往具有高度的主觀性，因為個人對聲音的感受與接受程度差異頗大，而此種主觀感受通常難以僅用客觀數值進行表示，因此各國在噪音定義上存有差異。例如美國職業安全衛生署（OSHA）將噪音定義為「足以造成聽覺損傷的聲音」；日本則於相關法規中定義為「能引發生理障礙、妨礙人際交談，或聲音過大而不具悅耳音色者稱

之為噪音」；我國環境保護署則在噪音管制法中規範為「凡超出規定管制標準之聲音皆視為噪音」

一般而言，人耳可感知之音量範圍約介於 0 至 140 dB 之間。然而，噪音標準的設定卻因人而異，個體感受並不一致。若從相關研究與數據分析顯示，一般情況下當聲音音量低於 50 dB 時，通常人們會感到較為舒適；當音量介於 50 至 70 dB 之間時，則可能引起輕微不適感；若長時間暴露於音量超過 70 dB 的環境中，將易使人產生焦慮與不安的情緒，甚至可能誘發生理或心理相關症狀。下表列示出一般環境中常見之噪音類型與相對應音量範圍，如表 2.11 所示。

表 2.11 環境中常見之噪音

分貝 (dB)	環境中噪音
10~20	時鐘滴答聲
20~40	樹林風吹
30~60	冷氣聲 (低頻)
60~70	聚眾高歌
70~80	裝潢施工
70~90	擴音設備
70~110	民俗噪音
80~110	營建工地
110~130	飛機起降
140	飛機引擎聲

資料來源：行政院環保署，2021

國內現行噪音管制標準主要係依據行政院環境保護署根據《噪音管制法》所訂定之相關規範。依該法規定，管制區域劃分為四種類型，分別為工廠噪音管制區、娛樂及營

業場所噪音管制區、營建工程噪音管制區及擴音設施噪音管制區，並依照日間、晚間及夜間三個時段訂定各自的噪音管制標準。其中，日間最高允許噪音值範圍為 55 dB 至 75 dB，夜間則介於 45 dB 至 65 dB。此外，依據《噪音管制區劃定作業準則》第 6 條之規範，於進行噪音測量時，感測器（聲音感應器）應設置於距離地面 120 至 150 cm 之間，並應選擇受其他噪音干擾較低之區域進行量測，同時應與周遭建築物外牆保持至少 100 cm 之距離（行政院環境保護署，2013）。

2.4.2 樓板衝擊音之理論分析

日常生活行為中，如步行、跑跳及家具移動等動作，皆會對建築物的樓板結構造成一定程度的衝擊，並進而產生所謂的「樓板衝擊音」。此類衝擊音乃是由樓板在受到外力衝擊後產生的結構振動，並以聲波的形式向下方空間放射所形成，其傳播途徑為固體結構內部振動轉化為空氣傳播的過程。綜合相關研究文獻顯示，樓板衝擊音的生成機制可歸納為三項主要因素，包括衝擊源的特性、樓板結構的振動反應特性以及樓板振動後的音響放射特性等，如圖 2.19 所示。（江哲銘，1993）

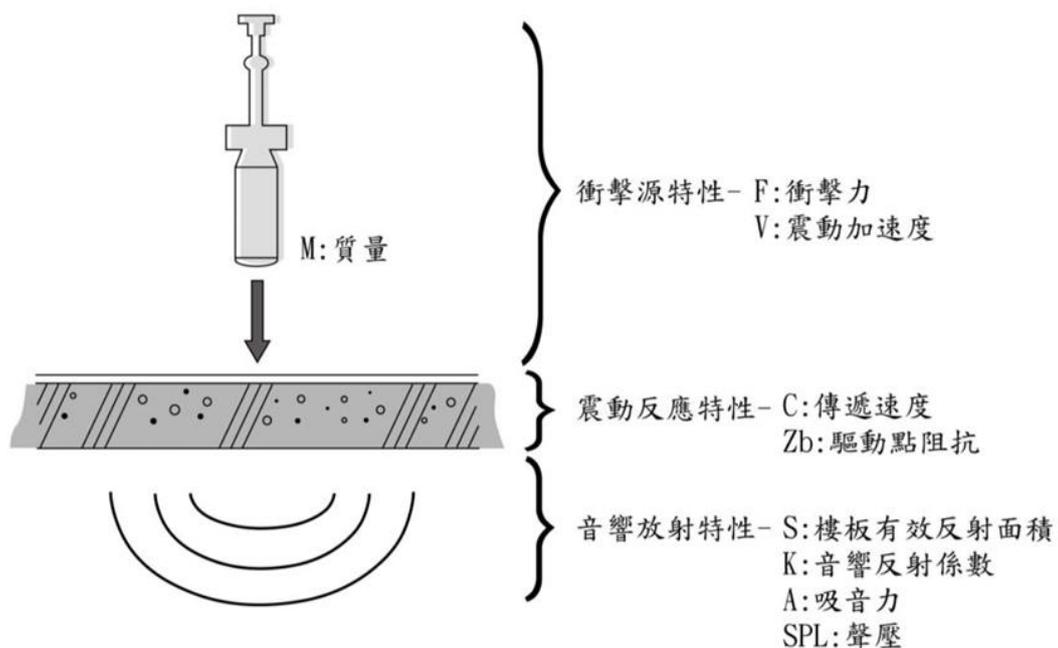


圖 2.19 樓版衝擊音發生機制與影響音子（江哲銘 1993）

因此該三者間之關係式如(2.1)式所示：

$$L = [20\log F + 10\log n] + [10kT_{60} - 10\log \rho^2 h^3] - [10\log A - 96] \quad (2.3 \text{ 式})$$

式中代數定義如下：

L：樓板衝擊音聲壓位準(dB)。

F：衝擊力(N)。

n：每秒衝擊次數。

k：音響放射係數。

ρ ：樓板密度(kg/m³)。

h：樓板厚度(m)。

A：吸音面積(m²)。

T₆₀：樓板振動衰退時間(sec)。

其中 $[20\log F + 10\log n]$ 代表樓板衝擊源特性， $[10kT_{60} - 10\log \rho^2 h^3]$ 為樓板振動反應特性， $[10\log A - 96]$ 代表室內音響放射特性。

2.4.3 衝擊源之種類

根據相關文獻的研究指出，國際上在進行樓板衝擊音量測實驗時，普遍採用之衝擊源可分為輕量衝擊源與重量衝擊源兩類。其中，輕量衝擊源之特性較接近日常生活中物品掉落、家具移動或穿著高跟鞋行走時所產生之噪音；而重量衝擊源則近似於兒童奔跑、成人跳躍以及大型物體掉落等具較大動能之聲響（羅武銘，1991）。此外，國際上常用之重量衝擊源尚包括車輛輪胎、人員行走、衝擊試驗槌、衝擊試驗球、沙袋及金屬球等工具，用以模擬各種真實情境下的樓板衝擊音產生過程（謝宛均，2005）。

2.5 隔音原理

隔音之主要原理係透過具備有效隔音性能之材料，以阻斷或降低聲波傳遞至接收者之途徑，進而達到降低接收端音量之目的。此外，隔音措施亦可透過將隔音材料直接包覆於噪音源周圍進行聲波阻隔，惟此類材料需具備質地緻密堅硬之特性，以利於將聲波反射回聲源處。然而，經由反射作用返回之聲波可能導致其他區域聲音增強，因此實務上往往須輔以具有吸音性能之材料，以吸收反射聲波並進一步降低整體噪音強度。

2.5.1 隔音

在噪音控制的實務應用中，直接由噪音源本身進行管制或降低噪音強度往往具有較高的困難性，因此可透過針對聲音傳播途徑採取相應措施以降低音量。整體而言，係利用特定材料（如結構、系統及構件）之緻密堅硬特性，阻斷或減緩噪音於傳播過程中的傳遞途徑，從而有效降低通過材料之聲波能量，此種方式即稱之為隔音（Soundproof）（盧博堅、劉嘉俊，2011）。其中，隔音材料之使用為噪音控制領域中最普遍且效果顯著的方法之一。而隔音材料之特性主要可進一步細分如下(行政院環保署，2021)：

- 一、空氣音隔音：空氣音主要透過空氣作為傳遞介質，聲波於空氣介質中進行震動傳播，並透過材料之透射特性進入相鄰空間。因此，可於環境及建築內部之構件間加裝適當的隔音材料，以達到有效阻隔兩空間之間的空氣音噪音傳播。然而，由於隔音材料可能將部分聲波反射回原音源空間，導致音源側的音量增加，間接降低隔音材料之整體效果。針對此現象，若能在隔音材料面向聲源處附加吸音材料，便可有效吸收反射之聲波，進而提高隔音效能。此種作法即形成以隔音材料為主、吸音材料為輔的整合型聲學處理措施。
- 二、衝擊音隔音：衝擊音係指以固體作為傳播介質，因物體或人體之碰撞、振動所引發，透過建築物之構造振動傳播至其他空間，尤常見於樓板或垂直空間之噪音問題。針對此類噪音，可於聲音傳播的源頭端進行隔振處理，例如於地板或

樓板結構內添加具緩衝性能的材料，以有效降低因衝擊所產生的聲波能量之傳遞，達成改善垂直空間中衝擊音問題的效果。

2.5.2 吸音

當聲波入射於障礙物時，其傳播途徑可分為三種形式，分別為反射、穿透與吸收。為有效降低空間中之音能，通常可透過材料本身之內部結構所產生之振動與摩擦作用，將聲波能量轉換為熱能進行消散，以達到聲能減少之目的，進而改善空間內聲學環境品質，而吸音材料主要可分為以下三種類型(內政部建築研究所，2005)：

一、多孔吸音材料：多孔吸音材料內部具有大量微小且相互連通之孔隙結構，當聲波入射至此類材料表面時，聲波透過孔隙進入材料內部，於微觀孔隙之間產生空氣分子的振動現象。由於空氣分子與孔壁間存在黏滯阻力，此摩擦作用及熱傳導效應可有效地將聲能轉化為熱能進行消散，達成吸音目的。常見的多孔吸音材料包括礦棉（岩棉）、玻璃棉及泡棉（如發泡聚苯乙烯，EPS）等。多孔吸音材料之吸音性能，主要受到下列幾項因素影響：

1. 材料流阻特性：材料流阻主要受到空氣流動速度、空氣之黏滯性以及材料或結構的厚度與密度等因素影響。若能將吸音材料或吸音結構之流阻控制於適當範圍內，材料之吸音效果將隨流阻的增加而提高。反之，過大的流阻將可能對通風系統及相關結構的正常運作產生負面影響，因此，在進行吸音材料設計時必須適當兼顧流阻特性。
2. 孔隙率：孔隙率（Porosity）係指材料內部孔隙的空氣體積占整體材料體積之百分比。一般常用的多孔吸音材料之孔隙率多達 70% 以上，某些高效材料更可達 90% 左右。此外，材料孔隙之大小及其分佈亦會顯著影響吸音性能，孔隙宜愈細小且分佈愈均勻，材料內總體表面積將顯著提升，有助於聲能的有效吸收。

3. 材料厚度：對同一多孔材料而言，在密度不變的情形下，材料厚度與聲波頻率之乘積將共同決定其吸音性能。理論上，增加材料厚度能提升吸音效果；但當材料厚度增加至一定程度後，因厚度引起的吸音效能提升幅度將逐漸趨緩甚至不再明顯。因此，需依實際情況選擇適當厚度之材料，以達成最佳吸音效益。
4. 材料密度：材料密度係指單位體積內吸音材料的質量，單位通常以 kg/m^3 表示。當多孔吸音材料密度提升時，通常能提供較佳的隔音性能，但密度若超過一定範圍後，則會導致吸音效能反而下降。故實務上需根據具體材料特性及用途，將密度控制於最佳之範圍內，以獲得最佳之吸音效果。

二、嵌板吸音材：嵌板吸音材料主要是利用具備一定彈性之薄膜或連續嵌板作為吸音主體，並於其背面預留適當空氣層或填充多孔吸音材料，以有效將入射之聲能轉換成板材的振動能量，進而透過內部摩擦作用消耗聲能。常見之嵌板吸音材料包括合板、石膏板、岩棉成型板及帆布等。

三、共鳴吸音材：共鳴吸音材料又稱空腔共振吸音材料，其原理係透過材料內部空腔結構產生共振現象，使空氣於狹窄開口處因共振效應產生摩擦作用，以有效吸收聲波能量。常見之共鳴吸音材料有開孔空心磚等建築材料。

2.5.3 隔音之相關法規

我國針對《噪音管制區劃定作業準則》，係根據行政院環境保護署依《噪音管制法》第 7 條第 1 項之規定所訂定；並據此擬定「噪音管制區劃定作業準則」，此準則於第 6 條中明確規範普通地區環境音之標準值與相關量測方法。其中，住宅區於都市計畫內被劃分為第一、第二、第三及第四類管制區，而都市化建築密度較高之區域，其環境噪音容許度相對提高。此標準明訂日間噪音容許值介於 55 dB 至 75 dB 之間，夜間則介於 45 dB 至 65 dB 之間，無論日夜間，最大與最小容許值之差距皆達 20 dB。於噪音量測時，聲音感測器應安裝於離地面 120 cm 至 150 cm 間之高度，且應選擇不受交通噪音干擾且

具代表性之測量地點進行測定，另需注意測量位置應距離建築物外牆牆面線 100 cm 以上。(行政院環境保護署，2009)。

國內目前建築相關法規而言，針對建築隔音或防音措施之規範尚屬較為不足。現行之相關規定主要集中於《建築技術規則》建築設計施工篇第二章「一般設計通則」之第九節「防音」規定內。其中，與本研究有直接關係之規範條文為第 46-6 條之規定，住宅建築中分戶樓板之衝擊音隔音構造需符合其所明列之規定之一；但如陽臺或樓板下方未設置居住空間者，則可不受此限制，如表 2.12 所示。

表 2.12 樓板鋪設表面材與緩衝材構造規定

緩衝材類型	規格條件	上層鋪設構造	表面材限制
橡膠緩衝材	厚度 $\geq 0.8\text{cm}$ ；動態剛性 $\leq 50\text{MN/m}^3$	混凝土地板 $\geq 5\text{cm}$ （須配筋）	不受限
		水泥砂漿+地磚合計厚度 $\geq 6\text{cm}$	—
	厚度 $\geq 0.5\text{cm}$ ；動態剛性 $\leq 55\text{MN/m}^3$	木質地板合計厚度 $\geq 1.2\text{cm}$	—
玻璃棉緩衝材	密度 96~120 kg/m^3 ； 厚度 $\geq 0.8\text{cm}$	木質地板合計厚度 $\geq 1.2\text{cm}$	—
玻璃棉及岩棉緩衝材	玻璃棉密度 96~120 kg/m^3 ， 岩棉密度 100~150 kg/m^3 ； 厚度 $\geq 2.5\text{cm}$	混凝土地板 $\geq 5\text{cm}$ （須配筋）	不受限
備註：上述規定適用於樓板厚度 $\geq 15\text{cm}$ （RC 樓板）或 $\geq 19\text{cm}$ （鋼承板式 RC 樓板）之構造條件下。			

資料來源：行政院內政部《建築技術規則》

根據我國國家標準（CNS）聲學 16211-4 之規定，建築構件表面材料之聲學性能通常會受到溫度變化影響，因此在進行樓板聲學性能測試時，建議將樓板表面溫度控制在 18°C 至 25°C 之間，以獲得較準確之測量結果。此外，測定樓板衝擊音時，其與背景噪音

之間差值建議應達 10 dB 以上；若此差值介於 6 至 10 dB 之間，則須依據式 2.4 進行修正，若差值低於或等於 6 dB，則須進行 1.3 dB 之修正，以對應至 6 dB 之差異標準。

$$L = 10\log (10^{L_{sb}/10} - 10^{L_b/10}) \quad (2.4 \text{ 式})$$

式中代數定義如下：

L：修正後之聲壓位準

L_{sb}：樓板衝擊音與背景噪音之混合位準

L_b：背景噪音之位準

2.6 精湛防衝擊音隔音樓板

精湛防衝擊音隔音樓板，如圖 2.20 所示（興吉發科技建材有限公司，2018），具備優化樓板衝擊音傳遞之設計，並於實務工程中廣泛應用，係依據建築技術規則第四十六條之二以及內政部營建署公告之新版規範「樓板撞擊音之構造標準」，以有效降低樓板衝擊音達 22 dB 以上，優於規範之 17 dB 降噪標準。此種樓板隔音施工法之吸音層材料為發泡聚乙烯（PE）柔韌墊材，該材料具備極佳的環保特性且 100% 不吸水，具有優良之貼合性與耐候性，於施工過程中不易破損。除此之外，該材料可透水、透氣，並可有效防止水泥之二次接觸粘合及鹼斑現象，進而避免樓板空鼓之問題發生。依據 SGS 檢驗抗壓測試報告指出，此施工方式於隔音樓板結構層（含防撞擊音柔墊層）上方施作約 3 cm 之水泥砂漿作為結構保護層，能夠承受壓縮強度比值達到一般樓地板水泥砂漿（比例 1:3）之 200 倍以上，顯示該施工法具備高度抗壓能力，足以因應建築物實際使用情況，且不易產生施工破損及品質問題。此施工方式之施作工序簡單且效率高，現場僅需將具備彈性及柔軟性之吸音材料平鋪後，再施作砂漿層即可完成樓板隔音層，過程中亦不需使用化學粘合劑，降低了施工難度及對環境之負面影響。

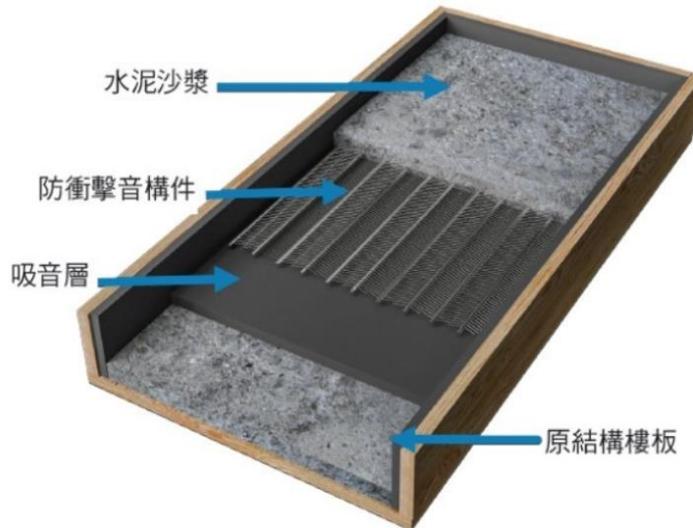


圖 2.20 精湛防衝擊音隔音樓板（興吉發科技建材有限公司，2018）

2.7 樓板緩衝材及表面材之隔音效能相關研究

透過以下相關文獻可知，影響樓板衝擊音隔音性能之主要因素可歸納為表面材料的彈性特性、緩衝層配置方式及緩衝材之物理性質等。相關研究顯示，材料之彈性係數與其衝擊音隔音能力具有高度相關性，當表面材料質地較柔軟時，有助於降低衝擊音的產生，反之則易造成聲能放大現象。此外，於樓板系統中設置緩衝層，特別是在架高地坪系統下配置具低動態剛性之緩衝材，對提升整體隔音效果具有顯著助益；其中彈簧型與發泡類緩衝材料於降低衝擊傳遞方面表現尤為優異。更有分析指出，相較於改變緩衝材密度，增加其厚度對於減緩輕量衝擊音更具成效。而部分實驗亦驗證，EPS 材料於中低頻範圍具良好隔音效果，且以塊狀構型應用於建築構造中，其整體性能優於顆粒狀形式。就成本效益面向而言，密度適中之 EPS（如 25K）不僅具備良好隔音能力，亦為目前具高度經濟性之選項，為兼顧性能與成本平衡之最佳方案，如表 2.13 所示。

表 2.13 樓板隔音相關研究文獻彙整表

謝宛均 (2003)	表面材之彈性係數為影響樓板衝擊音隔音性能之重要因素，且具高度相關性。
曾品杰 (2008)	表面材質地愈硬者，產生樓板衝擊音愈大；反之，愈柔軟之材質，衝擊音則愈小。
鍾松晉 (2010)	架高樓板底層設置緩衝材可提高整體衝擊音隔音性能，尤其以彈簧型緩衝材為佳。
孫滢翔 (2013)	地板架高能有效改善輕量樓板衝擊音；重量衝擊音在無緩衝層時可能放大。增加緩衝層厚度比降低密度更能改善輕量衝擊音。
Rasmussen (2014)	一般平鋪地板搭配聚乙烯能降低約 17dB 衝擊音；改採橡膠緩衝材或中密度纖維板構造後，降噪效能可達 20dB 以上。
柯廷衛 (2016)	發泡樹脂材料之密度、硬度及壓縮應力愈低，其樓板衝擊音隔音性能愈佳。
馮俊豪 (2017)	國內集合住宅普遍樓板隔音性能不足；增加緩衝材厚度可降低其動態剛性，低動態剛性之橡膠緩衝材有較佳隔音性能。
馬苡柔 (2019)	以成本效益與隔音性能而言，中低頻與中頻音源時，塊狀 EPS 複合材料隔音效果最佳。
高知鼎 (2021)	經濟效益分析顯示成本最低之隔音材料為 25mm 厚 25K EPS，其每坪降低 1 dB 僅需花費 7.57 元，最具經濟效益。

第三章 研究方法

3.1 實驗計畫

3.1.1 現地實驗量測計畫

本研究之現地實驗係針對臺北科技大學圖書館三樓樓板及承德陽光活力廣場結合樓板表層材後之衝擊音隔音效能進行探討，依據圖書館三樓 25cm RC 基準樓板及承德陽光活力廣場 38cm RC 防衝擊音隔音樓板為基礎進行實驗，而本研究在模擬實驗中再增加 EVA 巧拼與橡膠地磚作為變數材料，據以針對不同材料之組合配置進行衝擊音隔音效能測試，測試之實驗變數如表 3.1 所示。

表 3.1 實驗變數分類表

項目	實驗變數
承德陽光活力廣場 RC 基準樓板結合表面材	A：承德陽光活力廣場樓板 B：承德陽光活力廣場樓板 + 巧拼 C：承德陽光活力廣場樓板 + 橡膠地磚
圖書館三樓 RC 基準樓板	圖書館三樓樓板

因現地量測之地點為圖書館頂樓之「承德陽光活力廣場」，故量測時係為晚上 21:00 至 22:00（閉館前）進行，其量測標準為依據「噪音管制區劃定作業準則」第 6 條規定，在普通地區之音量標準值及相關量測規範時，應與建築物牆面線距離 100cm 以上處進行量測，且量測高度之噪音計應置離地面 120cm 至 150cm 之間，及觀測之樓板溫度依據 CNS 16211-4 規定建議在 18°C~25°C 範圍內，以測試不同實驗變數所降低之音量分貝數，另為提高數據之準確性，並避免單一位置測量結果可能產生誤差或異常數據，本實驗依照 CNS 16211-4 規定衝擊音隔音之量測時至少使用 4 個衝擊源位置，且每一個衝擊

源的位置必須至少進行兩次的聲壓位準測量以確保測量結果之準確性與代表性，本實驗為求精準性故選用三次聲壓位準測量以作為參考。本實驗流程如圖 3.1 所示。

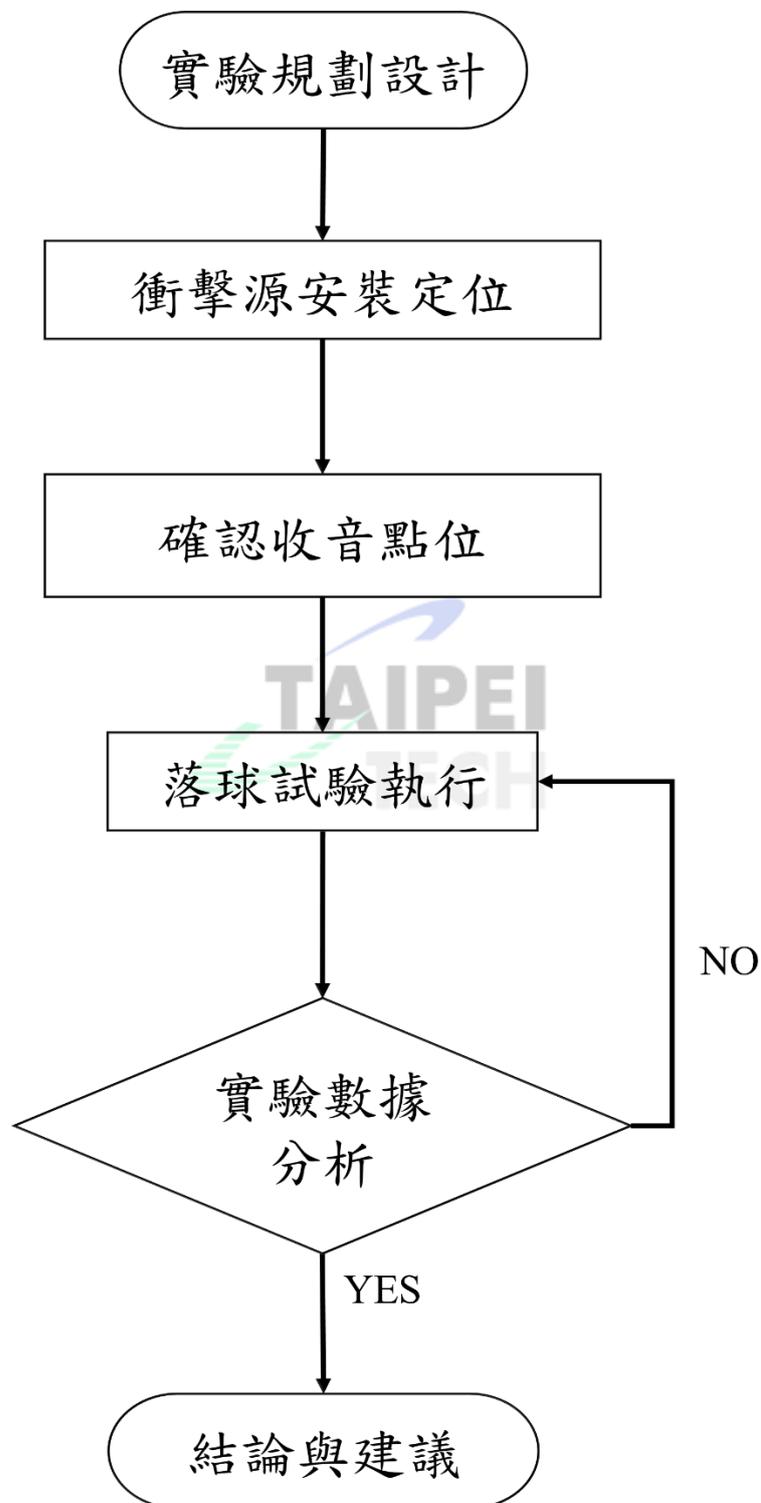


圖 3.1 現地實驗流程圖

3.1.2 模擬實驗量測計畫

因本研究之模擬實驗主要為欲得知地工泡棉 (EPS) 結合室外樓板表層材料之衝擊音隔音效能進行分析與探討，故模擬實驗採用厚度 15mm RC 樓板，並以不同單位重 (K 值) 之 EPS、橡膠隔音墊及 PE 隔音墊結合 EVA 巧拼與橡膠地磚等表面材料作為實驗變數，且所有試體皆以面積 50cm*50cm 進行試驗，並根據不同組合量測其衝擊音之隔音效能，所有模擬實驗之變數如表 3.2 所示。

表 3.2 模擬實驗變數分類表

項目		實驗變數
單一材料		A：15K EPS (塊體) 40mm B：20K EPS (塊體) 40mm C：25K EPS (塊體) 40mm D：30K EPS (塊體) 40mm E：橡膠隔音墊 5mm F：PE 隔音墊 15mm
複合材料	第一類	A：15K EPS (塊體) 40mm + 橡膠隔音墊 5mm B：15K EPS (塊體) 40mm + PE 隔音墊 15mm C：20K EPS (塊體) 40mm + 橡膠隔音墊 5mm D：20K EPS (塊體) 40mm + PE 隔音墊 15mm E：25K EPS (塊體) 40mm + 橡膠隔音墊 5mm F：25K EPS (塊體) 40mm + PE 隔音墊 15mm G：30K EPS (塊體) 40mm + 橡膠隔音墊 5mm H：30K EPS (塊體) 40mm + PE 隔音墊 15mm

(續)

表 3.2 模擬實驗變數分類表 (續)

項目	實驗變數
複合材料	<p>第二類</p> <p>A：巧拼 + 15K EPS (塊體) 40mm B：巧拼 + 15K EPS (塊體) 40mm + 橡膠隔音墊 5mm C：巧拼 + 15K EPS (塊體) 40mm + PE 隔音墊 15mm D：巧拼 + 20K EPS (塊體) 40mm E：巧拼 + 20K EPS (塊體) 40mm + 橡膠隔音墊 5mm F：巧拼 + 20K EPS (塊體) 40mm + PE 隔音墊 15mm G：巧拼 + 25K EPS (塊體) 40mm H：巧拼 + 25K EPS (塊體) 40mm + 橡膠隔音墊 5mm I：巧拼 + 25K EPS (塊體) 40mm + PE 隔音墊 15mm J：巧拼 + 30K EPS (塊體) 40mm K：巧拼 + 30K EPS (塊體) 40mm + 橡膠隔音墊 5mm L：巧拼 + 30K EPS (塊體) 40mm + PE 隔音墊 15mm M：巧拼 + 橡膠隔音墊 5mm N：巧拼 + PE 隔音墊 15mm</p>
複合材料	<p>第三類</p> <p>A：橡膠地磚 + 15K EPS (塊體) 40mm B：橡膠地磚 + 15K EPS (塊體) 40mm + 橡膠隔音墊 5mm C：橡膠地磚 + 15K EPS (塊體) 40mm + PE 隔音墊 15mm D：橡膠地磚 + 20K EPS (塊體) 40mm E：橡膠地磚 + 20K EPS (塊體) 40mm + 橡膠隔音墊 5mm F：橡膠地磚 + 20K EPS (塊體) 40mm + PE 隔音墊 15mm G：橡膠地磚 + 25K EPS (塊體) 40mm H：橡膠地磚 + 25K EPS (塊體) 40mm + 橡膠隔音墊 5mm I：橡膠地磚 + 25K EPS (塊體) 40mm + PE 隔音墊 15mm J：橡膠地磚 + 30K EPS (塊體) 40mm K：橡膠地磚 + 30K EPS (塊體) 40mm + 橡膠隔音墊 5mm L：橡膠地磚 + 30K EPS (塊體) 40mm + PE 隔音墊 15mm M：橡膠地磚 + 橡膠隔音墊 5mm N：橡膠地磚 + PE 隔音墊 15mm</p>

模擬實驗之地點為國立臺北科技大學國百館，為提升實驗數據之準確性並有效降低背景噪音之干擾，故每次實驗均於凌晨 00:00~04:00 進行量測。此外，測試位置之選擇亦參考行政院環境保護署「噪音管制區劃定作業準則」第六條所規定之普通地區環境音量標準值及相關量測規範，量測位置選於距建築物外牆之牆面線 100 cm 以上處，噪音

計高度則設置於離地面 120 cm 至 150 cm 範圍內，同時，實驗期間樓板之表面溫度依據國家標準 CNS 15160-8 規定建議控制於 18°C 至 25°C 範圍內，以確保量測數據之可靠性。本實驗針對不同材料之單一使用及複合應用進行五次樓板衝擊音隔音性能測試，並進一步分析材料特性對樓板衝擊音之影響及其隔音效益，以作為後續之分析依據。本實驗流程如圖 3.2 所示。

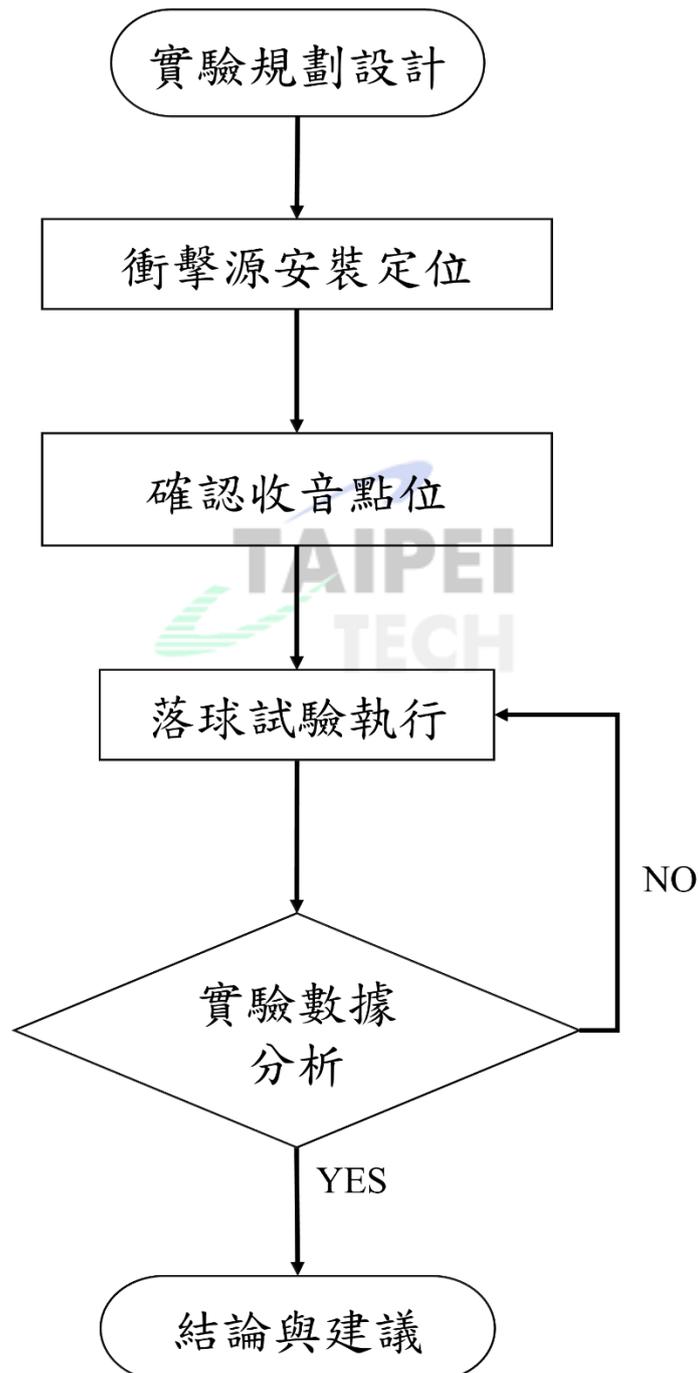


圖 3.2 模擬實驗流程圖

3.2 實驗測定架構

3.2.1 現地實驗測定架構

本研究之現地實驗採用落球衝擊試驗儀作為輕量衝擊音之發聲裝置，於建築物上層之音源室放置儀器並安裝定位，分別調整落球高度為 210cm、150cm 及 500cm，以進行多階段衝擊模擬；在建築物下層之收音室中，則將噪音計設置於距離地面上方 150 cm 處進行聲壓位準收音，量測過程須符合 CNS16211-4 現場測定標準，其中若衝擊音與背景噪音之差值介於 6 dB 至 10 dB 之間，則需依規定進行修正；差值大於 10 dB 時則無需修正，若小於 6 dB，則統一以 1.3 dB 進行補正。而觀測樓板溫度應界於 18°C~25°C 範圍內，實驗對象分別為圖書館三樓 RC 基準樓板、承德陽光活力廣場 RC 基準樓板及結合樓板表層材兩大類，會將各種面材平鋪於樓板上方，進行衝擊音隔音性能測試，以分析不同變數條件下之隔音特性，如圖 3.3、圖 3.4、圖 3.5 及圖 3.6 所示。

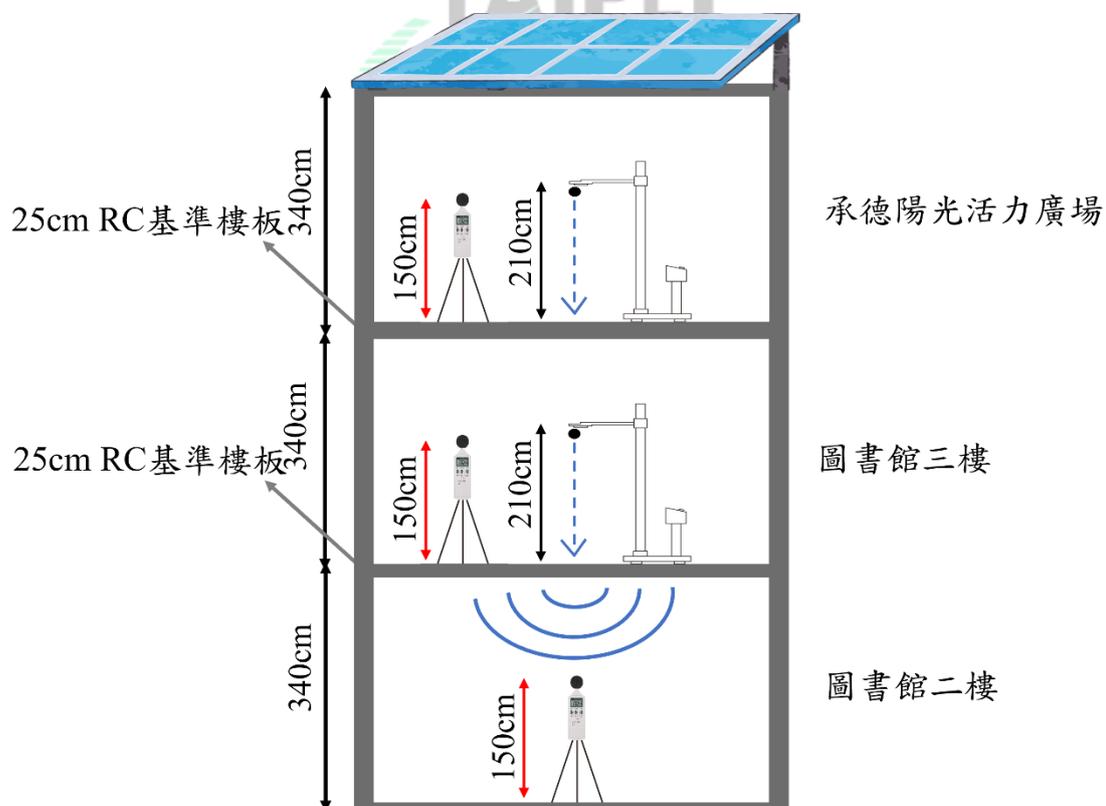


圖 3.3 現地實驗測定架構示意圖



圖 3.4 圖書館三樓樓板示意圖

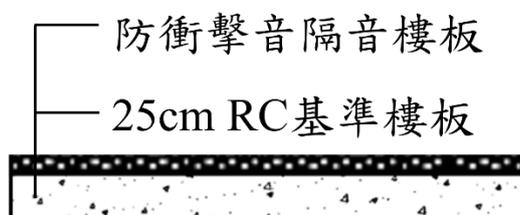


圖 3.5 承德陽光活力廣場樓板示意圖

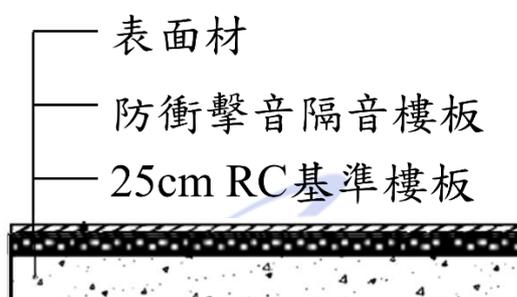


圖 3.6 承德陽光活力廣場樓板結合表面材示意圖

3.2.2 模擬實驗測定架構

本研究採用落球衝擊試驗儀作為樓板衝擊音之發聲器，將設備設置於實驗建築之上層音源室內，並將落球衝擊高度調整固定為 210cm，以模擬標準化的樓板衝擊音源。下層之收音室內，則將噪音計安置於距離地面垂直高度 150 cm 處，以測量穿透樓板所產生之衝擊音量值。實驗之背景噪音值依照國家標準 CNS 16211-4 之現場量測標準，分貝差應大於 10dB 以上，當分貝差小於 10dB 須進行修正；反之，差大於 10dB 不修正；若是差小於 6dB 則以 1.3dB 修正。而觀測樓板溫度應界於 18°C~25°C 範圍內，以確保測試數據之準確性。本實驗所選用之材料分為單一材料及複合材料兩大類型，分別將試驗材

料平鋪於樓板上方進行衝擊音量測，藉此探討不同變數條件下材料隔音特性之關係，詳細之實驗配置與流程如圖 3.7、圖 3.8 及圖 3.9 所示。

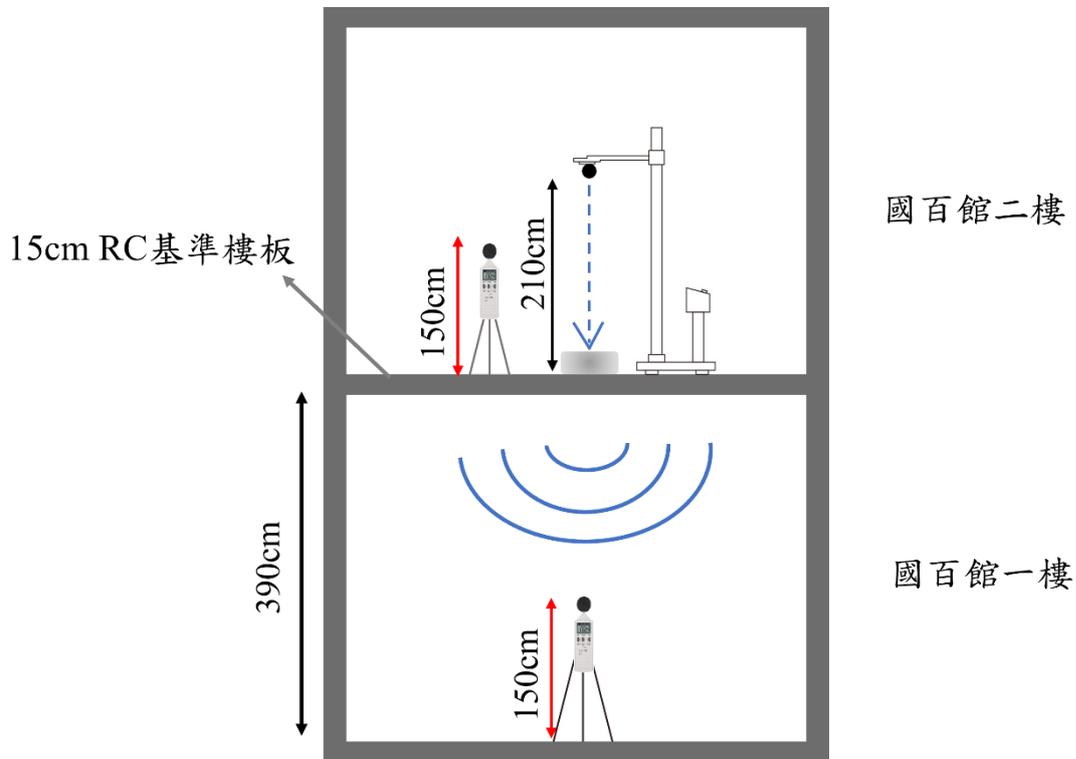


圖 3.7 模擬實驗測定架構示意圖



圖 3.8 單一材料示意圖

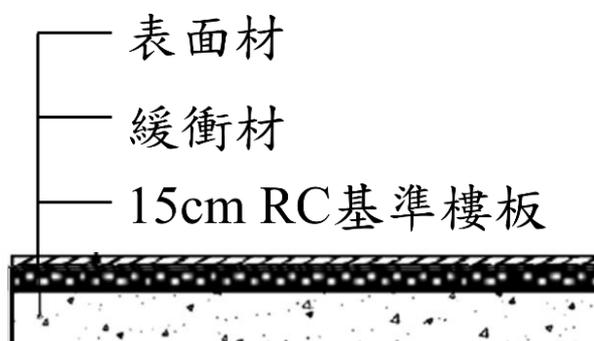


圖 3.9 複合材料示意圖

3.3 實驗材料

- 一、EPS:本研究所使用之EPS為國內台X積水化成品股份有限公司所製造的15K、20K、25K及30K之EPS作為實驗材料，尺寸為長50cm、寬50cm、厚4cm，如圖3.10所示。



圖 3.10 厚度 40mm EPS

- 二、橡膠隔音墊：本研究所使用之橡膠隔音墊為德國凱X膠寶集團所製造DAMTEC Black special 5 mm 隔音墊緩衝材，尺寸為長50cm、寬50cm、厚0.5cm，如圖3.11所示。



圖 3.11 厚度 5mm 橡膠隔音墊

三、PE 隔音墊：本研究所使用之 PE 隔音墊為國內啓 X 工業股份有限公司所製造的 L2500 15 mm 隔音墊緩衝材，同時也是國立臺北科技大學「圖書館屋頂太陽能設備暨休憩空間整建工程」所使用之隔音墊，尺寸為長 50cm、寬 50cm、厚 1.5cm，如圖 3.12 所示。



圖 3.12 厚度 15mm PE 隔音墊

四、巧拼：本研究所使用之巧拼為國內所製造的 EVA 巧拼，尺寸為長 30cm、寬 30cm、厚 1cm，如圖 3.13 所示。



圖 3.13 厚度 10mm 巧拼

五、橡膠地磚：本研究所使用之橡膠地磚為國內正 X 橡膠有限公司所製造的環保可回收橡膠地磚，尺寸為長 50cm、寬 50cm、厚 2.5cm，如圖 3.14 所示。



圖 3.14 厚度 25mm 橡膠地磚

3.4 實驗設備

- 一、落球試驗儀：落球試驗儀旨在模擬日常生活中孩童奔跑、跳躍及物體掉落等情境所產生之樓板衝擊音。落球衝擊試驗儀主要結構包含架台、支柱、電源開關、磁鐵及鋼球等五個主要部分。試驗時主要透過電流通電，使磁鐵產生磁力將鋼球吸附於設定高度，隨後利用控制按鈕關閉電流使鋼球自由落下，以產生穩定、可控制之衝擊聲源，藉此進行樓板衝擊音之量測與分析（參考圖 3.15）。

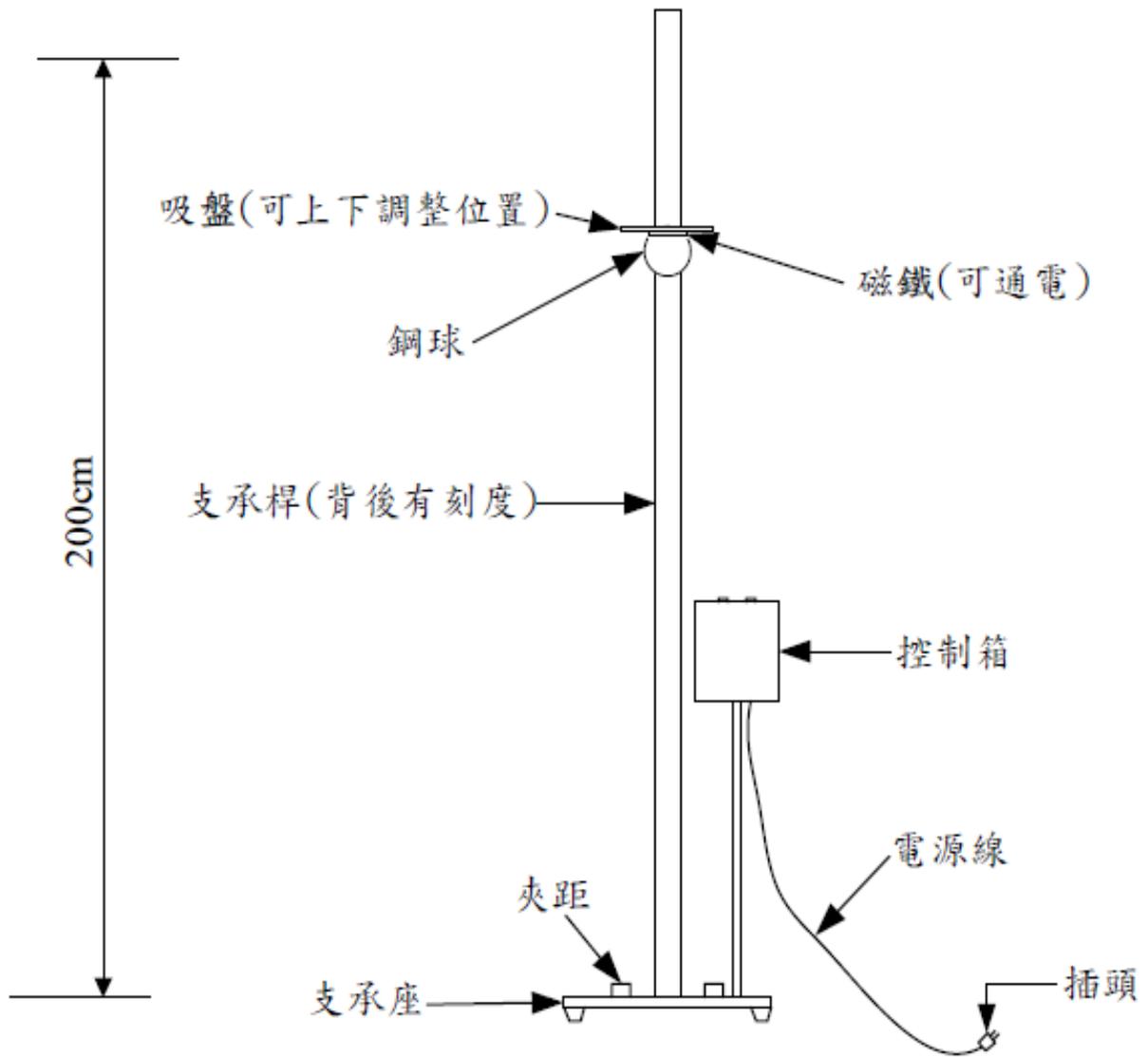


圖 3.15 落球試驗儀圖例

表 3.3 落球試驗儀

	
<p>落球試驗儀</p>	<p>電磁控制吸盤</p>
	
<p>控制箱</p>	<p>落距調整栓</p>
	
<p>鋼球</p>	

二、數位式噪音計：本研究之實驗使用泰 X 有限公司所販售數位式噪音計 TES-1350A 進行音量測量，此噪音計符合美國國家標準協會（American National Standards Institute；簡稱為 ANSI）S1.4 TYPE2 之分貝計，其測量頻率範圍在 31.5Hz 至 8KHz，準確性為 $\pm 1.0\text{dB}$ ，噪音之測量範圍為 35dB 至 130dB（參考圖 3.16）。



圖 3.16 數位式噪音計

3.5 實驗程序

3.5.1 現地實驗程序

步驟一：先於音源室內安裝落球衝擊試驗機，並依據實驗設計需求將落球高度固定於 50 cm、150cm 及 210cm 處。隨後通電使鋼球吸附於磁鐵裝置，確保鋼球能夠穩定且垂直落下，以維持衝擊音源產生之準確性與重現性。

步驟二：於受音室內，確認環境溫度符合 CNS 15160-8 規定之範圍（18°C至 25°C），並進行背景噪音之量測，以確保量測環境符合實驗需求。隨後將噪音計垂直設置於距離地面 150 cm 處，作為衝擊音之收音位置。

步驟三：依據實驗計畫，依序更換巧拼、橡膠地磚、鋼球及調整落距，並依序由 A1、A2、A3 及 A4，進行衝擊音量測試，如圖 3.17 所示。每組聲壓位準量測後，即記錄噪音計所測得之數據，直至全部試驗材料及位置測試完成，始結束本次實驗流程。

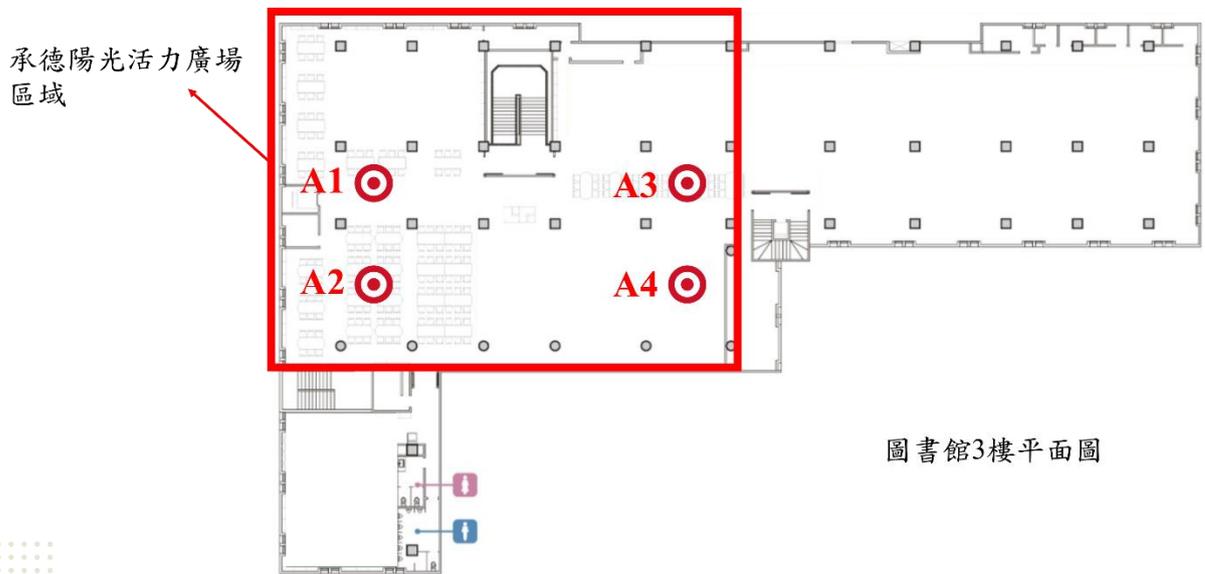


圖 3.17 北科大圖書館三樓平面圖及承德陽光活力廣場區域

3.5.2 模擬實驗程序

步驟一：先於音源室內安裝落球衝擊試驗機，並依據實驗設計需求將落球高度固定於 210cm 處。隨後通電使質量 2kg 之鋼球吸附於磁鐵裝置，確保鋼球能夠穩定且垂直落下，以維持衝擊音源產生之準確性與重現性。

步驟二：於受音室內，確認環境溫度符合 CNS 15160-8 規定之範圍（18°C 至 25°C），並進行背景噪音之量測，以確保量測環境符合實驗需求。隨後將噪音計垂直設置於距離地面 150 cm 處，作為衝擊音之收音位置。

步驟三：依據實驗計畫，依序更換試體，並進行衝擊音量測試。每組試體量測後，即記錄分貝計所測得之聲壓位準數據，直至全部試驗材料測試完成，始結束本次實驗流程。

第四章 研究結果

4.1 實驗背景

本實驗目的為求得承德陽光活力廣場之隔音效益及 EPS 結合樓板表層材之衝擊音隔音效能，依據 CNS16211 實施現地實驗以及選用四種不同密度（15K、20K、25K 及 30K）之 EPS 進行模擬實驗。現地實驗地點為國立臺北科技大學圖書館及承德陽光活力廣場；模擬實驗地點選為國立臺北科技大學國百館內，實驗所測得之分貝值將依據行政院環保署《噪音管制標準第三條》，量測特定聲壓位準時，除了預量測特定的聲壓位準外，其餘音量皆為背景噪音，測量場所之背景音量，應與欲測量聲壓位準之音量差達 10 分貝 dB 以上，如相差之分貝值未超過 10 分貝 dB 以上時，則欲測量聲壓位準應以附表進行修正，如表 4.1 所示。

表 4.1 測量音量修正表

$L_1 - L_2$	≤6.0	6.1	6.2	6.3	6.4	6.5	6.6	6.7	6.8	6.9
ΔL	1.3	1.2			1.1			1.0		
$L_1 - L_2$	7.0	7.1	7.2	7.3	7.4	7.5	7.6	7.7	7.8	7.9
ΔL	1.0	0.9					0.8			
$L_1 - L_2$	8.0	8.1	8.2	8.3	8.4	8.5	8.6	8.7	8.8	8.9
ΔL	0.7						0.6			
$L_1 - L_2$	9.0	9.1	9.2	9.3	9.4	9.5	9.6	9.7	9.8	9.9~10.0
ΔL	0.6			0.5						
註：										
L1：指整體音量之測量值。										
L2：指背景音量之測量值。										
ΔL ：指欲測量音源測量值受背景噪音影響之修正值。										

本現地實驗之實驗樓板分別有圖書館三樓 RC 基準樓板及承德陽光活力廣場 RC 基準樓板，樓板表層材分別有巧拼及橡膠地磚，如表 4.2 所示。

表 4.2 現地實驗對象分類表

項目	實驗變數
承德陽光活力廣場 RC 基準樓板結合表面材	A：承德陽光活力廣場樓板 B：承德陽光活力廣場樓板 + 巧拼 C：承德陽光活力廣場樓板 + 橡膠地磚
圖書館三樓 RC 基準樓板	圖書館三樓樓板

本模擬實驗之緩衝材料分別有 15K、20K、25K 及 30K 之 EPS、橡膠隔音墊及 PE 隔音墊，樓板表層材分別有巧拼及橡膠地磚，因緩衝材料及組合種類眾多故分為單一材料與複合材料三類，並統一採用面積為 50cm*50cm 之試體進行實驗，如表 4.3 所示。

表 4.3 模擬實驗試體分類表

項目	實驗變數
單一材料	A：15K EPS（塊體）40mm B：20K EPS（塊體）40mm C：25K EPS（塊體）40mm D：30K EPS（塊體）40mm E：橡膠隔音墊 5mm F：PE 隔音墊 15mm
複合材料	第一類 A：15K EPS（塊體）40mm + 橡膠隔音墊 5mm B：15K EPS（塊體）40mm + PE 隔音墊 15mm C：20K EPS（塊體）40mm + 橡膠隔音墊 5mm D：20K EPS（塊體）40mm + PE 隔音墊 15mm E：25K EPS（塊體）40mm + 橡膠隔音墊 5mm F：25K EPS（塊體）40mm + PE 隔音墊 15mm G：30K EPS（塊體）40mm + 橡膠隔音墊 5mm H：30K EPS（塊體）40mm + PE 隔音墊 15mm

（續）

表 4.3 模擬實驗試體分類表 (續)

	<p>第二類</p>	<p>A：巧拼 + 15K EPS (塊體) 40mm B：巧拼 + 15K EPS (塊體) 40mm + 橡膠隔音墊 5mm C：巧拼 + 15K EPS (塊體) 40mm + PE 隔音墊 15mm D：巧拼 + 20K EPS (塊體) 40mm E：巧拼 + 20K EPS (塊體) 40mm + 橡膠隔音墊 5mm F：巧拼 + 20K EPS (塊體) 40mm + PE 隔音墊 15mm G：巧拼 + 25K EPS (塊體) 40mm H：巧拼 + 25K EPS (塊體) 40mm + 橡膠隔音墊 5mm I：巧拼 + 25K EPS (塊體) 40mm + PE 隔音墊 15mm J：巧拼 + 30K EPS (塊體) 40mm K：巧拼 + 30K EPS (塊體) 40mm + 橡膠隔音墊 5mm L：巧拼 + 30K EPS (塊體) 40mm + PE 隔音墊 15mm M：巧拼 + 橡膠隔音墊 5mm N：巧拼 + PE 隔音墊 15mm</p>
	<p>第三類</p>	<p>A：橡膠地磚 + 15K EPS (塊體) 40mm B：橡膠地磚 + 15K EPS (塊體) 40mm + 橡膠隔音墊 5mm C：橡膠地磚 + 15K EPS (塊體) 40mm + PE 隔音墊 15mm D：橡膠地磚 + 20K EPS (塊體) 40mm E：橡膠地磚 + 20K EPS (塊體) 40mm + 橡膠隔音墊 5mm F：橡膠地磚 + 20K EPS (塊體) 40mm + PE 隔音墊 15mm G：橡膠地磚 + 25K EPS (塊體) 40mm H：橡膠地磚 + 25K EPS (塊體) 40mm + 橡膠隔音墊 5mm I：橡膠地磚 + 25K EPS (塊體) 40mm + PE 隔音墊 15mm J：橡膠地磚 + 30K EPS (塊體) 40mm K：橡膠地磚 + 30K EPS (塊體) 40mm + 橡膠隔音墊 5mm L：橡膠地磚 + 30K EPS (塊體) 40mm + PE 隔音墊 15mm M：橡膠地磚 + 橡膠隔音墊 5mm N：橡膠地磚 + PE 隔音墊 15mm</p>

表 4.4 現地實驗示意圖



圖書館三樓樓板



承德陽光活力廣場樓板



承德陽光活力廣場樓板結合巧拼



承德陽光活力廣場樓板結合橡膠地磚

表 4.5 模擬實驗試體示意圖

	
40mm EPS	5mm 橡膠隔音墊
	
15mm PE 隔音墊	10mm 巧拼
	
25mm 橡膠地磚	40mm EPS+5mm 橡膠隔音墊

(續)



40mm EPS+15mm PE 隔音墊



40mm EPS+10mm 巧拼



40mm EPS+25mm 橡膠地磚



5mm 橡膠隔音墊+10mm 巧拼



5mm 橡膠隔音墊+25mm 橡膠地磚



15mm PE 隔音墊+10mm 巧拼

(續)



15mm PE 隔音墊+25mm 橡膠地磚



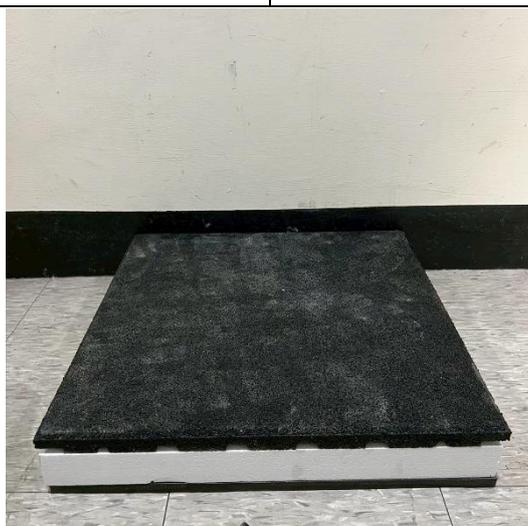
40mm EPS+5mm 橡膠隔音墊+10mm 巧拼



40mm EPS+5mm 橡膠隔音墊
+25mm 橡膠地磚



40mm EPS+ 15mm PE 隔音墊+10mm 巧拼



40mm EPS+ 15mm PE 隔音墊+25mm 橡膠地磚

4.2 現地實驗數據及隔音效能分析

4.2.1 承德陽光活力廣場樓板

承德陽光活力廣場樓板現地實驗主要將實驗類別分為承德陽光活力廣場 RC 基準樓板及承德陽光活力廣場樓板結合複合材料，其中結合之複合材料可再細分為巧拼及橡膠地磚，且依照三種落距（50cm、150cm、210cm）、三種鋼球質量（0.5kg、1kg、2kg）、四處衝擊源位置及三次衝擊聲壓位準，故共計三百二十四組數據，經前述實驗對象定位後，即可開始量測數據，而實驗數據分別為：（一）音源室無表面材時，於受音室及音源室量測之噪音分貝數、（二）音源室置放表面材時，於受音室及音源室量測之噪音分貝數、（三）無表面材所量測之音源室分貝數扣除阻擋噪音源所量測之受音室之分貝數即為該組變數降低之分貝數（ Δ dB）；由量測之結果進行分析，以探討分析承德陽光活力廣場樓板結合樓板表層材之隔音效能。

實驗依序為：落距 50cm 及鋼球 0.5kg、落距 50cm 及鋼球 1kg、落距 50cm 及鋼球 2kg、落距 150cm 及鋼球 0.5kg、落距 150cm 及鋼球 1kg、落距 150cm 及鋼球 2kg、落距 210cm 及鋼球 0.5kg、落距 210cm 及鋼球 1kg 及落距 210cm 及鋼球 2kg，實驗結果依序如下：

一、落距 50cm 及鋼球 0.5kg

從表 4.6 實驗結果可知，當樓板表面未鋪設緩衝材及表面材且鋼球砸落時，音源室之噪音最高為 84.3dB，再依照各聲壓位準結果計算可得降低之分貝數，如表 4.7 所示。在各區域中效果依序如下：承德陽光活力廣場樓板可降低 29.0dB、承德陽光活力廣場樓板結合巧拼可降低 29.2dB 及承德陽光活力廣場樓板結合橡膠地磚可降低 31.0dB，整體量測之測試結果皆優於規範 17dB 以上（參考圖 4.1）。

表 4.6 落距 50cm 及鋼球 0.5kg 測得之分貝數

地點 地點及變數	A1			A2			A3			A4		
	承德陽光活力廣場 (音源室)	80.7	77.1	81.2	82.4	81.9	84.3	83.0	83.6	82.4	82.2	80.9
承德陽光活力廣場樓板 (受音室)	52.7	52.5	52.4	52.5	53.4	56.6	51.1	51.9	52.9	52.1	52.8	52.9
承德陽光活力廣場樓板 +巧拼 (受音室)	53.1	55.5	52.8	52.8	52.1	53.6	53.5	53.1	54.2	50.3	50.0	49.6
承德陽光活力廣場樓板 +橡膠地磚 (受音室)	50.2	50.4	50.6	52.9	52.1	50.9	50.4	50.5	50.5	50.1	50.2	50.7

單位：dB

表 4.7 落距 50cm 及鋼球 0.5kg 降低之分貝數

地點 地點及變數	A1			A2			A3			A4		
	降低之分貝數											
承德陽光活力廣場樓板 (受音室)	28.0	24.6	28.8	29.9	28.5	27.7	31.9	31.7	29.5	30.1	28.1	28.8
承德陽光活力廣場樓板 +巧拼 (受音室)	27.6	21.6	28.4	29.6	29.8	30.7	29.5	30.5	28.2	31.9	30.9	32.1
承德陽光活力廣場樓板 +橡膠地磚 (受音室)	30.5	26.7	30.6	29.5	29.8	33.4	32.6	33.1	31.9	32.1	30.7	31.0

單位：dB

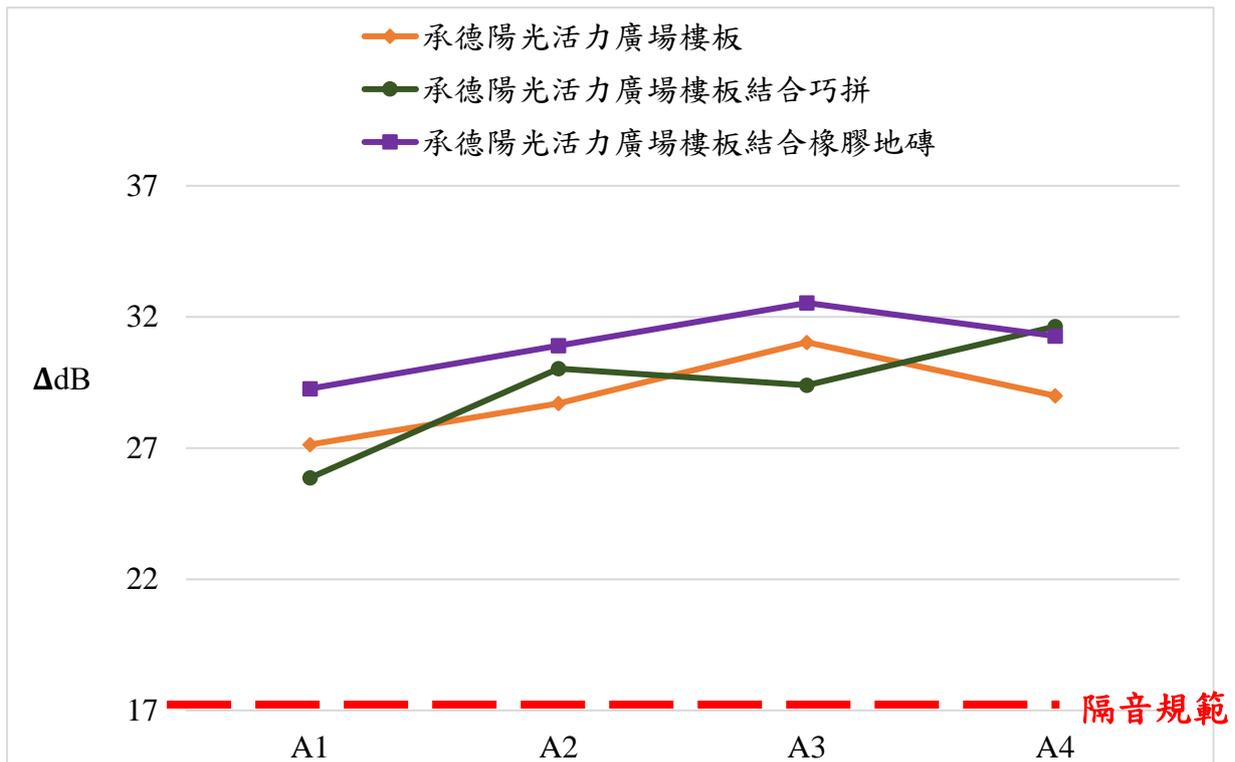


圖 4.1 落距 50cm 及鋼球 0.5kg 之隔音效果

二、落距 50cm 及鋼球 1kg

從表 4.8 實驗結果可知，當樓板表面未鋪設緩衝材及表面材且鋼球砸落時，音源室之噪音最高為 92.4dB，再依照各聲壓位準計算可得降低之分貝數，如表 4.9 所示。在各區域中效果依序如下：承德陽光活力廣場樓板可降低 31.5dB、承德陽光活力廣場樓板結合巧拼可降低 32.2dB 及承德陽光活力廣場樓板結合橡膠地磚可降低 36.9dB，整體量測之測試結果皆優於規範 17dB 以上（參考圖 4.2）。

表 4.8 落距 50cm 及鋼球 1kg 測得之分貝數

地點 地點及變數	A1			A2			A3			A4		
	承德陽光活力廣場 (音源室)	89.7	85.9	90.1	88.3	90.5	89.4	89.8	92.4	92.3	87.8	87.3
承德陽光活力廣場樓板 (受音室)	58.0	58.0	58.5	56.2	56.0	56.4	58.9	58.3	59.0	57.6	57.5	57.1
承德陽光活力廣場樓板 +巧拼 (受音室)	59.2	58.3	58.9	55.9	56.2	56.4	58.9	59.7	59.9	53.4	53.3	53.1
承德陽光活力廣場樓板 +橡膠地磚 (受音室)	52.4	51.8	52.1	53.1	53.6	53.5	50.7	50.9	50.2	52.1	52.9	52.6

單位：dB

表 4.9 落距 50cm 及鋼球 1kg 降低之分貝數

地點 地點及變數	A1			A2			A3			A4		
	降低之分貝數											
承德陽光活力廣場樓板 (受音室)	31.7	27.9	31.6	32.1	34.5	33.0	30.9	34.1	33.3	30.2	29.8	28.5
承德陽光活力廣場樓板 +巧拼 (受音室)	30.5	27.6	31.2	32.4	34.3	33.0	30.9	32.7	32.4	34.4	34.0	32.5
承德陽光活力廣場樓板 +橡膠地磚 (受音室)	37.3	34.1	38.0	35.2	36.9	35.9	39.1	41.5	42.1	35.7	34.4	33.0

單位：dB

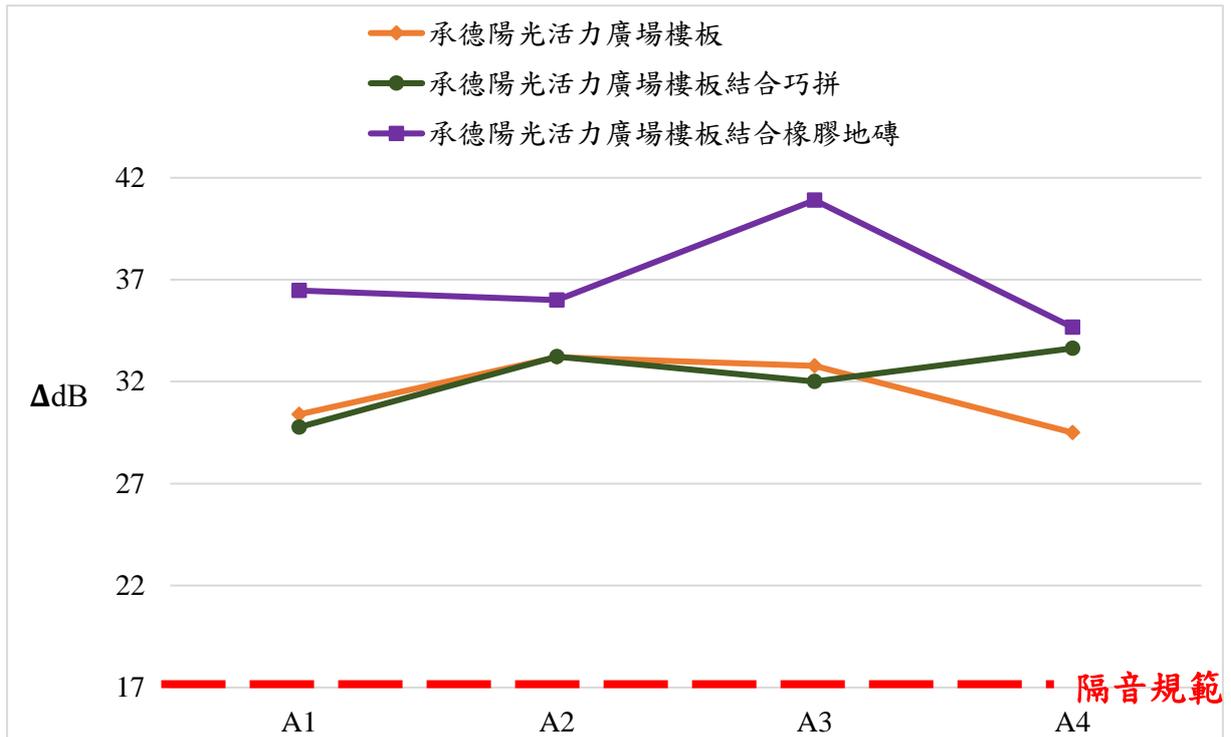


圖 4.2 落距 50cm 及鋼球 1kg 之隔音效果

三、落距 50cm 及鋼球 2kg

從表 4.10 實驗結果可知，當樓板表面未鋪設緩衝材及表面材且鋼球砸落時，音源室之噪音最高為 96.9dB，再依照各聲壓位準計算可得降低之分貝數，如表 4.11 所示。在各區域中效果依序如下：承德陽光活力廣場樓板可降低 31.1dB、承德陽光活力廣場樓板結合巧拼可降低 31.6dB 及承德陽光活力廣場樓板結合橡膠地磚可降低 38.0dB，整體量測之測試結果皆優於規範 17dB 以上（參考圖 4.3）。

表 4.10 落距 50cm 及鋼球 2kg 測得之分貝數

地點 地點及變數	A1			A2			A3			A4		
	承德陽光活力廣場 (音源室)	92.0	92.8	94.1	90.9	93.1	95.8	93.7	96.9	96.9	92.3	91.3
承德陽光活力廣場樓板 (受音室)	62.0	63.0	63.3	59.9	60.8	60.9	64.8	62.7	63.3	62.0	62.0	61.8
承德陽光活力廣場樓板 +巧拼 (受音室)	63.5	63.8	64.2	60.1	60.0	60.7	63.7	64.3	64.5	58.9	58.7	58.4
承德陽光活力廣場樓板 +橡膠地磚 (受音室)	54.3	54.2	56.9	55.6	55.4	55.4	53.5	54.4	53.8	56.8	56.2	56.6

單位：dB

表 4.11 落距 50cm 及鋼球 2kg 降低之分貝數

地點 地點及變數	A1			A2			A3			A4		
	降低之分貝數											
承德陽光活力廣場樓板 (受音室)	30.0	29.8	30.8	31.0	32.3	34.9	28.9	34.2	33.6	30.3	29.3	28.0
承德陽光活力廣場樓板 +巧拼 (受音室)	28.5	29.0	29.9	30.8	33.1	35.1	30.0	32.6	32.4	33.4	32.6	31.4
承德陽光活力廣場樓板 +橡膠地磚 (受音室)	37.7	38.6	37.2	35.3	37.7	40.4	40.2	42.5	43.1	35.5	35.1	33.2

單位：dB

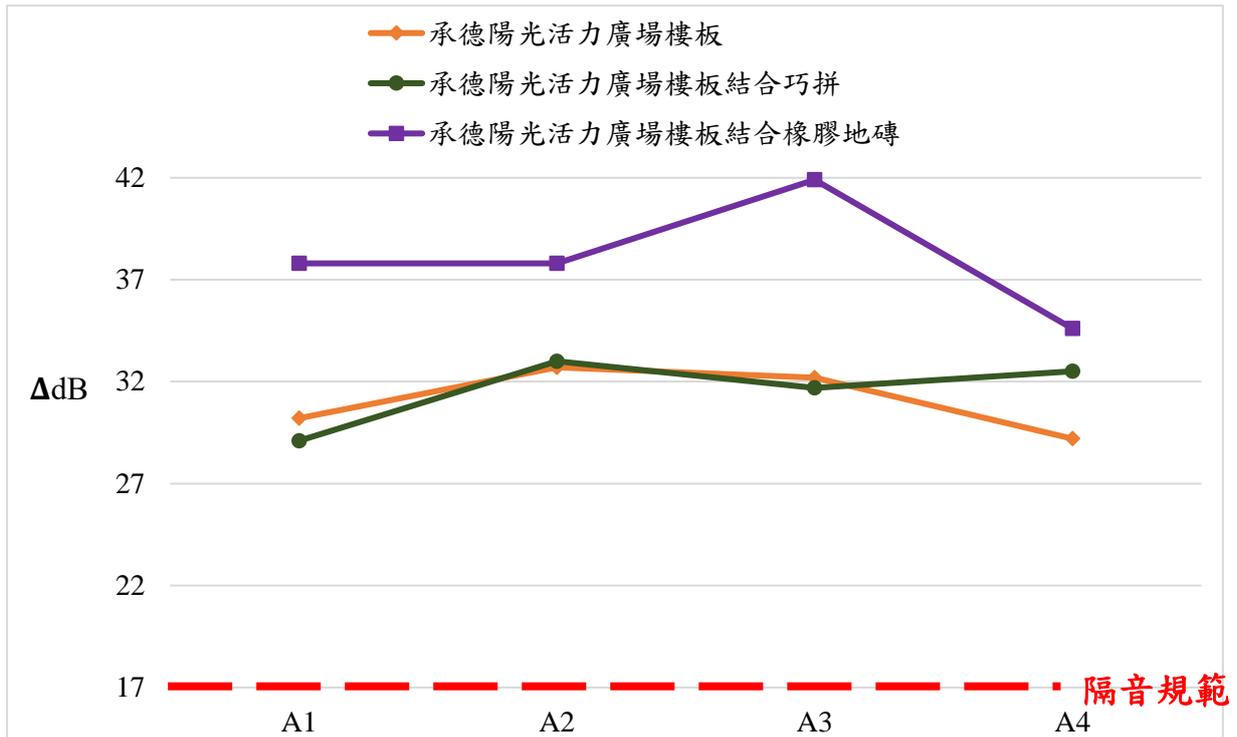


圖 4.3 落距 50cm 及鋼球 2kg 之隔音效果

四、落距 150cm 及鋼球 0.5kg

從表 4.12 實驗結果可知，當樓板表面未鋪設緩衝材及表面材且鋼球砸落時，音源室之噪音最高為 92.4dB，再依照各聲壓位準計算可得降低之分貝數，如表 4.13 所示。在各區域中效果依序如下：承德陽光活力廣場樓板可降低 31.6dB、承德陽光活力廣場樓板結合巧拼可降低 32.7dB 及承德陽光活力廣場樓板結合橡膠地磚可降低 34.9dB，整體量測之測試結果皆優於規範 17dB 以上（參考圖 4.4）。

表 4.12 落距 150cm 及鋼球 0.5kg 測得之分貝數

地點 地點及變數	A1			A2			A3			A4		
	承德陽光活力廣場 (音源室)	89.7	85.9	90.1	88.3	90.5	89.4	89.8	92.4	92.3	87.8	87.3
承德陽光活力廣場樓板 (受音室)	58.0	58.0	58.5	56.2	56.0	56.4	58.9	58.3	59.0	57.6	57.5	57.1
承德陽光活力廣場樓板 +巧拼 (受音室)	59.2	58.3	58.9	55.9	56.2	56.4	58.9	59.7	59.9	53.4	53.3	53.1
承德陽光活力廣場樓板 +橡膠地磚 (受音室)	52.4	51.8	52.1	53.1	53.6	53.5	50.7	50.9	50.2	52.1	52.9	52.6

單位：dB

表 4.13 落距 150cm 及鋼球 0.5kg 降低之分貝數

地點 地點及變數	A1			A2			A3			A4		
	降低之分貝數											
承德陽光活力廣場樓板 (受音室)	31.7	27.9	31.6	32.1	34.5	33.0	30.9	34.1	33.3	30.2	29.8	28.5
承德陽光活力廣場樓板 +巧拼 (受音室)	30.5	27.6	31.2	32.4	34.3	33.0	30.9	32.7	32.4	34.4	34.0	32.5
承德陽光活力廣場樓板 +橡膠地磚 (受音室)	37.3	34.1	38.0	35.2	36.9	35.9	39.1	41.5	42.1	35.7	34.4	33.0

單位：dB

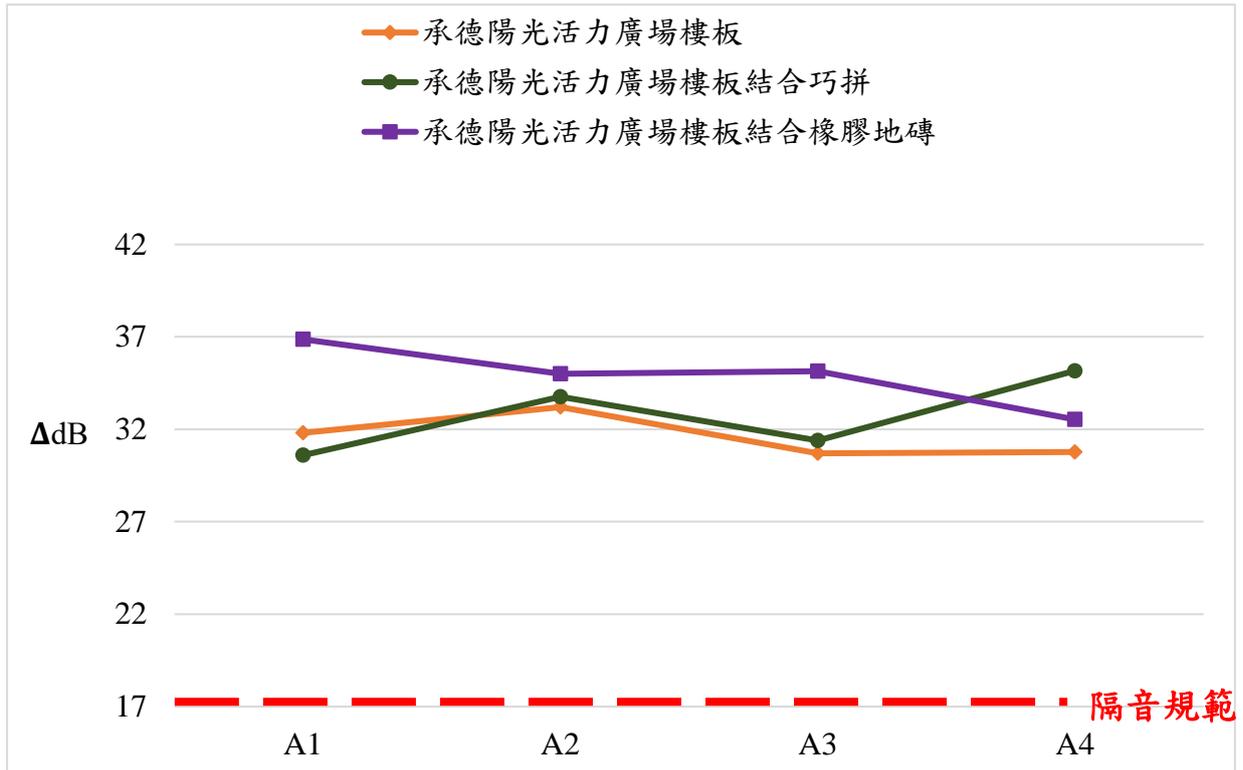


圖 4.4 落距 150cm 及鋼球 0.5kg 之隔音效果

五、落距 150cm 及鋼球 1kg

從表 4.14 實驗結果可知，當樓板表面未鋪設緩衝材及表面材且鋼球砸落時，音源室之噪音最高為 95.3dB，再依照各聲壓位準計算可得降低之分貝數，如表 4.15 所示。在各區域中效果依序如下：承德陽光活力廣場樓板可降低 31.7dB、承德陽光活力廣場樓板結合巧拼可降低 33.0dB 及承德陽光活力廣場樓板結合橡膠地磚可降低 36.8dB，整體量測之測試結果皆優於規範 17dB 以上（參考圖 4.5）。

表 4.14 落距 150cm 及鋼球 1kg 測得之分貝數

地點 地點及變數	A1			A2			A3			A4		
	承德陽光活力廣場 (音源室)	93.6	95.3	94.9	94.2	94.5	93.2	93.7	95.1	95.0	94.4	92.7
承德陽光活力廣場樓板 (受音室)	63.5	63.8	63.4	60.7	60.5	59.9	63.6	63.7	64.0	61.9	61.6	61.9
承德陽光活力廣場樓板 +巧拼 (受音室)	62.7	63.4	62.9	59.8	59.9	60.1	63.0	63.4	63.1	58.5	58.0	57.7
承德陽光活力廣場樓板 +橡膠地磚 (受音室)	55.9	55.9	56.2	57.3	57.6	56.9	56.9	57.1	56.8	59.1	59.0	58.9

單位：dB



表 4.15 落距 150cm 及鋼球 1kg 降低之分貝數

地點 地點及變數	A1			A2			A3			A4		
	降低之分貝數											
承德陽光活力廣場樓板 (受音室)	30.1	31.5	31.5	33.5	34.0	33.3	30.1	31.4	31.0	32.5	31.1	30.2
承德陽光活力廣場樓板 +巧拼 (受音室)	30.9	31.9	32.0	34.4	34.6	33.1	30.7	31.7	31.9	35.9	34.7	34.4
承德陽光活力廣場樓板 +橡膠地磚 (受音室)	37.7	39.4	38.7	36.9	36.9	36.3	36.8	38.0	38.2	35.3	33.7	33.2

單位：dB

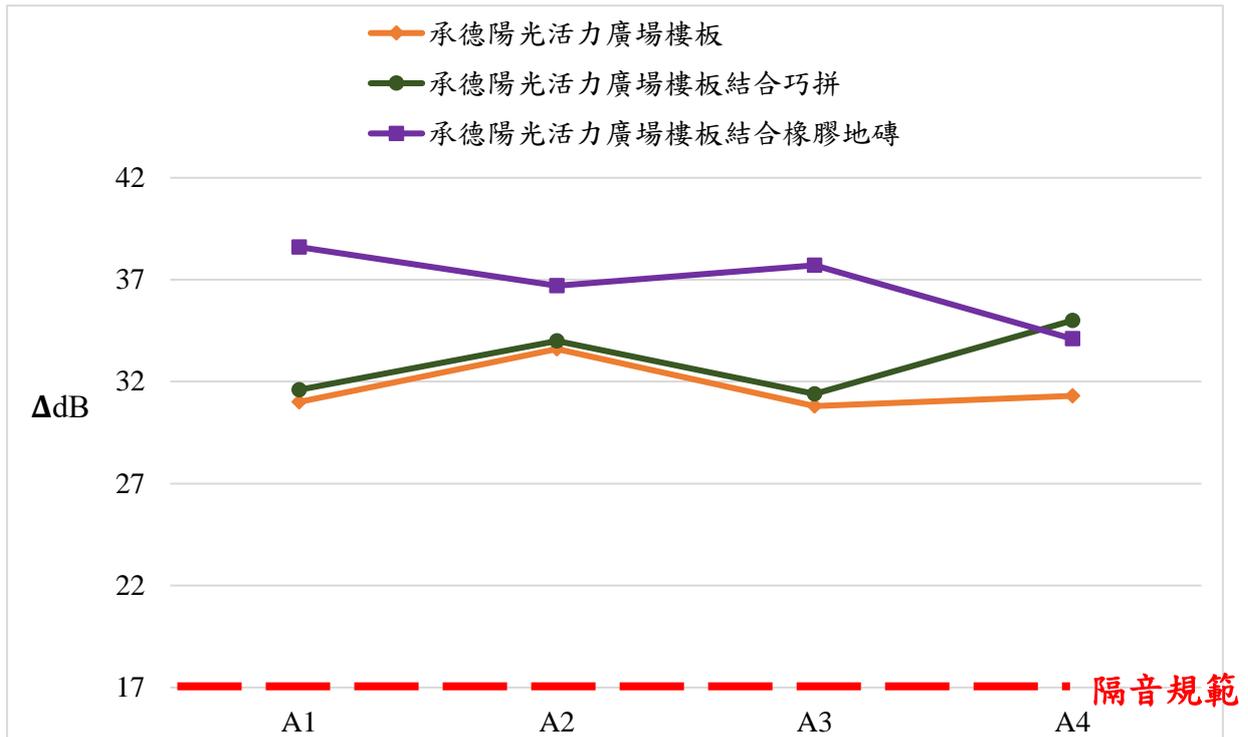


圖 4.5 落距 150cm 及鋼球 1kg 之隔音效果

六、落距 150cm 及鋼球 2kg

從表 4.16 實驗結果可知，當樓板表面未鋪設緩衝材及表面材且鋼球砸落時，音源室之噪音最高為 100.5dB，再依照各聲壓位準計算可得降低之分貝數，如表 4.17 所示。在各區域中效果依序如下：承德陽光活力廣場樓板可降低 30.4dB、承德陽光活力廣場樓板結合巧拼可降低 31.5dB 及承德陽光活力廣場樓板結合橡膠地磚可降低 35.9dB，整體量測之測試結果皆優於規範 17dB 以上（參考圖 4.6）。

表 4.16 落距 150cm 及鋼球 2kg 測得之分貝數

地點 地點及變數	A1			A2			A3			A4		
	承德陽光活力廣場 (音源室)	95.6	96.0	98.7	97.1	100.5	99.5	97.7	98.1	97.7	96.3	96.6
承德陽光活力廣場樓板 (受音室)	67.4	67.5	67.6	64.7	64.9	65.0	68.6	68.6	69.0	67.0	67.1	67.1
承德陽光活力廣場樓板 +巧拼 (受音室)	66.8	67.1	67.6	64.0	65.3	65.4	68.0	68.0	68.0	63.9	64.0	63.3
承德陽光活力廣場樓板 +橡膠地磚 (受音室)	60.3	60.3	60.4	61.2	61.2	61.1	61.4	61.1	60.8	63.6	63.7	63.6

單位：dB



表 4.17 落距 150cm 及鋼球 2kg 降低之分貝數

地點 地點及變數	A1			A2			A3			A4		
	降低之分貝數											
承德陽光活力廣場樓板 (受音室)	28.2	28.5	31.1	32.4	35.6	34.5	29.1	29.5	28.7	29.3	29.5	28.3
承德陽光活力廣場樓板 +巧拼 (受音室)	28.8	28.9	31.1	33.1	35.2	34.1	29.7	30.1	29.7	32.4	32.6	32.1
承德陽光活力廣場樓板 +橡膠地磚 (受音室)	35.3	35.7	38.3	35.9	39.3	38.4	36.3	37.0	36.9	32.7	32.9	31.8

單位：dB

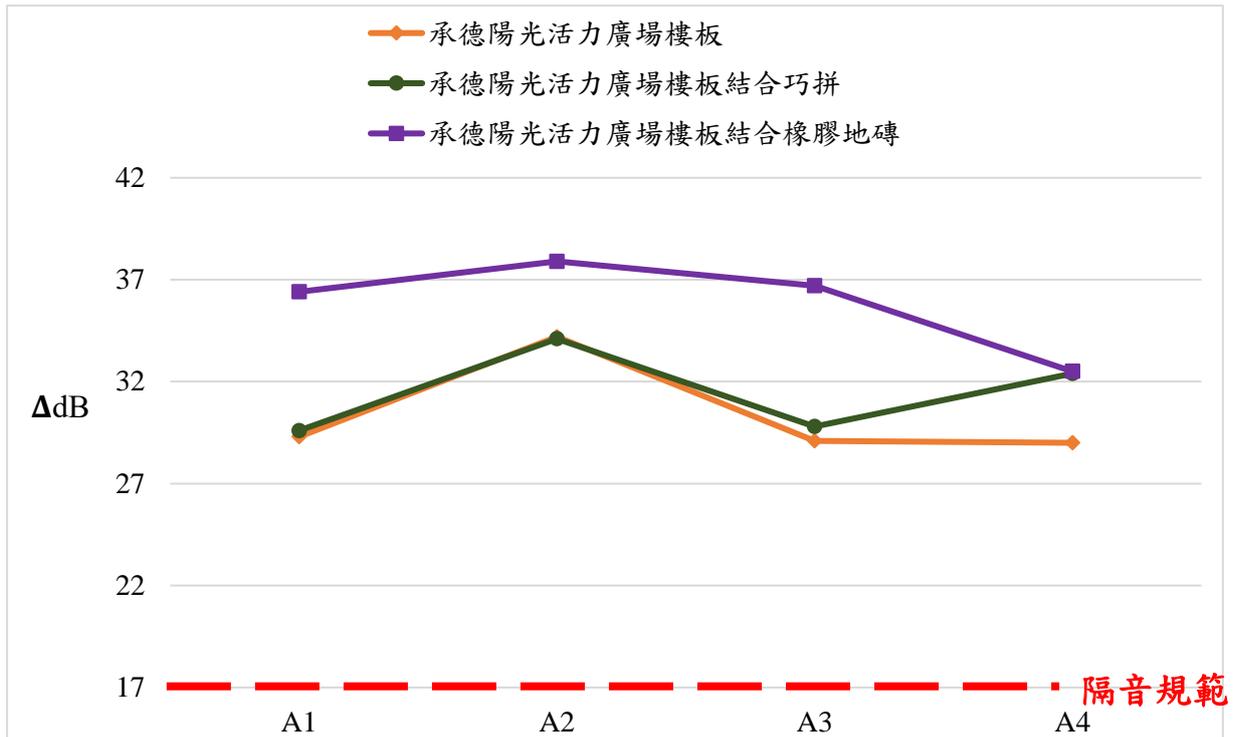


圖 4.6 落距 150cm 及鋼球 2kg 之隔音效果

七、落距 210cm 及鋼球 0.5kg

從表 4.18 實驗結果可知，當樓板表面未鋪設緩衝材及表面材且鋼球砸落時，音源室之噪音最高為 91.5dB，再依照各聲壓位準計算可得降低之分貝數，如表 4.19 所示。在各區域中效果依序如下：承德陽光活力廣場樓板可降低 31.6dB、承德陽光活力廣場樓板結合巧拼可降低 32.7dB 及承德陽光活力廣場樓板結合橡膠地磚可降低 34.9dB，整體量測之測試結果皆優於規範 17dB 以上（參考圖 4.7）。

表 4.18 落距 210cm 及鋼球 0.5kg 測得之分貝數

地點 地點及變數	A1			A2			A3			A4		
	承德陽光活力廣場 (音源室)	88.1	88.6	91.5	89.7	88.8	88.2	88.6	88.7	89.3	88.3	86.9
承德陽光活力廣場樓板 (受音室)	57	57.8	58	56.9	54.9	55.3	58.5	57.9	58.1	56.5	56.7	56
承德陽光活力廣場樓板 +巧拼 (受音室)	57.1	61	58.3	55.1	55.1	55.2	57.2	57.9	57.3	52	51.8	52.2
承德陽光活力廣場樓板 +橡膠地磚 (受音室)	52.7	52.2	52.7	54.3	54	53.4	53.5	53.6	54.1	54.9	54.5	54.5

單位：dB

表 4.19 落距 210cm 及鋼球 0.5kg 降低之分貝數

地點 地點及變數	A1			A2			A3			A4		
	降低之分貝數											
承德陽光活力廣場樓板 (受音室)	31.1	30.8	33.5	32.8	33.9	32.9	30.1	30.8	31.2	31.8	30.2	30.3
承德陽光活力廣場樓板 +巧拼 (受音室)	31	27.6	33.2	34.6	33.7	33	31.4	30.8	32	36.3	35.1	34.1
承德陽光活力廣場樓板 +橡膠地磚 (受音室)	35.4	36.4	38.8	35.4	34.8	34.8	35.1	35.1	35.2	33.4	32.4	31.8

單位：dB

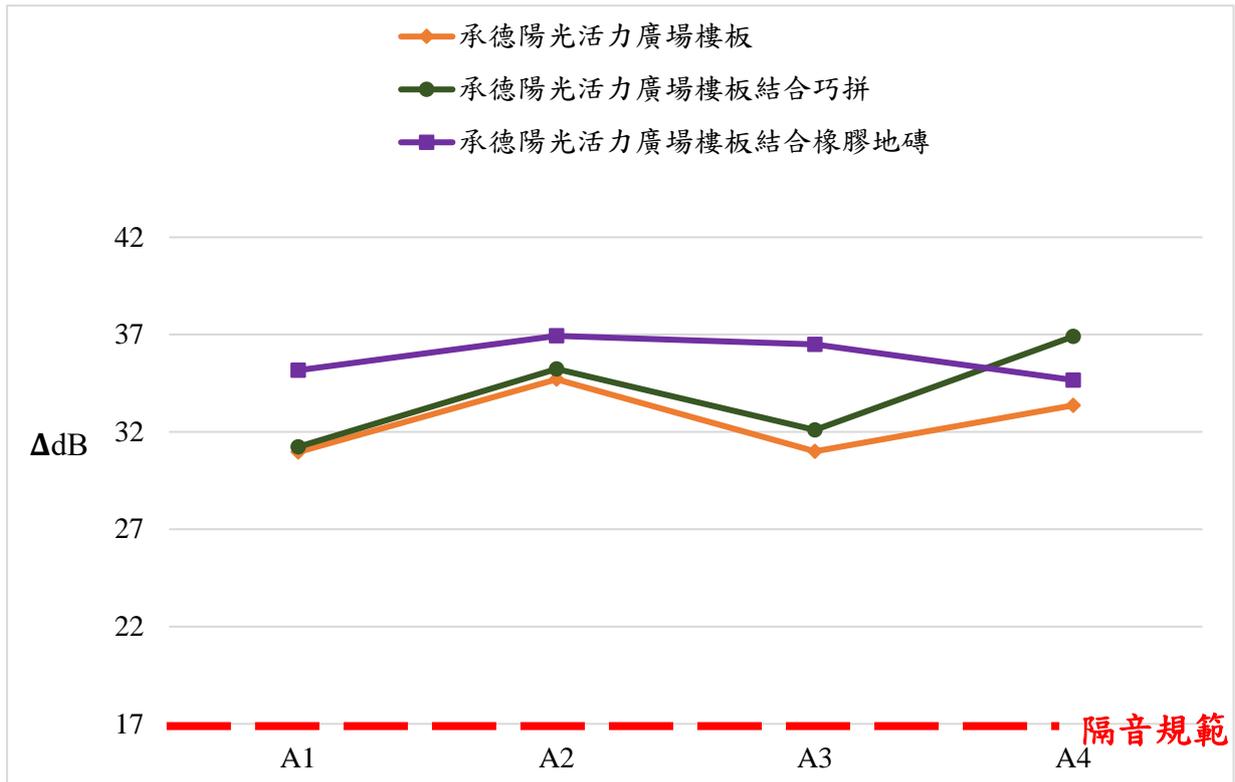


圖 4.7 落距 210cm 及鋼球 0.5kg 之隔音效果

八、落距 210cm 及鋼球 1kg

從表 4.20 實驗結果可知，當樓板表面未鋪設緩衝材及表面材且鋼球砸落時，音源室之噪音最高為 98.6dB，再依照各聲壓位準計算可得降低之分貝數，如表 4.21 所示。在各區域中效果依序如下：承德陽光活力廣場樓板可降低 33.0dB、承德陽光活力廣場樓板結合巧拼可降低 33.9dB 及承德陽光活力廣場樓板結合橡膠地磚可降低 37.0dB，整體量測之測試結果皆優於規範 17dB 以上（參考圖 4.8）。

表 4.20 落距 210cm 及鋼球 1kg 測得之分貝數

地點 地點及變數	A1			A2			A3			A4		
	承德陽光活力廣場 (音源室)	95.1	95.9	98.0	97.2	97.2	97.7	96.5	98.6	95.1	94.6	93.2
承德陽光活力廣場樓板 (受音室)	64.5	64.3	64.4	61.5	61.1	62.0	64.6	64.9	64.5	62.7	62.9	63.1
承德陽光活力廣場樓板 +巧拼 (受音室)	63.8	64.0	65.3	61.4	61.7	61.8	63.9	64.8	64.0	59.5	59.4	60.3
承德陽光活力廣場樓板 +橡膠地磚 (受音室)	58.6	57.9	58.3	58.9	59.1	58.8	58.5	58.8	58.6	61.8	61.3	61.4

單位：dB



表 4.21 落距 210cm 及鋼球 1kg 降低之分貝數

地點 地點及變數	A1			A2			A3			A4		
	降低之分貝數											
承德陽光活力廣場樓板 (受音室)	30.6	31.6	33.6	35.7	36.1	35.7	31.9	33.7	30.6	31.9	30.3	33.9
承德陽光活力廣場樓板 +巧拼 (受音室)	31.3	31.9	32.7	35.8	35.5	35.9	32.6	33.8	31.1	35.1	33.8	36.7
承德陽光活力廣場樓板 +橡膠地磚 (受音室)	36.5	38.0	39.7	38.3	38.1	38.9	38.0	39.8	36.5	32.8	31.9	35.6

單位：dB

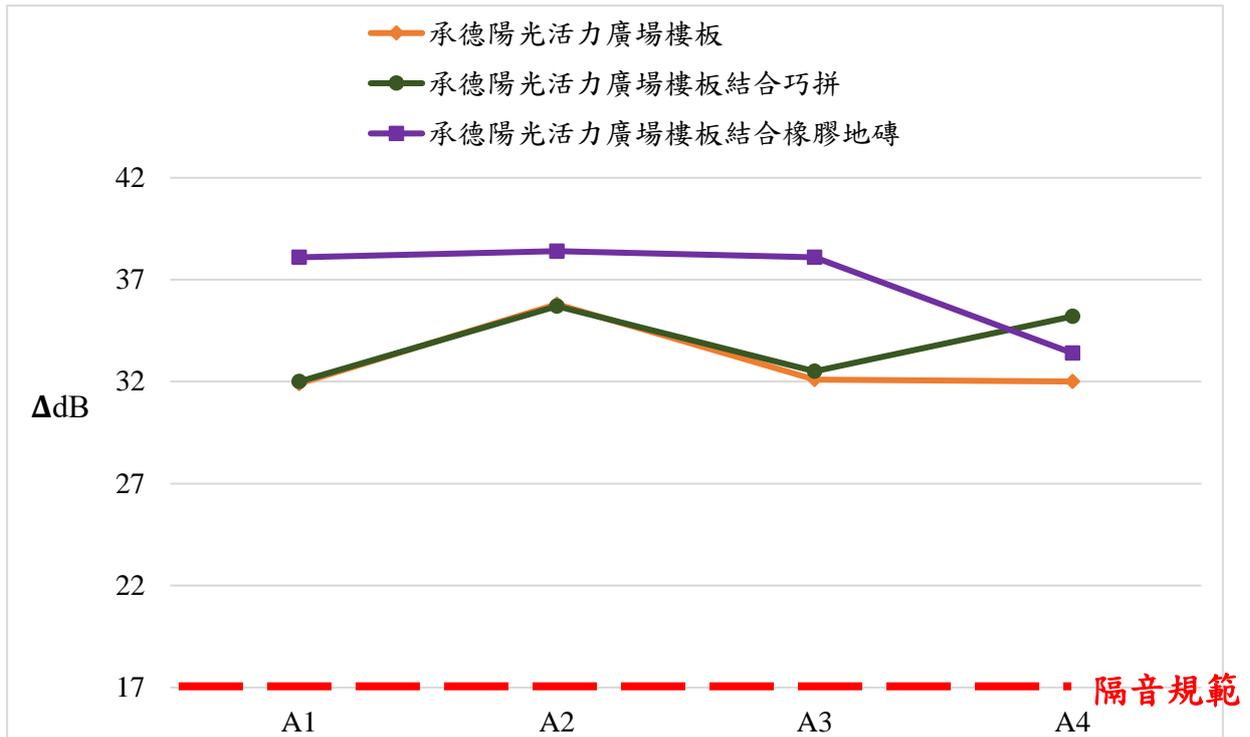


圖 4.8 落距 210cm 及鋼球 1kg 之隔音效果

九、落距 210cm 及鋼球 2kg

從表 4.22 實驗結果可知，當樓板表面未鋪設緩衝材及表面材且鋼球砸落時，音源室之噪音最高為 100.8dB，再依照各聲壓位準計算可得降低之分貝數，如表 4.23 所示。在各區域中效果依序如下：承德陽光活力廣場樓板可降低 31.2dB、承德陽光活力廣場樓板結合巧拼可降低 31.9dB 及承德陽光活力廣場樓板結合橡膠地磚可降低 35.5dB，整體量測之測試結果皆優於規範 17dB 以上（參考圖 4.9）。

表 4.22 落距 210cm 及鋼球 2kg 測得之分貝數

地點 地點及變數	A1			A2			A3			A4		
	承德陽光活力廣場 (音源室)	98.5	99.8	99.7	99.5	99.5	100.8	98.2	99.3	99.4	99.2	99.4
承德陽光活力廣場樓板 (受音室)	69.6	69.0	69.2	66.1	66.0	66.1	68.8	69.1	69.1	67.3	68.1	68.3
承德陽光活力廣場樓板 +巧拼 (受音室)	68.6	69.1	69.1	65.7	66.0	66.3	68.7	69.0	68.6	66.0	65.7	65.3
承德陽光活力廣場樓板 +橡膠地磚 (受音室)	62.8	62.6	62.9	63.1	62.9	63.4	63.6	63.4	63.5	65.7	66.0	65.7

單位：dB



表 4.23 落距 210cm 及鋼球 2kg 降低之分貝數

地點 地點及變數	A1			A2			A3			A4		
	降低之分貝數											
承德陽光活力廣場樓板 (受音室)	28.9	30.8	30.5	33.4	33.5	34.7	29.4	30.2	30.3	31.9	31.3	29.8
承德陽光活力廣場樓板 +巧拼 (受音室)	29.9	30.7	30.6	33.8	33.5	34.5	29.5	30.3	30.8	33.2	33.7	32.8
承德陽光活力廣場樓板 +橡膠地磚 (受音室)	35.7	37.2	36.8	36.4	36.6	37.4	34.6	35.9	35.9	33.5	33.4	32.4

單位：dB

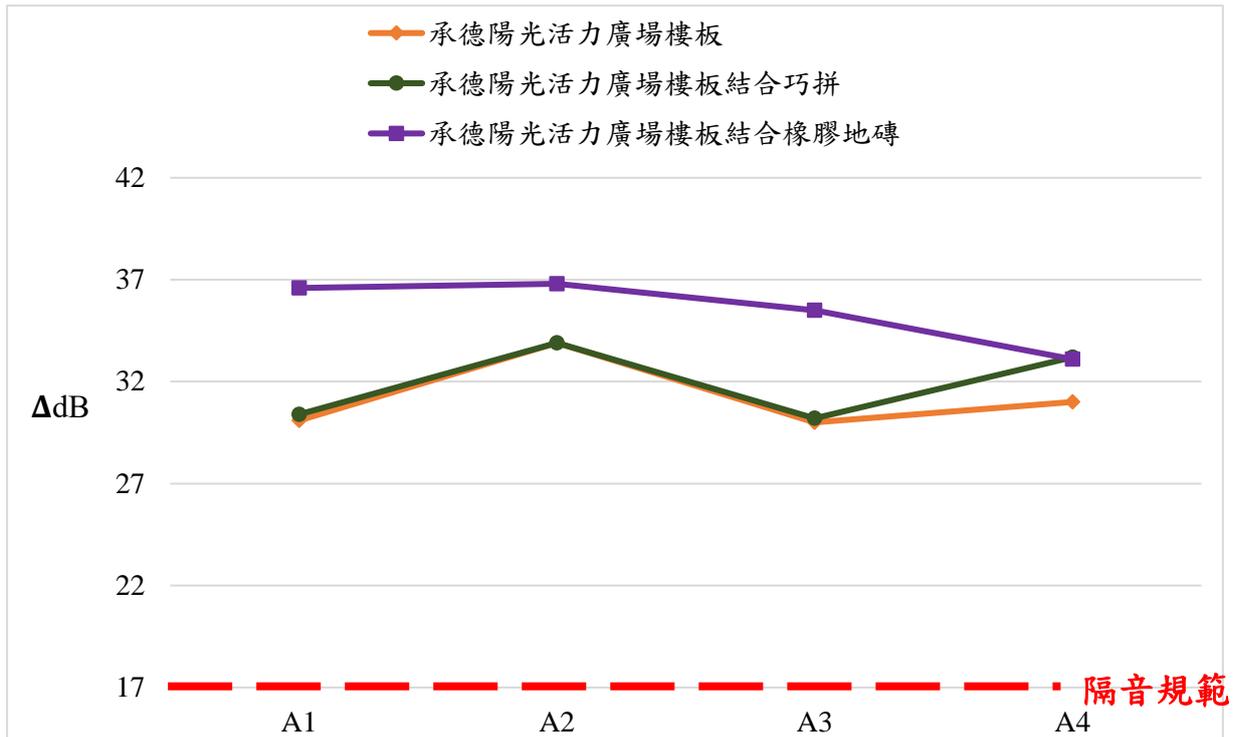


圖 4.9 落距 210cm 及鋼球 2kg 之隔音效果

4.2.2 圖書館三樓樓板

圖書館三樓樓板現地實驗主要將目的為量測三種落距（50cm、150cm、210cm）、三種鋼球質量（0.5kg、1kg、2kg）、四處衝擊源位置及三次衝擊聲壓位準，故共計一百零八組數據，經前述實驗對象定位後，即可開始量測數據，而實驗數據分別為：（一）音源室進行試驗時，於受音室及音源室量測之噪音分貝數、（二）於音源室所量測之分貝數扣除受音室量測之噪音分貝數即為該組變數降低之分貝數（ Δ dB）；由量測之結果進行分析，以探討分析圖書館三樓樓板之隔音效能。

實驗依序為：落距 50cm 及鋼球 0.5kg、1kg、2kg；落距 150cm 及鋼球 0.5kg、1kg、2kg；落距 210cm 及鋼球 0.5kg、1kg、2kg，實驗結果依序如下：

一、落距 50cm 及鋼球 0.5kg、1kg、2kg

從表 4.24 實驗結果可知，當樓板表面未鋪設緩衝材及表面材且鋼球砸落時，音源室之噪音最高為 95.0dB，再依照各聲壓位準計算可得降低之分貝數，如表 4.25 所示。在

各區域中效果依序如下：圖書館三樓樓板於鋼球 0.5kg 時可降低 7.9dB、圖書館三樓樓板於鋼球 1kg 時可降低 7.1dB 及圖書館三樓樓板於鋼球 2kg 時可降低 6.8dB，整體量測之測試結果皆劣於規範 17dB 以上（參考圖 4.10）。

表 4.24 落距 50cm 及鋼球 0.5kg、1kg、2kg 測得之分貝數

地點及變數		地點			A1			A2			A3			A4		
圖書館三樓 (音源室)	2kg	88.6	89.3	88.1	88.1	87.8	85.2	90.8	91.4	93.9	93.2	95.0	95.0			
	1kg	85.2	85.2	84.9	87.1	88.6	84.7	89.8	89.8	88.5	93.3	92.0	91.7			
	0.5kg	85.2	85.9	83.2	79.4	82.2	80.2	86.1	85.7	86.3	85.6	84.6	86.5			
圖書館三樓樓板 (音源室)	2kg	82.2	82.3	80.1	80.8	79.9	81.5	83.7	85.0	85.4	86.8	88.2	88.7			
	1kg	77.8	77.2	77.7	79.7	80.2	77.1	82.7	83.2	82.2	86.6	85.7	85.6			
	0.5kg	74.5	77.2	75.1	70.6	71.2	71.0	79.8	79.0	80.4	78.7	79.0	80.2			

單位：dB

表 4.25 落距 50cm 及鋼球 0.5kg、1kg、2kg 降低之分貝數

地點及變數		地點			A1			A2			A3			A4		
		降低之分貝數														
圖書館三樓樓板 (音源室)	2kg	6.4	7.0	8.0	7.3	7.9	3.7	7.1	6.4	8.5	6.4	6.8	6.3			
	1kg	7.4	8.0	7.2	7.4	8.4	7.6	7.1	6.6	6.3	6.7	6.3	6.1			
	0.5kg	10.7	8.7	8.1	8.8	11.0	9.2	6.3	6.7	5.9	6.9	5.6	6.3			

單位：dB

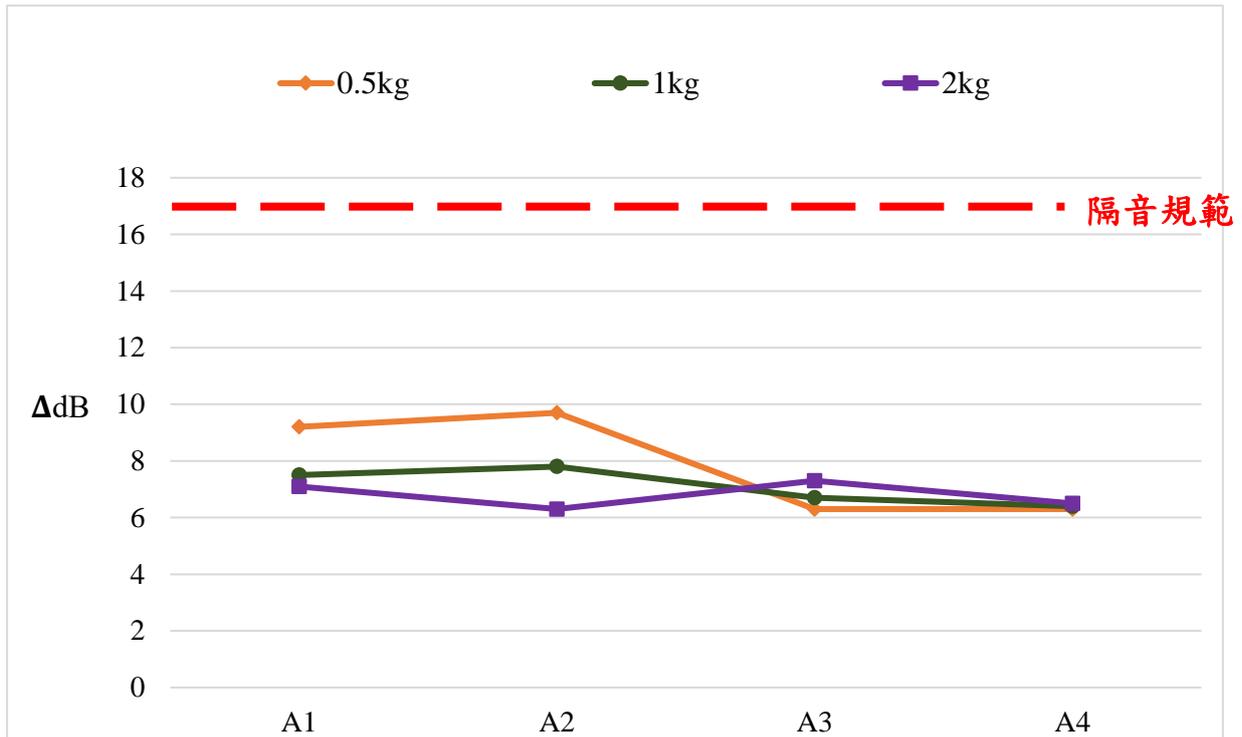


圖 4.10 落距 50cm 及鋼球 0.5kg、1kg、2kg 之隔音效果

二、落距 150cm 及鋼球 0.5kg、1kg、2kg

從表 4.26 實驗結果可知，當樓板表面未鋪設緩衝材及表面材且鋼球砸落時，音源室之噪音最高為 101.8dB，再依照各聲壓位準計算可得降低之分貝數，如表 4.27 所示。在各區域中效果依序如下：圖書館三樓樓板於鋼球 0.5kg 時可降低 9.3dB、圖書館三樓樓板於鋼球 1kg 時可降低 7.8dB 及圖書館三樓樓板於鋼球 2kg 時可降低 7.1dB，整體量測之測試結果皆劣於規範 17dB 以上（參考圖 4.11）。

表 4.26 落距 150cm 及鋼球 0.5kg、1kg、2kg 測得之分貝數

地點及變數		A1			A2			A3			A4		
圖書館三樓 (音源室)	2kg	93.4	96.3	96.4	91.9	94.1	94.5	96.1	97.6	98.6	97.6	100.1	101.8
	1kg	91.6	93.9	94.4	91.7	90.8	93.8	95.5	95.0	95.5	95.1	96.1	95.2
	0.5kg	92.3	90.9	88.3	94.3	87.4	90.0	92.9	95.2	91.6	90.3	92.5	92.5
圖書館三樓樓板 (音源室)	2kg	86.8	88.9	88.9	84.0	85.3	85.7	89.4	91.1	91.2	92.2	94.4	95.4
	1kg	84.2	86.2	86.7	80.2	81.6	83.0	89.3	88.3	88.4	88.4	89.6	89.5
	0.5kg	84.0	82.6	79.3	77.1	76.7	76.2	84.8	86.5	84.2	84.2	85.5	85.1

單位：dB

表 4.27 落距 150cm 及鋼球 0.5kg、1kg、2kg 降低之分貝數

地點及變數		A1			A2			A3			A4		
		降低之分貝數											
圖書館三樓樓板 (音源室)	2kg	6.6	7.4	7.5	7.9	8.8	8.8	6.7	6.5	7.4	5.4	5.7	6.4
	1kg	7.4	7.7	7.7	11.5	9.2	10.8	6.2	6.7	7.1	6.7	6.5	5.7
	0.5kg	8.3	8.3	9.0	17.2	10.7	13.8	8.1	8.7	7.4	6.1	7.0	7.4

單位：dB

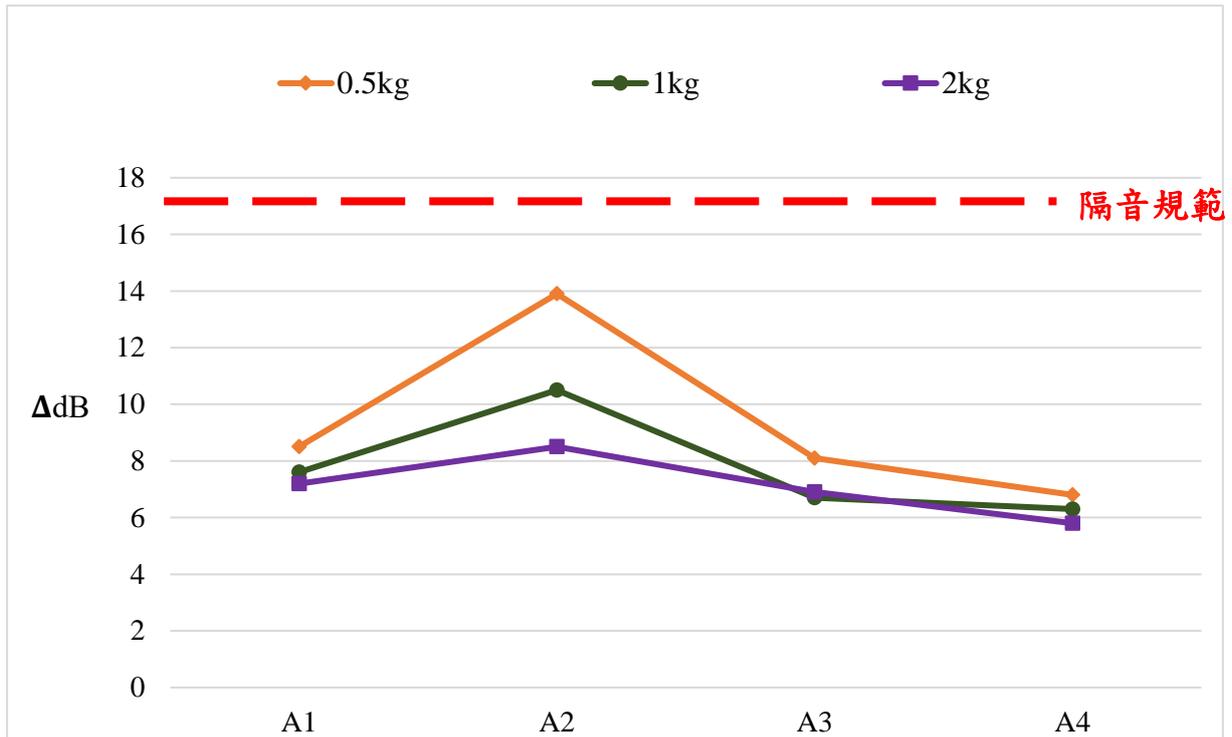


圖 4.11 落距 150cm 及鋼球 0.5kg、1kg、2kg 之隔音效果

三、落距 210cm 及鋼球 0.5kg、1kg、2kg

從表 4.28 實驗結果可知，當樓板表面未鋪設緩衝材及表面材且鋼球砸落時，音源室之噪音最高為 101.8dB，再依照各聲壓位準計算可得降低之分貝數，如表 4.29 所示。在各區域中效果依序如下：圖書館三樓樓板於鋼球 0.5kg 時可降低 9.6dB、圖書館三樓樓板於鋼球 1kg 時可降低 8.0dB 及圖書館三樓樓板於鋼球 2kg 時可降低 7.1dB，整體量測之測試結果皆劣於規範 17dB 以上（參考圖 4.12）。

表 4.28 落距 210cm 及鋼球 0.5kg、1kg、2kg 測得之分貝數

地點及變數		A1			A2			A3			A4		
圖書館三樓 (音源室)	2kg	98.7	96.0	97.5	95.6	97.7	98.6	99.8	100.4	99.8	99.3	100.3	101.8
	1kg	94.5	94.8	95.6	98.2	98.5	97.5	97.8	93.5	98.9	95.8	98.7	97.2
	0.5kg	85.9	88.2	88.4	97.5	97.4	93.4	92.5	92.3	92.0	93.3	93.7	94.3
圖書館三樓樓板 (音源室)	2kg	92.2	89.9	90.7	86.6	87.4	89.0	93.3	93.9	94.1	93.9	94.1	95.8
	1kg	88.8	88.3	88.4	84.9	86.2	84.3	91.9	88.3	92.0	89.7	92.1	90.7
	0.5kg	79.8	80.4	81.1	78.3	81.8	79.2	85.2	85.6	85.0	85.5	85.9	86.4

單位：dB

表 4.29 落距 210cm 及鋼球 0.5kg、1kg、2kg 降低之分貝數

地點及變數		A1			A2			A3			A4		
		降低之分貝數											
圖書館三樓樓板 (音源室)	2kg	6.5	6.1	6.8	9.0	10.3	9.6	6.5	6.5	5.7	5.4	6.2	6.0
	1kg	5.7	6.5	7.2	13.3	12.3	13.2	5.9	5.2	6.9	6.1	6.6	6.5
	0.5kg	6.1	7.8	7.3	19.2	15.6	14.2	7.3	6.7	7.0	7.8	7.8	7.9

單位：dB

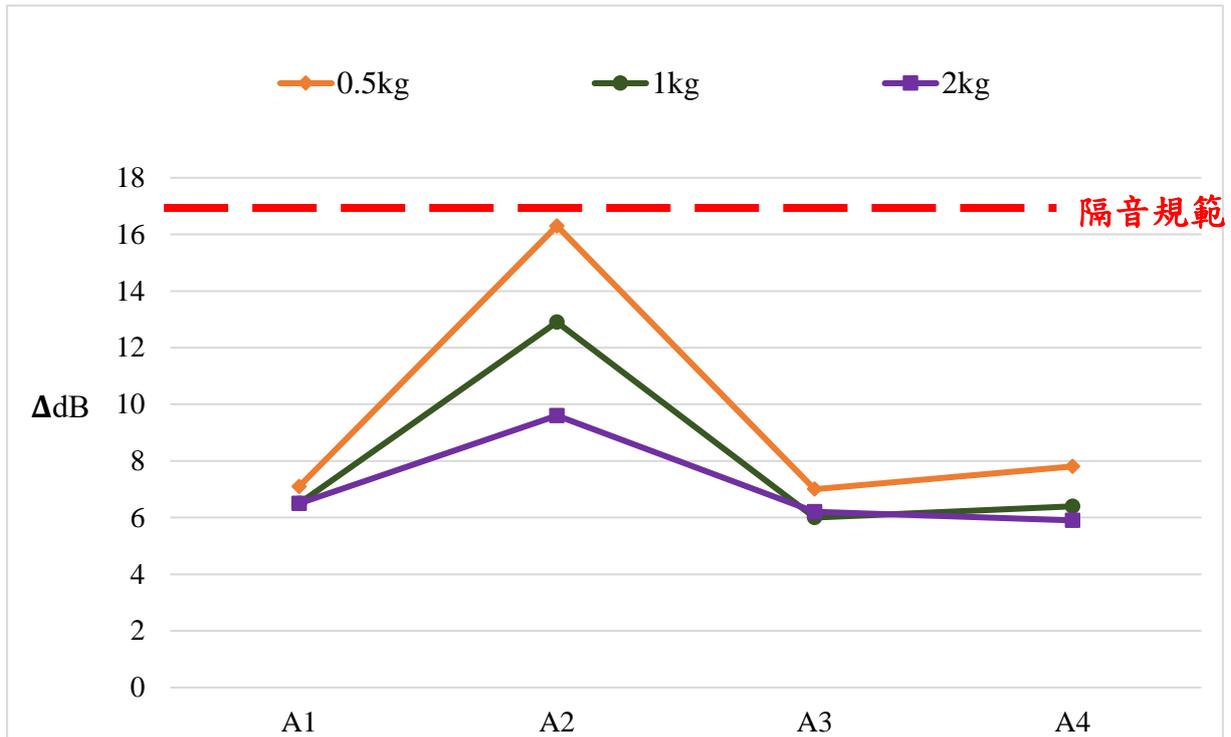


圖 4.12 落距 210cm 及鋼球 0.5kg、1kg、2kg 之隔音效果

4.2.3 現地實驗量測結果分析

現地實驗探討承德陽光活力廣場結合樓板表層材共計三百二十四組數據及圖書館三樓樓板共計一百零八組數據。

承德陽光活力廣場結合樓板表層材之現地量測共計有三百二十四組數據，本研究將其隔音效果依照鋼球落距 50cm、150cm 及 210cm 排序出承德陽光活力廣場樓板、承德陽光活力廣場樓板結合巧拼及承德陽光活力廣場結合橡膠地磚三種不同地板組合類型之隔音效果分別如圖 4.13、圖 4.14 及圖 4.15 所示。據此可得知隔音效果最佳者為承德陽光活力廣場結合橡膠地磚，不論在鋼球落距 50cm 組、150cm 組或 210cm 組中皆為最佳，且在落距 50cm、鋼球質量 2kg 量測時可降低 38dB 為最大值。

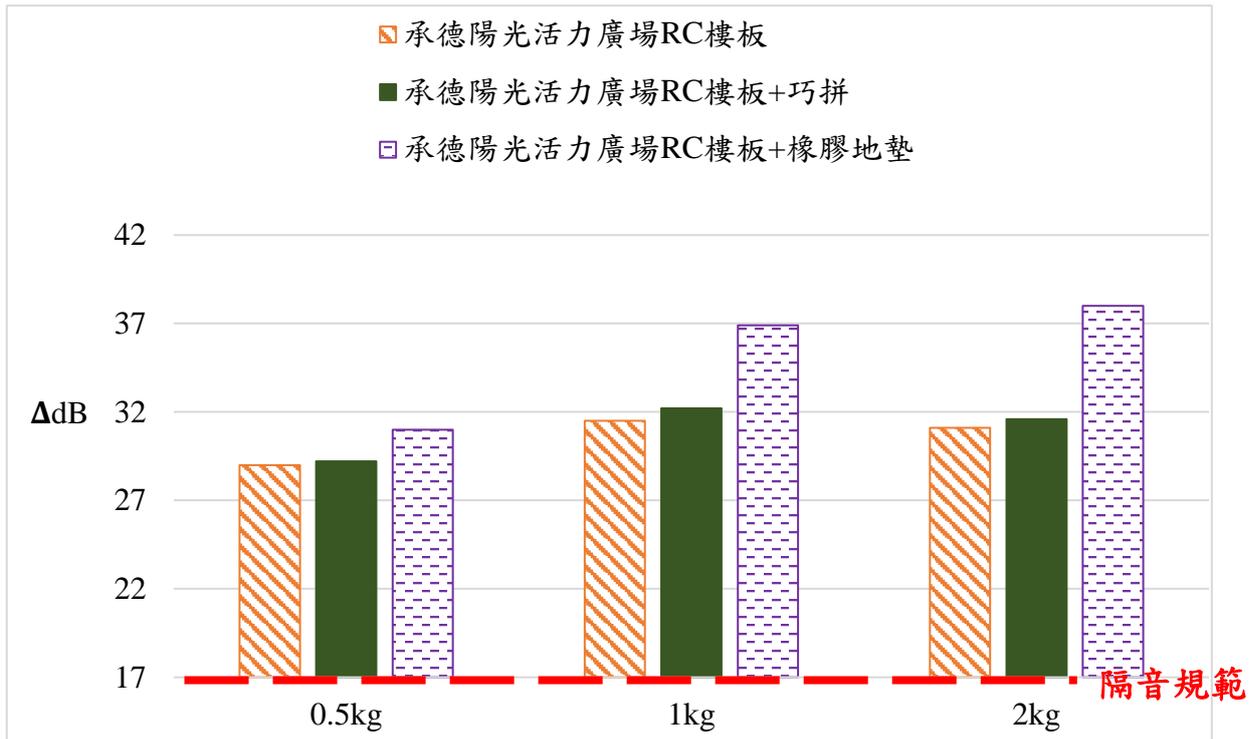


圖 4.13 落距 50cm 及鋼球 0.5kg、1kg、2kg 之隔音效果

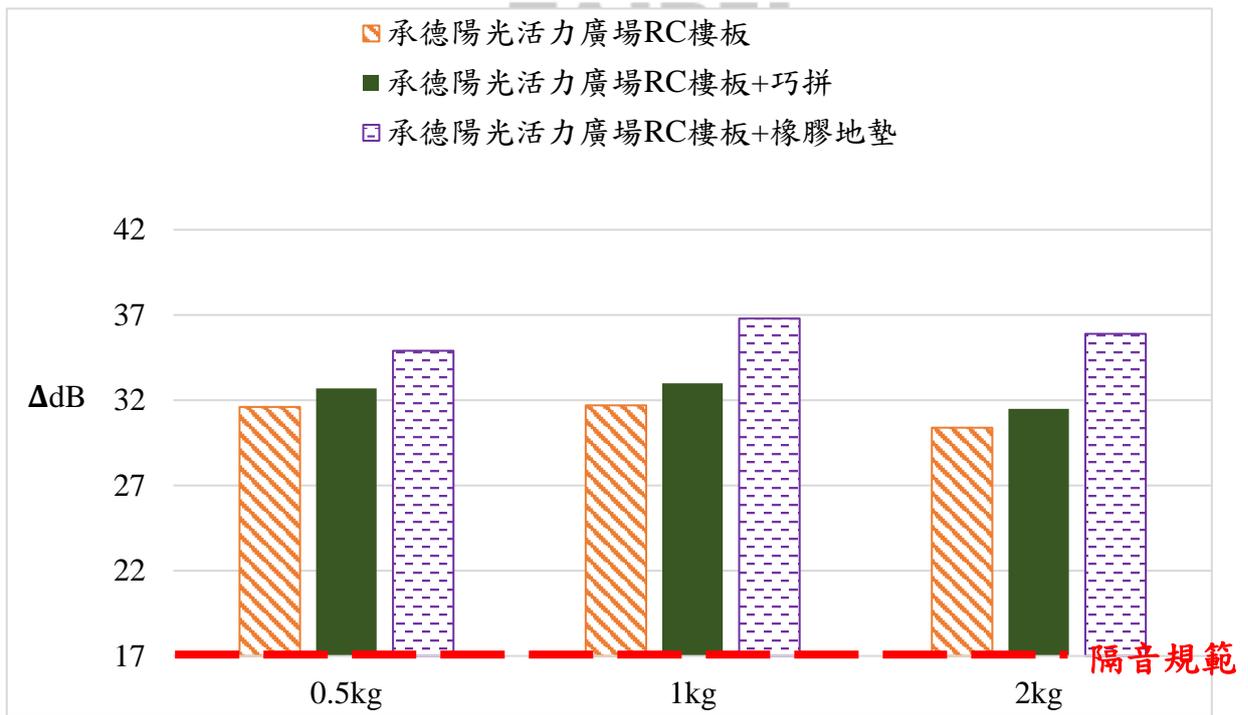


圖 4.14 落距 150cm 及鋼球 0.5kg、1kg、2kg 之隔音效果

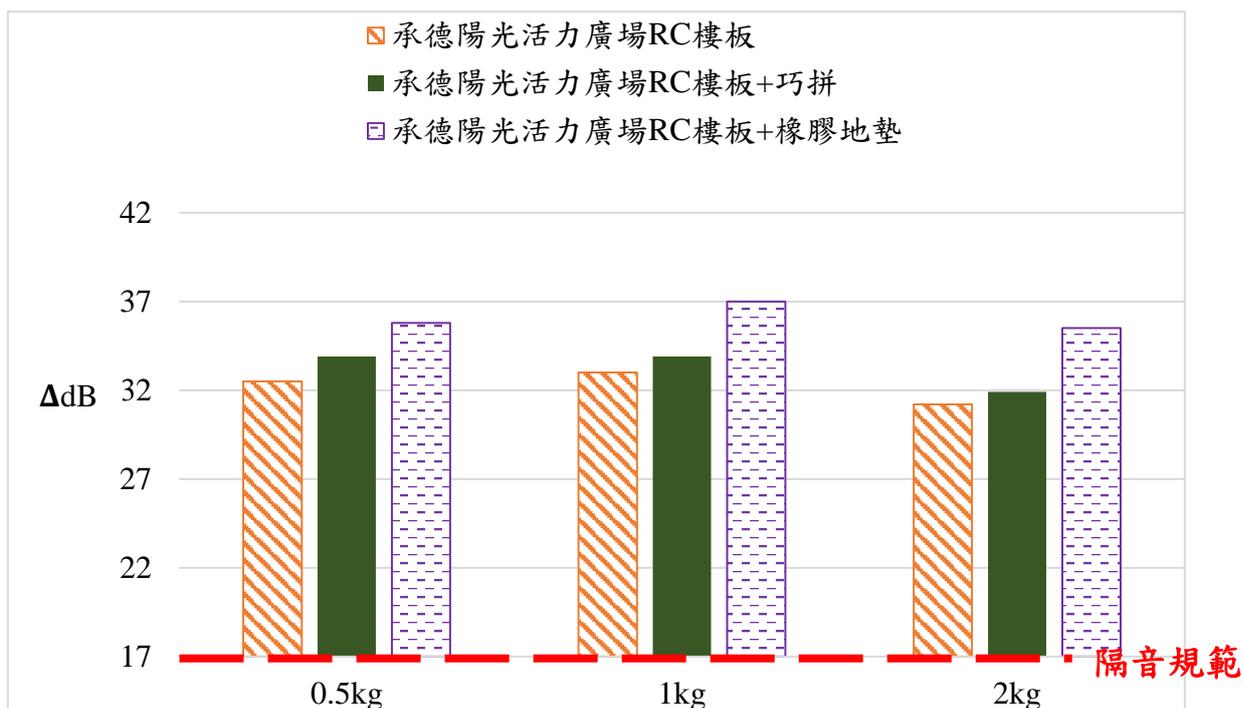


圖 4.15 落距 210cm 及鋼球 0.5kg、1kg、2kg 之隔音效果

圖書館三樓樓板將其隔音效果依照落距 50cm、150cm 及 210cm 排序，如圖 4.16 所示。得知在各敲擊次數中隔音效果不論在 50cm 組、150cm 組及 210cm 組中皆未符合規範，且在落距 210cm、鋼球質量 0.5kg 量測時僅降低 9.6dB 為最大值。

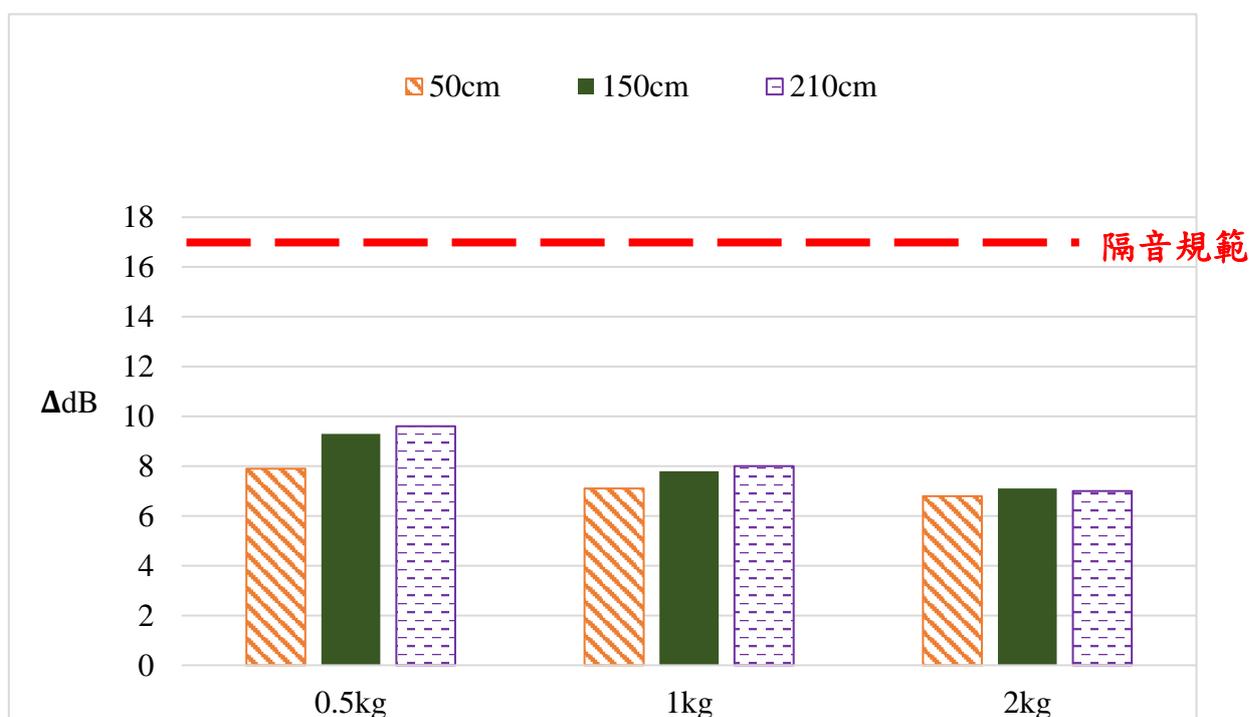


圖 4.16 落距 50cm、150cm、210cm 及鋼球 0.5kg、1kg、2kg 之隔音效果

4.3 模擬實驗數據及隔音效能分析

本研究主要將模擬實驗試體分為單一材料及複合材料，其中複合材料可再細分為三大類，故共計四十組數據，經所有試體組合完成後，即可開始量測數據，而實驗數據分別為：(一)音源室無試體時，於受音室量測之噪音分貝數、(二)音源室放置試體時，於受音室量測之噪音分貝數及(三)無試體所量測之分貝數扣除試體阻擋噪音源所量測之分貝數即為該組試體降低之分貝數 (Δ dB)；由量測之結果進行分析，以探討分析地工泡棉 (EPS) 結合樓板表層材之隔音效能。

4.3.1 單一材料

本實驗針對單一類別材料共進行九組試體之衝擊音隔音性能測試，材料類型包括：未鋪設任何緩衝材與表面材 (作為基準組)、40 mm 厚之 EPS 材料 (分別為 15K、20K、25K 及 30K)、5 mm 厚橡膠隔音墊、15 mm 厚 PE 隔音墊、EVA 巧拼，以及橡膠地磚；根據表 4.30 之實驗結果顯示，當樓板未鋪設任何緩衝材與表面材時，其所測得之最高噪音值為 93.7 dB。經由各組試體實驗結果與基準值進行比較，可得各材料之最大隔音量 (Δ dB) 排序如下：25K EPS 可降低 40.8dB、20K EPS 可降低 39.5dB、15K EPS 可降低 38.3dB、30K EPS 可降低 35.8dB、橡膠地磚可降低 23.6dB、橡膠隔音墊可降低 7.7 dB、巧拼可降低 3.6dB 及 PE 隔音墊可降低 2.0dB，因此 25K EPS 為單一材料中隔音效果最優者，而 PE 隔音墊為隔音效果最差者，整體試體中僅不同密度之 EPS 試體其隔音效果皆高於法規訂定之 17dB 以上 (參考圖 4.17)。

表 4.30 單一材料實驗數據

變數 \ 次數	第一次敲擊	第二次敲擊	第三次敲擊	第四次敲擊	第五次敲擊
無緩衝材及表面材	92.2	92.6	93.2	93.7	92.9
15K EPS	55.3	56.0	55.4	55.4	55.6
20K EPS	54.4	54.8	54.1	54.2	54.7
25K EPS	53.6	53.0	53.4	52.9	53.4
30K EPS	58.0	57.9	57.4	57.9	57.1
橡膠隔音墊	85.0	85.7	85.9	86.0	86.0
PE 隔音墊	91.6	91.8	91.2	91.7	92.0
巧拼	90.2	90.6	90.7	90.1	90.4
橡膠地磚	69.8	69.8	70.1	70.1	69.7

單位：dB

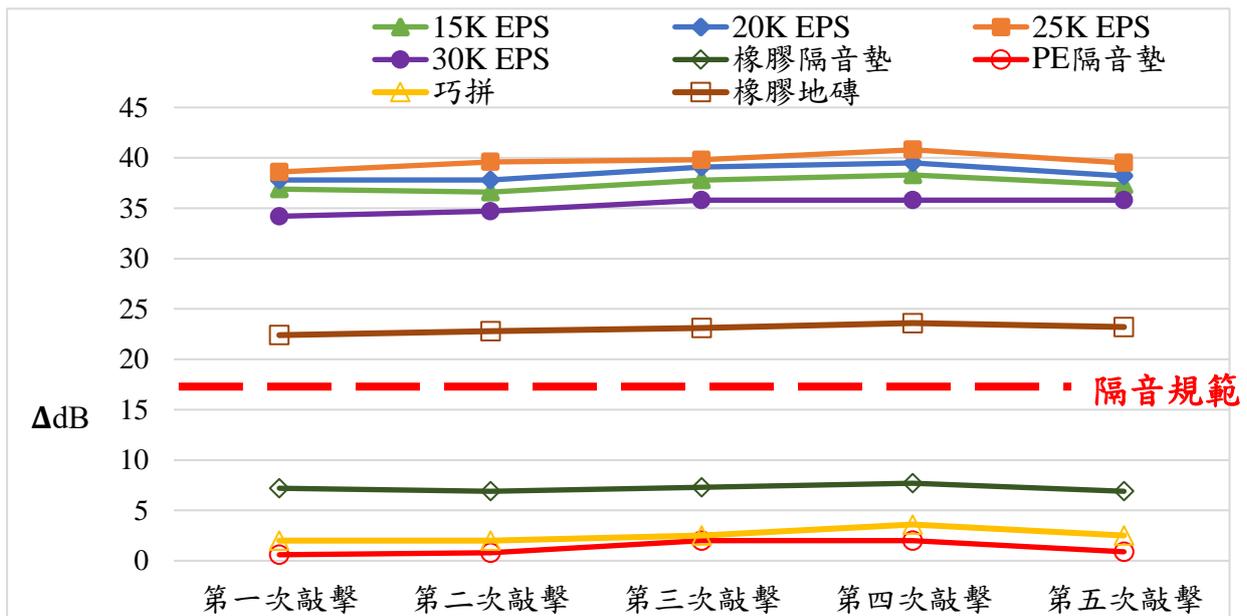


圖 4.17 單一材料隔音效果

經由單一材料實驗可得知當 30K 之 EPS 因隔音效能超過臨界值，隔音效果效益將逐漸下降，因此，本研究將針對 15K、20K 及 25K 之 EPS 密度 (K 值) 可降低之分貝數 (Δ dB) 進行線性迴歸分析，結果如表 4.31 所示，敲擊次數總計共 5 次，線性迴歸之判定係數分別為第一次敲擊 $R^2=0.9988$ 、第二次敲擊 $R^2=0.9868$ 、第三次敲擊

$R^2=0.9709$ 、第四次敲擊 $R^2=0.9995$ 及第五次敲擊 $R^2=0.9891$ ，水準皆達優異，表示 EPS 之 K 值於 15~25K 時可以有效預測隔音效果。

表 4.31 40mm EPS 線性迴歸方程式及判定係數 R^2

次數	迴歸方程式	判定係數 R^2
第一次敲擊	$y = 0.17x + 34.3667$	0.9988
第二次敲擊	$y = 0.3x + 32$	0.9868
第三次敲擊	$y = 0.2x + 34.9$	0.9709
第四次敲擊	$y = 0.25x + 34.5333$	0.9995
第五次敲擊	$y = 0.22x + 33.9333$	0.9891

註： $p < 0.05$ ， $p < 0.01$ 。

4.3.2 第一類複合材料

模擬實驗之第一類複合材料共計九組數據，分別為未鋪設任何緩衝材與表面材之基準組、以及分別由 40 mm 厚之 15K、20K、25K 及 30K EPS 材料分別結合橡膠隔音墊與 PE 隔音墊所構成之複合材組；從表 4.32 實驗結果可知，基準組（未鋪設緩衝材）測得之最大衝擊音值為 93.7 dB，經由各組複合材料之測試數據與基準值進行比較，所獲得之最大噪音降低量（ Δ dB）依優劣順序排列如下：25K EPS+PE 隔音墊可降低 41.9dB、20K EPS+PE 隔音墊可降低 41.6dB、25K EPS+橡膠隔音墊可降低 41.1dB、15K EPS+PE 隔音墊可降低 40.7dB、20K EPS+橡膠隔音墊可降低 39.7dB、30K EPS+PE 隔音墊和 15K EPS+橡膠隔音墊可降低 38.7dB 及 30K EPS+橡膠隔音墊可降低 34.8dB，因此隔音效益最佳者為「25K EPS + PE 隔音墊」組合，其隔音量達 41.9 dB；而「30K EPS + 橡膠隔音墊」組合為本組實驗中效果最差者，整體緩衝材之測試結果皆優於規範 17dB 以上（參考圖 4.18）。

表 4.32 第一類複合材料實驗數據

變數 \ 次數	第一次敲擊	第二次敲擊	第三次敲擊	第四次敲擊	第五次敲擊
無緩衝材及表面材	92.2	92.6	93.2	93.7	92.9
15K EPS+橡膠隔音墊	55.2	55.5	55.5	55.0	54.9
20K EPS+橡膠隔音墊	54.7	54.2	54.0	54.0	54.9
25K EPS+橡膠隔音墊	53.0	53.3	53.3	52.6	53.3
30K EPS+橡膠隔音墊	58.2	58.8	58.4	58.9	58.7
15K EPS+PE 隔音墊	53.0	53.3	53.6	53.0	53.8
20K EPS+PE 隔音墊	52.6	52.2	52.1	52.1	52.6
25K EPS+PE 隔音墊	51.8	51.8	52.6	51.8	52.0
30K EPS+PE 隔音墊	55.4	55.0	55.9	55.0	54.5

單位：dB

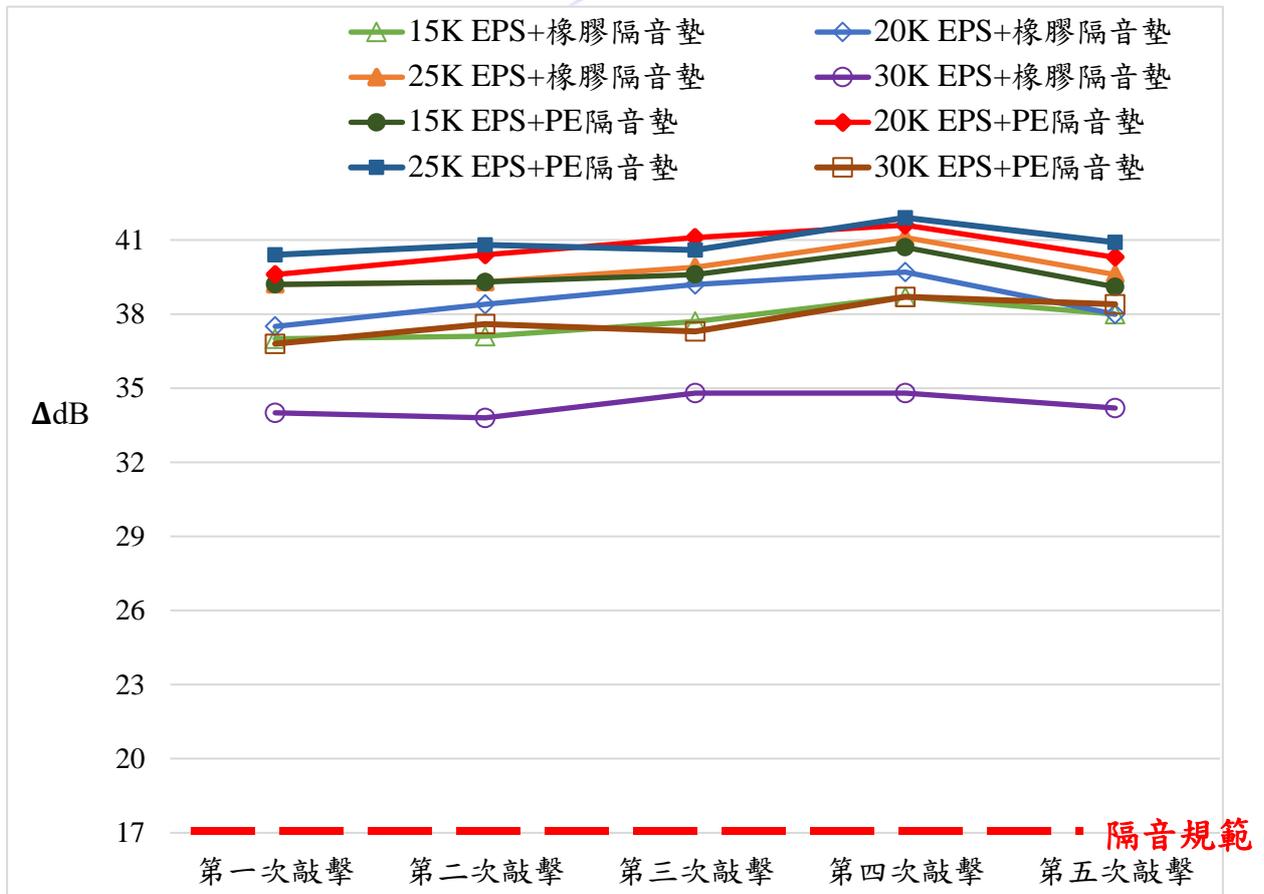


圖 4.18 第一類複合材料隔音效果

4.3.3 第二類複合材料

模擬實驗之第二類複合材料共計十五組數據，分別為單獨鋪設 EVA 巧拼、40 mm 厚不同密度之 EPS (15K、20K、25K 及 30K) 與 EVA 巧拼結合、橡膠隔音墊+巧拼、PE 隔音墊+巧拼、EPS 結合橡膠隔音墊與巧拼，以及 EPS 結合 PE 隔音墊與巧拼等多種複合組合；根據表 4.33 之實驗結果顯示，基準組（未鋪設任何緩衝材）之最大衝擊音量為 93.7 dB，而單獨鋪設 EVA 巧拼時最高音量則為 90.7 dB，再透過各試體之聲壓位準修正計算，依隔音效果由高至低之排序如下：25K EPS+PE 隔音墊+巧拼可降低 42.9dB、20K EPS+PE 隔音墊+巧拼可降低 42.2dB、25K EPS+橡膠隔音墊+巧拼可降低 42.0dB、15K EPS+PE 隔音墊+巧拼可降低 41.7dB、25K EPS+巧拼可降低 41.0dB、20K EPS+橡膠隔音墊+巧拼可降低 40.4dB、20K EPS+巧拼可降低 39.8dB、15K EPS+橡膠隔音墊+巧拼可降低 39.5dB、15K EPS+巧拼可降低 39.2dB、30K EPS+PE 隔音墊+巧拼可降低 38.3dB、30K EPS+橡膠隔音墊+巧拼可降低 37.6dB、30K EPS+巧拼可降低 37.3dB、橡膠隔音墊+巧拼可降低 10.8dB 及 PE 隔音墊+巧拼可降低 4.3dB，因此隔音效益最佳之組合為 25K EPS + PE 隔音墊 + 巧拼，而隔音效果最差者為 PE 隔音墊 + 巧拼，除了橡膠隔音墊+巧拼及 PE 隔音墊+巧拼兩組未能全數達到 17dB 以上外，其餘複合材料之測試結果皆優於規範 17dB 以上（參考圖 4.19）。

表 4.33 第二類複合材料實驗數據

變數 \ 次數	第一次敲擊	第二次敲擊	第三次敲擊	第四次敲擊	第五次敲擊
無緩衝材及表面材	92.2	92.6	93.2	93.7	92.9
巧拼	90.2	90.6	90.7	90.1	90.4
15K EPS+巧拼	53.8	54.4	54.5	54.5	54.1
20K EPS+巧拼	53.2	53.1	53.4	54.0	53.3
25K EPS+巧拼	52.9	52.4	52.5	52.7	52.4
30K EPS+巧拼	56.6	56.5	56.9	56.4	56.5
橡膠隔音墊+巧拼	82.3	82.4	83.0	82.9	82.8
PE 隔音墊+巧拼	89.0	89.0	89.2	89.4	89.7
15K EPS+橡膠隔音墊+巧拼	54.2	54.5	54.4	54.2	54.4
20K EPS+橡膠隔音墊+巧拼	53.0	53.9	53.6	53.3	53.8
25K EPS+橡膠隔音墊+巧拼	51.2	52.1	51.9	51.7	51.7
30K EPS+橡膠隔音墊+巧拼	56.5	56.5	56.5	56.1	56.0
15K EPS+PE 隔音墊+巧拼	51.3	51.8	51.8	52.0	52.0
20K EPS+PE 隔音墊+巧拼	51.6	50.4	52.0	52.8	51.4
25K EPS+PE 隔音墊+巧拼	50.9	50.5	50.3	52.0	52.7
30K EPS+PE 隔音墊+巧拼	55.2	55.3	55.1	55.4	55.1

單位：dB

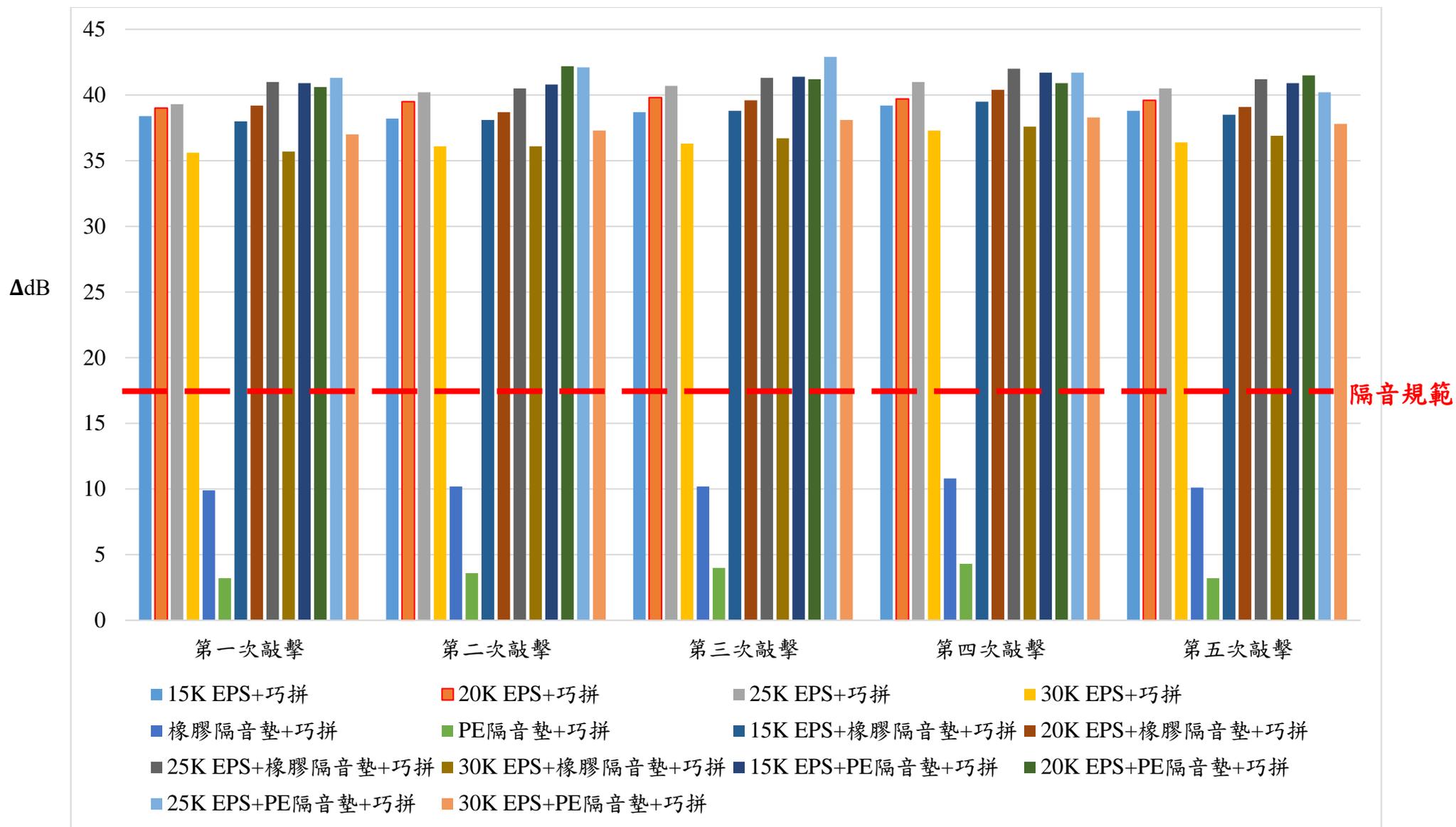


圖 4.19 第二類複合材料隔音效果

4.3.4 第三類複合材料

模擬實驗之第三類複合材料共計十五組數據，測試組合包括單獨鋪設橡膠地磚，以及分別將 40 mm 厚之 15K、20K、25K 與 30K EPS 材料結合橡膠地磚、橡膠隔音墊與橡膠地磚、PE 隔音墊與橡膠地磚，另亦包含 EPS 材料結合橡膠隔音墊或 PE 隔音墊後再鋪設橡膠地磚等複合結構；從表 4.34 實驗結果可知，基準組（未鋪設任何緩衝材）測得最高噪音值為 93.7 dB，而單獨鋪設橡膠地磚時最高噪音為 90.7 dB，再透過與各試體實驗結果計算，依其隔音表現由高至低排序如下：25K EPS+PE 隔音墊+橡膠地磚可降低 41.2dB、20K EPS+PE 隔音墊+橡膠地磚可降低 41.1dB、15K EPS+PE 隔音墊+橡膠地磚可降低 40.5dB、25K EPS+橡膠地磚可降低 39.8dB、25K EPS+橡膠隔音墊+橡膠地磚可降低 38.4dB、20K EPS+橡膠地磚可降低 38.3dB、15K EPS+橡膠地磚可降低 38.2dB、20K EPS+橡膠隔音墊+橡膠地磚可降低 37.9dB、30K EPS+PE 隔音墊+橡膠地磚可降低 37.6dB、15K EPS+橡膠隔音墊+橡膠地磚可降低 37.5dB、30K EPS+橡膠地磚可降低 36.0dB、30K EPS+橡膠隔音墊+橡膠地磚可降低 35.0dB、PE 隔音墊+橡膠地磚可降低 27.0dB 及橡膠隔音墊+橡膠地磚可降低 25.9dB，最佳隔音效果為 25K EPS + PE 隔音墊 + 橡膠地磚，橡膠隔音墊+橡膠地磚效果為最差，整體緩衝材之測試結果皆優於規範 17dB 以上（參考圖 4.20）。

表 4.34 第三類複合材料實驗數據

變數 \ 次數	第一次敲擊	第二次敲擊	第三次敲擊	第四次敲擊	第五次敲擊
無緩衝材及表面材	92.2	92.6	93.2	93.7	92.9
橡膠地磚	69.8	69.8	70.1	70.1	69.7
15K EPS+橡膠地磚	55.3	56.9	55.1	55.5	56.0
20K EPS+橡膠地磚	54.7	56.2	55.2	55.4	55.2
25K EPS+橡膠地磚	53.7	54.6	54.5	53.9	54.2
30K EPS+橡膠地磚	57.0	57.1	57.5	57.7	57.8
橡膠隔音墊+橡膠地磚	68.0	68.2	67.9	67.8	68.4
PE 隔音墊+橡膠地磚	65.3	66.2	66.2	67.0	67.0
15K EPS+橡膠隔音墊+橡膠地磚	55.9	56.5	56.9	56.2	56.3
20K EPS+橡膠隔音墊+橡膠地磚	56.1	55.3	56.0	55.8	55.5
25K EPS+橡膠隔音墊+橡膠地磚	55.0	54.8	55.4	55.3	54.9
30K EPS+橡膠隔音墊+橡膠地磚	58.1	58.5	58.3	58.7	58.9
15K EPS+PE 隔音墊+橡膠地磚	52.5	53.0	53.2	53.2	53.3
20K EPS+PE 隔音墊+橡膠地磚	52.9	52.3	52.7	52.6	52.6
25K EPS+PE 隔音墊+橡膠地磚	52.1	53.1	52.0	52.8	52.0
30K EPS+PE 隔音墊+橡膠地磚	55.3	56.3	56.6	56.1	56.3

單位：dB

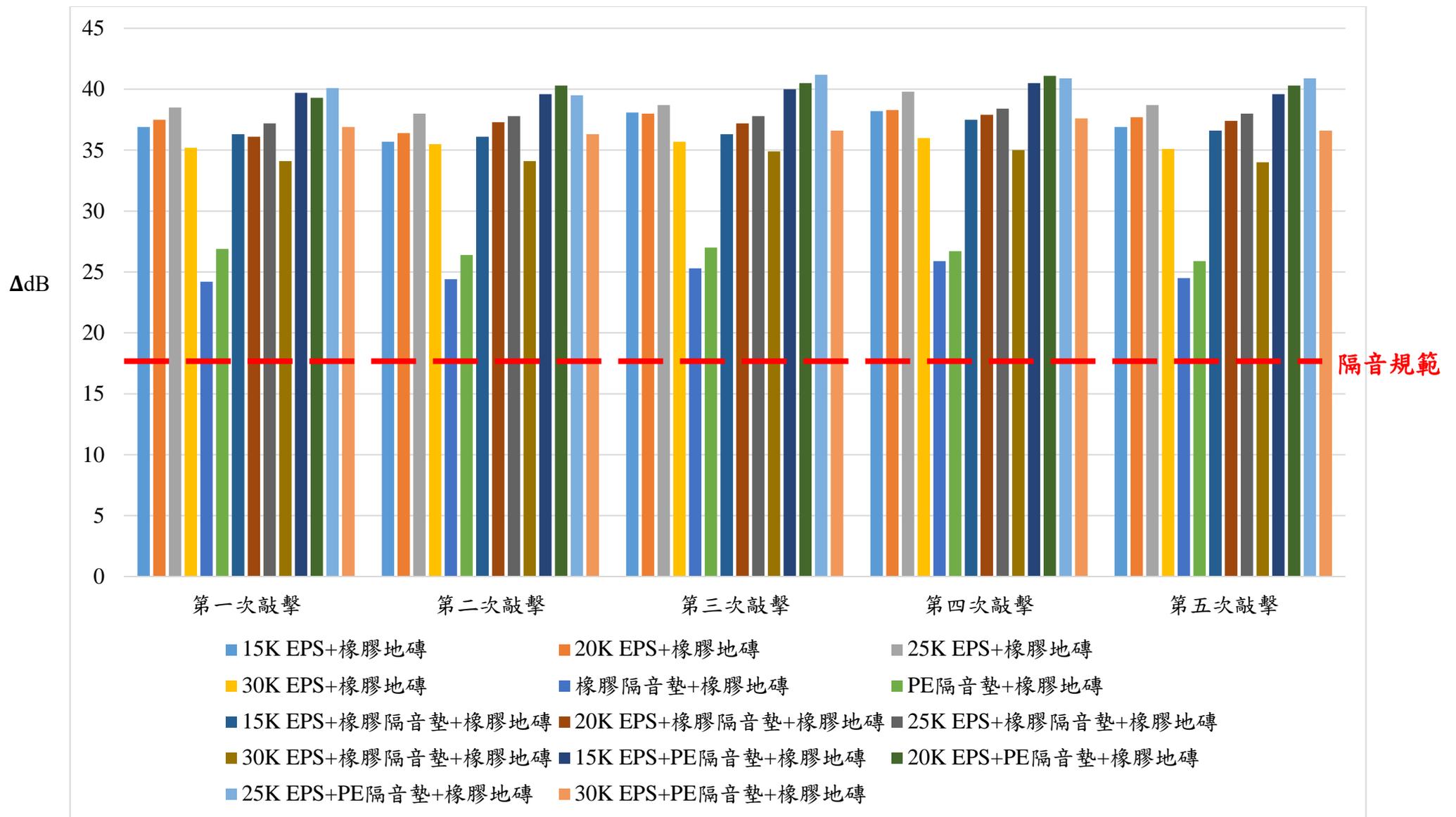


圖 4.20 第三類複合材料隔音效

4.3.5 模擬實驗量測結果分析

本模擬實驗係為探討單一緩衝材料及複合材料之隔音效果差異性，測試結果共計四十五組數據，經將其隔音效果之平均值由高至低依序排列，依此得知單一緩衝材料在五次數敲擊中隔音效益最佳為 25K EPS，最高可降低 39.7dB；前各隔音效果依序為 20K EPS、15K EPS、30K EPS。而複合材料在五次敲擊中隔音效果最佳為 25K EPS+PE 隔音墊+巧拼，最高可降低 41.6dB，其隔音之效果優劣排序分別如下表 4.35 所示。

表 4.35 隔音效果優劣排序表

排序	變數	噪音降低值 (Δ dB)
1	25K EPS+PE 隔音墊+巧拼	41.6
2	20K EPS+PE 隔音墊+巧拼	41.3
3	25K EPS+橡膠隔音墊+巧拼	41.2
4	15K EPS+PE 隔音墊+巧拼	41.1
5	25K EPS+PE 隔音墊	40.9
6	20K EPS+PE 隔音墊	40.6
7	25K EPS+PE 隔音墊+橡膠地磚	40.5
8	25K EPS+巧拼	40.3
9	20K EPS+PE 隔音墊+橡膠地磚	40.3
10	15K EPS+PE 隔音墊+橡膠地磚	39.9
11	25K EPS+橡膠隔音墊	39.8
12	25K EPS	39.7
13	15K EPS+PE 隔音墊	39.6
14	20K EPS+巧拼	39.5
15	20K EPS+橡膠隔音墊+巧拼	39.4
16	25K EPS+橡膠地磚	38.7
17	15K EPS+巧拼	38.7
18	15K EPS+橡膠隔音墊+巧拼	38.6
19	20K EPS+橡膠隔音墊	38.6
20	20K EPS	38.5
21	25K EPS+橡膠隔音墊+橡膠地磚	37.8
22	30K EPS+PE 隔音墊	37.8

(續)

排序	變數	噪音降低值(Δ dB)
23	15K EPS+橡膠隔音墊	37.7
24	30K EPS+PE 隔音墊+巧拼	37.7
25	20K EPS+橡膠地磚	37.6
26	15K EPS	37.4
27	20K EPS+橡膠隔音墊+橡膠地磚	37.2
28	15K EPS+橡膠地磚	37.2
29	30K EPS+PE 隔音墊+橡膠地磚	36.8
30	30K EPS+橡膠隔音墊+巧拼	36.6
31	15K EPS+橡膠隔音墊+橡膠地磚	36.6
32	30K EPS+巧拼	36.3
33	30K EPS+橡膠地磚	35.5
34	30K EPS	35.3
35	30K EPS+橡膠隔音墊+橡膠地磚	34.4
36	30K EPS+橡膠隔音墊	34.3
37	PE 隔音墊+橡膠地磚	26.6
38	橡膠隔音墊+橡膠地磚	24.9
39	橡膠地磚	23.0
40	橡膠隔音墊+巧拼	10.2
41	橡膠隔音墊	7.2
42	PE 隔音墊+巧拼	3.7
43	巧拼	2.5
44	PE 隔音墊	1.3

4.4 EPS 單一材料分析

經由模擬實驗之單一緩衝材料實驗可得知 30K 之 EPS 因隔音效能超過臨界值，隔音效果將逐漸下降，因此，本研究將透過對 15K、20K、25K 及 30K 之 EPS 單位重 (K 值) 可降低之分貝數 (Δ dB) 進行三次多項式迴歸分析，結果如表 4.36 及圖 4.21 所示，每項 K 值之 EPS 敲擊次數總計共 5 次，而三次多項式迴歸之方程式為 $y = -0.0075x^3 + 0.4544x^2 - 8.7033x + 91.16$ 且判定係數 R^2 為 0.8526，顯示材料單位重(K 值)對於衝擊音降低(Δ dB)具有高度相關性，亦表示 EPS 之 K 值可以有效預測隔音效果。

表 4.36 40mm EPS 三次多項式迴歸分析

次數 \ 密度	15K	20K	25K	30K
第一次敲擊(Δ dB)	36.9	37.8	38.6	34.2
第二次敲擊(Δ dB)	36.6	37.8	39.6	34.7
第三次敲擊(Δ dB)	37.8	37.8	39.8	35.8
第四次敲擊(Δ dB)	38.3	39.1	40.8	35.8
第五次敲擊(Δ dB)	37.3	39.5	39.5	35.8
迴歸方程式	$y = -0.0075x^3 + 0.4544x^2 - 8.7033x + 91.16$			
判定係數 R^2	$R^2 = 0.8526$			
註： $p < 0.05$ ， $p < 0.01$ 。				

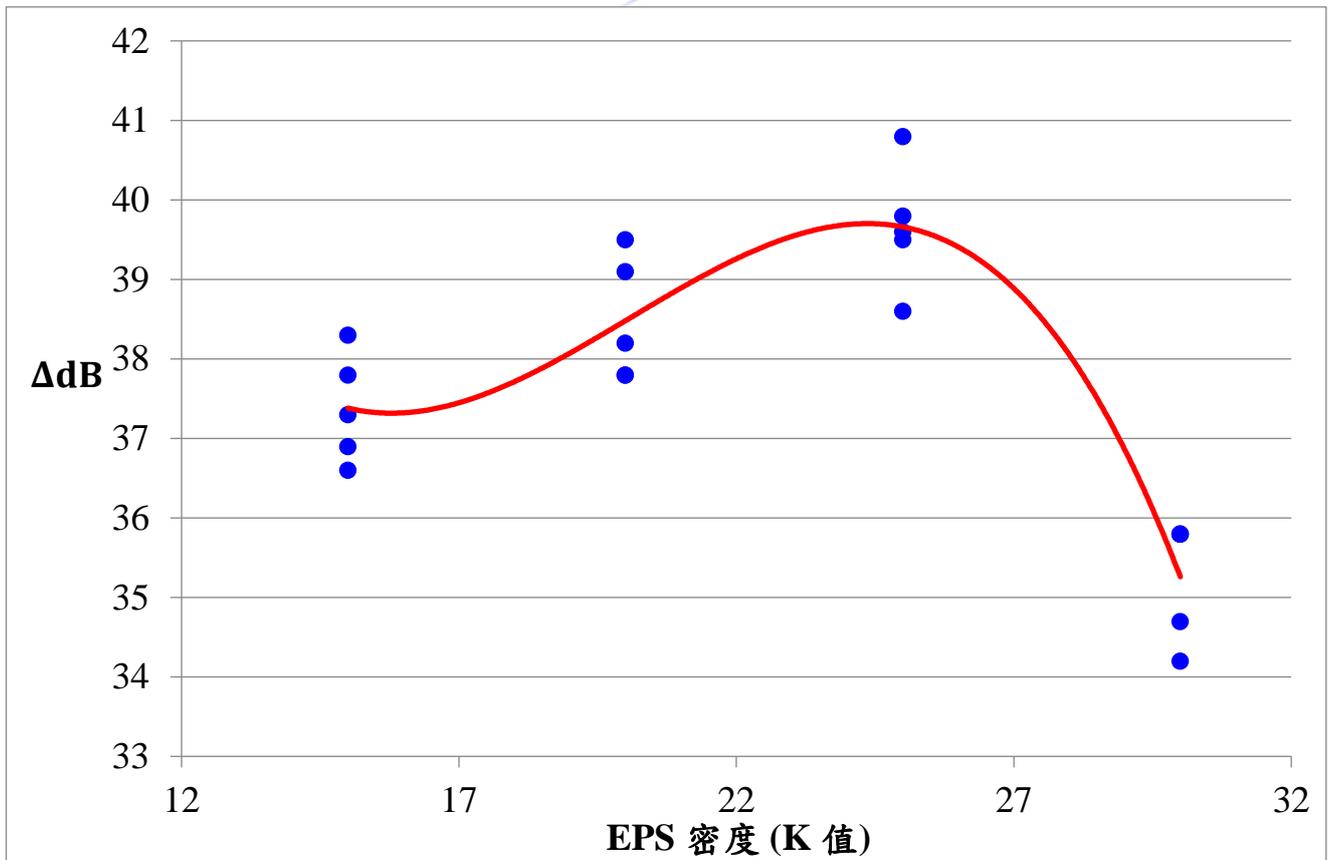


圖 4.21 40mm EPS 三次多項式迴歸分析

4.5 成本分析

4.5.1 緩衝材料及表面材料價格

本研究僅針對隔音效果最為優異之 25K EPS 塊體、「圖書館屋頂太陽能設備暨休憩空間整建工程」所使用之 15K EPS 和 PE 隔音墊、橡膠隔音墊、巧拼及橡膠地磚價格進行訪價，為提高價格公平合理性，EPS、巧拼及橡膠地磚將詢問三家廠商之價格作為材料平均成本，其中 EPS 塊體以平方公尺（厚度 4mm）為單位報價，且因各廠家之隔音墊價格浮動過大，因此 PE 隔音墊及橡膠隔音墊以本研究所使用之報價作為材料成本；將各廠商所得之價格與該材料規格進行單位成本之換算，可估算該材料每單位之平均成本，如表 4.37 所示；故將所得材料之平均價格帶入緩衝材試體，即估算該試體所需成本，如表 4.38 所示。

表 4.37 緩衝材料及表面材料價格

品項	廠商 A	廠商 B	廠商 C	平均價格
25K EPS 塊體 (1m*1m*0.04m)	220 元	250 元	300 元	256.667 元
15K EPS 塊體 (1m*1m*0.04m)	180 元	200 元	250 元	210 元
巧拼 (0.3m*0.3m*0.01m)	5 元	6 元	8 元	6.333 元
橡膠地磚 (0.5m*0.5m*0.025m)	220 元	220 元	235 元	225 元
PE 隔音墊 (1m*1m*0.015m)	94 元			
橡膠隔音墊 (1m*1m*0.005m)	350 元			

本研究將部分較具顯著隔音效果之 13 組試體材料所估算之該試體價格(如表 4.37)於各敲擊次數所降低之分貝值，求得該試體於各敲擊次數下所隔絕 1dB 之成本，如表 4.38 所示。

表 4.38 試體材料之成本

實驗試體品項規格	價格計算	試體價格 (元)
25K EPS 塊體 (0.5m*0.5m*0.04m)	0.25*256.667/1	64.167
15K EPS 塊體 (0.5m*0.5m*0.04m)	0.25*210/1	52.5
巧拼 (0.5m*0.5m*0.01m)	0.25*6.333/0.09	17.592
橡膠地磚 (0.5m*0.5m*0.025m)	0.25*225/1	225
PE 隔音墊 (0.5m*0.5m*0.015m)	0.25*94/1	23.5
橡膠隔音墊 (0.5m*0.5m*0.005m)	0.25*350/1	87.5

4.5.2 材料隔絕 1dB 花費成本

單一材料區分為兩大類型分別為緩衝材與表面材，其中緩衝材包含 25K EPS、15K EPS、橡膠隔音墊與 PE 隔音墊；表面材則包含 EVA 巧拼與橡膠地磚。針對上述材料進行成本效益分析，並以「每塊試體隔絕 1 dB 所需花費之成本」作為評估指標，如圖 4.22、4.23 所示；在單一緩衝材部分，15K EPS 表現出最佳經濟效益，每塊試體隔絕 1 dB 所需成本為 1.4 元，為所有緩衝材中最低；其次為 25K EPS，所需成本為 1.62 元；橡膠隔音墊則為 12.15 元；而成本最高者為 PE 隔音墊，需花費 18.65 元以達相同隔音效果；在

單一表面材部分，巧拼每塊試體隔絕 1 dB 所需成本為 7.04 元，相較之下，橡膠地磚則需 9.78 元，為成本較高者。

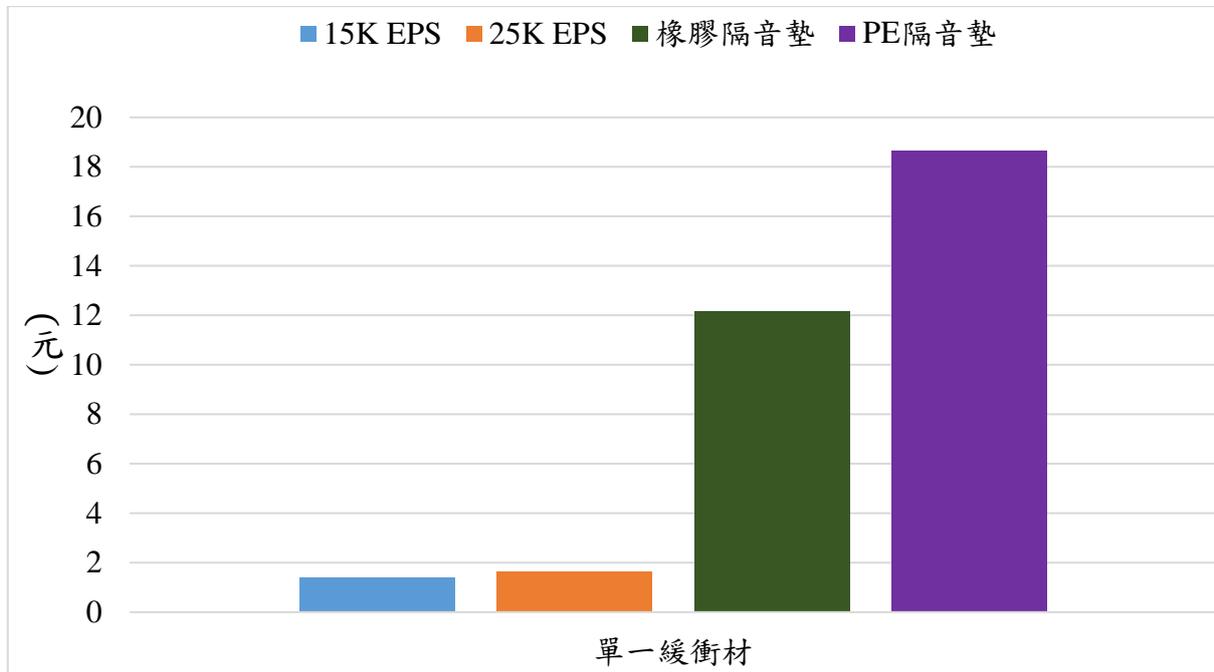


圖 4.22 最佳效益之單一緩衝材

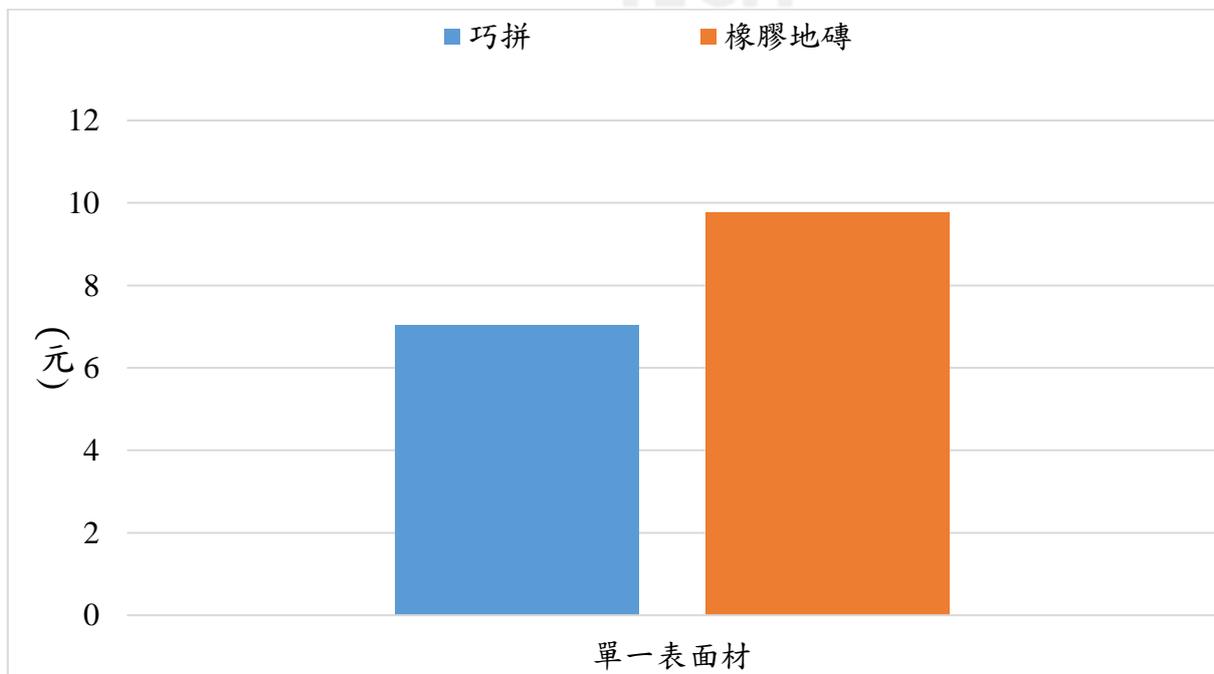


圖 4.23 最佳效益之單一表面材

單一材料在隔音效能差異過大，因此本研究將 25K EPS、15K EPS、橡膠隔音墊與 PE 隔音墊結合巧拼及橡膠地磚之複合材料較具顯著隔音效果之排序前 10 組試體材料所估算之該試體價格於各敲擊次數所降低之分貝值，求得該試體於各敲擊次數下所隔絕 1dB 之成本，如表 4.39 所示。

表 4.39 實驗試體隔絕 1dB 之價格

試體規格	敲擊次數				
	第一次	第二次	第三次	第四次	第五次
25K EPS+PE 隔音墊+巧拼	2.5	2.5	2.5	2.5	2.6
25K EPS+橡膠隔音墊+巧拼	4.1	4.2	4.1	4.0	4.1
15K EPS+PE 隔音墊+巧拼	1.9	1.9	1.8	1.8	1.9
25K EPS+PE 隔音墊	2.2	2.1	2.2	2.1	2.1
25K EPS+PE 隔音墊+橡膠地磚	7.8	7.9	7.6	7.6	7.6
25K EPS+巧拼	2.1	2.0	2.0	2.0	2.0
15K EPS+PE 隔音墊+橡膠地磚	7.6	7.6	7.5	7.4	7.6
25K EPS+橡膠隔音墊	3.9	3.9	3.8	3.7	3.8
25K EPS	1.7	1.6	1.6	1.6	1.6
15K EPS+PE 隔音墊	4.1	4.2	4.1	4.0	4.1

(元/dB)

經統整分析後，經由統整分析結果可知，本研究進一步針對不同表面材組合條件下之試體進行經濟效益探討，以每塊試體隔絕 1 dB 所需成本作為評估指標，辨識最具經濟性之隔音材料配置，如圖 4.24 所示。25K EPS 表現最佳，其每塊試體隔絕 1 dB 僅需花費 1.62 元，為本研究中經濟效益最高之隔音材料；其次為 15K EPS+PE 隔音墊+巧拼之組合，其隔音單位成本為 1.85 元，亦具高度成本效益；25K EPS+PE 隔音墊+橡膠地磚為隔音性能前十中最不符合經濟之隔音材料。

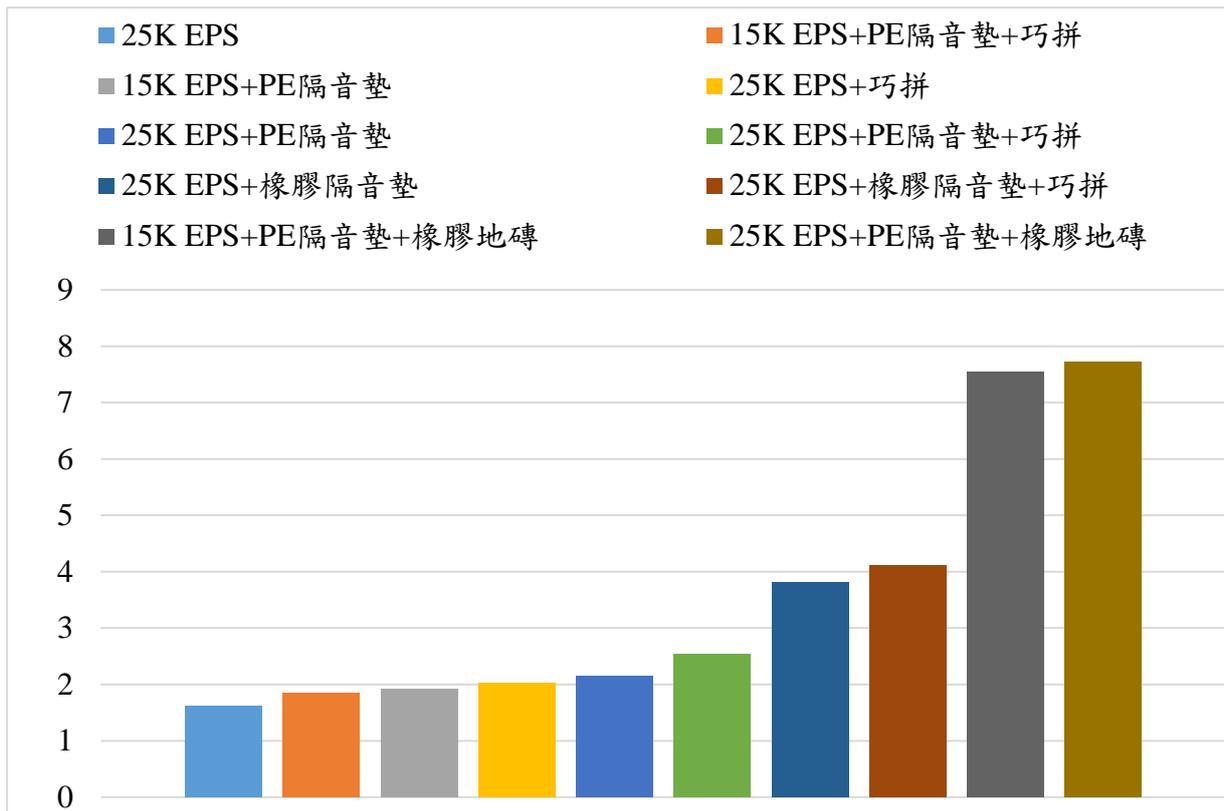


圖 4.24 最佳效益之試體



第五章 結論與建議

5.1 結論

本研究主要針對「圖書館屋頂太陽能設備暨休憩空間整建工程」進行現地隔音性能驗證，評估其是否符合施工效益與《建築技術規則－建築設計施工篇》第 46-6 條所規範之樓板衝擊音降低標準（降低量應達 17 dB 以上）。透過現地實驗量測實際樓板衝擊音數據，驗證整建工程後之樓板隔音性能是否符合法規要求。同時，本研究亦透過模擬實驗，探討不同單位重（K 值）之 EPS、橡膠隔音墊、PE 隔音墊等緩衝材，結合不同樓板表層材巧拼及橡膠地磚之複合構造對衝擊音隔音性能之影響，並以相同法規標準（17 dB 以上）作為性能判定依據。另針對各種緩衝材與表面材進行成本效益分析，評估其在實務應用中之經濟可行性與適用性，經兩種類別之實驗結果可分析出以下結論：

- 一、依本研究現地量測結果，「圖書館屋頂太陽能設備暨休憩空間整建工程」所施作之隔音地坪系統，於衝擊音量測中呈現良好之隔音性能。實驗之量測均依 CNS 16211-4 標準進行，在鋼球質量 2 kg、落距 50 cm 條件下，其樓板最大衝擊音降低量可達 38 dB；而於鋼球質量 0.5 kg、落距 50 cm 條件下，最低亦可達 29 dB 之隔音表現。由此可知該工程之隔音成效均符合《建築技術規則》所訂定之 17 dB 最低標準，顯示其樓板隔音施工具實質效益，且能有效抑制衝擊音傳遞，提升使用空間之聲環境品質。
- 二、本研究經模擬實驗得知 40 mm 厚、密度 25K 之 EPS 材料於單一材料組中具最佳隔音性能，其最高可降低衝擊音達 39.7 dB。然而，當 EPS 密度提高至 30K 時，其隔音效能雖仍優於法規基準，但因已超過其有效吸音能力之臨界值，導致其隔音效果呈遞減之趨勢。進一步以密度（K 值）為自變項、噪音隔絕值（ Δ dB）為應變項進行線性迴歸分析，排除 30K 資料後，可觀察到 15K 至 25K 之密度（K 值）與噪音隔絕值（ Δ dB）呈顯著正相關之線性關係，顯示適當提升 EPS

密度有助於提高衝擊音隔音效能，但須考量材料性能達臨界點後之隔音效果趨緩問題。

三、在模擬實驗之量測中，針對不同緩衝材結合樓板表層材料之複合構造，其衝擊音隔音效能表現存在顯著差異，經量測發現 25K EPS+PE 隔音墊+巧拼組合為所有複合材料中隔音效能最優，最高可降低衝擊音達到 42.9 dB；其次為 40 mm 20K EPS+PE 隔音墊+巧拼組合，其最高噪音降低量亦達 42.2 dB；依此亦顯示 EPS 材料結合高效隔音墊與適當表面材之構造，對於衝擊音傳遞之抑制具明顯成效，且以 25K 之 EPS 結合各類材料之性能皆大於其餘 K 值之 EPS 結合各類複合材。

四、針對具顯著隔音效能之複合材料進行成本效益分析後發現，25K EPS 為本研究中最具經濟效益之隔音材料，其每塊試體隔絕 1 dB 所需成本僅為 1.62 元，成本最低且隔音表現良好；其次為 15K EPS+PE 隔音墊+巧拼組合，每塊試體隔絕 1 dB 所需成本為 1.85 元，亦具高度成本效益。相對而言，雖 25K EPS+PE 隔音墊+橡膠地磚組合隔音性能優異，但其每塊試體隔絕 1 dB 所需成本高達 7.72 元，為本研究評估之隔音性能前十名組合中成本最高者，顯示在隔音設計實務中仍需兼顧性能與成本間之平衡。

5.2 建議

本研究係針對地工泡棉（EPS）結合樓板表層材進行衝擊音隔音效能之實驗探討，雖已初步驗證其隔音效能與經濟性，然整體研究仍存在部分限制，相關議題尚待進一步釐清與補充，爰提出以下建議，供後續研究作為參考方向：

一、本研究所採用之案例「圖書館屋頂太陽能設備暨休憩空間整建工程」進行隔音性能評估時，距離實際完工已達四年，故本次隔音測試僅能反映施工後之現況，無法與施工前之原始數據進行直接比較，以獲得更具參考價值之成效評估。未

來研究可擇定具完整施工前後紀錄之案例，進行縱向比較分析，以更明確驗證樓板隔音工程之實施成效與長期耐久性。

二、本研究於探討 EPS 之 K 值與輕量衝擊音降低量 (ΔdB) 進行線性迴歸分析時發現，當 EPS 密度 (K 值) 超過其材料有效吸音能力之臨界值後，隔音性能將呈現邊際效益遞減之趨勢，亦即增加密度所帶來之隔音效果提升有限，甚至趨於飽和。因此，建議後續研究可進一步結合不同厚度與不同 K 值之 EPS 材料進行系統性分析，以歸納出在樓板隔音應用中最適 K 值與厚度組合，以提升材料使用效率並兼顧經濟性。



參考文獻

1. 江哲銘 (1993)。建築物噪音與振動，建築情報雜誌社。
2. 行政院環境保護署，公害陳情案件，2024。
3. 行政院環境保護署，公害陳情案件，2021。
4. 行政院環境保護署，噪音管制標準，2013。
5. 行政院環境保護署，噪音管制法，2009。
6. 黃柏維 (2003)。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。
7. 須本一郎 (1989)。苯乙烯系 PS、AS、ABS 樹脂。台南市：復漢出版社。
8. 章裕民 (1995)。環境工程化學。新北市：文京圖書有限公司。
9. 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。
10. 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，2021。
11. 中華民國保麗龍回收再生協會 (1995)。「中華民國保麗龍回收再生協會創刊號」
12. 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。
13. 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。
14. 塚本英樹等，「EPS 工法の新たな展開」，発泡スチロール土工法開発機構，2008。
15. 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。
16. Miki, G. (1996). *EPS Construction Method in Japan*. Proceedings of International Symposium on Eps (Expanded Poly-Styrol) Construction Method (Eps Tokyo '96). 2-7.
17. 林利國 (1996)。地工泡棉在道路邊坡之運用實務。自動化、效率化工法與技術在道路邊坡應用研討會。

18. 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。
19. 積水化成品工業株式會社，EPS 土木施工法，2010。
20. 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。
21. 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。
22. 內政部營建署，建築技術規則建築設計施工篇，2017。
23. 謝宛均 (2003)。有限元素法預測樓版衝擊音衰減特性之研究—以樓版表面材彈性係數變因探討之。國立成功大學建築研究所碩士論文，台南市。
24. 興吉發科技建材有限公司，精湛防衝擊音隔音樓板，2018
25. 曾品杰 (2007)。樓版裝修材對樓版衝擊音隔音性能之效益。國立成功大學建築學系博士班博士論文，台南市。
26. 鍾松晉 (2010)。以表面裝修構造改善樓板輕量衝擊源之隔音性能實驗研究。建築學報增刊 (技術專刊)，74，15-32。
27. 孫澄翔 (2013)。木質表面構材對於重質樓板衝擊音之改善效果。國立屏東科技大學木材科學與設計系所碩士論文，屏東縣。
28. 柯廷衛 (2016)。直鋪式木質複合地板對樓板衝擊音改善效果之研究，國立成功大學建築研究所碩士論文，台南市。
29. 馮俊豪 (2018)。既有住宅樓板隔音性能提升策略之探討。國立成功大學建築學系博士論文，台南市。
30. 馬苡柔 (2019)。顆粒狀與塊狀 EPS 應用於石膏板輕隔間牆隔音之價值分析。國立臺北科技大學土木工程系與防災碩士班碩士論文，台北市。
31. 高知鼎 (2021)。地工泡棉(EPS)結合樓板表面材之衝擊音隔音性能研究。國立臺北科技大學土木工程系與防災碩士班碩士論文，台北市。

32. 羅傑鯨、林利國、高知鼎、葉育儒 (2022)。建物樓板衝擊音之音能降低研究。2022年第十五屆物業管理研究成果發表會論文集， 89-98。
33. 郭志揚 (2007)。表面裝修構造對樓板衝擊隔音性能影響之研究—以重量衝擊源為例。國立雲林科技大學空間設計系碩士班碩士論文，雲林縣。
34. 陳宏文 (2019)。學校活動中心樓板衝擊音對下方教學空間之影響評估。國立雲林科技大學創意生活設計系碩士論文，雲林縣。
35. 陳鈺文 (2017)。聲學地板材組配提升樓板衝擊音隔音性能之研究。國立臺灣海洋大學系統工程暨造船學系碩士論文，基隆市。
36. 經濟部標準檢驗局 (2023)。CNS 16211-1：聲學—建築構件隔音之實驗室量測—第1部：特定產品應用規則。CNS 16211-1 中華民國國家標準。
37. 經濟部標準檢驗局 (2023)。CNS 16211-2：聲學—建築構件隔音之實驗室量測—第2部：空氣音隔音量測。CNS 16211-2 中華民國國家標準。
38. 經濟部標準檢驗局 (2023)。CNS 16211-3：聲學—建築構件隔音之實驗室量測—第3部：衝擊音隔音量測。CNS 16211-3 中華民國國家標準。
39. 經濟部標準檢驗局 (2023)。CNS 16211-4：聲學—建築構件隔音之實驗室量測—第4部：量測程序及要求。CNS 16211-4 中華民國國家標準。
40. 經濟部標準檢驗局 (2023)。CNS 16211-5：聲學—建築構件隔音之實驗室量測—第5部：測試設施及設備之要求。CNS 16211-5 中華民國國家標準。
41. 羅時麒、林芳銘 (2019)。建築物重量衝擊源樓板衝擊音量測及評估方法之研究。內政部建築研究所協同研究報告。
42. Elragi, A.F. (2000). *Selected Engineering Properties and Applications of EPS Geofoam*. PhD Dissertation. State University of New York College of Environmental Science and Forestry. Syracuse, NY.
43. Negussey, D., (1997). *Properties & Applications of Geofoam*. Society of the Plastic Industry, Inc., Washington, D.C., USA.

44. Rasmussen, B., Hoffmeyer, D., & Hansen, R. (2014). *Impact sound insulation improvement of wooden floors on concrete slabs: A pilot study on solutions and test methods*. In Proceedings of Forum Acusticum 2014 European Acoustics Association - EAA. Forum Acusticum.

