

國立臺灣大學工學院土木工程學系



碩士論文

Department of Civil Engineering

College of Engineering

National Taiwan University

Master Thesis

利用打音法及頻譜分析

診斷建築物外牆磁磚劣化之研究

Deterioration Diagnosis of Building External Wall
Tiles Using Tap Tone Method and Spectral Analysis

洪子傑

Tzu-Chieh Hung

指導教授：郭斯傑 教授

Advisor: Sy-Jye Guo

中華民國 105 年 6 月

June 2016

國立臺灣大學碩士學位論文
口試委員會審定書

利用打音法及頻譜分析
診斷建築物外牆磁磚劣化之研究

Deterioration Diagnosis of Building External Wall
Tiles Using Tap Tone Method and Spectral Analysis

本論文係洪子傑君 (R03521701) 在國立臺灣大學土木工程學系碩士班完成之碩士學位論文，於民國 105 年 6 月 16 日承下列考試委員審查通過及口試及格，特此證明。

口試委員：

郭 斯 傑

(指導教授)

王 維 志

張 智 元

鄭 明 淵

呂 良 正

郭斯傑

王維志

張智元

鄭明淵

呂良正

(簽名)

系主任

誌謝



碩士這兩年非常感謝我的指導教授郭斯傑老師，他是我非常敬佩的老師，不僅在學術上有很多的貢獻，也與業界保持良好的關係，讓我認識了許多業界很有影響力的人物，在他身上除了學到了很多營建管理的知識，更難能可貴的是學到很多待人處事的道理。每個星期二的晚上是郭家報告論文互相切磋的時刻，能彼此監督同儕的進度也學到了很多不同領域的知識，郭老師也會在這時給予許多切中要害的建議，讓論文的缺點能夠一一被點出，使論文的品質不斷的進步，最終得以完成這本碩士論文。

再來要特別感謝江立偉學長，帶領我進入外牆磁磚檢測的領域，除了實務上的操作，還有許多學術上的探討，帶我參加了三場研習會，讓我能更深入地了解國內外關於外牆磁磚的相關知識，立偉學長每個禮拜也都會關心我的論文進度，許多關鍵的問題也幸好有他才得以解決，非常感謝他的耐心指導。

感謝石明哲學長，幫我安排了專家訪談，尤其我沒有音訊方面的人脈，這個訪談得來不易，以及提供我所有案例的基本資料，並幫我爭取了做破壞性檢測的機會，這個機會非常的難得，再次感謝。也感謝好同學遠安、楷倫、昕諺在我需要幫忙時協助我進行實驗，沒有你們，我就沒有辦法順利地完成這本碩士論文。

最後要感謝我人生中最重要的人，爺爺、爸爸、媽媽，謝謝你們全力的支持我朝著目標前進，讓我能無後顧之憂地將重心都放在學業上，還有幾次特別從嘉義北上關心我的居住環境、學習環境，讓我雖然獨在異鄉，卻時時能感受到家人的溫暖，謝謝你們！

洪子傑 謹誌
2016年6月於臺大

中文摘要



磁磚是臺灣常見的建築物外牆裝飾材料，具有保護內部結構及美化建築物的功能，不過自建築物新建完成起，便開始受到自然的劣化行為，近年來，臺灣建築物外牆磁磚剝落的現象不斷，不僅造成建築物美觀上的受損，也影響了用路人的生命安全及財產安全。

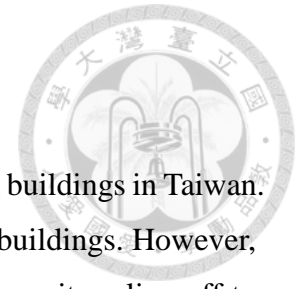
由於全面更新外牆磁磚的費用昂貴，因此決定是否更新外牆磁磚之前，建議先做外牆磁磚的健康狀況診斷。檢測方式分為兩大類，分別為破壞性檢測及非破壞性檢測，非破壞性檢測對建築物的外觀及功能上影響較小，對於全面性的檢測是較合適的，其中又以打音法為現階段準確性較高的檢測方式，也有操作容易的優點，不過此方式得由有經驗的檢測人員主觀判斷，無法以客觀科學的方式判斷及記錄，因此缺乏一個一致性的判斷準則以及可供參考的統計結果，也會有因檢測人員的不同造成檢測結果不一致的情形，此外，若檢測人員的精神狀況不佳或耳朵長時間的使用，都會使聽覺的靈敏度喪失，造成檢測結果不甚準確。

因此本研究認為需要以一套科學的方式來改善現階段打音法使用上的缺點，本研究設計固定敲擊力道及固定收音距離裝置，並使用指向性電容式麥克風收音，接著將收集到的聲音做音訊前處理，再透過 MATLAB 撰寫程式，利用快速傅立葉變換(FFT)來分析、探討正常磁磚與劣化磁磚之區別。

本研究建立了三種模式，分別為最高峰值、最高峰對應頻率及標準化後頻譜面積，並選用了五棟實體建築物作為案例，以探討這三種模式在實務上的應用，藉此將能以科學的方式量化音訊，解決了打音法得由有經驗的檢測人員主觀判斷的缺點，最終建立一套打音法作業流程，並期望本研究之研究成果能提供公部門納入修法時之參考，作為使用打音法診斷建築物外牆磁磚之劣化基準，或提供評估檢查人員在建築物外牆磁磚劣化診斷時使用，以及提供物業管理公司與整建維護公司在建築物外牆磁磚整建拉皮規劃時使用。

關鍵詞：外牆磁磚、打音診斷法、劣化評估、公共安全。

Abstract



The ceramic tile is a decorating material which is widely used on buildings in Taiwan. It has the functions of protecting internal structures and beautifying buildings. However, the ceramic tile will deteriorate due to natural factors which may cause it scaling off to affect the public safety.

As a result of the high cost of repairing external walls, the study suggests diagnosing the condition of ceramic tile as priority. The non-destructive test is proper to do it because of lightly affecting to the structure. Nowadays, tap tone method is a type of test with higher accuracy. Nevertheless, the testing result has no consistency by reason of the subjective judgement of the tester. Besides, it will lose accuracy if the tester is in a bad psychological state.

Therefore, the research considers there should be a set of scientific way to improve the disadvantages of tap tone method. It invents an instrument which can produce consistent impact and sound receiving distance. Furthermore, the study uses Directional Condenser Microphone to collect the sound and programs with MATLAB to do FFT analysis to distinguish whether the ceramic tile deteriorates.

The study establishes 3 assessment models: the peak value, the frequency of the peak and the area of spectrum after standardization. It chooses 5 buildings as cases to discuss the application of 3 assessment models. By doing so, the sound can be quantified by scientifically way. It solves the problem of subjective judgement of the tester. Finally, the research sets up a standard process of the tap tone method and expects its result can provide the Government as reference when it revises the law.

Keywords: External walls; Tap tone method; Assessment of deterioration; Public safety


目錄



口試委員會審定書	i
誌謝	ii
中文摘要	iii
Abstract	iv
目錄	v
圖目錄	viii
表目錄	xi
第一章 緒論	1
1.1 研究動機	1
1.2 研究目的	2
1.3 研究範圍與限制	2
1.4 研究方法與流程	2
1.4.1 研究方法	2
1.4.2 研究流程	3
第二章 文獻回顧	4
2.1 國內外建築物外牆檢查制度	4
2.1.1 台灣	4
2.1.2 香港	7
2.1.3 日本	8
2.2 磁磚劣化	11
2.2.1 磁磚材質	11



2.2.2 劣化形式.....	12
2.2.3 剝落的發生機制.....	13
2.3 建築物外牆磁磚檢測技術.....	14
2.3.1 各式檢測技術及其適用限度.....	14
2.3.2 打音診斷法.....	16
2.4 國內相關研究成果.....	17
2.5 訊號分析.....	21
2.6 小結.....	22
第三章 實驗設計.....	24
3.1 前言.....	24
3.2 實驗設備介紹.....	24
3.2.1 打音法設備及使用方法.....	24
3.2.1 拉拔試驗設備及使用方法.....	26
3.3 實驗規劃.....	27
3.3.1 劣化驗證.....	27
3.3.2 診斷步驟.....	29
3.3.3 案例介紹.....	31
第四章 實驗數據處理.....	37
4.1 音訊前處理.....	37
4.2 模式建立.....	39
4.3 小結.....	43
第五章 案例分析.....	44



5.1 模式一：最高峰值.....	44
5.2 模式二：最高峰對應頻率.....	52
5.3 模式三：標準化後頻譜面積.....	61
5.4 小結.....	69
第六章 結論與建議.....	72
6.1 研究結論.....	72
6.2 後續建議.....	73
參考文獻.....	75

圖目錄



圖 1.1 聯合報大樓外牆磁磚剝落及晶華酒店外牆磁磚剝落	1
圖 1.2 研究流程圖	3
圖 2.1 外牆飾材申報流程	4
圖 2.2 具較高風險的磁磚劣化	13
圖 2.3 外牆磁磚的剝落機制	13
圖 2.4 傅立葉變換	21
圖 2.5 訊號分析步驟	22
圖 3.1 打音法設備	25
圖 3.2 固定敲擊力道及固定收音距離裝置	26
圖 3.3 拉拔試驗設備	27
圖 3.4 劣化磁磚黏著情況(5cm X 5cm).....	28
圖 3.5 劣化磁磚黏著情況(22.7cm X 6.0cm).....	29
圖 3.6 診斷步驟說明圖	30
圖 3.7 生物化學研究所	32
圖 3.8 心理系北館	33
圖 3.9 第二學生活動中心	34
圖 3.10 漁業科學研究所	35
圖 3.11 地理環境資源研究所	36

圖 4.1 Audacity 去雜訊.....	37
圖 4.2 原始音訊、雜訊、去雜訊音訊之頻譜圖	38
圖 4.3 案例一之正常磁磚頻譜圖	40
圖 4.4 案例一之劣化磁磚頻譜圖	40
圖 4.5 模式一及模式二	41
圖 4.6 模式三	42
圖 4.7 MATLAB 程式撰寫自動讀取音訊匯出 Excel 表格.....	42
圖 4.8 實驗數據處理流程	43
圖 5.1 案例一(生物化學研究所)之各點最高峰值.....	45
圖 5.2 案例二(心理系北館)之各點最高峰值.....	46
圖 5.3 案例三(第二學生活動中心)之各點最高峰值.....	48
圖 5.4 案例四(漁業科學研究所)之各點最高峰值.....	49
圖 5.5 案例五(地理環境資源研究所)之各點最高峰值.....	51
圖 5.6 案例一(生物化學研究所)之各點最高峰對應頻率.....	53
圖 5.7 案例二(心理系北館)之各點最高峰對應頻率.....	54
圖 5.8 案例三(第二學生活動中心)之各點最高峰對應頻率.....	56
圖 5.9 案例四(漁業科學研究所)之各點最高峰對應頻率.....	57
圖 5.10 案例五(地理環境資源研究所)之各點最高峰對應頻率.....	59
圖 5.11 案例一(生物化學研究所)之各點標準化後頻譜面積.....	62



圖 5.12 常態分佈	62
圖 5.13 案例二(心理系北館)之各點標準化後頻譜面積.....	64
圖 5.14 案例三(第二學生活動中心)之各點標準化後頻譜面積.....	65
圖 5.15 案例四(漁業科學研究所)之各點標準化後頻譜面積.....	67
圖 5.16 案例五(地理環境資源研究所)之各點標準化後頻譜面積.....	68
圖 5.17 模式一作業流程	69
圖 5.18 模式三作業流程	70
圖 5.19 打音法作業流程	71



表目錄



表 2.1 應辦理外牆飾材評估檢查之建築物(部分表格內容).....	5
表 2.2 日本診斷指針之診斷等級	9
表 2.3 CNS 對磁磚品質的規定	11
表 2.4 診斷方法的適用限度	15
表 2.5 戴佩宜二丁掛黏貼方式之頻率值範圍表	18
表 2.6 國內相關研究整理	20
表 5.1 案例一(生物化學研究所)之各點最高峰值.....	44
表 5.2 案例二(心理系北館)之各點最高峰值.....	45
表 5.3 案例三(第二學生活動中心)之各點最高峰值.....	47
表 5.4 案例四(漁業科學研究所)之各點最高峰值.....	48
表 5.5 案例五(地理環境資源研究所)之各點最高峰值.....	50
表 5.6 五棟案例之模式一整理	51
表 5.7 案例一(生物化學研究所)之各點最高峰對應頻率.....	52
表 5.8 案例二(心理系北館)之各點最高峰對應頻率.....	53
表 5.9 案例三(第二學生活動中心)之各點最高峰對應頻率.....	55
表 5.10 案例四(漁業科學研究所)之各點最高峰對應頻率.....	56
表 5.11 案例五(地理環境資源研究所)之各點最高峰對應頻率.....	58
表 5.12 五棟案例之模式二整理	60

表 5.13 案例一(生物化學研究所)之各點標準化後頻譜面積.....	61
表 4.14 案例二(心理系北館)之各點標準化後頻譜面積.....	63
表 5.15 案例三(第二學生活動中心)之各點標準化後頻譜面積.....	64
表 5.16 案例四(漁業科學研究所)之各點標準化後頻譜面積.....	66
表 5.17 案例五(地理環境資源研究所)之各點標準化後頻譜面積.....	67
表 5.18 五棟案例之模式三整理	69



第一章 緒論



1.1 研究動機

磁磚是臺灣常見的建築物外牆裝飾材料，具有保護內部結構及美化建築物的功能，不過自建築物新建完成起，便開始受到自然的劣化行為，如溫度、濕度、酸雨、颱風、地震等，尤其近年來氣候劇烈的變化，劣化現象更加嚴重，2016年1月底罕見的霸王寒流，造成內政部統計全臺共有123棟建築物外牆磁磚剝落。若剛好建築物外牆磁磚剝落在高人口流動的街道上，則會危害用路人的生命安全，2015年3月14日聯合報大樓外牆磁磚剝落，釀成一死一傷的悲劇，2015年3月23日晶華酒店外牆磁磚剝落，砸傷孕婦，如圖1.1，由此可見，老舊建築物外牆磁磚隨時可能因原有的劣化或外力作用而剝落，不僅造成建築物的外觀受損，更已造成公共安全的疑慮。



圖 1.1 聯合報大樓外牆磁磚剝落及晶華酒店外牆磁磚剝落

由於全面更新外牆磁磚的費用昂貴，因此決定是否更新外牆磁磚之前，建議先做外牆磁磚的健康狀況診斷。檢測方式分為兩大類，分別為破壞性檢測及非破壞性檢測，非破壞性檢測對建築物的外觀及功能上影響較小，對於全面性的檢測是較合適的，其中又以打音法為現階段準確性較高的檢測方式，也有操作容易的優點，不過此方式得由有經驗的檢測人員主觀判斷，無法以客觀科學的方式判斷及記錄，因此缺乏一個一致性的判斷準則以及可供參考的統計結果，也會有因檢測人員的不同造成檢測結果不一致的情形，此外，若檢測人員的精神狀況不佳或耳朵長時間的使用，都會使聽覺的靈敏度喪失，造成檢測結果不甚準確。



1.2 研究目的

基於上述研究動機，本研究主要目的如下：

1. 建立一套打音法作業流程供使用者參考。
2. 提出打音法劣化標準判斷模式及準則。

1.3 研究範圍與限制

建築物外牆磁磚檢測方式有外觀目視法、打音法(打診法)、紅外線裝置法、反應法、超音波法、接著強度試驗等，本研究採用打音法，設備需求成本低，也是目前最值得信賴的方法。

本研究對象為丁掛平面磚，為商辦大樓及私人住宅常使用的外牆裝飾材料，選用的案例為屋齡 30 年以上或外牆磁磚曾經剝落之建築物，此類建築物與目前臺灣外牆磁磚具高剝落風險的老舊建築物屋齡或劣化情形相當。

建築物外牆磁磚的劣化有許多種形式，如剝落、浮起、凸起、髒污、潮濕、生鏽、白華、裂縫等，最嚴重者為剝落，次嚴重者為浮起及凸起，本研究以診斷浮起及凸起劣化為主。

1.4 研究方法與流程

1.4.1 研究方法

本研究藉由國內外文獻回顧，了解各地法規、磁磚材質、磁磚劣化形式、磁磚外牆檢測技術、打音法相關研究、聲音物理學、訊號分析，將相關文獻加以比較、應用、整理歸納。

製作固定敲擊力道及固定收音距離裝置，敲擊正常磁磚與劣化磁磚，用錄音筆搭配指向性電容式麥克風錄取音訊，再藉由電腦軟體 MATLAB 透過快速傅立葉變換分析音訊之特徵模式，比較正常磁磚與劣化磁磚之差異。



1.4.2 研究流程

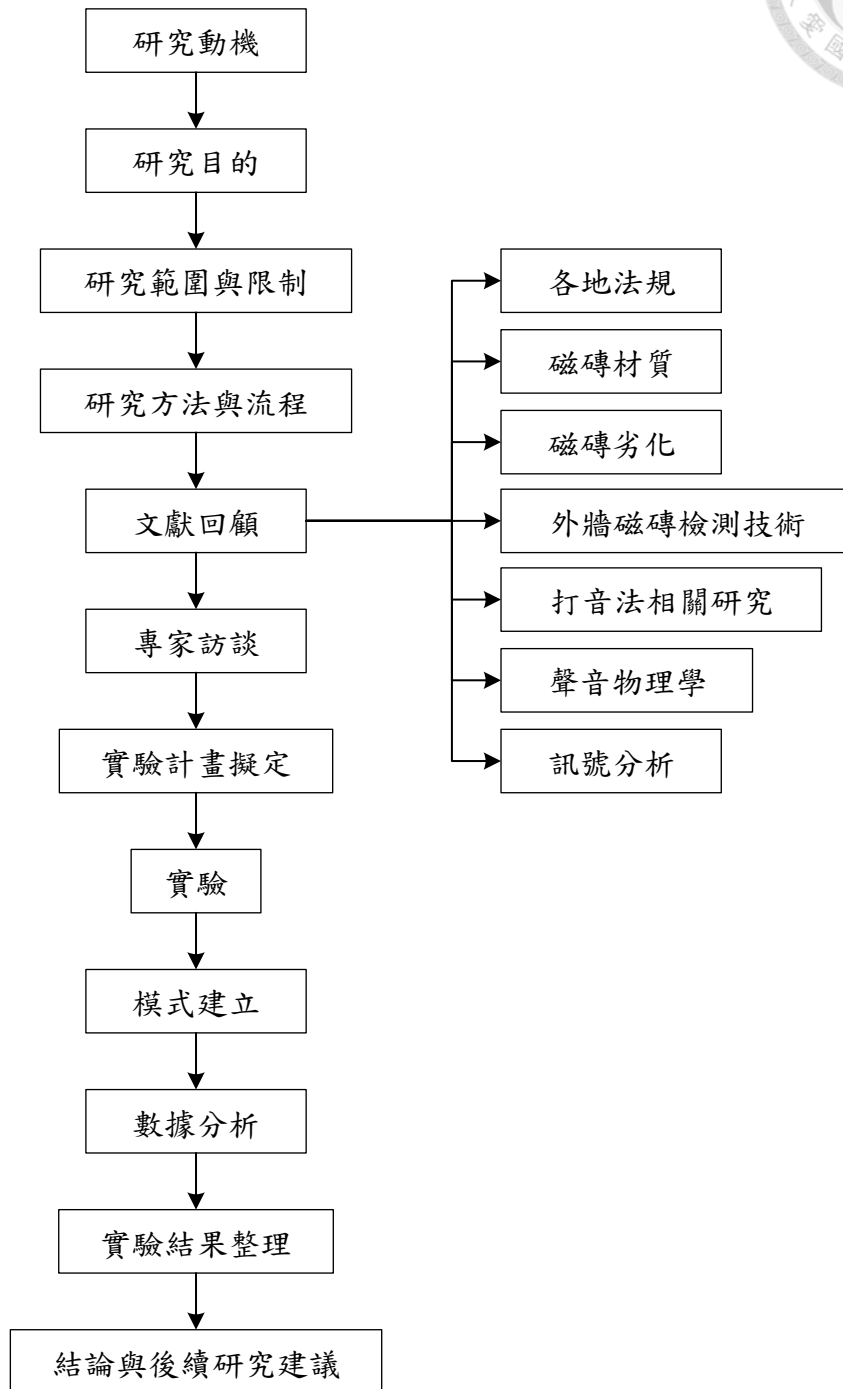


圖 1.2 研究流程圖

第二章 文獻回顧



2.1 國內外建築物外牆檢查制度

2.1.1 台灣

一、修正建築物公共安全檢查簽證及申報辦法

內政部營建署認為外牆飾材安全必須建立一套管理機制，因此近期密集的召會研商，預定在 105 年底完成法制作業程序，以下內容為目前的草案：

(一) 外牆飾材定義

外牆飾材：以濕式貼著、粉刷、乾掛等工法，黏著或設置於外牆構造體之建築材料。但不包括帷幕牆、招牌廣告、樹立廣告、空氣調節設備、鐵窗等之設置。

(二) 外牆飾材申報流程

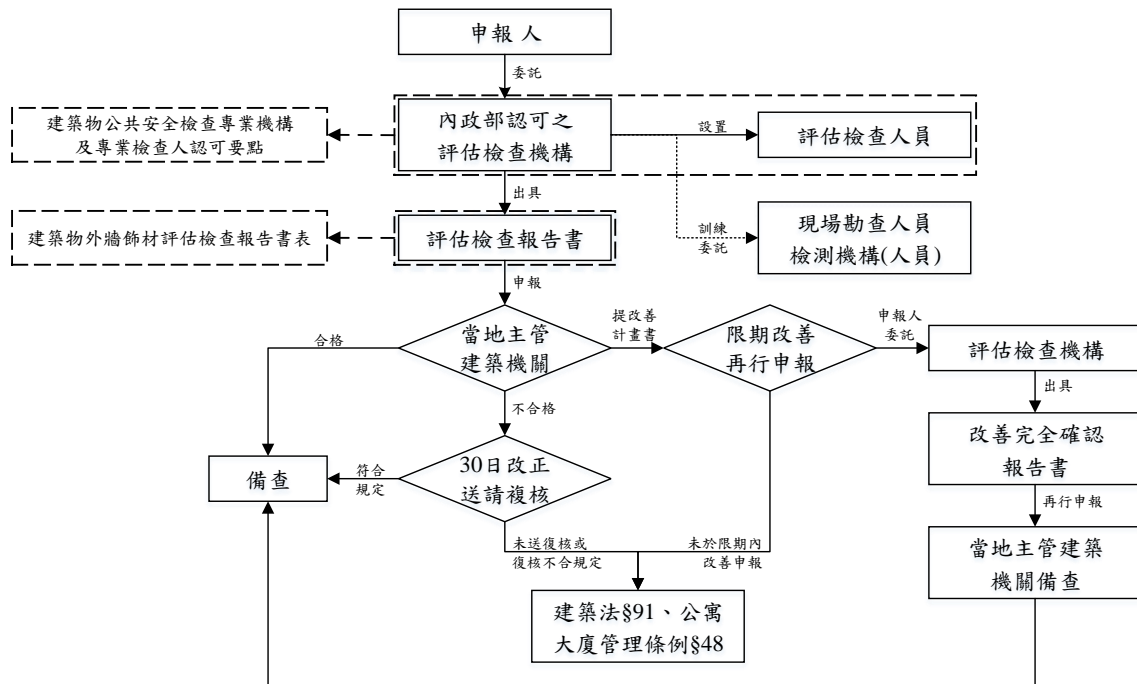


圖 2.1 外牆飾材申報流程

資料來源：高文婷，2016

(三) 應辦理外牆飾材評估檢查之建築物(部分表格內容)



表 2.1 應辦理外牆飾材評估檢查之建築物(部分表格內容)

樓層	高度	建築物年限		頻率
11 層 以上	建築物高 度在 35m 以上	領得使用執照達 30 年以上		每 3 年一次
		領得使用 執照達 15 年以上未 達 30 年	外牆飾材未曾剝落或全面更新之建築物	每 6 年 1 次
			外牆飾材曾經剝落且經當地主管建築機關列管有案，或經評估檢查結果為須改善，且僅進行局部修繕之建築物	每 3 年 1 次
7 層 以上 未達 11 層	建築物高 度在 21m 以上未達 35m	領得使用執照達 30 年以上		每 3 年 1 次
		領得使用 執照達 15 年以上未 達 30 年	外牆飾材未曾剝落或全面更新之建築物	每 6 年 1 次
			外牆飾材曾經剝落且經當地主管建築機關列管有案，或經評估檢查結果為須改善，且僅進行局部修繕之建築物	每 3 年 1 次
外牆飾材曾經剝落且經當地主管建築機關列管有案，或經評估檢查結果為須改善，且僅進行局部修繕之建築物				每 3 年 1 次
將當地主管建築機關選定或公告外牆飾材具有危險疑慮之建築物				備註三
備註： 三、檢查頻率、檢查及申報期間、施行日期，由當地主管建築機關依實際需求公告之 四、建築物外牆飾材全面更新者，其評估檢查頻率以建築物領得使用執照達 15 年以上未達 30 年之建築物年限計算，每 6 年檢查及申報 1 次				

資料來源：高文婷，2016



二、臺北市建築物外牆安全診斷及申報管理辦法(草案)

臺灣位處於環太平洋地震帶天然災害頻仍，再加上近年來氣候變遷，造成溫度劇烈變化，導致建築物外牆飾面容易因熱漲冷縮而剝落，造成公安意外，而臺北市建築物及人口稠密度均為全國之冠，若有建築物外牆飾面材料或附掛物剝落，極易導致人民傷亡憾事的發生，嚴重影響市民生命財產安全，因此著手訂定「臺北市建築物外牆安全診斷及申報管理辦法」，明定臺北市領得使用執照建築物達一定年限以上或外牆飾面較具風險之下列建築物，申報人應定期委託專業診斷機構或人員辦理建築物外牆安全診斷並辦理申報，其應申報之規模如下：

- (1) 地面十一層以上之建築物。
- (2) 地面三層以上之外牆飾面為石材、帷幕牆之建築物。
- (3) 經主管機關選定或公告外牆具有潛在危險疑慮或需注意之建築物。

(一) 明定建築物外牆安全診斷結果

共區分為 A 級(良好)、B 級(尚可)、C 級(需注意)、D 級(有潛在危險)及 E 級(有明顯剝落)等五種等級。經判認屬 D 級或 E 級者，專業診斷人員除應於現場明顯處所張貼警告標示外，並應會同申報人提具改善計畫書，於都發局之限期內輔導申報人自行改善。經判認屬 E 級者，專業診斷人員應於現場適當處所圍繞警示區域。

(二) 明定建築物外牆安全診斷之頻率

依下列規定辦理。但建築物外牆飾面全面更新者，其年限得重新起算：

- (1) 建築物年限在十五年以上未達三十年者，每六年診斷一次。
- (2) 建築物年限超過三十年以上者，每三年診斷一次。

(3) 建築物外牆飾面於地面三層以上採用石材、帷幕牆，其屋齡十年以上未達三十年者，每六年診斷一次。

(4) 建築物經診斷判認屬 D 級或 E 級者，若僅進行局部修繕，每三年診斷一次。


三、高雄市加強建築物公共安全管理自治條例

國人習慣於建築物外牆黏貼磁磚或飾材，由於建築物外牆因時間老化，加上氣候變化出現熱漲冷縮，造成國內多起外牆磁磚、塊石、飾材或其他構造物剝離或掉落，致有人員傷亡或財物損壞之情形。故明定一定規模以上且取得使用執照十五年以上之建築物，建築物所有權人、使用人、公寓大廈管理委員會、管理負責人應定期委託主管機關或中央主管建築機關認可之專業機構或人員辦理外牆安全檢查簽證，其檢查簽證結果應向主管機關申報。

2.1.2 香港

根據香港 2010 年屋宇署調查顯示，全港約 4,000 幢樓齡達 50 年或以上的樓宇，並以每年 500 幢的速度遞增。樓齡達 30 年或以上的樓宇，更多達 17,000 幢，10 年後會增至 28,000 幢，因此須立即採取行動，否則這類樓宇的狀況迅速惡化，將會危害公眾安全。

香港為應付樓宇失修問題，2012 年 6 月 30 日起全面實施「強制驗樓計劃」及「強制驗窗計劃」。「強制驗樓計劃」規定樓齡達 30 年或以上的私人樓宇(不超過 3 層高的住用樓宇除外)的業主，須在接獲屋宇署送達法定通知後，委任一名註冊檢驗人員就樓宇的公用部分、外牆及伸出物或招牌進行訂明檢驗並監督檢驗後認為需要進行的訂明修葺工程。在強制驗樓的法定通知獲遵從後，建築事務監督不得在該通知的日期起計 10 年內，就該建築物的同一部分送達新的通知。



檢驗時應從地面或其他可供使用的有利位置及開口，對外部構件及其他實體構件進行目視檢查，或利用非破壞性方式，例如錘敲、紅外線熱像探測或其他可行方法進行檢查。外牆飾面部分，註冊檢驗人員須認明以下欠妥之處及任何其認為涉及安全問題的欠妥之處：

- (1) 鬆脫或缺漏的瓦片及批盪
- (2) 裂縫
- (3) 隆起、彎曲、分離、脫層剝落
- (4) 外牆飾面內的金屬件銹蝕
- (5) 剝落

將欠妥範圍作紀錄，並於完成樓宇檢驗後呈交屋宇署。(香港屋宇署，2016)

2.1.3 日本

日本在 1989 年 11 月 21 日，北九州市小倉北區昭和町住宅磁磚連同水泥砂漿保護層自 31 公尺高剝落，造成用路人的死亡，此案件讓日本開始重視建築物安全的議題，並立即在隔年 1990 年 3 月著手推動「防止磁磚脫落之磁磚外牆、水泥砂漿外牆診斷指針」，最近在 2008 年修正成最新版本，明定了診斷等級、診斷頻率以及診斷範圍等，並且需定期向行政廳提出建築物結果報告。



(一) 診斷等級

表 2.2 日本診斷指針之診斷等級

診斷等級 I	(1) 外觀目視法 + 部分打診法
	(2) 外觀目視法 + 「局部紅外線裝置法與部分打診法並用」
診斷等級 II	(1) 外觀目視法 + 全面打診法
	(2) 外觀目視法 + 「全面紅外線裝置法與部分打診法並用」

資料來源：本橋健司，2015

(二) 診斷頻率

- (1) 建築物竣工 2 年以內：實施診斷等級 I (若外牆已發生相關問題則實施診斷等級 II)
- (2) 建築物竣工 2 年以後：每 3 年實施一次診斷等級 I (若外牆已發生相關問題則實施診斷等級 II)
- (3) 建築物竣工 10 年前後：實施診斷等級 II，必要時須進行接著強度測定

(三) 診斷等級 I 的部分打診實施範圍

- (1) 產生缺陷或剝落的磁磚、水泥砂漿約 1m 以內
- (2) 龜裂痕跡的兩側約 1m 以內
- (3) 白華部分及其上部約 1m 以內
- (4) 鏽蝕痕跡及其上部約 1m 以內
- (5) 開口部周邊約 1m 以內
- (6) 欄杆扶手上緣，窗台等異種材料介面部分約 1m 以內



- (7) 出隅部分，女兒牆之壓簷上端，雨庇及窗台部分約 1m 以內
- (8) 混凝土澆置介面及伸縮縫周邊約 1m 以內
- (9) 除上述之外，若依據龜裂狀況而判定具有危險的部分，則依據現況範圍實施打診

(四) 診斷等級 I 的結果判定

若有下列任一條件，需進一步執行診斷等級 II；若未發生下列任一條件，則針對脫落、龜裂、浮起等位置進行修補。

- (1) 至少出現一個部位產生磁磚或水泥砂漿的剝落，其面積占 $1m^2$ 以上
- (2) 牆體整體呈現龜裂現象
- (3) 牆面呈現兩個以上的表面浮起
- (4) 依據部分打診法等探查結果，浮起面積占探查面積的 30% 以上，或是浮起面積 $3m^2$ 以上的部分有兩個以上
- (5) 其他，若牆面表面出現異狀，依據預防外牆裝修材脫落的考量，須實施診斷等級 II

依據診斷等級 II 的測定所發現的浮起、膨脹等劣化現象，均視為具有脫落的風險，必須實施修補或改修等對策。(本橋健司，2015)



2.2 磁磚劣化

2.2.1 磁磚材質

在使用打音法時，會因為磁磚材質的不同，造成敲擊時發出不同的聲音，因此本研究進一步了解磁磚材質的種類及特性，如表 2.3。

表 2.3 CNS 對磁磚品質的規定

種類/項目	陶質磁磚	石質磁磚	瓷質磁磚
吸水率	壁：18%以下 地：16%以下	6%以下	1%以下
蒸壓試驗	10 kgf/cm ²		
抗曲強度	壁：60 kgf/cm ² 以上 地：100 kgf/cm ² 以上	壁：120 kgf/cm ² 以上 地：200 kgf/cm ² 以上	壁：180 kgf/cm ² 以上 地：300 kgf/cm ² 以上
釉面磨耗量	0.1g 以下		
耐酸鹼性	10% 酸鹼溶液及 10% 氫氧化鉀溶液，24 小時以上，釉面無污染變色		
莫式硬度	施釉磚：3~3.9 無釉射出陶磚：6~8	3.5~5.5	5~6

資料來源：中國國家標準(CNS)

本研究較關心的項目為吸水率，吸水率高的磁磚較容易吸水，易造成磁磚熱脹冷縮，而熱脹冷縮是磁磚表面龜裂及磁磚剝落的主要原因，由表中得知陶質磁磚的吸水率較高，不適合作為建築物外牆磁磚的飾面材，不過由於 30 年前對於磁磚材質方面的研究較不深入，因此仍有許多老舊建築物的外牆飾面材是使用陶質磁磚，近年來則多以瓷質磁磚作為建築物外牆飾面材以減少熱漲冷縮造成的劣化現象。

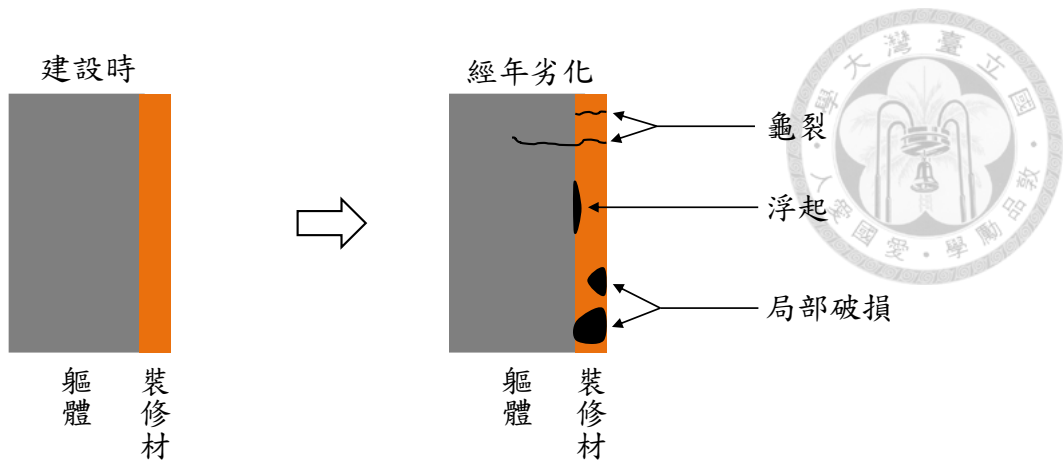


2.2.2 劣化形式

建築物外牆磁磚劣化有許多種形式，包括：

- (1) 剝落：磁磚剝落產生缺損時，周邊的磁磚也發生剝落的機率將提高。
- (2) 浮起：異種材料之間黏著不完全，造成空隙存在。
- (3) 凸起：大面積的浮起現象，存在大範圍的空隙。
- (4) 龜裂：當建築軀體發生變動或磁磚後方水泥層等處發生變動時，磁磚與其接縫處、水泥粉刷表面有可能產生裂縫，這些裂縫周邊的磁磚容易產生剝落或浮起的現象。
- (5) 局部破損：磁磚受外力造成表面破損，嚴重者破損處可見軀體混凝土。
- (6) 髒污：一類為附著於表面的污垢，一類為磁磚或水泥後有水滲入而造成。
- (7) 潮濕：若水滲入磁磚或水泥後而造成磁磚接縫位置產生潮濕顏色，則可能已經發生浮起劣化。
- (8) 生鏽：鋼筋保護層不足所造成之生鏽、開口部鋼製建具的生鏽、廣告塔或招牌固定用鐵件生鏽，這些狀況發生處的周邊磁磚或水泥容易產生浮起的現象。
- (9) 白華：磁磚表面或接縫處、水泥粉刷表面產生白色析出物時，表示磁磚或水泥後方可能已經產生空隙且有水滲入，可能已發生浮起的現象。

其中最嚴重者為剝落，其他如浮起、凸起、龜裂、局部破損皆具有磁磚掉落的風險，故必須進行修補等對策，如圖 2.2。(中島和幸，2007 與本橋健司，2015)



軀體：混凝土
裝修材：水泥砂漿塗布，張貼磁磚

圖 2.2 具較高風險的磁磚劣化

資料來源：本橋健司，2015

2.2.3 剝落的發生機制

在外牆磁磚剝落之前必定先發生了浮起的現象，其剝落機制為磁磚、水泥砂漿、混凝土軀體等異種材料間的接著界面間隙受到乾溼、溫度變化等反覆作用應力影響接著強度，進而分離剝落，如圖 2.3。

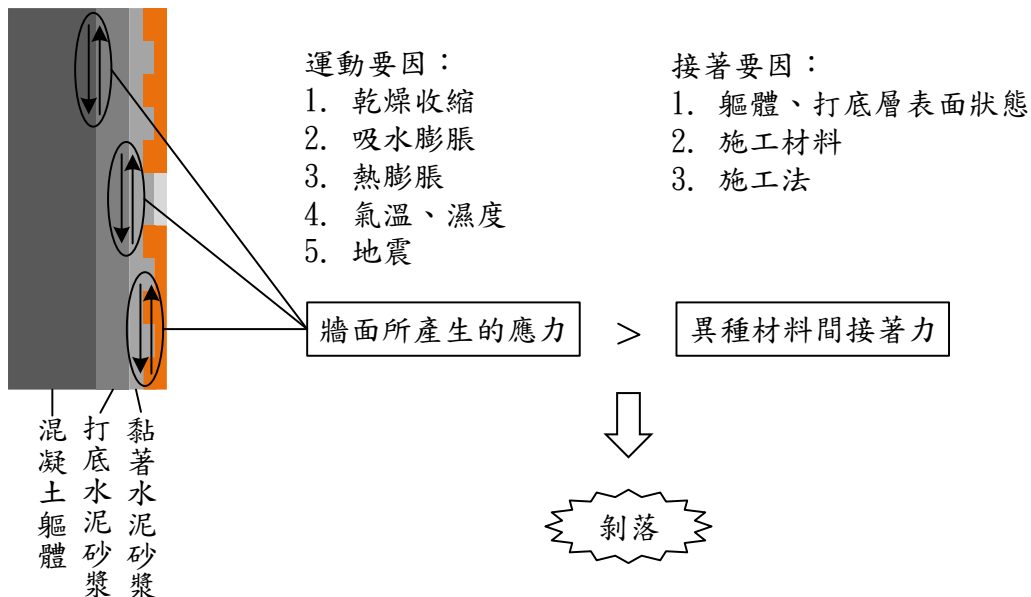



圖 2.3 外牆磁磚的剝落機制

資料來源：山崎健一，2015



以後貼工法為例，混凝土軀體與打底水泥砂漿存在一個界面，打底水泥砂漿與黏著水泥砂漿存在一個界面，黏著水泥砂漿與磁磚存在一個界面，共三個界面，而剝落的機制皆可能發生在任一個界面上，當牆面所產生的應力大於材料間的接著力時，剝落隨即發生。(山崎健一，2015)

2.3 建築物外牆磁磚檢測技術

2.3.1 各式檢測技術及其適用限度

外牆磁磚診斷的方法有外觀目視法、打診法、紅外線裝置法、超音波法、接著強度試驗等，目前最值得信賴的為打診法，亦是本研究使用之方法，而每個診斷方法都有其適用限度。

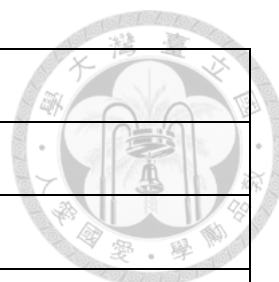
- (1) 外觀目視法：是最基本的調查方法，因此無論何種調查內容，都均由外觀目視法開始，操作方式是利用肉眼、望遠鏡來調查外牆磁磚的劣化狀況，是最簡便的方法，能讓建築物所有者或管理者在早期發現異狀以避免剝落造成事故。
- (2) 打診法：由技術熟練者利用打診棒等工具敲擊牆面，依據其聲音差異判別牆面的健全部與浮起部，因為可以近距離施測，故可同時確認浮起以外的劣化狀況，是現階段精度最高的方法。
- (3) 紅外線裝置法：磁磚面受到太陽輻射熱時，正常的情況為外牆表面的熱能順利地傳導至混凝土軀體，但若磁磚無密貼而產生浮起，中間的空氣層形成熱的不良導體，而衍生出劣化部位與正常部位有著不同的溫度，藉此溫差來調查有無浮起的現象發生。
- (4) 超音波法：藉由超音波探傷器原理，由發信探觸子與受信探觸子間的固定傳播距離以量測傳播時間，依據其時間的差異判斷外牆狀況，浮起部比健全部的傳播時間短，而脫落界面越淺傳播時間也越短，不過此法幾乎很少被使用。

(5) 接著強度試驗：屬於破壞性實驗，主要運用於磁磚張貼面的接著力及接縫健全度的確認，先將磁磚周圍的填縫處切割至打底水泥砂漿的深度，再將磁磚表面清潔後與塗佈滿黏著劑的專用金屬墊片黏著，再以磁磚拉拔器進行試驗，量測最大荷重，並觀察拉拔後水泥砂漿黏著情形。

各方法都有其適用限度，因此在使用前，需先對其適用限度有所了解，如表 2.4：

表 2.4 診斷方法的適用限度

診斷方法	適用限度
外觀目視法	(1) 可發現外觀上的異常，但無法發現外觀上無異常的浮起。
	(2) 雖可發現外觀上的異常，但可能因光線或遮蔽物而漏掉。
打診法	(1) 無法以客觀的數字來表示測定結果。
	(2) 有時無法測出厚度約在 40mm 以上部位的浮起。
	(3) 依據檢查者的熟練度不同，檢出浮起部的結果亦有差異。
	(4) 長時間作業下會影響判斷能力，故需要設置休息時間。
	(5) 需額外搭設鷹架等移動設施，故要探討經濟性、安全性。
紅外線裝置法	(1) 照相機受季節、天候、時刻、氣溫、壁面的方位、照相機距離、裝修材的色調、建築物冷暖機具發熱等的影響。
	(2) 在風或雨較強時難以測定。
	(3) 若壁面與照相機之間有樹木等障礙物時無法測定。
	(4) 不同的機器、畫面處理方法會造成結果有很大的差異。
	(5) 若有陽台或雨庇等突出物時難以測定。
超音波法	(1) 對於較寬廣的面，難以檢查出浮起。
	(2) 不適用於表面較粗糙的磁磚。
	(3) 難以檢查出較深層處的浮起。



診斷方法	適用限度
接著強度試驗	(1) 試驗用磁磚需要進行修補。
	(2) 不適用於表面有較大凹凸的磁磚。
	(3) 僅能測定部分的磁磚。(測定數目限制)

資料來源：中島和幸，2007 與本橋健司，2015

2.3.2 打音診斷法

打音法是由有經驗的檢測人員以測試錘或打診棒敲擊外牆磁磚，再利用敲擊時正常磁磚與劣化磁磚所發出的聲音相異來判定磁磚是否劣化，聲音的要素有三，分別為響度、音調、音品：

(一)響度：聲音的強弱稱為響度，通常以分貝(dB)來表示響度的大小，聲波振幅越大則響度越大。

(二)音調：聲音的高低稱為音調，音調是由發音體的振動頻率決定，頻率越高則音調越高，人類耳朵的聽覺範圍約在 20~20000Hz 之間。

(三)音品：聲音的獨特性稱為音品，又稱音色，不同的聲音體產生不同的波形，而形成不同的音品，大部分的樂器所發出之聲波都不是單純的正弦波，而是由基音和多組不同頻率的泛音複合而成的複合波。(泛音的頻率必為基音頻率的整數倍)。(黃福坤，<http://www.phy.ntnu.edu.tw/demolab/>)

打診法依範圍大小可分為部分打診法及全面打診法：

(一)部分打診法：主要針對具有剝落危險之部位進行打診的方法，採用部分打診法時費用較便宜，但只能由部分壁面來推測整體狀況，所以精度較差，常見的施測範圍如剝落磁磚周邊、龜裂兩側、白華上方、鏽蝕上方、開口部周邊等。

(二)全面打診法：利用吊掛機具、吊索、吊車或鷹架，對外牆整體進行打診的方法，其中使用鷹架的方便性及安全性最高，但若只是單純實施外牆檢查，則需考量高昂的搭架成本。(中島和幸，2007)



日本已有完善的外牆診斷指針，並且最信賴之診斷方法為打音法，不過此法仍是由經驗的檢測人員以主觀的方式進行判定，因此打音法的適用限制仍然存在，包括每位檢測人員所做出的結果將不盡相同，以及檢測人員會受到長時間的作業而影響判斷能力，因此本研究將使用指向性電容式麥克風收取音訊，並使用 MATLAB 進行快速傅立葉變換進行頻譜分析，找出特徵模式，以科學的方式判定磁磚劣化情形，藉此改善上述打音法仍無法解決的適用限制。

2.4 國內相關研究成果

顏嘉慶(2013)提出，使用指向性電容式麥克風相較線圈感應式麥克風，能減少環境背景雜音所造成的干擾，確保得到正確的聲音訊號來進行後續之研究，並採用時域概念，開發聲音能量面積法，利用異質音與正常音能量的差異分析，得到顯著的差異，並具有統計上的意義。

戴佩宜(2008)自製混凝土試體，設計了四種不同的黏貼缺陷，黏貼瓷質二丁掛磁磚，並記錄頻譜分析圖中最高峰所對應之頻率，表 2.5 為其研究成果。




表 2.5 戴佩宜二丁掛黏貼方式之頻率值範圍表

二丁掛磁磚 23cm(長) X 5cm(寬) X 0.75cm(厚)	
缺陷設計	頻率值範圍(Hz)
無	15.000~28.091
缺陷 a (平黏著層)	55.212~73.320
缺陷 b (薄黏著層)	19.046 左右
	37.136~64.273
	73.318 左右
缺陷 c (無黏著層)	28.091~46.182
缺陷 d (磁磚背溝與黏著層垂直)	55.227~91.410

資料來源：戴佩宜，2008

戴佩宜(2008)也提到打音法是以點為單位之檢測法，對於面積較大之磁磚需進行多點敲擊，否則對於缺陷範圍較小處或不明顯處，較無法檢測出。實驗結果得知磁磚黏貼缺陷處之聲音頻率較高(空洞聲)，而黏貼完整處聲音頻率較低(厚實聲)，檢測出之頻率值越低，其黏著強度越大。

許家豪(2010)自製混凝土試體並黏貼瓷質二丁掛磁磚，利用珍珠板墊於磁磚下方來設計四種空鼓率，分別為 0%(完整黏貼)、25%、50%及 75%，經過快速傅立葉變換繪出頻譜圖，得知完整黏貼磁磚之頻率值約在 1500~2000 Hz 之間有高峰值，磁磚預留空鼓 25%之頻率值約在 2000 Hz 左右有高峰值，磁磚預留空鼓 50%之頻率值約在 2500 Hz 左右有高峰值，磁磚預留空鼓 75%之頻率值約在 3000 Hz 左右有高峰值，頻率高峰值出現的大小順序為空鼓 75% > 空鼓 50% > 空鼓 25% > 空鼓 0%(完整黏貼)，將各種空鼓程度所得頻率尖峰值作迴歸曲線，嘗試建立頻率值與空鼓程度之關係，其關係式為 $y = 0.0571x - 95.487, R^2 = 0.9476$ 。許家豪(2010)



也由現地實驗得知空鼓磁磚頻率高峰值大於完整磁磚頻率高峰值，其基準值約在 2000 Hz，並建議以打診法進行磁磚空鼓檢測時，可嘗試將每次敲擊能量完全固定(避開人為誤差)，錄音時盡可能選擇外界干擾較低之深夜時段，可達到較佳之錄音品質。

張耀祖(2013)利用打診棒敲擊國立台灣大學共 34 棟建築物之外牆，磚種不盡相同，包括二丁掛磚、方塊磚、馬賽克磚以及國立台灣大學特有之 13 溝面磚，將頻譜圖中第一個波峰視為雜訊，取第二波長之起點為劣化音訊膨拱起始點，該波段之終點為劣化音訊膨拱終結點，統計劣化磁磚共 177 個後，提出若出現頻率 200~800 Hz，且振幅超過 0.01 V 的頻譜圖，則可推測磁磚有劣化空洞現象產生，並建議未來建築物評估需打音診斷之立面實施至少 5 點以上之敲擊，以提高整體磁磚劣化準確率。

陳柏穎(2014)自製混凝土試體並黏貼瓷質二丁掛磁磚，利用珍珠板墊於磁磚下方來設計四種分離率，分別為 0%、25%、50%及 75%，將每片壁磚敲擊數次後所得聲音檔進行快速傅立葉變換，經初步判定與比對，將曲線相近之 5 次頻譜圖加以套疊作為該壁磚之頻譜圖，並以此圖判斷各種分離率下的壁磚之主控頻率，分離率 0%壁磚之主控頻率值分佈在 1060~1980 Hz 之間；分離率 25%壁磚之主控頻率值在 1920~2040 Hz 之間；分離率 50%壁磚之主控頻率值在 2300~2460 Hz 之間；分離率 75%壁磚之主控頻率值在 3020~3120 Hz 之間，由不同分離率壁磚檢測所得之主控頻率大小關係為：分離 75%壁磚 > 分離 50%壁磚 > 分離 25%壁磚 > 分離 0%壁磚。壁磚分離率愈高，在敲擊壁磚時的聲音越清脆主控頻率愈高；反之分離率越低，聲音受混凝土牆體的影響愈高，其聲音較低沉，主控頻率越低，透過線性迴歸的方法，則可得到壁磚分離率與平均主控頻率關係式為

$D(\%) = 0.051 \times f(\text{Hz}) - 78.022, R^2 = 0.977$ ，式中 D 為分離率、f 為平均主控頻率。

上述國內相關的研究，除顏嘉慶(2013)為時域分析外，其餘皆是頻域分析，利

用快速傅立葉變換繪出頻譜圖，不過結果不盡相同，因此本研究將其個別的研究成果整理成表 2.6，以便比較對照。戴佩宜(2008)的結論，頻率最高僅 91 Hz，離人耳可聽最低頻率 20 Hz 只有些微差距，幾乎是無法聽見的，可能是因為未做去雜訊的處理，而分析到雜訊所提供之資料點，而許家豪(2010)、張耀祖(2013)、陳柏穎(2014)三位作者所提出的頻率是可輕易聽見的，其中許家豪(2010)與陳柏穎(2014)的結論相近，不過卻與張耀祖(2013)的結論相差甚多，基於上述理由，本研究將汲取前人經驗，做更深入的探討，並跳脫自製試體的室內實驗，轉為實體建築物的現地實驗。

表 2.6 國內相關研究整理

作者(出版年)	研究對象	數據分析模式	結論
戴佩宜(2008)	瓷質二丁掛	最高峰對應頻率	試體實驗： 正常磁磚頻率：15~28 Hz 劣化磁磚頻率：19~91 Hz
許家豪(2010)	瓷質二丁掛	最高峰對應頻率	試體實驗： 空鼓率 0% 頻率：1500~2000 Hz 空鼓率 25% 頻率：約 2000 Hz 空鼓率 50% 頻率：約 2500 Hz 空鼓率 75% 頻率：約 3000 Hz 現地實驗： 正常磁磚頻率：2000 Hz 以下 劣化磁磚頻率：2000 Hz 以上
張耀祖(2013)	無特別限制	劣化頻譜區間	現地實驗： 劣化磁磚區間：頻率 200~800 Hz 且振幅超過 0.01 V
陳柏穎(2014)	瓷質二丁掛	最高峰對應頻率	試體實驗： 分離率 0% 頻率：1060~1980Hz 分離率 25% 頻率：1920~2040Hz 分離率 50% 頻率：2300~2460Hz 分離率 75% 頻率：3020~3120Hz



2.5 訊號分析

傅立葉變換是個廣泛運用於數位訊號的分析技術，儀器上所量測的多是時間對上振幅的數據(時域)，以音訊每秒取樣 44,100 次來說，一個三秒的音訊即有 132,300 個點，數據量龐大，難以分析，不過可透過傅立葉變換將訊號轉換為頻率對上振幅的數據(頻域)，將可在頻譜分析圖中得出 22050Hz 內各頻率所對應的振幅，如圖 2.4，音訊可分解為不同頻率不同強度的正弦波疊加，由頻域的角度分析音訊。

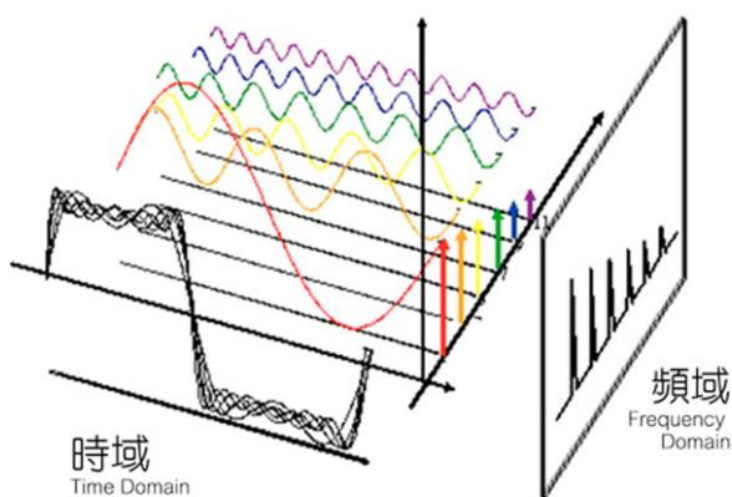


圖 2.4 傅立葉變換

資料來源：劉子健，2012

在做頻譜分析前，必須先對訊號做前處理，如濾波及去雜訊等，除非在頻譜分析時要探討雜音所帶來的影響，否則若把雜訊一起分析，可能會嚴重影響分析的結果，圖 2.5 為訊號分析的步驟。

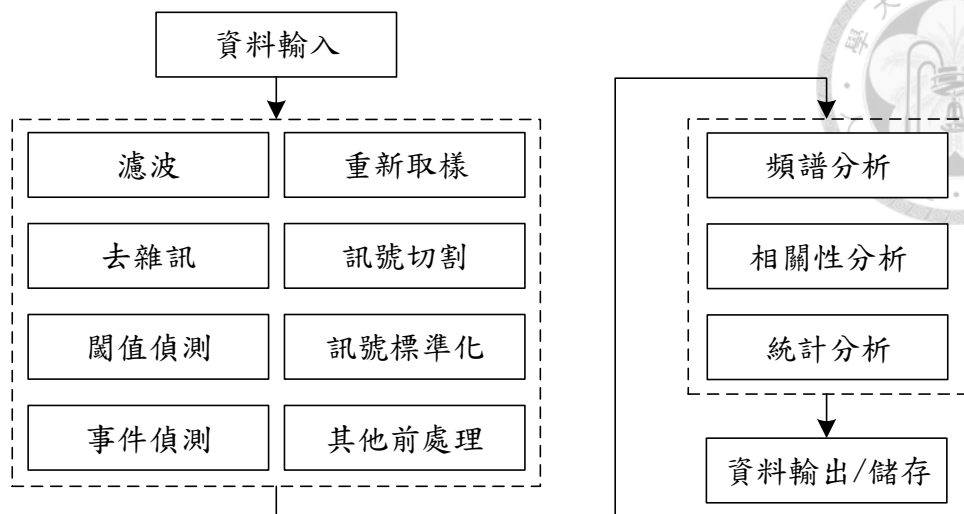



圖 2.5 訊號分析步驟

資料來源：盧家鋒，<http://www.ym.edu.tw/~cflu/>

一個時間訊號 $x(t)$ 的能量為 $\int_{-\infty}^{\infty} |x(t)|^2 dt$ ，能量譜密度(Energy Spectral Density)能描述訊號的能量或時間序列在頻率上的分布，單位是 J/Hz，可利用帕塞瓦爾定理(Parseval's theorem)，即能量有限的訊號之時域與頻域能量守恆的特性，公式為 $\int_{-\infty}^{\infty} |x(t)|^2 dt = \int_{-\infty}^{\infty} |x(f)|^2 df$ ，將訊號轉為頻率對上能量譜密度的頻譜圖。

2.6 小結

由文獻回顧中得知，臺灣正慢慢地建立起建築物外牆飾面材的安全檢查及申報制度，除了中央的內政部營建署準備推動辦法之外，地方的臺北、高雄也帶頭制定了自治條例或辦法，甚至已初步的使用外觀目視法對老舊建築物做診斷並記錄狀況，不過所有的法規中，皆無提及診斷方面的準則，只提及評估檢查人員之資格，並將準則全交由評估檢查人員判斷，這將會產生很大的問題，評估的太過寬鬆，將無法達到安全檢查的效果，外牆磁磚剝落的風險依然存在，評估的太過保守，將造成建築物所有權人財務上的負擔及資源上的浪費，因此極有必要訂定診斷準則供檢測人員參考。



國內已有數篇論文做了打音法的相關研究，不過研究多為室內的試體實驗，本研究認為實體建築物與室內試體有著很大的差異，經過大自然 30 年以上的劣化是很難模擬的，且建築物各面向及各部位的劣化情形也都不同，因此若要將實驗室的研究結果套用在實體建築物上，恐怕會衍生出許多問題，因此本研究將汲取前人研究之貢獻，並將研究對象由室內試體轉為實體建築物，最終擬提出打音法劣化標準判斷模式及準則，並建立一套打音法作業流程供使用者參考。

第三章 實驗設計



3.1 前言

打音法為目前非破壞性檢測中最值得信賴的方法，也具有設備成本低廉的優點，不過就連行之有年的日本也仍是由有經驗的檢測人員以主觀的方式來進行判斷，且不易紀錄的缺點，國內有些打音法的相關研究，嘗試以錄音及快速傅立葉變換繪圖分析來解決打音法之缺點，不過多以室內試體實驗為主且各篇論文結論差異甚大，因此本研究將以實體建築物現地實驗為主，並探討前人研究之差異，為了確定實驗設計的方向，本研究訪談了 OO 錄音室共同創辦人暨音控師，最後將與本研究相關的訪談內容整理成三項建議如下：

- (1) 建議敲擊力道及收音距離需標準化，減少人為的誤差，以利數據分析。
- (2) 每棟建築物因為磁磚材質及尺寸的不同會產生不同的音調，推測無法求得一固定的劣化磁磚頻率。
- (3) 建議找出正常磁磚與劣化磁磚的頻譜圖特徵模式，著重在應用層面，以真實建築物為案例驗證模式的使用。

3.2 實驗設備介紹

3.2.1 打音法設備及使用方法

台灣目前在使用打音法時，並沒有特定的工具，診斷的師傅常使用的是隨手的小錘子或木柄作為其敲擊的工具，因此聲音將會因為使用工具的不同而有所差異，而日本早已有診斷外牆專用的打診棒，且功能多樣化，本研究特別購入兩款打診棒，減少因不同的敲擊工具所造成的聲音差異，分別為一般型打診棒及南瓜型打診棒。

一般型打診棒為最初的設計款，適合敲擊使用，由於前端圓頭為一體成形，因此敲擊時聲音乾淨，不會有因鬆脫而產生二次敲擊的現象，南瓜型打診棒可用於刷動及敲擊，大範圍的刷動能初步找出可能劣化的位置，再進一步敲擊確定劣化範圍，前端南瓜型圓頭的可轉動的設計，可提高刷動時的聲響使使用者更容易判斷，不過因為不是一體成形，偶爾會有前端圓頭鬆脫產生二次碰撞的情形，因此本研究先使用南瓜型打診棒刷動找出劣化磁磚，收取音訊時，再以一般型打診棒敲擊，以提升音訊品質。使用指向性電容式麥克風，可接收指定方向聲音，減少收到雜音。使用 SONY 錄音筆，音檔為 LPCM 檔，取樣頻率每秒 44,100 次，位元深度 16bit，有效頻率範圍 50~20000 Hz。



圖 3.1 打音法設備

由於前述專家訪談建議敲擊力道需標準化以利後續數據分析，本研究使用了低成本的萬用角鋼、螺桿、螺帽等零件，製作一固定敲擊力道之裝置，可任意調整螺桿之位置，選擇敲擊力道大小，實驗初步認為大力敲擊能將聲音錄製清楚，有利於分析，不過結果卻不如預期，由於大力敲擊的聲音響度過大，造成音訊有爆音的現象，造成失真，因此經過多次的實驗嘗試，最終將打診棒擺幅固定在與垂直線夾角 40 度處，並將麥克風黏貼於螺桿上，固定收音距離，約離敲擊點 20 公分處。



圖 3.2 固定敲擊力道及固定收音距離裝置

3.2.1 拉拔試驗設備及使用方法

以磁磚切割器將欲拉拔之磁磚大小切割至打底混凝土之深度，接著將鐵塊塗布 AB 膠並黏貼於磁磚上，再以磁磚拉拔器進行接著強度試驗，測定磁磚的接著強度及觀察其內部黏著情形。



圖 3.3 拉拔試驗設備

3.3 實驗規劃

3.3.1 劣化驗證

本研究將正常磁磚記作「O」，而劣化磁磚經人耳判別即可區分成兩種不同的聲音，因此記作「X」及「Δ」，為了探討「X」與「Δ」之差異，本研究將對外牆磁磚作拉拔強度試驗，以測定其接著強度及觀察內部黏著情形。



第一種試驗，以浮起劣化點為中心，切割 5cm X 5cm 的大小後，記號「X」與「Δ」的磁磚皆隨即掉落，顯示著磁磚背溝與黏著層無任何黏著力，觀察磁磚背面，確實無任何水泥砂漿附著，如圖 3.4。

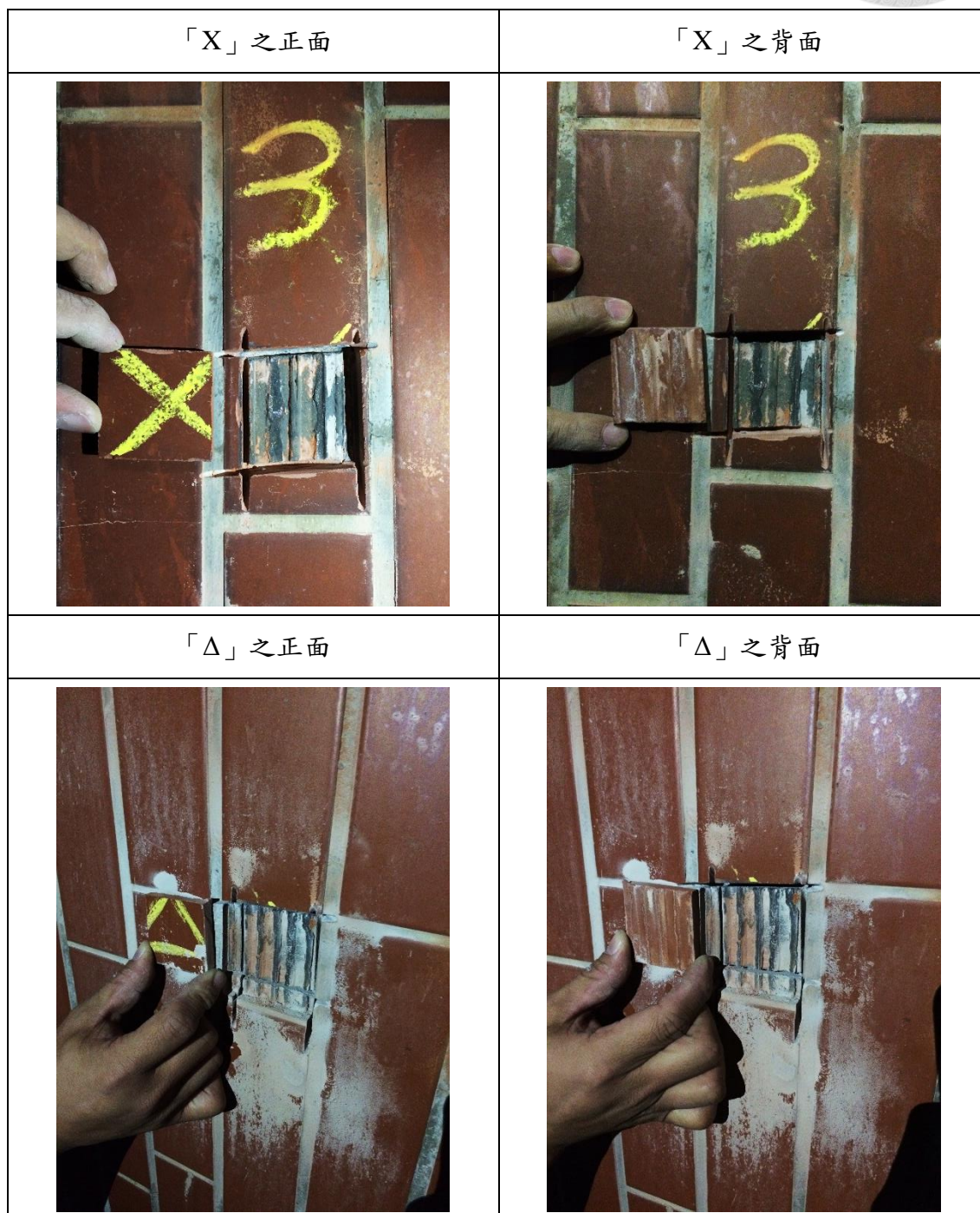


圖 3.4 劣化磁磚黏著情況(5cm X 5cm)

第二種試驗，由於二丁掛的面積大，局部的浮起劣化不會使整片磁磚掉落，部分的黏著仍可使磁磚附著於牆面上，因此本研究將切割二丁掛尺寸 22.7cm X 6.0cm 的大小，比較「X」與「Δ」之接著強度差異，如圖 3.5，「X」之接著強度為 0.69 kN，「Δ」之接著強度為 0.62 kN，由兩種試驗得知「X」與「Δ」之起劣化情形相當，因此往後將不再區分，都將其視為有浮起的劣化。

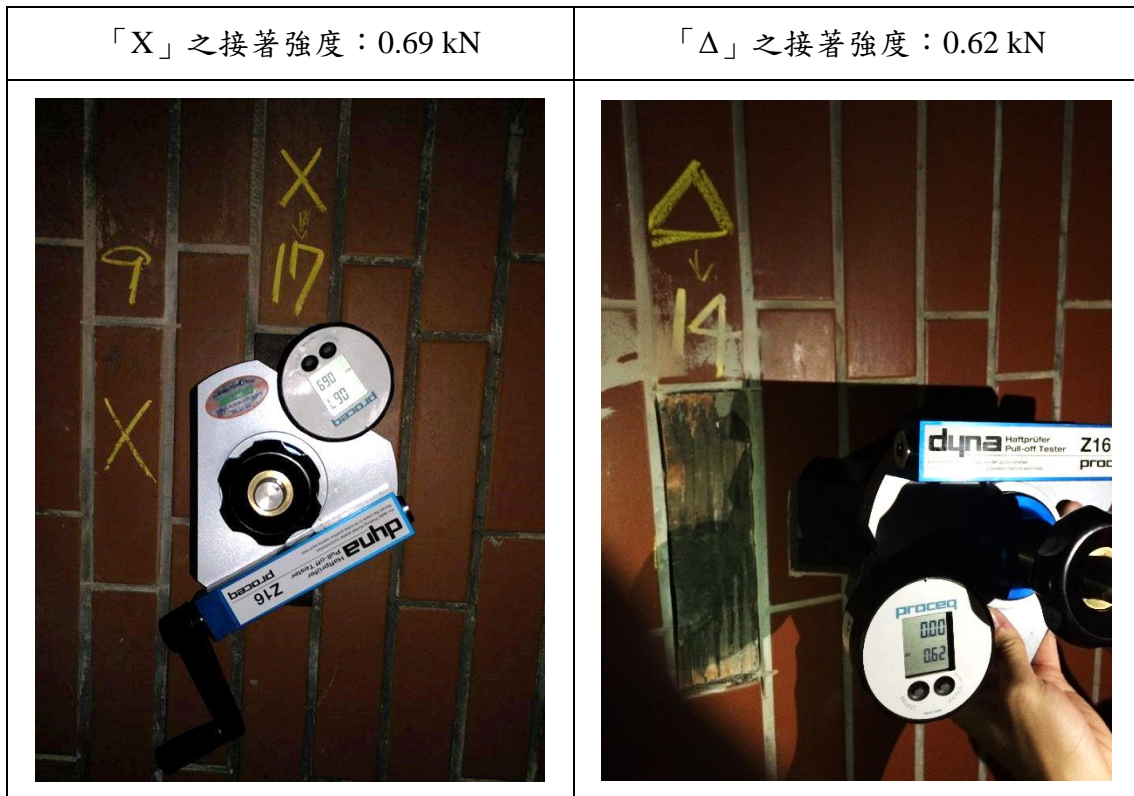


圖 3.5 劣化磁磚黏著情況(22.7cm X 6.0cm)

3.3.2 診斷步驟

診斷步驟如下：

- (1) 選定外牆使用丁掛磚之建築物，使用南瓜型打診棒刷動進行初步的大範圍檢查。
- (2) 確認劣化磁磚位置及附近正常磁磚位置並用粉筆紀錄記號「O」、「X」及點位編號，方便後續收音作業。

(3) 將麥克風置於距離點位約 20 公分之位置，固定收音距離。

(4) 利用固定敲擊力道裝置，將打診棒擺幅置於 40 度之處，以自由落下之力道敲擊外牆磁磚，並立即收棒避免二次碰撞，同時以錄音筆錄取音訊。

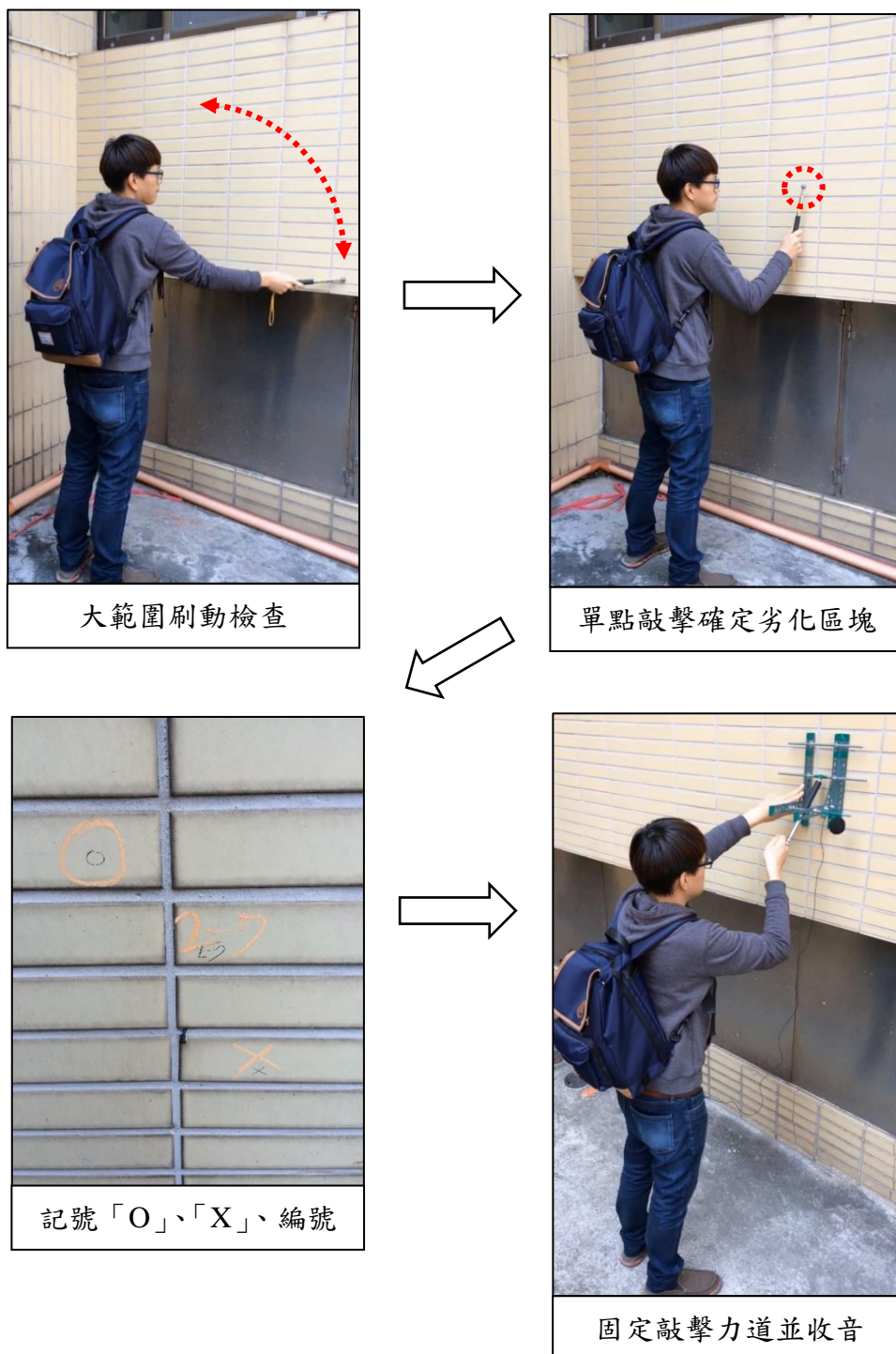


圖 3.6 診斷步驟說明圖



3.3.3 案例介紹

本研究共有五棟建築物作為案例，皆以平面丁掛磚為外牆飾面材，與其他國內研究不同之處，本研究並非自製試體，而是選用受到自然劣化，屋齡約 30 年以上或外牆磁磚已有剝落現象之建築物作為案例，因此磁磚的劣化嚴重程度皆不相同，也無從得知內部劣化情形，而本研究尋找劣化磁磚的工作是由擁有五年打音經驗的專家進行，以降低尋找劣化磁磚這部分的人工錯誤，在尋找點位時盡量平均分布於建築物的四個面向並至少各 5 點以上，讓浮起劣化的程度多元而不單一。



案例一：生物化學研究所

1974 年竣工，屋齡 42 年，材質為陶質，尺寸為二丁掛(23.2cm X 6.1cm)

圖 3.7 為生物化學研究所之外觀、磁磚近照圖及其平面圖，紅點為點位約略配置情形，東向 6 處、南向 8 處、西向 7 處、北向 8 處，共 29 處。

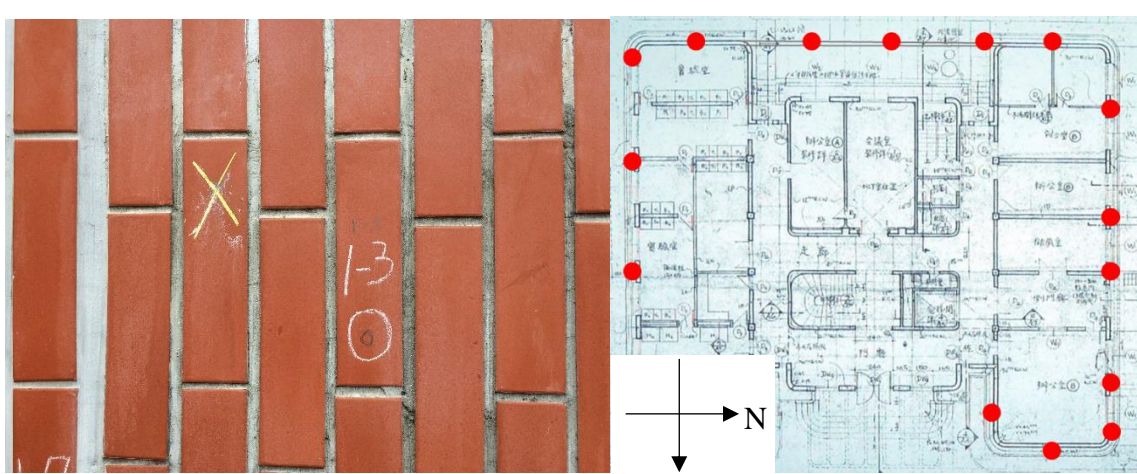


圖 3.7 生物化學研究所



案例二：心理系北館

1983 年竣工，屋齡 33 年，材質為陶質，尺寸為一丁掛(13.2cm X 6.2cm)

圖 3.8 為心理系北館之外觀、磁磚近照圖及其平面圖，紅點為點位約略配置情形，東向 7 處、南向 6 處、西向 7 處、北向 6 處，共 26 處，由於建築物一樓周邊植物密布，甚至攀爬到外牆磁磚上，將會影響實驗結果，因此選在二樓陽台處找尋點位。

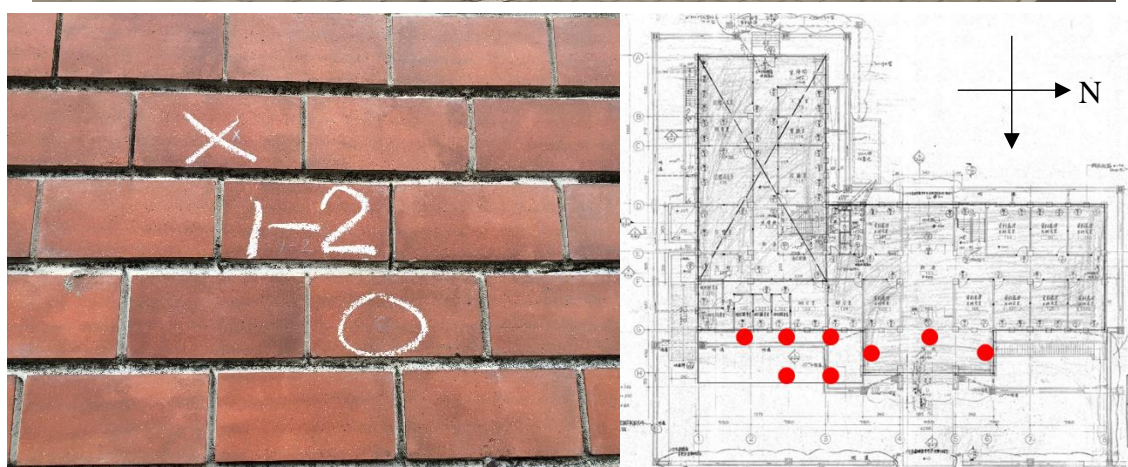


圖 3.8 心理系北館



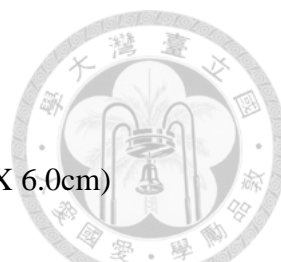
案例三：第二學生活動中心

1997 年竣工，屋齡 19 年，材質為瓷質，尺寸為二丁掛(24.0cm X 5.3cm)

圖 3.9 為第二學生活動中心之外觀、磁磚近照圖及其平面圖，紅點為點位約略配置情形，東向 8 處、南向 6 處、西向 6 處、北向 5 處，共 25 處，由於一樓挑高，外牆使用磁磚之部位人手無法觸及，且並非四個面向都使用磁磚作為外牆飾面材，因此選在二樓陽台處尋找點位。



圖 3.9 第二學生活動中心



案例四：漁業科學研究所

1982 年竣工，屋齡 34 年，材質為陶質，尺寸為一丁掛(10.8cm X 6.0cm)

圖 3.10 為漁業科學研究所之外觀、磁磚近照圖及其平面圖，紅點為點位約略配置情形，東向 8 處、南向 8 處、西向 8 處、北向 6 處，共 30 處。



圖 3.10 漁業科學研究所



案例五：地理環境資源研究所

1979 年竣工，屋齡 37 年，材質為陶質，尺寸為二丁掛(22.8cm X 5.0cm)

圖 3.11 為地理環境資源研究所之外觀、磁磚近照圖及其平面圖，紅點為點位約略配置情形，東向 8 處、南向 7 處、西向 7 處、北向 7 處，共 29 處。

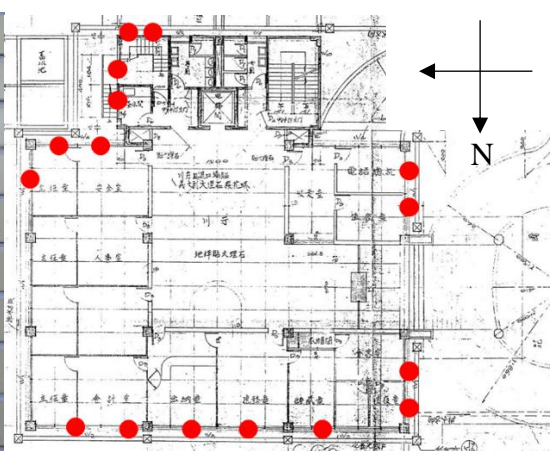


圖 3.11 地理環境資源研究所

第四章 實驗數據處理



4.1 音訊前處理

在錄製音訊時，周遭的聲音雖然會影響音訊品質，不過也不必刻意避開人群或選在深夜進行實驗，若如此將失去其工作方便性，由於規律的環境雜音是可以被去除的，因此需要避免的是不規律的雜音，如突然呼喊的人聲或汽車引擎發動聲等，只要雜音不與敲擊瞬間同時間點，皆可用靜音來減少其影響，若發生在同一時間點，則須重新錄製，另外，調低麥克風的靈敏度，也有助於減少收到細微的雜音。

本研究去雜訊使用的軟體為 Audacity，在錄製敲擊點音訊時，必須先錄製一小段環境雜訊以取得環境雜訊之特徵，再將特徵套用到整段音訊並調整去雜訊強度，如圖 4.1，約 1 秒處的高峰即為敲擊的瞬間，由原始音訊可以看到環境雜音明顯干擾了欲分析之敲擊瞬間音訊，經過去雜訊後環境雜音被消除，僅保留敲擊瞬間音訊，以利進入下一階段之頻譜分析。

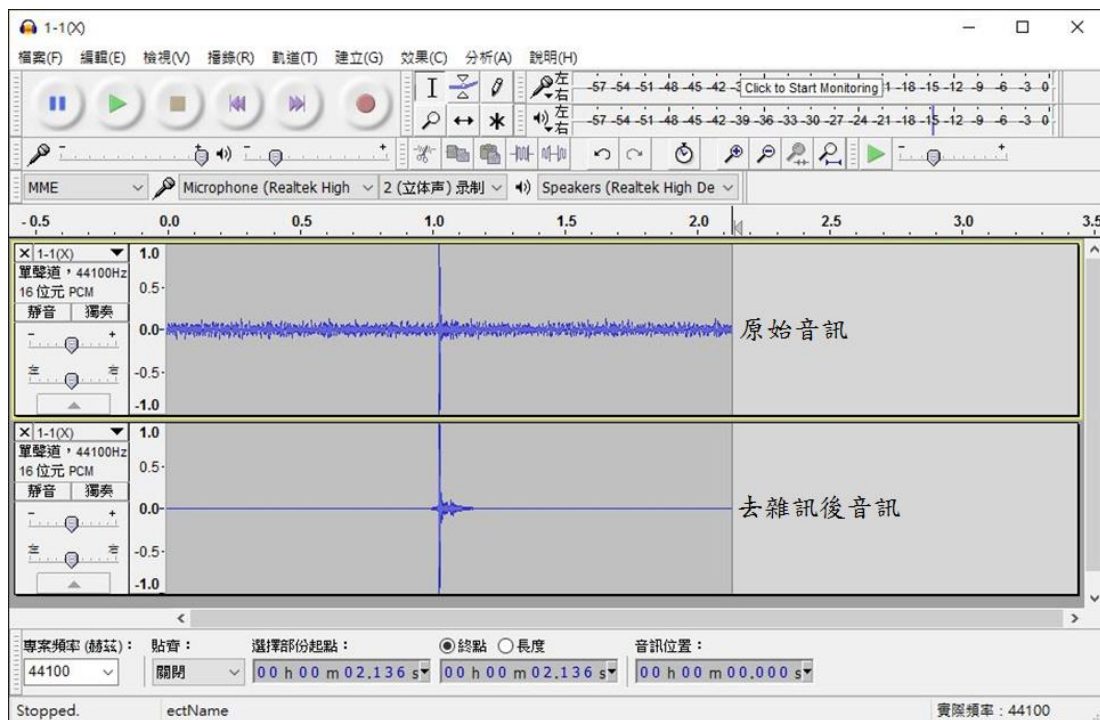


圖 4.1 Audacity 去雜訊

本研究以 MATLAB R2013a 進行音訊分析、快速傅立葉變換、程式撰寫及繪圖等工作，為驗證文獻回顧中去雜訊之重要性，本研究將錄製的原始音訊、雜訊及去雜訊後音訊分別進行快速傅立葉變換，並繪圖成橫坐標為頻率，縱座標為能量譜密度之頻譜圖。由圖 4.2 中可得知雜訊頻率主要分布在 1000 Hz 以下且其能量譜密度數值大，因此若未去雜訊就取最高峰對應頻率，很可能取得的是雜訊的頻率，而非敲擊瞬間音訊的頻率。

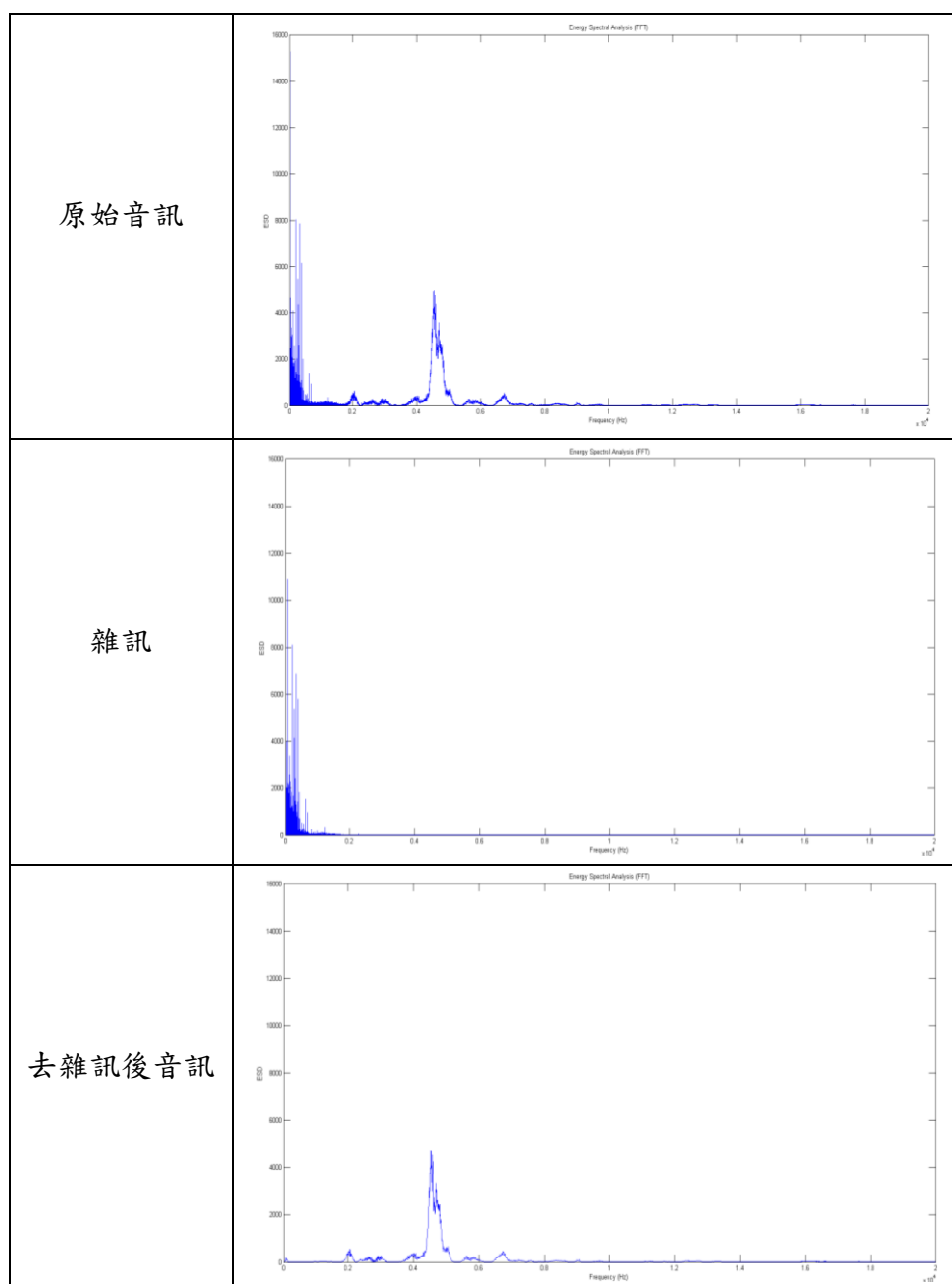



圖 4.2 原始音訊、雜訊、去雜訊音訊之頻譜圖



除了去雜訊外，由於錄音筆之有效頻率範圍為 50~20000 Hz，因此傅立葉變換後 50 Hz 以下及 20000 Hz 以上的數據將無意義，本研究利用 MATLAB 程式撰寫了一個濾波器，將 50 Hz 以下及 20000 Hz 以上的訊號濾掉以增加訊號的正確性，最後再將音訊統一剪為長度 1 秒的音訊，使傅立葉變換後的解析度一致。

4.2 模式建立

將案例一(生物化學研究所)依前述之實驗步驟取得音訊後，將其做音訊前處理並快速傅立葉變換繪成頻譜圖，共有正常磁磚及劣化磁磚各 29 張頻譜圖，觀察這 29 張頻譜圖，以尋找特徵模式。為方便說明，將舉例正常磁磚及劣化磁磚各 4 張頻譜圖作為說明，圖 4.3 為其中的 4 個正常磁磚頻譜圖，圖 4.4 為其中的 4 個劣化磁磚頻譜圖，經觀察發現正常磁磚因為與混能土軀體緊密黏著，音訊的組成不僅是由磁磚提供，也由內部混凝土軀體提供，造成頻譜圖上顯示音訊由各頻率依一定的能量組成，頻率分布較廣，能量較均勻，最高峰能量低，響度小。而劣化磁磚因為與混凝土軀體間有空隙，音訊的組成較單一，主要由磁磚所提供，造成頻譜圖上顯示音訊僅由一至二種頻率組成，頻率分布單一，能量較集中，最高峰能量高，響度大。

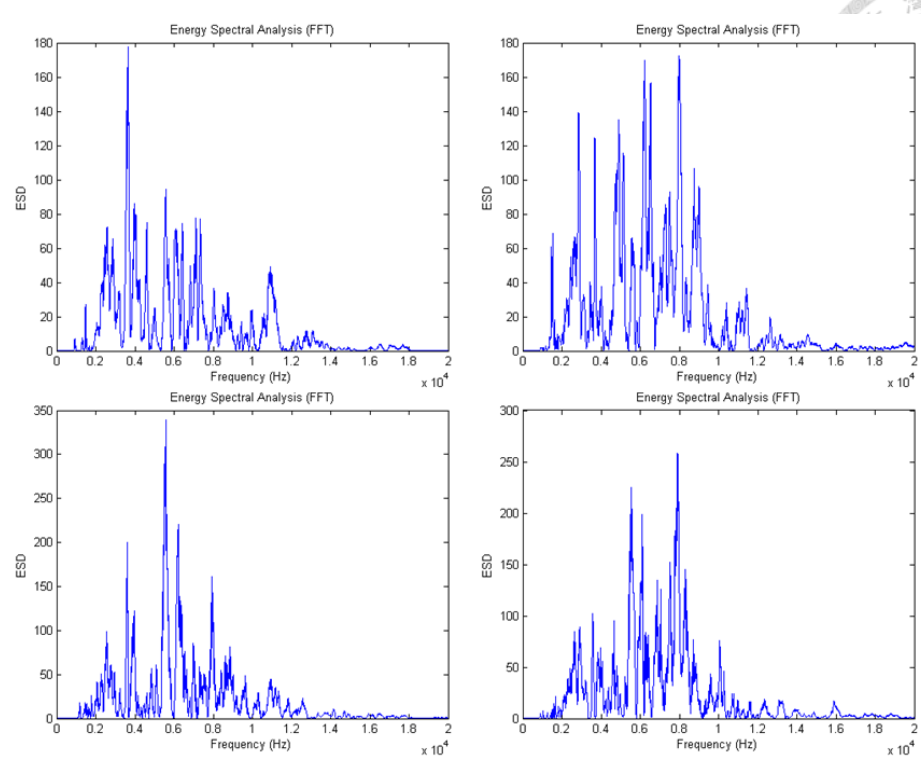
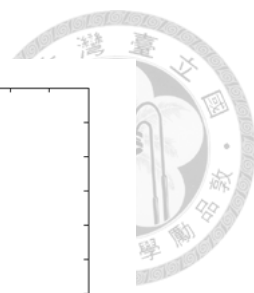


圖 4.3 案例一之正常磁磚頻譜圖

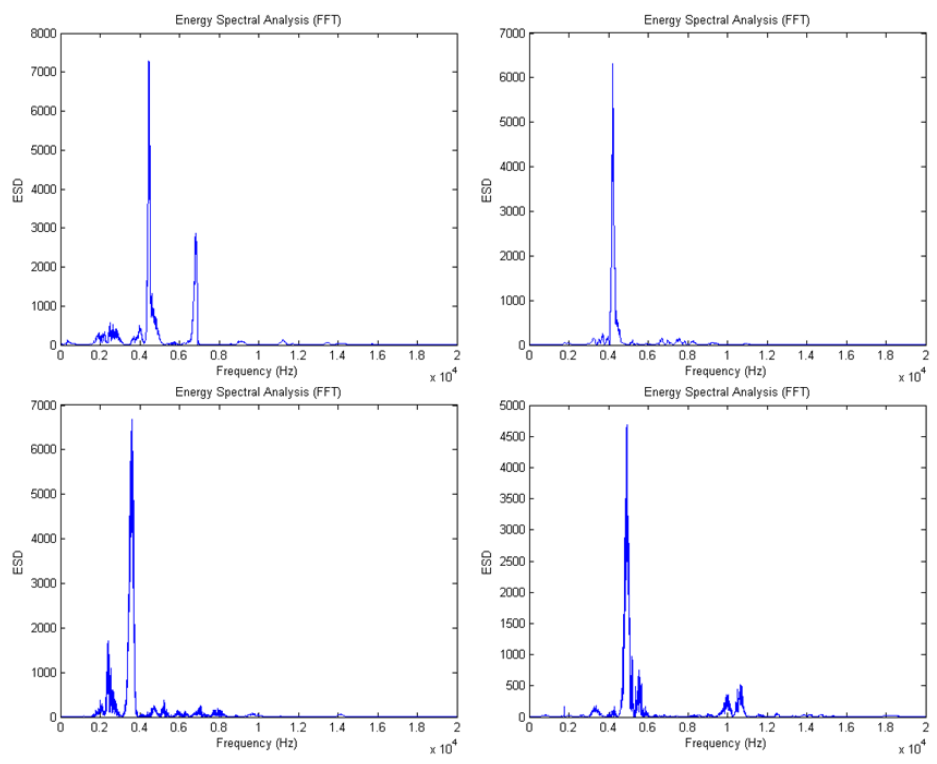


圖 4.4 案例一之劣化磁磚頻譜圖



本研究將提出三種模式，擬藉由正常磁磚及劣化磁磚套用模式取得數值的不同來判別磁磚是否發生劣化，如此便能以科學的方式分析音訊，期望改善打音法人為主觀判定且無法記錄的缺點。

模式一：最高峰值，頻譜圖中縱軸最大值，如圖 4.5，正常磁磚之 Y 值為 177.6，劣化磁磚之 Y 值為 7288，本研究假設劣化磁磚之值較正常磁磚之值為大，期望以一數值作為基準，區分正常磁磚與劣化磁磚。

模式二：最高峰對應頻率，頻譜圖中 Y 值最大的資料點所對應到的 X 值，如圖 4.5，正常磁磚之 X 值為 3665，劣化磁磚之 X 值為 4460，根據文獻回顧得知此模式應為劣化磁磚之值較正常磁磚之值為大，不過許家豪(2010)、張耀祖(2013)及陳柏穎(2014)所得結論皆不相同，且其中張耀祖(2013)與其他兩位作者結論差異甚大，為探討差異原因，本研究也將納入此模式。

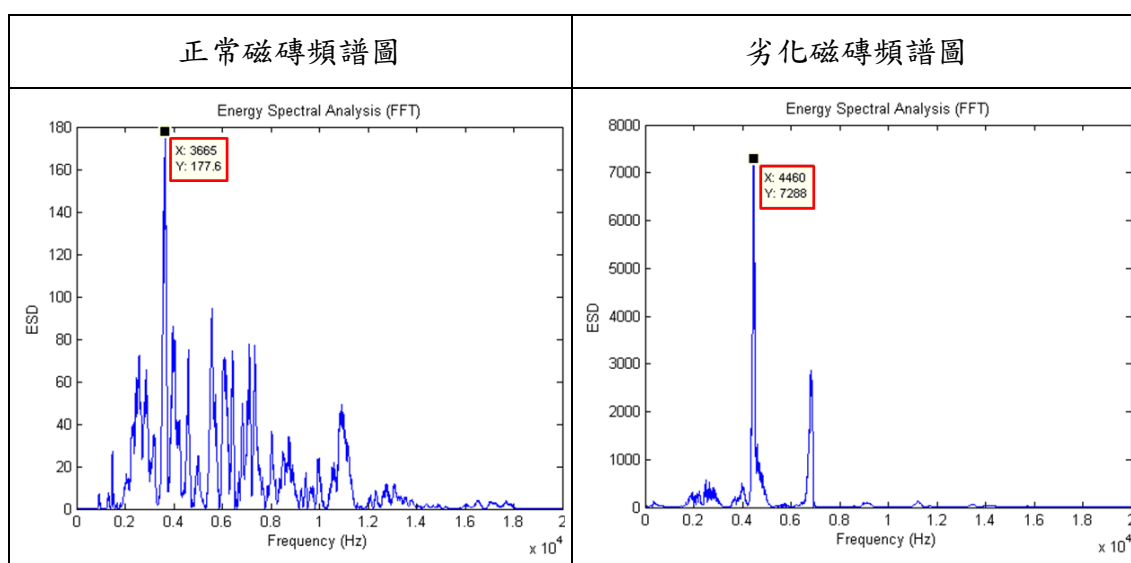


圖 4.5 模式一及模式二

模式三：標準化後頻譜面積，標準化即是將圖上的每個資料點之 Y 值除以頻譜圖中縱軸最大值，如圖 4.6，縱軸經標準化數值範圍由 0 到 1，再將其頻譜面積以程式計算求出，本研究假設正常磁磚之數值較劣化磁磚之數值為大，藉以區分正常磁磚與劣化磁磚。

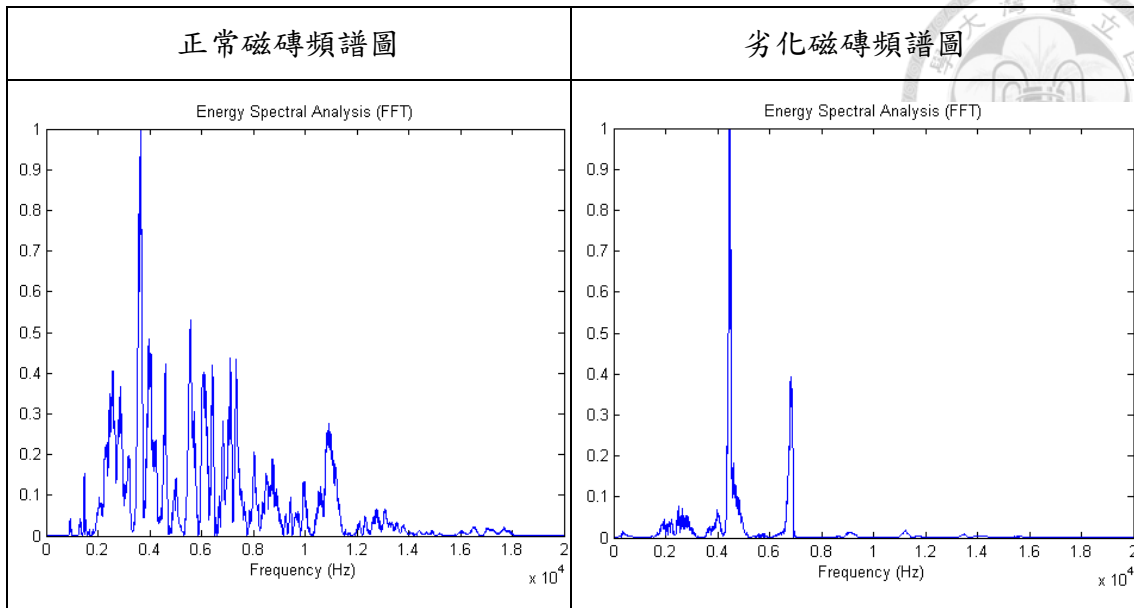


圖 4.6 模式三

確認模式後將開始記錄每段音訊之模式數值，不過若每段音訊皆以繪出頻譜圖再找尋資料點數值的方式記錄，將會耗費大量的時間，以案例一正常磁磚與劣化磁磚各 29 點的例子來說，若要將模式一、二、三的數值紀錄完成，約需耗費 1 個小時，且資料量大可能產生人為錯誤，因此本研究利用 MATLAB 撰寫程式，能自動讀取檔名抓取音訊，並分析音訊，套用模式一、二、三後，匯出 Excel 表格，約耗時 1 分 30 秒，大幅減少作業時間及避免人為錯誤發生，如圖 4.7，即是 MATLAB 程式撰寫的過程及 Excel 表格匯出的形式。

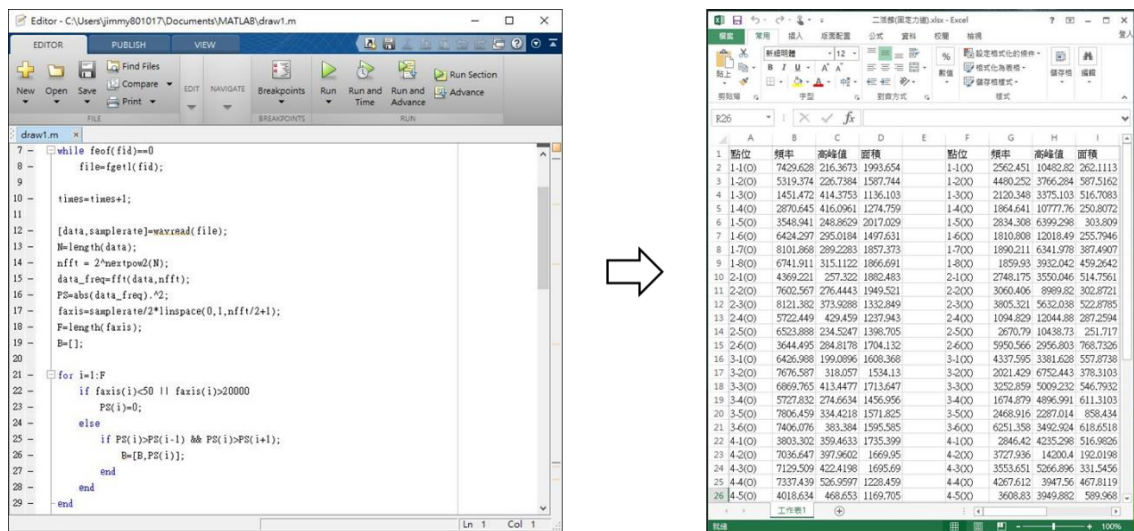


圖 4.7 MATLAB 程式撰寫自動讀取音訊匯出 Excel 表格



4.3 小結

案例分析前的實驗數據處理流程如圖 4.8。

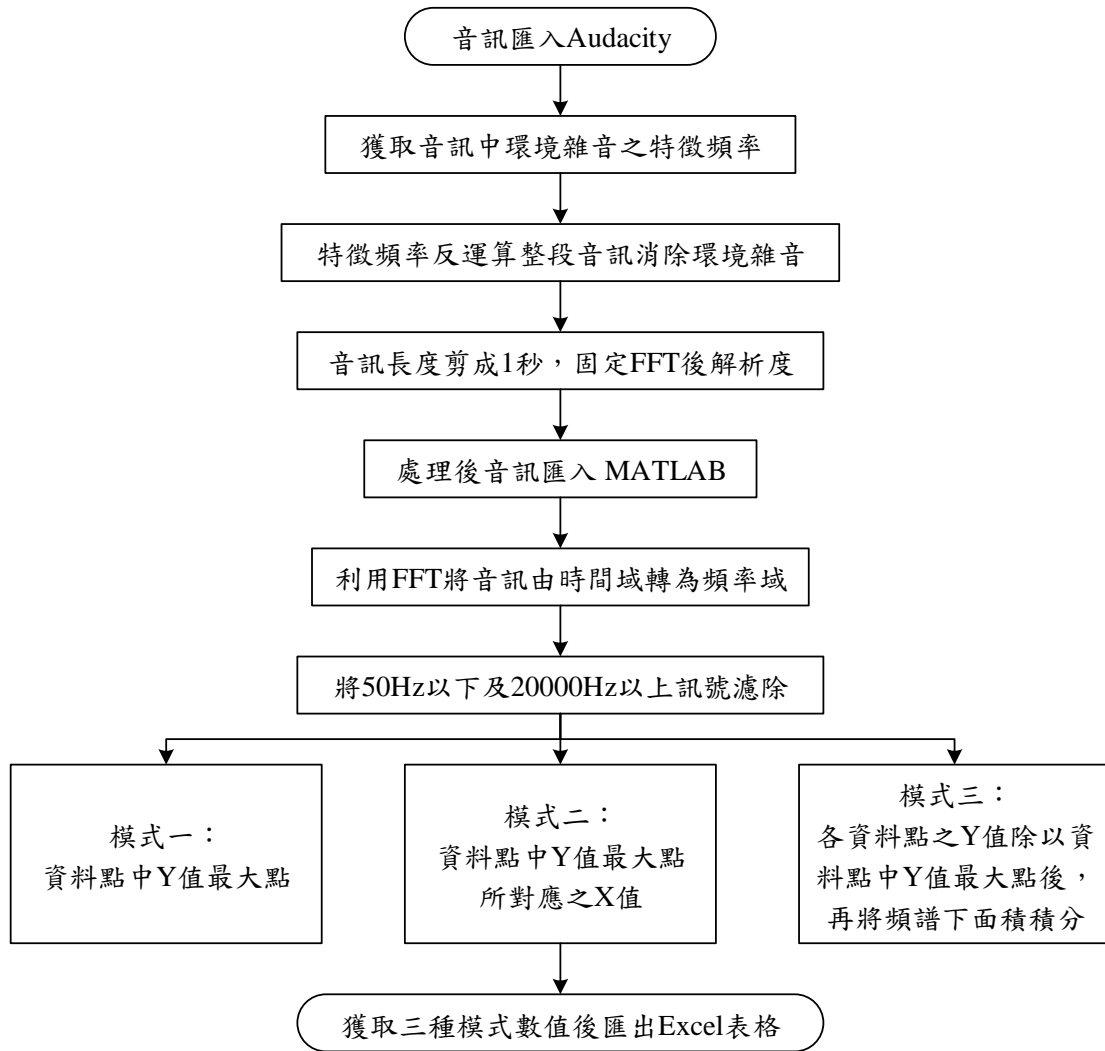


圖 4.8 實驗數據處理流程

第五章 案例分析



5.1 模式一：最高峰值

案例一(生物化學研究所)共 29 點最高峰值整理於表 5.1，點位中第一個數字代表面向，1234 分別代表東南西北，第二個數字代表第幾個點位，括弧中符號 O 代表正常磁磚，X 代表劣化磁磚，舉例來說，3-2(X)即是西向第二個劣化磁磚點。

表 5.1 案例一(生物化學研究所)之各點最高峰值

正常磁磚				劣化磁磚			
點位	最高峰值	點位	最高峰值	點位	最高峰值	點位	最高峰值
1-1(O)	280	3-1(O)	387	1-1(X)	4709	3-1(X)	6023
1-2(O)	178	3-2(O)	271	1-2(X)	7288	3-2(X)	14175
1-3(O)	640	3-3(O)	242	1-3(X)	2611	3-3(X)	4846
1-4(O)	226	3-4(O)	301	1-4(X)	3295	3-4(X)	6767
1-5(O)	172	3-5(O)	279	1-5(X)	6319	3-5(X)	2955
1-6(O)	218	3-6(O)	300	1-6(X)	2059	3-6(X)	5303
2-1(O)	317	3-7(O)	204	2-1(X)	3162	3-7(X)	6595
2-2(O)	339	4-1(O)	340	2-2(X)	6683	4-1(X)	27223
2-3(O)	307	4-2(O)	183	2-3(X)	4053	4-2(X)	10344
2-4(O)	259	4-3(O)	298	2-4(X)	4688	4-3(X)	17697
2-5(O)	291	4-4(O)	268	2-5(X)	4247	4-4(X)	30804
2-6(O)	401	4-5(O)	563	2-6(X)	5940	4-5(X)	12705
2-7(O)	303	4-6(O)	204	2-7(X)	19739	4-6(X)	3182
2-8(O)	218	4-7(O)	343	2-8(X)	18878	4-7(X)	18907
		4-8(O)	284			4-8(X)	4876

將表 5.1 之數值繪於圖 5.1，數值分布將一目了然，可得知劣化磁磚之數值較正常磁磚之數值大，因此找尋劣化磁磚的最小值為 2059 J/Hz，正常磁磚的最大值為 640 J/Hz，將其平均後約為 1350 J/Hz，再以水平紅線標示於圖 5.1 上，在紅線以上的為劣化磁磚，紅線以下的為正常磁磚。

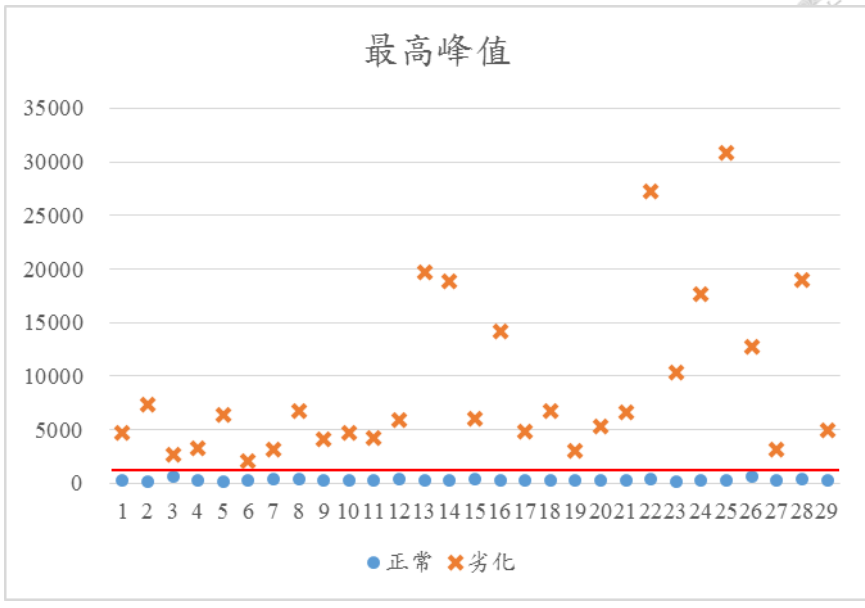


圖 5.1 案例一(生物化學研究所)之各點最高峰值

案例二(心理系北館)共 26 點最高峰值整理於表 5.2。

表 5.2 案例二(心理系北館)之各點最高峰值

正常磁磚				劣化磁磚			
點位	最高峰值	點位	最高峰值	點位	最高峰值	點位	最高峰值
1-1(O)	482	3-1(O)	315	1-1(X)	8301	3-1(X)	22573
1-2(O)	346	3-2(O)	382	1-2(X)	16383	3-2(X)	9873
1-3(O)	406	3-3(O)	329	1-3(X)	5541	3-3(X)	5908
1-4(O)	247	3-4(O)	377	1-4(X)	3883	3-4(X)	7506
1-5(O)	155	3-5(O)	477	1-5(X)	4452	3-5(X)	7115
1-6(O)	214	3-6(O)	392	1-6(X)	7629	3-6(X)	4216
1-7(O)	147	3-7(O)	358	1-7(X)	20411	3-7(X)	18935
2-1(O)	408	4-1(O)	360	2-1(X)	3629	4-1(X)	7559
2-2(O)	571	4-2(O)	266	2-2(X)	15874	4-2(X)	8316
2-3(O)	414	4-3(O)	249	2-3(X)	6339	4-3(X)	13037
2-4(O)	177	4-4(O)	382	2-4(X)	5897	4-4(X)	12919
2-5(O)	312	4-5(O)	237	2-5(X)	3471	4-5(X)	15934
2-6(O)	369	4-6(O)	172	2-6(X)	3169	4-6(X)	4068

將表 5.2 之數值繪於圖 5.2，可得知劣化磁磚之數值較正常磁磚之數值大，因此找尋劣化磁磚的最小值為 3169 J/Hz，正常磁磚的最大值為 571 J/Hz，將其平均後約為 1870 J/Hz，再以水平紅線標示於圖 5.2 上，在紅線以上的為劣化磁磚，紅線以下的為正常磁磚。

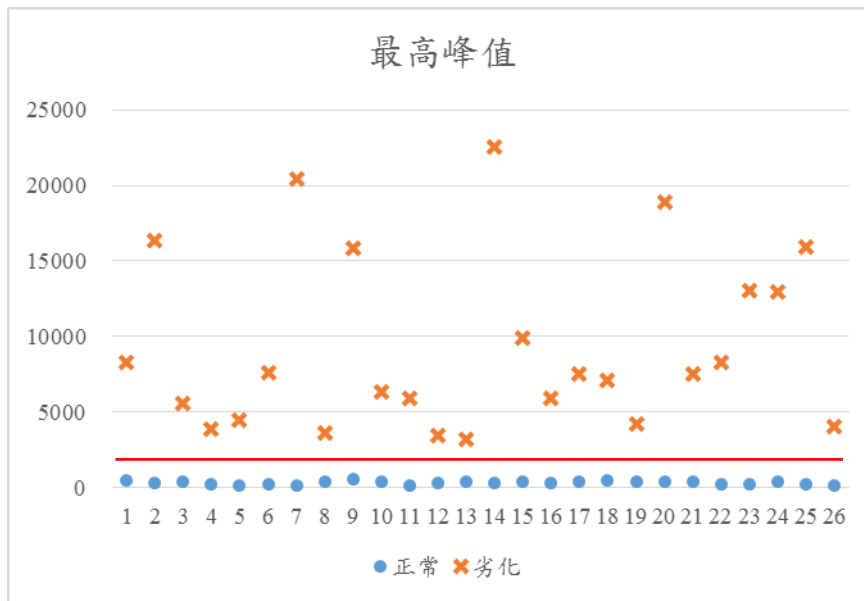


圖 5.2 案例二(心理系北館)之各點最高峰值

案例三(第二學生活動中心)共 25 點最高峰值整理於表 5.3。

表 5.3 案例三(第二學生活動中心)之各點最高峰值

正常磁磚				劣化磁磚			
點位	最高峰值	點位	最高峰值	點位	最高峰值	點位	最高峰值
1-1(O)	216	3-1(O)	199	1-1(X)	10483	3-1(X)	3382
1-2(O)	227	3-2(O)	318	1-2(X)	3766	3-2(X)	6752
1-3(O)	414	3-3(O)	413	1-3(X)	3375	3-3(X)	5009
1-4(O)	416	3-4(O)	275	1-4(X)	10778	3-4(X)	4897
1-5(O)	249	3-5(O)	334	1-5(X)	6399	3-5(X)	2287
1-6(O)	295	3-6(O)	383	1-6(X)	12018	3-6(X)	3493
1-7(O)	289	4-1(O)	359	1-7(X)	6342	4-1(X)	4235
1-8(O)	315	4-2(O)	398	1-8(X)	3932	4-2(X)	14200
2-1(O)	257	4-3(O)	422	2-1(X)	3550	4-3(X)	5267
2-2(O)	276	4-4(O)	527	2-2(X)	8990	4-4(X)	3948
2-3(O)	374	4-5(O)	469	2-3(X)	5632	4-5(X)	3950
2-4(O)	429			2-4(X)	12045		
2-5(O)	235			2-5(X)	10439		
2-6(O)	285			2-6(X)	2957		

將表 5.3 之數值繪於圖 5.3，可得知劣化磁磚之數值較正常磁磚之數值大，因此找尋劣化磁磚的最小值為 2287 J/Hz，正常磁磚的最大值為 527 J/Hz，將其平均後約為 1410 J/Hz，再以水平紅線標示於圖 5.3 上，在紅線以上的為劣化磁磚，紅線以下的為正常磁磚。

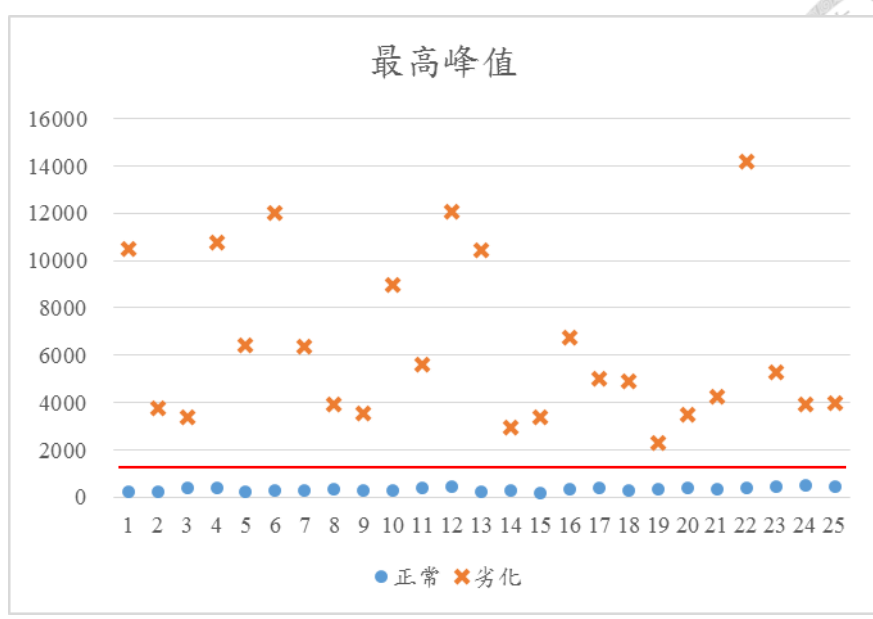


圖 5.3 案例三(第二學生活動中心)之各點最高峰值

案例四(漁業科學研究所)共 30 點最高峰值整理於表 5.4。

表 5.4 案例四(漁業科學研究所)之各點最高峰值

正常磁磚				劣化磁磚			
點位	最高峰值	點位	最高峰值	點位	最高峰值	點位	最高峰值
1-1(O)	155	3-1(O)	154	1-1(X)	20883	3-1(X)	1377
1-2(O)	311	3-2(O)	258	1-2(X)	4062	3-2(X)	4597
1-3(O)	288	3-3(O)	235	1-3(X)	2618	3-3(X)	2460
1-4(O)	200	3-4(O)	269	1-4(X)	7852	3-4(X)	3076
1-5(O)	144	3-5(O)	161	1-5(X)	2121	3-5(X)	11732
1-6(O)	357	3-6(O)	247	1-6(X)	5461	3-6(X)	2553
1-7(O)	268	3-7(O)	170	1-7(X)	3059	3-7(X)	1616
1-8(O)	232	3-8(O)	209	1-8(X)	4136	3-8(X)	5596
2-1(O)	310	4-1(O)	225	2-1(X)	2589	4-1(X)	2823
2-2(O)	265	4-2(O)	279	2-2(X)	2572	4-2(X)	6492
2-3(O)	229	4-3(O)	285	2-3(X)	2920	4-3(X)	4405
2-4(O)	187	4-4(O)	256	2-4(X)	3071	4-4(X)	12292
2-5(O)	197	4-5(O)	284	2-5(X)	2428	4-5(X)	2055
2-6(O)	245	4-6(O)	212	2-6(X)	2581	4-6(X)	902
2-7(O)	269			2-7(X)	10737		
2-8(O)	230			2-8(X)	5448		

將表 5.4 之數值繪於圖 5.4，可得知劣化磁磚之數值較正常磁磚之數值大，因此找尋劣化磁磚的最小值為 902 J/Hz，正常磁磚的最大值為 357 J/Hz，將其平均後約為 630 J/Hz，再以水平紅線標示於圖 5.4 上，在紅線以上的為劣化磁磚，紅線以下的為正常磁磚。

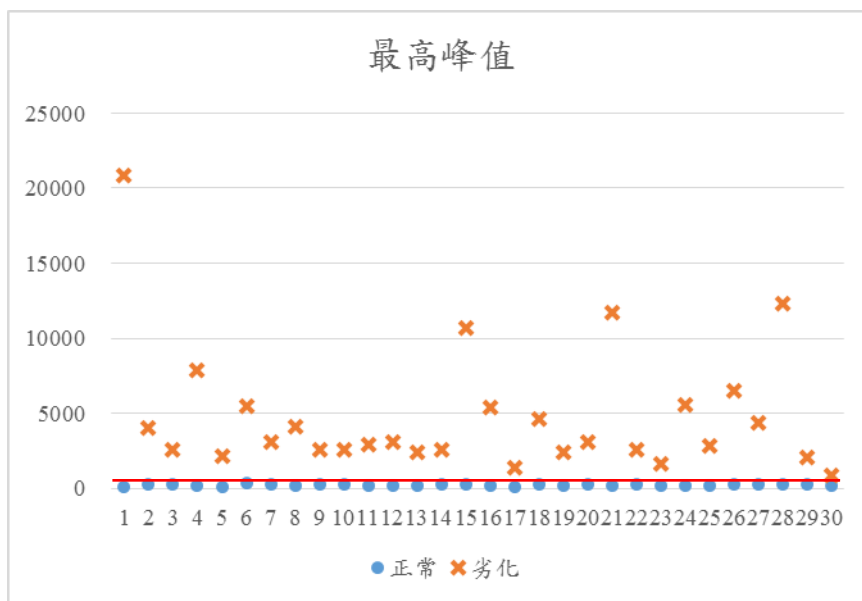


圖 5.4 案例四(漁業科學研究所)之各點最高峰值

案例五(地理環境資源研究所)共 29 點最高峰值整理於表 5.5。

表 5.5 案例五(地理環境資源研究所)之各點最高峰值

正常磁磚				劣化磁磚			
點位	最高峰值	點位	最高峰值	點位	最高峰值	點位	最高峰值
1-1(O)	312	3-1(O)	197	1-1(X)	6910	3-1(X)	8466
1-2(O)	375	3-2(O)	499	1-2(X)	8893	3-2(X)	4730
1-3(O)	295	3-3(O)	278	1-3(X)	20265	3-3(X)	6117
1-4(O)	320	3-4(O)	487	1-4(X)	4173	3-4(X)	1916
1-5(O)	330	3-5(O)	559	1-5(X)	4954	3-5(X)	4494
1-6(O)	285	3-6(O)	287	1-6(X)	5743	3-6(X)	5398
1-7(O)	288	3-7(O)	347	1-7(X)	2390	3-7(X)	6234
1-8(O)	297	4-1(O)	333	1-8(X)	2981	4-1(X)	5282
2-1(O)	302	4-2(O)	337	2-1(X)	2290	4-2(X)	5375
2-2(O)	245	4-3(O)	258	2-2(X)	4786	4-3(X)	1241
2-3(O)	347	4-4(O)	269	2-3(X)	5539	4-4(X)	2439
2-4(O)	286	4-5(O)	221	2-4(X)	22320	4-5(X)	2448
2-5(O)	484	4-6(O)	250	2-5(X)	4955	4-6(X)	9259
2-6(O)	271	4-7(O)	259	2-6(X)	89180	4-7(X)	4458
2-7(O)	302			2-7(X)	2209		

將表 5.5 之數值繪於圖 5.5，可得知劣化磁磚之數值較正常磁磚之數值大，因此找尋劣化磁磚的最小值為 1241 J/Hz，正常磁磚的最大值為 559 J/Hz，將其平均後約為 900 J/Hz，再以水平紅線標示於圖 5.5 上，在紅線以上的為劣化磁磚，紅線以下的為正常磁磚。

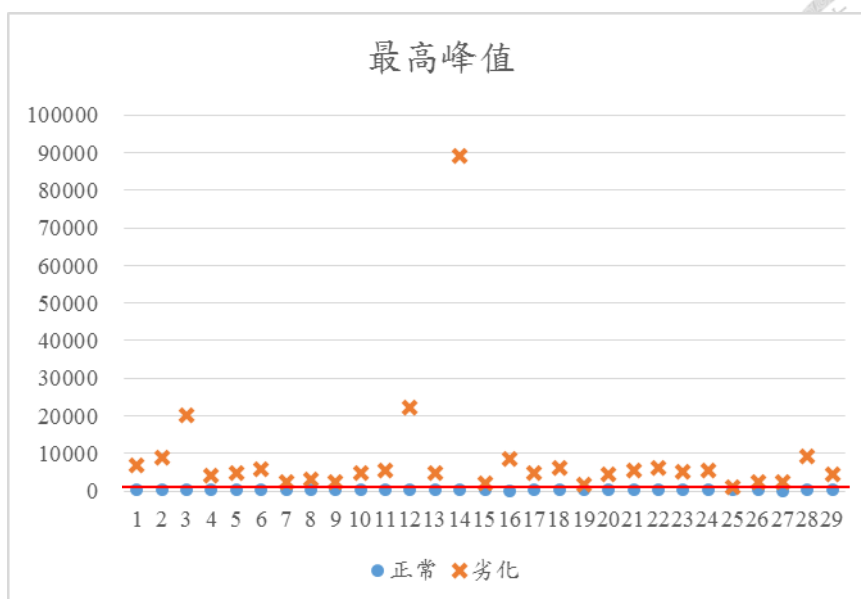


圖 5.5 案例五(地理環境資源研究所)之各點最高峰值

將五棟案例模式一的結論整理於表 5.6，再找尋其中劣化磁磚的最小值為 902 J/Hz，正常磁磚的最大值為 640 J/Hz，將其平均後約為 770 J/Hz，因此將此數值作為基準值，若最高峰值大於 770J/Hz，則可判斷為劣化磁磚，反之，若最高峰值小於 770J/Hz，則可判斷為正常磁磚，此模式可通用於本研究之案例所採納之陶質及瓷質丁掛磚且誤判率 0%。

表 5.6 五棟案例之模式一整理

案例	正常磁磚最大值	劣化磁磚最小值
案例一(生物化學研究所)	640	2059
案例二(心理系北館)	571	3169
案例三(第二學生活動中心)	527	2287
案例四(漁業科學研究所)	357	902
案例五(地理環境資源研究所)	559	1241



5.2 模式二：最高峰對應頻率

案例一(生物化學研究所)共 29 點最高峰對應頻率整理於表 5.7。

表 5.7 案例一(生物化學研究所)之各點最高峰對應頻率

正常磁磚				劣化磁磚			
點位	最高峰 對應頻率	點位	最高峰 對應頻率	點位	最高峰 對應頻率	點位	最高峰 對應頻率
1-1(O)	50	3-1(O)	6161	1-1(X)	4527	3-1(X)	5650
1-2(O)	3665	3-2(O)	6765	1-2(X)	4459	3-2(X)	4251
1-3(O)	5986	3-3(O)	6140	1-3(X)	4522	3-3(X)	4015
1-4(O)	6929	3-4(O)	7648	1-4(X)	2187	3-4(X)	2868
1-5(O)	7995	3-5(O)	8006	1-5(X)	4219	3-5(X)	3378
1-6(O)	6056	3-6(O)	7718	1-6(X)	4391	3-6(X)	5466
2-1(O)	6997	3-7(O)	6426	2-1(X)	4675	3-7(X)	4505
2-2(O)	5569	4-1(O)	6907	2-2(X)	3626	4-1(X)	3215
2-3(O)	5338	4-2(O)	7570	2-3(X)	5897	4-2(X)	6507
2-4(O)	7908	4-3(O)	6125	2-4(X)	4932	4-3(X)	5330
2-5(O)	6825	4-4(O)	6226	2-5(X)	4141	4-4(X)	4081
2-6(O)	8951	4-5(O)	6782	2-6(X)	347	4-5(X)	3622
2-7(O)	4640	4-6(O)	5411	2-7(X)	4269	4-6(X)	5817
2-8(O)	7206	4-7(O)	3858	2-8(X)	4240	4-7(X)	3597
		4-8(O)	3851			4-8(X)	1228

將表 5.7 之數值繪於圖 5.6，由分布狀態可得知正常磁磚之數值通常較劣化磁磚之數值大，目視後大約以 5000 Hz 為基準值畫一水平紅線將其區分，在紅線以上的為正常磁磚，在紅線以下的為劣化磁磚，不過有一定的誤判機率，29 點的正常磁磚中，有 5 點判斷為劣化磁磚，誤判率為 17%，29 點的劣化磁磚中，有 6 點判斷為正常磁磚，誤判率 21%。

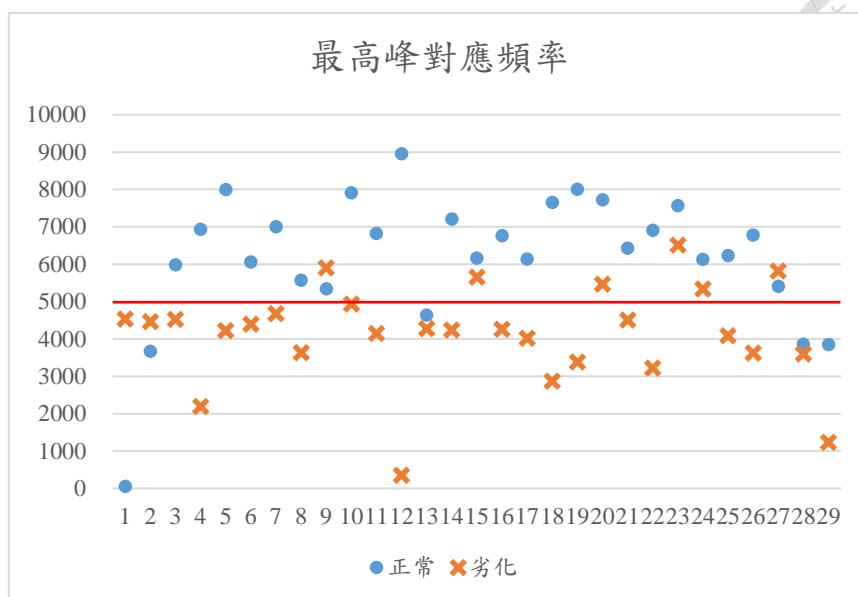


圖 5.6 案例一(生物化學研究所)之各點最高峰對應頻率

案例二(心理系北館)共 26 點最高峰對應頻率整理於表 5.8。

表 5.8 案例二(心理系北館)之各點最高峰對應頻率

正常磁磚				劣化磁磚			
點位	最高峰 對應頻率	點位	最高峰 對應頻率	點位	最高峰 對應頻率	點位	最高峰 對應頻率
1-1(O)	178	3-1(O)	6137	1-1(X)	2625	3-1(X)	2994
1-2(O)	3911	3-2(O)	1391	1-2(X)	4643	3-2(X)	1193
1-3(O)	3685	3-3(O)	3513	1-3(X)	1902	3-3(X)	2694
1-4(O)	3876	3-4(O)	3548	1-4(X)	1944	3-4(X)	3356
1-5(O)	176	3-5(O)	6121	1-5(X)	2960	3-5(X)	4274
1-6(O)	8709	3-6(O)	3804	1-6(X)	2939	3-6(X)	5888
1-7(O)	6239	3-7(O)	6213	1-7(X)	5046	3-7(X)	1962
2-1(O)	8183	4-1(O)	7862	2-1(X)	3855	4-1(X)	2154
2-2(O)	3112	4-2(O)	1460	2-2(X)	2234	4-2(X)	3369
2-3(O)	3599	4-3(O)	5656	2-3(X)	1112	4-3(X)	4144
2-4(O)	8045	4-4(O)	8725	2-4(X)	4301	4-4(X)	666
2-5(O)	3664	4-5(O)	4329	2-5(X)	2059	4-5(X)	3164
2-6(O)	2311	4-6(O)	5773	2-6(X)	3429	4-6(X)	2573

將表 5.8 之數值繪於圖 5.7，由分布狀態無法得知其規則，以此案例來說，模式二無法做正常磁磚與劣化磁磚的判斷。

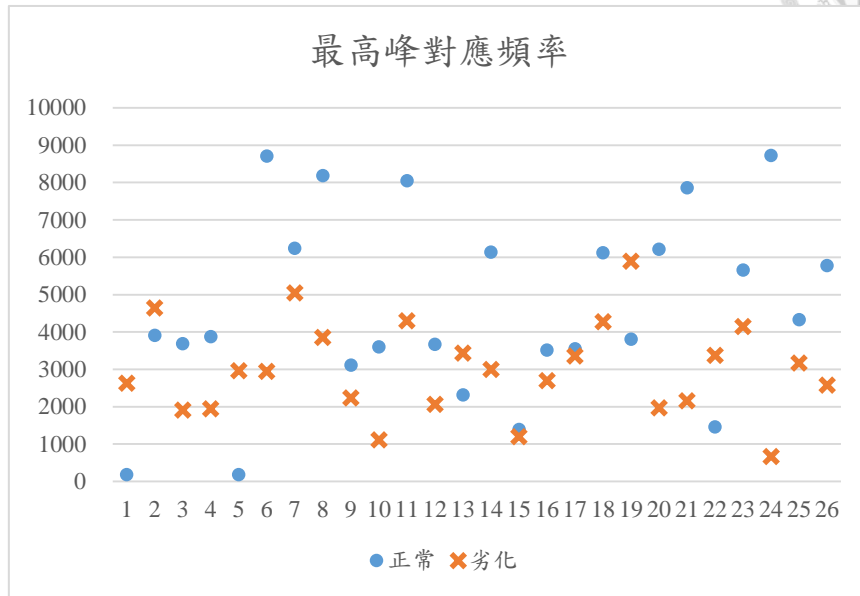


圖 5.7 案例二(心理系北館)之各點最高峰對應頻率

案例三(第二學生活動中心)共 25 點最高峰對應頻率整理於表 5.9。

表 5.9 案例三(第二學生活動中心)之各點最高峰對應頻率

正常磁磚				劣化磁磚			
點位	最高峰 對應頻率	點位	最高峰 對應頻率	點位	最高峰 對應頻率	點位	最高峰 對應頻率
1-1(O)	7430	3-1(O)	6427	1-1(X)	2562	3-1(X)	4338
1-2(O)	5319	3-2(O)	7677	1-2(X)	4480	3-2(X)	2021
1-3(O)	1451	3-3(O)	6870	1-3(X)	2120	3-3(X)	3253
1-4(O)	2871	3-4(O)	5728	1-4(X)	1865	3-4(X)	1675
1-5(O)	3549	3-5(O)	7806	1-5(X)	2834	3-5(X)	2469
1-6(O)	6424	3-6(O)	7406	1-6(X)	1811	3-6(X)	6251
1-7(O)	8102	4-1(O)	3803	1-7(X)	1890	4-1(X)	2846
1-8(O)	6742	4-2(O)	7037	1-8(X)	1860	4-2(X)	3728
2-1(O)	4369	4-3(O)	7130	2-1(X)	2748	4-3(X)	3554
2-2(O)	7603	4-4(O)	7337	2-2(X)	3060	4-4(X)	4268
2-3(O)	8121	4-5(O)	4019	2-3(X)	3805	4-5(X)	3609
2-4(O)	5722			2-4(X)	1095		
2-5(O)	6524			2-5(X)	2671		
2-6(O)	3644			2-6(X)	5951		

將表 5.9 之數值繪於圖 5.8，由分布狀態可得知正常磁磚之數值通常較劣化磁磚之數值大，目視後大約以 4000 Hz 為基準值畫一水平紅線將其區分，在紅線以上的為正常磁磚，在紅線以下的為劣化磁磚，不過有一定的誤判機率，25 點的正常磁磚中，有 5 點判斷為劣化磁磚，誤判率為 20%，25 點的劣化磁磚中，有 5 點判斷為正常磁磚，誤判率 20%。

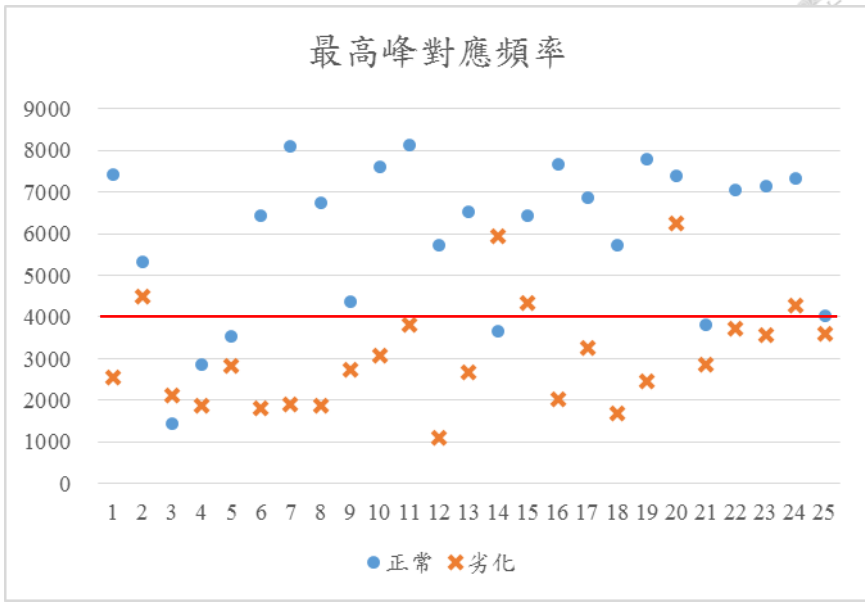


圖 5.8 案例三(第二學生活動中心)之各點最高峰對應頻率

案例四(漁業科學研究所)共 30 點最高峰對應頻率整理於表 5.10。

表 5.10 案例四(漁業科學研究所)之各點最高峰對應頻率

正常磁磚				劣化磁磚			
點位	最高峰 對應頻率	點位	最高峰 對應頻率	點位	最高峰 對應頻率	點位	最高峰 對應頻率
1-1(O)	8349	3-1(O)	6591	1-1(X)	2004	3-1(X)	2554
1-2(O)	6372	3-2(O)	6671	1-2(X)	1763	3-2(X)	3332
1-3(O)	7736	3-3(O)	7067	1-3(X)	1738	3-3(X)	1163
1-4(O)	4697	3-4(O)	6706	1-4(X)	2101	3-4(X)	2206
1-5(O)	8317	3-5(O)	6948	1-5(X)	1816	3-5(X)	781
1-6(O)	7170	3-6(O)	3748	1-6(X)	1832	3-6(X)	2838
1-7(O)	5870	3-7(O)	3088	1-7(X)	2259	3-7(X)	5691
1-8(O)	7276	3-8(O)	6158	1-8(X)	1847	3-8(X)	1582
2-1(O)	6200	4-1(O)	3653	2-1(X)	2570	4-1(X)	2698
2-2(O)	6103	4-2(O)	6136	2-2(X)	4243	4-2(X)	2882
2-3(O)	9140	4-3(O)	5350	2-3(X)	1355	4-3(X)	2799
2-4(O)	10736	4-4(O)	9954	2-4(X)	1720	4-4(X)	2992
2-5(O)	3986	4-5(O)	10133	2-5(X)	4935	4-5(X)	610
2-6(O)	7699	4-6(O)	5478	2-6(X)	3111	4-6(X)	1489
2-7(O)	8652			2-7(X)	1458		
2-8(O)	3719			2-8(X)	2960		

將表 5.10 之數值繪於圖 5.9，由分布狀態可得知正常磁磚之數值通常較劣化磁磚之數值大，目視後大約以 4000 Hz 為基準值畫一水平紅線將其區分，在紅線以上的為正常磁磚，在紅線以下的為劣化磁磚，不過有一定的誤判機率，30 點的正常磁磚中，有 5 點判斷為劣化磁磚，誤判率為 17%，30 點的劣化磁磚中，有 3 點判斷為正常磁磚，誤判率 10%。

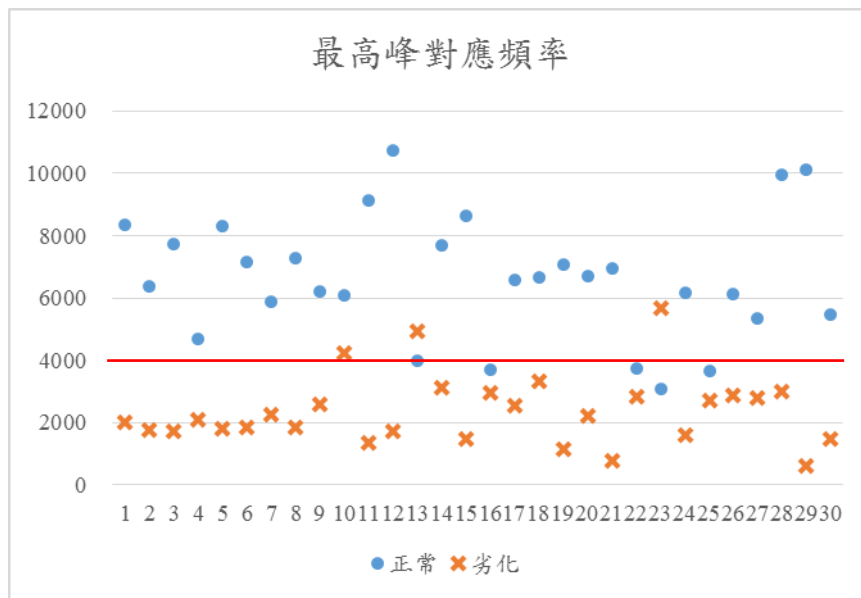


圖 5.9 案例四(漁業科學研究所)之各點最高峰對應頻率

案例五(地理環境資源研究所)共 29 點最高峰對應頻率整理於表 5.11。

表 5.11 案例五(地理環境資源研究所)之各點最高峰對應頻率

正常磁磚				劣化磁磚			
點位	最高峰 對應頻率	點位	最高峰 對應頻率	點位	最高峰 對應頻率	點位	最高峰 對應頻率
1-1(O)	8422	3-1(O)	4667	1-1(X)	1524	3-1(X)	2021
1-2(O)	8919	3-2(O)	4418	1-2(X)	3086	3-2(X)	2074
1-3(O)	4716	3-3(O)	10543	1-3(X)	2418	3-3(X)	2782
1-4(O)	3549	3-4(O)	4624	1-4(X)	1925	3-4(X)	4877
1-5(O)	6241	3-5(O)	7002	1-5(X)	5212	3-5(X)	2734
1-6(O)	8906	3-6(O)	5544	1-6(X)	1031	3-6(X)	739
1-7(O)	8531	3-7(O)	5745	1-7(X)	2887	3-7(X)	1446
1-8(O)	8986	4-1(O)	10162	1-8(X)	2576	4-1(X)	2231
2-1(O)	9680	4-2(O)	5482	2-1(X)	1785	4-2(X)	3527
2-2(O)	6106	4-3(O)	8905	2-2(X)	730	4-3(X)	3275
2-3(O)	6204	4-4(O)	8578	2-3(X)	1717	4-4(X)	3867
2-4(O)	8977	4-5(O)	7829	2-4(X)	2378	4-5(X)	3867
2-5(O)	8005	4-6(O)	4801	2-5(X)	3926	4-6(X)	1482
2-6(O)	4716	4-7(O)	6251	2-6(X)	1978	4-7(X)	3802
2-7(O)	6159			2-7(X)	3290		

將表 5.11 之數值繪於圖 5.10，由分布狀態可得知正常磁磚之數值通常較劣化磁磚之數值大，目視後大約以 4000 Hz 為基準值畫一水平紅線將其區分，在紅線以上的為正常磁磚，在紅線以下的為劣化磁磚，不過有些微的誤判機率，29 點的正常磁磚中，有 1 點判斷為劣化磁磚，誤判率為 3%，29 點的劣化磁磚中，有 2 點判斷為正常磁磚，誤判率 7%。

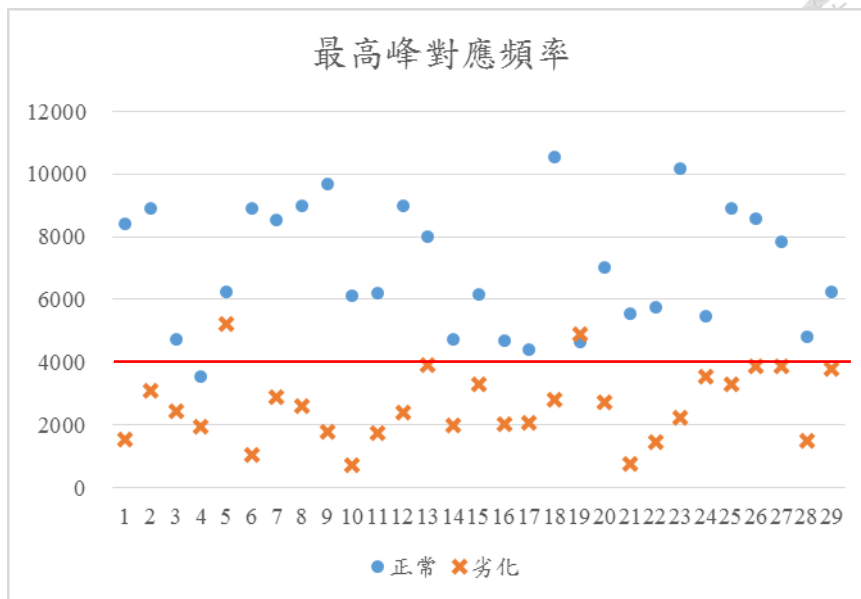


圖 5.10 案例五(地理環境資源研究所)之各點最高峰對應頻率

張耀祖(2013)雖然是現地實驗，不過由於磁磚的材質不同，因此其結果將無法與本研究的結果比較，許家豪(2010)及陳柏穎(2014)的研究對象皆為瓷質二丁掛平面磚，與本研究案例三(第二學生活動中心)相同，許家豪(2010)由現地實驗得知區分正常磁磚與劣化磁磚的基準值約在 2000 Hz，與本研究所得的基準值約在 4000 Hz 不相同，有可能是實體建築物案例不同所致，而陳柏穎(2014)的室內實驗，分離率 0% 頻率在 1060~1980 Hz，分離率 25~75% 頻率在 1920~3120 Hz，若將室內實驗分離率 0% 視為本研究之正常磁磚，室內實驗分離率 25~75% 視為本研究之劣化磁磚，25 點的正常磁磚中，有 1 點判斷為劣化磁磚，誤判率為 4%，25 點的劣化磁磚中，有 6 點判斷為正常磁磚，誤判率 24%，由於 3120 Hz 以上並無交代如何判定磁磚是否劣化，因此共 50 點的磁磚中，有 33 點無法判定，無法判斷率達 66%，與本研究結果不同可能因為陳柏穎(2014)利用珍珠板模擬浮起劣化與真實劣化情形不同所致。

將五棟案例模式二的結論整理於表 5.12，可看到判斷正常磁磚與劣化磁磚的基準值是不固定的，甚至在案例二(心理系北館)，根本無法訂出基準值，在誤判率的部分，除了案例五(地理環境資源研究所)是可以接受的，其餘案例的誤判率都偏高，因此此模式僅可用於部分建築物，使用性不廣泛，較不適合用來判斷磁磚是否發生劣化。

表 5.12 五棟案例之模式二整理

案例	基準值	正常誤判成劣化的機率	劣化誤判成正常的機率
案例一(生物化學研究所)	5000 Hz	17%	21%
案例二(心理系北館)	無		
案例三(第二學生活動中心)	4000 Hz	20%	20%
案例四(漁業科學研究所)	4000 Hz	17%	10%
案例五(地理環境資源研究所)	4000 Hz	3%	7%



5.3 模式三：標準化後頻譜面積

案例一(生物化學研究所)共 29 點標準化後頻譜面積整理於表 5.13。

表 5.13 案例一(生物化學研究所)之各點標準化後頻譜面積

正常磁磚				劣化磁磚			
點位	標準化後 頻譜面積	點位	標準化後 頻譜面積	點位	標準化後 頻譜面積	點位	標準化後 頻譜面積
1-1(O)	1108	3-1(O)	1050	1-1(X)	453	3-1(X)	355
1-2(O)	1441	3-2(O)	1327	1-2(X)	317	3-2(X)	199
1-3(O)	1033	3-3(O)	1587	1-3(X)	637	3-3(X)	473
1-4(O)	1647	3-4(O)	1420	1-4(X)	557	3-4(X)	338
1-5(O)	2270	3-5(O)	1428	1-5(X)	189	3-5(X)	292
1-6(O)	1854	3-6(O)	1477	1-6(X)	687	3-6(X)	545
2-1(O)	1247	3-7(O)	1870	2-1(X)	513	3-7(X)	357
2-2(O)	1165	4-1(O)	1373	2-2(X)	330	4-1(X)	126
2-3(O)	1675	4-2(O)	2188	2-3(X)	436	4-2(X)	240
2-4(O)	1683	4-3(O)	1356	2-4(X)	320	4-3(X)	172
2-5(O)	1523	4-4(O)	1534	2-5(X)	533	4-4(X)	123
2-6(O)	1373	4-5(O)	1021	2-6(X)	414	4-5(X)	255
2-7(O)	1248	4-6(O)	2448	2-7(X)	160	4-6(X)	530
2-8(O)	1778	4-7(O)	1408	2-8(X)	115	4-7(X)	201
		4-8(O)	1874			4-8(X)	538

將表 5.13 之數值繪於圖 5.11，由分布狀態可得知正常磁磚之數值通常較劣化磁磚之數值大，且其各自分佈均勻，因此嘗試利用軟體 SPSS 對正常磁磚及劣化磁磚做常態分布檢定，因為樣本數小於等於 50 個，所以使用 Shapiro-Wilk 來檢測是否為常態分佈，其 W 值分別為 0.098 及 0.226，皆大於 0.05，因此皆為常態分佈，如此將可利用常態分佈的特性「68-95-99.7 法則」，即是約 68% 數值分布在距離平均值 1 個標準差之內的範圍，約 95% 數值分布在距離平均值 2 個標準差之內的範圍，以及約 99.7% 數值分布在距離平均值 3 個標準差之內的範圍，如圖 5.12。本研究認為訂定基準應以劣化磁磚分布為主，因此將以劣化磁磚距離平均值 3 個標準

差作為標準化後頻譜面積分布範圍，確保能診斷出大部分的劣化磁磚，若有正常磁磚落入此範圍，此種誤判也相對較保守，較可接受，劣化磁磚標準化後頻譜面積平均值約為 360，標準差約為 165，因此有 99.7% 的信心，劣化磁磚的標準化後頻譜面積落在 0~855，如圖 5.11 中紅色框部分。

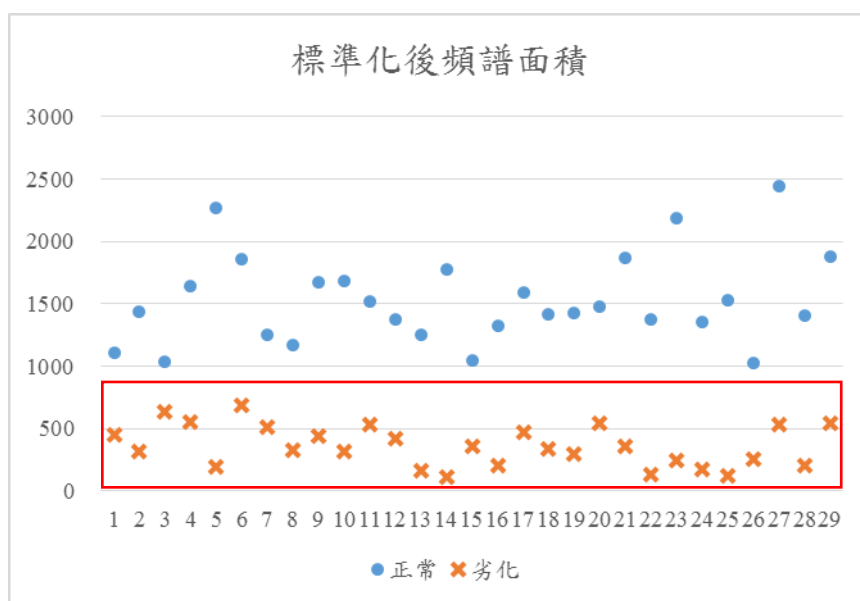


圖 5.11 案例一(生物化學研究所)之各點標準化後頻譜面積

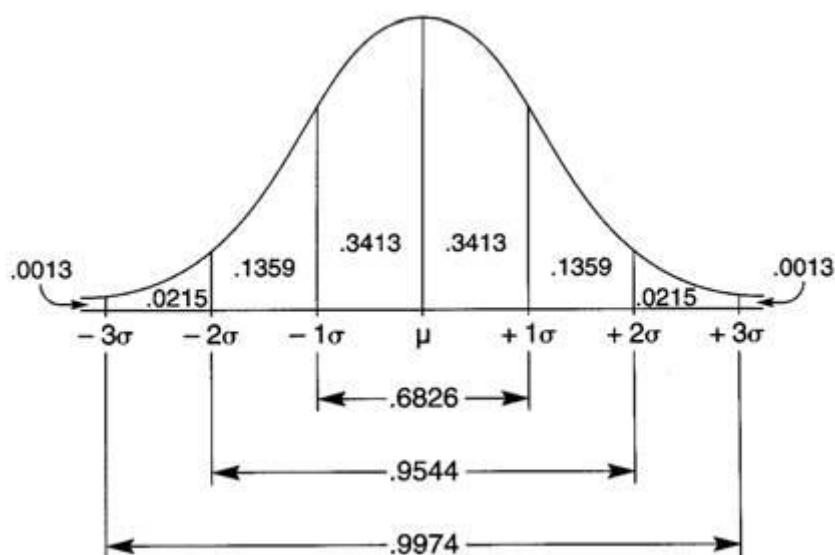


圖 5.12 常態分佈

資料來源：<http://www.csghs.tp.edu.tw/~captain/scienceliteracy/content/>

案例二(心理系北館)共 26 點標準化後頻譜面積整理於表 5.14。

表 4.14 案例二(心理系北館)之各點標準化後頻譜面積

正常磁磚				劣化磁磚			
點位	標準化後 頻譜面積	點位	標準化後 頻譜面積	點位	標準化後 頻譜面積	點位	標準化後 頻譜面積
1-1(O)	687	3-1(O)	1451	1-1(X)	272	3-1(X)	168
1-2(O)	1286	3-2(O)	1583	1-2(X)	180	3-2(X)	366
1-3(O)	1201	3-3(O)	1335	1-3(X)	296	3-3(X)	361
1-4(O)	1896	3-4(O)	1060	1-4(X)	532	3-4(X)	324
1-5(O)	1733	3-5(O)	1043	1-5(X)	353	3-5(X)	432
1-6(O)	1508	3-6(O)	1016	1-6(X)	335	3-6(X)	307
1-7(O)	2113	3-7(O)	1164	1-7(X)	149	3-7(X)	180
2-1(O)	1160	4-1(O)	1592	2-1(X)	430	4-1(X)	330
2-2(O)	1157	4-2(O)	1260	2-2(X)	210	4-2(X)	295
2-3(O)	958	4-3(O)	1666	2-3(X)	394	4-3(X)	202
2-4(O)	2197	4-4(O)	1539	2-4(X)	414	4-4(X)	223
2-5(O)	1181	4-5(O)	2077	2-5(X)	454	4-5(X)	190
2-6(O)	1378	4-6(O)	1994	2-6(X)	414	4-6(X)	495

將表 5.14 之數值繪於圖 5.13，Shapiro-Wilk 檢測劣化磁磚分布之 W 值為 0.389，大於 0.05，因此為常態分佈，劣化磁磚標準化後頻譜面積平均值約為 320，標準差約為 110，因此有 99.7% 的信心，劣化磁磚的標準化後頻譜面積落在 0~650，如圖 5.13 中紅色框部分。

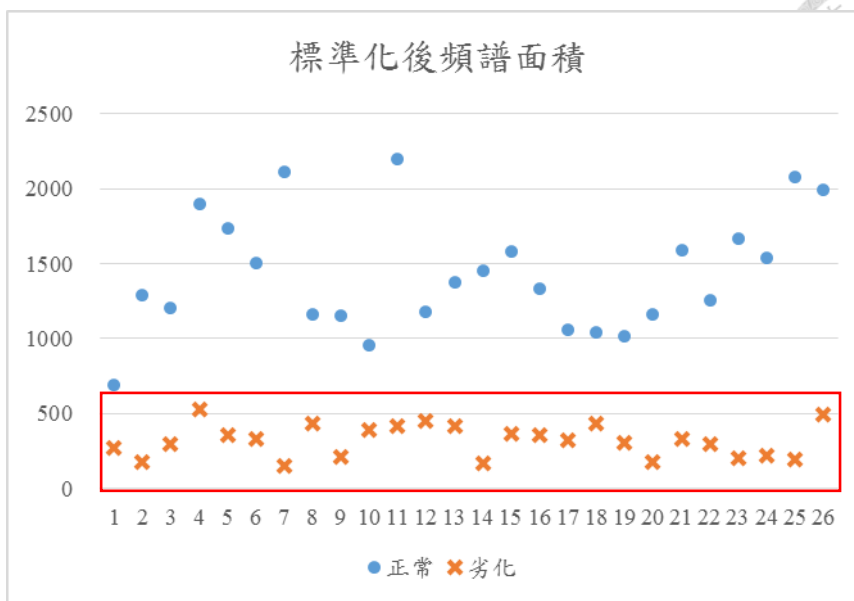


圖 5.13 案例二(心理系北館)之各點標準化後頻譜面積

案例三(第二學生活動中心)共 25 點標準化後頻譜面積整理於表 5.15。

表 5.15 案例三(第二學生活動中心)之各點標準化後頻譜面積

正常磁磚				劣化磁磚			
點位	標準化後 頻譜面積	點位	標準化後 頻譜面積	點位	標準化後 頻譜面積	點位	標準化後 頻譜面積
1-1(O)	1994	3-1(O)	1608	1-1(X)	262	3-1(X)	558
1-2(O)	1588	3-2(O)	1534	1-2(X)	588	3-2(X)	378
1-3(O)	1136	3-3(O)	1714	1-3(X)	517	3-3(X)	547
1-4(O)	1275	3-4(O)	1457	1-4(X)	251	3-4(X)	611
1-5(O)	2017	3-5(O)	1572	1-5(X)	304	3-5(X)	858
1-6(O)	1498	3-6(O)	1596	1-6(X)	256	3-6(X)	619
1-7(O)	1857	4-1(O)	1735	1-7(X)	387	4-1(X)	517
1-8(O)	1867	4-2(O)	1670	1-8(X)	459	4-2(X)	192
2-1(O)	1882	4-3(O)	1696	2-1(X)	515	4-3(X)	332
2-2(O)	1950	4-4(O)	1228	2-2(X)	303	4-4(X)	468
2-3(O)	1333	4-5(O)	1170	2-3(X)	523	4-5(X)	590
2-4(O)	1238			2-4(X)	287		
2-5(O)	1399			2-5(X)	252		
2-6(O)	1704			2-6(X)	769		

將表 5.15 之數值繪於圖 5.14，Shapiro-Wilk 檢測劣化磁磚分布之 W 值為 0.192，大於 0.05，因此為常態分佈，劣化磁磚標準化後頻譜面積平均值約為 455，標準差約為 170，因此有 99.7% 的信心，劣化磁磚的標準化後頻譜面積落在 0~965，如圖 5.14 中紅色框部分。

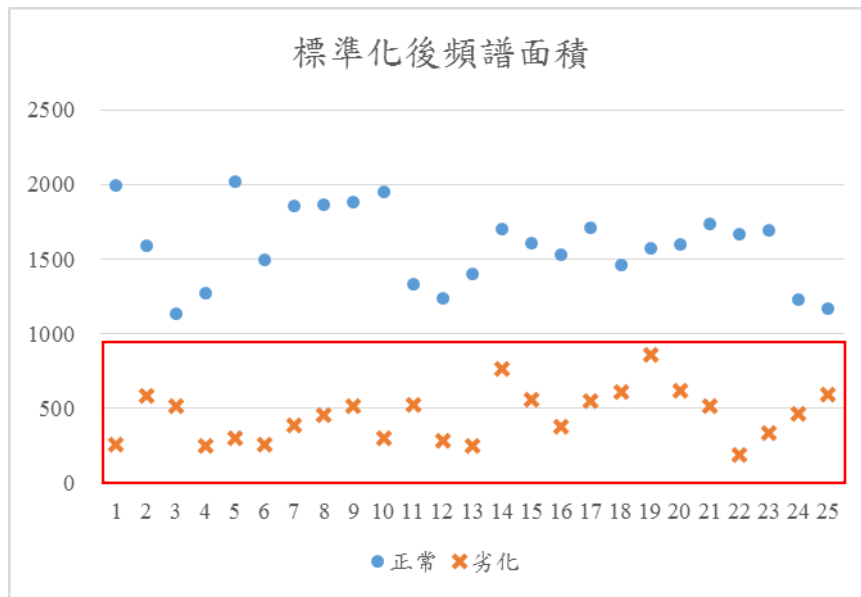


圖 5.14 案例三(第二學生活動中心)之各點標準化後頻譜面積

案例四(漁業科學研究所)共 30 點標準化後頻譜面積整理於表 5.16。

表 5.16 案例四(漁業科學研究所)之各點標準化後頻譜面積

正常磁磚				劣化磁磚			
點位	標準化後 頻譜面積	點位	標準化後 頻譜面積	點位	標準化後 頻譜面積	點位	標準化後 頻譜面積
1-1(O)	2772	3-1(O)	2565	1-1(X)	202	3-1(X)	936
1-2(O)	1607	3-2(O)	1753	1-2(X)	550	3-2(X)	545
1-3(O)	1811	3-3(O)	1871	1-3(X)	523	3-3(X)	850
1-4(O)	1937	3-4(O)	1979	1-4(X)	372	3-4(X)	574
1-5(O)	2753	3-5(O)	2164	1-5(X)	1222	3-5(X)	330
1-6(O)	1332	3-6(O)	1941	1-6(X)	494	3-6(X)	1016
1-7(O)	1596	3-7(O)	2062	1-7(X)	661	3-7(X)	986
1-8(O)	1755	3-8(O)	2189	1-8(X)	551	3-8(X)	316
2-1(O)	1456	4-1(O)	1890	2-1(X)	552	4-1(X)	611
2-2(O)	1857	4-2(O)	1701	2-2(X)	660	4-2(X)	350
2-3(O)	1773	4-3(O)	1711	2-3(X)	810	4-3(X)	464
2-4(O)	2072	4-4(O)	1818	2-4(X)	768	4-4(X)	224
2-5(O)	1743	4-5(O)	1388	2-5(X)	864	4-5(X)	598
2-6(O)	1819	4-6(O)	2148	2-6(X)	921	4-6(X)	922
2-7(O)	1680			2-7(X)	308		
2-8(O)	1583			2-8(X)	424		

將表 5.16 之數值繪於圖 5.15，Shapiro-Wilk 檢測劣化磁磚分布之 W 值為 0.402，大於 0.05，因此為常態分佈，劣化磁磚標準化後頻譜面積平均值約為 620，標準差約為 260，因此有 99.7% 的信心，劣化磁磚的標準化後頻譜面積落在 0~1400，如圖 5.15 中紅色框部分，30 點的正常磁磚中，有 2 點判斷為劣化磁磚，誤判率為 7%。

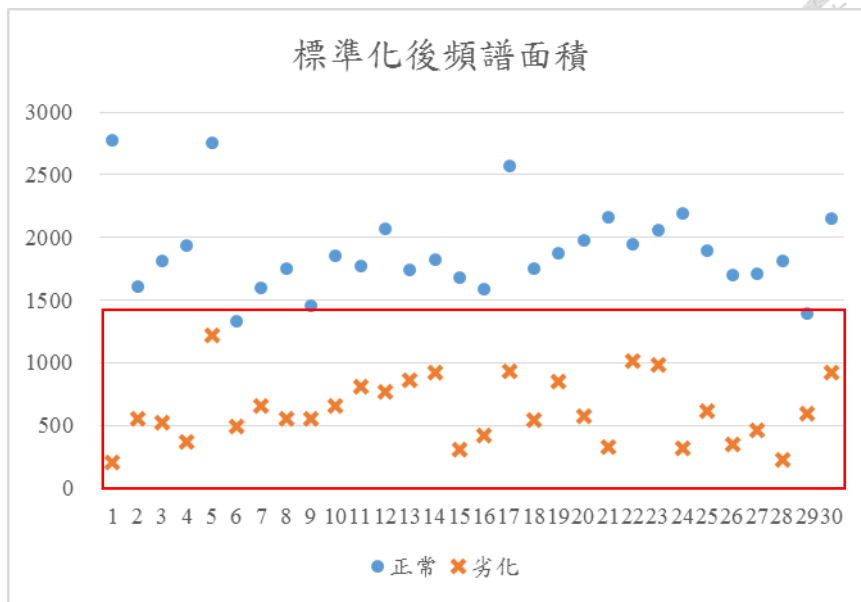


圖 5.15 案例四(漁業科學研究所)之各點標準化後頻譜面積

案例五(地理環境資源研究所)共 29 點標準化後頻譜面積整理於表 5.17。

表 5.17 案例五(地理環境資源研究所)之各點標準化後頻譜面積

正常磁磚				劣化磁磚			
點位	標準化後 頻譜面積	點位	標準化後 頻譜面積	點位	標準化後 頻譜面積	點位	標準化後 頻譜面積
1-1(O)	1613	3-1(O)	2090	1-1(X)	483	3-1(X)	267
1-2(O)	1509	3-2(O)	1347	1-2(X)	433	3-2(X)	465
1-3(O)	1739	3-3(O)	2344	1-3(X)	128	3-3(X)	419
1-4(O)	1592	3-4(O)	1393	1-4(X)	438	3-4(X)	920
1-5(O)	1448	3-5(O)	1478	1-5(X)	449	3-5(X)	555
1-6(O)	1729	3-6(O)	1594	1-6(X)	469	3-6(X)	408
1-7(O)	1813	3-7(O)	1181	1-7(X)	681	3-7(X)	308
1-8(O)	1526	4-1(O)	1467	1-8(X)	432	4-1(X)	373
2-1(O)	1515	4-2(O)	1554	2-1(X)	475	4-2(X)	278
2-2(O)	1969	4-3(O)	1800	2-2(X)	368	4-3(X)	962
2-3(O)	1378	4-4(O)	1863	2-3(X)	191	4-4(X)	860
2-4(O)	1767	4-5(O)	1867	2-4(X)	161	4-5(X)	856
2-5(O)	1114	4-6(O)	1744	2-5(X)	300	4-6(X)	198
2-6(O)	1423	4-7(O)	1458	2-6(X)	46	4-7(X)	395
2-7(O)	1789			2-7(X)	764		

將表 5.17 之數值繪於圖 5.16，Shapiro-Wilk 檢測劣化磁磚分布之 W 值為 0.054，大於 0.05，因此為常態分佈，劣化磁磚標準化後頻譜面積平均值約為 450，標準差約為 240，因此有 99.7% 的信心，劣化磁磚的標準化後頻譜面積落在 0~1170，如圖 5.16 中紅色框部分，29 點的正常磁磚中，有 1 點判斷為劣化磁磚，誤判率為 3%。

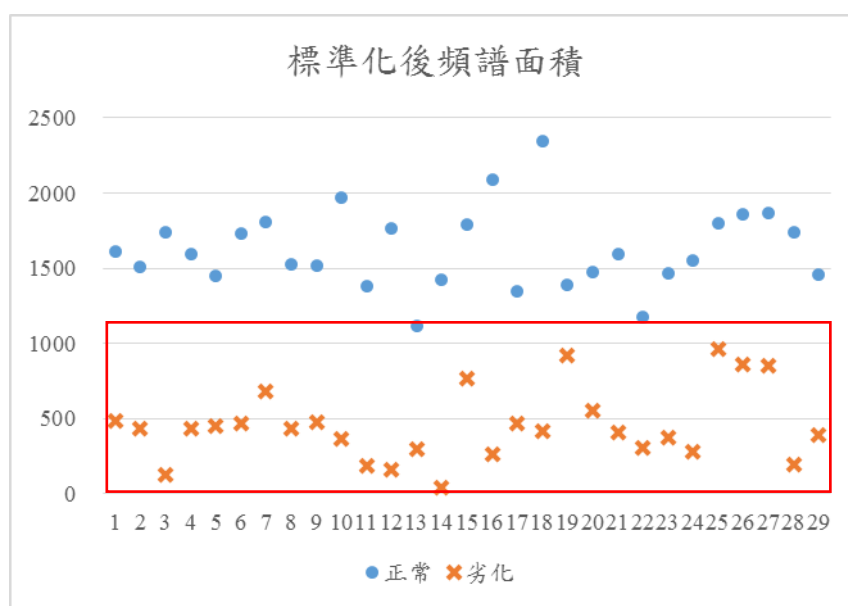


圖 5.16 案例五(地理環境資源研究所)之各點標準化後頻譜面積

將五棟案例模式三的劣化磁磚結論整理於表 5.18，劣化磁磚分布皆為常態分佈，利用常態分佈的特性「68-95-99.7 法則」，將劣化磁磚距離平均值 3 個標準差作為標準化後頻譜面積分布範圍，約有 99.7% 的數值分布在此範圍內。即使在現地實驗干擾因素多的情況下，誤判率仍低，可控制在 10% 以內，且是將正常磁磚誤判成劣化磁磚，是較保守的，此類誤判對診斷結果影響較小，若將劣化磁磚誤判成正常磁磚則會低估建築物劣化程度，應該盡量避免，本研究劣化磁磚誤判成正常磁磚誤判率皆為 0%，不過由表 5.18 中得知劣化磁磚標準化後頻譜面積分布在數值上無一定通則，每棟建築物將有其獨立的分布範圍，因此往後使用模式三診斷磁磚是否發生劣化時，將先尋找該建築物之劣化磁磚標準化後頻譜面積分布，才能進行下一步，使用其分布範圍來做診斷。

表 5.18 五棟案例之模式三整理

案例	劣化磁磚標準化 後頻譜面積分布	正常誤判成 劣化的機率	劣化誤判成 正常的機率
案例一(生物化學研究所)	0~855	0%	0%
案例二(心理系北館)	0~650	0%	0%
案例三(第二學生活動中心)	0~965	0%	0%
案例四(漁業科學研究所)	0~1400	7%	0%
案例五(地理環境資源研究所)	0~1170	3%	0%

5.4 小結

本研究使用模式一之作業流程，如圖 5.17。

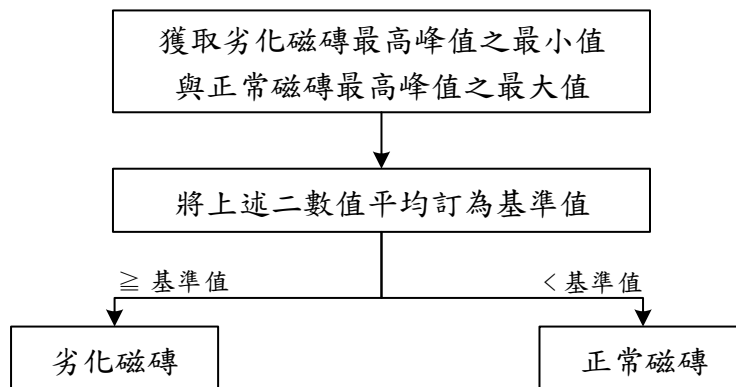


圖 5.17 模式一作業流程

本研究由五棟案例中，得出模式一的基準值為 770J/Hz，若最高峰值大於 770J/Hz，則可判斷為劣化磁磚，反之，若最高峰值小於 770J/Hz，則可判斷為正常磁磚，此模式可通用於本研究之案例所採納之陶質及瓷質丁掛磚且誤判率 0%。

模式一取得數值之方式為頻譜圖中最高峰的單一資料點 Y 值，因此較容易受敲擊力道大小不一致的影響，使用者應用此模式要特別注意敲擊力道的一致性，若



使用者與本研究力道不同則不可以 770J/Hz 作為基準值，可透過圖 5.17 的模式一作業流程自行獲取基準值。

本研究由五棟案例中得知，模式二判斷正常磁磚與劣化磁磚的基準值是不固定的，甚至有案例是無法訂出基準值的，且誤判率大部分都偏高，因此模式二僅可用於部分建築物，使用性不廣泛，較不適合用來判斷磁磚是否發生劣化。

本研究使用模式三之作業流程，如圖 5.18。

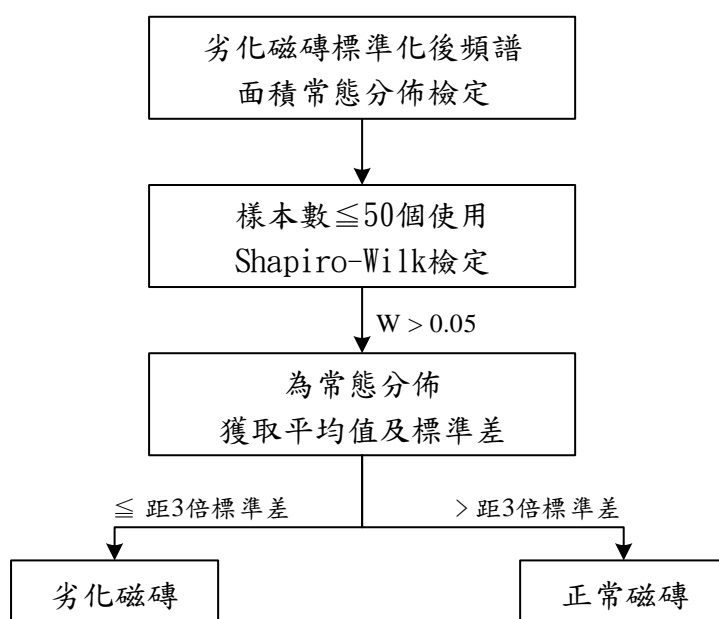


圖 5.18 模式三作業流程

本研究由五棟案例中，得知劣化磁磚分布皆為常態分佈，利用常態分佈的特性「68-95-99.7 法則」，將劣化磁磚距離平均值 3 個標準差作為標準化後頻譜面積分布範圍，約有 99.7% 的數值分布在此範圍內。誤判率低，可控制在 10% 以內，且是將正常磁磚誤判成劣化磁磚，是較保守的，此類誤判對診斷結果影響較小，若將劣化磁磚誤判成正常磁磚則會低估建築物劣化程度，應該盡量避免，本研究劣化磁磚誤判成正常磁磚誤判率皆為 0%。

模式三取得數值之方式為頻譜圖標準化後頻譜面積，因此受敲擊力道大小不一致的影響相對較模式一小，不過劣化磁磚標準化後頻譜面積分布在數值上並無一定通則，每棟建築物有其獨立的分布範圍，因此使用者透過圖 5.18 模式三作業流程獲取基準值時，僅可將其值應用於該棟建築物上。

最後，本研究將所有透過專家訪談、文獻回顧、現地實驗之經驗以及數據分析的結論彙整後，建立了一套打音法作業流程供使用者參考，如圖 5.19。

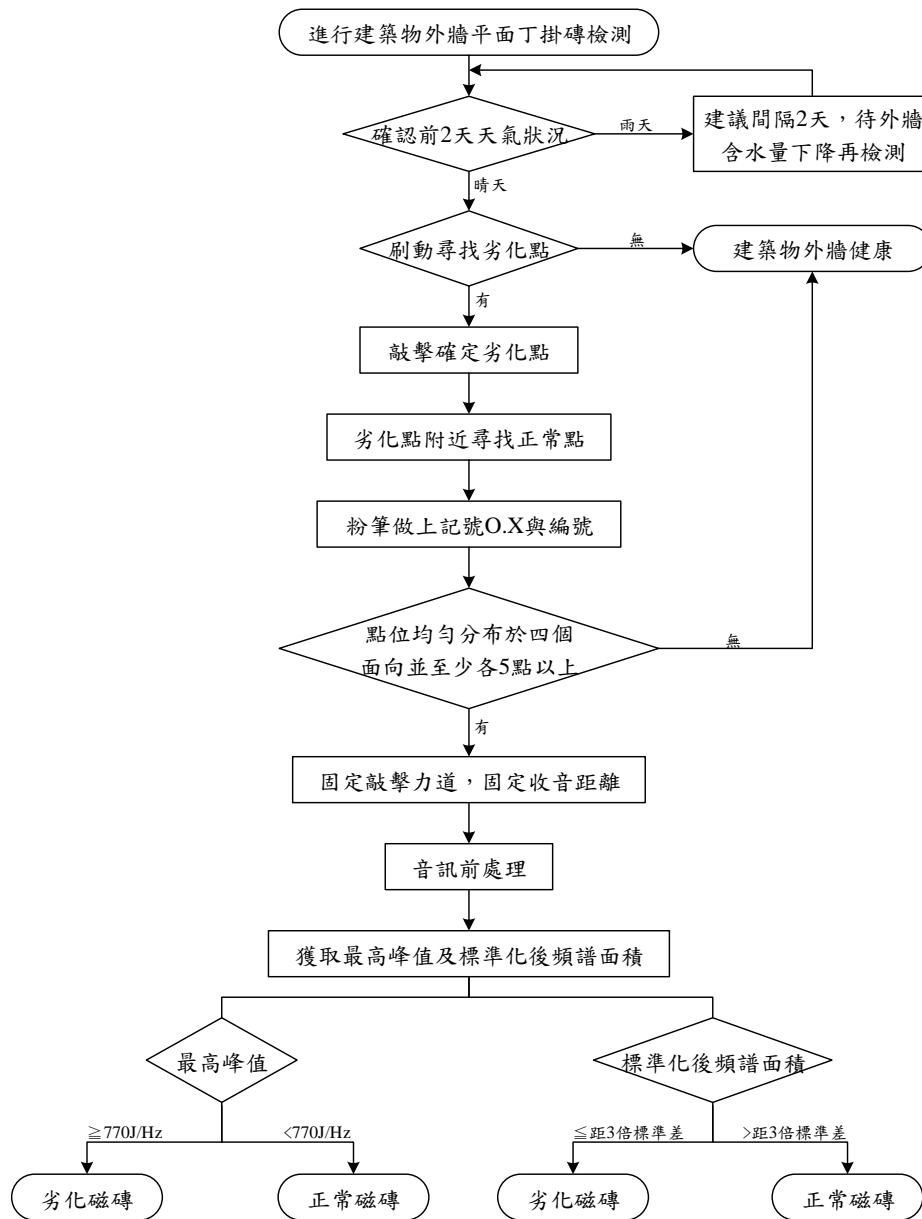


圖 5.19 打音法作業流程

第六章 結論與建議



6.1 研究結論

1. 本研究透過文獻回顧及觀察現地實驗的音訊所轉換之頻譜圖，提出三個模式，分別為模式一(最高峰值)、模式二(最高峰對應頻率)及模式三(標準化後頻譜面積)。
2. 模式一(最高峰值)經由五棟建築物的數據整理後推斷，最高峰值大於 770J/Hz 判斷為劣化磁磚，最高峰值小於 770J/Hz 判斷為正常磁磚，此模式可通用於本研究之案例所採納之陶質及瓷質丁掛磚且誤判率 0%。
3. 模式二(最高峰對應頻率)僅可用於極少部分的建築物，使用性不廣泛，較不適合用來判斷磁磚是否發生劣化。
4. 模式三(標準化後頻譜面積)，利用劣化磁磚分布為常態的特性，以距離平均值 3 個標準差的範圍作為判斷的基準，具有 99.7%的信心水準，落在範圍內則判斷為劣化磁磚，落在範圍外則判斷為正常磁磚，誤判率低，能控制在 10% 以內，且是將正常磁磚誤判成劣化磁磚，是較保守的，若將劣化磁磚誤判成正常磁磚則會低估建築物劣化程度，應盡量避免，本研究此類誤判率皆為 0%，不過劣化磁磚標準化後頻譜面積分布在數值上無一定通則，每棟建築物有其獨立的分布範圍，使用時判斷基準僅能使用在該棟建築物。
5. 本研究建議未來使用打音法來求得基準值時，將點位均勻分布於建築物四個面向並至少各 5 點以上，固定敲擊力道及收音距離，並經過音訊前處理，才進行下一步的頻譜分析，以提高基準值的準確性。



6.2 後續建議


本研究後續建議可區分建議與後續研究兩部分：

一、建議

打音法為現階段診斷建築物外牆磁磚最準確的非破壞性檢測方式，不過就連行之有年的日本也仍是由有經驗的檢測人員主觀判斷的方式來進行，本研究則期望打音法能以科學客觀的方式進行，臺灣由於近年來建築物外牆磁磚剝落事件頻仍，政府也積極著手在修法來改善此一現象，本研究的研究成果期望能提供公部門納入修法時之參考，作為使用打音法診斷建築物外牆磁磚之劣化基準，或提供評估檢查人員在建築物外牆磁磚劣化診斷時使用，以及提供物業管理公司與整建維護公司在建築物外牆磁磚整建拉皮規劃時使用。

二、後續研究

1. 在進行打音法時，經人耳即可聽出劣化磁磚有著不同的聲音，經拉拔試驗後，均發現有浮起現象或黏著不完全的情形，本研究皆將其定義為劣化磁磚，然而本研究建議為了精確分類，可嘗試蒐集更多案例並以數值分析方法加以分類。
2. 建議探討本研究案例中未使用之材質或尺寸，並比較其差異。
3. 建議探討不同變數下(如屋齡、樓層、部位等)的劣化特徵，並比較各變數之關係及影響。
4. 本研究僅探討浮起與凸起的劣化形式，建議可探討其他劣化形式如潮濕、白華等對磁磚剝落之影響。
5. 建議探討磁磚背溝型式、磁磚濕度及結構體混凝土強度對音訊分析之影響。


- 
6. 本研究設計之固定敲擊力道裝置收取音訊以小於爆音現象及大於環境雜音為原則，初步控制敲擊角度約 40 度，建議探討不同敲擊角度所得音訊對數據分析之影響。
 7. 建議研究磁磚生命週期中的其他階段，例如在施工階段採用新工法或新材料以避免磁磚剝落的現象發生，或者在修繕階段明定磁磚剝落後之修補對策。
 8. 建議研發行動裝置 APP，可即時將收音樣本作音訊前處理後回傳至後台，後台經診斷模式判定正常磁磚與劣化磁磚後，再將結果自動回傳行動裝置 APP，提升檢測人員評估效率。

參考文獻




英文部分：


1. Jiang, Z.D., B.L. Luk, and K.P. Liu, "Bispectra-based impact acoustic non-destructive evaluation," *NDT&E International*, Vol. 42, pp.652~657(2009).
2. Liu, K.P., B.L. Luk, F. Tong, and Y.T. Chan, "Application of service robots for building NDT inspection tasks," *Industrial Robot: An International Journal*, Vol. 38, No.1, pp.58~65(2011).
3. Liu, S.X., F. Tong, B.L. Luk, and K.P. Liu, "Fuzzy pattern recognition of impact acoustic signals for nondestructive evaluation," *Sensors and Actuators A*, Vol. 167, pp.588~593(2011).
4. Luk, B.L., K.P. Liu, and F. Tong, "Rapid evaluation of tile-wall bonding integrity using multiple-head impact acoustic method," *NDT&E International*, Vol. 44, pp.297~304(2011).
5. Luk, B.L., K.P. Liu, F. Tong, and K.F. Man, "Impact-acoustics inspection of tile-wall bonding integrity via wavelet transform and hidden Markov models," *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 329, pp.1954~1967(2010).
6. Luk, B.L., K.P. Liu, Z.D. Jiang, and F. Tong, "Robotic impact-acoustics system for tile-wall bonding integrity inspection," *Mechatronics*, Vol. 19, pp.1251~1260(2009).
7. Luk, B.L., Z.D. Jiang, K.P. Liu, and F. Tong, "Impact Acoustic Non-destructive Evaluation in Noisy Environment Based on Wavelet Packet Decomposition," *IMECS*, Vol. 2(2008).


- 
8. Tong, F., S.K. Tso, and M.Y.Y. Hung, "Impact-acoustics-based health monitoring of tile-wall bonding integrity using principal component analysis," *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 294, pp.329~340(2006).
 9. Tong, F., S.K. Tso, and X.M. Xu, "Tile-wall bonding integrity inspection based on time-domain features of impact acoustics," *Sensors and Actuators A*, Vol. 132, pp.557~566(2006).
 10. Tong, F., X.M. Xu, B.L. Luk, and K.P. Liu, "Evaluation of tile-wall bonding integrity based on impact acoustics and support vector machine," *Sensors and Actuators A*, Vol. 144, pp.97~104(2008).
 11. Tong, F., X.M. Xu, S.K. Tso, and K.P. Liu, "Application of Evolutionary Neural Network in Impact Acoustics Based Nondestructive Inspection of Tile-wall," International Conference of Communications, Circuits and Systems, Hong Kong, China, pp. 974~978(2005).

中文部分：

1. 山崎健一，「日本建築物外牆磁磚剝落機制與防止剝落商品、施工方法之開發與變遷」，台日建築物外牆磁磚性能診斷與更新工法研習會論文集，臺北，第 79~96 頁(2015)。
2. 中島和幸，「貼磁磚外牆之調查、診斷方法」，建築物外牆磁磚耐用診斷與維修技術研習會論文集，臺北，第 5-1~5-40 頁(2007)。
3. 本橋健司，「日本建築物定期申報制度與外牆裝修材料(以磁磚材料為主)之調查診斷方法」，台日建築物外牆磁磚性能診斷與更新工法研習會論文集，臺北，第 37~78 頁(2015)。

- 
4. 江立偉，「建築物外牆公共安全目視診斷評估方法之研究」，碩士論文，國立高雄大學都市發展與建築研究所，高雄(2009)。
 5. 江立偉，「老舊建築物外牆磁磚劣化診斷模式之研究」，博士論文，臺灣大學土木工程學系，臺北(2016)。
 6. 李育陞，「老舊建物外牆整修工法之研究」，碩士論文，臺灣大學土木工程學系，臺北(2010)。
 7. 李崇銘，「住宅整建診斷與修復決策支援系統」，碩士論文，臺灣科技大學建築研究所，臺北(2007)。
 8. 李銘鐘，「非破壞性打音法測定木材強度性質之研究」，碩士論文，中興大學森林研究所，臺中(1991)。
 9. 林宏義，「建築物外飾材施工品質之非破壞檢測」，碩士論文，朝陽科技大學營建工程系碩士班，臺中(2005)。
 10. 林禮德，「集合住宅外牆磁磚劣化評估工具建立之研究」，碩士論文，臺北科技大學，臺北(2011)。
 11. 施建志、蘇家慶，「建築物劣化問題及其修復」，工業材料雜誌，第 123 期，第 117~125 頁(1997)。
 12. 高文婷，「台灣建築物外牆飾材納入公共安全定期申報制度之實施」，日本建築外牆更新維護技術與長期修繕制度研習會論文集，臺北，第 5~16 頁(2016)。
 13. 郭斯傑、江立偉、羅紫萍，「建築物外牆磁磚劣化診斷模式之研究」，物業管理學報，第六卷，第二期，第 63~73 頁(2015)。

- 
14. 郭斯傑、黃世孟、張智元、江立偉，「建築立面更新健診與評估系統之研究」，內政部建築研究所研究報告，新北市(2011)。
 15. 郭斯傑、黎昌憲、李育陞，「建築物外牆整建更新之法令制度與關鍵因素分析」，物業管理學報，第二卷，第一期，第 1~12 頁(2011)。
 16. 秦賢治，「集合住宅增加之背景與大規模修繕之現狀」，日本建築外牆更新維護技術與長期修繕制度研習會論文集，臺北，第 17~32 頁(2016)。
 17. 高蔡義，「建築物外牆面磚劣化原因與對策之研究-以大學學校建築為例」，碩士論文，成功大學建築學系，臺南(2000)。
 18. 陳柏穎、李德河、吳建宏、許家豪、賴新龍，「以非破壞性檢測法檢測大樓壁磚分離率」，中國土木工程學刊，第二十六卷，第一期，第 23~36 頁 (2014)。
 19. 許家豪，「建築物外牆磁磚與木構件內部缺陷檢測之研究」，碩士論文，成功大學土木工程學系，臺南(2010)。
 20. 張智元，「建築醫學概念與應用機制之研究」，博士論文，臺灣大學土木工程學系，臺北(2006)。
 21. 張耀祖，「建築物外牆磁磚劣化檢測診斷應用之研究-以臺灣大學校園建築物為例」，碩士論文，國立臺灣大學工學院土木工程學系，臺北(2013)。
 22. 黃世孟、江立偉、李姿葶、賴玉恩，「建築屋主觀點對於建築物健康診斷與定期檢查共識之研究」，建築學報，第 71 期，第 233~253 頁(2010)。
 23. 黃世孟、李姿葶、江立偉、陳智偉、陳季妙，「建築業主對設施健診認知與實施建築強制檢查辦法之分析」，中華民國建築學會 97 年建築研究成果發表會論文集，高雄市，第 2625~2644 頁(2008)。

- 
24. 黃克翊，「既有 R.C.建築磁磚外牆劣化及改修工法調查研究-以高雄市透天厝為例」，碩士論文，成功大學建築研究所，臺南(2010)。
 25. 葉瑞娟，「聲紋分析技術外牆診斷之應用研究」，碩士論文，逢甲大學土木工程學系，臺中(2013)。
 26. 戴佩宜，「以打音法從事建築外牆瓷磚非破壞檢測之研究」，碩士論文，高雄大學都市發展與建築研究所，高雄 (2008)。
 27. 顏嘉慶，「利用打音法檢測學校建築外牆磁磚狀況之研究」，碩士論文，逢甲大學土木工程學系，臺中(2012)。

網路資料：

1. 香港屋宇署，<http://www.bd.gov.hk/>
2. 訊號分析步驟，<http://www.ym.edu.tw/~cflu/>
3. 常態分佈，<http://www.csghs.tp.edu.tw/~captain/scienceliteracy/content/>
4. 聲音，<http://www.phy.ntnu.edu.tw/demolab/>