

國立成功大學  
土木工程研究所  
碩士論文

灰漿之配比分析與工程性質研究  
A Study for Mix Proportion Analysis and  
Engineering Properties of Mortar

研究生：游晏愷

指導教授：李德河 博士

中華民國九十六年七月

國立成功大學  
碩士論文

灰漿之配比分析與工程性質研究

A Study for Mix Proportion Analysis and  
Engineering Properties of Mortar

研究生：游 晏 愷

本論文業經審查及口試合格特此證明  
論文考試委員

李德河

潘國樑 劉善昌 蔡光榮 紀聖維

指導教授：李 德 河

系主任：陳 東 陽

陳東陽

中華民國九十六年七月十三日

## 摘要

灰漿為古建築施工中重要的構材，係以石灰為膠結材料，摻合比例不等之填充料使用，灰漿配比多由匠師們口述傳承下來，然因年代久遠而古灰漿使用之配比早已失傳。本研究為使古蹟灰漿修復工程能達成真實維護文化資產保存的目的，透過微觀分析、醣類測定、碳酸鈣含量測定與粗細粒料含量分析的方式，建立一套分析灰漿配比之標準方法，對熱蘭遮城南殘牆、臺灣府城垣小東門段、鳳山縣城東便門段、恆春縣城垣北門段之古蹟灰漿進行配比分析。此外，由於水泥優越的強度與工作性使傳統灰漿之使用凋零，灰漿材料之相關性質的研究在國內是相對較少的，故為使古蹟灰漿修復所使用之材料的性質能更廣為瞭解，本研究透過基本性質試驗、中性化試驗、抗壓與劈張試驗、濕氣滲入與熱傳導係數測定來探討灰漿之物理性質與力學性質之特性。研究成果如下：

- (1) 熱蘭遮城南殘牆抹灰與灰縫之重量配比。

石灰：砂：牡蠣殼：醣類 = 1：0.15：0.25：0.04

- (2) 臺灣府城小東門段灰土之重量配比。

石灰：黏土：砂：牡蠣殼：醣類 = 1：4：6.22：1.55：0.02

- (3) 本研究使用石灰、黏土、里港砂和牡蠣殼之拌合試體，建立採用灰漿之初期強度與碳化程度來研判最終碳化強度的公式：

$y = -0.0038x^2 + 1.3484x + 0.4837$  ( $R^2 = 0.94$ )，其中  $x$  為碳化程度、 $y$  為強度生成率。

- (4) 水灰比 0.75 拌合之純石灰漿的熱傳導係數為  $0.42W/mK$ ，是水泥漿的  $1/3$  倍，且石灰防止濕氣滲入及其內部水氣蒸散之能力要優於水泥。

關鍵詞：灰漿、石灰

## Abstract

The mortar, consisting of the cementing material, lime, and various additives, is an important material in the construction of ancient architectures. The mixture proportion of the mortar traditionally dictated from craftsman to craftsman has failed to be handed down from the past generations. The preservation of the cultural heritage generally requires the use of the traditional mortar mixture to restore the ancient architectures. To this end, this study established a method for quantitatively analyzing the mortar mixture with the use of stereomicroscope micrograph analysis and the determination of content of the carbohydrate, calcium carbonate, and fine and coarse aggregates. Then, the method is employed to analyze the mortar mixture in the Remains Wall of the Fort Zeelandia, in the ruins of the Small East Gate section of Taiwan Fucheng, in the ruins of the Dongbianmen section of Fongshan City Wall, and in the ruins of the North Gate section of Hengchun City Wall. Due to the advantage of high strength and workability of the Portland cement, the traditional mortar is no longer used in the construction of recent architectures, which reflects the lack of studies of investigating the properties of the mortar. This study incorporates the basic physical property test, the carbonization rate test, the unconfined compressive and splitting tensile strength tests, the moisture content test, and the thermal conductivity test to investigate the physical and mechanical properties of the mortar. The test results include:

- (1) The mixture proportion of rendering and joint mortars in the Remains Wall of the Fort Zeelandia:  
Lime : Sand : Oyster Shell : Carbohydrate = 1.00 : 0.15 : 0.25 : 0.04
- (2) The soil-lime mixture proportion in the ruins of the Small East Gate section of Taiwan Fucheng:  
Lime : Clay : Sand : Oyster Shell : Carbohydrate = 1.00 : 4.00 : 6.22 : 1.55 : 0.02
- (3) With the use of lime, clay, Ly-port sand, and oyster shell, this study established an equation for evaluating the steady state strength of the mortar through the two parameters, the carbonization rates ( $x$ ) and the strength increase rate ( $y$ ) as follows:  
$$y = -0.0038x^2 + 1.3484x + 0.4837 (R^2 = 0.9407)$$
- (4) The heat transfer coefficient of a pure lime sample with water/cement ratio of 0.75 is  $0.42 W / mK$ , which is one third of that of the cement. In addition, the effect of use of the mortar on preventing the infiltration and evapotranspiration of the moisture is better than that of the Portland cement.

Key words: Mortar, Lime

## 誌 謝

本論文得以完成，最要感謝是指導老師 李德河教授，為學生提供完備的學習環境，以及研究期間殷切的悉心督導與旁徵博引，在此致上最深的敬意與感謝。

口試期間承蒙 潘國樑教授、蔡光榮教授、劉益昌教授、紀雲曜教授之細心審閱及指正，並提供寶貴的意見與精闢的見解，使得本文更臻完善，對此謹表最誠摯的謝意。

研究期間要感激 方一匡教授、陳鍵老師提供精良的試驗設備，才使本研究之試驗得以順利完成。

兩年轉瞬即逝，感謝吳建宏老師、龔東慶博士、朝景學長、舜孔學長對於本論文的逐字斧正；王金鐘老師、煌凱學長、泓銘學長、楷淳學長提供豐富的資料並總是抽空返回實驗室提供協助與引導；地科所博士班春滿學長熱情贊助相關儀器與試驗知識；古志生老師、謝松林學長與博士班百祥學長、雅芬學姊、新龍學長、正傑學長、柏穎學長在學習間的指導；碩士班學長稚榮、人豪、嘉穎、盟文、羿需與慧玲學姐在實驗上的經驗傳承及日常生活中的照顧；同窗好友永發、健峰、俊男、義清、周燕的砥礪與相互扶持；岩力室助理碧玲學姊、王姊在日常瑣事的幫助；土木系工友們在環境上的照料與打理；岩力室諸多學長、學弟的努力與付出都是本研究得以完成的重要因素。

最後，感謝父親、母親、妹妹對我長久以來的鼓勵與關心，才能使我順利完成論文取得學位，你們的支持是我最欣慰的動力。在此，僅以本文獻給我的家人、朋友、師長，願大家一切順心、平安。

游晏愷 2007 夏，寫於岩力試驗室

# 目 錄

摘要	I
Abstract	II
誌謝	III
目錄	IV
表目錄	VII
圖目錄	IX
照片目錄	XI

## 第一章 緒論

1-1 研究動機	1
1-2 研究流程與目的	1

## 第二章 文獻回顧

2-1 古蹟灰漿修復之真諦	3
2-2 灰漿之發展	5
2-3 灰漿材料之性質與作用	7
2-4 灰作之施工與灰漿配比	13
2-5 建築物的絕熱與熱探針量測之應用	20

## 第三章 試驗內容及方法

3-1 試驗材料及其製備	22
3-2 設計配比、試體製作與養護條件	25
3-2-1 試體之配比設計	25
3-2-2 材料之拌合水量	26
3-2-3 試體拌合與製作及其養護	27
3-3 試驗項目、儀器與內容	28
3-3-1 基本物性試驗	28

3-3-2	超音波檢測	29
3-3-3	實體顯微鏡觀察	29
3-3-4	定量化配比分析	29
3-3-5	中性化試驗	31
3-3-6	抗壓與劈張試驗	32
3-3-7	吸水試驗	32
3-3-8	熱傳導係數測定	32
<b>第四章 灰漿之配比分析</b>		
4-1	配比分析流程及方法	34
4-2	定量化成分分析結果	39
4-2-1	EDS 分析結果	39
4-2-2	粗、細粒料含量之測定	41
4-2-3	碳酸鈣含量之測定	43
4-2-4	醣類測定結果與石灰、黏土之計算	45
4-2-5	定量化成分分析小結	47
4-3	古蹟灰漿之配比分析	48
4-3-1	熱蘭遮城南殘牆之灰漿配比分析	49
4-3-2	臺灣府城之灰漿配比分析	52
4-3-3	鳳山縣城之灰漿配比分析	55
4-3-4	恆春縣城之灰漿配比分析	57
4-3-5	古蹟灰漿配比分析之小結	58
<b>第五章 灰漿之性質試驗結果</b>		
5-1	基本性質試驗結果	61
5-1-1	工作度試驗結果	61
5-1-2	乾縮比	61
5-1-3	乾單位重	62
5-1-4	超音波檢測	63

5-2 中性化試驗結果	64
5-3 力學性質試驗結果	66
5-3-1 氣乾養護之抗壓試驗結果	66
5-3-2 碳化養護之抗壓試驗結果	67
5-3-3 劈張試驗結果	70
5-4 吸水試驗結果	72
5-5 熱傳導係數測定	77
5-6 灰漿性質之探討	79
5-6-1 設計配比Ⅲ之抗壓試驗結果	81
5-6-2 抗壓強度試驗結果之討論	82
第六章 結論與建議	
6-1 結論	84
6-2 建議	85
參考文獻	86
附錄 A 中性化試驗結果	90
附錄 B 應力應變曲線	93
附錄 C 物理、力學性質試驗結果	97



## 表目錄

表 2-1	國內外常見之灰漿材料與其功能表	7
表 2-2	臺灣傳統砌體建築灰縫之配比	14
表 2-3	古蹟灰漿材料配合比與製作方法表(洪煌凱整理, 2003)	15
表 3-1	試驗用石灰之基本性質	22
表 3-2	試驗用黏土之基本性質	23
表 3-3	試驗用細骨材之基本性質	23
表 3-4	各材料之代號	26
表 3-5	設計配比 I	26
表 3-6	設計配比 II	26
表 3-7	各研究者對於石灰所使用之水灰比	26
表 3-8	材料之拌合水用量	26
表 3-9	不同性質試驗所需之試體	27
表 3-10	實體顯微鏡儀器性能	29
表 4-1	成分分析用試體之 EDS 化學元素分析結果	40
表 4-2	由 EDS 分析結果所推算之化合物含量	40
表 4-3	EDS 分析結果所推算之化合物含量正規化結果	40
表 4-4	透過 EDS 分析結果所推估之配比與原設計值之比較	41
表 4-5	設計配比 I 之粗、細粒料測定結果	42
表 4-6	設計配比 I 之碳酸鈣含量測定結果	44
表 4-7	設計配比 I 之配比分析結果	46
表 4-8	熱蘭遮城南殘牆灰漿之取樣部位與點數	50
表 4-9	熱蘭遮城南殘牆灰漿之配比分析結果	51
表 4-10	臺灣府城小東門段灰漿之取樣部位與點數	53
表 4-11	臺灣府城小東門段灰漿之配比分析結果	54
表 4-12	臺灣府城小東門段灰土牆之體積配合比	54

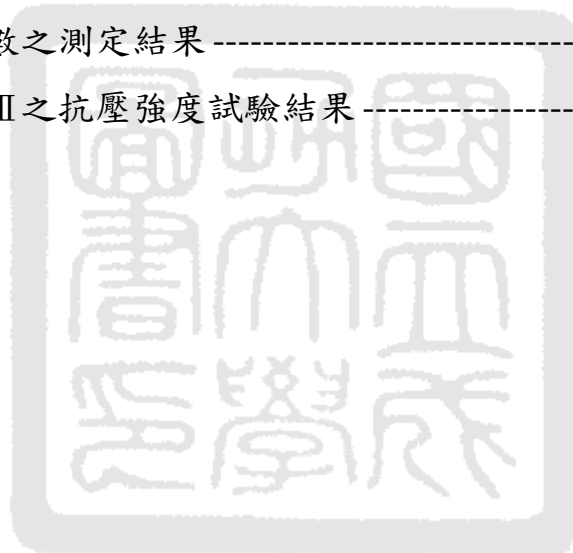
表 4-13 鳳山縣城東便門段灰漿之取樣部位與點數 -----	56
表 4-14 鳳山縣城東便門段灰漿之配比分析結果 -----	57
表 4-15 恆春縣城北門段灰漿之配比分析結果 -----	58
表 4-16 古蹟灰漿配比分析之結果平均值的比較 -----	59
表 5-1a 濕氣滲入與內部水氣蒸散之測定結果 -----	74
表 5-1b 濕氣滲入與內部水氣蒸散之測定結果 -----	74
表 5-2 灰漿材料之性質 -----	79
表 5-3 設計配比Ⅲ與其設計原因說明 -----	80
表 5-4 設計配比Ⅱ、Ⅲ之材料含量與強度關係 -----	82



## 圖目錄

圖 1-1	本研究之研究流程圖	2
圖 2-1	直鏈澱粉分子鏈	10
圖 2-2	支鏈澱粉分子鏈	10
圖 2-3	支鏈澱粉鍵結分子之形狀	10
圖 2-4	鑄造用型砂之黏結作用	12
圖 3-1	試驗用細骨材之粒徑分布曲線	24
圖 4-1	古蹟灰漿之配比分析流程	34
圖 4-2	粗、細粒料含量測定結果	42
圖 4-3	碳酸鈣含量測定結果	45
圖 4-4	醣類含量測定結果	45
圖 4-5	定量化配比分析結果	47
圖 4-6	熱蘭遮城原貌(改繪自文建會網頁)	49
圖 4-7	熱蘭遮城南殘牆灰漿之配比分析結果	52
圖 4-8	臺灣府城小東門段灰漿之配比分析結果	55
圖 5-1	各配比之工作度試驗結果	61
圖 5-2	中性化養護齡期與各配比乾縮比之關係	62
圖 5-3	中性化養護齡期與各配比乾單位重之關係	63
圖 5-4	中性化養護齡期與 P 波波速之關係	64
圖 5-5	石灰與石灰添加黏土配比之中性化養護齡期與碳化程度	65
圖 5-6	石灰添加里港砂配比之中性化養護齡期與碳化程度	65
圖 5-7	石灰添加里港砂配比之中性化養護齡期與碳化程度	66
圖 5-8	氣乾 28 天齡期與各配比之抗壓強度	66
圖 5-9	石灰與石灰添加黏土配比之中性化養護齡期與抗壓強度關係	68
圖 5-10	石灰添加里港砂配比之中性化養護齡期與抗壓強度關係	68
圖 5-11	石灰添加里港砂配比之中性化養護齡期與抗壓強度關係	69

圖 5-12	強度生成率之計算	-----	68
圖 5-13	碳化程度之計算	-----	69
圖 5-14	試體碳化深度與抗壓強度生成之關係圖	-----	70
圖 5-15	劈張試驗結果	-----	71
圖 5-16	各配比之批張強度與抗壓強度的關係	-----	71
圖 5-17	飽和含水量試驗結果與計算之孔隙比	-----	73
圖 5-18	水泥與石灰之烘乾試體在潮濕環境與自然環境之含水量變化	-----	75
圖 5-19	石灰添加黏土配比在潮濕環境與自然環境之含水量變化	-----	76
圖 5-20	石灰添加里港砂配比在潮濕環境與自然環境之含水量變化	-----	76
圖 5-21	石灰添加里港砂配比在潮濕環境與自然環境之含水量變化	-----	76
圖 5-22	熱傳導係數之測定結果	-----	78
圖 5-23	設計配比Ⅲ之抗壓強度試驗結果	-----	81



## 照片目錄

照片 2-1	熱蘭遮城南殘牆一景 -----	4
照片 2-2	臺灣府城南門段城垣一景 -----	4
照片 2-3	「羅馬灰漿」之膠結晶體的影像 -----	6
照片 2-4	石灰漿之膠結晶體的影像 -----	6
照片 3-1	黃色黏土 -----	22
照片 3-2	安平砂 -----	23
照片 3-3	通過 10 號篩之里港砂 -----	23
照片 3-4	牡蠣殼 -----	23
照片 3-5	高雄縣湖內鄉新吉勝商行 -----	23
照片 3-6	製備完成之糖漿 -----	25
照片 3-7	製備完成之糯米漿 -----	25
照片 3-8	定量化配比分析之試體製作 -----	27
照片 3-9	超音波與抗壓試體之試體製作 -----	27
照片 3-10	熱傳性質試驗之試體製作 -----	28
照片 3-11	超音波試驗相關儀器 -----	29
照片 3-12	實體顯微鏡相關儀器 -----	29
照片 3-13	掃描式電子顯微鏡附設能量分散光譜儀 -----	30
照片 3-14	中性化試驗機 -----	31
照片 3-15	十噸萬能試驗機 -----	32
照片 3-16	試驗用之熱探棒 -----	33
照片 3-17	電源供應器與溫度資料擷取器 -----	33
照片 4-1	低能量研磨力道的控制 -----	35
照片 4-2	灰漿之醣類含量測定 -----	37
照片 4-3	糖度測定所使用之強光源照射 -----	37
照片 4-4	醣類測定後的酸洗試驗 -----	38

照片 4-5	碳酸鈣含量測定	38
照片 4-6	超音波洗滌配合#200 篩盒洗篩	38
照片 4-7	以清水對粒料進行洗篩	38
照片 4-8	微觀 A 配比之粒料分離情形	43
照片 4-9	熱蘭遮城南殘牆全貌(黃稚榮, 2006)	49
照片 4-10	熱蘭遮城南殘牆灰漿之微觀	51
照片 4-11	今日臺灣府城小東門段現況	52
照片 4-12	臺灣府城小東門段灰漿之樣本取樣處	53
照片 4-13	臺灣府城小東門段灰漿之微觀	54
照片 4-14	今日鳳山縣城東便門段現況	55
照片 4-15	鳳山縣城東便門段灰漿之微觀	56
照片 4-16	今日恆春縣城北門段現況	57
照片 4-11	恆春縣城北門段灰漿之微觀	58
照片 4-12	臺灣府城小東門段版築夯土牆	60
照片 4-13	恆春縣城北門段版築夯土牆	60
照片 5-1	劈張試驗之 $L_{1.0}S_{0.5}$ 裂面	72
照片 5-2	劈張試驗之 $0.75L_{1.0}$ 裂面	72
照片 5-3	牡蠣殼形成之不連續面	83

# 第一章 緒論

## 1-1 研究動機

臺灣自荷治時期開始，引入磚砌建築，灰漿即大量被使用作為黏結材、承重材及隔間材。灰漿係以石灰為膠結料，使用時依用途與功能的不同或地緣關係或匠師調製配比的的不同，摻合比例不等的填充料，因此各式各樣的灰漿因應而生，自古坊間即流傳著「九漿十八灰」的說法。

近年來，隨著保護世界文化遺產風潮的推動，我國亦逐漸重視史蹟修繕維護事宜，但修復的過程是一項高度專門性的工作，同時1964年「國際文化紀念物與歷史場所維護與修復憲章」的第九條文指出：「修復的進行，在任何情況下都必須遵循該文化紀念物考古與歷史的研究。」，因此，史蹟修復需靠傳統匠師的積極參與方可。在灰漿方面縱然灰漿配比多由匠師們口述流傳下來，說法卻是各家不一，缺乏歷史的考據與科學的佐證，且傳統建築材料灰漿的使用幾近凋零，故灰漿性質之探究在國內乃至國外是相對較稀少的，因此在修復工程中，灰漿的設計依據或施工所使用的材料與其性質及施工方式缺乏相關之規範，工程的進行亦缺乏相關驗收查核的方法，造成灰漿品質難以控管，甚至失去其修復的真諦，令人不勝惋惜。故本研究欲針對修復工程所應當使用之灰漿配比與灰漿材料的性質來加以研究。

## 1-2 研究流程與目的

本研究之試驗分為兩階段，第一階段中，設計配比Ⅰ為石灰、黏土、安平砂、牡蠣殼、糖漿與糯米漿之混合，藉由與古蹟灰漿相仿之材料製作配比已知的試體來進行定量化成分分析，期能從中試驗出可行於分析灰漿配比的方法。且為能瞭解灰漿穩定狀態時的性質，初步將石灰單獨添加黏土、里港砂、牡蠣殼製作設計配比Ⅱ之試體，以進行力學及物理性質試驗，嘗試從中探討各別材料的性質。

在第二階段試驗中，則藉由第一階段之定量化成分分析結果建立一套分析灰漿配比的標準方法，以此法探知古蹟灰漿之配比，分析之古灰

漿為熱蘭遮城南殘牆、臺灣府城垣小東門段、鳳山縣城東便門段、恆春縣城北門段城垣，期能將此套灰漿之配比分析方法提供相關古蹟灰漿研究及修復工程之應用，使修復作業能依照原始配比與使用相近之材料來完整重現其原貌；並作為相關工程檢驗查核之用，以管控修復品質並達成真實維護文化資產保存之目的。此外，延續第一階段設計配比II之性質試驗，製作設計配比III之試體，將石灰、黏土、里港砂、牡蠣殼等多種材料一併混合，期能從試驗結果來討論多種材料混合後的整體抗壓強度性質。本研究之研究流程圖如下圖 1-1 所示。

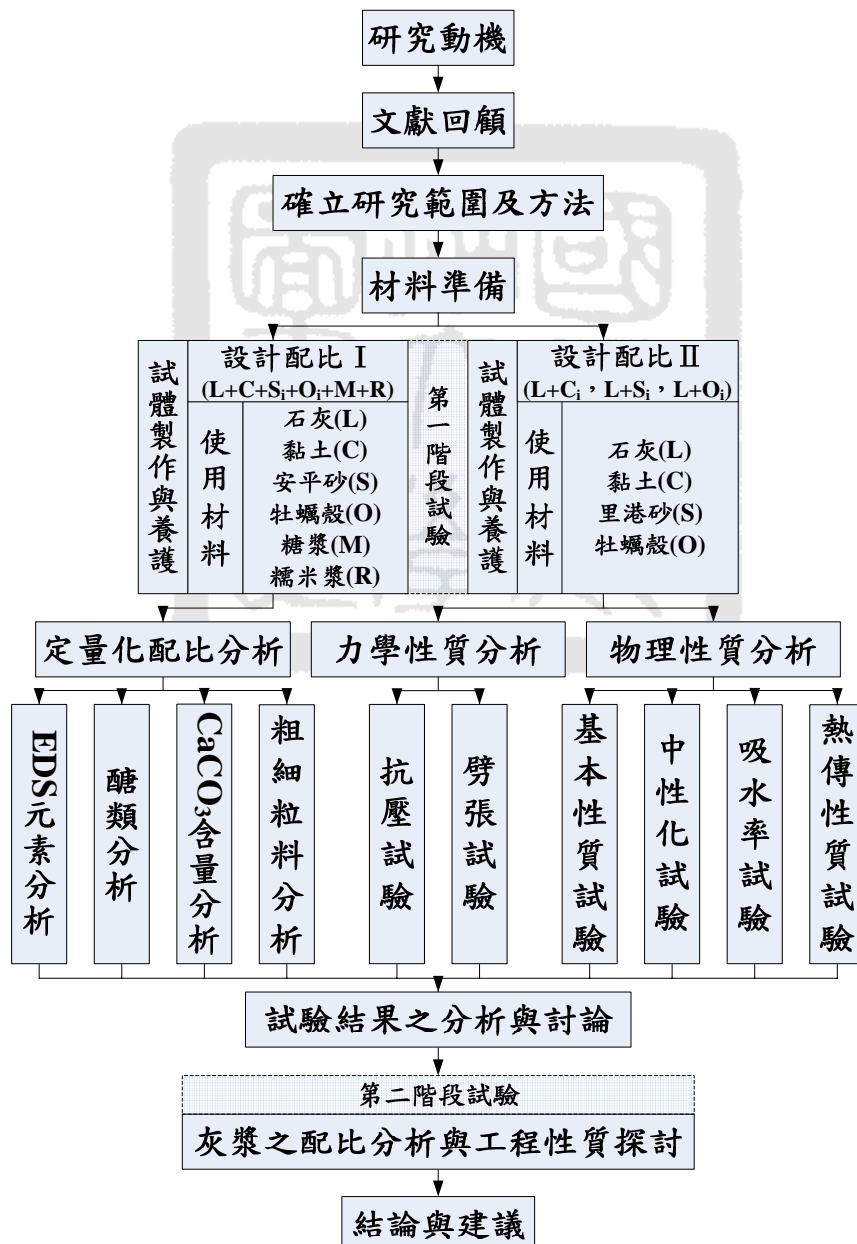


圖 1-1 本研究之研究流程



## 第二章 文獻回顧

### 2-1 古蹟灰漿修復之真諦

我國自 1982 年公佈文化資產保存法，將古蹟列為文化資產，然而，近年來『真實性』的議題逐漸被提出，質疑當前在文化資產保存上的真實性 (authenticity)。在臺灣，古蹟之修復常偏離世界文化遺產修復的精神，常以修復者之臆測或自以為是的習慣工法進行，造成不少古蹟在修復後偏離『真實性』，甚至形成破壞古蹟的行為。國外的古蹟或世界文化遺產中有為數眾多的『不完整』古蹟，即是因為依真實性之真諦來看待，『不完整的原物』遠比修復過『完整的非原物』更具有其真實性，因此，國外的相關學者並不鼓勵只求完整但忽略真實性的古蹟整修(傅朝卿，2001)。

《威尼斯憲章，1964》在第九條文中明確指出，「修復的過程乃是一項高度專門性的工作，其目的在保存和顯現該文化紀念物的美學和歷史價值，而且必須以尊重原始材料和真實的史料遺物為基礎。任何的臆測發生時修復應該馬上停止，如果不可避免的要有添加之作，其必須與原有建築構成有所區別，而且一定要烙印上當代的痕跡。在任何的情況下修復的進行都必須遵循該文化紀念物考古與歷史的研究。」，從該條文中揭示，復原一定要有充定的證據，不可以臆測，尊重歷代正確的原料，而且復原的部份，一定要能夠與原物區別。著名的世界遺產中，不完整的古蹟數量很多，如羅馬競技場與雅典帕特嫩神廟是殘跡，義大利及希臘政府當局並不是沒有能力將它們復原成完整的形貌，而是他們認為缺乏直接的原始證據就不該去復原(傅朝卿，2002)。

我國古蹟建築所用之灰漿，其使用之材料與配比多由匠師口述流傳下來，缺乏歷史的考據與科學的佐證，加以傳統匠師日漸凋零，年輕的泥水匠又習於波特蘭水泥的使用，或不瞭解、不信任傳統灰漿之性質，而在修復古蹟時大量的使用水泥，誠以失去古蹟修復之真諦。

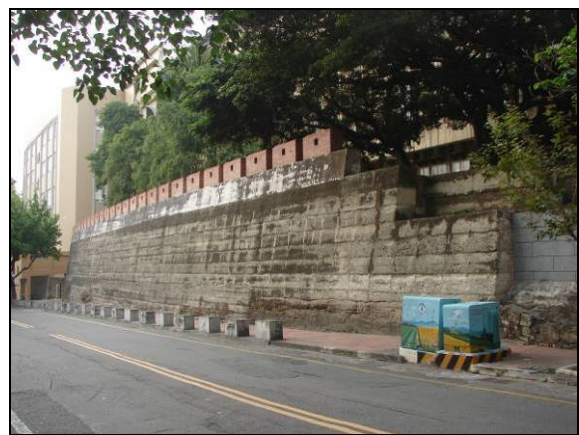
此外，國際文化紀念物及歷史場所委員會（International Council on Monuments and Sites，簡稱 ICOMOS）英國負責人 B.M. Feildend 曾列舉八點不宜採用水泥維修古建築之原因(陳志華；1986)：

1. 水泥是不可逆的材料，一但使用之後再想除去將會損及古建築的原有材料。
2. 水泥強度大，附著力過強，與古建築的弱性材料無法匹配。
3. 水泥硬固後缺乏變形性，使用於古建築後，易造成應力集中而導致相鄰的古蹟灰漿更易損毀。
4. 水泥透水率低，阻礙古建築牆體水分蒸發，使原有牆體容易因潮濕而受損。
5. 在凝固過程中，水泥會收縮，產生裂隙，使水分更易滲入牆體。
6. 水泥成分中的鹽類會因水解析出，破壞多孔性材料與有價值的裝飾。
7. 水泥導熱性高，當用來灌注牆縫時會形成冷橋(cold bridge)。
8. 水泥灰冷色澤難與傳統材料並列。

因此，若要從事古蹟修復的動作就必須使用古蹟灰漿最初所使用的物料及配比，才不會失去其原有的歷史背景與時代意義，且亦應避免使用水泥，以防止造成的二次破壞。照片 2-1 為熱蘭遮城南殘牆一景，照片 2-2 為臺灣府城南門段版築灰土城垣使用混凝土修復後的情景，兩者相比較，著實令人不敢想像若以水泥於熱蘭遮城南殘牆上粉刷後的情景。



照片 2-1 熱蘭遮城南殘牆之一景



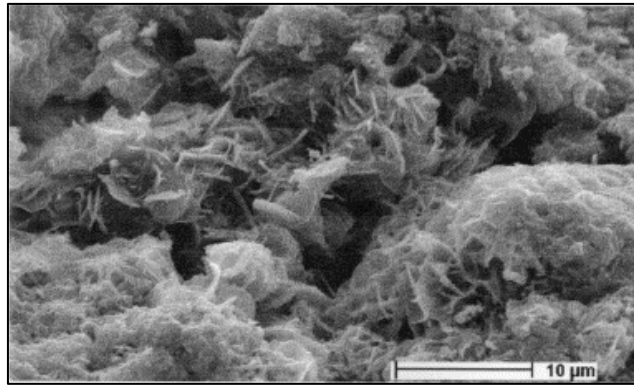
照片 2-2 臺灣府城南門段城垣一景

## 2-2 灰漿材料之發展

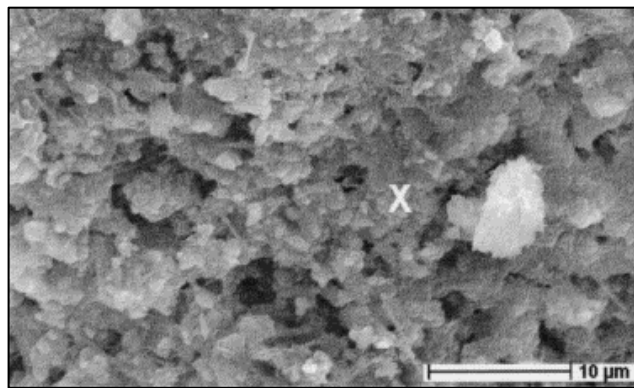
英國人 Joseph Aspdin 在 1824 年，成功調配出最適當的黏土和石灰之煨燒比例，並且取得英國的專利權，主要成分是氧化鈣和氧化矽，也就是矽酸鈣，是一種矽酸鹽。用它製成的混凝土，硬化以後，硬度、外觀和顏色，都跟當時英國波特蘭島上所產的波特蘭石材很相近，所以取名為「波特蘭水泥」(Portland cement)。每 1 公噸的水泥需要 1.4 公噸的石灰石、300 公斤的黏土和 60 公斤的矽砂，在我國，這些原料大半來自東部的海岸山脈(行政院國家科學委員會網頁)。

波特蘭水泥(Portland Cement)的發明是人類長期在建築技術與工程經驗中不斷累積的結果，是從古代膠結材料的基礎上發展起來，歷經了一個漫長的歷史過程。在波特蘭水泥出現前的數千年歲月中，在亞洲與西方世界皆使用石灰及黏土作為建築用的膠結材料。古埃及人最初使用尼羅河的泥漿來砌築未經煨燒的土磚，並在泥漿中添加砂子、草以增加強度及減少乾縮量，在西元前 3000 年到西元前 2000 年間，開始使用煨燒石膏作為膠結材料，直至埃及併入羅馬帝國版圖之前(BC 30)，古埃及人都是使用煨燒石膏來砌築建築物。西元前 146 年，羅馬帝國吞併希臘，同時繼承了希臘人生產和使用石灰的傳統。古羅馬人對石灰使用工藝進行過改進，在石灰中不僅摻合砂子，還將磨成細粉的火山灰摻入，在沒有火山灰的地區，則摻入與火山灰具有同樣效果的碎磚粉末，後人將此稱為「羅馬灰漿」。羅馬人製造灰漿的知識傳播較廣，「羅馬灰漿」在歐洲建築史上一直延續應用了很長的時間。不論是在今日的英國、法國或義大利等許多歐洲國家，仍有古羅馬建築非常堅固的屹立到現在。

透過掃描式電子顯微鏡(Scanning Electron Microscopy)的微觀，可清楚分辨「羅馬灰漿」與石灰漿所形成的膠結體不同，照片 2-3 為石灰摻合火山灰所形成的薄片狀碳酸鹽類膠體，照片 2-4 為純石灰的膠結體(Philippe , et al. 2000)。



照片 2-3 「羅馬灰漿」之膠結晶體的影像



照片 2-4 石灰漿之膠結晶體的影像

至今在中國所發現最早使用於建築的膠結材料，是出現在西元前 5000 年到西元前 3000 年的仰紹文化時期，將姜石(含二氧化矽較高的石灰石塊)磨粉後塗抹山洞、地穴的地面及四壁，因面呈白色而得名「白灰面」，到了西元前 16 世紀的殷商，木造建築取代地穴建築，除繼續用「白灰面」抹面之外，並開始使用黃泥漿砌土坯牆。西元前 7 世紀，周朝出現以蛤殼燒製石灰的技術，秦漢以來，使用石灰作為膠結材料已成為中國磚砌建築的主體(世界建築建材總網網頁)。在石灰的使用上，有別於「羅馬灰漿」，古代中國人將石灰拌合有機物(如糯米、桐油等)，還將比例不等的石灰與土夯作為灰土，或混合細砂。

荷治時期(AD 1624-1662) 我國開始引入磚砌建築，石灰即大量作為黏結材、承重材與隔間材之使用。迄今，熱蘭遮城、臺灣府城與恆春縣城等我國重要的史蹟建物，仍然有殘蹟屹立於原址，著實可見古灰漿之耐久性。

## 2-3 灰漿材料之性質與作用

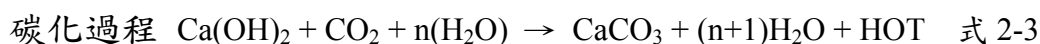
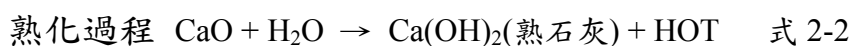
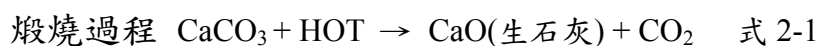
我國傳統灰漿中常見石灰、黏土、砂、牡蠣殼、紅磚碎屑、糖漿與糯米漿等材料，種類繁多，各有其作用與功能性，有些材料也兼具多種功用。本文將國內、外常見之灰漿材料依其作用整理成表 2-1，並將相關之材料文獻資料整理如下文：

表 2-1 國內外常見之灰漿材料與其功用(李泓銘，2005)

功用	傳統灰漿之材料
黏結材料	石灰、蠣殼灰、青灰、黏土、糖汁、糯米汁
骨材	砂、紅土、牡蠣殼、紅磚碎屑、貝殼
纖維物質	麥稈、麻絨、穀殼
染色材料	紅土、黃土、炭渣、燈黑、動物血
防水材料	桐油、明礬
減水緩凝材	糖
其它材料	米醋、鹽

### 1. 石灰(Lime)

燒製石灰的原料，以往來源主要為富含碳酸鈣之石灰岩、大理岩，或生物中含碳酸鈣之硬組織，如牡蠣殼、珊瑚礁，近年來亦有使用含碳酸鈣之化工副產品，如製備乙炔時產生的電石渣，依取得之便利性而選用不同型態的原料。從燒製、應用、及其強度生成之過程，係為高溫煅燒碳酸鈣(CaCO<sub>3</sub>)原料，使其排除二氧化碳(CO<sub>2</sub>)氣體後，得生石灰(CaO)。生石灰藉由少量的水熟化產生熟石灰(Ca(OH)<sub>2</sub>)，而熟石灰吸收二氧化碳並釋放水分子(H<sub>2</sub>O)形成碳酸鈣的膠結晶體。其化學反應如下：



其膠結原理如下述：

- (1) 結晶過程：灰漿在逐漸乾燥的過程中，會形成氫氧化鈣結晶，此結晶易微溶解於水，為物理變化過程。
- (2) 碳化過程：氫氧化鈣與二氧化碳結合成碳酸鈣，不溶於水的碳酸鈣因水分的蒸發而形成結晶，為化學變化與物理變化過程。

氫氧化鈣結晶易於水解，因此，石灰係依賴碳化作用而形成穩定的膠結體，這個過程實際上是二氧化碳與水結成碳酸，再與氫氧化鈣作用產生碳酸鈣，因此，如果沒有水分子是無法進行碳化反應，而碳化反應後生成物的固相體積比反應物的固相體積大，一莫爾的氫氧化鈣與二氧化碳發生化學反應生成碳酸鈣，固相體積增加  $3.58 \times 10^{-6} \text{m}^3$ ，當生成物的體積較反應物增加時，增加的體積會向孔隙內部增生(張建智等人，2000)，所以碳化作用使灰漿結構更為緻密。碳化作用從灰漿表面開始而逐漸往內部深入，然而表面經碳化後，會形成較緊密的外殼而延緩內部的結晶與碳化作用，且空氣中二氧化碳的含量極低，故灰漿從結晶的強度發展到碳化的強度是需要經年累月的。

中性化試驗機可使小型試體在短時間內完全碳化，然而，要將其應用在大規模的現地是困難的，要加速灰漿早期之碳化速率使強度提增，或許可從石灰的拌合過程中著手。若水中存有適量的酸根，如  $(\text{CO}_3)^{-2}$ 、 $\text{Cl}^{-1}$  或  $(\text{SO}_4)^{-2}$ ，則有助於日後之凝結硬化(李欣益，1999)。此外，根據趙國華教授之研究團隊指出，在生石灰粉末中混合適當之無水碳酸鈉之化學物質，則有助於強度之提高與壓縮性之改善，其化學反應如式2-4。



## 2. 黏土(Clay)

黏土在灰漿中可兼俱黏結與填充的功用。石灰與黏土拌合夯築，並非僅是簡單的壓實作用，而是灰土發生化學變化(薛琴，1996)，屬於氣硬性膠凝材料的石灰，與黏土等依照比例配製而成的灰土，經適量的水充

分拌合後，透過碾壓或夯實，在潮濕環境中石灰與黏土表面的活性氧化矽或氧化鋁反應，生成具有水硬性的水化矽酸鈣或水化鋁酸鈣膠體(張德思，2002)，此膠體促使土壤顆粒間產生膠結作用，顆粒間更形緊密與固化，其膠結強度與凝聚力因而增加，此反應一般稱為普作蘭反應，此外，不論是矽酸鈣水化合物或鋁酸鈣水化合物膠體，一旦形成膠結物質，則不會因土壤中的水分子產生變化而破壞或溶解於水中(Vanimpe,1989)。灰土或三合土的強度和耐水性會隨這些膠體生成而逐漸提高，因而即便是在潮濕的環境中亦能適用，如在基礎底層、道路路基或改良地盤等。

《中國古代建築技術史》一書中指出，石灰與黏土最常使用之灰土夯築配比以4:6或是3:7為多，然而中國古代建築工匠從試驗中證明，即使在灰土比2:8或1:9仍具有同樣優良的性能。整個灰土夯築的過程中，對含水量之控管要求至為嚴謹。

### 3. 骨材(Aggregate)

灰漿中常以砂、牡蠣殼、紅磚碎屑等填充作為骨材。砂的添加有助於提升早期強度，經過河流沖刷堆積於溪邊、河畔的砂為佳，淡水及海水交界處的砂因含鹽量較高，如未經過長時間以雨水或淡水沖洗之則不可用(莊敏信，2003)，粒徑較大的砂為堅實穩定的矽鋁礦物，幾乎無化學反應之發生，若顆粒比例良好，可以大幅提升灰漿之強度，有助於工作性與節省工程費(馮佳福，2003)。片狀的牡蠣殼常見於濱海地區之傳統建築灰漿中，為就地取材將牡蠣殼敲碎後作為骨材用，屬於輕質的骨材，可提供機械性的抗剪強度，並有助於減低乾縮量及避免脆性破壞，然而其本身強度不高，當膠結材強度較高時，添加牡蠣殼會造成整體強度的降低，基於力學性質之考量其添加量不宜過多(李泓銘，2005)。砌石用的摻灰泥，為了在灰泥硬結前確保砌築之石塊不會變位，往往摻入小石片(薛琴，1996)。



#### 4. 糯米漿(Glutinous Rice Paste)

有別於西方國家的灰漿，中國自古即使用糯米漿、糖漿等碳水化合物液體拌合石灰作為黏結材，醴類與石灰結合之後產生化學變化，有些極重要的變化甚至改變了灰漿結構。

糯米的主要成分是澱粉，澱粉的分子連接成直線狀的，稱直鏈澱粉(amylose)；連接成分支狀的，稱支鏈澱粉(amylopectin)。圖 2-1 所示為直鏈澱粉分子鏈，其含量多，則米質鬆散不黏。圖 2-2 所示為支鏈澱粉分子鏈，其含量越高，米質越富黏性；此外，支鏈澱粉如網狀般交織密結，在每個分支點上由  $\alpha$ -1,6 甘鍵所鍵結，其鍵結力較由  $\alpha$ -1,4 甘鍵所鍵結的直鏈澱粉難分離，如圖 2-3 所示。糯米的支鏈澱粉含量高達 99 % 直至 100 %，所以米質最黏，通常把秈糯和粳糯合稱糯米，非糯的秈和非糯的粳簡稱秈或粳。秈糯和粳糯外形的區別是，秈糯的米粒細長，粳糯的米粒短圓(中國食品產業網)，臺灣傳統建築所使用的糯米漿，則以短糯米做為原料烹煮而成(王新衡，2003)。

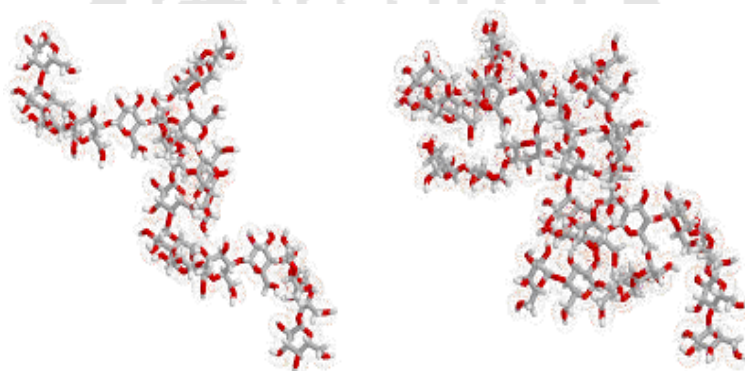


圖 2-1 直鏈澱粉分子鏈      圖 2-2 支鏈澱粉分子鏈

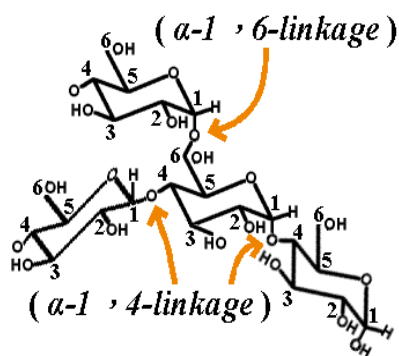


圖 2-3 支鏈澱粉鍵結分子之形狀



古代中國人可能從米食的製作中發現糯米(支鏈澱粉)製品具有黏度大、高稠度易定型、常溫(65°C)下穩定不易變質、乾燥硬化後緊縮難以切割等特性，因而常以糯米漿作為黏結劑，如書法和繪畫之裱糊、門窗用的紙張糊、黏合布鞋或衣料等，其中最重要的應用是在建築材料上，以糯米漿拌合石灰作為砌體建築之黏結材。糯米引入建築材料最早的傳說是在秦代修建長城的工程中，在漢代以後出土的歷代古墓之砌體建築遺蹟中也發現糯米漿的應用(洪煌凱，2003)。

呂忠所著《明朝小史》記述明代南京城建造時「築京城，用石灰秫粥(秫即糯)錮其外，上(明太祖朱元璋)時出閱視，監掌者以丈尺分治。上任意指一處擊視，皆純白色。或稍雜泥壤，即築工者于垣中，斯(金陵城)金湯之固也。」，規定之嚴格不允許絲毫石灰及糯米漿以外的材料夾雜其中，可見古代人可能認為以石灰摻合糯米漿是灰漿中最具黏結力的配合，殘存的明代南京城牆是中國乃至世界上保存至今最大的一座古代城垣，其城牆頂的步道上還有後人所立碑鐫刻的「漿固明城」四字，用以顯示糯米漿對於明代南京城牆構築的重要性。我國也有許多傳統砌體建築使用糯米漿，如臺灣縣誌(1807)記載「臺灣城，在安平鎮一鯤身，沙磧孤浮海上。……大抵比城磚砌，層疊悉以糖水糯汁搗灰傅之，堅不可劈。」。

近代模具鑄造工業，常使用糊化澱粉( $\alpha$ 澱粉)、黏土、水玻璃等原料製成接著劑，用以黏結鑄造用砂(圖 2-4)，使之成為鑄造砂型(古稱陶範)，周霞等人(2006)對於糊化澱粉複合黏結劑在濕潤狀態時的黏結硬化機理之研究結果，認為在常溫時，溶脹的糊化澱粉膠粒之周圍均勻地分佈著水玻璃和糊精反應所生成的快乾性糊狀物，而黏土粒子則以氫鍵吸附一層糊化澱粉膠，同時部分又與水玻璃發生離子交換反應，從而均勻分散在黏結膜中，強化了黏結劑，形成了非均勻多相複合結構。正是此複合結構使得該黏結劑在潮濕時具有足夠強度，又能不斷增加耐久強度，從而具有自硬特性。在建築材料中，糯米漿的長期反應，可不斷的填封裂

縫，提高混凝土的耐久性(黃兆龍，2003)。使用糊化澱粉摻入水泥漿內，可使其黏結度有很大的提高，可用於建築的混凝土澆築，牆面、地面瓷磚粘貼以及各種水池、浴缸邊的防水黏結，石膏裝飾材料的黏結劑。

從以上文獻資料可知，糯米漿中因富含支鏈澱粉分子，故黏結力強，且最大特性是處於潮濕狀態下其離子能不斷反應增生(自修復性)，因而提高耐久性。

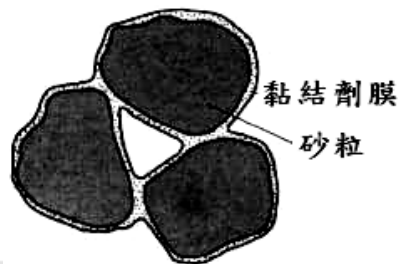
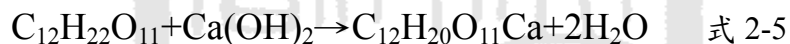


圖 2-4 鑄造用型砂之黏結作用

## 5. 糖漿(Molasses)

王龍盛(2003)指出糖灰漿是以糖之結晶能力與石灰混合後形成「蔗糖鈣  $C_{12}H_{20}O_{11}Ca$ 」而產生強度，其簡化之化學反應式如下：



而張芸理與卞葆芝(1998)敘述糖蜜減水劑是利用製糖過程中提煉食糖後剩下的殘液(稱為糖蜜)，經過石灰中和處理調製而成的一種粉狀或液體狀產品。

糖蜜減水劑的製備方法一般是將比重 1.3~1.6 的黏稠糖蜜用熱水稀釋至比重 1.2，再將磨細的石灰粉按稀釋後糖水重量的 12~16% 摻入，石灰粉必須少量徐徐加入，並用木棒連續攪拌，直至石灰均勻分佈於糖蜜中。化製後存放一星期左右即可使用。也有直接以蔗糖為原料及以澱粉經酸解來製造的。

糖蜜的主要成分是轉化糖、蔗糖及一些雜質。經石灰處理後，生成己糖鈣、蔗糖鈣、殘留一部份蔗糖。己糖鈣、蔗糖鈣及蔗糖均含有一些活性基團，是親水性表面活性物質(王龍盛，2003)。

在灰漿中加入適量糖漿可增加強度、延長初凝時間、提早終凝時間，且具有吸水率低、耐酸性高之特性(王龍盛，2003)。在電子顯微鏡下，其表面結構具有光滑、平整的特性(洪煌凱，2003)。但過量時造成乾縮龜裂、變形、潮濕時潮解的負面效應。在混凝土之相關研究中，亦指出添加過量之減水劑將會造成混凝土表面形成水泥沫。

馮佳福(2003)指出 0.02 的糖漿用量為匠師慣用配比，而王龍盛之研究中，石灰與糖之最佳重量比約為 1:0.04 至 1:0.067 之間，且以白糖或二砂取代黑糖，可提高強度。但王新衡(2003)認為以紅糖取代黑糖後，其黏結力與抗壓強度較黑糖低。

## 6. 纖維材料

穀殼(稻殼)、稻草段及麻絨皆為纖維材料，稻殼及稻草段多用於土角磚或竹篾土牆的打底，即黏土用量較多而易乾裂之材料中，以避免乾燥後形成大的龜裂。未裁切的長草在古城牆中亦有作為加勁材者，其工法如現今之加勁土牆(薛琴，1996)。而麻絨則用於壁面白灰粉光須較細緻之纖維者。

### 2-4 灰作之施工與灰漿配比

《營造法式》為中國現存最早、內容最豐富之建築學著作，書中將建築之各種工種稱為「作」。灰作之施工主要可分為抹灰、砌築、苫背、灰土夯築等項目(薛琴，1996)。周志明(2002)、王新衡(2003)等人訪談邱天祥、吳助雄與林益年等匠師後，將我國傳統砌體建築中，灰縫常用之配比整理如表 2-2 所示。灰漿的種類繁多，依其用途與功能的不同，匠師會選用不同配比的灰漿，因此，中國自古即流傳九漿十八灰的說法。關於灰漿之配比、製作及其用途，洪煌凱(2003)整理張海清(1984)、劉大可(1985)、程萬里(1990)、杜仙洲(1984)等人所提出之各種灰漿配比與用途，如表 2-3 所示。以下將各種灰作的使用分段敘述。

表 2-2 臺灣傳統砌體建築灰縫之重量配比(王新衡，2003)

	三合土 A	三合土 B	石灰膠泥	灰泥	麻絨白灰	硃砂石灰	桐油灰
石灰	1	6	1	1	10	-	1
黏土	3	0.5	-	3	-	1	1.5~2
砂	-	-	2.5~3	-	-	-	-
牡蠣殼	1~2	-	-	0.5	-	2	-
糖漿	0.4~0.5	0.3	-	0.2~0.3	-	-	-
糯米漿	1~1.5	1	-	-	-	-	-
稻殼	-	-	-	1	-	-	-
海菜	少許	-	-	少許	-	-	-
麻絨	-	-	-	-	6塊	-	-
桐油	-	-	-	-	-	-	0.5~0.6
窯灰	-	-	-	-	-	-	0.5

1. 抹灰：牆體表面層之抹灰，必須先徹底淋濕牆面，此舉之目的在於避免因牆體吸水而使新墁之灰漿迅速脫水乾裂，亦有助於灰漿之附著。牆面若缺損不平須先補平，在第一層打底時應以著平壁面為主，不宜抹光，如仍有不平或裂隙，可再做一度。待底材七成乾後，即可加上罩面材，若底材已乾燥或於舊牆上重新罩面，應在牆上剝出小孔，後充份澆水再行罩面抹光。古代建築的白牆多在石灰漿上罩以礬水溶液，使其保持長年潔白和穩定。
2. 砌築：一般砌體建築用的灰漿要求黏性大，故常添加糯米漿、糖漿或膠質等，目的在於增加其黏結力。
3. 苫背：屋(瓦)頂苫背之主要目的在於防水。此外，苫背所增加的重量，更能避面屋頂因強風吹襲而掀起，亦可使整修屋頂的曲線美。木構架遭到雨水侵襲會造成木料的腐朽，因此，傳統建築物之灰背至少要分兩次苫成，且密實抹平，進而達到良好的防水效果。
4. 灰土夯築：夯築灰土的工程，如基礎、地坪或牆體等。由石灰拌合大量的黏土作為灰土，亦有添加細砂於其中者。灰土之性質主要取決於夯築的操作技術，對於灰土的含水率之嚴格控制，拌合良好的灰土要能「握緊成團，落地散開」。

表 2-3 古蹟灰漿材料配合比與製作方法表（洪煌凱整理，2003）

名稱	主要用途	配合比及製作要點	說明	文獻出處
潑灰	製作灰漿的原材料	生石灰用水反覆均勻地潑灑成為粉狀後過篩	15 天後才能使用，半年後不宜用於抹灰	劉大可[40]
潑漿灰〔壓漿灰〕	製作灰漿的原材料	潑灰過細篩後分層用青漿潑灑，悶至 15 天以後即可使用。白灰〔生石灰〕：青灰=100：3〔重量比〕	超過半年後不宜使用	劉大可[40]
煮漿灰〔灰膏〕	製作灰漿的原料。室內抹白灰	生石灰加水攪成漿狀，過細篩後發漲而成	超過 5 天後才能使用	劉大可[40]
麻刀灰	抹靠骨灰〔附註 1〕及泥底灰的面層	各種灰漿調勻後摻入麻刀〔附註 2〕攪勻。用於靠骨灰時，灰：麻刀=100：4。用於面層時，灰：麻刀=100：3〔重量比〕	是各種麻刀灰漿的統稱	劉大可[40]
		用壓漿灰或月白灰與麻刀拌合均勻得之。	由於所加灰漿原料不同，可製成多種麻刀灰。根據麻刀長短與麻刀用量不同，又分有大麻刀灰與小麻刀灰。	張海清[24]
夾隴灰	屋面工程中筒瓦〔附註 3〕的夾蟹及合瓦的夾腮〔附註 4〕	潑漿灰〔或潑灰加其他顏色〕加煮漿灰〔3：7〕加麻刀〔100：3 重量比〕加水調勻而成		杜仙洲[8]
裹隴灰	打底抹面	打底：潑漿灰加麻刀〔100：3~5 重量比〕；抹面：煮漿灰摻顏色加麻刀〔100：3~5 重量比〕加水調勻而成		杜仙洲[8]
素灰		為各種不摻麻刀的煮漿灰〔灰膏〕或潑灰		杜仙洲[8]

表 2-3(續)

名稱	主要用途	配合比及製作要點	說明	文獻出處
色灰		各種灰加顏色而成。常用顏色有青漿、煙子〔附註 5〕、紅土與霞土粉等		杜仙洲[8]
青灰	常與潑灰或煮漿灰按一定比例調配使用	將青灰塊〔要求青灰中含石量不大於 5%〕投入加水的灰鍋〔少量的可大桶〕，以灰鎬攪動可得到青漿，漿成黑色。需過篩清理石塊。	青灰是北京西郊山區一種礦物膠結材料，呈黑色塊狀，浸水攪拌後能出黏膩的膠液，與石灰拌合可使灰漿具有一定的防水性能並增加強度	張海清[24]
花灰	抹面不易濕的部位	比潑漿灰水分少的素灰。青漿與潑灰可以不調勻。		杜仙洲[8]
月白灰	室外抹青灰或月白灰	潑漿灰加水或和青漿調勻，根據需要，摻入適量麻刀	月白灰分淺月白灰和深月白灰	劉大可[40]
		先將青灰漿入池，再將生石灰塊入池煮漿所得。青灰漿：白灰漿=3：7		張海清[24]
葡萄灰	抹飾紅灰	潑灰加水後加霞土〔二紅土〕，再加麻刀。 白灰〔生石灰〕：霞土=1：1， 灰：麻刀=100：3~4〔重量比〕	現代多將霞土改為氧化鐵紅。白灰：氧化鐵紅=100：3	劉大可[40]
	抹灰工程的打底	潑灰用大眼篩子篩過		杜仙洲[8]
黃灰	抹飾黃灰	室外用潑灰，室內用灰膏，加水後加包金土色〔深米黃色〕，再加麻刀。 白灰〔生石灰〕：包金土：麻刀=100：5：4〔重量比〕	如無包金土色，可改用土黃色，用量減半	劉大可[40]

表 2-3(續)

名稱	主要用途	配合比及製作要點	說明	文獻出處
紙筋灰	室內抹灰的面層	草紙用水悶成紙漿，放入灰膏中攪勻。 灰：紙筋=100：6~5〔重量比〕		劉大可[40]
蒲棒灰	壁畫抹灰的面層	灰膏內摻入蒲絨，調勻。 灰：蒲絨=100：3〔重量比〕	厚度不宜超過二毫米	劉大可[40]
三合灰	抹灰打底	月白灰加適量水泥。根據需要可摻麻刀		劉大可[40]
棉花灰	壁畫抹灰的面層。地方手法的抹灰做法	好灰膏摻入經加工的棉花絨，調勻。灰：棉花=100：3〔重量比〕	厚度不宜超過2毫米	劉大可[40]
毛灰	地方手法的外檐抹灰	潑灰摻入動物鬃毛或人的頭髮〔長度約5厘米〕灰：毛=100：3〔重量比〕		劉大可[40]
老漿灰	砌築工程	將青灰漿加入生石灰塊攪成稀粥狀過篩所得。青灰：生石灰=5：5	青白灰青應攪拌均勻，以免老漿灰內出現白點	張海清[24]
		青灰加水攪勻再加生石灰塊，攪成稀粥狀過篩發漲而成。青灰：生石灰=7：3		杜仙洲[40]
油灰	細墁〔附註6〕地面，磚棱掛灰，石活〔附註7〕勾縫，防水捻縫	細白灰粉、面粉、煙子〔用膠水〔附註8〕攪成膏狀〕加桐油攪勻；白灰：面粉：煙子：桐油=1：2：0.5-1：2-3。灰內可兌入少量白礬〔附註9〕水。	可用青灰面代替煙子，用量可根據顏色定	程萬里[20]
		面粉加細白灰粉〔過絹羅〔附註10〕〕加煙子〔用熔化的膠水攪成膏狀〕加桐油〔1：4：0.5：6重量比〕攪拌均勻而成。		杜仙洲[8]

接下頁

表 2-3(續)

名稱	主要用途	配合比及製作要點	說明	文獻出處
麻刀油灰	黏結石頭	用生桐油潑生灰塊，過篩後加麻刀〔100：5 重量比〕加適量面粉加水用重物反復錘砸而成。		杜仙洲[8]
磚面灰 〔磚藥〕	磚活打點	用磚面與白灰膏按 1：1 的重量比例均勻混合，亦可加適量青漿調勻。	磚面即是將磚塊碾磨成粉末過篩所得	張海清[24]
		磚面四份，白灰膏一份加水調勻。或七份灰膏三份磚面加少許青灰加水調勻。		杜仙洲[8]
生石灰漿	內牆白灰牆面刷漿	生石灰塊加水攪成漿狀，經細篩過淋後摻入膠類物質。		劉大可[40]
熟石灰漿	內牆白灰牆面刷漿	潑灰加水攪成稠漿狀，過篩後摻入膠類物質		劉大可[40]
青漿	青灰牆面刷漿	青灰加水攪成漿狀後過細篩〔網眼寬不超過 2 厘米〕	使用中，補充水兩次上時，應補充青灰	劉大可[40]
紅土漿 〔紅漿〕	抹飾紅灰時的趕軋刷漿	紅土兌水攪成漿狀後，兌入江米汁和白礬水，過篩後使用 紅土：江米：白礬=100：7.5：5〔重量比〕	現在常用氧化鐵紅兌水再加膠類物質	劉大可[40]
包金土漿 〔土黃漿〕	抹飾黃灰時的趕軋刷漿	土黃兌水攪成漿狀後，兌入江米汁和白礬水，過篩後使用 土黃：江米：白礬=100：7.5：5〔重量比〕	現在常用地板黃兌生石灰水〔或大白溶液〕，再加膠類物質	劉大可[40]
烟子漿	抹灰描縫做法時刷漿	黑烟子用膠水攪成膏狀，再加入攪成漿狀	可摻適量青漿	劉大可[40]
磚面水	牆面刷飾	以磚面：白灰膏=7：3 的比例用水均勻調和成漿。		張海清[24]



表 2-3(續)

名稱	主要用途	配合比及製作要點	說明	文獻出處
桃花漿	牆體灌漿墁尺四 以下方磚座漿用	用白灰黃土摻和加水調製成，白灰：黃土 =3：7 或 4：6，漿成淡黃色。		張海清[24]
		潑灰加好黏土即“膠泥”〔6:4 重量比〕 加水調成漿狀		杜仙洲[8]
	小式磚、石砌體灌 漿	白灰漿加黏土漿。白灰：黏土=3：7 或 4： 6〔體積比〕	黏土需要質量上乘 者	程萬里[20]
摻灰泥 〔插灰 泥〕	泥底灰打底	潑灰與黃土拌勻後加水，或生石灰加水， 取漿與黃土拌合，悶 8 小時後即可使用。好 灰〔熟石灰〕：黃土=3：7 或 4：6 或 5： 5〔體積比〕	土質以亞黏性土較 好	劉大可[40]
	牆身砌牆	石灰：黃土=3：7 或 4：6〔體積比〕		張海清[24]
滑稽泥	抹飾牆面。泥底灰 打底	與摻灰泥製作方法相同，但應摻入滑稽 〔麥桿〕。滑稽應經石灰水燒軟後再與泥 拌勻。滑稽使用前宜剪短砸劈。灰〔熟石 灰〕：滑稽=100：20〔體積比〕		劉大可[40]
麻刀泥	壁畫抹灰的面層	沙黃土過細篩，加水調勻後加入麻刀。沙 黃土：白灰〔生石灰〕=6：4，白灰：麻 刀=100：6~5〔重量比〕		劉大可[40]
棉花泥	壁面抹飾的面層	好黏土過篩，摻入適量細砂，加水調勻 後，加入經加工後的棉花絨。土：棉花 =100：3〔重量比〕	厚度不宜超過 2 毫 米	劉大可[40]

附註：〔中國傳統建築術語辭典，2003〕

1. 靠骨灰：又叫刮骨灰或刻骨灰，即在牆面上直接抹麻刀灰，最好能抹三層。靠骨有較薄、緊靠上一道工序克刮之意。

2. 麻刀：麻刀即麻類植物莖葉部分的韌皮纖維。用作泥的骨料，使泥層具有不易龜裂的特性，常用在建築中較高級的壁面。
3. 筒瓦：古建築瓦件的一種。屋面防水構件。
4. 夾腮：古建築合瓦屋面蓋瓦兩側腮部做法。將腮部蓋瓦睜眼處用麻刀灰糙抹一遍找平，再用夾鬚灰細抹謂之夾腮。
5. 煙子：即炭黑油，一種黑色細膩粉末。是有機物質〔如木材等〕在空氣不足的條件下燒製而成的。在古建築油飾彩畫中作黑色顏料使用。
6. 細墁：墁地細作術語，俗稱細地。多用於室內鋪墁。
7. 石活：古建築行業術語。泛指石構件或建築環境中的石製品。
8. 膠水：指某些具有黏性的液劑。用動物的皮、角等熬成或由植物分泌出來，也有人工合成的。
9. 白礬：又名明礬、礬。由礬石煎煉而成，成晶體狀，半透明，光澤似玻璃，性脆，其水溶液帶澀味。
10. 絹籬：用絲織品作籬底的籬。傳統上古建築油漆彩畫中的油料及顏料均以絹籬過濾，現已為銅絲籬代替。

## 2-5 建築物的絕熱與熱探針量測之應用

理想的房屋，應使居住者不因室外的氣溫變化而產生冷熱方面的不舒適感，不管是狂風暴雨，還是酷暑嚴寒。現代建築中，混凝土之熱容量雖然大，但傳熱係數也大；木構造房屋不僅熱容量小，傳熱係數又大，故兩者的傳熱量都比較大，室內氣溫易隨著室外氣溫的變化而劇烈地波動，因此，為穩定室內舒適的溫度環境，達到冬暖夏涼之目的，應考慮對它們採取絕熱措施。此外，房屋的供暖或供冷都要消耗作為能源之石油，因此，絕熱材料的應用對於供暖或供冷之能源節約有很大的作用。熱流的傳遞可分為輻射、對流和導熱三種方式，由於受太陽輻射會產生熱應力，使混凝土壁體遭受損害，因此，設計時應將絕熱材料置於混凝土為主體的房屋之室外側，尤其屋頂之影響更為顯著(山田雅士，1992)。

《建築絕熱學》一書中提及，所謂的絕熱，是指使通過物體的熱流阻抗增大，熱流量減少。同一材料之厚度( $d$ )越大，所形成之導熱熱阻( $R$ )也越大，即熱導( $C$ )因而變小，然而，增大建築材料之厚度往往會受到造價的限制，為此，若要得到相同的熱阻，使用熱傳導係數( $k$ )較小的材料，厚度可以相應減少( $R = \frac{d}{k}$ )；而熱導大的材料，厚度則要相應增大。以混凝土( $k = 1.4 \text{ W/mK}$ )為例，形成  $1.00 \text{ m}^2 \text{ K/W}$  之熱阻，需要 140 公分厚的壁體，而相同結果，以絕熱材料( $k = 0.02 \sim 0.05 \text{ W/mK}$ )僅需 2~5 公分之厚度。

由上述可知，材料的熱傳導係數為建築絕熱的重要指標之一，而熱傳導係數之量測依其原理可分為穩態法(steady state method)以及暫態法(transient state method)兩類。暫態法經長期發展已經成為相當成熟之技術，從最基本的線熱源法、帶狀熱源法，到盤狀熱源法、雷射掃描法等。

本研究採用熱探針法源屬暫態法的一種，由 Schleiermacher 於 1888 年提出，係將熱探針插入試體中，利用提供已知的電壓與熱探針的電阻，以獲知所提供之熱功率，並在熱源的中心點量測溫度與時間之關係，配合線熱源在無限域溫度隨時間變動的解析解，利用溫度與時間對數座標  $T\text{-}\log(t)$  曲線中直線段的斜率，可求得材料的熱傳導係數。熱探針法可快速完成試驗，在量測過程因熱源溫度所引致的水分遷移現象遠較穩態法小，故相當適用於含有水分之材料，如大地材料(田永銘等，2006)。

熱探針置入試體的方式分為埋入與鑽孔式，埋入是較佳的，然只適用於鬆散、軟弱且未固化的材料；鑽孔式的試體與熱探針間的淨空會形成熱阻，甚至嚴重影響熱流的擴散，ASTM D5334 建議熱探針在插入前須塗抹導熱泥。Krishnaiah et al. 發現即便使用導熱泥，鑽孔式的硬固水泥體之熱阻與直接埋入式相較，平均高估 17%；張家銘(2005)指出石蠟鑽孔會造成熱傳導係數之量測值下降 3~7%，且隨著淨空值的擴大而增加量測值之變異性，因此，縮小淨空與多次重複測定可獲得較準確的量測值，此外，當試體直徑大於熱探針直徑 12.5 倍，邊界的影響可忽略。

### 第三章 試驗內容及方法

本章節針對試驗用之材料、設計配比、試體製作、試驗之儀器與內容等詳加說明。

#### 3-1 試驗材料及其製備

使用材料為石灰、黏土、砂(里港砂與安平砂)、牡蠣殼、糖漿與糯米漿，係為臺灣傳統灰漿之常用的材料，其來源及製備過程敘述如下：

##### 1. 石灰

本研究在石灰的來源上有兩種選擇，其一是台南縣北門鄉農會所燒製之蠣殼灰，其二為關仔嶺所產之特白灰，但因蠣殼灰內含有煅燒不完全之牡蠣殼、蚵灰窯內剝落的紅磚碎屑等雜質，其粗粒料含量佔 43.21%，故選用雜質含量少的特白灰作為本研究之試驗材料。使用前先行過 40 號篩，並以夾鏈袋分裝密封使石灰免於受潮而結塊。表 3-1 所示為本研究之試驗用石灰基本性質。

表 3-1 試驗用石灰之基本性質

原料來源	石灰岩
鹽酸的不溶物 (wt%)	1.06
比重	2.33
乾單位重 ( $\text{gf}/\text{cm}^3$ )	0.72

##### 2. 黏土

取自台南縣大內鄉，南 182 與南 182-1 縣道交叉口西北側山坡地，以 40 號篩過篩而得之黃色黏土(照片 3-1)。其基本性質如表 3-2 所示。



照片 3-1 通過 40 號篩之黏土

表 3-2 試驗用黏土之基本性質

性質	Gs	W <sub>LL</sub> (%)	W <sub>PI</sub> (%)	土壤分類	黏土含量(%)
黃色黏土	2.72	33.52	10.76	CL	30

### 3. 細骨材(安平砂、里港砂、牡蠣殼)

本研究試驗砂為安平砂與里港砂，使用前先行過 10 號篩。牡蠣殼來源為高雄縣湖內鄉之新吉勝商行提供。三者之基本性質如表 3-3 所示，並將其粒徑分布曲線繪於圖 3-1 中。



照片 3-2 安平砂



照片 3-3 通過 10 號篩之里港砂



照片 3-4 牡蠣殼



照片 3-5 高雄縣湖內鄉新吉勝商行

表 3-3 試驗用細骨材之基本性質

性質	安平砂	里港砂	牡蠣殼
Gs	2.52	2.71	2.46
面乾內飽和含水量(%)	2.30	2.60	16.60
濕潤狀態之含水量(%)	5.83	6.05	22.50
單位重(g/cm <sup>3</sup> )	1.54	1.72	0.93
細度模數 F.M.	1.02	1.74	1.86

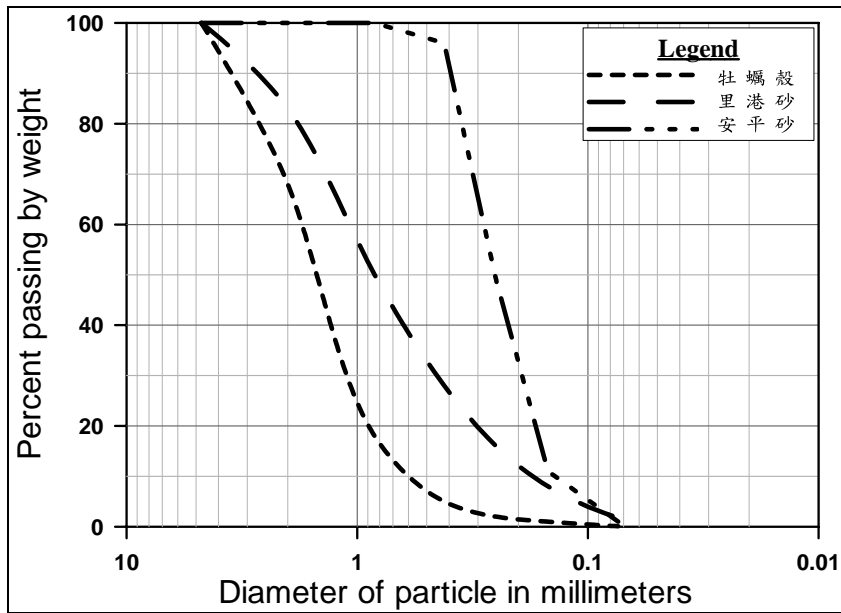


圖 3-1 試驗用細骨材之粒徑分布曲線

#### 4. 糖漿

為台糖公司生產之二號砂白，每包 1000 公克裝售價 30 元。

楊敦凱(2002)在「傳統磚材黏結材料抗拉力學行為之研究」提及室溫之下，糖可以溶解的最大份量為 100 公克的糖水溶液中有 67 公克的糖。因此本研究所用之糖漿中，糖與水的比例為糖：水 = 2：1(重量比)。

糖漿製備法(300 公克糖漿，糖：水 = 2：1 之重量比)

- (1) 將 200 公克糖溶入 130 公克之水中。
- (2) 在加熱器上加溫，加熱至糖完全溶解且總重量 300 公克。若超過 300 公克，則繼續煮沸，直到 300 公克為止。製備完成之糖漿(照片 3-6)即倒入密封罐中，置於室溫保存。

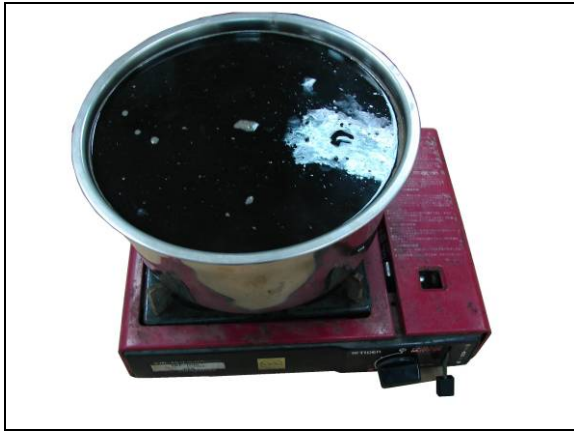
#### 5. 糯米漿

參考洪煌凱(2003)所使用之配比，訂定糯米漿中之糯米：水 = 1：9。本研究採用日正牌水磨糯米粉，每包 400 公克裝售價 40 元。

糯米漿之製備方法 (1000 公克之糯米漿)：

- (1) 將 100 公克糯米粉與 100 公克室溫水攪和成 200 公克的糯米汁。
- (2) 將糯米汁倒入 800 公克之 100°C 以上沸水中快速攪拌，使糯米熟化成純白色的糯米漿(照片 3-7)。





照片 3-6 製備完成之糖漿



照片 3-7 製備完成之糯米漿

### 3-2 設計配比、試體製作與養護條件

本研究採用兩類之設計配比。設計配比 I 是用於建構灰漿之配比分析方法的研究中，所使用的材料為石灰、黏土、安平砂、牡蠣殼、糖漿、糯米漿等六種。設計配比 II 是用於探究灰漿之物理與力學性質，所使用的材料為石灰、黏土、里港砂、牡蠣殼等四種。

由上述可知本研究之試驗用砂有兩種，分別為安平砂與里港砂，兩種材料在製作試體時有其不同的意義，安平砂為建構灰漿之配比方法的試驗砂，係考量熱蘭遮城、臺灣府城等古蹟灰漿樣本中，其作為骨材用之砂，皆為細砂，故以粒徑細小的安平砂作為分析對象。里港砂為探討灰漿之性質的試驗砂，係考量骨材之力學性質，故以粒徑大且級配較優良的里港砂作為試驗對象。

#### 3-2-1 試體之配比設計

各材料代號如表 3-4 所示，設計配比如表 3-5 及表 3-6 所示，皆採用重量百分比，如採用體積比將於文中特別註明，例如  $L_{1.0}C_{0.2}$  係代表石灰：黏土 = 1 : 0.2 之重量比。設計配比 I，其試體中的砂為安平砂、黏土為黃色黏土，使用相似於古蹟灰漿之材料，以製作配比已知的試樣，期能透過對這些試樣進行試驗，進而建構適用於分析古蹟灰漿之配比的方法。設計配比 II，主要為探討石灰單獨添加黏土、里港砂、牡蠣殼間之作用關係，包含力學、熱傳性質、吸水率與潮濕氣體滲透等，故除純石灰漿與純黏土外，其於配比皆僅為兩種材料之混合。

表 3-4 各材料之代號

中文	石灰	黏土	砂	牡蠣殼	糖漿	糯米漿	醣類(M+R)
英文	Lime	Clay	Sand	Oyster Shell	Molasses	Rice paste	carbohydrate
代號	L	C	S	O	M	R	T

表 3-5 設計配比 I

組別編碼	各材料之重量百分比(%)				
	L	C	S	O	L : T
A	25	20	45	10	1 : 0.09
B	25	20	40	15	1 : 0.09
C	25	20	35	20	1 : 0.09
D	25	20	30	25	1 : 0.09
E	25	20	25	30	1 : 0.09

表 3-6 設計之配比 II

材料	純石灰漿	純黏土	石灰加黏土	石灰加里港砂	石灰加牡蠣殼
配比	0.75L <sub>1.0</sub>	0.46C <sub>1.0</sub>	L <sub>1.0</sub> C <sub>0.2</sub>	L <sub>1.0</sub> S <sub>0.2</sub>	L <sub>1.0</sub> O <sub>0.2</sub>
	-	-	L <sub>1.0</sub> C <sub>0.5</sub>	L <sub>1.0</sub> S <sub>0.5</sub>	L <sub>1.0</sub> O <sub>0.5</sub>
	-	-	L <sub>1.0</sub> C <sub>1.0</sub>	L <sub>1.0</sub> S <sub>1.0</sub>	L <sub>1.0</sub> O <sub>1.0</sub>
	-	-	L <sub>1.0</sub> C <sub>2.0</sub>	L <sub>1.0</sub> S <sub>2.0</sub>	L <sub>1.0</sub> O <sub>2.0</sub>

### 3-2-2 材料之拌合水量

在考量試體澆製的工作性與延續先前研究者所用之水與石灰的比例(表 3-7)，本研究之水灰比亦設定為 0.75，其流度為 120%，在黏土試體製作時，亦採用相同流度(120%)，即以含水量 46%作為其固定的拌合需水量。骨材浸水飽和後以脫水機脫水，得含水量約 6±1%之濕潤里港砂骨材及含水量約 22±1%之濕潤牡蠣殼，以作為骨材之拌合用水量。茲將本研究中，各材料所使用之拌合用水量整理如表 3-8。

表 3-7 各研究者對於石灰所使用之水灰比

學者	張清忠	洪煌凱	陳俊良	李泓銘
年份	2002	2003	2004	2005
水灰比	0.74	0.74	0.75	0.75

表 3-8 材料之拌合水用量

材料	石灰	黏土	安平砂	里港砂	牡蠣殼
用水量 (wt%)	75	46	5.8	6.5	22.5

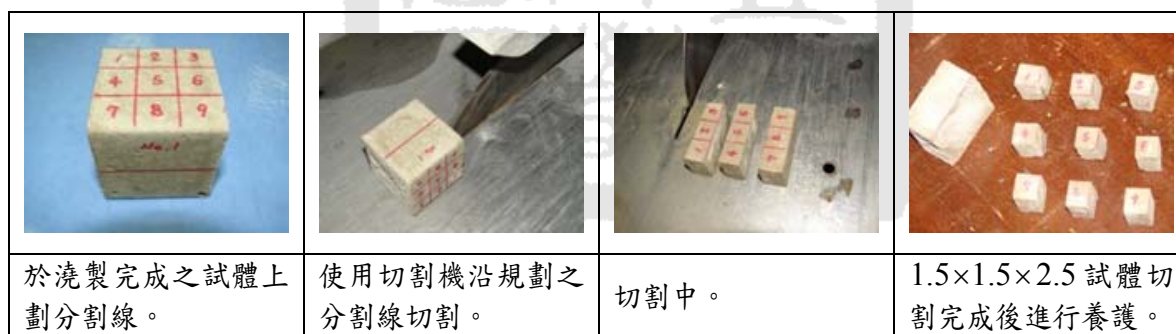


### 3-2-3 試體拌合與製作及其養護

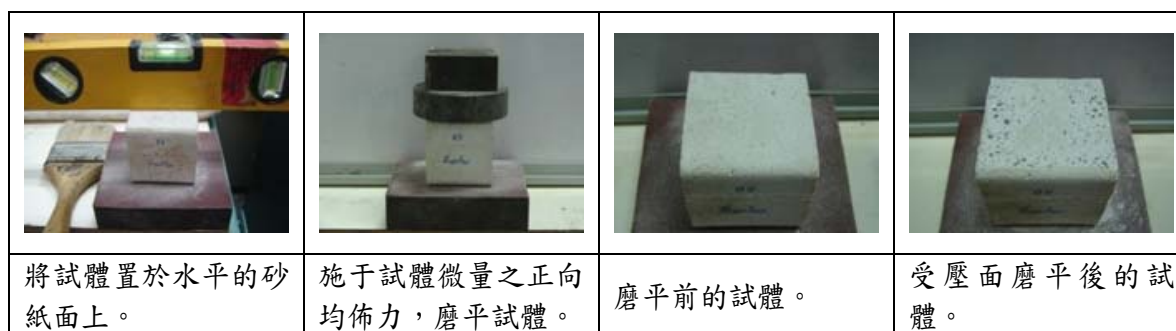
使用機械式攪拌器拌合，乾料(石灰、黏土、砂、牡蠣殼)先行乾拌後加入所需之拌合水量拌合，再添加膠體(糖漿與糯米漿)，例如  $L_{1.0}C_{0.2}$  之拌合水量為  $0.75L_{1.0} \times 0.46C_{0.2}$ 。在試體製作上，依尺寸可分為 3 種，而不同性質試驗所需之試體的後續製作及養護條件，一同整理於表 3-9 中。

表 3-9 不同性質試驗所需之試體(尺寸單位：公分)





試體樣式	試體尺寸	試驗項目	試體之後續製作及養護條件
正立方體 (長×寬×高)	5×5×5	(1) 配比分析	如照片 3-8 所示，切割成 1.5×1.5×2.5 之尺寸，進行中性化養護 28 天。
		(2) 中性化試驗	於規定之齡期，取試體由中央對切。
		(3) 抗壓試驗	於規定之齡期，取出試體將受壓面磨平，如照片 3-9 所示。
		(4) 吸水率	中性化養護 28 天齡期試體，切割成 5.0×5.0×1.5 之尺寸並磨平。
圓柱體 (直徑×高)	5×10	(5) 劈張試驗	中性化養護 28 天齡期，取出試體規劃受劈裂面及其表面處理。
	5×15	(6) 熱傳導係數測定	如照片 3-10 所示，預埋測孔於試體中央，進行中性化養護 28 天。



照片 3-8 定量化配比分析之試體製作



照片 3-9 超音波與抗壓試驗之試體製作

			
於鋼模內澆製試體。	將直徑 3.3mm 之不銹鋼棒植入試體。	試體正中央垂直植入鋼棒後。	拆模後，完成之試體

照片 3-10 熱傳性質試驗之試體製作

### 3-3 試驗項目、儀器與內容

本研究之試驗項目，包含基本物理性質試驗、配比分析、中性化試驗、抗壓與劈張試驗、吸水率、導熱係數測定，試驗儀器與內容分述於以下各節。

#### 3-3-1 基本物性試驗

1. 篩分析：依據 ASTM C136 進行試驗，所使用之設備有(1)電動搖篩機(2)標準篩(3)電子秤(4)氣槍。
2. 細骨材之含水量、比重、面乾內飽和水量及表面水量試驗：依據 ASTM C128、C70、C566 進行試驗，所使用之設備有(1)比重瓶(2)量筒(3)圓錐模與搗棒(4)烘箱(5)電子秤(6)吹風機(7)漏斗。
3. 流度試驗：依據 ASTM C230 進行試驗，所使用之設備有(1)流度儀(2)機械拌合機(3)刮刀(4)搗棒(5)電子秤(6)尺。
4. 液性限度試驗：依據 ASTM D4318 進行試驗，所使用之設備有(1)液性限度試驗儀(2)抹刀(3)電子秤(4)烘箱。
5. 塑性限度試驗：依據 ASTM D4318 進行試驗，所使用之設備有(1)毛玻璃(2)密封容器(3)電子秤(4)烘箱。
6. 土粒比重試驗：依據 ASTM D854-3 進行試驗，所使用之設備有(1)比重瓶(2)酒精燈(3)三腳鐵架(4)石綿板(5)電子秤(6)溫度計
7. 比重計分析：依據 ASTM D422-63 進行試驗，所使用之設備有(1)量筒(2)比重計(3)碼表(4)溫度計(5)烘箱。

### 3-3-2 超音波檢測

於試體進行抗壓試驗前，以壓力波對試體進行非破壞性檢測。目的在於透過超音波檢測儀器(照片 3-11)來嘗試檢測試體之中性化深度。

### 3-3-3 實體顯微鏡觀察

以實體顯微鏡配合數位相機拍攝樣本之微觀影像，透過微觀辨識樣本中可能的材料，相關儀器如照片 3-12 所示，而實體顯微鏡之性能列於表 3-10 中。



照片 3-11 超音波試驗相關儀器



照片 3-12 實體顯微鏡相關儀器

表 3-10 實體顯微鏡儀器性能

型號	STEMI-2000C
變焦範圍	0.65X~5.0X
倍率範圍	6.5X~50X、1.95X~250X
工作距離	92mm

### 3-3-4 定量化配比分析

定量化配比分析試驗之目的主要在針對灰漿中石灰、黏土、砂、牡蠣殼與醣類含量加以定量，規劃之試驗項目包含 EDS 成分分析與粗、細粒料含量測定及其中碳酸鈣含量測定及醣類含量測定等。EDS 為半定量化學分析，藉此可獲知灰漿之元素組成；石灰與黏土在統一土壤分類系統中同屬於細粒料，而砂與片狀的牡蠣殼則屬於粗粒料，因此，藉由界定粗、細粒料可以將灰漿之固體材料區分為兩類；醣類等膠體材料則無法以粒徑來界定，故以熱溶解的方式將灰漿中的醣類溶出於水中，進而

測定其含量；灰漿中的石灰與牡蠣殼的化學組成成分相同，因此透過鹽酸與灰漿中的碳酸鈣產生化學反應可測定其碳酸鈣及非碳酸鈣類之含量，石灰與牡蠣殼屬於碳酸鈣類，非碳酸鈣類則為土壤等。所需之試驗器材如下所述：

#### 1. 掃描式電子顯微鏡與能量分散式光譜儀分析(SEM-EDS)



照片 3-13 掃描式電子顯微鏡附設能量分散光譜儀

掃描式電子顯微鏡的解像力是介於光學顯微鏡與穿透式電子顯微鏡之間，其成像原理是利用一束具有 5~30 KV 之電子束掃描試片的表面，並將表面產生之訊號加以收集經放大處理後，輸入到同步掃描之陰極射線管 (CRT)，以顯現試片圖形之影像。

由於電子顯微鏡觀察需在高真空環境下進行，潮濕或易揮發之物質會妨礙高真空之維持，所以為了避免標本所含的水份、流質在高真空下揮發而影響觀察，所以必須先將樣品作固定、脫水等處理。除此之外，非導電性標本會因電荷累積於試片表面無法去除，產生排斥力，使電子束受到干擾無法進行觀察，也為了避免標本在電子束掃描時因高溫而遭破壞及增加二次電子的產生以得到更清晰的影像，必須在標本的表面上覆蓋一層金屬或碳的薄膜。

通常掃描式電子顯微鏡均會附加一座 X 射線能量散佈分析儀(energy dispersive X-ray spectrometer, EDS) 作半定量式的元素分析。藉由量測電子束照射試體所激發之能量分布，可得試體之較重元素之含量。



本研究將灰漿配比分析試驗用之試樣進行烘乾、鍍金等程序，施作 SEM 以及 EDS，期能了解灰漿之微觀性質與元素分析，並推求碳酸鈣化合物之含量。

2. 粗、細粒料含量之測定：依據 CNS 10989 現場粒料樣品減量為試驗樣品取樣法、CNS 486 粗細粒料篩分析法並參考 USCS 統一土壤分類法。所使用之設備有(1)瓷鉢與瓷棒槌(2)小湯匙(3)乾淨且平坦的紙張(4)乾淨的尺(5)超音波洗滌器(6)特製小型 200 號篩(7)滴管(8)乾淨器皿(9)靈敏度 0.001 公克之電子秤(10)烘箱。
3. 碳酸鈣含量測定：使用設備有(1) HCl 溶液(2)濾紙(3)漏斗(4)容器(5)靈敏度 0.001 公克之電子秤(6)烘箱。
4. 醣類含量測定：參考 CNS 1388 蔗糖檢驗法，使用設備有(1)靈敏度 0.2 °Brix 之屈折光式糖度計(2)靈敏度 0.001 公克之電子秤(3)玻璃漏斗(4)滴管(5)三腳架(6)酒精燈與酒精(7)小型濾紙(8)強光源投射器。

### 3-3-5 中性化試驗

中性化試驗機為恆溫恆溼槽與二氧化碳導入設備所構成，將試體置於中性化試驗機內以二氧化碳濃度 30%、相對溼度 70%、溫度 23°C 養護，於 1 天、2 天、4 天、7 天、14 天、28 天養治齡期取出試體，以切割機水冷切開，切開面經磨平、烘乾後以酚酞指示劑作碳化程度之測定。



照片 3-14 中性化試驗機

### 3-3-6 抗壓及劈張試驗

參考美國 ASTM C109 水泥砂漿抗壓試驗規範與 CNS 3801 混凝土圓柱形試體劈裂抗張強度之劈裂試驗法。將受壓面磨平整之試體置於使用 10 噸剛性抗壓試驗機(照片 3-15)支承座中央，以應變控制 1.3mm/min 的速率進行抗壓試驗，並使用擷取系統計讀壓縮過程之強度及位移量。抗壓試驗之齡期為氣乾養護 28 天與中性化養護 1、2、4、7、14、28 天；劈裂抗張試驗之齡期為中性化養護 28 天。



照片 3-15 十噸萬能試驗機

### 3-3-7 吸水試驗

參考 CNS 488 粗粒料比重及吸水率試驗法，對試體進行飽和吸水率試驗。另規劃將碳化養治 28 天之試體烘乾後，先置入相對溼度 95%、溫度 23°C 之恆溫恆溼機內，分別量測放置 1、2、4、8、24 小時之含水量，並在 24 小時後移出恆溫恆溼機，量測試體於自然環境中氣乾 1、2、4、8、24 小時之含水量，目的在於瞭解烘乾試體處於相對溼度較高的環境中與自然環境中，其含水量之變化情形。

### 3-3-8 熱傳導係數測定

透過熱探針來測定各試體的熱傳導係數，所使用之設備包含熱探棒、穩定電源供應器、溫度記讀系統、電壓電流計、計時器、不銹鋼棒，以下為器材之介紹：

- (1) 熱探棒：提供一線狀熱源，同時利用溫度量測元件（熱電耦、熱敏電阻等）在加熱過程同時量測其本身之溫度。熱探棒長 14.5cm，直徑 0.32 公分(如照片 3-16 所示)。
- (2) 穩定電源供應器：提供一穩定電流之輸出。照片 3-17 之上部儀器，為本研究所採用之電源供應器由安捷倫公司所生產型號 E3640A 的電源供應器。
- (3) 溫度記讀系統：具數位記讀功能，精度必需達到  $0.1^{\circ}\text{C}$ 。本研究所採用之擷取系統為安捷倫公司生產之 34970A 搭配 34901A 的 20 頻道多工模組。照片 3-17 之下部儀器，為本研究之擷取系統。
- (4) 電壓電流計：電壓量測值精度必需達到 0.01V。
- (5) 計時器：最少需能夠在 15 分鐘內保持精度 0.1 秒之計。
- (6) 不銹鋼棒：於待測試體製作過程中預埋，預埋深度與熱探棒相同，預埋之不銹鋼棒直徑為 0.33cm，大於熱探棒直徑 0.01cm，維持 0.1mm 之淨空係考慮量測時須注入導熱泥。



照片 3-16 試驗用之熱探棒



照片 3-17 電源供應器(上)與溫度資料擷取器(下)

## 第四章 灰漿之配比分析

本章節欲建立灰漿之配比的分析方法，首先使用石灰、黏土、安平砂、牡蠣殼、糖漿與糯米漿等材料製作試樣，再利用配比已知的試樣來進行定量化之成分分析，最後建立灰漿之配比分析方法。以本研究方法可探究古蹟灰漿之配比，並可應用於灰漿工程之查核驗收。

### 4-1 配比分析流程與方法

本研究首先將設計配比 I 中的 A 配比進行 5 個試樣的初步試驗，試驗方法如 3-3-4 節所述之粗細粒料含量測定、總體碳酸鈣與粗粒料之碳酸鈣含量測定、醣類含量測定，經由初步測試後訂定如下圖 4-1 所示之分析流程，並將各項試驗項目之內容詳細說明於以下各小節，以建立一套古蹟灰漿之配比分析的標準流程。

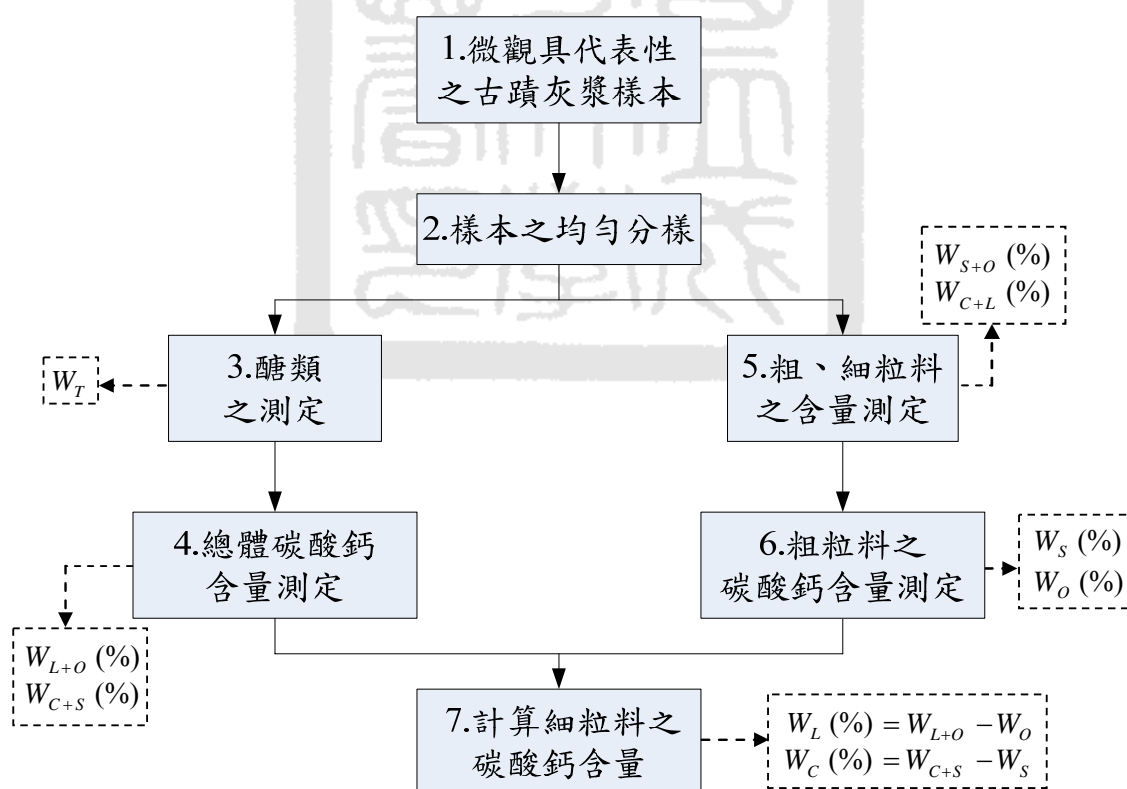


圖 4-1 灰漿之配比分析流程

以下將古蹟灰漿之配比分析的各步驟之試驗方法詳述如下：



## 1. 微觀具代表性之古蹟灰漿樣本

以實體顯微鏡對樣本微觀，研判灰漿之組成材料，如石灰(L)、黏土(C)、砂(S)、牡蠣殼(O)、紅磚碎屑(B)等。具代表性樣本之取樣，依照骨材之粒徑大小來決定，添加細骨材之灰漿經本研究之試驗結果，僅需 10 公克即可；添加粗骨材之灰漿則參考 CNS 11776 土壤粒徑分析試驗法，取樣約 100 公克。

## 2. 樣本之均勻分樣

依據 CNS 10989 現場粒料樣品減量為試驗樣品取樣法，將樣本以四分法分成等分為兩份，分別進行如上圖 4-1 之試驗流程。現將樣本均勻分樣之過程及步驟詳列於下：

- (1) 將敲碎的試樣散佈於乾淨的紙張上，紙張下鋪有軟墊，以瓷棒槌輕輕壓碎膠結塊，使其能完全通過#10 篩。
- (2) 若為添加粗骨材之試樣，則以四分法縮樣至 10 公克，如為細骨材樣本則無此步驟。
- (3) 單次秤取約 2.5 公克之樣本置於鉢中，使用棒槌以  $0.08 \pm 0.02 \text{ kgf}$  之低能量研開粒料。研磨力道之控制方式是將研磨鉢及試樣放於電子秤上研磨，如照片 4-1 所示。



照片 4-1 低能量研磨力道的控制

- (4) 反覆步驟(3)多次，使膠結塊受到充分研磨而分離後，將樣本置於不損失亦不摻入雜物之清潔平坦的紙面上，以乾淨的尺徹底翻拌試樣，將其堆出一圓錐體。

(5) 旋轉尺臂由錐頂向下緩慢推出一圓平面，將該圓平面以對稱的方式對切分割為四等分，以不相鄰的兩個四分之一圓面的試樣合為一組，則可將全部試體分成兩組。

### 3. 醣類測定( $W_T$ )

灰漿材料中醣類的使用量並不高，因此，作為將灰漿試樣中之醣份溶出用之蒸餾水加入過多，則會使糖水溶液的糖度值甚低，增加量測之困難性且降低量測之精確性；反之，蒸餾水加入過少，則易因煮沸而致乾涸，且過濾時，恐因濾紙吸水未達飽和而無任何糖水濾液滲出。

CNS 1338 蔗糖檢驗法有如此之敘述，「精秤 5.0 公克糖樣，於室溫下以 5 毫升蒸餾水溶解」，由於本研究並非如規範中有沸水浴及冷水浴等設備，亦未使用任何試劑，僅是簡易的將灰漿之糖分以煮沸方式溶解出，故經過多次實驗嘗試，在考量煮沸時水蒸氣的蒸散與過濾時濾紙會吸水等因素，將作為溶解用之蒸餾水量擬定為灰漿試樣的 1.5 倍，即本研究進行糖度測定所用之試樣為 5 公克，則溶醣用水量為 7.5 公克，並使用直徑為 4 公分之小型濾紙。

使用屈折光式糖度計量測糖度，以糖度值計算糖水溶液中的糖量，可得灰漿之醣類重量。以下為試驗步驟：

- (1) 以重量比例 1：1.5，秤取灰漿試樣與蒸餾水置入煮沸用量瓶中，蓋上其瓶蓋並置放於三角架上，使用酒精燈以溫火煮沸 15 分鐘以上。
- (2) 煮沸後靜置，使其冷卻至室溫再秤重( $W_1$ =試樣+糖水+空瓶重)。
- (3) 如照片 4-2 所示，將量瓶內的糖水溶液藉由過濾裝置濾出，使用滴管吸取糖水濾液滴入糖度計觀察玻片上，並在強光源(照片 4-3)照射下測讀糖度  $\chi$ ，其單位為白利糖度°Brix (%)。
- (4) 灰漿之醣類重量的計算過程，如下所示。式 4-3 之結果為灰漿中醣類重量，其單位為公克。 $W_0$  為煮沸前之試樣+空瓶之重量， $W_1$  為煮沸後經冷卻之糖水+試樣+空瓶的重量。

$$\chi^{\circ}Brix (\%) = W_{Carbohydrate} / (W_{Carbohydrate} + W_{Water}) \text{ ---式 4-1}$$

$$W_{Carbohydrate} = \chi^{\circ}Brix \times Water / (100 - \chi^{\circ}Brix) \text{ ---式 4-2}$$

$$W_{Carbohydrate} = \chi^{\circ}Brix \times (W_1 - W_0) / (100 - \chi^{\circ}Brix) \text{ ---式 4-3}$$



照片 4-2 灰漿之醣類含量測定



照片 4-3 糖度測定所使用之強光源照射

#### 4. 總體碳酸鈣含量測定( $W_{L+O}$ )

將醣類測定完成後的試樣浸入鹽酸溶液中，使試樣中的碳酸鈣( $\text{CaCO}_3$ )與鹽酸( $\text{HCl}$ )進行化學反應，如此可獲得總體碳酸鈣含量( $W_{L+O}$ )，總體碳酸鈣含量測定，可得灰漿中石灰(L)加碳酸鈣類骨材(O)之含量。鹽酸與碳酸鈣之化學反應列於下式 4-4。



其步驟如下所述：

- (1) 醣類測定完成之後，以鴨嘴瓶噴射清水將濾紙上的試樣及煮沸用量瓶內的試樣一併洗入鹽酸溶液中浸泡，如照片 4-4 所示，待其完成反應後，進行過濾。
- (2) 如照片 4-5 所示，過濾時需不斷以熱水洗滌樣本直至無氯酸根反應，即洗出之濾液呈透明無色。
- (3) 樣本烘乾後秤重，即為黏土與砂重量( $W_{C+S}$ )，而因酸洗反應所減少的重量為試樣中的石灰與牡蠣殼( $W_{L+O}$ )。



照片 4-4 醣類測定後的酸洗試驗



照片 4-5 碳酸鈣含量測定

### 5. 粗、細粒料之含量測定( $W_{S+O}$ 與 $W_{C+L}$ )

受到低能量研開之試樣中，仍會有細粒料附著於粗粒料上，故將分樣後的一份樣本透過超音波水體振離的方式，使粒料分離的更為完全，並依據 CNS 486 粗、細粒料篩析法與參考 USCS 統一土壤分類法，在超音波洗滌同時以#200 篩進行篩洗，如此可洗去灰漿中的石灰(L)與黏土(C)等細粒料，而保留砂(S)與牡蠣殼(O)等粗粒料。步驟詳述如下：

- (1)如照片 4-6 所示，將試樣置於特製小型#200 篩盒內，放入超音波洗滌槽內洗滌。洗滌時需不斷搖晃篩盒，以確保篩盒內的粒料能完全被翻洗過。



照片 4-6 超音波洗滌配合#200 篩盒洗篩



照片 4-7 以清水對粒料進行洗篩

- (2)超音波洗滌時，數次取出篩盒以清水洗去試樣中的細粒料(照片 4-7)，並將洗滌槽內置換為乾淨的水，直到將細粒料完全洗滌出，即洗滌槽內的水不再渾濁為止。

(3)取出#200 篩之留篩試體，將其烘乾後秤重可得到粗粒料之含量 ( $W_{S+O}$ )；並獲知洗去之細粒料含量( $W_{C+L}$ )。

#### 6. 粗粒料之碳酸鈣含量測定( $W_O$ )

將烘乾後的粗粒料( $W_{S+O}$ )浸入鹽酸溶液中，使粗粒料中的碳酸鈣與鹽酸進行化學反應，如此可獲得粗粒料之碳酸鈣含量( $W_O$ )及粗粒料之非碳酸鈣含量( $W_S$ )。試驗步驟如下之描述：

- (1)將試樣置入 HCl 溶液中浸泡，待其完成反應後，進行過濾。
- (2)過濾時需不斷以熱水洗滌樣本直至無氯酸根反應，即洗出之濾液呈透明無色。
- (3)樣本烘乾後秤重，即為粗粒料中非碳酸鈣含量( $W_S$ )；因酸洗反應所減少的重量即為粗粒料之碳酸鈣主要為牡蠣殼含量( $W_O$ )。

#### 7. 石灰與黏土含量之計算( $W_L$ 與 $W_C$ )

因已測知之總體碳酸鈣( $W_{L+O}$ )與土壤( $W_{C+S}$ )含量、粗粒料之碳酸鈣( $W_O$ )與非碳酸鈣之粗粒料( $W_S$ )含量，故石灰( $W_L$ )與黏土( $W_C$ )含量可由式 4-5 與 4-6 得知。

$$W_L (\%) = W_{L+O} - W_O \quad \text{---式 4-5}$$

$$W_C (\%) = W_{C+S} - W_S \quad \text{---式 4-6}$$

## 4-2 定量化成分分析結果

試驗用設計配比 I 的 ABCDE 五組配比之樣本於碳化養治 28 天後，利用此碳化試樣進行 EDS 分析、粗粒料與細粒料含量測定、碳酸鈣含量測定與醣類測定等 4 項試驗，以分析試樣中材料成分與含量，現將各試驗之結果分述於下面各小節。

### 4-2-1 EDS 分析結果

以往灰漿進行成分的化學分析時，常使用能量分散式光譜分析儀 (EDS)。本研究透過 EDS 對每一個配比之樣本施作 12 個光譜點之半定量



化學元素分析，此外，為得到較大面積的光譜分析範圍，分析時採用儀器最低倍率 30 倍之放大倍率，各組試樣之元素分析結果如表 4-1 所示，其中的鉀離子(K)可能是土壤材料中，可被交換(exchange)的鉀離子。

由 EDS 分析結果所推算之化合物含量如表 4-2 中所示，藉由化學元素分析結果推估化合物之方法，係依莫爾數之重量與分子量的關係加以計算，並假設碳化試體中，鈣(Ca)的含量完全由原設計配比之牡蠣殼及石灰碳化成碳酸鈣(CaCO<sub>3</sub>)後所提供。且假設忽略殘餘的碳(C)與氧(O)元素，並將其正規化得表 4-3 所示之結果，利用此正規化計算結果所推估出的配比與原設計配比之比較如表 4-4 所示。

表 4-1 成分分析用試體之 EDS 化學元素分析結果

Sample	C(%)	O(%)	Mg(%)	Al(%)	Si(%)	K(%)	Ca(%)	Fe(%)	Total(%)
A	10.35	48.90	1.50	3.86	12.20	1.12	19.37	2.70	100.00
B	12.16	55.44	1.33	3.33	9.66	0.91	15.39	1.78	100.00
C	10.98	49.99	1.26	3.26	10.04	0.97	21.05	2.44	100.00
D	12.46	52.87	1.34	3.37	9.55	0.90	17.56	1.95	100.00
E	11.41	50.91	1.38	3.48	9.77	0.96	19.92	2.17	100.00

表 4-2 由 EDS 分析結果所推算之化合物含量

Sample	CaCO <sub>3</sub> (%)	SiO <sub>2</sub> (%)	MgO(%)	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	K <sub>2</sub> O(%)	Total(%)
A	48.42	26.15	2.49	5.01	7.30	1.36	90.74
B	38.48	20.70	2.21	3.31	6.29	1.10	72.08
C	52.64	21.52	2.10	4.52	6.15	1.18	88.11
D	43.91	20.46	2.23	3.62	6.37	1.09	77.68
E	49.79	20.94	2.29	4.03	6.58	1.17	84.80

表 4-3 EDS 分析結果所推算之化合物含量正規化結果

Sample	CaCO <sub>3</sub> (%)	SiO <sub>2</sub> (%)	MgO(%)	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	K <sub>2</sub> O(%)	Total(%)
A	54.05	29.19	2.78	4.31	8.15	1.52	100.00
B	53.96	29.02	3.10	3.57	8.82	1.54	100.00
C	60.46	24.71	2.42	4.00	7.07	1.35	100.00
D	57.14	26.63	2.90	3.62	8.29	1.42	100.00
E	59.36	24.97	2.73	3.69	7.85	1.39	100.00

表 4-4 透過 EDS 分析結果所推估之配比與原設計值之比較

Sample	碳酸鈣類(石灰與蚵殼)		土壤(砂與黏土)		差異值(%)
	分析結果(%)	設計值(%)	分析結果(%)	設計值(%)	
A	54.05	35.00	45.95	65.00	19.05
B	53.96	40.00	46.04	60.00	13.96
C	60.46	45.00	39.54	55.00	15.46
D	57.14	50.00	42.86	50.00	7.14
E	59.36	55.00	40.64	45.00	4.36

臺灣傳統灰漿多摻合濱海地區牡蠣養殖所廢棄的牡蠣殼作為骨材，而曝於大氣中的石灰隨著時間會碳化成碳酸鈣( $\text{CaCO}_3$ )，此與牡蠣殼的化學組成相同，因此若以化學成分分析來探知灰漿中石灰及牡蠣殼的配比，則將遇到研判上的困擾，故 EDS 分析之結果僅能將灰漿分為碳酸鈣類及土壤(非碳酸鈣類)兩種。由 EDS 化學元素分析所推估之化合物含量的結果可歸納出下列幾點結論：

1. A、B、C 三組之結果相對差值甚大，僅 E 組試樣之分析結果尚可被接受。
2. 不同配比之試體卻有如此相近的分析結果，可能的原因在於灰漿屬複合材料，而牡蠣殼之粒徑相較於其他材料要大的多，且 EDS 是點狀區域的光譜分析，故推測其可能是因為分析區域太小導致結果的誤差。
3. 使用 EDS 分析方法無法準確得知石灰真正的含量，甚至是碳酸鈣含量之推求結果亦不甚準確。

#### 4-2-2 粗、細粒料含量之測定

由 4-1 節所述中，粗、細粒料測定方法進行試驗，其結果如表 4-5 與圖 4-2 所示。設計配比 I 中的五組配比所設計之粗、細粒料含量皆為定值，細粒料含量( $W_{c+L}$ )之設計值為 45%( $W_c = 20\%$ ， $W_L = 25\%$ )，而粗粒料( $W_{s+o}$ )含量則佔 55%( $W_s = 45\sim 25\%$ ， $W_o = 10\sim 30\%$ )。在全部 17 個試樣之分析結果中，有 14 個試樣的粗粒料含量被低估，平均低估 2.06%。

表 4-5 設計配比 I 之粗、細粒料測定結果

組別	編號	粗粒料(%)		細粒料(%)	
		分析值	差值	分析值	差值
設計值		55.00		45.00	
A	1	52.09	-2.91	47.91	2.91
	2	51.74	-3.26	48.26	3.26
	3	53.67	-1.33	48.33	1.33
	4	54.79	-0.21	45.21	0.21
	5	53.12	-1.88	46.88	1.88
B	1	54.06	-0.94	45.94	0.94
	2	55.48	0.48	44.52	-0.48
	3	53.36	-1.64	46.64	1.64
C	1	52.54	-2.46	47.46	1.64
	2	55.25	0.25	44.75	-0.25
	3	52.29	-2.71	47.71	2.71
D	1	55.72	0.72	44.28	-0.72
	2	52.32	-3.22	47.68	2.68
	3	51.78	-3.22	48.22	3.22
E	1	52.01	-2.99	47.99	2.99
	2	51.77	-3.23	48.23	3.23
	3	53.42	-2.58	47.58	2.58

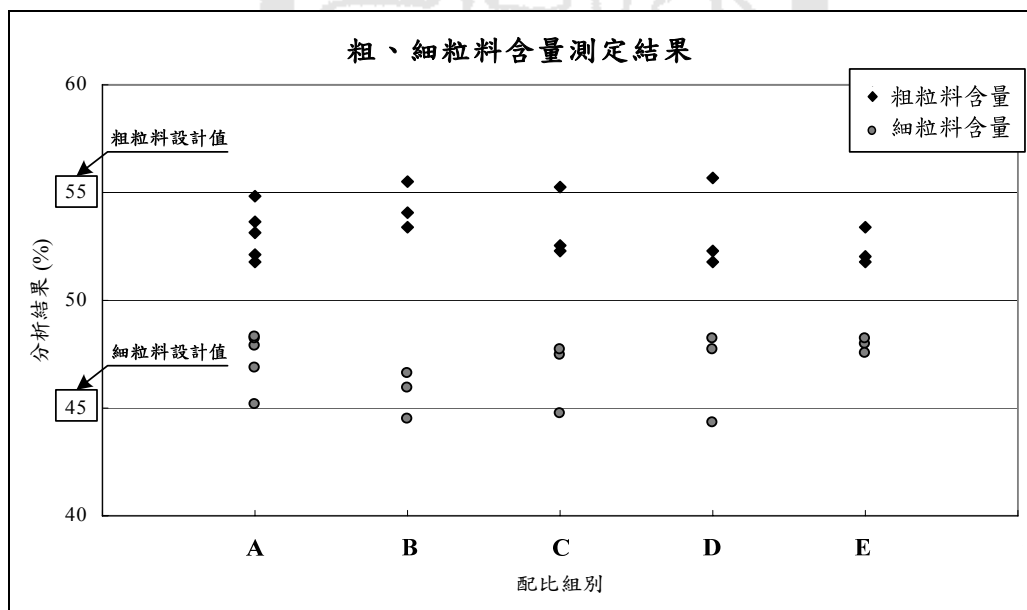
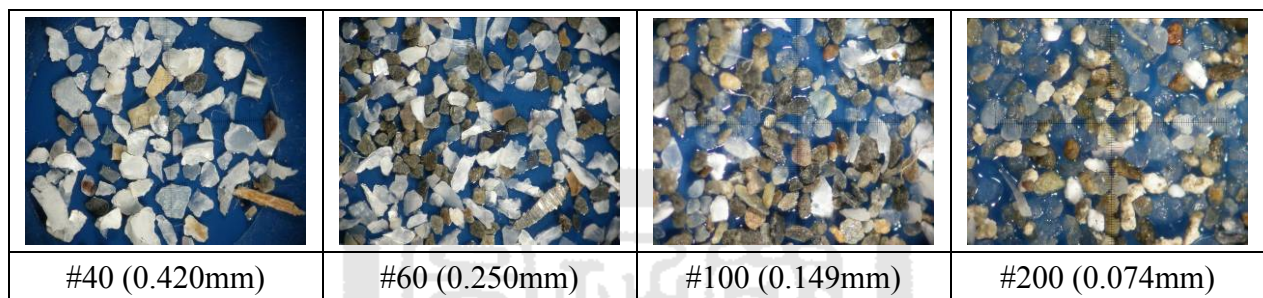


圖 4-2 粗、細粒料含量測定結果



為瞭解造成多數試樣之粗粒料被低估而細粒料被高估的原因，遂將配比 A 之試樣於粗、細粒料含量測定完成後，將其粗粒料進行篩分析，而後以實體顯微鏡觀察停留在各篩號上的粒料，如照片 4-8 所示，由觀察之結果可知透過低能量研磨與超音波洗滌方式可將膠結體完全分離。

然而粒料分離過程可能對顆粒之結構造成些許破壞，因而造成多數試樣之粗粒料含量被低估，細粒料含量則相對被高估。整體而言，所有試樣平均低估或高估 1.97%，應在可接受的範圍。



照片 4-8 微觀 A 配比之粒料分離情形

#### 4-2-3 碳酸鈣含量之測定

灰漿之碳酸鈣含量測定分為兩個測定項目，灰漿之(1)總體碳酸鈣含量之檢測與(2)粗粒料之碳酸鈣含量測定，透過此兩項含量測定結果可以計算出細粒料之碳酸鈣含量(如式 4-5)，即總體碳酸鈣含量減去粗粒料之碳酸鈣含量；五組樣本之細粒料中碳酸鈣含量( $W_L$ )皆為定值 25%，而粗粒料之碳酸鈣含量( $W_o$ )則依比例增加並非定值( $W_o = 10\sim 30\%$ )。測定之結果如表 4-6 及圖 4-3 所示，總體碳酸鈣含量測定之結果有 11 個試樣被低估，低估的範圍大致在 2%以下，平均值為 1.45%；但有 2 個試樣較離譜的被高估 3~4%，研判應是試樣中石灰結成團塊狀，若不計此 2 試樣，則整體分析結果平均低估或高估 1.28%，顯示灰漿試樣之總體碳酸鈣含量檢測結果十分準確。

而下表中，粗粒料之碳酸鈣含量測定的結果有 3 個試樣被高估(約 1%)；而其餘 14 個試樣之分析結果平均被低估 1.44%，其中僅有 1 個被低估 2.86%。粗粒料之碳酸鈣含量測定係在粗、細粒料含量測定完成後，再對其粗粒料進行碳酸鈣含量測定，故粗粒料測定之結果直接影響粗粒料的碳酸鈣含量測定。

表 4-6 設計配比 I 之碳酸鈣含量測定結果

組別	編號	總體碳酸鈣含量(%)		粗粒料之碳酸鈣含量(%)	
		分析值	差值	分析值	差值
A	設計值	35.00		10.00	
	1	38.39	3.39	9.51	-0.49
	2	35.46	0.46	8.29	-1.71
	3	32.98	-2.02	8.55	-1.45
	4	33.82	-1.18	10.88	0.88
	5	34.41	-0.59	8.76	-1.24
B	設計值	40.00		15.00	
	1	38.11	-1.89	13.79	-1.21
	2	38.33	-1.67	13.18	-1.82
	3	39.07	-0.93	14.31	-0.69
C	設計值	45.00		20.00	
	1	48.37	3.37	20.85	0.85
	2	45.40	0.40	18.73	-1.27
	3	44.04	-1.12	18.88	-1.12
D	設計值	50.00		25.00	
	1	48.71	-1.29	25.85	0.85
	2	50.55	0.55	22.14	-2.86
	3	48.11	-1.89	23.90	-1.10
E	設計值	55.00		30.00	
	1	56.78	1.78	28.41	-1.59
	2	53.85	-1.15	28.11	-1.89
	3	52.57	-2.42	28.27	-1.73

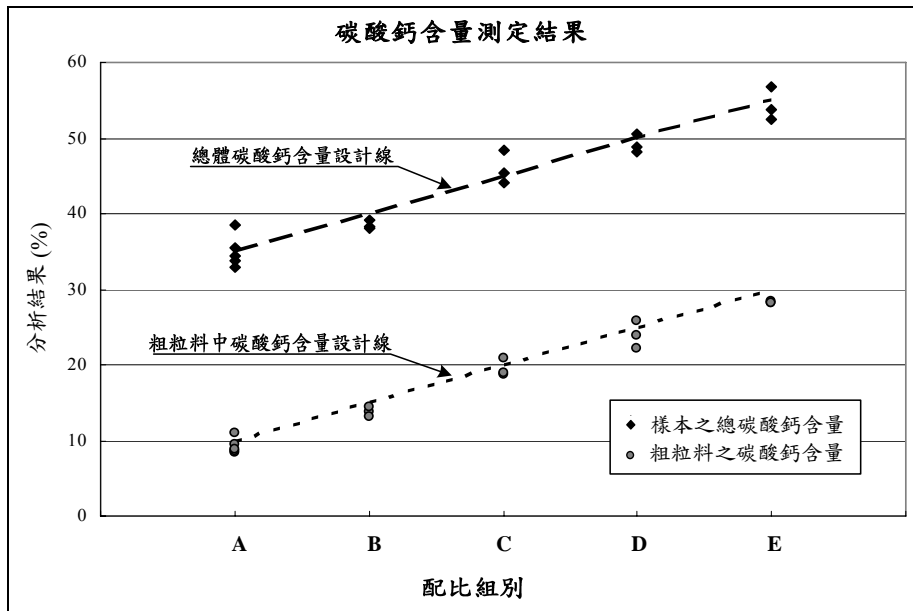


圖 4-3 碳酸鈣含量測定結果

#### 4-2-4 醣類測定結果與石灰、黏土之計算

糯米漿為多醣類而糖漿為雙醣類，本研究所使用之糯米漿的糖度為 10%，糖漿的糖度為 90%，五組配比之石灰與醣類配比之灰醣比設計值皆為  $L_{1.0} : T_{0.09}$ ，而其測定之結果如圖 4-4 所示。

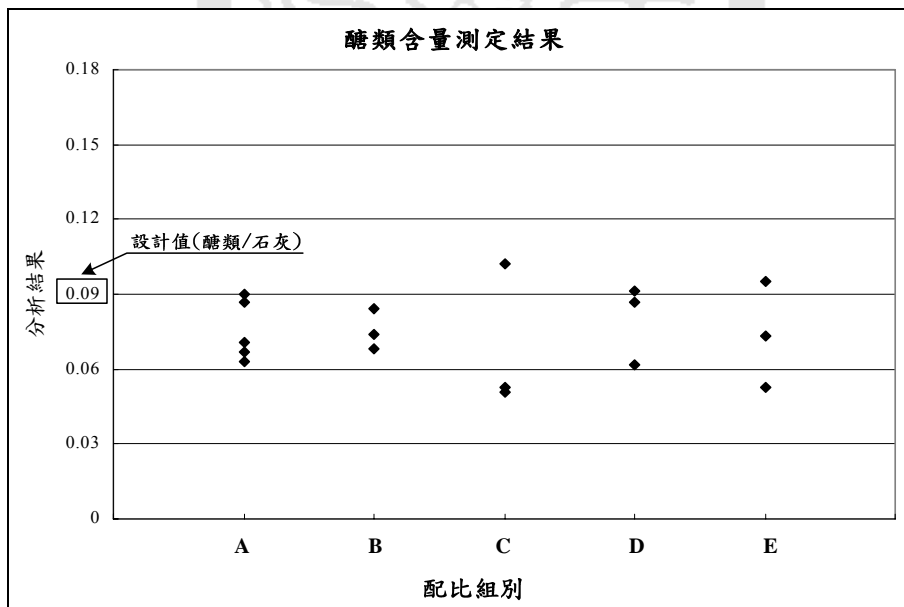


圖 4-4 醣類含量測定結果

最後，將醃類分析結果( $W_T$ )、粗粒料之碳酸鈣分析結果( $W_o$ 與 $W_s$ )、總體碳酸鈣分析結果( $W_{L+O}$ 與 $W_{C+S}$ )，透過式 4-5 及式 4-6 加以計算可得石灰與黏土之含量，現將設計配比 I 之定量化配比分析結果列於表 4-7 中，且為方便呈現其結果，以三角座標圖顯示試樣在配比分分析後，其石灰、牡蠣殼與土壤間三種含量之關係，如圖 4-5 所示，圖中 A、B、C、D、E 代表原設計值，而 Ai、Bi、Ci、Di、Ei 為表 4-7 中樣本組別編號，由圖中可知石灰皆被高估，相對的牡蠣殼則被低估。

表 4-7 設計配比 I 之配比分分析結果

試體		固體材料之重量百分比 (%)								漿體	
組別	編號	石灰		砂		黏土		牡蠣殼		醃/石灰	
		分析值	差值	分析值	差值	分析值	差值	分析值	差值	分析值	差值
A	設計值	25		20		45		10		0.09	
	1	28.89	3.89	19.02	-0.98	42.59	-2.41	9.51	-0.49	0.06	-0.03
	2	27.17	2.17	21.09	1.09	43.45	-1.55	8.39	-1.71	0.07	-0.02
	3	24.43	-0.57	23.83	3.83	45.12	0.12	8.55	-1.45	0.09	0.00
	4	22.94	-2.06	22.26	2.26	43.92	-1.08	10.88	0.88	0.06	-0.03
	5	25.65	0.65	21.23	1.23	44.36	-0.64	8.76	-1.24	0.09	0.00
B	設計值	25		20		40		15		0.09	
	1	24.32	-0.68	20.79	0.79	40.27	0.27	13.79	-1.21	0.09	0.00
	2	25.15	0.15	19.37	-0.63	42.30	2.30	13.18	-1.82	0.06	-0.03
	3	24.76	-0.24	21.88	1.88	39.05	-0.95	14.31	-0.69	0.07	-0.02
C	設計值	25		20		35		20		0.09	
	1	27.52	2.52	19.94	-0.06	31.69	-3.31	20.85	0.85	0.05	-0.04
	2	26.67	1.67	18.08	-1.92	36.52	1.52	18.73	-1.27	0.05	-0.04
	3	25.16	1.16	22.55	2.55	33.41	1.59	18.88	-1.12	0.10	0.01
D	設計值	25		20		30		25		0.09	
	1	22.86	-2.14	21.42	1.42	29.87	-0.13	25.85	0.85	0.06	-0.03
	2	28.41	3.41	19.27	-0.73	30.18	0.18	22.14	-2.86	0.09	0.00
	3	24.21	-0.79	24.01	4.01	27.88	-2.12	23.90	-1.10	0.09	0.00
E	設計值	25		20		25		30		0.09	
	1	28.37	3.37	19.62	-0.38	23.91	-1.09	28.41	-1.59	0.05	-0.04
	2	25.74	0.74	22.49	2.49	23.66	-1.34	28.11	-1.89	0.10	0.01
	3	24.30	-0.70	23.28	3.28	25.15	0.15	28.27	-1.73	0.07	-0.02

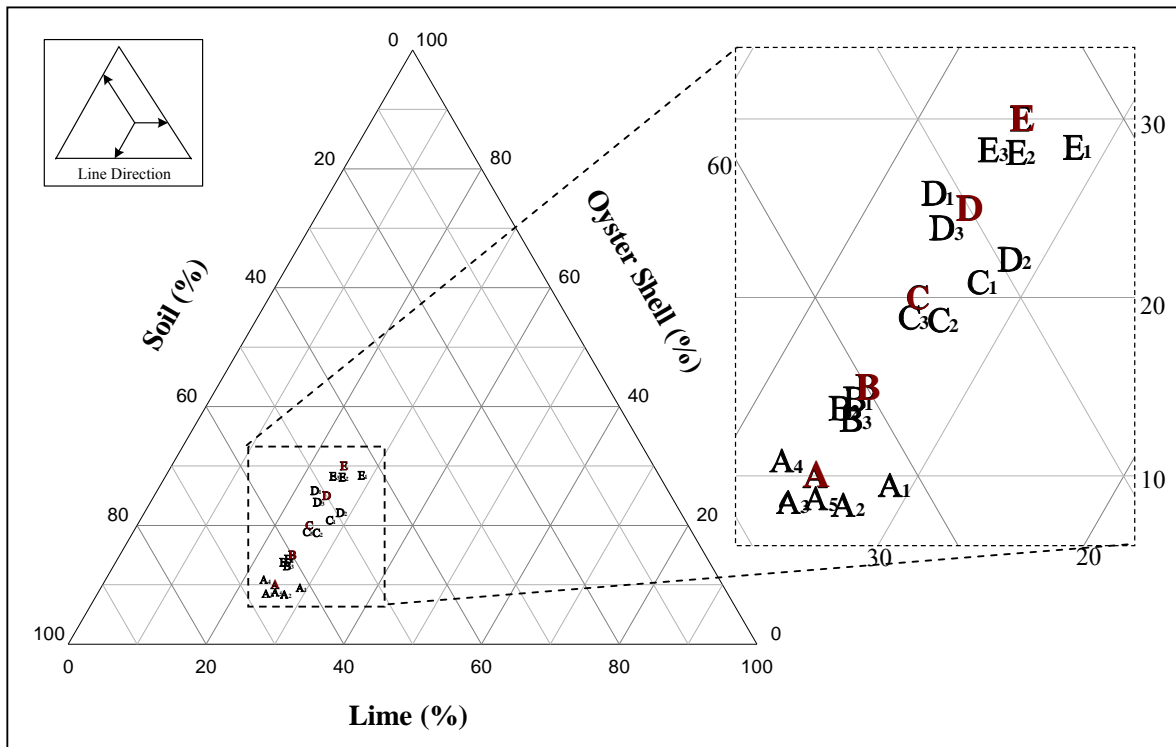


圖 4-5 定量化配比分析結果

#### 4-2-5 定量化成分分析結果之小結

設計配比 I 之五組試樣，經由 EDS 分析與粗、細粒料含量測定及其碳酸鈣含量測定、醣類測定等 4 個項目之檢測後，依據試驗結果可歸納出以下幾點結論：

1. EDS 之 X-ray 光束有其一定的穿透力，位於光束照射光譜分析的區域體積之內，牡蠣殼是易出現的，因其體積相較於灰漿中的其他材料要來的大。
2. 屬於複合材料的灰漿，並不適合透過 EDS 分析化學元素來探知其組成成分，若將 SEM-EDS 應用於探討灰漿之微觀結構組織則較具意義，如膠體晶相及其晶體成分等。
3. 碳化的石灰與牡蠣殼具有相同之化學組成成分，難以 EDS 或熱重分析等化學分析方法對兩者定量，故本研究嘗試以材料的物理性質來判別之，經試驗發現透過粒徑區別石灰與牡蠣殼是簡便的方式。

4. 拌合水用量決定膠結材的單位重，因此藉由面積或體積間接估算其重量，皆不如直接秤取粒料之重量來得可靠，故採取粒料分離的方式是必要的。
5. 由分析結果可知粗、細粒料含量測定及粗粒料之碳酸鈣含量測定與醣類測定等方法可將灰漿中石灰、黏土、砂、牡蠣殼與醣類的含量加以定量，尤以碳酸鈣含量檢測之結果最為準確。
6. 製作試體所使用之材料皆通過#10 篩(2.00mm)，本研究以 10 公克之微量試樣進行分析，從分析結果可知其取樣之代表性對於絕大多數添加細骨材之灰漿是適用的，如砌體灰縫、牆面抹灰等。古蹟取樣無疑是破壞古蹟之行為，然而，探知古蹟灰漿之配比有其更深層的歷史考據及文化教育等意義，為取得其間的平衡，特以少量之樣本進行研究，期能在日後實際應用於古蹟灰漿之配比分析時，減少取樣對古蹟所造成的破壞。

### 4-3 古蹟灰漿之配比分析

一位歐洲的老人說『建築是凝固了的音樂』(Friedrich von Schelling, 19<sup>th</sup>, 哲學家)，的確，建築不但是一種確著的物質，還是一種藝術，不論它站在那裡，或者坍塌成廢墟，總會以精心設計過的形狀和耐人尋味的表情，讓人聯想與其一起發生過的世界，以及它所經歷過的歲月。

熱蘭遮城南殘牆、臺灣府城垣、鳳山縣城垣與恆春縣城垣是著名且別具意義的古老城牆。熱蘭遮城乃是臺灣第一座規模完備的歐式建築(李德河, 2003)，而在荷蘭人離臺後的幾個世紀裡，滿清為臺灣近代統治時間最久的政府，周郁森(2003)對於清代臺灣城牆興築之研究中，將臺灣在清朝統治期間的築城歷史分為三個時代，從最初的不築城政策時代(康熙 23 年-乾隆 52 年, AD 1684-1787)，到開放築城政策時代(乾隆 52 年-同治 13 年, AD 1787-1874)，乃至清朝後期積極建設時代(光緒 1 年-光緒 21 年, AD 1875-1895)，本研究則以開放築城時代初期的臺灣府城垣，以及



築城時代已步入正軌的鳳山縣城，與清末積極建設時代的恆春縣城之古蹟灰漿樣本來作探討，期能透過古灰漿之配比分析，來瞭解不同時代背景與不同世代匠師之施工配比及使用材料是否有其相異或相同性，並提供古蹟修復工程之灰漿施作時的參考。

#### 4-3-1 熱蘭遮城南殘牆之灰漿配比分析

##### (1) 古蹟簡介

「奧倫治城」由荷蘭人於西元 1624 年在大員(今安平地區)以竹子、土塊建築城堡；其後逐漸以磚石砌築，並於 1627 年更名為「熱蘭遮城」，前後歷時二十餘載始將內、外城整體竣工(行政院文建會網頁)。

飽受戰火恣意的摧殘、歲月風霜的無情與人為破壞等種種考驗，三百多年來，迄今古城牆仍有部分磚砌結構體殘蹟屹立於原址，其用來膠結磚塊之古灰漿的耐久與耐候性著實令人讚嘆。圖 4-6 所示為熱蘭遮城全貌(改繪自文建會網頁)，照片 4-9 所示為今日之南殘牆全貌(黃稚榮，2006)。



圖 4-6 熱蘭遮城原貌(改繪自文建會網頁)



照片 4-9 熱蘭遮城南殘牆北面全貌(黃稚榮，2006)





## (2) 取樣部位及點數

本研究對南殘牆的南北兩面之牆面抹灰與磚縫處各取 3 個樣本，總計共 12 個樣本，如表 4-8 所示。

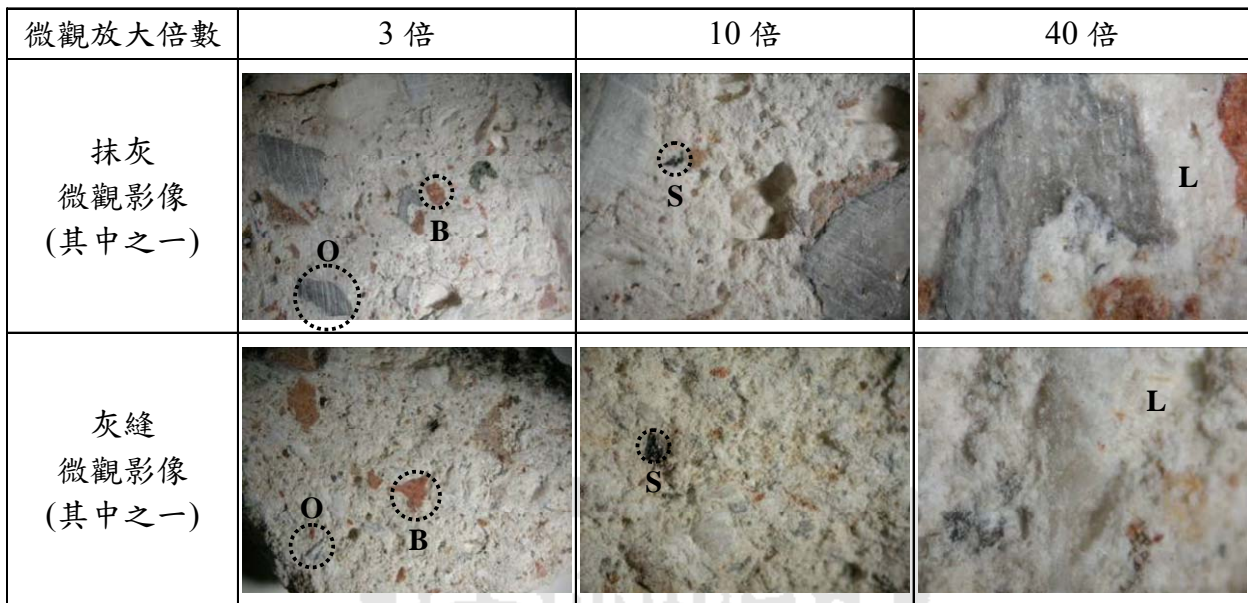
## (3) 配比分析結果

照片 4-10 所示為微觀影像，由圖中觀察可知南殘牆之灰漿含有石灰(L)、牡蠣殼(O)與少量的細砂(S)及紅磚碎屑(B)等材料，即圖中所標示之處。配比分析之結果如表 4-9 及圖 4-7 中所示，顯示牆的南北兩面之灰漿所用配比應是相同的，不論是在磚縫或是抹灰處，均使用大量的石灰(約 70%)作為膠結材，摻合細砂、牡蠣殼作為骨材，並添加適量的醣類漿體(醣類/灰=0.04)調和黏結。

表 4-8 熱蘭遮城南殘牆灰漿之取樣部位與點數

古蹟名稱		熱蘭遮城南殘牆	
位置		台南市安平區-安平古堡內	
本 樣 數	部位	抹灰	灰縫
	數量	6	6
北面牆 樣本照片 (其中之一)			
南面牆 樣本照片 (其中之一)			





照片 4-10 熱蘭遮城南殘牆灰漿之微觀

表 4-9 熱蘭遮城南殘牆灰漿之配比分析結果

樣本編號		$W_{Lime}(\%)$	$W_{O.S.}(\%)$	$W_{Sand}(\%)$	$W_T / W_L$	
抹灰	北面牆	No.1	81.63	9.31	9.06	0.042
		No.2	70.56	18.92	10.53	0.043
		No.3	66.77	22.98	10.25	0.049
	南面牆	No.1	70.11	18.84	11.05	0.037
		No.2	67.05	21.09	11.86	0.047
		No.3	82.59	6.18	11.23	0.035
灰縫	北面牆	No.1	74.46	17.39	8.15	0.029
		No.2	67.97	21.38	10.65	0.028
		No.3	67.67	15.51	16.82	0.037
	南面牆	No.1	71.19	18.39	10.42	0.058
		No.2	66.49	22.56	10.96	0.036
		No.3	68.43	20.56	11.01	0.029

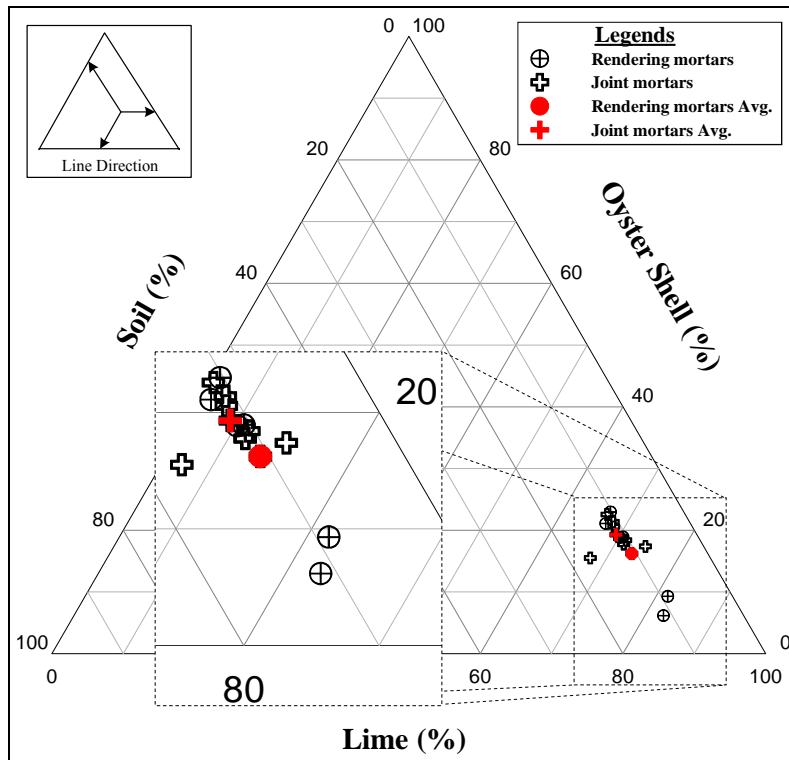


圖 4-7 熱蘭遮城南殘牆灰漿之配比分析結果

#### 4-3-2 臺灣府城垣之灰漿配比分析

##### (1) 古蹟簡介

清廷調動四省兵力於 1788 年平定歷時一年四個月之林爽文事件後，重新思量臺灣的定位，允許原先使用荊竹圍插的臺灣府城(今台南)改建為土城，然建城所需經費全由當地士紳自籌 (周郁森，2003)。其建城係以灰土版築內、外城垣及牆頂，於中復填土，並在牆體表面抹灰。目前較大面積保存下來的有小東門段城牆(照片 4-11)。



照片 4-11 今日臺灣府城小東門段現況，攝於 2007.04


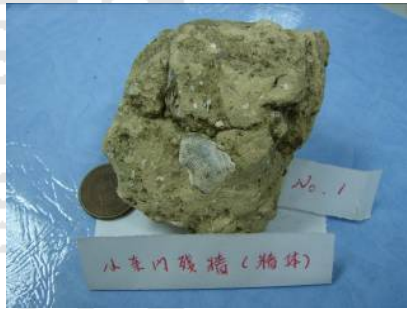
##### (2) 取樣地點

小東門段塌落之灰土塊為本研究樣本的來源，撿拾地點在面勝利路靖波門(原小西門遷建)右側的第一堵牆角，如照片 4-12 所示，試體編號由左而右依序編碼。現將臺灣府城之取樣部位與點數整理如表 4-10。



照片 4-12 臺灣府城小東門段灰漿之樣本取樣處

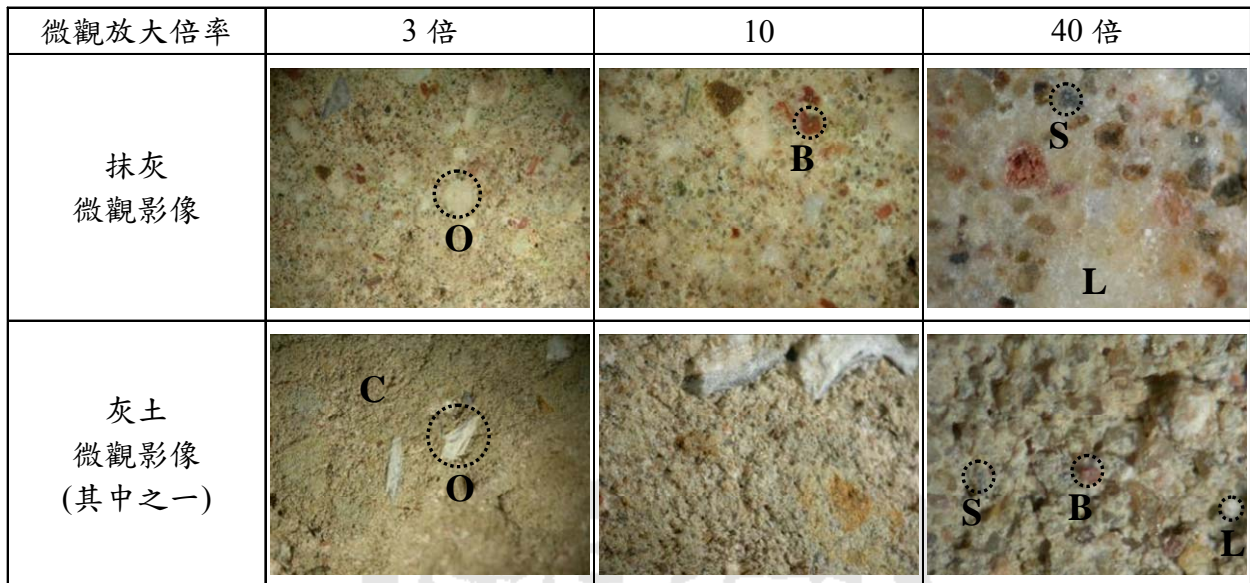
表 4-10 臺灣府城小東門段灰漿之取樣部位與點數

古蹟名稱		台灣府城垣小東門段	
興建年份		1788	
現址		台南市勝利路-成大校區內	
樣	部位	抹灰	灰土
	數量	1	5
樣本照片 (其中之一)			

### (3) 配比分析結果

由照片 4-13 所示之微觀影像，可知抹灰層的樣本中含有石灰(L)、細砂(S)、牡蠣殼(O)與紅磚碎屑(B)等材料；而灰土牆體所用的材料則有石灰、黏土(C)、細砂、牡蠣殼。配比分析之結果如表 4-11，將配比分析之結果換算成體積比，如表 4-12 所示，表中所列的材料乾單位重為第三章所述之材料基本性質，可知灰土牆體之構築約依照體積比一份石灰、二份黏土、三份細砂、一份蚵殼及適量的水及醱類夯築而成。配比分析的結果以三角座標圖示於圖 4-8，其中田為南門段之灰土樣本。





照片 4-13 臺灣府城小東門段灰漿之微觀

表 4-11 臺灣府城小東門段灰漿之配比分析結果

分析結果	抹灰	灰土					
		No.1	No.2	No.3	No.4	No.5	Avg.
$W_L$ (%)	59.92	9.82	6.75	8.26	6.37	7.97	7.83
$W_C$ (%)	-	29.94	28.63	31.96	33.44	32.18	31.23
$W_S$ (%)	37.06	48.09	45.46	48.49	52.61	49.16	48.76
$W_O$ (%)	3.02	12.15	19.17	11.29	7.58	10.69	12.17
$W_T/W_L$	0.009	0.012	0.018	0.021	0.021	0.019	0.018

表 4-12 臺灣府城小東門段灰土牆之體積配合比

	石灰	黏土	砂	牡蠣殼
含量(wt%)	7.83	31.23	48.76	12.17
材料乾單位重(g/cm <sup>3</sup> )	0.72	1.32	1.54	0.93
含量/材料乾單位重	10.88	23.66	31.66	13.08
灰漿材料體積配比	1.0	2.1	2.9	1.2

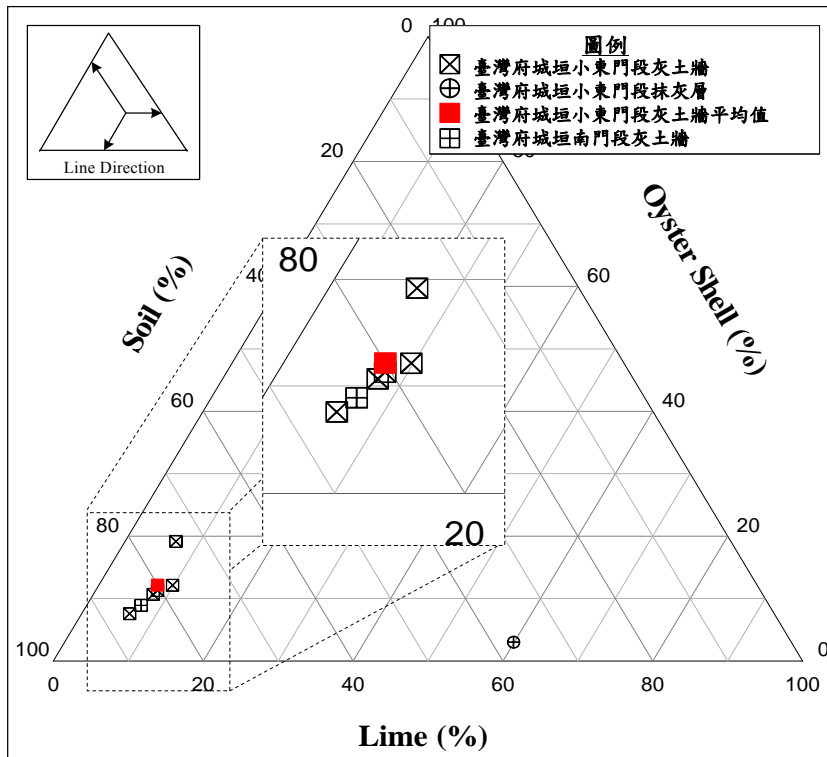


圖 4-8 臺灣府城小東門段灰漿之配比分析結果

### 4-3-3 鳳山縣城東便門段之灰漿配比分析

#### (1) 古蹟簡介



清康熙 23 年(1684 年)設置鳳山縣於興隆莊(今高雄市左營)，林爽文起事後(1786)，莊大田於南部響應，由龜山攻入興隆莊的鳳山縣城。1788 年事平後，官民協議移建城池到下坡頭街(今高雄縣鳳山)，此為鳳山新城，而興隆莊則被稱為舊城。嘉慶 9 年(1804 年)建城門六座並以荊竹圍插，本研究之東便門(同儀門)則為其中一座城門。咸豐 4 年(1854 年)，以官方捐款及民間募捐(佔絕大多數)的方式籌款將荊竹圍籬改為灰土牆。



照片 4-14 今日鳳山縣城東便門段現況，攝於 2007.05


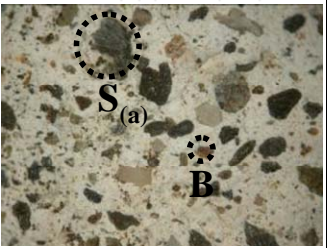
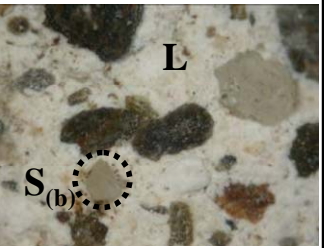
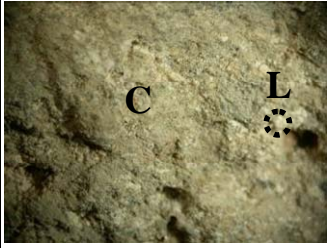
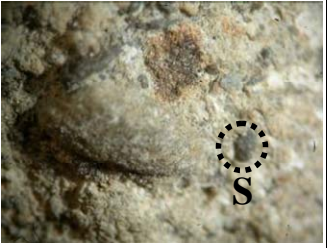

## (2) 取樣地點

表 4-13 鳳山縣城東便門段灰漿之取樣部位與點數

古蹟名稱		鳳山縣城東便門與東便門段城垣	
位置		高雄縣鳳山市	
興建年份		1804	1854
本 樣	部位	城門之磚面抹灰	東便門段城垣之灰土
	數量	1	1
樣本照片			

## (3) 配比分析結果

照片 4-15 為同儀門之抹灰的微觀，可知含有石灰(L)、黑色與乳白色砂(S<sub>a</sub>、S<sub>b</sub>)、貝類碎屑(O)與磚屑(B)等材料；灰土牆則含有石灰(L)、黏土(C)、砂(S)等材料。表 4-14 為配比分析之結果，可知其配比中，貝殼類的碎屑是較少的，即便是在灰土牆中亦沒有使用到牡蠣殼作為骨材；由分析之結果發現灰漿樣本中並無醣類含量。

微觀放大倍率	3 倍	10	40 倍
城門之抹灰 微觀影像 (其中之一)			
城牆之灰土 微觀影像 (其中之一)			

照片 4-15 鳳山縣城東便門段灰漿之微觀



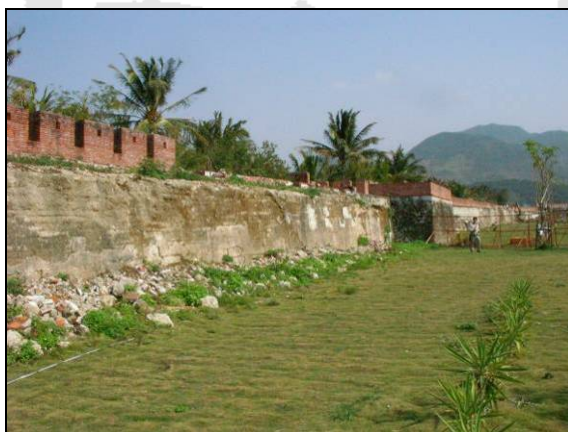
表 4-14 鳳山縣城東便門段灰漿之配比分析結果

分析結果	抹灰	灰土
$W_L$ (%)	72.94	17.86
$W_C$ (%)	-	44.97
$W_S$ (%)	25.59	36.79
$W_O$ (%)	1.47	0.38
$W_T / W_L$	-	-

#### 4-3-4 恆春縣城北門段之灰漿配比分析

##### (1) 古蹟簡介

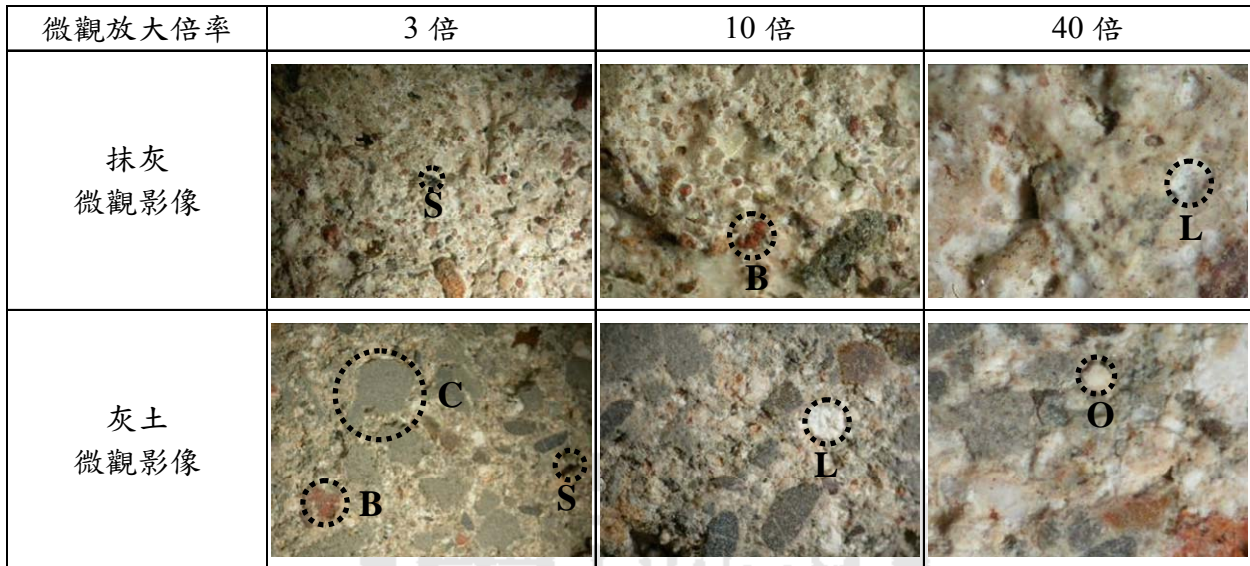
牡丹社事件(1871-74)結束，清政府遂有在琅嶠地區(恆春舊名)設官築城之議，以沈葆楨辦理臺灣海防事務及善後事宜，經履勘現地、規劃建邑諸事後，於光緒五年(1879)恆春縣城竣工為臺灣第一座由清政府出資興建之磚石城牆(周郁森，2003)，城門樓以磚石疊砌，城牆以三合土版築而成，迄今百餘年，是臺灣唯一保留四座城門與部分城牆的縣城。



照片 4-16 今日恆春縣城北門段現況，攝於 2007.04

##### (2) 配比分析結果

照片 4-11 為北門段灰漿之微觀，可知抹灰層含有石灰(L)、砂(S)與磚屑(B)等材料；灰土牆則含有石灰、黏土(C)、砂與貝類碎屑(O)等材料。表 4-15 為配比分析之結果，顯示其灰土牆使用大量的黏土，但並沒有將黏土使用在牆面的抹灰，而灰土牆之重量比約為石灰：黏土：砂：貝類碎屑=2：4：2：1。



照片 4-11 恆春縣城北門段灰漿之微觀

表 4-15 恆春縣城北門段灰漿之配比分析結果

分析結果	抹灰	灰土
$W_L$ (%)	69.13	23.75
$W_C$ (%)	-	44.74
$W_S$ (%)	25.13	21.73
$W_O$ (%)	5.64	9.79
$W_T / W_L$	0.025	0.008

#### 4-3-5 古蹟灰漿配比分析之小結

現將熱蘭遮城南殘牆、臺灣府城垣小東門段、鳳山縣城東便門段與恆春縣城北門段之古蹟灰漿樣本的平均分析結果，彙整在表 4-16 中，由於築城年代的不同、政治考量因素的不同、地域的不同、工匠的不同等，因而可藉由古灰漿配比分析的結果，透過這些不同的觀點來作討論。

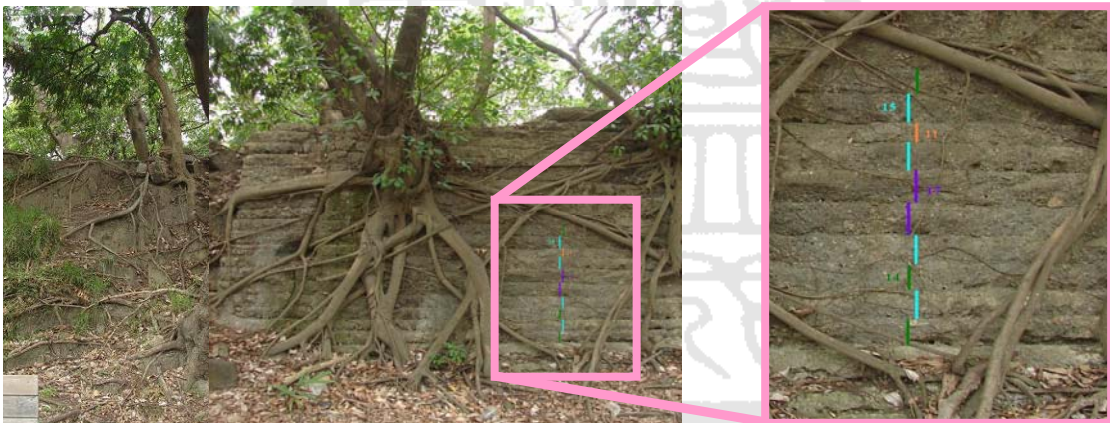


表 4-16 古蹟灰漿配比分析之結果平均值的比較

古蹟名稱		熱蘭遮城南殘牆		台灣府城垣小東門段		鳳山縣城東便門段		恆春縣城北門段	
位置		台南市安平		台南市東區		高雄縣鳳山市		屏東縣恆春鎮	
時代背景		荷治		清 乾隆		清 嘉慶	清 咸豐	清 光緒	
興建年份		1624-1662		1788		1804	1854	1875	
樣本	部位	抹灰	灰縫	抹灰	灰土	城門之抹灰	城牆之灰土	抹灰	灰土
	數量	6	6	1	5	1	1	1	1
	厚度(cm)	1.0	1.5	0.2	9~23	0.3	未量測	0.6	11
$W_L$ (%)	73.12	69.37	59.92	7.83	72.94	17.86	69.13	23.75	
$W_C$ (%)	-	-	-	31.23	-	44.97	-	44.74	
$W_S$ (%)	10.66	11.33	37.06	48.76	25.59	36.79	25.13	21.73	
$W_O$ (%)	16.22	19.30	3.02	12.17	1.47	0.38	5.64	9.79	
$W_L:W_T$	1 : 0.042	1 : 0.036	1 : 0.009	1 : 0.018	-	-	1 : 0.025	1 : 0.008	

1. 石灰與糖之最佳重量比為 1 : 0.04~0.067 (王龍盛, 2003), 由材料配比的觀點, 本研究所分析之四處古蹟建築中, 以熱蘭遮城南殘牆之石灰與糖類配比 1 : 0.04 最為理想。僅就牆面抹灰而言, 由石灰含量、糖類配比及抹灰厚度而觀, 熱蘭遮城南殘牆皆屬第一, 直至今日, 其保存狀況相較於其它三座城牆要完整的多, 且經歷的時間又較長久, 當然, 或許與抹灰層是附著於磚牆或灰土牆之不同有關。
2. 同屬於清代城牆, 臺灣府城垣之牆面抹灰厚度僅 0.2cm, 且灰土牆之含灰量極低(約 8%), 研判應是建城所需經費僅由當地士紳自籌, 故經費不足而減少石灰用量; 相較之下, 恆春縣城由滿清國帑撥款建造, 不論是在灰土牆或抹灰之含灰量皆較高, 且抹灰層亦較厚實。

3. 台南縣北門鄉農會所產之蠣殼灰中，夾雜少量之紅磚碎屑，應是蚵灰窯內燒製石灰時剝落的磚屑，因此同樣存在於古蹟灰漿中的少數磚屑，來源之一應是蠣殼灰本身的雜質，而非刻意添加紅磚碎屑作為細骨材。此外燒烤過的牡蠣殼呈暗黑之炭焦色，有別於常溫之下的黃白色，故灰漿中若存在炭焦色之牡蠣殼應是燒製石灰時煨燒不完全的蠣殼灰。
4. 如照片 4-12、13 所示，同屬於灰土版築牆體，臺灣府城每層夯土厚度不一，從 9cm 乃至 23cm，恆春縣城每層夯土厚度皆為 11cm，由此可知兩者施工要求之精密程度不同。再者，本研究對於臺灣府城小東門段 5 個灰土樣本之分析結果顯示其配比相近，可知其配比設計可能有一定的準則，造成夯土厚度不同的原因，可能是現場施工或監造不完善，亦或拌合水量不受控制的結果，或是單位夯土量未經計算的關係。



照片 4-12 臺灣府城小東門段版築夯土牆



照片 4-13 恆春縣城北門段版築夯土牆

## 第五章 灰漿之性質試驗

本章節旨在探知灰漿經加速碳化作用養護後，其抗壓強度、劈張強度、吸水率、潮氣滲透與熱傳性質，其結果詳述於以下各節。並將試驗之詳細數據資料整理於附錄中。

### 5-1 基本性質試驗結果

各配比之基本性質試驗結果包含工作度試驗結果、乾縮比、乾單位重與各齡期之壓力波波速檢測。

#### 5-1-1 工作度試驗結果

各配比拌合之工作度以流度值(%)表示，將試驗之結果繪製如圖 5-1 之關係，由該圖可知灰土比 1:0.5 之石灰添加里港砂配比的流度值最低(78.24%)，而石灰為黏稠之材料，流度值過低不利於試體之灌製，易因黏稠而吸附著搗棒。

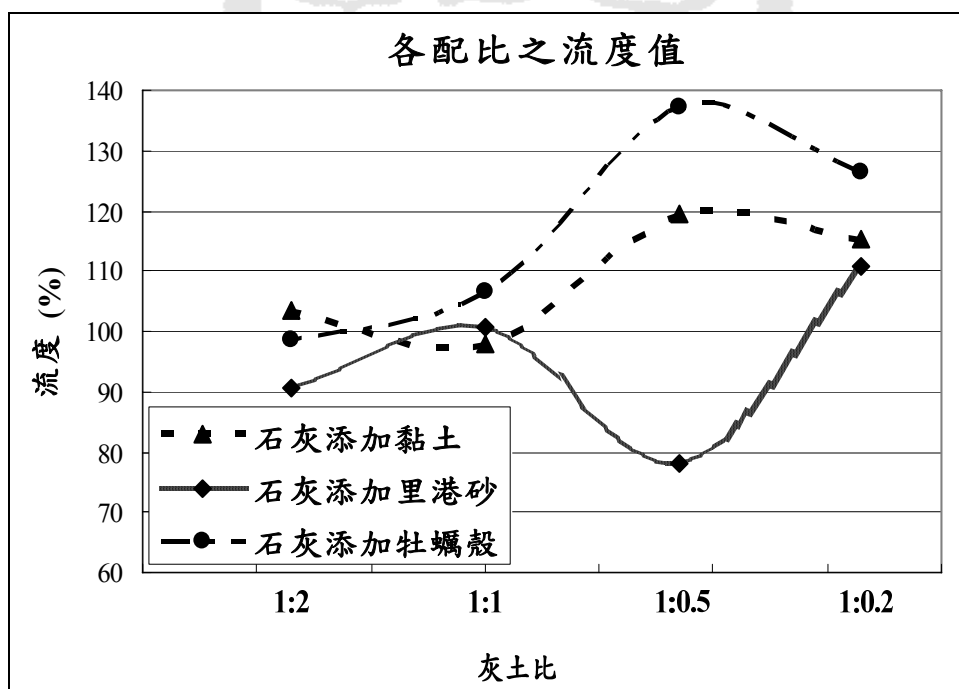


圖 5-1 各配比之工作度試驗結果

#### 5-1-2 乾縮比

中性化養護齡期與各配比乾縮比之關係如圖 5-2 所示，由圖中可知純石灰漿與石灰含量較高的  $L_{1.0}S_{0.2}$ 、 $L_{1.0}S_{0.5}$  及石灰添加黏土之試體，皆隨

著養護齡期增長而乾縮比漸增，應是活性較大的石灰、黏土易吸水膨脹且脫水後乾燥收縮量大之故，此乾縮之現象約在 4~7 天後趨於穩定。石灰添加牡蠣殼之配比則較無此現象，4 天內乾縮量已大致穩定。

現地施工時，乾燥收縮量過大易產生乾縮裂縫，因此乾縮量是值得注意的性質之一，由試驗結果可知添加牡蠣殼之試體，其乾縮量皆小於添加里港砂之試體，故欲得乾縮量小的配比，可適量加入牡蠣殼作為灰漿中的細骨材。添加黏土之試體的乾縮量較大，若灰漿中欲添加黏土，則拌合用水量不宜過多，且使用大量黏土作為骨材時，應予以夯實，如此可減少黏土之乾縮量。

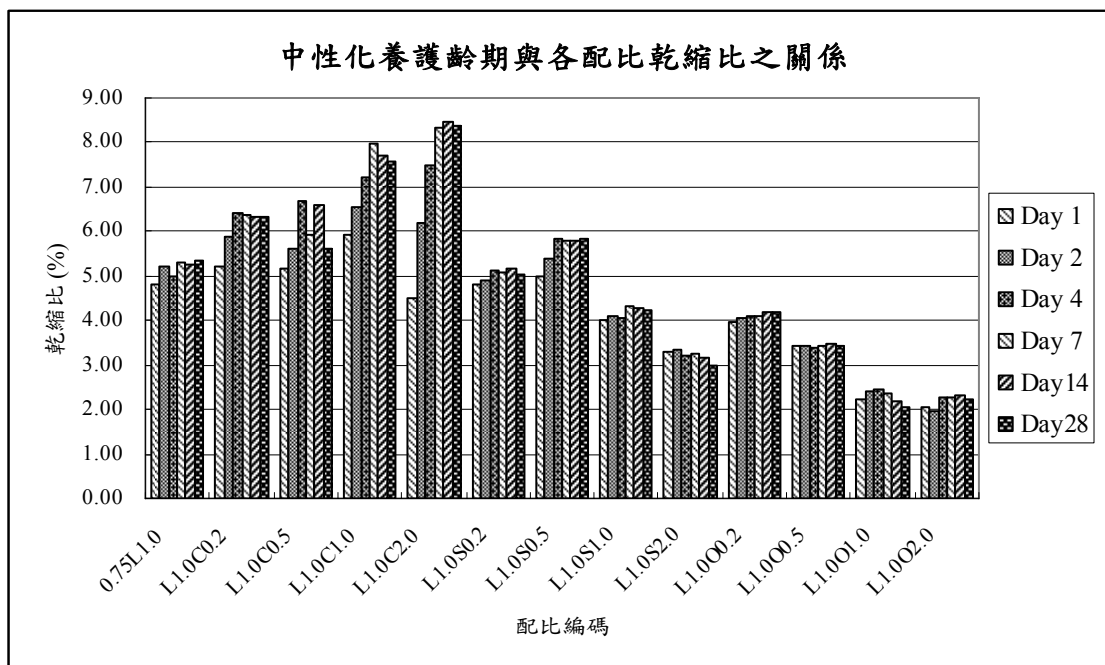


圖 5-2 中性化養護齡期與各配比乾縮比之關係

### 5-1-3 乾單位重

配比中若是石灰、黏土含量較高者，其乾縮量較大，在試體乾縮之過程中，因體積逐漸減小所以乾單位重會相形增加，故從圖 5-3 可知各配比之乾單位重隨著養護齡期增加有增大的趨勢。

配比設計使用重量比例混合各材料，故理論上隨著填充材之增加，乾單位重會呈比例增加，如石灰添加黏土之配比；然石灰添加里港砂之

配比中，可明顯察覺  $L_{1.0}S_{0.5}$  有較高於線性段的乾單位重，比對工作度試驗之結果可知，對於黏滯力較大之石灰材料而言，在較低的流度下拌合已經構成夯實行為；石灰添加牡蠣殼之配比中，單位重呈比例增加的趨勢是從  $L_{1.0}O_{0.5}$  開始，故石灰添加牡蠣殼之配比可分為兩種結構型式，當牡蠣殼含量較少時，其在石灰之間作為填充材，提高石灰膠結的緊密程度，反之，當牡蠣殼含量多時，石灰包覆之，單位重隨其添加量增加而增加。

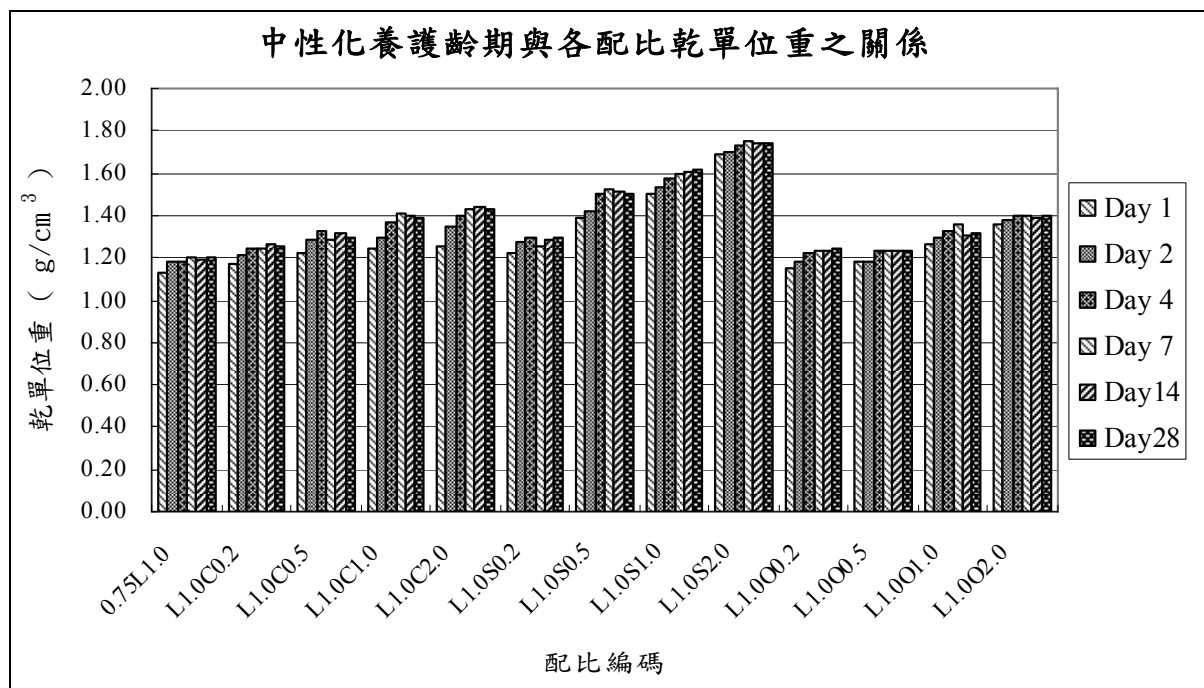


圖 5-3 中性化養護齡期與各配比乾單位重之關係

#### 5-1-4 超音波檢測

透過超音波檢測各配比在不同齡期之壓力波速，其結果如圖 5-4 所示，可知 P 波傳播速度隨著養護齡期增加而增快，其原因為中性化養護促進碳化作用之發展，使增生的碳酸鈣晶體填塞內部孔隙而使整體結構更為緊密，因而加快了 P 波之傳播速度，最終趨於穩定的 P 波波速則說明試體內的結構發展可能已成型，故可透過壓力波以非破壞性之方式檢測灰漿的中性化深度或強度生成。



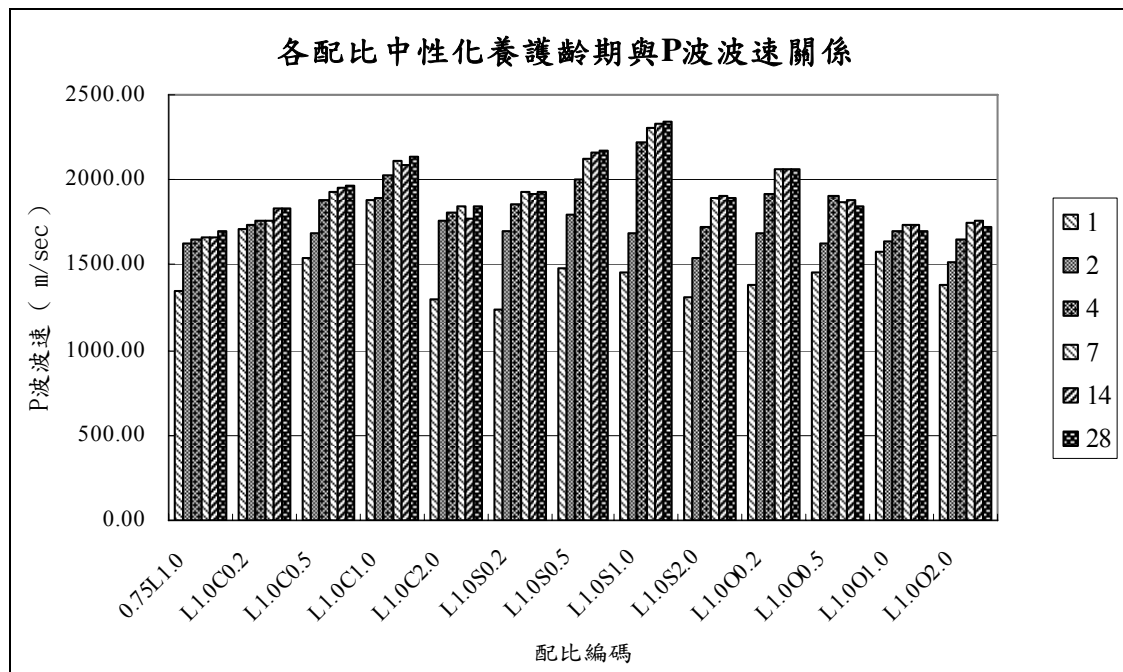


圖 5-4 中性化養護齡期與 P 波波速之關係

## 5-2 中性化試驗結果

碳化作用深入試體內部之速率，主要有兩個影響因素，其中之一是受到骨材所形成的阻礙，其二是膠結材之緊密程度。CO<sub>2</sub> 需經試體外壁透入孔隙進到試體內部，故孔隙比的大小決定了碳化作用之速率，由於骨材之孔隙比是穩定的，因此膠結材緊密程度是影響不同配比之碳化速率最關鍵的因素。本研究以酚酞指示劑評估試體之碳化程度，將碳化程度定義為碳化深與試體高度之比值，例如中性化養護齡期的第 1 天，量測 0.75L<sub>1.0</sub> 之試體碳化深達 2.26cm，而其試體高度為 4.88cm，故碳化程度為 46.31%。

因孔隙比與碳化速率有直接關係，故可藉由試體之碳化速率研判其緊密程度，由圖 5-5、5-6 及 5-7 之試驗結果可知，水灰比 0.75 之純石灰漿結構較為鬆散，若適當添加黏土、砂、牡蠣殼可形成較緊密之結構。另外，在石灰添加黏土之配比中，當石灰含量少於 50% 時，碳化作用較不明顯；當石灰含量在 50% 以上時，隨著黏土添加量的增多而試體趨於難碳化，故石灰添加少於其含量之黏土能降低孔隙比，其中以 L<sub>1.0</sub>C<sub>1.0</sub> 所形成之結構最為緻密。

在石灰添加里港砂之配比中，養護齡期第 4 天之碳化程度皆低於添加黏土的配比，應是里港砂本身結構緻密，且級配較為優良，骨材之間得宜交錯分布，故相較於石灰添加黏土所形成之連續性結構，石灰添加里港砂之配比所形成的碳化阻礙較大。其中以  $L_{1.0}S_{0.5}$  最不易碳化，應是同時受到骨材之阻礙與膠結材較緊密的影響。

石灰添加牡蠣殼之配比中，因  $L_{1.0}O_{0.2}$  與  $L_{1.0}O_{0.5}$  之乾單位重相近，故可知  $L_{1.0}O_{0.5}$  所構成之膠結材較為鬆散，因而加速了碳化作用之深入； $L_{1.0}O_{1.0}$  則是同時受到骨材阻礙與膠結材緊密的影響，故碳化速率亦較慢； $L_{1.0}O_{2.0}$  則因膠結材包覆厚度不足而出現不少微裂隙，促進了碳化作用之發展。

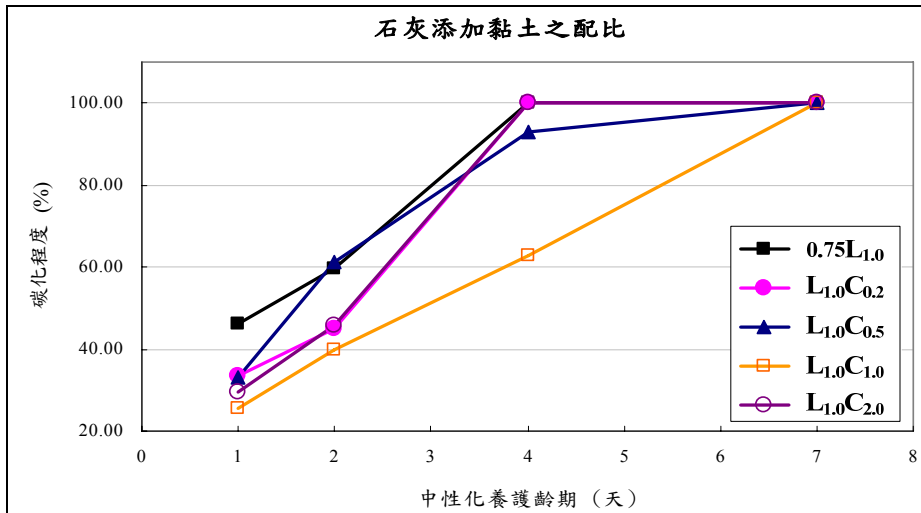


圖 5-5 石灰與石灰添加黏土配比之中性化養護齡期與碳化程度

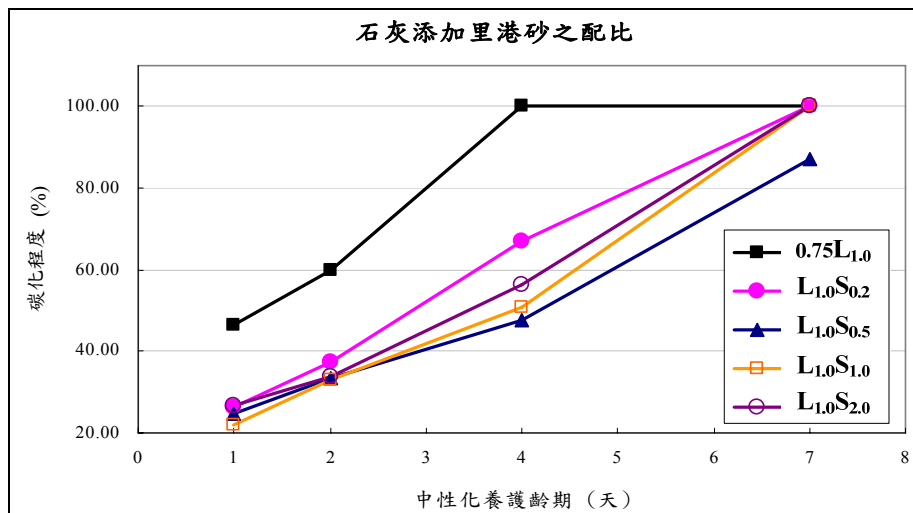


圖 5-6 石灰添加里港砂配比之中性化養護齡期與碳化程度

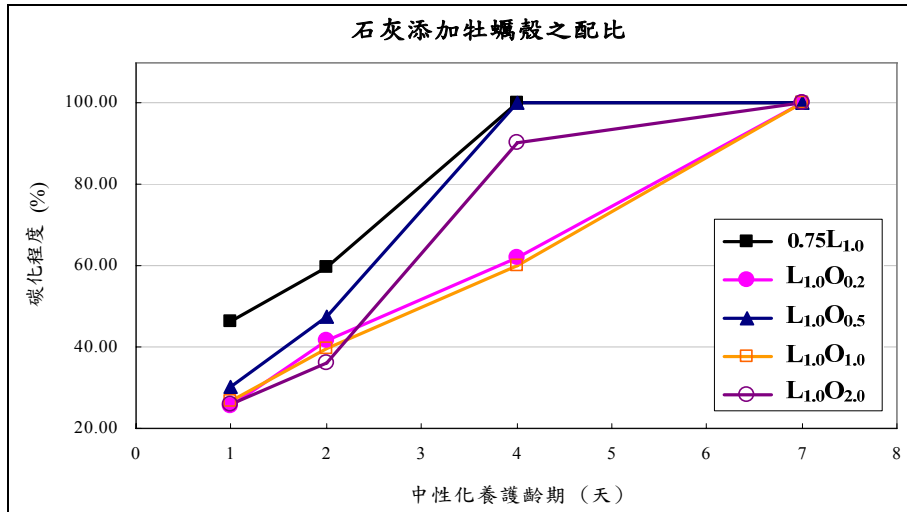


圖 5-7 石灰添加牡蠣殼配比之中性化養護齡期與碳化程度

### 5-3 力學性質試驗結果

本研究欲探討中性化養護後，灰漿最終穩態之抗壓強度與劈張強度，並期能瞭解試體碳化程度與力學性質之關係。相關試驗包含灰漿之氣乾 28 天齡期與中性化養護 1、2、4、7、14、28 齡期之抗壓強度及碳化養護 28 天齡期之劈張試驗，其結果詳述於以下各節。

#### 5-3-1 氣乾養護之抗壓試驗結果

圖 5-8 所示為氣乾 28 天齡期之抗壓強度結果，純石灰漿僅試體與空氣接觸的表面碳化，碳化程度為 10.69%，而其強度為 5.13 kgf/cm<sup>2</sup>，相較於 0.46C<sub>1.0</sub> 之純黏土乾燥後的強度 26.90 kgf/cm<sup>2</sup>，要低得許多。

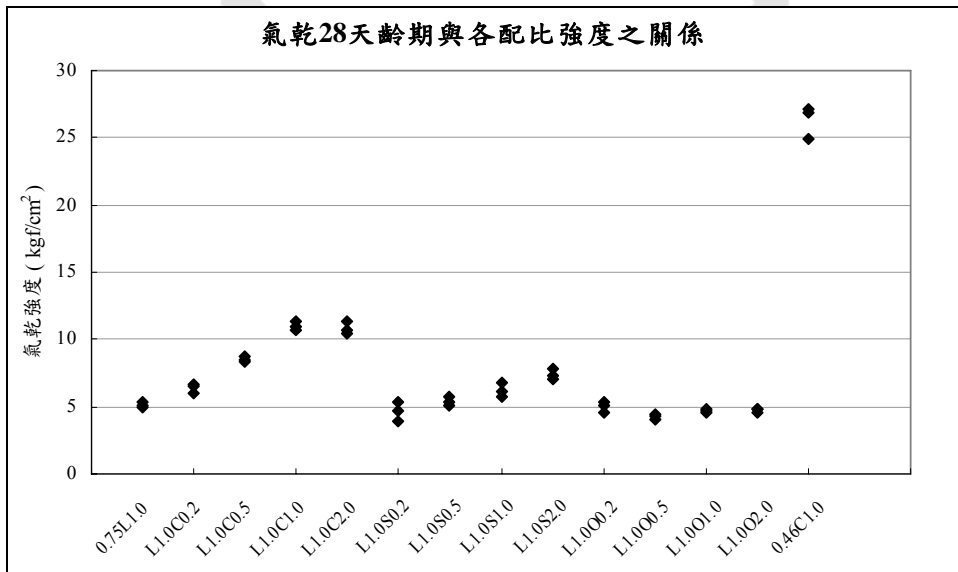


圖 5-8 氣乾 28 天齡期與各配比之抗壓強度



初期石灰對於骨材之膠結力不如黏土來得大，故黏土含量較多的  $L_{1.0}C_{1.0}$  與  $L_{1.0}C_{2.0}$  表現出高於添加里港砂、牡蠣殼等配比之強度；密集排列的稜角狀骨材可形成互鎖之鍵結力，故在膠結強度未生成時，添加里港砂之配比，其強度大於添加牡蠣殼；此外， $L_{1.0}S_{0.2}$  及  $L_{1.0}O_{0.2}$  配比之強度與  $0.75L_{1.0}$  相近，應是試體中骨材含量稀少缺乏機械性的鍵結；石灰添加牡蠣殼之配比在初期強度皆低於純石灰漿，應是由於膠體不足且牡蠣殼自身之互鎖能力低的緣故。

### 5-3-2 碳化養護之抗壓試驗結果

純石灰漿之強度與石灰燒製的品質有極大關係，本研究所用之石灰其  $CaO$  純度為 98.94%，在水灰比 0.75 設計下，最終完全碳化後的穩態強度為  $40.35 \text{ kgf/cm}^2$ 。

由圖 5-9 之試驗結果可知，石灰添加黏土之配比皆有助於提升強度，應是同為細顆粒的黏土與石灰拌合後相互填充彼此間之空隙，使添加黏土之試體較純石灰漿緊密，因而能發揮出較高的強度。其中以  $L_{1.0}C_{1.0}$  最能大幅提升灰漿最終之力學性質。對照中性化試驗之結果， $L_{1.0}C_{1.0}$  之碳化速度較其它組添加黏土之配比为慢，可知其試體的緊密程度在本研究之石灰添加黏土配比中為最佳。當黏土含量大於石灰時，未經夯實的黏土無法發揮出其作為骨材應有之凝聚力(Cohesive)，故降低  $L_{1.0}C_{2.0}$  之強度。

由圖 5-10 之試驗結果可知石灰添加里港砂之配比中，石灰含量低於 50%之配比  $L_{1.0}S_{2.0}$ ，其強度略小於純石灰漿，應是膠結材含量不足以使膠結強度適宜發展，故骨材亦無法發揮其機械性的互鎖與摩擦強度，此外， $L_{1.0}S_{1.0}$  之強度高於  $L_{1.0}S_{0.2}$  與  $L_{1.0}S_{0.5}$ ，應是石灰本身強度較低的原故，故可知  $L_{1.0}S_{1.0}$  之配比有最適當的石灰與里港砂之組合。對照中性化試驗結果， $L_{1.0}S_{0.5}$  之配比最不易碳化，顯示其試體有較為緊密的結構體，然而力學強度並非最高，可能是前述石灰本身強度不高所致，或是試體本身存在不連續面。

圖 5-11 中， $L_{1.0}O_{0.2}$  之強度略高於純石灰漿  $0.75L_{1.0}$ ，且兩者之乾單位重相近，可知傳統建築材料使用之蠣殼灰，因燒製技術不佳而煅燒不完全之牡蠣殼，若基於力學性質考量反而具有加勁材之功效。

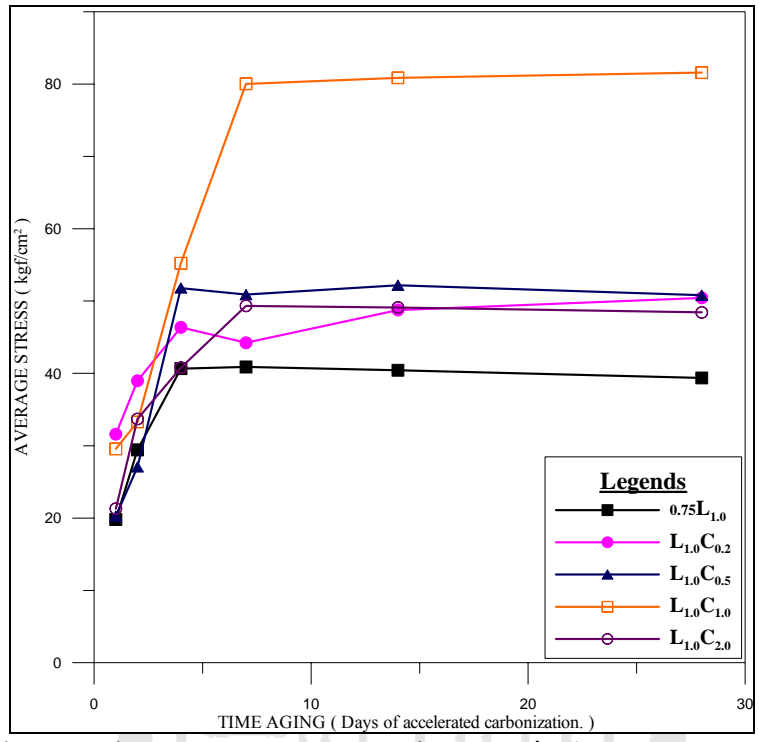


圖 5-9 石灰與石灰添加黏土配比之中性化養護齡期與抗壓強度關係

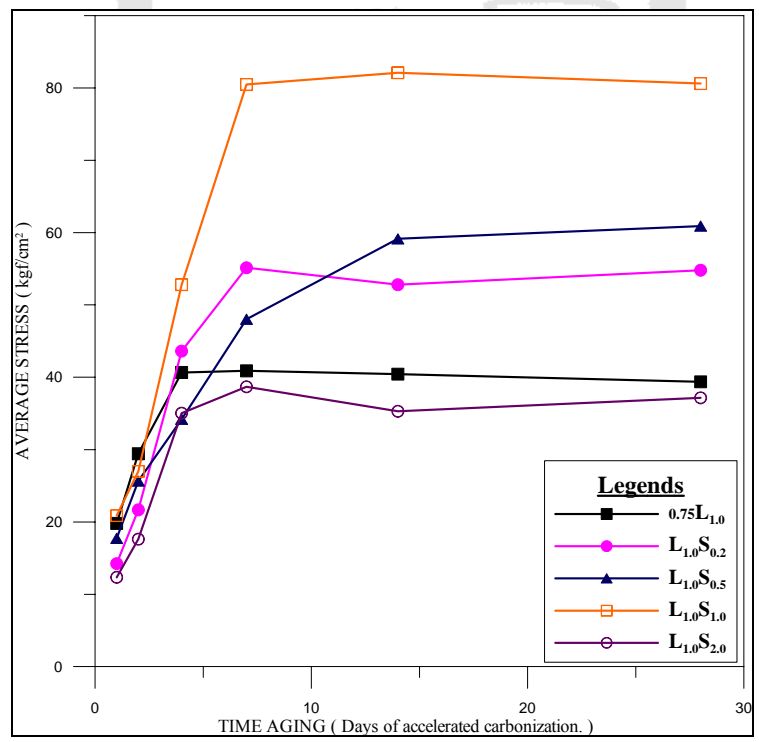


圖 5-10 石灰添加里港砂配比之中性化養護齡期與抗壓強度關係

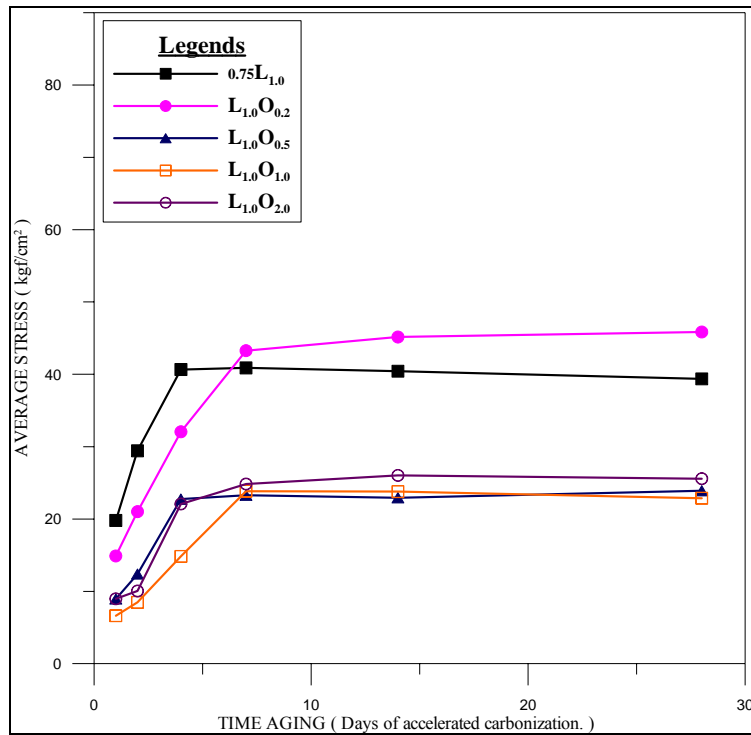


圖 5-11 石灰添加牡蠣殼配比之中性化養護齡期與抗壓強度關係

彙整氣乾與中性化養護各齡期之抗壓強度試驗結果與試體碳化程度之量測結果，可得設計配比 II 中的 14 組配比之碳化程度(x)與抗壓強度生成率(y)的關係，如圖 5-14 所示，由圖中可知兩者之關係曲線經回歸後，斜率近乎為 1.0，可知碳化作用所生成之碳酸鈣晶體對灰漿的強度影像極大，故灰漿材料之相關研究若無法透過中性化試驗機加速碳化養護，可藉由此關係來估測灰漿之最終強度。本研究將試體抗壓強度生成率定義為齡期強度與試體完全碳化之最終穩態強度的比值，如 0.75L<sub>1.0</sub> 最終之抗壓強度為 40.35 kgf/cm<sup>2</sup>，而在養護第一天的平均抗壓強度為 19.80 kgf/cm<sup>2</sup>，故強度生成率達到 49.07%。碳化程度的計算如 5-2 節所述。

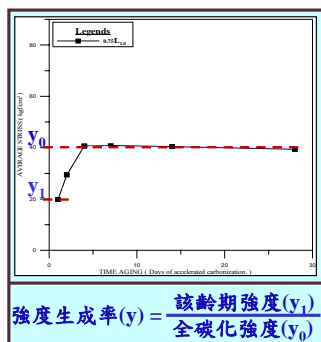


圖 5-12 強度生成率之計算

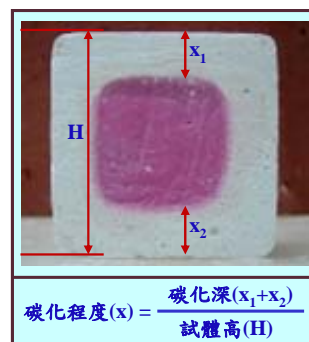


圖 5-13 碳化程度之計算

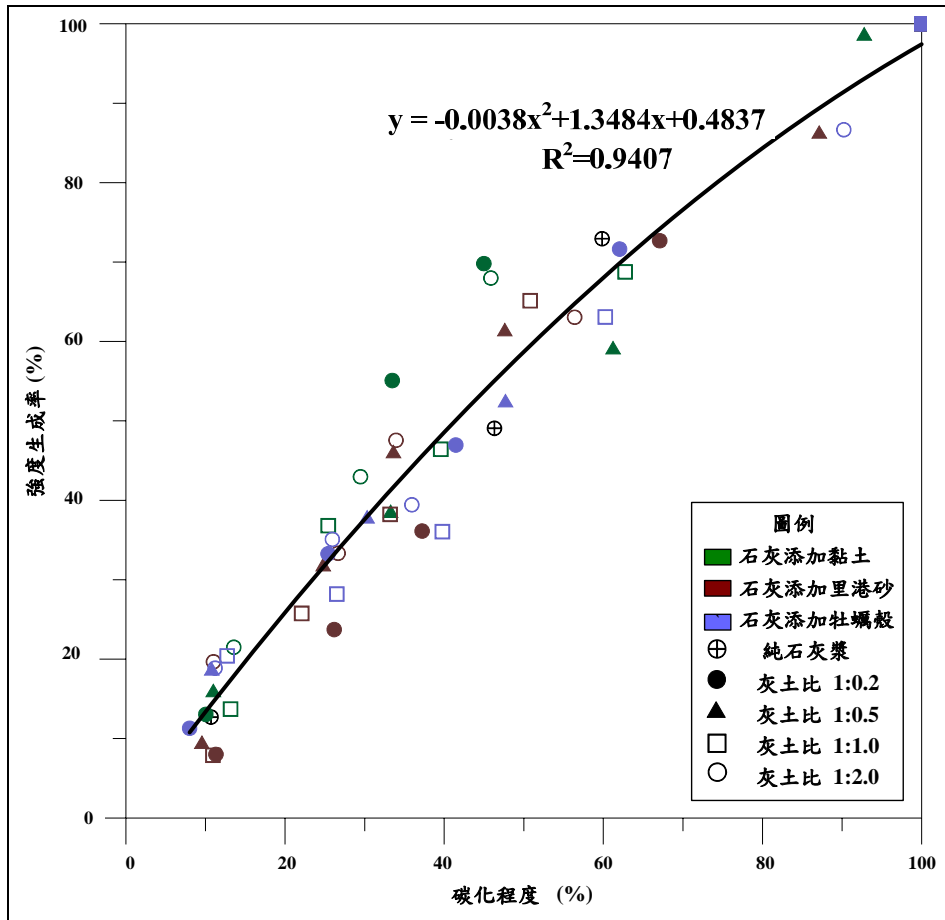


圖 5-14 試體碳化深度與抗壓強度生成之關係圖

### 5-3-3 劈張試驗結果

本研究之劈張試驗僅針對中性化養護 28 天，已完全碳化之試體作探討，目的在於瞭解灰漿完全碳化後之可能的最終強度，而未針對灰漿之劈張強度的生成行為進行探討。

試驗之結果如圖 5-15 所示，各配比穩態之抗壓強度與劈張強度整理如圖 5-16，由表中可知石灰添加黏土、里港砂、牡蠣殼配比之劈張強度約為抗壓強度的  $10 \pm 3\%$  (如不計  $L_{1.0}S_{0.5}$ )，此結果與一般混凝土抗拉強度為 10% 之抗壓強度是相近的，顯示石灰與水泥同屬於抗拉性質不良之膠結材料。而抗壓試驗表現出較高強度的  $L_{1.0}C_{1.0}$  與  $L_{1.0}S_{1.0}$  兩組配比，其劈張強度試驗之結果仍高於它組。

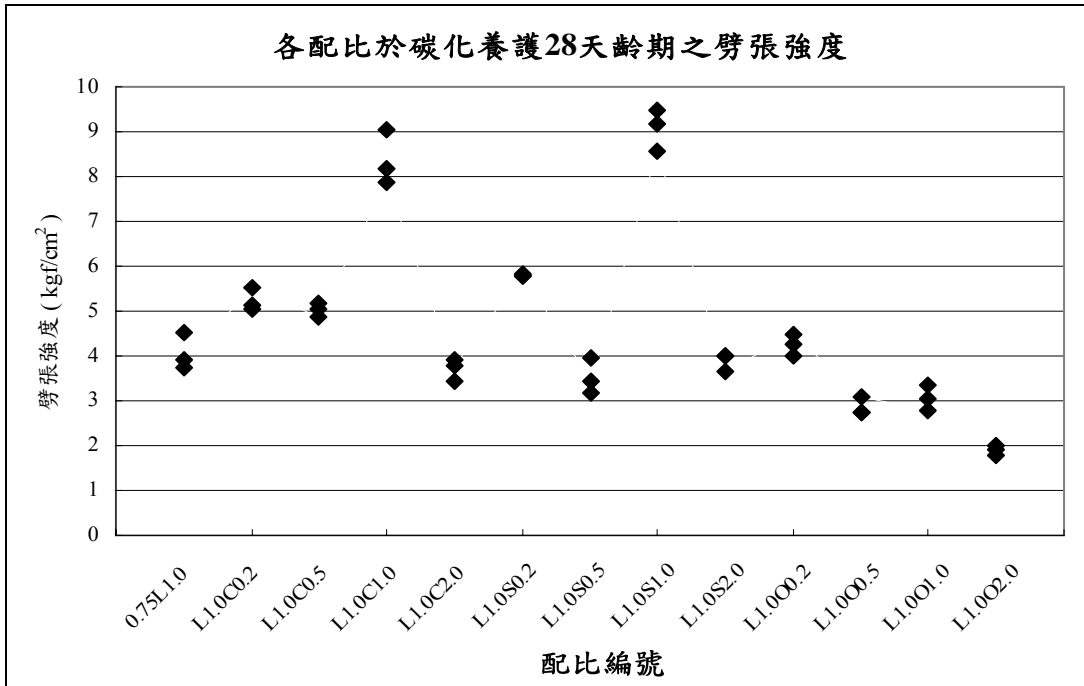


圖 5-15 劈張試驗結果

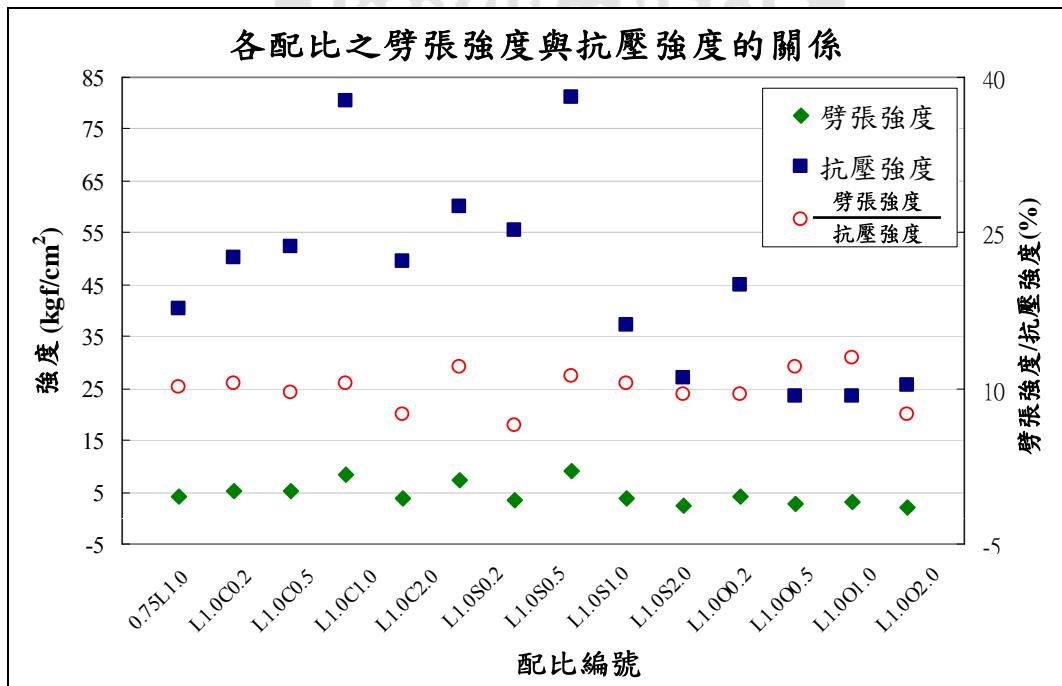
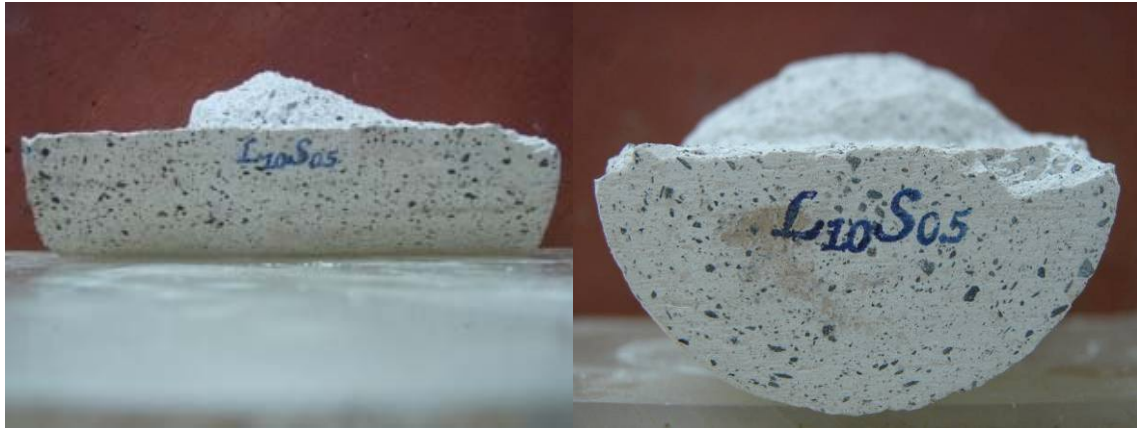


圖 5-16 各配比之劈張強度與抗壓強度的關係

如照片 5-1 所示， $L_{1.0}S_{0.5}$  之試體裂劈後，發現其開裂面為弧形，不若其他配比之劈裂面平整(照片 5-2)，研判是由於拌合之流度 78.24% 對於石灰含量較高的配比而言過於黏稠，不利於在較窄長的模具內進行澆灌搗

實，因搗棒回抽之動作會使具有黏滯力的灰漿吸附上浮，如此可能產生不連續面，故降低其劈張強度，由此推測  $L_{1.0}S_{0.5}$  之抗壓試體或許亦存在相同之不連續面，故其抗壓強度可能被低估。



照片 5-1 劈張試驗之  $L_{1.0}S_{0.5}$  裂面



照片 5-2 劈張試驗之  $0.75L_{1.0}$  裂面

#### 5-4 吸水率試驗結果

為比較石灰與水泥在物理性質上的差異，因此製作水泥試體於吸水率試驗與熱傳導係數測定中使用，本研究在製作水泥試體之水灰比設計為 0.6，未採用與石灰相同之 0.75 來設計水泥的水灰比，係由於澆置時有泌水與析離的現象不易製作試體，故採用與純石灰漿具有相同拌合流度 120% 之含水量來設計。

圖 5-17 為飽和吸水率之試驗結果，由圖中可知一重要結果，即石灰含量高的配比，其飽和含水量越大。隨著黏土含量增加而吸水量降低，

當黏土含量大於 50%，則吸水量變化不明顯，即  $L_{1.0}C_{1.0}$  與  $L_{1.0}C_{2.0}$  有相近的結果；相較於牡蠣殼，里港砂是較不容易吸水的，故以里港砂作為骨材之配比其吸水量較低。

由於試體之體積( $V$ )為已知，且假設量測時之水體單位重( $\gamma_w$ )為 1.0，則可透過飽和含水量( $V_w$ )來計算出各配比之孔隙比(Void Ratio)，現將其結果顯示於圖 5-17 中，由圖中可知純石灰漿之孔隙比最大，水泥則因水灰比設計的不同而小於純石灰漿。

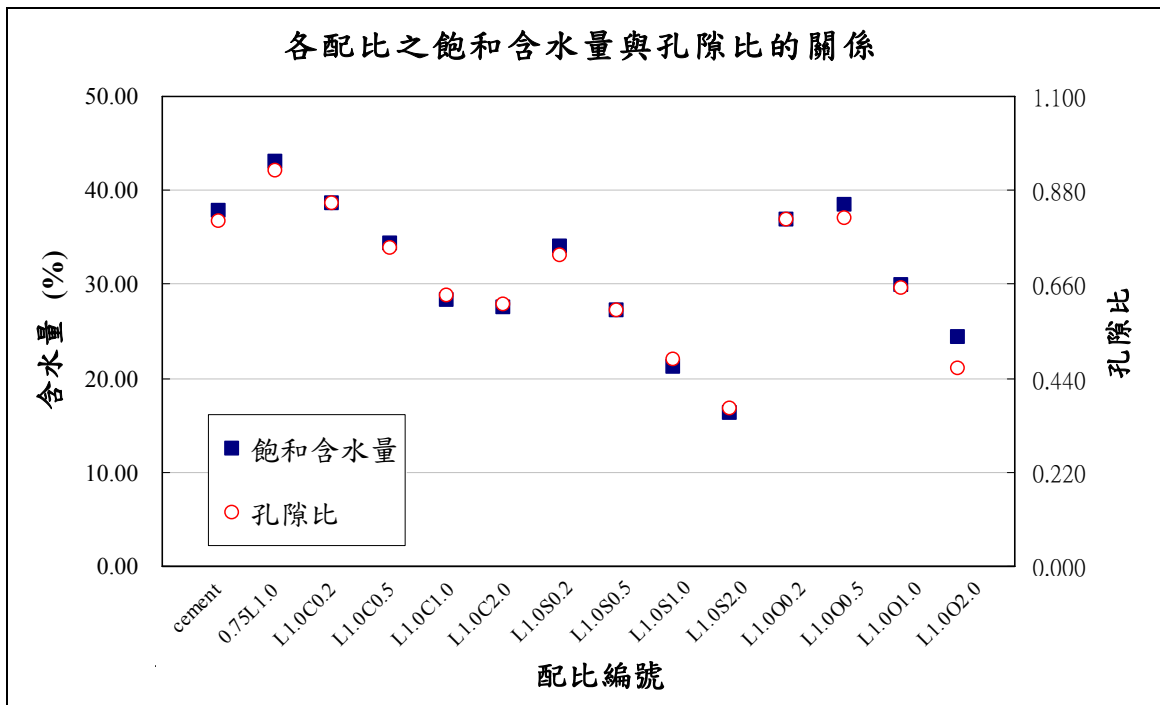


圖 5-17 飽和含水量試驗結果與計算之孔隙比

表 5-1(a、b)為本研究將各配比之烘乾試體先處於  $23^{\circ}\text{C}$  且相對溼度為 95%之恆溫恆濕環境 24 小時後，再置放於自然環境 24 小時(台南，溫度  $28.8^{\circ}\text{C}$ ，相對溼度 73%，2007.06.08，中央氣象局資料)，於訂定之時間量測各試體含水量變化之結果。為便於比較其間的關係，現將其結果繪於圖 5-18~21 中。

表 5-1(a) 濕氣滲入與內部水氣蒸散之測定結果

量測時間點(hr)	cement	L <sub>1.0</sub>	L <sub>1.0</sub> C <sub>0.2</sub>	L <sub>1.0</sub> C <sub>0.5</sub>	L <sub>1.0</sub> C <sub>1.0</sub>	L <sub>1.0</sub> C <sub>2.0</sub>	L <sub>1.0</sub> S <sub>0.2</sub>	L <sub>1.0</sub> S <sub>0.5</sub>	L <sub>1.0</sub> S <sub>1.0</sub>	L <sub>1.0</sub> S <sub>2.0</sub>	L <sub>1.0</sub> O <sub>0.2</sub>	L <sub>1.0</sub> O <sub>0.5</sub>	L <sub>1.0</sub> O <sub>1.0</sub>	L <sub>1.0</sub> O <sub>2.0</sub>
1	0.195	0.187	0.156	0.149	0.164	0.201	0.157	0.099	0.094	0.087	0.161	0.168	0.134	0.106
2	0.727	0.545	0.474	0.434	0.467	0.593	0.378	0.297	0.239	0.197	0.520	0.436	0.335	0.213
4	1.927	1.246	1.046	1.116	0.623	0.731	0.606	0.473	0.372	0.282	0.873	0.877	0.468	0.508
8	2.649	1.610	1.400	1.346	0.940	1.148	0.887	0.733	0.533	0.400	1.228	1.196	0.686	0.718
24	4.163	2.295	2.306	1.812	1.501	1.752	1.526	1.310	0.835	0.634	2.014	1.830	1.201	1.183
25	4.038	2.139	2.138	1.696	1.423	1.628	1.399	1.173	0.747	0.559	1.918	1.716	1.065	1.096
26	3.912	2.053	1.976	1.584	1.336	1.505	1.257	1.056	0.676	0.497	1.798	1.604	0.961	1.013
28	3.766	1.811	1.806	1.428	1.199	1.359	0.998	0.926	0.584	0.425	1.617	1.443	0.820	0.901
36	3.258	1.176	1.092	1.005	0.716	0.755	0.439	0.526	0.293	0.194	1.065	0.885	0.472	0.553
48	3.225	1.147	0.914	0.982	0.579	0.625	0.400	0.498	0.262	0.185	0.965	0.854	0.457	0.532

註：表中各時間點之量測值為試體之含水量(%)。

表 5-1(b) 濕氣滲入與內部水氣蒸散之測定結果

配比	cement	L <sub>1.0</sub>	L <sub>1.0</sub> C <sub>0.2</sub>	L <sub>1.0</sub> C <sub>0.5</sub>	L <sub>1.0</sub> C <sub>1.0</sub>	L <sub>1.0</sub> C <sub>2.0</sub>	L <sub>1.0</sub> S <sub>0.2</sub>	L <sub>1.0</sub> S <sub>0.5</sub>	L <sub>1.0</sub> S <sub>1.0</sub>	L <sub>1.0</sub> S <sub>2.0</sub>	L <sub>1.0</sub> O <sub>0.2</sub>	L <sub>1.0</sub> O <sub>0.5</sub>	L <sub>1.0</sub> O <sub>1.0</sub>	L <sub>1.0</sub> O <sub>2.0</sub>
濕氣滲入量(%)	4.163	2.295	2.306	1.812	1.501	1.752	1.526	1.310	0.835	0.634	2.014	1.830	1.201	1.183
水氣蒸散率(%)	9.54	21.07	21.66	21.18	20.11	22.44	34.63	29.34	30.14	33.06	19.74	21.12	31.72	23.88

註：(1)濕氣滲入量為上表中第 24 小時之含水量。  
(2)水氣蒸散率為上表中第 24 小時與第 28 小時之差值與濕氣滲入量之比值，即(24hr-28hr)/24hr。



如圖 5-18 所示，在潮濕環境中，水泥含水量之增加速率較純石灰漿快，在圖中第 24 小時，水泥與石灰之含水量分別為 4.16 與 2.30%，但在自然環境中，兩者含水量之蒸散速率則以石灰略為快速，在圖中 32~48 小時的持平階段為該自然環境中兩者之常態含水量，此應是材料本身自然含水量，故以 24~28 小時階段作為試體內部水氣蒸散能力之比較，在第 28 小時，水泥與石灰之含水量分別為 3.77 與 1.81%，比較兩者蒸散之水量，可知水泥蒸散原先含水量的 9.54% 的，而石灰蒸散原先含水量的 21.07%，由此可知石灰是較容易將濕氣散出的，相形之下，水泥易受濕氣滲入且不易將其排出，此即可能是一般水泥粉刷之室內磚砌壁體在陰雨天牆面潮濕的緣故，此外，屋外空氣中的濕氣滲入可能使室內有不良的氣味或黴菌的孳生而導致人體不適。由此一結果，可知若以水泥做為古蹟修復之材料，恐因其易受濕氣滲入且難透出而阻礙古建築牆體內部既有之水分的蒸散，或使原有牆體容易處於潮濕環境中而受損。

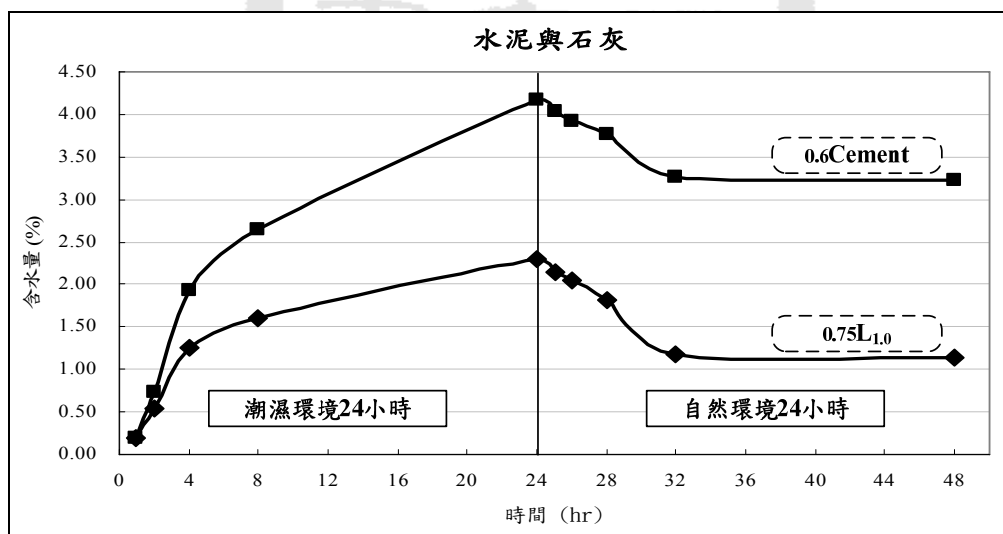


圖 5-18 水泥與石灰之烘乾試體在潮濕環境與自然環境之含水量變化

土壤力學之工程性質研判的觀念，可知水體對於孔隙比越大之材料其滲透性越大，由此可說明試驗之結果中，灰漿材料各配比對於濕氣滲入量隨著石灰含量之增加而增大，但卻無法解釋水泥與石灰兩者之試驗結果，比對兩者之孔隙比，水泥略小於純石灰試體，然兩者烘乾之試體

在同時置入潮濕環境 24 小時後，水泥含水量卻高於純石灰漿，由此可知，影響濕氣滲入的因素不單是孔隙比，事實上，可能包含材料本身的吸收力、活性、毛細作用、滲透路徑、既有的鹽分等，受影響的層面甚廣，材料的性質亦有相當多需要考量之處，本文僅由濕氣對材料滲透速率與其蒸散能力之試驗結果，來簡單說明石灰防止濕氣滲入及其內部水氣蒸散的能力要優於水泥。

圖 5-19 中， $L_{1.0}C_{0.2}$  與純石灰漿之含水量改變相近，惟在最終含水量持平階段  $L_{1.0}C_{0.2}$  略低於純石灰，可能是黏土的添加，使灰漿較易於蒸散濕氣。

圖 5-20 中，含水量變化的結果明顯是與石灰含量有關，隨著石灰含量較高而試體在潮濕環境中含水量較高，且在自然狀態中，含水量蒸散的速率也大致與純石灰漿相同。相較於添加黏土或牡蠣殼之配比，添加里港砂有助於降低潮氣的滲透。

圖 5-21 中， $L_{1.0}O_{2.0}$  與  $L_{1.0}O_{1.0}$  之含水量變化幾乎相同，可知牡蠣殼本身亦是容易受到潮氣的滲入，且不易於將水氣透出。

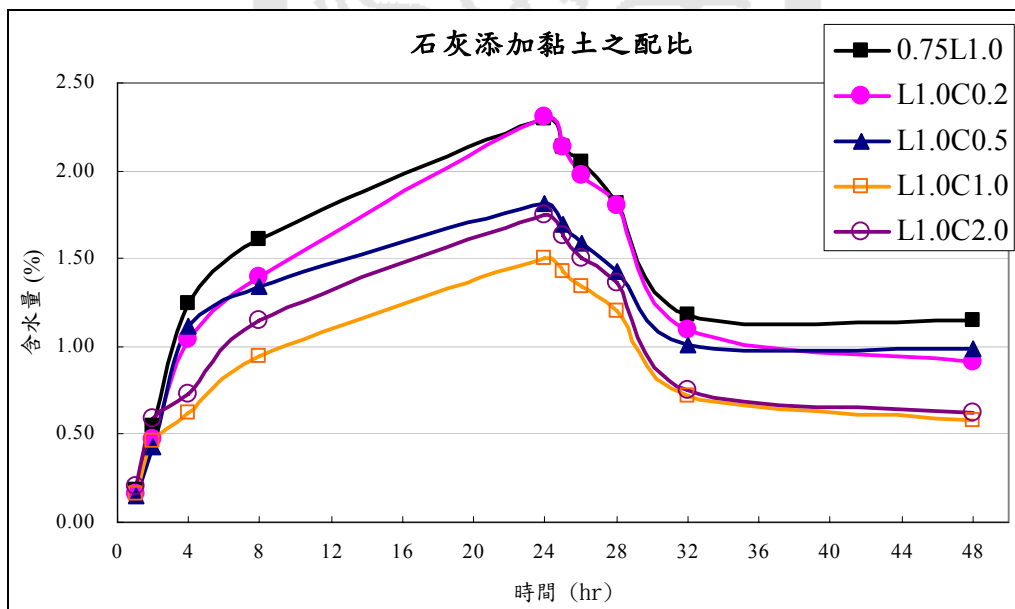


圖 5-19 石灰添加黏土配比在潮濕環境與自然環境之含水量變化

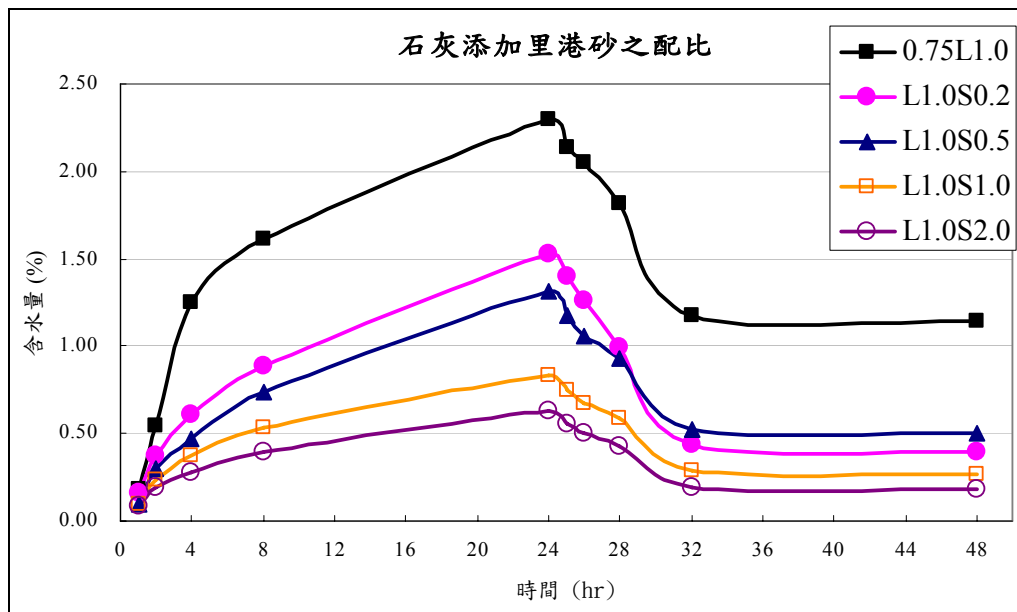


圖 5-20 石灰添加里港砂配比在潮濕環境與自然環境之含水量變化

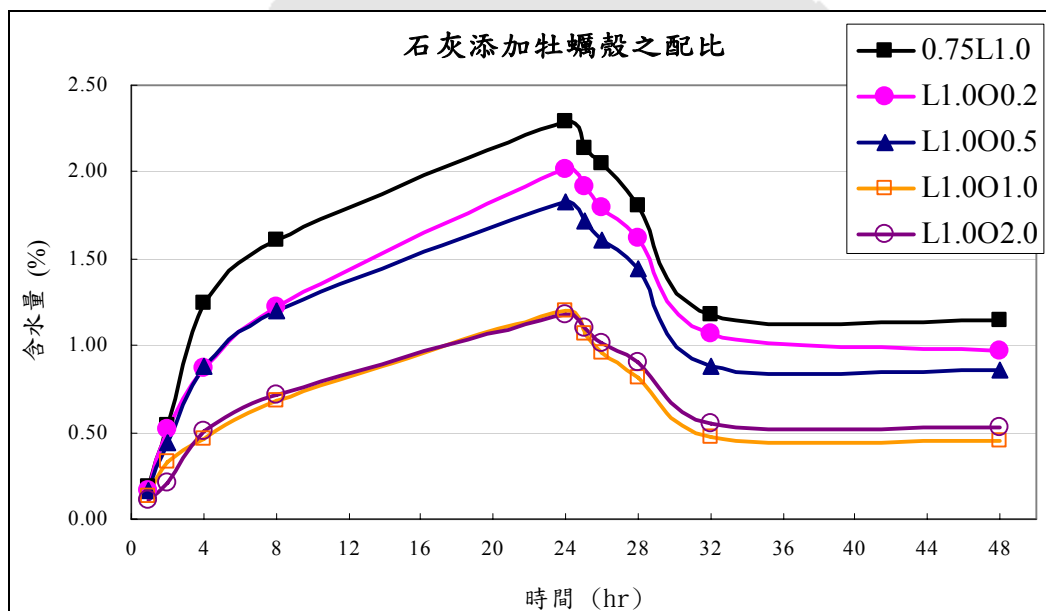


圖 5-21 石灰添加牡蠣殼配比在潮濕環境與自然環境之含水量變化

### 5-5 導熱係數測定

導熱係數之測定結果如圖 5-22 所示，每個試體各量測 5 次，由圖中可知，水泥之導熱係數為  $1.19W/mK$ ，灰漿材料中，僅  $L_{1.0}S_{2.0}$  之試體與其同樣具有較高的導熱係數，其餘之灰漿配比皆小於水泥，其中以純石灰漿  $0.75L_{1.0}$  之測定結果最低，為  $0.42W/mK$ ，相較於水泥，石灰之熱傳導係數僅為水泥的  $\frac{1}{3}$ 。

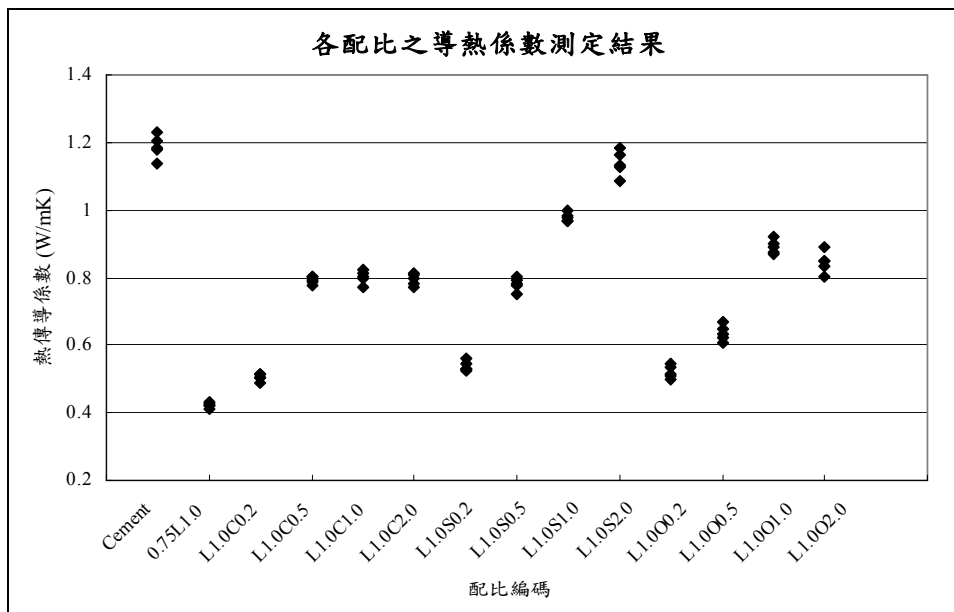


圖 5-22 熱傳導係數之測定結果

添加黏土之配比中， $L_{1.0}C_{0.2}$  量測結果略高於純石灰漿，而當灰土比小於 1:0.5 時，導熱係數並未隨著黏土含量增加而增大或減小，其值約在  $0.81W/mK$ 。此外，夯實的灰土是否具有此一特性，則需進一步的實驗來應證。

添加里港砂之配比中，導熱係數隨著骨材含量的增加而增大。添加牡蠣殼之配比中，導熱係數有隨著骨材含量增加而增大的趨勢，而  $L_{1.0}O_{2.0}$  則略有下降，應是包覆骨材之膠結材含量不足，故試體內部孔隙較多，而孔隙中的空氣阻礙了熱傳遞，由此可知傳統建築材料常使用之蠣殼灰，其夾雜煅燒不全之牡蠣殼，若基於建築材料之熱傳導性質考量，應在使用前予以篩除。

現代建築常用之水泥房屋，因其熱容量大且熱傳導係數亦大，故其傳熱量大，無法使室內具有舒適穩定的溫度環境，因此一般住家常有供暖或供冷之設備，而這些設備都要消耗石油能源，由本研究之試驗可知，相較於水泥，傳統建築以石灰粉刷壁體除有助於居住空間之溫度穩定，亦是有節約能源的作用。此外，如欲得到絕熱性質最佳的灰漿配比，則不應使用填充材。

## 5-6 灰漿性質之探討

由設計配比 II 之物理性質與力學性質的試驗結果，可將各材料之性質整理如表 5-2，表中所列為石灰單獨添加黏土、里港砂、牡蠣殼之兩種材料混合後所表現出的性質。

表 5-2 灰漿材料之性質

材料	性質
石灰	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 石灰完全碳化後，由破壞形式可知其為脆性材料。灰漿在穩態的力學行為下，其劈張拉力強度約為抗壓強度的 <math>10\pm 3\%</math>，此一性質與水泥大致相同，可知石灰亦為抗拉性質不佳之膠結材。</li> <li>2. 濕氣滲入時，石灰之含水量改變速度較水泥慢，且對於自身內部水氣蒸散能力亦優於水泥。</li> <li>3. 純石灰漿之熱傳導係數為 <math>0.42W/mK</math>，而水泥漿大於純石灰漿 3 倍。但石灰添加黏土、里港砂、牡蠣殼後，熱傳導係數皆增大。</li> </ol>
黏土	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 適當的黏土添加量，在劈張試驗中展現出較佳的韌性。</li> <li>2. 黏土的添加對於濕氣的滲入具有減低的效果，但對於試體內部水氣的蒸散能力則與純石灰相同而無明顯改變。</li> <li>3. 當灰土比小於 1:0.5 時，熱傳導係數之量測結果並無明顯隨黏土添加量的增加而改變，約為 <math>0.8W/mK</math>。</li> </ol>
里港砂	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 由於里港砂本身的吸水率低，因此隨著其添加量的增加而濕氣滲入的量會減少。</li> <li>2. 隨著里港砂含量的增加而導熱係數增大，當灰土比為 1:2 時，已接近水泥之熱傳性質。</li> </ol>
牡蠣殼	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 適量添加牡蠣殼不至於降低灰漿之強度，在灰土比為 1:0.2 時，其抗壓強度略大於純石灰，且較具有延展性。</li> <li>2. 牡蠣殼本身之吸水率較里港砂高，因此濕氣滲入的量與蒸散試體內部之水氣的能力也不如里港砂。</li> </ol>

由設計配比 II 之試驗結果，可知灰漿材料對於濕氣的滲入與內部水氣蒸散的能力主要由石灰的含量來控制；而灰漿材料的熱傳導性質除純石灰漿有較小的導熱係數，其餘添加黏土、里港砂、牡蠣殼的配比則使

導熱係數升高，如欲以灰漿作為空間的隔熱材，僅以純石灰漿能發揮最大的效能；在灰漿材料之強度行為則較為複雜，除了與石灰膠體量的多寡有關，亦與所添加之材料本身的性質有關聯，故為了解多種材料混合後的整體強度行為，則規劃設計配比Ⅲ來進行再次的試驗，設計配比Ⅲ如表 5-3 所列。

表 5-3 設計配比Ⅲ與其設計原因說明

重量配比	配比設計原因
$L_{1.0}C_{0.5}S_{0.5}$	設計配比Ⅱ中，以灰土比 1：1 之石灰單獨添加黏土、里港砂的配比表現出較佳的強度，故探討將石灰、黏土、里港砂一併混合後，是否灰土比 1：1 也同樣能表現出較佳的力學強度。
$L_{1.0}C_{1.0}S_{1.0}$	能否由石灰單獨添加黏土、里港砂之配比的試驗結果，來表現出較佳的強度配比。
$L_{1.0}C_{1.0}S_{2.0}$	設計配比Ⅱ中， $L_{1.0}S_{1.0}$ 為石灰添加里港砂之配比中表現最佳者，而 $L_{1.0}C_{1.0}$ 是石灰添加黏土之配比中表現較佳者，故假設以石灰與黏土為 1：1 來作為里港砂之膠結材，以探討是否能表現出與 $L_{1.0}S_{1.0}$ 相同之力學強度。
$L_{1.0}S_{0.3}O_{0.05}$	以 $L_{1.0}S_{1.2}O_{0.2}$ 之 4 倍的灰土比來設計，藉由提高灰土比來與 $L_{1.0}S_{1.2}O_{0.2}$ 作比較，以探討灰土比改變對於相同砂蚵比之強度影響。
$L_{1.0}S_{1.2}O_{0.2}$	設計配比Ⅱ中， $L_{1.0}S_{1.0}$ 為石灰添加里港砂之配比中表現最佳者，而 $L_{1.0}O_{0.2}$ 是石灰添加牡蠣殼之配比中表現為佳者，故假設以石灰與牡蠣殼為 1：0.2 來作為里港砂之膠結材，即假設 $L_{1.0}O_{0.2}$ 代表為蠣殼灰，而蠣殼灰( $L_{1.0}O_{0.2}$ )與里港砂( $S_{1.2}$ )灰土比為 1：1，以探討是否能表現出與 $L_{1.0}S_{1.0}$ 相同之力學強度。
$L_{1.0}C_{1.2}S_{2.4}O_{0.2}$	假設 $L_{1.0}O_{0.2}$ 為蠣殼灰，而以其與黏土 1：1 之配比來作為里港砂的膠結材，以探討能否具有 $L_{1.0}S_{1.0}$ 之強度。
$L_{1.0}C_{0.454}S_{0.454}O_{0.09}$	以灰土比 1：1 之設計，來與 $L_{1.0}C_{1.2}S_{2.4}O_{0.2}$ 之配比作為比較。

### 5-6-1 設計配比III之抗壓試驗結果

對於設計配比III所進行的抗壓試驗，為氣乾齡期 56 天與中性化養護 56 天之抗壓試驗。現將抗壓試驗之結果以關係圖的方式表現於圖 5-23 中，圖中  $\Delta$  所示之最終強度的推估值，係依照設計配比 II 之試驗結果所回歸的碳化程度(x)與強度生成率(y)之關係式加以計算，即圖 5-12 所示之關係式  $y = -0.0038x^2 + 1.3484x + 0.4837$  ( $R^2 = 0.9407$ )。由圖 5-23 中可知，透過各配比氣乾齡期 56 天之碳化程度量測與抗壓試驗結果所推估之最終強度值，其與各配比在中性化養護齡期 56 天之抗壓試驗結果是相近的，故可知，氣乾養護之灰漿試體可透過上述關係式來加以預測最終可能的強度值。

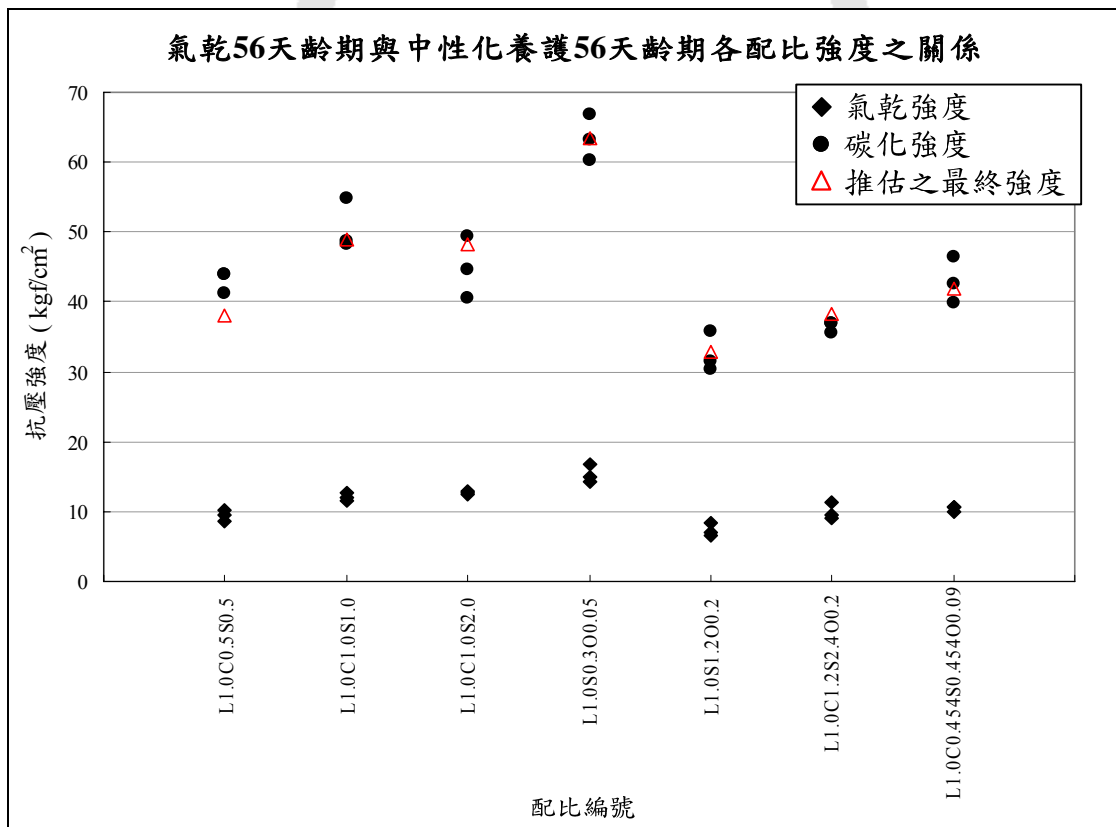


圖 5-23 設計配比III之抗壓強度試驗結果



### 5-6-2 抗壓強度試驗結果之討論

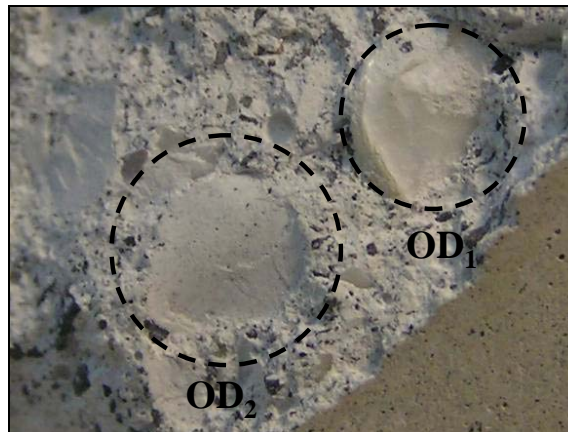
由於碳化作用是灰漿強度生成的重要來源，因此既使在相同的養護齡期，因為各配比之試體碳化程度的不同，而使灰漿材料強度之探討並非為同一基準，故本研究以灰漿完全碳化後的穩態強度進行探討，現將設計配比Ⅱ與Ⅲ之材料含量與抗壓強度試驗之結果示於下表 5-4。

表 5-4 設計配比Ⅱ、Ⅲ之材料含量與強度關係

配比編號	石灰含量 (%)	黏土含量 (%)	里港砂含量 (%)	里港砂含量 (%)	平均抗壓強度 (kgf/cm <sup>2</sup> )	
設計 配 比 Ⅱ	L <sub>1.0</sub>	100.00	-	-	40.35	
	L <sub>1.0</sub> C <sub>0.2</sub>	83.33	16.67	-	50.11	
	L <sub>1.0</sub> C <sub>0.5</sub>	66.67	33.33	-	52.47	
	L <sub>1.0</sub> C <sub>1.0</sub>	50.00	50.00	-	80.31	
	L <sub>1.0</sub> C <sub>2.0</sub>	33.33	66.67	-	49.57	
	C <sub>1.0</sub>	-	100.00	-	26.90	
	L <sub>1.0</sub> S <sub>0.2</sub>	83.33	-	16.67	60.01	
	L <sub>1.0</sub> S <sub>0.5</sub>	66.67	-	33.33	55.60	
	L <sub>1.0</sub> S <sub>1.0</sub>	50.00	-	50.00	81.06	
	L <sub>1.0</sub> S <sub>2.0</sub>	33.33	-	66.67	37.05	
	L <sub>1.0</sub> S <sub>8.0</sub>	11.11	-	88.89	27.01	
	L <sub>1.0</sub> O <sub>0.2</sub>	83.33	-	-	16.67	44.76
	L <sub>1.0</sub> O <sub>0.5</sub>	66.67	-	-	33.33	23.58
	L <sub>1.0</sub> O <sub>1.0</sub>	50.00	-	-	50.00	23.51
	L <sub>1.0</sub> O <sub>2.0</sub>	33.33	-	-	66.67	25.48
設計 配 比 Ⅲ	L <sub>1.0</sub> C <sub>0.5</sub> S <sub>0.5</sub>	50.00	25.00	25.00	-	43.07
	L <sub>1.0</sub> C <sub>1.0</sub> S <sub>1.0</sub>	33.33	33.33	33.33	-	50.62
	L <sub>1.0</sub> C <sub>1.0</sub> S <sub>2.0</sub>	25.00	25.00	50.00	-	44.89
	L <sub>1.0</sub> S <sub>0.3</sub> O <sub>0.05</sub>	74.07	-	22.22	3.70	63.48
	L <sub>1.0</sub> S <sub>1.2</sub> O <sub>0.2</sub>	41.67	-	50.00	8.33	32.55
	L <sub>1.0</sub> C <sub>1.2</sub> S <sub>2.4</sub> O <sub>0.2</sub>	20.83	25.00	50.00	4.17	36.42
	L <sub>1.0</sub> C <sub>0.454</sub> S <sub>0.454</sub> O <sub>0.09</sub>	50.06	22.72	22.72	4.50	43.04

由上表中可知石灰單獨添加黏土、里港砂、牡蠣殼時(設計配比Ⅱ)，材料間的強度關係是顯而易見的，但多種材料混合後，則使個別材料之強度行為複雜化，由試驗之結果歸納出以下幾點緣故：

1. 從照片 5-3 中可知，由於片狀的牡蠣殼其表面光滑( $OD_1$ )，且顆粒過於平整而不利於石灰之膠結，牡蠣殼之粒徑越大則形成越大的不連續面( $OD_2$ )，研判此應與添加牡蠣殼之灰漿能避免脆性破壞有關聯，但亦是降低灰漿試體強度的因素。設計配比 III 之  $L_{1.0}S_{0.3}O_{0.05}$  為添加牡蠣殼的配比中，抗壓強度表現較佳者，其餘添加牡蠣殼之配比的強度皆不大，且  $L_{1.0}S_{1.2}O_{0.2}$  之強度明顯低於  $L_{1.0}S_{1.0}$  甚多，由此可知灰漿中若含有牡蠣殼，則膠結材的膠結能力需較大才不至於因牡蠣殼而降低整體強度。灰作中，石灰含量高的墾料或是夯實過後的灰土應較能避免因牡蠣殼而降低強度。



照片 5-3 牡蠣殼形成之不連續面

2. 在設計  $L_{1.0}C_{1.0}S_{2.0}$  時，係假定其中的石灰與黏土皆為膠結材料，期能表現出設計配比 II 之  $L_{1.0}C_{1.0}$  的強度，由石灰與黏土共同來膠結里港砂，然從試驗之結果可知  $L_{1.0}C_{1.0}S_{2.0}$  之強度低於  $L_{1.0}C_{1.0}$  甚多。 $L_{1.0}C_{1.0}S_{1.0}$  之強度則略高於  $L_{1.0}C_{1.0}S_{2.0}$ ，應是灰土比提高的關係；然  $L_{1.0}C_{0.5}S_{0.5}$  之強度又略低於  $L_{1.0}C_{1.0}S_{1.0}$ ，可能是里港砂含量減少的關係。由於本研究對於灰漿中，添加黏土所產生之普作蘭反應不甚瞭解，故無法從中探討其影響強度的變因。
3. 作為墾料使用之灰漿，當多種材料混合後，如欲考量有良好的強度表現，則灰土比應大於 1：1，且避免牡蠣殼的使用。

## 第六章 結論與建議

基於探知史實與思索現況，本研究進行一系列之灰漿成分分析的方法研究及力學、物理性質等試驗，由研究之結果得結論與建議如下：

### 6-1 結論

1. 本研究所建立之灰漿配比分析方法，僅需 10 公克具代表性樣本即能完成對石灰、黏土、砂、牡蠣殼、醣類成分定量的所有試驗。
2. 熱蘭遮城南殘牆之磚砌灰縫與牆面抹灰，以本研究所建立之配比分析方法對其 12 個樣本進行試驗，其重量配比为  $L_{1.00} : S_{0.15} : O_{0.25} : T_{0.04}$ ，灰土比为 1 : 0.4，其中牡蠣殼來源之一是蠣殼灰本身煨燒不全者。
3. 臺灣府城小東門段之版築灰土牆，以本研究之配比分析方法對其 6 個灰漿樣本進行試驗，其重量配比为  $L_{1.00} : C_{4.00} : S_{6.22} : O_{1.55} : T_{0.02}$ ，灰土比为 1 : 11.8，其固體材料的體積比為一份石灰、二份黏土、三份細砂、一份牡蠣殼。
4. 在本研究分析的三座清代城池中，使用於牆面抹灰的灰漿，僅含微量的蠣殼或貝殼類碎屑，可知並非刻意添加。對於牡蠣殼的性質試驗中，因牡蠣殼表面平整光滑，存在於灰漿中易產生不連續面而降低試體的強度，且其添加對於絕熱的效果會降低，不適合做為墁料之用。
5. 本研究藉由中性化試驗機以二氧化碳濃度 30% 來加速碳化作用的進行，從養護齡期 14 及 28 天之抗壓試驗結果，顯示石灰、黏土、里港砂、牡蠣殼拌合之試體不隨著養護時間增長而增加其強度，可知灰漿完全碳化後有最終穩態之力學性質，且以石灰作為膠結料之抗拉強度為抗壓強度的  $10 \pm 3\%$ 。
6. 氣乾養護之灰漿試體，可藉由  $y = -0.0038x^2 + 1.3484x + 0.4837 (R^2 = 0.9407)$  之碳化程度 ( $x$ ) 與強度生成率 ( $y$ ) 的關係式，透過初期強度與碳化程度來研判最終完全碳化後之穩定狀態強度。本研究使用材料為石灰、黏土、里港砂、牡蠣殼，尺寸為  $5\text{cm} \times 5\text{cm} \times 5\text{cm}$  之墁料抗壓強度檢驗用試體。

7. 作為墁料使用之配比，在工作度的考量下，材料拌合所需的用水量會較高，因水灰比較高的緣故而膠結強度不是最佳的，故本研究使用石灰、黏土、里港砂與牡蠣殼混合之試體的抗壓試驗結果，僅灰土比大於 1:1 者為佳。
8. 由試驗結果，可知石灰防止濕氣滲入及其內部水氣蒸散的能力要優於水泥，故若以水泥做為古蹟修復之材料，恐因其易受濕氣滲入且難透出而阻礙古建築牆體內部既有之水分的蒸散，或使原有牆體容易處於潮濕環境中而受損。
9. 水灰比 0.75 拌合之純石灰漿的熱傳導係數為  $0.42W/mK$ ，是水泥漿的  $\frac{1}{3}$  倍，相較於水泥，傳統建築以石灰粉刷壁體有助於居住空間之溫度穩定。若欲以灰漿作為空間的隔熱材，僅純石灰漿能發揮最大的效能，添加黏土、里港砂或是牡蠣殼皆會增大熱的傳導。

## 6-2 建議

1. 本研究初步建立之配比分分析法，採取粒料分離方式，依分離之粒料的粒徑大小來區別石灰與牡蠣殼，雖在研究中對於研磨之能量有訂定，卻仍無法避免人為操作影響分析結果之疑慮，故後續研究可延續本研究之構思來開發相關機械設備。
2. 本研究僅針對古城牆殘蹟之灰漿進行配比分分析，缺乏對於其它傳統建築物所用之灰漿的配比分分析，後續研究可朝此方向努力，以統計出臺灣傳統建築灰漿材料使用之配比。
3. 本研究藉由中性化試驗機加速灰漿之碳化速率，以研究其最終之力學性質，然於現地難以提供大的密閉空間與高濃度的  $CO_2$ 。若致力於相關之研究，提增石灰材料之碳化速率，應可使其更為廣用。
4. 本研究已初步建立灰漿之配比分分析方法，若能以此方法詳加分析古灰漿之配比，藉由當今相似之材料加以模擬進行試驗，將能廣為瞭解其性質。

## 參考文獻

1. 山田雅士，「建築絕熱」，臺北斯坦出版有限公司，台北，1992。
2. 王效青，「中國傳統建築術語字典」，建築情報季刊出版，台北，2003。
3. 王新衡，「臺灣傳統磚砌建築灰縫材料特性之研究」，碩士論文，國立雲林科技大學文化資產維護研究所，2003。
4. 王龍盛，「清治時期砌磚用糖灰漿之做法與基本性質研究」，碩士論文，國立台灣科技大學營建工程研究所，2003。
5. 田永銘、朱正安、張家銘、鐘富誠、陳婕，「熱探針量測法應用於大地材料之適用性」，2006 岩盤工程研討會論文集，台南，2006。
6. 行政院文化建設委員會，「安平港國家歷史風景區-王城再現」，熱蘭遮城考古試掘計畫通訊月刊，2005。
7. 宋應星，「天工開物」，1637。
8. 李人豪，「紅外線熱影像與數值模擬於孔洞檢測之研究」，碩士論文，國立成功大學土木工程研究所，2006。
9. 李欣益，「以模型實驗探討排水石灰樁促進黏土壓密之研究」，碩士論文，碩士論文，國立成功大學土木工程研究所，1999。
10. 李泓銘，「傳統灰漿材料之作用與配比最佳化」，碩士論文，國立成功大學土木工程研究所，2005。
11. 李德河，「熱蘭遮城內城之建造始末」，熱蘭遮城考古試掘計畫通訊月刊，第 7 期，10-18 頁，2003。
12. 李德河、許朝景、李泓銘，「傳統灰漿對穩定室溫的初步探討」，熱蘭遮城考古試掘計畫通訊月刊，第 8 期，8-14 頁，2005。
13. 杜仙洲，「中國古建築修繕技術」，丹青圖書有限公司，台北，1984。
14. 周志明，「台灣傳統砌體建築「灰縫」之基礎研究」，碩士論文，國立雲林科技大學，2002。
15. 周郁森，「清代臺灣城牆興築之研究」，碩士論文，國立成功大學建築研究所，2003。
16. 邱上嘉，「傳統建築文化與保存之研究」，台灣建築與文化資產出版社，台南，2003。
17. 邱博舜，「真實性與文化差異」，2001 台灣文化資產保存研究年會，台北，國立文化資產保存研究中心籌備處，2001。

18. 洪煌凱，「古蹟灰漿之力學與微觀特性研究」，碩士論文，國立成功大學土木工程研究所，2003。
19. 張大猷，「熱探針連續量測法應用於緩衝材料熱傳導係數之量測與分析」，碩士論文，國立中央大學土木工程研究所，2004。
20. 張芸理、卞葆芝，「混凝土外加劑產品及應用手冊」，中國鐵道，北京，1998。
21. 張家銘，「以熱探針法量測大地材料熱傳導係數之適用性」，碩士論文，國立中央大學土木工程研究所，2005。
22. 張海清，「古建築灰漿」，古建園林技術，第二期，p13，北京，1984。
23. 張清忠，「三合土配比及材料行為之研究」，碩士論文，國立台灣科技大學營建工程研究所，2002。
24. 張德思，「土木工程材料」，西北工業大學出版社，西安，2002。
25. 莊敏信，「傳統灰作基本操作與應用之研究」，碩士論文，私立中原大學建築研究所，2003。
26. 許朝景、洪煌凱，「熱蘭遮城之砌磚古灰漿概述(上、下)」，熱蘭遮城考古試掘計畫通訊月刊，第3、4期，20-27、24-30頁，2003。
27. 陳志華，「修繕文物建築不要水泥」，古建園林技術，第二期，p14，北京，1984。
28. 陳俊良，「古蹟灰漿材料之配比與強度關係之研究」，碩士論文，國立成功大學土木工程研究所，2004。
29. 陳懷之，「傳統磚砌建築灰縫材料性質之研究」，碩士論文，國立雲林科技大學文化資產維護研究所，2004。
30. 傅朝卿，「建立台灣文化資產保存真實性的迫切性」，2001台灣文化資產保存研究年會，台北，國立文化資產保存研究中心籌備處，2001。
31. 傅朝卿，「國際歷史保存及古蹟維護憲章、宣言、決議文、建議文」，台灣建築與文化資產出版社，台南，2002。
32. 博遠，「中國古代建築技術史」，第二冊，p459-467，台北。
33. 曾國恩建築師事務所，「第一級古蹟臺灣城殘蹟修護工程工作報告書」，1999。
34. 程萬里，「中國建築形制與裝飾」，南天出版社，臺北，1990。

35. 馮佳福，「臺灣傳統屋面灰漿基本性質之研究」，碩士論文，國立成功大學建築研究所，2003。
36. 黃兆龍，「高性能混凝土理論與實務」，詹氏書局，台北，2003。
37. 黃稚榮，「熱蘭遮城南殘牆風化程度檢測之研究」，碩士論文，國立成功大學土木工程研究所，2006。
38. 楊敦凱，「傳統磚材黏結材料抗拉力學行為之研究」，碩士論文，國立台灣科技大學營建工程研究所，2002。
39. 楊睿雲，「古蹟詞彙手冊」，2005。
40. 葉世文，「古蹟修復技術-灰作材料性質與修復工法之研究」，內政部九十二年度研究報告，2002。
41. 劉大可，「古建築抹灰」，古建園林技術，第二期，p7，北京，1988。
42. 劉大可，「明、清官式灰背作法」，古建園林技術，第二期，p18，北京，1985。
43. 歐新通，「澎湖地區老咕石建築灰漿之研究」，碩士論文，國立成功大學建築研究所，2004。
44. 鄭弘文，「混凝土於碳化環境中微觀結構與力學行為之研究」，碩士論文，國立成功大學土木工程研究所，2001。
45. 閻亞寧等人，「古蹟保存科學架構與應用之基礎研究二」，內政部八十九年度研究報告，2001。
46. 薛琴，「傳統灰作施工方法」，第六次古蹟修護技術研討會專輯，1996。
47. Alvarez, J., I., Navarro, I., Martín, A., García Casado, P., J., 2000, “A study of the ancient mortars in the north tower of Pamplona’s San Cernin church,” *Cement and Concrete Research* Vol. 30, Pages.1413-1419.
48. Böke, H., Akkurt, S., İpekoğlu, B., Uğurlu, E., 2006, “Characteristics of brick used as aggregate in historic brick-lime mortars and plasters” *Cement and Concrete Research* Vol. 36, Pages.1115-1122.
49. Chiari, G., Torraca, G., Santarelli, M., L., 1996, “Recommendations for Systematic Instrumental Analysis of Ancient Mortars:The Italian Experience,” *Standards for Preservation and Rehabilitation. ASTM STP 1258*, S. J. Kelley, Ed., American Society for Testing and Materials, Pages. 275-284.



50. Doebley, C., E., Spitzer, D., S., 1996, "Guidelines and Standards for Testing Historic Mortars", Standards for Preservation and Rehabilitation. ASTM STP 1258, S. J. Kelley, Ed., American Society for Testing and Materials, Pages. 285-293.
51. Franzini, M., Leoni, L., Lezzerini, M., 2000, "A procedure for determining the chemical composition of binder and aggregate in ancient mortars: its application to mortars from some medieval buildings in Pisa," Journal of Cultural Heritage Vol. 1, Pages.365–373.
52. Gleize, P., Denise, A., Sergio Napolesi, S., 2000, "Ancient rendering mortars from a Brazilian palace Its characteristics and microstructure", Cement and Concrete Research Vol. 30, Pages.1609-1614.
53. Maravelaki-Kalaitzaki, P., Bakolas, A., Moropoulou, A., 2003, "Physico-chemical study of Cretan ancient mortars," Cement and Concrete Research, Pages 651-661.
54. Moropoulou, A., Bakolas, A., Bisbikou, K., 2000, "Investigation of the technology of historic mortars", Journal of Cultural Heritage Vol. 1, Pages.45–58.
55. Moropoulou, A., Bakolas, A., Bisbikou, K., 2000, "Physico-chemical adhesion and cohesion bonds in joint mortars imparting durability to the historic structures", Construction and Building Materials Vol. 14, Pages.35-46.
56. Riccardi, M., P., Duminuco, P., Tomasi, C., Ferloni, P., 1998, "Thermal, microscopic and X-ray diffraction studies on some ancient mortars", Thermochemica Acta 321, Pages.207-217.
57. <http://web.nsc.gov.tw/default.asp> , 行政院國家科學委員會網頁。
58. <http://www.cca.gov.tw/> , 文建會網頁。
59. <http://www.cnworld.net/> , 世界建築總網。
60. <http://www.foodqs.com/> , 中國食品產業網。

## 附錄 A 中性化試驗結果


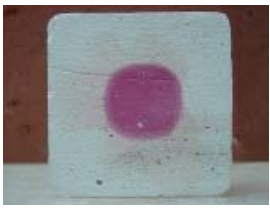



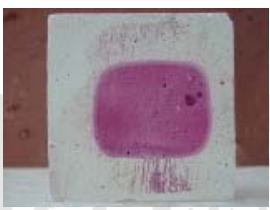


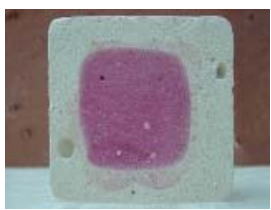










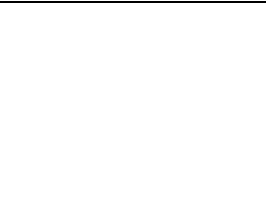
	Day 1	Day 2	Day 4	Day 7
0.75L <sub>1.0</sub>				
	46.31 %	59.84 %	100 %	100 %
L <sub>1.0</sub> C <sub>0.2</sub>				
	33.47 %	44.98 %	100 %	100 %
L <sub>1.0</sub> C <sub>0.5</sub>				
	33.26 %	61.22 %	92.78 %	100 %
L <sub>1.0</sub> C <sub>1.0</sub>				
	25.42 %	39.83 %	62.74 %	100 %
L <sub>1.0</sub> C <sub>2.0</sub>				
	29.47 %	45.86 %	100 %	100 %

圖 A-1 石灰及石灰添加黏土配比之中性化養護齡期與碳化程度關係



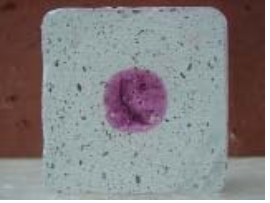

















	Day 1	Day 2	Day 4	Day 7
$L_{1.0}S_{0.2}$				
	26.17 %	37.22 %	67.08 %	100 %
$L_{1.0}S_{0.5}$				
	24.79 %	33.61 %	47.61 %	87.14 %
$L_{1.0}S_{1.0}$				
	22.08 %	33.20 %	50.80 %	100 %
$L_{1.0}S_{2.0}$				
	26.66 %	33.94 %	56.39 %	100 %
$L_{1.0}S_{8.0}$				
	31.55 %	83.53 %	100 %	100 %

圖 A-2 石灰與里港砂配比之中性化養護齡期與碳化程度關係


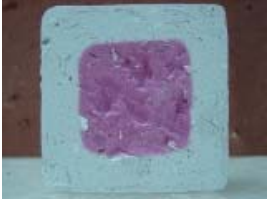
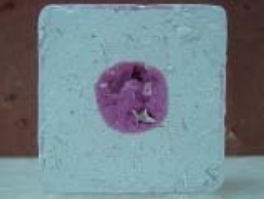
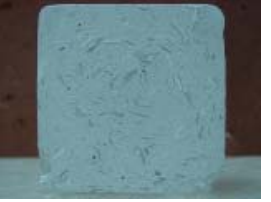

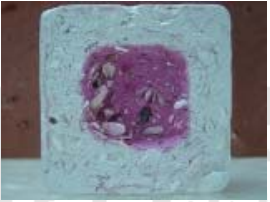










	Day 1	Day 2	Day 4	Day 7
$L_{1.0}O_{0.2}$				
	25.40 %	41.46 %	62.04 %	100 %
$L_{1.0}O_{0.5}$				
	30.30 %	47.70 %	100 %	100 %
$L_{1.0}O_{1.0}$				
	26.50 %	39.76 %	60.24 %	100 %
$L_{1.0}O_{2.0}$				
	25.94 %	35.93 %	90.22 %	100 %

圖 A-3 石灰與牡蠣殼配比之中性化養護齡期與碳化程度關係

## 附錄 B 應力應變曲線

附錄 B 為設計配比 II 在中性化養護第 28 天之抗壓試驗與劈張試驗之應力應變曲線。

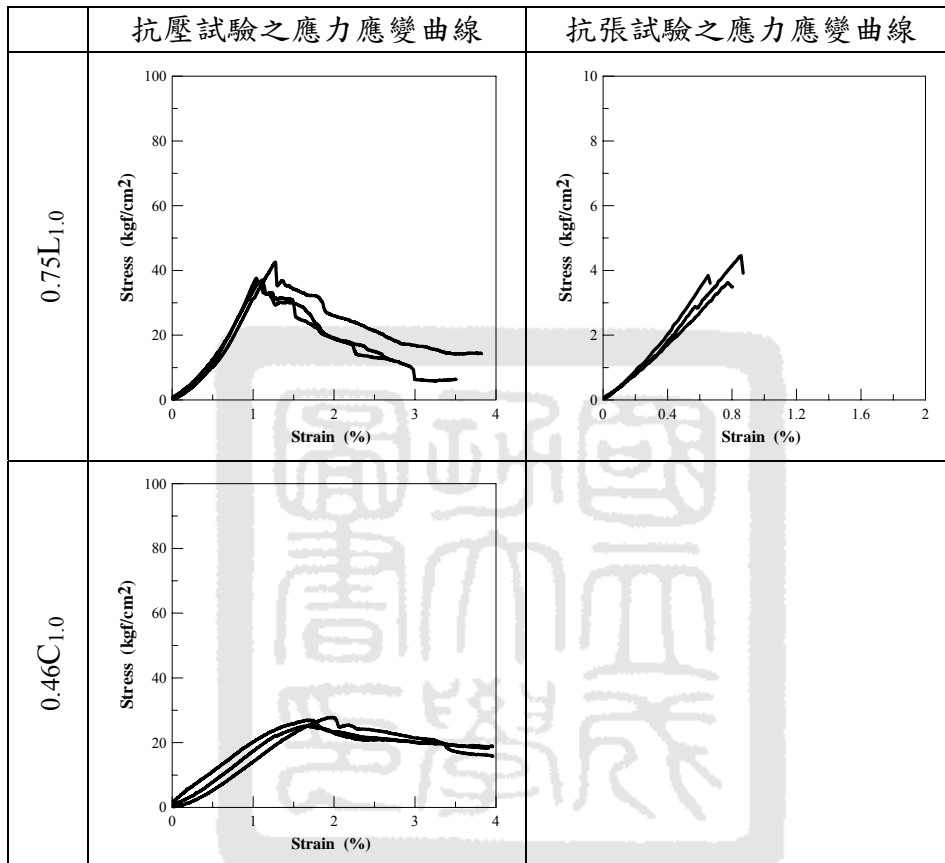


圖 B-1 純石灰漿與黏土之抗壓及劈張曲線

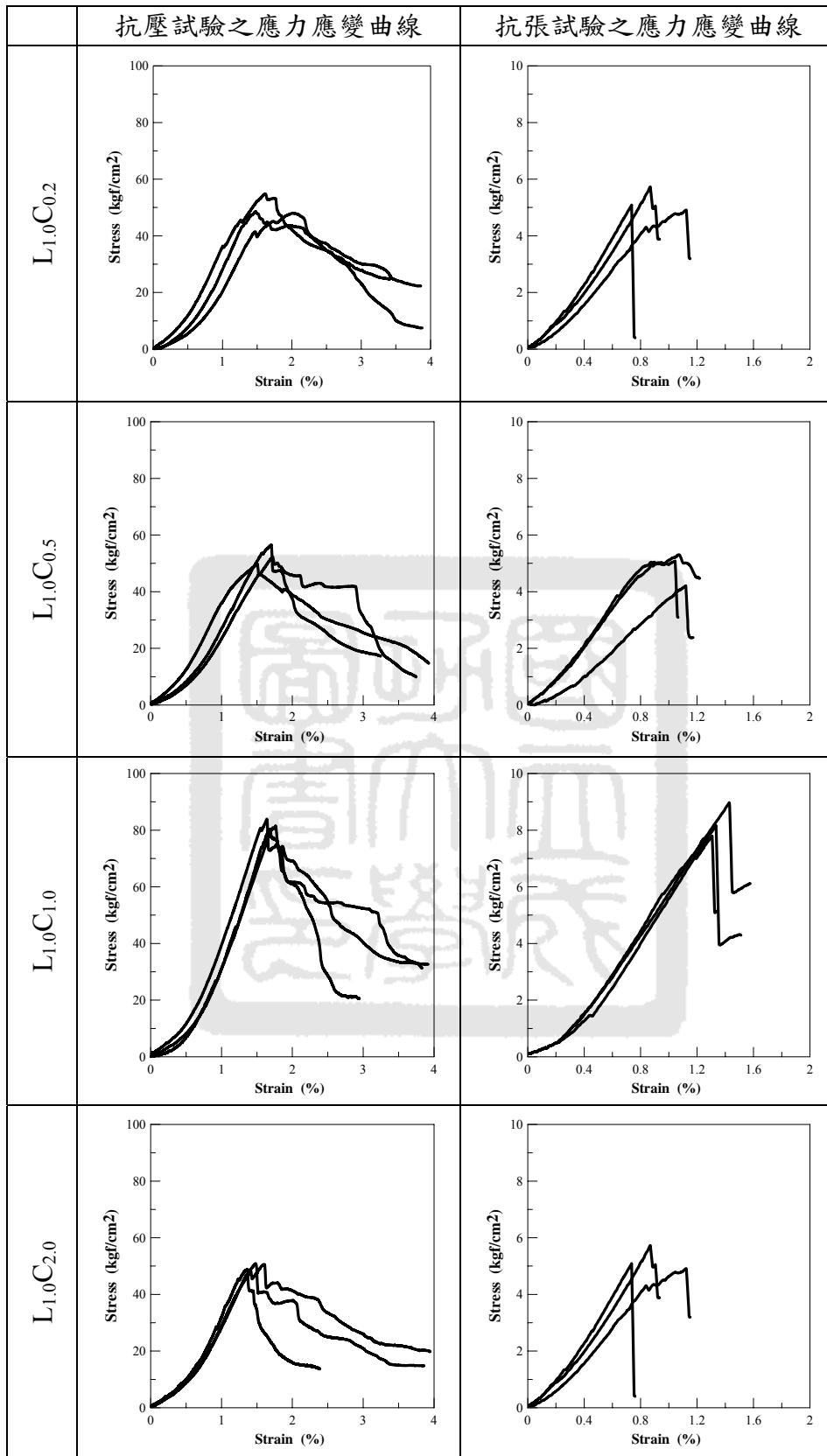


圖 B-2 石灰添加黏土配比之抗壓及劈張曲線



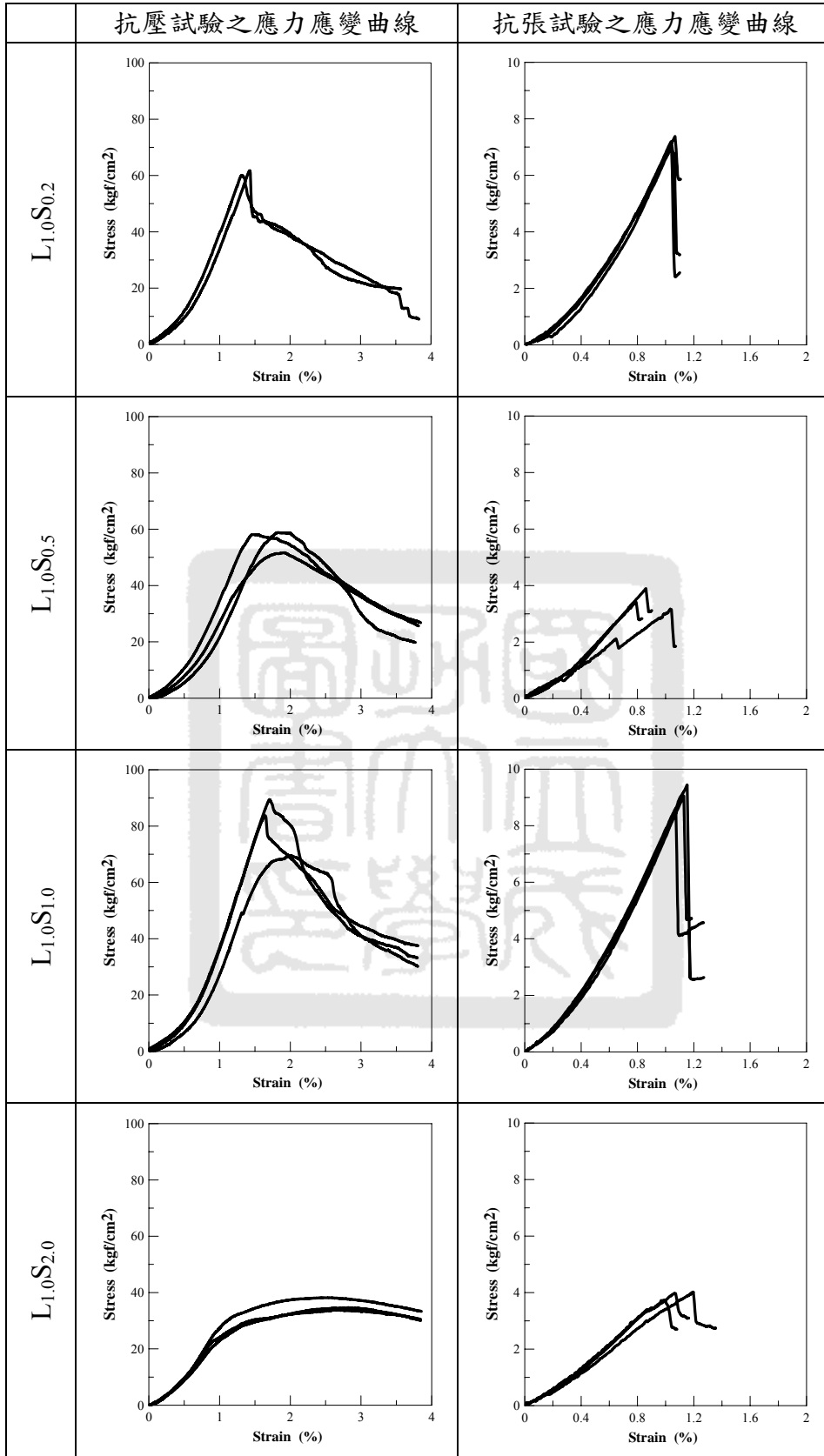


圖 B-3 石灰添加里港砂配比之抗壓及劈張曲線



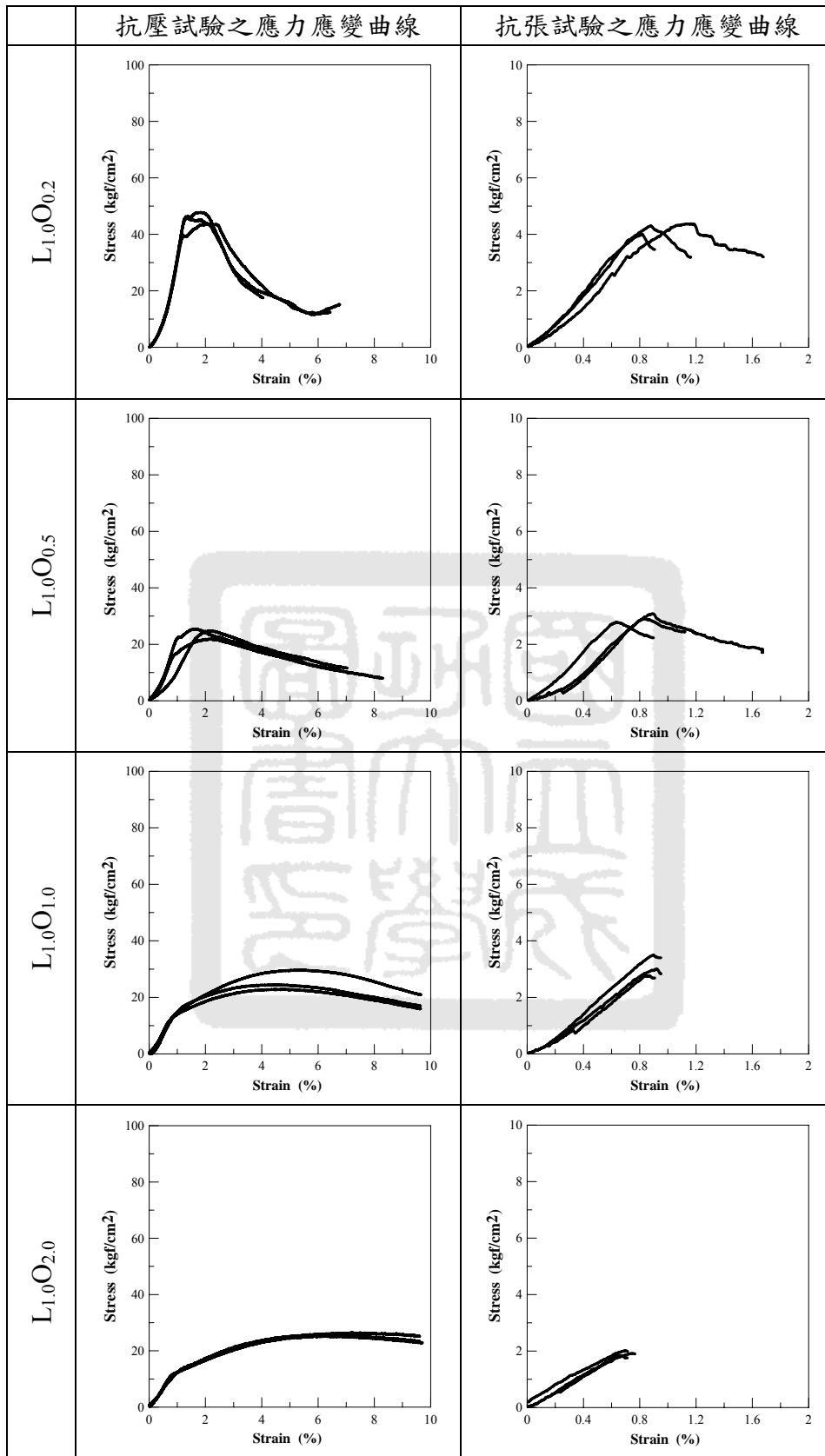


圖 B-4 石灰添加牡蠣殼配比之抗壓及劈張曲線

## 附錄 C 物理、力學性質試驗結果

配比編號	中性化養護 1 天齡期				
	平均乾縮比 (%)	平均乾單位重 (g/cm <sup>3</sup> )	平均 P 波波速 (m/sec)	碳化程度 (%)	平均抗壓強度 (kgf/cm <sup>2</sup> )
L <sub>1.0</sub>	4.83	1.13	1342.54	41.31	19.80
L <sub>1.0</sub> C <sub>0.2</sub>	5.20	1.17	1712.77	33.47	31.60
L <sub>1.0</sub> C <sub>0.5</sub>	5.16	1.22	1544.87	33.26	20.27
L <sub>1.0</sub> C <sub>1.0</sub>	5.94	1.24	1876.98	25.42	29.57
L <sub>1.0</sub> C <sub>2.0</sub>	4.51	1.25	1301.10	29.47	21.30
L <sub>1.0</sub> S <sub>0.2</sub>	4.81	1.22	1239.80	26.17	14.24
L <sub>1.0</sub> S <sub>0.5</sub>	4.97	1.39	1481.48	24.79	17.74
L <sub>1.0</sub> S <sub>1.0</sub>	4.01	1.50	1455.36	22.08	20.88
L <sub>1.0</sub> S <sub>2.0</sub>	3.31	1.69	1306.88	26.66	12.35
L <sub>1.0</sub> O <sub>0.2</sub>	3.97	1.15	1378.53	25.40	14.24
L <sub>1.0</sub> O <sub>0.5</sub>	3.43	1.18	1452.94	30.30	17.74
L <sub>1.0</sub> O <sub>1.0</sub>	2.25	1.26	1583.33	26.50	20.88
L <sub>1.0</sub> O <sub>2.0</sub>	2.06	1.36	1377.78	25.94	12.35

配比編號	中性化養護 2 天齡期				
	平均乾縮比 (%)	平均乾單位重 (g/cm <sup>3</sup> )	平均 P 波波速 (m/sec)	碳化程度 (%)	平均抗壓強度 (kgf/cm <sup>2</sup> )
L <sub>1.0</sub>	5.21	1.18	1630.87	59.84	29.43
L <sub>1.0</sub> C <sub>0.2</sub>	5.88	1.21	1737.41	44.98	38.98
L <sub>1.0</sub> C <sub>0.5</sub>	5.60	1.28	1685.31	61.22	27.07
L <sub>1.0</sub> C <sub>1.0</sub>	6.53	1.30	1892.00	39.83	33.29
L <sub>1.0</sub> C <sub>2.0</sub>	6.20	1.35	1757.46	45.86	33.70
L <sub>1.0</sub> S <sub>0.2</sub>	4.92	1.27	1699.30	37.22	21.68
L <sub>1.0</sub> S <sub>0.5</sub>	5.38	1.42	1791.04	33.61	25.66
L <sub>1.0</sub> S <sub>1.0</sub>	4.11	1.53	1686.21	33.20	26.99
L <sub>1.0</sub> S <sub>2.0</sub>	3.34	1.70	1543.75	33.94	17.62
L <sub>1.0</sub> O <sub>0.2</sub>	4.04	1.18	1682.76	41.46	21.68
L <sub>1.0</sub> O <sub>0.5</sub>	3.45	1.18	1625.00	47.70	25.66
L <sub>1.0</sub> O <sub>1.0</sub>	2.39	1.30	1635.76	39.76	26.99
L <sub>1.0</sub> O <sub>2.0</sub>	1.95	1.38	1512.20	35.93	17.62

配比編號	中性化養護 4 天齡期				
	平均乾縮比 (%)	平均乾單位重 (g/cm <sup>3</sup> )	平均 P 波波速 (m/sec)	碳化程度 (%)	平均抗壓強度 (kgf/cm <sup>2</sup> )
L <sub>1.0</sub>	4.99	1.18	1653.06	100.00	40.67
L <sub>1.0</sub> C <sub>0.2</sub>	6.41	1.24	1762.77	100.00	46.37
L <sub>1.0</sub> C <sub>0.5</sub>	6.69	1.33	1882.81	92.78	51.80
L <sub>1.0</sub> C <sub>1.0</sub>	7.23	1.37	2021.37	62.74	55.23
L <sub>1.0</sub> C <sub>2.0</sub>	7.48	1.40	1811.54	100.00	40.80
L <sub>1.0</sub> S <sub>0.2</sub>	5.12	1.30	1854.96	67.08	43.62
L <sub>1.0</sub> S <sub>0.5</sub>	5.82	1.50	2000.00	47.61	34.20
L <sub>1.0</sub> S <sub>1.0</sub>	4.04	1.57	2222.73	50.80	52.80
L <sub>1.0</sub> S <sub>2.0</sub>	3.22	1.73	1727.27	56.39	35.04
L <sub>1.0</sub> O <sub>0.2</sub>	4.12	1.22	1921.26	62.04	43.62
L <sub>1.0</sub> O <sub>0.5</sub>	3.39	1.23	1900.00	100.00	34.20
L <sub>1.0</sub> O <sub>1.0</sub>	2.43	1.33	1703.45	60.24	52.80
L <sub>1.0</sub> O <sub>2.0</sub>	2.27	1.40	1653.33	90.22	35.04

配比編號	中性化養護 7 天齡期				
	平均乾縮比 (%)	平均乾單位重 (g/cm <sup>3</sup> )	平均 P 波波速 (m/sec)	碳化程度 (%)	平均抗壓強度 (kgf/cm <sup>2</sup> )
L <sub>1.0</sub>	5.29	1.20	1664.38	100.00	40.89
L <sub>1.0</sub> C <sub>0.2</sub>	6.37	1.24	1762.77	100.00	44.23
L <sub>1.0</sub> C <sub>0.5</sub>	5.94	1.28	1928.00	100.00	50.89
L <sub>1.0</sub> C <sub>1.0</sub>	7.98	1.41	2111.61	100.00	80.03
L <sub>1.0</sub> C <sub>2.0</sub>	8.34	1.43	1839.84	100.00	49.34
L <sub>1.0</sub> S <sub>0.2</sub>	5.06	1.25	1928.57	100.00	55.14
L <sub>1.0</sub> S <sub>0.5</sub>	5.78	1.52	2123.89	87.14	48.02
L <sub>1.0</sub> S <sub>1.0</sub>	4.31	1.60	2306.60	100.00	80.48
L <sub>1.0</sub> S <sub>2.0</sub>	3.24	1.75	1892.72	100.00	38.69
L <sub>1.0</sub> O <sub>0.2</sub>	4.08	1.23	2067.80	100.00	55.14
L <sub>1.0</sub> O <sub>0.5</sub>	3.43	1.23	1864.15	100.00	48.02
L <sub>1.0</sub> O <sub>1.0</sub>	2.34	1.36	1733.33	100.00	80.48
L <sub>1.0</sub> O <sub>2.0</sub>	2.27	1.40	1746.48	100.00	38.69

配比編號	中性化養護 14 天齡期				
	平均乾縮比 (%)	平均乾單位重 (g/cm <sup>3</sup> )	平均 P 波波速 (m/sec)	碳化程度 (%)	平均抗壓強度 (kgf/cm <sup>2</sup> )
L <sub>1.0</sub>	5.24	1.19	1667.81	100.00	40.44
L <sub>1.0</sub> C <sub>0.2</sub>	6.31	1.26	1829.55	100.00	48.77
L <sub>1.0</sub> C <sub>0.5</sub>	6.59	1.32	1959.35	100.00	52.19
L <sub>1.0</sub> C <sub>1.0</sub>	7.72	1.40	2092.92	100.00	80.87
L <sub>1.0</sub> C <sub>2.0</sub>	8.48	1.44	1777.36	100.00	49.11
L <sub>1.0</sub> S <sub>0.2</sub>	5.18	1.28	1913.39	100.00	52.80
L <sub>1.0</sub> S <sub>0.5</sub>	5.80	1.51	2162.16	100.00	59.14
L <sub>1.0</sub> S <sub>1.0</sub>	4.27	1.61	2328.57	100.00	82.10
L <sub>1.0</sub> S <sub>2.0</sub>	3.16	1.74	1900.00	100.00	35.30
L <sub>1.0</sub> O <sub>0.2</sub>	4.17	1.23	2059.07	100.00	52.80
L <sub>1.0</sub> O <sub>0.5</sub>	3.47	1.23	1878.33	100.00	59.14
L <sub>1.0</sub> O <sub>1.0</sub>	2.19	1.31	1739.44	100.00	82.10
L <sub>1.0</sub> O <sub>2.0</sub>	2.31	1.39	1758.87	100.00	35.30

配比編號	自然氣乾養護 28 天齡期				
	平均乾縮比 (%)	平均乾單位重 (g/cm <sup>3</sup> )	平均 P 波波速 (m/sec)	碳化程度 (%)	平均抗壓強度 (kgf/cm <sup>2</sup> )
L <sub>1.0</sub>	5.23	1.11	895.22	10.69	5.16
L <sub>1.0</sub> C <sub>0.2</sub>	6.01	1.18	822.64	10.04	6.41
L <sub>1.0</sub> C <sub>0.5</sub>	6.83	1.20	901.85	10.98	8.49
L <sub>1.0</sub> C <sub>1.0</sub>	7.34	1.31	989.84	13.14	11.02
L <sub>1.0</sub> C <sub>2.0</sub>	8.51	1.37	817.11	13.55	10.80
L <sub>1.0</sub> S <sub>0.2</sub>	4.65	1.21	811.67	11.31	4.64
L <sub>1.0</sub> S <sub>0.5</sub>	5.33	1.48	851.40	9.54	5.36
L <sub>1.0</sub> S <sub>1.0</sub>	4.12	1.53	922.35	10.93	6.24
L <sub>1.0</sub> S <sub>2.0</sub>	3.26	1.74	1096.85	11.00	7.37
L <sub>1.0</sub> O <sub>0.2</sub>	4.23	1.18	974.00	5.06	4.99
L <sub>1.0</sub> O <sub>0.5</sub>	3.14	1.19	851.40	10.78	4.27
L <sub>1.0</sub> O <sub>1.0</sub>	2.16	1.31	901.85	12.72	4.70
L <sub>1.0</sub> O <sub>2.0</sub>	2.34	1.34	1132.56	11.20	4.75

配比編號	中性化養護 28 天齡期				
	平均乾縮比 (%)	平均乾單位重 (g/cm <sup>3</sup> )	平均 P 波波速 (m/sec)	碳化程度 (%)	平均抗壓強度 (kgf/cm <sup>2</sup> )
L <sub>1.0</sub>	5.33	1.20	1702.80	100.00	39.38
L <sub>1.0</sub> C <sub>0.2</sub>	6.32	1.25	1830.83	100.00	50.44
L <sub>1.0</sub> C <sub>0.5</sub>	5.62	1.30	1963.71	100.00	50.80
L <sub>1.0</sub> C <sub>1.0</sub>	7.56	1.39	2135.96	100.00	81.58
L <sub>1.0</sub> C <sub>2.0</sub>	8.37	1.43	1844.70	100.00	48.43
L <sub>1.0</sub> S <sub>0.2</sub>	5.05	1.30	1924.90	100.00	54.80
L <sub>1.0</sub> S <sub>0.5</sub>	5.85	1.50	2174.11	100.00	60.90
L <sub>1.0</sub> S <sub>1.0</sub>	4.22	1.62	2341.35	100.00	80.61
L <sub>1.0</sub> S <sub>2.0</sub>	2.97	1.74	1887.60	100.00	37.16
L <sub>1.0</sub> O <sub>0.2</sub>	4.18	1.24	2063.56	100.00	54.80
L <sub>1.0</sub> O <sub>0.5</sub>	3.44	1.23	1844.70	100.00	60.90
L <sub>1.0</sub> O <sub>1.0</sub>	2.06	1.32	1702.80	100.00	80.61
L <sub>1.0</sub> O <sub>2.0</sub>	2.21	1.40	1720.85	100.00	37.16

配比編號	自然氣乾養護 56 天齡期			
	平均乾單位重 (g/cm <sup>3</sup> )	平均 P 波波速 (m/sec)	碳化程度 (%)	平均抗壓強度 (kgf/cm <sup>2</sup> )
L <sub>1.0</sub> C <sub>0.5</sub> S <sub>0.5</sub>	1.28	1096.85	18.85	9.37
L <sub>1.0</sub> C <sub>1.0</sub> S <sub>1.0</sub>	1.50	1217.50	19.03	12.13
L <sub>1.0</sub> C <sub>1.0</sub> S <sub>2.0</sub>	1.61	1337.91	20.33	12.7
L <sub>1.0</sub> S <sub>0.3</sub> O <sub>0.05</sub>	1.38	1201.82	18.52	15.34
L <sub>1.0</sub> S <sub>1.2</sub> O <sub>0.2</sub>	1.45	1096.85	16.87	7.29
L <sub>1.0</sub> C <sub>1.2</sub> S <sub>2.4</sub> O <sub>0.2</sub>	1.62	1309.14	20.12	9.98
L <sub>1.0</sub> C <sub>0.454</sub> S <sub>0.454</sub> O <sub>0.09</sub>	1.27	1127.31	19.24	10.47

配比編號	中性化養護 56 天齡期			
	平均乾單位重 (g/cm <sup>3</sup> )	平均 P 波波速 (m/sec)	碳化程度 (%)	平均抗壓強度 (kgf/cm <sup>2</sup> )
L <sub>1.0</sub> C <sub>0.5</sub> S <sub>0.5</sub>	1.37	1645.27	100	43.07
L <sub>1.0</sub> C <sub>1.0</sub> S <sub>1.0</sub>	1.49	1790.44	100	50.62
L <sub>1.0</sub> C <sub>1.0</sub> S <sub>2.0</sub>	1.62	2099.14	100	44.89
L <sub>1.0</sub> S <sub>0.3</sub> O <sub>0.05</sub>	1.38	2237.18	100	63.48
L <sub>1.0</sub> S <sub>1.2</sub> O <sub>0.2</sub>	1.51	1656.46	100	32.55
L <sub>1.0</sub> C <sub>1.2</sub> S <sub>2.4</sub> O <sub>0.2</sub>	1.67	1858.78	100	36.42
L <sub>1.0</sub> C <sub>0.454</sub> S <sub>0.454</sub> O <sub>0.09</sub>	1.38	1790.44	100	43.04

## 自 述

姓 名：游晏愷

出生年月日：民國 72 年 8 月 8 日

出 生 地：臺灣 台中市

住 址：台中市北屯區豐樂路 302 巷 8 號

學 經 歷：民國 90 年私立光華高工建築製圖科畢業

民國 94 年國立台北科技大學土木工程系畢業

民國 96 年國立成功大學土木工程研究所畢業

