

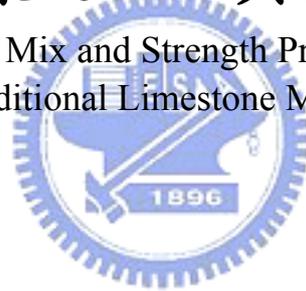
國立交通大學

土木工程學系碩士班

碩士論文

傳統石灰砂漿之配比與強度性質研究

Study on the Mix and Strength Properties of the  
Traditional Limestone Mortar



研究生：徐銘亨

指導教授：趙文成 博士

中華民國 九十七年 七月

# 傳統石灰砂漿之配比與強度性質研究

研究生：徐銘亨

Student : Ming-Heng Shiu

指導教授：趙文成

Advisor : Wen-Chen Jau

國立交通大學  
土木工程研究所  
碩士論文

A Thesis

Submitted to Department of Civil Engineering

College of Engineering

National Chiao Tung University

in partial Fulfillment of the Requirements

for the Degree of

Master

in

Civil Engineering

July 2008

Hsinchu, Taiwan, Republic of China

中華民國九十七年七月

# 傳統石灰砂漿之配比與強度性質研究

研究生：徐銘亨

指導教授：趙文成 博士

國立交通大學土木工程學系碩士班

## 摘 要

古蹟與古代建築的修復、保留、重建及再利用，慢慢是社會大眾愈來愈重視的問題，雖然目前台灣對古蹟保存修復之相關法令的周延性尚且不足，對於這些代表前人所遺留下來智慧與技術的古蹟中，灰漿材料種類繁多複雜，但相關於灰漿材料的特性及使用方式卻少之又少。若要維護前人所遺留下來的建築物，對於古蹟灰漿之特性及行為有深入研究的必要性。

本研究所選用的基本材料有砂、黏土、生石灰、熟石灰，於基本材料中所添加的材料有糖漿、楊桃汁、蚵殼粉、桐油。由實驗結果顯示楊桃汁及生石灰具減少乾縮量，蚵殼粉明顯提升早期強度，桐油具有絕佳的防水性，而糖漿可減少用水量及增加強度等功用。

關鍵字：灰漿、蚵殼粉、桐油、石灰

# Study on Mix and Strength Properties of The Traditional Limestone Mortar

Student : Ming-Heng Shiu

Advisor : Wen-Chen Jau

Department of Civil Engineering  
National Chiao Tung University

## Abstract

Historical monuments and ancient architectures repair, conservation, re-build and re-use have gained more popularity recently, though the current laws in this area are not comprehensive. Though the architecture mortar or plaster has many different compositions and of a great varieties, the characteristics and the right mix proportion are not available. In order to rehabilitate the historical monuments, it is thus necessary to study suitable mortar for different applications.

The materials used in this study include sand, clay, lime, plaster of Paris, syrup, carambola juice, oyster shell, and tung oil. The results show that the carambola juice and lime can reduce the shrinkage; oyster shell can increase the early strength; and tung oil can increase waterproof ability, while syrup may reduce the water requirement and increase strength.

Keyword: mortar, oyster shell, tung oil, lime

## 誌謝

進入研究所兩年的求學歲月中，恩師 趙文成博士的悉心指導，不論是課業上的問題或是在待人處事方面都不吝解惑，讓我從老師身上學習到許多專業的知識與為人處事的道理，受恩深重，于不敢忘矣。

在研究的期間，感謝楊景鼎學長與李思慧學姊，在實驗的過程中不斷的給予建議與指教，另外也感謝學弟廖侶翔、容沛倫、葉峻閣與江孟哲的幫忙。更要感謝交大材料實驗室，在試驗期間給予協助，使實驗能順利完成。

最後要感謝家人在我念碩士班的期間，不斷的給我支持與鼓勵，讓我順利完成學業。



# 目錄

摘要.....	I
英文摘要.....	II
誌謝.....	III
目錄.....	IV
表目錄.....	VI
圖目錄.....	VIII
第一章 緒論.....	1
1.1 前言.....	1
1.2 研究動機.....	1
1.3 研究目的.....	2
第二章 文獻回顧.....	4
2.1 膠結材料的演變.....	4
2.1.1 西方的膠結材料演變.....	4
2.1.2 中國的膠結材料演變.....	4
2.2 三合土概述.....	6
2.3 石灰砂漿種類與材料.....	7
2.3.1 石灰砂漿種類.....	7
2.3.2 石灰砂漿材料.....	8
2.4 材料概述.....	9
2.4.1 石灰.....	9
2.4.2 黏土.....	10
2.4.3 糖.....	12
2.4.4 桐油.....	13
2.5 石灰的化學反應.....	14
2.6 古蹟灰漿的力學性質.....	17
第三章 實驗計畫與設計.....	24
3.1 實驗計畫概述.....	24
3.2 試驗設備.....	25
3.3 試驗材料的備製.....	26
3.3.1 基本材料.....	26
3.3.2 添加材料.....	27
3.4 實驗試體的製作.....	29

3.4.1 立方試體製作流程 (5×5×5 cm立方試體)	29
3.4.2 砂漿棒試體製作流程	30
3.4.3 黏合紅磚之抗壓試體製作流程	31
3.4.4 溫度效應之抗壓試體的製作流程	32
3.4.5 耐水試驗之試體製作流程	33
3.4.6 黏合紅磚之剪力試體製作流程	34
3.5 實驗設計	35
3.5.1 實驗設計概述	35
3.5.2 基本材料配比設計	35
3.5.3 試驗內容	36
第四章 實驗結果與討論	52
4.1 添加材料的影響與添加用量的訂定	52
4.1.1 坍度範圍的訂定	52
4.1.2 蚵殼粉用量範圍的擬定	53
4.1.3 糖漿用量的擬定	54
4.2 凝結時間之測定	54
4.3 傳統砂漿的強度分析	55
4.3.1 7天抗壓強度分析	55
4.3.2 28天抗壓強度分析	56
4.3.3 56天抗壓強度分析	57
4.3.4 不同添加材料對強度之影響	59
4.4 砂漿棒的長度變化	60
4.5 傳統砂漿的耐水能力之初步分析	62
4.6 傳統砂漿對溫度效應的分析	63
4.7 傳統砂漿耐酸性試驗	64
4.8 黏結磚之強度試驗	65
4.8.1 黏結磚之抗壓強度分析	65
4.8.2 黏結磚之剪力強度分析	66
4.9 各種添加材料特性	66
第五章 結論與建議	103
5.1 結論	103
5.2 建議	105
參考文獻	107

# 表目錄

表【2-1】	石灰砂漿的種類	20
表【2-2】	灰漿材料	21
表【2-3】	台灣主要黏土類型化學組成的範圍	22
表【2-4】	石灰岩各種用途之規格一覽表	22
表【2-5】	台灣地區礦物性石灰岩分佈一覽表	23
表【2-6】	各研究學者之灰漿抗壓強度	23
表【3-1】	生石灰元素分析	40
表【3-2】	消石灰元素分析	40
表【3-3】	黏土粉元素分析	41
表【3-4】	細粒料篩分析	42
表【4-1】	傳統砂漿 7 天抗壓強度	68
表【4-2】	傳統砂漿 28 天抗壓強度	68
表【4-3】	傳統砂漿 56 天抗壓強度	68
表【4-4】	傳統砂漿 7 天抗壓強度	69
表【4-5】	傳統砂漿 28 天抗壓強度	69
表【4-6】	傳統砂漿凝結時間	69
表【4-7】	蚵殼粉配比之 7 天抗壓強度	70
表【4-8】	蚵殼粉配比之 28 天抗壓強度	71
表【4-9】	蚵殼粉配比之 56 天抗壓強度	72
表【4-10】	添加桐油配比之 7 天抗壓強度	73
表【4-11】	添加桐油配比之 28 天抗壓強度	74
表【4-12】	添加桐油配比之 56 天抗壓強度	75
表【4-13】	添加楊桃汁配比之 7 天抗壓強度	76
表【4-14】	添加楊桃汁配比之 28 天抗壓強度	77
表【4-15】	添加楊桃汁配比之 56 天抗壓強度	78
表【4-16】	改變 $\text{CaO}/\text{Ca}(\text{OH})_2$ 含量配比之 7 天抗壓強度	79
表【4-17】	改變 $\text{CaO}/\text{Ca}(\text{OH})_2$ 含量配比之 28 天抗壓強度	80
表【4-18】	改變 $\text{CaO}/\text{Ca}(\text{OH})_2$ 含量配比之 56 天抗壓強度	81
表【4-19】	砂漿棒乾縮長度變化率	82
表【4-20】	砂漿棒乾縮長度變化率	83
表【4-21】	傳統砂漿 7 天耐水試驗	84
表【4-22】	傳統砂漿 28 天耐水試驗	85
表【4-23】	傳統砂漿 56 天耐水試驗	86
表【4-24】	傳統砂漿 7 天溫度試驗( $100^\circ\text{C}$ )	87
表【4-25】	傳統砂漿 28 天溫度效應試驗( $100^\circ\text{C}$ )	88
表【4-26】	傳統砂漿 28 天溫度效應試驗( $1000^\circ\text{C}$ )	89

表【4-27】 28 天之酸性溶液中重量損失率 .....	90
表【4-28】 28 天之水中重量損失率 .....	90
表【4-29】 28 天(酸性溶液-水中)之重量損失率 .....	90
表【4-30】 黏結磚 28 天之抗壓強度 .....	91
表【4-31】 黏結磚 28 天之剪力強度 .....	91
表【4-32】 各添加材料之特性及用量建議 .....	91



# 圖目錄

圖【3-1】	實驗流程圖	43
圖【3-2】	切割機	44
圖【3-3】	游標卡尺	44
圖【3-4】	砂漿拌和機	45
圖【3-5】	5公分立方試體模	45
圖【3-6】	砂漿棒鋼模	46
圖【3-7】	Dialgage	46
圖【3-8】	萬能試驗機	47
圖【3-9】	高溫爐	47
圖【3-10】	線性差動變壓器 (LVDT)	48
圖【3-11】	變位計	48
圖【3-12】	費開氏儀器	49
圖【3-13】	凝結時間測定	49
圖【3-14】	抗壓強度試驗	50
圖【3-15】	黏結磚之抗壓強度試驗	50
圖【3-16】	黏結磚剪力強度示意圖	51
圖【3-17】	黏結磚之剪力強度試驗	51
圖【4-1】	蚵殼粉與抗壓強度之關係	92
圖【4-2】	20%蚵殼粉加糖漿與抗壓強度之關係	92
圖【4-3】	傳統砂漿凝結時間	93
圖【4-4】	7天齡期抗壓強度(糖漿+蚵殼粉)	93
圖【4-5】	(蚵殼粉/糖漿)與7天抗壓強度關係	94
圖【4-6】	28天齡期抗壓強度(糖漿+蚵殼粉)	94
圖【4-7】	56天齡期抗壓強度(糖漿+蚵殼粉)	95
圖【4-8】	7天齡期抗壓強度(糖漿+蚵殼粉+桐油)	95
圖【4-9】	28天齡期抗壓強度(糖漿+蚵殼粉+桐油)	96
圖【4-10】	56天齡期抗壓強度(糖漿+蚵殼粉+桐油)	96
圖【4-11】	糯米漿與楊桃汁抗壓強度	97
圖【4-12】	7天齡期抗壓強度(不同 $CaO/Ca(OH)_2$ 比例)	97
圖【4-13】	28天齡期抗壓強度(不同 $CaO/Ca(OH)_2$ 比例)	98
圖【4-14】	56天齡期抗壓強度(不同 $CaO/Ca(OH)_2$ 比例)	98
圖【4-15】	砂漿棒乾縮長度變化率	99
圖【4-16】	傳統砂漿7天耐水試驗	100
圖【4-17】	傳統砂漿28天之酸性溶液中重量損失率	100
圖【4-18】	傳統砂漿28天之水中重量損失率	101
圖【4-19】	傳統砂漿28天(酸性溶液-水中)之重量損失率	101



# 第一章 緒論

## 1.1 前言

台灣地區目前還遺留著許多珍貴的傳統建築物，這些建築物也保留了當時興建時所使的材料、構造、文化、工藝等，是相當重要的文化資產。修復古蹟與保存文化資產的過程中，也急需相關的理論及知識背景來輔助，以往古蹟修復只單憑建築師與傳統匠師的經驗判斷，常常導致古蹟工程修復品質難以掌控，使得許多古蹟在修復過程中失去建築物原有的壽命與其特色。若能利用現代科技方法重現古代灰漿，並研究各材料之特性，相信對古蹟修護有相當大的助益。



## 1.2 研究動機

「灰作」為古蹟中修復工程中項目使用最廣泛、材料成分最複雜又最難掌控，且為不可或缺的工作材料。近年來傳統古蹟修復相關工程，常因灰縫材料硬化太慢或強度明顯不足，故有許多修復工程常以水泥取代傳統灰作之材料，水泥雖強度、耐水性等其他性質遠高於灰作，但並不適用於灰作材料，英國 ICOMOS 主席費爾頓 (B.M. Feilden) 曾說明古蹟不適合使用水泥的原因：

1. 水泥使用是不可逆的，若是使用於古蹟之上，要再去除的話，會損傷古蹟原來的材料。
2. 水泥抗拉、抗壓、附著力太大，它與古蹟中的材料無法相互配合。
3. 水泥強大的機械力容易造成相鄰材料的破壞。
4. 水泥孔隙率低，不易滲透，它會保住水和水氣，阻礙蒸發，使牆體受潮。
5. 水泥的傳熱性很高，利用它來澆置牆縫時，它會形成冷橋。
6. 水泥的顏色是冷灰的，很像光滑的鐵皮，與古蹟中的傳統材料在審美上格格不入。

基於以上幾點，發現水泥確實不適用於修復古蹟。而且政府已於民國七十一年公佈「文化資產保存法」，當中便明文陳述需要採用原用或是相近的材料。不過對於實際上所採用的方法及配比，並沒有明確的規定，因此若能藉由現代的儀器及文獻資料來改善傳統的「石灰砂漿」，相信對於古蹟修復能夠有相當大的助益。

### 1.3 研究目的

目前對於傳統灰漿所能獲得的訊息並不多，對於傳統灰漿的資料主要來自於文獻記載及老匠師們的口述資料，對於這些配比亦無完整的力學行為分析。因此本研究以基本材料砂、黏土、石灰外，另添

加了許多不同的材料，藉由添加各種材料配比，進而得到不同的砂漿力學性質，並逐步修改配比，在其中尋找最佳的比例，並能夠進一步的分析各種材料對於砂漿的影響。使我們能夠依照各種不同的需求加入不同的添加物，而得到想要的使用目的。



## 第二章 文獻回顧

### 2.1 膠結材料的演變

#### 2.1.1 西方的膠結材料演變

約在西元前三千到兩千年間，古埃及人開始在建築上使用膠結材料，他們是以煅燒石膏做為建築的膠結材料，像在埃及的古金字塔中，便使用了煅燒石膏。古希臘人則是將石灰石經過煅燒後所得到的石灰，來當作建築的膠結材料。西元前 146 年羅馬帝國併吞希臘，保留了希臘人用煅燒石灰做建築黏結材料的技術。西元前 30 年，羅馬帝國併吞埃及，煅燒石膏的技術則被煅燒石灰所取代。羅馬人對希臘的煅燒石灰黏結材料加以改良，在石灰中摻入砂子，及磨細的火山灰，在沒有火山灰的地區，則摻入磨細的碎磚取代火山灰，此種改良過的砂漿，俗稱為「羅馬砂漿」，用其砌築的建築遠比單純使用煅燒石灰的效果好且耐久。在歐洲的建築史中，例如法蘭西和英國等，都普遍使用這種俗稱為「羅馬砂漿」的建築黏結材料，且延續了很長的時間。

#### 2.1.2 中國的膠結材料演變

中國古代的建築膠結材料發展，有著自己獨特的發展歷史，並沒有受到西方國家的影響，常用的膠結材料為石灰，石灰漿的使用，是始於中國東漢時期，例如河北一、二號漢墓就是使用石灰漿作為膠結的材料。到了宋代之後，在磚塔的灰縫材料上，除了原有的黃泥之

外，也開始普遍的加入石灰作為灰縫材料。明代開始遂將石灰漿運用於砌牆上，並使用不同的混合材料於石灰漿中。一般以石灰石鍛燒後得氣硬性石灰，在水中強度低。最早的建築黏結材料，出現在西元前 5000 到 3000 年間的新石器時代的仰韶文化時期，使用的黏結材料稱之為「白面灰」。「白面灰」是由天然的姜石磨細而成，呈白色的粉末狀。姜石的二氧化矽含量高，常夾雜在黃土中是黃土中的鈣質結核。西元前 403 年到西元前 221 年的戰國時代，使用的建築黏結材料演變為黃泥漿拌草混合，作為築橋的黏結材料來築牆，此種材料的使用在現今社會還是可以看見。蜃灰是用蛤殼燒製而成的鍛石材料，也就是所謂的生物性石灰，由此可見早在周朝就已發現石灰具有良好的吸濕、防潮效能和膠結的能力。在唐代的文獻中亦有記載牡蠣灰膠結性能，例如煮鹽時用以盛鹽鹵的竹盤，為使其不漏，“竹盤者，以篾細織，竹篾表裡以牡蠣灰泥之，自收海水煎鹽之，謂之野鹽”。明末宋應星在其著作《天工開物》中詳述石灰和蠣灰的製造技術。石灰用青色石(石灰石)鍛燒而成，方法是“先取煤炭、泥和做成餅，每煤餅一層，疊石一層，鋪薪其底，灼火燔之”“成質之後，入水永劫不壞”。蠣灰製作方法與石灰石相同。二者“粘砌城牆橋樑，調和桐油造舟，功皆相同”。清代《營造法原》一書中則記載了鍛石燒製工藝與鍛石性能之間的關係。由文獻的記載，可以知道中國到了明、清時期在石灰的生

產與使的技術已相當普遍、純熟。

## 2.2 三合土概述

「石灰砂漿」又叫做「三合土」。大約是由白灰、黏土糖漿、貝殼粉、糯米漿、海菜和水等材料組成，所使用的材料種類並沒有特定，一般作為砌築打底用的材料。最早出現的三合土是在西元 5 世紀的中國南北朝時代，是由砂、黏土、石灰所組成。明代是用煅燒石灰、陶粉和碎石所組成的三合土。清代則是用煅燒石灰、黏土（或爐渣）和細砂所組成的。砂是石灰砂漿中的粒料，有砂粒料支撐，灰漿易於接觸空氣而迅速凝聚，同時也可減輕灰漿凝聚，體積收縮時出現裂縫，石灰漿則形成膠結作用。在 20 世紀考古工作者在甘肅秦安大地灣清理房屋遺址二百四十多座。時間跨越仰韶文化早、中、晚期，其中仰韶中期的居室地面是用夯土築成，其上鋪一層紅燒土，表面再鋪一層堅硬的燒石灰膠凝材料，而在仰韶晚期(距今五千多年)的居室中，先民們曾使用一種有良好防潮和保溫性能的材料。這種材料是用料礧石（黃土層中的鈣質結核，含  $\text{CaCO}_3$  60~80%，含其他粘土礦物 40~20%）鍛燒而成的輕骨料。將其研磨成粉，摻入紅黏土，形成為膠凝材料。用以修築地面，既光滑又耐磨。晉代張華在其所撰《博物志》中最早記載了鍛燒石灰石製取石灰：“燒白石，作鍛石，既訖，積著地，經日都冷，遇雨及水澆，即更燃煙焰起。”而南方濱海地區，由於缺少

石灰石，“燒蠣殼為灰”。

中國的建築膠結材料的發展中，最特別的地方是用有機物拌和三合土，如「糯米石灰」、「桐油石灰」、「血料石灰」等。《宋會要》記載，西元 1170 年南宋乾道六年修築和州城，「其城壁表裡各用磚灰五層包砌，糯米粥調灰鋪砌城面兼樓櫓，委皆雄壯，經久堅固。」明代《天工開物》一書中記載：「用以襄墓及貯水池則灰一分入河砂，黃土二分，用糯米、羊桃藤汁和勻，經築堅固，永不隳壞，名曰三合土。」除了古籍的記載，許多考古的發現，也證實了許多古建築的膠結材料中都含有澱粉，且至今依然完好，可見其堅固及耐久的程度。

中國在三合土的運用裡，添加了許多的有機物，不斷改進三合土的膠結能力。在同一個時期裡，西方國家則是使用「羅馬砂漿」，或加以改進，並沒有添加有機物等，在這方面可以看出早期在中國的膠結材料研發上是明顯比西方來的進步。然而中國的膠結材料技術，一直停留在用有機物拌和三合土的階段，沒有再加以改良提升。西方國家在羅馬砂漿的基礎上，不斷的加以研究改良，最終發明出現在各界普遍使用的水泥。

## 2.3 石灰砂漿種類與材料

### 2.3.1 石灰砂漿種類

石灰砂漿是古建築施工中常用的黏結材料，其主要成份為石灰、

黏土、砂等材料按一定比例加水調和而成。石灰砂漿依照不同的用途，有不同的石灰砂漿種類，有用於打底之抹灰、牆面刷飾、防水捻縫、黏結石頭及牆身砌築等。因用途與地點的不同而選擇適合的石灰砂漿種類，例如用於基礎的灰漿不能太濕，且要用夯實的方式施工；用於砌磚的灰漿，要有一定的工作性，且要有黏性；用於泥塑剪黏方面，則要黏性高、容易塑形為主等。石灰砂漿的分類如【表 2-1】〔03〕。

### 2.3.2 石灰砂漿材料

台灣各歷史悠久的廟宇、古厝和城堡，其興建時所使用的石灰砂漿材料也不盡相同。趙崇欽(2001)在「北線尾荷蘭海堡遺址挖掘記」提及北線尾荷蘭海堡遺址的灰漿，顏色呈灰白色，並夾有貝殼、蚶殼及紅磚碎屑。孫全文(2001)在「台閩地區第一級古蹟赤崁樓修復過程工作過程記錄暨施工報告」記載，赤坎樓的灰壁粉刷乃採用麻絨、蚶殼灰加黃黏土、水泥、溪沙打底，再用麻絨、蚶殼灰整平，最後再以純淨的麻絨白灰層作最後一道的推光。石灰砂漿的基本材料如【表2-2】〔04〕〔07〕。

在國外文獻中，將古建築黏結添加材料，依其不同的性質分成：

一.染色用：如色土(*earth pigments*)、氧化鐵(*iron oxides*)、炭渣(*coal dust*)、燈黑(*lamp black*)。

二.增加力學強度：如植物纖維(*fibrous plant materials*)、動物毛

髮(*animal hair*)。

三.增加黏性：如蛋白(*egg white*)、動物血(*animal blood*)。

四.輸氣劑(*air entrainers*)：麥芽酒(*malt*)、尿(*urine*)。

L.B. Sickels(1981)舉出下列多種添加材料，如蛋白、啤酒、蜜蠟、血、奶油、乳酪、棉花、糞、榆樹皮、纖維、樹汁、樹脂、毛髮、豬油、角質、麥芽酒、糖漿、米、麵糰、蟲膠、牛油、糖、尿、蔬菜汁等材料。由以上國內外對灰漿添加材料的文獻中，可以發現添加材料的種類，並沒有一個固定的模式，但共通點都是生活周遭容易取得的材料為主，所以在不同的環境與用途上，添加的材料也因此會有所不同。



## 2.4 材料概述

### 2.4.1 石灰

石灰在台灣工業用途上是一種重要的原料。目前在台灣最主要是用水泥工業，其他則用在製糖業、玻璃工業、陶瓷工業、鋼鐵工業等。石灰岩在各種用途上之規格如【表 2-4】〔08〕。石灰依來源的地理環境不同及生成方式的不同分成兩大類，一種是礦物性石灰，以山區為主；一種是生物性石灰，以近海地區為主。礦物性石灰依照生成年代及地質作用的不同，又可分為中新世石灰岩、上新世及上新更新世石灰岩、更新世石灰岩、隆起珊瑚礁石灰岩。生物性石灰的來源

則是貝殼及珊瑚礁為主。台灣地區礦物性石灰岩分佈如【表 2-5】

〔08〕。

石灰早在公元前八世紀古希臘人使用於建築，在中國的春秋戰國時代，也已用於建築工程上，是人類最早應用的膠凝材料。石灰可分為生石灰與消石灰，以石灰岩燒製而成，主要的成分為  $CaO$  (氧化鈣)、 $MgO$  (氧化鎂)、 $SiO_2$  (氧化矽)、 $Al_2O_3$  (氧化鋁)、 $Fe_2O_3$  (氧化鐵)，依照石灰所含的氧化鎂含量的高低又可分為鈣質石灰與鎂質石灰，其不同的生成時期、產地、生產技術，也會造成成分比例的不同，因此會影響到石灰的品質。



## 2.4.2 黏土

自古以來黏土就應用於建築上，黏土拌和砂或稻草形成膠泥狀物質叫做粉塗物 (daub)。黏土是一種普遍存在的礦物，並非由特定岩石所形成，而是由許多不同種類的岩石所構成，所以有非常多的種類和型態。在黏土礦物中，氧、矽、鋁、鐵、鎂和鉀等元素，是呈離子狀態的球體，排成了規則的三度空間架構。這些球體是構成黏土礦物的基本單位，排列的方式不同便形成不同型式的礦物。每一種排列的型式，便構成了一個黏土礦物族，常見的黏土礦物可分為七族，高嶺土族 (*kaolin group*)、伊來石族 (*illite group*)、蒙脫石族 (*montmorillonite group*)、綠泥石族 (*chlorite group*)、蛭石族 (*vermiculite group*)、錯

層族 (*mixed layer group*)、板條族 (*lath-form group*)。這七族黏土礦物中，有 15 種常見的礦物。黏土礦物並不存在於地殼深處的岩石中，但在地表的含量卻很豐富，這種顯著的不同，是因一連串的地質作用中物質循環所造成的。

大部分的黏土礦物都是可塑性的，顆粒非常的細，在 0.5~4 微米 ( $\mu\text{m}$ ) 之間。在現今的社會中，黏土是陶瓷業和耐火工業的主要原料，但在其他產業也使用了相當數量的黏土，例如鑽井泥漿、土壩、造路材料、化學產物、充填料、覆蓋材料、水泥原料等。

台灣的黏土礦，依成因的不同，分成三種分類：

殘餘黏土—係由古第三世紀的板岩和千枚岩經風化作用所形成。另一

種則是火山岩屑和岩流的化學分解作用形成。

蝕變黏土—火山區的安山岩和火山角礫岩經受熱水或硫氣孔噴發蝕

變作用產生的黏土。

搬運 (沉積性) 黏土—包括在古代或現今河流地、沼澤地、湖泊、海

所沉積的黏土。

台灣所產的黏土以搬運黏土為主，黏土的主要成分為  $\text{SiO}_2$  和  $\text{Al}_2\text{O}_3$  佔了 80% 以上，其餘成分為  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ 、 $\text{CaO}$ 、 $\text{MgO}$  等。台灣主要的黏土類型與化學組成的範圍如【表 2-3】〔08〕。

在還沒發明水泥以前，不論是西方或是東方的世界中，黏土材料

在建築材料中都是不可缺少的，因為黏土提供了良好的可塑性及黏結性，且在拌和材料的過程中，黏土所含的  $SiO_2$  會與石灰產生化學變化，生成水化矽酸鈣，是一種水硬性的物質，也是此種黏結材料的強度生成來源之一。

### 2.4.3 糖

公元前 300 年印度已有從甘蔗取得所謂「無蜂之蜜」的記載。之後甘蔗栽培和製糖方法便慢慢流傳於世界各地，中國最早在戰國時代的《楚辭》中就有以蔗漿用於祭祀的記載，甘蔗製糖法的詳細論述則見於明代的《本草綱目》和《天工開物》，而至今蔗糖仍是製糖工業的主要原料。



《彰化縣志》記載：「甘蔗，有紅、白二種，性溫，漿甘，有一種幹小而韌者曰竹蔗，煮汁為糖。『廣志』一名竿蔗，又名都蔗。」專門用於製糖的甘蔗，是一種俗稱白甘蔗，即竹蔗的品種。甘蔗的製糖過程：

採收→過磅→餵蔗口→切割→壓榨→汽電共生→清靜及蒸發→結晶  
→分蜜→成品

甘蔗運送至製糖工廠，首先先將長短不一的甘蔗切齊，再經由撕裂機將甘蔗撕裂，然後經由壓榨機取出甘蔗原汁。剩餘的甘蔗渣便可送進鍋爐當作燃料，一方面可以熬煮甘蔗汁提煉出蔗糖，一方面可以用於

發電供應工廠的電力。甘蔗汁除了糖分外，還有許多的雜質存在，因此會添加石灰，將甘蔗汁加以清淨處理，製造出甘蔗原糖。將甘蔗原糖進一步的加熱蒸發，待蒸發濃縮到一定的過飽和度後，便可放入糖粉起晶，隨後繼續不斷加入糖漿或糖蜜，直到含晶率和母液濃度都符合規定的糖膏，即可用分蜜機將糖蜜和結晶糖分離。結晶糖經打水洗滌、卸出、乾燥後即為砂糖成品。

早期在石灰砂漿中添加糖漿，其功用就如同混凝土的減水劑一樣（例如：PNA 減水劑，其含糖量就超過 40%），能夠減少用水量，且能提高石灰砂漿試體的強度。



#### 2.4.4 桐油

台灣的油桐樹皆由大陸所引進，已有上百年的歷史，其原產於長江流域，引進台灣的品種主要有兩種：木油桐（千年桐）與桐油樹（三年桐）。質量較佳者為三年桐，每年收穫時間在九、十月間。桐油是將桐油樹的種子經過冷榨或油提而製得，主要的成分是桐酸，為含有三個雙鍵的不飽和脂肪酸，色呈金黃色黏稠液體，沒有其他添加物者稱為「生桐油」。桐油為良好的乾性油，具有乾燥快、比重輕、附著力強、耐熱、耐酸、耐鹼、防腐、防鏽、不導電性等特性。可用於油漆原料、防水紡織品（如油布、人造皮革等）、印刷油墨、軍用防潮用品、電器用品（如電器絕緣物、電話線）、填充物品（如船隻）、

捕魚網、殺蟲劑、瀝青代替品等多方面的用途。在建築使用方面，桐油則是用在木料的保護、油漆彩繪的配料、灰漿的耐水性添加材料。以上可以看出桐油的使用，在早期是相當重要的，尤其是桐油的防水效果。

## 2.5 石灰的化學反應

參考許多的文獻資料後，可以發現傳統的灰漿材料中，石灰這項材料是必定添加的重要材料，因為石灰的一連串化學反應，是使灰漿硬化產生強度的重要因素。以下就對石灰各階段的化學反應進行說明。

[10] [05]

一. 氧化鈣 ( $CaO$ ) 的生成：



在大自然環境自然存在的石灰石礦，一般通稱為灰石即碳酸鈣 ( $CaCO_3$ )，為白色結晶或粉狀固體。將碳酸鈣加熱到大約  $800^{\circ}C$  以上，碳酸鈣即開始分解成氧化鈣 ( $CaO$ ) 與二氧化碳 ( $CO_2$ )。



經過煅燒後的灰石生成的氧化鈣為白色固體，俗稱生石灰，熔點高達  $2580^{\circ}C$ 。

二. 氧化鈣的消化反應 ( $Ca(OH)_2$  的生成)

氧化鈣有很好的吸水能力，故常被當作乾燥劑使用。氧化概

與水反應生成氫氧化鈣 ( $Ca(OH)_2$ )，並且會產生大量的化合熱，此種反應過程稱為消化反應，所以氫氧化鈣又稱為熟石灰或消石灰，呈白色粉末狀。



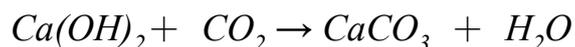
氧化鈣的消化反應過程中，除了放出大量的熱，體積也會增加 1.5~2 倍，因此可以利用此一特性，用於控制砂漿體積的膨脹或收縮情況。而氫氧化鈣水溶液會使漿體 pH 值上升，並可促進後續的化學反應進行。



氫氧化鈣在水中分解成鈣離子 ( $Ca^{2+}$ ) 和氫氧根離子 ( $OH^-$ ) 後，鈣離子置換黏土顆粒表面之弱陽離子，如氫離子、鈉離子及鉀離子等，由於許多鈣離子群集於粘土顆粒表面，此會改變了黏土顆粒之電表面力，並減少擴散電雙層水的厚度，使得土壤顆粒間的排斥力減弱，導致土壤顆粒膠凝且呈密簇與凝聚狀，此為離子交換與凝聚作用。離子交換的能力與 pH 值，粘土礦物種類有關；pH 值愈高則愈能促進離子交換，而粘土礦物中以蒙脫土 (*Montmorillonite*) 之交換能力最高，伊利土 (*Illite*) 次之，高嶺土 (*Kaolinite*) 最低。

### 三.消石灰的硬化反應 (碳化反應)

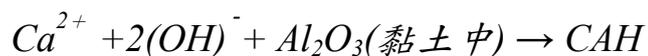
氫氧化鈣在水中的溶解度相對不大，但為一種強鹼。其澄清的水溶液稱為石灰水，會與空氣中的二氧化碳慢慢反應（或直接通二氧化碳氣體），生成碳酸鈣白色沈澱，但通過量的二氧化碳時，碳酸鈣沈澱又將被溶解。



灰漿的主要材料為石灰、細砂、土與適量的水，此種混合物又被稱為三合土。因為細砂和土中含有  $\text{SiO}_2$ ，再吸收空氣中的二氧化碳產生化學反應便會硬化成碳酸鈣與矽酸鈣。



氫氧化鈣分解出的鈣離子也會與土壤中的  $\text{SiO}_2$ （矽酸鹽）與  $\text{Al}_2\text{O}_3$ （鋁酸鹽）進行膠結作用，產生矽酸鈣水化合物 CSH 和鋁酸鈣水化合物 CAH 等膠結物質，增加其膠結強度，此過程稱做卜索蘭反應。其化學反應式如下：



石灰的碳化過程是非常緩慢的，在初期可以說只有少量氧化鈣吸收水分變成氫氧化鈣後，與有限的二氧化碳作用生成碳酸鈣

結晶，碳酸鈣結晶生成後，便阻絕了二氧化碳的滲入。當二氧化碳無法進入後，剩餘的氫氧化鈣，在潮濕的環境下，逐漸的與黏土中所含的二氧化矽緩慢的發生反應，生成矽酸鈣等硬性的化合物。

## 2.6 古蹟灰漿的力學性質

由於近代的磚砌黏結材料大部份都以水泥砂漿所取代，以傳統石灰砂漿進行相關力學研究並不多，較具相關性的有張清忠(2002)在「三合土配比及材料行為之研究」中，對於蠣殼灰、砂、紅土三材料混之三合土進行相關性質及配比研究。王龍盛(2003)在「清治時期台灣砌磚用糖灰漿之做法與基本性質研究」中，經由田野調查及實際施作灰漿試體，探討其本力學性質。楊敦凱(2002)「傳統磚材黏結材料抗拉力學行為之研究」，藉由實驗方法探討紅磚與傳黏結材料介面之抗拉力學性質，所考慮之黏結材料為糖灰漿和牡蠣粉漿。陳俊良(2004)「古蹟灰漿材料之配比與強度關係之研究」，從古蹟材料中選出石灰、黏土、海砂、牡蠣殼粉、糯米漿及紅糖漿等六種材料另加上稻殼灰，來進行配比與抗壓強度之關係。在表【2-6】〔07〕〔11〕〔12〕〔13〕列出其中傳統灰漿的抗壓強度較佳之配比。且成果如下：

張清忠(2002)「三合土配比及材料行為之研究」：

1. 紅土具有良好之保水力及黏著性，可提高三合土材料延展性、黏結力及防止水分快速蒸發。
2. 蠣殼灰係用以提昇三合土韌性、防潮及防蟻，以及與紅土混合後增加三合土之強度。

王龍盛(2003) 「清治時期台灣砌磚用糖灰漿之做法與基本性質研究」：

1. 本研究建議糖灰漿施作時採用 0.7 左右之水膠比較適當，石灰與砂的比值可為 1：1 或 1：2 之間。
2. 由試驗得知搗擊數之多寡與糖灰漿並無明顯的關係存在，但經過充分搗擊的石灰漿在加糖過程中較易進行，且可提高操作之工作性。
3. 由研究得知 60 天齡期對糖灰漿的成長是必須的。本研究證明糖的比例約在糖：石灰=1：96~160 較為適當。
4. 磚材吸水率與整體磚構造強度無關，但氣乾狀態時強度欠佳，砌磚時之佈漿方式（全面佈漿或四周佈漿）與整體強度無關。

楊敦凱(2002) 「傳統磚材黏結材料抗拉力學行為之研究」：

1. 影響介面拉力黏結強度之主要因素為介面黏結材料之種類和試體置放的齡期，而材料有含砂的強度較不含砂為高。

2. 以牡蠣粉砂漿為磚材介面黏結材料所探討抗拉力學性質時，發現此種材料的介抗強度並不穩其特性有待後續研究者探討之。

陳俊良(2004)「古蹟灰漿材料之配比與強度關係之研究」：

1. 灰漿中粗細骨材之比例與灰漿之抗壓強度並無一定之關係。
2. 添加黏土較多之試體，7天及28天氣乾強度普遍較高，且有黏土比例愈高，抗壓強度愈高之趨勢。牡蠣殼粉在級配中，扮演著重要的角色，加上與黏土適當的比例，可以達到較佳的抗壓強度。
3. 添加稻殼灰之試體，抗壓強度上升之幅度相當大，可知稻殼灰乃提升灰漿抗壓強度之一種非常好的材料。



表【2-1】 石灰砂漿的種類〔03〕

灰漿種類	製作方式
潑灰	將生石灰反覆用水均勻潑灑，成為粉狀過篩。
潑漿灰	潑灰過細篩後用青漿潑灑而成。
煮漿灰	生石灰攪成稀粥狀，過篩發漲而成。
老漿灰	青灰加水攪勻再加生石灰塊（青灰與白灰之比為 7:3），攪成稀粥狀過篩發漲而成。
大麻刀灰	潑漿灰或潑灰加麻刀（100:5 重量比）加水攪勻而成。
麻刀灰	潑漿灰或潑灰加麻刀（100:4 重量比）加水攪勻而成。
小麻刀灰	潑漿灰或潑灰加麻刀（100:3~4 重量比）加水攪勻而成。
夾隴灰	潑漿灰加煮漿灰（3:7）加麻刀（100:3）加水調勻。
裏隴灰	<input type="checkbox"/> 打底用：潑漿灰加麻刀（100:5 重量比）加水調勻而成。 <input type="checkbox"/> 抹面用：煮漿灰摻顏色加麻刀（100:3~5 重量比）加水調勻而成。
素灰	為各種不摻麻刀的煮漿灰（灰膏）或潑灰。用於瓦作勾縫。
色灰	各種灰加顏色而成，通常用於牆面。
花灰	比潑漿灰水分少的素灰。青漿與潑灰可以不調勻。
油灰	麵粉加細白粉和煙子（用融化之膠水攪成膏狀）加桐油（1:4:0.5:6 重量比）攪拌均勻而成。
麻刀油灰	用生桐油潑生石灰塊，過篩後加麻刀（100:5 重量比）加適量麵粉加水用重物反覆砸鎚而成。
葡萄灰	潑灰用大眼篩子篩過。
紙筋灰	先將草紙用水爛爛，再放入煮漿灰內攪勻。
護板灰	潑灰加麻刀（20:1 重量比）相摻加水調勻而成。
磚藥	磚面四份，白灰膏一份加水調勻。或七份灰膏三份磚面少許青灰加水調勻。

摻灰泥	泥七份，潑灰三份加水悶透調勻。
白灰漿	潑灰或生灰加水調成漿狀。
桃花漿	潑灰或生灰加好黏土即「膠泥」（6：4 重量比）加水調成漿狀。
月白漿	潑灰加適量青灰加水調成漿狀。
青漿	青灰加水調成漿狀。
煙子漿	把黑煙子用熔化的膠水攪成膏狀，再加水攪成漿狀。
紅漿	把紅土粉用熔化的膠水攪成膏狀，再加水攪成漿狀。
磚面水	把磚磨成細粉末加水調成漿狀。
江米漿	生石灰加江米（即糯米 6：4 重量比）加水煮，至江米煮爛為止。

表【2-2】 灰漿材料

灰 漿 材 料	黏結材料	石灰、蚶殼灰、青灰、黏土、糖汁、糯米汁
	細粒料	砂、紅土、蚶殼、紅磚碎屑、貝殼
	纖維物質	麥桿、麻絨、穀殼
	染色用	紅土、黃土、炭渣
	其他材料	桐油、米醋、明礬、血料

表【2-3】台灣主要黏土類型化學組成的範圍(Ho & Lee, 1963; 陳培源)

黏土類型	$SiO_2$	$Al_2O_3$	$Fe_2O_3 + CaO + MgO$
更新世沉積黏土	80.48~82.41	10.25~11.73	3.2~3.3
紅黏土	54.25~66.37	17.11~28.30	10.28~5.65
南莊層中的黏土地層	50.59~68.19	17.73~32.58	1.7~5.36
含煤地層中從白色砂岩挑出的洗選黏土	75.32~87.55	8.18~14.27	1.75~4.62
新第三紀海相黏土	59.42	21.10	11.77
黏土化安山岩中的黏土	29.86~62.71	23.15~37.88	0.80

表【2-4】石灰岩各種用途之規格一覽表

用途 \ 化學成份%	氧化鈣	氧化鎂	氧化矽	氧化鋁	氧化鐵	氧化磷	硫
製水泥原料	>50.4	<3-3.5 <2.7 <sup>a</sup>		<5		<1	<0.6
製糖之澄清劑	>50.4 <sup>b</sup>	<3					
鑄鐵用	>54	<0.5		<1.0		<0.023	<0.01
煉鋼用	>54	<0.5		<0.5		<0.046	<0.01
鐵合金用	>54	<0.5		<1.0		<0.011	<0.01
製電石原料	>54.9	<0.5	<1.0	<1.0	<1.0	<0.01	
	>51.5 <sup>c</sup>	<1.75	<2.0	<1.0		<0.02	<0.2
製玻璃原料	>54.4				<1.0	<1.0	
	>55.2 <sup>d</sup>				<0.035	<0.1	<0.1

註：本表 a.b.c.d.分別為

- a. British Standard Specification B. S. 12, 1958 for Portland Cement.
- b. U.S. Bureau of Standard Circular NO.207.
- c. ASTM Standard, C 258-52.
- d. British Standard Specification B. S. 3108, 1959.

表【2-5】 台灣地區礦物性石灰岩分佈一覽表

類型	年代	分佈區域	特色
結晶石灰岩	上古生代	中央山脈東坡，由蘇澳附近，南至知本溪中游	結晶甚高，呈白色或灰色， $MgO$ 、 $SiO_2$ 、 $Fe_2O_3$ 含量均甚少
半結晶石灰岩	白堊紀與古第三紀	中央山脈高山區	$MgO$ 、 $SiO_2$ 、 $Fe_2O_3$ 含量均甚少
中新統石灰岩	第三紀中新世	台北縣中、桃園縣龜山、新竹縣關西、台東	$MgO$ 含量較少， $SiO_2$ 、 $Fe_2O_3$ 含量較多
上新統珊瑚石灰岩	第三紀上新世	嘉義縣番路、台南縣白河、台南縣番社、高雄縣內門	$MgO$ 、 $SiO_2$ 、 $Fe_2O_3$ 含量均多
頭嵙山統珊瑚石灰岩	下更新世	高雄縣田寮、燕巢、高雄市半屏山、壽山、屏東恆春	$MgO$ 含量較少， $SiO_2$ 、 $Fe_2O_3$ 含量較多
隆起珊瑚礁	第四紀上更新世	屏東恆春、北部海岸、花蓮、台東、綠島、蘭嶼	多孔隙、有珊瑚紋釐

表【2-6】 各研究學者之灰漿抗壓強度

研究學者	試體尺寸	較佳的抗壓強度配比 (重量比)	28 天齡期之抗壓強度
張清忠 (2002)	直徑 5x高 10cm 之圓柱試體	螞殼灰漿泥：紅土：砂 =1：1.5：1	1.317MPa (191.015psi)
王龍盛 (2003)	5x5x2cm 立方體	石灰：砂：水=1：1：0.5	3.737MPa(542.007psi)
		紅糖：石灰=1：48 石灰：砂：水=1：1：0.5	11.978MPa (1736.105psi)
楊敦凱 (2002)	-	螞殼灰：砂：水 =1：1：0.5	0.213MPa (30.893psi)
陳俊良 (2004)	5x5x5cm 立方體	石灰：黏土：牡蠣殼粉 =2：1：3	1.515MPa (219.683psi)
		石灰：稻殼灰=1：0.4	

# 第三章 實驗計畫與設計

## 3.1 實驗計畫概述

根據文化資產保存法第四十六條（古蹟修護原則）：古蹟修復應採用原用或相近的材料。大部分古蹟所使用的黏結材料，並非現今所普遍使用的水泥砂漿，而是傳統的灰漿材料。

參考了許多傳統建築介紹與古蹟修復材料相關的文獻，絕大部分的灰漿材料是以砂、土（紅土、黏土等）、石灰為主要材料，再依照不同情況及需求添加其他材料，如纖維、蚶殼粉、桐油、糯米漿、海菜漿、蛋白等。本實驗是以傳統砂漿為主要研究，根據對古蹟黏結材料的化學分析結果，主要材料選擇使用河砂、黏土、生石灰、消石灰、生桐油、蚶殼粉及砂糖漿。

因為現有對傳統砂漿的研究並不多，大多都是依照傳統匠師的經驗來調製配比，根據文獻顯示，目前所做出的結果抗壓強度只達到  $5 \text{ kgf/cm}^2$  左右，因此本次實驗除了參考傳統匠師的經驗外，並對各種比例的材料進行研究，找出材料相互的關係，以找到提高抗壓強度的最佳配比為主要目標。

## 3.2 試驗設備

01. 切割機：如圖【3-2】
02. 標準篩
03. 游標卡尺：使用 Mitutoyo 公司製造之 Series No. 530-119 游標卡尺，有效長度為 300mm，精確值到 0.02mm。如圖【3-3】
04. 電子秤：最大秤重 12kg，精度 0.1g。量測添加材料之重量。
05. 電磁爐
06. 砂漿拌和機：如圖【3-4】
07. 立方試體鋼模：長、寬、高為 5cm×5cm×5cm，一組三個試體之鋼模。符合 CNS1010 之規定。如圖【3-5】
08. 砂漿棒鋼模：長×寬×高尺寸為 285mm×25mm×25mm，一組兩個試體之鋼模。符合 CNS14603 之規定。如圖【3-6】
09. Dialgage：如圖【3-7】
10. 萬能試驗機：本試驗使用 Shimadzu 公司製造之 UMH-100 萬能試驗機，最大重為 100 噸重。如圖【3-8】
11. 高溫爐：本試驗使用由詠欣有限公司所製造之高溫爐，最高溫度可達 1200°C。如圖【3-9】
12. 線性差動變壓器 (LVDT)：如圖【3-10】
13. 位移計：如圖【3-11】

14. 費開氏儀器：量測初凝、終凝時間。如圖【3-12】

### 3.3 試驗材料的備製

#### 3.3.1 基本材料

##### (一) 生石灰 (*calcium oxide*, $CaO$ )

此次實驗所用的生石灰為和興石灰工廠所生產的粉狀生石灰，因為工廠所生產的生石灰粗細不均勻，所以使用前先要先將生石灰篩過，將顆粒較粗的生石灰篩選掉，以免製作試體時，因為大顆粒的生石灰遇水膨脹，使試體造成應力集中的現象，甚至因此產生裂縫。化學成分分析如表【3-1】所示



##### (二) 消石灰 (*calcium hydroxide*, $Ca(OH)_2$ )

實驗所使用的消石灰為新興化學工廠所生產的消石灰，因為所生產的消石灰粗細均勻，並沒有較大的顆粒存在，拌和時可以輕易的攪拌均勻，所以可以直接使用，不需過篩。化學成分分析如表【3-2】所示。

##### (三) 黏土粉 (clay)

本實驗使用的黏土粉，是百康奈米科技股份有限公司所生產的一般黏土粉。使用台灣所產的黏土礦，經烘乾、碾碎、磨粉所製造出來。此黏土粉的化學成分分析如表【3-3】所示。

#### (四) 砂

本實驗所使用的細粒料為取自中部頭前溪天然河砂，篩分析結果如表【3-4】所示。

### 3.3.2 添加材料

#### (一) 生桐油

實驗所使用之生桐油，為不添加化學藥劑之桐油，經由油桐樹種子冷榨或油提而得，為金黃色黏稠液體，由一般油漆行可以購得。

#### (二) 蚵殼粉

取自高雄縣湖內鄉之新吉勝商行，用途為建材與飼料添加物。



#### (三) 紅糖漿

本實驗在糖的種類方面選用紅糖為主。選用的紅糖為一般市售的紅糖粉。

紅糖漿的配製過程：

1. 用電子秤秤紅糖粉 200 公克、100°C 的熱水 200ml，採用 1：1 的混合配製。
2. 將熱水分次倒入紅糖粉中，並不停的攪拌，直到紅糖粉完全溶解為止。

3. 將混和好的紅糖漿靜置冷卻，然後裝於瓶中密封，防止水分散失。

如果不是當天使用，則冰於冰箱冷藏。

#### (四) 糯米漿

因為要將糯米漿加熱至糊狀，所以一開始糯米水不能太稠，否則會不易加熱甚至導致燒焦。經過多次試驗後，本實驗添加適當之糯米粉與水。本實驗選用一般市售之水磨糯米粉。

糯米漿的配置方法：

1. 使用電子秤秤出適當的糯米粉與水。
2. 先倒入少量水與糯米粉混合，然後將糯米粉攪散，充分攪拌均勻後，將剩餘的水再加入混合均勻。
3. 將混和好但未加熱的糯米漿置於電磁爐上。首先將電磁爐調到高溫，然後加熱拌勻。
4. 將加熱完之糯米漿，至於空氣中冷卻至 40~50 度（糯米漿從未加熱時的右），然後將冷卻的糯米漿裝入瓶中密封，以防止水分散失。
5. 糯米漿若不是當天要使用，則需放入冰箱中冷藏，防止糯米漿的變質。

## 3.4 實驗試體的製作

### 3.4.1 立方試體製作流程（5×5×5 cm立方試體）

傳統砂漿試體從製作到拆模，依下列步驟執行：

1. 將鋼模組裝完成，並在試體模內部塗上黃油，以利拆模時容易脫膜。
2. 將所需的材料如砂、黏土粉、石灰、蚵殼粉等用電子秤量出所需的量。
3. 將所需的材料在加水前，先用拌和機乾拌和，將材料充分的混和。
4. 用電子秤量出所需的桐油及紅糖漿的用量，並先將兩者互相混和。
5. 將乾拌和好的材料加入所需的水量用拌和機攪拌，然後加入剛攪拌好的桐油與紅糖漿，繼續用拌和機攪拌，直到所有材料皆混和均勻為止。
6. 灌模時，將灰漿分兩層加入，每一層均要搗實並用膠槌敲擊試體模外部，使灰漿內的氣泡排出，最後再以刮刀將表面刮平。
7. 試體澆置完成後，置於溫度、濕度穩定且水平的地方。
8. 試體澆置完成二十四小時後，即可拆模。
9. 拆模後的試體，放置於陰涼且通風的空氣中，進行養護。

### 3.4.2 砂漿棒試體製作流程

傳統砂漿棒試體從製作到拆模，依下列步驟執行：

1. 將鋼模組裝完成，並在試體模內部塗上黃油，以利拆模時容易脫膜。
2. 將所需的材料如砂、黏土粉、蚵殼粉、石灰等用電子秤量出所需的量。
3. 將所需的材料在加水前，先用拌和機乾拌和，將材料充分的混和。
4. 用電子秤量出所需的桐油及紅糖漿的用量，並先將兩者互相混和。
5. 將乾拌和好的材料加入所需的水量用拌和機攪拌，然後加入剛攪拌好的桐油與紅糖漿，繼續用拌和機攪拌，直到所有材料皆混和均勻為止。
6. 灌模時，將灰漿一次灌滿鋼模，並用膠槌敲擊鋼模外側，使漿體內的氣泡震出，避免殘留於試體內部，而影響實驗結果。最後再以刮刀將表面刮平。
7. 試體澆置完成後，置於溫度、濕度穩定且水平的地方。二十四小時後，即可拆模。
8. 拆模後的試體，放置於恆溫恆濕且水平的空氣中氣乾養護。

### 3.4.3 黏合紅磚之抗壓試體製作流程

傳統砂漿黏合紅磚之抗壓試體的製作，依下列步驟執行：

1. 用切割機將紅磚從中間對切，切成兩塊相等大小的紅磚。
2. 將所需的材料如砂、黏土粉、蚵殼粉、石灰等用電子秤量出所需的量。
3. 將所需的材料在加水前，先用拌和機乾拌和，將材料充分的混和。
4. 用電子秤量出所需的桐油及紅糖漿的用量，並先將兩者互相混和。
5. 將乾拌和好的材料加入所需的水量用拌和機攪拌，然後加入剛攪拌好的桐油與紅糖漿，繼續用拌和機攪拌，直到所有材料皆混和均勻為止。
6. 將切割好的紅磚，浸泡於水中 5 分鐘以上，使紅磚充分吸收水分，再將紅磚拿出水面，待紅磚表面的水分消失，便可以使用傳統砂漿黏合。
7. 將一塊紅磚置於水平處，塗上適量的傳統砂漿，在將另一塊紅磚從上方往下壓，達到需要的厚度為止，並用水準氣泡將上方的紅磚置平，然後將四周多餘的傳統砂漿，用刮刀加以刮除。
8. 試體黏合完成後，置於溫度、濕度穩定且水平的地方，以氣乾的方式養護。



### 3.4.4 溫度效應之抗壓試體的製作流程

傳統砂漿試體從製作到拆模過程與抗壓試體 1~9 點相同：

- 1.將鋼模組裝完成，並在試體模內部塗上黃油，以利拆模時容易脫膜。
- 2.將所需的材料如砂、黏土粉、蚵殼粉、石灰等用電子秤量出所需的量。
- 3.將所需的材料在加水前，先用拌和機乾拌和，將材料充分的混和。
- 4.用電子秤量出所需的桐油及紅糖漿的用量，並先將兩者互相混和。
- 5.將乾拌和好的材料加入所需的水量用拌和機攪拌，然後加入剛攪拌好的桐油與紅糖漿，繼續用拌和機攪拌，直到所有材料皆混和均勻為止。
- 6.灌模時，將灰漿分兩層加入，每一層均要搗實並用膠槌敲擊試體模外部，使灰漿內的氣泡排出，最後再以刮刀將表面刮平。
- 7.試體澆置完成後，置於溫度、濕度穩定且水平的地方。
- 8.試體澆置完成二十四小時後，即可拆模。
- 9.拆模後的試體，依不同齡期需求，如 7 天 28 天。之後再放置於不同溫度的烘箱內加溫 24 小時後取出。



### 3.4.5 耐水試驗之試體製作流程

耐水材料的使用方面，分成內用與外用材料。內用材料為攪拌砂漿的同時加入一起拌和；外用材料為砂漿試體氣乾養護 7 天後，塗於試體表面。以下為砂漿試體製作步驟：

1. 將鋼模組裝完成，並在試體模內部塗上黃油，以利拆模時容易脫模。
2. 將所需的材料如砂、黏土粉、石灰等用電子秤量出所需的量。
3. 將所需的材料在加水前，先用拌和機乾拌和，將材料充分的混和。
4. 用電子秤量出所需的桐油及紅糖漿的用量，並先將兩者互相混和。
5. 將乾拌和好的材料加入所需的水量用拌和機攪拌，然後加入剛攪拌好的桐油與紅糖漿，繼續用拌和機攪拌，直到所有材料皆混和均勻為止。若為添加內用材料的試體，則在全部材料拌和完成後，再添加進去攪拌均勻。
6. 灌模時，將灰漿分兩層加入，每一層均要搗實並用膠槌敲擊試體模外部，使灰漿內的氣泡排出，最後再以刮刀將表面刮平。
7. 試體澆置完成後，置於溫度、濕度穩定且水平的地方。
8. 試體澆置完成二十四小時後，即可拆模。
9. 拆模後的試體，放置於陰涼且通風的空氣中，進行養護。

10. 使用外用材料之試體，養護 7 天後，將材料塗於試體表層，然後陰乾。

### 3.4.6 黏合紅磚之剪力試體製作流程

傳統砂漿黏合紅磚之剪力試體的製作，依下列步驟執行：

1. 用切割機將紅磚從中間對切，切成兩塊相等大小的紅磚。
2. 將所需的材料如砂、黏土粉、石灰等用電子秤量出所需的量。
3. 將所需的材料在加水前，先用拌和機乾拌和，將材料充分的混和。
4. 用電子秤量出所需的蚵殼粉、桐油及紅糖漿的用量，並先將兩者互相混和。
5. 將乾拌和好的材料加入所需的水量用拌和機攪拌，然後加入剛攪拌好的蚵殼粉、桐油與紅糖漿，繼續用拌和機攪拌，直到所有材料皆混和均勻為止。
6. 將切割好的紅磚，浸泡於水中 5 分鐘以上，使紅磚充分吸收水分，再將紅磚拿出水面，待紅磚表面的水分消失，便可以使用傳統砂漿黏合。
7. 將一塊完整紅磚置於水平處，塗上適量的傳統砂漿，在將另兩塊切半紅磚從上方往下壓，達到需要厚度為止，並用水準氣泡兩上方的紅磚置平，然後將四周多餘的傳統砂漿，用刮刀刮除，兩塊切半紅磚間及上面塗上適量的傳統砂漿，再將另一完整紅磚從上

方往下壓，達到需要的厚度為止，並用水準氣泡將上方的紅磚置平，然後將四周多餘的傳統砂漿，用刮刀加以刮除。

8. 試體黏合完成後，置於溫度、濕度穩定且水平的地方，以氣乾的方式養護。

## 3.5 實驗設計

### 3.5.1 實驗設計概述

本試驗可分成兩階段，第一階段為測試各項基本材料彼此間的關係，與決定添加材料的用量；第二階段為決定使用的基本材料種類後，測試基本材料不同比例的用量，對試體所造成的影響。

基本材料測試方面，以砂與黏土粉為主要的材料，個別添加生石灰與消石灰，測試其硬固性質。選用現階段最好之配比，分別添加蚵殼粉、桐油、紅糖漿，找出個別適合的添加量，使抗壓強度達到最高。決定基本材料的使用種類及添加材料的用量後，開始對材料的用量比例做配比規劃，測試砂漿棒長度變化、抗壓強度試驗、黏結磚的抗壓試驗及抗剪試驗、耐水能力測試及耐酸測試，以找出各種材料對試體所造成的影響，進而得到最佳的配比。實驗流程如圖【3-1】。

### 3.5.2 基本材料配比設計

根據文獻的資料，找出一些目前較常見的材料，分別對選用的材

料做初步的材料試拌，效果佳者則保留，效果不好者則淘汰。在初步拌和時發現，若石灰只單獨添加生石灰，所製作出來的試體容易膨脹且產生裂縫，因此造成強度降低；若石灰只單獨添加消石灰，所製作出來的試體，體積收縮量會過大，因此在石灰的使用上採取生石灰與消石灰混和使用。縮小使用的基本材料範圍後，再針對所選擇的材料進行交叉的混合拌和，找出初步的差異。進行材料配比規劃前，需先測試添加材料（蚵殼粉、紅糖漿、水）的用量百分比，確定用量後，再對使用材料進行不同比例的配比設計。在砂：黏土：石灰=1：1：0.75 的限制下，將蚵殼粉添加量由 12%~24%，並在每個比例上添加紅糖漿由 6%~12%，這樣可以得到 16 種配比，再觀察其各項力學性質差異，可以得到添加物蚵殼粉及紅糖漿對傳統砂漿的影響。最後在固定砂、黏土、石灰及糖的比例，將蚵殼粉含量 0%、16%、20%、24% 中添加桐油量由 3%~5%，如此可以得到 12 種配比，並依此觀察蚵殼粉及桐油對傳統砂漿的影響。

### 3.5.3 試驗內容

#### 一. 坍度試驗

傳統的傳統砂漿在國家標準裡並沒有規範，因此參考 CNS1176 [混凝土坍度試驗法] 以此為依據，再加以改變試驗方法。混凝土坍度試驗之坍度錐，其頂之內直徑為 10.16 公分 (4 吋)，底之內直徑為

20.32 公分 (8 吋)，高為 30.48 公分 (12 吋)，對於傳統砂漿來說，體積過大，用來測試砂漿的坍度過於浪費材料，且效果並沒有比較好。基於方便且不浪費材料的原則，因此參考 CNS485 [細粒料比重及吸水率試驗法] 當中所規定之圓錐模，來做傳統砂漿之坍度試驗。圓錐模的底部之內直徑為  $90\pm 3\text{mm}$ ，頂端之內直徑為  $40\pm 3\text{mm}$ ，高為  $75\pm 3\text{mm}$ ，金屬模壁厚至少 0.8mm。將砂漿灌入圓錐模內，然後將圓錐模垂直拉起，量測砂漿與圓錐模的高度差，即可得到砂漿之坍度。

## 二.凝結時間測定

參考 CNS786 [水硬性水泥凝結時間檢驗法(費開氏針法)]，並做適當改變。是否使用針頭來作彼此間的對照，以得到適當的初凝與終凝時間。如圖【3-13】。



## 三.抗壓強度試驗

### (1) 砂漿抗壓強度試驗 ( $5\times 5\times 5\text{cm}$ 之立方試體)

參考 CNS1010 [水硬性水泥壩料抗壓強度檢驗法] 並做適當的改變。使用之立方體試體模，每一立方體之格內，其模子之高度，在新模子應為  $50+0.25\text{mm}$  或  $-0.13\text{mm}$ ，在已用過之模子應為  $50+0.25\text{mm}$  或  $-0.38\text{mm}$ 。水泥砂漿的抗壓機之加壓速度為每秒  $2.54\text{ kgf/cm}^2$ ，但因為傳統砂漿的強度較水泥砂漿為低，故將抗壓機之加壓速度降為每秒  $0.15\text{ kgf/cm}^2$ ，以防止過快的加壓

速度造成對試體抗壓強度的高估。將試體置於空氣中氣乾養護，在齡期為 7、28、56 天，將立方試體用蓋平石膏蓋平後，進行抗壓試驗。每一個配比下的每一個齡期均製做 3 個試體，並取其平均值，即該齡期強度。如圖【3-14】。

## (2) 黏結磚之抗壓試驗

參考 CNS1127〔建築用普通磚檢驗法〕之規定，並做適當的改變。將用來黏結磚的水泥砂漿，改成本實驗之傳統砂漿，按照實驗之需求塗敷厚度加以變化，然後置於空氣中氣乾養護。根據 CNS 之規定，試驗時加壓速度每秒  $5\sim 10\text{ kgf/cm}^2$ ，取其中間值控制加壓速度為每秒  $7.5\text{ kgf/cm}^2$ 。在齡期 7 天，用蓋平石膏雙面蓋平後，進行抗壓試驗。如圖【3-15】。

## 四.砂漿棒長度變化試驗

參考 CNS14603〔硬固水泥砂漿及混凝土長度變化試驗法〕之規定。使用的砂漿試體模具，長×寬×高尺寸為  $285\text{mm}\times 25\text{mm}\times 25\text{mm}$  之長方柱試體。將試體置於空氣中氣乾養護，在齡期為 1~7、14、28 天，用精度為  $0.02\text{mm}$  之游標卡尺進行長度變化的量測。

## 五.耐水能力試驗

試體製作完成後，置於空氣中氣乾養護。氣乾養護七天後，將試體浸於水中 24 小時，然後將試體從水裡拿出，待表面乾燥後，用蓋

平石膏蓋平，進行抗壓試驗。抗壓機之加壓速度為每秒 0.15 kgf/cm<sup>2</sup>。

#### 六.耐酸性能力試驗

酸性能力試驗之試體養護時間為 28 天，待傳統砂漿塊養護齡期到期時，將試體取出，置於烘箱以 105°C 烘乾 24 小時後，先秤其重量，接著以 2% 的鹽酸溶液(水中)浸漬 24 小時，再置於烘箱中以 105°C 烘乾 24 小時後秤重，最後將其秤重前後重量以下列公式計算其重量損失率(%)，公式如下所示。

$$Ma(\%) = [(Ws - Wa) / Ws] - [(Ww - Wa) / Ws]$$

*Ma*：重量損失率(%)

*Wa*：試體以 2% 的鹽酸溶液浸漬 24 小時之後乾燥重量(g)

*Ww*：試體浸漬水中 24 小時之後乾燥重量(g)

*Ws*：試體乾燥後重量(g)

#### 七.黏結磚剪力試驗

黏結磚剪力試驗試體齡為 28 天，待試體到達 28 天齡期時，量測其邊長並計算其面積，隨即以蓋平石膏蓋平，然後將試體上下如圖

【3-16】放置鋼製墊片，以萬能試驗機加壓，其加壓速度為每秒 0.15 kgf/cm<sup>2</sup>。如圖【3-17】。

表【3-1】生石灰元素分析（和興石灰工廠提供）

化學元素分析 ICP	
<i>AV-CaO</i>	88±2%Min.
<i>CaCO<sub>3</sub></i>	6%Max.
<i>MgO</i>	1.5%Max.
<i>SiO<sub>2</sub></i>	5%Max.
<i>R<sub>2</sub>O<sub>3</sub></i>	3%Max.

ICP：Inductively Coupled Plasma (感應耦合電漿)，是一種物質含量的測定方法用於檢測環境和材料樣品等之中的後金多含量。

表【3-2】消石灰元素分析（新興化學工廠提供）

化學元素分析 ICP	
<i>Ca(OH)<sub>2</sub></i>	93%Min.
<i>CaCO<sub>3</sub></i>	3%Max.
<i>MgO</i>	1%Max.
<i>SiO<sub>2</sub></i>	1%Max.
<i>R<sub>2</sub>O<sub>3</sub></i>	1.5%Max.
<i>f-H<sub>2</sub>O</i>	1%Max.
<i>B.E.T.</i>	≥ 12m <sup>2</sup> /g

ICP：Inductively Coupled Plasma (感應耦合電漿)，是一種物質含量的測定方法用於檢測環境和材料樣品等之中的後金多含量。

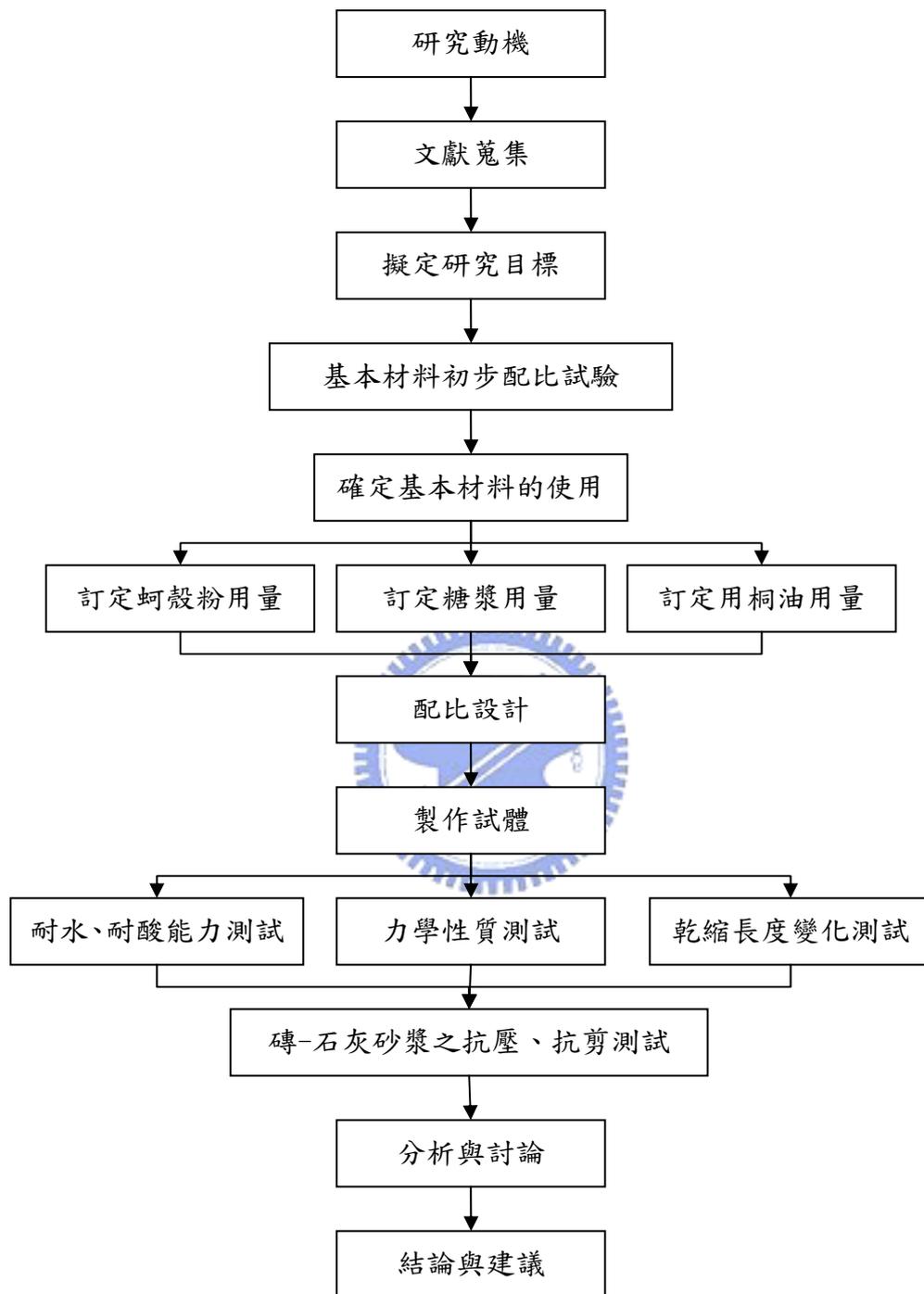
表【3-3】黏土粉元素分析（百康奈米科技公司提供）

化學元素分析 ICP (%)	
Oxide	黏土粉
$SiO_2$	49.81
$Al_2O_3$	32.85
$Na_2O$	0.01
$K_2O$	0.76
$MgO$	0.01
$CaO$	0.01
$Fe_2O_3$	0.55
$TiO_2$	0.62
燒失量(Ig. Loss.)	14.87
乾燥生料 Total	99.49

ICP：Inductively Coupled Plasma (感應耦合電漿)，是一種物質含量的測定方法用於檢測環境和材料樣品等之中的後金多含量。

表【3-4】細粒料篩分析

細砂粒徑分佈試驗結果						
篩	篩重(g)	留篩重(g)	留篩%	累計%	累計%	累計%
#4	418	1	0.12	0.12	0.32	0
#8	338	8	0.94	1.06	1.12	0.89
#16	296	31	3.64	4.70	4.72	4.54
#30	288	142	16.69	21.39	21.59	22.70
#50	298	304	35.72	57.11	61.69	54.67
#100	275	262	30.79	87.90	90.10	90.14
底盤	323	103	12.10	100	100	100
				272.28	279.54	282.94
				1.72	1.8	1.83
				平均 F.M.=1.78		



圖【3-1】實驗流程圖



圖【3-2】切割機



圖【3-3】游標卡尺



圖【3-4】砂漿拌和機



圖【3-5】5 公分立方試體模



圖【3-6】砂漿棒鋼模



圖【3-7】Dialgage



圖【3-8】萬能試驗機



圖【3-9】高溫爐



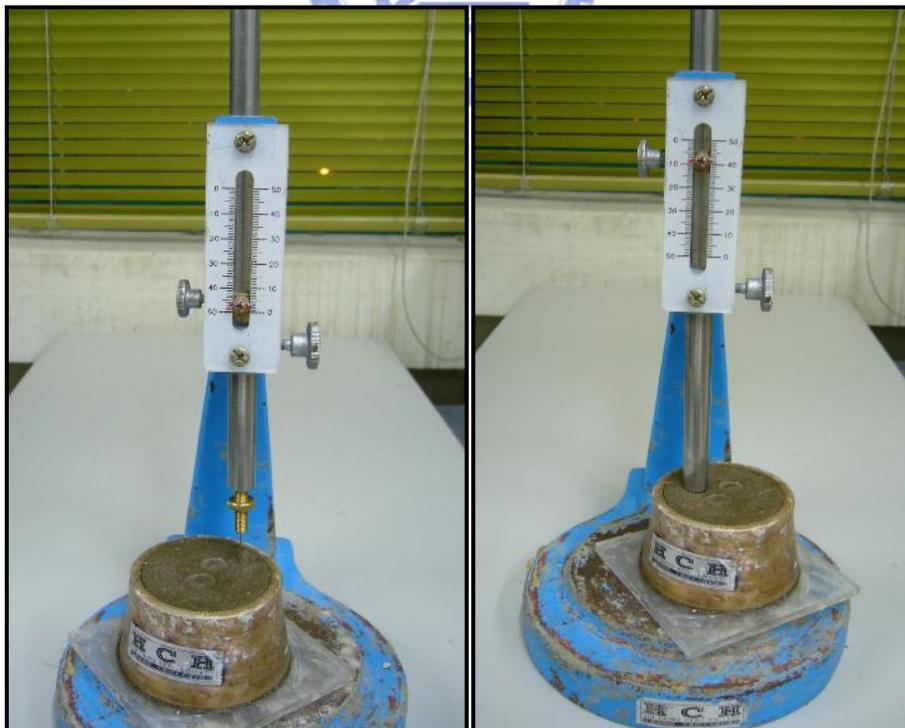
圖【3-10】線性差動變壓器 (LVDT)



圖【3-11】變位計



圖【3-12】費開氏儀器



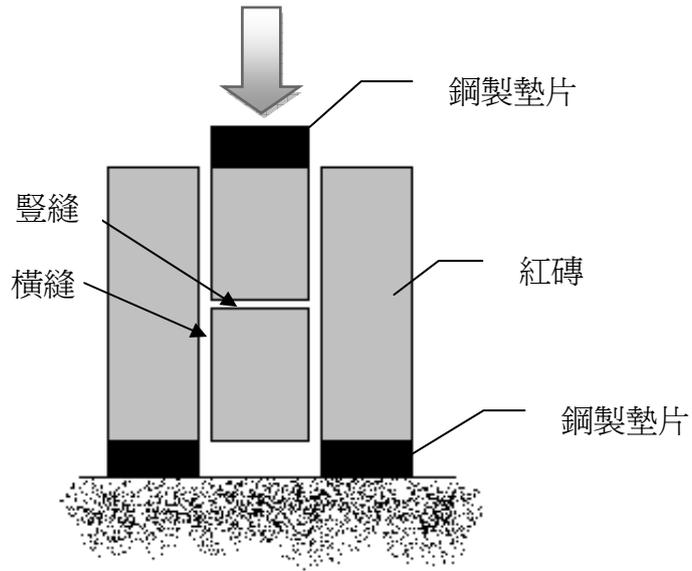
圖【3-13】凝結時間測定



圖【3-14】抗壓強度試驗



圖【3-15】黏結磚之抗壓強度試驗



圖【3-16】黏結磚剪力強度示意圖



圖【3-17】黏結磚之剪力強度試驗

## 第四章 實驗結果與討論

### 4.1 添加材料的影響與添加用量的訂定

為了使可能影響實驗結果的變數減少，所以先將添加材料的（蚵殼粉、紅糖漿）的用量定出固定範圍，維持添加材料的一定比例，以方便了解主要材料（砂、黏土、生石灰、消石灰）對傳統砂漿的影響程度。以下試驗分別對蚵殼粉、紅糖漿量做個別的討論，來決定材料的添加量。

#### 4.1.1 坍度範圍的訂定

在擬定各種添加材料的多寡前，首先需先設定砂漿的坍度範圍，然後再依照實驗測試的結果作必要的調整。設定好坍度的範圍後，將選用的材料做初步的配比試驗，在一定的坍度範圍下，統計各配比所需要的用水量，然後訂出本實驗之用水量。

傳統砂漿過於乾燥會造成試體不易製作，且容易造成孔洞的產生；若傳統砂漿所含水分過高，製作試體時則會造成過多水分滲出，且易使試體強度降低。一般混凝土（OPC）的坍度值，依照 CNS 的規定為 2.5~10 公分，以坍度錐高 30 公分來換算，約為高度的 8.3%~33.3%。細粒料吸水率試驗之圓錐模，其高度為 7.5 公分，坍度範圍以混凝土的規範值做等比例的縮小，高度的 8.3%~33.3% 約為 0.6~2.5 公分。經過試驗後，若砂漿的坍度值達到 1.5 公分以上，砂漿本身的

含水量已過高，在製作試體時會滲出過多的水分，而影響試體本身。因此砂漿的坍度範圍需要適當的縮小，本實驗則將坍度範圍縮減為 0.6~1.5 公分。流度方面，因為變化不是很明顯，所以本實驗以坍度的測定為主。

#### 4.1.2 蚵殼粉用量範圍的擬定

在測試蚵殼粉的用量時，採用的配比為砂：黏土：(生石灰/消石灰)=1：1：0.75，為避免過多添加物對試驗的結果造成影響，一律不加糖漿，坍度範圍控制在 0.6~1.5 公分左右。本試驗以抗壓強度的高低來判斷適合的添加量。

根據表【4-1】、【4-2】、【4-3】、圖【4-1】實驗結果顯示，蚵殼粉添加量由總重量(砂+黏土+石灰) 12%到 24%，在 7 天齡期下抗壓強度尚不明顯，但是在 28 天與 56 天的齡期時，佔總重量 20%的蚵殼粉的抗壓強度最高，當添加量高於或低於 20%時，試體強度呈現下降的趨勢，由此可以看出蚵殼粉的添加量應該控制在 20%以上。若是太多的蚵殼粉反而容易對試體造成負面的影響。因此主要的配比實驗規劃，將蚵殼粉的用量範圍訂在總重量(砂+黏土+石灰)的 20%以上，並觀察隨著蚵殼粉用量的改變，在不同紅糖漿及石灰用量下對抗壓強度及其他性質的影響。

### 4.1.3 糖漿用量的擬定

在測試糖漿用量時，採用的配比為砂：黏土：(生石灰/消石灰)  
=1：1：0.75，蚵殼粉用量固定為總重量(砂+黏土+石灰)的16%。  
逐次添加紅糖漿由6%~12%，並觀察其7天強度發展，以方便定出較  
佳的紅糖漿用量。

根據表【4-4】、表【4-5】、圖【4-2】實驗結果發現，糖漿添加量  
從0%增加到10%時，試體強度會不斷提高。可是當糖漿添加量超過  
10%以後，強度已無明顯提升，但都比添加10%糖漿以下的砂漿強度  
來的高，因此適當的糖漿添加量，對砂漿強度的提升有正面的幫助。  
故本實驗最終將糖漿用量範圍設定在總重量(砂+黏土+石灰)的10  
%，並觀察糖漿與其他添加材料彼此的影響。

## 4.2 凝結時間之測定

使用費開氏儀器來做傳統石灰砂漿之初凝與終凝的時間測定，  
依CNS786水硬性水泥凝結時間檢驗法規定，以一公釐直徑之針做針  
入試驗，每隔15分鐘紀錄一次，當針入深度小於或等於25mm即到  
達初凝。當針端不再明顯插入壩料時，此即為終凝。

由表【4-6】實驗數據知道，若固定砂：黏土：石灰=1：1：0.75，  
桐油用量3%及糖漿用量6%，使用費開氏針儀測定其初、終凝時間  
長達12小時及16小時。若將糖漿用量增至10%，其初、終凝時間並

無明顯縮短，再將此配比加入 20% 蚵殼粉後其初、終凝時間明顯縮短為 9 小時與 12 小時，可見添加蚵殼粉可以縮短其凝結時間，若配比中只添加 20% 蚵殼粉與 10% 糖漿，只需 5 小時及 5.75 小時即可到達初凝及終凝。

### 4.3 傳統砂漿的強度分析

添加材料的用量範圍決定之後，以基本材料砂：黏土：石灰=1：1：0.75 的比例下，以糖漿用量範圍的 6%~12%，蚵殼粉用量範圍 16%~24%，桐油用量範圍 3%~5%。藉改變各添加材料的比例，分析各項材料在砂漿中對強度的影響，並可以瞭解材料彼此間的變化關係和其材料特性，並在其中找出最佳強度配比。

#### 4.3.1 7 天抗壓強度分析

各配比的 7 天抗壓強度如表【4-7】、表【4-10】所示，在砂：黏土：(生石灰/消石灰)=1：1：0.75 的條件下，以糖漿添加量、蚵殼粉添加量及桐油添加量為變數。

(1)在只添加糖漿、蚵殼粉的條件下由圖【4-4】可以發現各配比 7 天的抗壓強度並沒有明顯的差異。但若是整理成(蚵殼粉/糖漿)與 7 天抗壓強度的關係，如圖【4-5】可看出，當(蚵殼粉/糖漿)=2 時，其 7 天抗壓強度為最佳，可見早期強度與材料之間的比例有相當的關

係。

(2)在 7 天的齡期之下，由圖【4-8】可看出，只添加桐油與糖漿的早期抗壓強度顯然較低，而添加桐油、蚵殼粉與糖漿的試體，其早期抗壓強度就明顯高出許多，在桐油添加 3%及 4%時較為明顯，但為在 5%桐油添加量時，蚵殼粉的添加多寡就較無明顯差別，由此可見無論是 3%、4%或是 5%的桐油添加量下，添加蚵殼粉確實對早期抗壓強度有提升的效果。

#### 4.3.2 28 天抗壓強度分析

各配比的 28 天抗壓強度如表【4-8】、表【4-11】所示，以蚵殼粉、糖漿添加量及桐油添加量為變數。

(1)在只添加蚵殼粉及糖漿的條件下，由圖【4-6】可以發現紅糖漿添加量愈高與 28 天抗壓強度也隨之增加，有成正比之趨勢，而蚵殼粉的添加，對 28 天抗壓強度並沒有明顯變化，且糖漿添加量在 10%及 12%時，蚵殼粉之含量多寡對強度的影響就變得更不明顯，若將 7 天及 28 天之抗壓強度來比較，添加 6%糖漿的 7 天到 28 天抗壓強度的成長約在 258%~324%之間，而添加 12%糖漿的 7 天到 28 天的抗壓強度成長約在 322%~371%，所以對於 28 天抗壓強度的高低，紅糖漿添加量比蚵殼粉的添加量更具影響力。

(2)在添加材料為蚵殼粉、糖漿及桐油的條件下由圖【4-9】可

以發現添加桐油比未添加桐油的 28 天抗壓強度有提升許多，其中又以添加 4%桐油時為最明顯，若將 7 天及 28 天之抗壓強度來比較，在未添加桐油只添加糖漿與蚵殼粉的配比中，其 7 天到 28 天的抗壓強度最多成長約 371%，添加 3%桐油及蚵殼粉配比的 7 天到 28 天抗壓強度的成長約在 315%~372%之間，而添加 5%桐油及蚵殼粉配比的 7 天到 28 天的抗壓強度成長約在 523%~632%，可見桐油添加量愈多，其 28 天抗壓強度也會增加的愈明顯。

#### 4.3.3 56 天抗壓強度分析

各配比的 56 天抗壓強度如表【4-9】、表【4-12】所示，以蚵殼粉、糖漿添加量及桐油添加量為變數。

(1)在砂：黏土：(生石灰/消石灰)=1：1：0.75 的條件下添加蚵殼粉與糖漿，由圖【4-7】可以發現添加 6%糖漿與蚵殼粉配比的 28 天到 56 天的抗壓強度只成長了 107%~132%，而就算將糖漿添加量提升到 12%，其 28 天到 56 天的抗壓強度也只成長 116%~123%，成長強度相當有限，而糖漿用量在 56 天抗壓強度也可以看出，當糖漿用量在 10%時其抗壓強度明顯高於糖漿用量在 8%時的抗壓強度，而添加 10%糖漿的抗壓強度與添加 12%糖漿的抗壓強度相差不遠，所以由此可知，當齡期到 28 天時其抗強度就發展了差不多了，若齡期超過 56 天，其抗壓強度的發展就更有限了。

(2) 在砂：黏土：(生石灰/消石灰)=1：1：0.75 與添加 10%糖漿的條件下，添加蚵殼粉與桐油，由圖【4-10】可發現桐油添加 4%時比添加 3%時的 56 天抗壓強度要高，而桐油添加 5%時又比 4%時的 56 天抗壓強度要高，似乎桐油添加愈多其 56 天抗壓強度也會隨之提升，但在桐油添加量為 4%時是最為明顯的，當桐油添加到 5%時，其 56 天抗壓強度就不是很明顯，所以桐油添加量 4%為最佳。

(3) 將 28 天及 56 天齡期之抗壓強度來比較，由表【4-11】與表【4-12】來看，添加 3%桐油配比的試體，其 28 天到 56 天齡期的抗壓強度成長 104%~109%，添加 4%桐油配比的試體，其 28 天到 56 天齡期的抗壓強度成長了 105%~117%，而添加 5%桐油的試體，其 28 天到 56 天齡期的抗壓強度成長了 113%~133%，由此可見，桐油添加愈多，其晚期抗壓強度的成長也明顯愈多。

(4) 齡期 56 天的石灰砂漿試體強度，以強度較高的配比而言大約有 5.0MPa~7.0MPa(725psi~1015psi)。早期傳統建築所使用的建材為木構造或以岩石或磚砌築而成，所使用的黏結材料即為石灰砂漿。一般岩石密度為 2.5 kgf/cm<sup>3</sup>~2.7 kgf/cm<sup>3</sup>，在此以 2.6 kgf/cm<sup>3</sup>來計算，即每公分高可承受 2.6 kgf/cm<sup>2</sup>。若不考慮岩石本身的破壞情形，單純的推算石灰砂漿所能承受岩石荷重的高度為 19.2m~26.9m，以長城為例，長城的平均高度為 7.8m，而本實驗得到之石灰砂漿強度，所

能承受的高度至少能達到 19m 左右，已高於長城的高度，因此實驗所得之石灰砂漿用來修築古蹟建築或是城牆碉堡，相信在耐重方面都是可以承受的。

#### 4.3.4 不同添加材料對強度之影響

根據文獻，傳統的石灰砂漿中，時常使用不同的添加材料以達到不同的使用目的。常添加的材料有屬於纖維材料的麻絨、稻草桿、稻殼及古代內陸地帶所使用的蛋白。並使用現代常用的減水劑羧酸，添加在不同配比之中，觀察其在配比中對抗壓強度的影響。

##### (一) 添加纖維材料的影響

在此先將新鮮的楊桃直接用果汁機打成汁，並均勻混入桐油砂漿之中，由於石灰砂漿在硬化過程中有大量的水分散失，所以容易有較大的乾縮，一般添加纖維材料的目的是希望減少乾縮，同時也能加速內部水分蒸發及二氧化碳透入以增加抗壓強度。由表【4-13】、表【4-14】、表【4-15】及圖【4-11】可以得知，添加楊桃汁對於 7、28、56 天抗壓強度有隨添加量成正比之趨勢，但楊桃汁添加量在 20% 時，其抗壓強度有減弱的趨勢，故楊桃汁最佳的添加量為 16%，由圖【4-11】可以看出，添加 16% 楊桃汁與添加最佳量 14% 糯米漿的抗壓強度只有 7 天及 28 天齡期時有些許差距，7 天抗壓強度高出了約 16% 左右，28 天抗壓強度高出了約 32%，而 56 天抗壓強度高出了約 25%，

可見楊桃汁的抗壓強度與一般古蹟常用的材料糯米漿的抗壓強度有過之而無不及，雖然抗壓強度並沒有像添加糖漿這樣明顯，但估計其主要作用應該是抑制砂漿的乾縮量，相信楊桃汁在乾縮量的抑制應該有不錯的表現。

## (二) 改變 $CaO/Ca(OH)_2$ 的比例影響

由表【4-16】、圖【4-12】可以發現在 7 天下  $CaO/Ca(OH)_2$  的比例較低，則抗壓強度會偏高，在 28 天齡期及 56 天齡期下由表【4-17】、表【4-18】、圖【4-13】及圖【4-14】可以看出，因  $CaO/Ca(OH)_2$  比例不同所造成的強度影響，隨著齡期的增加漸漸趨於不明顯，即  $CaO/Ca(OH)_2$  比例對晚期抗壓強度而言影響並不大，一般添加  $CaO$  的目的主要是為了控乾縮量，因為  $CaO$  與水接觸時體積會膨脹。因此我輩可以藉由改變  $CaO/Ca(OH)_2$  的比例來控制乾縮量，而不至於影響傳統砂漿的晚期強度。

## 4.4 砂漿棒的長度變化

### (一) 添加蚵殼粉多寡的影響

由表【4-19】及圖【4-15】可以發現蚵殼粉用量從 8% 增加到 20%，乾縮長度變化率卻從 6.10% 減少到 3.06%，可見蚵殼粉的添加可以抑制乾縮量的成長，雖然添加蚵殼粉可減少乾縮量，但其乾縮

量仍徧大，可能是因為基本用水量較多，所以造成的乾縮量也較高，若除了蚵殼粉外再添加糖漿後，其用水量可大幅減少，相對的乾縮量也大幅減少，由此可見，添加糖漿及蚵殼粉均可減少乾縮量。

## (二)添加蚵殼粉多寡的影響

由表【4-19】及圖【4-15】可以發現添加楊桃汁，其乾縮長度的變化率並不大，且隨著楊桃汁的用量增加，其乾縮變化率也隨之減少，但若是楊桃汁添加量到達 20%以上時，試體在乾縮後會開始膨脹並出現裂縫，最後甚至斷裂，所以楊桃汁雖然可有效的抑制乾縮量，但是若添加太多還是會有副作用的產生。

## (二)添加桐油多寡的影響

由表【4-19】及圖【4-15】可以發現試體添加桐油後，乾縮量亦隨之增加，但其增加的範圍並不大。

## (三)不同 $CaO/Ca(OH)_2$ 比例的影響

$CaO$  為一種不安定的化合物，其與空氣中的水分產生化學反應，會將體積膨脹為 1.5~2 倍，因此由表【4-20】、圖【4-15】可以發現  $CaO/Ca(OH)_2$  比例越高，即  $CaO$  的含量越高，則其乾縮量越小。

## (四)添加糖漿量多寡的影響

由表【4-19】、圖【4-15】比較可以發現，添加 12%紅糖漿的配比其乾縮量均比 8%紅糖漿的乾縮量為大，估計其原因是添加糖漿

比例越高則其添加的水量也相對高一些，因此隨著齡期的增加，其水分散失也較高，因此乾縮量會高一些，不過一般來說乾縮量差距不大。

觀察圖【4-15】可以發現不利乾縮量的原因有 1.只添加蚵殼粉且用量最少 2.  $CaO/Ca(OH)_2$  比例最低 3.糖漿用量過多，其中以只添加蚵殼粉的配比，其基本用水量為最多，因此其乾縮量最大是可以被預期的。

## 4.5 傳統砂漿的耐水能力之初步分析

### (一)齡期 7 天之耐水試驗



以齡期 7 天的試體來做耐水試驗，由於傳統石灰砂漿硬固模式屬於氣硬式，其硬化的過程最好是在乾燥高溫的環境下，否則在不添加任何外用或內用防水材料的情形下，將試體浸於水中 24 小時後，試體會因為吸收過多的水分而導致抗壓強度下滑，甚至破壞。由表【4-21】得知若是只添加桐油添加於試體中，在 7 天的齡期下，其強度亦下降約 37%~45%，防水狀況不佳，若將桐油中再添加蚵殼粉，其強度下降可獲得部分改善，抗壓強度下降減少至約 31%，可見強度的增加對耐水性有相當的幫助，所以添加可以提升早期強度的蚵殼粉，其 7 天齡期的耐水性均會高於未添加蚵殼粉的試體。

### (二)齡期 28 天之耐水試驗

由表【4-22】可以明顯看出，在 28 天齡期下，其泡水後強度折減約在 27%~12%，不論是否有添加蚵殼粉，耐水程度均差不多，但均比 7 天齡期下的耐水性高出許多，齡期 28 天的試體，不論有無添加蚵殼粉，所得到的結果都比齡期 7 天的試體好很多。隨著氣乾養護的時間愈長，當試體表面生成不透水的矽酸鈣結晶，所以其耐水能力會相對的提高。是否添加蚵殼粉當內用材料，浸水前後的強度差異不大，因為蚵殼粉對晚期強度幫助不大，所以效果是可以預期的，但添加桐油的 28 天試體，強度除了大幅度的提升外，耐水能力也非常的好，文獻中指出水泥未發明前，桐油石灰被使用在潮濕的環境，專門使用來當做防水材料，根據實驗數據，在此可以得到應證。

## 4.6 傳統砂漿對溫度效應的分析

### (一)加溫至攝氏 100 度

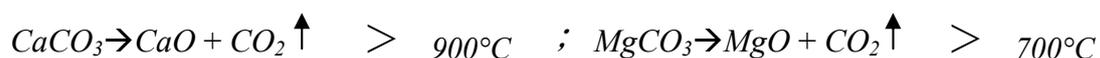
由於石灰砂漿的硬化是由於漿體水分蒸發或被砌體吸收，氫氧化鈣從過飽和溶液中析出，形成氫氧化鈣結晶，並與空氣中的二氧化碳接觸後產生強度。因此由表【4-24】可以發現，由於溫度上升，加速漿體形成過飽和溶液，快速將氫氧化鈣析出，等於加速了石灰砂漿的硬化速度，所以依不同的配比，7天齡期的石灰砂漿在經過24小時的加溫之後，抗壓強度均有大幅度的增長。

進一步分析各材料在溫度效應下的影響，由表【4-24】、表【4-25】

發現，添加桐油試體中，不論 7 天或 28 天齡期，其在加溫後抗壓強度明顯越高，這顯示在越高溫乾燥的環境下，在灰漿中添加桐油有助於抗壓強度的成長。7 天齡期加溫後抗壓強度大約上升 453%~595%，明顯比 28 天齡期的強度高出許多。

## (二)加溫至攝氏 1000 度

將試體表面加溫至一千度，由於形成砂漿強度主要結晶為碳酸鈣與碳酸鎂，由以下方程式



可以發現當溫度超過攝氏 900 度以上時，這些結晶將會開始分解，因此會造成抗壓強度大幅下滑，由表【4-26】所示，其平均折損強度約為 50%左右。



## 4.7 傳統砂漿耐酸性試驗

由傳統砂漿 28 天齡期來做耐酸性試驗，添加材料有蚵殼粉、桐油、糖漿，分別取抗壓強度較佳之添加量與無任何添加材料來比較，先將 28 天齡期試體浸入酸性溶液中，由表【4-27】可以看出，浸在酸性溶液中，重量損失率最多的是只添加蚵殼粉及無添加任何材料之配比，重量改變除與酸有關外，黏土或其他添加材料易溶解於水中也是另外一項影響原因，因此真正因為酸所造成的重量損失必須扣除浸在水中所造成的重量損失，而水中所造成的重量損失如表【4-28】可

以看出，重量損失較多的配比如 W5、SB11，此二種配比如均有添加糖漿，由於糖漿易溶解於水，所以這是可以預期的。而真正由酸性所造成的重量損失應該為(酸性溶液重量損失-水中之重量損失)，如表

【4-29】，可以看出重量損失最大的仍為只添加蚵殼粉及無添加任何材料的試體，接下來為無添加防水性桐油的配比如，所以試體的耐酸程度與耐水性有一定的關係。

## 4.8 黏結磚之強度試驗

黏結磚強度分為抗壓強度分析與剪力強度分析，實驗齡期均為 28 天，而添加材料有蚵殼粉、桐油及糖漿，選取其中抗壓強度表現較佳之配比如 B7、W5、SB11 等，來比較其抗壓強度與剪力強度的差別。

### 4.8.1 黏結磚之抗壓強度分析

黏結磚的抗壓強度配比如採用傳統的糯米砂漿、桐油砂漿並與對照組水泥砂漿做比較，探討其承受抗壓的能力。實驗試體齡期皆固定為 28 天，選取桐油砂將與糯米砂漿中，抗壓強度表現較佳之配比如 B7、W5、SB11、糯米砂漿，另外將水泥砂漿（砂：水泥=1：2.75）做為對照組。首先測試普通磚的抗壓強度，得到的抗壓強度平均值為 21.96 MPa。再用糯米砂漿配比如及桐油砂漿取代一般常用的水泥砂漿來做磚的抗壓試驗，試驗的結果如表【4-30】，由實驗數據可以發現，

無論使用任何一種膠結材，黏結磚的抗壓強度主要取決於磚的抗壓強度，因為黏結磚的破壞都是由於磚的破壞，這種結果顯示傳統砂漿亦有不錯的抗壓能力。若以傳統砂漿黏結磚的破壞情形與水泥砂漿做比較，可以發現水泥砂漿的黏結磚會與磚塊一起破壞。而傳統砂漿則因為壓力的關係會變的更加密實，且沒有明顯破壞的跡象。但是在破壞時，水泥砂漿的變形量明顯較傳統砂漿小許多，可能需要針對變形量對結構強度的影響程度做進一步探討。

#### 4.8.2 黏結磚之剪力強度分析

黏結磚的剪力強度配比採用其抗壓強度較佳的配比，而實驗的齡期均為 28 天，由表【4-31】可以看出，28 天剪力強度約在 0.152MPa ~0.203MPa，與抗壓強度似乎沒直接的關係，再由圖【4-20】可以看出破壞時的情況，破壞方式幾乎都延著磚塊與砂漿間的介面破壞，可見黏結磚剪力強度的大小，砂漿與磚塊介面間的黏結力比砂漿本身的剪力強度之影響來的大。

#### 4.9 各種添加材料特性

在傳統的石灰砂漿中，時常使用不同的添加材料以達到不同的使用目的。常添加的材料有屬於纖維材料的麻絨、稻草桿、稻殼及古代內陸地帶所使用的蛋白。但是有的添加材料所產生的效果並不明顯，

澱粉類的材料曾試過馬鈴薯粉、玉米粉、樹薯粉、麵粉等，以糯米漿的力學性質表現最好，在纖維材料方面，曾試過稻殼、稻草桿、楊桃汁等，其中以楊桃汁抑制乾縮的效果最為顯著。在其他材料特性及強度較明顯的只有桐油、蚵殼粉、糖漿等，只要依環境需求，添加所適量且適用的材料，其添加範圍也有所限制，以免浪費材料或產生反效果，使用量的多寡如表【4-32】。



表【4-1】傳統砂漿 7 天抗壓強度

砂：黏土：石灰=1：1：0.75(生石灰/消石灰=1)					
編號	蚵殼粉	紅糖漿	水量	荷重	抗壓強度
B4	8%	0%	40%	1.91 kN ( 429 lb )	0.81 MPa ( 117 psi )
B5	12%	0%	42%	2.21 kN ( 496 lb )	0.93 MPa ( 135 psi )
B6	16%	0%	45%	2.37 kN ( 533 lb )	1.00 MPa ( 145 psi )
B7	20%	0%	48%	2.39 kN ( 537 lb )	1.01 MPa ( 146 psi )
B8	24%	0%	51%	2.58 kN ( 580 lb )	1.09 MPa ( 158 psi )

註：紅糖漿採用 1:1 混合熱水配製

註：紅糖漿與蚵殼粉用量是以總重量(砂+黏土+石灰)來計算

表【4-2】傳統砂漿 28 天抗壓強度

砂：黏土：石灰=1：1：0.75(生石灰/消石灰=1)					
編號	蚵殼粉	紅糖漿	水量	荷重	抗壓強度
B4	8%	0%	40%	4.07 kN ( 915 lb )	1.72 MPa ( 249 psi )
B5	12%	0%	42%	4.63 kN ( 1041 lb )	1.95 MPa ( 283 psi )
B6	16%	0%	45%	5.70 kN ( 1281 lb )	2.40 MPa ( 348 psi )
B7	20%	0%	48%	7.23 kN ( 1625 lb )	3.07 MPa ( 445 psi )
B8	24%	0%	51%	6.94 kN ( 1560 lb )	2.93 MPa ( 245 psi )

註：紅糖漿採用 1:1 混合熱水配製

註：紅糖漿與蚵殼粉用量是以總重量(砂+黏土+石灰)來計算

表【4-3】傳統砂漿 56 天抗壓強度

砂：黏土：石灰=1：1：0.75(生石灰/消石灰=1)					
編號	蚵殼粉	紅糖漿	水量	荷重	抗壓強度
B4	8%	0%	40%	5.31 kN ( 1193 lb )	2.24 MPa ( 325 psi )
B5	12%	0%	42%	5.78 kN ( 1299 lb )	2.44 MPa ( 354 psi )
B6	16%	0%	45%	6.44 kN ( 1447 lb )	2.72 MPa ( 395 psi )
B7	20%	0%	48%	7.81 kN ( 1755 lb )	3.29 MPa ( 477 psi )
B8	24%	0%	51%	7.25 kN ( 1629 lb )	3.06 MPa ( 444 psi )

註：紅糖漿採用 1:1 混合熱水配製

註：紅糖漿與蚵殼粉用量是以總重量(砂+黏土+石灰)來計算

表【4-4】傳統砂漿 7 天抗壓強度

砂：黏土：石灰=1：1：0.75(生石灰/消石灰=1)					
編號	蚵殼粉	紅糖漿	水量	荷重	抗壓強度
S1	12%	0%	42%	2.21 kN ( 497 lb )	0.93 MPa ( 135 psi )
S2	12%	6%	31%	3.74 kN ( 840 lb )	1.58 MPa ( 229 psi )
S3	12%	8%	28%	3.65 kN ( 820 lb )	1.54 MPa ( 223 psi )
S4	12%	10%	26%	3.29 kN ( 739 lb )	1.39 MPa ( 202 psi )
S5	12%	12%	25%	3.37 kN ( 757 lb )	1.42 MPa ( 206 psi )

註：紅糖漿採用 1:1 混合熱水配製

註：紅糖漿與蚵殼粉用量是以總重量(砂+黏土+石灰)來計算

表【4-5】傳統砂漿 28 天抗壓強度

砂：黏土：石灰=1：1：0.75(生石灰/消石灰=1)					
編號	蚵殼粉	紅糖漿	水量	荷重	抗壓強度
S1	12%	0%	42%	4.63 kN ( 1041 lb )	1.95 MPa ( 283 psi )
S2	12%	6%	31%	9.97 kN ( 2241 lb )	4.21 MPa ( 611 psi )
S3	12%	8%	28%	11.28 kN ( 2535 lb )	4.76 MPa ( 690 psi )
S4	12%	10%	26%	11.97 kN ( 3690 lb )	5.05 MPa ( 732 psi )
S5	12%	12%	25%	12.49 kN ( 2807 lb )	5.27 MPa ( 764 psi )

註：紅糖漿採用 1:1 混合熱水配製

註：紅糖漿與蚵殼粉用量是以總重量(砂+黏土+石灰)來計算

表【4-6】傳統砂漿凝結時間

砂：黏土：石灰=1：1：0.75						
編號	用水量	糖	蚵殼灰	桐油	初凝(小時)	終凝(小時)
C1	31%	6%	0%	3%	12	16.5
C2	28%	10%	0%	3%	11.25	16
C3	29%	10%	20%	3%	9	12
C4	32%	10%	20%	0%	5	5.75
C5	48%	0%	20%	0%	8.5	10

註：紅糖漿採用 1:1 混合熱水配製

註：蚵殼粉、紅糖漿與桐油用量是以總重量(砂+黏土+石灰)來計算

表【4-7】 蚵殼粉配比之 7 天抗壓強度

砂：黏土：石灰=1：1：0.75 $CaO/Ca(OH)_2=1$				
編號	蚵殼粉	紅糖漿	用水量	抗壓強度
SB1	12%	6%	25%	1.58 MPa ( 229 psi )
SB2	16%	6%	26%	1.63 MPa ( 236 psi )
SB3	20%	6%	28%	1.36 MPa ( 197 psi )
SB4	24%	6%	31%	1.39 MPa ( 202 psi )
砂：黏土：石灰=1：1：0.75 $CaO/Ca(OH)_2=1$				
編號	蚵殼粉	紅糖漿	用水量	抗壓強度
SB5	12%	8%	28%	1.57 MPa ( 228 psi )
SB6	16%	8%	31%	1.73 MPa ( 251 psi )
SB7	20%	8%	33%	1.24 MPa ( 180 psi )
SB8	24%	8%	35%	1.23 MPa ( 178 psi )
砂：黏土：石灰=1：1：0.75 $CaO/Ca(OH)_2=1$				
編號	蚵殼粉	紅糖漿	用水量	抗壓強度
SB9	12%	10%	26%	1.39 MPa ( 201 psi )
SB10	16%	10%	30%	1.58 MPa ( 228 psi )
SB11	20%	10%	31%	1.58 MPa ( 229 psi )
SB12	24%	10%	34%	1.50 MPa ( 217 psi )
砂：黏土：石灰=1：1：0.75 $CaO/Ca(OH)_2=1$				
編號	蚵殼粉	紅糖漿	用水量	抗壓強度
SB13	12%	12%	25%	1.42 MPa ( 206 psi )
SB14	16%	12%	28%	1.50 MPa ( 217 psi )
SB15	20%	12%	29%	1.41 MPa ( 205 psi )
SB16	24%	12%	31%	1.60 MPa ( 232 psi )

註：紅糖漿採用 1:1 混合熱水配製

註：紅糖漿與蚵殼粉用量是以總重量(砂+黏土+石灰)來計算

表【4-8】 蚵殼粉配比之 28 天抗壓強度

砂：黏土：石灰=1：1：0.75 $CaO/Ca(OH)_2=1$				
編號	蚵殼粉	紅糖漿	用水量	抗壓強度
SB1	12%	6%	25%	4.21 MPa ( 610 psi )
SB2	16%	6%	26%	4.20 MPa ( 609 psi )
SB3	20%	6%	28%	3.78 MPa ( 549 psi )
SB4	24%	6%	31%	4.51 MPa ( 654 psi )
砂：黏土：石灰=1：1：0.75 $CaO/Ca(OH)_2=1$				
編號	蚵殼粉	紅糖漿	用水量	抗壓強度
SB5	12%	8%	28%	4.76 MPa ( 690 psi )
SB6	16%	8%	31%	4.52 MPa ( 655 psi )
SB7	20%	8%	33%	4.11 MPa ( 597 psi )
SB8	24%	8%	35%	3.99 MPa ( 578 psi )
砂：黏土：石灰=1：1：0.75 $CaO/Ca(OH)_2=1$				
編號	蚵殼粉	紅糖漿	用水量	抗壓強度
SB9	12%	10%	26%	5.05 MPa ( 732 psi )
SB10	16%	10%	30%	4.69 MPa ( 681 psi )
SB11	20%	10%	31%	4.91 MPa ( 712 psi )
SB12	24%	10%	34%	4.75 MPa ( 689 psi )
砂：黏土：石灰=1：1：0.75 $CaO/Ca(OH)_2=1$				
編號	蚵殼粉	紅糖漿	用水量	抗壓強度
SB13	12%	12%	25%	5.27 MPa ( 764 psi )
SB14	16%	12%	28%	5.16 MPa ( 748 psi )
SB15	20%	12%	29%	4.93 MPa ( 716 psi )
SB16	24%	12%	31%	5.15 MPa ( 747 psi )

註：紅糖漿採用 1:1 混合熱水配製

註：紅糖漿與蚵殼粉用量是以總重量(砂+黏土+石灰)來計算

表【4-9】 蚵殼粉配比之 56 天抗壓強度

砂：黏土：石灰=1：1：0.75 $CaO/Ca(OH)_2=1$				
編號	蚵殼粉	紅糖漿	用水量	抗壓強度
SB1	12%	6%	25%	4.498 MPa ( 652 psi )
SB2	16%	6%	26%	4.891 MPa ( 709 psi )
SB3	20%	6%	28%	4.981 MPa ( 722 psi )
SB4	24%	6%	31%	5.330 MPa ( 773 psi )
砂：黏土：石灰=1：1：0.75 $CaO/Ca(OH)_2=1$				
編號	蚵殼粉	紅糖漿	用水量	抗壓強度
SB5	12%	8%	28%	5.05 MPa ( 732 psi )
SB6	16%	8%	31%	5.13 MPa ( 744 psi )
SB7	20%	8%	33%	4.91 MPa ( 640 psi )
SB8	24%	8%	35%	5.18 MPa ( 606 psi )
砂：黏土：石灰=1：1：0.75 $CaO/Ca(OH)_2=1$				
編號	蚵殼粉	紅糖漿	用水量	抗壓強度
SB9	12%	10%	26%	6.00 MPa ( 870 psi )
SB10	16%	10%	30%	6.21 MPa ( 900 psi )
SB11	20%	10%	31%	5.82 MPa ( 845 psi )
SB12	24%	10%	34%	5.48 MPa ( 795 psi )
砂：黏土：石灰=1：1：0.75 $CaO/Ca(OH)_2=1$				
編號	蚵殼粉	紅糖漿	用水量	抗壓強度
SB13	12%	12%	25%	6.13 MPa ( 889 psi )
SB14	16%	12%	28%	6.03 MPa ( 875 psi )
SB15	20%	12%	29%	6.06 MPa ( 879 psi )
SB16	24%	12%	31%	6.09 MPa ( 883 psi )

註：紅糖漿採用 1:1 混合熱水配製

註：紅糖漿與蚵殼粉用量是以總重量(砂+黏土+石灰)來計算

表【4-10】添加桐油配比之 7 天抗壓強度

砂：黏土：石灰=1：1：0.75 $CaO/Ca(OH)_2=1$					
編號	蚶殼粉	桐油	糖漿	用水量	抗壓強度
T1	0%	3%	10%	28%	1.03 MPa ( 149 psi )
W1	16%	3%	10%	29%	1.45 MPa ( 210 psi )
W2	20%	3%	10%	30%	1.33 MPa ( 193 psi )
W3	24%	3%	10%	31%	1.53 MPa ( 222 psi )
砂：黏土：石灰=1：1：0.75 $CaO/Ca(OH)_2=1$					
編號	蚶殼粉	桐油	糖漿	用水量	抗壓強度
T2	0%	4%	10%	27%	1.07 MPa ( 155 psi )
W4	16%	4%	10%	28%	1.47 MPa ( 212 psi )
W5	20%	4%	10%	30%	1.27 MPa ( 184 psi )
W6	24%	4%	10%	32%	1.16MPa ( 169 psi )
砂：黏土：石灰=1：1：0.75 $CaO/Ca(OH)_2=1$					
編號	蚶殼粉	桐油	糖漿	用水量	抗壓強度
T3	0%	5%	10%	28%	0.94 MPa ( 136 psi )
W7	16%	5%	10%	30%	0.97 MPa ( 140 psi )
W8	20%	5%	10%	32%	1.03 MPa ( 149 psi )
W9	24%	5%	10%	34%	1.03 MPa ( 149 psi )

註：紅糖漿採用 1:1 混合熱水配製

註：蚶殼粉、紅糖漿與桐油用量是以總重量(砂+黏土+石灰)來計算

表【4-11】添加桐油配比之 28 天抗壓強度

砂：黏土：石灰=1：1：0.75 $CaO/Ca(OH)_2=1$					
編號	蚶殼粉	桐油	糖漿	用水量	抗壓強度
T1	0%	3%	10%	28%	5.32 MPa ( 771 psi )
W2	16%	3%	10%	29%	5.22 MPa ( 757 psi )
W3	20%	3%	10%	30%	4.94 MPa ( 717 psi )
W4	24%	3%	10%	31%	4.82 MPa ( 699 psi )
砂：黏土：石灰=1：1：0.75 $CaO/Ca(OH)_2=1$					
編號	蚶殼粉	桐油	糖漿	用水量	抗壓強度
T2	0%	4%	10%	27%	6.99 MPa ( 1013 psi )
W4	16%	4%	10%	28%	6.20 MPa ( 899 psi )
W5	20%	4%	10%	30%	6.73 MPa ( 976 psi )
W6	24%	4%	10%	32%	5.46 MPa ( 792 psi )
砂：黏土：石灰=1：1：0.75 $CaO/Ca(OH)_2=1$					
編號	蚶殼粉	桐油	糖漿	用水量	抗壓強度
T3	0%	5%	10%	28%	5.71 MPa ( 828 psi )
W7	16%	5%	10%	30%	6.10 MPa ( 884 psi )
W8	20%	5%	10%	32%	5.65 MPa ( 819 psi )
W9	24%	5%	10%	34%	5.38 MPa ( 780 psi )

註：紅糖漿採用 1:1 混合熱水配製

註：蚶殼粉、紅糖漿與桐油用量是以總重量(砂+黏土+石灰)來計算

表【4-12】添加桐油配比之 56 天抗壓強度

砂：黏土：石灰=1：1：0.75 $CaO/Ca(OH)_2=1$					
編號	蚶殼粉	桐油	糖漿	用水量	抗壓強度
T1	0%	3%	10%	28%	5.78 MPa ( 838 psi )
W2	16%	3%	10%	29%	5.43 MPa ( 788 psi )
W3	20%	3%	10%	30%	5.32 MPa ( 771 psi )
W4	24%	3%	10%	31%	5.03 MPa ( 729 psi )
砂：黏土：石灰=1：1：0.75 $CaO/Ca(OH)_2=1$					
編號	蚶殼粉	桐油	糖漿	用水量	抗壓強度
T2	0%	4%	10%	27%	7.42 MPa ( 1076 psi )
W4	16%	4%	10%	28%	6.73 MPa ( 976 psi )
W5	20%	4%	10%	30%	7.08 MPa ( 1027 psi )
W6	24%	4%	10%	32%	6.36 MPa ( 923 psi )
砂：黏土：石灰=1：1：0.75 $CaO/Ca(OH)_2=1$					
編號	蚶殼粉	桐油	糖漿	用水量	抗壓強度
T3	0%	5%	10%	28%	7.36 MPa ( 1067 psi )
W7	16%	5%	10%	30%	6.90 MPa ( 1000 psi )
W8	20%	5%	10%	32%	7.00 MPa ( 1015 psi )
W9	24%	5%	10%	34%	7.16 MPa ( 1038 psi )

註：紅糖漿採用 1:1 混合熱水配製

註：蚶殼粉、紅糖漿與桐油用量是以總重量(砂+黏土+石灰)來計算

表【4-13】添加楊桃汁配比之 7 天抗壓強度

砂：黏土：石灰=1：1：0.75 $CaO/Ca(OH)_2=1$				
編號	楊桃汁	紅糖漿	用水量	抗壓強度
F1	8%	0%	33%	0.65 MPa ( 94 psi )
F2	12%	0%	29%	0.69 MPa ( 100 psi )
F3	16%	0%	23%	0.88 MPa ( 127 psi )
F4	20%	0%	18%	0.59 MPa ( 85 psi )
砂：黏土：石灰=1：1：0.75 $CaO/Ca(OH)_2=1$				
編號	楊桃汁	紅糖漿	用水量	抗壓強度
F5	12%	0%	29%	0.69 MPa ( 100 psi )
F6	12%	4%	27%	0.75 MPa ( 109 psi )
F7	12%	8%	23%	1.13 MPa ( 164 psi )
F8	12%	12%	18%	1.28 MPa ( 186 psi )
砂：黏土：石灰=1：1：0.75 $CaO/Ca(OH)_2=1$				
編號	楊桃汁	紅糖漿	用水量	抗壓強度
F9	16%	0%	23%	0.88 MPa ( 127 psi )
F10	16%	4%	22%	0.76 MPa ( 111 psi )
F11	16%	8%	18%	0.99 MPa ( 144 psi )
F12	16%	12%	13%	1.05 MPa ( 152 psi )

註：紅糖漿採用 1:1 混合熱水配製

註：紅糖漿與楊桃汁用量是以總重量(砂+黏土+石灰)來計算

表【4-14】添加楊桃汁配比之 28 天抗壓強度

砂：黏土：石灰=1：1：0.75 $CaO/Ca(OH)_2=1$				
編號	楊桃汁	紅糖漿	用水量	抗壓強度
F1	8%	0%	33%	1.23 MPa ( 178 psi )
F2	12%	0%	29%	1.45 MPa ( 210 psi )
F3	16%	0%	23%	1.86 MPa ( 270 psi )
F4	20%	0%	18%	1.46 MPa ( 211 psi )
砂：黏土：石灰=1：1：0.75 $CaO/Ca(OH)_2=1$				
編號	楊桃汁	紅糖漿	用水量	抗壓強度
F5	12%	0%	29%	1.45 MPa ( 210 psi )
F6	12%	4%	27%	2.43 MPa ( 352 psi )
F7	12%	8%	23%	3.41 MPa ( 494 psi )
F8	12%	12%	18%	3.41 MPa ( 495 psi )
砂：黏土：石灰=1：1：0.75 $CaO/Ca(OH)_2=1$				
編號	楊桃汁	紅糖漿	用水量	抗壓強度
F9	16%	0%	23%	1.86 MPa ( 270 psi )
F10	16%	4%	22%	2.54 MPa ( 369 psi )
F11	16%	8%	18%	3.11 MPa ( 451 psi )
F12	16%	12%	13%	3.36 MPa ( 487 psi )

註：紅糖漿採用 1:1 混合熱水配製

註：紅糖漿與楊桃汁用量是以總重量(砂+黏土+石灰)來計算

表【4-15】添加楊桃汁配比之 56 天抗壓強度

砂：黏土：石灰=1：1：0.75 $CaO/Ca(OH)_2=1$				
編號	楊桃汁	紅糖漿	用水量	抗壓強度
F1	8%	0%	33%	1.56 MPa ( 227 psi )
F2	12%	0%	29%	1.79 MPa ( 260 psi )
F3	16%	0%	23%	2.22 MPa ( 321 psi )
F4	20%	0%	18%	1.56 MPa ( 226 psi )
砂：黏土：石灰=1：1：0.75 $CaO/Ca(OH)_2=1$				
編號	楊桃汁	紅糖漿	用水量	抗壓強度
F5	12%	0%	29%	1.79 MPa ( 260 psi )
F6	12%	4%	27%	2.63 MPa ( 381 psi )
F7	12%	8%	23%	4.24 MPa ( 615 psi )
F8	12%	12%	18%	5.28 MPa ( 766 psi )
砂：黏土：石灰=1：1：0.75 $CaO/Ca(OH)_2=1$				
編號	楊桃汁	紅糖漿	用水量	抗壓強度
F9	16%	0%	23%	2.22 MPa ( 321 psi )
F10	16%	4%	22%	2.54 MPa ( 380 psi )
F11	16%	8%	18%	3.11 MPa ( 520 psi )
F12	16%	12%	13%	3.36 MPa ( 608 psi )

註：紅糖漿採用 1:1 混合熱水配製

註：紅糖漿與楊桃汁用量是以總重量(砂+黏土+石灰)來計算

表【4-16】 改變 CaO/Ca(OH)<sub>2</sub> 含量配比之 7 天抗壓強度

砂：黏土：石灰=1：1：0.75			
編號	楊桃汁	CaO/Ca(OH) <sub>2</sub>	抗壓強度
F13	12%	1	0.69 MPa ( 100 psi )
F14	12%	0.75	0.80 MPa ( 116 psi )
F15	12%	0.5	0.97 MPa ( 140 psi )
砂：黏土：石灰=1：1：0.75			
編號	楊桃汁	CaO/Ca(OH) <sub>2</sub>	抗壓強度
F16	14%	1	0.76 MPa ( 110 psi )
F17	14%	0.75	0.74 MPa ( 107 psi )
F18	14%	0.5	0.72 MPa ( 105 psi )
砂：黏土：石灰=1：1：0.75			
編號	楊桃汁	CaO/Ca(OH) <sub>2</sub>	抗壓強度
F19	16%	1	0.88 MPa ( 127 psi )
F20	16%	0.75	0.83 MPa ( 120 psi )
F21	16%	0.5	0.95 MPa ( 137 psi )

註：楊桃汁用量是以總重量(砂+黏土+石灰)來計算



表【4-17】改變 CaO/Ca(OH)<sub>2</sub> 含量配比之 28 天抗壓強度

砂：黏土：石灰=1：1：0.75			
編號	楊桃汁	CaO/Ca(OH) <sub>2</sub>	抗壓強度
F13	12%	1	1.43 MPa ( 207 psi )
F14	12%	0.75	1.77 MPa ( 257 psi )
F15	12%	0.5	1.63 MPa ( 236 psi )
砂：黏土：石灰=1：1：0.75			
編號	楊桃汁	CaO/Ca(OH) <sub>2</sub>	抗壓強度
F16	14%	1	1.41 MPa ( 205 psi )
F17	14%	0.75	1.53 MPa ( 222 psi )
F18	14%	0.5	1.50 MPa ( 218 psi )
砂：黏土：石灰=1：1：0.75			
編號	楊桃汁	CaO/Ca(OH) <sub>2</sub>	抗壓強度
F19	16%	1	1.47 MPa ( 213 psi )
F20	16%	0.75	1.84 MPa ( 267 psi )
F21	16%	0.5	1.89 MPa ( 273 psi )

註：楊桃汁用量是以總重量(砂+黏土+石灰)來計算



表【4-18】改變 CaO/Ca(OH)<sub>2</sub> 含量配比之 56 天抗壓強度

砂：黏土：石灰=1：1：0.75			
編號	楊桃汁	CaO/Ca(OH) <sub>2</sub>	抗壓強度
F13	12%	1	1.59 MPa ( 234 psi )
F14	12%	0.75	2.09 MPa ( 303 psi )
F15	12%	0.5	2.03 MPa ( 295 psi )
砂：黏土：石灰=1：1：0.75			
編號	楊桃汁	CaO/Ca(OH) <sub>2</sub>	抗壓強度
F16	14%	1	1.77 MPa ( 256 psi )
F17	14%	0.75	2.22 MPa ( 322 psi )
F18	14%	0.5	2.18 MPa ( 316 psi )
砂：黏土：石灰=1：1：0.75			
編號	楊桃汁	CaO/Ca(OH) <sub>2</sub>	抗壓強度
F19	16%	1	1.77 MPa ( 257 psi )
F20	16%	0.75	2.48 MPa ( 360 psi )
F21	16%	0.5	2.31 MPa ( 335 psi )

註：楊桃汁用量是以總重量(砂+黏土+石灰)來計算



表【4-19】砂漿棒乾縮長度變化率

砂：黏土：石灰=1：1：0.75(生石灰/消石灰=1)									
編號	蚶殼粉	糖漿	桐油	用水量	1天	3天	7天	14天	28天
B4	8%	0%	0%	40%	2.15%	5.96%	6.09%	6.10%	6.10%
B5	12%	0%	0%	42%	1.11%	3.94%	4.00%	4.01%	4.01%
B6	16%	0%	0%	45%	1.23%	3.63%	3.71%	3.71%	3.71%
B7	20%	0%	0%	48%	1.78%	3.04%	3.05%	3.06%	3.06%
砂：黏土：石灰=1：1：0.75(生石灰/消石灰=1)									
編號	蚶殼粉	糖漿	桐油	用水量	1天	3天	7天	14天	28天
SB9	12%	10%	0%	26%	1.20%	1.59%	1.67%	1.68%	1.68%
SB10	16%	10%	0%	30%	1.18%	1.57%	1.63%	1.64%	1.64%
SB11	20%	10%	0%	31%	1.15%	1.56%	1.61%	1.62%	1.62%
SB12	24%	10%	0%	34%	1.09%	1.51%	1.56%	1.57%	1.57%
砂：黏土：石灰=1：1：0.75(生石灰/消石灰=1)									
編號	蚶殼粉	糖漿	桐油	用水量	1天	3天	7天	14天	28天
W4	16%	10%	4%	1.64%	1.66%	1.66%	1.67%	1.68%	1.68%
W5	20%	10%	4%	1.59%	1.61%	1.62%	1.63%	1.64%	1.64%
W6	24%	10%	4%	1.58%	1.60%	1.61%	1.61%	1.62%	1.62%
砂：黏土：石灰=1：1：0.75(生石灰/消石灰=1)									
編號	楊桃汁	紅糖漿	用水量	1天	3天	7天	14天	28天	
F1	8%	0%	33%	1.49%	2.04%	2.07%	2.07%	2.07%	
F2	12%	0%	29%	0.79%	1.04%	1.07%	1.08%	1.08%	
F3	16%	0%	23%	1.24%	1.02%	0.75%	0.75%	0.75%	
F4	20%	0%	18%	1.57%	-0.89%	*	*	*	
砂：黏土：石灰=1：1：0.75(生石灰/消石灰=1)									
編號	楊桃汁	紅糖漿	用水量	1天	3天	7天	14天	28天	
F5	12%	0%	29%	0.79%	1.04%	1.07%	1.08%	1.08%	
F6	12%	4%	27%	0.15%	0.56%	0.43%	0.39%	0.39%	
F7	12%	8%	23%	0.06%	0.24%	0.38%	0.46%	0.45%	
F8	12%	12%	18%	0.04%	0.34%	0.67%	0.65%	0.68%	
砂：黏土：石灰=1：1：0.75 CaO/Ca(OH) <sub>2</sub> =1									
編號	楊桃汁	紅糖漿	用水量	1天	3天	7天	14天	28天	
F9	16%	0%	23%	1.24%	1.02%	0.75%	0.75%	0.75%	
F10	16%	4%	22%	0.36%	0.55%	0.10%	0.07%	0.07%	
F11	16%	8%	18%	0.55%	0.65%	0.72%	0.79%	0.80%	
F12	16%	12%	13%	0.29%	0.84%	1.00%	0.99%	1.02%	

表【4-20】砂漿棒乾縮長度變化率

砂：黏土：石灰=1：1：0.75								
編號	楊桃汁	用水量	CaO/Ca(OH) <sub>2</sub>	1天	3天	7天	14天	28天
F13	12%	33%	1	0.79%	1.04%	1.07%	1.07%	1.07%
F14	12%	31%	0.75	0.88%	1.06%	1.03%	1.04%	1.06%
F15	12%	29%	0.5	1.01%	1.26%	1.16%	1.17%	1.19%
砂：黏土：石灰=1：1：0.75								
編號	楊桃汁	用水量	CaO/Ca(OH) <sub>2</sub>	1天	3天	7天	14天	28天
F16	14%	28%	1	1.05%	1.02%	0.92%	0.93%	0.93%
F17	14%	27%	0.75	0.68%	0.98%	1.00%	1.01%	1.01%
F18	14%	26%	0.5	1.42%	2.03%	1.71%	1.72%	1.72%
砂：黏土：石灰=1：1：0.75								
編號	楊桃汁	用水量	CaO/Ca(OH) <sub>2</sub>	1天	3天	7天	14天	28天
F19	16%	23%	1	1.24%	1.02%	0.75%	0.75%	0.75%
F20	16%	21%	0.75	0.51%	0.91%	0.95%	0.97%	1.01%
F21	16%	20%	0.5	1.69%	2.64%	2.12%	2.14%	2.16%

註：蚵殼粉、紅糖漿、桐油與楊桃汁用量是以總重量(砂+黏土+石灰)來計算

註：\* 表示試體自然斷裂

註：- 表示伸長



表【4-21】傳統砂漿 7 天耐水試驗

砂：黏土：石灰=1：1：0.75 (生石灰/消石灰=1)						
編號	蚶殼粉(%)	桐油(%)	糖漿(%)	抗壓強度(浸泡前)	抗壓強度(浸泡後)	剩餘強度
T1	0%	3%	10%	1.03 MPa ( 149 psi )	0.57 MPa ( 82 psi )	55%
W1	16%	3%	10%	1.45 MPa ( 210 psi )	0.78 MPa ( 114 psi )	54%
W2	20%	3%	10%	1.33 MPa ( 193 psi )	0.76 MPa ( 110 psi )	57%
W3	24%	3%	10%	1.53 MPa ( 222 psi )	1.02 MPa ( 149 psi )	67%
砂：黏土：石灰=1：1：0.75 (生石灰/消石灰=1)						
編號	蚶殼粉(%)	桐油(%)	糖漿(%)	抗壓強度(浸泡前)	抗壓強度(浸泡後)	剩餘強度
T2	0%	4%	10%	1.07 MPa ( 155 psi )	0.62 MPa ( 90 psi )	58%
W4	16%	4%	10%	1.47 MPa ( 212 psi )	1.01 MPa ( 147 psi )	69%
W5	20%	4%	10%	1.27 MPa ( 184 psi )	0.79 MPa ( 114 psi )	62%
W6	24%	4%	10%	1.16 MPa ( 169 psi )	0.76 MPa ( 110 psi )	64%
砂：黏土：石灰=1：1：0.75 (生石灰/消石灰=1)						
編號	蚶殼粉(%)	桐油(%)	糖漿(%)	抗壓強度(浸泡前)	抗壓強度(浸泡後)	剩餘強度
T3	0%	5%	10%	0.94 MPa ( 136 psi )	0.58 MPa ( 85 psi )	63%
W7	16%	5%	10%	0.97 MPa ( 140 psi )	0.67 MPa ( 97 psi )	69%
W8	20%	5%	10%	1.03 MPa ( 149 psi )	0.70 MPa ( 101 psi )	68%
W9	24%	5%	10%	1.03 MPa ( 149 psi )	0.70 MPa ( 101 psi )	68%

註：紅糖漿採用 1:1 混合熱水配製

註：蚶殼粉、紅糖漿與桐油用量是以總重量(砂+黏土+石灰)來計算

註：將 7 天試體浸泡於水中 24 小時後加壓

表【4-22】傳統砂漿 28 天耐水試驗

砂：黏土：石灰=1：1：0.75 (生石灰/消石灰=1)						
編號	蚶殼粉(%)	桐油(%)	糖漿(%)	抗壓強度(浸泡前)	抗壓強度(浸泡後)	剩餘強度
T1	0%	3%	10%	5.32 MPa ( 771 psi )	4.15 MPa ( 602 psi )	78%
W1	16%	3%	10%	5.22 MPa ( 757 psi )	3.92 MPa ( 568 psi )	75%
W2	20%	3%	10%	4.94 MPa ( 717 psi )	3.71 MPa ( 537 psi )	75%
W3	24%	3%	10%	4.82 MPa ( 699 psi )	3.52 MPa ( 510 psi )	73%
砂：黏土：石灰=1：1：0.75 (生石灰/消石灰=1)						
編號	蚶殼粉(%)	桐油(%)	糖漿(%)	抗壓強度(浸泡前)	抗壓強度(浸泡後)	剩餘強度
T2	0%	4%	10%	6.99 MPa ( 1013 psi )	5.73 MPa ( 831 psi )	82%
W4	16%	4%	10%	6.20 MPa ( 899 psi )	4.96 MPa ( 719 psi )	80%
W5	20%	4%	10%	6.73 MPa ( 976 psi )	5.72 MPa ( 829 psi )	85%
W6	24%	4%	10%	5.46 MPa ( 792 psi )	4.48 MPa ( 649 psi )	82%
砂：黏土：石灰=1：1：0.75 (生石灰/消石灰=1)						
編號	蚶殼粉(%)	桐油(%)	糖漿(%)	抗壓強度(浸泡前)	抗壓強度(浸泡後)	剩餘強度
T3	0%	5%	10%	5.71 MPa ( 828 psi )	5.02 MPa ( 729 psi )	88%
W7	16%	5%	10%	6.10 MPa ( 884 psi )	5.18 MPa ( 752 psi )	85%
W8	20%	5%	10%	5.65 MPa ( 819 psi )	4.80 MPa ( 697 psi )	85%
W9	24%	5%	10%	5.38 MPa ( 780 psi )	4.63 MPa ( 671 psi )	86%

註：紅糖漿採用 1:1 混合熱水配製

註：蚶殼粉、紅糖漿與桐油用量是以總重量(砂+黏土+石灰)來計算

註：將 28 天試體浸泡於水中 24 小時後加壓

表【4-23】傳統砂漿 56 天耐水試驗

砂：黏土：石灰=1：1：0.75 (生石灰/消石灰=1)						
編號	蚶殼粉(%)	桐油(%)	糖漿(%)	抗壓強度(浸泡前)	抗壓強度(浸泡後)	剩餘強度
T1	0%	3%	10%	5.78 MPa ( 838 psi )	4.62 MPa ( 670 psi )	80%
W1	16%	3%	10%	5.43 MPa ( 788 psi )	4.07 MPa ( 591 psi )	75%
W2	20%	3%	10%	5.32 MPa ( 771 psi )	3.99 MPa ( 601 psi )	78%
W3	24%	3%	10%	5.03 MPa ( 729 psi )	3.72 MPa ( 539 psi )	74%
砂：黏土：石灰=1：1：0.75 (生石灰/消石灰=1)						
編號	蚶殼粉(%)	桐油(%)	糖漿(%)	抗壓強度(浸泡前)	抗壓強度(浸泡後)	剩餘強度
T2	0%	4%	10%	7.42 MPa ( 1076 psi )	6.16 MPa ( 893 psi )	83%
W4	16%	4%	10%	6.73 MPa ( 976 psi )	5.39 MPa ( 781 psi )	81%
W5	20%	4%	10%	7.08 MPa ( 1027 ps i)	6.09 MPa ( 883 psi )	86%
W6	24%	4%	10%	6.36 MPa ( 923 psi )	5.41 MPa ( 785 psi )	85%
砂：黏土：石灰=1：1：0.75 (生石灰/消石灰=1)						
編號	蚶殼粉(%)	桐油(%)	糖漿(%)	抗壓強度(浸泡前)	抗壓強度(浸泡後)	剩餘強度
T3	0%	5%	10%	7.36 MPa ( 1067 psi )	6.62 MPa ( 960 psi )	90%
W7	16%	5%	10%	6.90 MPa ( 1000 psi )	5.93 MPa ( 860 psi )	86%
W8	20%	5%	10%	7.00 MPa ( 1015 psi )	6.09 MPa ( 883 psi )	87%
W9	24%	5%	10%	7.16 MPa ( 1038 psi )	6.15 MPa ( 893 psi )	86%

註：紅糖漿採用 1:1 混合熱水配製

註：蚶殼粉、紅糖漿與桐油用量是以總重量(砂+黏土+石灰)來計算

註：將 56 天試體浸泡於水中 24 小時後加壓

表【4-24】傳統砂漿 7 天溫度試驗(100°C)

砂：黏土：石灰=1：1：0.75 (生石灰/消石灰=1)						
編號	蚶殼粉	桐油	糖漿 (%)	抗壓強度(加溫前)	抗壓強度(加溫後)	上升強度
SB1	12%	0%	6%	1.58 MPa ( 229 psi )	4.90 MPa ( 711 psi )	311%
SB2	16%	0%	6%	1.63 MPa ( 236 psi )	4.91 MPa ( 712 psi )	302%
SB3	20%	0%	6%	1.36 MPa ( 197 psi )	4.75 MPa ( 689 psi )	350%
SB4	24%	0%	6%	1.40 MPa ( 202 psi )	4.54 MPa ( 358 psi )	326%
砂：黏土：石灰=1：1：0.75 (生石灰/消石灰=1)						
編號	蚶殼粉	桐油	糖漿 (%)	抗壓強度(加溫前)	抗壓強度(加溫後)	上升強度
SB9	12%	0%	10%	1.39 MPa ( 201 psi )	5.26 MPa ( 763 psi )	380%
SB10	16%	0%	10%	1.58 MPa ( 228 psi )	4.65 MPa ( 674 psi )	295%
SB11	20%	0%	10%	1.58 MPa ( 229 psi )	5.63 MPa ( 816 psi )	356%
SB12	24%	0%	10%	1.50 MPa ( 217 psi )	4.56 MPa ( 661 psi )	305%
砂：黏土：石灰=1：1：0.75 (生石灰/消石灰=1)						
編號	蚶殼粉	桐油	糖漿 (%)	抗壓強度(加溫前)	抗壓強度(加溫後)	上升強度
T1	0%	3%	10%	1.03 MPa ( 149 psi )	5.81 MPa ( 843 psi )	564%
W1	16%	3%	10%	1.45 MPa ( 210 psi )	6.82 MPa ( 989 psi )	471%
W2	20%	3%	10%	1.33 MPa ( 193 psi )	6.83 MPa ( 991 psi )	514%
W3	24%	3%	10%	1.53 MPa ( 222 psi )	6.93 MPa ( 1005 psi )	453%
砂：黏土：石灰=1：1：0.75 (生石灰/消石灰=1)						
編號	蚶殼粉	桐油	糖漿 (%)	抗壓強度(加溫前)	抗壓強度(加溫後)	上升強度
T2	0%	4%	10%	1.07 MPa ( 155 psi )	6.33 MPa ( 919 psi )	593%
W4	16%	4%	10%	1.47 MPa ( 212 psi )	7.47 MPa ( 1084 psi )	510%
W5	20%	4%	10%	1.27 MPa ( 184 psi )	7.37 MPa ( 1069 psi )	582%
W6	24%	4%	10%	1.16 MPa ( 169 psi )	6.92 MPa ( 1004 psi )	595%

註：紅糖漿採用 1:1 混合熱水配製

註：蚶殼粉、紅糖漿與桐油用量是以總重量(砂+黏土+石灰)來計算

註：將 7 天試體放置於烘箱攝氏 100°C 下 24 小時後加壓

表【4-25】傳統砂漿 28 天溫度效應試驗(100°C)

砂：黏土：石灰=1：1：0.75 (生石灰/消石灰=1)						
編號	蚶殼粉	桐油	糖漿 (%)	抗壓強度(加溫前)	抗壓強度(加溫後)	上升強度
SB1	12%	0%	6%	4.21 MPa ( 610 psi )	6.10 MPa ( 884 psi )	145%
SB2	16%	0%	6%	4.20 MPa ( 609 psi )	7.34 MPa ( 1065 psi )	175%
SB3	20%	0%	6%	3.78 MPa ( 549 psi )	6.02 MPa ( 874 psi )	159%
SB4	24%	0%	6%	4.51 MPa ( 654 psi )	5.90 MPa ( 856 psi )	131%
砂：黏土：石灰=1：1：0.75 (生石灰/消石灰=1)						
編號	蚶殼粉	桐油	糖漿 (%)	抗壓強度(加溫前)	抗壓強度(加溫後)	上升強度
SB9	12%	0%	10%	5.05 MPa ( 732 psi )	8.70 MPa ( 1261 psi )	172%
SB10	16%	0%	10%	4.69 MPa ( 681 psi )	6.90 MPa ( 1001 psi )	147%
SB11	20%	0%	10%	4.91 MPa ( 712 psi )	6.94 MPa ( 1007 psi )	141%
SB12	24%	0%	10%	4.75 MPa ( 689 psi )	6.60 MPa ( 957 psi )	139%
砂：黏土：石灰=1：1：0.75 (生石灰/消石灰=1)						
編號	蚶殼粉	桐油	糖漿 (%)	抗壓強度(加溫前)	抗壓強度(加溫後)	上升強度
T1	0%	3%	10%	5.32 MPa ( 771 psi )	8.66 MPa ( 1256 psi )	163%
W1	16%	3%	10%	5.22 MPa ( 757 psi )	8.44 MPa ( 1224 psi )	162%
W2	20%	3%	10%	4.94 MPa ( 717 psi )	7.85 MPa ( 1139 psi )	159%
W3	24%	3%	10%	4.82 MPa ( 699 psi )	8.73 MPa ( 1266 psi )	181%
砂：黏土：石灰=1：1：0.75 (生石灰/消石灰=1)						
編號	蚶殼粉	桐油	糖漿 (%)	抗壓強度(加溫前)	抗壓強度(加溫後)	上升強度
T2	0%	4%	10%	6.99 MPa ( 1013 psi )	9.72 MPa ( 1409 psi )	139%
W4	16%	4%	10%	6.20 MPa ( 899 psi )	9.40 MPa ( 1363 psi )	152%
W5	20%	4%	10%	6.73 MPa ( 976 psi )	9.14 MPa ( 1325 psi )	136%
W6	24%	4%	10%	5.46 MPa ( 792 psi )	9.57 MPa ( 1388 psi )	175%

註：紅糖漿採用 1:1 混合熱水配製

註：蚶殼粉、紅糖漿與桐油用量是以總重量(砂+黏土+石灰)來計算

註：將 7 天試體放置於烘箱攝氏 100°C 下 24 小時後加壓

表【4-26】傳統砂漿 28 天溫度效應試驗(1000°C)

砂：黏土：石灰=1：1：0.75 (生石灰/消石灰=1)						
編號	蚶殼粉(%)	桐油(%)	糖漿(%)	抗壓強度(加溫前)	抗壓強度(加溫後)	上升強度
T1	0%	3%	10%	5.32 MPa ( 771 psi )	2.61 MPa ( 378 psi )	49%
W1	16%	3%	10%	5.22 MPa ( 757 psi )	2.45 MPa ( 356 psi )	47%
W2	20%	3%	10%	4.94 MPa ( 717 psi )	2.42 MPa ( 351 psi )	49%
W3	24%	3%	10%	4.82 MPa ( 699 psi )	2.46 MPa ( 356 psi )	51%
砂：黏土：石灰=1：1：0.75 (生石灰/消石灰=1)						
編號	蚶殼粉(%)	桐油(%)	糖漿(%)	抗壓強度(加溫前)	抗壓強度(加溫後)	上升強度
T2	0%	4%	10%	6.99 MPa ( 1013 psi )	3.35 MPa ( 486 psi )	48%
W4	16%	4%	10%	6.20 MPa ( 899 psi )	2.91 MPa ( 423 psi )	47%
W5	20%	4%	10%	6.73 MPa ( 976 psi )	3.23 MPa ( 468 psi )	48%
W6	24%	4%	10%	5.46 MPa ( 792 psi )	2.84 MPa ( 412 psi )	52%

註：紅糖漿採用 1:1 混合熱水配製

註：蚶殼粉、紅糖漿與桐油用量是以總重量(砂+黏土+石灰)來計算

註：將 28 天試體放置於高溫爐內加溫至 1000°C 後加壓



表【4-27】28天之酸性溶液中重量損失率

砂：黏土：石灰=1：1：0.75 (生石灰/消石灰=1)						
編號	蚵殼粉	桐油	糖漿	浸泡前重量	浸泡後重量	重量損失率
B0	0%	0%	0%	1.842kN(414 lb)	1.635kN(367 lb)	11.24%
B7	20%	0%	0%	1.636kN(367 lb)	1.439kN(323 lb)	12.05%
T0	0%	4%	0%	1.667kN(374 lb)	1.625kN(365 lb)	2.53%
SB11	20%	0%	10%	1.817kN(408 lb)	1.687kN(379 lb)	7.13%
BT	20%	4%	0%	1.656kN(411 lb)	1.606kN(360 lb)	3.02%
W5	20%	4%	10%	1.832kN (411 lb)	1.776kN(399 lb)	3.05%

註：蚵殼粉、紅糖漿與桐油用量是以總重量(砂+黏土+石灰)來計算

表【4-28】28天之水中重量損失率

砂：黏土：石灰=1：1：0.75 (生石灰/消石灰=1)						
編號	蚵殼粉	桐油	糖漿	浸泡前重量	浸泡後重量	重量損失率
B0	0%	0%	0%	1.818 kN (408 lb)	1.816 kN (408 lb)	0.11%
B7	20%	0%	0%	1.648 kN (370 lb)	1.647 kN (370 lb)	0.06%
T0	0%	4%	0%	1.678 kN (376lb)	1.667 kN (374 lb)	0.47%
SB11	20%	0%	10%	1.824 kN (409 lb)	1.813 kN (407 lb)	0.59%
BT	20%	4%	0%	1.665 kN (374 lb)	1.661 kN (373 lb)	0.24%
W5	20%	4%	10%	1.810 kN (406 lb)	1.797 kN (403 lb)	0.70%

註：蚵殼粉、紅糖漿與桐油用量是以總重量(砂+黏土+石灰)來計算

表【4-29】28天(酸性溶液-水中)之重量損失率

砂：黏土：石灰=1：1：0.75 (生石灰/消石灰=1)						
編號	蚵殼粉	桐油	糖漿	酸性溶液中重量損失率	水中重量損失率	(酸性溶液-水中)之重量損失率
B0	0%	0%	0%	11.24%	0.11%	11.13%
B7	20%	0%	0%	12.05%	0.06%	11.99%
T0	0%	4%	0%	2.53%	0.47%	2.06%
SB11	20%	0%	10%	7.13%	0.59%	6.54%
BT	20%	4%	0%	3.02%	0.24%	2.79%
W5	20%	4%	10%	3.05%	0.70%	2.35%

註：蚵殼粉、紅糖漿與桐油用量是以總重量(砂+黏土+石灰)來計算

表【4-30】黏結磚 28 天之抗壓強度

黏結材料	黏結厚度	荷重	抗壓強度
B7	0.8cm	167.910 kN ( 37734 lb )	18.66 MPa ( 2706 psi )
SB11	0.8cm	170.197 kN ( 38248 lb )	18.91 MPa ( 2743 psi )
W5	1.0cm	184.650 kN ( 41496 lb )	20.52MPa ( 2976 psi )
糯米砂漿	1.1cm	166.506 kN ( 37419 lb )	18.50 MPa ( 2683 psi )
石膏	0.5cm	197.672 kN ( 44423 lb )	21.96 MPa ( 3186 psi )
水泥砂漿	1.0cm	190.645 kN ( 42844 lb )	21.18 MPa ( 3076 psi )

註：水泥砂漿為水泥：砂=1：2.75

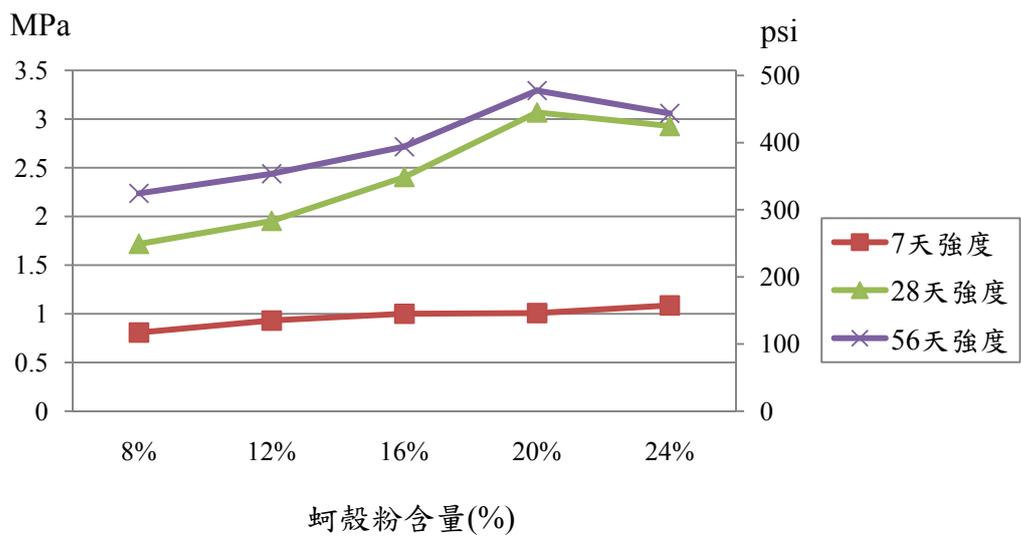
表【4-31】黏結磚 28 天之剪力強度

黏結材料	黏結厚度	荷重	剪力強度
B7	1.0cm	5.474 kN ( 1230 lb )	0.152 MPa ( 22.054 psi )
T2	1.2cm	6.110 kN ( 1373 lb )	0.170 MPa ( 24.615 psi )
SB16	1.2cm	5.933 kN ( 1333 lb )	0.165 MPa ( 23.903 psi )
W5	1.3cm	7.310 kN ( 1643 lb )	0.203 MPa ( 29.452 psi )
W6	1.2cm	6.781 kN ( 1524 lb )	0.188 MPa ( 27.318 psi )

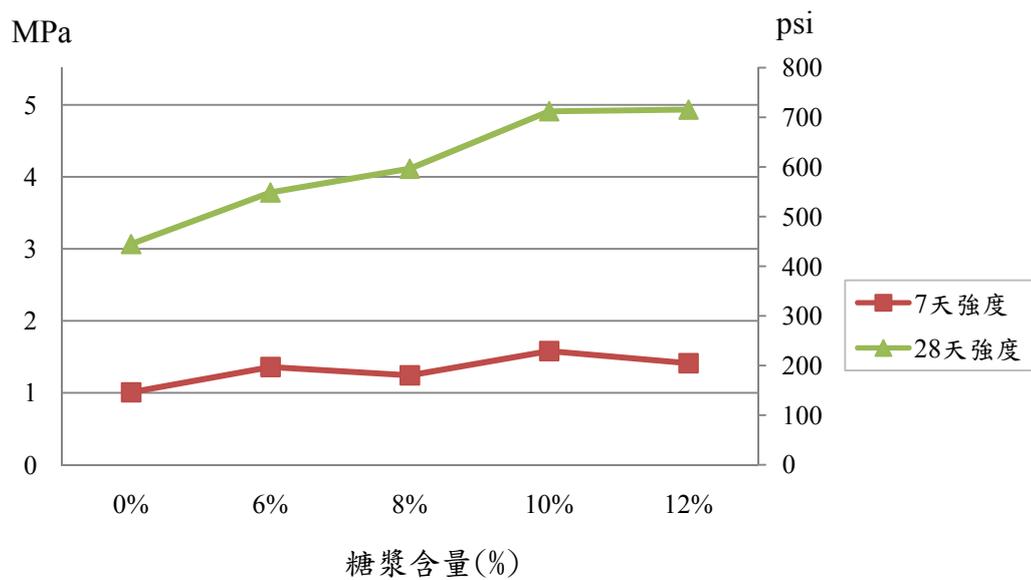
表【4-32】各添加材料之特性及用量建議

添加材料	主要特性及功用	建議用量	過量影響
糯米漿	增加力學性質	約 14%	強度下降 乾縮量增加
糖漿	增加力學性質 減少用水量	10%~12%	強度下降 耐水性下降
蚶殼粉	提高早期強度 減少凝結時間	16%~24%	強度下降
桐油	增加耐水性 增加晚期強度	4%	早期強度下降 增加凝結時間
楊桃汁	減少乾縮量 減少用水量	16%以下	試體龜裂 強度下降

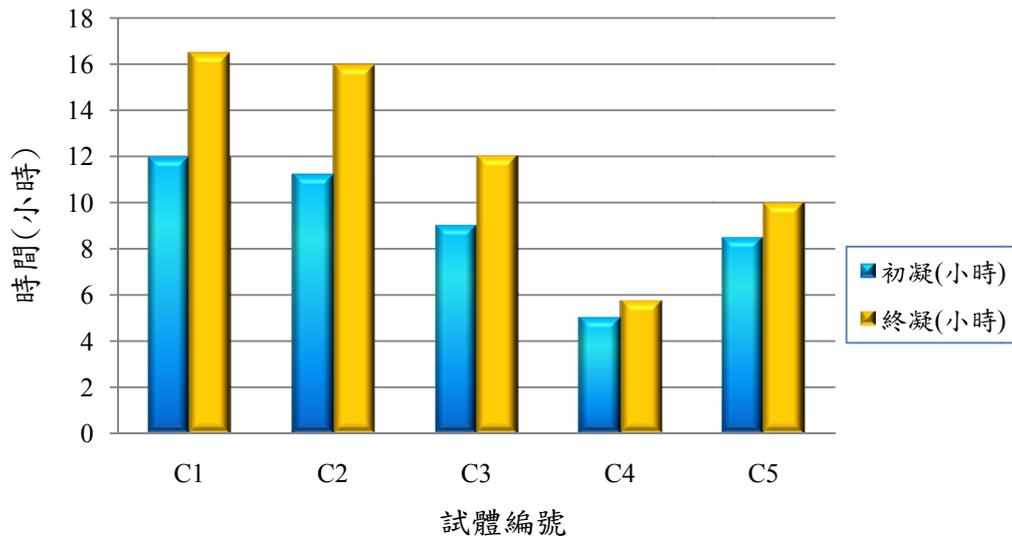
註：建議用量是以總重量(砂+黏土+石灰)來計算



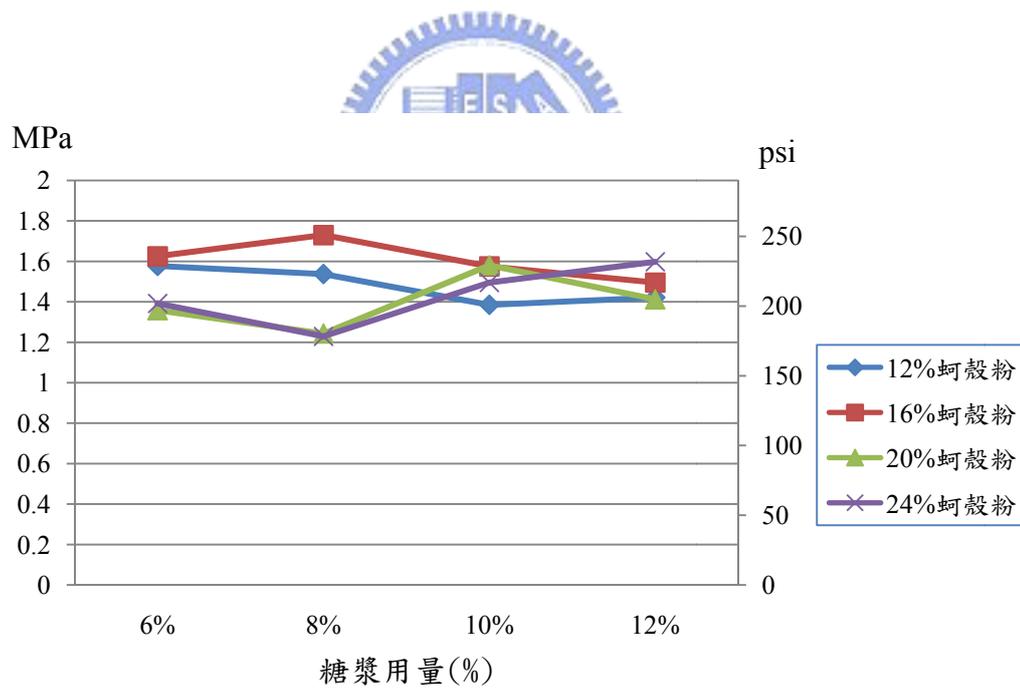
圖【4-1】蚵殼粉與抗壓強度之關係



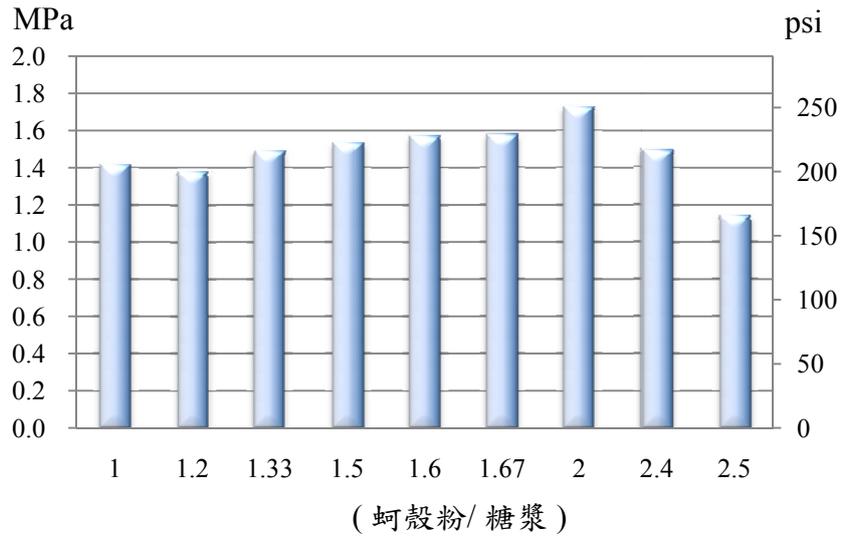
圖【4-2】20%蚵殼粉加糖漿與抗壓強度之關係



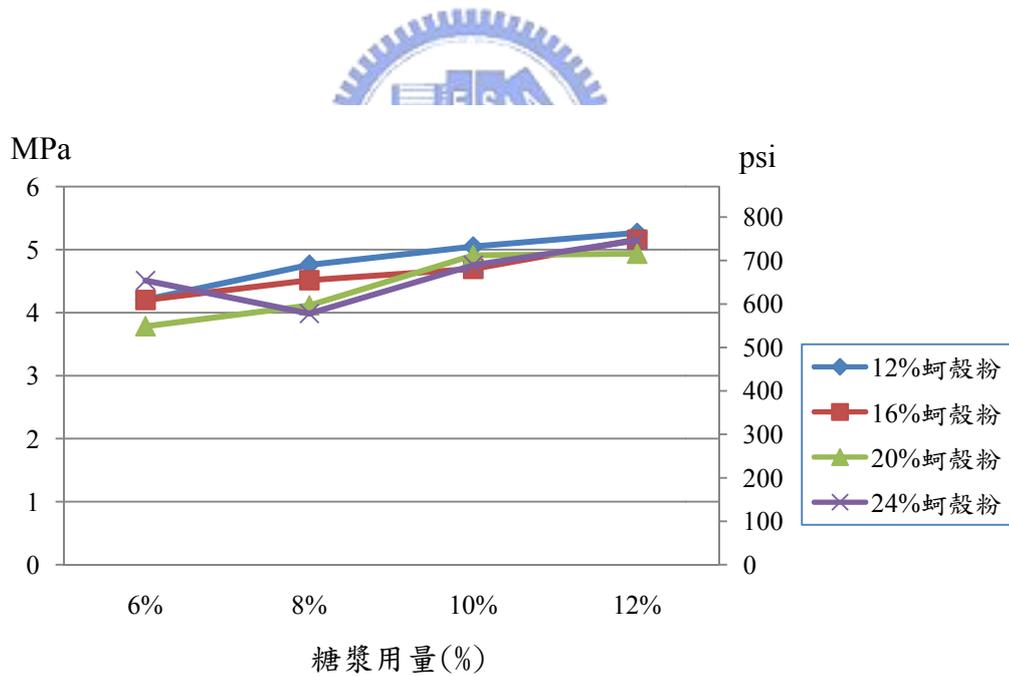
圖【4-3】傳統砂漿凝結時間



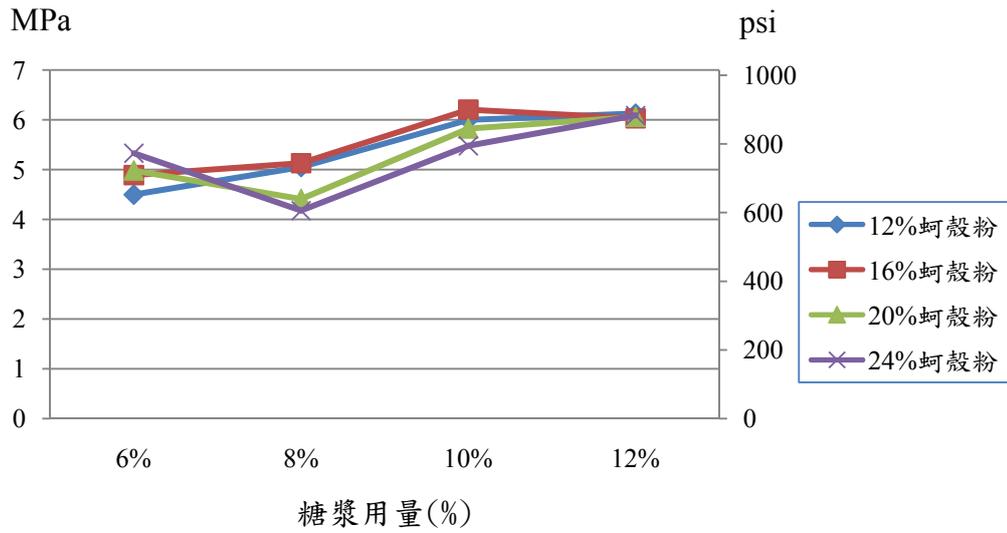
圖【4-4】7天齡期抗壓強度(糖漿+蚵殼粉)



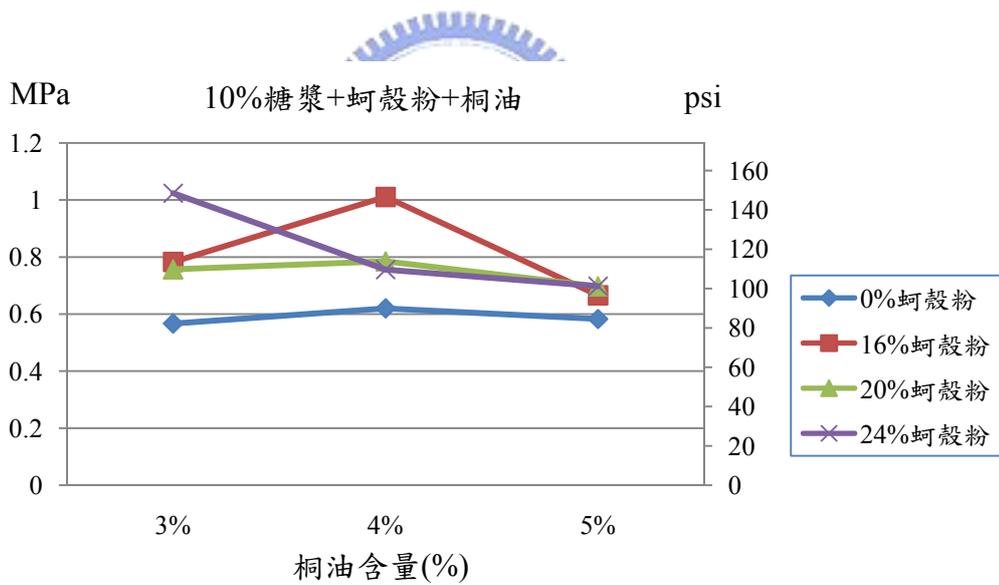
圖【4-5】(蚵殼粉/糖漿)與 7 天抗壓強度關係



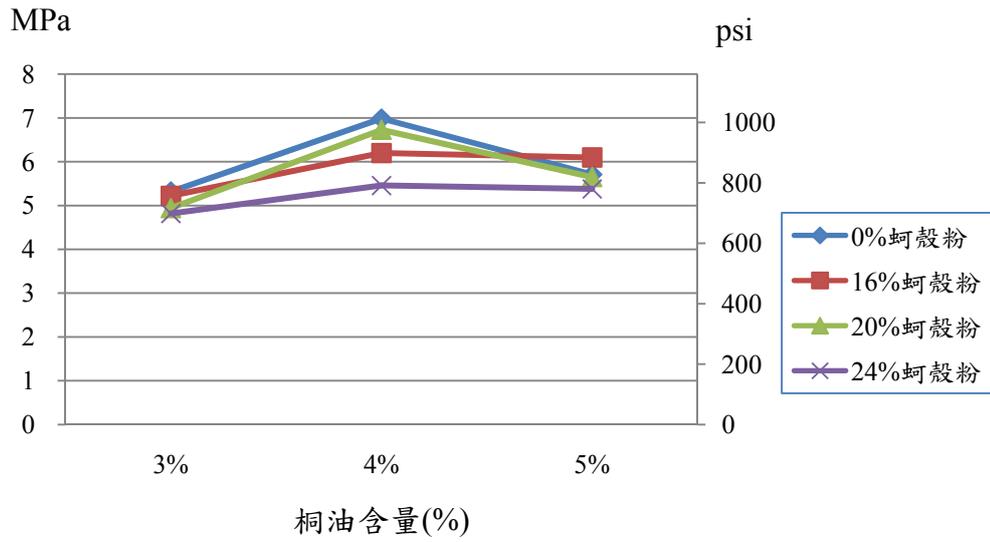
圖【4-6】28 天齡期抗壓強度(糖漿+蚵殼粉)



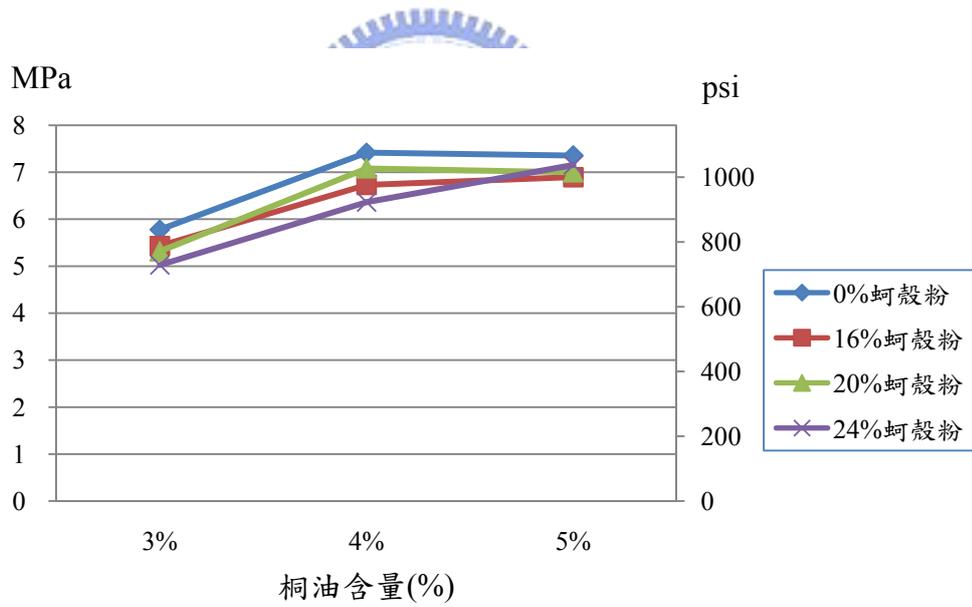
圖【4-7】56天齡期抗壓強度(糖漿+蚵殼粉)



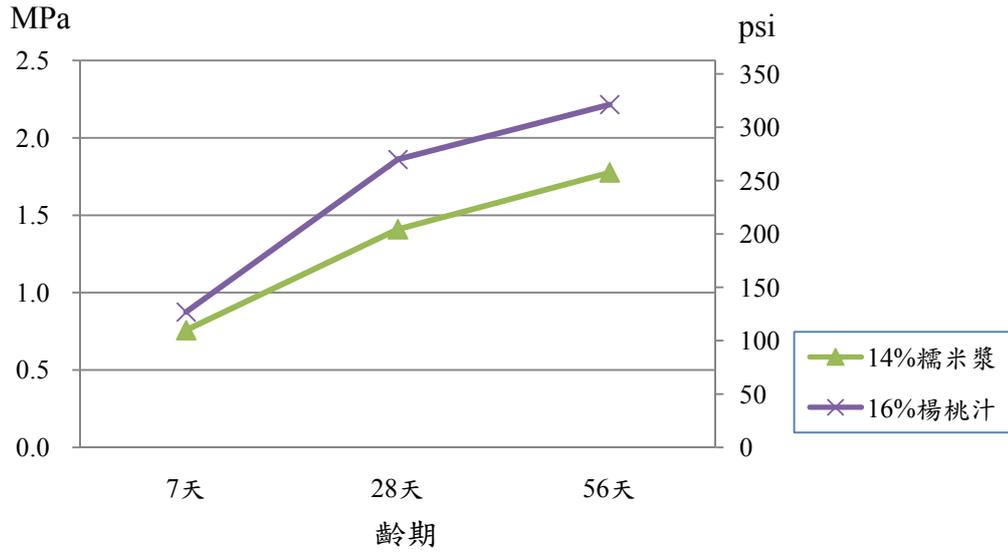
圖【4-8】7天齡期抗壓強度(糖漿+蚵殼粉+桐油)



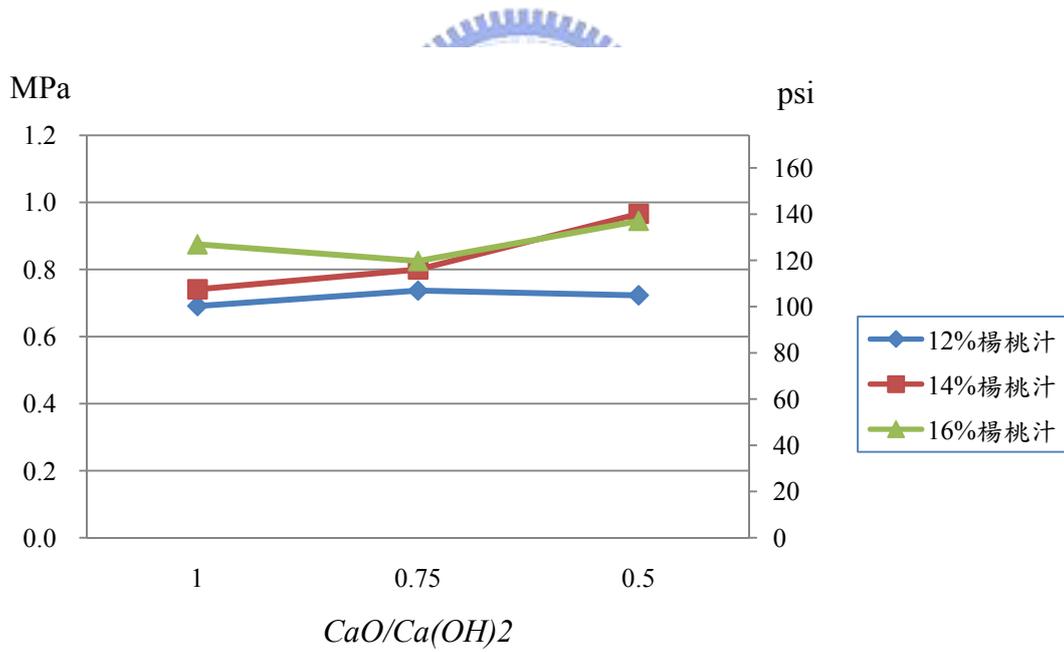
圖【4-9】28天齡期抗壓強度(糖漿+蚵殼粉+桐油)



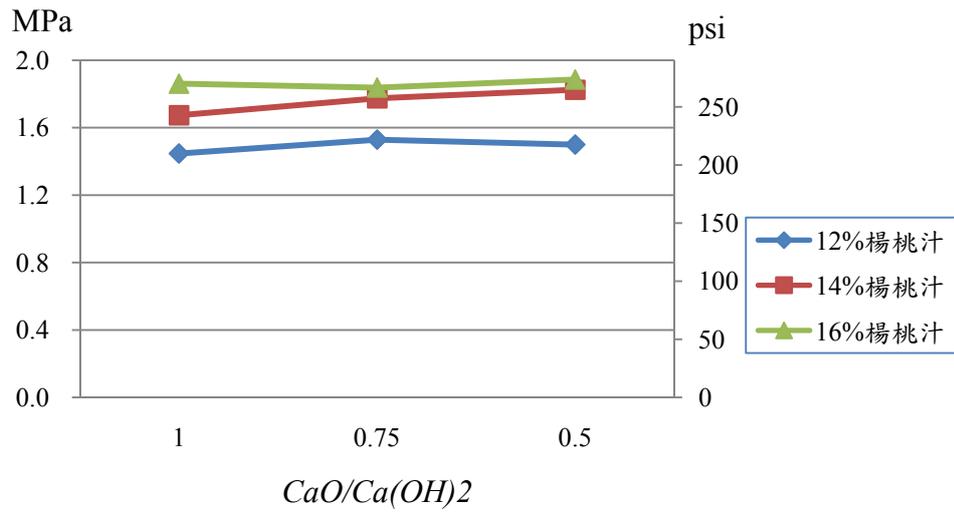
圖【4-10】56天齡期抗壓強度(糖漿+蚵殼粉+桐油)



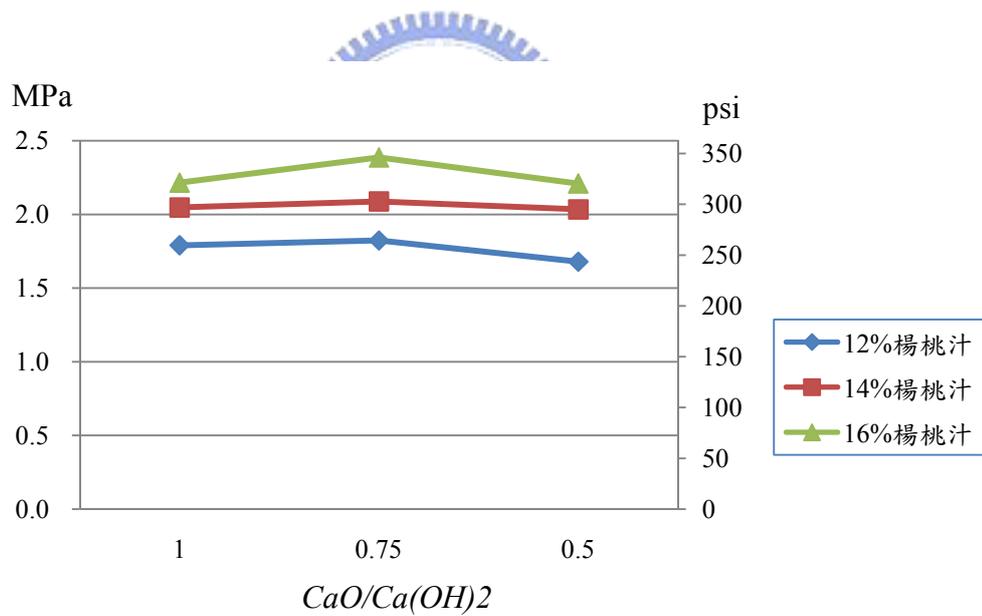
圖【4-11】糯米漿與楊桃汁抗壓強度



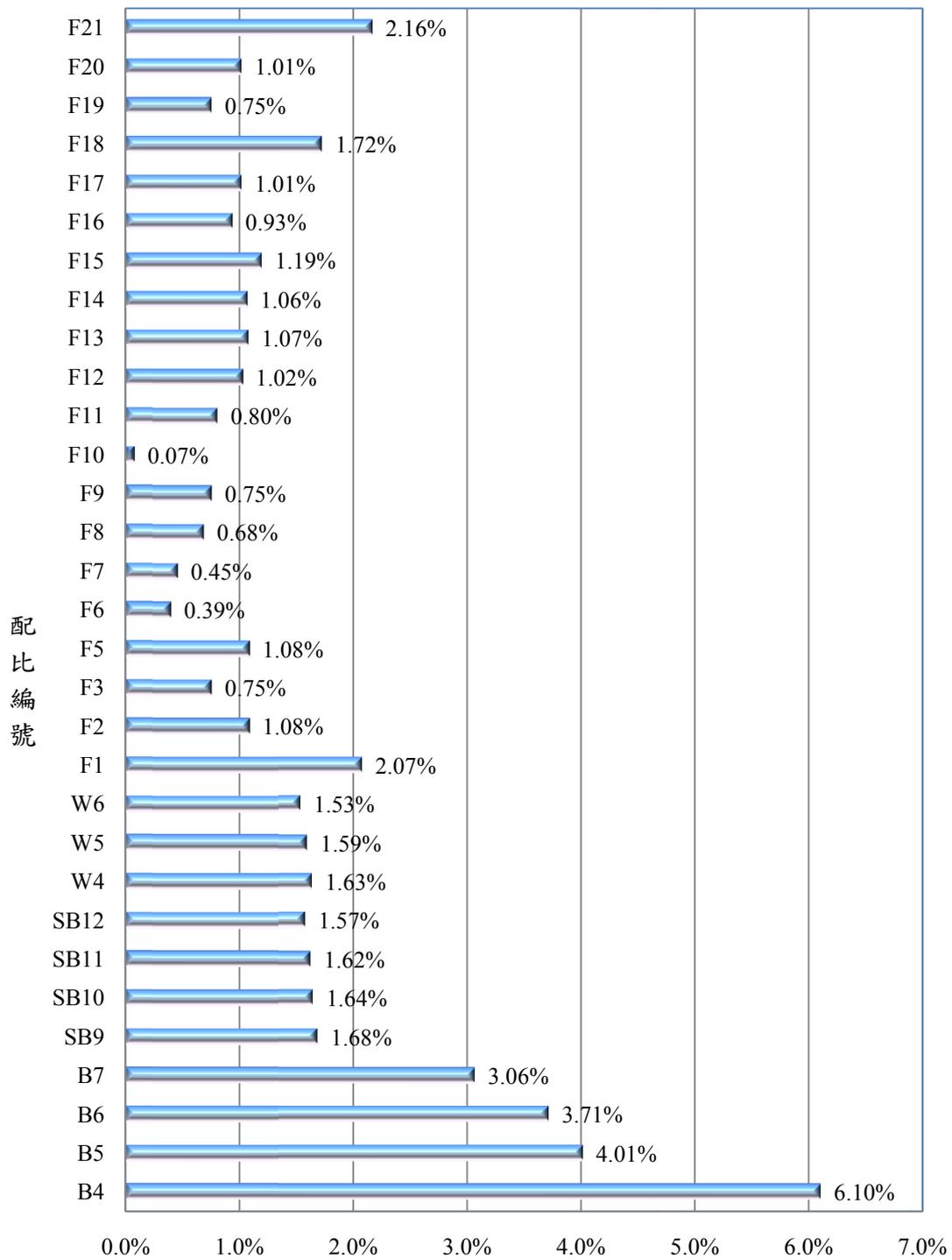
圖【4-12】7天齡期抗壓強度(不同  $CaO/Ca(OH)_2$  比例)



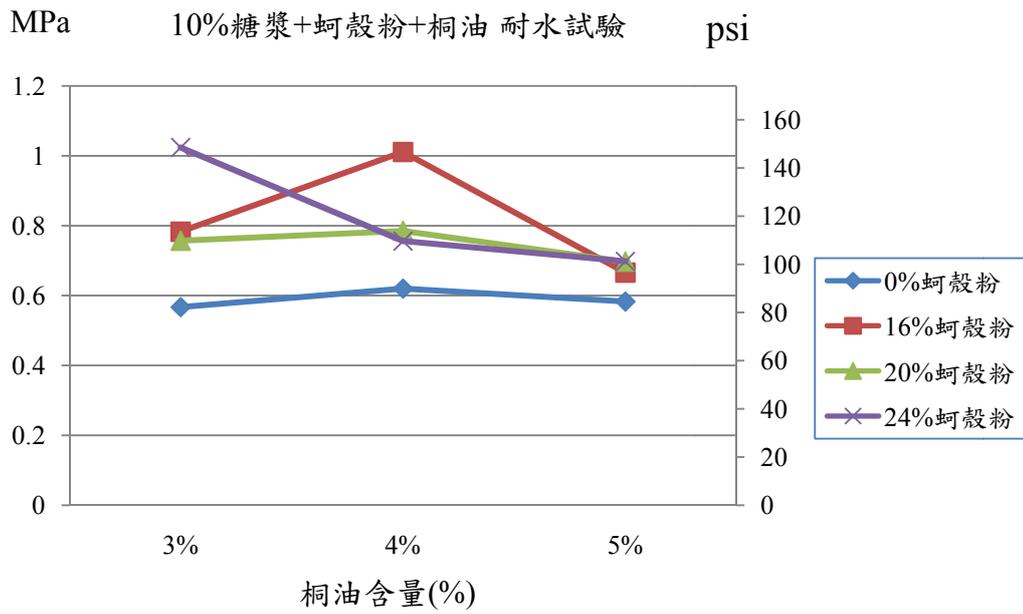
圖【4-13】28天齡期抗壓強度(不同  $CaO/Ca(OH)_2$  比例)



圖【4-14】56天齡期抗壓強度(不同  $CaO/Ca(OH)_2$  比例)



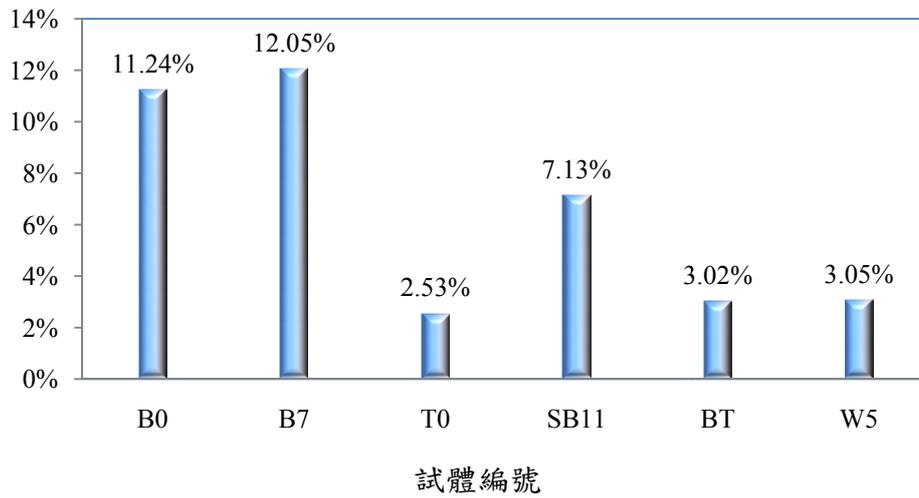
圖【4-15】砂漿棒乾縮長度變化率



圖【4-16】傳統砂漿 7 天耐水試驗

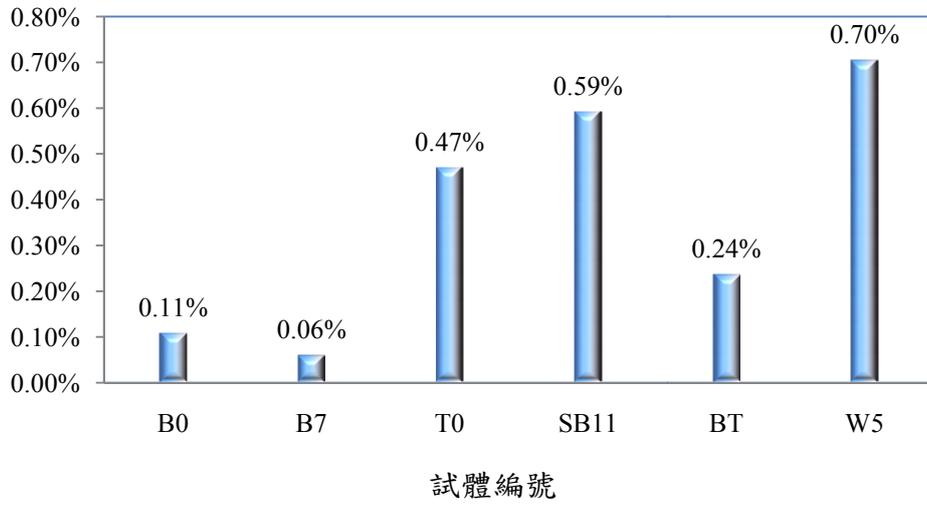


百分比



圖【4-17】傳統砂漿 28 天之酸性溶液中重量損失率

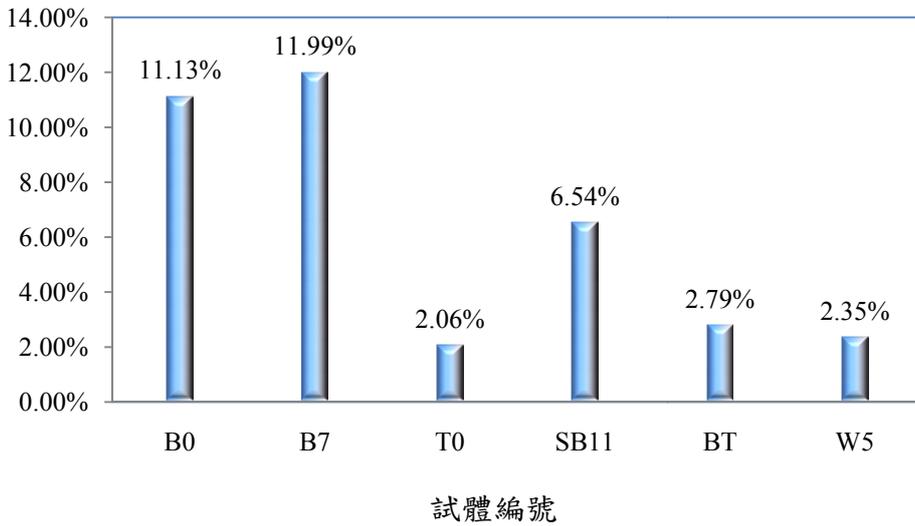
百分比



圖【4-18】傳統砂漿 28 天之水中重量損失率



百分比



圖【4-19】傳統砂漿 28 天(酸性溶液-水中)之重量損失率



圖【4-20】黏結磚剪力試驗破壞情形



# 第五章 結論與建議

## 5.1 結論

1. 添加蚵殼粉容易使用水量增加，若能適當的添加糖漿則有助於用水量的減少，使其抗壓強度增加，也可間接減少乾縮量和凝結時間，但添加量最好在 6%~12%，以免影響強度及凝結速度。
2. 桐油砂漿大部分配比的 7 天抗壓強度約為 0.9~1.0 MPa，添加蚵殼粉後，大部分配比的 7 天抗壓強度可提升至約 1.0~1.5MPa，早期強度明顯提升，初終凝時間也大幅減少，添加蚵殼粉可以改善以往桐油砂漿早期強度不佳及凝結時間太久的缺點。
3. 傳統砂漿的乾縮長度變化量，除了添加材料外與用水量外，和生石灰與消石灰之間的比例有很大的關係，當乾縮量過高時，可增加生石灰添加量，以減少乾縮長度的增加。
4. 添加適量的楊桃汁不但可大幅減少乾縮長度的增加，其抗壓強度方面也比一般最常使用的糯米砂漿來得高，其添加量最好在 16% 以下，否則會影響其抗壓強度。乾縮量抑制方面，若能與生石灰的用量配合，其效果會更佳。
5. 對傳統石灰砂漿而言，幾乎所有的乾縮長度的發展在前 7 天均可達到九成以上，在 7 天之後其乾縮長度就幾乎沒什麼變化。在強度發展方面則是在 7 天~28 天期間發展最快速，通常以倍數在成

長，但超過 28 天其抗壓強度發展就會變得緩慢。

6. 耐水能力方面以添加桐油的效果為最佳，7 天齡期試體隨著桐油用量增加，其強度折減率約在 37%~45%。28 天齡期試體隨著桐油用量增加，其強度折減率約在 12%~22%。56 天齡期試體隨著桐油用量增加，其強度折減率約在 10%~20%。若在桐油中添加蚵殼粉，明顯提高早期強度及耐水能力，折減率約在 31%~46%，隨著氣乾養護時間愈長強度愈高，以及桐油添加量愈高，其耐水能力亦會隨之提高。
7. 傳統砂漿養護方式是由氣乾方式，所以在加溫後抗壓強度也會明顯提高，顯示出在愈乾燥的環境下，愈有助於抗壓強度的成長。但是當溫度超過攝氏 900 度以上時，抗壓強度會大幅下降，其強度折減約在 50%以上。
8. 耐酸試驗中重量損失最多的為無添加防水桐油和抗壓強度較弱的試體，耐水能力愈差的試體其重量損失愈多，所以防水能力對於耐酸能力有一定的影響。而水中的重量損失偏高的試體中可發現均有添加糖漿，其重量損失與酸性溶液相較起來算相當的低，所以添加材料是否易溶於水中對耐酸試驗的影響並不大
9. 用傳統砂漿與水泥砂漿分別以 1~1.5 公分的厚度黏結磚做抗壓試驗，所得到的結果皆是磚的破壞，且水泥砂漿呈現破裂狀，但

傳統砂漿反而因為壓力的關係變的更加密實。傳統砂漿的缺點是受高壓時，其變形量遠大於水泥砂漿的變化量。

10. 在黏結磚的剪力試驗中，其各配比中的剪力強度均無明顯的差別，其各試體破壞處均為傳統砂漿與磚塊間的介面，並非從砂漿處直接破壞，所以與砂漿本身的剪力強度並無太大關係，反而是砂漿與磚塊間的黏結性影響較大。

## 5.2 建議

1. 抗壓強度的齡期到了 56 天，整體的抗壓強度仍是維持成長的趨勢，可以對傳統石灰砂漿做更長期的研究，以得到較完整的強度成長趨勢。
2. 本實驗為減少黏土的影響所以使用的土為黏土粉，但可以再進一步嘗試使用黃土或紅土等不同種類的材料，進而瞭解不同種類的土壤對傳統石灰砂漿的影響。
3. 除了本實驗所添加的桐油、蚵殼粉與糖漿外，可以嘗試著對不同性質的材料或添加多種材料，研究對傳統砂漿所造成的影響。
4. 傳統石灰砂漿的乾縮量普遍徧大，易有裂縫產生，尤其是大面積構件時，因本乾縮試驗均為小試體，可以嘗試使用大型構件，觀察是否有裂縫的產生或裂縫的型態，以及乾縮裂縫對構件強度是否具有影響。

5. 黏結磚的剪力強度取決於磚塊與傳統砂漿的介面剪力強度，所以可以嘗試更有效率的方法或更佳黏結性的材料，來加強其磚塊與砂漿間的介面剪力強度
6. 傳統砂漿的抗壓能力已經能夠承受傳統建築之重量，但對傳統砂漿的剪力與拉拔試驗方面仍可再多做研究與加強。



## 參考文獻

01. 林會承，「台灣文化資產保存年鑑」，國立文化資產保存研究中心籌備處，2002。
02. 吳浩坤，「古史探索與古蹟研究」，1990。
03. 薛琴，「傳統灰作施工方法」，第六次古蹟修復技術研討會專輯，行政院文化建設委員會，1996。
04. 淡江大學建築研究所，「古蹟及歷史建築使用與再發展研討會」，文建會，1996。
05. 葉世文、薛琴、張朝博、詹益榮，「古蹟修復技術-灰作材料性質與修復工法之研究」，內政部建築研究所，2003。
06. 閻亞寧、陳昶良，「古蹟基礎研究(三)-木料及灰作保存科技研究」，中國技術學院，2002。
07. 陳俊良(李德河指導)，「古蹟灰漿材料之配比與強度關係之研究」，國立成功大學土木工程研究所碩士論文，2004。
08. 魏稽生、譚立平，「台灣非金屬經濟礦物」，經濟部中央地質調查所，1999。
09. 蕭江碧、閻亞寧，「古蹟保存與再利用防火課題之基礎調查研究」，內政部建築研究所，2001。
10. 魏明通，「無機化學(下)」，東大圖書公司，1991。

11. 張清忠，「三合土配比及材料行為之研究」，國立台灣科技大學營建工程研究所碩士論文，2002。
12. 王龍盛，「清治時期台灣砌磚用糖灰漿之做法與基本性質研究」，國立台灣科技大學營建工程研究所碩士論文，2003。
13. 楊敦凱，「傳統磚材黏結材料抗拉力學行為之研究」，台灣科技大學營建工程研究所碩士論文，2002。
14. 莊敏信(薛琴指導)，「傳統灰作基本操作與應用之研究」，私立中原大學建築學系碩士學位論文，2003。
15. 朱元祥、吳奕德，「古蹟修護作業準則訂定之研究」，內政部，2000。
16. 江文彥，「碳水化合物與蔗糖工業」，方寸中的化學與化工技術，第七卷第十一期，1999年11月。
17. 歐新通(陳太農指導)，「澎湖地區咾咕石建築灰漿之研究」，國立成功大學建築研究所碩士論文，2004。
18. MuMurry 著，「有機化學(下)」第三版，方松傳等譯，高立圖書有限公司，1995。
19. 陳國成，「實用有機化學」，大中國圖書公司，1986。
20. 北京科學出版社，「中國古代建築技術史(二)」，博遠出版有限公司，1993。

21. 馮佳福(徐明福、黃斌指導),「台灣傳統屋面灰漿基本性質之研究」,國立成功大學建築研究所碩士論文,2003。
22. 王鎮華,「兩岸古蹟維修的主要問題」,1997。
23. 葉世文、閻亞寧,「古蹟修復工法程序及規範的基礎」內政部建築研究所,2003。
24. 薛琴,「國定古蹟總統府修護調查與研究」,內政部,2003。
25. 何明錦、林慶元,「臺灣古蹟磚、石質文物風化破壞之研究」,內政部建築研究所,2003。
26. 王貞富、邱上嘉、陳淮之,「傳統磚砌建築磚牆灰縫以 CO<sub>2</sub> 養護後之材料性質研究」,中華民國建築學會「建築學報」第 56 期,2006 年 6 月。

