

國立成功大學
土木工程研究所
碩士論文

古蹟灰漿材料之配比與強度關係之研究



研究生：陳俊良
指導教授：李德河 博士

中華民國九十三年六月

國立成功大學
碩士論文

古蹟灰漿材料之配比與強度關係之研究

研究生：陳俊良

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 許彥
田永銘 蔡光燦、傅朝卿

指導教授：李 德 河

系主任：吳 致 平

中華民國 九十三年 六月 二十三日

摘要

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，不過對於古蹟建築之保留、重建及再利用，已經是社會大眾普遍的共識，古蹟修復工作也相繼因應而生。由各種文獻中，可得知古蹟灰漿材料種類繁多，不過相對於這些古蹟灰漿材料之特性及使用方式，文獻之中卻是著墨甚少，面對現今如此多的古蹟修復工作，對於古蹟灰漿材料之特性及行為有必要深入去研究。

本研究從文獻所記載之眾多古蹟灰漿材料當中，挑選出石灰、黏土、海砂、牡蠣殼粉、糯米漿及紅糖漿等六種材料，再加上近代之一種新材料 - 稻殼灰，期望能藉由一連串之試驗，了解此七種材料之較佳配比與特性，以作為古蹟相關修復工作之參考。

由試驗結果可得以下之結論：

1. 不同灰土比之石灰海砂漿，以灰土比 1：4 之 7 天氣乾強度為最高。
2. 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。
3. 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。
4. 添加糯米漿之試體，其 7 天及 28 天氣乾強度表現不佳，糯米漿之添加量應控制在石灰重之 0.8 倍內為宜。
5. 添加紅糖漿之試體，隨著紅糖漿含量由石灰重之 0.025 倍增加至 0.1 倍，其 7 天齡期抗壓強度有著先降低再升高之趨勢；而 28 天齡期之試體，則隨著紅糖漿添加量之增加，其抗壓強度亦隨之上升。
6. 添加稻殼灰之試體，抗壓強度上升之幅度相當大，可知稻殼灰乃是提升灰漿抗壓強度之一種非常好的材料。

誌謝

一下子，兩年已經過去了，時間過的還真快。想當初到成大找指導教授時，對每個實驗室跟老師都不甚熟悉，不過當我看到岩力實驗室的環境之後，便下定決心要加入它成為其中的一份子。剛進入實驗室時，對於一切事物都感到新鮮：暑假時的教育訓練，學習到了各種儀器的使用方法以及試驗的規範；大大小小的出差活動，也讓我獲得不少經驗，增廣了見識；實驗室的聚會餐宴開始前，必定先敬個幾杯酒，之後可能又免不了一陣廝殺。這兩年的點點滴滴，我想這輩子都難以讓人忘懷。

在論文口試的期間，承蒙傅朝卿博士、田永銘博士、蔡光榮博士、許琦博士之審閱指正，您們的寶貴意見使得學生的論文內容更加完備，在此致上我最誠摯的謝意。而本論文得以順利完成，首先得要感謝恩師李德河老師的指導，老師對於論文內容所提出的見解，總是可以提供學生新的想法，並且了解到問題之所在；再來則是要感謝實驗室的學長王金鐘老師，若不是有王老師對於論文的指正及幫助，恐怕有些實驗都還難以完成；另外還要感謝宏明學長、老古學長、方老師、楊老師、百祥學長、朝景學長、雅芬學姊、孔哥及謝松林學長，我會記得你們對學弟的幫忙；感謝王姊跟壁玲學姊，辛苦了；同窗的阿福、仰哥、正傑、國彰、小豪及士凱也感謝一下好了，希望以後我們還是有機會可以在一起做運動；學弟泓銘、俊賢、彥燁、信洲及仁彰，常有事麻煩你們幫忙，謝謝你們。

最後要感謝我家人們對我的關心，你們的默默支持是我可以完成這本論文的最大原動力，以後我也會繼續努力加油的。

目 錄

摘要	-----	
誌謝	-----	
目錄	-----	
表目錄	-----	
圖目錄	-----	
第一章 緒論		
1-1 研究動機	-----	1
1-2 研究目的	-----	1
1-3 研究流程	-----	1
第二章 文獻回顧		
2-1 古蹟灰漿之配比文獻	-----	3
2-2 古蹟灰漿材料	-----	14
2-3 古蹟灰漿之力學性質	-----	21
第三章 材料製備與試驗方法		
3-1 材料之製備	-----	24
3-1-1 石灰	-----	24
3-1-2 黏土	-----	24
3-1-3 海砂	-----	25
3-1-4 牡蠣殼粉	-----	26
3-1-5 糯米漿	-----	26
3-1-6 紅糖漿	-----	27
3-1-7 稻殼灰	-----	29
3-2 試驗項目、儀器與步驟	-----	30
3-2-1 基本物性試驗	-----	30

3-2-1-1 篩分析試驗(細骨材) -----	30
3-2-1-2 骨材比重及吸水量試驗(細骨材) -----	31
3-2-1-3 土粒比重試驗 -----	33
3-2-1-4 液性限度試驗 -----	35
3-2-1-5 塑性限度試驗 -----	36
3-2-2 抗壓試驗 -----	37
3-2-3 流度試驗 -----	40
第四章 灰漿配比設計	
4-1 初期配比之設計 -----	41
4-1-1 由 EDS 元素元素分析圖之推算 -----	41
4-1-2 不同灰土比之配比強度比較 -----	43
4-1-3 粗細骨材比例之假設 -----	44
4-2 訂定各種材料之用水量 -----	47
4-2-1 用水量之初步擬定 -----	47
4-2-1-1 無塑性材料用水量之初步擬定 -----	47
4-2-1-2 塑性材料用水量之初步擬定 -----	48
4-2-1-3 添加物用水量之初步擬定 -----	49
4-2-2 擬定用水量之灰漿試拌 -----	50
4-2-3 工作度之定量 -----	51
4-2-3-1 利用細骨材吸水量試驗之圓錐模 -----	51
4-2-3-2 利用流度試驗 -----	52
4-2-3-3 利用液性限度儀 -----	53
4-3 無添加物之配比設計 -----	55
4-4 含添加物之配比設計 -----	60
第五章 試驗結果與分析	
5-1 材料基本性質試驗結果 -----	63
5-1-1 石灰 -----	63

5-1-2 黏土	63
5-1-3 海砂	64
5-1-4 牡蠣殼粉	64
5-1-5 糯米漿、紅糖漿	65
5-1-6 稻殼灰	65
5-2 抗壓試驗數據結果	66
5-2-1 EDS 元素分析表反推之配比抗壓試驗結果	66
5-2-2 不同灰土比之配比抗壓試驗結果	67
5-2-3 粗細骨材不同比例之配比抗壓試驗結果	69
5-2-4 無添加物之配比抗壓試驗結果	75
5-2-5 含添加物之配比抗壓試驗結果	82
第六章 結論與建議	
6-1 結論	90
6-2 建議	92
參考文獻	93

表目錄

表 2-1 台灣傳統砌體建築灰漿配比表(周志明, 2002)	5
表 2-2 古建築灰漿材料配合比與製作方法表	7
表 2-3 三合土用途類別及較適當配比表(張清忠, 2002)	11
表 2-4 不同學者之灰漿抗壓強度比較	23
表 4-1 不同灰土比之配比編號	44
表 4-2 Ab 與 Ae 配比之七天強度比較	45
表 4-3 不同粗細骨材之配比	46
表 4-4 海砂與牡蠣殼粉之飽和及氣乾含水量	47
表 4-5 石灰及黏土之工作度	48
表 4-6 試驗流度值	52
表 4-7 灰土比 1 : 1, 土為一種材料之配比	55
表 4-8 灰土比 1 : 1, 土為兩種材料之配比	56
表 4-9 灰土比 1 : 1, 土為三種材料之配比	56
表 4-10 灰土比 1 : 2, 土為一種材料之配比	57
表 4-11 灰土比 1 : 2, 土為兩種材料之配比	57
表 4-12 灰土比 1 : 2, 土為三種材料之配比	58
表 4-13 灰土比 1 : 4, 土為一種材料之配比	58
表 4-14 灰土比 1 : 4, 土為兩種材料之配比	59
表 4-15 灰土比 1 : 4, 土為三種材料之配比	59
表 4-16 含添加物之配比	62
表 5-1 各種材料之基本性質	65
表 5-2 Aa 與 Ab 配比強度之比較	66
表 5-3 不同灰土比之配比強度	67
表 5-4 不同粗細骨材之配比抗壓試驗結果(灰土比 1 : 1)	70

表 5-5	不同粗細骨材之配比抗壓試驗結果(灰土比 1 : 1)	71
表 5-6	不同粗細骨材之配比抗壓試驗結果(灰土比 1 : 1)	72
表 5-7	無添加物之配比抗壓試驗結果(灰土比 1 : 1)	76
表 5-8	無添加物之配比抗壓試驗結果(灰土比 1 : 2)	77
表 5-9	無添加物之配比抗壓試驗結果(灰土比 1 : 4)	78
表 5-10	C 系列配比群中強度排名前 10 之配比	81
表 5-11	含添加物之配比抗壓試驗結果(Cd3)	84
表 5-12	含添加物之配比抗壓試驗結果(Ce6)	85
表 5-13	含添加物之配比抗壓試驗結果(Ci8)	86

圖目錄

圖 1-1 研究流程圖	2
圖 2-1 卜作嵐材料之 C-A-S 相位平衡圖	20
圖 3-1 關子嶺特白灰	24
圖 3-2 黏土(左邊為過篩前, 右邊為過篩後)	25
圖 3-3 篩後之海砂	25
圖 3-4 牡蠣殼粉	26
圖 3-5 糯米漿	27
圖 3-6 紅糖漿(保存於密封罐中)	28
圖 3-7 製稻殼灰之火爐	29
圖 3-8 電動搖篩機	31
圖 3-9 圓錐模及搗棒	33
圖 3-10 比重瓶、酒精燈及石綿網	34
圖 3-11 液性限度試驗儀	35
圖 3-12 毛玻璃	36
圖 3-13 十噸剛性抗壓試驗機	37
圖 3-14 抗壓鐵模、搗棒及抹刀	37
圖 4-1 安平古堡古灰漿之 EDS 元素分析表	42
圖 4-2 拌製中之配比灰漿	54
圖 4-3 塗抹灰漿於液性限度儀上	54
圖 5-1 黏土之粒徑分布曲線	63
圖 5-2 海砂及牡蠣殼粉之粒徑分布曲線	64
圖 5-3 不同灰土比之 7 天氣乾強度趨勢圖	68
圖 5-4 黏土 : 海砂 = 1 : 0, 7 天齡期	73
圖 5-5 黏土 : 海砂 = 1 : 1, 7 天齡期	73

圖 5-6 黏土：海砂 = 1：0，28 天齡期-----	74
圖 5-7 黏土：海砂 = 1：1，28 天齡期-----	74
圖 5-8 灰土比 1：2，牡蠣殼粉含量 0%，7 天齡期-----	79
圖 5-9 灰土比 1：4，牡蠣殼粉含量 0%，7 天齡期-----	79
圖 5-10 灰土比 1：2，海砂含量 0%，7 天齡期-----	80
圖 5-11 灰土比 1：4，海砂含量 0%，7 天齡期-----	80
圖 5-12 添加糯米漿試體強度(7 天齡期)-----	87
圖 5-13 添加糯米漿試體強度(28 天齡期)-----	87
圖 5-14 添加紅糖漿試體強度(7 天齡期)-----	88
圖 5-15 添加紅糖漿試體強度(28 天齡期)-----	88
圖 5-16 添加稻殼灰試體強度(7 天齡期)-----	89
圖 5-17 添加稻殼灰試體強度(28 天齡期)-----	89

第一章 緒論

1-1 研究動機

一九六四年威尼斯憲章發布之後，「古蹟保存」發展成為人類共同認知的價值。我國則於民國七十一年訂頒「文化資產保存法」，開展我國古蹟保存政策〔全國文化會議手冊〕。歷史保存與古蹟維護的觀念倍受重視，因此許多古蹟修護的工作因應而生，不過古老的材料和製作方法常流於口述，相關文獻甚少提及，也無科學方法探討其特性。

此外，「文化資產保存法暨其施行細則」雖然規定古蹟修復需盡量採傳統技術、工法及材料〔文化資產保存法暨其施行細則第 46 條〕，不過對於實際採用的方法及材料配比，並無明確規定。若能利用現代科技方法重現古代灰漿，並研究改善其力學特性，將可提供給未來古蹟修護相關單位利用與參考。

1-2 研究目的

目前對於傳統灰漿所能獲得的訊息不多，所有資料皆只是文獻記載或老一輩的匠師口述，能夠知道的只是大概的施工方法及材料的配比，而這些材料的配比也只是大約的經驗數值，除此之外，我們更無法得知由這些配比可達到何種強度的要求。

本研究從文獻中所提及之材料中，選定了石灰、黏土、海砂、牡蠣殼粉、糯米漿、紅糖漿此六種材料，另外還選定了一種文獻中未提及的材料-稻殼灰，希望能夠藉著改變此幾種材料的比例，找尋出強度較佳的配比設計。此外，文獻中對於用水量的多寡皆未有詳細說明，在本研究中也將試著訂定出各材料適當的用水量，期能使灰漿有良好的工作度，並能增加日後的強度發展。

1-3 研究流程

本研究之研究流程如圖 1-1 所示：

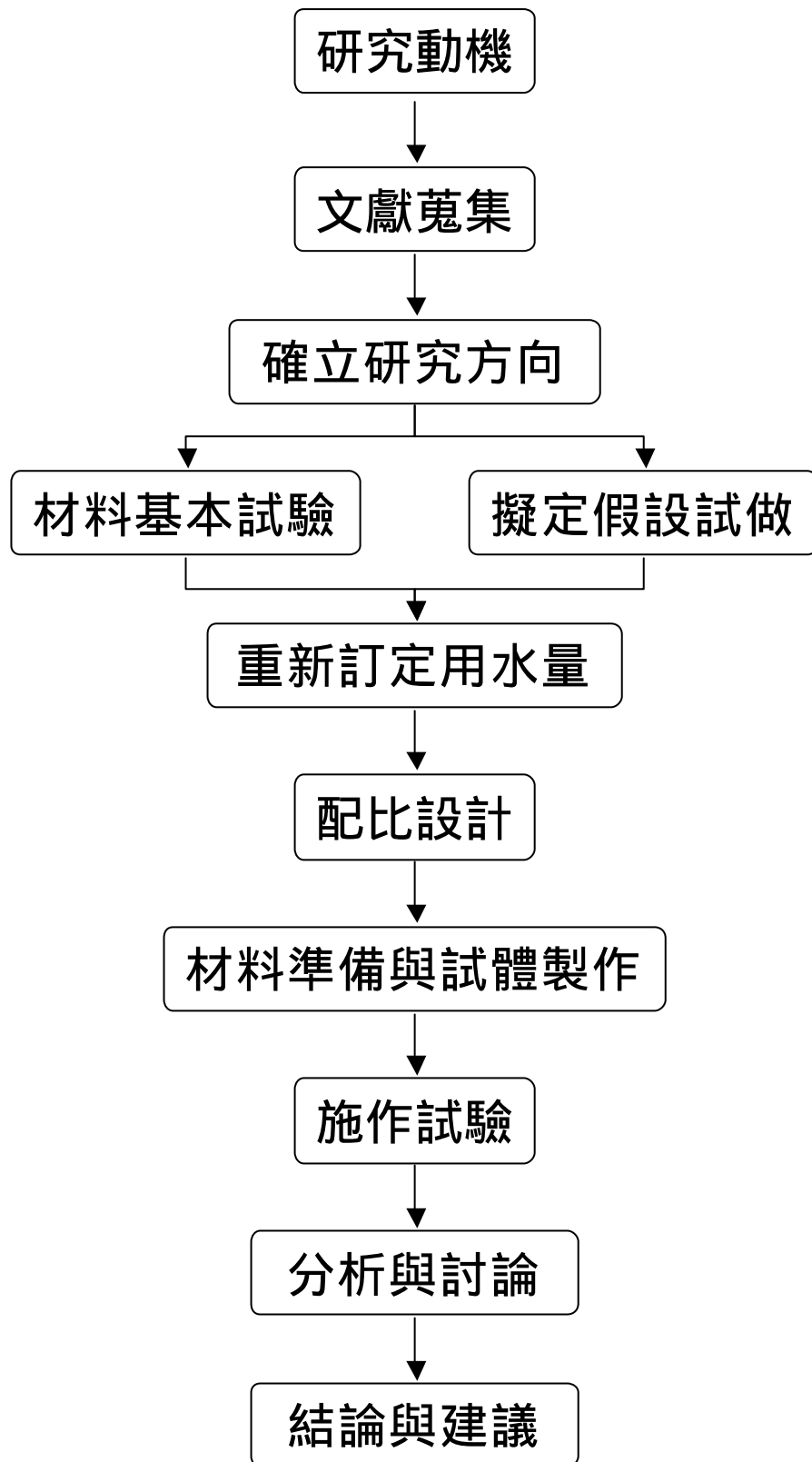


圖 1-1 研究流程圖

第二章 文獻回顧

2-1 古蹟灰漿之配比文獻

石灰漿的使用，是始於中國的東漢時期，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，開始普遍的使用石灰，因此在磚塔的灰縫材料上，除了一般的黃泥之外，也將石灰加入灰縫的調製材料中。而明代遂將石灰漿運用於砌牆之上，其所使用的混合材料也有所不同。在台灣的砌體建築中，十七世紀荷蘭人入台經營，由印尼進口磚材，並以糯米、紅糖調配牡蠣殼粉，這也是俗稱的三合土。

台灣傳統的灰漿做法可分為五大類。每一種類型的灰漿，則被使用於不同的砌體建築或施工位置，其稱謂分別是三合土、灰泥、麻絨白灰、石老石古石灰和桐油灰，對於各成分調配的比例分述如下(表 2-1)：

1. 三合土

由白灰、黏土、糖漿、貝殼粉、糯米漿、海菜和水等材料組成，一般作為砌築打底用的材料。其中前五項的比例為 1 : 3 : 0.4~0.5 : 1~2 : 1~1.5(體積比)，而海菜為少許，水分的多寡亦視匠師的經驗而定，但必須是使用無受污染的地下水或井水，不可直接引用自來水；糯米和貝殼粉的使用則須視材料的地域性，例如沿海地區養殖牡蠣，可利用廢棄的牡蠣殼進行加工再利用，而靠近山區則可以珊瑚礁或石灰岩取代之。另外，三合土是傳統灰縫或灰作的材料統稱，不同的匠師所使用的配比或材料種類也有所不同。

2. 灰泥

由白灰、黏土、貝殼粉、稻穀、糖漿、海菜和水等材料組成。其中前五項的調配比例為 1 : 3 : 0.5 : 1 : 0.2~0.3(體積比)，海菜為少許，水分的多寡亦視匠師的經驗而定，但必須是無受污染的地下水或井水。

3. 麻絨白灰

由麻絨和白灰養灰而成，多使用於斗仔砌建築上。其比例為麻絨六塊、白灰十包(每包 10kg 裝)。其養灰要用石老石古石灰，現代修復工程上，為了修復工期和顏色上的考量，會加入白水泥來控制。

4. 石老石古石灰

依施工的位置可分為填縫和勾縫。其調配方法如下：

(1)填縫：大量黏土、貝殼粉

(2)勾縫：少量黏土、貝殼粉

兩者黏土和貝殼粉的比例大約在 1 : 2 左右，同時也可加入少許的糖漿拌合。

5. 桐油灰

由桐油、黏土、白灰、窯灰和水等材料調配而成，多使用於石牆上的灰縫。其比例為 0.5~0.6 : 1.5~2 : 1 : 0.5，水分的多寡亦視匠師的經驗而定，但必須是無受污染的地下水或井水。另外，窯灰 0.5 的比例可有可無，影響並不大。

表 2-1 台灣傳統砌體建築灰漿配比表(周志明，2002)

	三合土 A	三合土 B	灰泥	麻絨白灰	石老石古 石灰(填 縫)	石老石古 石灰(勾 縫)	桐油灰
白灰	1	6	1	10	-	-	1
黏土	3	0.5	3	-	1	1	1.5~2
貝殼粉	1~2	-	0.5	-	2	2	-
糖漿	0.4~0.5	1/3	0.2~0.3	-	-	-	-
糯米漿	1~1.5	1	-	-	-	-	-
稻穀	-	-	1	-	-	-	-
海菜	少許	-	少許	-	-	-	-
麻絨	-	-	-	6 塊	-	-	-
水	適量	適量	適量	適量	適量	適量	適量
桐油	-	-	-	-	-	-	0.5~0.6
窯灰	-	-	-	-	-	-	0.5

註：1.以上配比為體積比。

2.表格中每一單位為 10kg 裝之包裝；麻絨單位為泡麵大小之塊狀物；桐油以水瓢（直徑 20cm，高 20cm）為一單位。

（本表資料根據邱天祥、吳助雄和林益年等匠師口述整理）

在台灣各地擁有許多的古城堡和廟宇，在當時所使用的灰漿材料也不盡相同。台灣縣誌(1807)，「台灣城，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。」，說明安平古堡磚砌乃用石灰、糯米漿、糖漿混合而成。傅朝卿(2001)在「台南市古蹟與歷史建築總覽」有更清楚的說明，安平古堡乃由糯米

汁、糖漿、砂、牡蠣殼粉等材料混合磚砌而成。

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」，赤坎樓灰壁粉刷乃採用麻絨、蠣殼灰加黃黏土、水泥、溪沙打底，再用麻絨蠣殼灰整平，最後再以純淨的麻絨白灰層作最後一道的推光。

在國外文獻中，也有提及許多早期建築黏結添加材料，可分成：

1. 染色用：如色土(earth pigments)、氧化鐵(iron oxides)、炭渣(coal dust)、燈黑(lamp black)。
2. 增加力學強度：如植物纖維(fibrous plant materials)、動物毛髮(animal hair)。
3. 增加黏性：如蛋白(egg white)、動物血(animal blood)。
4. 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、樹脂、米、麵糰、蟲膠、牛油、糖、尿、蔬菜汁等材料。這些均是在農場及居家隨手可得的材料。

灰漿的種類繁多，瓦工師傅會因用途和地點而選用不同的灰漿，於是流傳有九漿十八灰的說法〔張海清，1984〕。張海清、劉大可、程萬里(北京市第二房屋修繕工程公司古建科研設計室)、杜仙洲(中國古建築修繕技術作者)四人所提出之各種灰漿之配比與用途，如表 2-2。在三合土配比及材料行為之研究(張清忠，2002)中，利用金門蠣殼灰、砂、紅土等三種材料進行配比研究，並依用途分類建議出較適當配比如表 2-3。

表 2-2 古建築灰漿材料配合比與製作方法表

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
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
煮漿灰〔灰膏〕	製作灰漿的原材料。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
麻刀灰	抹靠骨灰〔附 1〕及泥底灰的面層	各種灰漿調勻後摻入麻刀〔附 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
		用壓漿灰或月白灰與麻刀拌和均勻得之。	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
夾隴灰	屋面工程中筒瓦〔附 3〕的夾鬻及合瓦的夾腮〔附 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
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
素灰		為各種不摻麻刀的煮漿灰〔灰膏〕或潑灰		杜仙洲
色灰		各種灰加顏色而成。常用的顏色有青漿、煙子〔附 5〕、紅土粉、霞土粉等		杜仙洲
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%〕投放入加水的灰鍋〔少量的可大桶〕，以灰?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
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

名稱	主要用途	配合比及製作要點	說明	文獻出處
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
		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
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
	抹灰工程的打底	潑灰用大眼篩子篩過		杜仙洲
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
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
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
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
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
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
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
		青灰加水攪勻再加生灰塊，攪成稀粥狀過篩發漲而成。青灰：生石灰=7：3		杜仙洲

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
		潑灰加好黏土即“膠泥”（6：4重量比）加水調成漿狀		杜仙洲
	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
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，取漿與黃土拌和，悶8小時後即可使用。 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
	牆身砌牆	石灰：黃土=3：7或4：6（體積比）		張海清
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碎。灰（熟石灰）：滑稽=100：20（體積比）		劉大可
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
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

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。（劉大可）。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，再用夾鬢灰細抹謂之夾腮。
5. 煙子：即炭黑油，一種黑色細膩粉末。是有機物質（如木材等）再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。



表 2-3 三合土用途類別及較適當配比表(張清忠，2002)

項次	用途	材料重量比例				使用 順序	主要理由說明
		蠣殼灰漿泥	紅土	砂	水泥		
1	屋頂防水 養瓦上層	1.0	0.8	1.2	0.0		訪談匠師配比
		1.0	1.3	0.7	0.3		
		1.0	1.0	2.0	0.5		
		1.0	0.0	3.0	0.0		
		1.0	0.0	1.7	0.7		
		1.0	0.0	1.0	0.5		
		1.0	1.0	1.0	0.8	1	工作性好，較不會產生龜裂，抗壓抗張較佳，延展及經濟性適中，耐久性良好。
		1.0	0.3	1.0	0.8	2	
2	屋頂瓦抵 墊料	1.0	0.5	1.0	0.5		訪談匠師配比
		1.0	3.0	1.0	0.0		
		0.0	4.0	0.0	1.0		
		1.0	3.0	1.0	0.0		
		1.0	1.2	0.1	0.2		
		1.0	1.2	0.1	0.2		
		1.0	0.3	1.0	0.0	1	工作性好，考量建物興建年久維修紅瓦再利用之經濟價值。
		1.0	1.0	1.0	0.0	2	
1.0	0.3	1.0	0.4	1	工作性好，較不會產生龜裂、滑落，不考慮未來屋瓦再利用。		
1.0	1.0	1.0	0.4	2			
3	砌紅磚牆	1.0	0.5	1.2	0.4		訪談匠師配比
		1.0	2.5	1.5	0.0		
		0.5	1.0	2.0	0.5		
		1.0	3.0	1.0	0.0		
		1.0	0.7	1.0	0.7		
		1.0	0.3	1.0	0.8	1	工作性好，抗壓 抗張較佳，耐久性良好，在不考慮經濟性、防潮性及隔熱性使用。
		1.0	1.0	1.0	0.8	2	
		1.0	0.3	1.0	0.4	1	工作性好，抗壓抗張耐久性適中，考慮經濟性、防潮性及隔熱性使用。
1.0	1.0	1.0	0.4	2			

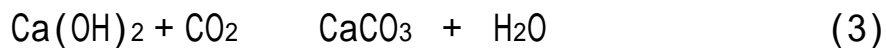
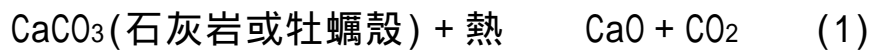
項次	用途	材料重量比例				使用 順序	主要理由說明
		蠣殼灰漿泥	紅土	砂	水泥		
4	磚牆體粉 刷打底層	1.0	0.3	1.0	0.6		訪談匠師配比
		1.0	0.7	1.3	0.3		
		1.0	1.0	2.0	0.5		
		1.0	0.2	2.0	0.0		
		1.0	1.0	1.2	0.8		
		1.0	0.2	2.0	0.0		
		1.0	0.3	1.0	0.8	1	工作性好、黏稠度適中，較不會產生龜裂，抗壓、抗張強度較佳，耐久性良好。
		1.0	1.0	1.0	0.8	2	
5	鋪尺二磚 打底	1.0	0.3	1.0	0.6		訪談匠師配比
		1.0	2.5	1.0	0.5		
		1.0	1.0	2.0	0.5		
		1.0	3.0	1.0	0.0		
		1.0	1.0	0.7	0.7		
		1.0	0.3	0.8	0.0		
		1.0	0.3	1.0	0.0	1	工作性好，考慮經濟性及防潮性，但抗壓、抗張強度較低
		1.0	1.0	1.0	0.0	2	
		1.0	0.3	1.0	0.4	1	工作性好，抗壓 抗張強度、經濟性、防潮及防蟻適中。
		1.0	1.0	1.0	0.4	2	
1.0	0.3	1.0	0.8	1	工作性好，抗壓抗張强度高，不考慮經濟性及防潮防蟻問題。		
6	捶土牆	1.0	0.5	1.5	0.0		訪談匠師配比
		1.0	0.5	2.0	0.0		
		1.0	1.0	1.0	0.0		
		1.0	0.3	1.3	0.0		
		1.0	0.4	0.6	0.0		
		1.0	0.4	0.6	0.0		
		1.0	0.3	1.0	0.8	1	工作性好，抗壓、抗張强度高，考慮承載負荷之功能。
		1.0	1.0	1.0	0.8	2	

項次	用途	材料重量比例				使用 順序	主要理由說明
		蠣殼灰漿泥	紅土	砂	水泥		
7	地坪澆置	1.0	0.3	1.0	0.0		訪談匠師配比
		1.0	0.5	1.2	0.0		
		1.0	1.0	1.3	0.3		
		1.0	7.0	1.0	1.0		
		1.0	0.7	0.7	0.7		
		1.0	0.5	3.0	0.4		
		1.0	0.3	1.0	0.4	1	地坪承載小，水泥配比少，相對多用蠣殼灰，增加防潮、防蟻之功能。
		1.0	1.0	1.0	0.4	2	
8	牆體面層 粉刷	0.0	0.0	2.0	1.0	考慮耐久性及其方便性使用，若考慮隔熱、防潮、防蟻及生態性，不適合使用，應另行配比。	

2-2 古蹟灰漿材料

1. 石灰

石灰是建築工程中使用很廣泛的建築材料。它是以石灰石及貝殼為原料，在 800°C ~ 900°C 的溫度下燒而成。石灰石的主要成分是碳酸鈣，經燒後排除了二氧化碳氣體，得到氧化鈣，即生石灰(中國古代建築技術史)。當生石灰藉由少量的水熟化後，會產生消石灰。而消石灰自大氣中吸收二氧化碳並釋放水分後形成碳酸鈣或石灰石。其化學式如下：



上述之 CaO 稱之為「生石灰」，但一般生石灰還含有其他少量的混合物。CaO 是一種極不安定的化合物，很容易與空氣中的水分產生化學反應，當與水接觸時會將體積膨脹為 2-3 倍的粉末狀，因此生石灰必須儲存於比較乾燥的環境中。上述(2)中 Ca(OH)₂ 稱之為「熟石灰」或「消石灰」(Hydrated lime)，在此對加入的水分必須適中，以免後續使用時消化不均勻產生破壞。而(3)的化學式中，代表著石灰再氣體中隨著二氧化碳的參與反應而硬化還原。

石灰的生產和應用在建築工程上，遠在春秋戰國時代已被人們所認識。「左傳」，「成公二年(西元前 635 年)八月，宋文公卒，始厚葬，用廬炭。」這裡所說的廬炭，「左傳注疏」裏指明「燒蛤為炭，亦灰之類」，即利用貝殼時時燒成的石灰。

「天工開物」中，對石灰材料的選擇有明確的規定，即「石以青色為上，黃白次之」，青色是密緻石灰石，氧化鈣含量高，黏土雜質含量低(不超過 2%)；而黃白色者，一般屬泥灰質、白雲質石灰石，黏土雜質及氧化鎂含量相對較多(中國古代建築技術史)。除此之外，也有利用大理石所製成的石灰。

石灰產出的品質，會因為年代的不同，生產技術的差異，以及地域不同(石灰石來源)，而有所差異。Q. A. Gillmore(1872)對於不同地方的石灰石所產出之石灰進行研究，發現石灰石來源不同的石灰，其氧化鈣的含量會有所不同，且其他物質的組成及含量也會有所差異，如：矽化合物(silica)、黏土(clay)、鋁化物(alumina)、氧化鐵(iron oxide)、碳酸鎂(magnesium carbonate)、硫化物(sulfuric)、氯化鉀(potassium chloride)、氯化鈉(sodium chloride)等。

古蹟建築維修上必須遵循古法進行，以減少新舊材料強度不同，避免造成結構行為的改變而破壞原有建物之安全，因此古蹟維修必須使用古法的石灰漿，而不能完全採用水泥來維護。英國 ICOMOS 主席費爾頓(B.M.Feilden)對古蹟傳統建築，曾說明不可用水泥的原因有下列八點：

- 1.水泥的使用是不可逆的。一旦用上之後再要除去就會損傷古蹟原來材料，這損傷是無法補償的。
- 2.水泥的抗壓、抗拉強度太大，粘著力也太大，因此無法與古蹟或傳統建築中較弱材料匹配，古蹟將會形成致命的弱點。
- 3.由於水泥砂漿強度大，且既缺乏彈性又缺乏塑性，因此水泥會施加比較大的機械力於相鄰的材料而促使古蹟灰漿破壞。
- 4.水泥孔隙率低不可滲透，它會保住水和水氣，阻礙蒸發，於是使牆體受潮，若為增強牆體防潮而粉刷水泥砂漿，會得到相反的結果，它會使潮氣上升。

5.在凝固過程中水泥會收縮，產生裂縫水份從縫中滲進來，但水泥是不可滲透材料，進來的水出不去，因此由於潮濕而產生破壞就更加嚴重了。

6.在凝固過程中，水泥會析出可溶性鹽類，它會溶解並破壞多孔性材料和很有價值的室內裝飾。

7.水泥傳熱性高，當利用它來灌注磚縫時，它會形成冷橋現象。

8.水泥的顏色是冷灰的，而且很暗，表面又往往很光滑，像鐵皮這種特點與古蹟(傳統建築)的傳統材料，在審美上是格格不入的。

2. 黏土

西元 1626 年，「戴維特致巴達維亞總督報告書」中提及熱蘭遮城除了以紅磚砌牆之外，對其餘兩座城堡與四個稜堡則是暫時以鄰近水邊叢林中的黏土築成六呎厚的土牆；而 1629 年，普特曼斯的報告書則稱熱蘭遮城在以石材建造外的其他部分，都是以黏土及細砂條築而成。

「中國古代建築技術史」中則是提到，唐代西安小雁塔以及一些在洛陽發掘之宋墓，使用黏土作為砌築膠泥。北平後花園的元代建築所用的磚築膠泥就是 3：1 的黃土石灰漿。

清「宮式石橋做法」中說明，灰土即石灰與黃土之混合，或謂三合土，並規定灰土按四六摻合，石灰四成，黃土六成。在土作技術中灰土的配比實際上是以 3：7 為多，經取樣試驗其性能最優。石灰與黃土拌合夯築基礎並非簡單的機械地摻合，而是原始材料的物性發生了變化，生成了一種屬於水硬性的物質——水化矽酸鈣，此種物質乃是夯築灰土中強度生成的來源。

3. 糯米漿

糯米引入建築材料最早的傳說是在秦代修建長程的工程中。有實物依據的是在中國河南省鄧縣發掘之南北朝時期(420-589AC)的一座磚墓，其膠結材料中，研判使用了澱粉類(可能就是糯米漿)的物質。

到五代時，考古發掘證明，南唐二陵封門砌體的膠泥即用糯米石灰，而在江蘇淮安發掘的一號宋墓墓室也是用糯米石灰澆砌。河南登封少林寺墓塔群中的幾座宋塔、明塔，對其砌築用的膠泥標本通過“碘澱粉”試驗，發現在沉澱物中有澱粉存在。

中國明代「天工開物」第十卷燔石條下有‘用以襄墓及貯水池，則灰一分，入河砂黃土二分，用糯米梗楊桃藤汁和勻’。通過模擬試驗，雖然糯米石灰的早期強度不如純石灰，但是在潮濕的條件下，其後期強度的生成，比普通石灰來的快。

一般砌築用的灰漿多半要求黏性要大，故考究一點的會用江米漿(江米即糯米)，主要目的是為了增加灰漿的黏合力及強度。

4. 糖漿

糖漿於以往文獻提及用作建築材料之外，楊敦凱(2002)在「傳統磚材黏結材料抗拉力學行為之研究」中，對於糖灰漿進行與磚料結合的抗拉力學性質研究。

而王龍盛(2003)「清治時期砌磚用糖灰漿之作法與基本性質研究」中初步推斷，糖灰漿是利用糖結晶能力與石灰混合之後形成離子化合物“蔗糖鈣”(C₁₂H₂₀O₁₁Ca)而獲得強度。我國早期盛產蔗糖，故灰漿常有添加糖汁者，主要目的亦是為了增加灰漿黏合力及強度。

5. 稻殼灰

稻殼之主成分乃為纖維素，而一般纖維質有機物熱分解過程分為裂解氣化和脫水碳化兩大部分，其氣化過程可分為(1)熱分解產生揮發和焦炭，(2)揮發物在氣相中再反應，(3)焦炭與水氣之氣化反應。故氣化後之產物可依其型態分為：

1. 氣體：H₂、CO、CO₂、CH₄ 等等。
2. 液體：H₂O 焦油及水溶性有機物。
3. 固體：黑色固狀物，通稱焦炭，主要來自木質素。

稻殼灰乃卜作嵐材料之一種，其在 C-A-S 相位平衡圖之位置如圖 2-1 所示。稻殼灰之主要成份為 SiO₂，如添加於水泥之中會反應產生具膠結作用的微小 C-S-H 膠體，可增加水泥的早期強度，但由於稻殼灰之多孔結構以及高度保水性能，故會隨著量之增加而伴隨著工作度下降。

卜作嵐(pozzolan)材料是一種矽酸質或矽酸質與礬土質的材料，本身具有很小或不具膠結功能，在常溫且有水的情況下會與氫氧化鈣產生具膠結性之化學反應，在常溫下其與氫氧化鈣進行緩慢的反應，稱為卜作嵐反應(pozzolanic reaction)。

卜作嵐的由來係來自義大利接近那不勒斯的卜作利城，那裡是火山灰的源頭，天然卜作嵐材料在好幾千年就被用於工程中，它們被使用於羅馬水道工程中。卜作嵐材料包括生天然料和熟天然料，如火山岩、頁岩、凝灰岩和浮石。人造卜作嵐材料如飛灰、矽灰等。

曹本介〔1997〕在「中低強度稻殼灰飛灰高性能混凝土之工程性質研究」中，說明稻殼灰水化機理如下：

1. 稻殼灰粉末顆粒組織鬆散，水分子容易侵入；顆粒與水接觸後會造成 Si^{+4} 之游離且與水分子形成矽酸鹽錯合物，水分子得以包裹於內部，導致較佳的保水性。
2. 由於稻殼灰內含約有 8~10% 的鹼金屬族元素，其中以鉀(K)之含量最高(約 5%)，造成溶液之 PH 值提高，也因此使得晶胚形成所需之分子碰撞能量更高，其 CH 與 C-S-H 晶胞數量也增加。
3. 晶胞之刺針與薄片在漸漸長大後會填塞內部結構孔隙，使得整個稻殼灰組織更加緻密；且由於表面之針刺狀 C-S-H 可能會和水泥之水化物緊密結合，致使強度提昇。

黃兆龍(1990)在「稻殼灰燃燒溫度對波索蘭反應性質之影響」之研究中，顯示稻殼灰為高矽質波索蘭材料，由於波索蘭作用可使水泥早期及晚期抗壓強度均提高；此外，由於稻殼灰的多孔結構以及高度保水性能，會使得水泥漿體之泌水量隨著稻殼灰取代量的增加而相對減少，同時凝結時間逐漸縮短。

吳東昇(2002)在「添加飛灰稻殼灰之高性能混凝土拌合模式對性能之影響中」提到，稻米為本國主食之一，年產量高達兩百萬公噸以上，因此每年稻殼產量極多，燒化後之稻殼灰為極佳之早強型卜作嵐材料，添加稻殼灰於混凝土之中可增強早期強度及達到廢棄物再利用之環保目的。

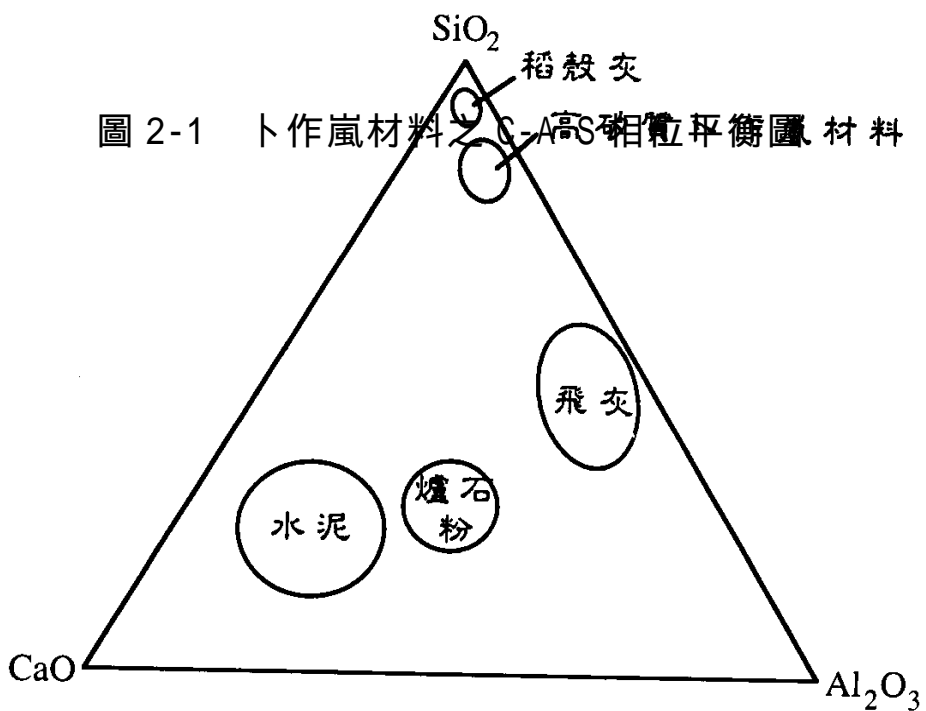


圖 2-1 卜作嵐材料之 C-A-S 相粒平衡圖 材料 (矽灰)

2-3 古蹟灰漿之力學性質

由於近代的磚砌黏結材料，大部分已被水泥砂漿所取代，因而有紅磚、砂漿之相關力學性質之研究；陳清泉等人(1984)於「紅磚與磚牆力學特性之試驗研究」中進行磚、砂漿的物理、機械性質試驗，得到磚與砂漿介面剪力黏結強度與拉力黏結強度試驗之結果。陳明生(1994)於「紅磚、砂漿與其介面之基本力學性質研究」中，探討紅磚、砂漿、紅磚與砂漿介面破壞準則。

以傳統之石灰砂漿進行相關之力學研究方面，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、紅土三種材料混合之三合土進行相關性質及配比研究。楊敦凱(2002)於「傳統磚材黏結材料(糖灰漿、牡蠣粉漿)抗拉力學行為之研究」中，藉由實驗方法探討紅磚與傳統黏結材料介面之抗拉力學性質。王龍盛(2003)在「清治時期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，探討其基本與力學性質。閻亞寧(2001)於內政部八十九年度研究報告中之「古蹟保存科學架構與應用之基礎研究(二)」中，討論水泥砂漿、石灰砂漿及礦物砂漿之基本性質與防潮特性。表 2-4 列出其較佳之灰漿配比抗壓強度。且其研究成果如下：

閻亞寧(2001)：

1. 吸水率試驗結果：石灰砂漿(16.95%)>水泥砂漿(15.17%)>礦物砂漿(12.49%)>磚塊(11.81%)，可知磚牆壁體內之潮氣與水分較易於石灰砂漿中存留。
2. 抗壓強度試驗結果：磚塊(356.65kgf/cm²)>礦物砂漿(91.83kgf/cm²)>水泥砂漿(86.71kgf/cm²)>石灰砂漿(2.13kgf/cm²)

張清忠(2002)：

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。

楊敦凱(2002)：

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，發現此種材料的介面抗拉強度並不穩定，其特性有待後續研究者探討之。

王龍盛(2003)：

1. 本研究建議糖灰漿施作時採用 0.7 左右之水膠比較為適當，石灰與砂的比值可為 1：1 與 1：2 之間。
2. 由試驗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. 由研究得之 60 天齡期對糖灰漿的成長是必須的。

本研究證明加糖的比例約在糖：石灰 = 1：96~160 較為適當。

表 2-4 不同學者之灰漿抗壓強度比較

研究學者	抗壓試體尺寸	較佳抗壓強度配比	28 天抗壓強度 (kgf/cm ²)
閻亞寧 (2001)	5×5×5 cm 立方體	1 份石灰 : 3 份砂 : 3 份水	2.13 (平均值)
張清忠 (2002)	直徑 5 cm×10 cm 高 之圓柱試體	螞殼灰漿泥 : 紅土 : 砂 = 1 : 1.5 : 1 (重量比)	13.43 (平均值)
楊敦凱 (2002)	-	螞殼灰 : 砂 : 水 = 1 : 2 : 0.74 (重量比)	2.17 (平均值)
王龍盛 (2003)	5×5×2 cm 長方體	石灰 : 水 = 1 : 0.5	19.44 (平均值)
		石灰 : 砂 : 水 = 1 : 1 : 0.5	38.09 (平均值)
		紅糖 : 石灰 = 1 : 48 石灰 : 砂 : 水 = 1 : 1 : 0.5	122.1 (平均值)

第三章 材料製備與試驗方法

3-1 材料之製備

3-1-1 石灰

使用之石灰為關子嶺特白灰，一般建築材料行可購得，一袋為 10Kg 重。

由於石灰暴露在空氣之中，會與空氣中之水分產生水化作用，故石灰開封較久之後，包裝內之石灰常有結塊之現象。本研究在準備材料之時，皆把石灰先過 50 號篩後才使用，避免結塊之石灰在拌製灰漿時會產生拌和不均之現象，進而影響試驗之結果。



圖 3-1 關子嶺特白灰

3-1-2 黏土

取自於南二高新化田寮段第 C368 標關廟龜洞段工程 STA261K + 575~261K + 886。由於現地取得之黏土中含有許多石塊或草根等雜質，故必須先將其敲細之後，過 50 號篩去除雜質才使用；除了去除雜質之外，過 50 號篩也是為了要使黏土之粒徑較為細緻，用來拌製灰漿才能與其他灰漿材料拌和均勻。



圖 3-2 黏土(左邊為過篩前，右邊為過篩後)

3-1-3 海砂

本研究所使用之海砂取自於台南市秋茂園之海邊。取得之海砂當中
含有許多貝類或植物等雜質，故亦將海砂過 50 號篩之後才使用。

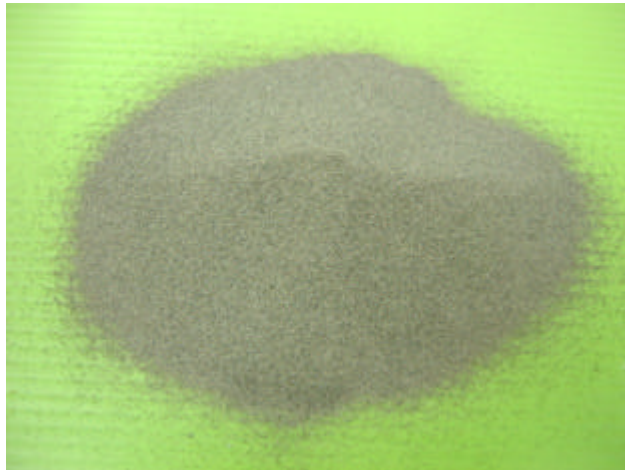


圖 3-3 過篩後之海砂

3-1-4 牡蠣殼粉

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。



圖 3-4 牡蠣殼粉

3-1-5 糯米漿

參考洪煌凱(2003)「古蹟灰漿之力學與微觀特性研究」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來製作糯米漿。

糯米漿之製備方法 (1000g 之糯米漿)：

1. 先秤出 100g 之糯米粉與 300g 左右之水。
2. 將糯米粉慢慢加入水中，此時須不停攪拌以求均勻，待大致混合均勻之後，再把糯米汁倒入果菜汁機中強力攪拌，完成之後將糯米汁倒出。
3. 對糯米汁進行秤重，並加水使得糯米汁大約等於 1020g 重。

4. 將未煮沸之糯米汁放置於電磁爐上，進行加溫的動作。一開始先將溫度調整於攝氏 300 度左右，然後開始不停地攪拌糯米汁，以免糯米產生結塊之現象；大約 10 分鐘之後，糯米開始膨脹，糯米汁呈現黏稠狀，此時將電磁爐溫度調至攝氏 100 度左右，依然不停攪拌；再過數分鐘之後，便可將糯米漿秤重，若超過 1000g 重，則繼續煮沸至 1000g 重為止即完成。
5. 煮好之糯米漿，必須立即倒進密封罐中保存，以免水分散失。
6. 把糯米漿置於冰箱中，以免變質。



圖 3-5 糯米漿

3-1-6 紅糖漿

楊敦凱(2002)在「傳統磚材黏結材料抗拉力學行為之研究」中提到，在室溫下紅糖可以溶解的最大份量為，100g 的紅糖水溶液中有 67g 的紅糖。因此本研究訂定紅糖漿中，紅糖與水的比例為紅糖：水 = 2：1(重量比)。所採用之紅糖為維生牌頂級黑糖。

紅糖漿製備法 (300g 之紅糖漿)：

1. 先秤出 200g 紅糖與 130g 之水。
2. 將紅糖與水混合在一起攪拌，攪拌至感覺紅糖無法再溶解後停止。
3. 將紅糖水放置於電磁爐上加溫，溫度調至攝氏 300 度左右，此時須不停攪拌，以免底部紅糖焦掉。
4. 感覺紅糖漿快沸騰時，便可開始將紅糖漿進行秤重，此時約可得到 300g 左右。若超過 300g 重，則繼續煮沸至 300g 重為止。
5. 煮好之紅糖漿立即倒入密封罐中，以免水分散失。紅糖漿置於室溫之中保存即可。



圖 3-6 紅糖漿 (保存於密封罐中)

3-1-7 稻殼灰

稻殼灰製備方法乃利用自行開發的火爐燒製而成，如圖 3-3 所示。將一廢棄的油桶洗淨後，在桶子上下各切出正方形的洞，桶身也切割許多小孔以利在燃燒時增加對流。鋪設鐵絲網於桶底，以能覆蓋底洞為原則；再取一鐵絲網用鐵絲綁成圓桶狀，固定在桶底的鐵絲網上。

燒製稻殼灰時，將稻殼倒進火爐約八分滿。須將稻殼倒於圓鐵絲網外，作用是利於對流，促進燃燒。瓦斯爐在火爐下方加熱四十分鐘。之後，移開瓦斯爐，使其自行燃燒，隔天將稻殼灰取出，過 20 號篩，裝袋保存。過 20 號篩，可將絕大部分燃燒不完全的稻殼灰給分離出來，約有四分之三之稻殼灰可通過 20 號篩。



圖 3-7 燒製稻殼灰之火爐

3-2 試驗項目、儀器與步驟

3-2-1 基本物性試驗

3-2-1-1 篩分析試驗(細骨材)

依據美國 ASTM C136-71 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)鋼刷。

試驗步驟：

- 〔 1 〕 以四分法取出具有代表性之試體，將其乾燥於 $105^{\circ}\text{C}\sim 110^{\circ}\text{C}$ 二十四小時之後，待其冷卻取出。
- 〔 2 〕 秤取 1000g 重之試樣，以容器裝承。秤取試樣重量之精度應達到 0.5g。
- 〔 3 〕 將所需使用之篩以鋼刷刷淨，再依孔徑之大小由上至下順序排列，另加一底盤及一頂蓋。
- 〔 4 〕 將試樣依量之多寡分數次置入，不可一次放得太多，1000g 重之細骨材，約可分成三次放入。
- 〔 5 〕 開動搖篩機，篩至每分鐘通過各篩之量低於遺留於篩上之重量 1%，方算完成。
- 〔 6 〕 每次篩析完，應即將各篩上遺留之細骨材分別倒出，再將另外之細骨材倒入篩中，重複篩析步驟，直至全部完成。
- 〔 7 〕 每次各個篩號之遺留細骨材應分別倒於同篩號者，最後以電子秤秤重，精讀至 0.1g 即完成。



圖 3-8 電動搖篩機

3-2-1-2 骨材比重及吸水量試驗(細骨材)

依據美國 ASTM C128-73 進行試驗，所使用之設備有：(1)圓錐模(2)搗棒(3)比重瓶(4)量筒(5)漏斗(6)吹風機(7)電子秤。

試驗步驟：

- 〔 1 〕 以四分法取出具有代表性之試體，將其乾燥於 $105^{\circ}\text{C}\sim 110^{\circ}\text{C}$ 二十四小時之後，再浸入水中 24 小時以上，使吸收飽和水分。
- 〔 2 〕 取試樣約 1000g，平鋪於金屬盤上，以吹風機徐徐吹之，使細骨材表面水分逐漸蒸發，並不停攪動，使乾燥度甚為均勻，至細骨材能自由流動時停止。
- 〔 3 〕 將此細骨材分兩層置於圓錐模內，每一層在其表面上以搗棒輕擊 25 次(約以搗棒自身之重量搗實即可)，刮平表面，並清除模邊之細骨材。

- 〔 4 〕 將圓錐模垂直提起，如細骨材自然坍下，上端成尖形狀，即表示達面乾內飽和狀態。如細骨材仍保持其圓錐狀，則其內部仍含有游離水分，再繼續風乾及搗動，頻做試驗直至細骨材達面乾內飽和狀態為止。若一開始提起圓錐模，細骨材即行坍下，表示該細骨材已非飽和水分而為乾燥狀態，此時應加入少許水，徹底拌合，並置於一有蓋之容器內 30 分鐘後再行試驗。
- 〔 5 〕 秤取比重瓶重量設為 W_1 。
- 〔 6 〕 將準備好面乾內飽和之試樣，取 500g 設為 W_2 倒入量瓶中，加水約達 500c.c. 之刻度。
- 〔 7 〕 將該瓶放在平板上搖動，以逐出其中氣泡，再將瓶浸入水盆內，約一小時後，液面如有低於 500c.c. 刻劃應再加滿至 500c.c. 處。
- 〔 8 〕 秤取瓶內加水之總重量 W ，準確至 0.1g，計算所加全部水量 W' 。
- 〔 9 〕 將細骨材自量瓶內取出後，置於 100~110^oC 之溫度下烘乾至恆重，冷卻至室溫後取出秤重 W_3 ，並秤碗重 W_4 。

計算：

- 〔 1 〕 比重 (S_s) = $W_2 / (V - W')$ (表面乾燥內飽和水分狀態)

W_2 ：表面乾燥內飽和水分之試樣在空氣中重，即 500 克。

S_s ：面乾內飽和砂之比重 (g/cm^3)。

V ：比重瓶體積，即 500c.c.。

W' ：瓶內二次所加水量，即等於 $W - W_1 - 500$ 。

〔 2 〕 比重 $S_d = W_d / (V - W') = (W_3 - W_4) / (V - W')$ (全乾燥狀態)

S_d : 細骨材全乾燥狀態之比重。

V : 比重瓶體積 500c.c.。

W_d : 烘乾試樣在空氣中重 = $W_3 - W_4$ 。

W' : 瓶內二次所加水量 , 即等於 $W - W_1 - 500$ 。



圖 3-9 圓錐模及搗棒

3-2-1-3 土粒比重試驗

依據 ASTM D854 進行試驗 , 所使用之設備有 : (1) 比重瓶 (2) 酒精燈
(3) 石綿網 (4) 電子秤。

試驗步驟 :

〔 1 〕 秤比重瓶重 W_c 。

〔 2 〕 50c.c. 比重瓶放入 15~20 克土樣 , 100c.c. 放入 35~40 克 , 秤
 $W_c + W_s$ 。

- 〔 3 〕 加水入比重瓶內至半滿(含土樣)。
- 〔 4 〕 比重瓶在酒精燈上煮沸 10~15 分鐘，煮沸中緩緩旋轉比重瓶。
- 〔 5 〕 待比重瓶溫度下降，添加蒸餾水至瓶口刻劃。
- 〔 6 〕 擦乾比重瓶外多餘水分，秤比重瓶重 W_1 (含土液)。
- 〔 7 〕 倒出土液，沖洗乾淨。
- 〔 8 〕 加水入比重瓶置瓶口刻劃，擦乾瓶外水分，秤比重瓶重 W_2 (含清水)。
- 〔 9 〕 計算比重 $G_s = W_s / (W_2 + W_s - W_1)$ 。
- 〔 10 〕 兩次試驗結果相差少於 0.03 始可平均之。



圖 3-10 比重瓶、酒精燈及石綿網

3-2-1-4 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。

試驗步驟：

- 〔 1 〕 取通過 40 號篩之土樣約 100g，放入容器中加水拌勻。
- 〔 2 〕 將拌勻之土壤塗在液限試驗儀之杯盤上，土樣中央高度為 1.3cm。
- 〔 3 〕 以規定尺寸之槽形工具於杯盤中央劃分土樣成溝槽狀。
- 〔 4 〕 以 2 轉/秒之速度搖轉液限試驗儀，每一轉杯盤打擊底部一次，直至溝槽兩邊土樣相接 1.3cm 為止，紀錄打擊次數，打擊次數最好控制在 25~35 下、20~30 下、15~25 下之三個區間內。
- 〔 5 〕 取出相接部分之土壤，求含水量 W_i (W_1 、 W_2)。
- 〔 6 〕 在半對數圖表上繪出 $W_i - \log N_i$ 之曲線，求得 $N = 25$ 下之含水量，即為液性限度 LL。



圖 3-11 液性限度試驗儀

3-2-1-5 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。

試驗步驟：

- 〔 1 〕 取出小塊土壤，約 1.5~2g 重，搓成橢圓形，隨即放在毛玻璃(粗面，不反光之玻璃板)上，以手掌均勻搓轉成細圓柱狀，直至柱狀直徑為 $0.32\text{cm} \pm 0.05$ 時，恰有龜裂紋路出現，整個試驗時間不可超過兩分鐘。
- 〔 2 〕 將龜裂之土條馬上放入容器內，並迅速加蓋求其含水量。
- 〔 3 〕 兩次試驗所得之含水量相差 2% 之內，才可平均。

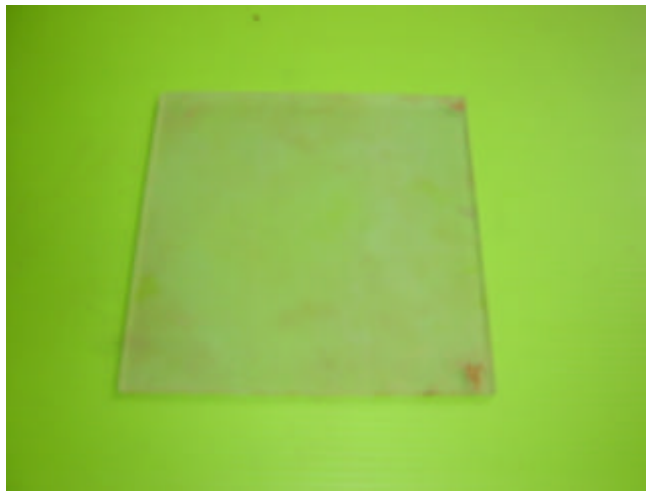


圖 3-12 毛玻璃

3-2-2 抗壓試驗

參考美國 ASTM C109 標準水泥砂漿抗壓試驗規範來施作。所使用的設備有：(1)5*5*5cm 抗壓鐵模(2)搗棒(3)抹刀(4)鏟子(5)鐵盆(6)電子秤(7)十噸剛性抗壓試驗機。



圖 3-13 十噸剛性抗壓試驗機



圖 3-14 抗壓鐵模、搗棒及抹刀

A. 灰漿拌和方法

由於灰漿配比材料與添加物的不同，拌和方法也有所差異，拌和方法詳述如下：

將所使用的灰漿材料分為三類：

- (1) 無塑性材料 - 海砂、牡蠣殼粉及稻殼灰
- (2) 塑性材料 - 石灰及黏土
- (3) 糯米漿及紅糖漿。

拌和步驟：

- 〔 1 〕 拌和灰漿時，先將無塑性材料量取所需重量之後，混合在一起乾拌均勻，之後加入無塑性材料所需之水量攪拌，讓無塑性材料先吸收水分。
- 〔 2 〕 再來才加入塑性材料(石灰跟黏土)及其所需水量攪拌均勻。
- 〔 3 〕 最後加入紅糖漿跟糯米漿拌勻即可。

由於糯米漿及紅糖漿黏稠性高，容易沾附在容器表面，因此拌和時可預留少許水量，待糯米漿及紅糖漿加入灰漿攪拌之後，可利用此少量水分沖洗承裝糯米漿及紅糖漿之容器再倒入灰漿中，如此可避免灰漿配比中，糯米漿與紅糖漿之用量產生誤差。

另外要注意的是，紅糖漿不可在灰漿材料還是乾燥狀態時添加，否則紅糖漿會結成塊狀，無法攪拌均勻。

B. 灌模

灌模之前，鐵模內面應先塗上一薄層的礦油或輕黃油，在各模子兩半接觸面上塗以一薄層重礦油或黃油，以避免水分滲出。

灌模時，將拌和好之灰漿分兩層填入抗壓鐵模之中，每層以搗棒於 10 秒之內均勻夯擊 4 遍每遍 8 次，最後用抹刀將試體的表面抹平，抹平時使抹刀之平面與鐵模之長方向垂直，全部填模時間不得超過兩分鐘。

C. 拆模及養護

在灌模完 24 小時之後即可拆模。本研究是採用氣乾養護，因此在拆模完畢之後，便將試體移到陰涼通風處養護，注意試體與試體之間不可排放太過緊密，須留有適當空間，以利空氣流通。

D. 抗壓試驗

1. 於規定之齡期取出試體，並拭乾表面，與儀器接觸之處使不致黏著任何砂粒或他物。
2. 檢查試體是否平面，否則應予磨平。
3. 置試體於抗壓試驗機支承座之中央。
4. 以應變控制 1.3mm/min 的速率進行抗壓試驗，以電腦計讀其抗壓過程之強度及位移值。

3-2-3 流度試驗

依據美國 ASTM C109-73 進行試驗，所使用之設備有：(1)流度台(2)流度模型殼(3)抹刀(4)搗棒(5)尺。

試驗步驟：

- (1) 將流度台表面及流度模殼內層擦拭乾淨，並塗以一層薄油脂，將流度模殼置於流度台中央處。
- (2) 將拌和好之灰漿分兩層倒入模殼內，每層之厚度約 2.54 公分，並以搗棒搗實 20 次。(ASTM 對於搗實壓力大小並無限制，但應以能使灰漿被均勻壓實為宜，壓力過大易使水分自模殼與流度台之接縫流出；壓力過小，則又不能均勻壓實。)
- (3) 用抹刀將模殼頂面多餘之灰漿刮去。將流度台表面及模殼周邊滲出之少許水分擦乾，於搗實一分鐘內將模殼垂直向上提開。
- (4) 使流度台於 15 秒鐘內震落 25 次，每次之落距為 12.7mm。
- (5) 以每 45° 平分線之間隔分四次量度流瀉後之灰漿直徑，四次量度之平均值與模殼底部內直徑之差，除以模殼底部內直徑，所得之值乘以 100 即為流度值百分率。

$$\text{流度值}(\%) = \frac{\text{四次量度平均值} - \text{模殼底部內直徑}}{\text{模殼底面內直徑}} \times 100$$

第四章 灰漿配比設計

從各類文獻或是從實際開挖出的古蹟之中，可知道古蹟灰漿材料的種類繁多，本研究挑選出其中數種材料 - 石灰、黏土、海砂、牡蠣殼粉、糯米漿、紅糖漿，再加上近代一種新材料 - 稻殼灰，試著去找尋出這些材料之間較佳的灰漿配比，並期待可以了解各種材料的特性以及其對於灰漿強度之影響。

另外，對於同一灰土比的各配比，假使使用相同的水量來製作灰漿，會造成某些配比灰漿的工作度，與灌製試體的適宜工作度相距過大，而且可能會造成試體強度發展的差異，為了避免此種情況發生，所以嘗試配置各種材料的適宜用水量。

4-1 初期配比之設計

初期配比之用水量，皆參考張清忠(2002)，「三合土配比及材料行為之研究」，其用水量為水/蠣殼灰=0.74，水/砂=0.1，水/紅土=0.33。

4-1-1 由 EDS 元素分析圖之推算

參考安平古堡古灰漿之 EDS 元素分析圖(成大土木系岩力實驗室，2003)，如圖 4-1 所示，可得知安平古灰漿中， C_a 佔了 44.04% 的重量，Si 為 10.25%，C 為 4.57%。

1. 假設灰漿只由石灰及海砂兩種材料所構成。石灰之化學式為 $C_a(OH)_2$ ，分子量為 74， C_a 佔了石灰之 40/74；海砂假設皆由 S_iO_2 構成，分子量為 64，Si 佔了海砂之 32/64。簡單反推計算可得石灰 $C_a(OH)_2$ 之重量約佔古灰漿之 81.5%，而海砂 S_iO_2 則佔了 20.5%，因此可得石灰與海砂之重量比，大約為 4：1。(反推所得兩種材料相加之重量約為 102%，與 100% 相當接近。)

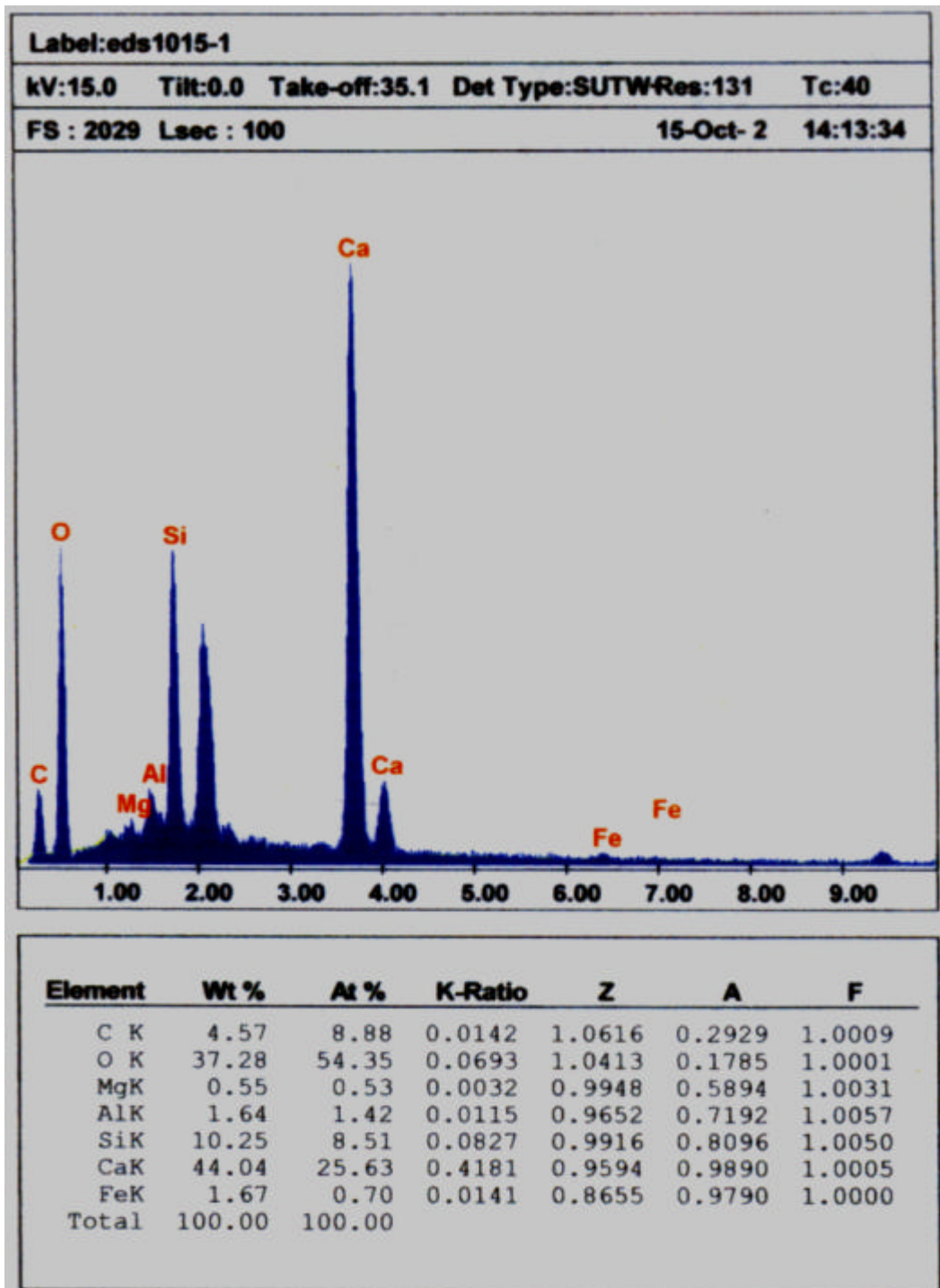


圖 4-1 安平古堡古灰漿之 EDS 元素分析表

2. 假設灰漿由石灰、海砂及牡蠣殼粉三種材料所構成；牡蠣殼粉假設皆由 CaCO_3 所構成，分子量為 100，Ca 佔了牡蠣殼粉之 40/100，C 佔了 12/100；古灰漿中之 C 假設皆由牡蠣殼粉所提供，Ca 由石灰 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 以及牡蠣殼粉 CaCO_3 兩者所提供。反推計算之後可得，古灰漿重量百分比石灰約佔 53.3%，海砂 20.5%，牡蠣殼粉 38.1%，因此石灰：海砂：牡蠣殼粉 = 1：0.385：0.715。（三種材料相加之重量百分比為 111.9%，與 100% 有段差距，顯示假設並不很合理，不過在此我們略過此處，亦參考根據假設所反推求得之三種材料重量比來施作試驗。）

由上述兩種假設，分別可得到(1)石灰：海砂 = 4：1(2)石灰：海砂：牡蠣殼粉 = 1：0.385：0.715 此兩種配比，配比編號分別定為 Aa 及 Ab。

4-1-2 不同灰土比之配比強度比較

洪煌凱(2003)「古蹟灰漿之力學與微觀特性研究」，裡面所使用之配比皆為灰土比 1：4 及 1：8 之配比，且可得知灰土比 1：4 之配比抗壓強度大都比灰土比 1：8 之配比较高，因此可推斷灰土比之大小，對抗壓強度有相當大的影響。

為了比較不同灰土比之配比強度，因此設計了由灰土比 4：1 開始，逐漸減少灰土比至 1：6 之一連串配比，灰漿材料採用石灰與海砂此兩種。灰土比 3：1 之配比編號定為 Ad，配比為石灰：海砂 = 3：1。灰土比 2：1 之配比編號定為 Ae，配比為石灰：海砂 = 2：1。以此類推，直至灰土比 1：6，如表 4-1 所示。

表 4-1 不同灰土比之配比編號

配比編號	灰土比	石灰含量(%)	海砂含量(%)
Ac	4:1	80	20
Ad	3:1	75	25
Ae	2:1	66.7	33.3
Af	1:1	50	50
Ag	1:2	33.3	66.7
Ah	1:3	25	75
Ai	1:4	20	80
Aj	1:5	16.7	83.3
Ak	1:6	14.3	85.7

4-1-3 粗細骨材比例之假設

比較 Ab 跟 Ae 配比 7 天齡期的氣乾強度，如表 4-2 所示。兩配比的灰土比雖然相差不多，不過 Ab 的強度卻比 Ae 高出不少，推測可能是跟骨材體積還有級配有關係。

表 4-2 Ab 與 Ae 配比之七天強度比較

配比編號	灰土比	7 天平均氣乾強度 (kgf/cm ²)	備註
Ab	1:1.1	4.46	砂:牡蠣殼粉 =0.385:0.715
Ae	1:1	3.10	無添加牡蠣殼粉

為了瞭解級配對灰漿之影響，因此決定施作試驗來比較。

配比設計過程如下：

1. 依據上述試驗結果，決定採用 1:1、1:2、1:4 三種灰土比。
2. 再來假設黏土跟砂為細骨材，牡蠣殼粉為粗骨材，然後變換粗細骨材的比例來試驗，分別是粗骨材：細骨材=0:1、1:2、1:1、2:1 等四種。
3. 細骨材中採用黏土：砂=1:0、1:1 兩種來試驗。
4. 參考前述張清忠(2002)「三合土配比及材料行為之研究」之用水量標準，再進行試拌之後，訂定灰土比 1:1=0.9、灰土比 1:2=1.1、灰土比 1:4=1.5 的水灰比。
5. 由前面試驗知道，7 天齡期試體的含水量，每個配比之間相差頗大，為了減小此差距，採用製作 7 天跟 28 天齡期的試體進行抗壓試驗來比較。

所設計出之配比編號與內容，如表 4-3 所示。

表 4-3 不同粗細骨材之配比

配比編號	灰土比	石灰(%)	黏土(%)	海砂(%)	牡蠣殼粉(%)
Ba	1:1	50	50	0	0
Bb	1:1	50	33.3	0	16.7
Bc	1:1	50	25	0	25
Bd	1:1	50	16.7	0	33.3
Be	1:1	50	25	25	0
Bf	1:1	50	16.7	16.7	16.7
Bg	1:1	50	12.5	12.5	25
Bh	1:1	50	8.3	8.3	33.3
Bi	1:2	33.3	66.7	0	0
Bj	1:2	33.3	44.4	0	22.2
Bk	1:2	33.3	33.3	0	33.3
Bl	1:2	33.3	22.2	0	44.4
Bm	1:2	33.3	33.3	33.3	0
Bn	1:2	33.3	22.2	22.2	22.2
Bo	1:2	33.3	16.7	16.7	33.3
Bp	1:2	33.3	11.1	11.1	44.4
Bq	1:4	20	80	0	0
Br	1:4	20	53.3	0	26.7
Bs	1:4	20	40	0	40
Bt	1:4	20	26.7	0	53.3
Bu	1:4	20	40	40	0
Bv	1:4	20	26.7	26.7	26.7
Bw	1:4	20	20	20	40
Bx	1:4	20	13.3	13.3	53.3

4-2 訂定各種材料之用水量

之前對於同一灰土比的各配比，都是使用相同的水量來製作灰漿，造成某些配比灰漿的工作度，與灌製試體的適宜工作度相距過大，而且可能會造成試體強度發展的差異，為了避免此種情況發生，所以嘗試配置各種材料的適宜用水量。

雖然張清忠(2002)「三合土配比及材料行為之研究」中，訂定了各種材料之用水量：水/蠣殼灰=0.74，水/砂=0.1，水/紅土=0.33，不過因為材料來源的差異，以及本研究使用之材料較多種，所以必須訂定一新的用水量準則才能適用。

4-2-1 用水量之初步擬定

在擬定用水量方面，將材料分為：(1)無塑性材料 海砂及牡蠣殼粉，(2)塑性材料 石灰及黏土，(3)添加物 糯米漿、紅糖漿及稻殼灰。

4-2-1-1 無塑性材料用水量之初步擬定

對無塑性材料，測其面乾內飽和含水量及一般氣乾情況下之含水量，如表 4-4 所示。

表 4-4 海砂與牡蠣殼粉之飽和及氣乾含水量

材料名稱	面乾內飽和 w(%)	氣乾情況下 w(%)	兩者差距之 w(%)
海砂	2.21	0.23	1.98
牡蠣殼粉	12.56	0.39	12.17

根據以上結果，先採用水/海砂 = 0.02, 水/牡蠣殼粉 = 0.12 的用水量

4-2-1-2 塑性材料用水量之初步擬定

1. 對於塑性材料，做液限及塑限試驗，以當做決定用水量的參考。不過在做石灰的液性限度試驗，敲擊液性限度儀之杯盤時，石灰很容易產生泌水的現象，而且水量加多，使土樣閉合 1.3cm 之敲擊次數不一定變少，判斷石灰此種材料並不適合拿來做液限試驗，因此只量測黏土的液限及塑限來做參考。量測出的黏土液限 $LL=39.1$ ，塑限 $PL=18.3$ ， $PI=20.8$ 。
2. 再來則是利用以往拌和及灌製灰漿之經驗，對石灰及黏土進行工作度方面的試驗：量取 100g 左右之石灰(或者黏土)，置於容器之中，加入適當之水開始拌和，當攪拌大致均勻之後，觀察灰漿是否達到理想之工作度。如果尚未達到，則繼續加入少許水拌和，直至完成；萬一灰漿太過濕潤，則加入少許石灰拌和。待灰漿達到理想工作度之後，馬上測其含水量，對每種材料做三組試驗，然後取其平均之結果，石灰及黏土之工作度試驗結果如表 4-5 所示。

表 4-5 石灰及黏土之工作度

	1	2	3	平均
黏土	24.30 %	23.61 %	25.61 %	24.51 %
石灰	67.33 %	70.81 %	70.04 %	69.39 %

根據上表之試驗結果，決定先採用水/石灰 = 0.7，水/黏土 = 0.25 之用水量。

4-2-1-3 添加物用水量之初步擬定

1. 糯米漿

洪煌凱(2003)「古蹟灰漿之力學與微觀特性研究」中提到，在計算用水量時，必須將糯米漿跟紅糖漿之水量扣掉。不過可發現到，如果在糯米漿用量較多之配比中回扣糯米漿之水量，會造成用水量大量減少，甚至還可能出現用水量為負值之情形，顯示此計算用水量方法並不合理。

為了釐清糯米漿與用水量之間關係，先假設糯米漿中之水分皆已經跟糯米完全融合，無法跟外界材料反應，因此在計算用水量時不須回扣糯米漿之水量。按照此假設來試拌幾組配比灰漿，不過試拌結果可發現到，如果不回扣糯米漿之水量，會造成灰漿太過濕潤，流動性太大，這也證實了此假設並不合理。

由以上兩次試拌之結果可得知，在計算用水量時必須回扣糯米漿之部分水量，此回扣之部分水量大小為多少，必須利用其他方法來擬定。

後來觀察糯米漿，發現到一現象，就是當糯米漿靜置一段時間之後，糯米漿上層部分會開始析水出來，因此便利用此種現象，將攪拌均勻之糯米漿取出一定重量，密封在罐中靜置 24 小時，之後將糯米漿析出之水倒出秤重，共施作 3 組取平均值，結果大約是 1g 重之糯米漿會析出 0.3g 重之水分，因此決定回扣水量為糯米漿重量之 0.3 倍。(例如一配比須加入 100g 重之糯米漿，則其用水量可回扣掉 30g 重)

2. 紅糖漿

由於本研究所設計之配比，紅糖漿之用量皆非常少，紅糖漿水量是否回扣，對整體用水量之影響皆不大，因此決定添加紅糖漿不須回扣水量以方便用水量之計算。

3. 稻殼灰

洪煌凱(2003)「古蹟灰漿之力學與微觀特性研究」中提到，稻殼灰所使用之水量比照石灰之用水量。不過經試拌後發現，此用水量太少，所拌出之試體皆太乾，於是添加水量繼續試拌，最後定出大約水/稻殼灰 = 1 之用水量。

4-2-2 擬定用水量之灰漿試拌

依據上述初步擬定之用水量來試拌灰漿。首先試拌無添加物之配比灰漿(即只有石灰、黏土、海砂及牡蠣殼粉)，發現到灰漿皆有稍乾之情形，猜想可能是因為各種材料在混合之交界面部分，得要有多一點的水分來潤滑，所需之用水量較單一材料來得多。

因此便稍微調高此四種材料之用水量，分別為水/石灰 = 0.75、水/黏土 = 0.3、水/海砂 = 0.05 以及水/牡蠣殼粉 = 0.15。用此調整過之用水量來試著配置灰漿，結果都還算合理。

接著利用上述調整過後之用水量，試拌含有添加物之配比灰漿。試拌後之結果，灰漿之工作度皆在合理範圍內，各組配比灰漿間之工作度差異亦不大，因此初步擬定之添加物用水量應算合理，不必調整。

最後根據上述試拌結果，正式訂定各材料之用水量為：

- (1) 水/石灰 = 0.75
- (2) 水/黏土 = 0.30
- (3) 水/海砂 = 0.05
- (4) 水/牡蠣殼粉 = 0.15
- (5) 糯米漿：用水量回扣 0.3 倍糯米漿重
- (6) 紅糖漿：不須回扣用水量
- (7) 水/稻殼灰 = 1

之後的配比設計，都將採用此新訂定之用水量來設計。

4-2-3 工作度之定量

在先前訂定用水量時，是憑經驗跟感覺來決定材料工作度，做多組試體之後取平均。不過此方法太過主觀，且旁人無法得知實際工作度情況，因此決定使用儀器來定量。

4-2-3-1 利用細骨材吸水量試驗之圓錐模

一般混凝土測定工作度時，常利用坍度法來試驗，不過由於坍度模之體積太大(頂之內直徑為 4 吋，底之內直徑為 8 吋，高為 12 吋)，如果使用坍度法來定量工作度，會造成許多灰漿材料的浪費。

因而在此改採用細骨材吸水量試驗之圓錐模(上端內徑 3.8 公分，下端內徑 8.9 公分，高 7.3 公分)及搗棒(重約 340 克，長約 16.8 公分，底面直徑 2.5 公分)來定量工作度。

先配合吸水量試驗的規範來施作，結果無法順利完成，原因是吸水量試驗規定搗實時僅以搗棒自重搗實，能量太小因此不足以均勻將材料搗實，因此不採用。

改以混凝土坍度試驗法的規範來施作，分三層將材料填入圓錐模中，每層約為全部體積之 1/3，每層以搗棒均勻搗實 25 下。施作之結果雖然較吸水量試驗規範者佳，不過還是無法很均勻的搗實。其中添加黏土較多之配比灰漿，搗實完提起圓錐模之後，幾乎皆形狀保持一定而無坍塌。用此方法，即使是工作度較大之配比灰漿，坍塌度也不會超過 1cm，對於工作度之定量範圍太小。

因此根據此工作度定量方法，僅能獲得一結論：利用細骨材吸水量試驗之圓錐模，搭配混凝土坍度試驗法來施作試驗，坍塌度大於 1cm 以上為太過濕潤之灰漿，不適合本研究灌模製作試體之用。

4-2-3-2 利用流度試驗

使用流度試驗儀，配合水泥砂漿之流度試驗規範來施作。將灰漿分兩層填入模殼(上端內徑 7 公分，下端內徑 10 公分，高 5 公分)，每層搗實 20 下，搗實完後將模殼向上提開，之後使流度台於 15 秒內震落 25 次，每次落距為 12.7mm。

施作結果，含有黏土較多之配比灰漿依然不太適合流度試驗，原因是流動性不高，在受到震落之後形狀變化不大。

因此先排除黏土，只利用石灰、海砂及牡蠣殼粉施作試驗來測試，採用(1)石灰：牡蠣殼粉：海砂 = 1：2：6 (2) 石灰：牡蠣殼粉：海砂 = 2：2：6 (3) 石灰：牡蠣殼粉：海砂 = 3：2：6 來測試。結果如表 4-6 所示

表 4-6 試驗流度值

配比	用水量(水/石灰)	流度值
1：2：6	2.4	82.2
1：2：6	2.5	91.2
1：2：6	2.6	117.1
2：2：6	1.2	78.3
2：2：6	1.3	98.5
2：2：6	1.4	132.9
3：2：6	0.9	63.3
3：2：6	1.0	96.6
3：2：6	1.1	110.6

由表 4-6 所得之結果可迴歸得到，上述三種配比 100% 流度值所對應之用水量分別為：(1) $1:2:6 = 2.52$ (2) $2:2:6 = 1.29$ (3) $3:2:6 = 1.04$ 。

以此用水量灌製灰漿來施作試驗，但所得之流度值並無法控制在 100% 上下，有相當大的差異：第一組所得流度值為 125.7，第二組所得流度值為 109.9，第三組所得流度值為 99.4。

由上述試驗可得知，利用流度試驗來定量本研究灰漿之用水量，並不太合適。

4-2-3-3 利用液性限度儀

將配置之灰漿以抹刀塗抹在液性限度儀之杯盤上，以規定尺寸之槽形工具於杯盤中央劃分土樣成溝槽狀，然後再以 2 轉/秒之速度搖轉液限試驗儀，每一轉杯盤打擊底部一次，直至溝槽兩邊土樣相接 1.3cm 為止，紀錄打擊次數。

試驗結果可發現到，各組配比灰漿所需之打擊次數，幾乎都落在 20~25 下之間，而重複施作試驗，所得之結果亦很接近。

因此以液性限度儀，訂定敲擊次數 20~25 下之間灰漿閉合 1.3cm，為適宜本研究灌模工作度之灰漿。



圖 4-2 拌製中之配比灰漿



圖 4-3 塗抹灰漿於液性限度儀上

4-3 無添加物之配比設計

石灰、黏土、海砂及牡蠣殼粉之間的比例關係，影響著灰漿試體的強度，為了找出此四種材料，何種比例關係之配比其抗壓強度較高，因此設計了以下之配比：

1. 灰土比有 1:1、1:2 及 1:4 三種。(土為黏土、海砂及牡蠣殼粉之總稱)
2. 配比種類可大略分為：(1)土為單一種材料所組成 (2)土為兩種材料所組成 (3)土為三種材料所組成。
3. 土為兩種材料之配比群中，其兩種材料之比例分別為(1)1/4 : 3/4 (2)1/2 : 1/2 (3)3/4 : 1/4 。
4. 土為三種材料之配比，是選定黏土、海砂及牡蠣殼粉其中一種材料，先佔土之 3/4、1/2 及 1/4 重，剩下之土重由另外兩種材料平均分佔。另外還有一組是黏土：海砂：牡蠣殼粉 = 1/3 : 1/3 : 1/3。
5. 採用 4-2 節中，新訂定之用水量來設計。

配比之比例與編號，如以下各表所示：

表 4-7 灰土比 1:1，土為一種材料之配比

編號	灰土比	石灰(%)	黏土(%)	海砂(%)	牡蠣殼粉(%)
Ca1	1:1	50	50	0	0
Ca2	1:1	50	0	50	0
Ca3	1:1	50	0	0	50

表 4-8 灰土比 1 : 1 , 土為兩種材料之配比

編號	灰土比	石灰(%)	黏土(%)	海砂(%)	牡蠣殼粉(%)
Cb1	1:1	50	37.5	12.5	0
Cb2	1:1	50	25	25	0
Cb3	1:1	50	12.5	37.5	0
Cb4	1:1	50	37.5	0	12.5
Cb5	1:1	50	25	0	25
Cb6	1:1	50	12.5	0	37.5
Cb7	1:1	50	0	37.5	12.5
Cb8	1:1	50	0	25	25
Cb9	1:1	50	0	12.5	37.5

表 4-9 灰土比 1 : 1 , 土為三種材料之配比

編號	灰土比	石灰(%)	黏土(%)	海砂(%)	牡蠣殼粉(%)
Cc1	1:1	50	37.5	6.25	6.25
Cc2	1:1	50	25	12.5	12.5
Cc3	1:1	50	12.5	18.75	18.75
Cc4	1:1	50	6.25	37.5	6.25
Cc5	1:1	50	12.5	25	12.5
Cc6	1:1	50	18.75	12.5	18.75
Cc7	1:1	50	6.25	6.25	37.5
Cc8	1:1	50	12.5	12.5	25
Cc9	1:1	50	18.75	18.75	12.5
Cc10	1:1	50	16.7	16.7	16.7

表 4-10 灰土比 1 : 2 , 土為一種材料之配比

編號	灰土比	石灰 (%)	黏土 (%)	海砂 (%)	牡蠣殼粉 (%)
Cd1	1:2	33.3	66.7	0	0
Cd2	1:2	33.3	0	66.7	0
Cd3	1:2	33.3	0	0	66.7

表 4-11 灰土比 1 : 2 , 土為兩種材料之配比

編號	灰土比	石灰 (%)	黏土 (%)	海砂 (%)	牡蠣殼粉 (%)
Ce1	1:2	33.3	50	16.7	0
Ce2	1:2	33.3	33.3	33.3	0
Ce3	1:2	33.3	16.7	50	0
Ce4	1:2	33.3	50	0	16.7
Ce5	1:2	33.3	33.3	0	33.3
Ce6	1:2	33.3	16.7	0	50
Ce7	1:2	33.3	0	50	16.7
Ce8	1:2	33.3	0	33.3	33.3
Ce9	1:2	33.3	0	16.7	50

表 4-12 灰土比 1 : 2 , 土為三種材料之配比

編號	灰土比	石灰(%)	黏土(%)	海砂(%)	牡蠣殼粉(%)
Cf1	1:2	33.3	50	8.33	8.33
Cf2	1:2	33.3	33.3	16.7	16.7
Cf3	1:2	33.3	16.7	25	25
Cf4	1:2	33.3	8.33	50	8.33
Cf5	1:2	33.3	16.7	33.3	16.7
Cf6	1:2	33.3	25	16.7	25
Cf7	1:2	33.3	8.33	8.33	50
Cf8	1:2	33.3	16.7	16.7	33.3
Cf9	1:2	33.3	25	25	16.7
Cf10	1:2	33.3	22.2	22.2	22.2

表 4-13 灰土比 1 : 4 , 土為一種材料之配比

編號	灰土比	石灰(%)	黏土(%)	海砂(%)	牡蠣殼粉(%)
Cg1	1:4	20	80	0	0
Cg2	1:4	20	0	80	0
Cg3	1:4	20	0	0	80

表 4-14 灰土比 1 : 4 , 土為兩種材料之配比

編號	灰土比	石灰(%)	黏土(%)	海砂(%)	牡蠣殼粉(%)
Ch1	1:4	20	60	20	0
Ch2	1:4	20	40	40	0
Ch3	1:4	20	20	60	0
Ch4	1:4	20	60	0	20
Ch5	1:4	20	40	0	40
Ch6	1:4	20	20	0	60
Ch7	1:4	20	0	60	20
Ch8	1:4	20	0	40	40
Ch9	1:4	20	0	20	60

表 4-15 灰土比 1 : 4 , 土為三種材料之配比

編號	灰土比	石灰(%)	黏土(%)	海砂(%)	牡蠣殼粉(%)
Ci1	1:4	20	60	10	10
Ci2	1:4	20	40	20	20
Ci3	1:4	20	20	30	30
Ci4	1:4	20	10	60	10
Ci5	1:4	20	20	40	20
Ci6	1:4	20	30	20	30
Ci7	1:4	20	10	10	60
Ci8	1:4	20	20	20	40
Ci9	1:4	20	30	30	20
Ci10	1:4	20	26.7	26.7	26.7

4-4 含添加物之配比設計

由上述之 C 系列配比，七天氣乾強度排名前五高之配比中，選出 Cd3(土為一種材料)、Ce6(土為兩種材料)及 Ci8(土為三種材料)此三組配比，添加糯米漿、紅糖漿及稻殼灰，且採用 4-2 節中新訂定之用水量來設計。

洪煌凱(2003)「古蹟灰漿之力學與微觀特性研究」中，添加物使用之比例為：

- (1) 糯米漿添加量為石灰重之 0.2、0.4 及 0.8 倍。
- (2) 紅糖漿添加量為石灰重之 0.1、0.2 及 0.4 倍。
- (3) 稻殼灰添加量為石灰重之 0.05、0.1 及 0.2 倍。

1. 糯米漿

由洪煌凱之研究結果中可看出，添加糯米漿之試體，並無隨著糯米漿添加量之增加而明顯提高強度，推測有可能是因為糯米漿中之糯米只佔全部之 1/10，糯米所佔整個試體之比例相當小，造成效果不顯著。

因此決定選取糯米漿添加量為石灰重之 0.8、1.2、1.6 倍來施作試驗。

2. 紅糖漿

王龍盛(2003)「清治時期砌磚用糖灰漿之做法與基本性質研究」中提到，灰漿中添加糖量太高時會造成漿體之體積變化，形成表面之乾縮現象而使強度降低，加糖的比例約在糖與石灰比例(重量比)為 1:96 至 1:160 之間較為恰當，若採用 1:48 或許強度可約略增加，不過糖灰漿在潮濕狀態下會有潮解之現象。

不過上述結果與洪煌凱之研究中所用紅糖漿添加量有不小差異，考慮兩者結果取其中間值，最後選取紅糖漿添加量為石灰重之 0.025、0.05 及 0.1 倍來施作試驗。

3. 稻殼灰

由洪煌凱之研究結果中可得知，隨著稻殼灰添加量之增加，灰漿強度也隨之增加，強度上升趨勢明顯。

為了得知稻殼灰添加量，如果超過洪煌凱研究中所用之上限時，強度是否還會繼續提高，因此選取了稻殼灰添加量為石灰重之 0.2、0.3 及 0.4 倍來施作試驗。

配比編號中，以 r 代表糯米漿，s 代表紅糖漿，rha 代表稻殼灰，此設計之配比如表 4-16 所示。

表 4-16 含添加物之配比

Cd3 系列	Ce6 系列	Ci8 系列
Cd3(r0.8)	Ce6(r0.8)	Ci8(r0.8)
Cd3(r1.2)	Ce6(r1.2)	Ci8(r1.2)
Cd3(r1.6)	Ce6(r1.6)	Ci8(r1.6)
Cd3(s0.025)	Ce6(s0.025)	Ci8(s0.025)
Cd3(s0.05)	Ce6(s0.05)	Ci8(s0.05)
Cd3(s0.1)	Ce6(s0.1)	Ci8(s0.1)
Cd3(rha0.2)	Ce6(rha0.2)	Ci8(rha0.2)
Cd3(rha0.3)	Ce6(rha0.3)	Ci8(rha0.3)
Cd3(rha0.4)	Ce6(rha0.4)	Ci8(rha0.4)

第五章 試驗結果與分析

5-1 材料基本性質試驗結果

5-1-1 石灰

石灰(關子嶺特白灰)之單位重為 0.72 g/cm^3 ，比重為 2.30。

5-1-2 黏土

黏土之乾單位重為 0.82 g/cm^3 ，比重為 2.72，液性限度 $LL = 39.1$ ，塑性限度 $PL = 18.3$ ，塑性指數 $PI = 20.8$ 。

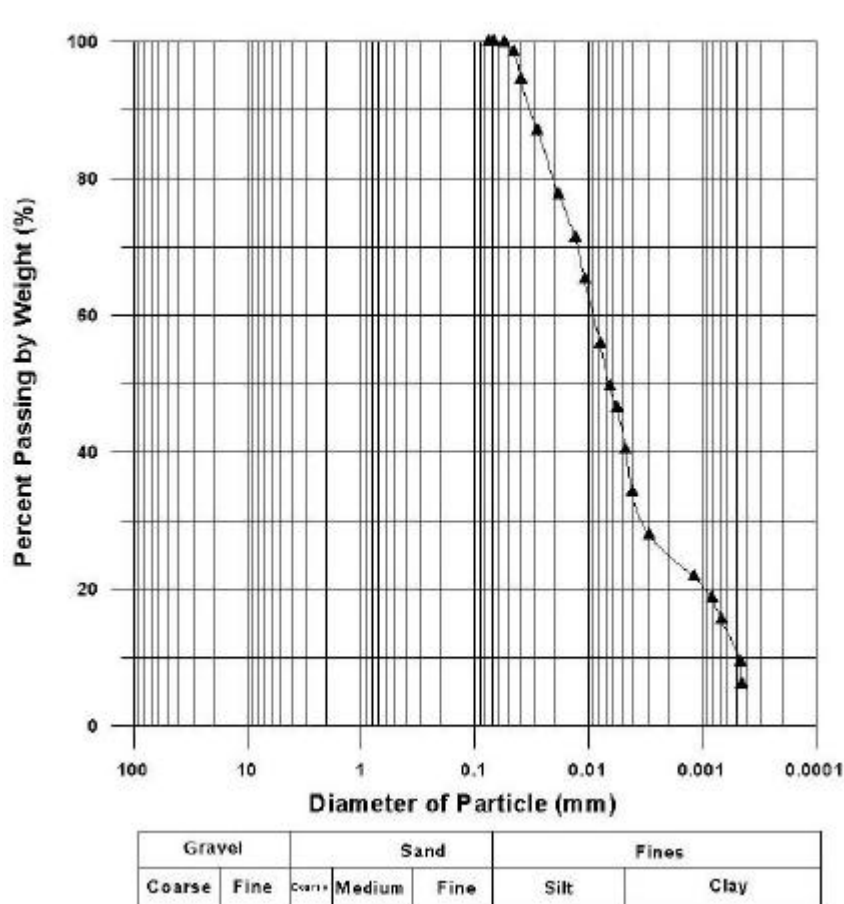


圖 5-1 黏土之粒徑分布曲線

5-1-3 海砂

海砂之乾單位重為 $1.52\text{g}/\text{cm}^3$ ，比重 2.52，面乾內飽和含水量為 2.21%，細度模數 F.M. = 1.02。

5-1-4 牡蠣殼粉

牡蠣殼粉之乾單位重為 $0.94\text{g}/\text{cm}^3$ ，比重 2.15，面乾內飽和含水量為 12.56%，細度模數 F.M. = 1.81。

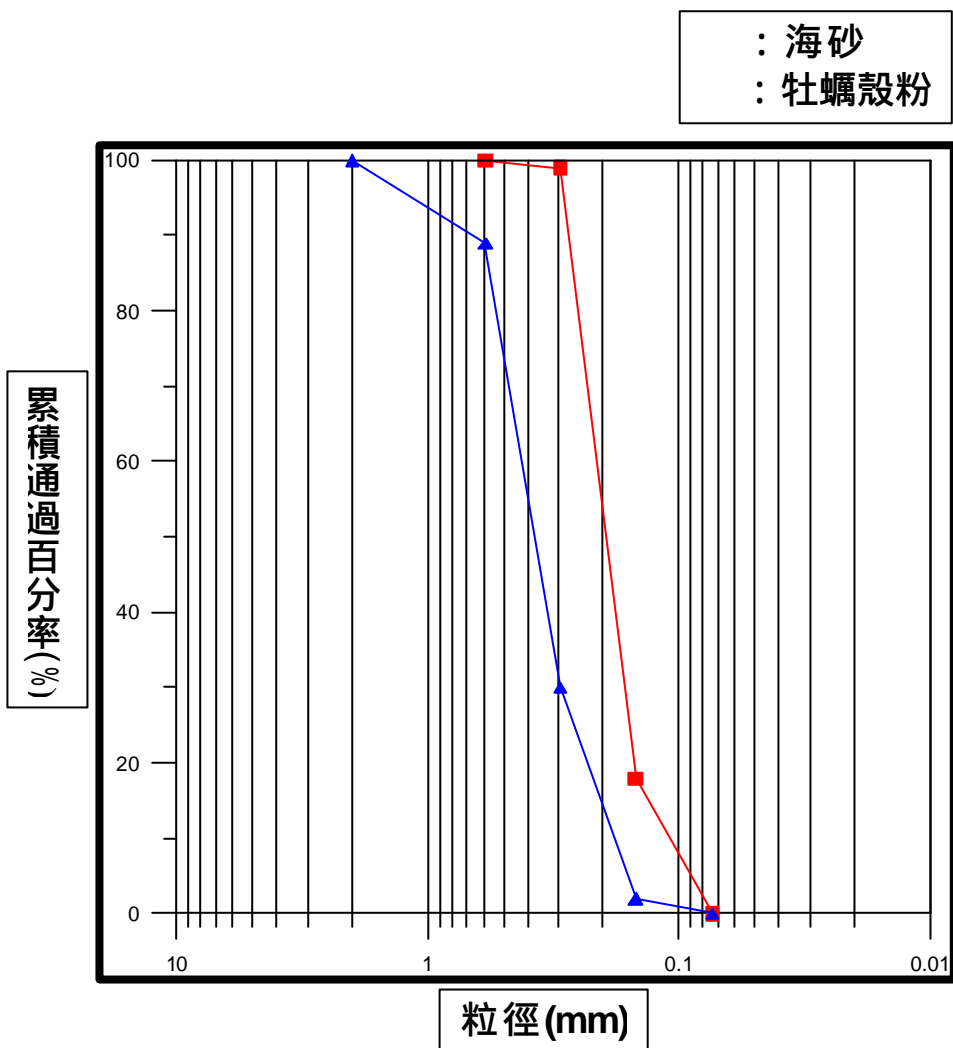


圖 5-2 海砂及牡蠣殼粉之粒徑分布曲線

5-1-5 糯米漿、紅糖漿

糯米漿之單位重為 $1.05\text{g}/\text{cm}^3$ ，紅糖漿之單位重為 $1.39\text{g}/\text{cm}^3$ 。

5-1-6 稻殼灰

稻殼灰之乾單位重為 $0.14\text{g}/\text{cm}^3$ 。

將以上各種材料之基本性質，表列於表 5-1。

表 5-1 各種材料之基本性質

基本性質	石灰	黏土	海砂	牡蠣殼粉	糯米漿	紅糖漿	稻殼灰
單位重 (g/cm^3)	0.72	0.82	1.52	0.94	1.05	1.39	0.14
比重	2.30	2.72	2.52	2.15	--	--	--
液限 LL	--	39.1	--	--	--	--	--
塑限 PL	--	18.3	--	--	--	--	--
面乾內飽和 含水量 (%)	--	--	2.21	12.56	--	--	--
細度模數 F.M.	--	--	1.02	1.81	--	--	--

5-2 抗壓試驗數據結果

5-2-1 EDS 元素分析表反推之配比抗壓試驗結果

由 EDS 元素分析表可推算出(1)石灰：海砂 = 4：1(2)石灰：海砂：牡蠣殼粉 = 1：0.385：0.715 兩種配比，編號分別為 Aa 及 Ab。

由試驗之結果可看出，Aa 配比之強度明顯低於 Ab 配比。Ab 配比的 7 天氣乾強度，可超過 4 kgf/cm²，甚至比 Aa 配比 28 天之氣乾強度還高；不過 Ab 配比齡期 14 天之試體，在強度上並未較 7 天明顯提升，一直要到 28 天齡期才有明顯的增加。

表 5-2 Aa 與 Ab 配比強度之比較

配比編號	灰土比	7 天強度 (kgf/cm ²)			14 天強度 (kgf/cm ²)			28 天強度 (kgf/cm ²)		
		1	2	3	1	2	3	1	2	3
Aa	4:1	1.91	1.68	2.01	2.52	3.08	2.15	3.01	3.42	3.81
Ab	1:1.1	4.53	4.08	4.76	3.85	4.45	4.30	7.54	9.75	8.24

5-2-2 不同灰土比之配比抗壓試驗結果

為了比較不同灰土比之配比強度，以及判斷 Aa 與 Ab 配比之強度差異是否由灰土比之差異所造成，因此灌製了不同灰土比之試體來做比較，灰土比由 4：1 開始，逐漸減少至 1：6，結果如表 5-3 所示。

由表 5-3 及圖 5-3 可以看出，由灰土比 4：1 開始，隨著灰土比之減少，7 天氣乾強度逐漸增加，直至灰土比 1：4 強度為最高。過了灰土比 1：4 之後，7 天氣乾強度便開始逐漸降低。洪煌凱(2003)「古蹟灰漿之力學與微觀特性研究」中，灰土比 1：4 的配比強度大多比灰土比 1：8 的配比強度來得高，本試驗結果與之頗為吻合。

表 5-3 不同灰土比之配比強度

配比編號	灰土比	石灰含量 (%)	海砂含量 (%)	七天平均強度 (kgf/cm ²)
Ac	4：1	80	20	1.87
Ad	3；1	75	25	2.75
Ae	2：1	66.7	33.3	2.92
Af	1：1	50	50	3.10
Ag	1：2	33.3	66.7	3.57
Ah	1：3	25	75	4.04
Ai	1：4	20	80	4.94
Aj	1：5	16.7	83.3	3.96
Ak	1：6	14.3	85.7	3.34

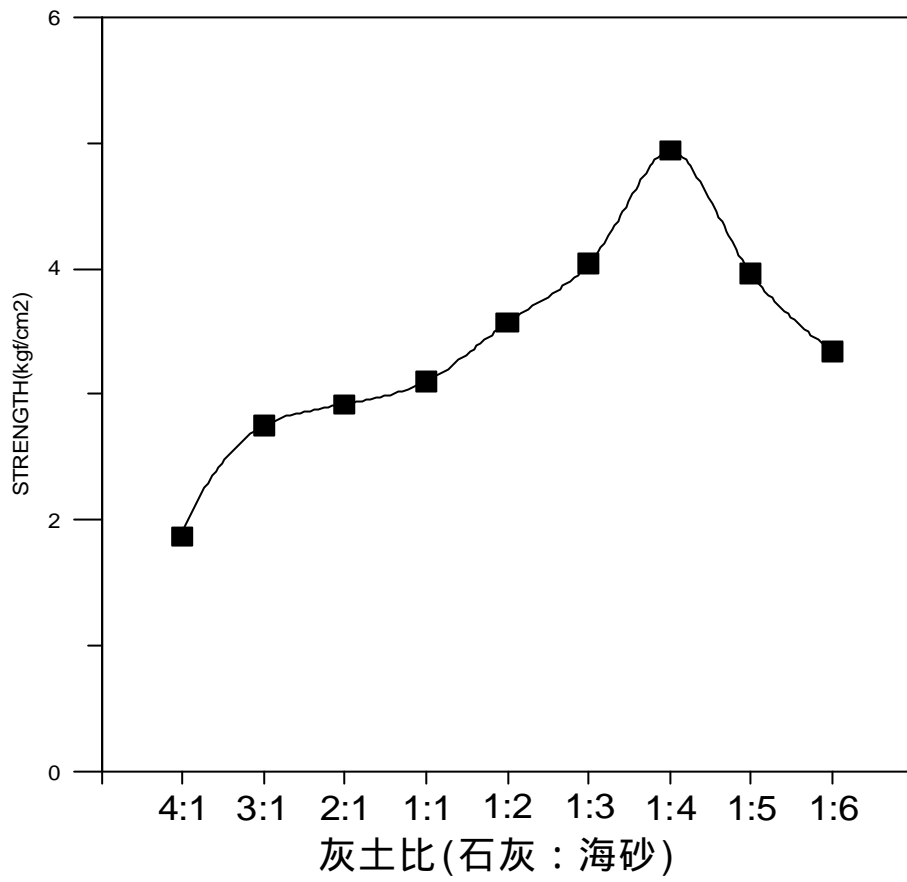


圖 5-3 不同灰土比之 7 天氣乾強度趨勢圖

5-2-3 粗細骨材不同比例之配比抗壓試驗結果

此配比群主要是為了探討不同之粗細骨材比例，是否會影響灰漿之強度，其抗壓試驗結果如表 5-4、5-5 及 5-6 與圖 5-4、5-5、5-6 及 5-7 所示。

從圖表中結果可發現，灰漿中粗細骨材之比例與其 7 天及 28 天抗壓強度並無一定之關係。不過可發現到，黏土：海砂=1：0 之配比，其 7 天及 28 天抗壓強度普遍較 1：1 者高；且黏土：海砂=1：0 之配比，隨著灰土比之降低，其 7 天及 28 天抗壓強度會隨之上升。

另外可以發現，由於本配比群採用固定之用水量(灰土比 1:1 用 0.9, 灰土比 1:2 用 1.1, 灰土比 1:4 用 1.5 之水灰比)，結果使得 7 天齡期之試體，其含水量皆不太相同，同一灰土比中最高與最低之含水量，差距頗大。此情形可能會影響 7 天齡期之灰漿強度發展，因此之後的配比皆採用 4-2 節中新訂定之用水量來設計。

表 5-4 不同粗細骨材之配比抗壓試驗結果(灰土比 1 : 1)

配比 編號	灰土比	石灰 (%)	黏土 (%)	海砂 (%)	牡蠣殼 粉(%)	粗骨材： 細骨材	7 天		28 天	
							平均抗壓強 度 (kgf/cm ²)	平均含水量 (%)	平均抗壓強 度 (kgf/cm ²)	平均含水量 (%)
Ba	1:1	50	50	0	0	0 : 1	4.37	14.32	7.58	2.65
Bb	1:1	50	33.3	0	16.7	1 : 2	5.16	16.24	7.32	1.94
Bc	1:1	50	25	0	25	1 : 1	4.22	18.57	6.36	1.92
Bd	1:1	50	16.7	0	33.3	2 : 1	3.98	19.83	6.48	2.45
Be	1:1	50	25	25	0	0 : 1	4.26	21.59	6.78	2.76
Bf	1:1	50	16.7	16.7	16.7	1 : 2	3.76	18.65	6.89	2.13
Bg	1:1	50	12.5	12.5	25	1 : 1	4.01	21.57	6.35	2.47
Bh	1:1	50	8.3	8.3	33.3	2 : 1	4.28	18.54	6.05	1.83

表 5-5 不同粗細骨材之配比抗壓試驗結果(灰土比 1 : 2)

配比 編號	灰土比	石灰 (%)	黏土 (%)	海砂 (%)	牡蠣殼 粉(%)	粗骨材： 細骨材	7 天		28 天	
							平均抗壓強 度 (kgf/cm ²)	平均含水量 (%)	平均抗壓強 度 (kgf/cm ²)	平均含水量 (%)
Bi	1:2	33.3	66.7	0	0	0 : 1	5.07	8.48	8.56	1.15
Bj	1:2	33.3	44.4	0	22.2	1 : 2	5.46	10.36	9.21	1.32
Bk	1:2	33.3	33.3	0	33.3	1 : 1	4.82	13.01	8.82	1.65
Bl	1:2	33.3	22.2	0	44.4	2 : 1	5.02	15.82	8.65	2.34
Bm	1:2	33.3	33.3	33.3	0	0 : 1	4.55	13.26	7.95	2.08
Bn	1:2	33.3	22.2	22.2	22.2	1 : 2	3.87	13.14	7.60	1.68
Bo	1:2	33.3	16.7	16.7	33.3	1 : 1	3.45	13.56	7.21	1.49
Bp	1:2	33.3	11.1	11.1	44.4	2 : 1	3.61	14.23	7.36	2.32

表 5-6 不同粗細骨材之配比抗壓試驗結果(灰土比 1 : 4)

配比 編號	灰土比	石灰 (%)	黏土 (%)	海砂 (%)	牡蠣殼 粉(%)	粗骨材： 細骨材	7 天		28 天	
							平均抗壓強 度 (kgf/cm ²)	平均含水量 (%)	平均抗壓強 度 (kgf/cm ²)	平均含水量 (%)
Bq	1:4	20	80	0	0	0 : 1	5.65	6.48	9.36	0.94
Br	1:4	20	53.3	0	26.7	1 : 2	5.20	9.65	9.31	1.32
Bs	1:4	20	40	0	40	1 : 1	5.47	8.86	8.46	1.25
Bt	1:4	20	26.7	0	56.3	2 : 1	6.13	11.77	8.52	1.34
Bu	1:4	20	40	40	0	0 : 1	4.51	14.57	7.92	1.78
Bv	1:4	20	26.7	26.7	26.7	1 : 2	4.32	13.27	6.48	1.42
Bw	1:4	20	20	20	40	1 : 1	4.63	15.35	6.80	1.93
Bx	1:4	20	13.3	13.3	53.3	2 : 1	5.28	13.34	7.21	1.65

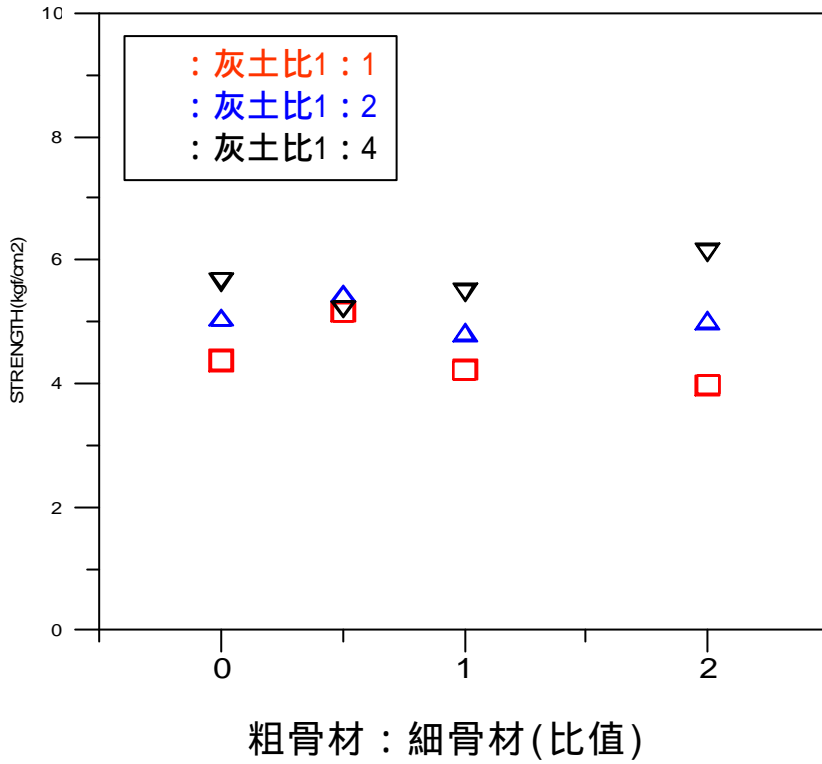


圖 5-4 黏土 : 海砂=1 : 0 , 7 天齡期

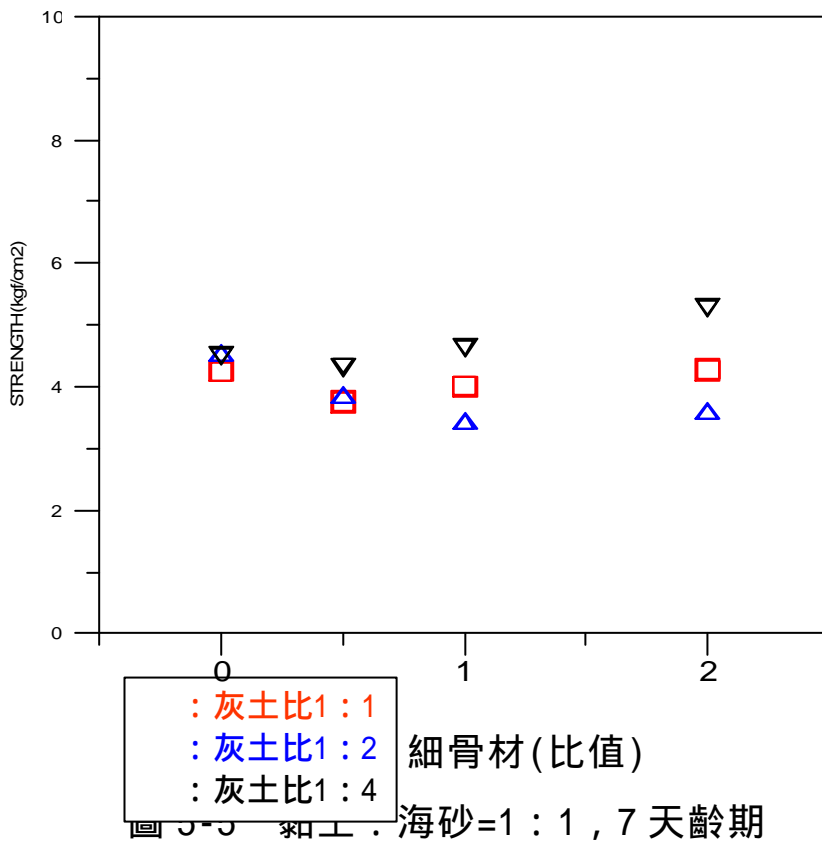


圖 5-5 黏土 : 海砂=1 : 1 , 7 天齡期

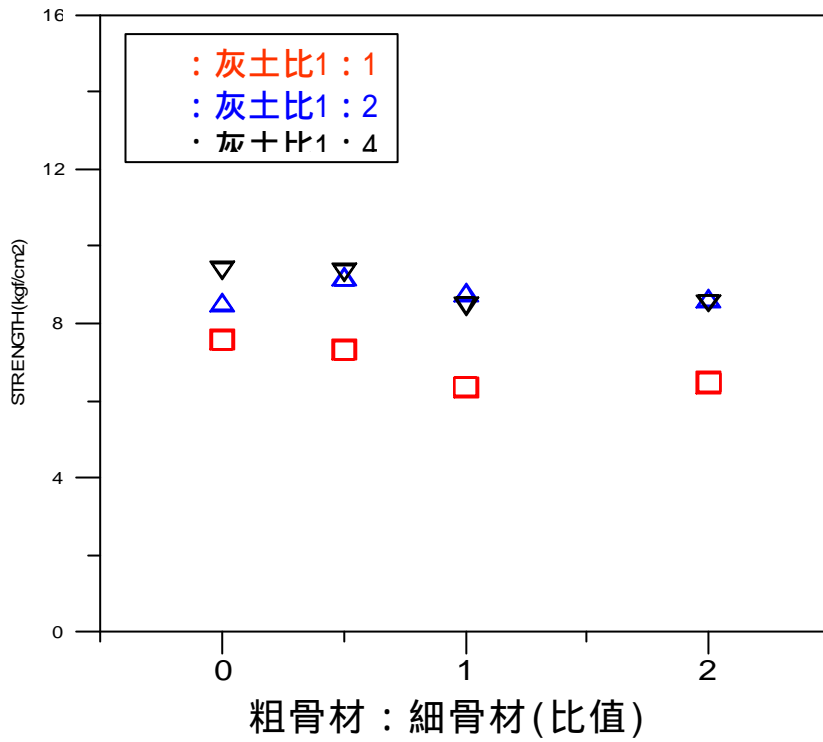


圖 5-6 黏土：海砂=1：0，28 天齡期

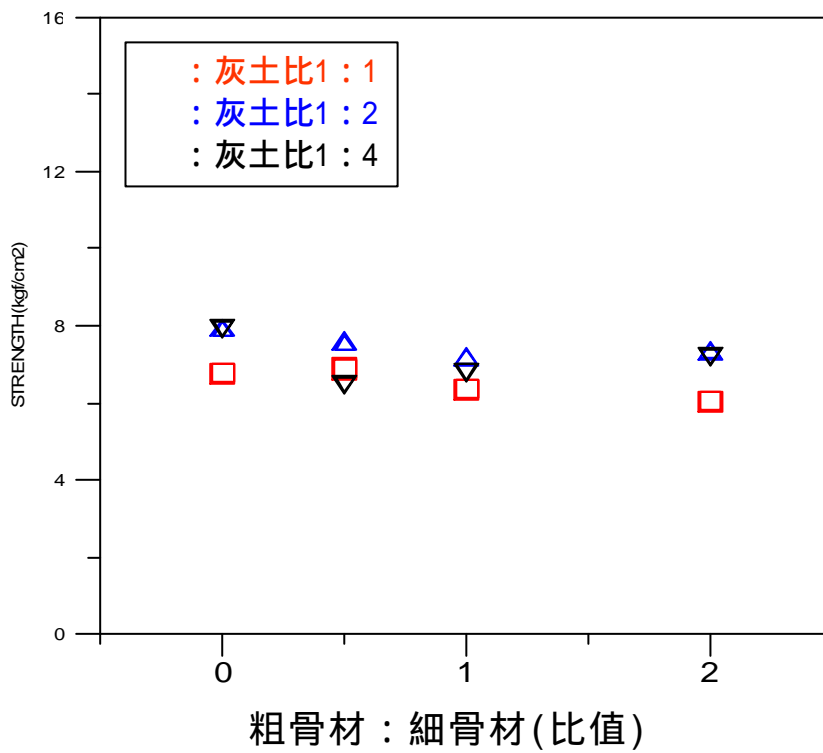


圖 5-7 黏土：海砂=1：1，28 天齡期

5-2-4 無添加物之配比抗壓試驗結果

此配比群乃利用石灰、黏土、海砂及牡蠣殼粉此四種材料，互相改變比例設計而成，其抗壓試驗結果如表 5-7、5-8 及 5-9 與圖 5-8、5-9、5-10 及 5-11 所示。

可得以下結論：

1. 灰土比 1：1 之試體抗壓強度表現不佳，大部分試體之 7 天氣乾強度皆在 4kgf/cm^2 以下，而灰土比 1：2 及 1：4 之試體強度明顯要比灰土比 1：1 者來得高。
2. 添加黏土較多之試體，抗壓強度普遍較高，且有黏土比例愈高，抗壓強度愈高之趨勢。
3. 另外可發現到，在灰土比 1：2 和灰土比 1：4 之配比當中，某幾組蠣殼粉含量較多之試體，其 7 天齡期的抗壓強度表現良好，甚至比添加黏土較多之試體強度還高。可看出牡蠣殼粉加上適當比例的黏土，便可以達到不錯的強度。

表 5-7 無添加物之配比抗壓試驗結果(灰土比 1 : 1)

配比 編號	灰土比	石灰 (%)	黏土 (%)	海砂 (%)	牡蠣殼 粉(%)	7 天平均抗壓 強度(kgf/cm ²)	7 天平均含 水量(%)
Ca1	1:1	50	50	0	0	4.12	24.41
Ca2	1:1	50	0	50	0	3.12	21.63
Ca3	1:1	50	0	0	50	3.95	25.76
Cb1	1:1	50	37.5	12.5	0	4.63	23.87
Cb2	1:1	50	25	25	0	4.13	23.54
Cb3	1:1	50	12.5	37.5	0	3.67	20.25
Cb4	1:1	50	37.5	0	12.5	4.97	16.92
Cb5	1:1	50	25	0	25	4.19	16.83
Cb6	1:1	50	12.5	0	37.5	4.06	24.32
Cb7	1:1	50	0	37.5	12.5	3.52	21.98
Cb8	1:1	50	0	25	25	3.41	22.43
Cb9	1:1	50	0	12.5	37.5	3.46	20.56
Cc1	1:1	50	37.5	6.25	6.25	3.81	22.20
Cc2	1:1	50	25	12.5	12.5	3.84	16.51
Cc3	1:1	50	12.5	18.75	18.75	3.19	15.66
Cc4	1:1	50	6.25	37.5	6.25	3.07	22.60
Cc5	1:1	50	12.5	25	12.5	3.48	22.68
Cc6	1:1	50	18.75	12.5	18.75	3.83	21.62
Cc7	1:1	50	6.25	6.25	37.5	3.94	23.74
Cc8	1:1	50	12.5	12.5	25	3.68	24.56
Cc9	1:1	50	18.75	18.75	12.5	3.71	16.65
Cc10	1:1	50	16.7	16.7	16.7	3.82	17.56

表 5-8 無添加物之配比抗壓試驗結果(灰土比 1 : 2)

配比 編號	灰土比	石灰 (%)	黏土 (%)	海砂 (%)	牡蠣殼 粉(%)	7 天平均抗壓 強度(kgf/cm ²)	7 天平均含 水量(%)
Cd1	1:2	33.3	66.7	0	0	4.63	15.06
Cd2	1:2	33.3	0	66.7	0	3.31	17.20
Cd3	1:2	33.3	0	0	66.7	7.89	13.89
Ce1	1:2	33.3	50	16.7	0	4.44	15.01
Ce2	1:2	33.3	33.3	33.3	0	4.52	16.24
Ce3	1:2	33.3	16.7	50	0	4.26	15.28
Ce4	1:2	33.3	50	0	16.7	4.51	17.98
Ce5	1:2	33.3	33.3	0	33.3	5.30	16.79
Ce6	1:2	33.3	16.7	0	50	6.16	16.37
Ce7	1:2	33.3	0	50	16.7	4.42	14.60
Ce8	1:2	33.3	0	33.3	33.3	4.75	13.87
Ce9	1:2	33.3	0	16.7	50	4.73	15.38
Cf1	1:2	33.3	50	8.33	8.33	4.21	16.45
Cf2	1:2	33.3	33.3	16.7	16.7	3.62	14.68
Cf3	1:2	33.3	16.7	25	25	3.98	14.24
Cf4	1:2	33.3	8.33	50	8.33	3.57	17.02
Cf5	1:2	33.3	16.7	33.3	16.7	3.72	16.53
Cf6	1:2	33.3	25	16.7	25	3.94	13.87
Cf7	1:2	33.3	8.33	8.33	50	4.35	15.21
Cf8	1:2	33.3	16.7	16.7	33.3	3.37	13.87
Cf9	1:2	33.3	25	25	16.7	4.17	13.89
Cf10	1:2	33.3	22.2	22.2	22.2	3.61	14.37

表 5-9 無添加物之配比抗壓試驗結果(灰土比 1 : 4)

配比 編號	灰土比	石灰 (%)	黏土 (%)	海砂 (%)	牡蠣殼 粉(%)	7 天平均抗壓 強度(kgf/cm ²)	7 天平均含 水量(%)
Cg1	1:4	20	80	0	0	4.29	12.23
Cg2	1:4	20	0	80	0	2.21	15.24
Cg3	1:4	20	0	0	80	3.57	11.26
Ch1	1:4	20	60	20	0	5.13	13.04
Ch2	1:4	20	40	40	0	4.36	14.82
Ch3	1:4	20	20	60	0	3.67	14.06
Ch4	1:4	20	60	0	20	4.57	12.85
Ch5	1:4	20	40	0	40	5.22	13.64
Ch6	1:4	20	20	0	60	6.64	13.42
Ch7	1:4	20	0	60	20	3.27	12.76
Ch8	1:4	20	0	40	40	3.64	12.68
Ch9	1:4	20	0	20	60	3.30	11.96
Ci1	1:4	20	60	10	10	4.06	12.58
Ci2	1:4	20	40	20	20	4.24	13.67
Ci3	1:4	20	20	30	30	5.09	13.64
Ci4	1:4	20	10	60	10	4.50	15.79
Ci5	1:4	20	20	40	20	4.86	14.35
Ci6	1:4	20	30	20	30	4.69	14.09
Ci7	1:4	20	10	10	60	5.56	12.45
Ci8	1:4	20	20	20	40	5.33	13.86
Ci9	1:4	20	30	30	20	4.44	13.37
Ci10	1:4	20	26.7	26.7	26.7	4.48	12.73

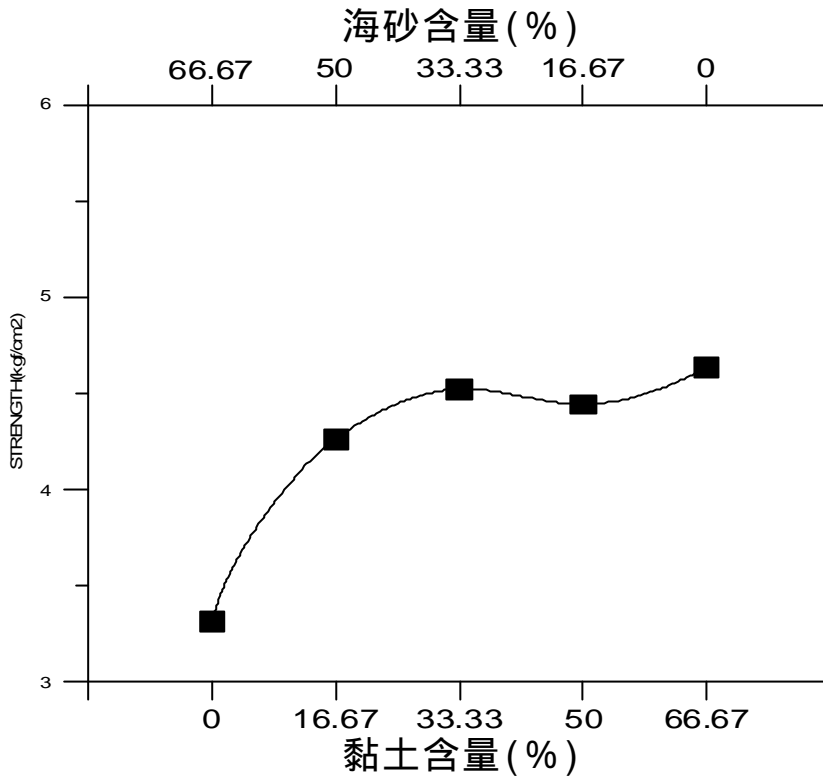


圖 5-8 灰土比 1 : 2 , 牡蠣殼粉含量 0% , 7 天齡期

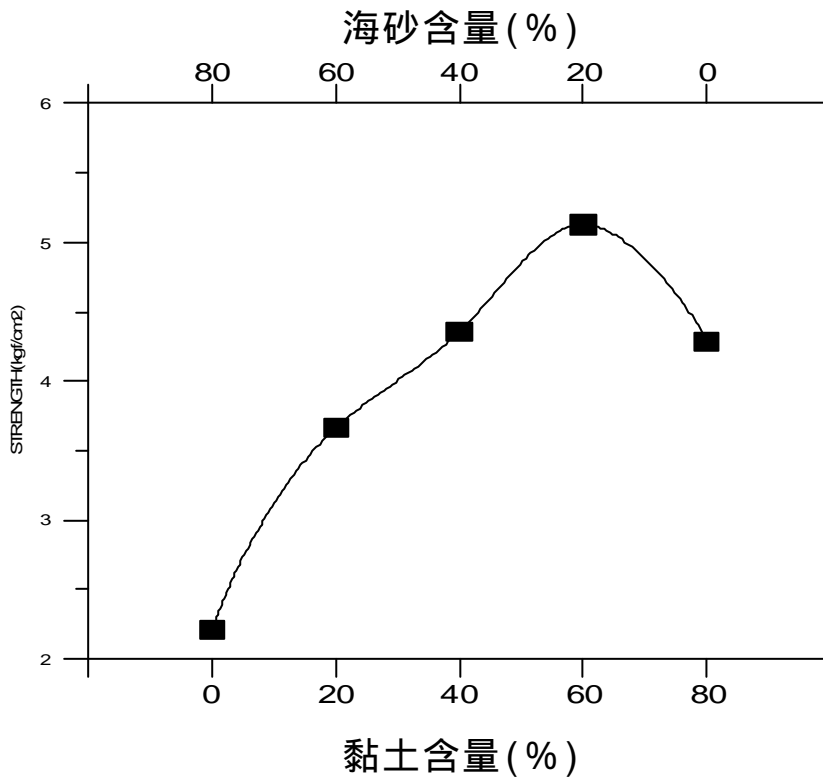


圖 5-9 灰土比 1 : 4 , 牡蠣殼粉含量 0% , 7 天齡期

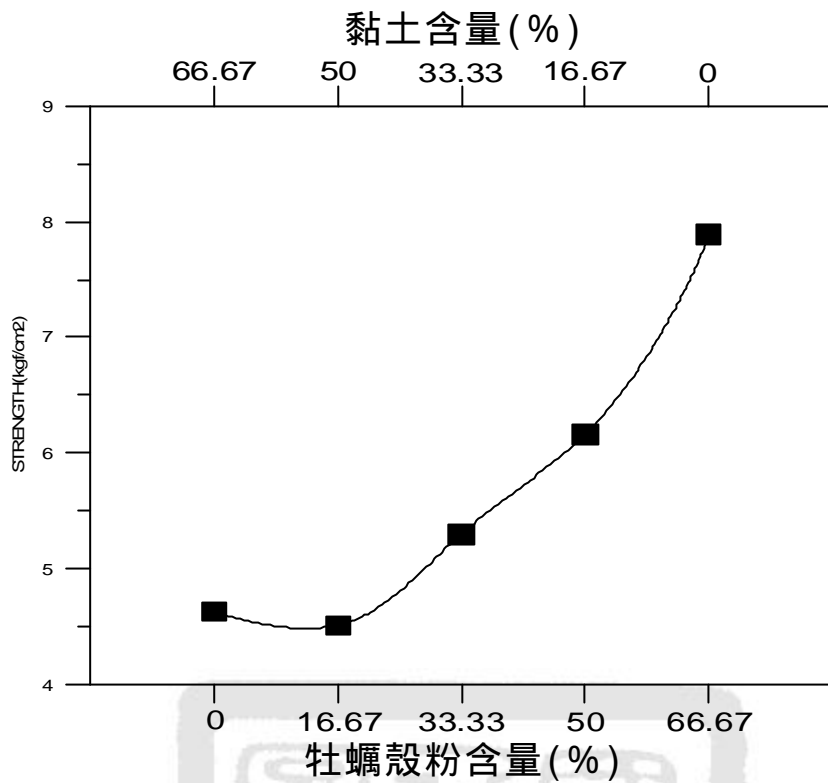


圖 5-10 灰土比 1 : 2 , 海砂含量 0% , 7 天齡期

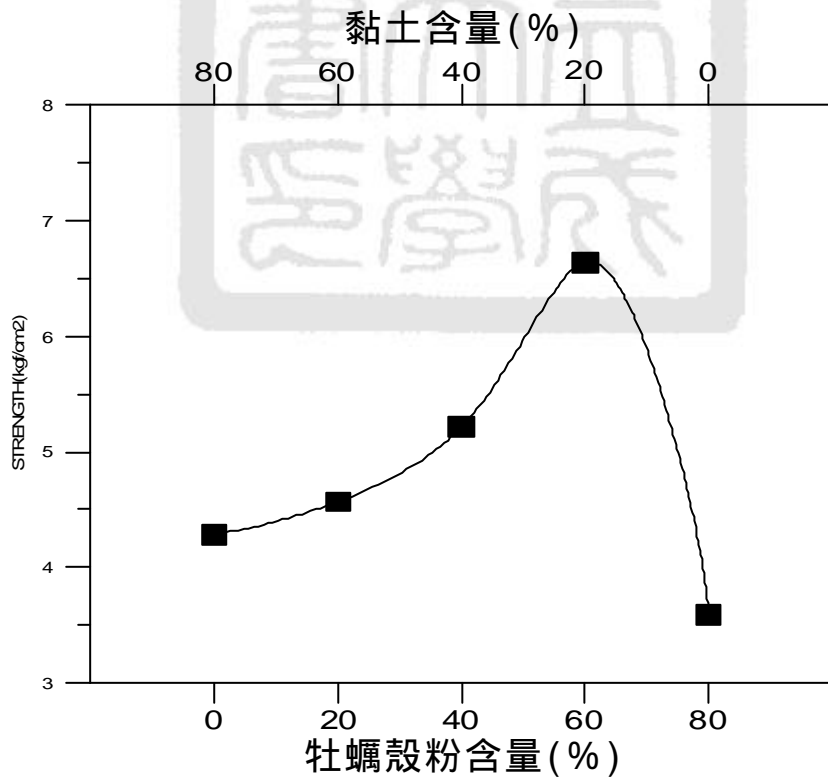


圖 5-11 灰土比 1 : 4 , 海砂含量 0% , 7 天齡期

在此列出 C 系列配比群中，7 天抗壓強度排名前 10 名者，如表 5-10 所示。

可明顯看出此 10 組配比中，其牡蠣殼粉之含量高者甚多，此情形更印證了之前的假設：牡蠣殼粉含量較多之試體，其較短齡期之抗壓強度，可能會因為灌模時之搗實動作而提高。也因此在此 C 系列配比群 7 天抗壓強度排名前 10 當中，牡蠣殼粉含量較多之配比佔了絕大部分。

另外在此前 10 名之配比當中，灰土比 1：1 者只有 1 組，灰土比 1：2 者有 3 組，灰土比 1：4 者則有 6 組之多。由 5-2-2 節之試驗結果，可知灰土比 1：4 之配比強度表現最佳，正可與此相印證。

表 5-10 C 系列配比群中強度排名前 10 之配比

強度排名	配比編號	灰土比	石灰 (%)	黏土 (%)	海砂 (%)	牡蠣殼粉 (%)	7 天平均抗壓強度 (kgf/cm ²)
1	Cd3	1：2	33.3	0	0	66.7	7.89
2	Ch6	1：4	20	20	0	60	6.64
3	Ce6	1：2	33.3	16.7	0	50	6.16
4	Ci7	1：4	20	10	10	60	5.56
5	Ci8	1：4	20	20	20	40	5.33
6	Ce5	1：2	33.3	33.3	0	33.3	5.30
7	Ch5	1：4	20	40	0	40	5.22
8	Ch1	1：4	20	60	20	0	5.13
9	Ci3	1：4	20	20	30	30	5.09
10	Cb4	1：1	50	37.5	0	12.5	4.97

5-2-5 含添加物之配比抗壓試驗結果

本配比群是由 C 系列配比，七天氣乾強度排名前五高者之中，選出 Cd3(土為一種材料)、Ce6(土為兩種材料)及 Ci8(土為三種材料)此三組配比，然後分別添加不同比例之糯米漿、紅糖漿及稻殼灰設計而成。(以 r 代表糯米漿，s 代表紅糖漿，rha 代表稻殼灰)

其抗壓試驗結果如表 5-11、5-12 及 5-13 與圖 5-12、5-13、5-14、5-15、5-16 及 5-17 所示，可得以下之結論：

1. 本研究添加糯米漿之試體，其強度表現相當差，甚至比未添加糯米漿之配比強度還低了許多。而隨著糯米漿添加量由石灰重之 0.8 倍增加至 1.6 倍，試體的抗壓強度也一直隨之降低。另外可發現到，添加糯米漿之試體，隨著齡期由 7 天增加至 28 天，其抗壓強度上升之幅度不是很大。

洪煌凱(2003)「古蹟灰漿之力學與微觀特性研究」之研究中顯示，糯米漿添加量由石灰重之 0.2 倍逐漸增加至 0.8 倍時，其對抗壓強度之提升並無顯著之影響，而本研究糯米漿之添加量由石灰重 0.8 倍增加至 1.6 倍時，更反而降低了抗壓強度。

2. 添加紅糖漿之試體，隨著紅糖漿含量之增加，其 7 天齡期抗壓強度有著先降低再升高之趨勢；而 28 天齡期之試體，則隨著紅糖漿添加量之增加，其抗壓強度亦隨之上升。

要特別注意的是，為何紅糖漿添加量由石灰重之 0.025 倍增加至 0.05 倍時，7 天齡期抗壓強度不是隨之上升而是呈現下滑之趨勢，此情形還有待研究與探討。

3. 添加稻殼灰之試體，隨著稻殼灰添加量由石灰重之 0.2 倍提升至 0.4 倍時，其抗壓強度有隨之上升之趨勢。添加稻殼灰之試體，抗壓強度上升之幅度相當大，可知稻殼灰乃是提升灰漿抗壓強度之一種非常好的材料。

不過尚須探討的一點是，假使將稻殼灰添加量提高至石灰重 0.4 倍以上，其抗壓強度是否會再繼續提升。另外可發現到，添加稻殼灰於 Cd3 配比之中，其 7 天抗壓強度卻反而低於未添加之前，此情形也需要再研究討論。

表 5-11 含添加物之配比抗壓試驗結果 (Cd3)

配比編號	7 天		28 天	
	平均抗壓強度 (kgf/cm ²)	平均含水量 (%)	平均抗壓強度 (kgf/cm ²)	平均含水量 (%)
Cd3(r0.8)	2.67	14.89	4.19	0.97
Cd3(r1.2)	2.41	15.65	2.86	1.11
Cd3(r1.6)	1.83	15.81	2.35	1.46
Cd3(s0.025)	5.69	13.25	8.07	0.92
Cd3(s0.05)	5.35	16.88	8.58	1.16
Cd3(s0.1)	6.56	16.49	11.19	1.57
Cd3(rha0.2)	5.04	15.12	7.75	1.53
Cd3(rha0.3)	5.46	16.07	8.33	1.93
Cd3(rha0.4)	5.76	17.69	9.46	2.06

表 5-12 含添加物之配比抗壓試驗結果 (Ce6)

配比編號	7 天		28 天	
	平均抗壓強度 (kgf/cm ²)	平均含水量 (%)	平均抗壓強度 (kgf/cm ²)	平均含水量 (%)
Ce6(r0.8)	3.76	13.56	4.80	1.41
Ce6(r1.2)	2.68	13.49	3.61	1.64
Ce6(r1.6)	2.85	15.67	3.52	1.88
Ce6(s0.025)	5.11	12.36	8.15	1.24
Ce6(s0.05)	4.94	12.89	8.87	1.36
Ce6(s0.1)	5.97	14.51	10.28	1.72
Ce6(rha0.2)	9.60	15.64	12.66	2.12
Ce6(rha0.3)	9.44	14.84	13.50	2.82
Ce6(rha0.4)	11.95	16.45	15.44	3.04

表 5-13 含添加物之配比抗壓試驗結果(Ci8)

配比編號	7 天		28 天	
	平均抗壓強度 (kgf/cm ²)	平均含水量 (%)	平均抗壓強度 (kgf/cm ²)	平均含水量 (%)
Ci8(r0.8)	4.78	12.48	6.46	1.19
Ci8(r1.2)	4.14	12.54	5.33	1.26
Ci8(r1.6)	3.54	11.38	4.17	1.03
Ci8(s0.025)	7.15	12.69	9.13	0.95
Ci8(s0.05)	6.81	13.87	9.60	1.08
Ci8(s0.1)	8.25	13.67	10.16	1.37
Ci8(rha0.2)	7.44	14.36	8.93	1.35
Ci8(rha0.3)	7.96	13.85	10.66	1.75
Ci8(rha0.4)	8.51	14.62	11.32	1.38

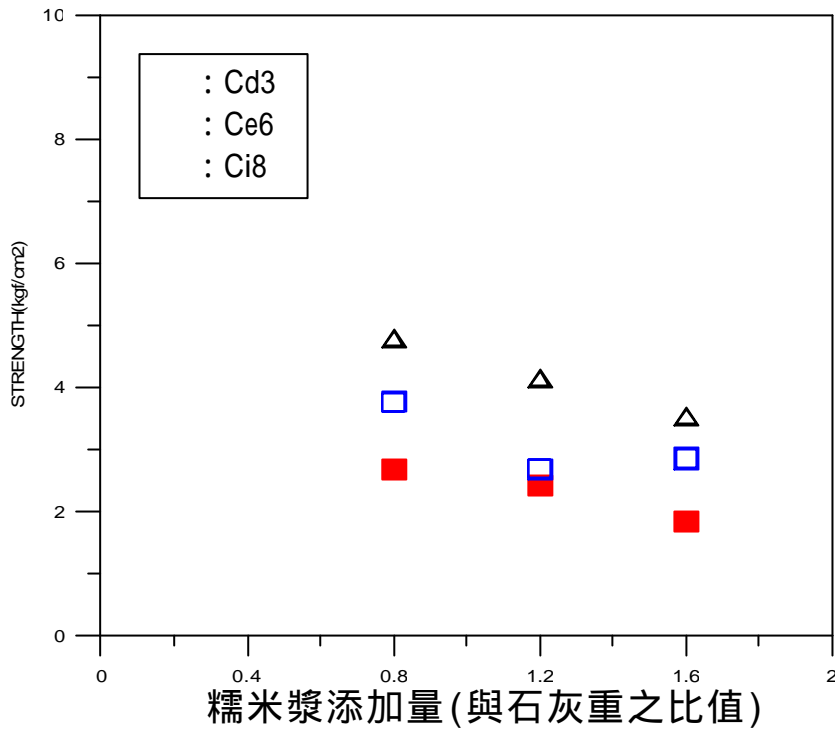


圖 5-12 添加糯米漿試體強度(7 天齡期)

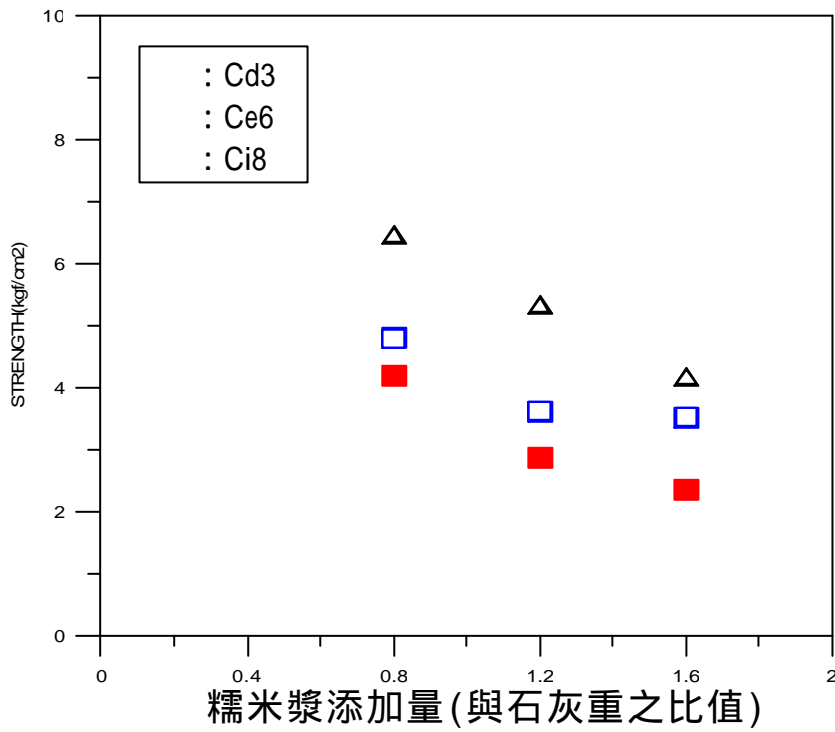


圖 5-13 添加糯米漿試體強度(28 天齡期)

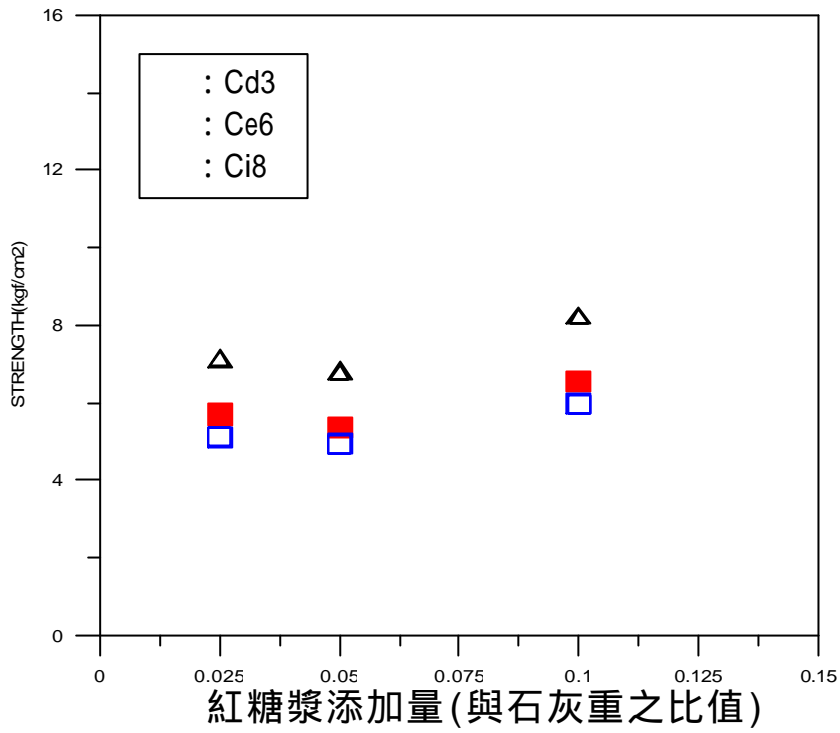


圖 5-14 添加紅糖漿試體強度(7 天齡期)

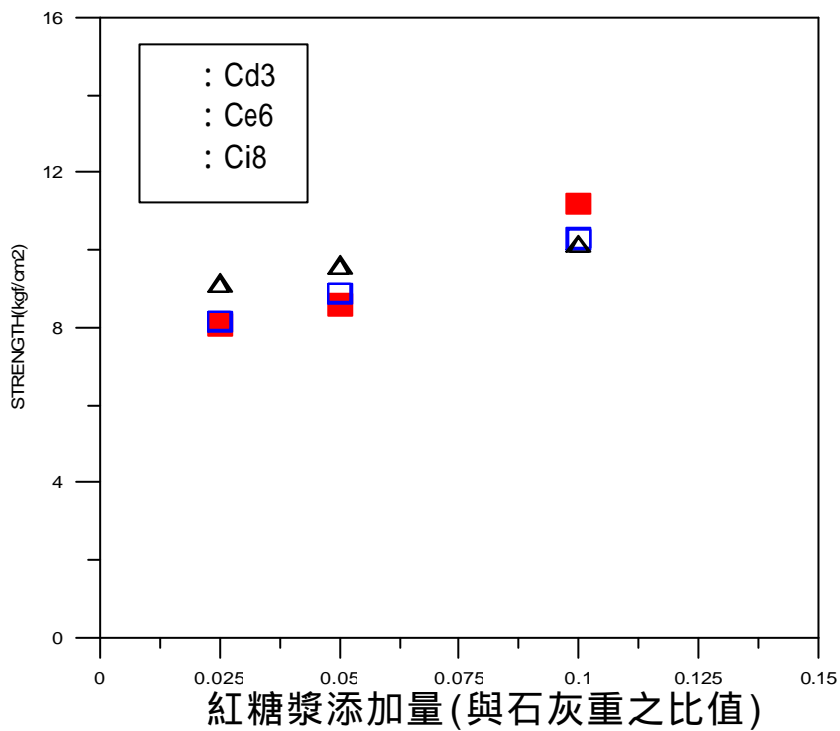


圖 5-15 添加紅糖漿試體強度(28 天齡期)

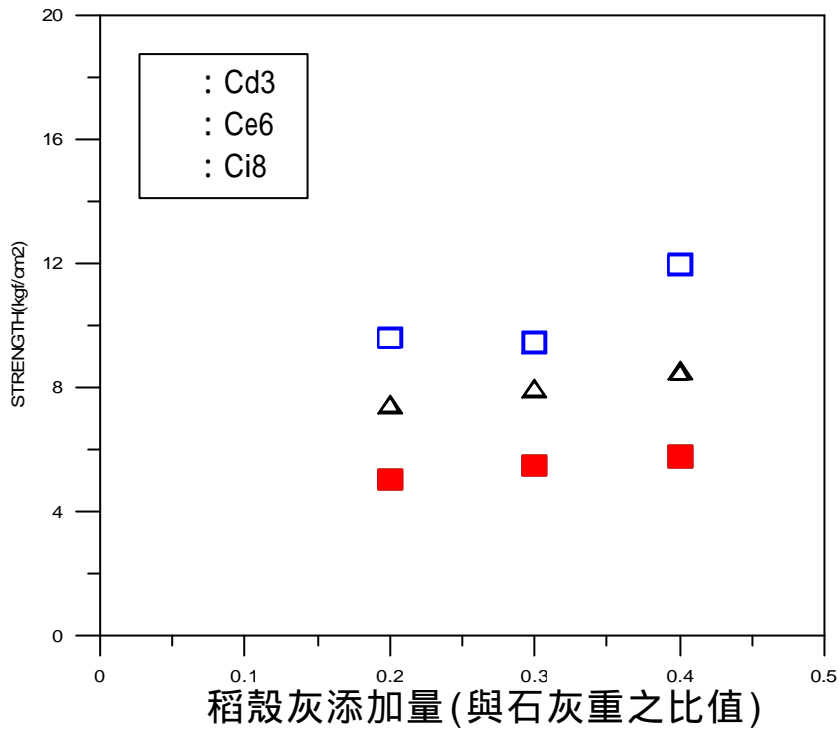


圖 5-16 添加稻殼灰試體強度(7 天齡期)

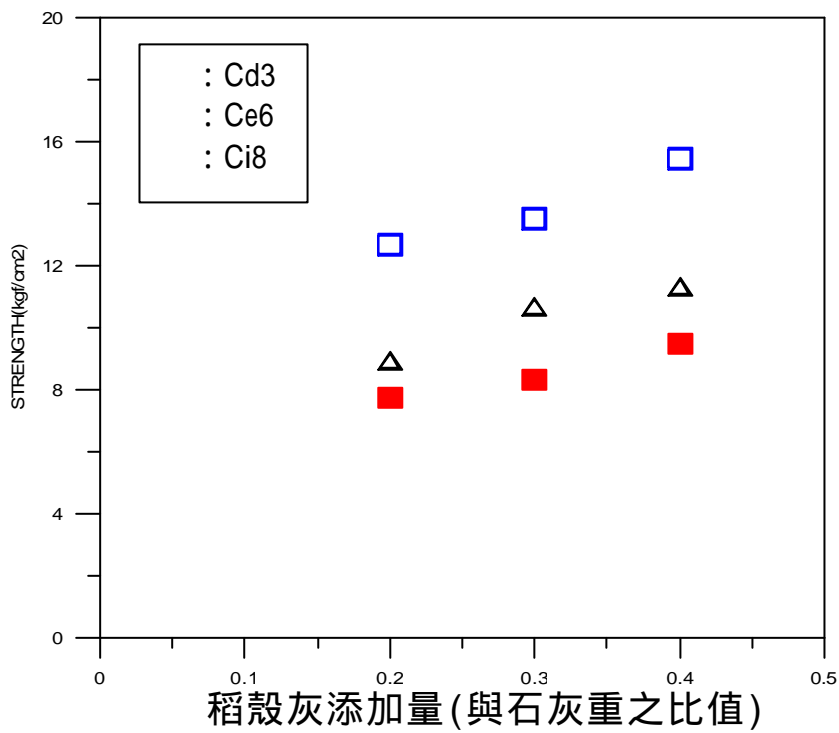


圖 5-17 添加稻殼灰試體強度(28 天齡期)

第六章 結論與建議

6-1 結論

1. 對於同一灰土比的各種配比，假使使用相同的水量來製作灰漿，會造成某些配比灰漿的工作度，與灌製試體的適宜工作度相距過大，而且可能會造成試體強度發展的差異，為了避免此種情況發生，本研究訂定了各種材料的適宜用水量如下所示：
(1)水/石灰 = 0.75 (2)水/黏土 = 0.30 (3)水/海砂 = 0.05
(4)水/牡蠣殼粉 = 0.15 (5)糯米漿：用水量回扣 0.3 倍糯米漿重
(6)紅糖漿：不須回扣用水量 (7)水/稻殼灰 = 1
2. 利用細骨材吸水量試驗之圓錐模，搭配混凝土坍度試驗法來施作試驗，坍塌度大於 1cm 以上為太過濕潤之灰漿，不適合本研究灌模製作試體之用；以液性限度儀搭配液性限度試驗法，敲擊次數 20~25 下之間灰漿閉合 1.3cm，為適宜本研究灌模工作度之灰漿。
3. 不同灰土比之石灰海砂灰漿，由灰土比 4:1 開始，隨著灰土比之減少，其 7 天抗壓強度逐漸增加，直至灰土比 1:4 為最高，過了灰土比 1:4 之後，7 天抗壓強度便逐漸降低。
4. 灰漿中粗細骨材之比例與其 7 天及 28 天抗壓強度並無一定之關係。不過可發現到，黏土：海砂=1:0 之配比，其 7 天及 28 天抗壓強度普遍較 1:1 者高；且黏土：海砂=1:0 之配比，隨著灰土比之降低，其 7 天及 28 天抗壓強度會隨之上升。

5. 添加黏土較多之試體，其 7 天氣乾抗壓強度普遍較高，且有黏土比例愈高，強度愈高之趨勢。而在灰土比 1：2 和灰土比 1：4 時，可發現多組牡蠣殼粉含量較多之試體，其 7 天齡期的抗壓強度表現良好，甚至比添加黏土較多之試體強度還高。
6. 隨著糯米漿添加量由石灰重之 0.8 倍增加至 1.6 倍，試體的 7 天及 28 天抗壓強度也一直隨之降低。
7. 隨著紅糖漿含量由石灰重之 0.025 倍增加至 0.1 倍，其 7 天齡期抗壓強度有著先降低再升高之趨勢；而 28 天齡期之試體，則隨著紅糖漿添加量之增加，其抗壓強度亦隨之上升。
8. 隨著稻殼灰添加量由石灰重之 0.2 倍提升至 0.4 倍時，其 7 天及 28 天抗壓強度有隨之上升之趨勢，且上升之幅度相當大，可知稻殼灰乃是提升灰漿抗壓強度之一種非常好的材料。

6-2 建議

1. 本研究訂定之各材料用水量，未必皆適用於各地區之材料，如遇到調配出的灰漿工作度不理想時，建議可自行微調，以供使用。
2. 紅糖漿添加量由石灰重之 0.025 倍增加至 0.05 倍時，7 天齡期抗壓強度不是隨之上升而是呈現下滑之趨勢，此情形還有待研究與探討。
3. 本研究所採用之稻殼灰添加量，最高到石灰重之 0.4 倍，建議可將添加量繼續往上提升，觀察試體之抗壓強度是否也會隨之繼續提升，以及稻殼灰添加量太多，是否對灰漿會有不良影響。
4. 由於各地之黏土性質與成分皆不太相同，建議可使用兩種以上不同之黏土來施作試驗，比較不同性質之黏土對強度之影響。

參考文獻

1. <http://www.cca.gov.tw/law/html/4-1.html> , 文建會。
2. http://www.moi.gov.tw/div1/maintain/maintain_f4.asp , 內政部民政司。
3. 「CNS 混凝土相關國家標準」, 經濟部中央標準局, 台北, 1993。
4. 王正雄, 「材料試驗」, 大中國圖書公司, 台北, 2002。
5. 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。
6. 杜仙洲, 「中國古建築修繕技術」, 丹青圖書有限公司, 台北, 1984。
7. 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。
8. 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, 2003。
9. 孫全文, 「台閩地區第一級古蹟赤崁樓修復工程工作過程記錄暨施工報告書」, 1995。
10. 張海清, 「古建築灰漿」, 古建園林技術, 第二期, p13, 北京, 1984。
11. 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。
12. 曹本介, 「中低強度稻殼灰飛灰高性能混凝土之工程性質研究」, 碩士論文, 國立交通大學土木工程研究所, 1997。
13. 傅朝卿, 「台南市古蹟與歷史建築總覽」, 台灣建築與文化資產出版社, 台南, 2001。
14. 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。
15. 博遠, 「中國古代建築技術史」, 第二冊, p459-467, 台北。
16. 曾國恩建築師事務所, 「第一級古蹟台灣城殘蹟修護工程工作報告書」, 1999。

17. 黃兆龍，「混凝土材料品質控制試驗」，詹氏書局，台北，1992。
18. 黃兆龍，「混凝土性質與行為」，詹氏書局，台北，1997。
19. 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。
20. 趙崇欽，「北縣尾荷蘭海堡遺址挖掘記」，台灣文獻，第五十二卷，第一期，1991。
21. 劉大可，「古建築抹灰」，古建園林技術，第二期，p7，北京，1988。
22. 劉大可，「明、清官式灰背作法」，古建園林技術，第二期，p18，北京，1985。
23. 劉致平，「中國建築類型及結構」，尚林出版社，台北，1984。
24. 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。
25. 薛孝彬，「添加稻殼灰飛灰高性能混凝土拌合效能之研究」，碩士論文，國立交通大學土木工程研究所，1997。
26. 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。
27. Chiari, G., Torraca, G., and Santarelli, M. L., "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, 1996, pp. 275-284.
28. Doebley, C. E. and Spitzer, D. S., "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, 1996, pp. 285-293.