

國立成功大學
土木工程研究所
碩士論文

傳統灰漿材料之特性與配比最佳化之探討



研究生：李泓銘

指導教授：李德河 博士

中華民國九十四年六月

國立成功大學
碩士論文

傳統灰漿材料之特性及配比最佳化之探討

研究生：李泓銘

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 蔡光榮 林炳

葉永鈞 田永銘 許中

指導教授：李德河
系主任：吳致平

中華民國九十四年六月十七日

摘要

灰漿為傳統建築中重要的構材，然而以往各研究使用之配比與養護方式不同，使結果的討論複雜化，甚至對同一材料之添加給予兩極之結論，本研究嘗試將配比簡化，並以中性化試驗機加速碳化，期能了解各材料在灰漿中對工作性、抗壓強度、吸水率、自修復性、耐久性及微氣候調節能力之貢獻，並提出較佳之配比。另嘗試以熱重分析、EDS 及光學顯微鏡分析推估灰土比，以作為古蹟修復時採樣分析之參考。

本研究之試驗項目包括材料之基本性質試驗，以及灰漿之流度、抗壓強度、吸水率、自修復性、浸泡硫酸鈉溶液耐久試驗、熱傳性質試驗、熱重分析、SEM&EDS 分析、光學顯微鏡分析等試驗，研究成果如下：

1. 添加糖漿有減水、緩凝的效果，製成之灰漿結構緊密、吸水率低、健康度佳，強度明顯較純石灰漿高。
2. 添加黏土配比在灰土比 2:1 時晚期抗壓強度明顯高於純石灰試體，在電子顯微鏡下呈現連續性的結構，且吸水率降低，但乾縮量增加。
3. 添加砂有助於提昇早期強度、減低乾縮量，但對晚期強度並無明顯提昇之效果。
4. 添加蚵殼除減低乾縮量外，亦有避免脆性破壞之效果，但當膠結材強度較高時，因蚵殼強度較低，將造成整體強度的降低。
5. 建議配比(重量比)

石灰：黏土：砂：糖漿：糯漿：水

1：0.5：2：0.08: 0.2：0.3

誌 謝

本論文得以完成，最要感謝是指導教授 李德河博士，為學生提供良好的學習環境，以及研究期間不厭其煩的關注與指導，在此致上衷心的敬意與感謝。

在論文口試期間承蒙屏東科技大學 蔡光榮博士、中央大學 田永銘博士、交通大學 廖志中博士、高雄應用科技大學 許琦博士及中央大學 董家鈞博士的細心審閱及指正，並提供寶貴的意見與精闢的見解，使得本文更臻完善，對此謹表最誠摯的謝意。

研究期間要感謝成功大學 方一匡老師、陳鍵老師提供精良的試驗設備，才使試驗得以順利完成。

另外要感謝博士班王金鐘老師、百祥學長、朝景學長、舜孔學長、正傑學長及雅芬學姊兩年來的照顧與解惑；前屆學長煌凱提供豐富的資料與熱心的協助；碩班學長志豪、國彰、子昭、俊良及君仰在實驗操作上提供寶貴的經驗傳承；同窗好友俊賢、仁彰、楷淳、信洲的砥礪與扶持；岩力試驗室助理璧玲學姊、王姊日常生活瑣事的協助；岩力試驗室諸多學長、學弟的努力與付出，都是本研究得以完成的重要因素。

最後，感謝父親、母親、姐姐對我長久以來的鼓勵與關心，我才能順利完成論文取得學位，你們的支持是我最大的動力。在此，僅以本文獻給我的家人、朋友、師長以及所有幫助過我的人，願你們永遠平安、喜樂。

李泓銘 謹識

2005 夏

于岩力試驗室

目 錄

摘要	I
誌謝	II
目錄	III
表目錄	VI
圖目錄	VII
第一章 緒論.....	1
第二章 文獻回顧.....	3
2-1 傳統灰漿種類與配比.....	3
2-2 傳統灰漿材料之作用.....	15
2-3 工序對強度及工作性之影響.....	25
2-4 傳統灰漿之力學性質.....	26
第三章 試驗內容與方法.....	30
3-1 試驗材料及其製備.....	30
3-2 試體製作配比及養護方法.....	32
3-2-1 配比設計.....	32
3-2-2 添加膠體之水量設定.....	33
3-2-3 骨材水量設定.....	34
3-2-4 黏土水量設定.....	35
3-2-5 石灰添加黏土配比之水量設定.....	36
3-2-6 養護方法.....	37
3-3 試驗項目、儀器與步驟.....	38
3-3-1 材料基本物性試驗.....	38
3-3-2 抗壓試驗.....	38

3-3-3 碳化試驗·····	39
3-3-4 吸水率試驗·····	39
3-3-5 自修復試驗·····	40
3-3-6 浸泡硫酸鈉溶液耐久試驗·····	41
3-3-7 掃描式電子顯微鏡〔SEM〕與 能量分散光譜儀〔EDS〕分析·····	41
3-3-8 熱重分析儀(TGA)·····	43
3-3-9 表面升溫性質試驗·····	45
3-3-10 實體顯微鏡分析·····	46
第四章 試驗結果與分析·····	47
4-1 材料基本性質試驗結果·····	47
4-1-1 黏土物性試驗·····	47
4-1-2 骨材基本性質·····	48
4-1-3 工作度試驗結果·····	49
4-2 抗壓試驗結果·····	51
4-3 物理性質試驗結果·····	54
4-3-1 碳化速度比較·····	55
4-3-2 吸水率試驗·····	57
4-3-3 自修復性試驗·····	59
4-3-4 浸泡硫酸鈉溶液耐久試驗結果·····	60
4-3-5 表面升溫性質試驗結果·····	62
4-3-6 其他物理性質·····	62
4-4 成分與微觀結構分析·····	70
4-4-1 熱重分析與 SEM&EDS 分析結果·····	70
4-4-2 實體顯微鏡分析結果·····	74
第五章 傳統灰漿材料之作用及配比最佳化之探討·····	79

5-1 傳統灰漿材料之作用.....	79
5-2 傳統灰漿配比最佳化之探討.....	80
5-2-1 骨材與膠體量之計算方法.....	80
5-2-2 第二階段配比計畫.....	84
5-2-3 第二階段配比試驗結果與討論.....	86
第六章 結論與建議.....	89
6-1 結論.....	89
6-2 建議.....	90
參考文獻	91
附錄	95

表目錄

表 2-1	古建灰漿材料配合比與製作方法表(洪煌凱, 2003).....	5
表 2-2	台灣傳統砌體建築灰漿配比表(王新衡, 2003)	11
表 2-3	三合土用途類別及較適當配比表(張清忠, 2002)	12
表 2-4	灰漿材料功能分類表.....	15
表 2-5	高分子複合材料性質比較表(余秉宥, 2004)	22
表 2-6	各研究者對糯漿功能之看法.....	22
表 2-7	捶鍊對工作度與強度之影響.....	25
表 2-8	不同學者之研究成果.....	28
表 3-1-a	配比設計 a.....	32
表 3-1-b	配比設計 b.....	32
表 3-2	石灰添加膠體之配比流度 75 時的水灰比.....	34
表 3-3	黏土添加膠體之配比流度 35 時的含水量.....	35
表 3-4	石灰添加黏土之配比流度 75 時的含水量.....	36
表 3-5	熱影像儀器性能.....	45
表 3-6	實體顯微鏡儀器性能.....	46
表 4-1	各黏土之物性與抗壓強度.....	48
表 4-2	骨材基本性質.....	48
表 4-3	熱重分析結果數值.....	71
表 4-4	EDS 分析之各配比元素重量百分比.....	72
表 4-5	熱重分析與 EDS 分析推估之灰土比.....	72
表 4-6	實際膠結材體積與影像分析計測結果.....	72
表 5-1	灰漿材料性質與功能.....	79
表 5-2	膠結材單位重 $1.2\text{gf}/\text{cm}^3$ 時, 膠體、砂及蚵殼之比值.....	83
表 5-3	第二階段配比計畫.....	85

圖目錄

圖 1-1	研究流程圖	2
圖 2-1	磚材的界面剪力強度試驗(陳淮之, 2004)	27
圖 2-2	磚材的界面剪力強度試驗	27
圖 2-3	ASTM 建議之黏結拉拔強度檢測方式	27
圖 2-4	灰漿之破壞形式 (陳淮之, 2004)	28
圖 2-5	灰漿與混凝土之應力應變曲線(陳淮之, 2004)	29
圖 3-1	蚶殼	30
圖 3-2	石灰添加膠體之流度與水灰比關係	33
圖 3-3	石灰加砂拌和後之流度	34
圖 3-4	黏土及黏土添加膠體之流度與含水量關係	35
圖 3-5	石灰加黏土之流度與水灰比關係	36
圖 3-6	石灰加黏土配比與流度關係	37
圖 3-7	中性化試驗機	39
圖 3-8	自修復試驗流程圖	40
圖 3-9	掃描式電子顯微鏡〔附設能量分散光譜儀〕	42
圖 3-10	熱重分析儀(TGA)	44
圖 3-11	熱重分析曲線	44
圖 3-12	熱影像儀	45
圖 3-13	實體顯微鏡	46
圖 4-1	黏土粒徑分佈	47
圖 4-2	骨材粒徑分佈	49
圖 4-3	石灰加黏土配比之流度與總含水量之關係	50
圖 4-4	石灰加黏土配比在流度 75 之需水量	51
圖 4-5	氣乾養護之抗壓強度	52
圖 4-6	二氧化碳養護之抗壓強度	53
圖 4-7	純石灰、灰砂比 1:1 與添加蚶殼配比之應力應變曲線	53

圖 4-8	碳化試驗各齡期照片	56
圖 4-9	浸水兩分鐘之含水量	57
圖 4-10	浸水 24 小時之含水量	58
圖 4-11	浸水 24 小時含水量與浸水 2 分鐘含水水量之差值	58
圖 4-12	自修復試驗試體超音波波速	59
圖 4-13	各配比浸泡硫酸鈉溶液五循環之損耗率	60
圖 4-14	各配比於浸泡硫酸鈉溶液五循環後之照片	61
圖 4-15	純石灰、石灰添加糖漿、水泥及磚之溫度變化曲線	63
圖 4-16	純石灰及添加糯漿配比之溫度變化曲線	63
圖 4-17	純石灰及添加黏土配比之溫度變化曲線	64
圖 4-18	純石灰及添加骨材配比之溫度變化曲線	64
圖 4-19	表面升溫性質試驗結果	65
圖 4-20	氣乾養護各齡期之含水量	66
圖 4-21	二氧化碳養護各齡期之含水量	67
圖 4-22	氣乾養護各齡期之乾縮比	68
圖 4-23	二氧化碳養護各齡期之乾縮比	68
圖 4-24	氣乾養護各齡期之乾土單位重	69
圖 4-25	二氧化碳養護各齡期之乾土單位重	69
圖 4-26	熱重分析結果曲線	71
圖 4-27	各配比之 SEM 影像	73
圖 4-28	L_1S_3 配比中的砂顆粒 SEM 影像(2000 倍)	74
圖 4-29	添加糖漿試體之 SEM 影像(2000 倍)	74
圖 4-30	實際膠結材體積與計測之膠結材面積關係圖	75
圖 4-31	顯微影像分析結果	76
圖 4-32	經酸洗後之顯微影像分析結果	77
圖 4-33	純石灰與添加糖漿試體之顯微影像	78
圖 5-1	砂蚶比與孔隙比之關係	81

圖 5-2	膠體與骨材重量配比流程圖·····	82
圖 5-3	膠結材重量 1kg 時所需之蚶殼與砂重·····	83
圖 5-4	不同砂蚶比時每立方米所需之膠結材重量·····	83
圖 5-5	第二階段配比二氧化碳養護 56 天後抗壓試驗結果·····	87
圖 5-6	$L_2 C_1 M_{0.16}$ 與 $L_2 O_{1.55} C_1 M_{0.16}$ 配比之應力、應變曲線·····	87
圖 5-7	第二階段配比二氧化碳養護 56 天後之乾縮比·····	88

第一章 緒論

1-1 研究動機與目的

近年來古蹟的保存與經營漸受重視，而我國之古蹟較易發生損壞的部分主要在灰作、木作及彩繪方面，至於磚瓦的部分在堪用的情況下則重複使用，舊材不堪使用時則多用新材，且磚瓦使用新材在強度要求上以現代技術皆可達到，但灰漿乃用以黏結磚瓦、固定木樑或作為隔間材，攸關整體結構之安全。在老匠師凋零又缺詳細的文獻記載下，灰漿之配比與工法流於口述，修復時工程品質難以控制。為保存及修復傳統砌體建築結構，實應探究各灰漿材料之作用並建立修復或興建時之配比設計準則之準則。

然而以往各研究使用之配比與養護方式不同，使結果的討論複雜化，甚至對同一材料之添加給予兩極之結論，因此本研究嘗試將配比簡化，期能了解各材料在灰漿中對工作性、抗壓強度、吸水率、自修復性、耐久性及微氣候調節能力之貢獻，並以之預測在多種材料混合時之整體行為。

1-2 研究流程

本研究由文獻回顧開始，期能瞭解有關灰漿材料功用及前人研究灰漿的方法與成果。其次，為瞭解各材料於灰漿中之功用以及其工程行為，本研究採兩種常用來製作灰漿的材料之混合配比製作試體。試體的養護分為氣乾養置與使用中性化試驗機加速碳化養護，並於各齡期施做抗壓強度試驗，再取已碳化試體施做吸水率試驗、自修復性試驗、硫酸鈉耐久試驗、表面升溫性質試驗等物理性質試驗，以及熱重分析、SEM&EDS分析、光學顯微鏡分析等成分與微觀性質試驗，並進行試驗結果的分析與討論。本研究根據試驗結果，探討傳統灰漿材料之作用，並提出傳統灰漿之最佳配比設計供古蹟修復之參考，最後提出結論與建議。

本研究之研究流程如圖 1-1 所示：

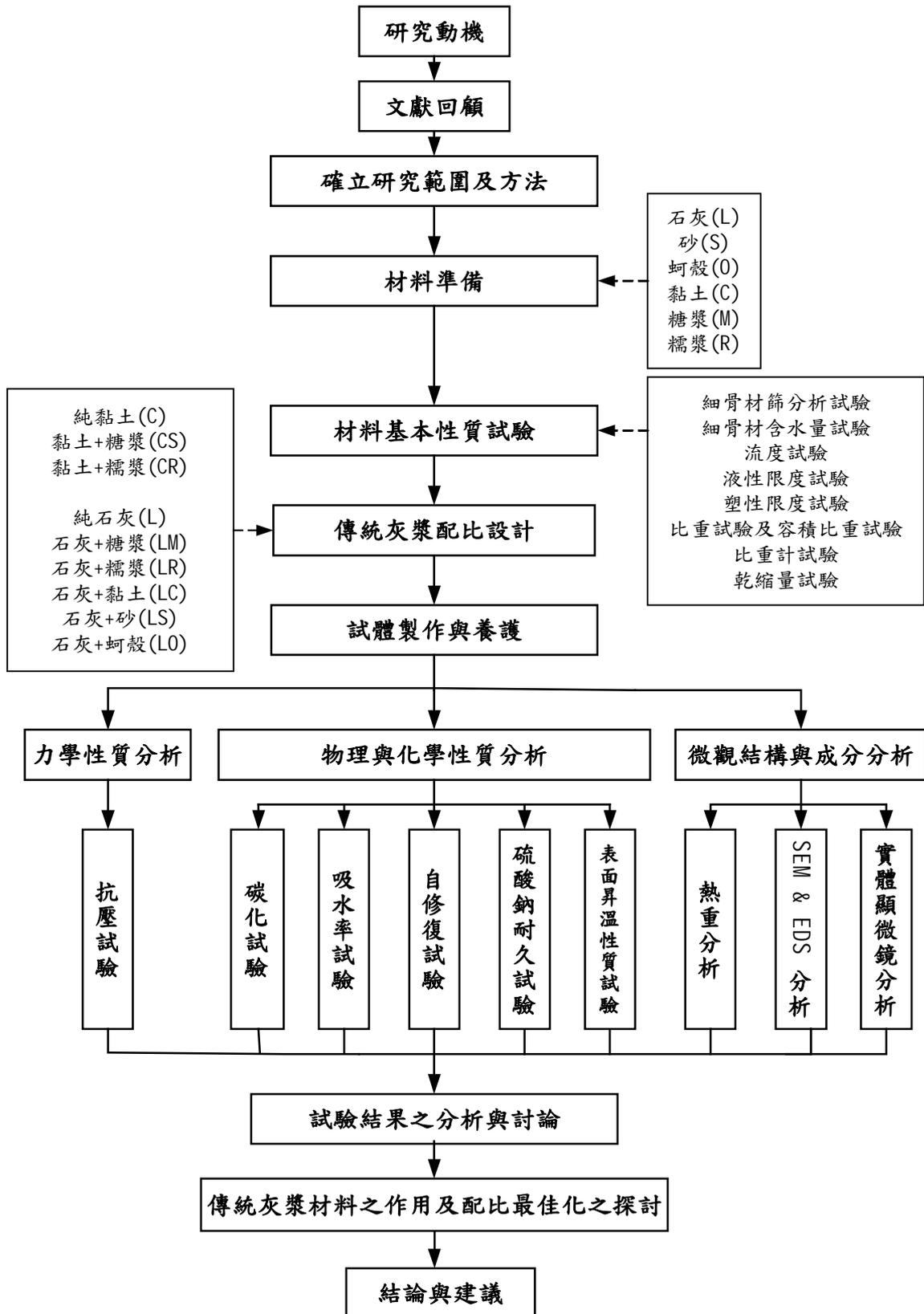


圖 1-1 研究流程圖

第二章 文獻回顧

2-1 傳統灰漿種類與配比

傳統建築中大量使用灰漿作為黏結材、承重材及隔間材，如用於磚或瓦之間的黏結，以抵抗垂直載重及提供抗拉、抗剪之強度。或作為斗子砌中的填土及製造土角磚，以提供承重、隔間、防水之需求。亦可用於竹篾土牆，提供隔間及控制溫度與溼度，穩定居住環境之微氣候。依使用目的、地區材料取得之便利性、匠師習慣的不同，材料之配比亦不同。

不論亞洲或歐洲地區皆有使用石灰及黏土作為建築用的膠結材料。台灣傳統灰漿之成分主要有石灰、牡蠣殼、砂、黏土、糯米漿、糖漿、麻絨、稻梗、穀殼…等。近代因傳統匠師凋零，年輕的泥水匠又習於卜特蘭水泥的使用，或不瞭解、不信任傳統灰漿之性質，而在修復古蹟時大量的使用水泥，然而 ICOMOS 英國負責人 B.M. Feilden[3]曾列舉八點理由不宜採用水泥維修古建築，其原因如下：

1. 水泥是不可逆的材料，一旦用上去之後再想除去將會損及古建築的原有材料。
2. 水泥強度大，附著力過強，與古建築的弱性材料無法匹配。
3. 水泥強度大，缺乏彈性及塑性，使用於古建築後，造成應力集中現象，導致相鄰的古蹟灰漿更易損壞。
4. 水泥透水性差，阻礙古建築牆體水分蒸發，使原有牆體容易因潮濕而受損。
5. 在凝固過程中，水泥會收縮，產生裂隙，使水分更易滲入牆體。
6. 水泥成分中的鹽類會因水解析出，破壞多孔性材料與有價值的裝飾。
7. 水泥導熱性高，當用來灌注牆縫時，它會形成冷橋。
8. 水泥灰冷色澤難與傳統材料並列。

此外，關於灰漿的配比、製作及其用途，洪煌凱在其碩士論文「古蹟灰漿之力學與微觀特性研究」中整理張海清[35]、劉大可[36]、程萬里[37]、杜仙洲[4]四人所提出之各種灰漿配比與用途，如表 2-1 所示。王新衡[24]在「台灣傳統砌體建築灰縫材料特性之研究」中，經由匠師訪談的過程，整理出五種傳統灰漿之配比，如表 2-2 所示。張清忠[19]在「三合土配比及材料行為之研究」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，建議較適當配比如表 2-3。

表 2-1 古蹟灰漿材料配合比與製作方法表（洪煌凱，2003）

名稱	主要用途	配合比及製作要點	說明	文獻出處
潑灰	製作灰漿的原材料	生石灰用水反覆均勻地潑灑成為粉狀後過篩	15 天後才能使用，半年後不宜用於抹灰	劉大可[36]
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[36]
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[36]
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[36]
		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[35]
夾隴灰	屋面工程中筒瓦〔附 3〕的夾蟹及合瓦的夾腮〔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[37]
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[37]
素灰		為各種不摻麻刀的煮漿灰〔灰膏〕或潑灰		杜仙洲[37]

接下頁

續上頁

名稱	主要用途	配合比及製作要點	說明	文獻出處
色灰		各種灰加顏色而成。常用的顏色有青漿、煙子〔附5〕、紅土粉、霞土粉等		杜仙洲[37]
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〕，以灰鎬攪動可得到青漿，漿成黑色。需過篩清理石塊。	青灰是北京西郊山區一種礦物膠結材料，呈黑色塊狀，浸水攪拌後能出黏膩的膠液，與石灰拌合可使灰漿具有一定的防水性能並增加強度	張海清[35]
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[37]
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[36]
		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[35]
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[36]
	抹灰工程的打底	潑灰用大眼篩子篩過		杜仙洲[37]
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[36]

續上頁

名稱	主要用途	配合比及製作要點	說明	文獻出處
紙筋灰	室內抹灰的面層	草紙用水悶成紙漿，放入灰膏中攪勻。 灰：紙筋=100：6-5〔重量比〕		劉大可[36]
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[36]
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[36]
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[36]
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[36]
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[35]
		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[37]
油灰	細墁〔附6〕地面，磚棧掛灰，石活〔附7〕勾縫，防水捻縫	細白灰粉、面粉、煙子〔用膠水〔附8〕攪成膏狀〕加桐油攪勻；白灰：面粉：煙子：桐油=1：2：0.5-1：2-3。灰內可兌入少量白礬〔附9〕水。	可用青灰面代替煙子，用量可根據顏色定	程萬里[4]
		面粉加細白灰粉〔過絹羅〔附10〕〕加煙子〔用熔化的膠水攪成膏狀〕加桐油〔1：4：0.5：6重量比〕攪拌均勻而成。		杜仙洲[37]

接下頁

續上頁

名稱	主要用途	配合比及製作要點	說明	文獻出處
麻刀油灰	黏結石頭	用生桐油潑生灰塊，過篩後加麻刀〔100：5 重量比〕加適量面粉加水用重物反復錘砸而成。		杜仙洲[37]
磚面灰〔磚藥〕	磚活打點	用磚面與白灰膏按 1：1 的重量比例均勻混合，亦可加適量青漿調勻。	磚面即是將磚塊碾磨成粉末過篩所得	張海清[35]
		磚面四份，白灰膏一份加水調勻。或七份灰膏三份磚面加少許青灰加水調勻。		杜仙洲[37]
生石灰漿	內牆白灰牆面刷漿	生石灰塊加水攪成漿狀，經細篩過淋後摻入膠類物質。		劉大可[36]
熟石灰漿	內牆白灰牆面刷漿	潑灰加水攪成稠漿狀，過篩後摻入膠類物質		劉大可[36]
青漿	青灰牆面刷漿	青灰加水攪成漿狀後過細篩〔網眼寬不超過 2 厘米〕	使用中，補充水兩次上時，應補充青灰	劉大可[36]
紅土漿〔紅漿〕	抹飾紅灰時的趕軋刷漿	紅土兌水攪成漿狀後，兌入江米汁和白礬水，過篩後使用 紅土：江米：白礬=100：7.5：5〔重量比〕	現在常用氧化鐵紅兌水再加膠類物質	劉大可[36]
包金土漿〔土黃漿〕	抹飾黃灰時的趕軋刷漿	土黃兌水攪成漿狀後，兌入江米汁和白礬水，過篩後使用 土黃：江米：白礬=100：7.5：5〔重量比〕	現在常用地板黃兌生石灰水〔或大白溶液〕，再加膠類物質	劉大可[36]
烟子漿	抹灰描縫做法時刷漿	黑烟子用膠水攪成膏狀，再加入攪成漿狀	可摻適量青漿	劉大可[36]
磚面水	牆面刷飾	以磚面：白灰膏=7：3 的比例用水均勻調和成漿。		張海清[35]

接下頁

續上頁

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劈。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，再用夾鬻灰細抹謂之夾腮。
5. 煙子：即炭黑油，一種黑色細膩粉末。是有機物質〔如木材等〕在空氣不足的條件下燒製而成的。在古建築油飾彩畫中作黑色顏料使用。
6. 細墁：墁地細作術語，俗稱細地。多用於室內鋪墁。
7. 石活：古建築行業術語。泛指石構件或建築環境中的石製品。
8. 膠水：指某些具有黏性的液劑。用動物的皮、角等熬成或由植物分泌出來，也有人工合成的。
9. 白礬：又名明礬、礬。由礬石煎煉而成，成晶體狀，半透明，光澤似玻璃，性脆，其水溶液帶澀味。
10. 絹籬：用絲織品作籬底的籬。傳統上古建築油漆彩畫中的油料及顏料均以絹籬過濾，現已為銅絲籬代替。

表 2-2 台灣傳統砌體建築灰漿配比表(王新衡，2003)

灰漿種類 材料	三合土 A	三合土 B	灰泥	石灰膠泥	桐油灰
白灰	1	6	1	1	1
黏土	3	0.5	3	-	1.5~2
貝殼粉	1~2	-	0.5	-	-
砂	-	-	-	2.5~3	
糖漿	1/12	1/12	1/12	-	-
糯米漿	1/6	1	-	-	-
稻穀	-	-	1	-	-
桐油	-	-	-	-	0.1
窯灰	-	-	-	-	0.5

註: 上表中配比为體積比

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	
		蚵殼灰漿泥	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		
		1.0	0.5	1.2	0.4			
		1.0	2.5	1.5	0.0			
3	砌紅磚牆	0.5	1.0	2.0	0.5		訪談匠師配比	
		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		

接下頁

續上頁

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	

接下頁

續上頁

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。

綜合上述配比資料可知傳統灰漿中黏土添加量為石灰重量的30%~700%。較低的黏土添加量，如30%~100%，主要作為黏結材料或構築捶土牆；較高的黏土添加量，如700%，主要作為地坪澆置，砂的添加量則為石灰重量的100%~300%。纖維材料之添加量為石灰重量的3%~6%。

2-2 傳統灰漿材料之作用

傳統灰漿材料種類繁多，各有其作用，有些材料兼具有多種功能，如黏土兼有黏結與填充的功能；有些彼此間有替代性，如糖與醋皆有減水之功能。本文將國內、外常見之灰漿材料依其作用整理成表 2-4，並將有關傳統灰漿主要材料之文獻整理如下文：

表 2-4 灰漿材料功能分類表

功能	使用材料
黏結材料	石灰、黏土、糖漿、糯米汁、動物血、蛋白
骨材	砂、黏土、蚶殼、紅磚碎屑、貝殼
纖維材料	稻桿、麻絨、穀殼、動物毛
染色用材	紅土、黃土、炭渣、燈黑、動物血
防水材	桐油、明礬
減水緩凝材	糖
其他	鹽、醋

1. 石灰

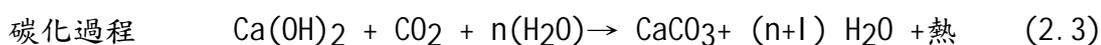
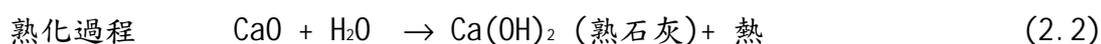
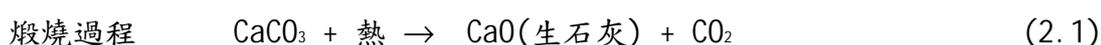
石灰的原料來源主要為富含碳酸鈣之石灰岩、大理岩，或生物中含碳酸鈣之硬組織，如蚶殼、珊瑚礁。依材料取得之便利性，採用不同型態之原料。在「天工開物」(宋應星，1637)中對石灰之燒製與應用有簡單的描述：

「燔灰火料，煤炭居什九，薪炭居什一，先取煤炭泥和作成餅，每煤餅一層，疊石一層，鋪薪其底，灼火燔之…，火力到後，燒酥石性，置於風中，久自吹化成粉，急用者以水沃之，亦自解散。」

「凡石灰經火焚煉為用，成質之後，入水永劫不壞，億萬舟楫，億

萬垣牆，窒隙防淫，是必由之…，凡灰用以固舟縫，則桐油、魚油調，厚絹、細羅和油杵千下，塞艙。用以砌牆石，則篩去石塊，水調黏和。用以墜牆壁，則澄過入紙筋塗縵。用以裹墓及貯水池，則灰一分，入河砂黃土二分，用糯米、粳米、羊桃藤汁和勻。輕築堅固，永不墜壞，名曰三合土…，凡溫、台、閩、廣、閩海濱，石不堪灰者，則天生螻蟻以代之」

由相關文獻可知石灰是將碳酸鈣經 900~1100°C 煅燒後排除二氧化碳氣體，而得氧化鈣，即生石灰。生石灰藉由少量的水熟化會產生熟石灰。而熟石灰吸收二氧化碳並釋放水分後形成碳酸鈣。其化學反應如下：



生石灰易與空氣中的水分產生化學反應，當與水接觸時體積會膨脹，因此生石灰用於灰漿前須經過熟化，避免使用後膨脹崩壞。Ca(OH)₂ 為氫氧化鈣，亦有稱之為「熟石灰」(Hydrated lime)或「消石灰」者。其膠結原理如下述：

- (1) 結晶: 石灰漿的水分散失，氫氧化鈣形成結晶，為物理變化過程。
- (2) 碳化: 氫氧化鈣和空氣中的二氧化碳合成碳酸鈣結晶，為化學變化過程，反應式如上述(2.3)式。

在混凝土之相關研究中，氫氧化鈣為一種無附著效果之六角狀晶體，極易溶出而降低緻密性。而在二氧化碳侵入後逐漸反應成碳酸鈣，碳酸鈣的溶解度較氫氧化鈣低，且碳化反應物的固相體積比反應物的固相體積大，一莫爾的氫氧化鈣與二氧化碳發生化學反應生成碳酸鈣，固

體積增加 $3.58 \times 10^{-6} \text{m}^3$ ，當生成物的體積較反應物增加時，增加的體積會向孔隙內部增生，所以碳化反應會造成混凝土的孔隙率減少，使混凝土變的緻密且硬度、抗壓強度、劈裂強度皆有明顯的提升。隨著混凝土碳化而發生一些細微的裂縫，但這對混凝土本身並無害處(張建智等人，2000)。

碳化過程為二氧化碳和水先形成碳酸，然後再與氫氧化鈣形成碳酸鈣，因此碳化過程中必須有水的存在，相對溼度在 50%~70%時混凝土碳化速度最快，當相對溼度小於 45%時，二氧化碳與氫氧化鈣便不能完全溶解於孔隙水膜中，碳酸鈣的生成速率就會減緩。當相對溼度高於大於 75%時，孔隙水形成大量的水膜，限制二氧化碳的滲透，甚至將毛細孔完全阻塞，二氧化碳於水中的擴散速率較空氣中慢，自然也減緩了混凝土碳化的速率。而灰漿之表面形成碳化物之後，使內部的碳化與結晶過程減緩，此為石灰砂漿乾硬極慢的主因(馮佳福, 2004)。

對於混凝土中性化深度之預測，1985 年蘇曼青提出了下列的預測公式：

$$X_c = X_0 \sqrt{\frac{C \times t}{C_0 \times t_0}} \quad (2.4)$$

其中 X_c : 加速碳化時混凝土的碳化深 (mm)

X_0 : 預測自然環境下混凝土的碳化深度(mm)

t : 加速碳化時間(年)

t_0 : 自然環境下碳化時間(年)

C : 加速碳化時二氧化碳的濃度

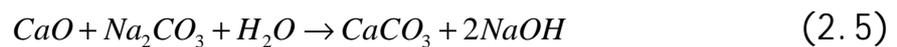
C_0 : 自然環境下二氧化碳的平均濃度，一般可取 0.0003。

由上式可發現二氧化碳濃度的平方根與碳化深度呈正比的關係。灰漿的碳化是二氧化碳以連通孔隙為通路，由表面向內擴散，所以影響碳化速率的因素主要應與孔隙結構有關。而孔隙結構又與水灰比、摻料及骨材級配有關。

一般而言，於石灰燒製過程中添加不同之化學反應物質，即可產生各種不同類型與用途之複合石灰，在石灰中添加鎂離子之白雲石石灰，其與黏土中水分之親和性與熱量反應等化學作用，遠低於無添加鎂離子之純石灰材料，就強度觀點，白雲石石灰硬化後則有較佳之剛性，故其短期強度雖較純石灰材料為低，長期強度則因鎂離子促進複合土體之硬化而有顯著之功效。

現代匠師認為近來生產之石灰品質較差，而以往關子嶺枕頭山生產之石灰品質較佳，經錘鍊後黏度較佳(莊敏信，2003)。由文獻可知分佈於西南部之上新世珊瑚石灰岩 MgO ， SiO_2 ， Fe_2O_3 含量均多，其中又以關子嶺枕頭山之石灰含鎂量特高，硬化後強度較高(葉世修，2003)，如無法重新開採枕頭山之石灰石，或可考慮在現有之關子嶺特白灰生產過程中添加氧化鎂，並在生石灰熟化過程中一併熟化，或在熟石灰中添加氫氧化鎂。

若水中存有適量的酸根，如 $(CO_3)^{-2}$ 、 Cl^{-1} 或 $(SO_4)^{-2}$ 等，則有助於日後之凝結硬化(李欣益，1999)。此外，根據趙國華等人之研究指出，在生石灰粉末中混合適當之無水碳酸鈉之化學物質，則有助於強度之提高與壓縮性之改善，(2.5)式即為其化學反應式。



2. 黏土、磚粉、砂與蚵殼

黏土、磚粉、砂與蚵殼皆為填充材，而黏土與磚粉因富含黏土礦物，可與氫氧化鈣將反應形成一種矽酸鈣水化合物膠體，或鋁酸鈣水化合物

膠體，此膠體促使土壤顆粒間產生膠結作用，顆粒間更形緊密與固化，其膠結強度與凝聚力因而增加，此反應一般稱為普作蘭反應。此外，不論是矽酸鈣或鋁酸鈣水化合物膠體，此膠結物質一旦形成，則不會因土壤中水分產生變化而破壞或溶解於水中(Van impe, W. F. , 1989)。且這些膠體生成物之反應齡期相當長，一般需幾個月或幾年的時間才會完全停止反應。

古羅馬人對石灰使用工藝進行過改進，在石灰中不僅摻砂子，還摻磨細的火山灰，在沒有火山灰的地區，則摻入與火山灰具有同樣效果的磨細碎磚（世界建築建材總網[46]）。故知，石灰與黏土混合後之強度增加主要乃導因於化學反應的過程，而非僅是機械性的增加強度。下文即整理石灰樁之相關研究對各階段之反應作一介紹(李欣益, 1999):

(1) 初始階段

氫氧化鈣與拌合水起分解反應，形成鈣離子(Ca^{++})及氫氧離子(OH^-)，其中二價之鈣離子與黏土顆粒表面所含之陽離子發生陽離子交換作用，鈣離子將取代黏土顆粒表面較弱之單價陽離子，如鈉離子(Na^+)、鉀離子(K^+)以及氫離子(H^+)等。在交換取代過程中由於黏土顆粒表面之氫離子大量被鈣離子所取代，電雙層之厚度因而減少。

(2) 膠體時期

當鈣離子環繞在黏土礦物表面時，黏土顆粒易與之起膠結反應，使得土壤之結構及稠度產生重大的改變。此膠體物質將使得黏土礦物之間相互連接並膠結在一起，進而降低顆粒間之孔隙結構。反應式如式(2.8)及式(2.9)所示。

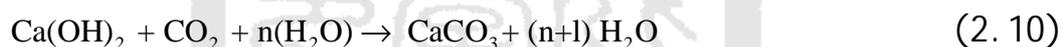
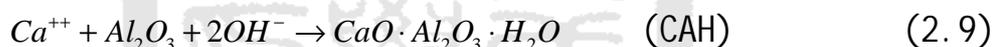
(3) 新結晶時期

黏土礦物顆粒間之膠體形成後，隨著時間之進行緩慢的進入新結

晶時期，從電子顯微鏡之下可以得知某些結晶正逐漸完成。因此，隨著新結晶階段的持續發展，黏土顆粒間將接結的更緊密。此反應階段後，黏土顆粒抵抗水分影響之能力有時可能低於膠體時期。

(4) 碳化時期

氫氧化鈣與空氣中之二氧化碳起碳酸化反應，形成碳酸鈣(CaCO₃)化合物。碳化作用之進行雖可促進石灰之硬化，但卻抑制鈣矽水化物膠體或鈣鋁水化物膠體之反應與成長，而不利於膠體進一步之凝結作用，且鈣矽水化物膠體或鈣鋁水化物膠體在碳化作用後皆形成碳酸鈣。因此以高濃度之二氧化碳養護試體，可能與自然狀態下碳化之最終強度不同。式(2.10-2.11)為碳化之過程(張達德等，1986):



而粒徑較大的砂為堅實穩定之矽鋁礦物，幾乎無化學反應之發生，若顆粒比例良好，可以大幅提升灰漿之強度，為有助於工作性與節省工程費之填充材(馮佳福, 2004)。片狀的蚶殼則可見於濱海地區之傳統建築灰漿中，為就地取材將蚶殼敲碎後作為細骨材用。砌石用的摻灰泥，為了在灰泥硬結前確保砌築之石塊不會變位，往往摻入小石片(薛琴，2003)，蚶殼可提供機械性的抗剪強度，且為一種輕質的骨材。

3. 糯米漿

糯米漿為多醣類，50 年後依然可以水溶解，化學式： $\text{HO}(\text{C}_6\text{H}_{10}\text{O}_5)_n\text{H}$ ，通常寫為 $(\text{C}_6\text{H}_{10}\text{O}_5)_n$ ，為葡萄糖鏈結長鏈而成並穿插支鏈葡萄糖分子，長鏈分子互相糾結而造成黏性。膠加入明礬後可以防菌、防腐，但就不溶於水了(文建會網頁)。

中國自古就有使用糯米漿於砌築墁料或地坪的實例，早自漢代古墓中之砌體建築遺址中，就已發現糯米漿的應用(王新衡，2003)。而「天工開物」中亦有記載使用糯米粳米之記錄。早期糯米漿的應用係以重要性公共建築為主，例如城堡、橋樑…等；另外大戶、富貴人家的宅院、墳墓等建築，亦會使用成本較高的糯米漿。我國也有許多傳統磚砌建築使用糯米漿的案例，例如南投、苗栗、新竹、嘉義…等地區之糯米橋，以及熱蘭遮城與普羅民遮城、安平古堡、砲台基座…等防禦性軍事建築。糯米的種類繁多，在我國常見的糯米有短(圓)糯米、長糯米、黑糯米，而傳統磚砌建築所使用的糯米漿，則以短糯米作為原料所烹煮而成(王新衡，2003)。糯米漿的烹煮過程，水量添加的多寡將大幅影響糯米漿的濃稠程度，添加水量愈少則濃稠，反之則愈稀並具有較高之流動性，糯米漿濃稠程度端視施工匠師的習慣(陳淮之，2004)。陳淮之在其碩士論文中指出糯漿可增強墁料之結合與黏著性，大幅降低硬固灰縫之比重，添加較高量之糯漿將提高墁料之流度，以及硬固試體之含水率、吸水率，然過度添加將降低試體之抗壓強度。除耐鹽性較低外，對各種劣化形式無明顯之變化。

雖早在中國的漢代灰漿中即有糯漿的添加，然近代之研究並無發現糯漿對耐久或強度有提升的效果。表 2-5 為余秉宥[30]針對高分子複合材料之性質所列之比較表，糯漿是否有相同之作用仍待研究。又其乾燥後之微裂隙可能可加速碳化，或用以固結氫氧化鈣，避免溶出。表 2-6 列出黃兆龍[43]、洪煌凱[22]及王新衡[24]三位研究者對糯漿功用之意見：

表 2-5 高分子複合材料性質比較表(余秉宥，2004)

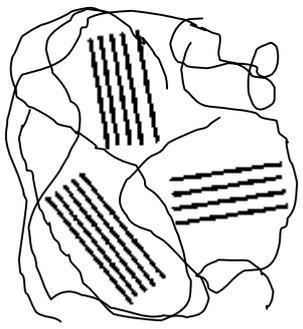
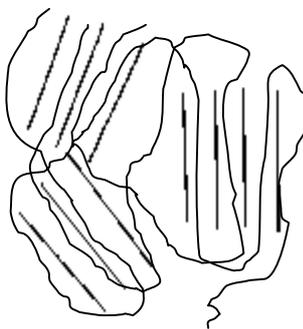
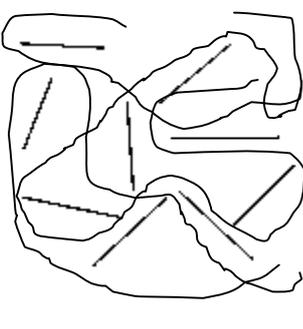
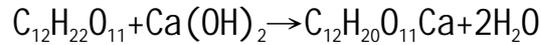
	傳統複合材料	插層型複合材料	剝離型複合材料
示意圖			
結晶完整性	保有原先完整結晶	矽酸鹽層仍具有層狀重現	矽酸鹽層完全剝落，失去原有結晶性
層間間距	約 $<10\text{\AA}$	約 $>20\text{\AA}$	約 $<100\text{\AA}$
機械性質	特定方向較純聚合物佳	較傳統複合材料強甚多	其機械性質遠超過傳統型與穿插型複合材

表 2-6 各研究者對糯漿功能之看法

黃兆龍(2003)	卜作蘭材料或糯漿的長期反應，不斷的填封裂縫，提高耐久性。
洪煌凱(2003)	添加糯漿對強度並無助益，所有添加糯漿之試體強度約在 $1\sim 4\text{ kgf/cm}^2$ ，在灰土比 $1:8$ 的試體有些微隨糯漿含量的上升而強度上升的趨勢，但在灰土比 $1:4$ 之土體則無此現象。糯漿含量增加，其吸水率隨之增加。
王新衡(2003)	可增強墁料之結合與黏著性，可大幅降低硬固灰縫之比重。添加較高量之糯漿將提高墁料之流度，以及硬固試體之含水率、吸水率。然過度添加將降低試體之抗壓強度。 除耐鹽性較低外，對各種劣化形式無明顯之變化。

4. 糖漿

王龍盛[23]在其碩士論文中指出，糖灰漿是以糖之結晶能力與石灰混合後形成「蔗糖鈣 $C_{12}H_{20}O_{11}Ca$ 」而產生強度，其簡化之化學反應式如下：



而在張云理與卞葆芝編著之「混凝土外加劑產品及應用手冊」[2]中表示糖蜜減水劑是利用製糖過程中提煉食糖後剩下的殘液（稱為糖蜜），經過石灰中和處理調製而成的一種粉狀或液體狀產品。

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

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

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

馮佳福[26]指出 0.02 的糖漿用量為匠師慣用配比，而王隆盛[23]之研究指出糖與石灰之最佳重量比約為 1:15 至 1:25 之間，且以白糖或二砂取代黑糖，可提高強度。但王新衡[24]在「台灣傳統磚砌建築灰縫材料特性之研究」中指出以紅糖取代黑糖後，其黏結力與抗壓強度較黑糖低。

5. 穀殼、稻草及麻絨

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

6. 明礬

明礬化學式為： $KAl(SO_4)_2 \cdot 12H_2O$ 。張云理與卞葆芝編著之「混凝土外加劑產品及應用手冊」[2]中提到明礬為一種膨脹劑。混凝土在攪拌過程中加入適量的膨脹劑可使水泥在水化及硬化過程中不斷生成大量體積增大的結晶體（如鈣礬石），堵塞或切斷了水泥中的孔隙，使水泥獲得緻密的結構，進而抗滲性提高 2~3 倍。

中華人民共和國國家標準中規定：現場配製的刷漿塗料，必須摻用膠黏劑；用於室外的石灰漿，必須摻用乾性油和食鹽或明礬等，其品種和摻量應由試驗確定，以漿膜不脫落、不掉粉為準。

許多古代建築的白粉牆多在石灰漿上罩以礬水溶液，使其保持潔白和穩定。礬的水溶液罩在新鮮的石灰漿粉刷的表面上可以增加石灰的早期強度，日後也不易被雨水沖刷(薛琴，2002)。

2-3 工序對強度及工作性之影響

1. 過篩

對於需養灰之生石灰而言，篩去較大之顆粒有助於熟化之完全，將熟石灰中之結塊篩去則可避免結塊之石灰拌和不易，影響施工品質。

2. 養灰

養灰之目的在使生石灰完全熟化為熟石灰，避免造成施作後生石灰水化膨脹，如以現在市面上之關子嶺特白灰施作，因已熟化過，故有無養灰對強度並未造成影響(王隆盛，2003)。但養灰之含水量不易控制。

3. 捶鍊的影響

由匠師之口述中可發現傳統灰漿的製作多有捶鍊之步驟，然多數研究中指出，捶鍊對灰漿強度影響不大，而對工作度似有助益。以下表列六位學者之意見：

表 2-7 捶鍊對工作度與強度之影響

張清忠(2002)	捶鍊與否似與強度無關(未捶鍊者抗壓强度高、抗張強度低)，然捶鍊後工作度及韌性較佳，且未捶鍊者易生裂縫。
莊敏信(2003)	捶鍊可製成黏性極高之石灰團，亦稱麻糬灰。
洪煌凱(2003)	有無捶鍊對強度之影響不明顯。
王龍盛(2003)	搗擊數之多寡與糖灰漿強度並無明顯的關係存在，但搗擊可提升工作度且有利加糖階段的順利進行，因此適當的搗擊工作定必要的。
葉世修(2003)	錘鍊可使顆粒變細，可提升工作度，且吸水率較低。可明顯提升延展性、塑性、抗張強度，體積收縮較少，表面幾乎不龜裂。
王新衡(2003)	單純白灰與白灰添加糯漿之墁料，其鍛鍊次數與流度成負相關。添加黑糖漿者其鍛鍊次數與流度成正相關。

以上各研究者僅有王新衡[24]以流度定義工作度，其他研究者皆為定性之描述，如以黏性之增加亦稱為工作度提升，則捶鍊有助於工作度的提升應是無誤的。

然捶鍊的步驟可能是以往無適當之拌和機具，為增加拌和能量之手段。以現代之拌和機具拌和應無能量不足之問題，但以拌和機拌和可能會將空氣拌入。

2-4 傳統灰漿之力學性質

現有之相關研究多以灰漿製成 $5 \times 5 \times 5 \text{ cm}^3$ 之試體進行抗壓試驗，或與磚黏結後量測其界面剪力強度及界面黏結強度，圖 2-1 為陳淮之[29]在其碩士論文中使用之黏結形式，圖 2-2 則為重現王隆盛[23]在其碩士論文中使用之黏結形式，圖 2-3 為 ASTM C952 建議之黏結拉拔強度檢測方式。

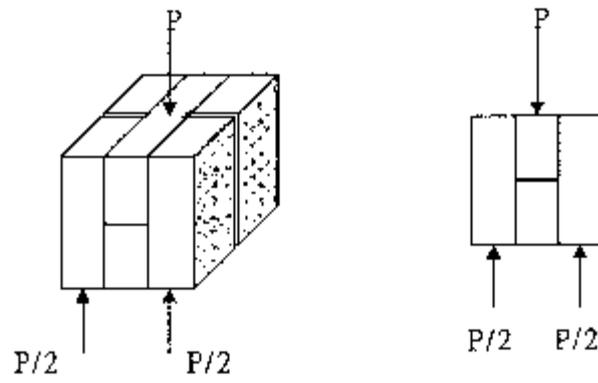


圖 2-1 磚材的界面剪力強度試驗(陳淮之，2004)

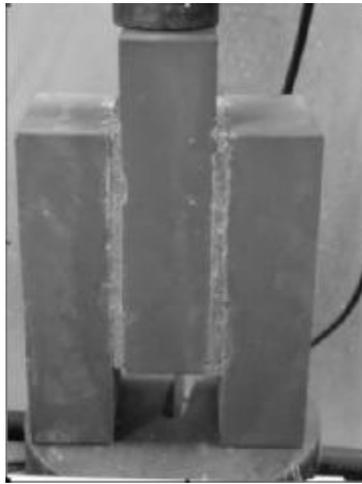


圖 2-2 磚材的界面剪力強度試驗

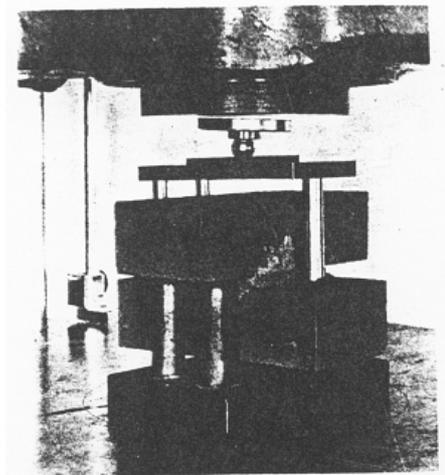


圖 2-3 ASTM C952 建議之黏結拉拔強度檢測方式

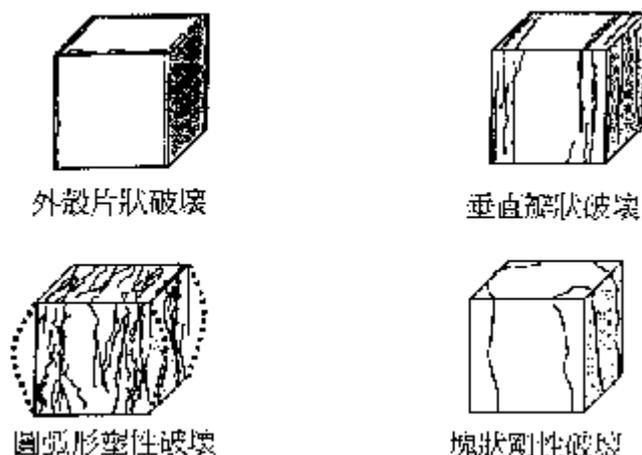


圖 2-4 灰漿之破壞形式 (陳淮之, 2004)

在灰漿的抗壓試驗中常可發現氣乾試體呈外殼片狀的剝落破壞，而以二氧化碳試體養護後之試體則可呈圓弧形塑性破壞或塊狀剛性破壞，如圖 2-4 所示[29]。由破壞形式可知灰漿與空氣接觸之面強度發展較快，而內部之強度發展較慢。

以下表列十位學者對傳統灰漿力學性質之研究結果：

表 2-8 不同學者之研究成果

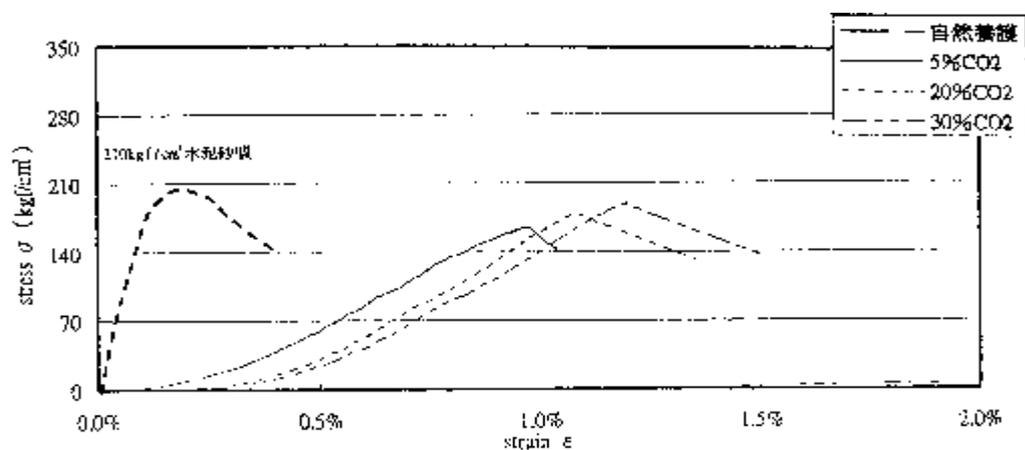
研究者	力學性質研究成果
張清忠(2002)	傳統三合土最佳配比为蚶灰漿泥:紅土:砂:水泥=1 : 1.5 : 1:0，90 天齡期平均抗壓強度為 46.76 kgf/cm ² 。
楊敦凱(2002)	最佳配比为蚶灰:砂:水=1 : 2 : 0.74，28 天齡期平均抗壓強度為 2.17 kgf/cm ² 。抗剪強度約為抗拉強度的 2 倍。
王龍盛(2003)	最佳配比为灰砂比 1/2，水膠比 0.5，糖:石灰=1:16，60 天齡期抗壓強度 131.5 kgf/cm ² ，(試體尺寸為 5x5x2 cm ³)
洪煌凱(2003)	最佳配比为灰:砂:糯漿:糖漿=1:4:0.4:0.2，56 天齡期抗壓強度 17.61 kgf/cm ² 。
王新衡(2003)	最佳配比为灰:黏土:糯漿:糖漿=6: 0.5: 1/6: 1/12(體積比)，水灰比為 0.3，140 天齡期抗壓強度 36.98 kgf/cm ² 。

接下頁

續上頁

葉世文(2003)	最佳配比為灰:砂=1:2(大理石潑灰)，抗壓強度 2.62kgf/cm ² 。
陳淮之(2004)	碳化後最佳之配比為灰:黏土:糯漿:糖漿=6:0.5:1/6:1/12(體積比)，水灰比為 0.3，抗壓強度 311.8 kgf/cm ²
歐新通(2004)	最佳之配比為黏土:砂=1:2.5，抗壓強度 15 kgf/cm ² ，加貝殼灰之最佳配比為灰:黏土=1:2，抗壓強度 11.8 kgf/cm ²
馮佳福(2004)	抗壓及抗彎強度最佳之配比為石灰:砂:糖漿=1:2:0.04，抗壓強度 16.47kgf/cm ² ，抗彎強度 6.27kgf/cm ² ，
莊敏信(2004)	最佳之配比為灰:砂:土=3:3.5:3.5，120天齡期抗壓強度為 26.80 kgf/cm ² 。

由陳淮之[29]的研究成果可知灰漿破壞時之應變約 0.01 至 0.015，而混凝土破壞時之應變約 0.003。灰漿之應力應變曲線下的面積積分約為同強度的混凝土的 2~2.5 倍以上，表示傳統灰漿在相同受力下能比混凝土吸收更多的能量，但勁度較低，變形量較大。



A01 試體與同強度混凝土 $\sigma - \epsilon$ 比較關係圖

圖 2-5 灰漿與混凝土之應力應變曲線(陳淮之，2004)

第三章 試體製作配比、養護及試驗方法

3-1 試驗材料及其製備

1. 石灰

本研究所使用的石灰為關子嶺特白灰，採 10kg 裝袋，一袋 70 元。使用前過 40 號篩，並以夾鏈袋分裝成 3kg 裝，以避免受潮。

2. 蚵殼(圖 3-1)

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。



3. 里港砂

本研究所使用之砂為里港砂，使用前過 10 號篩。

4. 黏土

取自台南縣大內鄉，南 182-1 與南 182 縣道交叉口西北側山坡地，使用前過 40 號篩。

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. 將 100g 之糯米粉與 300g 左右之水以果汁機攪拌，完成之後將糯米汁倒出。
2. 加水至 1100g，以電鍋隔水加熱，並一邊攪拌至呈黏稠狀且總重量剩 1000g 為止。

6. 紅糖漿

為台糖公司生產之高級紅糖，400g 裝，一包 36 元。

楊敦凱(2002)在「傳統磚材黏結材料抗拉力學行為之研究」，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。因此本研究紅糖漿中紅糖與水的比例為紅糖：水 = 2：1(重量比)。

紅糖漿製備法(300g 紅糖漿、紅糖：水 = 2：1 重量比)

1. 將 200g 紅糖融入 130g 之水中。
2. 在電鍋上加溫，加熱至紅糖完全溶解且總重量 300g。若超過 300g，則繼續煮沸，直到 300g 為止。做好之紅糖漿，立即倒進密封罐保存，置於室溫保存。

3-2 試體製作配比及養護方法

本研究之配比主要為探討石灰單獨分別與膠體、砂、黏土、蚶殼間之作用關係，故除純黏土與純石灰漿外，其餘各配比皆僅為兩種材料之混合。此外，本研究採取兩種養護方法，分別為氣乾養護與中性化試驗機加速碳化養護。

3-2-1 配比設計

各配比如表 3-1 a、b 所示，表中之 8%糖漿表示糖漿重量為石灰或黏土重量之 8%。

表 3-1-a 配比設計 a

配比	編號
純石灰	L
純黏土	C
黏土加 8%糖漿	CM
黏土加 10%糯漿	CR

表 3-1-b 配比設計 b

添加膠體		加砂配比		加黏土配比		加蚶殼	
配比	編號	配比	編號	配比	編號	配比	編號
純石灰加 8%糖漿	L ₁ M _{0.08}	灰砂比 1:1	L ₁ S ₁	灰土比 2:1	L ₂ C ₁	純石灰添加與灰砂比 1:1 之砂等體積之蚶殼。	L0
純石灰加 10%糯漿	L ₁ R _{0.1}	灰砂比 1:2	L ₁ S ₂	灰土比 1:1	L ₁ C ₁		
純石灰加 20%糯漿	L ₁ R _{0.2}	灰砂比 1:3	L ₁ S ₃	灰土比 1:3	L ₁ C ₃		
純石灰加 30%糯漿	L ₁ R _{0.3}	灰砂比 1:4	L ₁ S ₄	灰土比 1:8	L ₁ C ₈		
純石灰加 40%糯漿	L ₁ R ₄						

L: Lime R: Rice S: Sand C: Clay
M: Molasses O: Oyster

英文字母後之下標數字表示各材料之重量比例

3-2-2 添加膠體之水量設定

純石灰漿、石灰添加糯漿試體及石灰添加糖漿之試體皆以流度達到 75 ± 5 之含水量作為拌和水量。流度試驗結果之結果如圖 3-2 示，各配比在流度 75 時的含水量如表 3-2 所示。

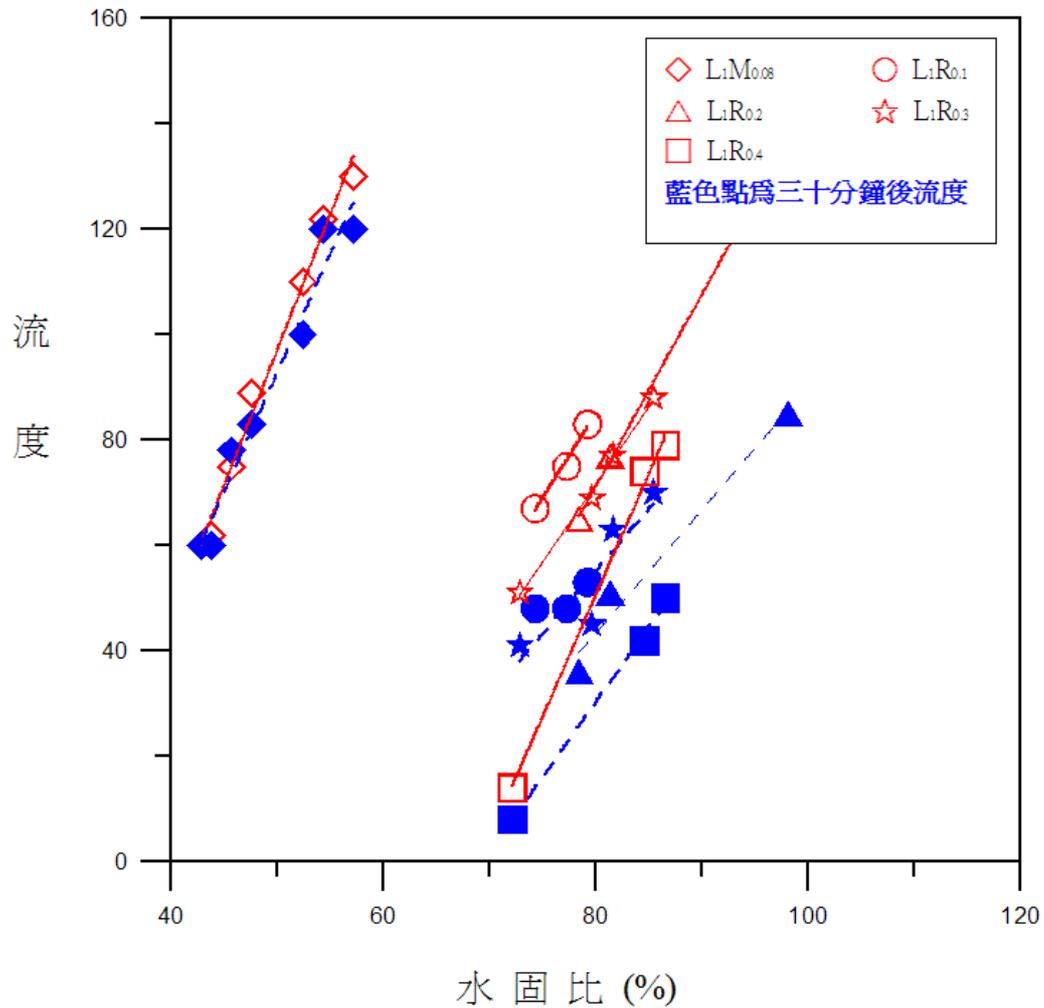


圖 3-2 石灰添加膠體之流度與水灰比關係

表 3-2 石灰添加膠體之配比流度 75 時的水灰比

配比	水灰比(%)
純石灰	75
石灰加 8%糖漿	48
石灰加 10%糯漿	78
石灰加 20%糯漿	83
石灰加 30%糯漿	84
石灰加 40%糯漿	88

3-2-3 骨材水量設定

骨材浸水飽和後以脫水機脫水，得含水量約 $6\pm 1\%$ 之濕潤砂骨材（面乾內飽和含水量為 1.96%）及含水量約 $22\pm 1\%$ 之濕潤蚵殼（面乾內飽和含水量為 16.60%），以之作為拌和之骨材。石灰之用水量固定為 75%。石灰加砂配比拌和後之流度如圖 3-3 所示。而加蚵殼之配比初始流度為 80，三十分鐘後為 62。

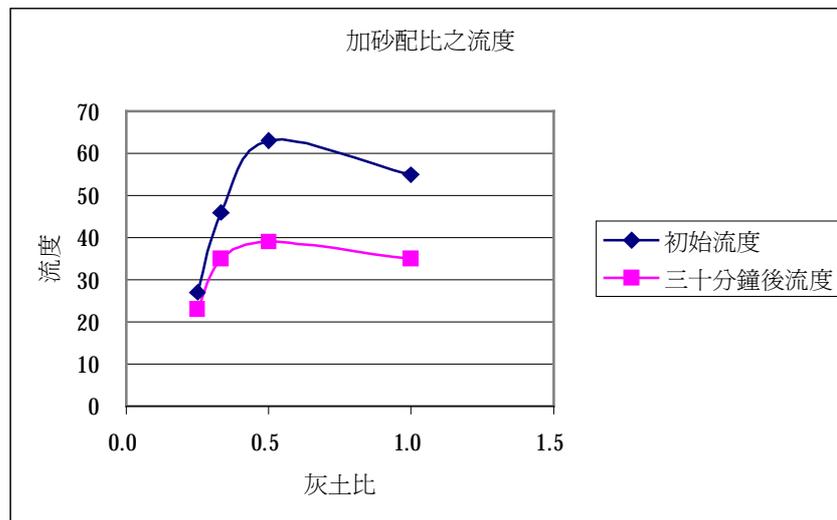


圖 3-3 石灰加砂拌和後之流度

3-2-4 黏土水量設定

純黏土漿、黏土添加糯漿試體及黏土添加糖漿之試體皆以流度達到 35 ± 5 之含水量作為拌和水量。流度試驗之結果如圖 3-4 所示，各配比在流度 35 時的含水量如表 3-3 所示。

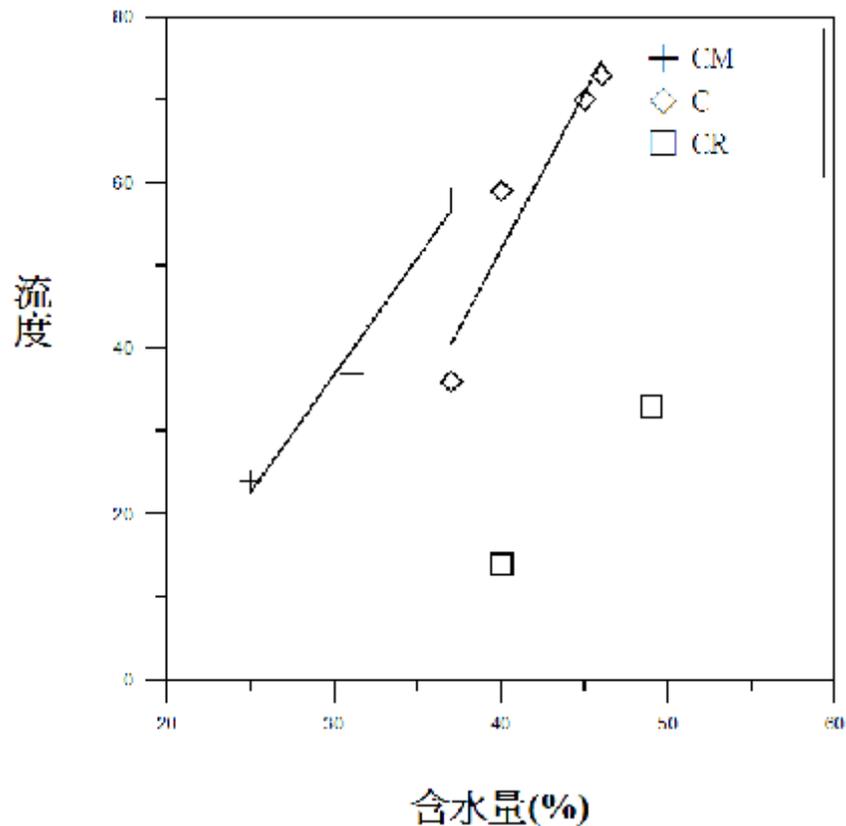


圖 3-4 黏土及黏土添加膠體之流度與含水量關係

表 3-3 黏土添加膠體之配比流度 35 時的含水量

配比	含水量 (%)
黏土加 8%糖漿	31
黏土	37
黏土加 10%糯漿	49

3-2-5 石灰添加黏土配比之水量設定

在石灰添加黏土之配比中，黏土採用流度達到 75±5 之含水量 (46%) 作為拌和水量預先拌和，再加入石灰與其餘之拌和水，施做流度試驗，結果如圖 3-5 所示，圖中之橫軸表石灰之加水量。各配比在流度 75 時的含水量如表 3-4 所示。

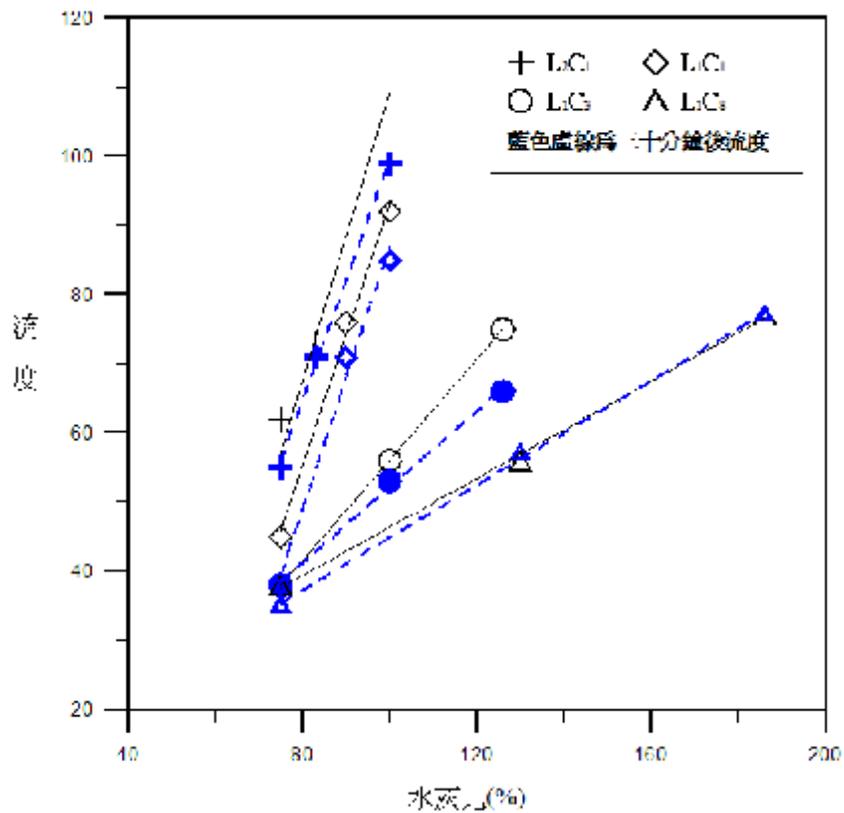


圖 3-5 石灰添加黏土之流度與水灰比關係

表 3-4 石灰添加黏土之配比流度 35 時的含水量

灰土比	總含水量 (%)
2:1	65.33
1:1	60.50
1:3	53.25
1:8	49.22

石灰加黏土試體之含水量如以流度 75 為控制，經試做結果含水量將過高，造成試體之乾裂。因此石灰加黏土試體之含水量將以石灰加水 75%、黏土加水 46%作為拌和水量。其流度如下圖 3-6 所示：

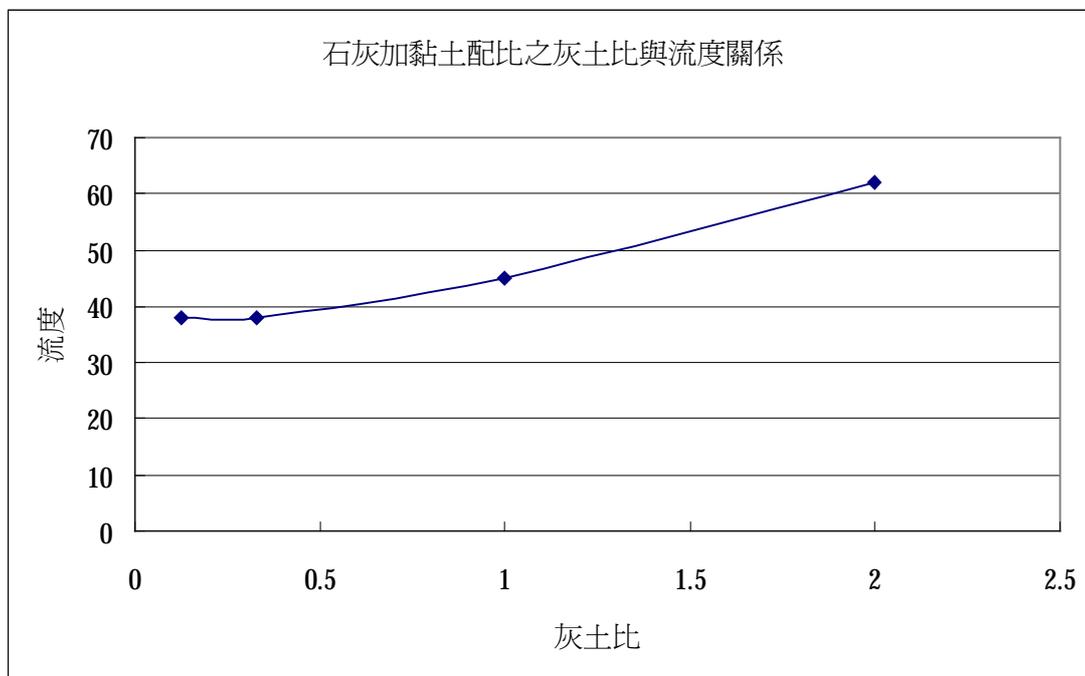


圖 3-6 石灰加黏土配比與流度關係

3-2-6 養護方式

所有試體以氣乾養治，並於 7 天、14 天、28 天及 56 天齡期時施做抗壓試驗，含石灰之試體除氣乾養治外，並有部分試體置於中性化試驗機中，以濕度 70%、溫度 23°C、二氧化碳濃度 20%之養護環境養護，並於 3 天、6 天、9 天、14 天及 28 天齡期時施做抗壓試驗。

3-3 試驗項目、儀器與步驟

3-3-1 材料基本物性試驗

1. 篩分析：依據 ASTM C136 進行試驗，所使用之設備有(1)電動搖篩機(2)標準篩(3)電子秤(4)鋼刷。
2. 細骨材之含水量、比重、面乾內飽和水量及表面水量試驗：依據 ASTM C128、C70、C566 進行試驗，所使用之設備有(1)比重瓶(2)量筒(3)圓錐模與搗棒(4)烘箱(5)電子秤(6)吹風機(7)漏斗。
3. 流度試驗：依據 ASTM C230 進行試驗，所使用之設備有(1)流度儀(2)三段式食物拌合機(3)刮刀(4)搗棒(5)電子秤(6)尺。
4. 液性限度試驗：依據 ASTM D4318 進行試驗，所使用之設備有(1)液性限度試驗儀(2)抹刀(3)電子秤(4)烘箱。
5. 塑性限度試驗：依據 ASTM D4318 進行試驗，所使用之設備有(1)毛玻璃(2)密封容器(3)電子秤(4)烘箱。
6. 土粒比重試驗：依據 ASTM D854-3 進行試驗，所使用之設備有(1)比重瓶(2)酒精燈(3)三腳鐵架(4)石綿板(5)電子秤(6)溫度計
7. 比重計分析：依據 ASTM D422-63 進行試驗，所使用之設備有(1)量筒(2)比重計(3)碼表(4)溫度計(5)烘箱。

3-3-2 抗壓試驗

抗壓試驗：參考美國 ASTM C109 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)拌合機(5)十噸剛性抗壓試驗機。

以應變控制 1.3mm/min 的速率進行抗壓試驗。

3-3-3 碳化試驗

將試體置入中性化試驗機中，以二氧化碳濃度 20%、相對溼度 70%、溫度 23°C 養護，於 3 天、6 天、9 天、14 天、28 天取出四個試體，其中之一以切割機水冷切開，以酚鈦指示劑作碳化深度之判定，其餘做抗壓試驗。



圖 3-7 中性化試驗機

3-3-4 吸水率試驗

本試驗參考 CNS 488 粗粒料比重及吸水率試驗法，對灰漿進行吸水率試驗，步驟如下：

1. 將灰漿試體以二氧化碳養治 35 天後進行吸水率試驗。首先將試體在 $110\pm 5^{\circ}\text{C}$ 之溫度下烘乾至恆重，在室溫冷卻 1~3 小時後秤重，其值為 A。再浸入室溫之水中 2 分鐘，從水中取出，倒在一大塊富吸水性之布上滾動，將能見到之表面水膜全部除去。
2. 此時的灰漿試體視為表面吸水狀態狀態，秤重，值為 B。

3. 計算試體的表面吸水率，方法如下：

$$\text{表面吸水率}(\%) = (B-A)/A \times 100$$

4. 試體再浸入室溫之水中 24 小時後，從水中取出，除去表面水膜。此時的灰漿試體視為飽和吸水狀態，稱重，值為 C。

5. 計算試體的吸水率，方法如下：

$$\text{飽和吸水率}(\%) = (C-A)/A \times 100$$

3-3-5 自修復試驗

完全碳化試體烘乾後，施作超音波檢測，超音波量測方向垂直加載方向。再以該試體施做抗壓試驗，施壓至極限強度後立即停止抗壓試驗機，完成預壓。預壓後再作超音波檢測，而後將試體浸水四小時後取出，氣乾養護 14 天後，烘乾再作超音波檢測，以檢驗是否有自修復性。

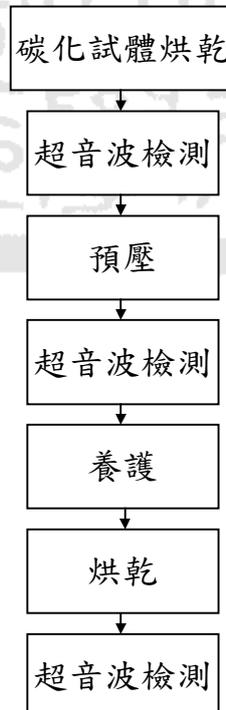


圖 3-8 自修復試驗流程圖

3-3-6 浸泡硫酸鈉溶液耐久試驗

為討論灰漿遭受酸性腐蝕及乾濕作用下之影響，參考 CNS 1167 使用硫酸鈉之粒料健度試驗法設計本試驗。其步驟如下：

1. 將體積 5×5×5cm 之灰漿試體以 110±5°C 烘乾至恆重，秤重。
2. 將試體浸置於飽和硫酸鈉溶液中，16 小時後取出，滴水晾乾 15 分鐘後再放入烘箱，烘乾至恆重，至此為第一循環。
3. 再將試體浸置於飽和硫酸鈉溶液中，如步驟 2 進行試驗，直到第五循環結束後為止。最後一次循環之試體，經冷卻後即用水清洗之，烘乾至恆重，秤重。
4. 計算其損耗率。

3-3-7 掃描式電子顯微鏡〔SEM〕與 能量分散光譜儀〔EDS〕分析

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

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

通常掃描式電子顯微鏡均會附加一座 X 射線能量散佈分析儀

(energy dispersive X-ray spectrometer, EDS) 作半定量式的元素分析。藉由量測電子束照射試體所激發之能量分布，可得試體之較重元素之含量。

本研究將抗壓試驗後之試體進行取樣、烘乾、鍍金等程序，施作 SEM 以及 EDS，期能了解灰漿之微觀性質與元素分析。

以 EDS 試驗的結果分析推估灰土比計算方法：

1. 假設 EDS 分析試料中的 Ca 完全由原始灰漿配比中的 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 提供，則 EDS 分析試料中原灰漿之 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 重量百分比如下：

$$\text{Ca}(\text{OH})_2 \text{ 重量百分比} = \text{EDS 分析試料中的 Ca 重量百分比} * 74/40$$

2. 假設原有灰漿中之 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 完全碳化為 CaCO_3 ，則 EDS 分析試料中應有 CaCO_3 重量百分比如下：

$$\text{CaCO}_3 \text{ 重量百分比} = \text{EDS 分析試料中的 Ca 重量百分比} * 100/40$$

3. 土重百分比 = 100% - EDS 分析試料中應有 CaCO_3 重量百分比

$$\text{灰土比} = \text{Ca}(\text{OH})_2 \text{ 重量百分比} / \text{土重百分比}$$



圖 3-9 掃描式電子顯微鏡〔附設能量分散光譜儀〕

3-3-8 熱重分析(TGA)

用於熱重分析法 (thermogravimetry analysis method) 的儀器主要為熱天平(圖 3-10)，它能連續紀錄質量與溫度之關係。操作時以程式溫控方式加熱或冷卻樣品。熱天平之主要組件包含紀錄天平、加溫爐、程式溫控系統及紀錄器。熱重分析法是在程式溫控下，量測物質的質量與溫度關係，而作出相對重量(%)或重量對溫度的變化曲線，從而分析其中各化合物之含量(孫逸民等, 2000)。

本研究以 210°C 作為試體吸附水及層間水脫水完成，以及有機質燃燒完畢的溫度，此時質量記為 m1。470°C 至 520°C 為氫氧化鈣脫水成氧化鈣，470°C 與 520°C 時之重量分別為 m2、m3。660°C 至 870°C 為碳酸鈣分解為氧化鈣及二氧化碳。660°C 及 870°C 之質量分別為 m4、m5，(圖 3-11)則：

$$\text{Ca(OH)}_2 \text{ 莫爾數} = \text{H}_2\text{O 莫爾數} = (m_2 - m_3) / 18$$

$$\text{Ca(OH)}_2 \text{ 重量} = (m_2 - m_1) / 18 * 74$$

$$\text{CaCO}_3 \text{ 莫爾數} = \text{CO}_2 \text{ 莫爾數} = (m_4 - m_5) / 44$$

$$\text{CaCO}_3 \text{ 重量} = (m_4 - m_5) / 44 * 100$$

設 CaCO₃ 為 Ca(OH)₂ 碳化而來，則

$$\text{原始總 Ca(OH)}_2 \text{ 重量} = (m_4 - m_5) / 44 * 74 + (m_2 - m_3) / 18 * 74$$

$$\text{灰土比} = \text{原始總 Ca(OH)}_2 \text{ 重量} / (\text{總重量 } m_1 - \text{Ca(OH)}_2 \text{ 重量} - \text{CaCO}_3 \text{ 重量})$$



圖 3-10 熱重分析儀(TGA)

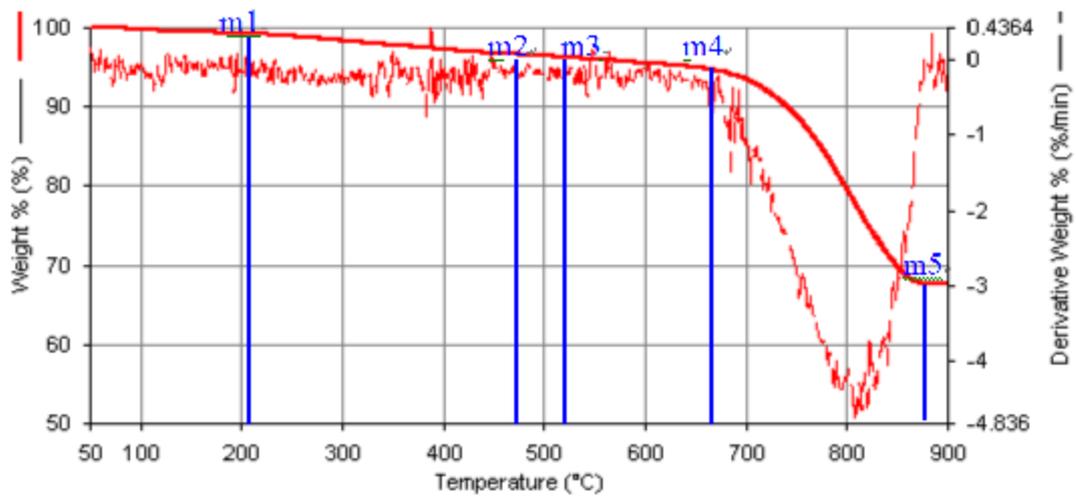


圖 3-11 熱重分析曲線

3-3-9 表面升溫性質試驗

將試體置入保利龍版中，以陽光為熱源單向加熱。以熱影像儀量測試體之昇溫與降溫變化，以了解各配比對環境溫度之控制能力。表 3-5 為熱影像儀器性能



圖 3-11 熱影像儀

表 3-5 熱影像儀器性能

型號	Thermo Tracer Th1101
溫度量測範圍	-50°C ~2000°C
波長	3 μ m~5 μ m 8 μ m~13 μ m
視野	水平 30°；垂直 28.5°
Zoom	1 倍至 5 倍
對焦範圍	20 cm~無限大
溫度最大解析度	0.05°C
系統冷卻方式	液態氮

3-3-10 實體顯微鏡分析

以實體顯微鏡配合數位相機及 PIA 影像分析計測軟體觀察分析各配比切開之試體，以了解各配比之顆粒排列情形。表 3-6 為實體顯微鏡儀器性能。



圖 3-12 實體顯微鏡

表 3-6 實體顯微鏡儀器性能

型號	STEMI -2000C
變焦範圍	0.65X~5.0X。
倍率範圍	6.5X~50X、1.95X~250X
工作距離	92mm
瞳孔距離：	55mm~75mm。

第四章 試驗結果與分析

4-1 材料基本性質試驗結果

4-1-1 黏土材料物性試驗

以灰色黏土、黃色黏土及灰黑色田土，三種黏土灌製抗壓試體，灌製時之水量為液性限度之 1.1 倍。

三種黏土之粒徑分佈及物性、抗壓強度如圖 4-1，表 4-1 所示。經抗壓試驗後，發現黃色黏土之抗壓強度最高，乾縮量在其他兩者之間，在考慮強度、乾縮量及顏色之美觀後，選用黃色黏土。

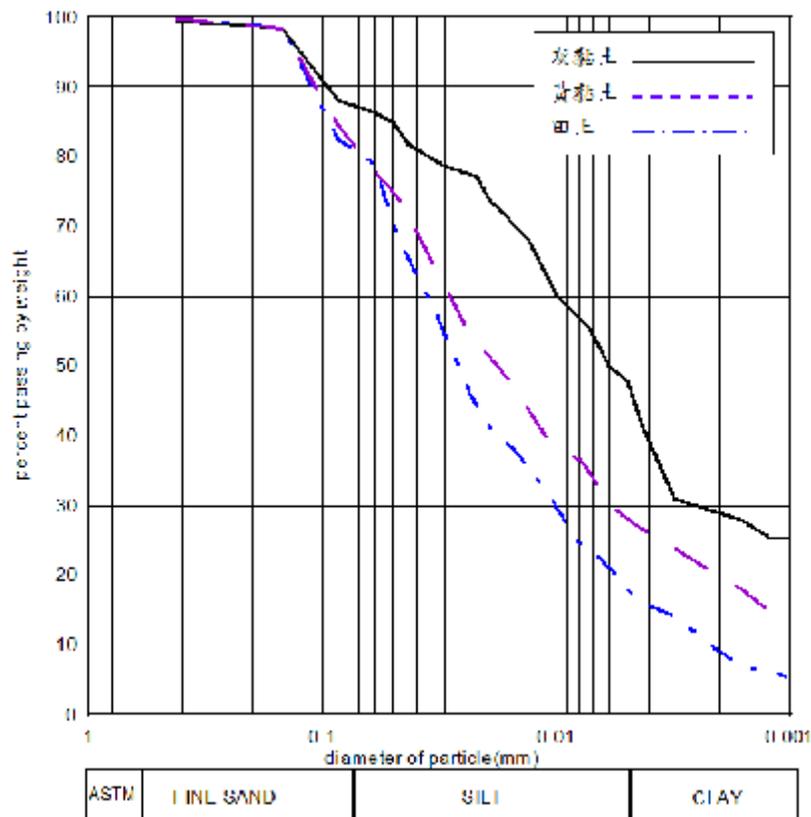


圖 4-1 黏土粒徑分佈

表 4-1 各黏土之物性與抗壓強度

	灰白黏土	黃黏土	田土
Gs	2.76	2.72	2.69
液性限度	39.02	33.75	31.30
塑性指數	15.07	10.58	8.35
土壤分類	CL	CL	CL
14 天平均抗壓強度 (kgf/cm ²)	28.86	30.86	29.05
乾縮百分比 (%)	10.37	9.28	6.06
黏土含量 (%)	48	29	18
粉土含量 (%)	40	53	64

4-1-2 骨材基本性質

骨材基本性質如表 4-2 所示，蚵殼面乾內飽和含水量可達 16.6%，拌合時蚵殼之含水量更高達 22.5%。造成在以相同骨材體積拌合時，添加砂之灰漿整體含水量較低，而添加蚵殼者整體含水量較高。

蚵殼的容積比重約為砂的三分之二，為較輕質的骨材。

表 4-2 骨材基本性質

基本性質 \ 材料	砂	蚵殼
面乾內飽和含水量 (%)	1.96	16.60
表面濕潤內飽和含水量 (%)	6.00	22.50
容積比重	2.59	1.73
比重 Gs	2.71	2.46

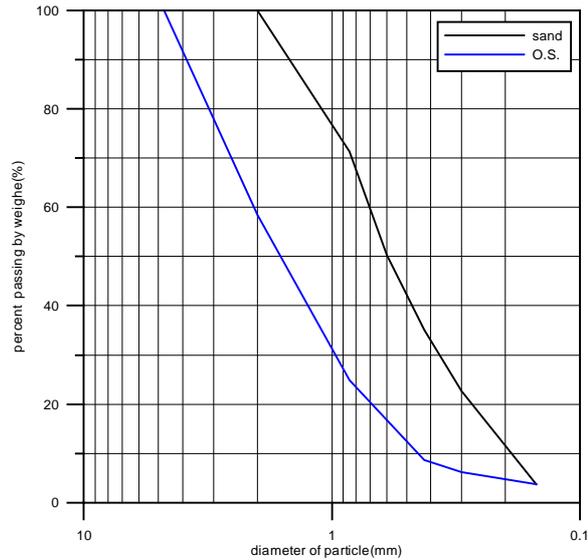


圖 4-2 骨材粒徑分佈

4-1-3 工作度試驗結果

由圖 3-2 及圖 3-4 可知添加糖漿對石灰與黏土有減水及緩凝之效果。由圖 3-3 可知，砂添加量在超過灰土比 1:2 時將會大幅的降低工作度，而添加蚵殼之配比與灰砂比 1:1 之流度比較可知蚵殼在此添加量的情況下是有助於流度的。

對於石灰加黏土配比之工作度與含水量關係可由圖 3-5 改繪成圖 4-3，由此圖可知，在相同配比時流度與總含水量成正比。灰土比愈高者，如欲達到相同流度則所需之含水量愈多。圖中四線段加以回歸可得下式：

$$w = 0.306 \times f + 4.62X + 39.46 \quad (4.1)$$

$$(R^2=0.93)$$

W : 總含水量

f : 流度

X : 灰土比

石灰之流度達到 75 之含水量為 75%，黏土之含水量則為 46%，如彼此之間無化學性的反應或機械性的鍵結，則應可以 5.2 式求得計算需水量，然實際需水量較計算需水量高(圖 4-4)，可知石灰與黏土之間應有前述文獻回顧中所述之反應。

$$W_{\text{灰土}} = W_{\text{灰}} - \frac{(w_{\text{灰}} - w_{\text{土}}) \frac{S_{\text{土}}}{S_{\text{灰}}}}{1 + \frac{S_{\text{土}}}{S_{\text{灰}}}} \quad (4.2)$$

- $W_{\text{灰土}}$ ：總含水量
- $W_{\text{灰}}$ ：石灰含水量(75%)
- $W_{\text{土}}$ ：黏土含水量(46%)
- $S_{\text{灰}}$ ：石灰重量
- $S_{\text{土}}$ ：黏土重量

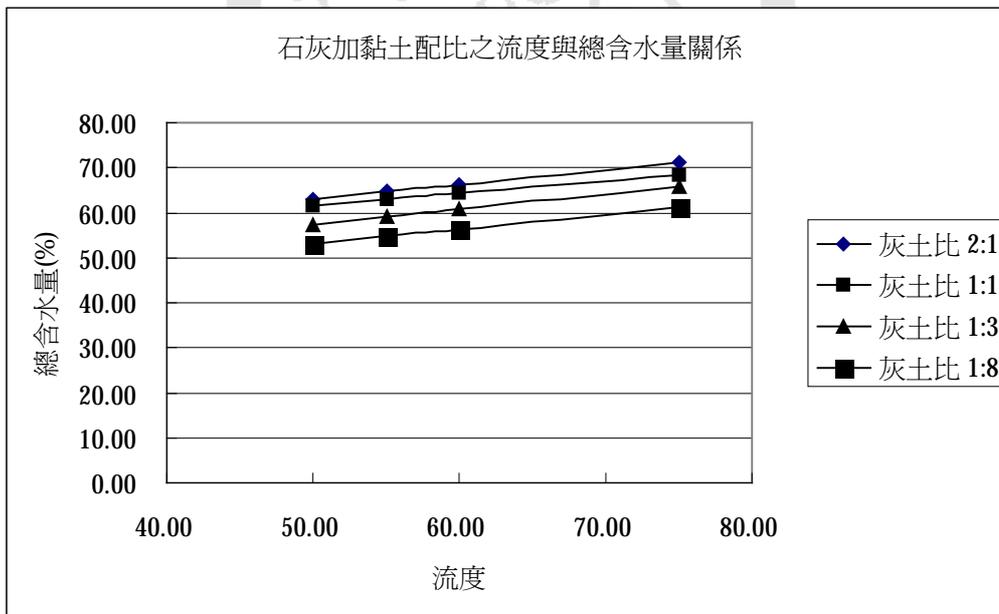


圖 4-3 石灰加黏土配比之流度與總含水量之關係

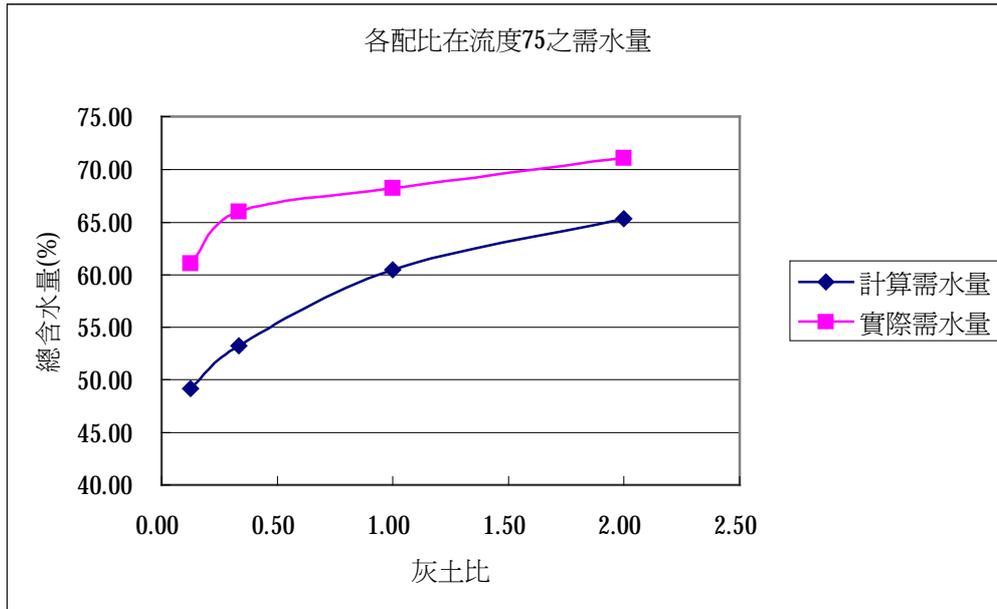


圖 4-4 石灰加黏土配比在流度 75 之需水量

4-2 抗壓試驗結果

抗壓試驗之結果如圖 4-5 及圖 4-6 所示，可見加糖試體之氣乾養置和二氧化碳養置的抗壓強度明顯較其他灰漿高。添加糯漿配比則僅有添加 20%者在氣乾養置 28 天及 56 天時較純石灰之抗壓强度高，但二氧化碳養護後之抗壓強度，添加糯漿者皆較純石灰低，然其中仍以添加 20%者之強度與純石灰漿相當，故糯漿之添加量應以 20%為宜。

添加黏土配比在氣乾養置下，14 天後抗壓強度皆較純石灰試體高，而灰土比 8:1 與灰土比 3:1 之試體抗壓強度較灰土比 1:1 及 2:1 試體高，這是因為低灰土比試體中的黏土乾燥後提供的強度。而以二氧化碳養護後則可見高灰土比者強度較佳，隨灰土比的降低，抗壓強度亦隨之降低，故適量的添加黏土等卜作蘭材料有助於強度的提高，但低灰土比時強度將接近純黏土試體。在此階段試驗中仍無法得知最佳的黏土添加量，再降低黏土的添加量強度或可再提昇。

添加砂之配比在氣乾養置時抗壓強度明顯較純石灰漿高，應是添加

砂後整體含水量降低，且水分的散逸較快，使氫氧化鈣較易固結、強度提昇較快。但在二氧化碳養置 28 天後，添加骨材各配比之強度皆與純石灰漿相近，應是膠結材之強度太低，不足以使骨材發揮其機械性的鍵結、摩擦強度所致。灰砂比 4:1 之試體在拆模後表面可見有較多的孔洞，膠體量有不足的現象，所以在使用純石灰為膠體時，灰砂比不宜小於 1:4。

添加蚵殼試體在抗壓試驗時表現出較佳的韌性，而純石灰試體則呈脆性的破壞，如圖 4-7 所示，亦即添加蚵殼有纖維加強的效果，在產生大應變時仍無整體碎裂崩解的情形。

圖 4-5 中最後三個配分別為黏土、黏土加糖漿及黏土加糯漿，試驗結果顯示添加糯漿及糖漿皆對黏土之強度無幫助。糖漿雖可提昇黏土的工作度，亦即有減水的效果，但試體乾燥過程易乾裂，造成強度的降低。故灰漿拌合時可先將石灰與水及糯漿、糖漿先行拌合，再加入黏土及砂。

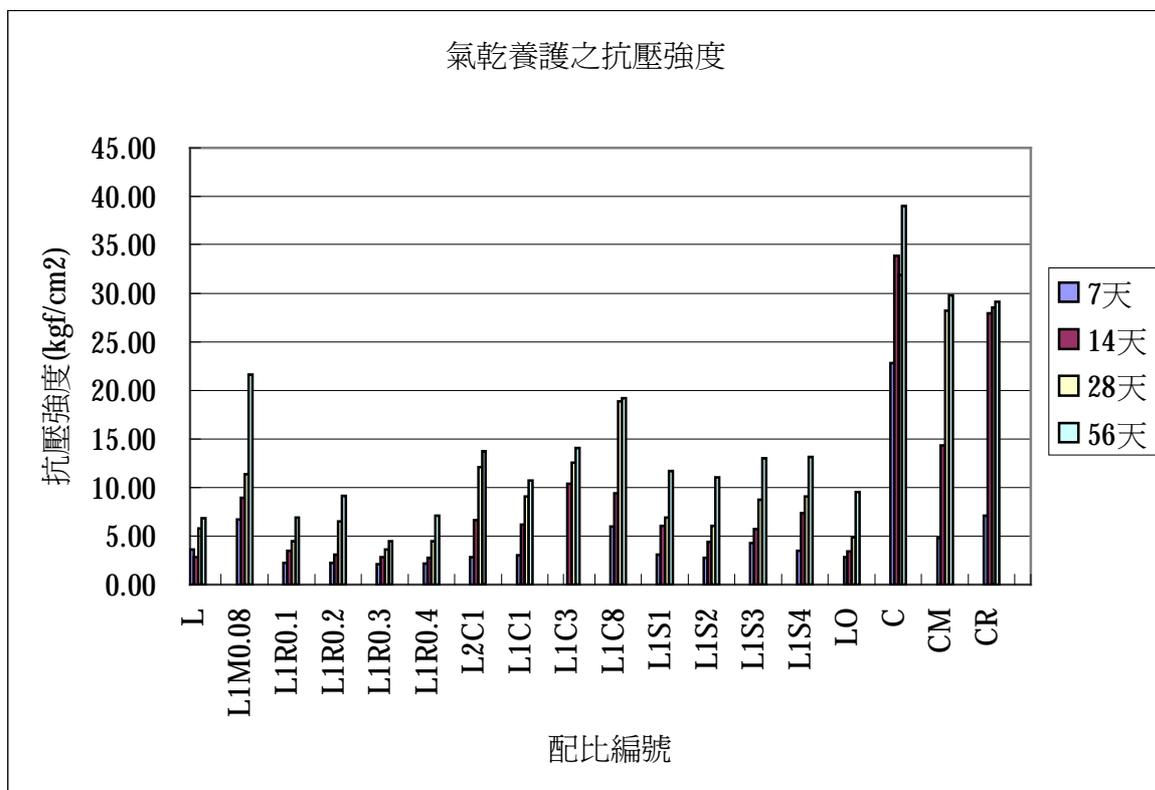


圖 4-5 氣乾養護之抗壓強度

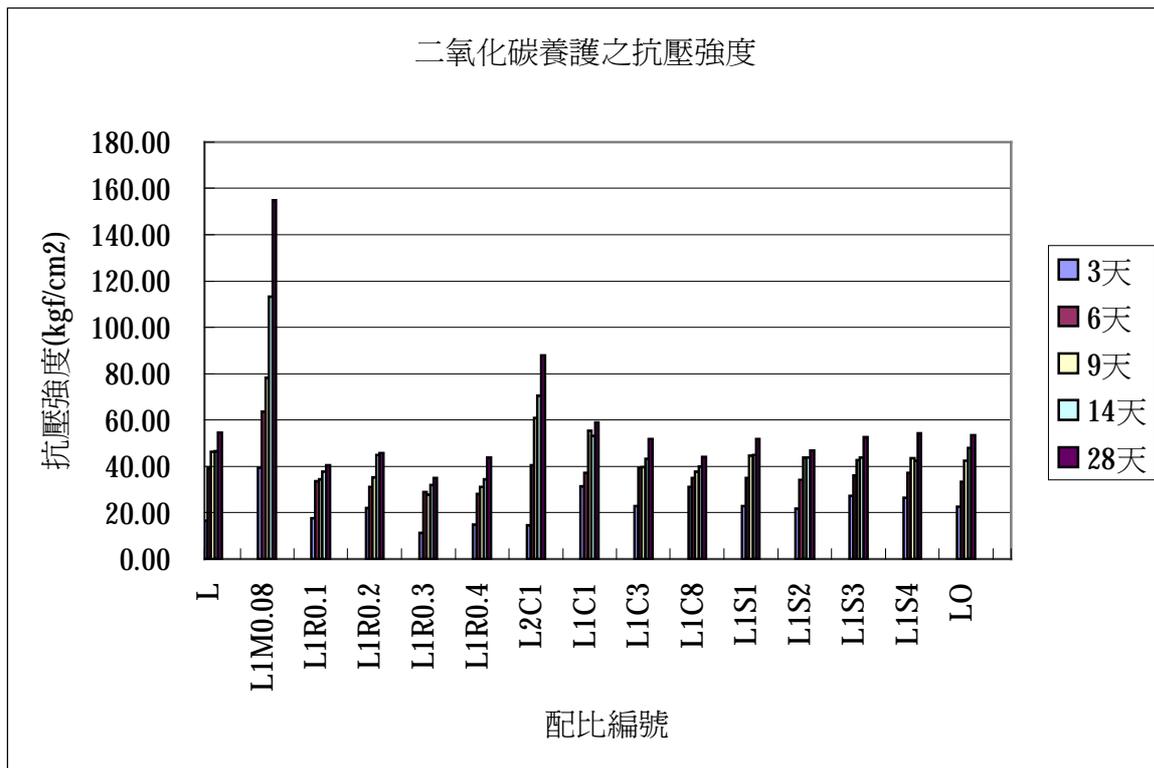


圖 4-6 二氧化碳養護之抗壓強度

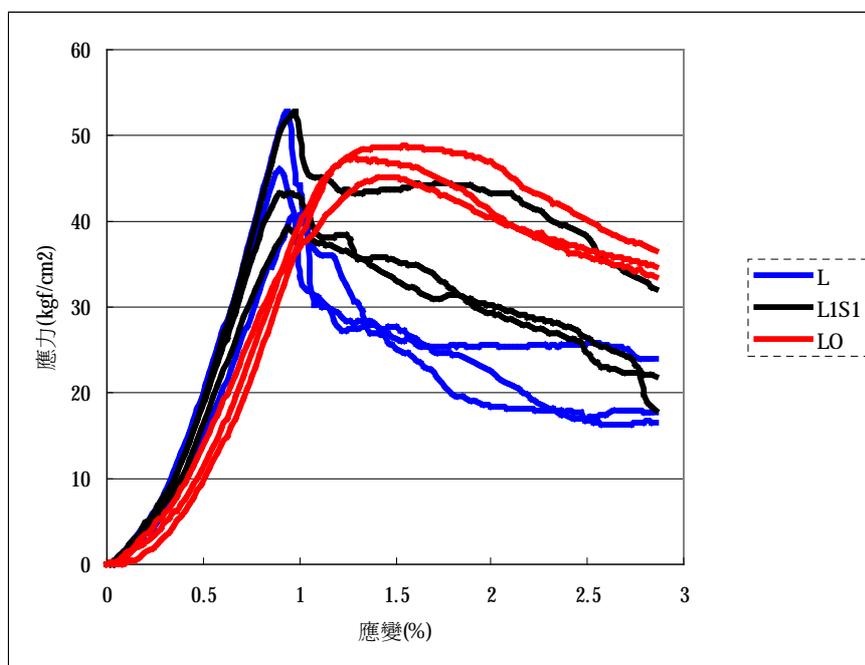


圖 4-7 純石灰、灰砂比 1:1、與添加蚶殼之應力應變曲線

4-3 物理性質試驗結果

4-3-1 碳化速度比較

1. 純石灰與含糖 8%之試體

由碳化試驗切開之試體可知含糖漿之試體最難碳化，由其乾土重與純石灰試體比較可發現含糖試體較重，即較緻密，應是較難碳化之原因。

2. 純石灰與含糯漿試體

含糯漿試體均較純石灰試體難碳化，應與糯漿試體含水量較高有關，過高之含水量不利於碳化之進行，此結果似與正常養護之情況不同，正常養護下碳化與水分之散失皆是緩慢進行的，而在高濃度二氧化碳養護下，水分的散逸速度仍接近正常狀況，而碳化速度加快許多，可能是造成加速碳化與正常養護之結果不同的原因。

含糯漿試體又以添加 20%之糯漿配比最難碳化，此配比之抗壓強度及乾縮百分比亦較其他含糯漿試體高，乾土單位重較大，顯示此添加量有助於石灰漿的內聚，應是造成碳化不易之原因。

3. 純石灰與添加黏土試體

灰土比 2:1、1:1、1:3 試體之碳化速度均較純石灰試體慢，可見石灰添加黏土可使孔隙較小，有助於最終強度的提昇，但碳化速度將較慢。在灰土比 1:8 時石灰之作用不再明顯，二氧化碳養護三天後幾已碳化完全，其強度亦與純黏土試體相差不大。

4. 純石灰與添加砂或添加蚵殼試體

觀察養護 3 天、6 天及 9 天之試體添加骨材並無加快碳化速度之功能，灰砂比對碳化速度亦無影響，且添加蚵殼之試體碳化速度又較慢，應是其片狀組織不利空氣進入造成。

設含糖試體於二氧化碳養護 28 天後才完全碳化，則以 2.8 式計算可知，在正常養護狀態下，約需五年才能碳化完全。

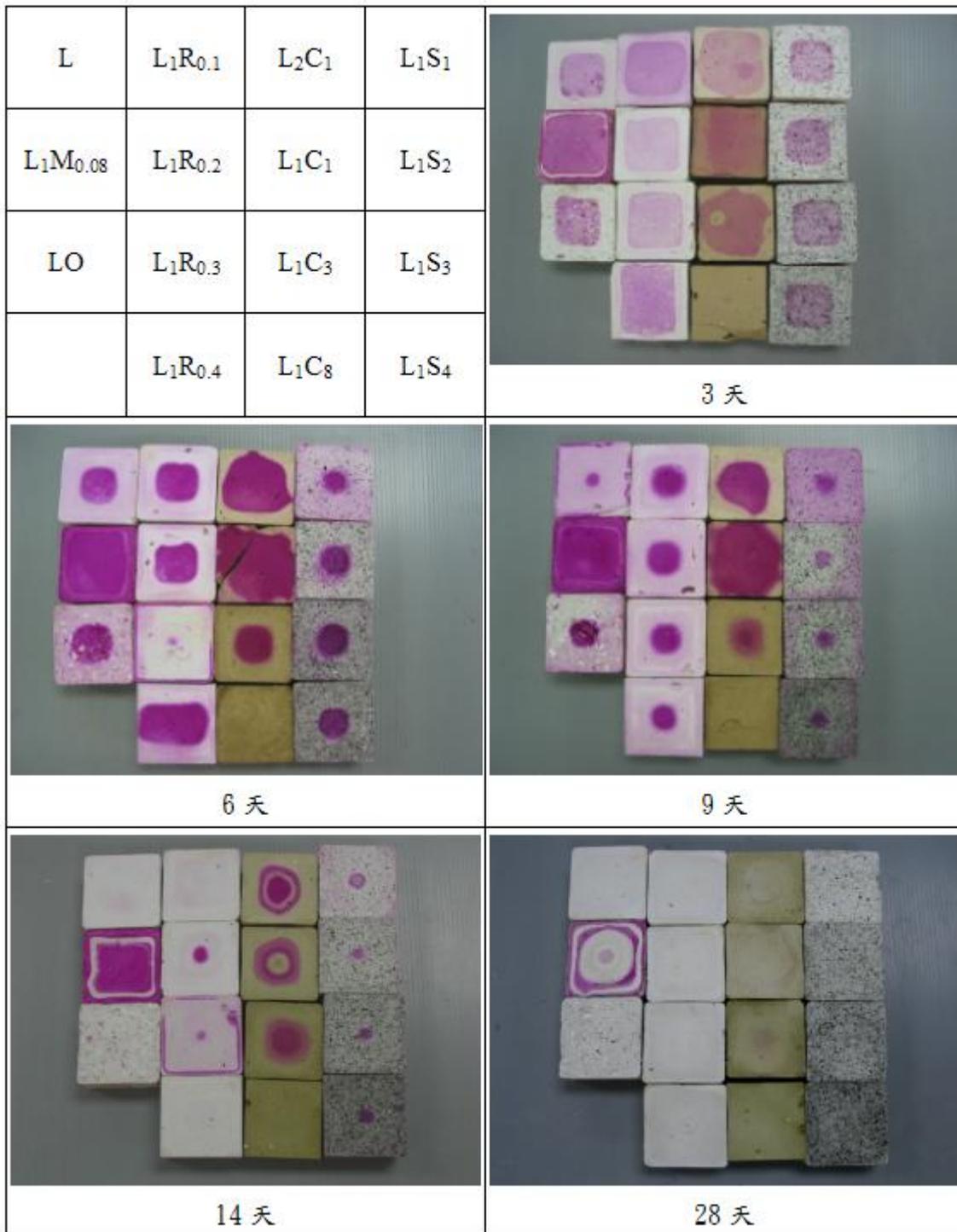


圖 4-8 碳化試驗各齡期照片

4-3-2 吸水率試驗

吸水率試驗結果如圖 4-9、4-10 及圖 4-11 所示，可見加糖漿試體結構較緊密，吸水率較純石灰漿低。加糯漿者結構較鬆散，吸水率皆較純石灰漿高，但加糯漿之配比中以加糯漿 20%者吸水率較低。

加黏土配比之吸水率較純石灰漿低，且隨黏土含量的增加而降低，又從浸水 24 小時含水量與浸水 2 分鐘含水量之差值可看出，多數試體兩種吸水率相差不大，但黏土含量多時水分較不易滲入，而使兩吸水率有較大之差別。

加入骨材後，因骨材之吸水率較石灰低，所以隨骨材含量增加吸水率降低。而蚵殼孔隙較多，因此加蚵殼配比之吸水率比 L₁S₁ 配比大。

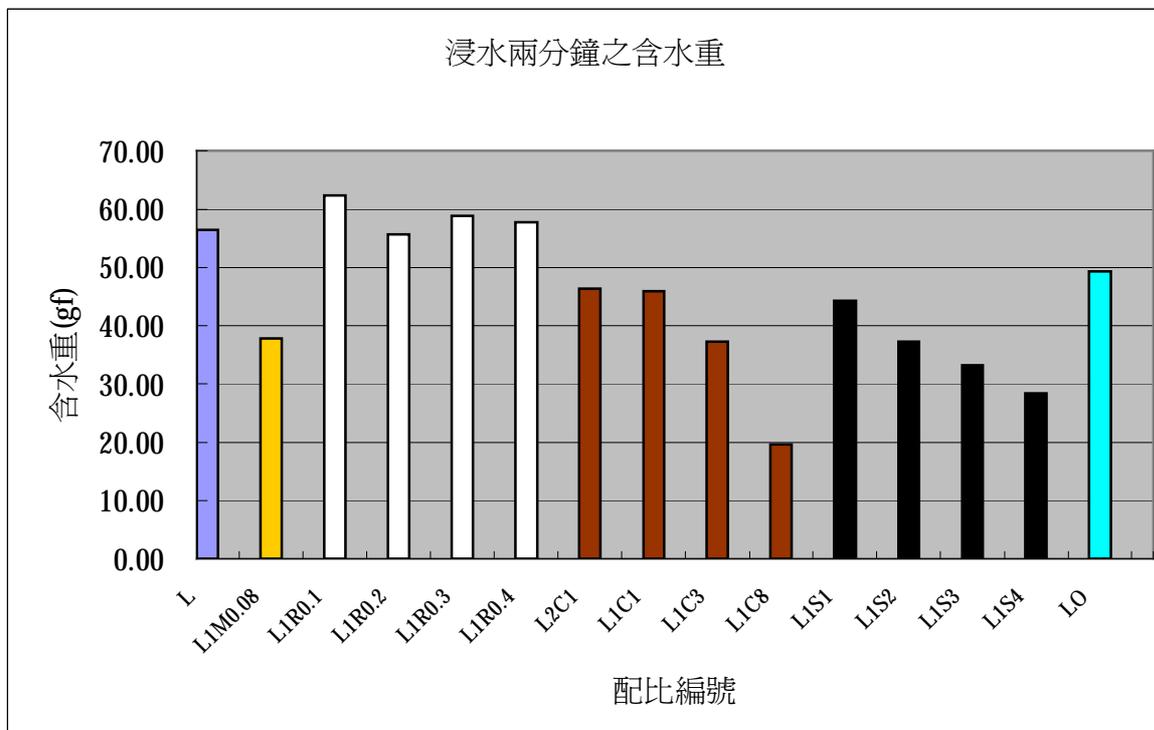


圖 4-9 浸水兩分鐘之含水量

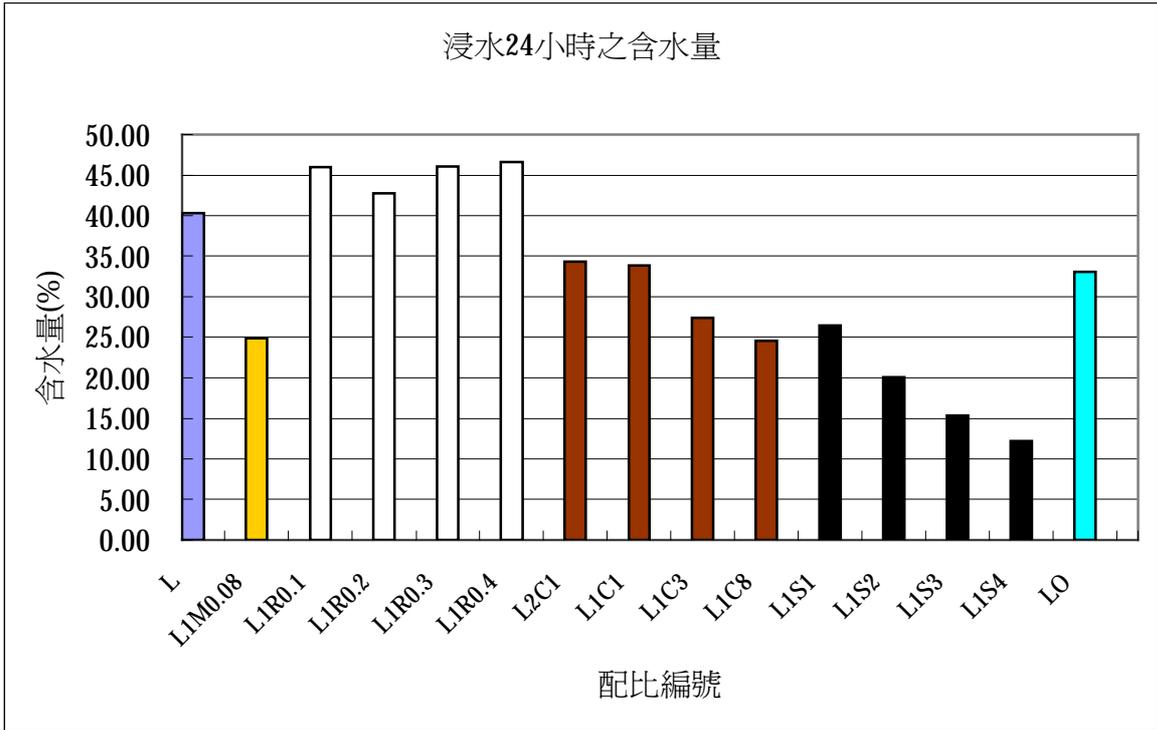


圖 4-10 浸水 24 小時之含水量

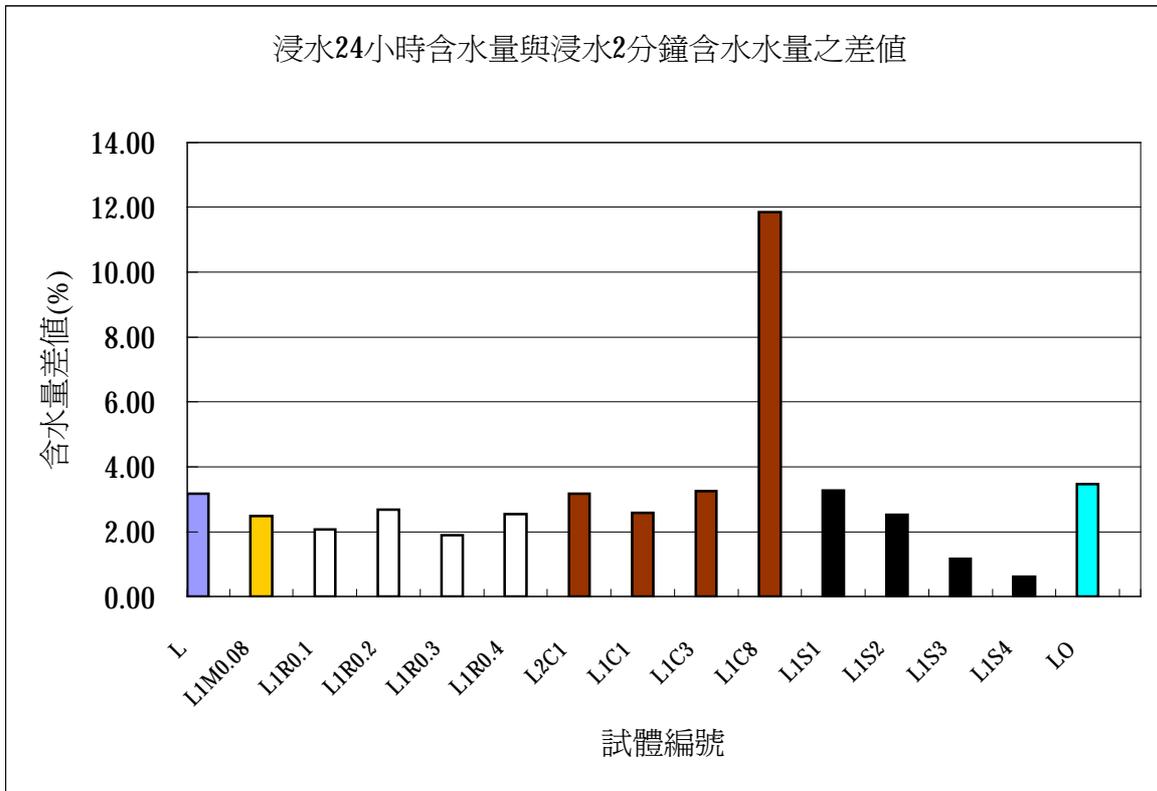


圖 4-11 浸水 24 小時含水量與浸水 2 分鐘含水量之差值

4-3-3 自修復試驗

試驗結果如圖 4-12 所示，對照試驗前超因波 P 波波速與試體之抗壓強度、單位重可知波傳速度與試體之強度及單位重有關，加糖試體單位重較純石灰試體大，且强度高、結構緊密，故波傳速度較快。而添加糯漿者隨添加量的增加，單位重及波傳速度降低，顯示其結構較為鬆散。

添加黏土者，灰土比 1:1 之試體波傳速度較灰土比 2:1 者快，且前者之單位重亦較後者大，但抗壓強度則以灰土比 2:1 者較大，可見波傳速度不只與結構之膠結程度有關，亦與單位重有關。

添加砂者波傳速度隨砂添加量的增加而增加，是因骨材較石灰之波傳速度快而造成的結果。而添加蚵殼試體之波傳速度較灰砂比 1:1 的試體快，應是 P 波循片狀之蚵殼傳遞所造成。

養護後各配比之波速普遍皆有回復的現象，但因預壓造成之波傳速度降低程度難以控制，使養護後之波速回復量難以比較。

P 波波速有部分試體養護後波速較試驗前快，應是預壓造成試體壓密的結果。以石灰含量較多之試體較易發生此現象，添加較多黏土及添加骨材之試體則無此現象。除了與石灰較易受壓密之原因外，添加骨材試體在預壓後造成之波速下降較多，養護後波速不易回復，可能亦是造成此現象的原因。

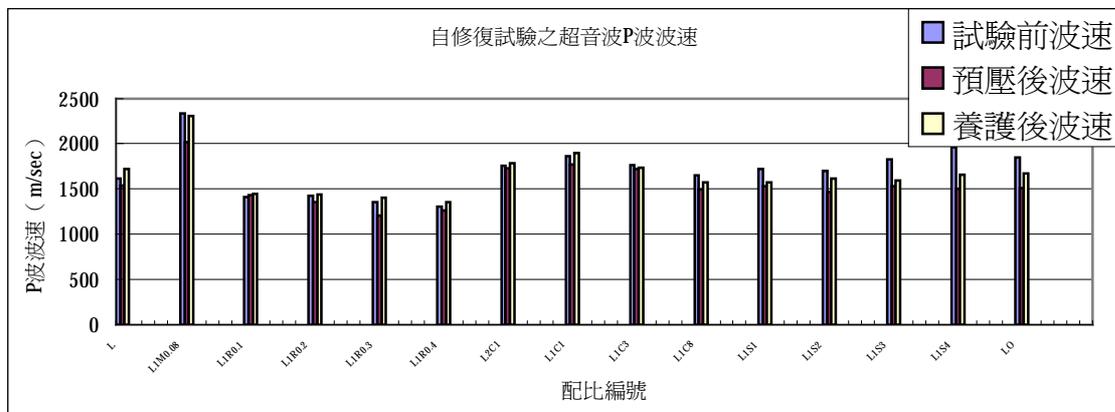


圖 4-12 自修復試驗試體超音波波速

4-3-4 浸泡硫酸鈉溶液耐久試驗結果

此試驗參考 CNS 1167 使用硫酸鈉或硫酸鎂之粒料健度試驗法而做，第五循環後之結果如圖 4-13 所示，其中 L₁C₈ 之配比在第一循環時即粉碎，L₁C₃ 配比則在第三循環後粉碎，L₁C₁ 配比在第五循環時粉碎。

在添加砂的配比中 L₁S₃ 及 L₁S₄ 之損耗較大，其次為 L₁S₂ 配比。添加糯漿配比中 L₁R_{0.4} 有一試體幾近粉碎。除前述之配比外，其餘配比之損耗情況相近，皆為表面剝落或試體開裂，而以添加糖漿之試體表現最佳，表面無剝落，亦無開裂的情形。未粉碎之試體試驗結束後重量大多增加，應是硫酸鈉停留於試體內所造成。

此試驗之結果可能無法代表實際之耐久性，規範中亦說明此試驗精確度較差。但黏土含量太多時，不利耐久性，而添加糖漿試體耐久性較佳之結果應是可以肯定的。

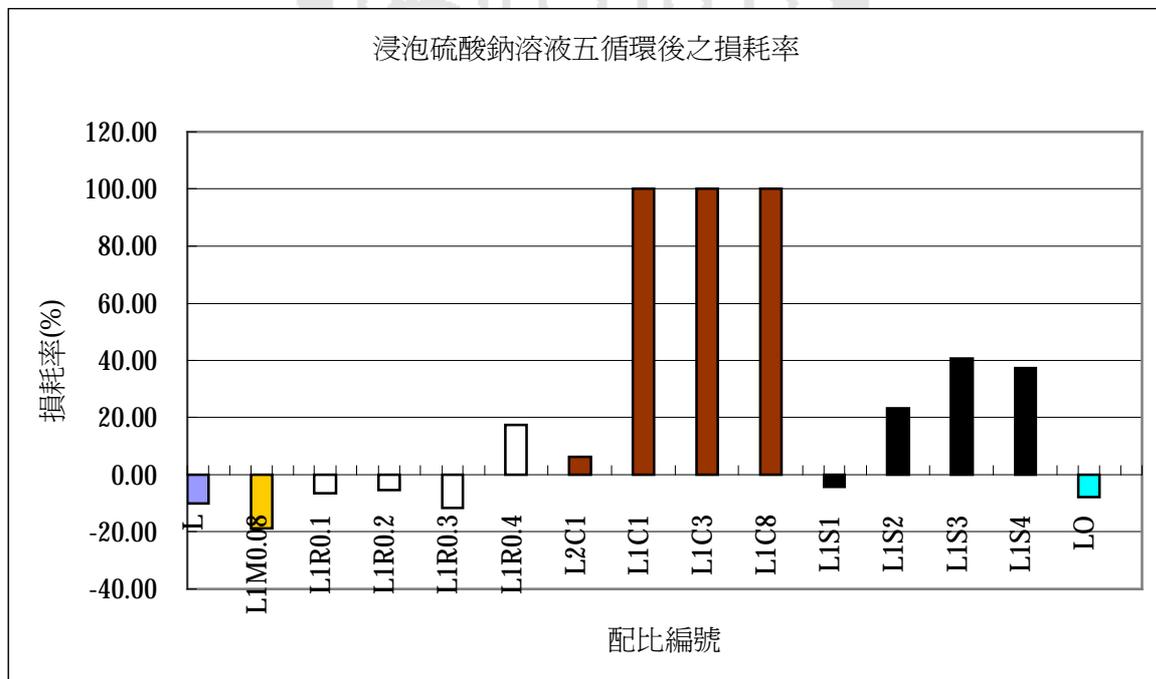


圖 4-13 各配比浸泡硫酸鈉溶液第五循環之損耗率

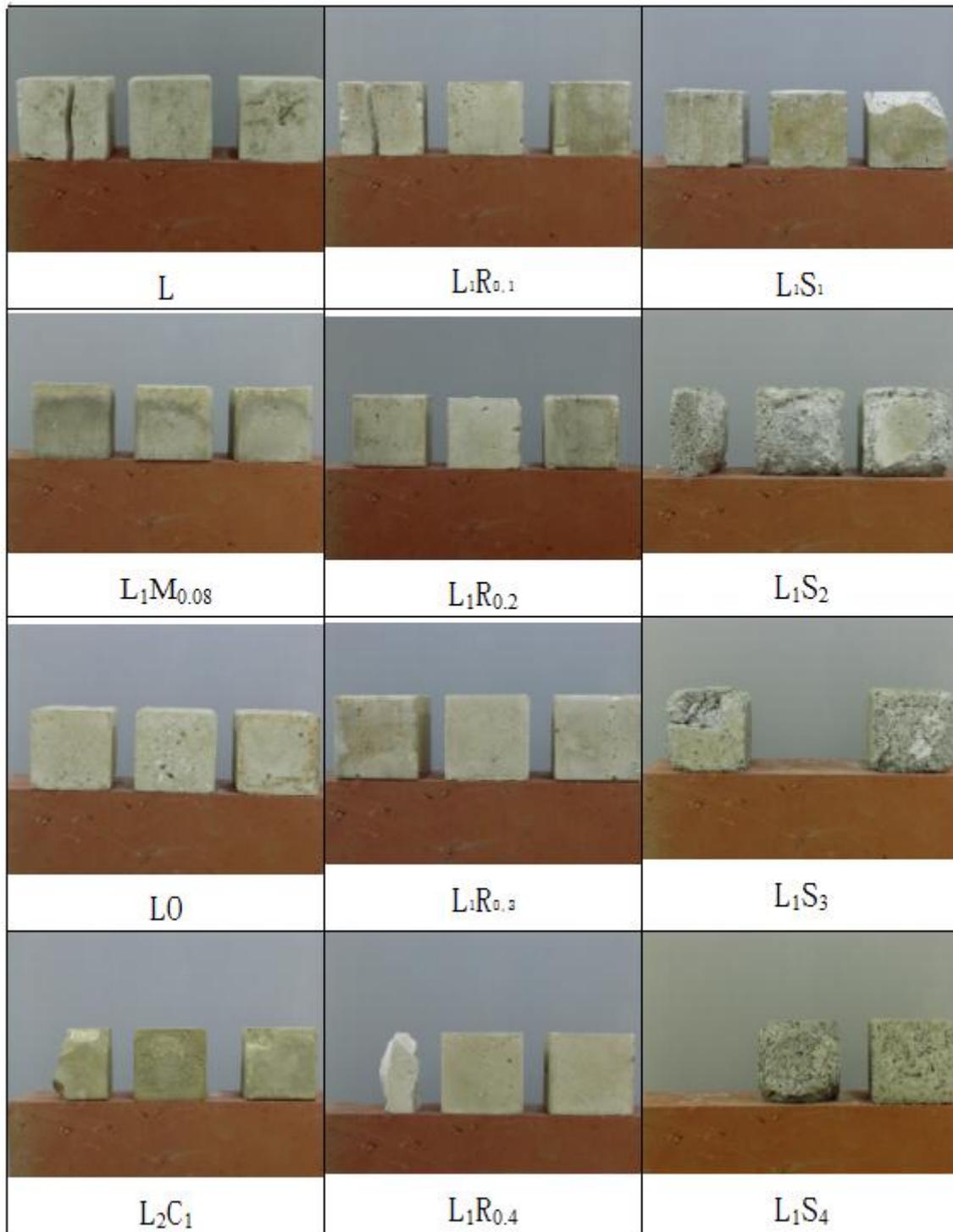


圖 4-14 各配比於浸泡硫酸鈉溶液第五循環後之照片

4-3-5 表面升溫性質試驗結果

表面升溫性質試驗結果如圖 4-19 所示，由加熱終止時熱影像溫度值減初始熱影像溫度值可得表格中的熱影像(4)，而降溫後熱影像溫度值減加熱終止時熱影像溫度值可得表格中的熱影像(5)。

由熱影像(4)與熱影像(5)可知，僅有灰砂比 1:4 之試體與水泥的升溫、降溫速度相當，其餘灰漿皆較水泥慢。由圖 4-15 可見加糖漿試體較緻密，其升溫速度較純石灰試體稍快，但仍低於水泥。由圖 4-16 可知，加糯漿試體之性質與純石灰試體相當，且並無明顯隨糯漿添加量之增加而改變其表面升溫性質的現象。由圖 4-17 可知，添加黏土試體其升降溫速度皆較純石灰快，且亦未因黏土添加量改變而改變其表面升溫性質，此現象可能因材料結構的連續性、材料的顏色及材料組成比例不同，皆會影響表面升溫性質而造成此結果。

添加砂之配比則隨添加量增加，升降溫速度增快，見圖 4-18。添加蚶殼者與 L_1S_1 配比比較，可發現添加蚶殼之升降溫速度較慢，除因蚶殼孔洞較多、熱傳不易外，試體的表面顏色可能亦是影響因素。

由此試驗結果可知傳統建築中以黏土為中間層、表面以白灰粉刷的隔間方式，是一種有助於居住空間溫度穩定的方法。

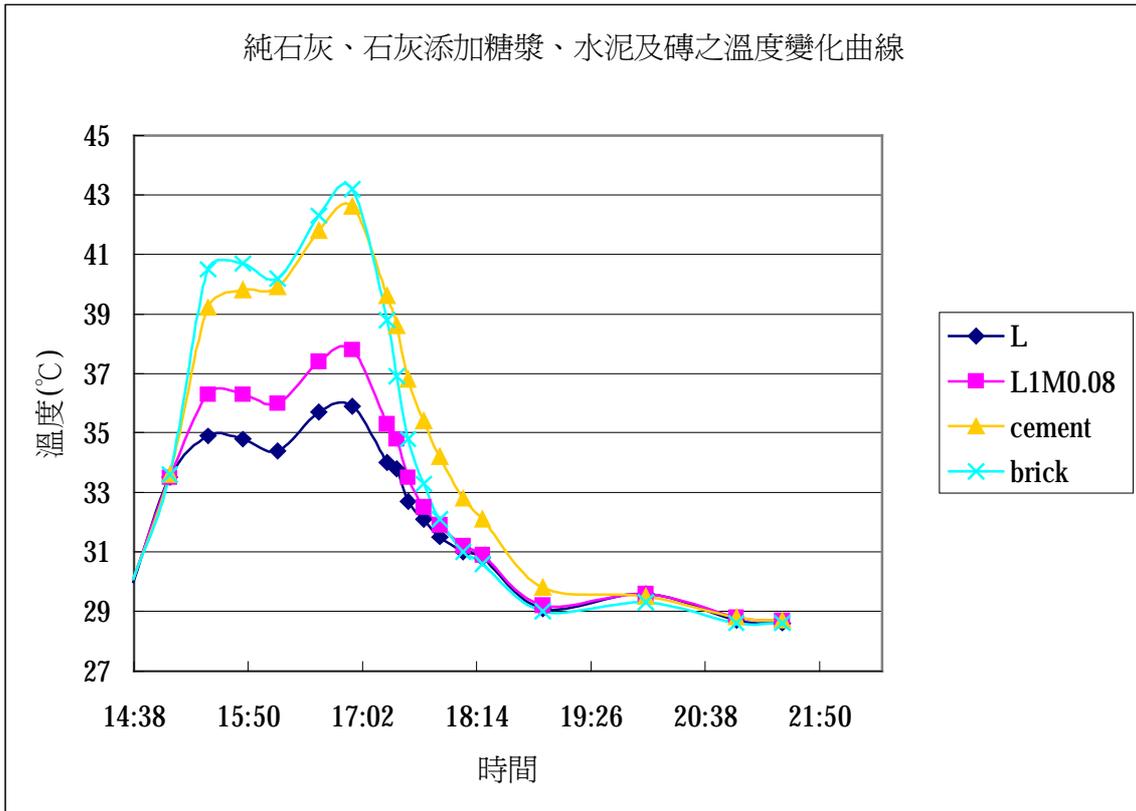


圖 4-15 純石灰、石灰添加糖漿、水泥及磚之溫度變化曲線

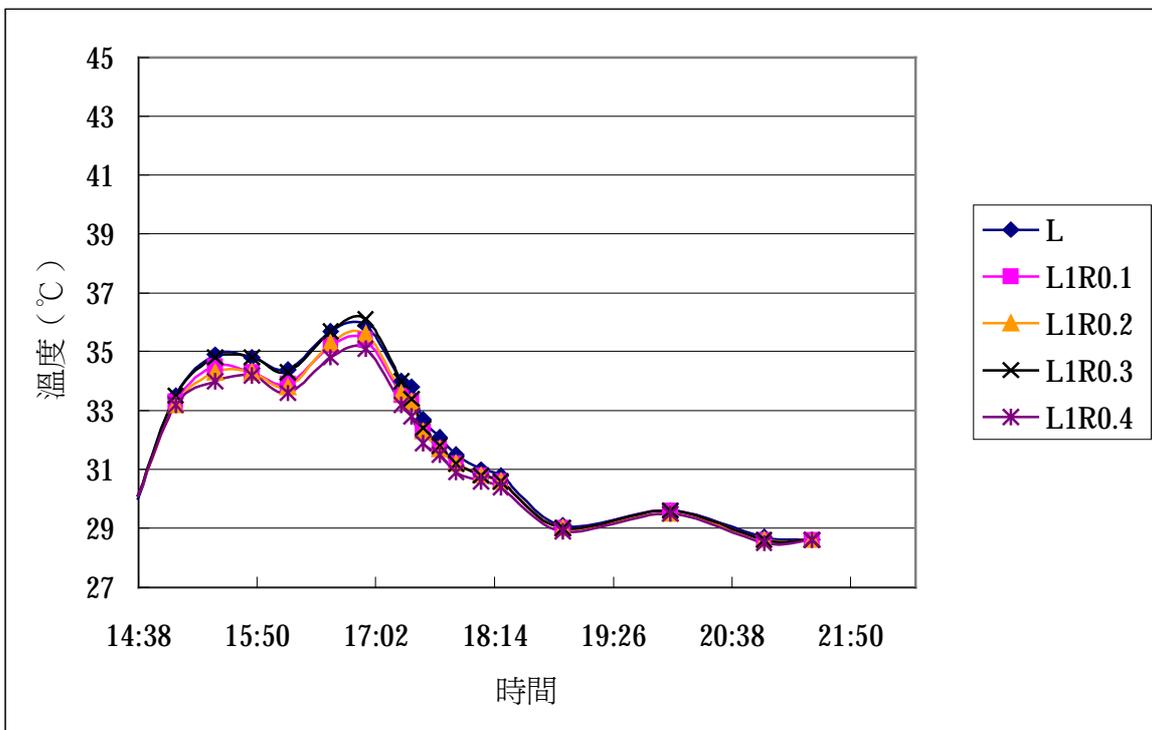


圖 4-16 純石灰及添加糖漿配比之溫度變化曲線

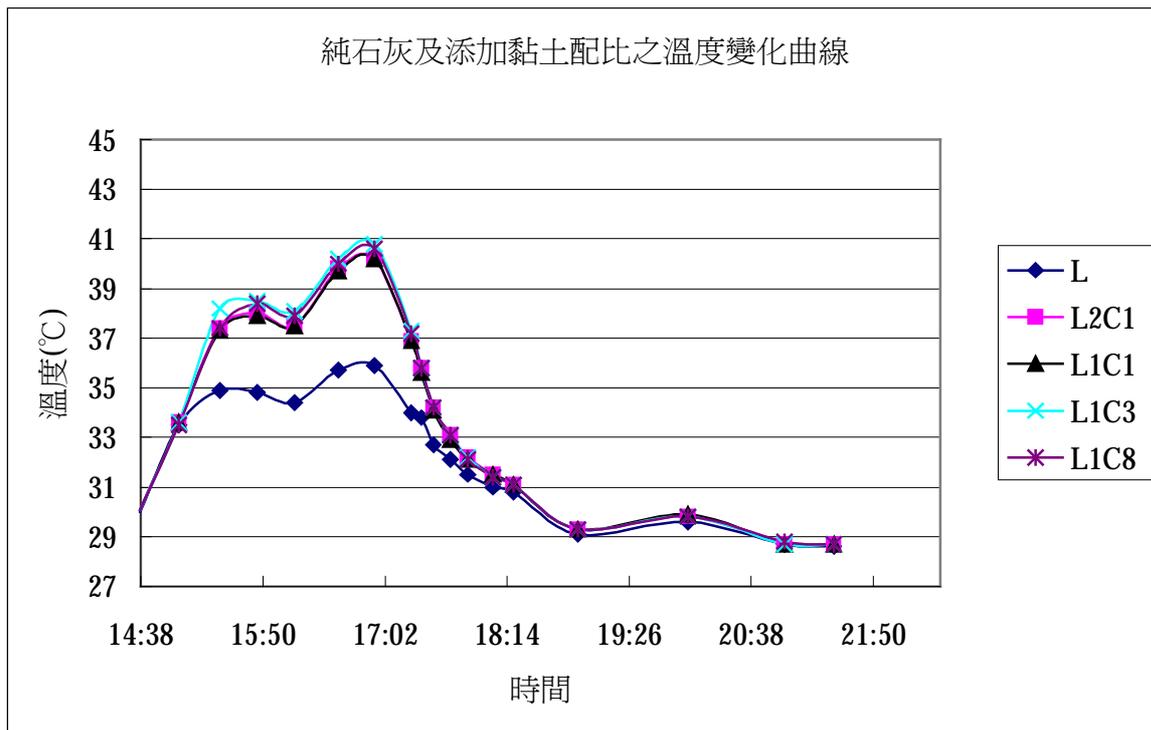


圖 4-17 純石灰及添加黏土配比之溫度變化曲線

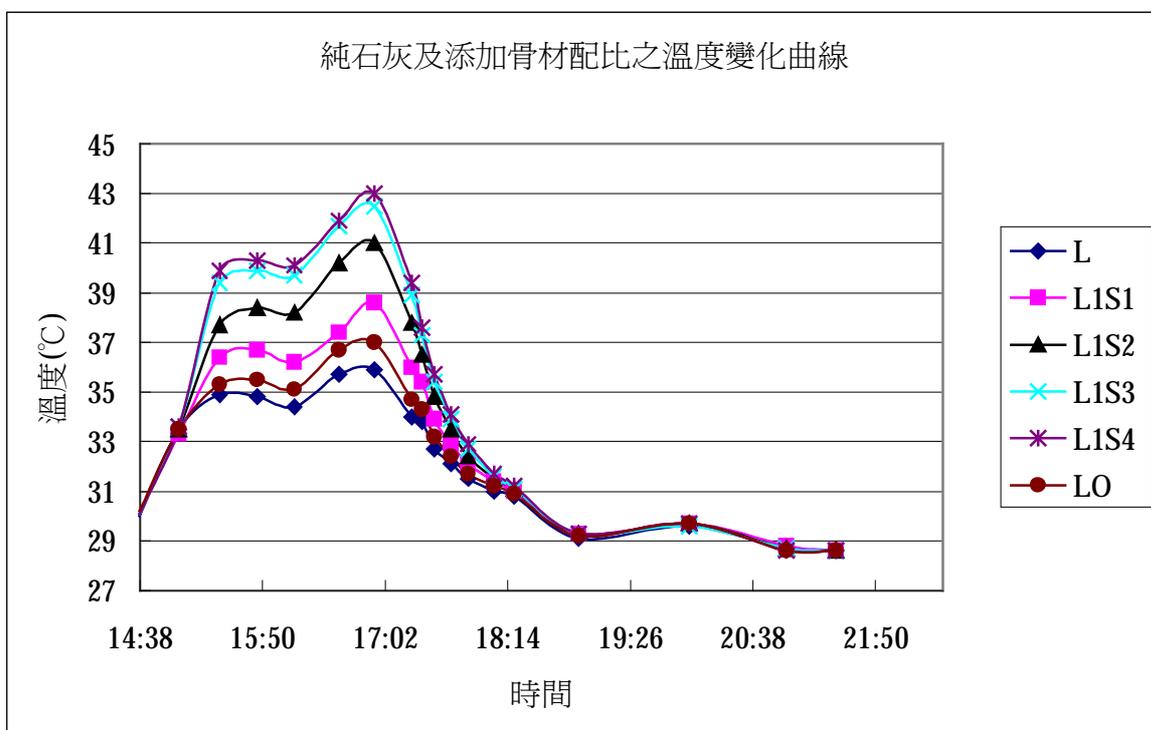


圖 4-18 純石灰及添加骨材配比之溫度變化曲線

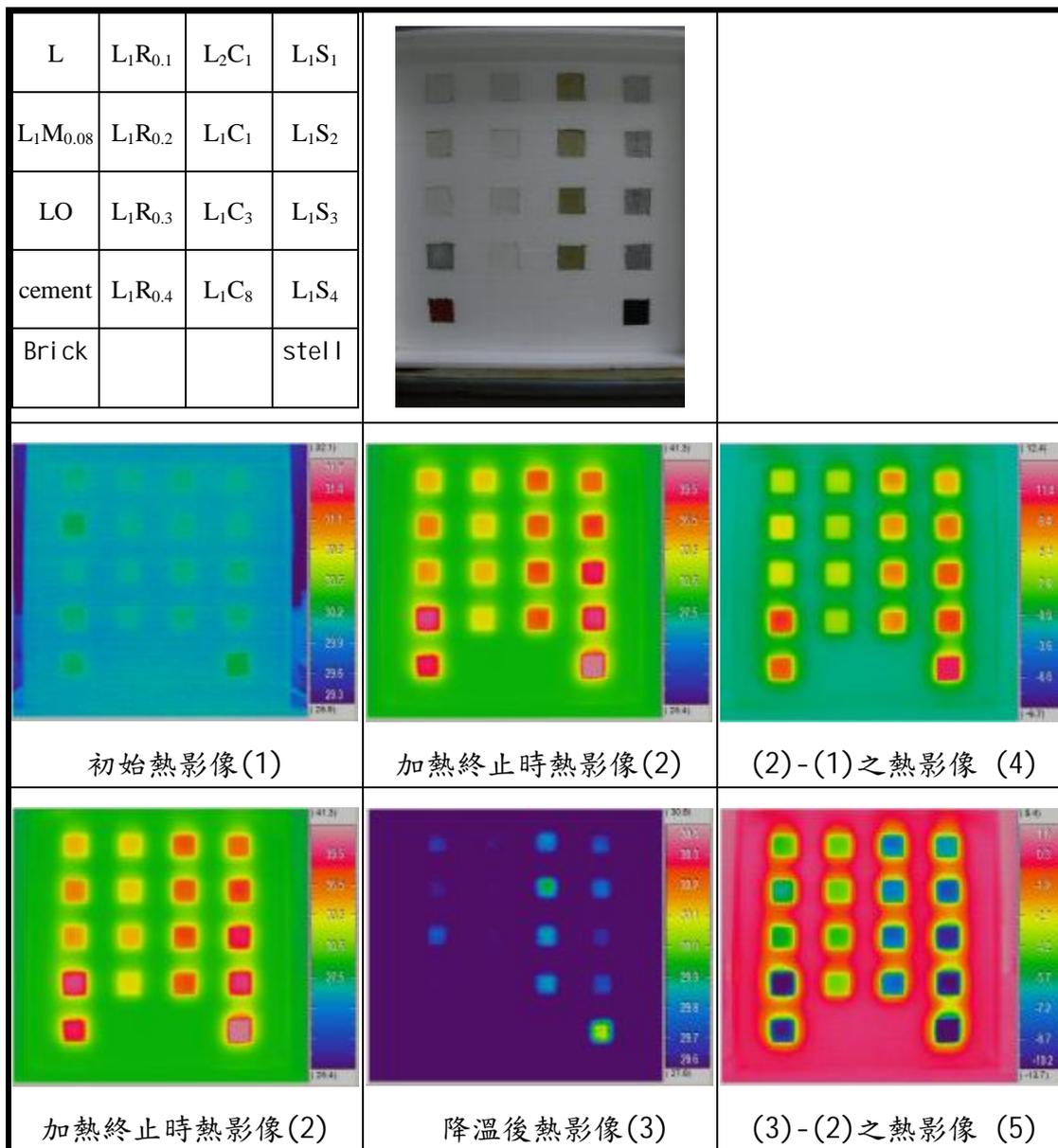


圖 4-19 表面升溫性質試驗結果

4-3-6 其他物理性質

1. 含水量

由圖 4-20 氣乾養護各齡期之含水量及圖 4-21 二氧化碳養護各齡期之含水量可知，添加糖漿試體初始之含水量較純石灰漿少，但在氣乾 14 天後反而是添加糖漿試體之含水量較高，且後期之含水量約在 3~4% 之間，而純石灰漿之含水量則會降到 2%，然而添加糖漿試體之抗壓強度始

終較純石灰漿高，可見在添加糖漿減水後，試體之含水量並非控制灰漿強度之主要因素。

添加糯漿試體在氣乾養置狀況下，七天及十四天之含水量以添加 10% 及 20% 者較高，30% 及 40% 者較低，但二十八天後含水量以添加 40% 者最高，其餘則隨配比中糯漿添加量的降低而降低。亦即添加較多的糯漿在初期乾的較快，但晚期則會保有較多的水分。

添加黏土試體初期之含水量與拌合時水量有關，灰土比高者含水量高，而晚期時高灰土比之含水量接近純石灰漿之含水量。隨灰土比降低，含水量稍有增加，也就是黏土之保水性較石灰高。

添加砂之配比拌合時之整體水量即較低，十四天後各配比之含水量幾為純石灰五十六天之含水量，且添加砂之配比在氣乾十四天之抗壓強度幾可達純石灰試體氣乾養置五十六天之強度，見圖 4-5，故知石灰之初期強度與含水量有關，初期強度主要由氫氧化鈣乾燥結晶而提供。添加蚵殼者拌合時之整體含水量即較高，乾燥的速度又較慢，造成氣乾養置之抗壓強度較添加砂者低，故不宜全以蚵殼為骨材。

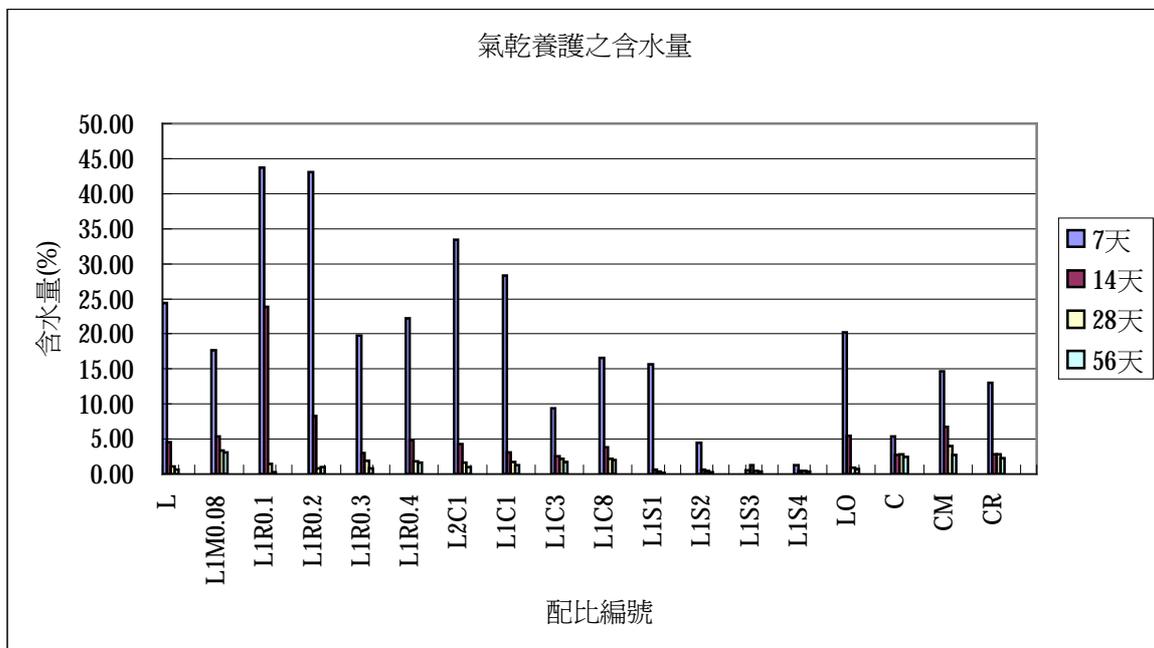


圖 4-20 氣乾養護各齡期之含水量

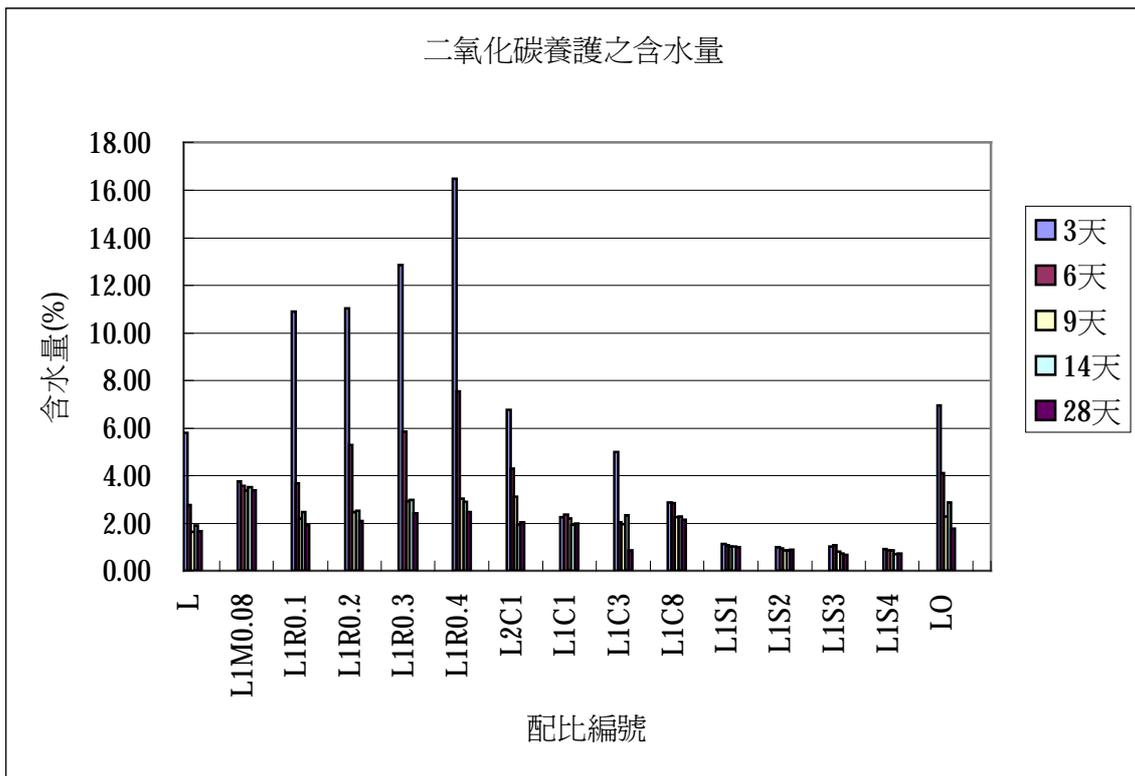


圖 4-21 二氧化碳養護各齡期之含水量

2. 乾縮比

圖 4-22 及圖 4-23 中各配比之乾縮量並未有明顯隨齡期之增加而增加的趨勢，可見各試體之乾縮大部分皆在七天內完成。

添加糖漿之試體乾縮量較純石灰大，且試體上表面可見明顯裂縫，此缺點在加入骨材後應可避免。添加糯漿配比的乾縮量以添加 20% 者稍大，但整體而言並無明顯趨勢。

添加黏土配比之乾縮量則隨黏土添加量的增加而增加，欲得強度佳、乾縮量少之灰漿應避免加入太多的黏土，而使用低灰土比之灰漿時則應加入稻桿、穀殼或麻絨等纖維材以避免乾裂。

添加砂之配比乾縮量皆相當，而加蚵殼者乾縮量稍低。

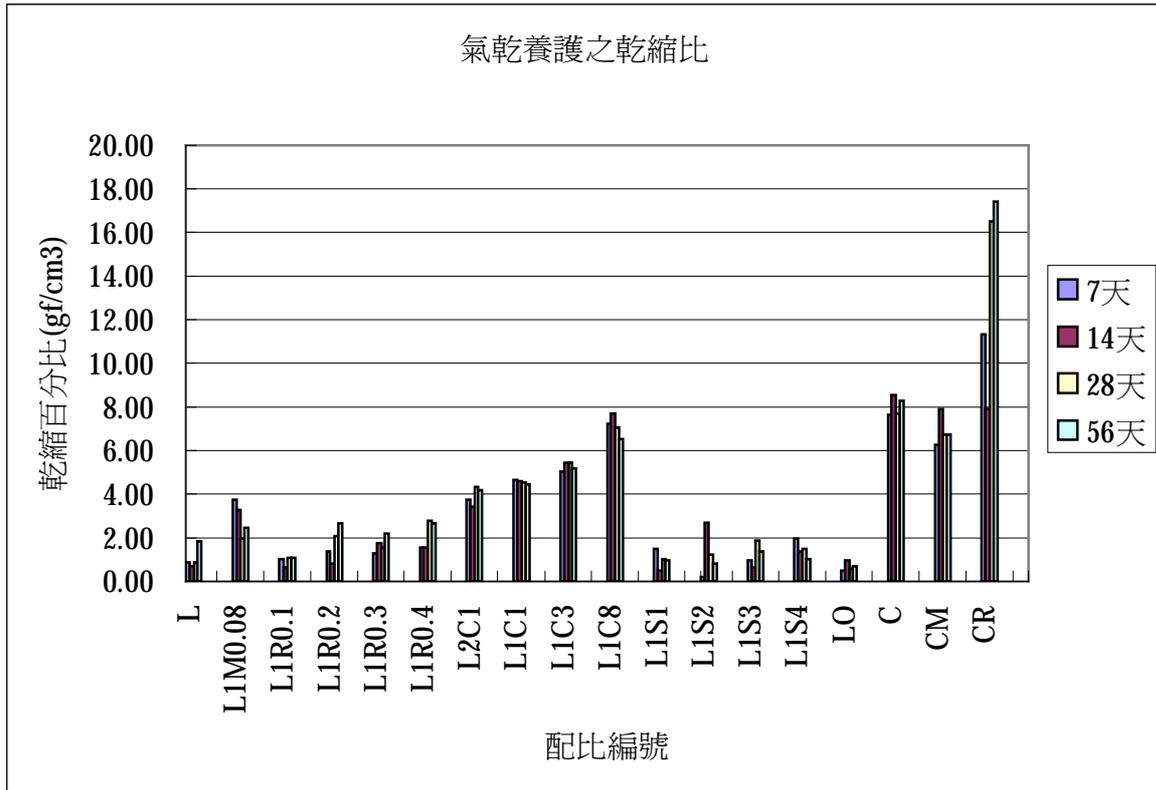


圖 4-22 氣乾養護各齡期之乾縮比

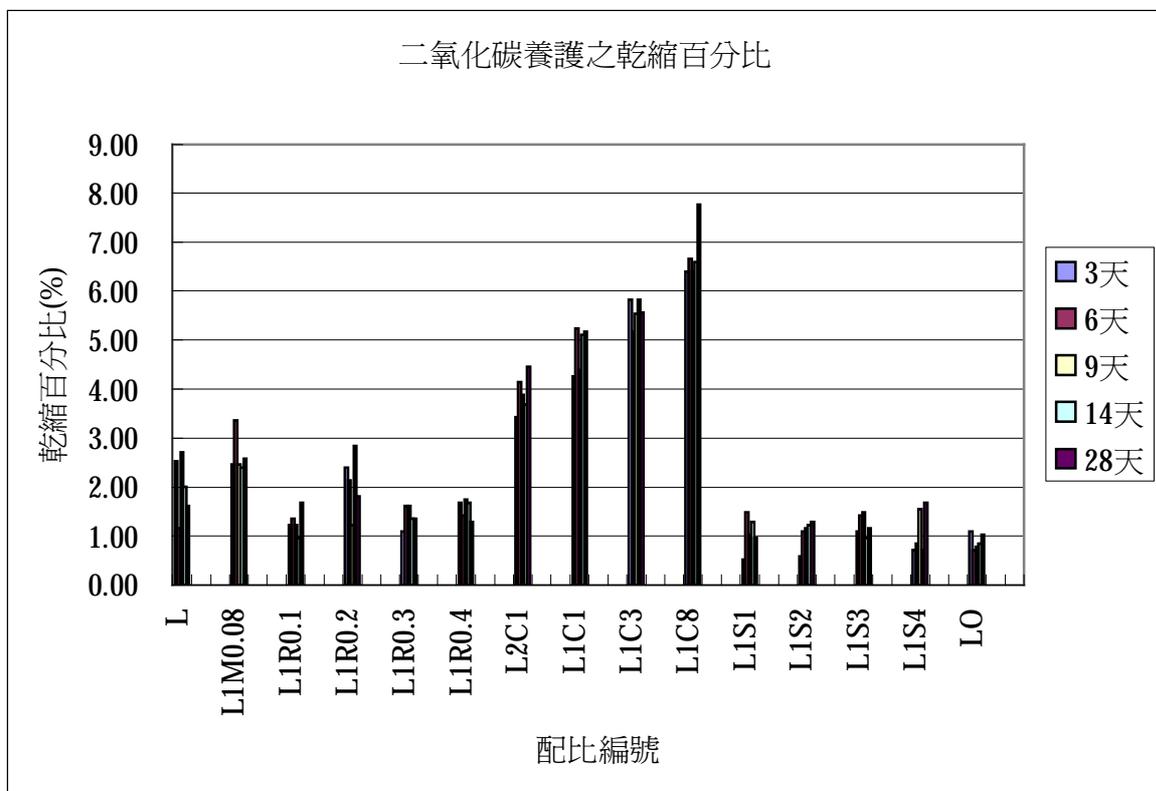


圖 4-23 二氧化碳養護各齡期之乾縮比

3. 乾單位重

圖 4-24 為氣乾養護各齡期之乾土單位重，圖 4-25 為二氧化碳養護各齡期之乾土單位重，由圖中可知各配比之乾單位重普遍有隨齡期而增加的趨勢。加糖漿配比的乾單位重比純石灰配比大，亦即較緻密。添加糯漿配比之乾單位重皆比純石灰配比小，且隨添加量的增加而降低。

添加黏土或添加砂時，單位重隨添加量的增加而增加。添加蚵殼之配比與 L1S1 相較，加蚵殼配比的乾單位重較低，可見蚵殼為輕質骨材。

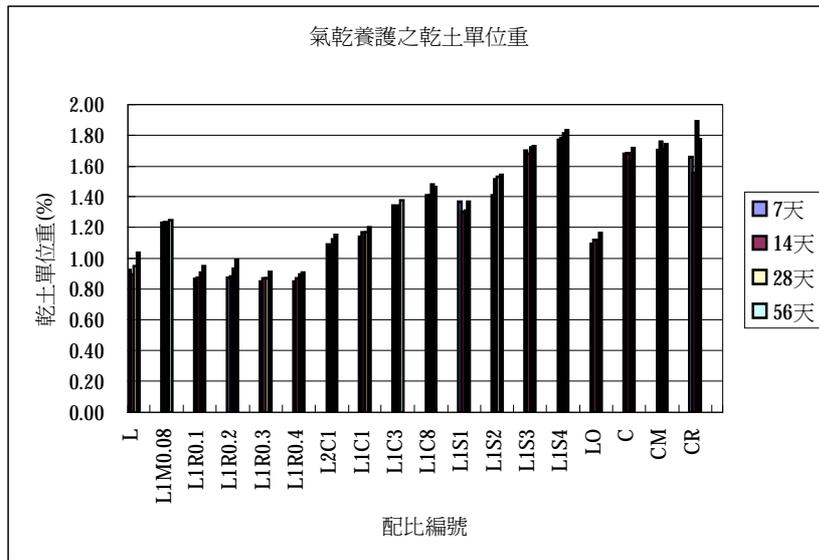


圖 4-24 氣乾養護各齡期之乾土單位重

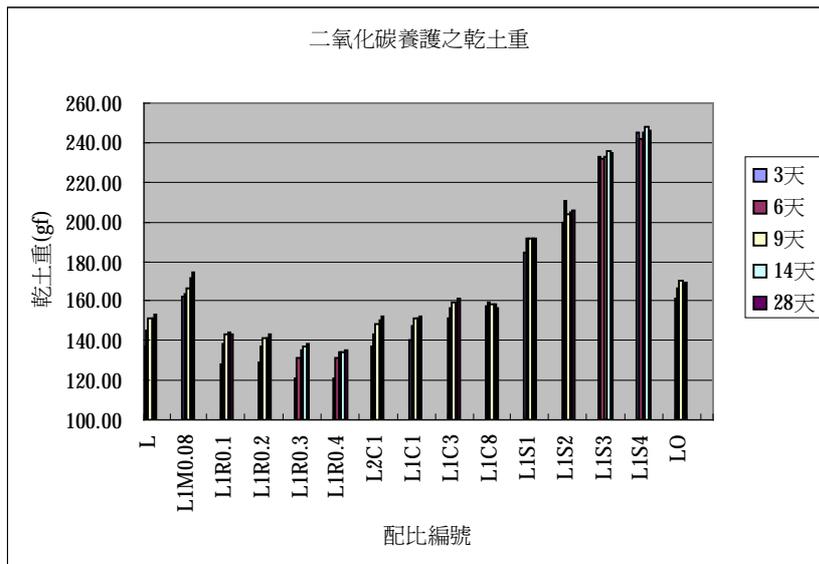


圖 4-25 二氧化碳養護各齡期之乾土單位重

4-4 成分與微觀結構分析

4-4-1 熱重分析與 SEM&EDS 分析結果

取以二氧化碳養治 35 天，試體中氫氧化鈣已碳化為碳酸鈣，編號 L、L₂C₁、L₁C₃、L₁S₃ 之試體施做熱重分析試驗，圖 4-26 及表 4-3 為熱重分析之結果。取編號 L、LM_{0.08}、L₁R_{0.4}、L₂C₁、L₁C₃ 及 L₁S₃ 之試體施做 SEM&EDS 分析。為得到較大的分析面積，施做 EDS 分析時採用 30 倍的放大倍率。試驗結果如表 4-4 所示。

依第三章所述之計算方法加以分析，推估得灰土比如表 4-5 所示，EDS 之分析結果明顯高估灰土比，應是黏土及砂顆粒表面附著之碳酸鈣並未在試體磨平時被磨乾淨，使 EDS 測得包含顆粒間與顆粒表面的鈣含量，圖 4-28 為 L₁S₃ 配比中的砂顆粒放大 2000 倍的影像，表面可見碳酸鈣黏附。

熱重分析推估之灰土比與實際配比較為接近，但如灰漿中有添加蚵殼，則因蚵殼與石灰碳化後同為碳酸鈣，使熱重試驗仍難以解析出灰土比。

加糖漿的試體在 30 倍的 SEM 影像中呈現平整而無孔洞的表面，在 2000 倍之 SEM 影像中，除可見到與純石灰試體相同的細小碳酸鈣外，亦可見到較大的結晶顆粒，或被磨平、無細小顆粒的平滑表面，如圖 4-20 所示。圖 4-27 中 L₂C₁ 配比在 2000 倍的 SEM 影像中全面顯現熔融狀的膠結，而 L₁C₃ 配比則僅有部分區域有此現象，可見添加黏土試體在高灰土比時可與石灰膠結成連續的結構，進而提昇強度。

添加糯漿試體在 30 倍的 SEM 影像中可見有較多的孔洞，在 2000 倍的 SEM 影像中只見石灰顆粒的影像與純石灰試體並無明顯差別。

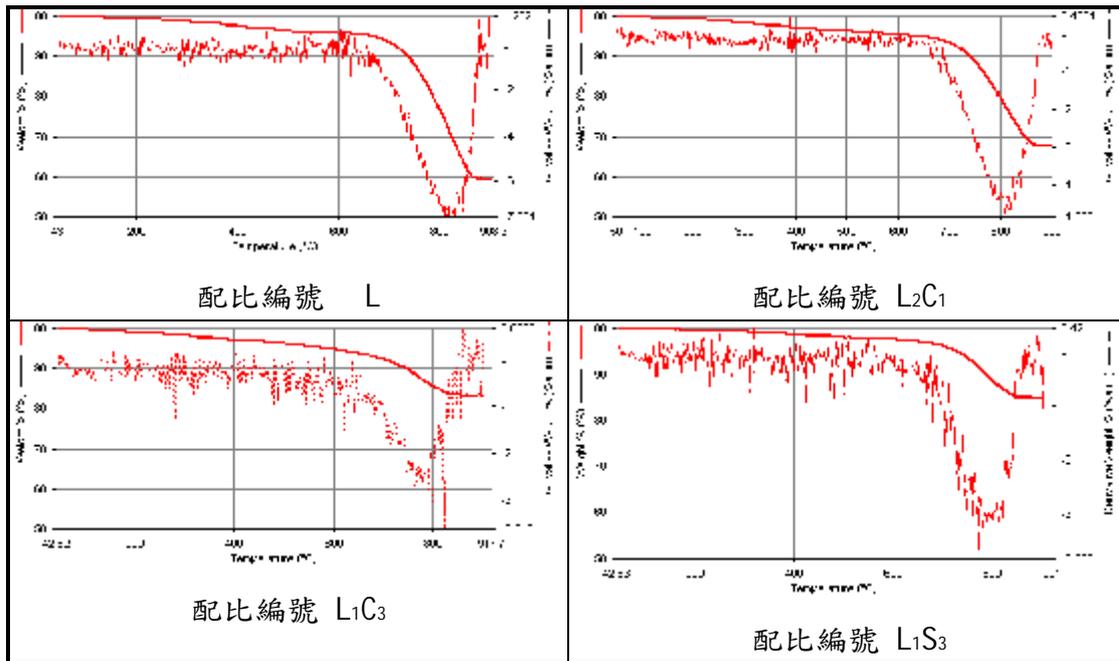


圖 4-26 熱重分析結果曲線

表 4-3 熱重分析結果數值

溫度 \ 配比編號 剩餘重量 百分比	L	L ₂ C ₁	L ₁ C ₃	L ₁ S ₃
210 °C	99.25	99.20	98.97	99.57
470 °C	96.89	96.60	96.71	98.36
520 °C	96.18	96.21	96.17	98.05
660 °C	95.28	94.74	93.55	97.12
870 °C	59.68	67.78	83.28	84.98

表 4-4 EDS 分析之各配比元素重量百分比

配比編號 元素	L	LM	L ₁ R _{0.4}	L ₂ C ₁	L ₁ C ₃	L ₁ S ₃
C	12.55	9.88	11.82	10.08	3.38	10.81
O	52.23	52.36	55.66	51.67	54.37	54.22
Na	0.00	0.00	0.44	0.00	0.41	0.00
Mg	1.77	1.81	1.76	0.93	1.19	1.19
Al	0.33	0.40	0.00	1.25	4.71	2.01
Si	0.36	0.40	0.47	4.26	13.76	6.97
Cl	0.21	0.00	0.28	0.00	0.26	0.23
K	0.00	0.00	0.00	0.25	1.33	0.44
Ca	32.54	34.83	28.52	30.54	16.75	22.84
Ti	0.00	0.00	0.00	0.00	0.36	0.00
Fe	0.00	0.00	0.00	1.03	3.49	1.29
Sn	0.00	0.00	0.60	0.00	0.00	0.00

表 4-5 熱重分析與 EDS 分析推估之灰土比

灰土比 配比編號	實際灰土比	熱重分析灰土比	EDS 分析灰土比
L ₂ C ₁	1:0.5	1:0.77	1:0.42
L ₁ C ₃	1:3	1:3.76	1:1.88
L ₁ S ₃	1:3	1:3.26	1:1.02

]

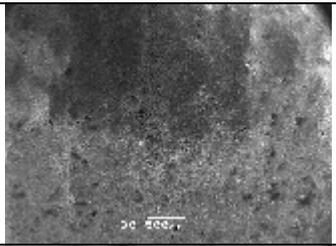
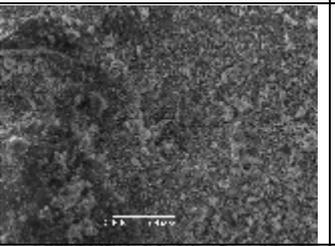
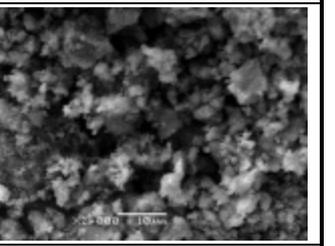
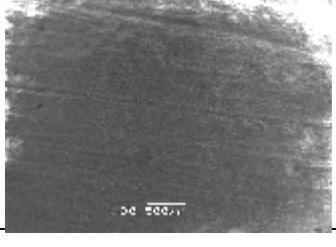
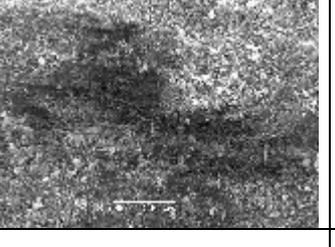
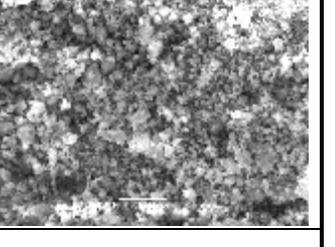
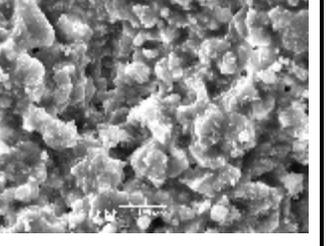
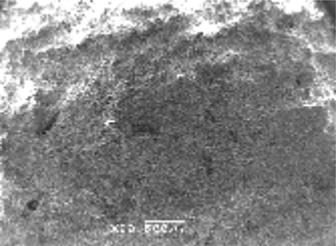
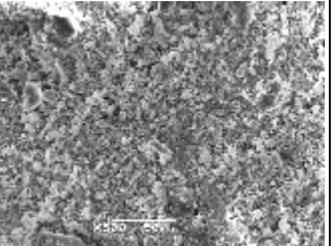
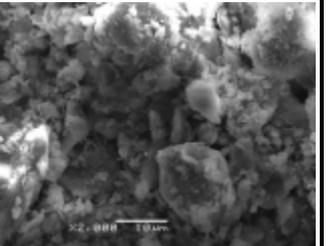
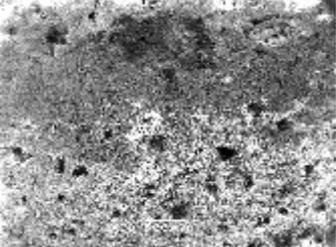
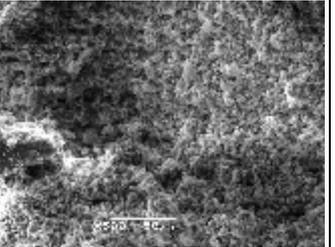
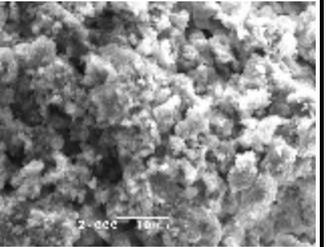
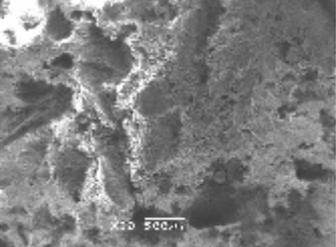
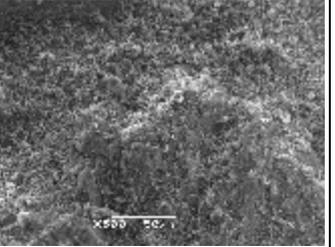
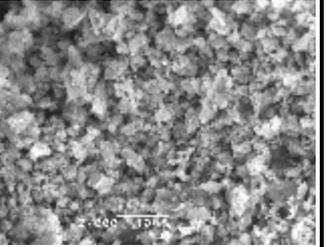
放大倍率 配比編號	30 倍	500 倍	2000 倍
L			
LM			
L ₂ C ₁			
L ₁ C ₃			
L ₁ R _{0.4}			
L ₁ S ₃			

圖 5-26 各配比之 SEM 影像

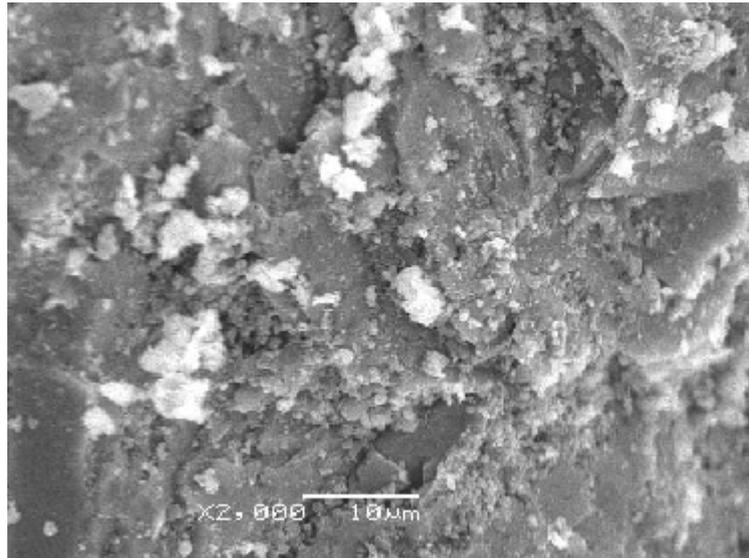


圖 4-28 L_1S_3 配比中的砂顆粒 SEM 影像(2000 倍)

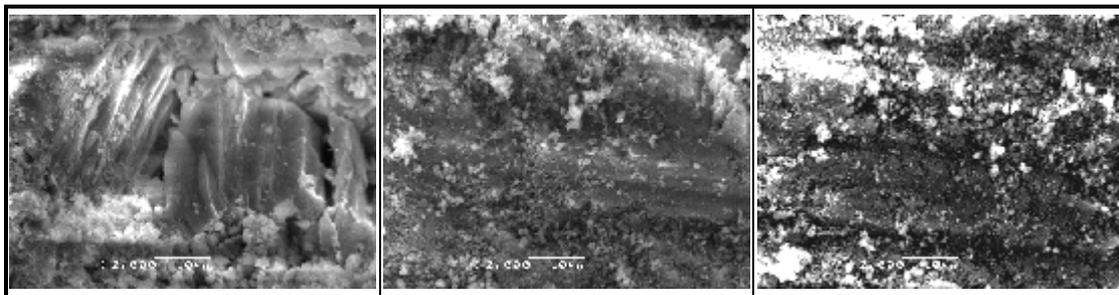


圖 4-29 添加糖漿試體之 SEM 影像(2000 倍)

4-4-2 實體顯微鏡分析結果

使用實體顯微鏡拍攝 L_1S_1 、 L_1S_2 、 L_1S_3 、 L_1S_4 及 L_0 試體表面，並將顯微影像經影像計測軟體分析得結果如圖 4-31 所示，可發現骨材在影像中所佔之面積有隨砂添加量增加而增加的趨勢，但灰土比 1:4 之骨材面積竟比灰土比 1:3 者小，此現象除與試體表面的處理有關外，主要應是影像分析軟體需以人工匡選選色範圍，如有骨材顏色接近乳白色，或膠結材顏色與骨材相近，皆可能造成計測的錯誤。對同一影像選擇計測骨材面積或膠結材面積亦可能得到品質不同的計測結果。如圖 4-30 所示，選擇計測膠結材之面積可得與實際膠結材體積百分比成線性關係的結果，但

含蚶殼之配比實際膠結材體積應與 L₁S₁ 配比相同，而影像分析之膠結材色塊面積卻不同，應是蚶殼之顏色與膠結材相近，造成判識的困難。

經鹽酸清洗試體表面後，會使更多的骨材顯露出來，而這些骨材並非在同一平面上，致使膠結材在影像上相對減少。

如欲以圖 4-30 之結果判斷灰土比，必須已知膠結材及骨材之單位重，才可由體積推算重量，則此法不如以鹽酸清洗碳酸鈣或以熱重分析推估灰土比來得直接、有效。

由圖 4-33 可見添加糖漿試體內部有乾縮裂縫產生，加入骨材後應可使裂縫細小化，使抗壓強度再提高。

表 4-6 實際膠結材體積與影像分析計測結果

配比	實際膠結材重量佔總試體重之百分比	實際膠結材體積佔總試體體積之百分比	膠結材色塊佔總面積之百分比
L ₁ S ₁	50.00	74.21	84.93
L ₁ S ₂	33.00	58.63	63.87
L ₁ S ₃	25.00	48.96	43.60
L ₁ S ₄	20.00	41.84	34.13

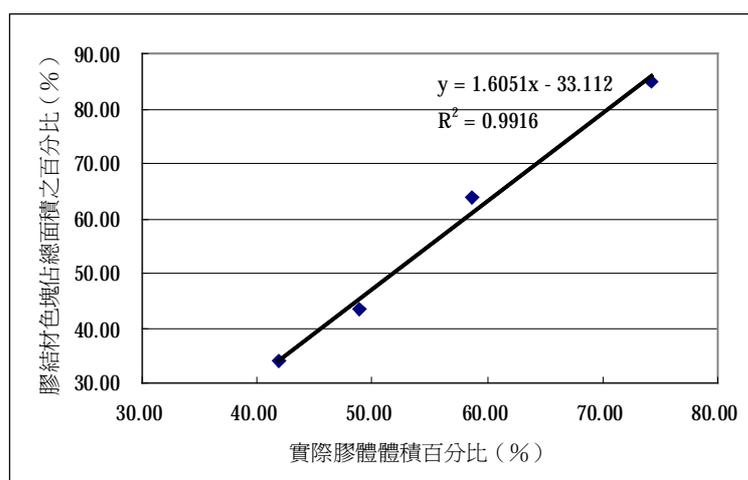


圖 4-30 實際膠結材體積與計測之膠結材面積關係圖

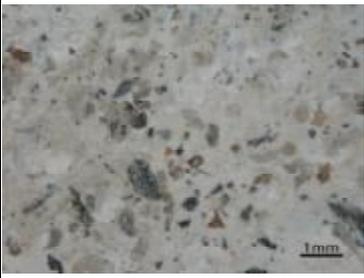
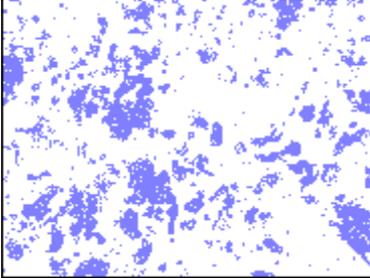
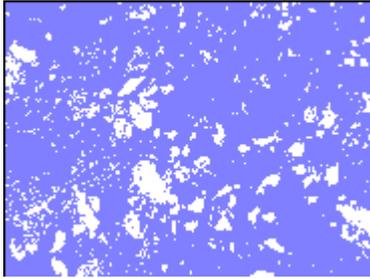
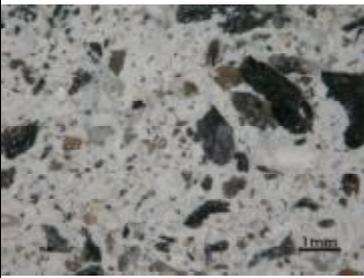
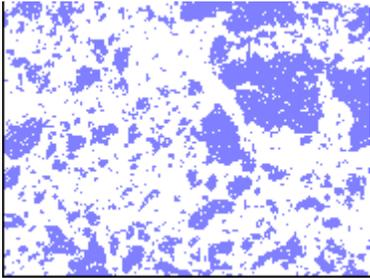
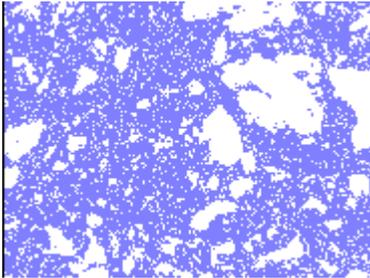
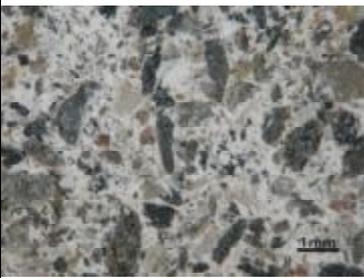
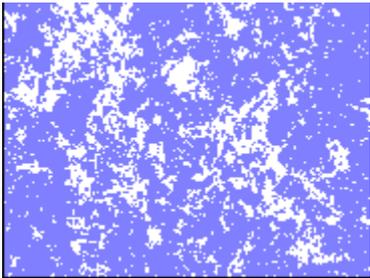
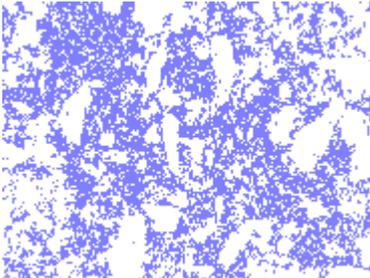
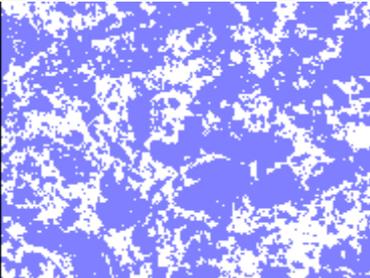
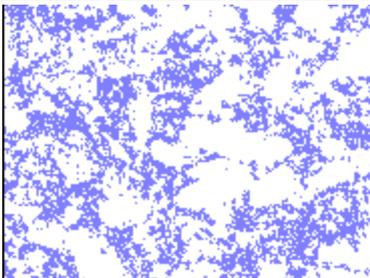
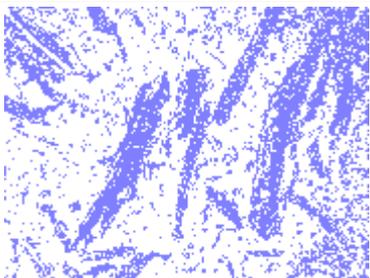
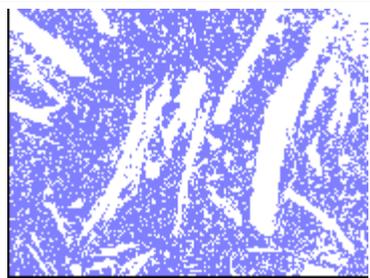
顯微影像	骨材之色塊 佔總面積百分比	膠結材之色塊 佔總面積百分比
 L ₁ S ₁	 22.52%	 84.94%
 L ₁ S ₂	 34.00%	 63.87%
 L ₁ S ₃	 75.59%	 43.60%
 L ₁ S ₄	 66.21%	 34.13%
 L ₀	 34.37%	 57.66%

圖 4-31 顯微影像分析結果

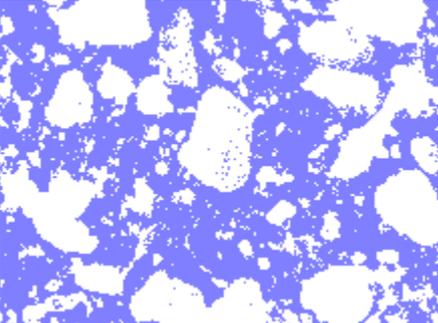
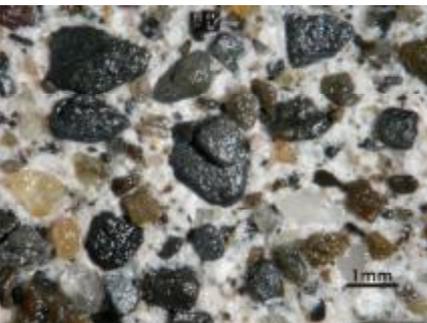
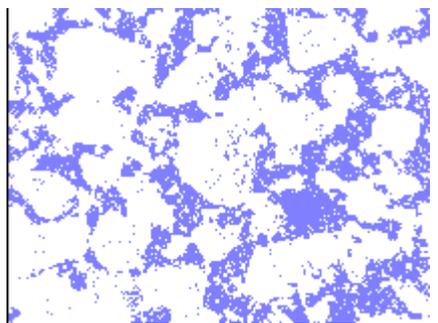
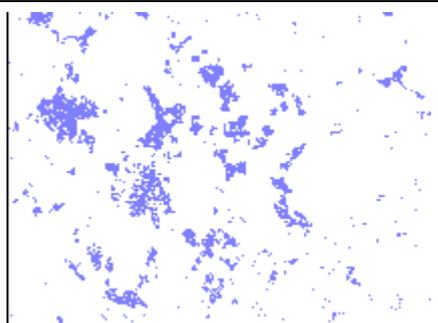
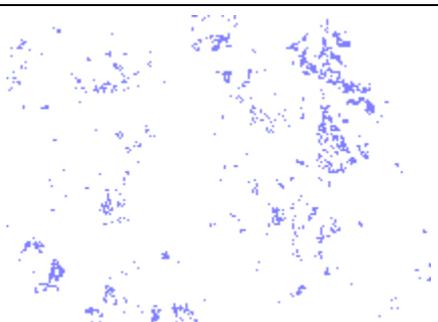
酸洗後顯微影像	膠結材之色塊佔總面積比
 <p data-bbox="518 651 571 680">L₁S₁</p>	 <p data-bbox="965 651 1056 680">53.27%</p>
 <p data-bbox="518 1037 571 1066">L₁S₂</p>	 <p data-bbox="965 1037 1056 1066">29.77%</p>
 <p data-bbox="518 1417 571 1447">L₁S₃</p>	 <p data-bbox="965 1417 1056 1447">8.28%</p>
 <p data-bbox="518 1805 571 1834">L₁S₄</p>	 <p data-bbox="965 1805 1056 1834">3.82%</p>

圖 4-32 經酸洗後之顯微影像分析結果

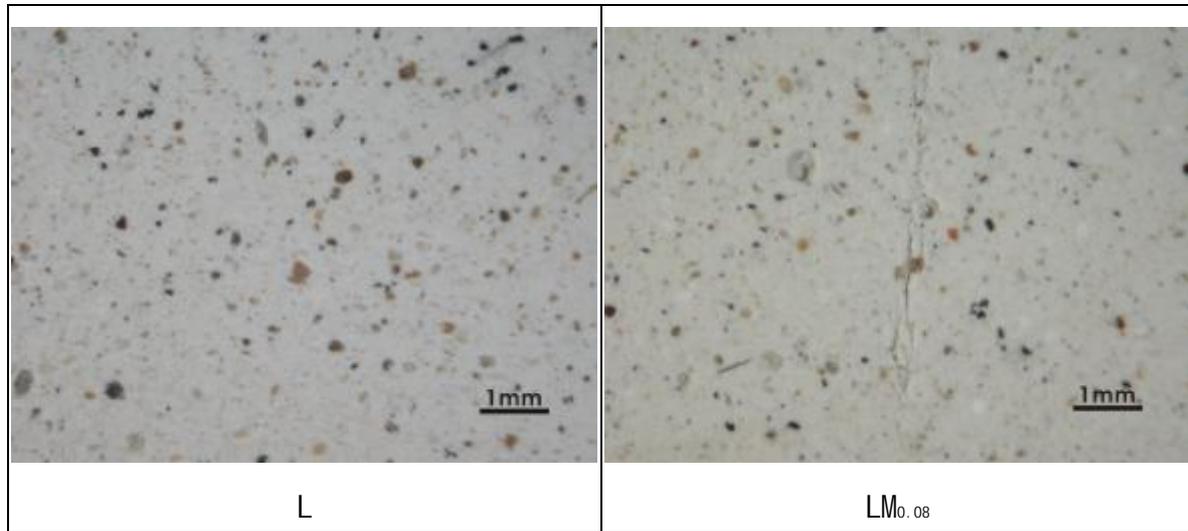


圖 4-33 純石灰與添加糖漿試體之顯微影像

第五章 傳統灰漿材料之作用及配比最佳化之探討

5-1 傳統灰漿材料之作用

由第四章所述之試驗結果可整理各材料功能如表 5-1 所示，表中所列之結果為兩種材料混合後表現之性質與功能，為確定多種材料混合後之整體行為表現，實應再設計較多種材料混合之配比。

表 5-1 灰漿材料性質與功能

材料	性質與功能
石灰	<ol style="list-style-type: none"> 1. 為膠結材。未添加其他添加劑時，為使流度達到 75，需添加石灰重量 75% 之水量。 2. 碳化後抗壓強度可達 54kgf/cm²。 3. 環境溫度改變時，升溫及降溫速度較水泥慢。
糖漿	<ol style="list-style-type: none"> 1. 為減水、緩凝劑。添加量為石灰重量之 8% 時，為使流度達到 75，需添加石灰重量 48% 之水量。 2. 製成之灰漿結構緊密、吸水率低、健度佳。環境溫度改變時，升溫及降溫速度較純石灰試體快，但仍較水泥慢。 3. 碳化後抗壓強度可達 155kgf/cm²。 4. 添加糖漿後，乾縮量稍有增加。
糯漿	<ol style="list-style-type: none"> 1. 添加糯漿會降低工作度，隨添加量的增加乾土重隨之減少。 2. 添加 20% 糯漿之試體在氣乾狀況下 28 天及 56 天抗壓強度均較純石灰漿高，因此糯漿之用量建議為 20%。
黏土	<ol style="list-style-type: none"> 1. 為普作蘭材料。隨添加量增加，工作度降低。 2. 添加量小於石灰重量時，可有效提昇灰漿之抗壓強度，試體於顯微鏡下呈現連續性結構。 3. 隨添加量增加，吸水率降低、乾縮量增加、健度降低。 4. 添加黏土試體之熱傳速度較純石灰漿及添加糖漿試體快，但仍較水泥慢。

砂	<ol style="list-style-type: none"> 1. 有助於早期強度的提昇，並減少乾縮量。 2. 為得膠結良好之灰漿，灰土比不宜小於 1:4。 3. 隨添加量增加，吸水率降低、熱傳速度增加、健度降低。
蚶殼	<ol style="list-style-type: none"> 1. 有助於早期強度的提昇，並減少乾縮量，且為輕質骨材。 2. 可避免脆性破壞。 3. 添加蚶殼試體含水量較添加砂之試體高，且不易乾燥。氣乾養治時，強度的提昇較添加砂者慢。

5-2 傳統灰漿配比最佳化之探討

5-2-1 骨材與膠體量之計算方法

在滿足工作度及最低膠體填充量的情況下,使用最大量的骨材可得較經濟之灰漿。為求得所需要的最低膠體填充量,需先求得骨材之孔隙比。以蚶殼及砂之混合物作為骨材時,孔隙比之求法如下述:

設砂與蚶殼混合之重量比為 a:b,混合後施做相對密度試驗,以之填滿容積 V 之容器,量測得混合填充物重量 W,則

$$a X + b X = W \quad \text{求得填充倍數 } X \quad X / \text{砂容積比重} = \text{砂體積} \quad (V1)$$

$$b X / \text{蚶殼容積比重} = \text{蚶殼體積} \quad (V2)$$

$$(V1) + (V2) = \text{總骨材體積}(V_s)$$

$$e = (V - V_s) / V_s$$

改變蚶殼與砂之重量比,施做相對密度試驗則可求得砂蚶比與孔隙比之關係,如圖 5-1 所示,砂蚶比越大則孔隙比越小,亦即僅以砂作為骨材時,所需之膠結材最少,而全以蚶殼為骨材時,需要之膠結材最多。

膠體與骨材重量比之計算流程如圖 5-2 所示，計算時的孔隙比使用以容積比重計算得之 e_{min} ，其中膠體體積設為 m 倍的孔隙體積，也就是 $(m-1)V_v$ 為潤滑漿體量，表 5-2 為膠體單位重 1.2 gf/cm^3 、不同砂蚵比與不同 m 值時，膠體、砂及蚵殼重量之比值，以其中 $m=2.2$ 的欄位為例，膠體重量 1kg 時，不同砂蚵比所需之蚵殼與砂重如圖 5-3 所示，圖 5-4 為膠體單位重 1.2gf/cm^3 、 m 等於 2.2 時，不同砂蚵比時每立方米所需之膠體重量，由圖中可知在膠體體積皆為 2.2 倍的孔隙體積時，如純以蚵殼為骨材將需較多的膠結材，又蚵殼之單價較砂高出許多，實不應全以蚵殼為骨材。在砂蚵比大於 2 後，孔隙比即趨近完全由砂組成之孔隙比，在考量蚵殼之功能與經濟性下，砂蚵比以大於 2 為宜。

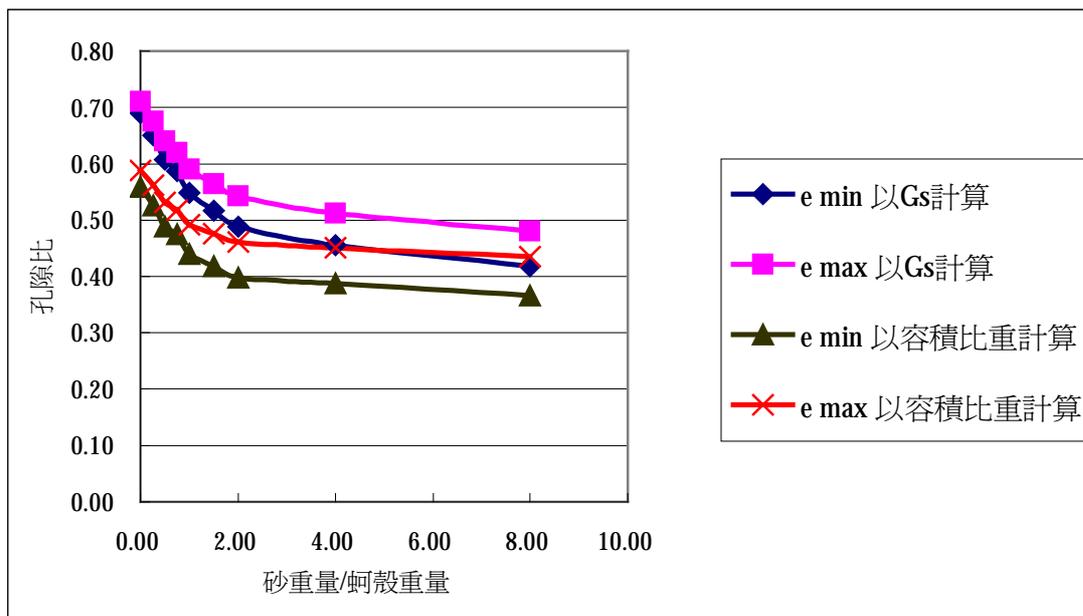


圖 5-1 砂蚵比與孔隙比之關係

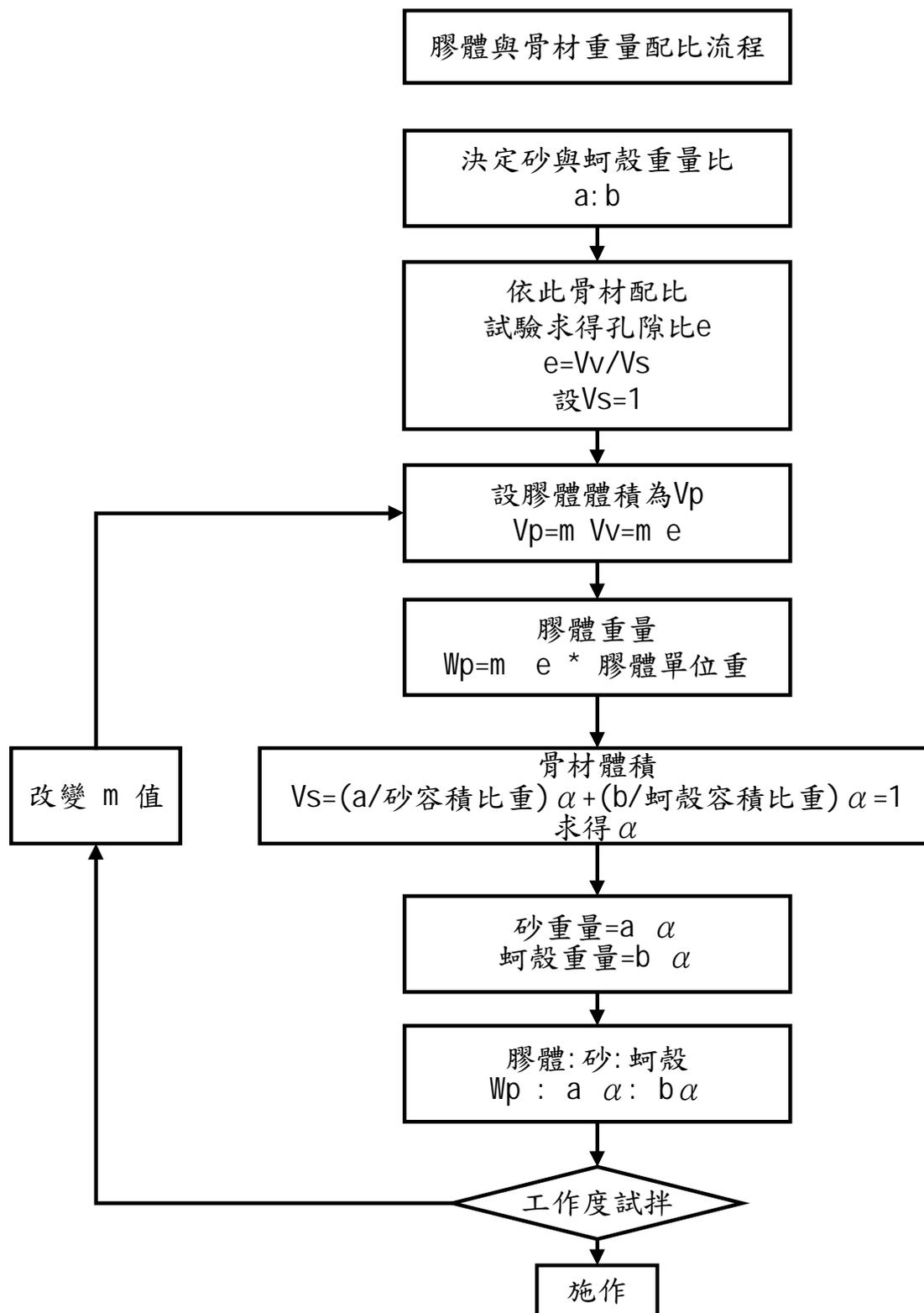


圖 5-2 膠體與骨材重量配比流程圖

表 5-2 膠結材單位重 1.2gf/cm³時，膠體、砂及蚵殼之比值

膠結材重量 1 時，不同 m 值及砂蚶比下，所需之砂與蚶殼重量										
	m=1.6		m=1.8		m=2.0		m=2.2		m=2.29	
砂蚶比(%)	砂重量	蚶殼重量	砂重量	蚶殼重量	砂重量	蚶殼重量	砂重量	蚶殼重量	砂重量	蚶殼重量
0	0.00	1.53	0.00	1.36	0.00	1.23	0.00	1.11	0.00	1.07
25	0.34	1.38	0.31	1.22	0.28	1.10	0.25	1.00	0.24	0.96
50	0.64	1.27	0.57	1.13	0.51	1.02	0.46	0.93	0.44	0.89
75	0.87	1.16	0.77	1.03	0.70	0.93	0.63	0.84	0.61	0.81
100	1.10	1.10	0.98	0.98	0.88	0.88	0.80	0.80	0.77	0.77
150	1.42	0.95	1.26	0.84	1.14	0.76	1.03	0.69	0.99	0.66
200	1.68	0.84	1.49	0.75	1.34	0.67	1.22	0.61	1.17	0.59
400	2.18	0.55	1.94	0.48	1.75	0.44	1.59	0.40	1.52	0.38
800	2.62	0.33	2.33	0.29	2.10	0.26	1.90	0.24	1.83	0.23
∞	3.20	0.00	2.84	0.00	2.56	0.00	2.33	0.00	2.24	0.00

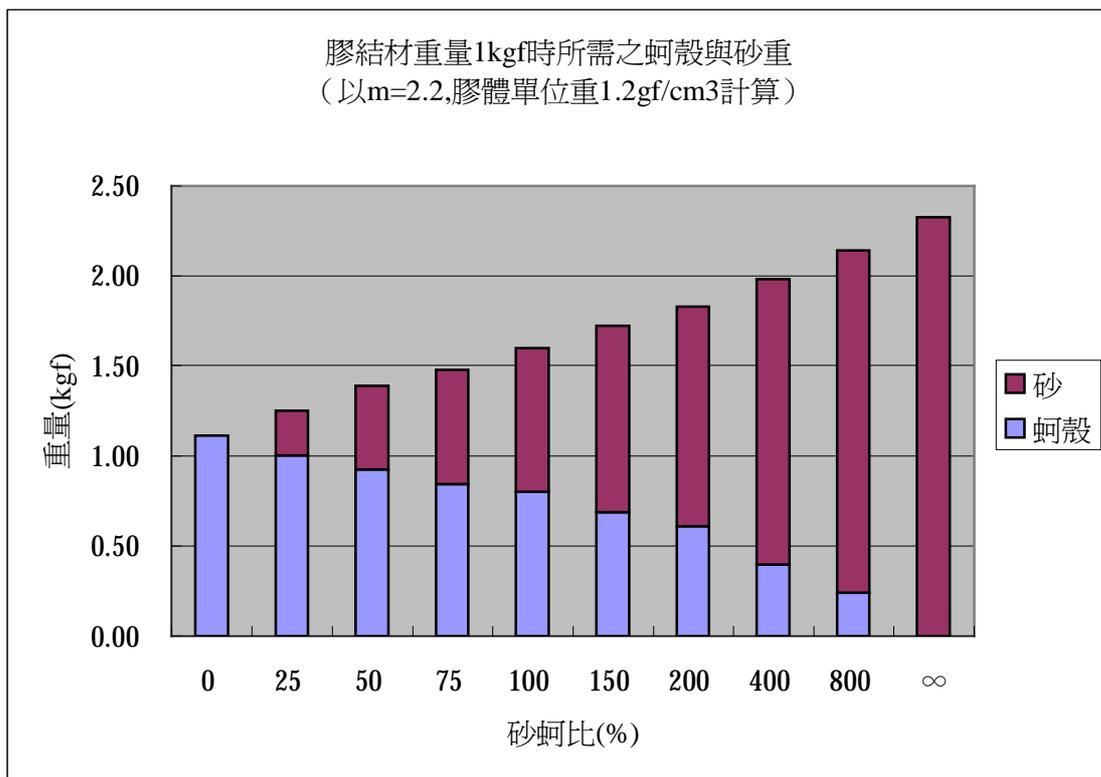


圖 5-3 膠結材重量 1kgf 時所需之蚶殼與砂重

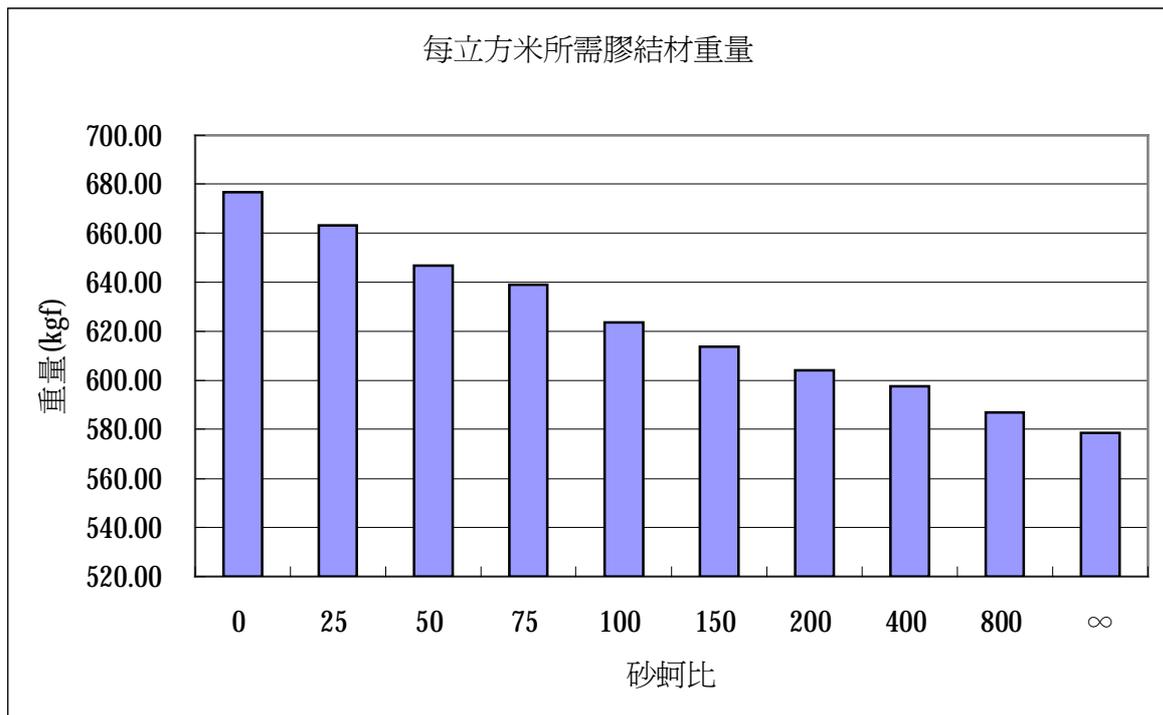


圖 5-4 不同砂蚵比時每立方米所需之膠結材重量

5-2-2 第二階段配比計畫

為瞭解多種材料混合後之抗壓強度是否可由第一階段配比所得之資料加以推估，以及求得黏土的最佳添加量為何，再設計表 5-2 中所列之配比。

第一階段試驗後可發現添加 20%的糯漿有助於氣乾養置下早期強度的發展，而添加糖漿後所需拌合水量為石灰重量的 48%，48%中糯漿可提供 18%的水分，故有添加糖漿及糯漿之配比的拌合水量設定為石灰重量的 30%。

表 5-2 中之 9、10、11 配比計畫使用之膠體配比為石灰:糖:糯漿:水 = 1 : 0.08 : 0.2 : 0.3，骨材使用純蚵殼、砂蚵比 2:1 及純砂三種配比，以比較灰漿中蚵殼添加量不同時之抗壓強度。m 設定為 2.2，亦即膠結材體積為骨材孔隙之 2.2 倍。

表 5-2 第二階段配比計畫

	配比(重量比)	配比變因	備註
1	灰：蚵殼：糖 1：0.57：0.08	添加蚵殼以避免乾裂。 如蚵殼的添加與強度無關，但可抑制乾縮裂縫及浮水現象的產生，則可得到較正確之石灰加糖試體的強度。	膠結材：蚵殼≐ 3：1（體積比）
2	灰：蚵殼：糖 1：1.14：0.08	添加較配比 1 多一倍的蚵殼。	膠結材：蚵殼≐ 1.5：1（體積比）
3	灰：糖：黏土 2：0.16：1	檢驗石灰加糖試體再加入黏土後是否有助於強度的增加。	
4	灰：糖：蚵殼：黏土 2：0.16：1.55：1	配比 3 加入蚵殼。	膠結材：蚵殼≐ 3：1（體積比）
5	灰：黏土 3：1	石灰添加黏土之配比，再提高灰土比。	
6	灰：黏土 4：1	石灰添加黏土之配比，再提高灰土比。	
7	灰：糯漿 1：1	石灰添加糯漿之配比，僅以糯漿拌合，不再添加拌合水。	
8	灰：糖：糯漿 1：0.08：0.51	石灰加糖配比所需水量由糯漿提供。	
9	石灰：蚵殼：糖：糯漿：水 1：1.11：0.08：0.2：0.3	膠結材體積為骨材孔隙之 2.2 倍。 骨材使用純蚵殼	
10	石灰：砂：蚵殼：糖：糯漿：水 1：1.22：0.61：0.08：0.2：0.3	膠結材體積為骨材孔隙之 2.2 倍。 骨材使用砂蚵比 2：1	
11	石灰：砂：糖：糯漿：水 1：2.33：0.08：0.2：0.3	膠結材體積為骨材孔隙之 2.2 倍。 骨材使用純砂	

5-2-3 第二階段配比試驗結果與討論

第二階段配比之抗壓試驗結果如圖 5-5 所示，經比較 $L_1 O_{0.57} M_{0.08}$ 、 $L_1 O_{1.14} M_{0.08}$ 及第一階段之 $L_1 M_{0.08}$ 配比，可知添加蚵殼將造成含糖試體之抗

壓強度損失。

第一階段之 $L_1M_{0.08}$ 配比的抗壓強度約為 155kgf/cm^2 ，第二階段之 $L_2 C_1 M_{0.16}$ 配比抗壓強度約為 231kgf/cm^2 ，可見添加適量之黏土有助於含糖試體抗壓強度的提高。但以 $L_2 C_1 M_{0.16}$ 配比為膠結材，再加入蚵殼後將造成抗壓強度的大幅損失。

由圖 5-5 中 $L_3 C_1$ 、 $L_4 C_1$ 之抗壓強度與第一階段之配比 $L_2 C_1$ 比較可知，石灰添加本研究使用之黏土時，較佳之灰土比為 2:1，提高或降低灰土比都將造成抗壓強度的降低。

提高糯漿添加量之配比，其抗壓強度與純石灰試體比較仍無較高。而於含糖試體中加入糯漿，對抗壓強度的提昇效果亦不明顯。

比較 $L_1 O_{1.11} M_{0.08} R_{0.2}$ 、 $L_1 S_{1.22} O_{1.11} M_{0.08} R_{0.2}$ 及 $L_1 S_{2.33} M_{0.08} R_{0.2}$ 配比，可見添加蚵殼對抗壓強度有不良的影響。 $L_1M_{0.08}$ 配比的抗壓強度約為 155kgf/cm^2 ， $L_1 S_{2.33} M_{0.08} R_{0.2}$ 配比的抗壓強度約為 181kgf/cm^2 ，石灰加糖配比再加入砂可避免較大的乾縮裂縫產生，應是強度提高的原因。

蚵殼的生成結構是呈層狀，層與層間易剝落，當膠結材之強度未高於蚵殼之強度時，此骨材弱點不易顯現，但膠結材之強度提高後，蚵殼將因無法承受較高之應力而使整體強度無法提升，造成蚵殼添加量越多，抗壓強度越低的趨勢。由圖 5-6 可見添加添加蚵殼後抗壓強度大幅滑落，原本可避免脆性破壞的功能在此情況下已變得沒有意義。

由圖 5-7 中第二階段配比之乾縮量亦可發現與第一階段配比相同之現象：添加黏土較多者乾縮量較大，添加骨材後乾縮量減少，膠結材使用量越少乾縮量越低。

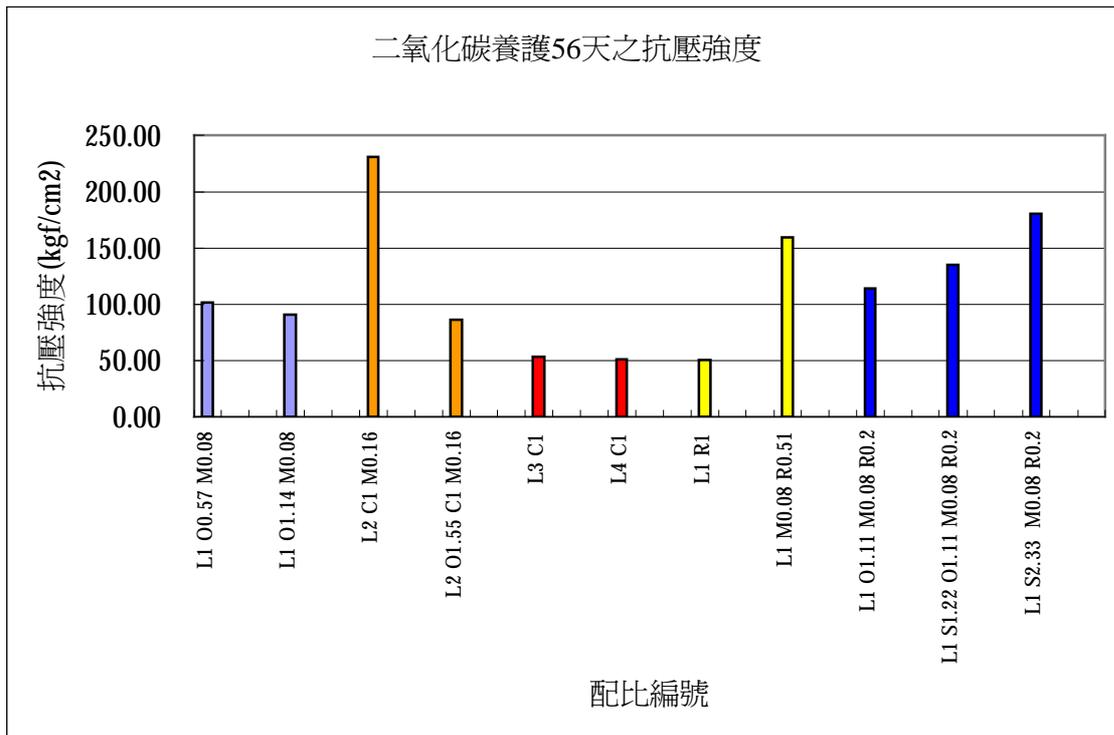


圖 5-5 第二階段配比二氧化碳養護 56 天後抗壓試驗結果

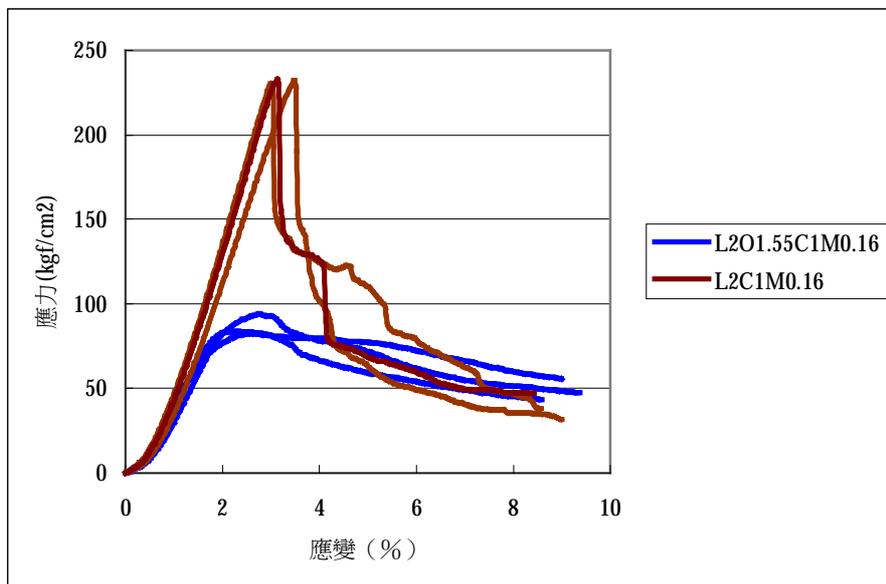


圖 5-6 L₂ C₁ M_{0.16} 與 L₂ O_{1.55} C₁ M_{0.16} 配比之應力、應變曲線

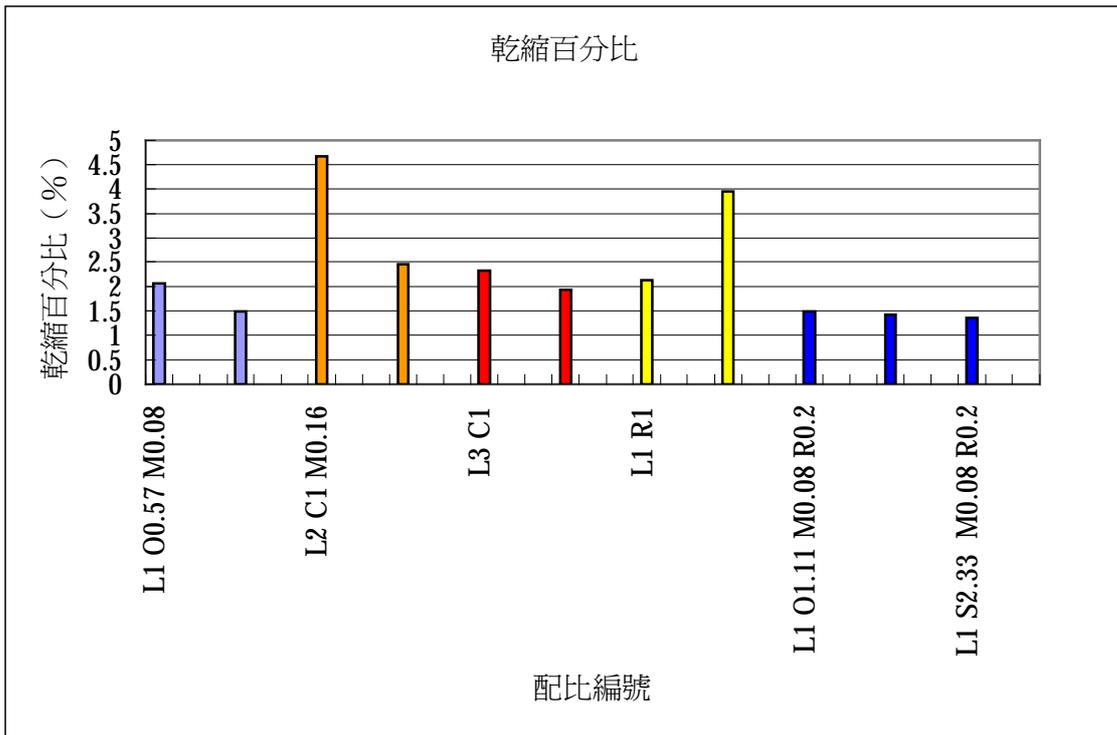


圖 5-7 第二階段配比二氧化碳養護 56 天後之乾縮比

第六章 結論與建議

6-1 結論

1. 添加糖漿有減水、緩凝的效果，製成之灰漿結構緊密、吸水率低、強度佳，強度明顯較純石灰漿高，且大量添加時可明顯觀察到放熱的現象，故其抗壓強度的增加不只是減水而得之效果。但有乾縮量稍大、且表面有可見微細裂紋的現象，此現象可在加入骨材後改善。
2. 添加糯漿會降低工作度，隨添加量的增加乾土重隨之減少。添加 20% 糯漿之試體在氣乾狀況下 28 天及 56 天抗壓強度均較純石灰漿高，因此糯漿之用量建議為 20%。
3. 添加黏土配比在灰土比 2:1 時晚期抗壓強度明顯高於純石灰試體，在電子顯微鏡下呈現連續性的結構，且吸水率降低，而重量的增加並不大，但乾縮量增加。本研究所得之最佳黏土添加量灰土比為 2:1。
4. 添加砂有助於提昇早期強度，但對晚期強度並無明顯提昇之效果。添加蚶殼除減低乾縮量外，亦有避免脆性破壞之效果，但因含水量較高又不易乾燥，強度的提昇速度不如添加砂者，且蚶殼本身強度不高，當膠結材強度較高時，添加蚶殼將造成整體強度的降低，由工程性質或經濟性的考量皆不宜過量添加。
5. 試體較緻密者，如添加糖與添加黏土試體皆有不異碳化之現象，但添加糖之配比在自然養護下早期強度即較純石灰大，而添加少量黏土者在自然養護下七天強度較低，但晚期強度兩者皆較純石灰高。低灰砂比及低灰土比試體在浸泡硫酸鈉溶液後損耗較大，但砌築牆體時如使用較厚的灰縫，勢必要添加骨材，且自然狀態下之耐久性不一定與此嚴苛的試驗條件結果相同，目前對一般之砌體灰漿仍建議加入適量的骨材。

7. 由熱傳性質試驗可知，水泥升溫速度較石灰快。砂含量增加後，升溫速度亦加快，添加黏土試體的升溫速度介於純石灰漿與添加砂之間，可見傳統建築中的竹篾土牆或斗子砌，以黏土為中間層、表面以白灰粉刷的隔間方式，是一種經濟且有助於居住空間溫度穩定的方法。
8. 採微量試體分析成分之方法以熱重分析結果較佳，但如能取得較大量的試樣，以鹽酸清洗法應可得相近的結果。
9. 建議配比

石灰：黏土：砂：糖漿：糯漿：水
1：0.5：2：0.08：0.2：0.3

6-2 建議

1. 蚶殼可避免脆性破壞，但乾燥及碳化的速度較添加砂者慢，在考慮工程性質及經濟性時，最適當的砂蚶比仍有待研究。
2. 灰漿之黏結強度不一定與抗壓強度成正比，例如添加黏土配比之抗壓強度雖較純石灰高，但乾縮量較大，可能影響黏結強度。檢驗灰漿之工程性質時應包含黏結強度。
3. 灰縫的厚度及磚塊的排列方式皆可能影響牆體的力學性質，較厚的灰縫可能使結構韌性增加，使用尺寸較小的磚及採丁字形排列砌法亦可能有較佳韌性。古蹟修復時縱使牆體之磚材表面有粉刷而不外露，磚材之砌法仍應遵照原樣砌築。

參考文獻

1. 宋應星，「天工開物」，1637。
2. 張云理、卞葆芝，「混凝土外加劑產品及應用手冊」，中國鐵道，北京，1988。
3. 內政部，「古蹟管理維護研習會教材」，1990。
4. 程萬里，「中國建築形制與裝飾」，南天出版社，台北，1990。
5. 中國土木工程學會，「混凝土及圬工」，台北，1996。
6. 邱上嘉，「傳統建築文化與保存之研究」，台灣建築與文化資產出版社，台南，2003。
7. 張達德、游坤、黃俊青、彭文煌，「石灰與飛灰對林口紅土穩定效果之研究」，國科會防災科技研究報告 74-61 號，1986。
8. 薛琴，「傳統灰作施工方法」，第六次古蹟修護技術研討會專輯，台北，1996。
9. 邱上嘉、方鳳玉、周志明、李琦華、蘇南、賴明茂，「紅磚與土角磚壁體之灰縫形式與材質調查研究」，台灣古蹟及歷史建築防震技術之研究期末研討會，台南，2001。
10. 文化資產保存研究中心籌備處，「古蹟及歷史建築屋頂修復研習會文集」，台南，2001。
11. 閻亞寧、陳昶良，「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。
12. 閻亞寧，「古蹟基礎科技研究(三)-木料及灰作保存科技研究」，內政部九十一年度研究報告，2002。
13. 葉世文，「古蹟修復工法程序及規範的基礎研究」，內政部九十二年度研究報告，2003。
14. 葉世文，「古蹟修復技術-灰作材料性質與修復工法之研究」，內政部九十二年度研究報告，2003。
15. 彭耀南，「碳纖維混凝土工程性質暨應用之研究」，內政部八十年

度研究報告，1992。

16. 李欣益，「以模型實驗探討排水石灰樁促進黏土壓密之研究」，碩士論文，國立成功大學土木工程研究所，1999。
17. 鄭弘文，「混凝土於碳化環境中微觀結構與力學行為之研究」，碩士論文，國立成功大學土木工程研究所，2001。
18. 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。
19. 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。
20. 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。
21. 詹士旻，「水泥砂漿受碳化與鹽害複合劣化之耐久性研究」，碩士論文，國立成功大學土木工程研究所，2003。
22. 洪煌凱，「古蹟灰漿之力學與微觀特性研究」，碩士論文，國立成功大學土木工程研究所，2003。
23. 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。
24. 王新衡，「台灣傳統磚砌建築灰縫材料特性之研究」，碩士論文，國立雲林科技大學文化資產維護研究所，2003。
25. 莊敏信，「傳統灰作基本操作與應用之研究」，碩士論文，私立中原大學建築研究所，2003。
26. 馮佳福，「台灣傳統屋面灰漿基本性質之研究」，碩士論文，國立成功大學建築研究所，2003。
27. 陳俊良，「古蹟灰漿材料之配比與強度關係之研究」，碩士論文，國立成功大學土木工程研究所，2004。
28. 歐新通，「澎湖地區老咕石建築灰漿之研究」，碩士論文，國立成功大學建築研究所，2004。

29. 陳淮之，「傳統磚砌建築灰縫材料性質之研究」，碩士論文，國立雲林科技大學文化資產維護研究所，2004。
30. 余秉宥，「添加奈米改質黏土之水泥砂漿鬆弛行為」，碩士論文，國立成功大學土木工程研究所，2004。
31. 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。
32. 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。
33. 重耀建築師事務所，「金門古洋樓維護工程工作報告書」，1999。
34. 漢光建築師事務所，「文台寶塔維護工程工作報告書」，2000。
35. 張海清，「古建築灰漿」，古建園林技術，第二期，p13，北京，1984。
36. 劉大可，「古建築抹灰」，古建園林技術，第二期，p7，北京，1984。
37. 杜仙洲，「中國古建築修繕技術」，丹青圖書有限公司，台北，1984。
38. 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。
39. 黃兆龍，「混凝土材料品質控制試驗」，詹氏書局，台北，1992。
40. 黃兆龍，「混凝土性質與行為」，詹氏書局，台北，1997。
41. 王櫻茂，「混凝土構造物的耐久性」，台南，2000。
42. 黃兆龍，「高性能混凝土理論與實務」，詹氏書局，台北，2003。
43. 黃兆龍，「混凝土耐久性設計的奈米新視界」，混凝土材料研發處理與再生技術研究成果發表會論文集，高雄，2004。
44. 黃克忠、郭佑麟，「石質文物與古蹟保存技術」，建築情報，台北，2004。
45. 孫逸民等，「儀器分析」，全威圖書，台北，2001。
46. <http://www.cca.gov.tw/>，文建會網頁。
47. <http://www.cnworld.net/>，世界建築建材總網。
48. 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.

49. 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.

50. Antonia Moropoulou, Asterios Bakolas, Katerina Bisbikou , “Investigation of the technology of historic mortars” , Journal of Cultural Heritage 1 , 2000 , pp.45–58.

51. A. Moropoulou, A. Bakolas, K. Bisbikou, “Physico-chemical adhesion and cohesion bonds in joint mortars imparting durability to the historic structures” Construction and Building Materials 14, 2000, pp.35-46.

52. Philippe Gleize, Denise A. Silva, Sergio Nappi , “Ancient rendering mortars from a Brazilian palace Its characteristics and microstructure” Cement and Concrete Research 30 , 2000, pp.1609-1614.

附 錄

試體編號	氣乾養護 7 天齡期				
	平均含水量(%)	平均乾單位重(gf/cm ³)	平均乾土重(gf/cm ³)	乾縮百分比(%)	平均抗壓強度(kgf/cm ²)
L	24.42	0.90	119.02	0.87	3.63
L ₁ M _{0.08}	17.69	1.12	148.23	3.75	6.67
L ₁ R _{0.1}	43.72	0.84	112.04	1.04	2.22
L ₁ R _{0.2}	43.09	0.84	111.22	1.36	2.23
L ₁ R _{0.3}	19.74	0.83	109.73	1.29	2.08
L ₁ R _{0.4}	22.23	0.81	107.36	1.55	2.17
L ₂ C ₁	33.43	0.96	127.70	3.75	2.81
L ₁ C ₁	28.30	1.00	132.62	4.66	3.01
L ₁ C ₃	9.37	1.12	148.86	5.05	
L ₁ C ₈	16.51	1.14	151.17	7.25	5.97
L ₁ S ₁	15.63	1.34	177.33	1.49	3.05
L ₁ S ₂	4.49	1.40	186.06	0.19	2.75
L ₁ S ₃	0.53	1.66	220.57	0.97	4.28
L ₁ S ₄	1.30	1.77	234.48	1.94	3.43
LO	20.20	1.09	144.03	0.52	2.80
C	5.36	1.29	170.53	7.64	22.80
CM _{0.08}	14.65	1.35	179.59	6.28	4.81
CR _{0.1}	12.98	1.11	147.64	11.33	7.12

試體編號	氣乾養護 14 天齡期				
	平均含水量(%)	平均乾單位重(gf/cm ³)	平均乾土重(gf/cm ³)	乾縮百分比(%)	平均抗壓強度(kgf/cm ²)
L	2.29	0.90	117.14	0.58	3.53
L ₁ M _{0.08}	5.38	1.24	150.79	2.52	9.29
L ₁ R _{0.1}	20.87	0.88	114.53	0.58	3.81
L ₁ R _{0.2}	12.85	0.88	113.57	0.00	3.10
L ₁ R _{0.3}	2.12	0.87	110.42	1.75	3.34
L ₁ R _{0.4}	7.30	0.87	106.52	1.55	2.67
L ₂ C ₁	4.03	1.08	128.70	3.69	6.02
L ₁ C ₁	3.19	1.17	136.06	4.27	6.57
L ₁ C ₃	2.56	1.33	157.21	5.24	8.66
L ₁ C ₈	2.96	1.41	150.02	8.16	11.71
L ₁ S ₁	0.69	1.30	175.11	0.58	5.75
L ₁ S ₂	0.61	1.52	200.35	2.52	4.00
L ₁ S ₃	2.30	1.68	219.76	0.78	6.06
L ₁ S ₄	0.51	1.78	234.97	1.17	6.33
LO	5.26	1.12	147.65	0.58	3.36
C	2.77	1.68	168.80	8.35	33.36
CM _{0.08}	6.87	1.76	180.28	6.99	11.96
CR _{0.1}	2.77	1.56	147.70	7.57	29.25

試體編號	氣乾養護 28 天齡期				
	平均含水量(%)	平均乾單位重(gf/cm ³)	平均乾土重(gf/cm ³)	乾縮百分比(%)	平均抗壓強度(kgf/cm ²)
L	1.08	0.95	123.97	0.97	5.43
L ₁ M _{0.08}	3.39	1.23	151.66	1.75	10.32
L ₁ R _{0.1}	1.51	0.91	116.43	0.97	4.70
L ₁ R _{0.2}	0.73	0.93	115.37	1.55	7.17
L ₁ R _{0.3}	2.10	0.87	110.39	2.33	3.20
L ₁ R _{0.4}	1.75	0.90	112.70	2.14	4.35
L ₂ C ₁	1.25	1.13	129.98	3.88	12.25
L ₁ C ₁	1.71	1.17	136.11	4.85	7.62
L ₁ C ₃	1.20	1.34	149.99	6.21	12.94
L ₁ C ₈	2.08	1.48	156.01	6.99	7.28
L ₁ S ₁	0.47	1.31	169.67	1.17	7.60
L ₁ S ₂	0.36	1.53	199.09	1.55	5.61
L ₁ S ₃	0.40	1.72	224.07	2.91	8.40
L ₁ S ₄	0.44	1.81	242.66	0.58	8.46
LO	0.88	1.12	150.45	0.58	5.44
C	2.84	1.63	172.88	5.63	29.67
CM _{0.08}	3.89	1.71	180.93	7.96	25.39
CR _{0.1}	2.80	1.89	146.95	20.19	33.29

試體編號	氣乾養護 56 天齡期				
	平均含水量(%)	平均乾單位重(gf/cm ³)	平均乾土重(gf/cm ³)	乾縮百分比(%)	平均抗壓強度(kgf/cm ²)
L	0.63	1.03	127.43	0.78	6.68
L ₁ M _{0.08}	3.03	1.25	151.20	2.91	23.87
L ₁ R _{0.1}	0.10	0.95	121.00	1.36	7.08
L ₁ R _{0.2}	1.03	0.99	120.96	2.91	9.23
L ₁ R _{0.3}	0.60	0.91	115.30	2.33	5.14
L ₁ R _{0.4}	1.69	0.91	113.11	3.11	7.39
L ₂ C ₁	0.99	1.15	135.53	4.27	15.46
L ₁ C ₁	1.32	1.20	141.06	4.08	11.30
L ₁ C ₃	1.75	1.38	153.63	5.05	14.84
L ₁ C ₈	1.99	1.46	155.72	6.41	19.37
L ₁ S ₁	0.01	1.37	177.15	0.97	10.57
L ₁ S ₂	0.22	1.54	204.39	1.17	9.99
L ₁ S ₃	0.39	1.73	226.37	1.55	13.13
L ₁ S ₄	0.40	1.83	239.62	1.17	14.10
LO	0.63	1.17	155.16	0.39	10.18
C	2.36	1.72	171.58	8.35	42.15
CM _{0.08}	2.79	1.74	187.41	6.60	27.68
CR _{0.1}	2.34	1.78	149.07	15.73	33.76

試體編號	二氧化碳養護 3 天齡期				
	平均含水量(%)	平均乾單位重(gf/cm ³)	平均乾土重(gf/cm ³)	乾縮百分比(%)	平均抗壓強度(kgf/cm ²)
L	5.79	1.09	137.34	2.52	16.58
L ₁ M _{0.08}	3.75	1.33	162.69	2.46	39.29
L ₁ R _{0.1}	10.92	0.99	128.12	1.23	17.63
L ₁ R _{0.2}	11.04	1.03	129.52	2.39	21.98
L ₁ R _{0.3}	12.85	0.94	120.98	1.10	11.22
L ₁ R _{0.4}	16.49	0.96	121.36	1.68	14.99
L ₂ C ₁	6.79	1.16	137.42	3.43	14.55
L ₁ C ₁	2.27	1.22	140.73	4.27	31.54
L ₁ C ₃	4.98	1.39	151.77	5.83	22.79
L ₁ C ₈	2.88	1.47	157.40	6.41	31.13
L ₁ S ₁	1.13	1.41	184.98	0.52	22.76
L ₁ S ₂	1.02	1.52	199.83	0.58	21.95
L ₁ S ₃	1.03	1.76	232.54	1.10	27.32
L ₁ S ₄	0.92	1.85	244.48	0.71	26.38
LO	6.94	1.23	161.85	1.10	22.45

試體編號	二氧化碳養護 6 天齡期				
	平均含水量(%)	平均乾單位重(gf/cm ³)	平均乾土重(gf/cm ³)	乾縮百分比(%)	平均抗壓強度(kgf/cm ²)
L	2.76	1.12	144.86	1.17	38.97
L ₁ M _{0.08}	3.57	1.36	163.79	3.37	63.79
L ₁ R _{0.1}	3.66	1.07	138.50	1.36	33.56
L ₁ R _{0.2}	5.31	1.09	136.88	2.14	31.11
L ₁ R _{0.3}	5.87	1.03	131.33	1.62	28.87
L ₁ R _{0.4}	7.53	1.02	131.15	1.42	28.03
L ₂ C ₁	4.29	1.23	142.79	4.14	40.50
L ₁ C ₁	2.37	1.29	147.57	5.24	37.19
L ₁ C ₃	2.04	1.40	156.81	5.18	39.34
L ₁ C ₈	2.85	1.50	159.80	6.67	34.92
L ₁ S ₁	1.07	1.48	191.56	1.49	34.85
L ₁ S ₂	0.93	1.63	210.59	1.10	34.19
L ₁ S ₃	1.07	1.77	232.11	1.42	36.11
L ₁ S ₄	0.86	1.84	242.20	0.84	37.26
LO	4.12	1.25	165.99	0.71	33.42

試體編號	二氧化碳養護 9 天齡期				
	平均含水量(%)	平均乾單位重(gf/cm ³)	平均乾土重(gf/cm ³)	乾縮百分比(%)	平均抗壓強度(kgf/cm ²)
L	1.64	1.20	151.58	2.72	46.29
L ₁ M _{0.08}	3.37	1.36	166.65	2.46	78.06
L ₁ R _{0.1}	2.20	1.11	142.95	1.23	34.41
L ₁ R _{0.2}	2.49	1.11	141.15	1.23	35.28
L ₁ R _{0.3}	2.93	1.06	135.55	1.62	27.84
L ₁ R _{0.4}	3.03	1.07	134.40	1.75	31.34
L ₂ C ₁	3.11	1.26	148.62	3.88	60.94
L ₁ C ₁	2.20	1.32	151.20	4.40	55.36
L ₁ C ₃	1.97	1.41	158.87	5.53	39.67
L ₁ C ₈	2.26	1.48	158.78	6.41	37.81
L ₁ S ₁	1.02	1.46	191.55	1.04	44.71
L ₁ S ₂	0.88	1.57	204.01	1.17	44.00
L ₁ S ₃	0.80	1.79	233.21	1.49	42.71
L ₁ S ₄	0.87	1.87	244.87	1.55	43.68
LO	2.28	1.28	170.24	0.78	42.46

試體編號	二氧化碳養護 14 天齡期				
	平均含水量(%)	平均乾單位重(gf/cm ³)	平均乾土重(gf/cm ³)	乾縮百分比(%)	平均抗壓強度(kgf/cm ²)
L	1.90	1.20	151.67	2.01	46.67
L ₁ M _{0.08}	3.51	1.38	171.06	2.39	113.34
L ₁ R _{0.1}	2.49	1.12	144.48	0.97	37.78
L ₁ R _{0.2}	2.52	1.17	141.50	2.85	44.97
L ₁ R _{0.3}	2.96	1.07	137.72	1.36	31.95
L ₁ R _{0.4}	2.91	1.06	134.06	1.68	34.55
L ₂ C ₁	1.95	1.27	150.43	3.69	70.48
L ₁ C ₁	1.92	1.36	151.19	5.11	53.33
L ₁ C ₃	2.32	1.44	157.18	5.83	43.17
L ₁ C ₈	2.27	1.47	158.39	6.60	39.90
L ₁ S ₁	1.04	1.47	191.39	1.29	44.95
L ₁ S ₂	0.88	1.57	204.48	1.23	43.93
L ₁ S ₃	0.70	1.79	235.68	0.97	44.02
L ₁ S ₄	0.69	1.86	247.50	0.71	42.63
LO	2.86	1.26	168.31	0.84	48.14

試體編號	二氧化碳養護 28 天齡期				
	平均含水量(%)	平均乾單位重(gf/cm ³)	平均乾土重(gf/cm ³)	乾縮百分比(%)	平均抗壓強度(kgf/cm ²)
L	1.69	1.19	152.96	1.62	54.53
L ₁ M _{0.08}	3.38	1.45	174.93	2.59	154.95
L ₁ R _{0.1}	1.93	1.12	143.63	1.68	40.57
L ₁ R _{0.2}	2.10	1.14	143.46	1.81	45.78
L ₁ R _{0.3}	2.42	1.09	138.68	1.36	34.86
L ₁ R _{0.4}	2.48	1.06	135.43	1.29	43.81
L ₂ C ₁	2.04	1.32	152.41	4.47	87.88
L ₁ C ₁	2.00	1.38	152.80	5.18	58.95
L ₁ C ₃	0.85	1.46	161.34	5.57	51.86
L ₁ C ₈	2.14	1.50	155.90	7.77	44.12
L ₁ S ₁	1.00	1.46	191.43	0.97	51.77
L ₁ S ₂	0.89	1.59	205.24	1.29	46.92
L ₁ S ₃	0.67	1.80	235.05	1.17	52.55
L ₁ S ₄	0.74	1.88	246.05	1.68	54.16
LO	1.77	1.28	168.96	1.04	53.50

試體編號	二氧化碳養護 56 天齡期				
	平均含水量(%)	平均乾單位重(gf/cm ³)	平均乾土重(gf/cm ³)	乾縮百分比(%)	平均抗壓強度(kgf/cm ²)
L ₁ O _{0.57} M _{0.08}	2.37	1.53	192.30	2.07	101.49
L ₁ O _{1.14} M _{0.08}	1.94	1.54	193.26	1.48	91.23
L ₂ C ₁ M _{0.16}	2.54	1.60	181.51	4.66	231.30
L ₂ O _{1.55} C ₁ M _{0.16}	2.03	1.51	184.80	2.45	86.69
L ₃ C ₁	1.73	1.22	149.82	2.33	53.51
L ₄ C ₁	1.74	1.21	148.47	1.94	50.81
L ₁ R ₁	2.87	1.08	136.02	2.13	50.53
L ₁ M _{0.08} R _{0.51}	3.68	1.49	173.90	3.94	159.60
L ₁ O _{1.11} M _{0.08} R _{0.2}	2.13	1.54	198.44	1.48	114.19
L ₁ S _{1.22} O _{1.11} M _{0.08} R _{0.2}	1.59	1.78	225.26	1.42	135.16
L ₁ S _{2.33} M _{0.08} R _{0.2}	1.39	1.94	243.79	1.35	180.68