

廢輪胎橡膠混凝土應用於建築 隔熱吸音牆板之研究



內政部建築研究所研究報告

中華民國 97 年 12 月

廢輪胎橡膠混凝土應用於建築 隔熱吸音牆板之研究

研究主持人：王榮進

協同主持人：劉玉雯

研究員：潘煌鏗、郭建源

研究助理：楊翔麟

內政部建築研究所協同研究報告

中華民國 97 年 12 月

目次

目次	I
表次	III
圖次	VII
摘要	XI
第一章 緒論	1
第一節 研究背景與目的	1
第二節 研究內容	3
第二章 蒐集之資料與文獻分析	7
第一節 輪胎之組成	7
第二節 廢輪胎之處理方式	9
第三節 橡膠之特性	22
第四節 橡膠水泥基材料之工作性、密度與滲透性	25
第五節 橡膠混凝土之力學性質	29
第六節 橡膠混凝土受高溫作用後之行為	38
第七節 橡膠混凝土之隔音性與隔熱性	43
第八節 橡膠水泥基材料之抗裂性與抗凍性	47
第九節 台灣地區隔間牆建材物性比較	50
第三章 橡膠水泥板之先期測試	57
第一節 材料	57
第二節 配比設計	60
第三節 橡膠水泥板之製作程序	66

第四節 試驗設備與方法	71
第五節 橡膠水泥板之基本性質	73
第六節 橡膠水泥板耐燃性之初步試驗	80
第四章 纖維橡膠水泥板之製作	87
第一節 試驗參數與配比設計	87
第二節 纖維橡膠水泥板之製作方法	91
第三節 試驗方法與設備	96
第五章 纖維橡膠水泥板之性質	107
第一節 纖維橡膠水泥板組成材料之基本性質	107
第二節 纖維橡膠水泥板之物理性質	119
第三節 纖維橡膠水泥板之力學性質	121
第四節 纖維橡膠水泥板之熱學性質	129
第五節 纖維橡膠水泥板之經濟性分析	139
第六章 結論與建議	141
第一節 結論	141
第二節 建議	143
參考文獻	145
附錄-期末審查會評審意見執行現況	151

表次

表 2-1	廢輪胎的基本成分組成[11]	6
表 2-2	轎車胎與貨車胎的重量與橡膠成分差異[12]	7
表 2-3	輪胎與一般常用燃料之組成及熱值比較[13]	7
表 2-4	各國廢輪胎處理現況(1/2) [15]	10
表 2-4	各國廢輪胎處理現況(2/2) [15]	11
表 2-5	國內廢輪胎回收再利用處理方式一覽表(1/2) [14]	13
表 2-5	國內廢輪胎回收再利用處理方式一覽表 (2/2) [14]	14
表 2-6	常用橡膠的燃燒性能[31]	23
表 2-7	高強度橡膠混凝土之配比[45]	31
表 2-8	混凝土抗壓強度發展百分比[45]	32
表 2-9	橡膠混凝土之配比 (kg/m^3) [40]	34
表 2-10	橡膠混凝土之抗壓強度[40]	34
表 2-11	試體表面之變化與原因分析[49]	41
表 2-12	混凝土受高溫作用後之試體狀況[48]	41
表 2-13	市面上一般隔間牆建材材質物性表[57]	50
表 2-14	市售環球石膏板分間牆性質 [60]	52
表 2-15	CNS 3802 纖維水泥板之性能規定	55
表 3-1	水膠比 0.4 非膠結材體積含量	60
表 3-2	水膠比 0.4 (C4) 配比表	61
表 3-3	水膠比 0.4 (C4) 配比表 (小粒徑橡膠粉)	61

表 3-4	水膠比 0.5 非膠結材體積含量	62
表 3-5	水膠比 0.5 配比表	63
表 3-6	水膠比 0.65 非膠結材體積含量	63
表 3-7	水膠比 0.65 配比表	64
表 3-8	水膠比 0.45 非膠結材體積含量	64
表 3-9	水膠比 0.645 非膠結材體積含量	65
表 3-10	水膠比 0.645 配比表	65
表 3-11	橡膠水泥漿試體之濕比重	76
表 3-12	C4 與 C645 細橡膠粉試體之抗彎強度試驗結果	78
表 3-13	水膠比 0.65 橡膠粒水泥漿抗彎強度試驗結果	79
表 3-14	水膠比 0.65 橡膠粒水泥漿試體之抗壓強度試驗結果	79
表 3-15	未塗佈防火批覆(水膠比 0.35) 橡膠水泥板燃燒試驗結果	81
表 3-16	C65-RG30F0B0-C 試體未塗佈防火批覆平板燃燒試驗結果	83
表 3-17	C5-RG30F0B0-B 塗佈防火批覆之不同延時燃燒試驗結果	84
表 3-18	C645-RS40F0B0-D 塗佈不同厚度之防火批覆試體高溫加熱試	86
表 4-1	試驗參數表	88
表 4-2	橡膠水泥漿之配比表	89
表 4-3	椰纖維水泥漿配比表	89
表 4-4	各項試驗之試體尺寸	90
表 5-1	橡膠與椰纖水泥漿試體之比重	108
表 5-2	橡膠水泥板之吸水率(%)	110

表 5-3	楊氏模數與柏松比	115
表 5-4	椰纖水泥漿試體之比重與強度	117
表 5-5	椰纖水泥板之吸水率(%)	118
表 5-6	纖維橡膠水泥板之比重	119
表 5-7	纖維橡膠水泥板之吸水率(%)	120
表 5-8	纖維橡膠水泥板之抗彎強度	122
表 5-9	纖維橡膠水泥板之衝擊試驗結果	125
表 5-10	纖維橡膠水泥板耐燃三級試驗結果	130
表 5-11	纖維橡膠水泥板耐燃二級試驗結果	131
表 5-12	纖維橡膠水泥板之熱傳導試驗結果	135
表 5-13	纖維橡膠水泥板煙毒試驗結果	138
表 5-14	纖維橡膠水泥板之材料價格與用量	140
表 5-15	纖維橡膠水泥板與市售水泥板成本之比較	140



圖次

圖 1-1	研究步驟流程圖	4
圖 2-1	市售轎車胎之橫斷面圖[10]	6
圖 2-2	廢輪胎經回收後再生料之資本投資與應用市場層級構圖[19]	12
圖 2-3	以原型廢輪胎構築公路之邊坡擋土牆[20]	15
圖 2-4	廢輪胎護坡工法[21]	15
圖 2-5	廢輪胎擋土牆（新竹市衛生掩埋場復育工程）[22]	16
圖 2-6	以廢輪胎作為混凝土梳子壩[23]	16
圖 2-7	以廢輪胎作為土石流源頭處理[23]	16
圖 2-8	攔砂壩之抗磨材料（宜蘭三星鄉）[23]	17
圖 2-9	雲林金湖漁港利用廢棄輪胎施作之防砂試驗堤[24]	18
圖 2-10	廢輪胎消波塊[25]	18
圖 2-11	德基水庫浮式廢輪胎消波消能堤之案例[8]	19
圖 2-12	雲林防砂試驗堤之現況[8]	19
圖 2-13	不同橡膠摻量對混凝土滲透高度之影響[40]	27
圖 2-14	不同橡膠摻量對普通混凝土滲透係數的影響[40]	28
圖 2-15	橡膠混凝土滲透性與水膠比的關係[40]	28
圖 2-16	橡膠粉混凝土抗壓強度變化[45]	33
圖 2-17	普通橡膠混凝土之抗壓強度[40]	35
圖 2-18	飛灰橡膠混凝土之抗壓強度[40]	35
圖 2-19	高溫作用前後橡膠混凝土之抗壓強度[49]	39

圖 2-20	高溫前、後混凝土抗壓強度之比值[49]	40
圖 2-21	高溫作用前後橡膠混凝土之抗彎強度[49]	42
圖 2-22	水泥覆合物熱傳導性與橡膠添加量關係[62]	46
圖 3-1	廢棉絮	58
圖 3-2	橡膠粒與橡膠粉	58
圖 3-3	椰子纖維	59
圖 3-4	拌合機	66
圖 3-5	平板試體模	67
圖 3-6	長方試體模	67
圖 3-7	恆溫恆溼養護機	68
圖 3-8	單點加溫高溫爐	71
圖 3-9	萬能材料試驗機	72
圖 3-10	中心點抗彎試驗	77
圖 3-11	加熱試驗前之橡膠水泥板	81
圖 3-12	加熱 150°C 試驗後之橡膠水泥板	82
圖 4-1	新拌橡膠水泥漿	92
圖 4-2	新拌纖維水泥漿	93
圖 4-3	纖維橡膠水泥板之組成	93
圖 4-4	橡膠心材置置中於模版內	94
圖 4-5	製作完成之纖維橡膠水泥板	95
圖 4-6	各項試驗用板材之尺寸	96

圖 4-7	吸音試驗之纖維橡膠水泥板	96
圖 4-8	纖維橡膠水泥板之抗彎試驗	98
圖 4-9	砂上全面支承	99
圖 4-10	耐衝擊試驗裝置	100
圖 4-11	隔熱材料導熱係數之測定裝置	101
圖 4-12	隔音牆試驗安裝框架	104
圖 4-13	NES 煙毒性試驗裝置	105
圖 5-1	心材-橡膠水泥板	107
圖 5-2	橡膠含量與水泥漿比重之關係	108
圖 5-3	橡膠含量 30%之水泥漿吸水率歷時曲線(C5-R30)	111
圖 5-4	橡膠含量 40%之水泥漿吸水率歷時曲線(C5-R40)	111
圖 5-5	橡膠含量 50%之水泥漿吸水率歷時曲線(C5-R50)	112
圖 5-6	不同橡膠含量之水泥板吸水率歷時曲線 (7 天)	112
圖 5-7	橡膠水泥板吸水後之尺寸變化率	113
圖 5-8	橡膠含量與橡膠水泥漿試體抗壓強度之關係	114
圖 5-9	橡膠含量與橡膠水泥漿試體抗彎強度之關係	115
圖 5-10	新拌之椰纖水泥漿	116
圖 5-11	椰纖水泥板之吸水率歷時曲線	118
圖 5-12	纖維橡膠水泥板之吸水率歷時曲線	120
圖 5-13	包覆材-椰纖水泥漿與心材-橡膠板兩者剝離之情形 (I)	122
圖 5-14	包覆材-椰纖水泥漿與心材-橡膠板兩者剝離之情形 (II)	123

圖 5-15	纖維橡膠水泥板抗彎破壞之情形(I)	123
圖 5-16	纖維橡膠水泥板抗彎破壞之情形 (II)	124
圖 5-17	C5R30 衝擊試驗後之情形	126
圖 5-18	C5R40 衝擊試驗後之情形	127
圖 5-19	C5R50 衝擊試驗後之情形	128
圖 5-20	耐燃性試驗情形	131
圖 5-21	耐燃 3 級試驗後纖維之橡膠水泥板—橡膠含量 40%	131
圖 5-22	耐燃 3 級試驗後纖維之橡膠水泥板—橡膠含量 50%	132
圖 5-23	耐燃 2 級試驗後纖維橡膠水泥板之受熱面—橡膠含量 50%	133
圖 5-24	標準板耐燃三級試驗曲線圖	133
圖 5-25	纖維橡膠水泥板耐燃三級試驗曲線圖—橡膠含量 40%	134
圖 5-26	纖維橡膠水泥板耐燃三級試驗曲線圖—橡膠含量 50%	135

摘要

關鍵詞：橡膠水泥板，熱傳導係數，衝擊性，耐燃性

一、研究緣起

廢輪胎是環境，衛生與安全的難題之一，廢舊輪胎的回收利用已是全世界關注的焦點。台灣地區每年大約產生 13 萬公噸的廢輪胎，但其再生利用之市場仍不足以消化之。而國外廢輪胎之回收處理方式已逐漸從早期能源回收的輪胎衍生燃料走向資源回收的進行材料回收再利用之方式，資源回收亦朝向開發附加價值較高的產品。廢輪胎由於熱值高(每公斤 37 百萬焦耳)，過去常充當水泥窯、電廠、紙廠燃料使用。但所排放的空氣中，含有致癌空污物，爐渣也有大量的灰燼，整體資源利用效益應重新加以評估。若改以低溫液氮冷卻，破碎後，所分離抽出橡膠塊粒，用於瀝青或水泥混凝土或隔音牆填充料，由於供需量大，應可提升廢輪胎資源再利用之效益。因此，本計畫主要目的為利用廢輪胎橡膠粒與農業廢棄物-椰纖製作橡膠水泥板，以應用於建築隔間材料上，研究成果更可提供營建業之應用參考。

二、研究方法及過程

本研究以三種橡膠含量(30%、40%與 50%)製作橡膠水泥板，再以椰纖含量為 15%(體積比)之水泥漿包裹，形成纖維橡膠水泥板，並分別製作試體以供板材各項性能測試用。測試項目主要為(1) 建立纖維橡膠水泥板之配比設計與製造技術；(2) 探討橡膠水泥板之各項性能，包括工作性、含水率、容積比重、吸水長度變化率、抗彎強度、耐衝擊性、耐燃性、隔熱性與隔音性。

三、重要發現

試驗結果顯示，橡膠水泥板之比重約為 1.4－1.48，含水率約為 5－6%，24 小時之吸水率約為 13.8%－15.4%。各組橡膠水泥板之彎曲破壞載重約為 80－83 kgf；熱傳導係數約為 0.247-0.286 kcal/m²℃hr；衝擊作用後未出現龜裂、剝離、貫穿孔及裂開之情形，凹陷直徑為 24mm。此外，由耐燃試驗顯示，各組橡膠水泥板均已達到耐燃 2 級之標準。

四、主要建議事項

建議一

制定獎勵措施：立即可行建議

主辦機關：內政部建築研究所

協辦機關：行政院農委會

(1)制定獎勵措施，鼓勵生產廢舊輪胎橡膠顆粒與椰子纖維，以保持原料來源穩定；(2)辦理橡膠水泥板隔間牆推廣說明會或參加相關產品建材展覽會，提高橡膠水泥板的知名度；(3)協助廠商進行工業化生產輕質橡膠水泥板。

建議二

提升纖維橡膠水泥板之功能：中長期建議

主辦機關：內政部建築研究所

協辦機關：行政院農委會

(1)繼續增強輕質橡膠水泥板的耐燃性能，朝向耐燃 1 級標準的目標；(2)進行橡膠水泥板外觀之結構(如顏色、圖樣)及其他附加功能之研發，提升國人生活品質；(3)制定輕質橡膠水泥板隔間牆相關規範與試驗，做為建築結構設計與使用依據。

Abstract

Keywords : partition of scrapped tire rubber concrete, coefficient of thermal conductivity, impact endurance, fireproof capability

1. Forward

Many junk tires are always discarded as the trash, and become a big problem in the environment and the sanitation all over the world. In some countries, the handling way of junk tires in early stages was treated as derivative fuel materials belong to a kind of energy recycling and was utilized for example in cement furnace, power plant and paper plane, where the heat value of the junk tire is about 37 MJ/kgf. However, the emissive air due to combustions contains some cancer-induced materials and the slag also possesses a large amount of ashes. Both disadvantages will affect the overall benefit of resource recycling which need to be re-evaluated and considered in use. Recently, a kind of resource recycling like materials recycling is proposed that can reproduce more valuable manufactures in industry. Especially, the rubber particles separated from junk tires by liquid nitrogen can be used as a fillet in asphalts or cement concrete. This separated technique can provide many scrapped tire rubbers and promote the recycling benefits of junk tires. In Taiwan, there are about one hundred thirty thousand tons junk tires per year. It is still difficult to handle all junk tires in recycling markets domestically. Therefore, the aim of this research is to make lightweight rubber concrete containing scrapped tire rubbers and coconut fibers

into the partition that can be used as the partition wall in the building broadly.

2. Investigation Method and Procedures

This research is trying to make lightweight coconut-fiber/rubber concrete with rubber/cement plate as the fillet and coconut fiber/cement as the binder, where 30%, 40% and 50% in volume of the rubber and 15% coconut-fiber in volume are adopt, respectively. The scrapped tire rubbers/coconut fibers concrete plates and samples are tested and found out the mixture proportions and manufacture techniques first, and then measure the material proportions of rubber/cement plate including workability, water absorbing and length increment, bulk specific gravity, bending strength and impact resistance. Finally, the properties of heatproof and sound absorbing in the partition are also investigated.

3. Major Findings

Results show that the measured rubber/cement plate has the water absorbing of 5% to 6%, bulk specific gravity of 1.4 – 1.48. Meanwhile, the bending strength is 80 - 83 kgf and the coefficient of thermal conductivity is about 0.247 - 0.286 kcal/m²°C hr, respectively. The partition of scrapped tire rubber concrete after the impact test, no cracks, the detachment, pinholes and the split exist, and the indentation diameters are all below 20mm. Besides, from the fire resistant test one finds that each group of designed the partition can reach the 2nd degree standard of the fire resistance.

4. Suggestions

For the resource recycling of the scrapped tire rubber and coconut fibers, the lightweight coconut-fiber/rubber concrete has been found to be suitable for the partition in the building compartments in this research. Thereby, some suggestions are necessary to be down immediately: (1) A system of rewards is needed to encourage producing scrapped tire rubber particles in order to keep the stable source of raw materials. (2) To have a well-known renown for scrapped tire rubber partition, one should participate in market illustration or product exhibition. (3) Technical assistance of scrapped tire rubber partition for factory owners is also a way. Besides, the medium and long term suggestions are also made: (1) The fireproof capability of scrapped tire rubber concrete is needed to be enhanced in the future. (2) The color and the pattern of scrapped tire rubber partition continue to modify to promote the quality of life. (3) Finally, the experimental standard and the Code of scrapped tire rubber partition are necessary in industry.

第一章 緒 論

第一節 研究背景與目的

廢輪胎是環境、衛生與安全的難題之一，廢舊輪胎的回收利用已是全世界關注的焦點。廢輪胎由硫化橡膠所合成，其性質非常穩定，可在自然環境中持續一百年以上而不致腐壞[1]。且由於廢輪胎之彈性佳、韌性強，無法以機械力壓實，因此堆置時須佔據大量的空間；同時在遇雨積水之情況下，極容易引起登革熱疾病的發生。再加上廢輪胎含有高熱值，若堆積貯存不慎，極易起火燃燒，不但造成空氣污染，而所產生的熔油、熔渣亦會滲入地下，進而造成土壤及地下水的污染[2]。因此，利用掩埋來處理廢輪胎之方法，不但需廣大之土地面積，且亦無法有效根本解決廢輪胎之處理問題。

台灣地區每年大約產生13萬公噸的廢輪胎，但其再生利用之市場仍不足以消化之[3]。而國外廢輪胎之回收處理方式已逐漸從早期的“能源回收—作為輪胎衍生燃料”走向“資源回收—進行材料回收再利用”之方式，資源回收亦朝向開發附加價值較高的產品。目前廢舊輪胎資源回收利用的技術包括：廢舊輪胎直接原型利用或翻修、廢橡膠熱能利用、改性瀝青、建築高速公路、生產防水卷材、防水塗料橡膠製品等多個方面。此外，廢輪胎粉可以加入化學添加劑，製成各種成品，如橡膠板、高速公路護欄、鐵路平交道、人造草皮、運動場跑道、防護墊等；廢輪胎於海洋之應用亦遍及人工魚礁、海岸防波堤、消波塊、碼頭防撞及浮油回收等方面[4-6]。

輪胎的組成複雜，內容包括天然與合成橡膠，黑碳，尼龍線圈，鋼絲，

硫，石油，樹脂等，在製造過程中加以混合並經高溫成型後，基本上已產生質變且無法回復原來的材質。廢輪胎由於熱值高(每公斤 37 百萬焦耳)，過去常充當水泥窯、電廠、紙廠燃料使用。但所排放的空氣中，含有致癌空污物，爐渣也有大量的灰燼，整體資源利用效益應重新加以評估。若改以低溫液氮冷卻，破碎後，所分離抽出橡膠塊粒，用於瀝青或水泥混凝土或隔音牆填充料，由於供需量大，應可提升廢輪胎資源再利用之效益。而近年來，美國、加拿大、日本等先進國家已分別進行廢舊輪胎橡膠水泥基材料各項性能之相關研究，並逐漸應用於實際工程中[7-13]。

本研究之主要目的為探討廢舊輪胎橡膠顆粒應用於水泥基材料中之工程性能、隔熱、吸音與防火性能，並研發具有隔熱、吸音與防火性能之橡膠水泥混凝土版，以作為建築工程非承重牆之材料。主要研究內容為，國內外廢舊輪胎橡膠水泥基材料相關文獻之搜集與整理，廢舊輪胎橡膠混凝土板之配比設計與隔熱、吸音、防火性能與煙毒性測試，以及廢舊輪胎橡膠混凝土板之經濟效益評估。

第二節 研究方法與進度

本計畫擬採用一定級配之廢輪胎橡膠粒，製作具有強度、耐燃性、防火性與隔熱性之輕質橡膠水泥板，以供建築隔間之應用。研究方法主要分成三大部分：(1) 建立輕質橡膠水泥板之配比設計與製造技術；(2) 探討輕質橡膠水泥板之各項性能，包括容積比重、吸水率、防火性、耐燃性與隔熱性；(3) 分析評估輕質橡膠水泥板之經濟效益。

研究內容之各項步驟，如圖 1-1 研究流程圖所示。目前之執行進度說明如表 1-1 所示。



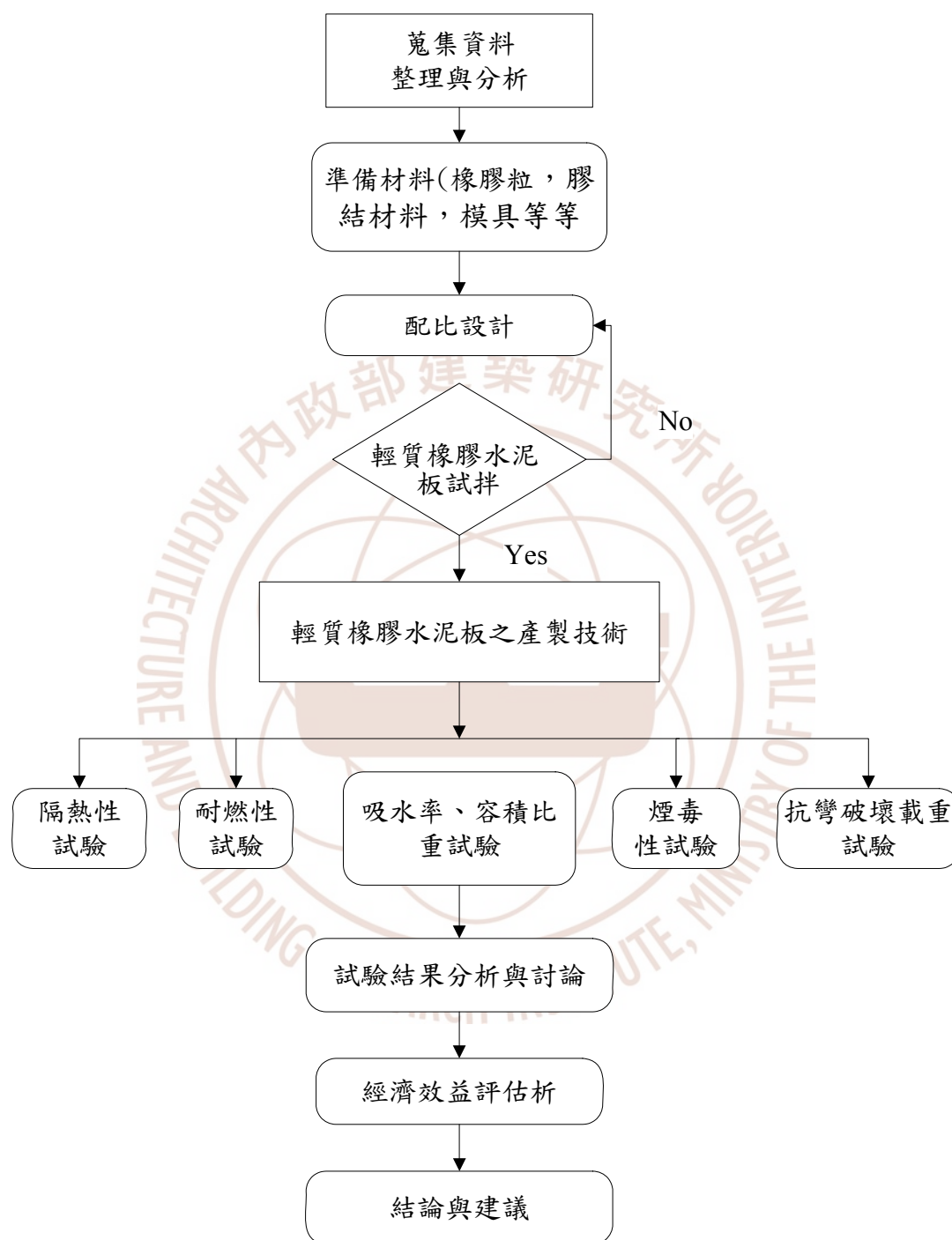


圖 1-1 研究步驟流程圖

*資料來源：本研究整理

第二章 蒐集之資料與文獻分析

第一節 輪胎之組成

輪胎主要是由橡膠、鋼絲、與纖維所組成，目前一般市售轎車胎之橫斷面，如圖2-1所示[9]。由圖2-1可知，除了兩條胎唇鋼絲外，整個胎體皆佈滿鋼環帶，胎面下以尼龍纖維加強，胎唇趾部份則再以纖維加以保護。廢輪胎之基本成分組成，包括橡膠、硫化劑、促進劑...等，其中橡膠為主要組成成分，如表2-1所示[12]。在輪胎的各部份組成中，橡膠成分約佔總重的60至70%之間。隨著輪胎應用範圍的不同，組成成份亦略有變化，根據美國聯邦公路總署(Federal Highway Administration，簡稱FHWA)之研究報告[10]，將輪胎依其使用特性區分為轎車胎與貨車胎兩種，其重量與橡膠成分的組成，如表2-2所示。典型轎車胎的重量約9.1公斤，其中可回收橡膠重量約為5.4至5.9公斤，而天然橡膠含量約為35%，合成橡膠的含量約為65%。另貨車胎重量約為18.2公斤，橡膠含量約介於60至70%之間，其中天然橡膠成份約佔65%，合成橡膠成份約35%。

廢輪胎的熱值含量高達15,000Btu/l，相當是一千二百萬桶的原油，每公斤3700 萬焦耳，此為其他燃料所不能比擬。由於廢輪胎之熱值較煤為高，且殘餘之灰渣亦較煤少的多，所以可以做為一種極佳的輔助燃料[11]。表2-3為輪胎之主要組成元素與一般常用燃料之比較[12]。由表2-3可知，輪胎因灰份較煤低，而擁有比煤高的熱值，又因含硫成份較重油稍低，可在燃燒製程中作為輔助燃料之用。

廢輪胎橡膠混凝土應用於建築隔熱吸音牆板之研究

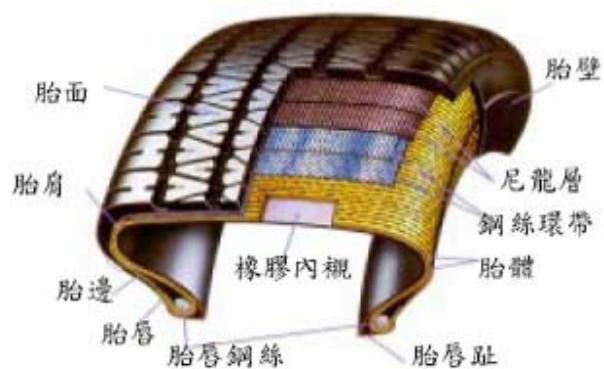


圖2-1 市售轎車胎之橫斷面圖

資料來源：[9]

表2-1 廢輪胎的基本成分組成

主成份	主要成份物
橡膠	天然橡膠、合成橡膠
硫化劑	有機硫
硫化促進劑	促進劑
促進劑	氧化鋅、硬脂酸
抗氧化劑	氮類抗氧化劑、氮類抗氧化劑、臘
加強劑	碳黑、白碳
填充劑	碳酸鈣
軟化劑	松焦油、芳香油
染色劑	鈦白、氧化鋅

資料來源：[12]

第二章 蒐集之資料與文獻分析

表2-2 轎車胎與貨車胎的重量與橡膠成分差異

輪胎種類	重量	可回收橡膠		橡膠成份含量百分比	
		重量(kg)	百分比(%)	天然	合成
轎車胎	9.1	5.4~5.9	60~65	35	65
卡車胎	18.2	10.9~12.7	60~70	65	35

資料來源：[10]

表2-3 輪胎與一般常用燃料之組成及熱值比較

組成	輪胎	重油	煤
含水率(%)	—	—	2.6
碳(%)	89.2	86.0	69.0
氫(%)	7.3	11.1	4.0
硫(%)	1.8	2.4	0.4
氮(%)	0.2	0.3	1.3
灰份(%)	1.5	—	15.2
熱值(kcl/kg)	8970	10350	6500

資料來源：[12]

另一方面，廢輪胎在破碎處理過程中會產生廢粗鋼絲、細鋼絲、膠片與少量廢棉絮等，而在磨粉過程中除了產生膠粒或膠粉產品之外，同時亦會產生鋼絲及棉絮。上述各類資源化產品或衍生物之個別處理方式或再利用途徑，分別

廢輪胎橡膠混凝土應用於建築隔熱吸音牆板之研究

說明如下[14-15]：

(1)膠片(尺寸在1 吋左右)

除了東南水泥將廢輪胎破碎後之膠片做為該廠水泥窯之輔助燃料外，其餘各廠大都以相當於運費的價格售予永豐餘新屋廠或台汽電官田廠做為輔助燃料。國內約有90%的廢輪胎膠片係作為輔助燃料使用。

(2)廢輪胎膠粒或膠粉產品

目前市面上以5 目膠粒產品的市場與應用途徑較為廣泛，其可出售給再生膠製造業、下游橡膠製品製造業(作為緩衝墊...等橡膠製品)、或作為地磚/道路/球場鋪材等。

(3)廢鋼絲

廢鋼絲可透過回收商出售給鋼鐵廠，其售價視廢鋼絲中橡膠沾黏情形以及表面銹化情形之不同而有所差異，每公斤價格從0.1 元到1.5 元不等，愈乾淨的鋼絲，售價愈高。隨著各廠處理技術與設備的提昇與改善，大多數處理廠產生之廢鋼絲中膠片的含量已大幅降低，且為鋼鐵廠所能接受者。

(4)廢棉絮

廢輪胎磨粉過程產生的棉絮遠較破碎處理過程產生之棉絮量為多，且研磨尼龍胎較研磨鋼絲胎所產生之廢棉絮為多。廢棉絮目前被認定為一般事業廢棄物，必須委託合格的清理機構進行清除處理，依據業者提供的資料顯示，目前的委託處理費用約為1500~2000 元/公噸。對多數的廢輪胎破碎廠而言，由於棉絮量較少，大都將其混在膠片中送到下游膠片再利用廠一併處理。

第二節 廢輪胎之處理方式

1. 國外廢輪胎回收處理概況

世界各國較常採用的廢輪胎處理方式，大致上可分為掩埋、翻胎再製、原型利用、熱轉換技術(包括焚化、熱裂解、氣化...等)與機械製程材料回收(包括切碎、粉碎、造粒...等)等六種方式。而目前歐、美、日先進國家之水泥業與造紙業者，均已利用回收輪胎做為輔助燃料；亦有利用輪胎鋪設道路、燃燒發電、再製胎等；另外廢輪胎粉可以加入化學添加劑，製成各種成品，如橡膠板、高速公路護欄、鐵路平交道、人造草皮、運動場跑道、防護墊等。世界各國廢輪胎之處理概況如表2-4所示[16]。

不同的廢輪胎處理技術，其相對產生的再生料產品有極大之差異。以熱轉換技術處理者，主要產品為能源、油和焦炭...等；而使用機械製程進行材料回收之主要產品則為廢鋼絲、橡膠碎片、粒狀物或碎屑...等。廢輪胎使用機械方式進行材料回收之程序，包括常溫切碎(shredding)、常溫造粒(granulation)和低溫(cryogenic)造粒。目前全球已有相當多的廢輪胎切碎製程以全商業化性質在運轉。由於切碎製程相當容易安裝，且現成設備僅需要少量或不需額外之資本支出即可使用，是一種相當低投資成本的廢輪胎處理方式，但其運轉維修成本較高。機械製程產生之主要產品以橡膠粉或橡膠片居多，未經處理的廢輪胎橡膠粉(5~15mesh)，由於已被硫化而失去熱可塑性，故只能被用來製作不需抗高應力的產品，如橡膠墊、運動場跑道、兒童遊樂場地面、鐵路平交道等等。在

廢輪胎橡膠混凝土應用於建築隔熱吸音牆板之研究

歐、美地區亦有直接將未經處理的廢輪胎橡膠粉填加於瀝青中（40~60mesh），以製成作為鋪設道路之用的橡膠瀝青[16-18]。廢輪胎回收再利用之再生料等級、資本投資與應用市場之層級構圖，如圖2-2所示[19]。

表2-4 各國廢輪胎處理現況(1/2)

國家	目前之處理方式	法令規定	未來計劃
西德	30 %未利用，37 %水泥廠輔助燃料，22 %物理處理後再利用(其中90 %為再胎)，11 %以舊胎型式外銷出口	輪胎不得與一般廢棄物一起清除	1.建立焚廠 2.發展新的回收再利用技術 3.道路工程之應用
英國	36 %掩埋，29 %堆放於堆場，21 %焚燒，8 %外銷，4 %水泥廠燃燒，2 %其它用途	只能棄置於有執照許可之場址	1.燃燒發電 2.道路工程
義大利	棄置於可控制的地方，或者切碎及燃燒	廢輪胎為都市廢棄物，應由當地政府機構負責解決	1.燃燒以回收能源
挪威	傾倒棄置	無	1.計畫限制廢胎棄置
荷蘭	23 %粉碎後再利用，54 %售予國外水泥廠作補助燃料(數量減少中)	西元2000 年時將完全禁止廢胎掩埋	1.計畫回收再利用半數的廢輪胎，另外50%則予以焚燒
瑞典	10~15 %再製胎	無	1.調查回收再利用技術 考慮補助廢胎之收集

資料來源：[16]

第二章 蒐集之資料與文獻分析

表2-4 各國廢輪胎處理現況(2/2) [16]

國家	目前之處理方式	法令規定	未來計劃
奧地利	由水泥業燃燒	無法令，但須申報數量，且不能存放於一般掩埋場	1.維持目前狀況
丹麥	由水泥業燃燒	無	1. 輪胎粉碎
瑞士	掩埋、水泥業燃燒，將橡膠粉填加於建築材料	無聯邦法令，但一些州政府禁止掩埋，或收取處理費	1.推廣水泥業之燃用 2.推廣橡膠瀝青
芬蘭	棄置、熱解、做墊子、防護板、路面實驗用	無	1.進行熱解研究 2.路面使用
美國	30%以再製胎、再生膠、補助燃料、發電、橡膠瀝青等方式再利用，10%合法掩埋，60%非法棄置	3/4 以上的州已有相關法規	1.製作橡膠瀝青 2.將橡膠粉與高分子聚合物混合，以製作新的且附加價值高的產品 3.當土木工程基礎之墊材填料工程
日本	50%以再生膠、再製胎、外銷等方式資源再利用，34%以上水泥補助燃料、解熱、鍋爐燃燒等方式回收能源，剩餘5%則未利用	依廢棄物清除處理法處理	1.再生膠 2.再製胎 3.出口外銷 4.能源利用

資料來源：[16]

廢輪胎橡膠混凝土應用於建築隔熱吸音牆板之研究

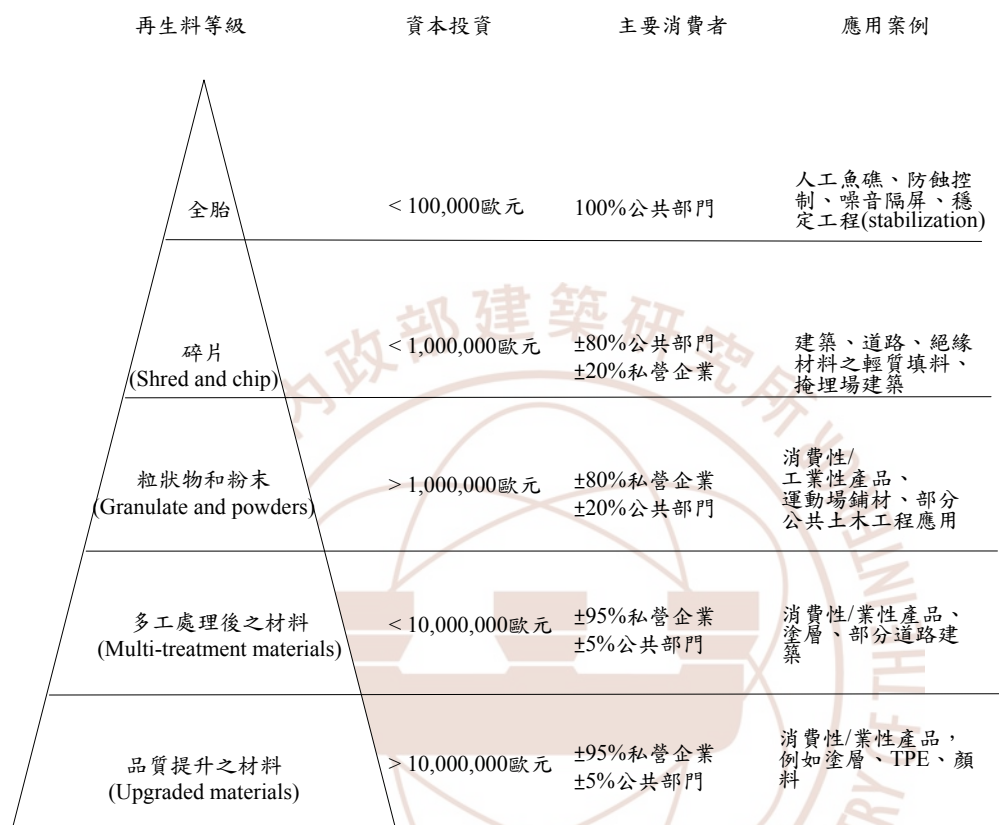


圖2-2 廢輪胎經回收後再生料之資本投資與應用市場層級構圖

資料來源：[19]

2. 國內廢輪胎回收處理技術

國內廢輪胎再利用方式有中古胎二次利用(再製胎使用)、土木工程應用、作為輪胎輔助燃料使用、熱裂解處理、研磨成橡膠粒或橡膠粉資源化利用等，如表2-5所示[14]。其中，中古胎二次利用及部分土木工程應用係為整胎利用，其餘之廢輪胎再利用所涉及之回收處理技術，大都以破碎法為其前處理方式。而

第二章 蒐集之資料與文獻分析

廢輪胎以常溫機械破碎後之再生料(約1吋左右之膠片產品)，其應用途徑以能源回收居多，且應用範圍集中在汽電共生廠(設施)鍋爐之輔助燃料，應用在水泥業作為生產水泥替代燃料者則較少數。

表2-5 國內廢輪胎回收再利用處理方式一覽表(1/2) [14]

處理方式	應用領域&備註說明
土木工程應用—全胎應用	1 應用領域：公園的遊樂器材、賽車場所防撞欄、提岸碼頭邊的防撞材、軍方靶場的擋土牆及近於規模化的人工漁礁及海邊、水庫邊的消波堤及平台等。 1 應用實例： (1) 將(2)廢輪胎使用做為擋土牆者：台灣省林業試驗所，(3) 將(4) 廢輪胎做為邊坡之節制壩，(5) 僅為小型試用。 (6) 高雄大林蒲海岸填海造陸計畫之南星計畫廢輪胎護岸工程，(7)採用廢輪胎做為海堤護岸工程。 (8) 雲林金湖漁港防砂試驗工程：做為此種應用之安全性，(9)仍待理論分析及實務來驗證
再製胎的使用	因安全考量，目前一般利用高速公路運輸之卡車，已少有使用再製胎的情形。但行駛於一般道路之重型卡車(如砂石車)使用勘用胎情形相當普遍。
勘用胎出口	勘用胎通常堆置在各維修廠區或回收處理廠，由貿易商引介及挑選後輸往開發中國家繼續使用。

資料來源：[14]

表2-5 國內廢輪胎回收再利用處理方式一覽表 (2/2)

處理方式	應用領域&備註說明
輪胎輔助燃料	使用於水泥窯者，須使用於橫窯並重新建置入料口，所費不貲。國內部分特定汽電共生廠亦接受破碎至3cm x 3cm 以下之廢輪胎膠片作為其輔助燃料。
常溫機械破碎	國內各廢輪胎處理廠目前最常使用之處理方式。不論廢輪胎處理之最終產品為何，大都需先經破碎程序將廢輪胎切碎成膠片後，再進行粉碎研磨或熱裂解處理。
熱裂解	將廢輪胎在缺氧狀態下將其裂解成裂解油、碳黑和瓦斯等產品，國內目前僅1 家處理機構使用廢輪胎熱裂解製程。

資料來源：[14]

3. 國內外現有之再利用方法

(1) 山坡地水土保持的利用

在山坡地或山林中，常有因不當砍伐林地，或者種植不易抓住土壤中水量的植物，而導致大雨來臨時，隨之而來的土石流造成山坡地的裸露，之後會很容易因雨水的沖刷而導致土壤的流失。但若在未大量種植草及樹木的山坡地上，堆放排列好的廢輪胎，不但可替代植草磚之用途，也可避免土壤的流失，落實水土保持的工作。以原型廢輪胎構築公路邊坡擋土牆之應用，以及在水土

第二章 蒐集之資料與文獻分析

保持工程之應用，如圖2-3~圖2-8所示[7,20-22]。



圖2-3 以原型廢輪胎構築公路之邊坡擋土牆

資料來源：[21]



圖2-4 廢輪胎護坡工法

資料來源：[7]

廢輪胎橡膠混凝土應用於建築隔熱吸音牆板之研究



圖2-5 廢輪胎擋土牆（新竹市衛生掩埋場復育工程）

資料來源：[22]



圖2-6 以廢輪胎作為混凝土梳子壩

資料來源：[8]



圖2-7 以廢輪胎作為土石流源頭處理

資料來源：[8]



圖2-8 攔砂壩之抗磨材料（宜蘭三星鄉）

資料來源：[8]

(2) 在海岸保護方面的利用

利用廢輪胎加上高爐水泥固定後可做為擋土牆、攔沙壩、潛堤、消波堤...等具有保護海岸，防止侵蝕之工程。若以大型的廢輪胎及混凝土混合，則可製成堆置在海岸邊的消波塊，減少波浪的能量對海防的衝擊，進而提供靜穩的海域養殖環境或作為海域工程的保護設施；而且廢輪胎的材質具有彈性，對於碼頭上漁船的停靠具有保護作用，能讓力量分散，不致於撞上邊岸，而且在大風浪時，也能夠防範漁船間互相的撞擊而損毀。廢輪胎於海岸保護工程之應用圖2-9～圖2-12所示[23-24]。

(3) 在海洋資源方面的利用

在海洋生態系中，仔稚魚是海洋生態食物鏈中重要之一環，若無適當之棲息場所很容易使仔稚魚散失，所以在水深10m 的淺海域內投放稚魚保護礁是有

廢輪胎橡膠混凝土應用於建築隔熱吸音牆板之研究

其必要性。但若使用水泥製成的人工魚礁投放，會因為重量較大，在投放後的五年內便會有被沙埋沒之堪慮，頗不經濟；而且稚魚保護礁之投放又必須考量其漲退潮時所帶來之安全性，如使船舶擱淺等，所以廢輪胎製成之人工魚礁，正可以彌補這項缺失，而且還可用來做緩和海浪對海岸的衝擊。至於廢輪胎架構而成之人工魚礁放置於海中（沈建全，1998 年），是否會造成二次污染問題，根據俞克儉與蔡復進(1998 年)報告指出，廢輪胎並不會對海洋中的生物造成不良影響，而且不但具有彈性，也較安全，又有聚魚效果，不用擔心有二次污染的問題。



圖2-9 雲林金湖漁港利用廢棄輪胎施作之防砂試驗堤

資料來源：[23]



圖2-10 廢輪胎消波塊

資料來源：[24]



圖2-11 德基水庫浮式廢輪胎消波消能堤之案例
資料來源：[7]



圖2-12 雲林防砂試驗堤之現況
資料來源：[7]

(4) 再製輪胎

為最簡單且通用的廢輪胎回收再利用方法；將廢輪胎已磨損的胎面刮除

後，重新再貼上新的胎面，製成再生胎；不過近幾年再生胎的需求已經不大了，一方面是新輪胎在價格上低廉，且在車輛行進中也比較安全、舒適；反之，再生胎安全性較差，如果超載或超速，新的膠層會因為輪胎磨擦過熱使得輪胎溫度升高、減低強度而導致脫落，進而發生爆破或其他故障，並且可能有翻車或與對面來車相撞等事故發生[11]。

(5) 直接原型再利用

將未嚴重破損、分裂的廢輪胎，以原來的形狀再加以利用，例如當做盪鞦韆、跳圈圈...等遊樂設施，以減少孩童骨折或其它意外的發生。或者作為公路護欄、擋車墩，因為其具有彈性，可以減少衝擊的力量，增加遊樂及行車安全；此種再利用方法簡單，不須高等的回收再利用技術，但在廢輪胎的使用量上數量有限。

(6) 粉碎後再利用

經由切片機切碎或研磨機磨碎後所得之橡膠粒，及經液態氮冷凍，再以超低溫粉碎機粉碎後取得的橡膠粉，則可以加入樹脂等化學添加劑中，製成各種橡膠再製品，不但富彈性、耐久性強、隔音效果佳，且不易龜裂或老化，並可止滑提高安全性。橡膠粉也可直接加入瀝青中，和瀝青混和後成為鋪路用的橡膠瀝青；因為橡膠粉可增加瀝青的彈性，降低行車的噪音，增加行車舒適度與安全，甚至有實驗證實橡膠瀝青路面可以減少輪胎的磨耗程度，並且路面壽命比一般的路面估計可以多至2 倍，但價格高且僅止於研究試驗階段，尚未大量使用於道路系統上[11, 25]。

(7) 農業上的應用

根據美國的研究報告中指出[26]，可以將廢輪胎切碎後混在泥土中，並用其種樹，對植物生長情況較好，因為切碎的廢輪胎塊性質穩定，能夠與泥土充份的混合，使土壤疏鬆，增加通氣性，以改善排水不良的土壤；而且廢輪胎中的棉絮可作為有機肥及培養土，讓植物在良好的環境下成長。

(8) 浮油吸附劑

根據王智龍與林啟燦等人（1999年）首先提出之構想，利用廢輪胎將其磨成粉來做為吸附浮油回收之材料，主要是因為輪胎粉的表面是由高分子的橡膠材質所構成，具有親油特性，所以吸油能力佳。初步測試結果顯示，每公克的輪胎粉若重複使用，可以回收二百公克以上的浮油，且不易受海況影響、操作容易[27]。此法可提供輪胎粉拓展出另一條展新的再利用市場，同時亦可減少廢輪胎之囤放量。

第三節 橡膠之特性

橡膠為以化學方法連結簡單之低分子物質而成之一種高分子材料，此種連結過程稱為聚合反應，聚合反應之方式，通常可分為聚加成反應及聚合反應兩種。橡膠材料在工程上被重用，其有優良的優點，亦有缺點，橡膠之特性茲分述如下[28-29]：

1. 優點

- (1) 強度大：抗壓強度為 $70\sim 2400\text{kgf/cm}^2$ 。抗拉強度為 $300\sim 900\text{kgf/cm}^2$ 。
- (2) 質輕：比重為 $1.0\sim 1.5$ (約鋁之半)。
- (3) 有展延性，極易輾薄，且膠結力強。
- (4) 易成型，加工方便。
- (5) 可著色或透明，光澤而美麗。
- (6) 傳熱率低。
- (7) 共有高度之電阻絕緣性。
- (8) 能抵抗多種液體及化學藥品之作用。

2. 缺點

- (1) 硬度略差。
- (2) 低溫下易變脆。
- (3) 不耐高溫，易軟化或燃燒。
- (4) 尺寸不穩定，易變型。

橡膠具有易燃之特性，其燃燒歷程可分為以下3個階段[30]：

- (1) 熱分解：加熱到一定溫度後橡膠開始分解出低分子化合物，或者先變軟，熔化，再分解成低分子化合物。

- (2) 燃燒：火焰是分解出低分子化合物進行激烈氧化反應的一種標誌。可燃性低分子化合物和氧氣在高溫下發生激烈的化學反應，放出大量的熱，促使橡膠繼續分解；同時氧化反應又生成新的物質，有可燃性的物質，如低分子醇、醛和一氧化碳等，也有不可燃性物質，如二氧化碳、水、煙（碳）和殘渣。
- (3) 繼續燃燒：由於燃燒放出大量的熱，又有新分解出的可燃燒性物質，在氧氣存在下，使燃燒繼續下去，直至橡膠燒盡，只剩下殘渣。這類橡膠如NR、BR、SBR、NBR、IIR、EPDM、PU。

橡膠燃燒時會產生有毒氣體的排放，如： SO_2 （二氧化硫）、HCL（鹽酸）、PAHs（多環芳烴）、Dioxin（戴奧辛）、 H_2S （硫化氫）、HCN（氰酸）、 NO_x （氮氧化物）。由於廢輪胎的熱值比MSW（城市固體廢棄物）高很多，所以燃燒時需要更大的燃燒面積、火燄溫度以及更充足的氧氣。不恰當的燃燒會造成飛灰的排放。常用橡膠之燃燒性能如表2-6所示[29]。

表2-6 常用橡膠的燃燒性能

名稱	分解溫度/ $^{\circ}\text{C}$	燃燒熱/ $(\text{kJ} \times \text{mol}^{-1})$
NR	260	46.05
BR	382	44.80
SBR	378	43.54
IIR	260	46.89
NBR	380	—
CR	> 180	—
CSM	> 200	—
EPDM	—	—
FKM	> 250	—
矽橡膠	> 400	—

資料來源：[29]

另一方面，橡膠之熱傳導係數較低，約為 $0.1\text{w/m}\cdot\text{k}$ ，而普通混凝土的熱傳導係數為 $2.1\text{w/m}\cdot\text{k}$ 。因此若將較大量的膠粉摻入混凝土中，將可減小混凝土的熱傳導係數。由Paine K.A等，對橡膠混凝土隔熱效能之研究顯示[31]，混凝土中膠粉用量為粗骨料的80%~100%時，混凝土的熱傳導係數大大減小，具有優良的保溫隔熱效能，可作冬暖夏熱地區以框架體系為主的建築物節約能源牆體材料。此外，當使用粒徑為 $0.5\sim 20\text{mm}$ 之膠粉替代粗粒料時，可使混凝土的隔熱效能提高至與傳統絕熱材料相當；而橡膠粉完全替代粗粒料時，混凝土之導熱係數小於 $0.3\text{w/m}\cdot\text{k}$ ，且放置28天後測得的抗壓強度高於 5MPa [31]。

第四節 橡膠水泥基材料之工作性、密度與滲透性

1. 工作性

廢橡膠水泥基材料與普通混凝土水泥基材料相比具有更好之工作性。橡膠顆粒粒徑、級配、表面形態與摻量均會影響水泥基材料之工作性。文獻[32]指出，經由維勃稠度儀測試橡膠水泥砂漿之工作性，橡膠顆粒摻量為水泥之0% - 15%。試驗結果顯示，摻入橡膠顆粒後，水泥砂漿之工作性可獲得改善。1999年，Khatib與Bayomy則進行了橡膠顆粒摻量對混凝土工作性影響之研究。研究成果指出，隨著橡膠顆粒含量的增加，混凝土之工作性變差。當橡膠顆粒體積摻量達到40 %時，混凝土之坍度幾乎為零。而以一定級配之廢橡膠顆粒等體積代替砂時，當水泥砂漿摻加廢橡膠顆粒小於50 %，可獲得較未摻加者較佳之工作性。而當添加之橡膠顆粒大於50 %時，隨著廢橡膠顆粒摻量的增加，橡膠水泥基材之工作性變差。其中廢橡膠顆粒摻量為60 %時，分層度最大，可施工性差[33-34]。

2. 含氣量與密度

廢橡膠水泥基材料在成型過程中，由於橡膠顆粒的加入會捲入大量之空氣，因此廢橡膠水泥基材料具有較高之含氣量。而材料組成、橡膠顆粒表面狀態、摻量、級配與粒徑等均會影響含氣量[35]。在定配比單方混凝土拌合物中，加入120kg廢輪胎橡膠顆粒，其所引入之空氣含量高達15 %，且隨材料組成不同，而造成不同之含氣量。

由於廢橡膠水泥基材料之製作過程中引入大量空氣，使得廢橡膠水泥基材

料具有一些優異之性能；如自重小、密度小之特點。1999年，Khatib與Bayomy經由試驗發現[34]，在混凝土中加入橡膠顆粒將減輕其自重。但橡膠摻量於10%-20%時，自重之減少可忽略[36]。2002年，法國科學家 A Benzouk等進行不同表面狀態(密實表面與膨脹表面)，不同粒徑橡膠顆粒水泥基材料密度之研究。試驗結果顯示，摻入密實表面橡膠顆粒之水泥基材料，密度約減少22 %。而入膨脹表面橡膠顆粒之水泥基材料，密度約減少35 %。對於同一摻量，隨著橡膠顆粒粒徑之減小，橡膠水泥基材料自重之減少更明顯，尤其是膨脹表面橡膠顆粒水泥基材料[37]。而此現象主要是基於橡膠表面狀態、比表面積不同所造成捲入空氣趨勢大小之差異。

3. 滲透性能

當混凝土中添加橡膠微粒量為5% (50 kg/m^3) 時，其平均滲水高度低於對照組混凝土；而橡膠微粒添加量為10% (100 kg/m^3)與15% (150 kg/m^3)時，試體之平均滲水高度較對照組高。換言之，混凝土中橡膠微粒摻量在5% (50 kg/m^3)以下時，可改善混凝土之滲透性能。但隨著橡膠摻量增加，混凝土之抗滲性能將有所下降，如圖2-13所示[38]。

此外，摻入橡膠微粒混凝土之滲透係數較對照組混凝土者小；其中以摻量為5%者之滲透係數最小，而10%和15%兩組有所增加，但仍小於對照組之滲透係數，如圖2-14所示[38]。由此可知，由於橡膠微粒的摻入，在一定程度上改善了混凝土之滲透性能；且以5%之摻量最佳。

另一方面，由不同水膠比之橡膠混凝土滲透性試驗結果(圖2-15)可看出，橡膠混凝土之滲透性與普通混凝土者均隨水膠比增加而有所增加。同時，橡膠混

第二章 蒐集之資料與文獻分析

凝土抗壓強度與滲透性間之相關性良好。當橡膠混凝土之抗壓強度增加時，其抗滲性能亦有所提升；但相較於未摻橡膠之普通混凝土，其強度與滲透性之關係出現較大的波動。此現象主要為混凝土之抗壓強度受總孔隙率之影響甚大。而混凝土之滲透性則受孔隙率，孔徑分佈，以及粒料-基體界面區礦物組成等因素之影響，且其中連通之孔隙對滲透性更有著重要的影響。由文獻39與文獻40指出，混凝土之滲透性與孔徑分佈之間存在良好的關係，其中孔徑大於132 nm之大孔隙為影響混凝土滲透性之主要因子[39-40]。而混凝土中橡膠微粒的存在，形成大量封閉的氣孔，並切斷孔隙的連通，進而增加孔隙之曲折度，從而阻止毛細孔成為連續，貫通的網狀結構體系，從而降低混凝土之滲透性。同時，由於橡膠微粒之憎水性，可降低毛細孔的抽吸作用，使得混凝土抗滲性能得以提高。也就是說，在孔隙率較大(強度較低)，孔徑較小且不連通的情況下，混凝土有可能獲得較低的滲透性。而橡膠微粒的摻入量勢必會改變混凝土之孔隙結構，且隨著橡膠摻量的增加，混凝土孔隙率與孔徑將有所增大，進而造成其滲透性降低。

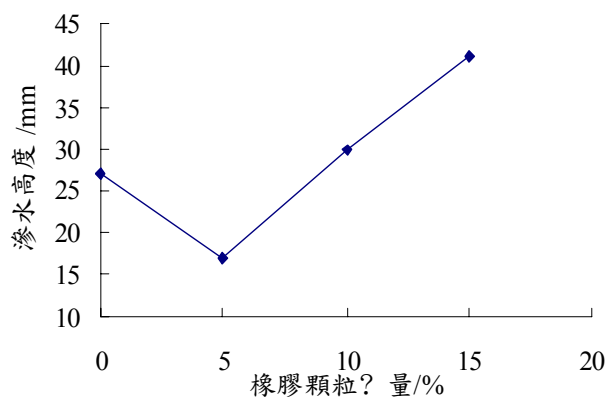


圖2-13 不同橡膠摻量對混凝土滲透高度之影響
資料來源：[38]

廢輪胎橡膠混凝土應用於建築隔熱吸音牆板之研究

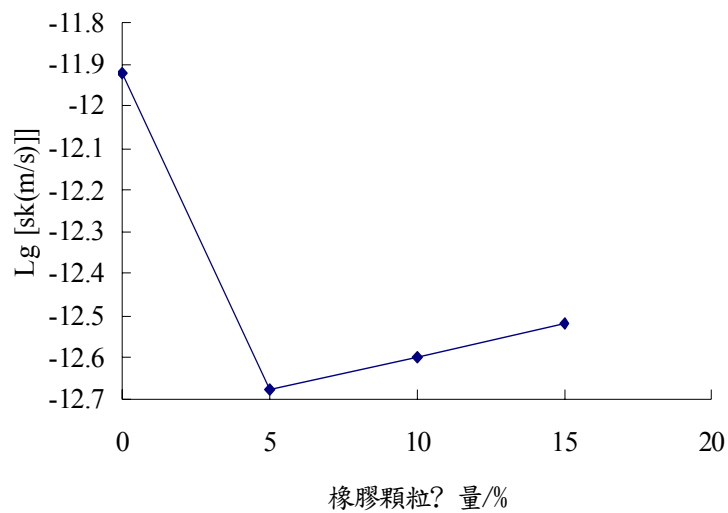


圖2-14 不同橡膠摻量對普通混凝土滲透係數的影響

資料來源：[38]

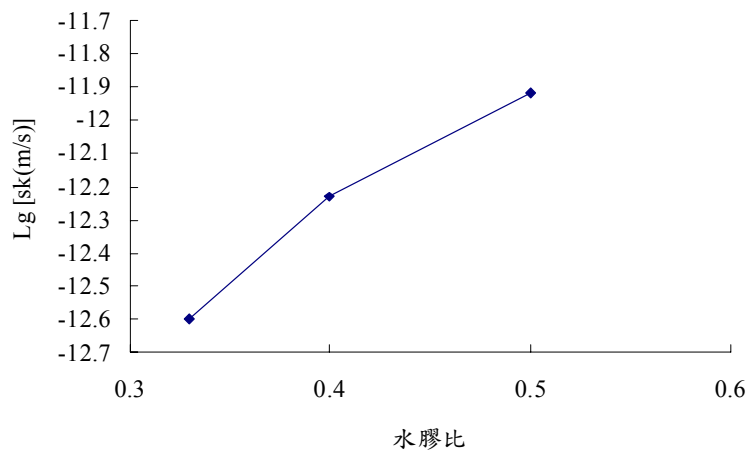


圖2-15 橡膠混凝土滲透性與水膠比的關係

資料來源：[38]

第五節 橡膠混凝土之力學性質

廢橡膠水泥基材料之力學性質之研究相當廣泛。不少之研究成果顯示，廢橡膠水泥基材料之強度隨著橡膠粒摻量之增加而降低。但韌性，變形性能與耐磨性卻可獲得改善。

1. 強度

1993年，Eldin和Senouci採用粗細兩種橡膠顆粒以研究廢橡膠混凝土之強度。當以粗橡膠顆粒等體積完全替代粗骨料時，水泥基材料之抗壓強度大約降低85%，抗彎強度約降低50%。而以細橡膠顆粒等體積完全替代細骨料時，水泥基材料抗壓強度約降低65%，劈裂抗拉強度約降低50%，且廢橡膠混凝土無論承受抗壓或抗拉荷載，當達到破壞荷載時，均能夠吸收大量之能量，且顯示出延性之破壞型態。[36]

1999年，Khatip和Bayomy建立強度折減係數(RF)與橡膠粉體積摻量R(占拌合物總體積的比率)關係之數學模型，且經由回歸分析得出RF與各參數間之關係。對於對照組混凝土(橡膠粉摻量為0%)而言，RF取1。其回歸方程式為：

$$SRF=a+b(1-R)^m, SRF=a+b(1-R)^m, \dots \dots \dots (2-1)$$

其中， $a = b - 1$ 。

SRF為強度折減係數，取值範圍0—1。R為橡膠顆粒的體積含量；a,b,m為函數參數。a,b,m值隨基準混凝土強度等級不同而不同。該數學模型也可用於描述混凝土之抗彎強度、彈性模數與橡膠體積含量之關係。同時，許多文獻顯示該數

學模型亦可描述任何強度等級的橡膠水泥基材料的力學性能折減與橡膠含量的關係[41]。而橡膠水泥基材料強度之減小量與橡膠顆粒體積含量增加成非線性關係[42]。

1999年，Khatib和Bayomy及1995年，Topcu探討橡膠顆粒細度對水泥基材料強度之影響。研究成果顯示，任何粒度的橡膠顆粒均會降低混凝土之自重與抗壓強度，且粗橡膠顆粒較細橡膠顆粒對混凝土強度之影響越大[36]。同時Khatib和Bayomy將抗壓強度之降低歸因於兩個方面，一為橡膠顆粒與周圍之水泥漿體相比，屬於軟質材料，當承壓時，裂縫將在水泥基體中圍繞橡膠顆粒迅速發展，導致水泥基體的破壞；另一方面，由於橡膠顆粒與水泥漿體之粘結較差，承壓時，橡膠顆粒的行為如同混凝土中孔隙的行為，而使得混凝土強度降低[41]。

2002年，法國科學家A.Benzzouk等人研究不同表面形態(密實表面和膨脹表面)之橡膠顆粒對混凝土強度的影響。研究成果顯示，隨著橡膠顆粒摻量增加，混凝土之強度下降顯著，且粗橡膠顆粒對強度之影響較其他者大。對於相同自重的橡膠混凝土，加入膨脹表面橡膠顆粒的混凝土，其強度高於密實表面橡膠顆粒之混凝土，且隨著橡膠顆粒摻量的增加而差異減小[37]。然而，1993年，Ali等人及1996年Fattuhi和Clark經由試驗得出，細橡膠顆粒對混凝土自重及抗壓強度的影響較粗橡膠顆粒之影響大[36]。

1996年，Biel和Lee對水泥種類與橡膠混凝土抗壓強度間之關係進行研究；其分別採用氯氧鎂水泥和普通矽酸鹽水泥製作橡膠混凝土。研究成果顯示，對未經過表面處理的橡膠顆粒而言，當橡膠顆粒的摻量達到90%時，兩種拌合物之抗壓強度均減少90%。同時無論是否含有橡膠粒，氯氧鎂水泥混凝土之抗壓

第二章 蒐集之資料與文獻分析

強度均為普通矽酸鹽水泥者之2.5倍，當橡膠顆粒取代砂體積率為25%時，普通矽酸鹽水泥之劈裂抗拉強度降低80%，而氯氧鎂水泥混凝土者降低約66%。此外氯氧鎂水泥可提供橡膠混凝土較高之強度與較佳粘結性能[36]。

文獻[43]採用水泥、複合礦粉、強塑劑（H-FDN100茶系高效減水劑）、粗粒料（粒徑5~20mm），砂（細度模數為2.9）、橡膠粉[40目(420 μ m)、60目(250 μ m)和80目(178 μ m)，密度為1.02kg/m³等材料，拌製橡膠混凝土，其配比設計，如表2-7所示。而不同橡膠摻量混凝土，齡期3及7天與28天抗壓強度之百分比，如表2-8所示。

表2-7 高強度橡膠混凝土之配比

膠結材用量 ()	膠結材		強塑劑 %	砂率 %	水膠比	橡膠粉摻量 (kgf/m ³)			
	水泥	礦粉				1%	2%	3%	4%
540	57	43	4.3	4.3	0.21	5.4	10.8	16.2	21.6

資料來源：[43]

由表2-8可看出，摻加橡膠粉之混凝土，其抗壓強度發展趨勢與對照組(高強度)相近。橡膠混凝土之早期強度發展較快，齡期3天的抗壓強度均超過28天者之70 %；而晚齡期時強度增長趨於緩慢，且其抗壓強度隨著橡膠粉摻量之增加而迅速下降。另由圖2-16顯示，三種不同粒徑之橡膠粉混凝土，其28天抗壓強度隨不同摻加量變化之趨勢亦相近；均是隨著橡膠粉摻量的增加，混凝土抗壓強度隨之下降。當橡膠粉摻量為16.2 kgf/m³時，混凝土28天之抗壓強度約下降19 %，而摻量增至21.6 kgf/m³時，橡膠混凝土之抗壓強度則微幅上升。

基本上，橡膠粉混凝土抗壓強度與粒徑之關係不明顯，而對抗壓強度之主要影響因子為橡膠粉摻量的多寡。由於橡膠粉為彈性體，其抗壓強度低，當摻加橡膠粉時，如同增加了混凝土中的軟弱點，使得減弱混凝土之受力性能，進而造成抗壓強度明顯下降。而當混凝土中橡膠粉摻量增至 21.6 kgf/m^3 時，抗壓強度不再降低，反而略為增加。此情形可能是因為使用大量的高效活性礦物摻料，並與橡膠粉相互填充於孔隙中，使得混凝土內部緻密性增加。而當混凝土之緻密性增加到一定程度時，其抗壓強度不再降低而趨於平緩變化。

表2-8、混凝土抗壓強度發展百分比

編號	3天	7天	28天
P0	75.9	90.5	100
RPC80-1	78.7	95.8	100
RPC80-2	79.8	93.4	100
RPC80-3	86.1	95.5	100
RPC80-4	80.5	95.1	100
RPC60-1	75.0	90.5	100
RPC60-2	73.8	89.6	100
RPC60-3	79.1	98.6	100
RPC60-4	71.4	88.0	100
RPC40-1	79.4	85.7	100
RPC40-2	76.9	84.1	100
RPC40-3	76.7	86.7	100
RPC40-4	73.1	89.1	100
註：P0為對照組 橡膠混凝土試體編號取為RPCm-n，其中m為橡膠粉粒徑，n為摻量，如RPC40-1指外摻40目橡膠粉，摻量為單位膠結材料總量之1%			

資料來源：[43]

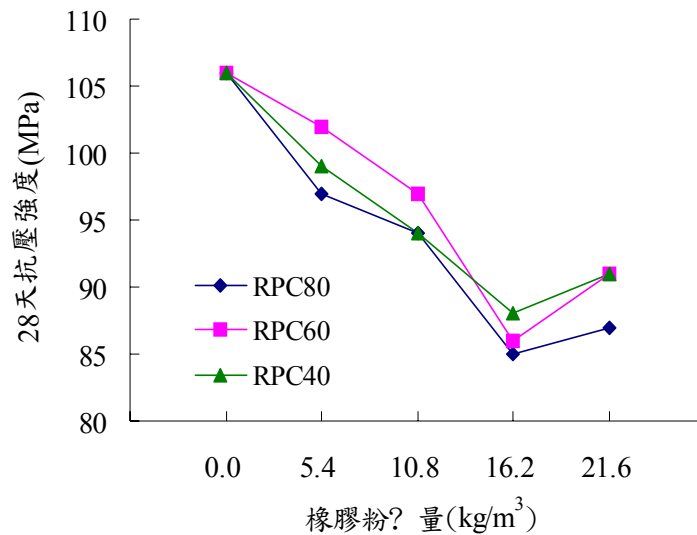


圖2-16 橡膠粉混凝土抗壓強度變化

資料來源：[43]

另一方面，以橡膠粒取代砂石，摻加量(體積比)分別為0%、5%、10%、15%時，橡膠混凝土之配比設計，如表2-9所示。而普通橡膠混凝土與添加礦物摻料混凝土之抗壓強度，如表2-10所示。而圖2-17與圖2-18分別顯示不同橡膠微粒摻量的混凝土抗壓強度變化[38]。由圖可知，混凝土之抗壓強度隨橡膠微粒摻量增加而減小，且減小量隨橡膠粒摻量之增加而增大。其中，橡膠粒摻量15%之混凝土，其齡期3天抗壓強度較對照組混凝土約降低60%左右，7天者約降低61%，而28天時強度則約降低53%。由此可知，混凝土之抗壓強度隨橡膠粒之摻加而大幅降低。而飛灰混凝土之早期強度較普通混凝土者低，其主要是因為飛灰與礦粉等細微粉粒的摻入，影響水泥的二次水化作用，使得混凝土之早期強度降低，但28天之強度基本上相近。

廢輪胎橡膠混凝土應用於建築隔熱吸音牆板之研究

表2-9 橡膠混凝土之配比 (kgf/m^3)

編號	橡膠粉	水膠比	水泥	飛灰	礦粉	砂率	減水劑(%)	石	砂
K-A	150	0.33	339	113	57	0.25	1.5	946	315
K-B	100	0.33	339	113	57	0.25	1.0	1050	350
K-C	50	0.33	339	113	57	0.25	1.0	1150	383
K-D	0	0.33	339	113	57	0.25	1.0	1249	416
P-A	150	0.33	509	0	0	0.25	0.5	994	331
P-B	100	0.33	509	0	0	0.25	0.5	1096	365
P-C	50	0.33	509	0	0	0.25	0.5	1192	398
P-D	0	0.33	509	0	0	0.25	0.25	1294	431
S-B	100	0.4	420	0	0	0.25	0.5	1153	384
W-B	100	0.5	336	0	0	0.25	0.5	1042	348

資料來源：[38]

表2-10 橡膠混凝土之抗壓強度

編號	橡膠摻量 (kgf/m^3)	3天強度 (MPa)	7天強度 (MPa)	28天強度 (MPa)
K-A	150	18.6	22.6	30.8
K-B	100	28.3	35.6	46.5
K-C	50	30.7	36.4	55.8
K-D	0	47.6	58.4	66.5
P-A	150	26.2	29.1	32.1
P-B	100	39.2	40.8	47.6
P-C	50	38.8	47.3	50.1
P-D	0	57.5	67.5	68.9

資料來源：[38]

第二章 蒐集之資料與文獻分析

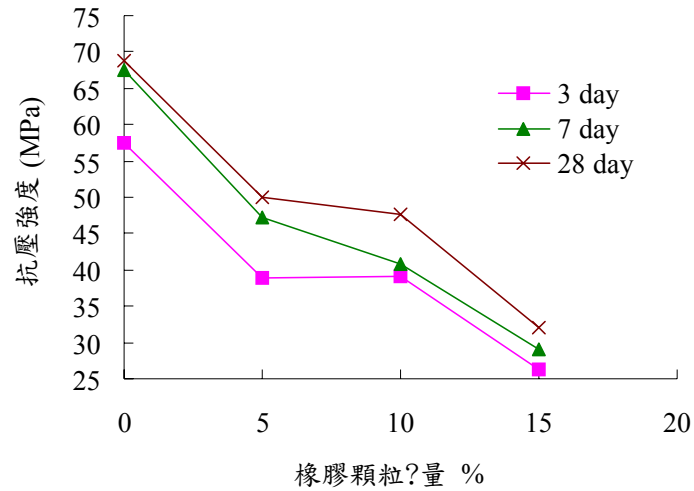


圖2-17 普通橡膠混凝土之抗壓強度

資料來源：[38]

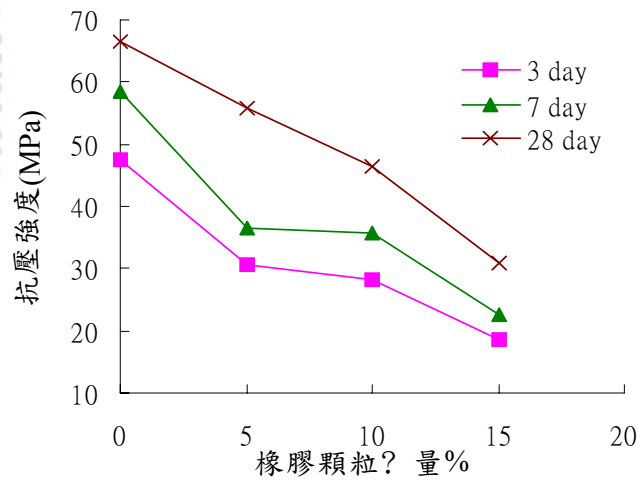


圖2-18 飛灰橡膠混凝土之抗壓強度

資料來源：[38]

2. 韌性

1996年，Tantala等人對橡膠混凝土之韌性進行研究，分別以體積摻量為5%，10%橡膠顆粒替代粗骨料。研究成果顯示，不同摻量橡膠混凝土之韌性均高於基準混凝土。且由於混凝土之抗壓強度降低，橡膠顆粒摻量10%者之韌性不及摻量5%者之韌性。另1998年，Raghvan等人將兩種細度之橡膠顆粒分別加入水泥砂漿中進行韌性測試。試驗結果顯示，兩種水泥砂漿在超過最大荷載後仍可繼續承載，且砂漿試樣在彎曲破壞荷載作用下，並沒有呈現出脆性斷開。對於對照組而言，橡膠顆粒體積含量為50%和100%時，其韌性大致上相同，韌性值為1.21；而不加橡膠顆粒混凝土之韌性值為1。因此橡膠粒混凝土之韌性大於不含橡膠粒者。然而，當橡膠顆粒體積含量由50%增加到100%，混凝土之韌性值並沒有得到提高[43-44]。

3. 抗衝擊性能

1996年，Bial和Lee進行橡膠水泥基材料破壞型態之研究。研究成果指出，橡膠水泥基材料隨著剪切應力增加，其破壞為一緩慢的過程；其裂縫形狀既不是錐形也不是柱狀。而基準混凝土之破壞則屬於脆性行為，同時伴隨著能量快速之釋放。而Topcu與Avicular，1997；Senouci，1993；與Topcu，1995之研究指出，隨著橡膠顆粒摻量的增加，混凝土之抗衝擊性能增加，且破壞時可吸收大量之能量，進而大幅提高水泥基材料之抗衝擊性能[45]。因此推薦橡膠混凝土可用於需要控制振動阻尼之情況下，用以吸收大量之震動能量。

4. 彈性變形

第二章 蒐集之資料與文獻分析

1997年，Goulias和Ali之研究發現，隨著橡膠顆粒的摻量的增加，混凝土之動彈性模量與剛度增加，阻尼性能增加，而硬度與脆性降低。但亦有學者指出，橡膠顆粒的加入會降低水泥砂漿之彈性模量[37]。此外，法國科學家A.Benzzouk等人對不同表面狀態(密實表面與膨脹表面)橡膠顆粒對混凝土彈性之影響進行研究。試驗結果顯示，混凝土中加入橡膠後，其彈性增加，且隨著顆粒粒徑的增大，混凝土彈性行為表現越為顯著[37]。



第六節 橡膠混凝土受高溫作用後之行為

由於橡膠粉為非耐高溫材料，當溫度達到 180°C 時，橡膠開始軟化，溫度超過 250°C 時，則開始降解[46]。因此，橡膠粉混凝土受高溫作用後，在不發生爆裂，且外觀完整時，其質量損失小於5%。而隨著橡膠粉摻量增加，混凝土之質量損失略有增加。

由文獻[47]指出，橡膠混凝土經 500°C 之高溫作用後，其抗壓強度下降，相對抗壓強度剩餘率最大約88.1%，而最小約為70.0%。而摻加較大粒徑(1.20 mm)之橡膠混凝土試體，其抗壓強度損失相對較小，如圖2-19所示。此外，採用外摻方法之試體殘餘抗壓強度較採用取代方法者高。在經 500°C 高溫作用後，有無摻加橡膠粉之混凝土內部結構密實性都很高，其抗壓破壞形態與常溫時相近，均為爆炸破壞，但爆炸聲較常溫時小。而在 800°C 高溫作用後，橡膠混凝土之性能嚴重劣化，其抗壓強度急劇下降，大部分試體之相對抗壓強度剩餘率不足30%。只有少數試件由於未發生或只發生輕微爆，其相對抗壓強度剩餘率較高(達35.0%)，殘餘強度僅為38 MPa [47]。

橡膠粉混凝土立方體試塊在高溫後之抗壓強度與常溫下之抗壓強度比值，如圖2-20所示[43]。由圖顯示，經 $500 \sim 600^{\circ}\text{C}$ 高溫作用後，在混凝土表面不發生爆裂，且外觀完整之情況下，其強度減少量小於5%。經高溫作用後，橡膠粉混凝土試體在不發生破壞性爆裂時，所測得的抗壓強度不但沒有下降反而上升，約增加4%~15%。此現象主要是由於高強混凝土所採用之水膠比甚低，而橡膠粉表面凹凸不平，且非極性，所以在攪拌時，橡膠粉將裹藏或吸附一定之水

第二章 蒐集之資料與文獻分析

分，使得新拌混凝土之坍度損失，接著影響水化物之成長，且隨著橡膠粉摻量之增加，後期強度增加更為緩慢。此外，在高溫作用時，由於橡膠粉融解，釋放其包藏的水分，並在一定區域連通混凝土內部之空間，而此空間內，如同高溫蒸汽養護般，促使水泥進一步進行水化反應，並激發了摻合料之火山灰效應及增強效應，從而強化該區域空間內之混凝土強度。同時，由於橡膠粉在攪拌後均勻分佈於混凝土裡面，使得高溫後整體混凝土強度提高。然而當混凝土試體發生爆裂時，其強度則明顯下降，最大損失超過25%，甚至失去持荷能力[43]。

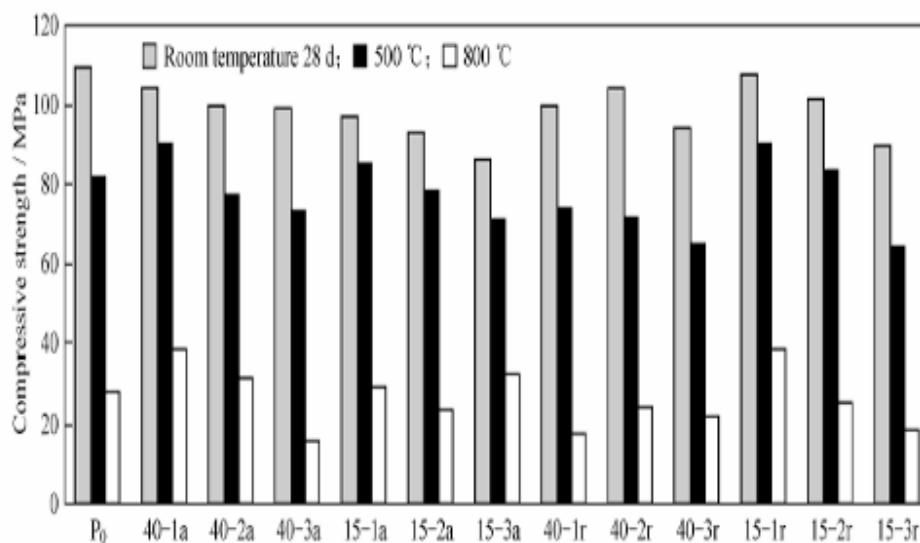


圖2-19 高溫作用前後橡膠混凝土之抗壓強度

資料來源：[47]

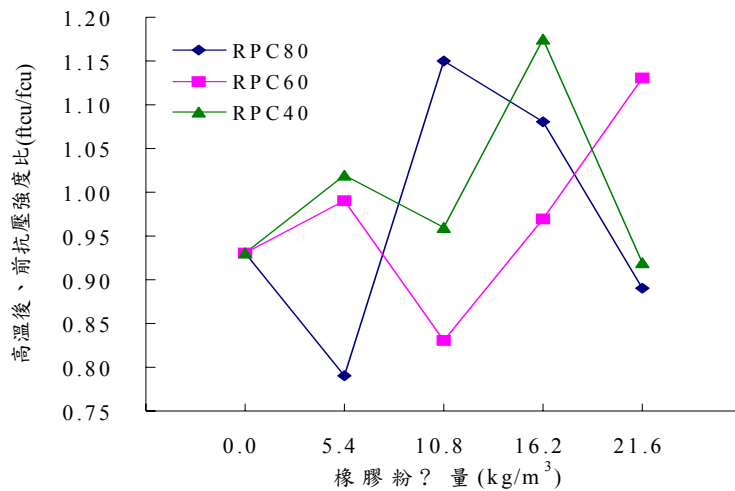


圖2-20 高溫前、後混凝土抗壓強度之比值

資料來源：[47]

另由高溫作用後之試體可發現，經800℃作用後，雖然未摻加橡膠粉之試體各個面都發生爆裂，但爆裂深度、爆裂面均較為均勻。而橡膠混凝土中出現部分試體在高溫下，雖然只有1個面或2個面發生爆裂，但因其爆裂深度較大，使得抗壓試驗時容易引起應力集中，進而造成其剩餘抗壓強度較低。各種橡膠混凝土受高溫作用後之表面變化與原因分析，以及試體狀況，如表2-11與表2-12所示。一般而言，未摻加橡膠粉之高強度混凝土，在高溫作用後，試體均發生爆裂之情形。而橡膠粉混凝土經高溫作用後，試體爆裂情況較為離散。總體而言，混凝土試體隨著橡膠粉摻量與顆粒細度增加，其爆裂情況加劇。此由於橡膠粉粒徑較大時，其連通之空間亦較大，而在高溫作用下，橡膠粉的融解如同打通了原本封閉的區域，疏緩混凝土內部高溫蒸汽壓，進而抑制爆裂的發生。但隨著摻量之增加，其本身汽化所產生的蒸汽壓，以及因其摻和而弱化的混凝土內部結構，將導致爆裂的發生[46-47]。

第二章 蒐集之資料與文獻分析

表2-11 試體表面之變化與原因分析

溫度	試體變化	試體表面顏色變化	原因分析
經500 °C 作用後	HSRC試體外觀顏色變為淺灰色、色差較小，試件的斷面中心部位與外圍部位的色差亦較小	HSRC試體外觀顏色變為淺灰色、色差較小，試件的斷面中心部位與外圍部位的色差亦較小	高溫時試體內部形成了一個溫度梯度場，斷面處的骨料顏色也發生了相應變化。因此，可根據高溫作用後混凝土顏色變化來定性判斷建築物所經歷的火災溫度，這為建築物的火災鑑定、檢測提供了依據。
經800 °C 作用後	HSRC試體外觀顏色變為灰白色，色差明顯，其斷面中心部位變成黑褐色。	HSRC試體外觀顏色變為灰白色，色差明顯，其斷面中心部位變成黑褐色。	

資料來源：[47]

表2-12 混凝土受高溫作用後之試體狀況

溫度 \ 添加量	HSRC-a	橡膠粉0%	橡膠粉1%	橡膠粉2%	橡膠粉3%
500°C 高溫作用試體狀況	大部份試體外觀完整,只有1個試體表面爆裂,且爆裂程度較輕	大部份試體外觀完整,只有1個試體表面爆裂,且爆裂程度較輕	試體外觀完整	有1個試體輕度爆裂	所有試體均爆裂,且爆裂面積較大,最大爆裂深度約10 mm
800 °C 高溫作用試體狀況	所有試體均輕度爆裂,雖然爆裂面積很小,爆裂深度均小於5 mm,但試件已無完整性	爆裂情況最為嚴重,各個面均不同程度爆裂,最大爆裂深度超過15 mm.	摻加1.2mm橡膠粉的3個試件外觀完整,而摻0.42mm橡膠粉的3個試件均爆裂,但爆裂程度較輕	摻1.20 mm橡膠粉的1個試體外觀完整,其餘試體均爆裂,且爆裂面積較大,爆裂深度均超過15 mm,但爆裂面主要是上表面。	

資料來源：[46]

另一方面，高溫作用前後橡膠混凝土之抗彎強度，如圖2-21所示。經500℃作用後，橡膠混凝土之抗彎強度變化較離散。大部分試體抗彎強度均呈下降之趨勢，但下降幅度不大，相對抗彎強度剩餘率達90%。個別試體則因為發生爆裂，相對抗彎強度剩餘率低於80%。總體而言，橡膠混凝土隨著橡膠粉摻量的增加，其殘餘抗彎強度下降幅度增大。而經800℃作用後，橡膠混凝土之抗彎強度與抗壓強度一樣急劇下降。與500℃作用後的抗彎強度相比，其下降幅度最大超過60%。而與純高強度混凝土相比，其殘餘抗彎強度則較高。此外，室溫(28天)與500℃作用後之試體在抗彎破壞時，其斷面處砂、石與水泥石斷口較為平整，內部結構密實。而經800℃作用後之試體抗彎破壞時，其斷面粗糙，各材料斷口不規整，且有許多孔洞，密實性明顯下降[47]。

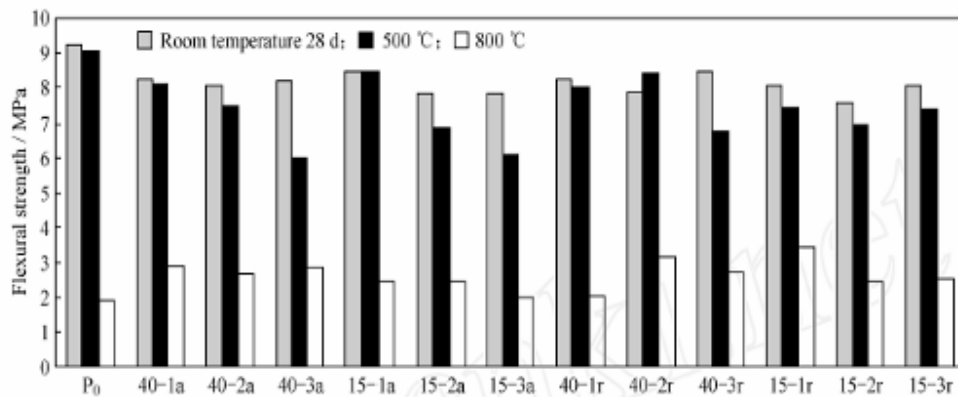


圖2-21 高溫作用前後橡膠混凝土之抗彎強度

資料來源：[47]

第七節 橡膠混凝土之隔音性與隔熱性

1. 隔音效能

對廢橡膠水泥基材料而言，入射聲波之反射、散射、折射與衍射作用較一般水泥系材料明顯。此情形主要是由於橡膠顆粒分散於水泥基材料基體之三維網狀結構體中，入射之聲波在橡膠顆粒間發生反彈。而橡膠本身是一種線彈性高分子材料，且具有較大之阻尼比，當受到衝擊後入射聲波衝擊後，可將其轉化成不同的、聽不到的頻率，使得聲波在無數橡膠顆粒之間被吸收、反彈、震顫與改變頻率。同時，由於橡膠顆粒之添加，使得水泥基材料之含氣量提高，造成入射聲波幾乎全部被吸收。另一方面，橡膠顆粒填充於水泥基材料之網路結構中，使得整體水泥基材料基體更緻密，且結構堅硬，彈性好。而除了透射被粘質性橡膠吸收大量聲能更發生衍射，使得聲波的傳播路徑加長，進而大大的消耗聲能，從而使其具有良好之隔聲效果[48]。

由文獻[48]指出，隨著膠粉用量的增大，混凝土的動彈性模量和固有頻率將低，超因波在其中的傳播速度減慢，隔音效能提高。史巍等，對橡膠混凝土的隔音效能進行了研究，試驗結果表明，當膠粉的粒徑為1~2mm，體積為砂體積的25%時，對混凝土的隔音效能最好，固有頻率較普通混凝土降低17%動彈性模量降低40%為改善膠粉與混凝土基體的粘合效能而用氫氧化鈉飽和溶液處理將不會影響混凝土隔音效果。因此，廢橡膠水泥基材料可用於需要控制噪音的環境中，減少雜訊污染[48]。

1999年12月18日，由上海市聲學學會主持，大韓民國世光株式會社介紹了一種隔聲隔振浮築結構的新材料—世光消音劑。該型消音劑利用廢橡膠輪胎為原料經清理、破碎、鬆散並添加粘結劑、加強劑、防老化劑等，製成類似於肉鬆般有袋裝之消音劑。而將其鋪裝於樓層結構層上，並在其上面蓋一層塑膠薄膜，再澆灌細石混凝土(30mm^3)，即可構成浮築式隔振結構。此材料在日、美、韓國等已應用於高層建築、高級辦公室和高級公寓，是為一種具有耐久性、耐熱性、耐寒性與保溫性，且施工十分便捷之無毒無害的綠色建材。經試驗測試，未裝世光消音劑時計權撞擊聲壓級為80dB，而鋪裝世光消音劑後為62 dB。顯示其具有隔離500Hz以上撞擊聲效果。此外，近年來，法國技術人員用廢舊輪胎建築“綠色消音牆”，使用證明吸音效果極佳，音頻在250~2000Hz的噪音可被吸收掉85% [48]。而中國橡膠解放軍日報曾報導：上海首段降噪音瀝青路面試驗段經兩年運行，已經通過市科委和市政局組織的專家驗收。龐大的載重貨車隆隆駛過時，噪音比其他路段低了將近3個分貝。因此，廢橡膠水泥基材料作為一種隔聲降噪材料具有很廣泛之應用前景，同時也需要更多這方面的研究[48]。

針對橡膠水泥隔音效能與含量關係，隨著橡膠水泥中的橡膠含量增加，由於孔隙與橡膠顆粒會減少水泥的動態彈性模數(Elasticity dynamic modulus)，因此代表著橡膠水泥中的隔音性將大幅提高[56]

2. 隔熱效能

橡膠水泥基材料的高含氣量使其具有一定保溫性能。空氣的導熱係數很小，傳熱能力較差，再加上橡膠本身屬於絕緣材料，傳導能力差且橡膠阻尼大，因此會消耗大量的熱能，提高橡膠水泥基材料的熱阻，減小導熱係數。橡膠導

第二章 蒐集之資料與文獻分析

熱係數較低，約為 0.1w/m.k ，而普通混凝土的導熱係數為 2.1 w/m.k 。因此若將較大量膠粉摻入混凝土中，可減小混凝土的導熱係數。Paine K.A等，對橡膠混凝土的隔熱效能之研究顯示，混凝土中膠粉用量為粗骨料之80%~100%時，混凝土之導熱係數將大幅減小，且具有優良之保溫隔熱效能，可作冬暖夏熱地區以框架體系為主的建築物節約能源牆體材料[48]。另Paine K.A等對橡膠混凝土傳熱效率之研究成果指出，以粒徑為 $0.5\sim 20\text{mm}$ 之膠粉替代粗骨料時，可使混凝土之隔熱效能提高至與傳統絕熱材料相當。而橡膠粉完全替代粗骨料時，混凝土之導熱係數小於 0.3w/m K ，且放置28天後所測得之抗壓強度高於 5MPa [31]。此外，若採用一定級配之橡膠顆粒以等體積取代砂，且摻量為0%—100%時，由試驗結果顯示，摻入橡膠顆粒之水泥砂漿具有較小的熱傳導係數，其中全部用橡膠顆粒等體積取代砂之水泥砂漿熱傳導係數僅為 0.0999W/mK 。顯示摻入橡膠顆粒砂漿之熱傳導係數均小於基準砂漿熱傳導係數之 0.23121W/mK 。然而，熱傳導係數的下降與橡膠顆粒摻量的增加並不成線性關係。同時，水灰比、灰砂比、亦會影響砂漿之隔熱保溫性能。

若將純水泥與粒徑小於 1mm 之橡膠顆粒混和，試驗結果發現，熱傳導率將隨橡膠量增加而減少。由於橡膠顆粒具有很低的熱傳導率，因此當添加進入水泥時，橡膠水泥漿之熱傳導率隨橡膠添加量增加而減少。而當橡膠含量達50%時，熱傳導率僅為 0.47W/m K ，但抗壓強度可達 10.50MPa [57]。此外，以通過4號篩，停留在200號篩上的橡膠取代細骨材製成的水泥砂漿而言，其隔熱性亦隨橡膠量增加而增加 [58]，如圖2-22所示。

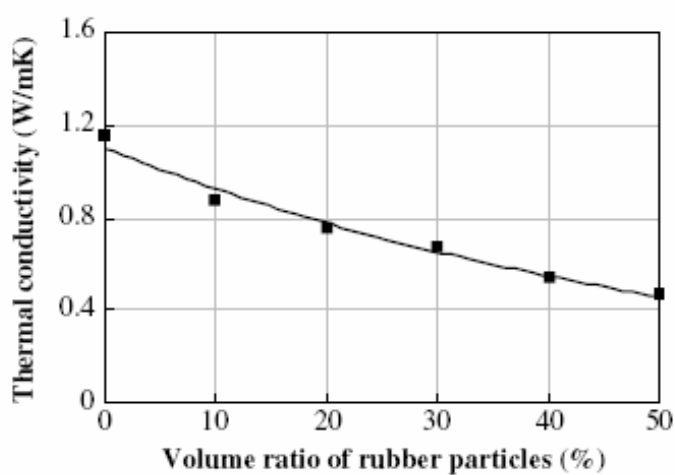


圖2-22 水泥覆合物熱傳導性與橡膠添加量關係

資料來源：[57]

第八節 橡膠水泥基材料之抗裂性與抗凍性

1. 橡膠水泥砂漿的收縮效能

由於橡膠自身之彈性作用，可使水泥膠砂中之漿體，在吸附水消失時能夠自由收縮，而延緩開裂時間。並且橡膠可抑制已有微裂縫之繼續延伸，減小裂紋寬度及數量，進而明顯改善混凝土之塑性收縮開裂[32]。文獻指出，在水泥砂漿中摻加橡膠後，其乾縮率稍微減小。若使用經NaOH處理後之橡膠則水泥砂漿之乾縮率更可獲得明顯改善。同時，隨著橡膠摻量的增加，混凝土初裂時間出現逐步延長之趨勢，且裂縫寬度亦有減小之趨勢。當增加橡膠摻量時，可更有效改善水泥膠砂之抗開裂效能。而橡膠摻量大於10%時，橡膠混凝土之抗裂性較聚丙烯纖維者佳。

2. 抗裂性

根據中心質理論，橡膠顆粒分佈在水泥基材料的三維網狀結構裡，形成了不同於砂的柔性中心質，分散了水泥基材料內部產生的應力集中，同時橡膠顆粒是一種粘彈性介質，可吸收、消耗掉大量的應變能，實現了能量的轉化，延緩了裂縫的發生時間，降低了裂縫的發生機率，同時可以阻礙、抑制裂縫的發展。橡膠水泥基材料由於橡膠顆粒以骨料方式分佈於其結構中，使其具有良好之變形以緩解水泥基材料內部的拉應力，從而使得水泥基材料具有良好之抗裂性。1998年，Raghvan 等人採用平板法測試添加廢橡膠水泥砂漿之塑性收縮裂

縫，並使用彎起的鋼板對試樣提供約束，將兩種不同形狀、不同粒徑的橡膠顆粒加入砂漿中，而橡膠顆粒之摻量範圍為0%—15%。經觀察測試後發現，加入橡膠顆粒之砂漿，其所產生之裂縫為沿提供約束的彎起金屬片方向發展，而且裂縫發生時間可延緩，並約束限制裂縫之擴展，同時減少裂縫的發生機率。橡膠水泥砂漿澆製成型3小時後，對照組砂漿試體之平均裂縫寬度約0.9mm，而摻量5%橡膠顆粒試體之平均裂縫寬度大約0.4—0.6mm；且對照組砂漿在30min內即產生裂縫，而摻量15%橡膠顆粒之砂漿，在1h後才發現裂縫[36]。因此，水泥基材料中添加橡膠顆粒可改善其抗裂性，並延緩開裂時間，對裂縫的發展具有良好之抑制作用。

3. 抗凍融性能

1996年，Savas等人進行橡膠混凝土凍融耐久性之研究。其試驗採用細度為2—6mm之橡膠顆粒，分別以不同摻量(水泥品質比)添加於混凝土中，並進行凍融迴圈測試。試驗結果顯示，橡膠顆粒摻量為10%與15%之橡膠混凝土，在經過300次凍融迴圈後之耐久性因數高達60%，但橡膠顆粒摻量為20%與30%時，橡膠混凝土之抗凍融性卻不及格。2002年，Benazzouk和Queneudec採用兩種不同橡膠骨料(壓縮骨料和膨脹骨料)代替砂，分別進行水泥—橡膠複合材料之抗凍融性能試驗，橡膠摻量為骨料體積的9%—40%。試驗結果顯示，當橡膠顆粒體積摻量達30%—40%時，複合材料之耐久性可獲得提高，且膨脹骨料之作用較明顯。同年，Paine等研究者採用不同細度的橡膠顆粒替代引氣劑，以提高水泥基材料之體抗凍融侵蝕能力，並進行一系列試驗。試驗結果顯示，摻加橡膠顆粒之混凝土較普通混凝土具有更好之抗凍融性能[36]。此外，2004年，中國東南大學陳波等人

第二章 蒐集之資料與文獻分析

採用橡膠粉(140 μ m)與橡膠顆粒(3mm—4mm)分別進行橡膠混凝土抗凍融性能之試驗。研究成果指出，摻加橡膠粉之混凝土其抗凍融性能較摻加橡膠顆粒者佳。而對改善抗凍性而言，橡膠粉之效果優於SJ引氣劑，可做為固體引氣劑存在；而橡膠顆粒之效果相當於SJ引氣劑[49]。因此，橡膠水泥基材料在嚴寒的冬季施工，不僅可以節約工程造價、方便施工，而且環保。



第九節 台灣地區隔間牆建材物性比較

台灣地區在地狹人稠之環境下，一般建築物內部隔間，幾乎以RC牆或是磚牆為主，但近年來建築物逐漸往高層伸展；而由於重壓型建材的使用將造成結構之負載增加，如：RC、磚塊等因此在高層建築物內部的隔間。因此，基於，施工需求與結構方面之要求，漸漸採用輕量隔間牆；但其因重量輕之緣故，在理論方面，隔音性能一般較傳統磚牆或RC牆差。但隨著技術改進，目前市面上一般隔間牆的耐燃性及吸音性已提升許多，如表2-13所示。國內目前一般裝潢建材的耐燃性均以CNS 6532「建築物室內裝修材料耐燃性試驗法」做為評定標準。

表2-13 市面上一般隔間牆建材材質物性表

	陶粒板 防火牆 8cm	保麗龍粒 子複合版 10cm	保麗龍粒 子灌漿牆 10cm	水泥中空 版10cm	石膏板 10cm	紅磚 14cm
重量	68kg/m ²	61kg/m ²	72kg/m ²	88kg/m ²	42kg/m ²	220kg/m ²
板片長度	300~400cm	240cm	240cm	300cm	240cm	
耐火性	1050°C	1050°C 產生有害 氣體	1050°C 產生有害 氣體	1050°C	1050°C	1050°C
防火性	2小時以上 背溫只有 108°C	1小時	1小時	1小時	1小時	2小時
隔音性	STC44db	STC36db	STC36db	STC36db	STC36db	STC36db

資料來源：[57]

以牆面的防火建材板而言市面上可見的大致分為：石膏板、矽酸鈣板、纖維板、纖維水泥板、木絲纖維水泥板、氧化鎂板等[60]。以下介紹幾種市面上常見的隔間防火建材板及輕質隔間：

一、隔間防火建材板

1. 石膏板

由石膏原礦粉碎後加入紙漿、纖維等漿製結合防火紙面而成、屬於完全綠建材且穩定性佳符合CNS規定。一般使用於輕鋼架隔間牆系統經過加工多樣變化後，可成裝飾石膏天花板，用於輕鋼架天花板美化。石膏板依中國國家標準(CNS4458)之定義：以石膏為主要原料作為心材，並以石膏板專用原紙被覆心材兩面及長度方向側面，石膏板本身的強度是靠石膏與紙張之結合。石膏板之蕊材是使用含約21%結晶水之石膏 $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 。因主體為無機質之礦物，所以燃燒時不會生成有毒氣體產生。石膏板加熱燃燒時，釋放結晶水，產生明顯的降溫作用，對火災初期有很大的防火效果。且石膏板在火場溫度高達攝氏一千多度時會慢慢剝落而成灰狀，不會如磚牆般整面倒塌，對生命財產更有保障。石膏板是以其燃燒時釋放結晶水的特性，來達到防火的效果。

石膏板具有的特性如下：

- (1) 防火：石膏板受火燃燒時，因其結晶水的釋放達到防火之效果。
- (2) 隔音：石膏板具有良好的隔音性，故被廣泛使用於要求安靜之建物之中。
- (3) 防震：石膏板隔間牆有效減輕結構物之靜載重，配合其為柔性設計，能達到建物防震設計之要求。

(4) 經濟方便：石膏板牆施工快速工地易維持清潔管線配置容易造價合理。

現以一般環球石膏板分間牆例子，其效能如表2-14所示。

表2-14 市售環球石膏板分間牆性質

	(防火時效1小時)	(防火時效2小時)
石膏板	厚度：12mm	厚度：15mm，15.9mm
玻璃棉	厚度：50mm，24k	厚度：50mm，密度：12kg/m ³
防火時效	一小時	二小時
隔音值	D-40 - STC 48dB	D-40 STC50
牆體重量	38 kg/m ²	45 kg/m ²
適用場所	辦公室，音響室，電腦室，商場	住宅，辦公室，音響室，電腦室，旅館，醫院

資料來源：[60]

2.矽酸鈣板

以矽酸藻土為基本原料、水泥、水、纖維等組合抄造後、經過高溫高壓 (Atoclave) 蒸氣養生，形成一種穩定性極佳之結晶體，烘製而成矽酸鈣板。原料中不含石棉，可有效降低吸水長度變化率。屬於完全綠建材且穩定性佳符合CNS規定。雖然業界早已引進輕隔間牆體工法(木板、石膏板)，但由於台灣位於亞熱帶，又濕又熱使得早期的木板受蟲蛀、石膏板受潮影響品質。

由於現代科技的進步，之前輕隔間所使用的材料大多是隔音效果比木板較好用的石膏板，作為隔間材料。然而石膏板易碎、怕潮濕、強度又比矽酸鈣板小，所以在某些特定的場所，石膏板漸漸地被矽酸鈣板取而代之。且矽酸鈣板

第二章 蒐集之資料與文獻分析

可作造型變化，它可作許可程度的彎折。

矽酸鈣板是採用多種含矽酸鈣成分之無機礦物為主。配合輕質材料與無機、有機纖維補強，及其他添加物(如：蛭石、雲母、賽璐璐纖維、紙漿纖維...等)經高壓蒸氣而成，產生化學結晶製成的防火板。南亞矽酸鈣板主要由無機質材料組成，採特有製程生產，具有相當優異之防火／耐燃性能；產品通過CNS 6532耐燃一級（6mm以上）及CNS12514系統防火效1小時（9mm以上）檢測。熱傳導率低，隔熱性佳。具隔音效果，可有效阻隔46dB值以上之噪音。材質穩定性佳，對於溫度及濕度的脹縮變化極微。100%不含石棉纖維，不會對人體及環境產生危害。適用於住宅／辦公室／大樓等各種建築物之隔間牆，內壁。公共場所之隔間，防火區劃分之分間牆。一般室內平頂天花及造型天花板。

3 纖維板

市售Fermacell為例：主要原料為石灰及強化纖維加特殊抗火素、水，在高壓下蒸氣養生成型；不添加水泥、石綿，屬於完全綠建材且穩定性佳符合CNS規定。

4. 纖維水泥板

以水泥為主要原料加特殊材料、纖維、水混合攪拌噴漿，在高壓下蒸氣養生成型；不含石綿者，屬於完全綠建材且穩定性佳符合CNS規定。近代的隔間材料，從1/2 B磚牆及木構造隔間，到現在纖維水泥板可提供一般傳統式或輕質水泥分間牆的優點。此外，纖維水泥板濕式牆及乾式牆提供防火系統時效1或2小時。纖維水泥板100% 不怕長久水浸，不會腐蝕或發霉，不受白蟻侵蛀，也不

受陽光及蒸氣影響。纖維水泥板壽命長，且不須作特殊踢腳處理，貼磁磚前需作防水工程。纖維水泥板之不怕水特性，適用於潮濕地區貼磁磚或大理石，成為理想的襯板。纖維水泥板之凹邊及平滑抗磨損板面設計，使板面可作無縫式平頭接合，平滑抗磨損之表面便利於各式油漆及磁磚飾材，表面平滑遠優於一般磚牆或水泥牆披土後的表面。纖維水泥板之性能要求如表2-15所示。

纖維水泥板材質組成如下：

- (1) 水泥：水泥為CNS 61 (卜特蘭水泥)所規定之第I型水泥或CNS 3654 (卜特蘭高爐水泥)所規定之第I種水泥。
- (2) 有機纖維：主要為木質纖維。
- (3) 無機質纖維材料：無機質纖維材料應為對纖維水泥板之品質無害者。
- (4) 珍珠岩：珍珠岩為CNS 6992 (珍珠石粉)所規定之珍珠石粉。
- (5) 無機質混合材料：為爐石灰、飛灰、蛇紋石粉、矽石粉等無機質材料並應對製品之品質無害者。適用範圍：辦公室、商業空間、醫院、飯店、住宅、大廳、廠房等公共場所，施工方式：輕隔間分間牆系統施工。

5. 木絲纖維水泥板

水泥、木材(刨碎)與無毒性化學添加物混合，經高壓過程製成。質輕、稍具彈性、表面平滑；一般運用於表面裝飾材，可勾勒出設計之美與造型的特殊。

6. 氧化鎂(碳酸鎂)板

主要由氧化鎂、碳酸鎂、氯化鎂、珍珠岩、纖維質材料及其他無機物製造而成，無毒無煙且不含石棉。經漿面處理後表面平滑，質輕；溼度過大的地方

第二章 蒐集之資料與文獻分析

尤應慎防反潮反鹵現象。

表 2-15 CNS 3802 纖維水泥板之性能規定

種類	厚度 mm	容積比重	彎曲破壞載重 N/ { kgf }	耐衝擊性	吸水長度 變化率 (%)	耐燃性
0.8 纖維 水泥板	6	0.6 以上	120 { 12 }	不得有龜裂、剝離、貫穿孔及裂開，且凹陷應在 20mm 以下。	0.25 以下	耐燃 1 級 或 2 級
	8		210 { 33 }			
	10	0.9 未滿	330 { 33 }			
1.0 纖維 水泥板	6	0.9 以上	200 { 20 }			
	8		350 { 35 }			
	10	1.2 未滿	550 { 55 }			

資料來源：[66]

二、輕質隔間牆

依據施工方法可分為乾式及濕式兩種，如下介紹：

1. 乾式隔間牆：

需求主要是從大型建築物而開始引進。乃因其施工快速、節省工時、造價便宜、牆面平整、易於維護等特性。主要是以輕鋼架為骨架，以石膏板、矽酸鈣板為表面材之搭配，並施以補土、粉刷或壁紙等善後工程之牆面，由於施工過程中所使用之材料及工法避開與水接觸，故又稱乾牆隔間。

2. 濕式隔間牆：

廢輪胎橡膠混凝土應用於建築隔熱吸音牆板之研究

需求主要是因應建築物室內吊掛而為之。因其節省工時、造價比較RC或磚造便宜且施工快速、牆面平整、易於維護等特性。主要是以輕鋼架為骨架，以纖維水泥板為表面材之搭配，並施以補土、粉刷或壁紙等善後工程之牆面，由於施工過程以清水模工法及使用輕質漿材料灌漿，故稱濕牆隔間。



第三章 纖維橡膠水泥板之先期測試

本計劃首要建立輕質橡膠水泥板之配比設計與製造技術，進而探討輕質橡膠水泥板之各項性能，包括容積比重、吸水率、防火性、耐燃性與隔熱性等。

第一節 材料

本計劃製作輕質橡膠水泥板所使用之材料分別為：

1. 水泥：使用台灣水泥公司製造之普通波特蘭 Type I 水泥，其性質符合 CNS 61 第 I 型波特蘭水泥之要求。
2. 爐石粉：中聯爐石處理資源公司所提供之水淬爐石粉，比重為 2.89。
3. 防火被覆材：為塗佈材，永記造漆工業股份有限公司提供，成分為 30% 水泥，70% 高分子材料。
4. 防火液：南寶樹脂公司提供，比重 1.1，固成分 55% 以上。
5. 廢棉絮：羽泰國際企業有限公司提供，為廢輪胎之產品，如圖 3-1 所示。
6. 橡膠：羽泰國際企業有限公司提供之廢棄輪胎粉粒，顆粒分別為顆粒狀，FM=3.69，以及粉末狀兩種，比重約 0.95~1.15，如圖 3-2 所示。
7. 水：一般使用之自來水，符合 CNS 拌合水之要求。
8. 椰纖：農委會高雄區農業改良場所提供，比重約 0.53，平均長度為 15 mm，平均直徑為 0.22 mm，如圖 3-3 所示。



圖 3-1 廢棉絮

*資料來源：本研究整理



橡膠粒



橡膠粉

圖 3-2 橡膠粒與橡膠粉

*資料來源：本研究整理



*圖 3-3 椰子纖維

資料來源：本研究整理

第二節 配比設計

1. 水膠比 0.4 (C 4) 配比

橡膠水泥漿分別採用大小粒徑橡膠拌製，膠結材中水泥含量 75wt%，爐石粉含量 25wt%，防火披覆添加後，再額外添加 1.5 倍防火被覆重量的水量，配比設計假設 5% 空氣含量。其中非膠結材料的體積含量有 5 種，配比編號如表 3-1。但經過試拌後，大粒徑橡膠體積含量 50% 和 55% 之工作性不佳，故只採用 C4-RG40F0B0、C4-RG40F3B0 與 C4-RG40F10B0 等 3 種配比做進一步的研究。各組試體之配比設計，如表 3-2 與表 3-3 所示。

符號說明：C 為水膠比；RG 表橡膠粒；RS 表橡膠粉；F 表防火被覆；B 表棉絮。

表 3-1 水膠比 0.4 非膠結材體積含量

編號	橡膠(%)	防火被覆(%)	廢棉絮(%)
C4-RG40F0B0	40	0	0
C4-RG40F3B0	40	3	0
C4-RG40F10B0	40	10	0
C4-RG50F0B0	50	0	0
C4-RS40F0B0	40	0	0
C4-RS40F3B0	40	3	0
C4-RS40F5B0	40	5	0
C4-RS40F7B0	40	7	0

*資料來源：本研究整理

表 3-2 水膠比 0.4 (C4) 配比表

試體編號 材料	C4-RG40F0B0	C4-RG40F3B0	C4-RG40F10B0
水	304 (0.304)	287 (0.287)	248 (0.248)
水泥	569 (0.180)	538 (0.171)	466 (0.149)
爐石	190 (0.066)	179 (0.062)	155 (0.054)
橡膠	460 (0.4)	460 (0.4)	460 (0.4)
防火被覆	0	13 (0.03)	42 (0.1)
空氣含量	-- (0.05)	-- (0.05)	-- (0.05)
總合 kgf/m ³ (m ³)	1523 (1.0)	1477 (1.0)	1371 (1.0)

*資料來源：本研究整理

表 3-3 水膠比 0.4 (C4) 配比表 (小粒徑橡膠粉)

防火批覆 材料	0% (C4-RS40F0B0)	3% (C4-RS40F3B0)	5% (C4-RS40F5B0)	7% (C4-RS40F7B0)
水泥	621 (0.198)	585 (0.186)	561 (0.179)	537 (0.171)
爐石	207 (0.072)	195 (0.067)	187 (0.065)	179 (0.062)
水	319 (0.319)	305 (0.305)	296 (0.296)	287 (0.287)
橡膠	380 (0.4)	380 (0.4)	380 (0.4)	380 (0.4)
防火被覆	0 (0)	12.5 (0.03)	20.8 (0.05)	29.1 2(0.069)
強塑劑	12.4 (0.011)	11.9 (0.011)	11.5 (0.01)	11.2 (0.01)
總和 kgf/m ³ (m ³)	1539 (1.0)	1489 (1.0)	1456 (1.0)	1422 (1.0)

*資料來源：本研究整理

2. 水膠比 0.5 之配比

橡膠水泥採用採用大粒徑橡膠拌製，膠結材中水泥含量 75wt%，爐石粉含量 25wt%，防火被覆添加後，再額外添加 1.5 倍防火被覆重量之水量，假設 5%空氣含量。其中非膠結材料的體積含量有 2 種，配比編號如表 3-4 所示，配比設計參見表 3-5。因橡膠水泥漿加入少量棉絮後之工作性甚差，因此不採用添加廢棉絮之 3 種配比。

表 3-4 水膠比 0.5 非膠結材體積含量

編號	橡膠(%)	防火被覆(%)	廢棉絮(%)
C5-RG30F0B0	30	0	0
C5-RG30F10B0	30	10	0
C5-RG45B10	45	0	10
C5-RG45B15	45	0	15
C5-RG45F10	45	10	0

*資料來源：本研究整理

3. 水膠比 0.65 之配比

採用橡膠粒(RG)拌製，膠結材中水泥含量 75wt%，爐石粉含量 25wt%，防火被覆添加後，再額外添加 1.5 倍防火被覆重量的水量，假設 5%空氣含量，且額外參加防火液。橡膠單位體積用量與防火液比例約 1：1，均勻混合於水泥漿內。非膠結材料的體積含量如表 3-6 所示，配比設計則參見表 3-7。

表 3-5 水膠比 0.5 配比表

試體編號 材料	C5-RG30F0B0	C5-RG30F10B0
水	394 (0.394)	333 (0.333)
水泥	591 (0.188)	500
爐石	197 (0.068)	167
橡膠	345 (0.3)	42
防火被覆	0	345
空氣含量	--(0.05)	--(0.05)
總合 kgf/m ³ (m ³)	1527 (1)	1387 (1)

*資料來源：本研究整理

表 3-6 水膠比 0.65 非膠結材體積含量

編號	橡膠(%)	防火被覆(%)	廢棉絮(%)
C65-RG30F0B0	30	0	0

*資料來源：本研究整理

4. 水膠比 0.45 之配比

此配比摻有不同含量棉絮，採用大粒徑橡膠製作，膠結材中水泥含量 75wt%，爐石粉含量 25wt%，假設 5%空氣含量。有關非膠結材料之體積含量如表 3-8 所示。而此 2 種配比，因加入少量之棉絮後，其工作性表現均不佳，因此不予採用。

表 3-7 水膠比 0.65 配比表

試體編號	C65-RG30F0B0
水	434 (0.434)
水泥	500 (0.159)
爐石	167 (0.058)
橡膠	345 (0.3)
防火液	345 (0.314)
空氣含量	-- (0.05)
總和 kgf/m ³ (m ³)	1790 (1.314)

*資料來源：本研究整理

表 3-8 水膠比 0.45 非膠結材體積含量

編號	水膠比	橡膠(%)	廢棉絮(%)	防火被覆(%)
C45-RG45F0B15	0.45	45	15	0
C45-RG50F0B0	0.45	50	10	0

*資料來源：本研究整理

5. 水膠比 0.645

為增加橡膠水泥漿體之工作性，調整水膠比為 0.645，並使用小粒徑橡膠粉，膠結材中水泥含量 75wt%，爐石粉含量 25wt%。其中非膠結材料的體積含量與表 3-1 相同，共 4 種配比。配比編號如表 3-9 所示，配比設計則參見表 3-10。

表 3-9 水膠比 0.645 非膠結材體積含量

編號	橡膠 %	防火被覆 %	廢棉絮 %
C645-RS40F0B0	40	0	0
C645-RS40F3B0	40	3	0
C645-RS40F5B0	40	5	0
C645-RS40F7B0	40	7	0

*資料來源：本研究整理

表 3-10 水膠比 0.645 配比表

試體編號 材料	C645-RS40F0B0	C645-RS40F3B0	C645-RS40F5B0	C645-RS40F7B0
水泥	464 (0.148)	464 (0.148)	475 (0.151)	479 (0.153)
爐石	154 (0.053)	155 (0.053)	158 (0.055)	160 (0.055)
水	399 (0.399)	399 (0.399)	395 (0.395)	393 (0.393)
橡膠	380 (0.4)	351 (0.37)	333 (0.35)	314 (0.33)
防火被覆	0	12.5 (0.3)	20.8 (0.05)	29.1 (0.07)
總和 kgf/m ³ (m ³)	1397 (1.0)	1382 (1.0)	1381 (1.0)	1374 (1.0)

*資料來源：本研究整理

第三節 橡膠水泥板之製作程序

橡膠水泥板的製作程序上是使用調配好的配比，依照所需要的量將水、水泥及爐石粉和橡膠、防火被覆準備好，分別依照不同配比及拌製方式倒入拌合機，如圖 3-4。拌合好之後，取出混凝土並灌入 200×200×10 mm 之平板試體模，如圖 3-5，或 40×40×160 mm 之長方試體模，如圖 3-6。試體製作完成 24 小時後拆模放入恆溫恆濕養護機，如圖 3-7，養護 7 天，齡期達 7 天時開始進行試驗。



圖 3-4 拌合機

*資料來源：本研究整理



圖 3-5 平板試體模

*資料來源：本研究整理



圖 3-6 長方試體模

*資料來源：本研究整理



圖 3-7 恆溫恆濕養護機

*資料來源：本研究整理

由於工作性之不同，本研究共嘗試五種不同之拌合方式，將各拌合方式分別編號為 A、B、C、D 及 E 五種，說明如下：

A：水膠比 0.4 (C 0.4) 拌製步驟：

1. 將水泥、爐石倒入拌合機中。
2. 添加量好的水量。
4. 拌合機轉速調至慢速，拌製 2 分鐘。
5. 將橡膠、防火被覆添加於已拌合好之水泥漿中。
6. 再將拌合機轉速調至慢速，過 45 秒再調至中速 2 拌製 45 秒，共 1.5 分鐘。
7. 將拌製好的水泥漿放置入板模，以振動桌頻率 60Hz 振動 60 秒，製作完畢。
8. 靜置 24 小時後拆模。
9. 利用濕棉被養護 7 天。

B：水膠比 0.5 拌製步驟

1. 將水泥、爐石粉與防火被覆倒入拌合機中。
2. 將水泥、爐石粉與防火被覆乾拌 1 分鐘。
3. 添加量好的水量。
4. 拌合機轉速調至慢速，拌製 1 分鐘。
5. 將橡膠添加於已拌合好之水泥漿中。
6. 再將拌合機轉速調至慢速，過 60 秒再調至中速拌製 60 秒，共 2 分鐘。
7. 將拌製好的水泥漿放置入板模，以塑膠袋封住，製作完畢。
8. 靜置 24 小時後拆模。
9. 利用濕棉被養護 7 天。

C：水膠比 0.65 拌製步驟

1. 將水泥、爐石倒入拌合機中。
2. 將水泥與爐石粉乾拌 30 秒。
3. 添加量好的水量。
4. 拌合機轉速調至慢速，拌製 1 分鐘。(1. 2. 3. 快速)
5. 將橡膠添加於已拌合好之水泥漿中。
6. 再將拌合機轉速調至慢速，拌製 1 分 15 秒後再調至中速拌製 1 分 15 秒，共 2.5 分鐘。
7. 將拌製好的水泥漿灌入板模，以塑膠袋封住，製作完畢。
8. 靜置 24 小時後拆模。
9. 利用濕棉被養護 7 天。

D：水膠比 0.4(小粒徑橡膠粒)拌製步驟

1. 將水泥、爐石粉與防火被覆倒入拌合機中。
2. 將水泥、爐石粉與防火被覆乾拌 1 分鐘。
3. 添加橡膠至水泥與爐石粉裡。
4. 將橡膠、水泥跟爐石粉乾拌 1 分鐘。
5. 添加已量好的水量。
6. 再將拌合機轉速調至 2(慢速)，拌製 5 分鐘。
7. 將拌製好的水泥漿分三層搗實灌入試體模之中。
8. 製作完畢，靜置 24 小時後拆模。
9. 放入 20℃，RH100%的恆溫恆濕養護機養護 7 天。

E：水膠比 0.645(小粒徑橡膠粒)拌製步驟

1. 將水泥、爐石粉與防火被覆倒入拌合機中。
2. 將水泥、爐石粉與防火被覆乾拌 1 分鐘。
3. 添加量好的水量。
4. 拌合機轉速調至 2(慢速)，拌製 2 分鐘。
5. 將橡膠添加入已拌合好的水泥漿之中。
6. 再將拌合機轉速調至 2(慢速)，拌製 5 分鐘。
7. 將拌製好的水泥漿分三層搗實灌入試體模。
8. 製作完畢，靜置 24 小時後拆模。
9. 放入溫度 20℃，RH100%的恆溫恆濕養護機養護 7 天。

第四節 試驗設備與方法

主要試驗設備有：

1. 升溫試驗儀器

橡膠水泥板的耐燃試驗採用的儀器為型號 F12-27 的單點加溫高溫爐，如圖 3-8，最大加熱溫度可達 1200 度左右。



圖 3-8 單點加溫高溫爐

*資料來源：本研究整理

2. 力學試驗儀器

本試驗採用之抗壓機為 MTS 公司出產之萬能材料試驗機 810 MTS (810 Material Test System)，如圖 3-9，所採用之油壓伺服器系統屬於數位式閉迴路控制系統(close loop control)，最大壓力為 250kN(25 噸)。



圖 3-9 萬能材料試驗機

*資料來源：本研究整理

第五節 橡膠水泥板之基本性質

1. 橡膠水泥漿之工作性

橡膠水泥漿之試驗中，採用 C4RS (水膠比 0.4，小橡膠粉末)所拌製之水泥漿體流度值非常小，在未添加防火被覆時(C4-RS40F0B0-D)，其流度值已非常小，幾乎呈不流動狀態。而後再添加防火被覆含量 3% (C4-RS40F3B0-D)，5% (C4-RS40F5B0)，7% (C4-RS40F7B0)時，隨著防火披覆添加量增加，其工作性亦隨著降低。雖然嘗試採用添加強塑劑之方式以改善橡膠水泥漿之工作性，但發現添加強塑劑對工作性並沒有很明顯的改善效果。而 C4RG (水膠比 0.4，大橡膠顆粒)之漿體拌製時，額外添加 1.5 倍防火被覆重量的用水量，則使得橡膠水泥漿之工作性較 C4RS 者佳。但橡膠水泥漿之稠度仍太高。且工作性偏低。

由橡膠水泥漿之拌製過程中發現，漿體之工作性隨著橡膠添加量增加而降低。當橡膠添加量增加時，漿體稠度變高，且試體表面平整度變差，如後續製作之 C5、C65 及 C645，其工作性僅獲得小幅改善，稠度仍然偏高。

另一方面，五種橡膠水泥漿之拌製方法中，A 方法使用振動桌對於水膠比較低之橡膠水泥漿體並沒有很大的改善效果。因此，後續之試驗即不再使用振動桌。同時，由拌製 D 方法及 E 方法所拌製之橡膠水泥漿得知，橡膠粒先添加於膠結材(水泥與爐石粉)中在拌合，與膠結材加水先造將後再加入橡膠粒，兩者之工作性相差不大。

2. 橡膠水泥板之單位重

表 3-11 為利用不同水膠比與拌合方式所製作出橡膠水泥板試體之濕比重。試體重量量測條件為試體製作完成後，靜置 24 小時拆模量測之。其中試體編號後面的符號 A、B、C、D 及 E 分別代表不同拌合方式。

水膠比與拌合方式對濕比重之影響，分別就以下幾點討論：

(1) 防火被覆添加量

由以橡膠粒製作之試體(RG)，C4-RG40F0B0-A、C4-RG40F3B0-A、C4-RG40F10B0-A 三組試體可看出，試體濕比重隨著防火被覆添加量增加而減少。雖然添加 3%防火被覆之試體比重較添加 0%者略高，但添加量 10%時(C4-RG40F10B0-A)，其試體比重已較其他組明顯減小。

另一方面，以橡膠粉製作之試體(RS)，利用 D 方法拌製者，C4-RG40F0B0-D、C4-RS40F3B0-D、C4-RS40F5B0-D、C4-RS40F7B0-D，此四組試體之比重隨防火被覆添加量之增加而有略增加之趨勢。而利用 E 方法拌製之試體，C4-RS40F0B0-E、C4-RS40F3B0-E、C4-RS40F5B0-E、C4-RS40F7B0-E，卻發現濕比重隨著防火被覆之增加而減少；且於 C645 系列中亦有相同之結果。此現象與上述使用 RG 者相同。

(2) 橡膠添加量

在水膠比 0.4(C4)一系列之試驗中可發現，橡膠添加量為 50%水泥漿試體(C4RG50F0B0-A)之濕比重較添加量 40%者(C4R50F0B0-A)小。由此顯示，橡膠水泥漿試體由於橡膠添加量的增加，將造成其比重降低之情形。

(3) 廢棉絮

試體 C5-RG45F0B10 與 C5-RG45F0B15 為添加廢棉絮所製作之試體。而添加廢棉絮考量主要為，其乃廢輪胎資源化處理過程中所分解產生之廢棄

物，且重量輕應可降低試體之單位重。然試驗結果發現，橡膠水泥漿中添加廢棉絮，使得平板市體之表面處理無法很平整，且其未有抗耐燃之效果，因此後續試驗則取消廢棉絮之添加。

(4) 拌合方式：

由表 3-11 可發現，以相同之水膠比，不同之拌合方式(編號 D 及編號 E)，橡膠水泥板之比重卻不同。以橡膠粉製作之試體中，採用 D 方法拌製之試體濕比重較用 E 方法者輕。

依據 CNS 3802 規定，「資源再生板」的容積比重須符合 1.2 以上，未滿 1.4。而以上依水膠比 0.4 與 0.65 配比製作之試體比重約為 1.35 到 1.39 之間，可符合 CNS 3802 之規定。

表 3-11 橡膠水泥漿試體之濕比重

試體編號	橡膠	濕比重
C4-RG40F0B0-A	橡膠粒	1.545
C4-RG40F3B0-A		1.644
C4-RG40F10B0-A		1.355
C4-RG50F0B0-A		1.470
C4-RG55F0B0-A		1.407
C5-RG30F0B0-B		1.504
C5-RG30F10B0-B		1.492
C65-RG30F0B0-C		1.500
C45-RG45F0B15		1.156
C45-RG50F0B0		1.088
C5-RG45F0B10		1.258
C5-RG45F0B15		1.067
C5-RG45F10B0		1.267
C4-RS40F0B0-D	橡膠粉	1.25
C4-RS40F0B0-E		1.34
C4-RS40F3B0-D		1.29
C4-RS40F3B0-E		1.41
C4-RS40F5B0-D		1.28
C4-RS40F5B0-E		1.37
C4-RS40F7B0-D		1.37
C4-RS40F7B0-E		1.34
C645-RS40F0B0-D		1.39
C645-RS40F0 B0-E		1.39
C645-RSS40F3 B0-D		1.43
C645-RS40F3 B0-E		1.36
C645-RS40F5 B0-D		1.39
C645-RS40F5 B0-E		1.36
C645-RS40F7 B0-D		1.41
C645-RS40F7 B0-E		1.37

*資料來源：本研究整理

3. 橡膠水泥漿之抗壓與抗彎強度

(1) 長方試體抗彎試驗

(1)試驗條件：依 CNS.1234(中心點抗彎試驗)之規定(如圖 3-10 所示)。

(2)試體大小：採用 40×40×160 mm 抗彎試體。

(3)加載速率： 5×10^{-3} mm/sec。

(4)試驗結果：

表 3-12 為水膠比 0.4 與 0.645，細橡膠粉製作之試體抗彎強度結果。由表顯示，當防火被覆含量增加時，試體抗彎強度有增加之趨勢。但防火被覆含量為 5%時 (試體 C4-RS40F5B0-D、C4-RS40F5B0-E、C645-RS40F5B0-D 與 C645-RS40F5B0-E)卻產生降低之現象。此外，由水膠比 0.4 試體之抗彎強度試驗結果發現，D 方法製作之試體抗彎強度較 E 方法者略高。整體而言，除防火被覆含量為 5%者外，橡膠粉水泥漿之抗彎強度隨防火被覆含量增加而增加，且採用拌製方法 D 者，抗彎強度亦較佳。

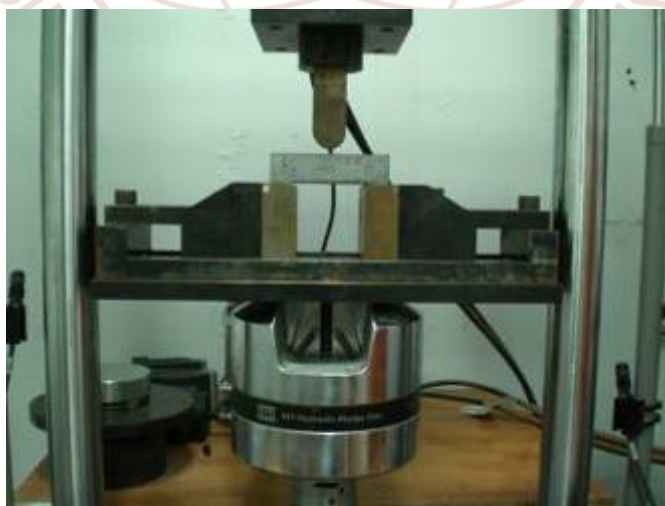


圖 3-10 中心點抗彎試驗

*資料來源：本研究整理

表 3-12 C4 與 C645 細橡膠粉試體之抗彎強度 (MPa)

試體編號	1	2	3	平均強度 MPa
C4-RS40F0B0-D	1.46	1.66	1.55	1.56
C4-RS40F0B0-E	1.46	1.60	1.46	1.51
C4-RS40F3B0-D	1.62	1.60	1.67	1.63
C4-RS40F3B0-E	1.58	1.74	1.58	1.63
C4-RS40F5B0-D	1.38	1.24	1.35	1.32
C4-RS40F5B0-E	1.41	1.43	1.46	1.43
C4-RS40F7B0-D	1.43	2.00	1.52	1.65
C4-RS40F7B0-E	1.29	1.58	1.88	1.58
C645-RS40F0B0-D	1.46	1.52	1.43	1.47
C645-RS40F0B0-E	1.53	1.36	1.53	1.48
C645-RS40F3B0-D	1.74	1.53	1.55	1.61
C645-RS40F3B0-E	1.48	1.22	1.67	1.46
C645-RS40F5B0-D	1.48	1.58	1.48	1.51
C645-RS40F5B0-E	1.55	1.62	1.65	1.61
C645-RS40F7B0-D	1.72	1.97	1.93	1.88
C645-RS40F7B0-E	1.79	1.72	1.79	1.77

*資料來源：本研究整理

2. 方型板抗彎試驗

(1)試驗條件：依 CNS 3904 之規定。

(2)試體大小：採用 250×300×20 mm 平板試體。

(3)結果說明：

由表 4-3 可看出，水膠比 0.65 之試體抗彎強度，未添加防火被覆及棉絮平板試體抗彎強度分別為 1.13 kgf/cm^2 與 1.5 kgf/cm^2 。

表 3-13 水膠比 0.65 橡膠粒水泥漿抗彎強度試驗結果

編號	齡期(強度)	抗彎強度 kgf/cm^2 (MPa)
C65-RG30F0B0-C		1.13 (0.11)
C65-RG30F0B0-C		1.5 (0.15)

*資料來源：本研究整理

3. 立方試體抗壓試驗：

(1)試驗條件：依 CNS 1010 之規定。

(2)試體大小：採用 $50 \times 50 \times 50 \text{ mm}$ 抗壓試體。

(3)結果說明：

由表 4-4，水膠比 0.65 橡膠粒水泥漿之抗壓試驗結果可看出，未添加防火被覆與棉絮立方試體之平均抗壓強度為 4.01 kgf/cm^2 。

表 3-14 水膠比 0.65 橡膠粒水泥漿試體之抗壓強度試驗結果

編號	抗壓強度 kgf/cm^2 (MPa)
C65-RG30F0B0-C	3.88 (0.381)
C65-RG30F0B0-C	3.92 (0.385)
C65-RG30F0B0-C	4.24 (0.416)
平均值	4.01 (0.394)

*資料來源：本研究整理

第六節 橡膠水泥板耐燃性之初步試驗

1. 未塗佈防火被覆之橡膠水泥板

(1) 水膠比 0.35 橡膠粒水泥板耐燃試驗

a. 試驗條件：採用 200×200×10 mm 平版試體，量測橡膠水泥試體的耐燃度，
每種配比製作三顆試體。

b. 試體條件：水膠比 0.35，橡膠體積含量 30%。

c. 升溫條件：升溫速率每分鐘約 10℃，達到溫度條件後延時 10 分鐘。

d. 試驗結果：

三塊橡膠水泥板均未在外層塗防火被覆，採用直接加熱，且試體之養護條件一致，僅加熱溫度條件相異。橡膠水泥板分別加熱至 100℃、150℃ 與 200℃ 等三種溫度。測試結果發現，橡膠水泥板加熱至 100℃ 與 150℃ 時，並無任何明顯之變化(包括味道)；但加熱溫度達 150 度時，近距離觀察(約 10 公分)，已可聞到些微的燒焦味。其中一塊橡膠水泥板加熱至 200℃ 時，其外表面雖無任何變化，但卻有強烈明顯之燒焦味。因此，推估一般橡膠水泥板於環境溫度達 200 度時，板材內之橡膠已被高溫燒焦，燃燒試驗結果所表 3-15 所示。

表 3-15 未塗佈防火被覆(水膠比 0.35) 橡膠水泥板燃燒試驗

加熱溫度(°C)	100	150	200
表面變化	無變化	無變化	無變化
味道	無	無	燒焦味
重量 (燃燒前)	689.80	703.94	667.72
重量 (燃燒後)	675.50	664.70	590.30
※單位: g			

*資料來源：本研究整理



圖 3-11 加熱試驗前之橡膠水泥板

*資料來源：本研究整理



圖 3-12 加熱 150℃ 試驗後之橡膠水泥板

*資料來源：本研究整理

(2) 水膠比 0.65 橡膠粒水泥板耐燃試驗

1. 試體編號：C65-30RGF0B0-C (此試體有添加防火液)。
2. 養護條件：以濕棉被養護 7 天。
3. 升溫條件：升溫速率每分鐘約 10℃，加熱至 150℃，進行不同延時效果測試。
4. 結果說明：

表 3-16 為 C65-RG30F0B0-C 試體加熱至 150℃ 各時間延時之變化情形。由表 4-6 可發現，當加熱延時時間從 10 分鐘延續到 24 小時，橡膠水泥板之表面並無任何變化，因此看不出來板材受高溫作用之改變情形。但以味道研判板材受加熱延時之變化可發現。加熱延時為 10 分鐘到 1 小時左右，未出現橡膠之燒焦味，直至延時時間達到 3 小時後，使聞出橡膠之燒焦味。由此現象顯示，橡膠粒經防火液處理後，橡膠水泥板加熱至 150℃，且延時在 1 小時內，並不會發生燒焦之現象；但延時達到 3 小時以上時，板材內部之橡膠

粒即可能已被燒焦。

表 3-16 C65-RG30F0B0-C 試體未塗佈防火被覆平板燃燒試驗結果

加熱溫度 150℃ (時間)	10 分鐘	20 分鐘	30 分鐘	40 分鐘	50 分鐘	1 小時	3 小時	24 小時
表面變化	無變化	無變化	無變化	無變化	無變化	無變化	無變化	無變化
味道	刺鼻味	刺鼻味	刺鼻味	刺鼻味	刺鼻味	刺鼻味	橡膠焦 味及輕 微刺鼻 味	橡膠焦 味
重量 (燃燒前)	724.42	704.90	678.34	658.87	637.09	618.34	599.21	510.61
重量 (燃燒後)	704.90	678.34	658.87	637.09	618.34	599.21	510.61	509.62
重量損失 %	2.7	3.8	2.9	3.3	2.9	3.1	14.8	0.2

*資料來源：本研究整理

2. 塗佈防火被覆之橡膠水泥板

(1) 水膠比 0.5 橡膠粒水泥板試驗條件

1. 試體編號：C5- RG30F0B0-B。
2. 試驗條件：將防火被覆塗置板材上進行高溫試驗(防火被覆塗上後試體為 21.65×21.65×1.67cm)。
3. 升溫條件：升溫速率每分鐘約 10℃，加熱至 150℃，採用不同延時效果測試。

4. 試驗結果：

C5-RG30F0B0-B 試體表面塗佈防火被覆之高溫加熱試驗結果，如表 3-17 所示。由表可發現，塗佈防火被覆之試體進行 150℃ 高溫試驗，可在延時達 170 分鐘(約 3 小時)時，試體並沒有任何味道變化發生。由此可知，橡膠水泥板表面經防火被覆塗層保護後，可阻隔高溫對板材之影響。但加熱溫度在升高時仍需進一步測試。

表 3-17 C5-RG30F0B0-B 塗佈防火被覆之不同延時燃燒試驗

加熱溫度 150℃ (時間)	10 分鐘	20 分鐘	50 分鐘	80 分鐘	110 分鐘	140 分鐘	170 分鐘
味道	無	無	無	無	無	無	無
重量(g) (燃燒前)	839.5	821.5	804.1	765.5	737.1	710.1	695.6
重量(g) (燃燒後)	821.5	804.1	765.5	737.1	710.1	695.6	686.0
重量損失 %	2.1	2.1	4.8	3.7	3.7	2.0	1.4

*資料來源：本研究整理

(2) 水膠比 0.645 橡膠粉水泥板試驗

1. 試體編號：C645-RS40F0B0-D

2. 試驗條件：將試體表層塗佈不同厚度的防火被覆進行高溫試驗。

3. 養護條件：橡膠水泥試體送入恆溫恆濕箱養護 7 天，養護條件為溫度 20℃，
RH 為 100%。

4. 升溫條件：升溫速率每分鐘約 10℃，達到條件溫度後延時 10 分鐘。

5.試驗結果：

將橡膠水泥板外層塗佈不同厚度之防火被覆材料，並進行高溫試驗。防火被覆塗佈厚度分別為 2、4、6 與 8mm，試驗加熱溫度分別為 100°C、150°C、200°C、250°C、300°C、350°C 與 400 °C。(延時 10 分鐘指達到目標溫度後持續燃燒 10 分鐘)

橡膠水泥板各防火被覆塗佈厚度加熱試驗結果，如表 3-18 所示。說明如下：

- (a)厚度 2mm：橡膠水泥板加熱至 200°C 時，並無任何味道產生，即使近距離觀察也無任何味道。此情形與未塗防火批覆之板材有極大之差異。但當持續升溫達 220°C 左右時，橡膠水泥板出現些微之橡膠燒焦味。而溫度達 250°C 時，味道則更為明顯。
- (b)厚度 4mm：橡膠水泥板加熱至 300°C 時，無明顯之味道產生，但近距離觀察(距離約 10 公分)時，可聞到些微之橡膠燒焦味。此時水泥板內部之橡膠已開始發生燒焦之情形(約 150°C)。
- (c)厚度 6mm：橡膠水泥板加熱至 300°C 時，未產生任何味道。而當加熱至 350°C 時，雖仍沒有明顯之燒焦味，但近距離觀察時，可聞到些微之橡膠燒焦味。
- (d)厚度 8mm：此橡膠水泥板分別以下兩種測試

試驗 1：橡膠水泥板加熱至 400°C 時，延時時間與前幾項試驗相同(10 分鐘)，採用近距離觀察發現些微之橡膠燒焦味，但仍不明顯。

試驗 2：加熱至 400°C，延時 1 小時，而於延時約 30 分鐘時，即產生強烈明顯之橡膠燒焦味。延時增至 50 分鐘時，發現板材防火

被覆底部與高溫爐接觸部分出現燒焦現象，但未與高溫爐接觸表面，未出現燒焦現象。此情形推估為與防火被覆直接接觸之高溫爐底座溫度較高，導致底部之防火被覆出現燒焦現象。而將外層防火被覆剝開時，可發現內部之橡膠水泥板亦產生稍微燒焦之現象。

表 3-18 C645-RS40F0B0-D 塗佈不同厚度之防火被覆試體高溫加熱試驗結果

目標溫度 試體	100 °C	150°C	200°C	250°C	300°C	350°C	400°C
C645-RS40F0B0-D (防火被覆 2mm)	無味道	無味道	無味道	燒焦味	N/A	N/A	N/A
C645-RS40F0B0-D (防火被覆 4mm)	無味道	無味道	無味道	無味道	燒焦味	N/A	N/A
C645-RS40F0B0-D (防火被覆 6mm)	無味道	無味道	無味道	無味道	無味道	燒焦味	N/A
C645-RS40F0B0-D (防火被覆 8mm)	無味道	無味道	無味道	無味道	無味道	無味道	燒焦味

*資料來源：本研究整理

第四章 纖維橡膠水泥板之製作與性質

第一節 試驗參數與配比設計

由第三章之試驗結果可知，若直接添加橡膠於水泥漿中，所製成之水泥板耐燃性不佳且容易產生異味。因此本研究利用椰纖水泥漿來包覆橡膠，以提高其耐燃性。其原理主要為水泥板耐燃性佳，而添加椰纖可提高水泥板之抗彎強度與抗衝擊性。因此本研究之纖維橡膠水泥板主要由橡膠水泥漿與椰纖水泥漿組合而成。其中橡膠水泥漿之部分，乃以水泥與爐石粉為膠結材，水膠比為 0.5，橡膠含量分別為體積比之 30%、40%與 50%三種。而椰纖水泥漿部份，採用水膠比為 0.4，水泥與爐石粉為膠結材，椰纖維添加量為體積比之 15%，並添加適量之強塑劑(體積比 0.12%)。

製作纖維橡膠水泥板前，先分別量測上述兩種水泥漿之抗壓強度、抗彎強度、吸水率、彈性模數與柏松比等性質，以作為纖維橡膠水泥板性質之參考。試驗所用之材料與 3-1 節所述之材料相同，而試驗參數、試驗項目、配比設計與試體尺寸，如表 4-1、表 4-2、表 4-3 與表 4-4 所示。此外，製作完成之纖維橡膠水泥板則分別測試其抗彎強度、抗衝擊性，耐燃性、隔熱(熱傳導係數)性與隔音性。各種試驗之板材尺寸，如表 4-4 所示。

表 4-1 試驗參數表

項目	橡膠水泥漿	椰纖維水泥漿
固定 參數	1.水膠比：0.5 2.爐石粉：25% vol.	1.水膠比：0.4 2.爐石粉：30% vol. 3.強塑劑：0.12% vol.
試驗 數	1. 橡膠含量：分別為體積含量 30%、40%、50% 2. 齡期：3 天、7 天、28 天	1. 齡期：3 天、7 天、28 天
量測 數值	1. 抗壓強度 a)破壞強度 b)彈性模數 c)柏松比 2. 抗彎強度 a)破壞強度 3. 吸水率	1. 抗壓強度 a)破壞強度 b)彈性模數 c)柏松比 2. 抗彎強度 a)破壞強度 3. 吸水率

*資料來源：本研究整理

表 4-2 橡膠水泥漿之配比表 (kgf/m³)

	C5-R30	C5-R40	C5-R50
水	394 (0.394)	334 (0.334)	273 (0.273)
水泥	591 (0.187)	500 (0.158)	409 (0.130)
爐石	197 (0.069)	167 (0.058)	136 (0.048)
橡膠	345 (0.3)	460 (0.4)	575 (0.5)
總和 kg/m ³ (m ³)	1528 (1.0)	1461 (1.0)	1394 (1.0)
空氣含量假設 5%			

*資料來源：本研究整理

表 4-3 椰纖維水泥漿配比表

	水	水泥	爐石	椰纖維	強塑劑	總和
kgf/m ³	446	780	334	77.0	1.1	1637
m ³	(0.446)	(0.248)	(0.116)	(0.150)	(0.001)	1.00
水膠比 W/B=0.4						
空氣含量假設 4%						

*資料來源：本研究整理

表 4-4 各項試驗之試體尺寸

	橡膠與椰纖水泥漿試驗				
試體類型	抗壓試體	抗彎試體		吸水率試體	
尺寸 (mm)	50×50×50	40×40×160		200×200×10	
體積 (mm ³)	125×10 ³	256×10 ³		400×10 ³	
	纖維橡膠水泥板試驗				
試體類型	耐燃試驗	隔熱試驗	吸音試驗	抗彎試驗	衝擊試驗
尺寸 (mm)	220×220×20	200×200×20	1000×600×20	250×300×20	220×220×20
體積 (mm ³)	968×10 ³	800×10 ³	12000×10 ³	1500×10 ³	968×10 ³

*資料來源：本研究整理

第二節 纖維橡膠水泥板之製作方法

1. 橡膠水泥漿之拌製方法

試驗材料依設計配比準備好後，置入單軸式拌合機內，依照下列程序拌合。拌合完成之水泥漿，分別灌置於試體模內，而試體製作與搗實，必須依規定確實做好每個步驟，以避免因搗實不良而產生大量孔隙與材料分佈不均等現象。隨後，將製作好之試體靜置於室內，並於 20~24 小時後拆模，拆模後以封口袋密封置放在室內中養護，達各齡期後分別進行各項試驗。

拌合程序：

- (1) 將水泥與爐石粉置入拌合機內乾拌一分鐘
- (2) 倒入將量好之用水量，攪拌一分鐘以形成水泥漿。
- (3) 橡膠顆粒，使橡膠顆粒與水泥漿進行攪拌一分鐘。如圖 4-1。
- (4) 將拌合完成之橡膠水泥漿倒入試體模內，試體製作完成後，靜置 24 小時後拆模。

2. 椰纖水泥漿之拌製方法

- (1) 將水泥與爐石粉置入拌合機內乾拌一分鐘。
- (2) 倒入將量好之用水量，攪拌一分鐘以形成水泥漿。
- (3) 加入椰纖維，使椰纖維與水泥漿進行攪拌二分鐘。如圖 4-2。
- (4) 將拌合完成之椰纖水泥漿倒入試體模內，試體製作完成後，靜置 24 小時後拆模。



圖 4-1 新拌橡膠水泥漿

*資料來源：本研究整理



圖 4-2 新拌纖維水泥漿

*資料來源：本研究整理

3. 纖維橡膠水泥板之製作方法

纖維橡膠水泥板之組成為：採用橡膠與水泥混合製作成橡膠水泥板，再以椰纖水泥漿做為外保護層包裹此橡膠水泥板，形成一複合式纖維橡膠水泥板，如圖 4-3 所示。

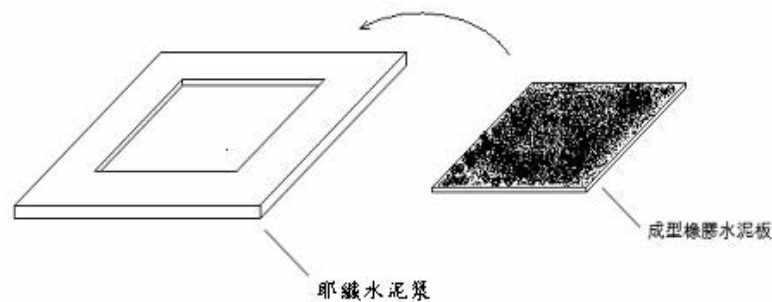


圖 4-3 纖維橡膠水泥板之組成

*資料來源：本研究整理

製作程序：

- (1) 將拌製好之椰子纖維水泥漿塗抹於橡膠水泥板任一面上，厚度為 5mm，再將塗抹椰纖水泥漿面朝下且放置在模版的正中央內，如圖 4-4 所示。
- (2) 將拌好的椰子纖維水泥漿填滿模板上層與四周邊緣，再以鏟刀飾平表面，如圖 4-5 所示。
- (3) 纖維橡膠水泥板製作完成後，靜置 24 小時後拆模。
- (4) 採用 CNS 3904 第一種試片型式(風乾狀態)放置試體，將已完成的水泥板試體以塑膠袋密封起來，於室內溫度下放置 7 天候進行各項板材

試驗。

(5) 各種試驗之纖維橡膠水泥板尺寸如圖 4-5 與圖 4-6 所示。

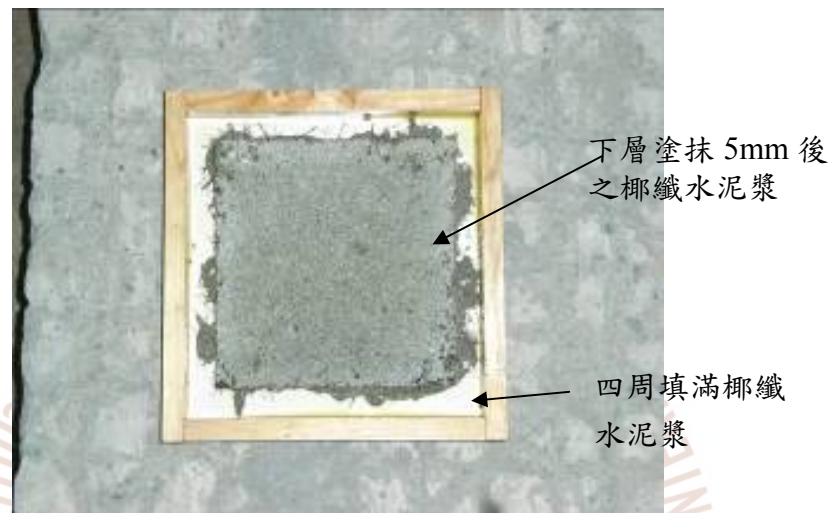


圖 4-4 橡膠水泥心材置置中於模版內

*資料來源：本研究整理

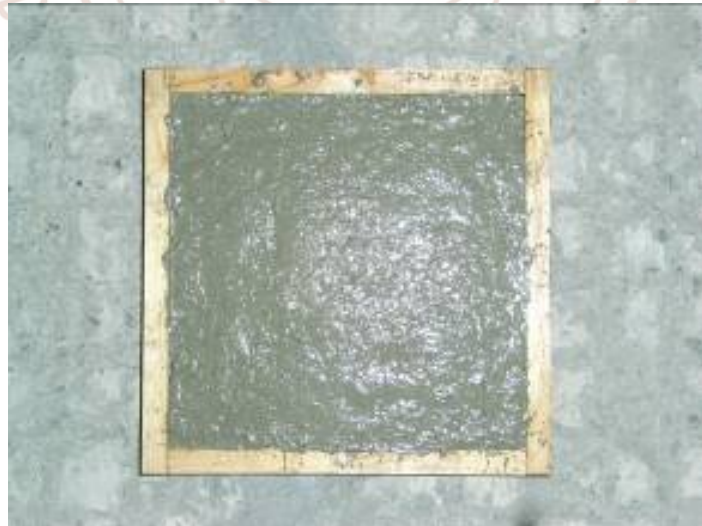


圖 4-5 製作完成之纖維橡膠水泥板

*資料來源：本研究整理

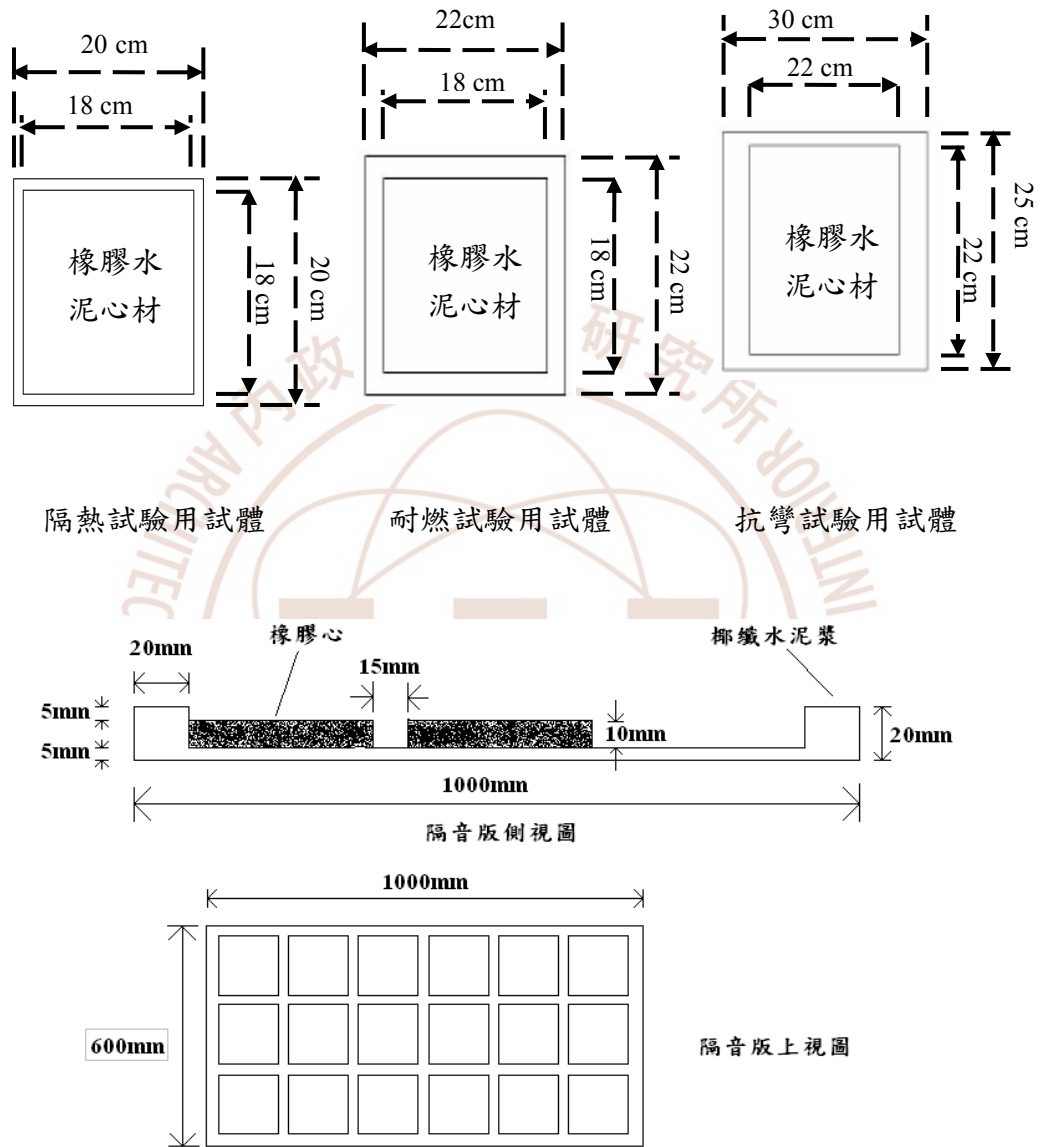


圖 4-6 各項試驗用板材之尺寸

*資料來源：本研究整理



圖 4-7 吸音試驗之纖維橡膠水泥板

*資料來源：本研究整理

第三節 試驗方法與設備

1. 比重與吸水率

依據 CNS 3802 之規定，容積比重與含水率之試驗法。使用同一纖維橡膠水泥板試片進行試驗。將試片放入附有強制循環烘箱內，在溫度 $(105\pm 5)^{\circ}\text{C}$ 下乾燥 24 小時，然後放入裝有無水氯化鈣或矽凝膠調節之乾燥器內冷卻至常溫，測其質量作為乾燥時試片之質量(W_0)，試片吸水後之質量(W_1)，測時間為試片自烘箱取出後吸水 0.5、1、2、3、6、12 與 24 小時。量測試片之寬度、長度和厚度，計算其體積(V_0)。含水率與容積比重依下式求得：

$$\text{吸水率}(\%) = \frac{W_1 - W_0}{W_0} \times 100 \quad (4-1)$$

$$\text{容積比重} = \frac{W_0}{V_0} \quad (4-2)$$

2. 抗壓試驗

抗壓強度試驗為利用 100T 萬能試驗機，最大載重為 600KN，壓力精度為 0.1KN，由下方油壓機向上加壓，再由電腦讀取。並參照 ASTM C39 規範，硬固混凝土圓柱試體抗壓試驗法進行。抗壓試驗完成後，取三個平均值表示各組試體之抗壓強度值。

3. 抗彎試驗

抗彎試驗為利用 100T 萬能試驗機，並參照 CNS 3904 規範，試片建築用板類彎曲試驗法進行，如圖 4-8 所示。試體尺寸採用第 4 種試片尺寸為 30cm×25cm，試片狀態採用風乾狀態，即試片放置於通風良好之室內風乾 7 天以上者。試驗平均載重速度為 1 至 3 分鐘內可到達預期最大載重之程度。

由下列式子計算求得

$$\text{抗彎強度} = \frac{3 \times P \times L}{2 \times W \times B^2} \quad (\text{kgf/cm}^2) \quad (4-3)$$

式中：P= 彎曲破壞載重 (kgf)

L= 板長 (cm) (= 20cm)；W= 板寬 (cm) (= 30cm)

B= 板厚 (cm) (= 2cm)

上式中 L= 20cm，W= 30cm，B= 2cm，則抗彎強度= P/4。

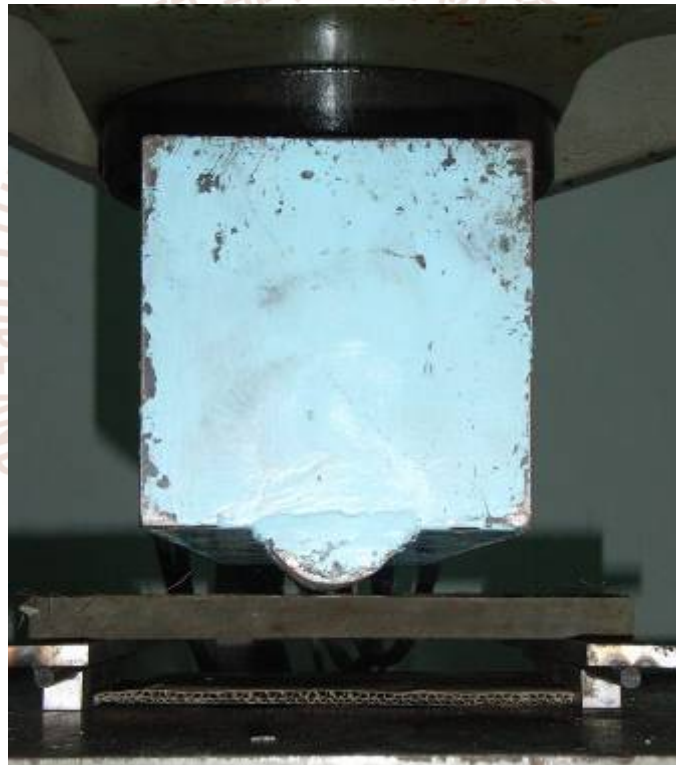


圖 4-8 纖維橡膠水泥板之抗彎試驗

*資料來源：本研究整理

4. 耐衝擊性試驗

參考 CNS 3802 規範，並依據 CNS 9961 規範，建築用板類衝擊試驗法所規定之砂上全面支承法進行，如圖 4-9 所示。使用 30cm×30cm×2cm 之纖維橡膠水泥板試體，使表面朝上保持水準，將球型重錘 W₂-500，質量約 530g，直徑約為 51mm，由高度 300mm 於試體中央部位自由落下(圖 4-10)，由距離 60cm 處以目視觀察試體之龜裂、剝離、貫穿及裂開狀態，並測量凹陷之直徑，其中龜裂是指球型重錘落下形成試體背面凸起圓周以外之龜裂。支承的砂應為通過 1.2mm 篩之乾燥狀態硬質砂，以標準砂為宜。

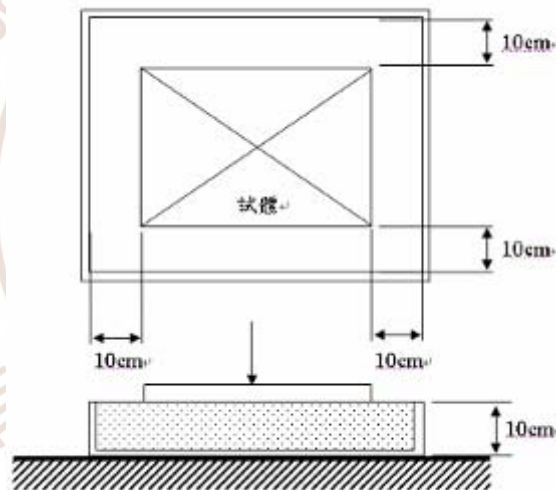


圖 4-9 砂上全面支承

*資料來源：本研究整理



圖 4-10 耐衝擊試驗裝置

*資料來源：本研究整理

5. 隔熱性試驗

竹絲水泥板砂漿板材之隔熱性試驗，依據 CNS7332，利用如圖 4-11 所示之測定裝置，隔熱材料之導熱係數測定法(平板比較法)進行。將尺寸 20cm×20cm×1cm 試體平行固定置於圖 4-11 中試樣處，測定係於溫度在穩定狀態下進行，穩定狀態之判定為使標準板(θ_1, θ_2)，試體(θ_2, θ_3)之表面溫度變動值在下述範圍內。

$$\frac{(\theta_2 - \theta_1) \text{ 之每小時變動溫}}{(\theta_2 - \theta_1)} \text{ 為 } \pm 2\%$$

$$\frac{(\theta_3 - \theta_2) \text{ 之每小時變動溫}}{(\theta_3 - \theta_2)} \text{ 為 } \pm 2\%$$

以及在標準板及試樣之兩面溫差($\theta_2 - \theta_1$, $\theta_3 - \theta_2$)於 3°C 以上之條件時作測定。完成試驗後，紀錄導熱係數，試體尺寸、密度及試體之平均溫度，其中試體密度之質量為導熱係數試驗後所測得之試體質量。熱傳導係數依下式計算求得：

$$\lambda = \lambda_0 \times \frac{L}{L_0} \times \frac{\theta_2 - \theta_1}{\theta_3 - \theta_2} \dots\dots\dots(4-4)$$

式內： λ = 試樣於平均溫度時之熱傳導係數($\text{kcal/mh}^\circ\text{C}$) { W/mk }

λ_0 = 標準板於平均溫度時之熱傳導係數($\text{kcal/mh}^\circ\text{C}$) { W/mk }

L = 試樣厚度(m)

L_0 = 標準板厚度(m)

$\theta_3 - \theta_2$ = 試樣之兩面溫度差($^\circ\text{C}$)

$\theta_2 - \theta_1$ = 試樣之兩面溫度差($^\circ\text{C}$)

$\frac{\theta_2 + \theta_3}{2}$ = 試樣之平均溫度($^\circ\text{C}$)

$\frac{\theta_1 + \theta_2}{2}$ = 標準板之平均溫度($^\circ\text{C}$)

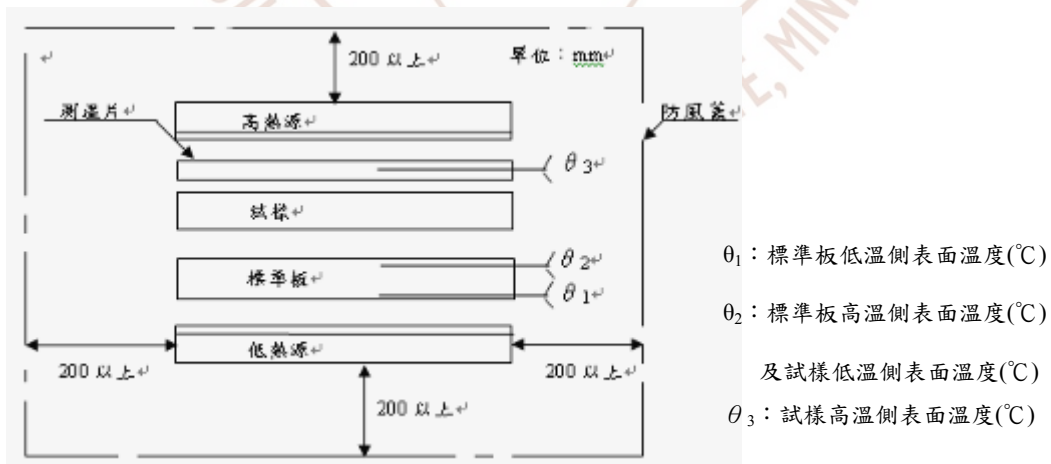


圖 4-11 隔熱材料導熱係數之測定裝置

*資料來源：本研究整理

6. 耐燃性試驗

依據 CNS 6532 規範，建築物室內裝修材料之耐燃性試驗法進行，以 $20\text{cm} \times 20\text{cm} \times 1\text{cm}$ 之耐燃性試體進行測試。試體完成後，須置放於通風良好室內一個月以上，再放入 $35 \sim 45^\circ\text{C}$ 烘箱內乾燥 24 小時以上後，立即放入乾燥器養護 24 小時以上，進行調濕處理。試驗之前，先以標準石棉水泥真珠岩板檢定儀器之準確性。將試體放入加熱爐，依 CNS 6532 耐燃二級之規定進行 10min 之加熱燃燒試驗，測驗燃燒過程之排器溫度變化曲線，煙霧濃度變化曲線，於加熱時間結束時，隨即觀察板材餘焰延燒時間，以及貫穿板材試體背面之裂縫寬度，作為評估之依據。

耐燃性之評定係按照 CNS 6532 標準所規定之建築物室內裝修材料耐燃性物質試驗法。竹絲水泥砂漿板材之耐燃性試驗為建築材料表面試驗裝置。各種處理試體耐燃性能之評定與分級，進行表面燃燒試驗所測得知著火性、發熱性、發煙係數、餘焰時間及試體背面龜裂現象等相關數值，均需符合 CNS 6532 各耐燃級別判定標準始為合格，並依序敘述如下：

1. 著火性(Ignitability)：即試體燃燒實驗之排器溫度區現超過標準溫度所需之時間(t_c)，由於 t_d0 是由此點計算起，故可將 t_c 視為試體表面開始發熱之前所經過的時間(sec)，用來表示試體之著火性或著火難易性， t_c 值越大，表示試體越不容易燃燒。
2. 發熱性(Heat generation)：當進行耐燃性實驗時，著火後之排器溫度曲線與標準溫度曲線所包圍部份之面積(t_d0)， t_d0 值越大，表示試體燃燒所產生之熱量越大，耐燃 2 級為 100 以下，耐燃 3 級為 350 以下。
3. 發煙係數(Fuming factor)：即試體加熱燃燒期間，單位面積最大的發煙量(C_A)；耐燃 1 級為 30 以下，耐燃 2 級為 60 以下，耐燃 3 級為 120 以下。
4. 餘焰時間(After flaming)：是指加熱結束後，試體表面持續焰燃的時間(t_l)，用來表示自熄性； t_l 值越大，表示試體自熄性越差。
5. 龜裂性(Cracking)：即耐燃性試驗後 $hoih$ ，觀測試體背面有無明顯貫穿板材全厚之裂縫發生，貫穿試體背面之裂縫寬度(ck)必須小於試體厚度之 $1/10$ 。

7. 隔音性試驗

建築構件的隔音試驗的標準方法共有兩種，一為音壓法(Sound pressure method)隔音試驗，另一為音強法(Sound intensity method)隔音試驗。一般最常使用的隔音試驗為音壓法，因該試驗原理簡單，試驗過程快速，且其結果亦獲得一致公認。音強法係較新的試驗方法，其量測原理較音壓法複雜，試驗步驟較為繁瑣，使用之設備亦較為昂貴，故該法不若音壓法廣受大眾熟悉。

音壓法之試驗設備須採用兩間室容積相差 10% 以上的餘響室進行試驗，其中一側為音源室(Source Room)另一側為受音室(Receiving Room)，一般而言室容積較小的一間作為音源室，而另一間作為受音室。為避免外界的震動傳入實驗室內影響量測結果，兩間餘響室之地板皆以避震彈簧與建築物之地面分離，而兩餘響室間僅由一道 3.5m*3.0m 之開口連接，此預留開口作為安裝試件之用。試件之安裝必須盡量依照現場施工之步驟進行。本研究之試驗框架尺寸為 3.5m*3.0m。依據 ISO 標準之試驗規範，音壓法隔音試驗的原理係量測音源室及受音室間的音壓差值，其關係式為：

$$R = L_1 - L_2 + 10 \log \frac{S}{A} \quad \dots\dots\dots(4-5)$$

其中：

R=試件隔音指標(Reduction Index)，或穿透損失(Transmission Loss)

L_1 =音源室的平均音壓位準，單位 dB；

L_2 =受音室的平均音壓位準，單位 dB；

S=試件的面積，單位為 m^2 ，其大小等同於自由測試開口；

A=受音室的等值吸音面積，為 $0.16V/T$ ，單位 m^2 ；等效吸音面積之計算公式中 V 為受音室內容積($250m^3$)，T 為受音室的餘響時間。

音壓法試驗步驟：

1. 完成試件安裝與確認後(試驗安裝框架如圖 4-12 所示)，將試件送入實驗室內靜待 24 小時，使試件溫度與實驗室空調溫度達平衡。
2. 依照 ISO140-3 第 6.2.2 節之規定架設麥克風及音源，其架設規定為：音源及麥克風距牆面至少 0.7m 以上，麥克風距音源及試件至少 1.0m 以上。音源室及受音室各放 5 支麥克風及一組音源，其擺放位置皆須依照 ISO 規定之距離架設。
3. 各項量測安裝完成之後，首先必須進行麥克風音壓位準校正，校正方式係使用麥克風校正器逐一檢查麥克風之量測值。
4. 設定量測頻率範圍(一般使用的範圍為 100Hz~5000Hz)及背景噪音、聲壓位準、餘響時間的量測次數。
5. 依序完成各量測步驟與產生試驗報告。



圖 4-12 隔音牆試驗安裝框架

*資料來源：本研究整理

8. 煙毒性試驗

煙毒性試驗為依據英國海軍工程標準 NES 713 之規範進行，其適用範圍為各類材料燃燒生成物之毒性濃度。評估判定項目為，依有毒氣體成份分析決定材料燃燒產生之毒性指數(Toxicity Indexes)。NES 煙毒性試驗裝置如圖 4-13 所示。



圖 4-13 NES 煙毒性試驗裝置

*資料來源：防火實驗室提供



第五章 結果分析與討論

第一節 纖維橡膠水泥板組成材料之基本性質

一、心材—橡膠水泥漿

1. 工作性

由試驗中發現，當橡膠含量增加時，橡膠水泥漿之工作性隨之降低。雖然橡膠顆粒並不吸水，但其表面會附帶水份，以至於造成水泥漿之工作性變差。尤其是當橡膠佔總體積含量達 50%時(試體 C5-R50)，幾乎呈現不流動狀態，工作性表現非常差，但試體仍可成型，如圖 5-1 所示。



圖 5-1 心材-橡膠水泥板

*資料來源：本研究整理

2. 比重

橡膠水泥漿與椰纖水泥漿之比重試驗結果，如表 5-1 所示。由表可知，橡膠水泥漿之乾比重約為 1.18-1.36 之間，橡膠含量增加而減小(圖 5-1)。當橡膠含量由 30 %增加至 40 %與 50 %時，橡膠水泥漿之比重分別減小 5 %與 16 %。而椰纖水泥漿之椰纖含量為 15 %，其比重約為 1.56。

表 5-1 橡膠與椰纖水泥漿試體之比重

項目 \ 橡膠含量	30%	40%	50%
橡膠水泥漿	1.36	1.29	1.18
椰纖體積	15%		
椰纖比重	1.56		

*資料來源：本研究整理

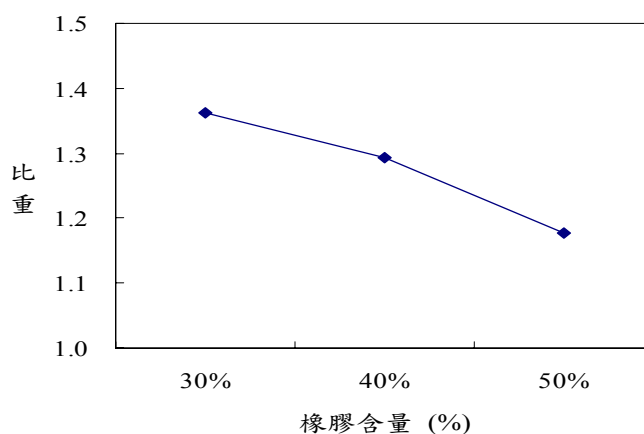


圖 5-2 橡膠含量與水泥漿比重之關係

*資料來源：本研究整理

3. 吸水率

橡膠含量為 30%、40%與 50% (C5-R30、C5-R40 與 C5-R50)試體，於齡期 3 天與 7 天之吸水率，分別如表 5-2 與圖 5-3 至圖 5-5 所示。吸水率試驗之量測時間分別為 0.5、1、2、3、6、12、24 小時，共 7 個時間點。由表 5-2 可得，當橡膠含量為 30%，且齡期 3 天時，初始 0.5 小時之吸水率為 12.2%，經過 24 小時候之吸水率達 21.4%左右。而齡期為 7 天時，初始 0.5 小時的吸水率較 3 天時低，約為 7.1%，吸水 24 小時候，吸水率約為 16.2%，而齡期 28 天時，初始 0.5 小時之吸水率為 7.9%，經吸水 24 小時後，吸水率約為 16.6%。橡膠含量為 40%，且齡期 3 天時，初始 0.5 小時之吸水率為 10%，經過 24 小時候之吸水率達 19.3%左右。而齡期為 7 天時，初始 0.5 小時之吸水率為 11%，經吸水 24 小時後，吸水率約為 18.1%，而齡期 28 天時，初始 0.5 小時之吸水率為 7.87%，經吸水 24 小時後，吸水率約為 14.9%。而橡膠含量為 50%，且齡期 3 天時，初始 0.5 小時之吸水率約為 11%，經過 24 小時候之吸水率約達 18.6%左右。齡期為 7 天時，初始 0.5 小時之吸水率較 3 天時低，約為 8.1%，經吸水 24 小時候，吸水率約為 15.2%。而齡期 28 天時，初始 0.5 小時之吸水率為 6.71%，經吸水 24 小時後，吸水率約為 13.5%。另由圖 5-3 至圖 5-5 可看出，無論橡膠含量多寡，各組橡膠水泥漿之吸水率均以前 0.5 小時之吸水率最快速，約為 24 小時吸水率之 44% -61%；而吸水達 6 小時候，板材之吸水率則逐漸趨於穩定。此外，由不同橡膠水泥漿之吸水率歷時曲線(圖 5-6)可知，橡膠水泥漿之吸水率以橡膠含量為 50%者最小，而以 40%含量者最大；三者相差約於 15%以內。

另一方面，由橡膠水泥板(200 × 200 × 10 mm)吸水後之尺寸變化率(圖 5-7)可知，板材吸水後尺寸之變化主要為厚度的增加，約為 1.5 % - 2 %；而總體

積增加率約為 1.7% - 2.3%。

表 5-2 橡膠水泥漿之吸水率 (%)

吸水時間 編號		0.5 hr	1 hr	2 hr	3 hr	6 hr	12 hr	24 hr
C5-R30	3 天	12.22	15.17	17.25	18.03	19.15	20.15	21.37
	7 天	7.05	8.82	11.05	12.34	14.38	15.07	16.20
	28 天	7.29	8.78	10.45	11.75	13.80	15.31	16.60
C5-R40	3 天	10.03	12.17	13.98	15.1	16.42	17.72	19.34
	7 天	11.01	12.56	13.89	14.63	15.35	16.46	18.06
	28 天	7.87	8.89	10.23	11.25	12.60	13.62	14.87
C5-R50	3 天	10.90	12.39	13.84	14.91	15.84	16.83	18.59
	7 天	8.11	9.50	11.03	11.72	12.89	14.14	15.17
	28 天	6.71	7.95	9.34	10.17	11.62	12.56	13.45

*資料來源：本研究整理

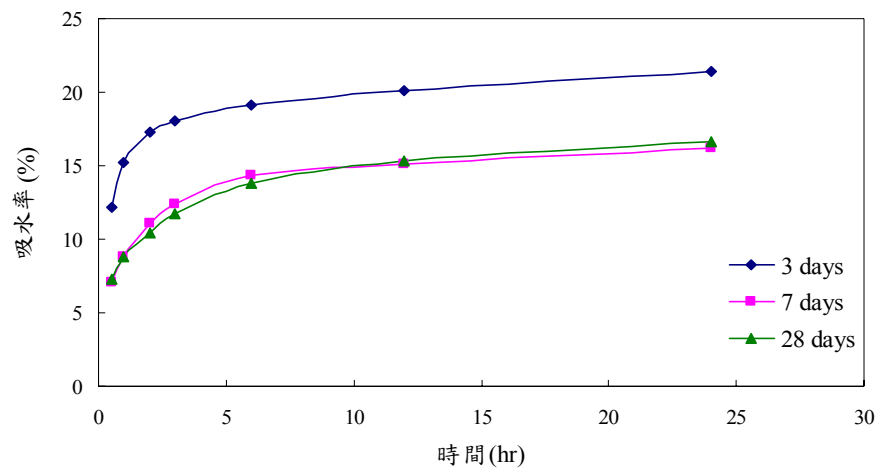


圖 5-3 橡膠含量 30%之水泥漿吸水率歷時曲線(C5-R30)

*資料來源：本研究整理

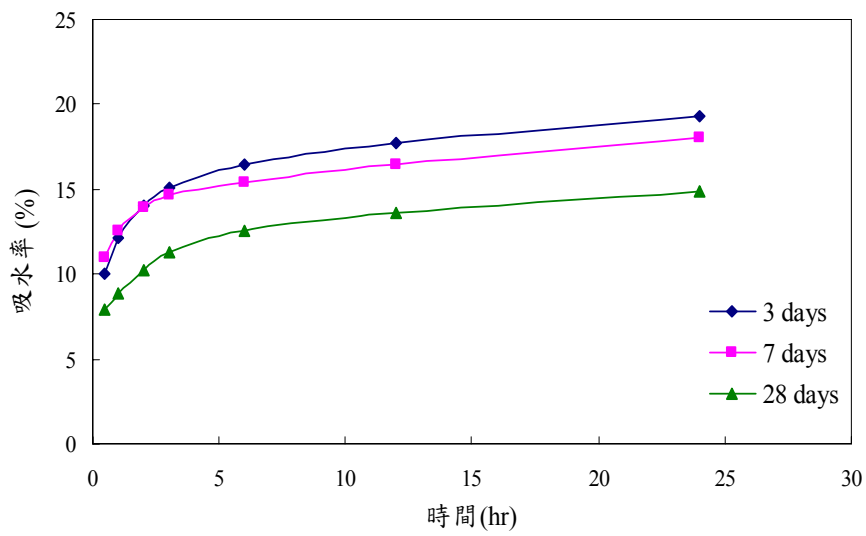


圖 5-4 橡膠含量 40%之水泥漿吸水率歷時曲線(C5-R40)

*資料來源：本研究整理

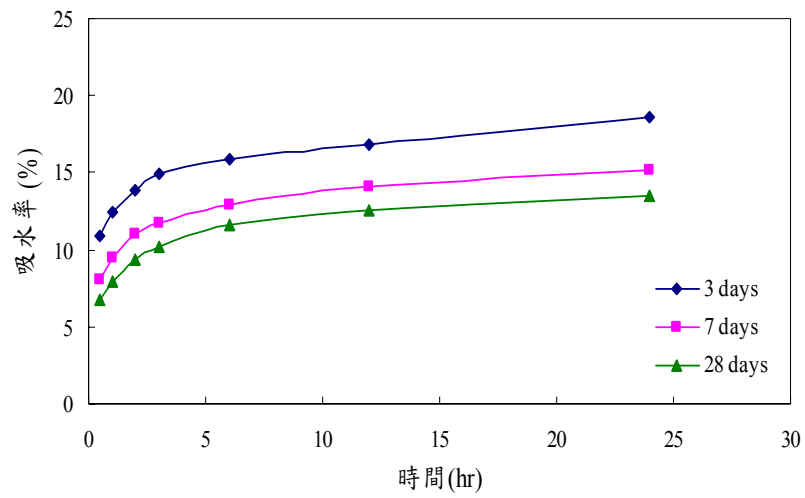


圖 5-5 橡膠含量 50%之水泥漿吸水率歷時曲線(C5-R50)

*資料來源：本研究整理

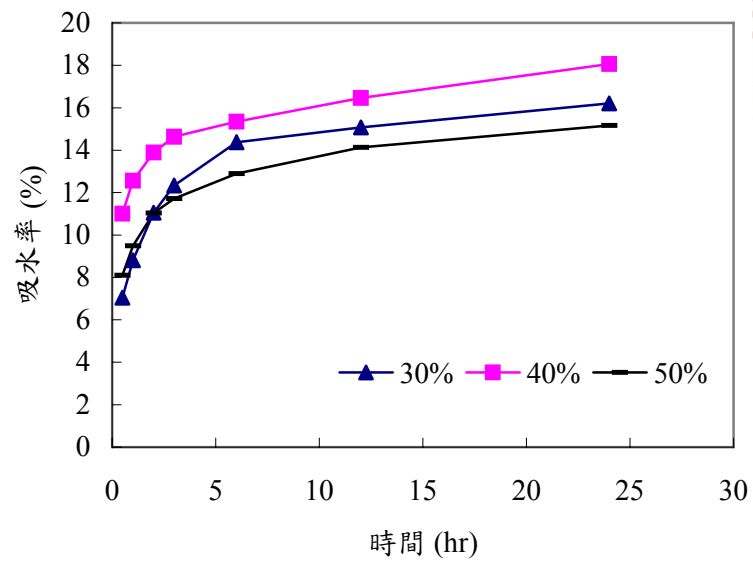


圖 5-6 不同橡膠含量之水泥板吸水率歷時曲線 (7 天)

*資料來源：本研究整理

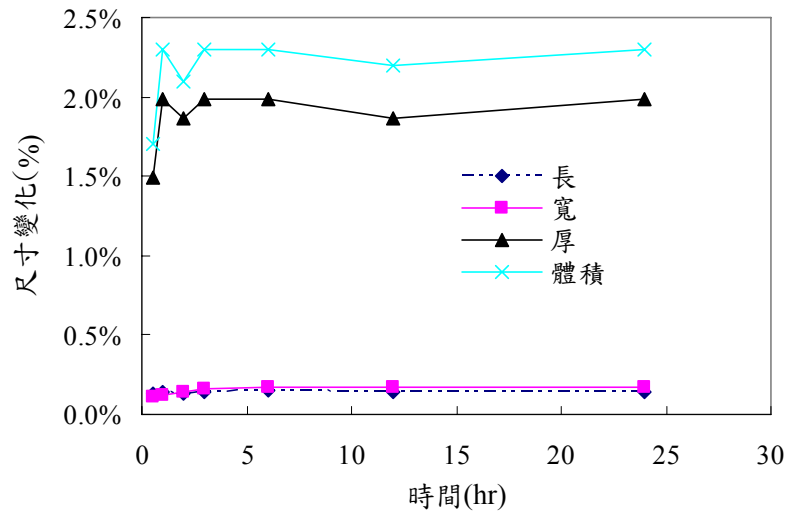


圖 5-7 橡膠板吸水後之尺寸變化率

*資料來源：本研究整理

4. 抗壓強度

圖 5-8 為橡膠水泥漿試體之橡膠含量與抗壓強度關係圖。由圖 5-8 可看出，橡膠水泥漿試體之抗壓強度隨著橡膠含量增加而減少，且因齡期增加而增加。各組試體齡期 3 天、7 與 28 天之抗壓強度平均值，分別為 10 - 38 kgf/cm^2 、14 - 46 kgf/cm^2 與 22 - 81 kgf/cm^2 。當橡膠含量由 30 % 增至 40 % 與 50 % 時，橡膠水泥漿試體之抗壓強度分別減少 43 % - 73 % 與 47 % - 69 %。由此可知，當使用高橡膠含量時，水泥漿試體抗壓強度因橡膠量增加而折減之比例甚大。但本研究之主要目標並非為抗壓強度，而在於質輕、隔熱與耐燃，因此仍採用高橡膠含量製作板材。

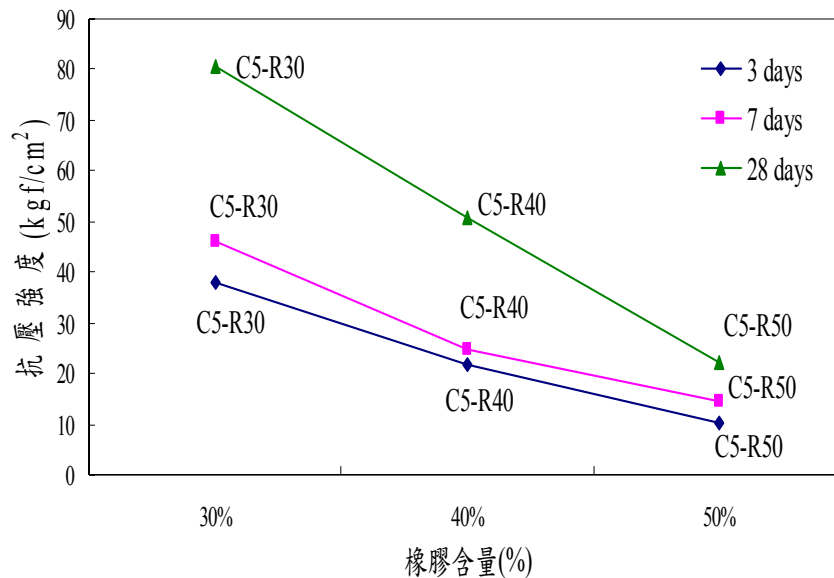


圖 5-8 橡膠含量與橡膠水泥漿試體抗壓強度之關係

*資料來源：本研究整理

5. 抗彎強度

橡膠水泥漿試體於不同齡期，橡膠含量與抗彎強度之關係，如圖 5-9 所示。而橡膠水泥漿試體抗彎強度與橡膠含量之關係，如同抗壓強度者。亦即橡膠水泥漿試體之抗彎強度隨著橡膠含量增加而減少。各組試體齡期 3 天、7 天與 28 天之抗彎強度平均值，分別為 $8.3 - 16.6 \text{ kgf/cm}^2$ 、 $8.6 - 18 \text{ kgf/cm}^2$ 與 $10.7 - 18.3 \text{ kgf/cm}^2$ 。當橡膠含量由 30 % 增至 40 % 與 50 % 時，橡膠水泥漿試體之抗壓強度分別減少 15 % - 50 % 與 17 % - 52 %。此抗彎強度隨校交含量增加而減小之情形，相較於抗壓強度者則較小。由此顯示，因橡膠含量增加所導致之強度降低，對抗彎強度之影響較小。

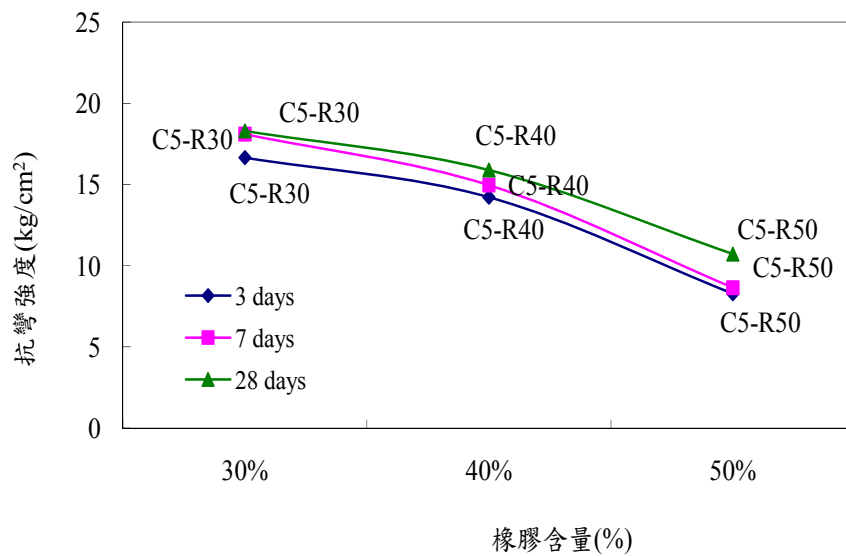


圖 5-9 橡膠含量與橡膠水泥漿試體抗彎強度之關係

*資料來源：本研究整理

6. 楊氏模數與柏松比

表 5-3 為橡膠水泥橡膠體積含量 30%及 40%的楊氏模數 E 值與柏松比 ν 值。可由表 5-3 中看到橡膠水泥橡膠含量為 30%時，楊氏模數為 4.16GPa，柏松比為 0.21。橡膠含量為 40%時，楊氏模數為 4.29GPa，柏松比為 0.30。而橡膠含量 50%及椰纖維試體由於試驗過程中，試體表面粗糙且呈現帶有細粉狀態，因此應變片的變形在試體進行試驗過程中無法與試體的變形一致，所以無法量測橡膠水泥的楊氏模數值與柏松比。

表 5-3、楊氏模數與柏松比

	E 值	ν 值
30%	4.16GPa	0.21
40%	4.29GPa	0.30

*資料來源：本研究整理

二、 包覆材—椰纖水泥漿

1 工作性

椰纖水泥漿之水膠比為 0.4，椰纖含量為 15%(體積比)，並添加適量之強塑劑以調整工作。由於椰纖水泥漿主要用於包覆橡膠水泥板，其流動性要求不須太高，但椰纖分佈須均勻，且不可有團聚或析離之情形。由新拌之椰纖水泥漿可發現，椰纖與水泥漿之黏結情形良好，未發生析離或團聚之情形，如圖 5-10 所示。



圖 5-10 新拌之椰纖水泥漿

*資料來源：本研究整理

2. 比重

椰纖水泥漿之比重約為 1.56，如表 4-1 所示。對於纖維水泥板而言，目前本研究製作之椰纖水泥板比重仍嫌太大。日後，若欲降低椰纖水泥板之比重，應可再增加椰纖之用量，或減少水泥量。

3. 抗壓強度

椰纖水泥漿試體之抗壓強度約為 125-286 kgf/cm² (表 5-4)，相較於橡膠水泥漿者大出許多，約高出 3-12 倍。

4. 抗彎強度

椰纖水泥漿試體之抗彎強度約為 37 - 41 kgf/cm² (表 5-5)，同樣較橡膠水泥漿者大出許多，約高出 2.2-4.6 倍。

表 5-4 椰纖水泥漿試體之比重與強度

齡期	比重	抗壓強度 (kgf/cm ²)	抗彎強度 (kgf/cm ²)
3 天	1.56	125	37.3
7 天		129	39.8
28 天		286	41.8

*資料來源：本研究整理

5. 吸水率

椰纖水泥漿試體之吸水率試驗結果，如表 5-5 所示。吸水率試驗之量測時間分別為 0.5、1、2、3、6、12、24 小時，共 7 個時間點。由表 5-5 可得，當椰纖含量為 15% 時，初始 0.5 小時之吸水率為 6.23% - 7.35%，經過 24 小時候之吸水率達 17.37% - 15.06% 左右。此外，由吸水率之歷時曲線(圖 5-11)可看出，椰纖水泥漿之吸水率以前 0.5 小時之吸水率最快速，約為 24 小時吸水率之 42%；而吸水達 6 小時候，板材之吸水率則逐漸趨於穩定。

表 5-5 椰纖水泥板之吸水率(%)

吸水時間		0.5 hr	1 hr	2 hr	3 hr	6 hr	12 hr	24 hr
F15	7 天	7.35	10.01	11.97	12.91	14.18	16.1	17.37
	28 天	6.23	8.15	9.79	10.53	11.79	13.77	15.06

*資料來源：本研究整理

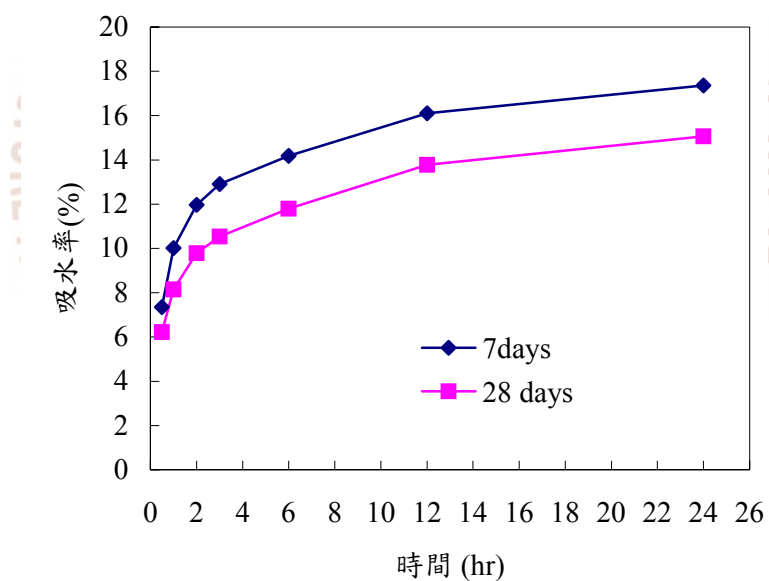


圖 5-11 椰纖水泥板之吸水率歷時曲線

*資料來源：本研究整理

第二節 纖維橡膠水泥板之物理性質

1. 比重

纖維橡膠水泥板比重之試驗結果如表 5-6 所示。由表可知，纖維橡膠水泥板內心材之橡膠含量為 30%、40%與 50%時，其比重分別為 1.48、1.46 與 1.40。此結果顯示，纖維橡膠水泥板之比重大於 CNS 3802 纖維水泥板之比重規格；而一般市售之水泥板比重約為 1.2 -1.4，因此本研究製作之纖維橡膠水泥板仍須再降低板材之比重。而纖維橡膠水泥板比重過大之原因，主要來自於包覆材，即椰纖水泥漿之比重；若能降低其比重，則纖維橡膠水泥板之比重即可減小。由試驗之過程可得，若於椰纖水泥漿中增加椰纖含量或添加適量之發泡劑，應即可減低其比重。

表 5-6 纖維橡膠水泥板之比重

試體 編號	C5R30	C5R40	C5R50
比重	1.48	1.46	1.40

*資料來源：本研究整理

2. 吸水率

纖維橡膠水泥板於室內環境中之吸水率約為 5 % - 6 %，而其 24 小時內之吸水率試驗結果，如表 5-7 所示。各組纖維橡膠水泥板於 24 小時之吸水率，分別約為 13.8% - 15.4%之間，而橡膠含量愈大，其吸水率愈大，但橡膠含量 40%與 50%者差距甚小。另由纖維橡膠水泥板之吸水率歷時曲線可發現，其

吸水之情形主要發生於前 3 小時，如圖 5-12 所示。由圖可知，纖維橡膠水泥板前 3 小時之吸水率已約為 24 小時之 60%，而前 0.5 小時之吸水率約為 24 小時之 40% - 50%。

表 5-7 纖維橡膠水泥板之吸水率(%)

試體 編號	0.5hr	1 hr	2 hr	3 hr	6 hr	12 hr	24 hr
C5R30	5.69	6.76	7.77	8.64	10.13	11.87	13.84
C5R40	7.05	8.45	9.62	10.43	11.84	13.70	15.24
C5R50	7.79	8.86	9.97	10.75	12.38	14.41	15.44

*資料來源：本研究整理

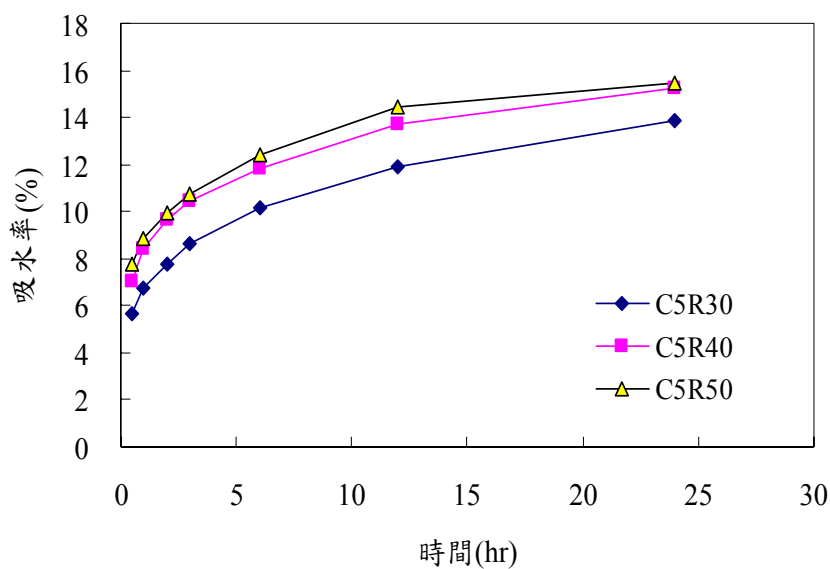


圖 5-12 纖維橡膠水泥板之吸水率歷時曲線

*資料來源：本研究整理

第三節 纖維橡膠水泥板之力學性質

1. 抗彎強度

各組橡膠水泥板之彎曲試驗結果，如表 5-8 所示。由表顯示，無論心材之橡膠含量多寡，纖維橡膠水泥板之彎曲破壞載重或抗彎強度各約為 80 kgf 或 20 kgf/cm²。而橡膠心材之抗彎強度約 9-18 kgf/cm²，椰纖水泥板約為 40 kgf/cm²。由此可知，以椰纖水泥漿包覆橡膠心材後，纖維橡膠水泥板之抗彎強度介於兩種材料之間，較心材之橡膠板約提升 10% - 136%，而約為椰纖水泥板之 50%。依 CNS 3802 纖維水泥板之性能規定，1.0 纖維水泥板(容積比重大於 0.9，小於 1.2)厚度 10 mm 板材抗彎強度須大於 55 kgf。而本研究之纖維橡膠水泥板容積比重為 1.4，厚度為 20 mm，因此無法對照 CNS 3802 之標準。

另一方面，由抗彎試體之破壞情形可發現，試體破壞時若發生包覆材之椰纖水泥漿與心材之橡膠板兩者剝離情形，如圖 5-13 與圖 5-14 所示，則纖維橡膠水泥板之抗彎強度將降低許多(約僅 40 kgf)。因此，本研究於製作纖維橡膠水泥板時，先以毛刷清除心材橡膠板表面之粉塵，並於椰纖水泥漿包覆後，震動板材且於上表面加壓，以消除兩者間之孔隙。如此製成之纖維橡膠水泥板於抗彎試驗後，已較無兩種材料剝離之情形發生。抗彎試體破壞後，板材之表面裂縫與兩種材料之界面，如圖 5-15 與圖 5-16 所示

表 5-8 纖維橡膠水泥板之抗彎強度

試體編號	彎曲破壞載重 P (kgf)	抗彎強度 (kgf/cm ²)
C5-B30	80	20.0
C5-B40	83	20.8
C5-B50	81	20.3

*資料來源：本研究整理



圖 5-13 包覆材-椰纖水泥漿與心材-橡膠板兩者剝離之情形 (I)

*資料來源：本研究整理



圖 5-14 包覆材-椰纖水泥漿與心材-橡膠板兩者剝離之情形 (II)

*資料來源：本研究整理



圖 5-15 纖維橡膠水泥板抗彎破壞之情形(I)

*資料來源：本研究整理

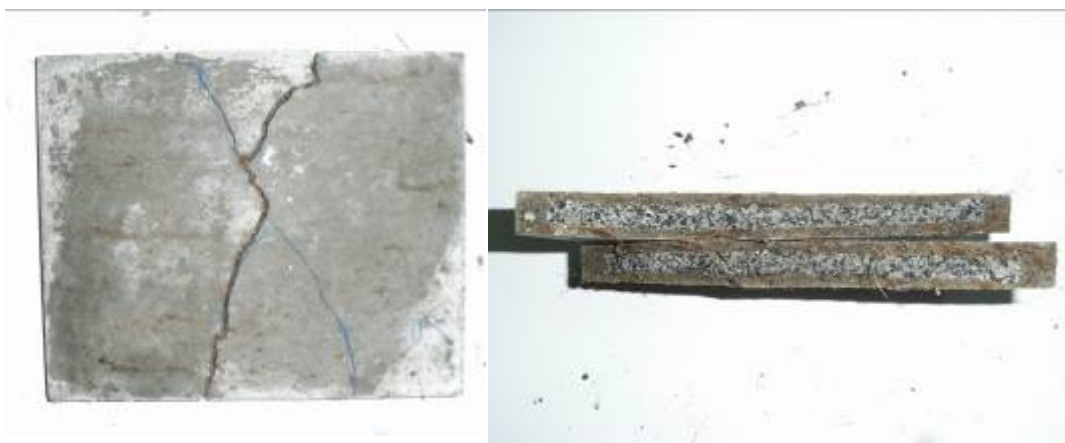


圖 5-16 纖維橡膠水泥板抗彎破壞之情形 (II)

*資料來源：本研究整理

2. 抗衝擊能力

由於椰纖維具有較水泥質材料佳之韌性，當纖維橡膠水泥板在受到外來之衝擊力作用時，椰纖可吸收衝擊能量，使水泥板之破壞降低。一般而言，當纖維橡膠水泥板受到高處落球的衝擊作用時，球落下之位能差將被板材吸收與分散為應變能。由於板材本身元素內應力的發展，導致凹陷與裂縫的產生。而板材之裂縫範圍多寡與衝擊能量大小、吸收能量，以及板內心材(橡膠板)之性質有關。本計劃利用的單次落錘衝擊試驗，用以評估各組纖維橡膠水泥板之相對的耐衝擊性能，並探討纖維橡膠水泥板之抗衝擊能力。

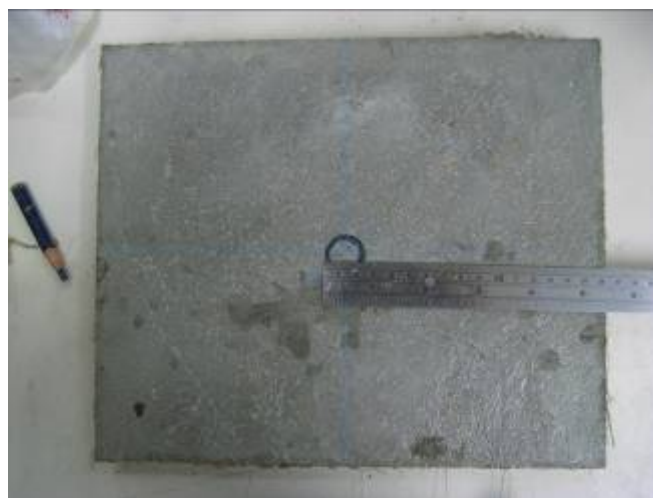
各組纖維橡膠水泥板之衝擊試驗結果如表 5-9 所示。當橡膠含量分別為 30%、40%與 50%時，纖維橡膠水泥板之衝擊凹陷直徑均為 24 mm。由此可知，橡膠心材之橡膠含量並不影響板才受衝擊凹陷之直徑。另由衝擊試驗後之板材可發現，無論橡膠含量多寡，纖維橡膠水泥板均出現明顯的凹痕，板材背面亦可看出隆起之情形，以及沿著凸面延伸出之裂縫，圖 5-17－圖 5-19

所示。由以上之試驗結果可知，纖維橡膠水泥板之抗衝擊性主要由外層之椰纖水泥板所提供，內部之橡膠板似乎影響不大，此部分需再進一步探討。

表 5-9 纖維橡膠水泥板之衝擊試驗結果

試體編號	凹陷直徑 (mm)	備註	
		板材正面	板材背面
C5R30	24	無龜裂、剝離貫 穿孔與裂開 凹陷	不明顯凸起，並沿著凸 面延伸出微小裂縫
C5R40	24	無龜裂、剝離貫 穿孔與裂開 凹陷	不明顯凸起，並沿著凸 面延伸出微小裂縫
C5R50	24	無龜裂、剝離貫 穿孔與裂開 凹陷	不明顯凸起，並沿著凸 面延伸出裂縫

*資料來源：本研究整理



衝擊正面



衝擊背面

圖 5-17 C5R30 衝擊試驗後之情形

*資料來源：本研究整理



衝擊正面



衝擊背面

圖 5-18 C5R40 衝擊試驗後之情形

*資料來源：本研究整理



衝擊正面



衝擊背面

圖 5-19 C5R50 衝擊試驗後之情形

*資料來源：本研究整理

第四節 纖維橡膠水泥板之熱學性質

1. 耐燃性

本計劃為節省試驗資源，分別進行橡膠含量為 40%與 50%水泥板之耐燃三級試驗，以及橡膠含量為 50%水泥板之耐燃二級試驗。試驗方法依據 CNS 6532 試驗法進行，耐燃三級加熱時間為 6 分鐘，耐燃二級則為 10 分鐘。各組纖維橡膠水泥板之耐燃性試驗情形，如圖 5-20 所示；試驗結果如表 5-10 所示與表 5-11；而耐燃試驗後板材之表面情形如圖 5-21 ~ 圖 5-23 所示。由耐燃試驗後板材之表面觀察可知，各組試體受熱面均無貫穿全厚之熔化，以及有礙防火性能之變形；試體背面亦無龜裂與無明顯之變形發生。符合 CNS 6532 耐燃三級與耐燃二級之規定。另一方面，試驗標準板與纖維橡膠水泥板之排氣溫度曲線，如圖 5-23 ~ 圖 5-25 所示。由圖可知，纖維橡膠水泥板之排氣溫度曲線均未超過標準溫度曲線；並且溫度時間面積($t d\theta$)、餘焰時間均為 0，發煙係數為 0 與 2。此外，背面空間溫度為 12°C -13°C，以及 33°C，加熱重量損失為 20.14 g、20.34 g 與 53.34 g。由以上之纖維橡膠水泥板耐燃性試驗結果可得，本研究製作之各組纖維橡膠水泥板符合 CNS 6532 建築物室內裝修材料耐燃三級與耐燃二級之要求，屬於耐燃二級之建材。

表 5-10 纖維橡膠水泥板耐燃三級試驗結果

實 驗 名 稱		CNS 6532 「建築物室內裝修材料之耐燃性試驗法」-表面試驗法	
樣 品 名 稱		纖維橡膠水泥板	
實 驗 日 期		97年11月10日	
前 置 處 理		40℃烘箱：24小時	矽凝膠乾燥器：70小時
實 驗 環 境		室內溫度：27℃	室內濕度：46%
加 熱 源		丙烷流量：350ml/min	石英加熱管熱量：1.5kW
樣 品 基 本 資 料	樣 品 序 號	F0897011-1	F0897011-2
	長(mm)×寬(mm)	220×220	220×220
	厚 度 (m m)	21.36	21.78
	實驗前重量 (g)	1626.93	1641.31
	實驗後重量 (g)	1606.79	1620.97
實 驗 結 果	加 熱 時 間 (分)	6	6
	排氣溫度曲線超過 標準板排氣溫度曲 線 t c (分 / 秒)	未超過標準溫度曲線	未超過標準溫度曲線
	上述兩曲線所圍溫 度時間面積 t d θ (° C · 分)	0	0
	發煙係數 (C A)	0	0
	餘 焰 時 間 (秒)	0	0
	是否有貫穿試體全 厚之熔化及有害的 變 形	未產生貫穿樣品全厚之熔化及有礙 防火性能的變形	未產生貫穿樣品全厚之熔化及有礙 防火性能的變形
	試體背面是否龜裂 及裂隙寬度(mm)	未產生龜裂	未產生龜裂
	加 熱 失 重 (g)	20.14	20.34
	背面空間溫度(°C)	13	12
	備 註	本案委託單位僅提供纖維橡膠水泥板2片進行耐燃三級測試。	
實 驗 操 作 人		專案助理 詹家旺	報 告 簽 署 人
			副任研究員 蔡銘儒 兼主任

*資料來源：本研究整理

表 5-11 纖維橡膠水泥板耐燃二級試驗結果

實 驗 名 稱		CNS6532 耐燃性試驗結果紀錄表	
樣 品 名 稱		廢輪胎橡膠混凝土板	
實 驗 日 期		97年12月04日	
前 置 處 理	40°C烘箱：24小時	矽凝膠乾燥器：24小時	
實 驗 環 境	室內溫度：24°C	室內濕度：46%	
加 熱 源	丙烷流量：350ml/min	石英加熱管熱量：1.5kW	
樣 品 基 本 資 料	樣 品 序 號	F0897015	
	長(mm)×寬(mm)	220×220	
	厚 度 (m m)	21.227	
	實 驗 前 重 量 (g)	1466.55	
	實 驗 後 重 量 (g)	1413.21	
實 驗 結 果	加 熱 時 間 (分)	10	
	排氣溫度曲線超過標準板排氣溫度曲線 t c (分 / 秒)	未超過標準溫度曲線	
	上述兩曲線所圍溫度時間面積 t d θ (° C · 分)	0	
	發 煙 係 數 (C A)	2	
	餘 焰 時 間 (秒)	0	
	是否有貫穿試體全厚之熔化及有害的變形	未產生貫穿樣品全厚之熔化及有礙防火性能的變形	
	試體背面是否龜裂及裂隙寬度(mm)	未產生龜裂	
加 熱 失 重 (g)	53.34		
背 面 空 間 溫 度 (° C)	33		
備 註	本案委託單位僅提供廢輪胎橡膠混凝土板1片進行耐燃二級測試。 10分鐘		
實 驗 操 作 人		專案助理 詹家旺	報 告 簽 署 人
			主任 蔡銘儒

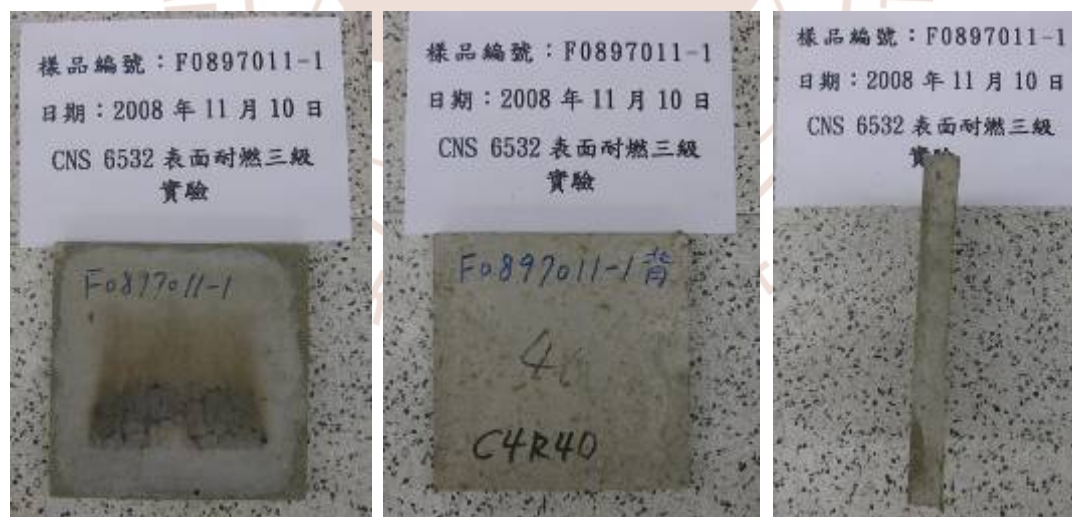
*資料來源：本研究整理

廢輪胎橡膠混凝土應用於建築隔熱吸音牆板之研究



圖 5-20 耐燃性試驗情形

*資料來源：本研究整理



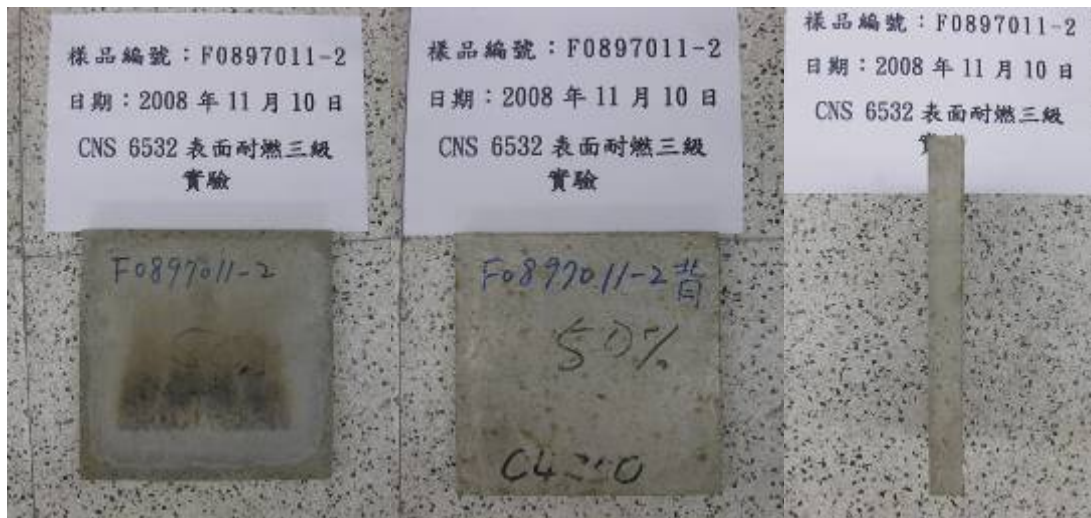
受熱面

背面

側面

圖 5-21 耐燃 3 級試驗後之纖維橡膠水泥板—橡膠含量 40%

*資料來源：本研究整理



受熱面

背面

側面

圖 5-22 耐燃試驗後之纖維橡膠水泥板—橡膠含量 50%

*資料來源：本研究整理



圖 5-23 耐燃 2 級試驗後纖維橡膠水泥板之受熱面—橡膠含量 50%

*資料來源：本研究整理

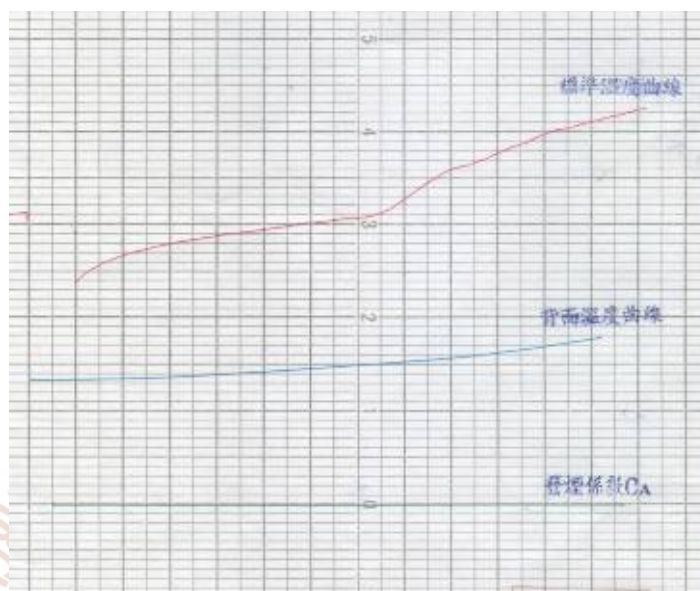


圖 5-24 標準板耐燃三級試驗曲線圖

*資料來源：本研究整理

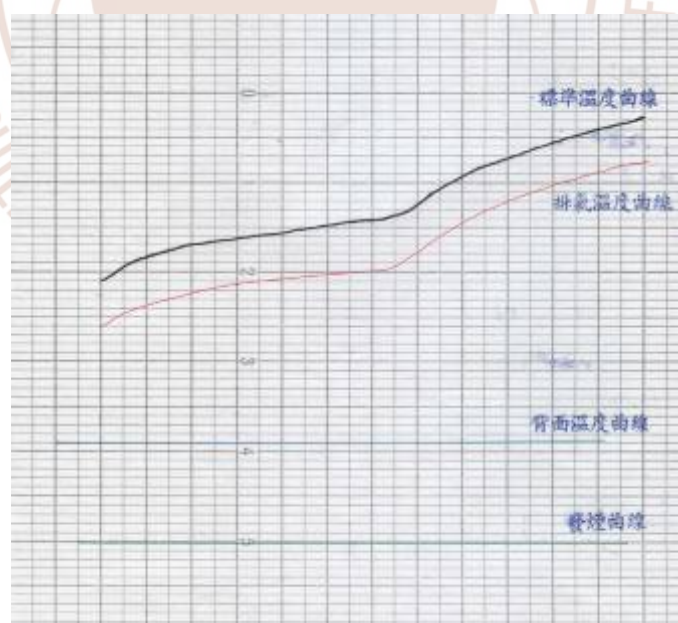


圖 5-25 纖維橡膠水泥板耐燃三級試驗曲線圖--橡膠含量 40%

*資料來源：本研究整理

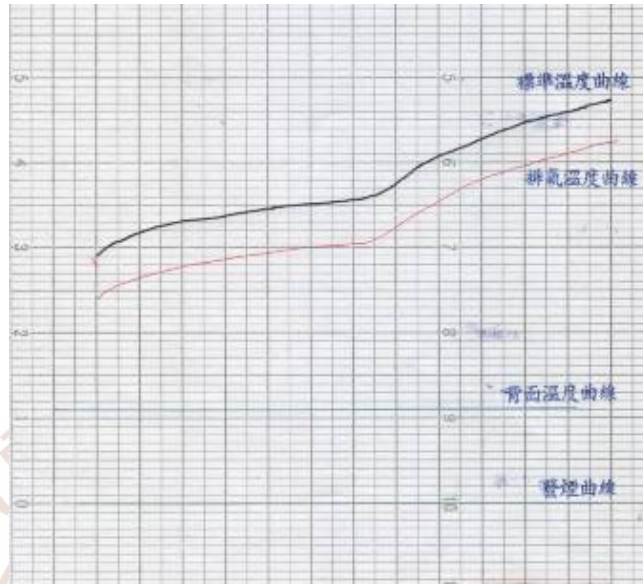


圖 5-26 纖維橡膠水泥板耐燃三級試驗曲線圖—橡膠含量 50%

*資料來源：本研究整理

2. 隔熱性

房屋建材之構成方式及材料性質乃決定其隔熱效果之基本因素。在節約能源之前提下，尋求良好的建材是迫切需要的。本計劃利用熱傳導定義，測定各組竹絲水泥板之熱傳導係數，並進行隔熱性分析，從而建立一個以隔熱性為基準之橡膠添加用量，以供營建工程界製作之參考。

各組纖維橡膠水泥板之熱傳導試驗結果如表 5-12 所示。纖維橡膠水泥板之熱傳導係數分別為 0.286、0.247 和 0.261 kcal/m °C hr。由此可知，纖維橡膠水泥板之熱傳導係數隨竹絲含量增加而減小。此外，通常水泥板之含水率越高，以及密度越大，其熱傳導係數越大。因此，當纖維橡膠水泥板以隔熱性能為主時，製作時除須考量橡膠含量外，板材之含水率與密度亦須同時注意，始能獲得理想之熱傳導係數。

表 5-12 纖維橡膠水泥板之熱傳導試驗結果

試體編號	熱傳導係數 (kcal/m °C hr)
C5-R30	0.286
C5-R40	0.261
C5-R50	0.247

*資料來源：本研究整理

3. 煙毒性

在火災中，煙對於人們之生命安全常造成重大威脅。煙是一項重要火災特性，煙產生會減低能見度（Visibility），是避難者能否逃出發生火災之建築物，以及消防人員能否找出火災、撲滅火災的影響因素。此外煙霧中通常伴隨著燃燒所生成的刺激物、窒息成分、毒性物質、腐蝕性物質等，如二氧化硫、二氧化氮、丙烯醛，造成呼吸道組織的傷害，引起火場者生理的不適，造成人員受傷，甚至因此喪失行動能力，導致無法逃生。由國外的統計資料可知，於發生建築物火災時，因室內裝修材料燃燒產生煙毒性氣體而致死之比率，保守估計高達50 %以上，甚至已有研究指出可能有將近80 %之火災死亡，起因於火災燃燒產生之煙毒性[61-62]。

煙粒子主要成分為碳分子（Carbon），半徑大約為0.1~2.5 μm 之間。當人體吸入微粒時，大部分的微粒子會因重力的緣故逐漸地在進入呼吸道時慢慢沈積下來，導致呼吸道受阻。Czerczak [63]認為CO是建材燃燒釋放最主要之毒性氣體。雖然CO₂本身毒性極低，但對於CO氣體的毒性有相當加成作用，故當CO₂的濃度大於5 %時，CO毒性便急劇地上昇。因此當建材燃燒不

完全時所產生的大量CO到了體內血液中，將會與血紅蛋白結合形成碳氧血紅蛋白（COHb），從而失去運氧功能。且一氧化碳與血紅蛋白的親和力比氧大210倍，當吸入氣體中有0.1 %的一氧化碳時，血液中的血紅蛋白就可能有50 %為COHb。因此，即使吸入少量的CO，也會立即與血紅素結合，進而影響血紅素的攜氧能力，使得人體缺乏氧氣而引起一氧化碳中毒症狀。此外，一氧化碳還能抑制紅血球內醣酵解，使2，3-DPG生成減少，使氧合血紅蛋白中的氧不易釋出，從而加重組織缺氧。曾有報告指出在60 %的火災死亡人數中有91 %罹難者的血液中的一氧化碳血紅素（COHb）高於20 %。人類血液中的COHb若達到60~70 %則有死亡的可能，若高達80~90 %則會在一小時內死亡[64]。

纖維橡膠水泥板煙毒試驗結果，如表 5-13 所示。試體外觀尺寸為(長×寬×厚) 20.41 mm×20.58 mm×20.3 mm；內部橡膠體積為 10 mm×10 mm×10 mm，外部以摺纖水泥漿包覆。試驗加熱溫度為 1135.4℃，試體加熱前後重量損失為 21.3 %；氣體生成量分別為： $\text{CO}_2 = 0.35\%$ ， $\text{NO}_x = 2.33 \text{ ppm}$ ， SO_2 與 COCL_2 為 0。

由於國內現行的法規對於室內裝修材料燃燒而生成之有毒氣體則尚未加以規範；相關研究中[65]認為煙毒與發熱具有正相關，故控制熱釋放率應已同時控制煙毒生成，因此在檢測方面常常較忽略煙毒危害部分，且火災中熱、煙、毒之危害因子通常有其合併作用，並且相互影響。由纖維橡膠水泥板之耐燃試驗與煙毒試驗結果可知，耐燃 2 級試驗之發熱性 td_0 值為 0(標準值為 100 以下)，且發煙係數為 2(標準值為 60 以下)，而二氧化碳生成量為 0.35 %。由此可得，纖維橡膠水泥板在燃燒時應無煙毒之情形發生。

表5-13 纖維橡膠水泥板煙毒試驗結果

實驗名稱		NES-713材料煙毒性指數試驗		
樣品名稱		廢輪胎橡膠混凝土		
實驗日期		97年12月8日		
樣品基本資料	樣品序號	F1697004		
	長(mm)×寬(mm)	20.41×20.58		
	厚度(mm)	20.3		
	實驗前重量(g)	7.12		
	實驗後重量(g)	5.60		
加熱條件	甲烷流量 (ml/min)	2		
	空氣流量 (ml/min)	10		
	燃料使用	甲烷+空氣		
	加熱溫度(°C)	1135.4		
	前置處理	置於溫度23±2°C相對溼度50±5%恆溫恆濕箱24小時以上		
實驗環境	室內溫度(°C)	23.0		
	室內濕度(%)	53		
	大氣壓力(hPa)	1008		
實驗結果	完全燃燒時間 (sec)	240		
	氣體生成量	F1697004		
	氣體種類	計算後氣體濃度Cg		
	CO ₂ (%)	0.35		
	NO _x (ppm)	2.33		
	SO ₂	0		
	COCL ₂	0		

*資料來源：本研究整理

第五節 纖維橡膠水泥板之經濟性分析

纖維橡膠水泥板之材料成本，如表 5-14 所示；而纖維橡膠水泥板與市售之各類板材的價格，如表 5-15 所示。由表 5-15 可知，纖維橡膠水泥板之成本約為木絲水泥板售價之 33% - 50%；約為矽酸鈣板售價之 40% - 50%。而未來纖維橡膠水泥板若能大量生產，則其成本應可再降低，估計約可減少 10% - 20%。由此可知，纖維橡膠水泥板甚具商業化生產之潛力。



表 5-14 纖維橡膠水泥板之材料價格與用量

水泥	爐石粉	橡膠粒	椰纖
2.7 元/kg	2.25 元/kg	7 元/kg	1 元/kg
630 kg/m ³	250 kg/m ³	350-570 kg/m ³	77 kg/m ³

*資料來源：本研究整理

表5-15 纖維橡膠水泥板與市售水泥板成本之比較

板材種類	成本	價格比
木絲水泥板	600-960元/片	~300 %
矽酸鈣板	500-600元/片	~200 %
石膏板	230-300元/片	~100 %
纖維水泥板	580-950元/片	~300 %
纖維橡膠水泥板	200-300 元/片	100 %

*資料來源：本研究整理

第六章 結論與建議

第一節 結論

本計畫以廢輪胎橡膠粒與椰纖維主要材料，研發質輕、隔熱與耐燃性佳之多功能纖維橡膠水泥板為主要目的。研究方法主要分成二大部分：(1) 建立纖維橡膠水泥板之配比設計與製造技術；(2) 探討纖維橡膠水泥板之各項性能，包括含水率、容積比重、吸水率、耐衝擊性、耐燃性、隔熱性與隔音性。以下綜合出各項主要結論：

1. 橡膠板之比重約為 1.18 – 1.36，椰纖板者為 1.56，而纖維橡膠水泥板者約為 1.4 - 1.48。
2. 橡膠板之吸水率以前 0.5 小時的吸水率最快速，約為 24 小時吸水率之 44% - 61%；而吸水達 6 小時後，板材之吸水率則逐漸趨於穩定。
3. 纖維橡膠水泥板之含水率約為 5 – 6 %；24 小時之吸水率約為 13.8% - 15.4%；而板材之吸水情形主要發生於前 3 小時，前 0.5 小時之吸水率約為 24 小時之 40% - 50%。
4. 纖維橡膠水泥板之彎曲破壞載重或抗彎強度各約為 80 kgf 或 20 kgf/cm²。而橡膠心材之抗彎強度約 9-18 kgf/cm²，椰纖水泥板約為 40 kgf/cm²。纖維橡膠水泥板之抗彎強度較橡膠板約提升 10% - 136%，而約為椰纖板之 50%。
5. 纖維橡膠水泥板經衝擊作用後，未出現龜裂、剝離、貫穿孔及裂開之情形，凹陷直徑約為 24mm。橡膠含量對板材抗衝擊性之影響不大。

6. 纖維橡膠水泥板之熱傳導係數約為 $0.247 - 0.286 \text{ kcal/m } ^\circ\text{C hr}$ 。
7. 纖維橡膠水泥板耐燃試驗後，耐燃試驗後板材之表面無貫穿全厚之熔化，試體背面亦無龜裂，且無明顯之變形發生。符合 CNS 6532 建築物室內裝修材料耐燃二級之要求。
8. 纖維橡膠水泥板經加熱至 1135.4°C ，氣體生成量分別為： $\text{CO}_2 = 0.35\%$ ， $\text{NO}_x = 2.33 \text{ ppm}$ ， SO_2 與 COCL_2 為 0；顯示其在燃燒時應無煙毒情形發生。



第二節 建議

本計畫以研發竹材有機建材為主要目的，根據研究結果，提出以下具體建議：

建議一

制定獎勵措施：立即可行建議

主辦機關：內政部建築研究所

協辦機關：行政院農委會

(1)制定獎勵措施，鼓勵生產廢舊輪胎橡膠顆粒與椰子纖維，以保持原料來源穩定；(2)辦理橡膠水泥板隔間牆推廣說明會或參加相關產品建材展覽會，提高橡膠水泥板的知名度；(3)協助廠商進行工業化生產輕質橡膠水泥板。

建議二

提升纖維橡膠水泥板之功能：中長期建議

主辦機關：內政部建築研究所

協辦機關：行政院農委會

(1)繼續增強輕質橡膠水泥板的耐燃性能，朝向耐燃 1 級標準的目標；(2)進行橡膠水泥板外觀之結構(如顏色、圖樣)及其他附加功能之研發，提升國人生活品質；(3)制定輕質橡膠水泥板隔間牆相關規範與試驗，做為建築結構設計與使用依據。



參考文獻

1. Kowalska, E., Wielgosz, Z., Scrap Rubber Reused: A New Process Produces Porous Pipes from Worn-Out Tires, Polymer Recycling Vol.2, No.3, pp.213-219, 1996.
2. 行政院環境保護署，廢棄物回收概論，環保署環境保護人員訓練所(廢棄物清除處理技術員訓練教材)，pp.33-37，1998。
3. <http://recycle.epa.gov.tw/result/images/aa.xls/>，行政院環境保護署資源回收基金管理委員會網路資料，2005 年。
4. 沈建全，利用廢棄輪胎與廢水泥電桿製作新型人工魚礁之技術—大量事業廢棄物資源化之積極處理方式，中華民國環境工程學會第十二屆廢棄物處理技術研討會論文集，pp.53-160，1997。
5. 王智龍、林啟燦、黃惠鳳、黃春蘭、沈建全，利用廢輪胎粉做為浮油回收材料之研究，中華民國環境工程學會第二十四屆廢水處理技術研討會論文集，pp.721-728，1999。
6. 段錦浩，泥岩地區透水式預鑄排水溝及廢輪胎節制壩之試驗研究，泥岩邊坡工程研討會論文集，pp.71-89，1993。
7. 黃正義等，廢輪胎原型利用之結構安全及環保效益研究，行政院環境保護署，2000。
8. 林辰雄，廢棄輪胎在水土保持工程的應用，國立東華大學自然資源管理研究所碩士論文，花蓮，2003。
9. James E. Mark, Burak Erman, Frederick R. Eirich, Science and Technology of Rubber”, Academic Press, Inc., Second Edition, 1994.
10. Turner-Fairbank Highway Research Center, The User Guidelines for Waste and Byproduct Material in Pavement Construction, Federal Highway Administration, Scrap Tires – Material Description.
11. 龔俊豪，美國廢輪胎回收利用方案-輪胎衍生燃料，工業污染防治季刊第 69 期，1999。

12. 楊金鐘，廢輪胎的有效利用方式：胎得福 (TDF)燃料，能源季刊第 21 卷第 1 期，pp.114 -132，1991。
13. Toutanji, H. A., The Use of Rubber Tire Particles in Concrete to Replace Mineral Aggregates, Cement and Concrete Composites Vol.18, No.2, pp.135-139, 1996.
14. 許順珠、黃英傑、陳冠中、鄭耀文，國內外廢輪胎回收處理技術與再生料應用市場之比較與分析，行政院環境保護署，2005。
15. 行政院環境保護署，廢輪胎破碎處理流程效能改善計畫（計劃編號：EPA-89-HA31-03-320），2000/12。
16. 行政院環境保護署，垃圾焚化灰渣利用之研發建制及推廣計劃（第二年），1998。
17. <http://recycle.epa.gov.tw/result/images/aa.xls/>，行政院環境保護署資源回收基金管理委員會網路資料，2005 年 2 月 14 日下載。
18. Egan Archer, Alex Klein and Kevin Whiting, The scrap tyre dilemma-Cantechnology offer commercial solutions Waste Management Word, 2004.
19. Dr. Valerie L. Shulman, Secretary General, Post-consumertyres in the expanded European Union, The European Tyre Recycling Association, UNOP Cyprus, 5 April, 2004.
20. 行政院環境保護署，廢棄物回收概論，環保署環境保護人員訓練所(廢棄物清除處理技術員訓練教材)，pp.33-37，1998。
21. Charles S. Hughes, Scrap Tire Utilization Technologies, National Asphalt Pavement Association, Information Series 116, pp.11-12, February, 1993.
22. 林辰雄，廢棄輪胎應用於坡地水保工程之方法調查研究，台灣水土保持手冊第 34 期，第 18-28 頁，2000。
23. 薄有為，廢輪胎擋土牆穩定性與經濟性分析，碩士論文，國立中央大學土木工程研究所，桃園，2004。
24. <http://www.kshs.kh.edu.tw/content/town/star/index.htm/>，填海造陸，南星計畫。
25. 郭俊良、湯輝雄，廢棄輪胎在公路維護上的應用，台灣公路工程第 20 卷第 3 期，第 2-5 頁，1993。

26. Serungard, J.R., Scrap Tyre Management:The United StatesPerspective, Progress In Rubber and Plastics Technology, pp.121-134, 1996.
27. 王智龍、林啟燦、黃惠鳳、黃春蘭、沈建全，利用廢輪胎粉做為浮油品收材料之研究，中華民國環境工程學會第二十四屆廢水處理技術研討會論文集，pp.721-728，1999。
28. Shiqun, Li, Jiashan, Hu, Fangzhen, Song, Xiaoxuan, Wang, “Influence of Interface Modification and Phase Separation on Damping Properties of Epoxy Cbncrete”, Cement and Concrete Composites Vol.18, No.6, pp.445-453, 1996.
29. 王明清，橡膠的阻燃技術進展，橡膠工業第 51 卷第 5 期，2004。
30. 顧介元、李鑫、嚴建華、蔣旭光、池湧、岑可法，國外廢輪胎焚燒處理技術，能源工程第 1 期，pp.29-31，2002。
31. Paine K. A., Moroney RC, Dhir RK, Performance of concrete comprising shredded rubber tyres [A]. Recycling and Reuse of Waste Materials, Proceedings of the International Symposium [C]. London, United Kingdom :Thomas Telford services Ltd, pp.719-729, 2003.
32. Khatib ZK, Bayomy FM. Rubberized Portland cement Concrete, mater Civil Eng., ASCE, Vol.11, No.3, pp.206-213, 1999.
33. 李娟 李啟令，廢橡膠水泥基材料的研究進展，同濟大學材料科學與工程學院，上海，2000。
34. Kyug-Ho Chung, young-Keun Hong, Introductory Behavior of Rubber Concrete Department of Polymer Engineering, The University of Suwon, South Korea, pp.440-660, 19980.
35. Rubber Concrete Mixes Tested for Toughness, Civil Engineering, August 2003.
36. Rafat Sddique, Tarun R. Naik, Properties of Concrete Containing Scrap-tire Rbber-an overview, Wast Management, Vol.24, pp.563-569, 2004.
37. A. Benazzouk, K. Mezreb, A Goullieux, Effect rubber aggregate on the physical-mechanical behavior of cement-rubber composites influence of the alveolar texture of rubber aggregate, Cement & Concrete composites, Vol.15, pp.711-720, 2003.

38. 胡鵬、朱涵、王旻，橡膠集料混凝土滲透性能的研究，天津理工大學學報第 22 卷第 4 期，pp.8-12，2006/8。
39. Nyame By, Illston J M. Capillary pore structure and permeability of hardened cement paste [C] // Proc 7 th Intl Cong Chem Cement Paris: [sn] , 1980.
40. Mehta P K, Manmohan D. Pore size distribution and permeability of hardened cement pastes[C] // Proc 7 th Intl Cong Chem Cement Paris: [sn], 1980.
41. Erhan Güneyisi, Mehmet Gesolu, Turan Ozturan, Properties of rubberized concretes containing silica fume, Cement and Concrete Research, Vol.34, pp.2309-2317, 2004.
42. Ilker Bekir Topcu, Osmanazi University, Civil. Dept., Eskisehir, THE PROPERTY OF RUBBERIZED CONCRETES, Cement and Concrete Research, Vol.25, No.2, pp.304-310, 1995.
43. 李麗娟、謝偉鋒、陳智澤、陳應欽、盧慧祥、王瑞華，「橡膠粉改性高強混凝土高溫前後性能研究，混凝土第 2 期（總第 208 期），pp.11-15，2007。
44. H. A. Toutanji, The Use Rubber Tire Practices in Concrete to Replace Mineral Aggregate s, Cement and Concrete Composites, Vol.18, pp.135-139, 1996.
45. 宋少民、劉娟紅、金樹新，橡膠改性高韌性混凝土的研究[J]，混凝土與水泥製品第 1 期，pp.10-11，1997。
46. 李麗娟、陳智澤、謝偉鋒等，橡膠改性高強混凝土基本性能的實驗研究，混凝土第 5 期，pp.60-63，2007 年。
47. 李麗娟、謝偉鋒、劉鋒、陳應欽，高溫作用後高強橡膠混凝土的性能研究，建築材料學報第 10 卷第 6 期，pp. 692-698，2007/12。
48. 史巍、張雄、陸沈磊，「橡膠粉水泥砂漿隔音功能研究」，建築材料學報第 5 卷第 8 期，2005/10。
49. 陳波、張亞梅、陳勝霞、張才華，橡膠混凝土性能的初步研究[J]，混凝土第 12 期，pp.37-39，2004。
50. <http://www.etra.eu.com/public.htm/>，歐洲廢輪胎回收資料。
51. <http://www.jatma.or.jp/>，日本廢輪胎回收資料。
52. <http://www.catraonline.ca/can-rcl.htm/>，加拿大廢輪胎回收資料。
53. Richard R. Schimizzze, S. M. ASCE, Use of Waster Rubber in Light-Duty

- Concrete Pavements INSTRUCTURE REPAIR METHODS, pp.367-374, 1999.
54. I.B.Topcu and N.Avcu. COLLISION BEHAVIOURS OF RUBBERIZED CONCRETE, Cement and Concrete, Vol.27, No.12, pp.1893-1898, 1997.
55. 顧介元、李鑫、嚴建華、蔣旭光、池湧、岑可法，「國外廢輪胎焚燒處理技術」，能源工程第1期，pp.29-31，2002。
56. A. Benazzouk, O. Douzane, K. Mezreb, B. Laidoudi, M. Que'neudec Physico-mechanical properties of aerated cement composites containing shredded rubber waste", Cement Concrete Composites Vol.28, pp. 650-657 2006.
57. A. Benazzouk, O. Douzane, K. Mezreb, B. Laidoudi, M. Que'neudec, "Thermal conductivity of cement composites containing rubber waste particles: Experimental study and modeling", Construction and building MATERIALS.
58. Paki Turgut a, Bulent Yesilata "Physico-mechanical and thermal performances newly developed rubber-added bricks", Energy and Buildings No.40, pp.679-688, 2008.
59. <http://www.top-panel.com/product01.asp> 家懋實業有限公司。
60. http://ca.geocities.com/taurus_soul/menu.html 防火建材。
61. 蘇文瑜，建築物室內裝修材料燃燒產生毒氣特性之探討，內政部建築研究所自行研究成果報告(編號:090301070000G2038)，2001。
62. 劉韋杜，"材料燃燒發熱、煙、毒性氣體之分析研究"，國立高雄第一科技大學環境與安全衛生工程研究所碩士論文，2007。
63. Czerczak S. and Stetkiewicz J., "Toxicity classification of thermal degradation products of chemical materials used in construction", Journal of Fire Sciences vol.14, pp.367-378, 1996.
64. Hirschler M. M., "Fire hazard and toxic potency of the smoke from burning materials", Journal of Fire Sciences, vol.5, pp.289-307, 1987.
65. 蔡匡忠，我國建築材料耐燃試驗法之未來發展，消防與防災科技雜誌 No.26, pp.24-26, 2006。



期末審查會評審意見執行現況

971205

評審意見		執行現況
邱昌平顧問	1. 本研究主要採用國產之橡膠粉末、顆粒及椰子纖維，與水泥加爐石粉(3:1)之膠結料做成板片，進行一系列試驗。另加入防火被覆粉末或鋁塗在表面，獲得一些初步之成果，未來仍有可繼續研究之事項。 2. 纖維橡膠水泥複合板(因有心板及外覆材二道施作，故宜稱複合板)，由於界面剝離之因素，故抗彎強度會降低許多。若製作時先除塵再震動纖維水泥漿後，其結果如圖 5-15、5-16 所示，但未見與表 5-7 比較之相關討論。 3. 文中多處文字錯誤，如批覆之「批」應為「被」。	2. 補充分析如 pp.119。 3. 已修正
高教授健章	1. 本研究用椰纖被覆可提高耐燃性，其原理為何需加以介紹。 2. 添加廢輪胎顆粒，若以環保目的為主，可能用量有限且其切割亦需耗能達不到節能之目的，因此後續研究重點應放在添加廢輪胎顆粒於混凝土中所顯現的優點為主。	1. 本研究利用椰纖水泥漿包覆橡膠以提高耐燃性，其原理主要為水泥板耐燃性佳，而添加椰纖可提高水泥板之抗彎強度與抗衝擊性，如 pp.87。 2. 遵照辦理。
張教授大鵬	1. 以椰子纖維+爐石粉+強塑劑做為被覆材增加耐燃效果之構想良好，也具有相當好的成效，惟表面上平整度問題及施工方式是否在日後實用上會有困難？如果直接使用現有的耐燃板料(如矽酸鈣板)其效果是否會更佳？ 2. 表 5-11 及表 5-12 成本比較中，如何得到 200~300 元/片，建請說明，且	1. 由施工與試驗的試體(或照片)得知，只要在製造時進行適當表面修飾，表面上平整度問題及施工方式在日後實用上並不困難。本研究的橡膠水泥隔間牆的研究動機與目的是針對廢棄物再利用與現有的耐燃板料(如矽酸鈣板)不同，且只要耐燃等及相同，其

	其施工成本是否也應列入考量？	耐燃效果當然亦會相同。 2.纖維橡膠水泥板的成本是本研究購買的成本(再加10%)計算得到。因板材的施工方式與業主要求品質有關，且會隨市場需求而變動；這裡只比較板材本身的成本，只要比較基準相同，即可。
劉教授明仁	1. 本研究報告文獻蒐集豐富，研究內容詳實，研究成果值得肯定。 2. 試驗數據若有規範建議之門檻值可否一併列於表中，俾便瞭解試驗結果。 3. P.2 最末段研究主要目的為探討「...防火性能...」，是否有考慮進行 CNS 12514 之防火時效試驗？ 4. 有文獻似提及廢輪胎橡膠粉具毒性，是否考慮進行毒性檢驗？ 5. 第三章與第四章之頁首似與章名不一致？參考文獻 17、20、23、26、29、46、52、57、59、60 似為重複出現，建請修正。	2.遵照辦理。 3.CNS 12514 為建築物構造部分耐火試驗法，試驗對象主要為構件。以牆構件而言，包括支撐鋼架與填充材(如岩綿)。而本研究主要為耐燃橡膠水泥板之研發與性能探討，因此耐燃性已 CNS 6532 為主，後續研究則可考慮納入防火時效試驗。 4.本研究已進行煙毒指數試驗，結果 CO 及 NO 釋出量皆符合規定。 5.已修正。
會議結論	1. 綜合討論建議事項，請研究團隊參採辦理或妥予回應，納入最後之成果報告，並利用後續時程充實研究內容；另有關成果報告格式，請研究團隊特別注意，務必依規定製作。	遵照辦理。



(廢輪胎橡膠混凝土應用於建築隔熱吸音牆板之研究)

出版機關：內政部建築研究所

電話：(02) 89127890

地址：台北縣新店市北新路三段 200 號 13 樓

網址：<http://www.abri.gov.tw>

編者：王榮進、劉玉雯、潘煌錕

出版年月：98 年 2 月

版(刷)次：初版

ISBN：978-986-01-7472-4

廢輪胎橡膠混凝土應用於建築隔熱吸音牆板之研究

內政部建築研究所協同研究報告

97 年度

