

# 熱熔塑膠輕質混凝土配比對工程性質之影響

董瀚友<sup>1</sup> 張朝順<sup>1</sup> 潘煌錕<sup>2</sup>

<sup>1</sup>高雄第一科技大學營建工程系助教、副教授

<sup>2</sup>高雄應用科技大學土木工程系教授

## 摘要

本研究係以複合材料的組成原理為基礎，減廢、再生利用生態化設計原則為依據。研擬以廢棄塑膠回收料熱熔膠液為黏結材；農漁廢棄物牡蠣殼與水庫淤泥輕質骨材為填充材，拌製新型高分子基顆粒複合材料。應用實驗設計法直交表配置試驗影響因子與水準，按隨機序列進行比重、抗壓強度與耐衝擊等試驗，以全距、變異數與綜合評估等統計方法進行數據分析，進而探討材料組成對工程性質的影響。研究結果發現：熱熔塑膠輕質混凝土具有質輕、高耐衝擊的特性，比重介於 0.88~1.38 之間；耐衝擊性相對量化指標之衝擊數達 15-78 次，為一般水泥混凝土的 6.5-15 倍。再者，材料組成與製程因子，對熱熔塑膠輕質混凝土之比重與抗壓強度等工程特性指標的顯著影響分別為：骨材類型、膠固比；對衝擊數的影響，則依序為膠固比、骨材類型與加熱持溫時間。綜合考量各工程特性指標，符合質輕、高抗壓強度與耐衝擊性等要求之最適材料組合為膠固比 1.5、使用水庫淤泥輕質骨材，且塑膠熱熔持溫時間為 80 分鐘。

**關鍵字：**輕質骨材、塑膠輕質混凝土、水庫淤泥、牡蠣殼、熱熔、衝擊數

## 一、前言

複合材料(Composite Material)係指由黏結材與填充材所組構而成，具有組成材料既有性能外，亦可因兩者複合後而改善、提昇或獨具特定性質的多元混合材料。其中，連續相的黏結材稱為基材(Matrix)；而離散相的填充材則稱為補強材(Reinforcement)。複合材料的類型，可依基材屬性與補強材料外觀形狀加以區分。按基材屬性可分為金屬基複合材料、陶瓷基複合材料與高分子基複合材料；若按補強材的形狀特徵，則可歸納為一維纖維狀、二維層片狀與三維顆粒狀補強複合材料。<sup>[1]</sup>

營建工程常用之水泥混凝土，依上述分類原則屬於陶瓷基顆粒複合材料，其係以水泥與水拌合後，經水化反應而成的水泥漿體為黏結材，而以粒徑不一的粗、細骨材粒料為填充材。另外，瀝青混凝土則以加熱熔融的瀝青為膠結材，而填充材與水泥混凝土相同，故屬於高分子基顆粒複合材料。

若以工程性質論之，水泥混凝土硬固後，具高強度、高比重、韌性低等特性，受力作用後變形小、易脆性破壞。而瀝青混凝土則強度低、比重小、韌性偏低，受力作用後，可承受大變形，屬彈塑性破壞類型。二者工程性質各具特色亦各有缺點如表一所示，其主要影響因素主要源自於黏結材特性的不同。因此，改變黏結材材料屬性，將顯著主導複合材料性能，而產製具特定功能之工程材料。

表一、水泥混凝土與瀝青混凝土一般工程性質比較<sup>[2-4]</sup>

類型		抗壓性質 kgf/cm <sup>2</sup>	彈性模數 kgf/cm <sup>2</sup>	比重	衝擊數(ACI)
水泥 混凝土	常重骨材	>140	1.0-2.4×10 <sup>5</sup>	2.20-2.40	1-5
	輕質骨材	30-350	0.4-1.9×10 <sup>5</sup>	0.58-1.85	3-12
瀝青混凝土		30-65	1.0-2.2×10 <sup>3</sup>	1.92-2.36	10-35

本研究考量比重、強度與韌性等工程特性指標，擬以熱熔塑膠(Hot-melt Plastic)為黏結材，牡蠣殼、水庫淤泥輕質骨材為填充材。依特定組成比例，調配拌製塑膠輕質混凝土，進而探析組成材料特性、配比與製程條件，對工程特性指標的影響程度，以作為研發新型高分子基顆粒複合材料的配比設計依據。

其中，熱熔塑膠原料係採用廢棄塑膠回收料，牡蠣殼則屬於農漁廢棄物，而輕質骨材則由水庫淤泥燒製而成。各組成材料不但符合廢棄物減量與降低二次污染的環保要求，亦可達到天然資源再生利用的生態化設計目標。

綜論之，本研究係以複合材料的組成原理為基礎，減廢、再生利用生態化設計原則為依據。研擬以廢棄塑膠回收料熱熔膠體為黏結材；農漁廢棄物牡蠣殼與水庫淤泥輕質骨材為填充材，拌製新型高分子基顆粒複合材料，並進行比重、抗壓強度與耐衝擊等試驗，以探討材料組成對工程性質的影響，進而評析熱熔塑膠輕質混凝土工程應用的可行性。

## 二、組構原理

熱熔塑膠輕質混凝土的組構可分成三部份：基材、骨材與界面(Interface)。其組成特性茲分別列敘如下：

### 1. 基材

基材最主要的功能係傳遞應力、膠結固定骨材與保護骨材。基材可藉由其連續相特性來分散應力，均勻傳遞作用力至各骨材表面外，同時利用與骨材膠結而成的複合結構共同承受應力，使材料受外載重作用時，不致於破壞或崩散。另外，骨材亦受到基材的保護而避免直接遭受磨損與侵蝕。

本研究採用低密度聚乙烯(Low-Density Poly ethylene, LDPE)為基材原料，其係由乙烯單體聚合而成，屬於熱塑性塑膠的一種，聚乙烯的性質如表 2-1 所示。聚乙烯是典型的結晶型高聚合物，結晶度越高其彈性模數越大，密度也愈高。聚乙烯具有優異的韌性與延展性，優良的耐化學性能。比重介於 0.91~0.97 之間，熱轉換參數之熔點介於 112°C~140°C 之間。其工程性質隨聚合壓力、分子量與結晶度變化而不同。<sup>[5]</sup>

表 2-1、低密度聚乙烯的工程性能

密度(g/cm <sup>3</sup> )		0.91~0.97
熔點(°C)		112~140
穿刺強度(J/mm)		25~60
抗拉強度(kgf/cm <sup>2</sup> )	縱向	200~350
	橫向	180~250
伸長率(%)	縱向	500~740
	橫向	300~690
彈性模數(kgf/cm <sup>2</sup> )	縱向	1.45~2.10×10 <sup>3</sup>
	橫向	1.75~3.50×10 <sup>3</sup>

### 2. 骨材

骨材為熱熔塑膠輕質混凝土之填充材亦是補強材，可增加複合材料的強度與彈性模數，且使複合材料承受作用力時不致於破壞。骨材性質是決定熱熔塑膠輕質混凝土工程性能的主要因素。骨材於熱熔塑膠輕質混凝土中，具有下列功能：

- (1) 承受主要荷載作用
- (2) 束制微裂隙的延伸與擴展
- (3) 提高材料強度與剛性
- (4) 降低材料受力作用之變形量
- (5) 改善材料疲勞強度與抗變潛變性能
- (6) 提昇材料使用壽命與可靠性

本研究使用輕質骨材以降低材料單位重，並依減廢與再生利用生態化設計原則，採用牡蠣殼與水庫淤泥輕質骨材，如照片 2-1 所示。其性質彙整如表 2-2 所示。



(a)牡蠣殼



(b)水庫淤泥輕質骨材

照片 2-1 牡蠣殼與水庫淤泥輕質骨材

表 2-2、牡蠣殼與水庫淤泥骨材性質

類型	密度(g/cm <sup>3</sup> )	容積比重	抗壓強度(Kgf/cm <sup>2</sup> )	顆粒最大粒徑(mm)
牡蠣殼	1.77 (未破碎前)	1.80	--	9.5
水庫淤泥 輕質骨材	0.45 (單粒密度)	1.01	19-100	9.5

### 3. 基材-骨材界面

基材-骨材的界面(Interface)是決定熱熔塑膠輕質混凝土使用壽命之重要因素。當材料受荷載作用時，界面處具有高度的局部應力。因此，基材-骨材界面必須黏結緊固，且具有良好的物理和化學性質，以利荷載作用力能夠平順地由基材傳遞至骨材。

熱熔塑膠輕質混凝土基材-骨材界面黏結反應機制可歸納如下：<sup>[5]</sup>

#### (1) 機械黏結

基材(黏結材)滲入骨材不平整表面的孔隙內部，擠壓替換接觸面凹凸孔洞的空氣，而與骨材膠結錨固。此一機械黏結效應取決於機械互鎖效應、骨材表面積、表面活性與表面潔淨度。

#### (2) 吸附黏結

基材-骨材黏結作用來自材料分子間的相互作用力與表面張力。其效應主要取決於基材熱融膠體對骨材的浸潤效果。

#### (3) 靜電與擴散黏結

基材-骨材的界面處可以形成具有靜電引力的雙電層，稱之為靜電黏結；藉由基材與骨材之間分子的相互擴散作用而黏結者，則稱為擴散黏結。

事實上，基材-骨材界面的黏結效果是上述各反應機理的綜合作用結果。若因黏結性差或界面內有雜質、水氣積聚，將於接觸表面形成弱邊界層，易造成界面黏結失效，而導致材料裂損破壞。

### 三、試驗規劃

本研究探討熱熔塑膠輕質混凝土組成材料配比對工程性質之影響，考量試驗配置的合理性及試驗組數的經濟性，應用實驗設計法直交表配置試驗影響因子與水準，按隨機序列試驗後，以全距、變異數與綜合評估等統計方法進行數據分析，進而探討其相關性與最適配比之因子組合。<sup>[6]</sup>本研究試驗規劃細項，茲分別列述如下：

#### 1. 影響因子與水準

依據熱熔塑膠輕質混凝土組構原理與拌製特性，參照配製初步測試結果，研擬材料組成因子為膠固比與骨材類型，而製程因子則為熱融持溫時間。其中，膠固比係指 LDPE 塑膠(黏結材)與輕質骨材(填充材)的體積比，如 3-1 式所示。

$$PS(\text{膠固比}) = \frac{V_{PE}}{V_{LA}} \times 100\% \quad (3-1)$$

式中：

$V_{PE}$ ：LDPE 塑膠的體積( $m^3$ )

$V_{LA}$ ：輕質骨材的鬆容積( $m^3$ )

熱融持溫時間係指 LDPE 塑膠加熱至熔點溫度時，持續維持加熱時間，其溫度變動範圍則控制在 $\pm 5^\circ C$ 之間。骨材類型的選擇亦是相當重要的課題，本研究以減廢、再生利用生態化設計原則為基準，考量地區特性與研究對象條件，選用比重差異性高的二種骨材類型，即水庫於泥輕質骨材與牡蠣殼。

影響因子與水準彙整如表 3-1 所示。

表 3-1 試驗影響因子與水準參數

影響因子		水準		
		1	2	3
A	膠固比	0.8	1.2	1.5
B	骨材類型	水庫於泥輕質骨材	牡蠣殼	混合骨材
C	持溫時間(min)	60	80	120

#### 2. 直交表配置與試驗組合

根據影響因子與參數水準，選用  $L_9(3^4)$  直交表進行配置三因子三水準試驗組合，第一欄為 A 因子-膠固比；第二欄為 B 因子-骨材類型；第三欄為 C 因子-持溫時間；第四欄則為誤差項。直交表配置與試驗組合如表 3-2 所示。

#### 3. 試驗項目與試樣

為測試熱熔塑膠輕質混凝土工程性質，本研究規劃進行比重、抗壓強度與耐衝擊等三項試驗。每一試驗組同項試驗進行三次獨立測試。由於比重試驗並非破壞性試驗，故其測試後試體經自然氣乾，再進行抗壓試驗。依直交表配置需九組試驗組，每組進行二項破壞性測試項目，每項三個試體，故總計需準備  $5 \times 5$  cm 試體  $9 \times 2 \times 3$  共計 54 個。同一試驗組六個試體於同時間，依拌製方法由同一試驗者拌製完成後備用。

表 3-2 直交表配置與試驗組合

組別	A	B	C	e
	膠固比	骨材類型	持溫時間	誤差項
P <sub>1</sub>	1	1	1	1
P <sub>2</sub>	1	2	2	2
P <sub>3</sub>	1	3	3	3
P <sub>4</sub>	2	1	2	3
P <sub>5</sub>	2	2	3	1
P <sub>6</sub>	2	3	1	2
P <sub>7</sub>	3	1	3	2
P <sub>8</sub>	3	2	1	3
P <sub>9</sub>	3	3	2	1

#### 四、試驗材料與方法

依試驗規劃依序進行材料準備，試體拌製與試驗測試工作。茲就試驗材料、試體拌製與測試方法分別敘述之。

##### 1. 試驗材料

本研究需用材料有 LDPE 塑膠回收料、水庫淤泥輕質骨材與牡蠣殼等三種，其材料特性與準備事項如下：

- (1) PE 塑膠回收料：本研究所使用之塑膠原料，係屬於低密度聚乙烯(LDPE)廢棄塑膠再製的回收料，如照片 4-1(a)所示。其比重為 0.95；外觀呈透明乳白色之圓球型顆粒狀。
- (2) 水庫淤泥輕質骨材：本研究試驗用輕質骨材係選自台灣石門水庫淤泥所燒製而成的輕質骨材，如照片 4-1(b)所示。其容積比重為 1.01；最大粒徑為 9.5mm，亦即通過 3/8” 篩停留於 1/4” 篩重量百分比大於 95%者。考量骨材表面潔淨度，將輕質骨材以清水洗淨後，用烘箱以 105°C 烘乾 24 小時。
- (3) 牡蠣殼：本研究試驗用牡蠣殼係為近海養殖業所產生的廢棄物。利用浸泡法去除殼體上有機物後，以壓碎機壓碎，再用標準篩篩選最大粒徑為 9.5mm 者，經 105°C 烘乾 24 小時，如照片 4-1(c)所示。其容積比重為 1.80，外觀則呈乳黃色之片狀。



(a) LDPE



(b)輕質骨材



(c)牡蠣殼

照片 4-1 試體材料

## 2. 試體拌製

依試驗規劃，各試驗組需試體 6 個，按材料組成影響因子水準調配材料，其計算方式如下：

$$V = V_{PE} + V_{LA} = P_S \cdot V_{LA} + V_{LA} = (1 + P_S)V_{LA}$$
$$\therefore V_{LA} = \frac{V}{1 + P_S}, \quad W_{LA} = r_{LA} \cdot V_{LA} \quad (4-1)$$

$$V_{PE} = P_S V_{LA}, \quad W_{PE} = r_{PE} \cdot V_{PE} \quad (4-2)$$

式中

$P_S$ ：為膠固比

$V_{PE}$ 、 $V_{LA}$ ：分別為 PE 塑膠粒體積與骨材體積( $m^3$ )

$r_{PE}$ 、 $r_{LA}$ ：分別為 PE 塑膠粒比重與骨材比重

$W_{PE}$ 、 $W_{LA}$ ：分別為 PE 塑膠粒重量與骨材重量

經配比計算後，依下列程序拌製試體：

- (1) 材料稱重後，混合後攪拌均勻。
- (2) 將混合料置入噴塗矽油的鋼製容器內。
- (3) 置入設定為 LDPE 熔點溫度的高溫爐內，直至持溫時間。
- (4) 以電動攪拌桿攪拌後，填入預熱之試體模內並夯壓刮平之。
- (5) 將試體模自然退火，冷卻成型。

拌製成型試驗如照片 4-2 所示。



(a) 輕質骨材

(b) 牡蠣殼

(c) 混合料

照片 4-2 拌製成型試體

## 3. 試驗方法

各組試體依隨機序列進行比重、抗壓與衝擊試驗，各試驗方法與儀器分別列述如下：

- (1) 比重試驗：參照 ASTM D792<sup>[7]</sup>之方法 A 進行比重試驗。
- (2) 抗壓試驗：參照 ASTM D695<sup>[8]</sup>標準測試方法，以萬能材料試驗機進行試驗。如照片 4-3(a)所示。
- (3) 衝擊試驗：參照 ACI 544.2R<sup>[9]</sup>標準方法，以 4.54kg 重錘，自 457mm 高處自由落下，撞擊試體製試體表面呈現第一道可視裂縫或界面剝離，則其撞擊次數即為衝擊數 N。衝擊試驗如照片 4-3(b)所示。



(a) 抗壓試驗



(b) 衝擊試驗

照片 4-3 試驗照片

## 五、試驗結果與分析

根據直交表配置，按隨機序號進行試驗組之比重、抗壓與衝擊試驗，各組各項試驗結果，彙整如表 5-1 所示：

表 5-1 各試驗組試驗數據

組別	比重	抗壓強度(Kgf/cm <sup>2</sup> )	衝擊數(次)	等權重綜合指標(%)
P <sub>1</sub>	0.88	56.09	24	38
P <sub>2</sub>	1.38	59.67	17	4
P <sub>3</sub>	1.10	57.38	15	20
P <sub>4</sub>	0.90	77.46	51	69
P <sub>5</sub>	1.28	82.86	23	35
P <sub>6</sub>	1.06	70.48	43	49
P <sub>7</sub>	0.90	91.06	60	86
P <sub>8</sub>	1.25	93.96	47	59
P <sub>9</sub>	1.08	90.23	78	84
平均值	1.09	75.47	40	48
最大值	1.38	93.96	78	85
最小值	0.88	56.09	15	4

由表中顯示：無論何種骨材類型，各組比重介於 0.88~1.38 之間，合乎輕質混凝土對比重上限值 1.85 之規定。亦即以熱熔塑膠取代水泥漿體更易於產製質輕、比重小的混凝土。

抗壓試驗結果則較一般水泥混凝土偏低，但較瀝青混凝土為高，介於 56~94 Kgf/cm<sup>2</sup> 之間；然而，表現於耐衝擊性的衝擊數，則遠高於一般水泥混凝土之 1~12 次，而介於 15~78 次之間，如照片 5-1 所示。

綜合抗壓強度與衝擊試驗結果可知：熱熔塑膠輕質混凝土的抗壓強度，因使用彈塑體的膠結材，而導致其抗壓強度整體下降，但耐衝擊性則因此而顯著提昇。換言之，熱熔塑膠輕質混凝土性質與傳統水泥混凝土剛強、脆性的特性不同，而類屬於低比重、中強度但具延展性的彈塑性材料。

由於熱熔塑膠輕質混凝土的工程特性，受其材料組成與製程因子所影響。茲將直交表配置之試驗結果，進行全距與變異數分析，以探究影響因子與工程特性指標間的相關性。



(a) 水泥混凝土



(b) 塑膠輕質混凝土

照片 5-1 衝擊破壞照片

### 1. 比重試驗

比重試驗數據以全距分析結果如表 5-2 所示，由表中計算結果顯示：骨材類型的全距比高達 74%。換言之，塑膠輕質混凝土比重大小，主要受到骨材類型的影響。輔以變異數分析結果(如表 5-3)，亦顯現比重受骨材類型的影響非常顯著。

依全距分析結果亦得知：影響熱熔塑膠輕質混凝土比重的因子排序為 BCA，即骨材類型、持溫時間與膠固比；若以比重值為特性目標值，其最適因子水準則為 B<sub>2</sub>C<sub>2</sub>A<sub>1</sub>。亦即欲產製較高比重的塑膠混凝土，宜採用比重大的牡蠣殼，較小的膠固比與製程中採用 80 分鐘之熱熔持溫時間。

表 5-2、比重試驗數據全距分析結果

因子	A			B			C		
	膠固比			骨材類型			持溫時間		
水準	1	2	3	1	2	3	1	2	3
		0.80	1.20	1.50	輕質骨材	牡蠣殼	混合骨材	60	80
試驗數據	0.877	0.904	0.904	0.877	1.381	1.098	0.877	1.381	1.098
	1.381	1.276	1.249	0.904	1.276	1.062	1.062	0.904	1.276
	1.098	1.062	1.076	0.904	1.249	1.076	1.249	1.076	0.904
MAX	1.381	1.276	1.249	0.904	1.381	1.098	1.249	1.381	1.276
平均值	1.119	1.081	1.076	0.895	1.302	1.078	1.063	1.120	1.093
MIN	0.877	0.904	0.904	0.877	1.249	1.062	0.877	0.904	0.904
組大值	MAX				MAX			MAX	
組全距	0.0			0.4			0.1		
全距比	8%			74%			11%		

根據變異數分析，若以信賴水準 90%、95%與 99%相對之 F 臨界值為影響顯著性的判別標準。A.膠固比與 C.持溫時間下的 F 統計量分別為 1.11 與 1.70，皆小於信賴水準 90%之臨界值 4.325。故可推論膠固比與加熱持溫時間，對塑膠輕質混凝土的比重值，不具統計學上的顯著意義。至於，B.骨材類型之 F 統計值則為 84.3，遠大於信賴

水準 99%的 F 臨界值 18。因此，可推論骨材類型對塑膠輕質混凝土的比重，具有統計學上非常顯著的影響。其變動對比重值的影響趨勢如圖 4-1 所示。

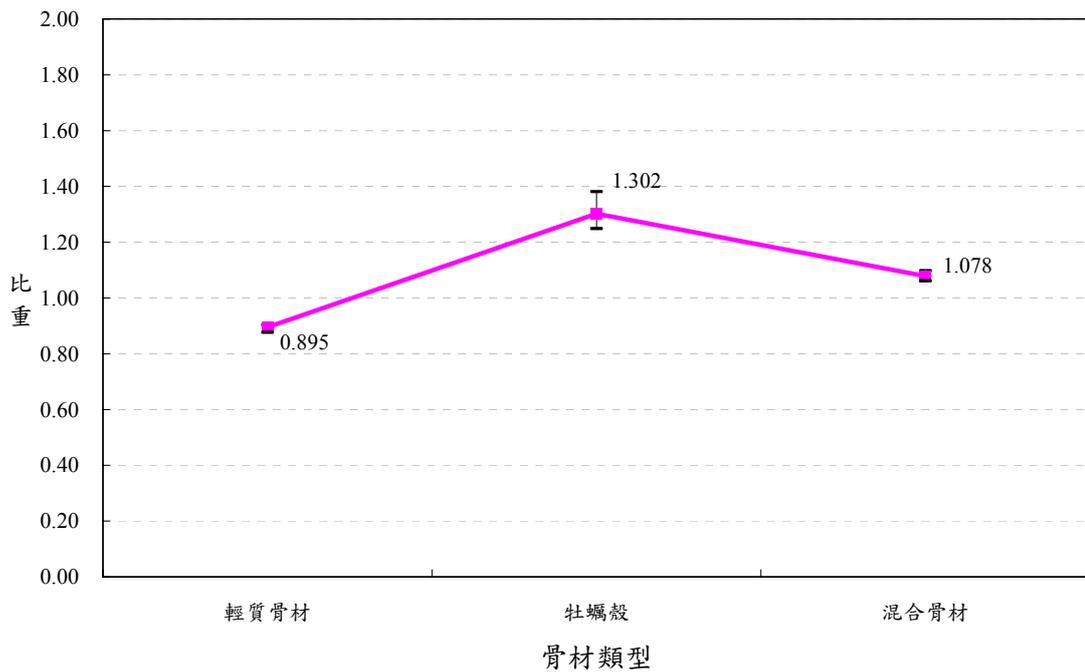


圖 4-1、骨材類型對比重值的影響趨勢

再者，由本次研究試驗規劃使用材料論之，水庫淤泥輕質骨材比重為 1.01，而牡蠣殼則高達 1.8，亦可說明填充材的比重，對與較小比重黏結材所組成之複合材料的比重，有非常顯著而關鍵性的影響。因此，欲調配塑膠輕質混凝土的比重值，則以改變或控制骨材類型為首要。

表 5-3、比重變異數分析結果

因子	S(平方和)	Φ(自由度)	V(變異數)	F 統計量	F 分配臨界值			顯著差異
					18.00	6.944	4.325	
A	0.00328	2	0.0016	1.11	18.00	6.944	4.325	不顯著
B	0.24969	2	0.1248	84.30	18.00	6.944	4.325	非常顯著
C	0.00503	2	0.0025	1.70	18.00	6.944	4.325	不顯著
誤差項	0.00592	4	0.0015					
總計	0.26064	8						

## 2. 抗壓強度

抗壓強度試驗數據平均值如表 5-1 所示。其全距、變異數分析結果分別如表 5-4 與表 5-5 所示。

由全距分析結果得知：影響熱熔塑膠輕質混凝土抗壓強度的因子排序為 A.膠固比、B.骨材類型，最後為 C.持溫時間。若以抗壓強度為主要特性指標時，其最適因子水準則為  $A_3B_2C_3$ ，亦即欲產製高抗壓強度的塑膠輕質混凝土宜採用高膠固比、牡蠣殼骨材且以 120 分鐘的加熱持溫時間。然而，骨材類型與持溫時間的全距比分別僅有 13% 與 8%，遠小於膠固比之 73%。換言之，欲調控塑膠輕質混凝土的抗壓強度，宜以膠固比為控制因子。此一推論亦可由變異數分析佐證之。

變異數分析結果顯示：A.膠固比的 F 統計值高達 129.68，大於信賴水準 99%之 F 臨界值 99。因此，可以證明全距分析結果的推論。亦即膠固比對塑膠輕質混凝土的抗壓強度，具有統計學上非常顯著的影響。膠固比對抗壓強度影響的變動趨勢如圖 4-2 所示，塑膠輕質混凝土抗壓強度隨著膠固比增大而明顯增加。

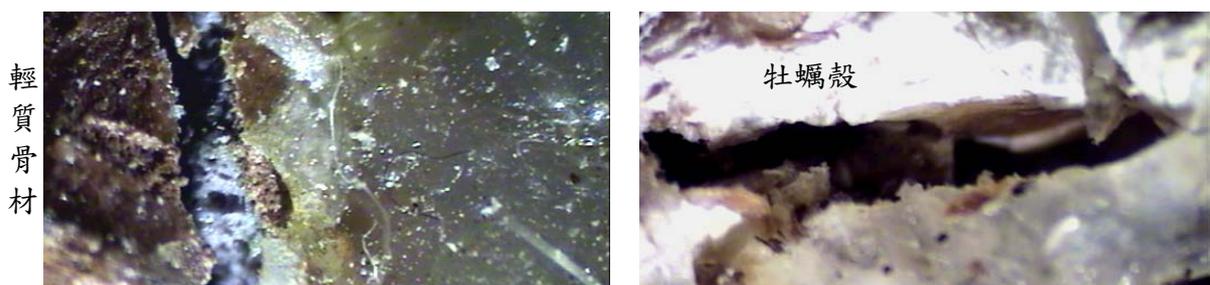
此相關性說明熱熔塑膠輕質混凝土抗壓強度受到黏結材性質的主導，黏結材含量越多，愈足以填充黏結骨材而具有較高的強度。但因 LDPE 塑膠為熱塑性塑膠，硬固後仍保有彈性，易因受壓變形，將荷載轉移至骨材或基材-骨材界面，導致骨材壓碎或界面裂損而破壞，如照片 5-2 所示。

表 5-4、抗壓強度試驗數據全距分析結果

因子	A			B			C		
	膠固比			骨材			持溫時間		
水準	1	2	3	1	2	3	1	2	3
		0.80	1.20	1.50	輕質骨材	牡蠣殼	混合骨材	60	80
試驗數據	56.09	77.46	91.06	56.09	59.67	57.38	56.09	59.67	57.38
	59.67	82.86	93.96	77.46	82.86	70.48	70.48	77.46	82.86
	57.38	70.48	90.23	91.06	93.96	90.23	93.96	90.23	91.06
MAX	59.67	82.86	93.96	91.06	93.96	90.23	93.96	90.23	91.06
平均值	57.71	76.93	91.75	74.87	78.83	72.70	73.51	75.79	77.10
MIN	56.09	70.48	90.23	56.09	59.67	57.38	56.09	59.67	57.38
組大值			MAX		MAX				MAX
組全距	34.0			6.1			3.6		
全距比	73%			13%			8%		

表 5-5、抗壓強度試驗數據變異數分析結果

因子	S(平方和)	Φ(自由度)	V(變異數)	F 統計量	F 分配臨界值			顯著差異
A	1747.4	2	873.7183	129.68	99.0	19.0	9.0	非常顯著
B	58.0	2	29.0114	4.31	99.0	19.0	9.0	不顯著
C	19.8	2	9.8981	1.47	99.0	19.0	9.0	不顯著
誤差項	13.5	2	6.7374					
總計	1838.7	8						



照片 5-2、受壓變形導致骨材壓碎或界面裂損而破壞

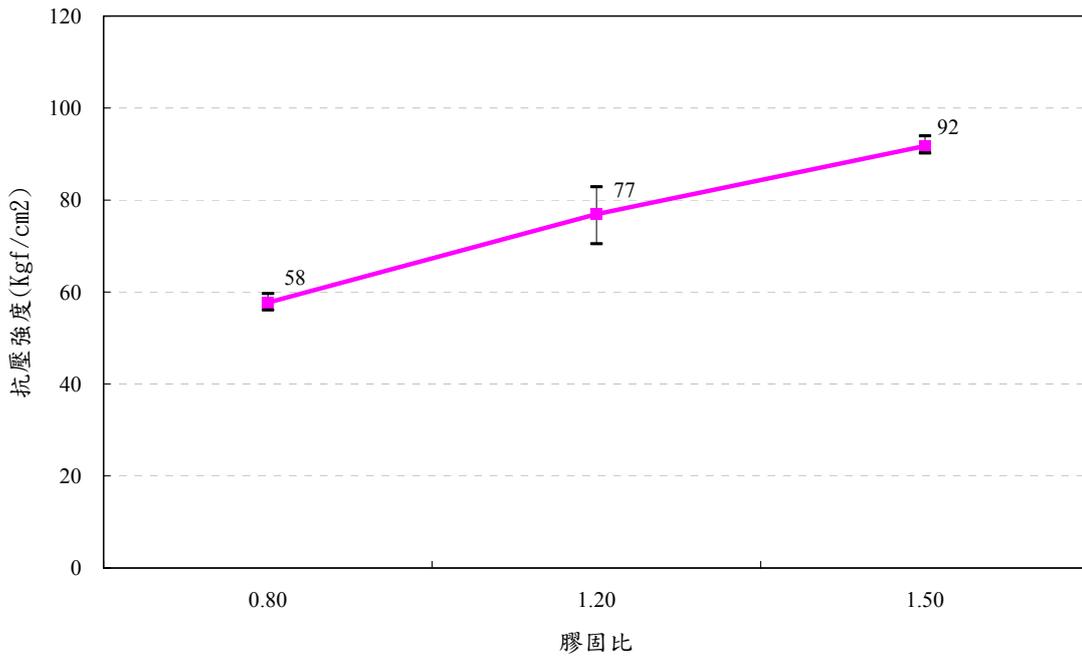


圖 4-2、膠固比對抗壓強度影響的變動趨勢

### 3. 衝擊性

熱熔塑膠輕質混凝土的耐衝擊性能，係以抵抗重錘落下撞擊試體能量的相對衝擊數來比較之。衝擊試驗全距分析與變異數分析結果，分別如表 5-6 與 5-7 所示。

表 5-6、衝擊試驗全距分析結果

因子	A			B			C		
	膠固比			骨材			持溫時間		
水準	1	2	3	1	2	3	1	2	3
	0.80	1.20	1.50	輕質骨材	牡蠣殼	混合骨材	60	80	120
試驗數據	24.00	51.00	60.00	24.00	17.00	15.00	24.00	17.00	15.00
	17.00	23.00	47.00	51.00	23.00	43.00	43.00	51.00	23.00
	15.00	43.00	78.00	60.00	47.00	78.00	47.00	78.00	60.00
MAX	24.00	51.00	78.00	60.00	47.00	78.00	47.00	78.00	60.00
平均值	18.67	39.00	61.67	45.00	29.00	45.33	38.00	48.67	32.67
MIN	15.00	23.00	47.00	24.00	17.00	15.00	24.00	17.00	15.00
組大值			MAX			MAX		MAX	
組全距	43.0			16.3			16.0		
全距比	54%			21%			20%		

全距分析表計算結果顯示：A.膠固比、B.骨材類型與 C 持溫時間的全距比分別為 54%、21%與 20%；亦即其對衝擊數的影響順序首為膠固比，骨材類型次之，最後為持溫時間。比較各影響因子的平均值發現，若以衝擊數為主要特性指標；最適因子水準為 A<sub>3</sub>B<sub>3</sub>C<sub>2</sub>。換言之，欲拌製耐衝擊性能較佳、高衝擊數之塑膠輕質混凝土，應以高膠固比、輕質骨材與牡蠣殼之混合骨材調配材料組成，並利用適度的加熱持溫時間加

以拌製之。

再者，根據變異數分析結果發現；膠固比、骨材類型與持溫時間等因子的 F 統計值為 114.61、21.59 與 16.44，分別大於信賴水準 99%、95%與 90%之 99、19、9。因此，其對衝擊數的影響，於統計學上分別具有非常顯著、顯著與有影響。此一結果與全距分析互為佐證。

表 5-7、衝擊試驗變異數分析結果

因子	S(平方和)	Φ(自由度)	V(變異數)	F 統計量	F 分配臨界值			顯著差異
A	2776.2	2	1388.11	114.61	99.0	19.0	9.0	非常顯著
B	522.9	2	261.44	21.59	99.0	19.0	9.0	顯著
C	398.2	2	199.11	16.44	99.0	19.0	9.0	有影響
誤差項	24.2	2	12.11					
總計	3721.6	8						

茲就非常顯著與顯著影響之膠固比與骨材類型二因子，進一步分析二者對衝擊數變動趨勢的影響，如圖 5-3 所示。

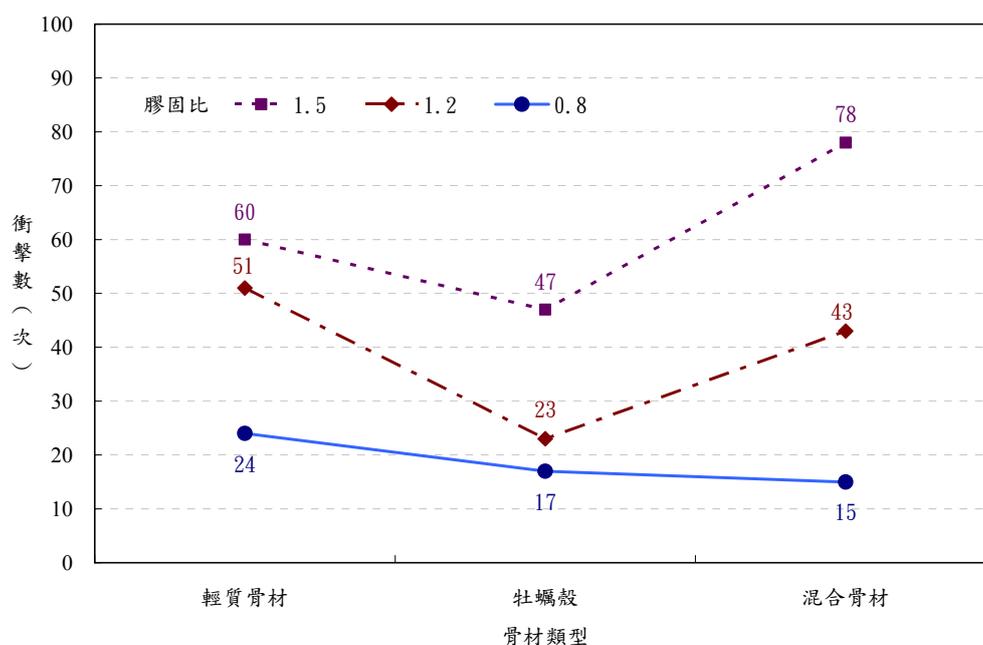


圖 5-3 膠固比與骨材類型對衝擊數變動趨勢的影響

由圖中顯示：當低膠固比(0.8)時，衝擊數隨骨材類型的變動而降低，其中以混合骨材衝擊數 15 為最低，當膠固比大於 1.2 時，則衝擊數以牡蠣殼 23 為最低，但無論骨材類型為何，皆以低膠固比(0.8)者之衝擊數為最小。

此一結果可推論：低膠固比時，黏結材不足，無法充分發揮其機械黏結與浸潤效果，以致無法完全傳遞衝擊能量，而易導致裂隙發展而破壞。當膠固比高達一定量以上時，黏結材足以發揮黏結效果，則衝擊數大幅增高。以水庫淤泥輕質骨材為例，當膠固比為 1.2 時，較膠固比 0.8 提高 112.5%，而膠固比為 1.5 時，則較膠固比 0.8 提高達 150%之多。至於，混合骨材與高膠固比衝擊數表現最佳，而於低膠固比則衝擊數最

小。此一現象推估可能是因骨材-基材與骨材-骨材界面所致，惟因衝擊數係為相對量化指標，其影響成因量化分析仍有待進一步研析之。

相對於一般水泥混凝土的脆性破壞，熱熔塑膠輕質混凝土展現優異的耐衝擊性與延展性，此一材料特性係導因於黏結材的本身特性，LDPE 塑膠屬熱塑性材料，其具有良好的彈性，可於承受衝擊荷重時，以大變形吸納高衝擊能，傳遞較小能量予骨材或界面，而使骨材或界面不致於破裂而損壞。因此，塑膠輕質混凝土較一般水泥混凝土具有較高的衝擊數，如照片 5-1 所示。

就骨材類型而言，比重大的牡蠣殼雖呈現較高的抗壓強度，卻有較小的衝擊數，如圖 5-4 所示。導致此一現象的原因，主要係因骨材外觀形狀與受力特性所造成。牡蠣殼外觀呈片狀，於受壓時與黏結材合成一體，可完全承受或傳遞漸增的壓力而不致於骨材或界面產生破壞。但於承受衝擊荷重時，由於黏結材產生大變形量以吸納能量，而於片狀牡蠣殼周圍界面，形成變形不一致或局部應變而易導致界面或骨材裂損而破壞。換言之，比重小的造粒型輕質骨材，具有較佳的耐衝擊性，另外其鬆散內部結構的高阻尼性，亦可能使其具有高耐衝擊性的另一主因。

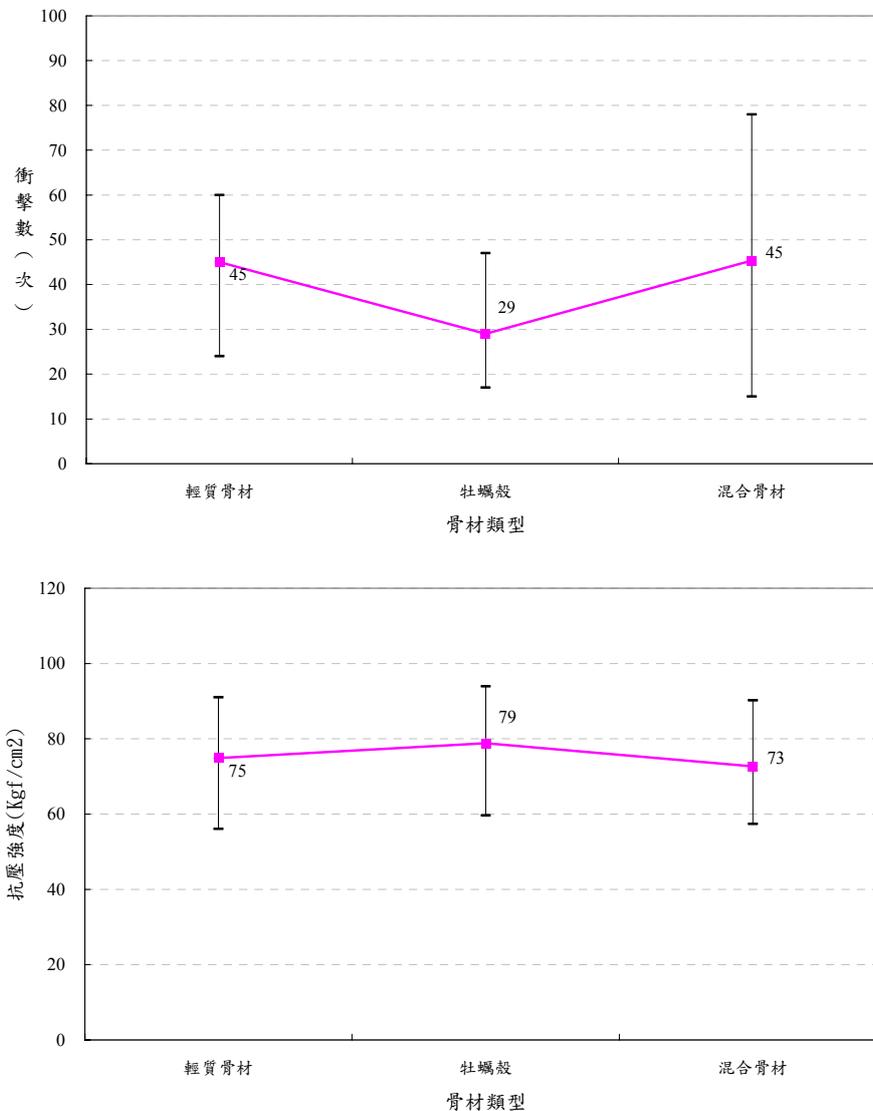


圖 5-4 骨材類型對抗壓強度與衝擊數的影響

#### 4. 綜合評析

熱熔塑膠輕質混凝土的特性指標，會隨實際工程用途而有不同的組合與要求。單一特性指標的探討，雖可深入了解並釐清說明材料組成與製程因子，對特性指標的影響程度。然而，對於實際工程之應用與配比設計，仍須綜合考量工程需求之整體目標，方可符合並滿足工程上的實際用途。

本研究以權重代表工程實際需求的量化指標，藉由對特性指標的期望最大、最小或特定值的正規化，計算各特性指標的綜合評估值。其正規化計算方式如下所示：

$$\text{期望最大評估值} = \frac{X_p - \text{Min}}{\text{Max} - \text{Min}} \times 100(\%) \quad (4-3)$$

$$\text{期望最小評估值} = \frac{\text{Max} - X_p}{\text{Max} - \text{Min}} \times 100(\%) \quad (4-4)$$

$$\text{期望特定值評估值} = \frac{|X_p - S_p|}{S_p - \text{Min}} \times 100(\%) \quad (4-5)$$

式中：

$X_p$ ：計算評估值的特性指標值

Max：該試驗組中特性指標和最大值

Min：該試驗組中特性指標和最小值

$S_p$ ：期望特定值

考量不同工程應用之權重，如表 5-8 所示。

表 5-8 不同工程用途之最適因子與水準組合

工程特性	權重(%)			最適因子 水準組合
	比重	抗壓強度	衝擊數	
輕質性	100	0	0	$A_3B_1C_1$
高抗壓性	0	100	0	$A_3B_2C_3$
高耐衝擊性	0	0	100	$A_3B_3C_2$
質輕且高抗壓強度	40	40	20	$A_3B_1C_2$
質輕且高耐衝擊性	40	20	40	$A_3B_1C_2$
高抗壓強度、高耐衝擊性	20	40	40	$A_3B_1C_2$
均衡考量	33	34	33	$A_3B_1C_2$

由工程應用特性權重之綜合評估顯示；若僅考量比重愈小愈佳，則以  $A_3B_1C_1$  為首選，即採用水庫淤泥輕質骨材，配合 60 分鐘加熱持溫時間；若僅以抗壓強度為主要用途指標時，則以  $A_3B_2C_3$  為最適配比，亦即改採牡蠣殼為骨材，而加熱持溫時間量增長至 120 分鐘。再者，若以衝擊數為唯一特性指標時，則以  $A_3B_3C_2$  為最適組合，即使用混合骨材，加熱持溫時間適中使用 80 分鐘。換言之，採用膠固比 1.5，變動骨材類型並搭配合宜的加熱持溫時間，即可產製符合不同工程用途之熱熔塑膠輕質混凝土。

綜合評析結果亦可得知，若同時考量比重輕、抗壓強度高、耐衝擊性佳三項特性

指標時，無論是等權重或任二項指標加計權重為 40%，其最適組成配比皆為  $A_3B_1C_2$ ，亦即採用高膠固比 1.5，使用水庫淤泥輕質骨材，且配合適中之 80 分鐘加熱持溫時間。由前述討論中，各工程用途之最適組合，皆以膠固比 1.5 為要件。此意謂著，足量的黏結材是確保熱熔塑膠輕質混凝土品質重要的材料組成條件。

## 六、結論與建議

本研究以減廢、再生利用生態化設計為基準，利用廢棄 LDPE 塑膠回收料熱熔液當黏結材，並以廢棄物水庫淤泥輕質骨材與牡蠣殼當填充材，成功拌製熱熔塑膠輕質混凝土。其具有質輕、高耐衝擊的特性，比重介於 0.88~1.38 之間；參照 ACI 之耐衝擊性相對量化指標之衝擊數達 15-78 次，為一般水泥混凝土的 6.5-15 倍。

由直交表配置實驗與統計分析結果顯示，材料組成與製程因子對熱熔塑膠輕質混凝土工程特性指標的影響為：

1. 比重主要控制因子水準為  $B_2C_2A_1$ ；B.骨材類型對比重之影響非常顯著。
2. 抗壓強度主要控制因子水準為  $A_3B_2C_3$ ；A.膠固比對抗壓強度的影響非常顯著。
3. 耐衝擊性主要控制因子水準為  $A_3B_3C_2$ ；對衝擊數的影響，A.膠固比非常顯著，B.骨材類型顯著，而 C.加熱持溫時間則為有影響。
4. 綜合考量各特性指標，符合質輕、高抗壓強度與耐衝擊性等特性要求之最適組合為  $A_3B_1C_2$ ，亦即膠固比 1.5、使用水庫淤泥輕質骨材，且塑膠熱熔持溫時間為 80 分鐘。

總而言之，本研究初步研析熱熔塑膠輕質混凝土材料組成對比對工程特性的影響，研究成果可作為配比設計與後續研發的參考依據。然而，熱熔塑膠輕質混凝土的性質與傳統水泥混凝土並不相同，其基材-骨材間的黏結效應，不再是水泥水化反應，而是高分子黏結作用。於工程實務應用上，除注意黏結材的影響外，填充材的選擇亦是關鍵的課題。

## 參考文獻

1. 朱世富，材料科學與工程，新文京開發，2002，pp456-458
2. J. Francis Young et al, The Science and technology of civil engineering materials, Prentice Hall, 1998
3. Shan Somayaji, Civil engineering materials 2nd ed, Prentice Hall, 2001.
4. 顏聰、陳豪吉、張朝順，輕質粒料混凝土施工參考規範訂定，內政部建築研究所，2005
5. Charles A. Harper, Handbook of plastics, elastomers, and composites 4th ed, McGraw-Hill, 2002
6. Douglas C. Montgomery, Design and analysis of experiments 6th ed., John Wiley & Sons, 2005
7. American Society For Testing and Materials, ASTM D792 Standard Test Methods for Density and Specific Gravity (Relative Density) of Plastics by Displacement, 2000
8. American Society For Testing and Materials, ASTM D695 Standard Test Method for Compressive Properties of Rigid Plastics, 2002
9. ACI Committee 544, ACI 544.2R Measurement of Properties of Fiber Reinforced Concrete, 1999