

第一章 緒論

一、前言

長久以來，混凝土一直是公共工程及房屋建築上的主要材料，雖然它不失為使用壽命頗長的一種耐久性材料，但是混凝土結構物在經過一段長時間的使用後，終於因各種不同的因素，如開裂至不堪再用、使用年限已到或都市的更新等，迫使構造體必須被拆除，因而產生了不少須予處理的混凝土廢料。這類混凝土廢棄物，正因經濟發展與建物更新的加速，而有日益增加的趨勢。以各先進國家為例^[1-3]，在 1991 年以前，混凝土廢料的年產量美國最多有約 3000 萬噸，日本 700~1200 萬噸，英國約 750~1050 萬噸，全東歐國家則有約 4000 萬噸。這些須予拋棄的混凝土廢料可能因處置不當而導致嚴重的環境污染。目前由於廢料棄置場難覓，環保意識又日漸高漲，而另一方面，國內可用以拌製混凝土的天然骨材來源卻日趨缺乏，若能有效回收廢棄混凝土充當骨材之用，將可使有限的資源再生利用，且同時達到解決部份環保問題的效益。

從結構物上拆除下來的混凝土塊，在碎細成骨材大小的碎料時，大都是表面沾附有水泥漿的石塊或純水泥料，用以做為拌製混凝土的骨材時，雖然有其缺陷，但是已有研究成功且應用於剛性路面的例子^[4-6]。以往的研究結果顯示，這種再生混凝土的各項性質可能較差，例如同一配比下的彈性模數較小，孔隙率較大，握裹力較低，尤其是強度及耐久性將較差^[7,8]，因此在應用上必須先進行完整的研究。

本研究擬利用回收舊混凝土廢料，經打碎、級配處理後作為

骨材，拌製可供結構性及非結構用的再生混凝土，一方面探求以不同強度的舊混凝土拌製特定強度的再生混凝土時所需之配比與製造技術；另一方面再對該等混凝土測析其強度、力學及工程性質，並從而建立完善的再生混凝土產製技術，提供產業界實際生產時之參考。

二、計劃內容

混凝土構造物因故而須拆除所產生的廢料，已有日益增多之勢。這些廢棄料若處置不當，可能成為環境的污染源。事實上，這類廢料具有相當高的基本強度，將之打碎當做骨材使用時，已有拌製成再生混凝土的研究報告，而過去的應用實例則以剛性路面居多。

本研究擬對再生混凝土的配比、拌製技術及其性質瞭解，作進一步的探討，一方面探求如何有效處理、調配混凝土廢料，使成為適用的骨材，以拌製各種強度的再生混凝土；另一方面將深入測析再生混凝土的工程及力學性質。如此，將可初步建立再生混凝土的配比及基本性質的資料庫，並綜合提出再生混凝土的產製技術，以供業界之參考。

三、文獻回顧

利用各種固體廢棄物用做混凝土骨材之再生利用觀念行之已久，在諸多文獻中曾被提及或使用過之固體廢棄物如表 1-1 所示。這些廢棄物都是一般人類產業活動中所產生，在棄之可惜並兼及環保意識下，人們開始進行研究如何予以再生利用。其中固化是最簡單亦方便之一種方法，尤其是當做混凝土骨材粒料用，一方面可消化固體廢棄物，另一方面又可生產成經濟材料以供使用；

但所需面臨的問題，是經濟性上的考量，如表中所列之礦石廢料，每年年產量約 2000×10^6 噸，但因多屬偏遠地區，交通不便，運輸費用高昂，不符合經濟效益而無法利用；再者是材料相合性的問題，如含玻璃等之廢棄物一般碎化後易造成扁平細長顆粒且表面平滑，混凝土材料握裹性變差，得需增加拌合之水泥含量；最後則需考慮製成之混凝土性質，如橡膠、塑膠等廢棄料，由於其低強度、低彈性模數等特性，使拌製所得之硬固混凝土強度及彈性模數值偏低而不符工程上之應用。至於建築物拆除後所產生之廢棄物如磚、混凝土、鋼筋等，全世界每年年產量如表 1-1 所示，數量亦相當龐大，並具有固定強度及質量，丟棄處理不易。就這類廢棄材而言，因多產生於經濟活動區域，與混凝土需求之地區相近，其運輸成本較低，且其與混凝土之組成材料屬同質性材料，相容性高，因此可預期拌製所得之混凝土品質亦將較由其他廢棄材拌製之混凝土品質為高。

國外對再生混凝土的研究，事實上從 1970 年代就已開始，近年來又注意到其重要性^[2,3,4,5,7]，研究中考慮採用的骨材材料，除混凝土廢料外，還包括有玻璃、爐渣、礦渣、橡膠、金屬廢料、有機廢料等^[9-14]，各類固體廢棄物在應用上，對混凝土性質可能產生影響的如工作性、凝結時間、強度、耐久性、鹼質反應等。其中，利用混凝土廢料於再生混凝土上需要注意的，主要為沾附在骨材上水泥漿所造成的製作過程及性質方面的影響，其他如級配、碎化費及雜質去除等^[10]，也是其不利點。從過去的研究中也可發現^[10]，若利用混凝土廢棄料拌製得之再生混凝土與採用天然骨材之混凝土比較可發現，再生骨材混凝土至少可維持 2/3 以上之抗壓強度及彈性模數，而且可滿足工作性及耐久性要求（如表 1-2 所示）。再生骨材之利用，主要之阻礙在於需要碎化、級配、去

塵及分離不需要之雜質等工作，但在慮及廢棄物處理之費用時，以廢棄混凝土碎化後充當混凝土骨材是具有其經濟性的。就上述文獻結果整理如下：

(一) 粒型及表面構造

再生粗骨材由混凝土碎化而得，其外觀略為扁平且多稜角，表面多孔又粗糙，細長率、方形率介於卵石與碎石之間，且較接近卵石之形狀。雖稱不上是最佳粒形，但已能滿足混凝土骨材的粒形要求。

再生細骨材形狀為多角形，孔隙率大、有高吸水率，將使得拌製所得之混凝土較為脆弱且不堅固。Buck^[8]建議再生混凝土最好只使用再生粗骨材，而細骨材部份，則以天然砂取代之。

(二) 骨材附著之水泥漿及水泥砂漿

廢棄混凝土經過碎化後所得之再生骨材，為一天然骨材及舊水泥砂漿之組合，附著於骨材的水泥砂漿對於再生混凝土的性質有重大的影響。這些附著在天然骨材上的水泥砂漿所佔體積比例，在 Hansen & Narud^[19]研究中指出，當原來使用的水泥及天然骨材為同一類時，即使在不同水灰比情況下，粗骨材粒徑為 16~32mm 者，其水泥漿體積約佔 25~35%；粒徑 8~16mm 者，約佔 40%；而粒徑 4~8mm 者，則佔約 60%。顯示粒徑愈小，附著之砂漿比例愈高。

另外 Hasaba et al.^[20]則發現，當舊混凝土抗壓強度為 24 MPa 時，附著在骨材上的水泥砂漿所佔體積比例約 35.5%，41 MPa 者，水泥砂漿所佔體積比例約 36.7%，51 MPa 者則為約 38.4%。綜合上述可知骨材表面沾附水泥漿所佔體積比例在 25%~60% 之間。

(三) 骨材密度、吸水率及落砂磨損強度

經 Hansen and Narud^[19] 研究指出，舊混凝土單位重介於 $2380\text{kg/m}^3 \sim 2410\text{kg/m}^3$ 之間(其中舊混凝土使用之天然骨材比重為 2.50~2.61)，則再生粗骨材 S.S.D 比重，從 2.34~2.49(粒徑 16~32mm)，且不受舊混凝土性質的影響。

Hasaba et al[11]指出，舊混凝土使用之天然骨材比重 2.70，天然砂比重 2.59，則再生粗骨材比重約 2.43(粒徑 5~25mm)，再生細骨材比重約 2.31。

日本的研究則指出，由大批廢棄混凝土碎化之再生粗骨材，乾燥單位重介於 $2120\sim 2430\text{ kg/m}^3$ 之間，S.S.D 比重為 2.29~2.51。再生細骨材，乾燥單位重介於 $1970\sim 2140\text{ kg/m}^3$ 之間，S.S.D 比重為 2.19~2.32。探究再生骨材比重較低的原因為再生骨材中含有比重較低的水泥砂漿(約 2.00)所致。

在與天然骨材做各種物理性質比較時，較特殊的部份就是再生骨材有較高的吸水率，Hansen & Narud^[19] 指出，再生骨材粒徑 4~8mm 者，吸水率為 8.7%，粒徑 16~32mm 者，吸水率為 3.7%，而再生骨材所沾的純水泥砂漿則高達 17%。相比較之下，原天然骨材吸水率只有 0.8~3.7%，顯見再生骨材的確吸水率偏高，其中骨材吸水率以規範 ASTM C127 方法測試。基於再生骨材之高吸水性，一般建議在拌製再生混凝土前，先將骨材預濕以保持再生混凝土品質之穩定。

日本從多種不同強度，以不同方式碎化得到的再生骨材，做落砂磨損試驗，磨損率在 25.1~35.1% 之間。ASTM 規定骨材磨損率不得超出 50%，因此除回收使用品質較差之混凝土外，一般再生骨材均能符合規範要求。

(四) 新拌混凝土用水量與工作度

在骨材面乾內飽和情況下，再生混凝土的稠度和普通混凝土相當接近，因此使用再生骨材在工作性方面並無多大問題，但有結果顯示其工作度損失較大。Mukai^[21]指出，若欲製造與普通混凝土相同坍度的再生混凝土(再生粗骨材+天然砂)，則拌合用水量需比同配比之普通混凝土增加 10 kg/m^3 或 5%。若同時使用再生粗骨材和再生細骨材，則用水量需增加 25 kg/m^3 或 15%。但同時使用再生粗骨材和再生細骨材製造的再生混凝土會顯得較粗糙，表面不易修飾。因此一般文獻皆建議以天然砂代替再生細骨材，藉由添加 25% 以上的天然砂將可改善其各項性質，因此建議完全使用天然砂，如此再生混凝土品質較好，工作性也較佳。

(五) 水灰比及水泥用量

從許多有關混凝土研究中已大致上確定，混凝土抗壓強度與水灰比有相當線性的關係，包括再生混凝土在內也有此種趨勢。但普遍存在著再生混凝土強度不如普通混凝土的情形。如上節所述，在相同水灰比下，為了使再生混凝土(再生粗骨材+天然砂)與普通混凝土有相同工作度而增加 5% 用水量，基於由水灰比控制抗壓強度的理由，為使水灰比保持一定，水泥用量也需相對提高 5% 或者更多^[8,19,22]。若使用再生砂，以往文獻^[8,19,22]均指出，使用再生砂會導致抗壓強度的明顯下降。因此，在相同強度或坍度條件下，再生混凝土將比普通混凝土需要較多水泥量，而使用再生砂則需要更多的水泥量，顯然較為不經濟。

(六) 空氣含量及單位重

新拌再生混凝土空氣含量較普通混凝土高，變動性亦大，單

位重約在 2020~2250 kg/m³ 之間，比普通混凝土單位重小，只約為其 85~95%^[8]。

(七) 再生混凝土之配合設計

再生混凝土的配合設計大致上與普通混凝土相同，一般配合設計的方法均可適用，但於實用方面，則須做些微的修正^[8,22]，包括：

1. 設計目標強度時，若碎化之舊混凝土品質不均勻，則須考慮較大的標準偏差。
2. 若要沿用一般普通混凝土，以水灰比決定拌製所得之混凝土強度，則須經過試拌，若所得之強度低於需求強度，則須調整水灰比。
3. 要達到與普通混凝土相同的坍度，拌製再生混凝土時須增加約 10 kg/m³ 的用水量。
4. 配合設計要以實測混凝土單位重作配比控制。
5. 再生骨材之級配要求與天然骨材相同。

(八) 再生混凝土之製作

實際經驗顯示，再生混凝土與普通混凝土在拌合、輸送、澆置、振動夯實和飾面時均一樣方便。然而，由於高吸水率的特性，須將骨材處理成面乾內飽和的狀態，因此必須保持濕潤，使之盡可能接近面乾內飽和狀態。

基於經濟及工程方面的考量，由於再生細骨材的粒度曲線大多無法滿足規範要求，且會降低抗壓強度，因此建議以天然砂取代再生砂。再生骨材因表面沾附有水泥砂漿，在拌合時會造成磨損的細微粉末加入拌合，因此使得再生混凝土的泌水現象較普通混凝土少。

(九) 再生混凝土抗壓強度與強度成長

文獻^[8,22]指出，在相同配比下，再生混凝土抗壓強度較普通混凝土低約 10%。另外 Hansen & Narud^[19]得出關於再生混凝土抗壓強度的結論，若用高強度舊混凝土(w/c=0.4)以及低強度舊混凝土(w/c=1.2)分別拌製高強度再生混凝土，以低強度舊混凝土拌製者較以高強度拌製之強度低 39%。又再生混凝土強度的高低與其所使用舊混凝土之水灰比，及再生混凝土本身的水灰比均有關聯。若舊混凝土之水灰比欲拌製再生混凝土之水灰比小，則再生混凝土強度將可達到或甚至超過普通混凝土強度。

骨材與砂漿的粘結力，按骨材來源而有不同，其大小順序為碎石場 > 廢棄碎石 > 廢棄碎水泥石 > 廢棄水泥砂漿，其中廢棄水泥砂漿只達天然碎石的約 54%^[22]。因此可得下述結論，即使用表面沾附砂漿之碎石，其抗壓強度會有所折減，乾淨之碎石則幾乎沒有折減。若使用碎石場之碎石，其破壞形式，不論天然或再生，試體破壞發生在骨材與砂漿之界面，但大部份再生骨材均沾附有水泥砂漿，則試體破壞經常是在骨材部份，因此強度較低的原因主要在水泥漿部份，骨材界面粘結力部份亦有些許影響。

一般作為強度比較的普通混凝土，若其強度高於拌製再生混凝土用之廢棄混凝土，則往往其強度亦較再生混凝土高，當舊混凝土中的天然骨材強度較高時，且新拌再生混凝土水泥砂漿強度及骨材與水泥砂漿粘結強度高於再生骨材強度或舊砂漿與原天然骨材之粘結強度時，則再生骨材強度即為再生混凝土強度之控制因子。換言之，當附著之舊砂漿強度高於舊混凝土中之天然骨材，而使得再生骨材強度高於新拌水泥砂漿強度時，則新拌水泥砂漿

為再生混凝土強度之控制因子。

若使用同一來源再生骨材在實驗室內進行抗壓強度試驗，其變動值與普通混凝土者相近不會有太大的變異值。實際應用上，基於再生骨材的高吸水率，即使事先預濕，大幅度的抗壓強度變動值仍會存在。

在骨材品質方面，不同品質的再生骨材容易造成抗壓值變動，De Pauw^[23]指出，從 12 種不同品質(不同水灰比或不同強度)舊混凝土，做同一配比之再生混凝土，其 28 天抗壓強度從 32MPa 到 49MPa 都有，平均強度 41 MPa，標準偏差 5 MPa，變動係數 12 %。

當變動係數高於一個程度，為了維持相同品質以達到一定強度，水泥量將被提高，但如此做極不經濟。

(十) 再生混凝土之力學性質

由於附著於再生骨材上之水泥砂漿具有低彈性模數之特性，造成再生混凝土之彈性模數普遍較普通混凝土略低。Frordistou-Yannas^[22]研究指出，再生混凝土的彈性模數比普通混凝土者低 33% 以上。另外 Gerardu^[24]則提出，因使用再生細骨材與否，對再生混凝土之彈性模數有顯著的影響。研究結果顯示，再生混凝土(再生粗骨材+天然砂)的彈性模數較普通混凝土低 15%；加入再生砂的再生混凝土(再生粗骨材+再生砂)則達 40%。

各別研究所使用的再生骨材性質不同，其降低幅度不盡相同，但是大致上可歸納出以下結論，再生混凝土(再生粗骨材+天然砂)降低幅度在 10~30% 之間，而摻加再生砂的再生混凝土(再生粗骨材+再生砂)則在 25~40% 之間。

至於再生混凝土的柏松比，一般認為與混凝土配比及抗壓強

度沒有明顯的關係存在，混凝土柏松比在 0.15~0.2 之間。

一般預測再生混凝土潛變量將較普通混凝土者大，原因為再生骨材內部孔隙較多且不如天然碎石緻密，一些文獻研究結果也證實在相同配比條件下，其潛變量將較普通混凝土高 20~ 60%^[24]。

在乾縮方面，再生混凝土亦明顯較普通混凝土大，其範圍在 14~95% 之間^[20]。

在國內，對再生混凝土之研究不多^[15-17]，尤其是以廢棄混凝土充當骨材之研究，僅停留在嘗試性之初步探討階段。劉玉雯^[16]曾於 1993 年提出再生混凝土抗壓行為之研究，將廢棄混凝土之原有強度亦考慮在內。以往之試驗資料顯示，於高水灰比時，再生混凝土之抗壓強度與普通土混凝土相差不大，但水灰比愈小其差距愈大；當水灰比為 0.45 時，再生混凝土之抗壓強度約為普通混凝土的 71~78%。並且舊混凝土之強度愈大，愈有利於再生混凝土強度之提升，而由再生粗、細骨材所製作之再生混凝土比起由再生粗骨材及天然砂製作而成之混凝土強度為高。此外，再生混凝土之強度成長，早期較普通混凝土快；但 14 天以後則較緩慢。1996 年，王弘佑^[17]針對廢棄混凝土再生細骨材實用性之探討中提出，若以再生細骨材取代天然細骨材使用時，對水泥砂漿 28 天齡期以前之抗壓強度有少許之負面影響，但對於較長齡期如 3 個月或 6 個月時之抗壓強度則有顯著之不良影響，甚至強度可降低至 25%~75% 如圖 1-1 所示，此結果與文獻^[16]結論不同，但對於混凝土之抗拉、抗彎強度而言，雖會造成負面影響，效應則不顯著，此點與國內外一般文獻結果相若。綜合國內研究可發現，對於廢棄混凝土之再生利用研究，僅止於片段性之研究，在進入實務應用之前，尚須更全面性之規劃試驗研究，以建立完整之資料來提供產業界使用。

表 1-1 Typical Solid Wastes That Have Been Considered As Aggregate for Concrete^[9]

表 1-2 Comparison of Properties of Uncontaminated Recycled Aggregate Concrete and Natural Aggregate Concrete of Similar Composition

圖 1-1 水泥砂漿抗壓強度曲線圖

第二章 研究方法及進行步驟

本研究將涵蓋廢棄混凝土的骨材化處理、再生混凝土配合設計與拌製技術，以及再生混凝土性質等的測析。各項研究方法與進行步驟如圖 2-1 所示。各項工作再分述如下：

一、廢棄混凝土的骨材化

廢棄混凝土塊常會夾雜有諸如土壤、裝璜建材、塑膠、鋼筋、瀝青、金屬、有機物等雜質。一般文獻建議在初步碎化之前，一些可以用手撿的雜物，以人工除去，骨材初步碎化後，使其過篩，將通過 3/8" 篩孔的粒料捨棄不用，以去除較細之雜質。另外，亦可在輸送帶上方以電磁鐵將金屬廢棄物自混凝土塊中取出。

碎化時，在國外的文獻研究中指出，以顎式碎石機，調整開口大小，碎化混凝土廢棄物，得到之再生粗骨材符合 ASTM C-33 規範之級配要求，且為一良好級配。但以同種碎石機，經碎化混凝土廢棄物所得到之再生細骨材大部份均無法符合 ASTM C-33 規範要求。其粒度分佈極不均勻，得到之粒度曲線仍無法達到規範最低要求，藉由添加較細之天然砂可使其符合規範標準。本文研究則採用天然砂替代再生砂使用。

至於再生骨材堆放及處理日本有制定規範如下：

- (一) 欲碎化成再生骨材之舊混凝土，因其品質不同或碎化方式不同時，須隔離存放。
- (二) 再生粗骨材與再生細骨材分開存放。
- (三) 再生骨材在存放、運送時，應避免造成骨材破損或使粒度分配不均勻的情形發生，而導致骨材品質上的變化。
- (四) 再生粗骨材的吸水率較高，因此這類骨材在使用之前須處理

成面乾內飽和。基於此一理由，再生骨材堆置場地須提供灑水設備，使骨材保持在濕潤狀態。再生細骨材因含有較多尚未水化之水泥和已水化之石灰石，放置過久易風化成塊狀，應避免長時間存放。

(五) 再生骨材不得和其它類骨材混合堆放。

由於本研究廢棄混凝土是由試驗室中混凝土抗壓圓柱試體中取得，因此並不考慮雜質去除之過程，且本研究亦將廢棄混凝土的強度納入為進行再生混凝土配合設計時的考慮項目之一，故於廢料收集上即開始做強度分類，然後從事碎細工作及篩分處理，經參考上述文獻定得廢棄混凝土骨材化之進行步驟簡述如下：

- (一) 在試驗室內回收混凝土廢料，依三種強度， $f'c = 2000 \sim 3000\text{psi}$ ， $3000 \sim 4000\text{psi}$ 及 $4000 \sim 5000\text{psi}$ ，分類收集備用。
- (二) 將混凝土廢料運到砂石場碎化，以最大粒徑 $D_{\max}=3/4"$ 為準。
- (三) 碎細後的廢料運回試驗室內做篩分工作，依 $3/4" / 3/8"$ 、 $3/8" / \#_4$ 及 $\#_4$ 以下等三群分類儲存。
- (四) 進行骨材之級配工作，使級配骨材的顆粒分佈符合 ASTM C33 的規定 ($D_{\max}=3/4"$)。

二、再生混凝土之配合設計與拌製

再生混凝土的配合設計大致上與普通混凝土相同，一般配合設計方法皆可使用，惟實用上須做些微修正，文獻上亦指出若欲製造與普通混凝土相同坍度之再生混凝土(再生粗骨材 + 天然砂)，因骨材粒型較差且表面粗糙，用水量需比同配比之普通混凝土增加 $10\text{kg}/\text{m}^3$ 或 5% 的用水量。若同時使用再生粗骨材和再生細骨材，則用水量需增加至 $25\text{ kg}/\text{m}^3$ 或 15%，且其製造之再生混凝土品質較粗糙，表面不易修飾。添加 25% 以上的天然砂將可改善

其各項性質，完全使用天然砂之再生混凝土品質較好，工作性亦較佳。

在相同水灰比下，為了使再生混凝土（再生粗骨材 + 天然砂）與普通混凝土有相同工作度，得增加 5% 用水量，基於水灰比控制抗壓強度的理由，為使強度保持一定，因此水泥用量亦需相對提高 5% 或者更多。且新拌再生混凝土之空氣含量亦較普通混凝土高。以上性質皆為再生混凝土配合設計時所需加以考量的因素。

基於上述文獻所述，本文之配合設計將參考美國 ACI 法，基於材料體積概念進行配比計算與試拌，設計上將以新加入於廢棄混凝土骨材內的水泥砂漿，掌握拌製所得再生混凝土的強度與性質，即由控制水灰比及水泥砂漿含量，達成拌製一定強度的再生混凝土，其進行步驟列述如下：

- (一) 對三種混凝土廢料之級配骨材，個別測定其比重、吸水率、乾搗單位重等性質。
- (二) 配比計算的新混凝土條件取為：
抗壓強度： $f'c=2000 \sim 5000$ psi
稠度：坍度=12cm
骨材最大粒徑： $D_{max}=3/4"$
水泥砂漿含量：對基本配比之水泥砂漿量增減 5% 及 10% (坍度將改變)。
- (三) 對上述條件依 ACI 法進行配比計算得各組配合比例。
- (四) 依各組配比進行再生混凝土試拌工作，對新拌混凝土的配比控制以坍度測值評估。
- (五) 量測各組新拌混凝土的單位重、空氣含量。
- (六) 評估、研擬再生混凝土拌製技術。
- (七) 製作試體測試 28 天抗壓強度。

(八) 由實測抗壓強度與原水灰比之關係曲線確定各指定抗壓強度對應的水灰比，並據以設計出需要的配比。

三、再生混凝土性質的試驗與分析

利用各組完成的再生混凝土配比，即可進行混凝土的拌合與試體製作，以測析各項性質。試驗對象包括新拌混凝土及硬固混凝土兩部份；測析項目則涵蓋工程性質、強度、破壞機理及力學性質等，再分述如下，但各項試驗中都包括一組採用普通骨材的控制組，以資比較：

(一) 再生混凝土的製作條件為：

抗壓強度： $f'c=3000, 4000, 5000$ psi

稠度：坍度=12cm

骨材最大粒徑： $D_{max}=3/4"$

(二) 試驗項目：

1. 新拌混凝土

(1) 坍度及坍度損失

(2) 單位重

(3) 空氣含量

2. 硬固混凝土

(1) 單位重

(2) 吸水率

(3) 抗壓強度 (7 天, 28 天)及強度成長 (1, 3, 7, 28, 56 天)

(4) 收縮

(5) 潛變

(6)彈性模數，柏松比

(7).握裹強度

(三) 試驗步驟：

- 1.依各組混凝土配比準備材料
- 2.進行混凝土拌製及各項試體製作
- 3.對新拌混凝土量測其工程性質
- 4.測析硬固混凝土的物理性質、強度及力學性質並觀察其破壞機理。
- 5.比較再生混凝土與普通混凝土在各項性質上的差異點。

四、再生混凝土的配比及拌製技術建議

基於前述對混凝土廢料的骨材化處理、再生混凝土的配合設計探討，以及各項混凝土性質的比較分析，將可研討出再生混凝土在骨材生產方面的處理與調配法、配比的推算法以及其製造技術，並對再生混凝土的工程與力學性質有完整的瞭解。如此，將可綜合建議再生混凝土的配比計算流程，建立基本的配比資料庫以及拌合製造的技術方法。

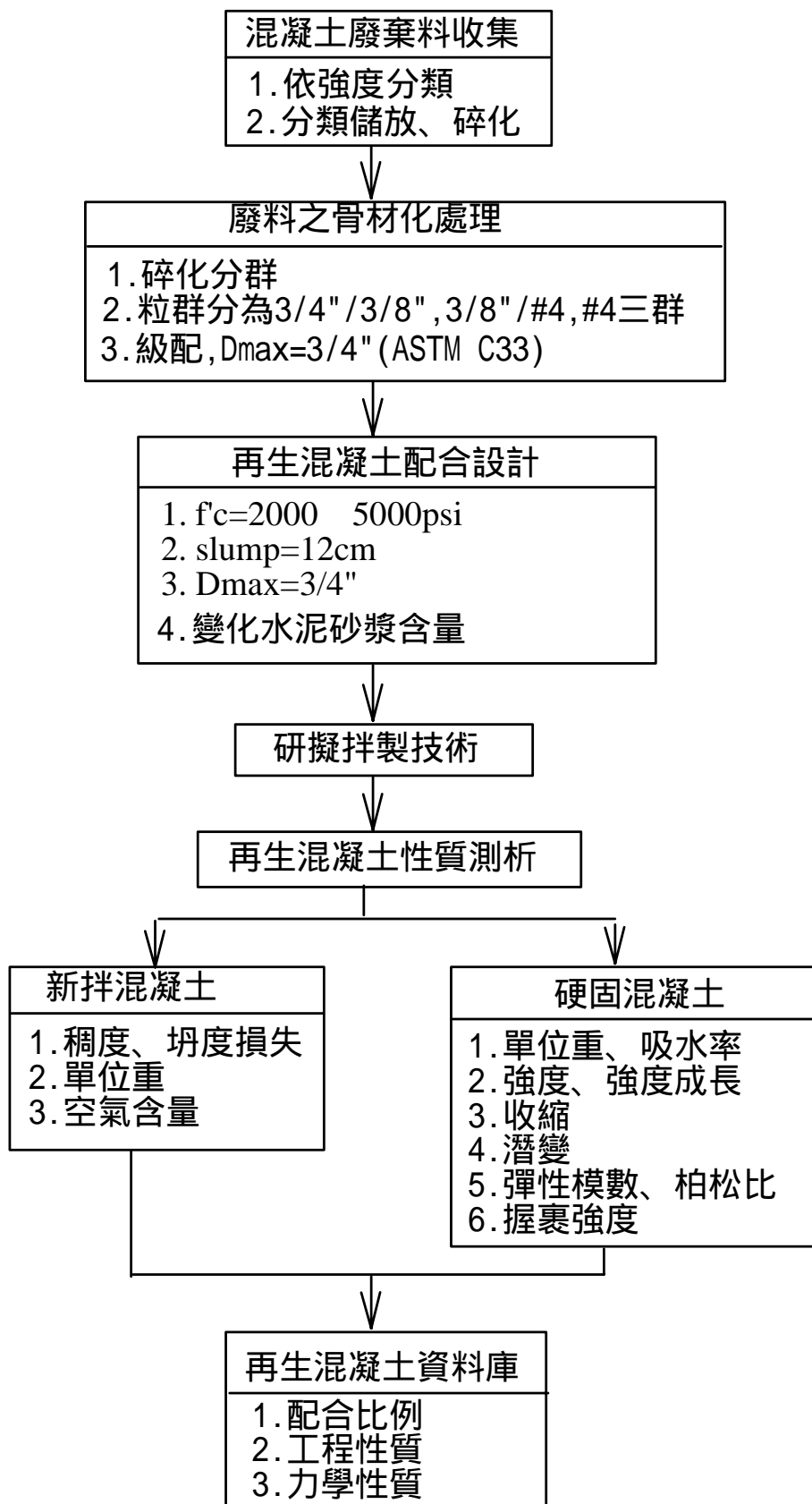


圖2-1 再生混凝土之試驗研究流程

第三章 試驗工作

一、試驗材料

本研究再生骨材之取得係利用夯擊式碎石機(如照片 3-1)將混凝土試體(15 ×30cm 或 10 ×20cm)擊碎為顆粒小於 3/4"之碎石,如照片 3-2,然後由篩分分群儲存,並依 ASTM 規範標準級配配得各粒群之百分比以得骨材級配。各項骨材之物理性質如下:

(一)天然粗骨材:比重、吸水率、乾搗單位重如表 3-1 所示,級配符合 ASTM C33 規定。其篩分析結果如表 3-2

(二)天然砂:比重 = 2.62

吸水率 = 0.87%

F.M.值 = 2.80

其篩分析結果如表 3-3

(三)再生骨材:比重吸水率、乾搗單位單重如表 3-1 所示,篩分析結果如表 3-4

扁長率: $b/a = 0.67$, $c/b = 0.65$

二、試驗方法

為瞭解再生混凝土與普通混凝土各項性質上之差異,本研究除了對不同配比之再生混凝土進行試驗外,另外亦拌製相同配比之普通混凝土為對照組比較之,試驗項目除硬固混凝土外亦對新拌混凝土性質測試之。所有試驗方法則依照 CNS 規範或 ASTM 規範進行。

三、試體規劃

試驗工作中，對不同之測試項目有不同尺寸之試體規劃，混凝土單位重、吸水率、強度性質採用 $10 \times 20\text{cm}$ 之圓柱試體，水泥砂漿強度試驗則取 $5\text{cm} \times 5\text{cm} \times 5\text{cm}$ 立方試體，潛變試驗（如照片 3-3）採用 $15 \times 30\text{cm}$ 之標準圓柱試體，試驗方法如照片 3-4 所示，乾縮試驗部分選用 $10 \times 10 \times 30\text{cm}$ 之長方柱試體，握裹試驗則選用 $15\text{cm} \times 15\text{cm} \times 15\text{cm}$ 混凝土試體及 6 號鋼筋，如照片 3-5 所示。針對不同廢棄混凝土強度等級及變化水灰比等參數所規劃得之試體數目如表 3-5 所示。

以上所有試體皆採標準濕治養護法養生，於試驗前一天自養生室取出，先行晾乾後再進行測試。

四、配比設計

本研究首先選取三種不同強度等級之廢棄混凝土及變化三種水灰比進行試拌，預期將得到各種不同強度之再生混凝土，以確定實測抗壓強度與水灰比之關係曲線，並據以設計出要求強度下所需要之配比。試拌坍度取 12cm ，骨材最大粒徑為 $3/4"$ ，以此條件並依 ACI 工法進行配比計算，可得各組之配合比例如表 3-6 所示。

表 3-1 粗骨材物理性質

依強度分類之再生粗骨材	乾比重	SSD 比重	吸水率 (%)	乾搗單位重 (kg/m ³)	方形率	細長率
2000~3000psi	2.25	2.40	6.64	1330		
3000~4000psi	2.29	2.43	5.70	1320	1.49	2.32
4000~5000psi	2.24	2.39	6.80	1322		
普通骨材	2.58	2.61	1.20	1520		

表 3-2 天然粗骨材篩分析表

篩孔大小 (in)	留篩重量百分率 (%)	累積留篩重量百分率 (%)	通過百分率 (%)
3/4"	2.9	2.9	97.1
1/2"	28.1	31.0	69.0
3/8"	37.6	68.6	31.4
# 4	31.4	100.0	0.0

表 3-3 天然砂篩分析表

篩孔大小(in)	留篩重量百分率(%)	停留於細度計算用篩上之重量累積百分率(%)
# 4	1.9	1.9
# 8	15.3	17.2
# 16	16.2	33.4
# 30	23.4	56.8
# 50	22.1	78.9
# 100	13.6	92.5
Pan	7.4	+280.3

F.M=2.80

表 3-4a 再生骨材(來源:2000-3000psi 強度圓柱試體)篩分析表

篩孔大小(in)	留篩重量百分率(%)	累積留篩重量百分率(%)	通過百分率(%)
3/4"	3.5	3.5	96.5
1/2"	35.2	38.7	61.3
3/8"	32.8	71.5	28.5
# 4	28.4	100.0	0.0

表 3-4b 再生骨材(來源:3000-4000psi 強度圓柱試體) 篩分析表

篩孔大小(in)	留篩重量百分率(%)	累積留篩重量百分率(%)	通過百分率(%)
3/4"	3.1	3.1	96.9
1/2"	27.4	30.5	69.5
3/8"	34.4	64.9	35.1
# 4	35.1	100.0	0.0

表 3-4c 再生骨材(來源:4000-5000psi 強度圓柱試體)篩分析表

篩孔大小(in)	留篩重量百分率(%)	累積留篩重量百分率(%)	通過百分率(%)
3/4"	1.8	1.8	98.2
1/2"	36.9	38.7	61.3
3/8"	34.1	72.8	27.2
# 4	27.2	100	0

表 3-5 a 試體規劃表

骨材來源	水灰比	砂漿Vol (%)	試 驗 項 目						試體個數
抗壓強度2000-3000psi 圓柱試體	w/c=0.5	Vm=65%	強度成長 (1.3.7.14.28天)	單位重 吸水率	彈性模數 卜松比	收縮		握裹強度	10 *20 15個 10*10*30 3個 15*15*15 3個 單位:cm
	w/c=0.6	Vm=55%	強度成長 (1.3.7.14.28天)	單位重 吸水率	彈性模數 卜松比	收縮		握裹強度	10 *20 57個 15 *30 4個
		Vm=60%	強度 (7.28天)	單位重 吸水率					10*10*30 9個 15*15*15 9個
		Vm=65%	強度成長 (1.3.7.14.28天)	單位重 吸水率	彈性模數 卜松比	收縮	潛變	握裹強度	單位:cm
		Vm=70%	強度 (7.28天)	單位重 吸水率					
	Vm=75%	強度成長 (1.3.7.14.28天)	單位重 吸水率	彈性模數 卜松比	收縮		握裹強度		
w/c=0.7	Vm=65%	強度成長 (1.3.7.14.28天)	單位重 吸水率	彈性模數 卜松比	收縮		握裹強度	10 *20 15個 10*10*30 3個 15*15*15 3個 單位:cm	

表 3-5b 試體規劃表

骨材來源	水灰比	砂漿Vol (%)	試 驗 項 目						試體個數	
抗壓強度3000-4000psi 圓柱試體	w/c=0.5	Vm=65%	強度成長 (1.3.7.14.28天)	單位重 吸水率	彈性模數 卜松比	收縮	潛變	握裹強度	10 *20 15個 15 *30 4個 10*10*30 3個 15*15*15 3個 單位:cm	
	w/c=0.6	Vm=55%	強度成長 (1.3.7.14.28天)	單位重 吸水率	彈性模數 卜松比	收縮	潛變	握裹強度	10 *20 57個 15 *30 4個	
		Vm=60%	強度 (7.28天)	單位重 吸水率	彈性模數 卜松比	收縮			10*10*30 9個 15*15*15 9個	
		Vm=65%	強度成長 (1.3.7.14.28天)	單位重 吸水率					握裹強度	單位:cm
		Vm=70%	強度 (7.28天)	單位重 吸水率						
		Vm=75%	強度成長 (1.3.7.14.28天)	單位重 吸水率					彈性模數 卜松比	收縮
	w/c=0.7	Vm=65%	強度成長 (1.3.7.14.28天)	單位重 吸水率			彈性模數 卜松比	收縮	潛變	握裹強度

表 3-5 c 試體規劃表

骨材來源	水灰比	砂漿VoI (%)	試驗項目						試體個數	
抗壓強度 4000-5000psi 圓柱試體	w/c=0.5	Vm=65%	強度成長 (1.3.7.14.28天)	單位重 吸水率	彈性模數 卜松比	收縮		握裹強度	10 *20 15個 10*10*30 3個 15*15*15 3個 單位:cm	
	w/c=0.6	Vm=55%	強度成長 (1.3.7.14.28天)	單位重 吸水率	彈性模數 卜松比	收縮	潛變	握裹強度	10 *20 57個 15 *30 4個	
		Vm=60%	強度 (7.28天)	單位重 吸水率						10*10*30 9個 15*15*15 9個
		Vm=65%	強度成長 (1.3.7.14.28天)	單位重 吸水率	彈性模數 卜松比	收縮		握裹強度	單位:cm	
	Vm=70%	強度 (7.28天)	單位重 吸水率							
Vm=75%	強度成長 (1.3.7.14.28天)	單位重 吸水率	彈性模數 卜松比	收縮	握裹強度					
w/c=0.7	Vm=65%	強度成長 (1.3.7.14.28天)	單位重 吸水率	彈性模數 卜松比	收縮		握裹強度	10 *20 15個 10*10*30 3個 15*15*15 3個 單位:cm		

表 3-5 d 試體規劃表

骨材來源	水灰比	砂漿Vol (%)	試 驗 項 目						試體個數
天然骨材	w/c=0.5	Vm=65%	強度成長 (1.3.7.14.28天)	單位重 吸水率	彈性模數 卜松比	收縮		握裹強度	10 *20 15個 10*10*30 3個 15*15*15 3個 單位:cm
	w/c=0.6	Vm=65%	強度成長 (1.3.7.14.28天)	單位重 吸水率	彈性模數 卜松比	收縮	潛變	握裹強度	10 *20 15個 15 *30 4個 10*10*30 9個 15*15*15 9個 單位:cm
	w/c=0.7	Vm=65%	強度成長 (1.3.7.14.28天)	單位重 吸水率	彈性模數 卜松比	收縮		握裹強度	10 *20 15個 10*10*30 3個 15*15*15 3個 單位:cm

表 3-6 新拌混凝土配比及性質

(一)

混凝土種類	普通混凝土	水泥砂漿量(Vm%)	64
設計用水量(kg/m ³)	208	設計水泥量(kg/m ³)	416
水灰比(w/c)	0.5	坍度(cm)	12
粗骨材用量(kg/m ³)	938	天然砂用量(kg/m ³)	734
設計混凝土單位重(kg/m ³)	2296	設計空氣含量(%)	2.0
新拌混凝土單位重(kg/m ³)	2355	實測空氣含量(%)	1.5
骨材來源：天然骨材			

(二)

混凝土種類	普通混凝土	水泥砂漿量(Vm%)	64
設計用水量(kg/m ³)	208	設計水泥量(kg/m ³)	347
水灰比(w/c)	0.6	坍度(cm)	18
粗骨材用量(kg/m ³)	938	天然砂用量(kg/m ³)	791
設計混凝土單位重(kg/m ³)	2284	設計空氣含量(%)	2.0
新拌混凝土單位重(kg/m ³)	2368	實測空氣含量(%)	1.0
骨材來源：天然骨材			

(三)

混凝土種類	普通混凝土	水泥砂漿量(Vm%)	64
設計用水量(kg/m ³)	208	設計水泥量(kg/m ³)	297
水灰比(w/c)	0.7	坍度(cm)	17
粗骨材用量(kg/m ³)	938	天然砂用量(kg/m ³)	833
設計混凝土單位重(kg/m ³)	2276	設計空氣含量(%)	2.0
新拌混凝土單位重(kg/m ³)	2305	實測空氣含量(%)	1.4
骨材來源：天然骨材			

(四)

混凝土種類	再生混凝土	水泥砂漿量(Vm%)	64
設計用水量(kg/m ³)	208	設計水泥量(kg/m ³)	416
水灰比(w/c)	0.5	坍度(cm)	16
粗骨材用量(kg/m ³)	865	天然砂用量(kg/m ³)	734
設計混凝土單位重(kg/m ³)	2223	設計空氣含量(%)	2.0
新拌混凝土單位重(kg/m ³)	2285	實測空氣含量(%)	1.5
骨材來源：抗壓強度 2000~3000 psi 圓柱試體			

(五)

混凝土種類	再生混凝土	水泥砂漿量(Vm%)	54
設計用水量(kg/m ³)	174	設計水泥量(kg/m ³)	291
水灰比(w/c)	0.6	坍度(cm)	13
粗骨材用量(kg/m ³)	1104	天然砂用量(kg/m ³)	664
設計混凝土單位重(kg/m ³)	2233	設計空氣含量(%)	2.0
新拌混凝土單位重(kg/m ³)	2293	實測空氣含量(%)	1.0
骨材來源：抗壓強度 2000 ~ 3000 psi 圓柱試體			

(六)

混凝土種類	再生混凝土	水泥砂漿量(Vm%)	59
設計用水量(kg/m ³)	191	設計水泥量(kg/m ³)	315
水灰比(w/c)	0.6	坍度(cm)	8
粗骨材用量(kg/m ³)	984	天然砂用量(kg/m ³)	728
設計混凝土單位重(kg/m ³)	2218	設計空氣含量(%)	2.0
新拌混凝土單位重(kg/m ³)	2280	實測空氣含量(%)	1.3
骨材來源：抗壓強度2000 ~ 3000 psi 圓柱試體			

(七)

混凝土種類	再生混凝土	水泥砂漿量(Vm%)	64
設計用水量(kg/m ³)	208	設計水泥量(kg/m ³)	347
水灰比(w/c)	0.6	坍度(cm)	18
粗骨材用量(kg/m ³)	865	天然砂用量(kg/m ³)	791
設計混凝土單位重(kg/m ³)	2211	設計空氣含量(%)	2.0
新拌混凝土單位重(kg/m ³)	2259	實測空氣含量(%)	1.5

骨材來源：抗壓強度 2000~3000 psi圓柱試體

(八)

混凝土種類	再生混凝土	水泥砂漿量(Vm%)	69
設計用水量(kg/m ³)	225	設計水泥量(kg/m ³)	378
水灰比(w/c)	0.6	坍度(cm)	21
粗骨材用量(kg/m ³)	744	天然砂用量(kg/m ³)	854
設計混凝土單位重(kg/m ³)	2201	設計空氣含量(%)	2.0
新拌混凝土單位重(kg/m ³)	2267	實測空氣含量(%)	1.0

骨材來源：抗壓強度 2000~3000 psi圓柱試體

(九)

混凝土種類	再生混凝土	水泥砂漿量(Vm%)	74
設計用水量(kg/m ³)	242	設計水泥量(kg/m ³)	403
水灰比(w/c)	0.6	坍度(cm)	22
粗骨材用量(kg/m ³)	624	天然砂用量(kg/m ³)	920
設計混凝土單位重(kg/m ³)	2189	設計空氣含量(%)	2.0
新拌混凝土單位重(kg/m ³)	2244	實測空氣含量(%)	1.0

骨材來源：抗壓強度 2000 ~ 3000 psi 圓柱試體

(十)

混凝土種類	再生混凝土	水泥砂漿量(Vm%)	64
設計用水量(kg/m ³)	208	設計水泥量(kg/m ³)	297
水灰比(w/c)	0.7	坍度(cm)	20
粗骨材用量(kg/m ³)	865	天然砂用量(kg/m ³)	833
設計混凝土單位重(kg/m ³)	2203	設計空氣含量(%)	2.0
新拌混凝土單位重(kg/m ³)	2254	實測空氣含量(%)	1.5

骨材來源：抗壓強度 2000 ~ 3000 psi 圓柱試體

(十一)

混凝土種類	再生混凝土	水泥砂漿量(Vm%)	65
設計用水量(kg/m ³)	208	設計水泥量(kg/m ³)	416
水灰比(w/c)	0.5	坍度(cm)	13
粗骨材用量(kg/m ³)	851	天然砂用量(kg/m ³)	760
設計混凝土單位重(kg/m ³)	2235	設計空氣含量(%)	2.0
新拌混凝土單位重(kg/m ³)	2278	實測空氣含量(%)	1.6

骨材來源：抗壓強度 3000 ~ 4000 psi 圓柱試體

(十二)

混凝土種類	再生混凝土	水泥砂漿量(Vm%)	55
設計用水量(kg/m ³)	175	設計水泥量(kg/m ³)	291
水灰比(w/c)	0.6	坍度(cm)	4.5
粗骨材用量(kg/m ³)	1094	天然砂用量(kg/m ³)	688
設計混凝土單位重(kg/m ³)	2248	設計空氣含量(%)	2.0
新拌混凝土單位重(kg/m ³)	2295	實測空氣含量(%)	1.3

骨材來源：抗壓強度 3000 ~ 4000 psi 圓柱試體

(十三)

混凝土種類	再生混凝土	水泥砂漿量(Vm%)	60
設計用水量(kg/m ³)	192	設計水泥量(kg/m ³)	319
水灰比(w/c)	0.6	坍度(cm)	3.5
粗骨材用量(kg/m ³)	972	天然砂用量(kg/m ³)	752
設計混凝土單位重(kg/m ³)	2235	設計空氣含量(%)	2.0
新拌混凝土單位重(kg/m ³)	2293	實測空氣含量(%)	1.4

骨材來源：抗壓強度 3000 ~ 4000 psi 圓柱試體

(十四)

混凝土種類	再生混凝土	水泥砂漿量(Vm%)	65
設計用水量(kg/m ³)	208	設計水泥量(kg/m ³)	347
水灰比(w/c)	0.6	坍度(cm)	16
粗骨材用量(kg/m ³)	851	天然砂用量(kg/m ³)	817
設計混凝土單位重(kg/m ³)	2223	設計空氣含量(%)	2.0
新拌混凝土單位重(kg/m ³)	2292	實測空氣含量(%)	1.0

骨材來源：抗壓強度 3000 ~ 4000 psi 圓柱試體

(十五)

混凝土種類	再生混凝土	水泥砂漿量(Vm%)	70
設計用水量(kg/m ³)	225	設計水泥量(kg/m ³)	374
水灰比(w/c)	0.6	坍度(cm)	17
粗骨材用量(kg/m ³)	729	天然砂用量(kg/m ³)	882
設計混凝土單位重(kg/m ³)	2210	設計空氣含量(%)	2.0
新拌混凝土單位重(kg/m ³)	2267	實測空氣含量(%)	1.5

骨材來源：抗壓強度 3000 ~ 4000 psi 圓柱試體

(十六)

混凝土種類	再生混凝土	水泥砂漿量(Vm%)	75
設計用水量(kg/m ³)	241	設計水泥量(kg/m ³)	402
水灰比(w/c)	0.6	坍度(cm)	20.5
粗骨材用量(kg/m ³)	608	天然砂用量(kg/m ³)	947
設計混凝土單位重(kg/m ³)	2198	設計空氣含量(%)	2.0
新拌混凝土單位重(kg/m ³)	2227	實測空氣含量(%)	1.0

骨材來源：抗壓強度 3000 ~ 4000 psi 圓柱試體

(十七)

混凝土種類	再生混凝土	水泥砂漿量(Vm%)	65
設計用水量(kg/m ³)	208	設計水泥量(kg/m ³)	297
水灰比(w/c)	0.7	坍度(cm)	16
粗骨材用量(kg/m ³)	851	天然砂用量(kg/m ³)	851
設計混凝土單位重(kg/m ³)	2215	設計空氣含量(%)	2.0
新拌混凝土單位重(kg/m ³)	2257	實測空氣含量(%)	1.9

骨材來源：抗壓強度 3000 ~ 4000 psi 圓柱試體

(十八)

混凝土種類	再生混凝土	水泥砂漿量(Vm%)	64
設計用水量(kg/m ³)	208	設計水泥量(kg/m ³)	416
水灰比(w/c)	0.5	坍度(cm)	9
粗骨材用量(kg/m ³)	861	天然砂用量(kg/m ³)	734
設計混凝土單位重(kg/m ³)	2219	設計空氣含量(%)	2.0
新拌混凝土單位重(kg/m ³)	2289	實測空氣含量(%)	1.1

骨材來源：抗壓強度 4000 ~ 5000 psi 圓柱試體

(十九)

混凝土種類	再生混凝土	水泥砂漿量(Vm%)	54
設計用水量(kg/m ³)	174	設計水泥量(kg/m ³)	291
水灰比(w/c)	0.6	坍度(cm)	10
粗骨材用量(kg/m ³)	1099	天然砂用量(kg/m ³)	664
設計混凝土單位重(kg/m ³)	2228	設計空氣含量(%)	2.0
新拌混凝土單位重(kg/m ³)	2243	實測空氣含量(%)	1.3

骨材來源:抗壓強度 4000 ~ 5000 psi 圓柱試體

(二十)

混凝土種類	再生混凝土	水泥砂漿量(Vm%)	59
設計用水量(kg/m ³)	191	設計水泥量(kg/m ³)	315
水灰比(w/c)	0.6	坍度(cm)	20.5
粗骨材用量(kg/m ³)	980	天然砂用量(kg/m ³)	728
設計混凝土單位重(kg/m ³)	2214	設計空氣含量(%)	2.0
新拌混凝土單位重(kg/m ³)	2250	實測空氣含量(%)	0.9

骨材來源:抗壓強度 4000 ~ 5000 psi 圓柱試體

(二十一)

混凝土種類	再生混凝土	水泥砂漿量(Vm%)	64
設計用水量(kg/m ³)	208	設計水泥量(kg/m ³)	347
水灰比(w/c)	0.6	坍度(cm)	17
粗骨材用量(kg/m ³)	861	天然砂用量(kg/m ³)	791
設計混凝土單位重(kg/m ³)	2207	設計空氣含量(%)	2.0
新拌混凝土單位重(kg/m ³)	2255	實測空氣含量(%)	1.0

骨材來源：抗壓強度 4000 ~ 5000 psi 圓柱試體

(二十二)

混凝土種類	再生混凝土	水泥砂漿量(Vm%)	69
設計用水量(kg/m ³)	225	設計水泥量(kg/m ³)	378
水灰比(w/c)	0.6	坍度(cm)	22
粗骨材用量(kg/m ³)	741	天然砂用量(kg/m ³)	854
設計混凝土單位重(kg/m ³)	2198	設計空氣含量(%)	2.0
新拌混凝土單位重(kg/m ³)	2236	實測空氣含量(%)	0.8

骨材來源：抗壓強度 4000 ~ 5000 psi 圓柱試體

(二十三)

混凝土種類	再生混凝土	水泥砂漿量(Vm%)	74
設計用水量(kg/m ³)	242	設計水泥量(kg/m ³)	403
水灰比(w/c)	0.6	坍度(cm)	23
粗骨材用量(kg/m ³)	621	天然砂用量(kg/m ³)	920
設計混凝土單位重(kg/m ³)	2186	設計空氣含量(%)	2.0
新拌混凝土單位重(kg/m ³)	2200	實測空氣含量(%)	1.3
骨材來源：抗壓強度 4000 ~ 5000 psi 圓柱試體			

(二十四)

混凝土種類	再生混凝土	水泥砂漿量(Vm%)	64
設計用水量(kg/m ³)	208	設計水泥量(kg/m ³)	297
水灰比(w/c)	0.7	坍度(cm)	14
粗骨材用量(kg/m ³)	861	天然砂用量(kg/m ³)	833
設計混凝土單位重(kg/m ³)	2199	設計空氣含量(%)	2.0
新拌混凝土單位重(kg/m ³)	2250	實測空氣含量(%)	2.4
骨材來源:抗壓強度 4000 ~ 5000 psi 圓柱試體			

照片 3-1 夯擊式碎石機

照片 3-2 再生骨材

照片 3-3 水泥砂漿抗壓試體

照片 3-4 潛變試驗

照片 3-5 握裹試驗試體拌製

第四章 試驗結果與分析

一、廢棄混凝土的骨材化

由於本研究將廢棄混凝土之原有強度考慮為混凝土配合設計時之因子之一，因此首先對廢棄混凝土之收集採強度等級分類，即在試驗室回收廢棄料時，依三種強度等級， $f'c = 2000\sim 3000\text{psi}$ ； $3000\sim 4000\text{psi}$ 及 $4000\sim 5000\text{psi}$ 分類收集儲存。運至砂石場碎化後攜回試驗室，經篩分依 $3/4'' \sim 3/8''$ ， $3/8'' \sim \#4$ 及 $\#4$ 以上三群儲放，並進行各項骨材物理性質測試。

假設骨料顆粒為扁平橢圓體，其長軸為 a ，中間軸為 b ，短軸為 c 時，則經夯擊式碎石機所得再生骨材之形狀係數為 $b/a = 0.67$ ， $c/b = 0.65$ 。參考以下骨材形狀分類可知，碎化所得之再生骨材顆粒屬於扁平型，雖稱不上最佳粒型，但已滿足混凝土骨材之粒型要求。

骨材形狀之分類

名稱	b/a	c/b
不扁平且不細長	$> 2/3$	$> 2/3$
扁平	$> 2/3$	$< 2/3$
扁平且細長	$< 2/3$	$> 2/3$
細長	$< 2/3$	$< 2/3$

再生骨材 $b/a=0.67$ $c/b=0.65$

再就下表中普通砂石、碎石形狀係數與再生骨材之比較得知，採夯擊式所得之再生粗骨材細長率為 2.32，介於卵石與碎石

之間，方形率為 1.49 亦介於卵石與碎石間，且較接近卵石之形狀，此乃肇因於再生骨材含有水泥漿體屬弱性材料，在劈碎過程時，不像一般常重骨材容易產生劈裂而形成扁平顆料，反而因水泥砂漿之附著，產生之碎石較接近於卵石形狀，如照片 3-2 所示。就以上資料可知，廢棄混凝土碎化過程所得之碎石形狀可符合一般混凝土骨材顆粒形狀之要求。

普通河石、碎石之形狀係數與再生骨材之比較

種 類	體積係數	球形率	細長率	扁平率	方形率
卵 石	0.490	0.936	2.25	45.9	1.47
碎 石	0.361	0.692	3.80	56.0	1.57
再生骨材			2.32		1.49

再生粗骨材之其他各項物理性質測試結果如表 3-1，由表中結果可知，再生粗骨材之 SSD 比重介於 2.39~2.43 間較一般常重骨材之 2.61 減少約 8% 左右，吸水率則介於 5.70~6.80% 間，較普通骨材高約 5% 左右；此乃因廢棄混凝土再生骨材為天然骨材與硬固水泥砂漿所組成，水泥砂漿之孔隙率遠大於天然骨材，因此造成再生骨材之多孔性及低比重之結果，此結果與一般文獻結論相符合。

二、再生混凝土之配合設計與拌製

根據 ACI 配合設計法所得，不同強度等級再生骨材及不同水灰比之配合設計及試拌結果如表 3-6 所示。由表中結果顯示在相同水灰比且相同水量情形下，再生骨材混凝土與普通骨材混凝土之坍度不盡相同，如 W/C=0.5 時，兩者坍度皆為 10cm，但 W/C=0.6

時，再生骨材混凝土及普通骨材混凝土之坍度分別為 12cm 及 14.5cm，W/C=0.7 時，則分別為 12.7cm 及 15.5cm，即新拌再生混凝土之坍度較低。此結果顯示，再生骨材因表面粗糙，若欲達到相同工作性條件，必需酌予增加水量，此結果與文獻相符。至於所有各組所測得之新拌混凝土實測之單位重皆較計算所得之單位重為重，此因預估新拌混凝土之空氣含量過高所致，由表中可知，各組預估之空氣含量值高出實測值約 0.4%~1% 左右，扣除此項因素，則實測與計算所得單位重相近，顯示混凝土配比之可信度。新拌再生混凝土單位重（標準配比組）介於 2230~2290 kg/m³ 之間，與控制組（一般混凝土）比較低約 80 kg/m³，此乃添加較低比重之再生骨材取代常重之一般骨材所造成。

再生混凝土之拌製過程係採用全乾之再生骨材，雖然拌製時，有事先預加骨材吸水量，但預期將有較大之坍度損失產生。對於不同時間下之坍度損失試驗結果如表 4-1 所示，其中很明顯看出再生混凝土在不同水灰比情形下，45 分鐘之坍度損失約 60%~70% 左右，而普通混凝土僅達 35%~45%，此乃再生骨材有較大孔隙及吸水率所致。

三、再生混凝土之性質試驗

再生混凝土之性質測析部份分為新拌混凝土及硬固混凝土兩大部分，新拌混凝土性質測析已詳述如前節，硬固混凝土部分之測析項目有單位重、吸水率、強度、時間性變形、彈性模數、柏松比及握裹強度等分述如下：

(一) 再生混凝土之單位重及吸水率

再生混凝土及普通混凝土在相同配比條件下之單位重及吸水率試驗結果如表 4-2。由表中結果可知，在水灰比為 0.6 時，普通混凝土單位重為 2390 kg/m^3 ，再生混凝土之單位重則依骨材強度遞減而遞減，最低至 2273 kg/m^3 。此因再生混凝土中再生骨材之比重僅 2.40 左右（如表 3-1）較一般常重骨材比重為低，所以拌製得之再生混凝土相對地亦較輕。另就吸水率結果觀之，再生混凝土之吸水率隨再生骨材強度之遞減而增加，吸水率在 7.2% 至 9.89% 間，較一般混凝土之 6.13% 為高。此結果相當合理，因再生骨材組成成份除了常重之一般骨材外另亦覆有水泥砂漿，且水泥砂漿中孔隙含量較高，由此種較大孔隙含量之再生骨材拌製得之再生混凝土其吸水率必定較大。

(二) 再生混凝土之強度及強度成長

首先就標準配比組（ACI 法配合設計所得）之強度結果觀之（如表 4-3），無論再生混凝土或普通混凝土，水灰比值愈低其所得 28 天抗壓強度愈高。但就不同骨材強度等級時，則可發現在相同水灰比值時，再生骨材強度愈高，所得 28 天之抗壓強度則愈高，其中又以普通骨材混凝土之強度最高，其強度比較表如表 4-4，由表中比較結果顯示，在水灰比值為 0.5 時，若以普通混凝土 28 天強度當基數，再生混凝土 28 天之可達強度從最低再生骨材強度組（2000psi~3000psi）之 85% 至最高再生骨材強度組（4000psi~5000psi）之 90%，而水灰比值 0.6 或 0.7 兩組，再生混凝土 28 天之可達強度大致上皆可超越 90%，顯示出當混凝土水灰比值較低時，因水泥砂漿之強度增高，混凝土整體表現之強度將受骨材強度之影響愈大，尤其當水泥砂漿強度超越骨材強度時（如 W/C=0.5 組）混凝土之可達強度因受限於再生骨材強度（此時骨

材為弱相材料，非加強材) 將無法隨水泥砂漿之強度成長而有效成長。綜合以上結果，當水灰比值愈低時，再生混凝土強度受骨材強度之影響愈明顯，水灰比值愈高，影響愈小。以本文之實驗結果可知，就再生混凝土之水灰比值在 0.6 至 0.7 間時，若採用 2000psi 至 5000psi 間之廢棄混凝土充當再生骨材，其 28 天抗壓強度值皆可達一般混凝土強度 90% 以上，當水灰比值降至 0.5 時，亦可維持在 85% 以上。

再就各組之強度成長曲線觀之 (如圖 4-1)，無論水灰比值大小，其強度成長趨勢皆相似，惟在相同水灰比值時，較弱之骨材有些微早強之傾向，或者在相同骨材時，較低水灰比亦有稍微早強之傾向，但不明顯。此因在較早齡期時，水泥砂漿強度不高，在仍低於再生骨材強度之情形下，混凝土強度之成長不致受限於骨材強度，但在較長齡期時，若水泥砂漿強度已超越較弱相之骨材時，其強度成長將趨緩慢，相對地，若以 28 天齡期之抗壓強度為基準做比較，較弱之骨材反而有早強之傾向。但因本研究試驗所得再生混凝土之 28 天可達強度值降低有限，因此早強之傾向亦不明顯。

再生混凝土變化水泥砂漿含量所得之抗壓強度結果如表 4-5 所示。由表中結果顯示，當水灰比值固定為 0.6 時，無論何種強度等級之再生骨材，當水泥砂漿含量增加時，其混凝土強度亦隨之增加，此結果顯示，混凝土中再生骨材為弱相材料，由表 4-6 中可知，三種水灰比值之水泥砂漿強度皆超過再生骨材強度，當水泥砂漿含量增加時，弱相之再生骨材量減少，因此對整體混凝土強度而言是有利的。將表 4-5 結果繪成圖 4-2，由圖中曲線趨勢可知，水泥砂漿含量愈高對混凝土強度愈有利，若慮及過大水泥砂漿量或過小水泥砂漿量對混凝土之工作性影響過鉅，對實際配合設

計工作並不實用，不予討論外，我們就標準配比組 ($V_m = 65\% \text{ or } 64\%$) 增減 5% 水泥砂漿量之抗壓強度結果觀之，當水泥砂漿體積增加 5% 時，整體混凝土抗壓強度約可增加 3% 至 10% 左右，其中又以再生骨材強度愈差者愈明顯 (如圖 4-2a)。此結果顯示當再生骨材強度較差時，可以調高水泥砂漿含量之方式以提高整體混凝土之可達強度，但再生骨材強度較高者，此項效果不明顯。

(三) 再生混凝土之收縮及潛變

再生混凝土之乾縮及潛變試驗結果與相同配比之普通混凝土結果比較如表 4-7。由表中結果知，在 60 天之觀測期內，再生混凝土之乾縮量值介於 555×10^{-6} 及 610×10^{-6} 間，較一般混凝土之 560×10^{-6} 稍微偏高，但變化不甚明顯，顯示再生骨材之應用對混凝土之乾縮影響不大。再就潛變試驗資料觀之，普通混凝土 60 天之潛變量為 589×10^{-6} ，再生混凝土之潛變值則介於 645×10^{-6} 至 716×10^{-6} 間，其中以低水灰比者 ($w/c = 0.5$) 及高強度再生骨材者潛變值較小，分別為 645×10^{-6} 及 656×10^{-6} ，但均高於普通混凝土之試驗值。此結果顯示，使用再生骨材充當混凝土骨材時，將使混凝土之潛變量增加，惟採用較低水灰比或較高強度之再生骨材時，可降低潛變量值。

(四) 再生混凝土之彈性模數及泊松比

再生混凝土及普通混凝土之彈性模數及泊松比之試驗方法如照片 4-1，試驗結果如表 4-8。由表中結果可知，在水灰比介於 0.5 至 0.7 時之普通混凝土彈性模數值維持在 21.5 Gpa 至 25.5 Gpa 間。相同配比下之再生混凝土彈性模數值則稍為偏低，約介於 19.0 Gpa 至 23.5 Gpa 間，而且再生骨材强度高者其彈性模數值亦較高，如再生骨材強度 4000~5000psi 者，其彈性模數值在 21.2 Gpa 至

23.5 Gpa 間。另外水灰比值低者，因整體混凝土強度較高，所測得之彈性模數值亦較高，如 $w/c = 0.5$ 者，其彈性模數值介於 21.0 Gpa 至 23.5 Gpa 間。就整體觀之，在相同配比下再生混凝土與普通混凝土之彈性模數值差距維持在 15% 以內。意即在水灰比 0.5 至 0.7 範圍內，再生骨材強度介於 2000psi~5000psi 間時，所拌製得之再生骨材混凝土的彈性模數值可維持在一般混凝土之 85% 上。卜松比試驗結果較無規律性（如表 4-8），但再生骨材混凝土之試驗值與普通混凝土所得結果相近，皆落在 0.16~0.21 間，顯示採用再生骨材拌製混凝土對混凝土之卜松比值影響不大。

(五) 再生混凝土之握裹力

再生混凝土與普通混凝土之握裹力試驗方法如照片 4-2，試驗結果如表 4-9 所示。由表中結果觀之，握裹力試驗數據變異性較大，但大體上還是有趨勢可循。普通混凝土之握裹力在三種不同水灰比 (0.5,0.6,0.7) 時，維持在 23000 lb~26500 lb 之間，再生混凝土握裹力則較低，約維持在 17000 lb~26500 lb 之間，再就相同水灰比條件下一般混凝土與再生混凝土握裹力之比較可發現，在水灰比為 0.5 時其變化最大，採用 2000psi~3000psi 等級之再生骨材時，握裹力僅 18350 lb，約為一般混凝土握裹力 (26497 lb) 之 70% 左右，其餘各組再生混凝土握裹力皆能維持在相同配比條件下一般混凝土握裹力之 70% 以上。

四、再生混凝土的配比及拌製技術建議

(一) 再生混凝土之配比設計方法建議

再生混凝土之計算配比資料與新拌混凝土之性質試驗結果比較如表 3-6，由表中結果可知，再生混凝土之空氣含量普遍較計算之假設空氣含量 2% 為低，實測之空氣含量（採電動棒夯實）約在 1%~1.5% 之間，與一般混凝土相似，因此文獻中所述需酌予調高再生混凝土之空氣含量建議在本研究中不予考慮。坍度部分如前節所論，再生混凝土若欲得到與一般混凝土相同之坍度需酌予增加水量，此部分則與文獻所述相符合。另就實測之新拌混凝土單位重與配比設計混凝土單位重比較可發現，若扣除空氣含量假設值過高之因素，兩者之單位重值極為接近，顯見本研究之配比可信度高。再由表 4-4 中，再生混凝土與相同配比下之普通混凝土抗壓強度比較可知，再生混凝土若使用較差之再生骨材 (2000~3000psi) 時，其強度可能降低至 85%，若使用較好再生骨材 (大於 3000psi)，其強度可維持在 90% 以上。據此，本研究建議，再生混凝土之配比設計可參照一般混凝土之配比設計法進行之，惟需獲得相同工作性時，需酌予提高用水量，且需降低水灰比以達到設計要求之強度。

(二) 再生混凝土拌製技術建議

由試驗經驗顯示，再生混凝土與普通混凝土，在拌合、澆置、振動夯實和飾面均一樣方便。然而，由於高吸水率的特性，須將骨材處理成面乾內飽和的狀態，因此必須保持濕潤，使之盡可能接近面乾內飽和。若採用絕乾之再生骨材進行拌合，則需將骨材吸水量預先求出，並加入用水量中拌合。且為避免過大坍度損失，拌合時可先加入部分水量，與骨材進行預濕拌合數秒後，再進行其他拌合步驟。若以此方式拌合，因再生骨材表面為水泥砂漿，拌合時磨損的細微粉末加入拌合，使得再生混凝土泌水現象較普

通混凝土少。但就整體而言，再生混凝土之拌製方法可參考一般混凝土之拌製步驟，惟需對高吸水率之再生骨材在進行拌製時如上述方法給予妥善之預濕。

表 4-1 再生混凝土及普通混凝土坍度損失比較表

水灰比	混凝土種類	坍度 (cm)				坍度損失
		0 min	15 min	30 min	45 min	
0.5	再生	13	9	5	4	69%
	普通	12	10	8	8	33%
0.6	再生	16	10	7	6	63%
	普通	16	13	10	9	44%
0.7	再生	16	10	8	7	56%
	普通	17	14	12	11	35%

表 4-2 硬固混凝土單位重及吸水率

種類	W/C	硬固單位重 (kg/m ³)		吸水率 (%)	
普通骨材	0.6	2411		6.51	
		2377	2390	6.17	6.13
		2382		5.73	
再生骨材 4000~5000 psi	0.6	2328		7.83	
		2316	2317	6.21	7.15
		2307		7.41	
再生骨材 3000~4000 psi	0.6	2306		6.51	
		2325	2307	10.66	8.24
		2288		7.54	
再生骨材 2000~3000 psi	0.6	2260		8.34	
		2321	2273	9.08	8.90
		2238		9.26	

表 4-3 標準配比混凝土依材齡所得之抗壓強度結果

	水灰比	材 齡									
		1 天		3 天		7 天		14 天		28 天	
再生骨材 強度 2000-3000psi	0.5	8.01		18.27		26.22		31.08		37.72	
		8.97	8.65	18.05	17.93	27.23	27.20	31.65	31.00	37.72	37.61
		8.97		17.47		28.14		30.28		37.40	
	0.6	5.65		13.04		23.10		27.16		34.60	
		5.88	5.73	13.22	13.49	24.45	23.49	26.92	26.98	30.68	32.12
		5.66		14.21		22.92		26.86		31.08	
	0.7	3.39		10.98		15.69		22.59		26.82	
		3.56	3.45	10.96	10.80	15.81	16.12	21.36	21.22	27.85	27.86
		3.41		10.47		16.86		19.72		28.92	
再生骨材 強度 3000-4000psi	0.5	7.92		18.52		27.26		31.46		35.34	
		9.27	8.65	20.23	19.20	27.90	27.60	31.16	31.70	38.18	37.70
		8.76		18.87		27.63		32.50		39.68	
	0.6	6.51		*		24.92		27.94		32.90	
		6.47	6.52	14.74	15.36	24.99	24.99	27.74	28.47	34.30	33.66
		6.59		15.98		25.07		29.72		33.79	
	0.7	4.88		12.86		19.49		22.03		28.80	
		5.50	5.14	12.22	12.74	19.69	19.88	22.84	22.99	28.44	28.55
		5.04		13.13		20.47		24.11		28.41	
再生骨材 強度 4000-5000psi	0.5	8.33		20.67		24.77		33.45		38.44	
		8.84	8.71	20.66	21.10	30.37	26.92	34.41	34.24	40.18	39.62
		8.95		21.96		25.63		34.87		40.25	
	0.6	6.22		13.18		*		26.89		32.62	
		5.85	5.63	13.18	13.52	23.55	24.02	27.20	27.26	34.01	34.23
		4.81		14.19		24.49		27.70		36.06	
	0.7	4.17		12.61		19.68		24.91		32.96	
		3.62	4.08	11.92	12.62	19.13	19.63	26.02	25.47	29.19	31.18
		4.46		13.32		20.09		25.48		31.40	
普通骨材	0.5	9.78		18.63		31.97		40.26		47.19	
		9.85	10.04	23.51	20.90	32.93	32.66	34.87	38.13	41.82	44.08
		10.50		20.57		33.09		39.25		43.24	
	0.6	6.80		16.20		25.57		30.14		37.21	
		7.06	6.92	16.83	15.68	26.41	25.99	31.25	30.70	34.91	36.02
		6.89		14.00		*		*		35.93	
	0.7	4.72		13.04		20.18		24.61		31.73	
		4.80	4.66	12.84	13.00	20.19	20.24	24.79	25.36	30.52	31.40
		4.46		13.12		20.35		26.69		31.94	

註 抗壓強度單位：Mpa

表 4-4 不同條件下混凝土 28 天抗壓強度比較表

水灰比	骨材	28 天抗壓強度 (MPa)	再生 / 普通 (%)
0.5	再生 2000~3000psi	37.6	85
	再生 3000~4000psi	37.7	85
	再生 4000~5000psi	39.6	90
	普通骨材	44.1	100
0.6	再生 2000~3000psi	32.1	89
	再生 3000~4000psi	33.7	94
	再生 4000~5000psi	34.2	95
	普通骨材	36.0	100
0.7	再生 2000~3000psi	27.9	89
	再生 3000~4000psi	28.6	91
	再生 4000~5000psi	31.2	99
	普通骨材	31.4	100

表 4-5a 再生混凝土變化水泥砂漿含量之抗壓試驗結果 (2000~3000psi)

w/c=0.6

再生骨材 種類	水泥砂 V _m (%)	抗壓強度 (MPa)									
		1 天		3 天		7 天		14 天		28 天	
2000~3000 psi	54	4.47		11.26		17.56		21.25		24.69	
		4.47	4.43	10.72	11.37	16.44	17.06	20.39	20.84	24.50	24.60
		4.35		12.14		17.18		20.88		*	
	59					23.99				32.21	
						22.14	23.16			32.71	31.79
						23.35				30.44	
	64	5.65		13.04		23.10		27.16		34.60	
		5.88	5.73	13.22	13.49	24.45	23.49	26.92	26.98	30.68	32.12
		5.66		14.21		22.92		26.86		31.08	
	69					26.66				34.20	
						24.56	24.52			34.60	34.57
						22.34				34.92	
	74	4.75		13.80		22.27		24.81		35.11	
		4.45	4.65	12.81	12.63	21.77	21.38	26.29	26.65	35.68	34.96
		4.74		11.29		20.10		28.84		34.08	

表 4-5b 再生混凝土變化水泥砂漿含量之抗壓試驗結果 (3000~4000psi)

w/c=0.6

再生骨材 種類	水泥砂 V _m (%)	抗壓強度 (MPa)									
		1 天		3 天		7 天		14 天		28 天	
3000~4000 psi	55	5.50		11.58		19.88		24.83		29.83	
		5.73	5.59	15.94	13.56	18.28	19.47	25.81	25.21	26.70	28.14
		5.54		13.16		20.26		24.98		27.88	
	60					27.01				33.52	
						27.76	26.59			32.49	33.00
						25.01				*	
	65	6.51		14.74		24.92		27.94		32.90	
		6.47	6.52	*	15.36	24.99	24.99	27.74	28.47	34.30	33.66
		6.59		15.98		25.07		29.72		33.79	
	70					28.04				38.40	
						28.49	28.83			38.43	38.49
						29.95				38.64	
	75	6.59		16.79		29.92		32.11		40.72	
		6.89	6.74	18.69	17.25	26.71	27.41	29.92	31.41	39.04	39.88
		6.75		16.27		25.60		32.20		*	

表 4-5c 再生混凝土變化水泥砂漿含量之抗壓試驗結果 (4000~5000psi)

w/c=0.6

再生骨材 種類	水泥砂 V _m (%)	抗 壓 強 度 (MPa)									
		1 天		3 天		7 天		14 天		28 天	
4000~5000 psi	54	3.68		9.02		16.61		18.73		27.46	
		3.54	3.83	10.07	9.70	17.77	17.64	20.35	19.92	29.49	27.50
		4.27		10.00		18.53		20.79		25.54	
	59					19.27				28.18	
						18.17	18.13			29.13	28.62
						16.95				28.64	
	64	6.22		13.18		*		26.89		32.62	
		5.85	5.63	13.18	13.52	23.55	24.12	27.20	27.26	34.01	34.22
		4.81		14.19		24.49		27.70		36.03	
	69					20.99				35.57	
						22.98	23.52			35.11	35.49
						26.60				35.79	
74	5.05		13.24		24.11		29.01		37.78		
	4.68	4.79	12.88	13.50	22.86	23.60	28.13	28.30	35.89	37.00	
	4.63		14.39		23.83		27.80		37.35		

表 4-6 不同水灰比之水泥砂漿抗壓強度

w/c	再生混凝土			普通混凝土
	2000~3000psi 骨材	3000~4000psi 骨材	4000~5000psi 骨材	常重骨材
0.5	58.26	54.72	56.60	57.46
	59.76 57.71	51.16 52.73	57.52 56.39	57.32 56.15
	55.10	52.30	55.06	53.66
0.6	39.78	43.20	45.28	49.18
	37.72 38.75	45.32 43.58	50.46 48.81	35.48 44.62
	*	42.22	50.68	49.20
0.7	*	*	38.98	34.92
	36.18 35.42	38.04 35.01	35.81 37.63	36.98 36.24
	34.66	31.98	38.16	36.82

註 抗壓強度單位：MPa

表 4-7a 混凝土潛變試驗結果

 $(\times 10^{-6})$

骨材種類	w/c	1 天	2 天	3 天	4 天	5 天	6 天	7 天	14 天	28 天	60 天
再生骨材 3000~4000psi	0.5	152	186	256	260	264	328	337	442	465	645
	0.6	129	138	217	258	283	301	328	458	555	716
	0.7	147	180	250	293	314	332	339	442	527	677
再生骨材 4000~5000psi	0.6	43	93	155	235	247	258	227	273	481	656
普通	0.6	47	87	153	219	256	287	256	299	419	589

表 4-7b 混凝土之乾縮試驗結果

($\times 10^{-6}$)

w/c	骨材種類	1 天	2 天	3 天	4 天	5 天	6 天	7 天	14 天	28 天	60 天
0.6	普通	15	50	47	120	153	180	367	447	507	709
		8 11	30 41	60 53	147 136	160 167	213 204	300 273	417 368	463 421	614 560
		11	43	53	140	187	220	153	220	293	357
	再生 2000~ 3000psi	4	13	20	73	87	103	153	227	373	543
		20 11	40 27	40 29	87 64	80 71	110 94	167 151	240 224	400 371	625 555
		9	27	27	33	47	70	133	207	340	497
	再生 3000~ 4000psi	27	47	53	113	153	167	210	290	357	526
		13 20	33 40	73 60	107 104	147 147	173 167	217 216	370 342	437 398	603 571
		20	40	53	93	140	160	220	367	400	584
	再生 4000~ 5000psi	35	80	127	167	187	233	273	260	423	542
		34 42	80 93	127 138	173 178	207 202	227 240	267 282	407 351	507 473	665 610
		57	120	160	193	213	260	307	387	490	623

表 4-8 硬固混凝土之彈性模數及卜松比

種類	W/C	彈性模數(GPa)		卜松比	
普通骨材	0.5	25.52	25.34	*	0.20
		25.20		0.23	
		25.29		0.16	
普通骨材	0.6	21.47	21.46	0.19	0.19
		22.90		0.18	
		20.00		0.19	
普通骨材	0.7	24.14	22.39	0.15	0.18
		20.03		0.16	
		23.00		0.23	
再生骨材 4000~5000 psi	0.5	21.00	23.50	0.19	0.18
		23.00		0.17	
		26.5		*	
再生骨材 4000~5000 psi	0.6	23.04	22.01	0.25	0.20
		23.00		0.20	
		20.00		0.16	
再生骨材 4000~5000 psi	0.7	22.70	21.17	0.17	0.21
		20.40		0.24	
		20.40		0.21	
再生骨材 3000~4000 psi	0.5	22.24	22.86	0.19	0.21
		23.47		0.22	
		*		*	
再生骨材 3000~4000 psi	0.6	22.00	21.80	0.20	0.16
		23.00		0.16	
		20.40		0.13	
再生骨材 3000~4000 psi	0.7	14.30	19.06	*	0.17
		20.83		0.22	
		22.04		0.12	
再生骨材 2000~3000 psi	0.5	22.33	21.00	0.10	0.16
		20.87		0.25	
		19.80		0.13	
再生骨材 2000~3000 psi	0.6	20.86	20.29	0.22	0.19
		22.00		0.10	
		18.00		0.26	
再生骨材 2000~3000 psi	0.7	19.60	19.11	0.23	0.18
		18.03		0.12	
		19.70		*	

表 4-9 再生混凝土握裹力試驗結果

骨材種類 \ w/c	0.5		0.6		0.7	
常重骨材	27864		25500		24250	
	29573	26497	24850	24100	24019	23207
	22055		21950		21352	
再生 (2000~3000psi)	20250		18362		19857	
	18250	18350	21970	20166	17829	18520
	16550		*		17874	
再生 (3000~4000psi)	28638		18800		27154	
	26268	26590	15650	16200	20986	23593
	24864		14150		22639	
再生 (4000~5000psi)	27917		28850		17100	
	24555	25035	20200	23117	17250	17150
	22633		20300		17100	

註 握裹強度單位：lb

圖 4-1 a 標準配比混凝土強度成長曲線 (普通混凝土)

圖 4-1 b 標準配比混凝土強度成長曲線 (2000~3000 psi 再生骨材)

圖 4-1 c 標準配比混凝土強度成長曲線 (3000~4000 psi 再生骨材)

圖 4-1 d 標準配比混凝土強度成長曲線 (4000~5000 psi 再生骨材)

圖 4-1 e 標準配比混凝土強度成長曲線 (W/C = 0.5)

圖 4-1 f 標準配比混凝土強度成長曲線 (W/C = 0.6)

圖 4-1 g 標準配比混凝土強度成長曲線 (W/C = 0.7)

圖 4-2 a 水泥砂漿含量變化對抗壓強度之影響 (2000~3000 psi 再生骨材)

圖 4-2 b 水泥砂漿含量變化對抗壓強度之影響 (3000~4000 psi 再生骨材)

圖 4-2 c 水泥砂漿含量變化對抗壓強度之影響 (4000~5000 psi 再生骨材)

照片 4-1 彈性模數、卜松比試驗

照片 4-2 握裹試驗

第五章 結論與建議

一、結論

根據以上試驗結果與分析可得結論如下：

- (一) 廢棄混凝土採用夯擊式碎石機所得之再生骨材顆粒粒型滿足混凝土骨材之粒型要求。
- (二) 再生骨材強度在 2000psi~5000psi 之間時，其顆粒密度較常重骨材降低約 8%，吸水率則高出約 5% 左右。
- (三) 再生骨材混凝土之拌製方法與一般混凝土相同，惟採乾燥再生骨材拌製時，需先加水預濕以免坍度損失過大。
- (四) 再生骨材混凝土之配合設計方法可採用一般混凝土之配合設計法，惟在相同工作性要求下需酌予增加用水量，相同設計強度時則須降低水灰比。
- (五) 再生混凝土單位重較普通混凝土低，吸水率則較普通混凝土高。
- (六) 再生骨材來源在 2000psi~5000psi 間，採用水灰比 0.5~0.7 之配比拌合時，再生混凝土 28 天之抗壓強度約為相同配比一般混凝土之 85%~100% 間。其中，水灰比愈低或再生骨材強度愈低者所獲得之再生混凝土強度百分比愈低。
- (七) 再生混凝土中水泥砂漿含量增加 5% 可提高混凝土之抗壓強度約 3%~10%。其中，再生骨材強度愈差者效果愈明顯。
- (八) 再生混凝土乾縮量與普通混凝土之值接近，惟潛變量偏大，但採用較低水灰比或較高強度之再生骨材時，可降低其影響。
- (九) 再生混凝土之彈性模數值可維持在一般混凝土之 85% 以上，卜松比變化則不大。
- (十) 在本研究之再生骨材強度及水灰比值範圍內，再生混凝土之

握裹力可達一般混凝土握裹力之 70% 以上。

二、建議

本文之再生骨材取自於試驗室內之廢棄混凝土試體，所以並無雜物去除之困擾，取得之骨材為單純之混凝土成份再生骨材，故試驗數據較理想且變異性較小。惟試驗結果顯示再生混凝土各方面之性質皆與普通混凝土相近，確可應用於結構性或非結構性營建工程上，國外諸多文獻亦證實此點，尤以鄰近之日本對再生混凝土之研究行之有年，亦有相當文獻之發表可供參考，而且有成功應用在實際結構物之經驗。因此，如何就國內之現有實際建築物的廢棄混凝土中有效去除雜質，及瞭解無法去除之雜質對再生混凝土各項工程或力學性質之影響，並比照國外文獻確定混凝土再生應用之系統，實為進一步需繼續予以研究之重要課題。

參考文獻

- [1] S.A. Frondiston-Yannas (1977), "Waste concrete as aggregate for new concrete", ACI Journal, No. 74-37, pp. 337-376.
- [2] 日本建設副產物對策研究會(1991), "建設副產物", 第 13-84 頁。
- [3] W. Gutt (1972), "Aggregate from waste materials", Chemistry and Industry, pp. 439-447.
- [4] N. K. Barragi, H. S. Vidyadhare and K. Ravande (1990), "Mix design procedure for recycled aggregate concrete", Construction & Building Material, Vol. 4, No.4.
- [5] C. J. Arnold (1988), "Recycling Concrete Pavements", Concrete Construction.
- [6] G. K. Roy (1985), "New pavement from old concrete", Civil Engineering, ASCE, vol.55, No.5.
- [7] S. A. Frondistou-Yannas (1980), "In progress in concrete technology", ed. V. M. Malhotra, CANMET, Ottawa, pp. 639-684.
- [8] A. D. Back (1977), "Recycle concrete as a source of aggregate", ACI Journal, Title No. 74-22, pp. 212-219.
- [9] S. Mindess and J. F. Young (1981), "Concrete", Prentice-Hall, Inc., N. J., pp. 154-156.
- [10] P. K. Metha (1986), "Concrete-Structure, Properties, and Materials", Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, N. J., pp. 231-232.
- [11] C. D. Johnston (1974), "Waste glass as concrete aggregate for concrete", Journal of Testing and Evaluation, Vol.2, No.5, pp. 344-350.
- [12] W. H. Harrison (1974)," Synthetic aggregate sources and resources", Concrete, Vol. 8, No.11, pp. 44-44.

- [13] K. S. Rebeiz, S. Yang and D. W. Fowler (1994), "Polymer mortar composite made with recycled plastics", ACI Material Journal Title No.91-M31, pp. 313-321.
- [14] M. S. Gopal (1977), "Evaluation of spent oil shale as concrete aggregate", M. S. thesis, AIT, Bangkok, Thailand.
- [15] 顏聰, 劉梁生(1980), "爐渣混凝土之研究", 工程, 五十三卷五期, 第 23-32 頁。
- [16] 劉玉雯(1993), "再生混凝土抗壓行為之研究", 第十七屆全國力學會議, 台北, 第 847-853 頁。
- [17] 王弘佑等(1996) "廢棄混凝土再生細骨材實用性探討", 第三屆結構工程研討會, 屏東, 第 9373-981。
- [18] L. Li, P Chan, D. G. Eollinger, and R. L. Lytton (1993), "Quantitative analysis of aggregate shape based on fractals", ACI Material Journal, Title No.90-M39, pp.357-365.
- [19] T.C.Hansen and H.Narud, "Strength of Recycled Concrete Made from Crushed Concrete Coarse Aggregate", Concrete Inter-national/January 1983.
- [20] HASABA. S, KAWAMURA.M, TORLLK.K, TAKEMOTO. K, "Drying Shrinkage and Durability of the Concrete Made of Recycled Concrete Aggregate", Trans of the Japan Concrete Institute, Vol.3.1981, pp.55-60.
- [21] MUKAI. T, KIKUCHI. M, KOIZUMI. H, "Fundamental Study on Bond Properties Between Recycled Aggregate Concrete and Steel Bar", Cement Association of Japan.32nd review, 1978.
- [22] S. Frondistou-Yannas, "Waste Concrete as Aggregate for New Concrete", ACI Journal/August 1977.
- [23] PAUW. c. de, "Fragmentation and Recycling of Reinforced Concrete", New York,1981,pp311-317.

- [24] Gerardu. J. J. A, Hendriks. C. F, "Recycling of Road Pavement Materials in the Netherlands", Rijkswatersteat Commuication, No.38. the Hague.1985.