

南華大學科技學院永續綠色科技碩士學位學程

碩士論文

Master Program of Green Technology for Sustainability

College of Science and Technology

Nanhua University

Master Thesis

再生材料與天然骨材於透水混凝土強度

及滲透特性之比較研究

Comparative Analysis of Recycled and Natural Aggregate on
Compressive Strength and Permeability Used in Permeable
Concrete

吳建陞

Chien-Sheng Wu

指導教授：洪耀明 博士

Advisor: Yao-Ming Hong, Ph.D.

中華民國 109 年 6 月

June 2020

南華大學

永續綠色科技碩士學位學程

碩士學位論文

再生材料與天然骨材於透水混凝土強度及滲透特性之比較
研究

Comparative Analysis of Recycled and Natural Aggregate on
Compressive Strength and Permeability Used in
Permeable Concrete

研究生：吳建隆

經考試合格特此證明

口試委員：

林松益

洪耀明

陳柏豪

指導教授：洪耀明

系主任(所長)：洪耀明

口試日期：中華民國 109 年 6 月 21 日

誌謝

本身在業界深感學歷和學識不足，經由學長的介紹，就讀南華大學碩士班，此次進修因許久未接觸到課業，學習上遇到困難，承蒙恩師 洪耀明博士耐心指導及協助，得以順利完成學位，由衷感謝。本論文稿，承蒙前高雄市都發局長 林裕益博士、南華大學教務長 陳柏青博士及洪耀明博士等師長，費心審閱與建議，獲益良多，謹表謝意。

研究學習期間，結識許多來自不同領域的先進同學，相互學習與鼓勵，得以順利完成學業。期間特別感謝桂田技術顧問有限公司桂田斗南實驗室同事們的支援協助，陳建丞學長、顏浚丞學長、陳美如學姊、王景田同學一等在課業上的協助與鼓勵，得以順利完成學業。

進修期間獲內人黃沛瑜小姐及小女翊綺的體諒與協助，使本人無後顧之憂，專心學習，方能順利完成學業，銘謝在心。

【中文摘要】

營造工程佔全球碳排放約 36%，營造廢棄物若能回收再利用，將可降低碳排放。本研究分析再生材料取代天然骨材之混凝土強度及透水性變化，首先將抗壓測試完之試體廢棄物經軋碎後為再生骨材，隨後將骨材以再生材料含量 100%、75%及 50%各製作 3 組透水混凝土樣品，每組均測試三種水灰比，每組各製作兩個圓柱試體，施作抗壓試驗及滲透試驗，總計完成 24 組圓柱體進行試驗。試驗結果顯示實驗組中再生骨材 50%(W/C 0.30)及(W/C 0.35)，抗壓强度高，透水性最佳，若鋪面設計以抗壓強度及透水性為目的，以本次試驗結果來看，則 50%再生骨材含量為最佳配比，可提供未來使用再生材料之參考依據。

關鍵詞：透水混凝土、再生骨材、水灰比、抗壓強度、滲透性

【ABSTRACT】

Construction projects occupies 36% of global carbon emissions. The recycle of construction waste materials can reduce carbon emissions. This study analyzed the strength and permeability of concrete, in which natural aggregate was replaced by recycled aggregate. Firstly, the waste of the test body after the compression test was crushed by yoke to make recycled aggregate. Recycle aggregate replace ratio (RARR) include 100%, 75% and 50%. Every RARR will prepare three permeable concrete samples, in which each sample will made two cylindrical specimens. In addition, three kinds of water-cement ratio will also test. Finally, total 24 samples were prepared to test the compressive strength and permeability. The test results show that the regenerated bone materials in the experimental group are 50% (W/C 0.30) and (W/C 0.35), with high compressive strength and best water permeability. According to the results of the second test, the content of 50% recycled bone material is the best ratio, which can provide a reference for the future use of recycled materials.

Keywords: permeable concrete, recycled aggregate, water-cement ratio, compressive strength, permeability.

目錄

誌謝.....	I
【中文摘要】.....	II
【ABSTRACT】.....	III
目錄.....	IV
圖目錄.....	VI
表目錄.....	VIII
第一章 前言.....	1
1.1 研究動機.....	1
1.2 研究目的.....	2
1.3 本文架構.....	3
第二章 文獻回顧.....	5
2.1 再生骨材的定義與法令.....	5
2.2 透水混凝土的定義.....	10
2.2.1 定義.....	10
2.2.2 透水混凝土性能及其優點.....	10
2.2.3 天然骨材與再生骨材之性質比較.....	12
2.3 透水混凝土配比設計.....	15
2.4 透水混凝土抗壓強度試驗.....	19
2.4.1 台灣透水混凝土抗壓強度之規定.....	19
2.5 透水性試驗.....	22
第三章 研究方法.....	24
3.1 試驗材料與配比.....	25
3.2 試驗設備.....	28
3.3 試驗流程.....	31
3.3.1 試體拌合製作流程.....	31
3.3.2 粒料篩分析試驗.....	33

3.3.3	粒料含泥量試驗	41
3.3.4	粒料比重吸水率試驗	45
3.3.5	洛杉磯磨損試驗	52
3.3.6	粒料單位重試驗	58
3.3.7	試體製作流程	64
3.4	圓柱試體抗壓試驗	67
3.4.1	試驗步驟	67
3.5	試體透水係數試驗	72
3.5.1	試驗步驟	72
3.6	試體孔隙率試驗	74
3.6.1	試驗步驟	74
第四章	結果與討論	76
4.1	圓柱試體抗壓強度分析	76
4.1.1	透水性鋪面之一般要求分析抗壓強度	81
4.1.2	透水混凝土應用於透水結構分析抗壓強度	82
4.2	滲透率分析	83
4.2.1	透水性鋪面之一般要求分析透水率	85
4.2.2	透水混凝土應用於透水結構分析透水率	86
4.3	孔隙率分析	87
第五章	結論與建議	88
5.1	結論	88
5.2	建議	89
參考文獻	.....	90
參考書籍	.....	90
學位論文	.....	91
期刊資料	.....	93
研究報告	.....	94
網際網路資料	.....	95
英文參考資料	.....	96

圖目錄

圖 1-1 本研究架構圖	4
圖 2-1 建築廢棄物處理現況	9
圖 3-1 試驗材料	26
圖 3-2 試驗設備	29
圖 3-2 試驗設備(續)	30
圖 3-3 配比試驗流程	31
圖 3-4 搖篩機進行篩分析	38
圖 3-5 粒料烘乾	39
圖 3-6 粒料面乾內飽和試驗	51
圖 3-7 粒料水中重試驗	51
圖 3-8 洛杉磯磨損試驗	56
圖 3-9 粒料鏟填法試驗	63
圖 3-10 粒料整平秤重	63
圖 3-11 試體製作流程	64
圖 3-11 試體製作流程(續)	65
圖 3-11 試體製作流程(續 1)	66
圖 3-12 混凝土破壞方式圖	71
圖 3-13 試體包覆彈性軟墊	73
圖 3-14 試體透水測試	73
圖 3-15 試體浸水 24 小時	74
圖 3-16 試體水中體積試驗	74
圖 4-1 抗壓試驗報告	79
圖 4-2 骨材比例與抗壓強度直條圖	81

圖 4-3 骨材比例與抗壓強度直條圖85



表目錄

表 2-1 混凝土用再生骨材暫定品質基準	6
表 2-2 日本再生水泥混凝土之種類與用途	7
表 2-3 天然粗骨材與再生骨材之基本性質	14
表 2-4 混凝土之水泥、粒料等之要求	17
表 2-5 細粒料混凝土之設計參考	17
表 2-6 硬固多孔混凝土之品質管理	20
表 2-7 透水混凝土應用於透水結構的工程性質	21
表 3-1 混凝土配比表	27
表 3-2 粗粒料試樣最少質量規定	35
表 3-3 粒料篩分析數據表	40
表 3-4 四分法縮分試樣	42
表 3-5 粒料含泥量數據表	44
表 3-6 標準取樣要求	47
表 3-7 比重值修正表	50
表 3-8 比重吸水率數據表	52
表 3-9 磨球數量與總質量	53
表 3-10 選用 CNS 490 或 CNS 3408 之判定原則	55
表 3-11 試樣級配	57
表 3-12 粒料磨損數據表	58
表 3-13 使用儀器及工具	59
表 3-14 粒料單位重數據表	62
表 3-15 混凝土抗壓試驗應力增加率一覽表	71
表 3-16 孔隙率試驗數據表	75

表 4-1 試體抗壓實驗數據表	80
表 4-2 透水混凝土應用於透水結構的工程性質（日本規範）	82
表 4-3 滲透性實驗數據表	84
表 4-4 透水混凝土應用於透水結構的工程性質（日本規範）	86
表 4-5 透水混凝土應用於透水結構的工程性質（日本規範）	87



第一章 前言

1.1 研究動機

由於城市發展快速，地表面積被不透水材料覆蓋的面積日漸擴大，現今全球溫室效應、氣候變遷、一次性的暴雨量發生的機率越來越高，導致雨水來不及排放而淹水造成人民的財產損失及生命威脅。因此利用透水材料來增加排水，改善淹水狀況讓地表逕流水能滲入土壤，能有效涵養地下水資源，緩解「熱島現象」。

台灣地狹人稠，土地資源有限，營建天然資源十分匱乏。隨著科技發展與社會進步，政府極力推廣都市更新計畫，許多老舊建築物被拆除，換上新的面貌，加上重大公共工程與民間建築工程需求，臺灣「每年建築拆除廢棄物約有726 萬立方公尺（1162 萬噸），開挖剩餘土石方約有 1200 萬立方公尺」（周進煌，2002）。

陳文卿於「建築廢棄物之再生利用技術開發-廢棄物混凝土塊再利用」研究報告中顯示，在使用回收之再生骨材與天然骨材製作的產品相較之下，有些再生骨材之產品經添加增強劑後，與天然骨材之產品不分軒輊，如高壓混凝土磚（陳文卿，2000）。

因此若能針對天然和再生骨材製訂配比資料以便提供工程施工參考，並將營建廢棄物善加利用不但可以節省天然粒料的使用，可減少廢棄物的問題，增加資源再利用，達成永續發展的市鎮規範。

1.2 研究目的

由於營建材料實驗室執行測試混凝土試體強度，測試完的試體廢棄物處理為本研究的目的，針對營建廢棄物資源回收再利用，以達到永續發展的理念。本文探討營建廢棄物與透水混凝土材料的整合應用及國家標準與施工綱要規範之推動，針對利用營建實驗室測試廢棄物取代天然骨材拌製成透水性混凝土的可能性，以蒐集國內外有關鋪面工法文獻、案例使用情形、問題遭遇等資料，探討營建廢棄物回收再利用之發展與案例。並測試特定再生骨材（Recycled Aggregate, RA）混凝土混合料設計的抗壓強度和滲透性，進行彙整歸納，用以提供適合於綠建築方案工作之推動，提倡維護生態環境、資源永續之理念。

透水混凝土材料組成的基本原理，係由裹覆在骨材顆粒外層的不足量水泥漿體與骨材顆粒之間點接觸，相互黏結形成多孔隙結構體，在這種結構之下擁有良好的透水性能，也因為此特性而使得其強度受到限制。執行測試完試體軋製成再生粒料應用於透水混凝土配比，並以相關檢測來評估其抗壓強度、透水係數及磨損等數據，檢視是否符合現行規範要求，彙整骨材的粒徑分布比例、水灰比等資料進行成本及效益上分析，使其具有抗壓强度高及高透水係數功能。

1.3 本文架構

依研究重點將本文分成五章，如圖1-1所示，各章內容如下：

本研究架構如下，一是前言，利用透水材料增加排水，改善淹水狀況讓地表逕流水能滲入土壤，有效涵養地下水資源，且研究再生骨材的再利用，二是文獻回顧，三是研究方法，四是針對本研究提出結果與討論，最後五為本研究結論與建議。依此研究重點將本文分成五章，各章內容簡述如下。

第一章為前言，說明研究背景、動機及研究目的，並概述論文架構。

第二章為文獻回顧，收集國內外文獻，內容包括營建廢棄物問題，再生骨材的定義與法令，再生骨材的性質及透水混凝土配比設計。

第三章為研究方法，內容包括試驗材料、試驗設備、試驗流程。

第四章為結果與討論，將不同配比的再生和天然骨材製成透水混凝土，以實驗結果分析抗壓強度及滲透性影響分析，做為未來再生骨材配比之選擇參考。

第五章為結論與建議，主要將上述各章之結果綜合歸納，並提出未來可以繼續研究之方向。

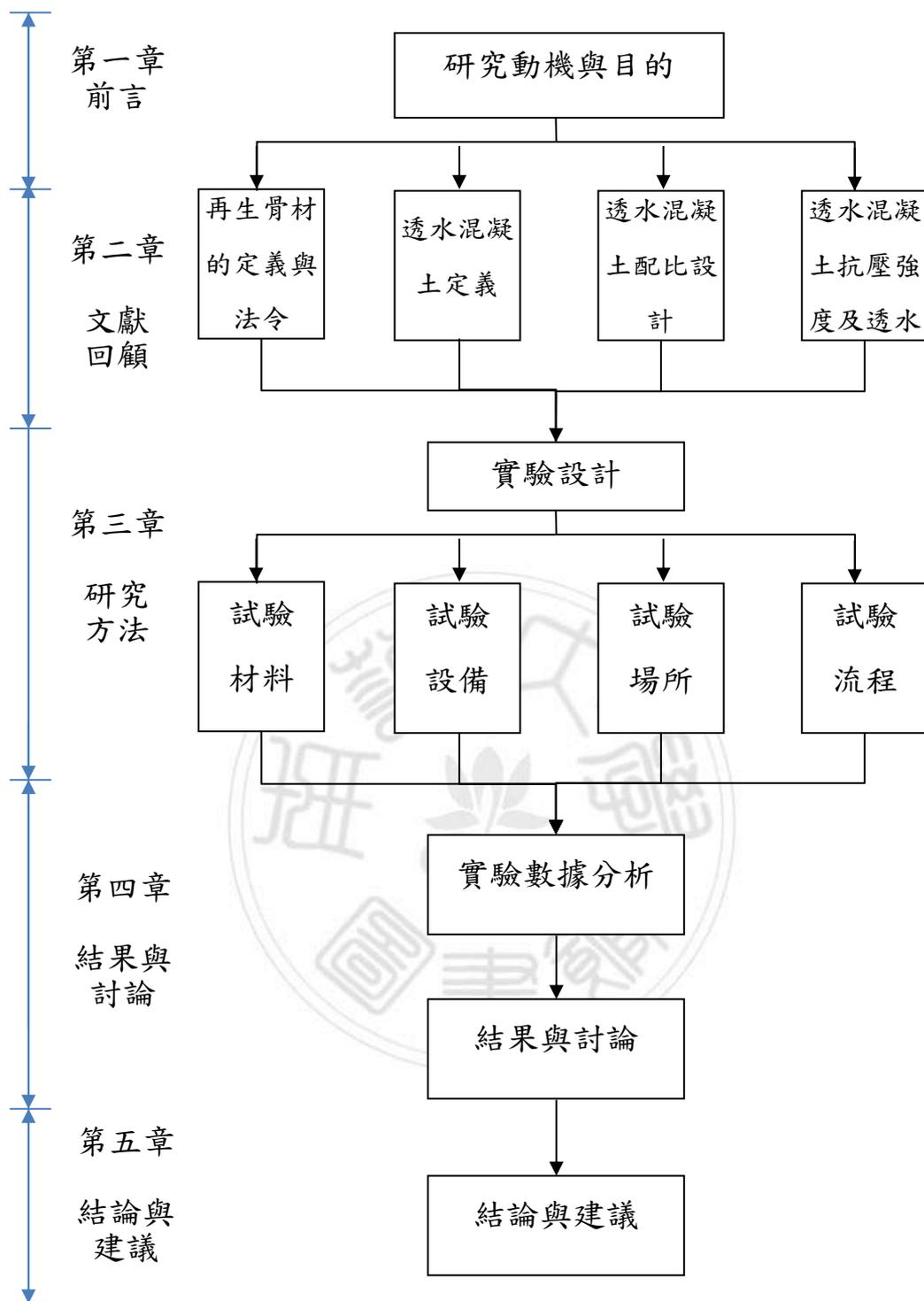


圖 1-1 本研究架構圖

第二章 文獻回顧

2.1 再生骨材的定義與法令

再生粗骨材乃是由廢棄建築混凝土塊碎化而成，其表面粗糙又多孔，其顆粒形狀雖比不上天然骨材的優良，但已能滿足混凝土骨材之粒形要求，至於再生細骨材部分，其外型為多角形，孔隙大、吸水率高，若將使用再生細骨材時，所得到的再生混凝土性質變異性差異太大，不好控制。建議再生混凝土最好只使用再生粗骨材，至於細骨材部分，則以天然砂取代之。一般而言，以混凝土碎塊所製成之再生骨材，其比重皆低於天然骨材，而再生骨材比重會較低的原因，為再生骨材中含有比重較低的水泥砂漿所致。與天然骨材之物理性質比較時，其中較特殊的部分就是再生骨材有較高的吸水率。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%，而再生骨材所佔的純水泥沙漿則高達 17%。相較之下，天然骨材吸水率只有 0.8-3.7%，顯見再生骨材的吸水率的確有偏高之趨勢。基於再生骨材之高吸水性，一般建議在拌製再生混凝土前，先將骨材浸溼處理成 S.S.D 狀態以保持再生混凝土品質之穩定。廢棄建築混凝土塊經由碎化之後所得之再生骨材，其成分主要是由廢棄混凝土碎石、碎紅磚、碎磁磚及其它雜質所組成的，其中以廢棄混凝土碎石占大多數。碎紅磚本身為多孔材料，再加上其本身之抗壓強度並不高，故其對整體再生混凝土得抗壓強度會有較大的折減作用。至於廢棄混凝土碎石部分，為一天然骨材及舊水泥砂漿之組合，附著於骨材表面的水泥砂漿，對於再生混凝土的性質有重大的影響。因此，再生骨材作為混凝土之填充料時，需注意級配

外形、比重、吸水率及含水量之改變，這將會造成拌製而成之再生混凝土的性質有所不同(<http://sites.google.com>)。

而結構或建築物拆除會堆積混凝土廢棄物，或可作為再生骨材但直接軋碎為再生骨材，對抗壓強度低於 175kgf/cm^2 以下等級之混凝土尚可適用，台灣再生粗骨材依日本「混凝土用再生骨材暫定品質基準」分級規定如表 2-1；再生水泥混凝土之種類與用途如表 2-2。

表 2-1 混凝土用再生骨材暫定品質基準

種類/項目	再生粗骨材			再生細骨材	
	1 種	2 種		1 種	2 種
吸水率	3%以下	3%以下	5%以下	7%以下	5%以下 10%以下
安定性	12%以下	40%以下	12%以下	—	10%以下 —

表 2-2 日本再生水泥混凝土之種類與用途

再生水泥 混凝土之 種類		第 I 型混凝土	第 II 型混凝土	第 III 型混凝土
使用 骨材	粗 骨 材	再生粗骨材 1 種	再生粗骨材 2 種	再生粗骨材 3 種
	細 骨 材	普通骨材	普通骨材或再生 細骨材 1 種	再生細骨材 2 種
適用強度		17.7~20.6Mpa (180~210kgf/cm ²)	15.7~17.7Mpa (160~180kgf/cm ²)	15.7Mpa 以下 (160kgf/cm ² 以下)
用途		鋼筋混凝土 無筋混凝土	無筋混凝土	襯底混凝土

資料來源:許桂銘、陳偉全，2004

隨著國內工商業之發展及生活品質之提升，許多公共工程正面臨使用年限屆滿需拆除或更新重建之問題，屆時將伴隨產生大量之營建廢棄物，依據內政部建築研究所之研究統計結果顯示，台灣每年經合法申請拆除之營建廢棄物數量據估約 1100 萬公噸，其中以廢棄混凝土數量占最大宗，以重量百分比約佔 53%，若以體積百分比約佔 41%，若能將其妥善有效回收處理及再利用，提升廢棄混凝土之再利用率，則有助於有限資源循環使用，減緩對環境之衝擊(全國法規資料庫，2019)。

「他山之石，可以攻錯」，國外對於廢棄混凝土之回收再生利用工作已頗具成效，如美國聯邦政府將廢棄混凝土應用於道路工程中；英國政府將營建廢棄物中取得之混凝土塊與磚塊與廢玻璃混合製成新之混凝土製品；荷蘭、丹麥及比利時三國政府於建築法規中強制訂立回收建材之比率，使 90% 之廢棄混凝土塊應用於道路底層之填充材料與填海造陸；日本於 1991 年制定「再生資源利用促進法」，將廢棄混凝土塊和磚塊應用於填海造陸工程。

有鑑於此，公共工程委員會依據「行政院國家永續發展委員會國土資源組行動計劃表」工作任務參、推動綠營建項下之工作項目三、推動營建資源再生利用，擬定「推動營建資源再利用於公共工程行動計畫」，以協調輔導之立場，協助各相關部會訂定配套措施，推動廢棄混凝土等營建資源應用於公共工程。

台灣在營建廢棄資源再使用及再生再利用方面，環保署及內政部營建署已有相關法規規範，如營建剩餘土石方處理方案、廢棄物清理法，內政部亦已發布營建事業廢棄物再利用管理辦法。我國營建廢棄物處理現況大致可分為產生（廢棄物產生之現場）、清運（運送過程）、中間處理（廢棄物收容或加以分類處理）與回收再利用（經分類處理後再應用於其他工程項目）等四個階段，如圖 2-1。

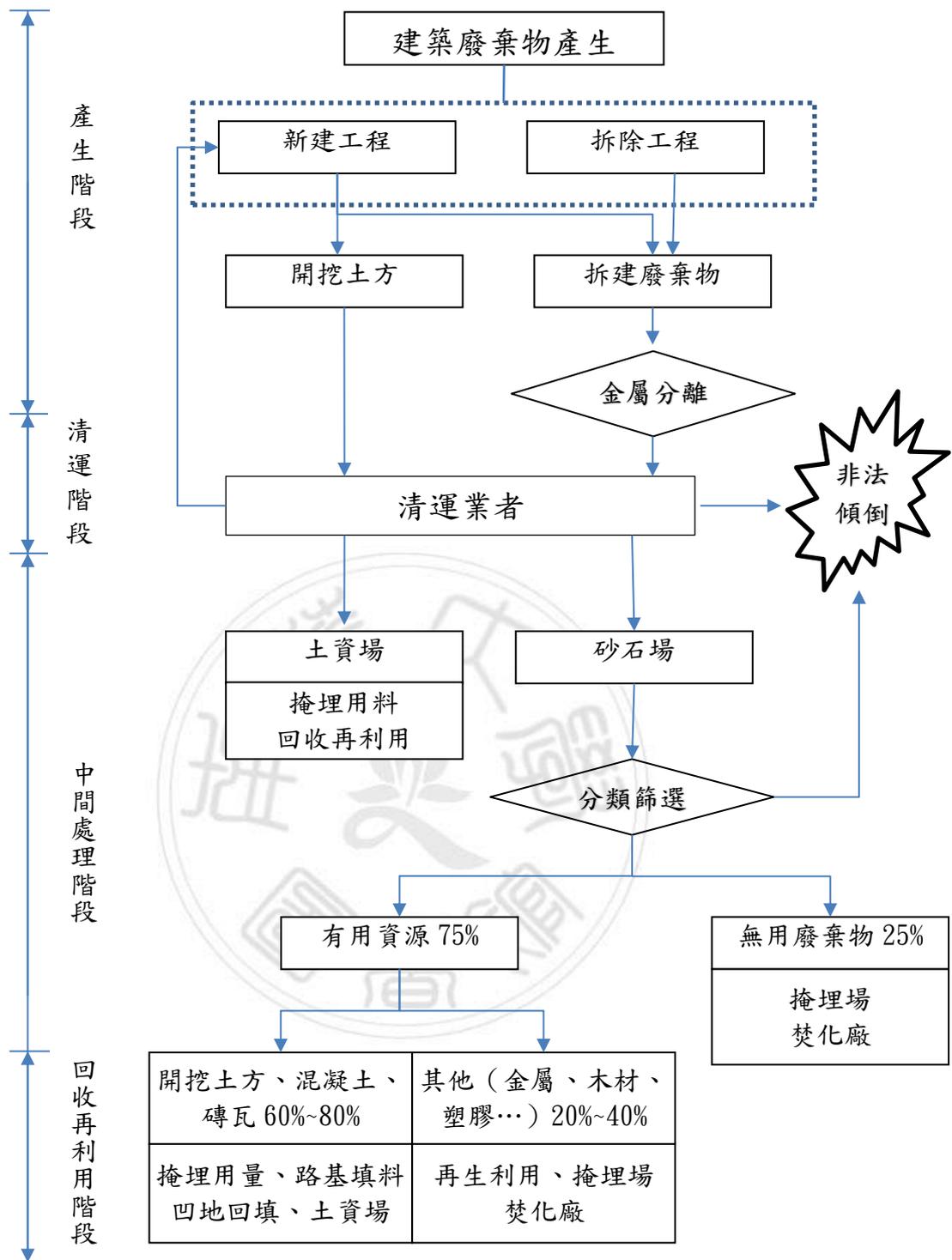


圖 2-1 建築廢棄物處理現況

資料來源:李崇德, 2002

2.2 透水混凝土的定義

2.2.1 定義

透水混凝土為材料本身具透水能力者，美日及大陸地區使用愈來愈普遍。透水混凝土為一種多孔隙的複合材料，亦可稱為無細混凝土，可視為一種粒料粒徑，分布在狹窄級配範圍內並且含微量細粒料加上不足量膠結漿體所構成的混凝土(潘昌林、鄭瑞濱，2001)，透水混凝土最明顯的特性即質輕且多孔隙。

「為由均勻級配之粗粒料、微量或無細骨材，且無足量水泥漿組成混凝土材料」經濟部水利署(2015)之經濟部水利署施工規範，對於透水混凝土之定義。

「均勻級配之粗粒料，藉由粗級配表面之水泥砂漿，使粒料表面接觸互相固結而發揮強度，同時形成多孔隙之結構體以提供透水功能」行政院公共工程委員會(2015)在公共工程施工綱要規範，對於透水混凝土的定義。

2.2.2 透水混凝土性能及其優點

是一種多孔、輕質、無細骨料混凝土，由粗骨材表面包覆一層膠結料相互黏結而形成孔隙均勻分布的蜂窩狀結構，故具有透水、透氣和質量輕的特點，透水混凝土的性能及其優點：

1. 增加可透水及透氣面積，使得土壤與空氣間可進行熱量和水分交換，調節氣候，降低地表溫度，緩解城市及熱島現象。
2. 採優良工法達到地表雨水滲入緩解地下水位急遽下降等一些

城市的生態環境問題。

3. 表面美化更具設計感(美觀、設計多樣化)，能夠配合設計師創意及業主的特殊需求，實現於不同環境、不同風格的裝飾創意，是其他地面材料無法比擬的。
4. 吸收車輛行駛時產生的噪音，創造安靜舒適的生活和交通環境。
5. 雨天防止路面積水和夜間路面反光，提高車輛行人的通行舒適性與安全性。
6. 透水混凝土通常使用壽命長，與普通混凝土的使用年限相當；較透水磚整體性好、較平坦穩固且使用週期較長。
7. 具排水防洪功能。
8. 具生態養護功能。
9. 減輕排水設施的負擔，進而減少排水設施建造費用。

透水混凝土適用範圍：

1. 都市透水步道、自行車道。
2. 校園、公園、戶外廣場地坪。
3. 河堤高灘地地坪。
4. 路肩停車區。
5. 生態停車場。

6. 疏洪道、溢洪區。

2.2.3 天然骨材與再生骨材之性質比較

再生骨材的性質主要取決於母體混凝土的水灰比，而再生骨材的質量取決於回收過程(Hansen TC, & Boegh E, 1985)。因此可以理解，粘附的砂漿在確定再生骨材的性質中起著非常重要的作用。由於粘附砂漿的存在比重和再生骨材的體積密度相對低於天然骨材(Padmini A.K, & Ramamurthy K., & Mathews, M.S., 2009)母體混凝土中骨材的尺寸增加，粘附砂漿的比例隨樣品體積的減少而增加(Suryawanshi S.R., & Singh, B. & Bhargava, P., 2015) arviz, .2012)(Bcs, J., 1978)。當測試含有不同尺寸再生骨材，包括16-32 mm, 8-16 mm, 4-8 mm的不同樣品的砂漿含量百分比時，發現按體積計算分別含有35%，40%和60%的砂漿(Hansen TC, & Narud H. 1983)。再生骨材和粘附砂漿的質量之間的關係總是成反比(Kisku, N., & Joshi, H., & Ansari, M., & Panda, S.K., & Nayak, S., and Dutta, S.C., 2017)。由於粘附砂漿層的存在，再生骨材具有很高的吸水能力，因為粘附砂漿的孔隙可以吸收更多的水(Butler L, & West JS, & Tighe SL., 2011),(Rahal K., 2007),(Yang KH, & Chung HS., 2008),(Evangelista L, & de Brito J., 2007),(Sanchez de Juan M, & Gutierrez PA., 2004),(McNeil K, & Kang TH-K., 2013)。再生骨材的吸水能力取決於骨材表面存在的粘附砂漿的量(Building Contractors Society of Japan., 1981)。根據不同研究人員和國際委員會的建議，必須使用吸水能力低於13%的細再生骨材，而對於粗再生骨材，當這些骨材用於混凝土時，這個百分比為7%(Li JB, 2004)。再生骨材吸收的水量幾乎是天然骨材的2-3倍(Katz A.,

2003) (Poon CS, & Shui ZH, Lam L. , 2004) (Tavakoli M, & Soroushian P. , 1996) 。因此，當通過破碎值試驗比較天然骨材和再生骨材時，發現再生骨材RA對於10-4.75mm和20-10mm的樣品尺寸分別具有45%和33%的高破碎值(S.R. Suryawanshi, & B. Singh, & P. Bhargava. , 2015)。與天然骨材相比，再生骨材還具有低耐磨性和低抗衝擊性(Hansen TC, editor. , 1992) (goe-CrentsSail KK, & Brown T, & Taylor AH. , 2001)(Limbachiya MC, & Leelawat T, & Dhir RK. , 2000) (López-Gayarre F, & Serna P, & Domingo-Cabo A, & Serrano-López MA, & López-Colina C. , 2009) 。

再生粗骨材乃是由廢棄建築混凝土塊碎化而成，其表面粗糙又多孔，其顆粒形狀雖比不上天然骨材的優良，但已能滿足混凝土骨材之粒形要求。而再生細骨材部分，因為多角形，孔隙率大、吸水率高因此若使用再生細骨材時，會使再生混凝土性質變異性太大。

以混凝土碎塊所製成之再生骨材，其比重皆低於天然骨材，而再生骨材比重會較低的原因為，再生骨材中含有比重較低的水泥砂漿所致。與天然骨材之物理性質比較時，其中較特殊的部份就是再生骨材有較高的吸水率。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%，如表2-3。

表 2-3 天然粗骨材與再生骨材之基本性質

材料 性質	天然粗骨材	再生骨材
形狀	多元	其外觀大致略為扁平並有些菱角，表面多孔隙且有水泥砂漿粘著骨材，外形介於卵石與碎石之間。
面乾內飽和比重	2.65	2.3
吸水率	1.33%	7.52%
乾搗單位重	1.50T/M ³	1.24T/M ³
乾比重	2.62	2.14
孔隙率	0.43	0.42

資料來源：(蘇南、曾郁文，2000)

2.3 透水混凝土配比設計

混凝土配比設計時，骨材以面乾內飽和狀態為基準，因骨材中有孔隙，水會因吸附作用包裹於顆粒，若骨材在拌和時會吸水，不僅會影響水灰比同時亦會降低工作度。骨材內含水狀態分絕對乾裸狀態、乾狀氣態、面乾飽和狀態及溼潤狀態。濕砂會有濕脹的現象，因為水份所產生的表面將顆粒推開，所以砂的鬆散體積會有明顯的膨脹，依骨料的含水量和粒徑而變。骨材吸水率依骨材風化程度、裂縫多寡、孔隙大小、礦物成分等而異。骨材之吸水率可間接量測孔隙率，進而推測骨材之緻密性與耐久性。一般規定混凝土用粗骨材之吸水率應小於3%，顯示骨材質地堅硬、孔隙率小(黃兆龍，1999)。

透水混凝土之配比，除力學強度之外，一般透水係數為性能的指標。故配比設計時，先將使用骨材之乾搗單位重求出，從而求取骨材中存在的孔隙。而後，依據需要強度，填充少於總孔隙體積但不同體積含量的水泥漿體，即可完成配比的設計(潘昌林、鄭瑞濱，2000)。

黃兆龍(1999)認為混凝土是一種非常特殊的複合材料「基本上由水泥、水、骨材三以上性質完全不同的材料所組成，水泥是一種「膠結性材料」，具有水化膠結的性能，加上「水」後開始進行「依時水化凝固」性能，將堅硬的碎石、石子、砂等固態粒子膠結在一起逐漸產生強度而形成人造石材(黃兆龍，1999)。一般可將混凝土的結構，區分為填充材(Filler)與膠結材(Adhesive)及摻料三種」，其性質如下：

(1) 填充材

即為粗骨材與細骨材，當骨材填充材於水泥漿中，一方面可提高混凝土整體性強度及對外加載之抵抗力，防止水分滲透，抗磨損及減少風化作用等。另一方面又可減少水泥漿體之用量，增加混凝土拌成品之體積，進而降低營造成本，同時，又可減少因水泥漿體凝結硬固所引起體積收縮變化量。

(2) 膠結材（水泥）

水泥漿體未產生水化作用前，具有潤滑功能，當其填充於粗細骨材間之空隙時，漿使未凝結固之混凝土具有流動性。其水化作用後，水泥漿體漸漸產生膠結力，進而將細骨材膠結成一體，然後硬化，逐漸具有強度。

(3) 摻料

台灣本土的混凝土配比設計方法，其中摻品，常見的是強塑劑之使用，係藉由強塑劑本身界面活性功用，避免顆粒產生聚簇作用，使其保持分散狀態，釋放出包裹於顆粒中的層間水，而提高新拌混凝土之流動性。然而不同分子結構的強塑劑，隨著分子量大小不同，極性基性質不同，分子空間構形不同，則對顆粒分散減水的作用也不盡相同。依照透水混凝土主要透水性與抗壓性為優先考慮，採利用行政院公共工程委員會施工綱要第02794章(2015)透水性鋪面之一般要求，建議水泥、粒料之要求設計，使用經驗圖表計算利於計算材料用量，如下表。

表 2-4 混凝土之水泥、粒料等之要求

原料	性能要求
水泥	<ol style="list-style-type: none"> 1. 水泥應符合第 03052 章「卜特蘭水泥」之規定。 2. 使用的粒徑越小，水泥顆粒亦應相應變小。
粒料	<ol style="list-style-type: none"> 1. 粗粒料應為單一級配。如 10~20mm、10~30mm 等，不宜小於 5mm 或大於 40mm。 2. 粗粒料至少須含[90%](重量比)破碎顆粒，且該破碎顆粒至少須具[一個]破碎面。 3. 粗粒料之扁平率應小於 15%，粒料含泥量應小於 1%。

資料來源:行政院公共工程委員會施工綱要第 02794 章 V4.0(2015)

表 2-5 細粒料混凝土之設計參考

水泥：粒料	水灰比	水泥 Kg/m ³	用水量 Kg/m ³	碎石 Kg/m ³
1：10	0.364	157	57	1570
1：10	0.582	152	88	1520
1：12	0.408	133	54	1597
1：15	0.41	107	44	1598
1：8	0.35	201	70	1608
1：10	0.36	158	57.5	1580

註：水灰比理想範圍介於 0.45~0.6 之間，較低者可選用 0.35

資料來源: 行政院公共工程委員會施工綱要第 02794 章 V4.0(2015)

林佑儒(2012)採用體積法結合比表面積法進行配比設計，使用之粒徑為三分石：粒徑分佈 12.5mm~4.75mm 與六分石：19.0mm~4.75mm 之骨材，其中透水混凝土之強度最高可達 307kgf/cm²，透水係數介於 0.061cm/sec~0.068cm/sec，試驗過程中發現對於三分石及六分石於水膠比 0.25 及 0.30 時，目標孔隙率越大，漿骨比越小，其強度也越小，透水係數則越大。

在「多孔隙混凝土配比試驗及應用之研究」一文中提到以粒徑分析抗壓強度，粒徑越大者，其抗壓強度越低，而透水係數隨著水灰比增加而降低，在相同水灰比時，透水係數隨著漿骨比提高而降低，粒徑為 25~37.5mm 時，透水係數介於 11.0~1.0cm/sec(羅常銓，2006)。

2.4 透水混凝土抗壓強度試驗

2.4.1 台灣透水混凝土抗壓強度之規定

經濟部水利署施工規範第 03378 章多孔混凝土的品質檢驗項目、試驗方法與頻率依下表辦理，未符判定基準依評估不合格之規定處理。根據行政院公共工程委員會施工綱要規範第 02795 章(2010)，中華民國國家標準(CNS) 14995 「透水性混凝土磚」，主要適用於景觀或室外鋪面如廣場、人行道、景觀步道及自行車道等透水性混凝土磚，規定之透水係數應於 $1 \times 10^{-2}(\text{cm}/\text{sec})$ 以上，抗壓強度於 $280\text{kgf}/\text{cm}^2$ 以上，抗彎強度也須 1200kgf 以上，適用於透水地磚長度或寬度超過 280mm 者。

表 2-6 硬固多孔混凝土之品質管理

種類	試驗項目	試驗方法	試驗頻率	試體採樣時期與試體材齡	判定基準
硬固多孔混凝土	抗壓強度	參照 CNS 1232	每 200 立方公尺採取 1 次及每澆置 1 日採取 1 次以上之圓柱試體。而且 1 次試驗須提供 3 個試體供試。	試驗齡期 28 天	任 1 個試體均不得低於 $0.75f_c'$ ，且平均抗壓強度須等於或超過 $0.85f_c'$ 。
	孔隙率	孔隙率 [註]	每 200 立方公尺採取 1 次，不足 200 立方公尺者亦同，。而且 1 次試驗須提供 3 個試體供試。	試驗齡期 28 天	任 1 個試體均不得低於 0.75 設計值，且平均孔隙率須等於或超過 0.85 設計值。

洪盟峰、黃兆龍(2013)期刊中說明，日本於透水混凝土用於透水構造物工程性質如表 2-7，建議透水構造物的透水係數在 1×10^{-2} (cm/sec) 以上。因此以日本透水結構規範 1×10^{-2} (cm/sec) 要求，大約與粗砂及礫石的透水性直接接近。日本透水結構物用途如人行道與自行車道的強度規範為 180kgf/cm^2 以上，廣場及停車場強度要求 210kg/cm^2 以上。

表 2-7 透水混凝土應用於透水結構的工程性質

用途	人行道	自行車道	廣場、停車場
強度	180(kgf/cm ²)	180(kgf/cm ²)	180(kgf/cm ²)
滲水係數	1×10 ⁻² (cm/sec)	1×10 ⁻² (cm/sec)	1×10 ⁻² (cm/sec)
空隙率	10%以上	10%以上	10%以上

資料來源：(洪盟峰、黃兆龍，2013)

依內政部營建署(2019)中，混凝土結構設計規範「結構混凝土之規定抗壓強度(f_c')不得小於 175kgf/cm²」。

而在行政院公共工程委員會施工綱要規範第 02794 章 (2015)「透水性鋪面之一般要求」，藉由配合設計與製程控制使鋪面達到適合之強度、透水性及無材料析離等工程需求，一般作為無須壓密之回填材料或水工構造物，抗壓強度約在 200 psi(1.5 Mpa)至 2000 psi(14 MPa)之間。

2.5 透水性試驗

行政院公共工程委員會認為透水鋪面能使雨水通過人工鋪築之多孔隙鋪面直接滲入路基，而具有使水還原於地下者，可減輕排水道負擔及延緩洪峰流量，並可減緩熱島效應，進而達到生態效益。

滲透性是為骨材被液體或氣體等能穿透的能力，一般以孔隙數量大小，形狀及連通性之影響最大。低滲透性的骨材摻入水泥漿體中期盼能降低整個混凝土的滲透性，因骨材顆粒會切斷水泥漿內部水流的通道。透水性支配骨材吸水率及水溶物進出，影響物理性質和化學安定性。尤其骨材內部有水份時，會因水分移動而導致靜水壓力，發生膨脹和發裂。若於飽和情況下，更會影響骨材之抗凍性(黃兆龍，1999)。

「環境科學大辭典」中滲透係數為達西定律的比例係數，代表單位面積和單位水力梯度下，通過水層斷面之流量，反映流體流經透水介質的速率，單位是長度／時間(L/T)。滲透係數值與下列二個因素相關：(1)介質的特性，如粒徑大小及分布、顆粒的圓度、顆粒自然堆列情形等，(2)流體的密度和黏滯性。滲透係數之求法有三種：(1)經驗公式，如Hazen公式或Terzaghi公式，(2)實驗方法，如用定水頭或變水頭滲透儀量測試體等，(3)現地方法，如利用抽水試驗、微水試驗(slug test)、或失蹤劑試驗等(國家教育研究院，2002)。「力學名詞辭典」中滲透係數定義為：

$$K=(Q/Ai)----- (a)$$

式中，K為滲透係數；A為流體與介質之總斷面積；i為水頭梯度；Q為流量。

K的意義為在單位水頭梯度作用下，通過單位斷面積（含介質）之流量。如圖所示，水頭梯度為兩斷面間之水頭差 h_1-h_2 除以在流動方

向兩斷面間之距離 L ，在多孔介質中之流速甚小，其流速水頭可略而不計，故水頭差即為能量損失水頭，亦即單位體積重量之流體流經該兩段面間之能量損失。因為滲透係數代表流體通過多孔介質之難易程度，故 K 值應為介質及流體性質之函數。由試驗及推理可以得知：

$$K=Cd^2 \gamma / \mu \text{-----} (b)$$

式中， d 為介質之粒徑； C 為介質之物理特性，如顆粒之級配、形狀、排列及方向等之函數； μ 為流體之動力粘性係數； γ 為單位體積之流體重量。

因為 μ 隨溫度而變， γ 隨壓力與溫度而異，故在同一介質中， K 值亦會因溫度與壓力而有不同(顏清連，2002)。

黃兆龍(1999)認為一般骨材孔隙大多介於1~5%之間，孔隙包括連通孔、半直通孔及閉孔三種基本型式，骨材孔隙影響凍融、耐久性及支配骨材之吸水率、透水性、外界物質進出，一般來說，孔隙率越高，其抗壓強度越低，若孔隙率高但孔隙小，則外界溶解物並不容易侵入骨材內部而起反應，反之若孔隙率小，但孔隙大則會被浸入侵蝕，導致鍵的破壞使骨材崩解，固孔隙對混凝土整體之耐久性有甚大影響。

第三章 研究方法

針對混凝土試體廢棄物可應用於透水混凝土，以降低骨材成本，減少其碳足跡，本文以抗壓強度和滲透性及孔隙率，分析以不同配比下再生膠結混凝土，利用收集文獻及製作不同配比圓柱試體，以抗壓實驗來進行分析材料強度之變化。

與天然骨材相比，再生骨材表面包裹水泥砂漿，稜角狀較多，且經二次破碎後產生的大量微細裂縫等種種因素導致再生骨材孔隙率較大，吸水率明顯較高，不同配比下的含混凝土廢棄物粒料之透水混凝土與天然骨材混凝土在抗壓強度和滲透性能方面存在較大的差異。本文主要考慮廢棄物之再生骨材取代天然骨材，對混凝土抗壓強度和滲透性的影響。因此本研究比較混凝土在不同再生骨材取代率下的數據，分析不同比例再生骨材和水灰比對含天然粒料混凝土抗壓強度及滲透性能的差異。

本研究分別取一般混凝土拌合廠碎石級配中粒徑為9.5-2.36mm及經回收再生廠軋碎混凝土塊的再生粒料，粒徑為9.5mm-2.36mm作為粗骨材級配。決定適合水灰比，進行圓柱試體製作，再來探討圓柱試體各項物理性質。本研究試驗計畫內容可分為：1. 粗骨材基本物理性質試驗；2. 透水混凝土圓柱試體抗壓強度試驗；3. 透水混凝土圓柱試體透水率試驗；4. 透水混凝土圓柱試體孔隙率試驗。

3.1 試驗材料與配比

說明如下：

(1) 水泥

試驗選用波特蘭水泥，本身為水硬性水泥，其主要成分為矽酸鈣鹽類組成。加水後起化學反應產生凝結與硬固作用，與粗細骨材膠結一起拌合形成混凝土，為營造工程普遍使用的材料

(2) 骨材

骨材是透水混凝土主要的骨架構，是提供主要強度之一，骨材包含天然骨材(礫石、卵石、砂)或特殊骨材(輕質骨材、營建回收材料等)。為確保透水混凝土的強度與透水性能，骨材是決定透水強度及性能的關鍵因素。天然骨材採用顆粒較小的單一粒徑級配，粒徑為9.5mm-2.36mm間，骨材含泥量應小於1%。本研究為收集試驗室廢棄之混凝土試體，至砂石場採用機械碾碎，然後再做篩分析，直到粒徑符合試驗所需粒徑之標準。混凝土使用的骨材及碎石料，一般要求必須「潔淨、堅硬、耐久，且不含有害之塵埃、泥土及有機物，和適當的顆粒形狀」。試驗骨材採用天然骨材9.5mm-2.36mm混合且具有堆積密度的粗骨材，及混凝土再生骨材混合物。

(3) 水

水是混凝土拌合物中重要的材料，它參與水泥的水化反應，對混凝土的強度有影響。其中的氯離子、酸鹼值、硫酸根離子、懸濁物質等均需符合規範要求

(4) 摻劑

摻劑是混凝土組成中的另一種附加材料，作用在水泥漿體中所發生的化學反應來改變混凝土性質的成效，目前在工程上應用最多的摻料，以減水、緩凝、輸氣等。其作用如下：

增強劑-有助於提高水泥漿與骨材間的介面強度。

減水劑-減少拌合水的用量，藉以降低水灰比來提升抗壓強度。

增黏劑-增加水泥漿體的黏稠度，提高施工面表層的平整度。

早強劑-在環境低氣溫情況下添加，可加速混凝土的硬化。

化學摻料應滿足國家標準CNS 12833「流動化混凝土用化學摻料」或美國材料試驗協會或美國材料試驗協會ASTM C1017 ASTM C1017「Standard Specification for Chemical Admixtures for Use in Producing Flowing Concrete」之相關規定為之。本次實驗化學摻料類型為TYPE-G，比重1.035。試驗材料如圖3-1所示。



卜特蘭水泥



再生骨材-試體廢棄物



天然骨材



添加劑

圖 3-1 試驗材料

(5) 配比設計

表3-1顯示試驗配比，設定0.25、0.3、0.35三種水灰比，以100%天然骨材為對照組、再分別以50%、25%及0%三種天然骨材，搭配再生骨材50%、75%及100%比例，及摻合料，每組配比做兩個試體。

表 3-1 混凝土配比表

項次	設計組合	W/C比例	最大粒徑(mm)	水泥種類	天然骨材百分比	再生粒料百分比	添加劑百分比
1	N100	0.25	9.5	台泥 I 型	100	0	1
2	N100	0.30	9.5	台泥 I 型	100	0	1
3	N100	0.35	9.5	台泥 I 型	100	0	1
4	R50	0.25	9.5	台泥 I 型	50	50	1
5	R50	0.30	9.5	台泥 I 型	50	50	1
6	R50	0.35	9.5	台泥 I 型	50	50	1
7	R75	0.25	9.5	台泥 I 型	25	75	1
8	R75	0.30	9.5	台泥 I 型	25	75	1
9	R75	0.35	9.5	台泥 I 型	25	75	1
10	R100	0.25	9.5	台泥 I 型	0	100	1
11	R100	0.30	9.5	台泥 I 型	0	100	1
12	R100	0.35	9.5	台泥 I 型	0	100	1

3.2 試驗設備

試體尺寸為 $\phi 15\text{cm} \times 30\text{cm}$ ，以鋼模製作，相關設備（如圖3-2）所示：

- (1) 粗、細粒料搖篩機：用以篩析骨材粒徑分布狀況。
- (2) #8、#200圓篩：用以水洗粒料，測定其含泥量。
- (3) 粗粒料比重吸水率設備：測定粒料的比重及吸水率，配比用。
- (4) 洛杉磯磨損機：用於測定粒料磨損抵抗力。
- (5) 單位桶：測定粒料單位重。
- (6) 混凝土拌合機：用於拌合粒料、水泥、水。
- (7) 圓柱試體鋼模：用以製作試體。
- (8) 搗實棒：製作圓柱試體中，搗棒搗實（每層搗 25 次）。
- (9) 膠槌：木槌輕輕敲模具側邊10至15下，藉以閉合搗棒搗實後在試樣內留下的孔洞及釋出試樣中較大的氣泡。
- (10) 試體養護水槽：養護圓柱試體用，溫度控制在 $23 \pm 2^\circ\text{C}$ 。
- (11) 恆溫水槽：用於測定試體孔隙率。
- (12) 透水試模：於滲透性實驗中，裝置試體用。
- (13) 橡膠軟墊：於滲透性實驗使用，避免造成從旁側漏，影響實驗數據，填縫使用。
- (14) 水槽：滲透性實驗中，能容納試模之適當容器，設一水槽排水口。
- (15) 電子秤：滲透性實驗中，用以量測數據。
- (16) 量筒：容量1000ml，刻度10ml之量筒。
- (17) 抗壓機台：於抗壓性實驗使用。



(1)粗粒料搖篩機



(2)水洗篩



(3)比重吸水率設備



(6)混凝土拌合機



(7)試體鐵模



(8)搗實棒

圖 3-2 試驗設備



(11) 養護槽



(12) 透水鐵模



(14) 水槽



(15) 電子天平



(16) 量筒



(17) 抗壓機

圖 3-2 試驗設備(續)

3.3 試驗流程

3.3.1 試體拌合製作流程

為方便現場拌合，本研究室驗方法採重量比例法，公共工程委員會施工綱要規範以「骨材」和「水泥」之重量比例，作為配比選用的依據。本研究試驗配比流程如圖 3-3 所示。

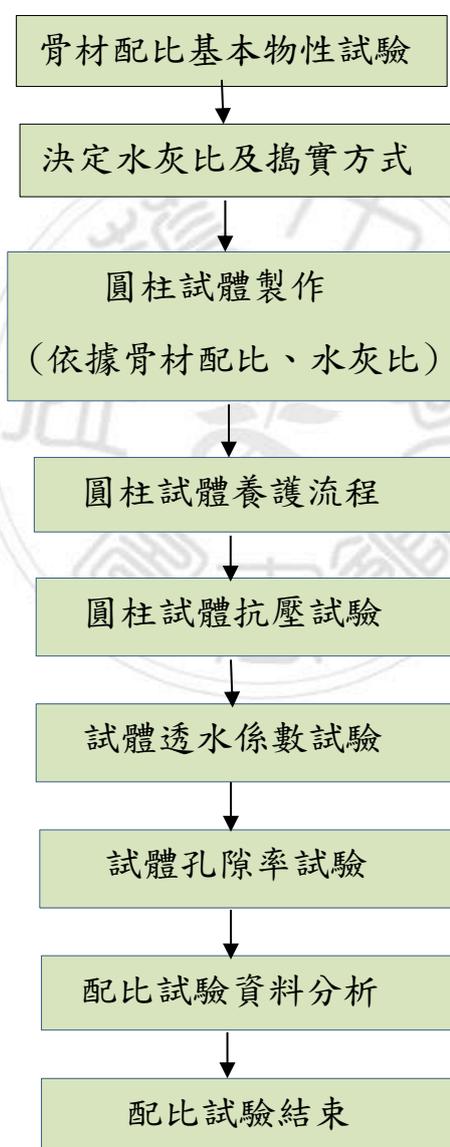


圖 3-3 配比試驗流程

(1) 粗骨材選用

至砂石場收集粒徑9.5mm~2.36mm間之天然骨材及將實驗室執行測試完，試體廢棄物送至資源再利用場，將試體廢棄物碾碎過篩取得粒徑9.5mm~2.36mm間之再生粒料。

(2) 水灰比設定

此次依據國內外有關透水鋪面施工文獻彙整，選用W/C 0.25、0.30及0.35三組水灰比作為此次研究之依據。

(3) 骨材配比組合

此次研究將100%的天然骨材作為對照組。再放置50%再生粒料和50%的天然粒料，75%再生粒料和25%天然骨材及100%再生粒料三種組合作為此次的實驗組。

(4) 圓柱試體製作

使用混凝土攪拌機將骨材及水泥材料充分拌合，將拌合好的透水混凝土，分三層將混凝土置入鋼模內，層與層間須充分搗實，確保粒料間密合，完成後須靜置於安全之處所，於24小時後將試體脫模。

(5) 試體養護

依據CNS 1230試體養護規範進行，水槽內之水溫須維持在 $23\pm 2^{\circ}\text{C}$ 間並為飽和石灰水。試體於24小時後拆模，於恆溫水槽內養置28天後抗壓。

3.3.2 粒料篩分析試驗

1.目的

為使粗細粒料篩分析作業標準化，以減少人為因素之誤差。

2.範圍

粗(石頭)、細(砂)粒料。粗、細混合料。

3.名詞解釋

3.1 細度模數《Fineness Modulus》：所謂細度模數乃是以表示粒料粗細程度之方式，常以英文 F.M.代表之。細度模數 $F.M.=\Sigma(\text{各標準篩號殘留累積百分率})/100$ (各標準篩號 150 μm 、300 μm 、600 μm 、1.18 mm、2.36 mm、4.75 mm、9.5 mm、19 mm、37.5 mm 及篩孔尺度以 2 倍遞增之更大篩號 CNS 386)。

4.參考資料

4.1 CNS 486(2001)、CNS 491(2001)

4.2 AASHTO T27-14

5.內容

5.1 使用儀器設備及工具

5.1.1 試驗篩網(63 mm~75 microns)。

5.1.2 電子秤(對細粒料可讀至 0.1 g 或試樣質量之 0.1%，對粗粒料可讀至 0.5 g 或試樣質量之 0.1%)。

5.1.3 烘箱(能維持 $110 \pm 5^\circ\text{C}$)。

5.1.4 銅刷、鋁盤、鏟子、計時器。

5.1.5 搖篩機。

5.2 試樣之準備

5.2.1 細粒料之準備

5.2.1.1 收件編號按"西元年取末 2 碼+編號+序號"予以編號。

細粒料收件須 2 公斤以上，並均勻拌合樣品，再以四分法縮分試樣至適於試驗之量(試樣烘乾後不得少於 300 g)。

5.2.1.2 將試樣放入溫度 $110 \pm 5^{\circ}\text{C}$ 烘箱中烘乾，並記錄樣品烘乾重。

5.2.1.3 洗去 $75\ \mu\text{m}$ 以下之粒料，並將其餘粒料烘乾至恆重並記錄所減輕之重量。

5.2.2 粗粒料之準備

5.2.2.1 收件編號按"西元年取末 2 碼+編號+序號"予以編號。

粗粒料收件重量應依其最大粒料尺度取以表(一)規定重量的四倍以上，並均勻拌合樣品，再以四分法縮分試樣至大於表 3-2 規定試驗之重量。

5.2.2.2 若需求得 $75\ \mu\text{m}$ 以下之粒料，先將試樣放入溫度 $110 \pm 5^{\circ}\text{C}$ 烘箱烘乾至恆重，並稱重記錄，再洗去 $75\ \mu\text{m}$ 以下重量記錄於底盤，同 5.2.1.3。

5.2.2.3 若不需求得 $75\ \mu\text{m}$ 以下之粒料，可不需將試樣乾燥，即可進行篩析。

5.2.3 粗細粒料混合料之準備

5.2.3.1 將試樣放入溫度 $110 \pm 5^{\circ}\text{C}$ 烘箱中烘乾，並記錄樣品烘乾重。

5.2.3.2 洗去 $75\ \mu\text{m}$ 以下之粒料，並將其餘粒料烘乾至恆重並記錄所減輕之重量。

表 3-2 粗粒料試樣最少質量規定

標稱最大尺度方孔篩		試樣最少質量 (kg)
公厘(mm)	英吋(inch)	
9.5	3/8	1
12.5	1/2	2
19.0	3/4	5
25.0	1	10
37.5	1 1/2	15
50	2	20
63	2 1/2	35

5.3 細粒料試驗步驟(CNS、ASTM、AASHTO 規範)

5.3.1 選擇需要篩號尺度，依篩孔由大至小之順序，從上而下組裝篩組，置試樣於頂篩上，並設定搖篩機約數分鐘(以現場使用之搖篩機設定充分篩析時間為基準)以搖篩機運用左右及上下之運動，輔以衝擊。

5.3.2 依篩孔由大至小之順序，依序秤取粒料重量並記錄(若有附著在篩網上之粒料應清理乾淨)。

5.3.3 完成篩析後，計算留篩百分率、過篩百分率、F.M.。

5.4 粗粒料試驗步驟(CNS、ASTM、AASHTO 規範)

5.4.1 選擇需要篩號尺度，依篩孔由大至小之順序，從上而下組裝篩組，倒入準備好之試樣進行篩析，篩析時間約數分鐘(依現場使用之搖篩機設定充分篩析時間為基準)。

5.4.2 篩孔由大至小，依序秤取粒料重量並記錄。

5.4.3 完成篩析後，計算留篩百分率、過篩百分率。(F.M.，若客戶要求再計算)

5.5 粗、細粒料混合料試驗步驟

5.5.1 選擇粗粒料需要篩號尺度，依 5.4.1 及 5.4.2 進行篩析。

5.5.2 各篩號秤重並記錄，底盤粒料倒入細粒料堆中。

5.5.3 以分樣器將底盤粒料縮樣成細粒料篩分析所需質量(最少 300 g)

5.5.4 選擇細粒料需要篩號尺度，依 5.3.1-5.3.2 進行篩析。

5.5.5 依序秤取各篩號之重量並記錄。

5.5.6 計算粒徑小於 4.75 mm 原有試樣中各篩號質量則可依 CNS 486 第 6.5.1 節或

AASHTO T27-14 第 8.3.1.5 節計算式求得：

A : 以總試樣為基準各篩號質量。

W1 : 總試樣中粒徑小於 4.75 mm 部分質量。

W2 : 試樣中粒徑小於 4.75 mm 材料經縮減後實際用於篩析試驗之質量。

B : 於篩分縮減試樣部分，各篩號之質量。

$$A = \frac{W1}{W2} * B$$

5.5.7 完成篩析後，計算留篩百分率、過篩百分率。(F.M.，若客戶要求再計算)

5.6 細粒料搖篩機充份篩析時間設定

5.6.1 選擇需要篩號尺度，依篩孔由大至小之順序，從上而下組裝篩組，倒入適當粒料，篩析時間先設定數分鐘進行篩析(以現場使用之搖篩機；設定充分篩析時間為基準)。

5.6.2 取出最上層之篩號倒出留篩粒料秤重記錄為 A，再倒回原篩號附上密合之底盤及頂蓋，以一手握篩呈微傾斜狀，另

一手將相對之篩緣震擊試驗篩，繼之兩手交互作一上下之震擊動作，其震擊頻率約為每分鐘 150 次並每隔 25 次旋轉圓篩周緣 1/6 更換震擊點一分鐘後再秤重記錄在留篩重量 B。

5.6.3 全部篩號同 5.6.2 節依次完成，若差異比全部小於 1% 時 (AASHTO 規範充分篩析、質量變化率為試樣總量之 0.5%)，此充份篩析時間即訂為數分鐘。
(差異比 $=\frac{A-B}{A} \times 100$)。

5.6.4 其中若有一篩號差異比大於 1% 時，即重新調整篩析時間，直到全部篩號差異比皆小於 1%，此調整時間即為篩析時間。

5.7 粗粒料搖篩機充份篩析時間設定

5.7.1 選擇需要篩號尺度，依篩孔由大至小之順序，從上而下組裝篩組，倒入適當粒料，篩析時間先設定數分鐘進行篩析 (以現場使用之搖篩機；設定充分篩析時間為基準)

5.7.2 取出最上層之篩號倒出秤重留篩粒料記錄為 A，再分次倒回同篩號依 5.6.2 節篩析動作進行篩析，此篩號全部篩析完畢再秤重記錄為留篩重量 B。

5.7.3 全部篩號同 5.7.2 節依次完成，若差異比全部小於 1% 時 (AASHTO 規範充分篩析；質量變化率為試樣總量之 0.5%)，此充份篩析時間即訂為數分鐘。
(差異比 $=\frac{A-B}{A} \times 100$)。

5.7.4 其中若有一篩號差異比大於 1% 時，即重新調整篩析時間，直到全部篩號差異比皆小於 1%，此調整時間即為篩析時間。

5.8 注意事項

- 5.8.1 篩析重量記錄至小數點第一位，過篩百分率也都計算至小數點第一位(第二位四捨五入)。
- 5.8.2 篩析完成後之試樣總質量和原試樣質量差值不可超過原試樣乾重之 0.3 %，若大於 0.3 %此篩析失敗，重新取樣篩析。
- 5.8.3 篩析過程中應限制各篩上之粒料量，使所有顆粒均有機會與篩孔接觸數次，篩孔較試驗篩 4.75 mm CNS 386 小者，篩析完成停留於任一篩號之試樣量不得超過 7 kg/m^2 (相當於 203 mm 直徑之圓篩上停留 200 g)。篩孔為試驗篩 4.75 mm CNS 386 及更大者，其篩面上停留量單位為 kg/m^2 之值，不得超過 $2.5 \times \text{試驗篩孔寬}(\text{mm}) \times \text{有效之篩網面積}(\text{m}^2)$ 。限制篩上粒料量之方法有二：(一)在特定篩上加一較大篩孔之篩，(二)逐次增量試驗樣品。



圖 3-4 搖篩機進行篩分析

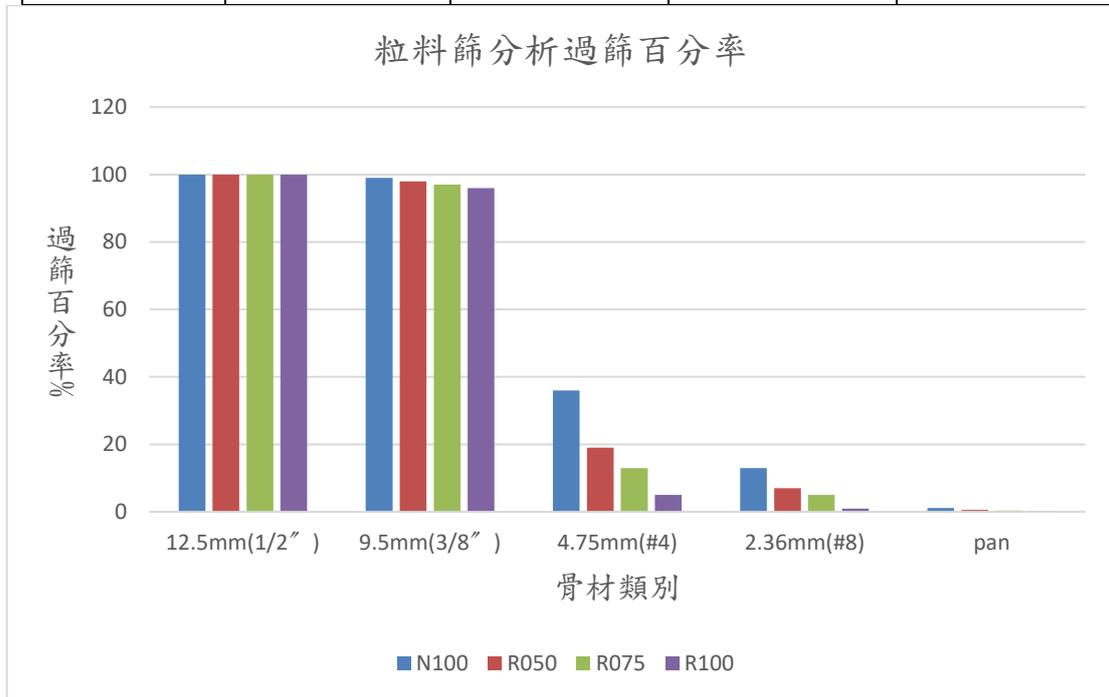


圖 3-5 粒料烘乾



表 3-3 粒料篩分析數據表

骨材類別	N100	R050	R075	R100
篩號	過篩百分率%	過篩百分率%	過篩百分率%	過篩百分率%
12.5mm(1/2")	100	100	100	100
9.5mm(3/8")	99	98	97	96
4.75mm(#4)	36	19	13	5
2.36mm(#8)	13	7	5	1
pan	1.1	0.6	0.4	0.2



3.3.3 粒料含泥量試驗

1.目的

為使試驗動作標準化，安全地執行，特訂定本程序。

2.範圍

粗細粒料骨材。

3.名詞解釋

無

4.參考資料

4.1 CNS 491(90)

4.2 ASTM C117-04

4.3 AASHTO T11-05(2005)¹。

5.內容

5.1 使用儀器設備及材料

5.1.1 電子秤：精確度為 0.1g 或重量之 0.1%。

5.1.2 烘箱：溫度能維持 $110\pm 5^{\circ}\text{C}$ 。

5.1.3 容器：盤子、盒子。

5.1.4 篩網：CNS 及 ASTM 規範之篩網為 1.18mm(#16)及 75 μm (#200),AASHTO 規範之篩網 2.36mm(#8),1.18mm(#16) 及 75 μm (#200)。

5.1.5 濕潤劑：任何分散劑,例如洗碗盤用之液態清潔劑,能促進細粒材料分離者。

5.2 試樣之準備

5.2.1 收件編號按"西元年取末 2 碼+編號+序號"予以編號。

充分混拌樣品,依四分法縮分試樣至適於試驗之量,且試樣質量於烘乾後須符合下列之規定。

表 3-4 四分法縮分試樣

標稱最大粒徑	烘乾後試樣最少質量(g)
4.75mm(或更小者)	300
9.5mm	1000
19.0mm	2500
37.5mm(或更大者)	5000

5.2.2 試樣須為樣品減量後之最後結果,不得刻意減量至一正好預定之質量。

5.3 程序之選擇

除規範或施工單位另有規定外,一般應採用第一種程序(A)。

5.3.1 以乾淨之水淘洗

5.3.1.1 將試樣以 $110\pm 5^{\circ}\text{C}$ 之溫度烘乾至恒重,秤重並記錄之。

5.3.1.2 將試樣置於容器內,加入足以淹沒試樣之水量。

5.3.1.3 充分攪動試樣,使所有粒徑小於 $75\mu\text{m}$ 之細顆粒完全由粗顆粒分離出來,立即將含有懸浮及溶解固體之淘洗水倒入重疊之 1.18mm (#16)及 $75\mu\text{m}$ (#200)篩上(AASHTO 規範為重疊篩之 2.36mm , 1.18mm 及 $75\mu\text{m}$ 篩上)。傾倒時應小心以防傾倒出試樣中較粗之顆粒。

5.3.1.4 再次加水於盛有試樣之容器中,用前節所述方法攪動及傾倒淘洗水,重覆此一操作直至淘洗水清澈為止。

5.3.1.5 將停留在重疊試驗篩組上之粒料,以清水沖洗併入洗淨之試樣中,置於 $110\pm 5^{\circ}\text{C}$ 之溫度烘乾至恒重,秤重並記錄之。

5.3.2 程序(B),使用含濕潤劑之水淘洗。

5.3.2.1 將試樣以 $110\pm 5^{\circ}\text{C}$ 之溫度烘乾至恒重，秤重並記錄之。

5.3.2.2 將試樣置於容器內,加入足以淹沒試樣之水量,並於水中加入適量溼潤劑(當攪動試樣時,適量溼潤劑須能產生少量之泡沫,其劑量將依水之硬度及清潔劑之品質而定)。充分攪動試樣,使所有粒徑小於 $75\mu\text{m}$ 之細顆粒完全由粗顆粒分離出來,立即將含有懸浮及溶解固體之淘洗水倒入重疊之 $1.18\text{mm}(\#16)$ 及 $75\mu\text{m}(\#200)$ 篩上。傾倒時應小心以防傾倒出試樣中較粗之顆粒。

5.3.2.3 再次加水於試樣之容器中,用前節所述方法攪動及傾倒淘洗水,重覆此一操作直至淘洗水清澈為止。

5.3.2.4 將停留在重疊試驗篩組上之粒料,以清水沖洗併入洗淨之試樣中,置於 $110\pm 5^{\circ}\text{C}$ 之溫度烘乾至恒重,秤重並記錄之。

[註]:1.程序 A 及 B,每次清洗後之粒料須由容器中再傾倒之水須通過 $75\mu\text{m}(\#200)$ 之試驗篩。

2.質量準確至試樣之 0.1%。

5.4 計算

$$A=(B-C)/B\times 100$$

A:以水洗法求得之粒料內 $75\mu\text{m}$ 材料之百分率, %

B:試樣之原始乾燥質量, g

C:水洗後試樣之乾燥質量, g

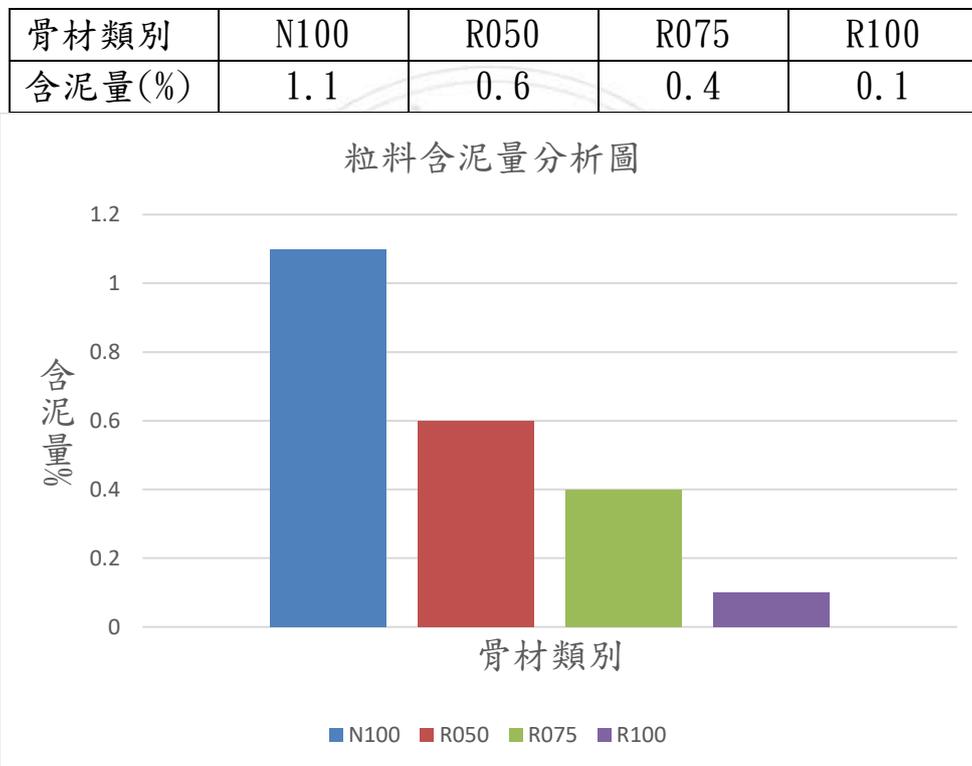
5.5 報告

5.5.1 報告中須包含下列項目

5.5.1.1 水洗法求得之粒料內小於試驗篩 75 μ m 材料含量百分率取至最近之 0.1%，若其結果為 10% 或更多時，則其百分率取至最近之整數。

5.5.1.2 須包含採用那一種程序之聲明。

表 3-5 粒料含泥量數據表



3.3.4 粒料比重吸水率試驗

1.目的

為使試驗動作標準化，以減少人為因素之誤差。

2.範圍

75 mm 以下之粗粒料但不包括輕質粒料。

3.名詞解釋

3.1 吸水率：在預定時間內，由於水分滲入粒料顆粒內之孔隙致使粒料增加之質量，但不包含附著在顆粒表面之水分，以粒料乾質料之百分比表示。

3.2 烘乾(OD)：與粒料顆粒有關，即粒料在 $110 \pm 5^{\circ}\text{C}$ 之烘箱內加熱乾燥足夠的時間至恆重之狀態。

3.3 面乾內飽和(SSD)：與粒料顆粒有關，指粒料在預定時間內浸泡水中，其可透水之孔隙充滿水分但表面沒有游離水之狀態。

3.4 密度：一種材料單位體積之質量，以 kg/cm^3 表示。

3.4.1 烘乾密度(OD)：烘乾粒料顆粒單位體積之質量，其體積包含粒料內可透水及不可透水之孔隙，但不包括粒料間之空隙。

3.4.2 面乾內飽和密度(SSD)：飽和面乾粒料顆粒單位體積之質量，其體積包含粒料內部可透水之孔隙，但不包括粒料間之空隙。

3.4.3 視比重：粒料顆粒不可透水部份每單位體積之質量。

3.5 相對密度(比重)：在特定溫度下，一種材料之密度與蒸餾水密度之比值，此比值無單位。

3.5.1 烘乾相對密度(比重)：在特定溫度下，粒料之烘乾密度與蒸餾水密度之比值。

3.5.2 面乾內飽和相對密度(比重)：在特定溫度下，粒料之面乾內飽和密度與蒸餾水密度之比值。

3.5.3 視相對密度(比重)：在特定溫度下，粒料之視密度與蒸餾水密度之比值。

4. 參考資料

4.1 CNS 488(2008)。

4.2 AASHTO T85-14。

4.3 ASTM D854-06。

5. 內容

5.1 使用儀器設備及工具

5.1.1 磅秤：CNS 規範為量測準確至試樣之 0.05 % 或 0.5 g(取其大者)。AASHTO 規範為最少讀數 1 g 或 0.1 %。

5.1.2 盛水容器：CNS 規範盛水容器沒有溢流口之規定。

AASHTO 規範盛水容器有溢流口之設施以維持固定水位。

5.1.3 選用不大於試驗篩 3.35 mm 網孔之鋼絲籃網，容量約 4~7 L；適用於粒料標稱最大粒徑 37.5 mm(1 1/2")以下者。更大粒徑之粒料需用更大容量之容器。

5.1.4 試驗篩 4.75 mm(# 4)。

5.1.5 烘箱：能維持溫度在 $110 \pm 5^{\circ}\text{C}$ 。

5.1.6 溫度計 (0.1°C)。

5.1.7 加蓋塑膠桶、大毛巾。

5.2 試樣之收件

5.2.1 收件編號按"西元年取末 2 碼+編號+序號"予以編號。先秤其試樣質量，如合乎標準取樣要求則編號並貼上標籤。

5.3 試樣之準備

5.3.1 將試樣充分拌勻後，以四分法縮分成規定之試樣量。

5.3.2 以乾篩法除去通過試驗篩 4.75 mm 之粒料，洗淨粒料表面之附著物及塵土，剩於之試樣需大於表 3-5 規定之最少質量。若粒料中含有多量試驗篩 4.75 mm 以下之材料，則可以試驗篩 2.36 mm 代替試驗篩 4.75 mm 進行乾篩法，或者將試驗篩 4.75 mm 以下之粒料依細粒料比重吸水率試驗作業規範進行試驗。

表 3-6 標準取樣要求

粒料標稱最大粒徑 mm (in)	試樣最少質量(kg)
12.5 (1/2)	2
19.0 (3/4)	3
25.0 (1)	4
37.5 (1 1/2)	5
50 (2)	8
63 (2 1/2)	12
75(3)	18

5.4 試驗步驟：

- 5.4.1 將試樣在 $110 \pm 5^{\circ}\text{C}$ 之溫度下烘乾至恆重，室溫冷卻 1-3 小時至適於操作之溫度，再浸入室溫之水中 CNS 規範為 24 ± 4 小時，AASHTO 規定為 15~19 小時。(用於混凝土配比之天然溼潤粒料，求其吸水率及比重時，不必先烘乾至恆重，若至試驗時，粒料仍保持溼潤狀況，則 24 小時之浸潤可免。)
- 5.4.2 將試樣自水中取出，倒在吸水性之布上滾動，將試樣表面水全部拭去（較大顆粒可個別擦拭後先置入加蓋不吸水容器），直到試樣表面在燈光下無明顯水光即表示已達面乾內飽和狀態（AASHTO：若試樣已較乾於面乾內飽和狀態，將試樣再浸入水中 30 分後，重新確認試樣的面乾內飽和狀態），稱取試樣質量記錄為 B。
- 5.4.3 磅秤歸零，立即將面乾內飽和試樣放入鋼絲網籃內，再將試樣放入水中記錄水中質量 C。（於秤重前應小心搖動容器除去粒料內陷入之空氣，且秤重時水面需淹沒網籃）；並以溫度計量測水中溫度，作為試驗結果之修正。
- 5.4.4 最後將試樣以 $110 \pm 5^{\circ}\text{C}$ 烘乾至恆重，並在室溫下冷卻 1-3 小時後再秤其質量 A。
- 5.4.5 若樣品停留在 37.5 mm 試驗篩上含量超過 15 % 時，則須將此部分粒料分幾個尺度分量試驗之；並依 CNS 488 第 8.3 節、8.5 節及 AASHTO T85-14 第 9.2 節、9.4 節之公式，計算平均密度與平均相對密度(比重)值及平均吸水率。

5.4.5.1 平均密度與平均相對密度(比重)值

當樣品按大小尺寸分開，分別予以試驗時，密度或相對密度(比重)之平均值可依下列公式計算

$$G = \frac{1}{\frac{P_1}{100G_1} + \frac{P_2}{100G_2} + \dots + \frac{P_n}{100G_n}}$$

式中 G=平均密度或相對密度(比重)，所有型式之密或相對密度(比重)均用此法平均 G1,G2,...,Gn=依各自的型式中每一種尺寸部份之密度或相對密度(比重)值 P1,P2,...,Pn=原始樣品中，每一尺寸部份所佔之質量百分率

5.4.5.1 平均吸水率

當樣品按大小尺寸分開，分別予以試驗時，按原始樣品中

$$A = \frac{P_1 A_1}{100} + \frac{P_2 A_2}{100} + \dots + \frac{P_n A_n}{100}$$

每一尺寸部份之所佔質量百分率求得平均值，依下列公式計算，須計算至 0.1 %

式中 A=平均吸水率，以%表示

P1,P2.....Pn=原始樣品中，每一尺寸部份所佔之質量百分率

A1,A2.....An=每一種尺寸部份之吸水率

5.5 計算(將試驗之比重值 $G \times$ 水溫 $^{\circ}\text{C}$ 修正係數 K)

5.5.1 相對密度(比重)

$$S_d \text{ 烘乾相對密度(比重)} = A / (B - C)$$

$$S_s \text{ 面乾內飽和相對密度(比重)} = B / (B - C)$$

$$S_a \text{ 視相對密度(視比重)} = A / (A - C)$$

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

精確度：AASHTO T85-14 比重計算至小數第三位、CNS

488 比重計算至小數第二位，吸水率計算至 0.1 %。

5.5.2 比重值修正如下表

表 3-7 比重值修正表

試驗之比重值 G	水溫 $^{\circ}\text{C}$ 修正係數 K 與比重值乘積修正
S_d 烘乾相對密度(比重)	$S_d \times K$
S_s 面乾內飽和相對密度(比重)	$S_s \times K$
S_a 視相對密度(視比重)	$S_a \times K$

5.5.3 密度(單位為 kg/cm^3)

$$D_d \text{ 烘乾密度} = 997.5A / (B - C)$$

$$D_s \text{ 面乾內飽和密度} = 997.5B / (B - C)$$

$$D_a \text{ 視密度} = 997.5A / (A - C)$$

上述 $997.5 \text{ kg}/\text{cm}^3$ 為 23°C 時水之密度。



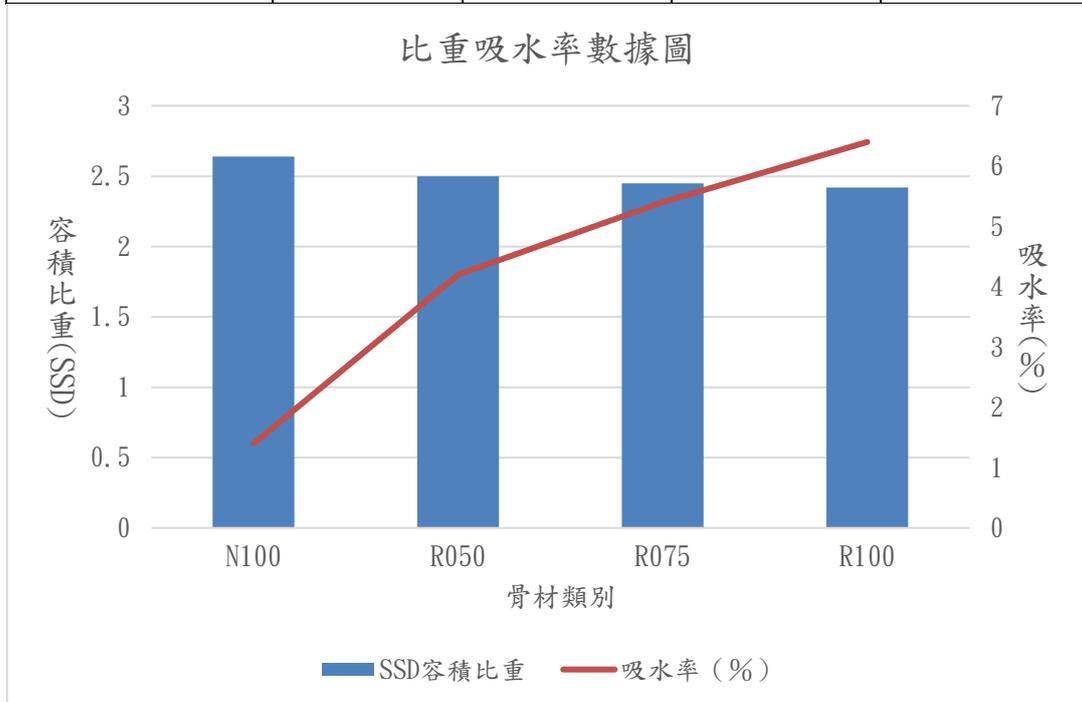
圖 3-6 粒料面乾內飽和試驗



圖 3-7 粒料水中重試驗

表 3-8 比重吸水率數據表

骨材類別	N100	R050	R075	R100
SSD 容積比重	2.64	2.50	2.45	2.42
吸水率(%)	1.4	4.2	5.4	6.4



3.3.5 洛杉磯磨損試驗

1. 目的

為使粗粒料磨損試驗標準化，以減少人為因素之誤差。

2. 範圍

適用最大粒徑小於 37.5 mm (1½") 之 CNS 490 (2009) 與最大粒徑大於 19 mm (¾") 之 CNS 3408 (1985) 尺寸之粗粒料，用洛杉磯試驗機試驗其磨損抵抗力之方法。

3. 名詞解釋

無。

4. 參考資料

4.1 CNS 490 (2009) 粗粒料 (37.5 mm 以下) 洛杉磯磨損試驗法。

4.2 CNS 3408 (1985) 粗粒料 (粒徑 19 mm 以上) 磨損試驗法。

5. 內容

5.1 使用儀器設備及工具

5.1.1 洛杉磯試驗機。

5.1.2 粗篩網乙套及 1.7 mm (No.12) 篩一個。

5.1.3 烘箱：溫度能維持在 110 ± 5 °C。

5.1.4 電子秤：1200 g/0.01 g、12 kg/0.1 g、30 kg/1 g 各一台。

5.1.5 鋁盤。

5.1.6 磨球：可由三種直徑 46.0 mm、46.8 mm、47.6 mm 的鋼球製成，平均直徑約 46.8 mm，每個鋼球重量在 390 ~ 445 g 之間。使用鋼球數量依試樣級配分類而定，規定如下表。

表 3-9 磨球數量與總質量

試樣級配	鋼球數量 (個)	鋼球總質量 (g)
A	12	5000 ± 25
B	11	4584 ± 25
C	8	3330 ± 20
D	6	2500 ± 15
1	12	5000 ± 25
2	12	5000 ± 25
3	12	5000 ± 25

※試樣級配 A、B、C、D 為 CNS 490 規範。

試樣級配 1、2、3 為 CNS 3408 規範。

5.2 試驗步驟：

5.2.1 樣品需先洗乾淨，然後在 110 ± 5 °C (CNS 3408 : 105 至 110 °C) 溫度下烘乾至恆重。

5.2.2 將試樣篩分成各種粒徑不同之粒料堆。

5.2.2.1 樣品為單一粒料時：

依篩分析後之粒徑分佈狀況選擇最接近表 3 規定之級配 (如粒徑分佈狀況有多種符合的情形，則應依表 3 由左至右選擇)，分別秤取該級配之各量 (g)，並記錄總重為 W1 至 1 g。

5.2.2.2 樣品為兩種以上之粒料時：

分別執行篩分析後，將各種不同尺寸之粒料加以配合計算，使其合乎工程合約或材料規範之要求 (如用於混凝土粒料或瀝青混凝土粒料)，依其配合計算後之粒徑分佈狀況，選擇最接近表 3 規定之級配 (如粒徑分佈狀況有多種符合的情形，則應依表 3 由左至右選擇)，分別將各粒料依配比分別秤取該級配之各量 (g)，並記錄總重 W1 至 1 g。

5.2.2.3 將 5.2.2.1 或 5.2.2.2 所得之粒徑分佈結果，依下表原則選用 CNS 490 或 CNS 3408 之試樣級配進行試驗。

表 3-10 選用 CNS 490 或 CNS 3408 之判定原則

依據規範	CNS 490	CNS 3408
適用範圍	最大粒徑小於 37.5 mm CNS 386 試驗篩之粗粒料。	最大粒徑大於 19.0 mm CNS 386 試驗篩之粗粒料。
選用原則	篩分析之粒徑分佈結果有停留在 37.5 mm 以上者，不適用 CNS 490。	篩分析之粒徑分佈結果沒有停留在 25.0 mm 以上者，不適用 CNS 3408。
判定結果	◎若篩分析之粗粒料最大粒徑為 37.5 mm 以上，則適用 CNS 3408。 ◎若篩分析之粗粒料最大粒徑為 25.0 mm，則適用 CNS 490。 ◎若篩分析之粗粒料最大粒徑為 19.0 mm 以下，則適用 CNS 490。	

5.2.3 清潔洛杉磯試驗機內部。

5.2.4 依上述篩分析結果選定表 3 之試樣級配種類後，將表 1 規定之鋼球數量及試樣放入洛杉磯試驗機內並將蓋子鎖緊。

5.2.5 依表 3 規定之轉數數值設定轉數，轉速：30~33 轉/分鐘。

5.2.6 啟動機器旋轉直到機器停止轉動，將蓋子取下後先取出鋼球。

5.2.7 倒出試樣先用 2.36 mm (No. 8) 篩做初步篩分析，剩餘試樣（若有超過 200 g，則分次篩之）再用搖篩機以 1.7mm (No. 12) 篩篩析之，停留其上者用水洗淨再置於 110± 5 °C 之烘箱內烘乾至恆重，秤其質量為 W4 並記錄至 1 g。

5.2.8 若要執行試樣之均勻性試驗，則應依表 3 的「均勻性轉數」設定分段試驗，第一段轉數試驗完成時應倒出試樣先用 2.36 mm (No. 8) 篩做初步篩分析，剩餘試樣（若有超過 200 g，則分次篩之）再用搖篩機以 1.7 mm (No. 12) 篩篩析之，停留其上者不得水洗，秤其質量為 W2 並記錄至 1 g；再繼續將全部試樣（包括碎片、塵土）倒回試驗機中，執行第二段轉數試驗，再依步驟 5.2.6 及 5.2.7 操作但先不水洗，秤其停留 1.7 mm (No. 12) 篩上質量為 W3 並記錄至 1 g 完成均勻性試驗。

5.3 計算

$$\text{磨損率(\%)} = [(W1 - W4) / W1] * 100$$

$$\text{均勻性} = (W1 - W2) / (W1 - W3)$$



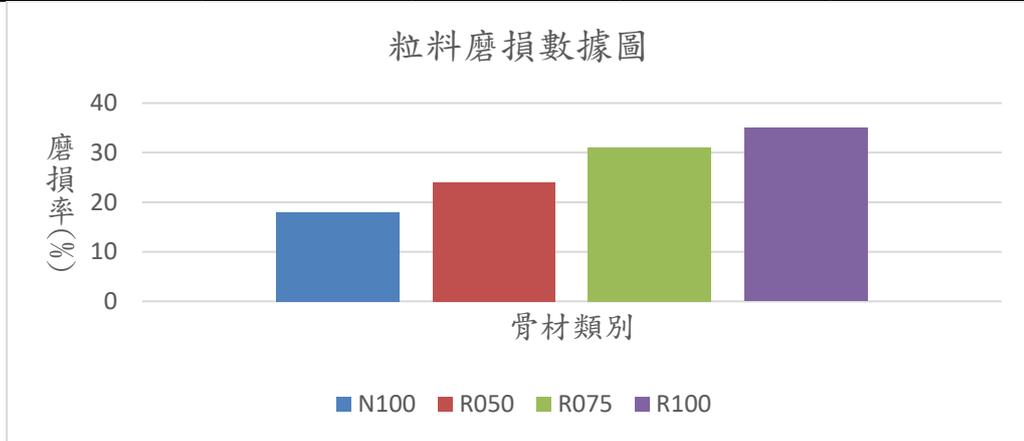
圖 3-8 洛杉磯磨損試驗

表 3-11 試樣級配

試驗篩尺度 (mm)		試樣級配質量(g)						
通過	停留	A	B	C	D	1	2	3
75	63					2500±50		
63	50.0					2500±50		
50	37.5					5000±50		
37.5	25.0	1250±10					5000±50	
25.0	19.0	1250±10					5000±50	5000±50
19.0	12.5	1250±10	1250±10					5000±50
12.5	9.5	1250±10	1250±10					
9.5	6.3			1250±10				
6.3	4.75			1250±10				
4.75	2.36				5000±10			
總重		5000±10	5000±10	5000±10	5000±10	10000±100	10000±75	10000±50
均勻性轉數		第一段轉數		100(轉)		200(轉)	200(轉)	200(轉)
		第二段轉數		400(轉)		800(轉)	800(轉)	800(轉)
磨損試驗轉數		500(轉)				1000(轉)		

表 3-12 粒料磨損數據表

骨材類別	N100	R050	R075	R100
磨損率(%)	18	24	31	35



3.3.6 粒料單位重試驗

1.目的

為使骨材單位重及空隙率試驗動作標準化，以減少人為因素之誤差。

2.範圍

粗、細或混合粒料依搗桿夯實法求取 4cm 以下單位質量及所含空隙之試驗方法。

3.名詞解釋

無

4.參考資料

4.1 CNS 1163(2008)

4.2 ASTM C29/C29M-17

4.3 AASHTO T19/T 19M-14

5.內容

5.1 使用儀器及工具

5.1.1 量桶：CNS 規範量桶為圓柱形金屬量桶，並附有手柄，須不透水，使用時不變形框頂須平整，誤差在 0.25mm 以內，並與底平行，誤差在 0.5 度以內，量桶之容量視試樣之最大粒徑而定，尺度須合於下表之規定。

ASTM 及 AASHTO 規範為高度與直徑之比應 80~150%。

表 3-13 使用儀器及工具

容量 (公升)	內徑 (mm)	內側高 (mm)	金屬厚度 (mm)		最大粒徑 (mm)
			底部	側壁	
3	155±2	160±2	5.0	2.5	12.5
10	205±2	305±2	5.0	2.5	25
15	255±2	295±2	5.0	3.0	40

5.1.2 搗棒：直徑 16mm 之圓形金屬直棒，長約 60cm，一端呈半圓球形。

5.1.3 天平：精準度 1g，容量為 15000g。精確度 5g，容量為 60kg，CNS、ASTM 及 AASHTO 規範之精確度在 0.1%。

5.2 樣品之準備：

5.2.1 將樣品放入 110±5°C 烘箱中，烘乾至恒重。

5.3 試驗步驟：

5.3.1 搗實法

5.3.1.1 依表 1 選取適當量桶。

5.3.1.2 將試樣分 3 次裝入量桶，每次三分之一並以手指整

平，再用搗棒全面均勻夯擊表面 25 次，夯實第一層時，搗桿不可直接搗壓至桶底，夯實第二層及第三層時所用之力，剛好夯至穿入前一層之頂部。

5.3.1.3 最上一層裝滿量桶，再搗夯 25 次，用手指或直尺修平量桶表面之粒料，使得大塊粗料之任何稍許突出部份，約略能抵消在容器頂面下之較大的空隙部份，稱量桶內試樣重並紀錄。

5.3.2 鏟填法

5.3.2.1 依表 1 選取適當量桶。

5.3.2.2 用鏟子或杓子將粒料裝滿量桶並使其溢出，裝填時，粒料應於不高於桶頂 50mm 處落下，儘可能注意使粒料不析離。用手指或直尺修平量桶表面之粒料，使其粒料凸出部份可約與量桶頂面下之較大空隙互相抵銷，稱量桶內試樣重並紀錄。

5.4 計算

5.4.1 CNS 規範

粒料單位質量(kg/m^3)=桶中粒料質量×量桶係數

$$\text{空隙率}(\%) = \frac{A*W-B}{A*W} * 100$$

A：容積比重(乾燥狀況)

B：粒料單位質量(kg/m^3)

W：水之單位質量($999\text{kg}/\text{m}^3$)

稱量量桶與桶中粒料質量，應準確至 1g。

粒料單位重有效位數至 $1\text{kg}/\text{m}^3$ 。

粒料空隙率有效位數至 1%。

5.4.2 AASHTO、ASTM 規範

$$M=(G-T)/V$$

M=容積密度(kg/m³)

G=粒料加量桶質量(kg)

T=量桶質量(kg)

V=量桶體積(m³)

$$\text{空隙率}(\%) = 100[(S*W)-M]/(S*W)$$

M=容積密度(kg/m³)

S=容積比重(乾比重)

W=水密度(998kg/m³)

5.5 量桶係數查驗步驟 1

5.5.1 量桶及玻璃板稱重，並記錄。

5.5.2 量取水溫，並由表 2 查出水之單位質量，若有需要可用內插法求得。

5.5.3 量桶裝滿水，再以玻璃蓋上，趕出桶面與玻璃間之氣泡。

5.5.4 擦乾桶外多餘之水份，稱重，並記錄。

5.5.5 量桶係數計算

表二 水之單位質量

$$\text{量筒係數} = \frac{\text{水之單位質量}}{\text{量桶水之質量}}$$

量桶係數計算至小數點二位

溫度°C	Kg/m ³
15.6	999.01
18.3	998.54
21.1	997.97
23.0	997.54
23.9	999.32
26.7	996.59
29.4	995.83

表 3-14 粒料單位重數據表

骨材類別	N100	R050	R075	R100
單位重(Kg/m ³)	1524	1312	1288	1258

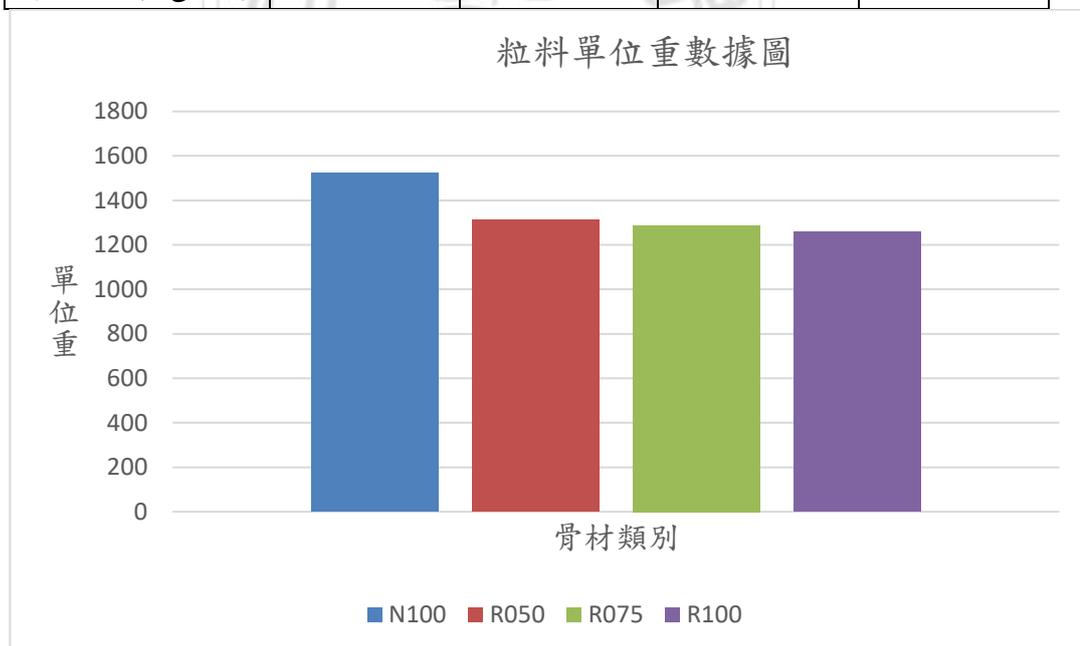




圖 3-9 粒料鏟填法試驗



圖 3-10 粒料整平秤重

3.3.7 試體製作流程

粒料依重量比例拌勻，以不同配比及水灰比製作圓柱試體，製作流程如圖3-16所示



(a)天然骨材秤重



(b)再生粒料秤重



(c)水泥秤重



(d)拌合水秤重

圖 3-11 試體製作流程



(e) 添加劑秤重



(f) 拌合機進行拌合



(g) 搗棒搗實(分三層)



(h) 膠槌輕敲側邊

圖 3-11 試體製作流程(續)



(i) 圓柱試體完成(蓋上保護蓋)



(j) 24 小時後拆模



(k) 試體養護



(l) 漿體垂流現象

圖 3-11 試體製作流程(續 1)

3.4 圓柱試體抗壓試驗

3.4.1 試驗步驟

1. 目的

為使混凝土抗壓強度試驗之作業標準化，減少人為因素之誤差。

2. 範圍

2.1 抗壓試驗機之能量：1 Ton~200 Ton。

3. 名詞解釋

蓋平：混凝土硬化，於頂端使用高強度石膏灰泥將其覆蓋平整。

4. 參考文件

4.1 CNS 1232 (2002)、CNS 1230 (2002)、CNS 11297 (2005)。

5. 內容

5.1 使用儀器設備、輔助器材

5.1.1 抗壓試驗機 (10 kgf/200 tf、1 kgf/100 tf)

5.1.2 蓋平台 (<0.05 mm、 $<0.5^\circ$)、蓋平板 (18 × 18 × 8 mm、11 × 11 × 8 mm、 <0.05 mm)、氣泡式水平器 ($<0.5^\circ$)、石膏 (420 kgf/c m²)、卡尺 (0.01 mm/300 mm)、捲尺 (1 mm/5 m)、直角規 (90°)、厚薄規 (0.02 mm、0.05 mm 等)。

5.2 蓋平

5.2.1 高強度石膏灰泥

高強度石膏灰泥於每次進貨時及開封使用每三個月均予以檢驗其強度（參考 CNS 11297 4.1 節）並置於乾燥處予以保存以防受潮。

5.2.2 使用適當比例拌合用水與高強度石膏灰泥徹底攪拌，並使用蓋平板將試體蓋平。

5.3 試驗方法概述

將預拌混凝土圓柱形之試體，放置於混凝土抗壓試驗機並依 CNS1232 施以適當速率（ $1.50 \sim 3.5 \text{ kgf/cm}^2 \cdot \text{s}$ ）之荷重並讀取破壞荷重，再除以試體斷面積得到抗壓強度，並依附件 6.6 修正係數、修正抗壓強度。

5.4 混凝土試體抗壓強度試驗步驟說明

5.4.1 混凝土收件程序

5.4.1.1 混凝土試體先置於收件區，送樣人員填寫送驗單並交給助理小姐編號。

5.4.1.2 檢查試體表面是否缺角、凹陷、裂紋，於送驗單背面註明，並使用 L 型直角規貼齊直立試體，緩慢轉動試體達 360 度檢查試體直立面與 L 型直角規是否有縫隙，以 3 mm 或 2 mm 厚薄規測試，（厚薄規 3 mm 用於直徑為 15 公分試體；厚薄規 2 mm 用於直徑為 10 公分試體）同以上步驟將試體頂、底面互換再行查核一次，用以確認兩端面與中心軸之垂直面偏差小於 0.5 度，若不符合則將結果記錄送驗單上。

- 5.4.1.3 流水號應以年為單位連號使用，把編流水號寫在試體上，年為西元年取末 2 碼+流水號 0001 號+序號。



5.4.2 混凝土試體養護程序

- 5.4.2.1 將收件編好號碼的試體於送驗單上填寫養護時間後，再放入養護槽養護。試體若由客戶自行養護則須依照送驗單下緣內容勾選或自行填寫。
- 5.4.2.2 試體搬運時須注意儘量避免碰撞或掉落，以免影響強度。
- 5.4.2.3 試體抗壓的當日取送驗單，確認試體無誤後取出置於水平台，進行蓋平作業。
- 5.4.2.4 備噴水器或擰乾之濕毛巾使待壓試體隨時保持濕潤。

5.4.3 石膏蓋平程序

- 5.4.3.1 設計強度若高於 420 kg/cm^2 ，則直接以研磨機磨平毋需蓋平。（若無磨平機設備此條款不列入考慮，應以石膏強度為認可範圍。）
- 5.4.3.2 將已收件之試體放置水平台上（若已蓋平之試體，為避免破壞試體不敲除石膏視同未蓋平）。
- 5.4.3.3 將牛眼水平儀放置試體中央，調整直到氣泡維持在圈內。



牛眼定水平



雙面蓋平

5.4.4 試體直徑與高度量測程序

5.4.4.1 使用游標卡尺量測試體直徑，格式為**.**公分
(在試體高度之中間量測試體兩相互垂直之直徑兩次)，若量測同一試體所得之任一直徑值超過另一直徑值的 2 %時，該試體不得作為試驗用。以捲尺量測蓋平後試體任一直徑兩端高度兩次並記錄之，格式為**.*公分。

5.4.5 試體置於抗壓機之程序

- 5.4.5.1 待抗壓之試體，於水平台，移至抗壓機旁。
- 5.4.5.2 去除試體兩面及抗壓機上、下盤面之雜物以免施力不均。
- 5.4.5.3 試體置於下盤的中央關上防護網等待抗壓試驗。
- 5.4.5.4 操作抗壓機，執行抗壓試驗。(操作使用方法，請參考附件)
- 5.4.5.5 記錄試體破壞方式。(依送驗單註明之6種破壞方式記錄)
- 5.4.5.6 記錄試體蓋平缺陷。(依送驗單內容記錄)

6. 附件

6.1 混凝土抗壓試體應力增加率一覽表。

表 3-15 混凝土抗壓試驗應力增加率一覽表

試體規格(cm)	試體截面積 (cm ²)	應力增加率 kgf/cm ² · s	kgf/s
15 φ×30(H)	176.7	1.50~3.5	265.1~618.5
12 φ×24(H)	113.1	1.50~3.5	169.7~395.9

6.2 混凝土破壞方式圖解

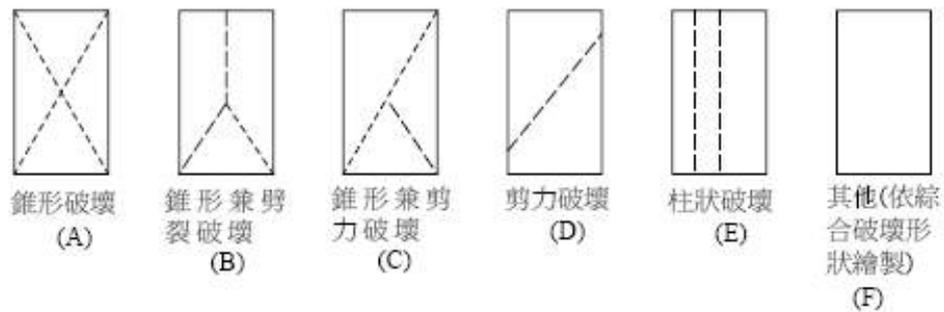


圖 3-12 混凝土破壞方式圖

3.5 試體透水係數試驗

3.5.1 試驗步驟

- 1.試驗目的:求得透水混凝土的透水係
- 2.試驗方法:依據 Daray 公式參考 CNS14995，以定水頭方式進行透水試驗。

3.試驗步驟:

(1)試驗儀器:

(a)透水圓筒:由中空試體圓模及套圈所組成，鐵模和套圈內徑為 10.2 公分，模高約 9 公分，組合後之高度約 14 公分。套圈上設一溢流槽，試體鐵模與套圈接合處需附以彈性套圈以防止滲出。

(b)底座:厚度約 5mm 之有孔洞之透水圓筒底座。

(c)水槽:能容納透水圓筒及其底座之適當大小金屬製圓形容器，距水槽容器內有孔底座之底端 1 公分高度設一水槽排流槽。

(d)其他:游標卡尺、磅秤、量筒、碼錶、溫度計、彈性套圈。

(2)以橡膠軟墊包覆透水混凝土試體，放入透水圓筒中，筒中密合貼緊使軟墊周圍之縫隙緊密連結。

(3)於圓筒上端注水，當水位到達一定程度後記錄高度(h1)，停止注水開始計時，當水流經試體至下端由水槽的排水口排出至一定高度(h2)，並記錄排水時間(t)及排出水量(Q)。

(4)依所得結果計算透水係數 K

$$K = L/H * Q/A(t_2 - t_1)$$

式中 K:透水係數(cm/sec)

L:試體厚度(cm)

H:水頭高(cm)

t_1 :試驗開始時間(s)

t_2 :試驗終止時間(s)

Q : t_1 至 t_2 時間內之滲流量(cm^3)

A :透水面積(cm^2)



圖 3-13 試體包覆彈性軟墊



圖 3-14 試體透水測試

3.6 試體孔隙率試驗

3.6.1 試驗步驟

1.試驗目的:求得透水混凝土的孔隙率，一般所指孔隙率指總孔隙率，為總孔隙率體積與試樣體積之比值。總孔隙率體積包含連通孔隙與封閉孔隙二部份，日本混凝土協會採排水體積法進行試驗，測定總孔隙率時，需要將試體浸入水中 24 小時後再水中稱重，以利用水份完全滲入孔隙內。

2.試驗方法:依據排水體積法進行試驗。

3.試驗步驟:

(1)試驗儀器:電子天平(精度 0.1g)、籃網、恆重水槽。

(2)將試體浸入水中 24 小時以上如圖，在水中稱重(W_s)，並在空氣中靜置 24 小時以上，空氣中稱重(W_g)，孔隙率為 V ，試體體積為 V_t ，水密度為 ρ_w ，計算如下:

$$V(\%) = (1 - \text{排水體積} / \text{試體體積}) = 1 - (W_g - W_s) / \rho_w / V_t$$



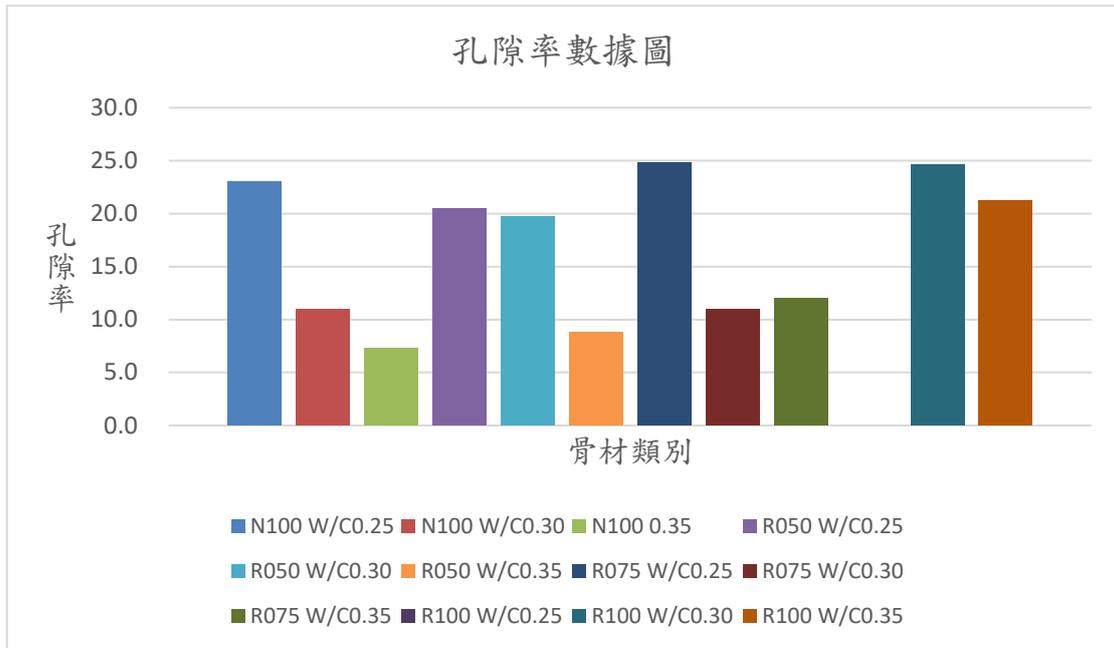
圖 3-15 試體浸水 24 小時



圖 3-16 試體水中體積試驗

表 3-16 孔隙率試驗數據表

骨材	N100	N100	N100	R050	R050	R050	R075	R075	R075	R100	R100	R100
類別	W/C0.25	W/C0.30	W/C0.35									
孔隙率	23.0	11.0	7.3	20.5	19.7	8.8	24.8	11.0	12.0	NG	24.6	21.2



第四章 結果與討論

4.1 圓柱試體抗壓強度分析

實驗結果顯示，水灰比對強度影響不大，但與水的滲透係數關係複雜。當水灰比為0.25時，已成型結果的角度考慮，由於再生骨材的高吸水率降低了可用水灰比，混凝土混和物未能充分混合，水泥漿太乾而無法成型。

(1) 骨材水泥配比對強度影響之研究

選擇骨材粒徑9.5mm~2.36mm的尺寸，水灰比為0.25、0.30及0.35。目的是研究預期達到210kgf/cm²強度，具體的配比量和測試數據，研究結果顯示，骨材水泥比決定了包裹再生骨材表面的漿層厚度。如果骨水泥的比例小，則漿層較厚。選擇合適的配合比例充分混和混凝土，可使骨材充分包裹，再生骨材與膠結材之間的黏結粒非常強呈現出高強度。但是當骨水泥比例變大，由於再生骨材無法被水泥漿完全包裹。骨材和水泥地結合會被破壞，混凝土將會提前破壞。

(2) 水灰比對強度影響之研究

本研究設定骨材粒徑9.5mm~2.36mm的尺寸，水灰比設定為0.25、0.30及0.35，具體的配比量和測試數據，實驗結果顯示水灰比對強度影響不大，但與水的滲透係數關係複雜，當水灰比為0.25時，以成型結果的角度考慮，由於再生骨材的高吸水率降低了可用淨水灰比，混凝土混和料未能充分混和，水泥漿太乾而無法成型，如圖所示。與回收的骨材充分拌合，會造成阻塞骨材間的縫隙，無法形成將上下連接的滲透通道而導致滲透性差。

(3) 水泥用量對強度影響之研究

水泥用量為 $2.50\text{kg}/\text{m}^3$ ，水灰比為 0.30 ，骨材粒徑為 $9.5\text{mm}\sim 2.36\text{mm}$ ，具體的配比和測試數據，實驗結果顯示，當水灰比為 0.30 時，減水劑成型時，試體底部未形成致密層，成型效果良好。由此可見，在水灰比範圍內，在確保一定的水滲透係數的情形下，隨著水泥用量的增加，抗壓強度也會增加。

再生粒料表面附著硬化水泥漿時。這些成分單位重、磨損粒、健全度及強度要低於天然骨材強度。然而，在軋碎的過程中產生了許多的裂紋。再生粒料中的最薄弱界面也就越多，在拌合混凝土的過程中，這些薄弱的界面上會脫落，破壞了混凝土的結構，因而造成再生粒料混凝土的強度低於天然骨材混凝土。再生粒料的吸水率高，影響水灰比導致再生粒料強度低於天然粗骨材，理論上來說，含細粒料再生骨材取代率與混凝土的抗壓強度呈線性關係；隨着再生粗骨材替代率增加，抗壓強度隨之降低。

本次抗壓試驗由桂田斗南實驗室執行，因再生粒料 100% 、水灰比 0.25 在拌合時因太乾導致無法製模，有一組（2個試體）失敗，無法進行後續實驗，故僅得22個數據，試驗報告如圖4-1所示，試驗結果整理如表4-1。

混凝土抗壓強度計算公式：抗壓強度(kgf/cm^2)=抗壓荷重 kgf /截面積(cm^2)，隨著再生骨材增加，混凝土抗壓性減小，此次試驗結果發現再生粒料 50% (W/C 0.25)因水灰比太低造成試體強度不佳及再生粒料 100% (W/C 0.30)因再生粒料本身吸水率高，混合料拌合後骨材吸水造成太乾狀態導致強度不佳。依此次抗壓結果顯示再生粒料 50% (W/C 0.30)及(W/C 0.35)平均抗壓強度分別為 $228\text{ kgf}/\text{cm}^2$ 及 $310\text{ kgf}/\text{cm}^2$ 均能達到 $210\text{ kgf}/\text{cm}^2$ 以上，此次結果顯示(W/C 0.25)所得試

驗數據無法獲得較佳的強度，因此次測試的骨材均在面乾狀態，導致骨材吸水太過乾燥，無法達到較佳強度。



表 4-1 試體抗壓實驗數據表

試體 編號	水灰 比(%)	天然 骨材 (%)	再生 骨材 (%)	水泥 (%)	拌合 水(%)	添加 劑(%)	抗壓強度 kgf/cm ² (psi)	平均抗壓 強度 kgf/cm ² (psi)
1-1	0.25	76.0	0	19	4.8	1	146(2077)	151(2148)
1-2							156(2219)	
2-1	0.30	75.3	0	19	5.7	1	256(3641)	248(3527)
2-2							240(3414)	
3-1	0.35	74.4	0	19	6.6	1	352(5006)	350(4978)
3-2							348(4950)	
4-1	0.25	38.0	38.0	19	4.8	1	67(953)	68(967)
4-2							68(967)	
5-1	0.30	37.7	37.6	19	5.7	1	232(3300)	228(3243)
5-2							224(3186)	
6-1	0.35	37.2	37.2	19	6.6	1	305(4338)	310(4409)
6-2							315(4480)	
7-1	0.25	19.0	57.0	19	4.8	1	140(1991)	145(2062)
7-2							150(2133)	
8-1	0.30	18.8	56.5	19	5.7	1	170(2418)	181(2574)
8-2							191(2717)	
9-1	0.35	18.6	55.8	19	6.6	1	172(2446)	178(2532)
9-2							184(2617)	
10-1	0.25	0	76.0	19	4.8	1	NG	0
10-2							NG	
11-1	0.30	0	75.3	19	5.7	1	82(1166)	86(1223)
11-2							90(1280)	
12-1	0.35	0	74.4	19	6.6	1	126(1792)	134(1906)
12-2							142(2020)	

註：一般混凝土-依據CNS1232 A3045 (2002) 執行試驗

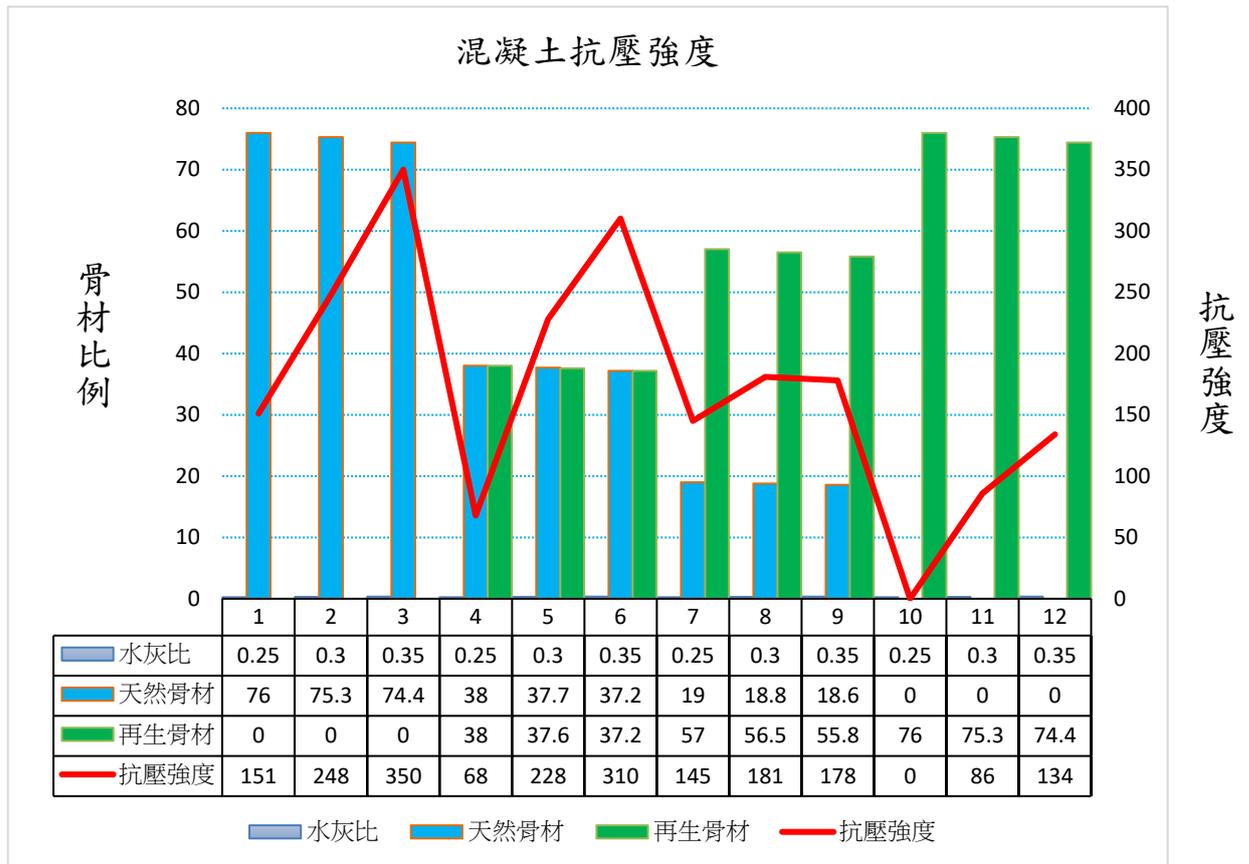


圖 4-2 骨材比例與抗壓強度直條圖

4.1.1 透水性鋪面之一般要求分析抗壓強度

在行政院公共工程委員會施工規範第02794章V4.0透水性鋪面之一般要求，2.1.2無細粒料混凝土鋪面，藉由配合設計與製程控制使鋪面達到適合之強度、透水性及無材料析離等工程需求，一般作為無須壓密之回填材料或水工構造物，抗壓強度

[200psi(1.5Mpa)~2000psi(14Mpa)][]之間。

此次研究配比中除再生粒料50%(W/C 0.25)、再生粒料100%(W/C 0.30)及再生粒料100%(W/C 0.35)三組試體抗壓強度分別為967psi、1223psi及1906psi符合此規範要求，其餘配比抗壓皆超過規範要求。

4.1.2 透水混凝土應用於透水結構分析抗壓強度

依據我國「標準法」之規定，中國國家標準CNS 14995(透水性混凝土磚)，透性地磚主要適用於鋪設自行車及人行道地面，其抗壓強度平均值應在 280kgf/cm^2 ，產品長度超過 280mm 者，其抗彎破壞載重須大於 1200kgf 。

日本對於透水混凝土作為透水構造物的工程性質如表 4-2，日本透水結構物如人行道和自行車道的規範 180kgf/cm^2 ，廣場及停車場要求 210kg/cm^2 。

表 4-2 透水混凝土應用於透水結構的工程性質（日本規範）

用途	人行道	自行車道	廣場及停車場
強度	180kgf/cm^2 以上	180kgf/cm^2 以上	210kgf/cm^2 以上
滲水係數	$1\times 10^{-2}(\text{cm/sec})$	$1\times 10^{-2}(\text{cm/sec})$	$1\times 10^{-2}(\text{cm/sec})$
空隙率	10%以上	10%以上	10%以上

資料來源：(洪盟峰、黃兆龍，2013)

此次研究配比顯示只有再生粒料50%(W/C 0.35)抗壓數據 310kgf/cm^2 ，試驗結果符合我國標準。

使用75%再生粒料(W/C 0.30)抗壓數據為 181kgf/cm^2 ，試驗結果不符合我國標準，但試驗結果可符合表4-2日本規範中人行道及自行車道標準。

使用再生粒料50%(W/C 0.30)及再生粒料50%(W/C 0.35)抗壓數據分別為 228kgf/cm^2 及 310kgf/cm^2 ，可符合我國標準亦可達到日本規範中人行道、自行車道及廣場及停車場。

4.2 滲透率分析

理論上，再生骨材表面包裹着舊水泥砂漿塊，加上經過機械碾碎過程中，再生骨材內部產生的二次裂縫會影響再生骨材的內部結構，提高了再生骨材的吸水率，相對於普通混凝土，再生骨材取代率越大，再生骨材混凝土的滲透性越高。故再生骨料具有吸水率大、密度小和壓碎指標高等特性。

· 透水試驗：於圓筒上端注水，當水位到達一定程度後記錄高度(h1)，停止注水開始計時，當水流經試體至下端由水槽的排水口排出至一定高度(h2)，並記錄排水時間(t)及排出水量(Q)。

(4)依所得結果計算透水係數 K

$$K = L/H * Q/A(t_2 - t_1)$$

式中 K: 透水係數(cm/sec)

L: 試體厚度(cm)

H: 水頭高(cm)

t1: 試驗開始時間(s)

t2: 試驗終止時間(s)

Q: t1 至 t2 時間內之滲流量(cm³)

A: 透水面積(cm²)

本次試驗圓面積 = $\pi * r^2 = 3.1416 * 5.0 * 5.0 = 78.5 \text{cm}^2$ ，滲透率計

算 = $\frac{\text{水量}}{\text{時間} * \text{面積}}$ ，試驗結果如表4-3，隨著再生骨材增加，混凝土滲透

性增加，本次完全使用粗骨材，無添加細粒料，故試驗出來的數據，透水性良好。在天然骨材和再生骨材各為50%時，再生骨材吸水率提高，滲透性隨之提高。吸水率大是不利再生骨料應用的一個制約因素，影響著再生混凝土的其他性能。通過化學和物理強化處理方法，

改善其表面狀況,從而減小它的吸水率,改變再生骨料混凝土拌合物的工作性能。

(1)當水灰比為0.25時,因再生骨材高吸水率,造成混合料太過乾燥,試體孔隙增加,透水率相對提高。

(2)因天然骨材摻雜較多的細粒料,當製作試體時填充粗粒料間的孔隙,相對其透水率較低。

(3)100%的再生骨材,因粗骨材間的孔隙大,相對其透水性能最好。

表 4-3 滲透性實驗數據表

試體編號	水灰比 (%)	天然骨材 (%)	再生骨材 (%)	水泥 (%)	拌合水 (%)	添加劑 (%)	透水率 cm/sec
1	0.25	76.0	0	19	4.8	1	0.51
2	0.30	75.3	0	19	5.7	1	0.35
3	0.35	74.4	0	19	6.6	1	0.26
4	0.25	38.0	38.0	19	4.8	1	0.67
5	0.30	37.7	37.6	19	5.7	1	0.55
6	0.35	37.2	37.2	19	6.6	1	0.34
7	0.25	19.0	57.0	19	4.8	1	0.43
8	0.30	18.8	56.5	19	5.7	1	0.36
9	0.35	18.6	55.8	19	6.6	1	0.38
10	0.25	0	76.0	19	4.8	1	-
11	0.30	0	75.3	19	5.7	1	0.78
12	0.35	0	74.4	19	6.6	1	0.64

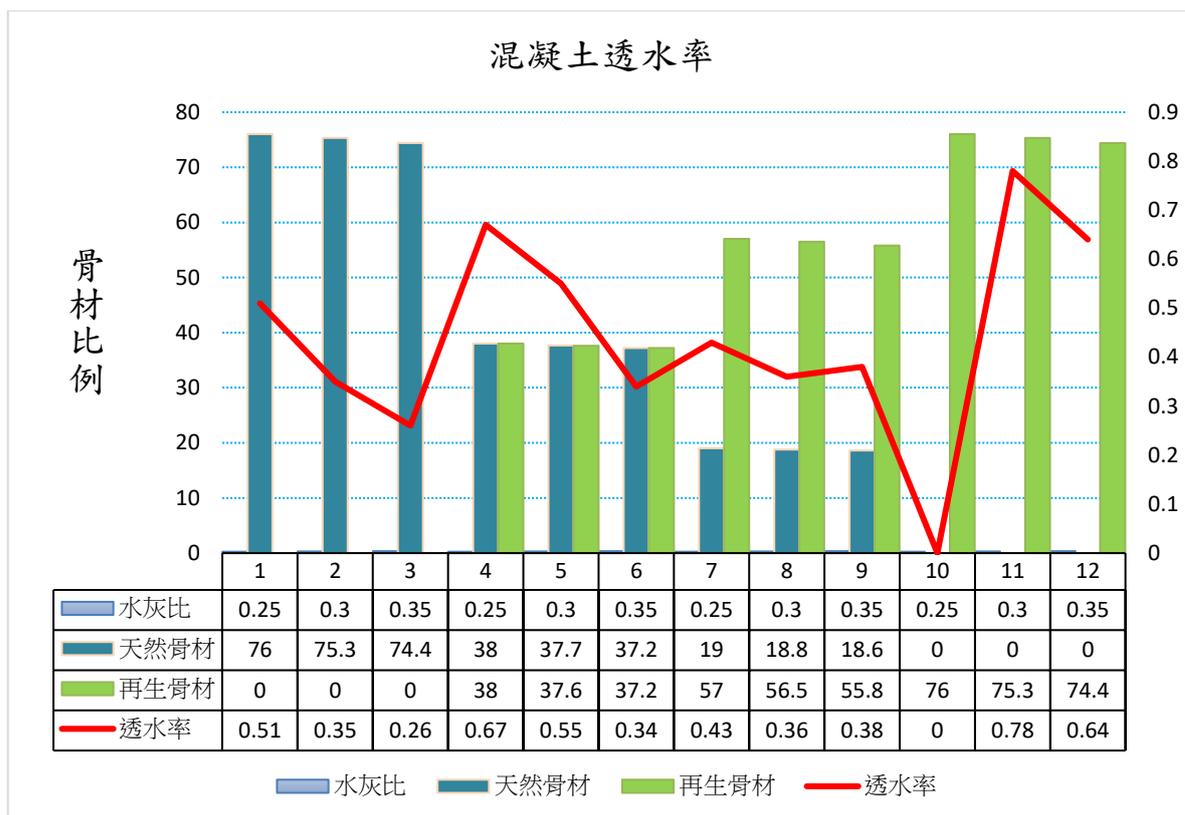


圖 4-3 骨材比例與抗壓強度直條圖

4.2.1 透水性鋪面之一般要求分析透水率

在行政院公共工程委員會施工規範第02794章V4.0透水性鋪面之一般要求，2.1.2無細粒料混凝土鋪面，藉由配合設計與製程控制使鋪面達到適合之強度、透水性及無材料析離等工程需求，一般作為無須壓密之回填材料或水工構造物，其滲透係數隨含砂量而不同，一般均大於 $[1.0 \times 10^{-3} \text{cm/sec}]$ ，無細粒料混凝土為增加透水性會犧牲強度，一般適合使用於承載力較小之區域，如人行道、停車場或廣場等。

此次的配比經透水係數試驗得到的數據最低為 $0.26(\text{cm/sec})$ 最高為 $0.78(\text{cm/sec})$ ，試驗結果符合。

4.2.2 透水混凝土應用於透水結構分析透水率

日本對於透水混凝土作為 透水構造物的工程性質如表 4-4，建議透水構造物的透水係數在 $1 \times 10^{-2} \text{cm/sec}$ 以上。因此以日本透水結構物的規範 $1 \times 10^{-2} \text{cm/sec}$ 要求，大約與粗砂及礫石的透水性質接近。

本次試驗結果，各種配比經透水係數試驗得到的數據最低為 0.26cm/sec 最高為 0.78cm/sec ，試驗結果符合。

內政部建築物研究所高性能透水綠建材規範及日本透水結構工程規範之透水性要求，透水係數 $> 1 \times 10^{-2} \text{cm/sec}$ 。

表 4-4 透水混凝土應用於透水結構的工程性質（日本規範）

用途	人行道	自行車道	廣場及停車場
強度	180kgf/cm^2 以上	180kgf/cm^2 以上	210kgf/cm^2 以上
滲水係數	$1 \times 10^{-2} \text{cm/sec}$	$1 \times 10^{-2} \text{cm/sec}$	$1 \times 10^{-2} \text{cm/sec}$
空隙率	10% 以上	10% 以上	10% 以上

資料來源：(洪盟峰、黃兆龍，2013)

4.3 孔隙率分析

內政部建築物研究所高性能透水綠建材規範及日本透水結構工程規範之孔隙率要求，孔隙率需大於10%。

表 4-5 透水混凝土應用於透水結構的工程性質（日本規範）

用途	人行道	自行車道	廣場及停車場
強度	180kgf/cm ² 以上	180kgf/cm ² 以上	210kgf/cm ² 以上
滲水係數	1×10 ⁻² (cm/sec)	1×10 ⁻² (cm/sec)	1×10 ⁻² (cm/sec)
空隙率	10%以上	10%以上	10%以上

資料來源：(洪盟峰、黃兆龍，2013)

此次研究的各種配比，經孔隙率試驗所得數據中，僅天然骨材100%(W/C 0.35)孔隙率為7.3%及再生粒料50% (W/C 0.35)孔隙率為8.8%，不符合要求，其餘配比均達到規範要求。

探討原因，此二種配比均為水灰比0.35，水灰比過高造成水泥漿體填充粒料間的空隙，將孔隙率降低。

第五章 結論與建議

本研究得到下列各項結論：

5.1 結論

1. 抗壓強度越高則透水性越低。再生粒料因本體的結構、磨損力及健度，都比天然骨材較差，需運用配比調整達到所需之強度及透水性。
2. 試驗結果顯示和對照組比對，以實驗組中再生骨材50%(W/C 0.30)及(W/C 0.35)，抗壓強度較高，透水性較佳，若鋪面設計以抗壓強度及透水性為目的，以本次試驗結果來看，則50%再生骨材為最佳方案。
3. 透水混凝土中粒料單位重越重，則抗壓強度越高)。
4. 粒料的磨損率越低，則抗壓強度越高。
5. 如何控制黏結材再混凝土內均勻分布，避免漿體垂流，以達到最佳之抗壓強度。
6. 試體製作的分層及搗實，會影響混凝土試體之強度及透水性。

5.2 建議

本研究所得之結果於實際應用上建議有下列幾點：

1. 本研究使用實驗室執行測試後之試體廢棄物中，破碎後所產生的再生骨材，取業界所謂的二分石來進行試驗，製作圓柱試體，但實務上可配合六分石及三分石不同比例，對再生混凝土抗壓性及滲透性影響，需做不同的探討。
2. 本研究試驗數據皆實驗室結果，未探討到運用至工程現場，建議後續研究，可蒐集不同配比及不同環境下，探討再生骨材混凝土抗壓性及滲透性。
3. 本研究目前只以水灰比0.25、0.30及0.35三種水灰比進行研究，後續研究可蒐集再生混凝土相關文獻，增加不同水灰比，做更精準之分析供業界參考使用。
4. 本研究單純針對再生粒料就物理性質進行試驗，後續應增加天然骨材及再生粒料之處理成本分析，就再生粒料的可行性進行探討

參考文獻

參考書籍

林金面 (2017)。土木工程學。第四章：混凝土工程。文笙出版社。

國家教育研究院 (2002)。環境科學大辭典。文景書局。

黃兆龍 (1999)。混凝土性質和行為。詹氏出版社。

顏清連 (2002)。力學名詞辭典。俊傑書局。

蘇南、曾郁文 (2000)。廢棄混凝土塊的再利用。中國土木水利半月集。台北。



學位論文

王瀚祥 (2010)。營建廢棄物資源化產值評估模式建立之研究。國立中央大學營建管理研究所。

沈美毅、2002、「廢棄混凝土再利用於開放級配與多孔隙瀝青混凝土之研究」、碩士論文、淡江大學土木工程研究所、臺北。

李崇德 (2002)。建築廢棄物回收系統制度之研究。國立中央大學土木工程研究所碩士論文，桃園縣。取自
<https://hdl.handle.net/11296/7hxvt2>。

周進煌 (2002)。營建廢棄物再利用於工程填方施工規範研擬之研究。國立中興大學土木工程學系。

林樹豪、張致瑋 (2016)。再生水泥混凝土力學性質關係之探討。

林晉丞 (2017)。資源永續—營建廢棄物回收再利用之研究。國立屏東高工。

高健章 (2008)。混凝土簡介。國立台灣大學土木系名譽教授。

陳明良 (1996)。建築產業廢棄物再利用之研究。國立臺灣科技大學工程技術研究所碩士論文，台北市。取自：<https://hdl.handle.net/11296/bxg7x4>

陳紹昫 (2000)。營建拆除廢棄物於公共工程再利用之可行性初步研究。國立中央大學土木工程研究所。

葉禮旭 (2011)。營建廢棄物總量推估與源頭管理之研究。中央大學土木工程學系學位論文。

熊希蕊、黃兆龍 (2013)。骨材對於混凝土之影響。取自：

<https://sites.google.com/site/bb9805102/di-yi-zhang-qian-yan/di-er-zhang>

潘昌林、鄭瑞濱 (2000)。透水混凝土與工程應用介紹。取自：

<http://www.c-km.org.tw/link/透水混凝土與工程應用介紹.pdf>

潘建舜（2011）。營建廢棄物處理機構資源化產品流向管理之研究。

國立中央大學土木工程研究所。

楊亦東（2015）。臺灣營建材料產業的現況與面臨的挑戰。財團法人

臺灣營建研究院。

梁桓郡（2008）。混凝土之分析與應用範圍之探討。高雄市。取自：

<https://www.shs.edu.tw/works/essay/2008/10/2008103114462138.pdf>

f



期刊資料

- 沈永年、林彥余 (2005)。混凝土版抗壓強度與反彈錘數之關係研究。高雄應用科技大學學報 第 37 期。取自 <http://www.arch.net.tw/modern/month/326/326-1.htm>。
- 姚志廷、蕭良豪 (2008)。綠建材產業分析及管理機制之研究。中華民國建築學會建築學報技術專刊，66增訂期，第35-46頁。
- 洪盟峰、黃兆龍(2013)。透水性水泥混凝土性質與應用之探討。德霖學報第十八期。
- 陳豪吉、彭獻生、楊宗岳 (2003)。「營建廢棄物 再生粒料應用於公路工程之可行性探討」，臺灣公路工程，第二十九卷，第九期，第 2-15 頁。
- 陳本源、談珮華、陳亮元 (2006)。建築廢棄物之環境空間再利用-以創造河川生態為例。臺灣遇現代性的後果與社區總體營造的創造性修補。環境與藝術期刊第四期。
- 陳正平 (2017)。談「結構混凝土規定抗壓強度之最低設計強度」修訂。技師報。
- 楊定良、黃隆茂 (2007)。混凝土的抗彎強度及抗壓強度於剛性鋪面工程之使用要點。現代營建 326 期。取自：<http://www.arch.net.tw/modern/month/326/326-1.htm>。
- 許桂銘、陳偉全 (2004)。水泥混凝土再生骨材優質化技術之研究。第6屆鋪面材料再生學術研討會論文集。

研究報告

李玉生、林志棟、陳世晃（2007）。再生透水鋪面材料關鍵技術探討與產業推廣之研究。內政部建築研究所協同研究計畫。

邱永芳、朱金元、張道光、黃然、張建智、葉為忠(2007)， 透水混凝土應用於交通工程之研究。交通部運輸研究所。

陳文卿、陳志桓（2000），建築廢棄物資源化再利用技術開發—廢棄混凝土塊再利用。新北市：中華民國內政部建築研究所。

蕭江碧、黃榮堯、許維庭、余昌翰、何坤憲（2003）。廢棄混凝土再生利用成本效益分析之研究。內政部建築研究所委託研究報告。國立中央大學營建管理研究所。

蘇茂豐、李婉諦、陳立、王義基、陳炯立（2007）。多元性廢棄物資源化於透水性混凝土磚及標準規範制定之研究。取自：
<https://www.bsmi.gov.tw/wSite/public/Data/f1316419969484.pdf>

網際網路資料

中華民國內政部建築研究所 (2019)。 <https://www.abri.gov.tw/>。

中華民國內政部營建署全球資訊網 (2019)。

<https://www.cpami.gov.tw/>。

行政院公共工程委員會 (2019)。施工規範第02794章V4.0 透水性鋪面之一般要求。 <https://www.pcc.gov.tw/>。

行政院環境保護署網站 (2019)。 <https://www.epa.gov.tw/>。

全國法規料庫 (2019)。 <https://law.moj.gov.tw/LawClass/LawSingle.aspx?pcode=O0050001&flno=39>

宜蘭縣政府環境保護局， <http://www.ilepb.gov.tw/Laws/LawsContent.aspx?id=170&p=1&type=3>，2001/03。

吳磐節能 (2017)。你了解混凝土的發展歷史嗎？ <https://kknews.cc/zh-tw/history/xrl4xnq.html>

美國國家海洋暨大氣總署。取自 <https://www.noaa.gov/>

混凝土強度等級。華人百科。取自：<https://www.itsfun.com.tw/%E6%B7%B7%E5%87%9D%E5%9C%9F%E5%BC%B7%E5%BA%A6%E7%AD%89%E7%B4%9A/wiki-252084-645354>

中國國家標準CNS 1232 (2002)。混凝土圓柱試體抗壓強度檢驗法。取自 https://www.thcia.gov.tw/df_ufiles/b/3-03%E6%B7%B7%E5%87%9D%E5%9C%9F%E6%9D%90%E6%96%99%E8%A9%A6%E9%A9%97%E5%8E%9F%E7%90%86%E8%88%87%E6%95%B8%E6%93%9A%E5%88%86%E6%9E%90-ok.pdf。

https://www.designingbuildings.co.uk/wiki/Carbon_dioxide_in_construction.

https://www.designingbuildings.co.uk/wiki/Carbon_dioxide_in_construction

英文參考資料

- A.K. Padmini, & K. Ramamurthy, & M.S. Mathews,. (2009). Influence of parent concrete on the properties of RAC, *Constr. Build. Mater.* 23 (2) 829–836.
- Building Contractors Society of Japan. (1981) . Committee on disposal and reuse of construction waste.
- Butler L, & West JS, & Tighe SL. (2011). The effect of recycled concrete aggregate properties on the bond strength between RCA concrete and steel reinforcement. *Cem Concr Res*;41(10):1037–49
- CSI. (2009) . The cement sustainability initiative. recycling concrete: executive summary. Genève: CSI.
- D. Ürge-Vorsatz, & A. Novikova . (2008) . Potentials and costs of carbon dioxide mitigation in the world's buildings, *Energy Policy* 36 (2) 642–661
- Evangelista L, & de Brito J. (2007). Mechanical behavior of concrete made with fine recycled concrete aggregates. *Cem Concr Compos*;29:397–401.
- F. Debieb, & L. Courard, & S. Kenai, & R. Degeimbre,. (2009) . Roller compacted concrete with contaminated RAs, *Constr. Build. Mater.* 23 (11) 3382–3387.
- Fisher, C. & Werge, M. (2009). EU as a Recycling Society; ETC/SCP Working Paper 2/2009; Available online: <http://scp.eionet.europa.eu.int> (accessed on 14 August)
- Li JB. (2004). Study on mechanical behavior of recycled aggregate concrete, Dissertation of Masteral Degree. Shanghai: Tongji University.
- Hansen TC, & Narud H. (1983). Strength of recycled concrete made from crushed concrete coarse aggregate. *Concr Int – Des Constr*;5(1):79–

83.

- Hansen TC, & Boegh E. (1985). Elasticity and drying shrinkage of recycled aggregate concrete. *J ACI*;82(5):648–52
- Hansen TC, editor. (1992). *Recycling of Demolished Concrete and Masonry*. Oxfordshire, UK: Taylor and Francis. J. Bcs., (1978). Study on RA and RAC, *Concr. J.* 16 (7) 18–31.
- Katz A. (2003). Properties of concrete made with recycled aggregate from partially hydrated old concrete. *Cem Concr Res*;33(5):703–11.
- Kisku, N., & Joshi, H., & Ansari, M., & Panda, S.K., & Nayak, S., and Dutta, S.C., (2017). A critical review and assessment for usage of recycled aggregate as sustainable construction material, *Construction and Building Materials* 131721–740.
- Limbachiya MC, & Leelawat T, & Dhir RK. (2000) Use of recycled concrete aggregate in high-strength concrete. *Mater Struct* ;33:574–80.
- López-Gayarre F, & Serna P, & Domingo-Cabo A, & Serrano-López MA, & López-Colina C. (2009). Influence of recycled aggregate quality and proportioning criteria on recycled concrete properties. *Waste Manage* ; 12:3022–8
- M. Martín-Morales, & M. Zamorano, & A. Ruiz-Moyano, & I. Valverde-Espinosa,. (2011). Characterization of RAs construction and demolition waste for concrete production following the Spanish Structural Concrete Code EHE-08, *Constr. Build. Mater.* 25 (2) 742–748.
- McNeil K, & Kang TH-K. (2013). Recycled concrete aggregates: a review. *Int J Concr Struct Mater*;7(1):61–9.
- Poon CS, & Shui ZH, Lam L. (2004). Effect of microstructure of ITZ on compressive strength of concrete prepared with recycled aggregates. *Constr Build Mater*;18:461–8

- Rahal K. (2007). Mechanical properties of concrete with recycled coarse aggregate. *Build Environ*;42(1):407–15.
- Sagoe-Crentsil KK, & Brown T, & Taylor AH. (2001). Performance of concrete made with commercially produced coarse recycled concrete aggregate. *Cem Concr Res*;31:707–12.
- Sanchez de Juan M, & Gutierrez PA. (2004). Influence of recycled aggregate quality on concrete properties. In: *Proceeding of the International RILEM Conference on the Use of Recycled Materials in Building and Structures*. Barcelona, Spain, 8–11 November;. p. 545 – 53.
- Spanish Minister of Public Works. (2008). Instrucción de Hormigón Estructural EHE-08 (Spanish Structural Concrete Code).
- S. Parviz,. (2012). Strength and durability of RAC containing milled glass as partial replacement for cement, *Constr. Build. Mater.* 29 368–377.
- S.R. Suryawanshi, & B. Singh, & P. Bhargava,. (2015) Characterization of RAC, *Advances in Structural Engineering*, Springer, India,. pp. 1813–1822.
- Tavakoli M, & Soroushian P. (1996). Drying shrinkage behavior of recycled aggregate concrete. *Concre Int*;18:58–61. Compendex.
- T. Yoshikane . (1988). Present status of recycling waste cement concrete in Japan, Private Communication Research Laboratory, Taiyu Kensetsu Co Ltd, Japan.
- Yang KH, & Chung HS. (2008). Ashour A. Influence of type and replacement level of recycled aggregates on concrete properties. *ACI Mater J*;3:289 – 96.
- Z. Zhang, & B. Wang . (2016) . Research on the life-cycle CO₂ emission of China's construction sector, *Energy Build.* 112244–255.