

國立中興大學土木工程學系
碩士學位論文

輕質骨材混凝土使用添加劑之特性探討
The performance of Lightweight Aggregate
Concrete using Admixture



指導教授：陳豪吉(How-ji Chen) 博士
研究生：羅永祥(Yung-hsiang Lo)

中華民國 一〇二 年 七 月

國立中興大學土木工程學系研究所

碩士學位論文

題目：輕質骨材混凝土使用添加劑之特性探討

姓名：羅永祥

學號：5100062011

經 口 試 通 過 特 此 證 明

論文指導教授

陳富吉

論文考試委員

湯北緯

潘坤騰

陳富吉

中華民國 102 年 07 月 26 日

致謝

在職進修期間承蒙恩師 陳豪吉教授在職場以及研究上的諄諄教導，學生因而能夠順利地完成論文，取得碩士學位，並啟發自己在工作崗位上專業知識的應用，且對所學於混凝土材料領域有更深切的認知。

學習期間及論文口試階段要特別感謝 學長蔡文博博士給予細心的指導，讓學生在論文的寫作與實驗方法能更加的完整。就學期間並承蒙混凝土工程實驗室碩士班同學道峯、兆建、育生，及台灣西卡中部同事冠瑩、承鋼、明鑫、嘉偉在試驗進行及口試論文階段的協助，系辦怡瑾在課程與學務上的叮嚀，才能夠順利地完成學業，在此致上最深忱的謝意。

National Chung Hsing University

此外更要感謝碩專班的學長何國意、洪振雄與同學趙明良、張國雄，在課業上互相勉勵讓我在就學期間獲益良多。最後感謝我的直屬主管陳奇裕副總在職進修兩年以來的支持與鼓勵；妻子妃婷獨攬了所有家務及相互鼓勵、無怨無悔的付出，讓我能夠順利完成碩士班學業，謹以此文，獻給所有關心過我的師長、同事與親友。在此祝福各位一切平安、順利！

羅永祥 謹致

中華民國一〇二年八月

摘要

自充填混凝土擁有高流動性及抗析離性，對於施工技術上有很大之貢獻。本研究針對輕質骨材所使用添加劑，討論其新拌及硬固性質之差異性。本研究為試驗不同分子鏈所組成不同添加劑型態，並針對輕質骨材自充填混凝土(SCLC)之適用性，且經由總膠結材及飛灰含量之差異性，來試驗出較符合工地適用的高流動性輕質骨材混凝土配比設計。

試驗結果顯示，藉由添加劑型態不同在視黏滯度之控制下，在輕質骨材自充填混凝土(SCLC)使用高分子量及長分子鏈添加劑之新拌性質，無論是坍流度、箱型及V型試驗皆同於常重自充填混凝土。而硬固性質皆可達到一般之基本要求，且其均勻性亦能符合規定。並就本研究之飛灰取代水泥比例而言(10%~40%)，在設計輕質骨材高流動混凝土時，建議飛灰取代水泥比例可大於等於30%，及水泥砂漿與輕質粒料的體積比應大於等於1.77以獲得較佳之新拌混凝土工作性。

高流動性輕質骨材混凝土因單位重較小及黏滯性略高，故其流動性較一般常重混凝土略慢，但坍流度試驗皆可符合工地所需之流動性，唯其坍流度超過700mm時，輕質骨材將有上浮析離之潛在危機。

關鍵字：輕質骨材、添加劑、輕質骨材自充填混凝土

ABSTRACT

Self-consolidating concrete with high flow-ability and segregation resistance was a great contribution to construction technology. This study mainly presents that the effects of admixtures on fresh and hardened properties of lightweight aggregate concrete. In order to obtain more appropriate mixture proportions of high flow lightweight aggregate concrete for application in construction site, the various type of admixtures composed of different molecular chains, fly ash contents, and total binder amounts were adopted to evaluate the suitability of self-consolidating lightweight aggregate concrete (SCLC).

The test results indicate that the fresh properties (e.g. slump flow, U-box, V-funnel test results) of self-consolidating lightweight aggregate concrete using the admixture with high molecular weight and long molecular chains were in accordance with normal weight concrete through controlling the visible viscosity of various admixtures. Both hardened properties and homogeneity of self-consolidating lightweight aggregate concrete satisfied the basic requirements. In terms of replacement (10 to 40 % by weight) of cement with fly ash in this study, at least a 30 % replacement of cement with fly ash by weight and a 1.77 volume ratio of mortar and lightweight aggregate were proposed for designing high flow lightweight aggregate concrete with better fresh properties. The flow velocity of high flow lightweight aggregate concrete was slightly slower than normal weight concrete due to the high flow lightweight aggregate concrete with lighter unit weight and more viscosity. Even so, slump flow test results show that the flow-ability of high flow lightweight aggregate concrete should satisfy demands for application in construction site. But the slump flow was over 700 mm, the high flow lightweight aggregate concrete would probably occur the potential crises of segregation and lightweight aggregate floating.

Keywords: Lightweight aggregate, Admixture, Self-consolidating lightweight aggregate concrete (SCLC)

目錄

第一章 緒論.....	1
1-1 前言.....	1
1-2 研究範圍及目的.....	3
第二章 文獻回顧.....	6
2-1 輕質骨材於混凝土之用.....	6
2-1-1 輕質骨材之種類.....	6
2-1-2 輕質骨材之特性.....	6
2-1-3 輕質混凝土工程性質.....	8
2-2 自充填混凝土的定義.....	9
2-3 自充填混凝土的配比設計.....	10
2-4 自充填混凝土的品質檢驗.....	12
2-4-2 V形漏斗試驗.....	14
2-4-3 鋼筋間隙通過性試驗(箱型試驗).....	15
第三章 試驗計畫.....	19
3-1 試驗材料.....	19
3-2 輕質自充填混凝土配比研製.....	20
3-2-1 配比試驗.....	21
3-3 試驗設備.....	22
3-4 試驗項目與試驗方法.....	22
3-4-2 試驗變數.....	23
3-4-3 試驗項目與方法.....	24
4-1 新拌性質試驗結果.....	36
4-1-1 添加劑型態對輕質混凝土新拌性質之影響.....	36
4-1-2 膠結材用量輕質骨材高流動混凝土新拌性質之影響.....	39

4-1-3 飛灰取代水泥比例對輕質骨材高流動混凝土新拌性質之影響.....	41
4-2 硬固性質試驗	41
4-2-1 輕質骨材自充填混凝土抗壓強度(SCLC-350)	41
4-2-2 輕質骨材高流動混凝土抗壓強度(SCLC-280)	42
4-2-3 輕質混凝土氣乾單位重.....	43
第五章 結論與建議	57
5-1 結論	57
5-2 建議.....	59
參考文獻	60



表目錄

表 2-1、輕質骨材之種類與基本物理性質	16
表 2-2、SCC 之箱型試驗檢驗標準.....	16
表 3-1、水泥之成分與性質	26
表 3-2、飛灰之成分與性質	27
表 3-3、爐石粉之成分與性質	28
表 3-4、添加劑型態分析	29
表 3-5 輕質粒料基本性質	32
表 3-6 輕質粒料自充填混凝土配比（單位： kg/m^3 ）	33
表 3-7 輕質粒料高流動混凝土配比（單位： kg/m^3 ）	34
表 3-8、試驗項目	35
表 4-1、SCLC 新拌性質試驗結果.....	45
表 4-2、SCLS 混凝土空氣含量與單位重試驗結果	46
表 4-3、SCLC 混凝土析離度試驗結果.....	46
表 4-4、輕質骨材高流動混凝土新拌性質試驗結果.....	47
表 4-5、輕質骨材高流動混凝土空氣含量與單位重試驗結果	49
表 4-6、輕質骨材高流動混凝土析離度試驗結果.....	50
表 4-7、膠結料-漿體-輕質粒料之體積相關性	51
表 4-8、輕質骨材自充填混凝土(SCLC-350)之抗壓強度試驗結果.....	52
表 4-9、輕質骨材高流動混凝土(SCLC-280-400)抗壓強度試驗結果 ..	52

圖目錄

圖 1-1、研究流程圖	5
圖 2-1、坍度、坍流度試驗示意圖	17
圖 2-2、混凝土試驗用 V 形漏斗尺寸圖	17
圖 2-3、箱型試驗示意圖	18
圖 2-4、填充高度 Bh 之測定方法示意圖	18
圖 4-1、輕質骨材高流動混凝土(SCLC-280-400)抗壓強度試驗結果 ..	54
圖 4-2、輕質骨材高流動混凝土(SCLC-280-420)抗壓強度試驗結果 ..	54
圖 4-3、輕質骨材高流動混凝土(SCLC-280-450)抗壓強度試驗結果 ..	55
圖 4-4、輕質骨材高流動混凝土(SCLC-280)預估材料成本	55
圖 4-5 上浮、大孔隙的輕質骨材	56
圖 4-6 輕質骨材混凝土析離、上浮比較	56

第一章 緒論

1-1 前言

台灣地區山高水急理論上應該有足夠的天然砂石來供應國內營造業所需，但因台灣本身人口稠密及環境保護意識高漲使得天然砂石開採與來源益加困難。為了應付國內大量建設所需的砂石及針對清理水庫淤泥淤積問題，因此有人造的輕質骨材的出現，來取代天然砂石用來拌製混凝土。目前國內自製的輕質骨材為挖掘水庫淤泥燒製而成【1, 2】，輕質骨材能有效降低混凝土單位重，進而降低結構物自重，如能有效推廣利用勢必能提高橋樑跨距設計，縮小結構體斷面尺寸，達到建築物使用面積更有效的利用。再加上國內目前水庫淤積嚴重並且無法立即增設新水庫，因此添加劑如果能夠更為適用輕質骨材的特性需求，使得輕質骨材在工程上的用途更為廣泛，不失為同時解決國內營造業砂石來源不足及疏浚水庫淤泥使其恢復原有蓄水功能既經濟又環保的作法。

混凝土施工品質不佳是工程項目中常令人詬病的地方，為了因應複雜的結構需求、較困難的施工環境及日益短缺的勞力，高性能混凝土材料技術的發展變的勢在必行。高性能混凝土（High Performance Concrete，簡稱 HPC）具備高流動性、高強度、高體積穩定性、高耐久性等性能，其中自充填混凝土（Self-Compacting Concrete，簡稱 SCC）【3, 4】與一般混凝土比較，具備高流動及抗析離的特性。混凝土的高流動性可使施工容易、節省人力，更能解決因搗實不確實所造成混凝土品質不佳的問題。因此，隨著科技的

進步發展之下，許多先進國家已逐漸使用 SCC 於高層建築、橋樑及海域結構物等工程上，高品質的建築結構材料也將更符合大眾要求【5，6】。

如果我們能將輕質骨材自重輕的優點及自充填混凝土高流動性、高填充性及抗析離性的要求結合在一起，並將輕質骨材自充填混凝土 (Self-Compacting Lightweight Aggregate Concrete，簡稱 SCLC) 常見的黏滯性及輕質骨材上浮問題克服；不但可以解決國內砂石短缺的問題，並可同時解決混凝土工所衍生的諸多問題，這應該可以將國內混凝土產製技術加以提升，達到先進國家技術產製之首。



1-2 研究範圍及目的

本研究主要是針對輕質骨材自充填混凝土所使用添加劑型態適用性，進而針對高流動性輕質骨材混凝土來探討添加劑在高流動輕質骨材混凝土要求下最佳適用型態【8】；且經由總膠結材及飛灰含量之差異性試驗出膠結材的最低使用量及飛灰的最佳使用量。首先以相同體積取代 SCC 中的常重骨材並依混凝土工作性要求將配比作適當調整，使得輕質骨材自充填混凝土（SCLC）達到如常重自充填混凝土（SCC）般相同之工作性效果，最後依試驗結果找出三種不同型態添加劑針對輕質骨材自充填混凝土關連性及適用性【9】，進而提出 SCLC 和 SCC 配比設計所適用添加劑的差異性，及試驗出高流動性輕質骨材混凝土來探討添加劑在高流動輕質骨材混凝土要求下最佳適用型態；且經由總膠結材及飛灰含量之差異性試驗出膠結材的最低使用量及飛灰的最佳使用量【15, 16, 18】；進而提出最佳高流動輕質骨材混凝土配比研究流程如圖 1-1、圖 1-2 所示。

主要研究內容條列如下：

- (1) 利用預濕輕質骨材拌製 SCLC，比較不同型態添加劑對新拌及硬固性質間之差異性。
- (2) 選擇適用添加劑調整總膠結材用量、輕質骨材含量及飛灰使用比例，拌製高流動性輕質骨材混凝土，並測其工作性質。
- (3) 推求最少膠結材用量及最佳飛灰所使用量，混凝土性能須

符合輕質骨材高坍流混凝土基本坍流度、施工性及均質性
之相關需求。



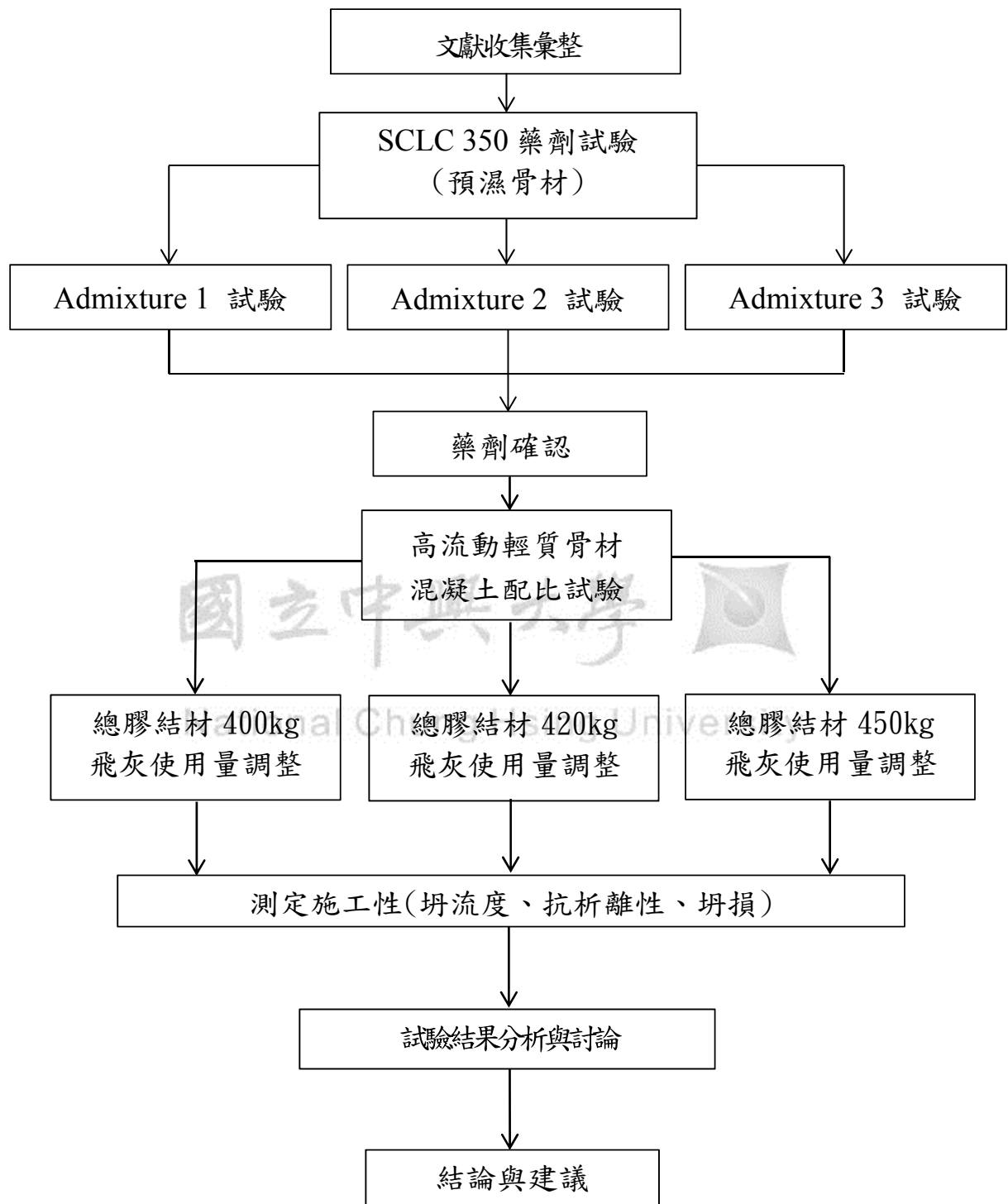


圖 1-1、研究流程圖

第二章 文獻回顧

2-1 輕質骨材於混凝土之用

2-1-1 輕質骨材之種類

輕質骨材可大概分為天然和人造骨材兩種如表 2-1，天然骨材大都為火山噴出岩，為多孔隙材料，最早使用天然輕質骨材的建築可追溯到西元二世紀古羅馬建築 "萬神廟"，至今依然保存完整。人造骨材直到西元 1917 年才出現，二次大戰後才有大量輕質混凝土應用的實例出現，如 1950 年代的芝加哥 42 層大樓 (Prudential Life Building) 及 1989 年挪威使用高強度輕質混凝土於大型橋樑建築上，就以目前常使用的人造輕質骨材而言，可分為兩大類：冷結型人造輕質骨材及燒結型人造輕質骨材。冷結型人造輕質骨材大多是以工業副產品煤灰或飛灰等為主要原料，利用水泥及石膏等膠結材料將之與砂相結合，不需加熱燃燒，故為冷結型人造輕質骨材。其目的是取煤灰等本身重量輕以及顆粒間孔隙多，故可製成單位密度較小的人造輕質骨材【20】。

燒結型人造輕質骨材主要原料為黏土、頁岩及板岩等，經由燒結而成。原料之發泡機構為燒結型人造輕質骨材製造上最重要的機理。然而原料會依其形成地質年代不同，以及本身所含礦物質和有機質含量相異，影響其燒製時的膨脹性質。

2-1-2 輕質骨材之特性

輕質骨材之性質由於產地種類不同、原料特性及形成方式

的不同等等因素，有諸多的差異，表 2-1 為典型輕質骨材分類及物理性質，表 2-1 將骨材分為天然及人造輕質骨材，物理性質則分顏色、外型、單位重、顆粒密度、孔隙率、吸水率來探討，在本研究中所燒製的膨脹黏土輕質骨材，如表中所示其顏色一般為紅棕色或黑色，外型為圓形，鬆單位重介於 $0.3\sim 0.9\text{ g/cm}^3$ 之間，顆粒密度介於 $0.6\sim 1.8\text{ g/cm}^3$ 之間，孔隙率為 70%，吸水率介於 8~20% 之間。天然輕質骨材係由火山岩噴發冷卻而成的多孔隙材料，由於在形成過程中無法加以控制，故外型幾乎為不規則的碎石狀，且表面和內部孔隙變異性甚大。人造輕質骨材一般都用膨脹性頁岩、黏土、板岩、輕石等原料經歷碎過篩，以冷結或燒結法製粒而成，所以其有利之處在於人工化製造可對其性質、粒度做某種程度的控制，不過除了膨脹黏土、頁岩、板岩可形成堅硬、渾圓、接近封閉的外表層外，其它如膨脹爐石、燒結飛灰、真珠石等均無堅硬之表層，外表較不規則，吸水率也較大，使其整體骨材品質較差【19】。

一般而言，無論天然或人造輕質骨材，皆具有質輕的效果，係因輕質骨材內外部皆含有大孔隙，外部孔隙的存在較不利於骨材的品質，對其強度、吸水率和混凝土工作性均有重大影響，另一方面也因內部孔隙的存在，使輕質骨材在隔熱性及吸音性均較天然骨材為佳。在人造輕質骨材中，品質已被肯定較為理想的為膨脹頁岩及膨脹黏土之類的輕質骨材，這類骨材除了不含表層孔隙外，還有一層燒結成型的硬表殼，使它們能因具有高含量的內部孔隙，而成為一種顆粒密度小，卻擁有低吸水率、高強度的輕質骨材。

大部份的天然輕質骨材為方形或多角形等形狀之顆粒，其表面粗糙，而人造輕質骨材可造粒成圓形，骨材粒徑大小的區分大都與天然骨材相同，一般而言，輕質骨材之最大粒徑為 3/4”(19mm)而不超過 1”(25mm)為宜。又輕質骨材內部含有大孔隙，使其彈性模數、強度、密度等均隨粒徑增大而降低，所以欲得較高強度輕質混凝土，須選用顆粒密度大、強度高的輕質骨材。

2-1-3 輕質混凝土工程性質

目前將輕質骨材使用於混凝土方面，使用最多的人造輕質骨材是膨脹頁岩、黏土、板岩，利用輕質骨材所製成之混凝土單位重依輕質骨材單位重而異，約為一般天然骨材混凝土單位重的 2/3 或更低。

抗壓強度為輕質混凝土品質優劣的重要依據，強度是由混凝土中水泥砂漿和粗骨材性質相互束制作用下所決定【2】，輕質混凝土和常重混凝土混凝土強度的差異就是在於骨材強度不同所造成的破裂模式不同，就一般結構性混凝土而言，常重混凝土粗骨材強度皆比水泥砂漿強度大，混凝土破裂時皆由水泥砂漿先行開裂並貫穿整體砂漿或是由骨材與水泥砂漿界面破壞，相反地，目前建築使用上的輕質骨材彈性模數都小於水泥砂漿，在受力情形下，輕質骨材不足以分攤和常重骨材相等比例之應力，因此輕質混凝土破壞大都因輕質骨材強度不足以承受所分配的應力而從輕質骨材剪壞，造成混凝土的破壞。此外，輕質骨材的顆粒大小對強度也有影響，一般建議最大粒徑應在 25mm 以下，粒徑愈大對強度愈不利。

2-2 自充填混凝土的定義

自充填混凝土就是混凝土本身具有自我充填能力為具有非常良好變形能力與抗析離性的高性能混凝土，於混凝土澆置過程中不需要震動夯實即能夠流過鋼筋間隙且充滿模版之各個角落，故於澆置過程中可以減少人力之使用以及減少震動夯實之噪音，同時又可以確保現地混凝土之品質。這個概念首先由日本高知科技大學的岡村甫（Hajime Okamura）教授於 1986 年提出，他發現日本用於建築方面之混凝土的耐久性不良，主要導因於灌漿過程中的夯實不充分而造成混凝土中的蜂窩，如果想要有良好的耐久性，必須由有技術的施工人員經過充分的夯實才能夠達到，可是在日本這些施工人員卻愈來愈少，導致於混凝土的品質相對的降低【17】。所以岡村甫教授發展出之混凝土能夠擁有高流動性、自行填充與抗析離的能力，這些能力可以減少混凝土中的蜂窩，因此 SCC 也消除了耐久性不良的主要原因。

文獻將 SCC 工程效益歸為下列幾項：

1. 經濟有效的技術。
2. 快速澆置、節約勞力及設備。
3. 無須震動、減少表面修飾。
4. 降低環境噪音。
5. 改善健康及安全條件。
6. 提高質量與耐久性。

2-3 自充填混凝土的配比設計

自充填混凝土性能的標準則是依據日本土木學會所提出併用系高性能混凝土之規範為依據，如表 2-2 所示。SCC 的配比設計步驟如下：

Step 1：決定粗粒料用量

日本建築學會 (JASS 5 1997) 18-3 節規定 SCC 粒料最大粒徑分為 15 mm、20 mm 及 25 mm 三種。一般使用粗粒料之最大粒徑為 20 mm，並假設空氣含量為 1.0%，即 $V_a = 0.01 m^3/m^3$ 。

$$W_g = V_g \times \rho_g \times 1000 \dots\dots\dots \textcircled{1}$$

其中， ρ_g 為粗粒料之比重， V_g 為單位粗粒料絕對體積，視配比設計所需充填等級而定。

粗粒料之用量會影響 SCC 之彈性模數 (E 值)，因此不宜為貪求良好之間隙通過性，一味降低其用量。如結構體配筋密集，例梁柱接頭，建議粗粒料之最大粒徑採用 13 mm (1/2")， $V_g = 0.30 m^3/m^3$ 。如結構體配筋稀少，例橋梁擴展基腳，則建議粗粒料之最大粒徑採用 25 mm (1")， $V_g = 0.35 m^3/m^3$ 。

以 G/G_{lim} 設計粗粒料用量，如使用日本一般的建議值 $G/G_{lim} = 0.5$ ，則粗粒料之絕對體積 $V_g(G) = 0.5 \times G_{lim} \times (1 - V_a)$ ，粗粒料之單位用量 $W_g = V_g \times \rho_g \times \rho_w \times 1000 = 0.5 \times \text{乾擣單位重} \times (1 - V_a) \approx 0.5 \times \text{乾擣單位重}$

其中， G_{lim} 為粗粒料之實積率，且 $G_{lim} = \text{乾擣單位重} / (\text{粗粒料比重} \times \text{水單位重})$ 。

Step 2：決定細粒料用量

$$V_s = (1 - V_a - V_g) \times (V_s / V_m) \dots\dots\dots ②$$

$$W_s = V_s \times \rho_s \times 1000 \dots\dots\dots ③$$

其中， ρ_s 為細粒料之比重， (V_s / V_m) 之建議值為 0.40~0.47。

$$S/a = 0.50 \pm 0.02$$

一般而言，細粒料以河砂為佳，若必須採用碎石砂，最好與一定比例之河砂一起使用，否則對間隙通過性（U 型試驗）會有不良的影響。

Step 3：計算漿體體積

$$V_{paste} = 1 - V_g - V_s \dots\dots\dots ④$$

其中， V_{paste} 為漿體體積，包含空氣含量之體積，建議值為 0.38~0.42 m^3/m^3 。

Step 4：決定用水量

日本建築學會（1997）JASS 5 對自充填混凝土的要求：

$$W_w = 160 \sim 185 \text{ kg}/m^3$$

$$V_w = 0.16 \sim 0.185 \text{ m}^3/m^3$$

在日本因冬天天氣嚴寒，所以一般混凝土均含有 4.5%±1.5% 的輸氣量，而台灣地區則無此需要因此用水量可酌予增加，建議以不超過 195 kg 為原則。

Step 5：決定粉體體積

$$V_p = V_{paste} - V_w - V_a \dots\dots\dots ⑤$$

其中， V_p 為粉體之體積，粉體系列建議粉體之體積為 $0.16 \sim 0.19 \text{ m}^3/\text{m}^3$ ，而粉體膠結料不低於 $300 \text{ kg}/\text{m}^3$ （增粘劑系列），以大於 $400 \text{ kg}/\text{m}^3$ 為佳（併用系列）。

Step 6：決定粉體量

$$W_p = V_p \times S.G_p \times 1000 \dots\dots\dots ⑥$$

其中， $S.G_p$ 為使用粉料之平均比重，其計算之方式如下：

$$S.G_p = \left[\frac{100}{\sum_{i=1}^n (P_i/S.G_i)} \right] \dots\dots\dots ⑦$$

其中， P_i 為第 i 種粉料佔所有粉料之重量比， $S.G_i$ 第 i 種粉料之比重，則由 $W_i = W_p \times P_i$ 可計算出各種粉料之使用量。

使用卜作嵐材料，可產生卜作嵐反應，惟其反應速率之快慢與溫度及波特蘭水泥（OPC）用量有關，如冬天低溫時，大量使用卜作嵐材料以致波特蘭水泥用量偏低，則強度之發展將極為緩慢，因此建議 OPC 之最低用量以 $270 \text{ kg}/\text{m}^3$ 以上為宜。

Step 7：決定強塑劑之用量

通常強塑劑的用量與粉料使用量的多少及水膠比之大小有關，不同強塑劑其使用之比例也有所不同。

Step 8：檢核水膠比是否滿足耐久性及強度之需求

2-4 自充填混凝土的品質檢驗

當混凝土拌合完成後，應進行以下坍流度試驗、V 型漏斗試驗、

箱型試驗、混凝土全量通過試驗，以確保 SCC 的流動性與充填能力。

各試驗方法詳述如下：

2-4-1 坍流度試驗 試驗裝置

(如圖 2-1 所示)：

1. 使用 CNS 1176 (混凝土坍度試驗法) 規定之坍度錐。
2. 使用具有十足水密性及鋼性，板厚 2.0 mm 以上，大小 80 cm*80 cm 以上表面光滑之鋼製品，若有握把需在不妨礙測定坍流度的位置，如要測 50 cm 坍流度到達時間，可在表面描繪 50 cm 的圓形刻劃。
3. 坍流度用縮尺或讀數為 1 mm 之量尺及測定用輔助器具，測定用輔助器具可為 L 形角鋼切割加工而成。若能保證使用量尺即能正確測量時，亦可不設測定用輔助器。
4. 裝載容器用有 12 公升左右容量之水桶。
5. 使用能測到 1/10 秒的馬錶。

試驗步驟：

1. 坍度錐內側及表面用濕布擦拭後置於水平之平板上，且平板表面亦需先用濕布擦拭。
2. 試料採用免搗實、免震動的方法，一次填滿坍度錐，且試料填充的動作需在 2 分鐘內完成。
3. 將充滿混凝土的坍度錐上面用刮刀刮平後，將坍度錐垂直向上拉起，拉上 30 cm 的時間約 2~3 秒，待混凝土停止流動後，量測擴散圓形的最大直徑及與其垂直的另一直徑，兩者之平均值即

為坍流度值（混凝土的坍流度如偏離圓形，當兩直徑相差 5 cm 以上時，則需以同一盤試料再做一次試驗），而混凝土中央部分的坍下量即為坍度值，並用目視觀察混凝土有無材料分離的現象。

4. 同時記錄自拉起坍度錐開始至混凝土流到坍流度 50 cm 的時間，並用馬錶量測到 1/10 秒精度。

量測項目：

1. 坍流度(混凝土自由擴散直徑)及混凝土擴散達直徑 50 cm 所經歷時間。

備註：應同時檢視是否有粒料沉澱、堆積、或漿體析離的現象。

2-4-2 V 形漏斗試驗

試驗裝置（如圖 2-2 所示）：

1. 鋼製 V 漏斗如下圖所示形狀、尺寸，容量為 10 公升、內部平滑之鋼製混凝土試驗用 V 形漏斗。
2. 漏斗試驗裝置設有支撐台，如下圖所示。
3. 漏斗排放口、開口、可瞬間打開具水密性的底蓋，上端都必須磨光平滑。
4. 漏斗試驗裝置以外，準備投料用容器、受料容器（12 公升左右）、刮平用刮刀、馬錶（能測到 1/10 秒）、濕布等。

試驗步驟：

1. 將洗淨漏斗垂直（上面水平）設置，漏斗內側用濕布擦乾。

2. 排放口下放置受料盤，關閉底蓋。
3. 填充混凝土前，檢查排放口確認動作正常，然後將試料慢慢進漏斗，並用刮刀將漏斗上面之混凝土刮平。
4. 蓋平完 10 秒內打開排放口底蓋，用馬錶測全量排完時間，並觀看排放中是否有部分塞住現象，而稠度較高之混凝土，較難判斷瞬間排完時間，故可從漏斗上方觀看。

量測項目：

1. 混凝土完全流經下方出口所經歷時間，計算至小數點下 1 位。

2-4-3 鋼筋間隙通過性試驗(箱型試驗)

試驗裝置 (如圖 2-3 所示)：

1. 依構件鋼筋量或最小鋼筋間距決定流動障礙等級(鋼筋量由高至低依續可分為 R1 障礙、R2 障礙、與無障礙三種等級，參考附表)。
2. 為儘量減少混凝土與容器磨擦，充填裝置使用表面平滑且能觀察混凝土流動狀態之材料，一般使用透明材質較多。填充裝置中央部分配置有柵狀竹節鋼筋之流動障礙物構造，其中流動障礙 R1 配置 D10 竹節鋼筋 5 支，R2 配置 D13 竹節鋼筋 3 支，如圖 2-7 所示 形狀、尺寸之容器。
3. 填充裝置中央部分設活動隔門，用可開關隔板將裝置分隔成兩室 (A 室、B 室)。
4. 如需測量通過障礙之粗粒料量，可利用在 B 室下方之採樣閘門。
5. 填充裝置以外需要準備投料用容器(約 5 公升左右)、刮平用刮刀、

量尺（讀數為 1 mm）、馬錶（能測到 1/10 秒）、濕布等。

試驗步驟：

1. 填充裝置垂直放置，上面保持水平。
2. 裝好填充裝置隔間門的流動障礙隔板。
3. 容器內面、隔間門、流動障礙隔板用濕布擦乾淨。
4. 關閉隔間門，將混凝土試料注入 A 室，不使用搗棒或敲打，連續將混凝土注入至 A 室上端。
5. 用金屬製規尺或刮刀除去多餘的試料後，再用刮刀刮平，並靜置 1 分鐘。
6. 一口氣拉起隔間門，混凝土就通過流動障礙流入 B 室，充填 B 室至靜止流動。
7. 用量尺量測 B 室容器底端至填充混凝土上面之高度，測到 1 mm 為填充高度 B_h （圖 2-8）

量測項目：

1. 混凝土由 A 室流經鋼筋障礙充填至 B 室後充填之高度，一般以高於 30cm 為通過標準。
2. 亦可觀察通過時間，可同時判斷工地現場的流動行為。

表 2-1、輕質骨材之種類與基本物理性質

來源	種類	物理性質					
		顏色	外型	單位重 (g/cm ³)	顆粒密度 (g/cm ³)	孔隙率 (%)	吸水率 (%)
天然	浮石	白色及淺灰色	渾圓或方形	0.34~0.63	0.35~1.15	85	達 50
	熔岩(泡沫火山岩)	棕色或棕褐色	準圓或方形	0.75~1.4	1.8~2.8	40	10
人造 輕質 骨材	珠岩	白色或淡色	粗短型	0.04~0.15	0.1~0.3	95	≒0
	蛭岩 膨脹黏土	黃棕色	立方形或長條形	0.06~0.17	0.1~0.35	95	≒0 紅
	膨脹頁岩 膨脹	棕色或黑色	圓形	0.3~0.9	0.6~1.8	75	8~20
	爐渣 有機質泡	棕色或灰棕色	立方形或長條形	0.45~0.9	0.8~1.8	70	5~10
	沫球	灰色或灰暗色	粗短多角或尖銳型	0.5~0.85	1.0~2.0	46~60	20~35
		白色	圓形	0.02	0.04	99	≒0

表 2-2、SCC 之箱型試驗檢驗標準

自充填混凝土等級		1	2	3
構件 條件	鋼筋最小淨間距(mm)	35-60	60-200	200 以上
	鋼筋量(kg/m ³)	350 以上	100-350	100 以下
單位粗粒料絕對容積(m ³ /m ³)		0.28-0.30	0.30-0.33	0.30-0.35
流動性	坍流度(mm)	650-750	600-700	500-650
U 型或箱型填充高度(mm)		300 以上 (R1 障礙)	300 以上 (R2 障礙)	300 以上 (無障礙)
材料分離 抵抗性	V 型漏斗流下時間(秒)	10-25	7-20	7-20
	達 500 mm 坍流度時間(秒)	5-20	3-15	3-15

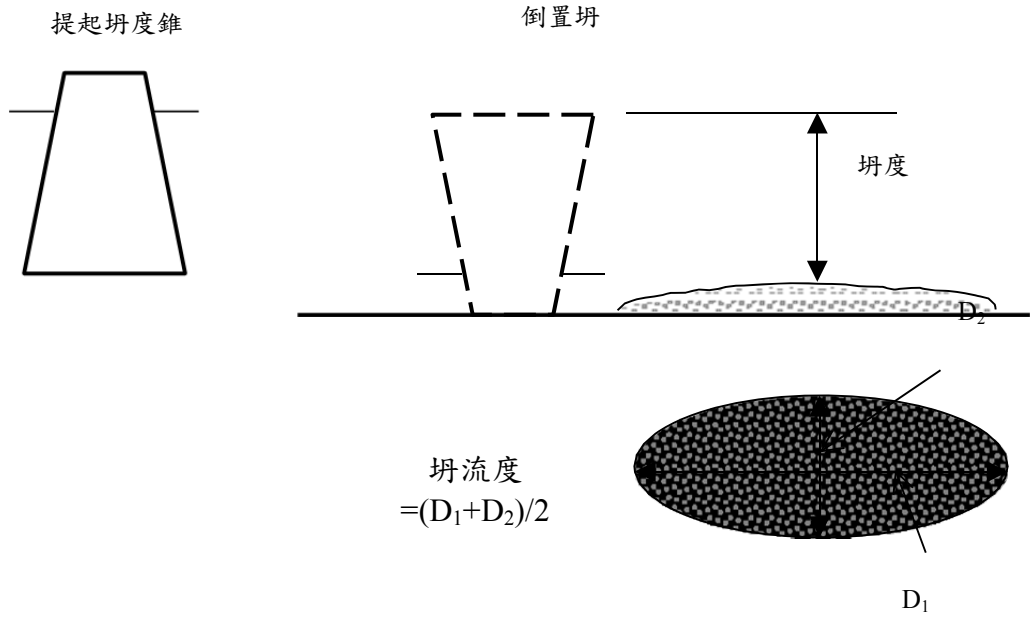


圖 2-1、坍度、坍流度試驗示意圖

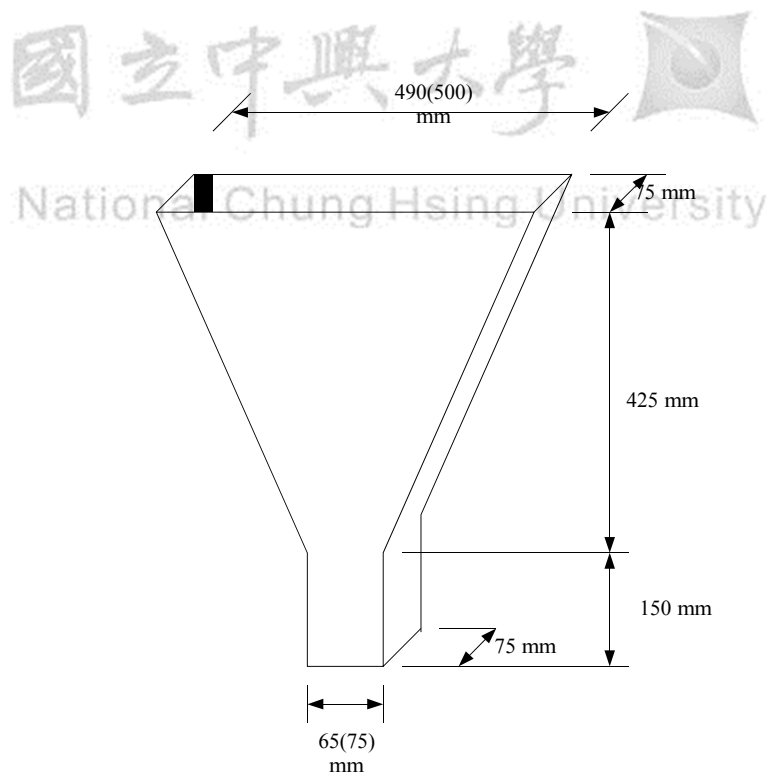


圖 2-2、混凝土試驗用 V 形漏斗尺寸圖

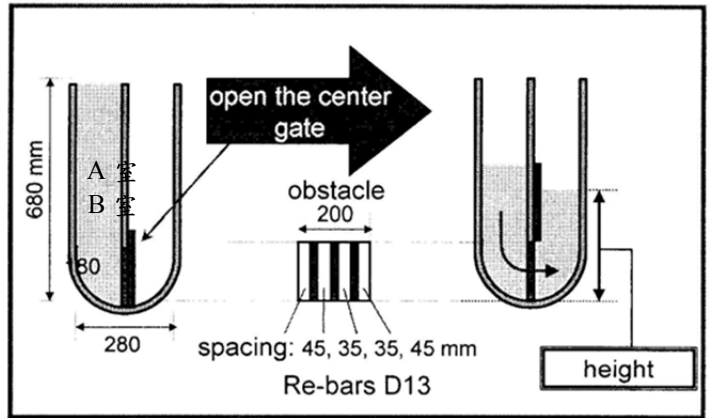
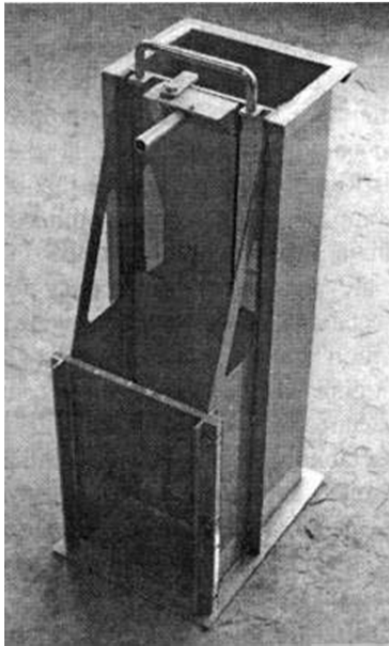


圖 2-3、箱型試驗示意圖

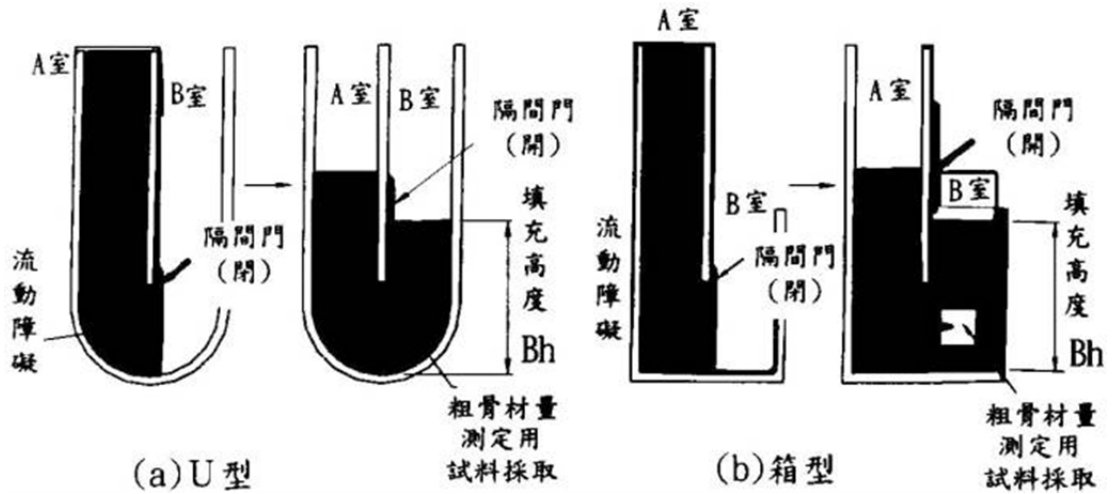


圖 2-4、填充高度 B_h 之測定方法示意圖

第三章 試驗計畫

本研究主要是針對高流動性輕質骨材混凝土來探討添加劑，在高流動輕質骨材混凝土要求下之最佳適用型態；且經由變化總膠結材及飛灰含量，試驗出膠結材的最低使用量及飛灰的最佳使用量。研究中所使用之材料與試驗規劃，將於本章內容中詳述之。

3-1 試驗材料

SCLC 所使用的材料包括水泥、水、飛灰、爐石粉、輕質骨材、粗細粒料及強塑劑等，其性質分述如下：

- 水泥：採用台灣水泥公司所生產的波特蘭 Type I 水泥，比重 3.15，水泥細度 $3420 \text{ cm}^2/\text{g}$ ，其化學成分與物理性質如表 3-1 所示。
- 水：一般之自來水。
- 飛灰：採用台塑六輕(麥寮)所產出之分級細灰，比重 2.08、燒失量 1.9%，28 天波索蘭活性指數為 95%，其餘化學成分與物理性質如表 3-2 所示。
- 爐石粉：為中聯爐石處理資源化公司所生產之 120 級爐石粉，比重 2.88、細度模數 $5930 \text{ cm}^2/\text{g}$ ，28 天波索蘭活性指數為 124.7%，其餘化學成分與物理性質亦列於表 3-3。
- 強塑劑：為台灣西卡股份有限公司於日本西卡及中國西卡所生產原料，此次試驗針對目前國內普遍使用三種不同型態原料。(如表 3-4 所示) Admixture 1(台灣西卡-ES)、Admixture 2(台灣西卡-530)、Admixture 3(台灣西卡-CR)，分別為 3 種不同分子鏈長度的羧酸強塑劑其功能差異為:Admixture 1(台灣西卡-ES)為減水性

強並具有緩凝功能的強塑劑、Admixture 2(台灣西卡-530)為緩凝(坍損抑制)效果強但是減水效果差的強塑劑、Admixture 3(台灣西卡-CR)為減水效果極強無任何緩凝成分的強塑劑。

- 細粒料：試驗所採用的砂石粒料均取自大甲溪，細粒料之細度模數為 2.85，SSD 比重 2.63，SSD 吸水率 1.80%。
- 輕質骨材：骨材為大陸進口之輕質粒料，屬於燒結型輕質粒料，形狀為碎石狀，其基本性質的試驗結果如表 3-5 所示。顆粒密度為 1515 kg/m^3 ；24 小時吸水率為 4.7%；筒壓強度為 7.94 MPa；強度標號為 35MPa。而粒料篩分析結果如表 3-5 所示，其細度模數為 6.27。

3-2 輕質自充填混凝土配比研製

本研究所採用之輕質粒料混凝土設計強度為 350 kgf/cm^2 與 280 kgf/cm^2 ，混凝土配合設計乃參考日本土木學會所提出併用系高性能混凝土之規範進行。在實驗室進行兩組不同設計強度之配比試拌，首先進行設計強度 350 kgf/cm^2 配比新拌性質試驗，其試驗目的為進行添加劑型態適用性測試，驗證之試驗為所拌製之輕質骨材混凝土是否符合 SCC 規範及抗壓強度可否達到目標，最後決定較佳添加劑型態。其次為進行不同膠結料量與飛灰添取代水泥比例之研究，其目的為透過變化膠結料的量與質，來找出在產製 SCLC 時，對於膠結料之最低需求量與較佳之飛灰取代量。本試驗所規畫之三種膠結材總量為 400 kg/m^3 、 420 kg/m^3 與 450 kg/m^3 ，而飛灰取代水泥比例則為 10%、20%、30%及 40%四種，設計出 12 組配比。試驗進行時

主要之控制項目有兩項，第一項為混凝土新拌及 60 分鐘後之新拌性質，是否可符合高坍流之工作性要求；第二項則為混凝土氣乾單位重是否合乎輕質混凝土單位重小於 2000 kg/m^3 (DIN、JIS) 之規定。依據上述兩項控制項目，最終確定之正式配比則如表 3-6 與 3-7 所示，正式配比之各項新拌性質與硬固性質試驗方法，將於本章各節中詳細說明之，使用飽和骨材則是依原配比進行拌製，視情況拌製結果再依變數酌予調整配比。此外為了檢驗其均勻性及輕質骨材是否有上浮析離情形，拆模當日將試體等分切成上中下三段，量測各段比重，過程詳述如下：

3-2-1 配比試驗

SCLC 配比在拌合完畢後，為瞭解其新拌性質是否符合自充填之要求，必須進行下列之判別：

1. 坍度及坍流度判別：坍流度是判別工作性是否合宜、骨材是否析離的重要指標，在不析離的情況下，坍度達到 25-28 公分，坍流度達到 55-70 公分後才會進行至下一步驟，過與不及對輕質混凝土而言都不是好事，坍流度太少流動性不佳，太多則是容易造成骨材上浮引起材料析離。
2. 箱型通過試驗判別：此項試驗是所有試驗項目中最難通過也最難達到，充填高度至少要達到 30 公分才算合格，但即使通過了，也有可能因視黏滯性不夠而造成骨材上浮析離之危機。
3. V 型試驗判別：一般而言箱型試驗通過，V 型試驗亦會通過，但因輕質骨材較輕，普遍地其落下時間會較一般 SCC 長。

4. 均勻性判別：此試驗是用來檢驗灌製的混凝土是否發生骨材上浮析離的檢驗方法，可用來彌補箱型試驗的不足，因箱型試驗無法檢驗出混凝土的均勻性。

如此複雜的檢驗步驟原因不外乎是為了確保混凝土本身的強度和提升混凝土製造的品質，如果配比可行不僅可以減少大量的人力，亦能發展出輕質骨材的另一用途。

3-3 試驗設備

- 〈1〉 強制式雙軸拌合機
- 〈2〉 坍度試驗設備
- 〈3〉 V 型漏斗試驗設備
- 〈4〉 箱型試驗設備
- 〈5〉 空氣含量試驗儀
- 〈6〉 抗壓試驗機

3-4 試驗項目與試驗方法

3-4-1 試體製作

依前述規劃的各組試驗配比，採用水平強制式拌合機拌製混凝土，整體拌合時間約為5分鐘，其拌合程序如下：

- (1) 將水泥、細粒料及波索蘭摻料置入拌合機內，充份乾拌以達均勻混合。
- (2) 將添加劑與 80%水充份攪拌均勻後，倒入拌合機內，再行拌

合約 1.5 分鐘。

(3) 其次將粗粒料(輕質骨材)倒入拌合機內，持續拌合約 2 分鐘。

(4) 最後再將剩餘 20%水混合後倒入拌合機內，再行拌合約 1.5 分鐘，完成混凝土拌合。

取出部分混凝土做新拌性質試驗，再將剩餘量持續低速拌和 60 分鐘後，再測其各項新拌性質。

3-4-2 試驗變數

本研究首先將不同添加劑型態使用於輕質骨材自充填混凝土，來比較不同型態添加劑對混凝土之新拌及硬化性質的影響，進而得知適用於輕質骨材添加劑的原料種類，並適當地降低總膠結材用量或增加粗骨材體積，求出最佳、最經濟的輕質骨材高坍流混凝土混配比，研究變數主要有：

(1) 添加劑型態

在實驗室進行設計強度 350 kgf/cm^2 配比新拌性質試驗，其試驗目的為進行添加劑型態適用性測試，驗證之試驗為所拌製之輕質骨材混凝土是否符合 SCC 規範及抗壓強度可否達到目標，最後決定較佳添加劑型態。

(2) 膠結料用量與飛灰取代水泥比例

本試驗所規畫之三種膠結材總量為 400 kg/m^3 、 420 kg/m^3 與 450 kg/m^3 ，而飛灰取代水泥比例則為 10%、20%、30% 及 40% 四種，設計出 12 組配比。其目的為透過變化膠結料的量與

質，來找出在產製 SCLC 時，對於膠結料之最低需求量與較佳之飛灰取代量。

3-4-3 試驗項目與方法

輕質骨材混凝土拌製完成後，隨即取樣進行相關新拌性質試驗及試體製作。所規劃之試驗項目如表 3-8 所示。新拌階段進行坍度、坍流度、V 型、箱型及抗析離度等，並澆製試體以進行硬固性質測試，其試驗項目有抗壓強度、均勻性等，各項試驗詳述如下：

1. 坍度與坍流度試驗

試驗依據 CNS 1176-A3040 進行，試驗步驟如 2-4-1 節所述。於試驗材料均勻拌合完成後，隨即進行坍度與坍流度量測，並量測坍流度達 50 cm 時的流動時間。另外，取一批混凝土試樣，以低速持續拌合 60 分鐘，在量測其坍度、坍流度值，分析並比較與新拌情形之差異。

2. V 型漏斗試驗

在進行坍度試驗的同時，一併進行 V 型漏斗試驗，其試驗時機與坍度試驗相同，分別於拌合完成及低速持續攪拌 60 分鐘後試驗之。本項試驗依據日本高性能混凝土流動性檢測規範，試驗步驟如

2-4-2 節所述。

3. 箱型試驗

本項試驗由 Matsuoka 與 Shindo 提出，適用於粗粒料最大粒徑 25 mm 以下的高流動混凝土，試驗設備與進行步驟如前所述。

採用自充填混凝土等級 2 之標準，即須符合表 2-2 的要求。本項試驗的試驗時機仍與坍度試驗相同，分別於拌合完成與低速持續攪拌 60 分鐘後試驗之，試驗步驟如 2-4-3 節所述。

4. 空氣含量試驗

試驗依據規範「CNS 9661 新拌混凝土空氣含量試驗法（壓力法）」進行試驗。

5. 抗壓強度試驗

除進行混凝土新拌性質測試外，另製作 $\Phi 12*24$ cm 的圓柱試體，進行抗壓強度試驗。試驗依據 CNS 1232 A3045 進行，將試體置於室內養護，於混凝土 3、7、14、28、56 及 90 天齡期時進行抗壓強度試驗。

6. 均勻性試驗

混凝土試體於拆模當日將試體等分切成上中下三段，量測各段單位重，檢驗是否有材料析離骨材上浮情形。

表 3-1、水泥之成分與性質

試驗項目 (%)	CNS61 規格	水泥
二氧化矽 Silicon dioxide (SiO_2)	-	20.68
氧化鋁 Aluminum oxide (Al_2O_3)	-	4.15
氧化鐵 Ferric oxide (Fe_2O_3)	-	3.52
氧化鈣 Calcium oxide (CaO)	-	62.85
氧化鎂 Magnesium oxide (MgO)	Max. 6.0	3.43
三氧化硫 Sulfur trioxide (SO_3)	Max. 3.0 ($\text{C}_3\text{A}>8.0$) Max. 3.5 ($\text{C}_3\text{A}<8.0$)	2.37
氧化鈉 Sodium oxide (Na_2O)	-	-
氧化鉀 Potassium oxide (K_2O)	-	-
鹼含量	-	-
矽酸三鈣 C_3S	-	54
矽酸二鈣 C_2S	-	19
鋁酸三鈣 C_3A	-	5.0
鋁鐵酸四鈣 C_4AF	-	10.7
石灰石(CaCO_3)	Min. 70	95.6
比重	-	3.15
細度(氣透儀法) (m^2/kg)	Min. 260	342
正常稠度用水量 (%)	-	-
初凝(費開氏針法) Min	Min. 45 Max. 375	147
終凝(費開氏針法) Min	-	256
健度(熱壓膨脹試驗) (%)	Max. 0.80	0.13
水泥漿體空氣含量 (%)	Max. 12.0	7.3
3 天抗壓強度 (MPa)	Min.12	22.6
7 天抗壓強度 (MPa)	Min. 19	29.5
28 天抗壓強度 (MPa)	Min. 28	39.2

表 3-2、飛灰之成分與性質

試驗項目	標準規定	飛灰	試驗方法
密度 Mg/m^3	-	2.08	CNS 11272
細度:試驗篩 0.045mm 篩餘量(濕篩法) (%)	≤ 34	18	CNS10896 CNS 11273
需水量,控制百分率	≤ 105	99	CNS10896
健度,高壓蒸煮膨脹或 收縮率 (%)	≥ -0.8 ≤ 0.8	0.0	CNS10896 CNS 1258
強度活性指數: (%) 與普特蘭水泥攪和 7 天	≥ 75	89	CNS10896
強度活性指數: (%) 與普特蘭水泥攪和 28 天	≥ 75	95	CNS10896
含水量 (%)	≤ 3.0	0.1	CNS10896
燒失量 (%)	≤ 6.0	1.9	CNS10896
三氧化硫 (%)	≤ 5.0	0.3	CNS10896
二氧化矽(SiO_2)+氧化鋁 (Al_2O_3)+氧化鐵(Fe_2O_3) 之總量	≥ 70.0	95.4	CNS1078

表 3-3、爐石粉之成分與性質

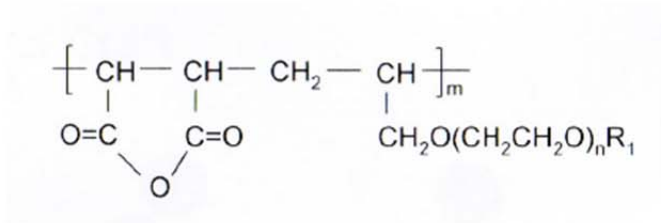
試驗項目 (%)	規格	爐石粉
二氧化矽 Silicon dioxide (SiO ₂)	-	33.56
氧化鋁 Aluminum oxide (Al ₂ O ₃)	-	13.61
氧化鐵 Ferric oxide (Fe ₂ O ₃)	-	0.34
氧化鈣 Calcium oxide (CaO)	-	41.80
氧化鎂 Magnesium oxide (MgO)	-	6.92
三氧化硫 Sulfur trioxide (SO ₃)	≤4.0	0.69
燒失量 (%)	-	1.26
鹽基度(Basicity)	-	1.86
硫化物硫(Sulfide Sulfur)	≤2.5	0.71
比表面積 (Fineness by Air Permeability test) (m ² /kg)	-	593
#325 篩餘(Amount Retained on #325 Sieve) (%)	-	19
比重(Density)	-	2.88
活性指數 7 天 (%)	95	104.0
活性指數 28 天 (%)	115	124.
鍰料空氣含量(Air Content of Mortar) (%)	≤12.0	2.31

表 3-4、添加劑型態分析

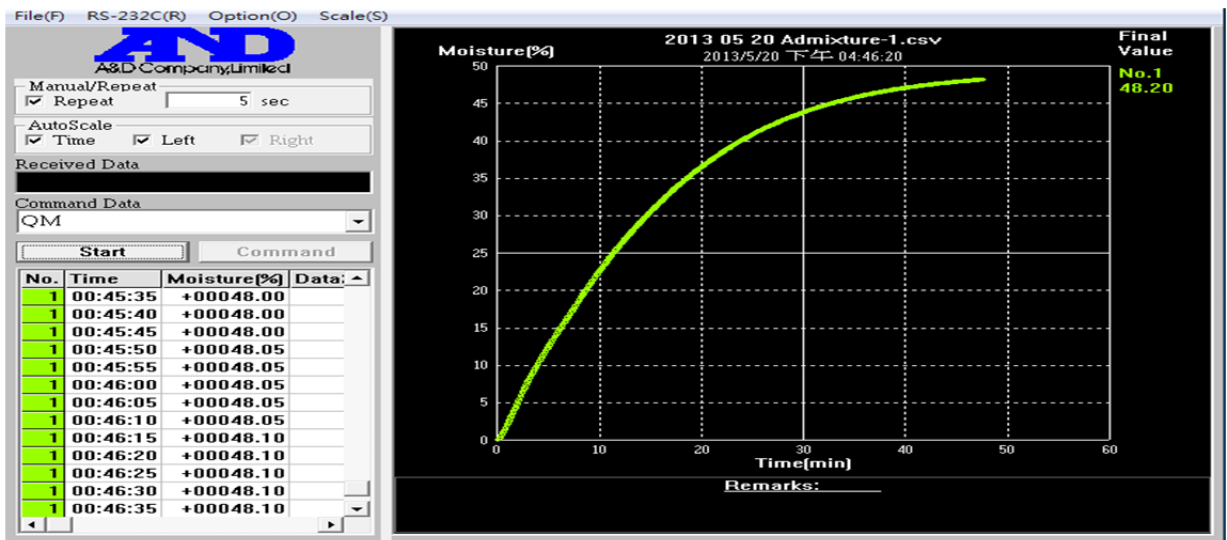
Admixture 1(台灣西卡-ES)

【減水緩凝型強塑劑】

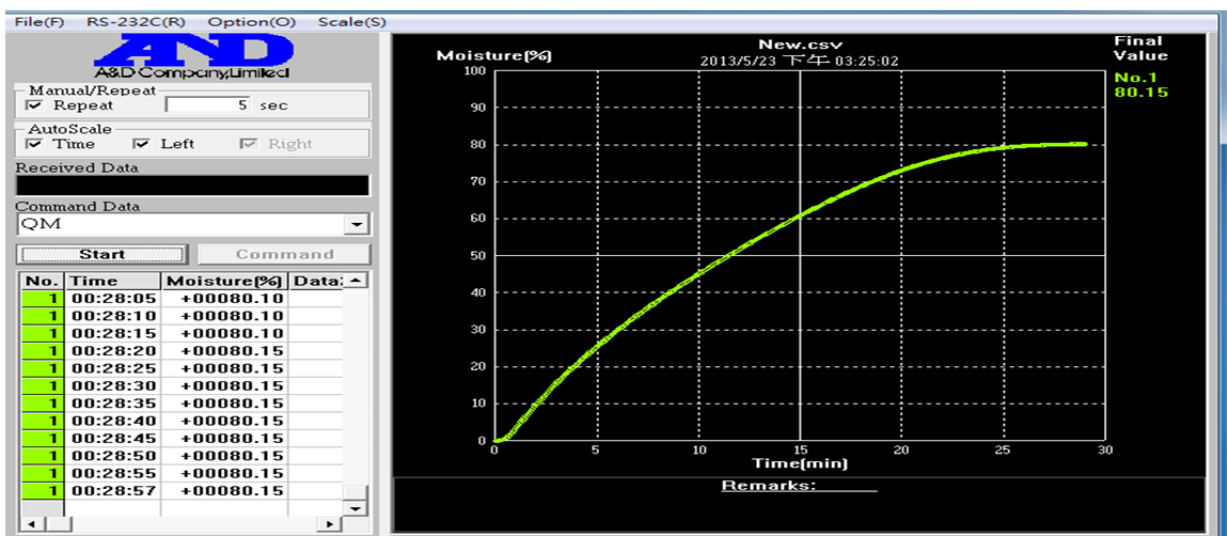
成分分析:



羧酸原始樣品烘乾殘留重(固成分):



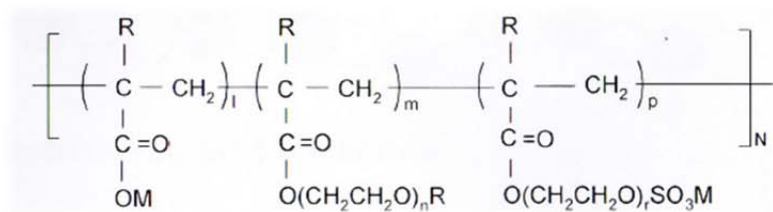
羧酸試拌樣品(稀釋)烘乾殘留重(固成分):



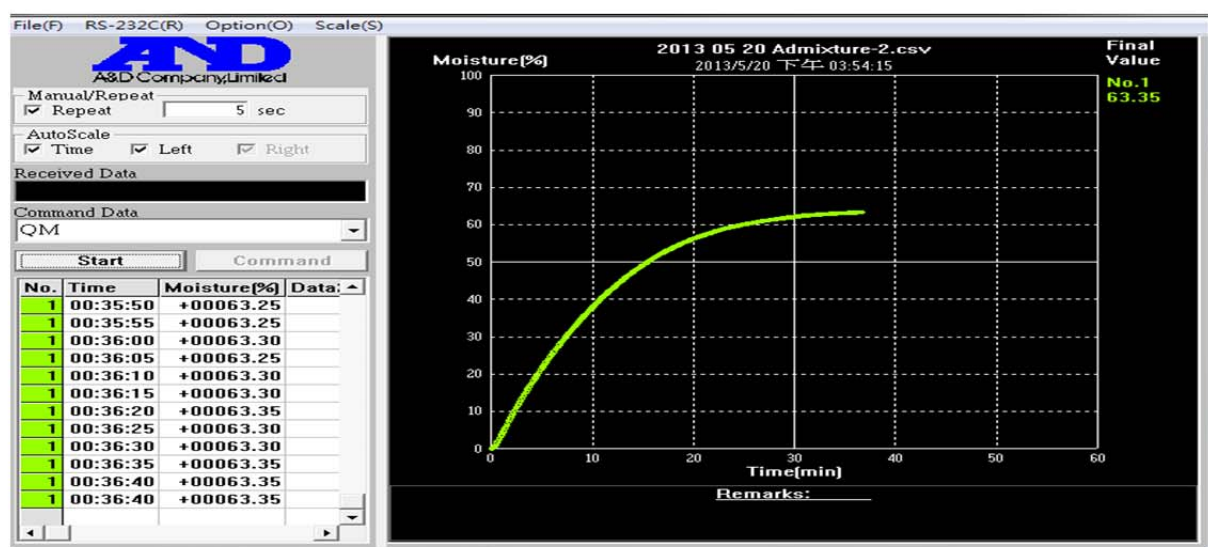
Admixture 2(台灣西卡-530)

【高緩凝型強塑劑】

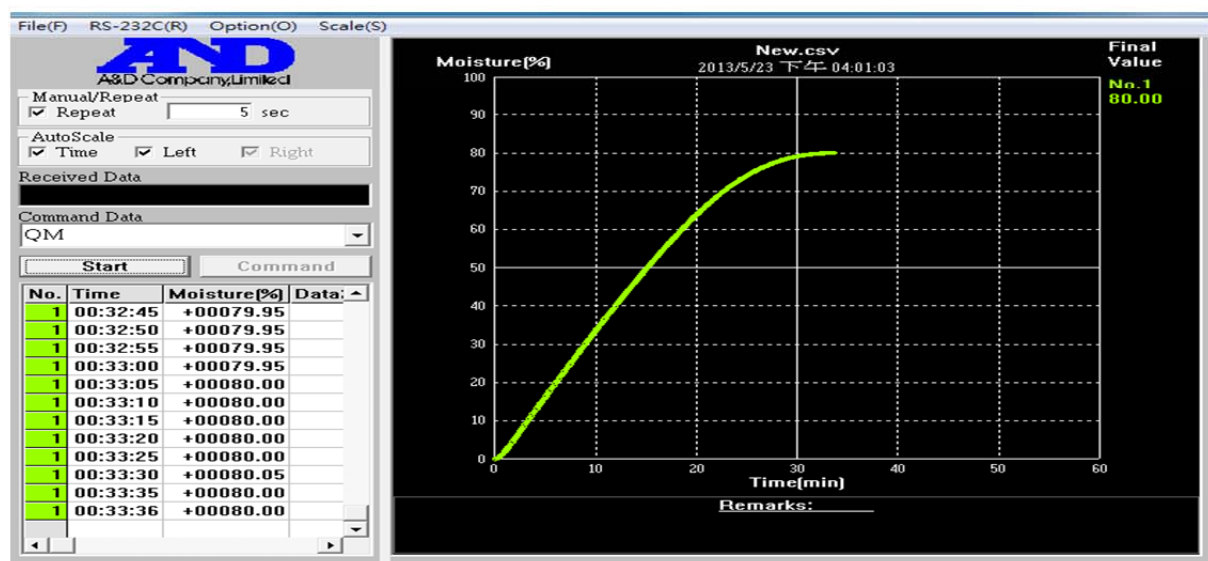
成分分析:



羧酸原始樣品烘乾殘留重(固成分):



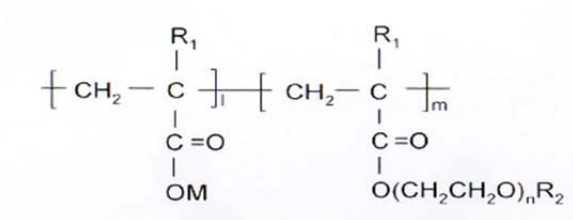
羧酸試拌樣品(稀釋)烘乾殘留重(固成分):



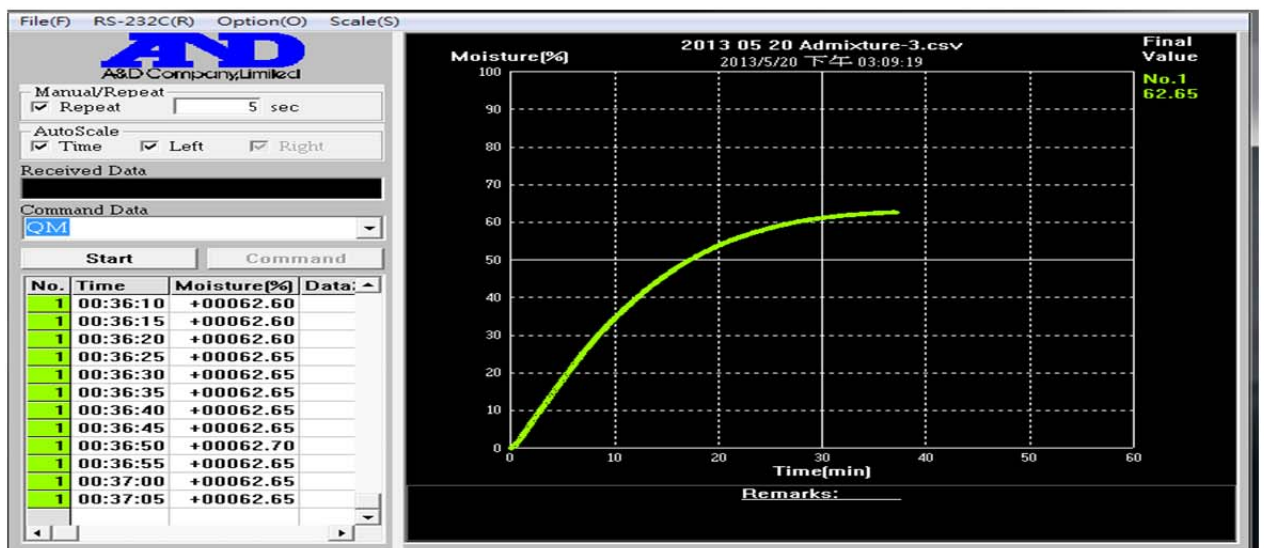
Admixture 3(台灣西卡-CR)

【高減水型強塑劑】

成分分析:



羧酸原始樣品烘乾殘留重(固成分):



羧酸試拌樣品(稀釋)烘乾殘留重(固成分):

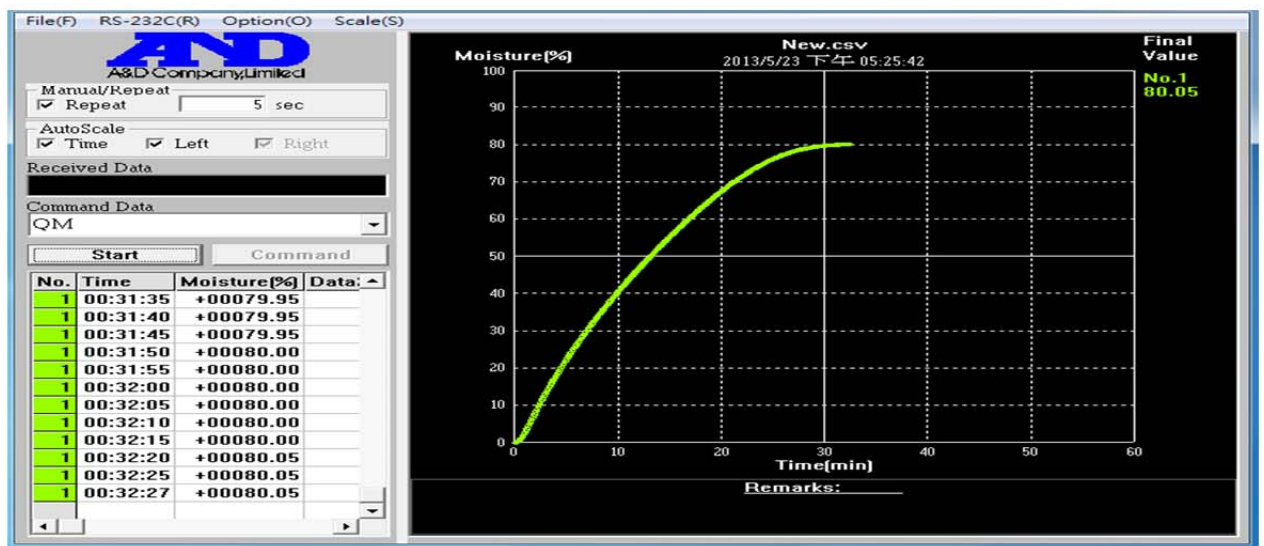


表 3-5 輕質粒料基本性質

輕質粒料基本性質：

種類	顆粒密度 (kg/m ³)	鬆乾單位重 (kg/m ³)	1 小時 吸水率 (%)	24 小時 吸水率(%)	筒壓強度 (MPa)	強度標號 (MPa)
1	1515	843	2.86	4.70	7.94	35

輕質粒料篩分析結果：

篩號	停留百分比	累積停留百分比	過篩百分比
1"	0.0%	0.0 %	100.0 %
3/4"	1.4%	1.4 %	98.6 %
3/8"	41.6%	43.0%	57.0 %
#4	44.3%	87.3%	12.7%
#8	11.7%	99.0 %	1.0 %
pan	1%	100.0%	0.0%
細度模數 = 6.27			

表 3-6 輕質粒料自充填混凝土配比 (單位：kg/m³)

配比編號	水膠比	水 泥 (kg)	爐 石 (kg)	飛 灰 (kg)	粗砂 (kg)	飛灰 (kg) (取代細砂)	輕質 粒料 (kg)	拌 合 水 (kg)	添加劑 (kg)
SCLC-350-1	0.409	270	135	45	683	63	544	180	5.4
SCLC-350-2	0.409	270	135	45	684	63	544	180	5.4
SCLC-350-3	0.409	270	135	45	684	63	454	180	5.4

SCLC : 輕質骨材自充填混凝土

350 : 設計強度

1~3 : 強塑劑代號



表 3-7 輕質粒料高流動混凝土配比 (單位：kg/m³)

配比編號	水膠比	水 泥 (kg)	爐 石 (kg)	飛 灰 (kg)	砂 (kg)	輕質粒料 (kg)	拌合水 (kg)	添加劑 (kg)
SCLC280-400-10	0.486	200	160	40	733	545	190	4.40
SCLC280-400-20	0.486	200	120	80	727	540	190	4.40
SCLC280-400-30	0.486	200	80	120	721	536	190	4.40
SCLC280-400-40	0.486	200	40	160	715	532	190	4.40
SCLC280-420-10	0.463	210	168	42	725	539	190	4.62
SCLC280-420-20	0.463	210	126	84	719	534	190	4.62
SCLC280-420-30	0.463	210	84	126	712	530	190	4.62
SCLC280-420-40	0.463	210	42	168	706	525	190	4.62
SCLC280-450-10	0.433	225	180	45	713	530	190	4.95
SCLC280-450-20	0.433	225	135	90	706	525	190	4.95
SCLC280-450-30	0.433	225	90	135	699	520	190	4.95
SCLC280-450-40	0.433	225	45	180	693	515	190	4.95

SCLC：輕質骨材自充填混凝土

280：設計強度

400：膠結材總量

10~40：飛灰佔膠結材總量比例(%)

表 3-8、試驗項目

新拌性質試驗	坍度、坍流度試驗 (CNS 1176-A3040)	於混凝土完成拌合後的 0、60 分鐘，進行坍度、坍流度試驗，並記錄坍流度到達 500 mm 時的流動時間。
	箱型試驗	於混凝土完成拌合後的 0、60 分鐘，進行箱型試驗，記錄其填充高度與時間。
	V 型試驗	於混凝土完成拌合後的 0、60 分鐘，進行 V 型試驗，記錄混凝土的通過時間。
硬固性質試驗	抗壓強度試驗 (CNS 1232 A3045)	製作 $\Phi 120 \times 240$ mm 的圓柱試體，置於室內養護，進行做 3、7、14、28、56 及 90 天齡期的抗壓強度試驗。
	析離度試驗	製作 $\Phi 120 \times 240$ mm 圓柱試體，拆模當日將試體等分切成上中下三段，量測各段單位重。

第四章 試驗結果與分析

輕質骨材質量輕、孔隙多，容易吸入大量的水分，完全乾燥的骨材會在拌和過程中吸去水分造成水膠比的變化，並影響工作性的表現，持續拌和時其影響會更大，若在拌和前將骨材維持在充分預濕狀態，骨材於拌和中幾乎沒有多餘的吸水能力，不會造成太大的坍塌。此外預濕的輕質骨材的比重會大於乾燥輕質骨材，因此預濕骨材會因比重大較不易上浮更容易均勻分佈於混凝土中，這是於實驗中所樂見的結果，可知在拌製輕質骨材混凝土使用預濕骨材會比使用絕乾骨材來得恰當，所以本研究在進行各項試驗時採用濕潤骨材。相關試驗結果，將於本章內容中詳細說明之。

4-1 新拌性質試驗結果

4-1-1 添加劑型態對輕質混凝土新拌性質之影響

常重和輕質骨材在水泥砂漿所扮演的角色並不相同，一般常重骨材比重大於水泥砂漿，自充填效果在於讓骨材懸浮於砂漿之中，所以砂漿必須提供足夠的浮力方可達到自充填之效果。反觀輕質骨材由於本身比重較小，要讓輕質骨材均勻分佈砂漿之中主要靠的是漿體具有足夠的黏滯度與包覆性，讓骨材不容易上浮，由實驗中發現拌製 SCLC 過程中，在不同型態的添加劑下我們可以將混凝土黏滯性降低，但流動性仍然可以維持。不管混凝土黏滯性如何，拌製 SCLC 之關鍵技術乃是要能讓輕質骨材不上浮。

根據前述所擬定的設計強度 350 kgf/cm^2 配比 (如表 3-6)，將所有材料依據第三章所述之拌合步驟，在常溫 27°C 下進行 SCC 拌製，

進行其新拌性質試驗，包括坍度、坍流度、V 型漏斗及箱型試驗，試驗結果如表 4-1 所示。在進行試拌過程中，發現了所選用的輕質骨材本身就有約 3~5%(重量比)是會浮在水面上的(如照片 4-1 所示)，意即輕質骨材比重小於 1，在高漿量的高流動性混凝土中，會降低混凝土單位重，反之亦可能較易造成骨材上浮之狀況，對於混凝土之新拌性能會有所影響。

由表 4-1(a)中可看出，三組輕質骨材自充填混凝土配比於拌合完成時，其坍度均大於 250 mm、坍流度大於 600 mm，坍流度達到 500 mm 時的流動時間約 5 秒，V 型流度試驗的通過時間為 7~20 秒，箱型試驗中的填充高度亦大於 300 mm，填充時間為 8~17 秒。各項試驗指標均滿足自充填等級 2 的要求。顯示本研究選用之三種型態添加劑所拌製的三組 SCLC 配比，均可達到鋼筋混凝土施工上的高流動性要求。若將三組輕質骨材自充填混凝土混凝土在拌合完成後，持續以低速攪拌 60 分鐘，因骨材不再吸附水分，混凝土均能維持與初拌狀態相似的工作性，如表 4-1(b)所示，坍流度約介於 590 ~ 620mm，SCLC-350-1 組坍流度小於 600mm；V 形試驗結果則為 16.3 ~ 24.6 秒，SCLC-350-1 組 V 形試驗時間大於 20 秒，其餘數據均在 R2 障礙規定的合格邊緣；箱型填充高度則為 325 ~ 330mm，均大於 R2 障礙規定的 300mm。不同添加劑型態拌製之 SCLC，經過 60 分鐘持續拌合後，就會有部分組別新拌性質不符合 SCC 標準，對於所使用添加劑的型態將會有更明顯的分辨性。

經由試拌數據得知坍流度在 60 至 70 公分之間最容易達到充填及高流動效果，但因 SCLC 新拌混凝土單位重較輕，約為 1900~

2000 kg/m³(如表 4-2 所示)，無法像 SCC 一樣靠以較大自重來達到快速充填與落下之效果，以落下試驗為例，新拌 SCLC 在該試驗項目中之結果介於 11.2~16.1 秒，比 SCC 花較多的時間，均較接近 R2 障礙規定 7~20 秒訂之上限。此外，在 V 型漏斗試驗中，SCLC 添加各項不同添加劑試驗結果，新拌與拌合完成 60 分鐘 V 型漏斗落下試驗時間大致會介於 10 秒至 30 秒間，可知 SCLC 在 V 型漏斗試驗中並不能只是在意添加劑的使用量，更要著重於型態上的要求（規範要求 7~20 秒通過 V 型試驗），因此對 SCLC 之添加劑的選擇，應選擇分子鏈較長及抗坍損性強之羧酸原料。箱型試驗部分，其填充時間約介於 5 ~ 20 秒間，充填性與常重 SCC 相當，均可符合 SCC 中 R2 障礙所規定之 300mm。

SCLC 的充填性質檢驗不能只靠坍度、坍流度、V 型漏斗及箱型試驗，需要輔以均勻性試驗，用以確定骨材不會出現上浮狀況，以免影響其硬固力學性能。表 4-3 為 SCLC 析離度試驗結果，由表中可知，有別於 SCC 會有骨材下沉之狀況，SCLC 確實會有輕質骨材輕微上浮之現象，但因漿體黏滯度控制得宜，上浮狀況並不明顯，上層與下層之單位重差異均在 5% 以內，尚在可以接受之範圍內。根據試驗結果，一般而言只要 SCLC 坍流度大於 60 公分，就可以很容易達到箱型試驗的標準，但若坍流度大於 70 公分時，此時混凝土乃由砂漿帶開骨材，造成大於 70 公分的坍流度，但漿體黏滯度已經不足以抓住輕質骨材，骨材會浮在砂漿上而析離，此狀態混凝土流動性雖佳，但灌注混凝土時會造成不均勻(如照片 4-2)，需特別注意。

綜合分析三組輕質骨材自充填混凝土試驗數據得知，羧酸

系的添加劑在新拌試驗時皆可達到試驗標準需求。但是唯有 Admixture 2(台灣西卡-530)高緩凝性質的添加劑型態在 60 分鐘後，仍可維持良好之工作性，能達到規範需求，特別是在 V 型落下試驗及廂型填充試驗的填充時間皆優於另外兩種型態之強塑劑。故選擇 Admixture 02(台灣西卡-530)來進行後續試驗。

4-1-2 膠結材用量輕質骨材高流動混凝土新拌性質之影響

因試驗得知，Admixture 02(台灣西卡-530)藥劑較適合於輕質骨材，此一藥劑為日本西卡生產，它不是高減水率的藥劑，而是一種高分子量及長分子鏈具有高度坍損抑制的原料，對於抗析離性及施工性保持亦有明顯差異。所以本研究在進行輕質骨材高坍流混凝土研究時，將使用 Admixture 02 (台灣西卡-530) 進行輕質骨材高坍流混凝土配比設計(如表 3-7)，共計 12 組配比。

表 3-7中之12組輕質骨材高坍流混凝土配比，所想要探討的標的為輕質骨材混凝土用於高坍流配比設計時，膠結材用量對混凝土性能之影響。表4-4為高坍流混凝土工作性試驗結果，由結果中可知SCLC 280-400-10 ~ SCLC 280-400-40這四組配比總膠結材皆設計為400kg，只有調整飛灰使用比例。前兩組的漿體量根本無法包覆及帶動輕質骨材，後兩組配比有較好的包覆性但是仍無流動性。SCLC 280-420-10與SCLC 280-420-20結果與前四組配比類似；漿體的飽和度不夠，但是當SCLC 280-420-30飛灰使用量增加到 30% 結果有了明顯改變，對於骨材的抗析離性及流動性有了明顯的改變(如表4-4)，其坍流度已達600mm與610mm。SCLC 280-450-10 ~ SCLC 280-450-40這四組配比因為漿體量皆足夠，坍流度介於520~680mm

間，皆能符合輕質骨材高坍流的工地需求。表 4-5 為輕質骨材高流動混凝土空氣含量與單位重試驗結果。飛灰使用量會造成混凝土本身空氣含量的差異性，因飛灰的燒失量愈高，其比表面積越大，對輸氣吸附的飽和度也越高，當飛灰對輸氣吸附越高時，則飛灰水泥漿體的含氣量就越低。因飛灰的燒失量高於水泥，得知飛灰使用量越高則混凝土的空氣含量越低，在輕質混凝土中的含氣量關係到輕質骨材混凝土的自重、黏滯性及施工性更關係輕質骨材的上浮行為，由表 4-6 可知，相同膠結料用量前提下，飛灰取代水泥比例越高，則輕質混凝土上層與下層單位種差異越小，也就是說輕質骨材上浮現象越輕微。

若將十二組輕質骨材自充填混凝土混凝土在拌合完成後，持續以低速攪拌(模擬拌合車轉速) 60 分鐘，因總膠結材及飛灰使用數量不同與比例不同造成坍度損失後的流動性、黏滯性及施工性就有明顯的差異(如表 4-4(b)所示)。SCLC 280-400-10 ~ SCLC 280-400-40 這四組配比因為漿體設計不足，導致新拌時坍流度不佳及有析離現象，經過 60 分鐘後已經剩下坍度無任何流動行為。SCLC 280-420-10 與 SCLC 280-420-40 結果與前四組配比類似。經計算水泥砂漿與輕質粒料的體積比(如表 4-7 所示)，發現水泥砂漿與輕質粒料的體積比在大於等於 1.77 時，輕質粒料混凝土具有較佳之新拌工作性，一但水泥砂漿與輕質粒料的體積比低於 1.77，則輕質骨材混凝土就算坍度接近，然則其坍流度亦會明顯較水泥砂漿與輕質粒料的體積比高於 1.77 者差，且 60 分鐘後之工作性之損失亦較明顯。以 SCLC 280-420-10 及 SCLC 280-450-10 兩組配比為例，兩者之水泥砂漿與輕質粒料的體積比分別為 1.73 與 1.78，在坍度同為 240mm 的情形下，水泥砂漿與輕質粒料的體積比為 1.78 者，其坍流度明顯較高。故在

設計輕質骨材高流動混凝土時，建議水泥砂漿與輕質粒料的體積比應大於等於1.77，以獲的較佳之新拌混凝土工作性。

4-1-3 飛灰取代水泥比例對輕質骨材高流動混凝土新拌性質之影響

在配比設計中若用飛灰取代相等重量水泥，由於飛灰比重只約水泥的三分之二，所以拌合時混凝土中的實際膠結漿量會增加，且因飛灰為表面光滑之球形，會在混凝土材料間有滾球潤滑作用，所以在輕質混凝土中使用適量之飛灰，對於輕質混凝土之工作性會有顯著之效益。表 4-7 為各組配比之水泥砂漿與輕質粒料的體積比，表中 SCLC280-420-30 與 SCLC280-450-10 及 SCLC280-420-40 與 SCLC280-450-20 兩個組合，每個組合中兩配比之混凝土漿體體積差距均在 $0.001 \text{ m}^3/\text{m}^3$ ，且水泥砂漿與輕質粒料的體積比均相同，但飛灰取代水泥量比例高者，儘管其坍度較低，但其坍流度卻明顯較高，可見在拌製輕質骨材高流動混凝土時，利用飛灰取代水泥可提高新拌混凝土工作性。且由上述試驗結果中亦可知，就本研究之飛灰取代水泥比例而言(10%~40%)，當飛灰使用到 30%以上時有，對於新拌混凝土工作性之助益更是顯著提升，故在設計輕質骨材高流動混凝土時，建議飛灰取代水泥比例可大於等於 30%，以獲的較佳之新拌混凝土工作性。

4-2 硬固性質試驗

4-2-1 輕質骨材自充填混凝土抗壓強度(SCLC-350)

抗壓強度試驗試體在各組混凝土配比於新拌試驗完成後，隨即澆置完成，經 24 小時後拆模，拆模後置於養護室中標準養護，養

護室的環境溫度控制在 $23\pm 2^{\circ}\text{C}$ 、相對濕度為 100%，試體於試驗材齡前取出進行抗壓試驗，試體以三個為一組，得其各別抗壓強度後，取其平均值，其平均抗壓強度試驗結果列於表 4-8。由表中可知三組配比之 3 天齡期強度分別為 39.1 MPa、37.3 MPa 與 38.9 MPa，均以高於設計強度 350kgf/cm^2 ，其 28 天強度更已超過 50 MPa，三組配比之抗壓強度均可符合設計需求。

一般而言，輕質混凝土中骨材強度小於水泥漿體，恰與常重混凝土相反，也因此強度發展的趨勢並不相同。當水泥漿體強度大於輕質骨材強度時，在混凝土承受壓力的情況下，漿體強度越高，則骨材所應承擔之應力比例越低，因此輕質混凝土強度發展曲線呈現前陡後平現象，表示早期強度增加快速(0~3天)已達設計強度 350kgf/cm^2 ，齡期14天以後則強度成長趨緩，相對於常重混凝土而言有早強現象。雖然三種添加劑在抗壓強度上反映出差異性為減水率愈高強度愈高(Admixture 1 > Admixture 3 > Admixture 2)，但是我們仍考慮其施工性及適用性，且由數據(表 4-8)得知，工作性最佳之 Admixture 2(台灣西卡-530)，雖然其抗壓強度為三組重最低，但其3天抗壓強度亦可達到設計強度。

4-2-2 輕質骨材高流動混凝土抗壓強度(SCLC-280)

各組混凝土配比於新拌試驗完成後，隨即完成試體澆置，經 24 小時後拆模，拆模後置於養護室中標準養護(養護室的環境溫度控制在 $23\pm 2^{\circ}\text{C}$ 、相對濕度為 100%)，試體於試驗材齡前取出進行抗壓試驗，試體以三個為一組，得其各別抗壓強度後，取其平均值，其

平均抗壓強度試驗結果列於表 4-9~表 4-11。

輕質骨材混凝土因為骨材本身特性，造成早強之情形。依水膠比不同強度之發展曲線如圖 4-1~圖4-3所示，由圖中可以清楚地看到在混凝土強度發展前 7 天，輕質骨材混凝土強度發展斜率大，代表強度發展速度較快。此外，由數據中亦發現，膠結料量 400 kg/m^3 之配比，其3天強度與28天強度的比值約介於61%~66%；膠結料量 420 kg/m^3 者，其3天強度與28天強度的比值約介於72%~63%；而膠結料量 450 kg/m^3 者，其3天強度與28天強度的比值約介於78%~63%，也就是說在用水量相同的情況下，膠結料用量越高(水膠比越低)之配比，混凝土早強之現象越顯著。導致此現象發生的原因，可能是膠結料用量高者，其漿體強度較高且強度發展速度也較快，所以造成混凝土早強現象明顯。

輕質骨材澆置的混凝土試體，其 7 天齡期強度，不論是 400 kg/m^3 膠結材用量或是 450 kg/m^3 膠結材用量強度皆已超過 280 kgf/cm^2 設計強度。圖 4-4 為輕質骨材高流動混凝土預估材料成本，由圖中可知飛灰因其單價較低(約為水泥之 1/3)，故飛灰取代水泥比例越高，則其材料成本越低。此外，以 SCLC-280-400-10 與 SCLC-280-420-40 兩組配比為例，兩者飛灰使用量分別為 40 kg/m^3 與 168 kg/m^3 ，在抗壓強度乎相同之情況下，SCLC-280-420-40 之材料成本可降低約 4.1%，可見適量使用飛灰，對於輕質混凝土之經濟性具有顯著之效益。

4-2-3 輕質混凝土氣乾單位重

氣乾單位重用試驗乃是利用四顆 $\Phi 120 \text{ mm} \times 240 \text{ mm}$ 圓柱進行量

測，試驗結果則是四顆圓柱之數據平均而得，混凝土氣乾單位重試驗結果如表 4-2 所示。設計強度 350 kgf/cm^2 配比中，SCLC-350-1 氣乾單位重 1848 kg/m^3 、SCLC-350-2 氣乾單位重 1855 kg/m^3 、SCLC-350-3 氣乾單位重 1863 kg/m^3 。設計強度 280 kgf/cm^2 配比中，混凝土氣乾單位重試驗結果如表 4-5 所示，SCLC-280-400-10 氣乾單位重 1820 kg/m^3 、氣乾單位重 1831 kg/m^3 、SCLC-280-400-30 氣乾單位重 1834 kg/m^3 、SCLC-280-400-40 氣乾單位重 1825 kg/m^3 ，SCLC-280-420-10 氣乾單位重 1837 kg/m^3 、SCLC-280-420-20 氣乾單位重 1841 kg/m^3 、SCLC-280-420-30 氣乾單位重 1839 kg/m^3 、SCLC-280-420-40 氣乾單位重 1843 kg/m^3 ，SCLC-280-450-10 氣乾單位重 1874 kg/m^3 、SCLC-280-450-20 氣乾單位重 1878 kg/m^3 、SCLC-280-450-30 氣乾單位重 1853 kg/m^3 、SCLC-280-450-40 氣乾單位重 1847 kg/m^3 ，試驗結果都有達到混凝土之氣乾單位重是否合乎輕質混凝土單位重小於 1840 kg/m^3 (ASTM、CNS) 或小於 2000 kg/m^3 (DIN、JIS) 之規定。

表 4-1、SCLC 新拌性質試驗結果

(a) SCLS 混凝土拌合完成時

組別	坍度 (mm)	坍流度試驗		V 型試驗	箱型試驗	
		坍流度 (mm)	達 500 mm 的時間(秒)	流動時間 (秒)	填充時間 (秒)	填充高度 (mm)
SCLC-350-1	270	690	5.1	16.1	6.4	340
SCLC-350-2	270	650	4.5	11.2	4.3	335
SCLC-350-3	270	700	6.6	13.5	6.6	340

(b) SCLS 混凝土拌合完成後，持續低速攪拌 60 分鐘

組別	坍度 (mm)	坍流度試驗		V 型試驗	箱型試驗	
		坍流度 (mm)	達 500 mm 的時間(秒)	流動時間 (秒)	填充時間 (秒)	填充高度 (mm)
SCLC-350-1	240	590	7.1	24.6	10.3	325
SCLC-350-2	260	620	5.4	16.3	7.1	330
SCLC-350-3	240	600	8.6	19.8	11.6	330

表 4-2、SCLS 混凝土空氣含量與單位重試驗結果

配比編號	含氣量(%)	新拌單位重(kg/m ³)	氣乾單位重(kg/m ³)
SCLC-350-1	3.4	1904	1848
SCLC-350-2	2.4	1932	1855
SCLC-350-3	2.5	1941	1863

表 4-3、SCLC 混凝土析離度試驗結果

配比編號	析離度(%)		
	上	中	下
SCLC-350-1	98.1	100	101.9
SCLC-350-2	99.7	100	100.5
SCLC-350-3	97.6	100	102.5

表 4-4、輕質骨材高流動混凝土新拌性質試驗結果
(a) 混凝土拌合完成時

組別	坍度(mm)	坍流度試驗	
		坍流度(mm)	達 500 mm 的時間 (秒)
SCLC280-400-10	210	380	-
SCLC280-400-20	210	390	-
SCLC280-400-30	220	390	-
SCLC280-400-40	230	520	-
SCLC280-420-10	240	430	-
SCLC280-420-20	240	430	-
SCLC280-420-30	260	600	4.2
SCLC280-420-40	260	640	4.5
SCLC280-450-10	240	510	6.5
SCLC280-450-20	250	590	5.8
SCLC280-450-30	260	680	5.5
SCLC280-450-40	270	700	5.6

(b) 混凝土拌合完成後，持續低速攪拌 60 分鐘

組別	坍度(mm)	坍流度試驗	
		坍流度(mm)	達 500 mm 的時間 (秒)
SCLC280-400-10	170	-	-
SCLC280-400-20	170	-	-
SCLC280-400-30	180	-	-
SCLC280-400-40	200	-	-
SCLC280-420-10	220	480	-
SCLC280-420-20	230	510	6.9
SCLC280-420-30	230	600	5.2
SCLC280-420-40	250	610	5.5
SCLC280-450-10	240	520	7.5
SCLC280-450-20	250	590	6.5
SCLC280-450-30	270	650	6.3
SCLC280-450-40	270	680	6.3

表 4-5、輕質骨材高流動混凝土空氣含量與單位重試驗結果

配比編號	含氣量(%)	新拌單位重(kg/m ³)	氣乾單位重(kg/m ³)
SCLC280-400-10	4.1	1875	1820
SCLC280-400-20	3.7	1886	1831
SCLC280-400-30	3.1	1878	1834
SCLC280-400-40	3.2	1868	1825
SCLC280-420-10	3.6	1892	1837
SCLC280-420-20	3.3	1889	1841
SCLC280-420-30	2.4	1902	1839
SCLC280-420-40	2.2	1882	1843
SCLC280-450-10	2.8	1931	1874
SCLC280-450-20	3.0	1925	1878
SCLC280-450-30	2.6	1890	1853
SCLC280-450-40	2.1	1879	1847

表 4-6、輕質骨材高流動混凝土析離度試驗結果

配比編號	析離度(%)		
	上	中	下
SCLC280-400-10	97.1	100	102.7
SCLC280-400-20	98.3	100	101.5
SCLC280-400-30	99.1	100	101.1
SCLC280-400-40	99.4	100	100.7
SCLC280-420-10	96.3	100	103.2
SCLC280-420-20	97.5	100	102.4
SCLC280-420-30	98.7	100	101.4
SCLC280-420-40	99.3	100	100.8
SCLC280-450-10	98.1	100	102.4
SCLC280-450-20	98.6	100	102.3
SCLC280-450-30	99.3	100	101.0
SCLC280-450-40	99.6	100	100.5

表 4-7、膠結料-漿體-輕質粒料之體積相關性

配比編號	膠結料+水與輕質粒料 體積比	膠結料+砂+水與輕質粒料 體積比
SCLC280-400-10	0.92	1.70
SCLC280-400-20	0.94	1.72
SCLC280-400-30	0.96	1.74
SCLC280-400-40	0.98	1.76
SCLC280-420-10	0.95	1.73
SCLC280-420-20	0.97	1.75
SCLC280-420-30	0.99	1.77
SCLC280-420-40	1.01	1.80
SCLC280-450-10	0.99	1.78
SCLC280-450-20	1.02	1.80
SCLC280-450-30	1.04	1.83
SCLC280-450-40	1.07	1.85

表 4-8、輕質骨材自充填混凝土(SCLC-350)之抗壓強度
試驗結果

試體編號	3day(MPa)		7day(MPa)		14day(MPa)		28day(MPa)	
SCLC-350-1	39.1	39.1	48.7	48.2	47.3	49.1	53.8	55.2
	38.7		46.2		48.5		55.5	
	39.4		49.7		51.6		56.4	
SCLC-350-2	37.3	37.3	44.3	44.5	45.5	46.9	51.4	50.6
	38.2		42.7		46.1		48.0	
	36.4		46.4		49.1		52.3	
SCLC-350-3	38.9	38.9	46.3	45.2	48.2	47.4	51.5	51.7
	38.8		45.2		46.9		49.9	
	39.1		44.2		47.1		53.7	

表 4-9、輕質骨材高流動混凝土(SCLC-280-400)抗壓強度
試驗結果

試體編號	3day(MPa)		7day(MPa)		14day(MPa)		28day(MPa)	
SCLC280-400-10	31.3	30.0	38.2	39.9	44.2	43.0	45.3	45.1
	30.2		39.3		42.8		43.8	
	28.4		42.1		41.9		46.2	
SCLC280-400-20	29.4	28.8	38.1	39.5	41.4	42.0	46.3	45.5
	27.6		40.7		41.3		45.7	
	29.3		39.6		43.2		44.6	
SCLC280-400-30	26.1	27.6	36.7	35.2	39.6	39.9	43.4	43.0
	29.7		34.2		40.5		44.4	
	26.9		34.8		39.7		41.2	
SCLC280-400-40	24.3	25.3	32.1	31.6	38.9	37.9	43.2	41.0
	27.8		31.8		37.6		41.1	
	23.9		31.0		37.2		38.7	

表 4-10、輕質骨材高流動混凝土(SCLC-280-420)之抗壓強度
試驗結果

試體編號	3day(MPa)		7day(MPa)		14day(MPa)		28day(MPa)	
SCLC280-420-10	34.7	34.3	41.9	41.6	47.2	45.8	49.8	47.1
	35.2		39.8		45.7		44.6	
	33.1		43.1		44.6		46.9	
SCLC280-420-20	33.9	31.3	40.1	40.9	43.2	43.8	48.4	47.0
	31.1		43.1		47.2		49.1	
	28.9		39.6		41.1		43.6	
SCLC280-420-30	30.3	30.7	39.8	37.9	41.7	42.4	47.8	45.3
	33.1		36.2		43.6		43.9	
	28.8		37.8		42.0		44.3	
SCLC280-420-40	29.3	29.2	35.1	35.0	45.2	44.5	41.4	46.0
	28.0		33.8		43.5		49.5	
	30.4		36.0		44.7		47.0	



表 4-11、輕質骨材高流動混凝土(SCLC-280-450)之抗壓強度
試驗結果

試體編號	3day(MPa)		7day(MPa)		14day(MPa)		28day(MPa)	
SCLC280-450-10	40.6	40.3	46.1	44.1	48.8	49.2	52.6	52.6
	41.8		42.5		52.7		55.7	
	38.5		43.7		46.2		49.6	
SCLC280-450-20	38.9	38.8	39.1	41.4	52.9	51.3	57.4	56.5
	36.6		43.7		49.9		52.7	
	40.9		32.6		51.1		59.5	
SCLC280-450-30	38.8	37.4	39.9	43.7	50.7	52.0	54.8	55.3
	37.4		44.2		50.2		56.2	
	36.1		47.1		55.2		54.9	
SCLC280-450-40	37.4	34.9	39.1	41.1	52.1	50.7	53.7	55.8
	32.9		42.8		50.3		55.6	
	34.4		41.3		49.7		58.1	

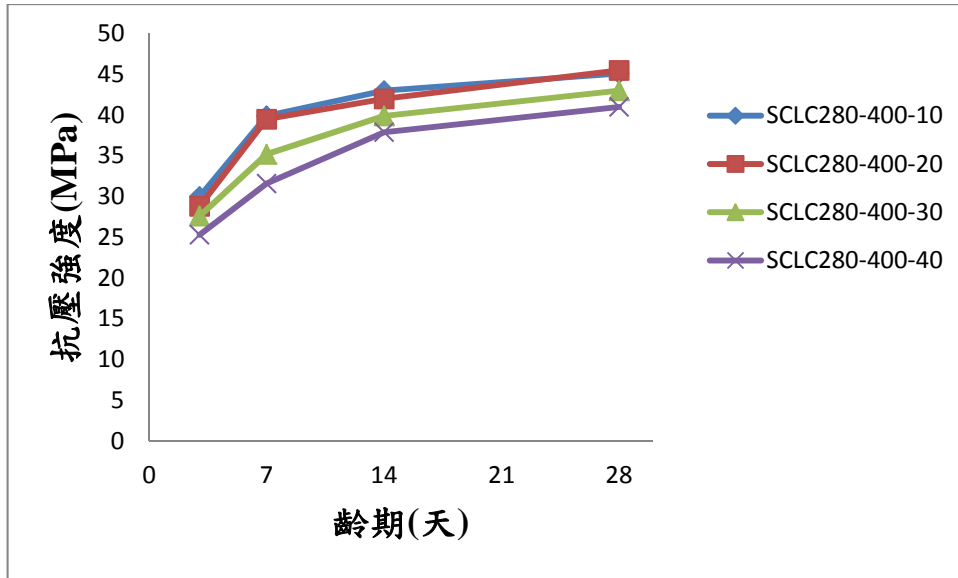


圖 4-1、輕質骨材高流動混凝土(SCLC-280-400)抗壓強度試驗結果

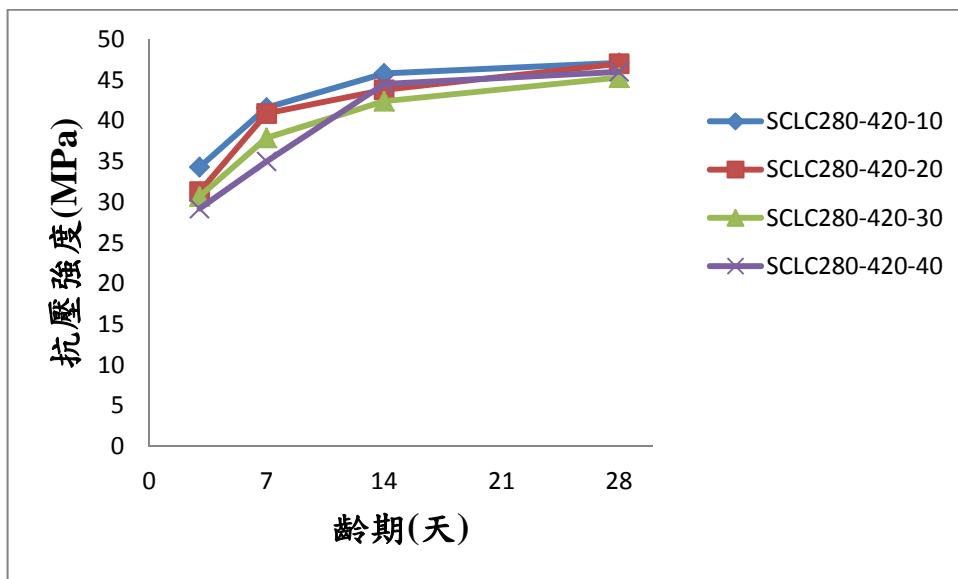


圖 4-2、輕質骨材高流動混凝土(SCLC-280-420)抗壓強度試驗結果

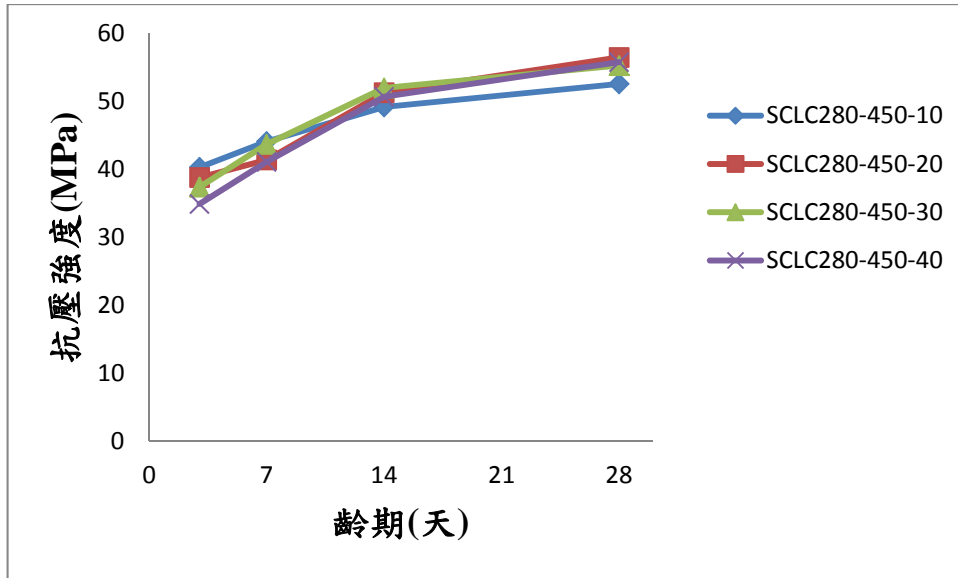


圖 4-3、輕質骨材高流動混凝土(SCLC-280-450)抗壓強度試驗結果

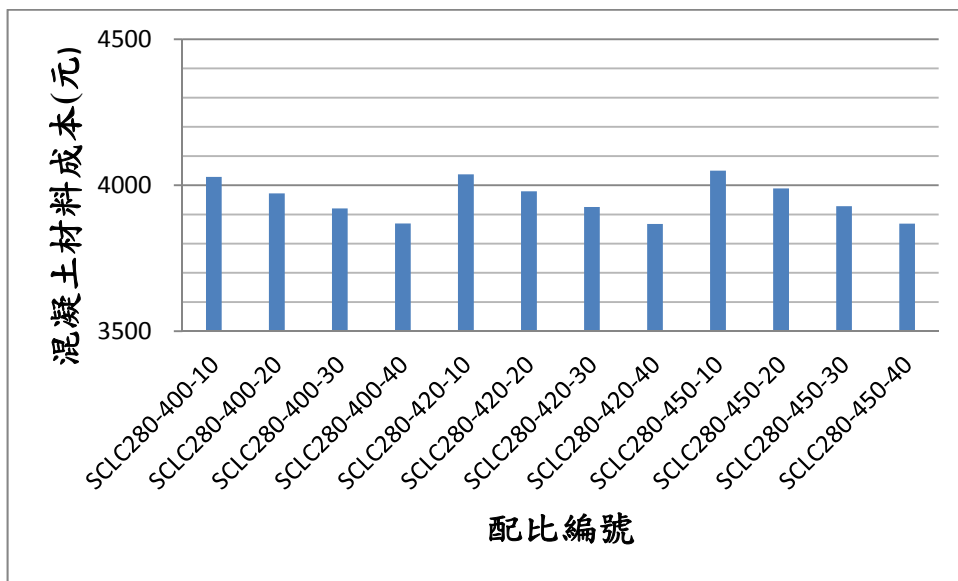


圖 4-4、輕質骨材高流動混凝土(SCLC-280)預估材料成本



圖 4-5 上浮、大孔隙的輕質骨材



(a)析離、上浮狀態

(b)無析離、上浮狀態

圖 4-6 輕質骨材混凝土析離、上浮比較

第五章 結論與建議

本研究探討輕質骨材混凝土所使用添加劑新拌特性及硬固性質，並設計、評估輕質骨材高性能混凝土所適合使用添加劑及較為符合輕質骨材可達到高效能施工性配比設計，得到結論與建議如下。

5-1 結論

1. 綜合分析輕質骨材自充填混凝土(SCLC-350)試驗數據得知，選擇高分子量及長分子鏈具有高度緩凝的羧酸系原料強塑劑(台灣西卡-530)，不論是在新拌時，抑或是新拌 60 分鐘後，均可維持良好之工作性，能達到規範需求。
2. SCLC 其單位重約在於 1850 kg/m^3 左右，比 SCC 單位重 $2300 \sim 2350 \text{ kg/m}^3$ ，約減輕 20%，就減輕結構物自重仍是相當可觀。
3. 試驗結果顯示，在產製輕質骨材高流動混凝土時，水泥砂漿與輕質粒料的體積比在大於等於 1.77 時，輕質粒料混凝土具有較佳之新拌工作性，一旦水泥砂漿與輕質粒料的體積比低於 1.77，則輕質骨材混凝土就算坍度接近，然則其坍流度亦會明顯較水泥砂漿與輕質粒料的體積比高於 1.77 者差，且 60 分鐘後之工作性之損失亦較明顯。
4. 在產製輕質骨材高流動混凝土時，若用飛灰取代部分水泥，可提高新拌混凝土工作性。且就本研究之飛灰取代水泥比例而言(10%~40%)，當飛灰使用到 30%以上時有，對於新拌混凝土工

作性之助益更是顯著提升。

5. 根據試驗結果，以 SCLC-280-400-10 與 SCLC-280-420-40 兩組配比為例，兩者飛灰使用量分別為 40 kg/m^3 與 168 kg/m^3 ，在 28 天抗壓強度乎相同之情況下，SCLC-280-420-40 之材料成本可降低約 4.1%，可見適量使用飛灰，對於輕質混凝土之經濟性具有顯著之效益。



5-2 建議

1. 輕質骨材高性能混凝土配比設計時所選用添加劑，由本論文中試驗得知較適合使用高緩凝型態羧酸藥劑；其分子鏈長及分子數量高；用於輕質骨材混凝土黏滯性較小益於現場施工，若使用高減水、高流動性質藥劑雖然有高度的流動行為但是坍度保持性較差，更會因為高減水的性質造成混凝土黏滯性過高而不易施工。
2. 在產製輕質骨材高流動混凝土時，若用飛灰取代部分水泥，可提高新拌混凝土工作性。就本研究之飛灰取代水泥比例而言(10%~40%)，在設計輕質骨材高流動混凝土時，建議飛灰取代水泥比例可大於等於30%，以獲得較佳之新拌混凝土工作性。
3. 本研究建議，在產製輕質骨材高流動混凝土時，水泥砂漿與輕質粒料的體積比應大於等於 1.77，以獲得較佳之新拌混凝土工作性。

National Chung Hsing University

參考文獻

- 【1】 李名浩（陳豪吉教授指導），「旋窯燒製水庫淤泥輕質骨材之研究」，國立中興大學土木工程學系碩士論文，2003。
- 【2】 陳豪吉（顏聰教授指導），「以台灣地區生產之輕質骨材探討輕質混凝土之配比、製作及強度性質」，國立中興大學土木工程學系博士論文，1998。
- 【3】 Okamura, H. and K. Ozawa, 「 Mix-Design for Self-Compacting Concrete」, Concrete Library of JSCE, No.25, pp. 107-120(1995).
- 【4】 Petersson,O.and P.Billberg, 「 A Model for Self-Compacting Concrete」, in Proc. of the Int. RILEM conf. on production methods and workability of concrete, Paisley, E&FN Spon, London, pp.483-492(1996).
- 【5】 柴希文、謝明宏，「自充填混凝土配比設計與施工」，自充填混凝土產製與施工研討會論文集，台灣營建院，2000。
- 【6】 謝明宏（詹穎雯教授指導），「自充填混凝土之本土化研究」，國立臺灣大學土木工程學研究所碩士論文，民國 87 年。
- 【7】 Masahiro Ouchi , 「 Mix-Design and Testing Methods for Self-Compacting Concrete」, 混凝土施工自動化論文集，台北:台灣營建研究院，1998，pp. 9-16。
- 【8】 牧保峰，「化學摻料在高性能混凝土之應用-日本經驗」，混凝土施工自動化論文集，台北:台灣營建研究院，1998，pp. 97-123。
- 【9】 牧保峰，「高性能混凝土流動性檢測規範-日本現行規範與探

討」，混凝土施工自動化論文集，台北:台灣營建研究院，1998，pp. 125-149。

- 【10】 詹穎雯、高健章、廖肇昌，「自充填混凝土簡介、施工與應用」，土木水利，第三十卷，第三期，pp. 86-91。
- 【11】 中華顧問工程司，「自充填混凝土使用手冊」，民國九十年八月。
- 【12】 顏聰、陳冠宏，「輕質骨材混凝土之力學性質」，輕質骨材混凝土會刊，2004，pp27-41。
- 【13】 柴希文、苗柏霖，「混凝土施工自動化-自充填混凝土在施工上的應用」，混凝土施工自動化論文集，台灣營建研究院，2000。
- 【14】 陳育聖（詹穎雯指導），「自充填混凝土工程性質研究」，國立台灣大學土木工程研究所碩士論文，2000。
- 【15】 台灣電力公司，1987，”煤灰利用推廣手冊”，台北。
- 【16】 林平全，1995，”飛灰混凝土”，科技圖書公司，台北。
- 【17】 黃兆龍，混凝土性質與行為，詹氏書局，2005。
- 【18】 黃兆龍，葛作嵐混凝土使用手冊，科技圖書，2007。
- 【19】 陳豪吉，「以水庫淤泥製造輕質骨材及輕質混凝土之研究」，國科會報告，2000。
- 【20】 陳胤成，「輕質骨材自充填混凝土之性質研究」，國立中興大學土木工程學系碩士論文，2004。