

碳纖維混凝土之工程性質暨應用之研究

摘 要

工程建設中最普遍且最重要之材料非混凝土莫屬，近年來隨著纖維技術的進步及工程上的需求，促使纖維混凝土在土木工程上的應用及需求日趨普遍。混凝土的工程性質與其材料的均質性有密切的關係，一般混凝土由骨材及水泥漿所組成，而張力強度為其最弱的一環，碳纖維之使用可增加混凝土的抗張強度、延遲裂縫的產生，提高混凝土的等相性 (Isotropic) 及使用性。在建研所的“台灣地區混凝土現況調查及未來發展計劃之研究”中，碳纖維混凝土為新開發建材，為提高該項新建材之廣泛應用，必需瞭解碳纖維混凝土之特性，及發展實施有效之施工法，及品質管制步驟確保工程品質。本研究將對碳纖維混凝土的材料選擇、施工拌合步驟及纖維摻入量、最佳長度、強度及乾縮的行為比較作一探討

目錄

摘要	i
目錄	ii
第一章 緒論	1
1.1 研究動機與目的	1
1.2 研究內容	2
1.3 研究方法	2
第二章 文獻回顧	4
2.1 碳纖維簡介	4
2.1.1 碳纖維的分類	4
2.1.2 PAN系碳纖維的製造方法	5
2.1.3 碳纖維的性質	6
2.2 強塑劑	6
2.3 工作度	7
2.4 混凝土破壞過程	8
2.5 界面強度	9
2.6 強度	10
2.7 彈性模數與卜松比	13
2.8 複合材料	15
2.9 韌性指數	18

2.10	乾縮的機理	19
2.11	硫酸鹽類侵蝕機理	21
2.12	目前國內外研究結果	23
第三章	試驗計劃	26
3.1	試驗材料	26
3.2	主要試驗儀器及設備	30
3.3	試驗變數	31
3.4	配比設計	31
3.4.1	碳纖維水泥砂漿(CFRM)	31
3.4.2	碳纖維混凝土(CFRC)	32
3.5	試驗方法	33
3.5.1	拌合方式試驗	33
3.5.2	水泥砂漿抗壓試驗	37
3.5.3	水泥砂漿抗拉試驗	37
3.5.4	水泥砂漿抗彎試驗	37
3.5.5	坍度試驗	37
3.5.6	反坍度錐試驗	38
3.5.7	單位重量試驗	38
3.5.8	抗壓強度試驗	39
3.5.9	抗劈裂試驗	39
3.5.10	抗彎強度試驗	40
3.5.11	直剪強度試驗	40
3.5.12	彈性模數與卜松比試驗	41
3.5.13	韌性指數	41
3.5.14	乾縮試驗	42
3.5.15	抗硫酸鹽試驗	42
3.5.16	高溫環境效應試驗	43
3.5.17	電子顯微鏡觀察	43

第四章	試驗結果與討論	45
4.1	新拌碳纖維混凝土	45
4.1.1	坍度與反坍度錐的關係	45
4.1.2	單位重量試驗	47
4.1.3	拌合方式評估	47
4.1.4	拌合水量與碳纖維體積比的關係	53
4.1.5	拌合水量與碳纖維長度的關係	55
4.1.6	強塑劑的最佳劑量試驗	58
4.1.7	強塑劑與拌合水量的關係	60
4.2	強度	62
4.2.1	強度與碳纖維長度的關係	62
4.2.2	強度與水灰比的關係	65
4.2.3	強度與齡期的關係	70
4.2.4	強度與纖維體積比的關係	92
4.2.5	抗壓強度與其他強度的關係	93
4.2.6	彈性模數與卜松比	96
4.2.7	有效係數探討	103
4.3	韌性	105
4.4	乾縮	108
4.5	抵抗裂縫能力	113
4.5.1	高溫環境效應	113
4.5.2	抗硫酸鹽類侵蝕	116
第五章	經濟評估	118
5.1	碳纖維混凝土的特點	118
5.2	碳纖維混凝土之應用實例	122
5.3	成本分析	123
第六章	結論與建議	130
6.1	結論	130

6.2 建議	131
参考文献	132

表格

2.1	纖維的有效係數表	18
2.2	土壤與水中所含不同濃度之硫酸鹽對混凝土作用之程度	22
2.3	文獻比較一-纖維性質	24
2.4	文獻比較二-試驗變數	25
3.1	水泥之化學成分與物理性質	27
3.2	骨材的基本性質	28
3.3	粗骨材篩分析結果	28
3.4	細骨材篩分析結果	29
3.5	台麗碳絲 C12K33 型品質規格表	29
3.6	碳纖維水泥砂漿試驗變數	31
3.7	碳纖維混凝土之試驗變數	32
3.8	碳纖維混凝土配比計算一	34
3.9	碳纖維混凝土配比計算二	35
3.10	試驗項目表	44
4.1	碳纖維混凝土單位重量試驗	48
4.2	CFRM 乾拌/溼拌試體強度相對百分比	50
4.3	拌合水量對纖維體積比與纖維長度的關係	56
4.4	各種抗壓強度對 28 天抗壓強度相對百分比	76
4.5	各種抗彎強度對 28 天抗彎強度相對百分比	77
4.6	CFRM 強度對 Plain Mortar 28 天強度相對百分比	83
4.7	CFRC 抗壓強度	84

4.8	CFRC抗劈裂強度	85
4.9	CFRC抗彎強度	86
4.10	CFRC直剪強度	87
4.11	CFRC抗壓強度對Plain 28天強度相對百分比	88
4.12	CFRC抗劈裂強度與Plain 28天強度相對百分比	89
4.13	CFRC抗彎強度與Plain 28天強度相對百分比	90
4.14	CFRC直剪強度與Plain 28天強度相對百分比	91
4.15	CFRM抗壓強度與抗張及抗彎強度的關係	97
4.16	碳纖維混凝土抗壓強度與抗劈裂、抗彎及直剪強度的關係	98
4.17	CFRC彈性模數	103
4.18	CFRC卜松比	104
4.19	碳纖維混凝土韌性指數表	106
4.20	CFRC乾縮應變表	109
4.21	CFRC乾縮重量損失率	110
4.22	CFRC高溫環境抗壓試驗	114
4.23	CFRC抗硫酸鹽類侵蝕抗壓強度表	117
4.24	CFRC抗硫酸鹽類侵蝕抗劈裂強度表	117
5.1	PAN系碳纖維全球需求(噸/年)	119
5.2	各種纖維性能表-ACI 544	119
5.3	混凝土劣化的因素	121
5.4	全世界PAN型碳纖維生產量能	124
5.5	CFRC單價分析表	126
5.6	CFRC每 kg/cm^2 單價分析表	127
5.7	各種纖維混凝土單位重量的比較	127
5.8	各種纖維混凝土 $V_f = 1\%$ 所需的纖維重量及單價比較	128
5.9	明潭工程鋼纖噴凝土 $1m^3$ 單價分析表	128
5.10	臺灣地區住宅類工程金額比例表	129

圖例

2.1	PAN系碳纖維的製造流程圖	5
2.2	混凝土抗壓強度之應力應變圖	8
2.3	混凝土骨材與漿體界面受張應變破壞圖	9
2.4	碳纖維混凝土破壞機構圖	11
2.5	複合材料彈性模數與體積的關係	16
2.6	荷重-變位曲線重要特徵	19
3.1	水泥砂漿拌合機及拌合葉片	36
3.2	反坍度錐試驗儀器配置	38
3.3	直剪試體示意圖	40
4.1	坍度與反坍度錐的關係	46
4.2	CFRM乾拌與溼拌試體強度	49
4.3	SEM照片:CFRM乾拌方式碳纖維在基質中的情形	51
4.4	SEM照片:CFRM溼拌方式碳纖維在基質中的情形	51
4.5	SEM照片:CFRC乾拌方式碳纖維在基質中的情形一	53
4.6	SEM照片:CFRC乾拌方式碳纖維在基質中的情形二	54
4.7	拌合水量與纖維體積比的關係	54
4.8	拌合水量與纖維長度的關係	57
4.9	強塑劑劑量與抗壓強度的關係	61
4.10	CFRM強度與碳纖維長度關係	63
4.11	碳纖維長度與碳纖維混凝土抗壓強度關係	66
4.12	碳纖維長度與碳纖維混凝土抗劈裂強度關係	67

4.13 碳纖維長度與碳纖維混凝土抗彎強度關係	68
4.14 碳纖維長度與碳纖維混凝土直剪強度關係	69
4.15 水灰比與CFRC抗壓強度關係	71
4.16 水灰比與CFRC抗劈裂強度關係	72
4.17 水灰比與CFRC抗彎強度關係	73
4.18 水灰比與CFRC直剪強度關係	74
4.19 CFRM抗壓、抗張及抗彎強度與齡期關係	78
4.20 CFRC抗壓強度與齡期關係	79
4.21 CFRC抗劈裂強度與齡期關係	80
4.22 CFRC抗彎強度與齡期關係	81
4.23 CFRC直剪強度與齡期關係	82
4.24 抗壓強度與CFRC纖維體積比的關係	93
4.25 抗劈裂強度與CFRC纖維體積比的關係	94
4.26 抗彎強度與CFRC纖維體積比的關係	94
4.27 直剪強度與CFRC纖維體積比的關係	95
4.28 水泥砂漿抗壓強度與抗拉強度關係	97
4.29 水泥砂漿抗壓強度與抗彎強度關係	99
4.30 CFRC抗壓強度與抗劈裂強度關係	100
4.31 CFRC抗壓強度與抗彎強度關係	101
4.32 CFRC抗壓強度與直剪強度關係	102
4.33 CFRC荷重-變位圖	107
4.34 CFRC乾縮應變與齡期的關係	111
4.35 CFRC乾縮重量損失率	112
4.36 CFRC高溫環境抗壓強度變化情形	115
5.1 伊拉克首都巴格達圓頂式紀念館	122
5.2 日本東京ARK 37層辦公大樓	123

第一章

緒論

1.1 研究動機與目的

美國打算降低軍事費用，將碳纖維用途從航太軍事轉成汽車、交通及營建方面。PAN系碳纖維設備擴充計劃自1989年起進展頗為神速，是因為全球需求轉殷，航空、運動器材、土木工程、建築材料及一般材料等用途方面的快速成長所致。

日本Toho Rayon公司正注意碳纖維在材料工業方面的市場，尤其是土木工程及營建材料，這是繼運動器材及航空方面較新的應用領域。日本建設省(Ministry of Construction)及地方政府正在測試其使用情形。

工程建設中最普遍且最重要之材料非混凝土莫屬，近年來隨著纖維技術的進步及工程上的需求，促使纖維混凝土在土木工程上的應用及需求日趨普遍。混凝土的工程性質與其材料的均質性有密切的關係，一般混凝土由骨材及水泥漿所組成，低張力強度與脆性為其最弱的一環，碳纖維之使用可增加混凝土的抗張強度、延遲大裂縫的產生，提高混凝土的等相性(Isotropic)及使用性。

1.2 研究內容

碳纖維混凝土(CFRC)為新開發建材，為提高該項新建材之廣泛應用，及提昇混凝土技術的理念，必需瞭解碳纖維混凝土之特性，發展有效之施工方法，及品質管制方法的建立。藉試驗的方法，探求施工拌合步驟、纖維摻入量、較佳拌合長度、強度、韌性及乾縮等性質。研究的內容將包含下列重點：

- 碳纖維摻入量對新拌與硬固混凝土的影響。
- 碳纖維混凝土配合設計的選擇，包括纖維長度、摻料及摻量。
- 提供碳纖維混凝土的基本力學性質、與一般混凝土的差異性，包括碳纖維長度、水灰比、齡期及纖維體積比。
- 研究碳纖維混凝土的基本特性，以供學術研究及施工使用的參考。

1.3 研究方法

碳纖維混凝土具有三大特性，為強度(strength)、韌性(toughness)及抵抗裂縫能力(resistance to cracking)。本研究可分成四大主要部份；

第一部份為碳纖維水泥砂漿(CFRM)試驗：為碳纖維混凝土的基礎研究，探求碳纖維與基質(matrix)握裹的關係。

第二部份為新拌碳纖維混凝土(Fresh CFRC)之性質研究：以第一部份所得結果來進行配比設計、工作度量測方式的建立。

第三部份為靜態短期(Short-term Static Loads)之力學行為研究：將第二部份的配比結果，以水灰比控制進行三種強度、五種纖維長度及三種纖維體積比拌合，量測抗壓、抗劈裂、抗彎及抗剪等強度，並可同時求得彈性模數、卜松比及韌性指數等特性。

第四部份為乾縮行為研究：乾縮行為試驗主要以23°C, 50%RH, 探求碳纖維混凝土對乾縮是否有貢獻。

第五部份為耐久性研究：耐久性試驗以抗硫酸鹽侵蝕及耐酷熱氣候(75°C)的條件下,探求碳纖維混凝土在惡劣環境下的抵抗能力。

研究流程共分五個階段進行,各階段概要說明如下:

1. 相關文獻蒐集與整理:蒐集國外先進國家已有的研究資料。
2. 研究方法與範圍之確定:基礎試驗進行,並與現有文獻做一比較,擬定試驗計劃。
3. 設備及材料之準備:將試驗計劃推行,試體灌製與試驗進行。
4. 試驗結果分析與討論:根據前述階段之成果進行分析與檢討。
5. 結論及建議:由分析討論之結果作成結論,並研提建議事項。

第二章

文獻回顧

2.1 碳纖維簡介

2.1.1 碳纖維的分類

碳纖維的種類依原料區分可分為下列四種：

1. 纖維素纖維系(Rayon)。
2. 纖維素纖維系(Lignin)。
3. PAN系(Polyacrylonitrile)。
4. 瀝青系(Pitch)。

依力學性質可區分為下列兩種：

1. 普通碳纖維(General Performance簡稱GP)， $\sigma_t \leq 120kg/mm^2$ ， $E \leq 10000kg/mm^2$
2. 高性能碳纖維(High Quality Performance簡稱HP)， $\sigma_t \geq 150kg/mm^2$ ， $E \geq 17000kg/mm^2$ 。高性能纖維又區分為高強度(High Tenacity簡稱HT)型及高彈性模數(High Modulus簡稱HM)型。

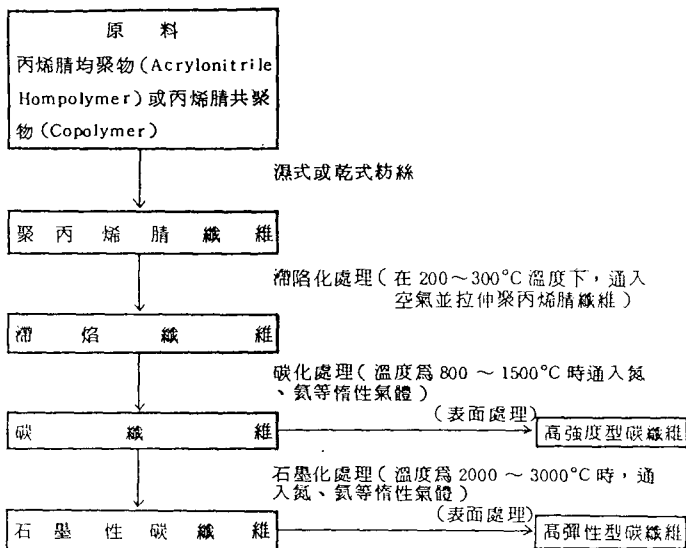


圖 2.1: PAN 系碳纖維的製造流程圖

2.1.2 PAN 系碳纖維的製造方法

自 1959 年 [17] 日本工業技術院大阪工業技術試驗所近藤昭男博士, 發明 PAN 系碳纖維, 並取得專利權後迄今已三十年其間經過世界各國不斷的改良及研究, 已使 PAN 系碳纖維成為高性能纖維的主流。PAN 系碳纖維之製造方法係採用 Polyacrylonitrile 為原料, 經紡絲、滯陷化處理等步驟而成, 其流程如圖 2.1。

2.1.3 碳纖維的性質

碳纖維的特性具有密度小、重量輕、抗張強度大、耐熱性、耐腐蝕、耐衝擊、尺寸安定性、熱膨脹係數小、彈性係數高(隨溫度升高而漸增,抗張強度在1600°C達到最高,其後又逐漸下降。)等優點,為國防及各種工業廣泛的採用[1,2,3,4]。碳纖維的優越性如下:

1. 碳纖維具有高抗鹼性,在混凝土不易受到腐蝕,安定性良好,長期強度變化小。
2. 一般常用之纖維混凝土均有其缺失[17],如鋼纖維混凝土(SFRC)之鋼纖維會有表面腐蝕、石棉纖維會產生公害、PP纖維在日光長期照射下,纖維老化的情形、玻璃纖維處於鹼性環境中,其強度會降低,而碳纖維無此缺點。
3. 如使用高性能拌合機,押出成型、濕式成型、擠壓成型及倒入模成型等方法均可採用,適用之範圍廣泛。

2.2 強塑劑

美國材料試驗協會(ASTM) C-494規範中,提到七種改進混凝土工作度的摻料,增加工作度的摻料,主要有減水劑及輸氣劑。摻料使用的目的,是不改變水灰比而藉拌合水的減少,降低水泥用量,強塑劑依其不同的化學組成,可分為四種類型[5,6,7]:

1. 磺化三聚氰胺甲醛縮合物(sulfonated melamine formaldehyde condensates),簡稱M.F.型。
2. 磺化奈甲醛縮合物(sulfonated naphthalene formaldehyde condensates),簡稱N.F.型。
3. 改良之磺化木質素(modified lignosulfonates),簡稱L.S.型。

4. 其他種類，如硫酸酯及碳酸酯等。

強塑劑的性質根據不同的型式有不同的作用，一般可分為下列三種：

1. 降低水的表面張力。
2. 使水泥顆粒等相均佈性。
3. 在水泥顆粒表面產生潤滑薄膜。

N.F.型強塑劑適合於：

1. 常溫或高溫下的預鑄方式。
2. 常溫或高溫下的大面積地板的灌注。
3. 巨積混凝土。

2.3 工作度

新拌混凝土性質的測定為品質控制的重要工具，這是施工過程中確保混凝土品質及性能不可或缺的手段[8,9,10,11]；其重要性基於兩種假設：

1. 試驗數據可提供估計硬固混凝土行為的資料。
2. 當新拌混凝土性質一旦變動時，即暗示混凝土配比已改變，此刻應採取應變措施加以補救。

混凝土的工作度[10,11]，從未被很準確的定義過。實際上是指混凝土粒料自拌合機出來被處理到最後搗實成形的容易程度。影響工作度的因素包括：

1. 組成材料：水、水泥、骨材、摻料及其他材料。
2. 周圍環境：溫度、溼度及風速。

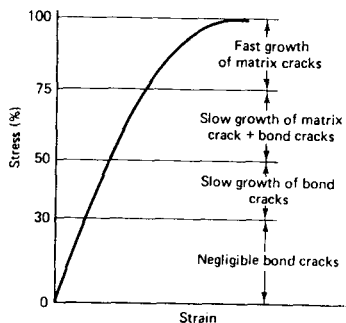


圖 2.2: 混凝土抗壓強度之應力應變圖

被廣泛用來量測工作度的試驗方法有：坍度 (slump)、搗實因素 (compacting factor) 與 V-B 稠度計 (consistometer) 等試驗 [12]。

混凝土單位重可由其配比各種材料重量之總和而求得，並經試拌之檢核加以調整，若配比不正確、拌合不均勻或材料析離，則所得之值將有偏差，單位重是瞭解混凝土之均勻度及材料析離情形的指標之一。

2.4 混凝土破壞過程

P. Kumar Metha[13,19] 將應力應變曲線分四個階段，在未加載前混凝土已有初始裂縫存在於骨材與漿體界面 (transition zone) 之間，這些初始裂縫之寬度、數目與水含量、界面強度及養護情況有關，由於骨材與漿體的彈性模數不同，致使不同的應變而產生界面裂縫。當試體承受應力未達極限應力 (f'_c) 30% 時，初始裂縫不會產生擴展或延伸，此一階段應力-應變曲線呈線性關係。當應力超過 30% f'_c 時，初始裂縫開始成長 ϵ 比值逐漸增加，應力-應變曲線呈非線性；當應力超過 50% f'_c 時，裂縫擴展逐漸加快，並穿過漿體在骨材間逐漸起橋接作用 (bridging effect)；

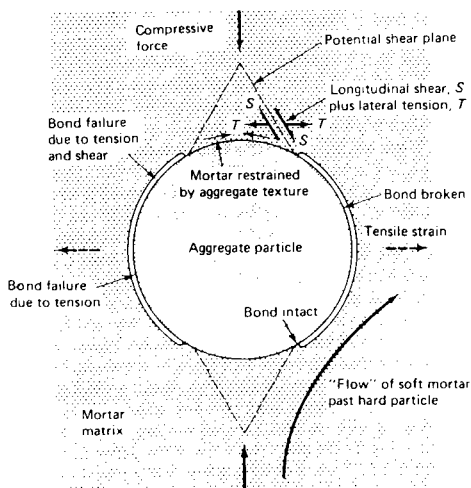


圖 2.3: 混凝土骨材與漿體界面受張應變破壞圖

當應力超過 $75\%f'_c$ 時，裂縫在界面區及漿體內部快速延伸擴展，應力-應變曲線漸趨平緩，此時即應力不再增加，混凝土亦會因長時間載重下的裂縫延伸而破壞。

2.5 界面強度

纖維混凝土強度主要是由水泥漿體、骨材、纖維及界面鍵結強度 (bond stress) 此四者所支配，此四種材料以骨材、纖維和水泥漿間的界面鍵結強度，為纖維混凝土強度指標。

界面區域 (Interfacial Zone) 指骨材與水泥漿體間的接觸面而言，其厚度約在 $12 \mu\text{m} \sim 23 \mu\text{m}$ 範圍之間 [34]，界面區是由接觸層 (Contact Layer)、界面層 (Interfacial Layer) 及轉變區 (Transition Region) 所組織而成。

在混凝土水化的初期，因為水化作用才剛開始，其 CH 及 C-S-H 膠體

之水化產物數量極少，此時之界面強度較低；到了晚期，水化行為較為成熟，水泥水化之產物，如氫氧化鈣(CH)、鈣矾石(Ettringite)及C-S-H膠體，交錯成長形成緻密的界面區，有助於水泥漿體／骨材之界面握裹力(Bond)的提昇[13]，一般而言，界面為混凝土強度最脆弱的部位，因此界面鍵結強度對於整個混凝土力學行為及工程性質的影響，扮演了相當重要的地位。

混凝土中之骨材和圍繞於其周圍之水泥漿體間之力學行為，是經由握裹力(Bond)來傳遞以達到力學的平衡。而構成握裹力的要素包括[19,35]：

1. 黏著力(Adhesion)。
2. 摩擦力(Friction)。
3. 機械互鎖效用(Mechanical Interlocking)。
4. 化學鍵結力(Chemical Reaction)。

碳纖維與骨材可視為不活潑體(Inert)，骨材與水泥漿體間主要是藉由黏著與互鎖的作用而產生鍵結強度，而碳纖維表面光滑，互鎖作用較不明顯，握裹力主要藉由黏著力與摩擦力提供。但並非所有的纖維或骨材皆不參與反應，有時在界面區多少會與水泥漿體產生不等程度的化學反應，Besab的研究提出握裹應力約為 $0.4f'_c$ 。

2.6 强度

混凝土强度的因素有組成條件、組成方法、養護方法及試驗條件等，影響組成條件的因素有水灰比、齡期、水泥含量、骨材及摻料。抗壓强度高之混凝土，其彈性係數、抗張强度、抗彎强度、水密性及耐久性等均會隨著提高。

Abrams[10]在1919年提出水灰比理論，其式如下：

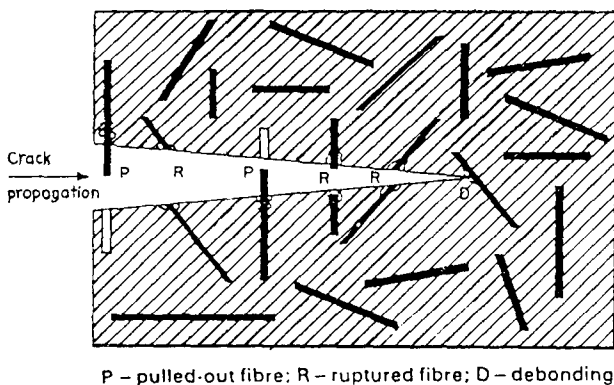


圖 2.4: 碳纖維混凝土破壞機構圖

$$f_c = \frac{K_1}{K_2^{w/c}} \quad (2.1)$$

式中 K_1 及 K_2 為試驗常數。

齡期越長, 強度越高, 但會趨近於定值, 且受溫度、濕度及水泥種類的影響, Prague[16] 建議

$$f_{cc,j} = a + b \log j \quad (2.2)$$

式中 a 為 f_c (100mm 立方體抗壓強度) 1 天的強度, b 為 1~9 天強度的增加量, 但此式當 j 趨近於無限大時, f_{cc} 亦趨於無限大, 此式僅適用某一時間內。一般以 7 天強度來預測 28 天強度, 較普遍, 德國規範對養護齡期與強度的關係如下:

$$\begin{aligned} f_{c,28} &= 1.4f_{c,7} + 1.0 \quad (Mpa) \\ f_{c,28} &= 1.7f_{c,7} + 5.9 \quad (Mpa) \end{aligned} \quad (2.3)$$

式中 $f_{c,7}$ 及 $f_{c,28}$ 為混凝土 7 天及 28 天的強度, Graf[16] 建議齡期之上下限為

$$f_{cc,28} = 1.2f_{cc,7} \quad (lower)$$

$$f_{cc,28} = 60 + 1.7f_{cc,7} \quad (\text{upper}) \quad (2.4)$$

Pineiro [10] 建議

$$f_{c,28} = K_2(f_{c,7})^{K_1} \quad (2.5)$$

式中 $K_1=0.3\sim 0.8, K_2=3\sim 6$ 。

纖維混凝土之抗壓強度文獻說法不一,有的提高、有的降低;影響強度度的外在因素有拌合是否均勻、骨材配比是否適當、及纖維維長寬比;內在的因素取決於界面之握裹及圍束能力。

混凝土的張力強度可分為直接張力強度(direct tension)、劈裂強度(splitting tension)與撓曲強度(flexure)。抗張強度與抗壓強度之比,約在1/10~1/13之間。抗張強度亦隨水灰比之減少而增加,但增加量沒有抗壓強度明顯。1986年Metha的研究報告中顯示,對於混凝土的抗壓強度在1000~9000psi的範圍間。抗張強度及抗壓強度比值之關係,在抗壓強度增大時其比值愈小,當抗壓強度達到9000psi時,抗張強度接近於抗壓強度的7%。劈裂強度與抗壓強度的比例,隨著抗壓強度的提高而由10%減弱為5%。而使用碎石骨材比使用卵石骨材會高約8%。顯示碎石骨材有較好的界面鍵結力,提高了骨材與水泥漿體間的互制力量,並有效地傳遞了骨材與水泥漿體之間的剪力行爲。

張力強度在不當的養護下,比抗壓強度敏感,在空氣中養護的 f_t/f_c 比標準養護下的 f_t/f_c 為低, f_t 與 f_c 之間的關係可表為:

$$f_t = K(f_c)^n \quad (2.6)$$

式中 $n=0.5\sim 0.75$, 碎石骨材 $K=10.4$ 。伊利諾大學(University of Illinois)所提建議式為:

$$f_t = \frac{3000}{4 + \frac{12000}{f_c}} \quad (\text{psi}) \quad (2.7)$$

Feret[16] 建議式如下:

$$f_{ct} = 0.5f_c^{2/3} \quad (2.8)$$

Comite Europeen du Beton 假設平均直接張力強度與圓柱抗壓強度有關:

$$f_t = 0.3f_{cyl,k}^{2/3} \quad (2.9)$$

1981年 Carrasquillo 等研究亦顯示，混凝土抗壓強度提高時，其劈裂強度並不會等比例的增加，且張力強度與抗壓強度之間有平方根的關係，約為常數，且劈裂強度的增加有一上下限的範圍，約為 f'_c 的 0.08 ~ 0.14 倍，其預測公式如下：

$$f_{ct} = 1.78\sqrt{f'_c} \quad (kg/cm^2) \quad (2.10)$$

式中 $210 \leq f'_c \leq 840$ ，抗彎強度為探求混凝土張力強度的主要方法，其約為 f'_c 的 0.11 ~ 0.23 倍。ACI 318-89 一般混凝土抗彎強度預測公式如下：

$$f_r = 1.99\sqrt{f'_c} \quad (kg/cm^2) \quad (2.11)$$

混凝土的剪力強度，僅比張力強度略高，約為 50% ~ 90% 的 f'_c 強度。ACI 318-89 一般混凝土抗剪強度預測公式如下：

$$f_s = 0.53\sqrt{f'_c} \quad (kg/cm^2) \quad (2.12)$$

纖維混凝土的剪力強度與纖維體積比有關，

$$f_{s,f} = a\sqrt{f'_{c,f}} + bV_f + cV_f^2 \quad (2.13)$$

式中 $f_{s,f}$ 為纖維混凝土的直剪強度， $f'_{c,f}$ 為纖維混凝土的抗壓強度， V_f 纖維體積比， a 、 b 及 c 為試驗常數。

2.7 彈性模數與卜松比

彈性模數(modulus of elastic)可定義為每單位面積的荷重(應力)與每單位長度的變形(應變)的比。

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon} \quad (2.14)$$

混凝土的彈性變形，依混凝土之材料、配比、施工、期齡、應力強度及試驗方法等而有所差異。碳纖維混凝土組成的材料中，以碳纖維與骨材的彈性係數較大，其次為水泥漿體。混凝土之彈性係數、破壞方式及受力結構，即由此三者之強度所決定。複合材料對外來載重的承擔分配，以材料的彈性係數高者，承受較高之應力，破壞發生則源於材料的強度較弱者。

因為混凝土不是完全的彈性材料，因此連續加壓力所得之應力－應變曲線不完全為直線。在彈性階段，水泥漿之單位變形量遠大於骨材，因此可推論混凝土變形受水泥漿體的影響很大。而硬化水泥漿體之強度與E值，受其膠體／單位體積比的影響甚大，也即膠體及孔隙的數量可能會對混凝土產生較大的影響，因此較強的混凝土具有較高的彈性模數，這一點與鋼材則有所不同，因鋼的強度是由其晶體之結構而非空隙決定，故鋼之彈性模數與強度無關。然而混凝土的彈性模數並不與抗壓強度成比例，但其彈性係數約為混凝土強度的1000倍左右。

中、低強度混凝土的彈性模數，已有相當多的文獻與報告提出相近的預測公式，ACI 318-83基於實驗結果的推導並參考PCA及Pauw等之建議公式，預測一般重量(normal weight)混凝土 E_c 之經驗式如下：

$$E_c = 0.137W_c^{1.5}\sqrt{f'_c} \quad (kg/cm^2) \quad (2.15)$$

若將單位重量 $2300kg/m^3$ 代入上式可得：

$$E_c = 15000\sqrt{f'_c} \quad (kg/cm^2) \quad (2.16)$$

Graf[10]根據試驗建議彈性模數為：

$$E_c = \frac{10000}{0.17 + \frac{36}{f_c}} \quad (Mpa) \quad (2.17)$$

Ros以稜柱抗壓試體來表彈性模數

$$E_c = \frac{5500}{15 + f_{cp}} \quad (Mpa) \quad (2.18)$$

Arutnian[16]以試驗建立彈性模數與時間的關係如下：

$$E_{c,j} = E_0(1 - \beta^{\alpha j}) \quad (2.19)$$

式中 $E_{c,j}$ 為混凝土在齡期 j 時的彈性模數, E_0 為其試驗最長齡期的彈性模數, α 及 β 為試驗常數。

當混凝土受到軸向應力時,側向會膨脹,卜松比(Poisson's ratio)即指橫向應變與相對應的軸向應變的比,一般混凝土在彈性區內卜松比約介於 0.11 ~ 0.21 間,一般約為 0.15 ~ 0.20. Auson[16] 指出卜松比與骨材的體積有關,其可表為:

$$dV = d\varepsilon_1 - 2d\varepsilon_2 \quad (2.20)$$

2.8 複合材料

從材料的觀點而言,混凝土可視為一種複合材料。複合材料的力學性質與變形行為,非源於單一機理,而是組合了各種材料的機理而成,且與微結構之物理特徵以及裂縫的發展有密切的關係。複合材料的成敗取決於兩個因素:

1. 加強材料的彈性模數必須大於基質材料。
2. 加強材料與基質間有良好的握裹力。

根據複合材料的混合比定律[14,15]之建議,纖維混凝土在受到單向力時其彈性模數可表為:其上限為

$$E_c = E_f V_f + E_m(1 - V_f) \quad (2.21)$$

其下限為

$$E_c = \frac{E_f E_m}{E_f(1 - V_f) + E_m V_f} \quad (2.22)$$

其應力可表為

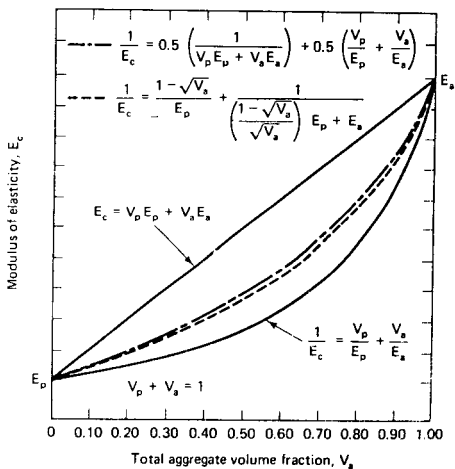


圖 2.5: 複合材料彈性模數與體積的關係

$$\sigma_c = \sigma_f V_f + \sigma_m (1 - V_f) \quad (2.23)$$

由變形一致性, 可得

$$\varepsilon_c = \varepsilon_f = \varepsilon_m = \frac{\sigma_c}{E_c} = \frac{\sigma_f}{E_f} = \frac{\sigma_m}{E_m} \quad (2.24)$$

將式(2.23)移項, 可得

$$\begin{aligned} \frac{\sigma_c}{\sigma_m} &= \frac{\sigma_f}{\sigma_m} V_f + (1 - V_f) \\ &= \left(\frac{\sigma_f}{\sigma_m} - 1 \right) V_f + 1 \end{aligned} \quad (2.25)$$

$$\sigma_c = \left[\left(\frac{E_f}{E_m} - 1 \right) V_f + 1 \right] \sigma_m \quad (2.26)$$

式(2.23)及(2.21)是假設纖維是連續而且成單向排列, 且和混凝土完全黏結; 若纖維為不連續則上述情況時, 則須作如下修正[15]:

$$\sigma_c = \eta_1 \eta_2 \sigma_f V_f + \sigma_m (1 - V_f) \quad (2.27)$$

$$E_c = \eta_1 \eta_2 E_f V_f + E_m (1 - V_f) \quad (2.28)$$

式中 η_1 稱為纖維排列有效係數, η_2 則和黏握性有關. J. R. Linton[40]將 η_1 及 η_2 合併為k

$$\sigma_c = k \sigma_f V_f + \sigma_m (1 - V_f) \quad (2.29)$$

式中k稱為纖維排列和黏握有效係數, 詳表2.1。Swamy將纖維的長細比考慮以破壞力學及複合材料理論提出

$$\sigma_c = A \sigma_m (1 - V_f) + B V_f \frac{l}{d} \quad (2.30)$$

初裂強度時 $A=0.843, B=3.41$, 極限強度時 $A=0.97, B=3.41$ 。根據 Antoine E. Naaman[39]之建議, SIFCON 其彈性模數可表為:

$$E_{ct} = E_f V_f + E_m (1 - V_f) \quad (2.31)$$

$$E_{ct} = \frac{E_f E_m}{E_f (1 - V_f) + E_m V_f} \quad (2.32)$$

$$E_c = \frac{3}{8} E_{ct} + \frac{5}{8} E_m \quad (2.33)$$

表 2.1: 纖維的有效係數表

纖維方向	η_1 值	η_2 值	Lsws	Linton
單向安排	1	$\frac{l}{4l_c}$ $l - \frac{l_c}{7}$	$(l \leq 2l_c)$ $(l \geq 2l_c)$	1/4
平面亂排	3/8	$\frac{3l}{10l_c}$ $l - \frac{5l_c}{6l}$	$(l \leq \frac{5}{3}l_c)$ $(l \geq \frac{5}{3}l_c)$	1/3
立體亂排	1/5	$\frac{7l}{20l_c}$ $l - \frac{5l_c}{7l}$	$(l \leq \frac{10}{7}l_c)$ $(l \geq \frac{10}{7}l_c)$	1/6

2.9 韌性指數

一般混凝土與纖維混凝土的最大區別在於韌性，韌性是以能量的觀點來量測材料破壞過程所需的功 [43]，一般以抗壓試驗或抗張撓曲破壞試驗量測荷重-變位 (load-deflection) 或應力-應變曲線下 (stress-strain) 的面積，並計算初裂強度 (first crack strength)、韌性指數 (toughness index) 與殘留應力 (residual strength)。韌性指數的計算方式如下式：

$$I_n = \frac{n+1}{2} \delta \quad (2.34)$$

式中 δ ：表混凝土開裂後之變位。ASTM C-1018 中由三彎點載重 (third-point bending) 梁試驗求得如圖 2.6 之荷重-變位曲線，並定義韌性為吸收能量產生變位所做的功。

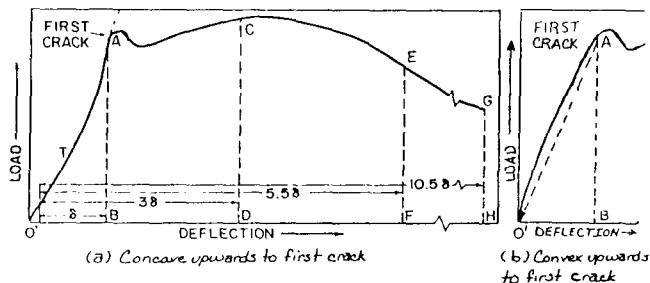


圖 2.6: 荷重-變位曲線重要特徵

2.10 乾縮的機理

對混凝土而言，若發生不當的乾縮，則可能造成混凝土構件的破裂或翹曲變形，混凝土係由水泥漿與骨材所組成，而水泥漿體則由固態水泥膠體(cement gels)及無數的孔隙(capillary pores)所組成，孔隙乃是影響混凝土乾縮相當重要的因素之一。在水泥水化的過程中，拌合水所佔之體積隨著水化程度逐漸被C-S-H膠體所填充，但因拌合水所佔有的空間並不能被水化膠體完全填滿，而形成孔隙(Porosity)，其體積約佔水泥膠體體積之40~55%。水泥漿體中之孔隙大概可分為二種[19.10.44]：

1. 毛細管孔隙(capillary pores): 孔徑大於 100\AA ($1\text{\AA}=10\text{mm}^{-4}$)，大部份是由水所填充的空間而形成，體積視水灰比而定，形狀不定，含有游離水或水蒸氣。
2. 膠體孔隙(gel pores): 其孔徑小於 100\AA ，為C-S-H膠體內的結晶水，其數量視水化程度而定，含有可蒸發水(evaporable water)，即吸水或層間水。

一般而言，混凝土中之骨材因乾燥所產生之收縮，相當細微甚至沒有，因此混凝土乾燥收縮現象的產生，主要是因硬固水泥漿體內部水分

的喪失而導致混凝土的變形。但混凝土乾縮體積並不等於所排出水量的體積，因為最初水份是由漿體內之大孔即毛细管孔隙失去，其所排出的遊離水 (free water) 僅會造成非常微量的收縮，對混凝土的乾縮影響不大，此部份乾縮行為之相對濕度約在 95% 以上。當大量水份由漿體內失去，才造成真正混凝土乾燥收縮的發生，此時之相對濕度約在 45~95% 之間。然空氣中之濕度在 10~45% 時，其 C-S-H 膠體間之吸附水被排出，乾縮速率受到影響，使得膠體體積產生變動，而引起混凝土之乾縮。而當相對濕度在 0~10% 範圍時，C-S-H 膠體開始失去結晶水，而產生極大的乾縮現象。

混凝土是由多種材料組合而成的複合材料，再加上周遭環境的影響，使得影響混凝土乾縮之因素變的相當的複雜 [10,13]。以外界環境之溫濕度影響為最大，溫度增減與相對濕度的改變會直接導致混凝土體積膨脹與收縮外，亦會促使混凝土內部水分的移動與分佈，而造成混凝土乾縮與膨脹的現象產生。如果將已經乾燥的混凝土若再將其置於潮濕的環境中，就會再產生膨脹的現象，但即使將乾縮後之混凝土長期的浸在水中，其膨脹量也不可能完全恢復先前收縮時的體積，遭受到週期性的反覆乾濕作用時，混凝土仍會接近完全乾燥所引起的收縮量。

雖然水泥量、骨材含量以及外界溫濕度皆與混凝土乾縮有密切的關係，混凝土的水灰比越高其乾縮量越大，是因為混凝土的拌合水量超過其水化所需之水量時，多餘之水量在混凝土中佔有部份的體積，而以孔隙的型態存在混凝土中，水灰比越高所產生之孔隙體積或數量會越多。當空氣之相對濕度在 45% 以上時，混凝土因孔隙的失水而產生乾縮的現象。

以 20 年的乾縮量而計，在 14 天內約有 14~34% 的乾縮量發生，在 90 天內約有 40~80% 的乾縮量，在 365 天內約有 66~85% 的乾縮量發生。乾縮與齡期的關係 [16] 可表為：

$$\varepsilon_{sh} = (\varepsilon_{sh})_{lim} (1 - \exp^{-\beta t}) \quad (2.35)$$

式中 $(\varepsilon_{sh})_{lim}$ 為試驗中最大的乾縮量，Arutiunian 建議 $\beta=0.0085\sim 0.01$, Kruml 建議 $\beta=0.025$ ACI Committee 209 [18,44], 為一般較方便的近似的預測方

式,其公式如下:

$$\varepsilon_{sh} = \frac{t}{35 + t} (\varepsilon_{sh})_{lim} \quad (2.36)$$

2.11 硫酸鹽類侵蝕機理

硫酸鹽類侵蝕是一非常雜的過程,其可能導致其他的反應,根據實驗室及經驗得知硫酸鹽與 C_3A 含量有關[19,10]。一般混凝土抵抗化學侵蝕的能力,通常都較低,而且有很多的化學藥劑會對混凝土產生侵蝕破壞的作用,因此當混凝土暴露在惡劣的環境中,則易導致混凝土使用年限的縮短。

一般卜特蘭水泥長時期暴露在超過1000ppm之硫酸鹽溶液中,容易產生惡化而有膨脹、龜裂、強度與勁度損失等現象產生,此情形謂之硫酸鹽侵蝕。硫酸鹽類對混凝土所形成的侵蝕環境,一般是由多種的鹽類併存於地下水或海水中,並非以單純的型態存在,且須透過溶液型的滲透方式才能侵入混凝土,亦需超過定量才會對混凝土造成危害。一般混凝土很少受到乾固化學物質的侵蝕,但若其溶解於水中,再加上乾濕反覆循環作用,則混凝土將很快地被侵蝕。

混凝土屬多孔易脆的材料,容易因毛細管作用及滲透作用受到外界化學物質的侵蝕,加上不當的設計與施工,及使用不當之材料,而產生大小不規則的裂縫,再經過外界有害物的滲入而與混凝土的成分(如 C_3A 、 C_4AF 、鈉及鉀等)產生膨脹反應,而造成破裂,導致一連串的二次反應(secondary processes)發生,這些情形會使混凝土受侵蝕的程度更形嚴重。

混凝土的水化產物氫氧化鈣 $Ca(OH)_2$ 屬於高度溶解物,很容易溶解於水中(特別是水中含有二氧化碳時),因此當受到水份的滲入,再藉著毛細管作用或水份的蒸發,皆可將溶解物析出結構體外,造成所謂的“白華”現象。基本上氫氧化鈣之溶解並不會產生不良的反應,然而由於氫氧化鈣被溶解而造成混凝土孔隙的增加,使得混凝土內部孔隙增加,因此製造外界有害物質侵蝕的機會。由於混凝土中之水泥為高鹼材料,

表2.2: 土壤與水中所含不同濃度之硫酸鹽對混凝土作用之程度

硫酸鹽對混凝土作用程度	土壤試樣所含可溶性硫酸鹽 SO_4^{2-} 含量(%)	水溶液中硫酸鹽 SO_4^{2-} 含量(ppm)
可忽略	0~0.1	0~150
少量	0.1~0.2	150~1000
相當多	0.2~0.5	1000~2000
非常嚴重	0.5以上	2000以上

因此一旦水中含有酸離子(H^+)或受到外界惡劣環境的侵蝕，則酸性中和性剝蝕作用必將發生，此時氫氧化鈣將被溶解並與其它有害物質結合，而發生鹽類溶出或結晶的現象產生，進而侵蝕混凝土或使之龜裂剝落與崩壞。

在混凝土的化學侵蝕中，以硫酸鹽類的侵蝕所導致混凝土破壞的影響最大。一般混凝土受到硫酸鹽侵蝕後，其表面上常會起鱗片及整片剝落的現象，而且硫酸鹽侵蝕會隨著時間的不同而有不同的膨脹現象。而水的滲透作用無疑是造成此病變的主因，因此為了防止硫酸鹽類侵蝕的發生，一般是避免水直接的接近為佳，因為對混凝土較少受到乾固化學物質的侵蝕。一般規範均採取減低水灰比、適當搗實及養護條件來降低大孔隙的比率。而ACI規範係採取低水灰比、添加波索蘭材料、或限制潛在有害物含量的策略來達成；其次水泥中之鋁酸三鈣(C_3A)的含量若過高，則混凝土很容易受到硫酸鹽類的侵蝕而破壞，因此為防止或減少硫酸鹽類對混凝土結構物的侵蝕破壞，水泥中之 C_3A 含量應越低越好。

2.12 目前國內外研究結果

自1960年來纖維混凝土有了較突破的進展，因為高性能纖維的研究發展有了相當的進步，在過去五十年間，由於新型的人造纖維日新月異，提昇了強度、耐熱性、抗化學侵蝕等優點，而在許多新型的纖維中，碳纖維是最具競爭的一種。

M. A. Ali[21]為碳纖維水泥複合材料的早期研究學者，其主要探求以PAN系碳纖維在基質(matrix)間的排列情形以巨觀的力學性質測知非軸向(uniaxial)排列較蓆式(mat)排列的破裂模數為高，相同的拌合方式碳纖維比石棉纖維的破裂模數為高，但抗衡能力僅些許的提昇。

B. K. Larson[20]以微觀分析比較不同摻料在界面破壞(interfacial failure)與黏著(adhesion)的關係，其研究結果為乳液(latex)增碳纖維與基質的黏著力為最好，可增加韌性100%；以熱水養護CFRC比一般養護CFRC可提抗彎強度40%。

Shigeru Furuakwa[23]研究長碳纖維(long carbon fiber)及不連續碳纖維(chopped carbon fiber)的撓曲強度，並添加爐石粉(slag)及矽灰(silica fume)改善工作度，依可工作度的纖維體積比；長碳纖維為0.3%~0.5%間，不連續碳纖維為3%以下。

Yoshihiko Ohama[26,27,28]對碳纖維水泥質材料的研究頗多，其研究顯示以40%矽灰摻入量為碳纖維的有效分散劑，可增加碳纖維水泥砂漿的流度值；碳纖維拌合長度3mm比10mm長度為佳，因纖維長度越長其吸水(water absorption)的可能越高，纖維含量與撓曲強度約正比的關係；碳纖維加入鋼絲網混凝土內可增加裂縫的抵抗，在同應力下使裂縫寬度更小，並增加50%韌性。

Ziad Bayasi[29,30]認為用小直徑的纖維可有效阻止大裂縫的發生，並建議矽灰為碳纖維有效分散劑，而且碳纖維為最有效改善混凝土張力強度的纖維。Parviz Soroshian[29]認為碳纖維的加入對抗壓強度貢獻較少，若以熱水養護(76.4~81.6°C)對撓曲強度的貢獻頗多，尤其纖維含量增加時越明顯。

Shigeyuki Akihama[22,24,25]為鹿島資深研究人員，其認為纖維含量

表2.3: 文獻比較—纖維性質

文獻作者	纖維直徑 (μm)	纖維長度 (mm)	纖維密度 (g/cm^3)	抗張強度 MPa	彈性係數 MPa
M.A. Ali	7.8	Mat	1.76	286	27500
M.A. Ali	7.5	Mat	1.95	204	38700
Shigeyuki Akihama	14.5	10	1.63	78	3800
Shigeru Furukawa	18.0	10	1.63	78	3800
Yoshihiko Ohama	14.5	3,10	1.63	85	4000
Nemkumar Banthia	18.0	6	1.63	85	4000
Parviz Sorouhian	12.0	1.6	1.63	42	28000
B. K. Larson	18.0	1.7	—	57	—
S B. Park	14.5	10	1.63	78	3800
S B. Park	6.8	10	1.78	350	35000
本研究所採用	7.0	6~36	1.8	352	23000

越多則單位重量呈線性遞減、纖維有效係數亦遞減，纖維含量越多則撓曲強度遞增、張力應變 (tensile strain) 亦遞增。其研究顯示碳纖維水泥砂漿在熱水中養護強度不減少，推測可承受高溫耐久性。

碳纖維強化水泥材料的研究，雖然在1970年就開始，但僅限於碳纖維水泥砂漿 (Carbon Fiber Reinforced Mortar) 的研究，推展至碳纖維混凝土 (Carbon Fiber Reinforced Concrete) 的研究並無文獻可供參考與應用。國內對碳纖維混凝土的研究亦相當欠缺，無明確的資料可循，欲推展碳纖維混凝土的應用，基礎的研究工作是不可忽略的。

表 2.4: 文獻比較二 - 試驗變數

文獻作者	試體種類	試驗變數	研究項目
M.A. Ali 1972	水泥漿	水灰比(0.35~0.8) 齡期(7天~360天) 纖維體積比3%~4% 纖維長度(Mat)	破裂模數 張力強度
Shigeyuki Akiham 1985	水泥砂漿	水灰比(0.62~1.13) 齡期(7天~150天) 纖維體積比2.5%~3% 纖維長度(10mm)	破裂模數 彎曲應力 尺寸效應
Yoshihiko Ohama 1985	水泥砂漿	水灰比(0.3~0.35) 纖維體積比3%~5% 纖維長度(3mm,10mm) 減水劑6%,砂灰40%	初裂載重 韌性 衝擊載重
Parviz Sorouahian 1988	水泥砂漿	水灰比(0.3~1.13) 纖維體積比3%.5% 四種養護情況 纖維長度(1.5mm,3mm) 強塑劑3.2%,砂灰23%	撓曲應力 張力強度 衝擊強度
S. B. Park 1990	水泥砂漿	水灰比(0.3~1.13) 纖維體積比0%~2% 纖維長度(10mm) 強塑劑,砂灰,飛灰	撓曲應力 抗壓強度 張力強度
本研究所採用	水泥砂漿 混凝土	水灰比(0.51~0.67) 纖維體積比0%~3% 纖維長度(6mm~36mm) 養護情況 齡期(7天~180天).	抗壓強度 抗彎強度 抗劈裂強度 韌性指數 乾縮,耐久性

第三章

試驗計劃

3.1 試驗材料

1. 拌合水：與一般混凝土相同，適於飲用的水均可作為碳纖維混凝土的拌合水。
2. 水泥：台灣水泥公司品牌卜特蘭第一型水泥，其化學分析詳表3.1。
3. 粗骨材：本試驗採用取自新竹縣頭前溪之天然卵石製成碎石，經過篩分析、清洗後使用，其最大粒徑為3/4”，其基本性質詳表3.2, 表3.3。
4. 細骨材：本試驗採用取自新竹縣頭前溪之河砂，其篩分析詳表3.4。
5. 碳纖維：台塑公司生產之台麗碳絲C12K33型，其規格如表3.5。
6. 摻料：本研究所添加之摻料為台灣基利士公司GRACE TYPE G強塑劑。

表3.1: 水泥之化學成分與物理性質

項 目	名 稱	含量(%)	ASTM C-150
化學成分	氧化矽 (SiO_2)	20.68	—
	氧化鋁 (Al_2O_3)	5.41	—
	氧化鐵 (Fe_2O_3)	3.23	—
	氧化鈣 (CaO)	63.95	—
	氧化鎂 (MgO)	1.98	—
	氧化硫 (SO_3)	2.43	≤ 5.0
	燒失量 (LOI)	0.90	≤ 3.5
物理性質	細度 (cm^2/g)	3310	≥ 2800
	比重 (25°C)	3.14	—
	熱壓膨脹 (%)	0.08	≤ 0.08
	初凝	2:48	$\geq 1hr$
	終凝	5:35	$\leq 10hr$

表3.2: 骨材的基本性質

物理性質	粗骨材	細骨材
比重	2.51	2.60
SSD 含水率	2.53%	3.0%
含水量	1.29%	4.82%
吸水率	1.24%	—
單位重	1546	—
細度模數	—	2.70
最大粒徑	3/4"	—
含泥量		6.80%

表3.3: 粗骨材篩分析結果

篩號	留篩重 (g)	留篩 (%)	累計留篩 (%)	通過率 (%)	規範通過率 (%)
1"	0	0.00	0.00	100.00	100
3/4"	390	13.00	13.00	87.00	90 - 100
1/2"	1800	60.00	73.00	27.00	-
3/8"	572	19.07	92.07	7.93	20 - 50
#4	226	7.53	99.60	0.40	0 - 10
底盤	12	0.40	100.00	0.00	—
合計	3000	100.00	377.67		

表3.4: 細骨材篩分析結果

篩號	留篩重 (g)	留篩 (%)	累計留篩 (%)	通過率 (%)	規範通過率 (%)
3/8"	0.0	0.00	0.00	100.00	100
# 4	5.4	0.59	0.59	99.41	95 - 100
# 8	165.8	18.08	18.67	81.33	80 - 100
# 16	185.1	20.18	38.85	61.15	50 - 85
# 30	158.4	17.27	56.12	43.88	25 - 60
# 50	134.8	14.70	70.82	29.18	10 - 30
# 100	125.5	13.68	84.50	15.50	2 - 10
底盤	142.2	15.50	100.00	0.00	—
合計	917.2	100.00	269.55		

表3.5: 台麗碳絲C12K33型品質規格表

每束纖維	12,000 條
單位重量	0.82 g/m
單纖直徑	7 μ
密度	1800 kg/m ³
強度	352 kg/mm ² (500 KSI)
彈性模數	23000 kg/mm ² (33 MSI)

3.2 主要試驗儀器及設備

1. 萬能試驗機：日本Shimadzu 100噸萬能油壓試驗機，使用於測定碳纖維水泥砂漿及碳纖維混凝土之力學性質。
2. 拌合機：水泥砂漿使用符合ASTM C305-65之小型拌合機，附有拌合槳及拌合碗等設備，混凝土則採用符合CNS 7102鼓型電動混凝土拌合機，容量為 $1m^3$ 。
3. 流動桌：符合ASTM C230及CNS 1012之流動桌，用以測定水泥砂漿之工作度。
4. 震動台：符合ASTM及CNS之規範，用以搗實試體使用。
5. 內部震動棒：符合ASTM 1230之規範，用以搗實試體使用。
6. 恆溫恆溼櫃：用以養護不同溫溼度的試體使用。
7. 測微計量器：量測混凝土乾縮試體使用。
8. X-Y記錄器：記錄荷重及中央變位之訊號。
9. 資料擷取系統：採用UCAM-5A型，用以應變計之數據。
10. 試體模：包括50mm立方鑄鐵模， $40 \times 40 \times 160$ mm砂漿抗彎試體模，啞鈴形之抗拉試體模； $\phi 10 \times 20$ cm圓柱試體模、 $10 \times 10 \times 38.3$ cm之抗彎試體模、 $7.5 \times 7.5 \times 30$ cm之乾縮模。
11. 電子秤：精度可達0.01公克，並有歸零裝置。
12. 台秤、坍度儀及比重瓶。

表 3.6: 碳纖維水泥砂漿試驗變數

試體種類	水泥砂漿(S/C=2.75)
水泥	台泥第一型水泥
標準砂	ASTM C109(抗壓)及C190(抗拉)
碳纖維	台塑台麗碳絲C12K33型
水灰比	0.51
纖維長度	12mm,24mm,36mm
纖維含量	0%,1%
齡期	7,14,28天
養護情況	23°C,95%RH

3.3 試驗變數

碳纖維水泥砂漿(CFRM)試驗變數詳如表3.6，碳纖維混凝土(CFRC)試驗變數詳表3.7。

3.4 配比設計

3.4.1 碳纖維水泥砂漿(CFRM)

以台泥第一型水泥和標準砂，依 ASTM-109 及 CNS 1010 規範所規定之配合比例，水泥：砂 = 1:2.75，並選擇 0.51 的水灰比依下式進行配比設計。

水泥單位重(γ_c)3.15, 水單位重(γ_w)1.0, 標準砂單位重(γ_s) 2.65。

$$(1 - V_f)V = V_W + V_c + V_s$$

表 3.7: 碳纖維混凝土之試驗變數

試驗變數	說	明
纖維長度	6mm,12mm,15mm,24mm,36mm	
纖維含量	0%,1%,2%,3%	
水灰比	0.58,(3500psi),0.63(3000psi)及0.67(2500psi)等三種	
齡期	7,14,28,56,90,180天等六種	
試體尺寸	φ 10 × 20cm 圓柱試體、10 × 10 × 38.3cm 抗彎試體	
養護情況	23°C,95%RH	

$$= \frac{(W/C)C}{\gamma_w} + \frac{C}{\gamma_c} + \frac{2.75C}{\gamma_s} \quad (3.1)$$

式中V表材料體積,V_f表纖維體比,

$$C = \frac{(1 - V_f)V}{(W/C) + 1.3561} \quad (3.2)$$

3.4.2 碳纖維混凝土 (CFRC)

碳纖維混凝土製造方法，著重於配比正確及拌合均勻，本節研究與製造纖維混凝土有關的問題，包括碳纖維混凝土配比設計及灌製的方法。碳纖維混凝土配比設的基本考慮為工作度、強度及耐久性；工法及組成材料會影響CFRCV_f值的多寡。碳纖維混凝土目前無任何規範可供參考，因此參照ACI 211.1規範作為設計的基礎，採用傳統拌合方式，纖維體積比介於1%~3%之間，碳纖維的加入體積量取代部份骨材為基本概念，因工作度需要調整用水量及水泥用量，再經試拌與調整配比後，求得碳纖維混凝土配比。控制組混凝土 (plain concrete) 的預估強度以

175kg/cm²、210kg/cm²與245kg/cm²等三種強度。碳纖維混凝土的配比設計的方法如下：

1. 確定碳纖維混凝土的目標強度。
2. 選定工作度所需漿量及摻料含量。
3. 決定最大骨材粒徑3/4”。
4. 決定用水量。
5. 計算水泥、粗骨材、細骨材用量。
6. 骨材吸水率、表面含水量調整拌合用水量。
7. 試拌與調整配比。

碳纖維混凝土材料計算如表3.8(不考慮摻料)及3.9(摻入強塑劑)。重量百分比 W_f 與體積百分比 V_f 的換算如下式：

$$W_f = \frac{V_f D_f}{V_f D_f + (1 - V_f) D_m} \times 100\% \quad (3.3)$$

式中 D_f, D_m 表纖維,混凝土密度,如碳纖維混凝土體積比為1%時,則。

$$W_f = \frac{0.01 \times 1800}{0.01 \times 1800 + (1 - 0.01) \times 2300} \times 100\% = 0.78\%$$

3.5 試驗方法

3.5.1 拌合方式試驗

拌和方式一(溼拌)

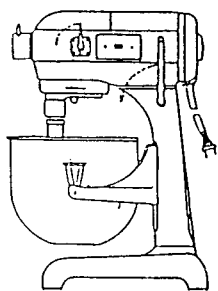
1. 以溼布塗抹拌和碗,然後倒入水,再倒入水泥。

表 3.8: 碳纖維混凝土配比計算一

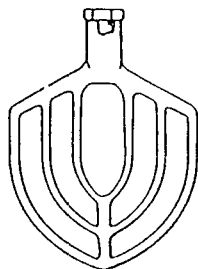
水灰比	體積比 (%)	纖維 長度	水 (kg/m^3)	水泥 (kg/m^3)	粗骨材 (kg/m^3)	細骨材 (kg/m^3)	碳纖維 (kg/m^3)
0.58	0%	—	203	350	974	775	—
0.58	1%	6mm	284	490	760	644	18
0.58	1%	12mm	288	497	760	644	18
0.58	1%	24mm	295	508	736	624	18
0.58	1%	36mm	296	510	735	622	18
0.58	2%	6mm	375	646	552	468	36
0.58	2%	24mm	384	662	532	451	36
0.58	2%	36mm	387	667	526	446	36
0.58	3%	6mm	480	828	314	266	54
0.58	3%	24mm	485	836	303	257	54
0.58	3%	36mm	487	846	296	251	54
0.67	0%	—	203	302	974	817	—
0.67	1%	24mm	284	424	789	669	18
0.67	1%	36mm	288	430	781	662	18
0.67	2%	24mm	382	570	576	488	36
0.67	2%	36mm	387	578	565	479	36
0.67	3%	24mm	483	721	356	302	54
0.67	3%	36mm	486	725	350	297	54

表 3.9: 碳纖維混凝土配比計算二

水灰比	體積比 (%)	水 (kg/m^3)	水泥 (kg/m^3)	粗骨材 (kg/m^3)	細骨材 (kg/m^3)	碳纖維 (kg/m^3)	強塑劑 (kg/m^3)
0.58	0%	203	350	974	775	—	—
0.58	1%	263	450	806	683	18	6.75
0.58	2%	340	586	627	531	36	8.79
0.58	3%	420	724	442	375	54	10.86
0.63	0%	203	322	974	800	—	—
0.63	1%	263	418	820	695	18	6.27
0.63	2%	340	540	647	548	36	8.10
0.63	3%	420	667	467	396	54	10.01
0.67	0%	203	302	974	817	—	—
0.67	1%	263	392	832	704	18	5.88
0.67	2%	340	507	661	560	36	7.61
0.67	3%	420	627	485	411	54	9.41



Overall View



Mixing Blade

圖 3.1: 水泥砂漿拌合機及拌合葉片

2. 以中速拌和30秒，並在30秒內再加入砂拌和，停留90秒。
3. 以中速拌和2分鐘，並在30秒內再加入碳纖維拌和，停留90秒。
4. 最後以中速拌和3分鐘。
5. 灌製試體¹。

拌和方式二(乾拌)

1. 以溼布塗抹拌和碗，再倒入砂及碳纖維。
2. 以中速拌和5分鐘，再將水及水泥加入，停留90秒。
3. 最後以中速拌和3分鐘。
4. 灌製試體。

註¹: 此法除第3項-加入碳纖維拌和外...，其與ASTM所規定相同。

3.5.2 水泥砂漿抗壓試驗

1. 依ASTM C109及CNS 1010、ASTM C39，CNS 1032規定進行試驗，試樣為50mm立方體。
2. 拆模後置於23°C，95%RH環境中養護，至試驗齡期7天、14天、28天時取出，以每分鐘70~420kg/cm²量測其極限荷重，並計算強度。

3.5.3 水泥砂漿抗拉試驗

1. 依CNS 1011及ASTM C190所規定之抗拉規範進行試驗，試體呈8字形，中央最小斷面為6.45cm²。
2. 拆模後置於23°C，95%RH環境中養護，至試驗齡期7天、14天、28天時取出。將試置入水泥砂漿抗拉試驗機之夾頭內，以每分鐘270±10kg之負荷連續施力，直至試體破裂，量測其最大荷重及破壞處之面積，計算抗拉強度。

3.5.4 水泥砂漿抗彎試驗

1. 依ASTM C348、ASTM C349及CNS 1234、規範進行三彎點載重試驗，試體尺寸為40mm×40mm×160mm。
2. 拆模後置於23°C，95%RH環境中養護，至試驗齡期7天、14天、28天時取出，以每分鐘270±10kg的加壓速率量測其極限荷重。計算抗彎強度。 $f_r = \frac{My}{I} = \frac{PL}{bd^2}$

3.5.5 坍度試驗

1. 依ASTM C-143規範使用標準型試模。

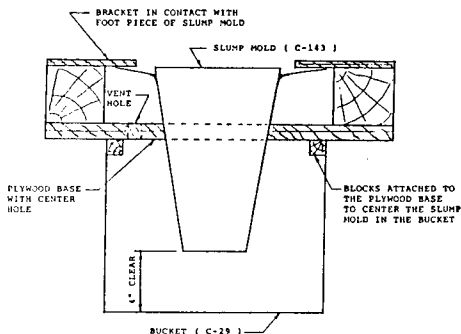


圖 3.2: 反坍度錐試驗儀器配置

2. 將試樣分三層置入試模中，每層分別使用標準搗棒搗擊 25 次。
3. 刮去模頂多餘之試樣並鏟平。
4. 將試模垂直移去，量測試模之高度與塌後試體的垂直高差為坍度。

3.5.6 反坍度錐試驗

1. 依 ASTM C-995 規範，使用 ASTM C-143 坍度錐及 ASTM C-29 $1ft^3$ 容器，並選擇符合 ASTM C-31 或 ASTM C-192 搗棒直徑為 25mm 之震動棒。
2. 將試樣分三層置入試模中；啟動振動棒同時計時。
3. 當坍度錐內已無試樣時，記錄時間及振動棒規格。

3.5.7 單位重量試驗

1. 依 ASTM C-138 及 CNS 1177 規定試驗。

2. 將試樣分三層澆注於測筒內，每層分別使搗棒搗實25次。
3. 以木槌拍擊測筒10-15次以清除空隙。
4. 量測重量並計算單位重： $W = \frac{W_2 - W_1}{V}$ ，W：單位重， W_1 ：容器重， W_2 ：總重，V：容器體積，

3.5.8 抗壓強度試驗

1. 依ASTM C-39，CNS 1230規定進行試驗。
2. 將試樣分二層置入 $\phi 10 \times 20$ cm圓柱試體模內，搗實後靜置24小時折模。
3. 折模後置於23°C，95%RH環境中養護，至試驗齡期7、14、28、56、90、180天時取出拭乾水份，以石膏蓋平，以1.4~3.4kg/cm²/sec(20~50psi/sec)加壓速率量測其極限荷重並計算抗壓強度。

3.5.9 抗劈裂試驗

1. 依ASTM C-496，CNS 3801規定進行試驗。
2. 試樣尺寸為 $\phi 10 \times 20$ cm圓柱試體，折模後置於23°C，95%RH環境中養護，至試驗齡期7、14、28、56、90、180天時取出，以7~14kg/cm²/min(100~200psi/min)加壓速率量測其極限荷重。
3. 抗劈裂強度計算

$$f_{ct} = \frac{2P}{\pi ld} \quad (3.4)$$

f_{ct} ：劈裂強度，P：極限荷重，l：試體長度，d：試體直徑。

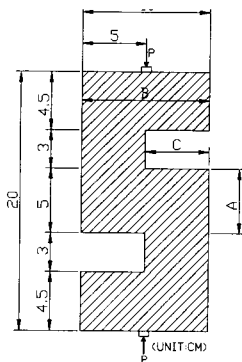


圖3.3: 直剪試體示意圖

3.5.10 抗彎強度試驗

1. 依 ASTM C-78、CNS 1230 及 CNS 1233 規範進行三彎點載重試驗。
2. 試樣尺寸為 $10 \times 10 \times 38.3$ cm 拆模後置於 23°C ，95% RH 環境中養護，至試驗齡期 7、28、56、90、180 天時取出以 $8 \sim 12 \text{ kg/cm}^2/\text{min}$ ($125 \sim 175 \text{ psi/min}$) 加壓速率量測其極限荷重。
3. 抗彎強度計算

$$f_r = \frac{My}{I} = \frac{PL}{bd^2} \quad (3.5)$$

f_r ：劈彎強度，P：極限荷重，l：荷重間距，b：試體寬度，d：試體深度。

3.5.11 直剪強度試驗

- 1 參照 J. Watkins. [31,32,13] 如圖 3.3 所示，訂作試體模。
2. 拆模後置於 23°C ，95% RH 環境中養護，至試驗齡期 7、28、56、90、180 天時取出拭乾水份，以 $7 \sim 14 \text{ kg/cm}^2/\text{min}$ ($100 \sim 200 \text{ psi/min}$)

加壓速率量測其極限荷重，計算直剪強度 $f_v = \frac{P}{A}$ 。

3.5.12 彈性模數與卜松比試驗

1. 依 ASTM C-469 規範進行試驗，試體尺寸為 $\phi 10 \times 20\text{cm}$ 圓柱試體。
2. 以石膏蓋平，試體縱軸方向中點，黏貼雙向應變計(日製 TML-PC10)後，以 $2.2 \sim 2.8\text{kg/cm}^2/\text{sec}$ ($30 \sim 40\text{psi/sec}$) 加壓速率加載。
3. 以 UCAM-5A 型資料擷取系統，記錄應變計之數據。
4. 計算

$$E = \frac{S_2 - S_1}{\epsilon_2 - 0.000050} \quad (3.6)$$

式中 E：正割彈性係數(chord modulus of elasticity)。S₂：極限應力的 40%、S₁：應變於 50×10^{-6} 時的應力， ϵ_2 ：S₂ 時的縱向應變。

$$\mu = \frac{\epsilon_{t2} - \epsilon_{t1}}{\epsilon_2 - 0.000050} \quad (3.7)$$

式中 μ ：卜松比(Poisson's ratio)， ϵ_{t2} ：S₂ 時的側向應變、 ϵ_{t1} ：S₁ 時的側向應變。

3.5.13 韌性指數

1. 依 ASTM C-1018 規範進行試驗。
2. 本試驗與抗彎試驗同時進行，並以 X-Y 記錄器記錄荷重及試體中央變位之訊號。
3. 計算韌性指數 I_5 、 I_{10} 及 I_{20} 。

$$I_5 = \frac{A_{3\delta}}{A_\delta} \quad (3.8)$$

$$I_{10} = \frac{A_{5.5\delta}}{A_{\delta}} \quad (3.9)$$

$$I_{20} = \frac{A_{10.5\delta}}{A_{\delta}} \quad (3.10)$$

式中 A_{δ} ：表混凝土開裂後之荷重-變位線下的面積。 $A_{3\delta}$ ：變位為開裂後之3倍時，荷重-變位線下的面積。 $A_{5.5\delta}$ ：變位為開裂後之5.5倍時，荷重-變位線下的面積。 $A_{10.5\delta}$ ：變位為開裂後之10.5倍時，荷重-變位線下的面積。

3.5.14 乾縮試驗

1. 依ACI Committee 209及CNS 1236規範製作 $7.5 \times 7.5 \times 28\text{cm}$ 之乾縮試體。
2. 拆模後置於 23°C ，95% RH 環境中養護28天後取出拭乾水份，稱重及量測長度後置於常溫 ($18^{\circ}\text{C} \sim 24^{\circ}\text{C}$ ，50%~65% RH) 環境中於第1、3、7、14、28、56、90、180天時量測長度及重量。
3. 計算乾縮應變， $\epsilon_s = \frac{\delta_0 - \delta_t}{L}$ 式中 δ_0 表第一天的讀數， δ_t 表第 t 天的讀數， L 表試體長度。

3.5.15 抗硫酸鹽試驗

1. 參考ASTM C88及CNS 1167規範進行試驗。
2. 每公斤水加350克脫水硫酸鈉 (Na_2SO_4)，使溶解成飽和溶液，比重約為1.151~1.174之間。
3. 試體灌製並養護28天後取出，浸置飽和硫酸鈉溶液28天後，置於 110°C ，95% RH 中之烘箱中24小時，如此反覆5次循環。後再浸置飽和硫酸鈉溶液24天後，量測重量及測試強度。

3.5.16 高溫環境效應試驗

1. 試體灌製並養護28天後取出,置於75°C,95%RH中之恆溫恆溼櫃中養置。
2. 於7天、14天、28天時測試抗壓強度。

3.5.17 電子顯微鏡觀察

1. 將破壞試片,浸泡甲醇,以終止水泥水化。
2. 置於真空皿內,以馬達抽真空,以Epoxy固定於圓盤上。
3. 將試樣置入sputter coater抽真空,同時表面鍍白金處理,俾使導電。
4. 將試樣置於電子顯微鏡內,進行掃描觀測,並拍攝其微觀結構。

表 3.10: 試驗項目表

試驗項目	參考規範	試體種類
拌合方式	ASTM C-31	水泥砂漿
抗壓試驗	ASTM C-109	水泥砂漿
抗拉試驗	ASTM C-190	水泥砂漿
抗彎試驗	ASTM C-348	水泥砂漿
坍度試驗	ASTM C-143	混凝土
反坍度錐試驗	ASTM C-995	混凝土
單位重試驗	ASTM C-138	混凝土
抗壓試驗	ASTM C-39	混凝土
抗劈裂試驗	ASTM C-496	混凝土
抗彎試驗	ASTM C-78	混凝土
直剪試驗	J. Watkins	混凝土
彈性模數	ASTM C-469	混凝土
卜松比	ASTM C-469	混凝土
韌性指數	ASTM C-1018	混凝土
乾縮試驗	ACI 209	混凝土
抗硫酸鹽試驗	ASTM C-88	混凝土
高溫環境效應試驗	S. Akihama	混凝土
電子顯微鏡觀察		水泥砂漿、混凝土

第四章

試驗結果與討論

4.1 新拌碳纖維混凝土

4.1.1 坍度與反坍度錐的關係

坍度試驗由美國 Chapman 氏於 1913 年所創，此法設備價廉、可移動且耐用，是所有量測工作度方法中最簡單者，迄今仍被廣泛使用，ASTM 將此方法納入 C-147 規範中。這種試驗雖適合做為品質控的目的，但對近零坍度及大坍度的混凝土並不適用。

Jim Shilstone 認為坍度只是稠度一種指標：Gray L. Vondran 以坍度試驗量測鋼纖維混凝土 (SFRC) 的工作度，其值約 0~51mm (0~2in)，並不適合於 SFRC。ACI Committee 544 [12] 建議纖維混凝土的工作度量測，使用反坍度錐試驗 (invert slump test)，已被美國材料試驗協會 (ASTM) 列入規範 C-995 中，其可視為研究位能 (potential) 的一種試驗，此試驗係利用振動棒，將標準混凝土坍度錐改變成壓實的平圓柱體的時間記錄，該試驗與實用上搗實碳纖維混凝土 (CFRC) 的方法可作比較，而且對稠度、流動度與可搗實度的變化亦較敏感，與現場工作度的評估有較合理的關係。

由試驗可知 CFRC 坍度試驗的結果與 Gray L. Vondran 的結果相似，坍度試驗不能準確的量測碳纖維混凝土 (CFRC) 的工作度，以反坍度錐

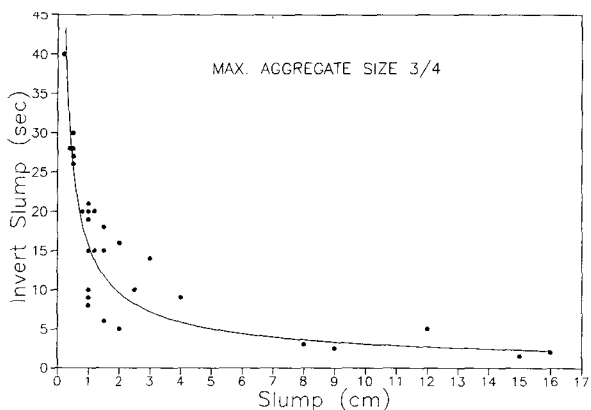


圖 4.1: 坍度與反坍度錐的關係

來量測可獲致較好的結果，由下表可知，反坍度錐在 3 秒內（坍度值大於 2.5cm），CFRC 具流動性，大於 3 秒（坍度值在 0.5cm ~ 2.5cm）以上時，皆不具流動性，反坍度錐在 3 秒 ~ 30 秒（坍度值在 1.5cm ~ 2.5cm）之間，可由振動方式搗實，大於 30 秒（坍度值在 0cm ~ 0.5cm）以上無法搗實。

由試驗結果知反坍度錐時間在 3 秒 ~ 9 秒（坍度值在 1.0cm ~ 2.5cm）之間，為較理想的可工作度，坍度與反坍度錐的關係如圖 4.1。

CFRC 反坍度錐與坍度對工作度之關係

反坍度錐(sec)	坍度(cm)	工作度
1~3	2.5以上	佳
3~9	1~2.5	中等
9~30	0.5~1	低
30以上	0~0.5	很低

Makita-VR280DL 振動棒規格

電壓	單相 110V
電流	5A
週波數	50 ~ 60HZ
振動數	12500 ~ 15000 VPM
消耗電力	460W

4.1.2 單位重量試驗

文獻 [10,11] 指出一般使用在路面、建築物及其他結構的混凝土，其單位重約在 $140 \sim 150 \text{pcf}$ ($2240 \sim 2400 \text{kg/m}^3$)，混凝土單位重的變化，依骨材的相對密度、輸氣量、骨材最大粒徑的影響，及水、水泥含量而定。

文獻 [8.9] 混凝土單位重可由其配比各種材料重量之總和而求得，並經試拌之檢核加以調整，若配比如不正確、拌合不均勻或材料析離，則所得之值將有偏差。

由表 3.9 中計算碳纖維混凝土的單位重，並與試驗值作一比較，所有結果均在 5% 以內，顯示配比設計與拌合方式仍可接受，試驗誤差值與纖維體積比及水灰比成正比，因為纖維體積比增加時，為了維持工作度，相對的用水量也增加，但過多的水份造成水份較易逸失，而影響單位重量。

4.1.3 拌合方式評估

ASTM C-31 及 C-192 對水泥砂漿及一般混凝土的拌合步驟有完整建議，CFRC 因為組成材料與一般混凝土不同，拌合方式的修正是必須的。Gray L. Vondran 對鋼纖維混凝土 (SFRC) 提出三種拌合方式，纖維先拌入 (before mixing)、後拌入 (after mixing) 及輸送過程 (during the batch sequence) 中拌入。

本研究拌合方式評估包含巨觀的力學性質及微觀的 SEM 分析，巨觀的力學性質比較乾拌與溼拌試體強度何者強度較高，用以推測何種方式能將碳纖維比較有效的分散在基質材料中，增加握裹面積提高強度。

表 4.1: 碳纖維混凝土單位重量試驗

水灰比	體積比 (%)	計算值 (kg/m^3)	試驗值 (kg/m^3)	誤差值 (%)
0.58	0%	2302	2307	0.02
0.58	1%	2227	2202	1.12
0.58	2%	2129	2110	0.89
0.58	3%	2050	1995	2.68
0.63	0%	2299	2304	0.22
0.63	1%	2221	2206	0.68
0.63	2%	2119	2111	0.38
0.63	3%	2039	1984	2.70
0.67	0%	2296	2301	0.21
0.67	1%	2215	2210	0.23
0.67	2%	2112	2104	0.38
0.67	3%	2030	1971	2.91

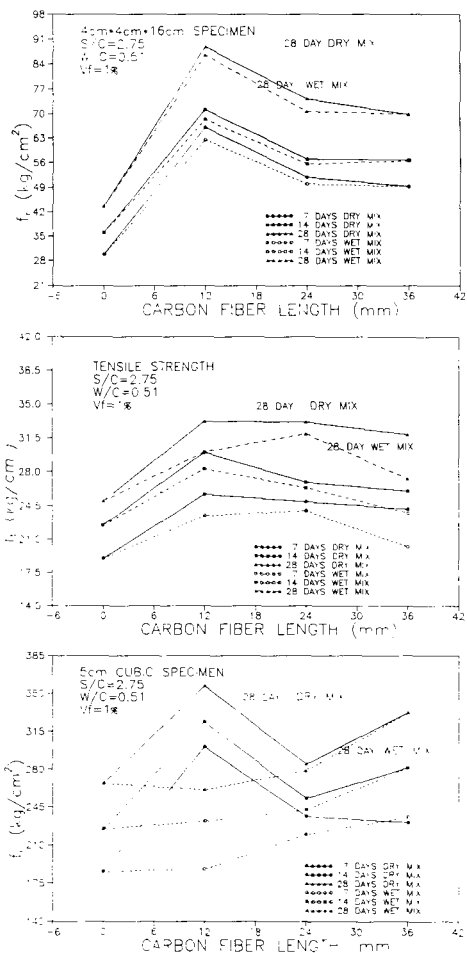


圖 4.2: CFRM 乾拌與溼拌試體強度

表 4.2: CFRM 乾拌／溼拌試體強度相對百分比

纖維長度	試驗種類	7 天	14 天	28 天
12mm	抗壓強度	160.21	139.60	136.91
24mm	抗壓強度	107.45	104.36	102.11
36mm	抗壓強度	97.92	90.23	84.66
12mm	抗拉強度	109.31	105.93	110.54
24mm	抗拉強度	103.91	102.20	103.85
36mm	抗拉強度	119.51	109.46	116.64
12mm	抗彎強度	105.69	104.01	102.60
24mm	抗彎強度	103.80	102.49	104.95
36mm	抗彎強度	100.12	100.57	101.33

註：水泥砂漿試體，每組試體數 3 個

碳纖維水泥砂漿 (CFRM)

由試驗結果得知：CFRM 抗拉及抗彎強度以 24mm 乾拌較佳；抗壓強度 36mm 的情形較不穩定，乾拌與溼拌的方式不易分辨，纖維長度超過 36mm 時，試體強度變異性較大。

由表 4.2 可比較出纖維長度在 12mm～24mm 之間乾拌的程序比溼拌具有較佳的效果，其原因如下：

1. 碳纖維成品每束約有 12,000 條碳絲，水若先與碳纖維接觸後，因為水的表面張力作用，在碳纖維間增加內聚力，碳纖維較不易分散。
2. 乾拌方式的優越性是因為骨材在拌和時，碳纖維之間內聚力較小，比溼拌更容易分散碳纖維，增加碳纖維接觸漿體面積。

SEM 觀測可看出乾拌試體（詳圖 4.3）比溼拌試體（圖 4.4）為佳，且碳纖維表面與纖維沾漿的情形，乾拌試體明顯的比溼拌試體為佳；乾拌試體



圖 4.3: SEM 照片:CFRM 乾拌方式碳纖維在基質中的情形



圖 4.4: SEM 照片:CFRM 溼拌方式碳纖維在基質中的情形

的碳纖維分散情形比溼拌試體好，且碳纖維的表面與基質的握裹均比溼拌為佳，所以提昇了CFRM的強度。

碳纖維混凝土 (CFRC)

G. Chiocchio 及 A.E. Paolini 指出拌合時添加強塑劑，應避免強塑劑在初期水化過程中為 C_3A 所吸附，應先讓部份 C_3A 先行水化，產生不易吸收強塑劑摻料的水化層後再添加強塑劑，如此可增加強塑劑之分散效果，達到更好之工作度。

為推廣碳纖維混凝土 (Carbon Fiber Reinforced Concrete) 的使用，拌合的機具及設備採用 ASTM C-305 之拌合鼓拌合，主要的基本成分有六種 (水、水泥、粗骨材、細骨材、碳纖維及強塑劑)，各成分拌合的程序，對 CFRC 的均勻性扮演著重要的角色。

ASTM 規範要求固定式拌合機的拌合容量在 $1m^3$ 內之拌合時間最少需 1 分鐘，每增加 $1m^3$ 的拌合量則增加 15 秒拌合時間，或是按其容量的比例增加拌合時間，拌合時期應從所有水泥和骨材在拌合鼓內算起，並將所有的水在 $1/4$ 的拌合時間內加入。在一般狀況下，約 10% 的拌合水應在固體材料加入前先置入鼓內，然後水應均勻加入固體材料中，但需留下 10% 的水直到所有其他材料均在鼓內再加入。

CFRC 的拌合程序，主要將碳纖維均勻的分散在混凝土中，由 CFRM 拌合方式的試驗結果，CFRC 拌合採用乾拌方式，藉骨材在拌合過程中將碳纖維分散；CFRC 與一般混凝土的組成材料略有不同 (碳纖維的拌入及高水泥含量)，為增加材料均勻的分佈，所以要延長其拌合時間；拌合的過程中先將 10% 的水與骨材拌合，再將碳纖維加入拌合；待纖維與骨材拌合均勻後，將水泥及 80% 水加入拌合，最後再將強塑劑及 10% 的水都加入拌和鼓中拌合；因為水泥含量較高，拌合前先將拌合鼓溼潤，可避免水泥漿粘附於拌合鼓內。

CFRC 的配比設計，因工作度不易而增加了漿量及摻料，硬化後 CFRC 的試體由目視可約略看出乾拌方式的拌合情形良好，再由 SEM 微觀 (詳圖 4.5 及圖 4.6) 分析，看出碳纖維在基質中分佈與黏握的情形比 CFRM 勻

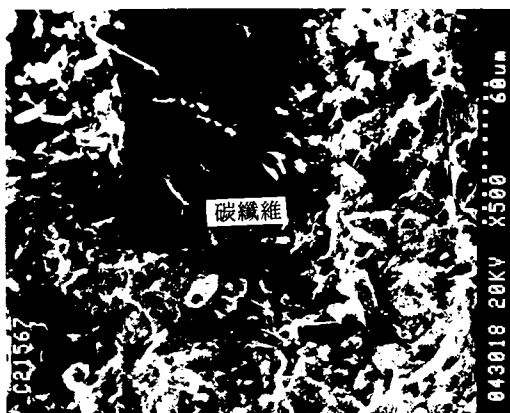


圖 4.5: SEM 照片:CFRC 乾拌方式碳纖維在基質中的情形一

均。

4.1.4 拌合水量與碳纖維體積比的關係

ACI 318 規範中指出,欲提高 5cm 之坍度,且維持相同強度,則須增加約 15% 之水泥漿量。水在水泥漿中之功能為提供水化作用,足夠使水泥完全水化之用水量是為最低用水量,而在不產生泌水(bleeding)或析離(segregation)現象下提供足夠工作度之用水量,為最大用水量。

CFRC 的工作度與拌合水量、纖維體積比(V_f)有關,纖維體積比越高,則所需拌合水量越多,拌合水量與纖維體積比具有線性的關係,如圖 4.7 所示,其式可表為:

$$W = 94.69V_f + 196.81 \quad (4.1)$$

式中 W 表用水量, V_f 表纖維體積比;拌合水量與體積比的變化較明顯,以相同工作度求得拌合水需水量相對百分比結果如下表所示,纖維體積比每增加 1% 時對 Plain 而言用水量增加 45%, $V_f=2\%$ 時拌合水量為 Plain 的 190%, $V_f=3\%$ 時拌合水量為 Plain 的 234%;不同水灰比拌合水量則無明顯

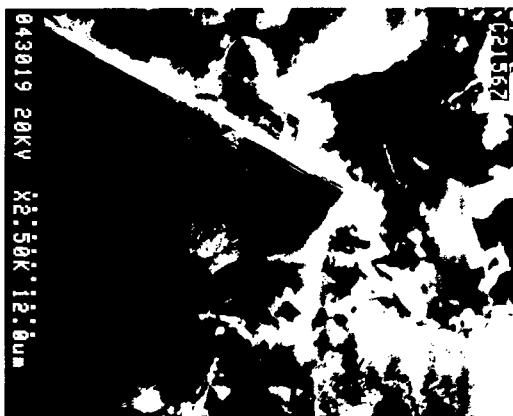


圖 4.6: SEM 照片:CFRC 乾拌方式碳纖維在基質中的情形二

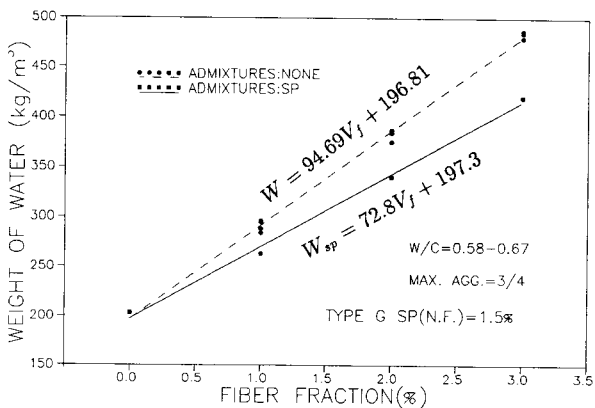


圖 4.7: 拌合水量與纖維體積比的關係

的差異, $V_f=3\%$ 時工作的困難度增加, 拌合水量的量測較不精確, 因為較高的 V_f 其纖維的比表面積增加, 施工的困難度增加. 所得的結果可能包圍了較多的誤差。

纖維體積比	拌合水量	$V_f/Plain$ (%)
plain	203.00	100.00
1%	291.50	143.60
2%	386.19	190.24
3%	480.88	236.88

4.1.5 拌合水量與碳纖維長度的關係

黃兆龍教授[6]的研究指出在水泥漿分散懸浮液中, 固態顆粒表面存在一吸附水層及擴散水層, 當固態顆粒的濃度及顆粒表面含電足夠時, 會在分子作用下通過水膜互相聯結成一個凝聚空間結構網. 但若含水量太少, 則吸附水層會有不足的現象, 表面潤滑作用不夠, 工作度差。

拌合水量隨碳纖維長度增加而增加, 試驗結果如圖4.8及表4.3。 $V_f=1\%$ 纖維長度6mm~24mm間用水量變化較大, 相差5.42%, 24mm~36mm的差異不大僅0.5%, 相同的漿量下, 6mm可獲致較好的工作度, $V_f=2\%$ 纖維長度6mm與24mm間用水量變化差4.43%, 24mm~36mm的差異1.48%. $V_f=3\%$ 纖維長度6mm與24mm間用水量變化差2.47%, 24mm~36mm的差異0.98%, $V_f=1\%$ 纖維長度6mm與24mm間用水量變化較明顯, 但 $V_f=3\%$ 纖維長度6mm與24mm間用水量變化僅 $V_f=1\%$ 的一半。

隨 V_f 值越大, 碳纖維的比表面積增加, 需要較多的拌合水量來潤滑纖維表面積, 不但增加施工的困難度, 且易產生拌合不均勻的情形。

相同纖維體積比及漿量下, 6mm纖維長度具有較好的工作度, 碳纖維在新拌(fresh)混凝土中, 纖維有組成的纖維網(或稱結球ballup)的現象, 減低了混凝土的流動性, 纖維長度越長, 纖維彎折的情形越明顯, 較易造成結球的現象, 更影響了CFRC的流動性。

表 4.3: 拌合水量對纖維體積比與纖維長度的關係

纖維體積比	纖維長度	拌合水量	$\frac{CFRC}{Plain} (\%)$
Plain	-	203	100.00
1%	6mm	284	139.90
1%	12mm	288	141.87
1%	24mm	295	145.32
1%	36mm	296	145.81
2%	6mm	375	184.73
2%	24mm	384	189.16
2%	36mm	387	190.64
3%	6mm	480	236.45
3%	24mm	485	238.92
3%	36mm	487	239.90

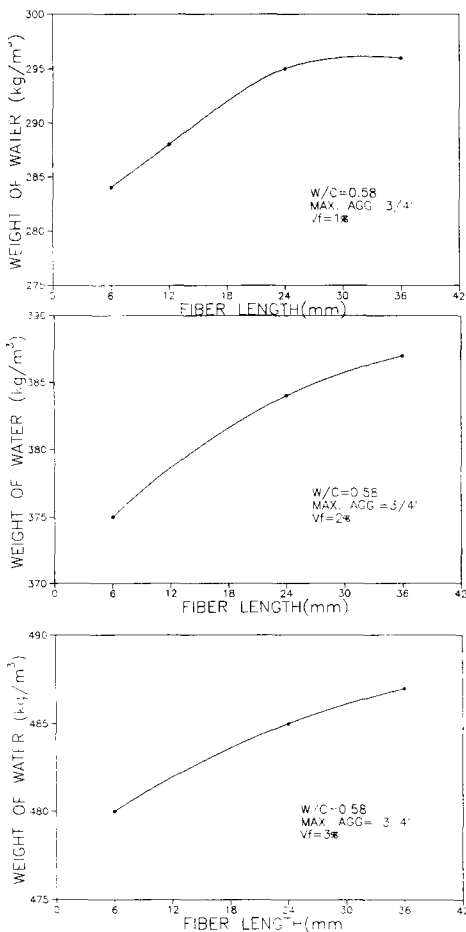


圖4.8:拌合水量與纖維長度的關係

4.1.6 强塑劑的最佳劑量試驗

A. M. Neville[10,11] 建議使用强塑劑的兩種功用：一是使混凝土具流動性，二是製造高强度混凝土。

ASTM C-494 指出 Type G 型强塑劑需具有緩凝的效果，凝結時間隨劑量的增加而增長，由於該型强塑劑具有緩凝的作用，其初凝的時間較一般型强塑劑慢 1~3.5 小時，所以可使坍度維持較長的時間，減少坍度的損失，但劑量不可超過 2%，否則會有不可預測的現象發生，若超量使用，會延緩其凝結時間達 48 小時以上。

J. M. Dransfield 認為强塑劑的特性能導致水泥顆粒從聚結而分散的效應，主要是由於强塑劑吸附於水泥顆粒表面時，因其帶有陰離子造成水泥顆粒間相互排斥，致使水泥顆粒分散的效應。强塑劑對硬固混凝土性質，無不良影響；因為水泥顆粒分散的效果，可加速水泥水化作用，促進早期强度的發展。

黃兆龍教授[6]的研究指出工作度為抗壓强度之重要因素之一，强塑劑之添加，除了對水泥材料有良好之分散性，促進水泥顆粒完全水化外，其對工作度之提高與維持，使得澆置與搗實工作更容易。因此間接提高水泥材料之强度品質；强塑劑對水泥材料的效能為不改變原設計條件下，增加工作性，其建議劑量緩凝型强塑劑量不超過 0.75%，否則會產生較嚴重之泌水，因為析離而產生强度折減。

CFRC 的配比設計為多漿配合，以一般的拌合方式需要較多的漿量來提供工作度， $V_f \geq 2\%$ 時，(表 3.8) 水泥量由 570~650kg (水灰比 0.58~0.67)， $V_f = 3\%$ 時更高達 720~840kg 顯得不經濟，使用强塑劑的目的為增加 CFRC 的流動性，因而減少水泥用量。

黃兆龍教授[6]提出混凝土添加强塑劑，坍度之變化隨劑量之增加而增加，但劑量達到一定的量時，坍度增加率變得很少，緩凝型 (Type G) 强塑劑，在低劑量時有較好之坍度增加量，隨劑量的增加，緩凝型强塑劑就沒有明顯的坍度增加，且水灰比較低者，則有較好之坍度增加量，高水灰比時，坍度並沒有太明顯的差異，水泥含量越高，坍度損失會隨之減小。

本研究中添加强塑劑是為維持 CFRC 與 Plain 相同之工作度，添加

強塑劑之CFRC可減少拌合水量，CFRC的水泥含量較高，應避免延遲澆置，如無法防止則應減少每次拌合量，澆置後採用高頻的振動機儘快搗實， $V_f = 3\%$ 時，因為水泥及碳纖維含量過高，造成CFRC相當粘滯及硬實，振動較不易，必須採取超振的措施是必需的。

文獻[9,18]中指出，搗實的主要目的在排除混凝土中之孔隙，使混凝土盡量填滿模板內之空間，形成均勻之固體；而且搗實是達到預估強度的重要因素，因為搗實不佳會造成強度不足及耐久性較差的現象。

強度與工作度有間接影響的關係，為有效的使用強塑劑，劑量多寡的選擇以28天抗壓強度的反應最佳者，為最佳劑量的選擇。如圖4.9所示，水灰比為0.58時，最佳值位於1.4~1.6%（與水泥含量之比）之間，水灰比為0.63時，最佳值位於1.2~1.4%之間，水灰比為0.67時，最佳值位於1.4~1.6%之間，由結果可知強塑劑最佳劑量位於1.4~1.6%之間。

N.F.型強塑劑的劑量若超2%時會有緩凝的效果，與ASTM及黃兆龍教授的研究[6]相似，且晚期強度會有遞減的情形。本研究以 $V_f = 2\%$ 的配比，水灰比為0.58的配比（水泥含量350kg）試拌，達可工作度時（以反坍度錐試驗控制），需5.5%強塑劑，初凝的時間延長為3天，硬化後試體表面呈魚鱗狀裂縫，強度與1.5%之差異如下表：ASTM C-494建議使用強塑劑不超過2%，因為劑量超過2%時混凝土會產生不可預期的效果，本試驗驗證ASTM的說法，在使用強塑劑前必須先試拌以確定劑量多寡，而且強塑劑不可能完全取代拌合水量以提供工作度。由以上的結果可得：

1. CFRC添加緩凝型強塑劑，劑量超過0.9%以上時並不產生泌水及析離的現象，所以最佳劑量比文獻的建議值略高。
2. N.F.型強塑劑的劑量，在CFRC使用時應不超過2%，否則會有緩凝的現象。
3. 由試驗結果可看出強塑劑最佳劑量位於1.4~1.6%之間，為了有效使用強塑劑，且減少試驗變數，將強塑劑劑量選用1.5%。

不同強塑劑強度差異情形

齡期	強塑劑 1.5%	強塑劑 5.5%	$\frac{SP_{3.5\%}}{SP_{1.5\%}}(\%)$
7	259.74	235.23	90.56
28	322.84	272.47	84.40
90	373.02	303.33	81.32
180	396.00	311.20	78.59

註： $V_f = 2\%$, 碳纖維長度 12mm

4.1.7 強塑劑與拌合水量的關係

文獻[6]指出要求維持相同工作度, 則緩凝型強劑比一般型強塑劑有較高之減效能, 以抗壓強度在 $210\text{kg}/\text{cm}^2 \sim 280\text{kg}/\text{cm}^2$ 之配比, 添加 1% 之強塑劑可減低 30% 之拌合水量。

以緩凝型強塑劑 1.5% 的劑量試拌, 所求得用水量 (W_{sp}) 與纖維體積比 (V_f) 之關係如圖 4.7 所示, 以試驗平均值迴歸其式可表為:

$$W_{sp} = 72.8V_f + 197.3 \quad (4.2)$$

強塑劑取代 9.78 ~ 12.66% 的水量, 以一般混凝土 N.F. 型強塑劑可減水約 30%, 而 CFRC 使用強塑劑減水僅一般混凝土的 1/3, 因為強塑劑是水泥分散劑, 它可使水泥顆粒帶電互斥增加工作度, 但工作困難度主要是碳纖維的拌入, 強塑劑對碳纖維的分散效果不明顯, 如果找出碳纖維的分散劑, 且不影響混凝土性質的摻料, 可減低水泥漿量。

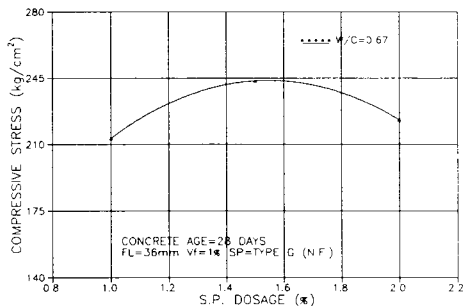
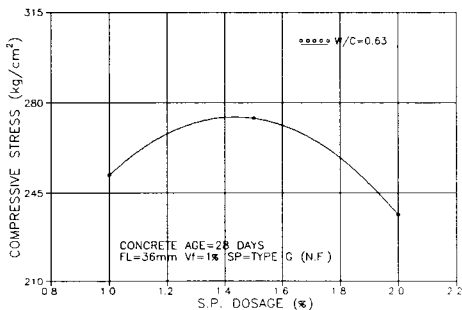
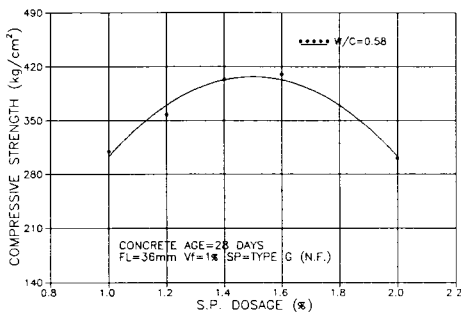


圖4.9: 強塑劑劑量與抗壓強度的關係

CFRC 使用強塑劑減水率的情形

纖維體積比	拌合水量 (無摻料)	拌合水量 (強塑劑)	減水率 (%)
1%	291.50	263	90.22
2%	386.19	340	88.04
3%	480.88	420	87.34

4.2 强度

4.2.1 强度與碳纖維長度的關係

碳纖維水泥砂漿(CFRM)

ACI Committee 504 建議纖維混凝土的纖維長細比(aspect ratios)介於30~150之間。J. R. Linton, 和P. L. Berneburg等提出,為確保纖維與基質間的有效握裹應力纖維長度必須大於臨界長度, K. Niswoka 建議 Pitch-Base 系碳纖維的臨界長度不低於1mm。

由圖4.10及表4.6可知12mm的28天抗壓强度為Plain的134%為最佳,其次為6mm抗壓强度為126%,36mm為105%,12mm及24mm的28天抗拉强度為Plain的133%為最佳,6mm抗拉强度較差為104%,12mm的28天抗彎强度為Plain的203%為最佳,36mm抗拉强度較差為160%。二次曲線迴歸推測抗壓、抗張及抗彎强度在12mm~24mm間較好。

碳纖維的成品其表面平滑,機械互作用較小,在不改變基質下,握裹應力主要由碳纖維長度提供,由結果可知24mm纖維長度可提供較佳抗拉强度,但就抗壓强度而言12mm纖維長度可提供較佳强度。

CFRC 的張力强度與直剪强度

CFRC 的各種强度可由圖4.11及圖4.12圖4.13及圖4.14,纖維長度介於6mm~24mm間會提昇抗劈裂、抗彎與直剪强度,抗劈裂强度在水灰比為0.58

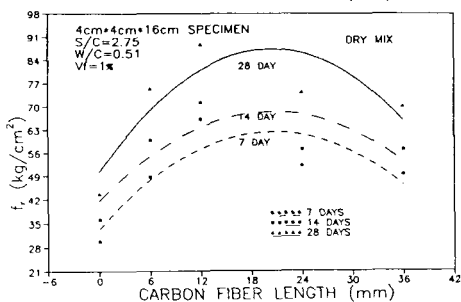
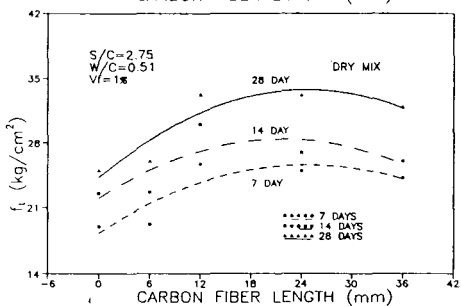
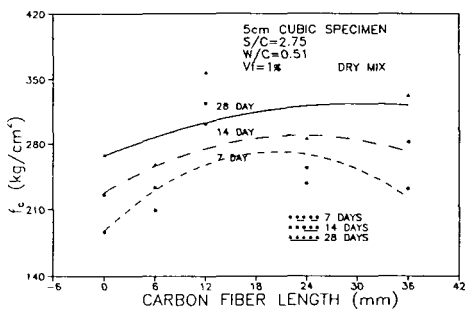


圖4.10: CFRM強度與碳纖維長度關係

時,纖維長度介於15mm~24mm之間,有較佳的強度;而水灰比0.63時纖維長度有偏移至15mm的趨勢;而水灰比0.67時纖維長度偏移至12mm為最佳的趨勢,抗彎與直剪強度也有類似的情形。

CFRC 的抗壓強度

抗壓強度在水灰比為0.58($f'_c = 280\text{kg/cm}^2$)時,可明顯的看出纖維長度介於12mm~24mm之間,有較佳的強度。水灰比為0.63($f'_c = 260\text{kg/cm}^2$)時,纖維長度在7天時曲線較明顯介於12mm~24mm之間,在14天以後曲線變得平緩,極值不明顯,有往24mm方向偏移的趨勢;水灰比為0.67($f'_c = 220\text{kg/cm}^2$)時,二次迴歸曲線比前二者平緩,且纖維長度往6mm方向偏移,在0.58及0.67的水灰比中以二次曲線迴歸,6mm的值乖離最大,且6mm的纖維長度與Plain的強度的變化約10%。

強度在水灰比0.58時,纖維長度36mm及6mm時抗壓強度略有降低,折減10%的抗壓強度,與Shigeyuki Akihama[22,24,25]所提出的CFRM的抗壓強度會折減相似。

CFRC 與 CFRM 之比較

基質的強度與纖維長度會互相影響,CFRM的基質強度($f'_{cc} = 270\text{kg/cm}^2$)與CFRC水灰比0.58的基質強度相近($f'_c = 279.05\text{kg/cm}^2$),其較佳長度結果相似; f'_c 低於 220kg/cm^2 時CFRC抗壓強度會比Plain為低。

碳纖維成品柔軟易彎飾,但太長的纖維在拌合中較易產生彎折,觀察混凝土試體,碳纖維長度在24mm以上,纖維有彎折的情形,纖維長度在15mm以下,纖維不會產生彎折的情形。

太長或太短的纖維長度無法提供最佳的強度,就混凝土而言,基質的強度與纖維的長度僅在某些範圍內有規則可循,低於此一範圍時,其變化情形又不同可能循另一方式求得。

Yoshihiko Ohama[26]比較纖維長度,以瀝青系碳纖維作研究,認為3mm比10mm碳纖維有較好的力學性質,但其未說明其拌合的方式及摻料的使用情形, J. R. Linton [40]以PAN系碳纖維,使用了兩種拌合方式

及兩種纖維的長度來比較, Before Mixing (與本試驗乾拌方式相似)的試體 6mm 比 3mm 的試體有較佳的抗彎強度, 且纖維長度越長, 抗彎強度趨勢有上昇的跡象, After Mixing 則趨向於 3mm 的試體抗彎強度較佳。

本試驗以乾拌的方式拌合, 纖維長度的最佳值介於 12mm ~ 24mm 之間, 低水灰比時 (基質的強度較佳時), 碳纖維的長度以 15mm ~ 24mm 之間較好, 高水灰比時 (基質強度較低時), 最佳纖維長度有往短纖維 (6mm) 偏移的趨勢。

4.2.2 強度與水灰比的關係

J. R. Linton, 和 P. L. Berneburg 等提出, 基質的強度為影響 CFRC 重要因素. Yoshihiko Ohama[26] 認為添加矽灰可增加 CFRC 的強度及工作度, 因為矽灰的細度比水泥細度還細 (約為 1/10), 其可有效填滿基質中的孔隙, 增加 CFRM 強度。

本研究以水灰比的變化來改變基質的強度作研究其原因如下:

1. 以水灰比來臆測混凝土的強度, 是簡單且常用的方式, 藉以驗證基質對 CFRC 的影響。
2. 減少試驗變數, 因為添加量的劑量, 亦影響其基質的強度多寡。

水灰比降低, 各種強度相對提昇, 三種水灰比中以 0.58 強度最高。(圖 4.15 ~ 4.18) 其次為 0.63、0.67, 各種強度與水灰比其趨勢約為線性的關係; CFRC 與基質的強度有密切的關係, 降低水灰比可使基質中減少孔隙增加強度, 但太低的水灰比亦會降低工作度, 造成配比的浪費, 若以填充基質孔隙的摻料 (如矽灰等高細度的摻料) 不但可增加強度且工作度可維持, 可能為較好的方式。

將試驗數據以 Abrams 水灰比理論迴歸分析得:

$$f_c = \frac{2324.38}{28.97^{w/c}} \quad (r = 38.69) \quad (4.3)$$

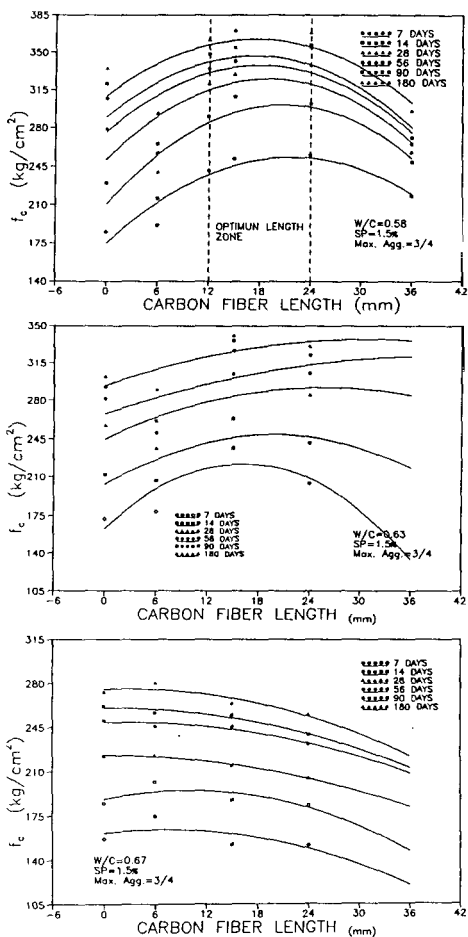


圖4.11: 碳纖維長度與碳纖維混凝土抗壓強度關係

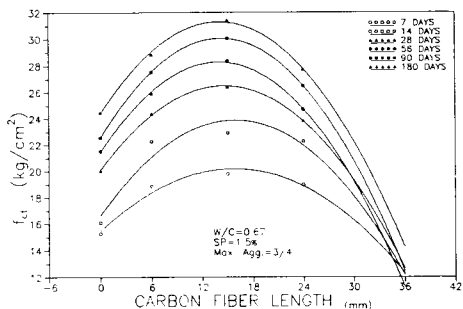
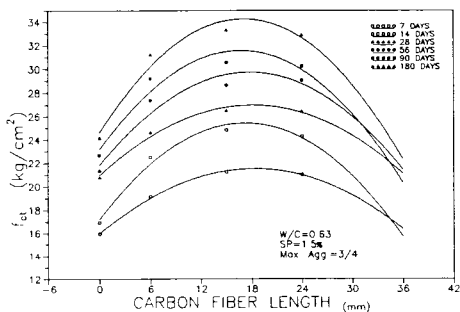
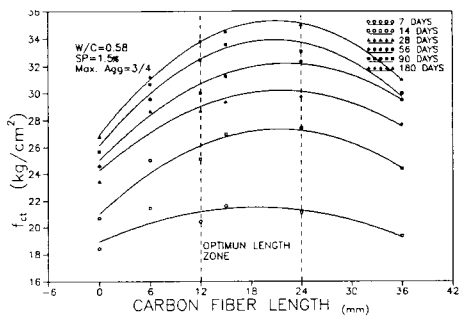


圖 4.12: 碳纖維長度與碳纖維混凝土抗劈裂強度關係

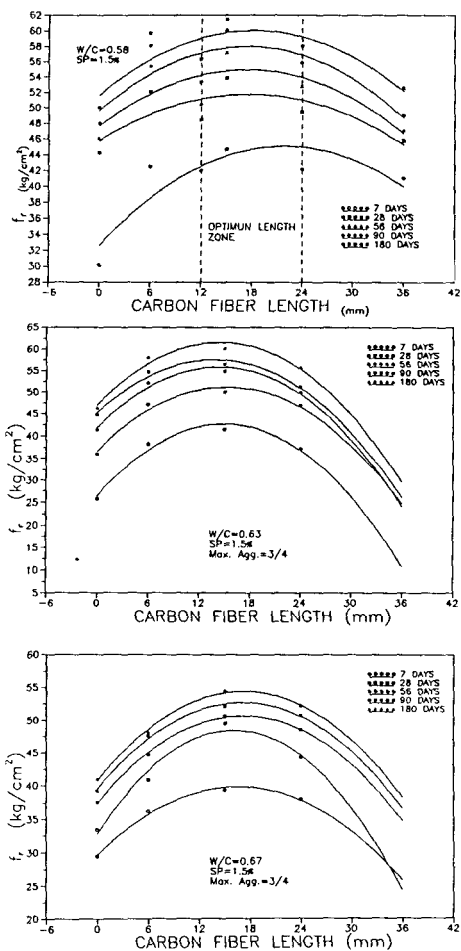


圖 4.13: 碳纖維長度與碳纖維混凝土抗彎強度關係

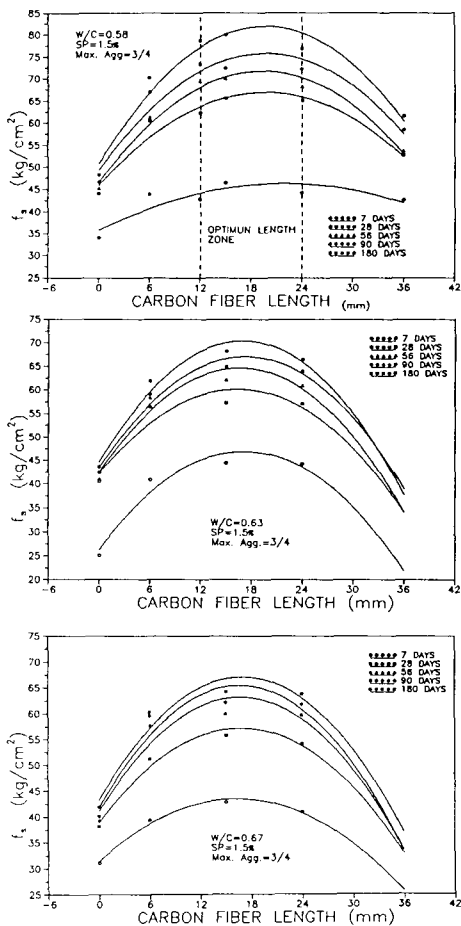


圖 4.14: 碳纖維長度與碳纖維混凝土直剪強度關係

$$f_{ct} = \frac{65.83}{3.99w/c} \quad (r = 3.55) \quad (4.4)$$

$$f_r = \frac{83.51}{2.23w/c} \quad (r = 7.93) \quad (4.5)$$

$$f_s = \frac{147.93}{4.36w/c} \quad (r = 10.23) \quad (4.6)$$

式中r表誤差半徑；式(4.3)中標準偏差50.05,變異係數0.18,式(4.4)中標準偏差2.33,變異係數0.08,式(4.5)中標準偏差4.77,變異係數0.09,式(4.6)中標準偏差4.86,變異係數0.08。

4.2.3 强度與齡期的關係

A.M. Neville[10,11]認為强度與gel/space有一函數的關係,而水泥膠體(gel)在任何時間在水泥漿中的數量,是時間的函數。

1981年Pettersson指出試體破壞能量與齡期的增加而增加,因為水泥顆粒的水化較完全時對强度會有較好的貢獻。

齡期與水泥水化及硬化程度有關,亦影響纖維的握裹强度; Prague[16]建議以對數時間座標來描述强度與時間的關係,混凝土齡期越長,强度越高,但會趨近於定值,其通式可表為:

$$f_{c,j} = a + b \log j \quad (4.7)$$

式中a為 f_c (100mm立方體抗壓强度)1天的强度,b為1~9天强度的增加量;由强度與對數時間的關係,就比較容易明瞭。

由圖4.20,圖4.21,圖4.22,圖4.23,所示為齡期與各種强度的關係,約略可看出在28天前的斜率較28天後為高,尤以抗壓强度最明顯。

CFRC早期(7天)抗彎强度的發展對其28天的强度比值為82~89%(詳表4.5),與控制組的結果(68~76%)為高,28天後的比值與控制組相似;抗壓强度的情形與抗彎强度結果類似(詳表4.4)。碳纖維並不會促進水化作用,但在試驗過程中,碳纖維若均勻分佈在基質中,可減低大裂縫的成長而提昇强度,尤其在早期强度貢獻更明顯。

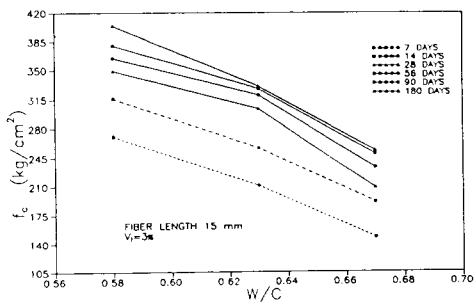
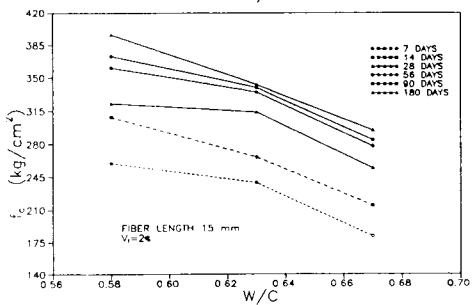
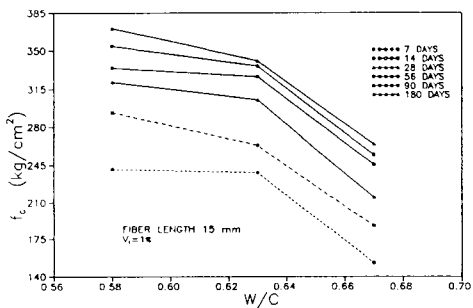


圖 4.15: 水灰比與CFRC抗壓強度關係

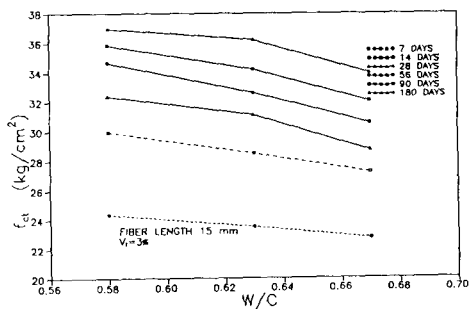
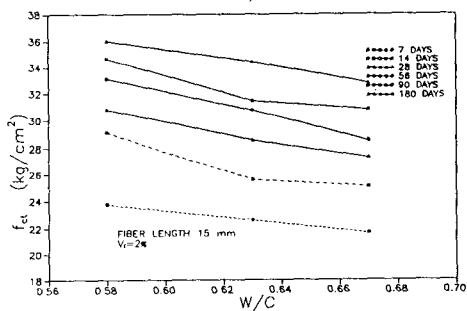
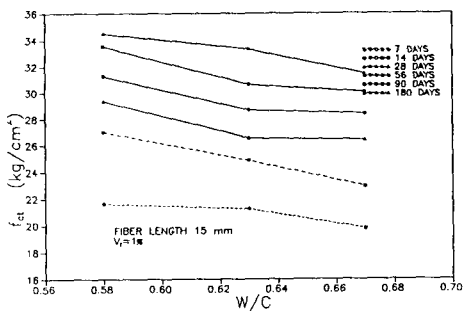


圖4.16: 水灰比與CFRC抗劈裂強度關係

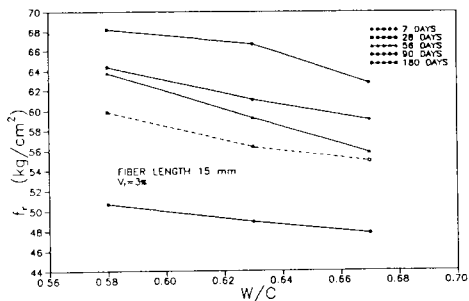
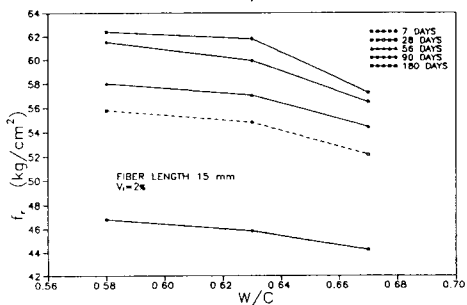
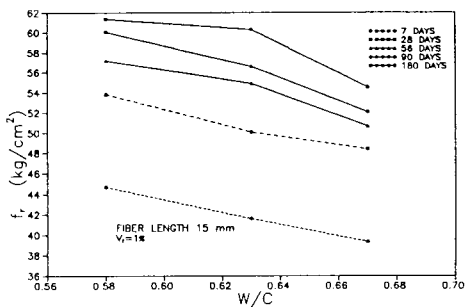


圖4.17: 水灰比與CFRC抗彎強度關係

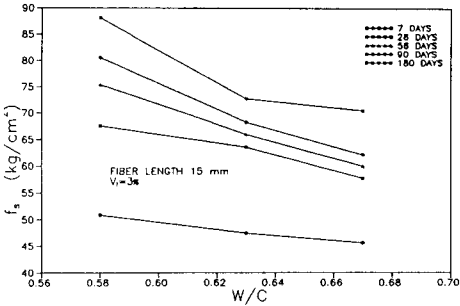
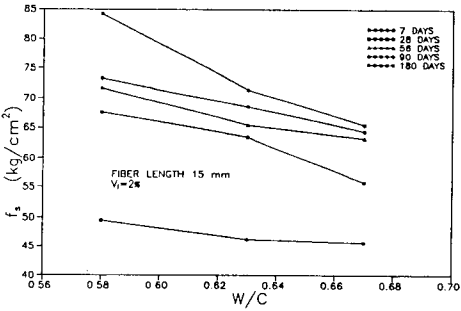
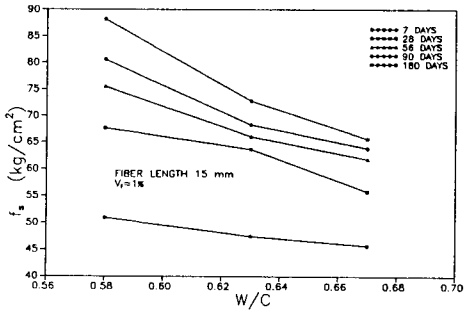


圖4.18: 水灰比與CFRC直剪強度關係

建立以 7 天抗壓強度預測 28 天的抗壓強度為較普遍且簡易的公式，其式如下：

$$f_{c,28} = 1.18f_{c,7} + 30.8 \quad (4.8)$$

$$f_{c,28} = 0.5(f_{c,7})^{1.18} \quad (4.9)$$

式中 $f_{c,7}, f_{c,28}$ 為 7 天及 28 天的圓柱試體抗壓強度。式(4.8)及式(4.9)標準偏差 41.92, 變異係數 0.18。

表4.4: 各種抗壓強度對28天抗壓強度相對百分比

水灰比	體積比	纖維長度	7天	14天	28天	56天	90天	180天
0.58	0%	Plain	66	82	100	110	115	120
0.58	1%	6mm	80	90	100	107	111	122
0.58	1%	24mm	84	97	100	103	105	115
0.58	1%	15mm	77	89	100	104	108	112
0.58	2%	15mm	80	96	100	112	115	123
0.58	3%	15mm	78	91	100	104	109	116
0.63	0%	Plain	67	82	100	109	114	117
0.63	1%	6mm	75	87	100	105	110	122
0.63	1%	24mm	71	85	100	107	118	119
0.63	1%	15mm	78	86	100	107	110	112
0.63	2%	15mm	76	85	100	107	108	109
0.63	3%	15mm	69	85	100	105	108	109
0.67	0%	Plain	71	83	100	112	118	123
0.67	1%	6mm	79	91	100	110	115	126
0.67	1%	24mm	74	90	100	113	117	125
0.67	1%	15mm	71	87	100	114	118	123
0.67	2%	15mm	71	84	100	109	112	116
0.67	3%	15mm	71	92	100	112	120	121

表 4.5: 各種抗彎強度對 28 天抗彎強度相對百分比

水灰比	體積比	纖維長度	7天	28天	56天	90天	180天
0.58	0%	Plain	68	100	104	104	106
0.58	1%	6mm	82	100	106	111	115
0.58	1%	24mm	85	100	107	113	117
0.58	1%	15mm	83	100	106	112	114
0.58	2%	15mm	84	100	104	110	112
0.58	3%	15mm	85	100	107	108	114
0.63	0%	Plain	77	100	115	123	128
0.63	1%	6mm	81	100	110	116	123
0.63	1%	24mm	79	100	106	109	118
0.63	1%	15mm	83	100	110	113	120
0.63	2%	15mm	84	100	104	109	112
0.63	3%	15mm	87	100	105	108	118
0.67	0%	Plain	74	100	112	118	122
0.67	1%	6mm	89	100	109	117	118
0.67	1%	24mm	86	100	109	115	118
0.67	1%	15mm	80	100	102	105	110
0.67	2%	15mm	85	100	104	108	110
0.67	3%	15mm	87	100	103	107	114

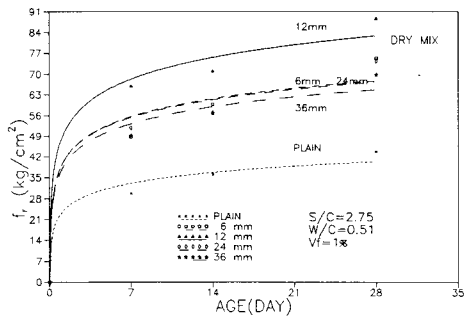
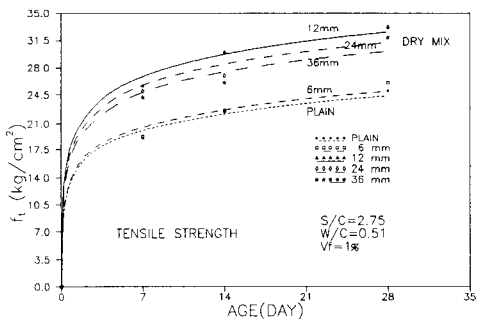
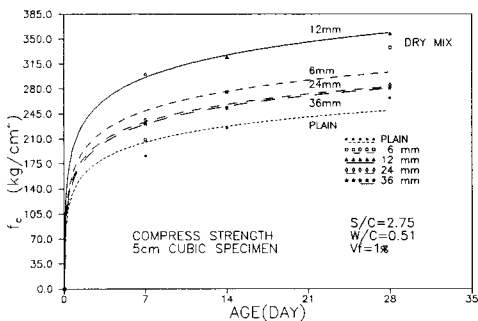


圖 4.19: CFRM 抗壓、抗張及抗彎強度與齡期關係

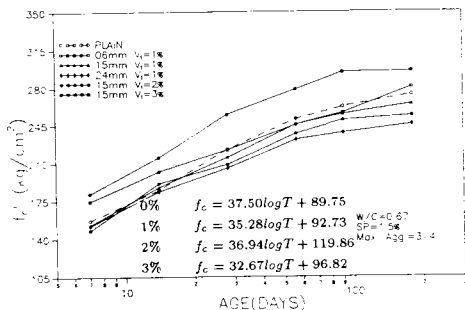
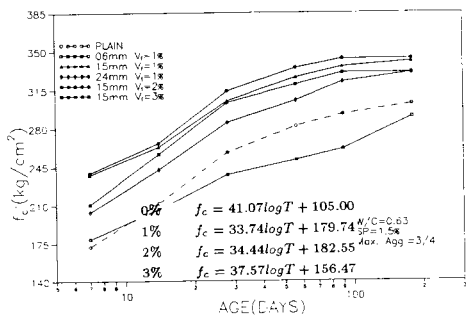
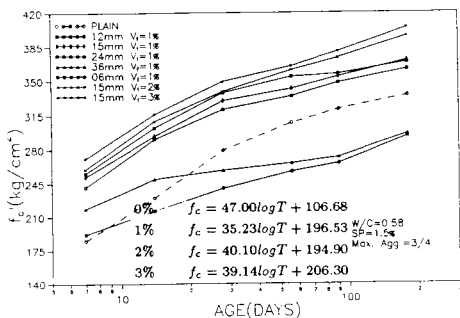


圖 4.20: CFRC 抗壓強度與齡期關係

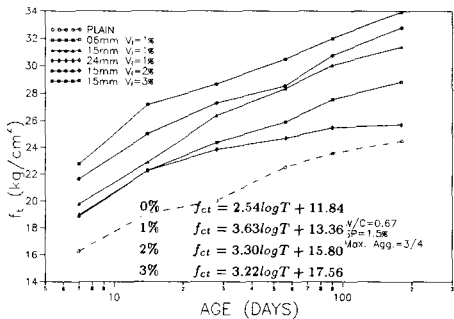
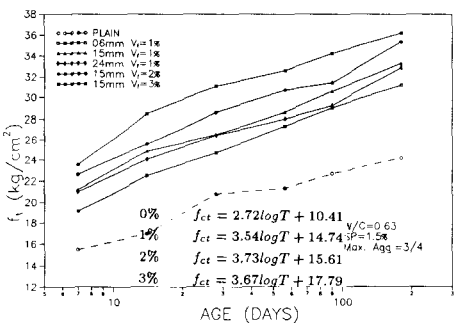
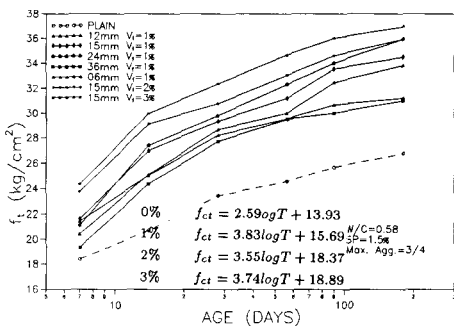


圖 4.21: CFRC 抗劈裂強度與齡期關係

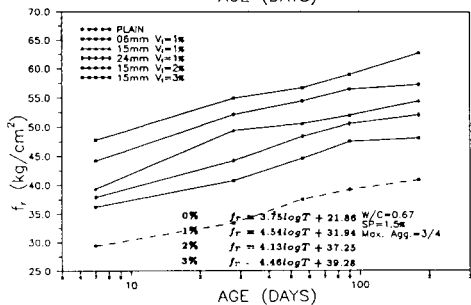
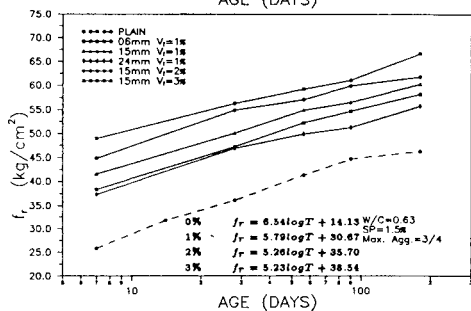
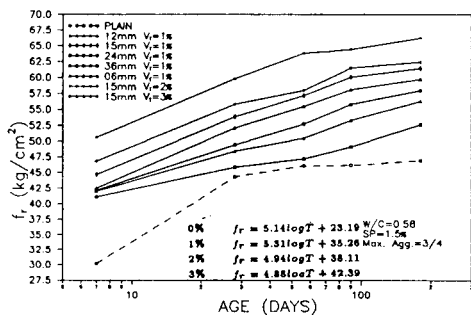


圖 4.22: CFRC 抗彎強度與齡期關係

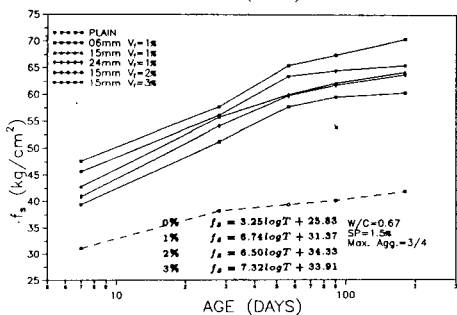
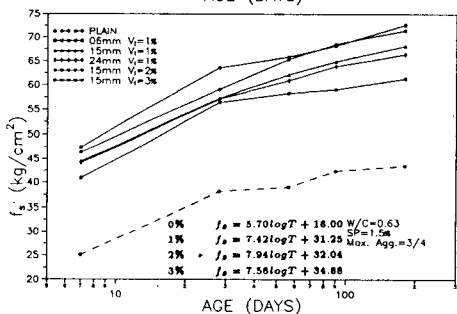
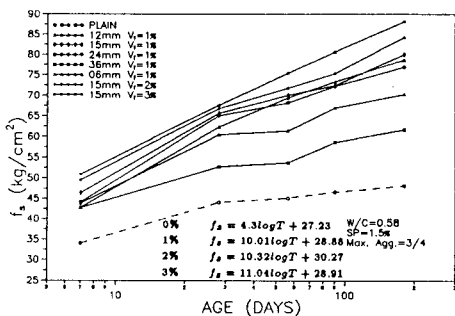


圖 4.23: CFRC 直剪強度與齡期關係

表 4.6: CFRM 強度對 Plain Mortar 28 天強度相對百分比

纖維長度	試驗種類	7 天	14 天	28 天
Plain Mortar	抗壓強度	70	84	100
6mm	抗壓強度	78	103	126
12mm	抗壓強度	113	121	134
24mm	抗壓強度	88	95	107
36mm	抗壓強度	86	95	105
Plain Mortar	抗拉強度	76	90	100
6mm	抗拉強度	77	91	104
12mm	抗拉強度	103	120	133
24mm	抗拉強度	100	108	133
36mm	抗拉強度	97	104	128
Plain Mortar	抗彎強度	68	83	100
6mm	抗彎強度	112	137	173
12mm	抗彎強度	151	163	203
24mm	抗彎強度	119	131	170
36mm	抗彎強度	113	130	160

註：水泥砂漿試體, $V_f=1\%$ 每組試體數 3 個

表4.7: CFRC 抗壓強度

水灰比	體積比	纖維長度	7天	14天	28天	56天	90天	180天
0.58	0%	Plain	185.06	230.00	279.05	306.96	320.91	334.86
0.58	1%	6mm	191.75	216.13	240.02	256.97	265.43	293.37
0.58	1%	12mm	241.33	290.54	320.77	334.23	348.00	361.77
0.58	1%	24mm	255.26	301.95	337.78	354.08	356.72	368.69
0.58	1%	36mm	218.36	249.56	258.48	265.74	271.68	296.32
0.58	1%	15mm	252.01	293.62	329.41	341.48	354.25	370.61
0.58	2%	15mm	259.74	308.54	322.84	360.82	373.02	396.00
0.58	3%	15mm	270.72	315.93	348.97	364.78	380.00	404.04
0.53	0%	Plain	172.13	212.00	257.90	281.69	292.75	302.18
0.53	1%	6mm	179.13	206.51	237.88	250.84	261.12	290.37
0.53	1%	24mm	203.88	242.47	285.42	305.31	322.37	330.30
0.53	1%	15mm	237.78	263.00	305.25	326.25	335.71	340.59
0.53	2%	15mm	239.33	266.56	314.13	334.79	339.82	342.82
0.53	3%	15mm	210.89	256.56	303.56	320.00	327.82	330.41
0.67	0%	Plain	156.93	185.00	222.58	250.36	261.74	273.12
0.67	1%	6mm	174.88	202.00	222.74	245.99	256.70	280.31
0.67	1%	24mm	152.15	183.50	204.99	231.65	239.71	255.69
0.67	1%	15mm	152.73	187.60	215.00	245.54	254.70	264.12
0.67	2%	15mm	181.81	215.00	254.70	278.00	284.49	294.96
0.67	3%	15mm	147.95	191.14	208.62	233.14	249.41	253.41

註：每組試體數3個，單位 kg/cm^2

表4.8: CFRC抗劈裂強度

水灰比	體積比	纖維長度	7天	14天	28天	56天	90天	180天
0.58	0%	Plain	18.41	20.70	23.42	24.56	25.67	26.79
0.58	1%	6mm	21.44	25.02	28.20	29.55	30.66	31.22
0.58	1%	12mm	20.43	25.09	28.67	30.00	32.47	33.82
0.58	1%	24mm	21.12	27.42	29.78	32.34	33.06	35.02
0.58	1%	36mm	19.34	24.38	27.72	29.50	29.98	31.02
0.58	1%	15mm	21.61	26.98	29.34	31.23	33.55	34.50
0.58	2%	15mm	23.75	29.12	30.77	33.08	34.61	36.00
0.58	3%	15mm	24.34	29.96	32.37	34.67	35.84	36.96
0.63	0%	Plain	16.94	18.96	21.79	22.33	23.67	25.17
0.63	1%	6mm	19.15	22.50	24.63	27.38	29.22	31.21
0.63	1%	24mm	21.01	24.30	26.42	29.05	30.22	32.90
0.63	1%	15mm	21.23	24.83	26.51	28.65	30.58	33.32
0.63	2%	15mm	22.61	25.56	28.60	30.72	31.43	35.37
0.63	3%	15mm	23.53	28.48	31.10	32.60	34.22	36.22
0.67	0%	Plain	15.27	16.10	20.03	21.53	22.56	24.50
0.67	1%	6mm	18.85	22.27	24.40	25.90	27.55	28.84
0.67	1%	24mm	18.97	22.26	23.85	24.70	26.50	27.72
0.67	1%	15mm	19.78	22.91	26.38	28.36	30.03	31.42
0.67	2%	15mm	21.64	25.04	27.30	28.56	30.77	32.79
0.67	3%	15mm	22.75	27.20	28.69	30.52	32.02	33.95

註：每組試體數3個，單位 kg/cm^2

表 4.9: CFRC 抗彎強度

水灰比	體積比	纖維長度	7天	28天	56天	90天	180天
0.58	0%	Plain	30.14	44.30	46.04	46.14	46.88
0.58	1%	6mm	42.53	52.13	55.46	58.12	59.73
0.58	1%	12mm	42.01	48.42	50.50	53.33	56.30
0.58	1%	24mm	42.15	49.41	52.73	55.80	57.98
0.58	1%	36mm	41.09	45.85	47.16	49.08	52.61
0.58	1%	15mm	44.70	53.82	57.15	60.05	61.39
0.58	2%	15mm	46.81	55.79	58.00	61.49	62.39
0.58	3%	15mm	50.64	59.82	63.75	64.38	68.20
0.63	0%	Plain	27.82	36.11	41.35	44.77	46.35
0.63	1%	6mm	38.38	47.28	52.23	54.72	58.21
0.63	1%	24mm	37.30	46.95	49.88	51.27	55.75
0.63	1%	15mm	41.60	50.09	54.90	56.57	60.28
0.63	2%	15mm	45.84	54.84	57.08	59.92	61.80
0.63	3%	15mm	48.92	56.31	59.24	61.05	66.69
0.67	0%	Plain	25.40	33.39	37.55	39.26	40.97
0.67	1%	6mm	36.22	40.82	44.66	47.57	48.16
0.67	1%	24mm	37.95	44.22	48.42	50.64	52.17
0.67	1%	15mm	39.34	49.46	50.69	52.09	54.50
0.67	2%	15mm	44.26	52.18	54.49	56.52	57.28
0.67	3%	15mm	47.78	54.92	56.77	59.03	62.72

註：每組試體數3個，單位 kg/cm^2

表4.10: CFRC直剪強度

水灰比	體積比	纖維長度	7天	28天	56天	90天	180天
0.58	0%	Plain	34.00	44.01	45.12	46.59	48.17
0.58	1%	6mm	43.85	60.50	61.37	66.97	70.22
0.58	1%	12mm	42.80	62.30	69.45	73.35	78.64
0.58	1%	24mm	44.20	65.02	68.20	72.19	76.89
0.58	1%	36mm	42.69	52.74	53.75	58.55	61.67
0.58	1%	15mm	46.40	65.64	70.04	72.44	80.00
0.58	2%	15mm	49.50	66.72	71.77	75.29	84.15
0.58	3%	15mm	50.90	67.57	75.42	80.56	88.15
0.63	0%	Plain	31.07	40.55	41.10	42.40	43.60
0.63	1%	6mm	40.87	56.41	58.39	59.14	61.90
0.63	1%	24mm	44.27	57.12	60.95	63.99	64.48
0.63	1%	15mm	44.47	57.31	62.24	64.99	68.27
0.63	2%	15mm	46.45	59.12	65.44	68.57	71.46
0.63	3%	15mm	47.47	63.60	66.00	68.25	72.72
0.67	0%	Plain	25.12	38.20	39.40	40.17	41.89
0.67	1%	6mm	39.40	51.25	57.75	59.57	60.33
0.67	1%	24mm	40.89	54.12	59.82	61.77	63.77
0.67	1%	15mm	42.79	55.70	60.00	62.17	64.27
0.67	2%	15mm	45.66	56.10	63.40	64.44	65.45
0.67	3%	15mm	47.66	57.70	65.41	66.42	70.45

註：每組試體數3個，單位 kg/cm^2

表 4.11: CFRC 抗壓強度對 Plain 28 天強度相對百分比

水灰比	體積比	纖維長度	7天	14天	28天	56天	90天	180天
0.58	0%	Plain	66	82	100	110	115	120
0.58	1%	6mm	69	77	86	92	95	105
0.58	1%	12mm	86	104	115	120	125	130
0.58	1%	24mm	91	108	121	127	128	132
0.58	1%	36mm	78	89	93	95	97	106
0.58	1%	15mm	90	105	118	122	127	133
0.58	2%	15mm	93	111	116	129	134	142
0.58	3%	15mm	97	113	125	131	136	145
0.63	0%	Plain	67	82	100	109	114	117
0.63	1%	6mm	69	80	92	97	101	113
0.63	1%	24mm	79	94	111	118	125	128
0.63	1%	15mm	92	102	118	127	130	132
0.63	2%	15mm	93	103	122	130	132	133
0.63	3%	15mm	82	99	118	124	127	128
0.67	0%	Plain	71	83	100	112	118	123
0.67	1%	6mm	79	91	100	111	115	126
0.67	1%	24mm	68	82	92	104	108	115
0.67	1%	15mm	69	84	97	110	114	119
0.67	2%	15mm	82	97	114	125	128	133
0.67	3%	15mm	66	86	94	105	132	114

註：單位%

表 4.12: CFRC 抗劈裂強度與 Plain 28 天強度相對百分比

水灰比	體積比	纖維長度	7天	14天	28天	56天	90天	180天
0.58	0%	Plain	79	88	100	105	110	114
0.58	1%	6mm	92	107	120	126	131	133
0.58	1%	12mm	87	107	122	128	139	144
0.58	1%	24mm	90	117	127	138	141	150
0.58	1%	36mm	83	104	118	126	128	132
0.58	1%	15mm	92	115	125	133	143	147
0.58	2%	15mm	101	124	131	141	148	154
0.58	3%	15mm	104	128	138	148	153	158
0.63	0%	Plain	78	87	100	102	109	116
0.63	1%	6mm	88	103	113	126	134	143
0.63	1%	24mm	96	112	121	133	139	151
0.63	1%	15mm	97	114	122	131	140	153
0.63	2%	15mm	104	117	131	141	144	162
0.63	3%	15mm	108	108	143	150	157	166
0.67	0%	Plain	76	80	100	107	113	122
0.67	1%	6mm	94	111	122	129	138	144
0.67	1%	24mm	95	111	119	123	127	128
0.67	1%	15mm	99	114	132	142	150	157
0.67	2%	15mm	108	125	136	143	154	164
0.67	3%	15mm	114	136	143	152	160	169

註：單位%

表 4.13: CFRC 抗彎強度與 Plain 28 天強度相對百分比

水灰比	體積比	纖維長度	7 天	28 天	56 天	90 天	180 天
0.58	0%	Plain	68	100	104	104	106
0.58	1%	6mm	96	118	125	131	135
0.58	1%	12mm	95	109	114	120	127
0.58	1%	24mm	95	112	119	126	131
0.58	1%	36mm	93	103	106	111	119
0.58	1%	15mm	101	121	129	136	139
0.58	2%	15mm	106	126	131	139	141
0.58	3%	15mm	114	135	144	145	154
0.63	0%	Plain	77	100	115	124	128
0.63	1%	6mm	106	131	147	152	161
0.63	1%	24mm	103	130	138	142	154
0.63	1%	15mm	115	153	152	157	167
0.63	2%	15mm	127	152	158	166	171
0.63	3%	15mm	135	156	164	169	185
0.67	0%	Plain	76	100	112	118	122
0.67	1%	6mm	108	122	134	142	144
0.67	1%	24mm	114	132	145	152	156
0.67	1%	15mm	118	148	152	156	163
0.67	2%	15mm	133	156	163	169	172
0.67	3%	15mm	143	164	170	177	188

註：單位%

表4.14: CFRC直剪強度與Plain 28天強度相對百分比

水灰比	體積比	纖維長度	7天	28天	56天	90天	180天
0.58	0%	Plain	77	100	103	106	109
0.58	1%	6mm	100	137	139	152	160
0.58	1%	12mm	97	142	158	167	179
0.58	1%	24mm	100	148	155	164	175
0.58	1%	36mm	98	120	122	133	140
0.58	1%	15mm	105	149	159	165	182
0.58	2%	15mm	112	152	163	171	191
0.58	3%	15mm	116	154	171	183	200
0.63	0%	Plain	78	100	101	105	108
0.63	1%	6mm	101	139	144	146	153
0.63	1%	24mm	109	141	150	158	159
0.63	1%	15mm	110	141	153	160	168
0.63	2%	15mm	115	146	161	169	176
0.63	3%	15mm	117	157	163	168	179
0.67	0%	Plain	66	100	103	105	110
0.67	1%	6mm	103	134	151	156	158
0.67	1%	24mm	107	142	157	162	167
0.67	1%	15mm	112	146	157	163	168
0.67	2%	15mm	120	147	166	169	171
0.67	3%	15mm	125	151	171	174	184

註：單位%

4.2.4 强度與纖維體積比的關係

Shigeru Furuakwa[23] 研究不連續碳纖維 (chopped carbon fiber) 可工作度的纖維體積比為 3% 以下, 本試驗依 Shigeru Furuakwa 的建議採用纖維體積比介於 0% ~ 3% 之間。

Yoshihiko Ohama[26,27,28] 其研究顯示纖維含量與撓曲强度約正比的關係; 抗壓强度有提昇的趨勢, 其試驗的纖維體積比從 0% ~ 5%, 在 $V_f = 3\%$ 時為最佳。

Shigeyuki Akihama[22,24,25] 亦認為纖維含量越多則撓曲强度遞增、張力應變 (tensile strain) 亦遞增。

S. P. Park[41] 研究亦認為纖維含量越多則撓曲强度遞增、但抗壓强度隨纖維體積比的增加而遞減。

CFRC 的纖維體積比, 明顯的影響了强度, 抗劈裂强度、抗彎强度、直剪强度均隨纖維體比成正, 纖維體比越高, 提高了混凝土張應變及剪應變, 對張力及剪力有明顯的貢獻; 抗劈裂强度隨纖維體積比的增加呈現遞增的現象, 抗彎及直剪强度的情形都類似 (如圖 4.24 ~ 圖 4.27 所示)。

一般强度與體積比的關係式, 亦有以 V_f 的一次方迴歸, 其式如下:

$$f_c = 28.6V_f + 227.99 \quad (4.10)$$

$$f_{ct} = 2.7V_f + 23.49 \quad (4.11)$$

$$f_r = 6.07V_f + 40.92 \quad (4.12)$$

$$f_s = 6.02V_f + 48.73 \quad (4.13)$$

(4.10) ~ (4.13) 式的預估值較樂觀, 纖維體積比越高, 强度越高, 但實際强度與 V_f , 工作度有密的關係, 較高的 V_f , 亦可能致工作度的不易而造成强度的損失, 式 (4.14) ~ (4.17) 的預估式可能比較接近實際的情形。

$$f_c = 189.42 + 111.67V_f - 26.7V_f^2 \quad (4.14)$$

$$f_{ct} = 21.97 + 5.7V_f - 0.95V_f^2 \quad (4.15)$$

$$f_r = 37.96 + 11.91V_f - 1.86V_f^2 \quad (4.16)$$

$$f_s = 41.96 + 19.41V_f - 4.25V_f^2 \quad (4.17)$$

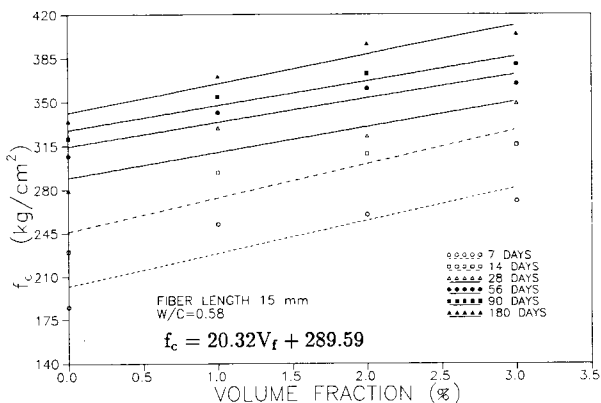


圖 4.24: 抗壓強度與CFRC纖維體積比的關係

4.2.5 抗壓強度與其他強度的關係

S. P. Park[41] 研究指出欲提高CFRC的力學性質, 必需降低骨材的粒徑, 增加碳纖維的分散; 添加聚合物乳液(polymer emulsion) 及乙基醋酸鹽(ethyl vinyl acetate) 可降低單位重量及增加張力強度及抗壓強度。

楊宏仁君[47] 指出纖維混凝土由於纖維的拌入, 藉由纖維的握裹拘束力來束制張力或剪力裂縫的延伸與擴展, 減緩材料軟化或崩潰的速度, 而增加材料的強度。其以三軸應力試驗得知纖維的加強效應, 是藉其所傳遞的張應力為之, 所以在壓力的作用下纖維效應並不明顯, 而張力作用特別顯著。

在抗壓強度中, 水灰比0.58時CFRC均比Plain為高, 水灰比0.63及0.67時產生略有不同, 其可能原因為:

1. 碳纖維對抗壓強度的貢獻是間接的效應, 低水灰比使碳纖維與基質有較好的握裹強度, 可增加CFRC的圍束效應。

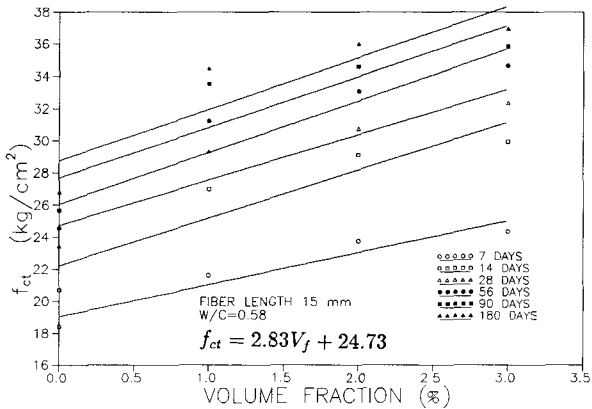


圖 4.25: 抗劈裂壓強度與CFRC纖維體積比的關係

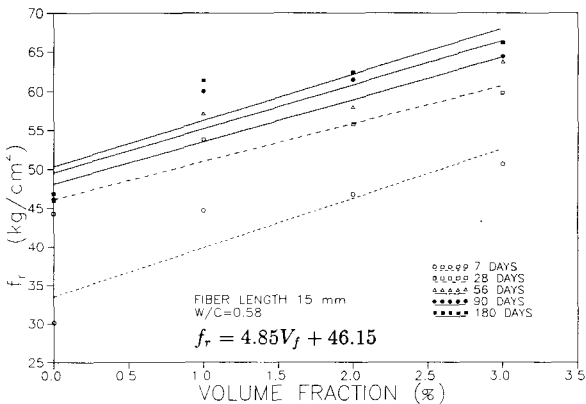


圖 4.26: 抗彎強度與CFRC纖維體積比的關係

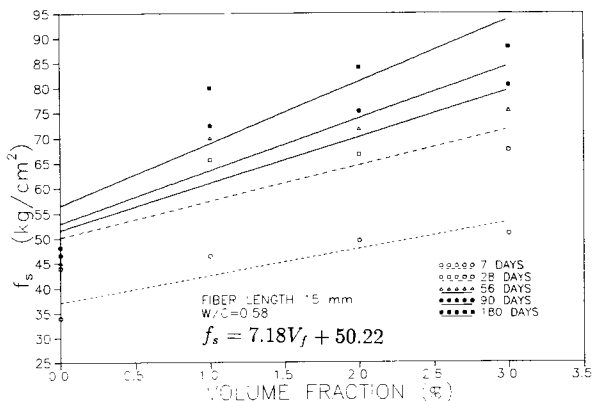


圖 4.27: 直剪強度與CFRC纖維體積比的關係

2. 較高的水灰比, 會產生較多的孔隙, 降低抗壓強度。
3. 如減少基質的孔隙, 可提昇CFRC的抗壓強度。

CFRC抗劈裂強度比Plain增加了1.07~1.36倍, (表4.15, 4.16), 抗彎強度增加了1.09~1.64倍, 直剪強度增加了1.2~1.57倍。體積比越高與水灰比越低其提昇倍數越高。

由表4.15、4.16可知CFRC與CFRM的試驗結果很接近, 因為CFRM的 f'_{cc} 值與混凝土的 f'_c 很接近, 其比值與回歸公式均近似。CFRM並沒有摻入任何添加劑, 所以工作度較差, 但適當的搗實與摻入強塑劑的CFRC強度的性質相似, 所以只要克服纖維混凝土的工作度, 其強度才能達到要求。CFRM的拌含量比CFRC較少, 造成工作度的難易, 無法單以CFRM來預測。ACI建議值為:

$$f_{ct} = 1.78\sqrt{f'_c}$$

$$f_r = 1.99\sqrt{f'_c}$$

$$f_s = 0.53\sqrt{f'_c}$$

Plain Concrete 以試驗平均值迴歸可得：

$$f_{ct} = 1.37\sqrt{f_c} \quad (4.19)$$

$$f_r = 2.39\sqrt{f_c} \quad (4.20)$$

$$f_s = 2.54\sqrt{f_c} \quad (4.21)$$

將CFRC試驗值迴歸並與上式作比較：

$$f_{ct} = A\sqrt{f'_{c,f}} \quad (4.22)$$

$$f_r = B\sqrt{f'_{c,f}} \quad (4.23)$$

$$f_s = C\sqrt{f'_{c,f}} \quad (4.24)$$

式中A值介於1.72~1.79之間($r=5.38$),B值介於3.07~3.28之間($r=12.82$),C值介於3.57~3.84之間($r=9.83$),標準偏差4.86,變異係數0.08。

考慮各種強度對抗壓強度及纖維體積比的關係式,可能比較合理,其關係式如下：

$$f_{ct} = 1.37\sqrt{f'_c} + 4.29V_f - 0.62V_f^2 \quad (4.25)$$

$$f_r = 2.35\sqrt{f'_c} + 9.87V_f - 1.38V_f^2 \quad (4.26)$$

$$f_s = 2.62\sqrt{f'_c} + 16.66V_f - 3.6V_f^2 \quad (4.27)$$

4.2.6 彈性模數與卜松比

A.M. Neville [10,11] 指出混凝土的彈性模數與強度有關,而強度與齡期有函數的關係,彈性模數與齡期有關。

Gray L. Vondram 指出大多數的纖維混凝土對彈性模數、卜松比、抗壓強度及潛變,沒有明顯的貢獻。

Shigeyuki Akihama[22,24,25] 的研究指出CFRM在拌合時比Plain增加了更多的空氣含量(air content),致使抗壓強度及彈性模數隨纖維體比增加而遞減。

表 4.15: CFRM 抗壓強度與抗張及抗彎強度的關係

纖維長度	f_c	f_t/f_c	f_r/f_c	f_t/f_r
Plain	267.41	0.10	0.17	0.57
6mm(乾拌)	337.78	0.08	0.22	0.35
12mm(乾拌)	357.28	0.09	0.24	0.37
24mm(乾拌)	285.00	0.12	0.26	0.44
36mm(乾拌)	281.48	0.11	0.25	0.46
12mm(溼拌)	260.88	0.12	0.33	0.34
24mm(溼拌)	279.10	0.11	0.25	0.44
36mm(溼拌)	332.50	0.08	0.20	0.40

註：水泥砂漿試體, $V_f=1\%$, 齡期 28 天

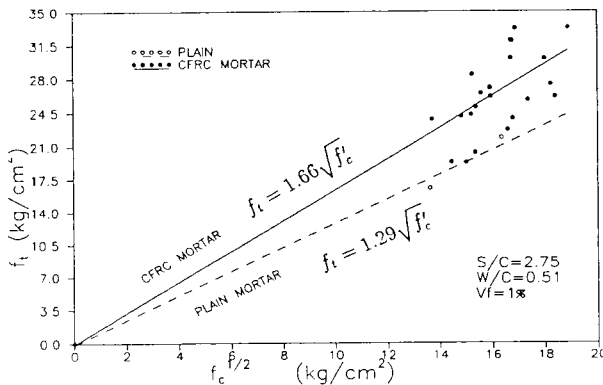


圖 4.28: 水泥砂漿抗壓強度與抗拉強度關係

表 4.16: 碳纖維混凝土抗壓強度與抗劈裂、抗彎及直剪強度的關係

水灰比	體積比	纖維長度	f'_c	f_{ct}/f_c	f_r/f_c	f_s/f_c	f_{ct}/f_r
0.58	0%	Plain	279.05	0.08	0.16	0.16	0.53
0.58	1%	6mm	240.02	0.12	0.22	0.25	0.54
0.58	1%	12mm	320.77	0.09	0.15	0.19	0.59
0.58	1%	24mm	337.78	0.09	0.15	0.19	0.60
0.58	1%	36mm	258.48	0.11	0.18	0.20	0.60
0.58	1%	15mm	329.41	0.09	0.16	0.20	0.55
0.58	2%	15mm	322.84	0.10	0.17	0.21	0.55
0.58	3%	15mm	348.97	0.09	0.17	0.19	0.54
0.63	0%	Plain	257.90	0.08	0.14	0.16	0.58
0.63	1%	6mm	237.88	0.10	0.20	0.24	0.52
0.63	1%	24mm	285.42	0.09	0.16	0.20	0.56
0.63	1%	15mm	305.25	0.09	0.17	0.19	0.53
0.63	2%	15mm	314.13	0.09	0.17	0.19	0.52
0.63	3%	15mm	303.56	0.10	0.19	0.21	0.55
0.67	0%	Plain	222.58	0.09	0.15	0.17	0.60
0.67	1%	6mm	222.74	0.11	0.18	0.23	0.60
0.67	1%	24mm	204.99	0.12	0.22	0.26	0.54
0.67	1%	15mm	215.00	0.12	0.23	0.26	0.53
0.67	2%	15mm	254.70	0.11	0.20	0.22	0.52
0.67	3%	15mm	208.62	0.14	0.26	0.28	0.52

註：齡期 28 天。

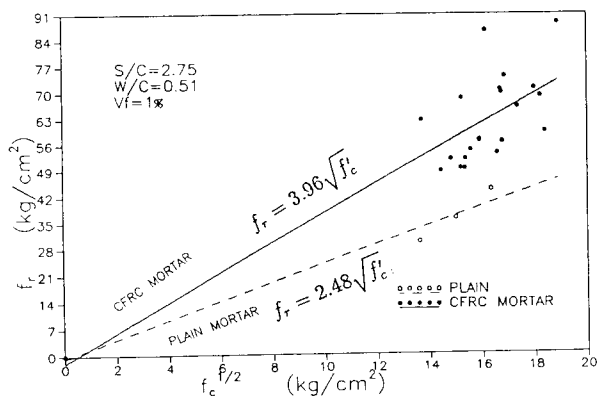


圖 4.29: 水泥砂漿抗壓強度與抗彎強度關係

依 ASTM C-469 試驗的方法求得正割彈性模數 (chord modulus of elasticity), 試驗結果詳表 4.17 及表 4.18。

1. 彈性模數隨水灰比的降低而增加, 且隨齡期的增加而增加。
2. 卜松比的試驗 Plain 的值介於 0.16 ~ 0.21 之間, CFRC 的值介於 0.10 ~ 0.19 之間, 其變化與水灰比、體積比並不是很明顯, 但可約略看出一趨勢, CFRC 卜松比的值比 Plain 的範圍低, 可推測碳纖維具有圍束效應。

ACI 建議彈性模數的公式如下:

$$E_c = 15000\sqrt{f_c}$$

本研試驗值迴歸求得抗壓強度與其彈性模數的關係如下:

$$E_c = 14076\sqrt{f_{c,f}} \quad (r = 19480) \quad (4.27)$$

式中標準偏差 15426.25, 變異係數 0.06。式 (4.27) 與 ACI 的建議公式 (2.16) 相比, 可知 CFRC 的 E 值比 Plain 為低, 折減了 0.94 倍, 其原因與抗壓強度

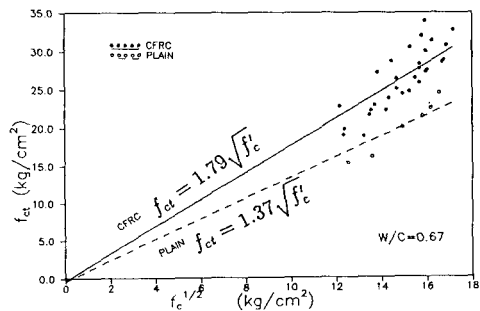
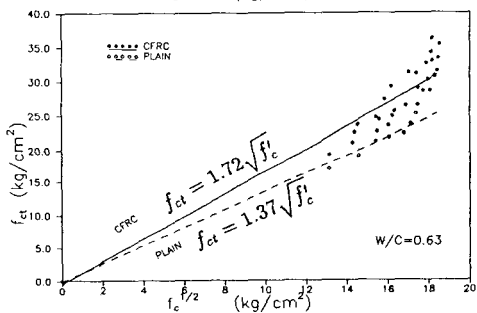
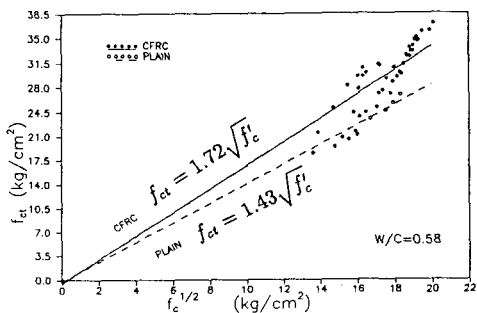


圖 4.30: CFRC 抗壓強度與抗剪裂強度關係

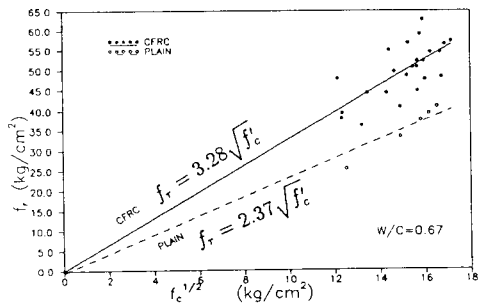
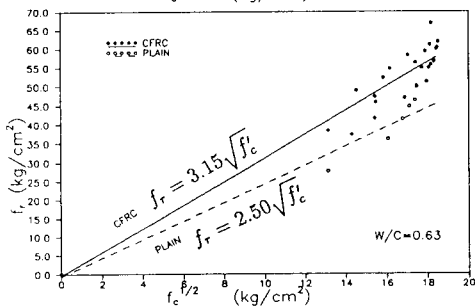
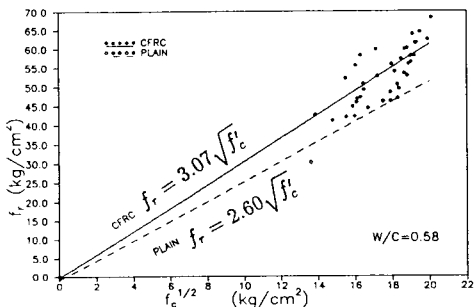


圖 4.31: CFRC 抗壓強度與抗彎強度關係

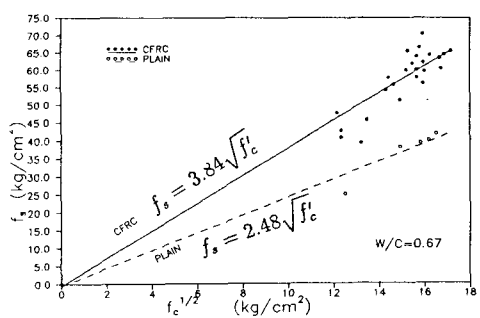
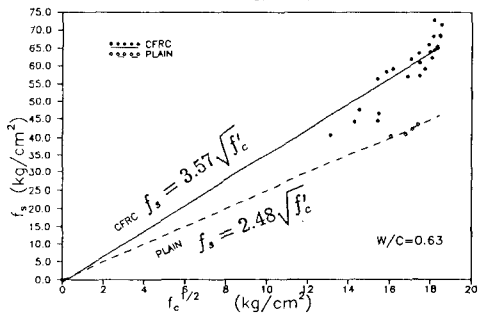
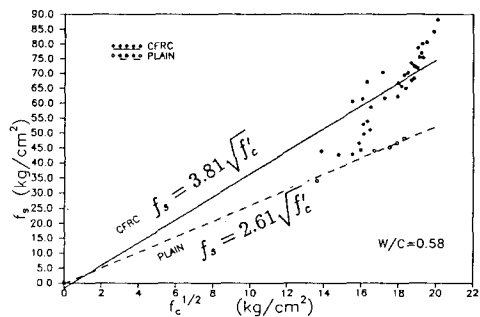


圖 4.32: CFRC 抗壓強度與直剪強度關係

表4.17: CFRC 彈性模數

水灰比	體積比	7天	14天	28天	56天	90天	180天
0.58	0%	204013	227050	251102	263205	269055	274040
0.58	1%	204260	227030	250797	262677	268610	273567
0.58	2%	204525	227064	250580	262340	268220	273126
0.58	3%	204786	227090	250373	262014	267830	272684
0.63	0%	197052	218016	241107	252400	257020	261016
0.63	1%	197106	217890	240664	251555	256505	260467
0.63	2%	197204	217785	240321	251107	256010	259920
0.63	3%	197304	217678	239985	250650	255502	259380
0.67	0%	188022	204056	224083	237064	243028	248049
0.67	1%	187962	203809	223607	236470	242414	247368
0.67	2%	187925	203606	223205	235948	241822	246724
0.67	3%	187881	203402	222804	235416	241232	246087

註：單位 kg/cm^2 。

的情形相似。考慮彈性模數對抗壓強度與纖維體積比的關係式如下：

$$E_c = 13455\sqrt{f_{c,f}} + 12982V_f - 3173V_f^2 \quad (4.29)$$

$$E_c = 14029\sqrt{f_{c,f}} + 426V_f \quad (4.30)$$

式中 V_f 介於 1% ~ 3% 之間。

4.2.7 有效係數探討

Shigeyuki Akihama[22.24.25]認為纖維含量越多則纖維有效係數會遞減。J. R. Linton 研究碳纖維水泥砂漿結果指出，纖維排列和黏握有效係數在一維(one dimension)時其值為0.25，二維時為0.33，三維時為0.17。

表4.18: CFRC卜松比

水灰比	體積比	7天	14天	28天	56天	90天	180天
0.58	0%	0.16	0.2	0.16	0.21	0.19	0.21
0.58	1%	0.15	0.15	0.18	0.14	0.15	0.14
0.58	2%	0.15	0.12	0.15	0.16	0.14	0.13
0.58	3%	0.14	0.13	0.14	0.16	0.15	0.14
0.63	0%	0.19	0.20	0.21	0.18	0.21	0.20
0.63	1%	0.14	0.16	0.15	0.12	0.15	0.14
0.63	2%	0.12	0.10	0.16	0.17	0.16	0.18
0.63	3%	0.15	0.15	0.20	0.16	0.18	0.20
0.67	0%	0.19	0.20	0.21	0.22	0.19	0.21
0.67	1%	0.14	0.15	0.14	0.19	0.16	0.13
0.67	2%	0.14	0.13	0.19	0.16	0.13	0.12
0.67	3%	0.14	0.12	0.10	0.16	0.17	0.16

註：單位無因次。

將試驗值參考複合材料的組成律及 J. R. Linton 建議公式迴歸並比較纖維排列和黏握有效係數：

$$\sigma_c = 0.07\sigma_f V_f + \sigma_m(1 - V_f) \quad (4.30)$$

$$\sigma_{ct} = 0.11\sigma_f V_f + \sigma_m(1 - V_f) \quad (4.31)$$

$$\sigma_r = 0.22\sigma_f V_f + \sigma_m(1 - V_f) \quad (4.32)$$

$$\sigma_s = 0.29\sigma_f V_f + \sigma_m(1 - V_f) \quad (4.33)$$

$$E_c = 0.09E_f V_f + E_m(1 - V_f) \quad (4.34)$$

式中 σ_f 表纖維的強度, σ_m 表基質強度, σ_c 、 σ_{ct} 、 σ_r 及 σ_s 表抗壓、抗劈裂、抗彎及直剪強度, 且 σ_c 標準偏差 48.62, 變異係數 0.16, σ_{ct} 標準偏差 2.4, 變異係數 0.09, σ_r 標準偏差 4.76, 變異係數 0.09, σ_s 標準偏差 2.86, 變異係數 0.08。

上式中有有效係數, 表示排列及黏握的關係; 可以看出以直剪強度有效係數最佳為 0.29, 次為抗彎強度 0.22, 抗劈裂強度 0.11, 彈性模數為 0.09, 抗壓強度為最低, 約 0.07, 碳纖維以此拌合方式對直剪強度的提昇較佳, 次為張力強度的提昇, 對抗壓強度的提昇最差; 抗彎強度的有效係數與 J. R. Linton 建議值約高了 30%, 本試驗與 J. R. Linton 不同的試驗條件為骨材粒徑的不同, 本試驗使用了 3/4" 的骨材, J. R. Linton 使用了標準砂。

上式以複合材料理論的模式建立與迴歸, 可知有效係數相當低, 其可能為:

1. 複合材料理論的模式分析, 其纖維假設為連續纖, 並不完全適合 CFRC 使用不連續纖維的分析模式。
2. 採 ASTM 傳統拌合方式, 對高性能碳纖的優越性無法發揮極至。

4.3 韌性

Gray L. Vondram 指出韌性是描述混凝土開裂後 (Post-crack) 行為的一種方法, 日本混凝土協會 (Japanese Concrete Institute) 指出韌性是纖維

表 4.19: 碳纖維混凝土韌性指數表

水灰比	體積比	I_5	I_{10}	I_{20}
0.58	1%	3.50	5.82	7.85
0.58	2%	4.07	6.38	8.42
0.58	3%	7.23	8.86	11.72
0.63	1%	2.19	2.46	3.47
0.63	2%	3.39	3.60	4.15
0.63	3%	5.56	6.59	7.12
0.67	1%	2.19	2.46	3.15
0.67	2%	3.01	3.60	3.87
0.67	3%	4.09	4.72	5.48

混凝土樑變位 (deflect) $1/150$ 跨徑時所需的能量。ASTM C-1018 定義韌性為彎矩載重下，中央點的變位與荷重所圍成的面積，韌性指數介於 $I_5=1 \sim 6$, $I_{10}=1 \sim 12$, $I_{20}=1 \sim 25$ 之間。

本研究對 CFRC 韌性指數的探討，分為纖維含量效應及水灰比效應兩個部份，韌性指數詳表 4.19, 表 4.33 所示：

1. 碳纖維的加入可提昇材料韌性，且隨纖維的增加而增加。
2. CFRC 的破壞為韌性破壞，具有預警效果。
3. 水灰比的降低可提昇韌性，低水灰比具有較佳的基質強度，對韌性的助益較大。
4. 試驗的過程以 Load Control 所得其韌性指數可能低估，若能以 Strain Control 所得的值較合理。

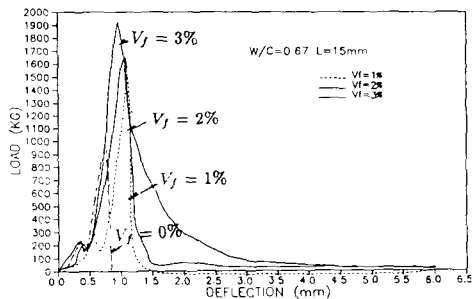
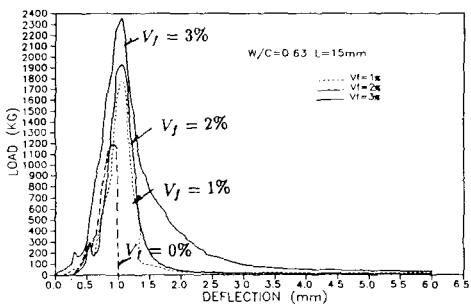
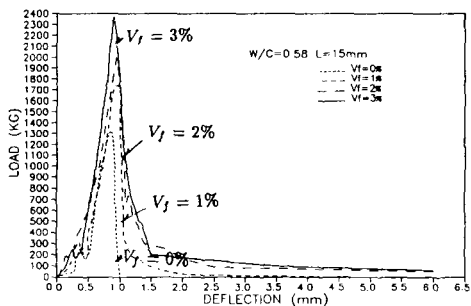


圖4.33: CFRC 荷重-變位圖

4.4 乾縮

ACI Committee 209[18] 指出影響混凝土乾縮的最重要的因素為每單位體積混凝土內的水量。卜特蘭水泥協會試驗結果說明含水量 $55\text{gal}/\text{yd}^3$ 時混凝土的乾量約為 1300×10^{-6} 並儘量減少混凝土中的水份及增加混凝土的骨材量,可使乾縮減小,使用低坍度及最少需水量的澆置方法是控制乾縮的主要因素。任何增加水泥漿量需水量的用法,如使用高坍度或小粒徑的粗骨材,都會使乾縮增加。在試驗環境 23°C 、 $50\%\text{RH}$ 下混凝土的乾縮範圍為 $400 \sim 800 \times 10^{-6}$ 。

鋼筋混凝土的收縮比純混凝土少,其差異依賴於鋼筋量的多寡,鋼筋對混凝土乾縮有束制的能力但無法防止乾縮產生;一般的 RC 結構物其乾縮量通常假設為 $200 \sim 300 \times 10^{-6}$ 。

Grzybowski 及 Shah 研究指出纖維混凝土可降低凝土裂縫寬度及對乾縮束制 (Restrained) 能力,且纖維含量越多,會延遲裂縫發生時間。

CFRC 因為纖維含量的不同,維持所需的工作度,其漿量就不同,固定水泥含量為 $627\text{kg}/\text{m}^3$,僅考慮拌合水量與纖維體積比的變數做一探討;乾縮的結果詳表 4.20 及圖 4.34, ACI Committee 209 建議一般混凝土乾縮範圍從 $415 \sim 1070 \times 10^{-6}$ 。

本試驗的乾縮均比 ACI Committee 209 的建議值都提高了許多,高水泥漿量影響了碳纖維束制乾縮的能力,但約略可看出一些趨勢:

1. 乾縮應變隨水灰比的降低而降低。
2. 乾縮應變在 $V_f = 1\%$ 時比 Plain 試驗值為高,且呈現不穩定的跳動,體積比在 $V_f = 3\%$ 乾縮應變比 Plain 的值為低。
3. 重量損失率的測定主要針對水份的逸失的試驗,其結果與乾縮應變相似,在 90 天後漸趨平緩。

乾縮應變結果詳表 4.20 及圖 4.34, 乾縮重量損失率詳表 4.21 及圖 4.35 將試驗結果迴歸,其式如下:

表 4.20: CFRC 乾縮應變表

水灰比	體積比	1天	3天	7天	14天	28天	56天	90天	180天
0.58	0%	80	127	257	336	554	775	1023	1129
0.58	1%	63	146	195	370	547	840	916	1045
0.58	2%	41	124	198	326	440	714	900	950
0.58	3%	37	110	132	273	380	604	710	920
0.63	0%	92	178	264	434	671	1114	1319	1453
0.63	1%	100	161	261	480	850	1250	1410	1610
0.63	2%	54	144	245	366	580	923	1015	1150
0.63	3%	44	132	239	273	504	720	882	1040
0.67	0%	107	540	650	780	969	1291	1371	1400
0.67	1%	251	480	791	971	1152	1308	1518	1750
0.67	2%	205	364	464	704	1050	1204	1420	1620
0.67	3%	102	231	417	578	870	1050	1205	1504

註：單位 10^{-6} ，養護環境： $18^{\circ}\text{C} \sim 24^{\circ}\text{C}$ ， $50\% \sim 65\%\text{RH}$ ），
水泥量 $627\text{kg}/\text{m}^3$ ，纖維長度 15mm 。

$$\varepsilon_{sh} = \frac{t}{22+t}(\varepsilon_{sh})_{lim} \quad (4.36)$$

式中標準偏差 262.52，變異係數 0.22，t 表齡期， $(\varepsilon_{sh})_{lim}$ 表 180 天乾縮應變。

表 4.21: CFRC 乾縮重量損失率

水灰比	體積比	1天	3天	7天	14天	28天	56天	90天	180天
0.58	0%	0.60	1.50	2.54	2.95	3.91	4.05	4.15	4.20
0.58	1%	0.49	1.31	1.62	2.26	2.78	3.09	3.19	3.23
0.58	2%	0.55	1.42	2.49	2.88	3.54	3.75	3.88	3.92
0.58	3%	0.62	1.45	2.50	3.40	4.12	4.59	4.70	4.75
0.63	0%	0.79	1.79	2.81	3.63	4.49	4.66	4.78	4.83
0.63	1%	0.76	1.37	1.85	2.36	3.17	3.82	3.90	3.96
0.63	2%	0.82	1.46	2.42	3.05	3.72	4.32	4.48	4.50
0.63	3%	0.89	1.56	2.55	3.42	4.98	5.65	5.81	5.94
0.67	0%	0.95	2.08	3.08	4.30	5.06	5.27	5.40	5.45
0.67	1%	0.83	1.35	2.17	2.88	3.47	3.83	4.03	4.09
0.67	2%	1.08	1.59	2.69	3.86	4.76	5.30	5.36	5.40
0.67	3%	1.31	1.83	2.82	4.27	4.89	5.67	5.85	5.97

註：單位%，養護環境：18℃～24℃，50%～65%RH，纖維長度15mm。

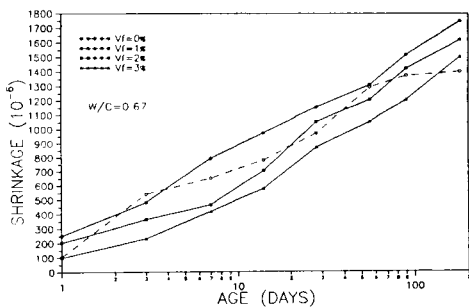
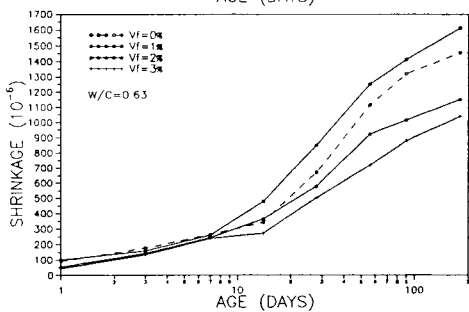
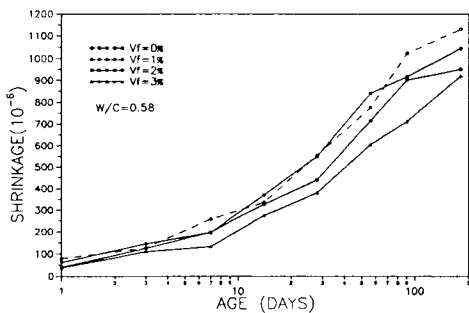


圖 4.34: CFRC 乾縮應變與齡期的關係

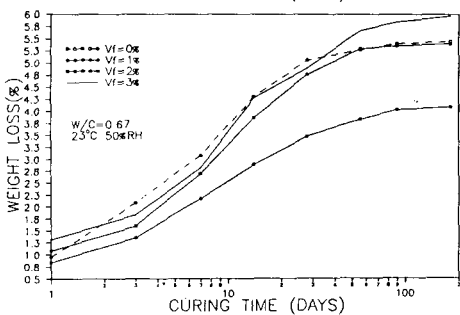
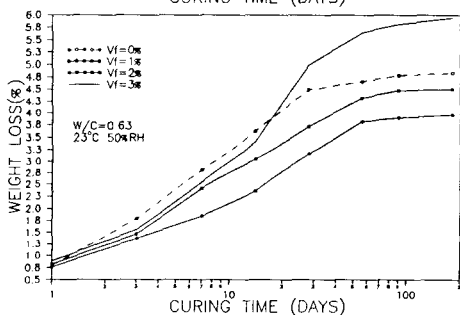
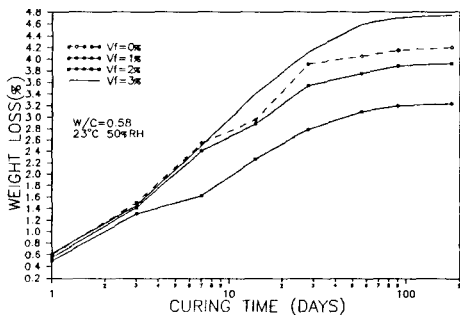


圖 4.35: CFRC 乾縮重量損失率

4.5 抵抗裂縫能力

4.5.1 高溫環境效應

A.M. Neville [10,11] 指出高溫對混凝土的早期強度有益,但在長期的高溫下的環境對混凝土有害,致使強度降低。

Colin Johnston 指出造成混凝土裂縫的兩個基本原因是:

1. 載重所產生的應力。
2. 因為乾縮或溫度改變所造成的應力。

乾縮是混凝土無法避免的特性,適當的安放鋼筋可減少裂縫的寬度,或使用伸縮縫的方式處理;溫度變化造成熱應力亦會造成裂縫,特別是齡期較短的混凝土,較易產生溫差裂縫。混凝土在溫度變化的環境下,會產生體積變化,混凝土內由多相材料組成,熱膨脹的體積並不一致,產生內應力,助長微裂縫的成長,降低混凝土的強度,而減少了混凝土的使用性。

Gray L. Vondram 指出纖維並不會改變混凝土的孔隙及透水性,但纖維會防止微裂縫成長為大裂縫,而且會保護多孔混凝土受環境的侵害。

Ench Fitzer[1] 指出碳纖維在無氧氣狀態下可耐 1600°C 的高溫,台塑台麗朗事業部指出 C12K33 型碳纖維在氧氣狀態下可耐 300°C 的高溫;碳纖維對環境的安定性極佳。

碳纖維混凝土與外界的環境息息相關,本試驗是探求對溼養 28 天後的抗壓圓柱試體置於 75°C 環境效應下的強度影響,由試驗結果(表 4.22 及圖 4.36),Plain 的強度隨養護的時間增加,呈現先昇後降的折線,折點發生在高溫養置後 7 天,第 14 天及 28 天呈下降的趨勢,CFRC 的強度隨養護的時間增加而增加。其原因如下:

1. Plain 組試體在高溫效應下 28 天後,表面有可見微裂縫,而 CFRC 則無可見裂縫,可知碳纖維對溫差裂縫控制有貢獻。

表 4.22: CFRC 高溫環境抗壓試驗

水灰比	體積比	$f_{c,28}$	$f_{c,56}$	$f_{c,35}^*$	$f_{c,42}^*$	$f_{c,56}^*$
0.58	0%	279.05	306.96	284.63	252.05	242.45
0.58	1%	329.41	341.48	342.34	347.28	350.68
0.58	2%	332.84	360.82	322.53	342.21	365.24
0.58	3%	348.97	364.78	362.56	381.29	389.27
0.63	0%	257.90	281.69	263.06	229.53	221.79
0.63	1%	305.25	326.25	308.30	329.33	335.32
0.63	2%	314.13	334.79	315.50	327.98	346.25
0.63	3%	303.56	320.00	309.40	327.05	343.62
0.67	0%	222.58	250.36	228.14	202.54	193.65
0.67	1%	215.00	245.54	208.50	217.15	221.45
0.67	2%	254.70	278.00	253.79	261.60	267.83
0.67	3%	208.62	233.14	205.67	208.97	218.71

註：單位 kg/cm^2 , $f_{c,35}^*$ 表在環境效應 $75^\circ C$, 7 天
50%RH, 纖維長度 15mm。

2. Plain 組試體在高溫效應下初期抗壓強, 仍受高溫催化而提昇抗壓強度, 但超過 7 天後, 抗壓強度不會提昇。
3. CRFC 在高溫養置 28 天後, 其強度仍有明顯提昇, 可能在纖維間的水泥, 受高溫催化, 加速水化反應, 更提昇其強度。
4. 強度隨著體積比的增加而增加。

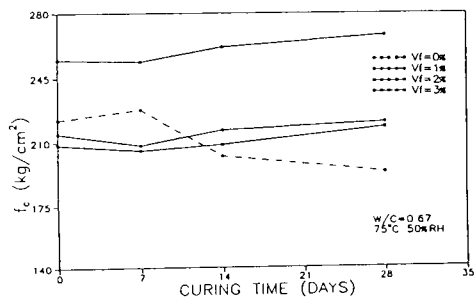
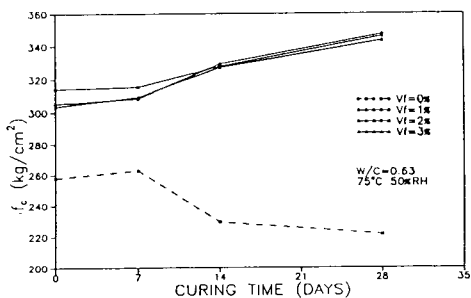
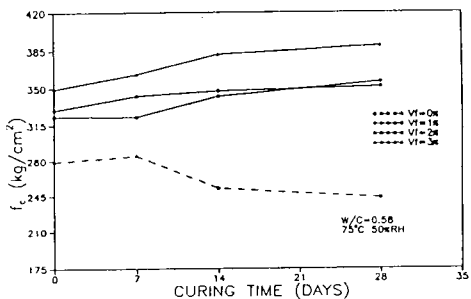
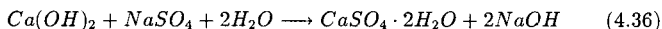


圖 4.36: CFRC 高溫環境抗壓強度變化情形

4.5.2 抗硫酸鹽類侵蝕

S. Mindess與J. F. Young[19]認為一般硫酸鹽對混凝土的侵蝕乃由於 $MgSO_4$ 、 Na_2SO_4 等硫酸鹽類與混凝土中之水化產物氫氧化鈣 $Ca(OH)_2$ 起反應，形成石膏($CaSO_4 \cdot 2H_2O$)使混凝土變質。混凝土受到硫酸鈉之侵蝕反應式，其反應後之副產品為氫氧化鈉($NaOH$)。



上式反應後之石膏($CaSO_4 \cdot 2H_2O$)會再與水泥中之鋁酸三鈣(C_3A)起化學反應而生成針狀形之鈣鈣石(Ettringite)，此反應產物即一般公認為因硫酸鹽導致混凝土膨脹的主因。由於鈣鈣石之結晶體積可膨脹兩倍，其膨脹所產生之壓力約可達 3500kgf/cm^2 ，因此混凝土受到了嚴重損傷而導致龜裂、崩壞的情形發生。如此反而更使有害物質加速及加深侵入混凝土內部，而加速其破壞。

1991年Erik Stoklund Larsen及Herbert Krenchel[49]對不同纖維混凝土材料作耐久性的研究，以鋼纖維、PP纖維、玻纖(AR-Glass)、及天然纖維，置於室外及試驗室比較，試驗齡期為10年，並以破壞能量(fracture energy)評估何種材料的值最高，其結果以鋼纖維及PP纖維的耐久性最佳且提高了40%，而玻纖及天然纖維的耐久性有遞減的情形，因為玻纖在自然的曝曬下產生脆化及老化的現象，但此結果均比不含纖維的混凝土的情形為佳。

試驗結果表4.23、表4.24所示：

1. CFRC對抗硫酸鹽的侵蝕比Plain為佳。
2. 抗壓強度的遞減92~98%，抗劈裂強度遞減79~81.9%。
3. 水灰比越低抗硫酸鹽的侵蝕能力越佳。
4. 水灰比0.67Plain試體在浸泡飽和硫酸鈉溶液60天後，試體表面有剝落的情形。

表 4.23: CFRC 抗硫酸鹽類侵蝕抗壓強度表

水灰比	體積比	$f_{c,28}$	$f_{c,90}$	$f_{c,90}^*$	$f_{c,90}^*/f_{c,90}$
0.58	0%	279.05	320.91	302.68	94.32%
0.58	1%	337.78	356.72	352.87	98.92%
0.63	0%	257.90	292.75	273.92	93.57%
0.63	1%	285.42	322.37	315.02	97.72%
0.67	0%	222.58	261.74	241.06	92.10%
0.67	1%	204.99	239.71	229.09	95.57%

註：單位 kg/cm^2 ，纖維長度 24mm。

$f_{c,90}^*$ 表置於硫酸鹽環境中 62 天 (90-28)。

表 4.24: CFRC 抗硫酸鹽類侵蝕抗劈裂強度表

水灰比	體積比	$f_{ct,28}$	$f_{ct,90}$	$f_{ct,90}^*$	$f_{ct,90}^*/f_{ct,90}$
0.58	0%	23.42	25.67	20.69	80.60%
0.58	1%	29.78	33.06	27.61	83.52%
0.63	0%	21.79	23.67	18.97	80.14%
0.63	1%	26.42	30.22	24.83	82.15%
0.67	0%	20.03	22.56	18.01	79.85%
0.67	1%	23.85	26.50	21.71	81.90%

註：單位 kg/cm^2 ，纖維長度 24mm。

$f_{ct,90}^*$ 表置於硫酸鹽環境中 62 天。

第五章

經濟評估

5.1 碳纖維混凝土的特點

自1960年來纖維混凝土有了較突破的進展，因為高性能纖維的研究發展有了相當的進步，在過去五十年間，由於新型的人造纖維日新月異，提昇了強度、耐熱性、抗化學侵蝕等優點，而在許多新型的纖維中，碳纖維是最具競爭的一種。

碳纖維的優越性可由表5.2知，唯單價偏高，但將最適合的材料用最適當的地方，亦可提供其時效的經濟性，將碳纖維混凝土的特點分述如下：

1. 就材料本身而言：

- 減少巨大裂縫產生。
- 增加材料強度及韌性。
- 減低混凝土的劣化，增加混凝土的壽命。
- 減少不當的內應力產生的破壞。
- 減少不均勻的收縮產生的破壞。
- 極限荷載後的Postpeak的行為比一般混凝土為高，以能量的觀點，其所能吸收的能量比一般的混凝土的能量高。

表 5.1: PAN 系碳纖維全球需求(噸/年)

地區\年	1989	1990	1991	1992	1993	1994	1995
美洲	2,500	2,630	2,760	3,040	3,350	3,690	4,060
歐洲	1,100	1,250	1,400	1,570	1,760	1,970	2,200
日本	1,110	1,170	1,310	1,400	1,470	1,550	1,650
亞洲及其他地區	1,090	1,140	1,230	1,300	1,380	1,480	1,600
合計	5,800	6,190	6,700	7,310	7,960	8,690	9,510

表 5.2: 各種纖維性能表-ACI 544

纖維種類	抗拉強度 ksi	彈性模數 10 ³ ksi	伸長率 %	比重
Acrylic	30~60	0.3	25~45	1.1
Asbestos	80~140	12~20	~0.6	3.2
Cotton	60~100	0.7	3~10	1.5
Glass	150~550	10	1.3~3.5	2.5
Nylon (high tenacity)	110~120	0.6	16~20	1.1
Polyester (high tenacity)	105~125	1.2	11~13	1.4
Polyethylene	~100	0.02~0.06	~10	0.95
Polypropylene	80~110	0.5	~25	0.9
Rayon (high tenacity)	60~90	1.0	10~25	1.5
Rock Wool(Scandinavian)	70~110	10~17	~0.6	2.7
Steel	40~400	29	0.5~35	7.8
Carbon (PAN)	500	33	1.5	1.8

2. 就結構體而言：

- 材料的韌性增加,有預警的作用,可提高結構安全性,適合耐震結構物使用。
- 增加反覆載重的抵抗能力[17],可適用於工廠地板或承受反覆載重的結構物。
- 抗裂能力的提昇,可適用於溫差大或環境惡(參照表5.7)劣的地點,如薄殼結構、屋面版結構、帷幕牆等構材。
- CFRC 為纖維混凝土的一種,其可使用於其他纖維混凝土適用的地方,而不會有表面腐蝕(鋼纖維)、表面墾飾的不易(鋼纖維)、不會產生公害(石棉纖維)、受日光長期照射纖維老化的情形(PP 纖維)、或因鹼性環境對纖維的破壞(玻璃纖維)而有所限制。

3. 就施工而言：

- 高溫養護的強度良好,較適於預鑄方式施工。
- 現場灌注需注意拌合均勻度及可搗實度。

表 5.3: 混凝土劣化的因素

混凝土劣化的種類	項 目	方 式
物理因素	龜裂、破裂	結構載重 超載、衝擊、疲勞 暴露極端溫度 凍融、火害 體積變化 溫度坡降、內應力
	磨耗	磨損 沖蝕 穴蝕
化學因素	硬固水泥漿水解	增加孔隙率 失去鹼性
	有害物與水泥漿交換反應	增加透水性 加速劣化反應 失去強度
	膨脹反應	硫酸鹽侵蝕 產生內應力 鹼骨材反應 剝落、破裂 鋼筋腐蝕 失去強度

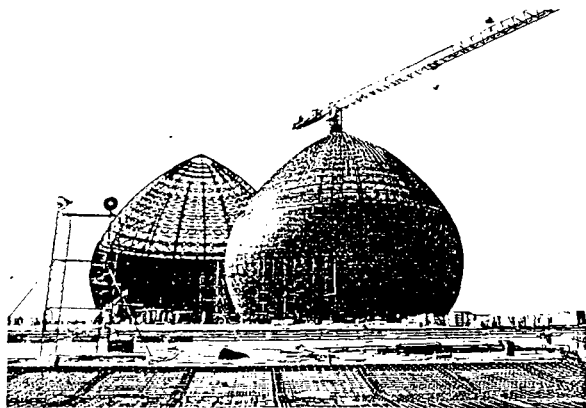


圖 5.1: 伊拉克首都巴格達圓頂式紀念館

5.2 碳纖維混凝土之應用實例

碳纖維混凝土應用範圍較鋼纖維混凝土或玻璃纖維強化水泥為少[17, 25], 主要用於構造物波形元件、薄殼結構、鷹架板、通道踏板及帷幕牆等。圖 5.1 中為伊拉克首都巴格達內之一圓頂式紀念館, 巴格達氣候夏天為高溫、濕度低, 冬天為低溫, 一年中四季溫度變化大的情況下, 該建築已存在八年, 其結構體相當良好, 這點足以證明 CFRC 性質不易溫差影響, 其對溫度變具甚高的耐久性及穩定性。

圖 5.2 中為日本東京 ARK 37 層辦公大樓帷幕牆採用輕質碳纖混凝土 (比重 1.3, 面積 $2000m^2$) 之實例, 其比一般混凝土材料提高 40%, 但因其具有較高的強度, 且相對使帷幕牆厚度減少, 因此節省了 4000 公噸的鋼骨及打樁、吊運安裝費, 減輕 12% 地震力的影響, 可增大開窗面積及視野, 設計時造型的多樣性, 使建築物外部美觀等優點。

國內民間水泥材料預鑄場, 引進日本技術於宜蘭龍德工業區內設廠, 為國內纖維混凝土的技術提昇水準, 其材料特性結合了預鑄、輕質、纖維混凝土等優點 (自動化、技術密集、品質佳、工期掌握及施工環保問題的降低), 且自重輕、施工搬運容易, 亦節省搬運及施工的能量。



圖 5.2: 日本東京ARK 37層辦公大樓

CFRC 的高單價主因為碳纖維的使用量,若考慮與其他纖維的組合 [42] 使用,不但可發揮碳纖維的高韌性,與其他纖維的特性可將此纖維混凝土 (hibrid) 發揮極至; CFRC 的工作度與骨材的粒徑有關,若引用粒徑極細的輕骨材 [25,42],不但可減輕台灣地區的骨材日漸枯竭的問題,而且可使用不同的拌合成型方式,如噴凝土或真空加壓成型的方式施工,不但可減低 CFRC 的工作困難度,更提昇混凝土材料的技術。

5.3 成本分析

碳纖維使用於混凝土工程上,雖有許多優點,但由於其價格較昂貴,因此對碳纖維混凝土的成本分析是必須考慮的。根據台灣地區砂石廠及預拌廠調查的結果,碳纖維混凝土其單位成本如下:

1. 水泥: 袋裝水泥, 每包淨重 50 公斤, 售價 150 元。單位價格為每公斤 3 元。
2. 細骨材: 新竹頭前溪上游之細骨材, 單位重 1440 公斤, 售價 450 元。單位價格為每公斤 0.31 元。

表 5.4: 全世界 PAN 型碳纖維生產量能

國別	產能(噸/年)	生產廠家
日本	3,870	Toray, Tohp Rayon, Mitsubishi Rayon Asahi Kasei Carbon Fiber
美國	3,325	Herculus, BASF Str. Materials Amoco Performance Products Courtaulds-Grafil, BPAC, Zoltex, Avco
歐洲	1,255	Courtaulds-Grafil, Akzo, Soficar, R.K. Carbon, Sigri
中華民國	230	台塑
韓國	150	韓國製鋼化學
以色列	100	Afikim Carbon

3. 粗骨材：新竹頭前溪上游之粗骨材，單位重1546公斤，售價350元。單位價格為每公斤0.23元。
4. 碳纖維：台塑台麗碳絲，CK1233型。單位價格為每公斤400元。
5. 強塑劑：使用N.F.緩凝型強塑劑。單位價格為每公斤35元。

將上述各基本價格，分別估算各混凝土配比的單位價格，如表5.5，以 $V_f = 1\%$ 的CFRC而言約為一般混凝土的六倍，每 kg/cm^2 的單價如表5.6所示。

CFRC與其他纖維混凝土在相同纖維體積比的重量比如表5.7所示，CFRC比SFRC及GFRC的單位重量為輕，表5.8中，CFRC的纖維總價最高，但僅SFRC的1.3倍。參照明潭地下工程的鋼纖噴凝土的配比計算其每立方米的工程單價如表5.9，每立方米單價為8382元，(表中骨材的單價假設與CFRC相同)，與CFRC的單價9100元相差1.09倍，此單價均不含拌合機具的費用。

文獻[45]中指出(如表5.10)，混凝土在工程中所佔的比例約10%，而使用纖維混凝土的部份低於10%，其單價雖高，但對總工程造价的影響並不是很多，相對的以混凝土的壽命及混凝土維修所需的成本一併考慮，CFRC的單價比一般混凝土的單價就降低許多。

台灣水泥用量1500萬噸/年，如果有1%的混凝土使用碳纖維補強，將有15萬噸碳纖維混凝土的使用，以1%的碳纖維摻入量計，則需每年1500噸的碳纖維產量才夠使用。

表5.5中影響混凝土的單價的主因為碳纖維，表3.9中知CFRC每立方米 $V_f = 1\%$ 所需的碳纖維的用量為18kg，約7200元，目碳纖維售價約每公斤400元，若用量的激增可降低碳纖維的售價，如此可將碳纖維混凝土打入台灣的建材領域。目前CFRC價錢比一般混凝土材料貴，但是，以長期而言複合材料會因技術不斷革新而逐漸掌握優勢，CFRC在未來會以其質輕、耐蝕及易成型等優點逐漸取代其他建材。

表 5.5: CFRC 單價分析表

水灰比	體積比	抗壓強度 kg/cm^2	抗彎強度 kg/cm^2	單價 元/ m^3
0.58	0%	279.05	44.30	1520
0.58	1%	321.41	53.82	9200
0.58	2%	322.84	55.97	16800
0.58	3%	348.97	59.82	24400
0.63	0%	257.90	36.11	1450
0.63	1%	305.25	49.09	9100
0.63	2%	314.13	54.84	16600
0.63	3%	303.56	56.31	24200
0.67	0%	222.58	33.39	1400
0.67	1%	215.00	49.46	9000
0.67	2%	254.70	52.18	16500
0.67	3%	208.62	54.92	24050

表 5.6: CFRC 每 kg/cm^2 單價分析表

水灰比	體積比	抗壓強度	抗劈裂強度	抗彎強度	直剪強度
0.58	0%	5.48	73.43	34.31	34.54
0.58	1%	27.93	340.99	170.94	140.16
0.58	2%	52.04	576.92	300.16	251.80
0.58	3%	69.92	814.42	407.89	361.11
0.63	0%	5.62	76.48	40.16	35.76
0.63	1%	29.81	366.49	165.94	158.79
0.63	2%	52.84	649.45	302.70	280.78
0.63	3%	79.72	839.40	429.76	380.50
0.67	0%	6.29	86.96	41.93	36.65
0.67	1%	41.86	392.84	181.97	161.58
0.67	2%	64.78	658.95	316.21	294.12
0.67	3%	115.28	884.19	437.91	416.81

註：單位元。

表 5.7: 各種纖維混凝土單位重量的比較

纖維混凝土種類	單位重 (kg/m^3)	FRC/Plain(%)
Plain	2300	100.00
SFRC	2355	102.39
GFRC	2302	100.08
CFRC	2295	99.78
PFRC	2286	99.39

註： $V_f = 1\%$ 。

表 5.8: 各種纖維混凝土 $V_f = 1\%$, 所需的纖維重量及單價比較

纖維混凝土種類	纖維重量 (kg/m^3)	纖維單價 (元/kg)	總價 (kg/m^3)
SFRC	78	70	5460
GFRC	55	25	1375
CFRC	18	400	7200
PFRC	9	50	450

表 5.9: 明潭工程鋼纖噴凝土 $1m^3$ 單價分析表

材料名稱	重量 kg/m^3	單價 (元/kg)	小計 (元)
水	198	—	—
水泥	450	3	1350
細骨材	1159	0.31	360
粗骨材	497	0.23	114
鋼纖維	60	70	4200
矽灰	45	35	1575
速凝劑	22.5	20	450
減水劑	0.9	20	18
強塑劑	9	35	315
			總計：8382

表 5.10: 臺灣地區住宅類工程金額比例表

項目	佔工程金額比例 (%)
鋼筋	14.8
混凝土	10.9
模板	14.7
砌 1B 磚牆	0.8
砌 1/2B 磚牆	1.7
鋁門窗類	5.2
磁磚類	11.2

第六章

結論與建議

6.1 結論

1. 拌合水量與CFRC的纖維體積比線性關係，碳纖維的加入造成工作度降低，為維持一定的工作度需加入相當的漿量，而強塑劑並不是CFRC最理想的纖維分散劑。
2. 拌合的方式以乾拌的方式比溼拌方式的試體會有較佳的力學性質。
3. CFRC的工作度的難易無法由CFRM得知。
4. 以反坍度錐量測碳纖維混凝土的工作度，比坍度試驗的結果為佳。
5. 碳纖維長度越長工作困難度會增加，而且強度並不與碳纖維長度成正比關係，以抗壓、抗張強度而言，最佳的碳纖維長度介於12mm～24mm之間。
6. 有效係數以直剪強度最好，其次為抗彎強度。
7. 碳纖維對基質的強度反應敏感，較佳的基質強度可有效提昇CFRC的強度，在水灰比為0.58時CFRC的各種強度均提昇，在0.63及0.67時直剪及抗張的強度亦明顯的提昇，對抗壓強度的影響則不明顯。

8. 碳纖維混凝土彎矩破壞的形式為韌性破壞,具有預警的效果。
9. 碳纖維對混凝土有圍束的效應,可減低側向的應變量。
10. 碳纖維加入混凝土中可有效的抵抗內部裂縫的延伸,減少混凝土惡化的因素。

6.2 建議

1. 由於受試驗設備的限制,本研究韌性指數以荷重控制(load control),若能符合ASTM C-1018之規定以應變控制(strain control)試驗,則更能提高其可信度。
2. 本研究為確保試驗數值的穩定性,對配比中的高水泥含量,未以礦物摻料取代,若考慮摻料當變數,可助於碳纖維混凝土工程應用與材料的發展。
3. 碳纖維混凝土骨材的粒徑,不但影工作度與拌合方式,如果將骨材粒徑改變,或改為輕骨材,材料重量降低,其力學性質亦會改變,可助於非主要結構的發展。
4. 碳纖維混凝土的力學行為與碳纖維的含量多寡有密切關係,但是受傳統混凝土拌合方式的限制,工作度相當不佳,需藉助摻料的使用,才能維持工作度,現有摻料以水泥顆粒分散為主的表面活性劑,如果能找出含概水泥及碳纖維的表面活性劑,不但能提高碳纖維混凝土的工作度,更能提高碳纖維混凝土的品質。
5. 碳纖維混凝土的拌合方式如果能夠改變,且纖維的排列方向能控制,則碳纖維混凝土的使用效益可提昇。

參考文獻

- [1] Ench Fitzer, *Carbon Fibers and Their Composites*, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 1985.
- [2] Antoine E. Naaman, "Fiber Reinforcement for Concrete," *Concrete International*, pp.21-25, March 1985.
- [3] 許永綏譯, 高性能纖維學, 徐氏基金會, 台北, 民國七十七年八月。
- [4] Erich Fitzer, "Carbon Fibres and Their Composites," United Nations Financing System for Science and Technology for Development (UN-FSSTD), 1985.
- [5] J.M. Dransfield and R. M. Edmeaves, "Superplasticisers," Cement Admixtures, pp. 85-101, Logman Group UK Limited, 1977.
- [6] 黃兆龍, 混凝土添加強塑劑之效能研究, 台灣營建研究中心, 台北, 民國七十五年。
- [7] 彭頌舜, 「有關強塑劑在混凝土之應用的研究」, 國立交通大學, 碩士論文, 民國七十六年。
- [8] 黃兆龍, 混凝土品質保證, 詹氏, 台北, 民國七十八年八月。
- [9] 沈進發, 混凝土品質控制, 工技學院, 台北, 民國七十五年三月。
- [10] A.M. Neville, *Properties of Concrete*, Pitman Publishing Inc., 1984.

- [11] A.M. Neville and J. J. Brooks, *Concrete Technology*, Logman Group UK Limited, 1987.
- [12] ACI Committee 544, "State-of-the-Art Report on Fiber Reinforced Concrete," *Concrete International*, ACI 544 1R-3R, Mich, USA, 1982.
- [13] Metha, P. Kumar, *Concrete: Structure, Properties and Materials*. Prentice-Hall, New Jersey, Inc., 1986.
- [14] C. R. Barrett 著, 工程材料原理, 黃偉哲譯, 科技, 台北, 民國七十五年五月。
- [15] 賴森榮, 纖維混凝土之發展與應用, 台灣管建研究中心, TR-7211, 台北, 民國七十二年。
- [16] Constantin Avram. *Concrete Strength and Strain*, Elsevier Scientific Publishing Company, 1981.
- [17] 宋佩瑄, 「碳纖維混凝土」, 現代營建, 63~67頁, 民國七十八年五月。
- [18] ACI Committee 209. "Prediction of Creep, Shrinkage, and Temperature Effects in Concrete Structures." *Concrete International*. ACI 209, Mich, USA. 1982.
- [19] S. Mindess and J. F. Young, *Concrete*, Prentice-Hall, Inc., New Jersey, 1981.
- [20] B. K. Larson. L. T. Drzal and P. Sorousian. "Carbon Fiber Cement Adhesion in Carbon Fiber Reinforced Cement Composites." *Composites*. Vol. 21, No. 3, pp.205-215. May 1989.
- [21] M. A. Ali, A. J. Majum and D. L. Rayment. "Carbon Fiber Reinforcement of Cement." *Cement and Concrete Research*. Vol. 2, pp.201-212. 1972.

- [22] Shigeyuki Akihama, Tatso Suenaga and Tadashi Banno, "Mechanic Properties of Carbon Fiber Reinforced Cement Composites," *The International Journal of Cement Composites And Light Concrete*, Vol. 8, No. 1, February 1986.
- [23] Shigeru Furukawa, Yukikazu Tsuji and Sugio Otani " Production and Mechanical Properties of Carbon Fiber Reinforced Cement Composites," The 30th Japan Congress on Materials Research, March 1987.
- [24] Shigeyuki Akihama, Tatso Suenaga and Hiroaki Nakagawa, "Carbon Fiber Reinforced Concrete," *Conceret International*, pp.40-46, January 1988.
- [25] Shigeyuki Akihama, Tatso Suenaga and Tadashi Banno, "Mechanic Properties of Carbon Fiber Reinforced Cement Composites and The Application to Larg Domes," *KICT Report*, No.53, Kajima Institute of Construction Technology, Tokyo, July 1984.
- [26] Yoshihiko Ohama, Mikio Amano and Mitshuhiro Endo, "Properties of Carbon Fiber Reinforced Cement With Silica Fume," *Conceret International*, pp.58-62, March 1985.
- [27] Yoshihiko Ohama and A. Shirai, "Flexural Behavior of Ferro cement with Carbon Fiber Reinforced Cement as a Matrix," *Ocean Space Utilization 85 Preceeding of the International Symposium*, Pub. by Springer-Verlay, Tokyo,Jpn and New York USA, Vol.2, pp. 391-398, 1985.
- [28] Nemkumar Bantia and Yoshihiko Ohama, "Dynamic Tensile Fracture of Carbon Fiber Reinforced Cement," *Fiber Reinforced Cement and Concrete Recent Development*, Elsevier Science Publishers LTD., PP.251-260, 1989.

- [29] Parviz Sorouahian, Ziad Bayasi and Mohamad Nagi, "Effect of Curing Procedures on Mechanical Properties of Carbon Fiber Reinforced Cement," *Fiber Reinforced Cement and Concrete Recent Development*, Elsevier Science Publishers LTD., PP.167-178, 1989.
- [30] Ziad Bayasi and Gregory Peterson, "Use of Small-Diameter Polypropylene in Fibers Cement-Based Materials," *Fiber Reinforced Cement and Concrete Recent Development*, Elsevier Science Publishers LTD., PP.200-207, 1989.
- [31] S. Sato, A Kurumada, H. Iwaki and Y. Komatsu, "Tensile Properties and Fracture Toughness of Carbon-Fiber Felt Reinforced Carbon Composites at High Temperature," *Carbon*, Vol.27, No.6, pp.791-801, 1989.
- [32] J. Watkins, and K. L. W. Liu, "A Finite Element Study of the Short Beam Test Specimen under Mode II Loading," *The International Journal of Cement Composites And Light Concrete*, Vol.7, No.1, pp.7-13, 1985.
- [33] 宋佩瑄, 「鋼纖維混凝土 $K_{II}C$ 及韌性指數之研究」, 土木水利, 第十四卷, 第四期, 91~100頁, 民國七十七年二月。
- [34] G. Rehm, P. Diem, R. Zimbelmann, "Technische Möglichkeiten zur Erhöhung der Zugfestigkeit von Beton." *Schriftenreihe des DAFStb*, Heft 283. Berlin 1977.
- [35] M. Monteiro, P. K. Mehta, "Interaction Between Carbonate Rock and Cement Past." *Cement and Concrete Research* Vol.16. pp.127-134. 1985.
- [36] Chen Zhi Yuan, Cheng Qing Hua. and Gao Feng, "Influence of Interface Modification in Fiber Reinforced Cement Composites on their

- Properties," *Materials Research Society(MRS)*, Vol.211, pp.209-214, 1991.
- [37] J. Moens, and D. Nemegeer, "Designing Fiber Reinforced Concrete Based on Toughness Characteristics," *Concrete International*, pp.38-43, November 1991.
- [38] Athel E. Allos, "Shear Transfer in Fiber Reinforced Concrete," *Fiber Reinforced Cement and Concrete Recent Development*, Elsevier Science Publishers LTD., PP.146-156, 1989.
- [39] Antoine E. Naaman, Duane Otter, and Husamuddin Najim, "Elastic Modulus of SIFCON in Tension and Compression," *ACI Materials Journal*, pp.603-612, December 1991.
- [40] J. R. Linton, P. L. Berneburg, E. M. Gartner and A. Bentur, "Carbon Fiber Reinforced Cement and Mortar," *Materials Research Society(MRS)*, Vol.211, pp.255-264, 1991.
- [41] S. B. Park, and B. I. Lee, "Fabrication of Carbon Fiber Reinforced Cement Composites," *Materials Research Society(MRS)*, Vol.211, pp.247-254, 1991.
- [42] Nemkumar Banthia and Tiakang Sheng, "Micro-Reinforced Cementitious Materials," *Materials Research Society(MRS)*, Vol.211, pp.25-32, 1991.
- [43] Colin D. Johnston, "Method of Evaluating the Performance of Fiber-Reinforced Concrete," *Materials Research Society(MRS)*, Vol.211, pp.15-24, 1991.
- [44] R. I. Gilbert, *Time Effect Concrete Structure*, Elsevier, New York, 1988.

- [45] 彭雲宏, 臺灣地區營建工程能量之調查與分析, 內政部建研所研究報告, 台北, 民國八十年六月。
- [46] 呂昫諭, 「PET 纖維混凝土工程特性之研究」, 國立中興大學, 碩士論文, 民國七十九年六月。
- [47] 楊宏仁, 「鋼纖維混凝土在多軸應力下之力學行為」, 國立台灣大學, 碩士論文, 民國七十八年六月。
- [48] Gary L. Vondran, “Applications of Steel Fiber Reinforced Concrete,” *Concrete International*, pp.44-49, November 1991.
- [49] Erik Stoklund Larsen, and Herbert Krenchel, “Durability of FRC Materials” *Materials Research Society*(MRS), Vol.211, pp.119-124, 1991.