

纖維混凝土材料強度之研究與應用

執行期間：民國七十四年七月至七十六年六月

計劃主持人：	林	維	明
助理研究員：	蘇	瑞	榮
助	理：	吳	信
技	工：	馬	倫
		曾	傑
		涂	娟
		何	火
臨	工：	陳	冰
		李	城
		王	霽
		李	萍

台灣省政府交通處港灣技術研究所
中華民國七十六年六月三十日編印

摘要

林維明，蘇瑞榮

纖維混凝土 (Fiber-Reinforced concrete 簡稱 FRC) 係於混凝土中摻入不連續短纖維拌合而成之複合材料。除具有普通混凝土的優點，如可現場澆置，施工、養護容易外，並能藉其纖維之高抗拉強度，高彈性模數，利用其與混凝土界面間之握裹力，以吸收、傳輸，並分散部分能量，增加延展性，韌性及改善混凝土之低抗拉強度，低延展性與張力區易生裂紋等缺點。由於纖維之強化作用，增強了許多普通混凝土之功能，使混凝土材料，更具多元化，多功能之特色。

本研究為進一步瞭解纖維混凝土之各項基本性質。經選定鐵絲、瓊麻、鋼纖、玻璃等四種纖維進行工作性及強度試驗，經過篩選並淘汰不佳纖維，確定表面具有摺皺之鋼纖維，具有較佳之工作性，且韌性亦最佳。因此選定鋼纖進行纖維混凝土之工程性質試驗。並同時針對水灰比及纖維體積比之影響，故選擇四種水灰比，分別為 0.48、0.55、0.62、0.68 及五種纖維體積比，分別為 0%，0.5%，1%，1.5%，2% 等二十種不同配比之試體，以供多項試驗。

由此一系列之試驗結果發現，纖維體積比及水灰比分別對各種工程特性且有影響。對工作性而言，纖維體積比之含量越高則工作性越差，且當纖維含量超過 2% 以上，其施工性相當困難。水灰比之影響則不甚明顯。就劈裂強度而言，纖維體積比之影響不如水灰比之重要。由此試驗同時獲知，在初裂前之張力負荷，主要由混凝土承受。就單位重而言，纖維之比重大小足於影響纖維混凝土之單位重，比重大者，其單位重將因纖維量之增加而遞增。就磨損而言，纖維體積比之影響較水灰比為重要，填加 1~2% 之纖維，可以提高耐磨能力 19~25%。就收縮而言，由於纖維之摻入，增加混凝土之抗張及抗剪強

度，減少因外在環境之改變所引起之體積不穩定性。就疲勞特性而言，水灰比及纖維體積比均有影響，降低水灰比或提高纖維含量均能提高疲勞限度。此點與普通混凝土不同。就抗壓強度而言，增加纖維含量對於抗壓強度之影響甚小，如因施工不良，可能導致負面結果。就抗彎強度而言，水灰比及纖維體積比均有影響，但仍以水灰比之影響較大。就韌性而言，水灰比及纖維體積比之影響同樣重要。但水灰比只能影響韌性而對韌性指數之影響則不明顯。纖維體積比對於韌性有影響，尤其對韌性指數更有絕對的影響。增加纖維體積比即是提高韌性指數。就透水性而言。雖然纖維之摻入提高滲透係數，但在良好的製程下，其透水率仍相當低。本試驗所獲之滲透係數，皆在 30×10^{-12} M/S 以內，屬於普通透水率之材料。就熱傳而言，纖維混凝土屬於熱之不良導體。此可能因熱傳導係數較高之纖維所佔有之體積有限所致。由此一系列之試驗結果顯示，纖維混凝土因纖維之強化，增強許多普通混凝土之特性，使得本種材料更具多功能及多元化之特性，但值得注意的是，隨纖維含量之增加，導致施工性不佳，將引起纖維糾結，致使材料析離，材質不均而影響其應有之品質之強度。因此在纖維之臨界含量範圍內，降低水灰比可得較佳品質之纖維混凝土，超此臨界含量，降低水灰比所獲之效果不一。而此臨界含量就纖維混凝土而言，約其纖維體積比之 2% 左右。良好的施工，可以確保更佳的品質，此就工程而言至為重要，就經濟觀點而言，本種材料將來如因市場需求增加，生產量增多，必使成本下降，使本材料更具有經濟效益及利於推廣之良性循環。

纖維混凝土材料強度之研究與應用

目 錄

摘 要	林維明... 蘇瑞榮	
一、前 言	林維明... 蘇瑞榮	1 — 1
二、研究背景	林維明... 蘇瑞榮	
2.1 纖維混凝土發展		2 — 1
2.2 美國混凝土學會在纖維混凝土之研究情形		2 — 10
三、研究步驟	林維明... 蘇瑞榮	
3.1 研究之動機		3 — 1
3.2 研究之目的		3 — 1
3.3 研究之範圍		3 — 3
3.4 研究之方法及研究之流程		3 — 4
3.5 研究所需之試驗設備及其條件		3 — 6
3.6 研究所需之試體數量及試體模型式		3 — 10
四、材料選用及配比設計	林維明... 蘇瑞榮	
4.1 材料選用		4 — 3
4.2 配比設計		4 — 8
五、纖維混凝土材料工程性質	林維明... 蘇瑞榮	
5.1 工作性		5 — 1
5.2 單位重及空氣含量		5 — 10

5.3 劈裂強度	5 — 17
5.4 磨損試驗	5 — 26
5.5 收縮	5 — 34
5.6 疲勞	5 — 41
5.7 抗壓強度	5 — 48
5.8 抗彎強度	5 — 54
5.9 韌性及韌性指數	5 — 66
5.10 透水試驗	5 — 95
5.11 熱傳導試驗	5 — 104

六、影響因子探討 林維明…蘇瑞榮

6.1 長寬比之影響	6 — 1
6.2 纖維種類之影響	6 — 3
6.3 纖維體積比之影響	6 — 3
6.4 纖維排列方向之影響	6 — 3
6.5 骨材粒徑之影響	6 — 4
6.6 骨材級配之影響	6 — 4
6.7 粗細骨材比之影響	6 — 5
6.8 水灰比之影響	6 — 5
6.9 拌合方法之影響	6 — 5
6.10 齡期之影響	6 — 6

七、結論與建議 林維明…蘇瑞榮

7.1 結論.....	7 — 1
7.2 建議	7 — 5
八、誌謝 林維明.....	8 — 1
九、參考文獻 蘇瑞榮.....	9 — 1
十、附錄	
A.1 纖維混凝土現有研究文獻整理報告 林維明.....	10 — 1
A.2 纖維混凝土之力學行為模式 蘇瑞榮.....	10 — 23

圖之目錄

- 圖 1.0.1 混凝土結構物裂縫之類型
- 圖 1.0.2 混凝土非結構性裂紋之歸類
- 圖 2.1.1 早期纖維混凝土專利之一
- 圖 2.1.2 早期纖維混凝土專利之二
- 圖 2.1.3 Constantinesco 專利
- 圖 2.1.4 代表性商業化鋼纖
- 圖 2.1.5 三度空間鋼纖
- 圖 2.1.6 非金屬纖維之一
- 圖 2.1.7 非金屬纖維之二
- 圖 2.1.8 三度空間聚丙烯纖維密集物
- 圖 3.4.1 研究流程圖
- 圖 4.1.1 瓊麻纖維之 SEM 照片
- 圖 4.1.2 鐵絲纖維之 SEM 照片
- 圖 4.1.3 鋼纖維之 SEM 照片
- 圖 4.1.4 玻璃纖維之 SEM 照片
- 圖 5.1.1 纖維混凝土工作性試驗設備一組
- 圖 5.1.2 倒坍度錐之配置圖
- 圖 5.1.3 承料盤及試料
- 圖 5.1.4 纖維混凝土工作性量測情形
- 圖 5.1.5 各種纖維混凝土工作性試驗結果

- 圖 5.1.6 玻璃纖維束狀結合情形
- 圖 5.1.7 玻璃纖維束狀結合示意圖
- 圖 5.2.1 單位重及空氣含量試驗設備一組
- 圖 5.2.2 空氣含量量測情形
- 圖 5.3.1 劈裂強度試驗設備一組
- 圖 5.3.2 放大器
- 圖 5.3.3 劈裂強度試驗配置圖
- 圖 5.3.4 初裂強度後試體開裂情形
- 圖 5.3.5 劈裂試體纖維排裂情形
- 圖 5.3.6 各種纖維混凝土之試驗結果
- 圖 5.3.7 各種鋼纖維混凝土之試驗結果
- 圖 5.3.8 齡期對纖維混凝土劈裂強度之影響
- 圖 5.4.1 纖維混凝土拌合情形
- 圖 5.4.2 磨損試驗儀
- 圖 5.4.3 試體磨損情形
- 圖 5.4.4 橋座及測微尺
- 圖 5.4.5 金鋼砂
- 圖 5.4.6 纖維體積比與相對磨損率之關係
- 圖 5.4.7 纖維混凝土水灰比與相對磨損率之關係
- 圖 5.4.8 鋼纖維
- 圖 5.5.1 長度變化量測儀一組
- 圖 5.5.2 長度變化試驗試體

圖 5.5.3 長度變化試驗用之試體模

圖 5.5.4 長度變化量測配置圖

圖 5.5.5 纖維混凝土長度變化試驗結果

圖 5.6.1 疲勞試驗機

圖 5.6.2 疲勞試驗配置圖

圖 5.6.3 纖維混凝土疲勞試驗之 S - N 曲線

圖 5.7.1 抗壓強度試驗之壓具及試驗配置

圖 5.7.2 Laap pace 及指示針與標示刻劃

圖 5.7.3 抗壓試體磨平情形

圖 5.7.4 試體受壓破壞情形

圖 5.7.5 纖維混凝土之抗壓強度試驗結果

圖 5.8.1 萬能試驗機抗彎試驗配置圖

圖 5.8.2 25 噸材料試驗機抗彎強度試驗配置圖

圖 5.8.3 抗彎試體開裂情形

圖 5.8.4 各種纖維混凝土之抗彎試驗結果

圖 5.8.5 鋼纖維混凝土水灰比對抗彎強度之影響

圖 5.8.6 鋼纖維混凝土纖維體積比對抗彎強度之影響

圖 5.8.7 鐵絲及瓊麻纖維混凝土水灰比及纖維體積比對抗彎強度之影響

圖 5.9.1 韌性試驗試驗機配置側視圖

圖 5.9.2 韌性試驗試驗機配置正視圖

圖 5.9.3 X - Y 記錄器繪圖情形

圖 5.9.4 韌性試體之開裂情形

- 圖 5.9.5 各種纖維混凝土之荷重撓度圖 (纖維體積比 F/C 0.5%)
- 圖 5.9.6 各種纖維混凝土之荷重撓度圖 (F/C 1%)
- 圖 5.9.7 各種不同水灰比鋼纖維混凝土之荷重撓度圖 (F/C 0.5%)
- 圖 5.9.8 各種不同水灰比鋼纖維混凝土之荷重撓度圖 (F/C 1%)
- 圖 5.9.9 各種不同水灰比鋼纖維混凝土之荷重撓度圖 (F/C 1.5%)
- 圖 5.9.10 各種不同水灰比鋼纖維混凝土之荷重撓度圖 (F/C 2%)
- 圖 5.9.11 各種不同水灰比之鐵絲纖維混凝土荷重撓度圖 (F/C 0.5%)
- 圖 5.9.12 各種不同纖維體積比之鋼纖維混凝土荷重撓度圖 (水灰比 (W/C) 0.68)
- 圖 5.9.13 各種不同纖維體積比之鋼纖維混凝土荷重撓度圖 (W/C 0.62)
- 圖 5.9.14 各種不同纖維體積比之鋼纖維混凝土荷重撓度圖 (W/C 0.55)
- 圖 5.9.15 各種不同纖維體積比之鋼纖維混凝土荷重撓度圖 (W/C 0.48)
- 圖 5.9.16 各種不同纖維體積比之鐵絲纖維混凝土荷重撓度圖 (W/C 0.48)
- 圖 5.9.17 各種不同齡期之鋼纖維混凝土荷重撓度圖 (F/C 0.5% W/C 0.68)
- 圖 5.9.18 各種不同齡期之鋼纖維混凝土荷重撓度圖 (F/C 0.5% W/C 0.62)
- 圖 5.9.19 各種不同齡期之鋼纖維混凝土荷重撓度圖 (F/C 0.5% W/C 0.55)
- 圖 5.9.20 各種不同齡期之鋼纖維混凝土荷重撓度圖 (F/C 0.5% W/C 0.48)

圖 5.9.21 各種不同齡期之鋼纖維混凝土荷重撓度圖 (F/C 1%
W/C 0.48)

圖 5.9.22 各種不同齡期之鋼纖維混凝土荷重撓度圖 (F/C 2%
W/C 0.55)

圖 5.9.23 各種不同齡期之鐵絲纖維混凝土荷重撓度圖 (F/C 1.5%
W/C 0.48)

圖 5.10.1 透水試驗儀

圖 5.10.2 三組試體容器

圖 5.10.3 不透水層塗封完成之試體連模

圖 5.10.4 各種水灰比對纖維混凝土滲透係數之影響

圖 5.10.5 各種纖維體積比對纖維混凝土滲透係數之影響

圖 5.11.1 熱傳導試驗機

圖 5.11.2 熱傳導試驗機主機配置

圖 5.11.3 熱傳導試驗機之試體

圖 5.11.4 烘箱與試體

圖 5.11.5 試驗記錄圖

圖 5.11.6 各種纖維混凝土熱傳導係數之試驗結果

圖 6.1.1 纖維含量及長寬比與工作性之關係

圖 6.3.1 纖維含量及骨材粒徑對工作度之影響

圖 6.5.1 不同粒徑對纖維分佈之影響

圖 6.6.1 不同級配大於 $\frac{3}{8}$ " 粒徑骨材之體積

圖 6.7.1 纖維及粗骨材含量對鋼纖混凝土工作性之影響

- 圖 A.1.1 鋼纖維混凝土斷裂面
- 圖 A.1.2 不同尺寸及形狀之鋼纖維
- 圖 A.1.3 玻璃纖維
- 圖 A.1.4 荷重變形關係示意圖
- 圖 A.1.5 理論之拉力龜裂應力與纖維間距之關係
- 圖 A.1.6 強度比與纖維間距之函數關係理論與實驗值比較
- 圖 A.1.7 間距對纖維砂漿初裂強度之影響
- 圖 A.1.8 間距與纖維體積比之關係
- 圖 A.1.9 極限強度與 LP/d 成直線關係
- 圖 A.1.10 受撓曲下纖維體積對韌性之影響
- 圖 A.1.11 拌合場內加纖維情形
- 圖 A.1.12 由於填加纖維坍度之變化
- 圖 A.1.13 Tampa 國際機場以滑棋舖面機舖設鋼纖維混凝土
- 圖 A.1.14 應用噴射鋼纖維混凝土穩定邊坡
- 圖 A.1.15 乾砌混凝土塊以玻璃纖維混凝土粉刷兩面黏結
- 圖 A.1.16 使用玻纖之房屋建築
- 圖 A.1.17 防波堤消波塊

表之目錄

- 表 1.0.1 實際發生裂縫之歸類（非結構性）
- 表 3.3.1 纖維混凝土試體主要參數之選定
- 表 3.5.1 試驗設備一覽表
- 表 3.5.2 試驗條件一覽表
- 表 3.6.1 各試驗項目齡期所需之試體數量
- 表 3.6.2 試體製作量與現有量對照表
- 表 4.0.1 纖維的種類、材料性質及應用
- 表 4.1.1 骨材篩分析結果
- 表 4.1.2 骨材之重要物理特性
- 表 4.1.3 水泥化學成份分析及化學組成
- 表 4.1.4 纖維之特性
- 表 4.2.1 混凝土配合比例表
- 表 4.2.2 玻璃纖維混凝土之主要配合比例表
- 表 4.2.3 纖維之配合比例表
- 表 5.1.1 各種纖維混凝土工作性試驗記錄
- 表 5.1.2 各種鋼纖維混凝土工作性試驗記錄
- 表 5.2.1 各種纖維混凝土之單位重試驗記錄
- 表 5.2.2 各種纖維混凝土之空氣含量試驗記錄
- 表 5.2.3 各種鋼纖維混凝土之單位重試驗記錄

- 表 5.2.4 各種鋼纖維混凝土之空氣含量試驗記錄
- 表 5.3.1 100 噸萬能試驗機試驗荷重速率表
- 表 5.3.2 各種纖維混凝土之劈裂強度試驗記錄
- 表 5.3.3 各種鋼纖維混凝土之劈裂強度試驗記錄
- 表 5.4.1 鋼纖維磨損深度
- 表 5.5.1 長度變化試驗記錄
- 表 5.6.1 疲勞試驗記錄表
- 表 5.7.1 纖維混凝土之抗壓強度試驗記錄
- 表 5.8.1 各種纖維混凝土之抗彎強度記錄
- 表 5.8.2 各種鋼纖維混凝土之抗彎強度記錄
- 表 5.8.3 各種鐵絲纖維混凝土之抗彎強度記錄
- 表 5.8.4 各種瓊麻纖維混凝土之抗彎強度記錄
- 表 5.9.1 25 噸動態材料試驗機 X - Y - T 記錄器換算表
- 表 5.9.2 各種纖維混凝土之韌性指數
- 表 5.9.3 各種鋼纖維混凝土之韌性指數
- 表 5.10.1 各種鋼纖維混凝土之透水試驗結果
- 表 5.10.2 各種鋼纖維混凝土之滲透係數
- 表 5.11.1 各種鋼纖維混凝土之熱傳導係數
- 表 A.1.1 纖維一般性質
- 表 A.1.2 纖維混凝土之強度
- 表 A.1.3 普通重纖維混凝土配比範例
- 表 A.1.4 含飛灰纖維混凝土配比範例

一、前言

林維明 · 蘇瑞榮

纖維混凝土的概念，起源很早，早在西元前 2500 年就已使用石棉稻草等天然纖維於建築物上。近年來由於混凝土使用上之需求，為改善混凝土的體積不穩定性及低抗拉強度等缺點。因此藉纖維的高抗拉強度及均勻分布形成裂縫阻止機構。以增加韌性，提高強度、延展性，並能預防非結構性裂紋之生成。減少收縮、乾縮或塑性沉陷量。一般引起非結構性裂紋之成因及分類分別繪於圖 1.0.1 及圖 1.0.2 中。並列於表 1.0.1 中。

纖維混凝土基本上是利用混凝土的變形將力量轉移至纖維分攤部份能量之過程及結果。纖維與混凝土間之應力傳遞係以纖維界面之剪應力與纖維受拉應力為之。

混凝土開裂前，混凝土及纖維分攤承受的拉力。開裂之後拉力則由纖維承受。當纖維所受之拉力大於纖維臨界容許剪力強度，纖維即被拉脫。為了確保最低之拉脫阻抗，可以增加界面之阻抗能力，包括增加纖維之長度，面積或使表面成摺皺以提高摩擦阻抗係數。

應用於纖維混凝土之纖維有兩項基本要求。其一為強度，其二為剛性。纖維即是利用此兩種特性。以達到分攤承受之應力。混凝土具備了連續性、彈性、強度、握裹力等特性，因此複合成纖維混凝土之後，這些特性更被強化。此即其韌性，耐久性、耐磨性提高之原因。並可概分為人造纖維與天然纖維，人造纖維可為鋼纖維、鐵絲纖維、鋁絲纖維、玻璃纖維、聚丙烯纖維、亞克力纖維等。纖維之材質均勻穩定，來源豐富，供應不具地域性。而天然纖維包括椰皮纖維、竹子

纖維、石棉纖維、瓊麻纖維等，材料均勻性較不穩定，材料之供求極具地域性。且因多屬於生命體，纖維材料本身之孔隙量很多，吸水率高，比重輕。摻入於混凝土中，有易受鹼侵蝕者。

但由於纖維混凝土之工作性較不佳，如因施工品質不良，則其優良之特性，未必可以顯現。如何促進良好的工作性，亦為確保纖維混凝土品質方法之一。通常利用較富配比及細粒徑級配或添加摻料來促進其工作性。纖維混凝土所要求的工程特性很多，最重要的有抗拉、抗彎、磨損、透水等項。而這些工程特性，皆受到混凝土品質之影響，良好的品質，易於施工，且其材料之強度亦復可以確保。

纖維混凝土之拌合可視工作需要與設備作多種選擇。其可為廠拌、手拌、或現場拌合，主要之考慮為纖維均勻分佈於混凝土中。拌合不良可能導致纖維糾結或成團，造成材料不均，而影響品質。影響拌合之難易，主要有如下諸因子纖維之長寬比、纖維體積比、骨材粒徑、粗骨材含量等。達到均勻拌合，以控制材質均勻可利用多種措施達成，本報告中將有述及。

在科技不斷進步之同時，社會環境亦不斷改變，住與行已為文明之表徵，因此土木與建築工程也受到時代進步之挑戰，傳統性之建築材料，已逐漸不敷應用，新材料之發展與應用，為課不容緩的課題。高能量之製造也漸不合經濟效益，因此符合時代需求之材料，必然應運而生，而在考慮新材料之研究發展方面必須著重於下列各項：

1. 新材料能產生比現有材料更佳之混凝土品質。
2. 使用者可有較大之配比彈性。

- 3.以經濟觀點而言，可節省經費。
- 4.有廣大之應用市場。
- 5.有很強之技術，知識及研究之投入與支持。

因此發展新材料產品對其特性，本質之了解相當地重要，需有相當優良之技術知識及研究支持，才能製造出耐久性、經濟實用之新材料。因此本研究即針對纖維混凝土材料強度進行深入之研究。

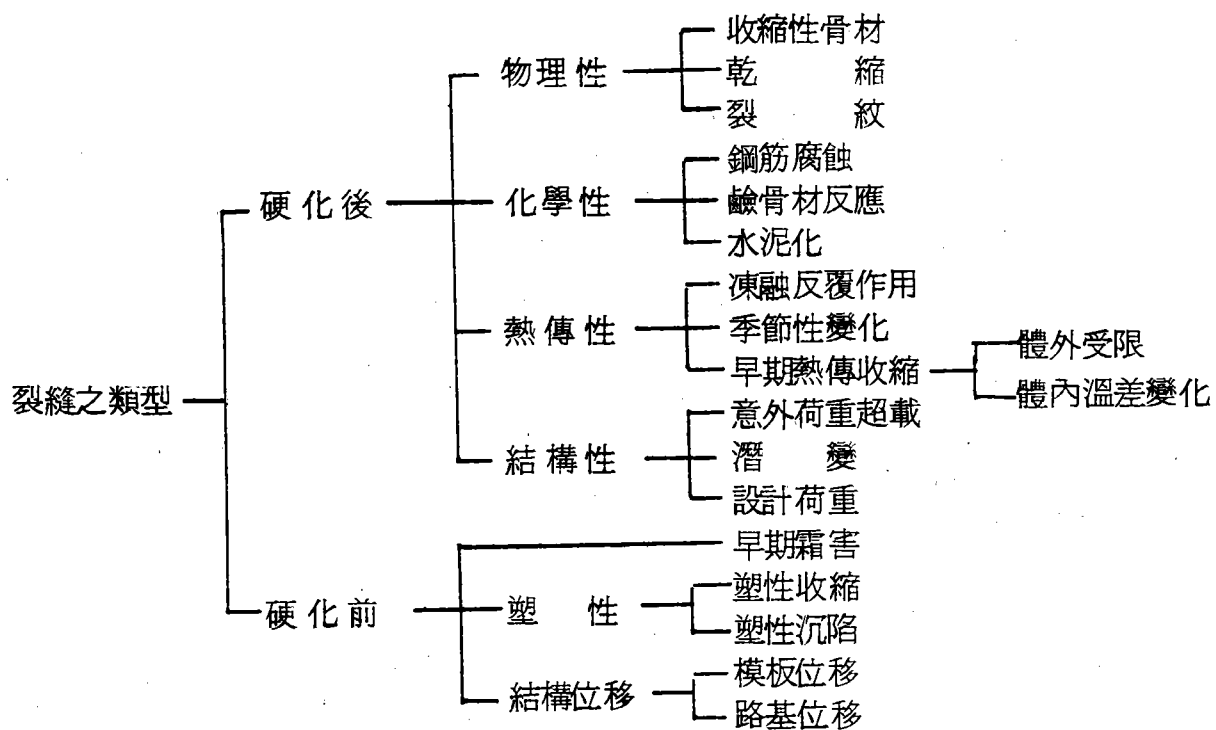


圖 1.0.1 混凝土結構物裂縫之類型

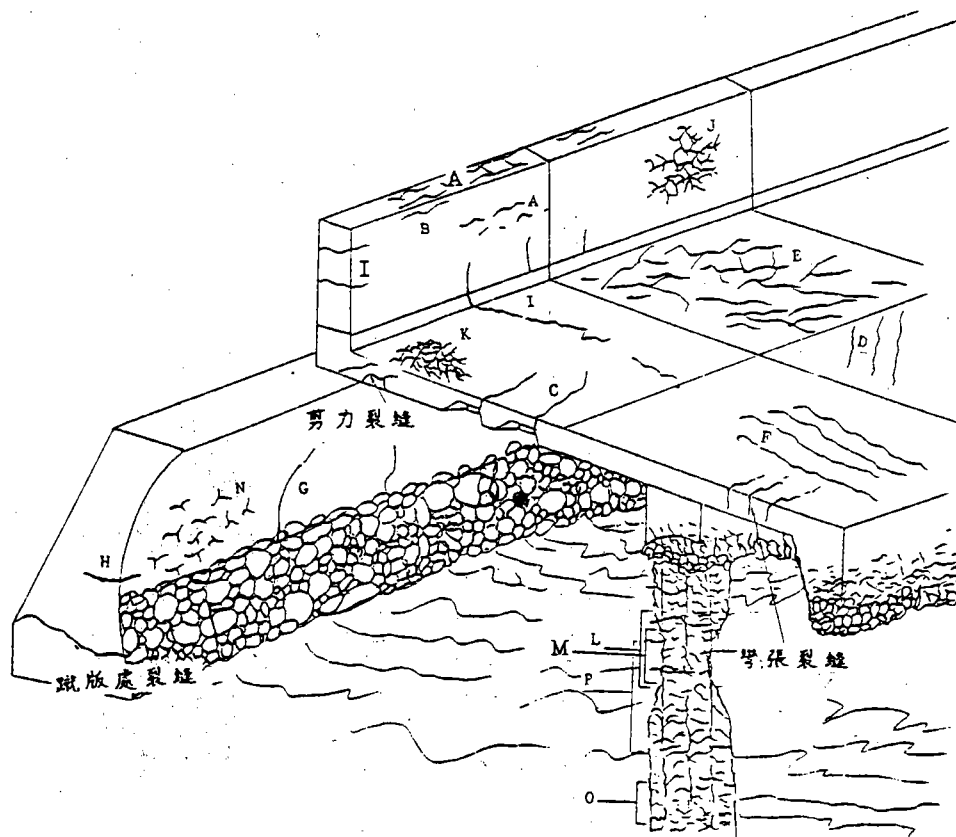


圖 1.0.2 混凝土非結構性裂紋之歸類

表 1.0.1.1 實際發生裂縫之歸類（非結構性）

裂縫類型	代號 參考圖示	細分	普遍發生之位置	主要致因	次要致因	解決對策	察覺的時間 (施工後起算)
塑性沉陷	A	排筋過密	深長斷面	過度泌水	早期快乾情況	減少泌水 (輸氣或再振動)	十分~3小時
	B	彎曲	柱頂				
	C	版厚變化	槽型或格子型版				
塑性收縮	D	對角	路面及版	早期快乾 同上加上鋼筋太近表面	泌水率低	改善早期養護	卅分~六小時
	E	隨機	R.C. 版				
	F	排筋過密	R.C. 版				
早期熱收縮	G	外部抑制	厚牆	發生過熱	快速冷卻	減熱或 / 及隔熱	1天~二、三週
	H	內部抑制	厚版	溫度變化太大			
長期乾縮	I		薄版 (或牆)	接縫不足	過度收縮及養護不良	減少及改善養護	數週~數月

裂紋	J	隨機模版	露面混凝土	不滲水模版	富配比及養護不良	改善養護及粉光	1 ~ 7 天 (有時較晚)
	K	泥鍍混凝土	版	過度表面粉光			
鋼筋腐蝕	L	自然	柱及樑	保護層不夠	混凝土品質不良	減少表列致因	超過 2 年
		氯化鈣	預鑄混凝土	氯化鈣過量			
鹼骨材反應	N		潤濕區	反應骨材加上高鹼性水泥		減少表列致因	超過 5 年
化學侵蝕	O	水下基礎	橋墩及柱	CO ₂ Mg ⁺² 離子 SO ₄ ⁻²	混凝土品質不良	改善混凝土品質	超過 5 年
				波浪、砂、礫 石浮水之作用	骨材及混凝土品質不良	改善骨材及混凝土品質	超過 5 年
物理性磨損	P	水面上下	橋墩及柱				

二、研究背景

林維明 · 蘇瑞榮

2-1 纖維混凝土發展

使用纖維改進建材之行爲之觀念很古老，且爲直覺的，例如古代用稻草加入泥漿中再經過太陽曬乾之磚（adobe）作爲房屋建材，在老舊農莊中可見，另外如石棉加入混凝土中爲石棉纖維，因而產生複合材料而得到良好之性能。

此種性能係因日曬乾磚可抗拒龜裂和因爲溫度與濕度之反覆變化所造成之龜裂，因此當卜特蘭水泥開始在建材上廣泛使用時，企圖增加纖維以改進其行爲實不足爲奇。

1847年 Joseph Lambot 建議在混凝土中增加鐵絲或鋼絲網型態之連續性纖維，因此得出一種新的建材，而導致現今之鋼骨水泥（ferrocement）及鋼筋混凝土之誕生。

然而使用連續性加強，需要小心地配製及所要求之技術水準較高，因此費用較貴，由於各方向使用配筋不同，因此對外行人而言，並不感到相當舒適。

使用非連續性短纖維於混凝土中爲加強物之觀點，似乎對許多土木工程師而言爲一大魔力與具有挑戰性，加入纖維於拌合機中如同加骨材或摻拌而得到一均勻性、各向同性、可塑造的建材，早在一世紀前已開始研究，而現今仍在繼續研究發展中。

在纖維混凝土之發展史上可分爲兩個主要時期，在1960年代以前爲緩慢之拓荒時期，幾乎沒有實際之應用，而在第二期間爲自1960年代初爲迅速之發展時期，同時增加很多之應用。

在纖維混凝土研究發展上有許多專利曾獲准，他們通常申請有關纖維混凝土拌合、生產過程及應用等，以下將簡介數種專利說明其專利之構想及隨時間發展一些新觀念。

2.1.1 先驅發展

在纖維混凝土之第一個專利似乎為 1874 年美國加洲 A Berard 先生建議使用粒狀廢鐵加入於混凝土拌合製造人工石頭。

法國專利起始於 H Alfson 於 1918 年敘述改進混凝土張力強度之方法為均勻地拌合鋼鐵木材或其他材料之纖維，同時亦建議纖維之表面必須為粗糙的且若可能其兩端必須彎曲，使其易與混凝土得到良好之黏著。

Weakley R.D. 於 1912 年獲得專利為使用鋼絲片做成兩條鋼絲含有圓環使其與混凝土可得耐久之握裹力（圖 2.1.1）在 1920 年德國 Kleinlogel A. 先生申請一項專利為拌合相當大量之鋼鐵粒子於混凝土中，以便產生一個能夠有冷硬的、轉向的及鋸齒狀的，其特性如同鋼鐵般。

爾後在 1927 年在加洲 G. Martin & W. Meischke Smith 分別獲得專利，Martin 專利（圖 2.1.2）為使用摺綳型或平直之鋼絲段與混凝土拌合增強混凝土管之強度，而 Meischke Smith 之專利為使用螺旋形鋼絲為混凝土拌合之加強物（圖 2.1.1）。

Etheridge（新澤西 1933）提出填加不同直徑及大小之小環狀纖維增強鐵軌混凝土材料枕木之龜裂阻抗和抗疲勞性為纖維混凝土觀

念上邁前一步。他曾敘述“我所考慮之東西爲可預防發生局部龜裂和破裂，且我完成此一東西爲相當量之金屬環與混凝土拌合而產生偶合之效果，我稱之爲混凝土體中之編織。接著在各國有許多專利獲准如 G. Constantinesco（1943 年在英國、1954 在美國）值得一提爲他所建議之纖維類似今日之鋼纖（圖 2.1.3）此專利使用線圈或螺旋狀型態之鋼纖，以便增加混凝土體之龜裂阻抗及能量吸收，建議應用範圍包括軍事油槽、防空洞、機械設備基礎等。

2.1.2 現今之發展

纖維混凝土現今之發展開始於 1960 年代早期，大量之纖維及纖維材料均推出且在市場上作爲廣受運用，已被確認且繼續推出新產品，包括如下：

- ①鋼纖（直的、波紋形、扭曲形，在纖維兩端彎成有鈎或槳形）。
- ②玻璃纖維。
- ③碳纖維。
- ④自然有機或礦物纖維（木材、瓊麻、黃麻、竹子、椰子、石棉岩絲等）。
- ⑤聚丙烯纖維（平直、扭曲、纖維狀和兩端具有鈕扣形）
- ⑥許多人造纖維如尼龍多元酯等。

圖 2.1.4 爲取自 ACI 544 委員會報告中有關現在使用之鋼纖維範例，利用四條鋼絲做成一骨架，如同兩個連續之足球之三度空間鋼纖維於 1974 取得專利權（圖 2.1.5）被證明可提供相當強之合成強度係因相當有效之錨碇和在球內母體之壓擠和多方面之伸長，因此具

有高韌性，然而此種鋼纖維，目前尚未商業化。

圖 2.1.6 及圖 2.1.7 示代表性之玻纖、碳纖及聚丙烯纖維，而圖 2.1.8 示三度空間纖維密集物，注入於混凝土中，正在研究階段可產生均勻、均質纖維分佈，而減少大量纖維量拌合上之困難，此程序亦使用於泥漿滲入之纖維混凝土（簡稱為 SIFCON）

這些發展一直在進行且更了解纖維混凝土之力學特性，（複合材料之力學、破壞力學、損害力學等）此類研究著重於更清楚的了解及確認為特殊應用之優良纖維特性。

2.1.3 優良之纖維特性

最優良之纖維特性為可能得到最高效率複合強度及韌性（或能量吸收能力）在短期及長期上均有實質上之增強，這些特性包括：

- 1.幾何特性：長度、直徑、長寬比（aspect ratio）形狀、表面變形、握裹和錨碇性質。
- 2.物理—化學性：表面粗糙度、密度、化學穩定性、非反應性、耐火性。
- 3.機械性：強度、堅硬性（彈性模數）延展性、破壞之延伸性，通常認定纖維之堅硬性愈高愈佳，此並非表示彈性模數，較鋼纖低30倍，而不被接受。

在薄板之應用上，複合材料之偏曲量與其厚度比較為大，聚丙烯纖維被證明不僅可實質上增加其強度且產生相當大之韌性。

上述特性大多數技術上的，而由應用之觀點而言，纖維之費用及其密度或比重相當地重要，此因通常費用計算為每單位重之纖維所需

之費用，而在纖維混凝土中估價為以每一體積所含之纖維量。

因此在纖維混凝土所需之纖維體積百分率，鋼纖維重量約為聚丙烯纖維之 8 倍，而為玻纖之三倍，因此每單位重之單位及相等性能下，低密度之纖維可得較價廉之纖維混凝土，然而必須注意不同材料相同之纖維之體積百分率並無法得到相同之性能。

2.1.4 未來之展望

分析早期纖維混凝土專利之觀念主要為增加複合材料之強度，然而抗壓強度並未隨著纖維之添加量增多而遞增，且僅在填加適當之纖維量才能使彎曲或抗拉強度增強。

在剛開始先驅研發階段很難找出填加纖維之益處。

這是特別如此，因為當時沒有變形控制試驗，且耐力試驗 (proof-testing) 經常用樑使用砂袋負荷 (荷重控制試驗)，而無法在複合材料可能得到有數量上表示其韌性之大小，能量吸收或韌性之觀念僅在某些專利中出現，而在現代之纖維混凝土發展中，韌性被人注意時間較晚。現在韌性可以量測且在某些代結構測試為必須之工作。

因此現在可以說纖維混凝土最明顯之好處為複合材料之韌性或能量吸收能力之實質之增加，然而目前仍在繼續改良纖維，纖維效率、纖維含量填加物等以求增強其抗拉強度。

在先驅者之夢想為製造一種新的混凝土材料具有高抗張強度和韌性強特性且為均質，等方向性如同鑄鐵，在今天之研究發展成果上已較過去更為接近該夢想，此特別在使用 SIFCON 上將為可能。

在工程材料方面，纖維混凝土填加現有摻料如強塑劑、矽土氣體（Silica fume）和聚合物（polymer）等使之變為一萬能措施之解決方法。或許將來混凝土材料工程師有自信可提供現在結構物之需求（抗地震結構、外海結構、抗爆炸結構）他們可以設計纖維混凝土材料以滿足需求。

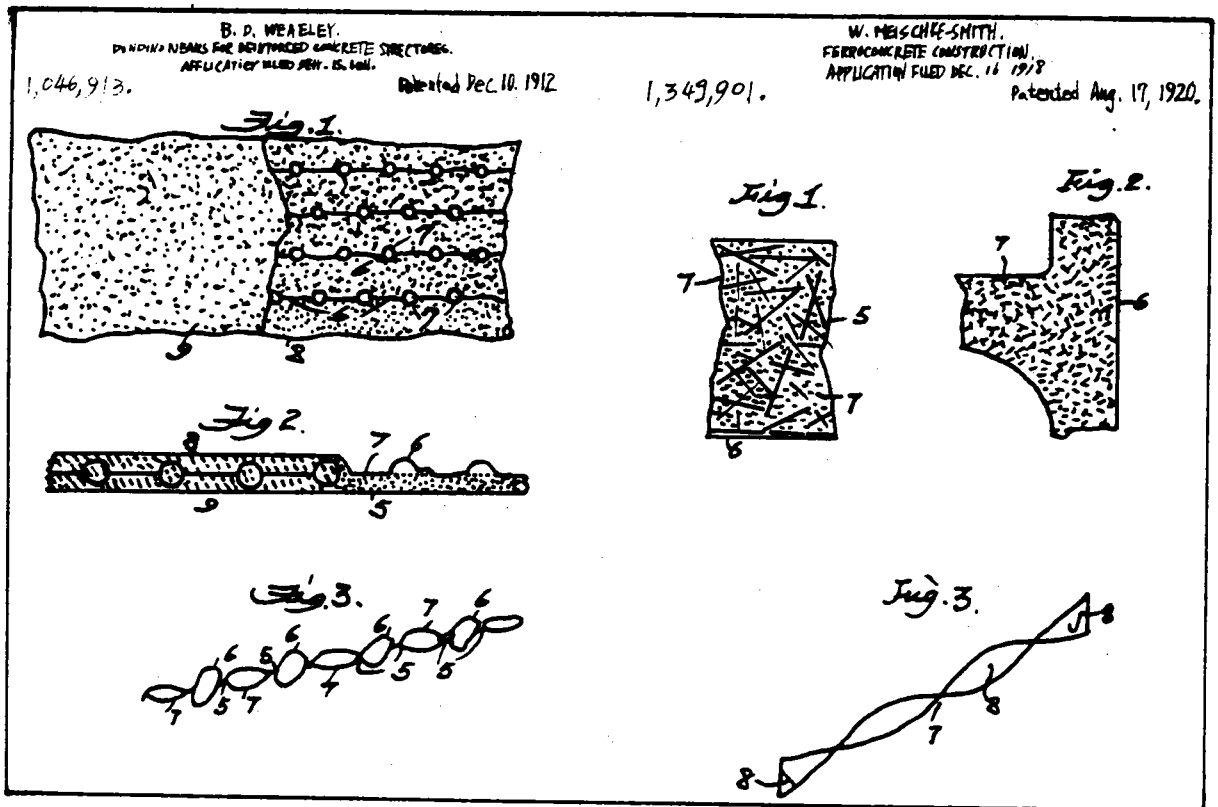


圖 2.1.1 早期FRC專利; 左側爲Weakley 之專利

右側爲Meischke-Smith 先生之專利

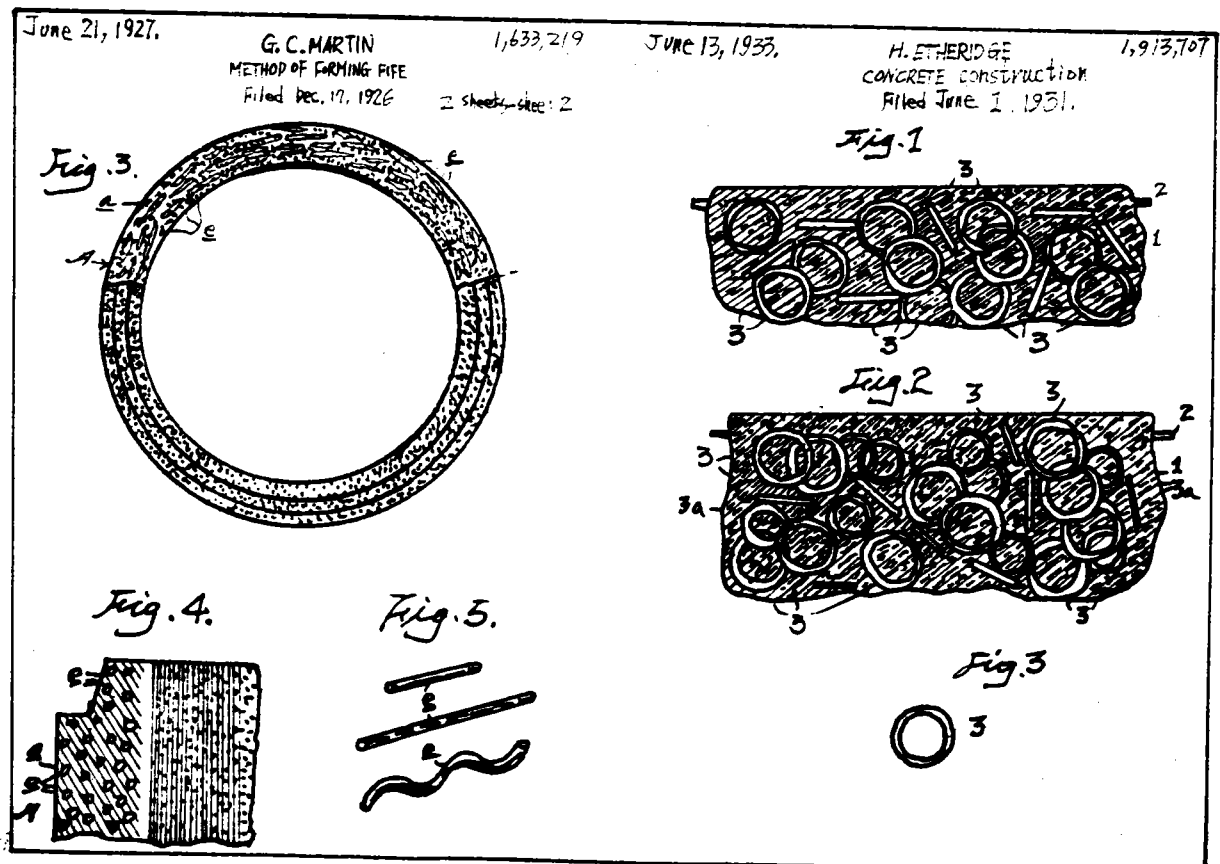


圖 2.1.2 早期FRC專利左側爲Martin 之專利

右側爲Etheridge 之專利

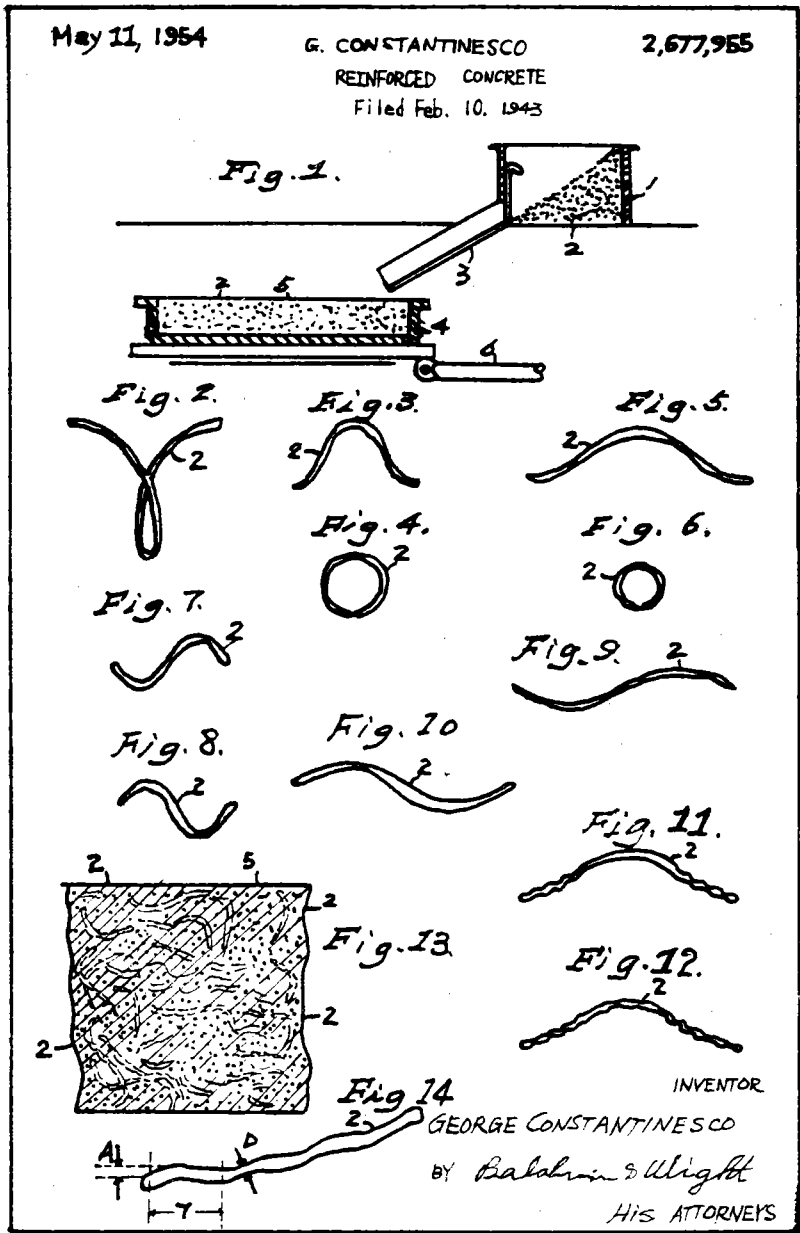


圖 2.1.3 Constantinesco 專利

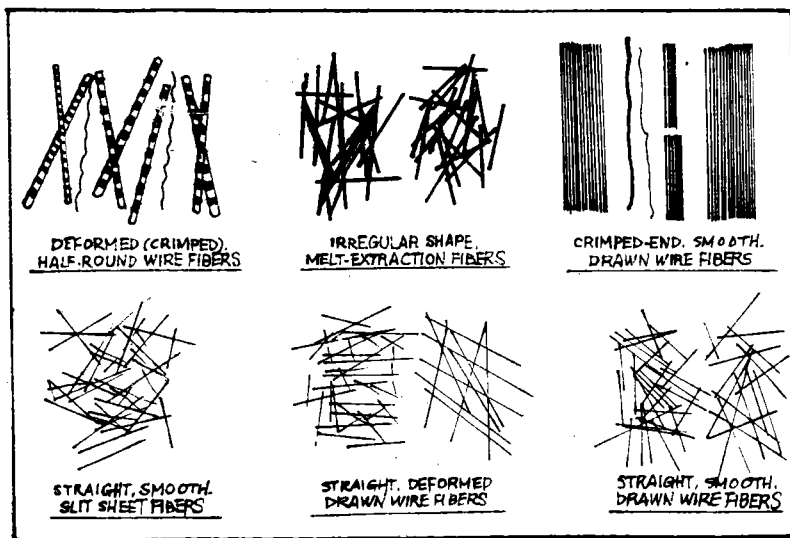


圖 2.1.4 代表性商業化鋼纖

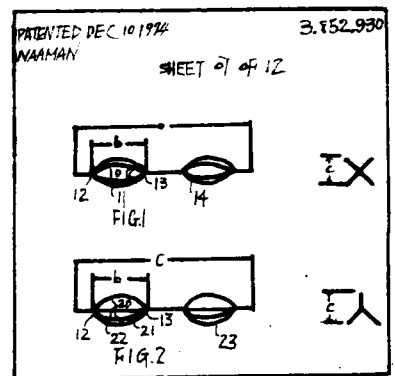


圖 2.1.5 三度空間鋼纖

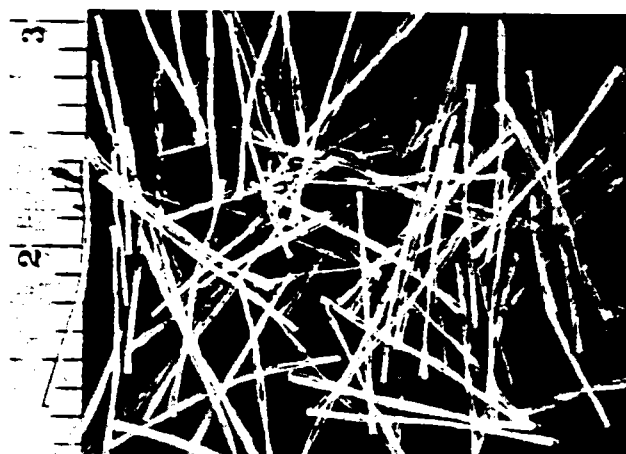
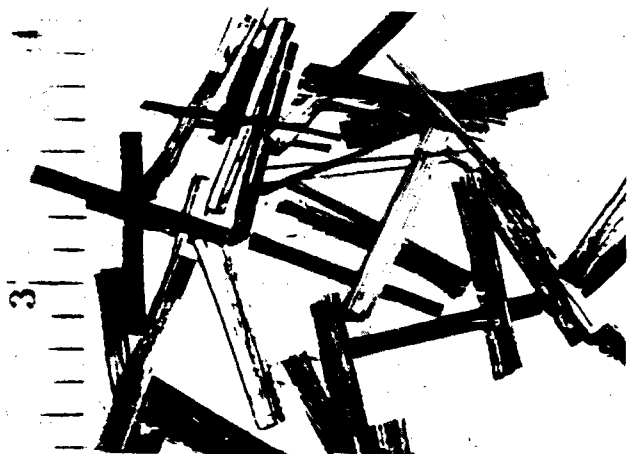


圖 2.1.6 非金屬纖維之一：左側為碳纖維，右側為扭曲之聚丙烯纖維

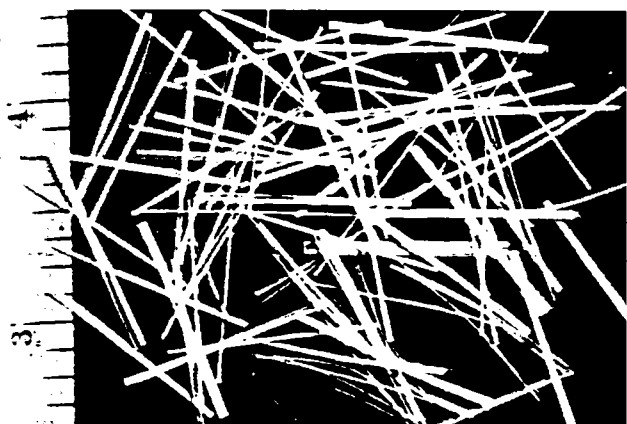


圖 2.1.7 非金屬纖維之二：左側為玻璃纖維，右側為聚丙烯纖維

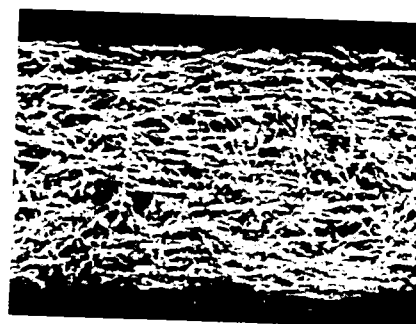
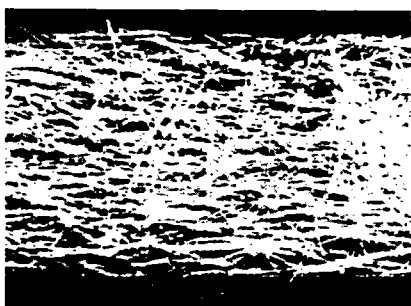


圖 2.1.8 三度空間聚丙烯纖維密集物

左端為 $V_f = 6.78\%$ 二股扭曲形

右端為 $V_f = 2.86\%$ 一股扭曲形

2-2 美國混凝土學會在纖維混凝土之研究情形

自從在 1960 年代早期纖維混凝土 (FRC) 之發展，美國混凝土學會 (ACI) 開始積極的整理資料及宣傳有關這種相當新的材料，因此 ACI 曾出版許多有關纖維加強之力學技術及實際應用與將來有應用之可能性等之資料，這些出版物其中兩本為兩個委員會之研究成果，另兩本為本 1973 及 1982 ACI 為 FRC 特別舉行之會議專集。

這兩個委員會為 506 shotcreting 委員會及 544 FRC 委員會，扼要簡介這些出版物之內容如下：

① ACI 544 1R-82⁽²⁾

544 委員會原始現有相關研究經驗文獻整理 (state of art) 報告是在 1973 年發表，然後在 1982 年修正，而以 ACI 544 1R-82 再發表一次，本報告著重於金屬、玻璃、塑膠和天然纖維作為混凝土加強物之力學之發展和拌合技術、混合比、澆置、修飾和實際應用及有發展潛力之應用。

544 委員會敘述其報告僅限於非連續性分離纖維，因此連續性之網狀物、織物纖維和細長棒等均不當作分離纖維形態之加強物，故不在該委員會之研究範圍。文中檢討各種不同纖維形態及各種性質。

在本報告中特別強調，必須再加強之研究和在有關纖維配方及放置之儀器改進及標準試驗方法。委員會所提出所需之研究專題為有關纖維之適應性 (orientation of the fibers) 抗拒地震使用，玻纖在鹼性環境下之耐久性。和在玻纖混凝土中使用特殊之聚合物等。

標準試驗程序必須建立，因此可達到品質控制，而且各研究者可複製試驗結果且與其他研究計劃所得之結果互相關連。

本報告包括 FRC 之力學性質，此類混凝土之製作代表性之材料性質與應用，共有 150 篇參考資料包括在本報告中。本報告翻譯詳見附錄(一)。

② ACI 544 2R-78⁽³⁾

本報告為 FRC 性質測量扼要建議樣品試拌程序及破裂模數之詳細試驗。

本報告之檢討為有關試驗方法如空氣含量、生產量、單位重、抗壓、劈裂抗張強度、凍融、收縮潛度及彈性模數、孔蝕、磨損及磨耗等之試驗方法。

本報告並建議有關強韌性、能量吸收、衝擊強度和工作度之新試驗方法。

現在 544 委員會正在將最新之試驗方法整理修正中。

③ ACI 544 3R-84⁽⁴⁾

本文為鋼纖混凝土規範、拌合、澆置及粉飾之指引，敘述現在之技術及強調傳統性混凝土與加鋼纖維之差異。

拌合技術為達到均勻拌合，以確保夯實性佳且表面粉飾之技術可使得有滿意之表面組織對於鋼纖混凝土之處理特別重要。

在報告中委員會指出鋼纖混凝土為一種水力水泥、細、粗骨材及分散一些非連續性、短小之鋼纖合成之複合材料如同一般混凝土。它可能亦參加波索蘭 (pozzolans) 及摻料。

填加鋼纖之量爲由 $30 - 118 \text{ Kg}/m^3$ 可對許多混凝土和水泥漿之工程性質提供相當的改進，包括衝擊和屈曲強度。

本文包括有關材料標準配合比、製模、澆置、烘乾、拌合、運送試樣和粉飾、養生與保護等。

④ ACI 506 1R-84⁽⁵⁾

本文爲有關纖維混凝土噴射混凝土 (shotcrete) 之介紹性報告由 506 委員會在 1984 年歲末發生，因此限制噴漿纖維混凝土使用與技術，特別重視鋼纖、玻璃纖維和聚丙烯 (Poly propylene) 纖維等。

有關使用噴射纖維混凝土後所導致之機械性質，特別是拉長性、韌性、衝擊強度和彎曲強度等均在本報告討論，同時亦敘述有關計量拌合和應用之程序，減少反彈方法和使用於 FRC 之設備等。

本報告亦評述一些應用實例，這些包括在華盛頓之邊坡穩定，在瑞典礦石場，在美國愛達荷一隧道進口，加拿大一電力廠房，Atlanta 地下鐵隧道內襯，賓州煤礦坑道，在瑞典一坑道和採礦，在豎井和在英國一拱架和隧道。

本報告指出用鋼纖製作證明在噴射混凝土有廣泛之應用，而玻璃纖維噴射混凝土已有一些使用範例①雖然使用噴射法，它可應用與傳統之噴射混凝土方法類似。

噴射聚合物纖維混凝土亦在過去有一些應用實例，最近有些報導在薄殼圓屋頂，表面之修理和當作塗灰泥型之覆面層系統之組成物。

根據本報告鋼纖加入於噴射混凝土是開始在 1971 年代試驗室工作使用，實地應用爲 1973 年在 Idaho 隧道入口處，而聚合物纖維

首先於 1968 年在歐洲應用。506 委員會指出“……龜裂後阻抗已經被引證可提供噴射混凝土之抗拉性，而對於在礦坑和隧道內襯有相當大的變形之應用具有其優點。

⑤ ACI 專集 81⁽⁶⁾

ACI 專集 SP-81 纖維混凝土為蒐集在 544 委員會在 1982 年秋在 Detroit 所發表之 19 篇論文，其包括上述 544 委員會三本報告。

本專集前半部為處理結構應用與設計特別是樑與柱。在本專集前言中，本研討會主席 G.C.Hoff 博士曾指出鋼纖混凝土在鋪路面，橋面、保護層等之應用已被接受，而在結構設計之使用上仍有點受限制。

由於耐衝擊及動力負荷，因此 Hoff 預測在未來 FRC 作為結構材料將會有很大之進步。

本專集第二部份包含應用、材料及技術評估，根據 Hoff 博士表示此種混凝土將會繼續擴展使用。為一相當有價值貢獻之土木建築材料。

⑥ ACI 專集 44⁽⁷⁾

ACI SP-44 為蒐集 29 篇文章為 544 委員會在 1973 年秋天在加拿大之 Ottawa 大學之研討會蒐集，本專集分為兩個部份，第一部份包括纖維之機理及性質，而第二部份包括在鋪路面、方塊砌牆，預鑄單位及其他結構使用之應用。

SP-44 發表時，纖維加強仍在萌芽階段，其中如玻纖尚未商業化，作者們注意纖維加強，因為其特殊性質例如耐衝擊、溫差阻抗和能量吸收等能力，發現將擴大發展，及有利之應用且施工技術可在未來擴展。

在專集中有兩位工作者，R N Swamy & Brina Kent 曾討論在倫敦，Heathrow 機場之停機場之屋頂板使用鋼纖，及製作混凝土管之情形，曾在文中預測“引用纖維加強可證以爲在預鑄混凝土工業上之一大發展，因爲在適合之環境下，其使用可提供比其他形態之加強混凝土有更卓越之優點。”

三、研究步驟

林維明 · 蘇瑞榮

3.1 研究之動機

纖維混凝土之研究，國內正如火如荼地進行，台大、技術學院等知名學府，已有多篇論著。因為屬於新一代的混凝土材料，熟知的人並不多，加於設計上，應用上或有不同於普通混凝土。一來由於其施工性較混凝土為難。二來由於摻入此昂貴之材料，增加工程成本負擔。因此國內除軍方、桃園、新竹及花蓮機場跑道使用外，未為其他工程廣泛應用。

本所因研究海中消波塊易受各方向力作用，導致張力區易生裂紋，而使鋼筋發生腐蝕，造成消波塊破壞，為改良混凝土之低拉張強度，以減少張力區裂紋之深度及寬度，根據文獻資料指出，纖維混凝土具有耐衝擊、韌性強及減少因乾縮作用引起之裂紋等優點。於是著手進行本研究。

3.2 研究之目的

纖維之摻入強化了混凝土，使得混凝土之抗張及抗剪強度提高。但由於本種材料成本較為昂貴，且施工技術國內亦付之闕如，為建立纖維混凝土的普遍概念及獲得纖維混凝土之工程性質，並針對材料強度，作一系列之試驗，期能對本種材料增加認識，俾引進國內應用。國人對於混凝土材料之應用較為保守，對於新水泥製品，向來不敢冒

然使用，強塑劑、飛灰等摻料即是一例。而纖維混凝土則由於成本增加，更無法為業主所接受。引起業者的重視，莫如對本種材料優點之宣揚。由於混凝土之抗拉強度，僅約為其抗壓強度之十分之一，此為其破壞之主因，如何增強混凝土抗拉強度，為本研究之重心。近年來為改進混凝土之低抗拉強度，已發展出注膠混凝土及注膠纖維混凝土，但因注膠之現場施工不易且成本過高，使用量相當有限。而纖維混凝土，係於混凝土中摻入高抗拉強度、高延展性、高彈性模數之不連續短纖維。並藉與混凝土界面之偶合，增進材料之抗張強度，及延展性等。且本種材料之施工亦甚為簡便，在推廣及應用上均具有潛力，因此本研究針對新拌及硬固纖維混凝土之工程特性加以探討，充分了解其優點，以使本種材料易為國人接受，廣受採用。經過挑選為最佳之纖維種類，進行第二階段之試驗。選定四種水灰比，五種纖維體積比，製作二十種不同配比之纖維混凝土試驗以供多項試驗。試驗項目除前述六種外，另有抗壓強度、收縮、磨損、疲勞、透水、熱傳等，以便充分了解纖維混凝土之各種物理性質。

3.3 研究範圍

本研究為確立研究之範圍，經選定主要參數，如表 3.3.1 所列，作為比較。並由此參數之選定，規劃工作之大要，概算工作量及工作時間安排等。

表 3.3.1 纖維混凝土試體之主要參數選定

參 數	範 圍
水 灰 比	0.48, 0.55, 0.62, 0.68
齡 期 (天)	7 , 28 , 90 , 180
纖 維 種 類	鋼纖、玻璃、瓊麻、鐵絲
纖維體積比(%)	0, 0.5, 0.75 [*] , 1, 1.25 [*] , 1.5, 2, 2.5
纖 維 型 態	褶皺或平滑
長 寬 比	165 , 50 , 45 , 102

*瓊麻纖維持有之纖維體積比

為能充分利用本所現有設備及廣泛研究纖維混凝土基本性質，擬定之試驗項目較多，但限於人力、物力、時間等因素，試驗分為兩個階段執行。第一階段主要在探求施工性之難易及材料強度，目的在以篩選纖維種類，並淘汰不佳之纖維。試驗項目包括工作度、單位重、空氣含量、劈裂強度、抗彎強度、韌性指數等。

3.4 研究方法及研究之流程

利用不同的水灰比及纖維比以了解纖維與混凝土界面間握裹力之關係。及纖維用量與強度發展之關係。

因各種纖維具有不同的外觀、外徑、吸水率、細長比、強度、及熱傳等特性，因此採用四種纖維材料分析各種纖維混凝土之力學反應，及其種類，以進行纖維混凝土其他工程特性之研究。

同時選用四種水灰比，藉以了解強度與水灰比及纖維與混凝土界面間作用力之關係。

另外選用五種纖維體積比，以了解因纖維比增加其強度與工作度發展之關係。

由上述各種不同因素製成不同配比之 FRC，可綜合歸納出纖維與混凝土間之各種特性。

同時為節省人力、物力，及工作時間，與避免無謂之浪費，特將研究中之試驗項目，分兩階段試驗。第一階段在於求得適合工程使用之最佳纖維之纖維混凝土，第二階段並對此種纖維混凝土作廣泛性之基本性質研究調查試驗。

而研究之流程，如圖 3.4.1 所示。

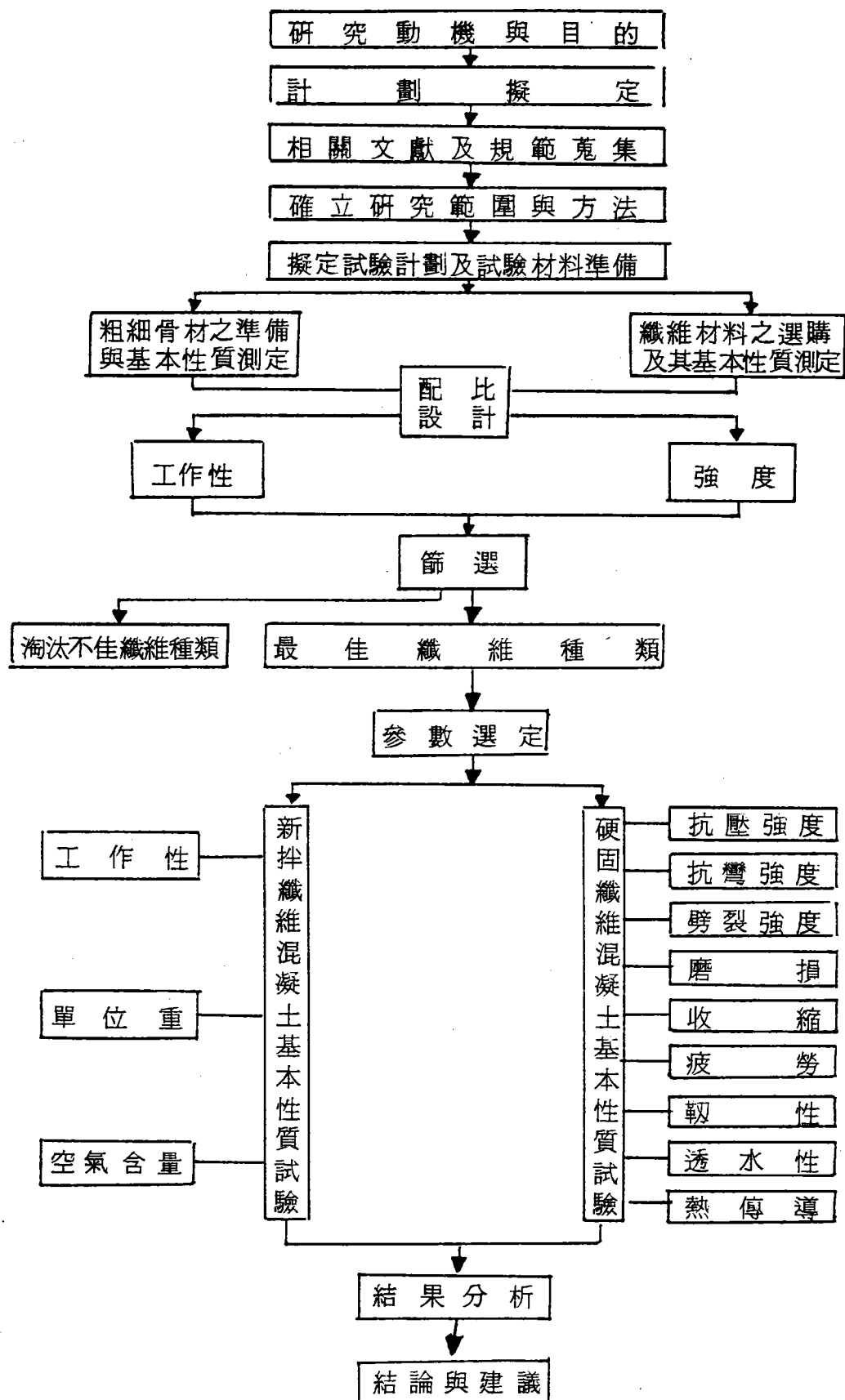


圖 3.4.1 研究流程圖

3.5 研究所需試驗設備及其條件

執行本研究所需之設備係利用本所現有之設備可概分為骨材性質量測，混凝土試體製作、整備、及執行不同試驗工作之設備等。其主要項目分別列於表 3.5.1 中，而試驗條件則列於表 3.5.2 中，便於參考。

表 3.5.1 試驗設備一覽表

骨 材	混 凝 土				
	製 作		整 備	試	驗
洛杉機磨損儀	拌 合 鼓	工作度	切割機	超 音 波	非破壞性檢驗
赤外線水份計	坍 度 計	單位重	磨平機	試 驗 錘	
搖 篩 機	空氣含量計	產 量	蓋平器	萬能試驗機	抗壓、劈裂
比 重 瓶	試 體 模			附件：	抗彎、韌性
磅	振 動 桌			柏松比測儀	彈性模數
五百公斤拉力機	溫 度 計			transducer	柏松比
				X-Y 記錄器	
				25 噸材料試驗機	疲勞、韌性
				附件：同上	
				熱 傳 導 儀	熱 傳 導
				C779磨損儀	磨 損 抗 值
				收 縮 儀	收 縮
				透 水 儀	透 水 性
				凍 融 儀	耐 久 性
				衝 擊 器	衝 擊 強 度

表 3.5.2 試驗條件一覽表

試驗與依據	齡期	試驗條件	試驗步驟	記錄	報告	備考
抗壓 ASTM C39	7天 ~ 1年	8.4~2.04Mpa/min (1200~3000Psi/min)		荷重 齡期 尺寸	$\sigma = \frac{4P}{\pi D^2}$	在 69 Kpa 以內 (10 psi)
劈裂 ASTM C496	7天 ~ 1年	689~1380Kpa/min (100~200Psi/min) 50~100KN/min for 15f×30cm		尺寸 荷重 齡期	$T = \frac{2P}{\pi L D}$	尺寸 D 三次平均 在 0.25 mm L 二次在 2.5 mm
彈性模數及 柏松比 ASTM C469	28天	241±34Kpa / S (35±5Psi/S)	對試體施荷重最少兩次，第一次 不記錄。	S ₁ =50MS S ₂ =0.40 之應變	$E_{chad} = \frac{(S_2 - S_1)}{(\epsilon_2 - 0.000050)}$ $\mu = \frac{(\epsilon t_2 - \epsilon t_1)}{(\epsilon_2 - 0.000050)}$	
試驗錘 ASTM C805	28天	0.15 σ _u 10 point	對試體先施於 0.15 極限荷重	齡期 讀數	$I = \frac{\sum I_i}{10}$	兩打擊點間 距不得少於 25mm 裂縫 或孔穴之讀 數應予忽略。

表 3.5.2 (續)

抗 彎 ASTM C293	7 天 1 年	0.86~1.21Mpa/min (125~175Psi/min)		荷 重 破裂處之高度 齡 期	$R = \frac{3PL}{2bd^2}$	在 35Kpa (5 Psi) 以內 尺寸三次平均 在 0.05~1.3mm
韌 性 ASTM C1018	7 天 1 年	0.05~0.1mm/min (0.002~0.004 in/min)	採用衝程控制。 連接記錄器 (X-Y)。	I ₅ , I ₁₀ , I ₃₀ , I _{0.75}	I 0.75	
工 作 度 ASTM C995		3 ± 1 秒 30 分鐘以內	①分三層填入錐中並用匙稍稍撫平。 ②振動棒和碼錶同時開啓，於 2 ~ 4 S 間穿過錐，並維持垂直。 ③錐透空時，記錄秒數。	時間 (S)	振動棒之直徑、 頻率、振幅、 延時	
單 位 重 量 ASTM C138		30 分鐘以內	①分二層填入。 ②振動桌振動到表面氣泡浮出。 ③稱重。	W ₁ V ₁ W	W ₁ /V ₁ (單位重) W ₁ /W (產 量)	振動桌之頻率 、振幅、振動 時間應記錄。
空氣含量 ASTM C231		30 分鐘以內	①②同上並讀取 A。 ③將 F _s , C _s 混合後，徐徐加入注 滿 1/3 水位之量筒內，移去氣泡。 ④讀取 G	A G	As = (A-G) 100 %	F _s = S/B × F _b C _s = S/B × C _b

表 3.5.2 (續)

收縮	ASTM C157 C490	2年	23±1.7°C >90% H	①試體製作後 23.5±0.5h 拆模，並浸於 23±0.5°C 水中 30 分鐘。 ②於 24.5±0.5 h 內量取試體之起始長度。 ③之後再養生於 23.0±1.7°C 飽和石灰水中 28 天。 ④水中養生 8、16、32、64、週、並適時量測長度。 ⑤氣中養生 4、7、14、28 天，8、16、32、64 週，並適時量測長度。	起始長度 L_i 各齡期長度 L	$\frac{L-L_i}{L_i}$ 與相對齡期	避免觸及 規準螺絲
磨損	ASTM C779-A	28 天	試驗時間 30 分鐘		2 組 20 組	$W = \frac{\sum W_i}{20}$	材料需註明
凍融	C666-A CNS1168 A 3036	14 天	(-17.8°C→4.4°C))/2~5 h (4.4°C→-17.8°C))/2~5 h	①不超過 36 週次於融解時量測其橫振頻率及長度變化。 ②直到 300 週次或相對動彌性模數降至 0.6 E_c 或膨脹率達 0.1 % 為止。	P_N , L_1, h_1 L_2, h_2	$P_F = P_N / M$ $L_c = \frac{L_2 - L_1}{L_g} \times 100\%$ $P_c = h_1^2 / h_2^2 \times 100$	試驗機內應 不留空位。

3.6 試驗所需之試體數量及試體模型式

爲執行本研究中之各項試驗所需之試體數量，依齡期與各種不同試驗項目；分別列於表 3.6.1。而所需之各種試體模之尺寸大小型式則列於表 3.6.2 中。由於執行期間，有些試體模到貨較晚，及有些數量不足，確會影響工作之執行，經過調整之後，使工作得以進行不輟。

表 3.6.1 各試驗項目、齡期所需之試體數量

試驗 齡期 項目	抗壓 10 f × 20cm	劈裂 10 f × 20cm	抗彎 10 × 10 × 35cm	衝擊 15 f × 6.4 cm	收縮 10 × 10 × 30cm	E & P* 15 f × 30 cm	耐久 (凍融) 7.5 × 10 × 40cm	疲勞 10 × 10 × 35cm	透水 15 f × 30cm	磨損 5 × 30 × 30cm	熱傳 5 × 20 × 20cm	其他
1 天					3							
7 天	3	3	3	3								
14 天							3					
28 天	3	3	3	3		2		50	3	2	2	
90 天	3	3	3	3								
半年	2	2		3								
一年	2	2										

*E & P：彈性模數及柏松比

表3.6.2 試體製作量與現有量對照表

試模尺寸	15 f × 30 cm	10 f × 20 cm	15 × 15 × 54 cm	10 × 10 × 35 cm	10 × 10 × 30 cm	7.5 × 10 × 40 cm	30 × 20 × 5 cm 20 × 20 × 5 cm
試項	衝擊; E & P 透水	抗劈 壓; 裂	抗彎	抗彎 及韌性 (疲勞)	收縮	耐久 (凍融)	磨損; 熱傳
原有量	30	15	6	0	3	0	0 0
採購量	0	30	0	9	0	18	2 2
初期製作量	4	32	4	0	0	0	0 0
製作量	8	18	4	9 (50)	3	3	2 2
備註				數量不足 分次製作			

※ E & P : 彈性模數及柏松比

四、材料研究及配比設計

林維明 · 蘇瑞榮

纖維混凝土係指配合水泥材料之高抗壓強度、耐久性與施工容易等特性在其拌合製作過程中摻入具有高抗拉強度、高延展性、高彈性模數，單位重量強度比大之不連續短纖維，以製成之新複合材料。藉以改善混凝土之低延展性、低抗張強度等缺點。

爲使纖維混凝土之品質可以確保，其使用之各種配料須謹慎選擇。從優良級配，質地堅實，磨損值低，抗壓強度大之骨材，品質穩定，化性良好，保存妥當之水泥以至高抗拉強度，高延展性之纖維，皆須謹慎選擇。水泥、骨材已爲工程界所熟稔，不必贅述。而一般使用之纖維，種類與材料性質差異極大，非適當的纖維無法發揮效果。目前常見之纖維種類及其特性列如表 4.0.1 中。

表列之纖維可概分爲人造纖維與天然纖維。人造纖維有鋼纖維、鐵絲纖維、鋁絲纖維、玻璃纖維、聚乙烯纖維、聚丙烯纖維、亞克力纖維、碳纖維等，其材質均勻，性質穩定，供應不具地域性；而天然纖維包括椰皮纖維、竹子纖維、石棉纖維、棉花纖維、瓊麻纖維等，材質均勻性較不穩定，材料供求極具地域性。由於工業發達、副產品或廢料亦相對增加，使用廢料之纖維亦曾被考慮過。就節約能源或環保觀點而言，確實可以節省很多能源，並處理一些頭疼的廢料問題。只是廢料之品質不穩定，難爲工程所接受，但就環保觀點而言，也許可行。

本研究中僅就纖維混凝土之材料強度進行探討，因此材料之選用及配比設計均著眼於工程特性研究。試驗過程中所選用之材料及配比設計，分述於后：

表 4.0.1 纖維的種類材料性質及

纖維的種類 (Types of Fibers)			纖維的		
材 料	種 類	生產方式	直徑(μm)	比重	E(GPa)
金 屬 (metallic)	鋼絲 (Steel)	截斷鋼絲	5~500	7.84	200
	鋁絲 (Alumina)	鋼片剪切 熔鋼抽絲		2.63	73
玻 璃 (glass)	ZrO ₂ 玻璃纖維	念線截斷	9~15	2.60	70~80
	金屬玻璃 (Metglas)				127.0
有 機 聚 合 物 (polymeric)	耐倫 (Kylon)	念線截斷	20~200 10 20~380 — 8~9	1.1	4.0
	聚丙烯 (polypropylene)			0.91	5~77
	Kevlar (聚醯胺香族)			1.45	65~133
	聚乙烯 (P.E)			0.9	0.1~0.4
	嫖縈 (Rayon)			1.5	6.8
	石墨碳 (graphite)			1.9	240~415
自 然 物 (natural)	石棉 (asbestos)		0.02~20	2.55	165
	麻 (sisal, jute)		10~50	1.50	—
	竹子 (bamboo)		—	—	35.0
	棉花 (cotton)			1.5	4.8
	椰皮纖維 (coir)			1.4	2.0

※ E, σ_{TS} , ϵ_t : 分別表彈性模數, 拉力強度及破壞時應變。水泥漿特性: 比重 2~2.4, $E = 30 \sim 45 \text{ GPa}$, $\sigma_{TS} = 1 \sim 4 \times 10^{-3} \text{ GPa}$, $\epsilon_t = 1 \sim 2 \times 10^{-3}$
 混凝土特性: 比重 2.3~2.45, $E = 30 \sim 45 \text{ GPa}$, $\sigma_{TS} = 1 \sim 4 \times 10^{-3} \text{ GPa}$, $\epsilon_t = 1 \sim 2 \times 10^{-3}$
 $\text{GPa} \times 0.145 = 10^6 \text{ psi}$ + v/o: 體積百分比

應用

般 性 質		拉 脫 (pull-out)	纖維加入方式	纖維最 高用量 (v/o) ⁺
σ_{Ts} (GPa)	ϵ_T (%)	強度 (Mpa)		
0.5 ~ 2.0	0.5 ~ 3.5	4.15 ~ 11.0 6.6 ~ 13.6	箭 散 法 帶 送 法 混 拌 法	3
2 ~ 4	2 ~ 3.5	6.38 ~ 9.25	噴 撒 法 (spray-up)	10
2.30		5.40	捲 繞 法 (Winding)	15
0.9	13.0 ~ 15.0	0.14	噴 撒 法 (spray-up)	10
0.5 ~ 0.75	20	1.0		
3.6	2.1 ~ 4.0			
0.7	10.0			
0.4 ~ 0.6	10.0 ~ 25.0			
1.5 ~ 2.6	0.5 ~ 1.0			
3 ~ 4.5	2 ~ 3	1.0 ~ 3.17		
0.8	0.3			
0.5	—	1 ~ 2.0		
0.4 ~ 0.7	3.0 ~ 10.0			
0.1				

2.2, $E = 10 \sim 45 \text{ GPa}$, $\sigma_{Ts} = 3 \sim 7 \times 10^{-3} \text{ GPa}$, $\epsilon_T = 0.02\%$
 $0.005 \sim 0.015\%$

4.1 材料選用

4.1.1 骨材

由於季節變化，天然產之骨材級配不穩定，無法滿足試驗要求，如欲自行調整級配，則設備不足。本研究中所採用之骨材係由榮工處大甲溪骨材場提供。其篩分析結果及重要特性如細度模數、吸水率、單位重、比重等分別列於表 4.1.1 及表 4.1.2 所示。由此兩表顯示，本骨材之級配及質地優良符合 CNS 及 ASTM 規範之要求。

表 4.1.1 骨材篩分析結果

骨材種類	篩號	$\frac{3}{4}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{3}{8}$	# 4	# 8	# 16	# 30	# 50	#100	# 200	篩盤
	m m	19	12.5	9.5	4.75	2.30	1.19	0.59	0.297	0.149	0.074	
粗 骨 材	留篩 (%)	0	1.4	85.8	56.2	6.6						
	過篩 (%)	100	98.6	62.8	6.6							
細 骨 材	留篩 (%)				1.9	11.7	11.0	19.9	27.5	21.8	5.3	0.9
	過篩 (%)				98.1	86.4	75.4	55.5	28	6.2		

表 4.1.2 骨材之重要物理特性

類 別	比 重	單 位 重 (Tons/ m^3)	吸 水 率 (%)	磨 損 率 (%)	細 度 (F.M)	健度損失率 (%)
粗骨材	2.62	1.515	1.35	22.48		0.06
細骨材	2.62	1.604	1.42		2.5	0.95

表 4.1.3 水泥化學成份分析及化學組成

主 要 組 成 成 分	含 量 (%)	化 學 成 分 分 析	含 量 (%)
$3CaOSiO_2$	39.27	SiO_2	20.49
$2CaOSiO_2$	29.11	Al_2O_3	6.57
$3CaOAl_2O_3$	11.75	Fe_2O_3	3.27
$4CaOAl_2O_3Fe_2O_3$	9.96	CaO	62.40
CaO	1.03	MgO	1.91
MgO	1.91	SO_3	2.20
$CaSO_4 \cdot 2H_2O$	4.73	CaO	1.03
物理性質		不純物 (L.I.O)	1.57
細 度	3013	燒失量 (I.R)	0.67
比 重	3.15		

4.1.2 水泥

採用台灣水泥公司出產之品牌波特蘭第一型水泥，其主要化學成分分析如表 4.1.3 所示。爲使水泥品質不變質。本研究概採用小量購買，於灌漿之前一日買進，購買時復以鬆軟之水泥爲原則。

4.1.3 纖維

應用於纖維混凝土之纖維種類繁多，特性亦異，如表 4.0.1 所列。本研究採用鐵絲、瓊麻、鋼纖、抗鹼玻璃四種纖維進行試驗。四種纖維之長度、長寬比、相當直徑、比重等特性列於表 4.1.4 所示。四種纖維之 SEM 照片附於圖 4.1.1 ~ 4.1.4。四種纖維之特性概述如下：

表 4.1.4 纖維之特性

纖維種類 \ 特性	長度 (mm)	相當直徑 (mm)	長寬比	比重 (Tons/ m^3)	荷重 (Kg)	抗拉應力 (MPa)	單價 (元/公斤)
瓊麻	30	0.08~0.30	165	0.884	1.5	200	75
鐵絲	40	0.75~0.80	50 ~ 53	6.854	22	441	45
鋼纖	50	1.11	45	7.840	45	455	贈予 (42)
抗鹼玻纖	25	0.007~0.020		2.650			300

※ 平均之長寬比



圖 4.1.2 鐵絲纖維之 SEM 照片



圖 4.1.4 玻璃纖維之 SEM 照片



圖 4.1.1 瓊麻纖維之 SEM 照片



圖 4.1.3 鋼纖維之 SEM 照片

本研究採用四種纖維，其中瓊麻、鐵絲爲就地採購，鋼纖由榮工處及美國 RIBBON 鋼鐵公司各提供六十公斤及一公噸，抗鹼玻纖則自英國進口。

四種纖維中瓊麻爲天然纖維，性甚柔軟，具多孔性，易吸水，吸水後體積膨脹，拉力強度降低，此可能係吸附砂漿，材料分離所致。因係一天然纖維，故其直徑並非均一（ $0.08\text{mm} \sim 0.30\text{mm}$ ），由圖 4.1.1 之瓊麻 SEM 照片，可見一斑。且其切口呈多孔狀，正爲吸水之孔道。本種纖維拌合不易，易結球團，吸附砂漿，造成材料分離，導致材料強度不足。

鐵絲由市售之 22 # 鐵絲加工裁切而成，直徑均一，表面平滑不具摺皺。由圖 4.1.2 之鐵絲 SEM 照片可見其切口處與鋼筋裁斷相似，爲一種延性材料。因係金屬材料，質地細緻，吸水性低，較瓊麻易於拌合、施工。纖維體積比高時，易結球團。本種纖維於 NaCl 及 Na_2SO_4 溶液中將生黑色之腐蝕生成物。

鋼纖爲美國 Ribbon Tech 公司產品。爲一具摺皺，斷面扁平之短纖，如圖 4.1.3。本種纖維拉力强度高，拌合及施工性均佳，因此可獲致較均質的 FRC。本種纖維於 NaCl 溶液中將生褐色之腐蝕生成物；於 Na_2SO_4 溶液中將生黑色之腐蝕生成物。

抗鹼玻纖由英國進口。具抗鹼性，適合於混凝土中使用。本種纖維直徑細小，常成束出現。由圖 4.1.4 玻纖 SEM 照片，可見玻纖之束狀排列整齊，直徑均一，表面平滑，且其切口斷面平滑光亮，與普通玻璃所見無異，爲一種脆性材料。因爲直徑細小，量測不易，由 SEM 照片，可以估算其直徑大小。本種纖維比重爲 2.65 與骨材相近，易於拌合。

4.2 配比設計

本研究中之配比設計，以水灰比為主要參數。先以前述之材料，依 ACI 318 及 ACI 211 之規範作普通混凝土配比設計，並製成試體以供試驗分析，經多次調整材料用量後，選定之四種水灰比（0.48，0.55，0.62，0.68）之素混凝土（無纖維）強度分別為 365.9 Kg/cm^2 ， 320.4 Kg/cm^2 ， 253.0 Kg/cm^2 及 225 Kg/cm^2 ，由此強度之分佈情形，認為合於試驗需求。各種材料之使用量，列於表 4.2.1。

表 4.2.1 混凝土配合比例表

U_M (公斤/ M^3)

材 料 \ W/C	0.48	0.55	0.62	0.68
水	230	230	230	230
水 泥	479	418	371	338
砂 (SSD)	663	714	753	781
石 (SSD)	890	890	890	890

由於玻璃纖維之長寬比及吸水率甚大，於普通混凝土配比下，易糾結成團，造成材料不均，於是修改配合比例，並將較富配比，經過多次調整後，玻璃纖維混凝土之主要配比列於表 4.2.2 中。

、表 4.2.2 玻璃纖維混凝土中之主要配合比例表 U_M (公斤/ M^3)

用量 Kg / 材料 M^3	0.48	0.55	0.62	0.68
水	250	264	275	283
水 泥	520	480	444	416
砂 (SSD)	1140	1156	1183	1190
石 (SSD)	200	200	200	200

纖維用量，依各種纖維之比重及其纖維體積比以計算其一混凝土方之用量，本研究中並以纖維取代部份粗骨材的設計概念為依據，各纖維體積比之纖維用量及粗骨材取代量列於表 4.2.3 中。

表 4.2.3 纖維混凝土之配合比例表 U_{MF} (公斤/ M^3)

$\frac{F}{C(\%)}$ 纖維	0	0.5	0.75	1	1.25	1.5	2	2.5
抗鹼玻纖	0	13.25	19.88	26.5	33.13	39.75	53	66.25
鋼 纖	0	39.2	58.80	78.4	98	117.6	156.8	196
瓊 麻	0	4.42	6.63	8.84	11.04	13.26	17.68	22.1
鐵 絲	0	34.27	51.41	68.54	85.68	102.81	137.08	171.35
被取代之 粗骨材量	0	-13.1	-19.6	-26.2	-32.7	-39.3	-52.4	-65.5

估計新拌纖維混凝土之單位重可利用下式：

$$U_{MF} = 10 G_a (100 - A) + C_M (1 - G_a / G_c) - W_M (G_a - 1) + F_M (1 - G_a / G_f) \quad \dots\dots\dots \text{式 4.2.1}$$

式中

U_{MF} : 新拌纖維混凝土單位重 (Kg / M^3)

A : 空氣含量

G_a, G_c, G_f : 分別為骨材, 水泥, 纖維之比重

M_c, M_w, M_f : 分別為水泥, 水, 纖維用量 (Kg / M^3)

本研究中之各種配比材料用量, 即據上述各表。

五、纖維混凝土材料工程性質

林維明 · 蘇瑞榮

纖維混凝土由於不連續短纖維之強化作用，增強了許多普通混凝土的功能。使混凝土材料更具多元化及多功能的特色。普通混凝土因有低抗拉強度及低延展性等缺點，使得其張力區易生非結構性之裂紋，而影響工程品質及美觀。增加水泥用量，可改善些許之抗拉強度，但伴隨著較高的收縮量。如藉纖維之強化，增強裂縫阻抗能力，及韌性，可以增加延展性及吸收部份能量，因此其抗拉強度、韌性、耐久性均相對地提高，有助於提昇工程品質。

本研究中對於纖維混凝土材料工程性質，作一系列之試驗，茲分述於后：

5.1 工作度試驗

5.1.1 試驗目的

本試驗之目的在瞭解纖維混凝土之工作性及施工之難易程度。作為工程材料，不僅須考慮其強度，亦需考慮其工作性。工作性之良否，直接影響現場施工品質。好的工作性，可確保品質，並能節省工時及人力。工作性差，施工不易，必然耗費人力與機具，而且品質參差無法一致。甚或品質劣於普通混凝土。纖維混凝土為一高成本材料，須有良好的製程管理及施工技術，以確保應有之品質。工作性正是影響品質最重要的因子。具有良好工作性之材料，其品質必然可以確保。本試驗不單在探求工作性更在探求如何改善工作性。

5.1.2 試驗驟及量測方法

①試驗設備

本研究中採用之方法係依 ASTM C995 之標準進行探討。坍度試驗可適用於普通混凝土，但對於纖維混凝土並不適用，測量纖維混凝土之工作性，除本方法外另有 V-B 試驗。本試驗之設備包括振動棒一支，馬錶一個，顛倒坍度錐一組（如圖 5.1.1）。

振動棒之直徑為 10 吋，頻率 60 H Z；馬錶精度 0.1 秒，顛倒坍度錐之規格依照 ASTM C995 之建議。使顛倒坍度錐附於一直徑及高度同為 14 吋之筒內，並使錐底距筒底有 3 吋之懸空。其尺寸說明如圖 5.1.2。

②試驗前準備

本試驗之試料係採自新拌之纖維混凝土。當試料自拌合鼓倒出至承料盤（鐵製不漏之盤）後如圖 5.1.3，即用平口鏟鏟進錐中。因錐為懸空，鏟進之料應足於使該料停於錐內，因此第一次進料量應約為所需試料之三分之一。錐中之料以平口鏟稍作整平，再進另三分之一之料，經整平後，再進最後三分之一之料。進料完成後，錐上之多餘料應去除。

③試驗

當試驗前準備工作就緒後，即可進行試驗，開啓振動棒，垂直插入錐內，並於 3 ± 1 秒內穿過錐且維持垂直。（如圖 5.1.4）。當振動棒接觸試料之同時，按下馬錶開始計時。直到錐內透空時，停止馬錶，並記錄延時。

5.1.3 試驗結果

試驗記錄如表 5.1.1 及表 5.1.2 所列結果繪如圖 5.1.5。由於纖維之摻入，增加混凝土之阻撓，使得纖維混凝土之工作性，大為降低，當纖維含量遞增，其結果更為明顯。如纖維體積比大於 2 % 時，本試驗法實際上不甚適用。因易流性之砂漿部份，會從材料析出，而使得纖維及粗骨材猶停於錐內。V - B 試驗法，應較本法為優。

由結果顯示，三種纖維以鋼纖維混凝土之工作性最佳，因其長寬比，表面積較小，且其鋼性足，不易扭曲變形，纖維本身之纖結機會降低，不易結團成球，因此其工作性較之他種纖維混凝土為佳。三種纖維中以瓊麻纖維混凝土之工作性最差。一則因其纖維軟弱，易糾結成團，使材料不易拌合，另因其比重較輕，易造成材料析離現象。二則由於其具多孔性，易吸水，使拌合水為纖維所吸附，影響拌合。另外由於其長寬比表面積大，使得拌合施工相形不易。瓊麻纖維與玻璃纖維具有相類似之特性，如將瓊麻應用於水泥漿或砂漿中，應可表現其材料特性。本研究將之應用於混凝土中，使其特性未能展露。玻璃纖維如應用於其混凝土中，其情形亦類似瓊麻纖維。

本研究中修改本種纖維混凝土之配比，使其具有較多之細骨材含量，使得玻璃纖維混凝土之工作性甚佳。玻纖雖然於單纖時長寬比甚大，但由於其結合成束，且每束由 150 ~ 250 支單纖組成，（如圖 5.1.6 及圖 5.1.7 所示）因此其長寬比亦顯為降低。本種纖維比重與骨材相近，拌合容易，唯其吸水率甚大，配比設計時，宜多注意。

5.1.4 討論

- ①鋼纖維混凝土具有較佳之工作性，因其纖維之長寬比表面積較小，且由於鋼性足不扭曲結團。而吸水率亦低。
- ②瓊麻纖維混凝土由於比重輕，材質軟弱，長寬比大、吸水率大，易於結團，拌合不易均勻，造成工作性較差。
- ③玻璃纖維混凝土因其比重與骨材相近，拌合容易，又由於配比上具有良好之細顆粒成分，流動性較佳，因此其工作性亦相當好。但其吸水率甚大，配比設計時，應加留意。
- ④瓊麻纖維與玻璃纖維具有較類似之特性，如將其混凝土之配比修改，應可得較佳之表現。
- ⑤纖維混凝土之配比應具有較多之細骨材含量，及較小之粗骨材粒徑，使材料易於拌合，及增進其工作性。
- ⑥飛灰或強塑劑之使用，實有必要，尤其瓊麻纖維或玻璃纖維混凝土或纖維體積比含量大時尤然。
- ⑦本試驗法於纖維體積比大於 2 % 時，量測不易。由於流動值較高之砂漿部份易先析出，造成不透空之現象。如改採 V - B 時間試驗法，應可得更佳之試驗數值。
- ⑧改進纖維混凝土之工作性可參考第六章影響強度及工作性諸因子之探討一章。

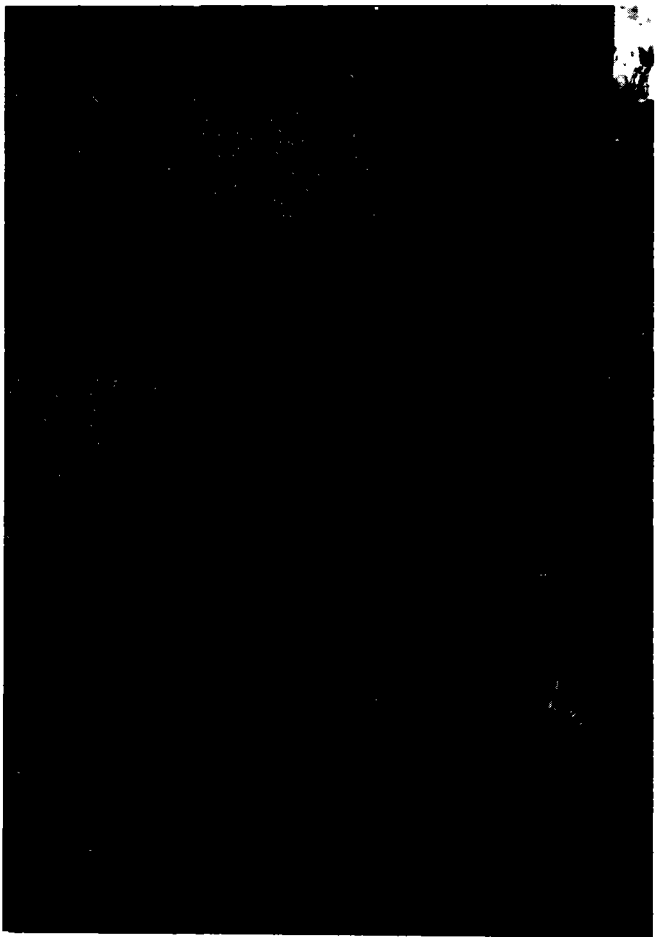


圖 5.1.1.3 承料盤及試料



圖 5.1.1.1 纖維混凝土工作性試驗設備一組



圖 5.1.1.4 纖維混凝土工作性量測情形

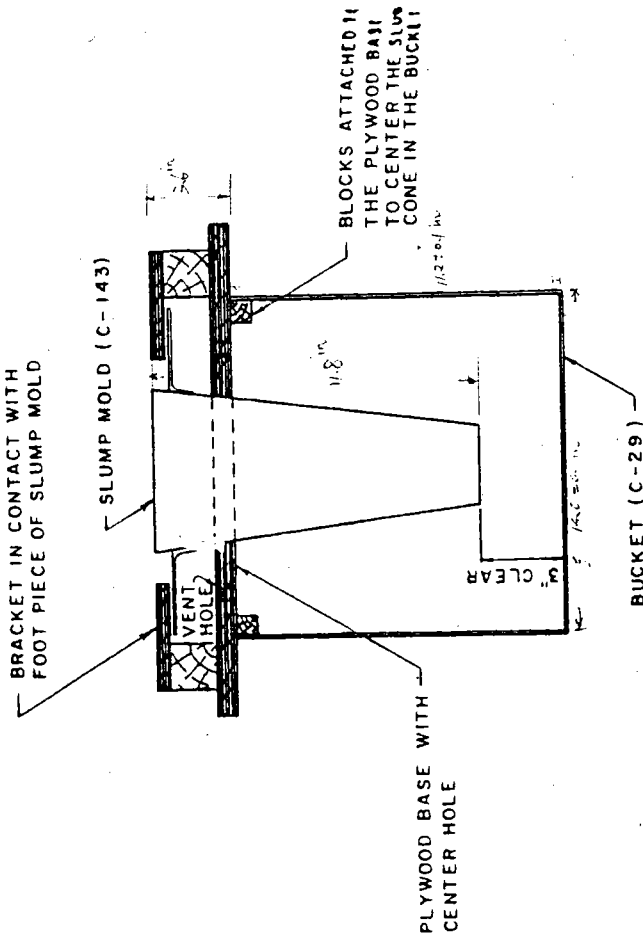


FIG-4 Method of Positioning the Inverted Slump Cone in the Bucket

圖 5.1.1.2 倒坍度錐之配置圖

表 5.1.1 各種纖維混凝土工作性試驗記錄

透空時間 (S) 纖維種類	纖維比 0.5 %	1 %	1.5 %	2 %	2.5 %
鐵 絲	15.2	36.4	80.6	—	—
瓊 麻	12.8	85	117	—	—
銅 織	11.2	30.4	72.8	—	—
玻 織	10.1	17.5	28.6	44.6	107.8

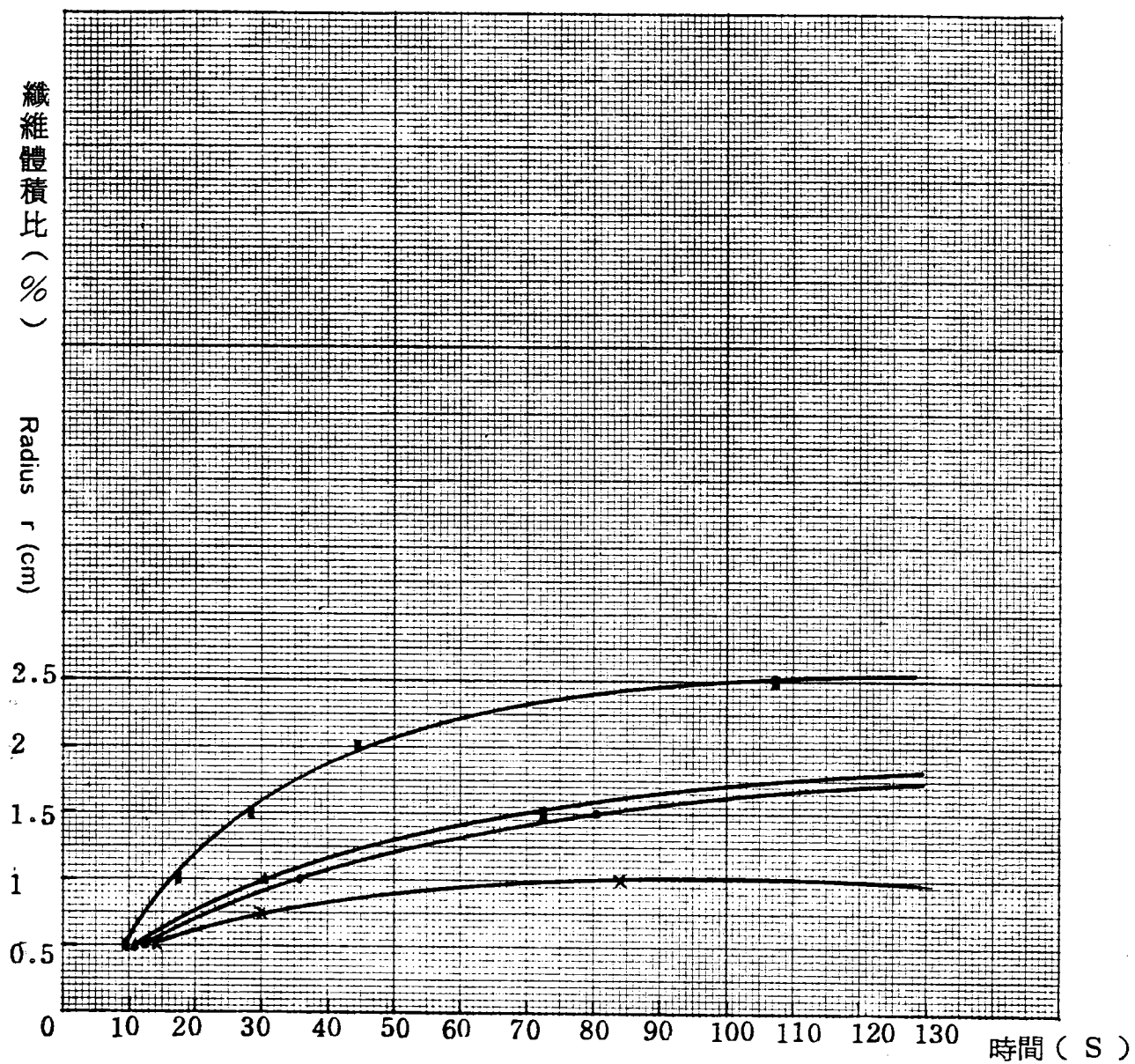


圖 5.1.5 各種纖維混凝土工作性試驗結果

表 5.1.2 各種鋼纖維混凝土工作性試驗記錄

透空時間 (S) 纖維比 水灰比	0.5 %	1 %	1.5 %	2 %
0.48	11.2	30.4	72.8	—
0.55	15.4	37.3	76.9	—
0.62	15.3	38.8	87.6	—
0.68	23.6	43.6	75.7	111.4

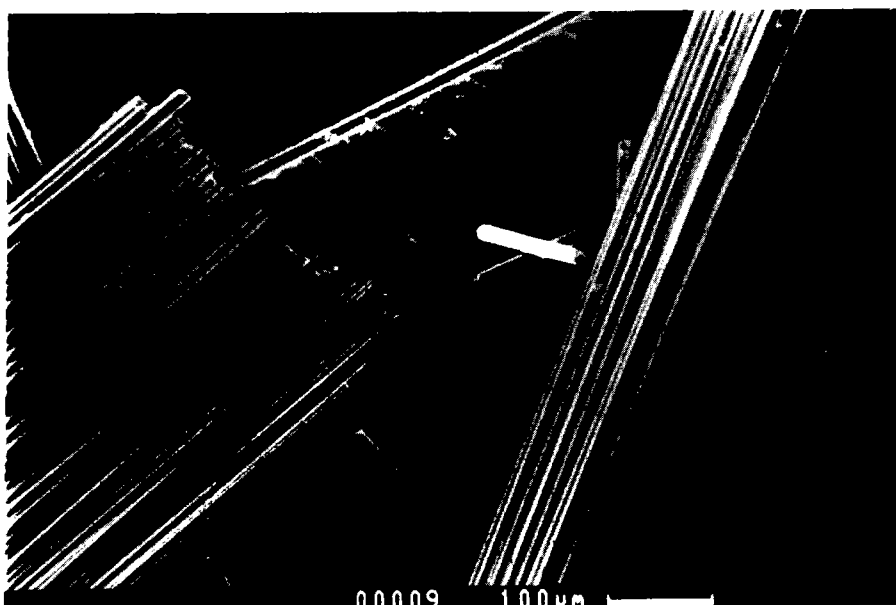


圖 5.1.6 玻璃纖維束狀結合情形

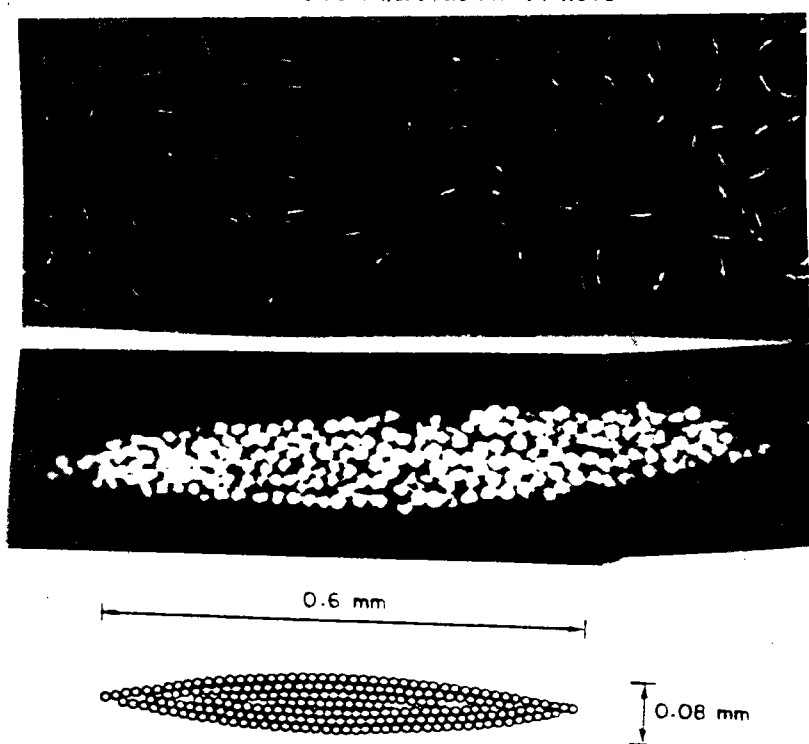


圖 5.1.7 玻璃纖維束狀結合示意圖

5.2 單位重及空氣含量試驗

5.2.1 試驗目的

藉以瞭解纖維混凝土之單位重、空氣含量、產量等。纖維因種類繁多，且其本身之材料特性及比重亦異，因此當其摻入混凝土後，即引起新鮮纖維混凝土諸多特性之改變。單位重、空氣含量，為新拌纖維混凝土之重要特性。由此特性之瞭解，始能掌握其材料用量之決定。纖維混凝土因強度及單位重之改變，影響結構斷面甚大。對於單價分析、材料用量、主要工程費等將有所影響，亦皆影響原始設計。

5.2.2 試驗步驟及量測方法：

①試驗設備

單位重及空氣含量係按 ASTM C - 138 規範規定步驟試驗，設備計有空氣含量計、量筒及天秤等（如圖 5.2.1）。量筒容量為 7 公升，直徑 204mm 高度 214mm，為由不受侵蝕之合金材料製成。空氣含量計具有氣壓表一個，打氣閥一個，排氣門一個，進水口一個，排水口一個，壓氣把一個，並附四個鎖鉗可與量筒鎖成一體。天秤之能量為 20 公斤，精度一公克。

②試驗前準備：

本試驗之試料採自新拌之纖維混凝土。當試料自拌合鼓傾倒出至承料盤後，即以平口鏟鏟進量筒內。試料分二層填入，每層並利用振動桌夯實，到表面無氣泡浮出為止。除去多餘之試料使量筒內之試料恰與量筒上緣成一平面。（可用厚玻璃板檢視），擦拭量筒外側

所流附之混凝土。便可進行該試料之單位重及空氣含量量測。

量測所得之空氣含量值（A）應再減去校正因子（G），才為該試料之真正空氣含量值（A_s）。校正因子之量測，係將粗細骨材之用量混合後，徐徐加入注滿三分之一水位之量筒內，補足水量，移去氣泡。其所量測之空氣含量值為校正因子。

③試驗：

蓋上空氣含量計，並利用四個鎖鉗，使量筒及空氣含量計結成一體，並不得有任何漏氣情形發生。利用空氣含量計之進水口與排水口加水以排除空隙間之空氣。閉上排氣門，經由打氣閥充氣，使氣壓錶之指針超過起始量測線，再利用排氣門將多餘之氣體排出，使指針恰位於起始量測線上。當壓下壓氣把後，該材料之空氣含量指數，可由指針位置讀出。（如圖 5.2.2）此讀數減去校正因子，即為該試料之空氣含量。除去空氣含量計，將試料連量筒移至天秤上量取重量並記錄之。

④計算：

$$A_s = (A - G) \times 100 \% \quad \text{..... 式 5.2.1}$$

$$W_u = W_1 / V_1 \quad \text{..... 式 5.2.2}$$

$$Y_u = W_1 / W \quad \text{..... 式 5.2.3}$$

式中：A_s：試料之空氣含量。

A：錶示之試料空氣含量值。

G：校正因子。

W_u：單位重（Kg / M³）

W₁：量筒內之試料淨重。

V_1 : 量筒內之實體積。

Y_v : 產量。

W : 總料使用量。

5.2.3 試驗結果：

試驗結果列於表 5.2.1 ~ 表 5.2.4。由此結果可以看出纖維混凝土之單位重與其組成材料及配比相關性密切。若纖維之比重大於混凝土，則其單位重將隨纖維體積比之增加而遞增，反之則遞減。但纖維體積比大於 1.5 % 時，則又由於孔隙之增加，使纖維之增重效應無法利用計算式精確估計。但仍有隨纖維體積比之增加而遞增之現象。纖維混凝土之單位重與水灰比有一不很明顯之趨勢，即水灰比降低，單位重增加，但此現象就試驗結果而言，屬於隱而不顯的現象。就空氣含量而言，鋼性纖維具有較小的空氣含量值，瓊麻纖維可能其本身具有多孔性，且由於易糾結成團，而導致空氣含量值偏高。就各種水灰比之影響空氣含量而言，其結果不明顯，但隨著纖維體積比之增加，空氣含量值有些微之增加。

5.2.4 討論

- ①纖維材料之比重大於混凝土，其單位重隨纖維體積比之增加而增加，反之若比重小於混凝土，則單位重將隨纖維體積比之增加而減小。
- ②當纖維體積比大於 1.0 % 時，比重大之纖維混凝土單位重趨平，而比重小之纖維混凝土則下降。

- ③ 瓊麻纖維性甚柔軟，又具多孔性，易吸水，拌合施工不易，空氣含量較大且與纖維體積比之關係影響較小。
- ④ 鋼纖、鐵絲等鋼性纖維之空氣含量，隨纖維體積比增加而增加。
- ⑤ 量筒內試料以補足為原則。如因試料過多需除去時，將導致纖維量過多之影響。

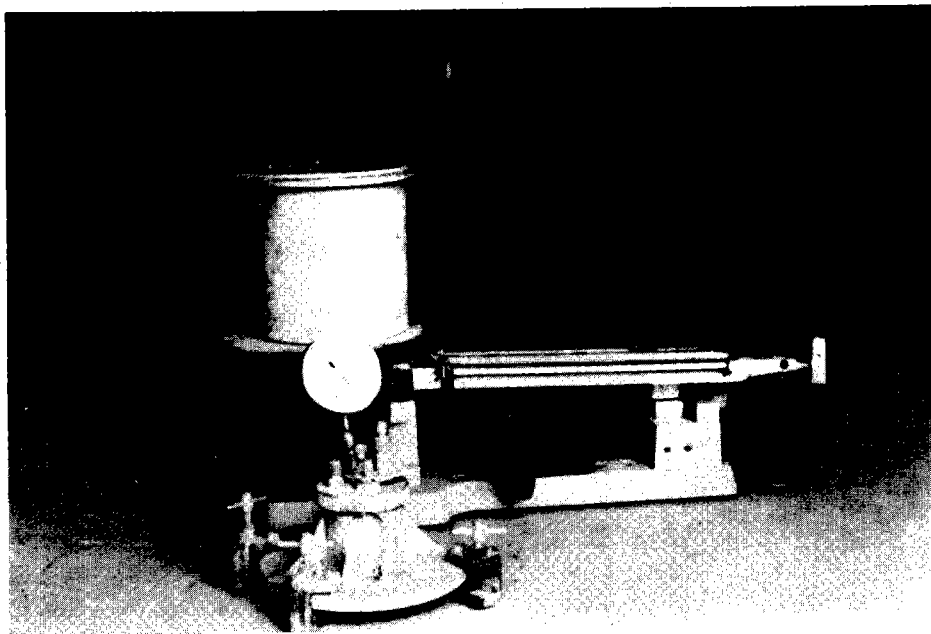


圖 5.2.1 單位重及空氣含量試驗設備一組



圖 5.2.2 空氣含量量測情形

表 5.2.1 各種纖維混凝土之單位重試驗記錄

空氣含量(%) 纖維種類	0 %	0.5 %	1 %	1.5 %	2 %
鐵 絲	2350	2380	2406	2389	2451
瓊 麻	2350	2279	2295	2275	—
鋼 織	2350	2360	2373	2403	2465

表 5.2.2 各種纖維混凝土之空氣含量試驗記錄

空氣含量(%) 纖維種類	0 %	0.5 %	1 %	1.5 %	2 %
鐵 絲	2.1	2.2	2.5	2.6	2.8
瓊 麻	2.1	4.5	4.2	4.0	—
鋼 織	2.1	2.2	2.8	3.9	3.1

表 5.2.3 各種鋼纖維混凝土之單位重試驗記錄

空氣含量(%) 纖維比 水灰比	0 %	0.5 %	1 %	1.5 %	2 %
0.48	2350	2360	2373	2403	2465
0.55	2332	2340	2350	2384	2395
0.62	2303	2338	2337	2369	2406
0.68	2284	2324	2331	2383	2385

表 5.2.4 各種鋼纖維混凝土之空氣含量試驗記錄

空氣含量(%) 纖維比 水灰比	0 %	0.5 %	1 %	1.5 %	2 %
0.48	2.1	2.2	2.8	3.9	3.1
0.55	2.6	3.0	3.1	2.4	2.7
0.62	2.1	2.1	2.2	2.5	2.6
0.68	2.3	3.0	3.8	2.9	3.9

5.3 劈裂強度試驗

5.3.1 試驗目的

藉以瞭解纖維混凝土之抗拉強度及纖維與混凝土界面間握裹力、剪力之關係。由於纖維與混凝土界面間之握裹力，及纖維本身之高抗拉強度，使得纖維混凝土之劈裂強度因纖維之種類、長寬比而改變。由於纖維混凝土之劈裂試驗目前尚無標準可循。且由於纖維混凝土受劈製作用當達初裂強度時其情形不同於普通混凝土迅速裂成二半，因此其荷重可持續性增加，若非藉其他輔助設備，實無法獲得其初裂強度，劈裂強度試驗在初裂點以後，作用力系趨於複雜，分析困難，且其作用力亦不單只是張力而已。因此如何獲取其初裂強度，為本試驗之關鍵。

5.3.2 試驗步驟及量測方法

①試驗設備

劈裂強度試驗係按ASTM C-496規範規定步驟試驗。設備有萬能試驗機，變位轉換器（TRANSDUCER）（如圖5.3.1）放大器（AMPLIFIER）（如圖5.3.2）X-Y記錄器、劈裂桿等。其中萬能試驗機能量為100噸，具有可選定最大荷重段數共五段，其最大荷重分別為5噸，10噸，25噸，50噸及100噸等，每一段內又分為500小格，因此最小讀數可精確至10公斤。變位轉換器為電子感應式，靈敏度高，經連接放大器後，其輸出電位為10V，再連接於

X - Y 記錄器上，變位量可以圖示出。配合萬能試驗機之荷重輸出（本設備之輸出電位 5 V）連接記錄器後，可繪出荷重變位曲線圖。由圖上之轉曲點，可以判讀初裂之荷重。

②試驗步驟

①試體置於萬能試驗機上之劈裂桿內，且使劈裂桿中心、試體中心與萬能試驗機中心線成一直線。（如圖 5.3.3）控制油壓，使試體微微受力（一小格內）以維持此一直線。

②配置變位轉換器於萬能試驗機上。且使其傳輸軸垂直於試驗機平台，並有一定量之接觸。連接放大器及 X - Y 記錄器，且於記錄器上調整適當之輸出量，以使圖示之荷重—變化曲線具有代表性（應先計算）。歸零後，再切下彩筆。

③以固定數值之荷重速率（ASTM 標準）開始試驗。萬能試驗機上配有 Load pacer，調整荷重指針與 Load pacer 之轉速同步，其荷重速率即符合 ASTM 標準值。本設備之 Load pacer 設定值如表 5.3.1 所列。

④於記錄紙上之荷重變位曲線上獲致轉曲點之荷重數值後，停止試驗，並記錄該荷重數值。圖 5.3.4 為試體達初裂強度時開裂情形。圖 5.3.5 為纖維混凝土受劈裂後，纖維裸露之排列情形。

5.3.3 試驗結果

試驗結果列於表 5.3.2 及 5.3.3 中，並繪如圖 5.3.6 ~ 圖 5.3.8 中。由此結果可知纖維混凝土之劈裂強度與纖維體積比之關係不大。此主要為試驗只取至初裂為止。而反應初裂強度之最主要因子為水灰

比。由水灰比之降低，可明顯看出劈裂強度之增加。雖然纖維含量之影響不如水灰比明顯，由此結果仍可以看出纖維含量愈高，其劈裂強度，亦有些微之上升。四種纖維之比較，瓊麻纖維混凝土之劈裂強度不佳比普通混凝土尤差，尤其纖維含量高時，更為明顯，鐵絲及鋼纖維的鋼性足，握裹力佳，因此其劈裂強度可以維持。另由 5.3.8 中知本材料如同混凝土材料一樣，其強度亦隨齡期之增加而增加，玻纖混凝土由於配比稍異，但由試驗結果可以看出，與其他纖維之劈裂強度差異不大。

表 5.3.1 100 T 萬能試驗機、試驗荷重速率表 (ASTM)

名稱	順數	5 T		10 T		25 T		50 T		100 T	
尺寸	Load Pacer	小	均大	小	均大	小	均大	小	均大	小	均大
抗壓	10f × 20 cm	673	—	336	600 840	135	240 337	67	120 167	24	60 86
	15f × 30 cm	—	—	770	—	308	540 770	154	270 385	77	135 193
劈裂	10f × 20 cm	222	333 444	111	166 222	44	67 89	22	33 44	11	17 22
	15f × 30 cm	500	750 1000	250	375 500	100	150 200	50	75 100	25	38 50
抗彎	4 × 4 × 14 cm	20	24 28	10	12 14	4	5 6	2	2 3	1	2 2
	6 × 6 × 20 cm	45	54 63	23	28 33	9	11 13	5	6 7	2	2 3
彈性模數 及 柏松比	10f × 20 cm	—	—	600	—	240	—	120	—	60	—
	15f × 30 cm	—	—	—	—	540	—	270	—	135	—
韌性	4 × 4 × 14 cm	24	—	12	—	5	—	2	—	2	—
	6 × 6 × 20 cm	54	—	28	—	11	—	6	—	2	—
行程控制	4 × 4 × 14 cm	(0.05 mm ~ 0.1 mm / min)									
	6 × 6 × 14 cm	→ 0.87 × (")									

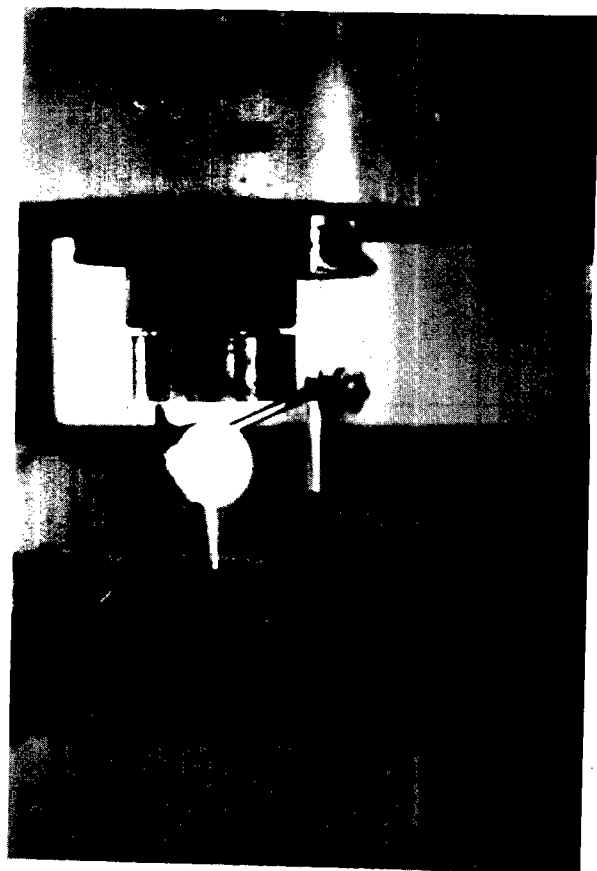


圖 5.3.1 劈裂強度試驗設備一組

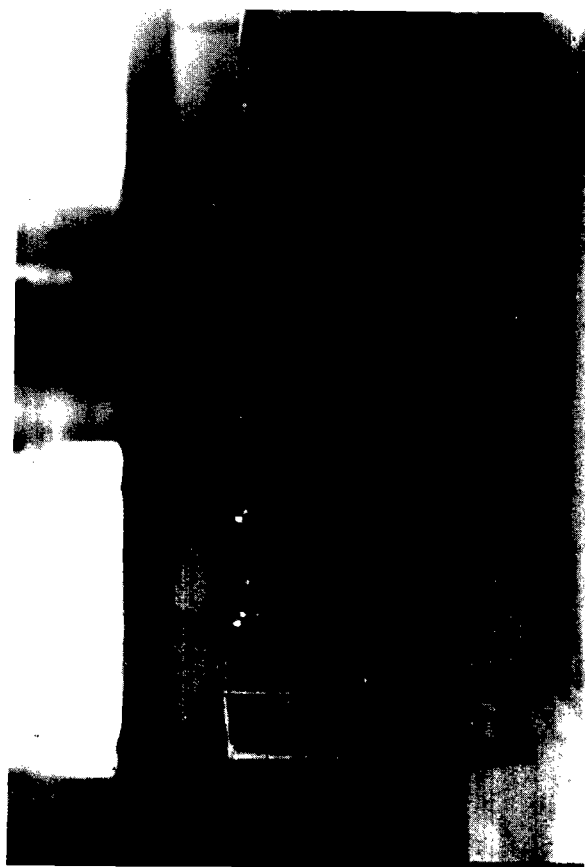


圖 5.3.2 放大器

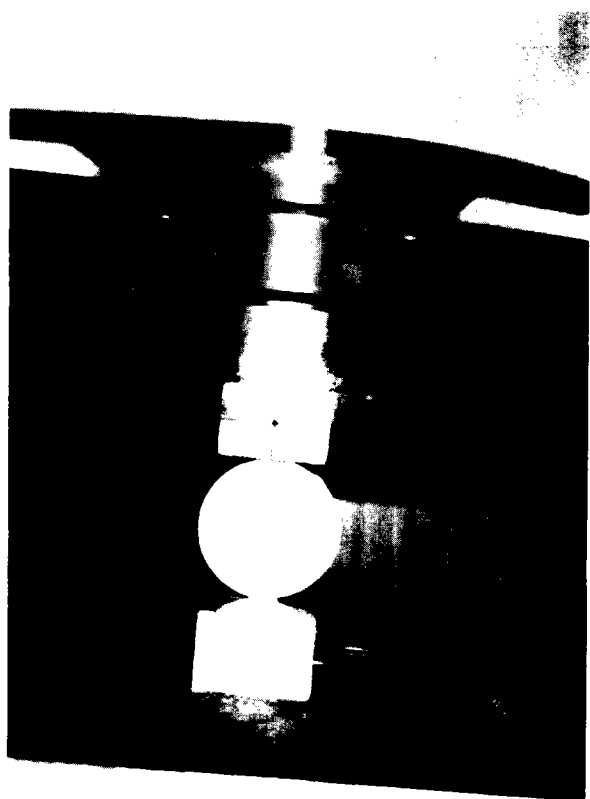


圖 5.3.3 劈裂強度試驗配置圖

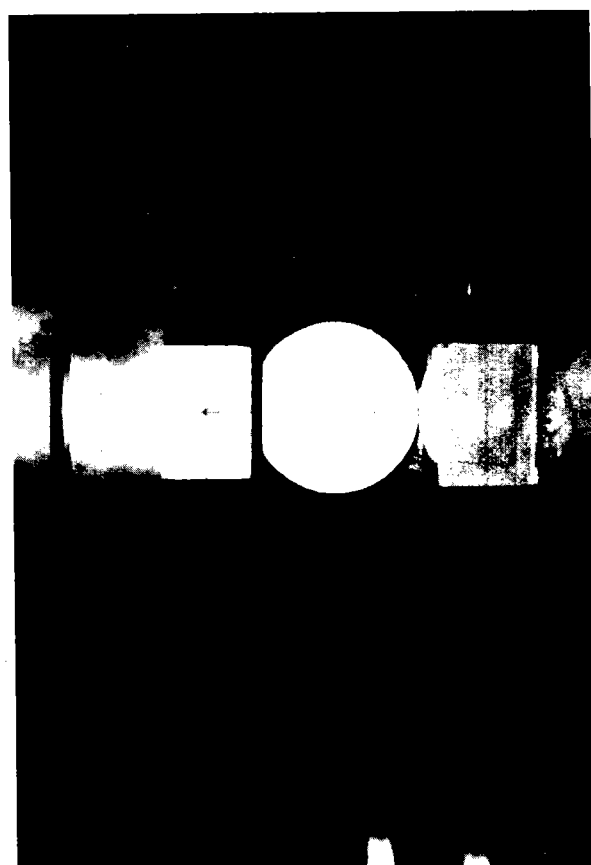


圖 5.3.4 初裂強度後試體開裂情形

表 5.3.2 各種纖維混凝土之劈裂強度試驗記錄

(齡期 28 天，水灰比 0.48)

劈裂強度 (Kg / cm^2) 種類 \ 纖維比	0 %	0.5 %	1 %	1.5%	2 %
瓊 麻	46.1	38.9	40.0	41.1	28.5
鐵 絲	46.1	46.3	46.3	43.3	49.4
鋼 織	46.1	43.4	45.3	45.5	48.7
玻 織	43.2	43.6	44.3	44.0	41.6

表 5.3.3 各種鋼纖維混凝土之劈裂強度試驗記錄 (齡期 28 天)

劈裂強度 (Kg / cm^2) 水灰比 \ 纖維比	0 %	0.5 %	1 %	1.5 %	2 %
0.48	46.1	43.4	45.3	45.5	48.7
0.55	34.1	34.5	36.5	37.1	37.7
0.62	29.4	32.0	30.3	30.0	35.9
0.68	27.6	29.9	31.4	27.9	33.0



圖 5.3.5 劈裂試體纖維排裂情形

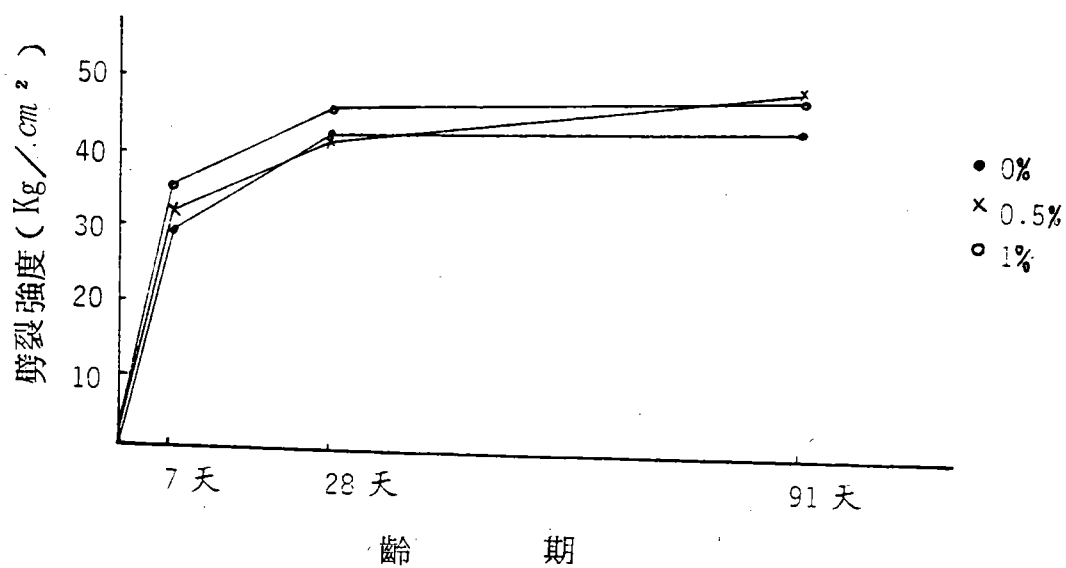


圖 5.3.8 齡期對纖維混凝土劈裂強度之影響

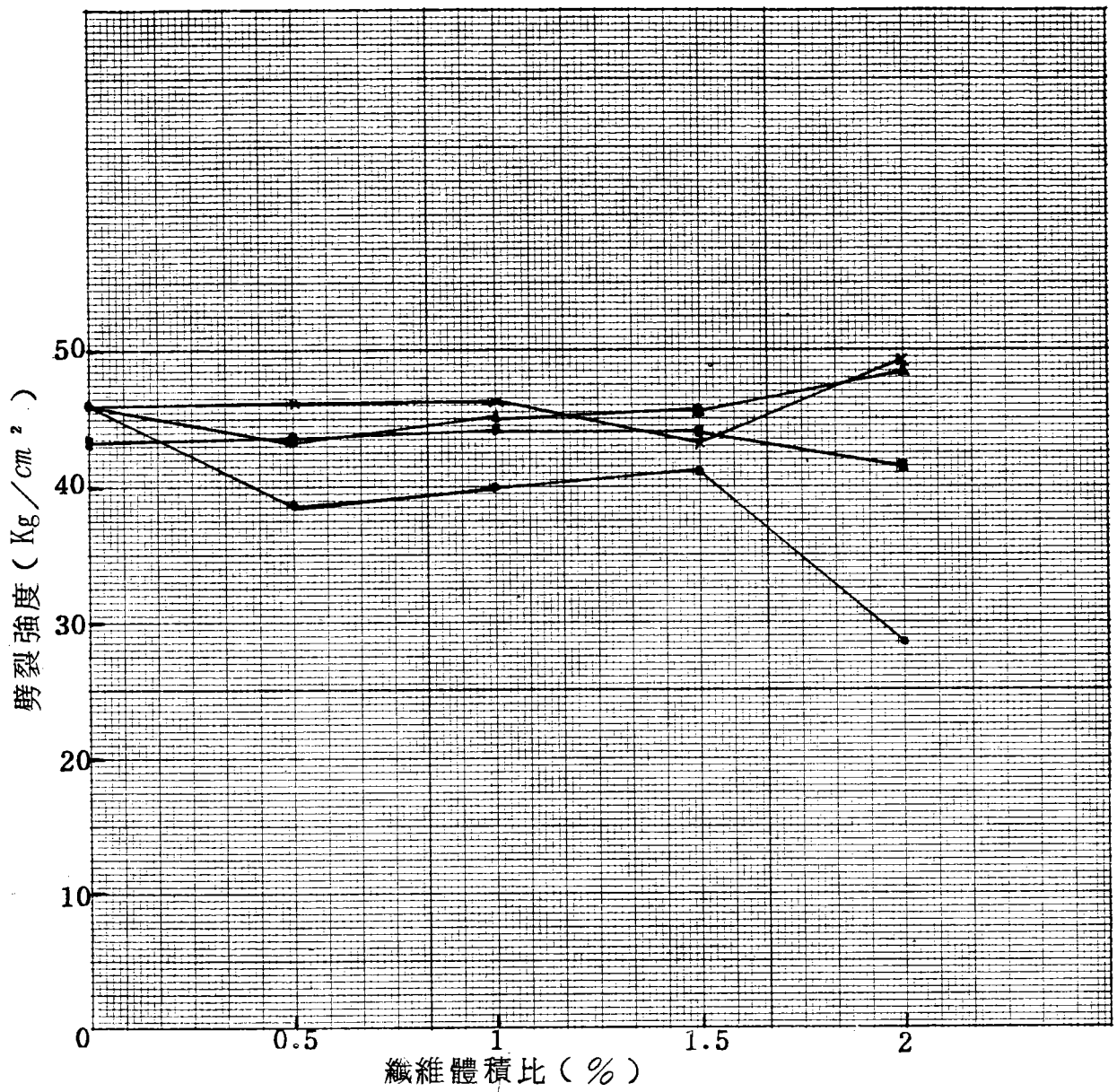


圖 5.3.6 各種纖維混凝土之試驗結果

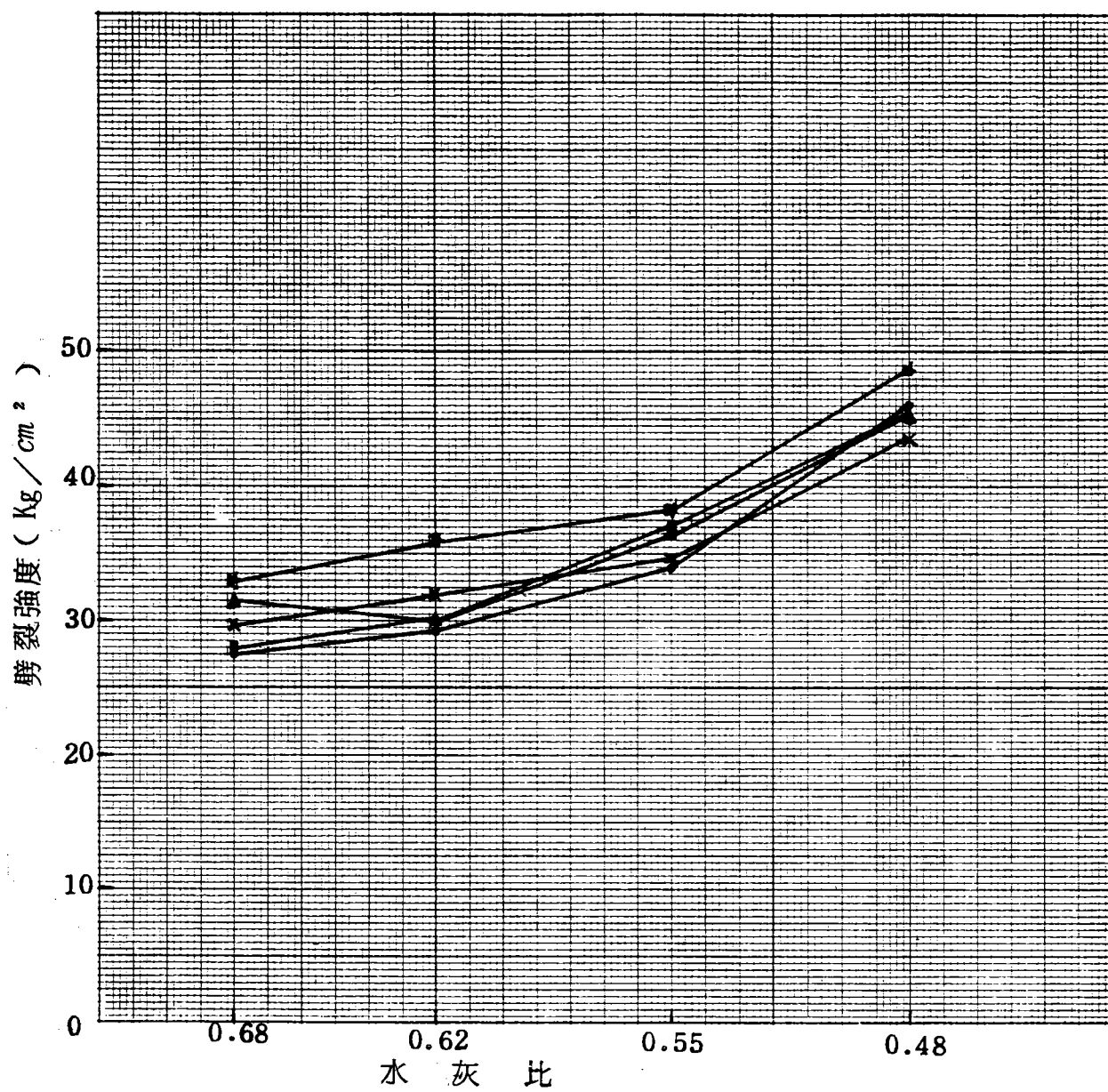


圖 5.3.7 各種鋼纖維混凝土之試驗結果

5.3.4 討論

- ①纖維混凝土之劈裂強度與混凝土相近。可知初裂以前之張力抵抗，主要來自混凝土。
- ②纖維體積比雖對 F.R.C 之劈裂強度有些微改變，但其量不足與水灰比抗衡。
- ③纖維混凝土如同普通混凝土一樣，其劈裂強度隨水灰比之降低而增加，且隨齡期之增加而增加。
- ④瓊麻纖維混凝土之劈裂強度試驗不佳，尤其纖維含量高時，尤為明顯。此可能導因於本種纖維之吸水性佳及吸水後膨脹，又由於強度不佳及排列不勻，使得受力之後，呈現強度不足。
- ⑤本試驗之量測不易，非輔於特殊設備，所獲得結果難達精確。
- ⑥本試驗受人為因素影響甚大，應仔細放置試體，並使試體之中心線與設備之中心線一致。

5.4 磨損試驗

5.4.1 試驗目的

本試驗之目的在求纖維混凝土之耐磨損特性。由於纖維種類繁多，複合於混凝土之後，材料特性更形複雜。而其耐磨能力互異，為能獲致一可靠完整之試驗數據，於是執行本試驗。纖維混凝土之用途廣泛，可普及程度同於普通混凝土，但由於本種材料成本較高，除了特殊工程使用外，較難為一般工程所接受。耐磨損為纖維混凝土重要特性之一，尤其應用於鋪面工程、路面工程，更見如此。本特性與抗彎強

度，衝擊強度，同為鋪面工程所要求之材料特性之一。

5.4.2 試驗步驟及量測方法

本試驗利用本所之試驗設備進行，有關試驗之程序及量測方法概述如下：

①試驗前準備工作

將水、水泥、骨材倒入拌合鼓後，採用手撒法將纖維徐徐加進拌合鼓內（如圖 5.4.1），依據 ASTM C192 規範，先拌合三分鐘，停拌三分鐘，並在拌合鼓開口處加活動蓋以防止水份蒸發，再拌合 2 分鐘後注入 $30\text{ cm} \times 30\text{ cm} \times 5\text{ cm}$ 不加蓋鐵模，折模後送進標準噴霧式養生室，相對溫度控制 100%，溫度控制 $23^{\circ}\text{C} \pm 1.7^{\circ}\text{C}$ ，28 天後置於室內乾燥至恒重後再進行磨損試驗。磨損試驗前先用橋型測微尺量測其初始高厚，精度在 0.01mm。

②試驗設備

①平面磨損試驗儀（Abrasion Test Machine）

本所之平面磨損試驗儀係屬 ASTM C779 TYPE A 型（如圖 5.4.2），為轉動圓盤式（Revolving Disks）具有三組磨具，直徑為 66mm。每一磨具有 2.2 公斤之自由重量，可保持受磨損面於常壓下進行試驗。主旋轉軸轉速 12rpm，磨具之轉速為 280rpm，試驗後留下一道軌跡內徑 151mm，外徑 283mm。（如圖 5.4.3）

②橋座及測微尺（Bridge & Micrometer）

橋座可隨意置於試體之標示點，並跨越磨損軌跡便於測微尺之量測，測微尺（由旋轉游標讀數），精度為 0.01mm，範圍為 6.6mm。藉由探測桿穿過橋座之孔達於磨損面，量取磨損深度。（如

圖 5.4.4)。

③磨損試驗量測步驟

將試體置於磨損試驗儀內作混凝土平面磨損，磨損介質採用 60# 金剛砂 (Silicon Carbide) (如圖 5.4.5)，出砂量為 5.6 ± 0.3 g / min，符合 ASTM 規定 $4 \sim 6$ g / min，先磨損 30 分鐘後，用測微尺量測其磨損深度，再重覆磨損試驗一次，為瞭解添加高纖維含量與低纖維含量在磨損抵抗上之差異，本試驗又再延長 30 分鐘，共執行三次磨損試驗，並作磨損深度量測，每一試體任取 10 點量測值平均。

5.4.3 試驗結果

本次磨損試驗結果列於表 5.4.1，將表 5.4.1 之資料繪製如圖 5.4.6 及圖 5.4.7 由圖中可見纖維混凝土與一般素混凝土之耐磨損能力比較，當纖維比 $F = 0.5\%$ ，磨損抵抗力並不增加，但若 $F = 1.0 \sim 2.0\%$ ，則耐磨性平均增加 $19 \sim 25\%$ ，而若在同一纖維比，不同水灰比之情況下 (圖 5.4.6) 比較，顯示差異不明顯，圖 (5.4.8) 為本試驗使用之鋼纖維，圖 (5.4.3) 不同纖維含量之 F R C 試體經磨損後纖維裸露情形。

表 5.4.1 鋼纖維混凝土磨損深度

單位: mm

纖維含量 (%) 水灰 (w/c)比	0 %	0.5 %	1.0 %	1.5 %	2.0 %
0.48	0.706 1.457 2.098	0.727 1.214 1.917	0.674 0.995 1.590	0.502 0.934 1.410	0.498 1.038 1.521
0.55	0.799 1.460 2.100	0.817 1.489 2.007	0.534 1.065 1.857	0.652 1.307 1.907	0.597 1.058 1.612
0.62	0.935 1.497 2.202	1.005 1.601 2.118	0.790 1.138 1.807	0.815 1.237 1.815	0.489 1.098 1.737
0.68	0.954 1.601 2.331	0.910 1.320 2.125	0.834 1.167 1.788	0.739 1.308 1.870	0.508 1.017 1.599

*: 磨損深度自上而下分別表 30、60、90 分鐘之磨損值。

5.4.4 結論與建議

- ①纖維混凝土耐磨損抵抗，以纖維含量多寡影響較大，而水灰比影響程度就稍嫌減少。
- ②由本試驗結果顯示纖維比為 1.0 % ~ 2.0 %，纖維混凝土之耐磨損能力平均可增加 19 % ~ 25 %，因此可預期加纖維混凝土在路面工程上之應用，確實發揮其磨損之抵抗力。
- ③影響纖維混凝土磨損因素很多，除上述纖維含量，水灰比外，粗骨

材最大粒徑，孔隙多寡，均有影響。

- ④在混凝土中加了纖維，其拌合及施工上均較素混凝土難，所以不妨在纖維混凝土中加入飛灰（Fly Ash），強塑劑（Superplasticizers）等摻料，增強其拌合，搗實等工作，減少孔隙含量使混凝土更密實，更可增加其磨損抵抗力。
- ⑤本試驗之後續研究為添加摻料，增加其工作度，求最佳粗骨材最大粒徑，減少水泥用量，以期降低纖維混凝土成本，然而減少水泥用量對其耐久性影響性如何，有待進一步試驗。
- ⑥鋼纖需要進口，若國內能自行研究發展鋼纖，降低成本，相信纖維混凝土在鋪面工程上可達經濟安全及實用之理想目標。

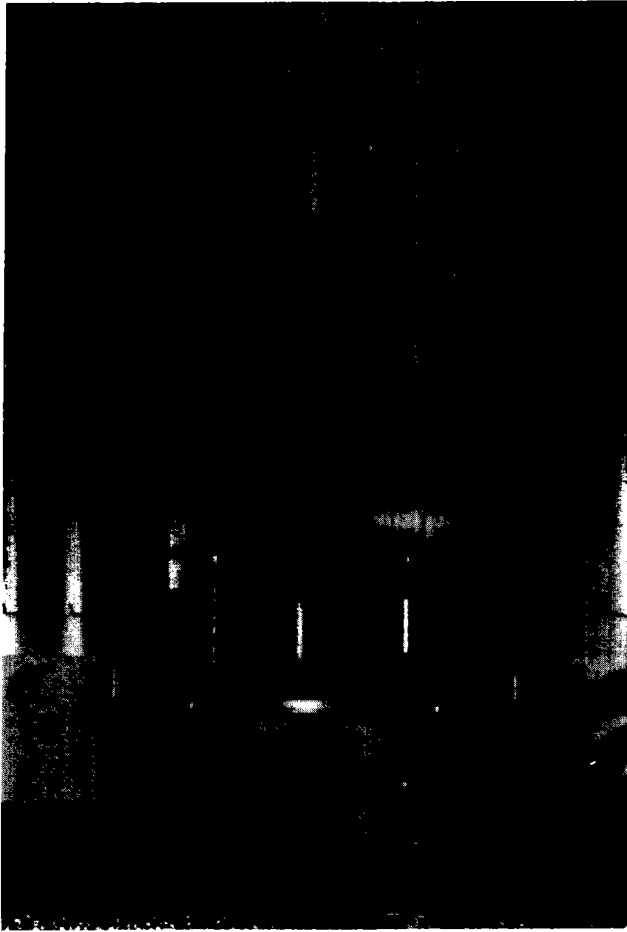


圖 5.4.2 磨損試驗儀

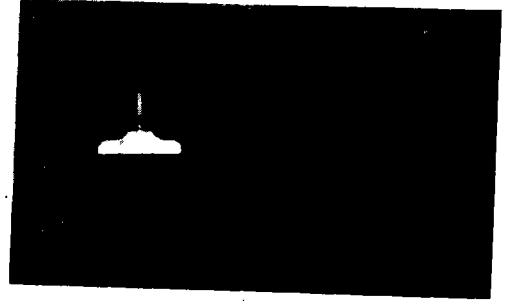


圖 5.4.4 橋座及測微尺



圖 5.4.1 纖維混凝土拌合情形

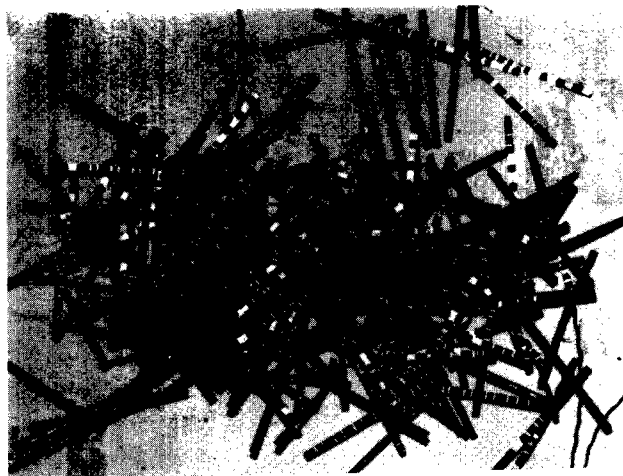


圖 5.4.8 銅纖維



$F = 2.0\%$ $F = 1.5\%$ $F = 1.0\%$ $F = 0.5\%$ $F = 0\%$

圖 5.4.3 不同纖維含量之 FRC 試體經磨損後纖維裸露情形



圖 5.4.5 60# 金剛砂

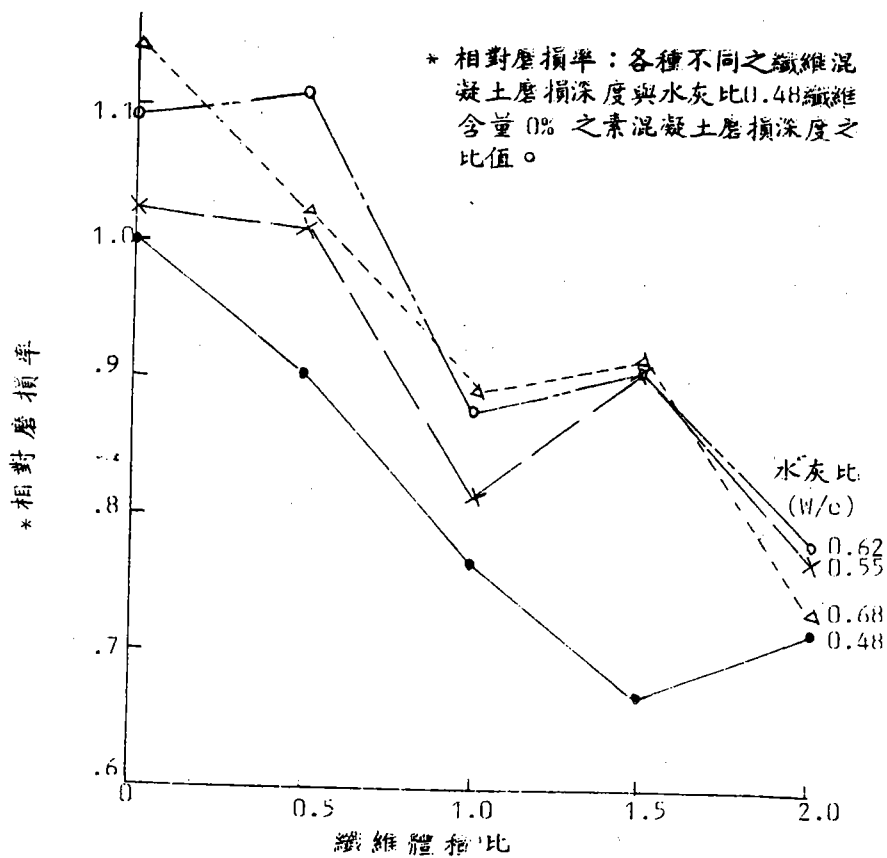


圖 5.4.6 纖維體積比與相對磨損率之關係

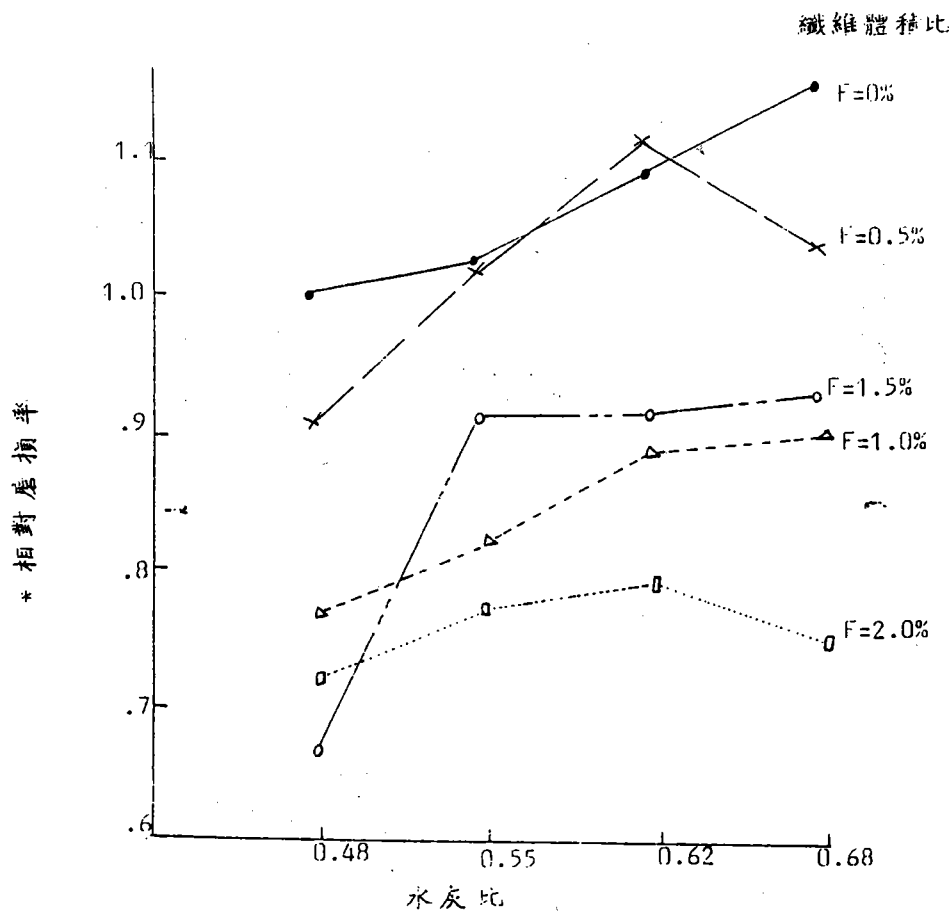


圖 5.4.7 纖維混凝土水灰比與相對磨損率之關係

5.5 收縮試驗

5.5.1 試驗目的

本試驗目的在以確定因纖維之摻入對混凝土收縮膨脹之影響。普通混凝土因水化硬固，拌合水減少而導致混凝土之收縮，如因處於濕潤之環境則由於母體孔隙間之吸水而引起膨脹。任何情況之體積不穩定，對於結構體將造成或多或少之不良影響。且由於體積不穩定引起材料本身之應力殘存，而造成非結構性裂紋之生成。此將影響美觀及工程品質，纖維之摻入使新複合材料具有較佳之抗張強度，同時亦提高其抗剪強度。由於纖維本身不參與水化作用，且藉其材料本身之高勁度，由其表面提供之磨擦剪力及其本身之強度抵抗，使得混凝土之收縮或膨脹，均需提高能量。相對的，由此亦可減少混凝土之收縮或膨脹量。因為纖維混凝土之體積穩定性較高，可以減少因外在環境改變所引起之收縮膨脹。

5.5.2 試驗步驟及量測方法

①試驗設備：

本試驗依據ASTM C490之標準試驗。設備有長度變化（收縮）量測儀（圖5.5.1）一組。且有標準桿一支長度294mm及圓盤式感應計（Dial gauge）一個，精度0.00254mm，量測範圍在6.35mm之間。圓盤式感應計為可拆式，便於攜帶，可現場量測。其靠

準點爲可旋動雙螺絲，可以任意調整規準桿之圓盤感應計讀數，以滿足試驗需要。

②試驗前準備：

①試體準備：

本研究採用之試體尺寸爲 $10 \times 10 \times 30\text{cm}$ ，兩端各有一規準螺絲（如圖 5.5.2），可以附於長度變化量測儀上，一端之螺絲附於靠準點上，另端則嵌入圓盤式感應計之圓環內。規準螺絲爲不變形不銹不腐蝕之合金材料製成，外端具有螺紋，鎖附於試體模上，內端具有交叉斜紋利於混凝土之握裹。試體製作前規準螺絲附於試體模上，如圖 5.5.3。試體模之兩端各具一個端模，便於拆模。

②起始長度量測

試體經製作後滿 23 ± 1 小時內拆模，並浸於 $23 \pm 0.5^\circ \text{C}$ 水中 30 分鐘後，取出試體利用乾布擦拭，於試體齡期 24.5 ± 0.5 小時內，量取試體之起始長度 L_i 。起始長度量測前，需使用規準桿先歸零，並讀取歸零之圓盤感應計讀數。量測之配置如圖 5.5.4 所示。

③試驗

試體經量測起始長度之後，即送入室溫控制於 $23 \pm 1.7^\circ \text{C}$ 之養生室養護，當達適當齡期，取出試體量測該齡期之長度。

④計算：

試體長度 $L = L_{\text{規準桿}} + (D_2 - D_1) \times 25.4 \text{ (mm)} \dots\dots\dots \text{式 5.5.1}$

長度變化 $\Delta L = L - L_i$

收縮或膨脹率 = $\Delta L / L_i$

式中：D₁：規準桿之圓盤感應計讀數。

D₂：試體之圓盤感應計讀數。

5.5.3 試驗結果

試驗結果列於表 5.5.1 及繪於圖 5.5.5。由此結果可以看出纖維混凝土長度因環境差異所生之改變量，將因纖維體積比之增加而遞減。此因纖維與混凝土界面偶合，增加張力及剪力，減少收縮或膨脹量。此對於混凝土體積不穩定性，甚有幫助，另由試驗結果之圖示看出，長度變化量有兩段之情況較激烈，前一段齡期從 0 天到 30 天左右，由於水泥糊體之水化作用，因此長度顯著變化，中間一段達半年之時間，因試體處於恒溫恒濕之情況下，長度變化量小，最後一段為試體自養生室取出，且暴露於大氣中，由於水份之散失而乾縮。另由於環境改變之差異不大，因此長度變化量小。

5.5.4 討論：

- ①由於纖維之存在，增加混凝土之剪及張力，拘束能量提高，減少因外在環境改變所引起之長度變化。
- ②由於體積穩定性增加，可以增加鋪面之長度，減少伸縮縫數量，提高服務品質。
- ③由於不易變形，因此裂縫較小較細，且具有與普通混凝土相同情形之裂縫時，仍保有相當完整的吸附能力，提昇耐久性，及增加美觀。

- ④本試驗採用ASTM C490 方法，因試體過重，影響量測時之穩定性，應改以其他試驗方法，如ASTM C157 替代。
- ⑤為使量測精確，圓盤感應計之精度應予提高。
- ⑥於乾縮情況下，應輔以應變計（Strain gauge）以提高精度。
- ⑦外在環境之改變量越小，則纖維混凝土之體積穩定性越高。
- ⑧本試驗一直處於養生室中，因此試驗結果所得之數值較一般試驗之長度變化量為小。

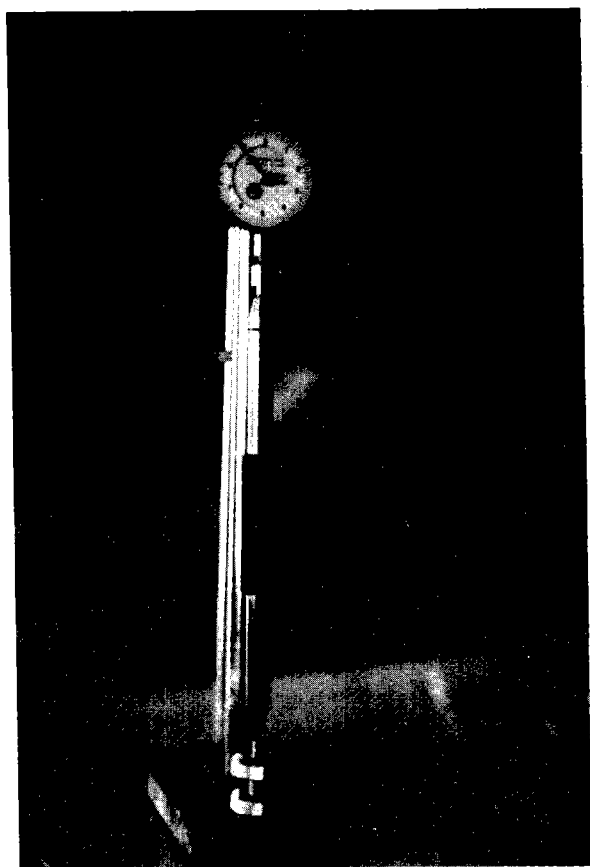


圖 5.5.1 長度變化量測儀一組



圖 5.5.2 長度變化試驗試體

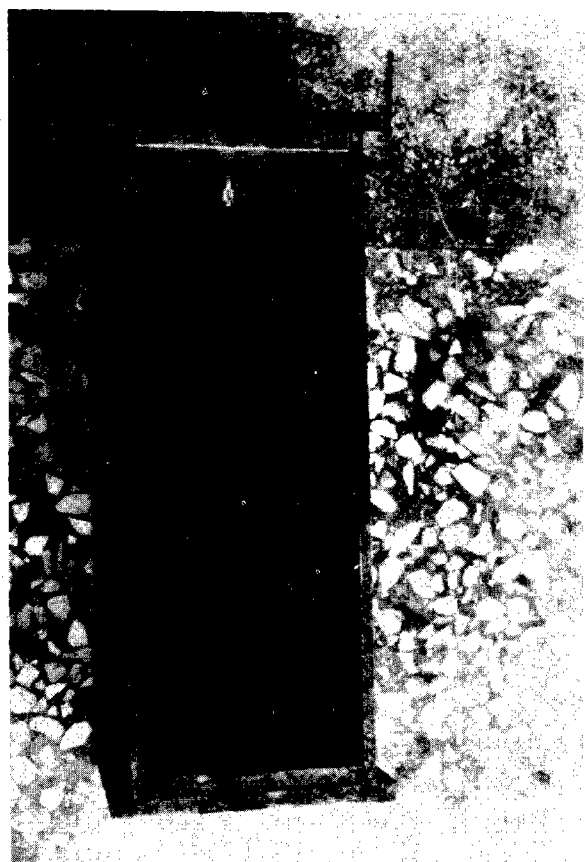


圖 5.5.3 長度變化試驗用之試體模

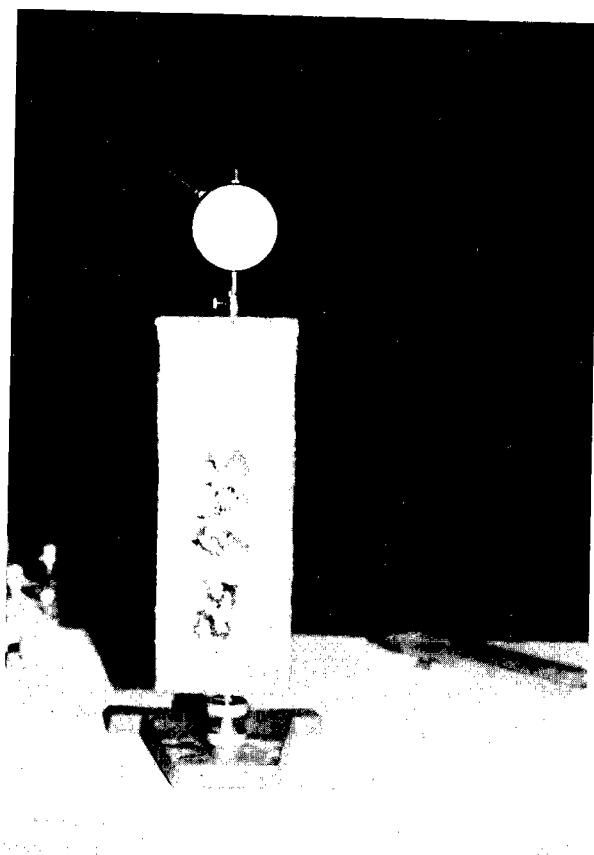


圖 5.5.4 長度變化量測配置圖

表 5.5.1 收縮膨脹試驗數據

量測 值及 混 凝土 種類*	7 / 21	8 / 4	8 / 19	8 / 26	9 / 9	10 / 8	11 / 5	12 / 4	12 / 29	1 / 26	2 / 9	2 / 10	4 / 30
T C α	0.08420 (292.329)	0.08560 121.64 μ	0.08630 182.47 μ	0.08639 190.30 μ	0.08607 162.48 μ	0.08606 161.61 μ	0.08583 141.63 μ	0.08572 132.08 μ	0.08615 169.4 μ	0.08637 188.54 μ	0.08625 178.00 μ	0.08499 68.63 μ	0.08451 26.94 μ
T C β	0.09312 (292.555)	0.09374 55.83 μ	0.09389 66.85 μ	0.09439 110.26 μ	0.09463 131.10 μ	0.09453 122.42 μ	0.09449 118.95 μ	0.09437 108.53 μ	0.09449 118.95 μ	0.09472 138.91 μ	0.09438 109.39 μ	0.09352 34.73 μ	0.09315 2.60 μ
T C γ	0.10482 (292.852)	0.10521 33.83 μ	0.10540 50.305 μ	0.10615 115.36 μ	0.10642 138.78 μ	0.10639 136.17 μ	0.10636 133.57 μ	0.10626 124.90 μ	0.10613 113.62 μ	0.10622 121.43 μ	0.10570 76.33 μ	0.10509 23.42 μ	0.10477 -4.34 μ
T C δ	0.10350 (292.819)	0.10430 69.390 μ	0.10450 86.74 μ	0.10461 96.28 μ	0.10423 63.32 μ	0.10412 53.78 μ	0.10404 46.84 μ	0.10391 35.56 μ	0.10386 31.23 μ	0.10387 32.09 μ	0.10382 27.76 μ	0.10375 21.69 μ	0.10371 18.21 μ
T C ϵ	0.09333 (292.561)	0.09318 -13.02 μ	0.09311 -19.10 μ	0.09342 7.81 μ	0.09350 14.76 μ	0.09353 17.36 μ	0.09358 21.70 μ	0.09360 23.44 μ	0.09357 20.84 μ	0.09350 16.50 μ	0.09340 6.07 μ	0.09321 -10.42 μ	0.09299 -29.52 μ

* T : 鋼纖維 ; C : 水灰比 0.55 ; α , β , γ , δ , ϵ 纖維體積比 0 % , 0.5 % , 1 % , 1.5 % , 2 % 。

() : 試體之起始長度

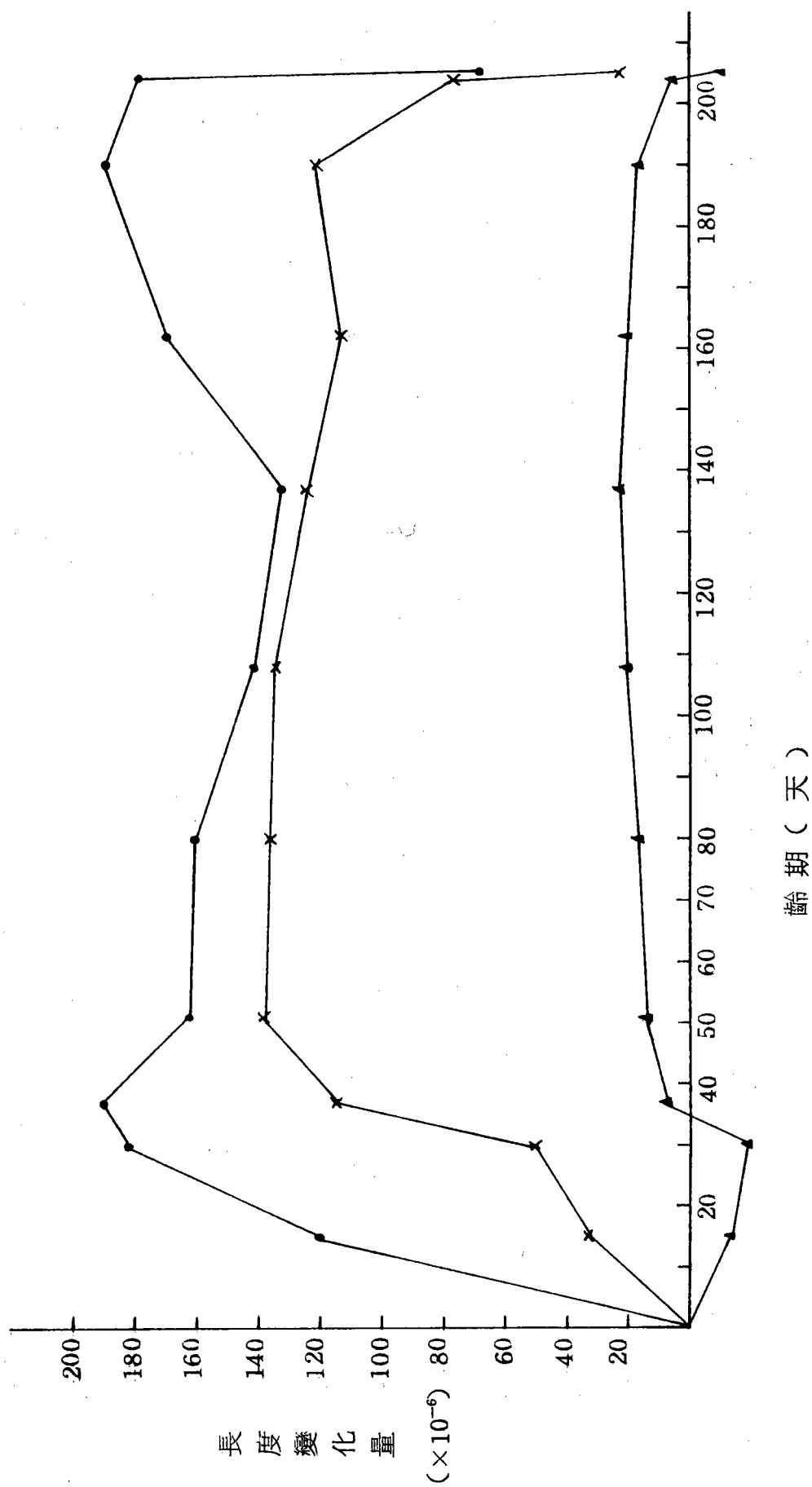


圖 5.5.5 纖維混凝土長度變化試驗結果

5.6 疲勞試驗

5.6.1 試驗目的

本試驗目的在求纖維混凝土之疲勞特性，藉以瞭解纖維含量及水灰比對疲勞之影響。由於高彈性模數之短纖維具有吸收，傳導並擴散多餘之能量，因此可以延緩裂紋之生成及限制裂縫之寬度，有效提高疲勞限度。文獻資料指出，普通混凝土具有相類似的 $S - N$ 曲線，且該曲線不隨齡期、配比不同而改變。鑑於此，本試驗即針對纖維混凝土疲勞之特性進行，但限於人力、物力及工作流程，只選定纖維體積比及水灰比等兩種參數，利用三組不同配比試體進行試驗，分別為其有相同水灰比不同纖維體積比及相同纖維體積比不同水灰比，以比較纖維含量及水灰比對纖維混凝土疲勞限度之影響。本組後續之研究，將可以蒐集更完整之資料。

5.6.2 試驗步驟及量測方法

①試驗設備

本試驗所使用之設備為疲勞試驗機（圖 5.6.1）具有油壓動力供給單元，電子控制單元，荷重單元，安全裝置等部份組成。動態能量為 25 噸，靜態能量 30 噸，衝程 ± 7.5 公分。具閉合環路及回授控制等功能，可長時間執行試驗。其安全裝置可於試體破壞時，自動停機，以保護設備免於受損。當試驗完成，疲勞週數可以於記數器上讀得。

②試驗前準備

①試體準備

配合抗彎強度及韌性指數等試驗，採用相同尺寸之試體（ $10\text{cm} \times 10\text{cm} \times 35\text{cm}$ ），於 $23 \pm 1.7^{\circ}\text{C}$ 之養生室養護 28 天後取出試驗。試體選定水灰比 0.48，纖維體積比 0.5%，水灰比 0.62，纖維體積比 0.5%，1% 等三種，便於比較纖維含量及水灰比對纖維混凝土之影響。

②起始試驗：為獲得控制試體之破裂模數之極限荷重，先利用靜載重試驗，依據 ASTM C1018 標準，藉以獲取控制試體之極限荷重。控制試體之極限荷重，可用於決定疲勞試驗之各載重比率之荷重多寡。作為執行試驗之依據。

③設備設定

由控制試體極限荷重之 90%，80%，70%，60% 作為最大荷重，20% 作為最小荷重，並計算出各載重率之平均荷重及其載幅距，依正弦曲線波形輸入，並選頻率為 10Hz。試驗程式設定完成之後，安全裝置亦需設定，藉以保護設備，免受損害。安全裝置可由荷重，衝程及誤差值等變異差數加以控制。當回授信號超出安全裝置之設定值，設備即自動停機。疲勞試驗時，受測試體因疲勞而應力鬆弛，導致破壞，其荷重迅速解除，及衝程下降將超過所設定之安全值，而使設備自動停機。另一方面，試驗之反覆荷重週數即記憶於計數器內。試驗中如因冷卻循環不良，引起液壓油溫度上升，當超過 50°C 時，亦可由回授信號之偵知，而自動切斷電源，以免發生火災毀損設備。

③試驗與記錄：

經上述各項之準備完成後，即開始執行試驗。本試驗係採用抗彎疲勞試驗。其配置如圖 5.6.2 所示。試驗完成後，於計數器讀取該載重率下之疲勞週數。每組結果依載重率及其對應之疲勞週數，可繪製於半對數方格內，其曲線為 S — N 曲線。

5.6.3 試驗結果

本研究之三組疲勞試驗結果列於表 5.6.1。最大載重率及其對應之平均疲勞週數，及控制試體之極限載重分別列於表內。由本次試驗顯示，纖維混凝土之水灰比及纖維體積比對疲勞效應均有影響。普通混凝土無法從降低水灰比而提高疲勞限。就試驗而言，因水灰比降低，強度增加，其相對之各載重率之負荷亦增加，此即何以其 S — N 曲線不隨齡期或配比而大幅改變。纖維混凝土因不連續短纖維之吸收及擴散能量，使得其水灰比及纖維體積比均能影響疲勞限度。當然實際工程之應用，因於定載重情況下，疲勞限度將因水灰比之降低而延長疲勞壽命。纖維比之增加同樣對疲勞特性有明顯改善。因此增加纖維含量或降低水灰比，對實際工程而言，均為有利。值得注意的是，當纖維含量增加愈不易施工，如因施工品質不良，可能導致負面結果。使用前應先模擬試驗，以確保施工品質。

表中之數值另繪於半對數方格內，如圖 5.6.3。

5.6.4 討論

①纖維混凝土之水灰比對於疲勞特性具有影響，此結果與文獻上所述

之普通混凝土不同。

- ②增加纖維含量對於疲勞效應，具有正面影響。因纖維之吸收、傳導擴散及阻止等功能，提升材料之韌性，亦提高疲勞限度。
- ③降低水灰比可以於相同疲勞狀態下，增加載重負荷，如在相同載重之負荷下，則可明顯地延長疲勞限度。
- ④本試驗因耗費人物力及設備時間甚長，如 10^7 次，每秒 10HZ 之試驗，通常費時 12 天左右。由於混凝土試驗受齡期之限制，試體之製作及準備，事先應有妥善規劃，以免因試驗佔用設備，而影響他種試驗之執行。
- ⑤本試驗因有上述之限制，故 60 % 或以下之載重率之試驗量較少，其他各載重率則可有多數之試體量以供試驗。本研究只採用三組配比進行試驗，乃因無法提供長期時段以供試驗。
- ⑥由於疲勞試驗結果，可能有一單位指數之差異，因此無法具有相當的精確度，故應增加試驗量，以獲取合理之準確度。

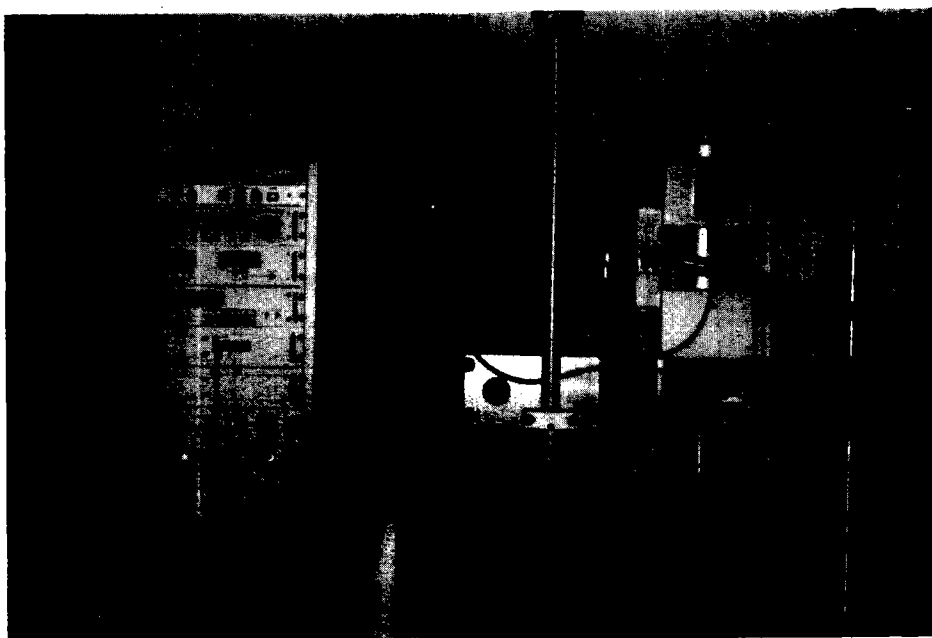


圖 5.6.1 疲勞試驗機

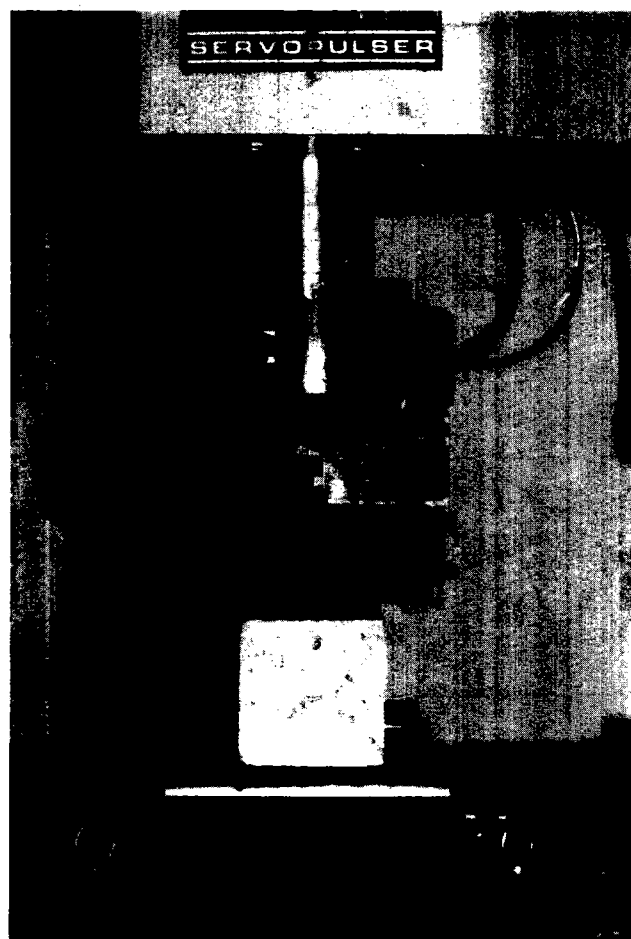


圖 5.6.2 疲勞試驗配置圖

表 5.6.1 疲勞試驗記錄

疲勞 序號	載重率 週數	9	8	7	6	極 限 載 重 (Kg)
T C γ		145	2, 293	10, 453	8, 839, 332	1462
T C β		127	775	5, 285	152, 528	1380
T A β		139	2, 918	27, 622	998, 846	1912

T : 鋼纖維 A , C : 水灰比 0.48 , 0.62 β , γ 纖維比 0.5 % , 1 %

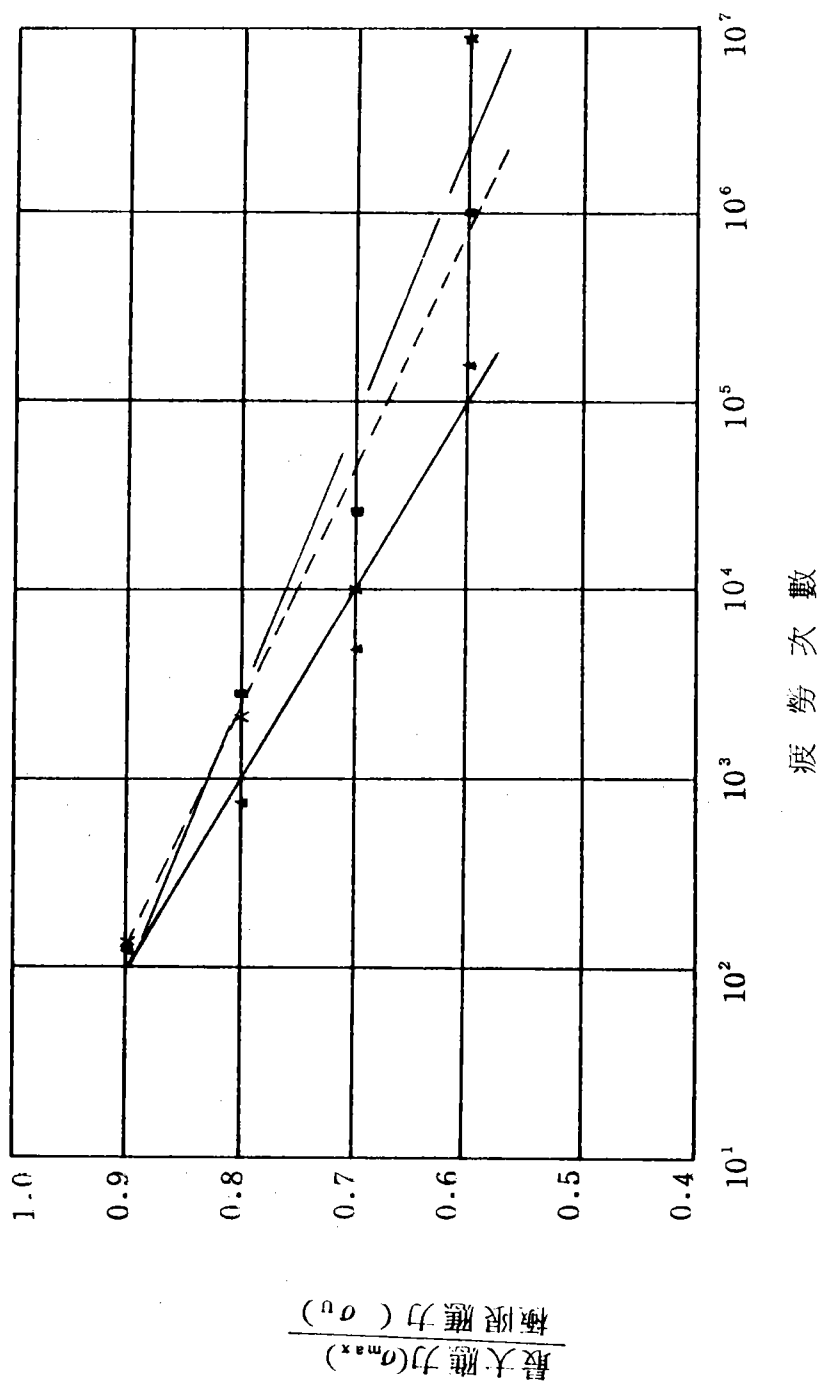


圖 5.6.3 纖維混凝土疲勞試驗之 S-N 曲線

5.7 抗壓強度

5.7.1 試驗目的

對於纖維混凝土而言，抗壓強度並不如抗彎或劈裂強度來得重要。根據文獻指出，纖維混凝土之抗壓強度只與普通混凝土有些微的差異，儘管如此，抗壓強度仍舊為混凝土材料最重要之特性。本研究不擬遺漏，其目的在藉以瞭解纖維混凝土材料之強度並與普通混凝土作一比較。

纖維混凝土因有纖維之摻入，其工作性大為降低，施工相形不易。如因材料析離造成材質不均，必然有不良影響。纖維含量之臨界值範圍內，雖然抗壓強度增加少許，但其吸收能量之能力則提昇數倍。超過此臨界纖維含量，不但強度將下降，更使增加之支出，形成無效益可言。另由於水灰比之不同，對於抗壓強度之影響亦異。探求何種纖維混凝土較為有利，亦為本試驗之目的，當然纖維之影響，亦將因配比之改變，程度亦有所不同。

5.7.2 試驗步驟及量測方法

①試驗設備

抗壓強度試驗係按 ASTM C 39 規範進行試驗，試驗設備同於劈裂強度試驗。主要設備為萬能試驗機。最大能量 100 噸，本試驗較劈裂試驗更為簡單，因此其附屬設備亦較少，具有一組壓具（如圖 5.7.1），一圓盤刻度，一標準轉速盤（Load pacer）及指示針

一組（如圖 5.7.2）。其中上壓具為兩半球形一凹一凸之組合，可以隨試體面作自由轉動；圓盤刻度共有 500 小格可精確讀取全荷重之五百分之一，標準轉速盤可以作為標準荷重速率之準則，其設定值如表 5.7.1 所列；而指示針具有一記錄指針隨荷重數值而改變，一最大荷重指針，不隨荷重數值而改變，但試驗時與記錄指針成一體，當試體破壞時，應力消退，記錄指針退却，最大荷重指針則停留於最大荷重處，便於讀取抗壓荷重。

②試體準備

適齡之試體自養生室取出後，利用試體磨平機加以磨平，磨平時使用 100[#] 金鋼砂作為磨損介質，試體經磨平及清理後，再送至試驗室。其受壓之兩平面應保持平行，誤差值不得超過 ASTM C39 之規定。試體之磨平情形如圖 5.7.3 所示。

③試驗步驟

①試體置於萬能試驗機上之壓具內（如圖 5.7.1），且使試體之中心與壓具之中心成一直線，控制油壓，試驗機之指示針歸零。

②調整標準轉速盤（Load pacer）之速率，（參考表 5.3.1）。

③開啓油壓閥門，開始執行試驗，調整油壓以使指示針之轉速與標準轉速盤同步。

④試體破壞時（如圖 5.7.4），應力消退，最大荷重指示針停留之位置為該試體之抗壓荷重，讀取並記錄之。

④計算

$$\sigma = P / A \dots\dots\dots \text{式 5.7.1}$$

式中 σ : 抗壓應力。

P : 抗壓荷重 (萬能試驗機上讀數) 。

A : 試體之平均受壓平均斷面積。

(三)試驗結果

試驗結果列於表 5.7.1 及繪於圖 5.7.5 中，纖維混凝土之抗壓強度與普通混凝土差異不大。且與纖維體積比之關係不大，但與水灰比之關係則甚為密切。隨水灰比之降低而抗壓強度明顯增加，本試驗係利用四種水灰比及五種纖維體積比進行試驗鋼纖維混凝土之抗壓強度試驗。

5.7.4 討論

- ①纖維混凝土之抗壓強度與普通混凝土之差異不大。
- ②纖維混凝土之抗壓強度與纖維體積比之關係不大，但與水灰比之關係密切，且隨水灰比之降低，其強度升高。
- ③就纖維混凝土而言，抗張、抗拉強度較抗壓強度為重要，雖然纖維混凝土對於抗壓強度之改善不明顯，但對於抗彎、抗拉之影響，則有明顯之改善。尤其韌性之增加。

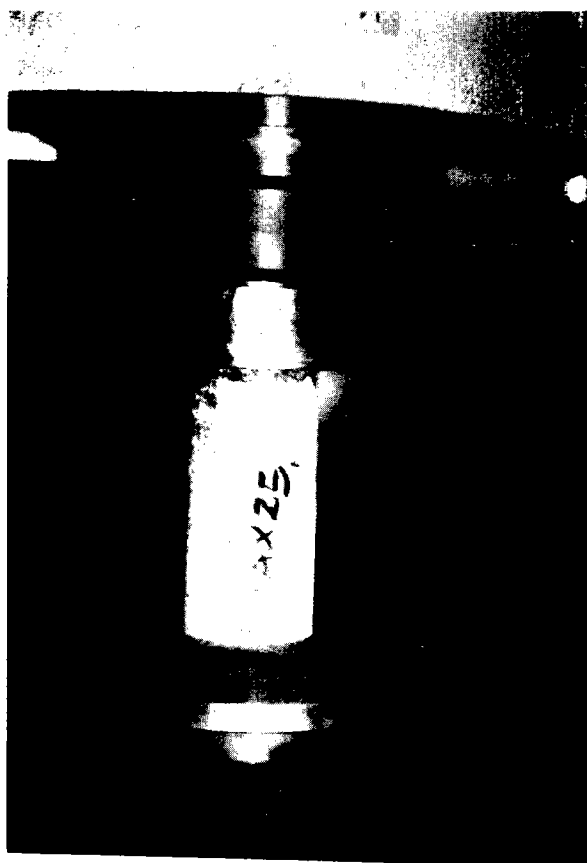


圖 5.7.1 抗壓強度試驗之壓具及試驗配置



圖 5.7.2 Load pacer 及指示針與標示刻劃

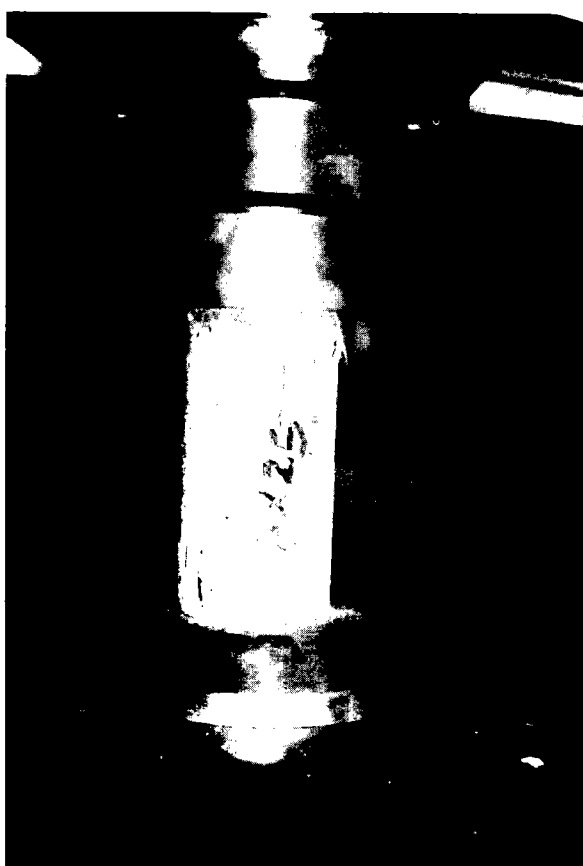


圖 5.7.4 試體受壓破壞情形

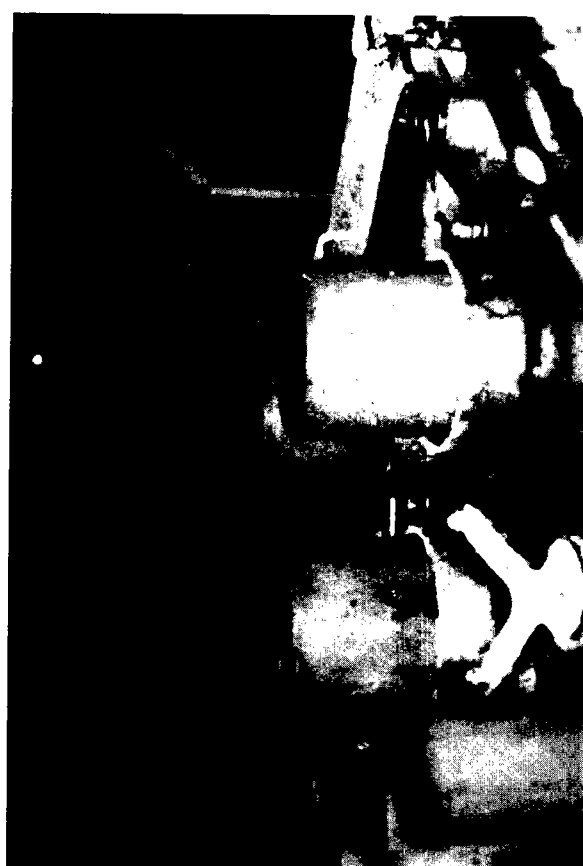


圖 5.7.3 抗壓試體磨平情形

表 5.7.1 纖維混凝土之抗壓強度試驗記錄

抗壓強度 Kg/cm ² 纖維比 水灰比	0 %	0.5 %	1 %	1.5 %	2 %
0.48	365.9	364.6	363.4	388.1	370.8
0.55	320.4	332.5	344.6	322.1	327.6
0.62	253.0	266.9	269.4	270.6	—
0.68	225.0	233.8	229.8	227.6	216.1

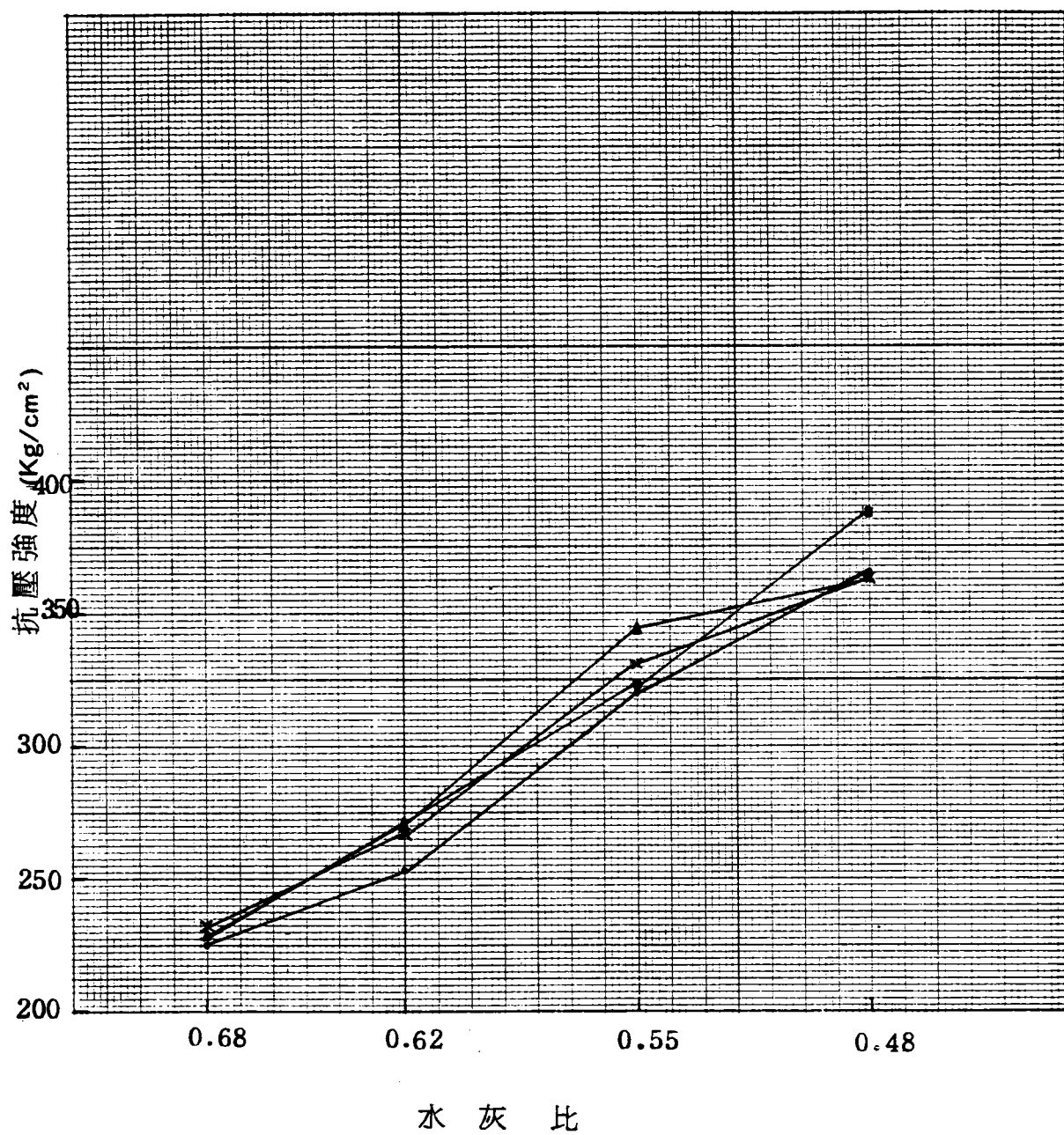


圖 5.7.5 纖維混凝土之抗壓強度試驗結果

5.8 抗彎強度

5.8.1 試驗目的

藉以瞭解纖維混凝土之抗彎強度，及纖維與混凝土界面間作用力之關係。由於纖維種類不同，其形狀、長寬比，相當直徑亦異，而纖維之鋼性、勁度亦各自不同，因此其對抗彎強度之影響，亦有差異。一般而言，纖維之抗拉強度數十倍於混凝土，因此摻入纖維，即是提高混凝土之抗拉強度，但由於纖維之排列，係以隨機方式與混凝土偶合，因此在受力之方向上，纖維之作用又少於其含量了。一般而言，因為纖維之摻入成為一種裂縫阻止機構，提高混凝土之延展性，對混凝土之抗彎強度亦有正面影響，本試驗藉不同水灰比及不同纖維體積比與不同纖維種類進行試驗，以獲得纖維對纖維混凝土之貢獻如何。

5.8.2 試驗步驟及量測方法

①設備

本試驗可使用萬能試驗機或動態材料試驗機，控制方法可有荷重控制（Load Control）或衝程控制（Stroke Control）。如使用萬能試驗機，只能使用荷重控制，為使荷重速率合於試驗要求，應配合 Load pacer。使用動態材料試驗機，因設備功能齊全，可有荷重控制或衝程控制。本研究中試驗標準，係依據 ASTM C1018，設備採用本所現有之 25 噸動態材料試驗機，設備配備有 LVDT，X-Y 記錄器，控制方法為衝程控制。

②試驗前準備：

①試體：

本試驗採用ASTM C1018建議之尺寸即 $10 \times 10 \times 35\text{ cm}$ 各種不同配比之纖維混凝土均製成試體，便於比較，由於鋼纖具有較優之特性，因此鋼纖混凝土又有不同水灰比之比較。另研究之前亦製有 $15 \times 15 \times 54\text{ cm}$ 之鐵絲及瓊麻纖維混凝土，齡期為180天，亦被試驗。

②試驗機：

本設備因為精密電子控制系統，使用前需先暖機十分鐘以上，開啓冷却水塔，調整油壓泵工作壓力，俟整個試驗機，處於穩定狀態下，可待進一步之執行工作。

③試驗步驟：

①試體置於試驗機下彎具上之兩軸承，試體如簡支樑狀，兩軸承與試體應緊密靠合（如圖5.3.1及圖5.8.2）。上彎具連接試驗機之引動器（Aculator），亦應與試體緊密靠合，且上下彎具需相互平行，使試體受一集中載重之作用力。

②試驗程式由試驗機之程式功能產生器上設定，本試驗採靜載重試驗，回授信號為衝程，其荷重速率由衝程控制，而衝程之設定係係ASTM之規定（如表5.3.1所列）。

③連接X—Y記錄器，選擇放大倍率，使X—Y記錄器輸出之信號易於判斷，並具代表性。

④試驗機歸零，X—Y記錄筆放下，開始執行試驗。試體受彎破壞，撓度達 1.9 mm 即完成試驗。抗彎試體開裂情形如圖5.8.3所示。

④計算

$$R = \frac{3}{2} \frac{PL}{bd^2} \dots\dots\dots \text{式 5.8.1}$$

式中 R : 破裂模數 Kg/cm^2

P : 荷重

L, b, d : 分別表試體尺寸之長、寬、高。

5.8.3 試驗結果

試驗所得之結果分別列於表 5.8.1 ~ 表 5.8.4 中，並繪圖示如圖 5.8.4 ~ 圖 5.8.7。由本次之試驗結果顯示，四種纖維中以鋼纖之抗彎強度最佳，鐵絲纖維次之，且抗彎強度隨纖維體積比而漸增。本試驗中纖維體積比 2 % 之纖維混凝土較普通混凝土（纖維體積比 0 %）約提高 12 % 左右。鐵絲纖維混凝土之抗彎強度與普通混凝土約略相近，當齡期增加時，纖維體積比之影響漸明顯。而瓊麻纖維混凝土之抗彎強度反隨纖維體積比之增加而降低。本試驗中纖維體積比 2 % 之瓊麻纖維混凝土之抗彎強度約為普通混凝土之 81 %。用水灰比之影響更為明顯，低水灰比具有較高之抗彎強度，本試驗中水灰比 0.48 較 0.68 之平均抗彎強度約高出 40 %。

5.8.4 討 論

纖維混凝土之極限強度依纖維種類，纖維體積比，長寬比而變。以平常使用之纖維體積比對初裂強度之影響並不顯著。對極限強度，則可以因纖維體積比及長寬比之增加而提高。當纖維體積比小於 1.5

%時，其極限強度即為初裂強度，當纖維體積比大於2%，其極限強度逐漸大於初裂強度。文獻指出，當纖維體積比達4.6%時，其極限強度約為初裂強度的兩倍，但繼續增加纖維體積比達8.8%時，其極限強度亦僅為初裂強度之2.1倍而已。本試驗所獲之結果為抗彎之極限強度隨纖維體積比而漸增，纖維體積比2%時之鋼纖維混凝土約提高12%左右，但鐵絲纖維混凝土則與普通混凝土約略相近，瓊麻纖維混凝土則約為普通混凝土之81%而已。因此纖維種類之影響亦相當明顯。由試驗結果水灰比之影響較纖維體積比更為明顯，低水灰比具有較高之抗彎強度，本試驗中水灰比0.48較0.68之平均抗彎強度約高出40%。文獻指出纖維體積比4%之鋼纖維混凝土之抗彎強度約提高2.5倍，體積比2—16%的石棉添加於水泥漿中，抗彎強度約增加1.6倍。其他易受鹼侵蝕之纖維包括棉花、耐龍、亞克力、多元脂之波特蘭水泥製品，加強效果不佳。另玻纖混凝土配比不同，但由結果看出，與他種纖維不太相似，因具有極相近之抗彎強度。本試驗所獲致之主要重點為：

- ①纖維種類亦影響纖維混凝土之抗彎強度。具有高抗拉強度、吸水率低及具較佳握裹力之纖維對纖維混凝土具有正面影響，反之則效果不彰。
- ②水灰比之影響較之纖維體積比之影響更為明顯。如同普通混凝土一樣，低水灰比具有較高之抗彎強度。
- ③纖維體積比亦影響纖維混凝土之抗彎強度，但纖維體積比太低或太高其影響皆不大，太高時尤其不符合經濟效益原則。

- ④如同一般波特蘭水泥製品一樣，纖維混凝土之抗彎強度亦隨水灰比之降低，齡期之增大，而強度增加。
- ⑤纖維之長寬比及表面型態亦影響抗彎強度，具有良好握裹特性之纖維，可以增加抗彎強度。

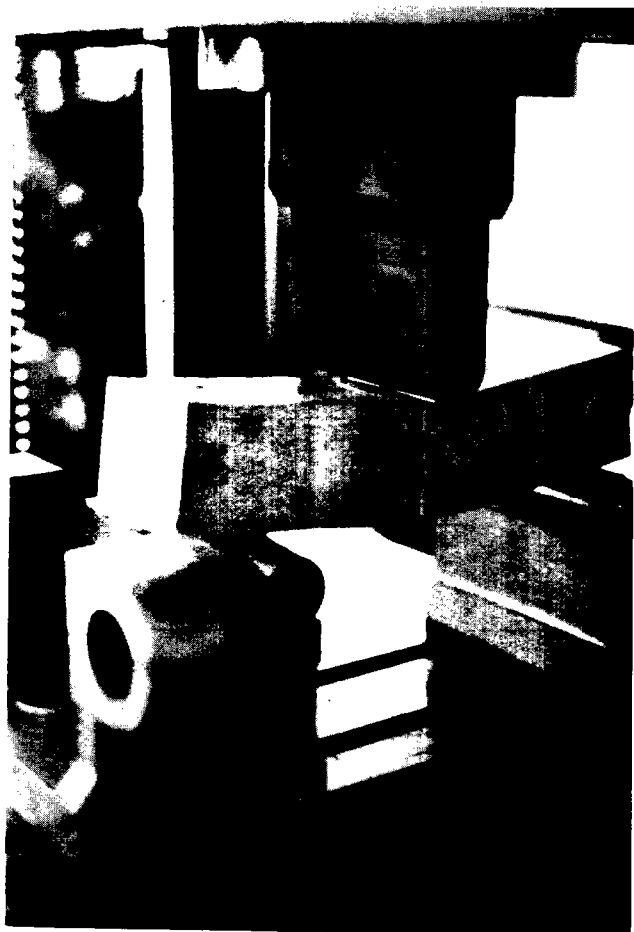


圖 5.8.1 萬能試驗機抗彎試驗配置圖



圖 5.8.2 25 噸材料試驗機抗彎
強度試驗配置圖



圖 5.8.3 抗彎試體開裂情形

表 5.8.1 各種纖維混凝土之抗彎強度記錄 (齡期 28 天，水灰比 0.48)

抗彎強度 (Kg/cm ²) 種 類	纖維比	0 %	0.5 %	1 %	1.5 %	2 %
瓊 麻		84.0	81.7	74.4	70.2	68.0
鐵 絲		84.0	81.2	82.4	82.0	86.7
鋼 織		84.0	86.1	88.9	83.4	91.4
玻 纖		84.0	80.9	81.6	82.0	82.6

表 5.8.2 鋼纖維混凝土之抗彎強度記錄 (齡期 28 天)

抗彎強度 (Kg/cm ²) 水灰比	纖維比	0 %	0.5 %	1 %	1.5 %	2 %
0.48		84.0	86.1	88.9	83.4	91.4
0.55		74.5	73.5	78.1	76.3	78.2
0.62		61.9	62.0	65.2	69.2	75.4
0.68		58.4	60.4	61.8	63.7	64.3

表 5.8.3 鐵絲纖維混凝土之抗彎強度記錄 (半年齡期)

抗彎強度 (Kg/cm ²) 纖維比 水灰比	0 %	0.5 %	1 %	1.5 %	2 %	2.5 %
0.48	74.6	75.1	86.4	86.0	82.2	94.2
0.55	69.2	76.9	75.8	78.6	81.2	102.2
0.62	61.8	71.0	74.2	80.5	81.1	108.9
0.68	52.3	64.0	64.8	65.0	82.7	92.0

表 5.8.4 瓊麻纖維混凝土之抗彎強度記錄 (半年齡期)

抗彎強度 (Kg/cm ²) 纖維比 水灰比	0 %	0.5 %	1 %	1.5 %	2 %	2.5 %
0.48	74.6	80.5	69.2	70	55.9	42.0
0.55	69.2	65	66.4	48	35.8	32.8
0.62	61.8	58.1	55.9	33.1	21.1	—
0.68	52.3	45.9	37.9	47.3	—	—

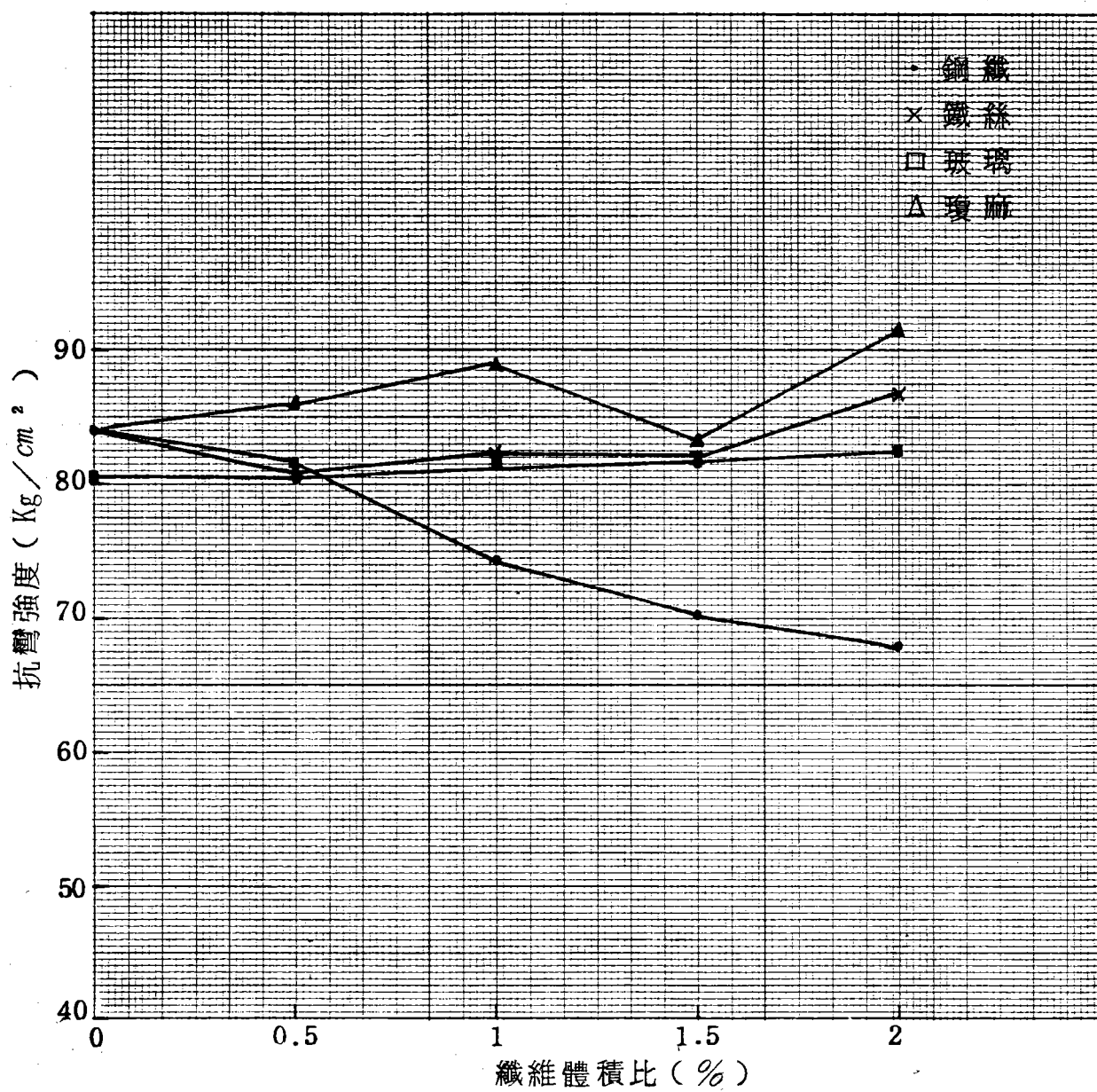


圖 5.8.4 各種纖維混凝土之抗彎試驗結果

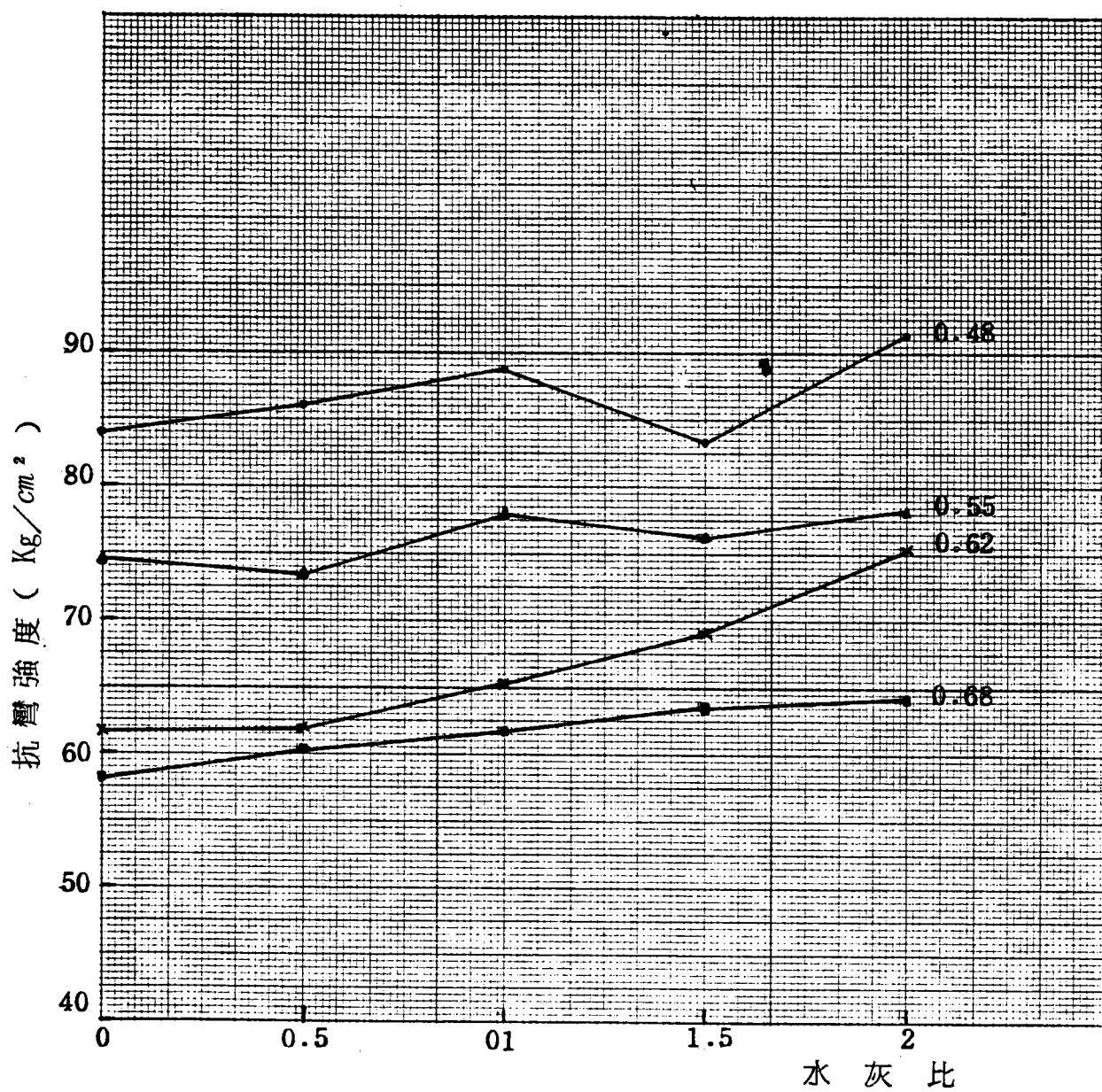


圖 5.8.5 鋼纖維混凝土水灰比對抗彎強度之影響

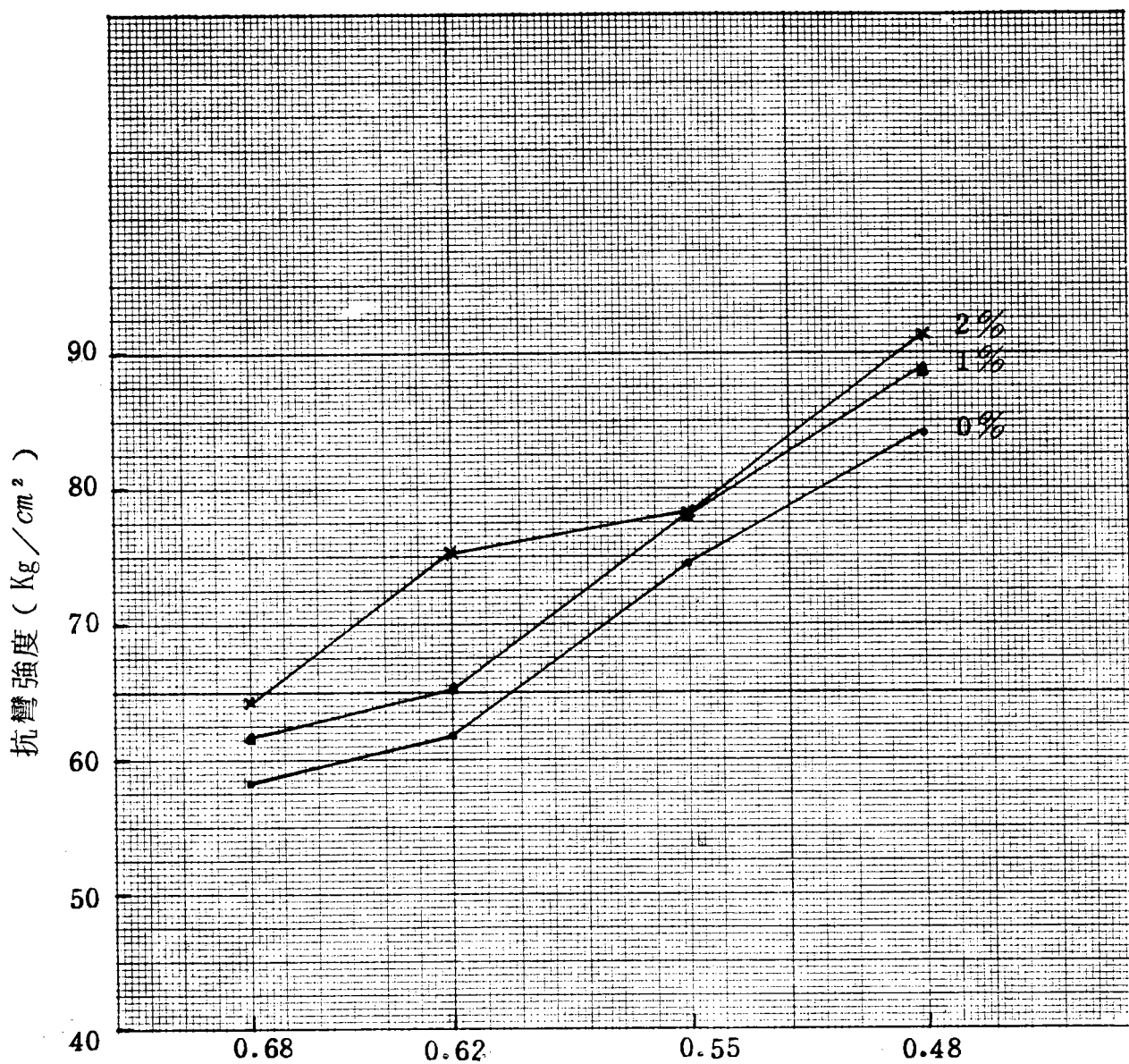


圖 5.8.6 鋼纖維混凝土纖維體積比對抗彎強度之影響

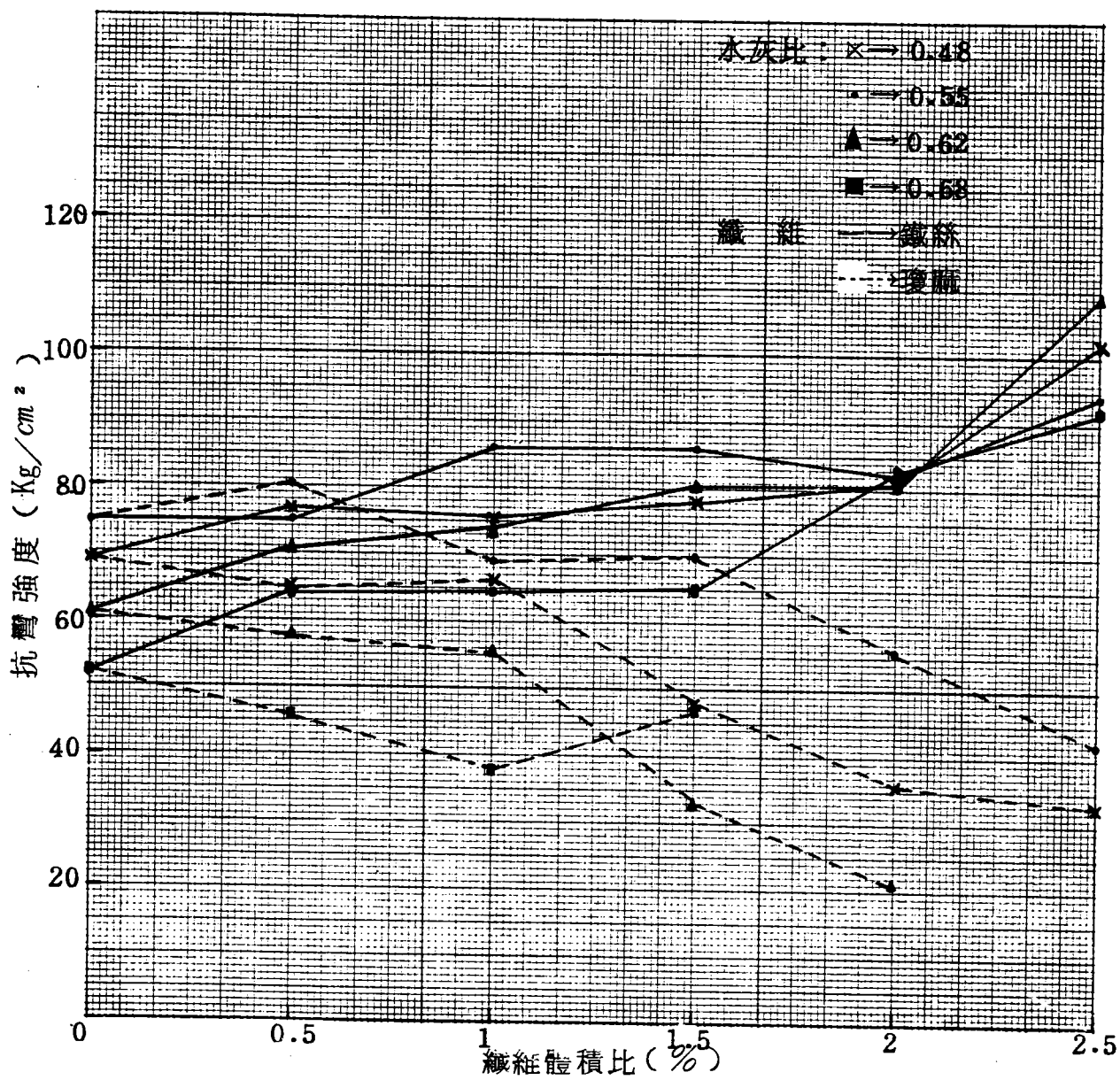


圖 5.8.7 鐵絲及瓊麻纖維混凝土水灰比及纖維體積比對抗彎強度之影響

5.9 韌性試驗

5.9.1 緒言

韌性為纖維混凝土最重要特性之一，由於不連續纖維之摻入，混凝土受到強化，提昇其延展性及抗張能力，並經由混凝土與纖維界面間之剪力以及纖維之高彈性模數，高抗拉強度，承受、傳輸並擴散部份能量，因此韌性大為提高。另一方面，由於纖維之拘束，使得混凝土之微裂紋減少，亦提昇部份強度。

纖維混凝土受拉力或彎曲作用，其行為模式不同於普通混凝土，由於纖維之張力及與混凝土界面間偶合之作用，其荷重變形曲線，呈現線性及非線性兩段，線性段依比例限度定義指出，屬於線性彈性，故可假定混凝土與纖維在此荷重下均呈彈性性質，受力作用分別由纖維及混凝土承受部份，比例限度內之極限荷重為複合材料之彈性限度或初裂強度，或破裂模數（抗彎試驗）荷重低於此限度之情況下，混凝土之裂紋可略而不計；當荷重超過此限度，則裂紋慢慢生成，導致應力疲乏，使試體開裂，開裂後混凝土即不再承受應力，而由纖維承受，當應力超過纖維之臨界體積比，纖維因具有柏松比之效益，致始纖維被拉伸，減低混凝土之握裹力，引起纖維被拉脫，材料則因強度消退，而使試體開裂以致破壞。普通混凝土不同於此，當其達到初裂強度時，試體即裂成兩半，無非線性段之反應。

5.9.2 試驗目的

本試驗之目的在以探討不同水灰比，不同纖維體積比及不同纖維種類對於纖維混凝土韌性之影響。

纖維之彈性模數為混凝土的數倍，鋼纖則在數十倍，因此增加纖維的體積，即提高荷重—變形曲線上偏離線性荷重之點，纖維與受力方向平行，則可充分發揮效應，因 F R C 之纖維為任意方式分佈，其影響勢必較傳統連續等量之鋼筋情況為小。

普通混凝土中韌性與裂紋成長有關。因為有骨材存在，使微裂紋有較廣的發展，其韌性較純水泥漿為大。

F R C 因纖維存在的情形，裂紋之伸展，必須拉伸纖維及解除其握力，故在完全破壞前，須投入相當多的能量。使 F R C 之韌性為素混凝土的數倍。

在試體完全斷裂破壞之前，其所吸收之總能量稱為韌性 (Toughness)。韌性可根據完整的應力—應變曲線下之面積，或荷重—撓度曲線下之面積計算得之。韌性將因荷重之型式及速度而變。

本試驗即針對纖維的各種影響因子進行試驗。

5.9.3 試驗步驟及量測方法

①設備：

本試驗所使用之設備同疲勞試驗一樣，係採用 25 噸動態材料試驗機。但本試驗因荷重撓度等數值之讀取較為繁雜，故配合 X—Y 記錄器以記錄，荷重與撓度之關係。本試驗所需設備應具之功能如

5. 8 節中所述。

②試驗條件：

本試驗依據ASTM C1018規定進行試驗。其荷重速率或衝程速率同於一般抗彎強度試驗。但執行本試驗時如採用普通之萬能試驗機或採用荷重控制等方法，當達到極限荷重時，試體即迅速開裂，荷重—撓度曲線無法完整發展。經採用衝程控制，雖達極限荷重，試體並不迅速破壞，可以記錄下完整之荷重撓度曲線。其曲線下所涵蓋之面積，以韌性稱之。經過計算可得其韌性指數。當然普通混凝土並不因使用衝程控制而獲得改善，因為普通混凝土之韌性甚小，張力強度不佳，當達極限荷重後，仍裂成二半。纖維混凝土因有纖維張力抵抗，開裂之後，應力由纖維承受，故其荷重撓度曲線之發展甚為完整。

③試驗前準備

①試體

本試驗之試體與抗彎強度試驗試體尺寸相同，為 $10\text{ cm} \times 10\text{ cm} \times 35\text{ cm}$ ，本試驗因採用之參數較多，計有四種纖維種類，四種水灰比，五種纖維體積比，因此配比較多，試體之數量亦較多。

②設備之安裝：

本試驗利用現有設備之各種輔助配備，以量取各種數據。衝程控制之回授，記錄係由LVDT及回授系統，經由放大器傳輸至X—Y記錄器，繪圖輸出，由輸出並繪於記錄紙上之各種量，為試驗所求之結果。本記錄器之橫軸連接於衝程之輸出端子，縱軸則連接於荷重輸出端子。由此兩軸信號所繪之荷重—撓度圖，便可

計算抗彎強度，韌性及韌性指數等。

④試驗

試驗機各項指令設定後，試體即置於機上之彎具內，經由調整旋鈕，使試驗機之上下彎具與試體緊密靠合，（如圖 5.9.1 及圖 5.9.2 所示），並維持試體之受力在 20 公斤以下，然後調整記錄器之放大倍率使記錄紙上之圖形易於判讀（如圖 5.9.3 所示）。本試驗機連接配備 X-Y 記錄器之各段放大倍率如表 5.9.1 所列。本試驗所採用之放大倍率為使橫軸每公分之量為 0.125 mm 之衡量程，而縱軸每公分之量為 250 Kg。當記錄紙之橫軸移動 15.2 cm 時即表試體受 1.9 mm 之撓度，此時試驗完成，而試體則開裂如圖 5.9.4 所示之情形。

⑤記錄：

試驗結果經由電位轉換放大及傳輸，然後繪圖於記錄紙上，不須另耗費人力於數據之讀取、計算及繪圖上。

⑥計算：

韌性為荷重撓度曲線下之面積，因此計算其面積便可得韌性。

韌性指數（Toughness Index）定義為試體尺寸 $10\text{ cm} \times 10\text{ cm} \times 35\text{ cm}$ 受抗彎試驗，當撓度達 1.9 mm 時，其曲線下之面積與初裂強度下面積之比值。有時曲線之初始段呈非線性，當初裂強度下彈性段改取線性關係時，其初始之原點右移，韌性及其指數的計算基準，便以此改正點為起始原點。在此定義下，普通混凝土之韌性指數為 1。

5.9.4 試驗結果

纖維混凝土由於纖維種類之不同，其韌性亦隨之而異。鋼性纖維具有較高的韌性及韌性指數。本次試驗結果，四種不同纖維種類之兩種不同纖維體積比之配比之荷重撓度圖分別繪於圖 5.9.5 及圖 5.9.6 中。由此兩圖示可以說明鋼纖維為最佳之纖維種類，其韌性及韌性指數最佳，而鐵絲由於表面平滑其韌性及韌性指數次之。而瓊麻及玻纖則由於鋼性不足，導致其韌性較差。除纖維種類之影響外，水灰比之影響韌性甚為明顯。纖維混凝土強度之來源，主要為水泥糊體之硬固產生強度。因此如同普通混凝土，水灰比降低則其韌性並隨之遞增，試驗結果繪於圖 5.9.7 ~ 圖 5.9.11。水灰比雖影響韌性，但對韌性指數而言，其影響不明顯。如表 5.9.3 所示。此係因韌性固然增加，但初裂強度下之面積亦相對增加，導致對韌性指數之影響不明顯，雖然水灰比對韌性指數之影響不明顯，但纖維體積比對韌性指數及韌性之影響則甚為明顯，且隨纖維體積比之增加，其韌性及韌性指數亦隨之遞增。試驗結果繪於圖 5.9.12 ~ 5.9.16 中。由於纖維含量之增加，纖維混凝土之鋼性隨之增加，而吸附能量之能力亦隨之增加，故韌性之曲線發展隨纖維含量而相對增加。另一方面因纖維含量之增加，其初裂強度下之面積增加並不明顯，故其韌性指數隨纖維含量而相對遞增。此結果亦可由表 5.9.3 中瞭解。另外齡期亦將影響纖維混凝土之韌性。且通常隨齡期之增加其韌性亦與之俱增。但齡期達二十八天以後，齡期之影響性逐漸減少。本次試驗結果繪圖於 5.9.17 ~ 圖 5.9.23。由此圖示可以看出韌性隨齡期之增加而增加。

由本次試驗所得之結果，影響纖維混凝土之韌性及韌性指數者主要來自兩部份。一部份來自混凝土，其影響因子有水灰比、齡期、骨材粒徑及級配，另一部份來自纖維，其影響因子有纖維種類、纖維型態、纖維體積比、長寬比等。本試驗僅對其中四項較重要者進行試驗，而後續之研究，應可函蓋更廣面。

5.9.5 討論

- ①鋼纖因扁平，表面具褶皺，表面積較大，提高握裹力，使複合材料能充分利用纖維之高抗拉強度，因此具有較佳之韌性。
- ②鐵絲纖維，雖然表面平滑不具褶皺，但其剛性勁度強，其韌性次於鋼纖而優於玻璃纖維及瓊麻纖維。
- ③玻璃纖維及瓊麻纖維兩者之韌性發展，甚為相似，玻璃纖維稍優，屬於同類型之纖維。兩種纖維均具有相當高之吸水率，且鋼性不足，（尤其瓊麻纖維）易於結球，使纖維難於均勻分布於混凝土內，引起材料析難，影響強度。
- ④具有褶皺之鋼纖維易於拌合，且較能均勻分布於混凝土中，另由於其吸水性低，使施工容易，品質較佳。
- ⑤水灰比可以影響纖維與混凝土界面之握裹力，亦影響強度發展，降低水灰比，可獲得品質較高之纖維混凝土。
- ⑥纖維體積比較高之纖維混凝土之韌性使其吸收能量更大，故韌性亦明顯增加。
- ⑦具有褶皺，鋼性足，吸水率低之纖維，適合拌合纖維混凝土，表面平滑鋼性不足之纖維，不適合摻入混凝土中。如應用鋼性較差，吸

水率高之纖維，以應用於砂漿或糊體爲佳。

⑧一般而言，纖維混凝土之水灰比皆甚低，強度可以無須顧慮，且因其糊體相對量較多，拌合較爲容易，蜂窩較少，品質可以確保，如欲使用高水灰比之纖維混凝土，其骨材比例，亦應保持於較少狀態，尤其粗骨材之含量，及粗骨材之粒徑，皆須考量。

⑨本研究顧及本省工程界之習慣，纖維混凝土之配比亦採高水灰比，低水灰比之纖維混凝土之成本，雖然高出許多，但水灰比太高，纖維混凝土之特性，不甚明顯。

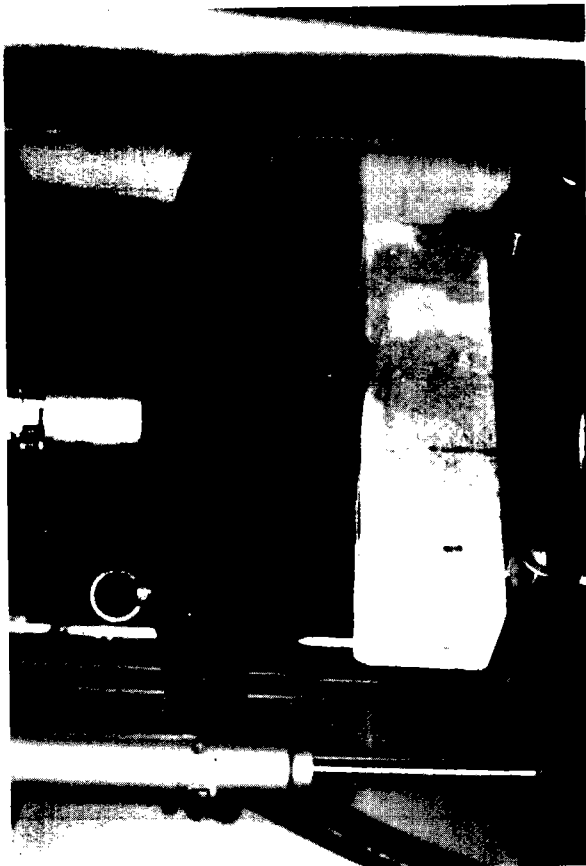


圖 5.9.1 韌性試驗試驗機配置側視圖

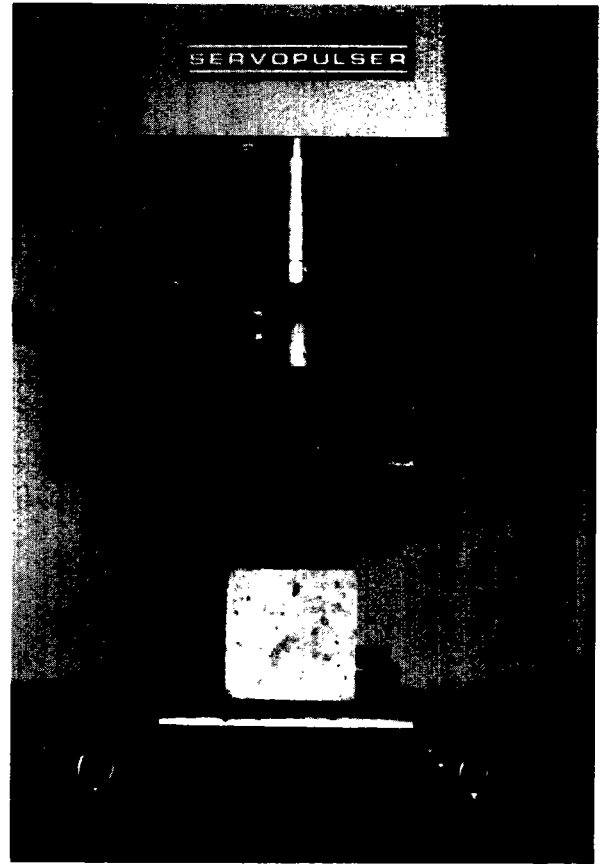


圖 5.9.2 韌性試驗試驗機配置正視圖

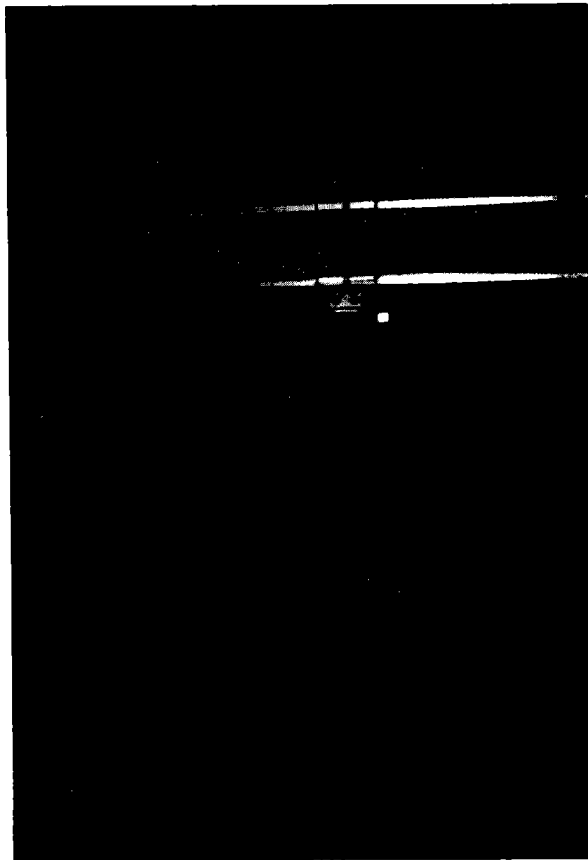


圖 5.9.3 X—Y 記錄器繪圖情形



圖 5.9.4 韌性試體之開裂情形

表 5.9.1 25 噸動態材料試驗機 X-Y-T 記錄器換算表

記錄器 試驗機	V / cm					mV / cm						
	5	2.5	1	0.5	0.25	50	25	10	5	2.5	1	0.5

Load _T	T / cm						Kg / cm					
2	10	5	2	1	0.5	0.1	50	20	10	5	2	1
4	20	10	4	2	1	0.2	0.1	40	20	10	4	2
10	50	25	10	5	2.5	0.5	0.25	0.1	50	25	10	5
20	100	50	20	10	5	1	0.5	0.2	0.1	50	20	10
30	150	75	30	15	7.5	1.5	0.75	0.3	0.15	75	30	15

Stroke mm	mm / cm							μ m / cm				
5	25	12.5	5	2.5	1.25	0.25	0.125	50	25	12.5	5	2.5
10	50	25	10	5	2.5	0.5	0.25	0.1	50	25	10	5
20	100	50	20	10	5	1	0.5	0.2	0.1	50	20	10
50	250	125	50	25	12.5	2.5	1.25	0.5	0.25	0.125	50	25
100	500	250	100	50	25	5	2.5	1	0.5	0.25	0.1	50

Strain %	gauge F.S $\times 1$ / cm					gauge F.S $\times 10^{-3}$ / cm						
10	0.5	0.25	0.1	0.05	0.025	5	2.5	1	0.5	0.25	0.1	0.05
20	1	0.5	0.2	0.1	0.05	10	5	2	1	0.5	0.2	0.1
50	2.5	1.25	0.5	0.25	0.125	25	12.5	5	2.5	1.25	0.5	0.25
100	5	2.5	1	0.5	0.25	50	25	10	5	2.5	1	0.5
150	7.5	3.75	1.5	0.75	0.375	75	37.5	15	7.5	3.75	1.5	0.75

註：T/cm 表圖上每公分之噸數。

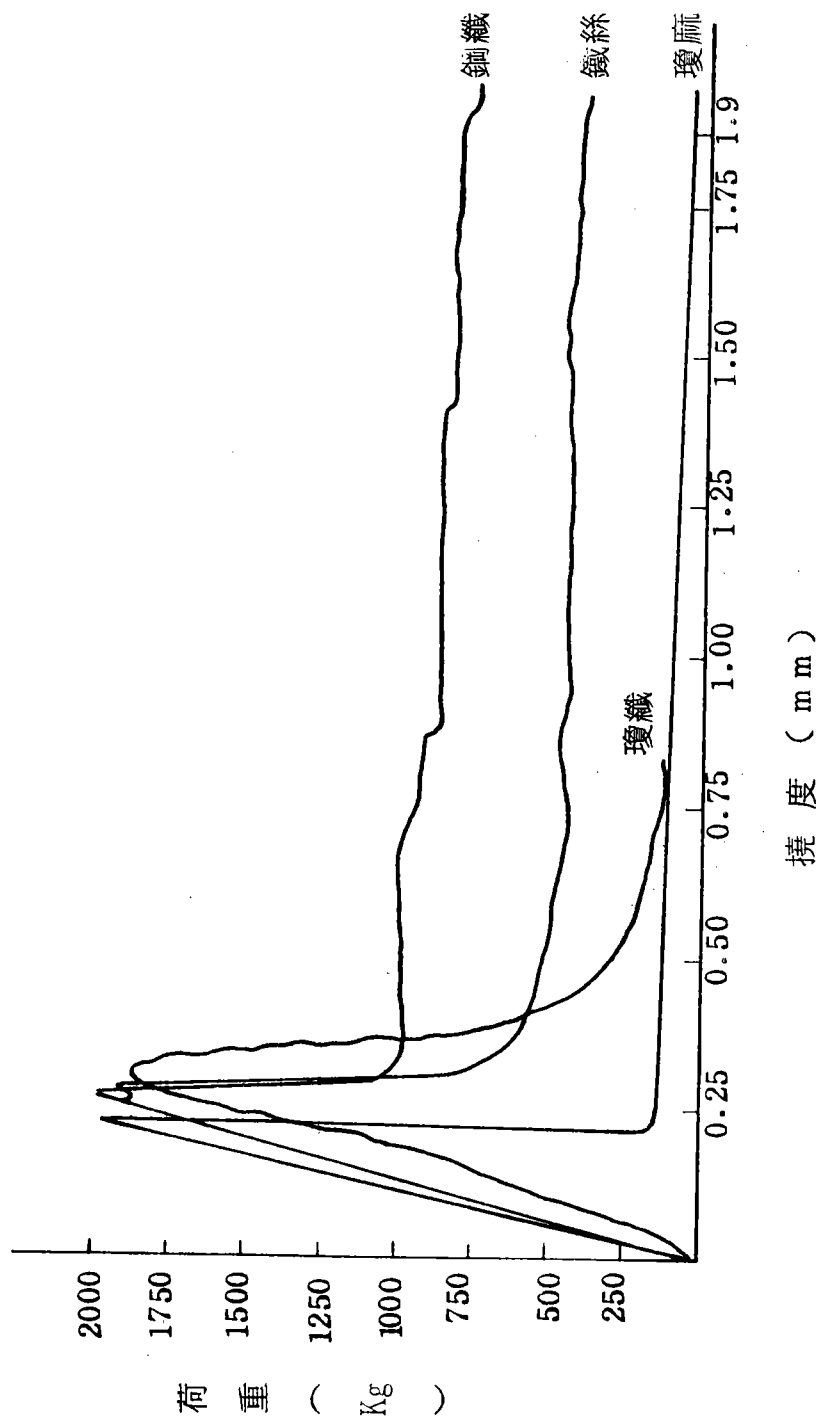


圖 5.9.5 各種纖維混凝土之荷重撓度圖 (纖維體積比 $F/C = 0.5\%$)

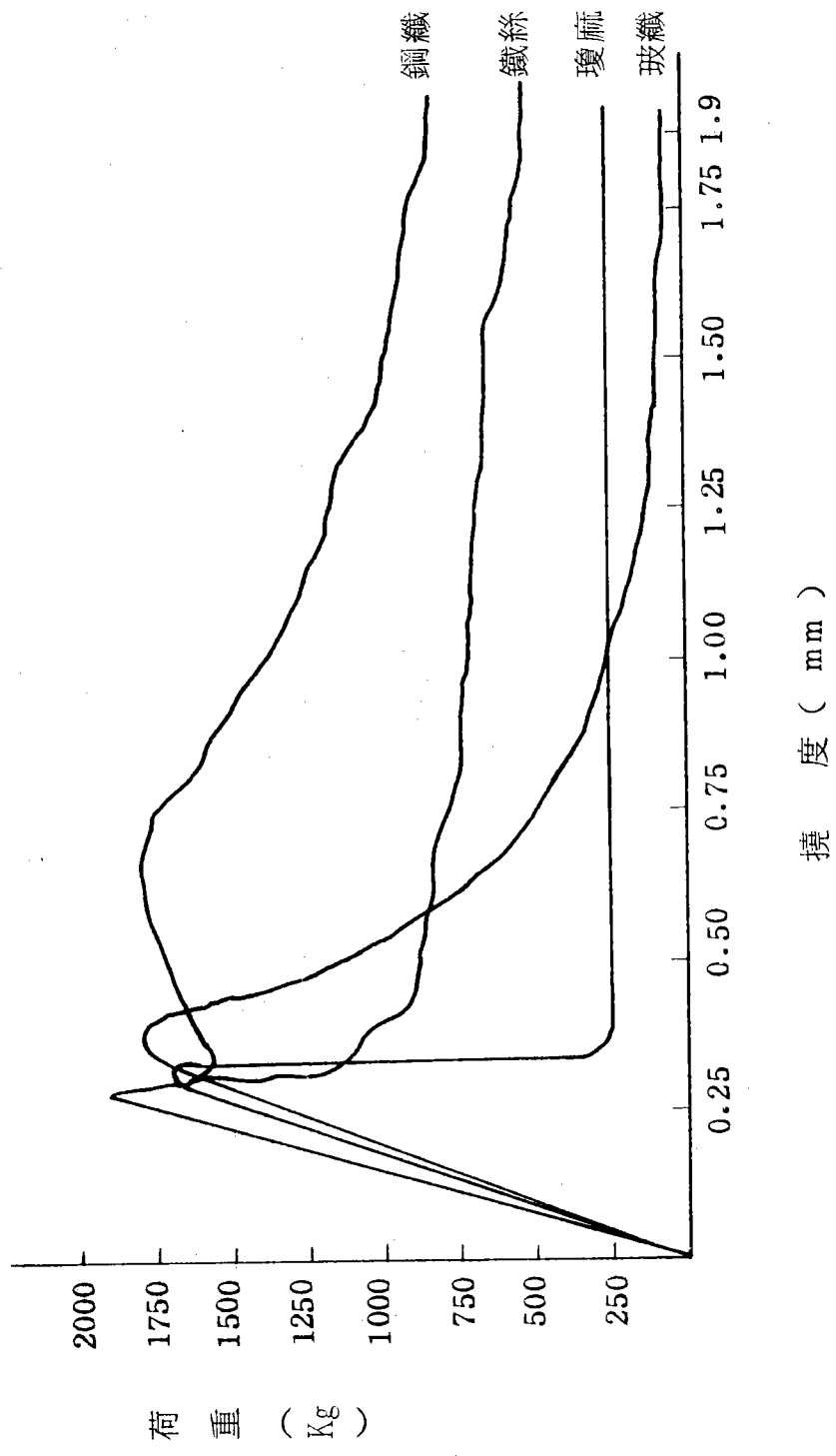


圖 5.9.6 各種纖維混凝土之荷重撓度圖 (F/C 1%)

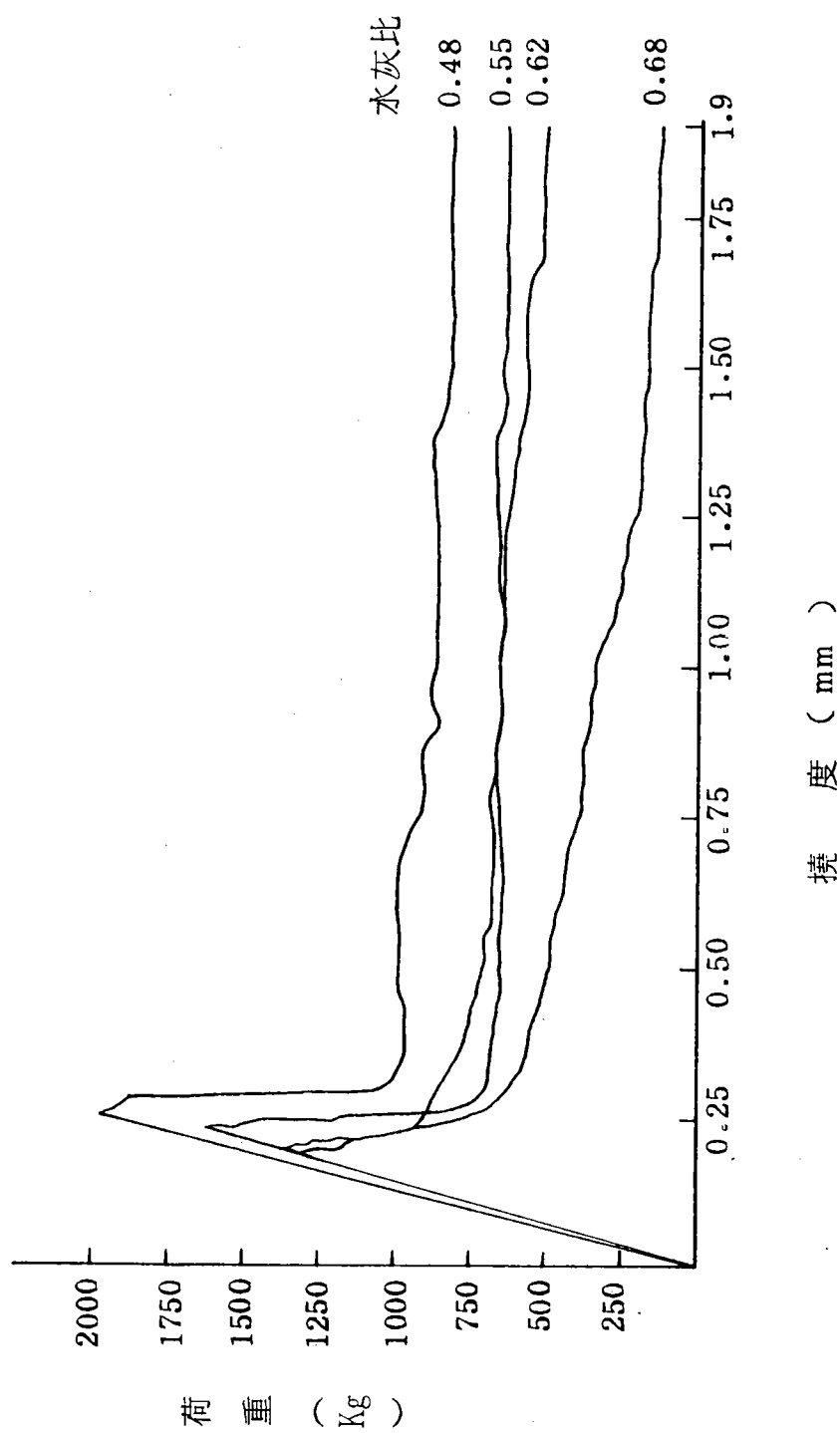


圖 5.9.7 各種不同水灰比鋼纖維混凝土之荷重撓度圖 (F/C 0.5 %)

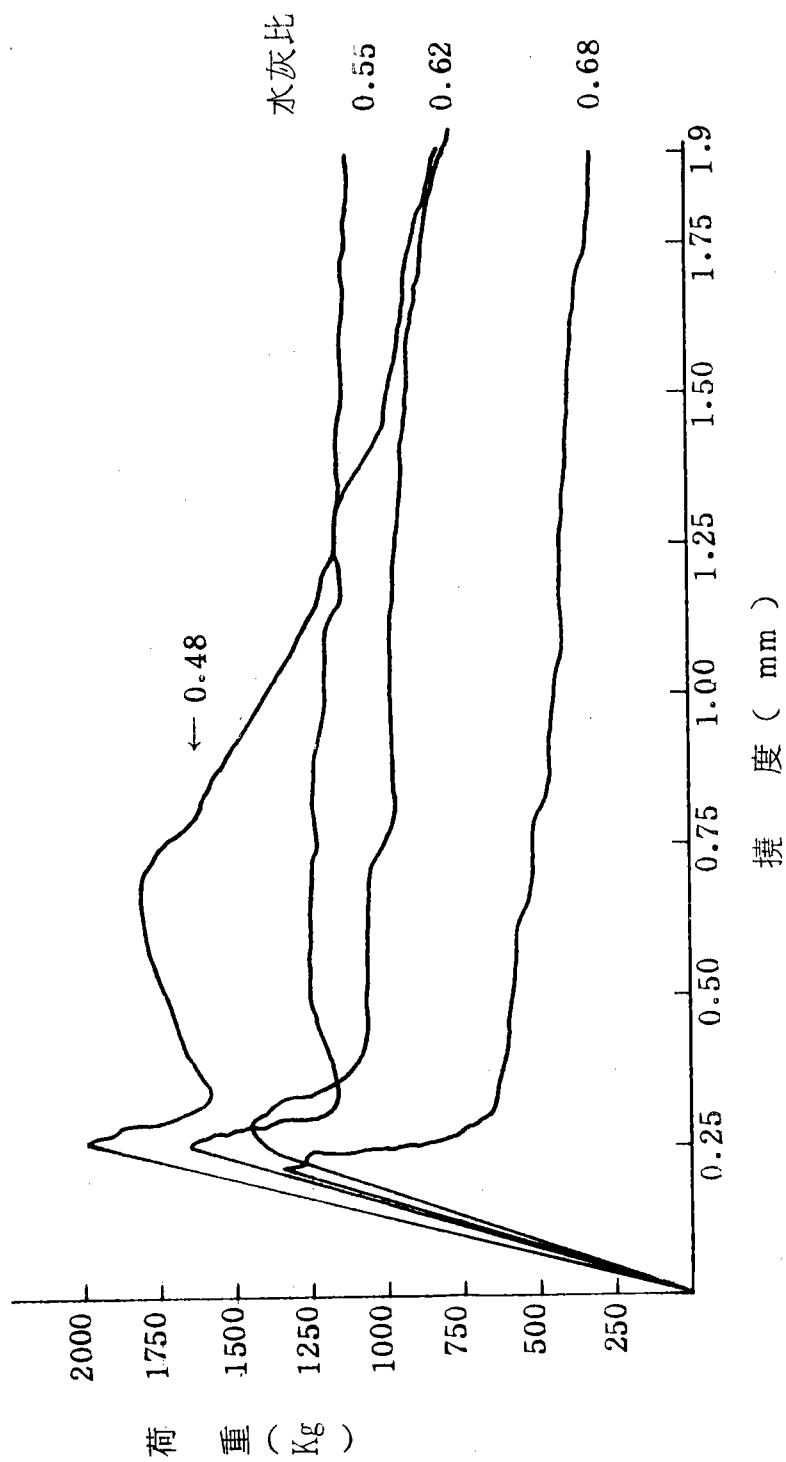


圖 5.9.3.3 各種不同水灰比鋼纖維混凝土之荷重撓度圖 (F/C 1 %)

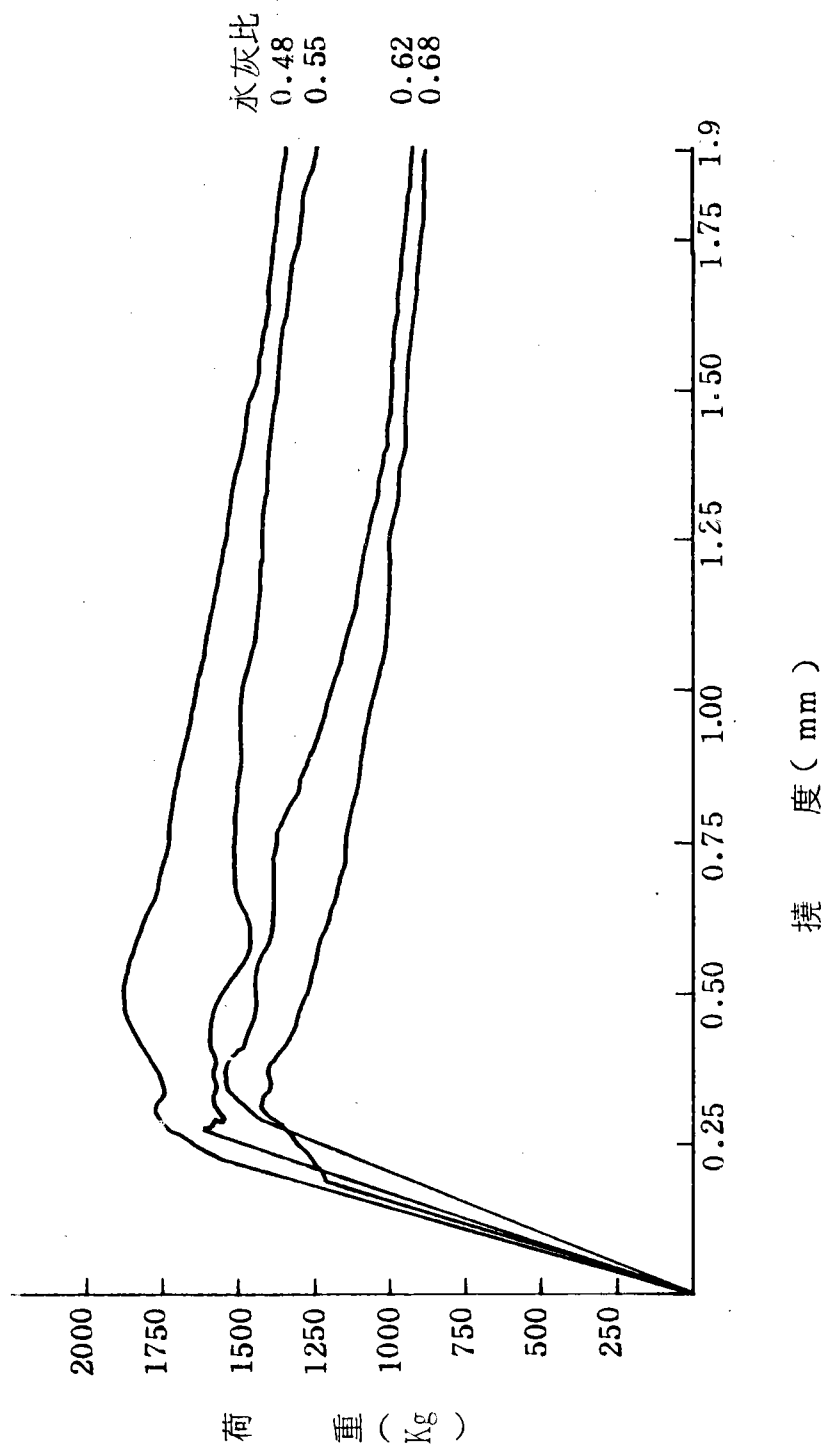


圖 5.9.9 各種不同水灰比鋼纖維混凝土之荷重撓度圖 (F/C 1.5%)

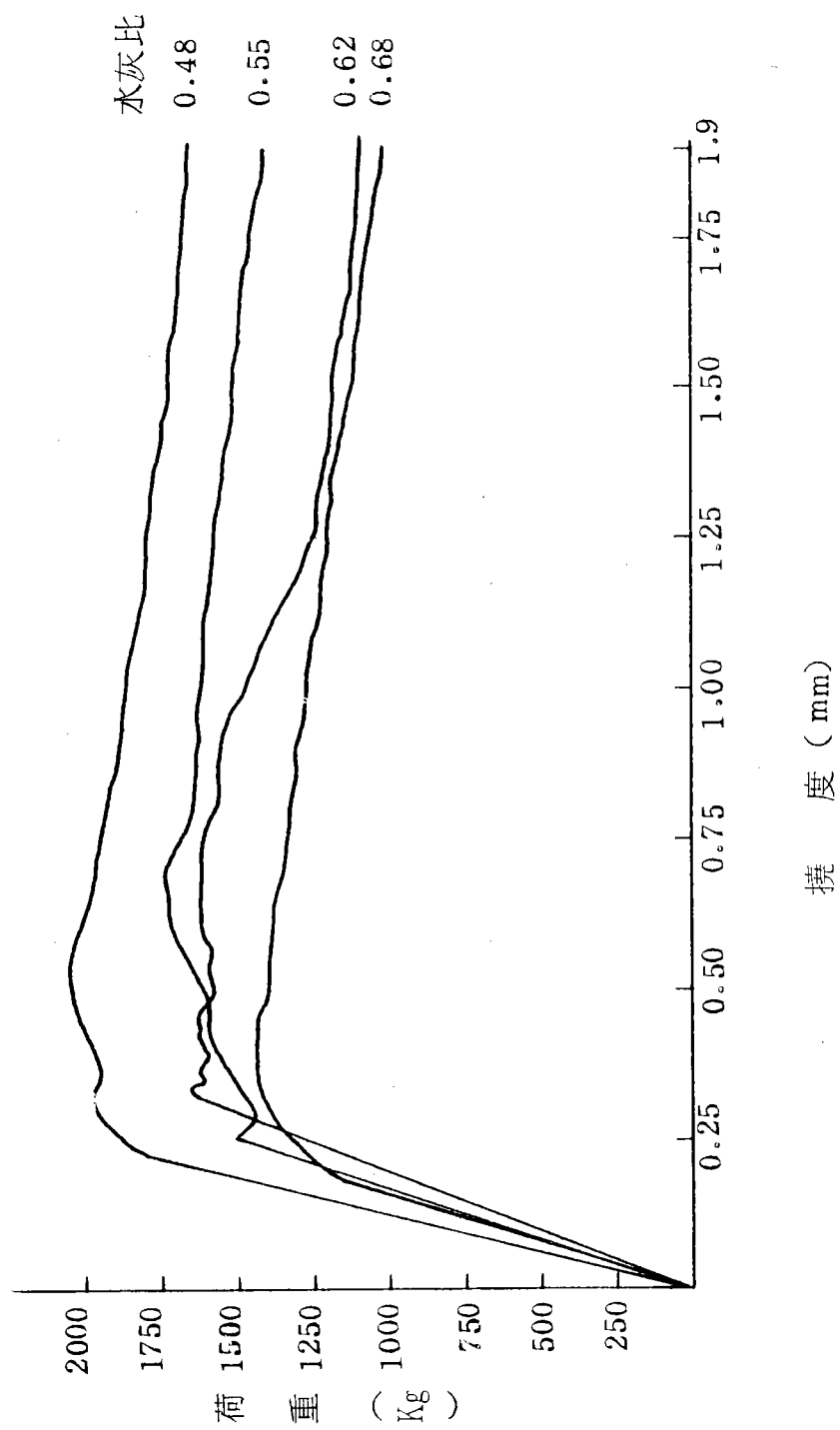


圖 5.9.10 各種不同水灰比鋼纖維混凝土之荷重撓度圖 (F/C 2%)

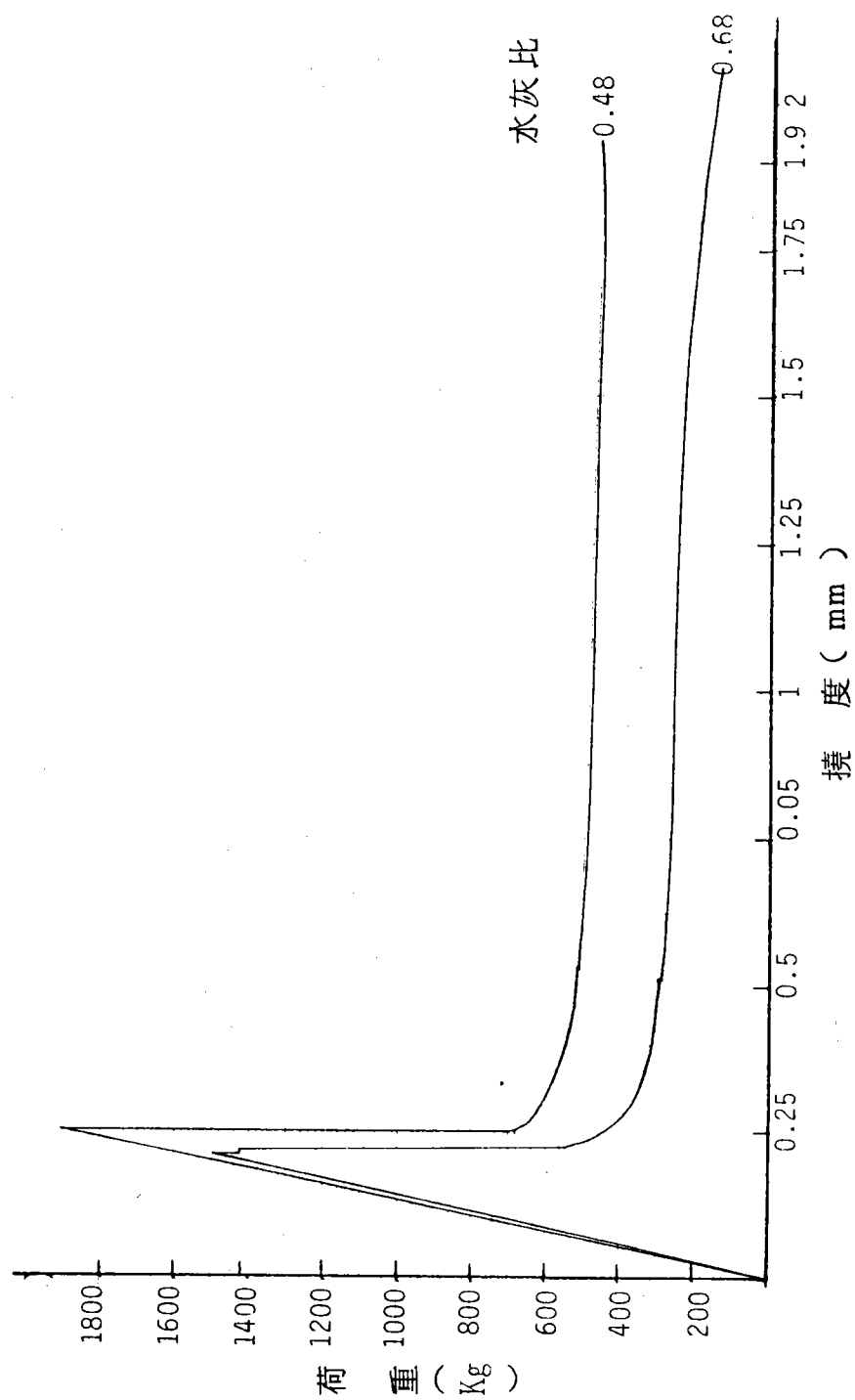


圖 5.9.11 各種不同水灰比之鐵絲纖維混凝土荷重撓度圖 (F/C 0.5 %)

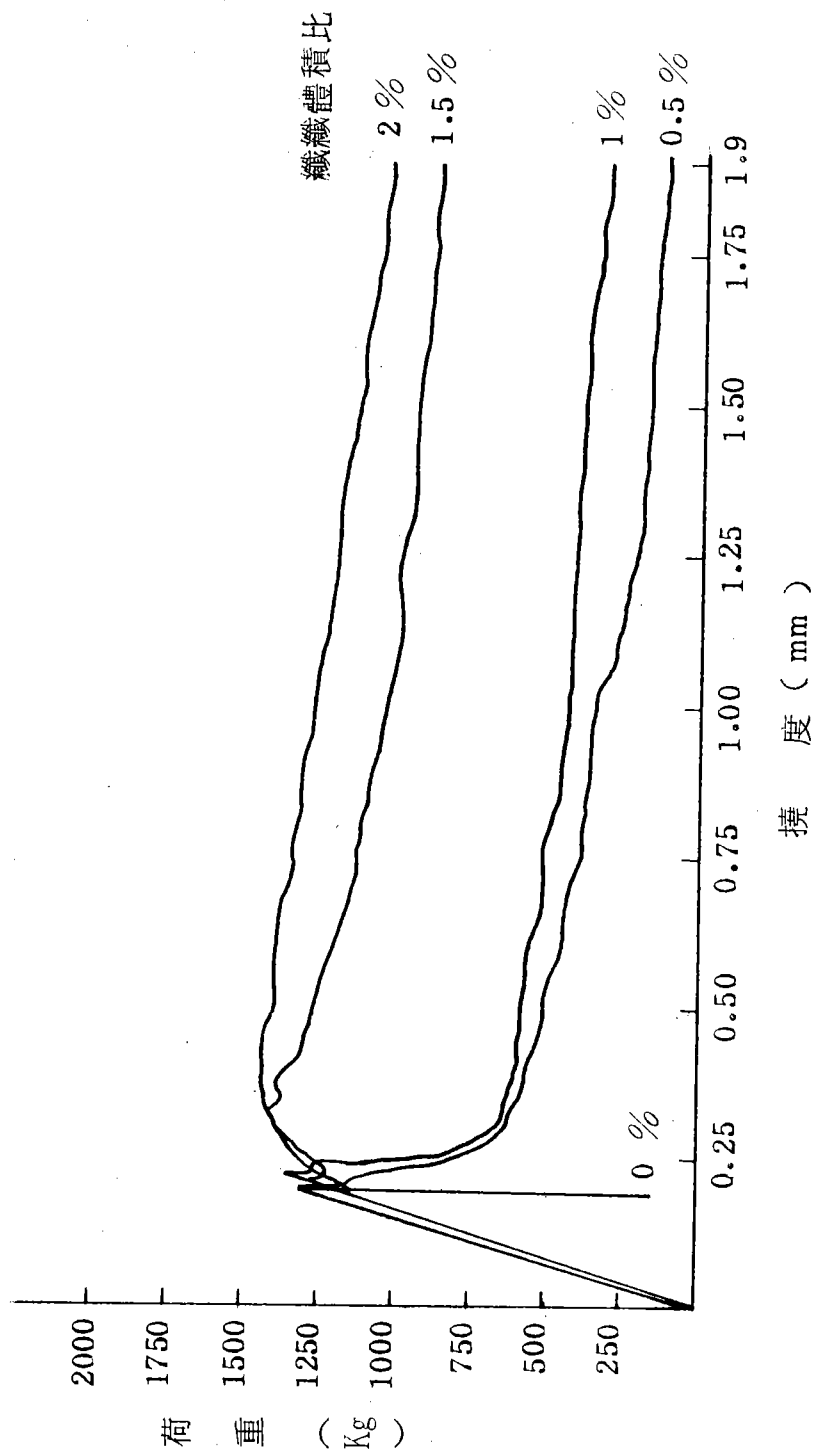


圖 5.9.12 各種不同纖維體積比之鋼纖維混凝土荷重撓度圖 (水灰比 (W/C) 0.68)

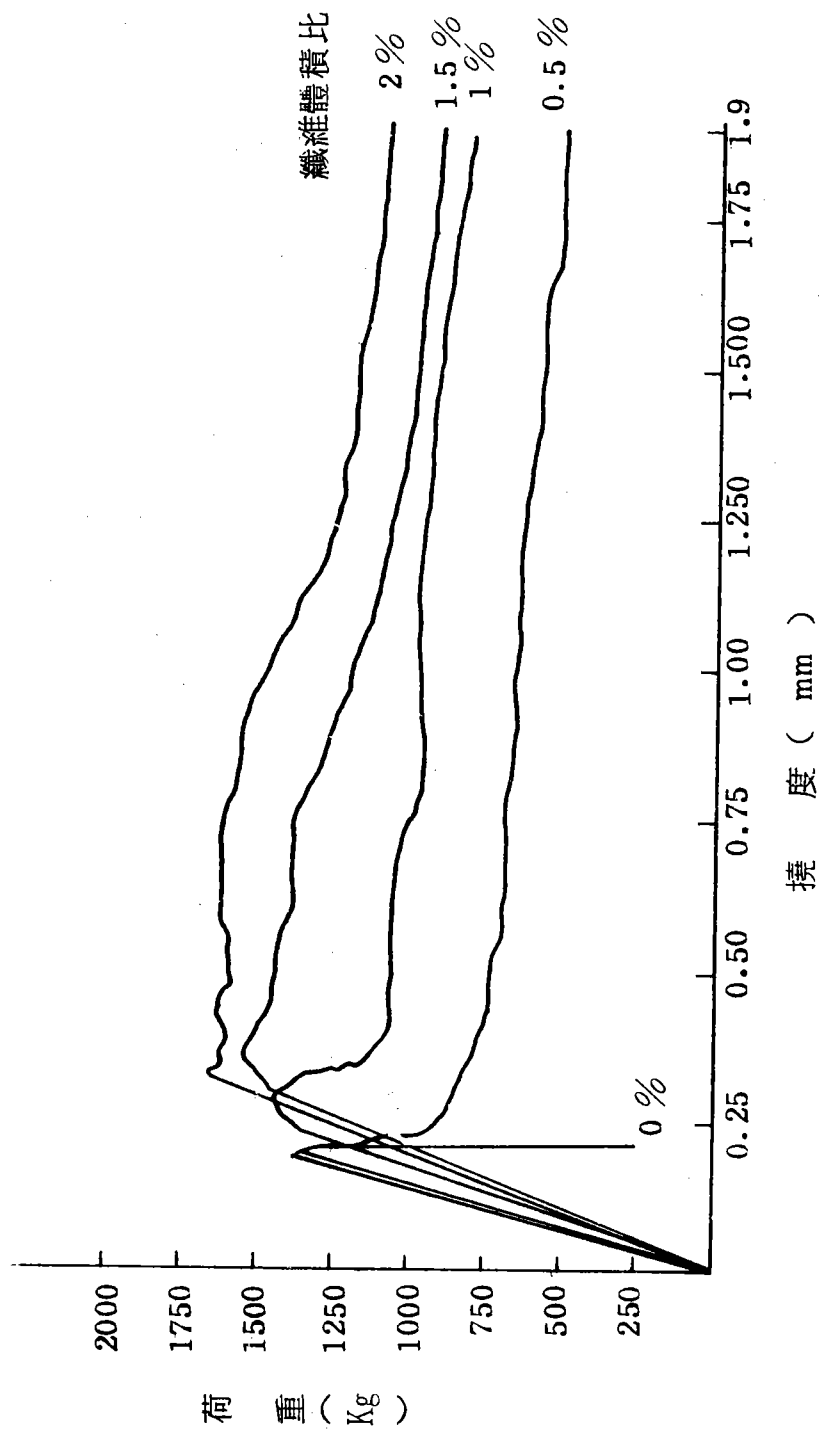


圖 5.9.13 各種不同纖維體積比之銅纖維混凝土荷重撓度圖 (W/C 0.62)

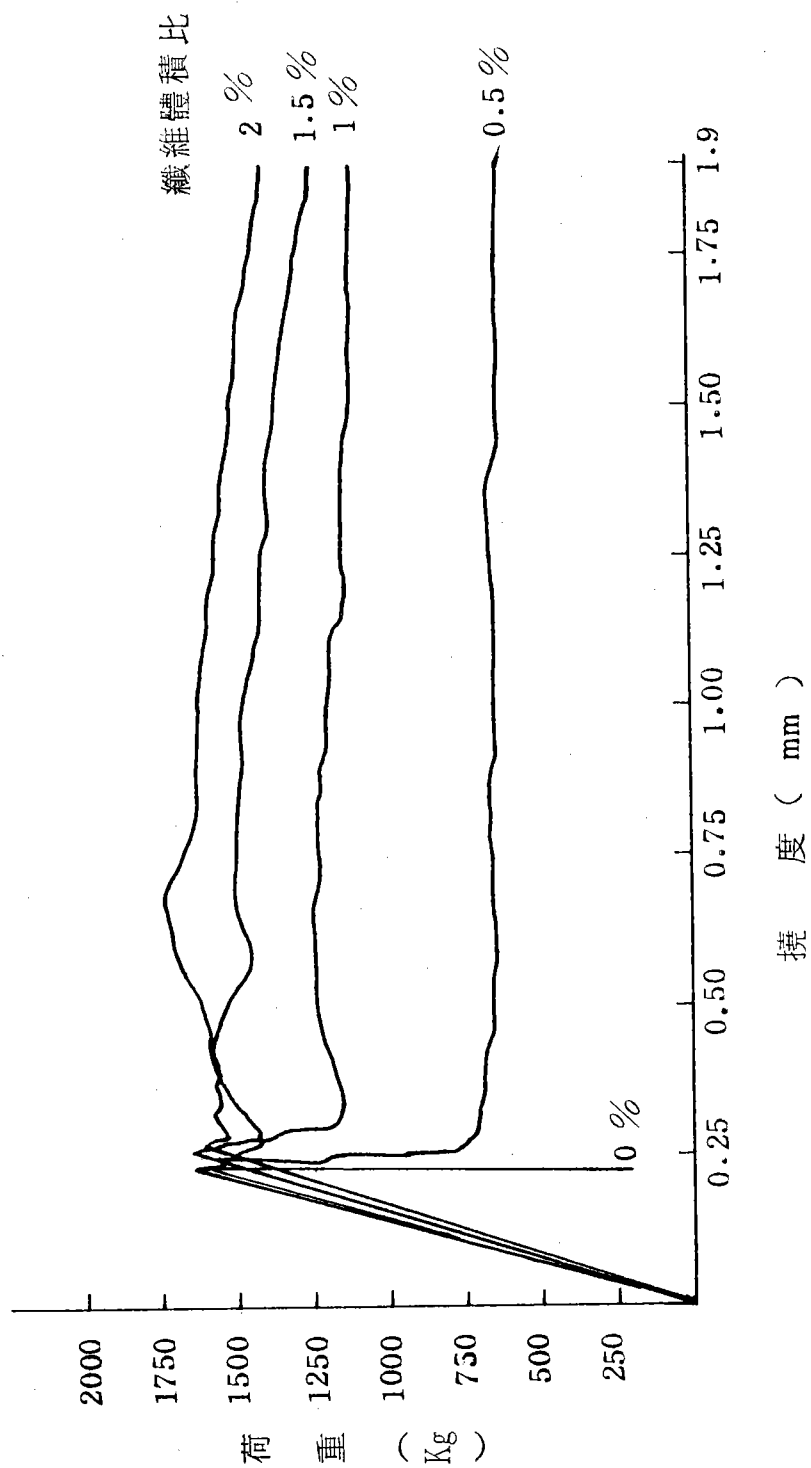


圖 5.9.14 各種不同纖維體積比之鋼纖維混凝土荷重撓度圖 (W/C 0.55)

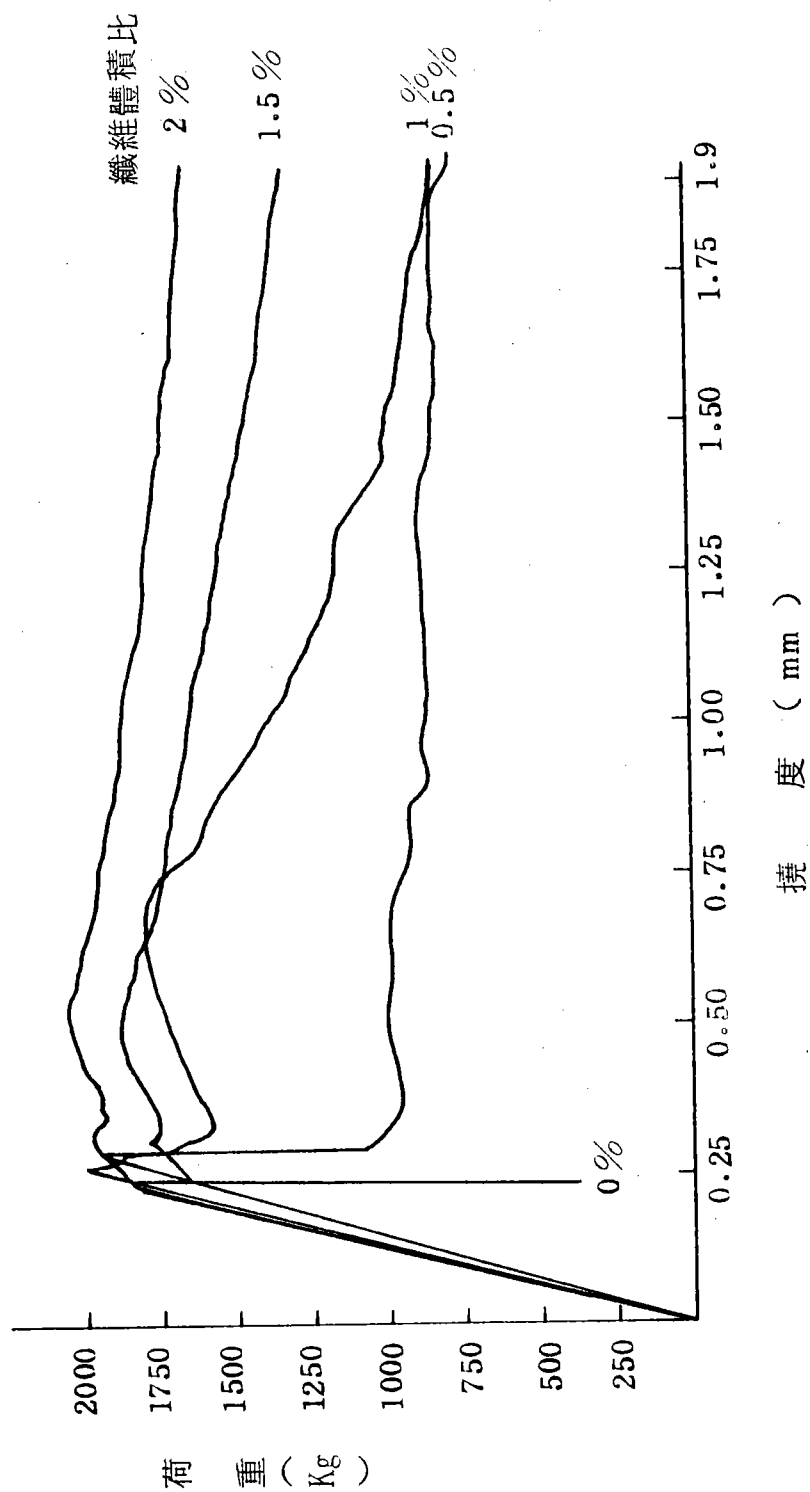


圖 5.9.15 各種不同纖維體積比之鋼纖維混凝土荷重撓度圖 (W/C0.48)

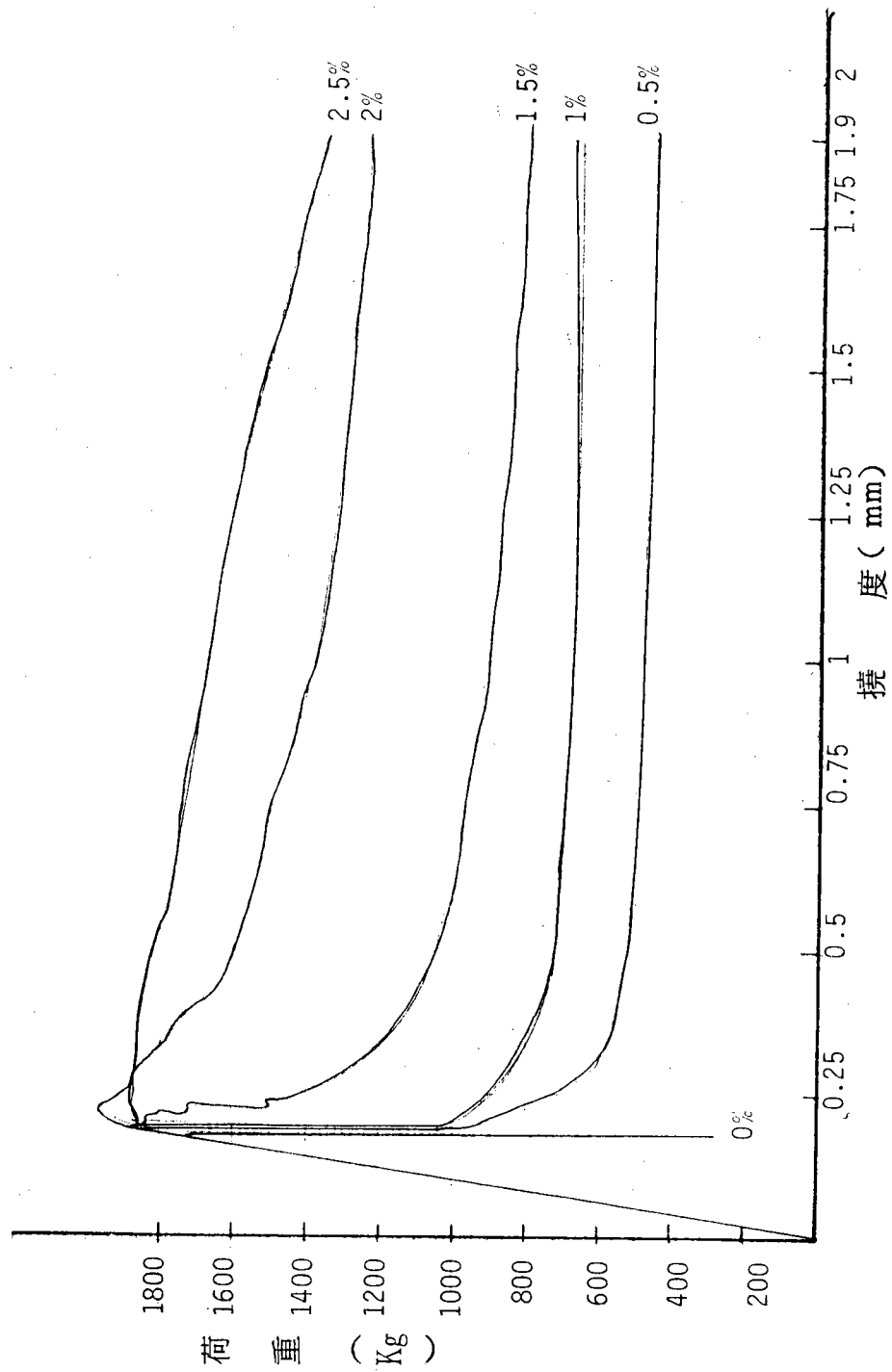


圖 5.9.16 各種不同纖維體積比之鐵絲纖維混凝土荷重撓度圖 (W/C 0.48)

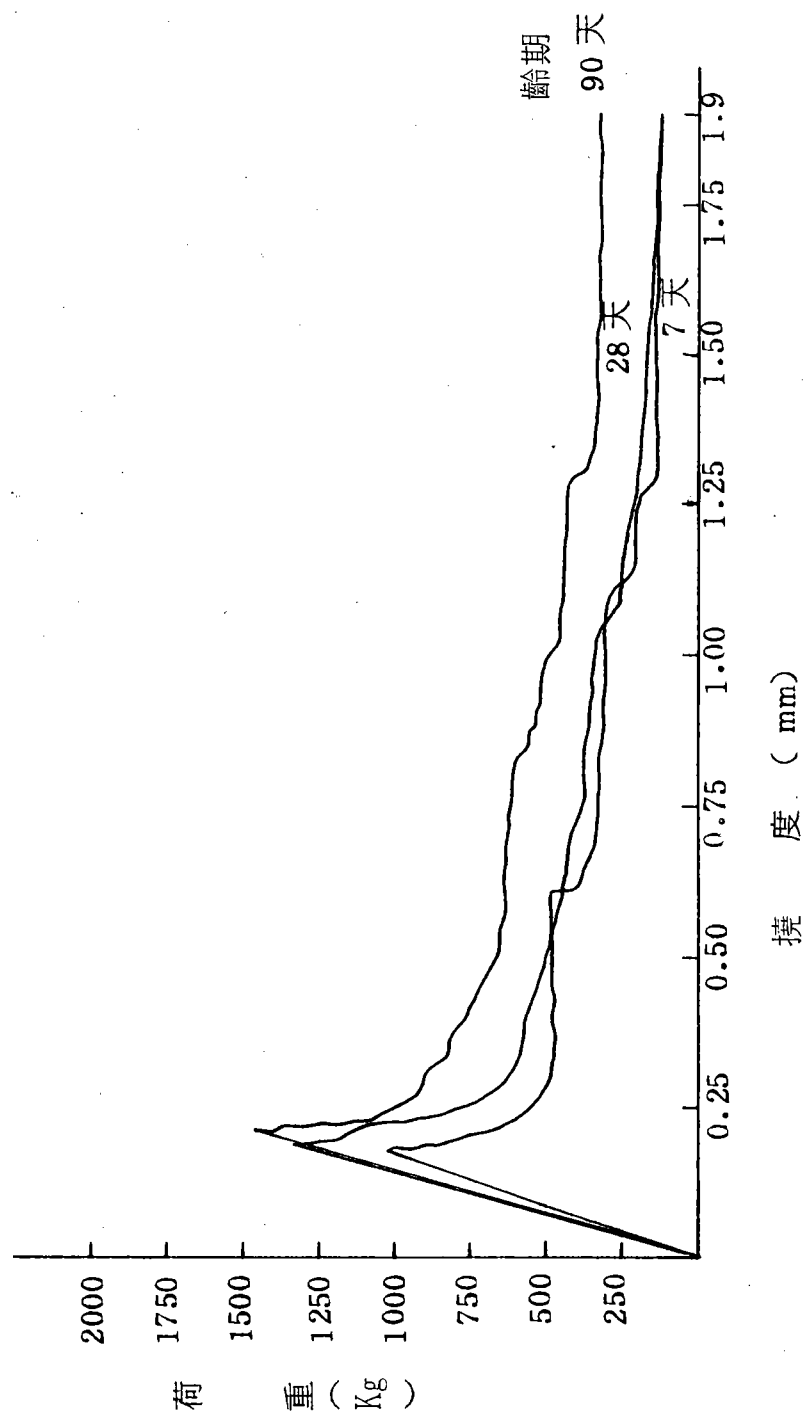


圖 5.9.17 各種不同齡期之鋼纖維混凝土荷重撓度圖 (F / C 0.5 % W / C 0.68)

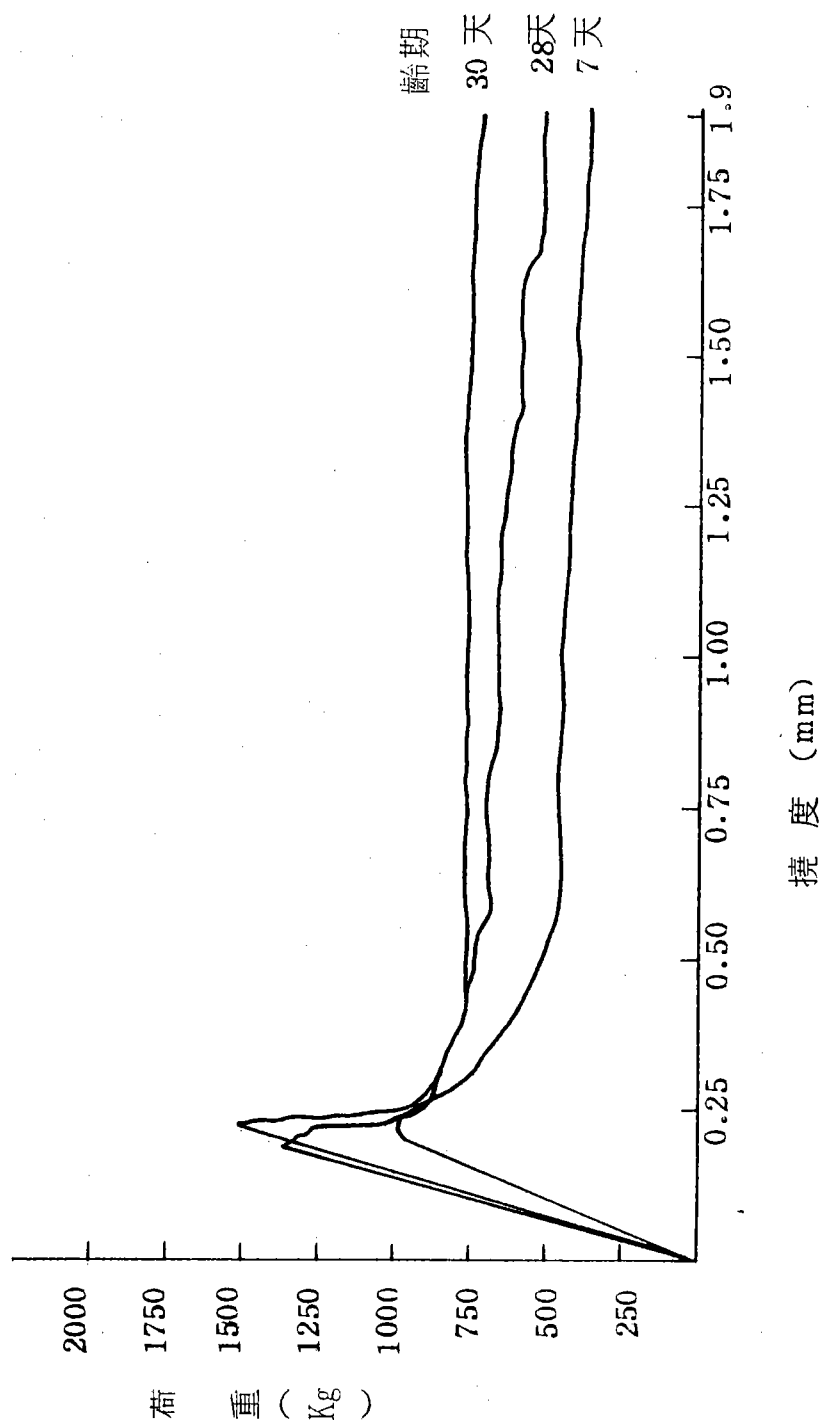


圖 5.9.18 各種不同齡期之鋼纖維混凝土荷重撓度圖 (F / C 0.5 % W / C 0.62)

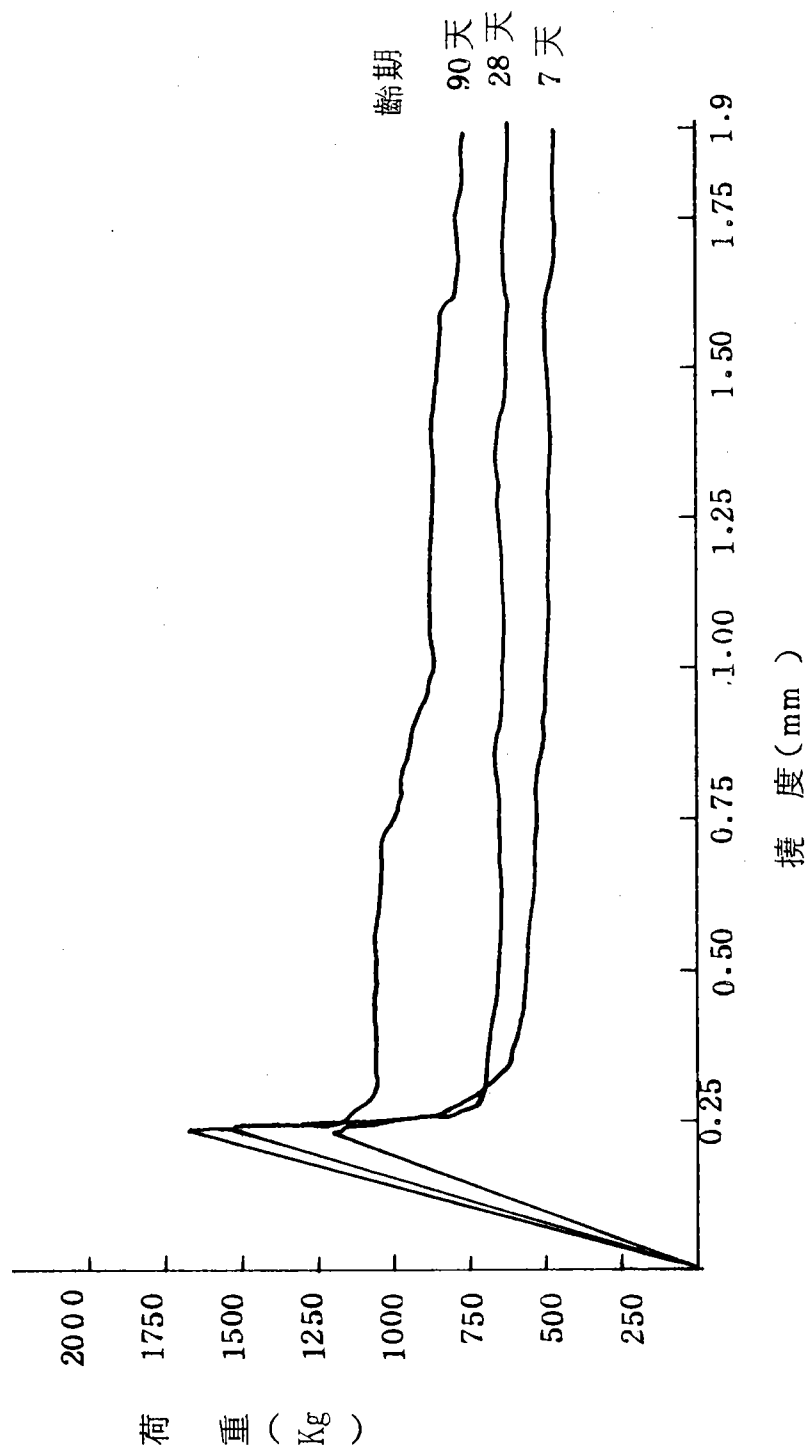


圖 5.9.19 各種不同齡期之鋼纖維混凝土荷重撓度圖 ($F/C 0.5\%$ $W/C 0.55$)

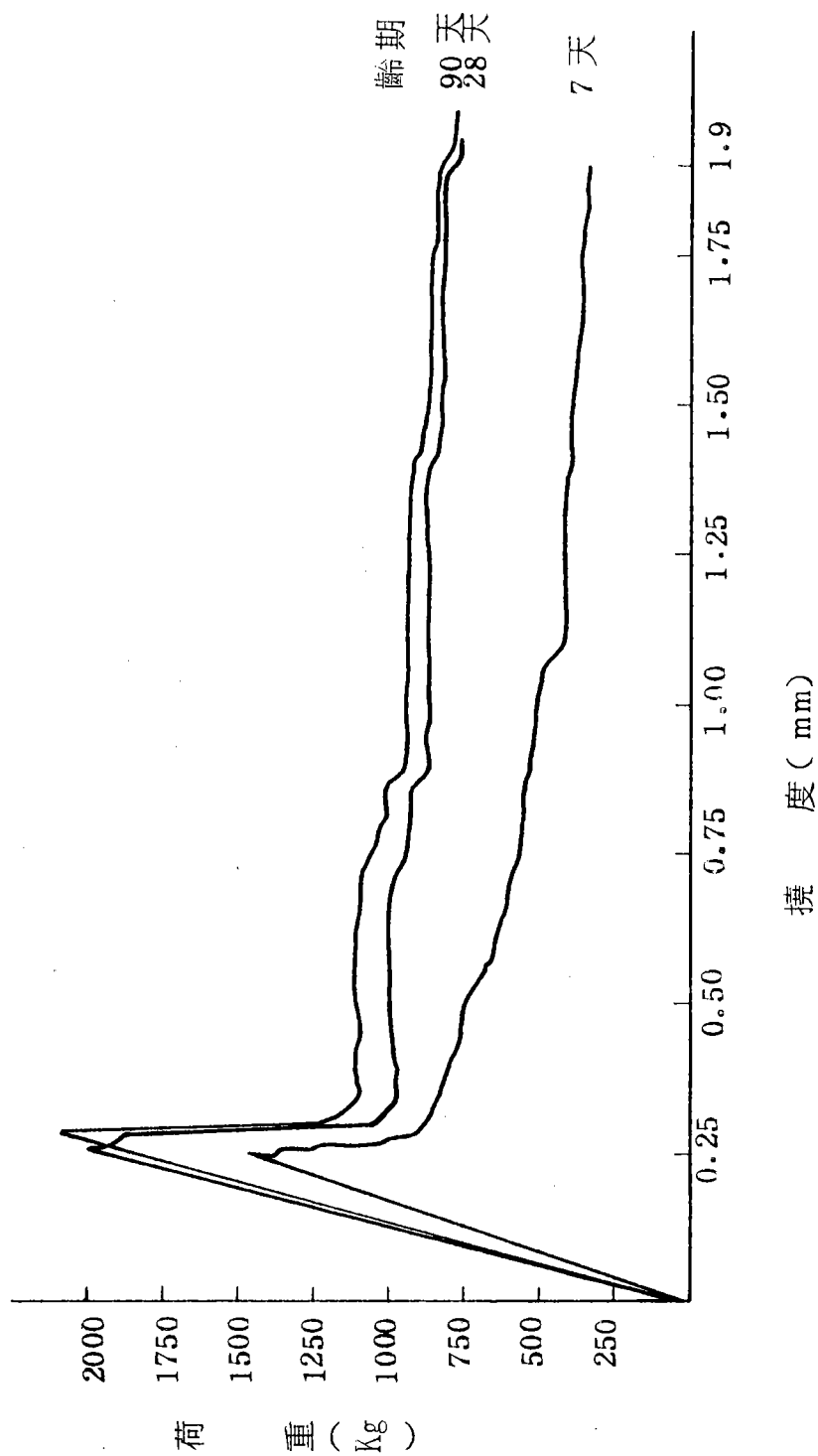


圖 5.9.20 各種不同齡期之鋼纖維混凝土荷重撓度圖 (F / C 0.5 % W / C 0.48)

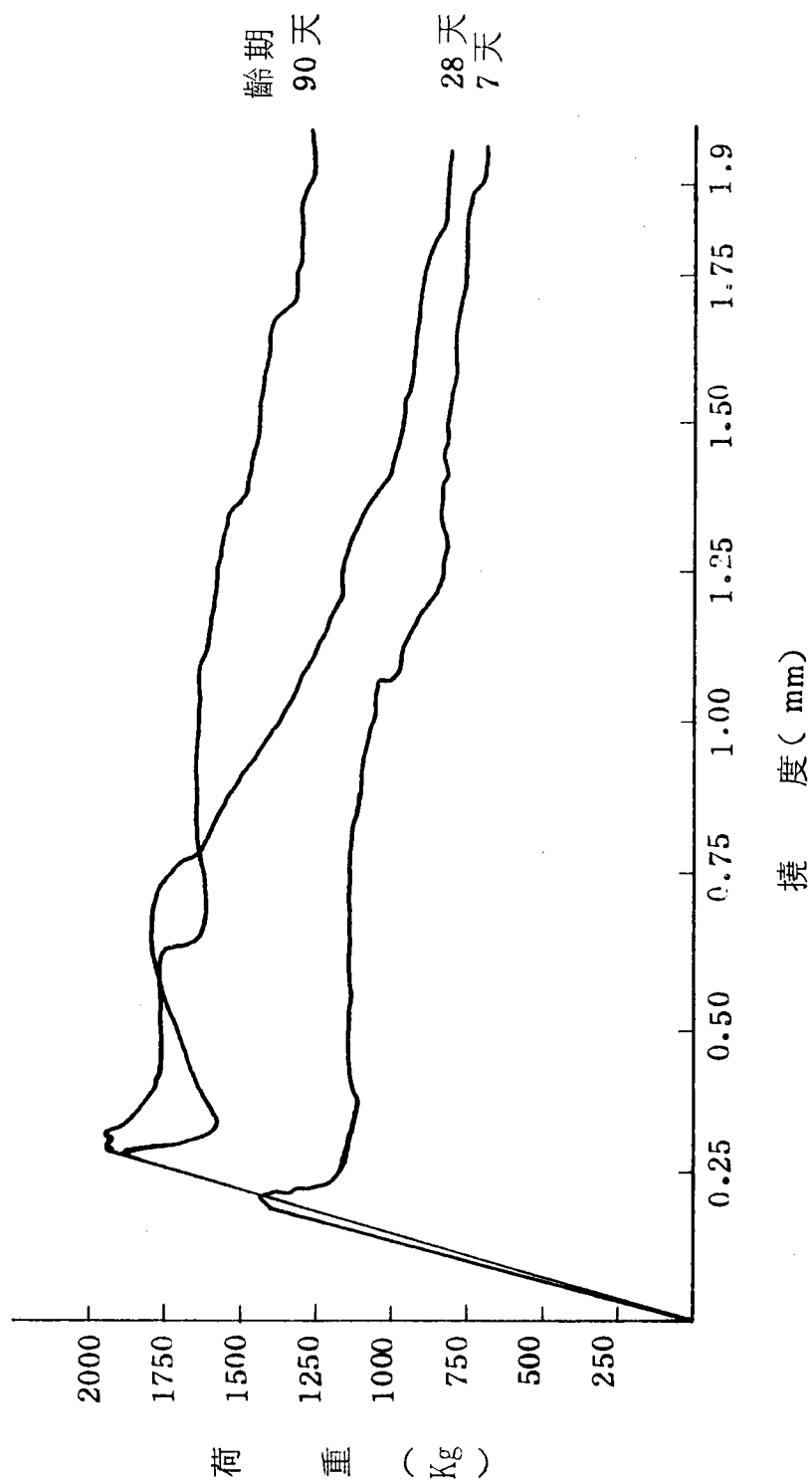


圖 5.9.21 各種不同齡期之銅纖維混凝土荷重撓度圖 (F / C 1 % W / C 0.48)

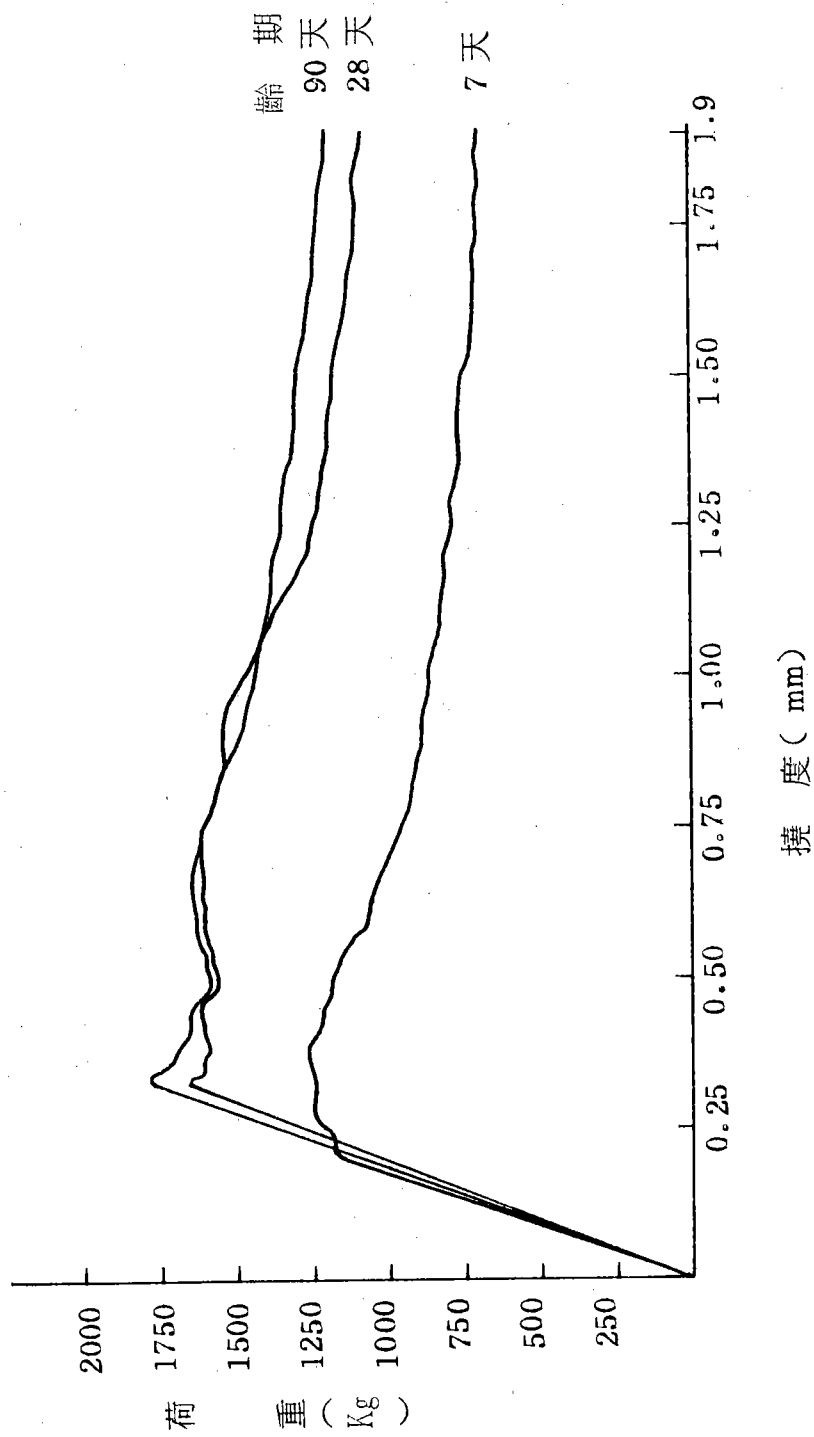


圖 5.9.22 各種不同齡期之鋼纖維混凝土荷重撓度圖 (F / C 2% W / C 0.55)

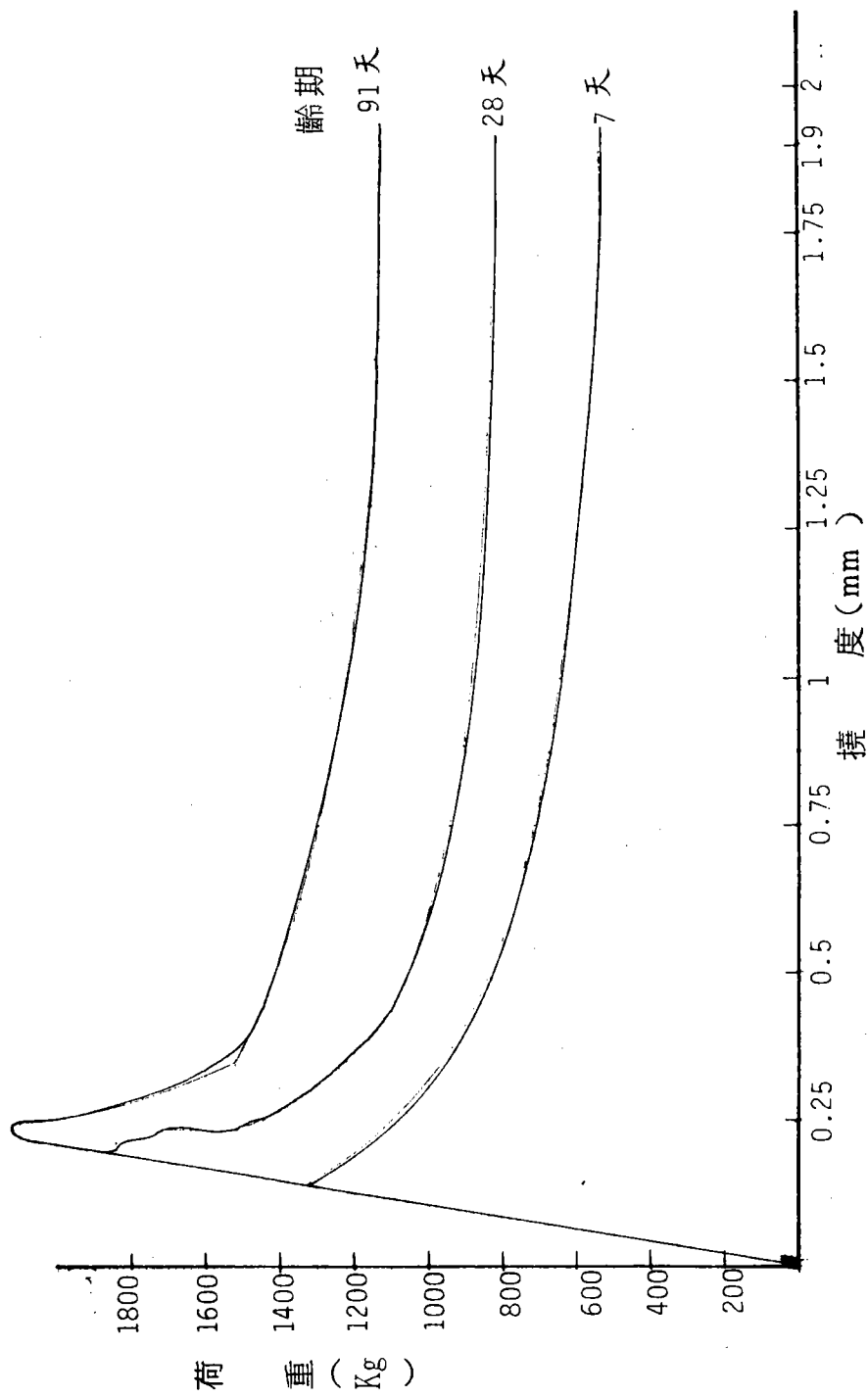


圖 5.9.23 各種不同齡期之鐵絲纖維混凝土荷重撓度圖 (F / C 1.5 % W / C 0.48)

表 5.9.2 各種纖維混凝土之韌性指數 (水灰比 0.48)
(齡期 28 天)

韌性指數 纖維種類 纖維比	0.5 %	1 %	1.5 %	2 %
鐵 絲	4.97	7.92	9.44	10.46
瓊 麻	2.12	4.55	5.29	—
鋼 纖	7.02	9.96	15.03	15.43
玻 纖	2.45	3.44	5.01	—

表 5.9.3 各種鋼纖維混凝土之韌性指數 (齡期 28 天)

韌性指數 水灰比 纖維比	0.5 %	1 %	1.5 %	2 %
0.48	7.02	9.96	15.03	15.43
0.55	7.14	9.75	11.55	10.41
0.62	8.51	10.70	10.05	12.86
0.68	6.05	6.58	17.73	20.39

5.10 透水試驗

5.10.1 試驗目的

本試驗之目的，在求纖維混凝土之透水特性。由於不連續短纖之摻入，使得纖維與混凝土界面，易於產生浮水吸附。當混凝土水化硬固後，其介面間留下之孔隙，可能成為通水路，鋼纖維為金屬材料，具有腐蝕性，而透水率的增加，足於引起腐蝕問題，而由腐蝕結果，可能擴大透水率。應用於港灣工程中，腐蝕因子百倍於離岸較遠之淡水域。由透水特性之獲得，有助於防蝕對策，本試驗在以獲得透水性小之優良纖維混凝土材料，俾供使用於港灣工程。

5.10.2 試驗步驟及量測方法

①試驗設備

本試驗所採用之設備為美國墾務局型（如圖 5.10.1）具有三組試體容器（如圖 5.10.）直徑為 17 公分，適合 $15\phi \times 30\text{ cm}$ 之試體，連接三組儲水槽及三個量筒，量筒內徑為 30 mm，其側緣備一量尺，精度 1 mm，用於讀取透性水量。量筒及儲水槽相互連通，並連接一氮氣瓶。氮氣瓶出口端分成三岐管，每一岐管各裝有一分壓錶，藉以調整，每一量筒之氣壓，各主要管路間皆裝有閥門，可以開關設備中之迴路。由氮氣瓶所提供之壓力使本試驗為定水頭透水試驗之一種。

②試驗前準備

①採用石腊及松香依 1 : 1 之比例，經融熔後，灌入模內（如圖

5.10.3）使試體之側面成爲一不透水面，並與模結成一體，模側鑽有螺孔，以利設備之裝置。

②先灌水後排氣，使連接試體之各管路中無氣泡存在。

③開啓氮氣瓶，並調整分壓表至試驗所需之壓力。

④調整量筒之水面高度，並從量筒側之量尺讀取起始讀數。

③試驗

經試驗前準備就緒後，即開始進行試驗。試驗間得隨時調整各分壓錶之壓力，使試驗之壓力維持一定。

④記錄：

於試驗開始後之 0 , 1 , 2 , 4 小時，1 , 2 , 3 , 4 , 5 , 到所需測試之日數。量測及記錄量筒之水位。所記錄之時間及其透水量，便可計算出，該受測試體之透水係數。由透水係數之比較，可以獲取較佳之材料，俾供採用。

⑤計算：

由達西公式

$$V = K i \dots\dots\dots (\text{式 5.10.1})$$

$$Q = A V \dots\dots\dots (\text{式 5.10.2})$$

$$Q = \frac{\pi}{4} D_1^2 \Delta h \div \Delta t \dots\dots\dots (\text{式 5.10.3})$$

$$A = \frac{\pi}{4} D_2^2 \dots\dots\dots (\text{式 5.10.4})$$

$$i = P / r \div L \dots\dots\dots (\text{式 5.10.5})$$

$$\therefore K = \frac{\frac{\pi}{4} D_1^2 \Delta h r L}{\frac{\pi}{4} D_2^2 P \Delta t} = \left(\frac{D_1}{D_2} \right)^2 \frac{\Delta h r L}{P (t_2 - t_1)} \dots\dots (式 5.10.6)$$

式中 K：滲透係數， Δh ：量筒之水位差數

D_1 ：量筒之直徑（30mm） r ：水之密度

D_2 ：試體之直徑（150mm） L ：試體長度（300 mm）

P ：試驗氣壓（5 Kg/cm²） Δt 試驗時距（hr·day）

將各已知量代入式 5.10.6 可得

$$K = 2.4 \times 10^{-4} \Delta h / \Delta t \dots\dots\dots (式 5.10.7)$$

5.10.3 試驗結果：

本試驗選定一種水灰比試驗各種不同纖維體積比之纖維混凝土之透水特性。由試驗結果可以看出，透水係數隨纖維體積比之增加而增加，並選定一種纖維體積比，變化各種不同水灰比，以求水灰比對透水係數之影響。由試驗結果可以看出透水係數，亦隨水灰比之增加而增加。本試驗所選定之兩種主要參數，目的在瞭解水灰比、纖維體積比，對纖維混凝土透水特性之影響。由本試驗結果可瞭解到，適當夯實之纖維混凝土其透水率亦相當低，足供工程使用。

試驗結果列於表 5.10.1 並繪圖如圖 5.10.4 及圖 5.10.5 以利比較。而透水係數可由表 5.10.1 之數據代入式 5.10.7 而獲得。本試驗之各種透水係數列於表 5.10.2。

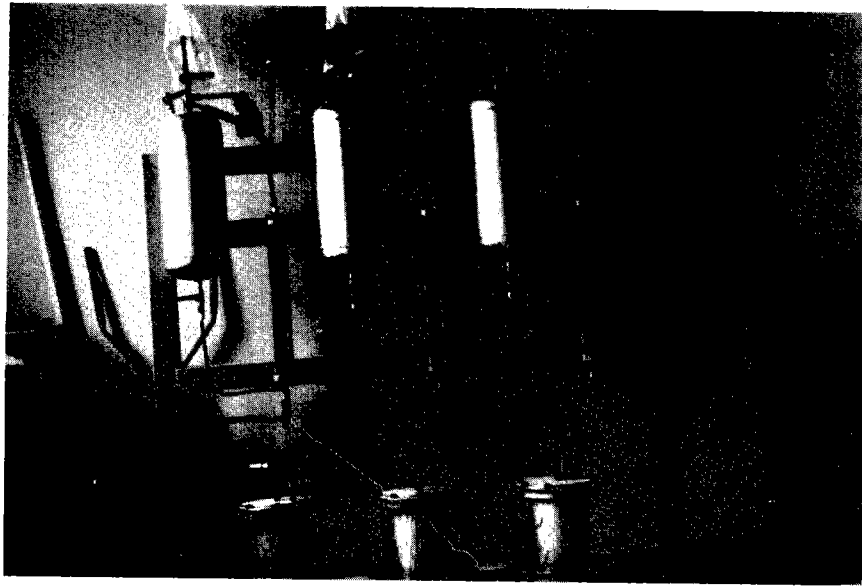


圖 5.10.1 透水試驗儀

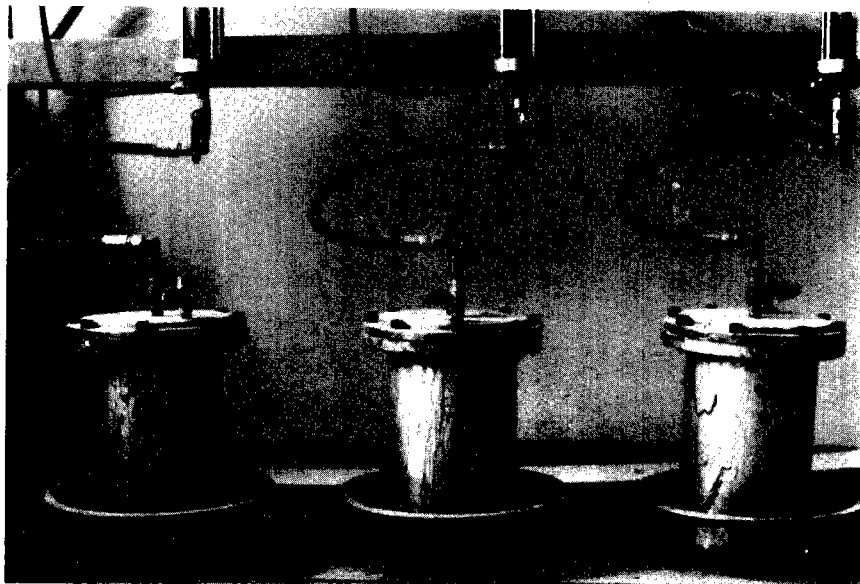


圖 5.10.2 三組試體容器



圖 5.10.3 不透水層塗封完成之試體連模

5.10.4 討 論

- ①由固定水灰比下之試驗，可以看出滲透係數隨纖維體積比之增加而增加，最高可達 2.5 倍。
- ②由固定纖維體積比之試驗可看出，滲透係數隨水灰比之增加而增加，最高可達 2 倍。
- ③由本試驗所得之纖維混凝土滲透係數約在 $10.346 \times 10^{-12} \sim 27.037 \times 10^{-12} \text{ m/S}$ 間。其值介於 $10^{-12} \text{ m/S} \sim 100 \times 10^{-12} \text{ m/S}$ 之間，可知其皆屬於普通透水率之材料。
- ④由討論③中可以知透水係數固然將因纖維體積比及水灰比之增加而增加，但在有充分良好搗實及良好之養護下，其透水性在可接受之範圍內。因此施工品質及技術亦為決定之因素之一。
- ⑤本種材料如使用於港灣構造物內，應使用較小水灰比而其纖維體積比不應大於 1.5 %。
- ⑥選用本種材料時，應具有良好之施工設備及技術。另工人之品行，亦應顧及。
- ⑦本種材料可配合強塑劑或飛灰的使用，可以有效地提高防水能力，並增進材料品質。

圖 5.10.4 各種不同水灰比在相同纖維比之透水結果比較

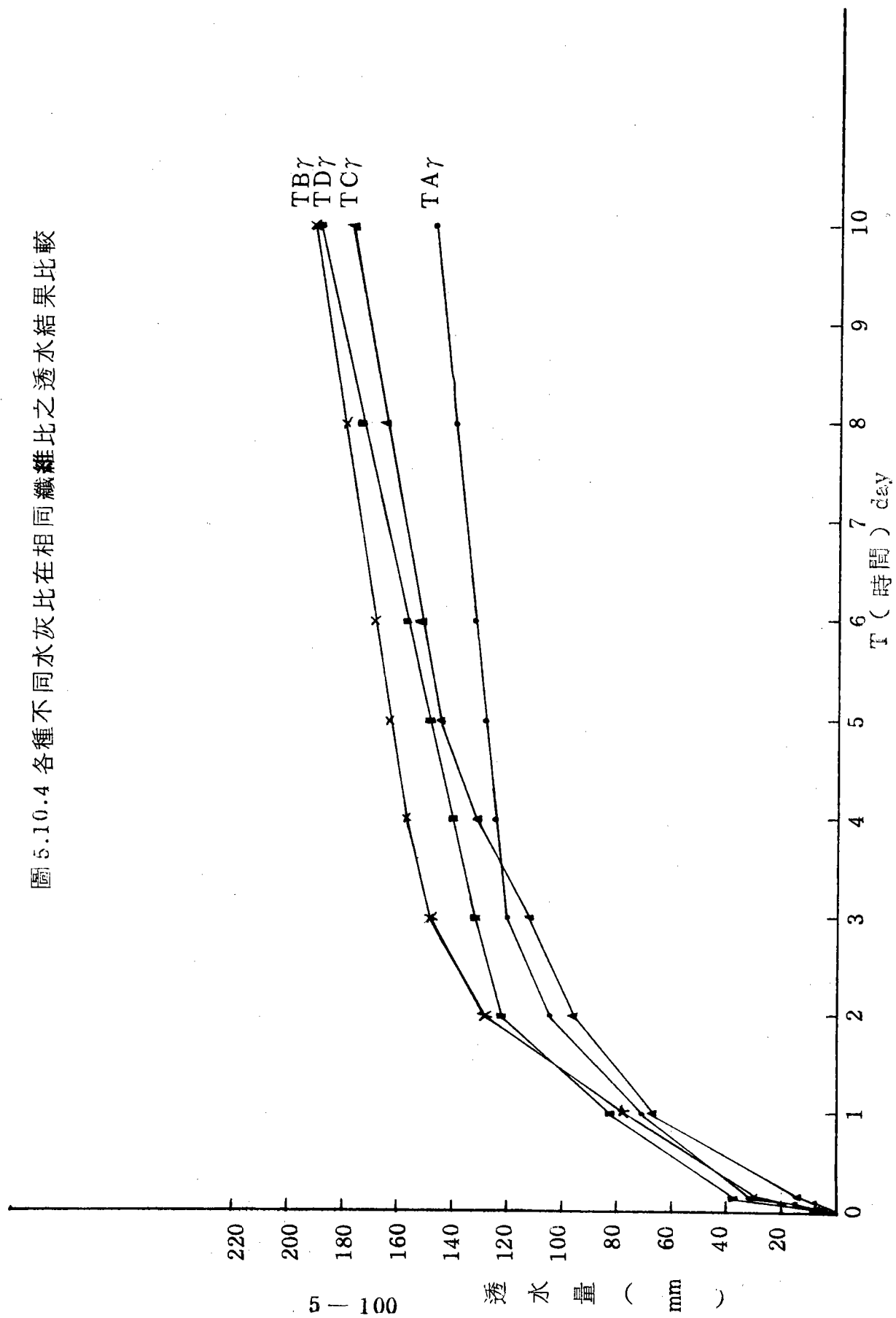


圖 5.10.5 各種不同纖維比在相同水灰比之透水結果比較

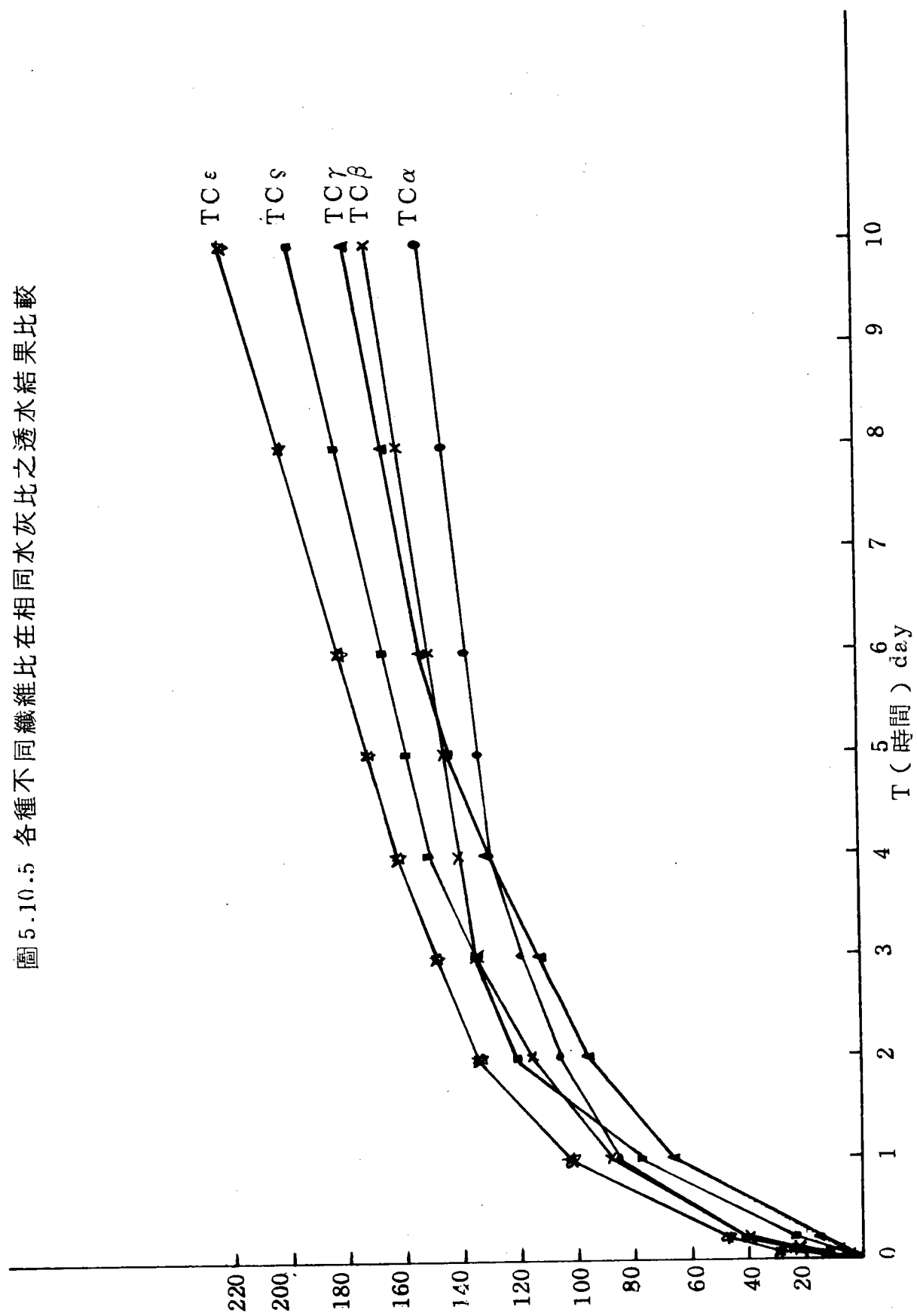


表 5.10.1 各種鋼纖維混凝土之透水

透水量 序號	時間 (mm)	0 (小時)	1 (小時)	2 (小時)	4 (小時)	1 (天)	2 (天)
T C α		400 0	385.7 14.3	375.4 24.6	359.2 40.8	314.3 85.7	293.6 106.4
T C β		400 0	386.8 13.2	377.7 22.3	359.5 40.5	311.5 88.5	284.3 115.7
T C γ		395 0	390.6 4.4	386.9 8.1	379.2 15.8	328.3 66.7	298.6 96.4
T C δ		400 0	393.8 6.2	388.0 12.0	376.2 23.8	324.0 76.0	279.5 120.5
T C ϵ		390 0	376.3 13.7	362.9 27.1	343.7 46.3	287.4 102.6	255.4 134.6
T A γ		390 0	381.2 8.8	374.6 16.4	358.0 32.0	318.6 71.4	285.2 104.8
T B γ		400 0	392.2 7.8	384.6 15.4	369.6 30.4	321.7 78.3	271.7 128.3
T D γ		400 0	389.4 10.6	379.4 20.6	361.3 38.7	317.5 82.5	277.3 122.7

※ T : 鋼纖維 A, B, C, D : 水灰比 0.48, 0.55, 0.62, 0.68 ; α , β , γ , δ , ϵ

試驗結果

3 (天)	4 (天)	5 (天)	6 (天)	8 (天)	10 (天)
280.5 119.5	270.5 129.5	266.3 133.7	262.6 137.4	255.2 144.8	247.8 152.2
265.0 135.0	260.0 140.0	255.0 145.0	250.0 150.0	240.0 160.0	230.0 170.0
282.4 112.6	264.3 130.7	250.5 144.5	242.4 152.6	229.9 165.1	217.4 177.6
264.1 135.9	248.8 151.2	241.1 158.9	233.4 166.6	218.1 181.9	202.7 197.3
241.3 148.7	227.6 162.4	217.8 172.2	208.1 181.9	188.6 201.4	169.2 220.8
269.4 120.6	256.7 124.3	262.0 128.0	258.3 131.7	250.9 139.1	243.5 146.5
251.3 148.7	242.6 157.4	236.4 163.6	231.3 168.7	220.4 179.6	209.5 190.5
267.9 132.1	259.3 140.9	251.2 148.8	243.1 156.9	227.0 173.0	210.9 189.1

纖維體積比 0%，0.5%，1%，1.5%，2%

表 5.10.2 各種鋼纖維混凝土之滲透係數

滲透係數 纖維體積比	水灰比			
	0.48	0.55	0.62	0.68
1 %	$10.346 \times 10^{-12} \text{ M/S}$	$15.1850 \times 10^{-12} \text{ M/S}$	$17.3611 \times 10^{-12} \text{ M/S}$	$22.407 \times 10^{-12} \text{ M/S}$

滲透係數 水灰比	纖維體積比			
	0 %	0.5 %	1 %	1.5 %
0.62	$10.2778 \times 10^{-12} \text{ M/S}$	$13.8889 \times 10^{-12} \text{ M/S}$	$17.3611 \times 10^{-12} \text{ M/S}$	$21.296 \times 10^{-12} \text{ M/S}$
				$27.037 \times 10^{-12} \text{ M/S}$

5.11 熱傳導試驗

5.11.1 試驗目的

本試驗之目的在以探討纖維混凝土之熱傳導性。普通混凝土具有較金屬材料為低之熱傳導性。纖維混凝土因摻入不同種類之纖維，有天然材料，有玻璃材料，因此其熱傳導性，勢必因纖維種類而改變。纖維混凝土材料之熱傳導係數，是否可依複合材料之比例關係，而計算出其複合後之熱傳導係數呢？由於纖維之排列非為定向（Noistropic）成為完全之均質（Homogeneity），另由於纖維含量之增加，材料內之孔隙量亦隨之增加，此皆足於影響纖維混凝土之熱傳導性。故非經試驗，無以知其確然。

5.11.2 試驗步驟及量測方法

①試驗設備

本試驗使用進步之熱傳導試驗儀，可迅速、精確地量測構造材料或絕緣材料之熱傳導係數。試驗方法係依據 ASTM C 518 標準。另外本設備另可執行 JIS 1412 之方法。

本設備計分兩部份，試驗主機及控制與記錄單位（如圖示 5.11.1），主機係為一箱式，六面絕緣，上下各為加熱及冷卻板，（如圖 5.11.2），可以執行 $+10^{\circ}\text{C} \sim +80^{\circ}\text{C}$ 間之試驗。試體為 $200\text{ mm} \times 200\text{ mm} \times 50\text{ mm}$ （如圖示 5.11.3），由於前後左右四板為固定式，故試體之長寬皆固定為 200 mm ，而上部加熱板可以自

由活動，因此試體之厚度可以從 30mm～100 mm，如試體厚於 100 mm，則試驗時須特別處理。

控制部份有一 CRT，冷熱板及熱流量試體厚度之數值，可以顯示於 CRT 中，試驗完成可以由 CRT 上之標桿成一直線上判得。完成試驗之後，可以由 Printer 印出，其變異值應為 0%，如變異值不為 0%，則計算之精度會受影響。此數據應予淘汰，並繼續試驗直至變異值為 0% 為止。

② 試驗前之準備

① 試體：

本研究所使用之試體為 200mm×200mm×50mm 之 F.R.C. 試體，製作之材料同於其他試驗為一次製作，不同配比之 F.R.C. 於不同日製作，相同配比之 F.R.C. 則一次製作以供各種試驗，包括耐磨、抗彎、劈裂等。試驗前試體須乾燥至恒重，故經 28 天之正常養生後，取出試體，並使用烘箱烘乾（如圖 5.11.4）至恒重。試驗時冷却至常溫。

② 試驗機：

開機之後，必須暖機 10 分鐘以上，以使內部之線路可以處於一穩定狀態，使量測之精度顯著提高。

③ 試驗：

試體置於主機箱內，關上絕熱外壁，然後壓下熱板，熱板之操作具有兩段，Hard down 具有 $250 \text{ Kg}/\text{m}^2$ 之壓力，Soft down 只具有 $25 \text{ Kg}/\text{m}^2$ 之壓力，因此視試體之種類而決定熱板下降之壓力。熱板附有一 meter，可以量測試體厚度。主機之冷熱板溫度

控制設定於 10°C 及 40°C ，當主機設定完成之後，可於控制部份輸入試體編號、試驗日期，然後切下開始量測之開關，開始進行試驗。

④記錄：

試驗完成之後，可於控制部份印出試驗結果。如圖 5.11.5。

⑤計算：

$$Q = \frac{E}{K} = \frac{\lambda \cdot \Delta T}{\ell}$$

$$\lambda = \frac{E \ell}{K \Delta T}$$

式中 Q ：通過試體單位面積之熱流量 $\text{K Cal}/\text{m}^2\text{h}$

K ：熱流計之靈敏度 $\text{mV}/\text{K Cal m}^{-2}\text{h}^{-1}$

E ：熱流計之輸出量 mV

λ ：試體之熱傳導係數 $\text{K Cal}/\text{m h}^{\circ}\text{C}$

ΔT ：試體上、下之溫度 $^{\circ}\text{C}$

ℓ ：試體之厚度 m

5.11.3 試驗結果

試驗結果列於表 5.11.1 及繪如圖 5.11.6。所得結果之熱傳導係數約在 $0.8412 \sim 1.4338$ 之間。由此結果可以看出，纖維混凝土之熱傳導係數均相當低，如同普通混凝土係屬於熱之不良導體，此可能導因於纖維含量太少（2%以下），因此其與混凝土之差異並不大。由圖示可見纖維混凝土之熱傳導係數，將因纖維含量之增加而遞增，但當纖維含量太高時，其熱傳導係數則不增反降，此可能由於纖維

含量增加，施工性不佳，造成材料內部孔隙增多所致（此點可由透水試驗結果獲得佐證）。

由圖上之結果亦可知熱傳導隨水灰比增加而遞增，雖然在量之差異不大。如在纖維含量較高之情況，水灰比之影響甚不明顯。

5.11.4 討論

- ①由於纖維佔有之體積比例甚小，其對熱傳導性之影響。就材料而言，屬於熱之不良導體。
- ②熱傳導係數，將受水灰比及纖維體積比等影響。當纖維體積比及水灰比增加，熱傳導係數將遞增。但當纖維含量較高時（如 2 %）則熱傳係數，不增反降，且於此情況下，水灰比之影響不明顯。
- ③本試驗中纖維長度為五公分，而試體之厚度亦為 5 公分，因此纖維排列與熱傳導方向直交較多，後續試驗之試體厚度最少應有纖維長度之一倍半以上，使纖維之排列，隨意性較高，亦較具代表性。

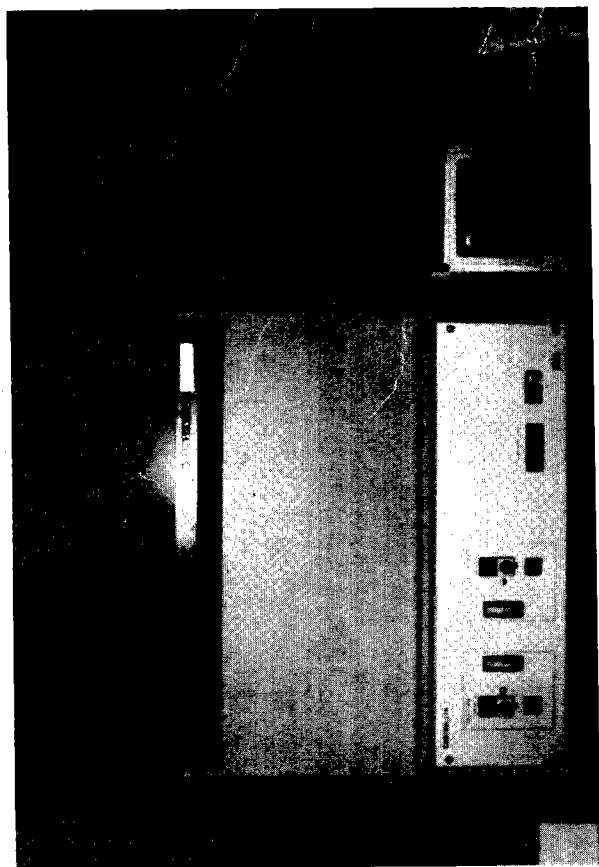


圖 5.11.1 熱傳導試驗機

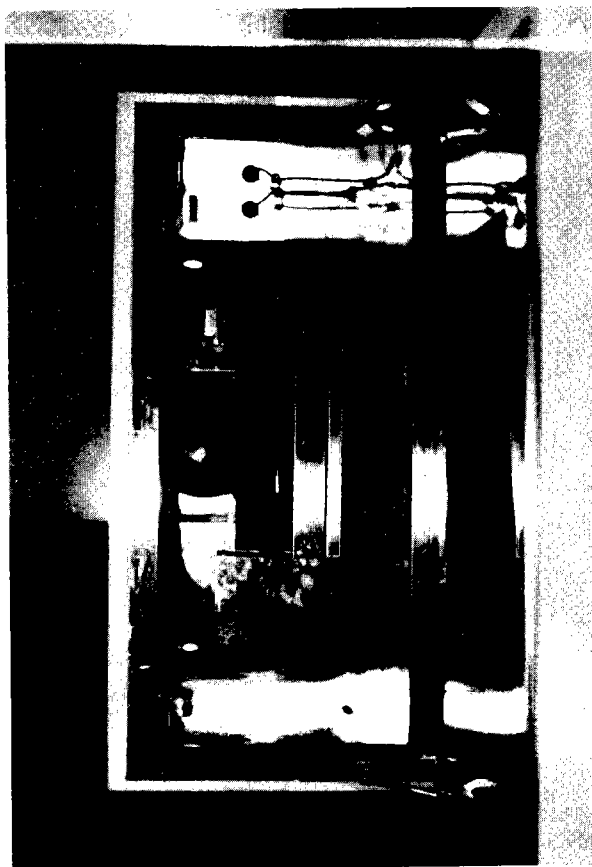


圖 5.11.2 熱傳導試驗機主機配置

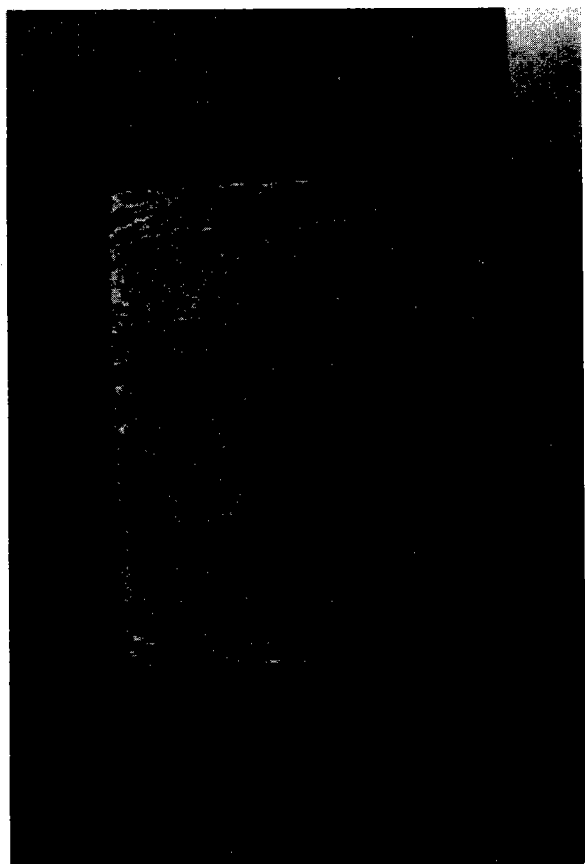


圖 5.11.3 熱傳導試驗機之試體



圖 5.11.4 烘箱與試體

=====	=====	=====	=====
HEAT FLOW METHOD (2)	HEAT FLOW METHOD (2)	HEAT FLOW METHOD (2)	HEAT FLOW METHOD (2)
=====	=====	=====	=====
SAMPLE NUMBER	SAMPLE NUMBER	SAMPLE NUMBER	SAMPLE NUMBER
NO. CAA160526	NO. CBA260527	NO. CCA160516	NO. CDA160528
=====	=====	=====	=====
SINGLE POINT CAL.	SINGLE POINT CAL.	SINGLE POINT CAL.	SINGLE POINT CAL.
24.48 °C	24.48 °C	24.48 °C	24.48 °C
=====	=====	=====	=====
THERMAL CONDUCTIVITY	THERMAL CONDUCTIVITY	THERMAL CONDUCTIVITY	THERMAL CONDUCTIVITY
0.8412	0.9941	1.1229	1.3919
Kcal/mh°C	Kcal/mh°C	Kcal/mh°C	Kcal/mh°C
=====	=====	=====	=====
MEAN TEMP.	MEAN TEMP.	MEAN TEMP.	MEAN TEMP.
26.05 °C	25.89 °C	25.23 °C	25.52 °C
=====	=====	=====	=====
THICKNESS	THICKNESS	THICKNESS	THICKNESS
52.29 mm	52.94 mm	53.58 mm	53.95 mm
=====	=====	=====	=====
TEMP.	TEMP.	TEMP.	TEMP.
HOT 35.85 °C	HOT 35.23 °C	HOT 34.01 °C	HOT 34.25 °C
MID. 37.92 °C	MID. 37.27 °C	MID. 34.49 °C	MID. 36.25 °C
COLD 16.25 °C	COLD 16.38 °C	COLD 16.45 °C	COLD 16.79 °C
HEAT FLOW	HEAT FLOW	HEAT FLOW	HEAT FLOW
HOT 292.77	HOT 348.54	HOT 372.30	HOT 482.07
Kcal/m^2h	Kcal/m^2h	Kcal/m^2h	Kcal/m^2h
COLD 337.66	COLD 359.37	COLD 363.78	COLD 418.85
Kcal/m^2h	Kcal/m^2h	Kcal/m^2h	Kcal/m^2h
=====	=====	=====	=====
* FLUCTUATION *	* FLUCTUATION *	* FLUCTUATION *	* FLUCTUATION *
TEMP.	TEMP.	TEMP.	TEMP.
HOT 0.0 %	HOT 0.0 %	HOT 0.0 %	HOT 0.0 %
MID. 0.0 %	MID. 0.0 %	MID. 0.0 %	MID. 0.0 %
COLD 0.0 %	COLD 0.0 %	COLD 0.0 %	COLD 0.0 %
HEAT FLOW	HEAT FLOW	HEAT FLOW	HEAT FLOW
HOT 0.0 %	HOT 0.0 %	HOT 0.0 %	HOT 0.0 %
COLD 0.0 %	COLD 0.0 %	COLD 0.0 %	COLD 0.0 %

圖 5.11.5 熱傳導試驗紀錄

=====	=====	=====	=====	=====
HEAT FLOW METHOD (2)	HEAT FLOW METHOD (2)	HEAT FLOW METHOD (2)	HEAT FLOW METHOD (2)	HEAT FLOW METHOD (2)
=====	=====	=====	=====	=====
SAMPLE NUMBER	SAMPLE NUMBER	SAMPLE NUMBER	SAMPLE NUMBER	SAMPLE NUMBER
NO. CAC360526	NO. CBC260520	NO. CCC260514	NO. CDC250825	
=====	=====	=====	=====	=====
SINGLE POINT CAL.	SINGLE POINT CAL.	SINGLE POINT CAL.	SINGLE POINT CAL.	SINGLE POINT CAL.
24.48 °C	24.48 °C	24.48 °C	24.48 °C	25.08 °C
=====	=====	=====	=====	=====
THERMAL CONDUCTIVITY	THERMAL CONDUCTIVITY	THERMAL CONDUCTIVITY	THERMAL CONDUCTIVITY	THERMAL CONDUCTIVITY
1.0294	1.3425	1.4263	1.4338	1.4338
Kcal/mh°C	Kcal/mh°C	Kcal/mh°C	Kcal/mh°C	Kcal/mh°C
=====	=====	=====	=====	=====
MEAN TEMP.	MEAN TEMP.	MEAN TEMP.	MEAN TEMP.	MEAN TEMP.
25.37 °C	26.10 °C	26.08 °C	24.71 °C	24.71 °C
=====	=====	=====	=====	=====
THICKNESS	THICKNESS	THICKNESS	THICKNESS	THICKNESS
51.26 mm	54.42 mm	54.71 mm	52.62 mm	52.62 mm
=====	=====	=====	=====	=====
TEMP.	TEMP.	TEMP.	TEMP.	TEMP.
HOT 34.14 °C	HOT 34.68 °C	HOT 34.33 °C	HOT 32.59 °C	HOT 32.59 °C
MID. 36.85 °C	MID. 35.62 °C	MID. 35.39 °C	MID. 32.22 °C	MID. 32.22 °C
COLD 16.61 °C	COLD 17.53 °C	COLD 17.83 °C	COLD 16.83 °C	COLD 16.83 °C
=====	=====	=====	=====	=====
HEAT FLOW	HEAT FLOW	HEAT FLOW	HEAT FLOW	HEAT FLOW
HOT 341.56	HOT 409.52	HOT 379.96	HOT 477.13	HOT 477.13
Kcal/m^2h	Kcal/m^2h	Kcal/m^2h	Kcal/m^2h	Kcal/m^2h
COLD 362.54	COLD 436.66	COLD 480.41	COLD 381.94	COLD 381.94
Kcal/m^2h	Kcal/m^2h	Kcal/m^2h	Kcal/m^2h	Kcal/m^2h
=====	=====	=====	=====	=====
* FLUCTUATION *	* FLUCTUATION *	* FLUCTUATION *	* FLUCTUATION *	* FLUCTUATION *
TEMP.	TEMP.	TEMP.	TEMP.	TEMP.
HOT 0.0 %	HOT 0.0 %	HOT 0.0 %	HOT 0.0 %	HOT 0.0 %
MID. 0.0 %	MID. 0.0 %	MID. 0.0 %	MID. 0.0 %	MID. 0.0 %
COLD 0.0 %	COLD 0.0 %	COLD 0.0 %	COLD 0.0 %	COLD 0.0 %
=====	=====	=====	=====	=====
HEAT FLOW	HEAT FLOW	HEAT FLOW	HEAT FLOW	HEAT FLOW
HOT 0.0 %	HOT 0.0 %	HOT 0.0 %	HOT 0.0 %	HOT 0.0 %
COLD 0.0 %	COLD 0.0 %	COLD 0.0 %	COLD 0.0 %	COLD 0.0 %
=====	=====	=====	=====	=====

圖 5.11.5 熱傳導試驗紀錄 (續)

=====	=====	=====	=====	=====
HEAT FLOW METHOD (2)	HEAT FLOW METHOD (2)	HEAT FLOW METHOD (2)	HEAT FLOW METHOD (2)	HEAT FLOW METHOD (2)
=====	=====	=====	=====	=====
SAMPLE NUMBER	SAMPLE NUMBER	SAMPLE NUMBER	SAMPLE NUMBER	SAMPLE NUMBER
NO. CAE160519	NO. CBE260521	NO. CBE260521	NO. CCE260529	NO. CDE150825
=====	=====	=====	=====	=====
SINGLE POINT CAL.	SINGLE POINT CAL.	SINGLE POINT CAL.	SINGLE POINT CAL.	SINGLE POINT CAL.
24.48 °C	24.48 °C	24.48 °C	24.48 °C	25.08 °C
=====	=====	=====	=====	=====
THERMAL CONDUCTIVITY	THERMAL CONDUCTIVITY	THERMAL CONDUCTIVITY	THERMAL CONDUCTIVITY	THERMAL CONDUCTIVITY
1.0340	1.2127	1.2127	1.3347	1.2671
Kcal/mh°C	Kcal/mh°C	Kcal/mh°C	Kcal/mh°C	Kcal/mh°C
=====	=====	=====	=====	=====
MEAN TEMP.	MEAN TEMP.	MEAN TEMP.	MEAN TEMP.	MEAN TEMP.
25.65 °C	25.93 °C	25.93 °C	25.08 °C	25.26 °C
=====	=====	=====	=====	=====
THICKNESS	THICKNESS	THICKNESS	THICKNESS	THICKNESS
52.87 mm	54.52 mm	54.52 mm	52.88 mm	52.55 mm
=====	=====	=====	=====	=====
TEMP.	TEMP.	TEMP.	TEMP.	TEMP.
HOT	HOT	HOT	HOT	HOT
35.05 °C	34.69 °C	34.69 °C	33.34 °C	33.66 °C
MID.	MID.	MID.	MID.	MID.
33.97 °C	36.13 °C	36.13 °C	35.80 °C	32.21 °C
COLD	COLD	COLD	COLD	COLD
16.25 °C	17.18 °C	17.18 °C	16.82 °C	16.87 °C
=====	=====	=====	=====	=====
HEAT FLOW	HEAT FLOW	HEAT FLOW	HEAT FLOW	HEAT FLOW
HOT	HOT	HOT	HOT	HOT
383.38	362.37	362.37	456.29	403.66
Kcal/m^2h	Kcal/m^2h	Kcal/m^2h	Kcal/m^2h	Kcal/m^2h
COLD	COLD	COLD	COLD	COLD
351.65	416.60	416.60	377.65	405.95
Kcal/m^2h	Kcal/m^2h	Kcal/m^2h	Kcal/m^2h	Kcal/m^2h
=====	=====	=====	=====	=====
* FLUCTUATION *	* FLUCTUATION *	* FLUCTUATION *	* FLUCTUATION *	* FLUCTUATION *
TEMP.	TEMP.	TEMP.	TEMP.	TEMP.
HOT	HOT	HOT	HOT	HOT
0.0 %	0.0 %	0.0 %	0.0 %	0.0 %
MID.	MID.	MID.	MID.	MID.
0.0 %	0.0 %	0.0 %	0.0 %	0.0 %
COLD	COLD	COLD	COLD	COLD
0.0 %	0.0 %	0.0 %	0.0 %	0.0 %
=====	=====	=====	=====	=====
HEAT FLOW	HEAT FLOW	HEAT FLOW	HEAT FLOW	HEAT FLOW
HOT	HOT	HOT	HOT	HOT
0.0 %	0.0 %	0.0 %	0.0 %	0.0 %
COLD	COLD	COLD	COLD	COLD
0.0 %	0.0 %	0.0 %	0.0 %	0.0 %

圖 5.11.5 熱傳導試驗紀錄 (續)

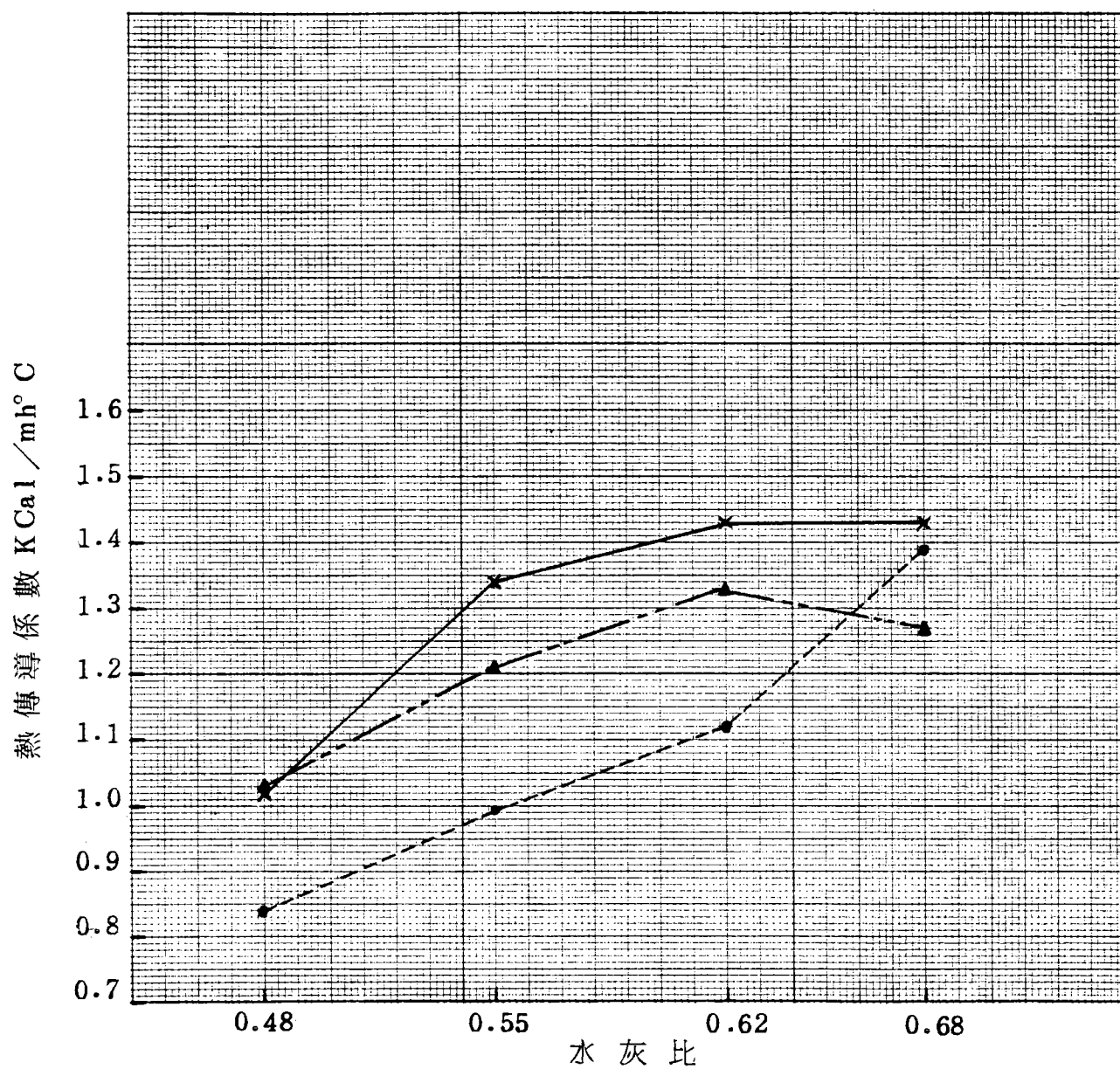


圖 5.11.6 各種纖維混凝土之熱傳導係數試驗結果

表 5.11.1 各種鋼纖維混凝土之熱傳導係數

熱傳係數 纖維體積比 水灰比	0.48	0.55	0.62	0.68
0 %	0.8412	0.9941	1.1229	1.3919
1 %	1.0294	1.3425	1.4263	1.4338
2 %	1.0340	1.2127	1.3347	1.2671

※熱傳係數之單位：K Cal/mh° C

六、影響因子探討

林維明 · 蘇瑞榮

影響強度及工作性之因子有纖維之長寬比、體積百分比、種類、粗骨材粒徑、級配、數量、水灰比，及拌合方法等。增加長寬比、體積比，及粗骨材粒徑、數量，將易於結團，因而導致材料分離，而影響強度及工作度。

6.1 長寬比之影響

纖維因其表面積大，需增加潤滑之劑量，又因不等稱性高，使轉動量小，拌合時，易糾結成團，尤以長寬比大皆為甚。但長寬比小，則效果不彰，一般應用於F.R.C之長寬比在30～150左右。但即使具有相同的長寬比與體積比，對工作性及強度之影響亦可能不同。當相當直徑變細，對於纖維之總拉力及握裹力越有利，但對於工作度則越不利。其原因由纖維的根數，表面積及間距等概念，了解此現象。

纖維之根數（ n ）因相當直徑變細而數量增多，且與相當直徑立方成反比。可說明如下：

假設兩種同材質纖維具有相同體積比（ V_f ）及長寬比（ L/d ）即：

$$V_{f1} = V_{f2} \quad , \quad L_1 / d_1 = L_2 / d_2$$

$$\therefore V_{f1} = \frac{\pi d_1^2}{4} L_1 \times n_1 = \frac{\pi d_2^2}{4} L_2 \times n_2 = V_{f2}$$

$$\therefore n_1/n_2 = d_2^2 L_2 / d_1^2 L_1$$

$$\therefore L_1/L_2 = d_1 / d_2$$

$$\therefore n_1/n_2 = (d_2/d_1)^3 \text{ 故得證}$$

因纖維數量不同，將使纖維之總拉力（ T_f ）及總握裹力（ B_f ）產生變化，與相當直徑成反比，可證明如下：

$$\therefore T_{f1} = \frac{\pi d_1^2}{4} \sigma n_1, \quad T_{f2} = \frac{\pi d_2^2}{4} \sigma n_2$$

$$\therefore T_{f1}/T_{f2} = d_1^2 n_1 / d_2^2 n_2 = d_2 / d_1$$

$$\therefore B_{f1} = \pi d_1 L_1 \tau n_1, \quad B_{f2} = \pi d_2 L_2 \tau n_2$$

$$\therefore B_{f1}/B_{f2} = \frac{d_1 L_1 n_1}{d_2 L_2 n_2} = d_2 / d_1 \text{ 故得證。}$$

而纖維之間距（兩相鄰纖維之距離）則將因相當直徑之變小而縮小。據 SWAMY 之估算纖維間距 $S = \sqrt{L^2/n}$ 此式因纖維數量之增加，導致間距縮小，纖維糾結之機會將相對地提高。

雖然因纖維之相當直徑之變小，而引發上述利與不利之結果，但實際上纖維之長度不小於其最大粒徑二倍或不小於 20mm，因此問題並非極端明顯的。即使是抗鹼玻璃，其直徑在 10 μ m 左右，但實際上皆為成束出現，每束從 150 根至 250 根不等。使其長寬比約在 100 左右。長寬比對工作性影響如圖 6.1.1 所示。

6.2 纖維種類之影響

不同種類之纖維，因具不同的外觀、長寬比、相當直徑、剛性、及吸水率等，故將影響工作性及強度，雖然纖維之抗拉強度皆較素混凝土高出數十倍，但吸水率高之纖維，則因吸收水份，而導致其強度降低。又因吸水使體積膨脹，而當水份漸次喪失後，留下較大空間，使握裹力大為降低。而影響工作性者有吸水率、長寬比、比重、及剛性等方面。吸水率大者，拌合不易，需採富配比，或使用添加劑，長寬比已如前述。比重輕者，不易親和，而剛性不足，則纖維本身易先結團。此種類纖維以天然纖維為甚。如瓊麻，不但具多孔性，又甚柔韌，比重輕，吸水率大易引起拌合之材料分離。其影響工作性如圖 5.1.1 所示。而對強度之影響如圖 5.9.5 及圖 5.9.6 所示。

6.3 纖維體積比之影響

纖維體積比之影響，實際是一個量的問題，體積比大、量多，自然便影響工作度及強度了。就工作性是負面影響，就強度是正面影響。由圖 6.1.1 及圖 6.3.1 可以纖維體積比高對工作性越不利，但由圖 5.9.12 ~ 圖 5.9.16 可以看出對強度有利。

6.4 纖維排列方向之影響

平行或近乎平行於力方向的纖維對力量之傳遞才有效率。但 F.R.C 中纖維之排列之方向是隨機性，因此加入的纖維並沒有依比例表現出來。依各種不同的假設，而有各種不同之比例。根據 ROMUALDI 等

人之研究，採用統計的方法，估計而得纖維之效率（ L_E ）為

$$L_E = \frac{\int_0^{\frac{\pi}{2}} \int_0^{\frac{\pi}{2}} L \cos \theta \cos \phi \, d\theta \, d\phi}{\left(\frac{\pi}{2}\right)^2} = \frac{4L}{\pi^2} = 0.405L$$

..... (式 6.4.1)

式中 L 為母體之邊長。

此係假設纖維均勻分佈於混凝土中，如纖維因結團而造成材料析離，則此效率降低。

6.5 骨材粒徑之影響

骨材一如纖維，於混凝土中具有多種功能，既是一種廉價的填充料，又是一種剛性，勁度及收縮拘限的主要來源。同樣的，骨材亦將排擠纖維，尤其大粒徑之骨材，更為明顯，由圖 6.5.1 可見粒徑影響之大了。此是骨材佔據混凝土的空間，而纖維又不能穿越骨材，相對地，纖維因骨材的排擠，而提高之單位體積的纖維數量，而導致纖維之易於結團。而又因為纖維之結團而造成粗顆粒的被排擠，而引發材料分離。此為 F.R.C 需採富配比及較小最大粒徑之骨材的理由。由圖 6.3.1，圖 6.5.1 可知骨材粒徑對工作性影響之大了。

6.6 骨材級配之影響

因骨材粒徑之大小，直接影響 F.R.C 之工作性。因此適用於纖維混凝土之骨材最大粒徑以 $\frac{3}{4}$ " 以下為宜，一般則建議採用較 $\frac{3}{8}$ " 為小之骨材粒徑，骨材之級配不單在粒徑大小的不同，更在量的差異。

舉ASTM C33之6.7.8等三種級配為例。大於 $\frac{3}{8}$ "之骨材分別佔有60%、45%、8%（以平均值論）不等。另圖示如圖6.6.1。由圖6.5.1可以清楚看出，大粒徑之骨材，迫使纖維擠於較小的空間，使同空間內之纖維密度大為提高，增加結團之機會，由圖6.6.1可知不單是骨材粒徑之大小，且數量上亦異。因此採用粒徑小之級配，對於施工性，拌合均勻性均有幫助。唯小粒徑之骨材，具有較大之表面積，此種又需較多的用水量及水泥用量。此為富配比較適於纖維混凝土之原因。

6.7 粗細骨材比之影響

粗細骨材比一如纖維體積比一樣，是一種量的問題，粗骨材比例高，使大粒徑之骨材佔有較多的空間，而迫使纖維擠向其他空間，造成材料分離及易於結團，如前所述。圖6.7.1說明，粗骨材含量越高對纖維混凝土之工作性越不利。

6.8 水灰比之影響

如同普通混凝土，纖維混凝土之強度亦與水灰比息息相關。低水灰比可提供較高之強度。水灰比主要影響強度，強度之發展隨水灰比之降低而遞增。由圖5.9.~5.9.11可以知水灰比影響之大了。

6.9 拌合方法之影響

纖維均勻分佈於母體中此點相當重要，此可在拌合過程中控制。拌合方法之好壞，與工作性、均勻性等有莫大關係。如何將易糾結，不易

親和的纖維均勻地分佈於混凝土內，將為提昇纖維混凝土技術的一大環節。尤其高纖維體積比的施工，更為一專門技術，它將是施工容易及提高強度的所在。因此在優良的配比之下，拌合方法亦應謹慎選擇。

6.10 齡期之影響

齡期之影響主要作用於強度方面，對工作性而言，通常不考慮。因施工係於新拌及流動之情況下進行，其齡期通常在30分鐘以內，而隨齡期之漸增其對強度之影響亦甚顯著。由圖 5.9.17～圖 5.9.23中可知水泥糊體水化硬固與日俱增，因此其對強度之影響，亦甚重要。但二十八天以後，由於強度發展正漸近飽和，其影響性逐漸下降。

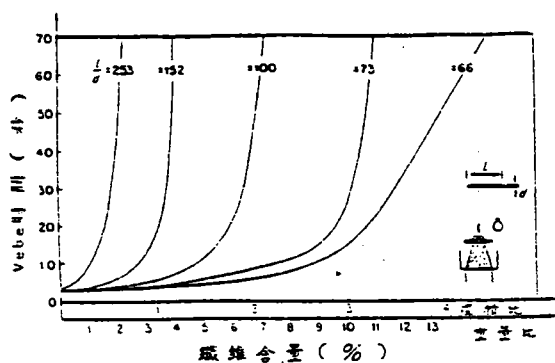


圖 6.1.1 纖維含量及長寬比與工作性之關係

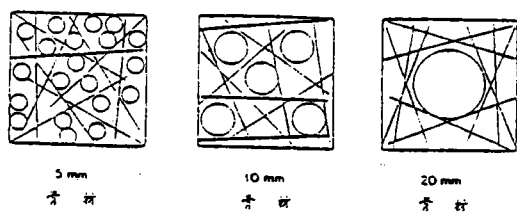


圖 6.5.1 不同粒徑對纖維分佈之影響

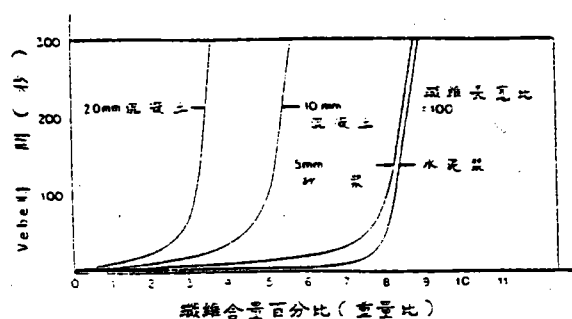


圖 6.3.1 纖維含量及骨材粒徑對工作度之影響

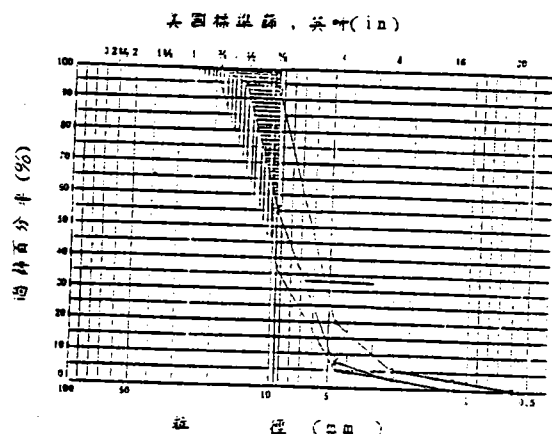


圖 6.6.1 不同級配大於 $\frac{3}{8}$ " 粒徑骨材之體積

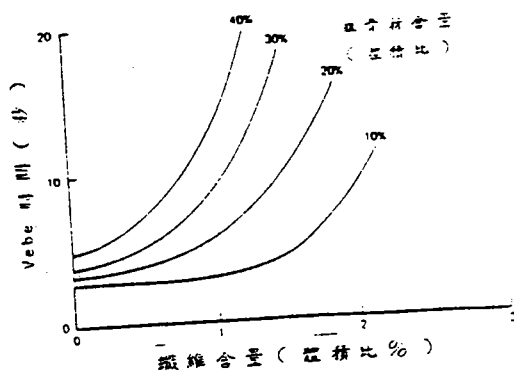


圖 6.7.1 纖維及粗骨材含量對鋼纖混凝土工作性之影響

七、結論與建議

林維明・蘇瑞榮

7.1 結論

本研究針對纖維摻入於混凝土後拌合而成之新複合材料之新拌與硬固等各項工程特性，進行探討，並歸納如下幾點：

(1)工作度

由於纖維之摻入，使得混凝土之工作性大為降低。纖維因表面積大，又具高不等稱性，轉動量小，拌合時易糾結成團，造成材料不均，尤其纖維之長寬比大，纖維含量高時尤然。另一方面纖維種類不同，其鋼性、吸水率亦異，如採用吸水率大，鋼性不足之纖維，將徒增施工困難。而混凝土之骨材粒徑及含量亦會影響纖維混凝土之工作性，骨材級配粗，含量高，將迫使纖維更易於糾結。採用吸水率低，鋼性足，適當長寬比之纖維與粒徑小，含量少之粗骨材級配，同時添加飛灰、爐石及強塑劑等摻料，必然可以製出高品質之纖維混凝土。

(2)空氣含量及單位重

由於纖維之比重不同於混凝土，因此當纖維摻入混凝土後，其單位重必然造成影響。且當纖維之比重大於混凝土時，纖維混凝土之單位重將隨纖維含量之增加而增加，但由於纖維之摻入，同時造成拌合不易，致使空氣含量提高，單位重將隨空氣含量之提高而減小。因此，纖維混凝土之實際單位重較不易估計，但大致上而言，纖維比重如約略等於或小於混凝土則其單位重將隨纖維體積比之增加而減小。估計纖維混凝土之單位重可應用式 4.2.1。

(3) 劈裂強度

纖維混凝土之劈裂強度因只取到初裂強度，因此纖維與混凝土偶合後之效益未及發揮，故其劈裂強度與普通混凝土約略相近。由此可知初裂以前之張力抵抗，主要來自混凝土，此可能導因於纖維與混凝土之相對變位甚小，使纖維之高抗拉強度無用武之地使然。由試驗結果顯示，纖維體積比雖對纖維混凝土之劈裂強度有些微改變，但不如水灰比影響之明顯。且如普通混凝土一樣，其強度隨水灰比之降低及齡期之增加而增加。

(4) 磨損試驗

鋼纖維之鋼性及耐磨性皆高出混凝土甚多。摻入高耐磨之鋼纖維，即提高混凝土之耐磨能力。由試驗結果顯示，纖維含量之影響較之水灰比之影響尤大。水灰比對於耐磨雖有影響，但其影響程度約為纖維含量影響程度之一半左右。由於纖維之價格昂貴，支出成本較高，調整纖維含量與水灰比，可得一較經濟之耐磨材料。除了鋼纖維之影響耐磨外，因摻入纖維造成孔隙量較多，由於孔隙無法抵抗磨損。抵消纖維之效應。緻密之纖維混凝土可以抵抗更高的耐磨損，因此增加工作性，提高材料品質亦為提高材料耐磨因素之一。

(5) 收縮試驗

混凝土因收縮或膨脹，引起體積不穩定，易造成非結構性裂紋之生成。影響美觀及工程品質。摻入高抗張強度之纖維，使複合材料具有較佳之抗張及抗剪強度，因而提高其拘束應力，減少因外在環境改變所引起之長度變化。試驗結果顯示，隨纖維體積比之增加，纖維混凝土之體積不穩定減小。且由於體積之穩定性增加，裂紋較小

，較細，因此其鋪面長度可以增加，減少伸縮縫之數量，提高服務品質。

(6)疲勞

纖維混凝土中混凝土與纖維界面間之握裹力，主要來自水化硬固之水泥糊體。水泥糊體之隕結性越高，材料強度即越高，而其受疲勞作用下，應力越不易疲乏，因此可以提高纖維混凝土之疲勞之限度，水灰比越低，其隕結性越佳，此為何以纖維混凝土之水灰比不同於普通混凝土，而具有影響力之故，試驗結果顯示，水灰比纖維體積比均對疲勞特性具有影響，低水灰比及高纖維體積比可以增加載重負荷或延長疲勞限度，此可能導因於纖維利用其高彈性模數及與混凝土界面之握裹力，吸收傳導並擴散多餘能量，另一方面因纖維之存在、材料之裂紋較細較少亦可提高材料強度，因韌性提高，促使其疲勞限度提高。

(7)抗壓強度

纖維混凝土之抗壓強度，約略與普通混凝土相等，且其特性表徵亦復與普通混凝土相同。本試驗所得之結論為纖維混凝土之抗壓強度與水灰比之關係較之纖維體積比為密切。如同普通混凝土一般，材料強度隨水灰比之降低而明顯提高。但與纖維體積比之變化關係不大。由試驗所繪之圖，可以看出，纖維體積比之增加有時反而導致抗壓強度之降低。由於纖維體積比越高，施工越不易，容易引起材料析離，造成材料不均，導致材料內部之微孔隙較多，因此受力作用之後，變形較大，材料強度則不明顯增加。

(8)抗彎強度

抗彎強度將隨水灰比、纖維體積比、纖維含量、長寬比、纖維種類包括吸水率及表面特性等差異而有不同。水灰比無疑的為最重要的影響因子，如同普通混凝土一般，水灰比為影響強度之最主要因子，同時亦為強度之主要來源。當水灰比降低，抗彎強度即提高。另外纖維體積比亦影響其抗彎強度。施工良好之纖維混凝土將隨其纖維體積比之增加而增加，但纖維體積比之影響不若水灰比影響之明顯，尤其當纖維體積比含量太低或太高時，其影響不大。另外纖維與混凝土間之偶合情況亦有影響，具有褶皺之鋼纖維因吸水率低且不參與水化，明顯地提高其韌性，為最有價值之纖維種類。鐵絲因表面平滑，韌性略嫌不足，而瓊麻及玻纖則由於其吸水率高，影響施工甚巨。本兩種纖維以應用在水泥漿或砂漿中較為有利。

(9) 韌性試驗

韌性將隨水灰比之降低及纖維體積比之提高而增加。而纖維則因其各種物理物性不盡相同，其影響程度亦異，具有褶皺之纖維提高之握裹力及摩擦剪力，均較表面平滑之纖維為佳，因此其吸收能量亦較多，具有較高之韌性，表面平滑之纖維，受力作用之後，由於柏松比效應使纖維受拉伸而減少與混凝土界面之偶合，造成纖維易被拉脫。除非再增加其纖維體積比，否則其韌性無法提高，褶皺之鋼纖維，不但表面積增加且受力作用之後，混凝土亦提供部份剪力，因此其韌性較佳。吸水率高之纖維因吸水膨脹，水化作用後，體積收縮，因此其與混凝土之握裹力降低，另一方面又因吸水後，纖維本身之強度亦降低，使纖維易被拉斷。另外，因纖維之鋼性不足，於拌合時，糾結成團，造成材料不均，亦為韌性不足之原因。因此選

擇良好之纖維，亦為提高韌性方法之一。

(10) 透水試驗

選擇良好之纖維易於施工，則纖維混凝土之透水特性，在可接受之範圍內。本試驗結果中，纖維混凝土之滲透係數隨水灰比之降低而降低，隨纖維體積比之增加而增加，但整個結果顯示，纖維混凝土之滲透係數皆屬於普通透水率，故其材料屬於普通透水率之材料。如欲減小其滲透係數，勢必從降低水灰比及纖維體積比兩方面著手，但因工程需要，無法降低纖維體積比時，可採用較低水灰比及添加摻料等方法來達成。諸如添加飛灰或爐石等摻料，改良施工性，並提供緻密性等。

(11) 熱傳導試驗

雖然鋼纖之導熱性甚佳，但拌合於混凝土中之體積比則甚小，另一方面由於孔隙量之增多，亦使得其作用不大。因此就材料而言，纖維混凝土屬於熱之不良導體。本試驗所得之熱傳導係數概在 0.84120 ~ 1.4338 之間。實際應用上，其熱傳性可視為與普通混凝土相同。試驗結果同時顯示，水灰比及纖維體積比等皆對熱傳導具有影響，只是其影響程度有限。

7.2 建議

- (一) 應用時以纖維之長寬比在 100 以下，長度在 20mm ~ 50mm 間，具有不平滑表面之鋼纖為最佳。
- (二) 纖維用量基於工作性及經濟性之考慮，其用量可在纖維體積比 0.75 % ~ 2 % 之間。

(三)粗骨材之級配以小於 $\frac{3}{8}$ " 最佳，若基於其他因素之考慮亦以不大於 $\frac{3}{4}$ " 粒徑之級配為原則。

(四)骨材中細骨材之用量在 50 ~ 100 % 之間。

(五)飛灰及摻料之使用，對於增加工作性或降低水泥用量，實有必要。

(六)應用前應先作配比設計，並對工作度、施工性及強度先行試驗。

(七)後續之研究應著眼於高強度纖維混凝土之研究，以符合材料發展之原則。

八、誌 謝

林維明

本研究承蒙榮民工程處中部地區施工處提供粗細骨材各十立方公尺，鋼纖維六十公斤，台電公司電研所協助拍攝各種纖維之SEM照片，台中港港務局承借養生室，空軍總部後勤署贈予桃園機場施工評估報告書乙份，及美國RIBBON纖維公司贈予鋼纖維一噸及繼興公司之協助，研究期間，承蒙國立台灣工業技術研究院黃兆龍教授，國立台灣大學高健章教授之指導及本組同仁之通力合作，使得研究工作得以順利進行，特此致謝。

本計劃協同主持人蘇瑞榮助理研究員，研究精神令人讚揚，帶領助理及技工臨工不眠不休地研究，本報告初稿除研究背景由本人主筆外，均由他完成，本計劃完成後他將另有高就，本人衷心感謝他的協助，也預祝他鵬萬里。

九、參考文獻

蘇瑞榮

- (一) ACI Committee 544 (1978) "Measurement of Properties of Fiber Reinforced Concrete." American Concrete Institute ACI 544, 2R-78 Detroit, 1978.
- (二) ACI Committee 544 (1982) "State-of-the-Art Report on Fiber Reinforced Concrete" Concrete International, ACI 544 1R-82, ACI Mich. U.S.A.
- (三) ACI SP-44 (1974) "Fiber Reinforced Concrete" International Symposium, Mich, U.S.A.
- (四) ACI SP-81 (1984) "Fiber Reinforced Concrete" International Symposium Mich. U.S.A.
- (五) Swamy R.N., P.S. Mangat, C.V.S.K. Rao (1974) "The Mechanics of Fiber Reinforced Cement Matrices" ACI SP-44, International symposium pp 1-28, 1974.
- (六) Sun Wei, J.A. Mandel, S. Said (1986) "Study of the Interface Strength in Steel Fiber-Reinforced Cement-Based Composites" ACI Journal No. 4 proceedings V. 83 July-August, 1986.
- (七) Young, J.F. (1981) "Concrete" Prentice-Hall, N.T. USA.
- (八) ACI Committee 544 (1984) "Guide for Specifying, Mixing, placing and Finishing Steel Fiber Reinforced Concrete" ACI 544, 3R-84, Mich. U.S.A.
- (九) Hanger, C.H. (1981) "Worldwide Fibrous Concrete Projects" American Concrete Institute Publication 1981.
- (十) Mehta P.K. "Concrete Structure Properties and Materials" prentice Hall, Inc. Englewood Cliff. N.J. 1986.
- (十一) Hannant (1978) "Fiber cements and Fiber Concretes" University of Surrey, Surrey U.K.
- (十二) Balaguru. P.N. V. Ramakrishnan (1986) "Fireeze-Thaw Durability of Fiber Reinforced Concrete "ACI JOurnal No. 3 proceedings V. 83. May-June 1986.
- (十三) Romualdi. J.P., J.A. Mandel (1964) "Tensile Strength of Concrete Affected by Uniformly Distributed and Closely Spaced Short Lengths of Wire Reinforcement" ACI Journal, June 1964 pp. 657-67.

- (四) ASTM C995 "Standard Test Method for Time of Flow of Fiber-Reinforced Concrete Through Inverted Slump Cone" Annual Book of ASTM Standards. Vol. 04. 02. 1984.
- (五) Cem-fil GRC "A Guide to Vibration Cast Premix GRC" Pikington Ltd. England.
- (六) ASTM C1018 "Standard Test Method for Flexural Toughness of Fiber Reinforced Concrete "Annual Book of ASTM Standards, Vol. 04. 02. 1984.
- (七) Eigington, J., D.J. Hannant and R.I.T. Williams (1978). "Steel Fiber Reinforced Concrete" Concrete CP69/74, pp. 154-175, The Construction Press, England, 1978.
- (八) 黃兆龍 (1984) "纖維加強混凝土介紹" 營建世界 Vol. 37. 10. 月份, 台灣。
- (九) 林維明 (1986) "纖維混凝土材料強度之研究與應用" 75 研(四)期中報告 港灣技術研究所, 1986 .
- (十) 黃兆龍、李鎮川 (1986) "混凝土添加強塑劑之效能研究" 台灣營建研究中心營建報告 T A R 7 5 1 0 3 , 75.8 月, 台灣。
- (十一) 陳振川 (1987) "特殊混凝土(二)纖維加強混凝土" 台灣營建研究中心, 混凝土施工技術研討會, 76, 2 月, 台灣。
- (十二) 高健章 (1981) "注膠鐵絲混凝土動態特性研究" 台大土木工程學研究所專刊, NSC 70-0201-E002-03 , 台灣。

十、附 錄

A.1 纖維混凝土現有研究文獻整理報告

林維明

本文為美國混凝土學會 ACI 544, 1R-82 報告譯文，主要目的在檢討以金屬、玻璃、塑膠及天然纖維加強之波特蘭水泥混凝土，其力學發展與拌合、配比、澆置、粉刷等技術之關係及實際上與將來可能之應用。

A.1.1 前言

①纖維混凝土之定義

水化水泥與骨材（細粒或細粒、粗粒均有）及不連續分散纖維做成之混凝土即稱為纖維混凝土，連續的網狀或編線之纖維及長條均不視為分散之纖維，圖 A.1.1 為鋼纖維斷裂面。

②纖維之定義

纖維由下列材料製成不同的形狀及尺寸：鋼；塑膠；玻璃；自然物。纖維以其長寬比表示，它的定義為纖維長度除以相當的纖維直徑*。一般長寬比均在 30 到 150 之間而其長度約為 0.1 到 3（0.25 到 7.6 公分）。⁺

圖鋼纖維由鋼線裁剪而得，平常直徑在 10 到 30mils（0.25 到 0.76 mm）扁鋼纖維之厚度一般在 6 到 16 mils（0.15 到 0.41mm），寬度在 10 到 35 mils（0.25 到 0.90mm），由裁剪鋼板或扁鋼線而得，亦有生產綑摺及變形的鋼纖維。

玻璃纖維（切斷）一般直徑 0.2 到 0.6mils （ 0.005 到 0.015 mm ），但均成束出現直徑約為 0.5 到 50mils （0.013 到 1.3mm）。

※相當之纖維直徑為該直徑所代表之面積等於纖維之斷面徑。

+ 本報告中所用公制（米）之值為由美國通用數值直徑換算而得。並不代表一般公制之範圍或尺寸，實際應用上應配合現況加以調整。

表 A.1.1 纖維一般性質

纖 維 種 類	抗 力 強 度 (k s i)	楊 氏 模 數 (10 ³ ksi)	極 限 伸 長 量 (%)	比 重
亞克力	30 ~ 60	0.3	25 ~ 45	1.1
石 棉	80 ~ 140	12 ~ 20	~ 0.6	3.2
棉 花	60 ~ 100	0.7	3 ~ 10	1.5
玻 璃	150 ~ 550	10	1.5 ~ 3.5	2.5
尼龍（高黏性）	110 ~ 120	0.6	16 ~ 20	1.1
多元酯（高黏性）	105 ~ 125	1.2	11 ~ 13	1.4
聚乙烯	~ 100	0.02 ~ 0.06	~ 10	0.95
聚丙烯	80 ~ 110	0.5	~ 25	0.90
耐龍（ Rayon 高黏性）	60 ~ 90	1.0	10 ~ 25	1.5
岩絲（ Seandinavian）	70 ~ 110	10 ~ 17	~ 0.6	2.7
鋼	40 ~ 600	29	0.5 ~ 3.5	7.8

$$1 \text{ ksi} = 70.31 \text{ Kg f / cm}^2$$

正常塑膠製成之尼龍，爲元酯、聚乙烯、聚丙烯、耐龍、纖維直徑約爲 0.8 到 15mils (0.02 到 0.38mm)

自然纖維如石棉或棉花尺寸之範圍甚廣。

不同種類纖維之部份性質列於表 A.1.1。

圖 A1.2 爲不同尺寸及形狀之鋼纖維，圖 A.1.3 爲玻璃纖維。

③纖維發展之歷史沿革

古代已利用纖維加強脆性的材料，稻草用於土磚，馬尾用於石膏，以及晚近石棉之用於波特蘭水泥，本世紀初以來在混凝土中加入鋼絲片段或金屬片獲得的專利權者亦不少。十九世紀中葉以來即在拉力區加以補強桿克服混凝土之低拉力及脆性。

1950 晚期 Romualdi 和 Batson¹ 及 1960 初期 Romualdi 和 Mendel² 就密排鋼絲及隨意置放纖維的研究，及成爲依據纖維間距⁴ 所取得專利之根本，1950 晚期 PCA 開始研究纖維混凝土⁵，1972 年⁶再有以長寬比及握裹力爲依據之專利出現，1960 早期進行了不少的塑膠纖維的混凝土試驗^{7,8}，其中有配合使用鋼筋及鋼筋網者，而在美國^{7,9}及英國^{10,13}蘇俄¹⁴有人於 1950 初期即已進行玻璃纖維的試驗，1960 中期已有纖維混凝土應用於道路及樓版，耐火材料，及混凝土製品。

美國主要的試驗，均利用鋼纖維與普通重量骨材及波特蘭水泥爲結合物，本報告只是一個雛形，使母體獲得高度握裹特性之配比方法正在發展中，拌合澆置、搗固及粉刷的方法已有相當的發展，特別是鋪面工程，鋼纖維混凝土極難搬運還需要比現有混凝土施工過程

更精密的規劃及工人素質，現階段製造搬運一些混凝土機械之操作可以或不可以適用纖維混凝土，視拌合條件而定。

A.1.2 纖維混凝土之力學性質

當纖維混凝土承受撓力時，通常如圖 A.1.4 之荷重變形圖呈現兩個階段。在 A 點之前大致上可視為線性的，超過 A 點後，圖形很明顯地變成非線性，而於 B 點開始下降，相當於 A 點之荷重或應力稱為“初裂強度 (first creak strength)” “彈性限度 (elastic limit)” 或 “比例限度 (proportional limit)”，而 B 點之強度則稱為極限強度 (ultimate strength)。

在一拌合中，纖維含量、纖維形狀及纖維之分佈對纖維混凝土之性質來說非常重要。換句話說，影響強度、耐久性及工作度的因子（水灰比、空氣含量、密度等）同樣影響纖維混凝土之性質¹⁵，而影響握力的因素，同樣影響纖維混凝土之強度性質，預測纖維混凝土之“初裂強度”或比例限度主要有二個機構，其一設定初裂強度與纖維間距的關係，另一為比例限度與纖維體積，方向性及長寬比之關係，纖維間距機構係依據線性彈性力學觀念及纖維之裂縫阻止行為，另一機構則依據合成材料混合理論³，將分別於①及②節中闡釋。一般均認為極限強度極易受纖維間距（視體積而定），長寬比及握裹特性所左右，將於③節討論極限強度及韌性。

①間距觀念

內部結構有缺陷之混凝土或砂漿強度可藉由增加斷裂韌性，減小缺陷尺寸，或減少內部裂縫尖端之應力強度，獲得改善。

Romualdi 和 Batson¹ 利用緊密排列之鋼絲作為裂縫阻止器，降低應力強度以增加砂漿之抗力強度，圖 A.1.5 示理論的初裂擴張應力與鋼絲間距在固定之應力強度下不同體積比之關係。

Romualdi 和 Mandel² 更表示緊密排列之鋼絲可由直接拌合短纖維於砂漿中取代，其結果示於圖 A.1.6，以強度比（纖維混凝土之初製強度比素混凝土開裂強度）與纖維間距之關係表示，隱含圖 A.1.5 之平方根倒數關係。

Snyder 和 Lankard¹⁵ 試驗結果示於圖 A.1.7，亦說明纖維對初裂強度之影響，其試驗之纖維含量均為體積比 2%，不同之間距依下列公式由纖維直徑而定²。

$$S = 13.8 d \sqrt{\frac{1.0}{P}} \dots\dots\dots(1)$$

式中 S 為纖維形心之間距，d 為纖維直徑，P 為體積百分比。

Snyder 和 Lankard 的試驗結果同時顯示對纖維長度與纖維間距有同樣之靈敏反應。

Mikee¹⁶ 所導引之式子與(1)式略有不同，列如下式

$$S = 3 \sqrt{\frac{V}{P}} \dots\dots\dots(2)$$

式中 V 表示單一纖維之體積，而 P 為砂漿中纖維之體積百分比，式(1)與式(2)比較如圖 A.1.8。

②複合材料觀念

荷重持續增加於素砂漿或素混凝土樑時，拉力區產生之裂紋即刻使樑破壞，在此應注意混凝土之開裂並不是一個突發的現象，仔細的

觀測發現，使樑破壞之開裂是由小裂紋慢慢成長導至的^{17,18}。

纖維混凝土的比例限度，定義指出該材料該荷重下呈現線性彈性，在此限度以下母體之裂紋可以忽略不計，荷重與變形關係曲線大體上在比例限度下仍為直線，因此可以假定素混凝土與纖維在此荷重下均呈現彈性性質，此荷重限度有時亦稱為合成材料之彈性限度或初裂強度。

鋼的彈性模數約為素混凝土之10倍，增加鋼纖維之體積即提高荷重—變形曲線上偏離線性荷重之點，當然，如果鋼纖維是以任意方式分佈，其影響勢必小於傳統連續等量之鋼筋，以平常使用之纖維體積對比例限度或“初裂強度”之影響並不顯著，表A.1.2。加入體積4.6%之纖維僅使彈性限度由920 psi上升到1060 psi（64 ~ 75 Kg f/cm²），但是最大荷重則超過一倍有餘，從表上亦可見到增加纖維體積，比例限度亦成比例增加，某些研究人員亦發現合成材料的“初裂強度”在纖維體積增加到4%時，考戲撓曲^{3,20}，考戲拉張²⁰及考慮壓縮^{16,21}，其影響均甚小且為線性。

纖維對合成材料彈性性質影響的近似觀念，可以下式表示：

$$E_c = E_f V_f + E_m V_m \quad \dots\dots\dots(3)$$

式中 E_c 、 E_f 及 E_m 分別表示合成體、纖維及母體之彈性模數， V_m 為母體之體積成份， V_f 為纖維體積成份依隨機性修正後所佔之比例。

方程式(3)祇適用連續纖維、彈性材料，而纖維與母體之間無滑動之合成體，但纖維均有一定的長度且在到達比例限度之前已有細微裂縫，纖維之握力解除等結果，本方程式僅能視為纖維混凝土之彈性係數及比例限度之上限，有部份試驗支持此一觀點^{3,21,22}。

有些理論推導式用來測定纖維方向對合成體彈性性質之影響，有效係數定義為全部體積對某一方向有效作用之比例，從 17 %²³，41%² 至 80 %²⁰，由於缺乏試驗數據，任何推導之理論尚在存疑之中。

表 A.1.2 纖維混凝土之強度*

纖維體積百分比	比例限度 (psi)	最大荷重 (psi)
0.0	920	920
4.60	1060	1930
5.32	1200	2290
7.80	1600	3140
8.80	1860	3960

※參考資料 19，樑斷面為 $1.5 \times 6.0 \times 22.0$ in，纖維直徑 17 mils 長度 15 in。

③極限強度與韌性

圖中之荷重—變形曲線在 A 點以後即變成非線性並達到最高點 B，極限強度與一般鋼筋混凝土不同，纖維混凝土最大荷重由纖維緩慢拉出決定，而纖維中之應力遠低於纖維之降伏強度，極限荷重以後變形增加所增加之荷重減小程度，纖維混凝土比素混凝土小很多，一根完全斷裂樑所吸收之能量，纖維混凝土幾為素混凝土之數倍，吸收之能量使握力解除，纖維拉長，影響的程度由纖維本身之應力—應變曲線決定，纖維

混凝土之極限強度依纖維體積比及型態比而變，雖然有關纖維混凝土的性質均以梁的方式進行研究，但纖維的影響仍可約略地應用於軸拉力及軸壓力的情況，在延性或韌性方面受壓力之纖維混凝土較素混凝土有相當可觀的增加，此可由應力—應變圖較平緩下降之段得知²¹。

在撓曲之最大荷重下，母體斷面有部份已開裂，部份纖維之握力可能已解除，在目前尚無法合理的推斷纖維混凝土之極限強度，不過根據實驗及理論可推演出一個經驗公式。

影響極限荷重之二個最重要因素分別為纖維的體積比及其長寬比。還有，業經證實如果沒有纖維的分離現象，增加纖維的體積比即可接近比例地增加合成體的強度⁵。同樣地，在長寬比 150 以內，增加長寬比可比例增加最大荷重³。根據上述觀察，合成體之極限強度為

$$S_c = A S_m (1 - V_f) + B V_f \frac{L}{d} \quad \dots\dots\dots(4)$$

式中 S_c 及 S_m 為合成體及母體之應力值³， L 表示纖維之強度， d 為纖維之直徑， A 及 B 為常數可由繪製合成體強度與 $V_f L/d$ 之關係求得，美國鋼鐵公司未公佈之資料，示於圖 A.1.9 與(4)式吻合。

(4)式右邊第一項代表母體在最大荷重之貢獻， A 值之最大值為 1， B 值則受纖維與母體之握力及纖維的分佈性影響，握力愈高及在受力方向纖維之排列愈佳，則 B 值愈高， B 值之單位與 S_c 及 S_m 相同，本式只適用於破壞是因纖維握力解除而發生者。

韌性的定義為試體完全斷裂之前吸收的總能量，該能量可由計算完整之拉力（壓力）之應力—應變曲線下之面積或撓曲荷重變形圖下之面積表示（見圖 A.1.10）吸收之能量亦可由衝擊試驗求得，很明顯

地韌性因荷重之型式及速度有所不同。

素混凝土中韌性與裂紋成長有關，混凝土比純水泥漿之韌性大，因為混凝土中骨材的存在使微裂紋有較廣面的發展，在纖維存在的情況下，裂紋之伸展必須拉伸纖維及解除其握力，結果在完全破壞該材料之前須投入相當多的能量，纖維混凝土之韌性至少為素混凝土之數倍²⁴⁻²⁶。添加纖維可以大幅增進韌性（見圖 A.1.10）。

有關纖維混凝土或素混凝土韌性的數值資料很少，但可很合理地斷言影響最大強度之因子亦必影響韌性，此類因子有纖維的方向性，纖維之體積比、纖維的長寬比，另外纖維本身的應力—應變曲線亦影響吸收之總能量，韌性的增加，可參看未處理之高強度纖維徑很大（annealed）處理後的性質，其結果可能是因為纖維拉伸吸收部份的能量。

A.1.3 纖維混凝土之製作

①拌合

纖維混凝土之拌合方法甚多，如何選擇因工作需要及可用設備而定：有場拌、預拌或實驗室內小量之手拌等，最重要的是使纖維均勻分散而不發生纖維之分離及結球。

拌合中產生分離及結球現象的原因很多，其中以長寬比為最重要，其他的原因有體積百分比、粗骨材尺寸級配及數量、水灰比及拌合方法，增加長寬比、體積百分比及粗骨材尺寸及數量有增加結球的傾向。

為求拌合均勻，圓鋼絲及扁條鋼纖維之長寬比最大為 100 左右，

即使如此鋼纖維在超過體積 2 % 時已很難拌合，一般之配比設計可應用於纖維混凝土，唯因工作度及空間狹狹的關係，粗骨材尺寸不要超過 $\frac{3}{8}$ "，或只使用砂。

耐火混凝土中加入鋼纖維或因為高氧化溫度而使用不銹鋼纖維，含量在 1 $\frac{1}{2}$ 到 2 % (體積)，亦可用相同的拌合方法。

吸水率的不同，拌合用水量視纖維的型式和特性而定，鋼纖維會使塌度因體積比增加而減少。

拌合物的塑性是使纖維分散的重要特性，依經驗，水灰比在 0.4 到 0.6 之間，水泥用量為每立方碼 550 磅到 950 磅 (249 到 430 Kg / cm^3) 才有足夠的漿量包住纖維廣大的表面。

表 A.1.3 為纖維混凝土配比的一個例子。

纖維混凝土中亦使用一般之填加劑作為空氣輸入、減水劑、縮變控制。

新近研究顯示使用飛灰可降低水泥用量²⁷。工作度增加且對撓曲及壓力強度無不良的影響，但對其他品質的影響則尚未明瞭，表 A.1.4 為有飛灰的配比例子。

表 A.1.3 普通重纖維混凝土配比範例

水 泥	550 / 950 磅 / 立方碼
水 灰 比 W / C	0.4 ~ 0.6
骨 材 砂 量	50 ~ 100 %
最 大 粒 徑	$\frac{3}{8}$ in
空 氣 含 量	6 / 9 %
纖 維 含 量	0.5 ~ 2.5 % (體 積) (鋼 1 % = 132 磅 / 立方碼) (玻 璃 1 % = 42 磅 / 立方碼) (尼 龍 1 % = 19 磅 / 立方碼)

表 A.1.4 含飛灰纖維混凝土配比範例

水 泥	490 磅 / 立方碼
飛 灰	225 磅 / 立方碼
水 灰 比	0.54
骨 材 砂 量	0.5 %
最 大 粒 徑	$\frac{3}{8}$ in
鋼纖維含量 (0.01×0.022×1.0in)	1.5 % (體 積)
空氣輸入劑	製造商說明書
減 水 劑	"
塌 度	5 ~ 6 in

纖維混凝土配比設計的步驟與普通混凝土相同，依經驗所得之配比，如表 A.1.3 及表 A.1.4 可做為試拌，然後再調整纖維含量及混凝土組成分，配比選定後最好再實際全量拌合，而後使用於工程上，拌合纖維在內主要考慮重點為工作度及容易倒出澆置。

②拌合方法

纖維均勻分散於母體中是很重要的事項，它可以在拌合過程中控制，最好在加入拌合水之前，試驗室的小量拌合可採用篩入，大量的鋼纖維類的拌合，採用拌合工場或預拌車，較佳的拌合程序，排列如下：

1. 在進入拌合機之前先混合骨材與纖維，利用輸送帶或料槽，然後再依正常步驟進行。
2. 在拌合機內混合粗細骨材，而後依拌合速度（標準為 12rpm）加入纖維，最後同時加水泥及水或先加水泥再加水及填加物。
3. 加纖維於先進入之骨材及水，再加水泥及剩餘水量。
4. 加水於先進入之所有其他材料。

目前纖維均是 40 磅一包裝，便於手搬運，此種包裝可以方便傾入預拌車內，通常尚需將因搬運緊密的纖維，加以翻鬆，以手將纖維置入緩慢移動的輸送帶是可行的。以振動桌或槽使纖維經過 4 × 4 in 到 3 × 3 in (10 × 10 cm ~ 8 × 8 cm) 進入輸送帶亦可以，在此要強調纖維置入的方法一定要在工作試拌時試做。注意糾結的纖維避免進入拌合，圖 A.1.11 為鋼纖維進入輸送帶的情形。

以目前使用人工加入纖維的工人應配備下列安全裝備：

1. 防護手套。
2. 三戟叉—最好 12 到 18 in (31 ~ 46 公分) 長的手把。

3.護目鏡。

4.長桿（用以清除攪散阻塞於出口的結球纖維）。

大量拌合合成纖維的經驗不多^{7,8,25}。小量的試驗室拌合，纖維可以小量地置入拌合鼓中，同樣的方式可用於大量拌合，但最好將纖維吹入拌合機內，亦可在稱量斗內分散置入再以輸送帶送入拌合機，水泥及水後加，拌合時間與一般混凝土相同。

至於玻璃纖維較不易結球，則可採用下列步驟：

- 1.試驗室拌合，不必經由篩入玻璃纖維可以直接加入已有各種材料包括水在內之拌合鼓。
- 2.工場或預拌車，遵循一般的步驟，最後再加玻璃纖維，玻璃纖維可以直接傾入或吹入。

③澆置

纖維混凝土一般需要較多的振動使其在模板內搗固，適當控制的內部振動雖可使用，通常喜用外模振動法以避纖維分離。纖維的特性使得使用勻鏟變成很困難，可用一般方法鏟平，如木製刮板、裝振動器之木板或滑動鋪面機，人行道鋪面機等均可。

可用鐵鏟刀、管狀鏟、及電動旋轉鏟粉刷纖維混凝土，以硬刷子輕刷表面可造成特殊質感，但應等待不致於拉出纖維之後才施工。當然“汗珠”式的粉刷亦可由熟練的粉刷工人施做，勿使用鋼狀麻袋拖曳，因它會將纖維鉤住，纖維混凝土之養治及維護方法均與普通混凝土相同。

纖維混凝土的標準品質控制試驗方法（塌度、空氣、密度及強度試驗），此類方法是為普通混凝土而定，可能會有誤導，塌度在有

鋼纖維存在的情形下，有很明顯的減少，如圖 A.1.12 所做的比較。

固定模及滑動模的道面鋪設機會用來澆置纖維混凝土⁶。

以壓縮空氣或幫浦輸送低纖維含量的纖維混凝土亦很成功²⁸。

例如在較厚的桿或樁可用旋轉方式搗固，而在薄片或版則可用噴吸方式達到搗固的功能。

A.1.4 材料一般性質

①靜態強度

以體積含量約 4 % 的鋼纖維加入普通混凝土可提高它的“初裂撓曲強度”約 2.5 倍^{7,8,15,23}，同時抗壓強度也有些微上升^{8,24}，使用量為體積 3 % 時，劈裂強度約提高 2.5 倍²，1.5 % 時約 2 倍²⁹。砂漿以 1.5 % 鋼纖維加強其直接拉力強度約提高 1.4 倍²⁹。

以 2 到 16 %（體積）的石棉填加可使水泥漿撓曲強度增加 1.6 倍³⁰。石棉對健康有嚴重妨碍，必須有完善的措施保護工人的安全。

有很多玻璃纖維加入波特蘭水泥的研究成果^{10-13,30}。但主要的困難為水化水泥的高鹼性會侵蝕玻璃纖維，解決的方法為發展抗鹼性的玻璃纖維¹⁰⁻¹³及被覆^{7,9,31}。

塑膠纖維如尼龍、聚丙烯、聚乙烯可不受混凝土浸蝕，一般不認為它對靜態強度有所助益^{7,8}。不過，較多的尼龍、聚丙烯可增加彎曲及衝擊強度¹⁷。

易受鹼性浸蝕的纖維，如棉花、耐龍、亞克力及多元酯，發現對波特蘭水泥製品加強的效果不佳。

②動態強度

各種纖維混凝土的動態強度及受爆炸、墜落、動態拉力、動態壓力均已量測過。纖維混凝土的各種不同荷重的動態強度均為素混凝土的 5 到 10 倍，需要較多的能量將纖維撕裂或拉出，因而發揮衝擊強度及抗拒爆裂或破碎^{7,8,10,25}的特性。

③疲勞強度

關於鋼纖維混凝土的疲勞已做過甚多的試驗，只是試體大小，荷重條件及疲勞定義頗不一致。大體說來鋼纖維量增加疲勞強度亦增加。

纖維混凝土的疲勞強度大致為：無反向荷重 2 到 3 % 體積鋼纖維混凝土荷重頻率為 2×10^6 時，約為初裂強度之 90 %，荷重頻率為 10×10^6 時約為 50 %^{16,32-34}。而在反向荷重頻率為 2×10^6 時，約為初裂強度之 73 %³⁵⁻³⁶。

疲勞以後，同樣的梁的靜撓曲強度約為未受疲勞試驗者的 10 到 30 %，其理由之一可能是因為反覆荷重減低了初期殘留拉應力，殘留拉應力乃因加速潛變造成母體縮變引起的。

④潛變

有限的試驗資料¹⁶顯示鋼絲纖維對波特蘭砂漿的潛變沒有明顯的影響。膨脹性砂漿以鋼纖維加強有助於早期無荷重潛變，稱為“預潛變”。

⑤鋼纖維的腐蝕

有一個研究顯示經 90 天交替浸漬飽和鹽水的 2 % 體積鋼纖維混凝土，並無腐蝕，亦未影響其撓曲強度³⁷。

⑥導熱性

體積比 0.5 到 1.5 % 的鋼纖維混凝土於大氣壓下的導熱係數僅有

少許的增加變化³⁸。Battelle Memorial Institute, Columbus, Ohio 未發佈的資料指出體積比的鋼纖維砂漿於真空狀況下溫度 120° C 到 -20° C (248 ° F 到 -4 ° F) 之間導熱係數增加 30 %。

⑦磨損抗性

美國鋼鐵公司未發佈之資料指出含量 2.5 % (體積) 的纖維混凝土版 (以豌豆大的石粒為骨材) 要比普通混凝土 (礫石為骨材) 的磨損深度少 27 %。試驗方法為修正的 NBS 磨損機。

纖維混凝土及普通混凝土的表面磨損及浸蝕有用噴砂及電動鋼刷³⁹ 的方式模擬過。

⑧滑動摩擦抗性

用模擬滑動試驗³⁹。比較纖維混凝土和普通混凝土的靜態摩擦、滑動及滾動阻力，纖維混凝土的最大尺寸為 $\frac{3}{8}$ in。試驗結果顯示未受磨損、浸蝕、老化的乾燥表面，靜摩擦係數與鋼纖維含量無關經模擬之磨損浸蝕後之表面，不論乾燥、潮濕或結凍纖維混凝土之滑動和滾動阻力，均較普通混凝土高 15 %。

A.1.5 應用

纖維混凝土的應用為設計者的創意及建築界的眼光，能否利用它的靜態動態拉力強度，高能吸收特性及疲勞強度，均勻分散的纖維使它具有等向性以別於普通混凝土。

目前應用鋼纖維混凝土於耐火材料，鋪面、加鋪、補襯、防波堤之消波塊，以及礦坑的內襯等方面^{6,40,41}。

結構單件：纖維混凝土用的最多的便是鋪面及加鋪，可以增加強

度，減少裂紋及減少厚度。例舉四個新近的工地實例於下：

1. 於美國陸軍水道試驗站，Vicksburg, Miss 於1971年6月到10月間由美國陸軍工程施工研究室執行試驗工作的跑道採用2%體積的鋼纖維，承受 C5 A 輪壓⁴⁰。試驗資料分析在同樣輪壓之下厚度可為普通混凝土之半。
2. 於 Tampa 國際機場的滑行跑道於1972年2月採用滑模鋪道機施工⁴⁰。配比為1.5%（體積）波特蘭水泥及飛灰，最大粒徑 $\frac{3}{4}$ in（1.9 cm）分成4 in（10 cm）及6 in（15 cm）兩種斷面主要供波音727使用。結果6 in 的斷面僅產生如髮絲的裂紋，未起作用，而4 in 的斷面裂縫寬度為 $1/32$ 到 $1/16$ （0.8到0.4 mm），頗有作為。圖A.1.13為Tampa國際機場以鋪面機加鋪的照片。
3. 1972年10月Ceder快速路，Iowa 加鋪於住宅區街道、高架管、及機場滑行道。
4. 1972年10月，Defroit, Mich，某一高流量的主要街道上長1093呎（333 m）厚3 in（8 cm）纖維混凝土加鋪。纖維含量分別為0.8%及1.5%，鋪面48小時後就開放交通。

試驗室的觀察指出鋼纖維可以代替構架、梁、平版的剪力箍筋¹⁶，

⁴²。鋼纖維混凝土的延性允許超過荷重條件下的塑絞產生。

纖維亦可加在預鑄、預力及場鑄混凝土特定的範圍內 Paul 在 Illinois 大學使用低比例的鋼纖維約0.25%，於預力混凝土橋梁以獲得最小的允許拉力強度而減低次要鋼筋的用量。

混凝土管中使用鋼纖維以減少或增大鋼筋的作用正在研究中。

纖維混凝土反應壓力容器可以減少鋼筋的擁擠，及提高拉力強度

，並對裂紋有較佳的控制。

防爆結構：混凝土做的防爆結構設計要求能抵抗爆炸引起之壓力波。爆炸波使結構物產生壓、拉、剪等複雜的應力；以纖維混凝土配合傳統的鋼筋混凝土或可提供必要的強度^{25,43,44}。纖維混凝土在這方面的應用主要是它的兩大特性：纖維的等向加強作用及初裂以後的延性。

受振動及晃動的機械基礎或可以纖維混凝土改善。

耐火材：溫度達到 2900° F (1595° C) 時可使用不銹鋼纖維⁴⁵較低溫 1000° F (537° C) 可以使用碳鋼纖維，水泥窖及開爐的門使用情形良好。即使在高溫側的纖維已經完全通紅，對阻止大裂紋產生及防止爆裂乃有相當的績效。向低溫側擴張的裂紋受到殘餘纖維的牽制使襯面不致完全裂透。

薄殼及牆：整體性均勻分佈的纖維提供的等向性強度，使平版及曲版結構更薄，因而減少此類結構體重量，較薄較輕的牆不久將來即可出現¹⁹。

美國農業部的低價住宅^{40,47,93}，利用乾砌混凝土塊疊砌，而在牆的兩側以玻璃纖維混凝土粉刷，如圖 A.1.15。

海洋結構物：海岸構造必須防止乾濕交替造成的腐蝕及衝撞，經以纖維混凝土控制裂紋或可減少腐蝕，圖 A.1.17，防波堤護石、雙丁塊，為鋼纖維混凝土。纖維混凝土的能量吸收特性增加抗衝撞強度。其他可能應用的地方有水下儲存構造，水邊倉儲樓板、碼頭地面等，纖維混凝土極易塑造成複合曲線，可應用在船殼的製造方面。單獨使用或與鐵絲網水泥砂漿配合使用。圖 A.1.14 為應用於噴射之鋼纖維

混凝土用以穩定邊坡。圖 A.1.16 為玻璃使用於房屋建築之情形。

A.1.6 研究方向

纖維材料種類繁多，配合的材料、方法也有數種及本身正在萌芽階段，研究產品的發展很明顯地是主要的方向。構造上需要使用大量時纖維的製造較送處理的經濟性，成為拌合場及營造廠應認真考慮的事。

設計方法，更可能為修正已有設計方法及規範，使工程師能設計及訂規範。

訂定標準實驗方法，以便達到品質的要求，同時個別的研究員可以重製試驗結果，並將資料與別的研究員相溝通。

基本研究有兩個目標。第一，提供更多的物理性質建立各種不同纖維混凝土的合理設計步驟。第二，基本的纖維混凝土顯微及巨象細節研究與其力學、熱及電特性和環境對物性的影響都很需要。

纖維及混凝土之間握力的瞭解使纖維拉斷而非拉出，新近有些研究指出注膠纖維混凝土強度及握力均有改善。

有數位研究學者^{7,8,10,11,14}均控制玻璃纖維在鹼性的水泥及混凝土的耐久性問題。使用有機被覆^{7,9,31}。低鹼水泥^{11,14}，及抗鹼玻璃纖維都是克服的方法需要更深入的研究玻璃纖維混凝土長期的耐久性。

鋼纖維混凝土對凍融的抵抗，暴露於溶水鹽，特別是裂紋產生後等的耐久性尚未明瞭。



圖 A.1.1 鋼纖維混凝土斷裂面



圖 A.1.2 不同尺寸及形狀之鋼纖維



圖 A.1.3 玻璃纖維

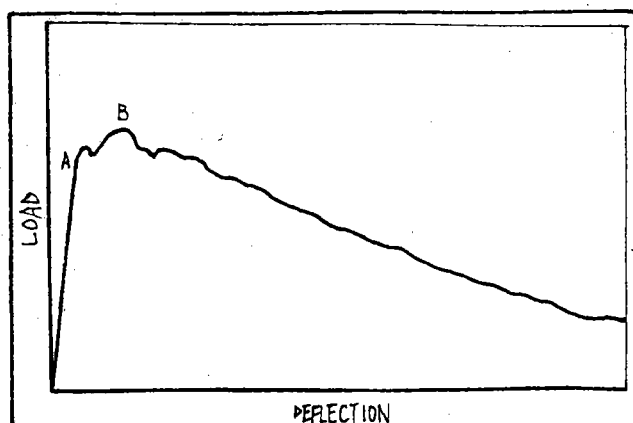


圖 A.1.4 荷重變形關係示意圖

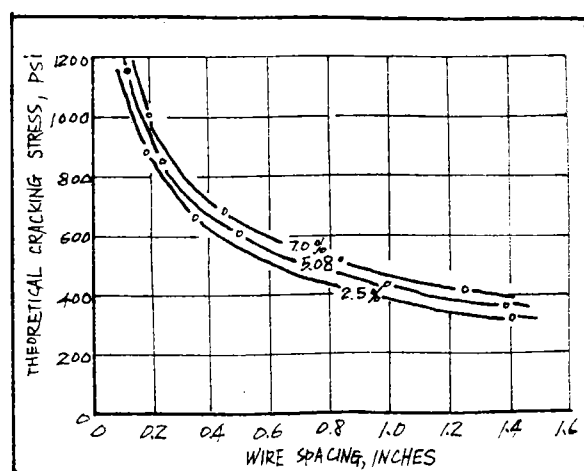


圖 A.1.5 理論之拉力龜裂應力與纖維間距之關係

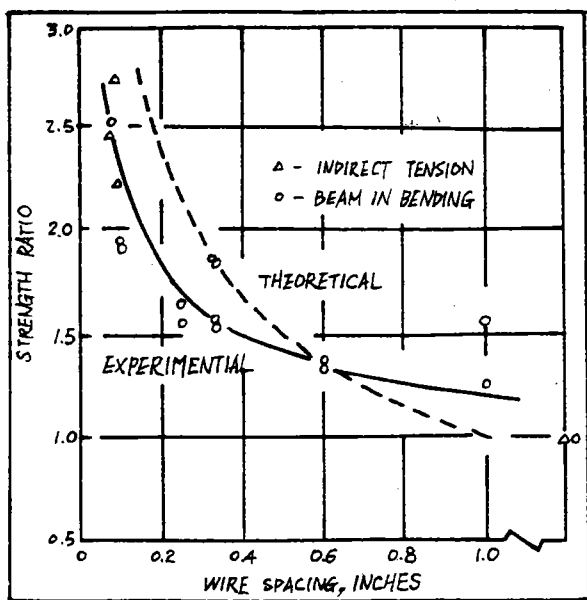


圖 A.1.6 強度比與纖維間距之函數關係
理論與實驗值比較

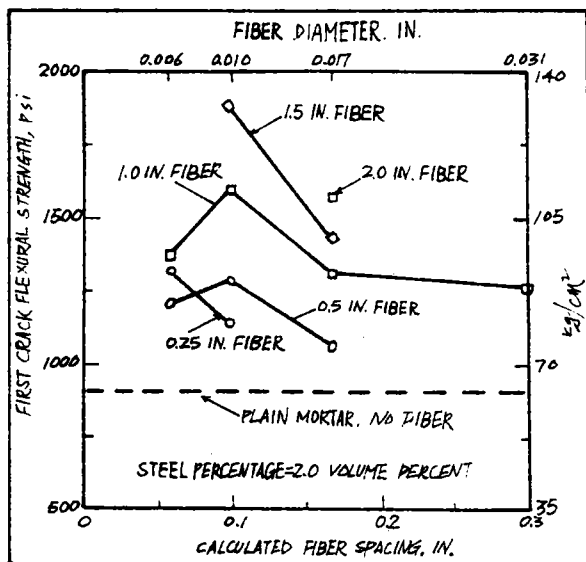


圖 A.1.7 間距對纖維砂漿初裂強度之影響

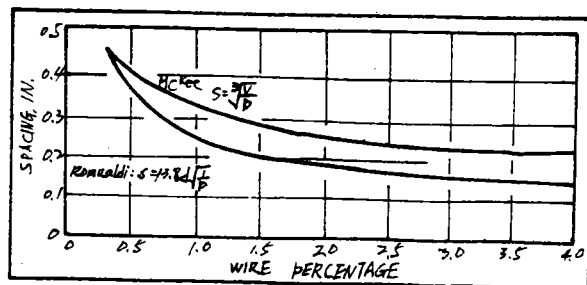


圖 A.1.8 間距與纖維體積比之關係

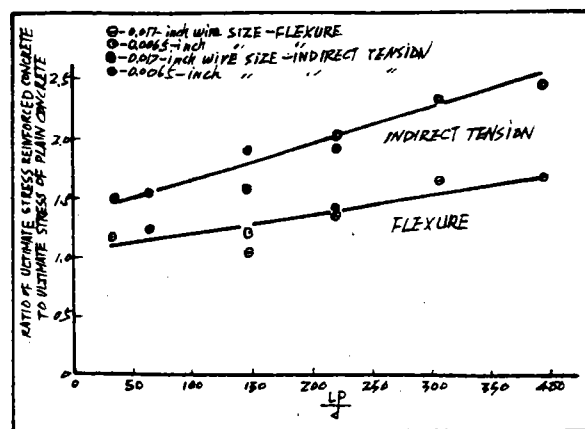


圖 A.1.9 極限強度與 L_p/d 成直線關係

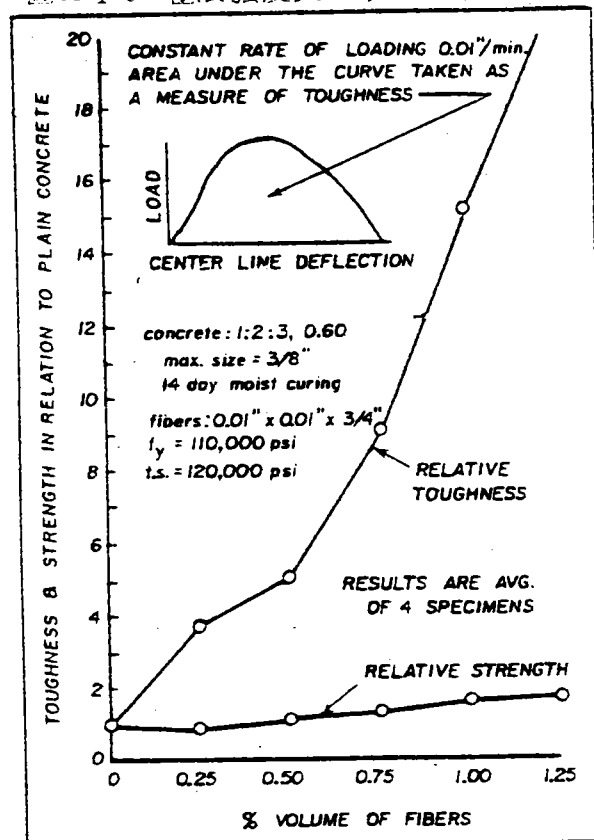
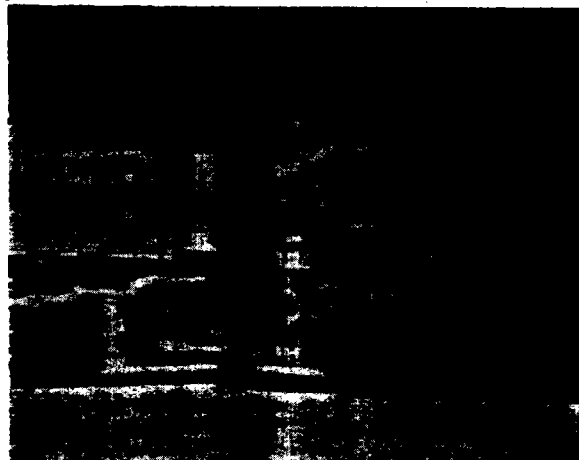


圖 A.1.10 受撓曲下纖維體積對韌性之影響



A.1.11 拌合場內加纖維情形



圖 A.1.12 由於填加纖維坍塌度之變化

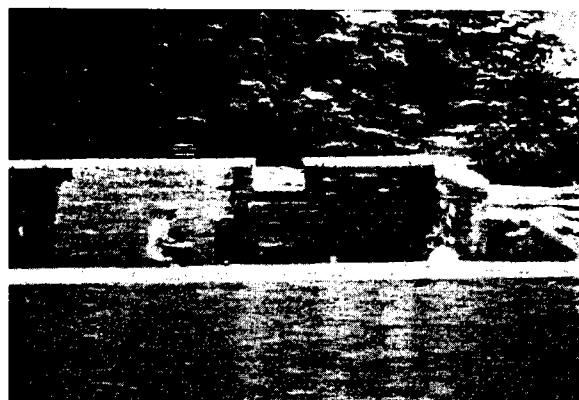


圖 A.1.15 乾砌混凝土塊以玻璃纖維
混凝土粉刷兩面黏結

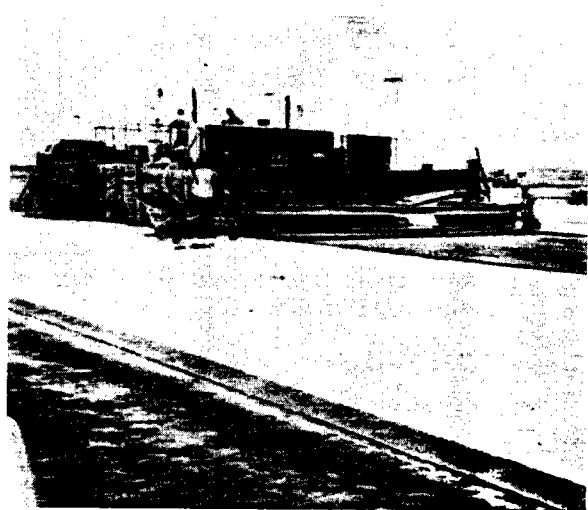


圖 A.1.13 Tampa 國際機場以滑棋舖面機
鋪設鋼纖維混凝土

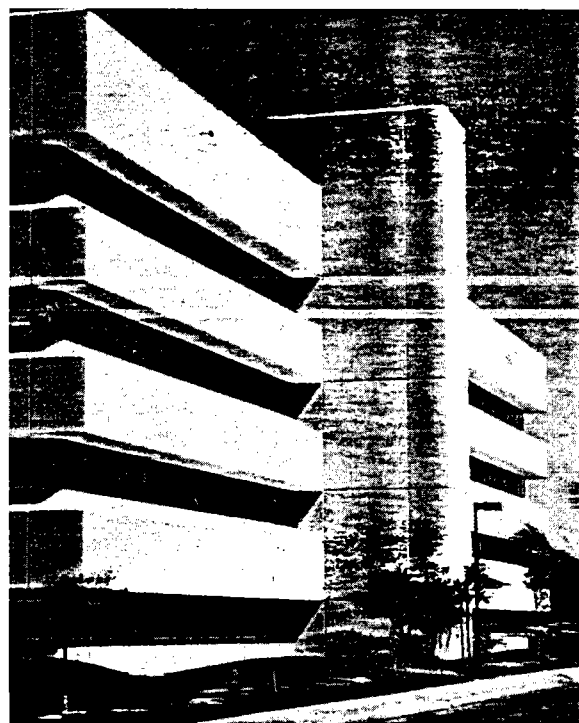


圖 A.1.16 使用玻璃之房屋建築

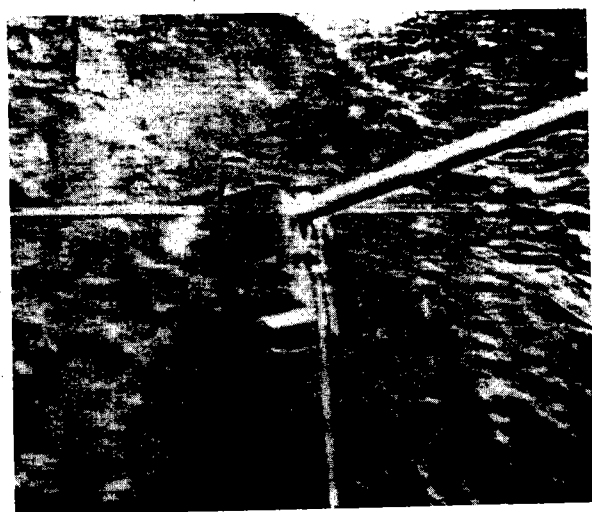


圖 A.1.14 應用噴射鋼纖維混凝土穩定邊坡



圖 A.1.17 防波堤消波塊

A.2 纖維混凝土之力學行為模式

蘇瑞榮

本研究所探討多著重於纖維混凝土材料強度方面之試驗，對於纖維混凝土材料之力學行為，則因限於人力及時間，無法深入驗證及探討。而文獻上對於此部份之研究，已有相當斐然之成績，藉著此行為模式之基本觀念，易於瞭解纖維混凝土之力學特性，為免有遺珠之憾，特輯於此，以供參考。另一方面則因限於篇幅，謹作扼要之摘錄，致於深入之瞭解，請另參考ACI SP44、SP81及其他相關文獻。

符 號 說 明

A : 係數

A_c : 複合材料之斷面積 (m^2)

A_f : 纖維材料之斷面積 (m^2)

A_m : 混凝土 (母體) 之斷面積 (m^2)

b : 纖維之寬度 (m)

D : 纖維之直徑 (m)

$\bar{D}$: 纖維之平均直徑 (m)

d : 微分運算式

E_c : 複合材料之彈性模數 (Kg/cm^2)

E_f : 纖維之彈性模數 (Kg/cm^2)

E_m : 混凝土之彈性模數 (Kg/cm^2)

F : 纖維之握裹力或纖維混凝土之抗拉強度 (Kg/cm^2)

L : 混凝土邊長或纖維之長度 (m)

L_R : 隨機定位之纖維長度效應 (m)

ℓ_c : 纖維之臨界長度 (m)

ℓ_f : 纖維之長度 (m)

M : 纖維及混凝土之應力比或彈性模數比

N : 纖維數量

N_e : 有效纖維數

P : 纖維體積比

- P_e : 有效纖維體積比
 P_f : 纖維之圓周長 (m)
 r : 混凝土之半徑 (m)
 S : 間距 (m)
 S_e : 有效間距 (m)
 t : 纖維之厚度 (m)
 V_f : 纖維之體積 (m^3)
 V_{fc} : 臨界纖維體積 (m^3)
 V_{fe} : 有效纖維體積 (m^3)
 V_m : 混凝土體積 (m^3)
 x' : 最小裂縫間距 (m)
 x_d : 裂縫間距 (m)
 α : 係數
 β : 係數
 ϵ_c : 複合材料 (纖維混凝土) 之應變量
 ϵ_f : 纖維之應變量
 ϵ_m : 混凝土之應變量
 σ_{mu} : 混凝土之極限應變量
 η_B : $(1 - \frac{\ell_c}{L})$
 η_D : 徑效率
 η_ℓ : 長度效率
 η_v : 纖維體積比效率
 τ : 混凝土之剪力 (Kg/cm^2)

- σ_c : 複合材料之抗拉強度 (Kg/cm²)
 σ_{ct} : 複合材料之抗彎強度 (Kg/cm²)
 σ_{cu} : 複合材料之極限抗拉強度 (Kg/cm²)
 σ_f : 纖維之抗拉強度 (Kg/cm²)
 σ_{fu} : 纖維之極限抗拉強度 (Kg/cm²)
 σ_m : 混凝土之抗拉強度 (Kg/cm²)
 $\sigma_{m\gamma}$: 混凝土之極限破裂模數 (Kg/cm²)
 σ_{mt} : 混凝土之破裂模數 (Kg/cm²)
 σ_{mu} : 混凝土之極限抗拉強度 (Kg/cm²)

A.2.1 纖維臨界長度 (ℓ_c)

$$\frac{\pi D^2}{4} \frac{d\sigma_f}{dL} = \pi D \tau \quad \dots\dots\dots \text{式 (1)}$$

$$\Rightarrow \frac{dL}{d\sigma_f} = \frac{D}{4\tau} \quad \dots\dots\dots \text{式 (2)}$$

$$\text{而 } \frac{\ell_c}{2} = \sigma_{fu} \cdot \frac{D}{4\tau}$$

$$\therefore \frac{\ell_c}{D} \geq \frac{\sigma_{fu}}{2\tau} \quad \dots\dots\dots \text{式 (3)}$$

A.2.2 隨機定位之纖維效應 (L_R) 及有效數 (N_e)

$$L_R = \int_0^{\frac{\pi}{2}} \frac{L \cos\theta d\theta}{\frac{\pi}{2}} = \frac{2L}{\pi} = 0.637 L (2D) \dots\dots \text{式 (4)}$$

$$L_R = \int_0^{\frac{\pi}{2}} \int_0^{\frac{\pi}{2}} \frac{L \cos \theta \cos \phi d\theta d\phi}{\left(\frac{\pi}{2}\right)^2} = \frac{4L}{\pi^2} = 0.41 L (3D) \dots \text{式(5)}$$

$$L_R = L \int_0^{\frac{\pi}{2}} \sin \theta \cos \theta d\theta = 0.5 L (3D) \dots \text{式(6)}$$

$$N_e = \frac{V_f}{\pi \gamma^2} (1D) \dots \text{式(7)}$$

$$N_e = \frac{2}{\pi} \frac{V_f}{\pi \gamma^2} (2D) \dots \text{式(8)}$$

$$N_e = \frac{1}{2} \frac{V_f}{\pi \gamma^2} (3D) \dots \text{式(9)}$$

$$N_e = \frac{P_e L^2}{25 \pi D^2} (3D) \dots \text{式(10)}$$

A.2.3 有效及臨界纖維體積比

纖維體積比 (P)

$$\frac{V_f}{L^3} = P \% = \frac{N \times \frac{\pi D^2 \ell_f}{4}}{L^3}$$

$$\therefore P = \frac{100 \times \frac{\pi}{4} N D^2 \ell_f}{L^3} = \frac{25 N \pi D^2 \ell_f}{L^3} \dots \text{式(11)}$$

長度效率 (η_e) :

$$\eta_e = \frac{L_R}{\ell_c} = \frac{0.41 L}{\sigma_{fu} \cdot \frac{D}{2} \tau} = \frac{0.82 L \tau}{\sigma_{fu} \cdot D} (3D) \dots \text{式(12)}$$

徑效率 (η_D)

$$\eta_D = \frac{D}{\bar{D}} \dots\dots\dots \text{式 (13)}$$

有效纖維體積比 (P_e)

$$\begin{aligned} P_e &= \frac{25 N \pi}{L^3} (\eta_D D)^2 \eta_\ell \ell_f \\ &= \frac{25 \pi N}{L^3} \left(\frac{D}{\bar{D}} \bar{D} \right)^2 \cdot 0.41 \cdot \left(\frac{0.82 L \tau}{\sigma_{fu} \cdot D} \right) \ell_f \dots\dots \text{式 (14)} \end{aligned}$$

纖維體積比效率 (η_p)

$$\eta_p = \frac{P_e}{P} = \frac{0.41 \cdot 0.82 L \tau D}{\sigma_{fu} \cdot \bar{D}^2} \dots\dots\dots \text{式 (15)}$$

有效纖維之體積

$$V_{fe} = \frac{P_e}{100} L^3 \dots\dots\dots \text{式 (16)}$$

臨界纖維體積比

$$\sigma_f = \varepsilon_{mU} \cdot E_f$$

$$\sigma_{mU} = \varepsilon_{mU} \cdot E_m$$

$$E_c \varepsilon_{mU} = \sigma_c = \varepsilon_{mU} \cdot E_{mU} (1 - V_f) + \varepsilon_{mU} E_f V_{fc} = V_{fc} \sigma_{fu}$$

$$\therefore V_{fc} = \frac{\sigma_{mU}}{(\sigma_{fu} - \varepsilon_{mU} E_f + \sigma_{mU})} = \frac{E_c \varepsilon_{mU}}{\sigma_{fu}} \dots\dots \text{式 (17)}$$

A.2.4 不連續短纖之間距效應

間距 (S) 定義為

$$S = \sqrt{\frac{L^2}{N}} \dots\dots\dots \text{式 (18)}$$

有效間距 (S_e)

$$S_e = \sqrt{\frac{L^2}{N_e}} = \sqrt{\frac{L^2 \cdot 25 \pi D^2}{P_e L^2}}$$

$$= 15.287 \sqrt{\frac{\sigma_{fu} \cdot \bar{D}^2}{\tau}} \cdot \sqrt{\frac{D}{P L}} \quad \dots\dots\dots \text{式 (19)}$$

於初裂時，其有效間距為

$$S_e = 27 \sqrt{\frac{D}{P L}} \quad \dots\dots\dots \text{式 (20)}$$

於極限破裂模數時其有效間距為

$$S_e = 25 \sqrt{\frac{D}{P L}} \quad \dots\dots\dots \text{式 (21)}$$

另外尚有

$$S_e = 13.8 D \sqrt{\frac{1}{P}} \quad \dots\dots\dots \text{式 (22)}$$

及 $S_e = 11.1 D \sqrt{\frac{1}{P}} \quad \dots\dots\dots \text{式 (23)}$

A.2.5 最小裂縫間距 (x') 之原理

$$N = \frac{V_f}{A_f}$$

$$P_f \cdot N \cdot \tau \cdot x' = \sigma_{mU} \cdot V_m \quad \dots\dots\dots \text{式 (24)}$$

$$\therefore x' = \frac{V_m}{V_f} \cdot \frac{\sigma_{mU}}{\tau} \cdot \frac{A_f}{P_f} \quad \dots\dots\dots \text{式 (25)}$$

於扁平纖維時

$$\therefore \frac{A_f}{P_f} = \frac{b t}{2(b+t)} \quad \text{且} \quad t \leq b \quad \Rightarrow \quad \frac{A_f}{P_f} = \frac{t}{2}$$

$$\begin{aligned} \therefore x' &= \frac{V_m}{V_f} \cdot \frac{\sigma_{mU}}{\tau} \cdot \frac{t}{2} \\ &= \frac{1-V_f}{V_f} \cdot \frac{\sigma_{mU}}{\tau} \cdot \frac{t}{2} \quad \dots\dots\dots \text{式 (26)} \end{aligned}$$

A.2.6 裂縫間距 (x_d) 及極限強度之關係

$$2\pi \gamma \tau x_d \cdot N \left(1 - \frac{x_d}{L}\right) = \sigma_{mU} \cdot V_m \quad \dots\dots\dots \text{式 (27)}$$

$$\Rightarrow x_d = \frac{1}{\left(1 - \frac{x_d}{L}\right)} \cdot \frac{V_m}{V_f} \cdot \frac{\sigma_{mU}}{\tau} \cdot \frac{\gamma}{2} = \frac{x'}{\left(1 - \frac{x_d}{L}\right)}$$

$$\therefore x_d = L \pm \left(\frac{L^2 - 4Lx'}{4}\right)^{\frac{1}{2}} \quad \dots\dots\dots \text{式 (28)}$$

$$\Rightarrow \frac{x_d}{L} = 1 \pm \frac{\left(1 - 4\frac{x'}{L}\right)^{\frac{1}{2}}}{2} \quad \dots\dots\dots \text{式 (29)}$$

A.2.7 纖維與混凝土界面之握裹力及拉脫力

$$F = \frac{\tau \pi D L}{4} \quad \dots\dots\dots \text{式 (30)}$$

$$\sigma_{cu} = N \cdot F = N \frac{\tau \pi D L}{4} \quad \dots\dots\dots \text{式 (31)}$$

$$\therefore \sigma_f = \frac{\tau \pi D L}{4} \cdot \frac{4}{\pi D^2}$$

$$\therefore \sigma_f = \tau \frac{L}{D}$$

故於隨機定位下之纖維混凝土極限應力為

$$\sigma_{cu} = V_f \tau \frac{L}{D} \quad (1D) \quad \dots\dots\dots \text{式 (32)}$$

$$\sigma_{cu} = \frac{2}{\pi} V_f \tau \frac{L}{D} \quad (2D) \quad \dots\dots\dots \text{式 (33)}$$

$$\sigma_{cu} = \frac{1}{2} V_f \tau \frac{L}{D} \quad (3D) \quad \dots\dots\dots \text{式 (34)}$$

另由 Allen 氏導出之式為

$$\sigma_{cu} = \frac{1}{2} \eta_B V_f \sigma_{fu} \quad \eta_B : \left(1 - \frac{\ell_c}{L}\right)$$

$$\therefore \ell_c = \frac{\sigma_{fu} \cdot D}{2 \tau} \quad \text{且於鋼纖之 } L \leq \ell_c \text{ 時}$$

$$\text{則 } \sigma_{cu} = \frac{1}{2} V_f \cdot \tau \frac{L}{D} \quad \dots\dots\dots \text{式 (35)}$$

A.2.8 纖維混凝土之抗拉強度

$$F = \sigma_c A_c = \sigma_m A_m + \sigma_f A_f \quad \dots\dots\dots \text{式 (36)}$$

$$\text{當 } \varepsilon_c = \varepsilon_f = \varepsilon_m \text{ 則 } \frac{\sigma_c}{E_c} = \frac{\sigma_f}{E_f} = \frac{\sigma_m}{E_m}$$

於單位強度下

$$V_c = A_c = 1 \quad \text{及} \quad V_f = A_f$$

$$\begin{aligned}\therefore \sigma_c &= \sigma_m (1 - A_f) + \sigma_f A_f \\ &= \sigma_m (1 - V_f) + \sigma_f V_f \quad \dots\dots\dots \text{式 (37)}\end{aligned}$$

$$\Rightarrow \frac{\sigma_c}{\sigma_m} = \frac{\sigma_f}{\sigma_m} V_f + 1 - V_f \quad \dots\dots\dots \text{式 (38)}$$

$$\therefore \frac{\sigma_f}{\sigma_m} = \frac{E_f}{E_m} = M$$

$$\text{故 } \frac{\sigma_c}{\sigma_m} = 1 + V_f (M - 1) \quad \dots\dots\dots \text{式 (39)}$$

$$\therefore \sigma_c = [1 + V_f (M - 1)] \sigma_m \quad \dots\dots\dots \text{式 (40)}$$

$$\therefore E_c = E_f V_f + E_m (1 - V_f) \quad \dots\dots\dots \text{式 (41)}$$

A.2.9 纖維混凝土之抗彎強度 (σ_{ct})

$$\sigma_{ct} = \sigma_{mt} V_m + \sigma_f V_f \quad \dots\dots\dots \text{式 (42)}$$

$$\therefore \sigma_m \gamma_{.m} = \beta \sigma_{mt}$$

$$\therefore \beta \sigma_{ct} = \sigma_m \gamma_{.m} V_m + \beta \sigma_f V_f \quad \dots\dots\dots \text{式 (43)}$$

$$\therefore M = \sigma_m \gamma_{.c} \cdot Z = \sigma_{ct} \cdot (\alpha Z)$$

$$\therefore \alpha \beta \sigma_{ct} = \alpha \sigma_m \gamma_{.m} V_m + \alpha \beta \sigma_f V_f \quad \dots\dots\dots \text{式 (44)}$$

$$\Rightarrow \sigma_m \gamma_{.c} = \frac{\alpha}{\beta} \sigma_m \gamma_{.m} V_m + \alpha \sigma_f V_f \quad \dots\dots\dots \text{式 (45)}$$

$$\text{且 } \eta_e \cdot \sigma_{fu} = \frac{0.82 L \tau}{D} = \sigma_f$$

$$\therefore \sigma_m \gamma_{.c} = \frac{\alpha}{\beta} \sigma_m \gamma_{.m} V_m + \alpha 0.82 \tau V_f \frac{L}{D} \quad \dots\dots\dots \text{式 (46)}$$

$$\therefore \sigma_{ct} = A \sigma_m V_m + 0.82 \tau V_f \frac{L}{D} \quad \dots\dots\dots \text{式 (47)}$$

76. — 研(六)纖維混凝土材料強度之研究與應用勘誤表

頁 數	行 數	字 數	圖 表	誤	正
封 內 頁	14	6	—	文 通 處	交 通 處
摘要首頁	9	6	—	玻 璃	玻 纖
摘要首頁	18	4	—	且有影響	具有影響
摘要次頁	15	3	—	注 要	注 意
V	9	12	—	排 裂	排 列
VI	8	5	—	Laap pace	Loqd pacer
1 — 2	18	20	—	課不容緩	刻不容緩
1 — 4	6	1	圖 1.0.1	水 泥 化	水泥劣化
1 — 5	17	1	表 1.0.1	—	M
3 — 3	13	5	表 3.3.1	持 有	特 有
5 — 2	1	3	—	試 驗 驟	試驗步驟
5 — 2	7	8	—	10 吋	1 吋
5 — 2	13	11	—	如圖 5.1.3	(如圖 5.1.3)
5 — 3	8	23	—	纖 結	糾 結
5 — 15	2	1	表 5.2.1	空氣含量(%)	單位重 kg/cm^2
5 — 16	2	1	表 5.2.3	空氣含量(%)	單位重 kg/cm^2
5 — 18	10	18	—	變化曲線	變位曲線
5 — 23	1	12	圖 5.3.5	排 裂	排 列
5 — 27	12	10	—	高 席	高 度
5 — 46	2	—	表 5.6.1	9,8,7,6	•9,•8,•7,•6
5 — 47	—	—	圖 5.6.3	—	—— TC γ TA β —— TC β
5 — 63	—	—	圖 5.8.5	01, 水灰比	1, 纖維體積比(%)
5 — 66	16	27	—	致 始	致 使
5 — 75	9	1	圖 5.9.5	瓊 纖	玻 纖
5 — 95	13	7	—	(如圖 5.10,—)	(如圖 5.10.2)
5 — 104	8	5	—	成 爲	非 爲
8 — 1	7	19	—	研 究 院	學 院
8 — 1	11	6	—	鵬 萬 里	鵬程萬里