

# 行政院國家科學委員會專題研究計畫 期中進度報告

## 活性粉混凝土於動態消能行為之研究與應用(2/3)

計畫類別：個別型計畫

計畫編號：NSC92-2211-E-002-082-

執行期間：92年08月01日至93年07月31日

執行單位：國立臺灣大學土木工程學系暨研究所

計畫主持人：陳振川

報告類型：精簡報告

處理方式：本計畫可公開查詢

中 華 民 國 93 年 9 月 2 日

# 活性粉混凝土於動態消能行為之研究與應用( )

## 期中報告

計劃編號：NSC 92-2211-E-002-021

執行期限：民國 92 年 8 月 1 日至 93 年 7 月 31 日

主持人：陳振川 國立台灣大學土木工程系教授

一．摘要(關鍵詞：活性粉混凝土、鋼纖維、點焊鋼絲網、韌性指數、殘餘強度因子)

相對於一般水泥質複合材料而言，活性粉混凝土(Reactive Powder Concrete, RPC)展現出非常良好的力學性質，抗壓強度可高達到 180~220 MPa，且由於隨機分佈之短鋼纖維的添加，利用纖維橋接效應，使其呈現高韌性行為。本計劃第二年研究以實驗的方法，配合加入點焊鋼絲網與製程的改進，控制纖維的分佈及均勻性，提升纖維效率，在單向靜態與反覆循環三分點彎矩加載下，探討活性粉混凝土薄版試體的韌性，以及纖維的效率與其消能的機制。結果指出，利用連續的點焊鋼絲網與不連續的短鋼纖維加強後，在靜態單向加載與雙向反覆循環加載彎矩試驗中，活性粉混凝土薄版表面出現較多重之裂縫，力與位移曲線亦呈現擬應變硬化(Pseudo Strain Hardening)現象，累積消散能量大幅提高，已能達到韌性纖維加強水泥質複合材料(Ductile Fiber Reinforced Cementitious Composite, DFRCC)的需求，對於應用於結構消能控制的材料可行性研究上，提供良好的選擇。

二．前言

一般水泥質複合材料，如水泥砂漿或混凝土等，在力學行為上屬於脆性材料，抗拉能力相當有限，在一般鋼筋混凝土結構設計中，甚至忽略了拉力行為的貢獻。雖然有不錯的抗壓能力，但當達到極限抗壓應力後，

隨即發生材料斷裂，呈現無預警式的破壞。為了彌補此方面的缺憾，故於水泥質複合材料中，添加具有韌性的纖維，藉由橋接效應，提高其塑性變形與吸收能量的能力，使得在建築和土木工程的結構應用上得以擴展。纖維加勁的方式，一般分為兩種：隨機分佈的不連續短纖維及編織或點焊的連續纖維網。材料包括金屬纖維、無機纖維與有機纖維等[1]。為了大幅提升韌性，常常須添加大量的纖維，如 SIFCON(Slurry Infiltrated Fiber Concrete)或 SIMCON(Slurry Infiltrated Mat Concrete)，纖維體積量可達 20%左右，但製作上非常困難，且材料成本大幅增加。Ferrocement 是一種高韌性、裂縫寬度小，且耐衝擊力的複合材料，由於不連續的短纖維在力學上，效率不及連續的纖維網，因此，利用纖維網的方式來加勁水泥質材料，尤其是受到彎曲應力的薄版構件，是相當有效率的做法。韌性纖維加勁水泥質複合材料(Ductile Fiber Reinforced Cementitious Composite, DFRCC)為纖維加勁水泥質複合材料(Fiber Reinforced Cementitious Composite, FRCC)的一個種類，其特性是在強調水泥質複合材料的高韌性行為，在拉力行為下為擬脆性材料，呈現局部裂縫與應變軟化現象，而在彎曲行為中，則展現韌性行為，並出現多重裂縫與應變硬化的趨勢[5]。本研究為了發展超高強度，同時亦能兼顧韌性需求的材料，採用了活性粉混凝土的技術與 Ferrocement 的概念，應用特殊的製程，製作出鋼纖維呈二維分佈的活性粉混凝土薄版，在三分點彎矩試驗中，施以單向靜態與

反覆循環載重，用以了解其彎曲載重下，極限承載力與韌性消能的特性，是否達到DFRCC的性能要求，同時觀察反覆循環彎矩載重下，遲滯迴圈的穩定性與累積消散能量。

### 三．試驗流程

材料包括波特蘭型水泥、石英砂、石英粉、矽灰、水及強塑劑，重量比為1:1.25:0.35:0.3:0.3:0.019。鋼纖維體積添加量為0%、1%、2%，鋼纖維長度為13mm，直徑為0.2mm，其長徑比為65之圓形斷面直纖維，抗拉強度為2600MPa。點焊鋼絲網直徑為0.8mm，網目為12.7mm，抗拉強度為320MPa，距離薄版試體上下表面5mm與10mm處各擺置1或2層，共4或8層鋼絲網，其中，同位置2層鋼絲網採錯開疊置，因此，其網目尺寸則減為6.35mm。經過強制式拌合機充分拌合後，灌製試體，並於24小時後拆模，隨即施予高溫養護，於適當齡期取出，進行各項力學試驗。材料試驗參數與配比試驗編號原則如下：第一個字母W代表點焊鋼絲網，第二個字元為數字，代表點焊鋼絲網層數，本實驗為4或8層，第三個字母F代表纖維，第四個字元為數字，代表纖維體積含量，第五個字母如為M，代表單向靜態彎矩試驗，如為R則代表反覆循環彎矩試驗。例如W4F2R，即代表加入4層點焊鋼絲網，鋼纖維體積添加量為2%的反覆循環彎矩試驗。反覆循環彎矩試驗加載歷程見圖1。流度試驗係參考ASTM C 230/C 230M-98，為保持一定需求之工作度，需調整強塑劑的用量。抗壓強度試驗參考ASTM C 39/C 39M-99，試體尺寸為直徑50mm之圓柱試體。單向靜態與反覆循環三分點彎矩試驗架構，以及各項韌度指數計算方式，係參考ASTM C 78-94及C 1018-97，採位移控制方式，於中點位置架設兩支LVDT，記錄整個施力與中點位移，試體尺寸為530mm×150mm×35mm的薄版，相關試驗設備見圖2及圖3。上述每一試驗參數皆製作三個試體，並求其平均值。

### 四．試驗結果與討論

未添加鋼纖維試體的極限抗壓強度約為170MPa，而添加1%或2%纖維含量的試體，抗壓強度約在180~200MPa左右，故鋼纖維的添加，對於極限抗壓強度的提升並不明顯，惟其應力應變曲線從脆性破壞轉變成為有較佳韌性的破壞模式。彎矩試驗的初裂強度(First Crack Strength, F. C. S.)與初裂後等值極限強度(Post Crack Strength, P. C. S.)的計算方式如公式(1)：

$$\sigma = \frac{PL}{bh^2} \text{ ----- (1)}$$

其中

$\sigma$ ：初裂強度或初裂後等值極限強度，單位為MPa。

$P$ ：載重，單位為kN。

$L$ ：試體跨度，450mm。

$b$ ：試體寬度，150mm。

$h$ ：試體厚度，35mm。

位移比(Drift Ratio)定義為中點位移除以跨度的一半距離，並以百分比表示。在單向靜態彎矩試驗中，力與中點位移曲線見圖4、5。初裂強度比較見圖6、7，初裂後等值極限強度見圖8、9，韌性指數(Toughness Index)比較見圖10、11，殘餘強度因子(Residual Strength Factor)比較見圖12、13。

F0M的行為明顯是呈現脆性，當達到初裂強度時即發生破壞，毫無預警性可言，其初裂強度為20.64 MPa。F1M的初裂強度為22.44 MPa，F2M的初裂強度為20.40 MPa，纖維的添加量與初裂強度並不相關，僅與漿體強度相關。但F1M的力與中點位移曲線於初裂後，能進入非線性行為，並持續增加變形，纖維不斷被拉脫，其初裂後等值極限強度為22.93 MPa，幾乎沒有增加，初裂後行為呈現持平狀態，觀察韌性指數與殘餘強度因子比較圖可知，其行為接近完全彈塑性材料。F2M的初裂後等值極限強度達到34.75 MPa，較其初裂強度成長0.7倍，力與中點位移曲線於初裂後，隨著位移增加，力量能夠持續成長，纖維在拉脫的過程中，仍然能夠順利的傳遞力量，比較韌性指數與殘餘強度因子比較圖，彎曲行為呈現擬應變硬化現

象，位移比持續至 3% 左右。韌性容量定義為當力與中點位移曲線達初裂後等值極限強度衰減至 80% 時，力與中點位移曲線下的面積，韌性容量比較見圖 14、15。當未添加纖維時，F0M 韌性容量為 3.17 kN-mm，纖維添加 1% 時，F1M 韌性容量為 54.54 kN-mm，纖維添加 2% 時，F2M 韌性容量為 103.84 kN-mm，由此可知，添加 1% 纖維較未添加時增加 16 倍，添加 2% 纖維較添加 1% 時增加 1 倍，只要添加纖維即能大幅改善其韌性行為，當添加量達 2% 時，纖維提升韌性容量仍相當有效率。

當添加 2% 體積的鋼纖維後，RPC 薄版在靜態彎矩加載下，已展現出高韌性的特質，再以點焊鋼絲網加勁，無論是 4 層或 8 層，其初裂強度、初裂後等值極限強度、韌性指數、殘餘強度因子及韌性容量的表現，並無明顯的增加，但在反覆循環彎矩加載下，鋼絲網的添加，對於累積消散能量有明顯的助益。F2R 與 W4F2R 於反覆循環彎矩加載下的遲滯迴圈情形見圖 16、17，當初裂後，其力與中點位移圖皆展現穩定的遲滯迴圈，但力量不再成長，呈現持平狀態，F2R 的持平區維持在 8kN(約 20MPa)左右，而 W4F2R 則維持在 12kN(約 30MPa)左右，鋼絲網的加入，有助於強度的提高，此有別於靜態加載時的情形，且遲滯迴圈較未添加時飽滿。在位移比 2% 左右的相同加載歷程下，F2R 累積消散能量約 200kN-mm，W4F2R 累積消散能量則達 670kN-mm，是 F2R 的 3.3 倍，因此，藉由鋼絲網加勁並消散能量的效果非常顯著。相較於單向靜態加載的情形，反覆循環加載的加載應變率較高，並且持續增加，其裂縫成長有集中的情形產生，纖維拉拔消能集中於某一破裂面。若加入連續的鋼絲網後，試體表面裂縫明顯較為平均而全面，亦即力量傳遞較為整體性，觀察破裂面的纖維分佈情形，明顯由三維分佈轉而成為二維分佈，使得纖維拉拔消能更有效率，同時鋼絲網亦因降伏而參與消能的機制。

## 五．結論

1. 在單向靜態彎矩載重下，RPC 薄版初裂強度與纖維添加量無關，僅與漿體強度有關。本試驗 RPC 薄版之初裂強度約為 20MPa。
2. 比較力與中點位移曲線圖，以及韌性指數與殘餘強度因子比較圖，不添加任何纖維時呈現脆性的無預警式破壞，而添加 1% 時，已呈現完全彈塑性模式，添加至 2% 時，則呈現擬應變硬化現象，初裂後等值極限強度達到 34.75 MPa，符合韌性纖維加強水泥質複合材料的需求。
3. 未添加鋼纖維時的韌性容量為 3.17 kN-mm，纖維添加 1% 時的韌性容量為 54.54 kN-mm，纖維添加 2% 時的韌性容量為 103.84 kN-mm，添加 1% 纖維較未添加時增加 16 倍，添加 2% 纖維較添加 1% 時增加 1 倍，只要添加纖維即能大幅改善其韌性行為，當添加量達 2% 時，纖維提升韌性容量仍相當有效率。
4. 2% 鋼纖維添加量的 RPC 薄版試體，在反覆循環彎矩載重下，初裂後其力與中點位移圖展現穩定的遲滯迴圈，但強度不再成長，呈現持平狀態，此行為與單向靜態彎矩試驗的擬應變硬化現象不同，欲讓 RPC 薄版能夠穩定消能，需至少添加 2% 的鋼纖維。加入點焊鋼絲網後，使遲滯迴圈更為飽滿，累積消散能量較未添加時增加約 2.3 倍，因此，點焊鋼絲網對於高應變率加載及反覆循環荷重下，能夠有效增加 RPC 薄版的消能能力。
5. 2% 鋼纖維添加量試體在單向靜態彎矩或反覆循環彎矩載重下，試體表面已出現多重裂縫的現象，但加入點焊鋼絲網後，裂縫分佈更為平均且全面，亦即力量傳遞更有效率。

## 六 參考文獻

1. Victor C. Li, "Large Volume, High-Performance Applications of Fibers in Civil Engineering," Journal of Applied Polymer Science, Vol. 83, pp. 660-686 (2002).

2. Pierre Richard, Marcel Cheyrezy, "Composition of Reactive Powder Concretes," Cement and Concrete Research, Vol. 25, No. 7, pp. 1501-1511 (1995).

3. J. Dugat, N. Roux, G. Bernier, "Mechanical Properties of Reactive Powder Concretes," Materials and Structures, Vol. 29, May, pp. 233-240 (1996).

4. Olivier Bonneau, Mohamed Lachemi, Éric Dallaire, Jérôme Dugat, and Pierre-Claude Aïtcin, "Mechanical Properties and Durability of Two Industrial Reactive Powder Concretes," ACI Materials Journal, Vol. 94, No. 4, July-August, pp. 286-290 (1997).

5. JCI-DFRCC Committee, "DFRCC Terminology and Application Concepts," Journal of Advanced Concrete Technology, Vol. 1, No. 3, November, pp. 335-340 (2003).

6. 鄭瑞濱, 「活性粉混凝土構件之工程性質研究」, 國立台灣大學土木工程研究所博士論文, 台北 (2003)。

7. 邱暉仁, 「活性粉混凝土版在反覆載重下之行為研究」, 國立台灣大學土木工程研究所碩士論文, 台北 (2003)。



圖 2 單向靜態彎矩試驗



圖 3 反覆循環彎矩試驗

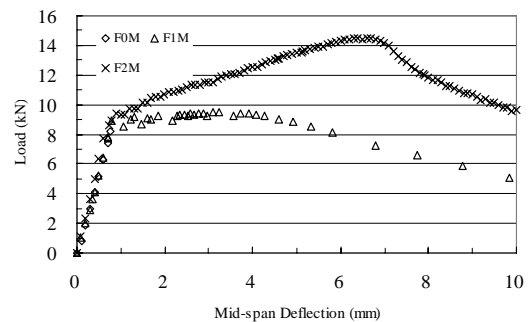


圖 4 FxM 力與中點位移曲線

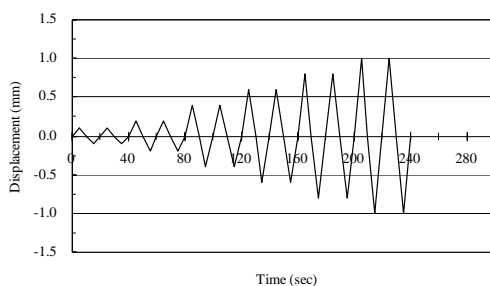


圖 1 反覆循環加載歷程

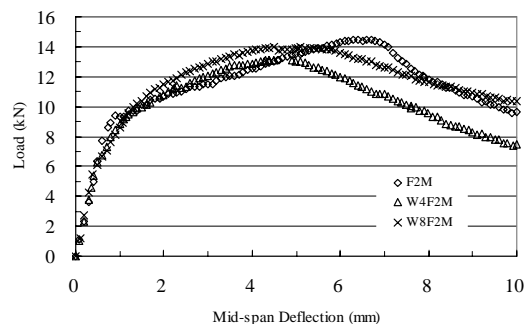


圖 5 WxF2M 力與中點位移曲線

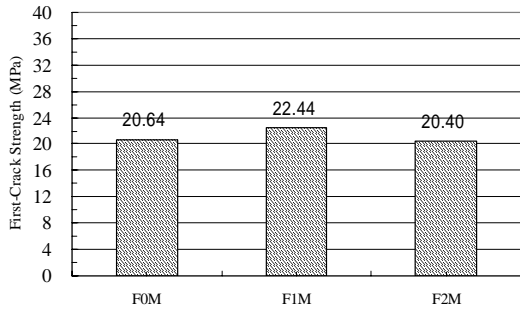


圖 6 FxM 初裂強度比較

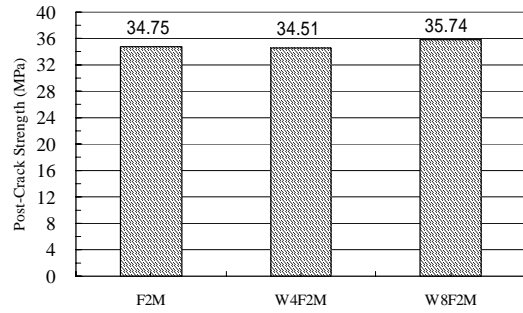


圖 9 WxF2M 初裂後等值極限強度比較

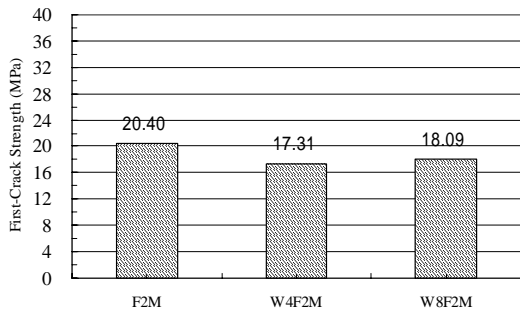


圖 7 WxF2M 初裂強度比較

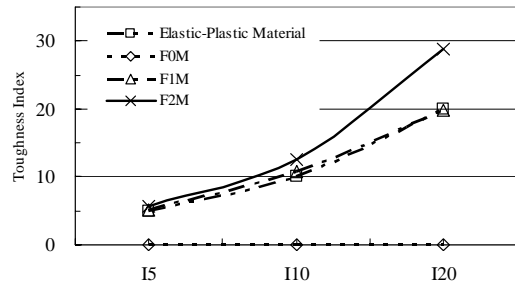


圖 10 FxM 韌性指數比較

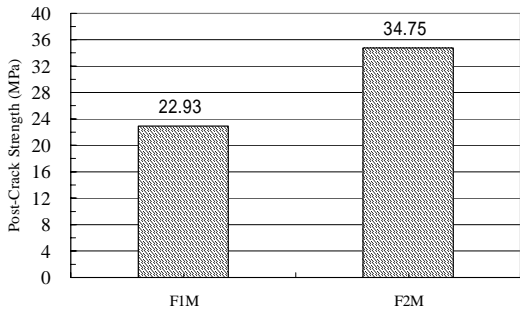


圖 8 FxM 初裂後等值極限強度比較

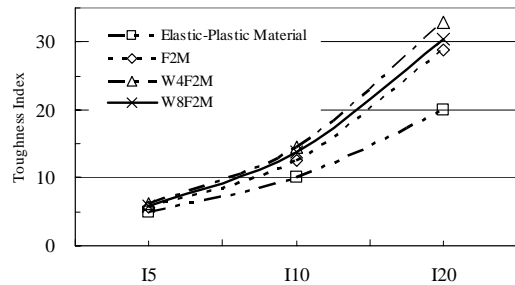


圖 11 WxF2M 韌性指數比較

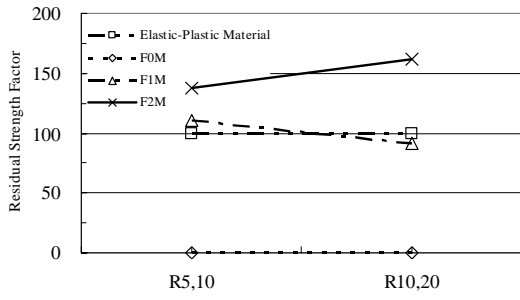


圖 12 FxM 殘餘強度因子比較

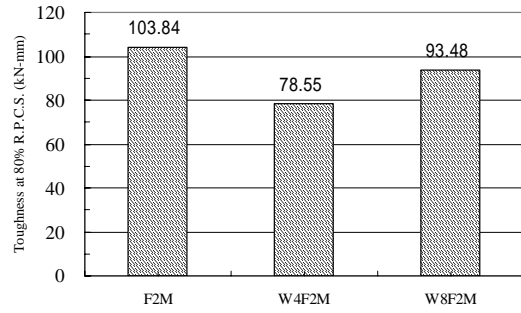


圖 15 WxF2M 韌性容量比較

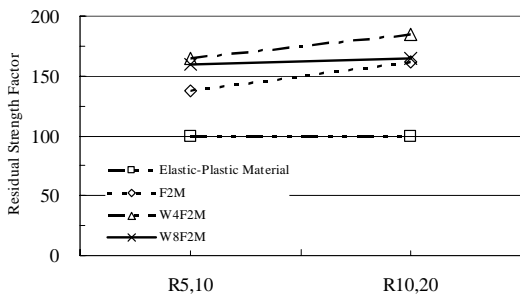


圖 13 WxF2M 殘餘強度因子比較

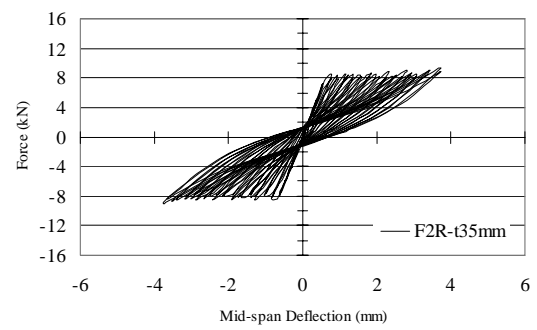


圖 16 F2R 反覆循環彎矩試驗遲滯迴圈

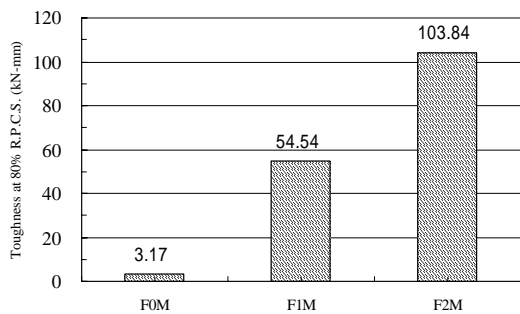


圖 14 FxM 韌性容量比較

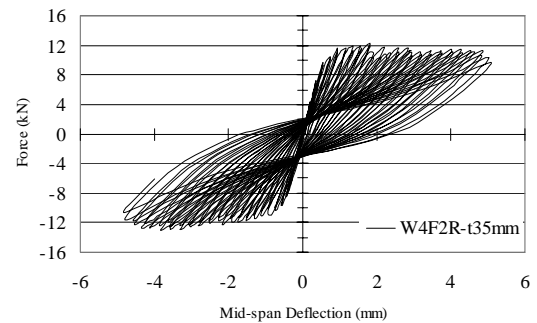


圖 17 W4F2R 反覆循環彎矩試驗遲滯迴圈