

活性粉混凝土之破裂與複合材料力學行為研究

Effect of Thermal Curing on Mechanical Properties of TAICON (I)

計劃編號：NSC89-2211-E-002-126

執行期限：民國 89 年 08 月 01 日至 90 年 07 月 31 日

主持人：陳振川 國立台灣大學土木工程教授

摘要

RPC 應用於結構物中，可預期其結構斷面，將可因力學行為的提升而大幅縮減，且仍可提供足夠的強度要求。但若輕薄斷面產生微小裂縫，則整體構件行為，或應從破壞力學特性出發對整體構件進行可靠度的評估以確保結構的安全。本研究即是在此想法下的成果，以提供破壞力學參數為目的。試驗內容包含有評估適合 RPC 的破壞準則、破壞行為、不同纖維量裂縫成長情況、CMOD 與中點變位關係、I-II 型破壞互制以及與鋼筋組成複合構造的鋼筋/RPC 界面行為探討等。
關鍵字：RPC、破壞、CMOD、鋼纖維

一、前言

RPC 為 1990 年源於法國的軍事材料，其有兩種的主要分類：抗壓強度 170~230MPa 的 RPC200 以及抗壓強度 450~800MPa 的 RPC800 等。1995 年後，諸如美國、加拿大等學者亦先後投入該領域的研究。在國內，台大土木所陳振川教授首先於 1997 年投入活

性粉混凝土配比及其性質之研究；隔年，該研究群更針對溫度製程、微觀物理特性、高應變率下之力學行為、纖維/漿體界面問題探討以及力學資料庫建立等皆有深入的研究。此外，財團法人台灣營建研究院，亦進行了諸多 RPC 材料應用於核廢料儲存槽、軍事防禦工事以及金庫保險櫃等工業產品的研究與測試，獲致頗佳的成果。歷經了幾年的研究，國內 RPC 材料已經達到了抗壓強度 (Compressive Strength) 210MPa 與抗彎強度 (Flexural Strength) 33MPa 的程度，與國外 RPC200 配比的等級不相上下。究其於力學性質中會有如此大的突破，實可歸納出下列幾個因素：(1) 改善了材料均勻性、(2) 提高了漿體實密性、(3) 採用高溫蒸氣養護以及 (4) 添加鋼纖維以增加韌性等研究突破等諸多因素。

本材料應用於結構物中，可預期其結構斷面，將可因力學行為的提升而大幅縮減，且仍可提供足夠的強度要求。但若輕薄斷面產生微小裂縫，則整體構件行為，或應從破壞力學特性出發對整體構件進行可靠度的評估以確保結構的安全。本研究即是在此

想法下的成果，以提供破壞力學參數為目的。試驗內容包含有評估適合RPC的破壞準則、I型破壞行為、不同纖維量裂縫成長情況、CMOD與中點變位關係、I-II型破壞互制以及與一般混凝土組成複合構造的試驗狀況等。

二、RPC的破壞準則

RPC屬於混凝土材料的一類，其藉由纖維的添加來增加材料的韌性。整體的分析上，可否使用強度準則(Strength Criterion)，將試驗室中的實驗結果應用於相差數十倍的結構體上，是本研究的第一個目的。本研究中，透過不同尺寸劈裂、抗壓、抗彎試體的試驗，採用Bazant的分析方式以 $\log(\frac{\sigma_N}{f_t})$ 與 $\log(\frac{d}{d_a})$ 之座標關係表示

於圖1~3所示。其中 f_t' 為混凝土之張力強度， σ_N 為荷載達到最大值時之標稱應力強度(Nominal stress)、 d 為混凝土試體深度以及 d_a 為骨材最大粒徑。

上述之試驗結果說明：添加纖維的活性粉混凝土，將可以強度準則之分析方式進行構造物的應力分析。纖維的添加，確實將原本漿體脆性的狀況改質為為韌性的材料。

三、I型破壞時不同纖維量裂縫成長情況與CMOD~中點變位關係

本破壞力學參數探討研究內容，採用破壞試驗試體之深、寬及長分別為7.5X4X30 cm的長方形試驗，其中間並預置有寬度2mm、長度為樑深一半

的裂縫，裂縫尖端採漸縮之型式，跨距為樑深之4倍。試驗過程採用的儀器有：裂縫長度量測儀(FRACTOMAT Model 1078)、30mm尺寸之裂縫規(KRAK-gage)、量測範圍0~25mm之電阻式變位計(Linear variable differential transformer, LVDT)以及MTS裂縫開口位移計(COD gage)，整個試驗的試驗架設詳見圖四所示。

圖5~7顯示荷載~裂縫長度~時間的關係圖。從試驗之結果可以發現，0%纖維含量之活性粉混凝土其裂縫是屬於快速成長的，代表材料一開裂，其裂縫便馬上迅速延伸，也就是此時材料並無任何阻止裂縫延伸的能力，屬於裂縫不穩定開裂型態。而添加纖維後之材料特性有截然之不同，由圖中可以發現加入纖維後之活性粉混凝土其裂縫是以穩定成長的方式傳播的，而且由曲線之斜率可以發現，其阻止裂縫傳播的能力，2%纖維含量之活性粉混凝土將較1%纖維含量之活性粉混凝土好。

圖9~13乃是利用裂縫阻力曲線之觀念，以求得材料之破壞能的一分析方式，其透過繪出如圖9之試體裂縫延伸與載重之關係曲線，找出載重與中點位移關係曲線(圖10~11)中所對應之能量吸收量，而後繪出如圖12之能量釋放與裂縫延伸之關係曲線從而將能量釋放對裂縫長度微分，再除上試體厚度後，即可得如圖13之裂縫成長阻力曲線。

經由以上方法所求出之裂縫成長阻力曲線，其後段之水平漸近部分一般定義為材料之破壞能。由圖12~13

的試驗結果可以發現，由於 0% 纖維含量之活性粉混凝土之破壞特性屬於脆性破壞，因此表現在圖形上曲線將非常靠近橫座標，其單位裂縫延伸吸收的能量為 64N/m，而 1% 纖維含量時，單位裂縫延伸吸收的能量為 14283N/m 以及 2% 纖維含量時，單位裂縫延伸吸收的能量為 19484N/m，單位裂縫延伸吸收的能量大抵與纖維含量呈現正相關。此可說明 RPC 中纖維扮演破壞過程吸能的重要，且纖維確實將原本脆性的 RPC 漿體改質成具有與鋁合金等同破壞能之特殊水泥質材料。

四、I-II 型破壞互制關係

圖 14 顯示 0% 纖維添加量 RPC 產生初始裂紋時，複合受力之 K_I - K_{II} 互制關係，試驗結果顯示 RPC 漿體與一般混凝土複合受力產生之 K_I - K_{II} 互制關係並無太大的不同。複合受力初始裂縫方向的判斷，以最大拉應力理論應可確實掌握。

五、與鋼筋組成複合構造之握裹應力

圖 15 為與鋼筋組成複合構造之握裹應力試驗試體。透過萬能試驗機進行直接拉拔試驗結果顯示於圖 16。由試驗結果換算成單根的鋼筋/RPC 界面黏裹應力約在 76MPa，此顯示漿體/鋼筋界面黏裹能力的大幅提升，使之未來加勁 RPC 複合材料將具備一致充分變形的能力。

六、結論

1. 鋼纖維的添加對於 RPC 之材料韌性有很大的幫助，反映在力學特性上，將使抗彎強度及劈裂張力強度有很大的提升比例。纖維的添加對於材料之破壞型式有很顯著的改變，使活性粉混凝土避免了突發性的脆性破壞，而轉變成具有材料韌性之破壞的特性。
2. 從破壞試驗之載重~中點位移曲線可以發現，2% 纖維含量之活性粉混凝土已經具有類似金屬材料之塑性平台區域，表示 2% 纖維含量之活性粉混凝土，已經具備了金屬材料之破壞特性。
3. RPC 的分析準則，應可以強度準則為之。
4. RPC 中纖維對於裂縫成長的抑制，具相當明顯的效果，纖維添加後的裂縫成長狀況屬穩定的裂縫成長。
5. RPC 複合受力破壞行為與一般混凝土無異，一般複合破壞分析模式應可充分模擬其初裂的行為。
6. RPC 與鋼筋組成的複合構造，鋼筋/RPC 界面的黏裹能力，較之一般混凝土高出許多，受力破壞時，裂縫將不會延伸於界面中成長。

七、參考文獻

- [1] Helene Zanni, Marcel Cheyrezy, Vincent Maret, Sameui Philippot., and Pedro Nieto, "Investigation of Hydration and Pozzolanic Reaction in Reactive Powder Concrete (RPC) Using ^{29}Si NMR", Cement and Concrete Research, Vol. 26, No. 1, pp. 93-100(1996).
- [2] Richard, P., and M. Cheyrezy, "Reactive Powder Concretes with

High Ductility and 200~800 MPa Compressive Strength”, ACI SP144, pp. 507-518(1994).

- [3] Dallaire, E., P. C. Aitcin, and M. Lachemi, “The Sherbrooke Reactive Powder Concrete Footbridge”, ACI 1997 International Conference on High-Performance Concrete, Kuala Lumpur, Malaysia(1997).
- [4] Melvin F. Kanninen, and Carl H. Popelar, “Advanced Fracture Mechanics”, Oxford University Press, New York(1985).
- [5] Surendra P. Shah, Stuart E. Swartz, and Chengsheng Ouyang, “Fracture Mechanics of Concrete”, John Wiley & Sons(1995).
- [6] Norman E. Dowling, “Mechanical Behavior of Materials”, Prentice-Hall International, Inc(1999).
- [7] David Broek, “Elementary Engineering Fracture Mechanics”, Noordhoff International Pub., Groningen(1986).
- [8] Bazant, Zdenek P., and Jaime Planas, “Fracture and Size Effect in Concrete and Other Quasibrittle Materials”, CRC Press, Boca Raton(1998).

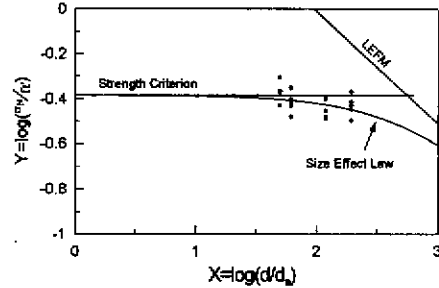


圖 2 1%纖維含量的尺寸定律曲線

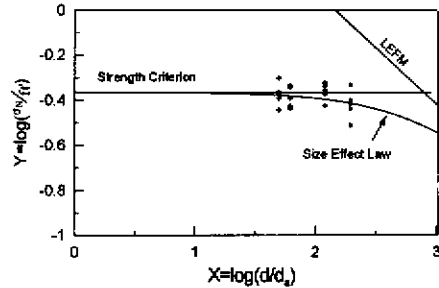


圖 3 1%纖維含量的尺寸定律曲線

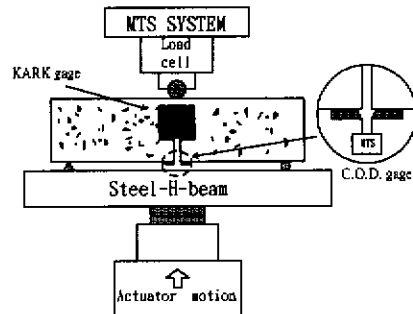


圖 4 破壞力學試驗架設

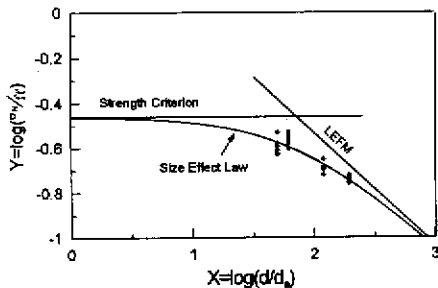


圖 1 10%纖維含量的尺寸定律曲線

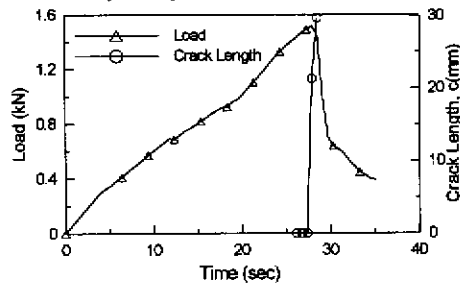


圖 5 0%纖維含量時間與荷重、裂縫延伸長度之關係曲線

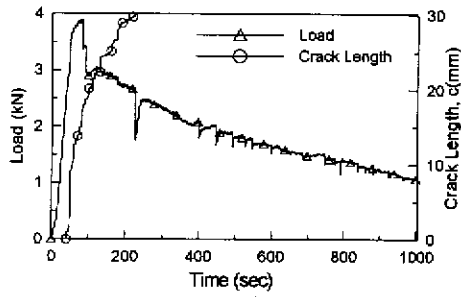


圖 6 1%纖維含量時間與荷重、裂縫延伸長度之關係曲線

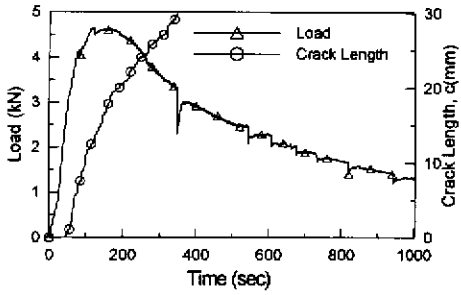


圖 7 2%纖維含量時間與荷重、裂縫延伸長度之關係曲線

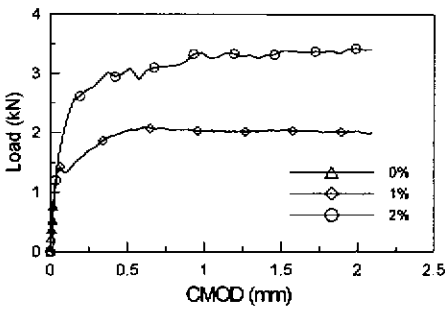


圖 8 不同纖維含量荷重與裂縫開口位移曲線

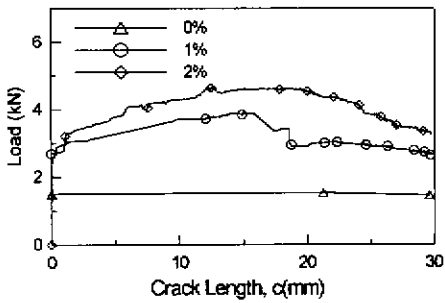


圖 9 不同纖維含量荷重與裂縫延伸長度曲線

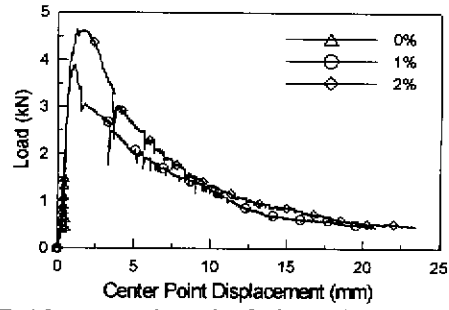


圖 10 不同纖維含量中央載重點荷重與位移曲線

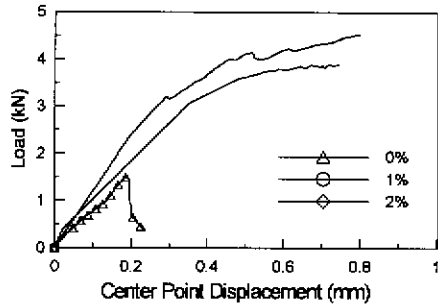


圖 11 不同纖維含量中央載重點荷重與初期位移曲線

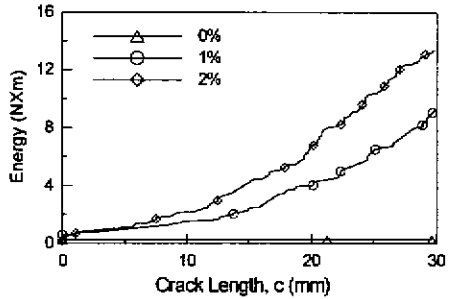


圖 12 不同纖維含量總能量釋放與裂縫延伸曲線

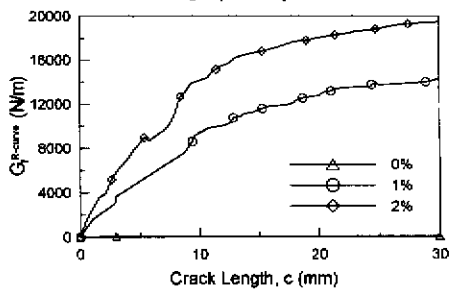


圖 13 不同纖維含量裂縫成長阻力曲線