活性粉混凝土巨微觀性質之研究

謝素蘭 [1,*]，華根 [1]

[1] 桃園創新技術學院室內設計系副教授

摘要

活性粉混凝土係由惰性固體粒料及膠結漿體組合而成之複合材料，其中膠結漿體則由水、水泥及卜作嵐材料組成，本研究主要應用「Full's 級配曲線配比設計法」，將水泥、飛灰與爐石參與堆積級配計算配比，探討其對活性粉混凝土巨微觀性質的影響。試驗項目包含抗壓強度、超音波波速、表面電阻等巨觀性質，並以電子顯微進行量測，以分析其化學反應過程之微觀結構特徵與水化產物之變動。結果顯示，Fuller 級配曲線配比模式設計之活性粉混凝土，水膠比(w/cm)愈低，水泥體積濃度愈高，膠結漿質愈佳，活性粉混凝土強度愈高，超音波速率愈快，其巨觀工程性質愈佳；微觀特性顯示水化初期以水泥水化產物為主，卜作嵐反應則必需待水化晚期。

關鍵字：活性粉混凝土(RPC, RPM) 、Fuller's 級配曲線、 巨微觀性質、緻密化

* E-mail addresses: sslan@tiit.edu.tw , Tel: 03 -4361070#3103 Fax: 03-4372193

THE STUDY OF REACTIVE POWDER CONCRETE FOR MACRO-MICRO PROPERTY

Su-Lan Hsieh[1,*], Ken Hwa[1]

[1] Department of Architecture, Taoyan Innovation Institute of Technology

Abstract

The reactive powder concrete(mortar) is a particulate composite consisting of a continuous binder phase and a dispersed particulate phace. This study is drafted as the foundation with mixed model by Fuller's ideal grading curve for reactive powder concrete. The result shows the mixture proportion of solid particles designed by Fuller's curve reaches the maximum density higher than conventional mixture design methods. This approach provides a basic numerical analysis model for designing RPC with less water and cement content. We analyzed physical properties, including compressive strength, pulse velocity, electrical resistivity, and the macro-micro property for SEM . Our results show that the lower water-to-binder ratio (w/cm), the quality of RPC is better. Assuming no imperfections are present in a sample, then for the same w/cm and age, compressive strength, ultrasonic pulse velocity and electrical resistance are linearly proportional to the water-to-binder ratio; the pozzolance reaction is happened at long-term age.

Keyword:Reactive power mortar (RPC, RPM), Fuller's ideal grading curve macro-micro property, densified.

* E-mail addresses: sslan@tiit.edu.tw , Tel: 03 -4361070#3103 Fax: 03-4372193

壹、前言

活性粉混凝土(RPC，RPM)的發展從 1990 年開始，較 1980 年代所發展出的高性能混凝土(High Performance Concrete, HPC)為晚，起初係由世界第二大營造公司-法國 Bouygues 公司開始投入研發，在 1994 年以前，此種材料一直是法國軍方的機密，僅用於軍事工程，於 1995 年，由 Bouygues 公司人員 Richard 等人在舊金山的美國混凝土學會(ACI)春季國際會議上首次公開其研究成果後[1]，此種新型混凝土材料的製作與材料特性始被世界其它各國(包括臺灣)所瞭解，自此，各國急起直追、相繼投入這種 RPC 超高性能混凝土研發行列 [1、2]。混凝土化學侵蝕的抵抗被決定在於大自然與環境的嚴酷和混凝土的配比及組成。惡化生成過程，造成一般混凝土碳化及氯侵蝕，大部分是由於混凝土有足夠的滲透率及過大的孔隙率。水灰比的減少及極小顆粒的增加幫助改善混凝土的壽命[3]。研究顯示活性粉混凝土超音波波速隨著矽砂含量增加而增加，係因矽砂緻密性優於水泥漿體，所以超音波波速以矽砂會較高。在鋼纖維含量改變上，超音波波速隨著鋼纖維含量增加而增加，乃因鋼纖維材料本身結構晶粒非常細緻且均勻，在吸收脈波方面比漿體快很多。研究中，超音波波速隨著養護溫度增加而增加對水泥、矽灰及石英粉之水化反應與卜作嵐反應，便提昇超音波波速。但在晚期 56 天時，超音波波速會隨著矽砂及鋼纖維兩種材料，與漿體造成的微裂縫，改變脈波進入活性粉混凝土內之路徑，讓原本的路徑拉長，接收端所接手到脈波的時間更慢，導致超音波波速有折減之現象[4]。吳建興(2003)將 RPC 試體在人工海水與 105℃烘箱之乾濕循環後進行超音波波速量測，結果顯示活性粉混凝土在經海水乾濕循環後，對其內部結構並無劣化損害[5]。N. Roux 等人研究顯示，當活性粉混凝土在齡期 28 天時，添加鋼纖維將會使表面電阻由 1130 $k\Omega-cm$ 下降至 137 $k\Omega-cm$ ，活性粉混凝土有極高電阻，具有高抗化學侵蝕的能力表現與良好的耐久性[3]。文獻[6]研究顯示，由於活性粉混凝土在配比內加入大量的矽灰，有助於提昇電阻值，呈現高防蝕的特徵，比 20 $k\Omega-cm$ 高出甚多。N. Roux 等人以厚 30 ㎜，直徑 70 ㎜的圓柱試體在相對溼度 50％與 20℃水中下養護 28 天後實行吸水試驗。活性粉混凝土薄片放置在一個飽和海綿上且浸入水中 5 ㎜，實驗中保持相對溼度 100％試驗 15 天後，吸水率保持少於 0.2kg/m2，非常低的吸水率，結果顯示活性粉混凝土有十分強的抵抗化學侵蝕能力[3]。文獻[6]研究顯示，活性粉混凝土一天吸水率皆低於 0.84％，一般混凝土用骨材的一天吸水率僅 0.8~1.0％，顯現出活性粉混凝土性質監硬及密實程度有如天然石頭般堅硬。吳建興(2003)將活性粉混凝土試體經人工海水與

105oC 烘箱之乾濕循環後測試 0、30、60 及 100 個循環試體之氯離子電滲改變情形；雖隨著人工海水乾溼循環次數的增加，活性粉混凝土之氯離子電滲量有逐漸升高之趨勢，但氯離子電滲量皆低於 2000 庫侖，顯示活性粉混凝土之滲透性很低[5]。N. Roux 等人以單純量測活性粉混凝土中氯離子濃度變化，試體用環氧樹脂塗布密封然後儲存在 0.5M NaCl 溶液的儲存池內。一年的試驗期間後氯離子濃度保持不變。RPC200 試體氯離子濃度並無變化，說明試驗期間內沒有發現產生氯的滲透。濃度的變化為混凝土質量的 0.01-0.03%之間，就實驗方法的使用而言，此範圍在敏感度門檻值極限以下，顯示活性粉混凝土有相當高的抗氯離子滲透能力，可以有效的防止活性粉混凝土內部金屬鋼筋的腐蝕[3]。

貳、 試驗計劃

本研究之活性粉混凝土配比設計，係依據 Fuller 級配曲線配比模式設計活性粉混凝土(RPC)。以水泥基質漿「質」的改變為基準，設計 6 組不同水膠比(w/cm=0.14、0.17、0.20、0.23)，經矩陣式計算之材料組成如表 1 所示。

表 1　活性粉砂漿配比設計表(kg/m^3)

組成材料 / 編號	w/cm	石英砂	石英粉	飛灰	爐石	矽灰	水泥	水	SP	消泡劑	總用水量
YYY-14	0.14	966	234	292	199	262	201	119	50	0.06	169
YYY-17	0.17	931	226	282	193	253	194	157	41	0.06	198
YYY-20	0.20	902	218	273	186	244	188	196	28	0.05	224
YYY-23	0.23	872	211	264	180	237	182	239	11	0.05	250
NYY-20	0.20	1001	249	310	-	279	214	187	27	0.06	214
NNY-20	0.20	1215	294	366	-	-	254	158	28	0.07	186
Control	0.20	900	205	-	-	250	720	204	40	0.10	244

本研究係採用卜特蘭第 I 型水泥，卜作嵐材料 F 級飛灰、爐石粉及矽灰則分別來自於台灣電力公司、中國鋼鐵公司和 Elken 公司，其化學成分、物理性質及粒徑分佈，如表 2 及圖 1 所示。

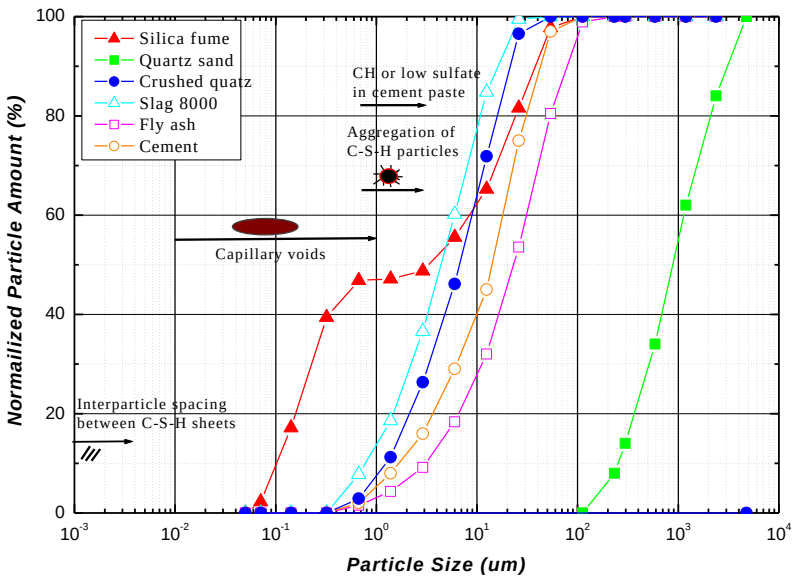


圖 1　活性粉混凝土組成材料粒徑分佈及水化產物粒徑比較

表 2. 各組成材料之物理和化學性質

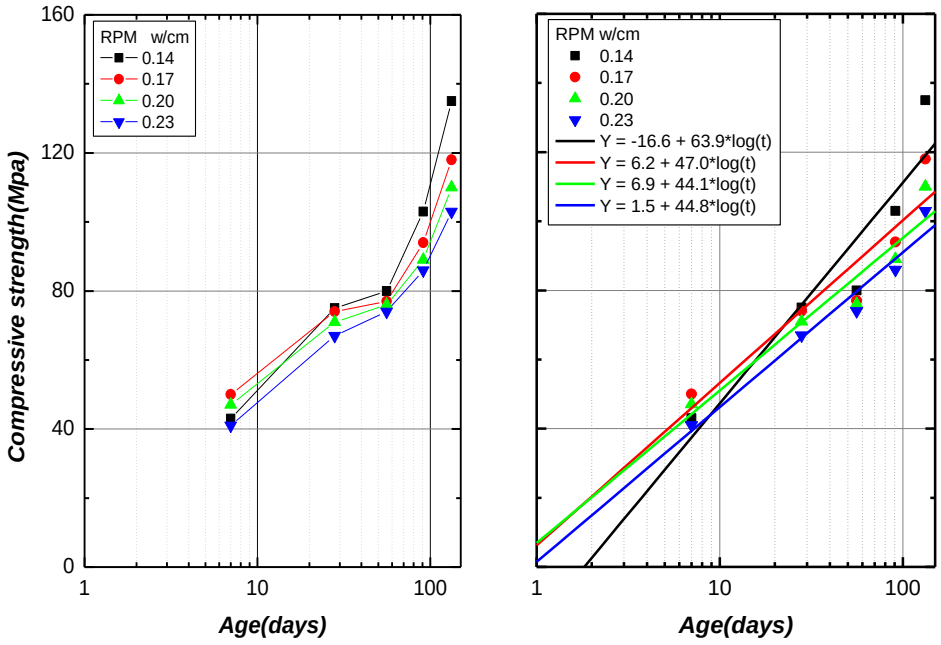
Items		Cement	Fly ash	Crushed quatz	Slag	Silica fume
Chemical	SiO_2	22.0	60.58	96.84	55.17	84.04
	Al_2O_3	5.6	18.54	0.13	11.13	0.43
	Fe_2O_3	3.4	11.39	--	0.6	0.71
	CaO	62.8	5.24	--	7.6	2.01
	MgO	2.6	1.67	--	0.24	2.87
	Na_2O	0.4	0.51	--	1.0	0.74
	K_2O	0.8	1.23	--	--	6.26
	SO_3	2.1	0.58	--	--	–
	P_2O_3	--		--	--	1.93
	L.O.I.	0.5	4.9	4.7	0.3	1.0
Physical properties	Specific gravity	3.15	2.17	2.68	2.85	2.2

參、結果與討論

3-1 抗壓強度(Compressive strength)

混凝土材料最重要的硬固性質為抗壓強度，而一般認為抗壓強度愈高，其它工程特性也會愈好，若水泥基質材料不添加爐石、飛灰及矽灰等卜作嵐材料時，強度發展隨齡期增加，其水化行為將持續緩慢進行，而強度亦會有漸進成長的現象，但 28 天後之強度成長有限。當水泥基質材料加入卜作嵐後，強度成長亦是緩慢的成長，但參與水化反應的材料不再只有水泥而已，其強度發展將是水泥水化反應和卜作嵐反應交互作用的成果；因此，水泥基質材料經過 28 天齡期後，硬固性質仍會不斷緩慢成長。本研究使用 Fuller 級配曲線配比模式設計水泥基質材料，將利用物理性緻密堆積法則，引用適量卜作嵐材料，作為填塞粗、細粒料空隙達到緻密化的效益，使粒料性質的變異度降至最低，進而探討水泥基質材膠結漿質與量對其工程性質的影響程度，以作為工程界應用的依據。

針對水泥基質材料之活性粉混凝土而言，其不同膠結漿質及膠結料組成之強度發展，如圖 2 所示，顯示由石英砂、石英粉、爐石、飛灰、矽灰及水泥組成之活性粉混凝土，當膠結漿質 w/cm = 0.14, 0.17, 0.20 和 0.23，其 28 天強度分別為 74, 73, 70 和 66Mpa，膠結漿質愈佳，其強度愈高，但早期強度的強度發展較平緩，而 28 天後的強度發展則快速成長，如圖 2(a)所示。如圖 2(b)所示不同膠結漿質各齡期強度發展回歸結果，由於 Fuller 級配曲線配比模式係以粒料緻密堆積為架構，且將水泥視為固體顆粒材料參與物理性堆積，當膠結漿質愈佳，用水量太少，導致膠結漿質 w/cm = 0.14 時之 7 天早期強度發展緩慢，但相較於其他膠結漿質之強度發展斜率，反而較大。



(a) (b)

圖 2 不同膠結漿質活性粉混凝土抗壓強度發展

3-2 超音波速率(Ultrsonic pulse velocity)

超音波屬於一種應力波，藉由量測脈波在介質內傳遞的速度，可供判斷材料品質良窳和內部探傷之用。水泥基質材料組成可區分為固體粒料和膠結漿，脈波在這些材料間的傳遞速度，可以組合成水泥基質材料的傳遞速度，而水泥基質材料屬於複合材料，本體內即存在許多的界面(Interface)和缺陷(Defects)，脈波經過這些地方會產生干擾的現象，因此當水泥基質材料內部有缺陷或裂縫時，則波速繞射時間較長，相對緻密度較低，水泥基質材料品質則較差。也因此水泥基質材料的密實度和粒料界面的緻密性，將影響脈波傳遞路徑的長短，故傳遞時間的快慢，可以直接顯示材料品質。本研究係以超音波的縱波，量測抗壓試體縱向波速。波速則受質量密度(ρ)、楊氏係數(E)和波松比(ν)等因素的影響，E 和 ν 值並不在本研究討論的範圍，波速量測結果則與混凝土單位重(度)直接相關。應用 Fuller 級配曲線配比模式，係以緻密堆積為架構，若膠結漿質佳且裹漿量低配比的單位重較高，水泥漿量較少，超音波傳遞速度快，將有助於提昇水泥基質材料品質。而活性粉混凝土之超音波速率隨齡期的增加而增加，相較於混凝土，由於其固體

顆粒與膠結漿間之弱界面較多，需要較多時間填塞，因此增加速率較平緩；對活性粉混凝土而言，超音波速率主要受到膠結漿質 w/cm 及膠結料粒級的影響，齡期 7, 28 及 132 天之關係式，如圖 3 示，顯示相同粒料粒級堆積下，膠結膠質愈佳，w/cm 愈低之超音波速率愈快，而改變粒料粒級堆積之影響以石英砂、石英粉、矽灰及水泥之配比，由於較微細之矽灰使用量最高，粒料間之空隙較微小，因此超音波速率最快，齡期 132 天達 4683 m/sec，而以同時加入飛灰、爐石參與堆積之配比最低，齡期 132 天為 4652 m/sec，但差異不大。

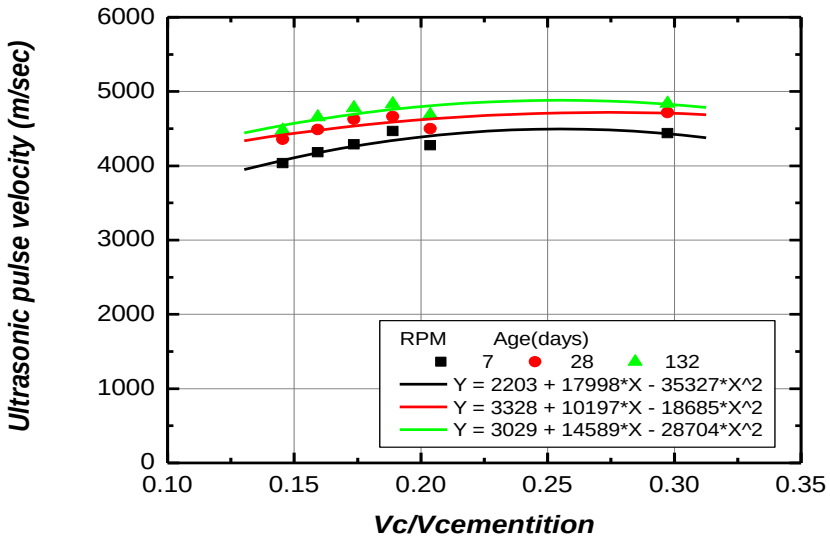


圖 3 不同水泥漿濃度活性粉砂漿超音波速率比較

3-3 表面電阻(Electrical resistivity)

水泥基質材料導電性能與材料孔隙內部電解質溶液之成分與濃度有關，因此影響水泥基質材料電阻值最大因素為材料微觀結構物的緻密程度。而混凝土電阻值即為探知混凝土緻密程度、抗滲性的耐久性指標，當混凝土緻密程度愈高表示孔隙愈少，電導通路變長，使得混凝土電阻值提高。雖然僅量測混凝土表面之阻抗性，但一般外界劣化因子乃由表面所滲入，在經由混凝土中之微裂縫滲入混凝土內部，因此電阻值能反映出外界劣化因子進入內層的易難程度，通常規定 56 天以上之混凝土電阻值必須大於 20kΩ-cm，才屬優良之抗蝕混凝土。對活性粉混凝土而言，表面電阻主要受到膠結漿質 w/cm 及水化程度的影響，齡期 7, 28 和 132

天之關係式，如圖 6-38(c)示，當固定粒料粒級堆積下，改變膠結漿質 w/cm = 0.14, 0.17, 0.20 和 0.23，其表面電阻分別為 18.1, 15.9, 15.6 和 17.4 kΩ，由於早期水化未完全，活性粉混凝土之固體顆粒與水泥漿界面較多，在卜作嵐未發揮反應前，無法有效地提昇水泥基質材料之密實度，因此電阻值較低，但齡期 132 天之表面電阻則高於 2000 kΩ，無法量測。

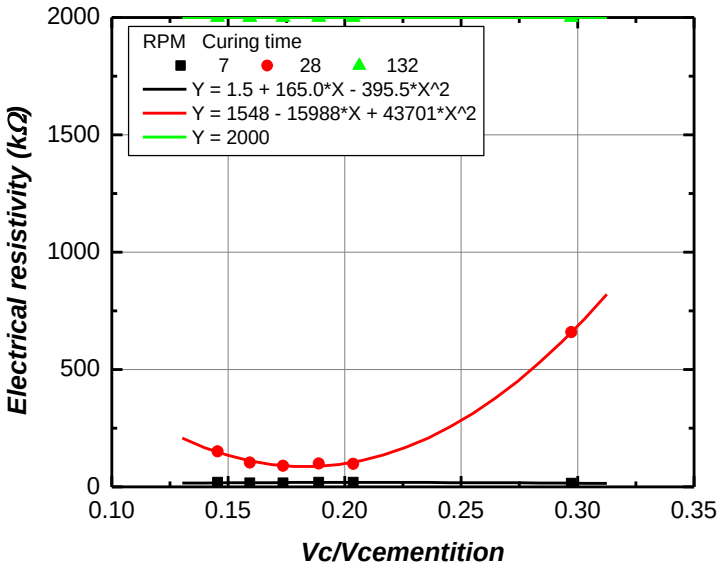


圖 4 不同水泥漿濃度活性粉混凝土表面電阻比較

3-4 電子顯微形態(SEM)

本研究採電子掃描式顯微鏡在混凝土上的應用，主要透過 SEM 觀察水泥水化後 C-S-H 膠體、氫氧化鈣(CH)、鈣釩石(AFt)、單硫型鋁酸鈣(AFm)等水化物產物的變化，以及毛細管孔隙與再生粒料中水泥砂漿之微觀圖片，並觀察混凝土不同齡期之結構變化。對於活性粉混凝土之電子顯微鏡觀察，不同膠結漿質於不同齡期之顯微形態成長，如圖 5 所示，顯示圖中早期可以觀察到 CH、AFm 等水化物。晚期則看到飛灰球體已被反應物質包圍，卜作嵐反應產物有效地填充微孔隙。

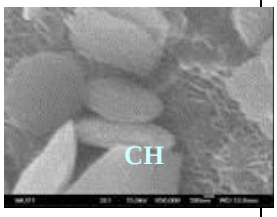
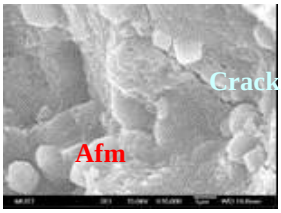
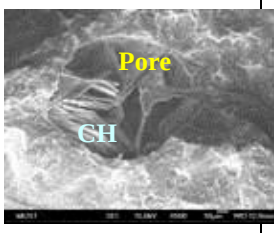
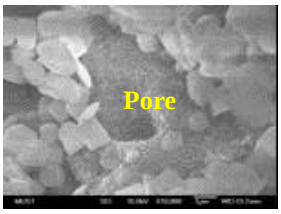
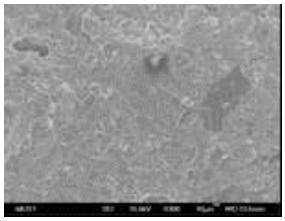
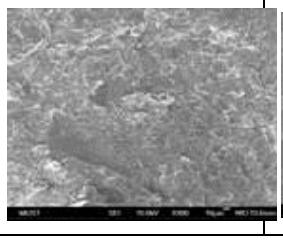
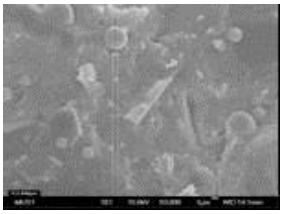
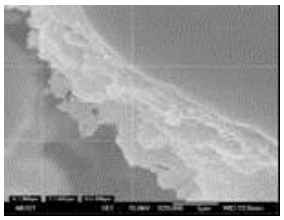
膠結料組成	7days	28days	132days
Fly ash- Slag- Silica fume- Cement			
Slag- Silica fume- Cement			
Silica fume- Cement			

圖 5 不同膠結料活性粉混凝土 SEM 微觀形態

肆、結論與建議

經由上述之結果與討論，可得以下結論：

1. 由石英砂、石英粉、爐石、飛灰、矽灰及水泥組成之活性粉混凝土，當膠結漿質(w/cm)膠結漿質愈佳，其強度愈高，但早期強度的強度發展較平緩，而 28 天後的強度發展則快速成長。
2. 活性粉混凝土之超音波速率隨齡期的增加而增加，相同粒料粒級堆積下，膠結膠質愈佳，w/cm 愈低之超音波速率愈快。
3. 由於早期水化未完全，活性粉砂漿之固體顆粒與水泥漿界面較多，在卜作嵐反應未發揮反應前，無法有效地提昇水泥基質材料之密實度，因此電阻值較低，但齡期 132 天之表面電阻則高於 2000 kΩ，無法量測。
4. 對於活性粉砂漿之電子顯微鏡觀察，水化初期可以觀察到 CH、AFm 等水泥水化產物。晚期則看到飛灰球體已被反應物質包圍，卜作嵐反應產物有效地填充微孔隙。

參考文獻

1. Richard, P. and M. Cheyrezy., “Reactive Powder Concretes with High Ductility and 200-800 MPa Compressive Strength.”, ACI Spring Convention, San Francisco, April 1994.
2. Richard, P. and M. Cheyrezy., “Composition of Reactive Powder Concretes.”, Cement and Concrete Research, Vol. 25, No. 7, pp. 1501-1511, 1995.
3. N. Roux, C. Andrade, M. A. Sanjuan, “Experimental Study of Durability of Reactive Powder Concrete,” Journal Of Materials In Civil Engineering, Feb 1996.
4. 林坤德,「鋼纖維與矽砂含量對活性粉混凝土熱學與力學性質之影響」,國立台灣科技大學碩士論文，2005 年七月。(張大鵬教授指導)
5. 吳建興,「活性粉混凝土補強混凝土構件與耐久性能之測試研究」,碩士論文，朝陽科技大學，民國 92 年。(李明君教授指導)。
6. 陳桂清、柯正龍、張大鵬和黃兆龍,「活性粉混凝土補強 R.C.構件與耐久性之研究(1/2)(期末報告)」，交通部運輸研究所與國立台灣科技大學合作辦理，民國 94 年 11 月。