

以同步輻射解析高性能混凝土漿體水化性質之研究

張炳坤¹ 黃兆龍² 蔡宗勳³

關鍵詞： 同步輻射、高性能混凝土、水膠比、水化性質。

摘要

本研究採用同步輻射 (SRA) 解析高性能混凝土漿體水化性質。SRA 最大優點即所測定試體毋需經過試片抽真空、乾燥及鍍金處理等麻煩手續，亦即試體完全在自然狀態下，對其實施全程水化監測與化學成份鑑定。依據研究結果顯示，水膠比減少，則 CH、AFm 形成比率將同時減少，若增加飛灰用量，將消耗 CH 的量，且隨齡期的增加，這種趨勢愈明顯，因此鑑定上並不困難，不但可以定性，更能定量分析出鈣釤石 (AFt)，單硫型鋁酸鈣 (AFm) 及氫氧化鈣 (CH) 等晶體結構。

A STUDY ON THE HYDRATION PROPERTIES OF HIGH PERFORMANCE CONCRETE ANALYZED BY SYNCHROTRON RADIATION

Ping-Kun Chang

Department of Civil Engineering
Van Nung Institute of Technology
Chung-Li, Taiwan 32054, R.O.C.

Chao-Lung Hwang

Department of Construction Technology
National Taiwan University of Science and Technology
Taipei, Taiwan 10672, R.O.C.

Tzung-Shiun Tsai

Key Words: synchrotron radiation, high performance concrete, water to binder ratio, hydration properties.

ABSTRACT

The synchrotron radiation accelerator (SRA) was applied to analyzing the hydration properties of high performance concrete in this study. The main advantage of employing the SRA is that such complicated procedures as making vacuum, drying and sputter coating are unnecessary for preparing the test specimens. Namely, the specimens prepared under normal conditions were used to monitor their hydration process and to analyze their chemical ingredients. The results show that as the water to binder ratio decreases, the formation rates of CH and Monosulfoaluminate (AFm) will also decrease. Also, if the content of fly ash is higher, then the formation rate of CH will become lower, especially when the age increases. In short, it is not difficult to apply the SRA to analyzing both qualitatively and quantitatively the structures of Ettringite (AFt), AFm, and CH.

一、前言

電磁波的理論顯示 [1]，加速中的帶電粒子都會輻射

電磁波。在圓形軌道上以接近光速的速度運動的帶電粒子，因為受到向心加速的原因，所以會沿著軌道切線的方向輻射電磁波。這種輻射現象係於 1947 年首次在「電子

¹ 萬能工商專科學校土木工程科講師、國立交通大學土木工程學研究所博士班研究生

² 國立台灣科技大學營建工程系教授

³ 國立台灣科技大學營建工程系碩士



同步加速器」(electron synchrotron) 中被觀察到，故稱為「同步加速器輻射」，簡稱「同步輻射」。於 90 年代被應用來研究水泥與混凝土之行為 [2]。因為 SRA 其高穩定度、高強度光源及電子在儲存環中能保持長時間運轉特性，故特別適合於研究「結晶性」(crystalline) 與不定形(amorphous) 材料 [3]。國內於 1995 年開始嘗試應用同步輻射技術於水泥漿體研究領域上 [4]，研究含飛灰水泥漿體之水化行為，以建立 SRA 研究混凝土漿體水化性質與可用性。高性能混凝土 (high performance concrete；簡稱 HPC) 之研究發展 [4]，目的在改善傳統混凝土之缺失，使施工容易，耐久而安全及提昇整體工程效益。經由 W/B 的降低，緻密配比的改良，強塑劑的使用，和卜作嵐摻料的添加以達到高強度、高工作性、高耐久性、高水密性、高耐磨性等優良性質之混凝土。對台灣而言，高性能混凝土的應用尤其是有必要的。本島的砂石資源有限，正可以利用高性能混凝土中強度高和耐久性好的性質，來降低混凝土的使用量，以避免因砂石過度開採所引發之環保抗爭。再者，像高性能混凝土中工作性高和流動性好的性質，正可以革除現階段在澆置時加水的惡習。

80 年代核磁共振儀被使用在水泥漿及混凝土探測上，為材料科學的一大進步，但由於製造試體時須終止水化，需以真空乾燥處理，且要將檢測之試體置入破碎機打碎後再置入研磨鉢研磨使之成為通過 #325 篩之粉末，手續相當麻煩。同步輻射最大的優點就是試體不用經過麻煩的手續如抽真空、乾燥及磨細處理，試體完全是在自然的狀況下，也就是說沒有終止水化。有關晶體的成長及轉變就可一目瞭然，同步輻射因可全程監測水化過程 [5]，不會像先前觀測法有如冰山一角之憾。在同步輻射加速儀觀測下，氫氧化鈣之形成就可進一步得到瞭解，針對其性質添加某些材料以去除之，或變成有利整體結構的物質，如添加卜作嵐材料後，反應生成 C-S-H 膠體。如此就可知道治療混凝土 CH 或其他鹼性物質之處方，增加混凝土之耐久性；又 AFm、AFt 之互動關係及形成因素產生量為多少，在同步輻射下將無所遁形，且一些更細微或不可知結構等著去發現。

二、試驗計畫

本研究試驗材料採用台電興達廠 F 級飛灰、欣得公司之 G 型強塑劑及台灣水泥公司第一型水泥，其物化性質資料如表 1 所示。材料配比如表 2 所示，水膠比 (W/B) 為 0.28, 0.32, 0.4，齡期為 7, 28 及 56 天。秤取適當水泥約 150g，依配比需要加入適當之水後手拌 2min，接著加入強塑劑後再均勻攪拌。拌合後之漿體小心移入 SRA 的透明塑膠試片內，再以 3M 隱形膠帶塞住出口，如此可減少蒸發量至最小。安置妥當後，放入同步輻射光源中觀測，SRA 試驗照片如圖 1 所示。同步輻射光自電子儲存環射出後，經各種光學元件的引導最後進入實驗站。光學元件中最重要的單光器通常為兩片裝在測角儀上的平行晶體，依據晶體繞射的布拉格定律，在某一特定的入射光與晶面間的夾角下，僅有相對應的某特定波長 (或其整數倍) 的光

可通過，而達到選取單一能量的功能，因此欲進行能量的掃描，只需轉動晶體而改變布拉格角即可。

表 1 卜特蘭水泥與飛灰之物化性質

試驗項目	水泥 (第 I 型)		飛灰
	CNS61	台泥	台電興達廠
化學成分 (%)	SiO ₂ (S)	—	51.23
	Al ₂ O ₃	—	24.31
	Fe ₂ O ₃ (F)	—	6.14
	S+A+F	—	81.78
	CaO	—	62.8
	MgO	Max: 6.0	1.61
	SO ₃	Max: 3.0	0.61
	f-CaO	—	—
	TiO ₂	—	—
	Na ₂ O	—	—
	K ₂ O	—	—
	V ₂ O ₅	—	—
	燒失量	Max: 3.0	4.85
	不熔殘渣	Max: 0.75	—
物理性質	C ₄ S	—	—
	C ₂ S	—	—
	C ₃ A	—	—
	C ₄ AF	—	—
細度 (cm ² /g)	Min: 2800	2970	3110
比重	—	3.15	2.18
初凝 (Vicat) 時間 (分：秒)	45	4 : 37 (W/C = 0.47)	—
終凝 (Vicat) 時間 (分：秒)	6 : 15	8 : 22	—

表 2 高性能混凝土漿體材料配比 (kg/m³)

組別	1	2	3	4
材料配比	W/B	0.28	0.32	0.40
飛灰 (%)	5	5	5	0



圖 1 同步輻射光束線試驗儀器照片

本文對於同步輻射 X 光光譜之延伸區精細結構 (extended X-ray absorption fine structure, 簡稱 EXAFS) [6] 作一介紹。基於單一散射以及平面波 (或小原子) 的假設，方程式可寫為：

$$X(k) = \sum_j \frac{N_j}{K R_j^2} S_j(k) F_j(k) \exp(-2 \sigma_j^2 k^2)$$



$$\cdot \exp[-2R_j/\lambda(k)] \sin[2kR_j + \delta_{ij}(k)] \quad (1)$$

其中 R_j ：第 j 層原子與中心原子間之距離

N_j ：第 j 層中含有的原子個數或稱配位數

$S_j(k)$ ：振幅減低因子，用以反映吸收程序中多重激發的效應

σ_j ：Debye-Waller 因子，用以描述原子排列的雜亂程度，為該層所有各別原子與中心原子間之距離減去平均距離之平方和的方根

$\lambda(k)$ ：電子的平均自由徑，用以考慮非彈性散射以及內層電洞半衰期效應

$S_{ij}(k)$ ：因中心原子 i 和背向散射原子 j 之電位而致的相位偏移

$F_j(k)$ ：由原子 j 背向散射的振幅大小

χ 稱為 EXAFS 函數 [7]，其定義為：

$$\chi(E) = \frac{\mu(E) - \mu_0(E)}{\mu_0(E)} \quad (2)$$

μ 為實際量測得之吸收係數， μ_0 則係假想無 EXAFS 存在下（獨立原子）的「平滑」吸收係數。至於能量 E 與光電子波向量 k 之間的關係為：

$$k = \left(\frac{8\pi^2 m}{h^2} E \right)^{1/2} \quad (3)$$

其中 m 為電子的質量。姑且先不論(1)式的複雜性，吾人可將其簡寫成如下型式：

$$\chi(k) = \sum_j A_j(k) \sin[\phi_{ij}(k)] \quad (4)$$

其中 $A_j(k)$ 為振幅項，而 $\phi_{ij}(k)$ 為相位項，亦即 EXAFS 為在 k -空間中一群具有不同振幅及頻率之振盪的總合。比較(1)式及(4)式可知，總相位 ϕ_{ij} 包含兩部份的貢獻：第一部份源自於光電子波由中心吸收原子 i 出發，到達背向散射原子 j ，再折回吸收原子所行經 $2R_j$ 之距離，此一路程導致向外行進與背向散射的電子波間有 $2\pi(2R_j/\lambda e)$ 之相位差，若將 $2\pi/\lambda e$ 定義成 k ，則：

$$k = \frac{2\pi}{\lambda e} = \frac{2\pi p}{h} = \frac{2\pi(2mE)^{1/2}}{h} p \quad (5)$$

總相位的第二部份貢獻，相位偏移 $\delta_{ij}(k)$ ，則係因為背向散射的光電子與中心，吸收 i -背向散射 j 原子對的電位相互作用所致。由(1)式可知許多結構上的參數，例如：原子間距離 R_j ，各層的配位數 N_j ，原子排列的雜亂度 σ_j^2 以及原子種類，有如水泥材料中的鈣 (Ca)、氧 (O) 等，可藉數據分析而萃取出。同步輻射是唯一能提供波長連續、可調且範圍寬廣的光源裝置，因為不同物質的物理與化學性質，對不同波長的光反應程度不一。於是這種波長連續可調的光源，可以廣泛的應用於基礎科學研究及材料科技應用上。

三、實驗結果與討論

高性能混凝土中添加卜作嵐材料如飛灰等，將使水泥中水化產物氫氧化鈣 (CH) 與飛灰中矽產生晶狀之鈣矽水化物 (C-S-H)，類似卜作嵐反應產物鈣鋁水化物 (C-A-H) 之特性，隨著鋁酸鹽含量、活性而變，並與硫酸鹽作用，產生鈣釔石 (Aft)，造成體積膨脹。而卜作嵐反應產物 C-S-H 為矽酸鹽與 CH 至少在 56 天以上緩慢作用而結合，由於易溶於水之 CH 消耗而增加水泥中 C-S-H 膠體含量，除提升 56 天後強度，更增加耐久性。含飛灰之水泥漿體中水泥水化初期，飛灰中鋁、矽離子易與 Ca 離子結合形成一矽—鈣薄層包覆飛灰顆粒表面，因而溶液中 Ca 離子濃度降低， C_3S 之水化作用由於 Ca 之消耗而遲滯。Mehta [8,9] 則認為飛灰與 CH 水化反應時，在飛灰與 CH 表面形成多孔性脆弱薄層，若反應環境穩定，則膠體進而成長為纖維狀或顆粒狀之 C-S-H 晶體。且沉積在飛灰表面，當晶體沉積量逐漸增加至飛灰及氫氧化鈣離子釋放困難，水化反應因而遲滯 [10,11]。倘若遇外力擾動，壓力改變或溫度增加則膠膜再破裂，C-S-H 晶體由飛灰表面剝落，呈現新鮮面，離子又重新釋出，水化反應再度進行。

由公式(1)~(4)式可知， $\chi(K)$ 為在 K -空間中許多不同頻率之正弦函數項的總和，經由傅立葉變換 (FT) 將各項貢獻予以解析，如在 CaO 中，再進行反傅立葉運算 (IFT)，可提供各單獨原子層如 Ca 及 O 振幅及總相位。因鈣和鈦原子序有相當差異，因此，鑑定分析上並不困難，經由 χ^2 加權後的函數中各振動頂點連接成一條平滑曲線，如圖 2 所示。為了尋求在相同的基礎上，以每一原子為基礎進行 EXAFS 數據之比較與分析，常將背景扣除後之光譜圖進行正規化運算，其分析條件方可得一致性。

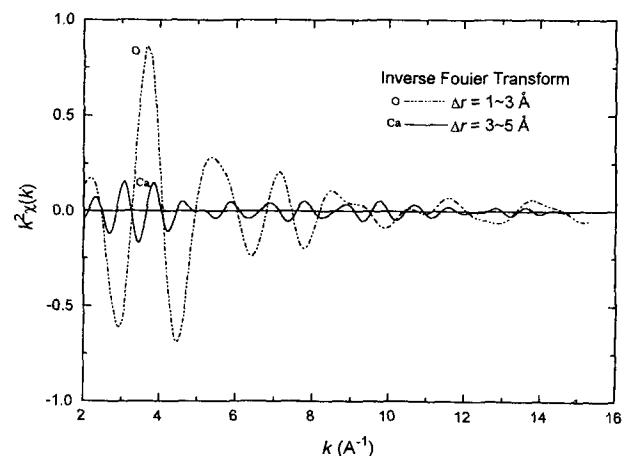


圖 2 CaO 中兩配位層反傅立葉變換之結果

本研究有關 HPC 漿體之水化行為，係由 CH、Alite、Ferrite、Aft、AFm 等晶體，對同步輻射光線吸收強度反應不同而有不同之晶格平行間距 d_{hh} (dspacing)，將譜圖上尖峰值吾人可以參照文獻 [12] 中，不同水化生成物所具有特定的晶格平行間距，在 SRA 光譜圖上所顯現之位置與特徵，

由波峰隨著齡期增加而改變予以積分，再由時間與強度之關係推估出水化產物之量。為避免光譜圖雜訊干擾而無法判別真正水化產物生成量，我們須先處理扣除干擾背景值，方可得出理想數據來協助分析。由各 d_{hkl} 所標示編號分別代表水泥漿體成份與產物。在飛灰在 CH 的功用，於相同 $W/B = 0.4$ ，5% 添加情形下較不添加飛灰的試樣，其輻射強度較低，亦即有添加飛灰者，隨齡期增加，由於卜作嵐反應產生 C-S-H (鈣-矽-水化物) 及 C-S-A (鈣-矽-鋁) 膠體，而使 CH 量減少，齡期從 7 天到 56 天水化作用期間，即可看出此種趨勢。 $W/B = 0.4$ 時，因含水量較高會產生更多的 CH，而低含水量時，即 W/B 較低時則有減少的趨勢，如圖 3、圖 4 所示齡期與輻射強度之關係。有關水泥中 Alite 含量隨水化程度之改變，其水化程度隨齡期及初期含水量之增加而增加，如表 4 不同水膠比、齡期與飛灰含量之 HPC 漿體輻射強度值，及圖 5、圖 6 所示資料，全部水化程度能夠被計算出來。在表 3 中兩個 d_{hkl}

反射平均值，可被用來計算水化程度，由結果評估得知，分析表 4 及圖 6 的資料顯示，Alite 的輻射強度值，有隨齡期增加而遞減的趨勢，探究其原因係含有雜質的 C₃S 水化反應後形成類似 Tobermorite 土的 C-S-H 膠體與氫氧化鈣生成物，促使 Alite 曲線只降不升的趨勢。隨齡期增加而 Alite 減少，顯示其參與水化反應，水膠比 W/B 愈低，即用水量愈少，Alite 參與水化反應量會減少。由於漿體配比在不同時間拌合及製作，所以不同組別的強度資料可以獲

得，經由如此，更多合理的定性及定量值可被取得。

表 5、圖 7 及圖 8 中 HPC 漿體由 7 天到 56 天齡期之 Ferrite 輻射強度改變，Ferrite 相存在係鋁鐵酸四鈣 (C_4AF) 含有雜質，其中鋁酸鈣鹽的反應速率遠比矽酸鈣鹽類的反應快很多，其輻射強度值僅次於 CH。圖 7 中不添加飛灰與飛灰含量 5% 的曲線，皆有很大的斜率，顯示其水化反應速率快。此亦印證鋁酸鈣鹽類的水化，類似一般放熱性物質迅速泡入水中，即刻會產生激烈反應。含雜質 C_4AF 之 Ferrite 由於儲存大量的放熱能，入水即產生水化崩解，其分裂狀況產生一片片碎裂的水化產物，對混凝土工程性質非常不利。從實驗資料得知，含水量愈多，則水化速率增加。增加強塑劑用量，同時減少含水量，將會影響早齡期水化作用試驗變數對於 C_4AF 水化速率的影響，但隨水化時間增加，而 Ferrite 量減少，顯示其參與水化反應，利用平均值計算漿體隨齡期增加，而水化程度愈高，此研究結果與文獻 [13] 相同。

圖 8 中的曲線若有添加 5% 飛灰含量者，由 7 天到 28 天輻射強度皆有下降的趨勢，水膠比愈大者如 $W/B = 0.4$ ，此種趨勢更加明顯，即含水量愈多者，其水化反應顯著。然而由 28 天到 56 天輻射強度有不減反增的趨勢，此時或許波索蘭反應所造成的結果對於晚期有所影響，然 $W/B = 0.32$ 此種曲線並未有不降反升的趨勢，反而是下降，但是其下降值並沒有很顯著，研判隨齡期增加，應會隨之有上升趨勢，此乃有待後續性研究之探討。

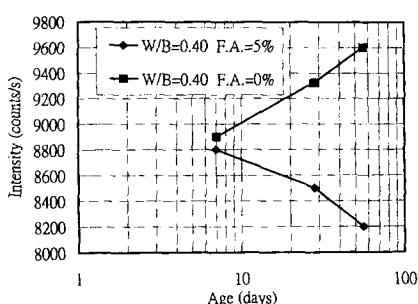


圖 3 $W/B = 0.40$ 時，不同飛灰含量之漿體，其 CH 輻射強度與齡期之關係

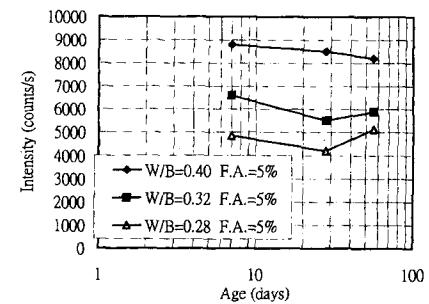


圖 4 飛灰含量為 5%，不同水膠比時之漿體，其 CH 輻射強度與齡期之關係

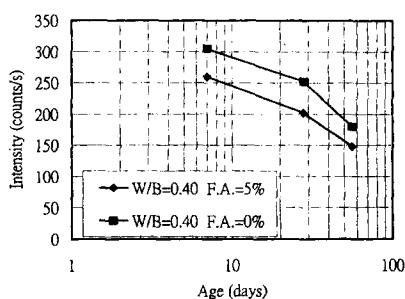


圖 5 $W/B = 0.40$ 時，不同飛灰含量之漿體，其 Alite 輻射強度與齡期之關係

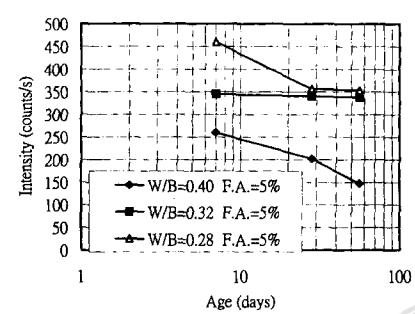


圖 6 飛灰含量為 5%，不同水膠比時之漿體，其 Alite 輻射強度與齡期之關係

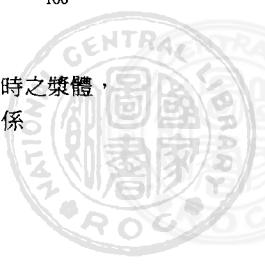


表 3 CH 在不同水膠比、齡期與飛灰含量之 HPC 漿體
輻射強度值 (counts/s)

水膠比 (W/B)	0.28	0.32	0.40	0.40
飛灰含量 (%)	5	5	5	0
齡期 (天)	7	28	56	
7	4850	6600	8800	8900
28	4200	5500	8500	9325
56	5120	5880	8200	9600

表 4 Alite 在不同水膠比、齡期與飛灰含量之 HPC 漿體
輻射強度值 (counts/s)

水膠比 (W/B)	0.28	0.32	0.40	0.40
飛灰含量 (%)	5	5	5	0
齡期 (天)	7	28	56	
7	460	345	260	305
28	356	340	202	252
56	353	338	148	180

表 5 Ferrite 在不同水膠比、齡期與飛灰含量之 HPC
漿體輻射強度值 (counts/s)

水膠比 (W/B)	0.28	0.32	0.40	0.40
飛灰含量 (%)	5	5	5	0
齡期 (天)	7	28	56	
7	1080	1095	1220	1256
28	1009	1050	1060	1190
56	1015	1025	1080	1090

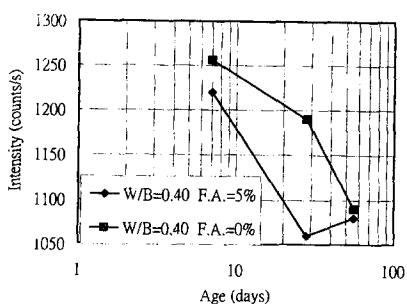


圖 7 $W/B = 0.40$ 時，不同飛灰含量之漿體，其 Ferrite
輻射強度與齡期之關係

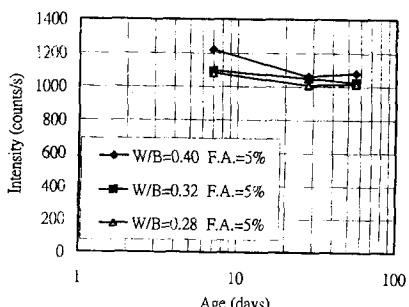


圖 8 飛灰含量為 5%，不同水膠比時之漿體，其 Ferrite
輻射強度與齡期之關係

HPC 漿體由 7 天到 56 天齡期之鈣矾石 (AFt) 輻射強度關係如表 6、圖 9 及圖 10 所示，其尖峰強度僅次於圖 3 之氫氧化鈣 CH。圖 10 中 W/B 愈高，含水量愈高，則 AFt 量隨之增加，鈣矾石將使混凝土體積膨脹，增加孔隙影響混凝土之強度。從 7 天到 56 天齡期，AFt 不會明顯有增量影響，顯示大部份 AFt 在 7 天齡期以前即水化完成，其對混凝土強度有不利影響，應儘可能予以避免。硫鋁酸鈣水化物 AFm 有一個低強度尖峰，如圖 11、圖 12 及表 7 所示，在漿體中可被觀察出來。水化程度及配比設計常是尖峰強度的函數值，尤其值得一提的是，在晶體不完整之晶相中有 AFm 存在，其強度較低。由圖中顯示減少初期含水量，將減少所有齡期尖峰強度，亦即 W/B 提高，用水量增加，輻射強度亦隨之而增加。在 $W/B = 0.4$ 時隨水化時間增長，將增加 AFm 尖峰強度，但是在 $W/B = 0.32, 0.28$ 時，隨齡期增加其尖峰強度將減少。探究其原因，應是在水化過程中形成 C-S-H 膠體及 CH 時，自由水已經消耗殆盡而影響 AFm 之形成，尤其水膠比愈低，此一現象尤其更為明顯。

表 6 AFt 在不同水膠比、齡期與飛灰含量之 HPC 漿體
輻射強度值 (counts/s)

水膠比 (W/B)	0.28	0.32	0.40	0.40
飛灰含量 (%)	5	5	5	0
齡期 (天)	7	28	56	
7	330	351	369	420
28	337	361	378	451
56	335	343	360	370

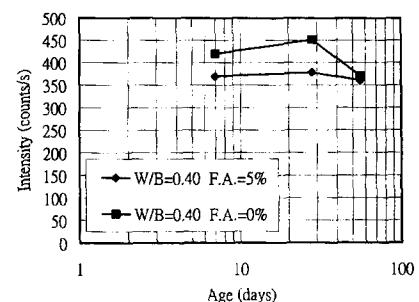


圖 9 $W/B = 0.40$ 時，不同飛灰含量之漿體，其 AFt 輻射
強度與齡期之關係

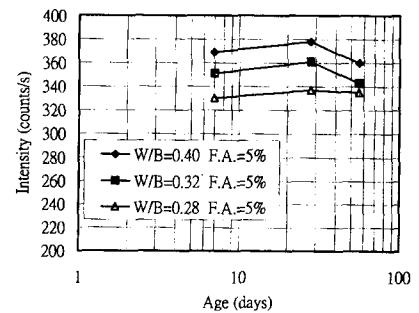
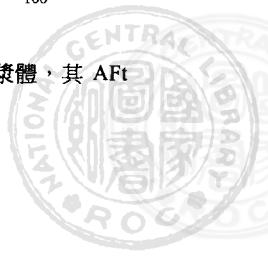


圖 10 飛灰含量為 5%，不同水膠比時之漿體，其 AFt
輻射強度與齡期之關係



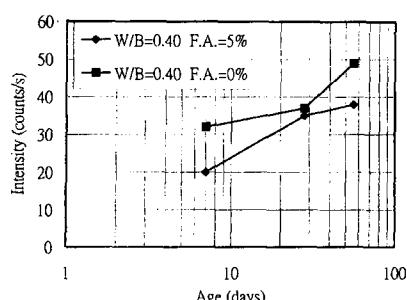


圖 11 $W/B = 0.40$ 時，不同飛灰含量之漿體，其 AFm 輻射強度與齡期之關係

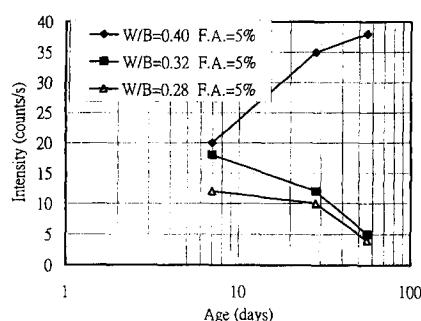


圖 12 飛灰含量為 5%，不同水膠比時之漿體，其 AFm 輻射強度與齡期之關係

表 7 AFm 在不同水膠比、齡期與飛灰含量之 HPC 漿體
輻射強度值 (counts/s)

水膠比 (W/B)	0.28	0.32	0.40	0.40
飛灰含量 (%)	5	5	5	0
齡期 (天)				
7	12	18	20	32
28	10	12	35	37
56	4	5	38	49

表 8 水化程度 (%) 計算值

水膠比 (W/B)	0.28	0.32	0.40	0.40
飛灰含量 (%)	5	5	5	0
齡期 (天)				
7	64	64	69	69
28	66	66	74	74
56	71	71	82	82

四、結論與建議

4.1 結論

- 由同步輻射可以直接得到詳細 XRD 所能獲取資料，不僅是晶相水化行為，同時對其形成的速率、特性以及水化過程亦可偵測。
- 可對氧化鈣 (CaO) 之化學成份中，距離最短的兩配位層進行「反傅立葉變換」，基於氧和鈣原子序的差異，

分析出氧和鈣原子並不困難。

- 水膠比 (W/B) 減少，則 CH 、 AFm 形成比率將同時減少。若增加飛灰用量將消耗 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 的量，在減少初期含水量情況下，輻射尖峰強度亦出現減少，產生不同 AFt 的 d_{hkl} 反射行為亦不同。
- 水膠比愈低， AFm 尖峰強度隨齡期增加而減少，因為在水化過程中形成 C-S-H 膠體及 CH 時，自由水已經消耗殆盡而影響 AFm 之形成。同時在晚齡期微觀結構增加改變，為維持連續穩定的相，自由水的提供是必需的，同時在足夠提供水化作用所需用水量，可藉著減少 C_3S 及用水量等策略予以解決。

4.2 建議

- 同步輻射在 HPC 漿體水化行爲探討有其獨特能力，惟仍不應偏廢其他分析技術，如核磁共振 (NMR)，熱刺激電流 (TSC) 等以獲致最佳效果。
- 長齡期的實驗及不同摻料對水化性質之影響有待後續之研究。

誌謝

本研究感謝行政院同步輻射研究中心提供研究設備，及李信義、許火順、李志甫與廖東昇先生之協助，謹此表達謝忱。

參考文獻

- 行政院國科會，同步輻射研究 (1994)。
- 行政院同步輻射研究中心，同步輻射簡介 (1995)。
- Muhamad, M.N., "A time-resolved synchrotron energy-dispersive diffraction study of the dynamic aspects of the synchrotron of ettringite during minepacking," *Cement and Concrete Research*, pp. 23–267 (1993).
- Hwang, C.L., Chang, P.K., "Hydration properties of high performance concrete analyzed by synchrotron radiation," SRRC 1995 Annual Users' Meeting, p. 29 (1995).
- Winick, H., *Synchrotron Radiation Research*, John Wiley & Sons Inc., New York, pp. 11–25 (1980).
- Teo, B.K., *EXAFS: Basic Principles and Data Analysis*, Springer-Verlag, Berlin (1986).
- Stern, E.A., *X-ray Absorption: Principles, Applications, Techniques of EXAFS, SEXAFS, and XANES*, John Wiley & Sons Inc., New York, pp. 3–51 (1988).
- Mehta, P.K., *Concrete-Structure, Properties, and Materials*, Perentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, pp. 75–117 (1993).
- Mehta, P.K., and Manmohan, K., "Pore size distribution and permeability of hardened cement paste," *Proceeding 7th International Congress Chemistry and Cement*, Paris, pp. VII 5–36 (1980).
- Taylor, H.F., *Cement Chemistry*, Academic Press, London (1990).

11. Pratt, P.L., "Mechanisms of hydration of Portland cement," *Proceeding Characterization and Performance Prediction of Cement and Concrete*, Henniker, p. 51 (1982).
12. Hwang, C.L., "Quantitative x-ray diffraction analysis," Material Research Group, Depertment of Civil Engineering, University of Illionis at Urbana (1977).
13. Malier, Y. "The French approach to using HPC," *Concrete International* (1991).

86年9月25日 收稿
87年1月19日 修改
87年2月18日 接受

