

## 第七章 混凝土中骨材與水泥漿界面處水化產物之發展

### §7-1 常溫濕拌混凝土骨材與水泥漿界面處水化產物之發展

使用 W/B=0.54 試體，在飽和石灰水中分別養護 1 天，7 天，14 天及 28 天，於規劃養護齡期時進行抗壓試驗，由試驗過程中發現抗壓試體之破壞係先從骨材界面處剝離，然後裂縫再轉折進入過渡區之弱面，因為考慮非平滑石頭表面被水泥漿覆蓋造成石頭部分與水泥漿部分之水化產物不易區別起見，故本研究直接選取抗壓試體中同時具有水泥漿和粗骨材的試片(稱為未處理)、選取之試片用酒精擦拭(稱為擦拭後)及將上述試片用最小號砂紙研磨後再用酒精擦拭(稱為研磨後)，利用 S-3000N 電子顯微鏡掃描水泥漿和粗骨材的界面，以 2000 倍的倍率進行 SEM 觀測，並將 SEM 照片執行 PhotoImpact 之『格式/影像類型/RGB』將其轉換成 RGB 色彩模型，用以觀察各種處理下水泥漿和粗骨材界面處之水化產物，各種處理下之 SEM 如圖 7-5 至圖 7-8 所示。為了明確界面處之水化產物之形狀，採用 10000 倍的倍率照相，以水泥漿和粗骨材的界面為準，左右各照四張，利用 PhotoImpact 之縫圖將此九張連接成連續之 SEM 圖，各種處理下連接之 SEM 照片如圖 7-9 至圖 7-20 所示，為了方便比較起見，首先按照上述方法先進行純石頭之 SEM 觀測，分別取蜂巢狀及片狀等兩種，其 SEM 圖如圖 7-1 至圖 7-4 所示。各種處理下之試片在不同齡期下的觀測結果說明如下：

各種處理情形在不同齡期下水化產物變化之比較表

齡期	未處理	擦拭後	研磨後
1 天	<ul style="list-style-type: none"> <li>於電子顯微鏡觀測下可發現在界面處左邊的顆粒骨材部分發現有水泥水化所產生的 Afm 覆蓋在骨材表面上且集中在離界面處 0~20 <math>\mu\text{m}</math> 的範圍內，此範圍外則為較零散的分佈，亦即骨材受水泥漿污染嚴重，幾乎看不到石頭，如圖 7-5(a)及圖 7-9 所示。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>由圖 7-5(a)及(b)發現試體擦拭後可有效地改善骨材受水泥漿污染的現象，另外由圖 7-10 可清楚發現在未處理試片中觀測到距界面處 0~20 <math>\mu\text{m}</math> 的範圍內形狀明顯之 Afm，因擦拭的關係變成碎屑狀並分佈於相同的範圍內，此原因為此試片之骨材為片狀，故其擦拭效</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>由圖 7-5(c)及圖 7-11 發現此試片之骨材為蜂巢狀石頭，由圖 7-11 發現在界面處左邊的顆粒骨材部分，其表面因研磨過，故較未處理試片之骨材來得平滑，但在石頭界面附近與距界面處 40 <math>\mu\text{m}</math> 的範圍外，有水泥水化所產生的水化產物覆蓋，其原因為研磨無法磨掉凹處之</li> </ul>

	<ul style="list-style-type: none"> <li>在界面處右邊的水泥漿部分，觀測到許多的 AFm 及部分 CH，其 AFm 之生成量較 CH 多，且分佈在離界面處 0~25 <math>\mu\text{m}</math> 的範圍內，並集中在 8~25 <math>\mu\text{m}</math> 間，大於 25 <math>\mu\text{m}</math> 範圍外就無發現其他明顯的水化產物生成，如圖 7-5(a)及圖 7-9 所示。</li> </ul>	<p>果特別好，見圖 7-10 所示。</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>在界面處右邊的水泥漿部分之水化產物，由於擦拭可觀測到較深層的水化產物，未處理試片所觀測到的是 AFm 及 CH，且 AFm 之生成量較 CH 多，而擦拭後的則在距骨材界面 10 <math>\mu\text{m}</math> 範圍內為 AFm，此範圍外則為 AFm 與 C-S-H 混雜且呈現網狀分佈於整個範圍內，見圖 7-5(b)圖 7-10 所示。</li> </ul>	<p>汙染，如圖 7-11 所示。</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>在界面處右邊的水泥漿部分之水化產物，由於研磨可觀測到更深層的水化產物，則與未處理者明顯的不同，但與擦拭者相同，更深層的水化產物仍是 AFm 及 C-S-H 混雜且零散地分佈於整個範圍內，在離界面處 8 <math>\mu\text{m}</math> 的範圍內呈片狀傾斜分佈，如圖 7-5(c)及圖 7-11 所示。</li> </ul>
7 天	<ul style="list-style-type: none"> <li>由圖 7-6(a)及圖 7-12 發現此試片之骨材為有層次之片狀石頭，故在界面處左邊的顆粒骨材部分有 AFm 零星堆積在高低界面處，由圖 7-6(a)可清楚看到水泥漿與骨材並非都是平滑接觸，而是在界面存在有高低的覆蓋裂縫，尤其在擦拭與研磨試片，此覆蓋的裂縫更明顯，且高低差愈大堆積量愈多，也可明顯觀察到石頭的片狀表面，如圖 7-6(a)及圖 7-12 所示。</li> <li>在界面處右邊的水泥漿部分，於 0~10 <math>\mu\text{m}</math> 間有 AFm 堆積在骨材與水泥漿之高低界面處，此範圍外則發現</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>由圖 7-6(b)及圖 7-13 發現此試片之骨材為片狀石頭，故在界面處左邊的顆粒骨材部分，觀測到未擦拭掉塊狀 AFm 零星分佈於距骨材界面 30 <math>\mu\text{m}</math> 的範圍內，此範圍外則無水化產物，但可明顯觀察到石頭的平滑表面，見圖 7-6(b)及圖 7-13 所示。</li> <li>在界面處右邊的水泥漿部分，可清楚看到 AFm 及 C-S-H 混雜，均勻地分佈於整個範圍內，如圖 7-6(b)及圖 7-13 所示。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>由圖 7-6(a)、(b)、(c)發現研磨後的骨材最為平滑，且受水泥漿汙染之水化產物最少，由圖 7-14 可清楚發現有 AFm 與 C-S-H 混雜覆蓋在距骨材界面 10 <math>\mu\text{m}</math> 的範圍內，且呈現斜條形分佈。</li> <li>在界面處右邊的水泥漿部分，為 AFm 及 C-S-H 交錯且呈現條形均勻地分佈於整個範圍內，如圖 7-6(c)及圖 7-14 所示。</li> </ul>

	<p>C-S-H 呈條狀的分佈，如圖 7-6(a)及圖 7-12 所示。</p>		
<p>14 天</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 這時已可明顯的發現在界面處左邊的顆粒骨材部分覆蓋有未產生卜作嵐反應之飛灰球存在，此飛灰球係因水泥漿汙染覆蓋在骨材上的(如圖 7-7(a)所示)，其距離距界面處約 <math>20\mu\text{m}</math>，同時在距界面處約 <math>10\mu\text{m}</math> 之範圍內有類似針刺狀之 AFm 與 C-S-H 交錯覆蓋於石頭表面，如圖 7-7(a)及圖 7-15 所示，另由本試驗得知，覆蓋在骨材部分的水化產物以 AFm 為主及少量的 CH，故骨材部分的飛灰尚未產生卜作嵐反應。但由擦拭後試片發現飛灰球表面覆蓋有 C-S-H 之水化產物，由此可知飛灰於 14 天就可產生卜作嵐反應。</li> <li>• 在界面處右邊的水泥漿部分，由圖 7-15 發現距界面處 <math>0\sim 5\mu\text{m}</math> 為 C-S-H，而在 <math>5\sim 15\mu\text{m}</math> 範圍內觀察到許多針刺狀之 AFm 與 C-S-H，交織成網狀的分佈，也觀測到飛灰球，其表面亦非常光滑，毫無卜作嵐反應之現象，如圖 7-7(a)及圖 7-15 所示。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 由圖 7-7(a)及(b)發現在界面處左邊的顆粒骨材部分之水化產物明顯地減少，其水化產物為三層 C-S-H 組成花朵狀的水化產物，零散地分佈於骨材表面上，因擦拭過，並無發現飛灰，如圖 7-7(b)及圖 7-16 所示。</li> <li>• 在界面處右邊的水泥漿部分，可清楚看到 C-S-H 均勻地分佈於整個範圍內，但其 C-S-H 外形與 7 天所觀測到的完成不同，7 天之 C-S-H 為針刺狀交織成網狀結構，見圖 7-15 之水泥漿部分 10000 倍的 SEM 圖，在 14 天時則可清楚看到由四片平行排列之三層 C-S-H 組成花朵狀的水化產物，見圖 7-16 之骨材與水泥漿部分 10000 倍的 SEM 圖，另外由圖 7-16 之水泥漿部分 10000 倍的 SEM 圖，發現飛灰球表面覆蓋有 C-S-H 之水化產物，其形狀與花朵狀的 C-S-H 完全不同，因為距骨材界面 <math>5\mu\text{m}</math> 範圍內為 C-S-H，故必有 CH 產生，其</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 這時已可明顯的發現在界面處左邊的大顆粒骨材有明顯被磨過的痕跡，在大顆粒骨材後面之小顆粒骨材因磨過，故其表面較未磨過純石頭來得平滑許多，在骨材背後可發現未磨掉之 C-S-H 與 AFm 混雜的水化產物，如圖 7-7(c)及圖 7-17 所示。</li> <li>• 在界面處右邊的水泥漿部分，觀測到粒徑為 <math>20\mu\text{m}</math> 之圓球，因為 Type F 飛灰之粒徑分佈範圍為 <math>10\sim 150\mu\text{m}</math> 【23】，因此研判該 <math>20\mu\text{m}</math> 之圓球應為未產生卜作嵐反應之飛灰，在飛灰背後之水化產物則為 C-S-H 呈塊狀零散的分佈，雖然經過研磨使得 C-S-H 水化產物之外形不明顯，但由圖 7-17 水泥漿部分之 SEM 圖觀測到三層狀 C-S-H，故判定該水化產物為 C-S-H，如圖 7-7(c)及圖 7-17 所示。</li> </ul>

		<p>生成量已足夠使飛灰產生卜作嵐反應，由此可進一步證明飛灰在 14 天就開始產生，但由飛灰產生卜作嵐反應所生長之 C-S-H 形狀與水泥水化所生長之 C-S-H 形狀完全不同，如圖 7-7(b)及圖 7-16 所示。</p>	
<p>28 天</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 這時在界面處左邊的顆粒骨材部分，觀察到由四片平行排列之三層 C-S-H 組合成花朵狀的水化產物，覆蓋於石頭表面，其範圍集中分佈於距界面處 <math>10\ \mu\text{m}\sim 50\ \mu\text{m}</math> 之間，如圖 7-8(a)及圖 7-18 所示。</li> <li>• 在界面處右邊的水泥漿部分，觀察到由四片平行排列之三層 C-S-H 組合成花朵狀的水化產物及少量已成片狀之 C-S-H 交錯分佈於整個範圍內，另外由圖 7-18 也發現有飛灰球存在，其表面所覆蓋由卜作嵐反應所生長之 C-S-H 較 14 天所觀察到的還多，故可證明飛灰在 14 天就開始產生卜作嵐反應，如圖 7-8(a)及圖 7-18 所示。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 由圖 7-8(a)及(b)發現在界面處左邊的顆粒骨材部分可發現，因為經過擦拭，故其水化產物明顯地較擦拭前減少許多，但仍可清楚觀察到由四片平行排列之三層 C-S-H 組合成花朵狀的水化產物覆蓋於石頭表面，並集中堆積在石頭與水泥漿的高低界面處，如圖 7-8(b)及圖 7-19 所示。</li> <li>• 在界面處右邊的水泥漿部分，觀察到由四片平行排列之三層 C-S-H 組合成花朵狀的水化產物及少量已成片狀之 C-S-H 交錯分佈於整個範圍內，且花朵狀的水化產物之排列較 14 天所觀察到的緻密許多，如圖 7-8(b)及圖 7-19 所示。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 這時在界面處左邊的顆粒骨材部分，除觀察到石頭仍有被磨過的痕跡外，其他骨材表面仍較未磨過純石頭來得平滑許多，且片狀石頭部分經研磨後已無發現由水泥水化所覆蓋的水化產物，但蜂巢狀石頭因無法完全磨平，故可發現仍有 C-S-H 之水化產物覆蓋在石頭的縫隙中，且無明顯的水化產物之外形，如圖 7-8(c)及圖 7-20 所示。</li> <li>• 在界面處右邊的水泥漿部分，雖然經過研磨，已無明顯的水化產物之形狀，但由圖 7-20 水泥漿部分 SEM 圖研判為集合花朵狀之水化產物經研磨成片狀，故判斷其水化產物仍為 C-S-H 呈片狀的分佈在整個範圍，如圖 7-8(c)及圖 7-20 所示。</li> </ul>

由 Ollivier-Grandet 及 Zimbelmann 【13, 14】 等人對骨材與水泥漿界面處過渡區之 SEM 觀測結果，在骨材表面為 CH、鈣氫石及 C-S-H 膠體之水化產物，其中在距骨材表面約 30  $\mu\text{m}$  範圍內之水化產物以 CH 為主，因為 CH 具方向性，故形成多孔隙的過渡區，並未說明其水化產物隨齡期之變化情形，故本研究以 10000 倍之倍率，以未經過處理與擦拭過試片，選取以同時含有骨材與水泥漿之界面處為主，分別向骨材部分及水泥漿(過渡區)部分各拍攝四張 SEM 圖，並將此九張 SEM 圖組成一連續的 SEM 圖，由於擦拭後試片之水化產物形狀比較明顯及骨材表面受水泥漿污染情況較輕，故以未處理及擦拭後之 SEM 圖來探討骨材部分及水泥漿(過渡區)部分水化產物隨齡期(取 1 天、7 天、14 天及 28 天等四個齡期)之變化，在 1 天與 7 天齡期時，可明顯看出骨材表面之水化產物均為水泥漿覆蓋(污染)所造成，且擦拭後之水化產物大幅度的減少，可清楚看到骨材的表面，由此可推論骨材與水泥漿之黏著力係由骨材界面所覆蓋水泥漿來支配，其水化產物為 CH、AFm 與 C-S-H 且以 AFm 生成量最多，換言之可說 1 天與 7 天骨材部分所覆蓋之水化產物以 AFm 為主，在水泥漿部分(即過渡區)之水化產物的種類亦同，靠近骨材界面處之水化產物仍以 AFm 為主，離骨材界面距離愈大有 C-S-H 生成量愈多的趨勢，至 14 天~28 天齡期時，骨材表面之水化產物為四片平行排列之三層 C-S-H 組合成花朵狀的水化產物聚集(稱為膠體-gel)，也發現尚未產生卜作嵐反應之光滑飛灰球，因為飛灰需與水泥水化之 CH 作用才能產生卜作嵐反應，由於靠近骨材界面處之水化產物以 AFm 為主且 CH 量不足以使飛灰產生卜作嵐反應，雖然 gel 之表面粘著力高於 AFm，即使如此，表面粘著力仍小於聚族的強度，更由圖 7-10、圖 7-13、圖 7-16 及圖 7-19 之擦拭後 SEM 圖發現，骨材並不會與水泥漿產生交互作用而生成水化產物，故對骨材與水泥漿之界面粘著力之影響僅由水化產物來控制，此現象亦可進一步說明混凝土試體破壞時為何先從骨材界面剝離，然後裂縫再轉折至過渡區之弱面處。而添加卜作嵐材料之高性能混凝土雖然無法有效改善骨材界面處之粘結力，但因卜作嵐反應能有效提高過渡區的強度，故有添加卜作嵐材料之高性能混凝土之整體強度仍然優於傳統混凝土。

## §7-2 常溫濕拌混凝土中骨材與水泥漿界面處水化產物之組成成分分析

為了進一步瞭解骨材與水泥漿界面處隨齡期增加在界面處左邊骨材部分及

右邊水泥漿部分各生成何種水化產物，除了由SEM來加以探討外，本研究選用W/B=0.54 分別在飽和石灰水中養護1天、7天、14天及28天等4個齡期，因考慮骨材污染特性，採用擦拭後之試片，進行2000倍的SEM拍攝，並在進行擦拭後試片SEM拍攝時，分別在骨材部分及水泥漿部分各打10點之EDS，共有20點之EDS，其EDS之位置如圖7-23~圖7-26所示，同時選用蜂巢狀與片狀之兩種石頭分別拍攝SEM及各打10點之EDS，其EDS之位置如圖7-21及圖7-22所示，混凝土試片與純石頭試片均做mapping(如圖7-27~圖7-32所示)，並做各齡期骨材部分之EDS與純石頭之EDS(如表8-2所示)比較，探討各種元素的分佈狀態，由水化產物隨齡期之變化，來探討骨材表面與水泥漿之間的粘著力，而以水泥漿部分之EDS(如表8-3所示)變化來印證水泥水化及飛灰之卜作嵐反應，表7-1及圖7-27、圖7-28為蜂巢狀與片狀石頭之EDS值與mapping圖，由表7-1中純石頭之EDS(採重量比)可看出純石頭之主要元素為氧(O)、矽(Si)、鋁(Al)及鐵(Fe)，由於粘土之成分為 $x\text{SiO}_2 \cdot y\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot z\text{Fe}_2\text{O}_3$ ，故本試驗所使用之骨材是屬於粘土質之骨材，而石頭之元素中只有氧(O)、矽(Si)、鋁(Al)、鐵(Fe)、鉀(K)及氯(Cl)之含量足夠形成mapping(如圖7-27及圖7-28所示)，不管是蜂巢狀或片狀，上述各種元素都是平均分佈於整個範圍內。

另外由表7-2及表7-3為W/B=0.54在飽和石灰水養護1天、7天、14天及28天之骨材部分與水泥漿部分的EDS值，由於採用不同試片及不同位置且石頭與水泥均屬於陶瓷材料，成分元素也相同，即使將混凝土試片之骨材部分與純石頭做比較，其EDS值之變化相當零亂，無法找出變化的趨勢，故轉由圖7-29~圖7-32之各種齡期2000倍的mapping圖來進一步探討，因為骨材與水泥同為陶瓷材料，能構成mapping圖的元素為鋁(Al)、鈣(Ca)、矽(Si)、鐵(Fe)及氧(O)，其中鋁(Al)、鐵(Fe)及氧(O)都是近乎均勻地分佈於整個範圍內，無法找出變化的趨勢，而本試驗是採用粘土質之骨材，其成分中並無鈣(Ca)存在，而鈣(Ca)卻是水泥中主要成分之一，各齡期之mapping圖中只有鈣(Ca)與矽(Si)有明顯的變化，由圖7-29~圖7-32中鈣(Ca)之mapping圖可清楚發現鈣(Ca)元素集中分佈於水泥漿部分，且呈均勻的分佈，不管任何齡期都有相同的現象，而骨材部分只有在受水泥漿污染(覆蓋)的地方才會出現(Ca)元素，由此研究結果可進一步說明骨材不會與水泥漿產生交互作用且與齡期無關。另外由矽(Si)之mapping圖可清楚發現，由於是矽質骨材，故骨材部分之矽(Si)元素含量較水泥漿部分多，

而在水泥漿部分沒有矽(Si) 元素出現的地方(即空白處)為水化產物之位置，此現象以 14 天與 28 天之矽(Si) 的 mapping 圖最明顯(如圖 7-31 及圖 7-32 所示)，至於水泥漿所產生的是何種水化產物，則需由 SEM 之水化產物形狀來加以判別，本研究結果 1 天與 7 天之水化產物為 AFm，而 14 天與 28 天之水化產物為 C-S-H，為了進一步印證上述之推論，加做各齡期及其骨材部分與純石頭之 10000 倍的 mapping，如圖 7-33~圖 7-37 所示，能共同構成 mapping 圖的元素為鋁(Al)、鈣(Ca)、矽(Si)及氧(O)，在 1 天齡期尚有鐵(Fe)元素，在 7 天與 14 天齡期則為鉀(K)元素，而在 28 天齡期時鐵與鉀均無出現，此原因在於 10000 倍之 EDS 範圍僅 2000 倍的五分之一，與各種齡期 2000 倍的 mapping 圖一樣，鋁(Al)、鐵(Fe)及氧(O)也是均勻地分佈於整個範圍內，仍無法找出其變化的趨勢，由圖 7-34~圖 7-37 中鈣(Ca)之 mapping 圖可清楚發現鈣(Ca)元素集中分佈於水泥漿部分，且呈均勻的分佈，由矽(Si) 之 mapping 圖也可清楚發現，沒有矽(Si) 元素出現的地方(即空白處)為水化產物之位置，此現象在各齡期之矽(Si) 的 mapping 圖均很明顯(如圖 7-34~圖 7-37 所示)，為了進一步證明 AFm 與 C-S-H 水化產物在 mapping 時是否真的不會出現矽(Si) 元素，於是加做 10000 倍水泥漿部分之 mapping，如圖 7-38~圖 7-41 所示，同 2000 倍與 10000 倍一樣，鋁(Al)、鐵(Fe)或鉀(K)及氧(O)也是均勻地分佈於整個範圍內，仍無法找出其變化的趨勢，由圖 7-38~圖 7-41 之(Ca)的 mapping 圖發現鈣(Ca)元素仍集中分佈於水泥漿部分，另外由矽(Si) 之 mapping 圖也可清楚發現，沒有矽(Si) 元素出現的地方(即空白處)仍為 AFm 與 C-S-H 水化產物之位置，由此可證實 AFm 與 C-S-H 水化產物在 mapping 時不會出現矽(Si) 元素，至於水泥漿所產生的是何種水化產物，可直接在 SEM 圖加以判別，與 2000 倍之觀測結果相同，1 天與 7 天之水化產物為 AFm，而 14 天與 28 天之水化產物為 C-S-H，最後由表 7-4 之擦拭後 W/B=0.54 各齡期骨材部分與純石頭 10000 倍之 EDS 比較表發現，純石頭無鈣(Ca)元素，各齡期之骨材部分因水泥漿污染而有少量的鈣(Ca)元素，雖然 10000 倍之 EDS 範圍小而無法顯示純石頭與各齡期骨材部分之所有元素，但所能顯示元素之含量(重量比)相近，藉此可進一步印證骨材不會與水泥漿產生交互作用且與齡期無關。

為了瞭解為何水化產物不會出現在矽(Si) 元素的 mapping 圖中，將 C-S-H 與 AFm 水化產物取 15000 倍照 SEM 及採用單點與整體打 EDS，如圖 7-42~圖 7-47 所示，用以探討水化產物之矽(Si) 元素的變化，由圖 7-42 之 C-S-H 單點 EDS

發現其矽(Si)元素含量小於鈣(Ca)元素的含量，雖然整體 EDS 之矽(Si)元素含量大於鈣(Ca)元素的含量，如圖 7-43 所示，故在整體矽(Si)元素之 mapping 圖中，因為單獨 C-S-H 之矽(Si)元素含量相對的少，又因彩色 mapping 圖在強調明顯對比下，造成矽(Si)元素之 mapping 圖中，C-S-H 水化產物所在處之矽(Si)元素沒有出現，進而形成明顯的水化產物之形狀，如圖 7-44 所示，另外由圖 7-45 之 AFm 單點 EDS 發現雖然矽(Si)元素含量略大於鈣(Ca)元素的含量，但與整體 EDS 之矽(Si)元素含量相比仍然小一半，如圖 7-46 所示，故在 AFm 整體矽(Si)元素之 mapping 圖中，AFm 水化產物所在處之矽(Si)元素仍然沒有出現，也形成明顯的水化產物之形狀，如圖 7-47 所示。

為了進一步確認骨材與水泥漿界面處之交互作用情況，選用 W/B=0.54 飽和石灰水養護 14 天擦拭後試片，分別取同時包括骨材與水泥漿、骨材部分、水泥漿部分進行 10000 倍 SEM 拍攝及 mapping，如圖 7-48 及圖 7-49 所示，並與圖 7-33 之純石頭比對，由圖 7-48 鋁(Al)元素之 mapping 圖發現鋁(Al)元素集中於骨材與水泥漿之界面處約  $4\mu\text{m}$ ，此範圍外就同純石頭一樣呈均勻散佈，因為石頭與水泥同為陶瓷材料，均含有鋁(Al)元素，而此集中於骨材與水泥漿之界面處係由交互作用所造成，但無法進一步研判是由石頭或水泥之鋁(Al)元素所造成。由圖 7-48 鈣(Ca)元素之 mapping 圖發現，鈣(Ca)元素分佈於石頭上的形狀與未擦拭掉 C-S-H 之形狀相同，故研判鈣(Ca)元素不會與矽質(粘土質)骨材產生交互作用，由圖 7-48 矽(Si)元素之 mapping 圖發現，石頭之矽(Si)元素明顯地較水泥多，不管是骨材部分或水泥漿部分均有水化產物所在處之矽(Si)元素沒有出現的現象，尤其以骨材部分之鈣(Ca)與(Si)元素之 mapping 圖具有明顯的對比。至於氧(O)與鉀(K)之 mapping 圖(如圖 7-49 所示)則無明顯的變化趨勢可循。

雖然 EDS 與 mapping 技巧應用於完全不同成分之兩種物質的效果最佳，但經本研究結果發現，應用於探討均為陶瓷材料之骨材與水泥漿界面處的交互作用，也是一種可行的方法。