

活性粉混凝土界面過渡區位移與耐久性

Durability of Reactive Powder Concrete Related to Interfacial Transition Zone

蕭力銘¹ 潘煌鏗²

¹ 高雄應用科技大學土木工程系 專題生

² 高雄應用科技大學土木工程系 教授

摘要

本研究利用電子剪切散斑干涉儀(ESPI)之非接觸式量測方式觀察活性粉混凝土界面過渡區的微奈米變位，討論界面過渡區對耐久性的影響。經由特殊熱養護方式，製作添加爐石與未添加爐石之活性粉混凝土，探討加入鋼纖維活性粉混凝土在 0.1、0.2、0.3、0.4、0.5 f_c' 壓應力時之鋼纖維與基材界面的微奈米變位，計算界面過渡區範圍及探討微奈米位移，並透過氯離子滲透試驗、硫酸鹽試驗與高壓透水試驗研究添加爐石後界面過渡區大小對耐久性的影響。試驗結果顯示，未添加爐石(A0)的界面過渡區會比有添加爐石(C0)的界面過渡區小 10 μm ；氯離子滲透試驗的電滲量得知，A0 和 C0 都具有良好的氯離子能力抵抗，但是 A0 硫酸鹽侵蝕試驗的重量損失率小於 C0，而浸泡前後的抗壓強度折減率差異不大；兩者的透水係數 K 皆為 0，滲透深度則是 A0 大於 C0。

關鍵字：微奈米位移、爐石、界面過渡區、活性粉混凝土、耐久性

Abstract

In this study, we first measured interfacial transition zone of reactive powder concretes containing silica fume and 50% slag replacement by using ESPI under loading from 0.1 to 0.5 f_c' . Durability of RPC related to interfacial transition zone was discussed. Results show that interfacial transition zone of RPC containing 50% slag (C0), calculated by the displacement along the boundary between a steel fiber and the binder, was 10 μm more than that without slag (A0). From chloride permeability test, both RPCs have a good durability with a negligible chloride permeability. Due to the difference of interfacial transition zone, weight loss of A0 tested by sodium sulfate is smaller compared with C0 materials. However, the loss rate of strength for both RPCs after sodium sulfate test are almost the same. Water permeability test indicates a zero value of permeability coefficient in RPC, but the water depth of permeability for A0 is with 1.45 times higher compared with C0.

Keywords: micro/nano displacement, blast furnace slag, Interfacial transition zone, IZT, reactive powder concrete(RPC), durability

一、前言

水泥與骨材交界面有一層微小未完全水化的區域，稱為界面過度區(interfacial transition zone，簡稱 IZT)，範圍約 50 μm ~100 μm [1-3]。界面過度區定義主要分為六項[4]：不同水泥漿體交界處，水泥與為水化水泥顆粒交界處，水泥漿與卜作嵐材料交界處，水泥漿與骨材交界處，水泥漿和纖維交界處，混凝土和鋼筋交界處。其中以水泥漿與骨材交界處及混凝土和鋼筋交界處的研究最為廣泛。

目前分析界面過度區的技術大都使用掃描式電子顯微鏡(scanning electron microscope，簡稱 SEM)和光學顯微鏡(optical microscope，簡稱 OM)的圖像分析界面過度區，可判斷界面過度區的範圍[4-5]。另外，混凝土也常利用維克氏硬度法(Vickers hardness)及微硬度法(microindentation)量測混凝土表面壓痕的對角線長度，以決定材料的硬度，利用硬度來判斷界面過度區的範圍[1,6]。

活性粉混凝土添加適量的鋼纖維可提升材料強度和增加韌性，雖然強度和韌性比普通混凝土好，但鋼纖維與水泥砂漿之間仍會形成界面過度區(弱面)，在外力作用下，界面過度區容易產生裂縫造成材料破壞[7]。而活性粉混凝土耐久性和鋼纖維界面過度區關係，目前的研究資料非常少；且觀察界面過度區的相關儀器設備(如 OM、SEM)和硬度試驗都是觀測經過切片處理後之界面過度區[1, 6, 8-12]，如過度區的厚度、成分、微觀結構及硬度等，屬於定性觀測或接觸式量測，無法得知過度區真正的動態行為變化。

因此，本研究針對活性粉混凝土耐久性和鋼纖維界面過度區範圍大小，採用非接觸式量測技術，使用電子剪切散班干涉儀(ESPI)直接量測水泥基材及鋼纖維界面過度區變形量，精度可達到 25 μm ，經計算求得位移變化率可判斷界面過度區範圍[13]，並配合 MTS 萬能材料試驗機及耐久性試驗，了解爐石活性粉混凝土界面過度區受外力過程的動態行為與耐久性，增加對混凝土微觀性質的了解。

二、實驗計畫

2.1 材料準備

為爐石活性粉混凝土採用設計強度 150MPa 配比，如表 1 所示，水膠比 0.23，代號 A0 為未添加爐石的活性粉混凝土，C0 為爐石取代砂灰 50%的配比。活性粉混凝土使用第二型卜特蘭水泥，石英砂(105~420 μm)，石英粉(5~25 μm)，砂灰(0.1~0.2 μm)，水淬爐石粉(細度#6000)。因活性粉混凝土使用低水膠比，因此拌合時添加強塑劑(SSP-104)來改善試體工作度，達到緻密的效果。另外，針對 1 根鋼纖維界面過度區微變位觀測，鋼纖維長度 12mm，直徑 0.18mm。

表 1 活性粉混凝土配比 (kg/m^3)

材料代號	水膠比	水	水泥	砂灰	爐石粉	石英粉	石英砂	強塑劑
A0	0.23	180	714	216	0	252	944	36
C0	0.23	180	714	108	108	252	973	36

2.2 試體製作

試體拌合參考 CNS 3655，材料乾拌 2 次各 3 分鐘，將三分之一的強塑劑與水加入材料拌合 1 分鐘總共三次，最後快拌 1 分鐘。試體製作參考 CNS 1010，試體尺寸 30mm×30mm×60mm，分兩層澆注每層各搗實 15 下，並用橡膠槌錘四個角落各 25 下，最後將 1 根鋼纖維插入試體中央。試體完成後用塑膠袋密封，靜置兩天後拆模，試體拆模後放入 90°C 熱水養護 7 天，再進行實驗。

2.3 ESPI 觀測

將試體置於 MTS 試驗機進行單軸抗壓實驗，施予不同壓應力，壓應力由 0 開始持續加壓，在應力到達 0.1、0.2、0.3、0.4、0.5 f_c' 時，使用 ESPI 量測鋼纖維表面 100 μm 範圍的變位，試體觀測位置如圖 1 所示。

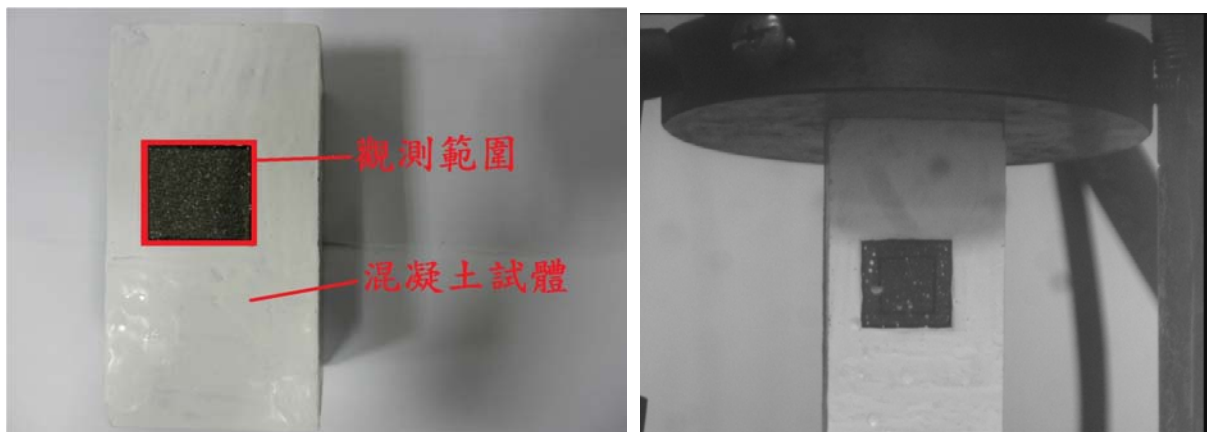


圖 1 試體基準圖

以試體施加 0.1 f_c' 為例，取鋼纖維下方位置分析界面過渡區，如圖 2 範圍，分析時必須對照數值座標圖找到相對位置取得分析區域。經由計算轉換求出施加應力時之鋼纖維與基材間的位移量。



圖 2 施加 0.1 f_c' 時觀測鋼纖維下方界面位移

2.4 耐久性試驗

2.4.1 氯離子滲透試驗

依據 ASTM C1202-97 與 AASHTO T277-89 規範規定，製作 $\Phi 100\text{mm} \times 200\text{mm}$ 混凝土圓柱試體，依試驗齡期量測混凝土內部電荷通過量，由通過的電荷量評估氯離子的穿透性。

2.4.2 硫酸鈉與硫酸鎂之粒料健度試驗

使用硫酸鈉與硫酸鎂進行耐久性試驗，硫酸鈉或硫酸鎂粒料健度試驗方法參考 CNS 1167 及 AASHTO-T104 試驗規範，將 $50 \times 50 \times 50\text{mm}$ 立方試體經歷五次乾濕循環，進行抗壓強度試驗，並觀測試體外部有無侵蝕剝落及計算重量損失率。

2.4.3 透水試驗

混凝土透水儀參考 JIS A6101 試驗規範進行透水試驗，先灌製 $\Phi 100 \times 200\text{mm}$ 圓柱試體，進行切割取出中間段 50mm 厚之試體進行透水試驗。為了判定爐石活性粉混凝土添加爐石 (50%) 及未加爐石 (0%) 配比之滲透行為，在透水試驗之滲透水添加染料，到達預定滲透天數時將試體在直徑中央沿高度方向剖開 (圖3)，量測滲透水滲入混凝土之最大深度，滲透深度 Δ 量測示意圖如圖4 所示。



圖3 量測試體滲透深度

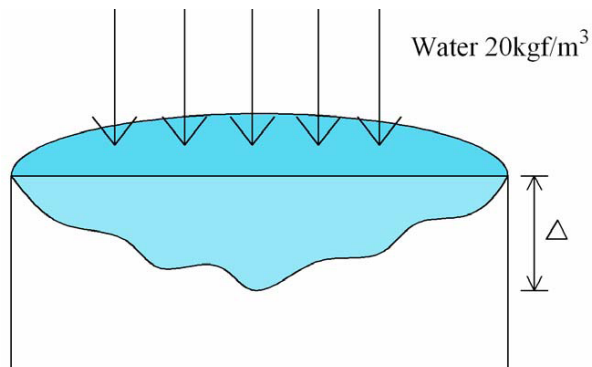


圖4 量測染料滲透深度示意圖

三、結果與討論

3.1 界面過渡區

使用 MTS 對試體施加 $0.1 \sim 0.5 f_c'$ 載重，每增加 $0.1 f_c'$ 載重時由 ESPI 觀測混凝土與鋼纖維界面位移。因混凝土界面過渡區的位移和混凝土基材不同，經 SEM 微觀發現位移變異轉折點及較大位移的轉換區內有許多 CH 晶體與 C-S-H 膠體，因此可判定鋼纖維邊界至最大位移轉換區 (位移變化率) 就是界面過渡區範圍，其中位移變化率計算如下

$$\frac{\Delta\delta}{\Delta d} = \frac{\text{兩點位移差異}}{\text{兩點距離}} \quad (1)$$

表 2 為 A0 活性粉混凝土(無爐石)在鋼纖維邊緣的位移變化量，如圖 5 顯示，A0 材料位移由 $0.1 f_c'$ 載重逐漸增加至 $0.3 f_c'$ ，在 $0.3 f_c' \sim 0.4 f_c'$ 載重時反而下降，在 $0.5 f_c'$ 時的位移變化率則趨於平緩，表示 A0 在載重超過 $0.3 f_c'$ 時位移重新分佈(調整)，由 SEM 微觀結構分析[13] 得知，此時界面過渡區有微裂縫產生，使得區域內的應力重新分配造成位移變化。圖 5 顯示，在 $0.1 f_c' \sim 0.5 f_c'$ 的位移有類似行為，即在距離鋼纖維 $20\mu\text{m} \sim 50\mu\text{m}$ 範圍有一位移變化固定區，在 $50\mu\text{m} \sim 70\mu\text{m}$ 區域則有位移變化調整區，這是因界面過渡區和混凝土基材的性質不同會造成位移差異，因此推測未添加爐石之 A0 材料的界面過渡區 $50\mu\text{m} \sim 70\mu\text{m}$ 。

表 2 A0 材料與鋼纖維界面位移變化率

距離鋼纖維	$0.1f_c'$	$0.2f_c'$	$0.3f_c'$	$0.4f_c'$	$0.5f_c'$
$0\mu\text{m}$	-83	-286	-95	-98	58
$10\mu\text{m}$	-178	-20	126	-147	69
$20\mu\text{m}$	-210	65	198	-163	72
$30\mu\text{m}$	-210	65	198	-163	72
$40\mu\text{m}$	-210	65	198	-163	72
$50\mu\text{m}$	-210	65	198	-163	72
$60\mu\text{m}$	-220	260	337	-200	63
$70\mu\text{m}$	-223	327	384	-213	60
$80\mu\text{m}$	-223	327	384	-213	60
$90\mu\text{m}$	-223	327	384	-213	60
$100\mu\text{m}$	-223	327	384	-213	60

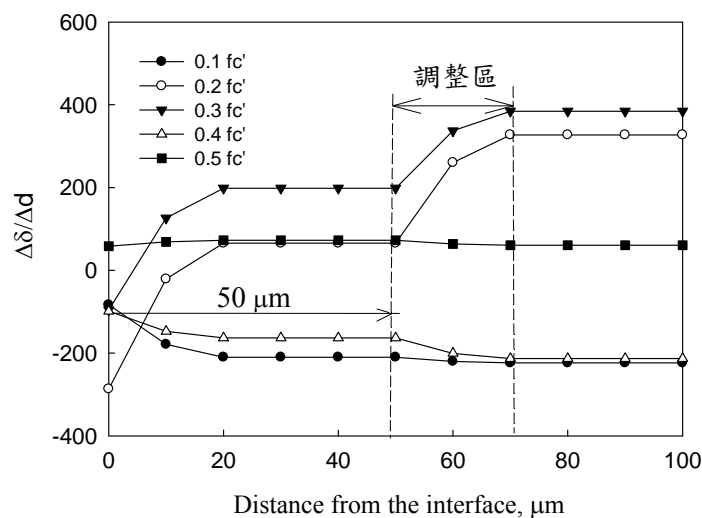


圖 5 A0 位移變化率

表 3 或圖 6 為 C0 活性粉混凝土(添加爐石)在鋼纖維附近的位移變化量， $60\mu\text{m}$ 範圍的位移

變化率在 $0.1 f_c' \sim 0.2 f_c'$ 是呈現增加，到了 $0.3 f_c'$ 時則減少，在 $0.3 f_c' \sim 0.5 f_c'$ 時位移變化率卻又增加，顯示在 $0 \sim 60 \mu\text{m}$ 範圍在 $0.2 f_c' \sim 0.3 f_c'$ 載重時有微裂縫產生造成應力重新分佈。另外，由圖 6 判斷，添加爐石的活性粉混凝土(C0)界面過渡區 $60 \mu\text{m} \sim 70 \mu\text{m}$ 。比較 A0 和 C0，在活性粉混凝土添加爐石後，界面過渡區由 $50 \mu\text{m} \sim 70 \mu\text{m}$ 增加到 $60 \mu\text{m} \sim 70 \mu\text{m}$ 有變大的趨勢，當界面過渡區越大表示水化及卜作嵐反應未完全的區域越大，使得鋼纖維與水泥漿體間的膠結程度會變差，相對的活性粉混凝土強度也比較低，因此材料的耐久性有可能會變差。

表 3 C0 材料與鋼纖維界面位移變化率

距離鋼纖維	$0.1f_c'$	$0.2f_c'$	$0.3f_c'$	$0.4f_c'$	$0.5f_c'$
$0 \mu\text{m}$	-178	0.2	-213	4	-18
$10 \mu\text{m}$	-153	16	-176	17	7
$20 \mu\text{m}$	-1	115	47	93	160
$30 \mu\text{m}$	-1	115	47	93	160
$40 \mu\text{m}$	-1	115	47	93	160
$50 \mu\text{m}$	-1	115	47	93	160
$60 \mu\text{m}$	11	69	71	100	170
$70 \mu\text{m}$	90	-225	225	144	236
$80 \mu\text{m}$	90	-225	225	144	236
$90 \mu\text{m}$	90	-225	225	144	236
$100 \mu\text{m}$	90	-225	225	144	236

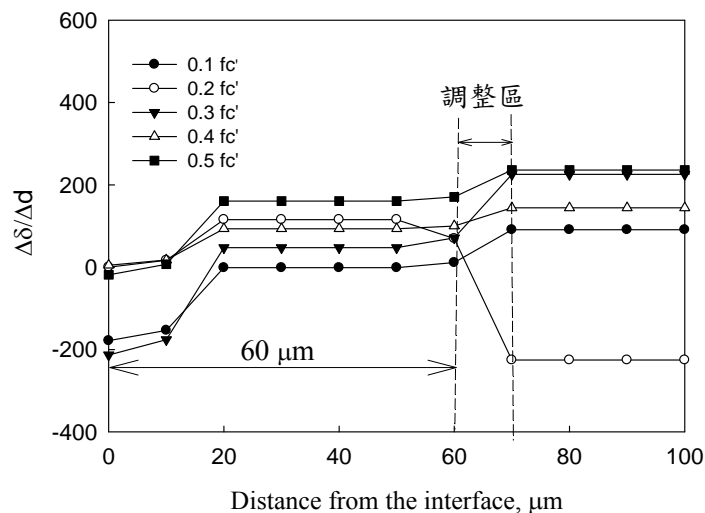


圖 6 C0 位移變化率

3.2 氯離子滲透

混凝土中的孔隙多寡、微結構完整性、孔隙間穿透性等因素都會影響混凝土的氯離子滲透能力，而氯離子滲透能力代表抵抗外界物質進入混凝土內部之能力，是耐久性指標之一。若氯離子含量過多，會侵蝕混凝土內的鋼筋，有加速鋼筋腐蝕的機率，容易使混凝土龜裂剝落，因此可透過氯離子滲透試驗探討爐石活性粉混凝土(C0)及未添加爐石(A0)的耐久性。

快速氯離子滲透試驗是依據 ASTM C1202-97，利用電流滲透量 Q 判斷氯離子滲透能力，也間接表示混凝土的緻密性。評估氯離子穿透性是使用 3.75" (95mm)圓柱試體，而本研究使用 100mm 圓柱試體，因此需要修正 Q 的電滲量為 Q_s 。

氯離子滲透試驗結果如表 4，若混凝土有足夠氯離子抵抗能力，其電滲量必須 <2000 庫侖 [14]。由表 4 得知，A0 及 C0 混凝土之 6 小時累積通過電荷量分別為 15 庫侖及 43 庫侖，都小於 100 庫侖，依據 ASTM C1202-97 評定等級為"可忽略"，兩者都具有良好抵抗氯離子滲透能力。比較電滲量和界面過渡區，因 C0 界面過渡區(60 μ m~70 μ m)比 A0 的 50 μ m~70 μ m 稍大，因此電滲量會比較大(43 庫侖)。

表 4 氯離子滲透試驗結果

材 料	A0	C0
電滲量Q(庫侖)	17	48
電滲量 Q_s (庫侖)	15	43
電滲等級	可忽略	可忽略

3.2 硫酸鈉及硫酸鎂粒料健度試驗法

根據 CNS1167 將活性粉混凝土浸泡於飽和硫酸鈉溶液中，進行 5 次乾溼循環計算重量損失率，探討爐石活性粉混凝土耐久性能，並對試驗後試體進行單軸抗壓試驗，比較浸泡硫酸鈉溶液後之抗壓強度折減率。

表 5 為浸泡 5 次硫酸鈉溶液乾溼循環之重量損失率和強度折減率，活性粉混凝土 A0 及 C0 的重量損失率相當低，A0 材損失率為 0.89%；C0 重量損失為 2.32%，因 C0 界面過渡區較 A0 大所以硫酸鹽會更容易侵蝕 C0 材導致 C0 才重量損失較 A0 材大。5 次乾濕循環後之試體，可以看出 A0 和 C0 沒有明顯受到硫酸鹽侵蝕痕跡，但是在受高溫烘乾作用下，試體表面會有些許裂痕產生。試體抗壓強度之折減影響，可以看出 A0 及 C0 的抗壓強度都會下降，強度折減率約 7~8%。

表 5 浸泡硫酸鈉溶液之重量損失率與強度折減率

材 料	A0	C0
重量損失率 (%)	0.89	2.32
未浸泡前抗壓強度 (MPa)	159.5	143.9
浸泡後抗壓強度 (MPa)	147.8	134.0
抗壓強度折減率 (%)	-7.9%	-7.4%

3.3 透水滲透係數

參考JIS A6101混凝土透水滲透試驗進行比較活性粉混凝土之水滲透性及耐久性關係，試驗發現，20kg/cm²水壓力進行48小時之A0及C0試體都沒有任何水從混凝土滲透過去，滲透係數K為0，因此繼續持壓到14天，發現滲透係數也是0，將試驗之圓柱試體從圓中心線劈開，看出有水滲透之水痕，但是並未完全滲透，如圖7所示。



圖7 活性粉混凝土透水試驗滲透水滲入情形

因14天滲透試驗之水仍無法滲透活性混凝土，在水中加入染料，以20kg/cm²壓力持壓7天，14天之透水係數K為0，而經剖開試體量測水痕(圖8和圖9)，表6為滲透深度結果。添加50%爐石之C0的滲水深度比未添加爐石之A0還要少，因此添加爐石之混凝土有明顯抵抗滲水能力。



圖8 A0透水深度



圖9 C0透水深度

表6 活性粉混凝土7 天滲透水之滲透深度

	A0	C0
滲透深度(cm)	4.30	2.96

四、結論

本研究使用 150MPa 抗壓強度的配比進行熱養護 7 天，分析活性粉混凝土之爐石粉取代砂灰的影響，探討耐久性與界面過渡區關係，結果如下。

1. 使用 50% 爐石取代量之活性粉混凝土的界面過渡區比未添加爐石的界面過渡區約增加 10 μ m。
2. 雖然 A0 與 C0 對氯離子滲透有較佳的抵抗能力，電滲屬可忽略等級，但是因 C0 的界面過渡區較大，導致電滲量比 A0 多。
3. 因添加爐石的界面過渡區比砂灰大，硫酸鹽液體更容易進入試體使得侵蝕程度較大，因此硫酸鹽健度的重量損失率也比較多；然而，浸泡後的 A0 抗壓強度折減率和 C0 差異不大，約有 8% 損失。
4. 透水耐久試驗發現，添加爐石之 C0 材的滲透能力會比 A0 材還佳，約增加 1.45 倍。

參考文獻

- [1] 蕭旭志，2005，界面過渡區對混凝土抗含砂水流衝擊性之影響，碩士論文，中興大學。
- [2] Sorelli, L., Constantinides, G., Ulm, F. J., and Toutlemonde, F., 2008, "The nano-mechanical signature of ultra high performance concrete by statistical nanoindentation techniques", *Cement Concrete Research*, Vol.38, pp. 1447-1456.
- [3] 金宏祥，2007，輕質骨材混凝土之界面過渡區研究，碩士論文，中興大學。
- [4] Mehta, P. K., and Monteiro, P. J. M., 2006, "Concrete microstructure, properties and materials", U. California, Berkeley, 3rd ed., Chap. 2.
- [5] Mindess, S., and Young, J. F., 1981, *Concrete*, Prentice-Hall, Englewood Cliff, N.J., Chap. 14.
- [6] Zhu, W., and Bartos, P. J. M., 2000, "Application of depth-sensing microindentation testing to study of interfacial transition zone in reinforced concrete", *Cement Concrete Research*, Vol. 30, pp. 1299-1304.
- [7] 彭仁柏，潘煌鏗，戴毓修，蕭力銘，鄭郁潔，2010，"爐石活性粉混凝土韌性性質"，第十屆中華民國結構工程研討會，桃園，paper No. 083。
- [8] Elsharief, A., Cohen, M. C., and Olek, J., 2003, "Influence of aggregate size, water/cement ratio and age on the microstructure of the interfacial transition zone", *Cement Concrete Research*, Vol. 33, pp. 1837-1849.
- [9] Leemann, A., Münch, B., Gasser, P., and Holzer, L., 2006, "Influence of compaction on the interfacial transition zone and the permeability of concrete", *Cement Concrete Research*, Vol. 36, pp. 1425-1433.
- [10] Diamond, S., 2001, "Considerations in image analysis as applied to investigations of the ITZ in concrete", *Cement Concrete Composites*, Vol.23, pp. 171-178.
- [11] Yang, C. C., 2006, "Influence of aggregate content on the percolated interfacial transition zone of chloride migration test", *J. Chinese Institute of Engineering*, Vol. 29, pp. 159-164.

- [12] Bouillaguet, S., Gamba, J., Forchelet, J., Krejci, I., and Watahac, J. C., 2006, “Dynamics of composite polymerization mediates the development of cuspal strain”, *Dental Materials*, Vol. 2, pp. 896–902.
- [13] 廖崑勝，2010，骨材和水泥系材料界面過渡區微奈米變位與微觀結構，碩士論文，高雄應用科技大學。
- [14] Buenfeld, N.R., Newman, J.B., Page, C.L., 1986, “The resistivity of mortar immersed in sea-water”, *Cement and Concrete Research*, Vol. 16, Part 1, pp. 511~524.