

含水爐石活性粉混凝土力學性質和磨耗

Mechanical Properties of Moisture and Abrasion in Reactive Powder Concrete Containing Blast Furnace Slag

陳志宏¹ 潘煌鏗² 戴毓修³ 李侖凌⁴ 蔡于萱⁴

¹高雄應用科技大學土木工程系碩士 07-3814526#5280,a2013259@gmail.com

²高雄應用科技大學土木工程系教授 pam@cc.kuas.edu.tw

³陸軍軍官學校土木工程學系教授 yuhshiou.tai@gmail.com

⁴高雄應用科技大學土木工程系學生

國科會計畫編號: NSC 101-2625-M-011-001

摘要

針對應用在水工構造物之活性粉混凝土，探討爐石取代部分矽灰及添加 1% 和 2% 鋼纖維對活性粉混凝土在含水狀態的抗壓強度、抗彎強度、破壞韌性、剪力強度及體積磨耗率。結果顯示，活性粉混凝土在含水狀態之抗壓強度會低於氣乾狀態，但是彈性模數 E 則差異不大；而含水狀態之大部分的抗彎強度都比氣乾狀態還要高。RPC 的破壞韌性約為普通混凝土的 3~4 倍，當 RPC 添加鋼纖維後的破壞韌性增幅更至少增加 2 倍以上，因此活性粉混凝土水工防洪構要增加耐衝擊性，應適當添加鋼纖維。含水的活性粉混凝土剪力強度都普遍低於氣乾狀態的強度，在進行水工防洪構造物耐震強度設計時，剪力強度必須折減 20%。經沖刷磨耗試驗發現，活性粉混凝土的體積損失大都是試體表面的磨損，且磨耗體積損失率約為普通混凝土的 30%。

關鍵字: 活性粉混凝土、爐石、水工構造、含水量、磨耗

Abstract

Reactive powder concrete (RPC) containing blast furnace slag is developed to apply to hydraulic structures. Moisture properties of RPCs with partial silica fume replaced by slag and adding steel fibers were investigated, including compressive strength, flexure strength, toughness, direct shear strength and volume abrasion. Experimental results indicate that compressive strength for RPC in moisture condition is lower than that in dry one. Moisture has less effective to elastic Young modulus of RPC. Toughness of RPC is pretty high, about 3~4 times of normal concrete. At least double toughness was also found in RPC containing steel fibers, compared with no steel fibers, and leading to add steel fibers into RPC is necessary to promote impact resistance of RPC-made hydraulic structures. 20% reduction of shear strength for RPC in moisture was found. Compared with normal concrete, 70% less of abrasions were obtained if hydraulic structures were manufactured by RPC.

Keywords: Reactive powder concrete, Slag, Hydraulic structure, Moisture, Abrasion

一、內容

台灣位於環太平洋地震帶西側的顯著環節上且河川湍急，防洪構造所使用的材料以天然土砂、石籠及混凝土為主，而大多主要河段為混凝土構造。在受地震、水質酸化或高鹽分之影響，以及長期受到水流、泥沙及土石的磨損與沖擊，防洪構造的破壞是可預期的。目前水工構造物

在規劃與設計時，除水庫壩體外，大部分防洪構造物常未考慮強度的重要性，使得每當地震及颱風來臨時，防洪構造物(如堤防、護岸、攔河堰等)會因地震或因土石、浮木撞擊而受損，進而產生裂縫，又有水流的沖刷與滲透，很容易造成防洪水工構件之損壞。

由於混凝土材料是由膠結材料和粗(細)骨材所組成的多相複合材料，在水流及砂石的沖刷和磨耗作用，首先組成材料之表面耐磨性能較差的部份會被磨掉，使得耐沖磨性能強的部份則曝露出來；且混凝土水工構造物因長期浸泡在水中，含水之力學性質會與在空氣中使用之一般構造物不同，其含水強度會低於乾燥時的強度。為確保防洪構造之服務功能及使用壽命能夠充分展現，增加混凝土耐磨性能，提升混凝土強度，這裡使用活性粉混凝土(RPC)的高強度和高韌性在防洪構造物以增加其耐久性與耐沖刷能力。

活性粉混凝土屬於超高強度混凝土，具有高強度有助於橋梁、高層建築結構自重減輕，也有效降低地震力的影響，尤其添加鋼纖維後具有高韌性之特性，減緩破壞發生時材料之瞬間破壞情形[1]。另外，因矽灰在台灣並未生產且單價偏高，若要活性粉混凝土在台灣構造物普遍廣泛使用，必須降低RPC的成本，則考慮由台灣生產之卜作嵐材料來取代矽灰較為恰當。因爐石粉為卜作嵐材料，為鋼鐵生產時之副產品，具有良好的膠結能力，若以適當的方法可激發其水化作用之活性，也會與氫氧化鈣進行「卜作嵐反應」形成類似水化產物C-S-H膠體。研究顯示，混凝土中添加爐石粉可以增進對混凝土抵抗硫酸鹽侵蝕之能力[2]。Halit研究活性粉混凝土中添加少量的飛灰、爐石粉之力學性能，結果顯示力學性能不會有明顯降低的現象[3]；在活性粉混凝土養護過程中，利用高溫高壓養護方式，添加飛灰、爐石粉的活性混凝土，可有效增加抗壓強度，也可以改善抗彎韌性[4]。

本研究為達到資源再生利用，降低成本效益，節能減碳永續發展之目的，將活性粉混凝土中之膠結材矽灰，利用不同含量的爐石粉取代，探討目標強度150MPa活性粉混凝土於氣乾及含水狀態之磨耗與力學性質，磨耗使用含砂水流進行磨耗試驗，力學試驗包含靜態抗壓強度，預裂縫抗彎強度，直接剪力強度，體積損失率。

二、試驗計劃

2.1 材料設計

本研究為探討活性粉混凝土利用水淬爐石粉取代矽灰之力學性能，找出使用在水工構造物之目標抗壓強度150Mpa的爐石活性粉混凝土性質。使用的材料為第二型卜特蘭水泥，石英砂，石英粉(5~25 μ m)，矽灰(0.1~0.2 μ m)，水淬爐石粉(細度#6000)及鋼纖維(長12mm，直徑0.18mm)等材料。因活性粉混凝土使用低水膠比比，拌合時必須添加強塑劑(SSP-104)來改善工作度，並且可以達到活性粉混凝土緻密的效果。活性粉混凝土經由熱養護方式會有較低的孔隙率，使得RPC有較佳之力學性能和耐久性[5]，一般常使用90 $^{\circ}$ C高溫養護。

2.2 試驗配比

本研究參考爐石活性粉混凝土的配比[6]，將爐石添加量增加及減少水泥用量來探討對活性粉混凝土強度的影響性。試驗中有三組配比，未添加爐石之活性粉混凝土編號為A，將A配比之50%矽灰被爐石取代編號為C，將C配比之部分水泥也被爐石取代編號為F。因三組配比額

外增加 210°C 高溫養護方式，與一般 RPC 的 90°C 養護不同，因此為了與一般 RPC 養護方式區別，這裡的三組配比加註編號 H。另外，活性粉混凝土添加鋼纖維 0%、1% 及 2% 體積的配比編號給予數字標號 0、1 和 2；試體為氣乾狀態時給予編號 D、含水狀態時給予編號 W，例如配比 A 含有 0% 鋼纖維且使用 210°C 高溫養護，並在含水狀態下進行實驗，則編號為 WHA0，當 A 配比含有 1% 鋼纖維並且 210°C 高溫養護，並在不含水狀態下進行實驗，則編號為 DHA1，以此類推，如表 1 的活性粉混凝土配比。編號 B3Y 為比較組，是設計強度為 35MPa 的普通混凝土。

表 1 活性粉混凝土配比表[kg/m³]

編號	鋼纖維含量	水膠比	水	水泥	矽灰	爐石粉	石英粉	石英砂	-	強塑劑
HA0	0%	0.23	180	714	216	0	252	944	-	36
HA1	1%	0.23	180	714	216	0	252	918	-	36
HA2	2%	0.23	180	714	216	0	252	891	-	36
HC0	0%	0.23	180	714	108	108	252	944	-	36
HC1	1%	0.23	180	714	108	108	252	918	-	36
HC2	2%	0.23	180	714	108	108	252	891	-	36
HF0	0%	0.23	180	606	108	216	252	944	-	36
HF1	1%	0.23	180	606	108	216	252	918	-	36
HF2	2%	0.23	180	606	108	216	252	891	-	36
編號	鋼纖維含量	水膠比	水	水泥	飛灰	爐石粉	三分石	六分石	細粒料	強塑劑
B3Y	0%	0.34	160	329	42	99	663	284	809	5

2.3 試驗計畫

2.3.1 抗壓試驗

混凝土抗壓試驗參考 ASTM C 39 和 CNS 1232 規範，使用 100 噸 MTS 萬能材料試驗機進行力學實驗，獲得活性粉混凝土之抗壓強度、楊氏彈性模數 E、靜態應力-應變曲線。使用 $\Phi 50 \times 100$ mm 之圓柱試體，每組試體灌製三顆試體，以 0.03mm/min 速率進行加載直到試體破壞，抗壓強度取三個試驗值的平均值。為進行完整的應力-應變曲線量測，在圓柱試體裝設軸向伸長計 (extensometer) 來量測試體的軸向變形量。

2.3.2 抗彎試驗

長方形試體 $40 \times 40 \times 160$ mm，參考 ASTM C1609 纖維混凝土彎曲試驗及 CNS1234 中心點抗彎試驗，使用 5 噸 MTS 材料試驗機，進行三點抗彎試驗，以 0.06mm/min 速率進行加載直到試體破壞，取三顆試體強度的平均值。為獲得臨界應力強度因子 K_{IC} (critical stress intensity factor)，俗稱破裂韌性 (Toughness)，依據 ASTM E399 線彈性材料破裂韌性試驗方法，在試體跨度中點下方預留 4mm 預裂縫，並且裝設 CMOD 開口位移計，利用 MTS 萬能材料試驗機進行破裂韌性彎曲試驗，以位移控制方式進行加載，速率為 0.02mm/min，量測中心點最大載重 (P) 和試體裂縫開

口的位移。將試體中心點載重(P)和試體裂縫開口位移，並代入下列公式計算臨界應力強度因子 K_{IC} 。

2.3.3 直接剪力試驗

直接剪力試體的長度 100mm、寬度 50mm，厚度為 30mm，如圖 1 所示[7]。利用 MTS 試驗機進行直接剪力試驗，以位移控制之加載速率為 1 mm/min。試體受剪力破壞時，會沿著試體設計之預定中心線剪力弱面破壞。直接剪力試體之中心線剪力弱面面積為 50×30 mm，利用最大加載之荷重力(P)和試體預設剪力弱面面積(A)計算出直接剪應力 τ 。

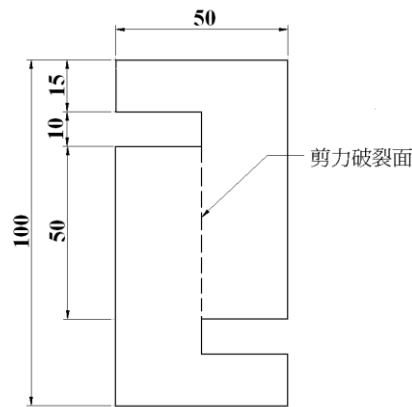


圖 1 直接剪力試體尺寸(單位：mm)

2.3.4 磨耗試驗

含砂水流磨耗試驗之儀器主體尺寸為 125.9cm×117.0cm×115.0cm 之水槽，如圖 2。利用水槽四個角落共四支葉片於試驗中不斷攪拌水中的泥砂，使其攪拌均勻後再開啟抽水馬達，進行含砂水流衝擊試體，水流速度約為 12m/s。實驗過程是在實驗儀器主體內倒入 200kg 的砂以及 0.87m³ 的水，使水中含砂量為 230kg/m³，再將試體放置在平台上進行含砂水流衝擊，試體大小為 200mm×200mm×50mm。然後先開啟四個轉動馬達，利用四個角落的葉片使水與砂混合均勻約 5 分鐘，混合均勻後再開啟抽水馬達進行含砂水流衝擊試體，實驗進行時間為 2 小時，每 30 分鐘停下並拿出拍照及紀錄體積損失量。



圖 2 含砂水流磨耗試驗的主體儀器

三、結果與討論

3.1 抗壓強度

在鋼模澆置 RPC 後，將試體模蓋上濕布，放置室溫 48 小時硬化後拆模，再將試體放入 90°C 恆溫恆濕箱熱養護 5 天，拿出後再放入 210°C 高溫爐中養護 2 天，最後取出放置於室溫一天使試體降溫再進行試驗，因此試體的試驗齡期為 10 天。試體在高溫養護後，取出冷卻一天，表示試體為氣乾狀態；而含水狀態之試體是指在進行實驗前一天先放置於水中進行吸水，於實驗前拿出擦拭試體表面。

結果顯示，配比 B3Y (比較組)在氣乾狀態的抗壓強度為 39.7MPa，含水狀態為 33.5MPa，抗壓強度約下降 15%。表 2 為氣乾和含水狀態之爐石活性粉混凝土抗壓強度，氣乾狀態之試體抗壓強度以配比 HA 最好，配比 HC 次之，而以爐石取代部分砂灰和部分水泥之配比 HF 的強度最低，且各配比隨著鋼纖維含量增加而提升抗壓強度(DHA2 除外)；含水狀態之抗壓強度也有類似氣乾狀態試體的傾向。比較氣乾狀態和含水狀態之抗壓強度，含水狀態之試體強度都有明顯的下降，例如以含鋼纖維 1% 的活性粉混凝土，配比 HA 在氣乾狀態的強度是 197.0MPa，在含水狀態的強度是 163.3MPa，含水狀態的強度比氣乾狀態的強度約低 17%；另外，配比 HC 則約降低 15~16%，配比 HF 則降低 10%，如圖 3~5。因此，水工防洪構造物使用一般普通混凝土或活性粉混凝土時，預期抗壓強度必須比原設計強度還要再降低 10%~20% 強度。

表 2 氣乾和含水狀態之抗壓強度 (MPa)

配比 (D=氣乾；W=含水)	鋼纖維含量		
	0%	1%	2%
DHA	159.0	197.0	180.6
DHC	148.4	166.3	181.9
DHF	135.2	166.3	175.9
WHA	131.2	163.3	149.6
WHC	124.2	141.7	153.2
WHF	120.6	153.2	157.4

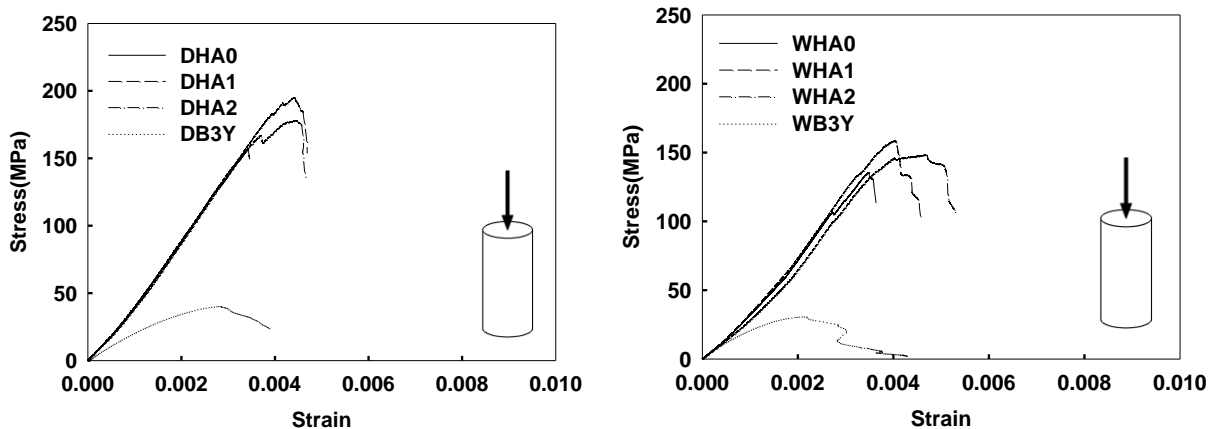


圖 3 HA 氣乾和含水狀態之抗壓強度

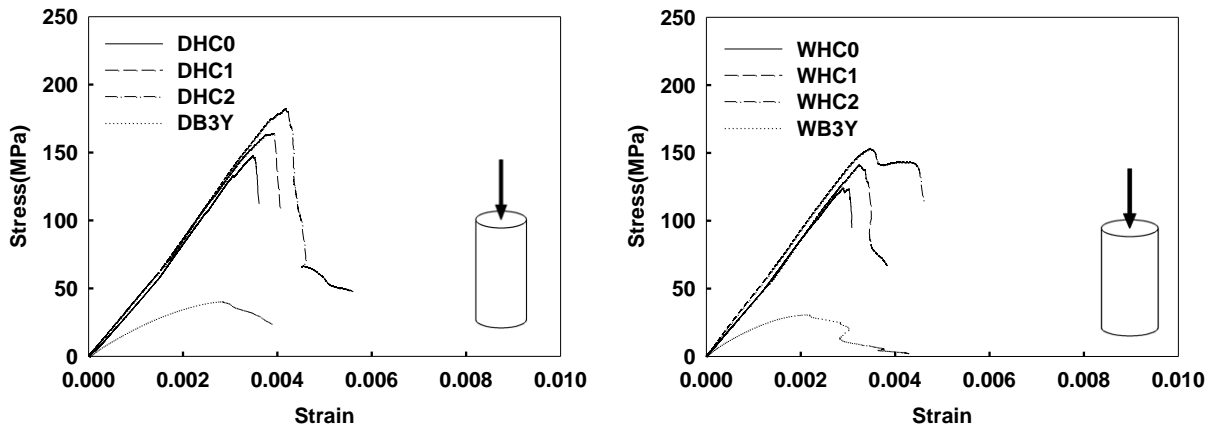


圖 4 HC 氣乾和水狀態之抗壓強度

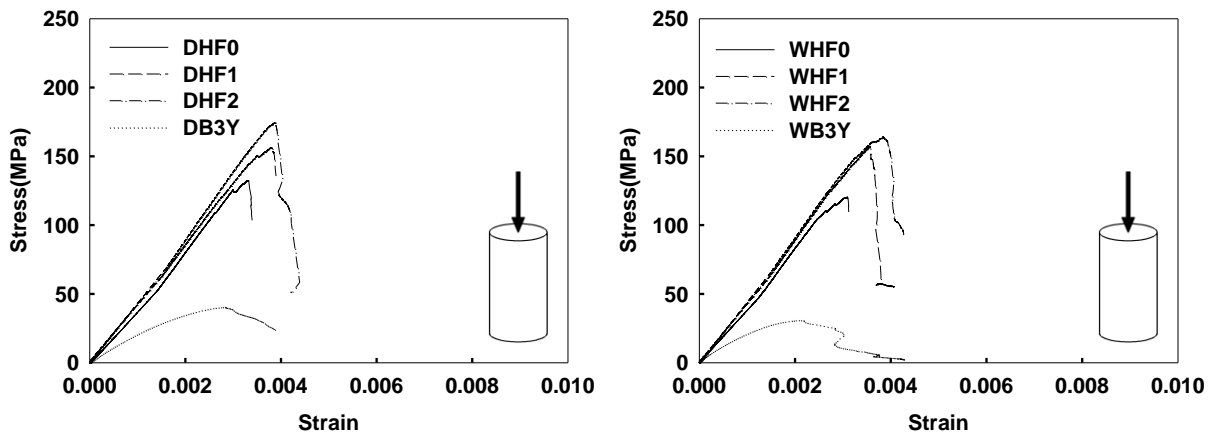


圖 5 HF 氣乾和含水狀態之抗壓強度

由圖 3~5 計算楊氏彈性模數 E ，結果在表 3。活性粉混凝土的楊氏彈性模數由普通混凝土(配比 B3Y)之 22.02GPa (氣乾)和 23.28GPa (含水)增加到 36~44GPa，增加約 1.6~1.9 倍。除了配比 HA2 外，各配比的彈性模數 E 隨著鋼纖維含量增加而提升；比較氣乾狀態和含水狀態的彈性模數，在含水之 HA 配比都有明顯的下降，但在 HC、HF 的部份則沒有明顯的增長減幅。

表 3 氣乾和含水狀態之楊氏彈性模數 (GPa)

配比	鋼纖維含量		
	0%	1%	2%
DHA	39.93	41.15	36.69
DHC	39.15	41.96	41.64
DHF	37.75	41.96	42.90
DB3Y	22.02	-	-
WHA	33.34	37.54	31.46
WHC	39.40	40.07	44.34

WHF	36.77	40.97	44.30
WB3Y	23.28	-	-

3.2 抗彎強度

實驗結果如圖 6，比較組 DB3Y 的抗彎強度 7.70MPa，而氣乾狀態之 HA0 配比抗彎強度為 30.68MPa，約高出 4 倍，添加 1% 鋼纖維(HA1)之抗彎強度更比 HA0 提高一倍，達到 61.01MPa，而 HA2 則是再增加一倍的抗彎強度，為 92.52MPa。而在 HC 配比的抗彎強度也如同 HA 配比，在鋼纖維 2% 時之抗彎強度達到 95.67MPa，HC 整體的抗彎強度都比 HA 配比较高。HF 配比在 0% 時的抗彎強度與 HA 相差不大，當添加 1% 鋼纖維時只有提升 0.7 倍的抗彎強度，但是在鋼纖維 2% 時又提升到 94.67MPa。

含水狀態之 HA 的抗彎強度比氣乾狀態的抗彎強度還要高，分別高出了 10%、12%、11% 左右的抗彎強度。在鋼纖維 0% 時的最高抗彎強度是 HC 配比，但是鋼纖維含量為 1% 和 2% 的 HC 配比卻比 HA 配比的抗彎強度低；在含水狀態下的 HC 配比比氣乾狀態下的抗彎強度提高為 19%、5%、7%，添加鋼纖維之 HC 配比之提高量沒有 HA 配比较高。HF 配比在含水狀態比氣乾狀態的抗彎強度提高為 -2.5%、0.3%、2%，在鋼纖維含量 0% 時 HF 配比卻比氣乾狀態下還低，但是添加鋼纖維後之抗彎強度還是有提高，因此含鋼纖維 RPC 在含水狀態也有些許的提升。

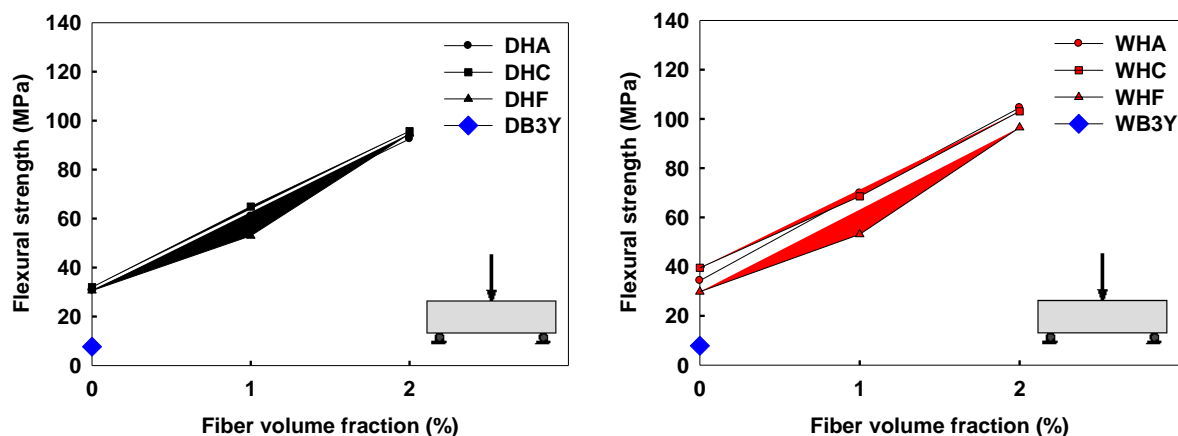


圖 6 氣乾和含水狀態之抗彎強度

3.3 破壞韌性

表 4 為破壞韌性(K_{IC})，普通混凝土(B3Y)的 $K_{IC} = 0.21 \text{ MPa}\sqrt{m}$ ，而沒有鋼纖維之 RPC 的破壞韌性約 $0.6\sim 0.7 \text{ MPa}\sqrt{m}$ ，約為普通混凝土的 3~4 倍。當 RPC 添加鋼纖維之破壞韌性的增幅至少 2 倍以上，因此要增加水工防洪構的耐衝擊性，活性粉混凝土應適當添加鋼纖維。

表 4 氣乾和含水狀態之破壞韌性 K_{IC} ($MPa\sqrt{m}$)

配比	鋼纖維含量		
	0%	1%	2%
DHA	0.70	1.84	2.51
DHC	0.59	2.21	3.44
DHF	0.73	1.88	3.43
DB3Y	0.21	-	-
WHA	0.62	2.11	2.83
WHC	0.87	2.38	3.46
WHF	0.84	2.20	3.24
WB3Y	0.21	-	-

3.4 直接剪力強度

在耐震設計時，剪力強度是一個很重要的參數，因此在氣乾狀態和含水狀態的活性粉混凝土的直接剪力行為也要留意。從圖 7 得知，三種活性粉混凝土配比(HA、HC、HF)的剪力強度會因鋼纖維增加而大幅度提升，鋼纖維 1% 時分別提高 212.0%、199.2%、202.7%，在 2% 鋼纖維達則分別為 128.4%、145.9%、115.7%，可以看到基材在添加 1% 鋼纖維後有大幅度提昇，但在添加 2% 鋼纖維為時卻小幅度提升，這是因為基材在添加鋼纖維後，藉由鋼纖維的拉拔、剪切作用而使得強度提升，但是當鋼纖維含量增加時卻沒有呈現線性成長，有可能是過多的鋼纖維會在試體中產生團聚現象而使得鋼纖維無法有效的發揮拉拔、剪切作用。比較圖 7，含水試體的直接剪力強度都普遍低於氣乾狀態的試體，平均強度下降約 20%，因此水工防洪構造物在進行耐震強度設計時，剪力強度必須折減 20% 以策安全。

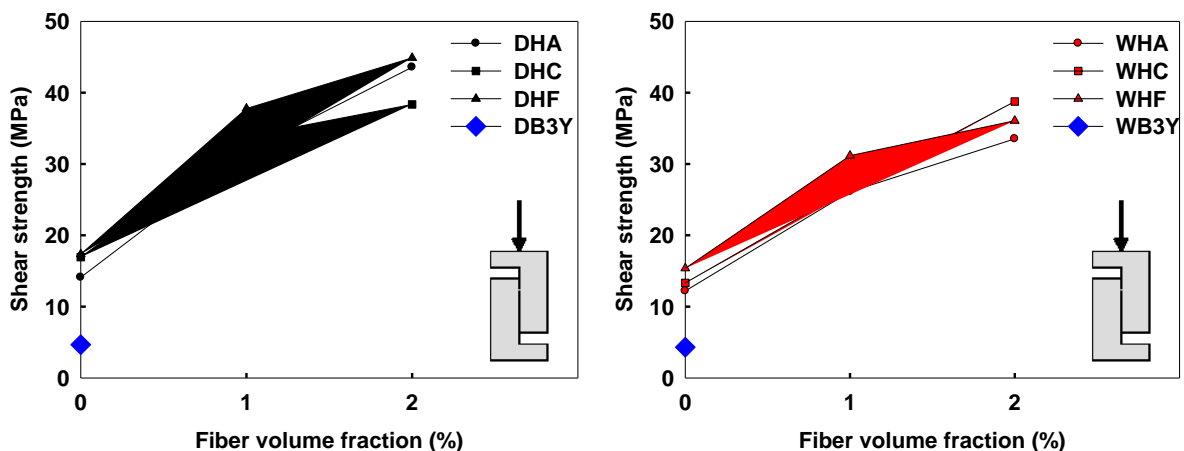


圖 7 氣乾和含水狀態之直接剪力強度 τ (MPa)

3.5 磨耗試驗

將 200×200×50mm 的方塊試體放入含砂水流磨耗試驗機具中，利用幫浦抽取混合之砂與水來加壓沖擊試體表面，每組配比取 3 個試體平均。試驗結果如圖 8，WB3Y 配比試體(比較組)經過 2 小時沖刷磨耗的體積損失率為 1.71%；而 WHA 配比依鋼纖維 0、1%、2% 添加量的體積損失率分別為 0.69%、0.49%、0.48%，顯示鋼纖維能夠降低沖刷磨耗，且觀察實驗照片發現，0% 鋼纖維含量試體在沖刷時出現的孔洞有穴蝕情況產生，所以 WHA0 有比較多的體積損失量。依鋼纖維 0、1%、2% 添加量的 WHC 配比的體積損失率為 0.78%、0.73%、0.41%，由照片觀察得到 HC 配比經沖刷後的表面出現大量孔洞而導致體積損失量比 HA 與 HF 配比高，但是當鋼纖維含量為 2% 時則有得到改善，這是因為試體表面有鋼纖維分布而大量減少體積損失量。同理，在 WHF 配比的體積損失率為 0.55%、0.54%、0.51%，HF 配比的體積損失率並沒有太大的變化，由照片觀察發現在試體兩側有比 HA 配比有較明顯的磨耗。比較實驗照片及數據結果，各配比之間的體積損失率差距並不是很大，多數都在表面磨損而已，只有比較組 WB3Y 在兩側有骨材被沖刷脫落現象。

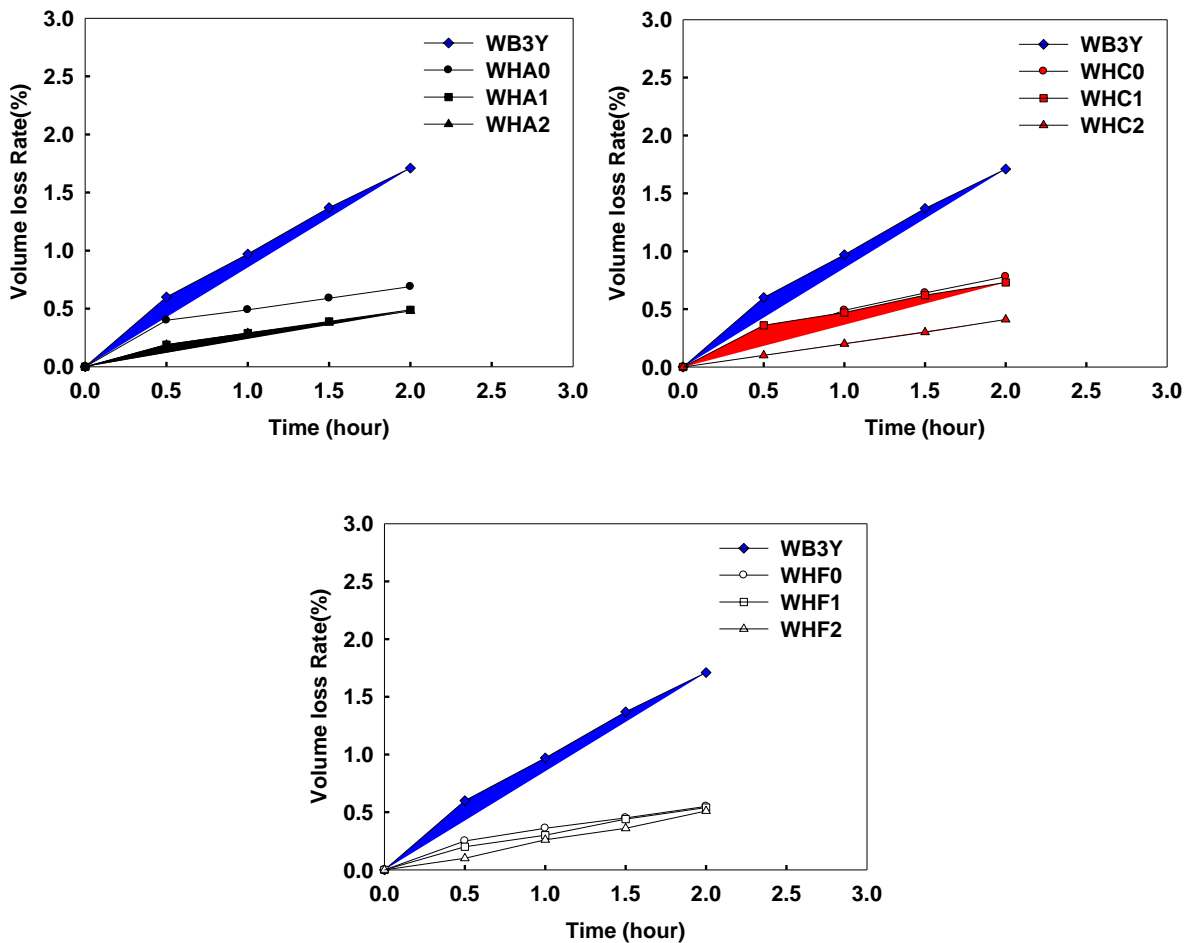


圖 8 各配比之磨耗損失率(%)

四、結論

1. 含水狀態的抗壓強度比氣乾狀態的強度降低 10~20%。
2. 比較氣乾和含水狀態的彈性模數 E ，含水狀態之 HA 配比都有明顯的下降，但在 HC 與 HF 配比則沒有明顯的增長減幅。
3. 三種活性粉混凝土在含水狀態之大部分的抗彎強度都比氣乾狀態還要高，依鋼纖維含量(0、1%、2%)，HA 配比分別高出了 10%、12%、11%的抗彎強度；HC 配提高為 19%、5%、7%。HF 配比則高為-2.5%、0.3%、2%。
4. RPC 的破壞韌性約為普通混凝土的 3~4 倍，當 RPC 添加鋼纖維後的破壞韌性增幅更至少增加 2 倍以上，因此要增加水工防洪構的耐衝擊性，活性粉混凝土應適當添加鋼纖維。
5. 含水的混凝土直接剪力強度都普遍低於氣乾狀態的強度，平均強度下降約 20%，因此水工防洪構造物進行耐震強度設計時，剪力強度必須折減 20%以策安全。
6. 活性粉混凝土的沖刷磨耗體積損失率約為普通混凝土(比較組)的 30%，各配比的體積損失率差距不大，多數都在表面磨損而已。

參考文獻

- [1] Halit, Y., Mert, Y.Y., Serdar, A., Anil, S.K., "Mechanical properties of reactive powder concrete containing mineral admixtures under different curing regimes", *Construction and Building Materials*, Vol.23, pp.1223-1231 (2009).
- [2] 黃兆龍，「卜作嵐混凝土使用手冊」，科技圖書股份有限公司，台北市(2007)。
- [3] Halit, Y., Huseyin, Y., Anil, S.K., Bulent, B., "Utilization of fly ash and ground granulated blast furnace slag as an alternative silica source in reactive powder concrete", *Fuel*, Vol.87, pp.2401-2407 (2008).
- [4] Halit, Y., Mert, Y.Y., Huseyin, Y., Serdar, A., Selcuk, T., "Mechanical properties of reactive powder concrete containing high volumes of ground granulated blast furnace slag", *Cement and Concrete Composites*, Vol.32, pp.639-648 (2010).
- [5] Cheyrezy, M., Maret, V., Frouin, L., "Microstructural Analysis of Reactive Powder Concrete", *Cement and Concrete Research*, Vol. 25, No. 7, pp.1491-1500 (1995).
- [6] 彭仁柏，爐石活性粉混凝土靜動態韌性及耐久性，國立高雄應用科技大學，碩士論文(2010)。
- [7] Millard, S.G., Molyneaux, T.C.K., Barnett, S.J., Gab, X., "Dynamic enhancement of blast-resistant ultra high performance fiber-reinforced concrete under flexural and shear loading", *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 37, pp.405-413 (2010).