

卜作嵐材料對混凝土影響之探討

目 錄

第一章	前言	2
第二章	卜作嵐的定義、種類	3
	2.1 飛灰介紹與特性	4
	2.2 爐石介紹與特性	5
	2.3 矽灰介紹與特性	6
第三章	添加卜作嵐材料對混凝土新拌性質的影響	8
	3.1 工作性質	8
	3.2 凝結性質	9
第四章	添加卜作嵐材料對混凝土硬固性質的影響	11
	4.1 添加飛灰對混凝土的力學性質	12
	4.2 添加爐石對混凝土的力學性質	14
	4.3 添加矽灰對混凝土的力學性質	16
第五章	添加卜作嵐材料對混凝土耐性質的影響	18
	5.1 添加飛灰對混凝土的耐久性質	19
	5.2 添加爐石對混凝土的耐久性質	21
	5.3 添加矽灰對混凝土的耐久性質	23
第六章	添加卜作嵐材料對混凝土工程案例介紹	25

卜作嵐材料對混凝土影響之探討

第一章 前言

隨著時代的演進，材料日新月異在更新與轉變，近代混凝土也隨著材料的引用移及新的思維，而漸漸走向高強度、高流動性與高耐久性。工程界中，混凝土是經常使用到的材料，也是目前營建業消耗能量與排放出二氧化碳最大的工項，因此能控制住混凝土的使用量即是達到節能減碳的最佳路徑。在台灣較常用的卜作嵐與膠結性材料有飛灰、爐石粉、矽灰等，其中飛灰及矽灰雖然均稱為卜作嵐材料，但其特性均各自不相同，尤其混合不同卜作嵐與膠結性材料使用時，更有不同的性能及功效。目前坊間許多自充填混凝土配比大多同時大量摻用飛灰及爐石粉或不同比例的爐灰（爐石粉加上飛灰），但因一般使用者常不明卜作嵐材料使用機理，反而常造成浮灰、浮水、龜裂、剝離、析離等混凝土病症。為避免使用不恰當，設計方式本書建議可參照公共工程委員會編定之「公共工程飛灰使用手冊」、「公共工程爐石使用手冊」及「卜作嵐使用手冊」來進行配比設計，以維持混凝土的品質控制。

為考慮混凝土的工作性、硬固性與耐久性，在經由文獻分析建議後，本書建議混凝土配比設計方式為：

- 1、水灰比（w/c） ≥ 0.42 ，以防止水泥水化產生自體收縮，並使得水泥中的 C_3S 、 C_2S 能充分達到水化反應。
- 2、水膠比（w/cm） ≤ 0.40 ，以達到整體品質所需之強度品質。
- 3、總用水量（拌和水+液態化學摻料） $\leq 160 \text{ kg/m}^3$ ，以防止泌水與析離。
- 4、水固比（w/s） ≤ 0.07 ，以確保體積穩定性，減少長期乾裂產生，以及長期耐久性質。

註：水灰比為水與(水泥)之比值。

水膠比為水與(水泥、卜作嵐材料)之比值。

水固比為水與(水泥、卜作嵐材料、砂、石)之比值

第二章 卜作嵐的定義、種類

卜作嵐材料包括飛灰、爐石粉、矽灰等，其化學特性差異甚大，如表1及圖1之鈣-鋁-矽相位圖所示[1]。飛灰之主要組成份為 SiO_2 及(二氧化矽) Al_2O_3 (三氧化二鋁)之粘土組成，爐石粉之主要組成份為 SiO_2 (二氧化矽) 及 CaO (氧化鈣)，矽灰之主要組成份為 SiO_2 (二氧化矽高達88%以上)。在這些卜作嵐材料中，F類飛灰相差水泥的性質甚大，易造成卜作嵐反應作用；爐石粉和C類飛灰則與水泥接近，因此兼具有膠結性反應及卜作嵐反應二種特性；矽灰則因活性最大，而具有減低鹼性質物之功能，能固化水泥漿中佔20%量的CH膠體。不同的卜作嵐材料，因其基本性質不同，也造就不同的使用性能，再依其不同的互補特性；如果使用者能夠充分瞭解掌握材性，並且好好運用，將可以達到最佳的卜作嵐混凝土配比。飛灰、爐石粉、矽灰外觀如圖2。

表1 矽灰、飛灰、爐石粉及矽灰和一般水泥之典型氧化物

氧化物 卜作嵐種類	SiO_2 (S)	Al_2O_3 (A)	FeO_3 (F)	CaO (I)	MgO (M)	氧化鹼 (%)	燒失量 (%)
飛灰(F類)	20~60	10~35	5~35	1~20	0.3~4	1~4	0.6~12
爐石粉	28~38	8~24	1~3	30~50	1~18	-	-
矽灰	85~97	-	-	<2	-	-	<6
一般水泥	21	6	3.3	64	2.0	-	1.1

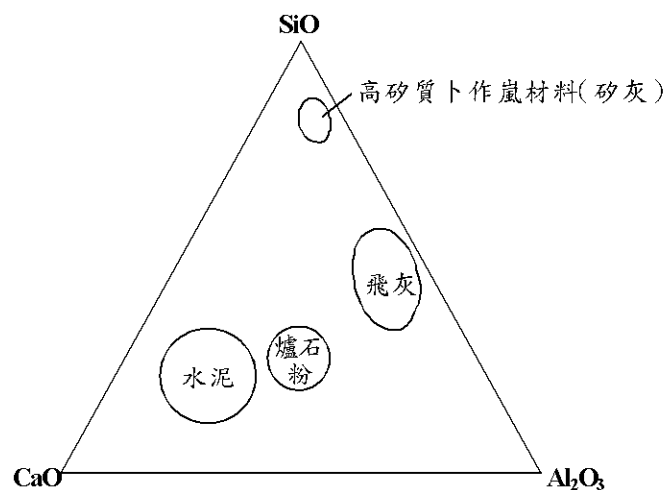


圖1 水泥及卜作嵐材料在C-A-S系統之相位示意圖

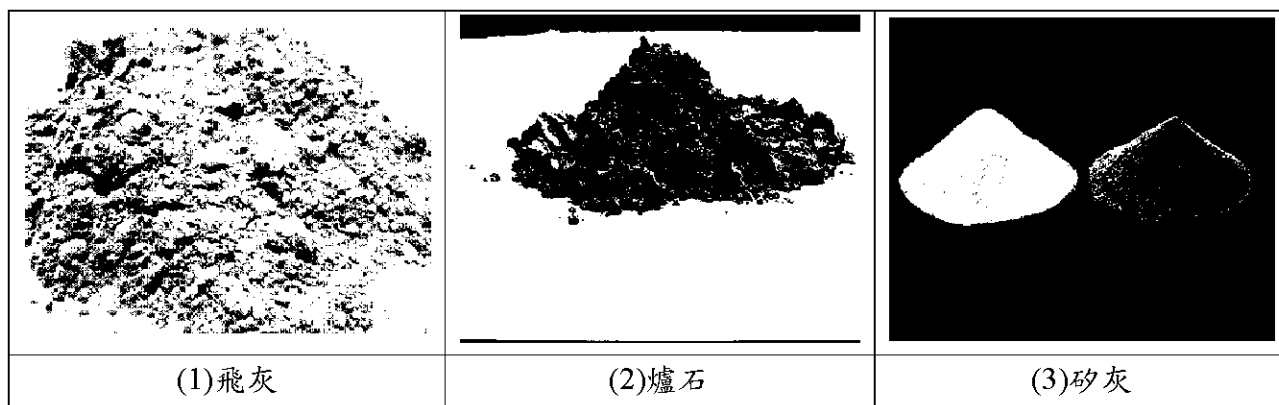


圖 2 飛灰、爐石粉、矽灰外觀圖

2.1 飛灰介紹與特性

在台灣，「飛灰」係指燃煤火力發電廠所產出者，在燃燒煤炭粉過後的產物，屬於工業的廢棄物，其生產過程簡示如圖 3[2]，製造過程中，煤含有粘土礦物，其成份中含大量 SiO_2 、 Al_2O_3 及 Fe_2O_3 等氧化物，這些粘土組成經過 $1,600^\circ\text{C}$ 的高溫燃燒後會熔化，其中質量較重的顆粒（約有 20%）會結塊掉入爐底，而成為「底灰」（Bottom Ash），舊稱「炭屎」。質量輕的顆粒（約有 80%）會鼓脹而隨著燃燒氣體飄浮而上昇，並且受到冷空氣冷卻作用而形成玻璃空心圓球，最後藉助靜電集塵器吸附而獲得之粉末，即為「飛灰」（Fly Ash）或「粉煤灰」。^[3]

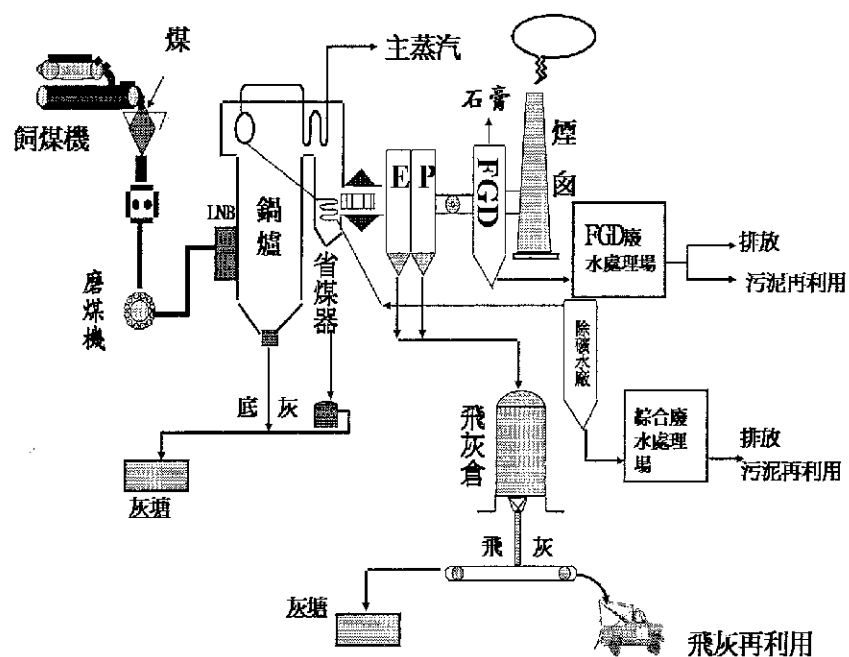


圖 3 火力發電廠燃煤產製飛灰過程

1990 年代以前，飛灰尚未被充分瞭解，外界甚至污名其使用，形成偷工減料的代名詞，在未能被妥善利用的情況下，許多飛灰被當成回填材料或廢棄物而遭淪落棄置處理，以致飛灰部分有毒金屬含量溶出，造成環境污染的問題[2-5]。現今飛灰已成為卜作嵐 (Pozzolan) 材料的一種，歸類為混凝土礦物摻料，若能善加利用除可節省可觀的處置費用外，亦可避免資源的浪費，更有助於增進混凝土耐久性。飛灰的特性受到粉煤品質及鍋爐運轉狀況而異，產生不同之含碳量，進而影響新拌混凝土性能，故必須特別注意。

2.2 爐石介紹與特性

在煉鐵過程中，會連續不斷從高爐上部卸下氧化鐵材料（礦砂、鐵丸、礦渣等）、熔化石（石灰石及白雲石）及燃料（焦炭），在 $1,500^{\circ}\text{C}$ 高溫燃燒下，會形成鐵水（融鐵）及礦渣[4]。自此可從爐底收集熔融鐵及浮在熔融鐵上面的高爐爐渣。高爐爐渣又依其冷卻方式之不同，分為氣冷高爐石及水淬高爐石，生產流程如圖 4 所示[5, 6]。氣冷爐石經過特殊處理，可當作為輕質粒料使用，然而通常並未加以特殊處理而被視為廢料或當作級配料，或填海處理或廠區內回填。水淬爐石則由於含高量玻璃質而本身具有潛在的膠結能力，而若加以適當的催化方法激發其水化活性，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[7]。

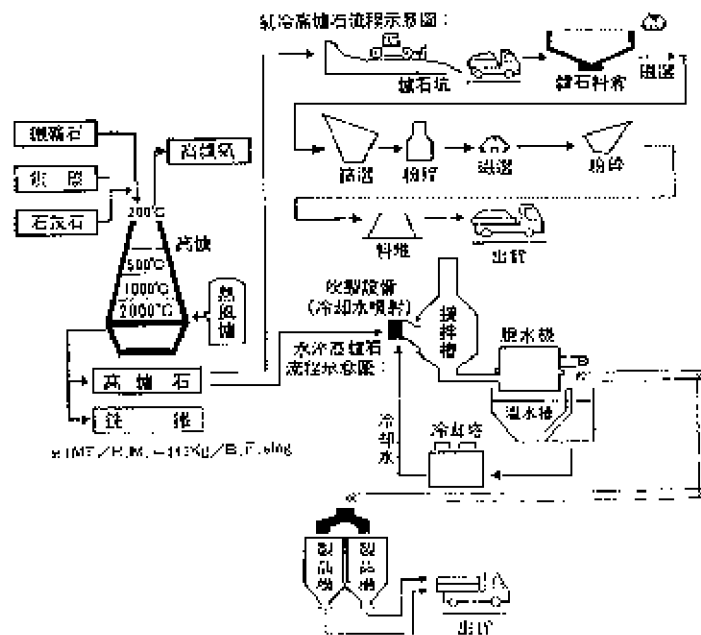


圖 4 高爐石之生產流程示意圖[5]

中鋼公司早期僅生產氣冷高爐石，用於路基，或用做混凝土粒料，品質遭質疑，使用量有限，一般都視之為廢棄物，而淪為將其做填海處理。在 1980 年代時，中鋼公司開始將原來生產之氣冷高爐石，改用噴水急速冷卻，因冷卻速率甚劇，產生大量玻璃質，而形成粒狀之水淬高爐爐渣，又稱高爐石，經研磨後形成爐石粉，即可用於混凝土中當作礦物摻料使用。高爐石粉成分中含鈣、矽、鋁、鐵等氧化物，其與卜特蘭水泥熟料相近，並具高量非晶性玻璃質而具有潛在水硬性膠結能力，若加以磨成高爐石粉與水泥混合，在與卜特蘭水泥併行之水化反應中，也藉著卜作嵐反應，可形成鈣、矽比較低之類似水泥熟料之低密度矽酸鈣 (C-S-H) 膠體及鋁酸鈣 (C-A-H) 等水化物，見圖 1。

目前國內之第 I 型卜特蘭水泥，在中國國家標準中華民國國家標準 CNS 61 中已允許添加 5% 以下之爐石粉、或飛灰或石灰石粉。在台灣，高爐石粉之生產與使用開始於 1983 年，但在土木水利工程方面之使用較少，但經產官學界的研究探討及工程界實際應用[8~21]，已充分印證高爐石粉混凝土的特性與效益，目前年用量超過 400 萬噸，而且供不應求，還由國外進口。

2.3 矽灰介紹與特性

矽灰是一種在精煉工廠使用電弧爐在 2000°C 條件下生產矽金屬或矽鐵合金的副產品，圖 5 顯示矽灰由煙囪內收集的情形[22]。這些含矽金屬的工業應用，包括生產鋁和鋼、製造電腦晶片、和生產矽樹脂，也廣泛使用於潤滑劑和密封膠上。

美國混凝土學會(ACI)定義「矽灰」是「非常細小的非結晶型二氧化矽，為一種利用電弧爐生產元素矽或含矽合金的副產品」(ACI 116R)。矽灰比起其他卜作嵐材料而言，是一種具高度活性材料，少量使用相對地可以提高混凝土的性質。矽灰通常被歸類為一種補充性膠結性材料，為混凝土中除卜特蘭水泥外添加的材料，又被歸類為純卜作嵐材料。

因為矽灰大大地可大量增進混凝土的新拌和硬固混凝土的特性，所以在國外常被使用於混凝土中。在 1940 年代末期，產、學界已知矽灰有使用於混凝土中的潛力，但因其卓越粘著性，使得混凝土流動性不佳。直到 1980 年代發展其它混凝土技術如強塑劑等強效性分散劑後，此時才突破矽灰應用的瓶頸，開拓矽灰的新應用領域。所以矽灰可以說是一種強化混凝土性能的強化

材料，而不是卜特蘭水泥的取代材料。在台灣使用矽灰之案例並不太多，主要係因為矽灰並非在台灣非主要廢棄物產品，研究工作進行並不太多，只限於高強度或特殊性能上的使用[23~25]。

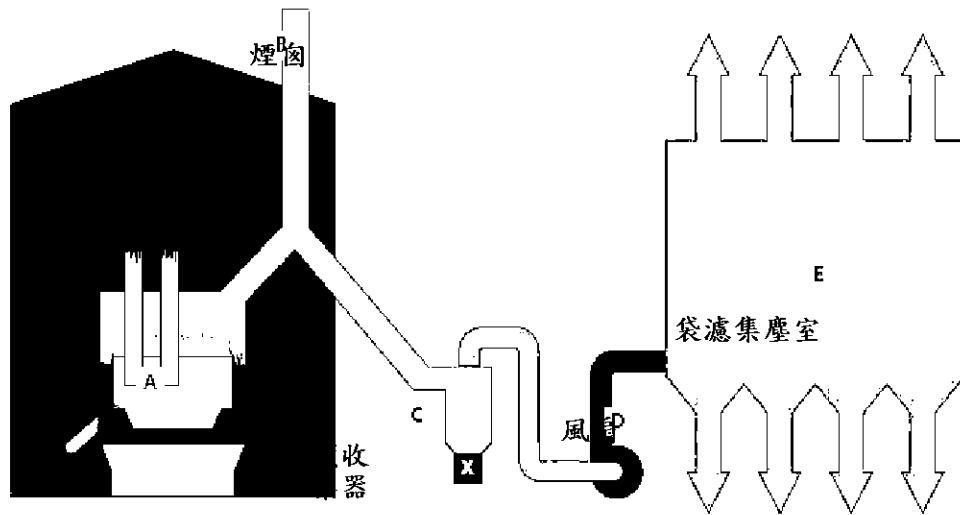


圖 5 生產矽金屬或矽鐵合金的精煉工廠，的矽灰收集在袋濾集塵室裡的大集塵袋[22]

第三章 添加卜作嵐材料對混凝土新拌性質的影響

卜作嵐材料基本上顆粒都是非常細的，添加入混凝土不論是取代部分水泥或填塞砂之間隙，都會增加細粒料的體積量、增加體積的總單位重。而由於卜作嵐材料粘稠性較大，所以需搭配適量強塑劑，即可製成工作性良好的混凝土，這也就是二十世紀末混凝土的新主流方向。在早期，現場需要改變工作性僅利用增加水量，造成的副作用為新拌混凝土容易產生泌水、析離、粒料沉澱、表面乳沫、塑性收縮裂縫和溫度裂縫的機率將大為增加，而對硬固混凝土結構體耐久性造成損傷[26]，若是用於需要高流動性的施工環境，則這種情形會更加顯現的嚴重。在現今觀念為改變此種不良情況，則會加添適量強塑劑，用以增加流動性，減少泌水、析離等情況發生。

3.1 工作性質

卜作嵐對新拌混凝土的影響有二個明顯的作用：在先決條件為拌和水量須減少的情況下，混凝土稍緩凝且更加黏滯，與混凝土減少泌水情況的發生。雖然有些粉光工人會認為這些作用會使得混凝土更難澆鑄和裝飾，但實際上流動性更黏滯，會對新拌和硬固混凝土與混凝土的耐久性都會有較佳性能。其中黏滯原因來自於卜作嵐的添加相對應降低了水泥用量，致使水泥水化物的產生量減少，水泥水化第二個放熱峰往後延遲，混凝土凝結時間往後延而有更多的工作時間，圖 6 為無添加卜作嵐混凝土與添加卜作嵐的混凝土流動比較圖，卜作嵐對工作性如同「軸承效應」有助混凝土中粒料之移動，因其比重較輕，在取代比重 3.15 的水泥後，水泥漿總體積量增加，粒料潤滑漿厚度相對增加，有助混凝土工作度。而在添加強塑劑後，水泥及卜作顆粒被充分分散更增加混凝土流動能力，甚至提高到高流動混凝土的範疇，令混凝土能充分的流動至現場鋼筋綁紮較密處，並填塞至結構體各處，並且因為卜作嵐材料的比表面積較高、顆粒較小，在混凝土採低水量的情況下，減短、減少了混凝土毛細現象，令乾縮龜裂、泌水、浮漿現象將大大的減低。但是要注意其負面的添加爐石粉很容易因泌水嚴重而造成毛細管孔道及表面浮灰現象。

目前台灣大量採用高流動化高性能混凝土，在沒有添加卜作嵐的情況下，

無論加入多少強塑劑，坍度損失及工作度損失是非常迅速的，接近在 1 小時左右，工作度將在運送途中喪失殆盡。因此現今的使用方式為：中高強度混凝土採用飛灰、爐石組成配比方式；超高強度上則採用矽灰、飛灰及爐石組成配比的方式。

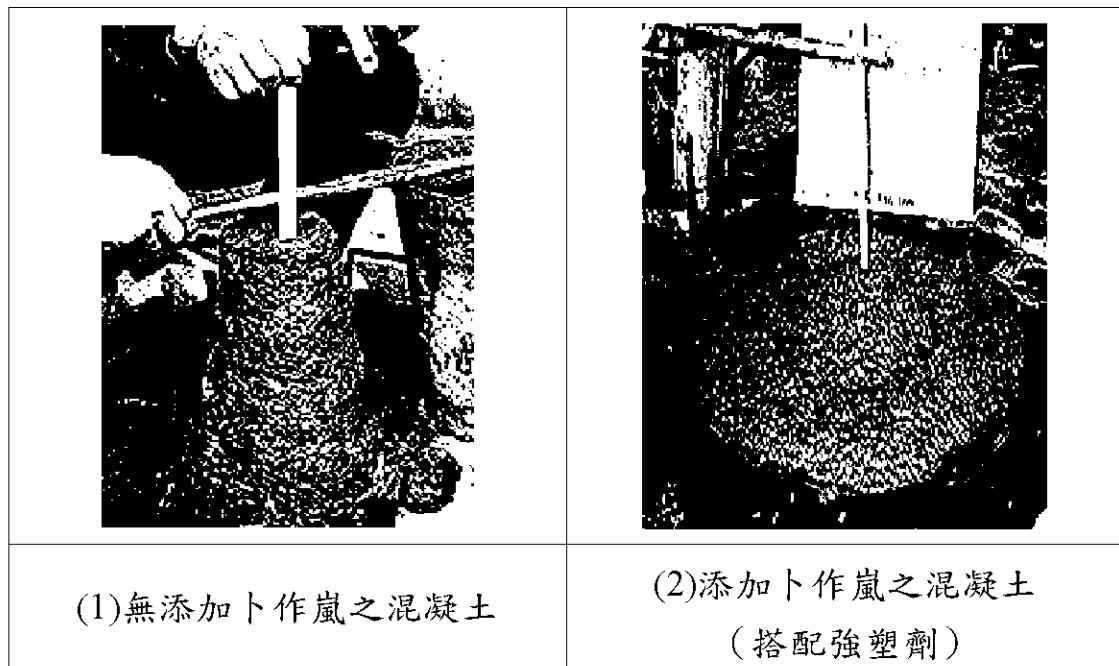


圖 6 無添加卜作嵐混凝土與添加卜作嵐的混凝土流動比較圖[27]

3.2 凝結性質

添加矽灰後明顯會改變混凝土凝結時間，矽灰取代水泥雖然減少水泥，但矽灰的表面積為水泥的 100 倍，大量吸水而使早期凝結時間縮短，另外原因為矽灰有更高的反應活性，將會縮短初凝時間。含飛灰及爐石粉參組成配比之混凝土，當水泥量減少時，相應凝結時間都會延遲，見圖 7[5]，初凝時間由 1.5 小時延至 6 小時，終凝則由 3.6 小時延至 26 小時，這也是現行卜作嵐混凝土的應用，最常遇到困難處與迷思。其實，只要妥善控制水灰比與水泥漿量，將可以有效的控制住凝結時間，進而有效運用到許多混凝土製品。如圖 7 混凝土中水泥漿量對凝結時間之影響，可以得知若需要早期快速凝結的混凝土製品，可以從配比上調整，選用漿量較厚的漿量，以卜作嵐材料為填充材的角色，來強化製成的混凝土產品；若是在現場需要長工作時間、較佳新拌性質與硬固性質的混凝土產品，則可以選用漿量較薄的方式，以卜作嵐材料為取代水泥的角色，來達到減少水泥、增進節能減碳的理念，並且又

可同時達到所需的混凝土強度，亦可運用養護條件來縮短凝結時間，增加養護溫度，同時可以增加反應速率，但溫度過高時，須注意混凝土劣化的情形。

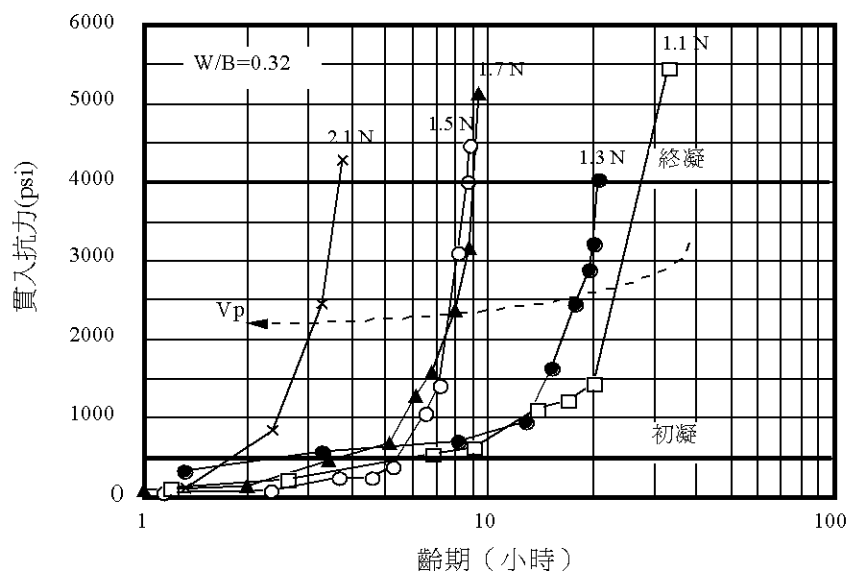


圖 7 混凝土中水泥漿量對凝結時間之影響[5]

第四章 添加卜作嵐材料對混凝土硬固性質的影響

古羅馬帝國的建築物，仍可屹立至今，而現代混凝土配比若設計恰當，可以在硬固後，達到所需的混凝土強度與耐久能力，更可達到混凝土永生的想法。混凝土從材料認知、選擇到配比及試拌，重要的目的都是希望所設計的結構混凝土性能可以如預期，使混凝土在結構體上能如期如質，永續長存，達到百年壽命。

卜作嵐摻加入混凝土影響力學性質的原因來自混凝土的配比組合、水泥膠結料漿品質及數量的支配，因此拌和水量、單位水泥量、水膠比 (W/B) 和水灰比 (W/C) 都會對卜作嵐混凝土的硬固性質直接產生影響。而影響耐久性質的原因則來自水泥量及水量、水泥漿濃度；當水泥量愈多，則水泥劣化的主要來源 C_3S 及 C_3A 都會相應增加，對硬固混凝土會造成膨脹性的劣化作用；水量多時，則不利於硬固混凝土的體積穩定性，諸如乾縮量及潛變量，毛細孔隙數量及路徑也增多，對外界的有害離子的侵入抵抗能力將大打折扣，造成結構體混凝土長期的不穩定性。

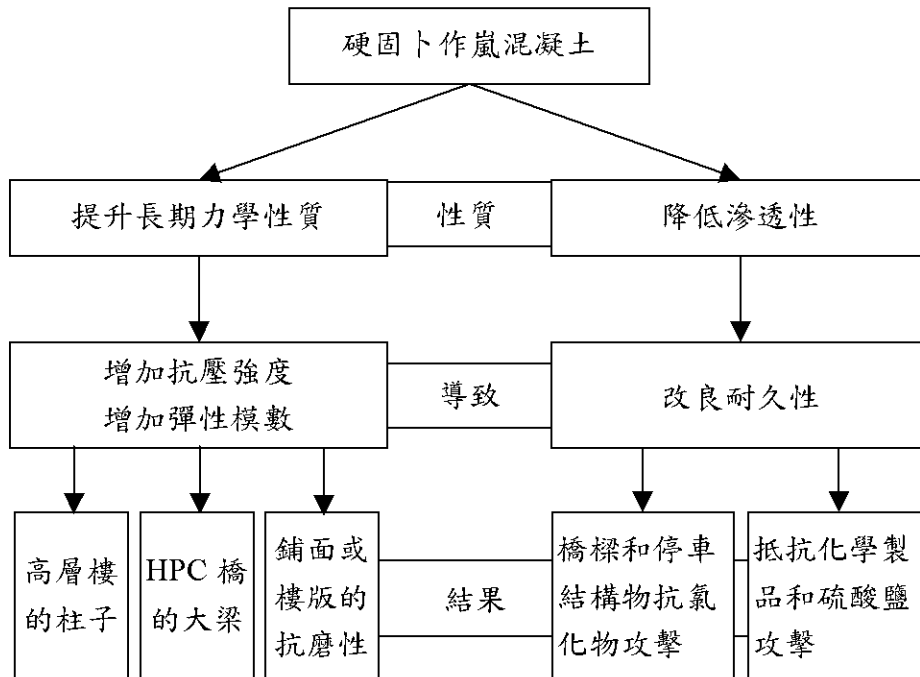


圖 8 卜作嵐對硬固混凝土的影響和應用策略[28]

4.1 添加飛灰對混凝土的力學性質

卜作嵐混凝土之水膠比 (W/B) 不變條件下；以飛灰取代部分水泥而減少水泥用量，能降低成本，且可以相對減少二氧化碳排放量。而在卜作嵐反應下，能消耗氫氧化鈣 (Ca(OH)_2) 而形成 C-S-H 膠體，適時填充內部孔隙，進而將大孔隙填塞及轉變成細小孔隙，除了減少界面微裂縫形成之機率，又可強化粒料界面的鍵結強度，這些效果是非常有助於混凝土強度長期持續的提昇。然而上述優點會因飛灰品質、取代量、養護條件與燒失量之差異而有不同的效益[5]。

- (1) CaO 含量：飛灰中 CaO 含量愈多，則卜作嵐水化反應性將愈佳，愈有利於混凝土早期強度的發展。因此若使用 C 類飛灰，可促進混凝土獲得較高的早期強度；而若添加 F 級飛灰，雖導致混凝土早期強度偏低，但卻可獲得較佳的晚期強度[29]，主要原因來自卜作嵐反應的進行速率。
- (2) 顆粒尺寸：由於飛灰顆粒愈細，比表面積愈大，活性愈佳而加速卜作嵐水化反應，這將非常有助於混凝土強度的提昇[5]。而 F 類飛灰之粒徑大於 $45\ \mu\text{m}$ 的數量則與活性成反比，另外粗粒飛灰中常含有未燃燒碳，對混凝土中之水量產生吸附作用而影響 W/C 或 W/B，而影響強度發展，所以摻用粒徑較粗的飛灰對混凝土強度不利。
- (3) 取代量：在合理的取代比例條件下，飛灰取代水泥量的比例愈高，混凝土中水泥量相應愈低，此時相對應之 W/C 愈高，早期強度發展愈慢，但長期強度則理論上不變或更高。圖 9 顯示[30]飛灰添加量超過 40%時，相應水泥量僅剩 60%，早期強度約折減 40%以上，但長期的 365 天齡期強度已能縮小與普通混凝土的差距至 1/10 左右。因此卜作嵐混凝土設計，添加飛灰取代部分水泥時要適當調整 W/B 及 W/C，見圖 10，確保早期強度的需求。但如果以飛灰填塞粒料達到最大密度的狀況下，則取代量隨 W/B 及漿量多少而變，見圖 10 可間接指出量多量少其實與觀察角度不同而異[5]，不過見圖 10 之上標，基本上拌和水量愈多，混凝土容積密度會愈輕，愈不緻密，品質愈不利。當固定漿量，則飛灰添加量 (P/B) 愈大，強度愈不好；可是當漿質 (W/B) 固定，則飛灰添加量 (P/B) 愈大，早期強度強度低而長期強度愈高，兩者早期一致，晚期強度則依 P/B 之量有相反

之勢。因此添加飛灰量之多寡將視工程性質而選擇適當的飛灰取代量，原則上以不超出第 2.5.1 節規定之取代水泥上限量為原則。

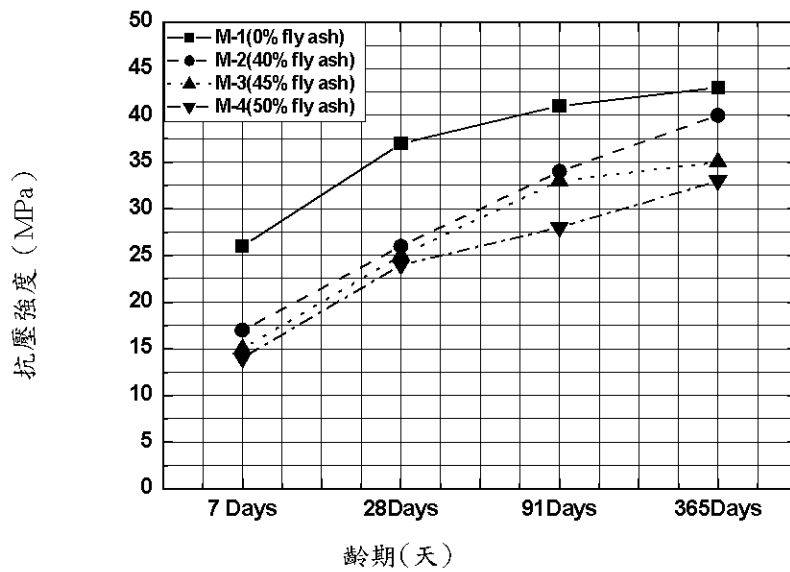


圖 9 飛灰混凝土抗壓強度與齡期之關係[30]

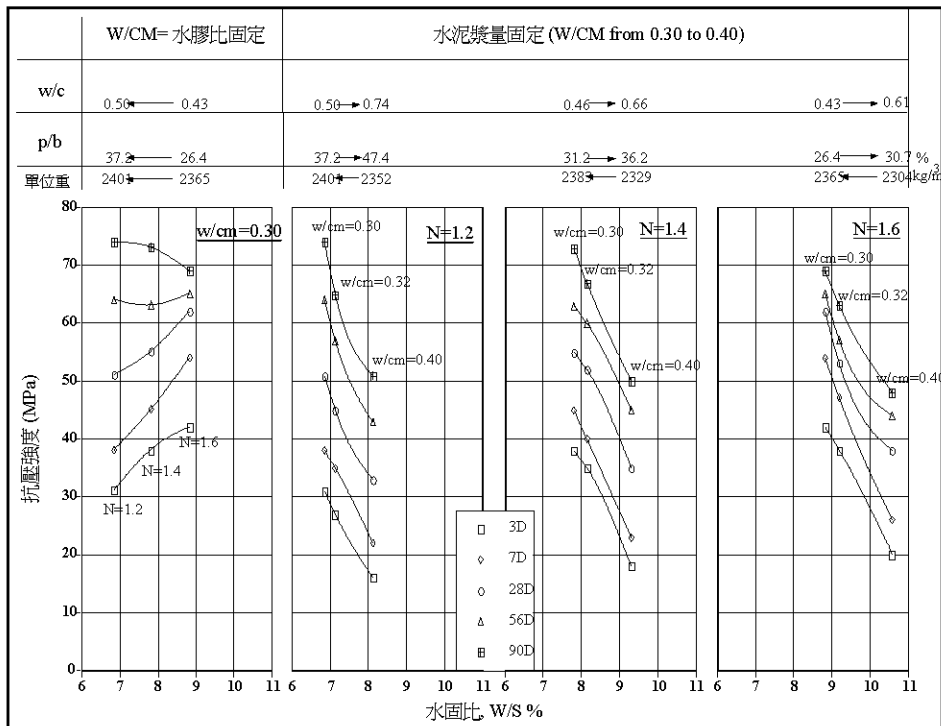


圖 10 不同卜作嵐水泥漿質與量下，卜作嵐用量對混凝土抗壓強度的影響[5]

(4) 養護條件：由於飛灰的卜作嵐反應緩慢，因此在常溫養護條件下，飛灰的卜作嵐反應會繼續進行相當長時間而發揮其膠結功能。另外因為溫度對化

學反應有催化效果，若能利用溫度的催化方式，將可有效刺激混凝土初期強度的成長，但要小心溫度過高（指 50°C 以上）也會使混凝土嚴重產生內部裂縫而劣化。

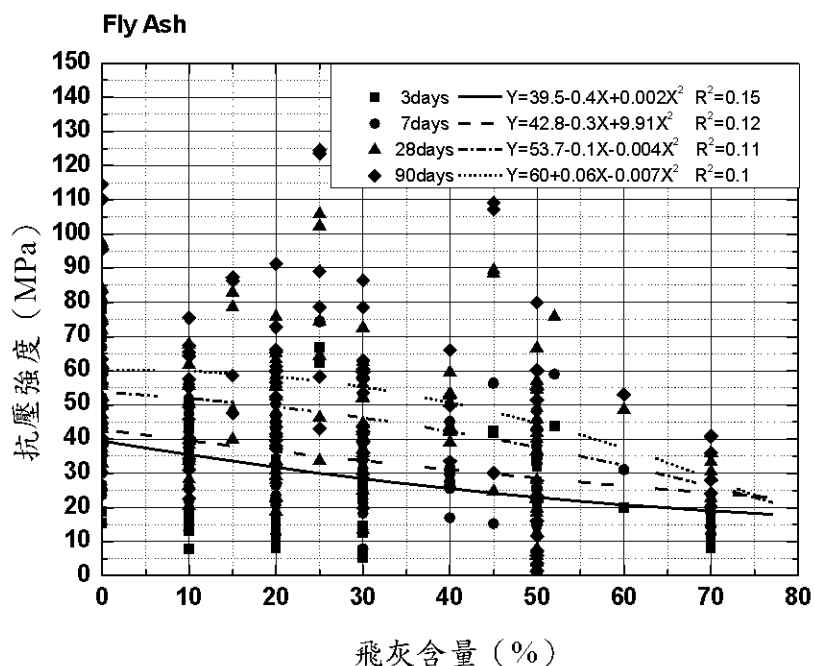


圖 11 飛灰添加量與混凝土抗壓強度的關係[31~40]

4.2 添加爐石對混凝土的力學性質

混凝土強度發展與爐石粉之反應活性有密切關係，依 ACI 233R[41]資料顯示，相對於普通水泥砂漿而言（以替代率 50%之標準水泥砂漿試體測得），採用 120 級爐石粉(CNS 12549)，早期(1 至 3 天)強度較低，晚期強度(7 天以後)較高；採用 100 級爐石粉，早期(1 至 21 天)強度較低，晚期強度相同或較高；採用 80 級爐石粉，各期強度均有較低之趨勢，見圖 12[41]。當水膠比愈低，尤其取代率較高時，爐石粉對混凝土規定強度之提昇愈明顯；爐石粉取代率愈高，基本上強度發展愈低，如圖 13 所示。所以爐石粉混凝土的強度可透過 W/B 及細度模數的調整而改變，並且可由圖中發現爐石粉取代比例 10~30% 的配比為最佳情形，其晚期強度(7 天以後)可達未取代配比的強度，甚至超越之。目前坊間已接受爐石粉添加於自充填混凝土配比或高強度混凝土，已充

分印證高石粉混凝土的特性與效益，但在土木水利工程方面之使用較少，爐石粉已由廢棄物轉換成有價值的混凝土材料。

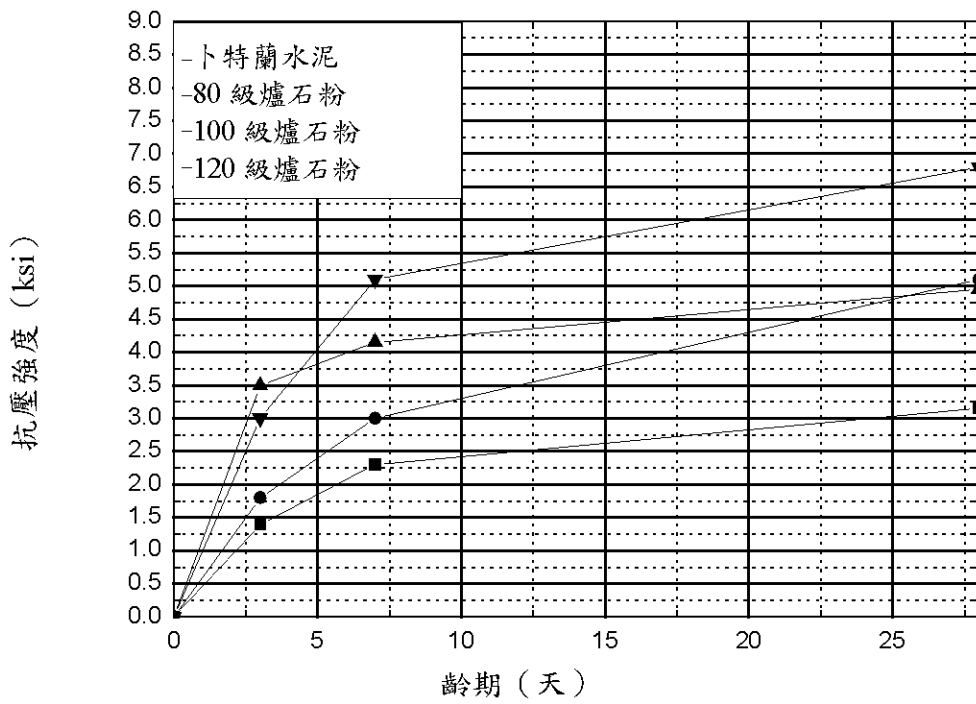


圖 12 爐石粉水泥砂漿強度成長趨勢[41]

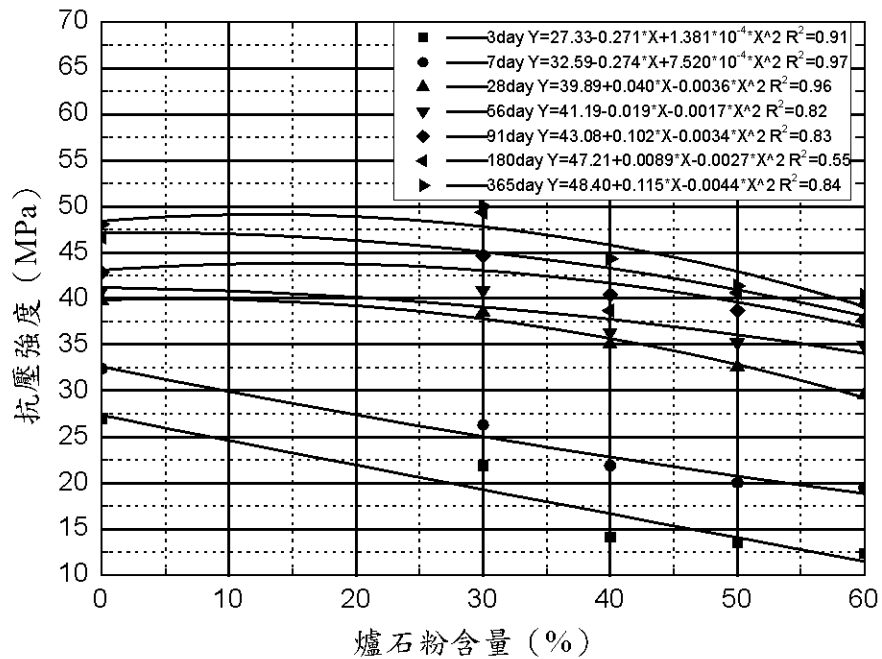


圖 13 爐石粉含量對混凝土強度的影響 (W/B=0.48) [42]

4.3 添加矽灰對混凝土的力學性質

矽灰最初應用時，就是因為能夠產生非常高的抗壓強度，所以獲得混凝土行業的重視。圖 14 顯示混凝土中使用不同數量的水泥、飛灰、矽灰和水，對抗壓強度的影響。圖中顯示各個齡期強度的增加是成比例的，添加更多矽灰會增加部分強度，然而，如果搭配使用飛灰，則水量、飛灰含量及種類和矽灰全都產生相互作用，將影響 28 天抗壓強度和各齡期抗壓強度的發展速率，主要原因係由於粒子級配關係。矽灰對抗壓強度的衝擊為混凝土 28 天後會繼續增加強度，但強度增加率則緩慢，這種強度增加曲線與另外一種純卜作嵐材料的 ASTM C618 F 類飛灰的曲線是非常不同的。

添加矽灰 5~15% 有強化混凝土抗壓強度之效益，較不添加矽灰之混凝土高出甚多，但過多矽灰則可能不利於混凝土抗壓強度，見圖 15 齡期 90 天之黑心倒三角圖之分布狀態所示。所以適量添加矽灰對抗壓強度是很重要的。

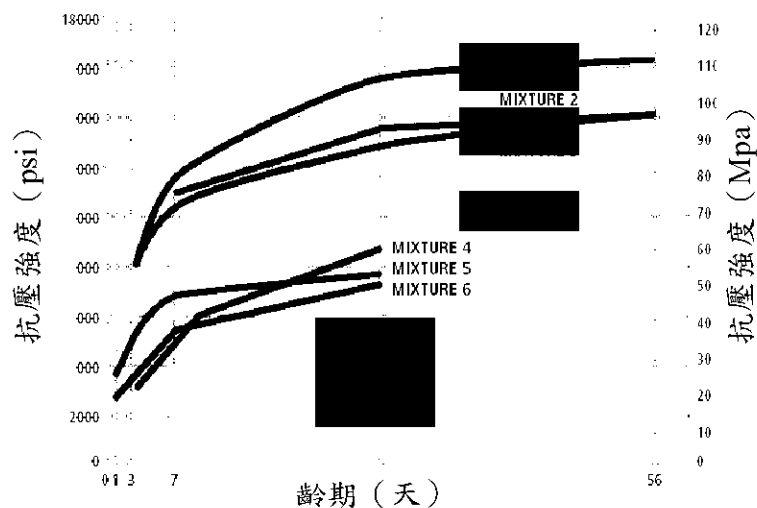


圖 14 數種矽灰混凝土配方的強度發展[28]

表 2 數種矽灰混凝土配方的強度發展配比表[28]

配比	水泥 kg/m ³	飛灰 kg/m ³	矽灰 kg/m ³	矽灰 %(註 1)	W/B	W/C
1 (註 3)	475	104	74	11	0.23	0.32
2 (註 2)	390	71	48	9	0.37	0.48
3 (註 3)	475	59	24	4	0.29	0.34
4 (註 2)	390	—	27	6	0.35	0.37
5 (註 2)	362	—	30	8	0.39	0.42
6 (註 2)	390	—	30	7	0.37	0.40

註 1.矽灰佔總膠結性材料質量的百分比。

註 2.由 Elkem 所提供資料。

註 3.資料來自 Burg and Ost (1994)。

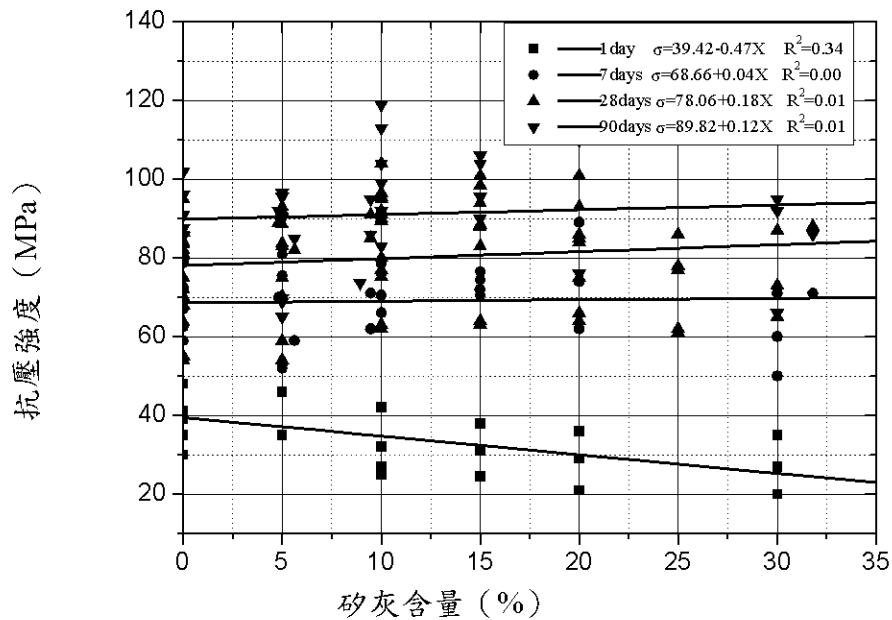


圖 15 矽灰含量與混凝土抗壓強度之關係[43~50]

第五章 添加卜作嵐材料對混凝土耐久性質的影響

由於混凝土摻用適量的卜作嵐材料，導致其含有大量的 SiO_2 與 Al_2O_3 會與水泥水化產物氫氧化鈣的長期發生卜作嵐反應作用，形成低密度 C-S-H 及 C-A-H 膠體並填塞部分孔隙，除減少孔隙數量外，亦使孔隙細緻化。這種反應結果將可促進混凝土裂縫的自癒性，對於惡劣天候或具侵蝕環境，諸如硫酸鹽侵蝕、凍融作用、海域環境及潮濕等區域，有助混凝土抵抗水分、硫酸鹽及氯離子的入侵，避免鋼筋的腐蝕膨脹，而增進鋼筋混凝土之耐久性能。

目前使用卜作嵐可以從三方面來改善混凝土的耐久性，分別是：

- 1、減少水泥量：降低水泥漿體中的 C_3S 和 C_3A 總量，降低水化熱量，減少熱裂縫的發生；降低 Na_2O 、 K_2O 等鹼類物質的含量，降低攻擊粒料產生鹼粒料反應；並且因水泥量的縮減而減少不利耐久因子氫氧化鈣的釋出。
- 2、卜作嵐反應：生成 C-S/A-H 膠體並填充孔隙，降低混凝土的滲透性，使有害物質難以入侵，同時也可彌補各種因素引起的微裂縫。
- 3、改善工作度：提高混凝土的流動性，減少新拌混凝土之泌水或析離現象，因而降低因搗實不良而引起的孔隙及蜂窩，提昇混凝土的水密性。

前述改善混凝土耐久性中之最有效方式，即減少內部的間隙量或裂縫數，以抵抗有害物質的侵入。因此對於混凝土耐久性的評估方式仍以混凝土表面第一線防衛系統來進行測試，其中以表面電阻及氯離子電滲量試驗為主。

- (1) 表面電阻值量測：是採用英國 CNS 公司出品的四極式電阻儀，進行硬固混凝土表面電阻值的量測，影響電阻值最大的因素是混凝土微觀結構的緻密程度，混凝土愈緻密，表示孔隙愈少，電導通路變長，電阻值較高 [51]。理論上電阻值超過 $20 \text{ k}\Omega\text{-cm}$ ，混凝土內之鋼筋則較不易腐蝕，如此可提昇鋼筋混凝土的耐久性能 [52]。
- (2) 氯離子電滲量試驗：依據 ASTM C1202 進行氯離子滲透性的量測，利用外加之直流電壓 (60V)，使電解液 (NaCl , NaOH) 產生帶電的氯離子，並加速對硬固混凝土的滲透，截取時間與電流量的變化量，再將其轉換為電滲量 (庫侖) [53]。氯離子電滲量愈低表示滲透性差，混凝土耐久品質愈佳，當電滲量小於 1,000 庫侖；屬於「非常低」滲透量，1,000~2,000 庫侖；屬於「低」滲透量，2,000~4,000 庫侖；屬於「中

度」滲透量，超過 4,000 庫侖；則屬於「高」滲透量。美國 AASHTO 規定鋼筋防蝕所需要的混凝土氯離子滲透電量必須小於 2,000 庫侖。

5.1 添加飛灰對混凝土的耐久性質

1、表面電阻值

由表 3[54~55]顯示出為幾種高摻量飛灰混凝土的表面電阻值量測結果，添加飛灰材料可降低混凝土毛細管孔隙量，有效阻斷電流通路及填塞部分拌和水量所遺留孔隙，進而提高混凝土電阻值，尤其是減少拌和水量至 160 kg/m³ 以下時，提昇電阻值效果更佳，然而若增加飛灰至 30 %以上則會有降低的趨勢。

表 3 飛灰混凝土之表面電阻值

W/C	W/B	拌和水量 (kg/m ³)	飛灰燒失量 (%)	飛灰取代水 泥量 (%)	表面電阻值(kΩ-cm)		
					28 天	56 天	91 天
0.40 ^(a)	0.40	220	—	0	9	12	13
0.40 ^(b)	0.30	192 ⁺	4	25	12	20	28
0.40 ^(b)	0.30	192 ⁺	6	25	12	19	25
0.40 ^(b)	0.30	192 ⁺	11	25	11	17	23
0.40 ^(b)	0.28	160*	4	25	28	66	75
0.48 ^(b)	0.32	160*	4	30	24	53	70
0.70 ^(b)	0.40	160*	4	40	21	47	68

註 1. ^(a)採用「ACI 規範配比設計」^(b)採用台灣科技大學黃兆龍教授之「緻密配比設計」[6-2]。

註 2. +添加 2.5%強塑劑(水泥百分比)；*添加 3.5%強塑劑(水泥百分比)。

2、氯離子電滲量

表 4 為幾種高含量飛灰混凝土的氯離子電滲量之量測結果[54~55]，依混凝土齡期而言；時間愈長久，內部組織愈顯緻密，以致可讓細小氯離子滲透量也逐漸降低。其中採用 ACI 規範之無飛灰混凝土配比設計之電滲量，齡期 91 天仍高於 4,000 庫侖，屬於「高滲透量」之性質，然而若添加 25%飛灰；整體上是明顯降低混凝土的電滲量，而且時間愈長降幅愈大，至齡期 1 年時皆低於 2,000 庫侖，達到「低滲透量」，顯示添加飛灰材料可填充孔隙而降低

混凝土的滲透性，具有與減滲劑相似的效應。而同樣地降低拌和水量至 160 kg/m³ 時，混凝土氯離子電滲量之降幅更顯著，甚至長期電滲量可低於 1,000 庫侖的「非常低滲透」等級。然而若增加飛灰至 30 % 以上則會有略為升高的趨勢，這種結果對應表面電阻值是有相似的關係，飛灰的添加量是應該低於 25%，不宜過量摻合於混凝土中。

綜合前述結果；摻用適量及低燒失量的飛灰，並採取低拌和水量的配比設計，將可降低混凝土的氯離子滲透性，對處於不良環境之結構混凝土，諸如海域環境、硫酸鹽濃度高的地區，具有優良的鋼筋防銹蝕效果及防硫酸鹽侵蝕效果，而增進混凝土的服務壽命。

表 4 飛灰混凝土之氯離子電滲量

W/C	W/B	拌和水量 (kg/m ³)	飛灰燒失量 (%)	飛灰取代水 泥量 (%)	氯離子電滲量(Coulombs)		
					56 天	91 天	365 天
0.40 ^(a)	0.40	220	—	0	4,770	4,150	3,984
0.40 ^(b)	0.30	192 ⁺	4	25	—	1,250	965
0.40 ^(b)	0.30	192 ⁺	6	25	—	1,370	1,053
0.40 ^(b)	0.30	192 ⁺	11	25	—	1,495	1,186
0.40 ^(b)	0.28	160*	4	25	1,490	970	610
0.48 ^(b)	0.32	160*	4	30	1,985	1,320	745
0.70 ^(b)	0.40	160*	4	40	2,140	1,570	815

註：1. ^(a) 採用「ACI 規範配比設計」^(b) 採用台灣科技大學黃兆龍教授之「緻密配比設計」。
2. + 添加 2.5% 強塑劑(SP)；* 添加 3.5% 強塑劑(SP)。

3、硫酸鹽侵蝕

使用飛灰可以因降低水泥量而降低硫酸鹽對混凝土侵蝕化學反應之反應物的含量，如 C₃S（矽酸三鈣）、Ca(OH)₂（氫氧化鈣）及 C₃A（鋁酸三鈣），因而降低混凝土產生異常膨脹所引起的微裂縫，因此美國混凝土學會 201 委員會建議在硫酸鹽侵蝕嚴重的環境下，應使用含有飛灰或抗硫水泥（第 V 型）之混凝土，當然必須搭配降低水膠比（W/B）及保障最低抗壓強度。

4、鋼筋抗腐蝕性

如果飛灰用量適當，並且有充足的養護作業，飛灰的卜作嵐反應不但不

會降低混凝土內部之 pH 值，而且會使包裹鋼筋之保護層更加密實，阻止水分子或更細小氯離子入侵，進而保護鋼筋，防範鋼筋的腐蝕作用。

5、鹼粒料反應

飛灰取代部分水泥可因為相對減少水泥量，因而降低水泥漿體的鹼性物質總含量，若接觸活性較高的粒料（如變質岩、火成岩），產生鹼粒料反應之機率就相對降低。

5.2 添加爐石對混凝土的耐久性質

1、表面電阻值

混凝土電阻係數可顯示混凝土的表面連續性與阻抗性，亦可評估混凝土的緻密性[56~57]。用爐石粉取代部分卜特蘭水泥，由於爐石粉本身即具有少量膠結性反應，也可藉由卜作嵐反應將界面的缺陷與間隙充填補強，轉化 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 為具膠結能力之 C-S-H 膠體，使內部愈趨緻密。另外，爐石粉細度（ $4,000\sim 8,000\text{cm}^2/\text{g}$ ）較水泥細度（ $2,800\sim 3,600\text{cm}^2/\text{g}$ ）大，因此部分未參與水化之顆粒仍具有填充細微孔隙之效果，使有害物質入侵管道受阻。由圖 16 可看出，爐石粉混凝土的電阻係數隨爐石粉添加量增加而增加，對混凝土耐久性能有提升之幫助。

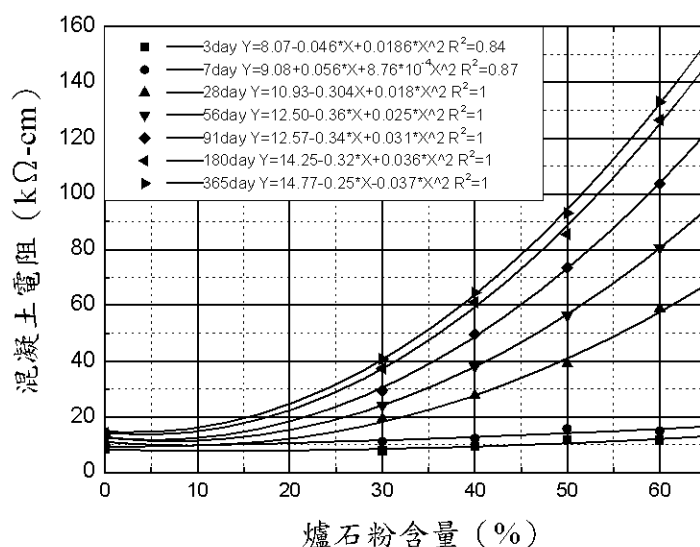


圖 16 爐石粉含量對混凝土表面電阻成長之趨勢 (W/B=0.48) [42]

2、氯離子電滲

混凝土滲透性能反映出混凝土內部孔隙大小、數量及路徑連通等情況，

水密性愈佳表示外界有害因子入侵愈難。圖 17 為氯離子電滲與爐石粉含量與電滲量之關係圖，顯示爐石粉混凝土抵抗氯離子電滲性質隨著爐石粉添加量增加而增強，表示隨齡期的增長，爐石粉混凝土持續水化、爐石粉的卜作嵐反應及細微顆粒填塞效應，可使混凝土氯離子電滲量降低，提升了耐久性。

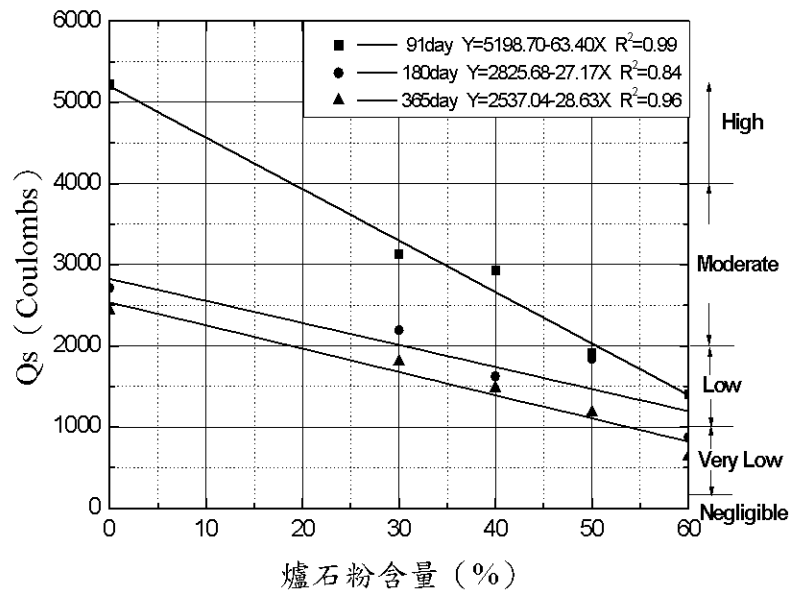


圖 17 爐石粉不同替代率之混凝土氯離子電滲成長趨勢 (W/B=0.48) [42]

3、硫酸鹽侵蝕

用爐石粉來取代部分水泥，因水泥減少而降低 C_3A 及 C_3S 含量，因此爐石粉間接增進混凝土對硫酸鹽侵蝕的抵抗能力。當爐石粉替代 50% 之第 I 型水泥，混凝土抗硫酸鹽侵蝕之能力與使用第 V 型水泥相當，以相同比例替代第 II 型水泥，則效果更佳[58]，這是因為爐石粉之使用使混凝土中 C_3A 及 C_3S 之含量降低，而且卜作嵐反應使 C-S-H 與 C-A-H 之膠體量增多，水密性提昇之結果。

4、鋼筋抗腐蝕性

爐石粉對混凝土水密性之提昇可有效抑制氯離子之滲入，並且有效改善混凝土的 pH 值，尤以添加爐石粉量在 20%~40% 範圍之效果較佳[59]，進而達到減少鋼筋被腐蝕機率。

5、鹼粒料反應

使用爐石粉取代部分卜特蘭水泥，因降低水泥含量，相應降低了 Na_2O 、 K_2O 之總鹼供應量，所以間接降低混凝土因鹼粒料反應所產生之膨脹，並且由卜作嵐反應消耗鹼性物質的情況下。在水泥含鹼當量($\text{Na}_2\text{O}+0.658\text{K}_2\text{O}$)不超過1%的情況下，有效減少鹼粒料反應所引起的膨脹。。

5.3 添加矽灰對混凝土的耐久性質

1、滲透性

混凝土的耐久性是直接跟滲透性相關的，在降低水膠比(W/B)和添加矽灰條件下，矽灰的貢獻在於能有效降低滲透性，使得水和氯化物或硫酸鹽等侵蝕性化學物質很難進入混凝土，可降低並延長任何侵蝕性化學物質進入混凝土造成損傷的時間[28]。目前高強度矽灰混凝土已被應用在垃圾轉運站和主要水壩的靜水池上，以增加鋪面耐磨性之修補工程，參見圖 18，該工程指定使用抗壓強度 86MPa 之高強度矽灰混凝土來修復沖刷損傷的靜水池[28]。



圖 18 混凝土磨蝕-沖蝕侵蝕損傷[28]

2. 鋼筋抗腐蝕性

鋼筋腐蝕是混凝土劣化中最嚴重而且維修困難的主要因素，圖 19 顯示混凝土中腐蝕發生的機理；在陽極區中，氯離子與鐵相互作用產生 Fe^{++} 離子，釋放的電子流經鋼筋到達陰極區，並由 OH^- 離子流經孔隙溶液(電解質)而完成了電子路徑。矽灰透過減少混凝土的滲透性，而延遲氯化物到達鋼筋的時間[28]。不論氯化物來自海洋或除冰鹽，它的結果都是一樣的。因此矽灰混凝

土就被廣泛使用在暴露於任何源頭鹽分的環境裡，減少混凝土滲透性，進而延長結構物壽命。圖 20 顯示腐蝕損傷的鋼筋混凝土結構物。

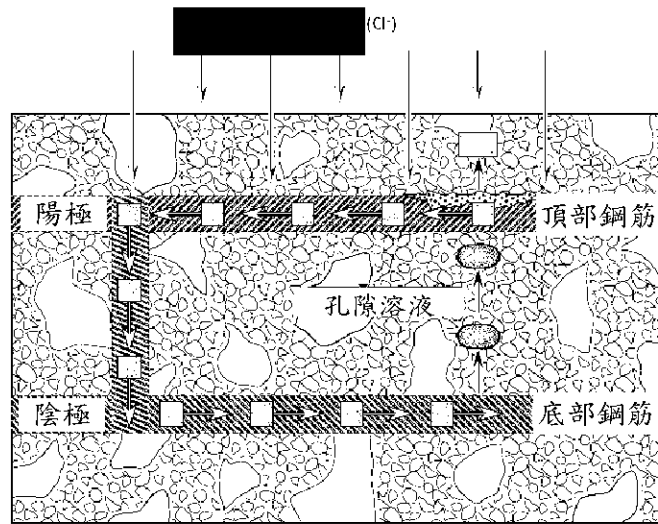


圖 19 鋼筋混凝土腐蝕示意圖[28]

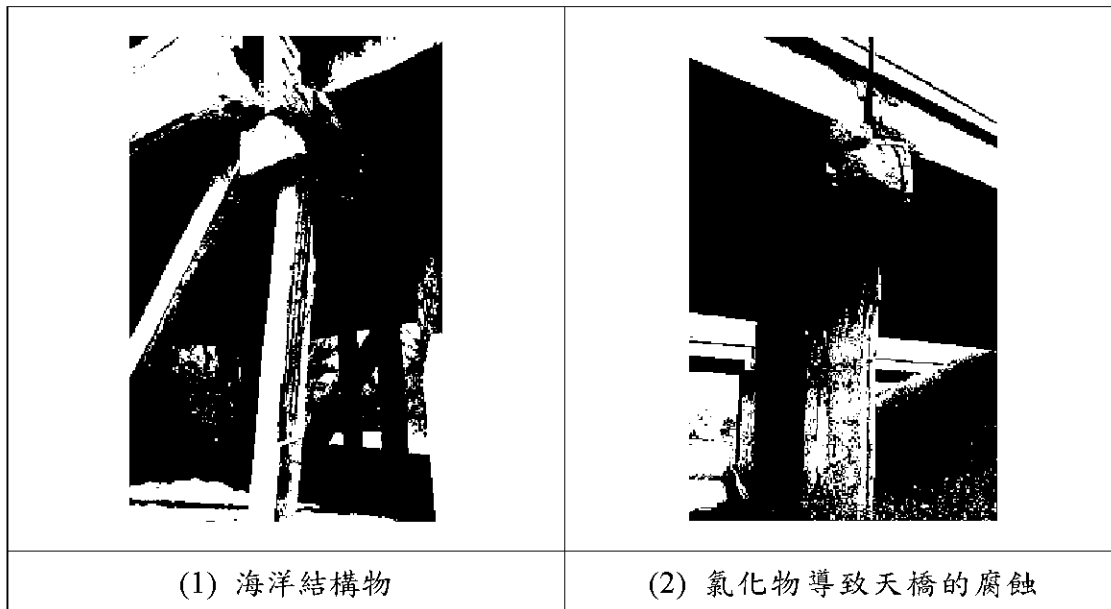


圖 20 腐蝕損傷的鋼筋混凝土結構物

3. 硫酸鹽侵蝕

卜特蘭水泥化學在硫酸鹽侵害上扮演重要角色，而水膠比 (W/B) 也是另外一個重要因數。降低 W/B 能有效降低混凝土的滲透性。添加矽灰能更進一步降低滲透性，進一步延遲任何有害起反應的時間。

第六章 添加卜作嵐材料對混凝土工程案例介紹

在認知材料基本性質後，即能有效的利用卜作嵐當作資源而非廢棄物來使用，並且發揮出材料特有的功能。過去卜作嵐的應用主旨在消耗及處理這些廢棄物，所以卜作嵐混凝土的特性無法充分發揮，類似於當初海鮮廢棄物的處理方式，如今被正視當作「膠原蛋白」般；如今已將卜作嵐材料有效率的使用以後，已成為古羅馬建築般的主配方，見圖 21，發揮出古今輝映的成效，也兼顧 CO₂ 之排放減量新潮流及綠建材新主張[5]。再經過前述章節的介紹後，落實到實際工程上，則是現今應用上的一項堅鉅任務，以下探討國內外有關工程應用實績及工程效益作一評估，希望能協助建立使用者的信心。

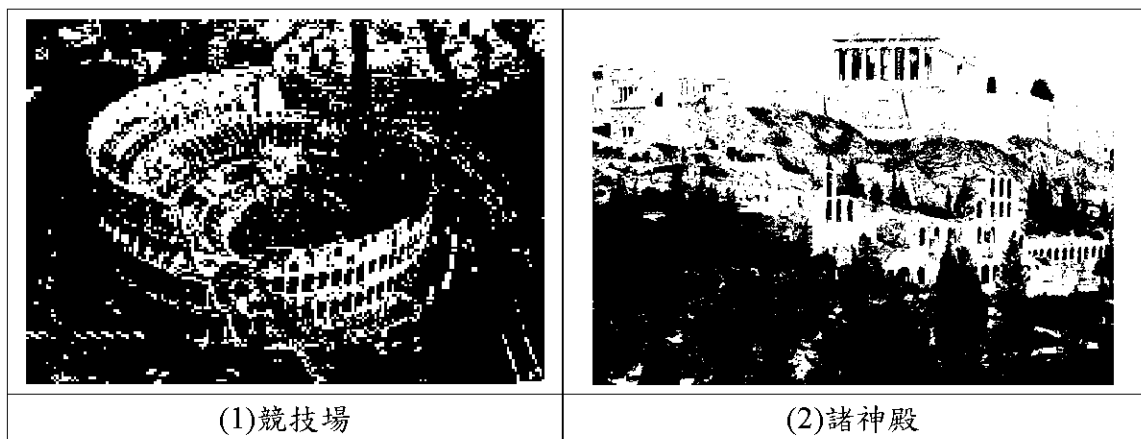


圖 21 羅馬競技場及羅馬諸神殿[5]

科羅拉多州交通部使用高強度矽灰混凝土於圖 22 的橋樑，俾能以一雙跨徑橋樑取代原四跨徑橋樑，削減二個橋墩，而新建大梁較淺而能增加橋樑下之淨空約 450mm[60]。



圖 22 高性能混凝土橋樑[60]

高雄東帝士 85 廣場採用 560 kgf/cm² (8,000 psi) 及台北 101 國際金融中心採用 700 kgf/cm² (10,000 psi) 混凝土如同蜂蜜般流動，而使混凝土能一次直接由柱底往上泵送，就是最典型的例子，見圖 23[5]。

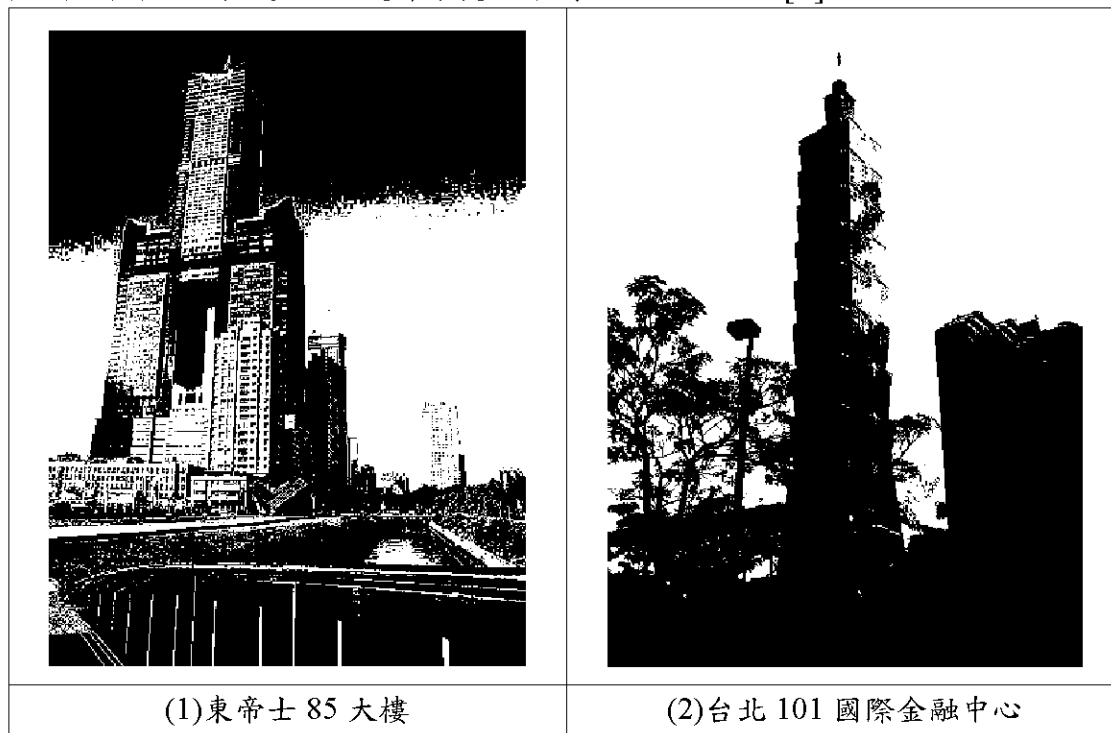


圖 23 採用卜作嵐混凝土的地標性建築[5]

民國 97 年交通部鐵路改建工程局興建南港車站地下化工程，車站建物涵蓋：台鐵車站、高鐵車站、捷運南港線、商業大樓、客運與公車轉運站、停車場及聯合開發大樓。為確保工程品質與考慮耐久性採用卜作嵐混凝土（自充填混凝土 SCC）；由於 SCC 為高流動性之卜作嵐混凝土，因此澆置過程中不須施加任何震動搗實，完全以其混凝土拌和特性而填充至模板各角落，其中須注意事項為：浮灰、泌水、粉化、龜裂、蜂窩等問題。

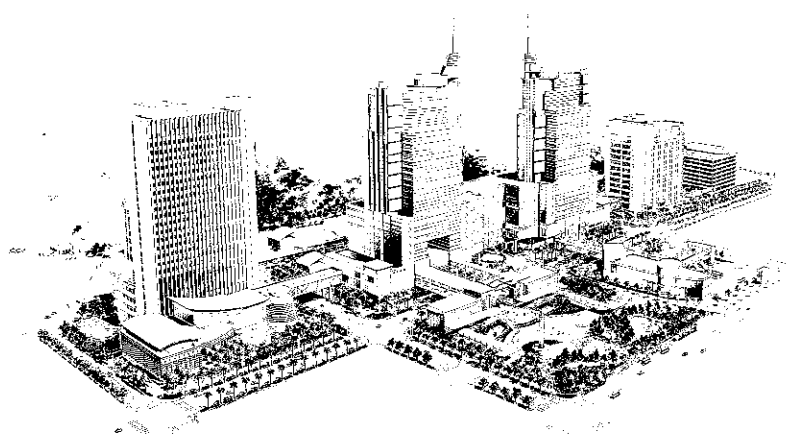


圖 24 南港車站地下化工程立面圖[61]

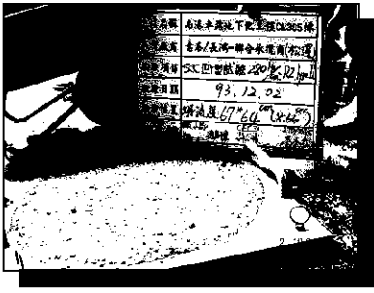

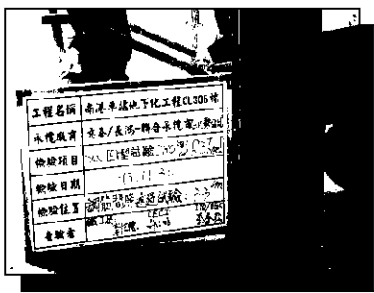
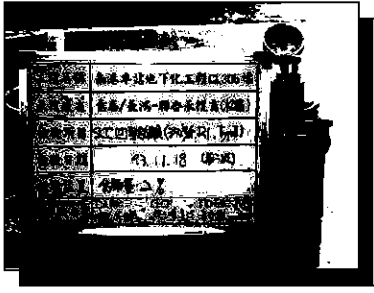
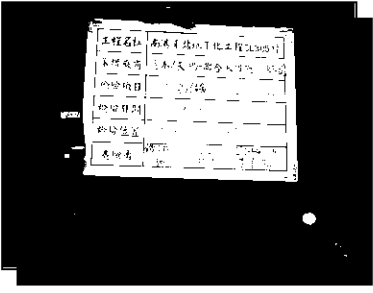
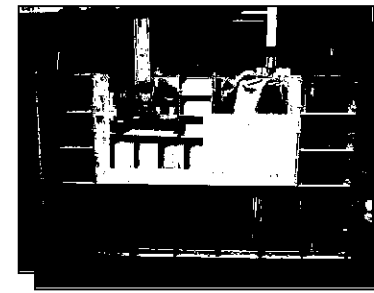
		
<p>坍度、坍流度量測</p>	<p>V型漏斗通過時間量測</p>	<p>U型槽試驗</p>
		
<p>混凝土空氣含量量測</p>	<p>混凝土溫度及氯離子含量測</p>	<p>凹型試驗</p>

圖 25 南港車站地下化相關試驗[61]

		
<p>拆模後表面 (一)</p>	<p>拆模後表面 (二)</p>	<p>拆模後表面 (三)</p>

圖 26 南港車站地下化拆模後表面[61]

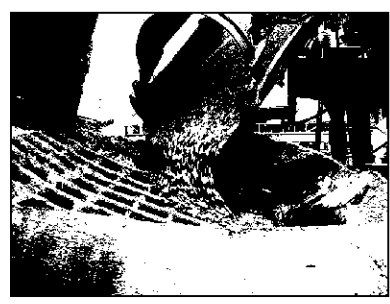
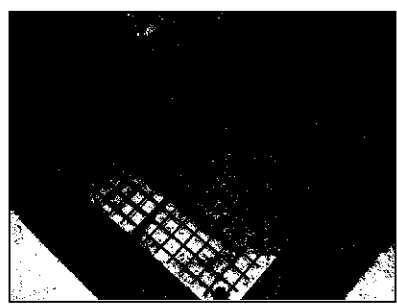

		
<p>填充情形 (一)</p>	<p>填充情形 (二)</p>	<p>填充情形 (三)</p>

圖 27 南港車站地下化拆模後表面[61]

誌謝

本篇文章的完成，首先要感謝國立臺灣科技大學 黃兆龍教授給予文章方向與相關資料及文獻的指導，讓此篇文章能夠順利完成，並感謝臺灣鐵路管理局給予此次寫作的機會，讓卜作嵐混凝土新思維能夠在路局推廣開來。在寫作期間，感謝花蓮工務段給予時間創作，令此次寫作能夠順利進行，感謝花蓮工務段 陳主安段長、許勝通副段長平時的關懷與照顧，並提供寶貴的意見作為指導。感謝施工股 劉醇隆股長、徐子平工程司、馬立仁工程司、吳昕明工程司、李瑞昌工程司、陳政峯工程司平日的協助與幫忙，給予修正指導的建議，揭發團隊力量讓此篇文章順利產出。

誌謝花蓮工務段中給予照顧的大哥、大姐與朋友們，有你們的互相陪伴以及關心，讓敝人能在花蓮順利工作，才有這個機會寫下對混凝土推廣有助益的一本創作書刊，希望此本書籍對臺灣鐵路管理局能有所幫助，讓接觸工程的各工程司們，能夠從此書之中了解混凝土的特性，並且能夠妥善的使用。

最後感謝我的家人，給予我一個可以依靠的家庭，讓我可以無憂無慮的來到花蓮工作，沒有家人的支持與鼓勵，不會有今天的我，而我將分享所有榮耀給予我所有的家人。

參考文獻

- 1.黃兆龍，混凝土性質與行為，詹氏書局，2003。
- 2.郭淑德，「飛灰的利用與發展」，如何使用飛灰以提升混凝土品質研討會論文集，財團法人台灣營建研究院，第 1-26 頁，1998。
- 3.黃兆龍，卜作嵐混凝土使用手冊，財團法人中興工程顧問社，2007。
- 4.行政院公共工程委員會，「公共工程高爐石混凝土使用手冊」。
- 5.黃兆龍，高性能混凝土理論與實務，詹氏書局，2003。
- 6.黃兆龍主編，高性能混凝土設計與應用，科技圖書股份有限公司，200。
- 7.中國鋼鐵公司，「爐石利用推廣手冊」。
- 8.黃兆龍，「高爐熟料的性質及在混凝土工程上的應用」，營建世界，第三十四期，第 pp.55~59 頁，台北，1984。
- 9.顏聰、劉梁生，「爐渣爐渣混凝土之研究」，工程月刊，第五十三卷，第五期，第 25~32 頁，1980。
- 10.林草英、黃兆龍，「摻加 5%高爐熟料對水泥砂漿物理性質及強度之影響」，卜特蘭水泥摻用高爐熟料研討會講義，第 10~29 頁，1984。
- 11.王和源、黃兆龍、林草英，「爐石製程及添加方式對水泥漿體強度之影響」，營建材料論文序列 002，國立台灣工業技術學院營建系，1985。
- 12.李釗，「普通水泥攪用 5%水淬爐石對混凝土性質影響之統計分析」，結構工程，第四卷，第一期，第 93 頁~102 頁，1986。
- 13.王和源、黃兆龍，「爐石添加對水泥漿微觀性質之探討」，中國土木水利工程學會 75 年年會論文集，第 155~171 頁，1986。
- 14.黃兆龍、張靖，「添加高爐熟料混凝土配比方法探討」，第一屆營建工程技術研討會論文集，第 176 頁，1987。
- 15.陳清泉、陳振川等，「爐石為水泥熟料與填加料對混凝土特性影響之文獻及國外現況調查研究」，台灣營建研究中心研究報告，TR-76004，第 192 頁，1987。
- 16.李釗、楊玉輝，「添加水淬爐石對混凝土抵抗硫酸鹽能力之影響」，第一屆營建工程技術研討會論文集，1987。
- 17.黃兆龍、宋明山、林仁益、王和源，「添加水淬高爐石改善水泥漿／骨材界面效應之研究」，中國材料科學學會 78 年年會論文集，第 739~724 頁，1989。
- 18.沈得縣、黃兆龍，「高爐熟料與飛灰對新拌水泥漿體水化機理影響之研究」，中國土木水利工程學刊，第三卷，第四期，第 333~338 頁，1991。
- 19.Hwang, C.L., "The Role of Pozzolans and Blast Furnace Slag on the Properties of High-Performance Concrete," pp.197-208, 1995
- 20.Hou, W.M., P.K. Chang and C.L. Hwang, "A study on anti-corrosion effect in high-performance concrete by the pozzolanic reaction of slag," Cement and Concrete Research Vol.34, pp.615~622, 2004. (SCI)
- 21.黃兆龍、李隆盛、葉叔通、林平全、張東源，「中鋼鋼爐石粉之性質及混凝土工程性質評估」，九十五年轉爐石工程材料應用研討會，p24，2006。
- 22.Silica Fume User's Manual, SFA, FHWA Publication#IF-05-016, April 2005.
- 23.黃兆龍，「The Study on Practice Replacement of Portland Cement with EAF Slag in Concrete」，電弧爐煉鋼還原渣取代部分水泥對混凝土性質影響之研究，2006。
- 24.方一匡、王瑞麟，「矽灰對高強度混凝土骨材界面影響之探討」，中國土木水利工程學刊，1990。

- 25.黃兆龍，侯威銘，「矽灰材料對混凝土防水效益之評估」，飛灰及爐石混凝土應用研討會專輯，第45~59頁，中壢，1994。
- 26.黃兆龍，「結構混凝土工程品質保證之使命」，土木水利工程學會會刊，第三十三卷，第二期，第5~8頁，2006。
- 27.Malhotra, V.M., and Mehta, P.K., 高性能高摻量飛灰混凝土：材料、配比、性質、施工和個案，2005。
- 28.Silica Fume User's Manual, SFA, FHWA Publication#IF-05-016, April 2005.
- 29.Bouzoubaâ, N., and M.Lachemi, "Self-Compacting Concrete Incorporating High Volumes of Class F Fly Ash Preliminary Results", Cement and Concrete Research, 31, pp.413-420, 2001.
- 30.Siddique, R., "Performance Characteristics of High-Volume Class F Fly Ash Concrete", Cement and Concrete Research, 34, pp.487-493, 2004.
- 31.Yazvev, H., S. Aydvn, H. Yig'iter and B. Baradan, Effect of Steam curing on Class C High-Volume Fly Ash Concrete Mixtures, Cement and Concrete Research 35, pp.1122-1127, 2005.
- 32.Poon, C.S., L. Lam and Y.L. Wong, A Study on High Strength Concrete Prepared with Large Volumes of Low Calcium Fly Ash, Cement and Concrete Research 30, pp.447-455, 2000.
- 33.Onera, A.T., S. Akyuzb and R. Yildiza, An Experimental Study on Strength Development of Concrete Containing Fly Ash and Optimum Usage of Fly Ash in Concrete, Cement and Concrete Research 35, pp.1165-1171, 2005.
- 34.Hana, S.H., J.K. Kimb and Y.D. Park, Prediction of Compressive Strength of Fly Ash Concrete by New Apparent Activation Energy Function, Cement and Concrete Research 33, pp.965-971, 2003.
- 35.Sahmaran, M., and I.O. Yaman, Hybrid Fiber Reinforced Self-Compacting Concrete with a High-Volume Coarse Fly Ash, Construction and Building Materials 21, pp.150-156, 2007.
- 36.Bouzoubaa, N., and B. Fournier, Optimization of Fly Ash Content in Concrete Part I: Non-Air-Entrained Concrete Made Without Superplasticizer, Cement and Concrete Research 33, pp.1029-1037, 2003.
- 37.Siddique, R., Performance Characteristics of High-Volume Class F Fly Ash Concrete, Cement and Concrete Research 34, pp.487-493, 2004.
- 38.蔡壽楨，飛灰混凝土之孔隙與強度關係，國立中興大學土木系論文，國內文獻（系統編號）093NCHU0015003，第73頁，2005。
- 39.Lo, T.Y., H.Z. Cui and Z.G. Li, Influence of Aggregate Pre-Wetting and Fly Ash on Mechanical Properties of Lightweight Concrete, Waste Management 24, pp.333-338, 2004.
- 40.Bouzoubaa, N., and M. Lachemi, Self-Compacting Concrete Incorporating High Volumes of Class F Fly Ash Preliminary Results, Cement and Concrete Research 31, pp.413-420, 2001.
- 41.ACI Committee 233, "Ground Granulated Blast-Furnace Slag as a Cementitious Constituent in Concrete," American Concrete Institute, Detroit, 1996.
- 42.蔡志達，水泥系複合材料緻密配比邏輯再演繹及其應用之研究，國立台灣科技大學營建工程系博士論文，2005。
- 43.Zaina, M.F.M., M. Safiuddina and H. Mahmudb, Development of High Performance Concrete Using Silica Fume at Relatively, Cement and Concrete Research 30, 1501-1505, 2000.
- 44.Prokopskia, G., and B. Langierb, Effect of Water Cement Ratio and Silica Fume Addition on the Fracture Toughness and Morphology of Fractured Surfaces of Gravel Concretes,

Received 12 November 1999, accepted 5 June 2000.

45. Wong, H.S., and H.A. Razak, Efficiency of Calcined Kaolin and Silica Fume as Cement Replacement Material for Strength Performance, *Cement and Concrete Research* 35, pp.696–702, 2005.
46. Persson, B., Eight-Year Exploration of Shrinkage in High-Performance Concrete, *Cement and Concrete Research* 32, pp.1229–1237, 2002.
47. Bhanjaa, S., and B. Sengupta, Influence of Silica Fume on the Tensile Strength of Concrete, *Cement and Concrete Research* 35, pp.743–747, 2005.
48. Bhanjaa, S., and B. Sengupta, Investigations on the Compressive Strength of Silica Fume Concrete Using Statistical Methods, *Cement and Concrete Research* 32, pp.1391–1394, 2002.
49. Bhanjaa, S., and B. Sengupta, Modified Water–Cement Ratio Law for Silica Fume Concretes, *Cement and Concrete Research* 33, pp.447–450, 2003.
50. Razak, H.A., and H.S. Wong, Strength Estimation Model for High-Strength Concrete Incorporating Metakaolin and Silica Fume, *Cement and Concrete Research* 35, pp.688–695, 2005.
51. Hansson, I.L.H., and C.M. Hansson., “Electrical Resistivity Measurements of Portland Cement Based Materials”, *Cement and Concrete Research*, Vol. 13, pp. 675–683, 1983.
52. 黃兆龍，湛淵源，廖東昇，「汗水處理廠防漏混凝土設計及施工驗證」，高性能混凝土設計及應用研討會，台北，1999。
53. Cavalier, P.G., and P.R. Vassie, “Investigation and Repair of Reinforcement Corrosion in a Bridge Deck”, *Proc. Inst. Of Civil Engineers*, Vol. 70, Part 1, August pp.460-480, 1981.
54. 林治強，「不同飛灰燒失量對優生混凝土工程性質之影響」，國立臺灣科技大學營建工程技術研究所碩士論文，台北，1998。
55. 江奇成，「電弧爐還原渣與鑄件廢料摻用於混凝土再生材之模式研究」，國立臺灣科技大學營建工程技術研究所博士論文，台北，2005。
56. 黃兆龍、湛淵源，「混凝土電阻性質與氯離子電滲行為之探討」，中國土木工程學刊，第十三卷，第二期，第 293~302 頁，2001。
57. Chen, Y. Y., C. T. Tsai and C. L. Hwang, “Evaluating Chloride-Ion Penetration of High Performance Concrete by Resistivity,” *Cement and Concrete Research*, 2005. (Under Review)
58. Hogan, F.J., and Meusel, J.W., “Evaluation for Durability and Strength Development of a Ground Granulated Blast-Furnace Slag,” *Cement, Concrete, and Aggregates*, V.3, No.1, Summer 1981, pp.40~52.
59. 陳韋嘉，添加爐石粉對混凝土抗壓強度及滲透行為之探討，國立台灣海洋大學，2006。
60. Silica Fume User’s Manual, SFA, FHWA Publication#IF-05-016, April 2005. 湛淵源，林治強，黃兆龍，「飛灰燒失量對高流動化高強度混凝土工程性質之影響」，中國土木工程學刊，第十二卷，第二期，第 217~223 頁，2000。
61. 黃兆龍，李隆盛，南港車站地下化土建及機電工程委託施工監造服務—SCC 新型製程研析及實務應用服務，期末報告，台灣世曦工程顧問股份有限公司委託，交通部鐵路改建工程局。