

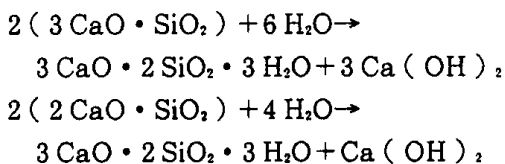
濱海（海上）混凝土橋樑拌用飛灰 增加耐久性及其防蝕之探討

莊秋明* 論述

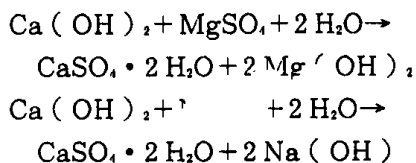
近幾年來國內普遍討論水泥混凝土內拌用飛灰（Fly Ash）不僅可廢物利用，節省水泥費用並在海洋腐蝕環境下增強其耐久性及其抗蝕作用。對於這些論點在國內外之混凝土構造物研討會或有關之會議上提出不少論文，發表很多有關之文獻及試驗報告，且國內外亦有不少實際拌用飛灰之混凝土構造物之實例。惟對於混凝土橋樑而言，尤其為預力樑，橋面之結構安全及抗蝕方面提出下列各點論述供設計和施工之有關人員參考。

一、中性化方面

卜特蘭水泥係由 CaCO_3 為主要成份之石灰與 $\text{SiO}_2 \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ 為主要成份之黏土採用適量調配，再以 1450°C 燒成而生成 $3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ （簡稱 C_3S ）， $2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ （簡稱 C_2S ）， $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ （簡稱 C_3A ）及 $4\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2 \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ （簡稱 C_4AF ）等四種主要化合物所組成⁽¹⁾，經與水拌合後發生下列水合作用，



由上述水合反應產生 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ，使混凝土保持 pH 值在 12~13，惟 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 會與 MgSO_4 ； Na_2SO_4 等硫酸類鹽繼續發生下列反應：

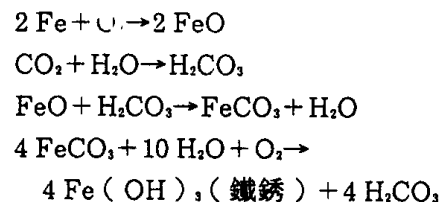


而 $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 又與水泥中之 C_3A 水合物發

生化學反應，產生高硫酸鋁酸鈣又稱鈣鉭石（Ettringite），導致體積脹大約 2 倍，使水泥硬化體發生龜裂⁽¹⁾， CO_2 則從裂縫侵入導致混凝土產生下列之反應而中性化，



鋼筋混凝土構造物之 pH 值保持在 12 以上時，因其鹼性強鋼筋經陽極極化後在表面產生 $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ 之鈍化膜而不易銹蝕，但混凝土一旦中性化後，pH 值降低至 10 以下，將喪失保護鋼筋銹蝕之功能而發生以下之反應導致鋼筋被腐蝕⁽⁴⁾，



據日本學者河野先生實驗證實飛灰滲入水泥拌合後，因水合作用產生之 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 較少，以致較普通水泥易中性化，其中性化之速度依其飛灰拌用量的多寡而異（詳飛灰水泥混凝土與卜特蘭水泥混凝土之平均中性化深度表⁽⁴⁾）。此種論點說明不同的混凝土構造物在不同腐蝕環境下拌用飛灰之含量應多加以留意。

二、抗硫酸鹽侵蝕方面

如上面所述，卜特蘭水泥因 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 與海水中之 MgSO_4 及水泥之 $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ （即 C_3A ）成份化合產生鈣鉭石（Ettringite）致體積脹大而產生龜裂，此更易使海水加速及加深侵入混凝土內部而加速其腐損破壞。此種因果循環作用將導致混凝土保護層一層又一層腐損剝落而減少原有鋼筋之混凝土保護層厚度，致氯離子更易侵入

* 公路局正工程師兼規劃處副處長

到鋼筋或終使鋼筋露出而被腐蝕。

C_3A 之水合熱很高，其脹縮率大。飛灰水泥由於加入飛灰減少 C_3A 含量降低水合熱，減少脹縮率而減少龜裂之發生，因此減低硫酸鹽侵蝕之工作⁽²⁾，但飛灰本身並無抗蝕之能力，尤其是 F 型飛灰毫無強度，必須依靠水泥水合作用產生之 $Ca(OH)_2$ 方有波索蘭反應 (Pozzolan Reaction)，而產生強度，因此 F 型飛灰水泥之初期強度甚低⁽⁴⁾，在施工現場工作必須注意此現象。

三、飛灰水泥混凝土施工方面

無強度之飛灰，其細度及比重與骨材相差極大，在工地攪拌時，如拌合設備不良，很容易產生攪拌不均勻，影響混凝土之品質，甚至混凝土內部發生斷層^(2,4)。因此國外廠商均於設備良好之水泥拌合廠拌合飛灰，依照設計製成飛灰水泥後，運往工地使用，或交由設備良好、品質嚴格又有信譽之水泥預拌廠拌合應用，或因大型混凝土構造物，如水壩工程或使用大量混凝土時，在工地設立設備良好之拌合廠，並配合嚴格品質及完善之檢驗設備下，就地拌合飛灰使用。工地應盡量避免採用小型或簡劣之拌合機拌合飛灰，以免因節省水泥用量而造成影響混凝土之強度及其構造物之安全。尤其在橋樑工程之大樑與橋面版或支柱，因其設計斷面不大，且多承受彎曲應力，更應特別小心其拌用飛灰之均勻性用量，及其品質之嚴格控制⁽⁴⁾。

四、鹽害方面

位於多氯離子環境之濱海混凝土構造物易受鹽份之侵透至混凝土內部，導致內部鋼筋原形成之鈍化氧化膜被破壞而腐蝕，惟此種現象係針對氯離子 (Cl^-) 而言，如果氯離子與其他物質化合物成氯化物，將減低其腐蝕影響⁽⁵⁾。同理，水泥中之 C_3A 成份與 $NaCl$ 化合物變成為無害之氯鋁化鈣水化物 ($C_3A \cdot CaCl_2 \cdot nH_2O$)，即所謂之 Friedel 氏鹽，能沖淡並抑制腐蝕之作用^(1,5)，故水泥混凝土中 C_3A 成份不應過高亦不應太低。飛灰水泥如拌用飛灰量多致 C_3A 成份過少時，其對鹽害之抑制或沖淡作用亦相對減低⁽⁴⁾

，飛灰雖依 CaO 含量之多少分為 C 型及 F 型飛灰⁽¹⁾，但台灣產之飛灰均屬 F 型飛灰，其 CaO 含量在 10% 以下，故飛灰水泥初期強度較一般卜特蘭水泥為低，其混凝土之初期密度亦低^(1,6)，因此位於多氯離子之海濱或海上的飛灰水泥混凝土構造物較卜特蘭水泥混凝土構造物在初期時較易被氯離子侵透進入混凝土內部，蓄積造成鹽害之因。此論點說明在多氯離子之易腐蝕環境下，飛灰混凝土構造物施工初期應多加注意其維護及防蝕設施。

五、適量之飛灰替用部份水泥拌合之飛灰水泥混凝土之優缺點方面

(1) 優點部份^(2,3,4,6)

- ①提高工作性，易供澆築施工搗實，有利品質之控制。
- ②90天以後之後期強度提高（較卜特蘭水泥混凝土為高，詳參見“卜特蘭水泥混凝土與 F 型飛灰水泥混凝土強度比較圖”）。
- ③減少乾縮，可減低混凝土硬化後之龜裂性。
- ④減少水合熱，降低脹縮率，可減少混凝土之龜裂。
- ⑤節省水泥費用：利用台電之廢棄飛灰，不僅可解決台電廢棄物處理問題，亦可節省水泥混凝土構造物材料費用。
- ⑥抗凍結融解作用。輸氣水泥混凝土可改善抗凍融作用，拌用飛灰之水泥混凝土亦能增加其功效。
- ⑦增加抗化學藥物：詳參見“飛灰水泥之耐化學藥物性表”。
- ⑧增加水密性而增進密度，使其透水性降低。詳參見“飛灰混凝土與侵水量之關係圖”。
- ⑨增加抗骨材鹼性反應。
- ⑩減少浮水。
- ⑪不同環境下拌用不同適量之飛灰可增加其混凝土之耐候性。

(2) 缺點部份^(2,3,4,6)

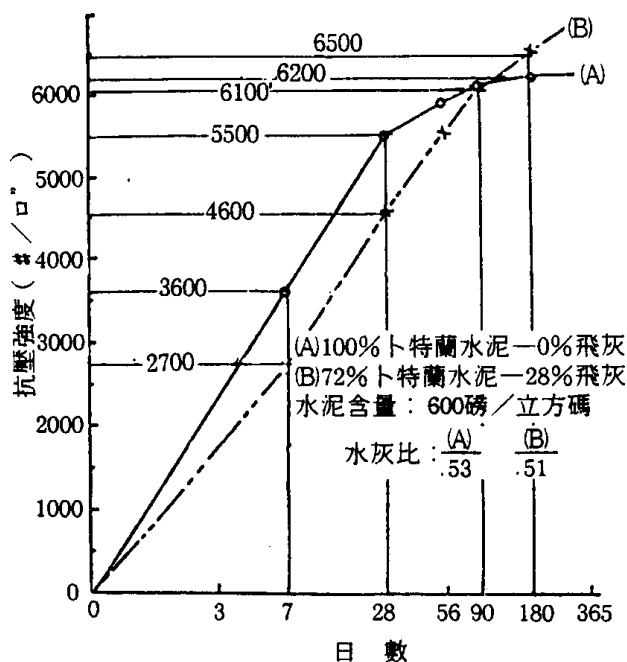
- ①台灣產之飛灰屬 F 型飛灰，其飛灰水泥混凝土初期強度低，密度亦低，在多氯離子之環境下，於初期時 Cl 易滲透進入混凝土內蓄積。
- ②較易中性化：經試驗證實飛灰水泥經水合作用產生之 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 較少致易中性化。詳參見“飛灰水泥混凝土與卜特蘭水泥混凝土之平均中性化深度表”。
- ③飛灰品質之良劣直接影響飛灰水泥混凝土之品質，而煤炭品質之良劣又直接影響飛灰之品質。煤炭燃燒不完全時將造成游離炭 (Free Carbon) 而降低其水泥漿與骨材及鋼筋之握著力。飛灰為台電之廢棄物並非經過品管設備製造出來之飛灰，未經品管作業而生產之飛灰理屬良劣不一之材料。
- ④飛灰水泥混凝土如攪拌不均勻易導致其混凝土之斷層，影響結構物之安全。尤其在國內工程品質低落之今日，在偏僻之海邊混凝土構造物工程不易監督週全，如無良好之拌合設備及完善之檢驗設施，冒用飛灰水泥混凝土建造橋樑應須額外慎重。
- ⑤飛灰之拌用量及配合比應須嚴格控制，多量拌用飛灰將導致其混凝土強度之降低，對混凝土構造物反而有害。

六、結 論

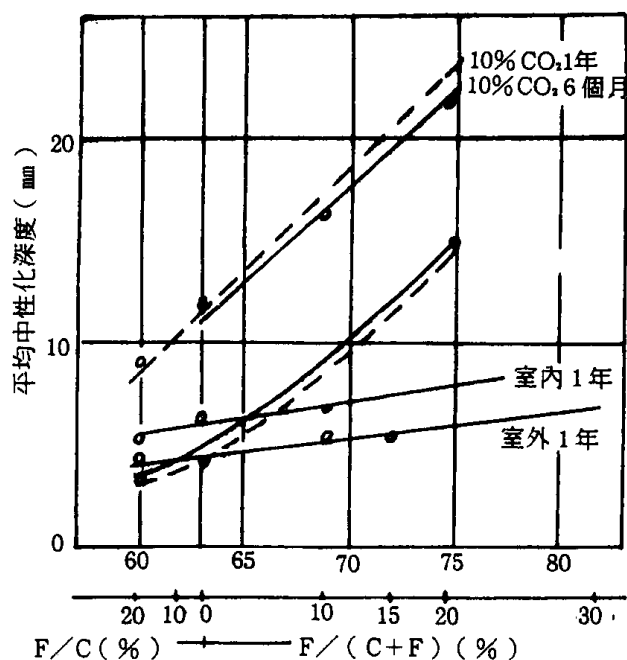
誠如上面論述分析，飛灰水泥混凝土有其優劣點（優點多於劣點），於施工時有許多必須特別注意之事項。濱海或海上混凝土橋樑等構造物在下列之前述條件下應可採用飛灰水泥混凝土來建造以改進其耐久性及防蝕作用，但仍應慎重考慮以防其產生反效果，以免影響結構物之耐久性及安全性：

- (1) 應有完好之拌合設備。
- (2) 需有完善之檢驗設備及品管制度。
- (3) 飛灰材料之品質必須檢驗合格，且每批拌用之飛灰水泥混凝土必須檢驗合格始可採用。
- (4) 飛灰之拌用量及配合比應嚴格控制。

七、圖 表



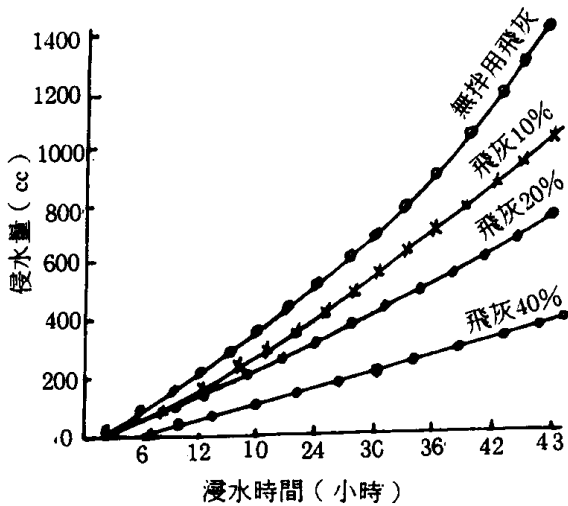
卜特蘭水泥混凝土與 F 型飛灰水泥混凝土強度比較圖⁽⁴⁾



飛灰水泥混凝土之水灰比與平均中性化深度之關係圖⁽⁴⁾

- 註：(1) 採用 19 cm 厚度之混凝土
 (2) 10% CO₂ 為加速其環境之實驗
 (3) W/C 為卜特蘭水泥之水灰比 (%)
 (4) F/C, F/(C+F) 為飛灰之混合比 (%)

濱海混凝土橋樑採用飛灰增加耐久性及防蝕之探討



飛灰水泥混凝土與侵水量關係圖⁽²⁾

參考文獻

- (1) The Chemistry of Cement and Concrete. Dr. Lea. F. M. 1956.
- (2) フライアッシュコンクリート, 吉越先生, 昭和31年。
- (3) フライアッシュ委員會報告, 火力發電協會, 昭和35年。
- (4) 日本“實用混凝土技術”, 森茂二郎, 昭和49年。
- (5) 海洋コンクリート構造物の防蝕方針, 日本コンクリート工學協會, 昭和58年
- (6) 現代混凝土技術研討會資料, 中國土木工程學會, 民國73年。

飛灰混合比 (%)	水泥單位用量 (kg)	飛灰單位用量 (kg)	水泥飛灰配合比 (%) W/(C-F)	水、水泥配合比 (%) W/C	水中養生					
					10%CO ₂ 中		14日	28日	91日	
					6個月	1年	室外 1年	室內 1年	室內 1年	
無	300	0	63	63	4.6	11.6	4.8	6.4	—	—
飛灰替用水泥 F/(C-F)	10	270	30	62	68.9	8.9	16.2	5.3	6.8	—
	15	255	45	61	71.8	—	—	5.5	—	—
	20	240	60	59.7	74.6	13.8	21.8	5.9	7.0	4.5
	30	210	90	57.4	81.9	—	—	6.7	—	—
飛灰替用砂 F/C	10	300	30	56.1	61.7	—	—	4.1	—	—
	20	300	60	50.0	60.0	4.2	9.3	4.0	5.0	—

註：混凝土坍度約為19 cm

飛灰水泥之耐化學藥物性表⁽¹⁾

飛灰混合比 (%)	水中養生 (20°C ± 2°C)						Na ₂ SO ₄ 溶液浸漬 (20°C ± 2°C)					
	彎曲強度 kg/cm ²		壓縮強度 kg/cm ²		重量變化 %		彎曲強度 kg/cm ²		壓縮強度 kg/cm ²		重量變化 %	
	28日	60日	28日	60日	28日	60日	28日	60日	28日	60日	28日	60日
	31.1 (100)	32.2 (100)	163 (100)	185 (100)	2.42	3.02	22.9 (100)	15.5 (100)	179 (100)	134 (100)	3.43	4.73
10	32.6 (105)	36.4 (113)	179 (110)	203 (115)	2.36	2.70	35.2 (154)	25.0 (161)	192 (107)	189 (141)	3.01	3.13
20	34.4 (111)	39.1 (121)	199 (122)	243 (131)	2.11	2.42	40.1 (175)	27.6 (178)	209 (117)	239 (178)	2.58	3.00
30	31.0 (112)	35.8 (111)	180 (104)	210 (114)	2.23	2.60	38.4 (168)	36.0 (232)	193 (108)	240 (180)	2.40	2.60

註：括弧內之數字係對卜特蘭水泥之強度比值 (%)