

飛灰混凝土之抗腐蝕性研究

蔡 得 時 譯

中國工商專科學校建築科講師

摘 要：

本研究試驗報告乃為評估純水泥混凝土及飛灰混凝土拌和物之抗腐蝕性。亦即以飛灰分別取代 0 % 及 20 % 之水泥量，並取用 4 種水泥含量，且兩種拌合物之水灰比及工作度皆固定。同時亦研究以飛灰取代等量砂所製作混凝土試樣之抗腐蝕性。所有試樣皆浸入濃度為 5 % 之氯化鈉 (NaCl) 溶液中超過 1000 天，並以半電池電位評估其抗腐蝕性及以電化學技術測量混凝土內鋼筋之腐蝕速率。

研究結果顯示，添加飛灰之飛灰混凝土有助於鋼筋之抗腐蝕性，且發現以飛灰為摻劑取代砂所製作混凝土之鋼筋抗腐蝕性比飛灰混凝土者為佳。而飛灰混凝土中鋼筋之良好抗腐蝕性效果可歸因於飛灰混凝土拌和物之凝結作用及水泥糊體較稠之故。

前 言：

以飛灰取代混凝土中之部份水泥，有助於其抗硫酸鹽類之侵蝕，並有減少水和熱，增加密度及抵抗骨材鹼性反應之優點。另外，飛灰尚可增進混凝土構造物之耐久性，故飛灰為一有用之摻劑。至於混凝土中添加飛灰是否有助於其長期抗腐蝕性之效果，則有待研究。飛灰混凝土中，飛灰與氫氧化鈣 [$\text{Ca}(\text{OH})_2$] 將於後期發生反應，並減少混凝土之塩基，如此將加速混凝土之中

性化並導致鋼筋腐蝕，基於此事實，故有待研究評估飛灰混凝土中鋼筋長期抗腐蝕性之效果。

研究宗旨：

本研究乃欲瞭解飛灰混凝土抑制由於氯離子侵入所引起鋼筋腐蝕之效果，由研究結果可知，由飛灰取代部份水泥之飛灰混凝土試樣之鋼筋腐蝕速率較純水泥混凝土試樣者為低。同時亦發現，將飛灰視為摻劑取代部份砂之混凝土試樣之鋼筋腐蝕性均較純水泥混凝土試樣及飛灰取代部份水泥之飛灰混凝土試樣為低。

試驗計畫：

本研究試驗計畫之混凝土拌和物可區分為以下三組：

第 I 組——水灰比固定之混凝土拌和物

本組混凝土拌和物取用之水泥含量為 275 , 300 , 350 及 450 kg / m^3 。

[註：若為純水泥混凝土時，即指水泥量，若為飛灰混凝土時，則指水泥與飛灰之總量]。且所有配比之水灰比均固定為 0.45 。同時，飛灰取代水泥之比例為 0 % 及 20 % 兩種。

第 II 組——工作度固定之混凝土拌和物

本組混凝土拌和物之坍度定為 50 ~ 75 mm 間，以維持同一工作度，而取用之水泥含量為 275 , 300 , 325 , 375 及 450 kg / m^3 ，且飛灰取代水泥

之比例亦為 0 % 及 20 % 兩種。

混凝土拌和物之材料

第Ⅲ組——飛灰取代水泥及飛灰取代砂之混凝土拌和物

本組製作兩種混凝土拌和物，第一種係取水泥重量 20 % 之飛灰視為摻劑來取代等量的砂，而與第二種係以飛灰取代 20 % 之水泥。

表 1. 水泥之化學成份

成 份	重量 (%)
二氧化矽 (SiO_2)	22.30
三氧化二鋁 (Al_2O_3)	3.55
三氧化二鐵 (Fe_2O_3)	3.63
氧化鎂 (MgO)	2.10
三氧化硫 (SO_3)	1.93
氧化鈣 (CaO)	64.60
氧化鈉 (Na_2O)	0.10
氧化鉀 (K_2O)	0.21
二氧化鈦 (TiO_2)	0.29
燒失量	1.22
不溶解殘渣	0.59

本研究之飛灰混凝土拌和物皆使用 F 型飛灰，表 1、表 2 及表 3 分別表示水泥的化學成份、物理性質及飛灰之化學成份。粗骨材係使用最大粒徑為 19 mm 之碎石，鬆比重為 2.4，吸水率為 2.6 %；細骨材係使用鬆比重為 2.6，吸水率為 0.6 % 之海砂，且所有混凝土拌和物之粗骨材與細骨材的比率為 1.7 之重量比。

表 3. 飛灰之化學成份

成 份	重量 (%)
二氧化矽 (SiO_2)	60.5
三氧化二鋁 (Al_2O_3)	23.0
三氧化二鐵 (Fe_2O_3)	7.52
氧化鈣 (CaO)	2.08
氧化鎂 (MgO)	1.00
三氧化硫 (SO_3)	0.26
燒失量	1.38

表 2. 水泥之物理性質

水泥砂漿之空氣含量 (體積, %)	8.0
比表面積 (布蘭氏法) (cm^2/g)	3881.0
熱壓膨脹 (%)	0.05
凝結時間 (維卡氏法)	
初凝 (分)	180.0
終凝 (分)	240.0
抗壓強度 (psi)	
3 天	3335
7 天	4193
28 天	5063

試體製作及試驗

混凝土拌和物試體之尺寸為 $65 \times 100 \times 300$ mm 之稜柱形，中心放置 12 mm 之鋼筋，鋼筋之底層淨保護層為 25 mm，混凝土經鼓形拌和機拌和 3 分鐘後即開始製作試體，試體製作完成即以溫麻布覆蓋養護，經 24 小時後拆模，繼續以自來水將試體養護 27 天。養護完畢後，將試體置於濃度為 5 % 之氯

化鈉 (NaCl) 溶液池中，並將溶液標高調整至試體高度之一半。在每一週均對氯化物之濃度作偵測及調整。

使用高電阻電壓計及飽和甘汞電極 (SCE) 來測量腐蝕活性及電位。當半電池電位比 -270 mV 大，即代表腐蝕活性低，不易腐蝕，而當半電池電位比 -270 mV 小，即代表腐蝕活性高，易腐蝕。利用此種技術即可將鋼筋腐蝕之定性性質測量並收集之。

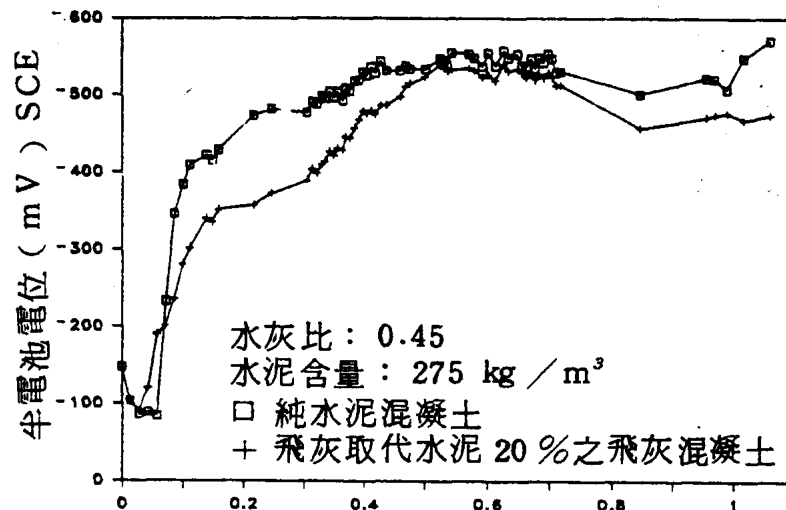
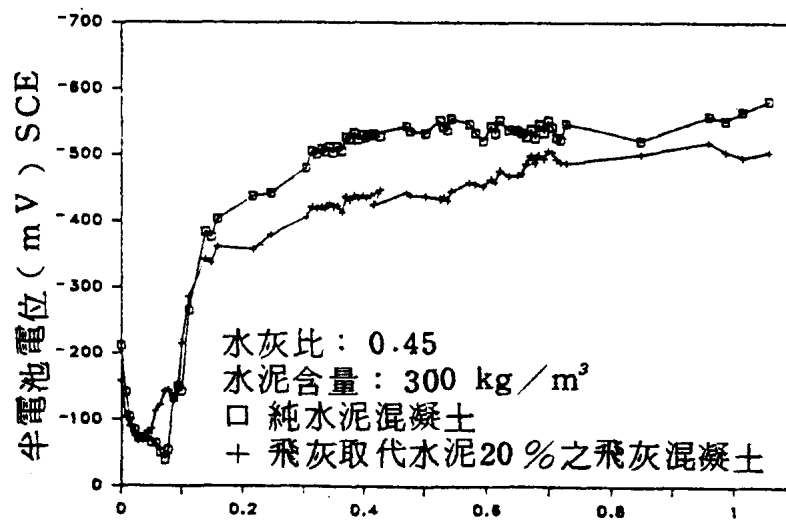


圖 1. 純水泥混凝土及飛灰混凝土中鋼筋之半電池電位腐蝕期間 (千天)



腐蝕期間 (千天)

圖 2. 純水泥混凝土及飛灰混凝土中鋼筋之半電池電位

試驗結果：

第 I 組——水灰比固定之混凝土拌和物

圖 1. 至圖 4. 乃表示本組混凝土拌和物試樣之腐蝕期間與半電池電位之關係。由圖知，在一固定期間，飛灰混凝土試樣之電位高於或等於純水泥混凝土試樣者。而在稍後期間，飛灰混凝土試樣

之電位較純水泥混凝土試樣者為低。再者，除了水泥含量為 450 kg/m^3 者外，飛灰混凝土試樣皆比純水泥混凝土試樣需較長時間達到活性電位 (-270 mV)。經 1000 天氯化鈉溶液之侵蝕，飛灰混凝土試樣通常比純水泥混凝土試樣有較低之電位。

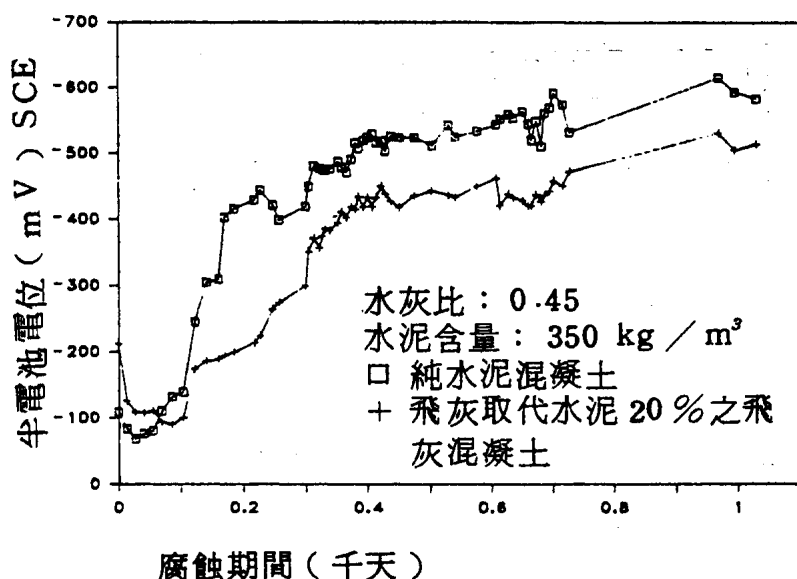


圖 3. 純水泥混凝土及飛灰混凝土中鋼筋之半電池電位

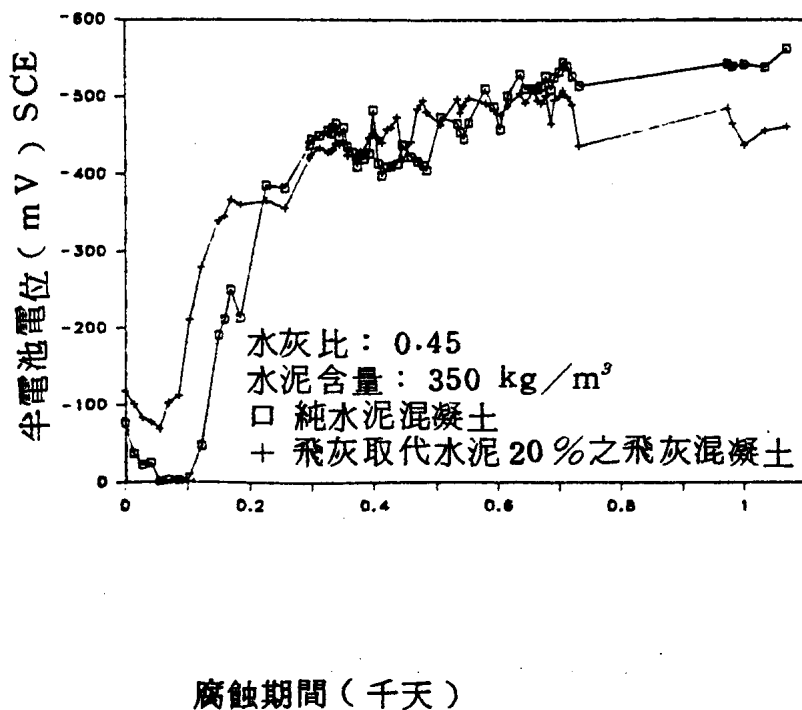


圖 4. 純水泥混凝土及飛灰混凝土中鋼筋之半電池電位

圖 5. 所示為純水泥混凝土試樣及飛灰混凝土試樣中鋼筋之腐蝕速率。此曲線顯示水泥含量為 275 , 300 , 350 及 450 kg / m^3 之純水泥混凝土試樣中鋼筋之腐蝕速率並無顯著變化。純水泥混凝土試樣中鋼筋之腐蝕速率為 1.91 至 2.00 mpy (mil / 年, $1\text{mil} = \frac{1}{1000}$ 吋) , 而飛灰混凝土試樣中鋼筋之腐蝕

速率為 0.61 至 0.93 mpy 。亦即飛灰混凝土試樣中鋼筋之腐蝕速率較小, 其對水泥含量為 275 , 300 , 350 及 450 kg / m^3 而言, 分別為純水泥混凝土試樣中鋼筋腐蝕速率之 3.03 , 3.21 , 2.08 及 2.10 倍。且水泥含量為 275 及 300 kg / m^3 之飛灰混凝土中鋼筋之腐蝕速率小於水泥含量為 350 及 450 kg / m^3 之飛灰混凝土者。

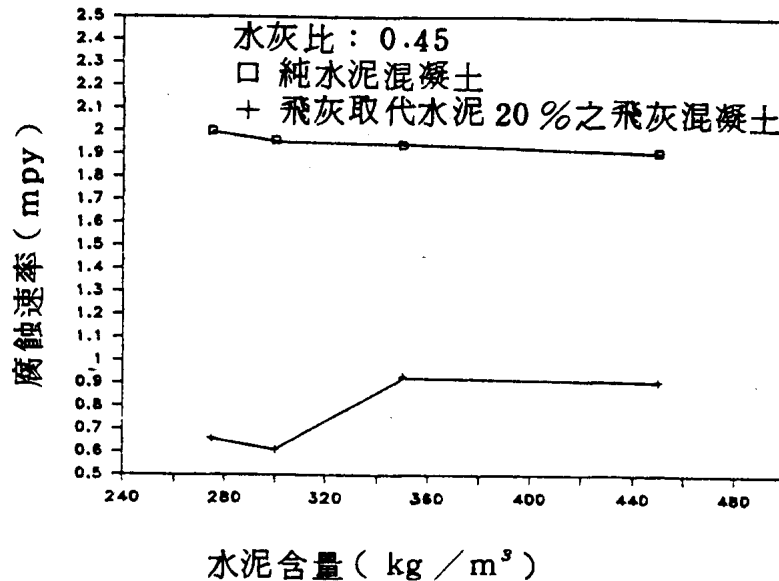


圖 5. 純水泥混凝土及飛灰混凝土中鋼筋之腐蝕速率

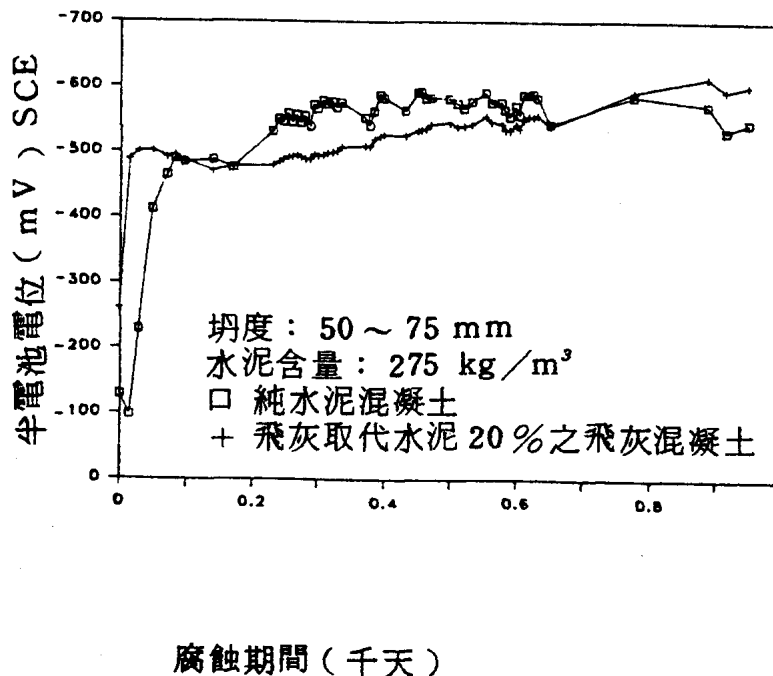
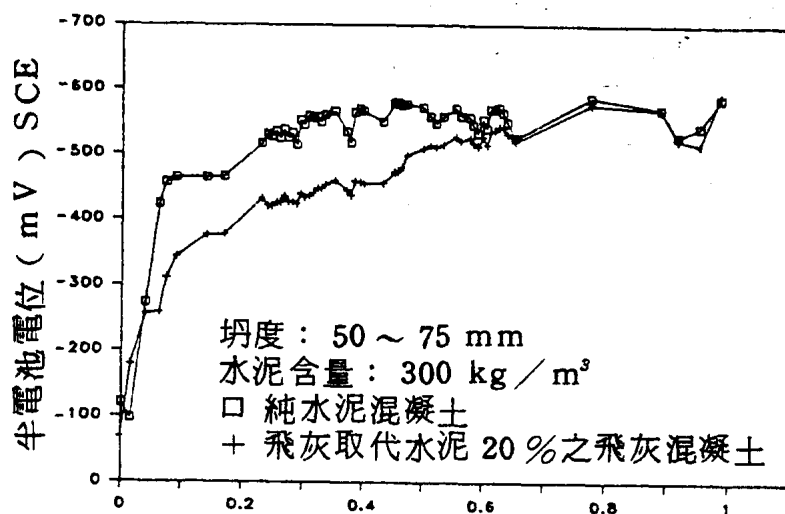


圖 6. 純水泥混凝土及飛灰混凝土中鋼筋之半電池電位

第Ⅱ組——工作度固定之混凝土拌和物

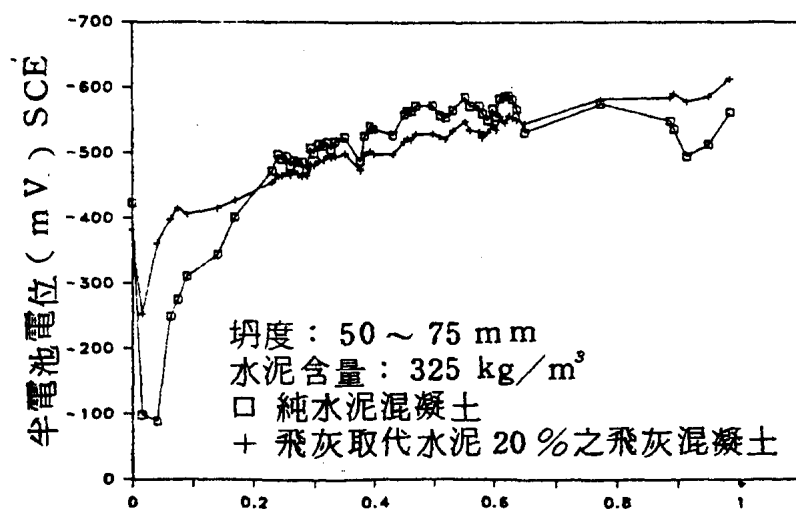
圖 6.至圖10.所示為坍度等於 50 ~ 75 mm 間混凝土拌和物試樣中鋼筋之腐蝕期間與半電池電位之關係。由圖知，在試驗早期時，純水泥混凝土試樣之電位較飛灰混凝土試樣者為低，而經 600 ~ 650 天侵蝕之晚期而言，飛灰混凝土試樣之電位反較純水泥混凝土試樣

者為低。而經此期間，甚或經 1000 天以後，對水泥含量為 275 , 300 , 325 及 375 kg/m^3 而言，飛灰混凝土試樣之半電池電位等於或高於純水泥混凝土者，但對水泥含量為 450 kg/m^3 而言，飛灰混凝土試樣之半電池電位仍然低於純水泥混凝土試樣者。



腐蝕期間 (千天)

17. 純水泥混凝土及飛灰混凝土中鋼筋之半電池電位



腐蝕期間 (千天)

圖 8. 純水泥混凝土及飛灰混凝土中鋼筋之半電池電位

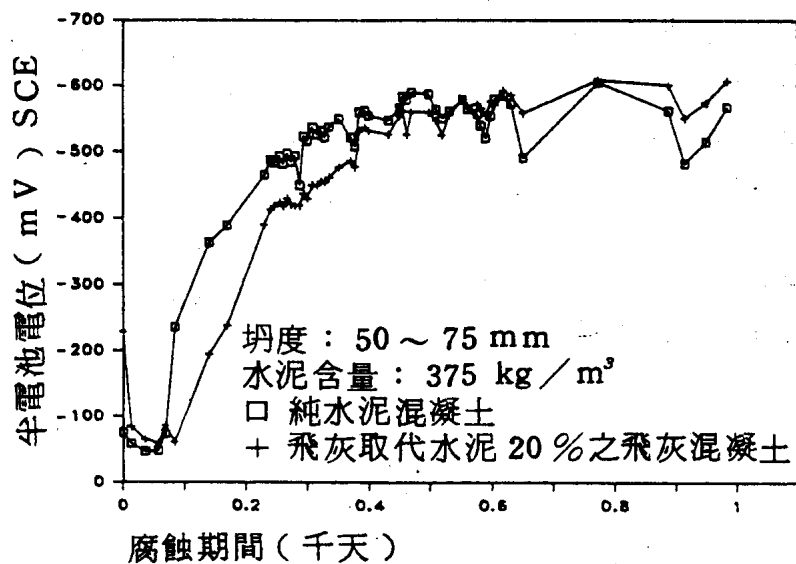


圖 9. 純水泥混凝土及飛灰混凝土中鋼筋之半電池電位

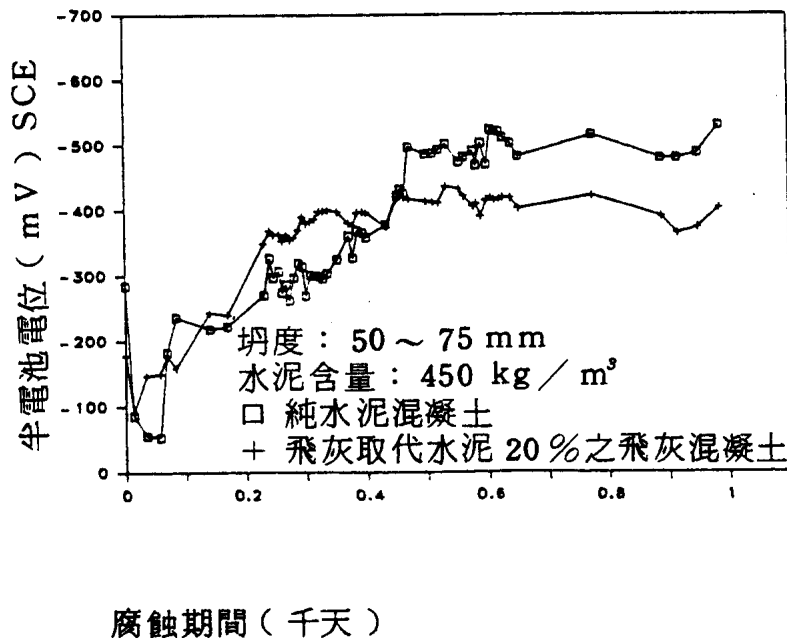


圖 10. 純水泥混凝土及飛灰混凝土中鋼筋之半電池電位

圖 11. 所示為本組純水泥混凝土試樣及飛灰混凝土試樣中鋼筋之腐蝕速率與水泥含量之關係。此曲線顯示，無論純水泥混凝土試樣或飛灰混凝土試樣中鋼筋之腐蝕速率皆隨水泥含量之增加而減少。純水泥混凝土試樣中鋼筋之腐蝕速率為 2.94 至 1.28 mpy，而飛灰混凝土試樣中鋼筋之腐蝕速率為 1.23 至 0.65

mpy。亦即飛灰混凝土試樣中鋼筋之腐蝕速率較小，其對水泥含量為 275，300，325，375 及 450 kg/m³ 而言，分別為純水泥混凝土試樣中鋼筋腐蝕速率之 2.39，1.40，1.39，1.54 及 1.97 倍。對水泥含量為 450 kg/m³ 之純水泥混凝土試樣中鋼筋之腐蝕速率與水泥含量為 375 kg/m³ 及以下者有顯著不同。

第Ⅲ組——飛灰取代水泥及飛灰取代砂之混凝土拌和物

圖12所示為純水泥混凝土試樣，飛灰取代水泥之混凝土試樣及飛灰取代砂之混凝土試樣中鋼筋之腐蝕期間與半電池電位之關係。由圖知，在腐蝕約50.天時，純水泥混凝土試樣，飛灰取代水泥之混凝土試樣及飛灰取代砂之混凝土試樣三者中之半電池電位均非常相近。而在50.天之前，飛灰取代水泥之混凝土試樣皆較純水泥混凝土試樣及飛灰取代砂之混凝土試樣者之電位為高。當腐蝕期

間繼續增加，則純水泥混凝土試樣中鋼筋之電位均較其他兩種混凝土試樣示（即飛灰取代水泥及飛灰取代砂之混凝土試樣）之電位為高。表4.所示為純水泥混凝土試樣，飛灰取代水泥之混凝土試樣及飛灰取代砂之混凝土試樣中鋼筋之腐蝕速率。由表中數據可知，飛灰取代水泥之混凝土試樣及飛灰取代砂之混凝土試樣中鋼筋之腐蝕速率皆較純水泥混凝土試樣者為低，分別為2.08及12.13倍之關係。

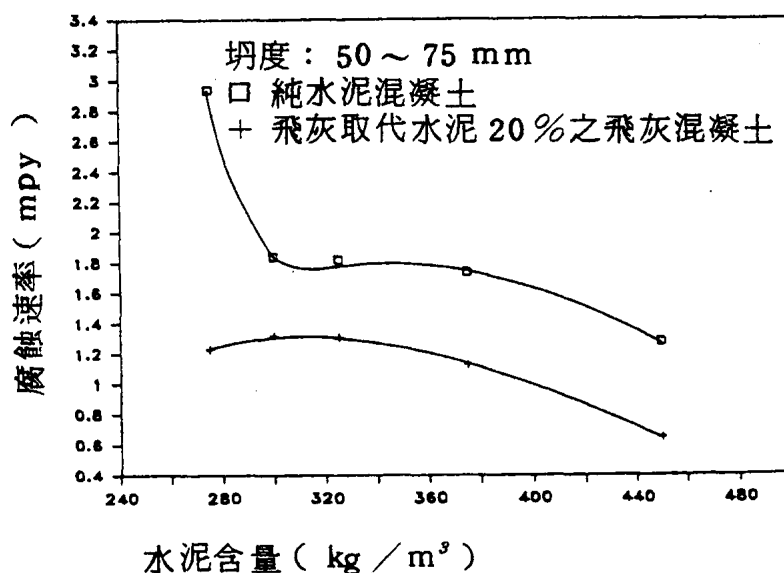


圖11. 純水泥混凝土及飛灰混凝土中鋼筋之腐蝕速率

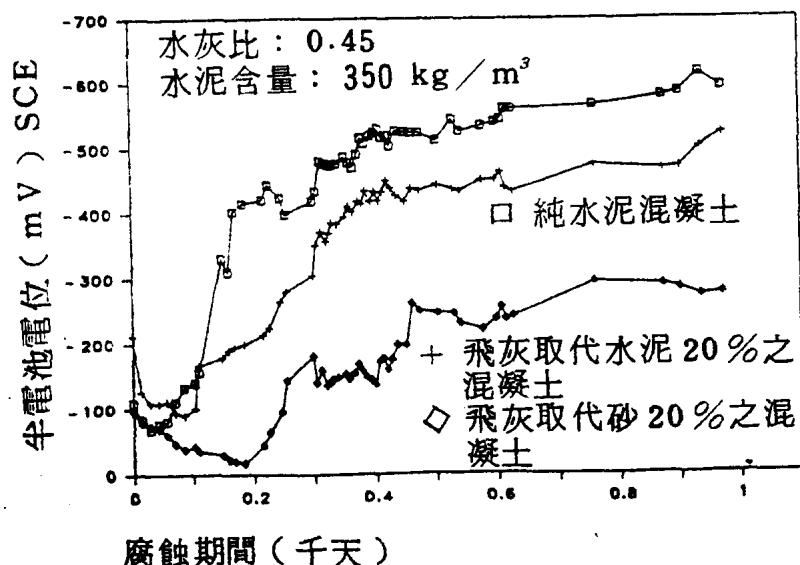


圖12. 純水泥混凝土，飛灰取代水泥之混凝土及飛灰取代砂之混凝土中鋼筋之半電池電位

表 4. 純水泥混凝土，飛灰取代水泥之混凝土及飛灰取代砂之混凝土中鋼筋之腐蝕速率

混凝土拌和物之種類	腐蝕速率 (mp.y)
純水泥混凝土	1.94
飛灰取代水泥 20 % 之混凝土	0.93
飛灰取代砂 20 % 之混凝土	0.16

討 論：

由本研究試驗之結果可知，添加飛灰於混凝土拌和物中，可以增加混凝土長期抗腐蝕性之效果。對水灰比固定及工作度固定之飛灰混凝土試樣而言，其初期之腐蝕活性較純水泥混凝土試樣者為高，此可歸因於飛灰混凝土試樣之水泥量較少，故其滲透性較高之故。於後期時，飛灰與氫氧化鈣〔 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 〕產生反應，生成一較稠之混凝土而阻止氯離子之侵入，在大部份情況下，約經100天後，飛灰混凝土試樣之電位等於或低於純水泥混凝土試樣者。Manmohan及Mehta研究報告指出，以10%及20%或30%之飛灰取代水泥之水泥糊體，其28天至90天期齡之滲透係數皆很低（由 $11 - 13 \times 10^{-11}$ 至 1×10^{-11} cm/sec）。Davis研究報告亦指出，添加飛灰製成之混凝土管之滲透係數亦如是。

由本研究試驗之結果可知，飛灰混凝土試樣中鋼筋之腐蝕速率較純水泥混凝土試樣者為低。同時，在水灰比固定時，該組之所有純水泥混凝土拌和物中鋼筋之腐蝕速率大致均相等，亦即，對純水泥混凝土拌和物而言，其水灰比若不隨著水泥含量之增加而改變時，則無助於其中鋼筋之抗腐蝕性。

由本研究試驗之結果可知，當水灰比固定時，對飛灰混凝土試樣而言，其水泥含量為275及300 kg/m³者之鋼筋腐蝕速率低於水泥含量為350及450 kg/m³者，此即表示，飛灰添加於水泥含量較少之貧級配拌和物，其鋼筋之抗腐蝕性較佳。

由本研究試驗之結果可知，當工作度固定時，該組所製作之飛灰混凝土試樣中鋼筋之抗腐蝕性均較純水泥混凝土試樣者為佳。並如所預期，無論純水泥混凝土試樣或飛灰混凝土試樣中鋼筋之抗腐蝕性均以水泥含量為450 kg/m³者為最佳。

將飛灰視為摻劑而取代細骨材之混凝土試樣中鋼筋之腐蝕電位及腐蝕速率均低於純水泥混凝土試樣及飛灰取代水泥之混凝土試樣，將飛灰視為摻劑而添加於混凝土中會導致水泥糊體之工作度及壓實性均增加。

甚者，部份細骨材被飛灰取代後，骨材之總表面積將減少。對阿拉伯灣的一些國家，貧級配海砂乃為細骨材之主要來源。以此種砂來拌和混凝土將增加水之需用量，在此情況下，建議減少砂的用量。

由本研究試驗可知，大致上添加飛灰於混凝土將有助於其抗腐蝕性，但建議不可添加飛灰至不能助於混凝土之極

化而導致碳化作用破壞。

Tsukayama 等研究得知，飛灰混凝土試樣經10年之現場暴露後之碳化深度稍小於純水泥混凝土試樣者，據Mas s - aza 之研究指出，混凝土之抗碳化作用性與溶液中氫氧化鈣〔 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 〕之數量並無關係，包括Diamond 在內之多位學者亦指出，成熟水泥糊體中之鈣含量僅有一點點甚或沒有。Mehta 認為混凝土之抗硫酸侵蝕或抗碳化作用，還得視其物理性質而定，諸如水泥糊體之滲透性。不滲透性愈佳，愈能阻止氧、二氧化碳及氯離子之侵入，則更能發揮飛灰混凝土之抗腐蝕性。

結 論：

本研究試驗結果發現，當偵測混凝土試樣之抗腐蝕性超過1000 天時，則飛灰取代水泥20 % 之飛灰混凝土試樣中鋼筋之抗腐蝕性較純水泥混凝土試樣者為佳。對純水泥混凝土拌和物而言，其水灰比若不隨著水泥含量之增加而改變時，則無助於混凝土之耐久性。同時亦發現，將飛灰視為摻劑來取代砂之混凝土試樣之抗腐蝕性較純水泥混凝土試樣及飛灰取代水泥之混凝土試樣兩者均為佳。

參考文獻：

1. Berry, E. E., and Malhotra, V. M., "Fly Ash for Use in Concrete—A Critical Review," *ACI JOURNAL*, Proceedings V. 77, No. 2, Mar.-Apr. 1980. pp. 59-73.
2. Mehta, P. Kumar, "Pozzolanic and Cementitious Byproducts as Mineral Admixtures for Concrete—A Critical Review," *Fly Ash, Silica Fume, Slag and Other Mineral By-Products in Concrete*, SP-79, American Concrete Institute, Detroit, 1983, p. 24.
3. Hanif, M., "Performance of Pozzolan Cement Concrete in a High Chloride-Sulfate Environment," MS thesis, University of Petroleum and Minerals, Dhahran, Sept. 1982, 169 pp.
4. Stern, M., and Geary, A. L., "Electrochemical Polarization: I. A Theoretical Analysis of the Shape of Polarization Curves," *Journal, Electrochemical Society*, No. 104, 1957, p. 56.
5. Manmohan, D., and Mehta, P. K., "Influence of Pozzolanic, Slag, and Chemical Admixtures on Pore Size Distribution and Permeability of Hardened Cement Paste," *Cement, Concrete, and Aggregates*, V. 3, No. 1, Summer 1981, pp. 63-67.
6. Davis, Raymond E., "Pozzolanic Materials—With Special Reference to Their Use in Concrete Pipe," *Technical Memorandum*, American Concrete Pipe Association, Arlington, 1954, 30 pp.
7. Tsukayama, R.; Abe, H.; and Nagataki, S., "Long-Term Experiments on the Neutralisation of Concrete Mixed with Fly Ash and the Corrosion of Reinforcement," *Proceedings, 7th International Congress on the Chemistry of Cement* (Paris, 1980), Editions Septima, Paris, V. 3, pp. 30-35.

8. Massaza, F., " Structure of Pozzolans and Fly Ash, and the Hydration of Pozzolan and Fly Ash Cements-General Report," *Proceedings*, 7th International Congress on the Chemistry of Cement (Paris, 1980), Editions Septima, Paris, V. 4, pp. 85-96.
9. Diamond, Sidney, " Long-Term Status of Calcium Hydroxide Saturation of Pore Solutions

in Hardened Cements," *Cement and Concrete Research*, V.5, No. 6, Nov. 1975, pp. 607-616.

註：本文係譯自 ACI Materials Journal / January-February 1987, p.42 - 50, " Effect of Fly Ash Addition on the Corrosion Resisting Characteristics of Concrete ", by Mohammed Maslehuddin, Huseyin Saricimen, and Abdulaziz I. Al-Mana