中華科技大學

建築工程與環境設計研究所

碩士學位論文

爐石及飛灰應用於水泥砂漿耐久性與建築減碳之探討

The Study of Durability and Carbon Reduction of Building of Slag and Fly Ash Applied in Mortar

研 究 生:曾玲群

指導教授：卓世偉

中華民國一００年一月

中華科技大學
建築工程與環境設計研究所

碩士學位論文

爐石及飛灰應用於水泥砂漿耐久性與建築減碳之探討

The Study of Durability and Carbon Reduction of Building of Slag and Fly Ash Applied in Mortar

研 究 生:曾玲群

指導教授：卓世偉

中華民國一００年一月

論文口試委員會審定書

誌謝

「流淚撒種的，必歡呼收割！」，「In GOD We Trust！」感謝信實與同在的上帝！第一個要謝謝的就是指導老師卓世偉恩師及師母，回想起陪著我們走過的Meeting、英文期刊的研討、實驗室的試驗及耳提面命的諄諄教誨，果然讓聽話照做的我在自己設定的時間內順利拿到學位，心中真有說不出的感激！也感謝陳所長宗鵠二年半傾囊相授的教導及啟示，相信在人生的里程中永難忘懷！更謝謝導師謝秉銓老師及親切的陳星皓老師，在初審及口試時的指導上有著諸多的幫助；最特別的是要感謝二十年前曾教過我結構學的外審口試委員詹添全老師，臨門一腳的指點與肯定，使得論文能完整地在材料與建築領域上取得平衡與認同！

另外要謝謝學姐老師翁彩瓊老師的鼓勵，學校土木防災所曹文琥老師的贊助實驗室、中央大學材試所、海洋大學劉彥志學弟、鐵工局工務組及第三工程隊、高公局及交通部路政司同事們的擔待；此外 vivi 學姐、玲岭、國義、亦文、研究所同學及學長、學弟妹們同甘共苦地一起打拼，相信大家有志者事竟成！

還有要感謝我的父母、公婆的體諒與支援，和我一起擔心和開心；新店浸信會、木柵便以利教會和交通部佳音讀書會的弟兄姐妹，以及遠在美國的弟弟彥彰常常為我代禱及扶持，讓我知道有一群人在背後撐腰不致害怕；另外特別謝謝我的三個寶貝兒女源中、恩揚及恩琪，尤其是恩揚、恩琪最常在實驗室陪伴我或當我的好幫手，我常說論文中有他們的影子，而且他們也因為我讀研究所後變得更加獨立自主，長大成熟！

最後要用力地感謝我的老公許偉鈞建築師，他真是我生活上屬世且屬靈的好伴侶，自我入學後當起家庭主夫，每天叫孩子起床上學及買早餐，在我遇到瓶頸或沮喪時給我加油打氣，更透過聖經的話安慰和感動我，讓我重新得力如鷹展翅上騰，深知上帝寶貴的應許永不落空，且如母鷹把我背在翅膀上；在我人生中有這麼多愛我支持我的人，真是何等的幸福！願上帝記念他們的一切，賜福給每一個人，再次地感謝大家和上帝！

Abstract

The slag and fly ash in industrial waste are mostly found in the application of structural concrete either domestic or foreign countries, which is commonly used as substitutive additives of concrete; however, due to the limitation of its slower hardening rate in early stage, it is unable to use massively in large quantity. Therefore, this study shall focus on the blast furnace slag & fly ash in the application of mortar in non-structural indoor/ outdoor decoration. Expect to increase substitution rate, reduce concrete quantity in use so as to achieve the effectiveness of carbon reduction of construction. On the other hand, the durability of mortar is less taken account of as it usually bears the key water-proof function of the construction in indoor/outdoor decoration as well as in direct contact of the external environment. In pre-casting construction method, the interface treatment of connector has usually been applied that a further study of its durability is necessary. Thus, this study will be focused on the influence of durability of mortar under the environment of temperature in deterioration as well as if there is positive effectiveness of adding slag & fly ash. Expect to reduce the later on maintenance frequency and cost due to increasing the durability so as to achieve the purpose of "sustainable construction".

The various substitution rate of concrete in quantity at fixed ratio of 0.45 of water/ resin of mortar have been put and raised in water for 56 days in this study, then proceed durability test, such as, pressure-resistance and elongation properties test as well as the chloral ion transmission and porous structure measurement after various temperature deterioration. From the result of experiment, it is found a 40% substitution rate of slag & fly ash comes with optimal pressure-resistance and elongation strength. The mechanical strength is increasing in tendency after salt-spray test. The chloral ion transmission at 25℃ and 75℃ shows the resistance to the invasion of chloral ions increase along with the increasing substitution rate, which indicate those mortar with this two additives can promote the capability of chloral ions resistance. Meanwhile, it is found under this two specific temperatures the substitution rate of 40% of slag is the optimal; while fly ash at 40% and 60% is the optimal; the porous structure in measurement also comes with a responding result.

Assessing by integrating the mechanical strength and durability, 60% slag and 40% fly ash have been found to be the optimal substitution rate in this study. Thus, in talking about the carbon reduction of construction by calculating according to the previous substitution rate, the max.CO_2 reduction quantity of 2,761 and 1,318 kg can be achieved by every m^2 of slag and fly ash as applied on the building floor with the carbon reduction ratio of 33% and 16%, which comes with better carbon reduction performance and can be promoted to the green constructions and public facilities. In the mean time, it complies with the contemporary regulation of enforcing 30% of green constructional material in use on the decoration area as well as carrying out the government policy of procurement budget in 10% green material.

Keywords：mortar, slag, fly ash, durability, carbon reduction.

中文摘要

屬於事業廢棄物的爐石與飛灰，在國內外大多應用於結構混凝土中，以作為替代水泥的摻料，然而受限於早期強度發展較慢，並無法大量使用。因此本研究將爐石與飛灰應用於非結構性室內外裝修的水泥砂漿上。期能提升替代率，減少水泥用量以達到建築減碳之效果。另水泥砂漿的耐久性較不受人重視，但於室內外裝修中，水泥砂漿常擔負起建築物第一線防水功用，並直接與外在環境接觸。在預鑄工法中接頭的界面處理亦常被使用，故有必要探討其耐久性。因此本研究針對水泥砂漿於溫度劣化環境下耐久性影響，以及飛灰與爐石添加是否有正面影響進行探討。期能在耐久性提升下，減少後續維護次數與費用，達到「永續建築」之目的。

本研究探討以不同的水泥替代量，水膠比固定為 0.45 之摻料水泥砂漿試體，於水中養護 56 天後，分別進行各種溫度劣化，於劣化後進行抗壓與抗拉基本性質量測，以及氯離子傳輸與孔隙結構量測等耐久性質試驗。由試驗結果發現，飛灰及爐石漿體皆以替代率 40%者可獲取最佳之抗壓及抗拉強度；經鹽霧劣化後力學強度均不受影響且有增強趨勢；於 25℃與 75℃氯離子的傳輸行為中，隨著替代率的提高越可抵抗氯離子的入侵，表示凡具此兩種摻料之水泥砂漿皆可提升抗氯離子能力，且於此兩種溫度下均以爐石替代率 40%最佳，而飛灰部分則各以替代率 40%及 60%者最佳，孔隙結構量測亦有相呼應的結果。

綜合力學強度與耐久性質評估下，結果以 60%爐石及 40%飛灰為本研究最適替代率，因此就建築減碳量而言，以前述替代量試算後，得知樓地板面積每 m^2 爐石及飛灰摻料水泥砂漿於本研究案例中最多可減少 2,761 及 1,318 kg-co_2 的碳量，減碳比為 33%及 16%，具較佳的減碳效益，可推廣至綠建築和公共工程的使用上，並符合目前綠建築需使用 30%綠建材裝修面積規定，以及應用於政府 10%綠色材料採購經費的政策上。

關鍵字：水泥砂漿、爐石、飛灰、耐久性、減碳

目次

Abstract ---------- i
中文摘要 ---------- iii
目次 ---------- iii
圖目錄 ---------- v
表目錄 ---------- x
第一章　緒論 ---------- 1
　第一節　研究動機---------- 1
　第二節　研究目的---------- 3
　第三節　研究架構與流程 ---------- 4
　第四節　研究範圍與限定---------- 5
　第五節　小結 ---------- 5
第二章 文獻回顧 ---------- 7
　第一節　事業廢棄物再利用現況與應用限制 ---------- 7
　第二節　波索蘭效應---------- 16
　第三節　氯離子傳輸行為與孔隙結構---------- 17
　第四節　減碳效益---------- 19
　第五節　小結 ---------- 22
第三章　試驗計畫 ---------- 23
　第一節　試驗方法與儀器---------- 23
　　壹、抗壓試驗 ---------- 23
　　貳、抗拉試驗---------- 25
　　參、壓汞孔隙量測試驗(MIP)---------- 27
　　肆、加速氯離子擴散試驗(ACMT) ---------- 30
　　伍、電位滴定試驗---------- 33
　　陸、鹽水噴霧試驗---------- 35
　第二節　試驗變數與配比設計 ---------- 36

第三節　小結 ---------- 40
第四章　試驗結果與分析---------- 41
第一節　抗壓試驗結果與分析---------- 41
第二節　抗拉試驗結果與分析---------- 45
第三節　壓汞孔隙量測試驗(MIP)結果與分析---------- 47
第四節　加速氯離子擴散試驗(ACMT)結果與分析---------- 57
第五節　小結 ---------- 78
第五章　減碳效益可行性評估---------- 83
第一節　綠建築減碳量指標評估 ---------- 85
第二節　減碳比評估法 ---------- 85
第三節　減碳量案例分析 ---------- 86
第四節　小結 ---------- 95
第六章　結論與建議---------- 96
第一節　研究結論 ---------- 96
第二節　研究建議 ---------- 98
參考文獻 ---------- 99

圖目錄

圖1-1　事業廢棄物資源再利用示意圖 ---------- 2

圖1-2　研究流程圖 ---------- 6

圖2-1　爐石(100級)替代率之水泥砂漿強度發展圖 ---------- 9

圖2-2　水泥與波索蘭效應示意圖 ---------- 13

圖2-3　一般水泥與高爐水泥CO_2排放率長條比較圖 ---------- 16

圖3-1　正立方體水泥砂漿試體 ---------- 23

圖3-2　正立方體水泥漿體經抗壓試驗後劣化情形---------- 24

圖3-3　正立方體鋼模 ---------- 24

圖3-4　萬能抗壓試驗機 ---------- 25

圖3-5　8字形水泥砂漿試體銅模---------- 25

圖3-6　8字形試體經抗壓後劣化情形---------- 26

圖3-7　抗拉試驗機 ---------- 26

圖3-8　抗拉試驗數據輸出端 ---------- 27

圖3-9　壓汞孔隙量測小圓柱試體 ---------- 28

圖3-10　壓汞孔隙(MIP)試體及精密測重儀 ---------- 28

圖3-11　Autopore 9500壓汞孔隙儀 ---------- 29

圖3-12　壓汞孔隙(MIP)試驗操作系統圖 ---------- 29

圖3-13　摻料水泥砂漿圓柱及試體水刀切割機---------- 30

圖3-14　3 cm試體環片置入烘箱劣化 ---------- 31

圖3-15　3 cm環片加止水帶 ---------- 31

圖3-16　環片置入導電銅網 ---------- 32

圖3-17　電流輸入端儀器 ---------- 32

圖3-18　陰極(黑線)、陽極(紅線)槽之通電情形---------- 33

圖3-19　ACMT取樣溶液---------- 34

圖3-20　電位滴定儀設備 ---------- 34

圖3-21　鹽水噴霧實驗機 ---------- 35

圖3-22　5x5x5 cm正立方體試體置入鹽水噴霧機劣化情形 ---------- 35
圖3-23　飛灰材料樣品 ---------- 37
圖3-24　水泥材料樣品 ---------- 37
圖3-25　爐石材料樣品包裝 ---------- 38
圖3-26　爐石材料粉狀樣品 ---------- 38
圖4-1　爐石漿體抗壓強度與效益分析圖 ---------- 42
圖4-2　飛灰漿體抗壓強度與效益分析圖 ---------- 43
圖4-3　爐石漿體抗壓強度比較圖 ---------- 44
圖4-4　飛灰漿體抗壓強度比較圖 ---------- 44
圖4-5　爐石漿體抗拉強度與效益分析圖 ---------- 45
圖4-6　飛灰漿體抗拉強度與效益分析圖 ---------- 46
圖4-7　孔徑與累積汞灌入量關係圖(B0)---------- 47
圖4-8　孔徑與累積汞灌入量關係圖(F2) ---------- 48
圖4-9　孔徑與累積汞灌入量關係圖(F4) ---------- 48
圖4-10　孔徑與累積汞灌入量關係圖(F6) ---------- 49
圖4-11　孔徑與累積汞灌入量關係圖(F8) ---------- 49
圖4-12　孔徑與累積汞灌入量關係圖(S2) ---------- 50
圖4-13　孔徑與累積汞灌入量關係圖(S4) ---------- 50
圖4-14　孔徑與累積汞灌入量關係圖(飛灰組) ---------- 51
圖4-15　汞灌入量與孔徑分佈關係圖(B0)---------- 52
圖4-16　汞灌入量與孔徑分佈關係圖(F2) ---------- 53
圖4-17　汞灌入量與孔徑分佈關係圖(F4) ---------- 53
圖4-18　汞灌入量與孔徑分佈關係圖(F6) ---------- 54
圖4-19　汞灌入量與孔徑分佈關係圖(F8) ---------- 54
圖4-20　各試體汞灌入量與孔徑分佈關係圖(飛灰類)---------- 55
圖4-21　汞灌入量與孔徑分佈關係圖(S2) ---------- 55
圖4-22　汞灌入量與孔徑分佈關係圖(S4) ---------- 56
圖4-23　穩態階段累積氯離子濃度與時間之線性關係圖 ---------- 58
圖4-24　累積氯離子濃度關係圖(B0)---------- 59

圖4-25　累積氯離子濃度關係圖(S2) ---------- 59
圖4-26　累積氯離子濃度關係圖(S4) ---------- 60
圖4-27　累積氯離子濃度關係圖(S6) ---------- 60
圖4-28　累積氯離子濃度關係圖(S8) ---------- 61
圖4-29　累積氯離子濃度與時間關係比較圖(爐石控制組)---------- 62
圖4-30　累積氯離子濃度關係圖(F2) ---------- 62
圖4-31　累積氯離子濃度關係圖(F4) ---------- 63
圖4-32　累積氯離子濃度關係圖(F6) ---------- 63
圖4-33　累積氯離子濃度關係圖(F8) ---------- 64
圖4-34　累積氯離子濃度與時間關係比較圖(飛灰控制組)---------- 65
圖4-35　累積氯離子濃度關係圖(5B0) ---------- 66
圖4-36　累積氯離子濃度關係圖(5S2)---------- 66
圖4-37　累積氯離子濃度關係圖(5S4)---------- 67
圖4-38　累積氯離子濃度關係圖(5S6)---------- 67
圖4-39　累積氯離子濃度關係圖(5S8)---------- 68
圖4-40　累積氯離子濃度關係比較圖(爐石50℃劣化組)---------- 68
圖4-41　累積氯離子濃度關係圖(5F2)---------- 69
圖4-42　累積氯離子濃度關係圖(5F4)---------- 69
圖4-43　累積氯離子濃度關係圖(5F6)---------- 70
圖4-44　累積氯離子濃度關係圖(5F8)---------- 70
圖4-45　累積氯離子濃度與時間關係比較圖(飛灰50℃劣化組)---------- 71
圖4-46　累積氯離子濃度關係圖(7B0) ---------- 72
圖4-47　累積氯離子濃度關係圖(7S2)---------- 73
圖4-48　累積氯離子濃度關係圖(7S4)---------- 74
圖4-49　累積氯離子濃度關係圖(7S6)---------- 74
圖4-50　累積氯離子濃度關係圖(7S8)---------- 75
圖4-51　累積氯離子濃度與時間關係比較圖(爐石75℃劣化組)---------- 76
圖4-52　累積氯離子濃度關係圖(7F2)---------- 76
圖4-53　累積氯離子濃度關係圖(7F4)---------- 77

圖4-54　累積氯離子濃度關係圖(7F6)---------- 77
圖4-55　累積氯離子濃度關係圖(7F8)---------- 78
圖4-56　累積氯離子濃度與時間關係比較圖(飛灰75℃劣化組)---------- 79
圖4-57　各替代率與不同溫度下穿透速率關係長條圖(爐石類)---------- 81
圖4-58　各替代率與不同溫度下穿透速率關係長條圖(飛灰類)---------- 81
圖4-59　不同溫度下各替代率與穿透速率比較圖(爐石類) ---------- 82
圖4-60　不同溫度下各替代率與穿透速率比較圖(飛灰類) ---------- 82
圖5- 1　高爐水泥CO_2減量比與再生建材使用率關係圖 ---------- 86
圖5- 2　各減碳效益評估法之減碳比與替代率比較圖 ---------- 90
圖5- 3　爐石減碳量與建築類型關係圖 ---------- 94
圖5- 4　飛灰減碳量與建築類型關係圖 ---------- 94

表目錄

表2-1　環保署公告爐石與飛灰為再生資源時程表 ---------- 7
表2-2　爐石應用一覽表---------- 8
表2-3　爐石替代率與強度成長之關係---------- 10
表2-4　混凝土中飛灰替代水泥之參考值---------- 13
表2-5　結構混凝土與建築水泥砂漿之差異分析表 ---------- 14
表2-6　爐石與飛灰替代水泥用量相關論文一覽表 ---------- 15
表2-7　爐石與飛灰經波索蘭效應之影響因素 ---------- 17
表2-8　建築水泥之CO_2 排放量表 ---------- 19
表2-9　非金屬再生建材(高爐水泥及高性質混凝土)係數對應表 ---------- 20
表2-10　爐石回收再利用效益統計表 ---------- 21
表2-11　營建工程再生材料及能源計畫碳排量一覽表---------- 22
表3-1　本研究摻料漿體每立方水泥砂漿材料配比設計(控制組) ---------- 36
表3-2　本研究水泥砂漿試體分類編號表---------- 39
表3-3　試驗計畫與預期成果一覽表---------- 40
表4-1　爐石漿體抗壓強度統計表---------- 41
表4-2　飛灰漿體抗壓強度統計表---------- 42
表4-3　爐石及飛灰漿體抗壓強度表(鹽霧組)---------- 43
表4-4　爐石漿體抗拉強度統計表---------- 45
表4-5　飛灰漿體抗拉強度統計表---------- 46
表4-6　飛灰漿體MIP汞總貫入量統計表---------- 51
表4-7　各組替代率於不同環境溫度之穿透速率與效益比(爐石類) ---------- 80
表4-8　各組替代率於不同環境溫度之穿透速率與效益比(飛灰類) ---------- 80
表5-1　綠建築CO_2減量指標爐石替代率各係數統計表 ---------- 85
表5-2　綠色材料法減碳比統計表---------- 87
表5-3　能源計畫法減碳比統計表---------- 88
表5-4　再生材料法減碳比統計表---------- 89

表5-5　水泥砂漿單價成本分析表---------- 90
表5-6　住宅類建築水泥砂漿減碳量分析表---------- 91
表5-7　商辦類建築水泥砂漿減碳量分析表---------- 92
表5-8　公有建築類水泥砂漿減碳量分析表---------- 93

第一章　諸論

第一節　研究動機

爐石（slag）與飛灰（fly ash）在國內外大多應用於結構混凝土中，以其波索蘭材料（Pozzolanic materials）的特性作為替代水泥的摻料，然而受限於早期強度發展較慢，並無法大量使用。因此本研究將此兩種摻料嘗試應用於較無強度要求且室內外裝修必要的建築水泥砂漿上。期能提升替代率減少水泥用量以達到建築減碳之效果。另一方面水泥砂漿的耐久性往往被人所忽略，然而在室內外裝修方面，牆構造常以水泥砂漿進行打底與粉光，並擔負起建築物第一線防水功能。所以水泥砂漿於建築物上所處環境常接觸外氣溫濕度變化，尤以我國夏季溫度常高達 30℃以上，根據 Peng 與 Wu 的相關研究，水泥砂漿內部溫度已高達 60℃以上（Peng and Wu，2007），也使國內許多建築物的迎風面牆，在沒有大型地震或外應力的影響，仍有室內牆壁滲水、白華、與壁癌等現象，然而日曬溫度這方面對耐久性的影響目前並沒有文獻或研究進行說明，故水泥砂漿耐久性及在溫度劣化下的探討有其必要性。而本研究除探討水泥砂漿於溫度劣化環境下耐久性的影響，並探討爐石與飛灰添加是否對耐久性有正面的影響；期能在耐久性提升下減少後續維護次數與費用，達到「永續建築」之目的。綜合上述本研究希望達到「爐石與飛灰替代水泥量較混凝土增加」、「探討耐久性較未添加的改善效益」、與「建築減碳效益評估」三大目標。

水泥為目前使用最多的建築材料之一，根據目前經濟部統計（經濟部統計處網站，2010），98 年度約使用 1,680 萬公噸的水泥，並運用於各種建築工程中。然而水泥生產過程中須開採石灰礦石，經煅燒與研磨等程序，所以對環境生態具有一定程度破壞，與使用過多能源導致高 CO_2 排放量。根據成功大學建築研究所 Sirya 研究室的調查，1 公噸水泥會產出 445.17 kg CO_2（林憲德，2007），因此 98 年度所用的水泥便產生 75 萬噸 CO_2 排放量。而爐石與飛灰均列名經濟部公告可供再利用的 57 種事業廢棄物範圍內，且因其為波索蘭材料，具與水泥

類似的化學組成，所以可考量用於替代水泥使用。爐石（亦稱為礦渣粉）係中國鋼鐵公司煉鋼所產生的事業廢棄物「水淬高爐石」回收研磨而成，其年產量約 560 萬噸（傅國柱，2010）；飛灰（亦稱為粉煤灰）為台灣電力公司燃煤設備由集塵器擷取的廢棄物，年產量則有約 200 萬噸，以上說明如圖 1-1（單信瑜，2010）；所示。上述兩項再生資源若達到 50%以上回收利用率，則 98 當年度有 380 萬噸以上可投入替代水泥，並可降低 17 萬噸以上 CO_2 排放量，以每株闊葉大喬木 40 年共吸收 900 公斤 CO_2 計算（林憲德，2007），等同種植 18.88 萬株喬木。另一方面又可節省廢棄物處理與水泥建材成本費用。

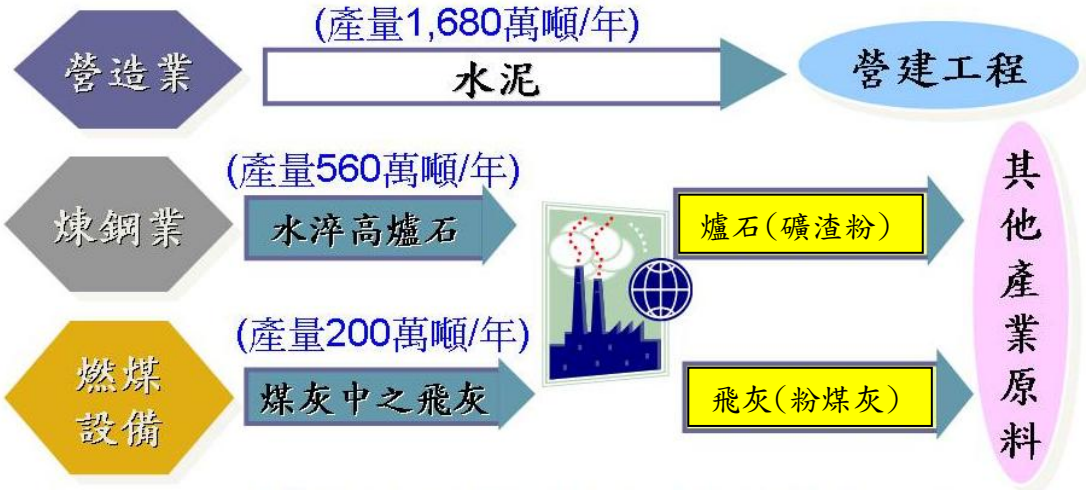


圖 1-1 事業廢棄物資源再利用示意圖（單信瑜，2010）

爐石及飛灰雖然目前在實務上已廣被接受可用於替代水泥使用，但受到早期強度及混凝土規範用量的限制，目前主要替代結構混凝土中的水泥材料僅約 20~30%。根據國內 2010 年較新的文獻研究，楊仲家教授等以台電 F 級飛灰進行替代混凝土中水泥研究，指出飛灰替代量超過 40%便有下降之趨勢（楊仲家等，2010），國外 Cheewaket 等也有類似研究成果（Cheewaket，2010）。主要原因在於混凝土材料含有粗細骨材，導致水泥用量每 m^3 在為 350kg 以內，故替代量無法太高，且爐石及飛灰比重比水泥低，因此 40%替代量僅約 100 kg。然而屬於非結構性的水泥砂漿，由於不需承載應力，因此對早期強度的要求不高，且規範並無限制爐石及飛灰於水泥砂漿的替代量，另一方面以常用的粉光水泥砂漿每立方需使用水泥 500 kg，因此取代量或可較多，並可利用爐石及飛灰細度

較低增加新拌時工作性，若能大於 40%高用量的替代，或可更能達到減碳之效益。但目前相關針對爐石及飛灰用於水泥砂漿文獻甚少，大部分僅探討力學性質，對耐久性並無相關文獻，因此本論文將定位於建築用粉光水泥砂漿材料替代研究上。

就溫度劣化而言，Aydin 等曾以混凝土進行大於 100℃劣化研究，發現以爐石替代部分水泥的混凝土可有效抑制 10 nm 寬度以下微裂縫的成長（Aydin，2008）。Xu 等則發現以飛灰替代部分水泥的混凝土亦有前述相同效果（Xu，2003）。Mahaboonpachi 等，亦以加熱板模擬不同溫度下，磁磚下水泥砂漿裂縫成長，由實驗發現 100℃時，磁磚下的漿體形成 3mm 長度的裂縫。105℃至 120℃時裂縫已延伸為 20 mm（Mahaboonpachi，2008）。但對於 100℃以下水泥砂漿耐久性變化與爐石及飛灰的影響並無文獻提及。

國內永續建築之技術緣於民國 93 年，為鼓勵建築物採行綜合設計，積極維護生態環境的平衡，落實節約能源制定建築技術規則綠建築專章，期為降低地球能源消耗及減少 CO_2 排放。而內政部建築研究所更制定「綠建材」環保標章，包含符合生態、再生、環保、健康及高性能等性質的建材運用。為因應京都議定書二氧化碳減量的要求，未來臺灣綠建材全面的採用，將使得綠建築延伸至全生命週期的永續建築，期能帶動國內建材循環再利用的環保風潮，確保健康舒適的環境居住品質，以促進地球永續發展。在建築工法方面，若本研究達到預期之目標，後續可供改良式輕隔間－水泥漿牆材料運用時參考。更可提供預鑄工法接頭界面使用。

第二節　研究目的

為使本研究可獲得「爐石與飛灰替代水泥量較混凝土增加」、「探討耐久性較未添加的改善效益」、與「建築減碳效益評估」等三大預期目標。本研究擬規劃飛灰與爐石替代水泥率（下述簡稱為替代率）為主要變數（變數範圍由 0%、20%、40%、60%、80%。詳細配比設計如 3-1 所示）進行探討。在試驗方面，分別以抗壓與抗拉試驗說明力學性質的改變；以加速氯離子傳輸試驗與孔隙結構

說明耐久性質的改變。除此之外，並探討水泥砂漿面臨高溫（模擬台灣夏季中午水泥砂漿表面溫度情形）劣化下之力學與耐久性質變化之狀況。最後並藉由建築案例分析減碳效益，以供未來導入綠建材與永續設計技術之參考。

相關研究目的條列如下：

壹、利用抗壓與抗拉力學性質試驗，探討不同飛灰與爐石替代率對水泥砂漿整體力學性質變化的探討，並瞭解可表現最佳力學性質的飛灰與爐石替代率。

貳、由加速氯離子傳輸試驗，探討不同飛灰與爐石替代率對水泥砂漿整體離子傳輸能力變化的探討。

叁、由壓汞孔隙儀量測結果，探討不同飛灰與爐石替代率對水泥砂漿整體孔隙結構變化的探討。並與離子傳輸能力變化的關聯性進行交互比對。

肆、模擬不同飛灰與爐石替代水泥率之水泥砂漿面對高溫劣化下之力學與耐久性質變化之狀況，並探討飛灰與爐石添加是否可改善高溫劣化水泥砂漿性質的影響。

伍、由上述試驗結果分析，建議飛灰與爐石用於水泥砂漿的經濟性替代率。

陸、以目前常見的各種減碳計算法，探討不同飛灰與爐石替代水泥率的減碳效益。

柒、藉由住宅類、商辦類、與公有建築類的高中低樓層案例，分析經濟性替代率對建築物單位樓地板面積的減碳量與效益。

第三節　研究架構與流程

本論文的研究架構共六個章節，分為：

壹、第一章諸論：探討研究動機與目的，架構與流程（含實驗流程）及研究範圍與限定等重要性。

貳、第二章文獻回顧：藉由廢棄物再利用現況與應用及替代量限制、以往國內外文獻的試驗結果及成效加以說明，並說明材料運用的學理與特性，如減碳效益、波索蘭效應及氯離子傳輸行為等。

參、第三章試驗計畫：說明本研究各種試驗方法與步驟、試驗設備及試體種類，綜合研究動機及目的，推導出試驗變數與配比設計等。

肆、第四章試驗結果與分析：提供各種試驗結果的數據、分析圖表與初步的研討及分析結果。

伍、第五章減碳效益可行性評估：以各種減碳比評估法得知摻料水泥砂漿各替代率的效益與減碳比，並應用第四章試驗成果試算水泥砂漿單價成本，及計算各類建築實例摻料水泥砂漿樓地板面積的減碳量與減碳比。

陸、第六章結論與建議：為試驗成果與減碳效益評估提出最終結論，與日後實際應用於粉光水泥砂漿的建議，並提出未來可供研究的方向等。

本研究流程如下圖 1-2 所示。

第四節　研究範圍與限定

本研究水泥砂漿研究用於非結構上，並以建築構造物外墻或室內裝修之粉光水泥砂漿為研究範圍。因此其水膠比設定為 0.45。相關水泥替代用量定義為飛灰或爐石取代控制組的水泥用量比例。而本論文試體係於實驗室內製作不同替代率之配比，故並不探討現場施工人為因素如搗實、蜂窩等試體上的狀況。

第五節　小結

近年來「綠建材」與「永續建築」概念興起，添加飛灰與爐石以減少水泥的用量，已被工程設計單位接受，並大量使用於混凝土中，並有大量學術研究成果。但受限於早期強度與規範現制，並無法大量使用。另一方面水泥砂漿具有高用量水泥，且大多用於粉刷外牆等非結構性使用，因此並無相關研究針對爐石與飛灰運用於水泥砂漿進行探討，以及耐久性影響研究。因此本研究以不同爐石與飛灰替代水泥砂漿部分水泥量進行性質影響探討，達到「爐石與飛灰替代水泥量較混凝土增加」、「探討耐久性較未添加的改善效益」、與「建築減碳效益評估」三個預設目標。並由此目標設定後續研究流程與研究目的。

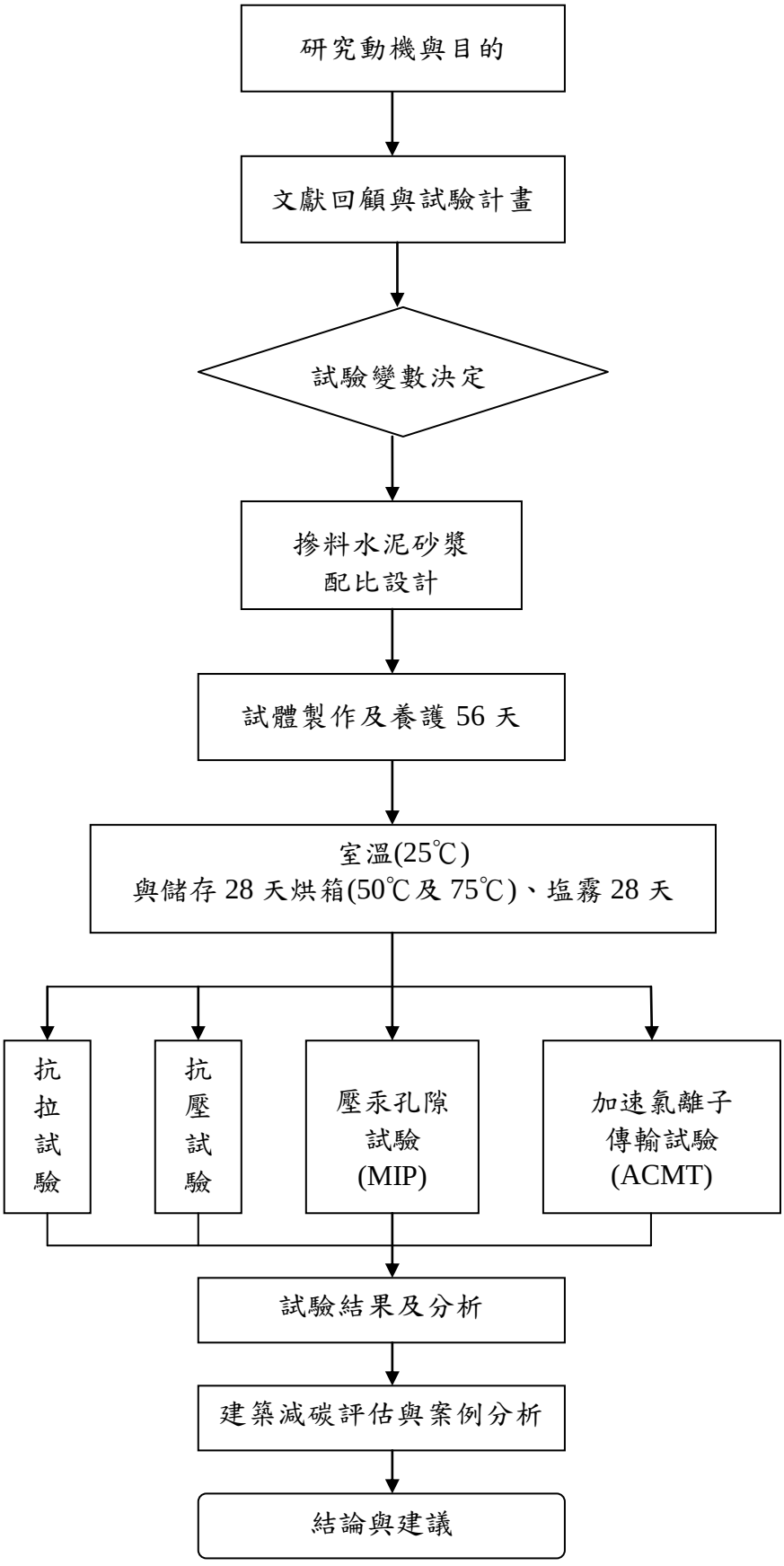

研究動機與目的
文獻回顧與試驗計畫
試驗變數決定
摻料水泥砂漿
配比設計
試體製作及養護 56 天
室溫(25℃)
與儲存 28 天烘箱(50℃及 75℃)、塩霧 28 天
抗拉試驗
抗壓試驗
壓汞孔隙試驗(MIP)
加速氯離子傳輸試驗(ACMT)
試驗結果及分析
建築減碳評估與案例分析
結論與建議

圖 1-2 研究流程圖

第二章　文獻回顧

近年來政府推行永續建築之節能減碳政策，將建築工程中高耗能及高 CO_2 排放所常用的水泥，以經濟部公告的 57 種事業廢棄物中，運用效益較佳之爐石及飛灰等再生資源取代，促進廢棄物減量、減碳及提昇資源有效利用，本章將就使用現況及限制、材料特性及減碳效益等陳述。

第一節　事業廢棄物再利用現況與應用限制

事業廢棄物係指營利事業場所所產生之廢棄物，區分為一般及有害事業廢棄物二種，本研究係探討一般事業廢棄物無害的D類，即依經濟部公告的 57 種可回收再利用的資源物料，再利用於混凝土添加者，依法需由主辦單位或廠商檢具工程核准使用文件，向廢棄物生產者取用或相關機關認證混凝土廠處理，其產品應符合國家標準、國際標準或相關使用規定。再以目前國內公共工程所應用於混凝土摻料最廣泛且效益較佳的爐石與飛灰（最初公告及最新公告詳台灣大學陳振川所整理的表 2-1），由此可見爐石與飛灰為視為再生資源的歷史分別已達 12 年與 7 年之久；本文將其再利用現況與相關應用限制等作一說明。

表 2-1　爐石與飛灰為環保署公告再生資源時程表（陳振川，2009）

項目	時程	內容
爐石	最初公告	85 年 11 月 5 日環署廢字第 53941 號函
	最新公告	97 年 4 月 29 日經工字 09704601860 號函
飛灰	最初公告	86 年 3 月 20 日環署廢字第 15018 號函
	最新公告	93 年 1 月 16 日公告「水淬高爐石」為再生資源

壹、爐石再利用現況與應用限制

「高爐爐石」為煉鐵業者研磨高爐爐渣所生產，簡稱爐石粉或爐石。其主要成分為 CaO、SiO_2、Al_2O_3、與 MgO 等近似水泥，其中約有 40% 以上的 CaO 含量較高，於鹼性環境、適當熱量與濕度中，與水產生水化反應，具有潛在膠結能力，故視為良好的水泥漿體摻料。當以爐石摻料替代水泥時，須依賴水泥釋放鹼性離子溶液提供大量的活化能力，才能發揮潛在的膠結力，當水泥水化反應生出 C-S-H 矽酸鈣膠體及 CH 晶體時，爐石便會與 CH 晶體作用產出更多相似卜特蘭水泥之水合物 C-(S/A)-H 膠體，填補原本 CH 晶體所佔體積，使得混凝土孔隙直徑縮小孔隙減少，進而促進較佳水密性，可抵抗外界有害性物質如氯離子、硫酸鹽類不易滲入（Osborne，1999）。

中鋼煉鋼廠在煉鐵過程，每一噸生鐵即產生約 300 公斤的高爐石，其冷卻方式可分為氣冷高爐石及水淬高爐石，一般用途詳表 2-2，本研究所稱之「爐石」係指符合 CNS 12243 及 CNS 12549 之水淬高爐石；依行政院公共工程委員會之「公共工程高爐石混凝土使用手冊」，記載日本已使用達 90 年之久，為十分成熟與應用廣泛的產品（公共工程委員會，2001），且其具有優異的強度及抗海水、抗硫酸鹽與侵蝕鋼筋的能力，所以可被應用在水利、橋樑、隧道及港灣工程上，但臺灣卻以建築工程應用居多。

表 2-2　爐石應用一覽表（公共工程委員會，2001）

種類	氣冷高爐石	水淬高爐石
用途	填海處理 道路工程應用 混凝土粗骨材應用 水泥生料應用 矽酸鈣塩肥料應用	波特蘭水泥材料應用 高爐水泥材料應用 混凝土混合材及細骨材應用 地板改良材應用 矽酸鈣塩肥料應用 陶磁摻料應用

爐石之應用限制因早期機械化不夠發達的限制，以往無法磨成細粉以供其他原料的運用，往往將之視為廢棄物做填海處理；現今爐石之顆粒較水泥顆粒細小，所以將爐石摻料適量地添加於混凝土中，可使原有顆粒堆積程度更加緻密。一般水泥之細度約在 2800 cm^2/g 上下，而爐石可提高細度達 4000 m^2/g 或更高（Hooton，1990）。根據 Hogan 研究爐石比重略小於水泥（水泥、爐石及飛灰比重各約為 3.15、2.90 及 2.10），且無飛灰摻料燒失量問題存在，故爐石若以同樣重量部分地替代水泥時，漿體實質佔有之體積會增加（Hogan，1981），但膠結料總重卻不變，此即漿體體積對骨材之比值提高，故可改善新拌混凝土之工作性，亦可大量改善爐石替代部份水泥對混凝土的縮變行為（黃然、卓世偉，2001）。

國內目前依 CNS 3654 規定卜特蘭高爐水泥中爐石所佔之重量百分率應在 25%~65%範圍之內，若參考日本規範 JIS R5211(1997)，可分類成 A 種（替代率 5~30%）較適用於建築工程；B 種（替代率 30~60%）較適用於土木工程，一般工程爐石含量為 40~50%，巨積混凝土爐石含量 50~60%；C 種（替代率 60~70%）較適用於大壩工程，故可依其用途而產製及選用。

有關爐石對混凝土強度之影響，係由水膠比、養護溫度及替代率等因素相關（公共工程委員會，2001）。水膠比愈低，其替代率較高時，則強度愈明顯隨之提昇（詳表 2-3 及圖 2-1）；高溫養護有提昇高爐石混凝土強度之效果；爐石替代率愈高，早期強度發展趨勢亦愈緩慢。

表 2-3　爐石替代率與強度成長之關係（公共工程委員會，2001）

卜特蘭水泥量(%)	爐石粉 100 級	混凝土強度(kgf/cm^2)			強度比		
		3 天	7 天	28 天	3 天	7 天	28 天
100	0	165.8	259.0	385.7	100.0	100.0	100.0
75	25	124.4	233.4	406.0	75.0	90.1	105.3
60	40	110.4	221.6	442.0	66.6	85.6	114.6
45	55	94.1	209.3	419.0	56.8	80.8	108.6
30	70	85.0	203.1	392.0	51.3	78.4	101.6
15	85	81.4	188.5	301.6	49.1	72.8	78.2

＊ 爐石粉 100 級之比表面積為 4100 cm^2/g。

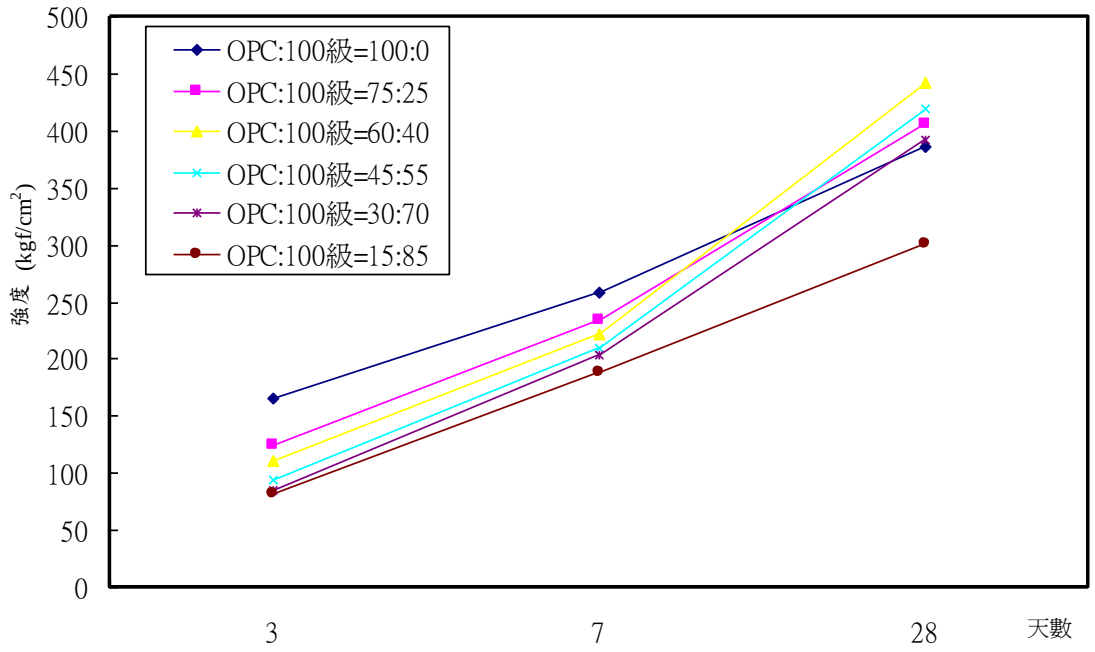


圖 2-1　爐石(100 級)替代率之混凝土強度發展圖（公共工程委員會，2001）

貳、飛灰再利用現況與應用限制

「飛灰」係為煤粉經鍋爐燃燒，由氣體排放，經集塵設備收集而得之無機物粉末，直徑大約分佈於 1 μm 至 100 μm 之間 （Yan，1996），須符合 CNS 3036 或 CNS 11271 之規定，其品質受燃煤料源或電廠燃燒程序等因素所影響，存在於含水份的條件，即可和水泥水化生成物中的氫氧化鈣產生波索嵐反應（pozzolanic reaction），故稱為波索蘭材料 （Mehta，1993）。由於波索蘭材料含有數量頗多的非晶質矽氧化物（amorphous silica），故於水泥水化過程中將會和氫氧化鈣 CH 水化生成物晶體再次反應，而形成緻密的$C-S-H$矽酸鈣粘結膠體。就水泥砂漿的孔隙來看，毛細孔隙尺寸逐漸縮小，孔隙率因此降低（Collepardi 等，1995）。

另飛灰種摻料含有相當多鋁化合物，再次與氫氧化鈣(CH)晶體反應生成$C-A-H$（calcium aluminate hydrates）鋁酸反應物 （Suryavanshi 等，1996），而此種反應物將與硫化物再反應生成鈣釩石等物質（黃然、卓世偉，2001）。由於鈣釩石係為摻料水泥砂漿硬固後，由硫化物侵入與$C-A-H$所反應的生成物，屬於一種遲滯形成鈣釩石 DEF（delay ettringite formation），其形成硬固摻料水泥漿體的穩定體積，故膨脹時產生的應力會造成摻料水泥漿體產生微裂縫。故當硫化物有侵蝕之可能時，需考量飛灰摻料鋁含量的最低限制（Dhir 等，1996）。

關於鋁含量雖然對摻料水泥漿體抗硫化物的侵蝕具不良影響，但於氯離子傳輸方面，當鋁化合物與孔隙水中的氯離子進行反應時，會形成穩定的法拉第鹽類（Friedel's salt），可以減少氯離子擴散路徑，可填充孔隙以增加耐久性（Princd 等，1995；Zhang 等，2000；Nixon，1996；黃然、卓世偉，2001）。

由於 Thomas 的文獻指出 F 級飛灰的波索蘭反應需在混凝土孔隙水 pH 大於 13.2 時才能反應，故得知飛灰的波索蘭反應與混凝土孔隙水之酸鹼環境有關連性（Thomas，1999）。故其波索蘭反應須於水泥水化反應數星期的時間，才能與足夠的鹼性氫氧化鈣 CH 生成而開始反應，所以飛灰摻料替代水泥加入混凝土後，可延後水化反應，故可降低水化熱而產生改善熱裂縫產生的良好效果。1993 年 Mehta 曾探討 F 級飛灰摻料替代水泥用量的高低，研究指出飛灰對混凝土氯離子

滲透率有正面效益之影響（Mehta，1993）。 Thomas 亦針對不同的養護齡期而進行研究，得知混凝土添加飛灰後，於 28 天或早期齡期時對氯離子擴散行為無多大改善，但於長達 91 天以後的期齡期卻可明顯改善其擴散行為（Thomas，1999）。另有研究得知加入適量飛灰摻料可抑制混凝土抵抗鹼骨材反應形成的膨脹裂縫，減少氯離子擴散行為 （Mehta，1993）。混凝土耐久性質雖然對飛灰摻入水泥用量有正面助益，但替代率過高反而導致力學強度的衰退，因此均會考量最適的替代率（黃然、卓世偉，2001）。

依據上述的論點，本研究試驗計劃中所採用台電公司之產品，係屬含鈣質較少的 Type-F 級飛灰；「飛灰混凝土」係為使用前述飛灰作為礦物摻料的普通混凝土，其摻用方式分為取代部分水泥、取代部分細粒料或同時取代水泥與細粒料等三種。

Davis 於 1950 年曾研究 F 級飛灰替代水泥量多寡，探討耐久性的關連性，結果指出當替代水泥量 10~30% 時，混凝土氯離子的滲透率可降為 3×10^{-11} 或 1×10^{-11} cm/sec（黃然、卓世偉，2001）。Thomas 研究在齡期上指出，摻入飛灰的混凝土在 28 天或早期材齡前的氯離子擴散改善不大，但在材齡 91 天之後的長期材齡卻有顯著的改善（Thomas，1999）。。此種力學強度之變化，因與波索蘭反應較慢具關連性。1960 和 1970 年的研究也探討 F 級飛灰，因含大量活性鋁故於混凝土中，較高鈣飛灰更能抗硫化物入侵（Mehta，1993）。

飛灰之應用限制，由「公共工程飛灰混凝土參考手冊」中飛灰替代水泥量之參考值如表 2-4，其替代率介於 10%~25%，最高上限大部分為 25%，如在海邊或地下工程所使用之混凝土；另其成份因為含有碳(吸溼)及硫(有害)等物質，對強度與人體健康等有影響的限制。一般運用於(1)土木與水利工程─大壩、道路、隧道、港灣與下水道等工程；(2)建築工程─現場澆置之建築工程的柱、梁、版、基礎及筏基等項目。而日本土木學會對自充填混凝土亦建議飛灰替代量不可大於 30% ，日本建築學會則建議不可大於 20% （日本土木學會，1998）。

表 2-4　混凝土中飛灰替代水泥之參考值（公共工程委員會，2001）

種　　類	允許飛灰替代水泥之上限
1.混凝土(不屬(2)～(7)項者)	20%
2.預力混凝土	10%
3.版混凝土	15%
4.海邊及地下工程混凝土	25%
5.巨積混凝土	25%
6.水密性混凝土	20%
7.鋪面混凝土	20%

參、混凝土及水泥砂漿差異性與摻料替代量相關論文

一般公共工程及建築工程之混凝土用量佔建造經費上重要的比例，爐石及飛灰等廢棄物料目前使用於建築材料，主要為替代混凝土結構中的水泥材料約 20~30%，因水泥在混凝土材料上有力學強度及用量的限制，故本論文定位在建築水泥砂漿的探討，茲將混凝土與水泥砂漿兩者之用途、力學強度與水泥用量等差異說明如表 2-5；另於表 2-6 整理歷年來學術論文有關爐石及飛灰等摻料替代量之研究臚列於后，以確立以往研究尚無 60%~80%之替代水泥用量，藉此比對混凝土水泥替代量超過 40%以上，是否於水泥砂漿亦有強度衰退的現象，並於減碳效益及經費節省上具可行性的評估。

表 2-5　結構混凝土與建築水泥砂漿之差異分析表

項　目	結構混凝土	建築水泥砂漿
用　途	結構體承載強度,如橋台、梁、柱及樓板	無載重作用,如粉刷墙面、黏著磁磚、防水層
結構體約佔比例	80%	20%
力學強度	140~350 kg/cm^2	──
水泥用量（每 m^3）	350 kg 以內 (約 7~8 包)以內	500 kg (約 9~10 包)

資料來源（張又升,2009）

混凝土中以爐石適量替代部分水泥後，因漿體微觀結構較緻密，增加了抵抗有害物質侵蝕、鹼骨材反應及鋼筋之銹蝕能力，使混凝土之耐久性提高。Hogan 研究結論於混凝土第Ⅰ型水泥加入 50 %替代率的（Al_2O_3的含量約 12% ）爐石摻料，與使用第Ⅴ型水泥的抗硫酸鹽侵蝕能力一樣。再以相同替代率的爐石摻入第 II 型水泥，則得到更佳的效果，係因使用爐石替代部分水泥，使混凝土中的 C_3S 及 C_3A 含量降低，又因化學反應致使 C-(S/A)-H 矽（鋁）酸鈣膠體數量增多。添加爐石後使混凝土漿體內之毛細孔隙直徑變小，微觀結構較緻密，故可增加其水密性，有效減少鹼骨材所引起的膨脹反應及抗氯離子之入侵，並可減少鋼筋銹蝕（Hogan，1981）。另爐石取代部分水泥的混凝土中，漿體內的 Ca^{2+}、Al^{3+}、$AlOH^{2+}$、Si^{4+}之成份，其總量比純水泥漿來得多且濃度較高，使漿體內氯離子有較低的擴散能力,進而約束氯離子移動,以增強其耐久性質（黃然、卓世偉,2001）。

此外抵抗硫酸鹽侵蝕係對耐久性質有良好的改善,因於水泥中的鋁化合物含量越低，其對抗硫酸鹽侵蝕能力便越高。研究文獻中亦提及以爐石替代部分水泥之混凝土對養護方式與溫度極為敏感（Young，1981）。除此之外，爐石對混凝土耐久性具正面的影響，因爐石的波索蘭效應導致氫氧化鈣濃度降低，故僅需少許的二氧化碳可以使氫氧化鈣形成碳酸鈣。Hooton 亦探討爐石替代率於 50% 以下時，中性化程度與未替代者相較，並無明顯增加中性化即碳化之情形（Hooton，

1990）。

表 2-6　爐石與飛灰替代水泥用量相關論文一覽表

作者 年代	論　文　題　目	混凝土最佳替代率		水泥砂漿最佳替代率	
		爐石	飛灰	爐石	飛灰
蔣國鈺 1999	混凝土質流行為與耐久性之關係		20%		
劉裕意 2001	添加波索蘭材料對於混凝土耐久性影響之探討	40%	20%		
黃柏毅 2002	以加速氯離子穿透試驗探討不同爐石使用量之混凝土耐久性	40%			
鄭永傑 2002	波索蘭材料及細粒料對水泥漿體熱傳導係數之影響			20%	10%
歐書豪 2003	礦物摻料及蒸氣養護對不同配比水泥砂漿熱傳導性質之影響			40%	20%

第二節　波索蘭效應

當水泥的水化作用進行時，水化生成物CH將與飛灰中的SiO_2或Al_2O_3等及爐石中的SO_3直接結合(Direct Combination Reaction)產生矽酸鈣(C-S-H)與鋁酸鈣(C-A-H)等水化合物的反應稱為「波索蘭效應」。

如圖 2-2 所示水泥與水可產生ＣＳＨ等粘結的膠結體物質，及ＣＨ與ＡＦＭ可填充孔隙的晶體物質；而水化生成物 CH 與飛灰中的 SiO_2 或 Al_2O_3 經過波索蘭效應，可將ＣＨ還原成較多的ＣＳＨ粘結體，此即提供水泥砂漿強度的來源（黃然、卓世偉，2001）。

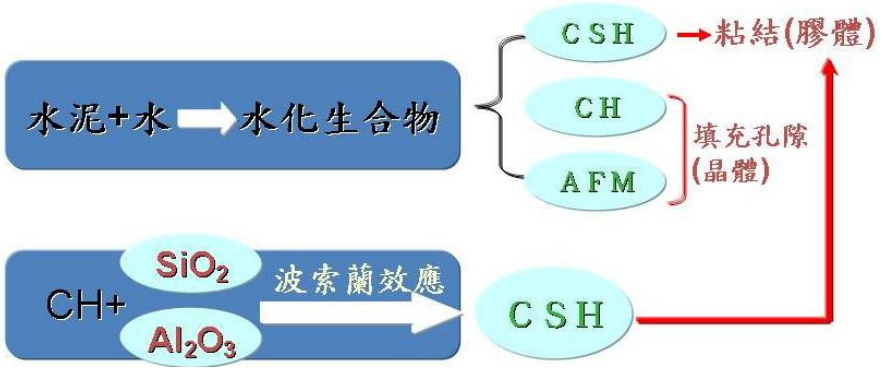


圖 2-2　水泥與波索蘭效應示意圖

其基本化學反應式如下：

$3CH+2SO_3 \rightarrow C_3S_2H_3$(膠體) ..... 式(2-1)

$3CH+3AL_3O_3 \rightarrow C_3A_3H_3$ (晶體) ..... 式(2-2)

由於波索蘭效應可有效填充孔隙、消耗氫氧化鈉以抵抗硫化物侵蝕與鹼性骨材反應，減少微裂紋發生並使有害物不易侵入水泥砂漿，因而提高水泥砂漿的強度與耐久性，故爐石與飛灰皆為優質環保的材料，並可發展成公共工程中所應用的再生綠建材（公共工程委員會，2001），經整理其影響水泥砂漿的因素如表 2-5 所示：

表 2-7　爐石與飛灰經波索蘭效應之影響因素（公共工程委員會，2001）

	爐石與飛灰經波索蘭效應
影響因素	凝結時間延長 早期強度發展較慢，晚期強度較快 水化熱較水泥低 透水性較水泥低 抗化學侵蝕性（抗硫鹽侵蝕及抗鹼骨材反應尤佳） 黏稠度提升，增加工作度

第三節　氯離子傳輸行為與孔隙結構

壹、不同溫度之抗氯離子穿透力與孔隙結構關係

水泥砂漿進行加速氯離子傳輸試驗(ACMT)、自然滲透的浸漬試驗(Ponding test)與壓汞孔隙試驗(MIP)等三種實驗，探討水泥質材料貯存於不同環境溫度下其氯離子傳輸性質與孔隙結構之關係。ACMT 試驗結果有二項：（一）貯存於 25℃的氯離子穿透時間比經劣化組溫度 50℃與 75℃高出 1-5 倍，（二）穩態與非穩態傳輸係數經劣化組溫度 50℃與 75℃皆比貯存於 25℃高出 1-5 倍;MIP 試驗結果得知水銀灌入量與氯離子傳輸係數及氯離子擴散係數皆有良好對應關係；故水泥質材料經溫度劣化後，其毛細孔隙與孔隙的連通性為氯離子傳輸行為的重要因素（李玉生等，2009）。

貳、波特蘭(OPC)水泥砂漿添加礦物對強度和孔隙度的影響

藉由 MIP 試驗研究於飛灰、高爐石、含燐爐石、石灰岩及灰泥等五種材料進行養護期 7、28 及 90 天測定，試驗結果有二項：（一）添加飛灰、爐石類之試體孔隙度明顯增加，但孔隙體積於所有試體發現幾乎相同，且孔隙度

增加則導致強度下降；（二） OPC 水泥砂漿強度的促進，亦可觀測石灰岩及灰泥類試體中獲得結果；（三）於飛灰和高爐石類中，7 天早期強度以 2000 nm 孔徑最受影響，而 28 及 90 天齡期強度分別以 1000 及 500 nm 孔徑最受影響；（四）於所有孔隙體積中，以 90 天晚期 200 nm 孔徑的試體抗壓強度最佳，顯示添加礦物摻料之晚期強度較佳；（五）OPC 添加石灰岩及灰泥對孔隙度及平均孔徑似乎無太大效果（Kumar and Bhattacharjee，2003）。

參、摻料混凝土養護對抗壓強度、抗氯離子滲透力和孔隙度的影響

針對爐石、飛灰及矽灰等三種混凝土的特性，研究四種不同養護狀況所進行的研究調查，除了高份量飛灰混凝土為 0.35，所有試體的水膠比皆為 0.50。這些樣本分為受到：（一）一般濕治、（二）脫模後於室溫養護、（三）經過 2 天的濕治後於室溫養護、（四）於 38℃ 和 65%的相對濕度(RH)下養護等四種養護狀況。受限於不同齡期的抗壓強度和抗氯離子滲透力的測量，需符合 ASTM C1202 規範，在不同齡期至 180 天內實施壓汞量測孔隙(MIP)試驗，用以驗證 28 天齡期的水泥砂漿樣本並進行比對。試驗結果有三項：（一）在濕治一段期間後，會導致混凝土縮減較低強度、高孔隙率和更多滲透力。（二）含飛灰或爐石混凝土相對於控制組，對不充份的養護會出現更多不穩定的強度，這些試體中增加越多的飛灰或爐石，則更增加不穩定的強度。（三）摻入爐石或矽灰或高份量飛灰在混凝土中，則可提高抗氯離子滲透力和產生非常低滲透率的混凝土。（Climent 等，2002）。

第四節　減碳效益

依據 2005 年成大建研所研究室所述，一般（卜特蘭）水泥每噸的 CO_2 排放量為 445.17 kg-CO_2，而高爐水泥每噸之 CO_2 排放量則為 280.90 kg-CO_2，以表 2-8 及圖 2-3 長條圖顯示使用高爐水泥可降低約 37%的排放量比例（林憲德，2007）。

表 2-8　建築水泥之 CO_2 排放量表（林憲德，2007）

水泥名稱	單位	CO_2 排放量(kg-eCO_2)
一般水泥(卜特蘭)	公噸	445.17
高爐水泥	公噸	280.90

圖 2-3　一般水泥與高爐水泥 CO_2 排放率長條比較圖

綠建築 CO_2 減量指標，係依據內政部建研所 2007 年更新版之「綠建築解說與評估手冊」,再生建材使用率(Xi)、CO_2 排放量影響率(Zi)及優待倍數(Yi）相對關係如表 2 所示，非金屬再生建材使用率(R)關係式如下定義：

$$R = Xi \times Yi \times Zi \quad \text{----------式(2-3)}$$

$$Zi = CCR \times 0.12 \quad \text{----------式(2-4)}$$

$$CCR = \text{高爐水泥替代量}/0.4(\text{爐石替代率基準值}) \quad \text{----------式(2-5)}$$

故高爐水泥之替代率（CCR）越高，則越可降低 CO_2 排放量影響率（Zi），及提高非金屬再生建材使用率(R)，亦即降低本項綠建築指標的減量設計值(CCO_2)≦ 0.82 的判斷值，進而提高減碳效益。

表 2-9　非金屬再生建材(高爐水泥及高性質混凝土)係數對應表

	高爐水泥	高性質混凝土
再生建材使用率	X_1	X_2
CO_2 排放量影響率 Zi	CCR x 0.12	CSER x 0.12
優待倍數 Yi	3.0	

資料來源（林憲德，2007）

由上表的判斷可知高爐水泥之替代率（X_1）愈高，愈可降低 CO_2 減量指標中 CCO_2 的數值，即相對提高節能減碳的效益；行政院公共工程委員會「節能減碳論壇」中亦提及第三代高速公路之「國道六號南投路段工程」，一般混凝土在規範 CNS 3654 允許範圍內摻用爐石粉替代部分水泥(平均約 25%)，可減少水泥用量約 19.2 萬噸，即降低 CO_2 排放量約 17.1 萬噸，係為國內之應用首例。

目前推估排放量的耗能種類中，主要以石化燃料的燃燒及電力使用兩大類，我國能源局於 98 年公布最新柴油能源排放係數為 2.61 CO_2/ml，而建材生產使用 1 度電約排放 0.623 kg-CO_2，經濟部能委會「能源查核管理輔導計畫」已說明水泥、爐石與飛灰的排放量，依序為 409.57、98.3 及 0 Kg-CO_2，另於 2010 年高雄應用科技大學土木系依 CO_2 的發生來源，提出爐石經回收再利用，以年產 100 萬噸來看，可降低其排放量為 79 萬噸，效益非常顯著，詳表 2-10 所示。

表 2-10　爐石回收再利用效益統計表（陳振川，2009）

CO_2 發生源	卜特蘭水泥	水淬爐石粉	差額
石灰石分解	0.480	-	0.480
燃煤燃燒	0.280	0.035	0.245
電力消耗相當 CO_2 產出	0.200	0.055	0.145
合計	0.880	0.090	0.790

行政院持續推動「國家節能減碳總計畫（草案）」，統籌全國 35 項標竿型計劃，並由各部會推動「各類節能減碳工法、材料之研究」與「制訂節能減碳規劃設計參考原則」等重點項目，其中交通部國道新建工程局已完成「高快速公路網」節能減碳規劃設計參考原則（草案），內容指出採用綠色材料，如透過添加波索蘭材料（爐石粉、飛灰）等再利用資源材料之綠色混凝土，減少工程使用水泥量，並降低生產水泥所耗費之能源及 CO_2 的產出，以達節能減碳及節約能源之效。

由相關研究指出目前常用五種再生材料，包含水淬爐石粉、飛灰等之產量與節碳效能藉文獻回顧整理分析，結果指出水淬爐石粉因產量多、可大量取代水泥，最具節能減碳效益；其中水泥、水淬爐石粉及飛灰等原料碳排放量，分別為 818.84、60.92 及 4.82 kg-CO_2；其於 CO_2 的評估納入直接與周邊耗能，原物料製造、儲存及國內車輛運輸，但化學作用、土地逸散、國外運輸、使用及拆除階段等均不納入，最終以國內每年再生原料生產量與再利用率(不包含國外進口)推估公共工程使用再生材料約可減少 349,050 萬 kg-CO_2(減碳)，相當於省下約 13,374 萬 L 柴油(節能)（林志忠，2010）。

表 2-11　營建工程再生材料及能源計畫碳排量一覽表（林志忠，2010）

	原料處理與產品製程	產品運輸	單位碳排量 ($kg\text{-}CO_2$)	能源計畫碳排量 ($kg\text{-}CO_2$)
水泥	814	4.84	**818.84**	**409.57**
水淬爐石粉	57.4	3.52	**60.92**	**98.3**
飛灰	__	4.82	**4.82**	**0**

第五節　小結

經由混凝土及水泥砂漿替代率相關研究統計與差異性分析，顯示水泥砂漿的耐久性較被人忽略，且在室內外裝修方面，水泥砂漿為建築物第一線防水功用並直接與外在大氣環境接觸，故本研究對水泥砂漿耐久性質有採討之必要性。除此之外亦探討飛灰與爐石的適量替代水泥下，於各種溫度劣化環境下抗氯離子能力及孔隙結構改變的影響；期能在耐久性提升下，減少建築物室內外裝修的維護與費用，達到節能減碳與經濟性之目的。

第三章　試驗計畫

本章內容包含抗拉、抗壓、孔隙結構量測、加速氯離子擴散、電位滴定及鹽霧等六種試驗方法與相關設備儀器之簡介，並經由整理替代率文獻，少有 60%以上替代水泥砂漿的研究，及夏季建築物表面樓板溫度可達 75℃的結果，推導出試驗變數與配比設計，據以製作各類型試體供各試驗使用。

第一節　試驗方法與儀器

壹、抗壓試驗

本試驗依據 CNS 1010 的規範標準，須製作出 5x5x5 cm 水泥砂漿試體若干組(詳圖 3-1 及 3-2)經 56 天的養護後，以萬能抗壓機於 20~80 秒間破壞劣化正立方體試體而得抗壓強度，相關試驗設備及鋼模如圖 3-3 及 3-4。

圖 3-1　正立方體水泥砂漿試體

圖 3-2　正立方體水泥漿體經抗壓試驗後劣化情形

圖 3-3　正立方體鋼模

圖 3-4　萬能抗壓試驗機

貳、抗拉試驗

本試驗係依據規範 CSN-1011 的要求，須製作出 8 字型水泥砂漿試體若干組，經 56 天齡期的養護後，以 275±10 kg/分鐘的速度進行單軸向拉力破壞，藉此得到抗拉強度數據，相關設備及試體如圖 3-5 至圖 3-8 所示。

圖 3-5　8 字形水泥砂漿試體銅模

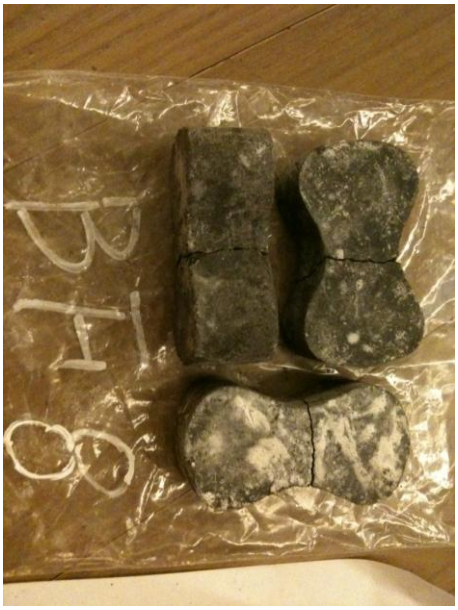


圖 3-6　8 字形試體經抗壓後劣化情形

圖 3-7　抗拉試驗機

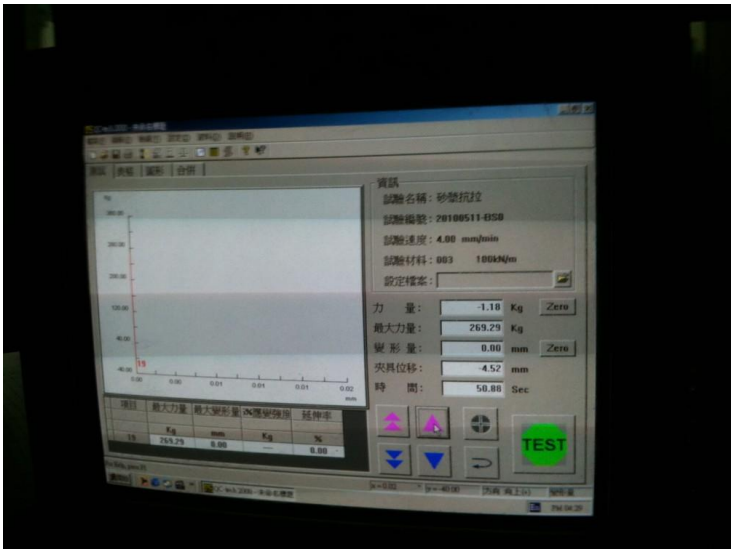


圖 3-8　抗拉試驗數據輸出端

參、壓汞孔隙量測試驗（MIP）

本項試驗使用內政部建築研究所之 Autopore 9500 壓汞孔隙儀進行。Autopore 9500 可量測孔隙 0.003~375 μm 的孔徑範圍。儀器具有 6 個樣品分析埠，包括 2 個高壓埠、4 個低壓埠、1 個氮氣鋼瓶（99.9% ，5 m^3）、6 支樣品管及 1 個調壓表。各分析埠可同時進行材料孔隙結構變化，與孔隙分佈的分析。分析方式則利用不同的壓力施加汞進入混凝土孔隙內部。以 Washburn Equation 獲得各水泥砂漿內部在各孔隙尺寸下分佈狀況，詳下列公式：

$$d_p = [-4 * \sigma_{Hg} * \cos 4] / (p * k) \quad \text{式(3-1)}$$

式中

d_p ：孔隙尺寸（μm）

σ_{Hg}：汞表面張力（dynes/cm）

θ：汞跟漿體表面之接觸角

p：壓力（psi）

k：轉換常數（10^{-4}cm/μm × 68947 psi/dynes×cm^2）

故低壓埠功能可由汞壓力 0~50 psi 量測孔隙尺寸 375~4 μm 的結構變化及分佈情形，高壓埠功能則由大氣壓力至 60000 psi 量測孔隙尺寸 10~ 0.01 μm 的結構變化及分佈情形。相關設備及試體如圖 3-9 至圖 3-12 所示。

圖 3-9　壓汞孔隙量測小圓柱試體

圖 3-10　壓汞孔隙(MIP)試體及精密測重儀

圖 3-11　Autopore 9500 壓汞孔隙儀

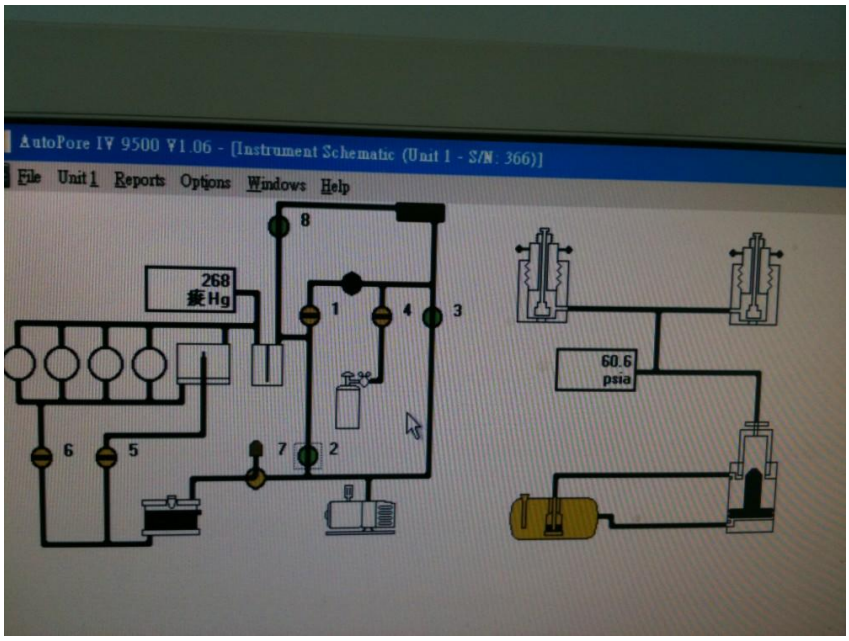


圖 3-12　壓汞孔隙(MIP)試驗操作系統圖

肆、加速氯離子擴散試驗(ACMT)

本試驗係依據 ASTM C1202-97 及 AASHTO T277-96，修改外加電場評估氯離子耐久性試驗(RCPT)，因容易產生誤差值、熱焦耳效應及氯離子濃度不易取得等條件下，由國立海洋大學楊仲家教授所創立的試驗(Accelerated Chloride Migration Test；ACMT)；取樣由陰極（NACL）溶液槽滲透至陽極（NAOH）溶液槽的溶液，透過硝酸銀電位滴定儀來量測氯離子濃度，以求得穩態階段之濃度，其與時間呈線性迴歸的關係，以求得氯離子的穿透速率(K)，進而判斷水泥砂漿的耐久性，相關試驗步驟如下：

一、將 ϕ10 x 20 cm 摻料水泥砂漿圓柱試體，養護 56 天齡期後,以水刀切割成 3 cm 厚之環片（如圖 3-13），再經 28 天烘箱 50℃及 75℃之劣化 (詳圖 3-14)，於圓形側邊表面塗封環氧樹脂後置入水中 24 小時，以使環片呈真空飽和(SSD)狀態。

圖 3-13　摻料水泥砂漿圓柱及試體水刀切割機

圖 3-14　3 cm 試體環片置入烘箱劣化

二、將環片自養護槽取出待乾，圓形側邊環繞以止水帶及防水膠帶，再置於壓克力槽座中，其接觸處務必施打矽利康，以確保於溶液槽中不致滲漏，並於兩邊槽中加入 20 號銅網，以利電流傳導之作用，如圖 3-15 及 3-16 所示。

圖 3-15　3 cm 環片加止水帶

圖 3-16　環片置入導電銅網

三、將 NACL 及 NAOH 攪拌均勻的兩種溶液分別加入陰極槽及陽極槽內，並分別以 24 V 加速電流之紅線及黑線接上陽極及陰極槽中的銅網通電，詳圖 3-17 及 3-18。

圖 3-17　電流輸入端儀器

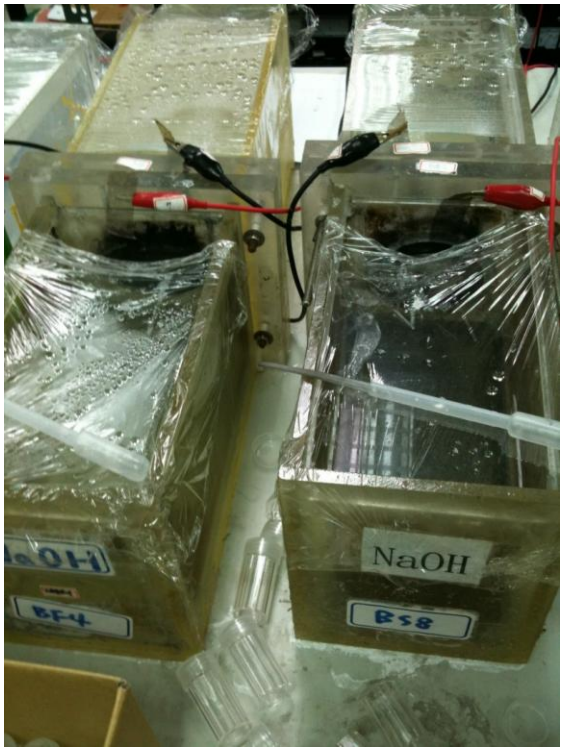


圖 3-18　陰極(黑線)、陽極(紅線)槽之通電情形

伍、電位滴定試驗

本試驗主要為量測氯離子濃度，摻料環片試體經前述 ACMT 試驗步驟後，於通電 7 至 10 天內，約 12~24 小時連續取樣至約 10 cc 的加蓋小瓶內，其上標註取樣時間、日期及試體編號等，以利滴定試驗的紀錄；參考 AASHTO T260-97 規範中所規定，將 ACMT 的次氯酸根還原成氯離子來作硝酸銀的電位滴定量測。本研究採用 Metrohm 702SM 之滴定儀，其量測精度可達 10 ppm，並由電腦輸出端可記錄數據，量測過程觀察氯離子的氧化電位，當其突然大幅變化時，則視為滴定終點(equivalencepoint，EP)，需注意的是硝酸銀易受光線干擾，故進行量測時需以 0.1 N 標準氯化鈉溶液再次進行標定，EP 值即為正確，最後經計算得知氯離子濃度(mole/L)，相關設備及取樣溶液詳圖 3-19 及 3-20。

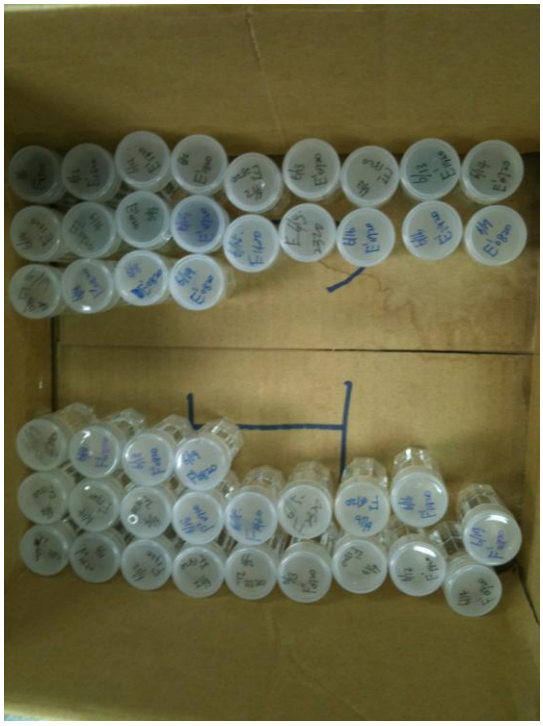


圖 3-19　ACMT 取樣溶液

圖 3-20　電位滴定儀設備

陸、鹽水噴霧試驗

本試驗係依據 ASTM-B117-95 之規範，為模擬沿海環境的建築水泥砂漿是否會因鹽份導致腐蝕，所進行的人工劣化試驗；以 9 組 5x5x5 cm 正立方體試體置入 GT-700 型鹽水噴霧實驗機（詳圖 3-21 及 3-22），主要利用氧濃差電位腐蝕原理，在水滴接近材料時，較易與溶解於水中的氧氣氧根中的氧原子作用而消耗氧氣，且吸附來自空氣中較多的氧，以彌補此消耗的氧氣水滴，如此造成氧氣濃度分佈差異，則更加刺激電子的產生造成持續腐蝕現象；據相關研究於室溫時，空氣飽和水所含 NACL 濃度為影響腐蝕速率之因素（劉茂成，2004）。

圖 3-21　鹽水噴霧實驗機

圖 3-22　5x5x5 cm 正立方試體置入鹽水噴霧機劣化情形

第二節　試驗變數與配比設計

本研究試驗操作方式，係為探討爐石與飛灰摻料建築水泥砂漿的適量替代率，且考量達到力學強度及抗氯離子之耐久性質，以抗壓、抗拉、壓汞孔隙量測(MIP)及氯離子傳輸(ACMT)等試驗方法，將一般常用 0.45 的水膠比，與中鋼資源股份有限公司提供細度 4000（cm^2/g）之爐石，及台灣電力公司所生產 Type-F 的飛灰，材料樣本如圖 3-23 至 3-26，因以往研究尚無 60%~80%之水泥替代量，藉此比對水泥砂漿中水泥替代量超過 40%以上，提升水泥用量時是否更具強度或耐久性的效果，故本研究藉由 0%~80%每增加 20%的 5 種替代率，作為本實驗之變數，並期望於減碳效益及經費節省的評估上更具可行性。

表 3-1　本研究摻料漿體每立方水泥砂漿材料配比設計(控制組)

試體	水膠比	替代率	水泥(kg)	爐石(kg)	飛灰(kg)	水(kg)	砂(kg)	總單位重
編號	W/B	WS/WC	C	S	F	W		(kg)
B0	0.45	0%	510	-	-	229	1530	2269
S2		20%	422	84	-	228	1530	2263
S4		40%	359	144	-	226	1530	2259
S6		60%	313	188	-	225	1530	2256
S8		80%	277	222	-	225	1530	2254
F2	0.45	20%	414	-	83	223	1530	2250
F4		40%	348	-	139	219	1530	2237
F6		60%	300	-	180	216	1530	2227
F8		80%	264	-	211	214	1530	2220

本試驗設計採用台灣水泥股份有限公司之卜特蘭水泥（第Ⅰ型），及建築裝修粉刷用之台灣卓蘭溪細砂，所製作成 1：3 的水泥砂漿試體，編號分別為對照組 B0，含爐石摻料的 4 組 S2、S4、S6、S8，及含飛灰摻料之 4 組試體 F2、F4、F6、 F8 共 9 組控制組試體，配比設計如表 3-1；各組配比均製作了 5 x 5 x 5 cm 的正立方體試體、2 cm 厚的 8 字形試驗、ϕ 1 x 1 cm 的小圓柱試

體及 ϕ 10 x 20 cm 之水泥砂漿圓柱試體，以進行各項試驗。

圖 3-23　飛灰材料樣品

圖 3-24　水泥材料樣品

圖 3-25　爐石材料樣品包裝

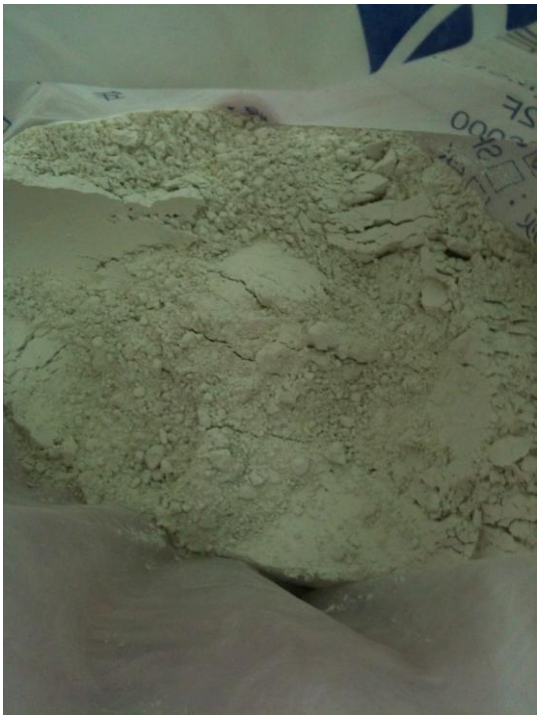


圖 3-26　爐石材料粉狀樣品

另將探討不同環境溫度下的氯離子傳輸行為及鹽份劣化下的力學行為，因台灣地區地理位置屬海島型氣候，使建築物長時間處於高溫環境，根據氣象局自 90 年代近 30 年的統計資料中，台北地區年平均有 133 天溫度達 30℃以上，台中及高雄地區亦達 163 及 150 天；又依據 Peng 與 Wu 文獻中，得知當大氣溫度由早晨的 28.2℃升高至中午 37.8℃時，量測 RC 建築物的溫度時，外牆表面之水泥砂漿可由 28.9℃升高至 54.0℃，而樓板表面水泥砂漿溫度則由 29.0℃升高至 78.2℃；故本研究以常態室溫 25℃、夏季建築物表面儲熱溫度 50℃及經外墻水泥砂漿 75℃之三種不同溫度狀況下分析比較。

本研究試體分類共有未劣化控制組、50℃劣化組、75℃劣化組及鹽霧劣化組等四大組，如 5S2 及 7F4 分別表示經 28 天烘箱 50℃溫度之爐石替代率 20%漿體劣化組及 75℃之飛灰替代率 40%漿體劣化組，而 NB0 則代表經 28 天鹽水噴霧下無替代率之劣化對照組，詳表 3-2 試體編號表。

表 3-2　本研究水泥砂漿試體分類編號表

試體分類	無替代率	爐石替代組				飛灰替代組			
	0%	20%	40%	60%	80%	20%	40%	60%	80%
未劣化控制組	B0	S2	S4	S6	S8	F2	F4	F6	5F8
50℃劣化組	5B0	5S2	5S4	5S6	5S8	5F2	5F4	5F6	5F8
75℃劣化組	7B0	7S2	7S4	7S6	7S8	7F2	7F4	7F6	7F8
鹽霧劣化組	NB0	NS2	NS4	NS6	NS8	NF2	NF4	NF6	NF8

第三節　小結

本章將就本研究六種試驗方法、試體種類、數量，以及養護期及劣化期所需時間，並將試驗規範、儀器設備及預期成果等列表整理說明如表 3-3，以利日後學界研究能快速檢核及參考。

本研究考量波索蘭材料早期強度發展不佳，因此所有試體養護齡期不考慮 28 天，僅考慮 56 天養護齡其後的性質。

表 3-3　試驗計畫與預期成果一覽表

試驗方法	試體種類	試體數量	養護期	劣化期	試驗規範	儀器	預期成果
抗壓	5x5x5 cm 正立方體	9 組@30 共 270 個試體	56 天	—	CNS 1010	萬能抗壓機	爐石及飛灰替代率符合力學性質規範
抗拉	8 字型	9 組@10 共 90 個試體	56 天	—	CNS 1011	抗拉試驗機	同上
鹽霧	5x5x5 cm 正立方體	9 組@10 共 90 個試體	56 天	28 天	ASTM-B117-95	GT-700 型鹽水噴霧實驗機	抵抗海水侵蝕後之力學強度影響
ACMT (25℃及 75℃)	10x20 cm 圓柱試體經水刀切成 3 cm 環片	9 組@6 共 54 個試體	56 天	28 天	ASTM -C1202-97 AASHTO T277-96	加速電壓(24 v)器	測量氯離子濃度擴散行為及穿透速率以求得耐久性質是否提高
滴定	10 cc 取樣溶液	9 組@10 共 90 個試體	—	7-10 天 12~24hr 取樣	AASHTO T260-97	Metrohm 702SM 滴定儀	同上
MIP	1x1 cm 小圓柱體	9 組@15 共 135 個試體	56 天	—	ASTM-B5449-00	Autopore 9500 壓汞孔隙儀	得知孔徑及孔隙度之結構是否改變以求得耐久性質

第四章 試驗結果與分析

本章將探討不同替代率的爐石與飛灰摻料漿體經 56 天（1344 小時）的養護時間進行抗壓及抗拉試驗，以得知相關力學性質強度；再將試體置於 50℃及 75℃的不同貯存環境溫度下，經 28 天（672 小時）的劣化時間，其劣化方式為 24 小時設定持續定溫環境之過程，進行加速氯離子傳輸試驗(ACMT)及孔隙結構量測(MIP)的試驗，由此探討穿透速率及孔隙結構分佈等耐久性的差異；最後得知不同替代率之 MIP 試驗結果與不同貯存環境溫度 ACMT 之關聯性。

第一節　抗壓試驗結果與分析

壹、爐石摻料漿體抗壓強度

本研究製作 5 組配比之 5x5x5 cm 爐石摻料水泥砂漿試體各 3 組，經養護 56 天齡期後於萬能抗壓強度機進行抗壓試驗，所得相關強度結果彙整如表 4-1，及抗壓強度分析詳圖 4-1。

由上得知平均抗壓強度以 S2、S4 及 S6 此三組試體皆有增強趨勢，且以 S4 為最佳強度，但 S8 之抗壓強度則急遽下降，且與無替代對照組 B0 的效益比降為 0.52，故可研判 S8 之抗壓強度不適用於摻料水泥砂漿等材料上。

表 4-1　爐石漿體抗壓強度統計表

試體編號	爐石替代率	1	2	3	平均抗壓強度 (kgf/cm^2)
B0	0%	358	362	363	**361**
S2	20%	390	391	384	**388**
S4	40%	394	397	395	**396**
S6	60%	372	376	375	**374**
S8	80%	187	184	186	**186**

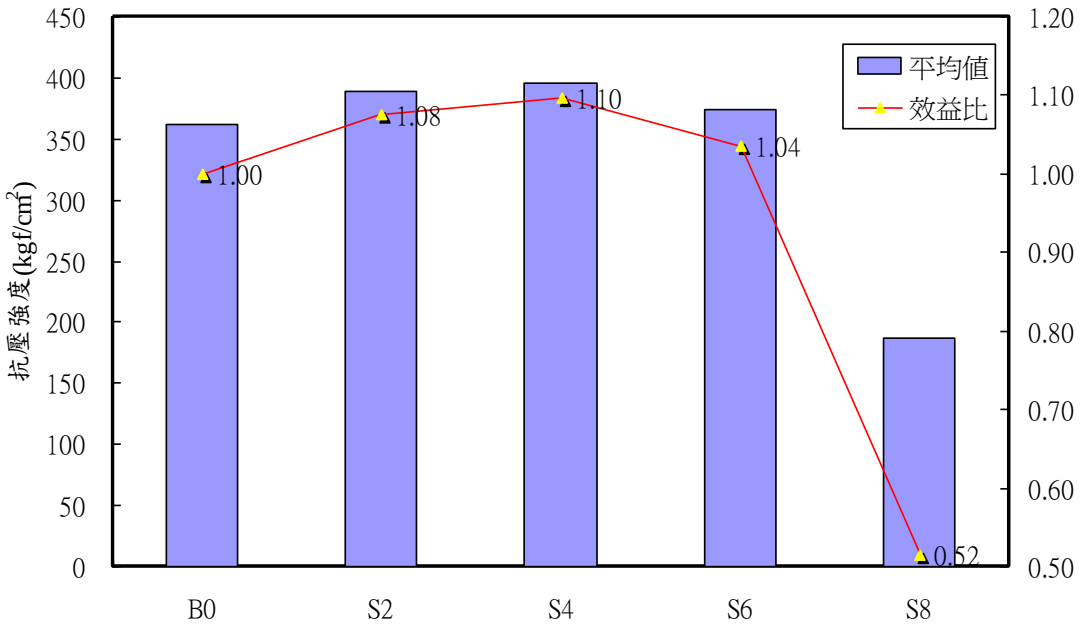


圖 4-1　爐石漿體抗壓強度與效益分析圖

貳、飛灰摻料漿體抗壓強度

本研究製作 5 組配比之 5x5x5 cm 飛灰摻料水泥砂漿試體各 3 組，經養護 56 天齡期後於萬能抗壓強度機進行抗壓試驗，所得結果彙整如表 4-2 及抗拉強度分析詳圖 4-2。

由此可知平均抗壓強度以 F2 及 F4 此二組試體皆有增強趨勢，其中以 F4 獲得最高平均強度，但自 F6 之抗壓強度則急遽下降，且與對照組 B0 的效益比降為 0.69 以下，故可研判 F6 及 F8 皆不適用於摻料水泥砂漿等材料上。

表 4-2 飛灰漿體抗壓強度統計表

試體編號	飛灰替代率	1	2	3	平均抗壓強度 (kgf/cm²)
B0	0%	358	362	363	**361**
F2	20%	379	418	347	**381**
F4	40%	408	384	391	**394**
F6	60%	285	216	249	**250**
F8	80%	169	164	228	**187**

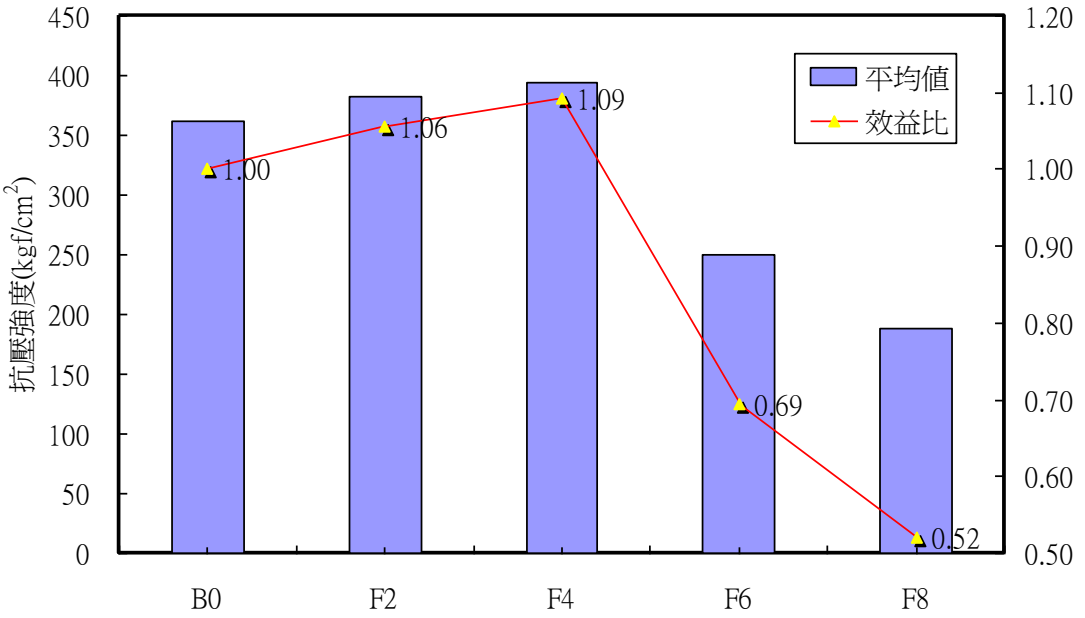


圖 4-2　飛灰漿體抗壓強度與效益分析圖

參、鹽霧試驗抗壓強度

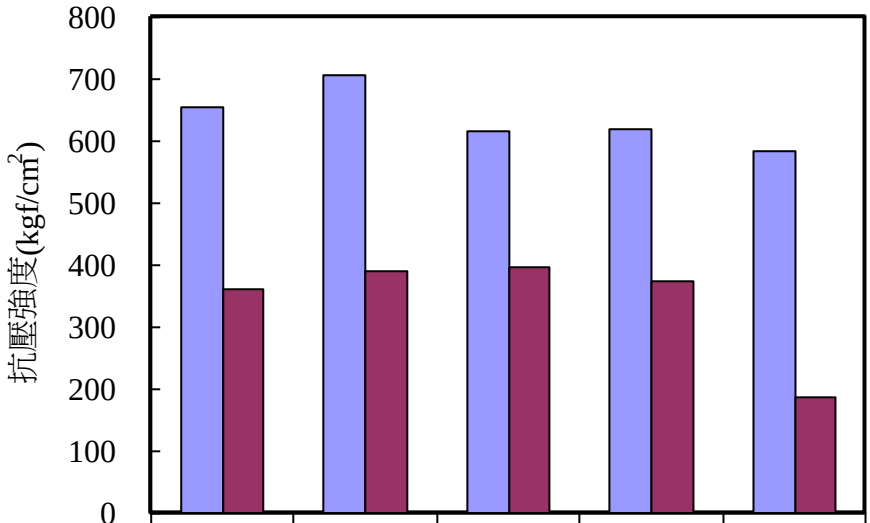
經養護 56 天齡期後之 5x5x5 cm 飛灰及爐石摻料漿體，再於鹽水噴霧實驗機進行 28 天的鹽霧試驗後，藉由萬能抗壓強度機進行抗壓試驗，所得結果彙整如表 4-3。

表 4-3　爐石及飛灰漿體抗壓強度表(鹽霧組)

試體編號	抗壓強度 (kgf/cm^2)	試體編號	抗壓強度 (kgf/cm^2)
NB0	654	NB0	654
NS2	706	NF2	666
NS4	616	NF4	394
NS6	620	NF6	488
NS8	584	NF8	418

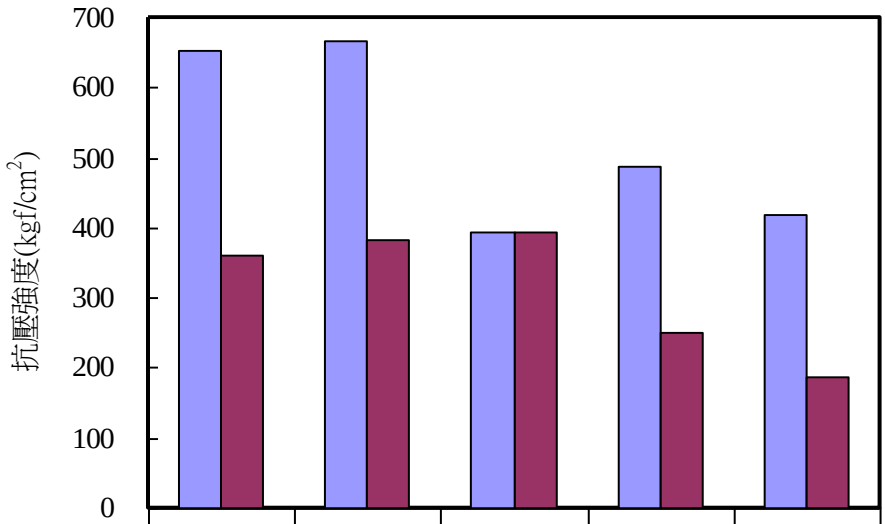
由圖 4-3 得知，經鹽水噴霧之爐石摻料漿體之抗壓強度皆大幅提升，其中 NS2 強度最佳，NS8 與對照組 S8 相對增加最多強度，表示於沿海地區可使用取代率 20%的爐石摻料，以獲得最大強度，但若考量節碳與節省經費，則取代率 80%之摻料可達極高效益。

由圖 4-4 可知經鹽水噴霧之飛灰摻料漿體的抗壓強度，除 NF4 與對照組 F4 相同外，其餘皆大幅提升且近達一倍，其中 NF2 強度最佳，顯示於沿海地區若使用飛灰摻料，大部分可獲得近達雙倍的強度。



爐石類	NB0	NS2	NS4	NS6	NS8
塩霧組	654	706	616	620	584
對照組	361	389	396	374	186

圖 4-3　爐石漿體抗壓強度比較圖



飛灰類	NB0	NF2	NF4	NF6	NF8
塩霧組	654	666	394	488	418
對照組	361	382	395	251	188

圖 4-4　飛灰漿體抗壓強度比較圖

第二節　抗拉試驗結果與分析

壹、爐石摻料漿體抗拉強度

依第三章之配比所製作 5 組水泥砂漿 8 字形試體，經養護 56 天齡期後，於抗拉強度機進行相關試驗，所得相關抗拉強度結果彙整如表 4-5 及圖 4-5，由此可知平均抗拉強度 S2、S4、S6 及 S8 各組試驗皆有增強之趨勢，並以 S4 抗拉強度為最佳，且與 B0 之無替代對照組比較增加 14%，其整體效益比介於 1.07~1.14 之間。

表 4-4　爐石漿體抗拉強度統計表

試體編號	爐石取代率	1	2	3	平均抗拉強度 (kgf/cm^2)
B0	0%	32	32	32	**32**
S2	20%	35	36	36	**36**
S4	40%	36	37	37	**37**
S6	60%	34	36	35	**35**
S8	80%	34	34	34	**34**

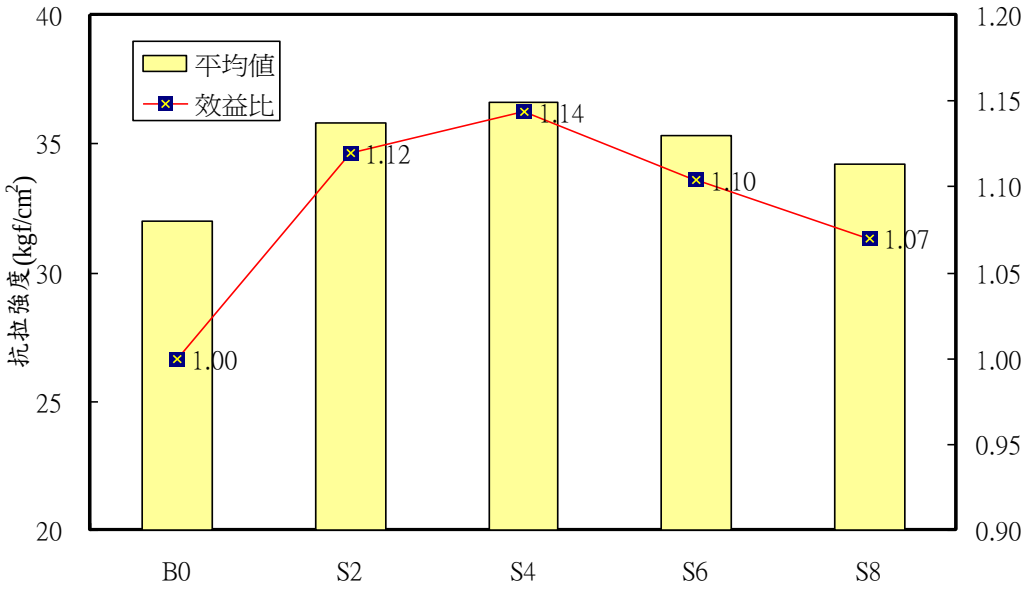


圖 4-5　爐石漿體抗拉強度與效益分析圖

貳、飛灰摻料漿體抗拉強度

依 4.1 節之配比所製作的 5 組摻料水泥砂漿 8 字形試體，經養護 90 天齡期後，進行抗拉強度試驗，所得結果及效益彙整如表 4 及圖 7，由此可知平均抗拉強度以 F2 及 F4 最佳，並以 F4 之 32.90(kgf/cm^2)獲得最佳平均強度，與對照組 BO 而言高出 9%；且自 F6 後的強度便急遽下降，顯示 F6 及 F8 皆較不適用於摻料水泥砂漿上。

表 4-5　飛灰漿體抗拉強度統計表

試體編號	飛灰替代率	1	2	3	平均抗拉強度 (kgf/cm^2)
B0	0%	32.32	26.94	31.63	**30.30**
F2	20%	24.19	36.60	32.96	**31.25**
F4	40%	34.88	29.84	33.97	**32.90**
F6	60%	28.04	29.43	21.38	**26.28**
F8	80%	22.79	22.61	24.48	**23.29**

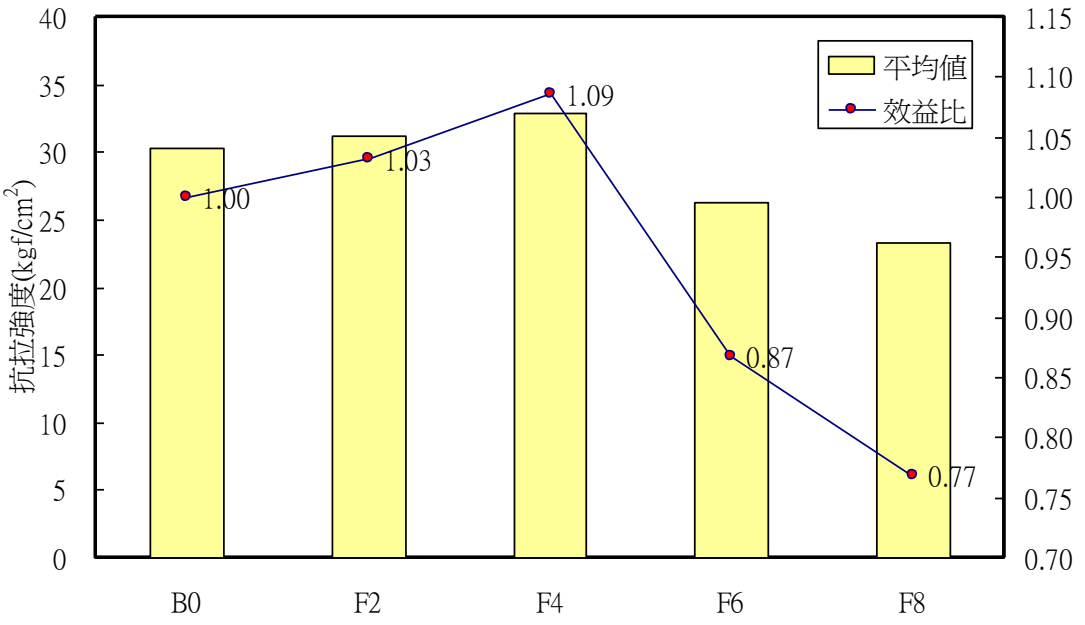


圖 4-6 飛灰漿體抗拉強度與效益分析圖

第三節　壓汞孔隙量測試驗(MIP)結果與分析

壹、水銀貫入量分析

圖4-7至圖4-11為不同替代率之飛灰摻料漿體的孔徑與累積汞貫入量的關係圖，各組的替代率明顯影響汞貫入量；結果顯示除F2組的貫入量比對照組B0減少外，其餘組別皆隨著替代率越高，則水銀累積貫入量亦越高，亦即得知F2試體孔隙度最小，而其餘試體隨著取代量越高，其孔隙度隨之逐漸增大（吳文貴，2006）。

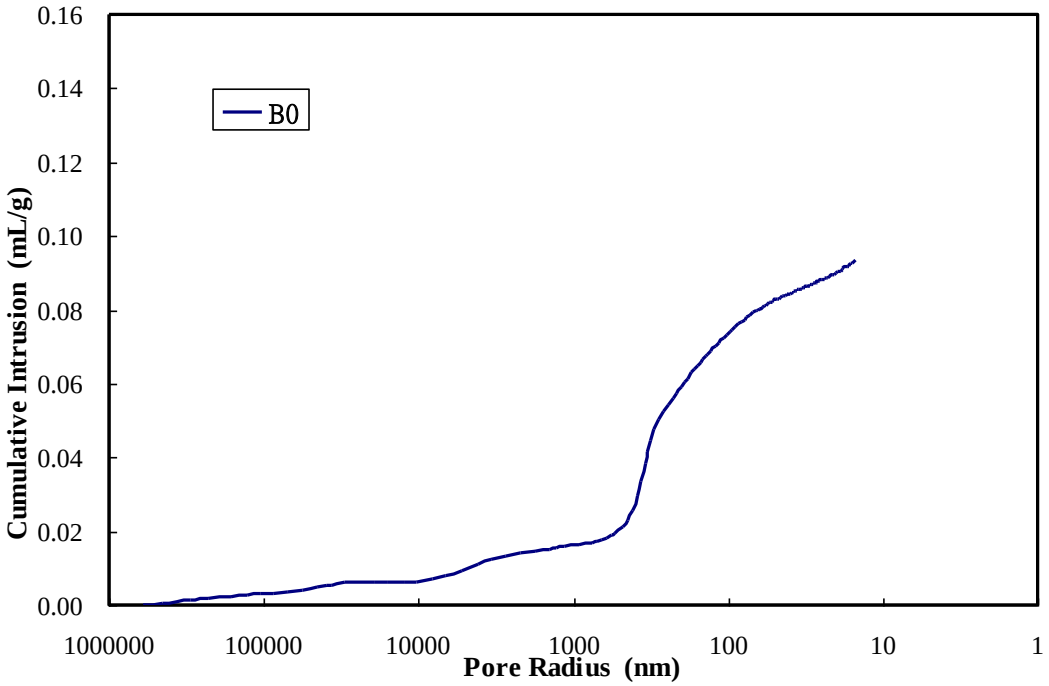


圖 4-7 孔徑與累積汞灌入量關係圖(B0)

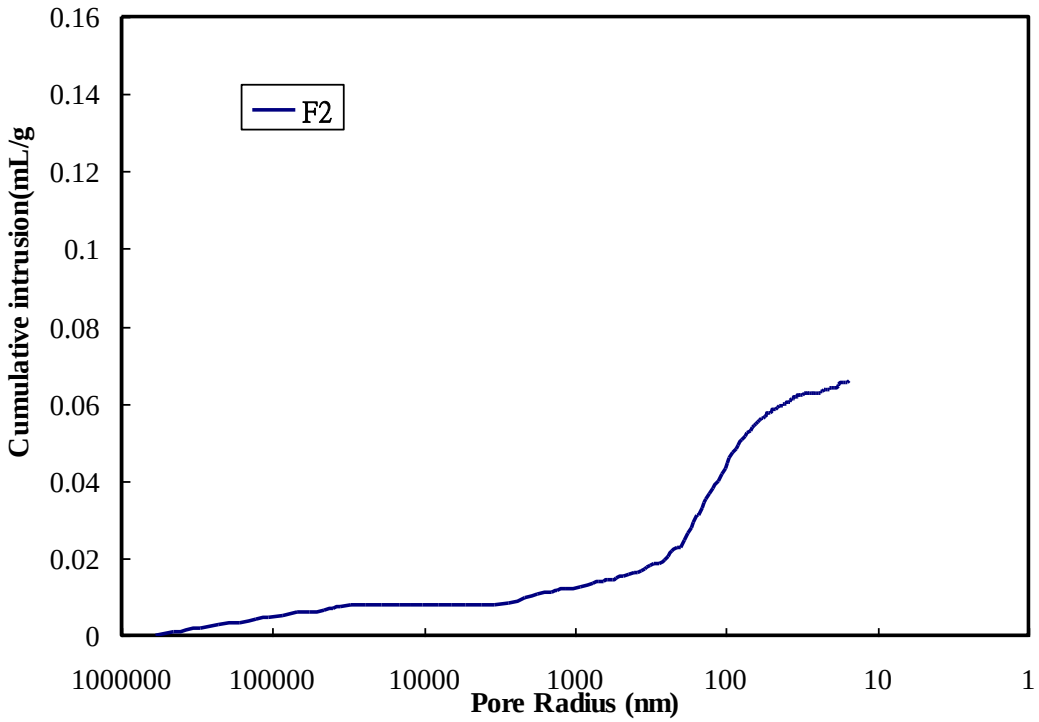


圖 4-8　孔徑與累積汞灌入量關係圖(F2)

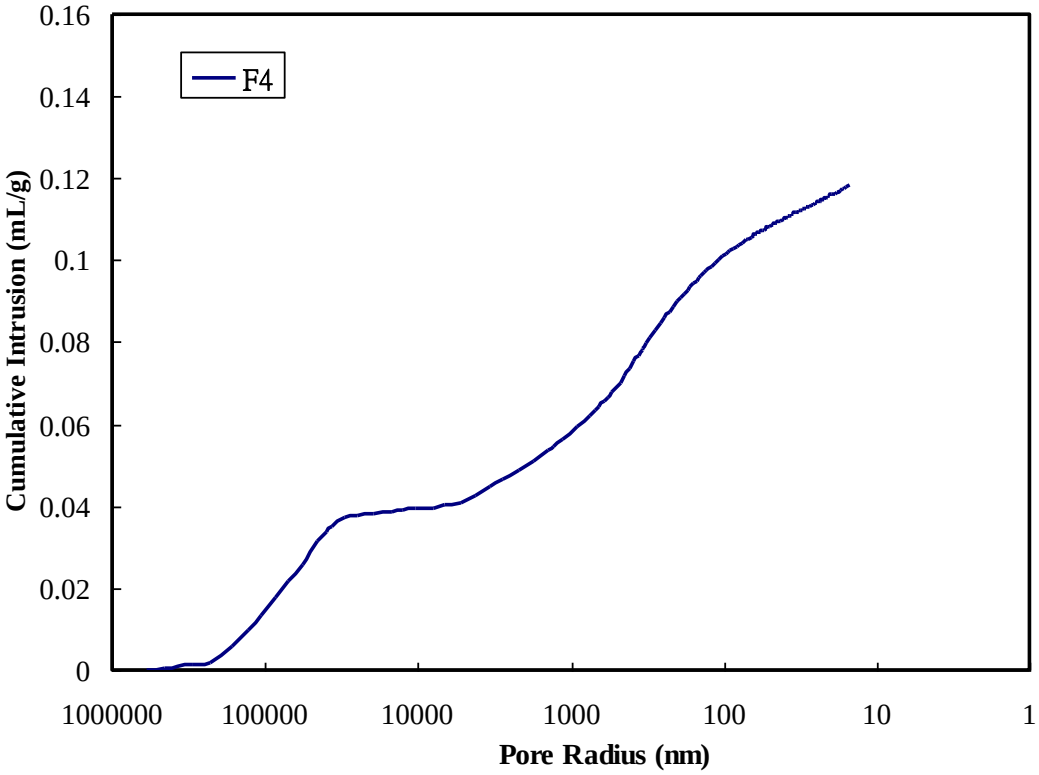


圖 4-9　孔徑與累積汞灌入量關係圖(F4)

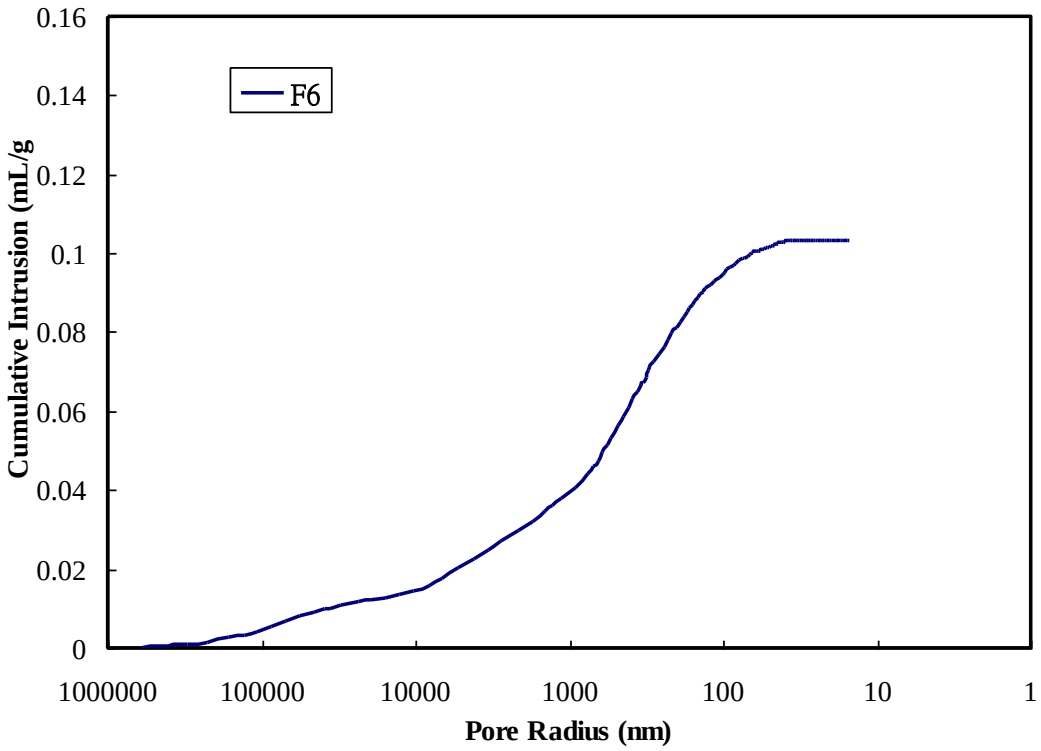


圖 4-10　孔徑與累積汞灌入量關係圖(F6)

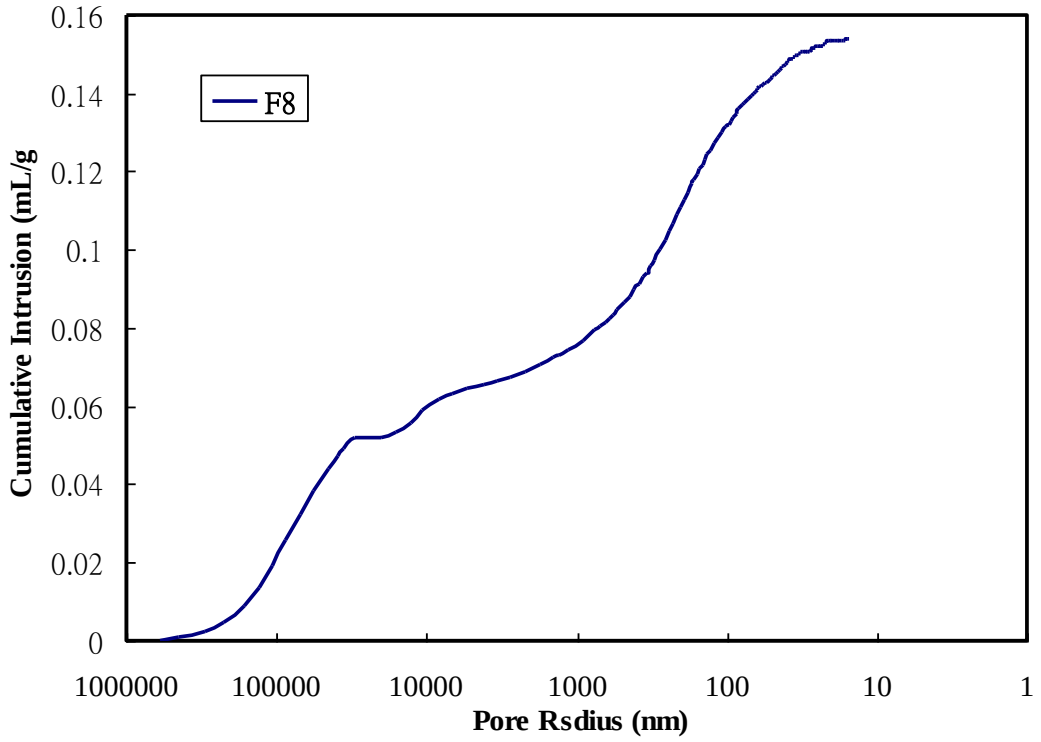


圖 4-11　孔徑與累積汞灌入量關係圖(F8)

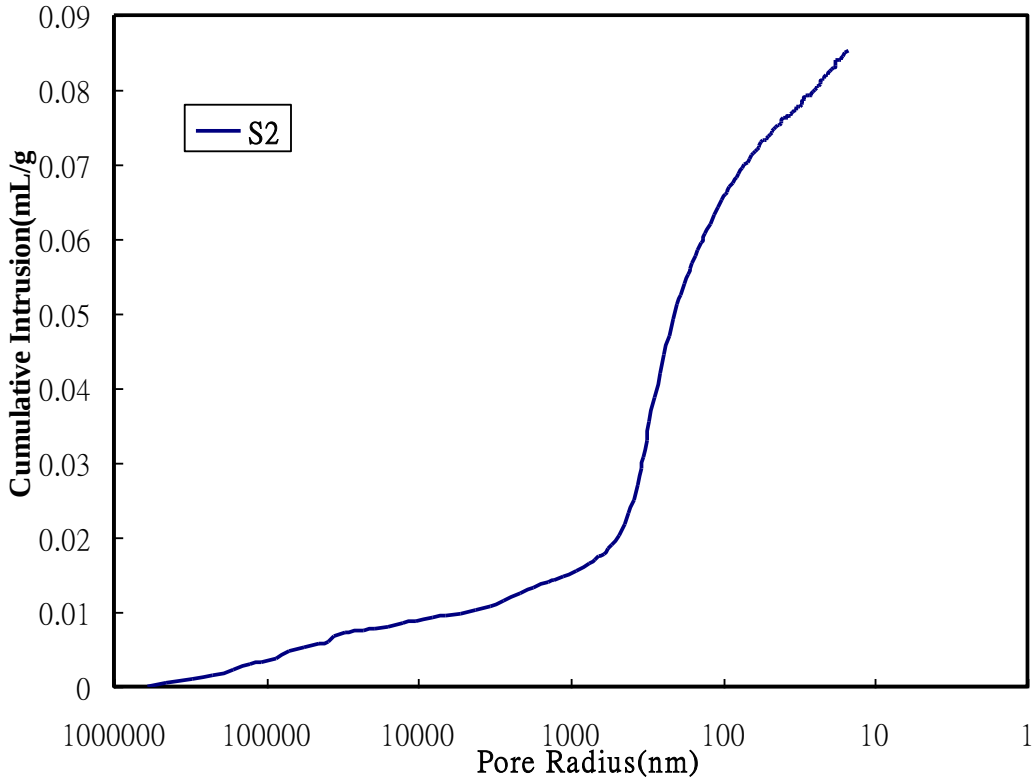


圖 4-12 孔徑與累積汞灌入量關係圖(S2)

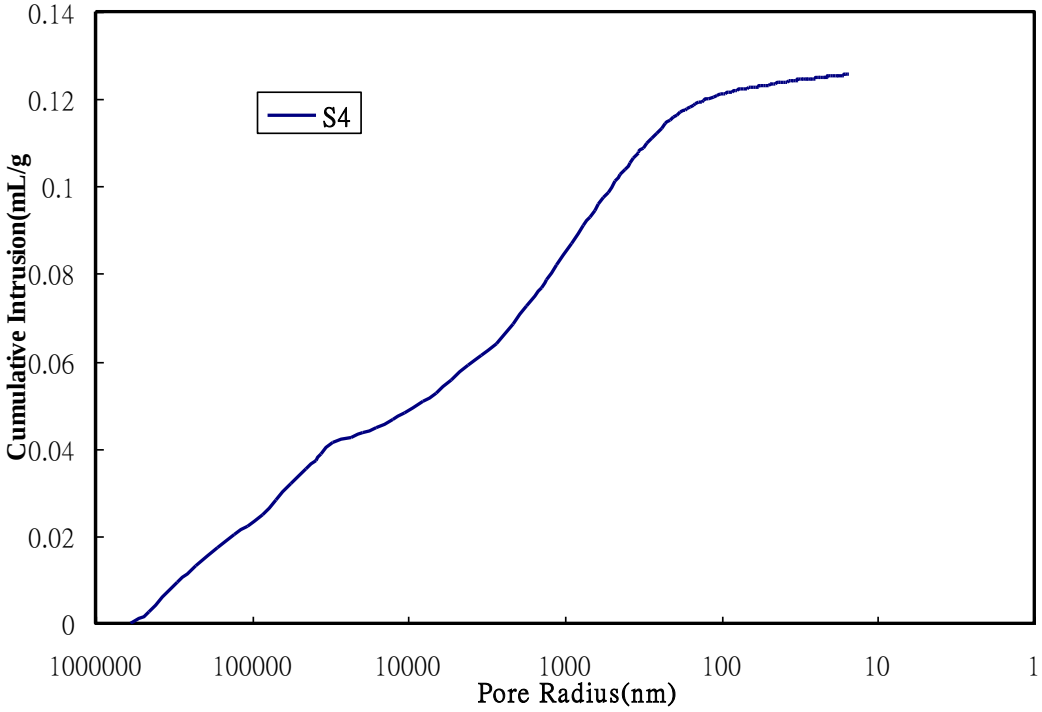


圖 4-13 孔徑與累積汞灌入量關係圖(S4)

經 MIP 試驗之各孔徑範圍的汞總貫入量，統計如表 4-6 及分析如圖 4-14 所示，可得 F2 的總貫入量最低，F8 為最高，顯示飛灰漿體的總貫入量隨替代量的增加而增加，即孔隙度越大，而強度則下降。

表 4-6　飛灰漿體 MIP 汞總貫入量統計表

孔徑範圍	BO	F2	F4	F6	F8
0-20	0.003741	0.001898	0.002622	0.000000	0.000362
20-50	0.007226	0.006029	0.007519	0.001596	0.009466
50-100	0.009212	0.014773	0.007165	0.006942	0.012700
100-500	0.053909	0.028548	0.033150	0.041508	0.046821
500-1000	0.003690	0.002552	0.011506	0.015503	0.010050
1000-10000	0.009407	0.004215	0.016987	0.023264	0.015571
>10000	0.006338	0.007887	0.039423	0.014396	0.058946
總貫入量 (mL/g)	0.093524	0.065902	0.118373	0.103210	0.153916

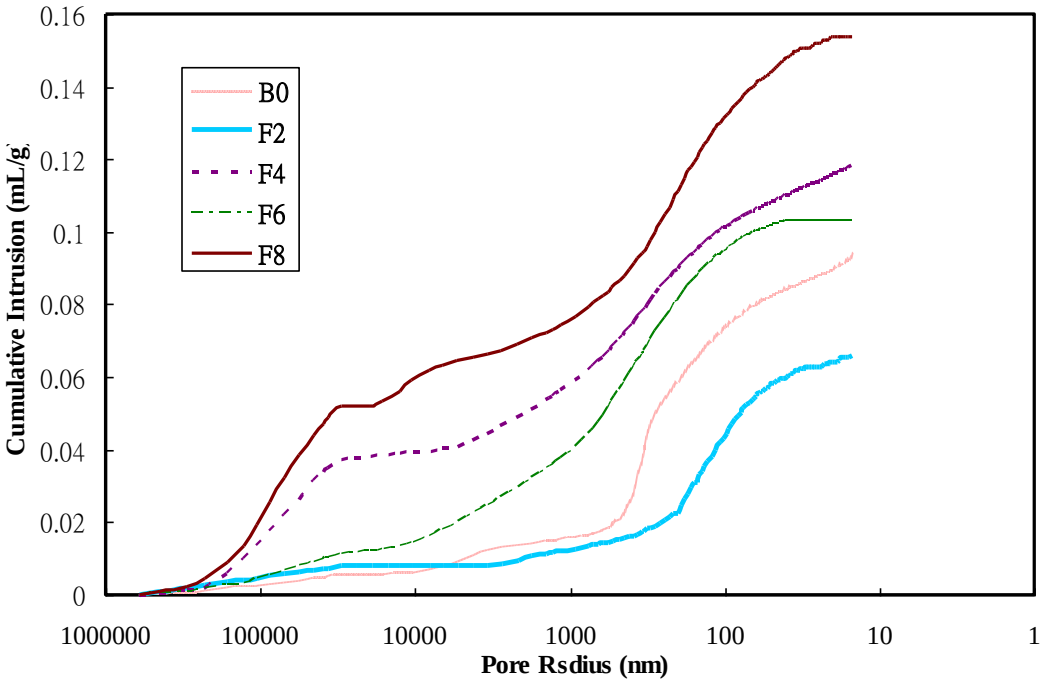


圖 4-14　孔徑與累積汞灌入量關係圖(飛灰組)

貳、孔徑分佈分析

圖4-15至圖4-20中顯示B0、F2、及F6及之汞最大貫入量落在孔徑100-500 nm中，而F4及F8之最大貫入量為>100,000 nm之孔徑，F2與對照組B0相較下，100-500 nm間孔徑的貫入量大幅減少，於50-100 nm孔徑有增加趨勢；F6與對照組B0相較下，於100-500 nm 孔徑中雖有減少，但卻於500 nm以上的孔徑皆有增加趨勢，圖4-20為各試體之孔徑之分佈關係圖，得知於藍色區域100-500 nm 孔徑中因添加飛灰後有縮小的趨勢，即顯示強度逐漸增加。

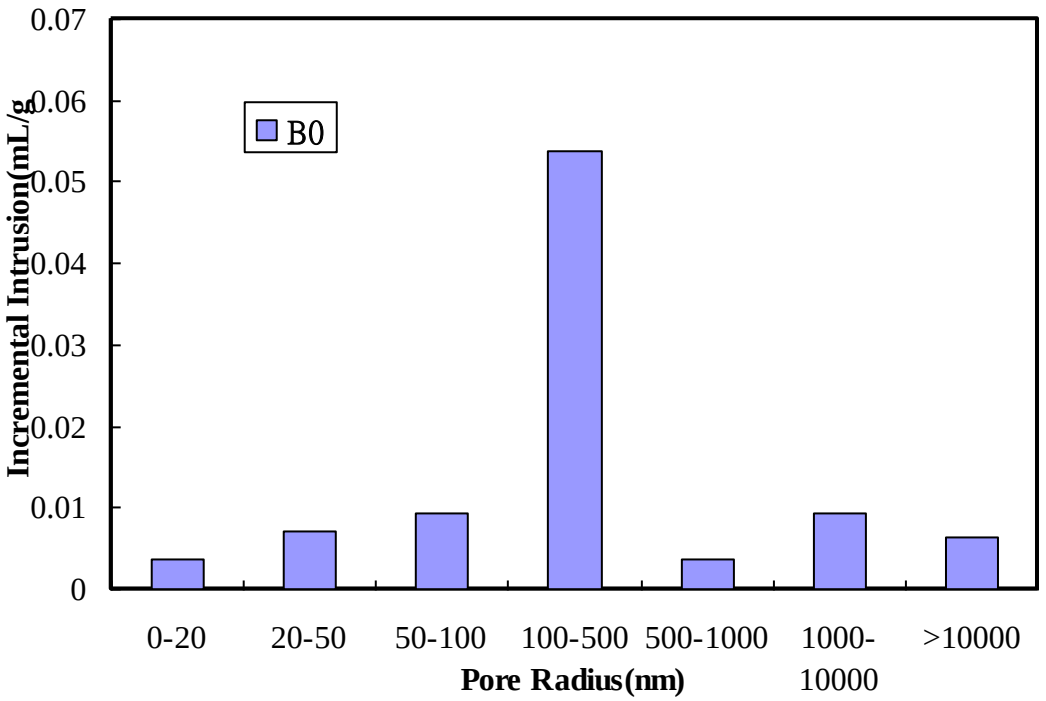


圖 4-15 汞灌入量與孔徑分佈關係圖(B0)

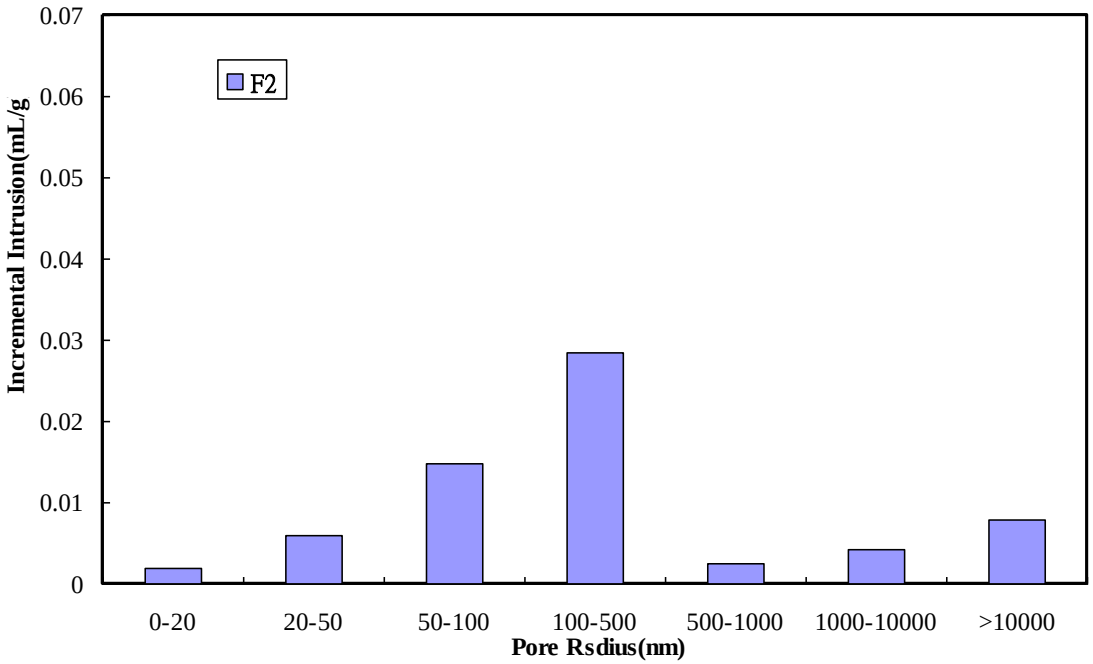


圖 4-16　汞灌入量與孔徑分佈關係圖(F2)

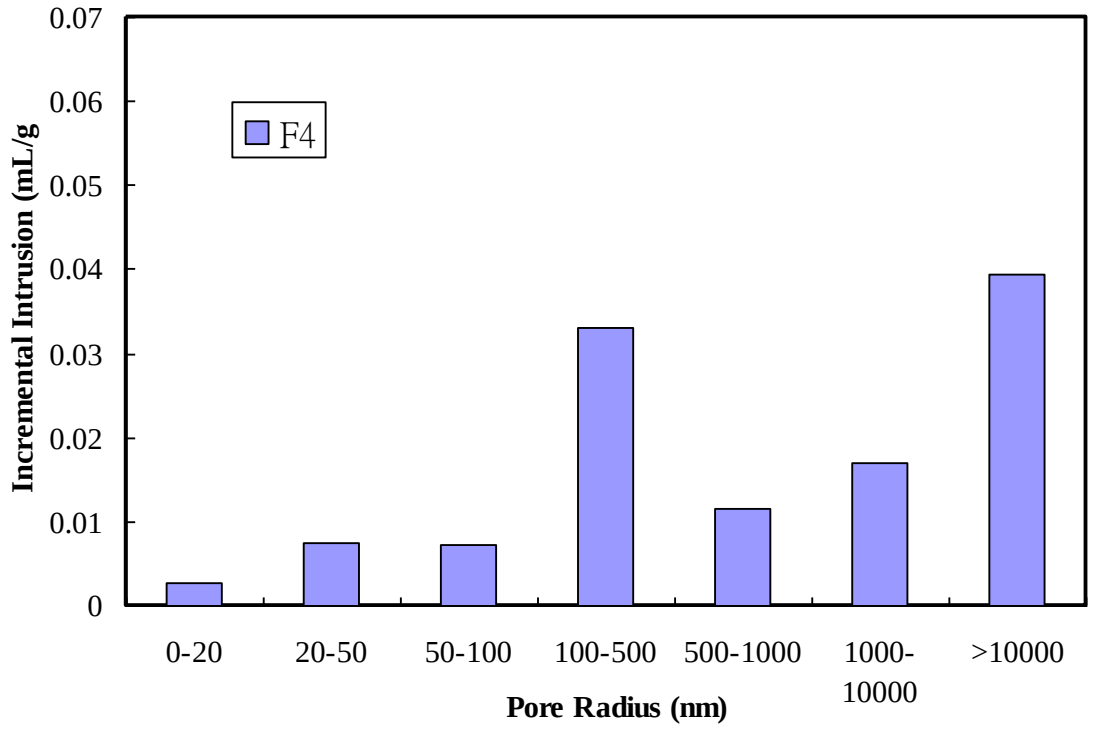


圖 4-17　汞灌入量與孔徑分佈關係圖(F4)

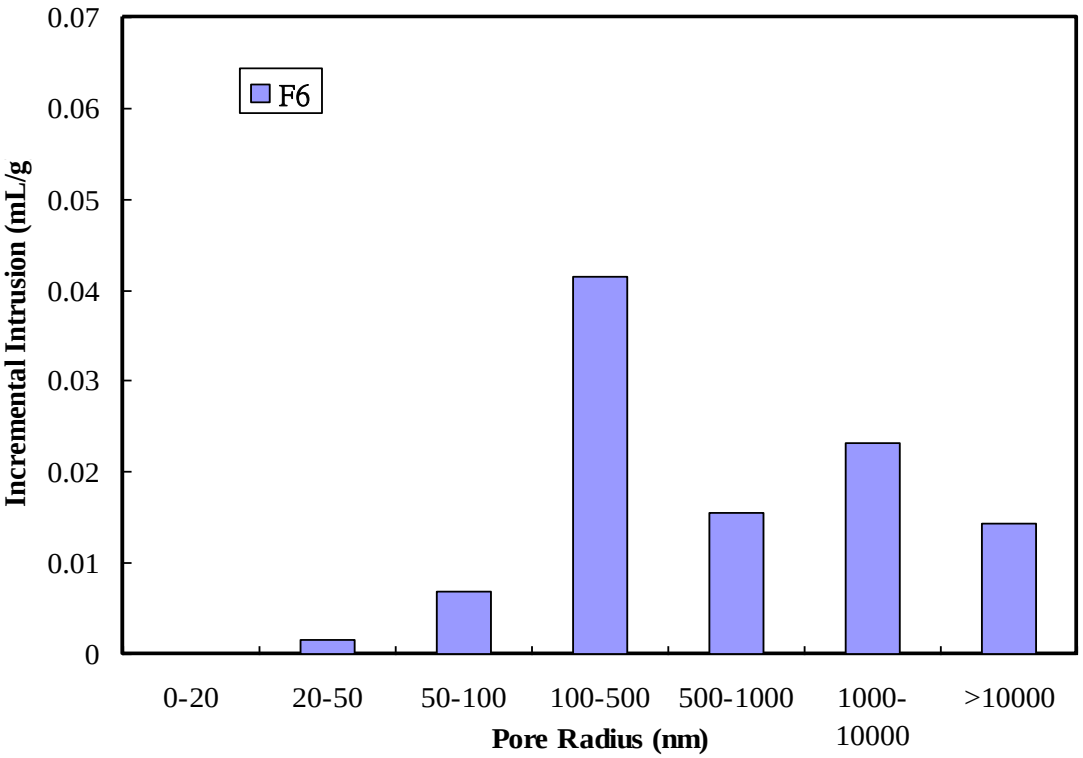


圖 4-18　汞灌入量與孔徑分佈關係圖(F6)

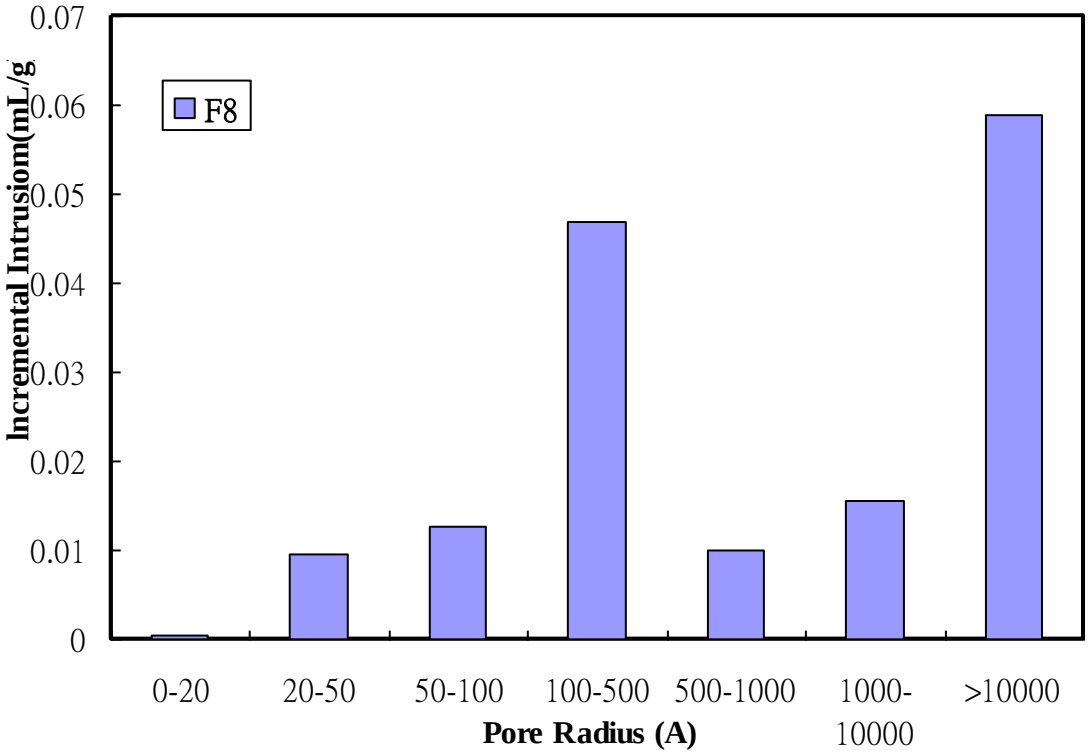


圖 4-19　汞灌入量與孔徑分佈關係圖(F8)

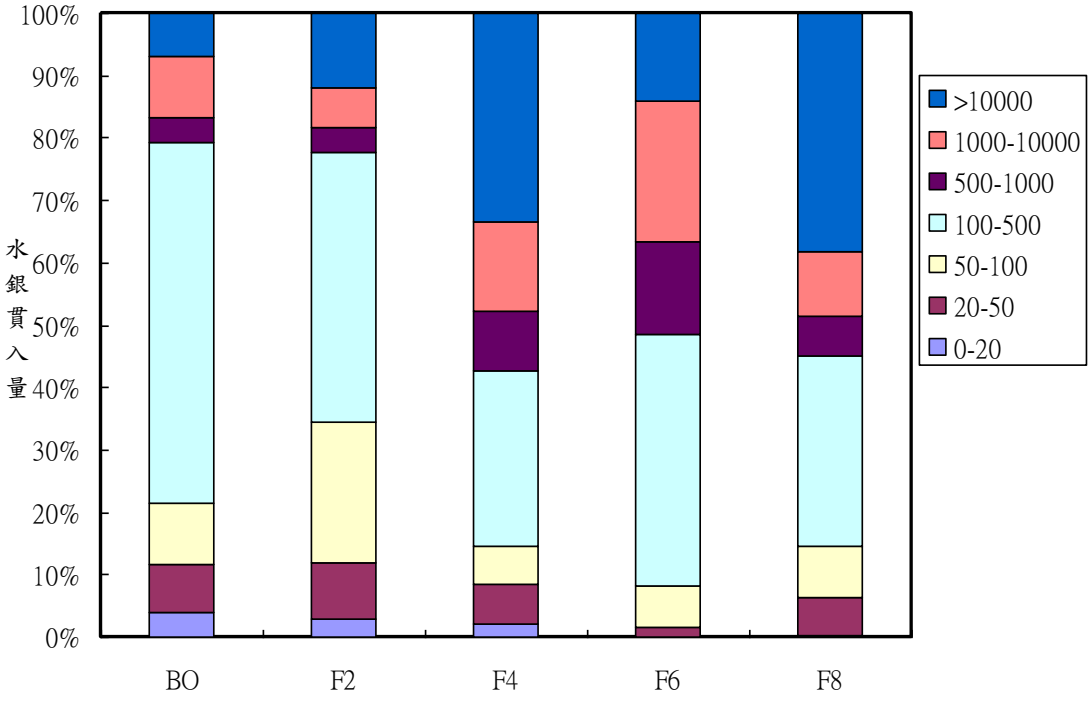


圖 4-20 各試體汞灌入量與孔徑分佈關係圖(飛灰類)

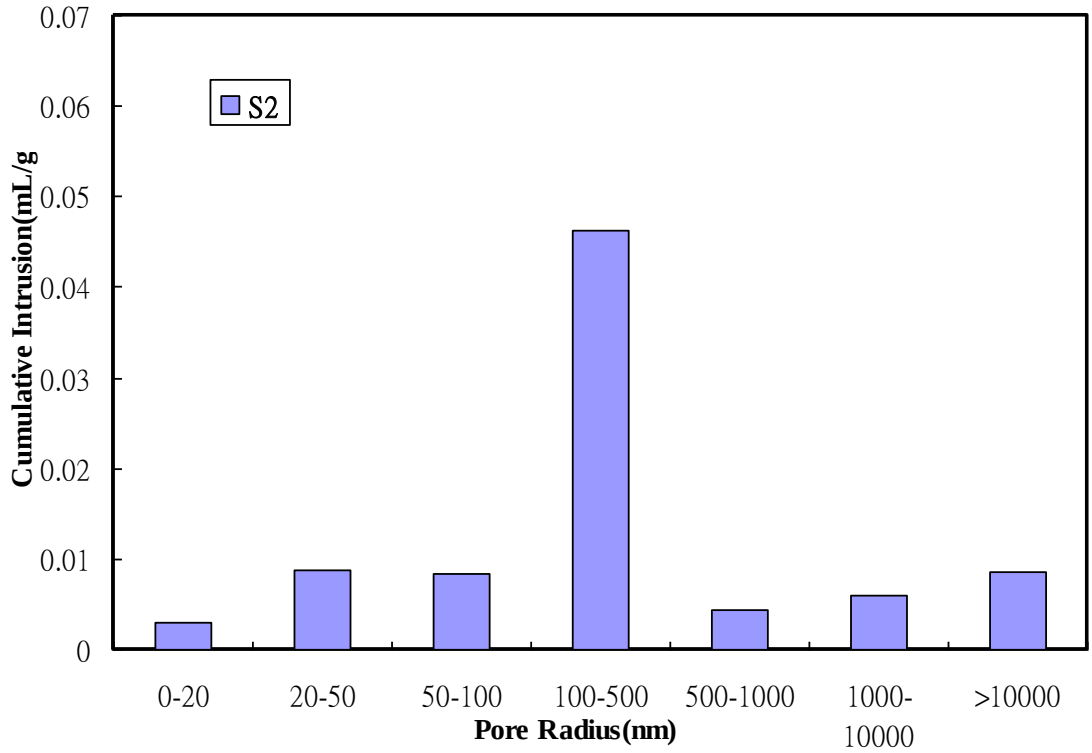


圖 4-21 汞灌入量與孔徑分佈關係圖(S2)

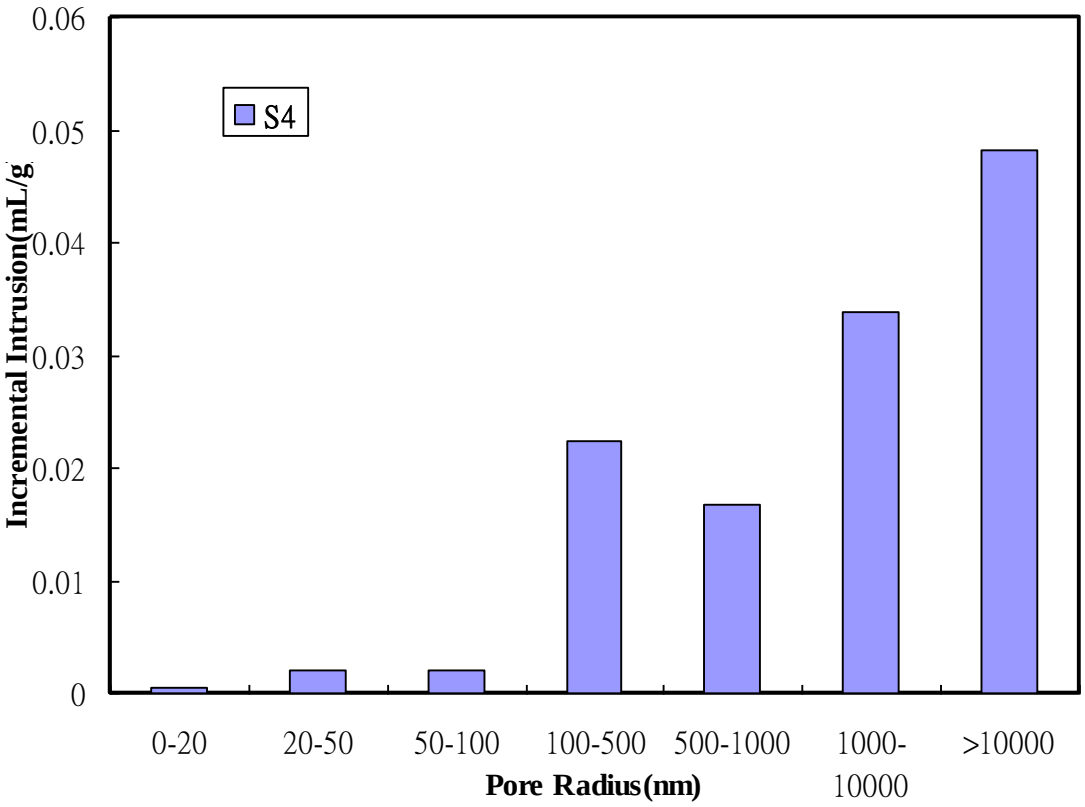


圖 4-22 汞灌入量與孔徑分佈關係圖(S4)

第四節　加速氯離子擴散試驗(ACMT)結果與分析

本試驗因氯離子受電場作用的影響，將由陰極槽快速穿過30 mm之摻料漿體而到達陽極槽，再由陽極槽抽取溶液以電位滴定法量測氯離子濃度。本研究藉由試驗結果，於爐石與飛灰不同替代率與環境溫度下，對摻料漿體氯離子的傳輸行為作一探討，其中更針對夏季高溫於建築物外牆水泥砂漿，若以爐石與飛灰替代時，將依本研究試驗結果探討是否增加抗氯離子能力等耐久性質。相關研究指出加速氯離子擴散(ACMT)試驗後，氯離子於水泥漿體中典型傳輸歷程圖，其歷程依序分為非穩態、(non-steady-state)、過渡時期（transition period)、穩態（steady-state)等階段（蕭克宇，2010）。

本研究因以不同替代量的爐石與飛灰取代水泥材料，且試體環片厚度由一般50 mm縮減為30 mm，可更加速氯離子之穿透時間，故僅討論穩態階段之氯離子傳輸行為，如圖4-23 所示為穩態階段累積氯離子濃度與時間之線性關係圖，圖中斜率越接近1即越顯示其為線性關係，則可求得穿透速率 k，為累積氯離子濃度與時間之比值。

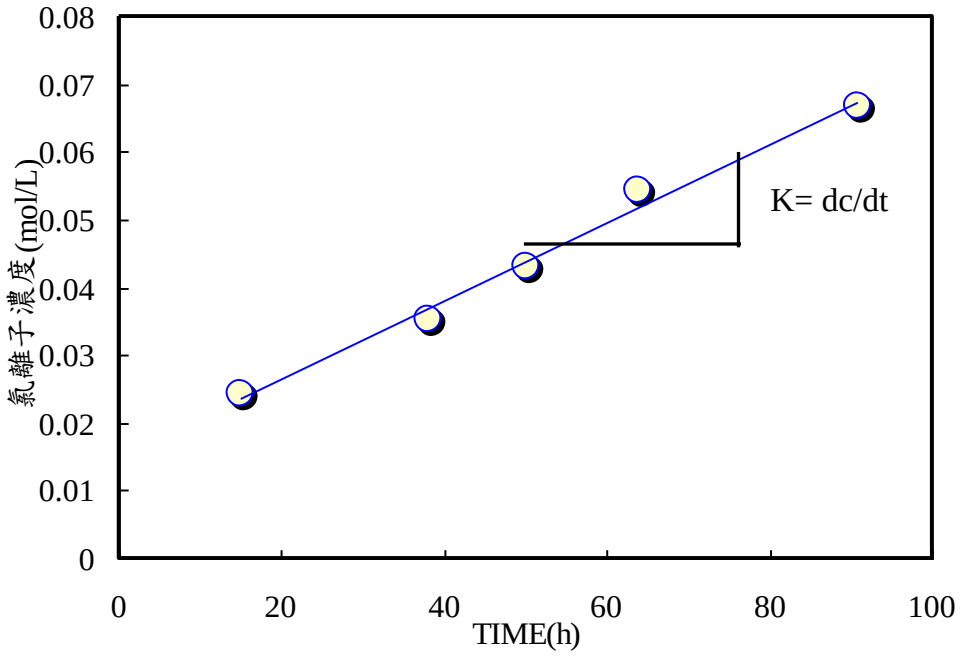


圖4-23　穩態階段累積氯離子濃度與時間之線性關係圖

壹、不同環境溫度之傳輸行為

一、25℃室溫對照組

各爐石及飛灰摻料漿體經約160小時取得ACMT試驗結果，由電位滴定法取得氯離子濃度值為0~0.16(mole/L)的範圍，共繪製成25 ℃室溫對照組如圖4-24 至4-34 。

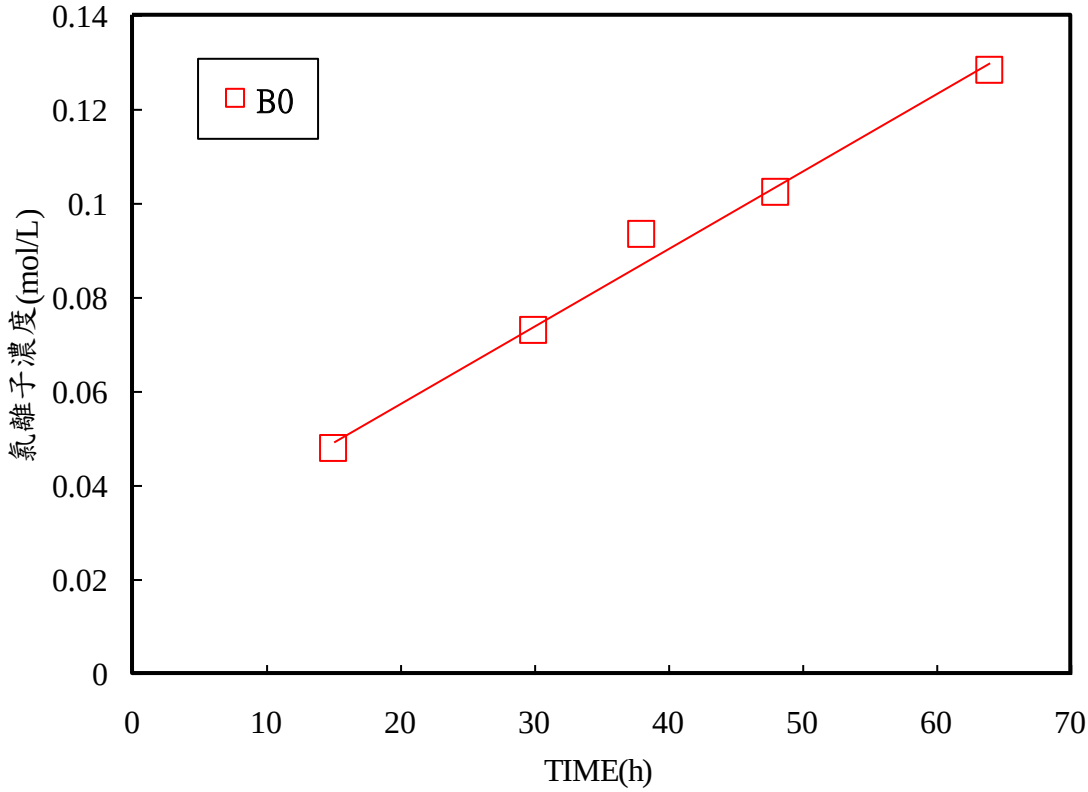


圖 4-24　累積氯離子濃度關係圖(B0)

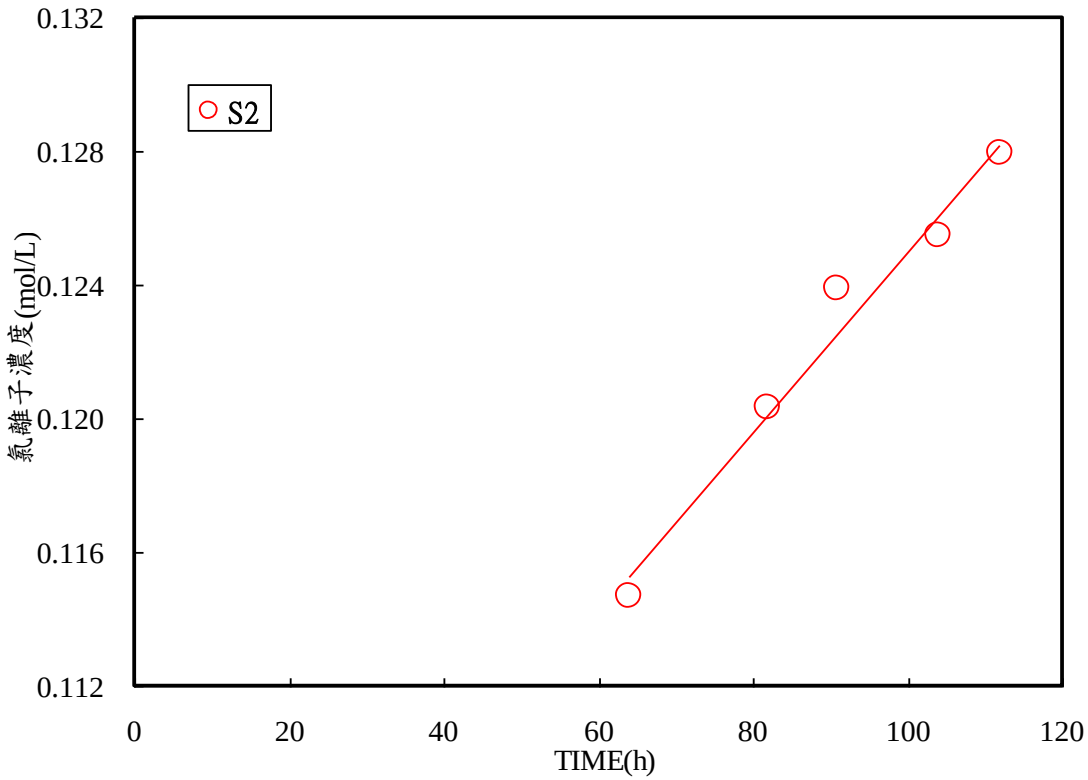


圖 4-25　累積氯離子濃度關係圖(S2)

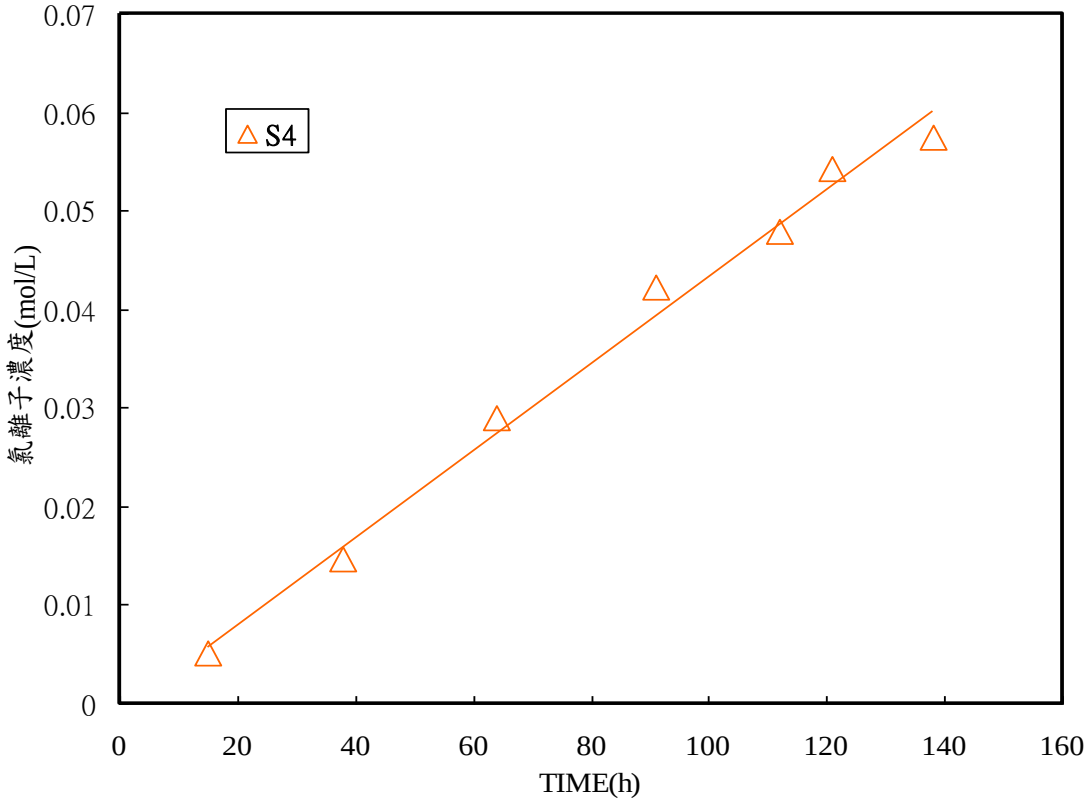


圖 4-26　累積氯離子濃度關係圖(S4)

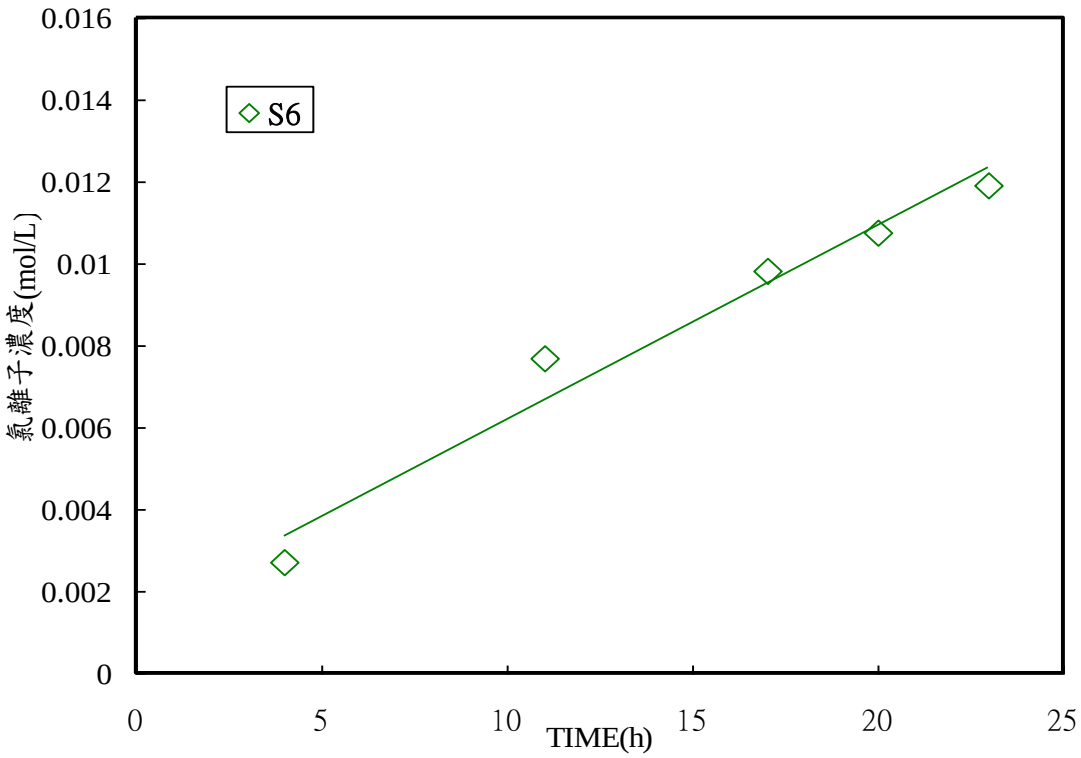


圖 4-27　累積氯離子濃度關係圖(S6)

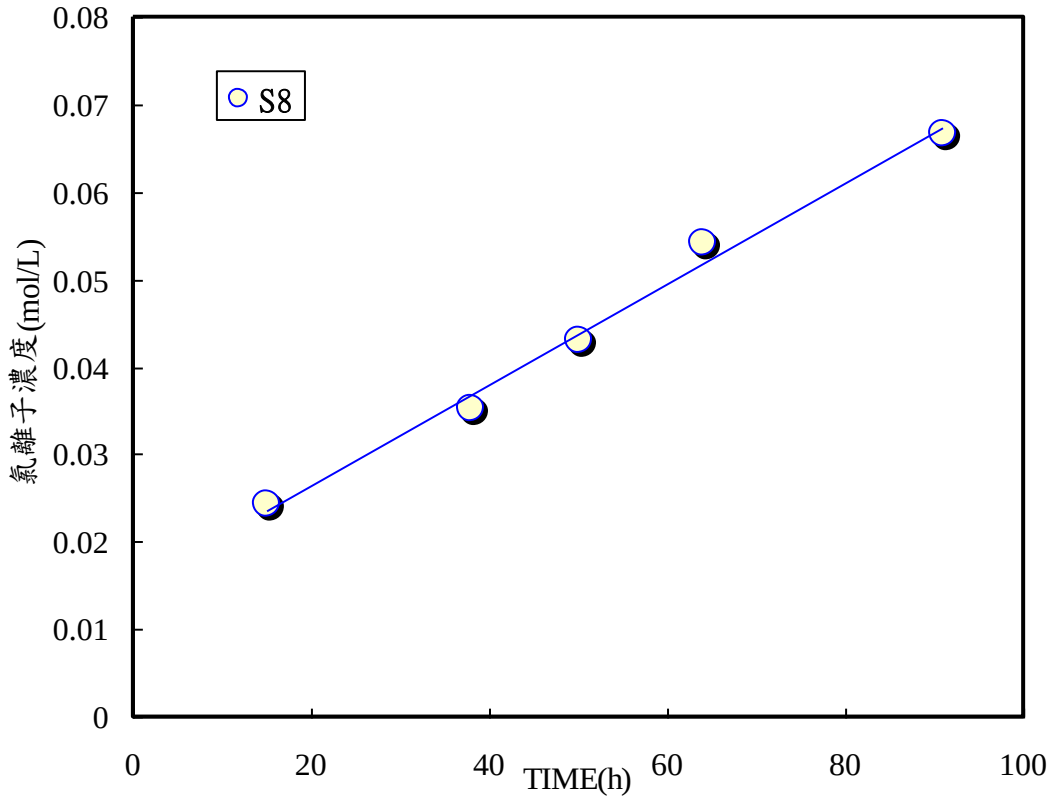


圖 4-28　累積氯離子濃度關係圖(S8)

由圖 4-29 得知各組於 25℃室溫中，具爐石摻料漿體之氯離子擴散濃度，皆比 B0 對照組來得低，其中以 S4 之濃度最低，而 S6 次之，表示具爐石摻料之水泥砂漿皆有助於抵抗氯離子的入侵，而以 S4 抵抗氯離子的能力最佳。

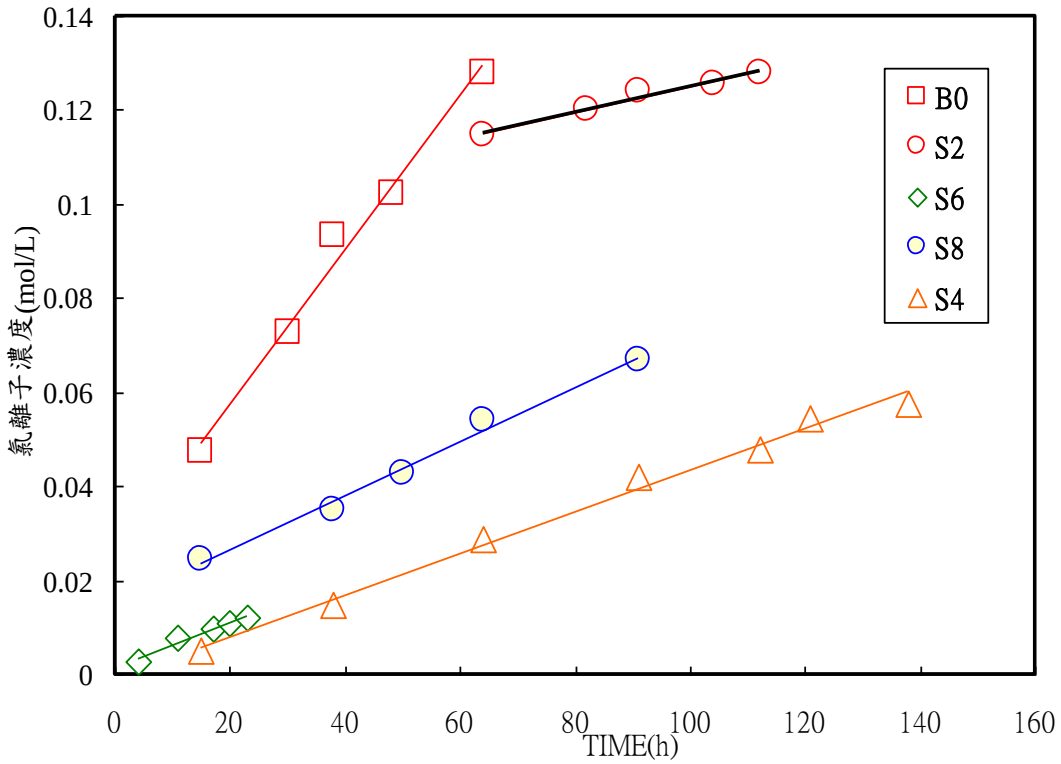


圖 4-29　累積氯離子濃度與時間關係圖(爐石控制組)

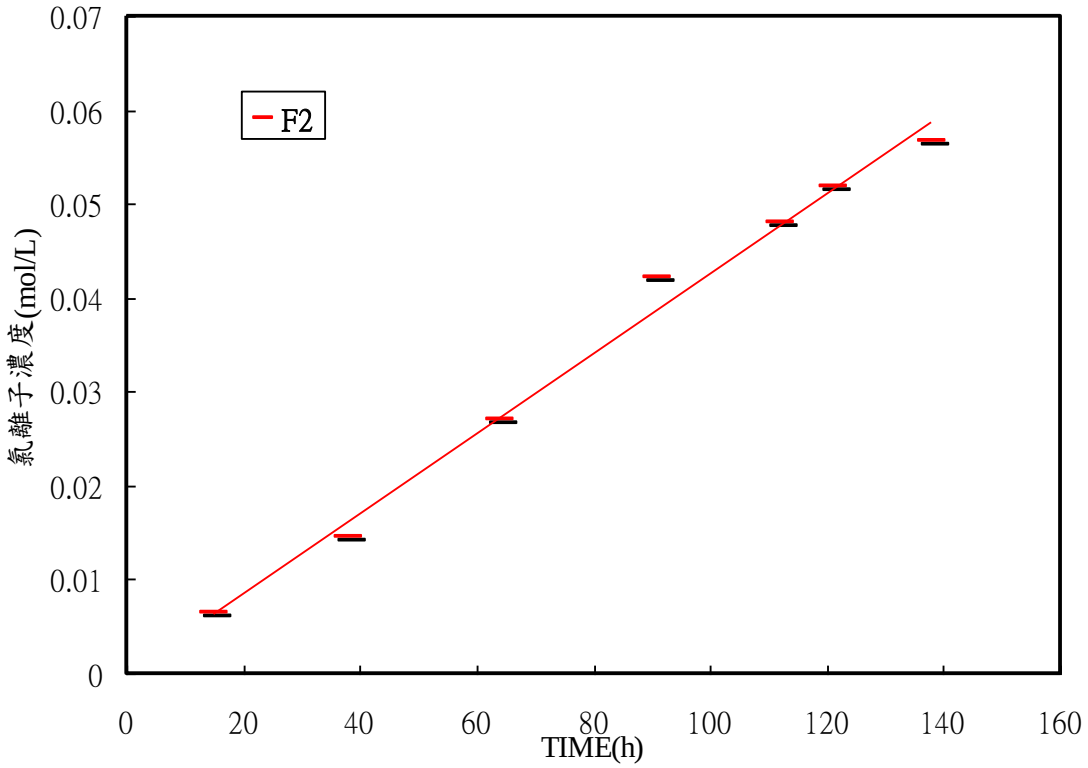


圖 4-30　累積氯離子濃度關係圖(F2)

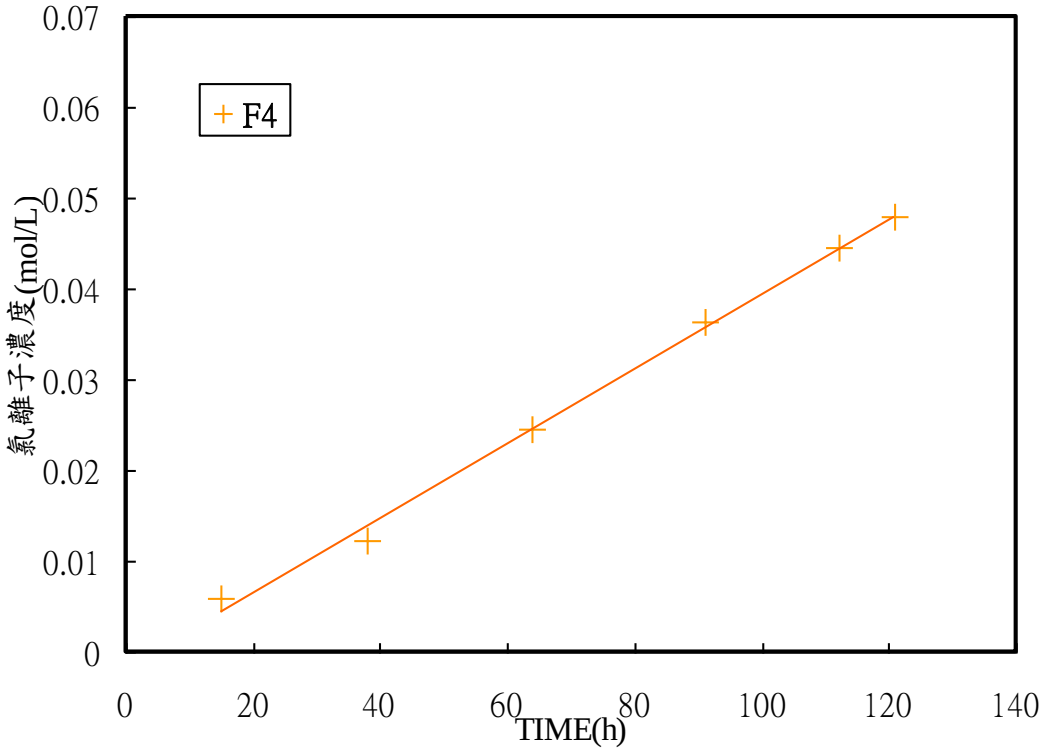


圖 4-31　累積氯離子濃度關係圖(F4)

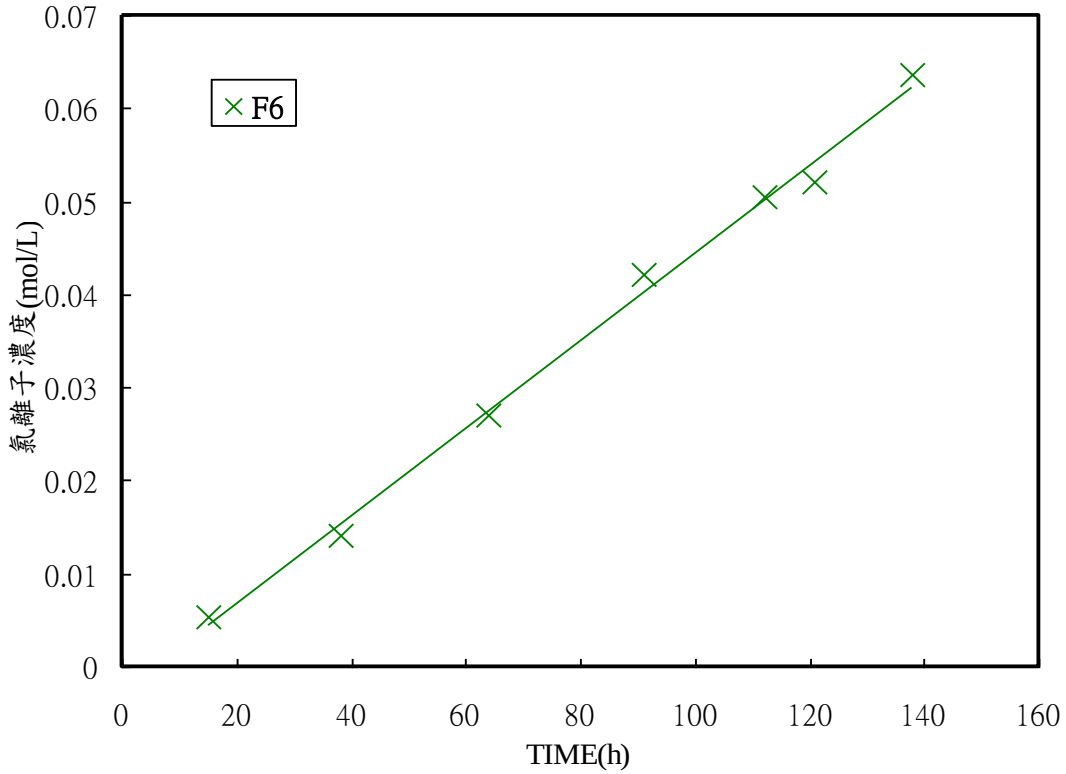


圖 4-32　累積氯離子濃度關係圖(F6)

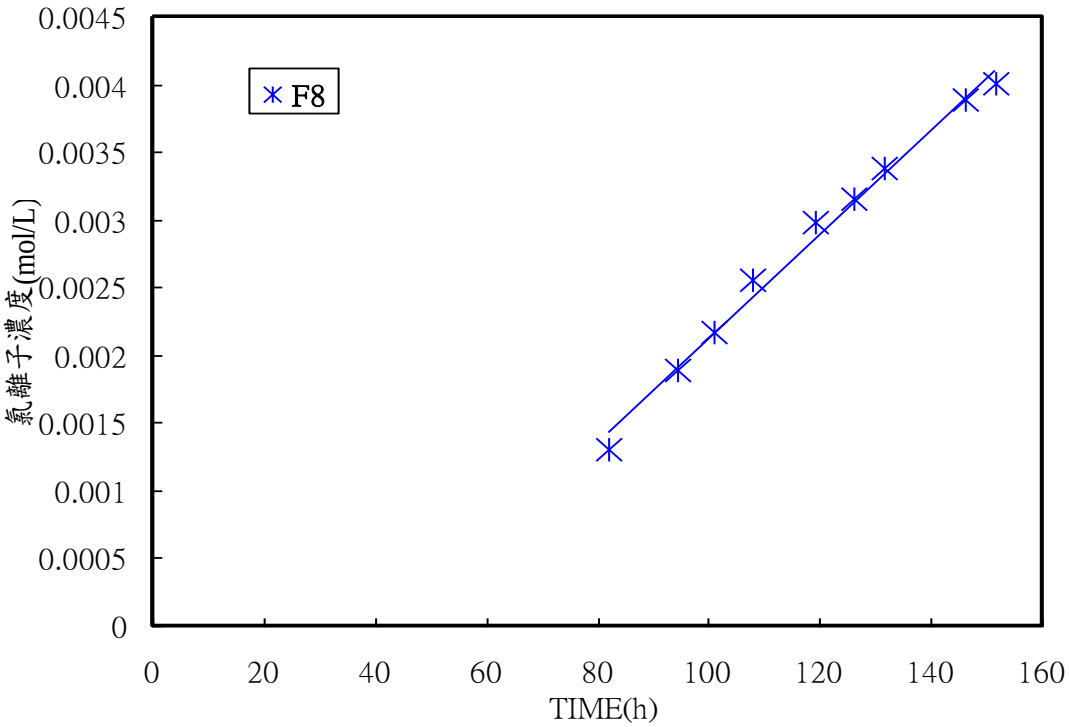


圖 4-33　累積氯離子濃度關係圖(F8)

由圖 4-36 得知於 25℃室溫中，各組具飛灰摻料漿體之氯離子擴散濃度，皆比 B0 對照組大幅降低，其中以 F8 之濃度最低，其餘各組濃度均接近，表示具飛灰摻料之水泥砂漿皆可大幅提升抵抗氯離子入侵的能力，並以最高替代率 F8 抵抗氯離子的能力最佳。

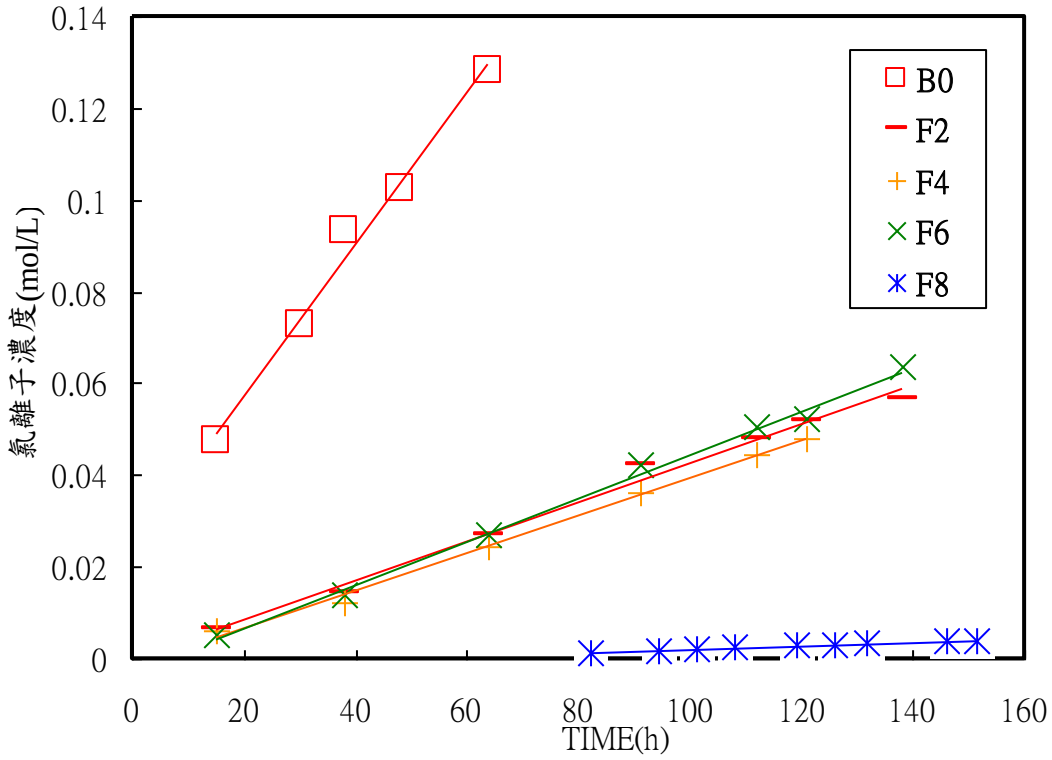


圖 4-34　累積離子濃度關係比較圖(飛灰控制組)

二、50℃劣化組

由於建築物表面於夏季環境儲熱溫度約達 50℃，本劣化組係探討夏季建築物表面水泥砂漿抗氯離子能力之耐久性試驗，本研究以爐石及飛灰替代的摻料漿體經約 100 小時取得穩態階段 ACMT 試驗結果，再由電位滴定法取得氯離子濃度值為 0~0.08(mol/L)的範圍，共繪製成 50℃劣化組如圖 4-35 至 4-47 所示。

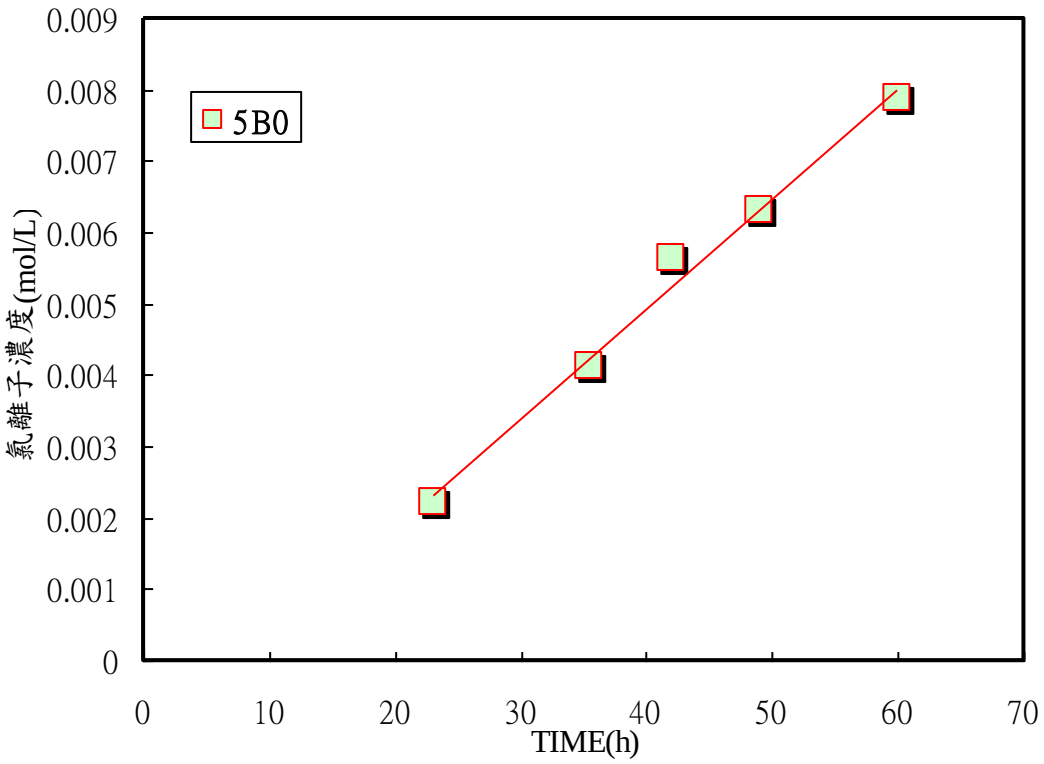


圖 4-35　累積氯離子濃度關係圖(5B0)

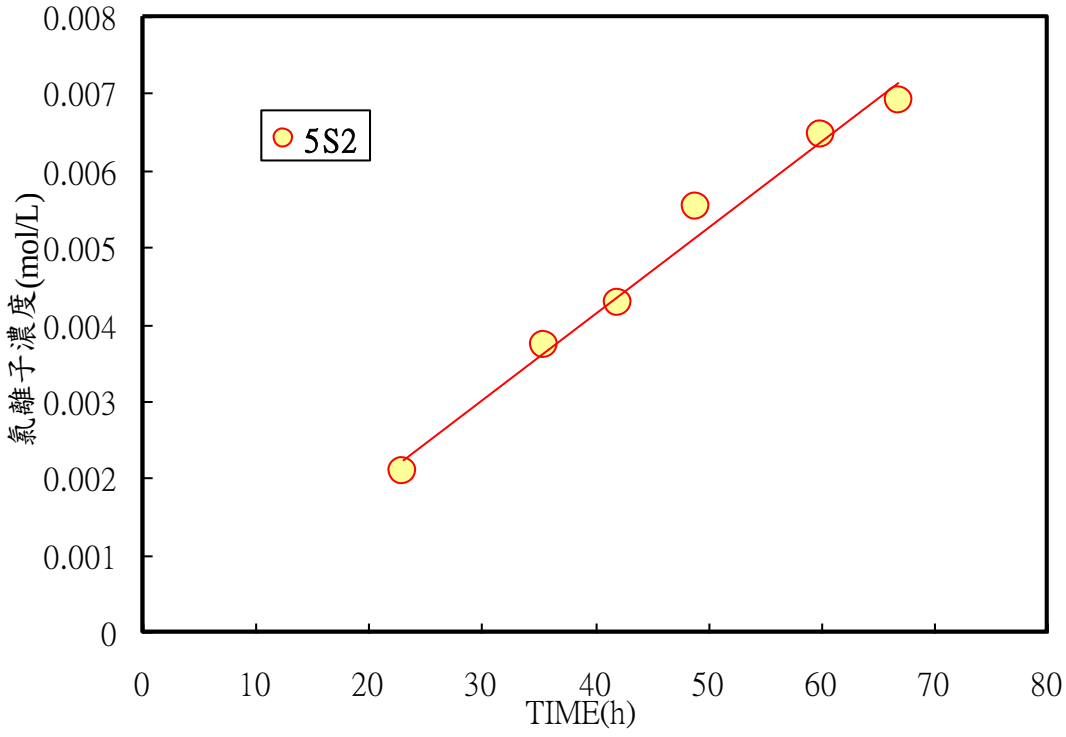


圖 4-36　累積氯離子濃度關係圖(5S2)

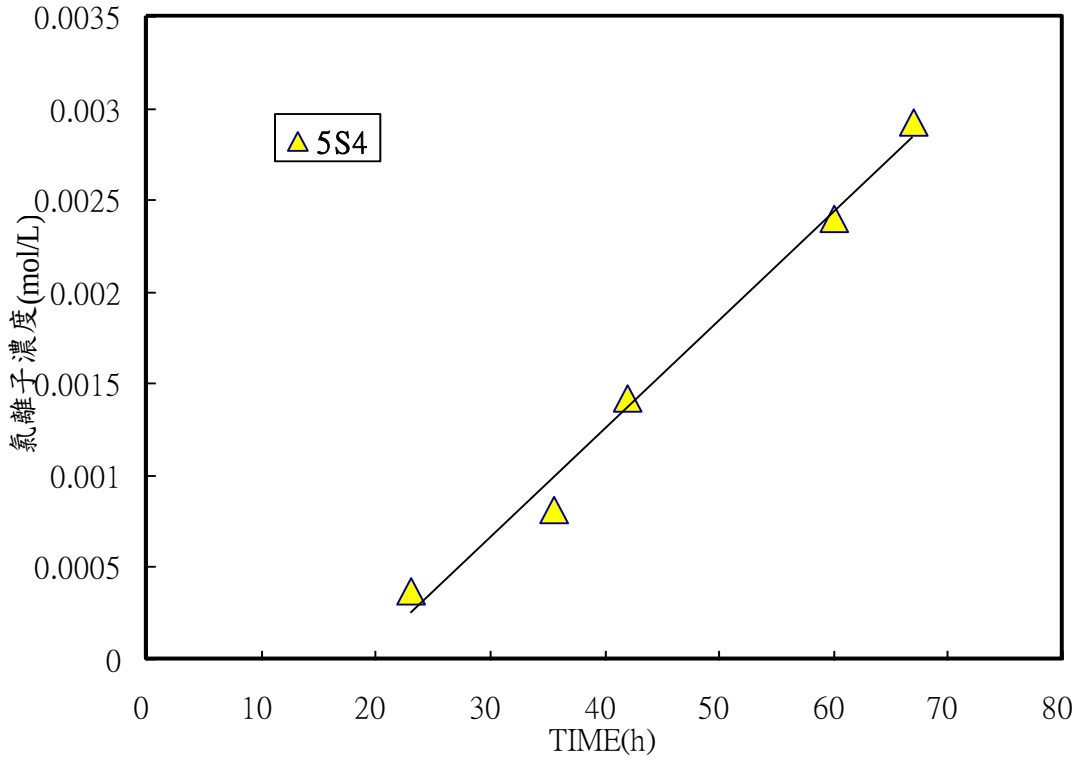


圖 4-37　累積氯離子濃度關係圖(5S4)

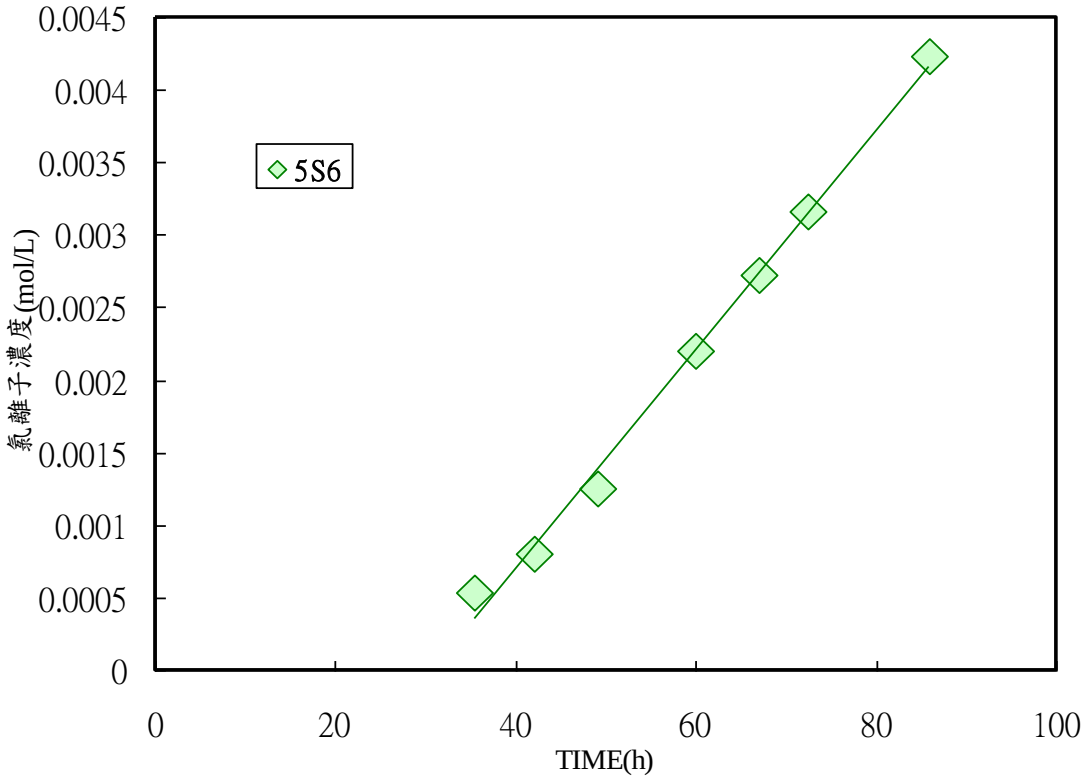


圖 4-38　累積氯離子濃度關係圖(5S6)

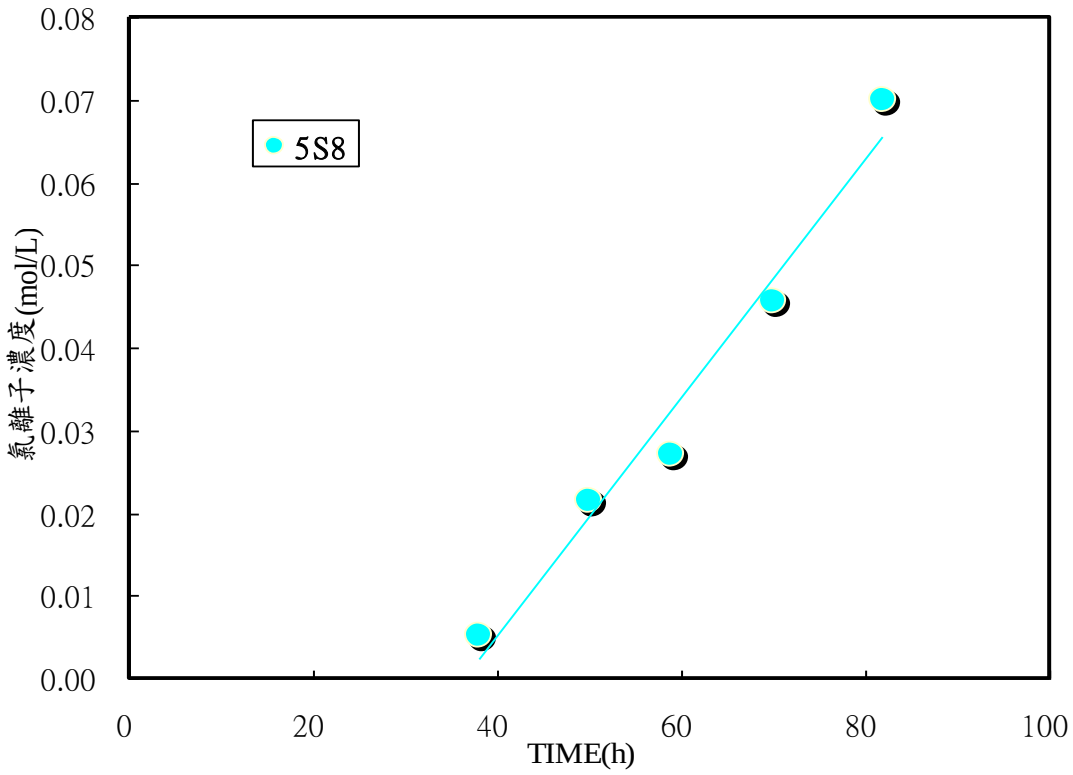


圖 4-39　累積氯離子濃度關係圖(5S8)

由圖 4-42 得知於 50℃環境溫度下，除 5S8 之外所有試體之氯離子濃度皆大幅減少，顯示經提高貯存溫度的爐石高替代率摻料之抵抗氯離子入侵的能力較差。

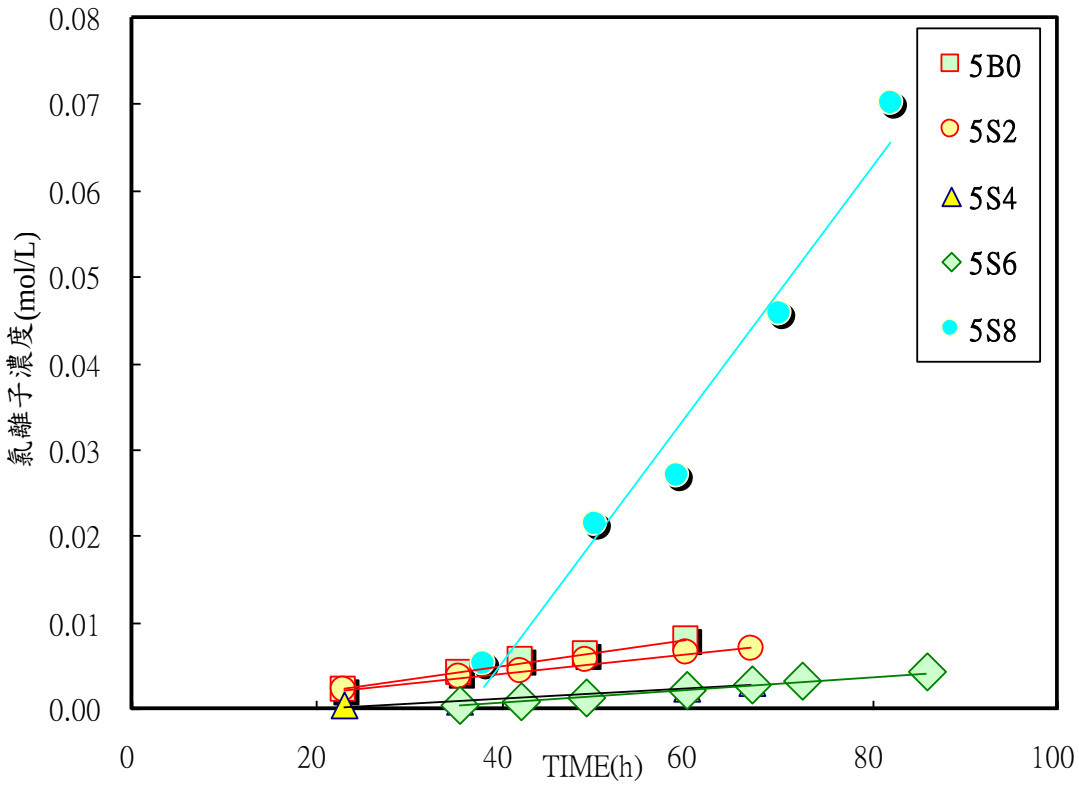


圖 4-40　累積氯離子濃度關係比較圖(爐石 50℃劣化組)

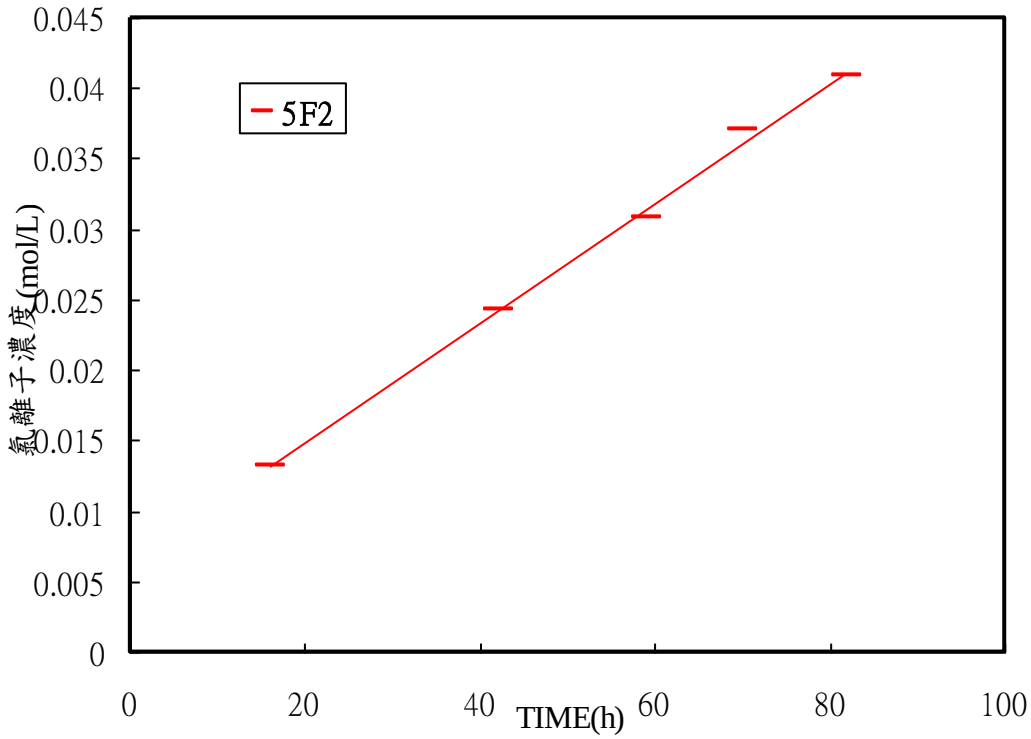


圖 4-41　累積氯離子濃度關係圖(5F2)

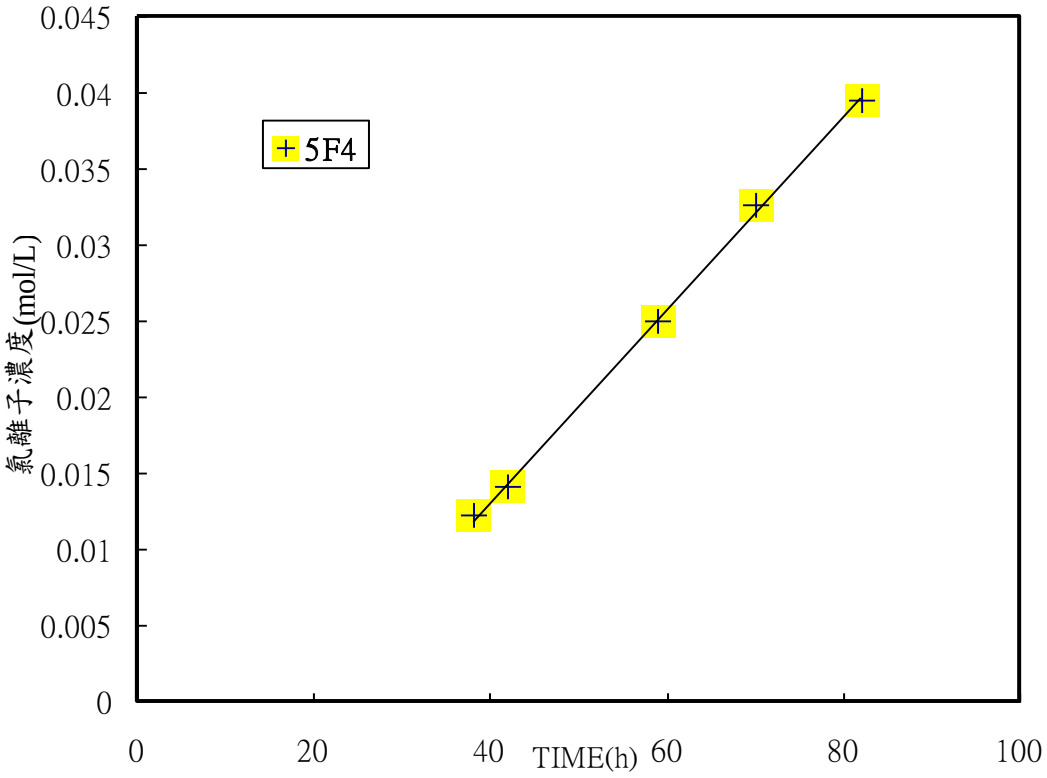


圖 4-42　累積氯離子濃度關係圖(5F4)

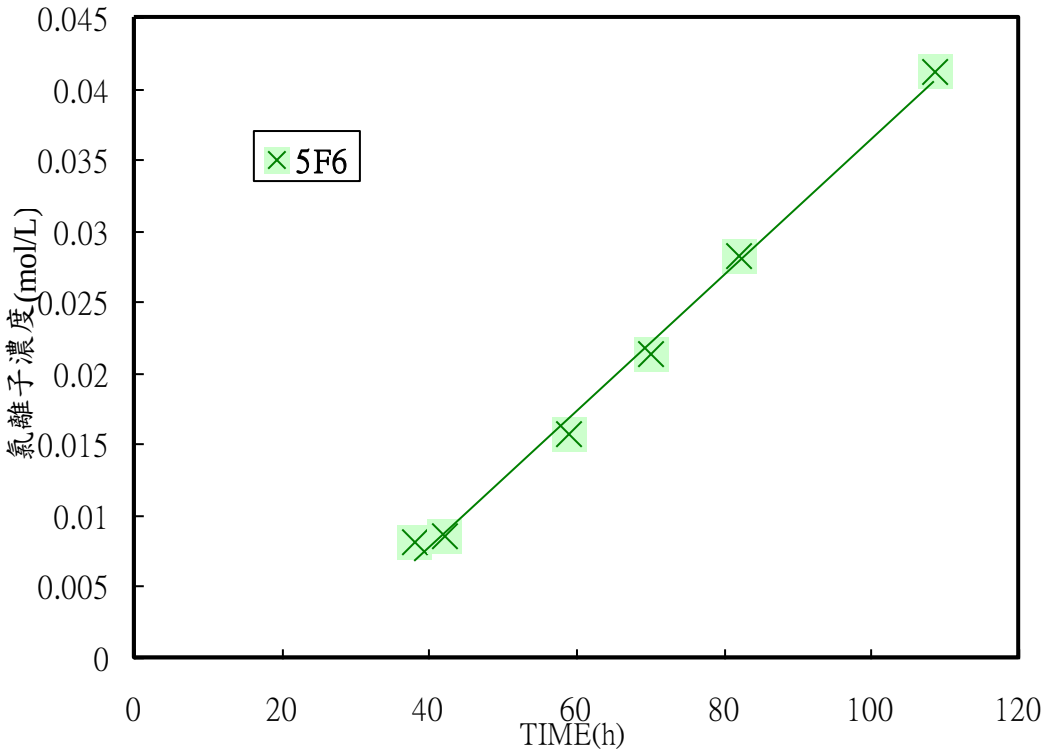


圖 4-43　累積氯離子濃度關係圖(5F6)

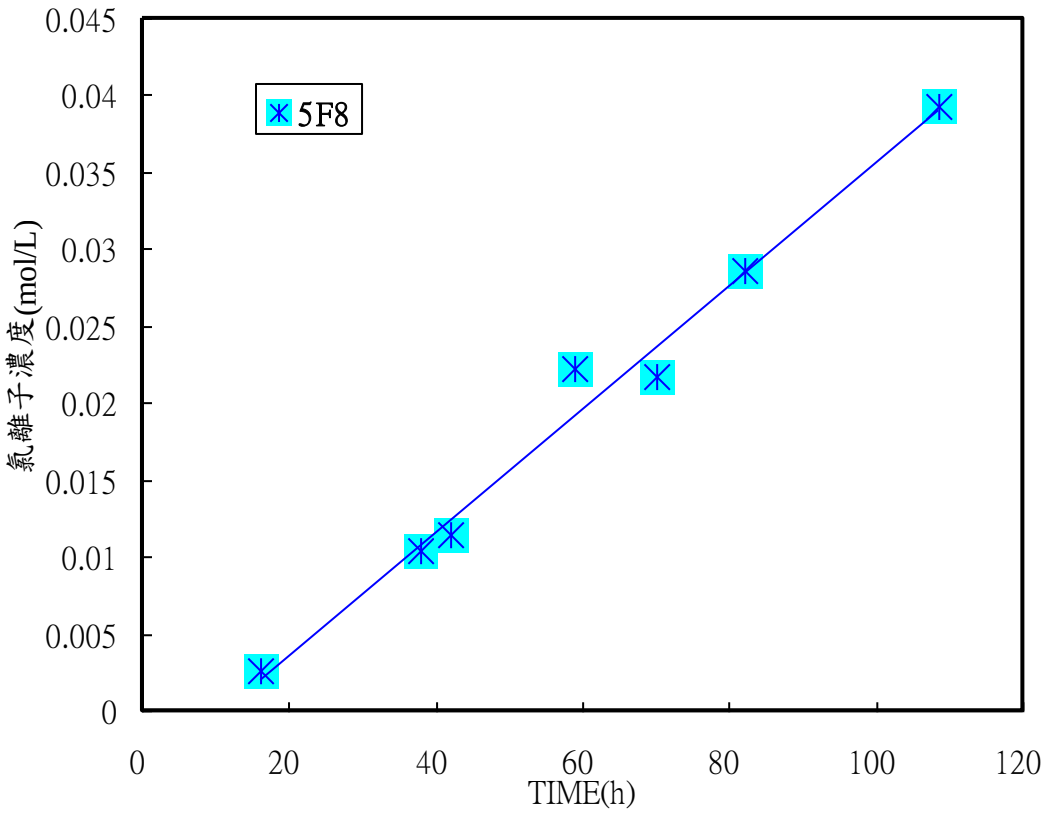


圖 4-44　累積氯離子濃度關係圖(5F8)

由圖 4-47 可知於 50℃環境溫度下，所有飛灰摻料漿體之氯離子濃度皆比 5B0 對照組增加，顯示可能經提高貯熱溫度而使漿體產生孔隙與微小裂縫，造成氯離子穿透速率增加，進而使得飛灰摻料漿體之抵抗氯離子入侵的能力皆下降。

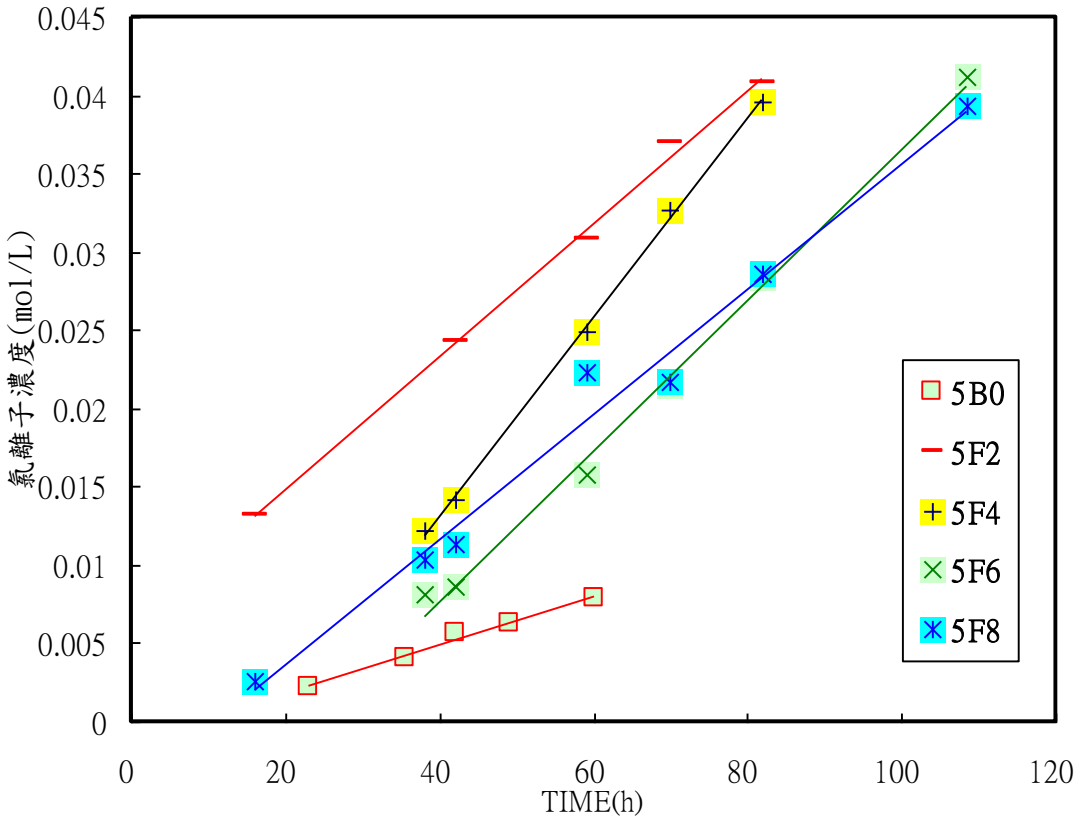


圖 4-45　累積離子濃度關係比較圖(飛灰 50℃劣化組)

三、75℃劣化組

本劣化組係探討建築物表面水泥砂漿，於夏季高溫達貯熱溫度為 75℃之環境溫度所得之抗氯離子等耐久性研究，試驗中以爐石及飛灰摻料取代水泥所製成的水泥砂漿，約經 140 小時取得穩態階段 ACMT 之試驗結果，再由電位滴定法取得氯離子濃度值為 0~0.16(mol/L)的範圍，共繪製成 75℃劣化組與氯離子濃度關係如圖 4-48 至 4-59 所示。

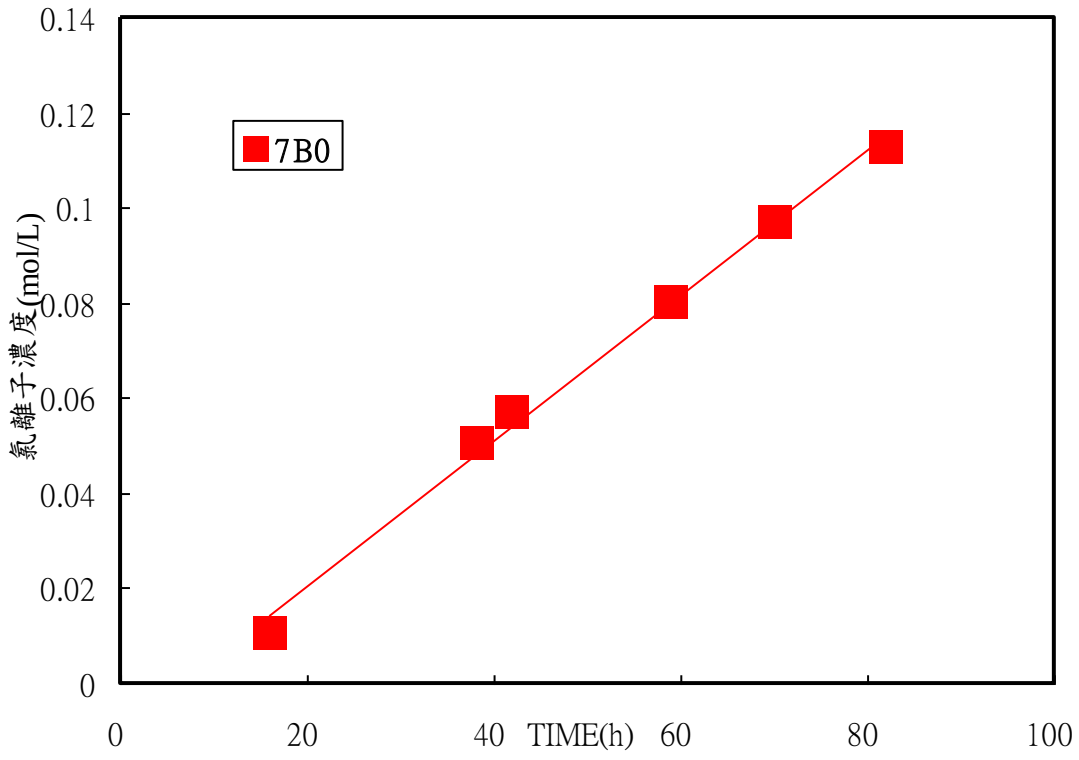


圖 4-46　累積氯離子濃度關係圖(7B0)

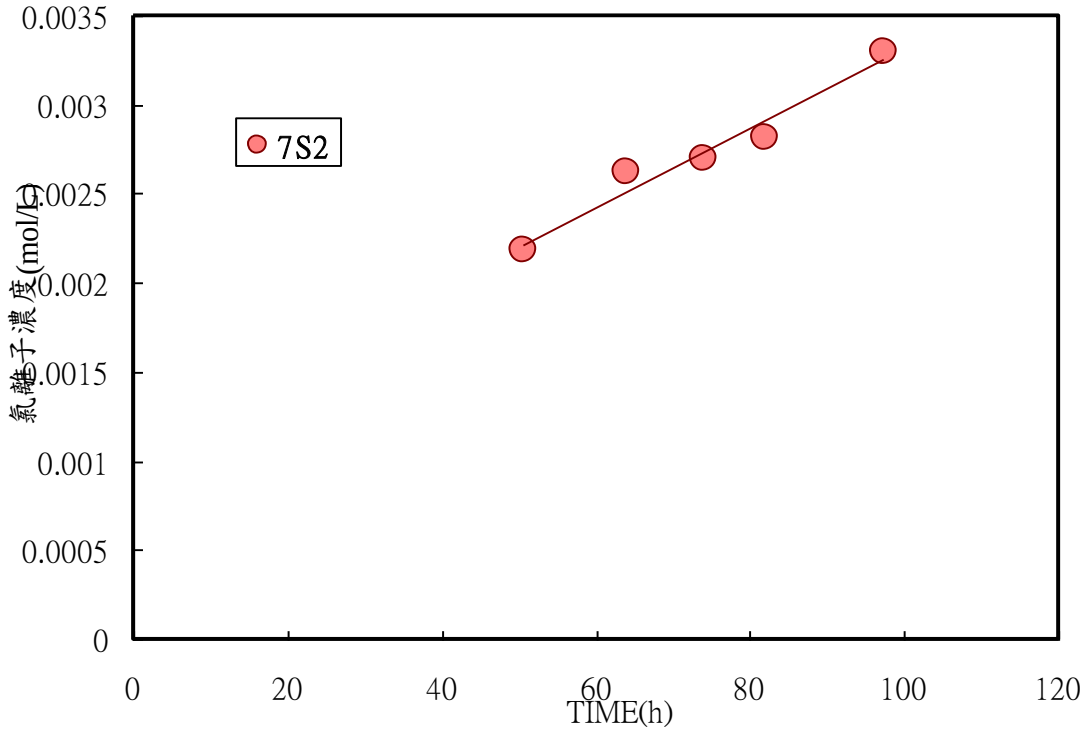


圖 4-47　累積氯離子濃度關係圖(7S2)

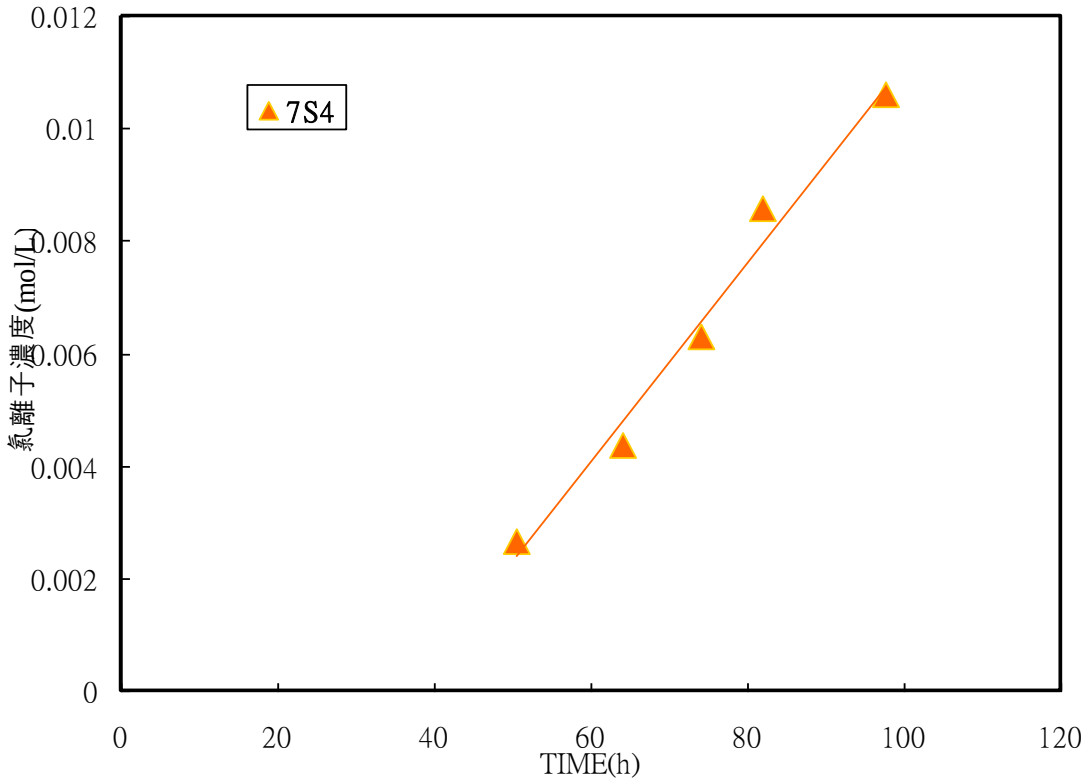


圖 4-48　累積氯離子濃度關係圖(7S4)

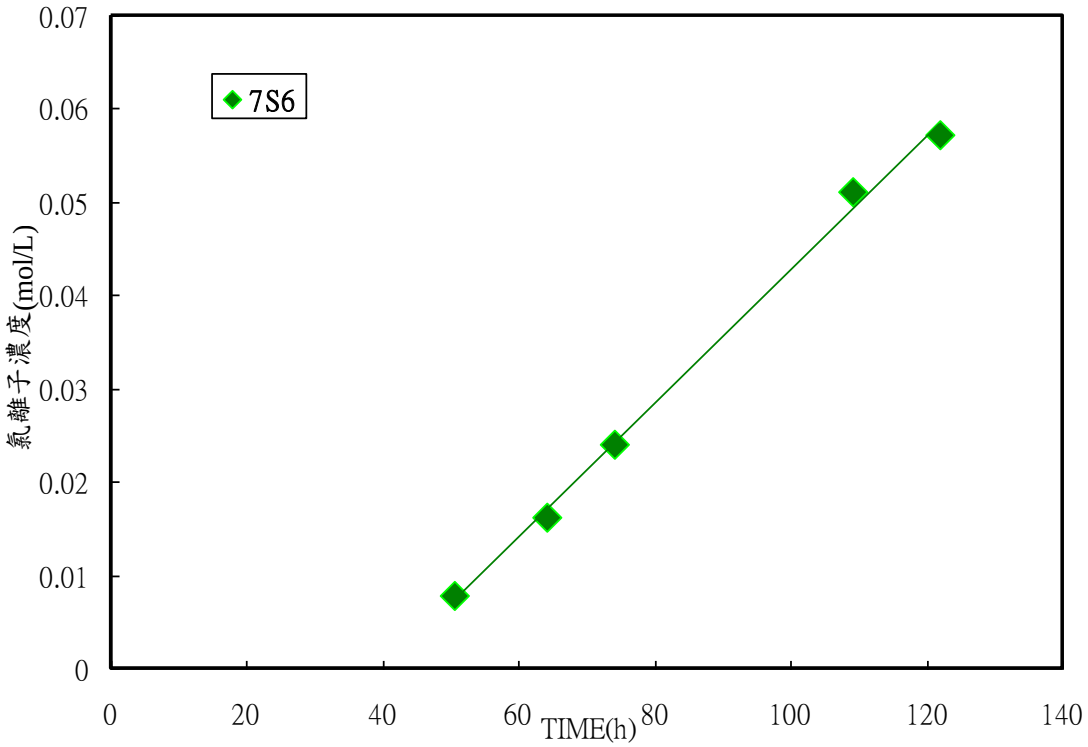


圖 4-49　累積氯離子濃度關係圖(7S6)

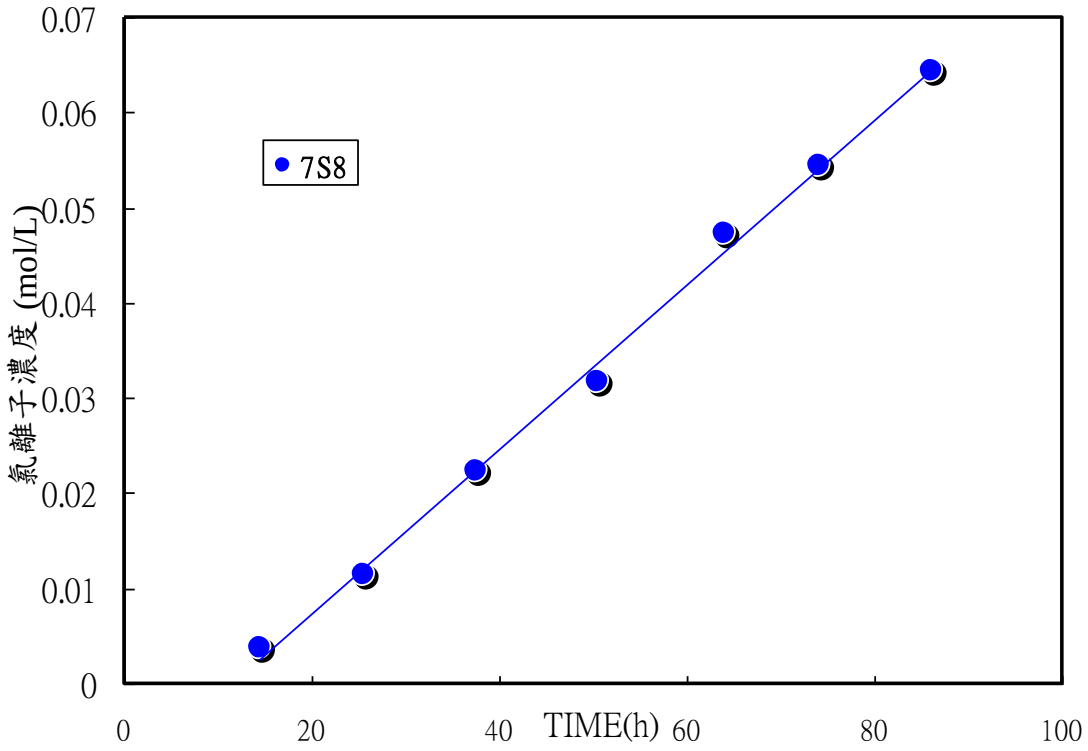


圖 4-50　累積氯離子濃度關係圖(7S8)

從圖 4-51 可知於 75℃貯存溫度下，所有爐石摻料漿體之氯離子濃度皆比 7B0 對照組減少，其中以 7S2 濃度最低，表示具爐石摻料之漿體之抵抗氯離子入侵的能力皆提升，其中以 7S2 之能力最佳。

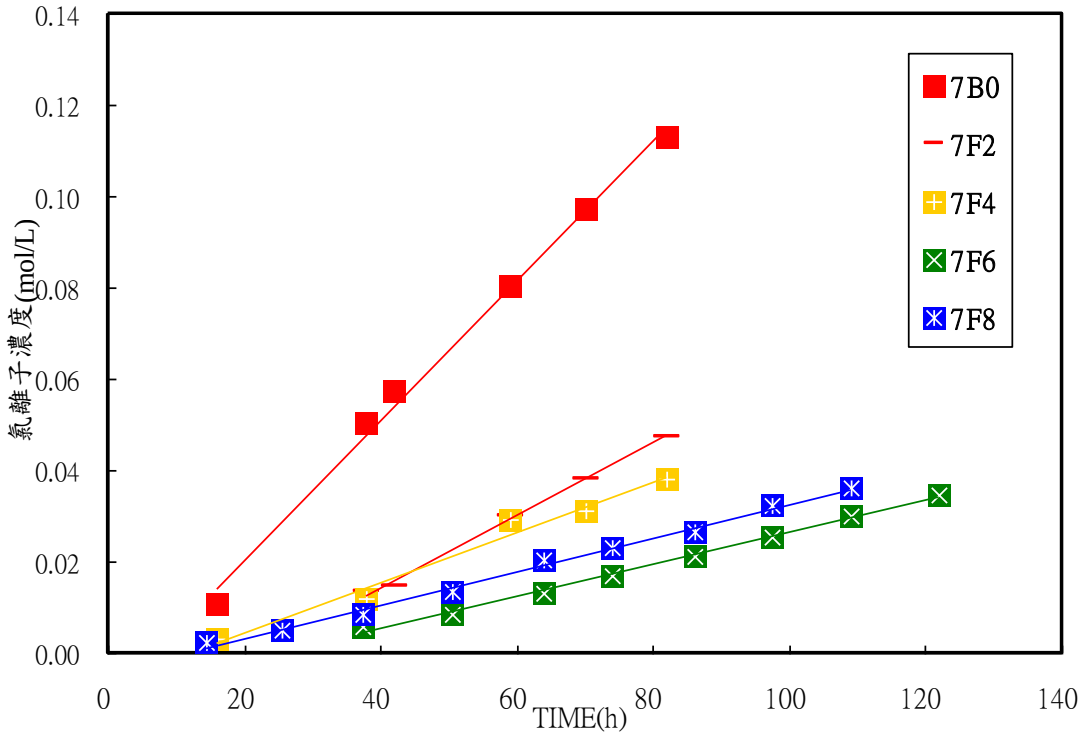


圖 4-51　累積氯離子濃度與時間關係比較圖(爐石 75℃劣化組)

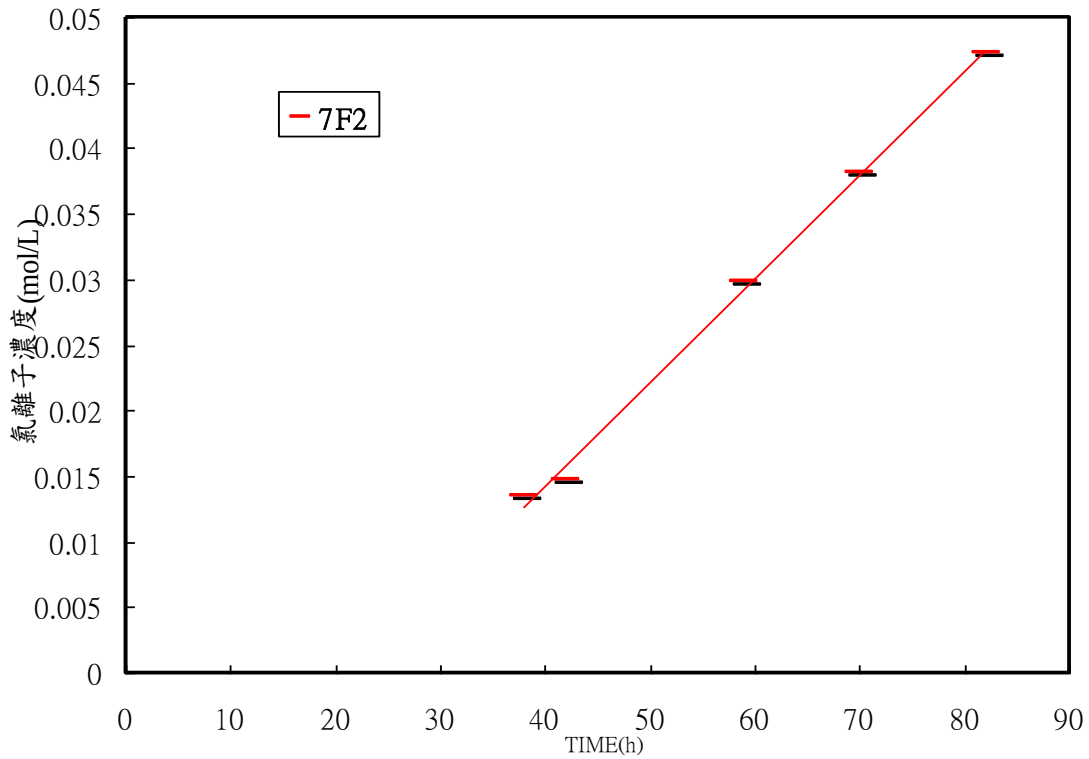


圖 4-52　累積氯離子濃度關係圖(7F2)

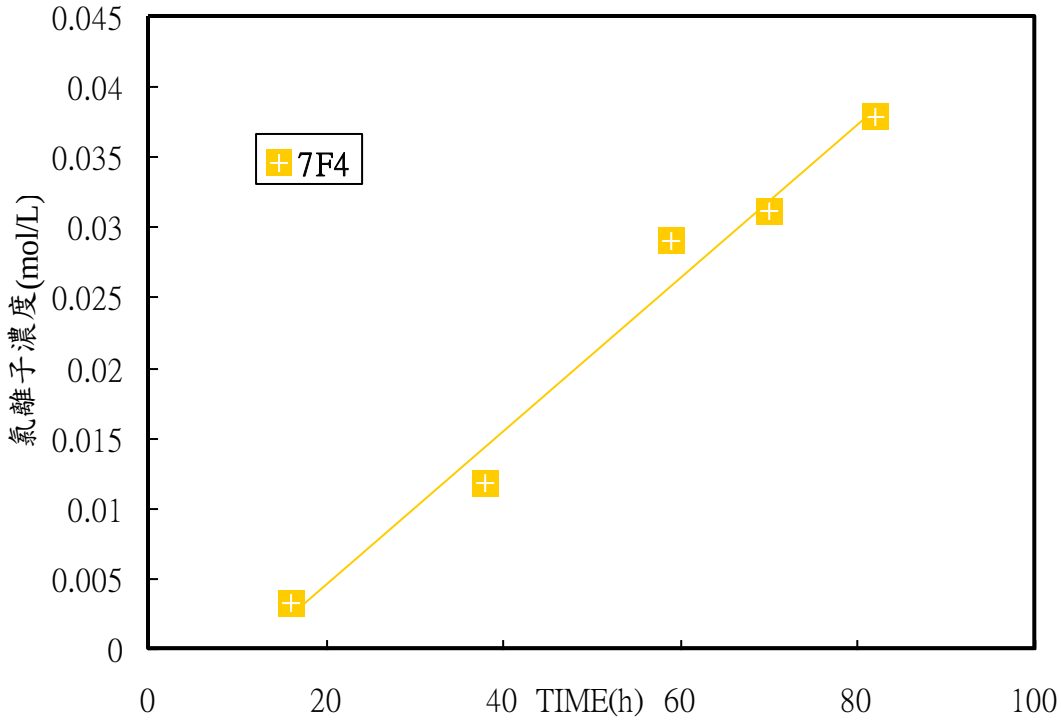


圖 4-53　累積氯離子濃度關係圖(7F4)

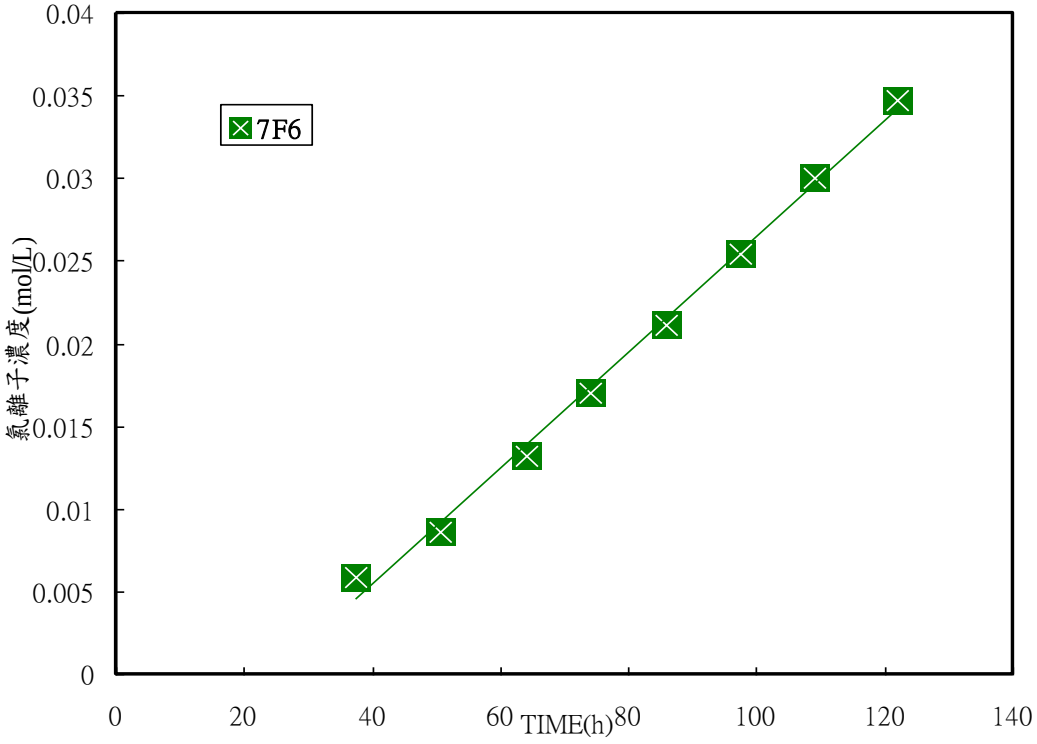


圖 4-54　累積氯離子濃度關係圖(7F6)

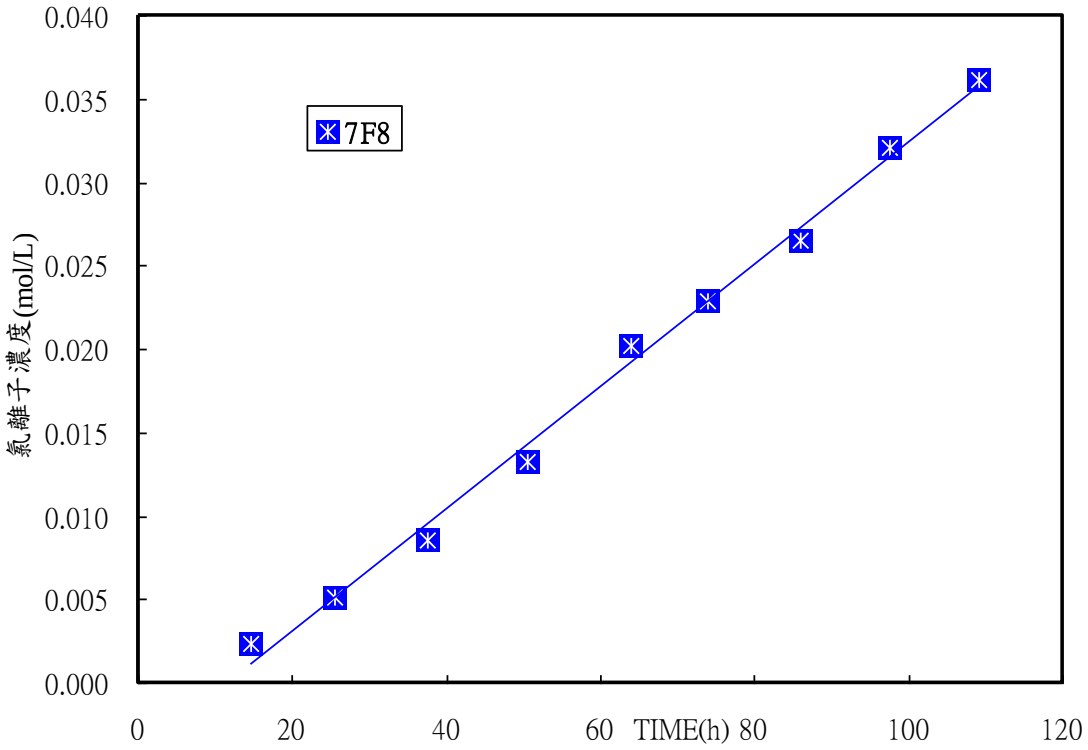


圖 4-55　累積氯離子濃度關係圖(7F8)

從圖 4-56 得知於 75℃貯存溫度下，所有飛灰摻料漿體之氯離子濃度皆比 7B0 對照組減少，其中以 7F6 濃度最低，表示具飛灰摻料之漿體之抵抗氯離子入侵的能力皆有效提升，其中以 7F6 之能力最佳。

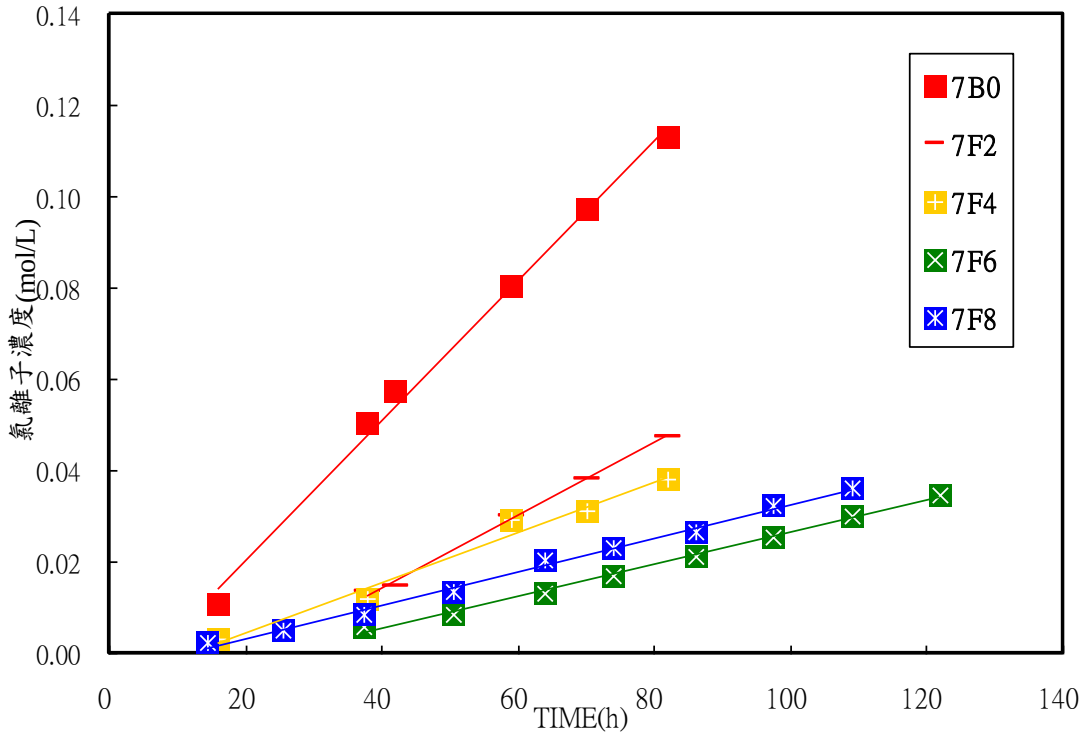


圖 4-56　累積氯離子濃度關係比較圖(飛灰 75℃劣化組)

貳、穿透速率於環境溫度下與替代率之關係

由表 4-7 得知爐石摻料漿體的穿透速率大部分會隨著替代率的增加而較快穿透，但穿透速率皆較低於無替代率之控制組，表示有各爐石摻料的漿體，於 25℃及 75℃的溫度下皆有助於抵抗氯離子的入侵；由圖 4-8 得知飛灰摻料漿體的穿透速率大部分會隨著替代率的增加而延緩穿透，且穿透速率皆較低於無替代率之控制組，表示越高飛灰替代率摻料，於常溫及 75℃的溫度下有助於抵抗氯離子的入侵。

表 4-7　各組替代率於不同環境溫度之穿透速率與效益比(爐石類)

穿透速率 K(x10^{-4} mol/L x h)						效益比	
編號	25℃(a)	編號	50℃(b)	編號	75℃(c)	b/a	b/c
B0	16.39	5B0	1.54	7B0	15.32	0.09	0.93
S2	2.79	5S2	1.12	7S2	0.22	0.40	0.08
S4	4.41	5S4	0.59	7S4	0.23	0.13	0.05
S6	4.75	5S6	0.75	7S6	7.15	0.16	1.51
S8	5.76	5S8	14.53	7S8	8.68	2.52	1.51

表 4-8　各組替代率於不同環境溫度之穿透速率與效益比(飛灰類)

穿透速率 K(x10^{-4} mol/L x h)						效益比	
編號	25℃(a)	編號	50℃(b)	編號	75℃(c)	b/a	b/c
B0	16.39	5B0	1.54	7B0	15.32	0.09	0.93
F2	4.26	5F2	4.24	7F2	7.91	1.00	1.86
F4	4.09	5F4	6.33	7F4	5.46	1.55	1.33
F6	4.72	5F6	4.80	7F6	3.51	1.02	0.74
F8	0.39	5F8	4.00	7F8	3.67	10.26	9.41

由圖 4-57 及 4-58 顯示除 S8 外，大部分的爐石摻料漿體經提高貯存溫度後，其穿透速率皆呈大幅下降趨勢，其中以 50℃的劣化組皆能有效提昇抵抗氯離子的能力；從圖 4-59 顯示於不同貯存溫度下之穿透速率以均以 F8 下降最多，且貯存溫度越高，皆提升大部分漿體的穿透速率，故具飛灰摻料之試體會因溫度提高而導致抵抗氯離子能力的下降。

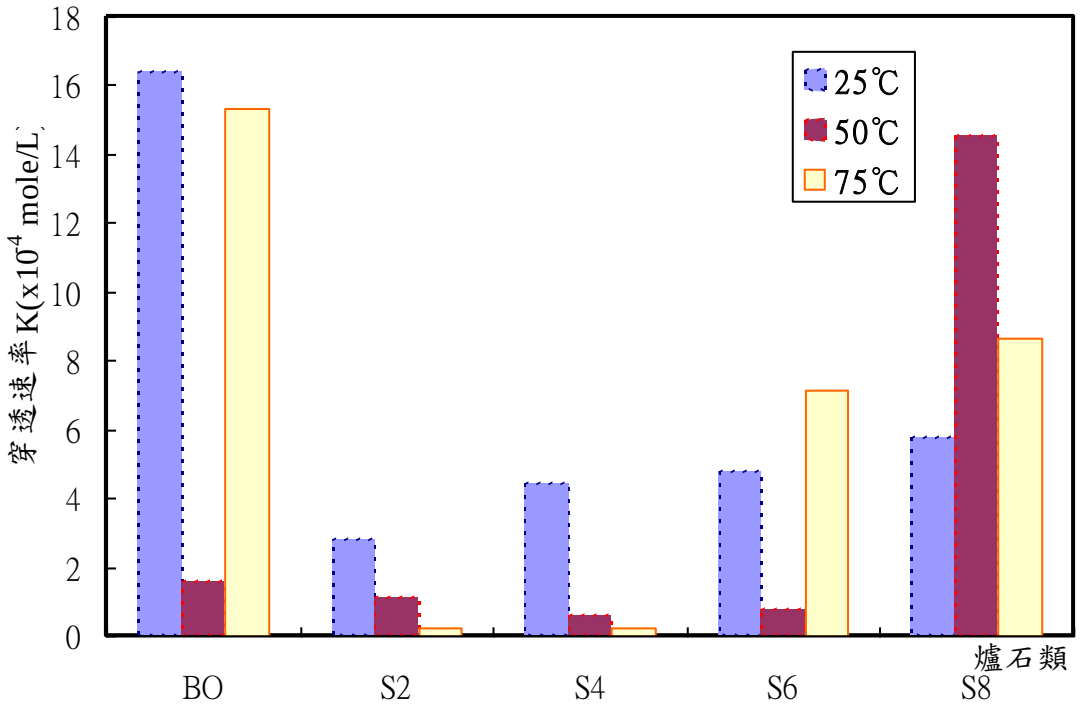


圖 4-57　各替代率與不同溫度下穿透速率關係長條圖(爐石類)

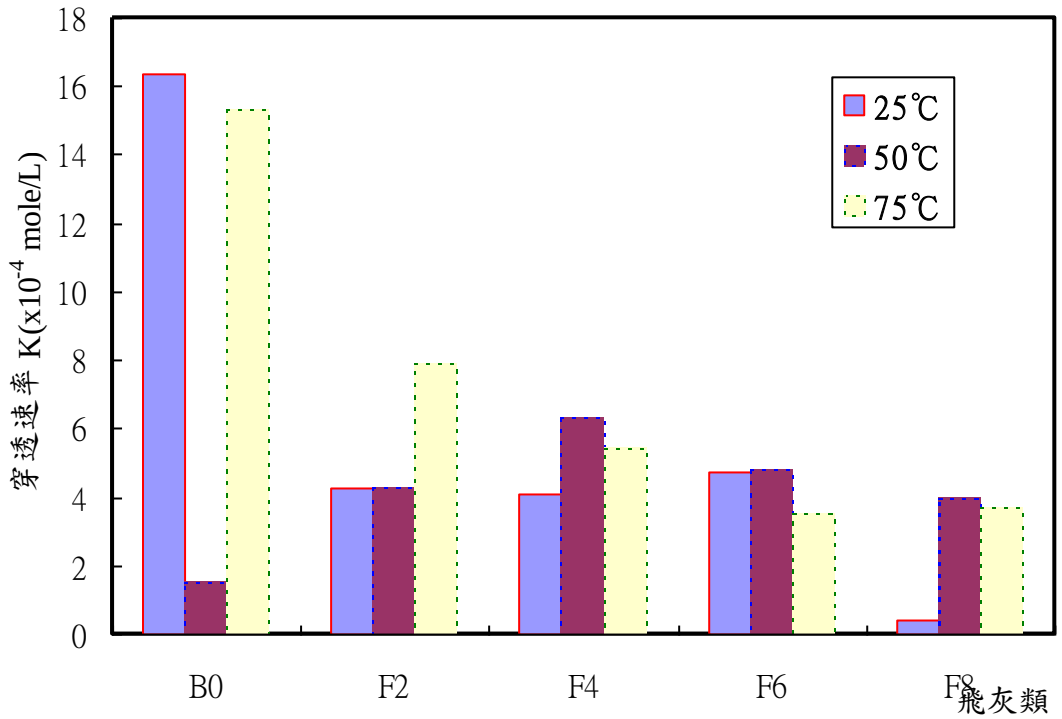


圖 4- 58　各替代率與不同溫度下穿透速率關係長條圖(飛灰類)

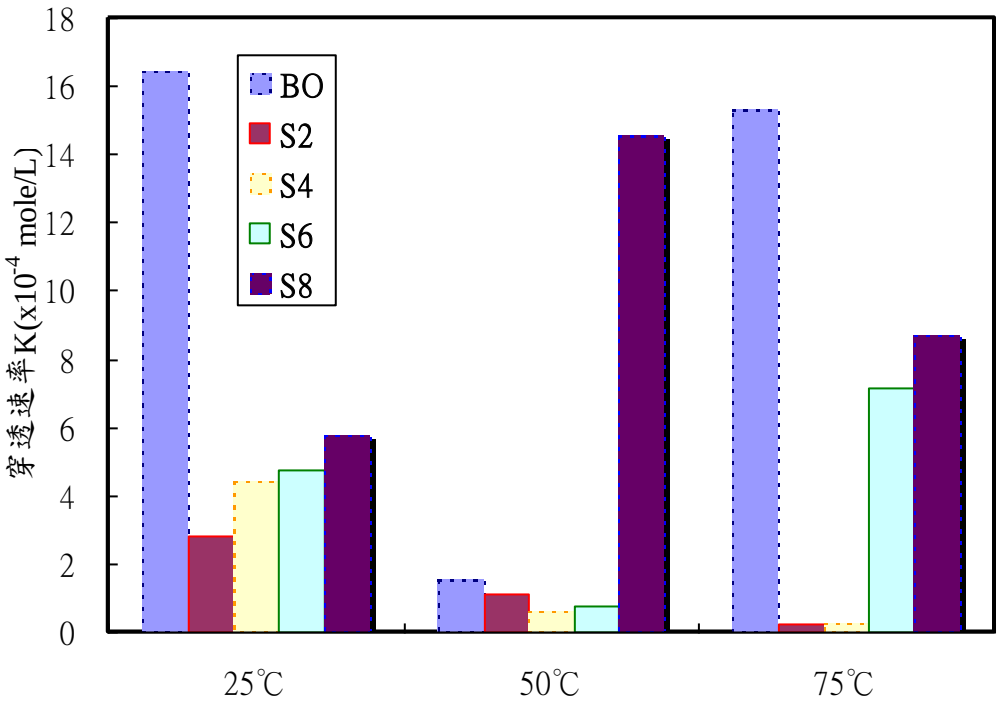


圖 4-59　不同溫度下各替代率與穿透速率比較圖(爐石類)

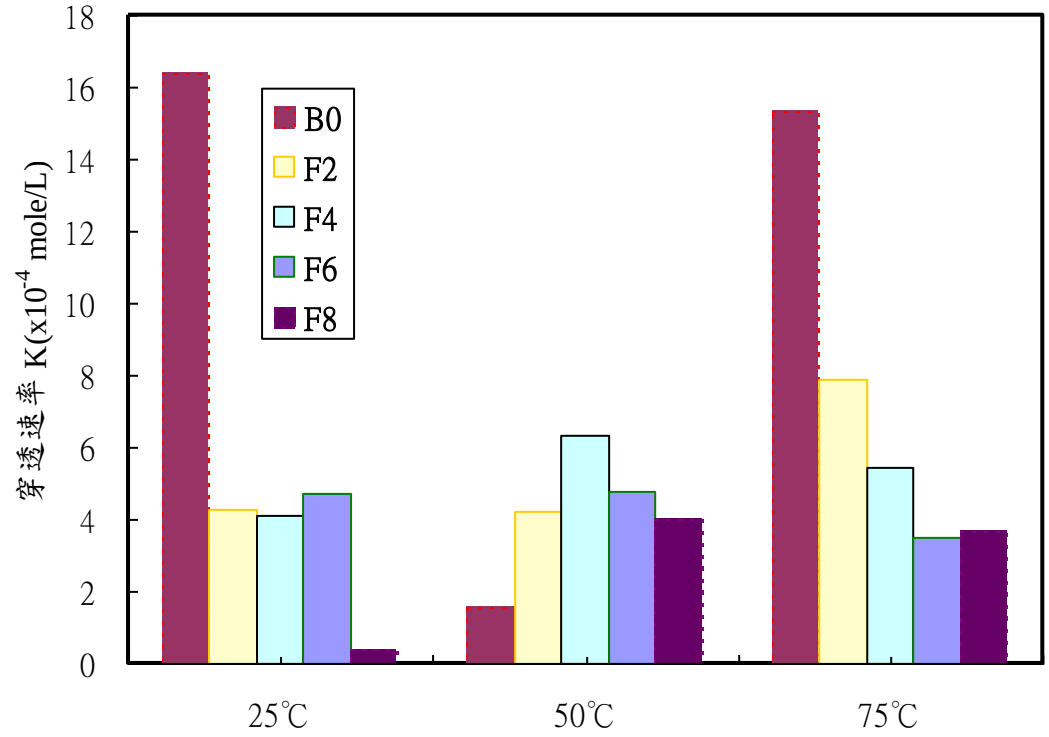


圖 4-60　不同溫度下各替代率與穿透速率比較圖(飛灰類)

第五節　小結

本研究將爐石及飛灰替代水泥之建築水泥砂漿經由56天養護後，放置不同貯存環境28天，之後進行抗壓、抗拉等力學試驗，得到強度數值，及進行加速氯離子傳輸試驗(ACMT)求得傳輸速率(k)，並藉由壓汞孔隙量測試驗(MIP)分析材料孔隙結構變化與分佈。故本節就前述一至四節的試驗結果與分析，將試驗成果綜整如下：

壹、經試驗結果得知爐石摻料漿體抗壓強度，以替代率 40%為最佳，而替代率 80%則明顯不適用於水泥砂漿等材料；抗拉強度各組皆呈現較佳強度，並以替代率 40%為最佳；且抗壓及抗拉強度效益比分別為 1.10 及 1.14，顯示相對強度均以替代率 40%為最佳，因爐石 60%替代率於強度上，仍可較無替代對照組為佳，表示與現行 CNS 規範之替代率 25%~65%相符。

貳、經飛灰摻料漿體抗壓及抗拉強度統計結果相同，得知替代率 20%及 40%皆有較佳強度，尤以替代率 40%最佳，而替代率 60%及 80%則明顯不適用於水泥砂漿等材料；且抗壓及抗拉強度效益比皆為 1.09，顯示相對強度均以替代率 40%最佳。

參、藉由抗壓試驗得知一般與沿海環境的差異性，建議沿海環境可使用飛灰摻料漿體，以增加抗氯離子入侵的能力。

肆、由壓汞孔隙量測試驗(MIP)得知，飛灰替代率 20%試體孔隙度最小，其餘試體隨著替代量越高，孔隙度隨之逐漸增大而耐久性呈下降趨勢，故替代率 80%試體孔隙度最大，顯示替代率 20%的耐久性最佳；由孔徑分佈觀察得知，飛灰替代水泥可有效降低影響耐久性的 100~500nm 孔徑的汞貫入量。

伍、經塩霧劣化後之爐石摻料抗壓強度皆大幅提升，且以爐石替代率 20%強度最佳，表示於沿海地區可使用替代率 20%的摻料可獲最大強度，但若考量節碳與節省經費，則替代率 80%之摻料可達極高效益；另飛灰摻料部分，除替代率 40%與未經劣化之對照組強度相同外，其餘皆大幅提升且近達一倍，並以替代率 20%最佳，顯示於沿海地區若使用爐石或飛灰摻料，大部分皆不受影

響且有增強趨勢。

陸、一般常溫 25℃下經 ACMT 試驗，可知爐石與飛灰摻料漿體之氯離子擴散濃度，皆比無替代對照組來得低，表示凡具爐石或飛灰摻料之水泥砂漿皆有助於抵抗氯離子的入侵，且以爐石替代率 40%及飛灰替代率 80%最佳。

柒、於 50℃貯存溫度的 ACMT 試驗結果，除爐石替代率 80%外，所有漿體氯離子濃度皆大幅減少，顯示經提高貯存溫度後，除替代率 80%試體之外，其餘抗氯離子入侵能力皆大幅增加；另各組飛灰漿體之氯離子濃度皆比無替代對照組增加，顯示可能經提高貯存溫度後使漿體產生孔隙與微裂紋，造成氯離子穿透速率增加，進而使得其抵抗氯離子入侵的能力大幅下降。

捌、由 75℃貯存溫度的 ACMT 試驗結果，顯示凡具爐石與飛灰摻料漿體之氯離子濃度皆比無替代對照組減少，故其抵抗氯離子入侵的能力皆提升，並以爐石替代率 40%及飛灰替代率 60%最佳。

玖、若以不同貯存溫度與摻料替代率而言，爐石漿體的穿透速率大部分會隨著替代率的增加而快速穿透，但穿透速率皆較低於無替代控制組，表示凡具爐石摻料的漿體，於 25℃及 75℃皆有助於抵抗氯離子的入侵；飛灰部分的穿透速率大部分則隨著替代率的增加而延緩穿透，且穿透速率亦低於無替代控制組，表示愈高替代率者，於 25℃及 75℃下愈可抵抗氯離子的入侵。

壹拾、　綜上，本研究試驗成果就力學強度及耐久性質整體評估得知，以 60%爐石及 40%飛灰之替代率水泥砂漿試體效益最佳。

第五章　減碳效益可行性評估

根據工研院能源與環境研究所 96 年再生綠建材的研究指出，建築產業市場包括新建築、裝修(含重新裝修與加增建)等，其產值約佔全國總值的 17%，又據統計包含材料生產、運輸、施工及完工後使用等各階段，能源消耗排放 CO_2 佔全國總消耗量的 28%，故本章就綠建築減碳指標及相關減碳評估法，以第四章研究成果試算減碳比，並對各類型建築做實例試算減碳量，以供學界參考。

第一節　綠建築減碳量指標評估

將本研究的爐石摻料各替代率的配比設計代入第二章綠建築 CO_2 減量比關係式(式 2-3)，經計算彙整如表 5-1 及分析如圖 5-1 所示，結果顯示高爐水泥 CO_2 減量比越高，則再生建材使用率係數亦越高，進而提高減碳效益且降低 CO_2 排放量。

表 5-1　綠建築 CO_2 減量指標爐石替代率各係數統計表

試體 編號	取代率 WS/WC	高爐水泥 CO_2 減量比 CCR	再生建材使用率 R
S0	0%	0	0
S2	20%	0.024	0.036
S4	40%	0.048	0.144
S6	60%	0.072	0.324
S8	80%	0.096	0.576

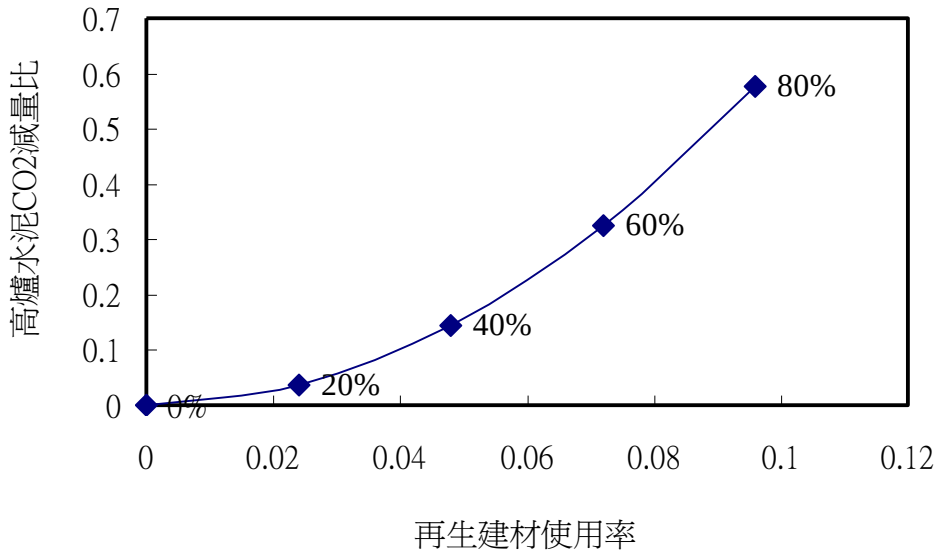


圖 5-1　高爐水泥 CO_2 減量比與再生建材使用率關係圖

第二節　減碳比評估法

由於近年全球溫室效應，致使各國政府莫不推動節能減碳政策，本章藉由爐石及飛灰替代水泥後的減碳量化數據，應用相關研究減碳比評估比較，目前相關評估方法有綠色材料法、能源計畫表及再生材料法等三種評估如下。

壹、綠色材料法

本項評估係為第二章所述，國道新建工程局制定之節能減碳規劃設計參考原則(草案)，若採用綠色材料時，可依據下列計算原則而得知減碳比等參考數據。

【計算原則】：依據使用添加卜作嵐材料之替代率計算減碳比 β，綠色混凝土價為添加卜作嵐材料（爐石：飛灰＝3:1）之混凝土造價乘以減碳比 β。

- 綠色混凝土價＝原混凝土價 × β

減碳比 β 計算說明
飛灰：F、爐石粉：S、水泥：C β =S÷（C+S+F）× 300/400＋F÷（C+S+F）×400/400----------式(4-1)

本研究的配比設計代入以下綠色材料減碳比之計算原則，得知爐石與飛灰漿體減碳比彙整如表 5-2 所示，顯示 S2~S8 之減碳比為 22%~59%，F2~F8 則有 17%~44%，相對其綠色混凝土經費約可節省近二成至六成，而針對本研究結果之最適替代率為 S6 減碳比為 50%，F4 減碳比則為 29%，顯示本方法爐石之減碳效益大於飛灰。

表 5-2　綠色材料法減碳比統計表

試體 編號	取代率 WS/WC	水泥(kg) C	爐石(kg) S	飛灰(kg) F	減碳比 β
B0	0%	510	0	-	0%
S2	20%	422	84	-	22%
S4	40%	359	144	-	38%
S6	60%	313	188	-	50%
S8	80%	277	222	-	59%
F2	20%	414	-	83	17%
F4	40%	348	-	139	29%
F6	60%	300	-	180	38%
F8	80%	264	-	211	44%

貳、能源計畫法

依經濟部能委會「能源查核管理輔導計畫」所訂定水泥、爐石與飛灰的碳排放量，各為 409.57、98.3 及 0 kg-CO_2，以本研究的配比計算碳排放量，得知其減碳比彙整如表 5-3 所示，顯示 S2~S8 之減碳比為 13%~35%，F2~F8 則有 19%~48%，可得知其減碳比以飛灰的效益大於爐石，而以本研究結果之最適替代率代入計算，S6

減碳比為 30%，F4 減碳比則為 32%，於能源計畫法中，均具三成的減碳效益。

表 5-3　能源計畫法減碳比統計表

試體編號	水泥		爐石		飛灰		**CO_2 排放總量** (kg-CO_2)	減碳比 β
	用量(kg) C	碳排放量 409.57	用量(kg) S	碳排放量 98.3	用量(kg) F	碳排放量 0		
B0	510	208,881	0	0	-	-	**208,881**	0%
S2	422	172,839	84	8,257	-	-	**181,096**	13%
S4	359	147,036	144	14,155	-	-	**161,191**	23%
S6	313	128,195	188	18,480	-	-	**146,676**	30%
S8	277	113,451	222	21,823	-	-	**135,273**	35%
F2	414	169,562	-	-	83	0	**169,562**	19%
F4	348	142,530	-	-	139	0	**142,530**	32%
F6	300	122,871	-	-	180	0	**122,871**	41%
F8	264	108,126	-	-	211	0	**108,126**	48%

參、再生材料法

依公共工程再生材料之研究（蕭克宇，2010）所訂定水泥、爐石與飛灰的碳排放量，各為 818.84、60.92 及 4.82 kg-CO_2，其碳排放量主要依產品碳足跡的計算精神，加入再生材料的製程、運輸及日後維護損耗等生命周期過程中所建立的碳排放量，以本研究的配比設計加以計算，得知各替代率摻料的減碳比彙整如表 5-4 所示，顯示 S2~S8 之減碳比為 16%~42%，F2~F8 則有 19%~48%，得知飛灰與爐石各替代率摻料的減碳比大致相同，且飛灰部分與能源計畫法減碳比完全相同；若以本研究結果代入，則顯示 S6 減碳比為 36%，F4 則為 32%，本法減碳效益與能源計畫法相同，均為三成以上。

表 5-4　再生材料法減碳比統計表

試體編號	水泥		爐石		飛灰		CO_2 排放總量 (kg-CO_2)	減碳比 β
	用量(kg) C	碳排放量 818.84	用量(kg) S	碳排放量 60.92	用量(kg) F	碳排放量 4.82		
B0	510	417,608	0	0	-	-	**417,608**	0%
S2	422	345,550	84	5117	-	-	**350,668**	16%
S4	359	293,964	144	8772	-	-	**302,736**	28%
S6	313	256,297	188	11453	-	-	**267,750**	36%
S8	277	226,819	222	13524	-	-	**240,343**	42%
F2	414	339,000	-	-	83	400.06	**339,400**	19%
F4	348	284,956	-	-	139	669.98	**285,626**	32%
F6	300	245,652	-	-	180	867.6	**246,520**	41%
F8	264	216,174	-	-	211	1017.02	**217,191**	48%

綜合上述三種方法由圖 5-2 得知以綠色能源法對爐石部分的減碳效益最佳，再生材料法次之，能源計畫法居最後；於飛灰部分則以能源計畫法及再生材料法同為最佳效益，綠色能源法效益次之。另以三種方法數據平均而言，顯示 S2~S8 之減碳比平均為 17%~46%，F2~F8 則為 18%~47%，得知飛灰與爐石摻料的減碳比大致相同，故此兩種再生材料均對減碳比有近二成至五成的效益，相對於綠水泥砂漿的經濟性有良好助益。

另於 1:3 水泥砂漿之工程項目，依據目前營建物價（99 年 10 月）將水泥、細砂、小工及零星工料等項目做一單價分析，並與 60%爐石與 40%飛灰替代用量比較如表 5-5，因此兩項材料屬事業廢棄物並無工料費用，僅計運費，經計算結果得知爐石與飛灰摻料水泥漿體各可節省 20%及 15%的單價成本。

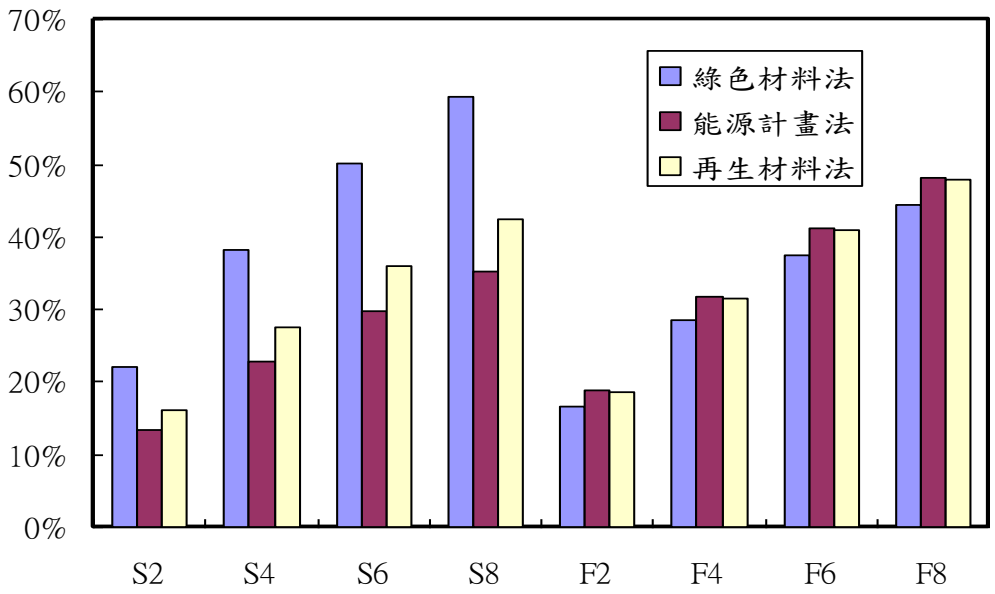


圖 5-2　各減碳效益評估法之減碳比與替代率比較圖

表 5-5　水泥砂漿單價成本分析表

工作項目：1:3 水泥砂漿(m^3)				複價		
工料名稱	單價	單位	數量	純水泥砂漿	60%爐石漿體	40%飛灰漿體
水泥(袋裝)Ⅰ型	2,475	t	0.45	1,114		
40%水泥(袋裝)Ⅰ型	2,475	t	0.18		446	
60%爐石(只計運費)	300	t	0.27		81	
60%水泥(袋裝)Ⅰ型	2,475	t	0.27			668
40%飛灰(只計運費)	100	t	0.18			18
細砂	950	m^3	0.95	903	903	903
小工	1,500	工	0.6	900	900	900
零星工料(約以上項目之 3%)		式	1	84	71	71
小計		**m^3**	**1**	**3,000**	**2,400**	**2,560**
節省成本效益		**m^3**	**1**		**20%**	**15%**

第三節　減碳量案例分析

本節將依第四章之試驗結果研討以 60%爐石及 40%飛灰替代水泥砂漿中之水泥用量，並依本章第二節依生產、製造及維護等生命週期之再生材料法（林志忠，2010），所得的水泥 818.84、爐石 60.92 與飛灰 4.82 kg-CO_2 之最高碳排量，分別試算住宅類、商辦大樓及公有建築等三大類型，大多屬 RC 構造加上預鑄型式之低樓層（6 層以下）、中樓層（7~14 層） 與高樓層（15 層以上）等三種案例之水泥砂漿減碳量，並概試算各類建築使用於非結構用之爐石及飛灰摻料水泥砂漿，與水泥減碳參考比例，進而得知各類建築物樓地板每 m^2 之減碳量影響範圍，以供減碳效益之參考。

表 5-6　住宅類建築水泥砂漿減碳量分析表

住宅類	規模	低樓層 地上 3 層	中樓層 3 棟最高地上 13 層 地下 1 層	高樓層 地上 35 層 地下 6 層
案別/地點	單位	A/台南	B/台南	C/台中
總樓地板面積(A)	m^2	688	17,117	44,930
混凝土用量	kg	283,800	8,027,017	20,427,425
粉光水泥 砂漿總量(B)	kg	75,680	1,934,221	4,717,650
漿體內水泥用量 (D=B*0.04)	kg	3,027	77,369	188,706
水泥總碳量 (C=D*818.84)	kg-CO_2	2,478,792	63,352,701	154,520,021
使用 60%爐石用量 (S=D*60%)	kg	1,816	46,421	113,224
爐石總減碳量 (SC=S*60%*(818.81-60.92))	kg-CO_2	825,975	21,110,181	51,488,659
樓地板採爐石每 m^2 減碳量 (E=SC/A)	kg-CO_2/m^2	1,201	1,233	1,146
使用 40%飛灰用量 (F=D*40%)	kg	1,211	30,948	75,482
飛灰總減碳量 (FC=F*40%*(818.81-4.82))	kg-CO_2	394,272	10,076,765	24,577,673
樓地板採飛灰 每 m^2 減碳量 (G=FC/A)	kg-CO_2/m^2	573	589	547

由表 5-6 得知，住宅類建類試算 60%爐石與 40%飛灰的替代水泥量，以中樓層樓地板面積每 m^2 減碳量各為 1,233 及 589 kg-CO_2 最高，發現各類樓層建築之減碳量均接近，顯示住宅類相對於裝修粉光材料的一般需求量皆相同，故單位面積減碳量亦相差不大。

表 5-7　商辦類建築水泥砂漿減碳量分析表

商辦大樓類	規模	低樓層 地上 4 層 地下 2 層	中樓層 地上 11 層 地下 4 層	高樓層 地上 20 層 地下 2 層
案別/地點	單位	A/台中	B/新竹	C/北京
總樓地板面積(A)	m^2	7,964	20,213	68,178
混凝土用量	kg	3,010,392	11,137,363	34,941,225
粉光水泥 砂漿總量(B)	kg	716,760	2,930,885	8,522,250
水泥用量 (D=B*0.04)	kg	28,670	117,235	340,890
水泥總碳量 (C=D*818.84)	kg-CO_2	23,476,470	95,997,035	279,134,368
使用 60%爐石用量 (S=D*60%)	kg	17,202	70,341	204,534
爐石總減碳量 (SC=S*60%*(818.81-60.92))	kg-CO_2	7,822,753	31,987,820	93,012,246
樓地板採爐石每 m^2 減碳量 (E=SC/A)	kg-CO_2/m^2	982	1,583	1,364
使用 40%飛灰用量 (F=D*40%)	kg	11,468	46,894	136,356
飛灰總減碳量 (FC=F*40%*(818.81-4.82))	kg-CO_2	3,734,125	15,269,114	44,398,604
樓地板採飛灰 每 m^2 減碳量 (G=FC/A)	kg-CO_2/m^2	469	755	651

經由表 5-7 發現商辦類建築以 60%爐石與 40%飛灰替代水泥量結果顯現，以中樓層樓地板面積每 m^2 減碳量各為 1,583 及 755 kg-CO_2 最高，其次為高樓層各為 1,364 及 651 kg-CO_2 之減碳量，顯示商辦類因中樓層案例為 RC 構造，相較於高樓層以預鑄構造之裝修粉光材料需求量高，故單位面積減碳量較大，減碳效益較佳。

表 5-8　公有建築類水泥砂漿減碳量分析表

公有建築類	規模	低樓層 地上 6 層 地下 1 層	中樓層 最高地上 14 層 地下 3 層	高樓層 地上 25 層 地下 4 層
案別/地點	單位	A/新北市	B/台北市	C/新北市
總樓地板面積(A)	m^2	4,774	282,683	321,738
混凝土總量	kg			
粉光水泥砂漿 總量(B)	kg	517,425	25,319,750	81,385,125
水泥用量 (D=B*0.04)	kg	20,697	1,012,790	3,255,405
水泥總碳量 (C=D*818.84)	kg-CO_2	16,947,531	829,312,964	2,665,655,830
使用 60%爐石用量 (S=D*60%)	kg	12,418	607,674	1,953,243
爐石總減碳量 (SC=S*60%*(818.81-60.92))	kg-CO_2	5,647,201	276,340,967	888,241,161
樓地板採爐石 每 m^2 減碳量 (E=SC/A)	kg-CO_2/m^2	**1,183**	**978**	**2,761**
使用 40%飛灰用量 (F=D*40%)	kg	8,279	405,116	1,302,162
飛灰總減碳量 (FC=F*40%*(818.81-4.82))	kg-CO_2	2,695,644	131,909,011	423,994,364
樓地板採飛灰 每 m^2 減碳量 (G=FC/A)	kg-CO_2/m^2	**565**	**467**	**1,318**

由表 5-8 得知，公有建築類試算 60%爐石的替代水泥量，以高樓層樓地板面積每 m^2 減碳量為 2,761 kg-CO_2 最高，其次為低樓層建築 1,183 kg-CO_2，中樓層 978 kg-CO_2 則為最少減碳量；經試算 40%飛灰的替代水泥量，亦以高樓層建築樓地板面積每 m^2 減碳量為 1,318 kg-CO_2，其次為低樓層建築 565 kg-CO_2，中樓層 467 kg-CO_2 為最少減碳量。顯示中樓層案例係因地下層空間供軌道設施及停車空間使用，相對於裝修粉光材料較無需求，故單位面積減碳量較小；而高樓層係為百貨商場及多個機關共同辦公使用，因其辦公隔層裝修空間需求較多，故粉光水泥砂漿之需求量較大，故顯示以爐石或飛灰替代時減碳量較多，則減碳效益較佳。

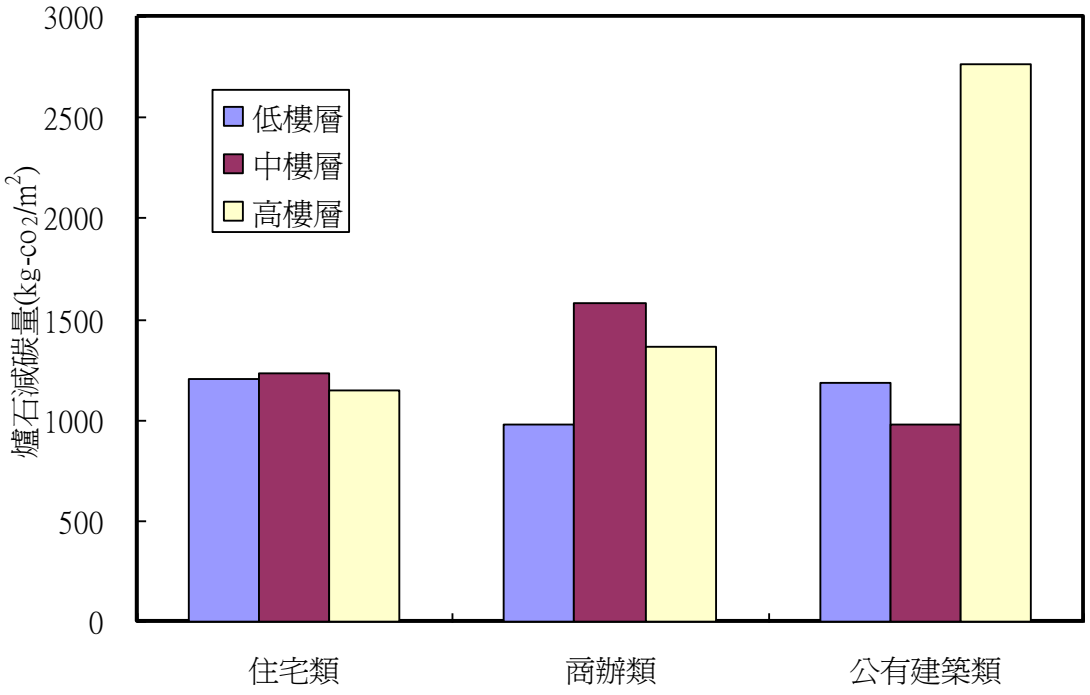


圖 5-3　爐石減碳量與建築類型關係圖

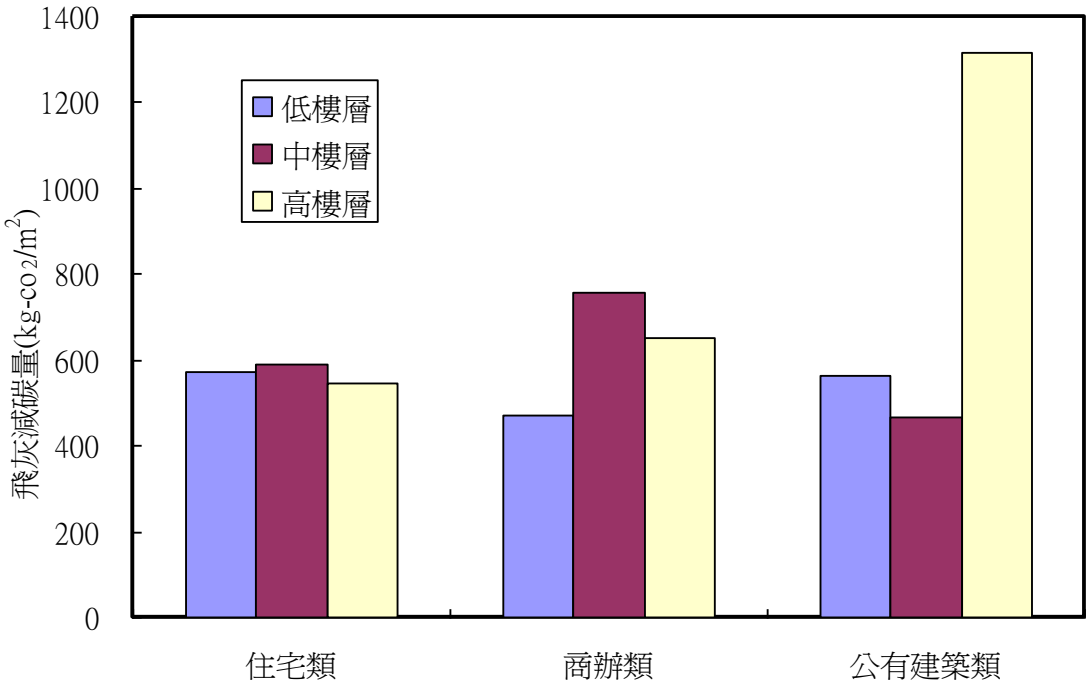


圖 5-4　飛灰減碳量與建築類型關係圖

依本研究成果代入，試算各類建築之 60%爐石替代率減碳比為 33%，結果與本章第三節各評估法計算相符；而各類型建築實例分析下以公有建築類減碳效益較佳，其次為商辦類，而住宅類最低，應與中低樓層混凝土構造與高層預鑄工法構造水泥砂漿需求量有關，且各類建築之 40%飛灰替代率減碳比為 16%，表示減碳比相較於相關研究評估法為低，故與依各類建築實例之結果較為保守，且爐石減碳效益較飛灰為佳。

第四節　小結

綜合本章三種減碳比評估法中，以綠色材料法之爐石減碳比最佳，而能源計畫法與再生材料法之飛灰減碳比均具相同效益，減碳比平均可達三成以上，且爐石較飛灰減碳效益佳；若以替代率試算成本分析，則水泥經費相對可節省約三成至五成。在各類建築實例分析下，發現高樓層公有建築類之減碳效益最佳，主要係與大量的裝修需求所需水泥砂漿用量有關，其中以爐石及飛灰替代水泥時，減碳比各為 33%及 16%。

第六章　結論與建議

本研究經由力學強度及耐久性試驗成果，評估於住宅、商辦大樓及公有建築等類型建築減碳效益之可行性，並就爐石及飛灰替代水泥量後水泥砂漿單價成本分析等，期望達到「爐石與飛灰替代水泥量較混凝土增加」、「探討耐久性較未添加的改善效益」、與「建築減碳效益評估」三大目標。提出下列結論與建議。

第一節　研究結論

壹、 本研究試驗成果就抗壓與抗拉強度力學性質試驗評估下，發現均以 40%爐石及 40%飛灰替代率，均可較未添加水泥砂漿的力學與耐久性質佳。

貳、 經由加速氯離子傳輸試驗發現穿透速率與抗氯離子能力均比未添加者佳，顯示可增加建築物粉刷表面耐久及耐候性，並可減少外墻之維護成本等經濟效益。

參、 由壓汞孔隙量測試驗(MIP)結果得知，顯示 20%飛灰替代率試體耐久性最佳；由孔徑分佈觀察得知，其中以 40%飛灰替代率較佳。而與抗氯離子能力交互比較下，發現凡具飛灰及爐石之水泥漿體均比未添加者為佳，顯示孔隙結構與抗氯離子能力有良好的關連性。

肆、 模擬於夏季高溫外墻表面加入飛灰與爐石水泥砂漿，於 25℃與 75℃氯離子的傳輸行為中，隨著替代率的提高越可抵抗氯離子的入侵，表示凡具此兩種摻料之水泥砂漿皆可提升抗氯離子能力，且於此兩種溫度下均以爐石替代率 40%最佳，而飛灰部分則各以替代率 40%及 60%者最佳。

伍、 綜合力學強度與耐久性質評估下，結果以 60%爐石及 40%飛灰為本研究最適替代率，故可符合現行規範的替代率。

陸、 經由本研究的配比設計所計算的三種減碳比評估法中，以綠色材料法之爐石減碳比最佳，而能源計畫法與再生材料法之飛灰減碳比均具相同效益，減碳比平均可達 30%以上，且爐石較飛灰減碳效益佳；若以替代率試算成本分析，則水泥經費相對可節省約三成至五成。

柒、 在本論文各類建築實例分析下，發現高樓層公有建築類之樓地板面積每 m^2 爐石及飛灰摻料水泥砂漿最多可減少 2,761 及 1,318 kg-CO_2 的碳量，減碳比約為 33%及 16%，具較佳的減碳效益；其中以爐石及飛灰替代水泥時，減碳比各為 33%及 16%；並以本研究成果代入 1:3 水泥砂漿項目單價成本分析，得知 60%爐石及 40%飛灰水泥砂漿分別可節省 20%及 15%的成本效益，顯示本研究成果於減碳及經濟上均有良好的效益。

第二節　研究建議

壹、對於現行規範替代率之探討，經本研究抗壓及抗拉試驗之力學性質結果得知，飛灰部分因現行規範替代率最高為 25%，可建議放寬至 40%，以提高資源化運用效益並節省水泥經費。

貳、本研究成果的各類建築減碳量及水泥砂漿成本分析，建議可運用於公共工程需有 10%之經費採用綠色材料的推動策略。

參、依據建築技術規則建築設計施工篇第 321 條，有關建築物之室內裝修及樓地板面材料，應採用綠建材達上述兩項總面積 30%以上規定之運用，因爐石與飛灰係屬資源回收再利用建材，建議將本研究減碳及經濟效益之成果納入「再生綠建材」的環保標章，以供建築工程材料之實際應用。

肆、本研究均採固定水膠比 0.45 之配比設計，建議日後可加入其他水膠比，添加各種助塑劑，及同時加入爐石與飛灰摻料等變數，以期增加材料的穩定性、耐久性，並符合水泥砂漿材料的實際施工狀況。

伍、為因應夏季高溫對建築物表面的影響，建築未來可進行爐石與飛灰等再生材料應用於磁磚黏著度性能相關研究，以探討取代傳統海菜粉水泥砂漿之可行性研究。

參考文獻

中文文獻

（一） 學位論文

・林志忠，「公共工程使用再生材料落實節能減碳初步探討」，碩士論文，國立中央大學土木工程研究所，桃園（2010）。

・陳建良，「應用廢棄纖維、爐石和灰渣等再生材料於水泥砂漿之研究」，碩士論文，國立中央大學環境工程研究所，桃園（2007）。

・張又升，「建築物生命週期二氧化碳減量評估」，博士論文，國立成功大學建築研究所，台南（2009）。

・劉茂成，「複合防蝕法應用於鋼構橋樑之探討」，碩士論文，國立海洋大學河海工程研究所，基隆（2004）。

・蕭克宇，「水泥砂漿於不同環境溫度下抗氯離子穿透能力與孔隙結構之關係」，碩士論文，國立海洋大學材料工程研究所，基隆（2010）。

（二） 期刊、研討會、計畫報告

・李玉生、楊仲家、卓世偉、翁在龍，“塗裝材料對水泥質基材耐候性能改善之試驗研究”，內政部建築研究所協辦研究案報告，基隆（2009）。

・黃然、卓世偉，”自充填混凝土之耐久性探討”，SCC 施工特性研討會,台灣營建研究院，pp. 79-94（2001）。

・楊仲家、詹穎雯，高飛灰量混凝土應用研究，台灣電力公司計畫報告，台北（2010）。

（三） 中文書目

・林憲德主編，綠建築解說與評估手冊（2007 年更新版），初版，內政部建築研究所，台北（2007）。

・陳振川，振興經濟擴大公共建設：又快又好永續公共工程－高性能混凝土運用（自充填混凝土與節能減碳），行政院公共工程委員會，台北（2009）。

・單信瑜，公共建設之永續思考與節能減碳，行政院公共工程委員會，台北(2010)。

（四） 日文書目

・日本土木學會，「高流動混凝土施工方針」，(1998)．

（五） 網路資料

・行政院公共工程委員會，「公共工程高爐石混凝土使用手冊」，http://erp.pcc.gov.tw/pccap2/BIZSfront/upload/article/g_2.doc，台北（2001）。
・行政院公共工程委員會，「公共工程飛灰混凝土使用手冊」，http://erp.pcc.gov.tw/pccap2/BIZSfront/upload/article/g_2.doc，台北（2001）
・傅國柱，台灣煉鋼業爐石資源化與品質管理，國立中央大學，2010 年，http://cspave.org.tw/material/class2/6.pdf（2010）。
・經濟部統計處，工業生產變動概況，http://www.moea.gov.tw，（2010）。

英文文獻

・Aydin S., " Development of a High-temperature-resistant mortar by using slag and pumice", Fire Safety Journal, Vol.43, pp.610-617,（2008）.
・Collepardi M., Monosi S., and Piccioli P., "The influence of pozzolanic materials on the mechanical stability of cement," Cement and Concrete Research, Vol. 25, pp. 961-968,（1995）.
・Climent M. A.,Vera G.D.,Lopez J. F.,Viqueira E.,Andrade C.," A test method for measuring chloride diffusion coefficient through nonsaturated concrete Part I. The instantaneous plane source diffusion case",Cement and Concrete Research, pp. 1113-1123,（2002）.
・Cheewaket T., Jaturapitakkul C., andChalee W., "Long term performance of chloride binding capacity in fly ash concrete in a marine environment", Construction and Building Materials, Vol. 24, pp. 1352-1357,（2010）.
・Dhir R.K., El-Mohr M. A. K., and Dyer T. D., "Chloride binding in GGBS concrete," Cement and Concrete Research, Vol. 26, pp. 1767-1773,（1996）.
・Hogan F.J., and Meusel J.W., "Evaluation for Durability and Strength Development of a Ground Granulated Blast-Furnace Slag," Cement, Concrete, and Aggregates, Vol.3, pp.40~52,（1981）.
・Hooton R.D., and Emery J.J., "Sulfate resistance of a Canadian slag cement", ACI Materials Journal, Vol. 87, pp. 547-555,（1990）.
・Kumar R., Bhattacharjee B.," Porosity, pore size distribution and in situ strength of concrete", Cement and Concrete Research, Vol. 33, pp.155-164,（2003）.
・Mahaboonpachi T., Kuromiya Y., and Matsumoto T., "Experiment investigation of adhesion failure of the interface between concrete and polymer-cement mortar in an external wall tile structure under a thermal load", Construction and Building

Materials, 22, pp. 2001-2006,（2008）.
・Mehta P. K., and Monteiro P. J. M., “Concrete-Structure, Properties, and Materials,” Prentice Hall,（1993）.
・Nixon P. J., “The effect of pfa with a high total alkali content on pore solution composition and alkali-silica reaction,” Magazine of Concrete Research, Vol. 38, pp. 30-35,（1986）.
・Osborne G.J., “Durability of Portland blast-furnace slag cement concrete,” Cement and Concrete Composites, Vol. 21, pp. 11-21,（1999）.
・Peng C., Wu Z., “In situ measuring and evaluating the thermal resistance of building construction”, Energy and Buildings, Vol. 40, pp. 2076-2082,（2008）.
・Princd W., Perami R., and Espagne M., “Mechanisms involved in the accelerated test of chloride permeability,” Cement and Concrete Research, Vol. 29, pp.687-694,（1999）.
・Suryavanshi A. K., Scantlebury J. D., and Lyon S. B., “Mechanism of Friedel’s salt formation in cement rich in tri-calcium aluminate,” Cement and Concrete Research, Vol. 26, pp. 1673-1680,（1996）.
・Thomas M.D.A., and Bamforth, P.B., “Modelling chloride diffusion in concrete effect of fly ash and slag,” Cement and Concrete Research, Vol. 29, pp. 487-495,（1999）.
・Xu Y., Wong Y. L., Poon C. S., andAnson M., “Influence of PFA on cracking of concrete and cement paste after exposure to high temperatures”, Cement and Concrete Research, Vol. 33, pp.2009-2016,（2003）.
・Young J. F., “Concrete”, Prentice Hall, pp.194~197,（1981）.
・Yan F. D., Ding J., and Beaudoin J. J., “Effect of different calcium aluminate hydrates on ettringite formation and expansion of high alumina cement-based expansive cement pastes,” Cement and Concrete Research, Vol. 26, pp. 417-426,（1996）.
・Zhang Y. M., Sun W. Y. and Han D., “Hydration of high-volume fly ash cement pastes,” Cement and Concrete Composites, Vol. 22, pp. 445-452,（2000）.

碩職專班研究生：曾玲群

出生地：臺灣省新竹市

出生年月日：民國 55 年 5 月 20 日生

學歷：木柵國小

實踐國中

中國市政專科學校六年制公共工程科建築組

中華科技大學建築工程與環境設計研究所

經歷：76.09～77.07　台北縣深坑鄉公所建設課

77.11～78.08　山地工程顧問公司設計部

78.10～78.11　泰興工程顧問公司設計組

78.11～96.12　交通部台灣區國道新建工程局設計組建築科

97.01～99.02　交通部鐵路改建工程局工務組建築科

99.02 迄今　　交通部路政司公路工程科

著作：二高雲嘉段中埔交流道公共藝術設置計畫書（88.11）

二高南投路段南投交流道暨服務區公共藝術設置計畫書（90.04）

馬祖南竿機場新建工程公共藝術設置計畫書（90.08）

二高古坑服務區公共藝術徵選結果報告書（91.08）

國道公共藝術導覽手冊（91.11）

驛棧：國道三號建築之旅（94.12）

通訊處：106 臺北市文山區秀明路 2 段 66 號 4 樓

E-mail：tsling0520@gmail.com

Blog：http://tw.myblog.yahoo.com/joe-young

Facebook：Lingchun Tseng