

修補材料性質對混凝土結構物 耐久性之探討

內政部建築研究所委託研究報告

中華民國 98 年 12 月

(國科會 GRB 編號)

PG9802-0227

(本部計畫編號)

098301070000G1023

修補材料性質對混凝土結構物 耐久性之探討

受委託者：國立台灣海洋大學

研究主持人：黃 然

協同主持人：張建智

研 究 員：林世堂

研究助理：蔡嘉榮

內政部建築研究所委託研究報告

中華民國 98 年 12 月

目次

表次.....	III
圖次.....	V
照片次.....	IX
摘要.....	XIII
第一章 緒論	1
第一節 研究緣起與背景	1
第二節 研究目的與範圍	4
第三節 研究方法與流程	4
第四節 執行進度說明	8
第二章 文獻回顧	11
第一節 混凝土劣化現象與機理	11
第二節 混凝土結構物修護與補強	17
第三節 鋼筋混凝土腐蝕與防蝕	27
第三章 試驗計劃與方法	37
第一節 試驗變數與試驗材料	37
第二節 試驗配比與試體製作	47
第三節 試驗方法與設備儀器	54
第四章 試驗結果與討論	61

第一節 裂縫注入修補試驗結果	61
第二節 裂縫灌漿修補試驗結果	74
第三節 補綴修補試驗結果	83
第四節 綜合討論	95
第五章 結論與建議	101
第一節 結論	101
第二節 建議	103
附錄 一 期初審查會議評審意見及回應	105
附錄 二 期中審查會議評審意見及回應	109
附錄 三 期末審查會議評審意見及回應	113
參考書目	117

表次

表 1-1	研究進度及執行進度報告表	7
表 3-1	膠結料物理性質	40
表 3-2	膠結料化學成分	41
表 3-3	粗粒料篩分析	42
表 3-4	細粒料(混凝土)篩分析	42
表 3-5	細粒料(砂漿)篩分析	43
表 3-6	#9 矽砂(修補砂)篩分析	44
表 3-7	#6 矽砂(修補砂)篩分析	44
表 3-8	#4 矽砂(修補砂)篩分析	45
表 3-9	緻密級配篩分析試驗結果	46
表 3-10	腐蝕抑制劑化學成分	46
表 3-11	裂縫注入修補材料試驗配比	48
表 3-12	水泥砂漿圓柱試體配比	49
表 3-13	灌漿修補材料試驗配比	50
表 3-14	鋼筋混凝土板配比	52
表 3-15	補綴修補材料試驗配比	54
表 4-1	裂縫注入修補材料流度試驗結果	61
表 4-2	裂縫注入修補材料性質試驗結果	64

修補材料性質對混凝土結構物耐久性之探討

表 4-3	注入修補後試體水滲透率.....	70
表 4-4	不同修補材料修補後試體累積通電量.....	70
表 4-5	灌漿修補材料流度試驗結果.....	74
表 4-6	灌漿修補材料性質試驗結果.....	76
表 4-7	補綴修補材料性質試驗結果.....	84
表 4-8	OCP(C1).....	87
表 4-9	OCP(C2).....	87
表 4-10	試體腐蝕速率.....	89

圖次

圖 1-1	研究流程圖	6
圖 2-1	氯離子侵入引發之腐蝕 [8]	14
圖 2-2	鋼筋腐蝕機理示意圖[13]	15
圖 2-3	鐵氧化體積膨脹倍率示意圖[14]	16
圖 2-4	噴砂法[29]	24
圖 2-5	高壓水射法[29]	24
圖 2-6	噴蒸氣法[29]	25
圖 2-7	真空噴砂法[29]	25
圖 2-8	噴燒法[29]	26
圖 2-9	鋼刷劃毛法[29]	26
圖 2-10	Pourbaix 圖[32]	28
圖 2-11	混凝土修補接面區電位差造成鋼筋腐蝕	29
圖 2-12	不同性質材料之防蝕效能[36]	31
圖 2-13	極陰保護極化示意圖[44]	35
圖 3-1	裂縫寬度 < 0.5 mm 及 > 5 mm 圓柱試體示意圖	38
圖 3-2	鋼筋混凝土板試體	38
圖 3-3	緻密級配曲線圖	45
圖 4-1	不同注入修補材料抗壓強度比較圖	65

圖 4-2	不同注入修補材料抗彎強度比較圖	65
圖 4-3	不同注入修補材料抗拉強度比較圖	66
圖 4-4	不同注入修補材料黏結強度比較圖	66
圖 4-5	不同注入修補材料吸水率之比較圖	67
圖 4-6	裂縫注入修補材料膨脹/收縮比	68
圖 4-7	試體體積變化圖(W/C 0.45)	68
圖 4-8	試體體積變化圖(W/C 0.3)	69
圖 4-9	不同配比累積電量	71
圖 4-10	不同修補材料 6 hour 累積通電量比較圖	71
圖 4-11	不同灌漿修補材料抗壓強度比較圖	77
圖 4-12	不同灌漿修補材料抗彎強度比較圖	78
圖 4-13	不同灌漿修補材料抗拉強度比較圖	78
圖 4-14	不同灌漿修補材料黏結強度比較圖	79
圖 4-15	不同灌漿修補材料吸水率比較圖	79
圖 4-16	灌漿修補材料膨脹/收縮比	80
圖 4-17	試體體積變化圖(S/C = 0.75)	81
圖 4-18	試體體積變化圖(S/C = 1)	81
圖 4-19	補綴修補材料膨脹/收縮比	85
圖 4-20	時間與 OCP 之關係(C1)	88

圖 4-21	時間與 OCP 之關係(C2).....	88
圖 4-22	母層與修補層間性質不同與 OCP 之關係.....	89
圖 4-23	不同材料之腐蝕程度.....	90
圖 4-24	純水泥(M)腐蝕生成物.....	93
圖 4-25	腐蝕抑制劑(3% NaNO ₂) (N)腐蝕生成物.....	94
圖 4-26	環氧樹脂(P)腐蝕生成物.....	94
圖 4-27	鋅粉(Z)腐蝕生成物.....	95

照片次

照片 3-1	飛灰	40
照片 3-2	爐石	40
照片 3-3	矽砂	44
照片 3-4	鋁粉	44
照片 3-5	亞硝酸鈉粉末	47
照片 3-6	強塑劑	47
照片 3-7	#4 竹節鋼筋	47
照片 3-8	鋅粉漆	47
照片 3-9	預設，5 及 0.5 mm 寬度裂縫	49
照片 3-10	0.5 mm 寬度裂縫	49
照片 3-11	5 mm 寬度裂縫	51
照片 3-12	鋼筋混凝土板模	52
照片 3-13	澆置鋼筋混凝土板	52
照片 3-14	鏽水流出	52
照片 3-15	修補範圍	52
照片 3-16	黏結面處理(前)	53
照片 3-17	黏結面處理(後)	53
照片 3-18	塗上黏結層	53

照片 3-19 補綴修補完成	53
照片 3-20 抗壓試驗機	58
照片 3-21 S-4100 型掃瞄式電子顯微鏡	59
照片 3-22 X 光繞射分析儀	59
照片 4-1 流度 32、50 sec 劈裂截面	62
照片 4-2 不同流度泌水現象	62
照片 4-3 持水性 27、28 % 劈裂截面	63
照片 4-4 裂縫注入修補貯鹽試驗結果	72
照片 4-5 4I,1,2,3 氯離子滲透深度(比色法)	73
照片 4-6 3I,1,2,3 氯離子滲透深度(比色法)	73
照片 4-7 流度 145, 120sec 劈裂試驗結果	75
照片 4-8 流度 91, 83sec 劈裂試驗結果	75
照片 4-9 灌漿修補貯鹽試驗結果	82
照片 4-10 約 ± 1 mm 之裂縫(光學顯微鏡(OM)影像)	83
照片 4-11 氧化鐵(X3000)(M)	91
照片 4-12 氧化鐵(X3000)(N)	91
照片 4-13 加速腐蝕前(X3000)(Z)	92
照片 4-14 加速腐蝕後(X3000)(Z)	92
照片 4-15 微裂縫(X100) (P)	92

照片 4-16 微裂縫(X1000) (P)92

摘要

關鍵詞：鋼筋混凝土、腐蝕、耐久性、加速試驗、水泥質系修補材料

一、研究緣起

混凝土結構物常因為受到外在物理及化學因素影響損壞而需要修補，加以近幾年 921 大地震與八八水災等天災的影響，更造成大量結構物損壞而需要修補，為有效達成修復需要選擇適當修補材料與配合的修補工法，然目前國內尚無一套完整可資遵循之混凝土結構物修復規範，亦無法確認混凝土結構物修復的品質及有效性。混凝土結構物使用壽命的延長與修補工法、修補材料的選擇及施工品質有密切的關係，所以有必要針對修補材料特性、工法及其對混凝土結構物耐久性的影響進行探討。

二、研究方法及過程

本研究主要參照日本土木學會 (JSCE) 針對水泥質 (灌漿、注入、補綴) 修補材料性質進行一系列試驗，並於試體預設裂縫 ($w < 0.5$ mm 及 $w > 5$ mm) 並進行灌漿及注入修補，然後依據 CNS 3763 透水試驗法、ASTM C1202 RCPT 氯離子快速穿透試驗法、AASHTO T259 貯鹽試驗法、光學顯微鏡 (OM) 巨觀觀察法等，來評估不同材料灌漿、注入修補後的混凝土特性 (填充、防水及耐久性)。另外設計鋼筋混凝土板 (L) 50cm × (W) 25cm × (H) 10cm，採用加速腐蝕試驗，SEM

微觀觀察、EDS 元素分析、XRD 成分分析，針對補綴修補的鋼筋混凝土板，進行腐蝕耐久性探討。

三、重要發現

1. 水泥質材料修補裂縫的品質首要條件在於控制適當的流動性，使能有效填充裂縫。本研究根據流度試驗、泌水率試驗及持水係數試驗結果得知以水泥漿修補裂縫寬度小於 0.5 mm 之裂縫，流度應不大於 32 sec，持水性不得小於 28%，而泌水率應趨近於 0%，對於裂縫寬度為 0.5 mm 裂縫，其修補效果佳。以水泥砂漿修補裂縫寬度大於 5 mm 之裂縫，流度在應不大於 83 sec 間、持水性不小於 28%，泌水率應趨近於 0%。
2. 修補材料性質試驗結果發現，添加 0.01% 鋁粉會影響修補材料抗壓、抗拉、抗彎及黏結強度、且膨脹作用在終凝前較為明顯，後期仍會因水水分變化而造成體積收縮。添加礦物摻料如飛灰或爐石能改善體積收縮的問題。透水、貯鹽、RCPT 試驗結果顯示，添加 10% 爐石對於注入修補的填充性、透水性及耐久性皆有正面的效果。
3. 由腐蝕試驗結果得知，黏結層使用添加腐蝕抑制劑的水泥漿(3% NaNO_2) (無機披覆法)、環氧樹脂 (有機披覆法)、添加鋅粉 (塗封、

- 陰極防蝕)等修復工法，能改善混凝土鋼筋腐蝕的現象。並由時間與 OCP 關係曲線及腐蝕速率結果得知添加鋅粉效果最佳。(塗封、陰極防蝕〔犧牲陽極法〕)效果最好。
4. 由 SEM 顯微圖(X3000)發現，以純水泥進行防蝕修復相較於添加腐蝕抑制劑(3% NaNO_2)的漿體，其微觀結構較為鬆散，並由時間與開路電位關係曲線得知 OCP 值至第 5 天便趨於平緩。由此可推估添加腐蝕抑制劑(3% NaNO_2)，能有效抑制鋼筋的腐蝕。
 5. 由 SEM 顯微圖發現環氧樹脂塗封橫截面上有寬度大約是 1 μm 左右的裂縫，觀察 OCP 曲線，OCP 值初期電位較高，至第 4 天便開始下降，前述微細裂縫可能是主要原因。
 6. 成分分析結果發現，以添加 Zinc 的方式進行防蝕，不但能夠代替鐵氧化作為犧牲陽極，且有吸附 Cl 形成 ZnCl_2 ， $\text{Zn}(\text{ClO}_4)_2$ 。

四、主要建議事項

建議一

AASHTO T277 有提到累積電量 > 4000 庫侖為高氯離子滲透值，因此以 4000 庫侖為參考值來評估試體修補之耐久性，修補後試體累積電量與參考值比較，最少相差 3.8 倍以上，也就表示 < 0.5 mm 之裂縫以本研究所選用之水泥質材料修補，僅能達到防水的效果，因

修補材料性質對混凝土結構物耐久性之探討

此建議後續可以試著改變礦物摻料用量或改採用高分子材料，進行相關耐久性之探討。

建議二

由透水試驗結果得知灌漿修補後試體不到 1 sec 水就已經噴出；再由光學顯微鏡(OM)影像發現在修補區域有著許多橫向及縱向之裂縫大小約 ± 1 mm，又從貯鹽試驗結果發現，這些裂縫是由修補表面直接貫穿到底層，因此推估 1：0.75 及 1：1 水泥砂漿做為灌漿修復材料，對於寬度 5 mm 裂縫僅能得到填充裂縫的效果，由於本研究對於所有混合摻料，皆是以最低的添加量添加，單純是想比較不同材料實際修補後差異性，如需改善修補後之防水性及耐久性，建議可以改變粒料粒徑或者調整摻料的用量，來改善修補材料之體積穩定性。

建議三

受到 921 大地震及八八水災之影響，造成大量營建構造物損壞急需修復、補強，由試驗結果發現不同水泥質修補材料進行注入、灌漿補綴等修補，修復效果差異甚大，如不儘早訂定出適當之規範與工法，對於修補工程品質、成效亦難保障。因此建議應儘快召集專家、學者討論一同訂定一套修補材料規範，亦能達到確保修補作業之有效性，同時因應政府推動永續經營之課題。

ABSTRACT

Keywords: reinforced concrete, corrosion, durability, accelerating test,
cementitious materials

Concrete has been commonly used over a century all over the world for its high compressive strength, mould ability, economy and corrosion protection on the embedded reinforcing steel. Normally, concrete can provide good barrier to keep the external aggressive substances such as chloride ion and sulfate ion on the concrete surface and prevent the occurrence of degradation or rebar corrosion. Whenever bad quality concrete or workmanship is applied, concrete may start to crack, delaminate or spall due to physical or chemical causes a short time after casting. Especially rebar corrosion would be accelerated by the degradation of protection cover. Maintenance, repairing or strengthening are usually required to increase serviceability and durability during the life span of reinforced concrete structure. Repairing materials can be divided into 9 groups based on the material type and execution method. They are (1) concrete surface coating materials , (2) organic crack injecting repairing materials , (3) cement crack injecting repairing materials) , (4) polymer modified cement crack injecting repairing materials , (5) organic grouting repairing or strengthening materials , (6) cement grouting repairing or strengthening materials , (7) polymer modified cement grouting repairing or strengthening materials , (8) patching repair materials and (9) surface penetrants for concrete

structures。

Different repairing materials or different execution methods would affect the durability of repaired structures. An electric voltage difference may produce in the interface between new and old materials and accelerate rebar corrosion. Thus, a remedy action such as zinc powder addition should be taken to solve the side effect from improper repairing materials. This study is aimed to evaluate the properties of cementitious repairing materials for injecting, grouting or patching method using standardized testing methods. And, the effect of zinc powder on the corrosion prevention of repaired RC plate will be also investigated by conducting electro-chemical testing processes based on the open circuit potential and polarization resistance. Testing results and suggestions will be reported and provided to designers, contractors and builders for reference.

第一章 緒論

第一節 研究緣起與背景

壹、研究緣起

為確保混凝土結構物的設計使用年限，採用適當的維護措施有其必要性。混凝土一般具有良好的抗壓強度，緻密性與抗水性；適當的混凝土保護層能阻止外部有害因子如水及氯離子等的侵入，提供鋼筋良好的腐蝕防護，避免或延緩鋼筋混凝土發生腐蝕或劣化，因此被廣泛應用在不同的土木構造物上。然而仍有許多原因如物理、化學或生物等原因，會造成混凝土結構物發生破壞，如若混凝土生產品質不佳，澆置、養護不當或經常暴露於惡劣環境中時，混凝土常會發生開裂、剝落等破壞，進而引發混凝土中的鋼筋快速腐蝕，加速混凝土剝落或崩落劣化，影響結構物的使用性與安全性。所以，有時需要進行必要的維修或補強工程。然而混凝土結構修補為專業技術，於修補設計與施工的過程中需要受過專業訓練的人員參與，及選用適當的材料與工法，才有可能成功地完成修補工作。應用在混凝土結構物的維補、增強水泥質系材料可概分為(1)混凝土表面塗層材料(concrete surface coating materials)，(2)有機裂縫注入修補材料(organic crack injecting repairing materials)，(3)水泥質系裂縫注入修補材料(cement crack injecting repairing materials)，(4)高分子(聚合物)改質水泥質系裂縫注入修補材料(polymer modified cement crack injecting repairing materials)，(5)有機灌漿修復或補強材料(organic grouting repairing or strengthening materials)，(6)水泥質系灌漿修復或補強材料(cement grouting repairing or strengthening materials)，(7) 高分子(聚合物)改質水泥質系灌漿修復或補強材料 (polymer modified cement grouting

repairing or strengthening materials), (8)補綴修復材料(patching repair materials)及(9)表面滲透修復材料(surface penetrants for concrete structures)。

對於混凝土結構物破壞原因沒有充分了解，使用錯誤修補規範及修補材料/技術，採用短期補修/粉刷(patch/paint)策略，將不可避免地獲致失敗的結果。混凝土結構物的修復與防護系統概略包括修補原理、正確的破壞診斷、材料性能需求與驗證法、材料品質控制與現場施工品質控制等。如使用不同的修補材料於待修復的混凝土結構物上時，可能會產生不同的結果或有負面的影響。結構物使用壽命的延長與修補工法、修補材料的選擇及施工品質有密切的關係，所以有必要針對修補材料特性對於混凝土結構物耐久性的影響進行探討；採用不適當的修補工法可能反會使混凝土結構物加速劣化，如使用高密度、不含氯離子的無收縮水泥進行修補，無收縮水泥層可提供良好保護環境使鋼筋免於腐蝕。然而如於修補界面區域，因修補材料與母材的氯離子含量、濕度及電導性不同，會增加鋼筋周圍的電位差而使腐蝕速率增加。因此改用陰極防蝕(犧牲陽極)法為另一可行之選擇；利用犧牲陽極(鋅)與鋼筋連結，可降低前述水泥質修補材料加速鋼筋腐蝕的問題。

本計畫擬選擇 3 種水泥質系修補材料(前述 3,6,8 項)進行力學及耐久性試驗。試驗項目包括(1) 水泥質系注入材料試驗：稠度(consistency)、持水係數(water retaining coefficient)、流度變化(change in flowability)、收縮比(shrinkage ratio)、抗壓強度、抗拉強度、抗彎強度、彈性模數、結合強度試驗及氯離子滲透試驗；(2)水泥質系灌漿修復或補強材料試驗及(3) 水泥質系補綴修復或補強材料試驗，以評估修補材料特性及評估試驗法的適用性。另針對修補材料與

被修補材料接合後，可能由於兩種材料間的電位差而加速鋼筋腐蝕問題進行探討。本計畫製作鋼筋混凝土板(L)50cm×(W)25cm×(H)10cm進行腐蝕試驗；混凝土採用兩種水灰比(0.45, 0.65)，板中央置入一根#4鋼筋，並施以定電流加速鋼筋腐蝕，亦鋼筋腐蝕劣化後，再使用水泥質系補綴修補材料(添加鋅粉與不添加鋅粉)進行修補。修復之混凝土板試體，再通以定電流加速試驗，利用開路電位、直流極化阻抗評估添加鋅粉修補材料對於混凝土結構物修復後，鋼筋腐蝕耐久性之影響。

貳、研究背景

鋼筋混凝土自從 19 世紀末葉開始被使用後，經過兩個世紀的發展，迄今已被廣泛地應用於各項建築與土木工程上，其對全球經濟發展具有重大的貢獻。鋼筋混凝土具有多項優點，然而即使良好品質的混凝土暴露於不同的大氣環境中，仍須定時進行維護或修復以確保能夠達到結構物設計的使用年限。台灣位處亞熱帶區且四面環海，常年氣候高溫潮濕，屬於高腐蝕發生區域，若混凝土配比品質不佳、澆置或養護不當、暴露環境變化因素或外力作用會產生裂縫，水分、氧氣及鹽份可能沿著裂縫侵入混凝土內，使混凝土劣化，增加鋼筋腐蝕的機會；鋼筋持續發生腐蝕反應後，腐蝕生成物體積會隨之膨脹，於接觸面會產生內應力使得混凝土裂縫擴張、剝落甚至發生坍塌等劣化現象，影響鋼筋混凝土結構物之安全性。為減少因混凝土開裂所造成之鋼筋腐蝕，可採用適當的防蝕技術，常見之鋼筋混凝土防蝕方法大致可分為：(1) 表面封閉修補法、(2) 灌漿修補法、(3) 壓力注射修補法、(4) 鋼板包覆補強工法、(5) 複合材料補強工法、(6) 陰極防蝕法及 (7) 電化學除鹽法等。

鋼筋混凝土鋼筋腐蝕破損修補，首先需將受損壞區域之表面層先行清除，然後加鋪修補層，但修補材料與被修復的混凝土，可能具有不同之離子含量、濕度及導電性，可能會在鋼筋表面產生高電位差，修補後反而加速鋼筋腐蝕速率，使鋼筋再次快速腐蝕，致使修復的鋼筋混凝土結構物無法延長使用年限，但如以水泥質修補材料配合鋅粉(犧牲陽極)的防蝕修補方式，或可解決前述問題，亦或改用其他修補材料與技術，防止鋼筋再度腐蝕，應可有效解決因修補材料與母材材質差異而造成之迦凡尼腐蝕。

第二節 研究項目與範圍

延長鋼筋混凝土結構物之的使用壽命，為目前政府推動永續發展政策的重要課題之一。本研究主要探討修補材料性質及其對修復後混凝土結構物耐久性的影響。進行相關力學與耐久性試驗，評估作為裂縫注入修補、灌漿及補綴修復與補強水泥質系材料之適用性。主要研究項目包括：

1. 評估水泥質系修補材料於修補後，可能造成鋼筋再腐蝕之機理。
2. 探討添加鋅粉於水泥質系修補材料中改善鋼筋再腐蝕的效能。
3. 評估修補材料中添加鋅粉與腐蝕抑制劑對修復的鋼筋混凝土結構物耐久性之影響。

第三節 研究方法與流程

本研究主要以修補材料性質對修復混凝土結構物耐久性的影響進行探討，因此擬定幾種水泥質修補材料對於混凝土劣化後修護、補

強之適用性進行評估；另為探討修補材料與母材接合，可能產生電位差進而加速腐蝕鋼筋的問題，本研究進行鋼筋混凝土板(L)50cm×(W)25cm×(H)10cm 試驗；混凝土採用兩種水灰比(0.45, 0.65)，板中央置入一根#4 鋼筋，並施以定電流加速鋼筋腐蝕，選擇適當材料及防蝕工法進行防蝕修復，並評估其有效性。研究方法如下，主要為文獻蒐集、分析與彙整，以及進行相關修補材料性質試驗、電化學試驗、微觀觀察，彙整試驗結果討論並提出結論與建議、提送成果報告，如下圖 1-1 所示。本研究完成進度如表 1-1 所示。

修補材料性質對混凝土結構物耐久性之探討

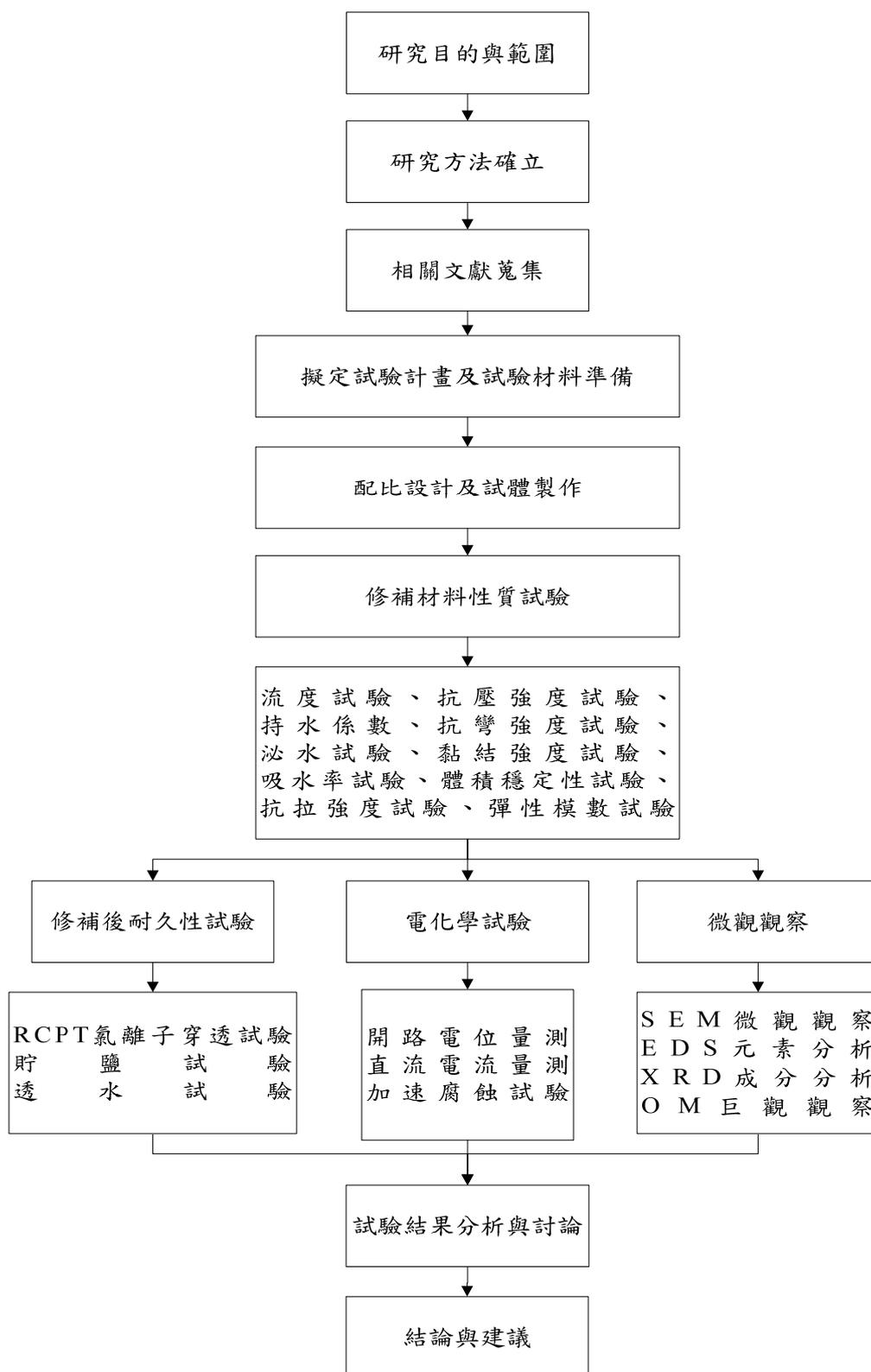


圖 1-1 研究流程圖

(資料來源：本研究整理)

表 1-1 研究進度及執行進度報告表

月次 工作項目	第一 月	第二 月	第三 月	第四 月	第五 月	第六 月	第七 月	第八 月	第九 月	第十 月	第十一 月	第十二 月	備註
國內外研究報告、文獻蒐集與歸納整理		預計完成 100%											
		以完成 100%											
彙整國內外修補材料種類，技術		預計完成 100%											
		以完成 100%											
進行修補材料性質試驗、試體製作			預計完成 100%										
			以完成 100%										
進行各項電化學試驗及微觀分析								預計完成 100%					
								以完成 100%					
結果與討論、期末報告撰寫										預計完成 100%			
										以完成 100%			
期末報告修正與定稿											預計完成 100%		
											以完成 100%		

(資料來源：本研究整理)

第四節 執行進度說明

本研究主要目的有四點：

1. 進行相關力學與耐久性試驗，評估作為裂縫注入修補、灌漿及補綴修復與補強水泥質系材料之適用性。
2. 評估水泥質系修補材料於修補後，可能造成鋼筋再腐蝕之機理。
3. 探討添加鋅粉於水泥質系修補材料中改善鋼筋再腐蝕的效能。
4. 評估修補材料中添加鋅粉與腐蝕抑制劑對修復的鋼筋混凝土結構物耐久性之影響。

經由修補材料性質、電化學試驗、微觀觀察及有關之耐久性試驗完成計畫中預期研究項目，具體完成試驗如下：

一、修補材料性質試驗

流度試驗、持水係數、泌水試驗、吸水率試驗、抗壓強度試驗、抗彎強度試驗、抗拉強度試驗、彈性模數試驗、黏結強度試驗、體積穩定性試驗。

二、電化學試驗

加速腐蝕試驗、開路電位量測、直流極化電流量測。

三、巨、微觀觀察與成分分析

SEM 微觀觀察、EDS 元素分析、XRD 分析、光學顯微鏡(OM)觀察。

四、耐久性試驗

快速氯離子穿透試驗(RCPT)、貯鹽試驗(ponding test)、透水試驗。

第二章 文獻回顧

第一節 混凝土劣化現象與機理

一般混凝土劣化的原因可概分為物理性及化學性兩大類，物理性劣化原因包括磨損及開裂兩種；而化學性劣化原因，可分為硬固水泥成分產生水解或析出、有害因子與硬化水泥成分發生交換反應和膨脹性化合物生成反應三種等[1]。造成混凝土開裂的原因甚多，主要影響因素包括材料性質，施工狀況、以及暴露環境條件與外力等。混凝土發生開裂尺度大小、形狀與範圍差異很廣，可由內部粒料與水泥間之細裂紋，擴大到混凝土受外在環境作用所產生的大裂縫。其嚴重開裂時會影響到混凝土結構物的完整性與使用的安全性。在一般情況下開裂雖不致於影響混凝土承受荷重的能力，但卻能使有害物質較易侵入內部發生化學反應或引發鋼筋鏽蝕，如若有體積膨脹或大量鏽蝕物產生，會導致混凝土耐久性降低及使用安全性[2]。

2-1-1 裂縫形成的原因

目前混凝土結構物所採用的配比設計與以往比較差異很大；坍度、水灰比、砂率等的控制不當，皆可能造成混凝土容易產生裂縫。混凝土澆置完後在凝結過程中所發生之裂縫稱為早期裂縫(early age cracking)，包括沉陷裂縫、塑性收縮裂縫、模板變形造成之裂縫、震動或荷重造成之裂縫。而混凝土硬化後產生的裂縫包括溫度裂

縫、乾縮裂縫、及鹼性粒料反應、硫酸鹽侵蝕、暴露環境，結構受外力等所造成之裂縫[2]。

2-1-2 鋼筋腐蝕對混凝土耐久性及安全性之影響

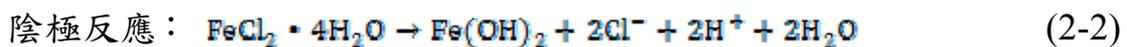
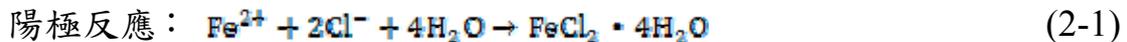
普通混凝土係由水泥、粒料、加水拌合而成具有良好的可塑性及填充效果；水泥反應硬化後，抗壓強度會隨齡期而增加。由於混凝土是脆性材料，因此抗拉強度相對於抗壓強度較低。鋼筋具有高抗壓、抗拉強度且有良好的延展性、韌性等特性，但缺點就是暴露於高溫環境下強度會折減且易發生腐蝕。因此鋼筋與混凝土結合為一體可以互補，成為一種具備耐久性、耐火性、耐震性、整體性、高強度、剛性、可塑性等多項性能的複合營建材料[3]。

欲造成鋼筋腐蝕需具備陽極、陰極、導電通路、電流、電解液等條件；一般正常情況下由於混凝土包覆鋼筋，使得鋼筋與外在環境隔離，且由於鋼筋在混凝土水溶液高鹼性環境下，表面會形成一層鈍態氧化膜，此鈍態膜對鋼筋具有保護作用[4,5]，使得鋼筋不易受外界環境有害物質入侵而造成破壞，但若混凝土配比不良、澆置及養護不當，致使混凝土品質不良，易於損壞，或因保護層厚度不足，鋼筋外容易外露，如同時暴露在大氣中或海洋環境等高腐蝕環境中[6]，會造成混凝土內部材料性質的改變與外在有害物質的侵蝕交互作用，鋼筋表層會由鈍態狀態轉變為腐蝕狀態，使得腐蝕發生[5]。

台灣位處亞熱帶區且四面環海，常年氣候高溫潮濕[7]，屬於高腐蝕發生區域。混凝土開裂後失去了對鋼筋保護作用，此時若結構物處於高腐蝕環境，有利於氯離子及其它有害物質如二氧化碳入侵，破壞鋼筋表面的鈍態膜或加速陽極反應，加上高溫潮濕的暴露環境，更能符合鋼筋腐蝕的五個基本要件。鋼筋腐蝕後腐蝕生成物體積可能為原來鋼筋體積的2~7倍[8]，由於束制條件會於混凝土內部產生應力，對保護層混凝土造成擠壓作用，使得混凝土出現裂縫，嚴重者更可能造成剝落或崩落等現象，影響結構物耐久性及使用者安全性。

氯離子去鈍化機理

二氧化碳與氯化物是破壞鋼筋鈍態膜的兩種介質，當氯離子濃度高過一定量時，即使在pH值很高的環境中，鈍態膜亦可能會被破壞[9]。Glasser [10] 提出陽極 Fe^{2+} 與 Cl^- 、 OH^- 反應後會形成淺綠或藍色溶性的 $\text{FeCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ 其化學反應如式2-1,2-2所示：



陽極反應生成的氯化鐵，會往混凝土含氧量較高的孔隙水移動並分解成褐鏽 $\text{Fe}(\text{OH})_2$ ，同時放出 H^+ 、 Cl^- ，由此反應可知(1) Cl^- 並未參與氧化還原反應，且 Cl^- 在腐蝕過程中也不會消失，它只會對鋼筋腐

蝕起催化作用，如加速鋼筋腐蝕；(2)鋼筋表面若有局部區域氯化物濃度較高時，鈍化膜會被破壞，形成大陰極小陽極的腐蝕電偶，鋼筋會產生快速的孔蝕反應，此對於預力構件影響尤為顯著；(3)氯化物的吸濕性會維持混凝土內部孔隙的含水量。前述三者的循環反應，使得鋼筋腐蝕持續進行[8]，足夠氯離子侵入衍生之腐蝕行為，如圖2-1所示。

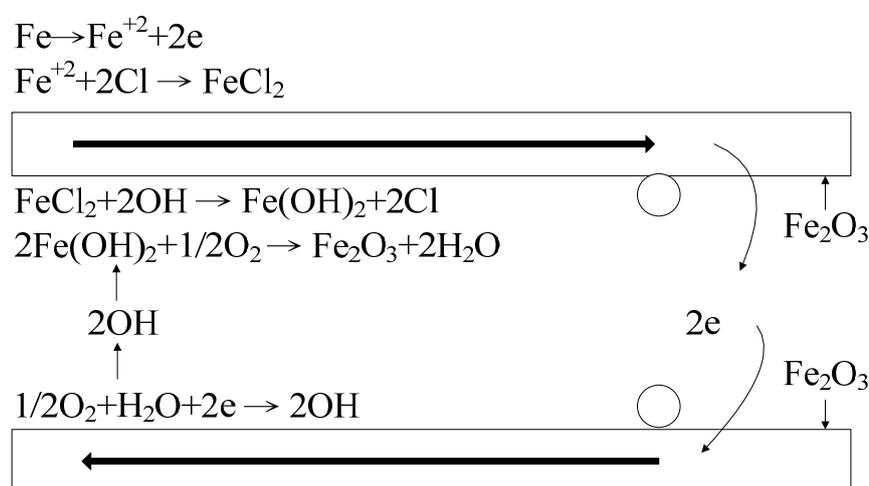


圖2-1 氯離子侵入引發之腐蝕行為

(資料來源：本研究整理)

鋼筋的腐蝕機理

在自然界中金屬大多與穩定的狀態存在，當氧化電位較高的金屬元素，為了達到穩定的平衡狀態，就會釋放出電子而與其他元素形成能量較低穩定性化合物，才能存在於自然界中，也就是金屬腐蝕的驅

動力 (driving force)；此外腐蝕作用的產生，需滿足以下五種條件 [11,12]：

(1) 陽極(anode)

釋放出電子，產生氧化反應的電極 $Fe \rightarrow Fe^{2+} + 2e^{-}$ (2-3)

(2) 陰極(cathode)

得到電子而產生還原反應的電極 $2H_2O + O_2 + 4e^{-} \rightarrow 4OH^{-}$ (2-4)

(3) 導電通路(conducting path)

電化學的氧化還原反應均須要有電子的轉移，因此有良好的導電通路腐蝕現象才能順利進行。

(4) 電流(corrosion current)

腐蝕的進行要有足夠的電子束才能使反應順利進行，即需要有足夠的電動勢才能驅動電子形成電流。

(5) 電解液(electrolyte)

電化學腐蝕又稱濕腐蝕(wet corrosion)，必須在潮濕或有水氣的情況下，氧化還原才會順利進行。

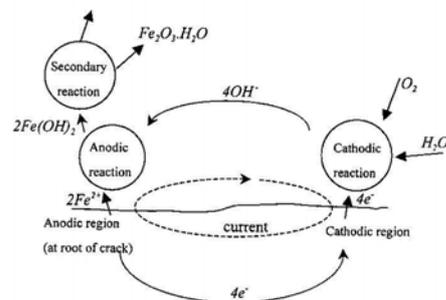


圖2-2 鋼筋腐蝕機理示意圖

(資料來源：Beeby，1978)

鋼筋的腐蝕膨脹

發生在鋼筋上的陽極反應，不只產生鐵離子而已，其中2價鐵離子會進一步氧化成3價鐵離子，鐵離子的化學反應，如式2-5~ 2-7所示：



鐵鏽的體積膨脹會隨著氧化程度而增加，鐵鏽增加鋼筋與混凝土交界區體積約2至7倍如圖2-3所示。當膨脹產生的內應力超過混凝土強度時，混凝土就會開裂(cracking)、剝落(delamination)或脹裂(spalling)。

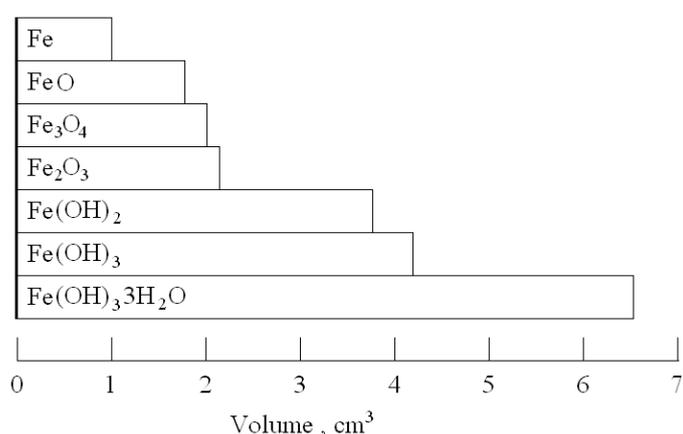


圖2-3 鐵氧化體積膨脹倍率示意圖

(資料來源：Mehta，1992)

第二節 混凝土結構物修復與補強

2-2-1 混凝土結構物修補規定與原則

關於混凝土結構物之修補方式，主要有以下規定與原則[15]。

1. 一般規定：新澆注的混凝土拆模後，若有表面不平整、蜂窩、麻面、裂縫、孔洞、石窩、露筋及空鼓等缺陷時，承包商須採用經監造工程師同意之方法，儘速完成修補；情況嚴重者須會同監造、設計工程師等協商辦理。修補後之表面混凝土顏色應與原混凝土接近，修補部份不得脫落、剝離或與原混凝土間產生隙縫。

2. 修補方式

- (1) 修補前準備：應在不影響構造物之強度下，敲鑿去除薄弱的混凝土面層與特別突出的粒料，然後用鋼刷、高壓空氣或壓力水清理表面，並依照擬使用之黏結劑特性規定，保持表面乾燥或濕潤。
- (2) 修補：將填充材料與黏結材料均勻混合直接填塞後再將黏結劑注入，施工應參照施工說明書之規定。
- (3) 保養：填補之混凝土或水泥砂漿應至少養治七日，黏結材料應依其產品說明書規定進行養護。

2-2-2 混凝土結構物修補材料

一般混凝土結構物劣化受損情況，主要為混凝土開裂及大塊混凝土剝落二類[16]。因此，凡修補材料具有良好施工性（灌注、填滿），能與舊混凝土有效結合，力學行為不低於舊混凝土等三項特性，基本上均可作為混凝土結構物修補材料。

中國土木工程學會出版的混凝土工程施工規範與解說

[15]，對於修補材料之選用有以下建議：

1. 修補材料：填充材料包括混凝土材料及混凝土填加材料。黏結材料包括水泥及高分子黏結劑。
2. 水泥砂漿修補：表面不平整、蜂窩、麻面、露筋或石窩等缺陷面積小且數量不多之缺陷，可用與原混凝土相近之水泥砂漿修補；修補前，缺陷及其周圍之軟弱部份應予鑿除至堅實的混凝土面。
3. 混凝土修補：較深或較大之蜂窩、露石和露筋之缺陷修補，應在不影響構造物之結構強度下，鑿去薄弱的混凝土與特別突出的粒料粒，然後用鋼刷、高壓空氣或壓力水清理表面，再用與原混凝土相同配比的混凝土確實填補搗實之。
4. 其他材料修補：表面缺陷亦可採用下列方式修補，但須提修補計畫經監造者認可：(1)高分子黏結劑修補，(2)填塞材修補，(3)表面

塗料修補。表面缺陷亦可用高分子黏結劑以下列方式修補：(1)表面塗敷修補及(2)灌漿修補，但須提送修補計畫經監造者認可。

日本土木學會[17]將混凝土結構物的維護、修補或補強材料，概分為九大類：

1. 混凝土表面塗層材料(concrete surface coating materials)。
2. 有機裂縫注入修補材料(organic crack injecting repairing materials)。
3. 水泥質系裂縫注入修補材料(cement crack injecting repairing materials)。
4. 高分子(聚合物)改質水泥質系裂縫注入修補材料(polymer modified cement crack injecting repairing materials)。
5. 有機灌漿修復或補強材料(organic grouting repairing or strengthening materials)。
6. 水泥質系灌漿修復或補強材料(cement grouting repairing or strengthening materials)。
7. 高分子(聚合物)改質水泥質系灌漿修復或補強材料(polymer modified cement grouting repairing or strengthening materials)。
8. 補綴修復材料(patching repair materials)。
9. 表面滲透修復材料(surface penetrants for concrete structures)。

水泥質修補材料

日本土木學會[17]提到水泥質系裂縫注入修補材料主要是針對混凝土結構物之裂縫修補；水泥質系灌漿修復或補強材料灌漿修補材料則主要修補較大的孔洞，如鋼板貼於混凝土表面修補及加強之混凝土結構；補綴修復材料是應用在混凝土結構物表面修補及加強。

營造法與施工[18]提到灌漿修補可用水泥漿或水泥砂漿；並可用不致損傷鋼材及混凝土摻劑以增加工作性，減少浮水及收縮，修補材料配比應於工作前依新製及硬化試驗結果決定之，所使用水分應為灌漿流動最低需要量，依重量不得超過水泥之 1/2。

灌漿修補用水泥漿為水泥、水及無收縮摻合劑的混合物，其比例為 50 kg 水泥加 22 kg 水拌合(相當於水灰比 0.45)，若使用水泥砂漿，則水泥及粒料(通過#30 篩)的混合比例為重量比 1 份水泥:0.75 份砂，實際正確比例應以達到水泥砂漿的適宜稠度而調整。水泥漿或水泥砂漿應有適當稠度，且水分不得從漿體中分離，每袋水泥可加入 1 或 2 匙鋁粉，或其他無收縮性材料及助塑性材料，其成分對鋼材無腐蝕性方可使用。

表面修補砂漿拌合比例約為 1 份水泥與 2 份砂，調整用水量，以產生適當流度。砂漿應按所需要數量拌合後立即使用，若加水拌合後 45 分鐘內未使用者，則應予廢棄不用。

日本施工法[19]提到混凝土修補之注入砂漿，可添加減水劑配合高速拌合方式促使水泥顆粒能夠均勻分散，或添加卜作嵐材料如飛灰、爐石粉來改善流動性，添加鋁粉以增加膨脹性，細粒料須小於 1.2 mm (約通過標準篩#30)。

2-2-3 摻料

膨脹混凝土

混凝土工程新技術[20]建議建築工程中，混凝土結構的缺陷修補、預鑄式結構接頭灌縫和有防水抗滲透要求的混凝土的修補，都需使用膨脹混凝土。文中提到以往較常以鐵粉或鋁粉來做為膨脹劑，其中鋁粉比較容易得到，鋁粉在水中的鹼粒料反應釋放出氣體。鹼粒料反應會從混凝土加水攪拌開始一直到凝固。氣體的產生與形成，跟水泥細度、混凝土水灰比、施工時溫度及鋁粉細度有關。鋁粉的細度越細，氣體產生數量也會越多；而鋁粉添加量越多，混凝土的體積膨脹率也會變大。鋁粉如果適量的添加，可利用其膨脹作用，使新、舊混凝土能夠更緊密的結合。鋁粉添加於水泥漿體，膨脹作用在水泥凝結過程中的化學反應式，如下 2-8 式[19]：



1996 年，徐浩 [21]為探討鋁粉不同摻量，對硬化混凝土體積的影響，採用兩種不同摻量鋁粉(分別為水泥重量之 0.05%與 0.01%)製作試體進行試驗。量測膨脹混凝土與對照混凝土之體積變化計算膨脹率(收縮率)，得到以下結論：

1. 不添加鋁粉的混凝土，硬化過程中體積略有收縮，6 小時後收縮量逐漸穩定。
2. 添加 0.005wt.%鋁粉的混凝土硬化過程中體積略有膨脹，10 小時後達最大值。
3. 添加 0.01wt.%鋁粉的混凝土硬化過程中的線性膨脹率比添加鋁粉 0.005wt.%的混凝土的線性膨脹率大，兩種添加量混凝土的線性膨脹規律一致。
4. 鋁粉的添加量與混凝土的體積膨脹量有密切關係，當鋁粉添加量越高時，混凝土體積膨脹量越大。

飛灰混凝土

飛灰主要取代混凝土中部分水泥或細粒料，在水化過程中飛灰可能與 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 發生卜作嵐反應，使水泥漿體(paste)內部結構更為緻密，或可提高粒料與漿體介面的鍵結強度，若有未反應的飛灰，則可作為惰性細粒料填充混凝土孔隙，增加混凝土緻密性。另外由於飛灰取代部分水泥可降低單位體積混凝土之水泥用量，降低混凝土水化熱，減少混凝土因溫度應力造成的龜裂現象。優良的品質的飛灰(F 級、C 級)適量添加於混凝土中作為礦物摻劑或輔助性膠結材料，能改善新拌混凝土的工作性、提高硬化混凝土強度、耐久性及節省水泥

用量之優點 [22]。

爐石混凝土

爐石主要是煉鐵過程中，高爐所產出的工業副產品「高爐爐渣」，由高溫降至室溫有兩種方式(1)於空氣中自然冷卻(氣冷高爐石)，(2). 利用水使其急速冷卻(水淬高爐石)[23]。水淬降溫可使高爐石形成具有反應性的玻璃質混合物，而抑制非反應性混合物之結晶化，因此水淬高爐石粉具有活性而氣冷高爐石無活性[24]。

爐石粉顆粒細小，將爐石粉適量摻用於混凝土中，除可進行反應外並可使混凝土顆粒堆積更加緻密[25][28]。爐石粉比重較水泥低，且無燒失量的問題，故爐石粉以相等重量代替部份水泥時，漿體對粒料之體積比會略為提高，可改善新拌混凝土的工作性，而爐石粉代替部分水泥可降低混凝土的縮變 [25] [26] [27][28]。

2-2-4 修補之黏結面的處理

新舊材料結合的效果與修補工作的成效有關，而影響新舊材料黏結性質的重要因素之一，是修補前結構表面的性質或狀況。當修補混凝土結構物在修補材料施作前，黏結面須先處理，如清除表面破損的混凝土及增加表面粗糙度等。一般黏結面的處理方法可分為物理方法與化學方法。物理方法分為噴射處理與機械處理兩類；而化學方法常

用的為酸浸蝕法。以下係工程上常用的表面處理法[29]。

1. 高壓水噴射法：以高壓噴水機噴射水柱(水壓力在 70~240MPa)，沖掉舊混凝土上殘餘的碎片或破損區域，並使得表面產生一定的粗糙度，如圖 2-4 所示[29]。採用此法處理新舊混凝土黏結面，工作效率高，效果顯著。
2. 噴砂法：噴射不同粒徑的鋼球或碎石，透過控制噴射速度與噴射密度，可得到可接受的黏結面，如圖 2-5 所示[29]。

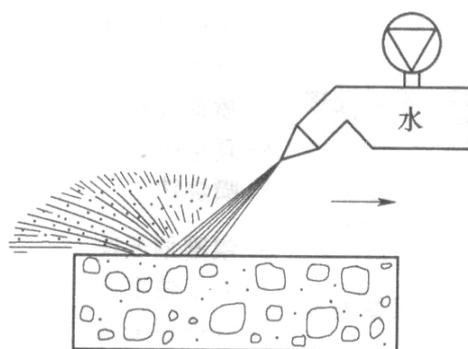


圖2-4 高壓水射法

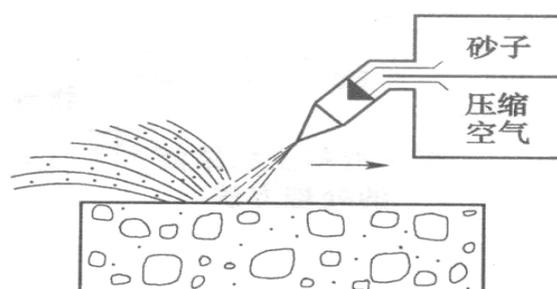


圖2-5 噴砂法

(資料來源：趙志方等，2003)

3. 噴蒸汽法：噴射高壓蒸汽處理混凝土表面的一種方法，如圖 2-6 所示[29]。該方法施工操作危險性較其他方法大。

4. 真空噴砂法：利用真空技術形成一種夾雜砂粒的壓縮空氣噴打處理面的方法，如圖 2-7 所示[29]。

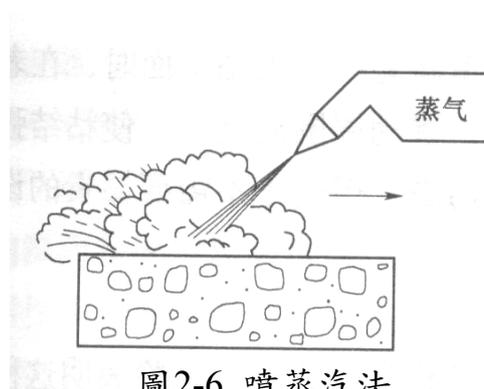


圖2-6 噴蒸汽法

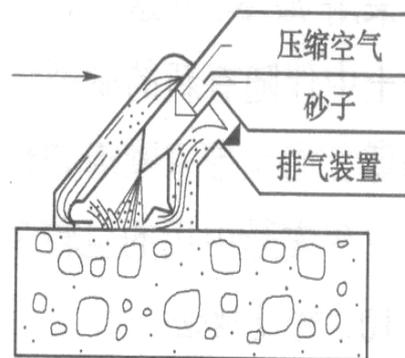


圖2-7 真空噴砂法

(資料來源：趙志方等，2003)

5. 噴燒法：用可燃性氣體的高壓力火焰噴蝕待處理面方法，此法危

險性大，如圖 2-8 所示[29]。

6. 鋼刷劃毛法：在混凝土初凝後、終凝前可進行鋼刷劃毛處理。有些混凝土在齡期 12~24hour 內，可用鋼刷劃毛處理其黏結面。對已硬化的混凝土的表面，鋼刷劃毛法只能做到輕度的處理，如圖 2-9 所示[29]。

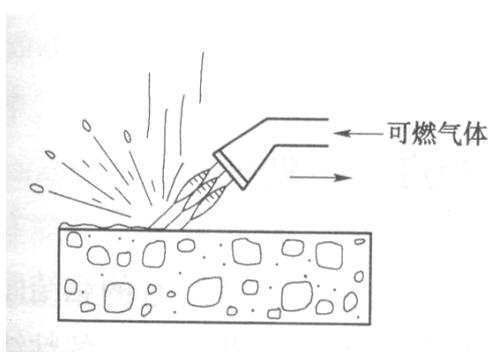


圖2-8 噴燒法

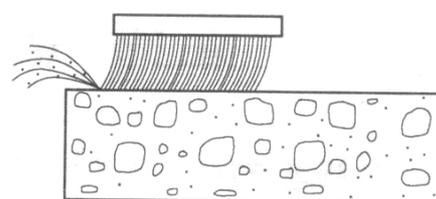


圖2-9 鋼刷劃毛法

(資料來源：趙志方等，2003)

7. 人工鑿毛法：使用如十字鎬、斧頭、錘等工具進行處理，由於操作簡單，也最為普遍使用，但處理效果仍劣於噴射處理法。
8. 氣錘鑿毛法：使用氣動式鑿毛機械打毛待處理面。
9. 機械切削法：採用特殊機械對待處理面進行切槽打毛等加工。
10. 酸浸蝕法：是黏結面處理的一種化學方法，但此方法不像物理黏結面處理方法可靠，而且酸浸蝕液可能含有氯化物，這些氯化物會腐蝕鋼筋。除非無法採用其他的黏結面處理方法，一般不建議

採用酸浸蝕法。

第三節 鋼筋混凝土腐蝕與防蝕

2-3-1 腐蝕電化學原理

金屬的反應進行趨勢，可以用熱力學的觀點，運用Gibbs自由能變化量公式來加以判斷當 ΔG 負值越大時，表示此化學反應的趨勢就越大[30,31]。

$$\Delta G = -NEF \quad (2-9)$$

ΔG ：自由能變化

N：參加反應的電子數(或化學當量)

F：法拉第常數

E：電動勢

此外金屬的反應趨勢，也可以應用Nernst方程式來加以判斷，如下式(2-10)所示。

$$E_{eq} = E^0 - \frac{RT}{nF} \ln \frac{[Red]}{[Ox]} \quad (2-10)$$

E_{eq} ：平衡時金屬電位

E^0 ：金屬標準電位

R：氣體常數

T：絕對溫度

n：反應之電子數目

[Red]：還原物的活度(activity)

[Ox]：氧化物的活度(activity)

上式所求出的電極電位，若以標準氫電極電位(S.H.E)為基準，配合反應時的pH值，並取對數座標，即可繪出E—pH的關係圖，即所謂的Pourbaix圖(如圖2-10所示)，此圖可以很清楚的評估金屬暴露的環境，如免疫區(immunity region)、腐蝕區(corrosion region)或鈍化區(passivation region)。

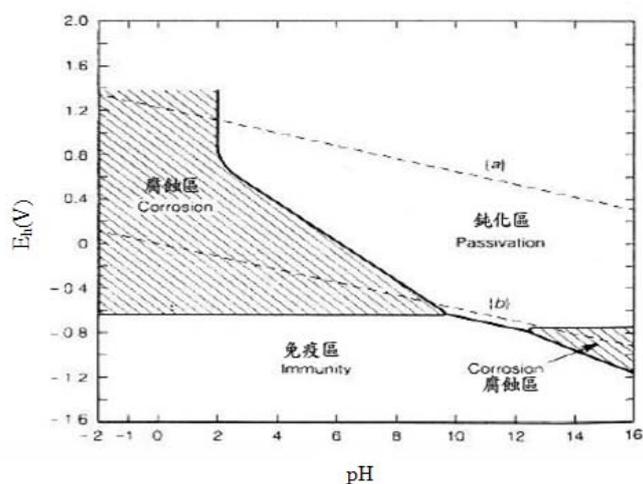


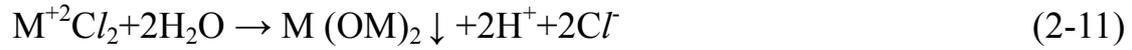
圖 2-10 Pourbaix 圖

(資料來源：柯賢文，1995)

2-3-2 電位差造成鋼筋腐蝕

電解液有濃度梯差存在時，它會使同一性質的兩電極間產生電位差，稱之為濃度差電池[32]。鋼筋混凝土結構物因鋼筋腐蝕造成混凝土保護層剝落，修補水泥質材料尚未完成水化前，新舊接合處可能因對流不良氧氣較少，而形成了一種氧氣的濃度差電池，如圖 2-11 所示，缺氧處為陽極，富氧處為陰極，此為間隙腐蝕之起始原因。由於舊混凝土層相對於修補層含有較高濃度之帶負電的離子(氫離子或氯離

子)，一般鹽類遇到水會水解。金屬氯化物遇到水亦會產生氫氧化物的沉澱合鹽酸，反應如下式(2-11)：



氫離子和氯離子會加速促使金屬的腐蝕，由其是於表面有氧化層的金屬。最易受到氯離子侵蝕，它們分別和金屬氧化物及鈍化膜作用，如式 2-11。結果腐蝕出更多的金屬離子，更多的金屬離子又引進了更多的氯離子。如此惡性循環，加速鋼筋腐蝕。

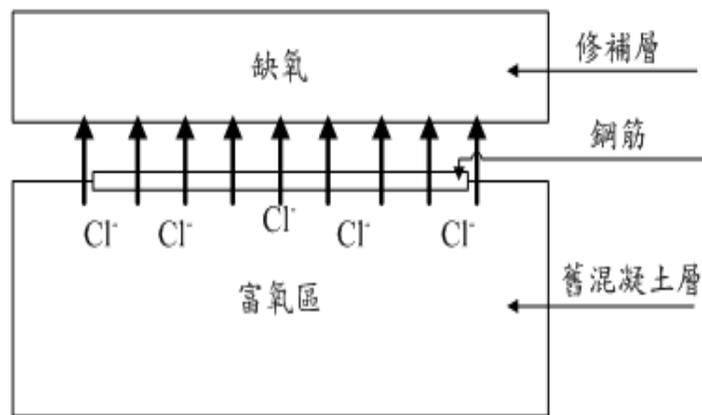


圖 2-11 混凝土修補接面區電位差造成鋼筋腐蝕

(資料來源：本研究整理)

2-3-3 防蝕材料、工法

港灣結構物防蝕技術應用[33]依據日本建設廳、日本港灣協會-港灣設施技術基準及解說綜合，提出防蝕工法可依使用材料分為：

1. 塗料，如無機鋅底漆+Coating coal tar Epoxy 面漆。
2. 有機披覆，如多元酯樹脂 PE、聚氨酯 PU、環氧樹脂。
3. 無機披覆，如水泥包覆、FRP 包覆、中性石油防蝕帶包覆。
4. 金屬包覆法
5. 金屬熔射
6. 陰極防蝕法

且依施工的性質可區分為 PE、PU 有機被覆、金屬熔射歸納為前置(先)工法，而無機被覆、金屬包覆法、陰極防蝕法歸納為後置(後)工法，至於塗料、環氧樹脂的施工，可於現場塗裝(先工法與後工法均適用)。

防蝕材料

2002 年， de Rincon 等學者，以氧化鋅添加於混凝土中以評估其抑制鋼筋腐蝕之效能[34]；2002 年， Ghassan Nounu 等學者，探討採

用丙烯酸塗料以塗抹方式，抑制鋼筋混凝土鋼筋腐蝕之效能[35]。

2006年Wang等學者[36]，採用水不同水膠比之水泥質修補砂漿，添加腐蝕抑制劑，及鋅包覆鋼筋不同面積做為試驗變數，進行鋼筋混凝土梁之防蝕修護有效性之探討。提出鋼筋腐蝕不僅與保護層厚度有關，且不同種類之橫截面上層有很大影響；採用水膠較高的水泥砂漿修補，具有較高的透水性，但相對的會影響鄰近混凝土的氯離子傳輸速率，加速鋼筋腐蝕；鋅能有效的防止鋼筋腐蝕，但其防蝕效果可能受到不同因素的影響，如鋅與鋼的接觸面，應該採取適當的措施，才能確保鋅應用在混凝土中的防蝕效能，詳細試驗結果，如圖2-12所示。

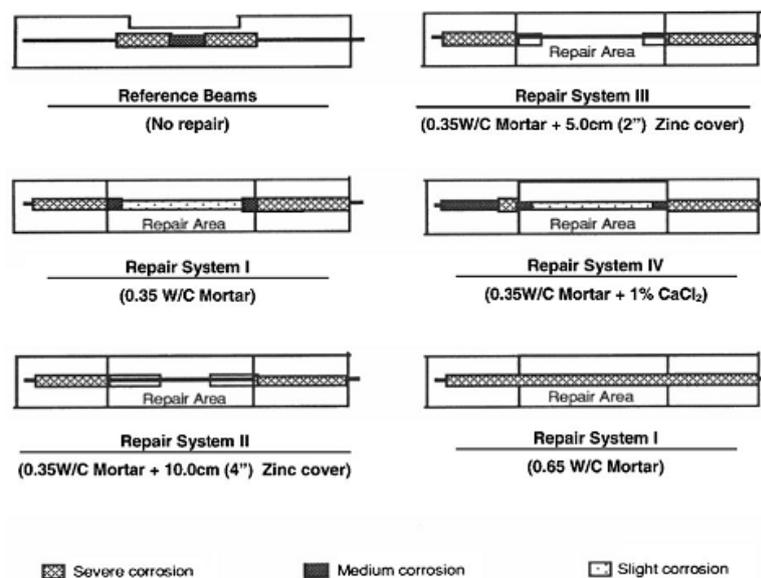


圖 2-12 不同性質材料之防蝕效能

(資料來源：Wang 等，2006)

1. 腐蝕抑制劑

腐蝕抑制劑通常分為鈍化(passivating)、陰極(cathodic)、有機(organic)、沉澱(precipitation)等 4 型[37]。2004 年，Berke 等學者指出[38]，以亞硝酸鹽鈣作為腐蝕制劑，其抑制鋼筋腐蝕的效果良好，且添加量越多效果越佳。

2003 年，Kondratova 等學者[39]，採用市面上較常使用之兩種腐蝕制劑(有機及亞硝酸鹽類)，作為修補砂漿之混合物，以減緩鋼筋混凝土中鋼筋腐蝕速率，並將試體暴露於潮汐高差約 1 公尺之海洋環境中，每 12 個月取樣一次量測試體腐蝕速率，連續三年試驗結果發現，兩種腐蝕抑制劑均能夠有效的減少鋼筋的腐蝕速率，但卻無法防制局部鋼筋腐蝕。

1979 年，Rosenberg 等學者，採亞硝酸鈣($\text{Ca}(\text{NO})_2$)作為腐蝕抑制劑，添加於含氯離子的鹼性溶液中，探討鋼筋的腐蝕速率。發現鐵離子和亞硝酸根不會發生反應，只有亞鐵離子和亞硝酸根離子會發生反應，產生 Fe_2O_3 與 NO ，其反應式如下所示



由式中得知，亞硝酸根離子會使亞鐵離子快速的氧化成鐵離子，在金屬的表面形成氧化鐵保護膜，阻礙亞鐵離子的產生[44][41]。

1970年，Gouda以苯甲酸鈉、酪酸鉀、亞硝酸鈉、磷酸鈉、硬酯酸鉍等作為腐蝕抑制劑，於鋼筋混凝土拌合水內添加腐蝕抑制劑及2%氯化鈉，並將硬固試體浸漬於海水中，結果發現腐蝕抑制劑以亞硝酸鈉抑制腐蝕效果最好[42]。

2-3-4 直流極化法

直流極化法是由 Stern 和 Geary 於 1958 年首先提出[43][12]，利用金屬極化的現象，在實驗系統中供給微小外加電流，來進行金屬的腐蝕量測，即在一個腐蝕的系統中，在自然的腐蝕電位下給予很小的電位，就會產生一個很小的電流，此時外加的微小電位與電流將成為一線性關係，而此線性關係的斜率稱之為極化電阻 R_p ；若 ΔE 不超過 10 mV 時，即可不考慮陰陽極面積的比值。

$$R_p = \frac{\Delta E}{\Delta I} \quad (2-11)$$

式中： R_p ：極化電阻 ($\text{ohm}\cdot\text{cm}^2$)

ΔE ：電位差 (Volts)

ΔI ：電流密度差 (A/cm^2)

由上式可得極化電阻 R_p

$$i_{corros} = \left[-\frac{\beta_c \beta_a}{2.303(\beta_a + \beta_c)} \right] \times \frac{\Delta E}{\Delta I} = \frac{B}{Rp} \quad (2-12)$$

式中： i_{corros} ：腐蝕電流密度 (A/cm^2)

β ：陰極和陽極的 Tafelt 常數，即陰、陽極極化曲線斜率

B：對一般腐蝕狀態下之鋼筋而言，B 值約為 26mV

再由 Stern 和 Geary 推導的公式中，可求得腐蝕電流 i_{corros} 。求得腐蝕電流後帶入法拉第定律 (Faraday's law)，由金屬損失重量與通電量的關係式，即可求得單位時間的腐蝕速率。

$$W = \frac{I \times t}{n \times F} \times M \quad (2-13)$$

式中：W：金屬損失重量 (g) M：金屬之原子量 (g/mole)

F：拉法第常數，1 莫耳等於 96500 庫倫 t：時間 (sec)

n：轉移的電子數

陰極防蝕

陰極防蝕法的原理由熱力學的觀點來看，就是將被保護的電位降低，使腐蝕不會產生。以鐵為例，在 Pourbaix diagram (E-pH diagram) 中，鐵與環境的作用型態可分為腐蝕區、鈍化區、及免疫區；在一定的 pH 情況下，將腐蝕區鐵的電位降低，到免疫區的範圍，則鐵將無

法產生腐蝕，如圖2-12。而從電化學觀點來看，一般腐蝕電池的產生，組成要件包含陰極、陽極、電解液及陰極與陽極間電子流通的線路。

由於陰極與陽極本身的結構性質與化學特性不同，使得彼此間會有電位差的反應，造成電流由陽極流向電解液。因此利用外加電流的方法，使陰極電流流向金屬，可以使金屬的淨陽極電流降低，甚至趨近於零，如此一來金屬的腐蝕便不會產生。表示陰極防蝕的基本原理就是降低腐蝕電位，往負質的方向進行，達到金屬防蝕的目的。金屬自由腐蝕狀況(無外電流的型況-condition 1)到完全被保護時(無陽極電流-condition 4)，可經由4個連續的陰極化過程達成，也就是說，當金屬的電位被極化至陽極的開路電位(open circuit potential)時金屬將完全被保護，使其超過陽極的開路電位)，不僅需要額外的陰極保護電流，而且氫氣的產生也會造成金屬的脆化或原有的塗層剝落，失去陰極保護的目的，如圖2-13所示[44]。

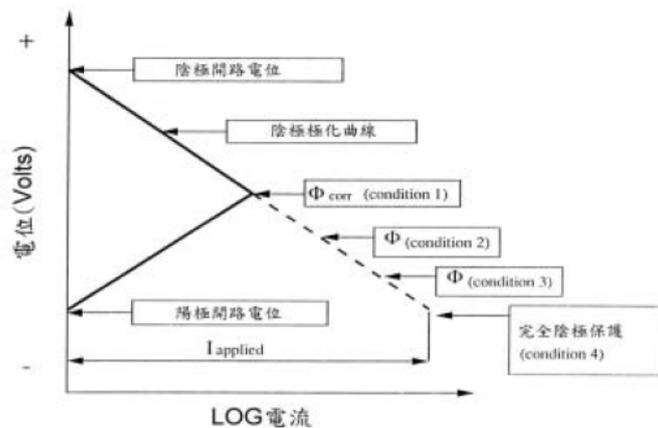


圖2-13 陰極保護極化示意圖

(資料來源：陳桂清等，2004)

適用時機：鋼筋混凝土結構物因氯離子含量偏高(俗稱海砂屋)而產生腐蝕問題，可採用陰極防蝕工法以抑制鋼筋之腐蝕。但若鋼筋是因混凝土中性化而腐蝕，則陰極防蝕工法的可行性尚待評估。一般而言，陰極防蝕工法可適用於地面上、下及水面上下的結構[45][46]。

陰極防蝕種類[44]：

- (1) 外加電流法：利用一外部電源來提供陰極與陽極之間的電位差。陽極必須接於電源之正被保護金屬則接於電源的負端。
- (2) 犧牲陽極法：犧牲陽極法主要是利用活性較高之金屬(如鎂、鋁、鋅)為陽極，與被保護金屬於介質(如土壤、水、混凝土等)中聯結，形成一電化學電池。

第三章 試驗計劃

第一節 試驗變數與試驗材料

3-1-1 試驗變數

試驗計劃主要試驗變數可分為 3 部分：

第一部份針對水泥質系裂縫注入修補材料修補特性進行探討，主要採用 4 種膠結材料(純水泥、膨脹性水泥、膨脹性飛灰水泥、膨脹性爐石水泥)與兩種水膠比(0.45 及 0.3)作為裂縫注入修補材料，拌製修補水泥漿並應用於裂縫寬度小於 0.5 mm 之試體，如圖 3-1 所示。

第二部份針對水泥質系灌漿修補材料修補特性進行探討，主要採用 4 種修補材料(純水泥砂漿、膨脹水泥砂漿、膨脹飛灰水泥砂漿、膨脹爐石水泥砂漿)，砂漿使用種砂率(水泥：砂=1：1 及 1：0.75)，拌製灌漿修補材料並應用於裂縫寬度大於 0.5 mm 之試體，如圖 3-1 所示。

第三部份針對水泥質系補綴修補材料修補後腐蝕耐久性進行探討，主要採用 2 種材料(純水泥砂漿、腐蝕抑制水泥砂漿(3% NaNO_2))做為補綴層材料，而黏結層以 4 種材料及對應工法(純水泥、腐蝕抑制劑水泥漿(3% NaNO_2)(無機披覆法) 與環氧樹脂(有機披覆法)、Zinc(塗封、陰極防蝕〔犧牲陽極法〕))，針對已發生腐蝕損壞之鋼筋

混凝土板(水膠比 0.45、0.65)進行修復，如圖 3-2 所示。

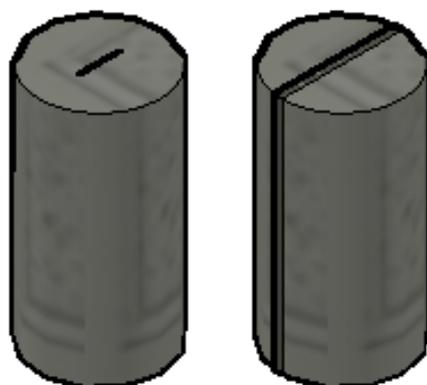


圖 3-1 裂縫寬度 $< 0.5 \text{ mm}$ 及 $> 5 \text{ mm}$ 圓柱試體示意圖

(資料來源：本研究整理)

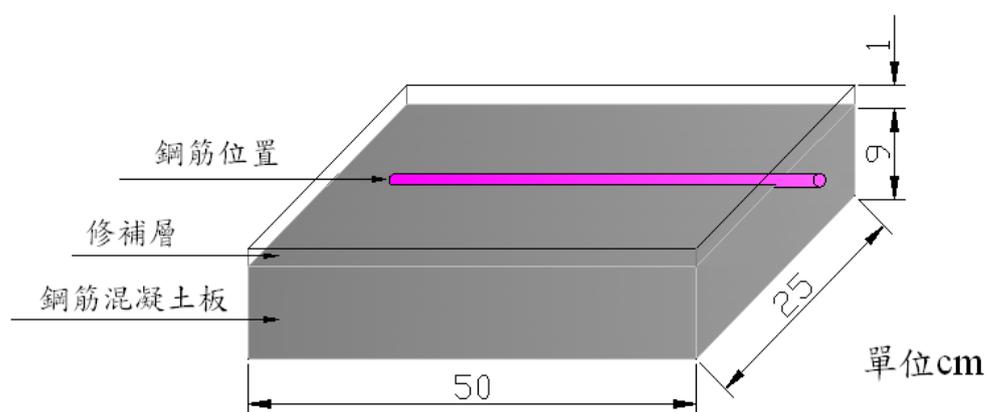


圖 3-2 鋼筋混凝土板試體

(資料來源：本研究整理)

3-2-2 試驗材料

試驗用材料包括水泥、水、礦物摻料、粗細粒料、摻劑(強塑劑、腐蝕抑制劑、無收縮劑)、鋅粉、鋼筋等，其性質如下：

水：自來水，符合 CNS 拌合水要求。

海水：取自於基隆濱海區，鹽分含量 3.3%，氯離子濃度 0.56 Mole/L。

樹脂乾粉：採用 DM 200 樹脂乾粉，比重 1.4，建議用量為的水泥用量 3%~5%。

水泥：採用台灣水泥公司所生產的卜特蘭 Type I 水泥，其性質符合 CNS 61 第 I 型卜特蘭水泥之要求，卜特蘭水泥的物性及化性詳列於表 3-1 與表 3-2。

飛灰：採用 F 級飛灰，如照片 3-1 所示，細度為 $376 \text{ m}^2/\text{kg}$ ，通過 #325 篩約 14%，比重為 2.46，飛灰物性及化性詳列於表 3-1 與表 3-2。

爐石：水淬爐石粉如照片 3-2 所示，細度為 $412 \text{ m}^2/\text{kg}$ ，比重為 2.89。物性及化性詳列於表 3-1 與 3-2 表。



照片 3-1 飛灰

(資料來源：本研究整理)



照片 3-2 爐石

(資料來源：本研究整理)

表 3-1 膠結料之物理性質

項目	水泥 I 型	爐石	飛灰
比重	3.15	2.89	2.46
細度(透氣儀試驗) m ² /kg	362	412	370
正常稠度用水量 %	25.8	-	-
假凝結 %	87.3	-	-
凝結時間	-	-	-
初凝 min	195	-	-
終凝 min	290	-	-
抗壓試驗 psi			
3 天	3602	-	-
7 天	5092	-	-
28 天	6418	-	-
水泥砂漿空氣含量(體積比) %	3.23	-	-
細度 (NO.325 濕篩法停留量)%	-	2.2	14

(資料來源：台灣水泥股份有限公司、

中聯爐石處理資源化公司)

表 3-2 膠結材料化學成分

項目	水泥	爐石	飛灰
二氧化矽 (SiO ₂) %	21.04	33.42	57.2
氧化鋁 (Al ₂ O ₃) %	5.46	13.35	20.8
氧化鐵 (Fe ₂ O ₃) %	2.98	0.21	8.1
氧化鈣 (CaO) %	63.56	41.16	2.4
氧化鎂 (MgO) %	2.52	7.76	2.2
三氧化硫 (SO ₃) %			
三氧化硫 C ₃ A ≤8%	-	0.61	-
(SO ₃) % C ₃ A ≥8%	2.01	-	-
燒失量(L.O.I) %	1.38	0.30	2.1
不容殘渣%	0.1	-	-
有效鹼類	0.78	-	-
(Na ₂ +0.65K ₂ O) %			
氧化鈉 (Na ₂ O) %	0.32	-	-
氧化鉀 (K ₂ O) %	0.7	-	0.8
游離氧化鈣 (Free CaO) %	0.76	-	-
矽酸三鈣 (C ₃ S) %	49.08	-	-
矽酸二鈣 (C ₂ S) %	23.3	-	-
鋁酸三鈣 (C ₃ S) %	9.43	-	-
鋁鐵酸四鈣 (C ₄ AF) %	9.07	-	-

(資料來源：台灣水泥股份有限公司、

中聯爐石處理資源化公司)

粗粒料：粗粒料最大粒徑為 20 mm，乾搗單位重圍 1652 kg/m³，比重

2.61，吸水率 0.8%，符合 ASTM C136 規定，篩分析結果如

表 3-3 所示。

表 3-3 粗粒料篩分析

篩號	各篩停留量 (g)	停留百分率 (%)	累積停留百分率 (%)	通過百分率 (%)
1"	0	0	0	100
3/4"	24.9	0.8	0.8	99.2
1/2"	662.9	22.1	22.9	77.1
3/8"	1053	35.1	58.0	42.0
NO.4	1042	34.7	92.8	7.2
NO.8	129.9	4.3	97.1	2.9
底盤	87.1	2.9	100	0
	2999.8	100	F.M	2.72

(資料來源：本研究整理) 粗粒料量 3000(g)

混凝土用細粒料：天然河砂的細度模數為 2.1，比重為 2.54，吸水率 2%，符合 ASTM C136 規定，篩分析結果如表 3-4 所示。

表 3-4 細粒料(混凝土)篩分析

篩號	各篩停留量 (g)	停留百分率 (%)	累積停留百分率 (%)	通過百分率 (%)
3/8"	1.7	0.34	0.34	99.66
NO.4	2.7	0.5	0.9	99.12
NO.8	8.4	1.7	2.6	97.44
NO.16	24.8	5.0	7.5	92.48
NO.30	102.8	20.6	28.1	71.92
NO.50	210.3	42.1	70.1	29.86
NO.100	129.5	25.9	96	3.96
底盤	19.4	3.9	99.9	0.08
	497.9	100	F.M	2.1

(資料來源：本研究整理) 細粒料用量 500.4 (g)

環氧樹脂：採用 XX 公司提供之接著劑，型號 EP-27，建議主劑與混

合劑比例為 2.6:1.4，調和後需要在 30 分鐘內使用完畢。

水泥砂漿用細粒料：天然河砂的細度模數為 2.9，比重 2.55，吸水率

3%，符合 ASTM C136 規定，篩分析結果如表

3-5 所示。

表 3-5 細粒料(砂漿)篩分析

篩號	各篩停留量 (g)	停留百分率 (%)	累積停留百分率 (%)	通過百分率 (%)
3/8"	0	0	0	100
NO.4	0	0	0	100
NO.8	12.9	2.6	2.6	97.4
NO.16	38.6	7.7	10.3	89.7
NO.30	83.2	16.6	26.9	73.1
NO.50	180.4	36.1	63	37
NO.100	115.1	23	86	14
底盤	70.2	14	100	0
	500.4	100	F.M	2.9

(資料來源：本研究整理)

細粒料用量 500.4 (g)

修補用標準砂砂：採用標準砂 #4、#6、#9，如照片 3-3 所示，平均

粒徑分別為 46~56、70~105、85~150 (μm)，參照

CNS 486 A3005 及 ASTM C136 規定設計緻密級

配，詳如表 3-6~3-9 所示，緻密級配曲線，如圖 3-3

所示。

鋁粉：鋁粉如照片 3-4 所示。



照片 3-3 矽砂

(資料來源：本研究整理)



3-4 鋁粉

(資料來源：本研究整理)

表 3-6 #9 矽砂(修補砂)篩分析

篩號	各篩停留量 (g)	停留百分率 (%)	累積停留百分率 (%)	通過百分率 (%)
NO.30	13.9	2.8	2.8	97.22
NO.50	310.9	62.2	65.0	35.04
NO.100	157.9	31.6	96.5	3.46
NO.200	13.3	2.7	99.2	0.8
NO.300	2.6	0.5	99.7	0.28
底盤	1.4	0.3	100	0

(資料來源：本研究整理)

粒料用量 500 (g)

表 3-7 #6 矽砂(修補砂)篩分析

篩號	各篩停留量 (g)	停留百分率 (%)	累積停留百分率 (%)	通過百分率 (%)
NO.30	0	0	0	100
NO.50	6.9	1.4	1.4	98.62
NO.100	321.3	64.3	65.6	34.36
NO.200	145.3	29.1	94.7	5.3
NO.300	21.9	4.4	99.1	0.92
底盤	4.6	0.9	100	0

(資料來源：本研究整理)

粒料用量 500 (g)

表 3-8 #4 矽砂(修補砂)篩分析

篩號	各篩停留量 (g)	停留百分率 (%)	累積停留百分率 (%)	通過百分率 (%)
NO.30	0	0	0	100
NO.50	0	0	0	100
NO.100	81.4	16.3	16.3	83.72
NO.200	355.9	71.2	87.5	12.54
NO.300	43.3	8.7	96.1	3.88
底盤	19.4	3.9	100	0

(資料來源：本研究整理)

粒料用量 500 (g)

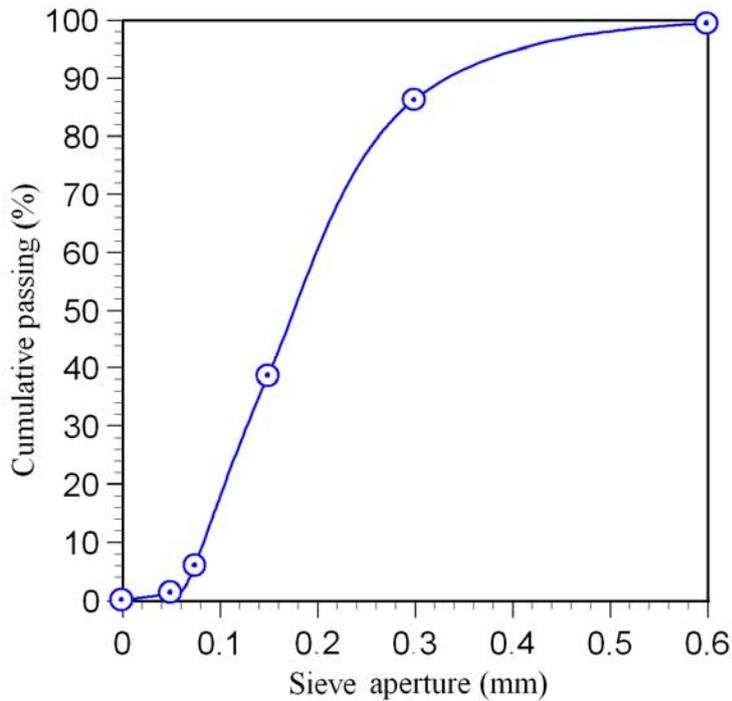


圖 3-3 緻密級配曲線圖

(資料來源：本研究整理)

表 3-9 緻密級配篩分析試驗結果

篩號	各篩停留量 (g)	停留百分率 (%)	累積停留百分率 (%)	通過百分率 (%)
NO.30	3.56	0.7	0.7	99.288
NO.50	65.76	13.2	13.9	86.136
NO.100	238.24	47.6	61.5	38.488
NO.200	163.04	32.6	94.1	5.88
NO.300	23.06	4.6	98.7	1.268
底盤	6.34	1.3	100	0

(資料來源：本研究整理)

粒料用量 500 (g)

腐蝕抑制劑：主要為亞硝酸鈉，如照片 3-5 所示，白色略帶黃色之結晶粉末，其化學性質，如表 3-10 所示。

表 3-10 腐蝕抑制劑成分

項目	結果
氯 (Cl) %	0.01
氧化硫 (SO ₄) %	0.01
鐵 (Fe) %	0.002
甲 (K) %	0.02
鉛 (Pb) %	0.002
亞硝酸鈉 (NaNO ₂) %	97
雜質%	2.956

(資料來源：片山試藥株式會社)

強塑劑：採用台灣 BASF Glenium 51 高性能減水劑，如照片 3-6 所示，

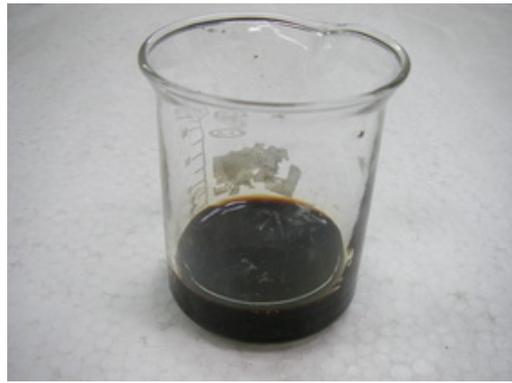
其成分主要為羧酸系高分子材料，混合比重為 1，pH 值為

1.5~4.5，建議用量為水泥重量的 0.2~1%。



照片 3-5 腐蝕抑制劑粉末

(資料來源：本研究整理)



照片 3-6 強塑劑

(資料來源：本研究整理)

鋼筋：採用#4 竹節鋼筋，如照片 3-7 所示，降伏強度 583.58 MPa，
極限強度 831.91 MPa。

鋅粉：採用單劑型鋅粉漆，型號為 700，如照片 3-8 所示。



照片 3-7 #4 竹節鋼筋

(資料來源：本研究整理)



照片 3-8 鋅粉漆

(資料來源：本研究整理)

第二節 配比與試體製作

3-2-1 裂縫注入修補材料配比及試體製作

表 3-11 為裂縫注入修補材料配比，編號 I、II、I2、I3 分別表示

水泥漿、膨脹水泥漿、膨脹飛灰水泥漿及膨脹爐石水泥漿，水膠比採用 0.45 及 0.3(編號 I 前數字 4 表示水膠比 0.45，數字 3 表示水膠比 0.3)，其中礦物摻料飛灰及爐石用量為水泥重量的 10%，膨脹劑用量為水泥重量 0.01%，乾粉樹脂用量為水泥重量 3%，以強塑劑用量控制漿體之流動性，並依照各項試驗規範之要求，灌置試體進行裂縫注入修補材料性質試驗。

表 3-11 裂縫注入修補材料配比

編號	W/B	水	水泥	SP	鋁粉	爐石	飛灰	樹脂
4I		573	1273	1.27	-	-	-	-
4I1	0.45	530	1142	1.18	0.11	-	-	35.31
4I2		521	1008	1.16	0.1	-	116	34.75
4I3		528	1021	1.17	0.1	117	-	35.19
3I		470	1173	12.6	-	-	-	-
3I1	0.3	427	1380	11.4	0.14	-	-	42.7
3I2		418	1212	12.5	0.12	-	139	41.8
3I3		425	1232	11.3	0.12	142	-	42.5

(資料來源：本研究整理)

單位 kg/m^3

編號 CY 表示圓柱試體，配比水灰比為 0.5。試體製作方式是將 (L)5 x (W) 0.4 cm 鋼片，預設在 (D) 10 x (H) 20 cm 圓柱模中央後注入水灰比 0.5 的水泥砂漿，並於靜置 24 小時後拆模，將試體浸置水中養護 28 天，把試體切成 (H) 5 cm 及 (H) 10 cm 試體，如照片 3-9~3-10 所示，修補完成後進行 RCPT 試驗、抗滲透水壓試驗及貯鹽試驗，詳細配比資料，如表 3-12 所示。

表 3-12 水泥砂漿圓柱試體配比

	編號	W/C	水	水泥	細粒料
圓柱試體	CY	0.5	320	639	1131

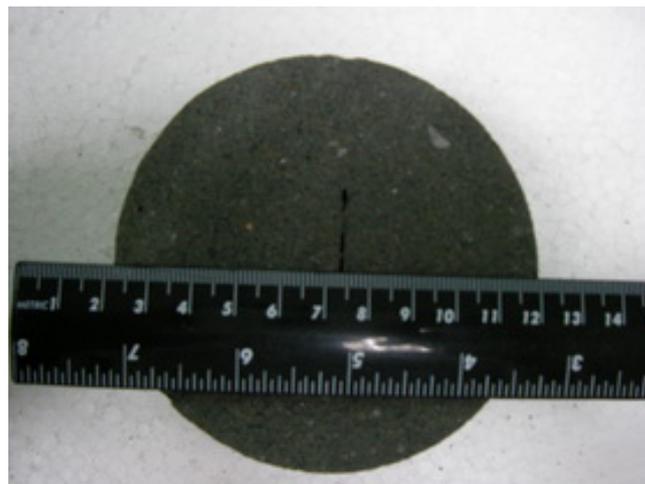
(資料來源：本研究整理)

單位 kg/m^3



照片 3-9 預設，5 及 0.5 mm 寬度裂縫試體

(資料來源：本研究整理)



照片 3-10 0.5 mm 寬度裂縫

(資料來源：本研究整理)

3-2-2 裂縫灌漿修補試驗配比及試體製作

表 3-13 為灌漿修補材料配比，編號 G、G1、G2、G3 各別表示，水泥砂漿、膨脹水泥砂漿、膨脹飛灰水泥砂漿及膨脹爐石水泥砂漿，採膠結料:細粒料=1:1、1:0.75 拌製水泥砂漿(編號 G 前數字 1 表示 1:1，數字 7 表示 1:0.75)，水膠比設為 0.45，其中礦物摻料(飛灰或爐石)用量為水泥重量 10%，膨脹劑用量約占水泥重量 0.01%，乾粉樹脂用量為水泥重量 3%，修補用砂採用#30 通過率 100%之砂砂，以強塑劑用量控制漿體之流動性，並依照各項試驗規範之要求，澆置試體進行裂縫灌漿修補材料性質試驗。

表 3-13 灌漿修補材料配比

編號	W/B	水	水泥	SP	鋁粉	爐石	飛灰	樹脂	粒料
7G		417	927	1.85	-	-	-	-	691
7G1		396	854	1.76	0.9	-	-	26	638
7G2		391	756	1.74	0.8	-	86	26	631
7G3	0.45	395	736	1.76	0.8	87	-	26	636
1G		381	823	2.54	-	-	-	-	848
1G1		365	787	2.43	0.8	-	-	24	784
1G2		361	698	3.12	0.7	-	80	24	773
1G3		364	704	2.34	0.7	81	-	24	783

(資料來源：本研究整理)

單位 kg/m^3

編號 CY 表示圓柱試體，配比水灰比為 0.5。試體製作方式是將水灰比 0.5 之水泥砂漿澆置於(D) 10 x (H) 20 cm 圓柱模中，靜置 24

小時後拆模並將試體浸置水中養護 28 天，以試體中心線為基準，切開一條寬度度 $> 5 \text{ mm}$ ，深度大約為 19 cm 之裂縫，待灌漿修補養護滿 28 天後，將試體切成(H) 5 cm 及(H)10 cm 之試體，如照片 3-9~3-11 所示，進行抗滲透水壓試驗及貯鹽試驗，詳細配比如表 3-12 所示。



照片 3-11 5 mm 寬度裂縫

(資料來源：本研究整理)

3-2-3 補綴修補材料配比及試體製作

編號 C1、C2 表示鋼筋混凝土板補綴修補材料配分別為水灰比 0.45 及 0.65。試體製作方式是將水灰比 0.45 及 0.65 之混凝土，澆置於 (L)50×(W) 25×(H)10cm 板模中，如照片 3-12~3-13 所示，養護齡期 28 天後，通以定電流至鋼筋混凝土板表面有鏽水滲出後，將腐蝕損壞區域敲除，如照片 3-14~3-17 所示，並以鋼刷將鋼筋表面鐵鏽清除，再以高壓水柱清洗修補表面，最後施以黏結層及補綴層完成修

修補材料性質對混凝土結構物耐久性之探討

補，詳如照片 3-17~3-18 所示。鋼筋混凝土板補綴修補材料詳細配比資料，如表 3-14 所示。

表 3-14 鋼筋混凝土板配比

	編號	W/C	水	水泥	粗粒料	細粒料
鋼筋	C1	0.45	200	444	964	698
混凝土板	C2	0.65		308	1032	748

(資料來源：本研究整理)

單位 kg/m^3



照片 3-12 鋼筋混凝土板模

(資料來源：本研究整理)



照片 3-13 澆置鋼筋混凝土板

(資料來源：本研究整理)



照片 3-14 鏽水流出

(資料來源：本研究整理)



照片 3-15 修補範圍

(資料來源：本研究整理)



照片 3-16 黏結面處理(前)

(資料來源：本研究整理)



照片 3-17 黏結面處理(後)

(資料來源：本研究整理)



照片 3-18 塗上黏結層

(資料來源：本研究整理)



照片 3-19 補綴修補完成

(資料來源：本研究整理)

編號 M、MN 為補綴材料各別表示，水泥砂漿、腐蝕抑制劑與水泥砂漿，其配比為水泥：砂=1:27.5，水膠比為 0.45。修補用砂採用 #30 通過率 100%之標準砂砂，腐蝕抑制劑(NaNO_2)用量為水泥用量 3%，並依照各項試驗規範之要求，澆置試體進行各項，補綴修補材料性質試驗，詳細配比資料，如表 3-15 所示。

表 3-15 補綴修補材料配比

編號	W/B	水	水泥	亞硝酸鈉	粒料
MN	0.45	371	808	16.49	807
M		382	849	-	850

(資料來源：本研究整理)

單位 kg/m^3

鋼筋混凝土板防蝕修護方法是先將鋼筋混凝土板損壞之區域各別塗上環氧樹脂(有機披覆法),環氧樹脂 + 鋅粉(陰極防蝕〔犧牲陽極法〕)、水泥漿+腐蝕抑制劑(3% NaNO_2) (無機披覆法)、純水泥漿(無機披覆法)做為黏結劑,再以補綴材料覆蓋修補表面,並將其編號 P、Z、N、M,待 28 天後進行電化學加速腐蝕試驗及微觀觀察。

第三節 試驗方法與設備儀器

3-3-1 裂縫注入修補試驗方法

1. 注入修補材料性質試驗

主要試驗係參照 JSCE F521 灌漿水泥砂漿流度試驗法與 JSCE F531 流動性試驗法,JSCE K542,5.3 水泥質系裂縫注入修補材料持水性試驗法,JSCE F532 泌水率及膨脹率試驗法(塑膠袋法)與 JIS A1123 混凝土泌水率試驗法,CNS 1010 水硬性水泥壘料抗壓強度檢驗法進

行抗壓試驗，CNS1236 水泥砂漿及混凝土體積變化檢驗法，ASTM C469 混凝土靜彈性模數及波生比試驗法，JIS A1171,7.4 水硬水泥壩料吸水率試驗法，ASTM C348 水硬性水泥壩料抗彎強度試驗法，ASTM C190 水硬性水泥壩料抗拉強度試驗法，JSCE K542,5.10 水泥質系裂縫注入修補材料黏接強度試驗法。

3. 耐久性試驗

主要參照 CNS 3763 透水試驗法，ASTM C1202 RCPT 試驗法，AASHTO T259 貯鹽試驗法。

3-3-2 裂縫灌漿修補試驗方法

1. 灌漿修補材料性質試驗

主要參照 JSCE F521 灌漿水泥砂漿流度試驗法與 JSCE F531 流動性試驗法，JSCE K542, 5.3 水泥質系裂縫注入修補材料持水性試驗法 JS, CE F532 泌水率及膨脹率試驗法(塑膠袋法)與 JIS A1123 混凝土泌水率試驗法，CNS1010 水硬性水泥壩料抗壓強度檢驗法進行抗壓試驗，CNS1236 水泥砂漿及混凝土體積變化檢驗法，JIS A1171, 7.4 水硬水泥壩料吸水率試驗，ASTM C348 水硬性水泥壩料抗彎強度試驗法；ASTM C469 混凝土靜彈性模數及波生比試驗法，ASTM C190 水硬性水泥壩料抗拉強度試驗法，JSCE K552, 5.11 水泥質系灌漿修補材

修補材料性質對混凝土結構物耐久性之探討

料黏接強度試驗法與 ASTM C190 水硬性水泥壩料抗拉強度試驗法。

3. 耐久性試驗

依據 CNS 3763 透水試驗法，AASHTO T259 貯鹽試驗法。

4. 巨觀觀察

光學顯微鏡(OM)觀察

將 4cm (H)圓柱試體，利用光學顯微鏡進行表面特性觀察。

3-3-3 補綴修補試驗方法

補綴材料性質試驗

主要參照 CNS 1010 水硬性水泥壩料抗壓強度檢驗法進行抗壓試驗，CNS1236 水泥砂漿及混凝土體積變化檢驗法，JIS A1171, 7.4 水硬水泥壩料吸水率試驗法，ASTM C348 水硬水泥壩料抗彎強度試驗法；依據 ASTM C190 水硬水泥壩料抗拉強度試驗法，JSCE K561, 5.8 水泥質系補綴修補材料黏接強度試驗法與 ASTM C190 水硬水泥壩料抗拉強度試驗法。

定電流加速腐蝕試驗

養護 28 天後將試體浸置於海水中，一天後量測開路電位及腐蝕速率，接續利用電源供應器以串聯方式施加定電流 100 mA/cm^2 進行定

電流加速腐蝕試驗，每加速 24 小時切斷電源後，靜置 18 小時(目的為使鋼筋電荷轉移達穩定狀態)，在以開路電位法求得鋼筋開路電位。

SEM 微觀結構分析：

微觀結構分析之 SEM 觀察，係參照下列步驟進行：

- (1) 裁切取樣試片，試片尺寸約為 $10 \times 10 \times 3$ mm 大小範圍。
- (2) 將試片置入 80°C 恆溫箱內烘烤 24 小時，進行乾燥去除水氣程序。
- (3) 將試片乾燥處理並預抽真空，並濺鍍金鉑以便導電。
- (4) 置入試體於電子顯微鏡內進行抽真空程序。
- (5) 場發射電子束掃描試片表面，顯像觀察並且照相。

X 光繞射分析：

X 光繞射分析，參照下列步驟進行

- (1) 均勻選取具代表性之試片粉末約 1 公克。
- (2) 將試樣置入 $100 \pm 5^{\circ}\text{C}$ 恆溫箱，進行乾燥去除水氣程序 24 小時以上。
- (3) 試樣黏置於玻璃片上並定位於 XRD 分析儀器中，採銅鉑進行放射以及設定繞射角度為 $10^{\circ} \sim 80^{\circ}$ ，掃描速率設定為 $3 \text{ sec./}0.05^{\circ}$ 。
- (4) 將分析後之 X 光繞射強度圖(intensity diagram)與電腦軟體所有化合物資料庫進行該試驗之化合物尖峰值(peak)比對。

3-3-4 試驗儀器

壓力試驗機

本研究使用之壓力試驗機係由日本 SHIMADZU 公司所製造的 CCM - 200A，利用油壓平台升降系統控制，可進行金屬或混凝土工程材料作抗壓、抗彎等力學性質之試驗研究。抗壓試驗機最大容許荷重為 200 tons，最小讀值為 1 kg，荷重範圍為 20、40、100、200 tons，可以由手動控制加壓速度，亦可從面板或連接電腦由軟體自動控制速率及紀錄數據，儀器如照片 3-20 所示。



照片 3-20 抗壓試驗機

(資料來源：本研究整理)

掃描式電子顯微鏡

本研究中微觀組織觀察是使用日本 HITACHI 公司生產 S-4100 型掃描式電子顯微鏡，放大倍率 10 萬倍。本設備利用電場發射電子束撞擊試片激發出訊號，經由訊號放大器再送至陰極映像管中，可以由螢光幕呈現試體微觀晶相；能量分散光譜儀(Energy Dispersive Spectroscopy, EDS)附屬於 SEM 設備中，儀器外觀如照片 3-21 所示。



照片 3-21 S-4100 型掃瞄式電子顯微鏡

(資料來源：本研究整理)

X光繞射分析儀

本研究利用 Panalytical 公司生產之 DY2611 X 光繞射分析儀進行化合物分析，本儀器應用於分析結晶材料化合物化學成份，儀器外觀如照片 3-22 所示。



照片 3-22 X 光繞射分析儀

(資料來源：本研究整理)

第四章 試驗結果與討論

第一節 裂縫注入修補試驗結果

本研究依據 JSCE-K 542 水泥質裂縫注入修補材料性質試驗法並參照 CNS、ASTM、JIS 相關規定進行流度、持水性、泌水性、抗壓強度、抗彎強度、抗拉強度、吸水率、乾縮等試驗法進行試驗來比較不同修補材料的填充性及差異性。並製作裂縫寬度 0.5 mm 圓柱試體進行注入修補試驗，並參照 AASHTO T259 貯鹽試驗法、CNS 3763 透水試驗法、ASTM C1202 RCPT 試驗法進行修補試體試驗，以驗證水泥質裂縫注入修補材料試驗方法的可行性並同時評估修補材料特性(填充性、防水性、耐久性)。

4-1-1 水泥質裂縫注入修補材料試驗結果討論

利用控制拌合水及 SP 用量，將水泥漿流度調整至 17、17、23、32、50 sec，而持水性分別為 27、28、37、33、35 %，詳如表 4-1 所示。

表 4-1 裂縫注入修補材料流度試驗結果

流度(sec)	17	17	23	32	50
持水係數(%)	27	28	37	33	35

(資料來源：本研究整理)

將水泥漿澆注於試體模中，設定裂縫寬度小於 0.5 mm，試體硬固後將其劈裂並觀察填充裂縫情況，結果發現流度在 ≤ 32 sec 時，持水性至少要控制 $\geq 28\%$ 填充效果較佳。即使流度達到 17 sec，也可能因為混凝土表面吸水率或水份流失的影響而改變，而從方塊試體側面

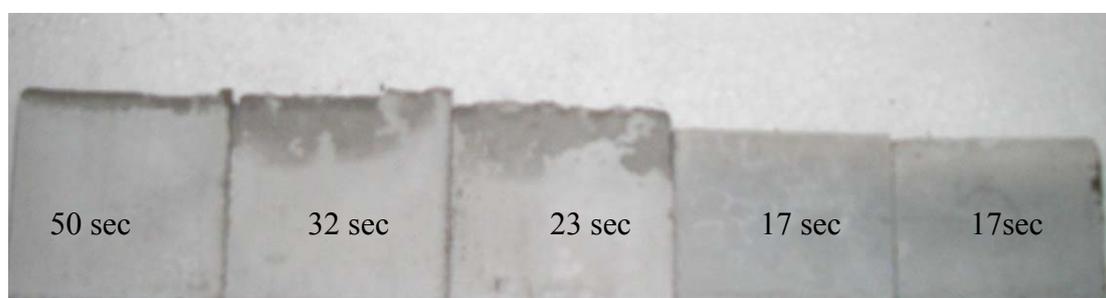
修補材料性質對混凝土結構物耐久性之探討

發現流度 < 32 sec 較容易產生泌水現象，如照片 4-1~4-3 所示，可以推估流度在 ≤ 32 sec 間、持水性不得小於 28%，對於 0.5 mm 寬度裂縫修補效果較佳。上述試驗結果，作為本新拌性質試驗流度、持水性及泌水率之參考依據。

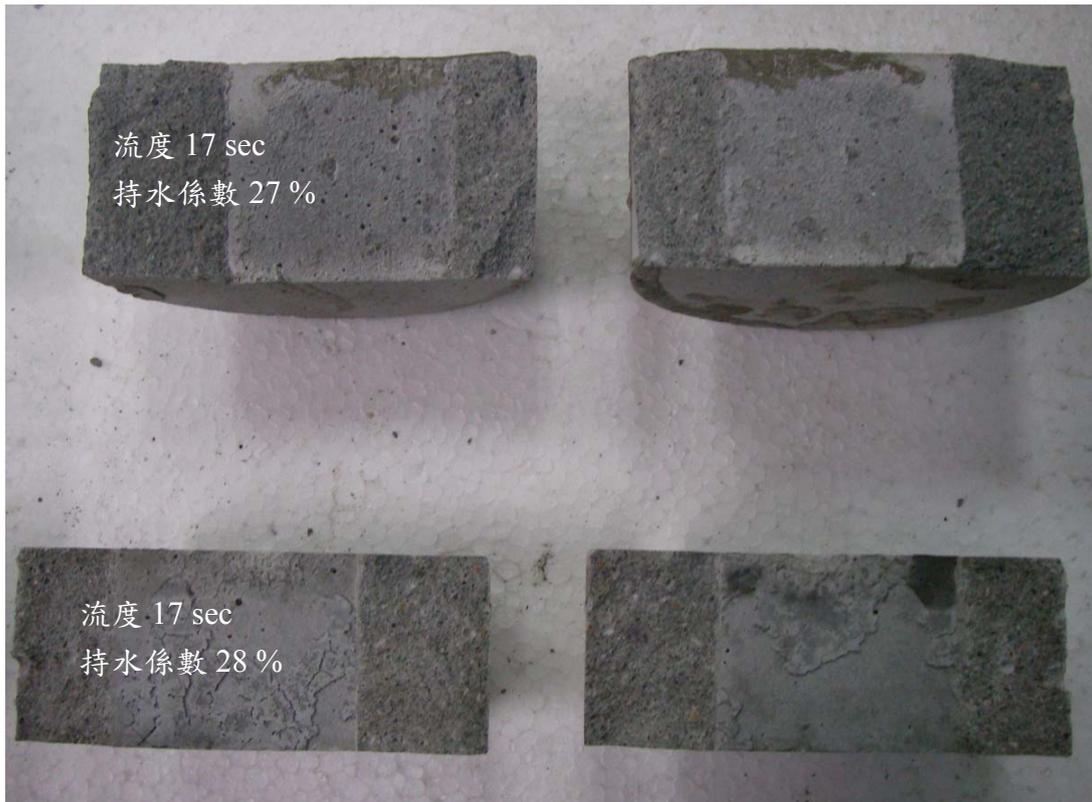


照片 4-1 流度 32、50 sec 劈裂截面

(資料來源：本研究整理)



照片 4-2 不同流度泌水現象(資料來源：本研究整理)



照片 4-3 持水性 27、28 %劈裂截面

(資料來源：本研究整理)

4-1-2 裂縫注入修補材料特性評估

注入修補填充性評估

編號 I、I1、I2、I3 分別表示水泥漿、膨脹水泥漿、膨脹飛灰水泥漿及膨脹爐石水泥漿，水膠比採用 0.45 及 0.3(編號 I 前數字 4 表示水膠比 0.45，數字 3 表示水膠比 0.3)。由新拌性質試驗結果得知，所有注入修補材料，流度、持水性、泌水率均符合需求條件。從力學試驗結果可以發現，添加鋁粉的修補材料的抗壓、抗拉、抗彎強度較純水泥漿明顯降低。而添加鋁粉之試體，由於飛灰卜作嵐反應較遲緩，所以養護 28 天強度稍微偏低，而添加爐石 10 %試體的抗壓及黏接強度有偏高的趨勢。水膠比 0.45 抗壓強度增加了 1.5%、黏接強度增加

修補材料性質對混凝土結構物耐久性之探討

了 3.1%，水膠比 0.3 抗壓強度增加 12.6%，黏接強度增加了 4.1%，詳如表 4-2 及圖 4-1~4-5 所示。

表 4-2 裂縫注入修補材料性質試驗結果

編號 試驗項目	4I	4I1	4I2	4I3	3I	3I1	3I2	3I3
抗壓(MPa)	48.81	38.01	34.57	38.59	86.12	67.98	68.9	76.52
抗彎(MPa)	3.01	2.45	2.19	2.44	5.31	4.28	4.02	4.20
抗拉(MPa)	2.65	2.15	1.98	2.02	4.78	3.99	2.99	3.92
黏接(MPa)	2.21	1.63	1.51	1.68	2.6	3.2	1.96	3.33
彈性模數 (GPa)	33.17	25.31	22.81	25.73	60.30	47.11	47.78	53.32
吸水率(%)	18.73	16.62	17.82	17.82	12.63	9.06	8.85	9.26
流度(sec)	27	30	33	33	29	29	33	32
持水性(%)	28.57	27.75	29.41	28.57	29.41	31.25	30.3	35.71
泌水率(%)	0	0	0	0	0	0	0	0

(資料來源：本研究整理)

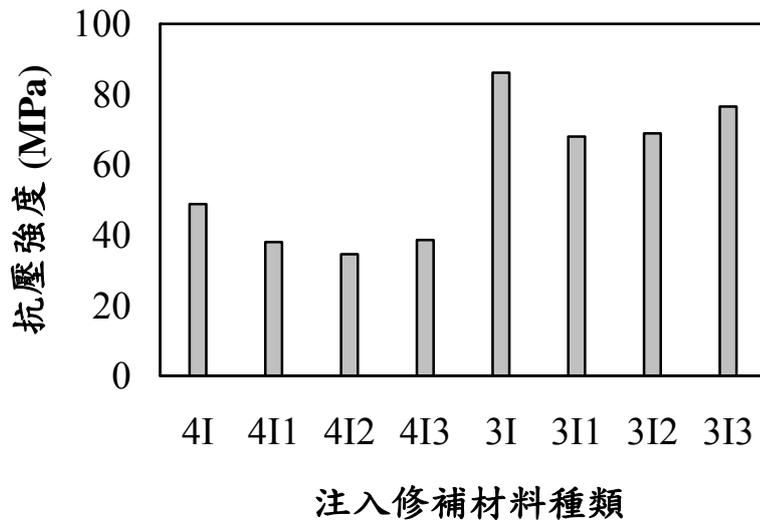


圖 4-1 不同注入修補材料抗壓強度比較圖

(資料來源：本研究整理)

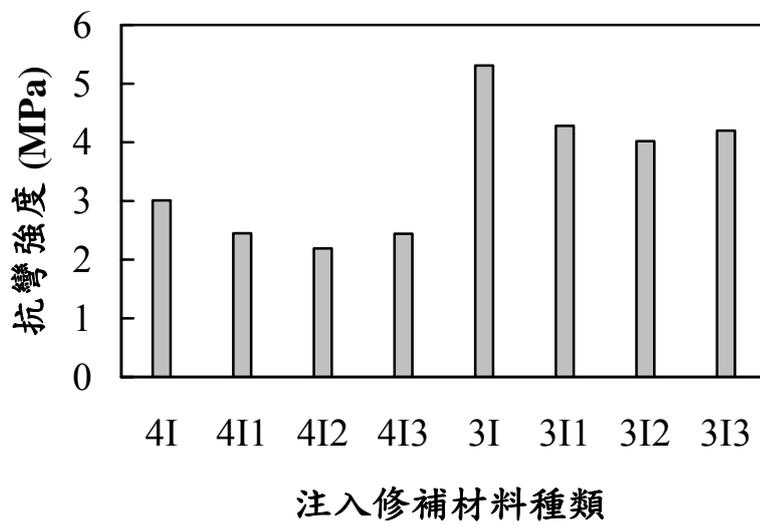


圖 4-2 不同注入修補材料抗彎強度比較圖

(資料來源：本研究整理)

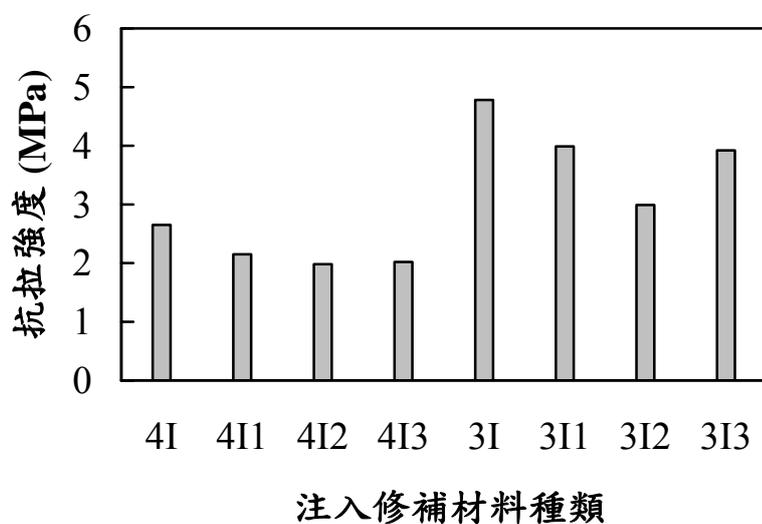


圖 4-3 不同注入修補材料抗拉強度比較圖

(資料來源：本研究整理)

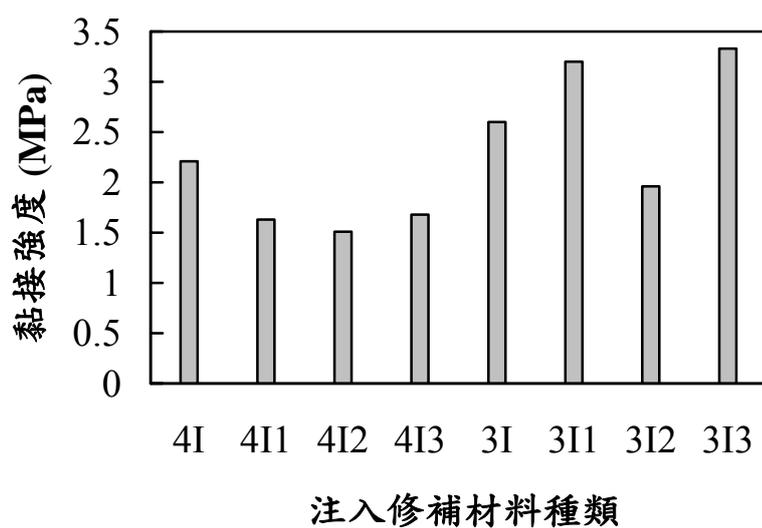


圖 4-4 不同注入修補材料黏結強度比較圖

(資料來源：本研究整理)

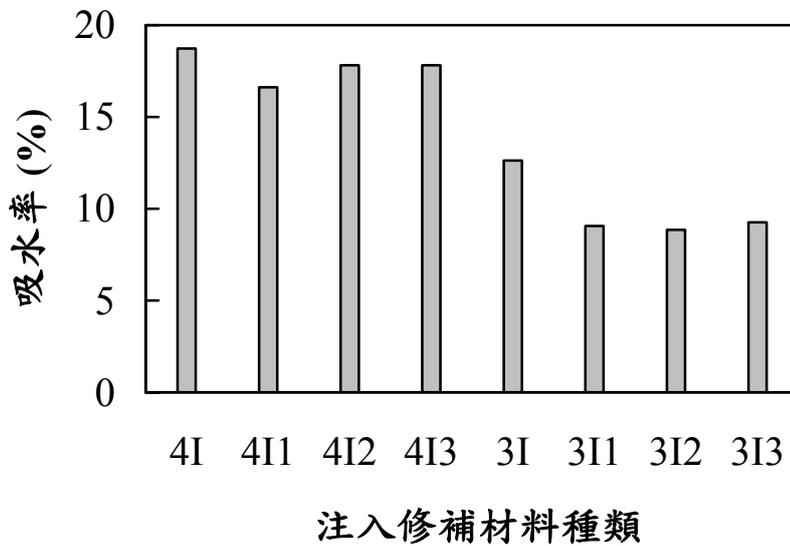


圖 4-5 不同注入修補材料吸水率比較圖

(資料來源：本研究整理)

一般而言水泥質材料會發生塑性收縮、自體收縮及乾縮，所以水泥質修補材料有時可添加鋁粉、鋅粉、鐵粉等材料來改善體積收縮的問題[20]，本研究主要採用鋁粉做為膨脹劑填補體積乾縮的問題，從膨脹/收縮比試驗結果發現，結果是似乎不如預期，由圖 4-6 膨脹/收縮比試驗結果來看，單添加鋁粉 0.01 % 試體，僅在初期會發生體積膨脹，後期仍會因水分消失及化學反應而造成體積收縮，添加礦物摻料(飛灰、爐石)能改善此問題，其中以添加爐石粉較為明顯。

圖 4-7 及圖 4-8 顯示水膠比 0.45、0.3 添加礦物摻料與鋁粉的試體的體積變化，添加飛灰的試體，初期會有明顯的膨脹與收縮，後期逐漸緩和；而添加爐石粉的試體，體積初期至 28 天體積的變化，呈現出一種穩定的膨脹曲線，且隨著水膠比越高越明顯。

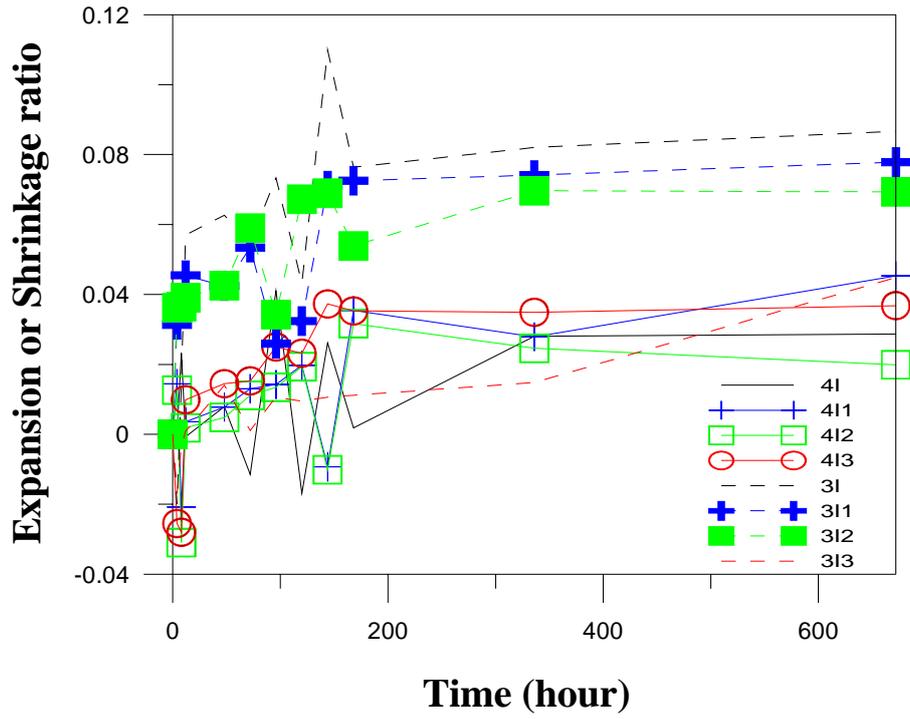


圖 4-6 裂縫注入修補材料收縮/膨脹比

(資料來源：本研究整理)

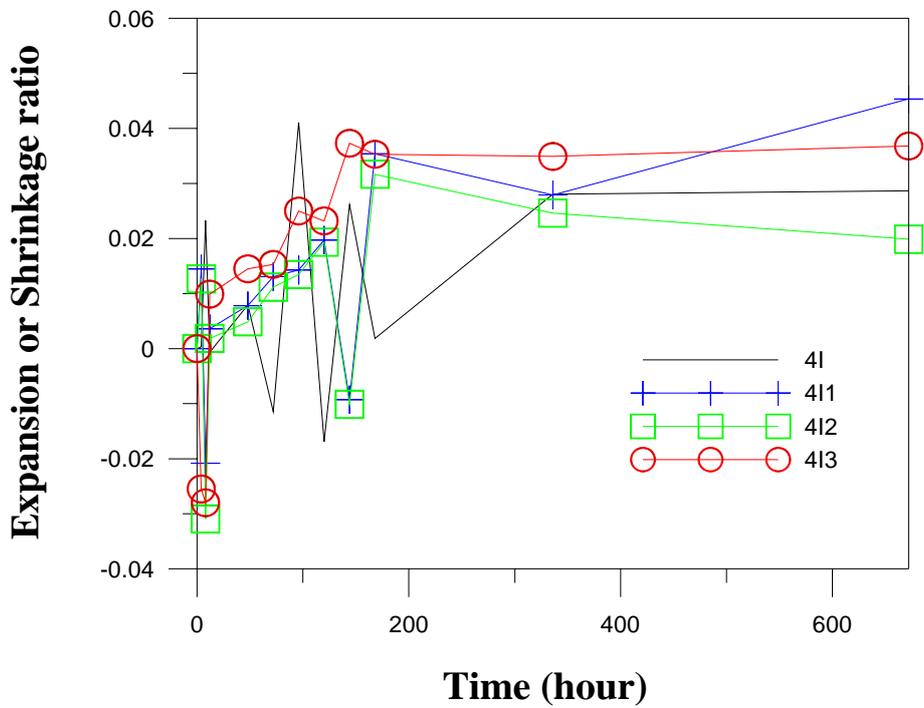


圖 4-7 試體體積變化圖 (W/C= 0.45)

(資料來源：本研究整理)

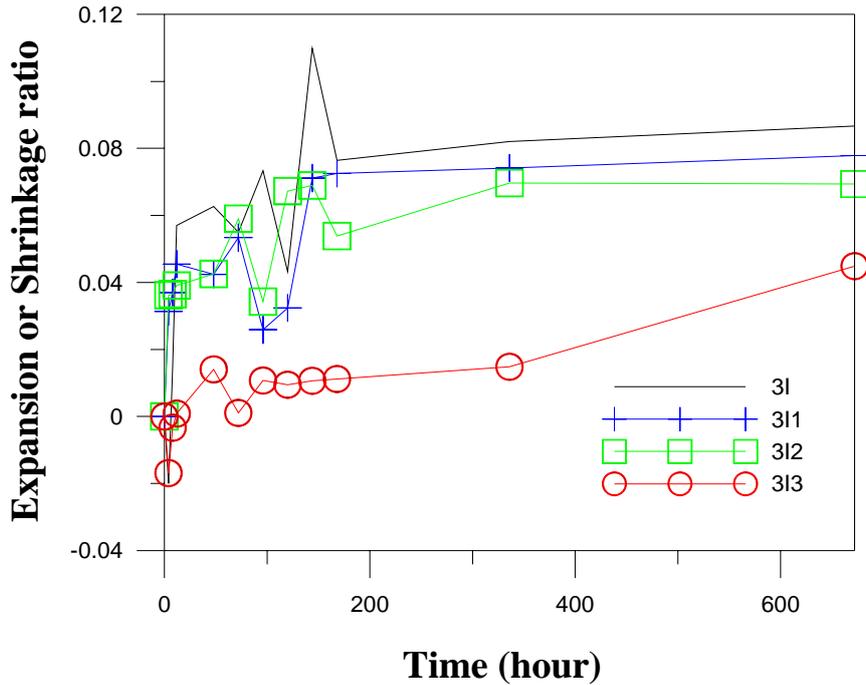


圖 4-8 試體體積變化圖 (W/C= 0.3)

(資料來源：本研究整理)

注入修補後試體防水性評估

利用透水試驗觀察試體底部狀態，評估不同性質材料修補後之防水性。以試體試驗前後淨重求得修補後水的滲透率來比較不同修補材料之差異性。

試驗結果發現僅有編號 4I1、4I1 底部呈濕潤狀態，也就表示純水泥漿，膨脹水泥漿應用於裂縫注入修補可能不具防水性，初步判定可能是因為修補材料體積乾縮，導致修補材料硬固後產生微裂縫而影響到修補後試體之防水性。

水滲透率結果顯示，膨脹水泥漿添加飛灰及爐石試體的滲透率較低，其中水膠比 0.45 試體的滲透率為 0.7%、0.06%，水膠比 0.3 試體的滲透率為 0.1%、0.03%，且水膠比越低防水效果越好，詳細如表 4-3 所示。

表 4-3 注入修補後試體水滲透率

編號	4I	4I1	4I2	4I3	3I	3I1	3I2	3I3
滲透率(%)	1.46	3.39	0.7	0.06	0.41	0.33	0.1	0.03

(資料來源：本研究整理)

注入修補後耐久性評估

利用通過混凝土試體累積電量(庫倫)評估不同性質材料修補後之試體抗氯離子穿透能力，並進行貯鹽試驗，利用比色法來評估氯離子的滲透深度。又參照 AASHTO T277 用庫倫電量來評估修補後混凝土的耐久性。

表 4-4 為 RCPT 貯言試驗結果，由圖 4-9 顯示不同配比試體累積電量，整體而言除編號 4I1 膨脹水泥漿試體累積電量與控制組編號 4I 純水泥試體接近外，其餘試體的累積電量均較低，以膨脹水泥漿添加礦物摻料爐石及飛灰試體最為顯著。

表 4-4 不同修補材料修補後試體累積通電量

編號	累積電量(庫倫)
4I	20982
4I2	17868
4I3	15088
3I	19258
3I1	18958
3I2	17720
3I3	16825

(資料來源：本研究整理)

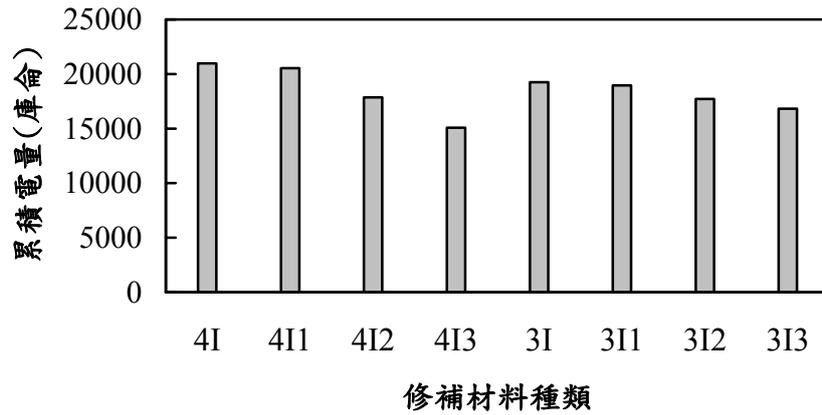


圖 4-9 不同配比累積電量

(資料來源：本研究整理)

編號 4I2、4I3、3I2、3I3 各別約降低 14.84%、28.09%、7.99%。AASHTO T277 規定累積電量 > 4000 庫侖為高氯離子滲透值，因此可以 4000 庫侖為參考值來評估修補試體的耐久性。圖 4-10 不同配比試體累積電量關係圖，圖中顯示所有修補後試體與參考值比較，相差 3.8 倍以上，詳細如表 4-4 所示。

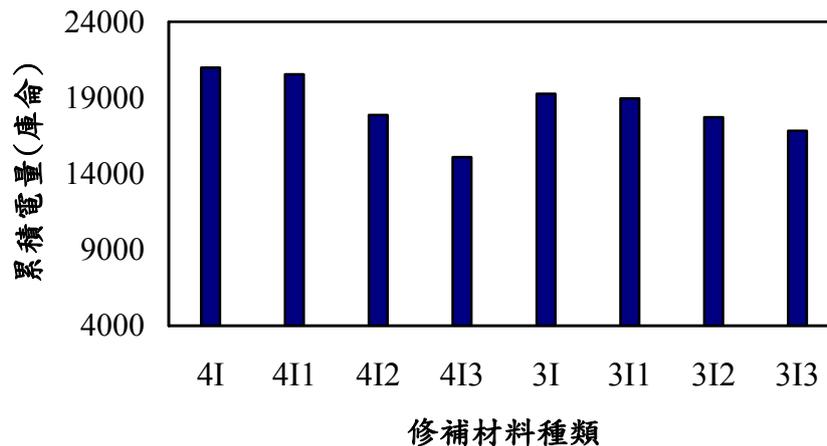
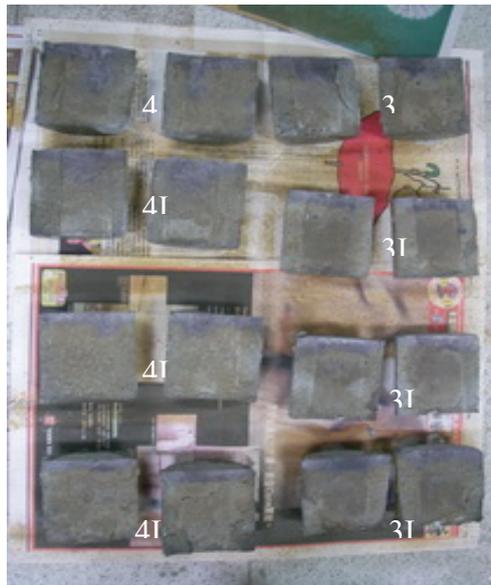


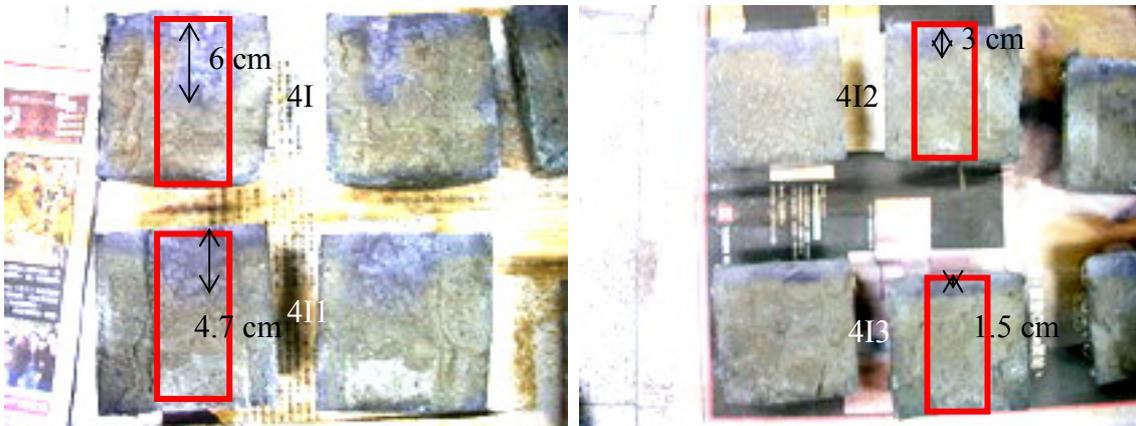
圖 4-10 不同修補材料 6 hour 累積電量比較圖

(資料來源：本研究整理)

照片 4-4 為貯鹽試驗試體，本研究採用比色法辨識氯離子的滲透深度，並用此來比較不同材料修補後試體氯離子滲透的差異性。照片 4-5,4-6 顯示編號 4I,1,2,3、3 I,1,2,3 試體氯離子滲透深度，照片中紅色框框表示修補區域，白色色差表示氯離子滲透深度，經量測後可以得到編號 4I 滲透深度約 6 cm、編號 4I1 滲透深度約 4.7 cm、編號 4I2 滲透深度約 3 cm，編號 4I3 滲透深度約 1.5 cm、編號 3I 滲透深度約 4.5 cm、編號 3I1 滲透深度約 1.5 cm、編號 3I2 滲透深度約 1.5 cm、編號 3I3 滲透深度約 1.7 cm。如果以 4I 為控制組，以 4I1,4I2,4I3 對照組相互比較，整體來看效果皆比 4I 純水泥佳，其中以添加 10 % 爐石粉之膨脹水泥(4I3)效果較佳(提升約 4 倍)，添加 10%飛灰之膨脹水泥次之(4I2)提升約 2 倍，最後膨脹水泥提升約 1.28 倍。再由照片 4-6 觀之，3I,1,2,3 試體氯離子滲透深度，若以 3I 為控制組，3I1,3I2,3I3 為對照組，大致提升了 3 倍左右。最後以水膠比 0.45 與 0.3 兩組的平均滲透深度相互比較，水膠比 0.45 試體的平均滲透深度為 3.8 cm，水膠比 0.3 試體的平均滲透深度為 2.3 cm，水膠比 0.45 試體約為水膠比 0.3 試體的 1.65 倍。



照片 4-4 裂縫注入修補貯鹽試驗結果
(資料來源：本研究整理)



照片 4-5 4I,1,2,3 氯離子滲透深度(比色法)

(資料來源：本研究整理)



照片 4-6 3I,1,2,3 氯離子滲透深度(比色法)

(資料來源：本研究整理)

第二節 灌漿修補試驗結果

本研究依據 JSCE-K 552 水泥質灌漿修補材料性質試驗，並參照 CNS、ASTM、JIS 進行各項試驗流度、持水性、泌水性、抗壓強度、抗彎強度、抗拉強度、吸水率、乾縮等試驗來比較不同材料間的填充性及差異性。並模擬製作裂縫 5 mm 圓柱試體進行灌漿修補，且根據 CNS 3763 透水試驗法及光學顯微鏡(OM)觀察修補表面結構，加以驗證水泥質灌漿修補材料試驗方法的可行性並同時比較判定各材料之特性(填充、防水、耐久性)。

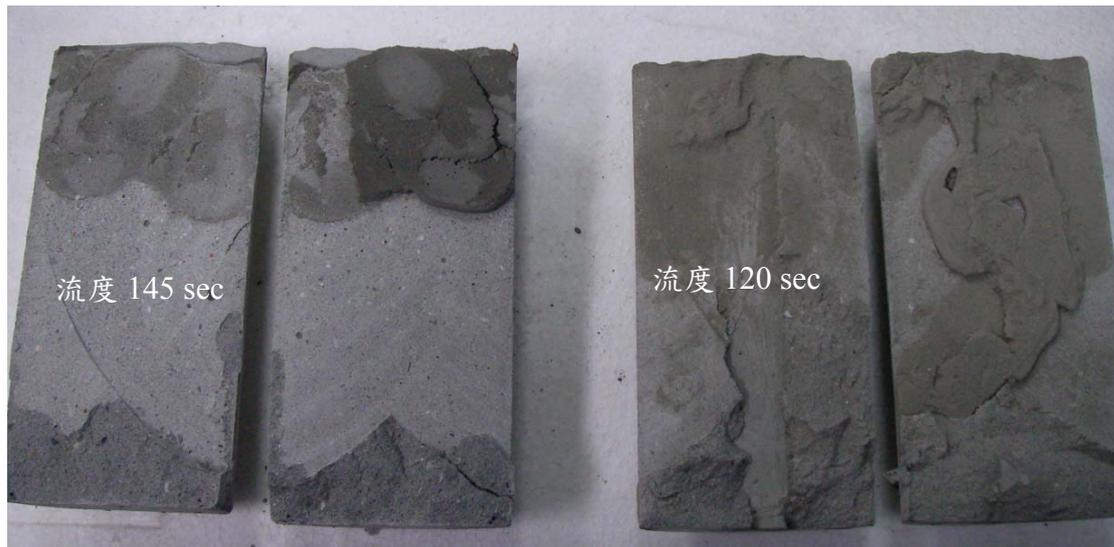
4-2-1 灌漿修補材料試驗結果討論

利用拌合水及強塑劑用量將水泥漿流度調整至 145、120、91 及 82 sec，對應的持水性分別為 47、29、33 及 29，如表 4-5 所示，並將其灌入於預設裂縫寬度 5 mm 之圓柱試體中，由劈裂試體，流度小於 83 sec 的材料填充效果較佳，詳如照片 4-7 及 4-8 所示。依據前節有述以持水性 28 % 為準，推估流度應 ≤ 83 sec 且持水性不小於 28 % 時，對於 0.5 mm 裂縫試體修補效果較佳。上述試驗結果可作為新拌性質試驗流度、持水性及泌水率之參考依據。

表 4-5 灌漿修補材料流度試驗結果

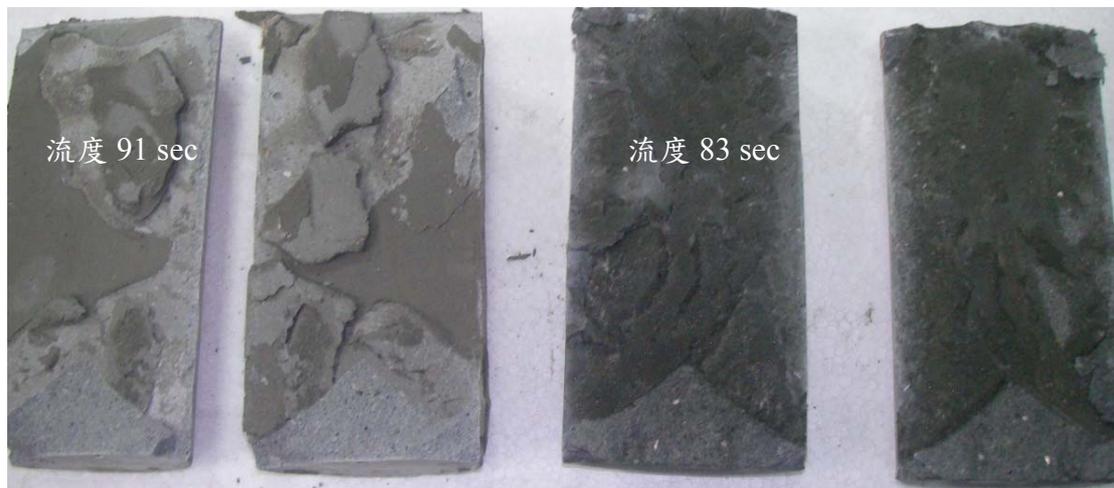
流度(sec)	145	120	91	83
持水性(%)	47	29	33	29

(資料來源：本研究整理)



照片 4-7 流度 145, 120sec 劈裂試驗結果

(資料來源：本研究整理)



照片 4-8 流度 91, 83sec 劈裂試驗結果

(資料來源：本研究整理)

4-2-2 灌漿修補材料特性評估

灌漿修補材填充性評估

編號 G、G1、G2、G3 各別表示，水泥砂漿、膨脹水泥砂漿、膨

修補材料性質對混凝土結構物耐久性之探討

脹飛灰水泥砂漿及膨脹爐石水泥砂漿，採膠結料:細粒料=1:1、1:0.75拌製水泥砂漿(編號 G 前數字 1 表示 1:1，數字 7 表示 1:0.75)。由新拌性質試驗結果得知，所有灌漿修補材料，流度、持水性、泌水率均符合上述之條件。從力學性質試驗結果可以發現，整體來看添加鋁粉的修補材料的抗壓、抗拉強度純水泥漿較低，從黏接強度來看砂率 0.75 與 1 比較，砂率 1 比砂率 0.75 強度低；水泥砂漿試體較為明顯，砂率 1 約為砂率 0.75 強度的 0.64 倍，此可能受到水泥漿體量的影響。再以添加鋁粉試體比較，由於飛灰的卜作嵐反應晚期才會有明顯效果，所以造成添加飛灰修補材料試體 28 天力學強度略低，而添加爐石試體則有偏高的趨勢，使用砂率 0.75 試體強度分別提升抗壓強度 0.64%，抗拉強度 37.15%，黏接強度 9.93%，吸水率降低 36.65%，砂率 1 試體抗壓強度 4.13%，抗拉強度 19.27%，抗彎強度 9.06%，黏接強度 10.24%，吸水率降低 46.72%，詳如表 4-6 及圖 11~15。

表 4-6 灌漿修補材料性質試驗結果

編號 試驗項目	7G	7G1	7G2	7G3	1G	1G1	1G2	1G3
抗壓(MPa)	59.23	38.44	37.72	40.93	74.61	45.05	40.72	46.91
抗彎(MPa)	3.24	3.22	3.12	3.19	4.47	3.42	3.28	3.73
抗拉(MPa)	3.84	2.53	3.14	3.47	4.47	3.27	3.37	3.9
黏接(MPa)	2.04	1.51	1.47	1.66	1.31	1.27	1.26	1.4

彈性模數 (GPa)	34.48	21.68	21.24	23.21	43.94	25.75	23.08	26.89
吸水率(%)	8.76	9.55	10.41	6.05	8.62	10.51	11.17	5.60
流度(sec)	46	46	63	63	51	81	63	68
持水性(%)	29	29	21	21	29	29	29	29
泌水率(%)	0	0	0	0	0	0	0	0

(資料來源：本研究整理)

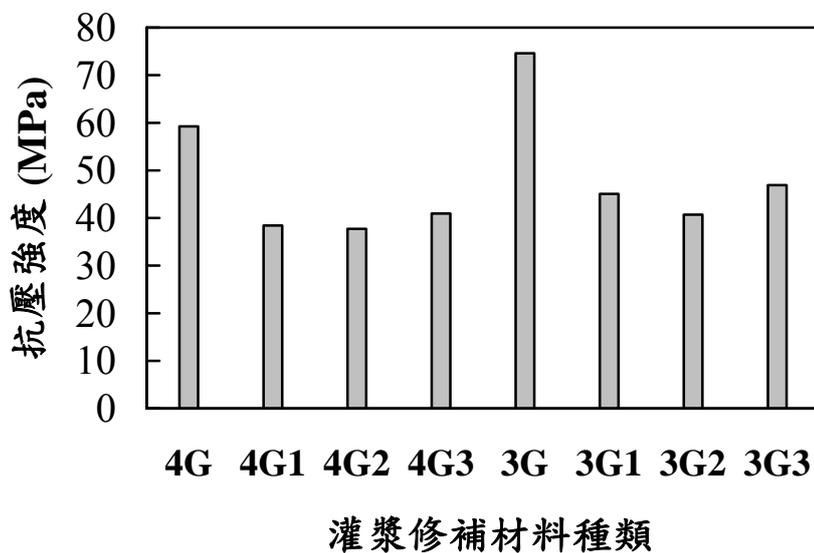


圖 4-11 不同灌漿修補材料抗壓強度比較圖

(資料來源：本研究整理)

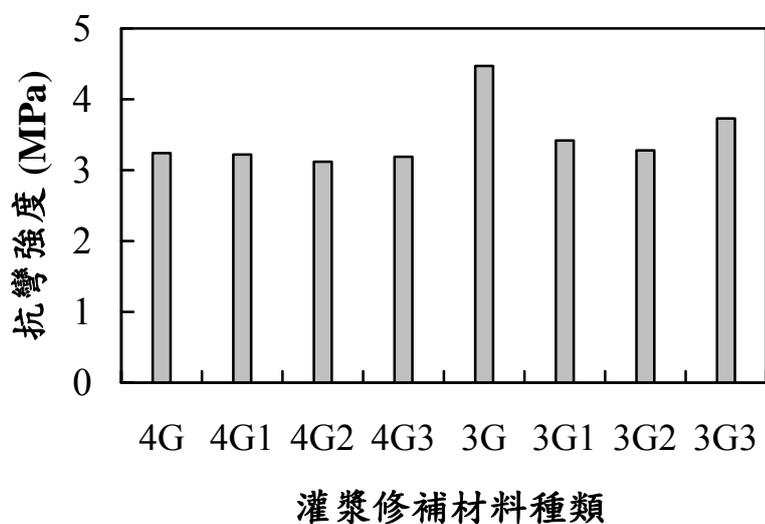


圖 4-12 不同灌漿修補材料抗彎強度比較圖

(資料來源：本研究整理)

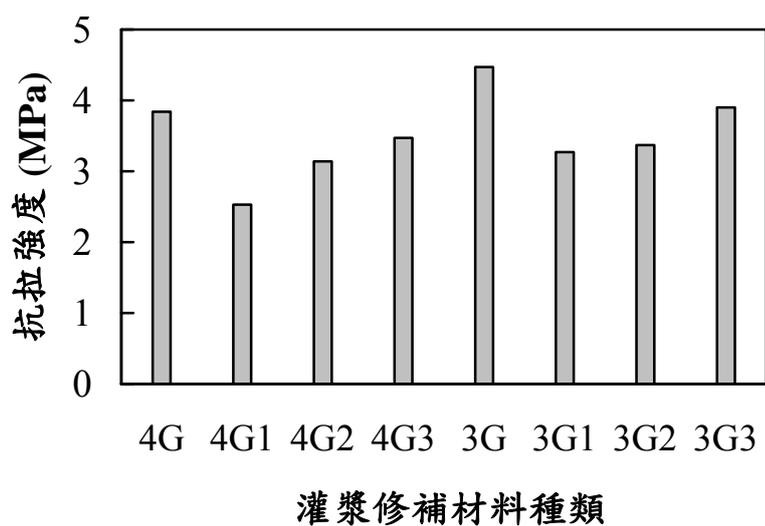


圖 4-13 不同灌漿修補材料抗拉強度比較圖

(資料來源：本研究整理)

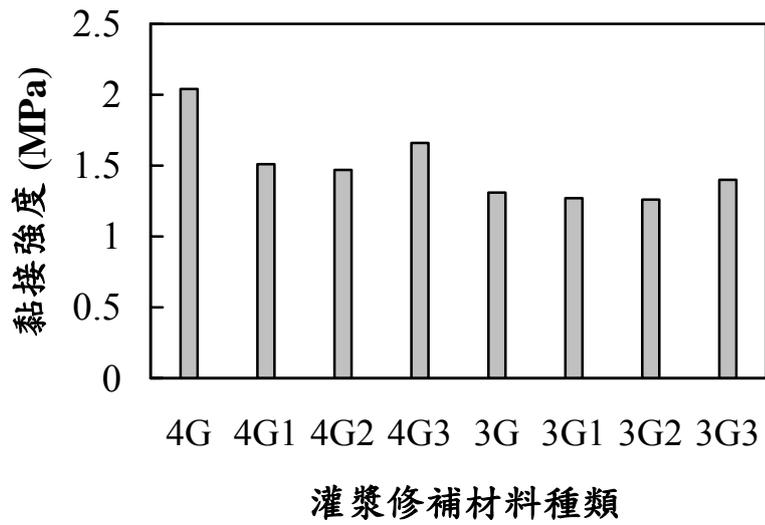


圖 4-14 不同灌漿修補材料黏結強度比較圖

(資料來源：本研究整理)

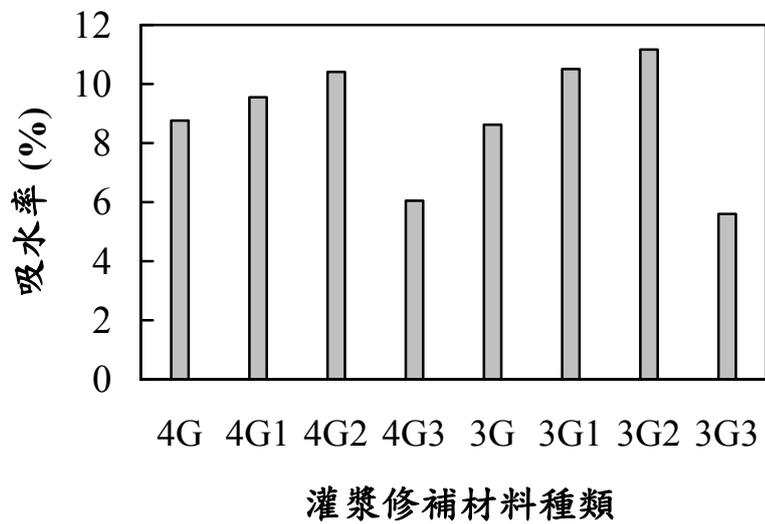


圖 4-15 不同灌漿修補材料吸水率比較圖

(資料來源：本研究整理)

圖 4-16 為灌漿修補材料膨脹/收縮比試驗結果，由圖中可以發現水泥與砂比率 1：1 與 1：0.75 兩組試體膨脹/收縮率有明顯落差，整體來看以水泥與砂比率 1：1 體積變化較為穩定效果較佳。圖 4-17 及圖 4-18 試體中水泥與砂的比率分別為 1：1 與 1：0.75，添加飛灰與鋁粉試體，由圖中可以發現初期會有明顯的膨脹，至後期僅有小幅度的收縮，而添加爐石粉的試體，體積變化呈現出一種穩定的膨脹曲線。也就表示水泥質灌漿修補材料添加爐石粉，其改善體積穩定性的效果較好，且砂率越高越明顯。

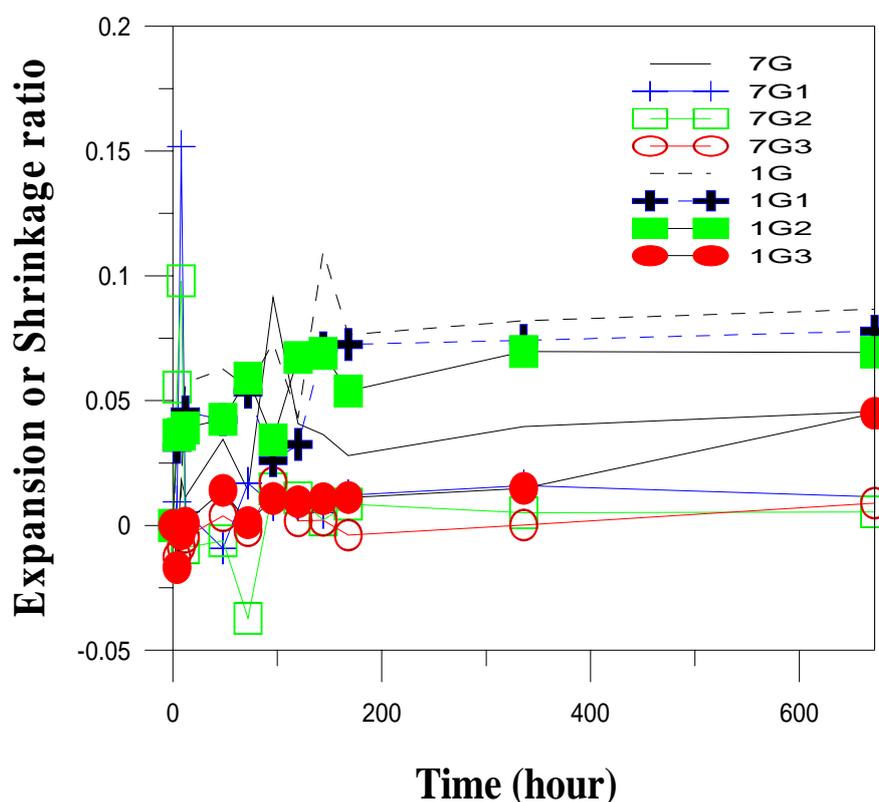


圖 4-16 灌漿修補材料收縮/膨脹比

(資料來源：本研究整理)

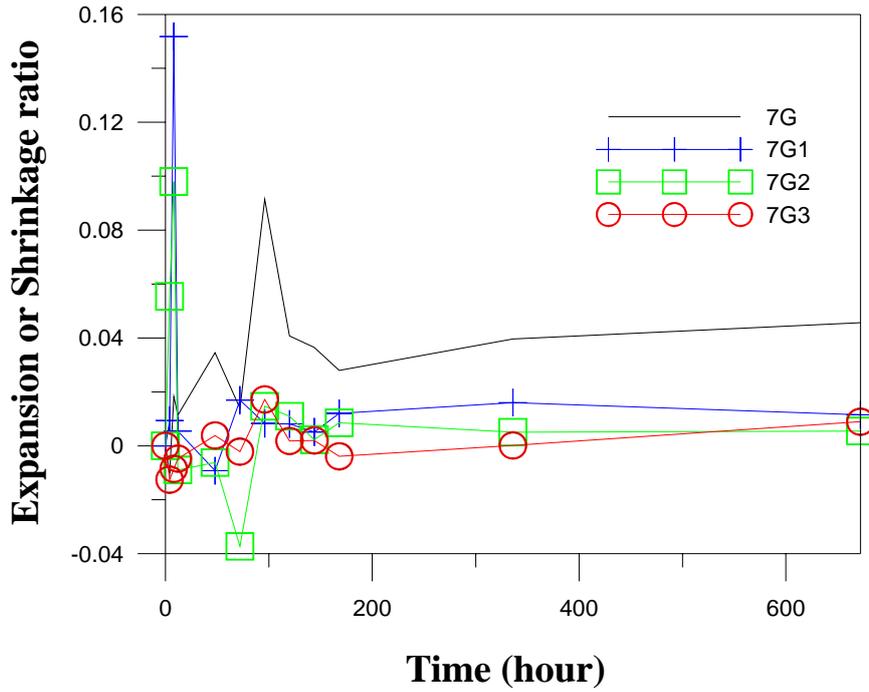


圖 4-17 試體體積變化圖(S/C =0.75)

(資料來源：本研究整理)

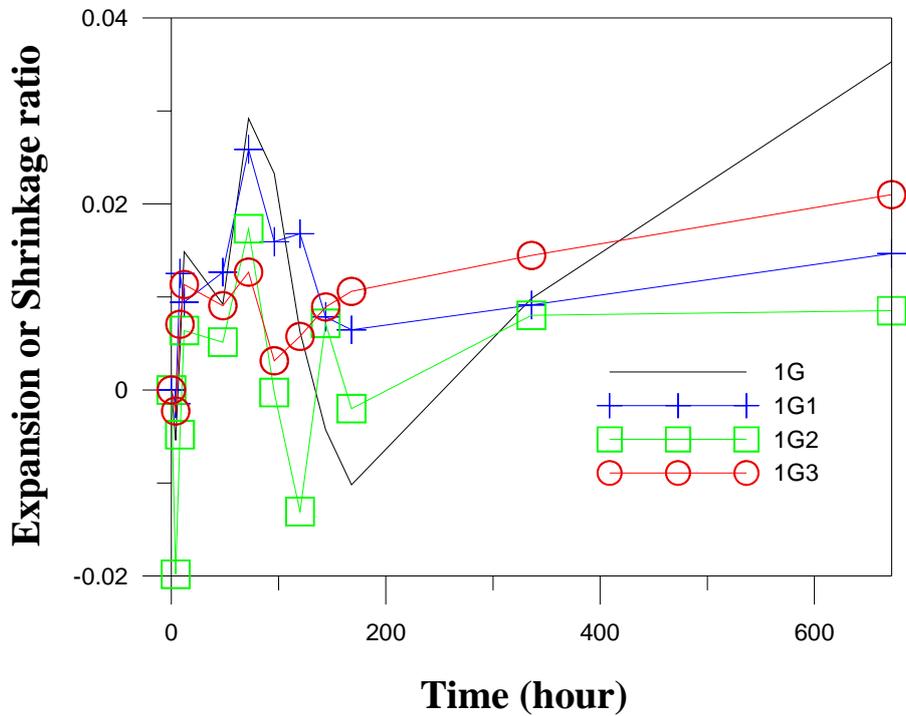


圖 4-18 試體體積變化圖(S/C =1)

(資料來源：本研究整理)

灌漿修補透水性及耐久性評估

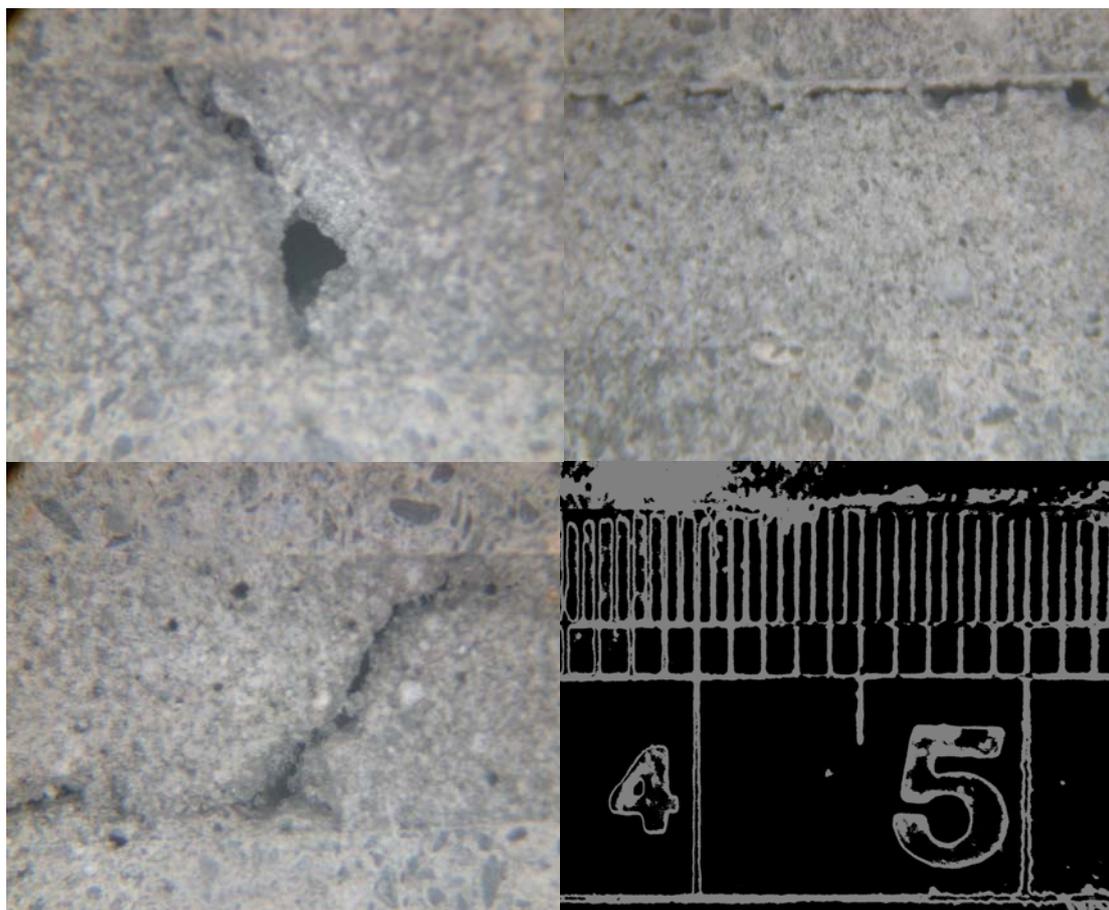
施加定水壓進行透水試驗，觀察試體底部狀態，評估不同性質材料修補後之抗水性。在透水試驗過程中發現，灌漿修補後試體通水後瞬間即噴出。因此利用光學顯微鏡觀察修補區域，可以清楚看見，在修補區域有著許多橫向及縱向約 1 mm 的裂縫，又從貯鹽試驗結果發現，這些裂縫是由修補表面直接貫穿到底層，詳如照片 4-9 所示。這些現象可能是因為修補區域表面吸水性及修補深度過深，而造成修補材料產生收縮、沉陷裂縫，如照片 4-10 所示。

以上結果顯示已砂率 0.75 及 1 的水泥砂漿做為灌漿修復材料，對於寬度 5 mm 裂縫無法獲致緻密的填充效果，如需改善修補後之防水性及耐久性，或可改變粒徑及調整摻料的用量，以改善修補材料之體積穩定性。



照片 4-9 灌漿修補貯鹽試驗結果

(資料來源：本研究整理)



照片 4-10 約 ± 1 mm 之裂縫(光學顯微鏡(OM)影像)

(資料來源：本研究整理)

第三節 補綴修補試驗結果

本試驗係參照 JSCE-K 561 水泥質補綴修補試驗法進行，並參照 CNS、ASTM、JIS 規定進行抗壓強度、抗彎強度、抗拉強度、吸水率、體積穩定性等試驗，以比較驗證腐蝕抑制劑添加至水泥砂漿中是否會影響補綴效能。又針對修補材料與母材間性質不同亦可能產生電位差造成再次腐蝕問題進行探討。本研究模擬製作水灰比 0.45、0.65 兩種鋼筋混凝土板，於黏接層採純水泥漿、鋅粉漆、環氧樹脂、腐蝕抑制劑(3% NaNO_2)進行防蝕修復，並使用加速腐蝕試驗法量腐蝕電

修補材料性質對混凝土結構物耐久性之探討

位、SEM 微觀影像、EDS 元素分析、XRD 成分分析，判定不同材料的腐蝕與防蝕效能及腐蝕生成物。

4-3-1 補綴修補材料試驗結果討論

表 4-7 為補綴層修補材料試驗結果，以純水泥漿(M)做為控制組，水泥砂漿+腐蝕抑制劑(3% NaNO₂) (MN)做為比照組，兩者相較起來發現添加腐蝕抑制劑(3% NaNO₂)，會有稍微降低修補材料力學與物理性質的負面作用。

表 4-7 補綴修補材料性質試驗結果

試驗項目	編號	M	MN
抗壓(MPa)		63.6	57.55
抗彎(MPa)		4.19	3.95
抗拉(MPa)		3.47	3.97
黏接(MPa)		2.78	1.93
吸水率(%)		4.53	4.01
泌水率(%)		0	0

(資料來源：本研究整理)

再由膨脹/收縮比試驗結果來，可以發現(MN)曲線有偏高的現象，也就表示添加腐蝕抑制劑(3% NaNO_2)會造成混凝土體積膨脹，因此初步對估可能是因為混凝土體積膨脹的作用，而使得上述之現象產生，詳如圖 4-19 所示。

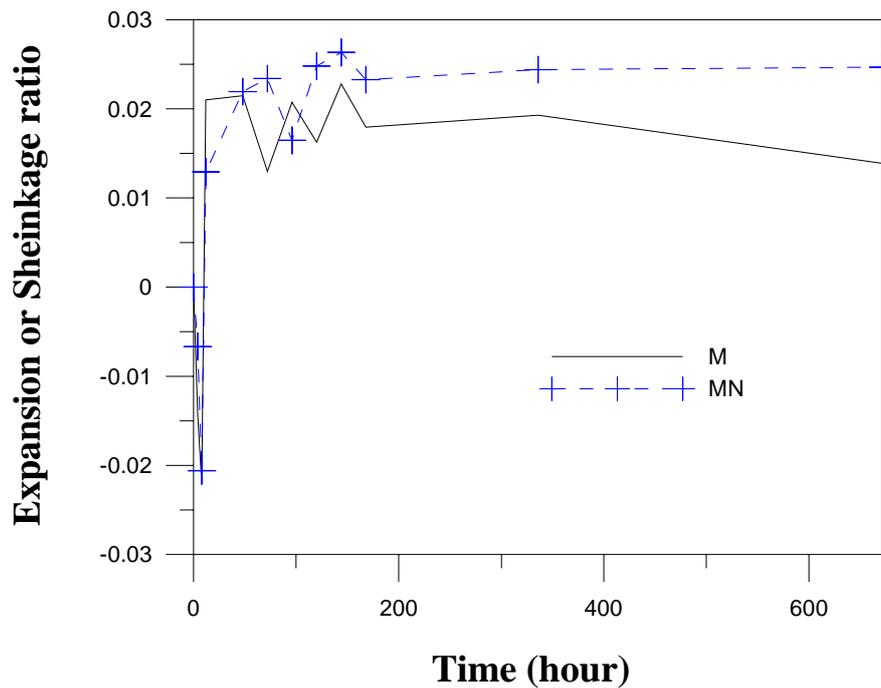


圖 4-19 補綴修補材料收縮/膨脹比

(資料來源：本研究整理)

4-3-2 電化學腐蝕試驗結果與討論

C1、C2(水灰比 0.45、0.65)兩組試體的腐蝕與防蝕做法是一樣的，其中編號 Z、P、N、M 各別表示鋅粉漆、環氧樹脂、腐蝕抑制劑(3% NaNO_2)、純水泥漿等材料塗封、而差異主要為於底層材料(損壞混凝土層)，其目的是要探討母層與修補層之間材料性質的差異對於鋼筋腐蝕與防蝕的影響，同時比較不同修補材料的防蝕效能，本研

修補材料性質對混凝土結構物耐久性之探討

究將試體浸漬於海水中（氯離子含量約 0.56 Mole/L），以定電流（mA/cm²）進行加速腐蝕，並採用恆電流電位儀，量測鋼筋開路電位（open circuit potential, OCP）、極化電流 I_{corr} 及電流密度，又根據法拉第定律(Faraday's law)，利用腐蝕電流密度推算腐蝕速率，詳如式 4-1 所示。

$$CR = k_1 \times \frac{i_{corr}}{\rho} \times E.W \quad (4-1)$$

k_1 : 常數(0.1288 mpy g/ μ Acm)

i_{corr} : 腐蝕電流密度 (μ A/cm²)

ρ : 材料密度 (g/m³)

E.W : 材料之當量重

不同材料修補對於鋼筋腐蝕之影響

表 4-8 至 4-9 分別為 C1、C2 兩組試體所測得之開路電位(OCP)，以開路電位(OCP)比較不同材料對於鋼筋腐蝕之影響的差異，由圖 4-20 時間與 OCP 之關係(C1)圖觀之，Z 曲線與 M 曲線相較起來是整體的 OCP 值是偏高的，而由 N、P 曲線可以發現，它們起始的 OCP 值與 M 曲線相較起來也同樣是偏高的，可是卻會隨著時間逐漸遞減下降到接近 M 曲線。再由圖 4-21 時間與 OCP 之關係(C2)圖來看，可以發現 Z 曲線與 M 曲線關係跟 C1 的效果是一樣的，而 N、P 曲線卻有不一樣的變化，由圖上來看 N 曲線在初期 OCP 會隨著時間逐漸偏低，到了第 4 天又開始逐漸上升，再來看 P 曲線可以發現它整條曲線 OCP 值與 M 曲線相較來均偏高了。

表 4-8 OCP (C1)

編號	Z	P	N	M
Day				
1	-527	-550	-565	-609
2	-463	-558	-613	-653
3	-487	-674	-664	-658
4	-455	-688	-674	-660
5	-486	-617	-668	-669
6	-523	-691	-704	-702
7	-532	-677	-709	-707

(資料來源：本研究整理)

單位(mV)

表 4-9 OCP (C2)

編號	Z	P	N	M
Day				
1	-548	-580	-631	-496
2	-602	-463	-676	-439
3	-686	-529	-675	-419
4	-708	-525	-665	-368
5	-691	-511	-653	-375
6	-690	-531	-651	-382
7	-698	-534	-650	-419

(資料來源：本研究整理)

單位(mV)

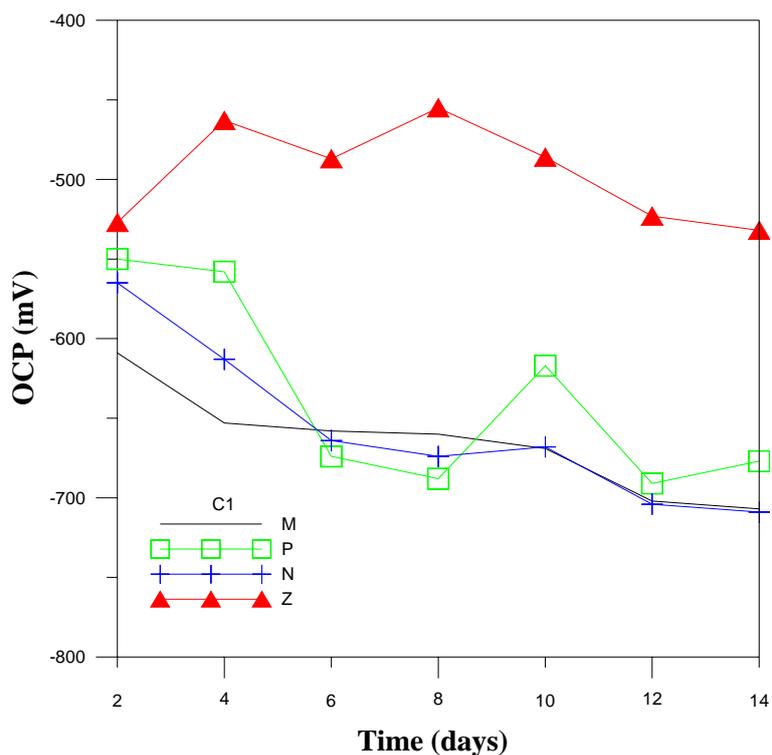


圖 4-20 時間與 OCP 之關係(C1)

(資料來源：本研究整理)

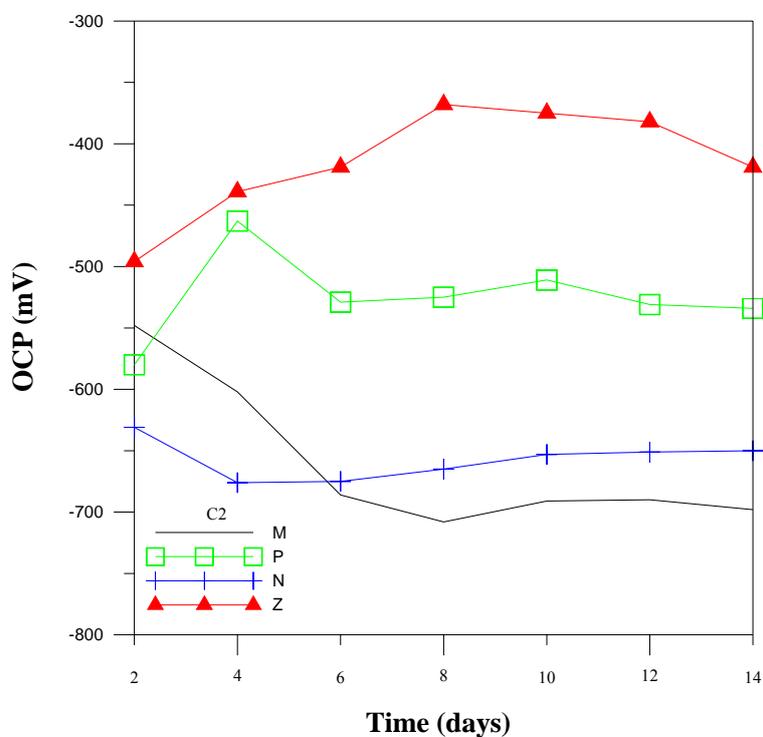


圖 4-21 時間與 OCP 之關係(C2)

(資料來源：本研究整理)

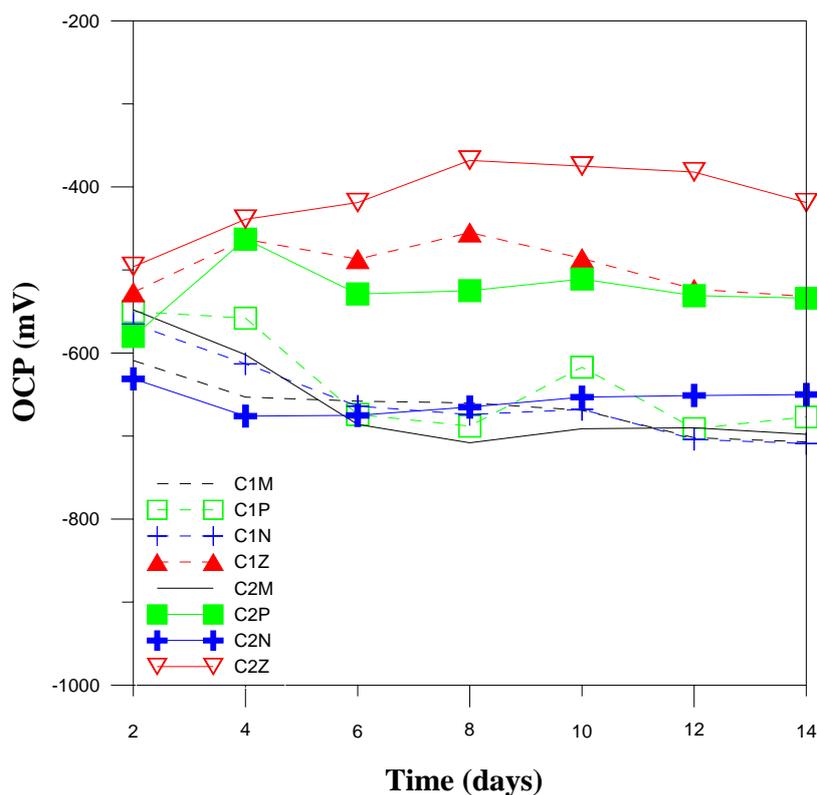


圖 4-22 母層與修補層間性質不同與 OCP 之關係

(資料來源：本研究整理)

再由腐蝕速率來比較不同材料的腐蝕程度及防蝕效果，由圖 4-23 得知 C1、C2Z、N、P 與 C1、C2M 比較起來腐蝕速率均較低，其中以 Z 效果最好 C1、C2 各別降低 7.39、23.13 倍，編號 C1、C2P 各別降低 2.6、6.48 倍、編號 C1、C2N 各別降低 1.5、1.6 倍。

表 4-10 試體腐蝕速率

編號	M	P	N	Z
C1	15.81	7.01	10.56	2.14
C2	14.85	2.29	9.30	0.64

(資料來源：本研究整理)

單位(mpy)

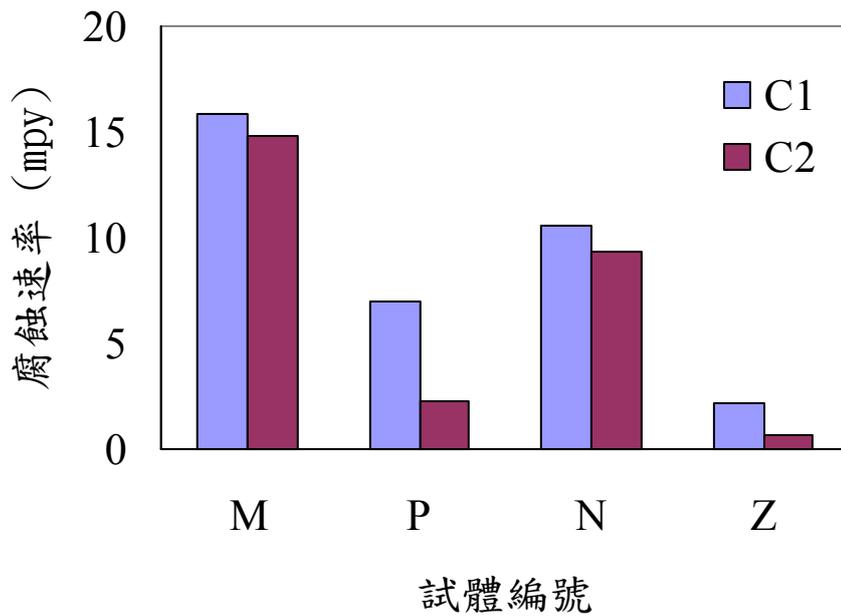


圖 4-23 不同材料之腐蝕程度

(資料來源：本研究整理)

由以上兩結果顯示修補材料與母材間性質不同，確實會影響到鋼筋的腐蝕程度。單純採用環氧樹脂、腐蝕抑制劑(3%NaNO₂)、鋅粉再受損表面塗封皆有抑制腐蝕的效果，但也僅能比較不同材料彼此間防蝕程度的差異性。

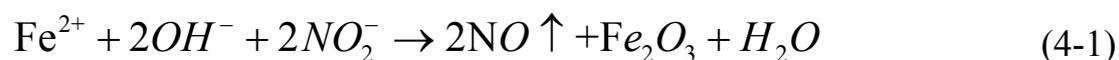
4-3-3 微觀試驗結果討論

本研究採 SEM 微觀觀察、EDS 元素分析，推估黏接層不同防蝕材料及工法的腐蝕與防蝕之機理，利用 XRD 進行成分分析以判定各材料的腐蝕生成物。

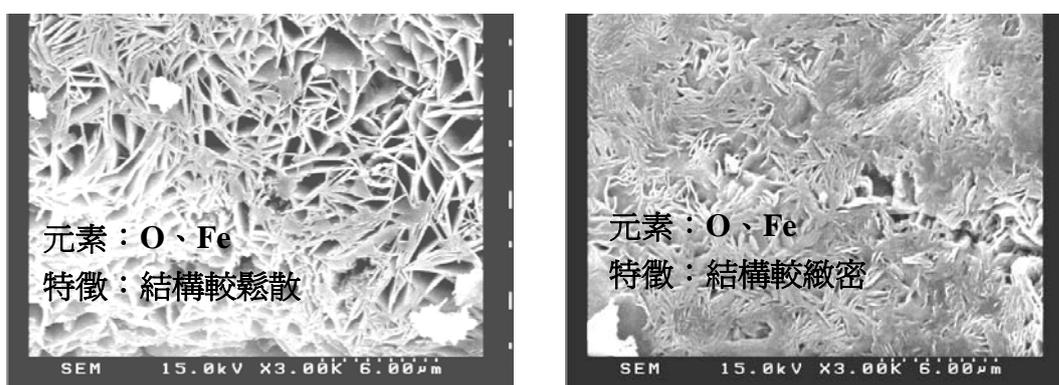
SEM 微觀觀察及 EDS 元素分析

照片 4-11 及 4-12(X 3000)可以發現，以純水泥進行防蝕修復，相較於添加腐蝕抑制劑(3% NaNO₂)，微觀結構較為鬆散，根據文獻

[45][46]鐵離子與亞硝酸根離子不發生反應，只有亞鐵離子和亞硝酸根離子會發生反應，產生一氧化氮(NO)和氧化鐵(Fe_2O_3)，反應式如下 4-1：



由上式得知，亞硝酸根離子會使亞鐵離子快速氧化的氧化成鐵離子，在金屬表面形成亞化鐵保護膜阻礙亞鐵離子的生成抑制鋼筋腐蝕。與圖 4-20 及圖 4-21 比較，N 曲線 OCP 值至第 4 天電位下降，第 5 天又開始逐漸平緩上升。此表示添加腐蝕抑制劑(3% $NaNO_2$)，或能有效抑制鋼筋的腐蝕。



照片 4-11 氧化鐵(X3000) (M) 照片 4-12 氧化鐵(X3000) (N)

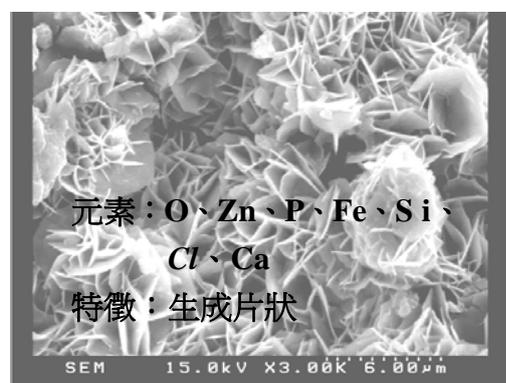
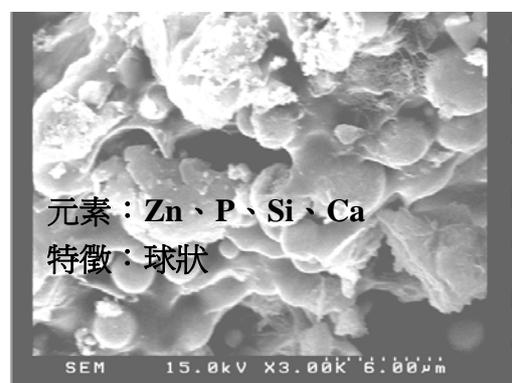
(資料來源：本研究整理)

觀察照片 4-13 及 4-14(X 3000)，可比較加速腐蝕前後鋅粉微觀結構，顯示鋅粉在修補前結構較接近圓球狀，加速腐蝕後便開始形成片狀，與圖 4-20 及圖 4-21 比較，可知編號 Z 曲線與編號 M 純水泥曲線，OCP 無論前期、後期，皆是電位偏高的。因此由試驗結果得知以鋅粉塗封做為陰極防蝕材料是有效的。

觀察照片 4-15 及 4-16(X 100)，可發現環氧樹脂塗封在橫截面有著許多條紋，將影像再放大至 1000 倍可概估裂縫寬度約為 $1 \mu m$ ，環

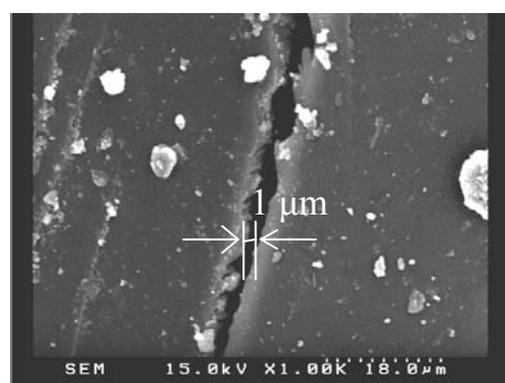
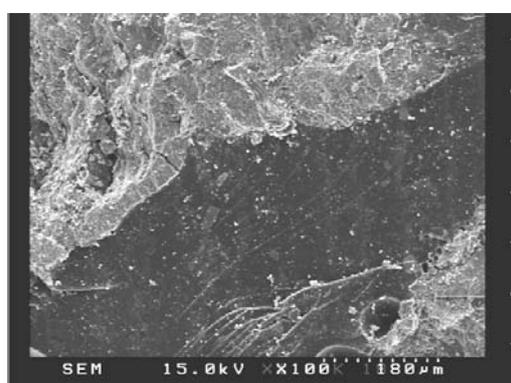
修補材料性質對混凝土結構物耐久性之探討

氧樹脂塗封的目的是要將鋼筋與 O、Cl、水等因子阻隔。但與圖 4-20 及圖 4-21 比較，編號 P 曲線 OCP 在初期電位較高，但到了第 4 天便開始下降，或因微小的裂縫造成鋼筋腐蝕。



照片 4-13 加速腐蝕前(X3000) (Z) 照片 4-14 加速腐蝕後 (X3000) (Z)

(資料來源：本研究整理)



照片 4-15 微裂縫(X100) (P)

照片 4-16 微裂縫(X1000)(P)

(資料來源：本研究整理)

XRD 成分分析

使用 X-ray 對加速腐蝕後試體進行繞射，得到以下結果：純水泥 (M) 試體的腐蝕生成物有 Ca(OH)_2 、 NaCl 、 Fe_2O_3 、 SiO_2 ；腐蝕抑制劑 (3% NaNO_2) (N) 試體的腐蝕生成物有 Ca(OH)_2 、 NaCl 、 Fe_2O_3 、 SiO_2 、

KNO_3 ；環氧樹脂 (P) 試體的腐蝕生成物有 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 、 SiO_2 、 KSH ；Zinc (Z) 試體的腐蝕生成物有 Zn 、 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 、 SiO_2 、 Fe_2O_3 、 ZnCl_2 、 SiP_2O_7 、 Fe_2P 、 CaSO_4 、 $\text{Zn}(\text{ClO}_4)_2$ 、 ZnO ，詳如圖 4-24~27 所示。

由整體來看腐蝕抑制劑(3% NaNO_2)、環氧樹脂、純水泥的腐蝕生成物，似乎無生成出可提高鋼筋抗蝕的氧化層，而 Zinc (Z) 的腐蝕生成物如 ZnCl_2 ， $\text{Zn}(\text{ClO}_4)_2$ 、 ZnO 等可作為鋼筋的防蝕層。

因此以 Zinc 塗封的方式進行陰極防蝕(犧牲陽極法)，不但能夠代替鐵氧化形成 ZnO 等成分，且有消耗 Cl 的作用形成 ZnCl_2 ， $\text{Zn}(\text{ClO}_4)_2$ 。

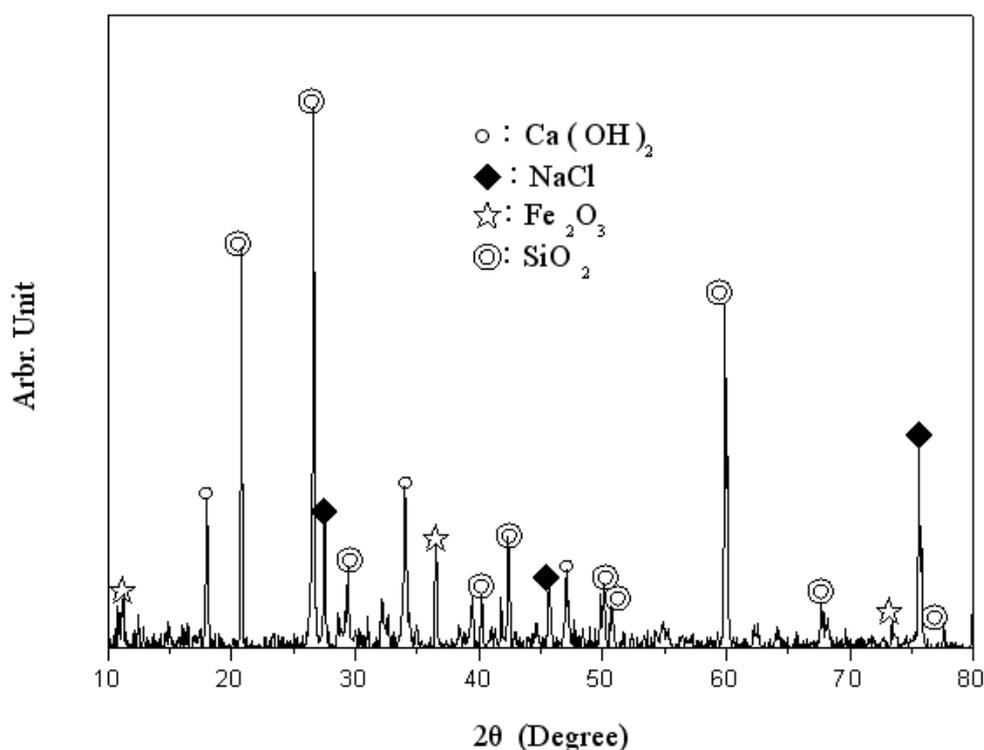


圖 4-24 純水泥(M)腐蝕生成物

(資料來源：本研究整理)

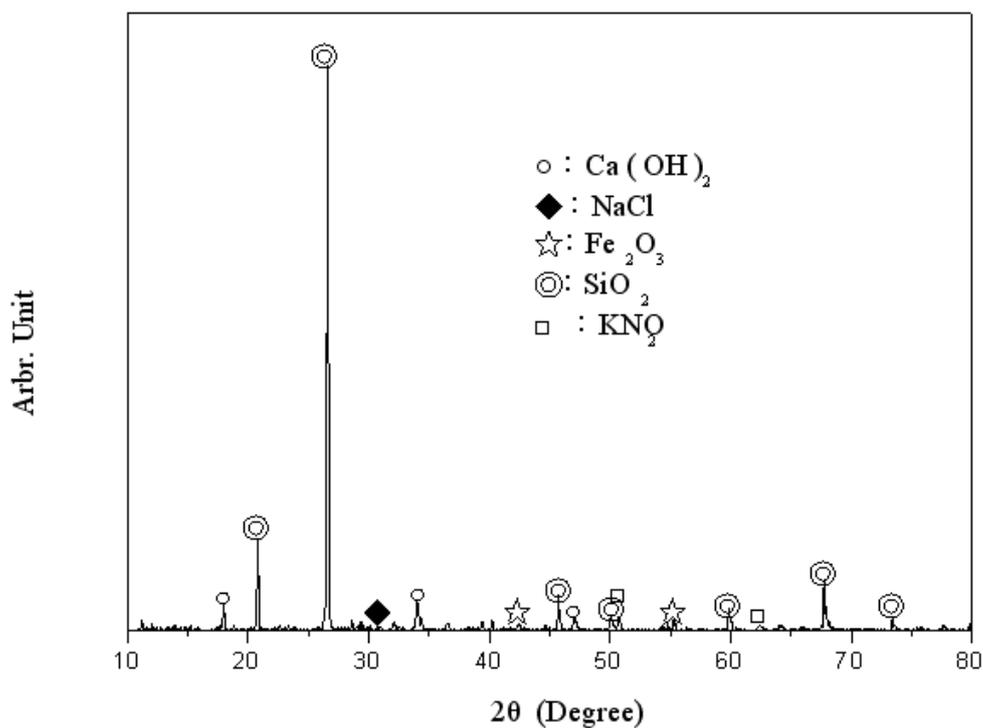


圖 4-25 腐蝕抑制劑(3% NaNO_2) (N)腐蝕生成物

(資料來源：本研究整理)

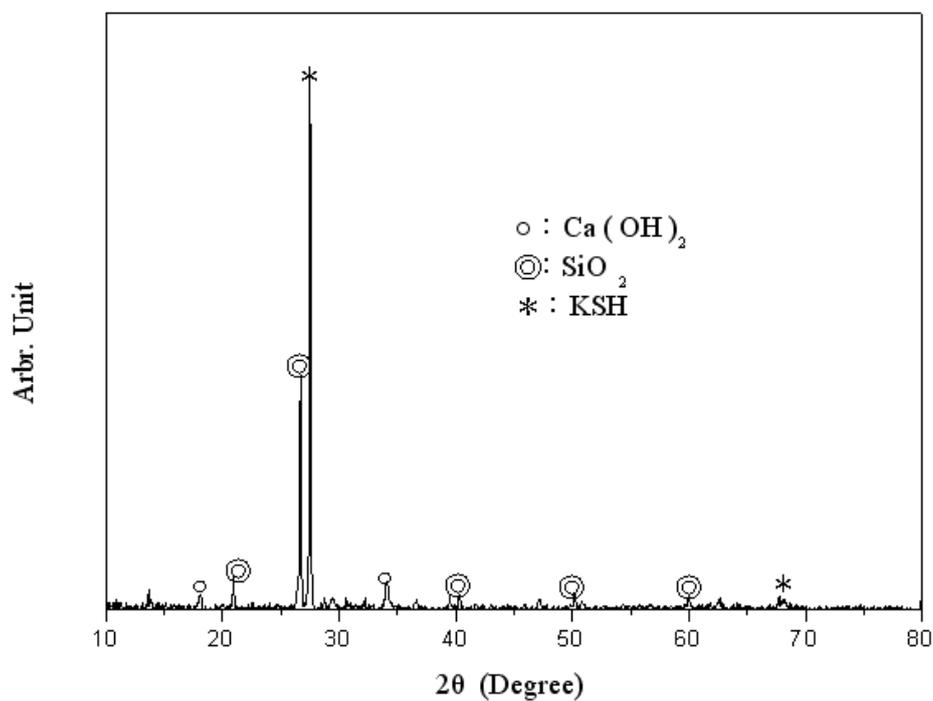


圖 4-26 環氧樹脂(P)腐蝕生成物

(資料來源：本研究整理)

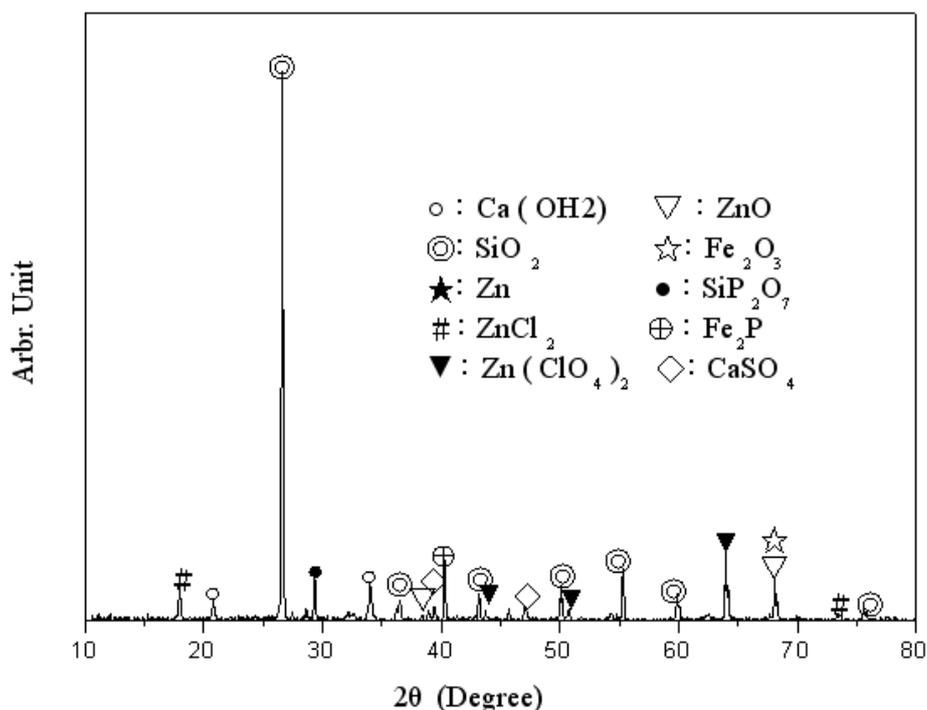


圖 4-27 鋅粉(Z)腐蝕生成物

(資料來源：本研究整理)

第四節 綜合討論

由於長期使用及天災影響，造成混凝土劣化，使得我國損壞待修復補強的鋼筋混凝土結構物逐年增加，所以對於修補材料的需求亦快速的提升。目前雖然許多商業化的修補材料/工法已被使用，但對於修補材料的物理或化學特性評估的標準試驗法仍未尚未訂定，以致於要獲致應用在鋼筋混凝土結構物的高性能修補材料，仍有相當的困難度。本計畫參考日本土木學會(JSCE)出版的應用於混凝土結構物修補材料標準試驗法 (JSCE-STANDARDS ON TEST METHODS OF REPAIRING MATERIALS USED FOR CONCRETE STRUCTURES, JSCE Guideline for Concrete)，提出綱要說明。

4-4-1 混凝土表面塗層材料耐候試驗法

混凝土表面塗層材料耐候試驗法(Test methods for weathering resistance of concrete surface coating materials)，主要說明決定混凝土表面塗層材料耐候性的步驟，可以加速試驗為主配合長期戶外曝曬試驗(如有必要)。混凝土表面塗層材料包括合成樹脂(synthetic resin)及高分子改質水泥系塗層材料(polymer modified cement coating materials)等。表面塗層材料一般包含表面材(primer)、平整材(putty)與修飾面材(finish coating materials)。建議使用 70x70x20mm 水泥砂漿試體(w/c=0.5, S/A=3)作為試驗用底板，依照標準程序養護及進行前處理，可使用“xenon-arc lamp”法及“sunshine carbon-arclamp”法進行加速試驗並比較塗層顏色變化。

4-4-2 混凝土表面塗層材料氧氣滲透試驗法

混凝土表面塗層材料氣滲試驗法(Test method for oxygen permeability of concrete surface coating materials)，主要敘明決定混凝土表面塗層材料氧氣滲入量測的程序。試體與加速耐候試驗用試體相同。氧氣滲透性可以氧氣滲透率($\text{mol}/\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{Pa}$)及氧氣滲透係數($\text{mol} \cdot \text{m}/\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{Pa}$)表示。

4-4-3 混凝土表面塗層材料氣滲試驗法

混凝土表面塗層材料氣滲試驗法(Test method for vapor permeability of concrete surface coating materials)，主要敘明決定混凝土表面塗層材料水氣滲入量測的程序。試驗環境設定溫度為 $40 \pm 1^\circ\text{C}$ ，相對溼度為 $90 \pm 2\%$ 。

4-4-4 混凝土表面塗層材料水滲透試驗法

混凝土表面塗層材料水滲透試驗法(Test method for water permeability of concrete surface coating materials)，主要敘明決定混凝土表面塗層材料水滲入量測的程序。滲透水量可依下式計算。

$$W_p = W_1 - W_2$$

W_p :水滲透量(g)

W_1 :施加水壓前試體重(g)

W_2 :施加水壓後試體重(g)

4-4-5 混凝土表面塗層材料氯離子滲透試驗法

混凝土表面塗層材料氯離子滲透試驗法(Test method for chloride ion permeability of concrete surface coating materials)，主要敘明決定混凝土表面塗層材料氯離子滲透滲入測的程序。試體尺寸為150x150x150 mm，利用劈裂試體量測氯離子滲入深度。

4-4-6 混凝土表面塗層材料黏結強度試驗法

混凝土表面塗層材料黏結強度試驗法(Test method for bond strength of concrete surface coating materials)，主要敘明決定修補混凝土結構物表面塗層材料的黏結強度試驗程序。黏結強度試體分成三類：標準試體、抗鹼試驗後試體及加速耐候試驗後試體。

4-4-7 混凝土裂縫上表面塗層材料伸長率試驗法

混凝土裂縫上表面塗層材料伸長率試驗法(Test method for elongation performance of concrete surface coating materials)，主要敘明修補混凝土結構物表面塗層材料橋接裂縫的性能。試體尺寸為40x120x10mm。試體共分成四類：標準試體、低溫試體、抗鹼試驗後

修補材料性質對混凝土結構物耐久性之探討

試體及加速耐候試驗後試體。

4-4-8 混凝土結構修補用有機裂縫注入材料試驗法

混凝土結構修補用有機裂縫注入材料試驗法(Test method of organic crack injecting materials for repairing in concrete structures)，主要敘明修補混凝土結構物用有機裂縫注入材料試驗程序。有機材料如合成樹脂其試驗性質包括黏滯性、彈性模數、抗彎強度、收縮比、抗拉抗壓強度、結合強度、振動液化指標(thixotropic index)及膨脹係數等。

4-4-9 混凝土結構修補用水泥質裂縫注入材料試驗法

混凝土結構修補用水泥質裂縫注入材料試驗法(Test methods of cement crack injecting materials for repairing in concrete structures)，主要敘明修補混凝土結構物用水泥質裂縫注入材料試驗程序。水泥質材料如水泥漿/灰漿(cement slurry)其試驗性質包括稠度、彈性模數、抗彎強度、膨脹/收縮比、抗拉抗壓強度、結合強度、保水係數(water retaining coefficient)及吸水率等。

4-4-10 混凝土結構修補用高分子改質水泥裂縫注入材料試驗法

混凝土結構修補用高分子改質水泥裂縫注入材料試驗法(Test methods of polymer modified cement crack injecting materials for repairing in concrete structures)，主要敘明修補混凝土結構物用高分子改質水泥裂縫注入材料試驗程序。高分子改質水泥質材料為無機材料其試驗性質包括稠度、彈性模數、抗彎強度、膨脹/收縮比、抗拉抗壓強度、結合強度、保水係數(water retaining coefficient)、熱脹係數及吸水率等。

4-4-11 混凝土結構修補及補強用有機灌漿材料試驗法

混凝土結構修補用及補強用有機灌漿材料試驗法(Test method of organic grouting materials for repairing and strengthening in concrete structures)，主要敘明修補混凝土結構物用注入混凝土與補強材間空隙如混凝土與補強鋼板的間隙的有機材料試驗法。有機材料如合成樹脂黏著劑其試驗性質包括滯性、彈性模數、抗彎強度、收縮比、抗拉強度、抗壓強度、結合強度及熱膨脹係數等。

4-4-12 混凝土結構修補及補強用水泥灌漿材料試驗法

混凝土結構修補及補強用水泥灌漿材料試驗法(Test method of cement grouting materials for repairing and strengthening in concrete structures)，主要敘明修補混凝土結構物用注入混凝土與補強材間空隙如混凝土與補強鋼板的間隙水泥材料的試驗法。水泥材料如水泥漿或水泥砂漿其試驗性質包括稠度、彈性模數、抗彎強度、膨脹/收縮比、抗拉抗壓強度、結合強度、保水係數(water retaining coefficient)、泌水率、流度變化及吸水率等。

4-4-13 混凝土結構修補及補強用高分子改質水泥灌漿材料試驗法

混凝土結構修補及補強用高分子改質水泥灌漿材料試驗法(Test method of polymer modified cement grouting materials for repairing and strengthening in concrete structures)，主要敘明修補混凝土結構物用注入混凝土與補強材間空隙如混凝土與補強鋼板的間隙高分子改質水泥材料的試驗法。水泥材料如高分子改質水泥漿或高分子改質水泥砂漿其試驗性質包括稠度、彈性模數、抗彎強度、膨脹/收縮比、抗拉抗壓強度、結合強度、保水係數(water retaining coefficient)、泌水率、流度變化、熱脹係數及吸水率等。

4-4-14 混凝土結構補綴修補材料試驗法

混凝土結構修補補綴材料試驗法(Test method of patching repair materials for concrete structures)，主要敘明混凝土結構物修補或補強用補綴修補材料的試驗法。水泥材料如水泥漿或水泥砂漿其試驗性質包括視密度(apparent density)、彈性模數、抗彎強度、膨脹/收縮比、抗拉、抗壓強度、結合強度、體積穩定性、膨脹係數及彎曲韌性(flexural toughness)等。

4-4-15 混凝土結構用表面滲透材料試驗法

混凝土結構用表面滲透材料試驗法 (Test method of surface penetrants for concrete structures)，主要敘明混凝土結構修復或防護用表面滲透材料的規格與相關試驗法。混凝土結構修復或防護用表面滲透材料如矽酸鹽(silicate)其試驗性質包括表面觀察外觀、滲透深度試驗、透水試驗、溼氣滲透試驗、碳化試驗及氯離子滲透試驗等。

第五章 結論與建議

第一節 結論

本研究參照 JSCE 針對水泥質(灌漿、注入、補綴)修補材料性質進行進行一系列試驗，並設計 < 0.5 、 > 5 mm 之裂縫進行灌漿及注入修補，依據 CNS 3763 透水試驗法、ASTM C1202 RCPT 耐久性試驗法、AASHTO T259 貯鹽試驗法、光學顯微鏡(OM)巨觀觀察法.....等方法，來評估各項材料灌漿、注入修補後特性(填充、防水、耐久性)。又設計鋼筋混凝土板(L)50cm \times (W) 25cm) \times (H) 10cm，採用加速腐蝕試驗，SEM 微觀觀察、EDS 元素分析、XRD 成分分析，針對鋼筋混凝土板補綴修補後，腐蝕耐久性進行探討。由以上試驗得到以下結論。

1. 水泥質材料修補裂縫的品質首要條件在於控制適當的流動性，使能有效填充裂縫。本研究根據流度試驗、泌水率試驗及持水係數試驗結果得知以水泥漿修補裂縫寬度小於 0.5mm 之裂縫，流度應不大於 32 sec，持水性不得小於 28%，而泌水率應趨近於 0%，對於裂縫寬度為 0.5 mm 裂縫，其修補效果佳。以水泥砂漿修補裂縫寬度大於 5 mm 之裂縫，流度在應不大於 83 sec 間、持水性不小於 28%，泌水率應趨近於 0%。
2. 修補材料性質試驗結果發現，添加 0.01% 鋁粉會影響修補材料抗壓、抗拉、抗彎及黏結強度、且膨脹作用在終凝前較為明顯，後期仍會因水水分變化而造成體積收縮。添加礦物摻料如飛灰或爐石能改善體積收縮的問題。透水、貯鹽、RCPT 試驗結果顯示，

添加 10 % 爐石對於注入修補的填充性、透水性及耐久性皆有正面的效果。

3. 由腐蝕試驗結果得知，黏結層使用添加腐蝕抑制劑的水泥漿(3% NaNO_2) (無機披覆法)、環氧樹脂 (有機披覆法)、添加鋅粉 (塗封、陰極防蝕)等修復工法，能改善混凝土鋼筋腐蝕的現象。並由時間與 OCP 關係曲線及腐蝕速率結果得知添加鋅粉效果最佳。(塗封、陰極防蝕〔犧牲陽極法〕)效果最好。
4. 由 SEM 顯微圖(X3000)發現，以純水泥進行防蝕修復相較於添加腐蝕抑制劑(3% NaNO_2)的漿體，其微觀結構較為鬆散，並由時間與開路電位關係曲線得知 OCP 值至第 5 天便趨於平緩。由此可推估添加腐蝕抑制劑(3% NaNO_2)，能有效抑制鋼筋的腐蝕。
5. 由 SEM 顯微圖發現環氧樹脂塗封橫截面上有寬度大約是 1 μm 左右的裂縫，觀察 OCP 曲線，OCP 值初期電位較高，至第 4 天便開始下降，前述微細裂縫可能是主要原因。
6. 成分分析結果發現，以添加 Zinc 的方式進行防蝕，不但能夠代替鐵氧化作為犧牲陽極，且有吸附 Cl 形成 ZnCl_2 ， $\text{Zn}(\text{ClO}_4)_2$ 。

第二節 建議

建議一

改變礦物摻料用量或改採高分子材料，進行相關耐久性之探討：

立即可行建議

主辦機關：內政部建築研究所

協辦機關：各大專院校

AASHTO T277 有提到累積電量 > 4000 庫侖為高氯離子滲透值，因此以 4000 庫侖為參考值來評估試體修補之耐久性，修補後試體累積電量與參考值比較，最少相差 3.8 倍以上，也就表示 < 0.5 mm 之裂縫以本研究所選用之水泥質材料修補，僅能達到防水的效果，因此建議後續可以試著改變礦物摻料用量或改採高分子材料，進行相關耐久性之探討。

建議二

調整粒料粒徑或者調整摻料的用量，來改善修補材料之體積穩定性：

立即可行建議

主辦機關：內政部建築研究所

協辦機關：各大專院校

由透水試驗結果得知灌漿修補後試體不到 1 sec 水就已經噴出；再由光學顯微鏡(OM)影像發現在修補區域有著許多橫向及縱向之裂縫大小約 ± 1 mm，又從貯鹽試驗結果發現，這些裂縫是由修補表面直接貫穿到底層，因此推估 1：0.75 及 1：1 水泥砂漿做為灌漿修復材料，對於寬度 5 mm 裂縫僅能得到填充裂縫的效果，由於本研究對

於所有混合摻料，皆是以最低的添加量添加，單純是想比較不同材料實際修補後差異性，如需改善修補後之防水性及耐久性，建議可以改變粒料粒徑或者調整摻料的用量，來改善修補材料之體積穩定性。

建議三

研擬一套適用國內建築產業之修補材料規範：中長期建議

主辦機關：行政院公共工程委員會、內政部營建署、經濟部標準檢驗局

協辦機關：行政院各部會相關主管機關

受到 921 大地震及八八水災之影響，造成大量營建構造物損壞急需修復、補強，由試驗結果發現不同水泥質修補材料進行注入、灌漿補綴等修補，修復效果差異甚大，如不儘早訂定出適當之規範與工法，對於修補工程品質、成效亦難保障。因此建議應儘快召集專家、學者討論一同訂定一套修補材料規範，亦能達到確保修補作業之有效性，同時因應政府推動永續經營之課題。

附錄一 期初審查會議評審意見及回應

項次	審查委員意見	回應
1	因混凝土保護不足導致鋼筋腐蝕，影響鋼筋混凝土結構劣化減低使用年限，為國內常見且嚴重的課題，本案專對此問題及其補修材之有效性加以探討，實用性甚高，值得研究。	國內在本領域從事的研究較少，且尚無相關試驗或檢驗標準，因此希望透過本研究探討相關問題，並建議適合之試驗方法。
2	本研究總期限只有 11 個月，扣除前後準備期與報告撰寫期之後，剩下可進行研究試驗時間就相當有限，對此主持人所謂的加速試驗應如何進行，方能模擬實際情況，有待說明。	本研究係利用定電流加速腐蝕，大約二個禮拜即可得到鋼筋腐蝕之結果，故無時間之問題。
3	請補充說明控制組試體製作的設計條件。	本研究所使用之修補材料，係使用一般商業上所使用之乾拌水泥砂，再進行相關調配，以比較不同情況之耐久性。
4	在試體製作時鋼筋外緣的修補厚度為 1cm，是否與一般工程鋼筋保護層的情況相符，抑或有特別考量。	本試驗主要利用定電流加速鋼筋之腐蝕，探討修補材料與舊混凝土以及鋼筋界面之腐蝕情形，因為主要在於交接面之觀察，故修補厚度可為 1cm。
5	本計畫使用鋅粉添加於修補之水泥砂漿，是否會因鋅粉的腐蝕電路不連續，而影響研究成果。	有關鋅粉如何加以混合調配，以達到防止腐蝕效果，即為本計畫中所擬進行之試驗內容與探討對象。
6	擬進行修補試驗之混凝土試體，建請加強說明其剝落損壞之處理方式，及如何控制各組試體變異因子一致，並進而取得標準剝落方式及強度。	本計畫未來希望能提出修補材料驗證試驗法的確認，並探討係使用抗壓強度或結合強度或流度作為驗收標準，同時瞭解其關連性。

修補材料性質對混凝土結構物耐久性之探討

7	整體試體數量不夠明確，建議每種實驗組合應有足夠試體數量，俾能求取可信之變異數及標準偏差，以供統計之需。	本計畫係針對水泥質系修補材料進行試驗探討，擬採用 6 種配比製作試體，每一配比試體數量至少 15 個，以評估不同材料的變異性或試驗偏差。
8	以鋅為犧牲陽極之意義為何，建議加強說明。	有關鋅粉到底要加多少，或者添加腐蝕抑制劑，如何加以混合調配，以及所達到的效果如何，未來於本計畫中都將加以試驗探討。
9	本研究計畫對解決台灣海島氣候之構造物劣化有實務價值與理論探討意義。	感謝委員意見。
10	鋅粉加到水泥砂漿中，其詳細配比為何？尤其鋅粉價格貴，在本計畫中僅編 0.1 噸即已達 15000 元，故其未來研究成功後在實際應用上之成本效益請補充論述。	有關鋅粉到底要加多少，或者添加腐蝕抑制劑，如何加以混合調配，以及所達到的效果如何，未來於本計畫中都將加以試驗探討。
11	計畫書 P.8 所列之九大類修補材料性質有所不同，那些添加鋅粉效益大（抑制腐蝕），那些則相對而言效益並不一定很明顯，建議先作規劃與理論分析。	本計畫雖列出九大類之修復與補強之材料，但主要是針對 injecting、grouting、patching 三種修補基本材料性質加以研究，且國內對於相關修補作業未有完整的標準，目前在日本已有較完整之標準，而本計畫即針對相關修補與驗收標準加以探討，並提出建議。
12	水膠比或水灰比為重要因素，其規劃對腐蝕速率（與否）影響性大，敬請作試體時定出合理之 W/B 或 W/C。	本研究所使用之修補材料，係使用一般商業上所使用之乾拌水泥砂，再進行相關調配，以比較不同情況之耐久性，調配出符合緻密性與強度需求之修補材料。
13	服務建議書內容符合計畫所需，應能有所貢獻。	感謝委員意見。
14	研究內容主要針對結構性修補為主，對於服務性之補強，建議可在最後結論與建議加以說明。	本研究主要為修補材料對混凝土結構物耐久性之研究，關於服務性部分於後續計畫亦將提出說明。
15	工作小組初審意見中有五項針對經費編列之建議，請加	有關設備租用費用與設備維護費，係為不同設備，設備租用費用係為外借設備

	<p>以修正，其中設備租用費用與設備維護費是否重複編列，請加以說明。</p>	<p>之使用費，例如 SEM 與 XRD 等設備（可向貴所材料實驗中心租用）；設備維護費係用於執行本計畫使用本校試驗儀器或設備之維護費用，例如萬能試驗儀、腐蝕測定儀、透水試驗設備、氣離子滲透試驗設備等。</p> <p>有關工作小組初審意見修正如下：服務建議書第 13 頁未編列費用之項目將刪除，第二項業務費之報告印製費依契約書草案加以說明。第 15 頁第六項其他費用所需臨時工之總時數為 1600 小時。第 15 頁第七項雜支費之文具紙張金額誤繕為 10,000 元，將修正為 10,906 元。本次招標總費用修正為 100 萬元。</p>
--	--	--

附錄二 期中審查會議評審意見及回應

審查委員意見	回應
<p>1. 中華民國建築師公會全國聯合會 林建築師平昇：</p> <p>(1) 請儘速提出可行之實用方案</p> <p>(2) 建議提出目前修補材料之相關缺失情形，並於計畫內加以說明。</p> <p>2. 台灣區綜合營造工程工業同業公會 王總幹事榮吉：</p> <p>(1) 修補材料性質對混凝土結構物耐久性之研究國內以往較少重視，未來公共工程、橋梁之修補、維修、都市更新等，都將大量使用修補材料，因此，國內應研發適合國內之修補材料檢測基準與規範。</p> <p>(2) 以往修補材料多數從國外引進，並與國內產業界之材料摻合共同使用，但國內仍缺乏完整的修補材料基準規範與施工程序，如能從實證與研究來完成相關基準規範與施工程序，以增強就有建築與橋梁之修補維修，進而延長使用年限，將更有助於達到節能減碳的目標。</p> <p>3. 徐副教授輝明：</p> <p>(1) 整體研究理論及實驗技術非常嚴謹及可行，部分報告內容仍有少許可修正之處，煩請參閱建議之事項，以決定是否修改。</p> <p>(2) 有關第三章試驗步驟之照片整理中，是否考慮抽換部分照片，就有實驗人員出現之部分，須考慮實驗人員之標準個人防具。</p>	<p>1. 有關委員所提高氯離子含量結構或海砂屋之修補說明、國內現有修補材料資訊、國外相關之試驗標準，將於後續報告書中加以論述。</p> <p>2. 本研究係透過修補材料之驗證試驗相關標準，並探討修補材料之相關參數、性質、品質，期能建立國內修補材料之整體架構。</p> <p>3. 本研究之相關是體以製作完成，目前係等待齡期，預計未來一個月可陸續進行試驗，計畫進度上應無問題。</p> <p>4. 本研究因針對三種不同修補方式進行試驗，故以 5mm 做為分界點，未來於後續報告書中將針對結構性或非結構性裂縫部分加以說明。</p> <p>5. 有關修補材料之厚度、與實際環境之比較，由於本研究係針對腐蝕之機理進行驗證，且修補材料之厚度、與實際環境主要係影響腐蝕的速度，在腐蝕之機理方面差別較小。</p> <p>6. 有關報告書內容有誤繕、格式錯誤、欠缺或不一致的地方，將一委員意見配合增修於後續報告書中。</p>

4. 廖組長肇昌：

- (1) 老舊建物的修補，常見及主要的項目為混凝土裂縫的修補，混凝土剝落的局部小區塊的修補及表層平面的修補，因此各項修補材料應考慮其易施工性(流動度)、凝固的時間、必要的強度、黏著特性及其耐久性等。
- (2) 修補材料應能因不同目的所需(裂縫會填補或粉刷)，而提供不同的材料配比，建議針對第(1)點的修補對象提出適用的材料型別及配比，並標註其特性(物理、力學)，以達研究成果實用化的目的。

5. 沈總務長進發：

- (1) 本研究對文獻回顧資料蒐集豐富，對混凝土劣化及鋼筋鏽蝕之機理有充分瞭解，而能以實驗來印證發展防蝕技術，具有相當實用性。
- (2) 本研究能集中力量真對水泥質材料之注入、灌漿及補綴三種方式進行試驗，而此三種方式為最常用且簡易，故甚為適當。
- (3) 本研究於預定時間進行之試驗內容，符合原計畫。

6. 陳教授豪吉：

- (1) 文獻收集充足，可以提供後研究參考。
- (2) 文中試驗方法中有關修補材料之基本物理及力學性質試驗未見諸於報告中，故針對修補材料特性之評估尚未進行，期末報告中應提出以滿足合約要求。

<p>(3) 修復後之檢驗成果亦未見諸於期中報告中,例如透水壓及貯鹽試驗等。</p> <p>(4) 研究案係針對劣化混凝土修復,而非補強,故請說明為何取裂縫寬度至 5 mm(5 mm 係屬結構性裂縫)</p> <p>7. 沈教授得縣：</p> <p>(1) 期中報告大致上實際進度符合預定進度且報告內容豐富,值得肯定,但報告中缺中英文摘要,請作補充,又第一章研究起緣請更正為研究緣起,以及本節末尾關鍵詞可以刪除。</p> <p>(2) 期中報告中錯別字請作修正,又第一章研究流程圖與研究主題、研究方法及試驗計畫有些不一致請修正。</p> <p>(3) 期中報告再緒論中提到混凝土結構物修補材料有九類,但研究僅探討其中三類,其原因何在,為呼應委託案之研究題目為「修補材料」,因此應交代限縮內容之理由。</p> <p>(4) 本研究計畫提供修補材料之前,建議能先針對混凝土結構劣化之現象及原因做探討,以提供合適之修補材料。</p> <p>(5) 建議板鹽就能建立相關修補材料之品質標準及標準施工程序或施工規範,以確保結構物之耐久性。</p> <p>8. 林組長建宏：</p> <p>(1) 非結構性之劣化裂縫與結構性的裂縫兩者並不相同,針對此點請加以說明。</p>	
--	--

<p>(2) 有關修補材料使用上的限制與條件為何，請加以說明，以利使用者能針對不同情形，選用最佳之修補材料。</p> <p>9. 簡副研究員文聖：</p> <p>(1) 報告書之文獻回饋建議針對國外現有相關規範加以蒐集探討，以使成果與國際接軌，並符合過內需求與既有之標準。</p> <p>(2) 本研究試驗時，有關修補材料之厚度、與實際環境之比較，請加以說明。</p>	
--	--

附錄三 期末審查會議評審意見及回應

審查委員意見	回應
<p>1. 沈教授得縣：</p> <p>(1) 期末報告文獻收集完整，報告內容豐富值得肯定，但報告中錯別字偏多，文辭欠通順者亦不少，建議定稿前作校正。</p> <p>(2) P.6 研究流程圖中試驗項目有直式與橫式混用，建議改為橫式之格式。P.8 執行進度說明一節建議列入第三節研究方法中，並增訂一節為研究目的。P.7 進度甘特圖在期末報告中不可列入。</p> <p>(3) P.17 及 P.18 排版錯誤，請修正。</p> <p>(4) 報告中修補材料及試驗變數甚多，進行評估時盡可能用圖表或條列呈現，例如 P.65、P.71 及 P.77 避免用文章方式呈現。</p> <p>(5) 建議依混凝土結構物老化現象，劣化原因、合適隻修補材料、檢驗基準及修補績效列表說明。</p> <p>2. 沈總務長進發：</p> <p>(1) RC 結構體隻維修為當務之及研究課題，本研究對修補材料之選擇題供相當具體之結論，可提供技術手冊或規範訂定之參考。</p> <p>(2) 四個研究要項(研究目標)均為工程技術很重要性之意義，對修補及鋼筋在腐蝕之狀況有具體之結論。</p> <p>(3) 試驗於灌漿液中加鋁，與混凝土施工規範規定不得與新拌混凝土接觸之規定是否有抵觸，請加以說明。</p>	<p>1. 有關研究報告內容未詳細說明所使用之材料基本資料，因本研究著重在於說明修補材料性質對混凝土結構物耐久性之影響，故未詳細說明，但本研究所有使用之材料皆依照國家標準 CNS 之規定內容，符合相關規範之規定。</p> <p>2. 本研究中添加鋁粉僅為少量，生產之氫氣量亦有限，目的在於利用其膨脹之性質將裂縫加以充滿，雖然添加鋁粉對於混凝土性質會有所影響，但於修補材料添加鋁粉，對於混凝土耐久性方面，應該利大於弊。</p> <p>3. 有關研究報告之文字誤繕、文辭敘述，章節編排、報告書格式，將依委員指正部分，於後續成果報告書中加以修正，並依建築研究所規定之格式加以修正完成。</p> <p>4. 有關委員建議將修補材料於混凝土耐久性相關內容加以列表說明，使研究更加容易讓人比較與瞭解，將依委員建議修正後續報告中。</p> <p>5. 有關委員之各項意見，漿一委員之建議修正於成果報告書，並於報告書中妥予回覆</p>

<p>(4) 建議研究結果整理出簡要具體結論發表論文，可供用於 RC 結構物修補強之技術手冊或規範中。</p> <p>3. 廖組長肇昌：</p> <p>(1) 本研究以進行一些修補試驗評估，並有成果對應預期效果，建議將結果進一步彙整，提出修補材料特性評估準則，另應提供修補材料資訊部分，亦可以適當方式在報告中說明。</p> <p>(2) 有關簡報 P.36 第一部分真對裂縫寬度小於 0.5 mm，以水泥質系在此微小裂縫，如何確認可完全填充，又若裂縫係在柱面或梁側面，則直立式裂縫可否順利注入？對裂縫修補，本材料是否應訂定最小可修補的裂縫寬度。</p> <p>(3) 此等水泥質修補材料，是否適合結構性裂縫，若適合，是否要訂定修補材料與原材質堅在力學性質上應具有的性質及門檻值。若著重在修護的整理性質，則材料要具有體積穩定性、不收縮，避免最後仍留有間隙。</p> <p>(4) 請補充在抗彎試驗中破壞面位置，是否能再修補接著面。</p> <p>4. 高教授健章：</p> <p>(1) 題目建議將「混凝土」改為「鋼筋混凝土」，因為研究內容均在鋼筋腐蝕之相關修補上。</p> <p>(2) 於混凝土之劣化，如硫酸鹽侵蝕等，未在本研究範疇內，應先述明。</p>	
--	--

5. 陳教授豪吉：

- (1) 第四章試驗結果與討論中，的4-4節綜合評估內容係說明日本之修補材料檢驗方法與第四章試驗結果及綜合討論內容較無關聯，不適合置入本章節中。
- (2) P.57與P.58規範ASTM C190敘述重覆。
- (3) 有關修補材料性質之檢驗，在報告中僅列出試驗法規編號，是否補充試驗時之基本資料，如試體尺寸(如何準備或製作)、試驗齡其及貯要試驗流程等，以利報告可讀性。較重要試驗項目之試驗規範條文考率可列於附錄中，如黏接強度、膨脹收縮率試驗法等。

6. 鄭教授紹材：

- (1) 本研究針對水泥質係修補材料與修補技術，經由試驗計畫與試驗結果分析討論，研究成果顯著且具體。
- (2) 近年來政府在推的建築延壽，本計畫之研究成果可提供工程界應用，為避免業界誤用，建議在未來研究及早研擬「修補材料規範」。

7. 林組長建宏：

- (1) 有關本次會議兩案之通案性意見，請計畫團隊注意期程，依照合約要求如期繳交成果報告書，另外報告書格式不分，請依「內政部委託研究計畫作業規定辦理。
- (2) 兩岸後續發展部分，建議在成果

修補材料性質對混凝土結構物耐久性之探討

<p>報告書中，將後續研究內容，可再進行之研究課題加以說明，提供本所未來發展方向之研擬，使研究內容之成果更加完整。</p>	
---	--

參考書目

1. 劉福勳，“營建材料”，漢天下工程管理顧問有限公司，2000。
2. 林平全，“混凝土施工”，徐氏基金會出版，1998。
3. 彭添富，“鋼筋混凝土學”，大中國圖書公司印行，2001。
4. 陳冠霖，“添加係灰與飛灰對鋼筋混凝土腐蝕行為影響之研究”，國立台灣海洋大學河海工程學系，碩士論文，2007。
5. 林維明，“鋼筋混凝土腐蝕要因及對策之檢討”，港灣技術研究所，1989。
6. 楊定良、王起平、黃隆茂，“混凝土修補—材料性質選擇要點(一)”，現代營建，Vol. 347，2008。
7. 陳保成，“矽灰與纖維砂漿作為修補材料抗撞擊行為之探討”，國立嘉義大學土木與水資源工程研究所，碩士論文，2008。
8. P. K. Mehta and M. Paulo, “Concrete : Structure, properties, and Materials,” 2nd Ed., Prentice Hall, pp160-171, 1992.
9. 鄭讚慶，“防蝕塗層效能評估及鋼筋腐蝕對握裹強度影響之研究” 國立台灣海洋大學河海工程學系，碩士論文，2001。
10. K. K. Creatsil and F. P. Glasser., “Analysis of the steel : concrete interface, Proc. of Conf. On Corrosion on Reinforcement in Concrete”, UK, pp, 74-86, 1990.
11. H. H. Uhlig and R. W. Revie, “Corrosion and Corrosion Control”,

3rd edition, Wiley Interscience, N. Y., pp.28-35, 1985.

- 12.汪士鈞，“鋼筋在高性能混凝土內腐蝕特性”，國立成功大學土木工程研究所，碩士論文，1999。
- 13.A. Beeby., “Corrosion of reinforcement steel in concrete and its relation to cracking”, The structural engineer, No.3, Vol.56A, March, 1978.
- 14.S. W. Tsai and H. T. Hahn, Introduction to Composite Materials, Technomic Publishing Co., Inc. Westport, 1980.
- 15.混凝土工程施工規範與解說，中國土木水利工程學會，混凝土工程委員會，1999。
- 16.林秉誼，“混凝土劣化後基本性質及修補後破裂韌性之研究”，碩士論文，私立朝陽科技大學，2003。
- 17.JSCE-Standards on test Methods of Repairing Materials used for Concrete Structures, Japan Society of Civil Engineers, NO. 11, 2007.
- 18.吳卓夫、葉基棟，“營造法與施工”，茂榮圖書有限公司，1978。
- 19.村田二郎、岩崎訓明，“コンクリート施工法”，山海堂，1978。
- 20.傅溫，“混凝土工程新技術”，中國建材公會，1996。
- 21.徐浩，“微膨脹混凝土配合比設計”，中國建材公會，第16~18頁，1996。
- 22.林平全，“飛灰混凝土”，科技圖書股份有限公司，1995。
- 23.顏旭堯，“以不同試驗法探討添加卜作嵐材料對混凝土微觀特性

- 影響之研究”，國立台灣海洋大學材料工程學系，2001。
- 24.C. L. Page and N. R. Short and El, T. A.,“Diffusion of Chloride Ions in Hardened Cement Paste”, Cement and Concrete Research, Vol. 11,NO. 3, pp.395-406., 1981.
- 25.翁在龍，“電場作用下氯離子在混凝土中傳輸速率與電流關係之探討” 國立台灣海洋大學材料工程學系，碩士論文，2005。
- 26.R. D. Hoot and j. j. Emery, “Sulfate resistance of a Canadian slag cement” ,ACI Materials Journal, Vol. 87, pp.547-555, 1990.
- 27.A. A. Ramezaniapour, “Effect of curing on the compressive strength resistance to chloride-ion penetration and porosity of concrete incorporating slag, fly ash or silica fume,” Cement and Concrete Composites, Vol. 17, No.2, pp.125-133, 1995.
- 28.沈進發等，“公共工程高爐石混凝土使用手冊”，行政院公共工程委員會專案計劃，2003。
- 29.趙志方、周厚貴、袁群、馬金剛，“新老混凝土黏結機理研究與工程應用”，中國水利水電出版社，2003。
- 30.吳建國、黃然、梁明德、葉為忠、楊仲家、張建智，“混凝土橋梁鹽份腐蝕問題之研究”，交通部台灣區國道新建工程局，1985。
- 31.謝祥昇，“水淬鋼筋及鋼筋混凝土構建腐蝕行為之研究” 國立台灣海洋大學材料工程學系，碩士論文，2001。

- 32.柯賢文，“腐蝕及其防治”，全華科技圖書股份有限公司，1995。
- 33.廖肇昌，“構造物防蝕概念、策略與管理”，台灣營建研究院，2001。
- 34.Oladis Troconis de Rinc_on, Orlando P_erez, Edgar Paredes, Yaxcelys Caldera, Carolina Urdaneta, Isabel Sandoval, “Long-term performance of ZnO as a rebar corrosion inhibitor” *Cement & Concrete Composites*, Vol.24, pp.79–87, 2002.
- 35.Ghassan Nounu, U, Zia-UL-Hasan Chaudhary, “Reinforced concrete repairs in beams” *Construction and Building Materials* , Vol.13, pp.195-212, 1999.
- 36.K. Wang., P. R. L. Helene., P. J. M. Monteiro., “Potential use of zinc in the repair of corroded reinforced concrete”, *Cement & Concrete Composites*, Vol. 28, pp, 707–715, 2006.
- 37.Y. R. Hsu., W. L. Jang., W. Kai., J. K. Wu., “Effects or Corrosion Inhibitors no the Fe-Co-In-Cu-Cr High Entropy Alloy in 3.5 wt % NaCl Solution”*Journal of Chinese Corrosion Engineering*, Vol.18., NO. 3, pp. 281~288, 2004.
- 38.Neal S. Berke., Maria C. Hicks., “Predicting long-term durability of steel reinforced concrete with calcium nitrite corrosion inhibitor”, *Cement & Concrete Composites*, Vol. 26, pp. 191~198, 2004.
- 39.I. L. Kondratova, P. Montes, T. W. Bremner., “Natural marine exposure results for reinforced concrete slabs with corrosion inhibitors”, *Cement & Concrete Composites*, Vol. 25, pp. 483–490, 2003.

- 40.A. M. Rosenverg and J. M. Gaidis, "The mechanism of Nitrite Inhibition of Chloride Attact of Reinforcing Steel in Alkaline Aqueous Environments", *Materials Perfomance*, November, pp.45-48, 1979.
- 41.吳昇宗, "腐蝕抑制劑對鋼筋混凝土防蝕及力學行為影響之研究", 國立台灣海洋大學河海工程學系, 碩士論文, 1994。
- 42.V. K. Gouda and W. Y. Halaka, "Corrosion and corrosion Inhibition of reinforcing steel", *Br. Corros. J.*, Vol.5 Sept., pp.204-208, 1970.
- 43.M. Stern, "A Method for Determining corrosion Rates from Linear Polarization Data" *Sep*, 1985.
- 44.陳桂清、饒正、柯正龍、羅俊雄、翁榮洲、王瑞坤、張英傑、劉益雄、江淑慈, "港灣構造物陰極防蝕準則訂定研究", 交通部運輸研究所, 2004。
- 45.Principles and Prevention of Corrosion, Macmillan Publishing Co., 1992.
- 46.林瑞棋, "921地震後受損鋼筋混凝土建築物緊急修復及補強技術手冊之可行性探討(一)" 中華建築中心, 2000。

修補材料性質對混凝土結構物耐久性之探討

出版機關：內政部建築研究所

電話：(02) 89127890

地址：台北縣新店市北新路三段 200 號 13 樓

網址：<http://www.abri.gov.tw>

編者：黃然、張建智、林世堂、蔡嘉榮

出版年月：98 年 12 月

版(刷)次：初版

ISBN：978-986-02-1632-5 (平裝)