

既有 RC 建築物劣化及其修復之研究

內政部建築研究所研究報告
中華民國 95 年 12 月

095301070000G3322

既有 RC 建築物劣化及其修復之研究

研究主持人：葉祥海

協同主持人：黃 然、張建智

研究助理：陳建宏、曾進宏

內政部建築研究所研究報告

中華民國 95 年 12 月

**ARCHITECTURE AND BUILDING RESEARCH INSTITUTE
MINISTRY OF THE INTERIOR
RESEARCH PROJECT REPORT**

**Study of Degradation and Rehabilitation of Existing RC
Buildings**

BY

**SHING-HAI YEH
RAN HUANG
JIANG-JHY CHANG
CHIEN-HUNG CHEN
CHIN-HUNG TSENG**

December, 2006

目次

表次	.....	III
圖次	.....	V
摘要	.....	IX
第一章 緒論	.....	1
第一節 研究緣起與背景	.....	1
第二節 研究目的	.....	1
第三節 研究方法與流程	.....	1
第二章 既有RC建築物劣化及修復文獻回顧	.....	7
第一節 混凝土裂縫	.....	7
第二節 混凝土剝落	.....	18
第三節 建築物滲漏水	.....	22
第四節 國內RC建築物劣化修復材料應用	.....	28
第五節 聚合物改質水泥基修復材料	.....	29
第六節 新建RC建築物劣化修復	.....	35
第三章 生命週期成本評估	.....	37
第一節 生命週期成本評估概念	.....	37
第二節 生命週期成本評估步驟	.....	38
第三節 生命週期成本評估考慮因素	.....	40
第四節 生命週期成本評估案例	.....	41
第五節 生命週期性應用現況	.....	43
第四章 聚合物改質水泥砂漿材料配製及性能驗證	.....	47
第一節 試驗材料與配比設計	.....	47
第二節 試驗方法	.....	54
第三節 試驗儀器與設備	.....	59
第四節 結果與討論	.....	61
第五節 聚合物改質水泥砂漿性能探討	.....	92
第六節 評估聚合物改質水泥砂漿可行試驗法	.....	93
第五章 結論與建議	.....	97
第一節 結論	.....	97
第二節 建議	.....	98
附錄一 座談會審查會意見彙整表	.....	99
附錄二 混凝土修補材料價目表	.....	101

參考書目	103
附件 既有RC建築物修復施工綱要草案	109

表次

表 2-1	不同暴露環境下混凝土最大允許裂縫寬度(ACI 224).	8
表 2-2	不同規範規定最大允許裂縫寬度	9
表 2-3	環氧樹脂系裂縫灌注材料分類	17
表 2-4	混凝土剝落劣化修補材料使用準則	21
表 2-5	改質水泥砂漿之力學性質及物理性質	33
表 2-6	聚合物改質水泥砂漿特性	34
表 3-1	實務上修補材料概估費用(2006).....	43
表 3-2	各國應用生命週期成本評估現況	44
表 3-3	生命週期成本評估相關研究彙整	45
表 4-1	試驗項目及試體製作數量	47
表 4-2	水泥化學成分	48
表 4-3	水泥物理性質	49
表 4-4	聚乙烯-醋酸乙烯樹脂元素分析	50
表 4-5	聚乙烯醋酸乙烯羧酸酯元素分析	52
表 4-6	細粒料性質	53
表 4-7	聚合物改質水泥砂漿配比(kgf/m ³).....	54
表 4-8	吸水率試驗結果	61
表 4-9	初始吸水速率試驗結果	63
表 4-10	乾縮試驗結果	66
表 4-11	膨脹率試驗結果	68
表 4-12	與控制組膨脹率差異值比較(%)	68
表 4-13	抗壓強度試驗結果(齡期 28 天).....	71
表 4-14	抗壓強度試驗結果(齡期 56 天).....	71
表 4-15	抗彎強度試驗結果(齡期 28 天).....	74
表 4-16	抗彎強度試驗結果(齡期 56 天).....	75
表 4-17	抗彎強度試驗結果(齡期 91 天).....	75
表 4-18	黏結強度試驗結果	79
表 4-19	聚合物改質水泥砂漿累積通過電量	86
表 4-20	水泥漿體孔隙與影響性質	87
表 4-21	壓汞試驗之各孔隙範圍汞注入量(mL/g)	88
表 4-22	壓汞試驗結果	88

圖次

圖 1-1	建築物生命週期之耐久性與工程成本示意	3
圖 1-2	研究步驟與流程	4
圖 1-3	研究大綱與工作架構	5
圖 2-1	超音波檢測表面裂縫之示意	10
圖 2-2	敲擊回音法偵測表面裂縫試驗儀器配置	11
圖 2-3	改良式敲擊回音法偵測裂縫深度試驗儀器配置	11
圖 2-4	頻譜檢測表面裂縫示意(Ohtsu and Yunso 法).....	12
圖 2-5	相位變化法量測裂縫深度示意	12
圖 2-6	透水試驗儀外觀與試體外觀	25
圖 2-7	透水試驗設備(CRD C48).....	26
圖 2-8	聚合物基材分類	31
圖 3-1	生命週期現金流量與性能劣化示意圖	38
圖 3-2	生命週期成本評估步驟	40
圖 3-3	混凝土結構物方案生命週期比較	42
圖 4-1	苯乙烯-丁二烯橡膠液體外觀	50
圖 4-2	聚乙烯-醋酸乙烯樹脂粉末外觀.....	51
圖 4-3	聚乙烯-醋酸乙烯樹脂微觀分析	51
圖 4-4	聚乙烯醋酸乙烯羧酸酯粉末外觀	52
圖 4-5	聚乙烯醋酸乙烯羧酸酯微觀分析	52
圖 4-6	黏著強度試體示意	56
圖 4-7	氯離子快速滲透設備	59
圖 4-8	掃描式電子顯微鏡設備	60
圖 4-9	壓汞孔隙量測儀	60
圖 4-10	聚合物改質水泥砂漿試體吸水率	62
圖 4-11	聚合物改質水泥砂漿試體吸水率關係.....	62
圖 4-12	聚合物改質水泥砂漿之初始吸水速率試體比較(EVA 組).....	64
圖 4-13	聚合物改質水泥砂漿之初始吸水速率試體比較 (VeOVA組)	64
圖 4-14	聚合物改質水泥砂漿之初始吸水速率試體比較(SBR 組).....	65
圖 4-15	聚合物改質水泥砂漿乾縮試體比較(EVA組).....	66

圖 4-16	聚合物改質水泥砂漿乾縮試體比較(VeoVA組)	67
圖 4-17	聚合物改質水泥砂漿乾縮試體比較(SBR組)	67
圖 4-18	聚合物改質水泥砂漿膨脹率比較(EVA組)	69
圖 4-19	聚合物改質水泥砂漿膨脹率比較(VeoVA組)	69
圖 4-20	聚合物改質水泥砂漿膨脹率比較 (SBR組)	70
圖 4-21	聚合物改質水泥砂漿試體之抗壓強度(齡期 28 天)	72
圖 4-22	聚合物改質水泥砂漿試體之抗壓強度(齡期 56 天)	72
圖 4-23	聚合物改質水泥砂漿試體抗壓試體關係(齡期 28 天)	73
圖 4-24	聚合物改質水泥砂漿試體抗壓試體關係(齡期 56 天)	73
圖 4-25	聚合物改質水泥砂漿試體之抗彎強度(齡期 28 天)	76
圖 4-26	聚合物改質水泥砂漿試體之抗彎強度(齡期 56 天)	76
圖 4-27	聚合物改質水泥砂漿試體之抗彎強度(齡期 91 天)	77
圖 4-28	聚合物改質水泥砂漿試體抗彎試體關係(齡期 28 天)	77
圖 4-29	聚合物改質水泥砂漿試體抗彎試體關係(齡期 56 天)	78
圖 4-30	聚合物改質水泥砂漿試體抗彎試體關係(齡期 91 天)	78
圖 4-31	聚合物改質水泥砂漿試體之黏結強度	79
圖 4-32	聚合物改質水泥砂漿試體黏結試體關係	80
圖 4-33	聚合物改質水泥砂漿之黏結強度破壞試體(AC)	80
圖 4-34	聚合物改質水泥砂漿之黏結強度破壞試體(AE5)	81
圖 4-35	聚合物改質水泥砂漿之黏結強度破壞試體(AE10)	81
圖 4-36	聚合物改質水泥砂漿之黏結強度破壞試體(AE15)	82
圖 4-37	聚合物改質水泥砂漿之黏結強度破壞試體(AV5)	82
圖 4-38	聚合物改質水泥砂漿之黏結強度破壞試體(AV10)	83
圖 4-39	聚合物改質水泥砂漿之黏結強度破壞試體(AV15)	83
圖 4-40	聚合物改質水泥砂漿之黏結強度破壞試體(AS5)	84
圖 4-41	聚合物改質水泥砂漿之黏結強度破壞試體(AS10)	84
圖 4-42	聚合物改質水泥砂漿之黏結強度破壞試體(AS15)	85
圖 4-43	聚合物改質水泥砂漿累積通過電量	86

圖 4-44	聚合物改質水泥砂漿試體累積通過電量關係	87
圖 4-45	累積注入量與孔隙尺寸分布圖(AC組)	89
圖 4-46	累積注入量與孔隙尺寸分布圖(AE10 組)	89
圖 4-47	累積注入量與孔隙尺寸分布圖(AV10 組).....	90
圖 4-48	累積注入量與孔隙尺寸分布圖(AS10 組).....	90
圖 4-49	聚合物改質水泥砂漿之SEM圖(AC組)	91
圖 4-50	聚合物改質水泥砂漿之SEM圖(EVA組).....	91
圖 4-51	聚合物改質水泥砂漿之SEM圖(SBR組).....	91
圖 4-52	聚合物改質水泥砂漿之SEM圖(VeoVA組).....	92

摘要

關鍵字：裂縫、剝落、滲漏水、聚合物改質水泥砂漿、生命週期成本評估

一、 研究緣起

台灣地區既有建築物使用 RC 材料之比例可謂稱冠。RC 房屋大量興建始於民國六十~七十年代，許多 RC 建築物使用迄今已達二十、三十年之久，由於早期房屋建築設計標準與施工品管制度未臻完善及在供不應求倉促趕工交屋的情形下，多數房屋建築的品質備受工程界質疑，又因受到頻繁地震的影響，許多既有 RC 結構物已呈現劣化現象，甚至達到有安全疑慮的臨界階段，所以建立 RC 建築物劣化評估的方法及選擇適當的修復材料與修復技術，對國內營建產業為一重要且必須重視的研究課題。

二、 研究方法及過程

本計畫分成三部分執行，第一部分：彙整國、內外有關 RC 建築物劣化現象、原因、檢測及修復材料與方法，參考國內外相關文獻瞭解 RC 建築物材料劣化現象，劣化原因及劣化檢測診斷方式或技術，並蒐集台灣地區 RC 建築物目前主要使用之修復材料與方法；第二部分：改良既有修復材料並進行性能驗證，試驗計畫旨在探討聚合物改質水泥砂漿於修復材料之特性及影響；第三部分：利用生命週期成本評估方法，選擇最佳修復材料與施工方法，提高既有 RC 建築物修復工程之效益。

三、 重要發現

國內既有 RC 建築物劣化行為主要為混凝土裂縫、混凝土剝落與滲漏水，彙整相關文獻資料提出「既有 RC 建築物修復施工綱要草案」於研究報告之附錄中，其中包括劣化原因、檢測技術、修復材料與方法以及效能驗證試驗法。

利用生命週期成本評估(Life Cycle Cost Assessment, LCCA)概念建立 RC 建築物修復材料效益評估方法，除考慮 RC 建築物初期的建造成本，並將建築物後續的維護管理、檢修、拆除等變異因素列入成本考量之評估方法概論。

改良聚合物水泥砂漿修復材料並進行性能驗證試驗，獲致適當修復材料資訊，添加 EVA 的改質水泥砂漿，可降低乾縮(46.8~58.6%)、膨脹率與基材相近、可減緩吸水速度、降低吸水速率(57.1~74.0%)、提升抗彎強度(0~10.5%)以及降低

離子穿透量(45.8 ~ 74.3%)，雖然添加 EVA 會使試體增加發泡效果，但是硬固後會產生薄膜可以阻止孔隙連通性。

四、 主要建議事項

國內RC建築物修復材料、技術或方法目前尚未明訂規範之際，藉由本研究計畫蒐集國內外學術研究成果、修補規範與案例，以及進行部份修復材料性能檢驗試驗，以確認修復材料、方法或技術與相關施工程序。根據本研究針對「既有RC建築物修復施工綱要草案」提出下列具體建議。以下分別從立即可行的建議及長期性建議加以列舉。

立即可行之建議

主辦機關：內政部

協辦機關：交通部

本研究報告彙整國內既有 RC 建築物劣化類型主要為混凝土裂縫、混凝土剝落與建築物滲漏水，上述劣化行為之破壞原因或機理，可藉由目測或簡易之儀器設備量測即可判斷，另外針對不同劣化方式所對應之適當修補材料或方法，提出「既有 RC 建築物修復施工綱要草案」條列於附錄中，以供各政府機關或工程施工單位參考。

長期性建議

主辦機關：內政部、經濟部標準檢驗局

協辦機關：交通部

國內既有 RC 建築物劣化修補工程，目前大多以水泥砂漿草率修補外觀以掩飾實質劣化行為，除修復後安全性不易控管與監測外，亦造成修補區域成為整體建築物耐久性問題之缺口，以及多次翻修造成建築物生命週期成本負擔增加與浪費地球有限資源。

因此藉由本研究報告結果，建議國內政府機關應依據國內地區主要之既有 RC 建築物劣化類型，著手訂定「既有 RC 建築物劣化修補材料基本性質」標準，以及「修補材料結合既有混凝土材料」之各種性能標準與適當檢測試驗方法。

Abstract

Keywords: cracking, delamination, leakage, polymer modified mortar, life-cycle cost assessment

A large number of RC residential and public buildings have been constructed since 1970 in Taiwan Area. Many RC buildings have been used for more than 20~30 years and degradation or deterioration were widely found in RC members due to improper design criteria, poor construction quality and frequent earthquake during their service life. Some of old RC buildings even reach the critical stage and demolition measure must be taken for the safety of residents. There is a need to develop a strategic project to evaluate the conditions of existing RC buildings using proper inspection or testing methods and to repair or rehabilitate the degraded RC buildings as soon as possible. However, the inspection technique, repair materials and the cost effectiveness of rehabilitation need to be determined before conducting the previous project.

This project is aimed to (1) summarize the causes and mechanisms of degradation of RC buildings, (2) to differentiate the inspection and testing techniques of existing RC buildings, and (3) to propose proper repair materials and methods through life cycle cost analysis. Testing materials include polymer modified cementitious systems and resin repair mortar and testing program include material properties, performance of composite materials, and execution methods. The technique of repairs of cracked concrete, repairs of spalled concrete, sprayed concrete, large-volume repair, leak sealing, surface coatings, and underwater repair will be discussed and presented in the final report.

The gradation of RC buildings in Taiwan includes cracking, delaminating and leakage. In this report, the draft of repair procedure of existing RC buildings was presented as annex, which consists of causes of degradation, inspection technique, repair materials, repair methods and efficiency assessment testing methods.

Application of life cycle cost assessment (LCCA) on the selection of repair methods of existing RC buildings was introduced. The cost includes construction cost, maintaining cost, inspection cost, repair cost, demolition cost and rebuild cost which all are taken into account in the assessment procedure. An example was given to illustrate

the LCCA procedure.

Polymer modified cementitious materials were tested and some useful information was obtained such as the efficiency of addition of polymers. Drying shrinkage, permeability and absorption are significantly reduced and flexural strength is increased by EVA modification. MIP results and SEM micrographs also demonstrate the modification of pore size distribution of polymer modified specimens.

第一章 緒論

第一節 研究緣起與背景

探討比較國內與全世界建築物建造使用材料之種類，台灣地區既有建築物使用 RC 材料之比例可謂稱冠，乃因台灣地區建築業蓬勃發展，RC 房屋大量興建始於民國六十~七十年代，許多 RC 建築物使用迄今已達二十、三十年之久，由於早期房屋建築設計標準與施工品管制度未臻完善，及在供不應求倉促趕工交屋的情形下，多數房屋建築的品質備受工程界質疑，又因受到頻繁地震的影響，許多既有 RC 結構物已呈現劣化現象，甚至達到有安全疑慮的臨界階段，所以建立 RC 建築物劣化評估的方法及選擇適當的修復材料與修復技術，對國內營建產業為一重要且必須重視的研究課題。

第二節 研究目的

國內 RC 建築物修復材料、技術或方法目前尚未明訂規範之際，藉由本研究計畫蒐集國內外學術研究成果、修補規範與案例，以及進行部份修復材料性能檢驗試驗，加以整理、分析、比對，並利用生命週期成本評估方法評定修復材料及方法所獲致之效能，以確認修復材料、方法或技術與相關施工程序。本計畫研究目的如下所述：

- (1)彙整分析文獻及相關資料，獲致 RC 建築物劣化原因及診斷技術；
- (2)改良聚合物水泥砂漿修復材料並進行性能驗證試驗，獲致適當修復材料資訊；
- (3)利用生命週期成本概念，建立 RC 建築物修復材料效益評估方法；
- (4)依據既有 RC 建築物劣化情況，建立修復施工綱要草案。

第三節 研究方法與流程

本計畫內容分三部分進行，第一部分：彙整國、內外有關 RC 建築物劣化現象、原因、檢測及修復材料與方法；第二部分：改良既有修復材料並進行性能驗證試驗；第三部：分利用生命週期成本方法，評估 RC 建築物修復材料及技術的效能。研究方法概述如下：

1.彙整 RC 建築物的劣化現象、檢測診斷方法及原因

參考國內外相關文獻瞭解 RC 建築物材料劣化現象。探討內容包括劣化原因(物理原因、化學原因及鋼筋腐蝕原因)及劣化檢測診斷方式或技術(目測、現場或實驗室試驗)；修復材料應用與施工方式依混凝土裂縫修復、混凝土剝落修復與滲漏水修復等三大主題分別探討敘明，另外蒐集台灣地區 RC 建築物目前主要使用之修復材料與方法。

2.修復材料配製及性能驗證試驗

試驗計畫旨在比較不同聚合物改質水泥砂漿(polymer modified cementitious systems)對修復材料性能之影響，製作試體主要添加不同類型及不同比例之聚合物於水泥砂漿中進行拌合，試驗結果可作為選擇聚合物改質水泥砂漿的參考，以及建議可行之驗證聚合物改質水泥砂漿性能之試驗法。

3.生命週期成本評估方法

為提高既有 RC 建築物修復工程之效益，本研究利用生命週期成本評估方法，判定不同建築物劣化行為與因素，選擇適當修復材料與技術，以及修復後之耐久性能等參數進行評估分析。本研究生命週期成本評估分析方法如下公式表示：

$$LCC = C_{t-it} + \sum C_{t-mr} + \sum C_{t-rm} + \sum C_{t-et}$$

上式符號代表依序如下所述，LCC：生命週期成本； C_{t-it} ：建築物初期建造成本； C_{t-mr} ：維修成本； C_{t-rm} ：拆除重建成本； C_{t-et} ：拆除重建期間所造成之經濟損失成本。其中維修成本(C_{t-mr})主要依據修復材料與技術，探討拆除置換成本、維修材料成本、維修人工成本、施工影響經濟損失成本、後續維護管理成本等；另外亦比較倘若捨去以維修補救機制，改採拆除重建所耗費成本($\sum C_{t-rm} + \sum C_{t-et}$)歸納分析，提供業主與施工單位於 RC 建築物修復決策之參考依據。建築物生命週期之耐久性能與工程成本示意如圖 1-1 所示，藉由不同修復時機、修復次數、修復材料與技術，以及修復工程對建築物耐久性能維持之優劣，將影響建築物總工程成本。

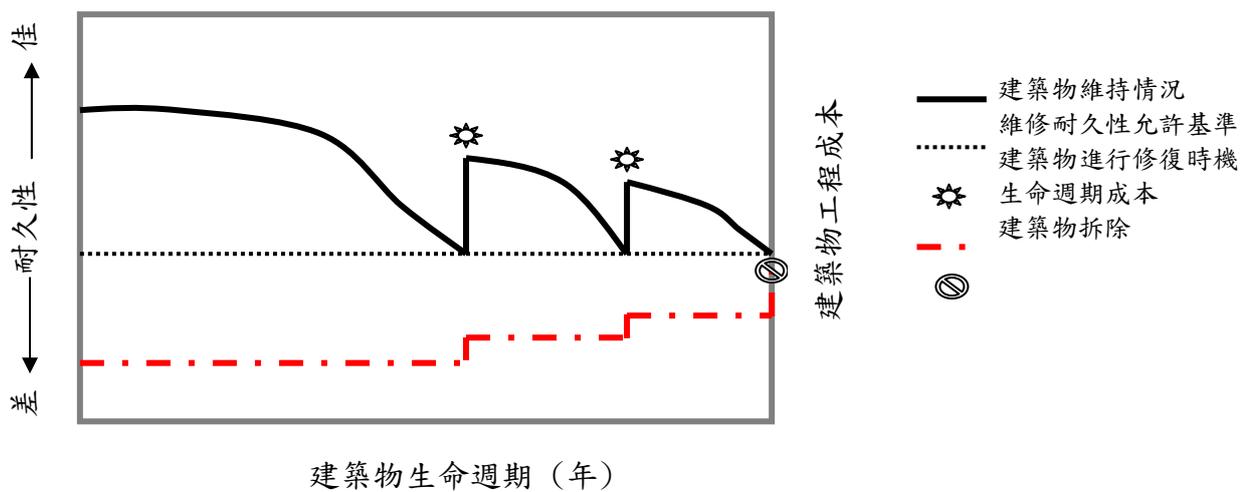


圖 1-1 建築物生命週期之耐久性與工程成本示意

本研究進行既有 RC 建築物劣化及修復之研究，研究步驟與流程如圖 1-2 所示。



圖 1-2 研究步驟與流程

本計劃研究大綱與工作架構編排如圖 1-3 所示：

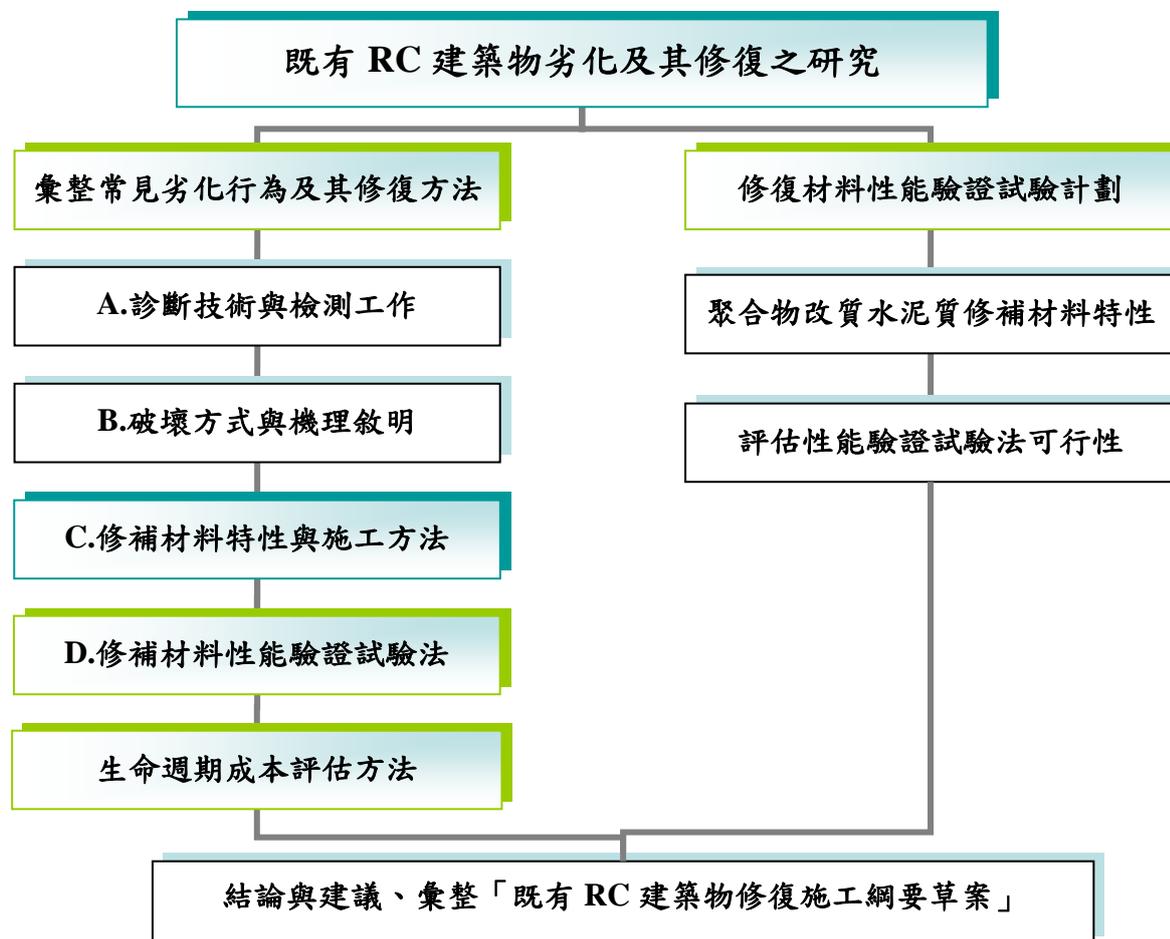


圖 1-3 研究大綱與工作架構

第二章 既有 RC 建築物劣化及修復文獻回顧

本章節將針對國內既有 RC 建築物常見且嚴重之劣化行為，訂定不同對應之修復工程為探討主題，以落實政府大力推廣之舊有建築物修復再利用政策。歷經實地訪談、現地調查與專家學者建議綜合結論提出國內既有 RC 建築物常見劣化行為主要包括：一、混凝土裂縫；二、混凝土剝落；三、建築物滲漏水等三大廣泛且嚴重之缺失。

本章節文獻回顧與彙整將依據上述三大劣化方式所對應之 A.診斷技術與檢測工作；B.破壞方式與原理；C.修補材料特性與施工方法；D.修補材料性能驗證試驗法等相關文獻資料可作為草擬既有 RC 建築物劣化修復施工綱要之參考於附件。另外，本章第四節補充 RC 建築物於新建工程所造成之劣化型態，以及其施工疏失之預防及後續修復方法等說明；第五節說明應用於 RC 建築物混凝土修復材料之聚合物改質水泥砂漿類別，並由文獻研究得知基本改質特性與相關性能試驗數值。

第一節 混凝土裂縫

結構物裂縫產生，除對本身會產生安全上及使用上的影響，外在環境之有害成分侵入，促使裂縫部分持續擴大及劣化，造成使用性能的降低，而導致使用壽命的縮短。嚴重者，可能會影響結構物之安全性。結構強度之影響：結構物裂縫發生後，對於本身之剛性、剪力強度、拉力強度、抗彎強度都會降低，並可能使得結構行為發生應力重分配，造成破壞的連續及進展。嚴重尚會使構材掉落而造成危害。耐久性能之影響：裂縫對耐久性之影響，最主要的是加速混凝土中性化現象，使鋼筋腐蝕速度變快，並因滲漏水造成油漆塗層發霉與混凝土析晶，導致保護層剝落與縮短結構物之使用年限。氣密性能之影響：裂縫對於氣密性能之破壞，主要是指特別需要高氣密性能的結構物而言，如醫院、核能發電廠，或一些疫苗培植性能的結構物。裂縫一旦發生將造成氣密性降低，造成輻射線或疫苗菌類外洩，影響到人們的安全。

裂縫種類

混凝土裂縫的種類概分如下：

(1)微細裂縫(micro-crack)與組織裂縫：通常為細而短之裂縫，部分存在於砂漿內，部份介於顆粒與砂漿間，僅能利用顯微鏡方能觀察得知，它主要是由自體應力或內部應力流之轉向力而產生。

(2)開裂裂縫(separate crack)：此項裂縫通過構件全部斷面，由中央拉力或受較

小偏心拉力而產生。

(3)彎曲裂縫(bending crack)：此項裂縫走向略垂直於受彎曲拉力鋼筋，產生於受拉緣至中心軸線。

(4)剪力裂縫(shearing crack)：此項裂縫與構件軸成斜向，由彎曲裂縫發展而成。

(5)收縮裂縫(shrinkage crack)：此項裂縫發生於構件之大量配筋腹帶內或厚構件內，僅一部份裂縫伸入中心軸線。

(6)間隙裂縫(interstitial crack)：有配筋帶貫通裂縫間偶而形成細微之間生裂縫，一般僅止於最外側之配筋，可由原來表面裂縫或細小之內部結合裂縫引起。

(7)縱向裂縫(longitudinal crack)：由於新鑄混凝土之凝結或由於鋼筋在多孔狀混凝土內腐蝕之容積增大將沿著配筋裂開而形成。

(8)表面裂縫(surface crack)：原則上發生於版狀構件之表面裂縫深度通常不大，表面裂縫會沿配筋產生或任意方向。

裂縫寬度

混凝土劣化與混凝土開裂寬度有關，因此在一些規範中都列有裂縫寬度的限制值，一般都設定限制寬度為0.1~0.4 mm，ACI committee 224 規定如表2-1所示，多數規範基於經驗、試驗或理論方式來訂定限制值。表2-2則為整理各國規範所規定之最大允許裂縫寬度。

表 2-1 不同暴露環境下混凝土最大允許裂縫寬度(ACI 224)

暴露環境	最大允許裂縫寬度 (mm)
乾燥空氣或有薄膜層保護	0.40
高相對濕度、濕潤空氣、土壤	0.30
除冰鹽或化學藥品	0.18
海洋環境中及海水潑濺及乾濕循環環境	0.15
儲水結構物、考慮壓力的導管	0.10

表 2-2 不同規範規定最大允許裂縫寬度

國家	機關單位	結構物、受力狀態及暴露環境	最大允許裂縫寬度 (mm)
日本	運輸省 日本工業規格	港灣構造物	0.2
		考慮彎矩作用	0.25
		未考慮彎矩作用	0.05
法國	Brcard		0.40
瑞典		僅靜載重	0.30
		靜載重 + 1/2活載重	0.40
蘇俄	鋼筋混凝土規範標準		0.20
美國	ACI建築規範標準	室內構造物	0.38
		室外構造物	0.25
歐洲	歐洲混凝土委員	嚴重腐蝕環境下	0.10
		無防護措施之構造物	0.20
		具防護措施之構造物	0.30

診斷技術與檢測工作

RC 建築物劣化之檢測方式可分為(1)以非破壞(non-destructive)檢測方式進行現場試驗(testing in the field)，與(2)現場取樣後進行試驗室試驗(laboratory tests)等。其中非破壞檢測法包括裂縫目視量測判斷、混凝土反彈錘強度試驗、腐蝕電位與電流密度試驗等，試驗室試驗包括混凝土中性化試驗、硬固混凝土氯離子含量檢測與鑽心混凝土抗壓強度試驗等。

1. 裂縫寬度量測

裂縫寬度量測一般在 RC 構造物表面明顯處進行，基本上選取 2 至 3 處應用裂縫計或輔以目視計量測確認其裂縫寬度，但需注意若受污染的裂縫實際寬度會較量測寬度值大，所以進行裂縫量測應注意在此視覺上錯覺。

2. 超音波量測裂縫深度

超音波波速檢測法(Ultrasonic Pulse Velocity Method)即在待測物體上的一點發

出超音波脈衝(Ultrasonic Pulse)，在量取從這一點傳至另一點所需的距離，試驗主要包含產生及傳導脈衝進入混凝土(脈衝發射器、傳送器)，及精準的量測脈衝通過混凝土的歷時，兩大部分。由於超音波經過空氣層僅可傳送非常少的能量，因此當超音波通過開裂面或空隙時，透過空氣層傳送的能量可忽略。且當開裂面的投影面垂直於傳播路徑，大於傳送器的區域時，脈衝會在瑕疵的周圍產生繞射。如此，波的歷時將會比完整無瑕疵的混凝土來的大，因此利用此種特性便可迅速的指出混凝土內的瑕疵。超音波檢測表面裂縫之示意如圖 2.1 所示。

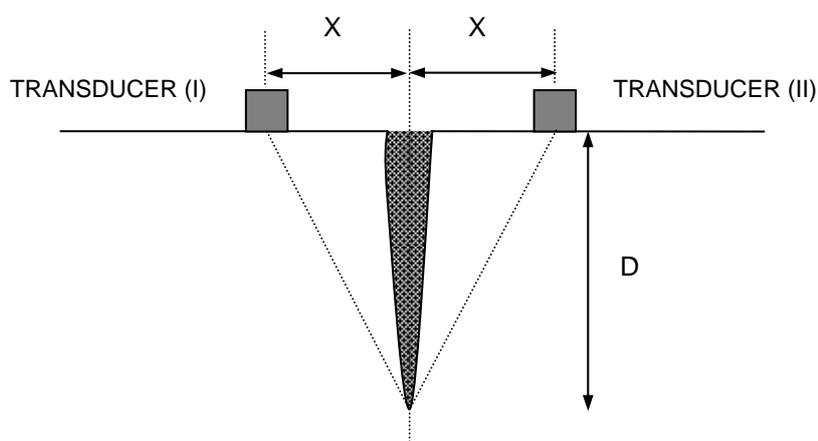


圖 2-1 超音波檢測表面裂縫之示意

3. 敲擊回音法

敲擊回音法(Impact-echo)乃在量測混凝土表面孔隙及表面裂縫深度，利用機械性敲擊方式產生暫態應力波動，並將其導入物體內，該應力波動包含表面波(R-wave)、縱波(P-wave)及橫波(S-wave)，其中表面波的傳動是沿著物體表面以遠離敲擊點的方式向外擴散，縱波及橫波如遇到物體內部的瑕疵(如裂縫、孔隙)或物體邊界將被反射回去，此反射波回到敲擊面時會產生表面位移，因此利用表面放置訊號接收器(receiver)可監測到此位移反應。此一位移可用來決定縱波再敲擊面與反射面間來回一趟所需時間，而去推算出反射介面的深度。簡言之敲擊回音法量測表面裂縫深度，主要是靠裂縫尖端之繞射波與版頂面之反射波來回傳動，所產生之共振現象。敲擊回音法偵測表面裂縫試驗儀器配置如圖 2-2 所示。

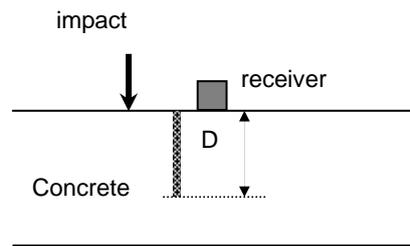


圖 2-2 敲擊回音法偵測表面裂縫試驗儀器配置

4.改良式敲擊回音法

改良式敲擊回音法為敲擊回音法的延伸，此法是根據分析敲擊回音試驗所得資料，考量如遇幾何邊界較多且接近之結構，或內含瑕疵之物體，欲自位移波形上辨讀波的到達時間是非常困難費時，故將記錄到的數位化波形利用快速傅利葉轉換技巧(FFT)轉換到頻率領域上做分析，因此可簡單且快速由頻譜上做辨讀與分析。且此法同時也考量當繞射波傳回至敲擊面時會產生擾動，為能精確測得繞射波到達時間，因此於裂縫兩邊各放置一接收器(receiver)監測擾動反應。改良式敲擊回音法偵測裂縫深度試驗儀器配置如圖 2-3 所示。

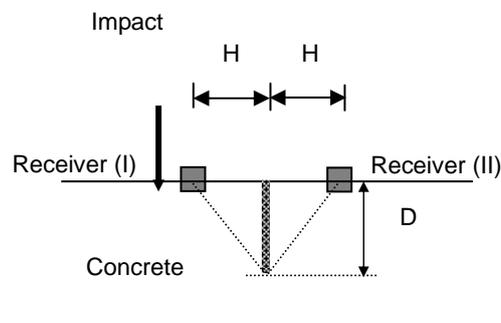


圖 2-3 改良式敲擊回音法偵測裂縫深度試驗儀器配置

5.Ohtsu and Yunoo 法

此法主要是利用頻譜反應來量測表面裂縫深度之方法，試驗方法為在距離裂縫 5 cm 處，配置一個訊號產生器及一個訊號接收器，由訊號產生器發出頻率為 1kHz 變化至 20kHz 之固定振幅正波，導入測試物體，再由訊號接收器感應在某一特定頻率下之輸出訊號，以 X-Y 座標方式，將輸出訊號與頻率關係繪出，即得頻

譜反應。但該法應用尚有困難之處待解決。Ohtsu and Yuno 法以頻譜檢測表面裂縫之示意如圖 2-4 所示。

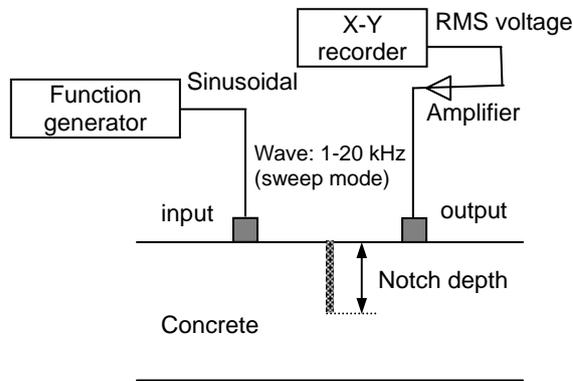


圖 2-4 頻譜檢測表面裂縫示意(Ohtsu and Yuno 法)

6. 相位變化法

此法以繞射波波前之相位變化原理，來量測混凝土表面裂縫之開裂深度，試驗方法為令波源至裂縫開口處距離為 a ，接收器至裂縫開口之距離為 b ，試驗時， a 固定， b 變化，觀察繞射波波前之相位變化情形，再以二為繞射波理論求出 α 與 θ 之關係曲線，進而求出裂縫深度。相位變化法量測裂縫深度示意如圖 2-5 所示

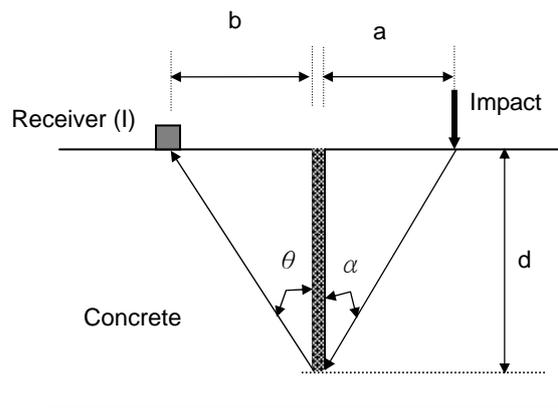


圖 2-5 相位變化法量測裂縫深度示意

破壞原因及機理

混凝土內部孔隙或裂縫會使外界水分、氯離子及二氧化碳等有害因子可滲入

內部造成混凝土劣化或鋼筋腐蝕，使得結構物承载力下降、使用性受到影響。因此混凝土從材料準備、配比拌合、施工養護受外力作用過程及暴露環境條件皆會影響其耐久性，影響因素與說明如下所述六項：

1.施工作業因素

施工作業或施工技術會影響到混凝土劣化的速率，施工作業包括混凝土的水灰比、坍度及保護層厚度控制、搗實、養護的過程。保護層一般在設計時均由規範依據構件型式及位置，暴露環境加以規定，然而常因施工者未按圖施工或未謹慎施工，以致保護層厚度不足。而搗實不足，會有蜂窩孔洞現象發生；搗實過度，則會造成泌水及析離的現象。養護對混凝土的水化完全程度有相當的影響，養護時間愈長，則水化愈完全，混凝土中的孔隙被填塞也愈多，緻密性及強度也愈高。

2.水灰比因素

水灰比為影響混凝土品質最主要因素之一，同時亦決定水及有害因子的滲透性，當混凝土的拌和水量超過水泥水化的需水量時，多餘的用水會在混凝土內形成毛細孔隙而增加混凝土的滲透性。通常水灰比小，混凝土之品質良好，緻密性高、強度也較高，則水與有害因子不易滲入，水灰比愈高則混凝土滲透性愈高，愈易讓水分、氯離子、氧氣及二氧化碳等有害物質侵入而促使鋼筋腐蝕。

3.化學摻料因素

使用於混凝土中的摻料種類甚多，基本上大多為有機物材料，對鋼筋較無腐蝕影響，若使用減水劑、強塑劑和輸氣劑等具有減水功能而降低水灰比時，摻料即具有良好的抑制鋼筋腐蝕的功能。使用波索蘭材料時會與氫氧化鈣結合而降低鹼性強度(pH 值)，理論上 pH 值降低似乎會使中性化程度增加，而使得鋼筋更加容易腐蝕，但是實際上由於波索蘭反應的影響而生成更多細小 C-S-H 膠體填充孔隙，使得混凝土的緻密程度增加，滲透性降低，鋼筋更加不易腐蝕。

4.粒料級配因素

粒料對於腐蝕的影響主要是在於粒料的粒徑大小，粒料的粒徑愈小，在粒料周圍所能產生的縫隙就愈少，混凝土就會較為緻密，滲透性就會較小，相反粒徑愈大滲透性愈大，將來對於腐蝕發生的機率也愈大。另一方面，粒料的級配不良，會造成混凝土產生泌水及析離的現象，將會形成水、氯化物、氧氣和二氧化碳等

有害物質侵入的路徑，進而促使腐蝕的進展。若粒料取自於海岸線或挖泥之堆積場，則可能含有硫化物或氯化物，而有害鋼筋及混凝土。

5. 粒料性質因素

粒料影響混凝土耐久性質影響可分為物理作用與化學作用兩部分探討。以物理方式影響混凝土品質包括：凍融膨脹、暴露極端溫度乾濕循環、高溫火害、表面磨損(沖蝕、穴蝕)、載重破壞、體積變化。其中表面磨耗、載重破壞等因素導致劣化，皆因為粒料本身強度硬度不足，及粒料與界面漿體鍵結性差。以化學方式影響混凝土品質包括：鹼矽粒料反應、硫酸鹽侵蝕、酸侵蝕、溶解與析晶。詳述敘明如：

(1)磨損：主要原因係由於快速流水的孔蝕作用、水中的摩擦物質、狂風強吹的磨損及交通工具的衝擊。通常會造成混凝土表面形成洞穴，這些洞穴會充填著水蒸氣，與混凝土表面反覆接觸後，會形成洞坑，即所謂的孔蝕，造成混凝土結構物的破壞。

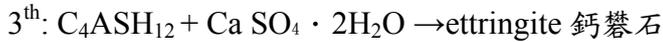
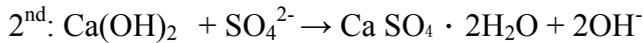
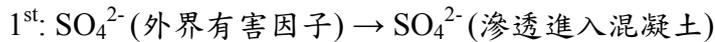
(2)凍融：在混凝土結構物中，由於水泥漿體孔隙體積多且孔隙較小，所以較易受到凍融作用之影響。當溫度低於 0°C 時，混凝土中的水份大約在 -5°C 時會形成冰晶體，而導致體積膨脹約 9%，導致混凝土孔隙內部產生膨脹壓力，造成水泥漿體局部破裂。若粒料體積較大，具有比重大、硬度高特性，有利於抗浸蝕、沖蝕；粒料體積較小，具良好鍵結性，有利於抗穴蝕、孔蝕。凍融膨脹、暴露極端溫度乾濕循環、高溫火害等因素，為粒料熱膨脹與冷收縮係數過大或與漿體差別太大，導致粒料界面破裂。

(3)鹼粒料反應：粒料中含有矽質的成分，可能會與水泥漿體或外在之鹼性物質產生反應，而進入混凝土內部孔隙結構，稱之為鹼粒料反應。

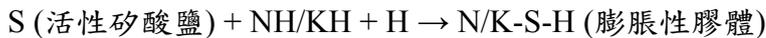
6. 水泥因素

(1)硫酸鹽反應：水泥中的鋁酸三鈣(C_3A)對氯離子有吸附作用，即鋁酸三鈣會與氯化物形成單一氯鋁酸鈣水化物，而使氯離子的濃度降低，腐蝕程度減少。但若鋁酸三鈣含量過多，則再與硫酸根離子作用時，則可能會造成混凝土內鈣鈣石的二度膨脹破壞，而使混凝土產生裂縫，致使鋼筋腐蝕。為減少硫酸鹽類對混凝土的侵蝕，故水泥中鋁酸三鈣含量應愈少愈佳，因此，波特蘭第二型水泥(含鋁酸三鈣量 6%)較波特蘭第一型水泥(含鋁酸三鈣量 11%)具抗硫酸鹽之侵蝕。

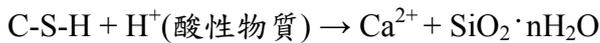
當來自週遭環境之(地下水或海水)硫酸根離子(SO_4^{2-})，滲入混凝土後，將會造成硫酸鹽侵蝕。其化學反應依序分為三個階段：



粒料的活性矽酸鹽與水泥中的鹼鹽(NaOH/KOH , NH/KH)反應，以及硫酸鹽侵蝕生成鈣礬石皆會使混凝土體積膨脹，產生結晶內應力破壞混凝土強度。其中鹼粒料與硫酸鹽侵蝕化學反應式依序為：



(2)溶解析晶：溶解析晶為混凝土中失去 CH 鹼性物質，水化作用停止及強度發展惡化。混凝土中 Ca^{2+} 被酸性物質侵蝕溶解生成氯化鈣(CaCl_2)、硫酸鈣(CaSO_4)、醋酸鈣、重碳酸鈣促使透水孔隙率增加，讓有害物質更加容易侵入混凝土，酸性物質侵蝕化學反應式為：



修復材料與施工方法

修復非動態裂縫，因該裂縫位置屬於非反覆載重構件上，表面裂縫寬度約為 1 mm 範圍通常以水泥漿體(cement grout)修復。當裂縫延伸至混凝土構件時，甚至表面可見裂縫寬度已經大於鋼筋尺寸時，無論該範圍產生任何細微裂縫皆應以聚合物塗封(polymer sealing)方式修復。該類型修復工程通常使用聚酯樹脂(polyester resin)以提高鋼筋抗腐蝕能力，另外，使用聚合物加壓注膠(polymer gravity/positive pressure injection)或真空注膠(vacuum assisted injection)可以達到較完全的修復。一般混凝土裂縫之修補材料分類如下所述：

1. 灌注工法專用添加劑

特殊添加劑於在混凝土中可使水泥在初凝之前膨脹，適用於預力套管灌漿、疏鬆地層或岩盤洞隙填縫灌漿。

2. 灌注工法專用微水泥

雙成分包括微水泥和防腐蝕抑制劑，可填補裂縫寬度介於 0.2 mm - 3.0mm 以上的裂縫。

3.低黏度裂縫灌注工法專用環氧樹脂

可填充和密封結構元件的空洞和裂縫，如橋樑、工業用廠房、樑柱、基礎、牆、樓版及儲水用結構物等，不僅可形成一個有效的阻絕層，以防止水份經由裂縫滲入而產生侵蝕現象，且可提供良好的接著效果。

4.含填充料之防水環氧樹脂

屬注入型樹脂用來以高壓注入填充和裂縫寬度大於 0.5 mm 之密封裂縫，接著混凝土和鋼鐵的填充水泥。該材料不只為防水或預防侵蝕的有效媒介，同時可黏結混凝土結構元件。

環氧樹脂系裂縫灌注材料在工程上的應用極廣，依 ASTM C881-90 之規定，環氧樹脂在混凝土工程上之應用，共分為七類(type I~VII)，三級(grade 1~3)及六型(class A~F)。其中 type I~VII 主要係依用途不同而分。現分述七類不同用途之環氧樹脂材料如表 2-3 所示。

表 2-3 環氧樹脂系裂縫灌注材料分類

類別	用途說明	備註
Type I	應用於硬固混凝土與硬固混凝土間之黏結，膠結面不承受載重者。	或硬固混凝土與其他材料間，如木料、金屬、石磚、塑膠材料等。
Type II	應用於新拌混凝土與硬固混凝土間之黏結，膠結面不承受載重者。	
Type III	應用於固混凝土面上加設之抗滑，耐磨等面層材料。	如耐磨地磚
Type IV	應用於硬固混凝土與硬固混凝土之黏結，膠結面須承受載重者。	或硬固混凝土與其他材料間之黏結，如木料、金屬、石磚、塑膠材料等。
Type V	應用於新拌混凝土與硬固混凝土間之黏結，膠結面須承受載重者。	
Type VI	應用於預鑄元件或分段加設之後拉預力元件間之粘結與封膜，膠結面須承受應力者。	
Type VII	應用於預鑄元件或分段架設元件間之粘結與封膜，膠結面不須承受應力者。	

(ASTM C881)修補材料性能驗證試驗法

環氧樹脂接著劑基本性能試驗包括：粘滯度、膠凝時間、粘著力、斜面剪力、變形溫度、乾縮係數、壓力屈服強度、壓縮模數、抗拉強度、斷裂時張力延長度等試驗，以及 2 天及 7 天試體抗壓強度、抗拉強度、伸長率、降伏強度試驗。

環氧樹脂灌注入混凝土裂縫，主要目的確認裂縫是否填滿環氧樹脂，驗證方法如下所述：

1. 目視法

目視注射針筒是否殘留環氧樹脂。

2. 鑽心檢驗法

沿裂縫位置鑽心，觀查裂縫是否確實填滿環氧樹脂。若針筒無殘留環氧樹脂，表示裂縫尚未填滿環氧樹脂，應抽換注射針筒再加注入環氧樹脂。

第二節 混凝土剝落

造成混凝土剝落等劣化因素影響修復材料與修復技術之選擇甚鉅，因此正確驗證與決策判斷為修復混凝土剝落工程前必須詳加確認之重點工作。混凝土剝落主要因素分為力學破壞或鋼筋腐蝕造成，前者修復方式簡便易處理，後者則必須分析探討是否為腐蝕因子存在於混凝土材料中，亦或 RC 建築物於使用期間受外界環境影響導致混凝土環境中性化，以及腐蝕因子穿透、滲透侵入混凝土構件致使鋼筋表層鈍化膜喪失造成腐蝕膨脹。

診斷技術與檢測工作

1. 紅外線法

此法原理為利用飾材或混凝土保護層剝落部份會形成空氣層，致使比健全部分之熱傳導率小而在牆面溫度上升或下降時會形成溫差，而以紅外線檢測裝置測其溫差，以調查飾材或混凝土保護層有無鼓浮之法。

2. 敲擊法

敲擊法以試錘等敲擊牆面，由其反應之異常音可檢知預剝落位置，該檢測方法簡單，但隨試驗技術人員之熟練度易造成判斷差異或錯誤。

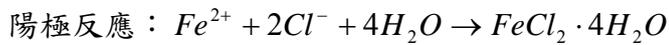
破壞形式及原理

1. 力學破壞因素

剝落是混凝土結構物呈片塊狀之脫落現象，主要成因有二，分別為力學方面的混凝土拉力超出容許值及腐蝕方面鋼筋鏽蝕，本節主要探討力學破壞因素，因此依據力學破壞導之致剝落程度概分為兩類解釋，分別為(1)小型剝落：通常是由作用於混凝土之水平或斜向力量所造成，深度未達 25 mm，淨寬通常小於 150 mm；(2)大型剝落：其成因與小型剝落無異，但更嚴重，其可能是因巨大地震力或外力使結構物變形超出容許值，而產生大型片塊狀剝落，深度達 25 mm 以上，淨寬大於 150 mm。

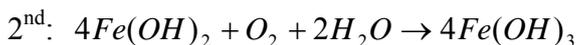
2. 鋼筋腐蝕因素

RC 結構之鋼筋於正常狀況下，係在高鹼性環境中不易腐蝕，此因暴露於高鹼性環境中的鋼筋處於鈍化狀態(passive state)，因此鋼筋鈍化膜的破壞為鋼筋腐蝕的先決條件。鋼筋鈍化膜破壞後，假若混凝土在一定的濕度及氧氣環境下，即使無有害物質的侵入，混凝土中的鋼筋也會腐蝕。二氧化碳與氯化物是破壞鋼筋鈍態膜主要因素，當氯離子濃度過高，即使鋼筋處於高 pH 值環境中，鈍態膜亦會被破壞，Glasse 提出陽極 Fe^{2+} 與 Cl^- 、 OH^- 反應後會產生淺綠藍色易溶性的 $FeCl_2 \cdot 4H_2O$ 其化學反應為：



綠鐵鏽會往含氧量較高的混凝土孔隙移動，分解為褐鏽 $Fe(OH)_2$ ，同時放出 H^+ 、 Cl^- ，由此反應可知(1) Cl^- 並未參與電極上的氧化還原反應，且 Cl^- 在腐蝕過程中也不會消失，它只會對腐蝕起催化作用，加速鋼筋腐蝕；(2) 鋼筋上若有局部氯化物濃度較高時，局部鈍化膜被破壞，形成大陰極小陽極的腐蝕電偶，此時鋼筋會產生快速的孔蝕效應，對於預力構件影響尤為顯著；(3) 氯化物的吸濕性維持混凝土內部孔隙含水量。此三者的不斷循環，使得腐蝕持續進行。

發生在鋼材上的陽極反應，不只產生鐵離子而已，其二價鐵離子會進一步氧化成三價鐵離子，所以鐵離子在陽極的化學反應為：



鐵鏽的體積膨脹隨著鐵的氧化程度而變大，鐵鏽增加鋼筋與混凝土交界區體積膨脹 2~7 倍。膨脹應力超過混凝土強度時，混凝土就會產生裂縫(cracking)和剝裂(spalling)現象。由上述發生腐蝕化學反應式中說明鋼筋腐蝕條件如下：(1) 鋼筋金相組織具不均勻性，且混凝土為一多孔隙，不均質、非等向性材料，因此環境介質(如水分、氧氣、二氧化碳)皆有可能透過混凝土保護層達到鋼筋/混凝土的界面，然而環境介質到達界面時濃度難達到一致性，致使一根鋼筋上，會同時具備電位較低(陽極)及電位較高(陰極)兩區域；(2) 陰極要有足夠的氧化劑(通常為 H_2O 、 O_2)與陽極的自由電子生成 OH^- ，換言之，在混凝土為乾燥的狀態即電阻係數(resistivity)大於 20000 Ω -cm 時或相對濕度小於 60% 的乾燥室內，鋼筋是不會產生

腐蝕現象。

依據中國土木水利學會(土木 402-88)「混凝土工程施工規範與解說」3.3.3 規範規定，預力混凝土與鋼筋混凝土等結構物，其允許最大氯離子含量分別為 0.15 kg/m^3 與 0.30 kg/m^3 。

修復材料與施工方法

修復工程首先必須移除鬆散結構、進行必要之鋼筋防蝕處理與界面的前處理，再以水泥質材料(cement-based materials)或樹脂材料(resin-based materials)等進行表面封層。

傳統水泥砂漿修補材料黏結強度低、乾縮變形大、抗滲性、抗裂性較差，造成使用後產生缺點如開裂、脫落等，易造成結構體滲水、混凝土碳化和鋼筋腐蝕等問題，其使用範圍受到很多限制，因此近來發展出應用有機聚合物混合水泥或粗/細粒料製成聚合物混凝土，按其組成方式與製作過程概可分為：

1. 聚合物混凝土(polymer Portland cement concrete, PPC)

聚合物水泥混凝土亦稱為聚合物波特蘭水泥混凝土，以聚合物原料取代部分水泥，再以一般混凝土拌製方法製成，聚合物能均勻地分布於混凝土內。填充水化產物與粒料間的孔隙，進而改善混凝土的抗滲性、耐蝕性及耐磨性，可用於鋪設無縫地面，也常用於修補混凝土路面、機場跑道等。

2. 聚合物膠結混凝土(polymer binding / polymer concrete, PBC or PC)

聚合物膠結混凝土也稱為樹脂混凝土，完全以聚合物做膠結材料拌製而成，該混凝土黏結强度高、抗滲、抗凍、耐腐蝕，唯其成本較高，適用於須耐腐蝕性佳之工程建築、混凝土的構件及裂縫修復。

3. 聚合物改質水泥砂漿(polymer modify mortar, PMM)

聚合物改質水泥砂漿可應用作為修補材料與防水材料，聚合物水泥防水材料簡稱 PMC 或複合防水塗料或彈性水泥，主要係以丙烯酸酯等聚合物乳液或水泥為主要原料，具有良好的抗滲性、耐水性、耐候性和黏結性，與混凝土、石材、磁磚、鋼材、木材、玻璃等材質介面都有良好的黏結性，特別是能夠在潮濕基層上施工固化成膜。

修補材料性能驗證試驗法

由美國陸軍工兵規範(U.S. Army Engineer Research and Development Center, CRD)參考文獻得知，RC 建築物剝落劣化修補材料使用準則概分為七大項目，進行評估與檢驗修補材料之性能驗證，細項說明示如表 2-4 所示。

表 2-4 混凝土剝落劣化修補材料使用準則

項目	詳細說明
1.修補材料說明書	適用範圍建議、修補效益、使用限制
2.材料組成成分	基本組成材料、SO ₃ 含量(%) [ASTM C563]、鹼含量(kg/m ³)、pH 酸鹼值、空氣含量
3.物理性質	單位重量(kgf/m ³)、新拌濕密度[ASTM C138]、水泥砂漿抗壓強度[ASTM C109]、混凝土抗壓強度[ASTM C39]、水泥砂漿與混凝土抗彎強度[ASTM C78]、水泥砂漿與混凝土直接拉力強度[CRD C164]、水泥砂漿與混凝土彈性模數[ASTM C469]
4.性能試驗	水泥砂漿與混凝土乾燥收縮[ASTM C157]、水泥砂漿與混凝土熱膨脹係數[CRD C39]、抗凍融[ASTM C666 試驗法 A]、水泥砂漿與混凝土壓力潛變[ASTM C512]、水泥砂漿與混凝土快速氯離子穿透[ASTM C1202]、抗硫酸鹽[ASTM C1012]、環片試驗[Ring test]、抗裂縫[German Angle]
5.包裝與儲存	包裝方式說明、容量說明、使用期限、儲放須知
7.修補材料注意事項	混凝土表面前處理、材料拌合方式、使用方式與施工說明、養護方式、廢棄材料清除須知、告知安全注意事項

第三節 建築物滲漏水

RC 建築物滲漏水問題經常發生且難以防範，通常以目視即可判斷 RC 建築物是否存在滲漏水缺失，假若有水氣或水滴滲透穿過混凝土疏鬆孔洞或裂縫，則此區域易產生白色碳酸鹽類白樺風化作用(leaching and efflorescence)，亦或附著於混凝土表面之油漆或磁磚產生水氣膨脹剝離。

破壞原因及機理

風化白樺之鹽基化合物，乃由混凝土之析出物與水氣或大氣中之二氧化碳結晶反應形成，鹽基化合物主要為碳酸鈣，另外亦包含硫酸與碳酸化合物(鈉、鉀或鈣)。風化白樺造成混凝土產生大量析出物，導致孔隙率增加而降低混凝土強度，同時脆弱區域更容易遭受外界化學物質的侵襲。析出風化屬於混凝土耐久性之化學侵蝕範疇，風化白樺經常發生於水可連續或間斷滲透穿越並到達混凝土表面，亦或混凝土表面暴露於乾與濕輪替環境中。

混凝土水化產物中之氫氧化鈣($\text{Ca}(\text{OH})_2$, CH)可以容易地由混凝土中析出，而本質不溶解的 C-S-H 膠體，除非長時間暴露於嚴酷的析出環境中才會退化，因此高 CH 含量之漿體較可能發生析出白樺風化作用。析出反應速率與滲透水之可溶性鹽基化合物多寡有關，所以軟水(如:雨水)中之可溶性鹽基化合物較少，使得危害混凝土程度較硬水(含鈣離子)大。溫度效應亦為一影響因素，因為 CH 於冷水中較易溶解，因此冷水環境下較溫水危害大。析出物普遍產生於水可以滲透過之混凝土面，特別於受壓力環境下。混凝土不會於流水通過之表面產生析出反應，除非表面受到懸浮於水中之固體物質進行物理磨蝕作用。

水泥牆壁遭外界水氣入侵至水泥中之孔隙裂縫，發生酸鹼中和產生毛狀白色碳酸鹽結晶體(碳酸鈣為主)，當長久淤積於牆面時，將導致牆面塗料壁紙起泡、鼓起、碎裂、剝落。當牆壁於雨季漏水、滲水或建築物通風不良所累積大量的水氣時，再遇上空氣中的二氧化碳或二氧化硫等酸性氣體，即形成酸性水氣，進而在水泥牆上凝結成酸性水露(pH 值達 4.0 如酸雨一般)。酸性水氣與水露滲透至防水不良或有裂縫之牆壁內，進而與水泥、砂、磚牆中的鹼性分子(如鈉、鈣、鎂、鉀)產生中和作用，再與空氣中的二氧化碳結合成白色針狀或粉末狀結晶體。

若混凝土表面存在大量密集白色斑痕，對混凝土強度是一種嚴重的傷害，基本上滲漏水的現象取決於混凝土裂縫的大小定之。漏水的形式可分為點、線、面三種方式，『點』如預留管孔，『線』如施工縫及裂縫、伸縮縫，『面』如蜂窩麻

面。

修復材料與施工方法

針對 RC 建築物滲漏水問題，傳統修復方法以表面塗封居多，依照正水壓或負水壓狀況選擇表面密封材料(surface sealers or coatings)，表面密封材料包括含溶劑(solvent-based)塗層、無溶劑(solvent-free)塗層、水性(water-borne)塗層與加勁(reinforced)塗層等。

根本解決的方法要從滲漏水源頭徹底處理，將防水工程處理完成，再將破損的水泥刮除並重新批土粉刷。如果能在房舍當初建造時，即早著手做好防水處理工程，可減少室內潮濕造成壁癌的發生，並減少事後補救的麻煩。

混凝土表面處理修復技術為快速與經濟之建築物滲漏水修復方式，亦可有效改善舊有建築物的耐久性，具有多項優點包括原料取得容易、成本低廉、施工快速與方便等優點，近年來便發展出多種可用於混凝土表層塗封的保護材料，以阻擋外在水氣和氯離子的滲入。常用於修復 RC 建築物滲漏水之混凝土表層塗封材料，依其機制主要可分為下列兩種：

1. 滲入式塗封劑(penetrating sealer)

主要利用本身所帶的有機化合物群互相鍵結，並沿著毛細孔隙內部表面形成疏水(hydrophobic)的緻密組織。而這類塗封方式又可細分成沒有薄膜產生(non film-forming)與有薄膜產生(film-forming pore-sealing)兩種形式。現今水泥質矽酸質系修復材料由德國化學家 Lauritz Jensen 於 1942 年發明，1960 年代歐美及日本地區引進發展使用。其組成材料包括波特蘭水泥、矽砂和活性矽化學觸媒化合物，主要用於混凝土結構體之防水、強化與保護作用；使用時只須依一定比例與水調合後塗佈於混凝土表面。以加拿大化學公司於 1969 年生產之結晶滲透防水材為例，包括主要成份與輔助/次要成份；其中，主要成份係由波特蘭水泥、矽砂、觸媒化合物(catalytic chemical compound)等無機粉所組成。輔助成份則稱之為養護劑，具有保濕作用延緩水氣蒸發，保存塗層內的濕度，使其在充分濕潤的條件下進行化學反應。矽酸質材料之防水原理並非如薄膜、片狀等防水材料，只作為表面材料防止有害因子滲入混凝土內，而是利用混凝土多孔特性，以水為媒介，促使矽酸質材料的活性物質快速滲入於混凝土溶液內，再與原混凝土中水化物進行水化反應，進而產生不溶於水的針狀結晶體，填充混凝土毛細孔，有效增加混凝

土的水密性，達到防滲、防潮的效果。含觸媒化合物催化劑之防水材料塗抹於混凝土表面時，會於混凝土的孔隙溶液中快速的擴散成為 Ca^{2+} 及 X^{2-} ，由於擴散混凝土中存有矽酸根離子 (SiO_3^{2-})， Ca^{2+} 會與 SiO_3^{2-} 反應成結晶物 $\text{CaSiO}_3 \cdot (n\text{H}_2\text{O})$ ，結晶填充於孔隙並與混凝土結為一體。另外 X^{2-} 離子會於混凝土孔隙溶液中移動，與水泥水化生成物 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 接觸時生成 C-S-H 結晶。由於矽酸質材料滲入混凝土內遇水可釋出鈣離子與原混凝土內之矽酸根離子及 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 發生反應，生成樹枝狀結晶體填充於混凝土孔隙及裂縫，達到防水、保護鋼筋之目的。

2. 表面封層(surface coating)

固體含量多的聚合物聚合物溶液，除可堵住孔隙外，亦可在水泥質材料表面生成一層較薄且連續的護膜(thin continuous film)，表面封層係利用乳劑(emulsion)或乳膠(latex)在水泥質材料表面製造一層相當厚度且緻密的不透水層(thick dense layer)來防止水汽進入，但這類物質並不進入孔隙內產生堵塞的作用。而以緻密的塗料或特殊的環氧樹脂砂漿(epoxy mortar)披覆在水泥質材料表面也屬於表面封層的保護方式。混凝土中使用摻料，以增加緻密性來改善透水性，亦可於混凝土表面使用塗封材料，來提昇混凝土之耐久性。

聚合物水泥防水材料(polymer modified cementitious waterproofing coating, PMC)為表面封層修復材料，亦稱為複合防水塗料或彈性水泥，主要係以丙烯酸酯等聚合物乳液或水泥為主要原料，加入其它外加劑製得的建築防水塗料，其對環境和人體健康無害。具有良好的抗滲性、耐水性、耐候性和黏結性，尤其與混凝土、石材、磁磚、鋼材、木材、玻璃等都有很好的黏結性，特別是能夠在潮濕基層上施工固化成膜。聚合物水泥防水塗料根據其性能分為 I 型和 II 型兩種型號。其中 I 型拉伸強度 ≥ 1.2 MPa，斷裂伸長率 $\geq 200\%$ ，潮溼基面黏結強度 ≥ 0.5 MPa，主要用於有較大變形的建築部位，如屋面、牆面等部位；II 型拉伸強度 ≥ 1.8 MPa，斷裂伸長率 $\geq 80\%$ ，潮溼基面黏接強度 ≥ 1.0 MPa，主要用於長期浸水環境下的建築防水工程，如地下室、浴廁間、游泳池、蓄水池、地鐵、隧道等工程防水。

修補材料性能驗證試驗法

1. 抗化學侵蝕試驗

本試驗參照 ASTM C88 進行水泥砂漿抗化學試驗，分別將試體浸於 3.5% NaCl

(pH=5.5)、3% NaOH (pH=12.4)及飽和 Na_2SO_4 (pH=8.7)溶液中進行循環試驗，將試體浸置於試驗溶液中 24 小時後取出至溫度 $100 \pm 5^\circ\text{C}$ 環境中烘乾 24 小時視為 1 次循環，經 5 次循環後紀錄水泥砂漿試體重量變化情形。

2. 透水試驗(JIS)

透水試驗參照日本 JIS-A 6101 規範進行，本試驗藉由量測試體在定水壓下從試體表面至中心之透水量，以達西定律求得混凝土之透水係數。試驗方法簡述如後：將混凝土製成 $\phi 10 \times 20 \text{ cm}$ 中空之圓柱試體，中空部分圓柱直徑 1.77 cm，試驗儀器與試體外觀如圖 2-6 所示，拆模後分別於第 1、7、14 天齡期，利用噴塗或刷塗適量之修復材料於混凝土試體表面，待修復材料硬固或穩定後繼續置於飽和石灰水中養護至齡期 28 天，待混凝土試體達 28 天齡期後由飽和石灰水中取出並置於室溫環境 7 天後進行透水試驗，混凝土材齡共 35 天。



圖 2-6 透水試驗儀外觀與試體外觀

試驗壓力以定水頭壓力 10 kgf/cm^2 進行透水試驗，每 4 小時記錄流出水量 (cm^3)，試驗時間為 48 小時。透水係數 K 可由下式表示：

$$K = \frac{\rho \log \frac{r_0}{r}}{2\pi H} \times \frac{Q}{P_0 - P_i}$$

其中 K ：滲水係數(cm/sec)

ρ ：水的單位重(kg/cm^3)

r ：試體之半徑(cm)

r_0 ：試體中央孔之半徑(cm)

Q ：單位時間流量(cm^3/sec)

P_0 ：試體外側之壓力(kgf/cm^2)

P_i ：試體內側之壓力(kgf/cm^2)

3. 透水試驗(CRD)

CRD-C 48-92 為美國陸軍工兵署之防水檢測方式，其原理為利用一定之水壓注入混凝土試體內，玻璃圓筒內下降之刻度，即為混凝土所能滲入之水量，再將下降刻度之水量建議代入 Darcy 公式，即可求出其滲透係數。試體準備：(1)試體側面周圍塗封比例為 7：3 的石臘和松香和 6.4 mm 厚的高強度膠泥；(2)試體上層放置膠環並將其放置於金屬容器中；(3)於試體與金屬容器間注入 110 °C 的瀝青，以防止施加水壓時，水從側面塗封材料（石臘、松香及高強度膠泥）中滲流出來。

操作程序：(1)將試驗系統壓力先降至(9.8×10^4 Pa)，系統內必須裝滿 $23 \pm 1^\circ\text{C}$ 的水，直到真空計顯示(6.75×10^4 Pa)；(2)先施加 100 psi (0.69 MPa) 的壓力到貯水容器(water reservoir)，此時將閘門先打開，五分鐘後再將系統的壓力提高至 200 psi (1.38 MPa)；(3)每 10 分鐘記錄 gage glass 直到滲流量穩定，記錄 14~20 天。透水試驗設備及試驗原理係參照 CRD C48-92 規範進行，其設備包括氮氣鋼瓶、儲水器、油壓錶、進水閘門、放水閘門、放氣閘門、入氣閘門，如圖 2-7 所示。其最大壓力為 $50 \text{ kg}/\text{cm}^2$ 。



圖 2-7 透水試驗設備(CRD C48)

4. 透水試驗(CNS)

係參照 CNS 3763 標準進行，將試體上下面中央處置放一塊中央直徑為 5 cm 透水圓孔，厚度 1 cm 以上之橡皮襯墊並緊塞後，由試體上方施加水壓 1 小時，如為水泥砂漿用應加水壓 9.8 kPa，如係混凝土用則採水壓 294.0 kPa，其結果以下式表示之：

$$\text{透水量(g)} = m_2 - m_1$$

式中， m_1 = 試體乾燥後，於室溫下存放 1 小時後試體質量。

m_2 = 施以 9.8 kPa 及 294.0 kPa 之水壓 1 小時後試體重。

5. 吸水率試驗法

本試驗係參考 ASTM C642-97 硬固混凝土吸水率試驗進行實驗，首先將養護的試體取出後直接置入烘箱(100°C~110°C)中烘乾，待 24 小時後取出在室溫(20°C~25°C)下冷卻並秤重，待此值相差在 0.5%時記錄其重量(A)；然後將試體置於水中，每格 48 小時取出並將表面擦乾後秤重，待實驗值相差在 0.5%時，視為試體以達飽合狀態，記錄其重量(B)並帶入下列公式求出試體之吸水率。

$$\text{試體吸水率 (\%)} = \left(\frac{B-A}{A} \right) \times 100\%$$

式中 A：爐乾試體重量(g)

B：試體飽合狀態重量(g)

6. 初始吸水速率試驗

初始吸水速率試驗(initial surface absorption test, ISAT)是評估試體中水分藉毛细現象傳送的一項簡便試驗，因此也可利用來評估試體的表面性質。試驗時，將爐乾的試體置入水槽，試體底部應墊高儘量使整個底面浸入水中，水面高度不應超過試體底部 5 mm，同時可在試體側面以防水材料塗封，避免水由側面孔隙進入，接著分別在靜置 1、4、9、16、25、36、49 及 64 分鐘後取出試體，以濕布擦拭底部後秤重。計算公式如下：

$$a = \frac{\Delta m}{Af(t)}$$

式中，a：吸水速率(g/m²tⁿ)

Δm ：吸收水量(g)

A：接觸水面積(m^2)

Af(t)：時間函數，通常 $f(t) = (t)^{1/2}$ 亦即 $n = 1/2$ 。

第四節 國內 RC 建築物劣化修復材料應用

混凝土裂縫修補材料

1.環氧樹脂(epoxy resin)

主要針對 RC 建築物之內外壁、柱、樑與天花板等小於 0.5 mm 之微裂縫(hair crack)進行修補。主要特性包括(1)黏度低；(2)滲透性佳，可注入修補微細之裂縫；(3)具有高強度之接著力；(4)耐水性；(5)耐久性；(6) 依環境條件調整溶質比例，搖變性易控制；(7)垂直面施工垂流；(8)充填性佳，最適用於多孔性材質。

2.無收縮灌漿劑

無收縮灌漿劑屬於水泥砂漿添加為膨脹劑進行灌漿修復大於 0.5 mm 之較大裂縫，主要為 RC 建築物之柱與牆。

3.液體橡膠型聚硫化物

橡膠型聚硫化物(polysulfide caulking)主要針對活動載重所造成之伸縮裂縫進行修補，特性包括(1)流動性佳；(2)搖變性佳；(3)硬固後延展性佳與彈性接著力強；(4)適用於平面之填縫；(5)垂直面施工不垂流。

4.聚氯丁烯系合成橡膠

一般聚合物修補材料使用之聚氯丁烯系合成橡膠為聚偏二氯乙烯(poly vinylidene chloride, PVDC)，應用作為混凝土間之填充與填縫接著用，主要特性包括(1)乾燥速度快；(2)具彈性；(3)耐衝擊；(4)耐水；(5)耐熱性；(6)施工方便。

混凝土剝落修補材料

1.聚合物改質水泥砂漿

一般應用於聚合物樹脂水泥砂漿包括壓克力系乳膠(SA)與 EVA 系乳膠，與普通水泥砂漿相比較，聚合物樹脂水泥砂漿特性包括：(1)流動性增加：因為聚合物樹脂中均含有分散劑使聚合物樹脂微粒均勻分散，同時分散劑對水泥有減水分散效果；(2)具輸氣性：如果分散劑為陰離子型界面活性劑，則會有輸氣效能；(3)增

進保水性：在水化過程中，因為聚合物樹脂微粒充填於毛細孔中及形成薄膜，因此失水現象會減緩；(4)保水性增加，泌水降低；(5)抗凍融性佳；(6)水密性好，防水性優良；(7)乾燥收縮的量減少；(8)撓度、抗折強度顯著增加；(9)耐磨及耐衝擊性增加 10-15 倍；(10)對於藥品、化學品、油資之抵抗力增加防腐蝕；(11)對於磁磚、新舊混凝土、石材、鋼板、玻璃等等材料之接著力增強；(12)抗壓強度可能降低、因輸氣效果使空氣含量增加，抗壓強度降低。

2. 塑鋼土

混凝土專用塑鋼土為液態環氧樹脂添加填充物-石粉拌合製成，主要為建築物表面修飾與局部孔洞之鋼性接縫填補，其他亦可應用於建築結構體內外牆、屋頂、門窗裂縫、水管、磁磚之修補，以及樑柱、樓版鋼筋外露修補，混凝土破損修補。該材料主要特性包括(1)接著性強；(2)乾面、潮濕面、水中，可直接黏附凝固；(3)硬化後堅硬強固；(4)耐高溫；(5)耐酸鹼；(6)修補後可直接油漆。

建築物滲漏水修補材料

1. 彈性水泥

彈性水泥即為混合苯丙烯酸樹脂(styrene acrylate, SA)與普通水泥砂漿製成。

2. 水泥防水劑

水泥防水劑屬於油酯類化合物，添加於水泥漿拌合後直接塗封。國內 CNS 3763(水泥防水劑) 規範針對該類型產品已制定測試方法與標準包括凝結時間、安定性、強度比、吸水比與透水比。

第五節 聚合物改質水泥基修復材料

改質水泥基質材料的方式很多，分別有卜作嵐材料(pozzolans)、纖維(fiber)以及聚合物(polymer)，添加至水泥砂漿中都有不同的效益。卜作嵐材料有飛灰(fly ash)、矽灰(silica fume)以及爐石(blast furnace slag)，在水泥砂漿中添加卜作嵐材料的目的是，可提供細粒料保持良好工作性與粉飾性，而耐久性方面者可提供抗硫性、抗檢粒料反應之膨脹作用、降低滲透性以及降低水化熱；在經濟上可以減少水泥用量同時節省成本。

普通水泥基質材料具有很高的抗壓強度、較大的剛性與較好的耐久性，但存

在凝結與硬化過程中收縮大、抗拉、抗彎強度低、伸長率小以及抗衝擊性低...等缺點。其抗拉強度又是抗壓強度的 1/7-1/10，受拉伸長率只有 0.005% - 0.05%，斷裂功為 30 J/m² - 80 J/m²。隨著水泥基材抗壓強度的大幅提高，乾縮與脆性問題也顯得更為突出。水泥質材料中加入纖維其主要作用如(1)使水泥基材的力學強度提高，例如提高抗壓、抗彎、抗拉強度；(2)在水泥基材中起抗裂作用：當水泥基材在塑性階段時，很容易發生微細裂縫，在硬化過程中則因失水乾縮導致微細裂縫的擴大產生新的裂縫，纖維加入水泥基質材料中可阻止材料中原有裂縫的擴展並延緩新裂縫產生，可使複合材料的抗滲及抗凍等性能增加；(3)提高水泥基材的變形能力：纖維增強水泥基複合材料的抗彎強度，即時基材已出現大量的分散裂縫，仍可繼續承受外力具有延性，由此可見複合材料的韌性與抗衝擊性明顯提高。

聚合物

聚合物基材的種類甚多，分為乳液狀聚合物、再分散聚合物粉末、水溶性聚合物以及液態聚合物，上述四類之聚合物又分許多總類，如下圖 2.8 所示。利用聚合物來作水泥基質材料的改質，其原因有下列幾點：

- (1)減水效果功能，所產砂漿有好的工作性且可降低水灰比減少乾縮。
- (2)可增加混凝土新舊交界處的黏結強度。
- (3)可減少修補砂漿對水、CO₂ 及油類的滲透性，並且可增加抗化學性。
- (4)可增加砂漿的拉力及抗彎強度。

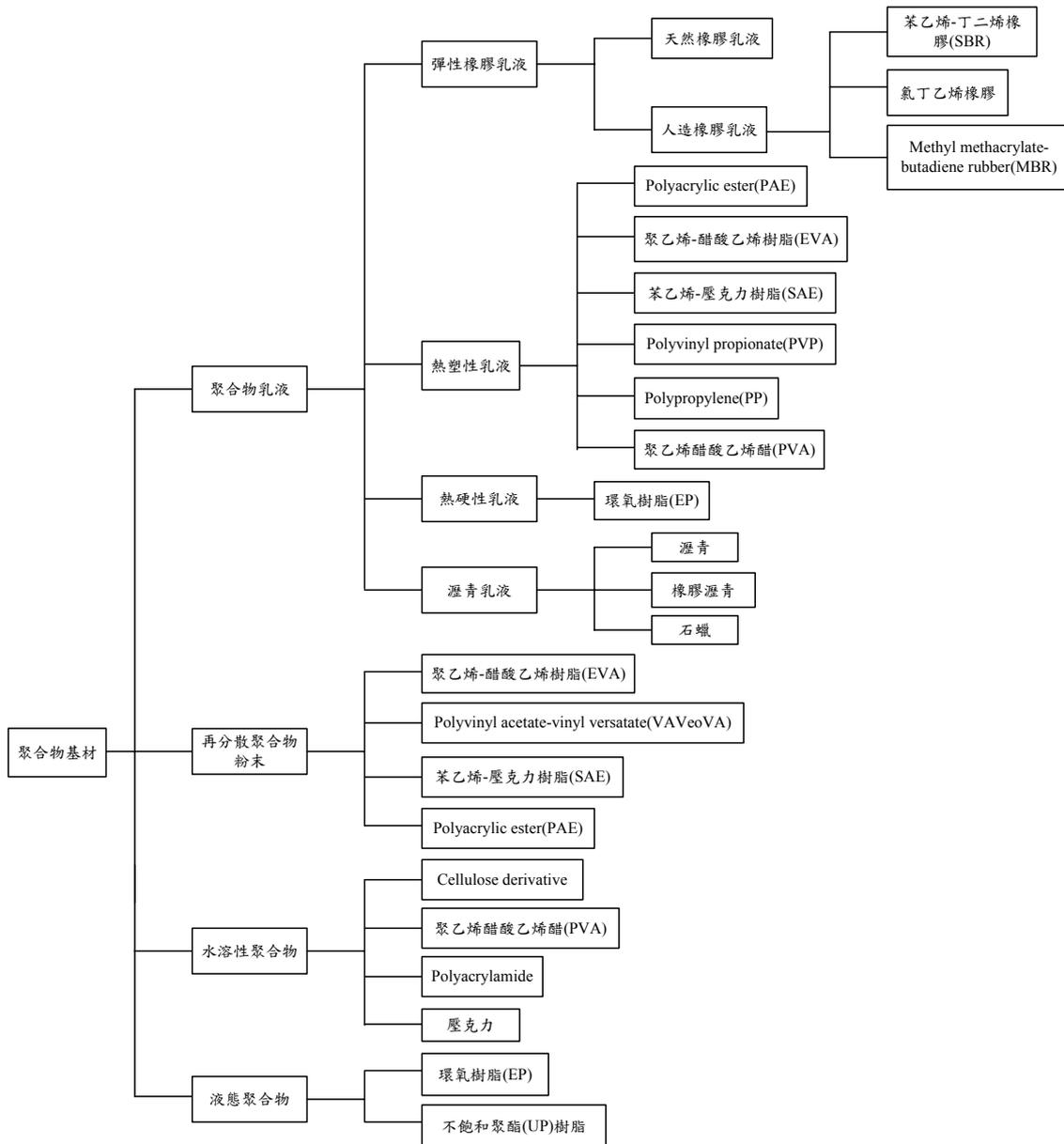


圖 2-8 聚合物基材分類

本研究係將聚合物(polymer)應用在水泥基質砂漿中，來作為改善水泥基質砂漿的缺點，由於水泥基質砂漿本身的黏結強度低、抗彎強度低、抗拉強度低、乾縮大、防水性不佳及多孔性...等。研究計畫利用聚合物作為水泥基質砂漿改質研究，從聚合物中選用三種樹脂類一種橡膠類來做深入探討，分別為苯乙烯-丁二烯橡膠(Styrene Butadiene Rubber, SBR)、聚乙烯-醋酸乙烯樹脂(Ethylene Vinyl Acetate, EVA)及聚乙烯醋酸乙烯羧酸酯(Polyvinyl acetate-vinyl versatate, VeoVA)，本研究使用上述三種樹脂的原因包括(1)增加流動性；(2)增加保水性；(3)降低泌水；(4)抗彎強度增加；(5)黏結強度增加；(6)抗拉強度增加；(7)水密性好；(8)減少乾縮；(9)

抗氯離子滲透；(10)抗中性化。

經由聚合物改質水泥砂漿後，可應用作為修補材料與防水材料，聚合物水泥防水材料簡稱 PMC 或複合防水塗料或彈性水泥。主要係以丙烯酸酯等聚合物乳液或水泥為主要原料，加入其它外加劑製得的建築防水塗料，其對環境和人體健康無害。具有良好的抗滲性、耐水性、耐候性和黏結性，尤其與混凝土、石材、磁磚、鋼材、木材、玻璃等都有很好的黏結性，特別是能夠在潮濕基層上施工固化成膜。

聚合物改質水泥砂漿之材料備製形式與其拌合方式，對施工便利性與品管控制之優缺點如下所述：

(1)乾粉形：在工廠內比照最佳配比調製而成，直接加水使用方便，經過品管生產，品質均勻。

(2)液體形-現場配式：在工地現場師父依建議配比自己配製，施工步驟繁雜，品管難控制，品質不均勻。

(3)液體形-現場添加式：在工廠內僅調好水泥、粒料及其他化學品，現地摻加樹脂乳液及水，施工步驟雖以簡化，但仍需過秤，品質難控制，品質易流於不均勻。

(4)糊狀形：在工廠內已依最佳配比調製而成，可直接使用，乾燥硬化慢，不可用於室外，未添加水泥。

國內外研究文獻顯示，針對聚合物改質水泥砂漿進行力學性質及物理性質試驗之成果如表 2-5 所示。另外，藉由表 2-6 比較各種聚合物改質水泥砂漿於試體硬固前後之特性差異，可以瞭解不同聚合物屬性為何。

表 2-5 改質水泥砂漿之力學性質及物理性質

聚合物名稱	SBR	EVA	S/A
試驗項目	苯乙烯-橡膠乳液	聚乙烯-醋酸乙烯 樹脂	苯乙烯-壓克力樹 脂
抗壓強度	30.5 MPa	32 MPa	21.9-52.1 MPa
抗彎強度	7 MPa	5 MPa	6.0-7.6 MPa
黏結強度 (剪力試驗)	7-11.5 MPa	10-11MPa	10-12.6 MPa
黏結強度 (直接拉拔試驗)	0.8-2.1 MPa	0.8-2.5 MPa	0.83-2.13 MPa
乾縮	1.1%	0-0.15%	0.7-1.1%
吸水率	5-10%	5.5-10%	4~8%
透水性	4-18 g/m ² /24h	2-20 g/m ² /24h	6-10 g/m ² /24h

表 2-6 聚合物改質水泥砂漿特性
(◎：最佳 ○：佳 △：可 X：不佳)

聚合物名稱		聚醋酸 乙烯樹 脂 (VAC)	VA/VE OVA	聚乙 烯-醋 酸乙 烯 樹 脂 (EVA)	壓克力 樹脂 (ACRY LIC)	苯乙 烯-壓 克力 樹 脂(S/A)	苯乙 烯-橡 膠乳 液 (SBR)	
硬 固 前	減水性	△	○	○	◎	◎	◎	
	非空氣連行性	X	△	○	○	○	○	
	保水性	○	○	○	△	△	△	
	接著 力	水中養生	X	○	○	○	○	○
		標準養生	○	◎	◎	○	○	○
	抗壓 強度	水中養生	X	△	○	○	○	○
標準養生		○	○	◎	◎	◎	◎	
硬 固 後	乾燥收縮	X	△	○	○	○	○	
	防水性	X	◎	○	◎	◎	◎	
	耐衝擊性	△	○	○	○	○	◎	
	耐磨耗性	△	○	○	○	○	○	
	耐變形性	△	○	○	○	○	◎	
	耐油性	◎	◎	◎	△	△	△	
	難燃性	◎	○	◎	△	△	△	
	耐候性	△	◎	◎	◎	◎	△	

第六節 新建 RC 建築物劣化修復

RC 建築物發生劣化的主要原因是混凝土材料組成、拌製、澆注及養護條件不良，致使混凝土品質低劣，在化學、物理及鋼筋腐蝕(corrosion of reinforcement)等作用下，造成裂縫產生(crack)、表面缺陷(surface texture defects)、顏色變化(color variation)、其他表面瑕疵(other surface blemishes)及保護層不足(lack of cover)等現象，以致喪失其強度或完整性。RC 建築物劣化表面現象、劣化原因、施工預防方法以及後續修補技術概述如下：

(1)混凝土水平表面裂縫：混凝土快速硬化後，表面快速風乾產生塑性乾縮，預防方法以混凝土硬化後覆蓋濕養護或使用輸氣劑，亦或工程後續利用水泥塗刷密封材料或低黏滯性聚合物修復。

(2)鋼筋模板上部形成裂縫：以深構件為主要，乃因混凝土硬化後持續塑性沈陷，預防方法以變更混凝土配比或使用輸氣劑，亦或工程後續於混凝土硬化後進行裂縫塗封修復。

(3)巨積混凝土熱裂縫：熱收縮限制，預防方法以抑制收縮量減到最小，延遲冷卻速度以達混凝土強度產生，亦或工程後續使用裂縫塗封材料修復。

(4)混凝土表面形成氣泡：空氣或水被模板束縛、配比設計不合適、混凝土不夠密實或脫模劑使用不當，預防方法以改善搗實震動方式、變更配比設計、使用正確脫模劑或吸水模板，亦或工程後續以填充聚合物改良砂漿修復。

(5)混凝土蜂窩空隙：混凝土不夠密實、水泥漿的流失，預防方法以防止水泥漿的流失、減少使用大尺寸粒料，亦或工程後續清除鬆散物並以樹脂注膠修復。

(6)混凝土垂直面受沖蝕：水於表面流動沖刷，預防方法以改變混凝土配比設計、增加黏著力或減少用水量，亦或工程後續採用改良式聚合物水泥砂漿修復修復。

(7)混凝土表面顏色變化：混凝土拌合比例、養護條件、材料、模板面特性、振動或脫模劑變異，或模板處漏水，預防方法以控制所有重要設計參素保持一致，以及防止模板漏，亦或工程後續使用表面塗封修復。

(8)混凝土表面粉化：混凝土表面緩凝，預防方法改變組成材料、密封模板面或表面使用石灰塗刷硬化成面，通常發生後無需修復。

(9)鐵鏽外露：粒料殘留硫化鐵礦、鋼筋裸露於水中、模板上的殘留物或鐵絲捆束邊端，預防方法以徹底的清洗粒料、避開使用受污染的粒料、保護暴露的鋼筋，亦或工程後續稀釋酸性溶液或檸檬酸鈉清洗鐵鏽，或使用表面塗層修復。

(10)模板脫離破損表面：任意的移動模板或使用不適當的脫模劑，預防方法為使用正確的脫模劑，並注意模板的移動與拆卸，亦或工程後續將易剝落的砂漿剷除並以混凝土修復。

(11)混凝土保護層厚度不足：混凝土澆置移動鋼筋或鋼筋固定位置不正確，預防方法以提供鋼筋較好的支撐、較精確鋼鐵固定位置，亦或工程後續使用增加保護塗層或使用聚合物改良水泥砂漿修復。

上述可見大部分 RC 建築物劣化行為發生歸咎於施工過程即已造成嚴重瑕疵與疏失，然而此部分劣化徵兆亦為台灣地區 RC 建築物劣化之大宗，此外台灣地區位於環太平洋地震頻繁擾動區域，導致混凝土微裂縫破壞機率升高，外加溫暖潮濕副熱帶氣候條件促使鋼筋腐蝕行為機率劇增，因此造成台灣地區屋齡歷經二十至三十年暴露於惡劣環境下，況且當時急於趕工交屋潛藏施工瑕疵風險之 RC 建築物，至今百姓仍身受生命財產之威脅。

第三章 生命週期成本評估

近年來各國對於混凝土結構物耐久性的問題，皆相當的重視。主要因為混凝土耐久性不足會造成重大的經濟損失，根據統計數據與國外學者現場調查，影響耐久性的主要因素分別為鋼筋腐蝕、凍融與物理化學作用，其中腐蝕所造成的經濟損失最為嚴重(P.K Mehta and R.W.Burrows, 2001)，一般平均約為國民生產毛額(GNP)2~4%，美國與澳洲為 4.2%、歐洲為 3% (洪乃丰，2002)，鑑此混凝土耐久性已不單是技術性問題，而是以延伸到經濟性及持續發展的問題。近年來生命週期成本評估(Life Cycle Cost Assessment, LCCA)已成為熱門的研究課題，生命週期成本(Life Cycle Cost, LCC)不僅考慮初期的建造成本，並將建築物後續的維護管理、檢修、拆除等列入考量。

第一節 生命週期成本評估概念

LCCA 是將結構物的規劃設計、興建、維護、拆除等全生命週期列入成本考慮，因此評估時投資資金包括兩部份初始投資及後續投資兩部份，第一部份指建築物的設計施工費用，第二部份是保證建築物到使用年限所需的費用(如檢修及維修費等)；計算 LCC 時基本上大多採用現值法，但也有採用年值法、益本法(B/C)、及投資報酬率法(IRR)等，常用之現值法計算公式如下：

$$NPV = \text{初值} + \sum [1/(1+i)^n]$$

式中：NPV=淨現值(Net present value)

n = 分析年期

i = 折現率

生命週期成本評估中建築物的維修時機預測的關鍵點，就是要能準確的推估混凝土結構物使用性能已下降達一低點(性能最低要求點)如圖 3.1 所示，而在此一低點時進行維修是具有經濟性，但在技術實務上，此維修點是相當難以準確預測，需要不斷的經由大量案例的統計及經驗加以修正。建設項目在整各生命週期內的費用為：

$$LCC = C_{t-it} + \sum C_{t-mr} + \sum C_{t-m} + \sum C_{t-et}$$

式中：LCC：生命週期成本

C_{t-it} ：建築物初期建造成本

C_{t-mr} ：維修成本

C_{t-m} : 拆除成本

C_{t-et} : 拆除重建期間造成的經濟損失成本

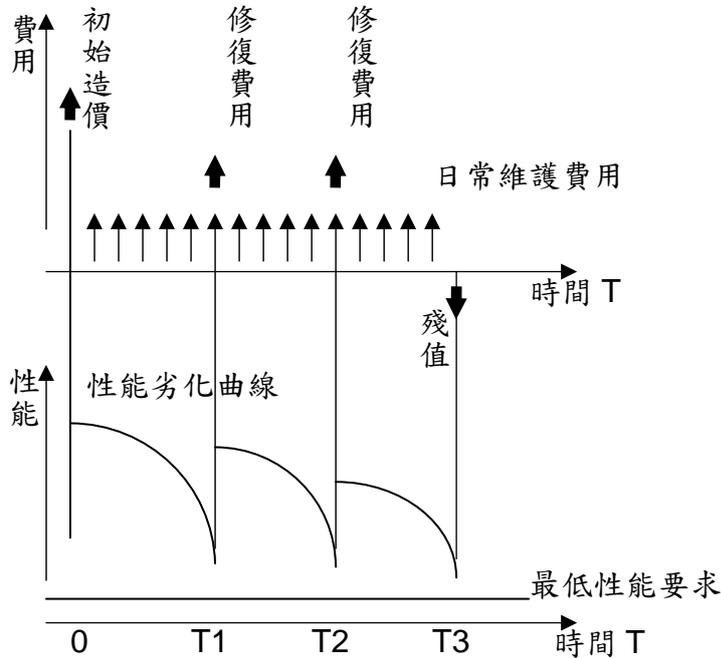


圖 3-1 生命週期現金流量與性能劣化示意圖

美國 LCCA 委員會明確指出採行 LCCA 法的目的就是在減少後期投資、提高工程項目質量與性能，鑒於美國有四座橋樑興建費用維持一座橋樑維修費用的教訓(王增忠、柳玉杰等，2005)，基本上 LCCA 法是投資決策最重要的依據，假若初期投資時即採用 LCCA 法分析，應可有效降低後期投資成本，例如適當提高混凝土材料強度，就能大量節省後期使用的維修費，或是提高設計標準也可達到此效能。

第二節 生命週期成本評估步驟

許多文獻均有提出建築物生命週期成本評估法或評估步驟，但多不夠詳盡，相對而言，ASTM (ASTM E917-94, Standard practice for measuring Life-cycle cost of buildings and building systems)介紹之方法較為詳盡，其評估步驟條列如下：

1. 定義目標及選定替代方案

選定專案預期功能目標，並在滿足此功能目標下選出可行的替代方案。

2. 建立基本假設

決定或假設生命週期成本評估的方法，如現值法或年金法、分析年期、折現率、稅率等，作為各方案生命週期成本評估基礎。

3. 輸入成本項目及費用：

決定各方案包含之成本及發生之時間，如規劃設計、用地取得、興建、營運維護、拆除等費用。

4. 各方案生命週期成本計算：

決定分析年期、使用利率、成本項目及發生時間，計算整體生命週期成本。

$$LCC = \sum (C_t / (1+i)^N)$$

C_t = t 年所發生之所有成本

i = 折現率

N = 分析年期

5. 比較各方案生命週期成本

比較何者具較小生命週期成本。

6. 決策者在考量生命週期成本評估結果、不確定性或風險、無法量度化因數、資金取得狀況等因素後選擇最優方案。

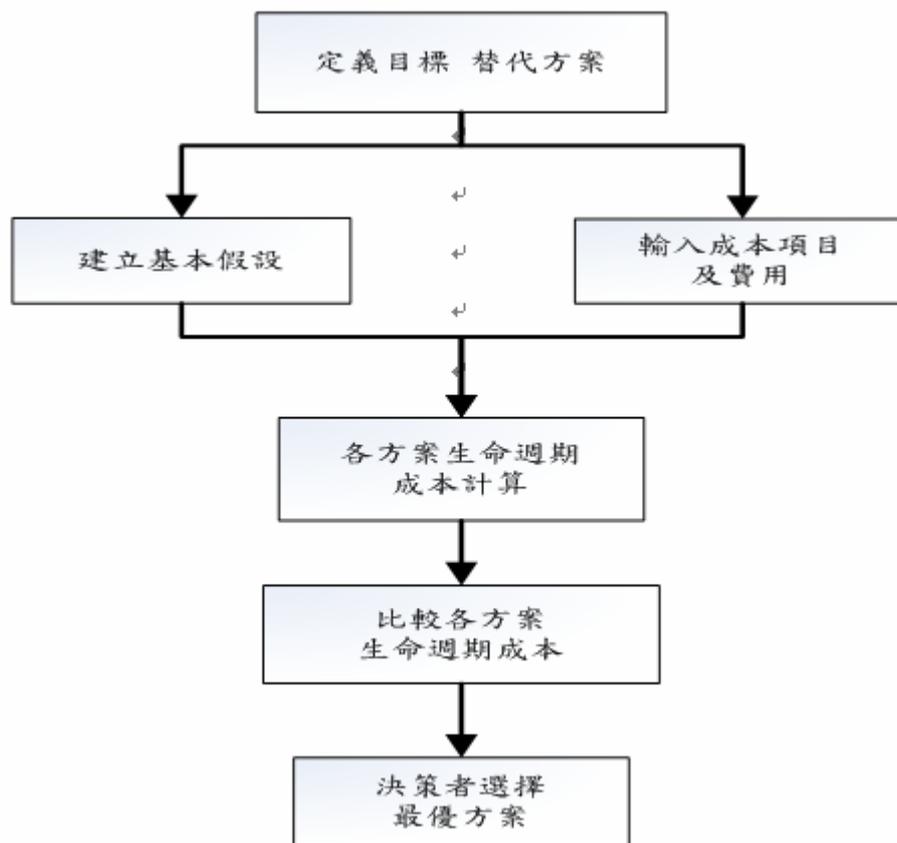


圖 3-2 生命週期成本評估步驟

(ASTM E917-94, Standard practice for measuring Life-cycle cost of buildings and building systems.)

第三節 生命週期成本評估考慮因素

混凝土結構物進行生命週期成本評估時，需考慮因素相當的多且複雜，本節主要探討幾個重要的問題：

(a) 混凝土結構物性能劣化的預測與評估

生命週期成本分析須能準確的預測劣化狀態及時間點，才可建立可靠的預測模型，但混凝土結構物性能劣化具有相當的不確定性及模糊性，可能因作用荷重、材料強度、使用環境、施工品質等而造成劣化的現象，因此耐久性與結構物性能劣化歷時之間不易找出一對應的函數關係，導致成本分析的不確定性與風險性。

(b) 混凝土結構物修復時機選擇

基本上選擇結構物適當維修時機是非常難掌握的，唯有透過大量定期的檢測結果加以修正，配合經驗與統計，才可掌握預測的要點，進行綜合的技術分析及

經濟分析；假若能準確的掌握維修時機，將可有效節省成本。

(c) 混凝土結構物最佳使用年限

影響混凝土結構物使用年限的因素相當的多，個因素多是隨機不易掌握的，因此混凝土結構物的壽命也是隨機的，雖可藉由修補及維修來延長結構物的使用年限，但當結構物剩餘使用壽命期內所創造的效益小於修復費用或預期效益時，此結構物即不值得修復。

第四節 生命週期成本評估案例

混凝土結構物生命週期成本評估於計算過程尚稱簡易，基本上係將各方案生命週期內所發生的現金流量或成本折現為現值加總，以成本最小的方案作為選定標準。然而建築物於生命週期成本分析因子複雜，且不同分析者針對的角度或分析目的，會有不同。目前國內外在進行混凝土結構物生命週期成本分析時，大多仍倚賴經驗方式與適當假設來決定成本發生的金額與時間點，因實務分析所需考慮因子眾多，鑑此本計畫假設兩個混凝土結構物比較方案，如圖 3-3 所示；方案一：特別考慮耐久性問題，並加強混凝土結構物耐久性，期使混凝土結構物於使用時期維修費降低，因此初期投入較多金額假設為 NT\$ 30,000,000，預計使用年限為 50 年，基於材料劣化預測(假設條件)，分別於 30 年進行第一次維修，維修成本為 NT\$ 6,000,000，且預計之後每 10 年進行例行性維修，成本假設與第一次維修相同，至混凝土結構物中止使用，並假設拆除費用為 NT\$ 100,000。方案二：耐久性未特別考量，採用現行一般標準，因此初期投入較少金額為 NT\$ 26,000,000，預計使用年限為 50 年，基於材料劣化預測，分別於使用後 20 年進行第一次維修，維修成本為 NT\$ 10,000,000，且預計之後每 10 年進行例行性維修，成本與第一次維修相同，至混凝土結構物中止使用，並假設拆除費用為 NT\$ 100,000。

本案例生命週期成本分析採用現值法，有效利率假設為 5%，經利用前述公式計算，可得方案一之生命週期成本為 NT\$ 32,327,742 低於方案二之生命週期成本 NT\$ 33,590,330，因此方案一為較佳方案。

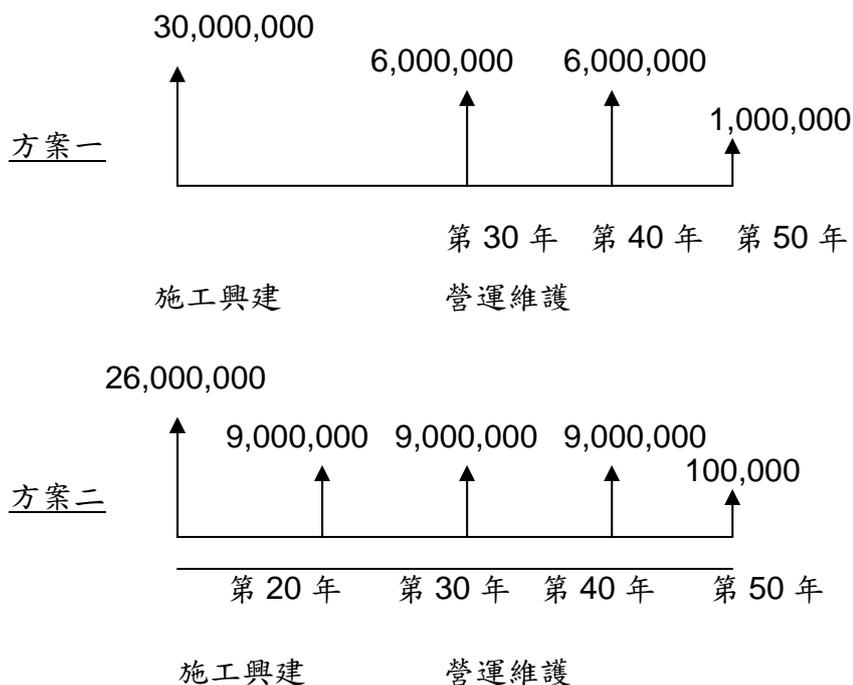


圖 3-3 混凝土結構物方案生命週期比較

混凝土結構物生命週期評估主要考量因子有使用年限、折現率、成本資料，由於混凝土結構物可選擇的修補材料及施工方法甚多，成本與修補成效並不一樣，且修補費用與材料會依地域性而有所不同，因此執行 LCCA 時，其成本項須依當時、當地價格決定之，且結構物維修後能延長的使用年限，尚缺具有可靠性的統計數據，目前工程實務上常採用的修補材料有環氧樹脂、無收縮灌漿劑及水泥砂漿修補等，材料成本如表 3-1 所示，施工費用方面因時間不同而改變。基本上混凝土結構物的維修頻率與混凝土品質有密切的關係，假若不重視混凝土品質，後續的維修費用有時甚至會超出初始的興建費用。

表 3-1 實務上修補材料概估費用(2006)

修補材料	價格	適用範圍
環氧樹脂(Epoxy)	300 元/kg	主要修補裂縫寬約 0.5 mm ~ 5 mm
無收縮灌漿劑	350~400 元/包 每包約 25kg	主要修補裂縫寬約 5 mm ~ 2 cm
水泥砂漿	水泥：150 元/包 河砂：800 元/m ³	大體積修補

第五節 生命週期性應用現況

生命週期成本評估應用於土木工程領域中，尚屬起步階段，初期應用於結構物劣化與損傷、材料等，偏向物理性之生命週期探討，近年來逐步擴展至橋樑結構，但目前生命週期成本評估法仍偏於理論方式應用，主因為環境中有太多不可預測、不易掌握的因素，而常以假設方式或排除設定定之，鑑此世界各國仍致力於生命週期成本評估的研發。

倘若混凝土結構物耐久性不足，會造成後期維修費用比初始建造費用高，這是相當不經濟的結果。世界多國為解決此問題而提出生命週期成本評估，近年來陸續發展出一些可供應用之「模型」，並舉辦「基礎設施 LCCA 世界學術會議」共三次(分別於美國、日本、瑞典)。

美國生命週期評估法的發展較為積極與成熟，無論於研究領域或實務應用皆有相當成果，而歐洲及日本等國尚屬萌芽階段，但近年來也積極的發展方興未艾；茲將國 LCCA 實際應用現況及研究概況列如表 3-2 及表 3-3 所示。

表 3-2 各國應用生命週期成本評估現況

國家	日本	英國	法國	瑞典	荷蘭	丹麥	美國
應用	預估橋樑生命週期成本及材料選擇	公路建設新建與維護	重大建設投資效益評估	規畫、設計及使用維護之決策分析	土木工程設計與管理	規畫、設計及使用維護之決策分	公路、橋樑新建與維護
折現率	4%及8%	8%	8%	--	5%	5%~8%	--
分析年限	50年及100年	--	--	--	--	25年	--

(資料來源主要為：橋樑生命週期成本評估方法與結構使用年限之建立 2/2，台灣營建研究院，2003。)

表 3-3 生命週期成本評估相關研究彙整

時期	1999	1999	1999	2001
國家	英國	英國	美國	美國
研發者 或單位	AL-HAJJ	Rowe	NIST	Venkatesh & Dimitri
內容	提出簡單維護成本預測模式，指出10~20%的成本項目確佔80~90%的生命週期成本。	提出關於決策訂定、物理過程及成本間的邏輯關係圖。各階段決策皆會影響到其他時期的使用方式及營運維護策略。	進行鋼筋混凝土使用年限及生命週期成本模式之研究。	以控制的概念對專案進行評估，提供成本最小化、最佳使用年限之估計等效益。
時期	2002	2002	--	--
國家	美國	美國	美國	日本
研發者 或單位	Testa & Yanev	TRB	Chang & Shinozuka	清水建設
內容	提出預防性定期維護觀念。	探討橋樑構件之生命週期成本式，期望提供橋樑新建或維修時決策參考。	提出ISTEA之觀念，建立數學微積分分析模型，可提供各種所需之經濟要素與評估資訊。	嘗試於生命週期成本評估中導入材料腐蝕機率觀念，目前屬概念階段。

(資料來源主要為：橋樑生命週期成本評估方法與結構使用年限之建立2/2，台灣營建研究院，2003。)

第四章 聚合物改質水泥砂漿材料配製及性能驗證

第一節 試驗材料與配比設計

本試驗的配比設計，水灰比為 0.4、水泥:細粒料=1:3，試驗變數包括聚合物材料(SBR、EVA、VeOVA)及聚合物添加比例(依水泥重量百分比分別為 0%、5%、10%及 15%)。本研究執行的試驗項目及參照規範如表 4-1 所示。

表 4-1 試驗項目及試體製作數量

試驗項目		試體尺寸(mm)	規範及文獻
物理性 試驗	吸水速率	$\phi 100 \times 40$	C.Hall
	吸水率	$\phi 100 \times 40$	ASTM C642
	乾燥收縮	285×25×25	ASTM C596
	熱膨脹係數	285×25×25	--
力學性 質試驗	抗壓強度	50×50×50	ASTM C109
	抗彎強度	40×40×160	ASTM C348
	黏結強度試驗	$\phi 75 \times 150$	ASTM C882
耐久性 試驗	快速氯離子穿透試驗 (RCPT)	$\phi 100 \times 50$	ASTM C1202
微觀 結構 試驗	掃描式電子顯微鏡 (SEM)	10×10×3	--
	壓汞試驗 (MIP)	10×10×3	--

組成材料性質

1. 水泥

本研究使用台灣水泥公司所生產的卜特蘭第 I 型水泥，其化學成分以及物理性質如表 4-2、4-3 所示：

表 4-2 水泥化學成分

項目	國家標準	試驗值
二氧化矽 SiO ₂		20.7
氧化鋁 Al ₂ O ₃		5.4
氧化鐵 Fe ₂ O ₃		3.2
氧化鈣 CaO		63.9
氧化鎂 MgO	Max : 6.0	2.0
三氧化硫 SO ₃	Max : 3.5	
燒失量 L.O.I	Max : 0.3	1.0
不容殘渣 Ins.Res	Max : 0.75	0.1
矽酸三鈣 C ₃ S		51.0
矽酸二鈣 C ₂ S		21.0
鋁酸三鈣 C ₃ A		8.9
鋁鐵酸四鈣 C ₄ AF		9.8

表 4-3 水泥物理性質

水泥型號	第一型水泥(Type I Cement)	
項目	國家標準	試驗值
壘料空氣含量(%)	Max. 12.0	7.2
細度：Fineness(cm ² /g)	Max. 2800	3310
健度：Soundness(%)	Max. 0.80	0.05
抗壓強度 Compressive Strength, kgf/cm ² (MPa)		
3(days)	Min.126(12.35)	210(20.60)
7(days)	Min.197(19.31)	282(27.66)
28(days)	Min.281(27.54)	384(37.67)
凝結時間：Time of setting(Vicat test)		
初凝：Initial	Min. 0：45	2：30
終凝：Final	Max. 8：00	3：50

2. 聚合物橡膠及樹脂材料

(1) 苯乙烯-丁二烯橡膠(SBR)：

SBR 為乳液狀，如圖 4-1 所示，其固形量為 40%，比重為 0.93，是由丁乙炔與苯乙烯在參加醇烯或丁基鋰作為催化劑及其他自由基起始劑，調節劑、乳化劑共同聚合反應再經回收塔回收，溶劑催化劑等有用系料即為 SBR 乳液；其使用方式為先與水做均勻攪拌後，再倒入乾拌好的水泥與細粒料中，後做 1.5 分鐘的拌合即可下料灌置；藉由光譜分析、EDX 分析等可以得知聚合物化學成分。(本材料為台灣巴斯夫提供)

SBR 化學結構式如下所示：

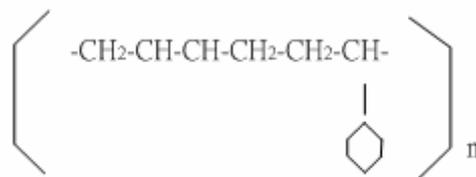




圖 4-1 苯乙烯-丁二烯橡膠液體外觀

(2) 聚乙烯-醋酸乙烯樹脂(EVA)：

EVA 為粉狀材料，如圖 4-2 所示，比重為 0.457；其使用方法，必須先與水泥及細粒料乾拌達均勻分布狀態約 1.5 分鐘，後將水加入在作拌合約 1.5 分鐘左右即可下料灌置；利用光譜分析、熱重分析、EDX...等，分析材料化學成分，如表 4-4 所示；圖 4-3 所顯示為 EVA 微觀分析。(本材料為南星顏料廠提供)

EVA 化學結構式如下所示：

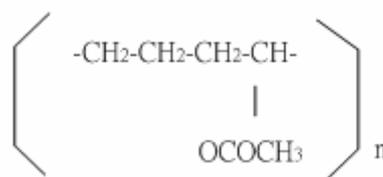


表 4-4 聚乙烯-醋酸乙烯樹脂元素分析

元素	重量百分比(%)
C	50.18
O	43.01
Si	1.53
Ca	5.28
Totals	100.00



圖 4-2 聚乙烯-醋酸乙烯樹脂粉末外觀

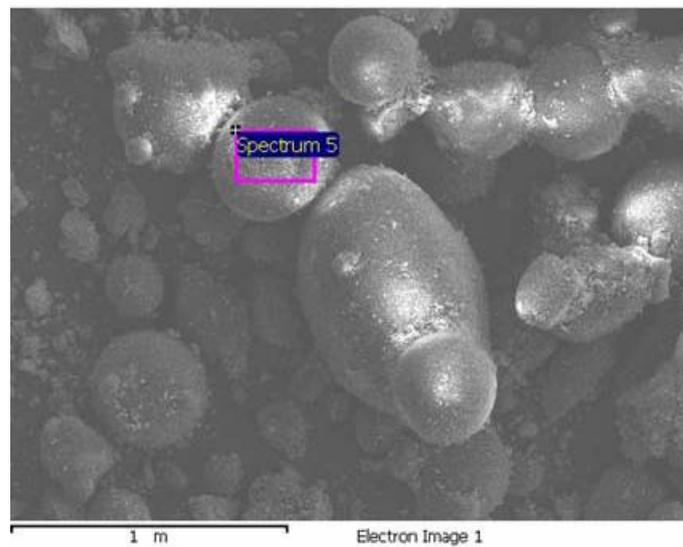


圖 4-3 聚乙烯-醋酸乙烯樹脂微觀分析

(3) 聚乙烯醋酸乙烯羧酸酯(Polyvinyl acetate-vinyl carboxylate, VeoVA)

VeoVA 為粉狀材料，如圖 4-4 所示，比重為 0.432，其使用方法，必須先與水泥及細粒料乾拌達均勻分布狀態約 1.5 分鐘，後將水加入在作拌合約 1.5 分鐘左右即可下料灌置；利用光譜分析、EDX...等，分析材料化學成分，如表 4-5 所示；圖 4-5 所顯示為 VeoVA 微觀分析。(本材料為南星顏料廠提供)

表 4-5 聚乙烯醋酸乙烯羧酸酯元素分析

元素	重量百分比(%)
C	44.44
O	51.27
Si	2.44
Zr	1.38
Pd	0.48
Totals	100.00

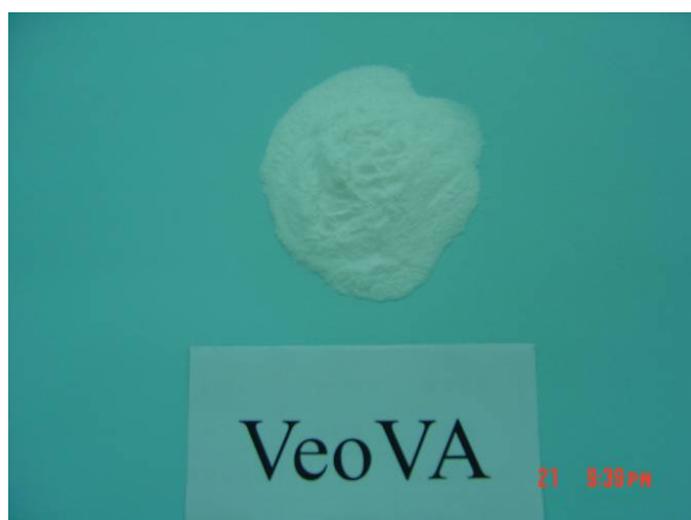


圖 4-4 聚乙烯醋酸乙烯羧酸酯粉末外觀

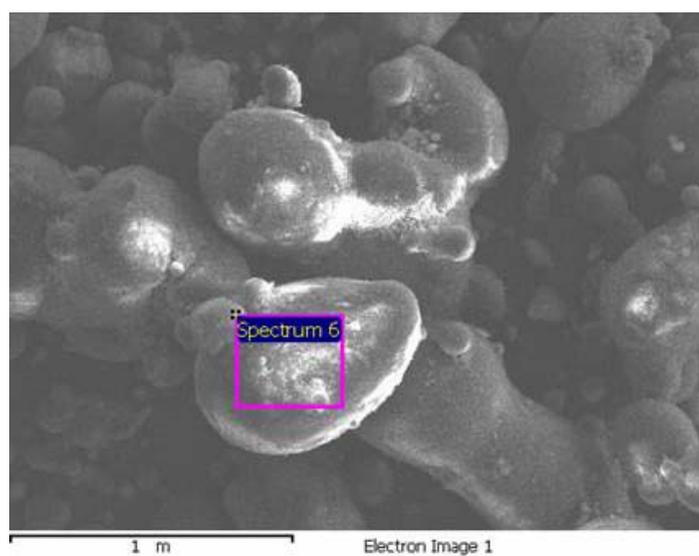


圖 4-5 聚乙烯醋酸乙烯羧酸酯微觀分析

3. 細粒料

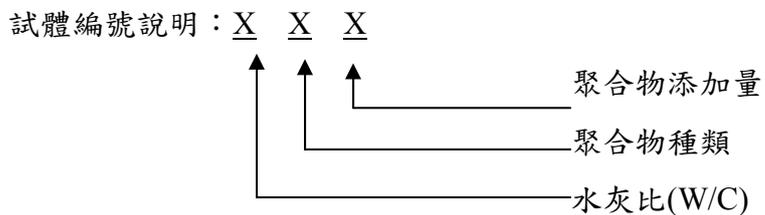
本研究使用的細粒料為ATSM C109所規定的沃特華(OTTAWA)標準砂，其相關性質與級配以及化學成分如表4-6所示。

表 4-6 細粒料性質

試驗項目	試驗值	參照規範
比重	2.65	
細度模數 (F.M.)	2.95	
顏色	白色	CNS487
外觀	圓形	
pH	7	

配比設計及試體編號

1. 試體編號



第一碼：水灰比(W/C)(X=A=0.4)

第二碼：聚合物添加種類(C=無添加、S=SBR、E=EVA、V= VeoVA)

第三碼：聚合物添加量(0%=0、5%=5、10%=10、15%=15)

2. 試驗配比

水灰比 0.4 聚合物改質水泥砂漿配比如表 4-7 所示：

表 4-7 聚合物改質水泥砂漿配比(kgf/m³)

編號	水	水泥	SBR	EVA	VeOVA	細粒料
AC0	216.3	540.7	0	0	0	1622.0
AS5	172.8	540.7	72.5	0	0	1622.0
AS10	129.3	540.7	145.0	0	0	1622.0
AS15	85.8	540.7	217.5	0	0	1622.0
AE5	216.3	540.7	0	29.0	0	1622.0
AE10	216.3	540.7	0	58.0	0	1622.0
AE15	216.3	540.7	0	87.0	0	1622.0
AV5	216.3	540.7	0	0	29.0	1622.0
AV10	216.3	540.7	0	0	58.0	1622.0
AV15	216.3	540.7	0	0	87.0	1622.0

第二節 試驗方法

基本物理性質試驗

1. 初始吸水速率試驗

本試驗係參考 C. Hall 文獻中提出吸水數率試驗法進行，試體烘乾至恆重紀錄其重量後進行試驗，將爐乾的試體製入水槽，試體底部墊高盡量使整個底面浸入水中，水面高度不超過試體底部 0.5 cm，同時在試體側面以 epoxy 塗封，防止水由側面孔隙進入，接著分別在靜制 1、4、9、16、25、36、49 與 64 分鐘後取出試體，以濕布擦拭底部後秤重並紀錄之，計算公式如下：

$$i = \frac{\Delta m}{Af(t)} = St^{1/2}$$

i ：初始吸水速率(g/m²tⁿ)

Δm ：吸收水量(g)

A ：接觸水面積(m²)

$Af(t)$ ：時間函數，通常 $f(t) = \sqrt{t}$ 亦即 $n=1/2$ 。此 a 即定義為吸水速率。

2. 吸水率試驗

本試驗依 ASTM C642-90 進行，試驗時將爐乾之試體完全浸入水中，浸置二天後取出，再以濕布擦拭表面後秤重，在置入水中二天後秤重，後者與前者之重量差小於 0.5% 時，視為試體以達飽合狀態，試體吸水率計算式如下：

$$\text{聚合物改質砂漿試體(\%)} = \frac{B - A}{B} \times 100\%$$

其中 A：爐乾試體重量(g) B：試體飽合狀態重量(g)

3. 乾燥收縮

本試驗依據 ASTM C596 規定，為了解漿體與砂漿的乾燥收縮情形，試體拌合澆置完成後，須於模具內濕養 23 1/2±1/2 小時，脫模在置入水中濕養 48 小時，於齡期為 72±1/2 小時經試體從水中取出並以濕抹布擦拭後即量測其長度，並以此長度為基準，試體繼續存放在溫度 23±1°C、相對溼度 50% 的恆溫恆濕櫃中乾養至第 4、11、18 及 25 天量測其長度，其長度乾縮率公式如下：

$$\text{試體乾燥收縮率(\%)} = \frac{A - B}{A} \times 100\%$$

其中 A：自水中取出量測之長度(mm)

B：各齡期量測之長度(mm)

力學性質試驗

1. 抗壓強度試驗

本試驗灌置 5 cm 立方體之砂漿試體，並參考 ASTM C109 之方法進行抗壓試驗。當拌合後試體養護完成且依各齡期到達時取出，以抹布拭乾並以石膏蓋平，置於萬能材料試驗機上，以每秒 1.4~3.4 kgf/cm² 的加壓速率做單軸載重試驗，在齡期達到 28 天、56 天及 91 天時之抗壓強度。等待試體破壞後，記錄其最大荷重值，將此最大荷重值除以受力面積即可得混凝土試體的抗壓強度值。

2. 抗彎強度試驗

本試驗依據 ASTM C348 水泥砂漿抗彎試驗，測試在求得漿體與砂漿之抗彎強度。試體在拌合後分二層澆置在抗彎模中，在養護於濕櫃中 24 小時後拆模，試體置於清水槽中，至預定齡期時，將試體取出拭乾，進行抗彎試驗，由所讀得之最大破壞荷重帶入下式即可計算出抗彎強度(kgf/cm²)。

$$\text{抗彎強度(kgf/cm}^2\text{)} = \frac{pl}{4} \cdot \frac{h}{2} \cdot \frac{12}{bh^3} = \frac{3}{2} \cdot \frac{pl}{bh^2} = \frac{1.5 \times 10 \times p}{4 \times 4 \times 4} = 0.234 \times p$$

其中：P=最大荷重(kgf)

L=試體支點間距(cm)

b=試體寬度(cm)

h=試體高度(cm)

3.黏結強度試驗

本試驗參考 ASTM C882 進行試驗，如圖 4-6 所示，先進行灌製水泥基材養護 28 天後取出，基材接著面仰角 60° 。隨後將基材至於一內徑 7.5 cm、高 15.0 cm 的鋼模底度，灌入聚合物改質砂漿拆模後，置放於大氣中養護 28 天後進行抗壓強度試驗，經由與接著橢圓面積的換算，即可求得試驗材料之接著強度，接著面橢圓長軸 15.24 cm，接著面橢圓短軸 7.62 cm。

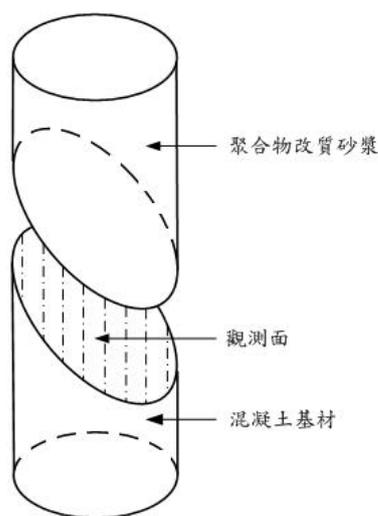


圖 4-6 黏著強度試體示意

耐久性試驗

1. 快速氯離子穿透試驗(RCPT)

本試驗依據 ASTM C1202-97 之規定方法進行電滲試驗。聚合物改質砂漿試體在水中養護 91 天後取出並以混凝土切割機切割，取試體中央部份橫向切割尺寸為直徑 10 公分、厚 5 公分之兩試片，進行氯離子快速滲透試驗，切割完成後，將試片烘乾並逕至 24 小時後，使用防水材料將試片四周塗封，將試片置入真空室中，

利用真空幫浦抽至真空度達到 1 mmHg 大氣壓，即停止幫浦運轉，並保持真空度三小時。

讓蒸餾水流入真空室直到蒸餾水蓋過試片，並打開真空幫浦開始續抽且必須抽一各小時以上。關掉真空幫浦，打開真空式使空氣進入真空室，並取出試片浸置水中 18 ± 2 小時。將試片安裝於電滲槽中，陰極槽放入 3% 之氯化鈉溶液，陽極槽放入 0.3N 氫氧化鈉溶液，且測試試片與電滲槽之間是否漏水，並完成整各電路的配置，電滲試驗裝置如圖所示。

外加 60V 的直流電壓，通電後便可得到第 0 小時的電流值，之後每半各小時記錄一次，直到 6 小時後試驗完成。將所記錄每半小時的電流值代入以下公式便可計算出總通電量。

$$Q=900(I_{00}+2I_{30}+2I_{60}+\dots\dots\dots+2I_{300}+2I_{330}+2I_{360})$$

其中：Q：總通過電量(coulombs)

I_0 ：外加電壓後初始值的電流值(amperes)

I_t ：外加電壓後第 t 分鐘的電流值(amperes)

若試體的直徑非 9.5cm，則依據 ASTM C1202-97 規範對總通過電量作以下公式的修正。

$$Q_s = Q_x \times \left(\frac{9.5}{X} \right)^2$$

其中： Q_s ：試體直徑為 9.5cm 之總通過電量(coulombs)

Q_x ：試體直徑為 X cm 之總通過電量(coulombs)

X：試體直徑(cm)

微觀結構分析

1. 掃描式電子顯微鏡(SEM)

將試體部分微小切割，並以砂紙 1000 號拋光磨平至光滑表面，在以清水清洗後放置烘箱，烘乾後於蒸鍍儀內鍍金，之後即可進行掃描式電子顯微鏡觀測照攝分析。

將試片抽真空，等待高真空的綠燈亮起 30 秒後，才算完全抽真空。之後開始儀器操作，先做校正放低倍率找到想觀察是片之位置再放大倍率，調對焦、對比、相散，觀察低倍率時，可利用 Z 軸來調整觀測範圍，可使景深較大的影像清楚，當高倍率時，則不可用此法來調整，調整後經掃描影像把拍攝後的影像存檔。

本研究微觀結構分析之 SEM 觀察，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，並濺鍍金鉑以增進導電性。
- (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。
- (6) 分析 SEM 之微觀結構：水泥砂漿試體中 SEM 微觀分析倍率以 2000 倍至 100000 倍為觀察範圍，觀察並比較其微觀結構緻密性之變化。

2. 壓汞孔隙試驗(MIP)

壓汞試驗，係依照 ASTM D4404-84 規範，其原理是利用加壓之壓力使汞充滿乾燥試體周圍，然後利用高壓(油壓)汞注入試體內，量測加壓之壓力與灌入汞量，注入進試體內之汞量即是試體孔隙體積，再由電腦換算可得孔隙體積、尺寸、分佈情形及孔隙率等資料。其試驗步驟如下：

本試驗法係依照 ASTM D4404 規範，試體執行高低壓槽分析前，須進行前處理，將水泥質材料體至於烘箱中(105°C)乾燥至少 24 小時以排除試體內之水氣。其後，試體應至於密封設備儘量避免與空氣接觸。開始進行分析前，應再乾燥至少 1 小時，減少低壓槽抽真空的時間。選擇適當之樣品試管，儀器可分析塊狀或粉末狀之試體，不同之試體型態必須選擇不同之樣品試管。依據 Washburn equation 進行電腦軟體設定，水銀與水泥質材料表面接觸角(contact angle)為 130° 、水銀表面張力為 0.485 N/m 、水銀密度為 $13.5335(\text{g/ml})$ 。進行低壓分析，此時系統將以每分鐘 10 psi 的速率加壓至 30 psi，把水銀注入至試體表面，可分析之孔隙大小約 $360\sim 3.6\mu\text{m}$ ，所需時間約為 30 分鐘。再來須將試體樣品放入高壓槽中進行高壓分析，此時系統會加壓至 60000 psi，可分析之孔隙大小約為 $6\sim 0.003\mu\text{m}$ ，高壓槽分析大約一小時可完成。其孔隙大小可由公式求得：

$$d = \frac{\Phi \gamma \cos \theta}{p} + 4b \cos \theta$$

式中， Φ ：孔隙形狀因子

γ ：水銀表面張力(設定值為 0.485 N/m)

θ ：接觸角(設定值 130°)

p ：注入壓力(隨時間變化 N/m^2)

b ：水銀原子的有效半徑(約 270nm)

第三節 試驗儀器與設備

壓力試驗機

本研究中所使用壓力試驗機為日本 SHIMADZU 公司製造的 CCM-200A 型壓力試驗機，係以油壓系統控制，可進行混凝土等工程材料及金屬材料之抗壓、抗彎等力學性質試驗之研究，此儀器最大容許載重為 200 噸，最小讀值為 1 公斤，荷重範圍可設定 4、10、20、40、100 及 200 噸等 6 段不同範圍之切換，可以手動控制亦可由面板操作，經由電腦軟體自動控制速率及記錄數據。

氯離子快速滲透試驗

本研究進行 RCPT 試驗所使用的設備參照 ASTM C1202-97 設計，包含真空設備與電流量測設備，真空設備有真空幫浦、真空槽與真空計；電流量測設備包括直流電源供應器、數位式電流計、RCPT 槽。另外，數位式電壓計由電路連接而成，並外加電壓 60 伏特量測其電流值(I)，電流量測範圍 0.1 mA ~ 1 A；電壓量測範圍 0.1 V ~ 100 V。儀器外觀如圖 4-7 所示。



圖 4-7 氯離子快速滲透設備

掃描式電子顯微鏡設備(Scanning Electron Microscopy, SEM)

係利用加熱燈絲所發射出來的電子束在試件上掃描，打在試件上的每一點，螢光屏上即出現一亮點與之對應，且隨著相對應檢視器所接收訊號之強弱，而有不同之亮度。因此，試件之特徵、形貌及由亮點組合成像，皆可一一表現出來。本研究使用日本製 HITACHI 公司生產之 S-4800，圖 4-8 所示。



圖 4-8 掃描式電子顯微鏡設備

壓汞孔隙量測儀

本研究使用之壓汞孔隙量測儀，如圖 4-9 所示，為 Micromeritics 所生產的 AutoPore IV 9500，可利用所注入的水銀量換算得到孔隙體積、孔隙分佈、孔隙率及密度，量測孔隙範圍可達 $0.003\sim 360\mu\text{m}$ ，其最大可加壓至 60000psi，試驗部分高、低壓兩部份進行，進行低壓分析時，系統會加壓至 30psi，接著放入高壓槽，進行高壓分析，最大可加壓至 60000psi。



圖 4-9 壓汞孔隙量測儀

第四節 結果與討論

基本物理性能

1. 吸水率

吸水率為評估外界水分子進入試體的能力，主要是在一定時間內或是達飽和狀態時，測定試體所能吸水的總量，並且得以驗證聚合物的成膜效應對試體吸水的影響，而本試驗將 $\phi 10 \times$ 高 4 cm 的試體烘乾至恆重，等試體冷卻後置入水槽內並且水高必須高於試體頂端，至於水中 24 hr 後取出並擦乾表面後秤重，其試驗結果如表 4-8 所示，結果顯示：

添加 EVA 試體的吸水率隨聚合物添加越多其吸水率就越低，而在吸水的過程中，其吸水的至飽和的速度較為緩慢，控制組達飽和時間為 24 hr，而 EVA 改質水泥砂漿達飽和時間長達 120 hr 之長，其中 AE15 組的吸水率是所有聚合物改質砂漿中最低，比控制組下降為 5.6 %。

添加 VeoVA 的試體吸水率皆與控式組相近，隨著添加量的增加其吸水率略有減少，並且此種聚合物改質水泥砂漿吸水達飽和的時間須 96 hr，添加 VeoVA 組的試體吸水率差異值約提昇 2.1 % ~ 6.5 % 之間。

而添加 SBR 的試體吸水率為三種聚合物改質水泥砂漿最高的，其差異值約昇高 37.3 % ~ 44.5 % 之間，其中 SBR15 組的吸水率最高，比控制組高 44.5 %，但此種聚合物改質水泥砂漿吸水達飽和的時間也須達 96 hr。

由於聚合物改質水泥砂漿在試體內部會產生薄膜，使得有阻止孔隙連通效果，得以減緩試體吸水的速度。

表 4-8 吸水率試驗結果

試體編號	吸水率(%)	與控制組吸水率 差異值比較(%)
AC	5.68	--
AE5	6.42	13.0
AE10	6.04	6.3
AE15	5.36	-5.6
AV5	6.05	6.5
AV10	6.0	5.6
AV15	5.8	2.1
AS5	7.80	37.3
AS10	8.07	42.1
AS15	8.21	44.5

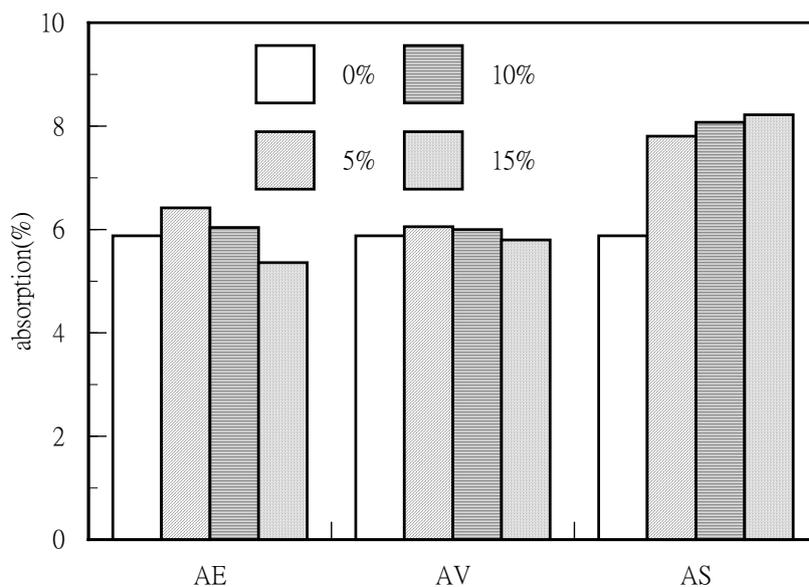


圖 4-10 聚合物改質水泥砂漿試體吸水率

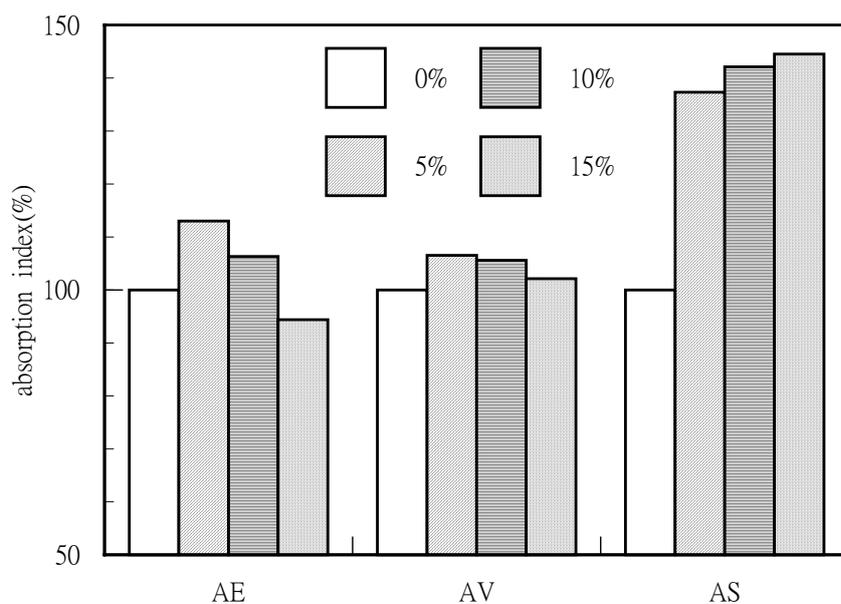


圖 4-11 聚合物改質水泥砂漿試體吸水率關係

2. 初始吸水速率

初始吸水速率試驗用來評估聚合物改質水泥砂漿材料孔隙中的毛細傳輸現象，並探討聚合物改質水泥砂漿材料是否有填充孔隙及成膜後斷絕孔隙連通效用；其試驗結果如表 4-9 所示，結果顯示：

添加 EVA 的試體，吸水速率值隨著添加量增加而有減緩的趨勢，從未改質的

砂漿有高達 980.9 g/m^2 吸水速率，隨著增加量至 15% 的 EVA 時，其吸水速率降低至 254.8 g/m^2 ，添加 EVA 後吸水速率與控制組差異約降低 57.1 ~ 74.0% 之間。

添加 VeoVA 的試體，其吸水速率也有明顯的下降，在控制組與聚合物改質水泥砂漿的吸水速率差異值比較聚合物改質水泥砂漿約降低 57.1 ~ 61.0% 之間，但在添加 5 ~ 10% 間的 VeoVA 試體中，從試驗結果瞭解吸水速率也僅降低 4%，其效果並沒有隨著添加量提昇而大幅的改善吸水速率。

而添加 SBR 的試體，其吸水速率也有隨著聚合物的添加量增加，而減少吸水速率，而添加 5% 及 10% 的 SBR 試體與控制組比較吸水速率卻有明顯的降低約 59.7 ~ 61.0% 之間。

表 4-9 初始吸水速率試驗結果

試體 編號	初始吸水速率(g/m^2)								差異 值比 較 (%)
	1 分	4 分	9 分	16 分	25 分	36 分	49 分	64 分	
AC	178.3	254.8	356.7	484.1	611.5	726.1	840.8	980.9	--
AE5	191.1	203.8	229.3	267.5	305.7	343.9	382.2	420.4	-57.1
AE10	114.6	140.1	152.9	191.1	242.0	280.3	318.5	369.4	-62.3
AE15	89.2	114.6	127.4	152.9	178.3	203.8	229.3	254.8	-74.0
AV5	114.6	140.1	178.3	216.6	267.5	318.5	369.4	420.4	-57.1
AV10	101.9	127.4	165.6	216.6	267.5	305.7	369.4	394.9	-59.7
AV15	76.4	127.4	165.6	191.1	229.3	267.5	331.2	382.2	-61.0
AS5	124.2	257.1	329.9	395.3	472.0	573.9	675.8	765.0	-22.0
AS10	140.1	216.6	293.0	356.7	407.6	458.6	509.6	560.5	-42.9
AS15	127.4	165.6	216.6	254.8	305.7	331.2	369.4	407.6	-58.4

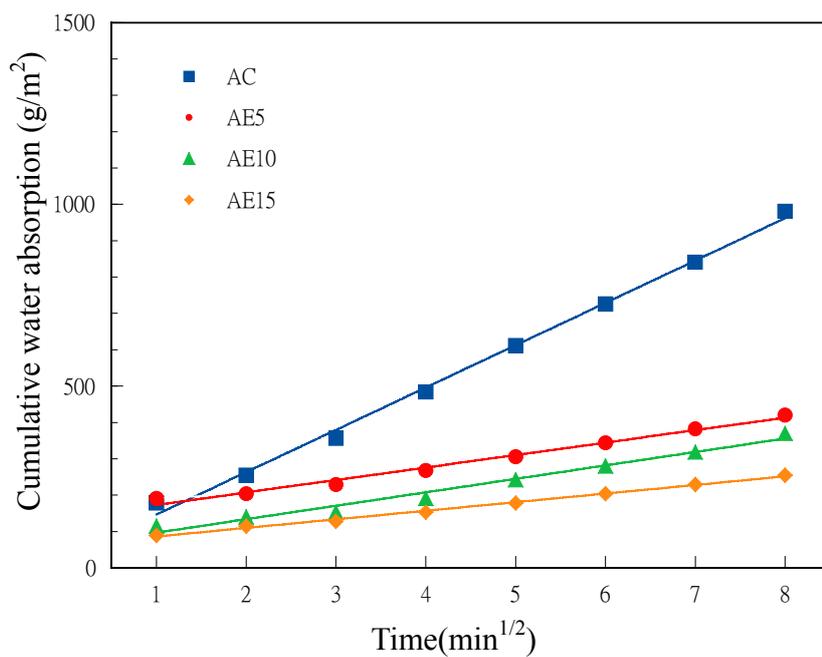


圖 4-12 聚合物改質水泥砂漿之初始吸水速率試體比較(EVA 組)

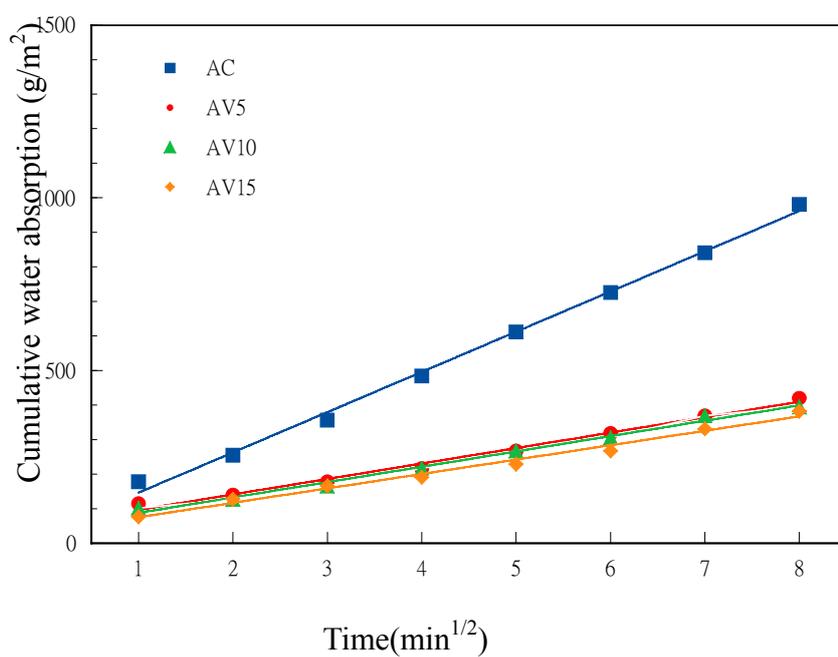


圖 4-13 聚合物改質水泥砂漿之初始吸水速率試體比較(VeoVA 組)

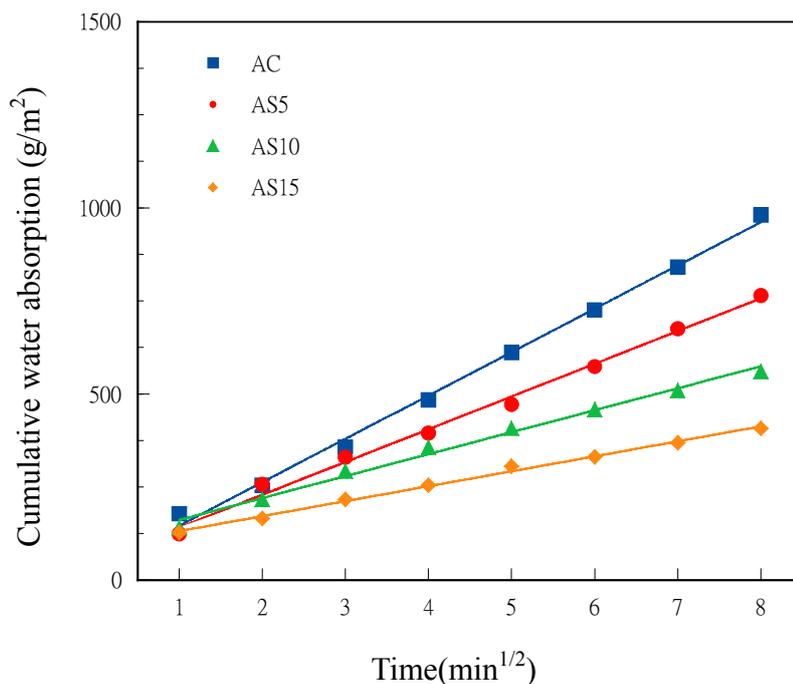


圖 4-14 聚合物改質水泥砂漿之初始吸水速率試體比較(SBR 組)

3. 乾縮

乾縮試驗為評估水泥砂漿硬固後持續水泥水化反應所產生的收縮，在此研究中試體組成有額外添加三種聚合物，並且在試體硬固期間聚合物也隨著水份的蒸發而產生成膜效果，都可能影響 PMM 的長度變化量，其試驗結果如表 4-10 所示，結果顯示：

添加 EVA 試體的乾縮量，在齡期 25 天前皆比控制組低，降低最多的為添加 5% 的 EVA，與控制組差異約 -58.5%，不過其試體情形在第 4 天時有些微的膨脹產生，而添加 EVA 試體的乾縮與控制組的差異約減少 46.8%~58.5% 之間。

添加 VeoVA 試體的乾縮量，隨著添加量的增加，其乾縮值卻有抑制乾縮的情形出現；但在齡期第 25 天時，添加 5% 的 VeoVA 試體乾縮量卻有超過控制組的情形，增加 14.4%；而添加 5% 及 10% 的 VeoVA 試體乾縮量比控制組降低約 2.5%~15.3% 之間。

添加 SBR 的試體乾縮量是全部試體收縮最多的一組，但添加量的增加其乾縮量也有抑制的效果，與控制組乾縮增加約 52.1%~66.2% 之間，此種聚合物最不合用於修補材料上。

表 4-10 乾縮試驗結果

試體編號	乾縮(%)				與控制組乾縮差異值比較(%)
	4 天	11 天	18 天	25 天	
AC	1.069	1.343	1.429	1.976	--
AE5	-0.655	-0.123	-0.102	0.821	-58.5
AE10	-0.344	0.077	0.191	0.957	-51.6
AE15	-0.565	0.065	0.147	1.051	-46.8
AV5	0.421	1.064	1.175	2.261	14.4
AV10	0.098	-0.044	0.840	1.926	-2.5
AV15	0.404	0.303	1.049	1.674	-15.3
AS5	0.837	1.867	2.383	3.284	66.2
AS10	0.520	1.649	1.974	3.111	57.4
AS15	0.426	1.131	1.841	3.005	52.1

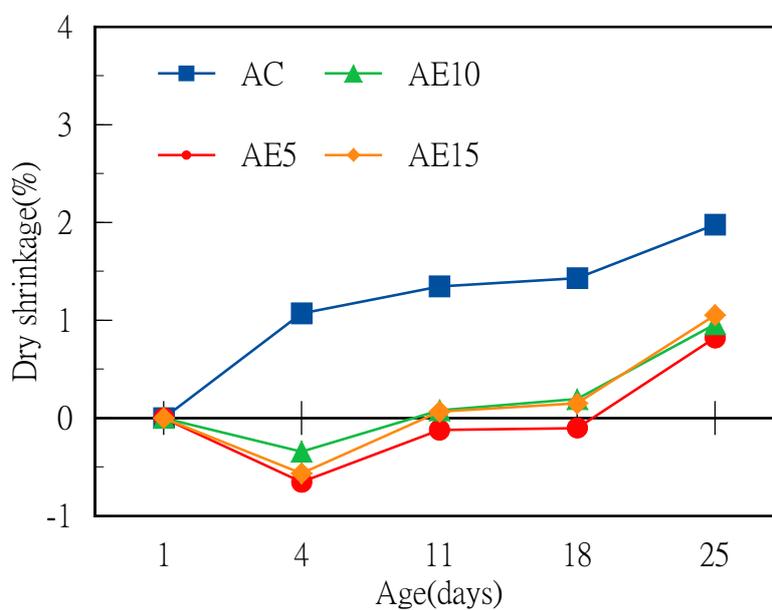


圖 4-15 聚合物改質水泥砂漿乾縮試體比較(EVA 組)

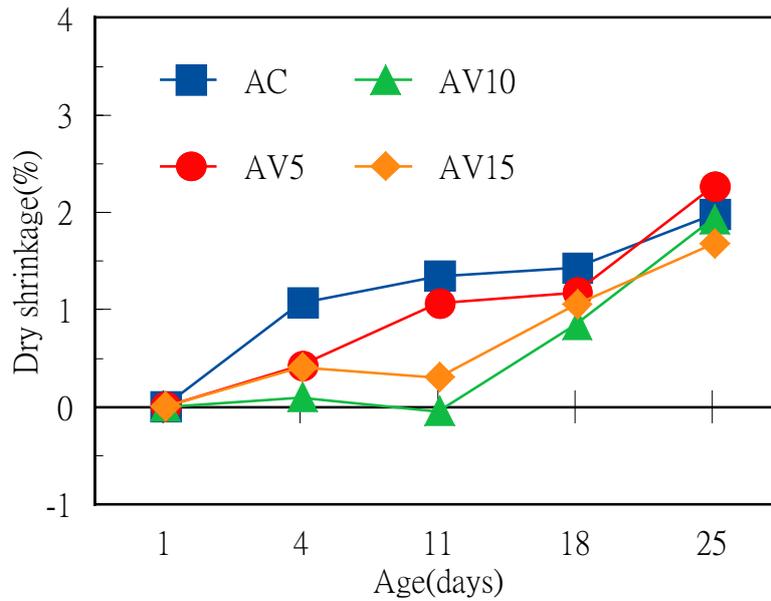


圖 4-16 聚合物改質水泥砂漿乾縮試體比較(VeoVA 組)

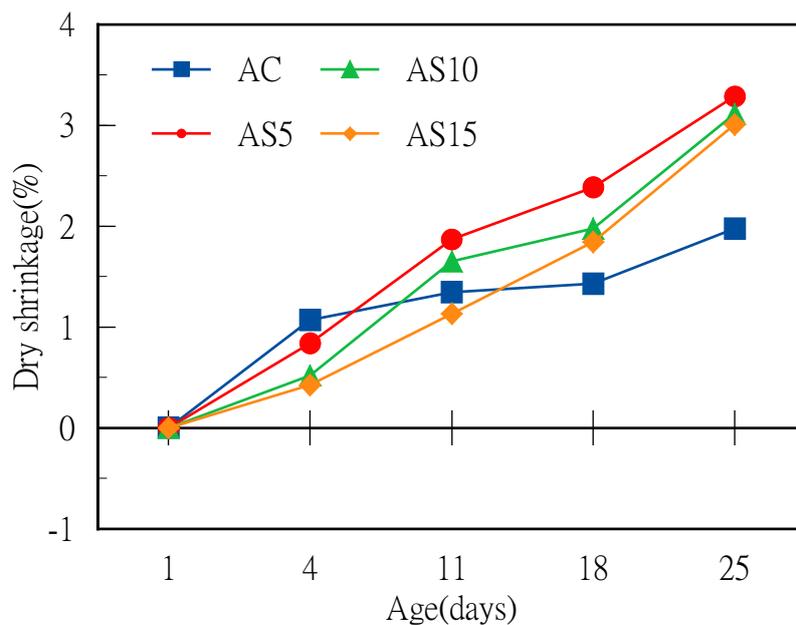


圖 4-17 聚合物改質水泥砂漿乾縮試體比較(SBR 組)

4. 膨脹率

本試驗為評估聚合物改質水泥砂漿，將 91 天齡期之試體放入烘箱中經過 25°C、40°C、60°C 及 80°C 的溫度變化後，對試體所產生的膨脹大小，其試驗結果如表 4-* 所示，結果顯示：

添加 EVA 的聚合物改質水泥砂漿，其膨脹率皆比控制組低，並且皆與控制組相近，在溫度上升至 40°C 時，添加 5~15% 的 EVA 試體膨脹量約比控制組減少 12.97~15.48%；而上升至 60°C 時，其膨脹量約比控制組減少 2.46~3.69%；而溫度在高於 60°C 後，其膨脹量者略收縮的現象。

添加 VeoVA 的聚合物改質水泥砂漿，其膨脹率皆比控制組低，在溫度上升至 40°C 時，添加 5~15% 的 VeoVA 試體膨脹量約比控制組減少 70.71~76.15 %；而上升至 60°C 時，其膨脹量約比控制組減少 29.51~31.15 %；而溫度在高於 60°C 後，其膨脹量者略收縮的現象。

添加 SBR 的聚合物改質水泥砂漿，其膨脹率皆比控制組低，在溫度上升至 40°C 時，添加 5~15% 的 SBR 試體膨脹量約比控制組減少 60.67~82.85 %；而上升至 60°C 時，其膨脹量約比控制組減少 56.56~81.15 %；而溫度在高於 60°C 後，其膨脹量者略收縮的現象。

表 4-11 膨脹率試驗結果

試體編號	膨脹率(%)		
	40°C	60°C	80°C
AC	2.39	2.44	2.09
AE5	2.08	2.38	1.74
AE10	2.04	2.36	1.64
AE15	2.02	2.35	1.48
AV5	0.70	1.72	1.21
AV10	0.66	1.70	0.92
AV15	0.57	1.68	0.86
AS5	0.94	1.06	0.59
AS10	0.65	0.86	0.42
AS15	0.41	0.46	0.01

表 4-12 與控制組膨脹率差異值比較(%)

試體編號	與控制組差異值比較(%)		
	40°C	60°C	80°C
AC	--	--	--
AE5	-12.97	-2.46	-16.75
AE10	-14.64	-3.28	-21.53
AE15	-15.48	-3.69	-29.19
AV5	-70.71	-29.51	-42.11
AV10	-72.38	-30.33	-55.98
AV15	-76.15	-31.15	-58.85
AS5	-60.67	-56.56	-71.77
AS10	-72.80	-64.75	-79.90
AS15	-82.85	-81.15	-99.52

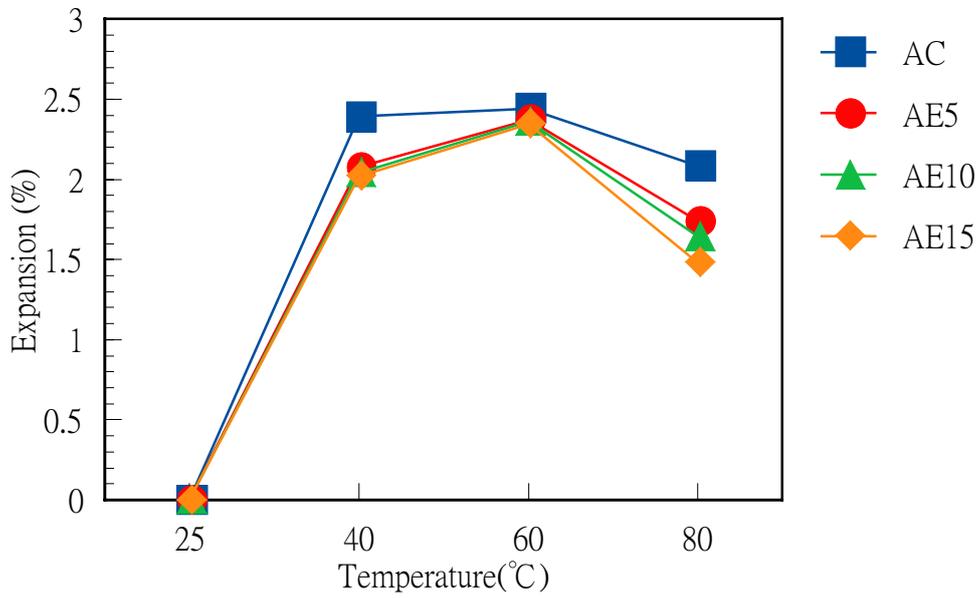


圖 4-18 聚合物改質水泥砂漿膨脹率比較(EVA 組)

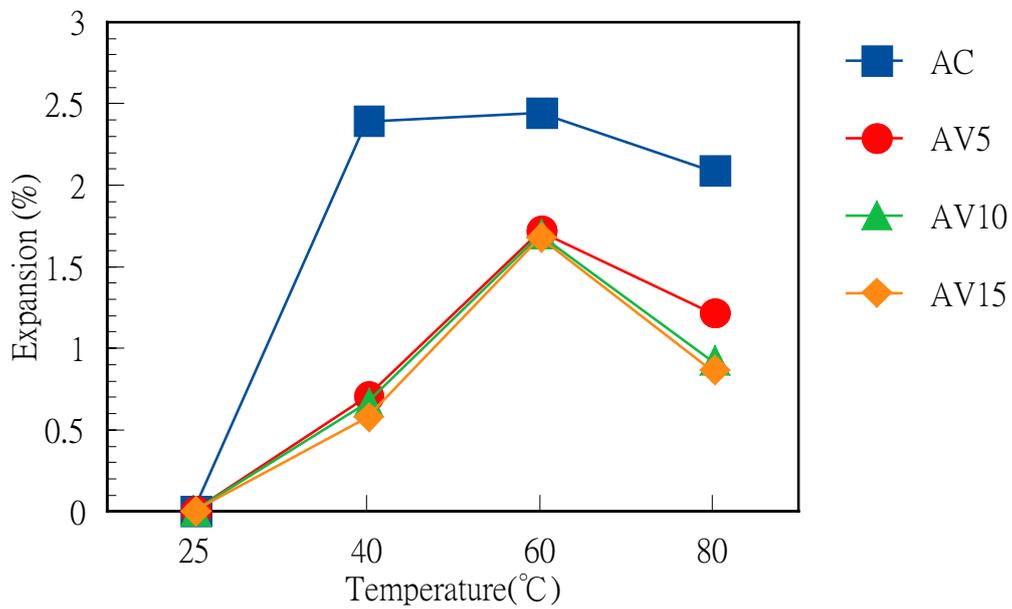


圖 4-19 聚合物改質水泥砂漿膨脹率比較(VeoVA 組)

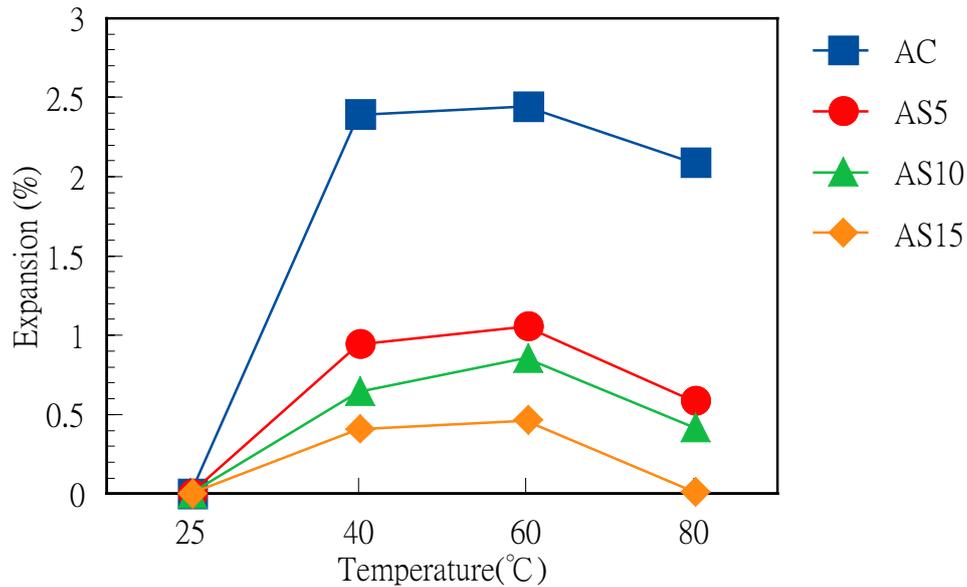


圖 4-20 聚合物改質水泥砂漿膨脹率比較 (SBR 組)

力學性質

1. 抗壓強度

利用抗壓強度試驗，可瞭解添加不同聚合物後，對於水泥基質材料其力學性質的影響，其試驗結果如表 4-13、4-14 所示，結果顯示：

添加 EVA 與 SBR 的 28 天抗壓強度皆比控制組低，其中添加 EVA 組的試體強度與控制組抗壓強度約降低 17.4 ~ 26.1 %；添加 SBR 組的抗壓強度其成長趨勢與添加量成反比，與控制組抗壓強度降低約 28.4 ~ 37.8 %。

而添加 VeoVA 的 28 天抗壓強度皆比控制組高，並且添加越多強度越高，所顯示的強度比控制組約提昇 9.4 ~ 18.4 %。

添加 EVA 與 SBR 的 56 天抗壓強度皆比控制組低，其中添加 EVA 組的試體強度與控制組抗壓強度約降低 19.2 ~ 27.3 %；添加 SBR 組的抗壓強度其成長趨勢與添加量成反比，與控制組抗壓強度降低約 26.1 ~ 39.3 %。

而添加 VeoVA 的 56 天抗壓強度皆比控制組高，並且添加越多強度越高，所顯示的強度比控制組約提昇 9.6 ~ 19.8 %。

表 4-13 抗壓強度試驗結果(齡期 28 天)

試體編號	抗壓強度(MPa)				與控制組抗壓強度差異值比較 (%)
	#1	#2	#3	平均	
AC	29.2	28.6	31.9	29.9	--
AE5	24.5	24.9	--	24.7	-17.4
AE10	23.9	23.7	--	23.8	-20.2
AE15	23.3	24.0	--	23.6	-21.1
AV5	33.4	32.3	31.8	32.7	9.4
AV10	32.8	34.1	31.9	33.0	10.4
AV15	37.5	35.1	33.6	35.4	18.4
AS5	21.0	20.7	22.6	21.4	-28.4
AS10	19.1	18.7	20.7	19.5	-34.8
AS15	19.0	18.5	18.2	18.6	-37.8

表 4-14 抗壓強度試驗結果(齡期 56 天)

試體編號	抗壓強度(MPa)				與控制組抗壓強度差異值比較 (%)
	#1	#2	#3	平均	
AC	35.8	35.7	28.3	33.3	--
AE5	26.7	27.1	--	26.9	-19.2
AE10	25.9	27.0	--	26.4	-20.7
AE15	24.1	24.2	--	24.2	-27.3
AV5	37.8	35.4	36.3	36.5	9.6
AV10	39.8	38.8	--	39.3	18.0
AV15	39.5	39.0	39.9	39.5	19.8
AS5	27.0	22.7	23.8	24.6	-26.1
AS10	22.0	24.5	21.3	22.6	-32.1
AS15	18.3	22.3	20.1	20.2	-39.3

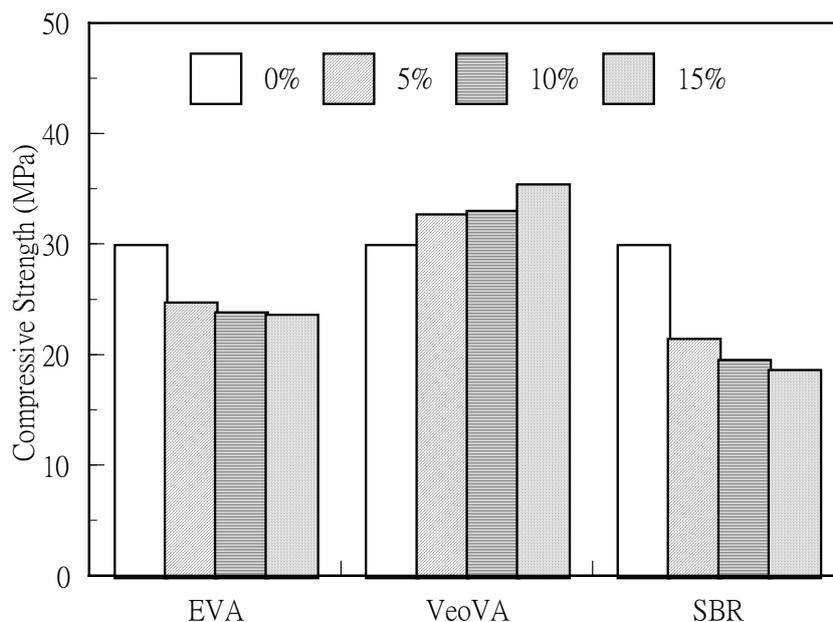


圖 4-21 聚合物改質水泥砂漿試體之抗壓強度(齡期 28 天)

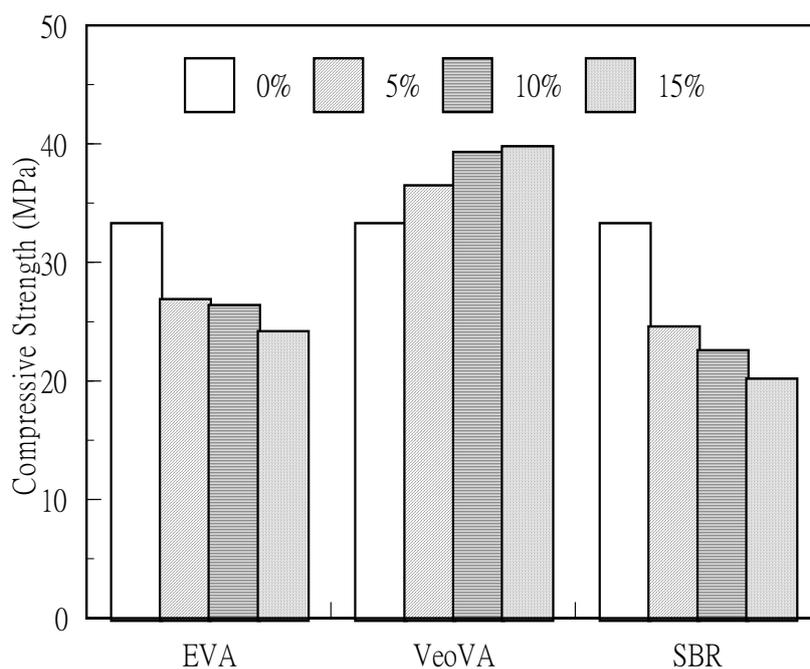


圖 4-22 聚合物改質水泥砂漿試體之抗壓強度(齡期 56 天)

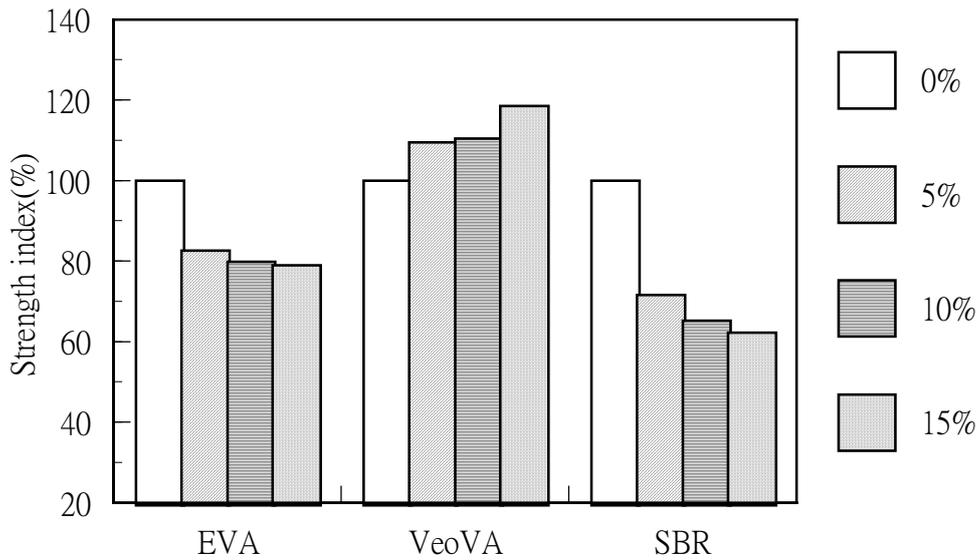


圖 4-23 聚合物改質水泥砂漿試體抗壓試體關係(齡期 28 天)

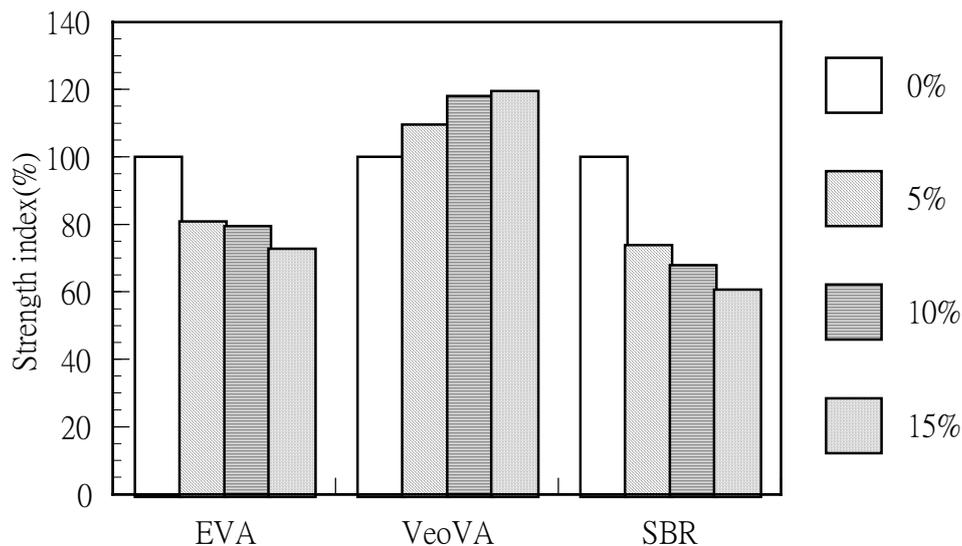


圖 4-24 聚合物改質水泥砂漿試體抗壓試體關係(齡期 56 天)

2. 抗彎強度

利用抗彎強度試驗，可瞭解添加不同聚合物後，對於水泥基質材料其力學性質的影響，其試驗結果如表 4-15 及 4-16 所示，結果顯示：

添加 EVA 試體的抗彎強度，其強度的成長趨勢與添加量成正比，其中在齡期 28 天時，添加 5% 及 10% 的試體皆比控制組低，但是添加 15% 的試體強度比控制組高，提高 7.8%；在齡期 56 天時，添加 EVA 的聚合物改質砂漿抗彎強度皆比控制組提升，提高約 2.6~4.9% 之間；而齡期達 91 天時，強度提升約比控制組

高 10.5 %。

添加 VeoVA 試體的抗彎強度，其添加量在 10%以內雖然有些微的提升，但是添加量超過 10%強度卻有降低的趨勢；在齡期 28 天時，其強度約為 5.7~6.5 MPa，而齡期 56 天者強度約為 5.8~6.9 MPa，而齡期 91 天者強度約為 6.0~8.1 MPa，；齡期 91 天時，添加 15 %的 VeoVA 其強度為最高，僅低於控制組 3.6 %。

添加 SBR 的試體，其抗彎強度卻與添加數量成反比，與控制組抗彎強度減少約 29.1~46.6%之間。

三種聚合物以及三種不同添加量的試體中，僅有 EVA 的抗彎強度比控制組高，其強度最高者為 EVA 添加 15% 齡期為 91 天強度為 9.2 MPa；添加 EVA 的試體中其強度增加隨著聚合物添加量的增加而增加，但添加 SBR 的試體強度者反之。

表 4-15 抗彎強度試驗結果(齡期 28 天)

試體編號	抗彎強度(MPa)				與控制組抗彎強度差異值比較 (%)
	#1	#2	#3	平均	
AC	7.49	7.39	6.60	7.2	--
AE5	6.46	6.83	--	6.7	-7.2
AE10	7.02	7.11	6.67	7.0	-3.1
AE15	7.77	7.72	7.68	7.7	7.8
AV5	5.57	5.80	--	5.7	-20.6
AV10	5.62	6.32	6.58	6.5	-10.0
AV15	5.34	4.91	4.91	5.1	-29.4
AS5	4.96	5.01	5.29	5.1	-29.0
AS10	4.52	4.49	--	4.5	-37.1
AS15	3.70	3.93	3.84	3.8	-46.6

表 4-16 抗彎強度試驗結果(齡期 56 天)

試體編號	抗彎強度(MPa)				與控制組抗彎強度差異值比較 (%)
	#1	#2	#3	平均	
AC	7.16	8.38	7.49	7.7	--
AE5	7.96	7.72	7.96	7.9	2.6
AE10	7.68	8.14	8.26	8.0	4.6
AE15	8.05	8.10	8.00	8.1	4.9
AV5	5.92	5.66	--	5.8	-24.5
AV10	7.18	6.25	7.14	6.9	-10.7
AV15	5.80	6.65	--	6.2	-18.9
AS5	5.15	5.15	5.01	5.1	-33.5
AS10	5.03	5.01	--	5.0	-34.6
AS15	4.98	4.45	4.40	4.6	-39.9

表 4-17 抗彎強度試驗結果(齡期 91 天)

試體編號	抗彎強度(MPa)				與控制組抗彎強度差異值比較 (%)
	#1	#2	#3	平均	
AC	8.96	8.19	7.89	8.4	--
AE5	9.17	7.68	8.24	8.4	0.1
AE10	8.26	9.41	9.55	9.1	8.6
AE15	9.66	9.22	8.80	9.2	10.5
AV5	5.45	5.62	6.32	6.0	-28.5
AV10	8.47	7.70	--	8.1	-3.6
AV15	7.30	7.49	--	7.4	-11.5
AS5	5.71	5.38	--	5.6	-33.5
AS10	5.80	5.45	5.15	5.5	-34.5
AS15	5.15	5.19	5.34	5.3	-36.9

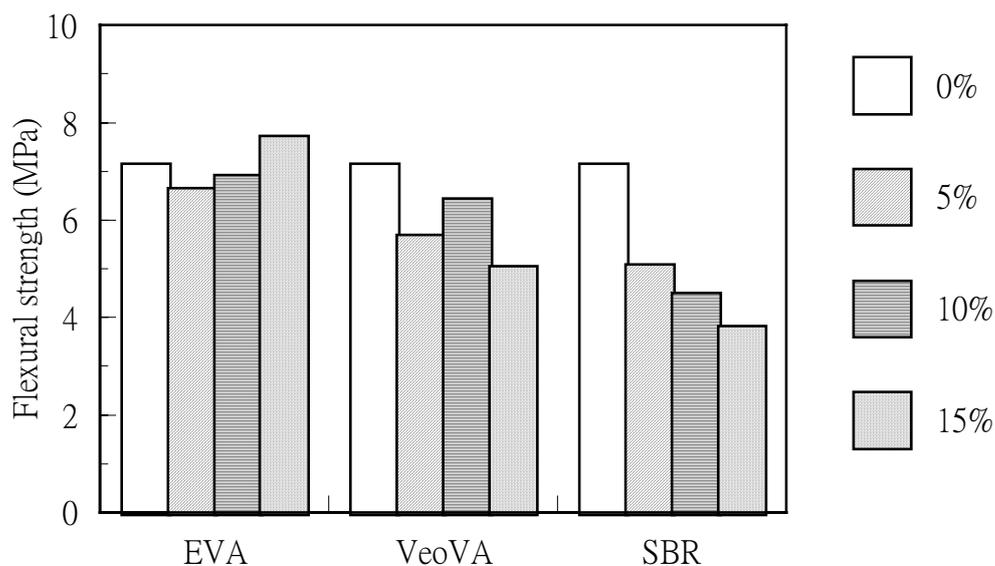


圖 4-25 聚合物改質水泥砂漿試體之抗彎強度(齡期 28 天)

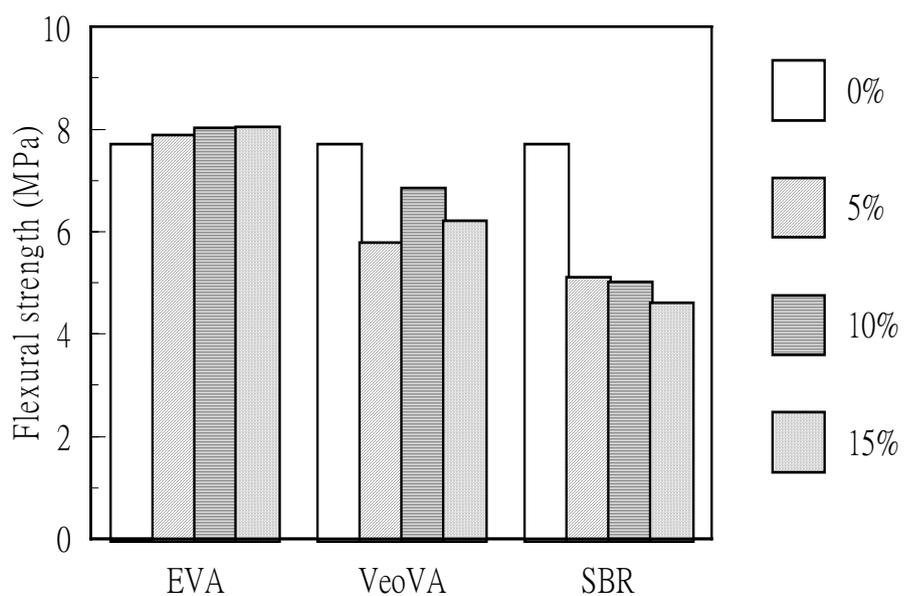


圖 4-26 聚合物改質水泥砂漿試體之抗彎強度(齡期 56 天)

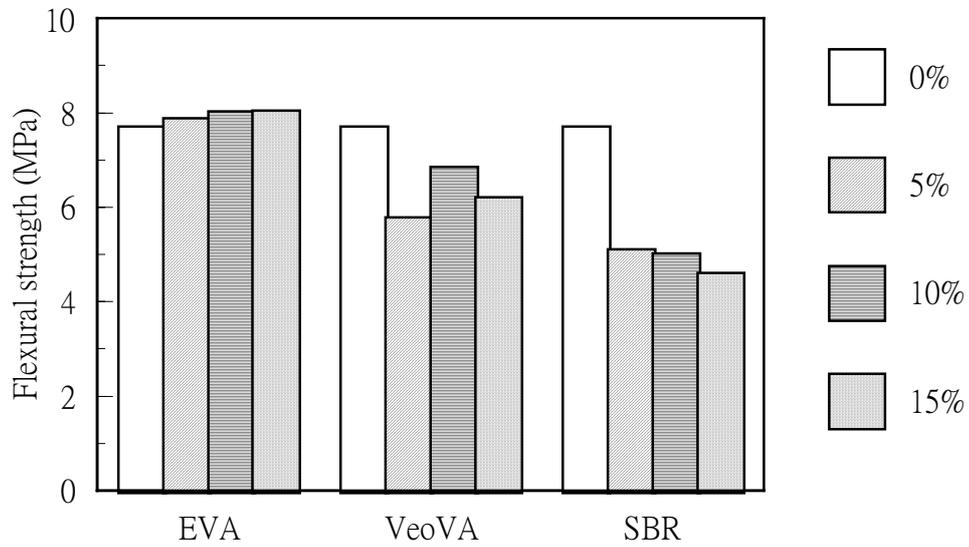


圖 4-27 聚合物改質水泥砂漿試體之抗彎強度(齡期 91 天)

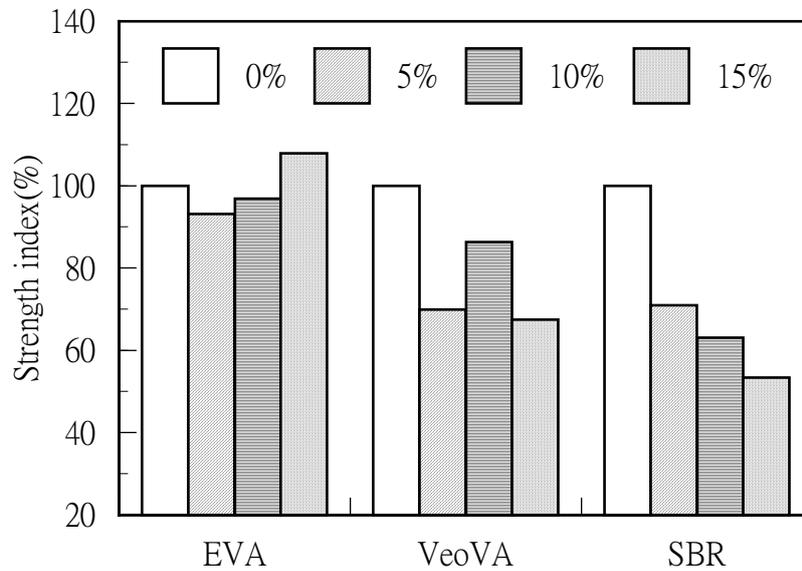


圖 4-28 聚合物改質水泥砂漿試體抗彎試體關係(齡期 28 天)

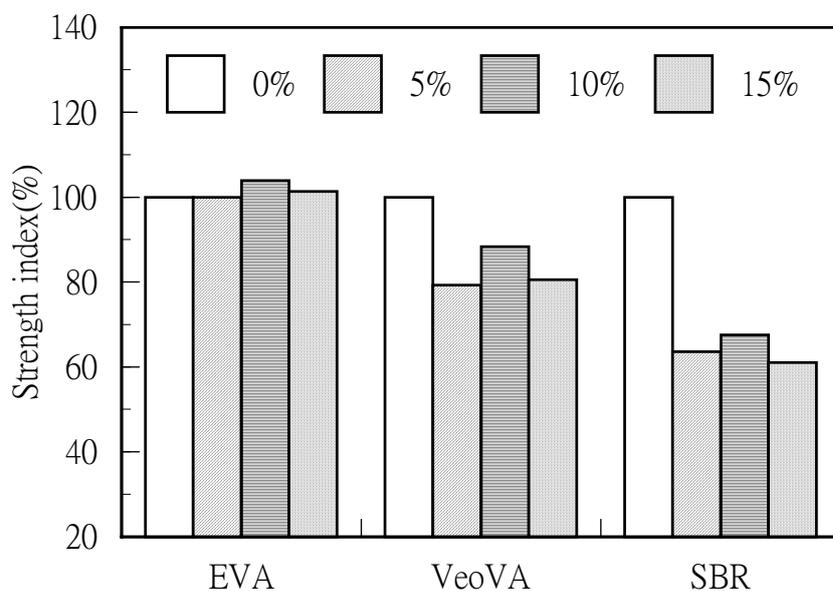


圖 4-29 聚合物改質水泥砂漿試體抗彎試體關係(齡期 56 天)

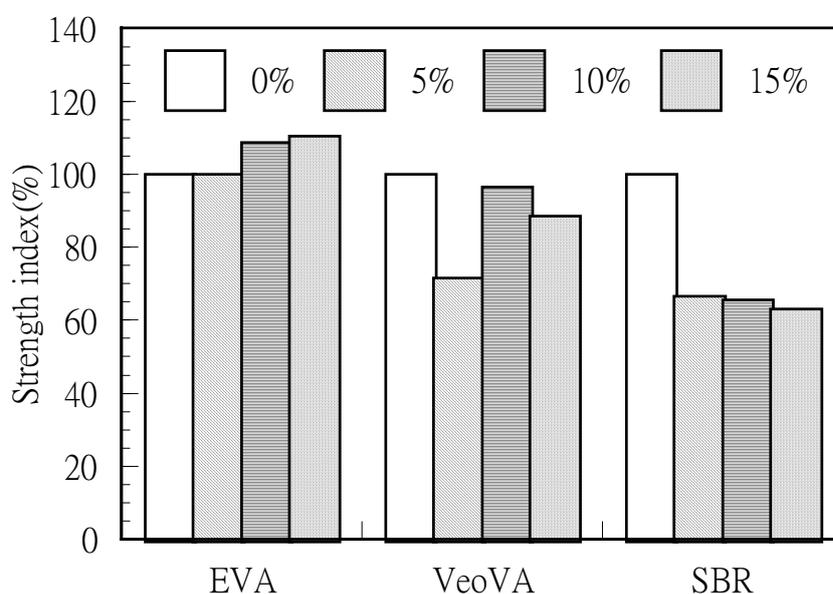


圖 4-30 聚合物改質水泥砂漿試體抗彎試體關係(齡期 91 天)

3.黏結強度

利用剪力試驗，可瞭解添加不同聚合物後，對於水泥基質材料其黏結性質的影響，其試驗結果如表 4-18 所示，結果顯示：

全部改質水泥砂漿的試體強度都比控制組低，而添加 EVA 的改質水泥砂漿的黏結強度都約比控制組低 50%，添加量在 5~15% 之間的黏結強度僅差異在 5% 以內，所以黏結強度並不隨著添加量的增加而隨之增減。

添加 VeoVA 試體的黏結強度從結果顯示，添加量的增加其強度卻隨之降低，添加 VeoVA 的試體強度比控制組約降低 32.2~61.2% 之間。

添加 SBR 試體的黏結強度，從結果顯示最多僅提升至控制組強度的 50%。

綜合抗壓強度與黏結強度試驗的試體破壞情形結果顯示，由於修補材料的抗壓強度控制組低，故使試體的破裂處皆於強度較低的修補材上。

表 4-18 黏結強度試驗結果

試體編號	黏結強度(MPa)				與控制組黏結強度 差異值比較(%)
	#1	#2	#3	平均	
AC	41.8	38.7	42.4	41.0	--
AE5	18.0	24.7	--	21.4	-47.9
AE10	20.8	22.8	--	21.8	-46.8
AE15	20.6	20.3	--	20.4	-50.2
AV5	27.7	28.0	--	27.8	-32.2
AV10	19.5	22.8	16.7	19.7	-52.0
AV15	15.3	15.5	16.8	15.9	-61.2
AS5	15.3	16.3	17.8	16.5	-59.8
AS10	19.0	21.2	21.3	20.5	-50.0
AS15	18.2	21.8	21.5	20.5	-50.0

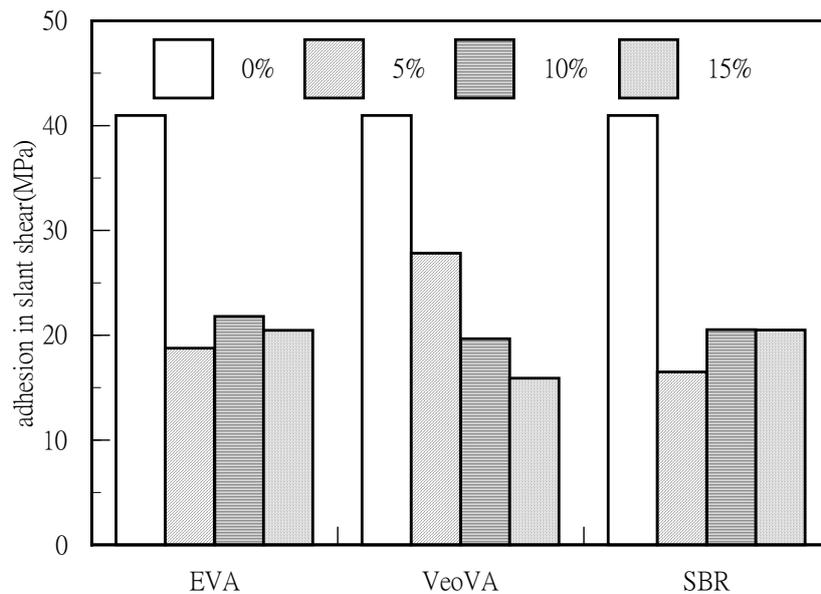


圖 4-31 聚合物改質水泥砂漿試體之黏結強度

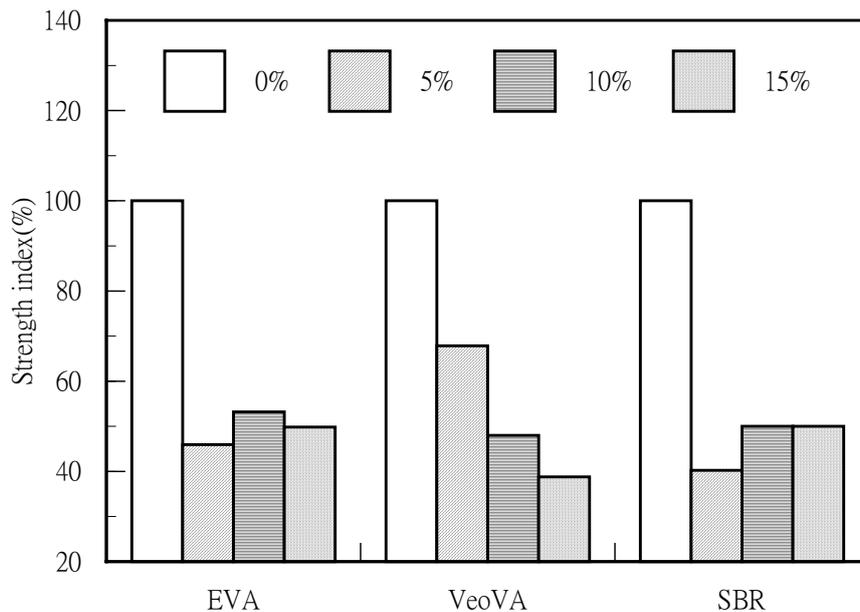


圖 4-32 聚合物改質水泥砂漿試體黏結試體關係



圖 4-33 聚合物改質水泥砂漿之黏結強度破壞試體(AC)

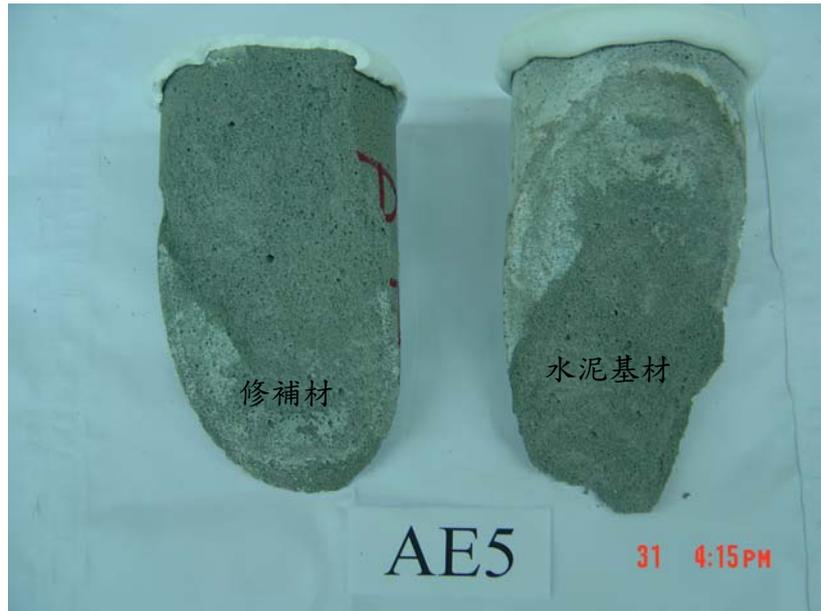


圖 4-34 聚合物改質水泥砂漿之黏結強度破壞試體(AE5)

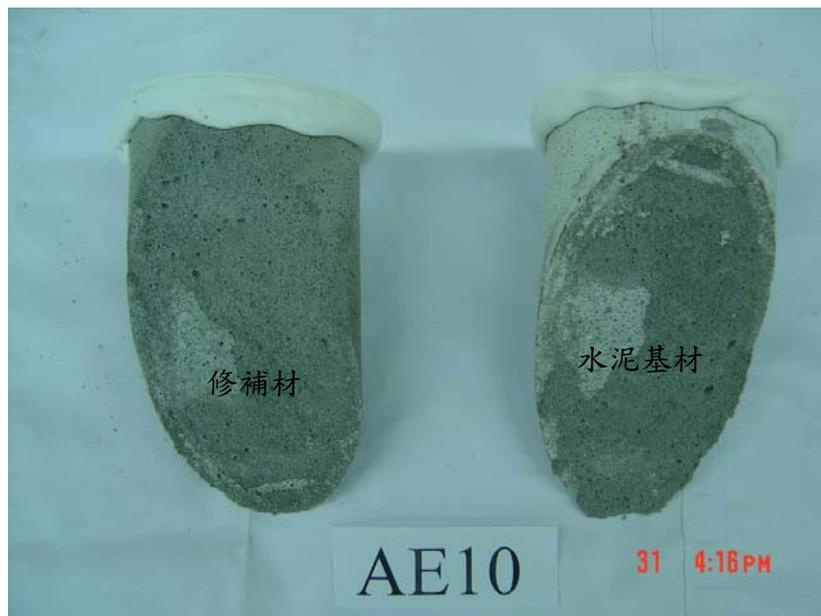


圖 4-35 聚合物改質水泥砂漿之黏結強度破壞試體(AE10)



圖 4-36 聚合物改質水泥砂漿之黏結強度破壞試體(AE15)

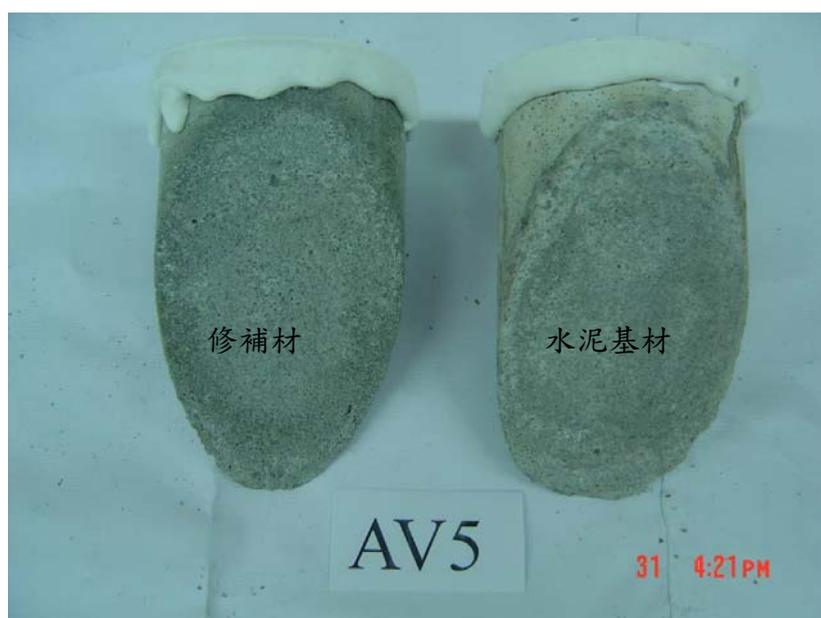


圖 4-37 聚合物改質水泥砂漿之黏結強度破壞試體(AV5)



圖 4-38 聚合物改質水泥砂漿之黏結強度破壞試體(AV10)



圖 4-39 聚合物改質水泥砂漿之黏結強度破壞試體(AV15)

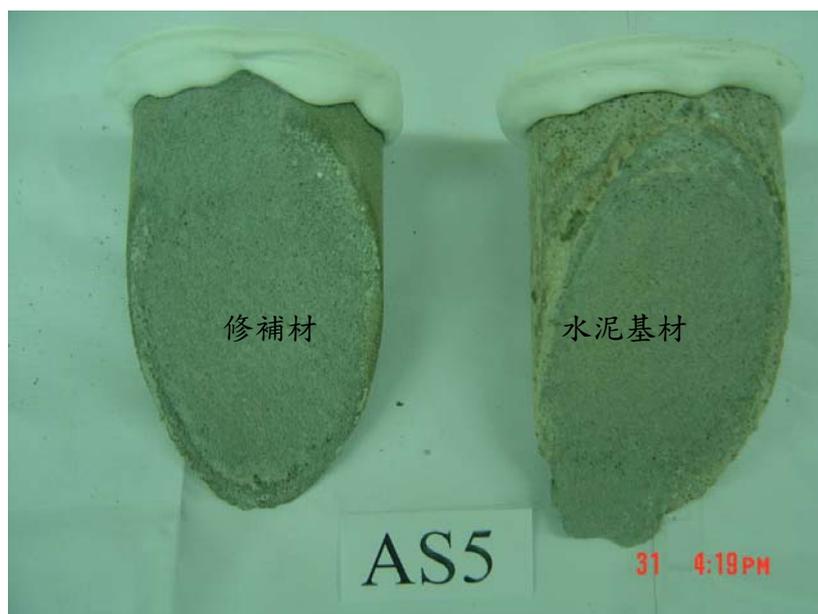


圖 4-40 聚合物改質水泥砂漿之黏結強度破壞試體(AS5)

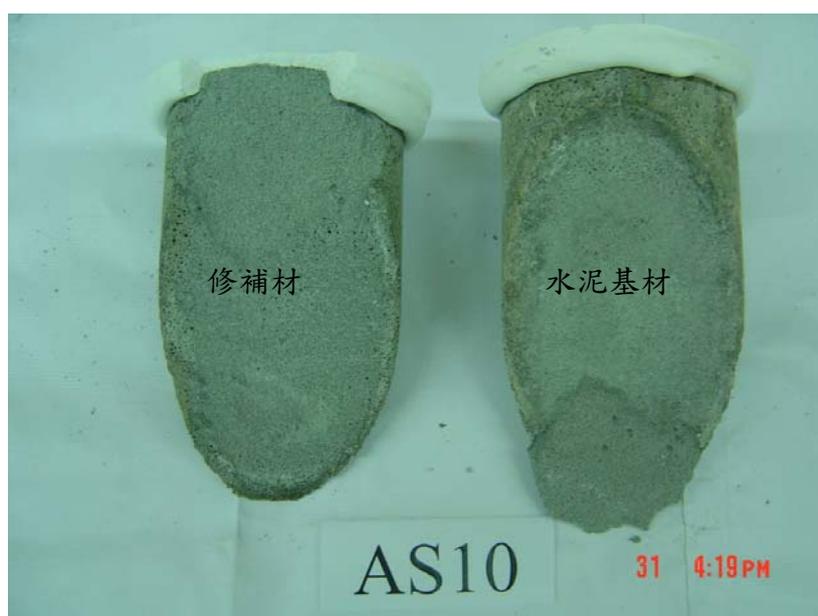


圖 4-41 聚合物改質水泥砂漿之黏結強度破壞試體(AS10)

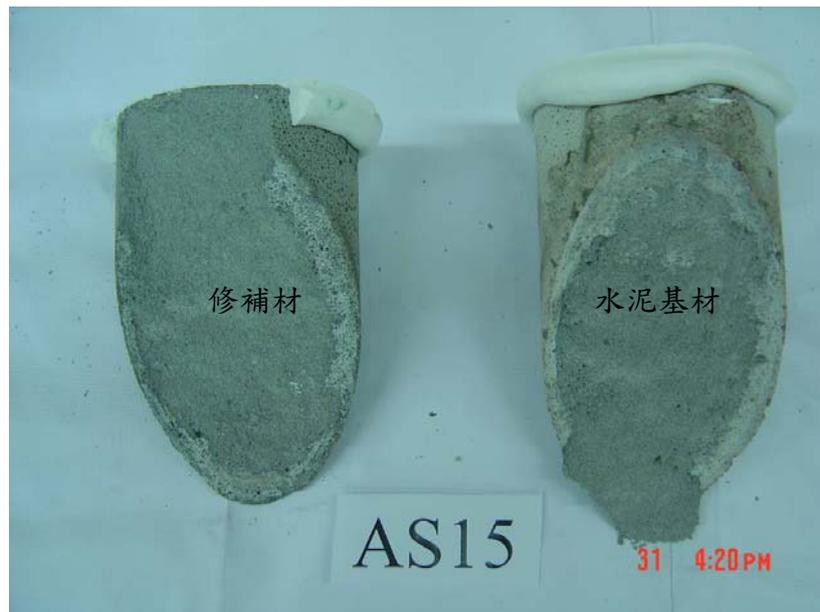


圖 4-42 聚合物改質水泥砂漿之黏結強度破壞試體(AS15)

耐久性

1. 快速氯離子穿透試驗

快速率離子穿透試驗為評估混凝土耐久性重要指標，本研究利用 RCPT 評估聚合物改質水泥砂漿試體抵抗率離子穿透能力，本研究進行 RCPT 試驗時，因試體為水泥砂漿試體不含粗粒料，並不適用 ASTM C1202 規範所規定之評估標準，其結果如表 4-19 所示，添加 EVA 及 VeoVA 的試體累積通過電量皆比控制組低，並且兩者的添加量越多其累積通過電量者越少，最低為 AE15 組累積通過電量為 494 Coulombs，比控制組下降 74.26%；而添加 SBR 的試體，添加量 5%及 10%的累積通過電量皆比控制組高，而添加 15%的累積通過電量為 1886 Coulombs，比控制組下降 1.72%。聚合物改質砂漿累積通過電量如圖 4-43 所示。

表 4-19 聚合物改質水泥砂漿累積通過電量

試體編號	6 小時累積通過電量 (Coulombs)	與控制組累積通過電量差 異值比較(%)
AC	1919	--
AE5	1040	-45.8 %
AE10	785	-59.1 %
AE15	494	-74.3 %
AV5	1167	-39.2 %
AV10	1163	-39.4 %
AV15	872	-54.5 %
AS5	2702	40.9 %
AS10	2158	12.5 %
AS15	1886	-1.7 %

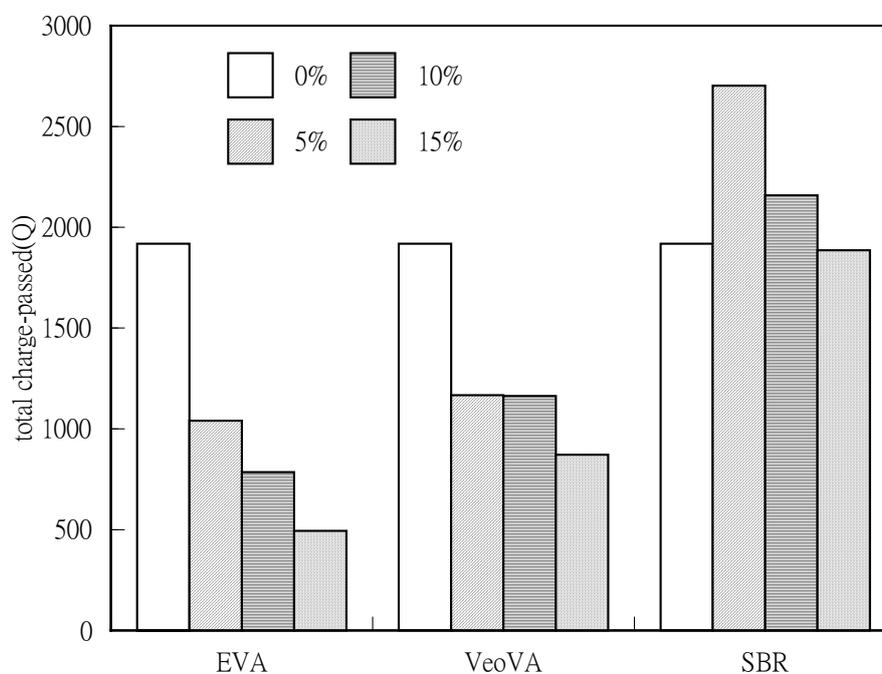


圖 4-43 聚合物改質水泥砂漿累積通過電量

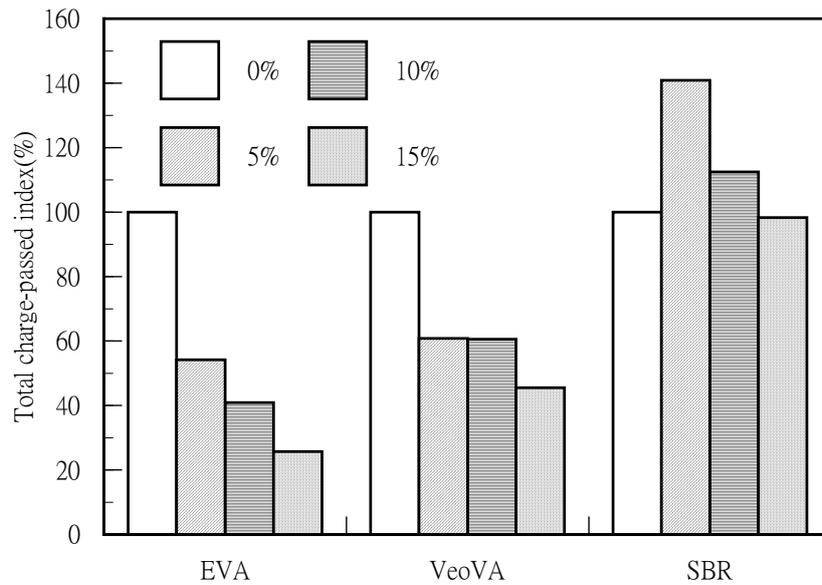


圖 4-44 聚合物改質水泥砂漿試體累積通過電量關係

微觀結構分析

1、MIP 試驗

壓汞式孔隙量測試驗法，可用來評估孔隙率、孔隙大小和孔隙尺寸分布，而在水泥漿體中孔隙結構內主要可分成兩大類：膠體孔隙及毛細孔隙，兩者各影響混凝土中的力學及物理性質。

影響混凝土內的機理主要影響的是毛細孔隙，而毛細孔隙也同時影響強度。水泥漿體的多孔性分類在表 4-20；所顯示的孔隙直徑大小從 10,000 nm ~ 2 nm。

表 4-20 水泥漿體孔隙與影響性質

分類	孔隙	孔隙尺寸	影響性質
毛細孔隙	大毛細孔隙	$d > 50\text{nm}$	強度、滲透
	中毛細孔隙	$10\text{nm} < d < 50\text{nm}$	強度、滲透、乾縮
膠體孔隙	小毛細孔隙	$2.5\text{nm} < d < 10\text{nm}$	乾縮
	微孔隙	$0.5\text{nm} < d < 2.5\text{nm}$	乾縮、潛變

壓汞試驗結果顯示，添加EVA與SBR試體的水銀總注入量(total intrusion)、孔隙率(porosity)有較控制組高的趨勢，因添加這兩種材料孔隙大，在相同的壓力下，水銀較易注入試體；臨界直徑為孔隙連通性的指標，與材料的滲透性(permeability)和擴散性(diffusivity)相關，臨界直徑小，表示材料的滲透、擴散性較低，抵抗外界不利因素(水分子、氯離子)入侵的能力較佳，而添加VeoVA的試體雖然表面孔隙較大但是內部孔隙小較致密，其水銀注入量、孔隙率及臨界直徑皆比控制組小，故表示材料的滲透、擴散性較佳，抵抗外界不利因素(水分子、氯離子)入侵的能力較佳。

表 4-21 壓汞試驗之各孔隙範圍汞注入量(mL/g)

試體編號	孔隙	孔隙範圍			累積注入量
		10~50nm	50~1000nm	>1000nm	
AC	#1	0.0157	0.0359	0.0493	0.0729
	#2	0.0089	0.0371	0.0152	0.0612
AE10	#1	0.0032	0.0829	0.0134	0.0963
	#2	0.0271	0.0709	0.0215	0.1196
	#3	0.0220	0.0995	0.0171	0.1387
AV10	#1	0.0335	0.0273	0.0158	0.0767
	#2	0.0276	0.0270	0.0126	0.0671
	#3	0.0301	0.0229	0.0159	0.0689
AS10	#1	0.0354	0.0856	0.0246	0.1457
	#2	0.0183	0.1144	0.0390	0.1717
	#3	0.0258	0.1153	0.0173	0.1584

表 4-22 壓汞試驗結果

試體編號	試體編號	臨界孔徑(nm)
AC	#1	141.9
	#2	175.1
AE10	#1	339.3
	#2	276.4
	#3	217.1
AV10	#1	33.6
	#2	33.6
AS10	#1	174.9
	#2	276.3
	#3	129.4

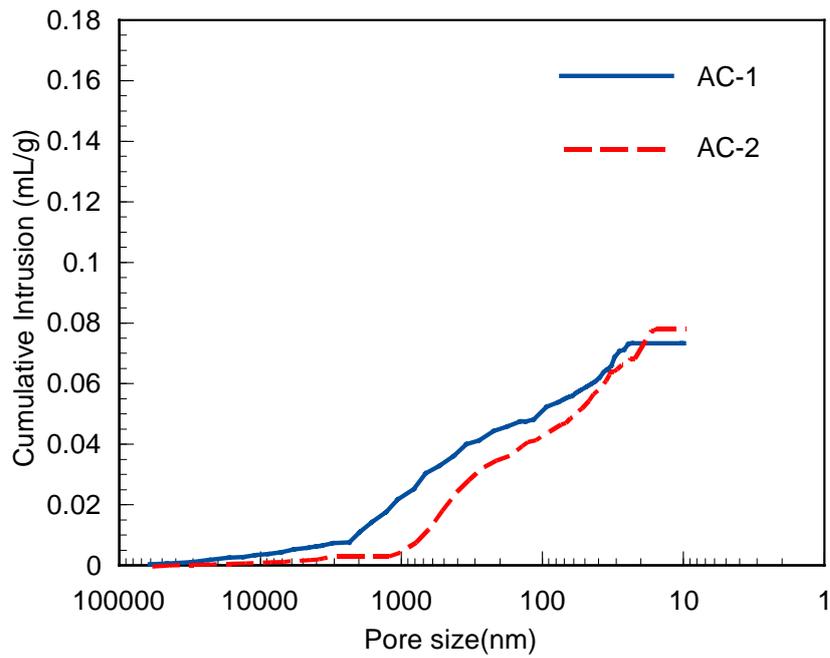


圖 4-45 累積注入量與孔隙尺寸分布圖(AC 組)

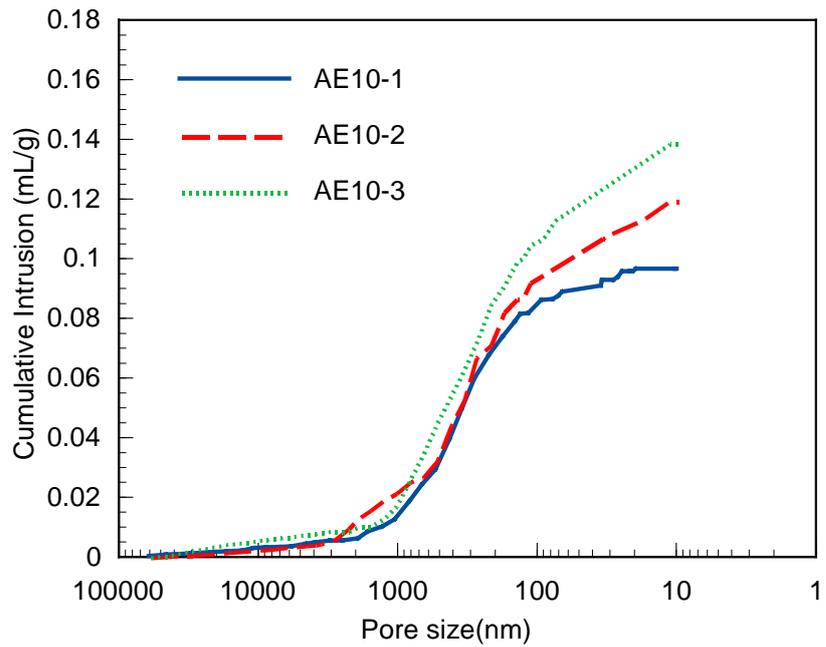


圖 4-46 累積注入量與孔隙尺寸分布圖(AE10 組)

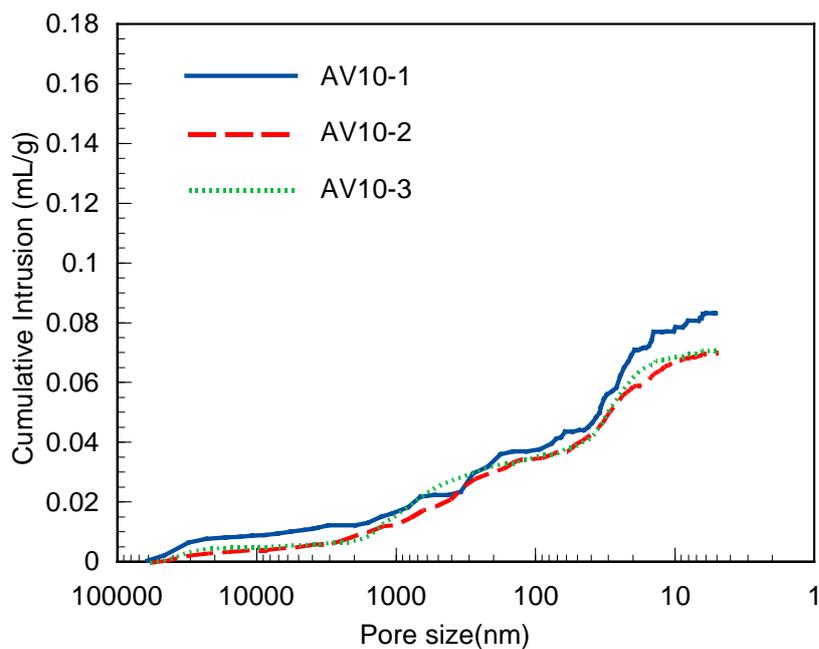


圖 4-47 累積注入量與孔隙尺寸分布圖(AV10 組)

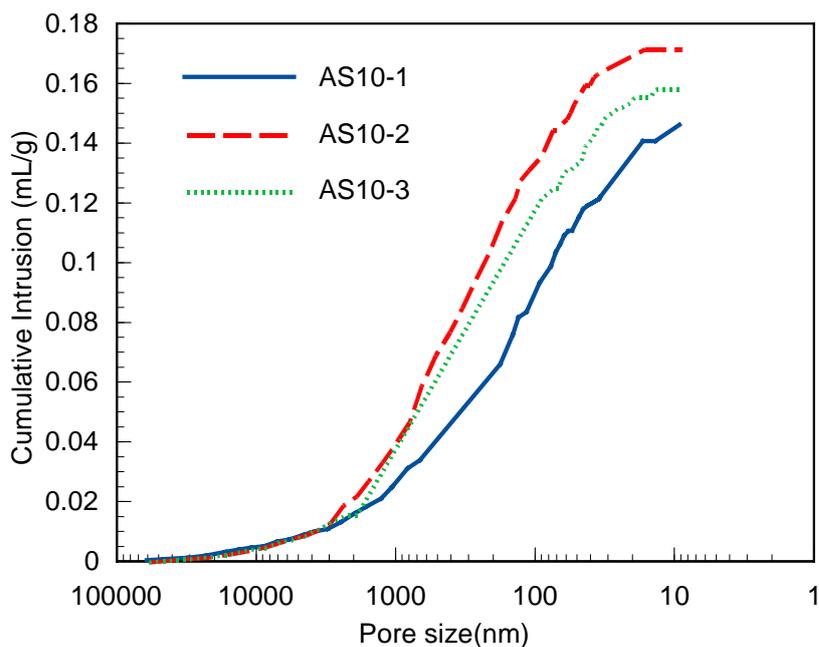


圖 4-48 累積注入量與孔隙尺寸分布圖(AS10 組)

2、SEM 圖

本研究使用 SEM 來觀測聚合物改質水泥砂漿之微觀結構，是否試體會呈現成膜現象，以及成膜的形狀，其放大倍率為 2000~10000 倍。

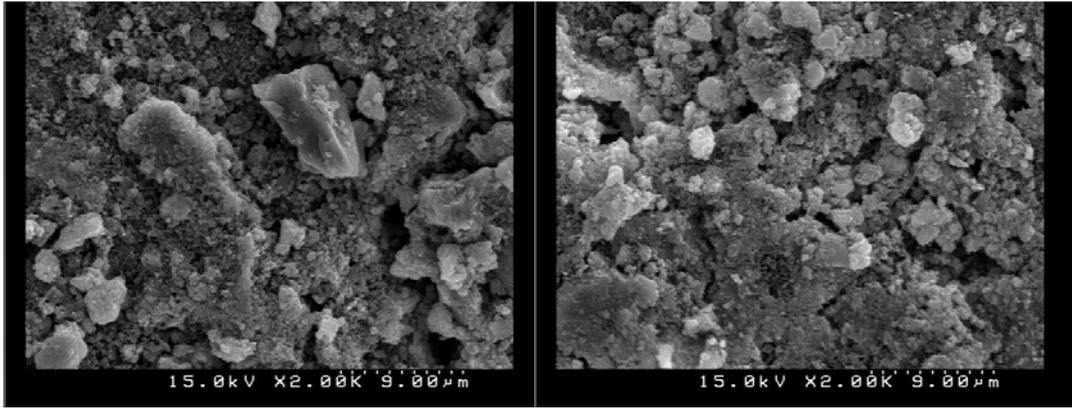


圖 4-49 聚合物改質水泥砂漿之 SEM 圖(AC 組)

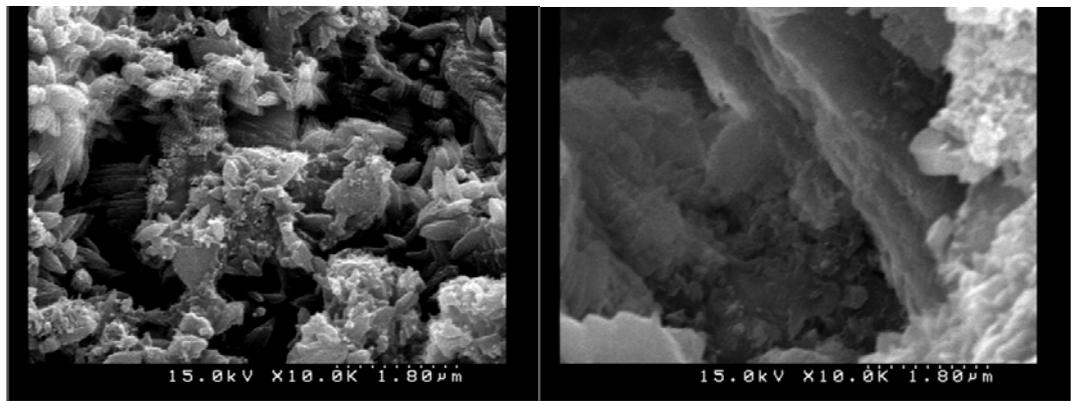


圖 4-50 聚合物改質水泥砂漿之 SEM 圖(EVA 組)

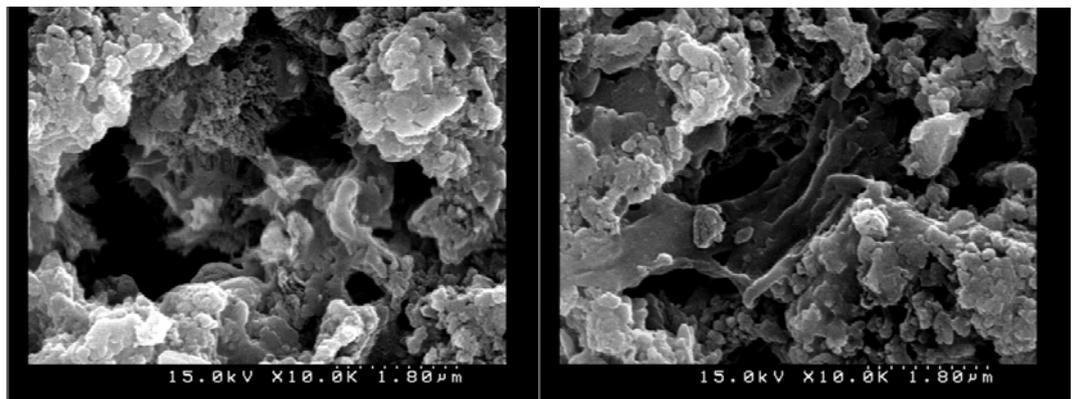


圖 4-51 聚合物改質水泥砂漿之 SEM 圖(SBR 組)

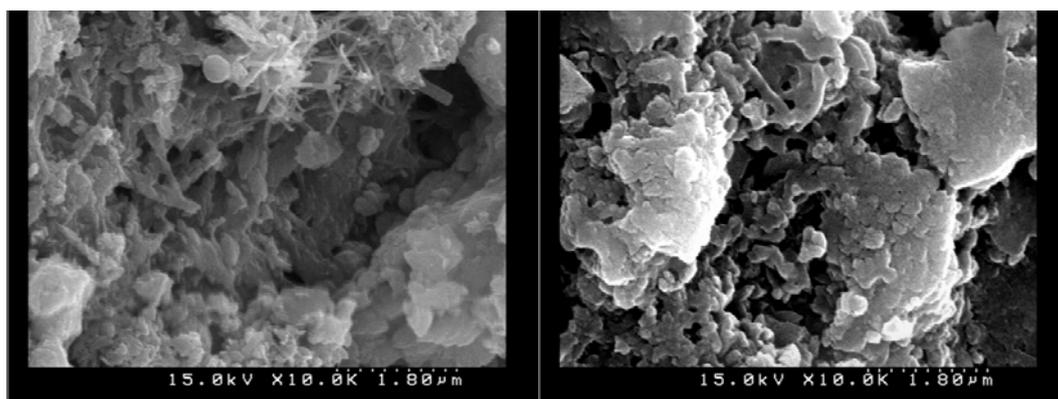


圖 4-52 聚合物改質水泥砂漿之 SEM 圖(VeoVA 組)

第五節 聚合物改質水泥砂漿性能探討

基本物理性質

1. 乾縮

乾縮試驗是評估修補材料相對重要性最為重要的評估試驗，而本研究的三種聚合物改質水泥砂漿的試體，只有 EVA 組的試體乾縮量比控制組低，而 VeoVA 的乾縮與控制組相差不大。

2. 吸水率

添加 EVA、VeoVA 及 SBR 的改質水泥砂漿，雖然添加後會產生發泡效果，但是硬固後會產生薄膜，所以有阻止孔隙連通效果，使得試體吸水達飽和狀態時間延長。

3. 初始吸水速率

添加 EVA、VeoVA 及 SBR 的初始吸水速度皆比控制組低，因為有成膜效果使得有中斷毛細現象，所以效果比控制組佳。

力學性質

1. 抗壓強度

添加 EVA 的改質水泥砂漿從結果顯示，強度明顯的比控制組低，因為添加 EVA 後骨材與骨材間並不僅只是水泥水化作用後的產物，並且有發泡效果使得孔隙變多且不致密，所以才會使抗壓強度降低。

2. 抗彎強度

添加 EVA 的改質水泥砂漿結果顯示，在齡期 28 天時只有添加 15% 的試體強度比控制組高，但是在 56 天齡期時所有添加 EVA 的改質水泥砂漿的抗彎強度皆比控制組高，由此可推估添加 EVA 的水泥砂漿的水泥水化及樹脂硬固成膜速度會減緩。

3. 黏結強度

添加 EVA 的改質水泥砂漿結果顯示，所有種類的添加量的黏結強度都比控制組低，因為三種添加量的試體破壞情形都是從改質砂漿的地方先破壞，導致施壓面無法平均受力到試體表面，所以試體會產生偏心載重才使黏結面強度降低。

耐久性

1. 快速氯離子穿透試驗

添加 EVA 以及 VeoVA 的改質水泥砂漿結果顯示，這兩種聚合物累積通過量皆比控制組低，所以添加這兩種類的試體都有提升耐久性能的效果，從抗壓強度以及抗彎強度推論 EVA 是因為成膜效果而使累積通電量降低，而 VeoVA 是因為有填充孔隙作用而使累積通過量降低。

第六節 評估聚合物改質水泥砂漿可行試驗法

本研究為既有 RC 建築物劣化及其修復技術之探討，而試驗材料與方法是針對薄層修復及防水鋪面來作設計，並且從文獻中及試驗後得知，利用聚合物來作為水泥砂漿的改質需要經過下列幾項試驗之可行性評估：

基本物理性質

1. 乾縮

本試驗依據 ASTM C596 規定，為了解漿體與砂漿的乾燥收縮情形，試體拌合澆置完成後，須於模具內濕養 $23 \pm 1/2$ 小時，脫模在置入水中濕養 48 小時，於齡期為 $72 \pm 1/2$ 小時經試體從水中取出並以濕抹布擦拭後即量測其長度，並以此長度為基準，試體繼續存放在溫度 $23 \pm 1^\circ\text{C}$ 、相對溼度 50% 的恆溫恆濕櫃中乾養至第 4、11、18 及 25 天量測其長度。

2. 初始吸水速率

本試驗參考 C. Hall 的試驗方法，用來評估聚合物改質水泥砂漿孔隙中的毛細傳輸現象。

力學性質

1.黏結強度

本試驗參考 ASTM C882 進行試驗，先進行灌製水泥砂漿基材養護 28 天後取出，基材接著面仰角 60°。隨後將基材置於一內徑 7.5 cm、高 15.0 cm 的鋼模底度，灌入聚合物改質水泥砂漿拆模後，置放於大氣中養護 28 天後進行抗壓強度試驗，所得數值可用來判定聚合物改質水泥砂漿與基材間的黏結強度。

2.抗彎強度

本試驗依據 ASTM C348 水泥砂漿抗彎試驗，測試在求得漿體與砂漿之抗彎強度。試體在拌合後分二層澆置在抗彎模中，在養護於濕櫃中 24 小時後拆模，試體置於清水槽中，至預定齡期時，將試體取出拭乾，進行抗彎試驗。

3.抗壓強度

本試驗灌置 5 cm 立方體之砂漿試體，並參考 ASTM C109 之方法進行抗壓試驗。

耐久性

1.快速氯離子穿透試驗

可依據 CNS14795 或 ASTM C1202-97 混凝土抗氯離子穿透能力試驗法-通過電賀亮表示法，以混凝土導電性之測定，作為混凝土抗氯離子滲透入侵之指標。

2.透水試驗

CRD-C 48-92 為美國陸軍工兵署之防水檢測方式，其原理為利用一定之水壓注入混凝土試體內，玻璃圓筒內下降之刻度，即為混凝土所能滲入之水量，再將下降刻度之水量建議代入 Darcy 公式，即可求出其滲透係數。

孔隙結構量測

1.壓汞孔隙量測試驗法

壓汞試驗，係依照 ASTM D4404-84 規範，其原理是利用加壓之壓力使汞充滿乾燥試體周圍，然後利用高壓(油壓)汞注入試體內，量測加壓之壓力與灌入汞量，注入進試體內之汞量即是試體孔隙體積，再由電腦換算可得孔隙體積、尺寸、分佈情形及孔隙率等資料。

第五章 結論與建議

第一節 結論

1. 國內既有 RC 建築物劣化行為主要為混凝土裂縫、混凝土剝落與滲漏水。
2. 彙整相關文獻資料提出「既有 RC 建築物修復施工綱要草案」於研究報告之附錄中，其中包括劣化原因、檢測技術、修復材料與方法以及效能驗證試驗法。
3. 利用生命週期成本評估(Life Cycle Cost Assessment, LCCA)概念建立 RC 建築物修復材料效益評估方法，除考慮 RC 建築物初期的建造成本，並將建築物後續的維護管理、檢修、拆除等變異因素列入成本考量之評估方法概論。
4. 乾縮試驗是評估修補材料相對重要性最為重要的評估試驗，而本研究的三種聚合物改質水泥砂漿的試體，只有 EVA 組的試體乾縮量比控制組低。
5. 結果顯示添加 EVA 的改質水泥砂漿，可降低乾縮(46.8 ~ 58.6%)、膨脹率與基材相近、可減緩吸水速度、降低吸水速率(57.1 ~ 74.0%)、提升抗彎強度(0 ~ 10.5%)以及降低離子穿透量(45.8 ~ 74.3%)，雖然添加 EVA 會使試體增加發泡效果，但是硬化後會產生薄膜可以阻止孔隙連通性。
6. 添加 VeOVA 以及 SBR 的改質水泥砂漿試體不適用於修補材料的原因，是因為添加這兩種聚合物後的試體乾縮值比控制組增加約 14.4 ~ 62.2%之間，以及抗彎強度比控制組降低約 11.7 ~ 39.0%。

第二節 建議

1. 建議國內政府機關應依據國內地區主要之既有 RC 建築物劣化類型，著手訂定「既有 RC 建築物劣化修補材料基本性質」標準，以及「修補材料結合既有混凝土材料」之各種性能標準與適當檢測試驗方法。
2. 選擇適當之修補材料必須考慮下列相對重要之性能試驗(1)乾縮；(2)黏結強度；(3)抗彎強度；(4)彈性模數；(5)抗離子穿透；(6)抗壓強度。
3. 本研究試驗配比為控制水灰比，但在實際施工上必須考量各施工環境下去調整用水量，以控制工作性質且達到修補材料的最大效用。

附錄一 座談會審查會意見彙整表

1. 擬訂診斷技術：如超音波檢測…，收集建築物的診斷工具以及檢測方式。
2. 研發出來之配比設計以及成果可申請專利，並可以產學合作完成研究。
3. 裂縫修復與滲透修復，須配合哪些適當的工法，可訓練修復技術之人才，並嚴控施工人員之施做技術。
4. 修補材料的厚度適用於何處，聚合物改質砂漿的養護方式，紫外線對聚合物的影響。
5. 塗封修復應用於滲透方面，但修補後脆性材料受外力衝擊所能承受的範圍。
6. 因劣化種類的不同，其修復的方式也不同，請明確指出並擬訂施工方法。
7. 溫、溼度對聚合物改質砂漿的影響
8. 文獻上指出乾縮量大於1%明顯太大，本研究需加強改善
9. 新舊交界面是否成為混凝土的弱面，其耐久性是否受影響。
10. 聚合物材料的壽命，並提供材料性質及化學性質。
11. 補強後是否變好，怕補強之後其修補材料本身對結構體造成不好的化學反應，因導致加速腐蝕…。
12. 與哪些廠商合作或取得材料，請明確說明，或者以代號A. B. C…，及目前聚合物的實用性。
13. 混凝土粗細骨材，含有氯離子成分，最主要起源於料源狀況，民國70~75年，台北市所見房屋，其細骨材來自於關渡附近潮汐影響之淡水河沙，故甚多海砂屋產生，防止之道在於確認，骨材取得之環境，防止裂縫比修補裂縫重要。
14. 在低壓灌漿中應註示各修補材料的流動性及凝固時間，以保證材料的工作性。
15. 在「施工綱要草案」的內容屬摘要型之規定，因此很多的細節未能詳細地描述，可能會造成日後使用時的詮釋會有所不同，也比較容易造成爭議，因此建議在第一頁的前言中，能將此草案的撰寫原則與目的、適用的場合、使用時注意事項及限制條件，待補充的內容等重要事項加以較詳細的說明，嘗可使此草案的參與者能了解其適用性及限制性。
16. 草案中的所有方程式宜加以編號
17. 宜將相關的參考文獻列在草案後供給參用者之參考（尤其是草案中有引用教案之部份均宜列出文獻出處）。
18. 在文件的標題為「既有RC建築物修復施工細要」草案，可考慮將主題縮小在「施工細要」方面，因此，此手冊有些章節可考慮刪除或縮短內容（如1.2.5試驗報告中之滲透性試驗(over)），共有六種滲透性試驗，CRD四項性能試驗，這些屬於事前或事後品質保證相關問題，是否與標題的「施工細要」有直接的必要性，而必須列在本手冊中，可再考量。
19. 建議可將第一節縮短，第二節材料列入「第三節施工」中，為廣大「第三節施工」的內容，加第四篇施工後品質檢測與管制。
20. “grout”名詞目前無適當中文名詞，可考慮使用一個新的名稱“稠漿”與能與“灌漿”（此名稱在工程界中為動詞，“動作”有所區別，今將其也作為名詞用，可能會產生混淆。）
21. 判斷裂縫深度為維修RC結構之關鍵因素，惟很難準確有效測量。若能由裂縫寬度、長度等容易觀測值，配合建物形狀、受力狀態、乾縮本能(即強度)、環境因素等加以綜合診斷分類，則後續修復工作較有依據。如醫生之診斷與開藥，方能有事半功倍之效。

22. 本研究前半部診斷技術之研究較弱，後半部之修復技術較全。
23. 報告內容涵蓋 RC 建築物劣化及修復，及修復材料等項目，均有明確的敘述與說明，也提出了 RC 建築物修復後生命週期成本之評估方式，值得肯定。
24. 試驗數據顯示三種水泥砂漿添加 EVA、VeOVA 及 SBR 之強度變化，可減低乾縮量；抗壓強度均有良好表現，可作為修復材料選用之評估依據。為配合實用性，建議將其來源、購置成本、施工方法等亦在報告書中加入。
25. 中國土木水利學會有相關的修補規範，可考慮加以整合評估。
26. 請考慮有關劣化診斷程序、所用技術、修復方法、材料及生命週期評估，是否能整合成一按時間發生順序的流程圖。
27. 為簡化生命週期成本評估，在選擇不同的修復方法及材料，是否也能就所選用的修復方法及材料，個別進行生命週期成本評估。
28. RC 建築物修復施工綱要已有雛形，後續可以選擇較常用的幾種修復方法，深入做施工綱要。
29. 建議將已收集之修復材料做整理，提供使用者參考。
30. 論及修復材料，國內學術界應加強與產業界的技術研發及合作開發。
31. 建議訂定修復材料之檢驗基準及測試方法以確保材料品質，未來應研擬製訂國家材料檢驗方法。
32. 國內修復材料之施作人員訓練培訓，應引用先進國家工作人員需具備的訓練及施工程序。
33. 施工綱要規範部分建議增加對鋼筋劣化之修復部分，以提供規範部分要求之建議條文草案。

附錄二 混凝土修補材料價目表

台灣西卡股份有限公司混凝土用修補材料一覽表(混凝土修補+保護+結構補強)

1. 混凝土修補

品名	用途	材料成本	施工成本	預期壽命
Sika MonoTop 610	含矽灰及鋼筋防腐蝕抑制劑之底塗	\$ 55 / mm / m ²	\$ 250 / m ²	10 ~ 15年
接著層砂漿+鋼筋防腐蝕抑制劑				
Sika MonoTop R40	含矽灰及抗裂纖維之厚層修補砂漿	\$ 800 / cm / m ²	\$ 250 / m ²	10 ~ 15年
高分子修補砂漿				
Sika MonoTop 620	含矽灰之表面修飾砂漿	\$ 60 / mm / m ²	\$ 250 / m ²	10 ~ 15年
高分子表面修飾砂漿				
SikaPatch M	超早強修補砂漿	\$ 1400 / cm / m ²	\$ 250 / m ²	5 ~ 10年
超早強可澆置修補砂漿				
Sika Repair Mortar	含矽灰及抗裂纖維之水泥系修補砂漿	\$ 800 / cm / m ²	\$ 250 / m ²	10 ~ 15年
高效能修補砂漿				
Sikadur 31 SBA	可用於混凝土修補	\$ 400 / kg	\$ 500 / m ²	> 15年
節塊橋樑環氧樹脂接著劑				
Sikadur 52	可用於混凝土孔洞及裂縫修補	\$ 500 / kg	工加料 \$ 1,000 / m	> 15年
低黏度裂縫灌注工法專用環氧樹脂				

2. 保護

品名	用途	材料成本	施工成本	預期壽命
Sika Ferrogard 903	滲入混凝土，與鋼筋表面結合可延遲並減緩腐蝕	\$ 120 / m ²	\$ 200 / m ²	> 10年
滲透式防腐蝕抑制劑			(施作4層)	
Sikagard 550W Elastic	抗紫外線，15年不褪色，具有極佳的抗裂功能	\$ 240 / m ²	\$ 240 / m ²	> 15年
混凝土表面抗裂保護塗料			(施作3層)	

3. 結構補強

品名	用途	材料成本	施工成本	預期壽命
Sikadur 32雙液 型新舊混凝土 環氧樹脂接著 劑	提供比混凝土 本身更高的抗 拉強度及良好 的結構黏合	\$ 250 / m ²	\$ 120 / m ²	> 15 年
SikaWrap碳纖 維網結構補強 系統	可用於混凝土 修補及增加承 載力	\$800~1,000/m ²	工加料 第一層	> 15 年
Sikadur -330碳 纖維網專用環 氧樹脂黏著劑	供碳纖維網黏 著用	\$ 500 / mm / m ²	\$3,000 / m ² 第二層	> 15 年
Sika CarboDur 高強度碳纖維 結構補強系統	結構補強	\$ 2,000 / m(10 cm寬)	工加料	> 15 年
Sikadur -30 LP 碳纖維版專用 環氧樹脂黏著 劑	供碳纖維版黏 著用	\$ 360 / kg	\$ 4,000 / m	> 15 年

南星顏料股份有限公司修補材料一覽表

品名	用途	材料成本	施工成本	預期壽命
樹脂益膠泥		350	-	-
南星 SBR 樹脂		2000	-	-
南星益鏝泥		110	-	-
坪平泥 ECO		280	-	-
批土益薄泥		200	-	-
南星防水粉		100	-	-
彈性防水材-益柔泥		1200	-	-
無收縮水泥		300	-	-
速硬 3K-III		250	-	-

參考書目

(一)中文資料

- 1991 混凝土編輯委員會 混凝土工程施工須知 中國土木工程學會
- 1995 劉名昱 混凝土之裂縫 水利工程 第五期
- 1996 鋼筋混凝土橋樑腐蝕及使用年限之研究 財團法人中興工程顧問社
- 1996 林宜清/劉宗豪 鋼筋混凝土結構物表面裂縫檢測技術之研發現況 檢測科技
- 1997 蔡得時 腐蝕環境對鋼筋混凝土結構物及材料耐久性之研究 博士論文
- 1998 黃君雄 鋼筋混凝土安全性檢測之研究 建築物防災檢測與補強技術研討論文集
- 1998 楊逸詠/江勇清/吳金龍 鋼筋混凝土建築物龜裂理論與實際 詹式書局
- 1999 徐耀賜/苟昌煥/吳東昇 混凝土橋樑檢測時常見之結構損傷模式(三) 現代營建 第231期
- 1999 吳傳威/彭富添 鋼筋混凝土建築物之修復與補強技術彙編 內政部建築研究所
- 1999 王鐵梵 工程結構裂縫控制 中國建築工業出版社
- 1999 徐耀賜 混凝土橋梁檢測時常見之結構損傷模式(一) 現代營建
- 2000 丁育群/陳宗禮 鋼筋混凝土建築物之修復與補強技術彙編(二) 內政部建研所
- 2000 謝素蘭 土木工程材料-科學與應用 五南圖書出版公司
- 2001 內政部建築研究所 建築物防水設計手冊 社團法人中華民國營建防水技術協進會
- 2001 譚大璐/陳建成/洪盟峰 土木材料 新文京開發出版有限公司
- 2002 洪乃丰 鋼筋混凝土基礎設施的腐蝕與全壽命經濟分析 建築技術 第4期
- 2003 橋樑生命週期成本評估方法與結構使用年限之建立1 台灣營建研究院
- 2003 橋樑生命週期成本評估方法與結構使用年限之建立2 台灣營建研究院
- 2003 橋樑生命週期成本評估模式建立應用手冊(草案) 台灣營建研究院
- 2003 馬眷榮 建築材料辭典 化學工業出版社
- 2003 徐峰/朱曉波 實用塗料技術建築 化學工業出版社
- 2004 沈榮熹/崔琪/李清海 新型纖維增強水泥基複合材料 中國建材工業出版社
- 2005 內政部建築研究所 RC 建築物防蝕技術施工準則與檢驗技術之建立
- 2005 洪乃丰 氣鹽環境中混凝土耐久性與全壽命經濟分析 混凝土 第8期

2005 王增忠/柳玉杰 混凝土建設項目全壽命經濟分析 基建優化 第5期

2006 傅德海/趙四渝/徐洛屹 乾粉砂漿 中國建材工業出版社

(二)英文資料

1978, A. Beeby, <Corrosion of reinforcement steel in concrete and its relation to cracking>, The Structural Engineer, No. 3, Vol. 56A.

1979, N. Jackson, <Civil Engineering Materials>, Cen Tai.

1981, S. Mindness, J.F. Young, Concrete, 1st ed., Prentice-Hall.

1990, K.K. Creasil, F.P. Glasser, <Analysis of the steel: concrete interface>, Proc. of Conf. On Corrosion on Reinforcement in Concrete, UK.

1990, J.G. Cabrear, P.A. Claisse, <Measurement of Chloride Penetration into Silica Fume Concrete>, Cement Concrete Composites, Vol.12.

1991, D.C. Allen, H. Roper, <Concrete structures: materials, maintenance and repair>, Longman scientific & technical.

1992, P.K. Mehta, M. Paulo, <Concrete: Structure, Properties, and Materials>, 2nd. Ed., Prentice Hall.

1993, ACI Committee 224, Causes, <Evaluation and Repair of Cracks in Concrete Structures>.

1993, R.T.L. Allen, S.C. Edwards, J.D.N. Shaw, <The repair of concrete structures>, Blackie academic & professional.

1993, R.T.L. ALLEN, S.C. EDWARDS, J.D.N. SHAW, <The repair of concrete structure>

1994, S. Chandra, Y. Ohama, <polymer in concrete>, CRC Press Inc

1995, M.U.K. Afridi, Y. Ohama, M. Zafar Iqbal&K.Demura, <Water retention and adhesion of powdered and aqueous polymer-modified mortar>, Cem. Concr. Compos.

1995, P.S. Mangat, M.K. Limbachiya, <Repair material properties which influence long-term performance of concrete structures>.

1995, A.M. Neville, <Properties of Concrete>, 4th ed., Addison Wesley Longman.

1996, R.K. Dhir, M.R. Jones, <Concrete in the service of mankind: concrete repair>, rehabilitation and protection, E & FN SPON.

- 1996, P.H. Emmons, A.M. Vaysburd, <System concept in design and construction of durable concrete repairs > .
- 1996, A. M. Neville, <Properties of Concrete > , 4th ed., Longman, New York.
- 1996, D.R. Morgan, <Compatibility of concrete repair materials and systems > .
- 1996, < National Highway System designation Act : LCCA Requirements FH-WA-HNG-40 > .
- 1997, Dr. M.H Decter BSc (Honnurs) PhD CChen MRSC, <Fosroc International Led, Durable concrete repair-importance of compatibility and low shrinkage > .
- 1997, I.J. Vries, R.B. Polder, <Hydrophobic Treatment of Concrete Construction and Building Materials > .
- 1997, Robert S.Zobel, R.L. Carrasquillo, D.W. Fowler, <Repair of impact damaged prestressed bridge girder using a variety of materials and placement methods > .
- 1997, P.F. G.Binfill, <Re-alkalisation of carbobated concrete - effect on concrete properties > .
- 1997, D.J. Cleland, K.M. Yeoh, A.E. Long, <Corrosion of reinforcement in concrete repair > .
- 1997, J.G. Cabrera, A.S. Al-Hasan, < Performance properties of concrete repair materials > .
- 1999, Andrea Saccani, Vittorio Magnaghi, <Durability of epoxy resin-based materials for the repair of damaged cementitious composites > , Cem. Concr. Res.
- 1999/3, Joachim Schulze, <Influence of water-cement ratio and cement content on the properties of polymer-modified mortars > , Cem. Concr. Res.
- 1999 D.M. Frangopol, <Life-Cycle Cost Analysis for Bridges > , Bridge Safety and Reliability.
- 1999, A.F. Bennett, K. Bourke, <Life Cycle costing for a design life standard > , Durability of building Material and Components, Vol. 8, 1509-1517.
- 2000, A.I. Abu-Taira, U.D. Laverya, A. Nadjaja, S.R. Rigdenb, T.M.A. Ahmedb, <A new method for evaluating the surface roughness of concrete cut for repair or strengthening > .
- 2000, A.M. VaysburdU, P.H. Emmons, <How to make today's repairs durable for tomorrow - corrosion protection in concrete repair > .

- 2000, Concrete Waterproofing by Crystallization, <A Briefing Data from Xypex Chemical corporation>, Vancouver, Canada.
- 2000, M.J. Shannag, <High strength concrete containing natural pozzolan and silica fume>, Cem. Concr. Compos. Vol. 22.
- 2001, P.K. Mehta, R.W. Burrows, <Building Durable Structures in the 21st century>, Concrete International.
- 2001, Y.K. Wen, Y.J. Kang, <Minimum building life-cycle cost design criteria II : application>, Journal of structural Engineering.
- 2002, M.J. Shannag, <High-performance cementitious grouts for structural repair>, Cem. Concr. Res. , Vol. 32.
- 2002/3, Shiyun Zhong, Zhiyuan Chen, <Properties of latex blends and its modified cement mortar>, Cem. Concr. Res.
- 2002/3, D.A. Silva, H.R. Roman, P.J.P. Gleize, <Evidences of chemical interaction between EVA and hydrating Portland cement>, Cem. Concr. Res.
- 2003, M.M. Al-Zahrani, M. Maslehuddin, S.U. Al-Dulaijan, M. Ibrahim, <Mechanical properties and durability characteristics of polymer-and cement-based repair materials>, Cem. Concr. Compos.
- 2003, Antonio Nanni, <North American design guidelines for concrete reinforcement and strengthening using FRP: principles, applications and unresolved issues>.
- 2003, <Proposal document of waterproofing system for Taiwan high speed Rail>.
- 2004/3, A. Momayez, M.R. Ehsani, A.A. Ramezani pour, H. Rajaie, <Comparison of methods for evaluating bond strength between concrete substrate and repair materials>, Cem. Concr. Res.
- 2004/10, D.A. Silva, P.J.M. Monteiro, <ESEM analysis of polymeric film in EVA-modified cement paste>, Cem. Concr. Res.
- ASTM E917-94, <Standard practice for measuring Life-cycle costs of buildings and building systems>.

(三) 網頁資料

李有豐 非破壞性檢測與評估，台大營建知識網

李有豐/施邦築 鋼筋混凝土橋樑非破壞性檢測評估原理與實務研究，台大營建知識

網

李有豐 混凝土結構物劣化機制與維修補強要領，台大營建知識網

安固工程有限公司，<http://www.anchors.com.tw/>

南星顏料廠股份有限公司，<http://www.alcaflex.com.tw/>

昭凌工程顧問股份有限公司，<http://www.join.com.tw/>

國森企業股份有限公司，<http://www.ksbond-tec.com.tw/>

田心工程有限公司，<http://www.ten-shin.com.tw/>

台灣西卡股份有限公司 <http://www.sika.com.tw/>

台灣省土木技師公會 <http://www.twce.org.tw>

附件 既有 RC 建築物修復施工綱要草案

目錄

前言	124
第一節 通則	124
1.1 定義(Definition)	124
1.1.1 混凝土(Concrete).....	124
1.1.2 水泥砂漿(Mortar).....	124
1.1.3 水泥灌漿材料(Grout).....	124
1.1.4 水泥基材料(Cement-Based Material)	124
1.1.5 聚合物改質劑(Polymer-Modifier)	124
1.1.6 聚合物改質材料(Polymer-Modified Material) ...	124
1.1.7 環氧樹脂(Epoxy Resin Binder).....	124
1.1.8 環氧樹脂混凝土(Epoxy Concrete)	125
1.1.9 環氧樹脂砂漿(Epoxy Mortar)	125
1.1.10 環氧樹脂漿(Non-Pressure Epoxy Grout).....	125
1.1.11 環氧樹脂注膠劑(Epoxy Injection Adhesive)....	125
1.1.12 快速硬固修補材料(Rapid-Hardening Repair Material).....	125
1.1.13 非結構型裂縫(Non-Structural Cracks).....	125

1.1.14 結構型裂縫(Structural Cracks)	127
1.2 系統說明(System Description)	128
1.2.1 設計要求(Design Requirements).....	128
1.2.1.1 修補材料(Repair Materials)	128
1.2.2 修補材料性能要求(Repair Material Performance Requirements)	128
1.3 資料送審(Submittals)	128
1.4 品質保證(Quality Assurance)	129
1.4.1 資格(Qualifications)	129
1.4.1.1 承包商資格(Contractor Qualifications)	129
1.4.1.2 施工人員資格(Worker Qualifications).....	129
1.4.1.3 拆除人員資格(Blasting Personal Qualifications).....	129
1.4.1.4 品管人員資格(Quality Control Personal Qualifications).....	129
1.4.2 法規要求(Regulatory Requirements)	129
1.4.3 施工前會議(Pre-Construction Conference)	129
1.4.4 修補材料配比(Repair Material Mixture Proportioning)	129

1.4.5 試驗報告(Test Reports).....	130
1.4.5.1 環氧樹脂黏著劑.....	130
1.4.5.2 環氧樹脂砂漿.....	131
1.4.5.3 水泥質混凝土或水泥砂漿.....	131
1.4.5.4 聚合物改質混凝土或水泥砂漿.....	133
1.4.6 現場取樣(Field Samples)	134
1.4.6.1 混凝土移除(Concrete Removal)	134
1.4.6.2 接合或裂縫塗封(Joint and Crack Sealing).....	134
1.4.6.3 預鑄單元組合試驗(Precast Unit Assembly Test).....	134
1.4.6.4 修補嵌板取樣(Sample Repair Panels).....	134
1.5 交貨、儲存與搬運(Delivery, Storage, and Handling)	135
1.5.1 包裝、運輸、搬運與裝卸(Packing, Shipping, Handling, and Unloading).....	135
1.5.2 環氧樹脂(Epoxy-Resin Materials)	135
1.5.3 聚合物材料(Polymer Materials)	135
1.5.4 化學摻料(Chemical Admixtures).....	135

1.5.5 廢棄物管理及拋置(Waste Management and Disposal).....	135
1.6 工地條件(Project/site Conditions).....	135
1.6.1 環境要求(Environmental Requirements).....	135
1.6.2 現有條件(Existing Conditions).....	135
1.7 施工順序及排程(Sequencing and Scheduling)....	136
1.8 施工容差(Construction Tolerances).....	136
1.8.1 混凝土移除(Concrete Removal).....	136
1.8.2 修補材料與產品(Repair Materials and Products).....	136
1.9 現場量測(Field Measurements).....	136
1.9.1 垂直混凝土移除量測(Measurement of Vertical Concrete Removal).....	136
1.9.2 水平混凝土移除量測(Measurement of Horizontal Concrete Removal).....	136
1.9.3 混凝土量測(Measurements of Concrete).....	136
1.10 其他相關作業(Related Work Specified Elsewhere).....	136
1.10.1 模板(Formwork).....	136

1.10.2	鋼筋(Reinforcing Steel)	136
1.10.3	現調密封劑(Field-Molded Sealants)	136
1.10.4	施壓塗封(Compression Seals)	136
1.10.5	混凝土(Concrete)	136
1.10.6	噴凝土(Shotcrete)	136
1.10.7	預壘混凝土(Preplaced-Aggregate Concrete)	137
1.10.8	預鑄混凝土(Precast Concrete)	137
1.10.9	廢棄材料拋置(Disposal of Waste Materials)	137
1.11	安全須知(Safety)	137
第二節	產品	137
2.1	材料(Material)	137
2.1.1	水泥質材料(Cement-Based Materials)	137
2.1.1.1	快速硬固修補材料(Rapid-Hardening Repair Material)	137
2.1.1.2	超微細水泥(Ultra-fine Cement)	137
2.1.2	摻料(Admixtures)	137
2.1.3	粒料(Aggregate)	137
2.1.4	水(Water)	138
2.1.5	纖維(Fiber Reinforcement)	138

2.1.6 聚合物材料(Polymer Materials)	138
2.1.6.1 混凝土或水泥砂漿使用之聚合物改質劑 (Polymer Modifier for Concrete or Mortar).....	138
2.1.6.2 聚氨基甲酸酯注膠黏著劑(Polyurethane Injection Adhesive)	138
2.1.6.3 聚酯樹脂灌漿材料(Polyester Resin Grout).....	138
2.1.6.4 乳膠黏結材(Latex Bonding Compound)....	139
2.1.6.5 高分子量甲基丙烯酸酯(High Molecular Weight Methacrylate, HMWM)	139
2.1.7 環氧樹脂材料(Epoxy Resin Materials)	141
2.1.8 黏結破裂(Bond Breaker).....	141
2.1.9 現調密封劑及底漆(Field-Molded sealants and primer)	141
2.1.10 高拉力鋼筋(High-strength steel bars).....	141
2.1.11 施壓塗封與潤滑劑(Compression Seals and Lubricant).....	141
2.1.12 環氧塗封鋼筋(Epoxy-Coated Steel Bars).....	141
2.1.13 錨栓(Anchors)	141

2.1.14 綴縫釘(Dowels).....	141
2.1.15 錨栓頭(Anchor Head).....	141
2.1.16 機械錨栓(Mechanical Anchors).....	141
2.2 配比設計(Mixture proportioning).....	141
2.2.1 水泥質混凝土(Cement-Based Concrete)	141
2.2.2 纖維混凝土(Fiber-Reinforced Concrete)	141
2.2.3 乾式包裝水泥砂漿(Dry-Pack Mortar).....	141
2.2.4 聚合物改質水泥砂漿(Polymer-Modified Mortar).....	141
2.2.5 聚合物混凝土(Polymer-Modified Concrete)	141
2.2.6 預鑄混凝土單元(Precast Concrete Units)	141
2.2.7 水泥質灌漿材料(Cement-Based Grout)	141
2.2.8 超細水泥灌漿材料(Ultra-fine Cement Grout)....	141
第三節 施工	142
3.1 設備(Equipment).....	142
3.1.1 水泥質混凝土拌合設備(Cement-Based Concrete Mixing Equipment).....	142
3.1.2 聚合物改質混凝土拌合設備(Polymer-Modified Concrete Mixing Equipment).....	142

3.1.3 環氧樹脂拌合設備(Epoxy Mixing Equipment)	142
3.1.4 灌漿材料拌合設備(Grout Mixing Equipment)	142
3.1.5 接合與裂縫清除或修補設備(Joint and Crack [Cleaning] and [Sealing] Equipment)	142
3.1.6 鑽孔設備(Drilling Equipment)	143
3.1.7 車輛式破碎機(Vehicle-Mounted Breakers)	143
3.1.8 手提式破碎機(Hand-Held Breaker)	143
3.1.9 水刀清除設備(Hydromilling Equipment)	143
3.1.10 旋轉式研磨設備(Rotary Milling Equipment)	143
3.2 防護措施(Protection)	143
3.2.1 現有構造物防護措施(Protection of Existing Features)	143
3.2.2 施工人員防護措施(Protection of Personnel)	143
3.3 拆除既有混凝土(Remove of exiting concrete)	143
3.3.1 通則(General)	143
3.3.2 切除(Cutting)	143
3.3.3 撞擊(Impacting)	143
3.3.4 磨平(Milling)	143
3.3.5 預劈裂(Presplitting)	143

3.4 錨定與強固(Anchoring and reinforcing).....	143
3.4.1 鑽孔和填漿錨定(Drilling and Grouting Dowels and Anchors).....	143
3.4.2 鑽孔與安裝機械錨定(Drilling and Installing Mechanical Anchors).....	143
3.4.3 安裝鋼筋(Installing Reinforcement).....	143
3.5 材料拌合(Mixing Materials).....	144
3.6 表面處理(Surface Preparation).....	144
3.6.1 通則(General).....	144
3.6.2 清除(Cleaning).....	144
3.6.3 廢水拋置(Waste Water Disposal).....	144
3.7 表面修補(Surface Repairs).....	144
3.7.1 環氧樹脂水泥砂漿(Epoxy Mortar).....	146
3.7.2 環氧樹脂混凝土(Epoxy Concrete).....	146
3.7.3 聚合物改質水泥砂漿或混凝土(Polymer-Modified Mortar or Concrete).....	146
3.7.3.1 水平表面(Horizontal Surfaces).....	147
3.7.3.2 垂直表面(Vertical Surfaces).....	147
3.7.4 乾式包裝水泥砂漿(Dry-Pack Mortar).....	147

3.7.5 水泥質水泥砂漿或混凝土(Cement-Based Mortar or Concrete)	147
3.7.6 接縫和裂縫的崩碎(Spalls at Joints and Cracks).....	147
3.7.7 快速硬固修補材料(Rapid-Hardening Repair Material).....	147
3.8 裂縫修補(Crack Repair)	147
3.8.1 延裂縫路徑填封(Routing and Sealing)	149
3.8.1.1 配製(Routing and Sealing)	149
3.8.1.2 注入速率(Rate of Progress).....	150
3.8.1.3 應用時間(Time of Application).....	150
3.8.1.4 塗封(Sealing).....	150
3.8.1.5 施壓塗封(Prefomed Compression Seals)..	150
3.8.2 水泥灌漿材料或水泥砂漿填封裂縫(Filling Cracks with Grout or Mortar)	150
3.8.2.1 配製(Preparation).....	150
3.8.2.2 環氧樹脂漿體(Epoxy Grout)	150
3.8.2.3 乾式包裝水泥砂漿(Dry-Pack Mortar).....	150
3.8.2.4 養護(Curing).....	150

3.8.3 重力式裂縫填封(Gravity Crack Filling).....	150
3.8.3.1 表面處理(Surface Preparation)	150
3.8.3.2 塗密封材料(Applying Sealer).....	150
3.8.4 鑽孔和堵塞裂縫(Drilling and Plugging Cracks)	150
3.8.5 灌漿材料注入裂縫(Injection Grouting Cracks) .	150
3.8.5.1 配製(Preparation).....	150
3.8.5.2 灌注(Injection).....	150
3.8.6 額外使用鋼筋修補裂縫(Crack Repair with Additional Reinforcement)	151
3.8.6.1 綴縫釘(Stitching).....	151
3.8.6.2 一般鋼筋(Conventional)	151
3.8.6.3 內部施加預力鋼筋(Internal Prestressing Reinforcement)	151
3.8.6.4 外加應力(External Stressing).....	151
3.9 滲漏水修復(Leaking Repair).....	151
3.9.1 修補材料(Repair Materials)	152
3.9.2 滲透型塗封劑(Penetrated Sealer)	152
3.9.3 聚合物塗封劑(Polymer Sealer)	153
3.10 清理與再填充接縫(Cleaning and Resealing	

Joints)	154
3.10.1 接縫的配製(Preparation of Joints).....	154
3.10.1.1 現有密封劑移除(Existing Sealant Removal).....	154
3.10.1.2 噴砂和噴射水柱(Sandblasting and Waterjetting).....	154
3.10.1.3 接縫處理進度(Rate of Progress of Joint Preparation).....	154
3.10.2 安裝密封劑(Installation of Sealant).....	154
3.10.2.1 應用時間(Time of Application).....	154
3.10.2.2 填料和黏結破碎(Back-Up Material and Bond Breaker).....	154
3.10.2.3 密封接縫(Sealing Joints).....	154
3.10.3 施加壓力密封裝置(Installation of Preformed Compression Seals).....	154
3.11 覆蓋層(Overlays)	154
3.11.1 水泥質混凝土覆蓋層(Cement-Based Concrete Overlay)	154
3.11.2 聚合物改質混凝土覆蓋層(Polymer-Modified	

Concrete Overlay).....	154
3.11.3 接頭(Joints).....	154
3.12 垂直表面修整(Refacing Vertical Surfaces).....	154
3.12.1 水泥質混凝土(Cement-Based Concrete).....	154
3.12.2 預壘混凝土(Preplaced-Aggregate Concrete)....	154
3.12.3 預鑄混凝土單元(Precast Concrete Units)	154
3.12.3.1 預鑄構件組立(Erection of Precast Units)	154
3.12.3.2 臨時元件支撐(Temporary Unit Supports)	154
3.12.3.3 合成橡膠支撐墊及接縫填充材置放 (Installation of Neoprene Bearing Pads and Joint Filler Materials).....	154
3.12.3.4 填充混凝土澆置(Placement of Infill Concrete).....	155
3.12.4 噴凝土(Shotcrete).....	155
3.13 試驗及檢驗(Tests and Inspections)	155
3.13.1 通則(General)	155
3.13.2 澆置準備(Preparations for Placing)	155
3.13.3 灌漿材料澆置綴縫釘及錨定(Grouted Dowels and Anchors).....	155

3.13.4 環氧砂漿(Epoxy mortar).....	155
3.13.4.1 取樣(Sampling).....	155
3.13.4.2 試驗(Testing).....	155
3.13.4.3 檢驗(Inspection).....	155
3.13.5 水泥質或聚合物改質混凝土和水泥砂漿 ([Cement-Based] [or] [Polymer-Modified] Concrete and Mortar).....	155
3.13.5.1 空氣含量(Air Content).....	155
3.13.5.2 坍度(Slump).....	155
3.13.5.3 強化防護(Consolidation and Protection) .	155
3.13.5.4 抗壓試驗(Compression Test).....	155
3.13.5.5 養護(Curing).....	155
3.13.6 粒料(Aggregates).....	155
3.13.7 必須動作(Action Required).....	155
3.13.7.1 澆置(Placing).....	155
3.13.7.2 灌漿填塞錨釘與綴縫釘(Grouted Anchors and Dowels).....	155
3.13.7.3 空氣含量(Air Content).....	155
3.13.7.4 坍度(Slump).....	155

3.13.7.5 養護(Curing).....	155
3.13.8 最後檢驗(Final Inspection)	155
3.13.9 報告(Reports)	156
3.13.10 製造廠商現場服務(Manufacturer Field Service)	156
3.14 清理(Clean Up)	156
3.15 灰塵控制(Dust Control).....	156
3.16 完工驗收前保護(Protection Prior To Acceptance)	156
3.17 排程(Schedules).....	156

前言

針對國內既有 RC 建築物常見劣化現象，訂定修復策略。經由現地調查與專家學者座談結論，認為國內既有 RC 建築物常見損壞主要包括：(1)混凝土裂縫；(2)混凝土剝落；及(3)建築物滲漏水。

第一節 通則

1.1 定義(Definition)

1.1.1 混凝土(Concrete)

混凝土組成材料包括膠結材料、水、及粗細粒料，亦可添加其他摻料。

1.1.2 水泥砂漿(Mortar)

水泥砂漿組成材料包括膠結材料、水與細粒料，亦可添加其他摻料。

1.1.3 水泥灌漿材料(Grout)

灌漿材料組成材料包括膠結材料與水，亦可添加其他填充材料與摻料。

1.1.4 水泥基材料(Cement-Based Material)

卜特蘭水泥或其他水泥質膠結材料及粒料。水泥基材料不包括聚合物。

1.1.5 聚合物改質劑(Polymer-Modifier)

聚合物使用在修補水泥基底混凝土或砂漿。聚合物一般混合苯乙烯-丁二烯橡膠(Styrene Butadiene Rubber, SBR)、丙烯酸乳膠(Acrylic Resin)與聚乙烯-醋酸乙烯樹脂(Ethylene Vinyl Acetate, EVA)。

1.1.6 聚合物改質材料(Polymer-Modified Material)

聚合物添加於卜特蘭水泥基混凝土或砂漿。聚合物改質混凝土適於修復厚度大於 25 mm 的損壞。聚合物改質水泥漿適用於修復厚度小於 25 mm 的損壞。

1.1.7 環氧樹脂(Epoxy Resin Binder)

環氧樹脂係由中黏度和低黏度混合而成，可製成環氧樹脂混凝土與砂漿。

1.1.8 環氧樹脂混凝土(Epoxy Concrete)

環氧樹脂結合粗細粒料。

1.1.9 環氧樹脂砂漿(Epoxy Mortar)

環氧樹脂結合細粒料。

1.1.10 環氧樹脂漿(Non-Pressure Epoxy Grout)

環氧樹脂黏結劑結合礦物填充料與防垂流劑。

1.1.11 環氧樹脂注膠劑(Epoxy Injection Adhesive)

低黏度的環氧樹脂可使用唧筒壓入裂縫。

1.1.12 快速硬化修補材料(Rapid-Hardening Repair Material)

膠結材料與粒料快速結合，發展足夠的早期強度。

1.1.13 非結構型裂縫(Non-Structural Cracks)

裂縫不影響結構承載能力。

當混凝土裂縫大於規範限制值時，工程單位必須建議業者進行修復補強工程。混凝土裂縫寬度的限制，一般都設定限制寬度為 0.1~0.4 mm，ACI committee 224 規定不同暴露環境下混凝土最大允許裂縫寬度如表 1.1 所示，多數規範基於經驗、試驗或理論方式來訂定限制值。

表 1.1 - 不同暴露環境下混凝土最大允許裂縫寬度(ACI 224)

暴露環境	最大允許裂縫寬度 (mm)
乾燥空氣或有薄膜層保護	0.40
高相對濕度、濕潤空氣、土壤	0.30
除冰鹽或化學藥品	0.18
海洋環境中及海水潑濺及乾濕循環環境	0.15
儲水結構物、考慮壓力的導管	0.10

裂縫診斷技術與檢測工作方法如下詳述：

(1)裂縫寬度量測：裂縫寬度量測一般在 RC 構造物表面明顯處進行，基本上選取 2 至 3 處應用裂縫計或輔以目視計量測確認其裂縫寬度，但需注意若受污染的裂縫實際寬度會較量測寬度值大，所以進行裂縫量測應注意在此視覺上錯覺。

(2)超音波量測裂縫深度：超音波波速檢測法(Ultrasonic Pulse Velocity Method)即在待測物體上的一點發出超音波脈衝，在量取從這一點傳至另一點所需的距離，試驗主要包含產生及傳導脈衝進入混凝土(脈衝發射器、傳送器)，以及精準的量測脈衝通過混凝土的歷時兩大部分。由於超音波經過空氣層僅可傳送非常少的能量，因此當超音波通過開裂面或空隙時，透過空氣層傳送的能量可忽略。且當開裂面的投影面垂直於傳播路徑，大於傳送器的區域時，脈衝會在瑕疵的周圍產生繞射。如此，波的歷時將會比完整無瑕疵的混凝土來的大，因此利用此種特性便可迅速的指出混凝土內的瑕疵，若遇鋼筋，應作適當修正。

(3)敲擊回音法(Impact-echo)：敲擊回音法乃在量測混凝土表面孔隙及表面裂縫深度，利用機械性敲擊方式產生暫態應力波動，並將其導入物體內，該應力波動包含表面波(R-wave)、縱波(P-wave)及橫波(S-wave)，其中表面波的傳動是沿著物體表面以遠離敲擊點的方式向外擴散，縱波及橫波如遇到物體內部的瑕疵(如裂縫、孔隙)或物體邊界將被反射回去，此反射波回到敲擊面時會產生表面位移，因此利用表面放置訊號接收器可監測到此位移反應。此一位移可用來決定縱波再敲擊面與反射面間來回一趟所需時間，而去推算出反射介面的深度。簡言之敲擊回音法量測表面裂縫深度，主要是靠裂縫尖端之繞射波與版頂面之反射波來回傳動，所產生之共振現象。

(4)改良式敲擊回音法：改良式敲擊回音法為敲擊回音法的延伸，此法是根據分析敲擊回音試驗所得資料，考量如遇幾何邊界較多且接近之結構，或內含瑕疵之物體，欲自位移波形上辨讀波的到達時間是非常困難費時，故將

記錄到的數位化波形利用快速傅利葉轉換(FFT)到頻率領域上做分析，因此可簡單且快速由頻譜上做辨讀與分析。且此法同時也考量當繞射波傳回至敲擊面時會產生擾動，為能精確測得繞射波到達時間，因此於裂縫兩邊各放置一接收器監測擾動反應。

(5)Ohtsu and Yuno 法：此法主要是利用頻譜反應來量測表面裂縫深度之方法，試驗方法為在距離裂縫 5 cm 處，配置一個訊號產生器及一個訊號接收器，由訊號產生器發出頻率為 1k HZ 變化至 20k HZ 之固定振幅正波，導入測試物體，再由訊號接收器感應在某一特定頻率下之輸出訊號，以 X-Y 座標方式，將輸出訊號與頻率關係繪出，即得頻譜反應。但該法應用尚有困難之處待解決。

(6)相位變化法：此法以繞射波波前之相位變化原理，來量測混凝土表面裂縫之開裂深度，試驗方法為令波源至裂縫開口處距離為 a ，接收器至裂縫開口之距離為 b ，試驗時， a 固定， b 變化，觀察繞射波波前之相位變化情形，再以二為繞射波理論求出 α 與 θ 之關係曲線，進而求出裂縫深度。

1.1.14 結構型裂縫(Structural Cracks)

裂縫影響結構承載能力。混凝土結構型裂縫的種類概分如下：

(1)微細裂縫(micro-crack)與組織裂縫：通常為細而短之裂縫，部分存在於砂漿內，部份介於顆粒與砂漿間，僅能利用顯微鏡方能觀察得知，它主要是由自體應力或內部應力流之轉向力而產生。

(2)開裂裂縫(separate crack)：此項裂縫通過構件全部斷面，由中央拉力或受較小偏心拉力而產生。

(3)彎曲裂縫(bending crack)：此項裂縫走向略垂直於受彎曲拉力鋼筋，產生於受拉緣至中心軸線。

(4)剪力裂縫(shearing crack)：此項裂縫與構件軸成斜向，由彎曲裂縫發

展而成。

(5)收縮裂縫(shrinkage crack)：此項裂縫發生於構件之多量配筋腹帶內或厚構件內，僅一部份裂縫伸入中心軸線。

(6)間隙裂縫(interstitial crack)：有配筋帶貫通裂縫間偶而形成細微之間生裂縫，一般僅止於最外側之配筋，可由原來表面裂縫或細小之內部結合裂縫引起。

(7)縱向裂縫(longitudinal crack)：由於新鑄混凝土之凝結或由於鋼筋在多孔狀混凝土內腐蝕之容積增大將沿著配筋裂開而形成。

(8)表面裂縫(surface crack)：原則上發生於版狀構件之表面裂縫深度通常不大，表面裂縫會沿配筋產生或任意方向。

1.2 系統說明(System Description)

1.2.1 設計要求(Design Requirements)

1.2.1.1 修補材料(Repair Materials)

1.2.2 修補材料性能要求(Repair Material Performance Requirements)

1.3 資料送審(Submittals)

1.4 品質保證(Quality Assurance)

1.4.1 資格(Qualifications)

1.4.1.1 承包商資格(Contractor Qualifications)

1.4.1.2 施工人員資格(Worker Qualifications)

1.4.1.3 拆除人員資格(Blasting Personal Qualifications)

1.4.1.4 品管人員資格(Quality Control Personal Qualifications)

1.4.2 法規要求(Regulatory Requirements)

1.4.3 施工前會議(Pre-Construction Conference)

註釋：專業的修補材料必須有適當的技術代表，代表保證材料的性質與應用的需求。

1.4.4 修補材料配比(Repair Material Mixture Proportioning)

修補施工前進行配比設計，包括聚合物改質卜特蘭水泥材料如聚合物改質砂漿、聚合物改質混凝土或無乾縮砂漿的配比。試驗報告需評定組成材料特性與配比。試驗室應符合 ASTM C1077 之規定；粒料應符合 ASTM D75 之要求。試驗配比、工作性及空氣含量可參照 ACI 211.1 建議值與配比方法進行。

每個試驗應詳列資料：

- (1)重量比
- (2)單位體積重和比重
- (3)批次重量
- (4)抗壓強度：試驗依據標準規範與試體要求尺寸進行，如表 1.2 所示。
- (5)養護時間
- (6)工作時間(聚合物改質材料)
- (7)坍度

(8)空氣含量

表 1.2 - 抗壓試體尺寸與試驗參考規範

材料	試體尺寸	規範
混凝土	$\phi 50 \times 300$ mm	ASTM C39/C39M
水泥砂漿	$\phi 75 \times 150$ mm	ASTM C39/C39M
水泥灌漿材料	50 × 50 × 50 mm	ASTM C109/C109M

1.4.5 試驗報告(Test Reports)

1.4.5.1 環氧樹脂黏著劑

檢測試驗包括：

- a.黏滯性
- b.濃稠度
- c.膠凝時間
- d.吸水
- e.收縮
- f.熱相容

環氧樹脂黏著劑基本性能試驗包括：黏滯度、膠凝時間、粘著力、斜面剪力、變形溫度、乾縮係數、壓力屈服強度、壓縮模數、抗拉強度、斷裂時張力延長度等試驗，以及2天及7天試體抗壓強度、抗拉強度、伸長率、降伏強度試驗。環氧樹脂灌注入混凝土裂縫，主要目的確認裂縫是否填滿環氧樹脂，驗證方法包括目視法與鑽心檢驗法。

1.4.5.2 環氧樹脂砂漿

檢測試驗包括：

- a.環氧樹脂用量
- b.濃稠度
- c.單軸壓縮剪力強度

1.4.5.3 水泥質混凝土或水泥砂漿

檢測試驗包括：

- a.坍度
- b.坍度損失
- c.空氣含量
- d.抗壓強度：試驗齡期為 7 天、28 天、56 天，亦可增加 14 天及 91 天。
- e.水膠比
- f.抗張強度
- g.抗彎強度

其他修補材料抗滲透性性能驗證試驗法如下所述：

(1)抗化學侵蝕試驗：本試驗參照ASTM C88進行水泥砂漿抗化學試驗，分別將試體浸於3.5% NaCl (pH=5.5)、3% NaOH (pH=12.4)及飽和Na₂SO₄ (pH=8.7)溶液中進行循環試驗，將試體浸置於試驗溶液中24小時後取出至溫度100±5°C環境中烘乾24小時視為1次循環，經5次循環後紀錄水泥砂漿試體重量變化情形。

(2)JIS透水試驗：透水試驗參照日本JIS-A 6101規範進行，本試驗藉由量測試體在定水壓下從試體表面至中心之透水量，以達西定律求得混凝土之透水係數。試驗方法簡述如後：將混凝土製成 $\varnothing 10 \times 20$ cm中空之圓柱試體，中空部分圓柱直徑1.77 cm，拆模後分別於第1、7、14天齡期，利用噴塗或刷塗適量之修復材料於混凝土試體表面，待修復材料硬固或穩定後繼續置於飽和

石灰水中養護至齡期28天，待混凝土試體達28天齡期後由飽和石灰水中取出並置於室溫環境7天後進行透水試驗，混凝土材齡共35天。試驗壓力以定水頭壓力10 kgf/cm²進行透水試驗，每4小時記錄流出水量(cm³)，試驗時間為48小時。透水係數K可由下式表示：

$$K = \frac{\rho \log \frac{r_0}{r}}{2\pi H} \times \frac{Q}{P_0 - P_i}$$

其中 K：滲水係數(cm/sec)； ρ ：水的單位重(kg/cm³)；r：試體之半徑(cm)； r_0 ：試體中央孔之半徑(cm)；Q：單位時間流量(cm³/sec)； P_0 ：試體外側之壓力(kgf/cm²)； P_i ：試體內側之壓力(kgf/cm²)。

(3)CRD 透水試驗：CRD-C 48-92 為美國陸軍工兵署之防水檢測方式，其原理為利用一定之水壓注入混凝土試體內，玻璃圓筒內下降之刻度，即為混凝土所能滲入之水量，再將下降刻度之水量建議代入 Darcy 公式，即可求出其滲透係數。試體準備：1.試體側面周圍塗封比例為 7：3 的石臘和松香和 6.4 mm 厚的高強度膠泥；2.試體上層放置膠環並將其放置於金屬容器中；3.於試體與金屬容器間注入 110 °C 的瀝青，以防止施加水壓時，水從側面塗封材料（石臘、松香及高強度膠泥）中滲流出來。操作程序：1.將試驗系統壓力先降至(9.8×10⁴ Pa)，系統內必須裝滿 23±1°C 的水，直到真空計顯示(6.75×10⁴ Pa)；2.先施加 100 psi (0.69 MPa)的壓力到貯水容器(water reservoir)，此時將閥門先打開，五分鐘後再將系統的壓力提高至 200 psi (1.38 MPa)；3.每 10 分鐘記錄 gage glass 直到滲流量穩定，記錄 14~20 天。透水試驗設備及試驗原理係參照 CRD 48-92 規範進行，其設備包括氮氣鋼瓶、儲水器、油壓錶、進水閥門、放水閥門、放氣閥門、入氣閥門。

(4)CNS 透水試驗：係參照 CNS 3763 標準進行，將試體上下面中央處置放一塊中央直徑為 5 cm 透水圓孔，厚度 1 cm 以上之橡皮襯墊並緊塞後，由試體上方施加水壓 1 小時，如為水泥砂漿用應加水壓 9.8 kPa，如係混凝土用則採水壓 294.0 kPa，其結果以下式表示之：

$$\text{透水量(g)} = m_2 - m_1$$

式中， m_1 = 試體乾燥後，於室溫下存放 1 小時後試體質量； m_2 = 施以 9.8 kPa 及 294.0 kPa 之水壓 1 小時後試體重。

(5)吸水率試驗法：本試驗係參考 ASTM C642-97 硬固混凝土吸水率試驗進行實驗，首先將養護的試體取出後直接置入烘箱(100°C~110°C)中烘乾，待 24 小時後取出在室溫 (20°C~25°C) 下冷卻並秤重，待此值相差在 0.5%時記錄其重量(A)；然後將試體置於水中，每格 48 小時取出並將表面擦乾後秤重，待實驗值相差在 0.5%時，視為試體以達飽合狀態，記錄其重量(B)並帶入下列公式求出試體之吸水率。

$$\text{試體吸水率 (\%)} = \left(\frac{B-A}{A} \right) \times 100\%$$

其中 A：爐乾試體重量(g) B：試體飽合狀態重量(g)

(6)初始表面吸水速率：評估試體中水分藉毛細現象傳送的一項簡便試驗，因此也可利用來評估試體的表面性質。試驗時，將爐乾的試體置入水槽，試體底部應墊高儘量使整個底面浸入水中，水面高度不應超過試體底部 5 mm，同時可在試體側面以防水材料塗封，避免水由側面孔隙進入，接著分別在靜置 1、4、9、16、25、36、49 及 64 分鐘後取出試體，以濕布擦拭底部後秤重。計算如公式：

$$a = \frac{\Delta m}{Af(t)}$$

a：吸水速率(g/m²tⁿ)； Δm ：吸收水量(g)；A：接觸水面積(m²)；Af(t)：時間函數，通常 $f(t) = (t)^{1/2}$ 亦即 $n = 1/2$ 。

1.4.5.4 聚合物改質混凝土或水泥砂漿

試驗包括：

- a. 抗張強度
- b. 彈性模數

- c. 熱膨脹係數
- d. 乾縮
- e. 塑性收縮
- f. 裂縫
- g. 一年齡期內應變

參考美國陸軍工兵規範(CRD)，建議國內RC建築物混凝土剝落劣化之修補材料測試方法，以及性能驗證試驗法如下所述：

(1)材料組成分析：基本組成材料、SO₃ 含量(%) [ASTM C563]、鹼含量(kg/m³)、pH值、空氣含量。

(2)物理性質試驗：單位重(kgf/m³)、新拌濕密度[ASTM C138]。

(3)力學性質試驗：水泥砂漿抗壓強度[ASTM C109]、混凝土抗壓強度[ASTM C39]、水泥砂漿與混凝土抗彎強度[ASTM C78]、水泥砂漿與混凝土直接拉力強度[CRD C164]、水泥砂漿與混凝土彈性模數[ASTM C469]。

(4)耐久性試驗：水泥砂漿與混凝土乾燥收縮[ASTM C157]、水泥砂漿與混凝土熱膨脹係數[CRD C39]、水泥砂漿與混凝土潛變[ASTM C512]、水泥砂漿與混凝土快速氯離子穿透[ASTM C1202]、抗硫酸鹽[ASTM C1012]、環片試驗[Ring test]、抗裂縫[German Angle]。

1.4.6 現場取樣(Field Samples)

1.4.6.1 混凝土移除(Concrete Removal)

1.4.6.2 接合或裂縫塗封(Joint and Crack Sealing)

1.4.6.3 預鑄單元組合試驗(Precast Unit Assembly Test)

1.4.6.4 修補嵌板取樣(Sample Repair Panels)

1.5 交貨、儲存與搬運(Delivery, Storage, and Handling)

1.5.1 包裝、運輸、搬運與裝卸(Packing, Shipping, Handling, and Unloading)

檢查原料運送的損壞及卸貨、儲存、搬運的影響必須降至最小。運送樹脂與粒料可使用密封容器。

1.5.2 環氧樹脂(Epoxy-Resin Materials)

運送環氧樹脂至指定地點必須避免變質，及不允許環氧樹脂冰凍，儲藏區域應關窗與耐風雨，材料使用規定溫度範圍在 20~30°C，且開封 48 小時內使用。須在溫度 30°C 以下乾燥隱蔽地方儲存環氧樹脂與粒料。未使用的原料須在工作結束後封存。使用環氧樹脂之前需檢查包裝上註明的到期日。

1.5.3 聚合物材料(Polymer Materials)

儲存的區域應是無窗與耐風雨，且隔離於耐燃建材內。儲存聚合物材料溫度需在 4.4~30°C 之間，且不允許聚合物結冰。

1.5.4 化學摻料(Chemical Admixtures)

化學摻料儲存須保持溫度在 5~30°C 之間，且易受外部的溫度影響，假若長時間儲存必須洽詢製造廠商。

1.5.5 廢棄物管理及拋置(Waste Management and Disposal)

1.6 工地條件(Project/site Conditions)

1.6.1 環境要求(Environmental Requirements)

1.6.2 現有條件(Existing Conditions)

(1) 混凝土試驗資料

*註釋：試驗資料及評估報告應包含在契約內。現有混凝土的評估方法包括鑽心破壞試驗、晶相檢驗、測定彈性模數、測定滲透力、超音波評估。

(2) 混凝土鑽心試驗

混凝土鑽心試驗可獲得結構非破壞性試驗的資料。

(3) 埋入材料

1.7 施工順序及排程(Sequencing and Scheduling)

施工順序及排程資料內容包括材料與工法。

1.8 施工容差(Construction Tolerances)

1.8.1 混凝土移除(Concrete Removal)

1.8.2 修補材料與產品(Repair Materials and Products)

建築物的混凝土與砂漿修補材料偏差須符合 ACI 117 之要求。建築物預鑄混凝土單元垂直容許偏差須符合 PCI MNL-116 之要求。

1.9 現場量測(Field Measurements)

1.9.1 垂直混凝土移除量測(Measurement of Vertical Concrete Removal)

1.9.2 水平混凝土移除量測(Measurement of Horizontal Concrete Removal)

1.9.3 混凝土量測(Measurements of Concrete)

1.10 其他相關作業(Related Work Specified Elsewhere)

1.10.1 模板(Formwork)

模版應符合規範要求。

1.10.2 鋼筋(Reinforcing Steel)

應符合普通鋼筋規範規定。

1.10.3 現場調製密封劑(Field-Molded Sealants)

工地現場調製封劑應符合規範規定。

1.10.4 施壓塗封(Compression Seals)

施壓塗封應符合規範規定。

1.10.5 混凝土(Concrete)

1.10.6 噴凝土(Shotcrete)

噴將混凝土應符合規範規定。

1.10.7 預壘混凝土(Preplaced-Aggregate Concrete)

預壘混凝土應符合規範規定。

1.10.8 預鑄混凝土(Precast Concrete)

預鑄混凝土應符合規範規定。

1.10.9 廢棄材料拋置(Disposal of Waste Materials)

廢棄材料與廢棄材料拋置應符合規範規定。

1.11 安全須知(Safety)

第二節 產品

2.1 材料(Material)

2.1.1 水泥質材料(Cement-Based Materials)

水泥質材料除水泥外可選擇適當膠結如火山灰、飛灰、矽灰或爐石粉等；這些水泥質材料須符合物理和化學性質要求，並應考量結構物暴露環境。

2.1.1.1 快速硬固修補材料(Rapid-Hardening Repair Material)

應符合ASTM C928規範中R2與R3之特性要求。

2.1.1.2 超微細水泥(Ultra-fine Cement)

最大的粒子尺度不到 10 μm。超微細水泥須配製分散劑。

2.1.2 摻料(Admixtures)

速凝或緩凝摻料應審慎使用；水泥灌漿材料自流動化強塑劑應符合ASTM C937 之規定。

2.1.3 粒料(Aggregate)

粒料品質要求取決於暴露環境，應考慮品質問題和材料可能發生的潛在反應。粗粒料最大尺寸應該基於凝土修補的深度和粘著強度。粒料品質應符合ASTM C33 之規定。通過#200 號篩可提供石灰岩，滑石或者矽灰惰性填充

料。

2.1.4 水(Water)

清潔、乾淨符合 CRD-C400 的要求，非飲用水亦可被使用。

2.1.5 纖維(Fiber Reinforcement)

聚烯烴纖維中聚丙烯應符合ASTM C1116規範中第III型規定，鋼纖維應滿足ASTM A820之規定。長徑比建議介於45~100，纖維長度不大於40 mm。

2.1.6 聚合物材料(Polymer Materials)

2.1.6.1 混凝土或水泥砂漿使用之聚合物改質劑(Polymer Modifier for Concrete or Mortar)

聚合物改質劑應符合 ASTM C1438 規範中第 II 型改質劑之要求。

2.1.6.2 聚氨基甲酸酯注膠黏著劑(Polyurethane Injection Adhesive)

聚氨基甲酸酯注入黏著劑適用於非結構裂縫，聚氨基甲酸酯注入灌漿材料性能標準如表2.1所示。

表2.1 - 聚氨基甲酸酯(Polyurethane, PU)注入灌漿材料性能標準

受養護的聚氨基甲酸酯注射灌漿材料的特性		
特性	試驗方法	標準值
抗拉強度	ASTM D 1623	138 kPa (minimum)
伸長率	ASTM D 1623	400% (minimum)
與混凝土黏結力(濕潤狀態)	ASTM C 273	138 kPa (minimum)

2.1.6.3 聚酯樹脂灌漿材料(Polyester Resin Grout)

聚酯樹脂灌漿材料不應使用在潮濕的環境中。飽和的聚酯樹脂灌漿材料強度可穩定的成長、而非飽和的聚酯樹脂灌漿材料反應較差 活性較低，在容

器中的膠結或分離時 應注意整個生產過程，膠結時間以及養護時間應當要適當。聚酯樹脂灌漿材料強度特性如表2.2所示。

表2.2 - 聚酯樹脂灌漿材料強度特性

聚酯樹脂灌漿材料最低強度要求	
抗壓強度	83 MPa
抗拉強度	27.6 MPa
剪應力	20.7 MPa

2.1.6.4 乳膠黏結材(Latex Bonding Compound)

乳膠黏結複合劑用於新拌混凝土與舊有混凝土的黏結應符合 ASTM C1059 規範中第 II 型規定。

2.1.6.5 高分子量甲基丙烯酸酯(High Molecular Weight Methacrylate, HMWM)

高分子甲基丙烯酸酯(PolyMethyl MethAcrylate, PMMA)為兩部分組成的快速滲透塗封劑，此單體為高分子或可以符合下表 2.3 特性的甲基丙烯酸酯代替。

表 2.3 - HMWH 單體物理特性

特性	試驗方法	標準值
蒸氣壓力	ASTM D323	< 133 Pa, 25°C
閃火點	--	> 93°C
高密度	--	> 1.0 g/cm ³ , 25 °C
黏滯性	ASTM D4016	0.012 ± 0.004 Pas, 23°C
折射率	--	1.470 ± 0.002
沸點(133Pa 壓力下)	--	70°C
養護收縮	--	< 11%
玻璃轉換溫度(DSC)	ASTM D3418	57.2°C
養護時間	ASTM D2471	> 40 mins., 25°C
黏結強度	ASTM C882	> 10.3 MPa

2.1.7 環氧樹脂材料(Epoxy Resin Materials)

2.1.8 黏結破裂(Bond Breaker)

2.1.9 現調密封劑及底漆(Field-Molded sealants and primer)

2.1.10 高拉力鋼筋(High-strength steel bars)

2.1.11 施壓塗封與潤滑劑(Compression Seals and Lubricant)

2.1.12 環氧塗封鋼筋(Epoxy-Coated Steel Bars)

2.1.13 錨栓(Anchors)

2.1.14 綴縫釘(Dowels)

2.1.15 錨栓頭(Anchor Head)

2.1.16 機械錨栓(Mechanical Anchors)

2.2 配比設計(Mixture proportioning)

2.2.1 水泥質混凝土(Cement-Based Concrete)

2.2.2 纖維混凝土(Fiber-Reinforced Concrete)

2.2.3 乾式包裝水泥砂漿(Dry-Pack Mortar)

2.2.4 聚合物改質水泥砂漿(Polymer-Modified Mortar)

2.2.5 聚合物混凝土(Polymer-Modified Concrete)

2.2.6 預鑄混凝土單元(Precast Concrete Units)

2.2.7 水泥質灌漿材料(Cement-Based Grout)

2.2.8 超細水泥灌漿材料(Ultra-fine Cement Grout)

第三節 施工

3.1 設備(Equipment)

在工作的場應充分使用設備，以完成指定的工作。在修復開始之前，應有足夠的時間徹底檢查設備，量測裝置校正。在工作開始時，機具和在工作的過程中使用的設備應確認，並且保持在完好的狀態。

3.1.1 水泥質混凝土拌合設備(Cement-Based Concrete Mixing Equipment)

拌合設備需符合要求。

3.1.2 聚合物改質混凝土拌合設備(Polymer-Modified Concrete Mixing Equipment)

在聚合物改質混凝土表面上的薄膜形成之前完成。設備能生產均勻的混凝土：

- a. 配置計量器和印表機，可紀錄在拌合中水泥數量。測量的設備誤差應在 $-1\% \sim 3\%$ 之內。
- b. 配置聚合物量測設備。設備誤差應在 2% 內。
- c. 配置流量計，誤差容許範圍在 $\pm 1\%$ 內。

3.1.3 環氧樹脂拌合設備(Epoxy Mixing Equipment)

應使用一個動力驅動螺旋槳類型的葉片拌合機。

3.1.4 灌漿材料拌合設備(Grout Mixing Equipment)

使用高速與高剪力拌合設備，進行膠狀類型水泥漿體拌合時，漿體可均勻混合並無塊狀且不稀離。

3.1.5 接合與裂縫清除或修補設備(Joint and Crack [Cleaning] and [Sealing] Equipment)

接縫和裂縫前處理之密封設備應滿足指定的要求。

3.1.6 鑽孔設備(Drilling Equipment)

使用合適的振動與螺旋式鑽孔設備，對於長度、直徑和材料應有規定。
使用螺旋式鑽孔設備不應損壞混凝土或者附近的結構。

3.1.7 車輛式破碎機(Vehicle-Mounted Breakers)

3.1.8 手提式破碎機(Hand-Held Breaker)

3.1.9 水刀清除設備(Hydromilling Equipment)

3.1.10 旋轉式研磨設備(Rotary Milling Equipment)

3.2 防護措施(Protection)

3.2.1 現有構造物防護措施(Protection of Existing Features)

進行混凝土移除工程前應仔細檢查建築物結構，並檢查、說明與確定工程的進度。

3.2.2 施工人員防護措施(Protection of Personnel)

3.3 拆除既有混凝土(Remove of exiting concrete)

3.3.1 通則(General)

3.3.2 切除(Cutting)

3.3.3 撞擊(Impacting)

3.3.4 磨平(Milling)

3.3.5 預劈裂(Presplitting)

3.4 錨定與強固(Anchoring and reinforcing)

3.4.1 鑽孔和填漿錨定(Drilling and Grouting Dowels and Anchors)

3.4.2 鑽孔與安裝機械錨定(Drilling and Installing Mechanical Anchors)

3.4.3 安裝鋼筋(Installing Reinforcement)

3.5 材料拌合(Mixing Materials)

3.6 表面處理(Surface Preparation)

3.6.1 通則(General)

進行修復施工前之混凝土表面必須乾淨，不可有塵土、油脂、油漆或其他可能影響黏結之外來物質，如有裂縫、不良施工縫、蜂窩、螺桿孔、混凝土碎片等瑕疵時，應先進行結構修補，必要時可採高壓水洗，以確保的毛細孔徑能提供吸附的作用。另外，依照選擇修復材料類行決定是否潤濕混凝土表面或石材表面，以利塗料基質吸附或避免塗層硬化速度影響工作性。

3.6.2 清除(Cleaning)

修復工程首先必須移除鬆散結構、進行必要之鋼筋防蝕處理與界面的前處理，再以水泥質材料(cement-based materials)或樹脂材料(resin-based materials)等進行表面封層。

3.6.3 廢水拋置(Waste Water Disposal)

3.7 表面修補(Surface Repairs)

造成混凝土剝落等劣化因素影響修復材料與修復技術之選擇甚鉅，因此正確驗證與決策判斷為修復混凝土剝落工程前必須詳加確認之重點工作。診斷技術與檢測工作包括：

- (1)紅外線法：此法原理為利用飾材或混凝土保護層剝落部份會形成空氣層，致使比健全部分之熱傳導率小而在牆面溫度上升或下降時會形成溫差，而以紅外線檢測裝置測其溫差，以調查飾材或混凝土保護層有無鼓浮之法。
- (2)敲擊法：敲擊法以試錘等敲擊牆面，由其反應之異常音可檢知預剝落位置，該檢測方法簡單，但隨試驗技術人員之熟練度易造成判斷差異或錯誤。

混凝土剝落主要因素分為力學破壞或鋼筋腐蝕造成，前者修復方式簡便

易處理，後者則必須分析探討是否為腐蝕因子存在於混凝土材料中，亦或 RC 建築物於使用期間受外界環境影響導致混凝土環境中性化，以及腐蝕因子穿透、滲透侵入混凝土構件致使鋼筋表層鈍化膜喪失造成腐蝕膨脹。使用水泥砂漿修補材料進行施工作業前，必須確認下列注意事項，包括混凝土表面前處理、材料拌合方式、使用方式與施工說明、養護方式、廢棄材料清除須知。破壞形式及原理可分為：

(1)力學破壞因素：剝落是混凝土結構物呈片塊狀之脫落現象，主要成因有二，分別為力學方面的混凝土拉力超出容許值及腐蝕方面鋼筋鏽蝕，本節主要探討力學破壞因素，因此依據力學破壞導之致剝落程度概分為兩類解釋，分別為(1)小型剝落：通常是由作用於混凝土之水平或斜向力量所造成，深度未達 25 mm，淨寬通常小於 150 mm；(2)大型剝落：其成因與小型剝落無異，但更嚴重，其可能是因巨大地震力或外力使結構物變形超出容許值，而產生大型片塊狀剝落，深度達 25 mm 以上，淨寬大於 150 mm。

(2)鋼筋腐蝕因素：RC 結構之鋼筋於正常狀況下，係在高鹼性環境中不易腐蝕，此因暴露於高鹼性環境中的鋼筋處於鈍化狀態(passive state)，因此鋼筋鈍化膜的破壞為鋼筋腐蝕的先決條件。鋼筋鈍化膜破壞後，假若混凝土在一定的濕度及氧氣環境下，即使無有害物質的侵入，混凝土中的鋼筋也會腐蝕。二氧化碳與氯化物是破壞鋼筋鈍態膜主要因素，當氯離子濃度過高，即使鋼筋處於高 pH 值環境中，鈍態膜亦會被破壞。鐵鏽的體積膨脹隨著鐵的氧化程度而變大，鐵鏽增加鋼筋與混凝土交界區體積膨脹 2~7 倍。膨脹應力超過混凝土強度時，混凝土就會產生裂縫和剝裂現象。由上述發生腐蝕化學反應式中說明鋼筋腐蝕條件如下：(1)鋼筋金相組織具不均勻性，且混凝土為一多孔隙，不均質、非等向性材料，因此環境介質(如水分、氧氣、二氧化碳)皆有可能透過混凝土保護層達到鋼筋/混凝土的界面，然而環境介質到達界面時濃度難達到一致性，致使一根鋼筋上，會同時具備電位較低(陽極)及電位較高(陰極)兩區域；(2)陰極要有足夠的氧化劑(通常為 H_2O 、 O_2)與陽極

的自由電子生成 OH⁻，換言之，在混凝土為乾燥的狀態即電阻係數大於 20000 Ω-cm 時或相對濕度小於 60% 的乾燥室內，鋼筋是不會產生腐蝕現象。

3.7.1 環氧樹脂水泥砂漿(Epoxy Mortar)

首先必須先把原有的待修補面清理乾淨，再塗上厚度約 0.5 mm 的環氧樹脂，最後再鋪上環氧樹脂砂漿。

3.7.2 環氧樹脂混凝土(Epoxy Concrete)

首先必須先把原有的待修補面清理乾淨，再塗上厚度約 0.5 mm 的環氧樹脂，最後在鋪上 2.5 cm 後的環氧樹脂混凝土。

3.7.3 聚合物改質水泥砂漿或混凝土(Polymer-Modified Mortar or Concrete)

傳統水泥砂漿修補材料黏結強度低、乾縮變形大、抗滲性、抗裂性較差，造成使用後產生缺點如開裂、脫落等，易造成結構體滲水、混凝土碳化和鋼筋腐蝕等問題，其使用範圍受到很多限制，因此近來發展出應用有機聚合物混合水泥或粗/細粒料製成聚合物混凝土。聚合物改質水泥砂漿可應用作為修補材料與防水材料，聚合物水泥防水材料簡稱 PMC 或複合防水塗料或彈性水泥，主要係以丙烯酸酯等聚合物乳液或水泥為主要原料，具有良好的抗滲性、耐水性、耐候性和黏結性，與混凝土、石材、磁磚、鋼材、木材、玻璃等材質介面都有良好的黏結性，特別是能夠在潮濕基層上施工固化成膜。

聚合物水泥混凝土(polymer Portland cement concrete, PPC)亦稱為聚合物卜特蘭水泥混凝土，以聚合物原料取代部分水泥，再以一般混凝土拌製方法製成，聚合物能均勻地分布於混凝土內。填充水化產物與粒料間的孔隙，進而改善混凝土的抗滲性、耐蝕性及耐磨性，可用於鋪設無縫地面，也常用於修補混凝土路面、機場跑道等。

聚合物膠結混凝土(polymer binding / polymer concrete, PBC or PC)也稱為樹脂混凝土，完全以聚合物做膠結材料拌製而成，該混凝土黏結强度高、抗滲、抗凍、耐腐蝕，唯其成本較高，適用於須耐腐蝕性佳之工程建築、混

土的構件及裂縫修復。

3.7.3.1 水平表面(Horizontal Surfaces)

在黏結劑乾燥前將聚合物改質砂漿或混凝土灌入，其聚合物改質水泥砂漿所修復厚度不超過2.5 cm，而聚合物改質混凝土所修補的厚度者不超過5.0 cm；而濕養護必須超過24小時，以及48小時後者乾式養護。

3.7.3.2 垂直表面(Vertical Surfaces)

垂直面的修復方式與水平面的施作程序相同。

3.7.4 乾式包裝水泥砂漿(Dry-Pack Mortar)

3.7.5 水泥質水泥砂漿或混凝土(Cement-Based Mortar or Concrete)

3.7.6 接縫和裂縫的崩碎(Spalls at Joints and Cracks)

3.7.7 快速硬化修補材料(Rapid-Hardening Repair Material)

3.8 裂縫修補(Crack Repair)

混凝土內部孔隙或裂縫會使外界水分、氯離子及二氧化碳等有害因子可滲入內部造成混凝土劣化或鋼筋腐蝕，使得結構物承载力下降、使用性受到影響。因此混凝土從材料準備、配比拌合、施工養護受外力作用過程及暴露環境條件皆會影響其耐久性。造成裂縫發生因素與說明如下所述：

(1)施工作业因素：施工作业或施工技术會影響到混凝土劣化的速率，施工作业包括混凝土的水灰比、坍度及保護層厚度控制、搗實、養護的過程。保護層一般在設計時均由規範依據構件型式及位置，暴露環境加以規定，然而常因施工者未按圖施工或未謹慎施工，以致保護層厚度不足。而搗實不足，會有蜂窩孔洞現象發生；搗實過度，則會造成泌水及析離的現象。養護對混凝土的水化完全程度有相當的影響，養護時間愈長，則水化愈完全，混凝土中的孔隙被填塞也愈多，緻密性及強度也愈高。

(2)水灰比因素：水灰比為影響混凝土品質最主要因素之一，同時亦決定水及有害因子的滲透性，當混凝土的拌和水量超過水泥水化的需水量時，多餘的用水會在混凝土內形成毛細孔隙而增加混凝土的滲透性。通常水灰比小，混凝土之品質良好，緻密性高、強度也較高，則水與有害因子不易滲入，水灰比愈高則混凝土滲透性愈高，愈易讓水分、氯離子、氧氣及二氧化碳等有害物質侵入而促使鋼筋腐蝕。

(3)化學摻料因素：使用於混凝土中的摻料種類甚多，基本上大多為有機物材料，對鋼筋較無腐蝕影響，若使用減水劑、強塑劑和輸氣劑等具有減水功能而降低水灰比時，摻料即具有良好的抑制鋼筋腐蝕的功能。使用波索蘭材料時會與氫氧化鈣結合而降低鹼性強度(pH 值)，理論上 pH 值降低似乎會使中性化程度增加，而使得鋼筋更加容易腐蝕，但是實際上由於波索蘭反應的影響而生成更多細小 C-S-H 膠體填充孔隙，使得混凝土的緻密程度增加，滲透性降低，鋼筋更加不易腐蝕。

(4)粒料級配因素：粒料對於腐蝕的影響主要是在於粒料的粒徑大小，粒料的粒徑愈小，在粒料周圍所能產生的縫隙就愈少，混凝土就會較為緻密，滲透性就會較小，相反粒徑愈大滲透性愈大，將來對於腐蝕發生的機率也愈大。另一方面，粒料的級配不良，會造成混凝土產生泌水及析離的現象，將會形成水、氯化物、氧氣和二氧化碳等有害物質侵入的路徑，進而促使腐蝕的進展。若粒料取自於海岸線或挖泥之堆積場，則可能含有硫化物或氯化物，而有害鋼筋及混凝土。

(5)粒料性質因素：粒料影響混凝土耐久性質影響可分為物理作用與化學作用兩部分探討。以物理方式影響混凝土品質包括：凍融膨脹、暴露極端溫度乾濕循環、高溫火害、表面磨損(沖蝕、穴蝕)、載重破壞、體積變化。其中表面磨耗、載重破壞等因素導致劣化，皆因為粒料本身強度硬度不足，及粒料與界面漿體鍵結性差。以化學方式影響混凝土品質包括：鹼矽粒料反應、

硫酸鹽侵蝕、酸侵蝕、溶解與析晶。

(6)水泥因素：硫酸鹽反應，即水泥中的鋁酸三鈣(C₃A)對氯離子有吸附作用，即鋁酸三鈣會與氯化物形成單一氯鋁酸鈣水化物，而使氯離子的濃度降低，腐蝕程度減少。但若鋁酸三鈣含量過多，則再與硫酸根離子作用時，則可能會造成混凝土內鈣氫石的二度膨脹破壞，而使混凝土產生裂縫，致使鋼筋腐蝕。粒料的活性矽酸鹽與水泥中的鹼鹽(NaOH/KOH, NH₄/KH)反應，以及硫酸鹽侵蝕生成鈣礬石皆會使混凝土體積膨脹，產生結晶內應力破壞混凝土強度。溶解析晶為混凝土中失去 CH 鹼性物質，水化作用停止及強度發展惡化。混凝土中 Ca²⁺被酸性物質侵蝕溶解生成氯化鈣(CaCl₂)、硫酸鈣(CaSO₄)、醋酸鈣、重碳酸鈣促使透水孔隙率增加，讓有害物質更加容易侵入混凝土。

3.8.1 延裂縫路徑填封(Routing and Sealing)

進行修復補強設計時，應先了解構造物在修復補強後的結構行為，並依現場狀況訂定施作完成後的標準檢驗程序與方法，以確保裂縫修復施工之效益。修復非動態裂縫，因該裂縫位置屬於非反覆載重構件上，表面裂縫寬度約為 1 mm 範圍通常以水泥漿體修復。當裂縫延伸至混凝土構件時，無論該範圍產生任何細微裂縫皆應以聚合物塗封方式修復。該類型修復工程通常使用聚酯樹脂以提高鋼筋抗腐蝕能力，另外，使用聚合物加壓注膠或真空注膠可以達到較完全的修復。

3.8.1.1 配製(Routing and Sealing)

環氧樹脂系裂縫灌注材料在工程上的應用極廣，依ASTM C881-90之規定，環氧樹脂在混凝土工程上之應用，共分為七類(type I~VII)，三級(grade 1~3)及六型(class A~F)。其中type I~VII主要係依用途不同而分。

3.8.1.2 注入速率(Rate of Progress)

3.8.1.3 應用時間(Time of Application)

3.8.1.4 塗封(Sealing)

3.8.1.5 施壓塗封(Prefomed Compression Seals)

3.8.2 水泥灌漿材料或水泥砂漿填封裂縫(Filling Cracks with Grout or Mortar)

3.8.2.1 配製(Preparation)

3.8.2.2 環氧樹脂漿體(Epoxy Grout)

3.8.2.3 乾式包裝水泥砂漿(Dry-Pack Mortar)

3.8.2.4 養護(Curing)

3.8.3 重力式裂縫填封(Gravity Crack Filling)

3.8.3.1 表面處理(Surface Preparation)

3.8.3.2 塗密封材料(Applying Sealer)

3.8.4 鑽孔和堵塞裂縫(Drilling and Plugging Cracks)

含填充料之防水環氧樹脂，屬注入型樹脂用來以高壓注入填充和裂縫寬度大於0.5 mm之密封裂縫，接著混凝土和鋼鐵的填充水泥。該材料不只為防水或預防侵蝕的有效媒介，同時可黏結混凝土結構元件。

3.8.5 灌漿材料注入裂縫(Injection Grouting Cracks)

3.8.5.1 配製(Preparation)

3.8.5.2 灌注(Injection)

低黏度裂縫灌注工法專用環氧樹脂，可填充和密封結構元件的空洞和裂縫，如橋樑、工業用廠房、樑柱、基礎、牆、樓版及儲水用結構物等，不僅可形成一個有效的阻絕層，以防止水份經由裂縫入滲而產生侵蝕現象，且可

提供良好的接著效果。

3.8.6 額外使用鋼筋修補裂縫(Crack Repair with Additional Reinforcement)

3.8.6.1 綴縫釘(Stitching)

3.8.6.2 一般鋼筋(Conventional)

3.8.6.3 內部施加預力鋼筋(Internal Prestressing Reinforcement)

3.8.6.4 外加應力(External Stressing)

3.9 滲漏水修復(Leaking Repair)

RC 建築物滲漏水問題經常發生且難以防範，通常以目視即可判斷 RC 建築物是否存在滲漏水缺失，假若有水氣或水滴滲透穿過混凝土疏鬆孔洞或裂縫，則此區域易產生白色碳酸鹽類白樺風化作用(leaching and efflorescence)，亦或附著於混凝土表面之油漆或磁磚產生水氣膨脹剝離。

風化白樺之鹽基化合物，乃由混凝土之析出物與水氣或大氣中之二氧化碳結晶反應形成，鹽基化合物主要為碳酸鈣，另外亦包含硫酸與碳酸化合物(鈉、鉀或鈣)。風化白樺造成混凝土產生大量析出物，導致孔隙率增加而降低混凝土強度，同時脆弱區域更容易遭受外界化學物質的侵襲。析出風化屬於混凝土耐久性之化學侵蝕範疇，風化白樺經常發生於水可連續或間斷滲透穿越並到達混凝土表面，亦或混凝土表面暴露於乾與濕輪替環境中。

混凝土水化產物中之氫氧化鈣($\text{Ca}(\text{OH})_2$ ，CH)可以容易地由混凝土中析出，而本質不溶解的 C-S-H 膠體，除非長時間暴露於嚴酷的析出環境中才會退化，因此高 CH 含量之漿體較可能發生析出白樺風化作用。析出反應速率與滲透水之可溶性鹽基化合物多寡有關，所以軟水(如:雨水)中之可溶性鹽基化合物較少，使得危害混凝土程度較硬水(含鈣離子)大。溫度效應亦為一影響因素，因為 CH 於冷水中較易溶解，因此冷水環境下較溫水危害大。析出物普遍產生於水可以滲透過之混凝土面，特別於受壓力環境下。混凝土不會

於流水通過之表面產生析出反應，除非表面受到懸浮於水中之固體物質進行物理磨蝕作用。

水泥牆壁遭外界水氣入侵至水泥中之孔隙裂縫，發生酸鹼中和產生毛狀白色碳酸鹽結晶體（碳酸鈣為主），當長久淤積於牆面時，將導致牆面塗料壁紙起泡、鼓起、碎裂、剝落。當牆壁於雨季漏水、滲水或建築物通風不良所累積大量的水氣時，再遇上空氣中的二氧化碳或二氧化硫等酸性氣體，即形成酸性水氣，進而在水泥牆上凝結成酸性水露（pH 值達 4.0 如酸雨一般）。酸性水氣與水露滲透至防水不良或有裂縫之牆壁內，進而與水泥、砂、磚牆中的鹼性分子（如鈉、鈣、鎂、鉀）產生中和作用，再與空氣中的二氧化碳結合成白色針狀或粉末狀結晶體。

3.9.1 修補材料(Repair Materials)

鋼筋與混凝土雖為最佳的建築材料，然而滲漏水問題卻經常發生且難以防範，傳統修復方法以表面塗封處理居多，依照正水壓或負水壓選擇表面密封材料，表面密封材料包括溶劑基(solvent-based)塗層、無溶劑(solvent-free)塗層、水性(water-borne)塗層與加勁(reinforced)塗層等。針對 RC 建築物滲漏水問題，傳統修復方法以表面塗封居多，依照正水壓或負水壓狀況選擇表面密封材料(surface sealers or coatings)，表面密封材料包括含溶劑(solvent-based)塗層、無溶劑(solvent-free)塗層、水性(water-borne)塗層與加勁(reinforced)塗層等。

3.9.2 滲透型塗封劑(Penetrated Sealer)

混凝土表面處理修復技術為快速與經濟之建築物滲漏水修復方式，亦可有效改善舊有建築物的耐久性，具有多項優點包括原料取得容易、成本低廉、施工快速與方便等優點，近年來便發展出多種可用於混凝土表層塗封的保護材料，以阻擋外在水氣和氯離子的滲入。常用於修復 RC 建築物滲漏水之混

凝土表層塗封材料，依其機制主要可分為下列兩種：

滲入式塗封劑主要利用本身所帶的有機化合物群互相鍵結，並沿著毛細孔隙內部表面形成疏水的緻密組織。而這類塗封方式又可細分成沒有薄膜產生(non film-forming)與有薄膜產生(film-forming pore-sealing)兩種形式。組成材料包括卜特蘭水泥、矽砂和活性矽化學觸媒化合物，主要用於混凝土結構體之防水、強化與保護作用；使用時只須依一定比例與水調合後塗佈於混凝土表面。矽酸質材料之防水原理並非如薄膜、片狀等防水材料，只作為表面材料防止有害因子滲入混凝土內，而是利用混凝土多孔特性，以水為媒介，促使矽酸質材料的活性物質快速滲入於混凝土溶液內，再與原混凝土中水化合物進行水化反應，進而產生不溶於水的針狀結晶體，填充混凝土毛細孔，有效增加混凝土的水密性，達到防滲、防潮的效果。

3.9.3 聚合物塗封劑(Polymer Sealer)

表面封層為固體含量多的聚合物聚合物溶液，除可堵住孔隙外，亦可在水泥質材料表面生成一層較薄且連續的護膜，表面封層係利用乳劑或乳膠在水泥質材料表面製造一層相當厚度且緻密的不透水層來防止水汽進入，但這類物質並不進入孔隙內產生堵塞的作用。而以緻密的塗料或特殊的環氧樹脂砂漿披覆在水泥質材料表面也屬於表面封層的保護方式。混凝土中使用摻料，以增加緻密性來改善透水性，亦可於混凝土表面使用塗封材料，來提昇混凝土之耐久性。

聚合物水泥防水材料為表面封層修復材料，亦稱為複合防水塗料或彈性水泥，主要係以丙烯酸酯等聚合物乳液或水泥為主要原料，加入其它外加劑製得的建築防水塗料，其對環境和人體健康無害。具有良好的抗滲性、耐水性、耐候性和黏結性，尤其與混凝土、石材、磁磚、鋼材、木材、玻璃等都有很好的黏結性，特別是能夠在潮濕基層上施工固化成膜。聚合物水泥防水塗料根據其性能分為 I 型和 II 型兩種型號。其中 I 型拉伸強度 ≥ 1.2 MPa，斷

裂伸長率 $\geq 200\%$ ，潮溼基面黏結強度 ≥ 0.5 MPa，主要用於有較大變形的建築部位，如屋面、牆面等部位；II 型拉伸強度 ≥ 1.8 MPa，斷裂伸長率 $\geq 80\%$ ，潮溼基面黏接強度 ≥ 1.0 MPa，主要用於長期浸水環境下的建築防水工程，如地下室、浴廁間、游泳池、蓄水池、地鐵、隧道等工程防水。

3.10 清理與再填充接縫(Cleaning and Resealing Joints)

3.10.1 接縫的配製(Preparation of Joints)

3.10.1.1 現有密封劑移除(Existing Sealant Removal)

3.10.1.2 噴砂和噴射水柱(Sandblasting and Waterjetting)

3.10.1.3 接縫處理進度(Rate of Progress of Joint Preparation)

3.10.2 安裝密封劑(Installation of Sealant)

3.10.2.1 應用時間(Time of Application)

3.10.2.2 填料和黏結破碎(Back-Up Material and Bond Breaker)

3.10.2.3 密封接縫(Sealing Joints)

3.10.3 施加壓力密封裝置(Installation of Preformed Compression Seals)

3.11 覆蓋層(Overlays)

3.11.1 水泥質混凝土覆蓋層(Cement-Based Concrete Overlay)

3.11.2 聚合物改質混凝土覆蓋層(Polymer-Modified Concrete Overlay)

3.11.3 接頭(Joints)

3.12 垂直表面修整(Refacing Vertical Surfaces)

3.12.1 水泥質混凝土(Cement-Based Concrete)

3.12.2 預壘混凝土(Preplaced-Aggregate Concrete)

3.12.3 預鑄混凝土單元(Precast Concrete Units)

3.12.3.1 預鑄構件組立(Erection of Precast Units)

3.12.3.2 臨時元件支撐(Temporary Unit Supports)

3.12.3.3 合成橡膠支撐墊及接縫填充材置放(Installation of Neoprene

Bearing Pads and Joint Filler Materials)

3.12.3.4 填充混凝土澆置(Placement of Infill Concrete)

3.12.4 噴凝土(Shotcrete)

3.13 試驗及檢驗(Tests and Inspections)

3.13.1 通則(General)

3.13.2 澆置準備(Preparations for Placing)

3.13.3 灌漿材料澆置綴縫釘及錨定(Grouted Dowels and Anchors)

3.13.4 環氧砂漿(Epoxy mortar)

3.13.4.1 取樣(Sampling)

3.13.4.2 試驗(Testing)

3.13.4.3 檢驗(Inspection)

**3.13.5 水泥質或聚合物改質混凝土和水泥砂漿([Cement-Based] [or]
[Polymer-Modified] Concrete and Mortar)**

3.13.5.1 空氣含量(Air Content)

3.13.5.2 坍度(Slump)

3.13.5.3 強化防護(Consolidation and Protection)

3.13.5.4 抗壓試驗(Compression Test)

3.13.5.5 養護(Curing)

3.13.6 粒料(Aggregates)

3.13.7 必須動作(Action Required)

3.13.7.1 澆置(Placing)

3.13.7.2 灌漿填塞錨釘與綴縫釘(Grouted Anchors and Dowels)

3.13.7.3 空氣含量(Air Content)

3.13.7.4 坍度(Slump)

3.13.7.5 養護(Curing)

3.13.8 最後檢驗(Final Inspection)

3.13.9 報告(Reports)

3.13.10 製造廠商現場服務(Manufacturer Field Service)

3.14 清理(Clean Up)

3.15 灰塵控制(Dust Control)

3.16 完工驗收前保護(Protection Prior To Acceptance)

3.17 排程(Schedules)

既有 RC 建築物劣化及其修復之研究

出版機關：內政部建築研究所

電話：(02)8912-7890

地址：台北縣新店市北新路三段 200 號 13 樓

網址：<http://www.abri.gov.tw>

出版年月：95 年 12 月

版(刷)次：初版

工本費：