

鋼筋混凝土梁構件之鋼筋腐蝕斷面補修工法研擬

內政部建築研究所委託研究成果報告

(100年度)

鋼筋混凝土梁構件之鋼筋腐蝕斷面補修 工法研擬

內政部建築研究所委託研究報告

中華民國 109 年 12 月

(本報告內容及建議，純屬研究小組意見，不代表本機關意見)

10915G0011
PG10902-0031

鋼筋混凝土梁構件之鋼筋腐蝕斷面補修 工法研擬

受委託單位：國立臺灣科技大學
研究主持人：邱建國
協同主持人：陳君弢
研究助理：陳儷文、許譽騰
研究期程：中華民國 109 年 1 月至 109 年 12 月
研究經費：新臺幣 99.5 萬元

內政部建築研究所委託研究報告

中華民國 109 年 12 月

(本報告內容及建議，純屬研究小組意見，不代表本機關意見)

目次

| | |
|-----------------------------|------|
| 目次..... | I |
| 表次..... | III |
| 圖次..... | VII |
| 摘要..... | XIII |
| ABSTRACT..... | XVII |
| 第一章 緒論 | 1 |
| 第一節 研究背景 | 1 |
| 第二節 研究目的 | 3 |
| 第三節 預期目標 | 5 |
| 第二章 文獻回顧 | 7 |
| 第一節 RC 建築物之耐久性能評估方法 | 7 |
| 第二節 混凝土構件修復工法 | 25 |
| 第三節 美國相關規範 | 69 |
| 第三章 研究方法與相關試驗規劃 | 93 |
| 第一節 研究方法與流程 | 93 |
| 第二節 斷面修復材料之力學性能試驗建置規劃 | 95 |
| 第三節 新舊材料介面問題探討之建置規劃 | 105 |
| 第四節 鋼筋腐蝕梁構件之修復性試驗建置規劃 | 113 |
| 第四章 試驗結果與討論 | 131 |
| 第一節 第一階段試驗結果與討論 | 133 |
| 第二節 第二階段試驗結果與討論 | 177 |
| 第三節 第三階段試驗結果與討論 | 188 |
| 第五章 鋼筋腐蝕構件斷面補修工法 | 201 |
| 第一節 構件劣化修復策略 | 201 |
| 第二節 斷面補修工法種類與適用範圍 | 205 |
| 第三節 斷面補修材料分類與試驗 | 208 |
| 第四節 補修材料性能要求 | 212 |
| 第五節 施工程序與注意事項 | 217 |
| 第六節 參考圖說範例 | 222 |
| 第七節 補修材料性能要求 | 225 |

| | | |
|------------|---------------------------|------------|
| 第六章 | 結論與建議 | 227 |
| | 第一節 結論 | 227 |
| | 第二節 建議 | 229 |
| 附錄一 | 工作會議記錄 | 231 |
| 附錄二 | 歷次專家座談會議記錄 | 233 |
| 附錄三 | 第一次專家座談會議簽到表 | 237 |
| 附錄四 | 第二次專家座談會議簽到表 | 239 |
| | 參考書目 | 241 |

表次

| | |
|--|----|
| 表 2-1 檢討項目 | 9 |
| 表 2-2 目標等級區分 | 10 |
| 表 2-3 初步診斷項目說明 | 13 |
| 表 2-4 劣化症狀定義 | 14 |
| 表 2-5 耐久性能指標權重值 | 19 |
| 表 2-6 鋼筋腐蝕修復工法與回復目標方法之關係 | 20 |
| 表 2-7 混凝土中性化程度分類 | 21 |
| 表 2-8 混凝土中性化修復工法之選定 | 21 |
| 表 2-9 中性化抑制工法與回復目標方法之關係 | 22 |
| 表 2-10 混凝土氯離子含量程度分類 | 23 |
| 表 2-11 混凝土氯離子修復工法之選定 | 23 |
| 表 2-12 氯離子修復工法與回復目標方法之關係 | 24 |
| 表 2-13 以回復或增加性能為目的所對應之修復/補強工法 | 28 |
| 表 2-14 修復/補強使用之材料種類 | 29 |
| 表 2-15 水泥系材料之試驗方法 | 30 |
| 表 2-16 受鹽害之鋼筋混凝土建築物外觀等級和劣化狀態 | 33 |
| 表 2-17 鹽害劣化等級與適用之補修工法的關係 | 34 |
| 表 2-18 受中性化之鋼筋混凝土建築物之外觀等級和劣化狀態 | 38 |
| 表 2-19 中性化劣化等級與適用之補修工法的關係 | 39 |
| 表 2-20 ASR 之鋼筋混凝土建築物之外觀等級和劣化狀態 | 43 |
| 表 2-21 ASR 劣化等級與適用之補修工法的關係 | 44 |
| 表 2-22 劣化類型和手冊的主要目標 | 48 |
| 表 2-23 修復工法對應之檢查項目和方法 | 50 |
| 表 2-24 斷面修復後之檢查要點 | 51 |
| 表 2-25 建築物外觀之劣化程度和可採用之工法範例 | 53 |
| 表 2-26 建築結構來考慮其修復/補強之目的和施工方法 | 55 |
| 表 2-27 灌注用之環氧樹脂黏度值建議表 | 61 |
| 表 2-28 美國 ASTM 環氧樹脂材料之用途分類表 | 62 |
| 表 2-29 裂縫寬度在 0.3 mm 以上之灌注環氧樹脂材料規格表 | 63 |
| 表 2-30 CNS 10141 環氧樹脂性能要求表 | 64 |

| | |
|--------------------------------------|-----|
| 表 2- 31 適用於斷面缺損時之鋼筋防鏽材料表 | 65 |
| 表 2- 32 適用於斷面缺損時之填補用材料 | 66 |
| 表 2- 33 斷面缺損時之填補用樹脂砂漿材料主要規格表 | 67 |
| 表 2- 34 無收縮混凝土之規格要求表 | 68 |
| 表 2- 35 無收縮水泥砂漿之規格要求表 | 68 |
| 表 2- 36 由混凝土局部或全部承受介面應力需求之試驗要求 | 70 |
| 表 2- 37 強制性要求清單 | 71 |
| 表 2- 38 非強制性要求清單 | 75 |
| 表 2- 39 混凝土移除法的特色、考量與限制 | 83 |
| 表 2- 40 表面處理的特色、考量與限制 | 86 |
| 表 2- 41 卜特蘭水泥混凝土替代材料的試驗法與試驗值 | 89 |
| 表 2- 42 改質卜特蘭水泥混凝土或砂漿的性質改變 | 91 |
| 表 3- 1 聚合物水泥砂漿之品質基準 | 96 |
| 表 3- 2 環氧樹脂系斷面修復材之品質基準(AIJ) | 97 |
| 表 3- 3 各材料之代號 | 99 |
| 表 3- 4 修復材料之配比 | 99 |
| 表 3- 5 基礎混凝土之配比 | 99 |
| 表 3- 6 水泥系材料黏結劑之配比 | 109 |
| 表 3- 7 鋼筋腐蝕等級評定基準 | 113 |
| 表 4- 1 聚合物水泥砂漿之品質基準 | 132 |
| 表 4- 2 F00SP00 之撓曲強度 | 136 |
| 表 4- 3 F25SP00 之撓曲強度 | 136 |
| 表 4- 4 F00SP07 之撓曲強度 | 137 |
| 表 4- 5 F25SP07 之撓曲強度 | 137 |
| 表 4- 6 無收縮水泥砂漿試體之撓曲強度 | 138 |
| 表 4- 7 環氧樹脂砂漿試體之撓曲強度 | 138 |
| 表 4- 8 F00SP00 之抗壓強度 | 139 |
| 表 4- 9 F25SP00 之抗壓強度 | 139 |
| 表 4- 10 F00SP07 之抗壓強度 | 140 |
| 表 4- 11 F25SP07 之抗壓強度 | 140 |
| 表 4- 12 無收縮水泥砂漿試體之抗壓強度 | 141 |

| | |
|---|-----|
| 表 4- 13 環氧樹脂砂漿試體之抗壓強度 | 141 |
| 表 4- 14 F00SP00 之黏結強度 | 142 |
| 表 4- 15 F25SP00 之黏結強度 | 143 |
| 表 4- 16 F00SP07 之黏結強度 | 144 |
| 表 4- 17 F25SP07 之黏結強度 | 145 |
| 表 4- 18 無收縮水泥砂漿試體之黏結強度 | 146 |
| 表 4- 19 環氧樹脂砂漿試體之黏結強度 | 147 |
| 表 4- 20 F00SP00 之透水量 | 148 |
| 表 4- 21 F25SP00 之透水量 | 148 |
| 表 4- 22 F00SP07 之透水量 | 148 |
| 表 4- 23 F25SP07 之透水量 | 149 |
| 表 4- 24 無收縮水泥砂漿試體之透水量 | 149 |
| 表 4- 25 環氧樹脂砂漿試體之透水量 | 149 |
| 表 4- 26 F00SP00 之吸水量 | 150 |
| 表 4- 27 F25SP00 之吸水量 | 150 |
| 表 4- 28 F00SP07 之吸水量 | 150 |
| 表 4- 29 F25SP07 之吸水量 | 151 |
| 表 4- 30 無收縮水泥砂漿試體之吸水量 | 151 |
| 表 4- 31 環氧樹脂砂漿試體之吸水量數據 | 151 |
| 表 4- 32 不同配比試體之長度變化 | 152 |
| 表 4- 33 不同配比表面粗糙度與環境溫度影響下之 28 天齡期黏結強度 | 178 |
| 表 5- 1 氯離子或中性化劣化適用之補修工法 | 204 |
| 表 5- 2 斷面補修工法適用範圍概念 | 207 |
| 表 5- 3 斷面修復材料之相關試驗 | 210 |
| 表 5- 4 斷面修復材之適用效果 | 212 |
| 表 5- 5 斷面修復材料之性能要求 | 213 |
| 表 5- 6 斷面補修用之防銹劑品質規格 | 216 |
| 表 5- 7 水泥系材料黏結劑之配比 | 218 |
| 表 5- 8 水量對混漿之影響 | 221 |
| 表 5- 9 補修材料性能要求 | 225 |

| | |
|--------------------------|-----|
| 附表 2-1 第一次專家座談會議紀錄 | 233 |
| 附表 2-2 第二次專家座談會議紀錄 | 235 |

圖次

| | |
|-------------------------------------|-----|
| 圖 1-1 本研究執行步驟 | 4 |
| 圖 2-1 混凝土構造物之維護管理實施流程 | 8 |
| 圖 2-2 常見的混凝土修復工法 | 9 |
| 圖 2-3 耐久性能診斷方法流程 | 12 |
| 圖 2-4 耐久性能初步診斷項目 | 15 |
| 圖 2-5 初步診斷綜合評定 | 16 |
| 圖 2-6 耐久性能詳細診斷方法 | 18 |
| 圖 2-7 修復/補強流程 | 27 |
| 圖 2-8 修復/補強工法之選定流程 | 52 |
| 圖 2-9 裂縫修復工法 | 58 |
| 圖 2-10 斷面修復法 | 59 |
| 圖 2-11 修補方法 | 82 |
| 圖 3-1 研究步驟 | 94 |
| 圖 3-2 撓曲強度試驗儀器 | 100 |
| 圖 3-3 抗壓強度試驗儀器 | 101 |
| 圖 3-4 黏結強度試驗儀器 | 102 |
| 圖 3-5 長度變化試驗儀器 | 104 |
| 圖 3-6 斷面修復法 | 105 |
| 圖 3-7 試體示意圖 | 107 |
| 圖 3-8 本研究設計之試驗模具 | 107 |
| 圖 3-9 恆溫恆濕箱之設置 | 107 |
| 圖 3-10 本研究恆溫恆濕箱之設置(7 天 7 個循環) | 108 |
| 圖 3-11 直拉式拉拔試驗 | 108 |
| 圖 3-12 表面粗糙度之砂目 | 111 |
| 圖 3-13 表面粗糙度之中間 | 111 |
| 圖 3-14 水泥系黏結材之水泥砂漿 | 112 |
| 圖 3-15 環氧樹脂系黏結材之環氧樹脂 | 112 |
| 圖 3-16 本研究鋼筋腐蝕之實際配置 | 115 |
| 圖 3-17 撓區段鋼筋量測 80 公分 | 116 |
| 圖 3-18 兩端塗上防鏽劑 | 116 |

| | |
|---------------------------------|-----|
| 圖 3- 19 負極接於水中之銅片 | 116 |
| 圖 3- 20 正極接於水箱外之鋼筋 | 117 |
| 圖 3- 21 待鋼筋表面腐蝕至本研究目標腐蝕狀態 | 117 |
| 圖 3- 22 鋼筋腐蝕等級目視法 | 118 |
| 圖 3- 23 本研究鋼筋腐蝕狀態 | 118 |
| 圖 3- 24 本研究梁構件之配筋設計 | 119 |
| 圖 3- 25 澆置前中央放置之保麗龍 | 120 |
| 圖 3- 26 內埋式吊點 | 120 |
| 圖 3- 27 鋼筋綁紮完成 | 121 |
| 圖 3- 28 梁構件灌漿 | 121 |
| 圖 3- 29 拆模後翻轉試體 | 122 |
| 圖 3- 30 初步敲除保麗龍處 | 122 |
| 圖 3- 31 敲除裂化混凝土及鋼筋腐蝕之受損區域 | 123 |
| 圖 3- 32 敲除深度達鋼筋背側 | 124 |
| 圖 3- 33 鋼筋腐蝕清除 | 124 |
| 圖 3- 34 鋼筋表面塗佈防腐蝕漆 | 125 |
| 圖 3- 35 水泥砂漿黏結材塗佈 | 125 |
| 圖 3- 36 環氧樹脂黏結材塗佈 | 126 |
| 圖 3- 37 水泥砂漿修復材灌入 | 126 |
| 圖 3- 38 環氧樹脂修復材灌入 | 127 |
| 圖 3- 39 水泥砂漿修復材完成修復 | 127 |
| 圖 3- 40 環氧樹脂修復材完成修復 | 128 |
| 圖 3- 41 試驗裝置側視圖 | 129 |
| 圖 3- 42 試驗裝置前視圖 | 129 |
| 圖 3- 43 試驗加載程序 | 130 |
| 圖 4- 1 各試體之撓曲強度結果 | 153 |
| 圖 4- 2 各試體之抗壓強度結果 | 154 |
| 圖 4- 3 各試體之黏結強度結果 | 155 |
| 圖 4- 4 各試體之透水量結果 | 156 |
| 圖 4- 5 各試體之吸水量結果 | 157 |
| 圖 4- 6 各試體之吸水率結果 | 158 |

| | |
|---|-----|
| 圖 4- 7 各試體之長度變化結果 | 159 |
| 圖 4- 8 F00SP00 之 7 天齡期下撓曲及抗壓試驗照片 | 160 |
| 圖 4- 9 F00SP00 之 28 天齡期下撓曲及抗壓試驗照片 | 160 |
| 圖 4- 10 F00SP00 之 7 天齡期下黏結強度試驗照片 | 161 |
| 圖 4- 11 F00SP00 之 28 天齡期下黏結強度試驗照片 | 161 |
| 圖 4- 12 F00SP00 之 7 天循環齡期下黏結強度試驗照片 | 162 |
| 圖 4- 13 F00SP00 之 28 天循環齡期下黏結強度試驗照片 | 162 |
| 圖 4- 14 F25SP00 之 7 天齡期下撓曲及抗壓試驗照片 | 163 |
| 圖 4- 15 F25SP00 之 28 天齡期下撓曲及抗壓試驗照片 | 163 |
| 圖 4- 16 F25SP00 之 7 天齡期下黏結強度試驗照片 | 164 |
| 圖 4- 17 F25SP00 之 28 天齡期下黏結強度試驗照片 | 164 |
| 圖 4- 18 F25SP00 之 7 天循環齡期下黏結強度試驗照片 | 165 |
| 圖 4- 19 F25SP00 之 28 天循環齡期下黏結強度試驗照片 | 165 |
| 圖 4- 20 F00SP07 之 7 天齡期下撓曲及抗壓試驗照片 | 166 |
| 圖 4- 21 F00SP07 之 28 天齡期下撓曲及抗壓試驗照片 | 166 |
| 圖 4- 22 F00SP07 之 7 天齡期下黏結強度試驗照片 | 167 |
| 圖 4- 23 F00SP07 之 28 天齡期下黏結強度試驗照片 | 167 |
| 圖 4- 24 F00SP07 之 7 天循環齡期下黏結強度試驗照片 | 168 |
| 圖 4- 25 F00SP07 之 28 天循環齡期下黏結強度試驗照片 | 168 |
| 圖 4- 26 F25SP07 之 7 天齡期下撓曲及抗壓試驗照片 | 169 |
| 圖 4- 27 F25SP07 之 28 天齡期下撓曲及抗壓試驗照片 | 169 |
| 圖 4- 28 F25SP07 之 7 天齡期下黏結強度試驗照片 | 170 |
| 圖 4- 29 F25SP07 之 28 天齡期下黏結強度試驗照片 | 170 |
| 圖 4- 30 F25SP07 之 7 天循環齡期下黏結強度試驗照片 | 171 |
| 圖 4- 31 F25SP07 之 28 天循環齡期下黏結強度試驗照片 | 171 |
| 圖 4- 32 無收縮水泥砂漿試體於 7 天齡期下撓曲及抗壓試驗照片 .. | 172 |
| 圖 4- 33 無收縮水泥砂漿試體於 28 天齡期下撓曲及抗壓試驗照片 .. | 172 |
| 圖 4- 34 無收縮水泥砂漿試體於 7 天齡期下黏結強度試驗照片 | 173 |
| 圖 4- 35 無收縮水泥砂漿試體於 28 天齡期下黏結強度試驗照片 ... | 173 |
| 圖 4- 36 無收縮水泥砂漿試體於 7 天循環齡期下黏結強度試驗照片 | 174 |

| | |
|--|-----|
| 圖 4- 37 無收縮水泥砂漿試體於 28 天循環齡期下黏結強度試驗照片 | 174 |
| 圖 4- 38 環氧樹脂砂漿試體於 7 天齡期下撓曲及抗壓試驗照片 | 175 |
| 圖 4- 39 環氧樹脂砂漿試體於 28 天齡期下撓曲及抗壓試驗照片 | 175 |
| 圖 4- 40 環氧樹脂砂漿試體於 7 天齡期下黏結強度試驗照片 | 176 |
| 圖 4- 41 環氧樹脂砂漿試體於 28 天齡期下黏結強度試驗照片 | 176 |
| 圖 4- 42 各材料在不同表面粗糙度與冷熱循環下之 28 天試驗結果 | 179 |
| 圖 4- 43 F00SP00 之 28 天齡期下表面粗糙度為中間之黏結強度試驗照片 | 180 |
| 圖 4- 44 F00SP00 之 28 天齡期下表面粗糙度為砂目之黏結強度試驗照片 | 180 |
| 圖 4- 45 F00SP00 之 28 天循環齡期下表面粗糙度為中間之黏結強度試驗照片 | 181 |
| 圖 4- 46 F00SP00 之 28 天循環齡期下表面粗糙度為砂目之黏結強度試驗照片 | 181 |
| 圖 4- 47 F25SP07 之 28 天齡期下表面粗糙度為中間之黏結強度試驗照片 | 182 |
| 圖 4- 48 F25SP07 之 28 天齡期下表面粗糙度為砂目之黏結強度試驗照片 | 182 |
| 圖 4- 49 F25SP07 之 28 天循環齡期下表面粗糙度為中間之黏結強度試驗照片 | 183 |
| 圖 4- 50 F25SP07 之 28 天循環齡期下表面粗糙度為砂目之黏結強度試驗照片 | 183 |
| 圖 4- 51 無收縮水泥砂漿之 28 天齡期下表面粗糙度為中間之黏結強度試驗照片 | 184 |
| 圖 4- 52 無收縮水泥砂漿之 28 天齡期下表面粗糙度為砂目之黏結強度試驗照片 | 184 |
| 圖 4- 53 無收縮水泥砂漿之 28 天循環齡期下表面粗糙度為中間... | 185 |
| 圖 4- 54 無收縮水泥砂漿之 28 天循環齡期下表面粗糙度為砂目 ... | 185 |
| 圖 4- 55 環氧樹脂砂漿之 28 天齡期下表面粗糙度為中間之黏結強度試驗照片 | 186 |

| | |
|--|-----|
| 圖 4- 56 環氧樹脂砂漿之 28 天齡期下表面粗糙度為砂目之黏結強度試驗照片 | 186 |
| 圖 4- 57 環氧樹脂砂漿之 28 天循環齡期下表面粗糙度為中間之.... | 187 |
| 圖 4- 58 環氧樹脂砂漿之 28 天循環齡期下表面粗糙度為中間之.... | 187 |
| 圖 4- 59 由水泥砂漿修復之鋼筋腐蝕梁構件達變位角 0.1 %之修復區域..... | 189 |
| 圖 4- 60 由水泥砂漿修復之鋼筋腐蝕梁構件達變位角 0.4 %之修復區域..... | 189 |
| 圖 4- 61 由水泥砂漿修復之鋼筋腐蝕梁構件達變位角 3.5 %之修復區域..... | 190 |
| 圖 4- 62 由水泥砂漿修復之鋼筋腐蝕梁構件達破壞時之修復區域.. | 190 |
| 圖 4- 63 水泥砂漿修復材之梁構件純彎段各變位量之裂縫發展圖.. | 192 |
| 圖 4- 64 由環氧砂漿修復之鋼筋腐蝕梁構件達變位角 0.1 %之修復區域..... | 194 |
| 圖 4- 65 由環氧砂漿修復之鋼筋腐蝕梁構件達變位角 0.2 %之修復區域..... | 194 |
| 圖 4- 66 由環氧砂漿修復之鋼筋腐蝕梁構件達變位角 0.4 %之修復區域..... | 195 |
| 圖 4- 67 由環氧砂漿修復之鋼筋腐蝕梁構件達變位角 0.8 %之修復區域..... | 195 |
| 圖 4- 68 由環氧砂漿修復之鋼筋腐蝕梁構件達變位角 3.5 %之修復區域..... | 196 |
| 圖 4- 69 由環氧砂漿修復之鋼筋腐蝕梁構件達變位角破壞時之修復區域..... | 196 |
| 圖 4- 70 環氧樹脂修復材之梁構件純彎段各變位量之裂縫發展圖.. | 198 |
| 圖 4- 71 水泥砂漿與環氧樹脂砂漿之撓曲裂縫總和與變位角之關係 | 200 |
| 圖 4- 72 水泥砂漿與環氧樹脂砂漿之最大撓曲裂縫與變位角之關係 | 200 |
| 圖 5- 1 目標恢復等級 | 201 |
| 圖 5- 2 維護管理流程 | 202 |

| | |
|-------------------------------|-----|
| 圖 5-3 修復工法選擇考慮條件 | 203 |
| 圖 5-4 斷面補修工法施作流程 | 205 |
| 圖 5-5 斷面補修工法之選擇參考 | 207 |
| 圖 5-6 修復設計、修復施工及修復材料之關係 | 208 |
| 圖 5-7 斷面修復材料之選定流程 | 208 |
| 圖 5-8 斷面補修工法之施工流程 | 217 |
| 圖 5-9 前處理(單純混凝土劣化) | 219 |
| 圖 5-10 前處理(鋼筋腐蝕引起之劣化) | 220 |
| 圖 5-11 參考圖說 | 223 |
| 圖 5-12 斷面補修工法之施工範例 | 224 |

摘要

關鍵字：鋼筋混凝土、腐蝕構件、修復材料

一、研究源起

在台灣，鋼筋建築物常見劣化狀況之一，便是內部鋼筋鏽蝕而造成混凝土裂縫或剝落，且當裂縫發生或混凝土剝落，亦會加劇鋼筋鏽蝕速度，進而影響建築物之安全性。當鋼筋混凝土構件劣化到某些程度時，將導致影響結構物之安全性與使用性，根據構件劣化程度，此時便需要進行補修、補強或拆除重建。嚴重劣化嚴重之鋼筋混凝土建築物，日本建築學會針對腐蝕劣化構件之修復方面可分為：裂縫填補、斷面補修及整體構件包覆等不同等級對策工作，其中又以斷面補修適用範圍最廣。於「既有混凝土結構物維修及補強技術手冊」中，清楚地提出關於修復材料使用的種類及施作方法。然而，依現地調查結果及建物使用者反應，修復區域大多未滿一年即發生新舊材料分離或補修材料剝離，進而造成鋼筋裸露、鏽蝕等現象。此情形可能係由於斷面修復材之黏結力不足，或介面處理不確實。台灣之補修施作過程大多全憑現場人員經驗操作，並無明確之使用手冊或量化數據，且內政部建築研究所於 108 年度所執行的鋼筋混凝土建築物之耐久性能診斷相關研究中，有根據診斷結果建議其合適之修復工法。然而其中之斷面補修工法的施作程序與有效性尚未經試驗驗證，因此，本計畫針對常見的斷面補修工法進行試驗探討，以決定合宜之腐蝕補修工法。

二、研究方法及過程

1. 腐蝕構件的斷面修復和鋼筋腐蝕的設計之相關文獻蒐集
蒐集臺灣、日本及美國現行鋼筋混凝土建築物之修補規範及修復材料之基本性能，以參考並擬定適用台灣的斷面修復材料基本性能。
2. 斷面補修材料類別及其基本性能探討
斷面補修材料種類繁多，單純地選擇材料性質優於舊有混凝土的補修材料並非最恰當的，補修材料與舊有混凝土之間的相容性以及使用環境等因素皆是關鍵。為探討國內常用斷面修復材之修復性能，共規劃三個階段試驗，分別為：第一階段試驗，針對不同類型的修復材料之力學性能進行相關試驗，修復材料之類型參考既有混凝土結構物維修及補強技術手冊之建議。第二階段試驗，探討新舊材料介面性能，包含表面處理方式、粗糙程度評定，及介面黏結劑之使用，並針對有可

能影響到修復材料黏結力之原因提出介面處理之建議。第三階段試驗是進行鋼筋腐蝕梁構件之修復，以進一步探討修復材料之修復性能。

3. 鋼筋混凝土腐蝕梁構件製作及試驗

本研究主要以鋼筋腐蝕狀況尚不嚴重之梁構件為對象，目的為延長構件之耐使用年限；對於鋼筋混凝土腐蝕梁構件之製作，其鋼筋採預腐蝕後埋置，鋼筋腐蝕程度參考「鋼筋混凝土建築結構耐久性能診斷技術手冊(草案)」之鋼筋腐蝕等級評定基準，製作腐蝕等級IV之腐蝕鋼筋，採用外加電流將梁試體撓曲段之鋼筋，通電電解強迫及加速其腐蝕，腐蝕後埋入梁構件中，並將腐蝕段的混凝土敲除再進行除鏽及修復，最後利用四點抗彎試驗，探討修復材料於受拉側之裂縫發展、剝落或剝離狀態，以量化其修復性能。

4. 鋼筋混凝土梁構件之鋼筋腐蝕斷面補修工法建議

中國土木工程學會出版之「既有混凝土結構物維修及補強技術手冊」，主要以維修補強結構物強度為重點，對於劣化係由於環境影響、材料劣化或其他內在、外在因素等原因，而欲進行結構劣化損傷的維修補強以延長結構物耐久性之問題，該技術手冊不予列入，關於結構劣化損傷之維修補強，其所採用之工法及材料，可另參考內政部建築研究所「鋼筋混凝土建築物之修復與補強技術彙編(二)(內政部建築研究所，2000)」，惟其維修補強後結構物之安全性、使用性、復舊性之逐項查核，可依「既有混凝土結構物維修及補強技術手冊」規定辦理。「鋼筋混凝土建築物之修復與補強技術彙編(二)」主要目的為提供對於既有鋼筋混凝土構造建築物之結構體，發現有劣化症狀時或欲掌握劣化狀況進行調查、評估之方法及改善或抑制建築物之性能、機能，謀求強化或延長耐用年限所進行之補強、補修及劣化抑制之方法，以達成維護保全鋼筋混凝土構造建築物，但僅適用於因鋼筋腐蝕等相關局部劣化現象之調查、評估及補強、補修、劣化抑制施工等，相關補修工法缺乏試驗進行有效性與合適性探討，根據本研究之試驗結果，可補充該手冊對於斷面補修工法程序之細節，以提供技師進行補強工程或修復工程規劃設計時參考。

三、重要發現

經本次研究後發現，現行鋼筋混凝土結構物腐蝕之相關斷面補修工法，缺乏試驗進行有效性與合適性探討，與相關專家及學者交流訪談後，統整研究成果並草擬之鋼筋混凝土腐蝕工法對實務應用上有極大助益，可提供各土木結構技師公

會參考擴大使用標的。

四、主要建議事項

建議一

本研究針對修復材料訂定量化標準，並針對腐蝕構件之斷面修復法之施作程序進行試驗，補足內政部建築研究所於 108 年度所執行的鋼筋混凝土建築物之耐久性能診斷中提及之工法且加以驗證，後續可將斷面修復工法提供給建築師、土木結構技師公會參考，以推動建築物依耐久性診斷結果決定修復策略：立即可行建議
主辦機關：中華民國全國建築師公會、中華民國土木技師公會全國聯合會、中華民國結構工程技師公會全國聯合會
協辦機關：內政部建築研究所

據統計全臺屋齡超過 30 年的老公寓約有 72 萬棟，而就臺北市居住資訊服務網指出臺北市 30 年以上老屋以宅數而言約占總宅數 68%，由此調查已知臺灣建築物屋齡老化現象已趨嚴重，因此進行建築物之耐久性診斷後之修復是必要的。因目前國內尚無對於修復材料明確之使用手冊或量化數據，後續可將鋼筋混凝土補修工法之建議，提供給建築師、土木結構技師公會參考，以推動建築物之耐久性診斷與維護。

建議二

本研究已建立斷面修復材料之量化標準與腐蝕梁構件相關之補修工法，為確保構件劣損區域於修復後之耐久性，仍具有對中性化、氯離子滲透及化學侵蝕等之抵抗能力，臺灣目前尚無相關技術文件或規定可供參考，建議後續可規劃相關課題，並可利用試驗證實其有效性：中長期建議
主辦機關：內政部建築研究所
協辦機關：內政部建築研究所

結合本研究之相關建議，深入補充及草擬鋼筋混凝土構件腐蝕劣損區域之補修工法手冊，供技師或建築師依現場構件之劣損狀態或程度，選擇合適補修工法並可確保其修復性能。

ABSTRACT

Keywords: reinforced concrete, corroded structural members, repair material

The reinforced concrete structure is the most common form of building components in Taiwan due to its low cost, high durability, and easy maintenance. Taiwan is surrounded by the sea, the climate is humid and earthquakes are frequent. Reinforced concrete buildings have been exposed to humid environments for a long time, and many buildings have been used for nearly 50 years. As a result, most of the components have deteriorated or aged. Even reaching the critical stage of safety concerns. Recently, the government has actively promoted health inspections and the renewal of old buildings. However, in the current seismic evaluation methods of building structures, there is still a lack of quantitative diagnosis of durability and it is impossible to evaluate the impact of material degradation on the seismic performance of structures. In this regard, in the research related to the diagnosis of the durability of reinforced concrete buildings carried out by the ABRI (Architecture and Building Research Institute, Ministry of the Interior) in 2019, it is recommended that the appropriate repair method be based on the diagnosis. However, the implementation procedures and effectiveness of the section restoration method have not been verified by experiments. Therefore, it is necessary for architects, civil engineers, and structural engineers to plan reinforcement or restoration projects by implementing this plan and integrating relevant literature suggestions to construct practical suggestions for repairing steel corrosion sections.

For immediate strategies:

1. This study sets quantitative standards for repair materials and tests the procedures for the implementation of the section repair method of corroded components.
2. This study suggests the method of repairing reinforced concrete members provided for reference by the architects, civil engineers, and structural engineers association to promote the durability diagnosis and maintenance of the building.

For long-term strategies:

1. This study has established a quantitative standard for section repair materials and

repair methods related to corroded beam components. In order to ensure the durability of the damaged area of the component after repair, it still has the ability to resist neutralization, chloride ion penetration and chemical erosion. It is recommended that relevant topics can be planned in the future, and experiments can be used to verify its effectiveness.

第一章 緒論

第一節 研究背景

在臺灣，鋼筋混凝土建築物常見的劣化狀況之一，便是構件內部之鋼筋鏽蝕進而造成混凝土裂縫或剝落。當裂縫發生或混凝土剝落時，便會加劇鋼筋鏽蝕速度，進而影響建築物之安全。內政部建築研究所於 108 年進行了「鋼筋混凝土建築結構耐久性能診斷技術手冊研擬」，參考日本相關耐久診斷指針，以建立臺灣鋼筋混凝土建築適用之耐久性能診斷技術手冊，以協助建築師及土木、結構技師進行鋼筋混凝土建築之耐久性量化診斷與修復對策擬定。鋼筋混凝土建築結構耐久性能診斷技術手冊係針對建築物結構體部分(包含：梁、柱、版、RC 結構牆及外牆等)進行耐久性調查及診斷，調查一般鋼筋混凝土之混凝土內部鋼筋是否產生鏽蝕或建築物是否有劣化現象，進行劣化診斷與修復方法建議。除此之外，另提供適用於梁柱構件之塑鉸容量修正之腐蝕構件力學模型評估，以提供作為非線性靜力分析時使用。

一般而言，建築物概要調查及耐久性能初步診斷為必要實施項目，而詳細診斷則須根據初步診斷結果而判定有無實施之必要性。鋼筋混凝土建築物之耐久性能初步診斷依「構件劣化」→「外牆劣化」→「環境影響因子」→「其他使用性相關項目」等階段式方式配合表格進行評定，讓調查人員者能快速得到初步判定結果，以決定是否進入詳細診斷。耐久性能詳細診斷是根據特定之劣化現象進行現地調查並採取試體樣本進行相關材料檢驗或試驗，其目的主要了解劣化原因與程度，並判定是否進行修復/補強及合適之修復/補強工法選定。當鋼筋混凝土構件劣化到影響其安全性與使用性，此時便需要進行修復、補強或拆除重建。一般來說，修復係將建築物之劣化部分去除，以恢復建築物之美觀和提高耐久性為目的；補強則是提出可讓建築物提高其安全性和使用性，並增進構件力學性能之對策。臺灣在判斷修復或補強，最重要的考量係根據裂縫發生之位置及裂縫開裂程度，裂縫若發生在建築物之主要構件上，經專業技術人員研判會影響其安全性，應施予「補強」；若裂縫發生在建築物之主要構件上，但無立即之危險，或發生影響建築物之耐久性能的劣化現象，則施予「修復」。根據建築物之耐久性診斷調查結果，在確定其劣化主因、程度及範圍後，進而決定修復/補強策略，包含修復/補強範圍、工法及修復材料之選定，並考量施工性、工期、經濟性、施工安全和施工環境等因素。一般而言，除上述之客觀條件外，建築物管理者或使用人可

依需求設立修復目標。

針對嚴重老劣化嚴重之鋼筋混凝土建築物，日本建築學會針對腐蝕劣化構件之修復方面可分為：裂縫填補、斷面修復及整體構件包覆等不同等級對策工作，其中又以斷面修復適用範圍最廣。就斷面修復而言，臺灣出版之「既有混凝土結構物維修及補強技術手冊(土木 405-94)」中，清楚地提出關於修復材料使用的種類及施作方法。然而，依現地調查結果及建物使用者反應，修復區域之再劣化現象非常顯著，且大多未滿一年即發生新舊材料分離或修復材料剝離，進而造成鋼筋裸露、鏽蝕等現象。此情形可能係由於修復材料之黏結力不足，或介面處理不確實。當修復材料與舊有基底混凝土間之黏結能力不足，將導致修復材料剝離，則修復材料便無法發揮應有之效用。臺灣之修復施作過程大多全憑現場人員經驗操作，並無明確之使用材料性能要求與施作條件或程序。因此，確實地量化黏結劑對新舊材料介面黏結力之貢獻能力，對混凝土斷面修復材料之修復效果，係非常重要的課題之一。

除此之外，雖然「鋼筋混凝土建築結構耐久性能診斷技術手冊(草案)(內政部建築研究所，2019)」中有提出根據診斷結果建議之合適的修復工法。然而，對於斷面修復工法的施作程序與有效性仍尚未經試驗驗證，因此，本計畫將針對常見的斷面修復工法進行試驗探討，以決定合宜之腐蝕修復工法。

第二節 研究目的

本研究目的為鋼筋混凝土梁構件之腐蝕補修工法研擬，將採用鋼筋腐蝕梁構件進行一系列試驗，來探討國內常見的斷面修復材之修復性。首先，針對不同類型的修復材料之力學性能進行相關試驗，修復材料之類型依「既有混凝土結構物維修及補強技術手冊(土木 405-94)」建議分別有水泥砂漿、環氧樹脂砂漿/環氧樹脂水泥砂漿及聚合物水泥砂漿等，試驗項目包括抗壓試驗、撓曲試驗、抗拉試驗、乾燥收縮試驗、黏結力試驗等，根據各項試驗結果提出國內具本土性之修復材料之力學性能評定標準。其次，將修復材料用以修復鋼筋腐蝕劣化梁構件，進一步探討修復材料之修復性。藉由四點荷重試驗，觀察修復材料於受拉側是否能維持貼附不至於剝落，以及是否可以保持或恢復原有構件能力，以探討國內常見的修復材料修復性。除了分別使用不同斷面修復材料外，對於新舊材料接觸面之表面處理方式、粗糙程度評定，及黏結劑使用，有可能影響到修復材料黏結強度之原因提出探討，並提出界面處理之建議。最後，提出鋼筋混凝土梁構件之鋼筋腐蝕斷面補修工法建議，用以作為技師進行補強工程或修復工程規劃設計時之參考。本研究之執行步驟詳見圖 1-1。

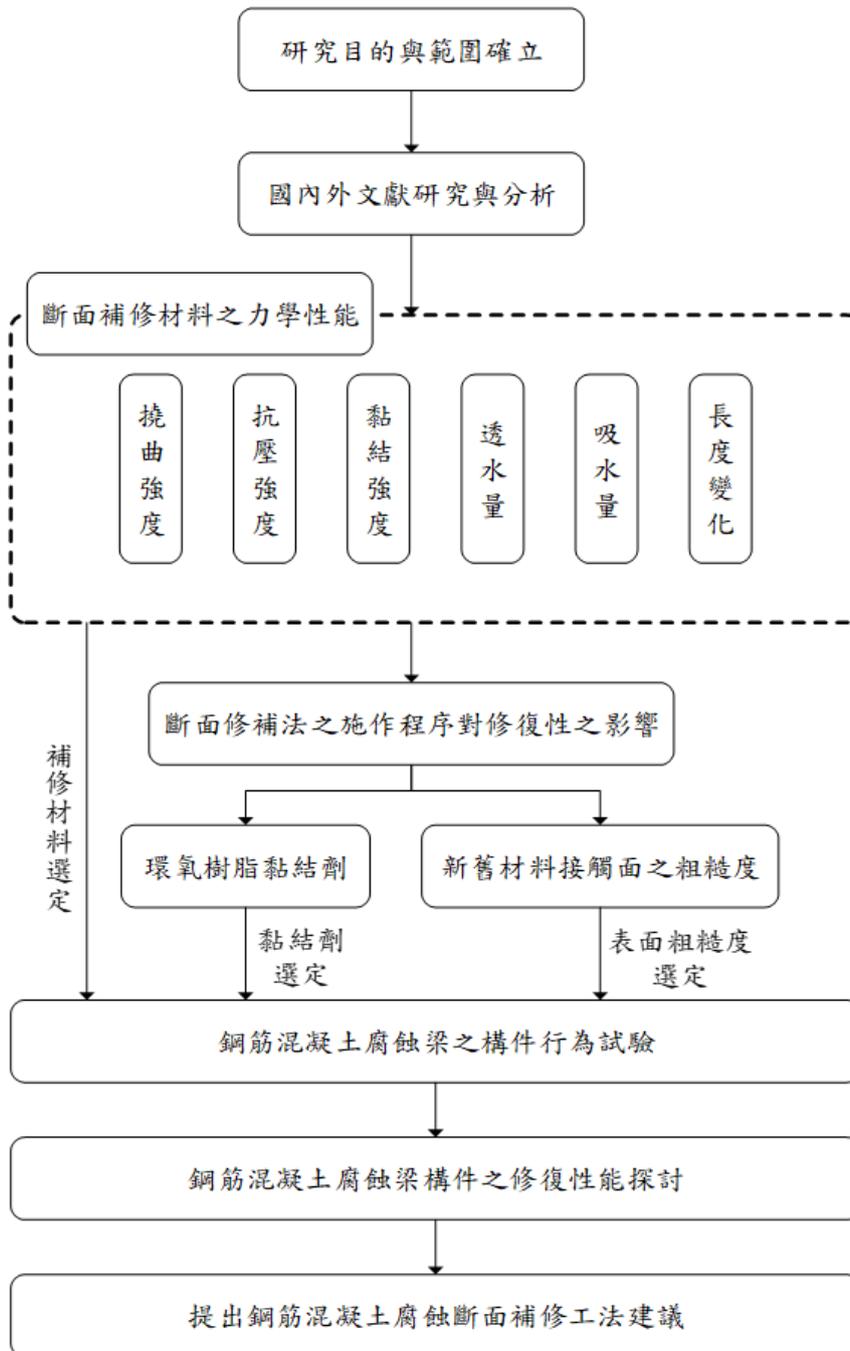


圖 1-1 本研究執行步驟

(資料來源：本研究整理)

第三節 預期目標

鋼筋混凝土構造由於成本低、耐久性高及容易維護，為臺灣最普遍之建築構件形式。臺灣四面環海、氣候潮濕且地震頻繁，鋼筋混凝土建築物長期暴露在潮濕之環境下，且許多建築物使用了近五十年之久，致使絕大多數之構件皆已出現劣化或老化之現象，甚至達到安全疑慮之臨界階段。近期政府積極推動老屋健檢及危老更新，然而現行之建築結構耐震評估方法中，仍缺乏耐久性能定量診斷而無法評估材料劣化對於結構耐震性能之影響。對此，建研所於 108 年度所執行的鋼筋混凝土建築物之耐久性能診斷相關研究中，有根據診斷結果建議其合適之修復工法。然而，其中之斷面修復工法的施作程序與有效性，尚未經試驗驗證。因此，藉由此一計畫之執行，並統整相關文獻建議，以建構具實用性之鋼筋腐蝕斷面補修工法建議，而對於技師或建築師於補強或修復工程規劃時有其必需性。

本研究之預期目標分述如下：

1. 完成混凝土斷面補修工法對鋼筋腐蝕梁構件的修復性能試驗
2. 研擬鋼筋混凝土構件之斷面修復材料性能評定標準
3. 建立鋼筋混凝土構件之斷面修復施作工法程序
4. 研擬鋼筋混凝土梁構件之斷面修復介面處理建議
5. 完成鋼筋混凝土梁構件之鋼筋腐蝕斷面補修工法建議，以提供技師進行補強工程或修復工程規劃設計時參考

第二章 文獻回顧

第一節 RC 建築物之耐久性能評估方法

壹、コンクリート診断技術(日本コンクリート工学協会，2016)

為了保持混凝土結構的性能，有必要根據混凝土的當前劣化程度並根據結構的調查和診斷結果，對將來的劣化進展進行定期的適當的維護管理。選擇修復/補強方法時，重要的是要徹底了解結構劣化的原因和劣化狀態，並建立一種能夠適當對應這些劣化機理的方法。圖 2-1 為混凝土結構之維護管理流程。進行修復/補強時，應根據結構的劣化狀態及對安全性緊急程度之影響來判斷和處理。如果難以消除劣化原因或劣化進展太快，則應考慮目標結構物的預期壽命和生命週期成本，設定修復/補強的目標水平。從長期的角度來看，有必要制定維修/補強的維護計劃。

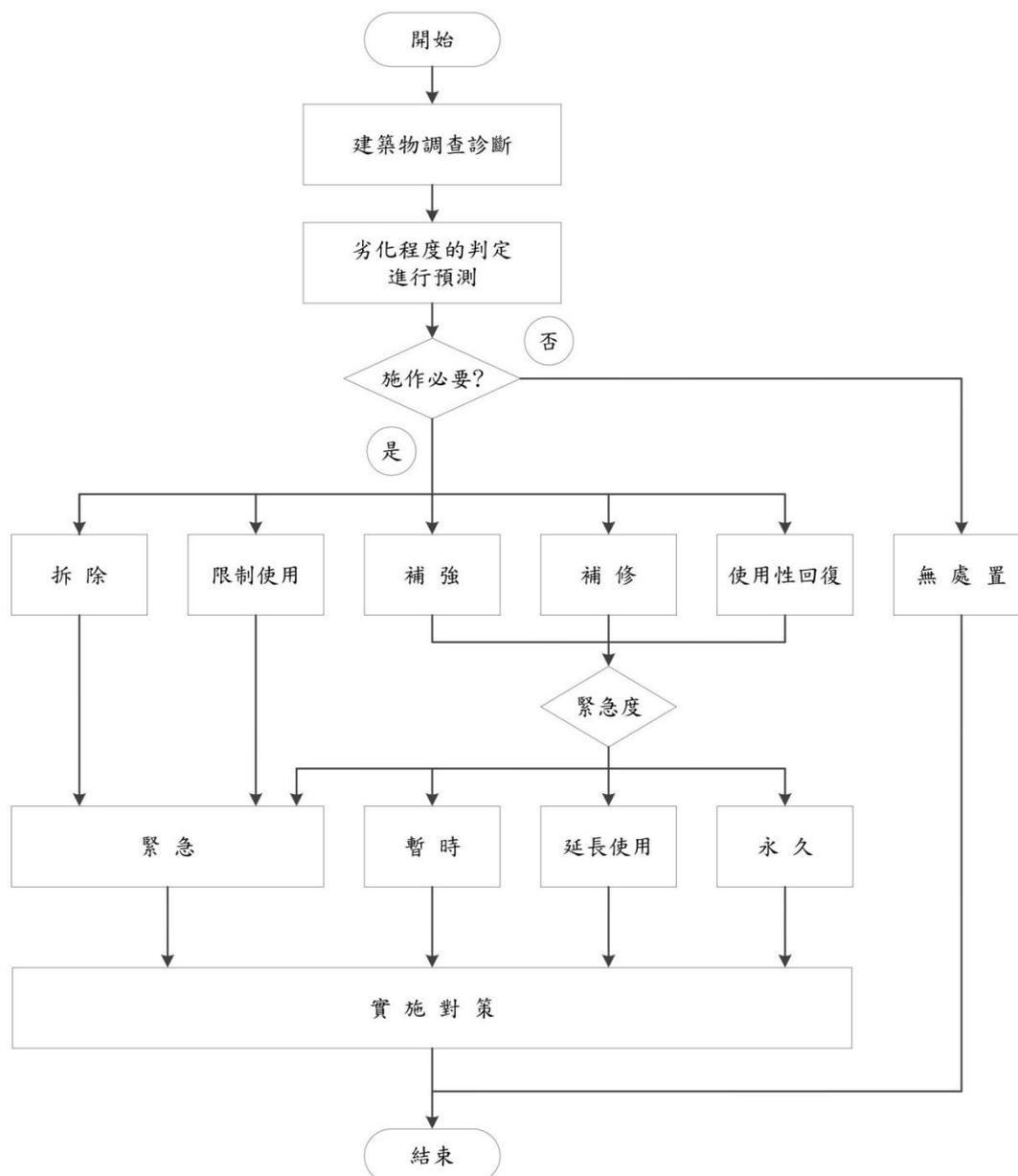


圖 2-1 混凝土構造物之維護管理實施流程

(資料來源：日本コンクリート工学協会，2016)

修復是為了抑制即將劣化之構件或結構的劣化狀況，這是為了恢復及提高耐久性並消除或減少對第三方(受損結構物周遭的人和物)影響程度的措施。常見的混凝土修復工法如圖 2-2 所示。修復工作必須根據惡化因素和構件劣化之程度選擇適當地修復工法和材料。通常，依據結構變形之類型、劣化機制和劣化程度，施工方法可以單獨進行或結合多種施工方法進行。

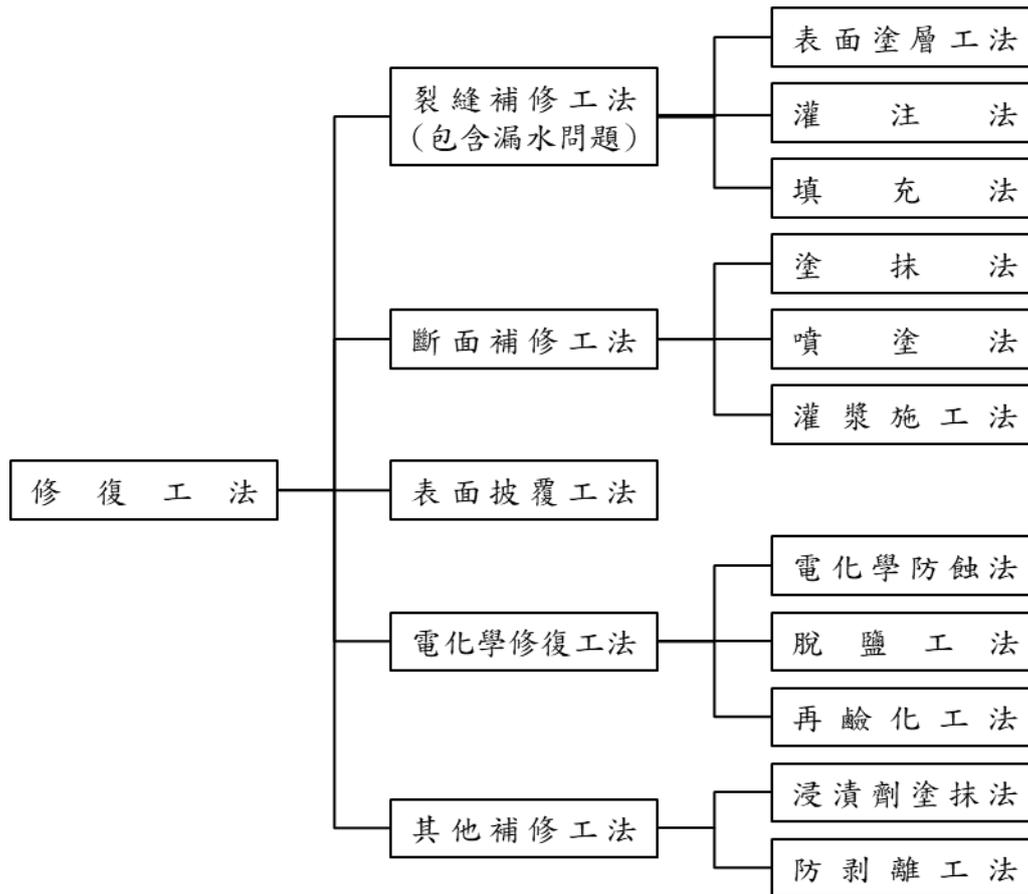


圖 2-2 常見的混凝土修復工法

(資料來源：日本コンクリート工学協会，2016)

在確定混凝土結構的修復/補強策略及選擇施工方法時，其檢討項目如表 2-1 所示。在考慮修復/補強策略及選擇施工方法時，應根據調查診斷之結果來確定修復/補強目標物的劣化的類型、程度和範圍，並且，必須正確地理解和了解發生的原因和因素。因為，即使可見的劣化狀況相同，根據發生之原因，其修復/補強方法也不同。因此，如果錯誤地識別了原因或因素，劣化則可能再次發生或擴散。

表 2-1 檢討項目

| | |
|------------|----------------------------------|
| 基本項目 | |
| 明確對象 | 劣化的類型、程度、原因 |
| 結構物的要求條件 | 機能、性能、剩餘壽命 |
| 回復目的等級 | 修復/補強效果的目標 |
| 材料、工法的比較檢討 | |
| 基本性能 | 材料物性(硬度、強度、黏結性、延伸性、耐水性、防水性、遮鹽性等) |
| 效果和持續性 | 修復/補強性能、材料壽命(資料、試驗、實績等) |

| | |
|-----------|--------------------------|
| (耐久性) | |
| 經濟性 | 材料和施工成本、生命週期成本 |
| 施工性 | 作業性、操作安全、減少工時、維持保全性(修復性) |
| 美觀性(設計方案) | 質感、色調、花紋、隱藏性、耐汙染 |

(資料來源：日本コンクリート工学協会，2016)

在考量了各種條件後，可參考下表來設定修復/補強後預期之性能目標等級，並選擇合適地修復/補強方法來達到目標等級。如果劣化的原因是一時的，可僅透過修復或補強其劣化之後便可無須再擔心，因此施工方法的選擇就很簡單。但是，如果難以消除或劣化情況嚴重，則在某些情況時就不可避免地需要臨時修復。此外，有必要考慮目標結構物之預期剩餘壽命和生命週期成本以及維修/補強後的維護管理方法和頻率來設定目標水平，如表 2-2 所列。

表 2-2 目標等級區分

| | |
|----|---|
| 臨時 | 主要目的是確保安全，防止劣化發展和消除是次要的。 |
| 暫定 | 僅修復出現劣化狀況的部分而不是消除主因，因此當劣化出現在哪個位置就修復該位置。 |
| 延命 | 修復出現明顯劣化之部位，並抑制劣化因子對其之影響，保證至少幾年間不再出現同樣的劣化狀況。 |
| 永久 | 不僅修復已經出現明顯劣化之部位，並幾乎完全消除潛在的劣化因子，消除或減少外在因素。此目標等級預計具有 10 年或 10 年以上之修復效果。 |

(資料來源：日本コンクリート工学協会，2016)

貳、鋼筋混凝土建築結構耐久性能診斷技術手冊研擬(內政部建築研究所，2019)

鋼筋混凝土建築物因明顯看出劣化症狀，或想掌握建築物於完工後歷經數年後之軀體劣化狀況，從而進行耐久性能調查及診斷。2019 年內政部建築研究所之「鋼筋混凝土建築結構耐久性能診斷技術手冊研擬」內提出建議之耐久性能調查及診斷，參考了內政部建築研究所之「鋼筋混凝土建築物耐久性能診斷方法研擬(內政部建築研究所，2013)」及日本建築研究所「既存マンション軀体の劣化度調査・診断技術マニュアル(日本建築研究所，2002)」，其內容不僅包含建築

物基本資料、構件劣化狀況、環境影響及其他使用性相關項目等外，另外亦採用相關檢驗或試驗以了解鋼筋與混凝土現況，並配合環境與使用年限設定可用於研擬各種修補或補強之方案，其耐久性能診斷方法流程詳見圖 2-3。該文獻所述之耐久性能診斷方法及流程僅適用於自然狀態下鋼筋混凝土材料或因本身材料不良，所引發之老劣化現象；若因外力、地震力或施工不良等造成之建築物損壞，則不適用於此提供之方法。因地震所引致之損傷可參考國家地震研究中心建議之初步耐震能力診斷方法，或是內政部營建署建議之鋼筋混凝土建築物耐震能力初步評估(PSERCB)(內政部建築研究所，2016)以進行耐震能力評估。

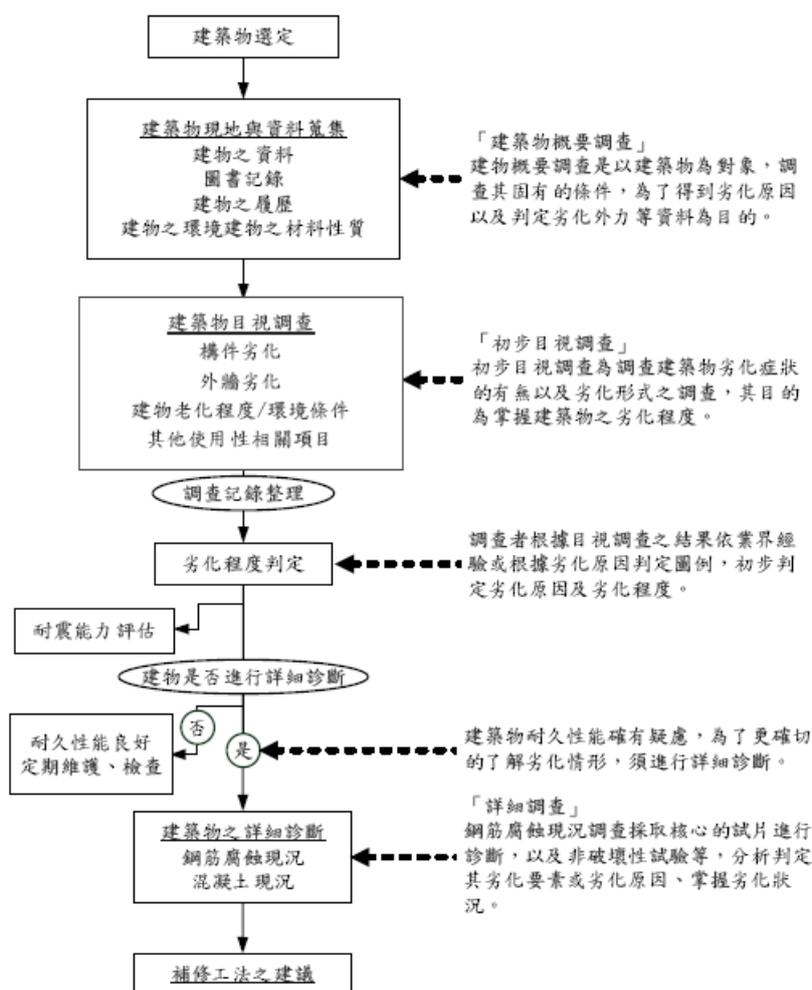


圖 2-3 耐久性能診斷方法流程

(資料來源：內政部建築研究所，2019)

耐久性能診斷方法，其建築物概要調查為第一步。透過與建築物使用者訪談及現地探勘、調查，以初步了解該建築物之相關基本資料，而後進行耐久性能初步診斷。一般而言，建築物概要調查及耐久性能初步診斷為必要實施項目，而詳細診斷則須根據初步診斷結果而判定有無實施之必要性。建築物概要調查內要包含設計圖書、施工紀錄、檢查或修復工事紀錄等資料，並透過與建築物使用者之訪談以獲得建築物相關資訊；換言之，其目的為調查建築物固有條件而實行之調查。

初步診斷以目視調查為主，用眼睛觀察構件劣化情形並利用望遠鏡或相機等輔助工具，以確實掌握劣化狀況。由於目視調查較為主觀，因此為了降低調查者不同而產生之落差，須由相關專業人員進行調查。在「鋼筋混凝土建築結構耐久性診斷技術手冊研擬」中，建議了相關診斷準則與評估表，可協助調查人員按表操

作並記錄。建築物耐久性能可大致分為四類進行判定(圖 2- 4)，一為構件劣化，主要評估建築物構件，包含柱、梁、版及 RC 結構牆等劣化狀況；二為外牆劣化程度，主要調查建築物的壁體、女兒牆、雨遮、陽臺於自然環境及維護不當之狀況下造成的劣化狀況；三為環境影響因子，因建築物耐久性能受氯鹽、二氧化碳、溫度及濕度等影響甚大，故依據建築物所在環境及已使用之年限來判定其環境劣化潛勢；四為其他使用性相關項目，以使用者觀點出發，判定是否有變形及振動等易造成其他使用性相關項目不佳的問題。綜合上述四類因子結果，用以初步判定建築物之耐久性能。表 2-3 和表 2-4 為初步診斷項目說明和各劣化症狀定義。初步診斷範圍以共同使用空間為主要調查對象，對於專用或私人使用空間部分，則須依合約或業主需求而定。此外，進行各項工作調查時，不使用鷹架等輔助器具，且以不去除表面裝修或裝飾材料為原則。

表 2-3 初步診斷項目說明

| 調查方法 | 調查項目 | 調查位置 |
|-------|-------------------|------------------------------|
| 目視調查 | 裂縫(型態、寬度) | 外牆、護欄、圍欄、陽臺、走廊、室外樓梯、伸縮縫等可視範圍 |
| | 裝修材料鼓起 | |
| | 剝落、缺陷(片狀剝落、鋼筋裸露) | |
| | 表面狀態(汗損、粉化、漏水痕跡等) | |
| | 表面脆弱化 | |
| | 漏水痕跡 | |
| 打診調查 | 裝修材料鼓起 | 外牆(伸手可及) |
| 混凝土強度 | 反彈垂法(施密特錘) | 樓梯間等可觸及之混凝土表面 |
| 其他 | 樓板下陷、傾斜、體感異常 | 樓板(如有必要) |

(資料來源：內政部建築研究所，2019)

表 2-4 劣化症狀定義

| 劣化狀況 | | 定義 |
|------|------|--|
| 裂縫 | 沿鋼筋 | 於混凝土面上之沿鋼筋位置裂縫，一般呈現垂直或水平線性，鋼筋包含主筋和橫向鋼筋。 |
| | 開口周邊 | 由開口邊角發生之斜向裂縫。 |
| | 網狀 | 網狀(不一定為矩形)裂縫，間接目視檢查無法確認之微細物除外。 |
| | 其他 | 上述以外之裂縫(規則性、不規則性不拘)。 |
| 鼓起 | | 具裝修材時，出現與軀體分離之狀態，或保護層混凝土呈現鼓起而與鋼筋已有分離現象。對於鼓起之裝修材和混凝土，在初次診斷中無區別處理。 |
| 剝落 | 裝修材 | 裝修材剝離掉落。 |
| | 混凝土 | 鼓起之保護層混凝土由軀體上剝離掉落，部分鋼筋露出。 |
| 鏽蝕汙損 | | 腐蝕鋼筋的鏽蝕外露可見，並附著在裝修材或混凝土表面之情況。 |
| 白華 | | 硬化混凝土表面出現白色物質，通常伴隨著漏水。 |
| 起泡 | | 由於混凝土內部之部分的膨脹壓力使混凝土表面的小部分出現錐形凹陷的破壞狀況。 |
| 表面弱化 | | 混凝土表面因凍害和磨損而減弱，包含粉末化。 |
| 其他汙損 | | 黴菌、煤煙、苔蘚等汙垢，除了鏽漬和粉化。 |
| 漏水痕跡 | | 過去曾有漏水現象發生，常伴隨著粉化。 |
| 異常體感 | | 下陷和傾斜引起的異常感，有地板震動、開關配件感覺異常。 |

(資料來源：內政部建築研究所，2019)

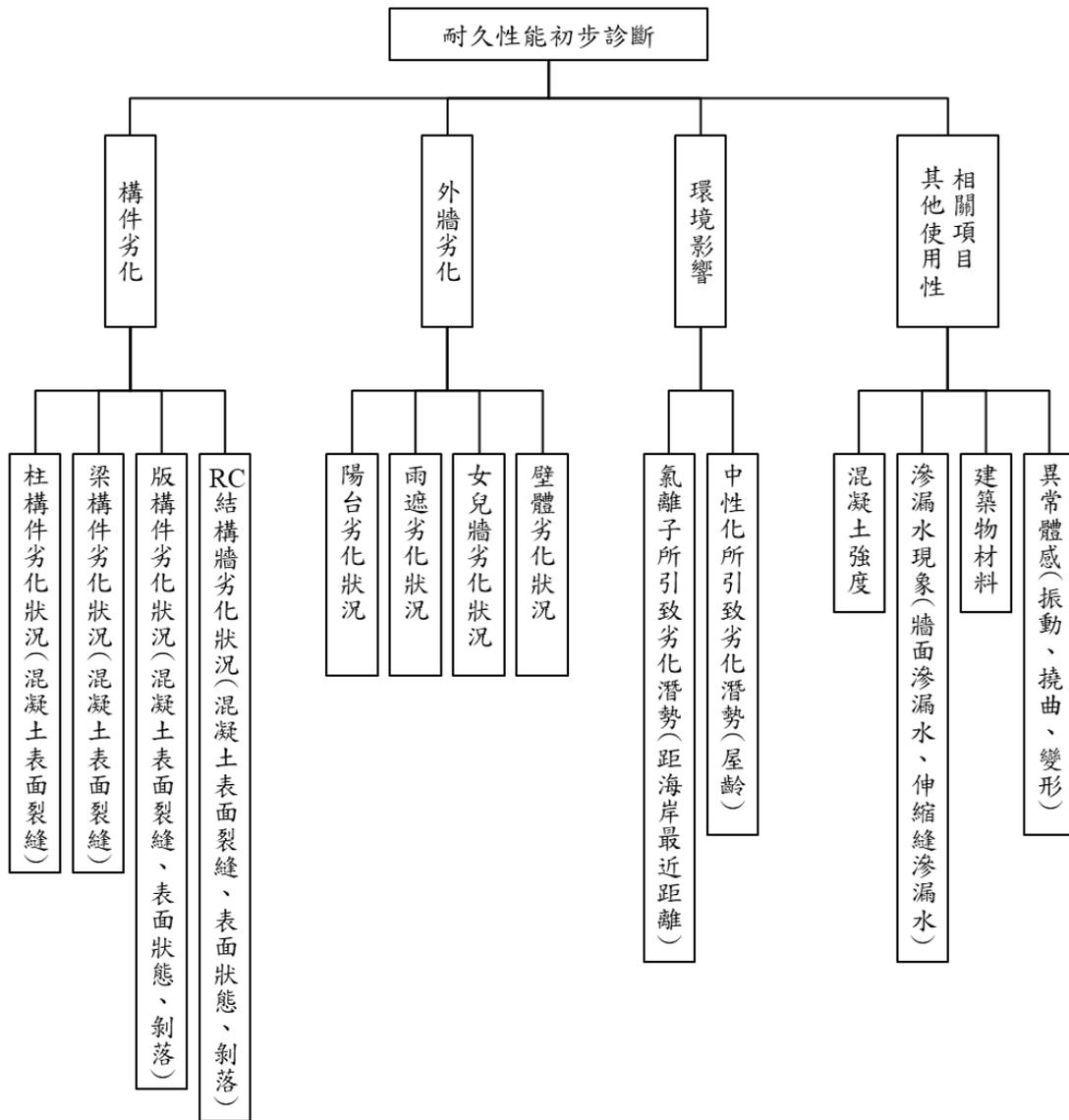


圖 2-4 耐久性能初步診斷項目

(資料來源：內政部建築研究所，2019)

鋼筋混凝土建築物耐久性能初步診斷包括「構件劣化」、「外牆劣化」、「環境影響因子」、「其他使用性相關項目」共四項因子，配合表格使用及保守判定基準，用以簡化初步診斷流程，讓調查人員能快速得到初步診斷判定結果，並決定是否進入詳細診斷。診斷方法詳見圖 2-5，依「構件劣化」→「外牆劣化」→「環境影響因子」→「其他使用性能相關項目」順序採階段式進行評定。各階段評定結果以顏色區分，其中若有依項目進入黃色則判定該建築物之耐久性能存有疑慮，紅色則判定為確有疑慮，均建議進入耐久性能詳細診斷以進一步了解其劣化主因。此外，有關其他使用性相關評定部分，因大多與混凝土或鋼筋劣化無關，

建議根據評定結果並由專業技師配合使用者或所有權人共同討論決定適合地修復工法與維護策略。

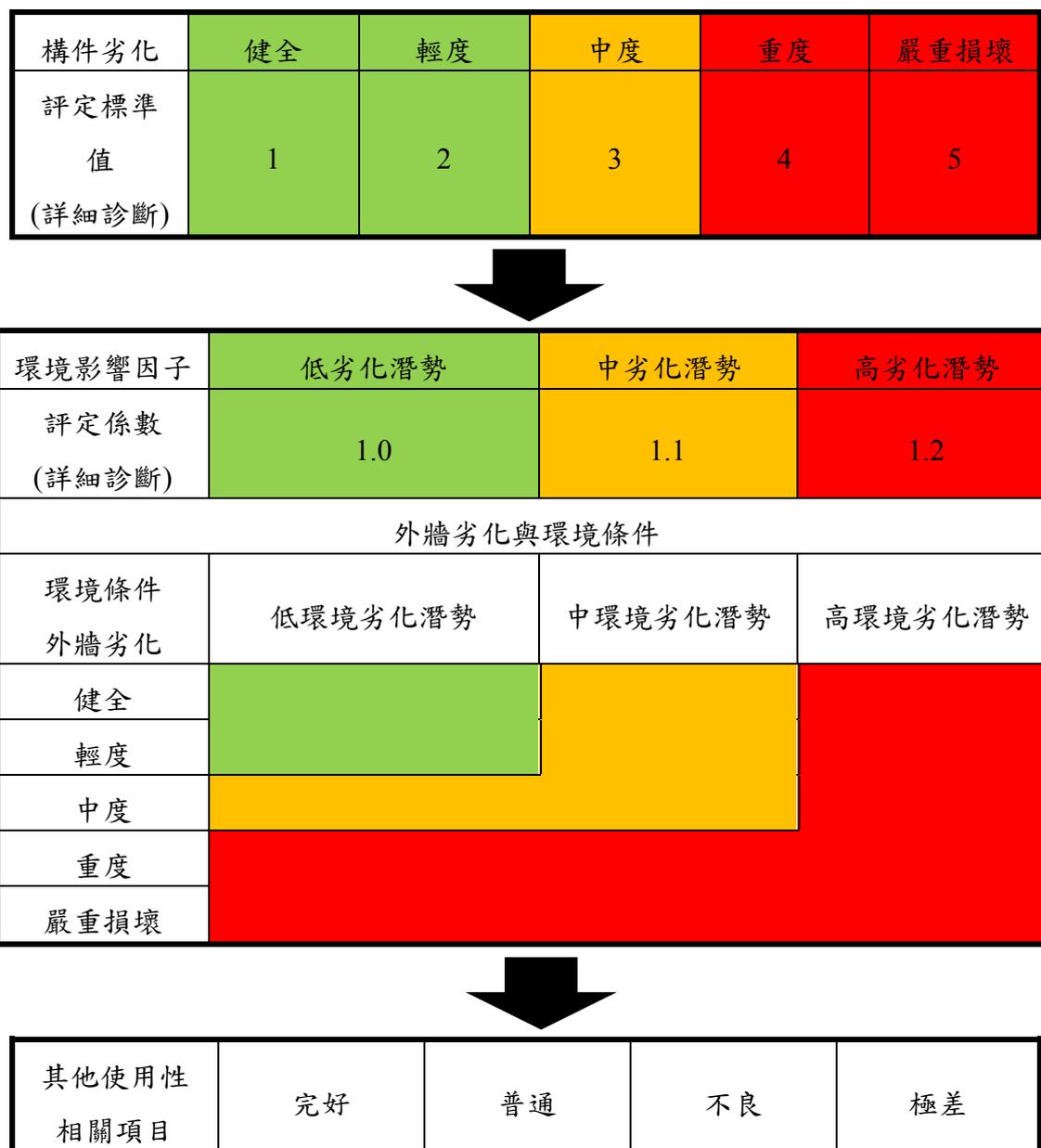


圖 2-5 初步診斷綜合評定

(資料來源：內政部建築研究所，2019)

一般而言，經由概要調查及初步診斷之結果即可大致了解建築物之劣化狀況，但若資訊不夠充分而無法判定或判定為耐久性不佳，則需進行詳細診斷。初步診斷以目視調查為主，特點為快速且易簡單上手，但僅能以外觀來研判各種構件劣化程度，無法了解表面劣化嚴重構件之內部劣化情形以及引致的關鍵因子。因此，需藉由儀器進行詳細材料試驗診斷，以判定嚴重程度是否如初步診斷調查之結果，

並利用診斷結果及權重分析，進而得到較為客觀之耐久性能評定值，以進一步決定建築物是否進行修復或補強建議。

詳細診斷之診斷因子分為鋼筋腐蝕現況及混凝土現況兩部分，結合初步診斷之構件劣化、外牆劣化、環境影響因子的結果，使詳細診斷結果能更確切地反應建築物真實之劣化程度。如圖 2-6 所示，耐久性能詳細診斷包含鋼筋腐蝕現況檢測、混凝土現況檢測、環境影響係數因子。根據過去文獻，鋼筋腐蝕現況檢測項目為中性化深度檢測、氯離子檢測、腐蝕電位檢測及構件劣化；混凝土現況檢測項目為混凝土電阻率檢測、抗壓強度檢測、混凝土保護層厚度檢測及外牆劣化。因初步診斷中即包含建築物各構件和外牆之劣化狀況，所以可將初步診斷之結果彙整入詳細診斷標準評定值，再將整個詳細診斷權重值重新分配。詳細診斷與初步診斷不同在於，其診斷結果不再只是獲得劣化程度，而是將劣化程度賦予評定標準值，除目視調查結果外，還採用相關材料試驗用以決定一量化之評定標準值，而使詳細診斷結果更具客觀、公平及實用價值。

耐久性能指標權重值係利用層級分析法和專家問卷調查統計來建議。利用層級分析法把相互比較之要素根據重要程度做評估尺度的基本劃分，包括相等重要、稍微重要、重要、相當重要、絕對重要，並賦予 1、3、5、7、9 衡量值，以利後續數值運算。接著利用問卷調查方式，統計後用列向量幾何平均值標準化計算得其權重值。根據內政部建築研究所「鋼筋混凝土建築結構耐久性能診斷技術手冊研擬」，所統計出之耐久性能指標權重值如表 2-5 所示。

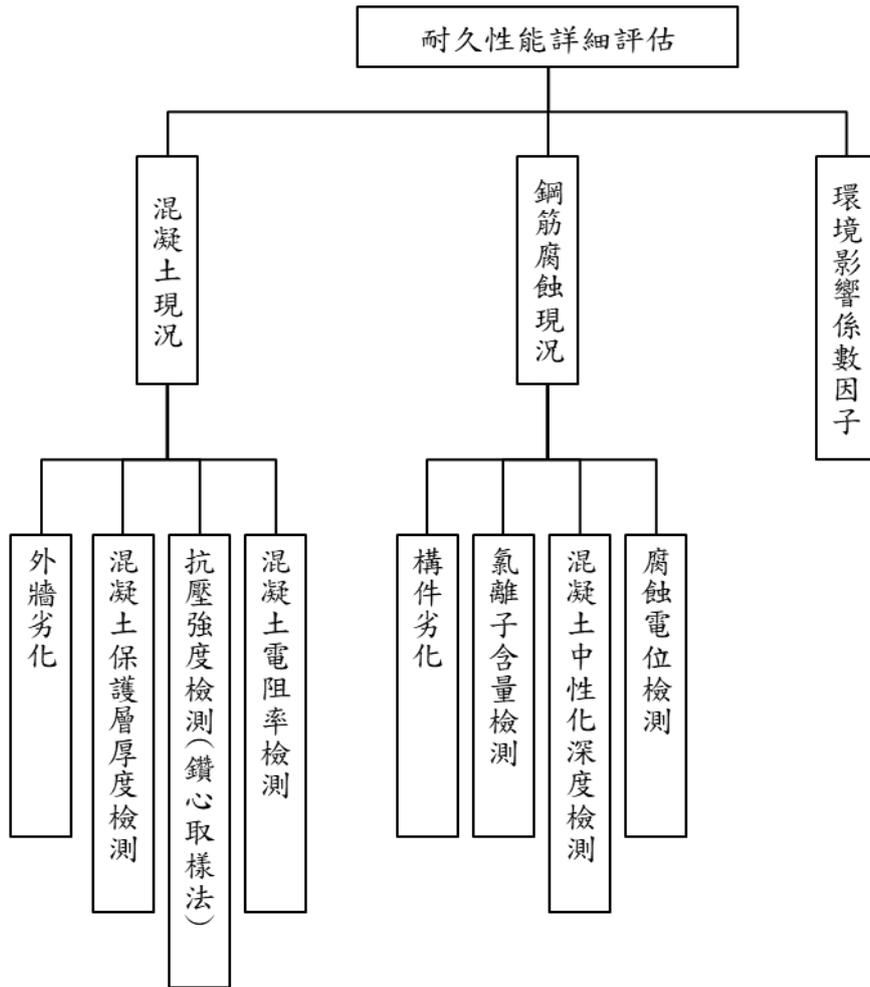


圖 2-6 耐久性能詳細診斷方法

(資料來源：內政部建築研究所，2019)

表 2-5 耐久性能指標權重值

| 診斷指標 | 重要度 | 權重值 | |
|---------|-----|------|-----|
| 腐蝕現況 | | 0.52 | |
| 構件劣化 | 1 | 0.38 | |
| 氯離子檢測 | 2 | 0.25 | |
| 腐蝕電位 | 3 | 0.20 | |
| 中性化深度 | 4 | 0.17 | |
| 混凝土現況 | | 0.48 | |
| 抗壓強度 | 1 | 0.37 | |
| 鋼筋保護層厚度 | 2 | 0.26 | |
| 外牆劣化 | 3 | 0.21 | |
| 電阻係數 | 4 | 0.16 | |
| 環境影響因子 | 1.1 | 1.2 | 1.3 |

(資料來源：內政部建築研究所，2019)

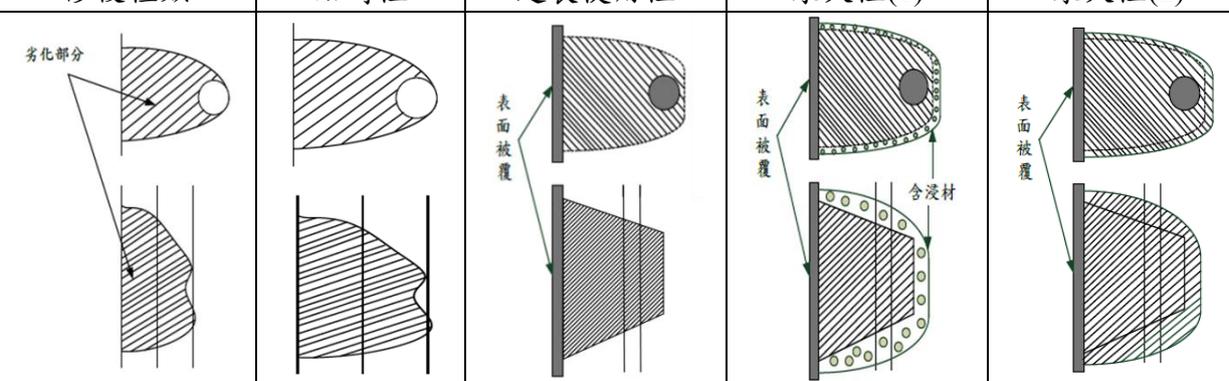
因鋼筋混凝土建築物係由混凝土和鋼筋組成，所以，劣化亦可分為混凝土部分劣化或鋼筋部分劣化。經過診斷並判定須修復之鋼筋混凝土建築物，其修復設計需根據診斷和調查得到之劣化原因、劣化程度、劣化情形、預測劣化狀況、修復之必要性和適當地修復工法等訊息來設定目標物恢復層級，建立指定的修復範圍、施工方法、選定材料，並規定施工規格是絕對必要的。針對修復策略，不僅需考量施工性、施工周期和經濟效益，還有施工安全、法律規範、工作環境外和周遭環境。

修復的主要目的係針對以劣化之構件或未來有可能劣化之建築物進行抑制，並使耐久性提升或恢復。修復策略中的恢復層級共分為三階段：永久性、延長使用性和暫時性。永久性修復係不僅修復所有變質之劣化部份，並且幾乎完全消除內部的劣化因子，並期望具有永久地修復效果。延長使用性修復係意謂修復暴露的劣化部份，並且對被認為含有劣化因子的部份，採取抑制工法消除劣化發展，以求延長建築物壽命。暫時性修復係只對於明顯劣化的部份進行修復，只有在構件出現明顯劣化時才執行。修復範圍必須在不影響結構承載能力下來執行，再根據修復範圍來制定構件之修復程度和施工方法。

1. 鋼筋腐蝕修復工法

鋼筋腐蝕修復工法即利用防鏽材料對鋼筋進行防鏽處理，使鋼筋表面形成保護膜，以隔絕外界的空氣及水分，抑制鋼筋繼續鏽蝕，再以修復材料填充形成保護層作用，藉此達到修復之目的。表 2-6 為鋼筋腐蝕修復工法與回覆目標方法之關係，對於臨時性修復，主要係針對腐蝕部分進行除鏽處理，延長使用性修復則增加了鋼筋防鏽處理。至於永久性修復，除了上述修復工法外，還需增加表面披覆材料處理以隔絕劣化因子入侵。

表 2-6 鋼筋腐蝕修復工法與回覆目標方法之關係

| 損傷種類 修復種類 | | 回復目標方法 | | | |
|---|---------|--------|----------------------|----------------------|----------------------|
| | | 臨時性 | 延長使用性 | 永久性(1) | 永久性(2) |
|  | | | | | |
| 鋼筋腐蝕修復工法 | 劣化混凝土處理 | 除去裂縫 | 鋼筋腐蝕部分 | 鋼筋腐蝕部分 | 鋼筋腐蝕部分 |
| | 鏽蝕鋼筋處理 | 劣化部分去除 | 劣化部分去除 | 劣化部分去除 | 劣化部分去除 |
| | 含浸材處理 | - | - | 強鹼塗佈型材料 | - |
| | 鋼筋防鏽處理 | - | 鋼筋防鏽材料 | 鋼筋防鏽材料 | 鋼筋防鏽材料 |
| | 斷面修復 | 斷面修復 | 斷面修復 | 斷面修復 | 斷面修復 |
| | 表面披覆 | - | 中性化抑制材料 氯離子浸透抑制材料 | 中性化抑制材料 氯離子浸透抑制材料 | 中性化抑制材料 氯離子浸透抑制材料 |

(資料來源：內政部建築研究所，2019)

2. 中性化抑制工法

混凝土中性化速度受材料或混凝土密實性等因素影響，如何根據損傷部位之受損程度進行有效地修復，須依劣化程度將其分類(表 2- 7)。一般來說，可通過表面披覆來防止外部二氧化碳入侵，抑制中性化反應。但如果中性化達到鋼筋位置時，混凝土中需浸漬強鹼劑，強鹼劑可回復鋼筋抑制的腐蝕的能力。因中性化造成劣化時，所採取之修復工法以及中性化抑制工法與回復目標方法之關係，如表 2- 8 和表 2- 9 所示。

表 2- 7 混凝土中性化程度分類

| 劣化因子程度 | 中性化進展程度 |
|--------|----------------|
| 輕度以下 | 中性化深度評定值為 2 以下 |
| 中度 | 中性化深度評定值為 3 |
| 重度以上 | 中性化評定值為 4 以上 |

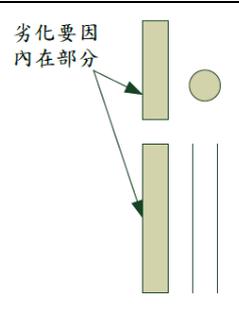
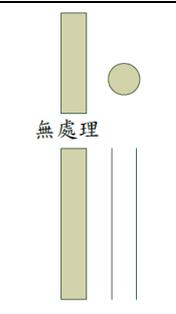
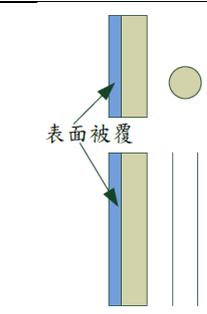
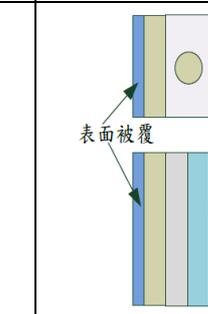
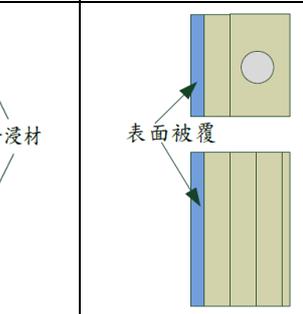
(資料來源：內政部建築研究所，2019)

表 2- 8 混凝土中性化修復工法之選定

| 劣化度 | 劣化原因的強度(中性化深度) | | |
|------|----------------|-------------------|---------------------|
| | 小 | 中 | 大 |
| 輕度以下 | 不用 | 中性化抑制工法 | 中性化抑制工法 |
| 中度 | 檢討其他原因 | 裂縫補修工法 中性化抑制工法 | 鋼筋腐蝕修復工法 中性化抑制工法 |
| 重度以上 | 檢討其他原因 | 檢討其他原因 | 鋼筋腐蝕修復工法 中性化抑制工法 |

(資料來源：內政部建築研究所，2019)

表 2-9 中性化抑制工法與回復目標方法之關係

| 損傷種類 修復種類 | | 回復目標方法 | | | |
|--|---------|--|---|--|---|
| | | 臨時性 | 延長使用性 | 永久性(1) | 永久性(2) |
|  <p>劣化要因 內在部分</p> | |  <p>無處理</p> |  <p>表面被覆</p> |  <p>表面被覆 含浸材</p> |  <p>表面被覆</p> |
| 中 性 化 抑 制 工 法 | 混凝土表面處理 | 劣化部分 清除、處理 | 劣化部分 清除、處理 | 劣化部分 清除、處理 | 中性化部分去除 |
| | 含浸材處理 | - | - | 強鹼性材料 | - |
| | 斷面修復 | - | - | - | 斷面修復 |
| | 表面披覆 | - | 中性化抑制材料 | 中性化抑制材料 | 中性化抑制材料 |

(資料來源：內政部建築研究所，2019)

3. 鹽害抑制工法

硬固結構混凝土中最大水溶性氯離子含量，於一般鋼筋混凝土須小於 0.6 kg/m^3 (水溶法)、超過 0.3 kg/m^3 至 0.6 kg/m^3 時，鋼筋須做防蝕處理；CNS 3090 A2042 新拌混凝土中最大水溶性氯離子含量之規定，鋼筋混凝土須小於 0.3 kg/m^3 (水溶法)。因此，若建築物之硬固結構混凝土中最大水溶性氯離子含量介於 0.3 kg/m^3 至 0.6 kg/m^3 之間，混凝土氯離子含量程度評判為中度，氯離子含量平均值為 0.6 kg/m^3 以上，評判為重度(表 2-10)。鹽害抑制工法主要係通過表面披覆來防止外部氯離子入侵，抑制水分和氧氣供給造成鋼筋腐蝕。當混凝土已含有大量氯化物時，需使用防鏽劑來阻止氯離子吸收並抑制鋼筋繼續腐蝕。其劣化程度之分類以及建議之修復工法如表 2-11 和表 2-12 所示。

表 2-10 混凝土氯離子含量程度分類

| 劣化因子程度 | 氯離子含量平均值 |
|--------|--|
| 輕度以下 | 0.3 kg/m ³ 以下 |
| 中度 | 0.3 kg/m ³ 以上 0.6 kg/m ³ 以下 |
| 重度以上 | 0.6 kg/m ³ 以上 |

(資料來源：內政部建築研究所，2019)

表 2-11 混凝土氯離子修復工法之選定

| 劣化度 | 劣化原因的強度(鋼筋位置的氯離子含量) | | |
|-----|---------------------|--------------------|--------------------|
| | 小 | 中 | 大 |
| 輕度 | 不用 | 鹽害抑制工法 | 鹽害抑制工法 |
| 中度 | 檢討其他原因 | 鋼筋腐蝕修復工法 鹽害抑制工法 | 鋼筋腐蝕修復工法 鹽害抑制工法 |
| 重度 | 檢討其他原因 | 檢討其他原因 | 鋼筋腐蝕修復工法 鹽害抑制工法 |

(資料來源：內政部建築研究所，2019)

表 2-12 氯離子修復工法與回復目標方法之關係

| 損傷種類 修復種類 | | 回復目標方法 | | | |
|--------------|---------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| | | 臨時性 | 延長使用性 | 永久性(1) | 永久性(2) |
| | | | | | |
| 氯離子抑制工法 | 混凝土表面處理 | 劣化部分清除、處理 | 劣化部分清除、處理 | 劣化部分清除、處理 | 氯離子滲透部分去除 |
| | 含浸材處理 | - | - | 塗佈形防鏽材 | - |
| | 斷面修復 | - | - | - | 斷面修復 |
| | 表面披覆 | - | 氯離子滲透抑制材料 | 氯離子滲透抑制材料 | 氯離子滲透抑制材料 |

(資料來源：內政部建築研究所，2019)

第二節 混凝土構件修復工法

壹、セメント系材料を用いたコンクリート構造物の補修・補強指針(日本土木學會，2018)

於 2018 年出版之「セメント系材料を用いたコンクリート構造物の補修・補強指針」內容包括可用於所有修復/補強工法之「共通篇」和介紹使用水泥系材料進行修復/補強之設計、施工、維護之「工法類別篇」。

該指針專門針對使用碳纖維(Fiber Reinforced Plastics; FRP)進行補強之方法加以描述，其工法分別有樓板之頂面及底面進行增厚之施工方法，以及橋墩包覆的設計和施工方法。

1. 上表面增厚工法

上表面增厚工法係在樓板頂部上安裝鋼筋並鋪設碳纖維補強混凝土，此為一種與現有樓板整合之施工方式，並能有效地提高抗剪和抗彎承載能力。因要與現有樓板整合，如現有樓板表面上有局部受損，則必須去除劣化、受損之混凝土。

2. 下表面增厚工法

下表面增厚工法係將鋼筋鋪設在樓板底面上，然後使用聚合物水泥砂漿、碳纖維補強快速硬化砂漿等材料使之與現有樓板結合。使用增厚工法後之樓板能有效地提高抗彎承載能力。如果有水從樓板上部滲入，則滲透之水分將會停留在樓板與鋼筋界面處，導致耐久性下降，因此需配合防水工法。

3. 包覆工法

包覆工法係用包覆之方式把現有之鋼筋混凝土柱構件進行補強，使之與既有構件整合形成複合結構，進而確保承載能力。其包覆材料有鋼筋混凝土、聚合物水泥砂漿、鋼板、碳纖維網等。為防止補強之結構扭曲，在某些情況下，會在構件中間穿刺 PC 鋼管用以約束鋼筋。

建築物之修復/補強流程詳見圖 2-7，在該文獻之共通篇中提到，修復主要係為了使構造物之性能回復至設定值，並減低會引起性能低下之原因。一般來說，

修復之目的包含對產生裂縫、開裂、變形、腐蝕等劣化部位進行修復、部分區域填補、除去劣化部位、除去劣化因子、降低可能影響性能低下之原因。補強主要係為了使提升該構造物之性能，其方法有更換鋼筋、導入預力以及增加斷面、部材、支撐點、補強材等。表 2-13 為以回復或增加性能為目的所對應之修復/補強工法，表 2-14 為修復/補強使用之材料。除此之外，關於水泥系之修復/補強材料之試驗方法，詳列見下表 2-15 中。

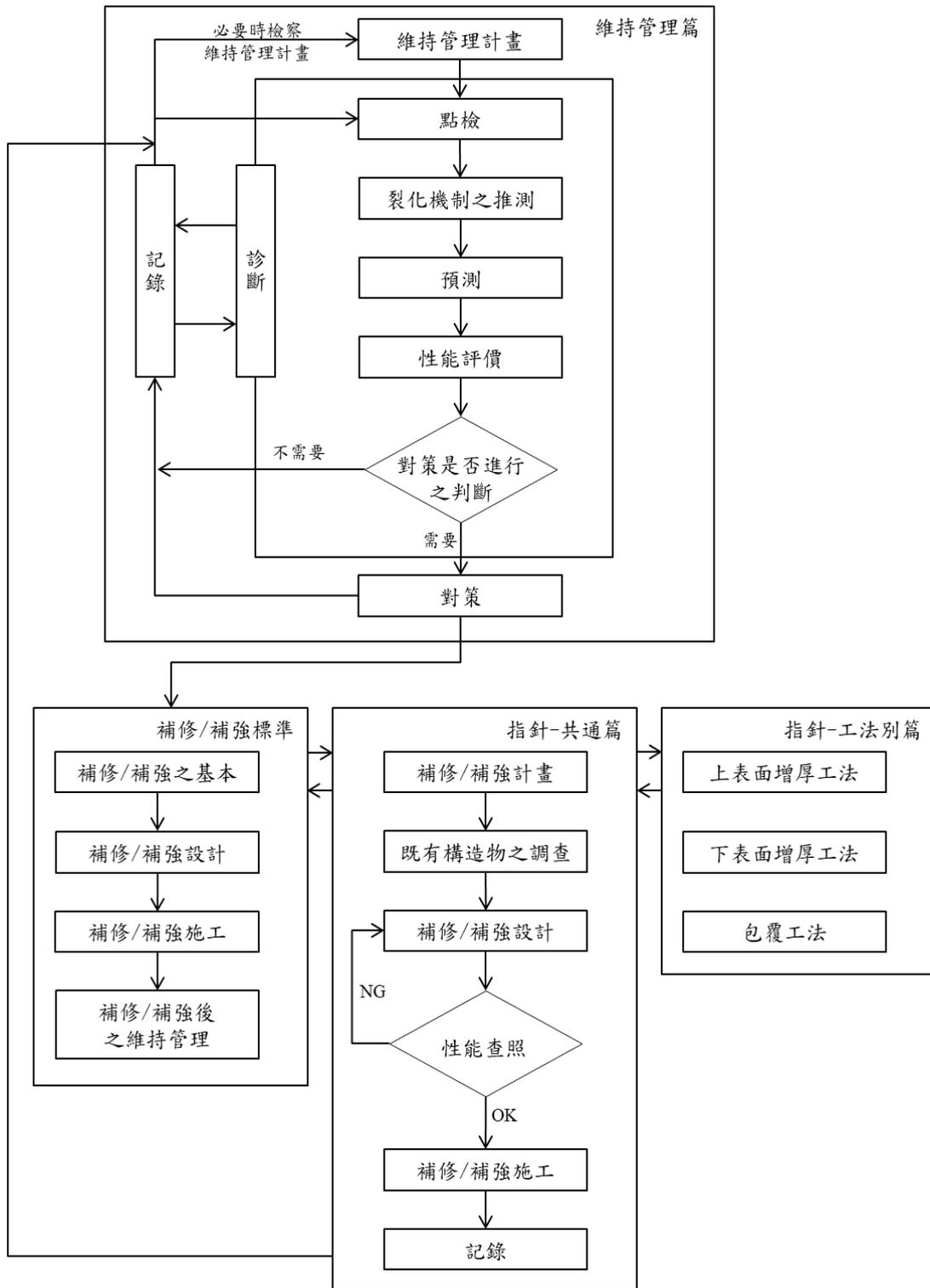


圖 2-7 修復/補強流程

(資料來源：日本土木學會，2018)

表 2-13 以回復或增加性能為目的所對應之修復/補強工法

| 修復/補強之目的 | 修復/補強之方法 | 修復/補強之工法 |
|-------------|---------------|---|
| 維持/提升力學的抵抗性 | 部分交換 | 更換混凝土工法 替換高抗拉螺栓工法 |
| | 增加斷面 增加補強材 | 砂漿增厚工法 混凝土增厚工法 砂漿包覆工法 混凝土包覆工法 鋼板包覆工法 FRP 包覆工法 墊片、鋼板接著工法 FRP 接著工法 |
| | 增加部材 | 橫梁設工法 壁增設工法 支撐增設工法 |
| | 增加支撐 | 支持增設工法 |
| | 導入預力 | 導入預力工法 |
| | 維持/提升材料劣化之抵抗性 | 部材表面保護 |
| 電氣化學防蝕 | | 電氣防蝕工法 脫鹽工法 再鹼化工法 電鍍工法 |
| 裂縫/裂紋抑制 | | 注入工法 充填工法 打孔抑制工法 |

(資料來源：日本土木學會，2018)

表 2- 14 修復/補強使用之材料種類

| 分類 | 種類 |
|---------|--|
| 水泥系材料 | 普通混凝土、高強度混凝土 短纖維補強砂漿/混凝土 流動混凝土 高流度混凝土 聚合物水泥砂漿/混凝土 |
| 補強材料 | 鋼筋、PC 鋼材 鋼板 補強用 FRP、構造用 FRP |
| 接合材料 | 樹脂系/水泥系接著劑 錨栓 |
| 填充/注入材料 | 無收縮灌漿 水中不分離性砂漿/混凝土 聚合物水泥砂漿 樹脂系注入材 |
| 表面保護材料 | 樹脂塗料 聚合物水泥漿/砂漿 矽烷系/矽酸鹽系浸漬材 連續纖維片 |
| 防鏽材料 | 樹脂塗料 亞硝酸鹽系 / 螯合反應系 (Chelation) / 氨基醇 (Aminoalcohol) 系防鏽材 陽極材 |

(資料來源：日本土木學會，2018)

表 2-15 水泥系材料之試驗方法

| 項目 | 試驗方法 |
|---------|---|
| 抗壓強度 | JIS A 1108:コンクリートの圧縮強度試験方法 |
| | JIS A 1171:ポリマーセメントモルタルの試験方法 |
| | JSCE-G 541-1999:充てんモルタルの圧縮強度試験方法 |
| | JSCE-G 551-2007:鋼繊維補強コンクリートの圧縮強度および圧縮タフネス試験方法 |
| | JSCE-G 562-2007:はりによる吹付けコンクリートの初期圧縮強度試験方法 |
| | JSCE-G 505-1999:円柱供試体を用いたモルタルまたはセメントペーストの圧縮強度試験方法 |
| 抗拉強度 | JIS A 1113:コンクリートの割裂引張強度試験方法 |
| 撓曲強度 | JIS A 1106:コンクリートの曲げ強度試験方法 |
| | JIS A 1171:ポリマーセメントモルタルの試験方法 |
| | JSCE-G 552-2007:鋼繊維補強コンクリートの曲げ強度および曲げタフネス試験方法 |
| 黏結強度 | JIS A 1171:ポリマーセメントモルタルの試験方法 |
| | JSCE-K 561-2003:コンクリート構造物用断面修復材の試験方法 |
| 破壊エネルギー | JCI-S001:切欠きはりを用いたコンクリートの破壊エネルギー試験方法 |
| 楊氏係数 | JIS A 1149:コンクリートの静弾性係数試験方法 |
| 熱膨脹係数 | JSCE-K 561-2003:コンクリート構造物用断面修復材の試験方法 |
| | JCI マスコンクリートのひび割れ制御指針 2016 |
| 収縮 | JIS A 1129:モルタル及びコンクリートの長さ変化測定方法 |
| | JIS A 1171:ポリマーセメントモルタルの試験方法 |
| | JIS A 6202:コンクリート用膨張材 |
| | JCI-SAS2:セメントペースト、モルタルおよびコンクリートの自己収縮および自己膨張試験方法 |

| 項目 | 試驗方法 |
|---------|---|
| | JSCE-K 561-2003:コンクリート構造物用断面修復材の試験方法 |
| 熱變形 | JIS A 1157:コンクリートの圧縮クリープ試験方法 |
| 中性化速率係數 | JIS A 1153:コンクリートの促進中性化試験方法 |
| | JIS A 1171:ポリマーセメントモルタルの試験方法 |
| 氯離子擴散係數 | JSCE-G 571-2007:電気泳動によるコンクリート中の塩化物イオンの実効拡散係数試験方法 |
| | JSCE-G 572-2007:浸せきによるコンクリート中の塩化物イオンの見掛けの拡散係数試験方法 |
| 相對動彈性係數 | JIS A 1148:コンクリートの凍結融解試験方法 |

(資料來源：日本土木學會，2018)

貳、コンクリート構造物の維持管理～塩害・中性化・ASR 補修の考え方～技術資料 Ver. 4.2 (混凝土維護協會，2017)

1. 混凝土結構之定期維護

混凝土建築物之檢查、調查、診斷、修復及補強等相關維護工作，在日本被視為極其重要並獲得廣泛關注。根據早期之混凝土修復工程，對劣化修復之對策大多為「因產生裂縫而採取灌注工法修復」和「由於鋼筋裸露而使用斷面補修工法修復」，未對劣化之主因進行探討，例如「為何會產生裂縫？」和「為何鋼筋會腐蝕？」，導致修復後之構件仍會再次產生劣化。為此，日本混凝土維護協會針對混凝土之鹽害、中性化和 ASR 之劣化，進行相關研究。對於混凝土建築物所發生的各種劣化，例如裂縫、浮起、剝落等，採取詳細調查、實驗室試驗等程序來釐清劣化機理，依據其劣化原因來選擇修復方法和材料，並聲稱此該修復方法能有效地對抗劣化機理。由於大量的新材料和新工法開發，修復手冊變得十分豐富。但不幸的是，構件修復後再劣化之狀況，仍無止境。

日本混凝土維護協會提出了「定量補修工法」。舉例來說，構件受

鹽害而損壞之情況下，所進行修復之目的將根據劣化過程而異，例如防止氯離子侵入、防止水和氧氣滲入、減緩鋼筋腐蝕反應速度、停止鋼筋腐蝕反應、填補因鋼筋腐蝕所減少之斷面積、恢復構件之承載性能等。首先，須清楚補修工法之性能要求，其次是調查和診斷氯離子含量，因氯離子濃度與內部鋼筋腐蝕速率有關，使用含亞硝酸根離子之塗佈材，利用浸漬工法不但可阻隔劣化因子，亦可增加抑制鋼筋腐蝕之效果。同樣地，使用斷面補修工法時，於聚合物水泥砂漿修復材料中添加所需之亞硝酸根離子量，採用內部注入工法對鋼筋進行大面積的包覆，即使在高氯離子濃度之結構和已具有明顯鋼筋腐蝕之結構，仍可定量且迅速地將亞硝酸根離子提供給鋼筋。除了選擇定量補修工法外，修復後的維持管理在時間軸上的掌握也很重要。不會再劣化的補修工法並不總是最好的選擇，還有一種修復方式，是先進行最小限度之修復，然後再通過反覆地進行修復來抑制劣化。通過綜合評估之定量地施工方法和未來維護方案，以實現延長混凝土建築物之使用年限。

2. 鹽害補修工法

當因鹽害而劣化之混凝土建築物，選擇補修工法時，應確認建築物處於哪個劣化過程，潛伏期、進展期、加速期還是劣化期？表 2-16 列出了由於鹽害引起的建築物外觀等級(劣化過程)與劣化狀況之關係。表 2-17 顯示鹽害劣化等級與適用之補修工法的關係。

表 2-16 受鹽害之鋼筋混凝土建築物外觀等級和劣化狀態

| 建築物外觀等級 | 劣化過程 | 劣化狀態 |
|----------|-------|--|
| 等級 I | 潛伏期 | 外觀上無變化，氯離子濃度低於腐蝕發生之極限。 |
| 等級 II | 進展期 | 外觀上無變化，氯離子濃度超過腐蝕發生極限，開始腐蝕。 |
| 等級 III-1 | 加速期前期 | 腐蝕裂縫產生，可以看見銹汁。 |
| 等級 III-2 | 加速期後期 | 腐蝕裂縫長且多，隨著裂縫發展，觀察到混凝土部分剝離、剝落，且有觀察到鋼筋斷面積顯著減小。 |
| 等級 IV | 劣化期 | 觀察到由於腐蝕裂縫而導致大規模地剝離、剝落，鋼筋斷面積減少，以及大位移、變形。 |

(資料來源：日本土木學會，2013)

表 2-17 鹽害劣化等級與適用之補修工法的關係

| | | | | | | |
|-----------|------|------------------|---|-----------------------------|-----------------------------|--------------------------|
| 鹽害造成之劣化程度 | | | | | | |
| | 劣化過程 | 潛伏期 | 進展期 | 加速期前期 | 加速期後期 | 劣化期 |
| | 劣化狀況 | 外觀無變化。 | 外觀無變化。氯離子濃度超過腐蝕發生極限，開始腐蝕。 | 腐蝕裂縫產生。銹汁。混凝土浮起。 | 腐蝕裂縫長且多。混凝土剝離、剝落。 | 大規模地剝離、剝落。鋼筋斷面積減少。位移、變形。 |
| | 工法選定 | 表面塗層工法 表面浸漬工法 | 表面塗層工法 表面浸漬工法 脫鹽工法 電化學防蝕工法 斷面補修工法 內部注入工法 | 電化學防蝕工法 斷面補修工法 內部注入工法 | 電化學防蝕工法 斷面補修工法 內部加壓工法 | 斷面補修工法 +補強工法 |
| | | | | | | |

(資料來源：日本土木學會，2013)

於潛伏期時，儘管觀察到氯離子滲透，但鋼筋腐蝕尚未發生，此時維護性能要求為抑制氯離子自外部滲透，適合此性能要求之方法有表面塗層工法或表面浸漬工法。鋼筋於進展期時開始腐蝕，但尚未產生裂縫等變化，這時基本仍是通過表面塗層工法或表面浸漬工法來抑制氯離子、水分和氧氣之滲透並抑制隨後之鋼筋腐蝕。如在氯離子濃度高或不允許劣化時，則可通過斷面補修工法或脫鹽工法除去氯離子以改善鋼筋腐蝕環境，亦可考慮採用電化學防蝕工法和內部注入工法進行修復。在加速

期前期，鋼筋腐蝕，混凝土出現裂縫和浮起，此時僅通過遮斷或去除劣化因子是不夠的，重要的是要考慮將鋼筋腐蝕進行抑制，可採取大面積斷面補修工法除去所有含氯離子之混凝土並進行鋼筋防銹。由於加速期後期是加速期前期之發展狀態，因此可認為此時適用之方法與加速期前期相同。如果達到劣化期，則有必要通過大規模的斷面補修工法進行修復，且鋼筋斷面積因腐蝕減少，造成耐久性和乘載能力降低，須配合使用適當地補強工法。

在評估劣化時，主要是從表面混凝土是否被擠出、腐蝕存在與否、位置、面積、是否存在點腐蝕等，以便獲取有關鋼筋腐蝕之定量數據。另外，量測混凝土中之氯離子含量，特別是量測距離混凝土表面深度之氯離子量，可使用 Fick 擴散方程式來評估將來之劣化程度。通過充分地調查和診斷結果，來確定修復之必要性並選擇符合性能要求之補修工法。鹽害補修工法性能要求以及為滿足要求之補修工法如下：

(1) 遮蔽劣化因子-降低氯離子、水、氧氣侵入混凝土。

a. 表面保護工法之表面塗層法

表面塗層法是通過將有機或無機覆蓋材料塗抹到混凝土表面，以阻止外界之劣化因子侵入。通常，會將多種類型之材料分批塗抹，如底漆、中塗層材料、面塗層材料等。有機塗料種類繁多，可根據環境條件自由地選擇柔軟性和膜厚；無機塗料主要是使用聚合物水泥砂漿基塗料。

(a) 表面保護工法之表面浸漬法

表面浸漬法是通過用刷子或滾筒將矽烷或矽酸鹽等浸漬材料塗抹在混凝土表面並使其滲透，以阻止外部之劣化因子侵入。矽烷類浸漬材具有浸漬混凝土表層以形成防水層；矽酸鹽類浸漬材具有使混凝土表層緻密化和改性作用。一般來說，此法對劣化因子之阻斷效果不如表面塗層法，但表面浸漬法因不添加塗層，因此不會改變結構外觀，此有便於後續監測。

(b) 裂縫灌注工法(超細水泥型材料、環氧樹脂材料等)

裂縫灌注工法是使用低壓注入器於低壓低速下，將水

泥、聚合物水泥、環氧樹脂和丙烯酸樹脂等有機材注入裂縫中。裂縫灌注工法可應用於裂縫寬度 0.2 mm ~30.0 mm 之混凝土表面。在簡單的裂縫修復中，如出於經濟原因，可將裂縫填充工法(U型切槽)應用於寬度較寬之裂縫。自抑制鋼筋腐蝕之觀點來看，裂縫灌注工法比裂縫填充工法具有更有效之抑制效果，因此需要視情況來選擇。

使用有機灌注材料時，必須在乾燥狀態施作，如裂縫內部是濕的，則可能會阻礙灌注材料的固化且不能獲得足夠之附著能力。反之，使用水泥基灌注材料時，必須在施工前對裂縫內部進行預濕潤(澆水)，以增加流動性和填充性。

(2) 除去劣化因子-除去侵入既有混凝土內之氯離子。

a. 斷面補修工法(局部斷面補修工法、大面積斷面補修工法等)

如果混凝土中之氯離子含量超過腐蝕發生極限並已經開始發生腐蝕，則應清除含有氯離子之混凝土，之後再用斷面修復材料進行斷面修復。一般而言，斷面補修工法是用於修復混凝土脆弱部位(浮起、剝落、鋼筋裸露、斷面缺陷之部位)，目的在去除混凝土內部氯離子。由於斷面修復材與基礎混凝土需具有黏合性和完整性，因此聚合物水泥砂漿常被使用於斷面補修工法。

(a) 局部斷面補修工法

局部斷面補修工法其施工範圍相對較小，因此主要使用塗抹法。由於氯離子從刮除之混凝土中被去除，因此可以表示為劣化因子已被部分去除，但由於修復範圍之外的氯離子仍存於混凝土內，因此預計未來仍會發生新的鋼筋腐蝕。此外，經修復部位和未修復部位間之介面可能會發生巨觀腐蝕(Macro corrosion)，須謹慎注意。

(b) 大面積斷面補修工法

為去除鋼筋周圍所有的氯離子，大面積斷面補修工法是除去區域範圍內所有的混凝土，以滿足除去劣化因子之

要求，之後再用斷面修復材料回填。不管混凝土表面是否有浮起或剝落，大面積斷面補修工法皆適用。大面積斷面修復工法根據目標位置、施工方向、施工規模等，可使用塗抹法、噴塗法和灌漿施工法等。

b. 脫鹽工法

脫鹽工法係將陽極材料和電解質溶液放置於混凝土表面上，並將直流電流從陽極傳遞到混凝土中的鋼筋(陰極)，將混凝土中之氯離子帶到陽極，此為減少混凝土內氯離子之方法。通過此工法可減少鋼筋位置的氯離子量，改善鋼筋腐蝕環境。脫鹽工法之電流通常約為 1 A/m^2 ，通電約 8 週。當混凝土表面健全之情況下，此法可使氯離子自混凝土內去除，如對於鹽害劣化嚴重之狀況，則須配合表面保護工法等對策，來防止脫鹽後氯離子再次侵入。

(3) 抑制鋼筋腐蝕—抑制已經開始腐蝕的鋼筋其腐蝕進展。

a. 電化學防蝕工法(外部電源法、陽極法)

電氣防蝕工法係通過持續通電，控制鋼筋在混凝土中的腐蝕反應來抑制劣化。電氣防蝕工法係將陽極材料安裝在混凝土表面，通以直流電(防蝕電流)將陽極材料連續流至混凝土內的鋼筋(陰極)。電氣防蝕電流通常約為 $0.001 \sim 0.03 \text{ A/m}^2$ 。電氣防蝕工法大致可分為 2 種，使用外部電源強制防蝕電流流至外部電源之方法，以及通過鋼筋和陽極材料之電池作用，使防蝕電流通過陽極之方法(犧牲陽極法)。

b. 使用鋼筋防銹材(亞硝酸鉀等)

亞硝酸根離子具有預防鋼筋鏽蝕之作用。因此，由於鹽害引起的鋼筋鏽蝕嚴重，或預計未來鋼筋腐蝕會顯著發展之狀況，可採用亞硝酸鹽離子用作鋼筋防銹材。

3. 中性化補修工法

當因中性化而劣化之混凝土建築物選擇補修工法時，可通過評估混凝土建築物所處之劣化過程，潛伏期、進展期、加速期或劣化期，來根據需求確認補修工法。表 2- 18 列出了由於中性化引起的建築物外觀等

級(劣化過程)與劣化狀況之關係。表 2- 19 顯示中性化劣化等級與適用之補修工法的關係。

表 2- 18 受中性化之鋼筋混凝土建築物之外觀等級和劣化狀態

| 建築物外觀等級 | 劣化過程 | 劣化狀態 |
|----------|-------|----------------------------------|
| 等級 I | 潛伏期 | 外觀上無變化，殘留中性化在生鏽極限內。 |
| 等級 II | 進展期 | 外觀上無變化，殘留中性化超過生鏽極限，腐蝕開始。 |
| 等級 III-1 | 加速期前期 | 腐蝕裂縫產生。 |
| 等級 III-2 | 加速期後期 | 隨著腐蝕裂縫發展，觀察到混凝土剝離、剝落，且鋼筋斷面積沒有缺損。 |
| 等級 IV | 劣化期 | 觀察到由於腐蝕裂縫而導致剝離、剝落，鋼筋斷面積減少。 |

(資料來源：日本土木学会，2013)

表 2-19 中性化劣化等級與適用之補修工法的關係

| | | | | | |
|------------|------------------|---|--------------------------------------|--------------------------------------|------------------------|
| 中性化造成之劣化程度 | | | | | |
| 劣化過程 | 潛伏期 | 進展期 | 加速期前期 | 加速期後期 | 劣化期 |
| 劣化狀況 | 外觀無變化。 | 外觀無變化。 殘留中性化超過腐蝕發生極限，鋼筋開始腐蝕。 | 腐蝕裂縫產生。 | 腐蝕裂縫發展。 混凝土剝離、剝落。 | 大規模地剝離、剝落。 鋼筋斷面積減少。 |
| 工法選定 | 表面塗層工法 表面浸漬工法 | 表面塗層工法 表面浸漬工法 再鹼化工法 電氣防蝕工法 斷面補修工法 內部注入工法 | 表面塗層工法 電氣防蝕工法 斷面補修工法 內部注入工法 | 表面塗層工法 電氣防蝕工法 斷面補修工法 內部注入工法 | 斷面補修工法 +補強工法 |

(資料來源：日本土木学会，2013)

於中性化潛伏期時，鋼筋腐蝕尚未發生，此時維護性能要求為抑制二氧化碳侵入，適合此性能要求之方法有表面塗層工法或表面浸漬工法。鋼筋於進展期時開始腐蝕，但尚未產生裂縫等變化，這時基本仍是通過表面塗層工法或表面浸漬工法來抑制二氧化碳、水分和氧氣之滲透並抑制隨後之鋼筋腐蝕。如重要結構不允許中性化劣化，則可通過斷面補修工法去除中性化混凝土，或者利用再鹼化工法恢復混凝土鹼度，以改善鋼筋腐蝕環境，亦可考慮採用電氣防蝕工法和內部注入工法進行修復。在加速期前期，鋼筋腐蝕，混凝土出現裂縫和浮起，此時僅通過遮斷劣

化因子來恢復中性化區域是不夠的，重要的是要考慮將鋼筋腐蝕進行抑制，可採取大面積斷面補修工法除去所有中性化之混凝土並進行鋼筋防銹。由於加速期後期是加速期前期之發展狀態，因此可認為此時適用之方法與加速期前期相同。如果達到劣化期，則有必要通過大規模的斷面補修工法進行修復，且鋼筋斷面積因腐蝕減少，造成耐久性和乘載能力降低，須配合使用適當地補強工法。

在評估中性化劣化時，重要的是獲得類似於鹽害時之鋼筋腐蝕定量數據。酚酞溶液可測量混凝土中性化深度，以及使用 \sqrt{t} 定律可預測中性化發展。由於混凝土受中性化發展導致鋼筋腐蝕，其中性化補修工法性能要求以及為滿足要求之補修工法如下：

(1) 遮蔽劣化因子-降低二氧化碳、水、氧氣侵入混凝土。

a. 表面保護工法

中性化之劣化因子為二氧化碳，二氧化碳會降低混凝土 pH 值並破壞鋼筋之鈍態膜。利用表面保護工法減少二氧化碳之滲透時，可抑制中性化產生並防止鋼筋腐蝕環境擴大，還可防止水和氧氣侵入。表面保護工法分為表面塗層法和表面浸漬法兩種，其基本考量與鹽害相同。

(a) 表面塗層法

表面塗層法是通過將有機或無機覆蓋材料塗抹到混凝土表面，以阻止外界之劣化因子侵入。通常，會將多種類型之材料分批塗抹，如底漆、中塗層材料、面塗層材料等。有機塗料種類繁多，可根據環境條件自由地選擇柔軟性和膜厚；無機塗料主要是使用聚合物水泥砂漿基塗料。

(b) 表面浸漬法

表面浸漬法是通過用刷子或滾筒將矽烷或矽酸鹽等浸漬材料塗抹在混凝土表面並使其滲透，以阻止外部之劣化因子侵入。矽酸鈉和矽酸鋰類浸漬材具有使混凝土表層緻密化和改性作用；通常認為矽烷浸漬材對中性化適應性低。一般來說，此法對劣化因子之阻斷效果不如表面塗層法，但表面浸漬法因不添加塗層，因此不會改變結構外觀，此有便於後續監測。

b. 裂縫灌注工法(超細水泥型材料、環氧樹脂材料等)

裂縫灌注工法是使用低壓注入器於低壓低速下，將水泥、聚合物水泥、環氧樹脂和丙烯酸樹脂等有機材注入裂縫中。裂縫灌注工法可應用於裂縫寬度 0.2 mm~30.0 mm 之混凝土表面。在簡單的裂縫修復中，如出於經濟原因，可將裂縫填充工法(U 型切槽)應用於寬度較寬之裂縫。自抑制鋼筋腐蝕之觀點來看，裂縫灌注工法比裂縫填充工法具有更有效之抑制效果，因此需要視情況來選擇。

使用有機灌注材料時，必須在乾燥狀態施作，如裂縫內部是濕的，則可能會阻礙灌注材料的固化且不能獲得足夠之沾附性。反之，使用水泥基灌注材料時，必須在施工前對裂縫內部進行預濕潤(澆水)，以增加流動性和填充性。

(2) 恢復中性化區—使已中性化之混凝土恢復鹼性。

a. 斷面補修工法(局部斷面補修工法、大面積斷面補修工法等)

如果混凝土內之鋼筋位置發生中性化，鋼筋開始發生腐蝕，則應清除中性化之混凝土，之後再用斷面修復材料進行斷面修復，使中性化深度回歸到 0。一般而言，斷面補修工法是用於修復混凝土脆弱部位(浮起、剝落、鋼筋裸露、斷面缺陷之部位)，目的在恢復中性化範圍之混凝土的 pH 值。由於斷面修復材與基礎混凝土需具有黏合性和完整性，因此聚合物水泥砂漿常被使用於斷面補修工法。

(a) 局部斷面補修工法

局部斷面補修工法其施工範圍相對較小，因此主要使用塗抹法。由於部分刮除區域之混凝土中性化深度回歸到 0，因此可以說是部分區域恢復中性化，但由於修復範圍之外的中性化仍在發展，因此預計未來仍會發生新的鋼筋腐蝕。

(b) 大面積斷面補修工法

大面積斷面補修工法是除去區域範圍內所有的混凝土，使中性化深度回歸到 0，之後再用斷面修復材料回填。不管混凝土表面是否有浮起或剝落，大面積斷面補修工法皆適用。大面積斷面修復工法根據目標位置、施工方向、施工規模等，可使

用塗抹法、噴塗法和灌漿施工法等。

b. 再鹼化工法

再鹼化工法係將陽極材料和電解質溶液放置於混凝土表面上，並將直流電流從陽極傳遞到混凝土中的鋼筋(陰極)，使鹼性溶液滲透至混凝土內，直到混凝土 pH 值回到原始值。通過此工法恢復混凝土之 pH 值以改善鋼筋腐蝕環境，其電流通常約為 1 A/m^2 ，通電約 1~2 週。再鹼化施作後，為防止二氧化碳再次侵入，應配合表面保護工法等對策。

(3) 抑制鋼筋腐蝕-抑制已經開始腐蝕的鋼筋其腐蝕進展。

a. 電化學防蝕工法(外部電源法、陽極法)

電氣防蝕工法係通過持續通電，控制鋼筋在混凝土中的腐蝕反應來抑制劣化。電氣防蝕工法係將陽極材料安裝在混凝土表面，通以直流電(防蝕電流)將陽極材料連續流至混凝土內的鋼筋(陰極)。電氣防蝕電流通常約為 $0.001 \sim 0.03 \text{ A/m}^2$ 。電氣防蝕工法大致可分為 2 種，使用外部電源強制防蝕電流流至外部電源之方法，以及通過鋼筋和陽極材料之電池作用，使防蝕電流通過陽極之方法(犧牲陽極法)。

b. 使用鋼筋防銹材(亞硝酸鉀等)

亞硝酸根離子具有預防鋼筋鏽蝕之作用。因此，由於中性化引起的鋼筋鏽蝕嚴重，或預計未來鋼筋腐蝕會顯著發展之狀況，可採用亞硝酸鹽離子用作鋼筋防銹材。

4. ASR 補修工法

當因 ASR 而劣化之混凝土建築物選擇補修工法時，有必要確認該建築物在哪個劣化過程，潛伏期、進展期、加速期還是劣化期，並根據需求選擇補修工法。表 2-20 列出了由於 ASR 進行的建築物外觀等級(劣化過程)與劣化狀況之關係。表 2-21 顯示 ASR 劣化等級與適用之補修工法的關係。

於潛伏期時形成凝膠，但混凝土尚未出現裂縫，此時維護性能要求為抑制水從外部滲透，適合此性能要求之方法有表面塗層工法或表面浸

漬工法。在進展期間凝膠膨脹，混凝土表面開始出現裂縫。這時裂縫小，因此仍採取阻止水分滲入之策略，並通過裂縫灌注法與表面塗層工法和表面浸漬工法來抑制 ASR 膨脹。該階段結構被認為具高殘餘膨脹性，考慮結構之重要性和維護之容易性，如不允許再次劣化，則採用內部注入方式用於預防性維護。在加速期前期，ASR 膨脹進展速度快，此時裂縫寬度和延展增加，建築物之耐久性能迅速下降。如果建築物之殘餘膨脹性低，可利用裂縫注入工法和表面塗層法來抑制水分滲透。另外，根據構件形狀，可應用包覆工法和接合工法抑制 ASR 膨脹。當達到劣化期，則混凝土劣化範圍和缺陷部位大，然結構殘餘膨脹性已收斂，因此在該階段不再需要用內部注入工法那樣的抑制策略。可由於鋼筋斷裂或強度降低，會影響結構之承載能力，需進行適當地補強措施。

表 2- 20 ASR 之鋼筋混凝土建築物之外觀等級和劣化狀態

| 建築物外觀等級 | 劣化過程 | 劣化狀態 |
|---------|------|--|
| 等級 I | 潛伏期 | 尚未因 ASR 發生膨脹和裂縫，且外觀無變形。 |
| 等級 II | 進展期 | 在水和鹼的供應下，膨脹發展，出現裂縫、色變和鹼凝膠滲出。然而，沒有出現鋼筋腐蝕造成的銹汁。 |
| 等級 III | 加速期 | 此階段之 ASR 造成的膨脹速度最快，裂縫擴展，且裂縫寬度和密度增加。另外，可能會看到由於鋼筋腐蝕造成的銹汁。 |
| 等級 IV | 劣化期 | 裂縫的寬度和密度進一步增加，導致段差、錯位、覆蓋部位發生剝離、剝落，鋼筋腐蝕並能看到銹汁。且由於外力影響，可能會發現鋼筋破裂、損壞，位移、變形增加。 |

(資料來源：日本土木学会，2013)

表 2- 21 ASR 劣化等級與適用之補修工法的關係

| | | | | | |
|-------------|------|--------------------------|--|---|---|
| ASR 造成之劣化程度 | | | | | |
| | 劣化過程 | 潛伏期 | 進展期 | 加速期 | 劣化期 |
| | 劣化狀況 | 外觀無變化。 | 膨脹裂縫發生。 | 膨脹裂縫發展。 膠體滲出。 強度、彈性係數下降。 鋼筋腐蝕產生銹汁。 | 膨脹裂縫擴張。 錯位、段差 強度、彈性係數顯著下降。 剝離、剝落。 鋼筋斷裂。 位移、變形。 |
| | 工法選定 | 防水處理 表面塗層工法 表面浸漬工法 | 防水處理 表面塗層工法 表面浸漬工法 裂縫灌注工法 內部注入工法 | 防水處理 表面塗層工法 表面浸漬工法 裂縫灌注工法 內部注入工法 補強以限制膨脹 | 防水處理 斷面補修工法+補強工法 鋼筋斷裂位置之修復 |

(資料來源：日本土木学会，2013)

ASR 之劣化主要是通過外觀變形引起的程度來判斷，此時，掌握該建築物殘餘之膨脹性，就目前的劣化狀況和評估未來膨脹的程度，選擇適當地修復方法。例如，即使外觀等級與加速期相對應之劣化狀況，如果鹼性凝膠仍具有較高之膨脹性，應選擇能抑止膨脹效果較高之補修工法。如果在相同加速期和外觀等級但膨脹性低之情況，則可簡單地修復變形即可。由於鹼凝膠吸水膨脹導致的 ASR 劣化，其 ASR 補修工法性

能要求以及為滿足要求之補修工法如下：

(1) 遮蔽劣化因子—降低水分侵入混凝土。

a. 表面保護工法

表面保護工法可以阻止並減少來自外部的的水分，以抑制 ASR 之膨脹。表面保護工法分為表面塗層法和表面浸漬法兩種。

(a) 表面塗層法

表面塗層法是通過將有機或無機覆蓋材料塗抹到混凝土表面，以阻止外界之劣化因子侵入。通常，會將多種類型之材料分批塗抹，如底漆、中塗層材料、面塗層材料等。有機塗料種類繁多，可根據環境條件自由地選擇柔軟性和膜厚；無機塗料主要是使用聚合物水泥砂漿基塗料。當表面塗層法應用於 ASR 修復時，可使用柔軟性塗層材料，使得塗層能隨著 ASR 膨脹而延展。如覆蓋材料之延伸能力跟不上 ASR 之膨脹速度，將導致再劣化的發生，因此需要重複地進行維護。

(b) 表面浸漬法

即使抑制了外部的的水分，但混凝土內部之水分同樣會造成 ASR 膨脹，如表面塗層具有高不透水性，使得水分被困於混凝土內部，這也會促使 ASR 發生。因此，常採用表面浸漬法，可抑制來自外部的的水分同時亦可消散混凝土內部的水分。表面浸漬法是通過用刷子或滾筒將矽烷或矽酸鹽等浸漬材料塗抹在混凝土表面並使其滲透，以阻止外部之劣化因子侵入。矽烷類浸漬材料具有在混凝土表層形成防水層之作用；矽酸鹽類浸漬材具有使混凝土表層緻密化和改性作用。表面浸漬法對劣化因子之阻斷效果不如表面塗層法，但表面浸漬法因不添加塗層，因此不會改變結構外觀，此有便於後續監測。

b. 裂縫灌注工法(超細水泥型材料、環氧樹脂材料等)

裂縫灌注工法是使用低壓注入器於低壓低速下，將水泥、聚合物水泥、環氧樹脂和丙烯酸樹脂等有機材注入裂縫中。裂縫灌注工法可應用於裂縫寬度 0.2 mm~30.0 mm 之混凝土表

面。當裂縫灌注工法應用於 ASR 修復時，據 ASR 預期膨脹，可使用會隨著裂紋延伸之灌注材。使用有機灌注材料時，必須在乾燥狀態施作，如裂縫內部是濕的，則可能會阻礙灌注材料的固化且不能獲得足夠之沾附性。反之，使用水泥基灌注材料時，必須在施工前對裂縫內部進行預濕潤(澆水)，以增加流動性和填充性。

(2) 非膨脹化凝膠—使鹼凝膠之膨脹性消失。

a. 內部注入工法(亞硝酸鉀)

常見的 ASR 抑制劑為亞硝酸鉀，其鉀離子可取代鹼凝膠中的鈉和鉀來使凝膠膨脹，從而生出不同吸水膨脹性能之矽酸鉀，此為通過供給鉀離子來抑制鹼凝膠之吸水膨脹性。內部注入工法首先會在 ASR 劣化之混凝土上鑽一個小直徑的孔，然後將亞硝酸鉀加壓注入，使之滲透到混凝土內部。鑽孔直徑為 $\phi 10$ mm 或 $\phi 20$ mm，鑽孔間隔為 500~1000 mm，加壓壓力根據目標結構物之劣化程度來設置，通常在 0.5~1.5 MPa 之間。由於內部注入工法是從根本上抑制凝膠膨脹，因此結構劣化程度在進展期和加速期，通常應用於殘留膨脹性高之結構。一旦凝膠被亞硝酸鉀還原，即使水分滲入也不會發生膨脹，因此可說此法將不會發生再劣化。

(3) 限制混凝土膨脹—利用外部拘束來限制 ASR 膨脹。

a. 接合工法、包覆工法(鋼板、FRP 板等)

此工法係利用在混凝土表面添加構件來抵抗 ASR 所引起之混凝土膨脹，此物理性限制膨脹的附加構件有 FRP 板、鋼板、PC 面板等。由於目的是為抑止膨脹，因此當結構劣化程度在進展期和加速期，並應用於殘留膨脹性高之結構。但是，部件形狀複雜或設置範圍受限制之情況下，無法得到膨脹抑制效果。限制膨脹所需的加固量之計算方法在應用時，需事先進行詳細檢查及計算。

參、コンクリート構造物の補修対策施工マニュアル(案)(國立研究開發法人土木研究所，2016)

「コンクリート構造物の補修対策施工マニュアル(案)」分為共通篇、表面塗層/表面浸漬法篇、斷面修復法篇和裂縫修復法篇。共通篇為修復工法之通用介紹，包含各種修復工法之選定、修復方針之設定、劣化原因和劣化等級，以及各種修復方法之特點和整理。此外，除了施工前之調查很重要外，為了防止修復之構件提早再劣化，修復後之維護管理也需要注意。表面塗層/表面浸漬法篇中，針對表面塗層和表面浸漬材料發生缺陷之問題，提出能防止缺陷發生之施工控制和質量控制的方法。斷面修復法篇中，提出針對斷面修復材料之品質和與基礎混凝土間的黏結力的測試方法，以及施工之注意事項和檢查方法。裂縫修復法篇中，針對裂縫注入法和裂縫填充法，提出了在低溫環境時材料的選擇方法，以及施工之注意事項和檢查方法。

該手冊中之修復設計適用之劣化類型如表 2- 22 所示，同時也適用於具有初始缺陷之結構物，並說明修復設計之基本概念和注意事項。以及，ISO 16311 Maintenance and repair of concrete structures (コンクリート構造物の維持管理と補修)為混凝土結構物之修復/補強的維護管理。修復工法對應之檢查項目請詳見表 2- 23 所示。

表 2-22 劣化類型和手冊的主要目標

| 劣化類型 | | 劣化機制(概略) | 手冊之 主要目標 |
|----------|------------|--|-------------|
| 鹽害 | | 氯離子滲透到混凝土中，鋼材的鈍化膜被破壞，鋼材腐蝕，由於鋼材的體積膨脹，在混凝土中產生裂縫。 | O |
| 中性化 | | 滲透到混凝土中的二氧化碳與水泥的氫氧化鈣反應生成碳酸鹽，強鹼性混凝土的 pH 值降低，鋼材的鈍化膜被破壞，鋼材腐蝕，從而導致鋼材體積膨脹，混凝土開裂的現象。 | O |
| 凍害 | | 由於混凝土中的水因凍融作用而產生混凝土裂縫的現象。 | O |
| 鹼骨材反應 | | 由於混凝土的水泥所含的氫氧根離子與含有二氧化矽成分的骨材反應而生成之反應物（鹼矽膠）的體積膨脹，導致混凝土開裂，從而產生混凝土裂縫。 | O |
| 化學侵蝕 | | 土壤、污水處理設施、工廠、溫泉等環境中的化學物質腐蝕混凝土使其變質的現象，包括酸變質、硫酸鹽變質和微生物變質。 | - |
| 疲勞 | | 在公路橋樑橋面經常看到的現象，其中之混凝土變質並受到重複負載之損壞，並且由於過度負載和配筋不足而加速了損傷。 | - |
| 外力損傷 | | 地震、地層下陷、土壓、水壓和波壓等外力破壞混凝土的現象。 | - |
| 複合劣化 | | 凍害、鹽害、中性化等共同作用而導致劣化之現象。 | △□ |
| 初期 缺陷 | 乾燥收縮 裂縫 | 混凝土表面乾燥時產生裂縫之現象。 | O |
| | 溫度裂縫 | 水化反應產生的熱量所導致的裂縫發生，係由於混凝土表面與內部之間的溫差（內部拘束）或現有混凝土的拘束（外部拘束）所引起。 | O |

| 劣化類型 | 劣化機制(概略) | 手冊之 主要目標 |
|------|---|-------------|
| 孔 | 混凝土澆築過程中由於壓實不足而導致混凝土內產生大空隙之現象。 | △□ |
| 面 | 澆築混凝土時，在壓實過程中殘留空氣聚集在表面上。 | △□ |
| 氣 | 當後澆注的混凝土堆積在先澆注的混凝土時，因堆積的部分不平整而出現不連續表面的現象。 | △□ |
| 泡 | 由於混凝土在下沉和固化的過程中，因鋼筋的拘束而產生裂縫，或者是當混凝土開始硬化時，模板或支撐結構發生變形。 | △□ |

(資料來源：國立研究開發法人土木研究所，2016)

表 2-23 修復工法對應之檢查項目和方法

| 修復工法 | 檢查項目 | 檢查方法 |
|-------|-------------------|-----------------|
| 表面塗層法 | 浮起、膨脹 | 目視、觸診 |
| | 剝落 | 目視 |
| | 裂縫 | 目視、裂縫尺規 |
| | 滲水、游離石灰、鏽汁等滲出 | 目視 |
| | 變色、粉化、失去光澤等美觀度下降 | 目視、觸診、光澤計等 |
| | 起泡、孔洞 | 目視 |
| | 收縮 | 目視 |
| 表面浸漬法 | 變色(白化) | 目視 |
| 斷面修復法 | 斷面修復後浮起、剝離、剝落 | 目視、觸診、打音法、紅外線調查 |
| | 斷面修復材表面出現裂縫 | 目視 |
| | 裂縫造成滲水、游離石灰、鏽汁等滲出 | 目視 |
| | 磨損或凍害造成之結垢 | 目視 |
| 裂縫修復法 | 裂縫 | 目視、裂縫規 |
| | 滲水、游離石灰、鏽汁等滲出 | 目視 |
| | 擠出修復材料 | 目視 |

(資料來源：國立研究開發法人土木研究所，2016)

斷面修復方法包括塗抹法、噴塗法、填充法等，每種方法都有其特點，必須考慮施工面的方向和修復場地的大小來選擇合適地施工方法。斷面修復材料所要求之品質項目包括材料品質、加工性、抵抗中性化能力和強度等，如有必要，還必須要確認其抗凍融、抗鹽分滲透、抗裂縫之能力。考慮斷面修復材料與基礎混凝土間之相容性，黏結強度、阻擋劣化因子之能力和耐久性皆為必需的。斷面修復材料之塗抹面的表面粗糙度對黏合強度有很大的影響。將不同程度的表面粗糙度進行了相關實驗顯示，如果沙子粗糙到足以看出出沙子的不均勻性，則可獲得穩定的黏結強度，且又證實，用砂紙對混凝土表面進行拋光和使之平滑的條件下，黏合強度可能會大大降低(片平博、渡邊博志，2014)。關於斷面修復後之檢查，詳見表 2-24 所示。

表 2-24 斷面修復後之檢查要點

| 對象 | 檢查項目(注意事項) | 檢查方法 |
|-------|------------|-----------|
| 斷面修復材 | 裂縫 | 目視、裂縫規 |
| | 裂縫造成滲水 | 目視 |
| | 裂縫造成鏽汁 | 目視 |
| | 結垢 | 目視 |
| 界面 | 浮起、剝離、剝落 | 目視打音法、裂縫規 |
| | 滲水 | 目視 |
| | 鏽汁 | 目視 |

(資料來源：國立研究開發法人土木研究所，2016)

肆、コンクリート補修・補強ハンドブック(宮川豊章，2011)

「コンクリート補修・補強ハンドブック」一書中，介紹了混凝土建築物之各種劣化機制(如鹽害、霜害等)引起之剝離和裂縫的詳細檢查、診斷、評估和測量方法，並提供許多現場修復/補強之案例。在選擇修復/補強時，根據詳細調查之結果來評估結構性能劣化，並且經判斷需要進行修復/補強，為滿足目標物之性能水平，選擇與劣化機理對應之修復/補強方法是很重要的。其修復/補強工法之選定流程如圖 2-8 所示。

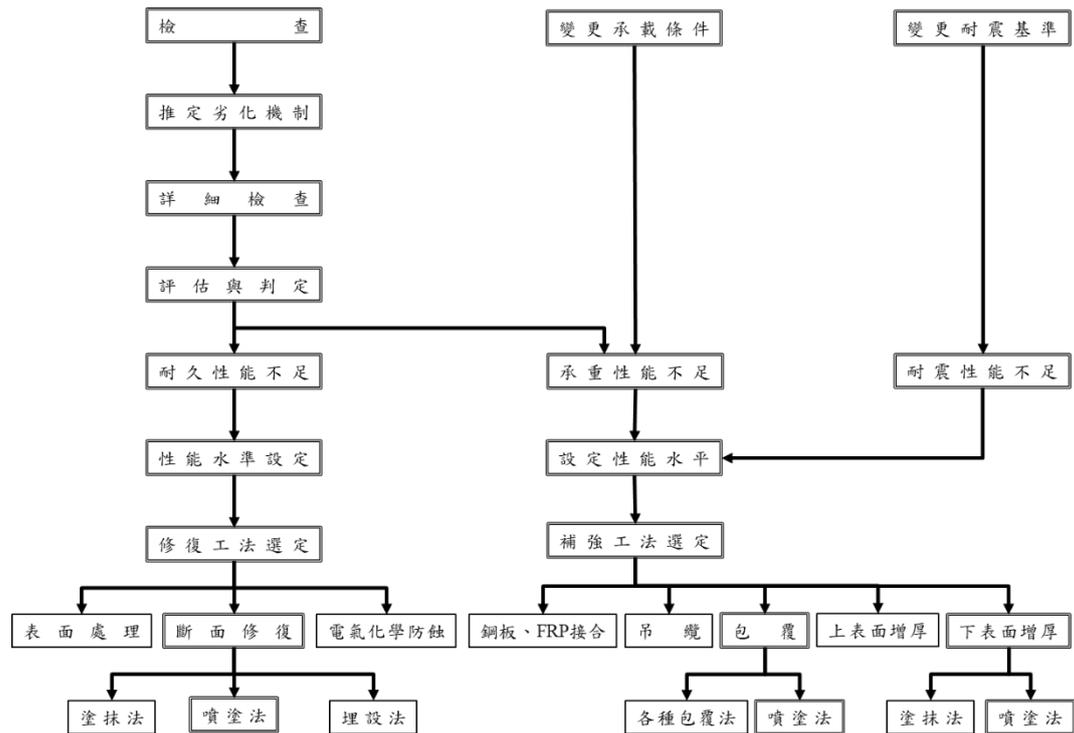


圖 2-8 修復/補強工法之選定流程

(資料來源：宮川豐章，2011)

「コンクリート補修・補強ハンドブック」亦整理日本土木學會於 2007 年コンクリート標準示方書[維持管理編]內關於建築物外觀之劣化程度和可採用之工法範例，如表 2-25。除此之外，還提出了根據建築結構來考慮其修復/補強之目的和施工方法(表 2-26)。

表 2-25 建築物外觀之劣化程度和可採用之工法範例

| 建築物 外觀等 級 | 劣化機構對應之標準工法 | | | | | | |
|-----------------|-----------------------------|----------------------------|----------------------|-------------------------------------|---|--|--------------|
| | 中性化 | 鹽害 | 凍害 | 化學侵蝕 | 鹼骨材反應 | 樓板疲勞 | 磨耗 |
| 潛伏期 | 表面處理* 再鹼化* | 表面處理* | 表面處理* | 表面處理 換氣、清洗 | 防水處理 (止水、排水處理)* | 橋面防水層* | 表面處理* |
| 進展期 | 表面處理 斷面補修 再鹼化 | 表面處理 斷面補修 電氣防蝕 脫鹽 | 表面處理 | 表面處理 斷面補修 埋設框架 換氣、清洗 | [未來預期膨脹量小] 防水處理 (止水、排水處理) 裂縫灌注 表面處理 (塗層、浸漬) 預防剝落 | 橋面防水層 鋼板、FRP 接合 上表面增厚 下表面增厚 增設桁架 | 斷面補修 表面處理 |
| 加速期 (前期) | 表面處理 電氣防蝕 再鹼化 斷面補修 | 表面處理 斷面補修 電氣防蝕 脫鹽 | 表面處理 裂縫灌注 斷面補修 | 斷面補修 表面處理 增厚 埋設框架 換氣、清洗 | [未來預期膨脹量大] 防水處理 (止水、排水處理) 裂縫灌注 表面處理 (塗層、浸漬) 預防剝落 斷面補修 導入預力 鋼板、FRP 接合 鋼板、PC、FPR 包覆 吊纜 | [有滲透水影響] 橋面 防水層 鋼板接合 上表面增厚 [無滲透水影響] 橋面 防水層 鋼板接合 上表面增厚 增設桁架 | 斷面補修 表面處理 |
| 加速期 (後期) | 斷面補修 | 斷面補修 | | | | | |

| 建築物 外觀等 級 | 劣化機構對應之標準工法 | | | | | | |
|-----------------|--|-------------------------------------|----------------------------|---|---|------------|--|
| | 中性化 | 鹽害 | 凍害 | 化學侵蝕 | 鹼骨材反應 | 樓板疲勞 | 磨耗 |
| 劣化期 | 斷面補修 鋼板、FRP 接合 吊纜 包覆 增厚 | FRP 接合 斷面補修 吊纜 包覆 增厚 | 裂縫 灌注 增厚 替換 包覆 | FRP 接合 斷面補修 表面處理 增厚 包覆 埋設框架 換氣、 清洗 | [未來預期膨 脹量小] 防水處理 (止水、 排水處理) 斷面補修 表面處理 (塗層) 預防剝落 導入預力 鋼板、 FRP 接合 增厚 鋼板、 PC、FPR 包覆 吊纜 | 限制使用 替換 | 鋼板、 FRP 接合 包覆 替換 表面 處理 |

*預防之實施工法

(資料來源：日本土木學會，2007)

表 2-26 建築結構來考慮其修復/補強之目的和施工方法

| 部件 | 目的 | 劣化機制 | 修復/補強工法 |
|-----|-----------------|---|----------------------|
| 外牆 | 裂縫造成的紋路等汙漬、美觀對策 | 混凝土乾燥收縮 外部氣溫變動 雨水滲入 | 表面塗抹工法 裂縫灌注工法 |
| | 裂縫造成漏水對策 | 同上 | 裂縫灌注工法 U 槽填充工法 |
| | 耐久性劣化(鋼筋腐蝕)對策 | 中性化(CO ₂) 水分、氧氣滲透 氯離子滲透 | 防鏽處理和斷面補修工法 |
| | 混凝土片狀剝落對策 | 鋼筋腐蝕膨脹 反應性骨材膨脹 | 斷面補修工法 表面塗層工法 |
| | 冷縫、內部缺陷對策 | 施工不良 | 斷面補修工法 |
| | 裝修材不相容對策 | 裝修材耐久性劣化 裝修骨架接合劣化 | 再塗裝裝修材修復工法 防剝落工法 |
| 樓板 | 表面劣化(裂縫、缺角)對策 | 混凝土乾燥收縮 疲勞(車輛負重等) 施工不良 | 裂縫灌注工法 斷面補修工法 |
| | 過大變形對策 | 混凝土蠕變 耐變形性能不足(設計考慮不足) | 非土地維修 加鋼筋工法 |
| | 裝修材不相容(剝落等)對策 | 地下室裂縫影響 施工不良 | 地下室修復 裝修材修復工法 |
| 柱、梁 | 表面劣化(孔洞版、冷縫)對策 | 施工不良 | 斷面補修工法 |
| | 強度低下對策 | 施工不良 材料品質經年劣化 | 補強工法 |
| | 裂縫對策 | 負載等結構性因素(梁) 地震力等水平外力造成 之結構性因素 | 裂縫灌注補修工法 裂縫幅度大時,補 |

| 部件 | 目的 | 劣化機制 | 修復/補強工法 |
|-----|---------------|--------------------------------|---------|
| | | 混凝土收縮 | 強工法 |
| 地下室 | 地下漏水對策 | 接合部位，裂縫使地下水滲入 地下室防水不慎 | 止水工法 |
| 屋頂 | 表面劣化(裂縫、剝離)對策 | 混凝土乾燥收縮 凍害 車輛負重疲勞(屋頂停車場) | |

(資料來源：宮川豐章，2011)

伍、臺灣現行之混凝土構件修復工法(內政部建築研究所，2019)

當鋼筋混凝土構件劣化到某些程度時，將導致影響建築物之安全性與使用性，根據構件劣化程度，此時便需要進行修復、補強或拆除重建。一般來說，修復係將建築物之劣化部份去除，以恢復建築物之美觀和提高耐久性為目的，並提供建築物持續保有安全性、使用性和回復力學性能之對策；補強則是提出可讓建築物提高其安全性和使用性，並增進構件力學性能之對策。目前工程界常採用的修復/補強工法大致可分為四大類：

1. 結構元件修復工法：針對結構桿件之裂縫損壞加以修復，使其恢復原有強度。
2. 結構元件補強工法：針對結構桿件之剪力、彎矩、軸力及韌性等加以補強(如鋼板補強、碳纖補強及擴大斷面等)以提昇桿件及總體結構之強度，一般而言對結構元件加以補強，多少可提昇其總體結構之強度，惟其補強成本效益較差。故結構元件補強適用於耐震能力不足程度較低者或採用結構系統補強有困難者，一般而言須與結構系統之改善補強配合使用可得最佳之補強效果。
3. 結構系統改善補強工法：抗震補強中增設抵抗地震橫力的構材如(剪力牆、斜撐及翼牆等)以改變結構系統的力量傳遞路徑應屬最具總體補強效益(安全性高、成本低)等，惟建築物使用機能可能會受到影響。
4. 結構系統加設消能隔減震裝置補強工法：建築物若本身抵抗垂直力之能

力無虞，但耐震能力不足，則在原結構系統中加設消能隔減震裝置亦可具體提昇建築物耐震能力，惟一般消能隔減震裝置具有專利，且成本較高。

根據建築物之耐久性診斷調查結果，在確定其劣化主因、程度及範圍後，進而決定修復/補強策略，包含修復/補強範圍、工法及修復材料之選定，並考量施工性、工期、經濟性、施工安全和施工環境等因素。一般而言，除上述之客觀條件外，建築物管理者或使用人可依需求設立修復目標。對於建築物之修復/補強之策略建議，除考量耐震能力評估外，如出現以下之狀況，建議進行適當地修復或補強。例如，建築物之主結構有裂縫產生，基於結構安全，建議仍需針對受損結構進行適當地修復/補強；樓版及牆面有滲(漏)水現象，考量使用性及耐久性，建議仍需適當地修復/補強；屋頂版防水隔熱層因長時間曝曬出現龜裂老化及滲水現象，建議全面施作防水隔熱層，以避免裂縫滲水導致鋼筋鏽蝕；建築物出現鋼筋腐蝕膨脹導致保護層剝落之情況，建議鋼筋需先經除鏽處理，方才進行後續修復工程。

根據構件裂縫開裂程度，日本建築學會(AIJ, 1997)針對腐蝕劣化構件之修復方面可分為：裂縫灌注、裂縫修復、斷面修復、構件包覆補強、構件拆除重作等不同等級對策工作，其詳細描述如下：

1. 裂縫灌注工法

適用於鋼筋混凝土梁、柱、版、牆等裂縫寬度 0.3 mm 以下之構件。一般而言，裂縫寬度 0.3 mm 以下之非結構性裂縫，經填補後可有效地防止水氣侵入。將混凝土表面清理乾淨，以水泥漿、環氧樹脂或彈性披土填充、抹平裂縫，或沿裂縫開 V 形槽再以水泥砂漿填補粉平，最後塗刷油漆與周圍顏色一致。施工前應事先取得技師同意，施工時需嚴格遵守安全防護措施，並依材料廠商建議方式塗刷、施作。

2. 裂縫修復工法

適用於鋼筋混凝土梁、柱、版、牆等裂縫寬度 0.3 mm 以上之構件。裂縫修復工法係注入樹脂類修復材料填補裂縫，防止水、氧氣和腐蝕物質從裂縫中進入，造成鋼筋腐蝕，如圖 2-9。當鋼筋混凝土建築物之構件雖出現受損現象，但混凝土與鋼筋之黏結握裹依舊完好，均可以合宜之修復工法和修復材料將其「修復」，亦可藉此維持構件之既有強度。

一般而言，環氧樹脂之力學強度遠高於混凝土，且可與混凝土充分黏結，固以壓力注入環氧樹脂之裂縫不但可以達到完全密合之效果，還可防止水氣侵入。且修復過後之部位若再受外力導致混凝土開裂，因環氧樹脂之黏結強度高於基礎混凝土，則再開裂之位置應不會發生在灌注環氧樹脂的部位。

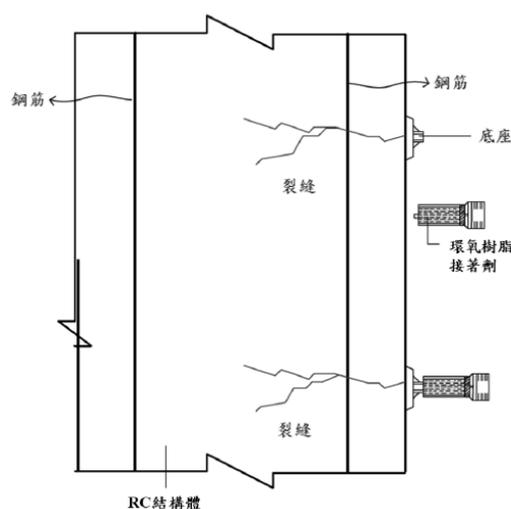


圖 2-9 裂縫修復工法

(資料來源：內政部建築研究所，2019)

3. 局部鬆動之混凝土修復工法(斷面修復法)

適用於鋼筋混凝土構件局部混凝土嚴重開裂或鬆動。一般而言，當混凝土表面出現鬆動或嚴重開裂之現象，需先敲除鬆動之混凝土至堅實面，再以高壓噴槍進行清除修飾作業，待清除表面粉塵及鬆動碎屑待，等乾燥後塗抹環氧樹脂黏著劑於新舊混凝土接觸面上，並於黏著劑尚未硬化前以環氧樹脂砂漿填補，最後加以整平及養護，如圖 2-10。斷面修復法之應用範圍包括(1)施工期間發生未填滿之混凝土或混凝土部分質量劣化區域，(2)混凝土開裂或剝落、鋼筋腐蝕等劣化受損區域，以及(3)需去除劣化因子之混凝土開裂或剝落、鋼筋腐蝕等具體損壞區域。通常，斷面修復材之強度會等於或高於基礎混凝土之強度，並且滿足規定之黏結強度。在許多情況下，修復材料需要具備良好之耐久性，通常會使用聚合物水泥砂漿型修復材料。塗抹工法是針對很小或分散之區塊，藉由人力塗抹施工。灌漿施工法是針對修復範圍較大之區塊，灌以斷面修復材或無收縮砂漿。噴塗工法針對大區域之大規模修復工作，有乾式

和濕式兩種。利用可壓縮空氣之專用噴塗器具進行施工，此為可適用於恢復頂部或側向斷面之結構修復法。

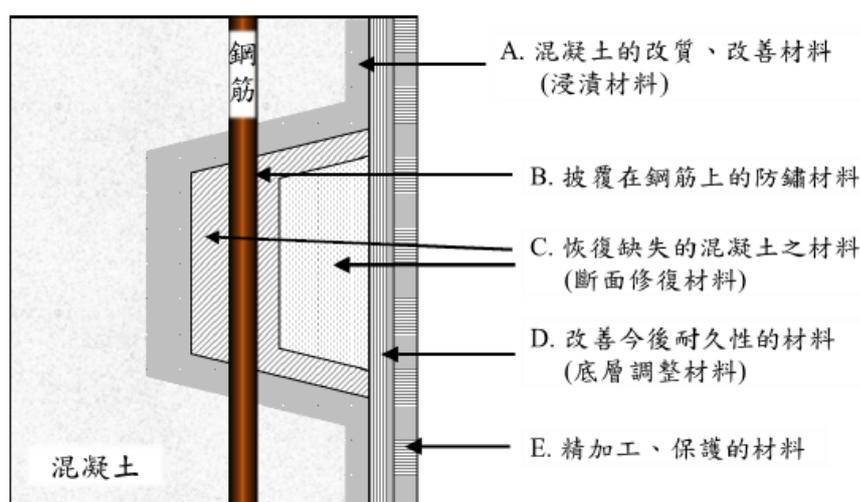


圖 2-10 斷面修復法

(資料來源：內政部建築研究所，2019)

4. 構件包覆補強工法

適用於鋼筋混凝土構件可能發生嚴重開裂或鬆動。構件包覆補強工法係將鋼板或碳纖維布等包覆材料緊緊包覆在柱體外圍。當地震發生時，開裂的混凝土塊也會因為包覆材料而不會輕易地自柱體剝落，進而提升耐震能力。首先，打除混凝土碎塊及粉刷層，並在柱體裂縫注入膠結劑填滿。其次，將裸露之鋼筋除鏽後，組模灌製混凝土。拆模後在柱體塗上底漆打底及表面批平，表面進行包覆材披覆，最後處理表面。

5. 局部構件敲除重作工法

適用於鋼筋混凝土構件嚴重開裂或鬆動，因範圍過大而無法使用填補材料進行修復時。一般而言，當鬆動或嚴重開裂之混凝土體積過大時，可將舊有混凝土之鬆動或嚴重損害部位完全敲除後，依新舊混凝土接合面之施工方式修復其嚴重受損之構件。首先，確定欲敲除之混凝土範圍，敲除表面鬆動之混凝土後檢查鋼筋是否鏽蝕。如確定鋼筋已鏽蝕，敲除範圍則須包含從混凝土表面至鋼筋內側，之後進行鋼筋除鏽以及用高壓噴槍清除雜物。外露之鋼筋確實塗上除鏽劑後，塗抹水泥漿或符合規定之黏著劑於新舊混凝土接處面，在黏著劑仍然保持濕潤狀態時以新拌混凝土填補，最後進行表面修飾整平及養護。經敲除後之構件應注意施工

期間之結構安全性，新舊混凝土接著面鑿毛應有 6 mm 以上粗糙度。如新灌混凝土並非使用無收縮混凝土，應預留接縫，待養護拆模後補灌無收縮水泥砂漿以避免新舊混凝土間發生乾縮裂縫。

由於導致鋼筋混凝土劣化原因相當複雜，所以在進行修復/補強時，其工法、步驟及材料的選擇上必須仔細評估並執行。為了避免結構在維修後再度損壞，修復/補強工程應考慮施工方便性，及需具有耐久性、安全性、經濟性和環境適應能力，並且也要將後續維護管理納入考量。

陸、鋼筋混凝土結構修復補強設計參考手冊(中華民國結構工程技師公會全國聯合會，2008)

鋼筋混凝土結構之修復與補強不僅須注意到其經濟性、美觀性，更需注意到強度、新舊結構體介面之黏結性與力傳遞能力、施工性限制等等，舉例來說對於構件之補強，鋼筋混凝土材料雖較為經濟，但其施工性與在新舊混凝土之交界面之結合力是否會造成使用性的影響，都需要深入了解，另外常見之修復/補強材料，如：環氧樹脂材料，其黏度佳、施工性佳，能深入裂縫中與混凝土有良好的接著性，但因其力學強度高於常用混凝土，須依修補之混凝土結構物之狀態、裂縫寬度或用途，選用適當之環氧樹脂種類。

鋼筋混凝土結構中常見之損壞分為混凝土裂縫及斷面缺損兩大類。其中，混凝土裂縫與結構安全性有關，通常採用低黏滯性之環氧樹脂來進行施作；若為混凝土斷面缺損，則材料項目可分為：鋼筋防鏽材料、接合面處理材料、斷面填補材料。以下將分別整理各材料於參考手冊中之規定與說明：

1. 裂縫灌注用之環氧樹脂材料：
 - (1) 使用時機：防止裂縫繼續擴大及抑制內部鋼筋鏽蝕。
 - (2) 種類：分為有機系與無機系兩種，有機系國內較常用環氧樹脂與聚脂樹脂，無機系為聚合水泥漿等。
 - (3) 材料規定：一般環氧樹脂之力學強度高於常用混凝土，故環氧樹脂之主要重點在於黏度、黏接強度與抗拉強度，當裂縫灌注時，須配合灌注壓力(小於 3 kgf/cm^2)緩慢注入以確實填滿裂縫。其中黏度值依 CNS 10141 之規定，分成低黏度型、中黏度型及高黏度型，而

灌注用環氧樹脂屬於中、低黏度型，並依照裂縫寬度建議使用不同種類之環氧樹脂，如表 2- 27 所示。美國 ASTM 則依用途分為七類，依黏度分為三級，依適用溫度分為六型，由表 2-28 中資料所示。國內相對應 ASTM 為 Type IV。另外，針對黏結強度、抗拉強度及硬化收縮率的部分，當裂縫寬度在 0.3 mm 以上，在國內有針對常用之環氧樹脂材料要求，如表 2-29 所示。CNS 之建築灌注補修用環氧樹脂(CNS 10141)中，根據不同施工環境溫度條件下，其適用之性能要求規定如表 2- 30，且環氧樹脂施工環境可分為一般用和冬季用兩種，一般用之施工環境溫度為 10 °C ~35 °C 之間，冬季用則為 5 °C ~15 °C。

表 2- 27 灌注用之環氧樹脂黏度值建議表

| 種類 | 黏度(20 °C, Pa · S) | 適用之裂縫寬度 |
|---------|-------------------|-----------|
| 低黏度型(L) | 0.5 ± 0.2 | 0.1 mm 以下 |
| 中黏度型(M) | 1.5 ± 0.5 | 0.2 mm 左右 |
| 中黏度型(M) | 5.0 以上 | 0.3 mm 以上 |

(資料來源：中華民國結構工程技師公會全國聯合會，2008)

表 2-28 美國 ASTM 環氧樹脂材料之用途分類表

| 類別(Type) | 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，膠結面不受載重者。 | |
| Type III | 應用於硬固混凝土面上加設之抗滑、耐磨等面層材料。 | 如耐磨地坪 |
| Type IV | 應用於硬固混凝土與硬固混凝土間之黏結，膠結面須受載重者。 | 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 V | 應用於新拌混凝土與硬固混凝土間之黏結，膠結面須受載重者。 | |
| Type VI | 應用於預鑄元件或分段施力之後拉預力元件之黏結與封膜，黏結面須承受應力者。 | |
| Type VII | 應用於預鑄元件或分段施力之後拉預力元件之黏結與封膜，黏結面不須承受應力者。 | |
| *聚乙炔(polyethylene)、碳氟化合物(TFE-fluorocarbon)、玻璃紙(cellophane)、油質或蠟質表面等材料無法藉環氧樹脂與混凝土有效黏結。 | | |

(資料來源：中華民國結構工程技師公會全國聯合工會，2008)

表 2-29 裂縫寬度在 0.3 mm 以上之灌注環氧樹脂材料規格表

| 試驗項目 | 規定值 | 適用之測試方法 |
|-------|-----------------------------------|--|
| 黏度 | 3~10 Pa·S | CNS 13065 或 CNS10141 (ASTM D293-86) |
| 黏接強度 | $\geq 90 \text{ kgf/cm}^2$ (14 天) | ASTM C882-87 |
| 抗拉強度 | $\geq 30 \text{ kgf/cm}^2$ | CNS 1011 (ASTM C190-85) (已廢止) |
| 硬化收縮率 | 3%以下 | CNS 10141 |

(資料來源：中華民國結構工程技師公會全國聯合工會，2008)

表 2- 30 CNS 10141 環氧樹脂性能要求表

| 品質 | | 種類 | 試驗條件 | | 低黏度型 | | 中黏度型 | | 高黏度型 | | | |
|--|-------------|----------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|--|--|--|
| | | | 一般用 | 冬季用 | 一般用 | 冬季用 | 一般用 | 冬季用 | | | | |
| 黏性 | 黏度 mPa·S | 20±0.5°C | 100~1000 | | 5000~20000 | | - | | | | | |
| | 搖變度 | 20±0.5°C | - | | 5±1 | | - | | | | | |
| | 坍度 mm | 25±2°C | - | | - | | - | 5 以下 | 5 以下 | | | |
| | | 30±2°C | - | | - | | - | 5 以下 | - | | | |
| 初期硬化性 N/ cm ² (kgf/ cm ²) | | 標準條件 | 200 (20.4) 以上 | - | 200 (20.4) 以上 | - | 200 (20.4) 以上 | - | | | | |
| | | 低溫條件 | - | 200 (20.4) 以上 | - | 200 (20.4) 以上 | - | 200 (20.4) 以上 | | | | |
| 接著強度 N/cm ² (kgf/ cm ²) | | 標準條件 | 600(61.2)以上 | | 600(61.2)以上 | | 600(61.2)以上 | | | | | |
| | | 特殊 條件 | 低溫時 | - | 300 (30.6) 以上 | - | 300 (30.6) 以上 | - | 300 (30.6) 以上 | | | |
| | | | | 濕潤時 | 300(30.6)以上 | | 300(30.6)以上 | | 300(30.6)以上 | | | |
| | | | | 反覆 乾濕時 | 300(30.6)以上 | | 300(30.6)以上 | | 300(30.6)以上 | | | |
| 硬化收縮率 % | | - | 3 以下 | | 3 以下 | | 3 以下 | | | | | |
| 加熱變化 | 質量變化率% | - | 5 以下 | | 5 以下 | | 5 以下 | | | | | |
| | 體積變化率% | - | 5 以下 | | 5 以下 | | 5 以下 | | | | | |
| 抗彎強度 N/ cm ² (kgf/ cm ²) | | - | 3000(306)以上 | | 3000(306)以上 | | 3000(306)以上 | | | | | |
| 抗壓強度 N/cm ² (kgf/ cm ²) | | - | - | | - | | 5000(510)以上 | | | | | |

(資料來源：中華民國國家標準，2010)

2. 斷面修復用之防鏽材料：

- (1) 使用時機：防止修補後之鋼筋繼續腐蝕。
- (2) 基本要求：可抑制鋼筋腐蝕、能與鋼筋及斷面填補材料間有良好接著性。
- (3) 材料規定：無標準化規格，但需具耐鹼性、防鏽性、對鋼筋之黏著性之規定，適用之鋼筋防鏽材料表如表 2-31 所示，建議以工程實績作為選用標準。若修復工程使用環氧樹脂砂漿作為填補材料，則配合選用環氧樹脂系塗料；若採用水泥砂漿或混凝土填補，則採用水泥漿作為接合處理。
- (4) 施工注意事項：在防蝕塗裝前，須先用敲除裂化混凝土，並使用動力工具將鐵鏽去除，增加防蝕能力及附著性。若鋼筋鏽蝕導致鋼筋斷面機減少，應檢討是否要補強鋼筋施工。

表 2-31 適用於斷面缺損時之鋼筋防鏽材料表

| | |
|---------|--|
| 聚和水泥系塗料 | 1. 苯乙烯-丁二烯橡膠 (Styrene Butadiene Rubber ; SBR) 系。 2. 丙烯(Acryl)樹脂系。 3. 防鏽劑添加系。 |
| 合成樹脂系塗料 | 1. 環氧樹脂(Epoxy)系塗料(符合 CNS K2089 規範)。 2. 丙烯樹脂(Acryl)系塗料。 3. 尿烷(Urethane)系之樹脂底塗料(Primer)。 |
| 鏽層轉換塗料 | 磷酸、有機酸、螯行化合物(Chelate)劑等。 |

(資料來源：中華民國結構工程技師公會全國聯合工會，2008)

3. 斷面修復用之接合面處理材料：

- (1) 使用時機：在填補前，混凝土需均為健全、膠結良好之結構材料，結合面處理材料可增加填補材料與基礎混凝土之接著性。若原有混凝土表面有鬆動或孔洞，須先鑿除並維持 6 mm 以上之粗糙度，以利黏接。
- (2) 基本要求：高滲透性、高附著力，與混凝土具相容性，可遮斷原有材料之化學反應。
- (3) 材料種類：可用於接合處理之黏結層材料甚多，必須配合填補材料之種類與鑿除方式來選用。國內常見之修補工程，在謹慎敲除裂化混凝土後，配合高壓噴槍清除雜物，再以環氧樹脂黏著材料作為接

合面處理材料。若採用水泥系填補材料，則應採用水泥與砂為 1：1 之比例作為接合面處理材料。

4. 斷面填補用之樹脂砂漿材料：

- (1) 使用時機：用以修復缺損斷面，恢復原有形狀，較大缺損時可用一般混凝土當作填充材，較小斷面或須重量輕又黏結力強之材料時，可用水泥砂漿或樹脂砂漿進行，適用斷面缺損之填補用材料如表 2-32 所示。

表 2-32 適用於斷面缺損時之填補用材料

| | |
|-------------------------------------|--|
| 聚合水泥砂漿 (高分子水泥砂漿) (俗稱輕質環氧樹脂砂漿) | 1. SBR(苯乙烯丁二烯橡膠)系。 2. 丙烯樹脂系(壓克力樹脂)。 3. 防鏽添加系等聚合水泥砂漿。 |
| 聚合樹脂砂漿 | 環氧樹脂砂漿。 |
| 水泥砂漿、混凝土 | 水泥、骨材、水、摻料等拌合而成之水泥砂漿或混凝土。 |

(資料來源：中華民國結構工程技師公會全國聯合工會，2008)

- (2) 基本要求：能與原有混凝土充分黏結，強度及耐久性等力學性質高於基礎混凝土之材料。
- (3) 國內常見之樹脂砂漿種類：環氧樹脂系砂漿、丙烯樹脂系聚合物水泥砂漿。
- a. 環氧樹脂系砂漿：以 A、B 劑形式之產品，需依廠商提供之比例混和。施工時，確保環境乾燥，且須先完成接合處理及塗抹環氧樹脂底劑於原有混凝土表面以確保品質。另外，也可添加於水泥砂漿中作為環氧樹脂水泥砂漿使用，不同於輕質環氧樹脂砂漿，其具有凝結速度快、黏結力強、強度高之特性。
- b. 丙烯樹脂系聚合物水泥砂漿：一般砂漿拌和時添加適量丙烯樹脂(壓克力樹脂)，可增加材料之黏著性及水密性，且可在不影響水灰比之情形下於濕潤環境實施填補工程。因其施工方式與水泥砂漿大致相同，故可用於較大面積之混凝土修補。
- (4) 環氧樹脂系砂漿與丙烯樹脂系聚合物水泥砂漿之比較：環氧樹脂系砂漿重量輕，黏結性與強度高於丙烯樹脂系聚合物水泥砂漿，但成

本高且凝結時間快，又不可於潮濕條件下施工。丙烯樹脂系聚合物水泥砂漿比重較重，且使用時須注意介面處理。一般補強工程應盡量採用黏著力高、強度高、重量輕之材料，故斷面缺損之填補，尤其對於混凝土劣化或鋼筋腐蝕之頂面的梁和板更宜採用環氧樹脂系砂漿。

- (5) 材料規定：可依 JIS A 1172 與 JIS A 6203 之規定辦理，另外對於鋼筋腐蝕之修復與填補，可增加透水性規定，故可採用 JIS A 6916 所訂之測試辦理，各試驗項目之主要規格可參考表 2-33。

表 2-33 斷面缺損時之填補用樹脂砂漿材料主要規格表

| 試驗項目 | 規定值 | 試驗方法 |
|----------------|---|----------------------------|
| 抗壓強度 | 依設計需求 (至少大於 210 kgf/cm ²) | CNS 1010 (ASTM C109-90) |
| 黏結強度 | > 15 kgf/cm ² (一般) | ASTM 882-87 |
| 膨脹率 | 0~4%@7 天 | ASTM C927-87 |
| 最大水溶性 氯離子含量 | 鋼筋混凝土 0.3 kgf/m ³ 預力混凝土 0.15 kgf/m ³ | CNS 13465 |

(資料來源：中華民國結構工程技師公會全國聯合工會，2008)

5. 斷面填補用之水泥系材料：

- (1) 水泥系補強材料種類：除混凝土和水泥砂漿外，又因考量材料與施工法，還包含無收縮混凝土、無收縮水泥砂漿與噴凝土。
- (2) 規定原則：依需求規定其抗壓強度、變形特性、彈性模數、膨脹係數等，並考量施工性，可訂定合宜之坍度。其防蝕需求，可規定混凝土之空氣含量，將依據 CNS 9661 進行測試。
- (3) 混凝土材料：強度不應低於既有混凝土。配合補強工程，粗骨材粒徑應比一般新建工程小，依照規範規定視施工需求添加摻料。以混凝土材料當作填補材時，可用水泥漿或水泥砂漿(水泥與通過 30 號篩之砂，以 1：15 之配比混合)。
- (4) 水泥砂漿材料：水泥與砂之比例視強度需求而定，一般採用 1：2~3，而所用之砂應為通過 16 號篩之細骨材。除作為填補用外，水泥砂漿與混凝土材料常用來提高材料強度、增加黏結能

力及縮短凝土時間，常使用摻料、化學材料、高強度骨材，故除一般力學性質外，可比照聚合水泥砂漿與聚合樹脂砂漿之材料規定。

- (5) 無收縮混凝土與無收縮水泥砂漿材料：其材料中添加膨脹性之水泥添加劑，使固化過程中不致於產生體積變化。該摻料應為非金屬氧化性材料且無侵蝕性，其規格要求如表 2- 34、表 2- 35 所規定。
- (6) 噴凝土：使用噴附方式施工之水泥砂漿稱為噴漿，可分為乾式與濕式。每層最大噴附厚度約為 5 公分，其相關試驗及規定應詳見「結構混凝土施工規範」(內政部營建署，2011)及「混凝土工程施工規範與解說」(中國土木水利工程學會，2007)之相關規定。

表 2- 34 無收縮混凝土之規格要求表

| 試驗項目 | 規定值 | 試驗方法 |
|------------|------------------------------|----------------|
| 膨脹率 | 0~0.3% | ASTM C878 |
| 泌水率 | 0 | ASTM C232 |
| 坍度 | 小於 15cm | ASTM C143 |
| 初凝時間 | 小於 4 小時 | ASTM C403 |
| 抗壓強度(28 天) | $\geq 350 \text{ kgf/ cm}^2$ | CNS 1010 R3032 |

(資料來源：中華民國結構工程技師公會全國聯合工會，2008)

表 2- 35 無收縮水泥砂漿之規格要求表

| 試驗項目 | 規定值 | 試驗方法 |
|------------|------------------------------|----------------|
| 膨脹率(7 天) | 0~0.3% | ASTM C827 |
| 收縮率(28 天) | 0 | ASTM C596 |
| 抗壓強度(28 天) | $\geq 350 \text{ kgf/ cm}^2$ | CNS 1010 R3032 |

(資料來源：中華民國結構工程技師公會全國聯合工會，2008)

由「鋼筋混凝土結構修復補強設計參考手冊」可以了解，不同修復材料有不同之試驗方法與規定，但因水泥砂漿常添加不同之摻料及化學材料，故可以環氧樹脂砂漿及聚合物水泥砂漿之材料規定為標準，惟無收縮水泥砂漿之試驗方法有所不同，故在比較各項材料差異時，需要更加詳細說明。

第三節 美國相關規範

美國混凝土學會(American Concrete Institute；ACI)針對鋼筋混凝土構件之修補曾陸續出版四本相關指引與規範，依出版時間先後分別為「ACI 546.3R-14 Guide for the Selection of Materials for the Repair of Concrete」(美國混凝土學會，2014)、「ACI 546R-14 Guide to Concrete Repair」(美國混凝土學會，2014)、「ACI 563-18 Specifications for Repair of Concrete in Buildings」(美國混凝土學會，2018)及「ACI 562-19 Code Requirements for Assessment, Repair, and Rehabilitation of Existing Concrete Structures and Commentary」(美國混凝土學會，2019)，其中 ACI 562-19 最新出版，內容涵蓋最廣泛，除討論修補(repair)材料外，亦包括評估法(assessment)及修復法(rehabilitation)，明確定位為規範(code)。因此未來從事修補作業時，可以 ACI 562-19 為基本要求，再參考其他三本手冊選定修補方法與材料。以下重點整理各手冊所提及之修補材料或工法要求。

壹、既有混凝土結構之評估、補強與修復規範(ACI 562-19)(美國混凝土學會，2019)

修補與修復係用來彌補結構或構材的缺陷或破壞，修補後的構件(element)與接頭(connection)在各斷面須具設計強度或至少達到根據設計載重而計算之要求強度。修補的設計須能與既有結構結合，於修補材與既有構件間傳遞載重。在工作載重下，修補後仍能維持複合行為(composite behavior)，即使修補材與基材間的握裹喪失時，該修補系統可減緩可能的危險狀況。修補設計須包括修補材與基材間界面的剪力與拉力分析，並據此計算要求界面應力需求(interface stress demand)(vu)，如表 2- 36 所示。若該界面應力需求小於 30 psi，則不須使用界面鋼筋(interface reinforcement)，若介於 30 psi 與 60 psi 間，雖不須使用界面鋼筋，但須測試握裹強度以確認是否符合性能要求，如使用直拉法(direct tension pull-off)(ASTM C1583)或其他可定量的方法，若超過 60 psi，則須使用界面鋼筋。

修補系統須考慮修補材料與工法，至少包括修補材的性質、使用形式、黏結、體積穩定性、熱變形、耐久性、抗蝕性、安裝法、養護要求及環境條件等。修補設計須考量現地構材(member)條件，包括混凝土性質與鋼筋的腐蝕狀態，亦須考量改變既有結構物的形式、損壞狀況、預力損失及修補順序所造成的效應。移除

局部混凝土的斷面應力不可超過設計應力。修補的形式須考量既有結構與修補區域應力集中或開裂的可能性。

修補系統的設計須考量高溫下的性能表現，並符合構材的防火要求。若未修補的構材本身於設計時即考量其可耐火，不須使用額外的防火防護。

表 2- 36 由混凝土局部或全部承受介面應力需求之試驗要求

| v_u | Testing requirements |
|------------------------------|--|
| Less than or equal to 30 psi | Bond integrity testing |
| Greater than 30 psi | Quantitative bond strength testing unless design satisfies 7.4.5 |

(資料來源：美國混凝土學會，2019)

修補設計須考量修補材、修補後的結構及修補區域與既有結構介面的耐久性，因此須評估修補材目前的狀況、缺陷和未來可能的劣化。選擇修補材時，須考量其與結構的相容性，並考量其未來的維護策略與方法。使用混凝土修補時，須至少滿足其對鋼筋的防蝕性能、防火及錨定。使用其他材料時，不可含可造成修補區域鋼筋腐蝕的添加物，亦須考量不同材料間的伽凡尼腐蝕(galvanic corrosion)。選擇混凝土表面處理的方法時須考慮表面磨耗的影響、混凝土開裂及伴隨的膨脹與收縮、結構活動影響修補系統的耐久性及結構物的預期壽命等。

貳、 建築中混凝土的修補規範(ACI 563-18)(美國混凝土學會，2018)

本規範包含修補與修復所需之強制及非強制要求，如表 2- 37 與表 2- 38 所列，較前版納入 ACI 503.7 與 ACI 506.2 兩規範，新增環氧樹脂及噴凝土作為修補及修復材料。除基本要求、名詞定義及適用試驗規範外，主要內容可分為施工與材料兩部份，施工部分包括支撐、修補所需之混凝土移除、模板等，材料則包括鋼筋、混凝土、高分子材料、環氧樹脂、噴凝土等。

修補材除了使用現地拌合的水泥砂漿外，亦可包括乳膠改質水泥砂漿(latex-modified hydraulic-cement mortar)、環氧樹脂砂漿(epoxy mortar)、包裝快硬混凝土、包裝砂漿與混凝土、速硬水泥、噴凝土、噴凝土用包裝預混乾燥複合材料等，同一品牌的材料需來自相同的製造廠，須滿足合約文件所要求的性能及修補後表面外觀的要求，不可含可溶性氯離子及其他可造成鋼筋腐蝕的材料，須依照修補材料製造商(RMM, Repair Material Manufacturer)指示準備材料、表面處理、拌合、澆置、粉飾、養護及維護等。

表 2- 37 強制性要求清單

| Section/Part/Article | Notes to Specifier |
|----------------------|---|
| 1.5.1.1 | Indicate maximum live and dead loads, and any temporary reduction in loads, to be permitted during repair and after completion of repair program, in concert with the requirements of 2.1.1.1. Indicate location and magnitude of minimum dead loads if needed to act as counterweights. |
| 1.5.2 | Indicate Owner-approved work areas, and schedule requirements. |
| 1.5.4.1 | Indicate the demarcation line of the project location, specific Work areas, and adjacent construction |
| 1.8.2.1 | Indicate the required certifications and experience for every repair material, when deemed necessary and possible alternate credentials and experience. Examples of possible field personnel include, but are not limited to: a) ACI Concrete Field Testing Technician - Grade I b) ACI Adhesive Anchor Installation Inspector c) ACI Concrete Construction Special Inspector d) ACI Masonry Field Testing Technician e) CSA-Based Concrete Construction Special Inspector (Canada Only) f) CSA-Based Concrete Field Testing Technician - Grade I (Canada Only) g) ICRI Concrete Surface Repair Technician Grade 1 h) ICRI Concrete Slab Moisture Testing Technician-Grade 1 i) NACE Coatings Inspector Program Levels 1 through 3 j) SSPC Concrete Coating Inspector |
| 1.8.2.2(d) | Indicate specific repair procedures that require review and approval. |
| 1.8.2.2(e) | Indicate submittal of component materials, repair material mixture proportions or batch requirements, and concrete supplier's or repair material manufacturer's quality control program |
| 1.8.3.3(d) | Indicate frequency of sampling and whether sampling will be performed on a random basis. As a minimum, consider specifying at least one sample be obtained for every day of placement or 38 m. Indicate testing requirements in accordance with critical design performance requirements, which could include mold strength test specimens per ASTM C31/C31M slump (ASTM C143/C143M), air content (ASTM C231/C231M or C173 C173M), temperature (ASTM C1061/C1061M), and density (ASTM C138/C138M), or other properties. |
| 1.8.3.3(g) | Indicate tests required to be performed by Owner's testing agency |
| 1.8.3.4(c) | When it is necessary or desirable to know properties of concrete at the point of placement or at locations other than the delivery point indicate that concrete is to be sampled at these other locations for testing See the discussion under Optional Requirements in 6.2 2.4. |
| 1.8.3.4(e) | Indicate additional testing and inspections services desired for the Work, if applicable. Refer to ACI 311.1R, ACI 311.4R, ACI 311.5R and ACI 546,3R for specific inspection items that may be appropriate. |
| 1.8.7.2 | Indicate relevant performance and other relevant requirements appropriate for the Work |
| 1.9.2.2 | Indicate materials and provide details in conformance with ACI 562 that address known conditions for the Work where the tolerances in ACI 117 cannot be satisfied. Indicate that for conditions not shown or that are different from those shown in the Contract Documents, the Architect Engineer will provide alternate details to address those conditions. |
| 1.10.2 | Indicate repair material manufacturer's field representative qualifications |
| 2.1.1.1 | Indicate location and load requirements, and deflection limitations of temporary shoring and bracing deemed necessary to address unsafe structural conditions existing before contractor's mobilization on site. |

鋼筋混凝土梁構件之鋼筋腐蝕斷面補修工法研擬

| Section/Part/Article | Notes to Specifier |
|----------------------|--|
| | <p>Deflection limit criteria apply to members being shored and members supporting shoring Indicate load limitations within regions of the structure where shoring is anticipated, to aid specialty engineer in determining the extent of shoring beyond the immediate repair area in horizontal directions, vertical directions, or both</p> <p>Indicate limits of concrete, reinforcing removal or both beyond which shoring will be necessary, as well as where composite action between existing concrete to remain and repair material cannot be maintained without shoring, load removal, or both via jacking.</p> <p>Indicate requirements for construction sequence where concrete removal, shoring and bracing installation, and application of repair materials in certain portions of the Owner's building must be scheduled around shutdowns of the building operations</p> |
| 2.3.3.2 | Indicate if specialty engineer inspection is required |
| 3.1.1.2 | Indicate the required surface profile(s) and acceptable cleaning techniques, or method(s) for evaluation and acceptance criteria. Consider ICRI 310.2 and SSPC SP-13 (NACE 6) specification for surface preparation, and guidance for surface preparation equipment that minimizes bruised surfaces (microcracks) per ACI 364.7T. If desired, consider specifying which equipment will be permitted |
| 3.1.3.1 | Indicate testing locations, and number and frequency of tests. Refer to guidance provided in ICRI Technical Guideline No. 210.3R for specifying tests. |
| 3.1.3.1(a) | Indicate if pull-off strength testing is required and provide the minimum pull-off strengths based on project conditions. See ACI 562 for guidance on pull-off testing requirements. If different minimum pull-off strengths are required for different locations or repair types, designate appropriate minimum pull off values and where they apply. Indicate a means to revise the stated minimum pull-off strengths locally based on additional testing if the stated values cannot be achieved. The maximum achievable pull off strength of the prepared substrate surface is limited to the strength of the substrate concrete, which can be determined by the testing of sound original Concrete in accordance with ASTM C1583/C1583M and guidance provided in ICRI Technical Guideline No. 210.3R. |
| 3.1.3.2 | Indicate if mockups are required, state specific parameters including but not limited to locations, number of mockups, acceptance criteria, requirements for additional mockups due to failure or for other reasons deemed necessary by the Architect Engineer |
| 3.2.1.4 | Indicate whether high-pressure water for concrete removal by hydrodemolition is permitted to be used for the project, and permitted locations. |
| 3.2.1.5 | Indicate required surface profiles |
| 3.3.1.1 | Indicate the required depth of removal in concert with perimeter requirements 3.3.2.2(b). |
| 3.3.2.1 | Indicate any specific advance-notice requirements and any other parties requiring notification |
| 3.3.3.3 | Indicate moisture requirements, or those of repair material manufacturer substrate moisture requirements apply. |
| 3.3.4.2 | If verification of the adequacy of the prepared substrate is required, indicate that tensile pull-off tests shall be performed at specified locations in accordance with ASTM C1583/C1583M and guidance provided in ICRI Technical Guideline No. 210.3R. Indicate who performs and pays for the testing. Indicate the required pull-off strengths that must be achieved for acceptance. |
| 4.1.2.1(b) | Provide locations and details of construction and contraction joints. |
| 4.1.2.2 | Review the submittal list and indicate in Contract Documents the items to be submitted |
| 4.2.2.6 | Indicate appearance and texture required |

| Section/Part/Article | Notes to Specifier |
|----------------------|--|
| 5.1.4.2 | Indicate requirements for mockups, if mockups required. |
| 5.1.4.3 | Indicate inspection and/or observation requirements and access criteria for the Work, tailored to repair scope. Special inspections may be required by the Architect Engineer by the applicable code. |
| 5.2.1.1 | Indicate required grades, types, and sizes of reinforcing bars. |
| 5.2.1.2(a) | For zinc-coated reinforcing bars conforming to ASTM A767/A767M, indicate coating class, whether galvanizing is to be performed before or after fabrication, and indicate which bars require special finished bend diameters (usually smaller sizes used for stints and ties). |
| 5.2.1.2(b) | Indicate ASTM specification to which epoxy-coated reinforcing bars are to conform |
| 5.2.1.7 | Indicate sheets or rolls of plain or deformed welded wire reinforcement, and if epoxy-coated or stainless steel welded wire reinforcement is required. Refer to WRI Manual of Standard Practice for additional guidance. |
| 5.2.1.10 | Indicate types of connections and location used within structure. Indicate design criteria. Indicate if substitutions are permitted and criteria for acceptance |
| 5.3.1 | Indicate acceptance criteria, including but not limited to, section loss. In addition indicate evaluation requirements. Guidance for the measurement of section loss is provided in ACI 364.14T, and evaluation of reinforcement by ACI 562 |
| 5.3.3.5(a) | indicate location and tolerance for placement of welded wire reinforcement |
| 5.3.3.5(b) | Indicate method of lapping at edges and ends of wire reinforcement |
| 5.3.3.7 | Indicate locations of splices |
| 6.2.1.1 | Indicate specific cementitious materials, or that one or a combination of the cementitious materials given in 6.2.1.1(a) through 6.2.1.1/8) is permitted. Use ACI 318 and ACI 225R to determine what will be acceptable for the project conditions. Refer to PCA Publication EB001 for additional guidance |
| 6.2.2.6(a) | Indicate the exposure class for portions of the structure requiring concrete resistant to sulfate attack. Refer to ACI 318 for description of exposure classes. |
| 6.2.2.6(b) | Indicate the exposure class for portions of the structure requiring resistance to freezing and thawing Refer to ACT 318 for additional guidance. |
| 6.2.2.6(c) | Indicate the exposure class for portions of the structure requiring low permeability when in contact with water. Refer to ACI 318 for description of exposure classes |
| 6.2.2.6(d) | Indicate chloride exposure classifications for area(s) of work. Refer to ACI 318 for additional guidance of chloride exposure classes. Refer to ACI 201.2R and ACI 222R for additional information on the effects of chlorides on corrosion of reinforcement |
| 6.2.2.6(e) | Indicate maximum length change, and whether modifications to the ASTM C157/C157M procedures are permitted to reflect drying restraint possibly experienced by concrete repair materials. Refer to U.S. Department of Interior C.R.E.E.P. Report for guidance in modifying ASTM C157 |
| 6.2.2.7 | Indicate the specified compressive strength of concrete f for various portions of the Work. For most structural members, the requirements of the design will dictate the required strength. A higher compressive strength may be required for durability considerations. For floors, the specified compressive strength f_c will generally depend upon the intended use and expected wear unless durability considerations dictate higher strengths. If the floor will be exposed to abrasive wear from early construction traffic, consider requiring a minimum compressive strength at 3 days of 13 MPa or higher. Refer to ACI 302. IR for guidance on compressive strengths to |

| Section/Part/Article | Notes to Specifier |
|----------------------|---|
| | specify for various classes of floors. |
| 6.2.2.8 | Indicate flexural performance requirements. |
| 6.2.2.9 | Indicate flexural performance requirements. |
| 7.1.2.2 | Indicate the information in 7.1.2.2(a) to 7.1.2.2(g) that is to be submitted. |
| 7.3.1.3 | Indicate requirements of base and subgrade preparation for slab-on-ground |
| 7.3.2.6 | Indicate locations of construction joints. |
| 7.3.7.6 | Indicate those portions of the structure where stains, rust, efflorescence, and surface deposits are to be removed. |
| 8.1.2.1 | Indicate which repair products require samples, and the quantity and size(s) of samples required |
| 8.1.2.1(a) | Review the submittal list and indicate the testing data required to be submitted. |
| 8.1.3 | Indicate required mockups, including type, number, curing duration, testing protocols, and criteria for acceptance. Indicate how far in advance of the work the Architect/Engineer needs to be notified |
| 8.1.4 | Indicate required data for submission on substituted repair material(s) if different than 8.1.2 and 8.1.2.1(a). |
| 8.1.6.2 | Indicate certification or testing/inspection requirements Indicate criteria for acceptance, including testing requirements for properties of fresh concrete, mortar, and grout proprietary repair materials, such as slump (ASTM C143/C143M), slump flow (ASTM C1611/CI61M), air content (ASTM C231C231M) and whether cylinders (ASTM C39/C39M) or cubes (ASTM C109/C109M) shall be prepared and tested for compressive strength. Hardened in-place repair materials can be tested for bond in accordance with 3.1.3.1 and other properties using nondestructive methods. Refer to ACI 228.2 for additional information on non-destructive testing |
| 8.2.3.1 | Indicate which types of materials are acceptable, acceptance criteria such as from ACI 546.3R, and tolerances for repair materials, such as "net weight (mass) shall be within 2% of the value stated by the RMM" or another appropriate measure, like volume or yield, Indicate if only specific repair materials permitted. |
| 8.2.4 | Indicate required performance criteria citing reference standards from national standard bodies relevant to the project location and surface finishes for acceptance of products and installation. Refer to ACI 546.3R Tables 3.8.4.7, 5.7, 5.7b, 5.7c, 7.5, 7.5b, and 7.5c for guidance on additional requirements. Indicate required certificates or other specified supporting information to document material performance |
| 8.3.2 | Indicate minimum notification period |
| 8.3.3.5 | Indicate the type of surface finish at all repair locations for the project. |

(資料來源：美國混凝土學會，2018)

表 2- 38 非強制性要求清單

| Section/Part/Article | Notes to Specifier |
|----------------------|---|
| 1.5.2 | Indicate designated tool and equipment storage areas. |
| 1.6 | Indicate if reinstallation meetings are not required, or are only required for certain Work scopes or particular repair materials and assemblies. Indicate alternate representatives and topics for the meeting. Indicate alternate submittal submission schedule. Indicate specific meeting preconstruction meeting time(s) and location(s). |
| 1.7.3 | Indicate if Contractor is required to submit a Quality Control Plan, and timing of plan submission. |
| 1.8.2.2 | Indicate if other testing duties and responsibilities are required. |
| 1.8.2.2(c) | Indicate additional or alternative project site requirements specific to the repair materials to be used. |
| 1.8.2.2(f) | Specify quality control requirements to verify conformance of repair Work |
| 1.8.3.2 | Indicate if other testing services will be provided. |
| 1.8.3.3(e) | Indicate when compressive test specimens are to be tested if other than at 28 days. |
| 1.8.3.3(f) | Indicate circumstances that justify alternate or supplementary testing and who pays for such testing. |
| 1.8.4.2 | Indicate if rebound hammer or pulse velocity testing will not be permitted to evaluate uniformity of in-place concrete. Refer to ACI 228. 1R for guidance on these test methods. |
| 1.8.4.3(a) | Indicate if cores are required other than if concrete strength is in doubt. Indicate alternative moisture conditioning procedures and duration to those defined in ASTM C42/C42M. The core conditioning procedures defined in ASTM C42/C42M are intended to minimize the effects of moisture gradients on the measured strengths of cores. |
| 1.8.4.3(c) | Indicate alternative curing requirements for repairs to core holes. |
| 1.8.6.1 | If another basis for acceptance of concrete strength is required for accelerated strength testing, specify the basis for acceptance |
| 1.8.6.3 | Indicate requirements for use of in-place tests, such as pullout testing or penetration resistance (probe) testing in the event standard-cured specimens fail to meet the strength criteria. Include procedures to develop strength correlations. Refer to ACI 228. 1R for guidance on required correlation data and acceptable data analysis methods |
| 1.8.7.1(a) | Indicate if on-site addition of air-entraining agent is not permitted when air content as delivered is less than required |
| 1.8.7.1(b) | Indicate when job-site adjustments in accordance with ASTM C94C94M are not permitted |
| 1.8.7.1(c) | Indicate if maximum and minimum temperatures other than given in 6.2.2.6 are permitted. The Architect Engineer will need to decide if other limits are acceptable without affecting performance. |
| 1.9.2.1 | Indicate tolerances different from those in ACI 117. |
| 1.10.1 | Indicate alternate approval process for missing and installing proprietary materials Indicate alternative repair material manufacturer field representative visit schedule and documentation |
| 2.1.2.1 | Indicate whether submittals 2.1.2.1(a) through (d) are not required |
| 2.2.1.1 | Indicate where custom-built assemblies of lumber or other suitable materials are permitted |
| 2.3.2.1 | Indicate additional requirements necessary for creep concerns or core testing results. |
| 3.1.2.3 | Indicate if submittals listed in 3.1.2.2 through 3.1.2.6 are not required to be submitted |
| 3.2.1.3 | Indicate maximum breaker size or weight, and style of tips |
| 3.2.2 | Indicate if specific surface preparation and cleaning means and methods are required or not permitted. |
| 3.3.1.2 | Indicate whether Architect Engineer or other party will perform initial |

| Section/Part/Article | Notes to Specifier |
|----------------------|--|
| | inspection |
| 3.3.2.2 | Indicate contractual remedies or allowances to address additional removals. |
| 3.3.2.2(b) | Indicate alternative saw-cut depth. |
| 3.3.2.3.(b) | Indicate alternate concrete removal requirements. |
| 3.3.2.3(c) | Indicate conditions where it is allowable to remove concrete behind vertical reinforcement in columns such as for lightly loaded or no structural columns or if other methods such as phased repairs or supplemental restraint of bars to prevent buckling are incorporated to facilitate such removal |
| 3.3.4.1 | Indicate any specific advanced notice requirements, if different than 3.3.2.1, and indicate frequency of Architect/ Engineer reviews for conformance with acceptance criteria or if all repair areas will be reviewed and accepted prior to any repair materials being installed |
| 4.1.2.1 | Review the submittal list and specify the items that are not required to be submitted |
| 4.2.1.1 | Indicate specific form-facing materials and surface finish requirements, as defined in 7.3.3.3. |
| 4.2.1.2 | Indicate where walls require form ties with a positive water barrier. Indicate alternative break-back distance for ferrous ties Indicate if drilled anchor bolts in existing concrete are not permitted |
| 4.2.1.6 | Indicate alternative materials or size, or both for chamfer strips. |
| 4.2.1.1 | Indicate alternative documentation or submission requirements |
| 4.2.2.3 | Indicate if earth cuts will be permitted or required |
| 4.2.2.4 | Indicate more stringent limitations on deflection of facing materials when needed. Refer to ACI 347R for further guidance |
| 4.2.2.5(b) | Indicate or allow alternative locations for formed repair material construction joints when necessary to facilitate formwork removal or accelerate construction, provided that the alternative joint locations do not adversely affect the strength of the structure Indicate if and where repair material construction joints must match construction joints in the existing structure |
| 4.3.1.2 | Indicate if chamfer strips are not required on exterior comers of permanently exposed surfaces. Indicate if bevels are required on reentrant corners of repair material or on edges of formed concrete joints |
| 4.3.1.5 | Indicate tolerance limits different than those of ACI 117. Indicate when a more or less restrictive tolerance for an abrupt offset is required. Refer to ACI 347R and ACI 117 for further guidance. |
| 4.3.2.5 | Indicate the minimum compressive strength for removal of forms supporting the weight of repair material if different than Refer to ACI 347R and ACI 347.2R for guidance on items to consider Indicate if non-load-carrying form-facing material is not permitted to be removed at an earlier age than the load carrying portion of the framework. |
| 4.3.4.1 | Indicate standards for test specimen molding and testing if other than indicated above. |
| 4.3.4.2 | Indicate if alternative methods for evaluating repair material strength for formwork removal are permitted |
| 4.3.5.2 | Indicate if Owner's quality assurance inspection is to be coordinated by another party |
| 5.1.2.1 | Indicate if the submittals listed in 5.12.1(a) through 5.1.2.1) are not required Indicate special notation requirements using ACI 104 as a reference guide |
| 5.1.4.1 | Provide specific guidance for placement of reinforcement using ACI 315 as a reference. |
| 5.2.1.2 | Indicate if coated reinforcing bars are permitted and, if so, whether coating is to be zinc or epoxy, or zinc and epoxy dual-coated Avoid mixing galvanized and non-galvanized reinforcement or other embedded metal that could result in galvanic corrosion |
| 5.2.1.2(b) | Indicate repair coating, application procedures, and coating repair approval process. |

| Section/Part/Article | Notes to Specifier |
|----------------------|--|
| 5.2.1.4 | Indicate use of bar mats. |
| 5.2.1.5 | For beaded bars, indicate alternative type of steel for reinforcing bars: -Carbon-steel (ASTM A615/A615M), also indicate grade and • Low-alloy steel (ASTM A706 A706M) |
| 5.2.1.9 | Indicate types of reinforcement supports and locations used within a structure. Reference Chapter 3 in CRSI Manual of Standard Practice. |
| 5.2.1.11 | Indicate types of connections and location used within structure. Indicate design criteria. Indicate if substitutions are permitted and criteria for acceptance |
| 5.2.2.2(a) | Indicate desired requirements for welding preparation such as removal of zinc or epoxy coating, or more stringent requirements than those in AWS D 1.4 Indicate desired requirements for chemical composition of reinforcing bars if more stringent than ASTM specifications referenced in 5.2.1.1. Indicate special heat treatment of welded assemblies, if required. Indicate supplementary requirements for welding of wire to wire and welding of wire or welded wire reinforcement to reinforcing bars or structural steel. |
| 5.3.3.3 | Indicate alternative cover requirements for corrosive atmosphere, other severe exposures, fire protection, and bundled bats or headed shear studs. Refer to ACI 318. and ACI 562 Chapter 8 |
| 5.3.3.4 | Indicate if methods of support are to be different than those conforming to CRSI RB-4.1. |
| 5.3.3.5(a) | Indicate location and alternative tolerances for reinforcement. Specify where welded wire reinforcement may extend through movement joints, including saw-cut joints. Specify alternative method of lapping at edges and ends of welded wire reinforcement. Refer to WRI Manual of Standard Practice for additional guidance. |
| 5.3.3.8 | Indicate if bending or straightening reinforcing bars partially embedded in concrete is permitted |
| 6.2.1.2 | If aggregates are to conform to a specification other than ASTM C33/C33M or ASTM C330/C330M for grading, deleterious substances, or soundness, specify the other requirements. If aggregate deleteriously reactive with alkalis is permitted, the effect of the expansion can be mitigated by limiting the total equivalent alkali content ($\text{Na}_2\text{O}+0.658\text{K}_2\text{O}$) to less than 3 kg m or by the appropriate use of supplementary cementitious materials. Refer to Section 6.2.2. Indicate the test for determining conformance to requirements for cleanliness, and specify grading be performed on samples obtained from the aggregates at the point of batching Indicate additional requirements for aggregate such as hardness, color, mineralogical composition, texture, or shape (crushed or gravel). If concrete will be exposed to wetting, extended humidity, or in contact with moist ground, indicate aggregates that do not contain materials deleteriously reactive with alkalis in the cement; however, such aggregates may be used with cement containing less than 0.60% alkalis such as ($\text{Na}_2\text{O}+0.658\text{K}_2\text{O}$) in concrete mixtures containing a total alkali content less than 3 kg/m ³ or with a material such as natural pozzolan, fly ash, slag, or silica fume in an amount shown to be effective in preventing harmful expansion due to alkali-aggregate reaction in accordance with ASTM C1567. |
| 6.2.1.3 | Indicate if non potable water complying with ASTM C1602/1602M or if alternative sources of water are permitted |
| 6.2.1.4 | Indicate the admixtures that are required or prohibited. Indicate the parts of the Work in which each type of admixture should or may be used |
| 6.2.2.1 | Indicate minimum test placement size and parameters |
| 6.2.2.2 | Indicate slump or slump flow if it is not permissible for Contractor to select these values. |
| 6.2.2.3 | If an aggregate size requirement differs from that specified by 6.2.2.3 (for example, smaller size in for smaller repair areas or concrete cover constraints), indicate nominal maximum size of aggregate |

| Section/Part/Article | Notes to Specifier |
|----------------------|--|
| 6.2.2.4 | <p>Indicate if concrete should be non-air-entrained or an alternative air content is required Air entrainment should not be used in flatwork to receive a hard steel troweled finish.</p> <p>Indicate if a particular ASTM test method (ASTMC231/C231M or C173/C173M) is required for measuring air content</p> <p>It may be necessary to indicate that air content be measured at the point of placement to account for loss of air content during pumping, if applicable.</p> <p>Once the loss of air content during pumping is established, acceptance limits at the point of discharge can be determined</p> |
| 6.2.2.5(a) | <p>The temperature of concrete as placed shall not exceed these values by more than 11°C. These minimum requirements may be terminated when temperatures above 10°C occur during more than half of any 24-hour duration</p> <p>These requirements have been excerpted from ACI 306.1. For projects in cold climates, such as in northern winters, or in situations where it is prudent to require Contractor to follow specific procedures to achieve the limits of 6.2.2.5(a), the temperature limits for cold weather may be deleted and ACI 306.1 can be referred to in its entirety Options provided in ACI 306.1 must then be exercised</p> |
| 6.2.2.5(b) | <p>Indicate alternate minimum temperatures to concrete at delivery Refer to the Optional Requirements Checklist for 7.3.2.1(c). If concrete delivered in hot weather with a temperature higher than 35°C has been used successfully in given climates or situations, the higher temperature may be specified in place of the 35°C limit</p> |
| 6.2.2.6(a) | <p>Indicate alternative mixture requirements for sulfate resistance.</p> |
| 6.2.2.6(b) | <p>Indicate alternative mixture requirements for freezing-and-thawing resistance</p> |
| 6.2.2.6(c) | <p>Indicate alternative requirements for low permeability.</p> |
| 6.2.2.6(d) | <p>Indicate alternative mixture requirements for corrosion protection of reinforcement instead of chloride-limited concrete</p> <p>Refer to NRMCA Report SP-308-02 "Confusion on Chloride Limits in Specification That Challenge the Industry for potential changes the Specifier can make in this limit.</p> |
| 6.2.2.7 | <p>Concrete assigned to Exposure Class S1, S2, S3, F1, F2, F3, C2, or Pl as defined in ACI 318, is required to meet the maximum w/cm limits given in Table 6.2.2.6(a), Table 6.2.2.6(b), Table 6.2.2.6(c), and Table 6.2.2.6(d).</p> |
| 6.2.2.8 | <p>Indicate dosage of steel fibers. Consider guidance from fiber manufacturers for required performance criteria.</p> |
| 6.2.2.9 | <p>Indicate dosage of macro-synthetic fibers. Consider guidance from fiber manufacturers for required performance criteria</p> |
| 6.2.3.5 | <p>Indicate when field verification of concrete mixtures is required. Indicate method for sampling at point of placement.</p> |
| 6.3.1.1 | <p>If concrete materials are to be measured, batched, or mixed other than in conformance to ASTM C94/C94M, specify how these procedures are to be accomplished.</p> <p>Indicate if the ready mixed concrete production facility should be certified by the NRMCA Program for Certification of Ready-Mixed Concrete Production Facilities or an equivalent program. NRMCA's Certification Program is in accordance with NRMCA Quality Control Manual</p> |
| 6.3.2.1 | <p>Indicate when slump adjustment by addition of water at the Project site is not permitted.</p> |
| 6.3.2.2 | <p>If shorter or longer time for completion of discharge is required or permitted specify maximum time.</p> |
| 7.1.2.1 | <p>Indicate submittals listed in 7.12.1.a through 7.1.2.1.f that are not required</p> |
| 7.2.1.1 | <p>Indicate if alternative sources of curing water are permitted. Water may be used if it can be demonstrated to cause no harm to concrete by meeting the requirements of ASTM C1602/C1602M.</p> |
| 7.2.1.2 | <p>Where concrete surface is exposed to view and appearance is a factor, indicate curing materials that will not stain or discolor concrete. If flooring materials or</p> |

| Section/Part/Article | Notes to Specifier |
|----------------------|--|
| | surface densifiers are to be used, indicate compatible curing materials and procedures. Refer to ACI 302.2R |
| 7.2.1.3 | Where concrete surface is exposed to view and appearance is a factor, indicate curing sheet materials that will not stain or discolor concrete. |
| 7.2.1.6 | Indicate alternative repair materials. |
| 7.2.1.9 | Indicate if air entrainment for hard-trowel finish concrete exposed to freezing and thawing is permitted. |
| 7.3.2.1(b) | Indicate minimum temperature of reinforcement before placing concrete. Refer to ACI 306R for additional guidance. |
| 7.3.2.1(c) | If a concrete temperature limit higher or lower than 35°C for concrete members is required or acceptable, based on member being cast, location, relative humidity and past experience, indicate a lower or higher limit for concrete temperature in hot weather. Review ACI 305R for guidance on specifying a higher temperature limit |
| 7.3.2.5 | Indicate if consolidating of concrete by methods other than vibration will be permitted. |
| 7.3.2.6 | Indicate if bond is required at construction joints. |
| 7.3.3.2 | Specify additional mockups types, locations, and sizes. |
| 7.3.4.2(e) | For dry-shake finishes, indicate the metallic or mineral aggregate, the final finishing methods, and the location. Indicate if proprietary bagged premixed materials are to be used. |
| 7.3.4.2(f) | Indicate alternate aggregate distribution if uniform distribution is not required Indicate requirements of surface retarder |
| 7.3.4.2(g) | Indicate locations of nonslip finishes. If abrasive particles other than aluminum oxides are to be used, specify the other abrasive particles and the rate of application. |
| 7.3.5 | Indicate where saw-cut joints are required. Indicate alternate saw-cut depth for conventional concrete slab Indicate alternate saw cut depth for fiber reinforced concrete slab. |
| 7.3.6.3 | The measures specified in 7.3.6.3 are for final curing of unformed concrete surfaces, intended to provide protection against moisture loss beginning immediately after final finishing Indicate if a curing procedure of 7.3.65 that supplies additional water is required Indicate if supplying additional water is required for the entire curing period Indicate locations requiring specific curing methods. Refer to ACI 308R for specific curing method recommendations |
| 7.3.6.5 | Indicate if another procedure is required or if any procedures are not permitted |
| 7.3.6.6(a) | Indicate alternative minimum curing period or criteria, if applicable. Shorter curing periods may be permitted by Architect Engineer when strength and durability requirements are met. For concrete surfaces that require enhanced durability, such as high wear resistance, low permeability, or minimal cracking, a longer curing duration could be needed than is required to meet compressive strength criteria alone. When such enhanced properties are required, minimum curing periods of 7 days for high-early-strength concrete, 14 days for concrete incorporating Type I or Type II cements, and 14 to 21 days for concrete incorporating pozzolan as one of the cementitious materials are recommended. Indicate a longer curing duration as appropriate to the performance requirements of the concrete. Refer, to ACI 308R for additional guidance. |
| 7.3.6.6(b) | Indicate curing procedure is not allowed to change for entire duration of curing period. |
| 7.3.6.7(a) | Indicate alternative requirements for duration of thermal protection Refer to ACI 306.1. |
| 7.3.6.7(b) | Indicate alternative requirements for removal of thermal protection. Requirements for rate of temperature change have been adapted from ACI 306.1. |

| Section/Part/Article | Notes to Specifier |
|----------------------|---|
| 7.3.7.1 | Indicate requirements for surface repairs that are different than in 7.3.3. |
| 7.3.7.2 | Indicate alternative ties that do not require repair. |
| 7.3.7.3 | Indicate alternative method to repair surface defects other than tie holes. |
| 8.1.3 | Specify other reviewers—for example, Construction Manager, Historic Preservation Authority—that shall review and accept the mockup |
| 8.1.3(a) | Indicate additional mockups specifically for mixing, installation, and curing of repair materials, if RMM permits mixing, installation, and curing options. Indicate alternate acceptance criteria. |
| 8.1.4 | Indicate if substitutions are not permitted |
| 8.1.5(c) | Indicate if ice is pot permitted as mixing water source. |
| 8.1.6.3 | Indicate the alternative records to be submitted and to whom the documents should be sent. |
| 8.2.1 | Indicate alternate requirements. |
| 8.3.3 | Indicate alternate instructions. |
| 8.3.3.2 | Indicate if mixing partial packages or containers of materials is permitted. Indicate if any or all batching and mixing quality control requirements are not required. |
| 8.3.4 | Specify alternative acceptance criteria. Indicate remedial actions if repair materials do not meet acceptance criteria. |

(資料來源：美國混凝土學會，2018)

參、 混凝土修補指引(ACI 546R-14)(美國混凝土學會，2014)

本指引提供混凝土修補所需之相關資訊，包括修補前準備、選擇材料與工法。相較於前述之 ACI 563-18，該指引提供較詳細的修補法，隨附許多圖說與照片以利了解。

混凝土結構的修補方法包括結構評估、修補設計、準備施工文件、投標與溝通過程及進行修補施工，如圖 2- 11 所示。首先就表面混凝土移除而言，此為確保修補年限的最重要因素，過程中不可破壞鄰近混凝土或影響新修補材的握裹，尤其留意預力鋼筋附近的混凝土。一般移除的方式包括鋸切、衝擊與高壓水柱，如表 2- 39 所示。混凝土移除後，接下來最重要的步驟即為表面處理，只有好的表面處理下才有好的修補，與移除混凝土的程序及修補材的類型有關，處理的技術通常包括噴砂(abrasive blasting)、珠粒噴擊(shot-blasting)、噴水(water blasting)及清潔(cleaning)，如表 2- 40 所示。

本指引介紹數類混凝土修補或修復材料的性質、優缺點、限制、典型用途及適用規範與參考文獻。其中就本研究所選用的材料而言，傳統砂漿的優點在於其性質與原混凝土接近，具經濟性，易澆置、粉飾與養護，特別適合局部修補，但其乾縮量大。高分子改質水泥砂漿(PPCC, polymer-portland-cement concrete)具有優良的長期性能表現，能抵抗凍融，長時間後較不會發生握裹破壞，亦具低滲透性。然而其必須於 7-30 °C 間澆置與養護，30 分鐘內完成澆置與粉飾，於現地使用可能具較高的塑性乾縮。此外，因為其彈性模數較混凝土低，因此用於垂直或軸向荷重的構材時須特別留意。高分子混凝土與砂漿(polymer concrete and mortar)係指粒料非由水泥漿而是由高分子材料所膠結。環氧樹脂即為其中之一材料，雖然貴，但具低乾縮、快速養護、高抗拉、高抗彎及高抗壓強度，與多數的表面具高黏結，抗凍融，低滲水，適合用於較薄層修補(小於 20 mm)。然而，高溫造成高分子混凝土與砂漿軟化，須考慮其抗火能力。

修補材料的選擇主要考慮黏結性及抗壓強度，亦包括熱膨脹係數、乾縮、滲透性、彈性模數、化性、導電性、施工難易、成本、勞工技術、設備及顏色與紋理。

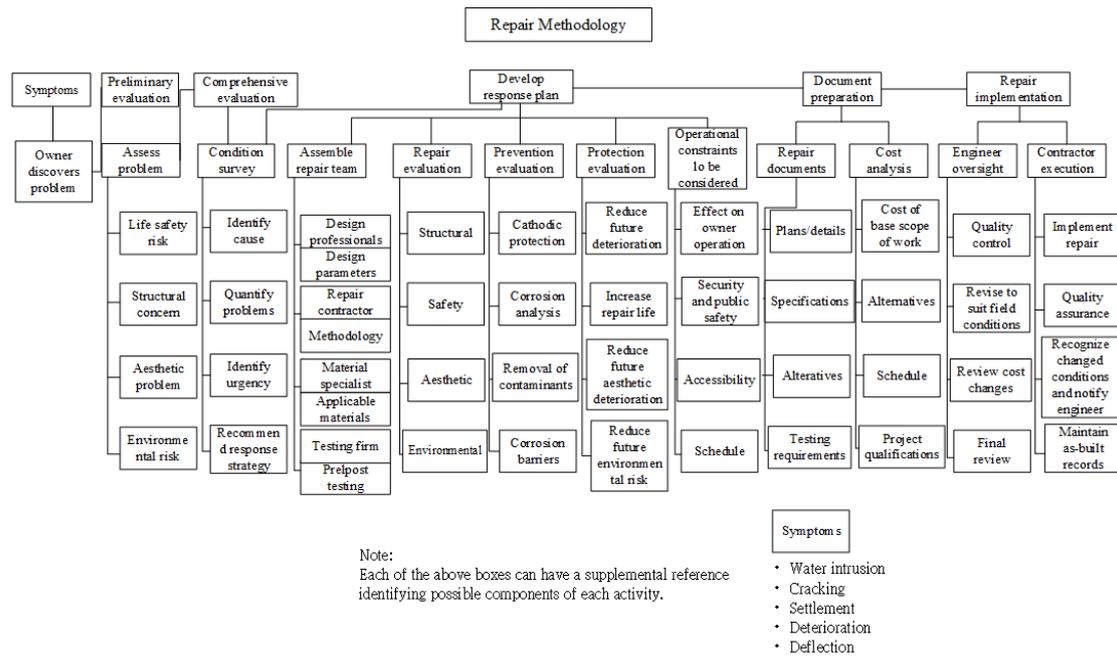


圖 2- 11 修補方法

(資料來源：美國混凝土學會，2014)

表 2-39 混凝土移除法的特色、考量與限制

| Category | Features | Considerations/limitations |
|---|---|--|
| Water-jet cutting (uses perimeter cuts to remove large pieces of concrete) | <ul style="list-style-type: none"> a) High-pressure water jet without abrasives b) Applicable for making cutouts through slabs, decks, and other thin concrete members c) Cuts irregular and curved shapes d) Makes cutouts without overcutting corners e) Cuts flush with intersecting surfaces f) No heat, vibration, or dust is produced g) Handling of debris is efficient because bulk of concrete is removed in large pieces | <ul style="list-style-type: none"> a) Cutouts for removal limited to thin sections b) Cutting is typically slower and more costly than diamond blade sawing c) Moderate levels of noise may be produced d) Controlling flow of waste water may be required e) Additional safety precautions are required due to the high water pressure produced by the system f) Does not cut reinforcing steel |
| Saw cutting (applicable for making cutouts through slabs, decks, and other thin concrete members) | <ul style="list-style-type: none"> a) Makes precision cuts b) No vibration is produced c) Handling of debris is efficient because bulk of concrete is removed in large pieces | <ul style="list-style-type: none"> a) Cutouts for removal limited to thin sections b) Performance is affected by type of diamonds and the diamond-to-metal bond in blade segments (segment selection is based on aggregate hardness) c) The higher the percentage of steel reinforcement in cuts, the slower and more costly the cutting d) The harder the aggregate, the slower and more costly the cutting e) Controlling flow of waste water may be required |
| Diamond wire cutting (applicable for cutting large, thick pieces of concrete) | <ul style="list-style-type: none"> a) The diamond wire chain can be any length b) No dust or vibration is produced c) Large blocks of concrete can be lifted out by a crane or other mechanical methods d) The cutting operation can be efficient in any direction | <ul style="list-style-type: none"> a) The cutting chain must be continuous b) Access to drill holes through the concrete must be available or access around the full section of the structure if the full section is to be cut c) Water must be available to the chain d) Controlling the flow of waste water may be required e) The harder the aggregate or concrete, and the higher the percentage of steel, the slower and more costly the cutting f) Performance is affected by the quality, type, and number of diamonds as well as the diamond-to-metal bond in the chain. |
| Mechanical shearing (applicable for making cutouts through slabs, decks, and other thin concrete members) | <ul style="list-style-type: none"> a) Steel reinforcement can be cut b) Limited noise and vibration are produced c) Handling of debris is efficient because bulk of concrete is removed in large pieces | <ul style="list-style-type: none"> a) Limited to thin sections where an edge is available or a hole can be made to start the cut b) Exposed reinforcing steel is damaged beyond reuse c) Remaining concrete is |

| Category | Features | Considerations/limitations |
|--|--|---|
| | | damaged d) Extremely rugged profile is produced at the cut edge e) Ragged feather edges remain after removal |
| Stitch drilling (applicable for making cutouts through concrete members where access to only one face is feasible) | a) Handling of debris is more efficient because bulk of concrete is removed in large pieces | a) Rotary-percussion drilling is more expedient and economical than diamond core drilling; however, it may result in more damage to the concrete that remains, especially at the point of exit from the concrete b) Depth of cuts is dependent on accuracy of drilling equipment in maintaining overlap between holes with depth and diameter of the boreholes drilled. The deeper the cut, the greater borehole diameter required to maintain overlap between adjacent holes and the greater the cost c) Uncut portions between adjacent boreholes will hamper or prevent the removal d) Cutting reinforced concrete increases the cutting time and increases the cost. Aggregate toughness for percussion drilling and aggregate hardness for diamond coring will affect cutting cost and rate. e) Personnel must wear hearing protection due to high noise levels. |
| Impacting (uses repeated striking of the surface with a mass to fracture and spall the concrete) | a) Hand-held breakers b) Applicable for limited volumes of concrete removal c) Applicable where blow energy must be limited d) Widely available commercially e) Can be used in areas of limited work space f) Produces relatively small and easily handled debris | a) Performance is a function of concrete soundness and aggregate toughness b) Significant loss of productivity occurs when breaking action is other than downward c) Removal boundaries will likely require saw cutting to avoid feathered edges d) Concrete that remains may be damaged (micro cracking) e) Produces high levels of noise, dust, and vibration |
| Boom-mounted breakers (applicable for full-depth removal of slabs, decks, and other thin concrete members and for surface removal from more massive concrete structures) | a) Can be used for vertical and overhead surfaces b) Widely available commercially c) Produces easily handled debris | a) Blow energy delivered to the concrete may have to be limited to protect the structure being repaired and the surrounding structures from damage b) Performance is a function of concrete soundness and aggregate toughness |

| Category | Features | Considerations/limitations |
|----------|----------|--|
| | | c) Damages remaining concrete d) Damages reinforcing steel e) Produces feathered edges f) Produces high level of noise and dust |

(資料來源：美國混凝土學會，2014)

表 2- 40 表面處理的特色、考量與限制

| Category | Features | Considerations/limitations |
|--|--|---|
| Abrasive blasting- Sandblasting (dry/wet) (uses equipment that propels an abra-size medium at high velocity at the concrete to abrade the surface) | <ul style="list-style-type: none"> a) Efficient method for roughening the surface and exposing aggregate b) Cleans reinforcing steel c) Removes surface contamination | <ul style="list-style-type: none"> a) Dry sandblasting procedure produces large volumes of dust b) Wet sandblasting is slow |
| Low-pressure water blasting (with abrasives) | <ul style="list-style-type: none"> a) Selectively removes defective concrete b) Precise control of removal process c) Cleans reinforcing steel while removing concrete d) Produces minimal damage to remaining concrete e) Produces no heat or dust f) Abrasives enable jet to cut steel reinforcement and hard aggregates | <ul style="list-style-type: none"> a) High initial investment b) Additional protection and safety procedures may be required due to water pressure c) Controlling flow of contaminated waste water may be required |
| Abrasive blasting- Shot Blasting | <ul style="list-style-type: none"> a) Efficient method for roughening the surface and exposing aggregate b) Low dust emissions c) Removes surface contaminants d) Controlled depth of concrete removal e) Readily available commercially | <ul style="list-style-type: none"> a) Large units may produce high noise levels b) High voltage power requirements |
| Chemical cleaning | <ul style="list-style-type: none"> a) Application of chemicals to remove dirt and contaminants from surface b) Additional surface preparation may be necessary to remove cleaning chemical residue c) Follow cleaning chemical manufacturer's recommendations d) Follow coating manufacturer's instructions | <ul style="list-style-type: none"> a) Additional surface preparation may be necessary b) May not be effective in removing all contaminants c) May have strong chemical odor d) Protection of adjacent area necessary |
| Acid etching | <ul style="list-style-type: none"> a) Effective in removing cement-based materials b) Increases porosity of concrete surface | <ul style="list-style-type: none"> a) Protective clothing is necessary b) Large amounts of water necessary c) May permanently stain concrete d) Protection of adjacent area necessary e) May contaminate and damage remaining concrete surface |

| Category | Features | Considerations/limitations |
|---|---|---|
| Low-pressure water cleaning (without abrasives) | a) Effectively removes surface contaminants without chemical residue b) Minimal protection of adjacent areas necessary | a) Control of large amounts of water b) Removal of small amounts of concrete may be noticeable |

(資料來源：美國混凝土學會，2014)

肆、 混凝土修補材之選擇指引(ACI 546.3R-06)(美國混凝土學會，2006)

本指引介紹混凝土修補材的性質、試驗法與選擇方式，涵蓋的修補材包括：

1. 混凝土替代材(concrete replacement)：依深度與修補方向而分類。
2. 加鋪材(overlays)：依厚度分類。
3. 裂縫修補材(crack repairs)：依裂縫穩定性、裂縫寬度與其他服務性質條件而分類。
4. 表面填縫(surface sealers)及(traffic-bearing elastomeric coatings)：依水及氯離子滲透性分類。
5. 抗碳化塗層(anti-carbonation coatings)：依二氧化碳擴散性而分類。
6. 加勁鋼筋材塗層(reinforcing steel coatings)、內埋伽凡尼陽極(galvanic anodes)、混凝土黏結材(bonding agents)、孔隙結晶阻斷劑(pore blockers)及表面施加滲透之腐蝕抑制劑等：依改變不同混凝土的性質而分類。

有別於前述指引，此指引詳細說明試驗法並於部份試驗法建議合格數值，須考慮修補材料的性質包括體積穩定性、力學性質、可施工性(constructability characteristics)、美學性質(aesthetic properties)、耐久性質及化學成分等，試驗方法如表 2- 41 所示，適用於未摻料或改質的卜特蘭水泥混凝土(portland-cement replacement concrete)。當使用摻料、高分子、卜作嵐材料等改質卜特蘭水泥混凝土時，或添加其他膠結材或僅砂漿的修補材時，則可能的性質改變如表 2- 42 所列。

選擇材料時須依以下步驟：

1. 背景調查包括結構條件、修補目的、目視或不可目視所及之瑕疵、破壞及未來可能的劣化及破壞等。
2. 探討造成劣化的原因。

3. 評估修補材暴露的環境、條件。
4. 決定修補的目的及使用年限。
5. 選擇修補策略，包括未來維護所需的保護系統。

由於所有的修補材料都有其限制，因此使用者須根據試驗結果選擇最有機會成功的材料。比較差不多的材料時，成本通常為決定的因素，尤其可考慮整個生命週期的成本。

表 2-41 卜特蘭水泥混凝土替代材料的試驗法與試驗值

| Description | Test method | Typical value | Recommended value* | Recommended test |
|---|----------------------------|--|--|--|
| 3.2-Volume stability | | | | |
| Length change - concrete | ASTM C157 | 0.02 percent (expansion) to -0.05 percent (shrinkage) | Less negative than (-0.05 percent) (shrinkage) | No; curing and comparator reading regimens not representative of field conditions of repair mortars and concretes. |
| Drying shrinkage - mortar* | ASTM C596 | 0.05 to 0.15 percent | <0.10 percent | Yes |
| Restrained expansion | ASTM C806 | 0.06 percent | Refer to 3.2 | Yes |
| 3.3.2-Modulus of elasticity | ASTM C469 | 1,000,000 to 5,500,000 psi (6.8 to 38 GPa) | Refer to 3.3.3 | Yes |
| | ASTM C 580 | 300,000 to 3,000,000 psi (2.1 to 21 GPa) | | Yes |
| 3.3.3-Thermal expansion | ASTM C531 | 0.000014/°F (0.000025/°C) | Refer to 3.3.3 | Yes |
| | ASTM D696 | 0.000014/°F (0.000025/°C) | | Yes |
| | USACE CRD-C 39 | 0.000006/°F (0.0000108/°C) | | Yes |
| | ASTM C884 | Qualitative test | | Yes |
| 3.3.4-Creep | ASTM C512 | 0.000000001/psi (0.000000007/KPa) | Refer to 3.3.4 | Yes |
| | ASTM C1181 | — | | Yes |
| 3.3.5-Bond strength | | | | |
| Slant shear bond | ASTM C882 | 1 day-400 to 1000 psi (2.8 to 6.9 MPa) 7 days - 1000 to 1800 psi (6.9 to 12 MPa) 28 days - 2000 to 3000 psi (14 to 21 MPa) | Committee 546 does not have a recommended value for this test. | No; results are highly dependent on compressive strength of substrate and roughness of bonding surface. |
| | ASTM C1042 | | | |
| Direct tensile bond | ASTM C1404 | 1 day - 70 to 150 psi (0.48 to 1.0 MPa) 7 days - 150 to 250 psi (1.0 to 1.7 MPa) 28 days - 250 to 300 psi (1.7 to 2.1 MPa) | Refer to 3.3.5 | Yes |
| | CSA A23.2-6B | | | Yes |
| | ASTM C1583 | | | Yes |
| | ICRI 210.3 | | | Yes |
| Direct shear bond | MDOT | 1 day - 150 to 300 psi (1.0 to 2.1 MPa) 7 days - 300 to 400 psi (2.1 to 2.8 MPa) 28 days - 400 to 600 psi (2.8 to 4.1 MPa) | Committee 546 does not have a recommended value for this test. | No, test apparatus not commonly available and test not commonly performed. |
| 3.3.6-Compressive strength | ASTM C39 | 28 days - 3000 to 10,000 psi (21 to 70 MPa) | Similar to substrate | Yes |
| | ASTM C109 | 28 days - 4000 to 12,000 psi (28 to 85 MPa) | | Yes |
| 3.3.7-Tensile strength* | ASTM C307 | — | — | Yes |
| | ASTM C496 | 400 to 1800 psi (2.8 to 12 MPa) | > 400 psi (2.8 MPa) | Yes |
| | USACE CRD-C 164 | 200 to 600 psi (1.4 to 4.1 MPa) | > 400 psi (2.8 MPa) | Committee 546 does not have a recommendation for this test. |
| 3.3.8-Flexural strength | ASTM C78 | 28 days - 1200 psi (8.3 MPa) | Committee 546 does not have a recommended value for this test. | Yes |
| | ASTM C293 | 28 days - 500 to 1200 psi (3.4 to 8.3 MPa) | | Yes |
| | ASTM C348 | 28 days - 1500 psi (10 MPa) | | Yes |
| | ASTM C580 | 7 days - 2400 psi (17 MPa) | | Yes |
| 3.6.1-Resistance to freezing and thawing* | ASTM C666 | 28 days - 80 to 100 DF at 300 cycles | > 80 DF | Yes |
| Scaling resistance | ASTM C672 | 28 days - 0 to 5 visual rating at 50 to 300 cycles | < 2 | Yes |
| | ASTM C672 modified by ICRI | | Committee 546 does not have a | Yes |

鋼筋混凝土梁構件之鋼筋腐蝕斷面補修工法研擬

| Description | Test method | Typical value | Recommended value* | Recommended test |
|---------------------------------|-----------------------|--|--|--|
| | 320.2R | | recommended value for this test. | |
| 3.6.2-Permeability | | | | |
| 90-day ponding | AASHTO T259 | 0.42 percent at 0.5 in. (13 mm) 0.15 percent at 1.0 in. (25 mm) | Committee 546 does not have a recommended value for this test. | Yes |
| | ASTM C1543 | | | NO |
| Rapid chloride permeability | AASHTO T277 | 28 days - 4000 to 5000 C | 4000 C ⁺ | Yes |
| | ASTM C1202 | | | Yes |
| Absorption after immersion | ASTM C642 | 4 to 6 percent | <6 percent | Yes |
| Volume of permeable pore space | ASTM C642 | 5 to 12 percent | < 12 percent | Committee 546 does not have a recommendation for this test. |
| 3.6.3-Alkali-aggregate reaction | ASTM C227 | Refer to 3.6.3 | <0.1 percent | Yes |
| | ASTM C1260 | Refer to 3.6.3 | <0.1 percent | Yes |
| | ASTM C1293 | Refer to 3.6.3 | <0.1 percent | Yes |
| | ASTM C289 | Refer to 3.6.3 | Refer to 3.6.3 | No; may not reliably predict aggregate reactivity in concrete. |
| | ASTM C295 | Refer 3.6.3 | Refer to 3.6.3 | Yes |
| 3.6.5-Abrasion resistance | ASTM C779 Procedure A | 0.004 to 0.1 in. (0.1 to 2.5 mm) at 30 min. 0.008 to 0.2 in. (0.2 to 5.1 mm) at 60 min. | Refer to 3.6.5 | Refer to 3.6.5 |
| 3.6.6-Sulfate resistance | ASTM C1012 | 0 to 0.2 percent | <0.1 percent | Yes |

(資料來源：美國混凝土學會，2014)

表 2-42 改質卜特蘭水泥混凝土或砂漿的性質改變

| Modification to basic portland-cement concrete | Effects on properties |
|---|---|
| Various hydraulic cements (slag cement is discussed separately below) | Reduce heat of hydration; reduce set time; increase early strength; reduced drying shrinkage; expansive or shrinkage compensating; improve sulfate resistance. |
| Chemical admixtures | |
| Air-entraining | Improved workability; improved durability in freezing-and-thawing, deicing, sulfate, and alkali-reactive environments; reduced compressive strength |
| Accelerating | Accelerated set and early-strength development; increased creep and drying shrinkage. |
| Water-reducing, mid-range water-reducing | Reduce water content at least 5 percent (5 to 10 percent for mid-range); reduced permeability; increased strength. |
| Water-reducing and set-retarding | Reduce water content at least 5 percent and delay set time; reduced permeability, increased strength. |
| High-range water-reducing | Reduce water content by at least 12 to 40 percent, increase slump, decrease placing time, and increase flowability; reduced permeability; increased strength. |
| Flowing concrete | Slump greater than 7-1/2 in. (190 mm) while maintaining cohesive nature (ASTM C1017); reduced permeability. |
| Self-consolidating concrete | Reduced construction time and labor; improved formed surface finish; increased strength, shrinkage, and creep; reduced permeability and improved durability |
| Very high early strength | Reduced set/working time; Strategic Highway Research Program (SHRP) SHRP-C-363 defines very high-early strength material as 2000 psi (13.8 MPa) minimum compressive strength 6 hours after mixing; durability factor of 80 percent after 300 freezing-and-thawing cycles in accordance with ASTM C666, Procedure A. |
| Extended set control | Used to stop or severely retard cement hydration process. |
| Shrinkage-reducing | Increased set time; reduce drying shrinkage by 30 to 50 percent; reduced strength, thermal cracking, and slab curling; increased susceptibility to freezing-and-thawing deterioration. |
| Corrosion-inhibiting | Significantly reduce rate of steel corrosion and extend time of onset of corrosion; reduced or increased compressive strength; may distort results of ASTM C1202 and AASHTO T277. |
| Lithium | May affect set/working time; minimize deleterious expansion from alkali-silica reaction. |
| Permeability-reducing: For hydrostatic conditions. | Reduced permeability, increased resistance to water penetration under pressure; Can affect finishing properties, consistency, compressive strength, freezing-and-thawing resistance, and shrinkage. |
| Bonding | Increased bond, tensile, and flexural strength; decreased compressive strength; latex may cause excessive entrained air; some polymers may decompose and soft in the presence of moisture. |
| Rheology- and viscosity-modi-fying; <i>Anti-washout</i> | Increased cohesiveness; reduced segregation and bleeding; used as pumping aid, for concrete to be pumped underwater; reduced loss of <i>cementitious material due to washout</i> . |
| <i>Supplementary cementitious materials</i> | |
| Fly ash | Reduced water demand; reduction in portland cement; increased air-entraining admixture demand; improved workability; slower rate of reaction; reduced permeability and alkali-aggregate reactivity; improved sulfate resistance; discoloration of concrete. |
| Silica fume | Increased water demand; increased air-entraining admixture demand; decreased workability; increased cohesiveness, reduced bleeding; |

| Modification to basic portland-cement concrete | Effects on properties |
|---|--|
| | increased plastic shrinkage cracking; darker color; increased compressive and bond strength; increased electrical resistivity; reduced permeability; increased resistance to alkali-silica reaction; sulfate and chemical attack; increased abrasion resistance. |
| Natural pozzolans | Improved workability and finishing; reduction in portland cement; increased cohesiveness; increased set time; reduced permeability, increased strength at later ages; improved resistance to alkali-silica reaction in minimum dosages; too little natural pozzolan may actually increase detrimental effects of alkali-silica reaction; improved resistance to sulfate attack |
| Slag cement | Improved workability; increased set time; reduced early rate of heat generation; reduced strength at early ages; increased strength at later ages; lighter in color, reduced permeability and potential expansion due to alkali-silica reaction; improved sulfate resistance. |
| Polymer modifiers | Excessive amounts of entrained air unless antifoam agent is used; improved workability, increased set time, increased tendency for plastic shrinkage cracking; lower compressive strength; increased bond and tensile strength; reduced permeability, improved resistance to freezing and thawing; may improve impact strength and abrasion resistance. |
| <i>Fiber reinforcement</i> | |
| Steel fibers | Reduced slump and workability; tendency for fibers to ball; increased number of smaller-width shrinkage cracks; improved post-cracking ductility; increased compressive, direct tension, shear and torsion, flexural, and flexural fatigue strength; improved toughness and resistance to flexural impact loading. |
| Synthetic fibers | Reduced workability; reduced average width of shrinkage cracks; improved post-cracking ductility; improved resistance to impact, fatigue strength, and flexural toughness. |
| Polymer concrete | Increased safety concerns during construction; typically less contractor familiarity with materials and installation procedures, reduced cum time; reduced weight; increased tensile, flexural, compressive, and bond strengths; reduced modulus of elasticity, increased coefficient of thermal expansion; reduced permeability; improved chemical resistance. |
| Portland-cement mortar | Increased drying shrinkage; may be modified by substituting various hydraulic cements or polymers; or including chemical mineral admixtures, polymer modifiers, slag cement and fiber reinforcement, or both; effects on properties are similar to these discussed to concrete above. |

(資料來源：美國混凝土學會，2014)

第三章 研究方法與相關試驗規劃

第一節 研究方法與流程

為探討國內常用斷面修復材之修復性能，以提出適合斷面修復之使用材料與施工程序，共規劃三個階段試驗，分別為：第一階段試驗，針對不同類型的修復材料之力學性能進行相關試驗，修復材料之類型參考既有混凝土結構物維修及補強技術手冊之建議，分別使用水泥砂漿、聚合物水泥砂漿及環氧樹脂砂漿等常見之斷面修復材，試驗項目包括撓曲強度、抗壓強度、黏結強度(標準環境下和冷熱反覆循環環境下)、透水量、吸水量和長度變化，並根據各項試驗結果來提出國內具本土性之斷面修復材之力學性能評定標準。

第二階段試驗，主要探討新舊材料介面性能，包含表面處理方式、粗糙程度評定，及介面黏結劑之使用，並針對有可能影響到修復材料黏結力之原因提出介面處理之建議。

第三階段試驗是進行鋼筋腐蝕梁構件之修復，以進一步探討修復材料之修復性能。將經修復後的鋼筋腐蝕梁構件藉由四點抗彎試驗，探討修復材料於受拉側之裂縫發展、剝落或剝離狀態，以量化其修復性能。研究步驟可參考圖 3-1。

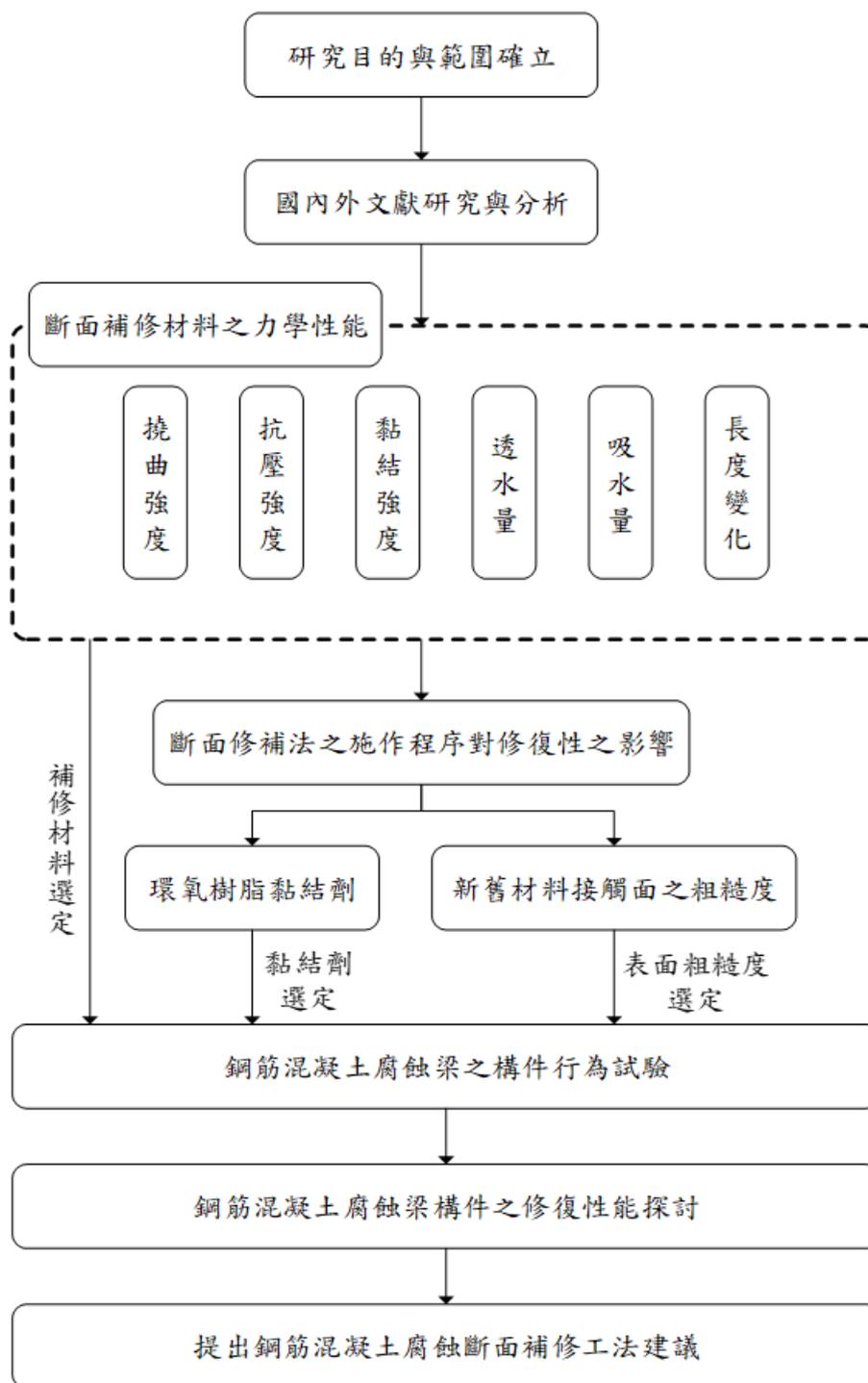


圖 3-1 研究步驟

(資料來源：本研究提供)

第二節 斷面修復材料之力學性能試驗建置規劃

斷面修復材料種類繁多，僅選擇材料性質優於舊有混凝土的修復材料並非最恰當之作法，而修復材料與舊有混凝土之間的相容性以及使用環境等因素皆為重要關鍵，大致分為以下 6 點：

1. 力學性能

在選擇修復材料時，雖然水泥用量偏高之產品能有效地提高抗壓強度，但同時也容易發生乾縮現象或裂縫，因此選擇與基底材料抗壓強度相似之修復材料較為恰當。除了抗壓強度外，還需考慮材料強度之變化，早期抗壓強度發展較快之材料有可能使其整體的使用壽命與耐久性能降低。

2. 黏結強度

修復材料與舊有基底材料間必須要有良好的黏結能力，如黏結強度不足，修復材料則不能發揮應有之效果，導致構件再度破壞。其次，基底材料之表面處理也是重要一環，須將舊有基底材料上之已破壞或鬆動之混凝土和表面灰塵等雜質徹底清除，才能避免對材料間的黏結造成阻礙。修復材料與基底材料之乾燥收縮和熱膨脹率差異也不可過大，否則材料界面處將產生過大的應力，使得修復材料脫落或擠壓基底材料產生二度破壞。

3. 彈性模數

彈性模數係度量材料受力後的變形指標。當修復材料和基底材料之黏結面與外力作用方向平行時，彈性模數較高之材料容易產生應力集中。如修復材料之彈性模數高於基底材料許多，將導致修復材料承受的應力大於基底材料，容易使界面處產生裂縫。

4. 熱膨脹

修復材料與基底材料之熱膨脹係數差異太大時，在溫度出現劇烈變化下，材料界面處將產生剪應力，一旦此應力大於黏結力，就會發生破壞。所以在環境溫度變化較大之地區，需選擇考量修復材料與基底材料間之熱膨脹相容性。

5. 乾燥收縮

大部分在需要進行修復之混凝土幾乎已停止乾燥收縮，因此在選擇修復材料時，優先選擇乾燥收縮較小之材料或無收縮之修補材，以避免造成修復材料在邊緣處因張應力發生龜裂。

6. 透水性

低透水性之修復材料有利於耐久性能之發展，但當混凝土表面水分蒸發時，內部的水分会因毛細作用而往表面移動，造成與修復材料之界面處有水氣存在，這會使得黏結強度降低或在溫度變化時產生裂縫。因此，在考量修復材料時，必須選擇透水性低且透氣性高之材料。

目前臺灣尚無相關規範可依循，如要配置適用於斷面修復法之修復砂漿，包含水泥系、環氧樹脂類及聚合物類等，將無法保證其修復砂漿之品質。日本建築學會對於斷面修復工法使用之聚合物水泥砂漿品質和環氧樹脂系斷面修復材品質基準，如表 3- 1 和表 3- 2 所示，根據表 3- 1 可發現，與力學性質相關之項目有撓曲強度、抗壓強度以及黏結強度。本研究以上述各項之考量，以水泥修復砂漿、環氧樹脂修復砂漿、聚合物修復砂漿等斷面修復材料進行一連串的力學性能相關試驗，試驗項目包含撓曲強度、抗壓強度、黏結強度(標準環境下和冷熱反覆循環環境下)、透水量、吸水量和長度變化試驗，並根據各項試驗結果提出國內具本土性之修復材力學性能評定標準。

表 3- 1 聚合物水泥砂漿之品質基準

| 項目 | | 基準值 |
|--|-------|--------------|
| 撓曲強度(N/ mm ²){kgf/ cm ² } | | 6.0{61} 以上 |
| 抗壓強度(N/ mm ²){kgf/ cm ² } | | 20.4{204} 以上 |
| 黏結強度 (N/ mm ²){kgf/ cm ² } | 標準時 | 1.0{10} 以上 |
| | 冷熱反覆後 | 1.0{10} 以上 |
| 透水量(g) | | 20.0 以下 |
| 吸水量(ml/ hr) | | 0.5 以下 |
| 長度變化(%) | | 0.15 以下 |

(資料來源：日本建築學會，1997)

表 3-2 環氧樹脂系斷面修復材之品質基準(AIJ)

| 項目 | 基準值 | | |
|-------------------------------|---------|--------|--------|
| | 一般用 | 低溫用 | |
| 撓曲強度(N/ mm ²) | 10.0 以上 | | |
| 抗壓強度(N/ mm ²) | 35.0 以上 | | |
| 黏結強度 (N/ mm ²) | 標準時 | 1.0 以上 | - |
| | 低溫時 | - | 1.0 以上 |
| | 耐久性 | 1.0 以上 | |
| 硬化收縮率(%) | 3 以下 | | |

(資料來源：日本建築學會，2013)

壹、斷面修復材料之類別

斷面修復材料依成分可概分為水泥系修復砂漿、環氧樹脂修復砂漿及聚合物修復砂漿(中國土木水利工程學會，2005)。

1. 水泥系修復砂漿：

其優點包含與混凝土性質相近、使用範圍廣泛、施工容易、較經濟，可根據需求添加特殊摻料或藥劑等。缺點為凝結時間長、強度發展慢、黏結強度低、抗裂性差、脆性大和無法改善舊有混凝土抗滲透性等。

2. 環氧樹脂修復砂漿：

施工方法與水泥系修復砂漿類似，但環氧樹脂修復砂漿支應固時間短，易於未施工完畢前就硬固。優點為適用於薄邊緣區域之修復、緊急時可快速修復、比水泥系修復砂漿擁有更高的不透水性。

3. 聚合物修復砂漿：

聚合物可改善水泥系修復砂漿之撓曲和抗拉強度、滲透性、黏結能力、抵抗化學侵蝕能力及抗動容能力。但因聚合物修復砂漿熱膨脹係數較大、成本高且含化學毒性，使用時必須了解其材料特性和使用方法，以避免修復失敗。

貳、斷面修復材料之試驗方法

本階段試驗將以日本建築學會對於斷面修復工法使用之聚合物水泥砂漿品質基準表為主要參考依據並進行相關試驗，包含撓曲強度、抗壓強度、黏結強度(標準環境下和冷熱反覆循環環境下)、透水量、吸水量和長度變化，試驗方法係根據 JIS A 1171 ポリマーセメントモルタルの試験方法(Test methods for polymer-modified mortar)進行。

1. 材料配比

本研究採用四種不同類型之斷面修復材料，分別為水泥砂漿修復材料、環氧樹脂修復砂漿、聚合物水泥修復砂漿和無收縮水泥砂漿。環氧樹脂修復砂漿和無收縮水泥砂漿皆採用市售之產品，本研究採用市面上較易取得之產品，環氧樹脂砂漿是將主劑(A 劑)和硬化劑(B 劑)混合使用，混合之比例為 2:1，並且使用之砂量為劑量的 5 倍；無收縮水泥砂漿之配比，細粒料的添加量因為商業機密，故無法提供，依廠商之建議，砂與水之比例為 25:4。本研究使用之砂皆使用通過 16 號篩之細骨材，水與砂比之比例控制為 1:3、W/C 比固定為 0.5。聚合物水泥砂漿修復材使用之聚合物為粉末狀丁苯橡膠(styrene-butadiene rubber；SBR)，其聚合物材料與水之比例(S/W)為 7%，且水與砂之比例和 W/C 比同水泥砂漿修復材(高玉荃，2019)。

此外，飛灰擁有的火山灰性能，可以在不犧牲建築物強度下取得良好的耐久性和經濟性，有效利用可維持地球生態平衡。根據過去研究(高玉荃，2019)，於修復砂漿中添加飛灰取代部分水泥，可有效降低成本提高耐久性。故本研究參考過去之研究，特將飛灰以取代部分水泥之方式摻入斷面修復材中，探討飛灰對修復材料之修復性的影響。

綜合上述，試體代號如表 3-3 所示，F00、F25 分別代表未添加及添加 25% 飛灰，SP00、SP07 分別代表未添加及添加 7% 聚合物，水泥砂漿修復材料和聚合物水泥砂漿修復材料之配比如表 3-4 所示。另外，根據 ASTM C1583，黏結強度之試驗方法係將混凝土/砂漿修復或覆蓋材料覆蓋在已處理好的基礎混凝土表面上，再利用鐵片透過直拉方式施加拉力，直到修復或覆蓋材料與基礎混凝土分離破壞以獲得其黏結強度，故基礎混凝土之配比參照表 3-5 所示。

表 3-3 各材料之代號

| 修復材料 | 代號 |
|----------------|---------------|
| 水泥砂漿(水灰比 0.50) | F00SP00 |
| 水泥砂漿(含飛灰) | F25SP00 |
| 聚合物水泥砂漿 | F00SP07 |
| 聚合物水泥砂漿(含飛灰) | F25SP07 |
| 無收縮水泥砂漿 | NON-SHRINKAGE |
| 環氧樹脂砂漿 | EPOXY |
| 水泥砂漿(水灰比 0.45) | F00SP00-45 |
| 水泥砂漿(水灰比 0.6) | F00SP00-60 |

(資料來源：本研究提供)

表 3-4 修復材料之配比

| 類型 | 名稱 | W/B (%) | 飛灰 取 取 代 率 (%) | S/W (%) | P/C (%) | Unit amount(kg/m ³) | | | | |
|----------------------|---------|---------|-------------------------------|---------|---------|---------------------------------|---------|--------|--------|-------|
| | | | | | | C | S | W | FA | SBR |
| 水泥砂漿 | F00SP00 | 50 | 0 | 0 | 0 | 495.67 | 1487.01 | 247.84 | 0.00 | 0.00 |
| 水泥砂漿 (含飛灰) | F25SP00 | | 25 | | 0 | 365.41 | 1461.63 | 243.61 | 121.80 | 0.00 |
| 聚合物 水泥砂漿 | F00SP07 | 50 | 0 | 7 | 3.50 | 484.71 | 1453.13 | 242.36 | 0.00 | 16.96 |
| 聚合物 水泥砂漿 (含飛灰) | F25SP07 | | 25 | | 4.67 | 357.45 | 1429.80 | 238.30 | 119.15 | 16.70 |

(資料來源：本研究提供)

表 3-5 基礎混凝土之配比

| W/ C (%) | s/ a (%) | G _{max} (mm) | Unit amount(kg/ m ³) | | | | |
|----------|----------|-----------------------|----------------------------------|-----|-----|-----|------|
| | | | C | W | S | G | WRA* |
| 60 | 48 | 15 | 300 | 180 | 833 | 903 | 0.5 |

WRA*：減水劑

(資料來源：本研究提供)

2. 試驗方法

配比之混合方法利用機器混合時，運轉模式以低速進行(機器自轉轉速：每分鐘 140 轉，公轉轉速：每分鐘 62 轉)。首先，將水泥、細骨材、聚合物粉末等摻料放入混合機中混合均勻，再加入水混合 3 分鐘。暫停 3 分鐘，同時用刮勺刮掉槳上和鍋邊的混料。3 分鐘暫停結束後，再次啟動攪拌機攪拌 2 分鐘，混合結束後，用勺子取出。

環氧樹脂砂漿則是依照廠商給予之施工方法進行，本研究先將主劑 A 劑與硬化劑 B 劑混和均勻後，再加入所需要的砂進行拌合，待 AB 劑與砂混和均勻後，用勺子取出。

(1) 撓曲強度

撓曲強度試驗與 JIS A 1171 及 ASTM C348 試驗方法原理相同，試體尺寸為 40 mm × 40 mm × 160 mm，濕治養護至指定齡期後再利用萬能試驗機和三點抗彎加壓板進行撓曲強度試驗(如圖 3- 2)，每一指定齡期至少取 3 個數據之平均值至小數點以下 1 位。其三點抗彎公式為：

$$S_f = \frac{3PL}{(2bh^2)} = 0.00234P \quad (1)$$

其中， S_f ：撓曲強度(MPa)、 P ：最大破壞荷重(N)、 L ：試體支點間距(mm)、 b ：試體寬度(mm)、 h ：試體高度(mm)。



圖 3-2 撓曲強度試驗儀器

(資料來源：本研究提供)

(2) 抗壓強度

JIS A 1171 之試體尺寸約為 40 mm × 40 mm x 160 mm 折半(取撓曲強度試驗後，劈裂之試體進行抗壓試驗)，濕治養護至指定齡期後利用萬能試驗機和特殊壓頭進行抗壓強度試驗(如圖 3- 3)，每一指定齡期至少取 6 個數據之平均值至小數點以下 1 位。其抗壓強度公式為：

$$\sigma_c = \frac{P}{1600} \quad (2)$$

其中， σ_c ：抗壓強度(MPa)、 P ：最大破壞荷重(N)。



圖 3-3 抗壓強度試驗儀器

(資料來源：本研究提供)

(3) 黏結強度

黏結強度試驗 JIS A 1171 與 ASTM C1583 試驗方法原理相同，將混凝土修補或覆蓋材料覆蓋在已處理好之基礎混凝土表面，試體濕治養護至指定齡期後，先將測試區域切至基底混凝土至少 10 mm，再利用黏結劑將鐵片黏合於測試區域上，並去除測試區域周圍多餘的黏結劑，待 24 小時黏結劑乾固後，以 1500 ~ 2000 N/ min 之加載速度沿垂直方向直拉，直到試體破壞修復或覆蓋材料與基礎混凝土分離破壞，使用之儀器如圖 3-4 所示，本研究所有試體皆採用環氧樹脂膠作為拉片之黏結劑，每一指定齡期至少取 5 個數據之平均值至小數點以下 1

位。其黏結強度公式為：

$$\sigma_a = \frac{T}{1600} \quad (3)$$

其中， σ_a ：黏結強度(MPa)、 T ：最大破壞荷重(N)。

關於冷熱反覆循環環境，依 JIS A 1171 黏結強度試驗方法，冷熱反覆循環的環境條件為：試體於 20°C 水中靜置 18 小時後，放入恆溫恆濕箱中-20°C 的環境下冷卻 3 小時，再將溫度調至 50 °C 加熱 3 小時，總計 24 小時，並做 10 天 10 個循環。為符合臺灣氣候條件，並於指定齡期進行材料力學性能試驗，故將試驗方式調整為：將試體至於恆溫恆濕箱時，環境濕度保持為 70%，溫度設定以 1 天為依循環，前 12 小時環境溫度為 10 °C，後 12 小時溫度升高至 50 °C，分別在第 7 個循環和第 28 個循環時取出試體進行後續工序及試驗。



圖 3-4 黏結強度試驗儀器

(資料來源：本研究提供)

(4) 透水量

本研究參考 JIS A 1171 之方法進行試驗。試體尺寸為 $\phi 150$ mm \times 40 mm，經濕治養護至指定齡期後，先將試體至於 80°C 之環境乾燥 48 小時後，將試體圓形面上的殘留物或污漬清除後秤重，再對試體施加 100 kPa 之水壓 1 小時，取出秤重。本研究每一指定齡期取 2 個數據之平均值至小數點以下 1 位。其透水量公式為：

$$W_p = w_1 - w_0 \quad (4)$$

其中， W_p ：透水量(g)、 w_0 ：乾燥後重量(g)、 w_1 ：透水後重量(g)。

(5) 吸水率

本研究參考 JIS A 1171 之方法進行試驗。試體尺寸為 40 mm × 40 mm × 160 mm，經濕治養護至指定齡期後，將試體在 80 °C 之環境下乾燥 48 小時，冷卻後秤重，再將試體浸入 20 °C 水中 48 小時後取出，用乾布擦拭試體表面後秤重。本研究每一指定齡期取 2 個數據之平均值至小數點以下 1 位。其吸水率公式為：

$$W_a = \frac{w_1 - w_0}{w_0} \times 100 \quad (5)$$

其中， W_a ：吸水率(%)、 w_0 ：乾燥後重量(g)、 w_1 ：吸水後重量(g)。

根據日本聚合物水泥砂漿品質基準，吸水量之單位為 ml/hr，欲將吸水率轉換為吸水量，故將上式轉換為(6)式，經計算後得出吸水量：

$$W_{a'} = \frac{w_1 - w_0}{w_0} \div 48 \quad (6)$$

其中， $W_{a'}$ ：吸水量(ml/hr)、 w_0 ：乾燥後重量(ml)、 w_1 ：吸水後重量(ml)。

(6) 長度變化

長度變化試驗與 JIS A 1171 與 ASTM C596 試驗方法原理相同，目的係為了瞭解砂漿之體積穩定性，試體尺寸為 25 mm × 25 mm × 285 mm。試體經養護 72 小時後量測值為初始長度，之後恆溫恆濕箱中，恆溫恆濕箱環境設定為濕度 70%、溫度 25 °C，於 7 天、14 天、21 天及 28 天量測其長度變化值，使用之儀器如圖 3-5 所示。經由換算取得砂漿之乾燥收縮值。取，4 個數據之平均值至小數點以下 3 位；長度變化計算公式為：

$$\text{Drying Shrinkage}(\%) = \frac{\text{CRD} - \text{Initial CRD}}{285} \times 100 \quad (7)$$

其中，CRD：試體長度(mm)-標稱長度(mm)、Initial CRD：初始長度(mm)。



圖 3-5 長度變化試驗儀器
(資料來源：本研究提供)

第三節 新舊材料介面問題探討之建置規劃

據鋼筋混凝土結構修復補強設計參考手冊中提及之斷面修復法，其步驟係針對混凝土表面出現鬆動或嚴重開裂之部分時，需先敲除鬆動之混凝土至堅實面，再以高壓噴槍進行清除修飾作業，清除表面粉塵及鬆動碎屑，待乾燥後塗抹適當之黏著劑於新舊混凝土介面上，並於黏著劑尚未硬化前以環氧樹脂砂漿、水泥系砂漿等修復材進行填補，最後加以整平及養護(如圖 3- 6)。但是，根據現地調查結果及建物使用者反應，修復區域之再劣化現象非常顯著，且大多未滿一年即發生新舊材料分離或修復材料剝離，進而造成鋼筋裸露、鏽蝕等現象。此情形可能係由於修復材料之黏結強度不足，或界面處理不確實。因此，量化黏著劑對於新舊材料界面黏結強度之貢獻，對混凝土斷面修復材之修復效果，修復後是否能使構件持續保有安全性、使用性和回復力學性能，皆是非常重要的課題。此外，建研所 108 年度執行之鋼筋混凝土建築物之耐久性能診斷相關研究中，有提出可依診斷結果建議合適之修復工法，但其斷面修復工法之施作程序與有效性尚未經試驗驗證。因此，本階段將針對常見之斷面修復工法進行試驗探討，對於新舊材料接觸面之表面處理方式、粗糙程度之評定，及環氧樹脂黏結劑對增加黏結力之效益、修復材料類型對黏結劑之影響等，會影響到修復材料之黏結度之因素，一併探討並提出介面處理之建議。

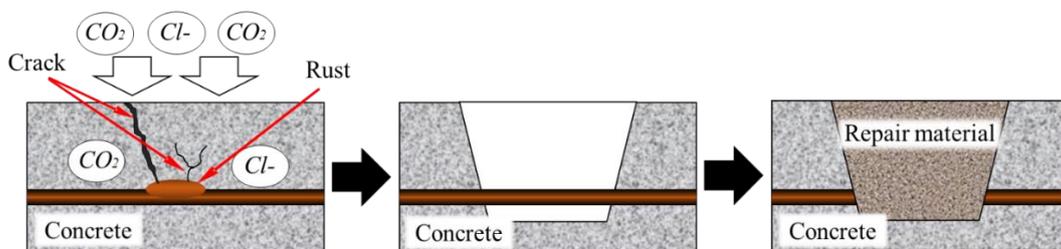


圖 3- 6 斷面修復法

(資料來源：內政部建築研究所，2019)

壹、新舊材料接觸面之粗糙度探討

針對新舊材料接觸面之粗糙度，「混凝土構造物的補修對策施工手冊(案)(日本建築學會，1997)」中有提到不同粗糙度之表面對黏結強度之影響。利用 150 號或 180 號砂紙處理基礎混凝土之表面，將表面粗糙程度分為平滑、砂目(細骨材裸露)、中間(介於細骨材裸露和粗骨材裸露之間)、洗出(粗骨材裸露)。本階段試

驗規劃探討砂目及中間的表面粗糙度，為確實地量化粗糙度對於黏結強度之影響，擬用黏結強度試驗來獲得相關數據探討其相關性。

貳、黏結劑對修復性之影響

作為修復材料時，水泥系之材料，如水泥砂漿、無收縮水泥砂漿，依照「鋼筋混凝土結構修復補強設計參考手冊(中華民國結構工程技師公會全國聯合會，2008)」中之建議，黏結劑使用水泥與砂為 1：1 之水泥砂漿；環氧樹脂砂漿則以環氧樹脂作為黏結劑；另外，聚合物水泥砂漿，在手冊中歸類為樹脂砂漿材料，但因其也為水泥與砂依比例拌合而成之修復材料，故本研究以水泥系材料之建議，採用水泥與砂為 1：1 之水泥砂漿作為黏結劑。由實驗結果，進一部探討黏結劑對修復性之效益。

參、環境溫溼度對修復材料黏結強度之影響

除了新舊材料界面之表面粗糙度和黏結劑之效益外除此之外，環境溫度及濕度也可能影響修復材料之黏結強度。在高溫環境下施工，可能導致修復材料在固化過程中因乾燥收縮變形使得修復材料附著不完全，致使修復材料提早脫離剝落。本研究在基底混凝土試體中央填入一梯形修復材料(圖 3- 7、圖 3- 8)，並將試體放置於一般室溫及恆溫恆濕箱內。其環境設置是參考過去參考文獻「コンクリート断面修復部の変形・強度特性(加藤誠司，2018)」(如圖 3-9)以及根據臺灣實際環境狀況，將恆溫恆濕箱之循環條件訂為以 1 天為 1 循環，前 12 小時環境溫度為 10℃，後 12 小時溫度升高至 50℃，濕度保持為 70%。內政部建築研究所材料試驗中心所借用之恆溫恆濕箱設備的升溫性能，從 10℃ 升溫至 50℃ 約需 10 分鐘，維持濕度 70% 之穩定約需 15 分鐘，降溫性能則從 50℃ 降溫至 10℃ 約需 20 分鐘，維持濕度 70% 之穩定約需 25 分鐘(如圖 3- 10)。試體分別在恆溫恆濕箱中經 28 個循環後取出，進行直拉式拉拔試驗(如圖 3- 11)，以探討環境溫度對斷面修復材料之修復性之影響。

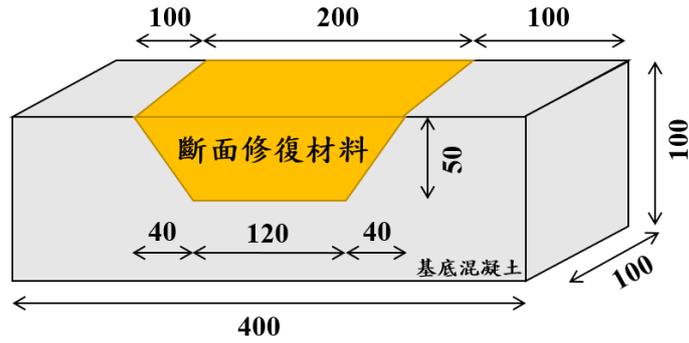


圖 3-7 試體示意圖

(資料來源：本研究提供)



圖 3-8 本研究設計之試驗模具

(資料來源：本研究提供)

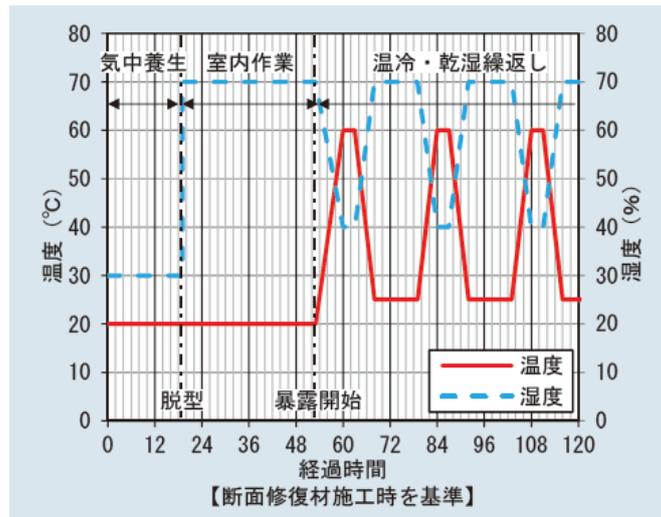


圖 3-9 恆溫恆濕箱之設置

(資料來源：加藤誠司，2018)

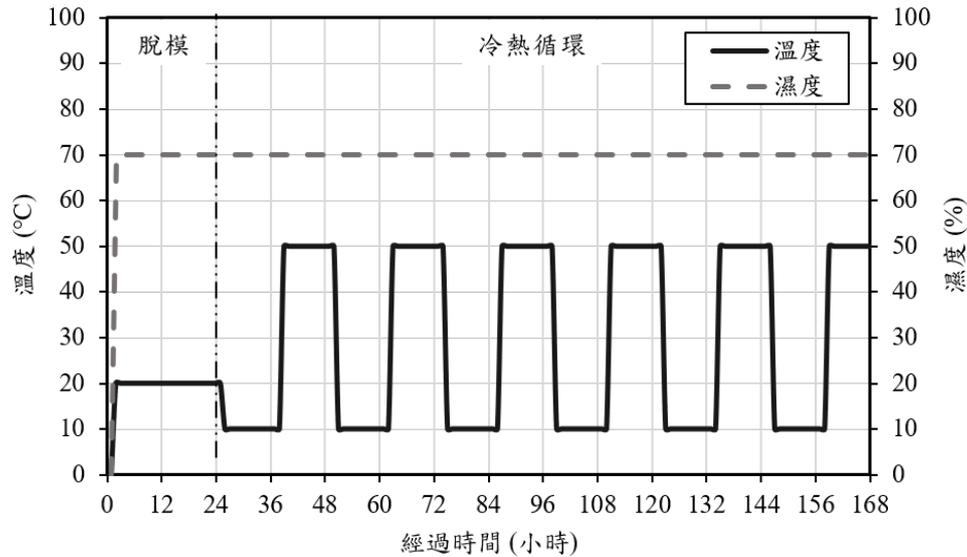


圖 3-10 本研究恆溫恆濕箱之設置(7 天 7 個循環)

(資料來源：本研究提供)

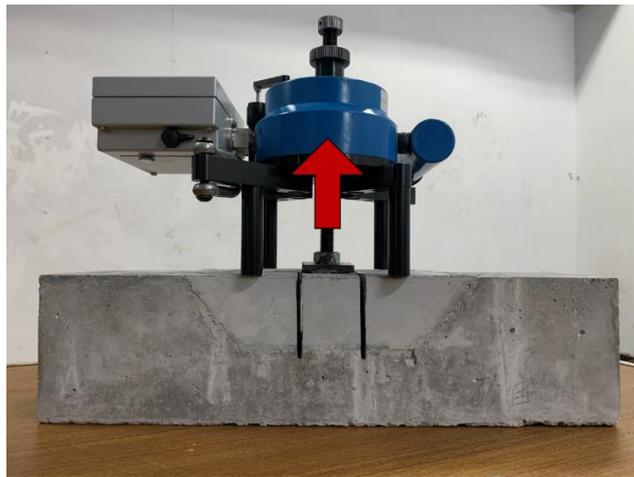


圖 3-11 直拉式拉拔試驗

(資料來源：本研究提供)

肆、修復材料黏結強度之試驗方法

本階段試驗以日本建築學會對於斷面修復工法使用之聚合物水泥砂漿品質基準表之黏結強度(標準環境下和冷熱反覆循環環境下)，其試驗方法係根據 JIS A 1171 ポリマーセメントモルタルの試験方法(Test methods for polymer-modified mortar)進行。

1. 斷面修復材料配比

本階段採用四種斷面修復材料，分別為水泥砂漿、聚合物水泥砂漿、

環氧樹脂砂漿和無收縮水泥砂漿。環氧樹脂砂漿和無收縮水泥皆採用市售之產品，本研究採用市面上較易取得之環氧樹脂砂漿，環氧樹脂砂漿是將主劑(A 劑)和硬化劑(B 劑)混合使用，混合之比例為 2：1，並且使用之砂量為劑量的 5 倍；無收縮水泥砂漿之配比，細粒料的添加量因為商業機密，故無法提供，依廠商之建議，砂與水之比例為 25：4。本研究使用之砂皆使用通過 16 號篩之細骨材，水與砂比之比例控制為 1：3、W/ C 比固定為 0.5。聚合物水泥砂漿修復材使用之聚合物為粉末狀丁苯橡膠(styrene-butadiene rubber；SBR)，其聚合物材料與水之比例(S/W)為 7%，且水與砂之比例和 W/ C 比同水泥砂漿修復材(高玉荃，2019)，綜合上述，水泥砂漿和聚合物水泥砂漿之配比如表 3-4 所示。

另外，根據 ASTM C1583，黏結強度之試驗方法係將混凝土/砂漿修復或覆蓋材料覆蓋在已處理好的基底混凝土表面上，再利用鐵片透過直拉方式施加拉力，直到修復或覆蓋材料與基礎混凝土分離破壞以獲得其黏結強度，故基底混凝土之配比參照表 3-5 所示。

2. 黏結材材料配比

依照「鋼筋混凝土結構修復補強設計參考手冊(中華民國結構工程技師公會全國聯合會，2008)」中之建議，水泥系修復材料需使用水泥與砂為 1：1 之黏結劑，環氧樹脂砂漿則需使用環氧樹脂作為黏結劑；本研究以水泥系材料之建議，水泥砂漿與聚合物水泥砂漿之黏結劑，砂使用通過 16 號篩之細骨材，水與砂比之比例控制為 1：1，並考慮黏結層的附著性 W/ C 比固定為 35%，環氧樹脂砂漿是將主劑(A 劑)和硬化劑(B 劑)混合使用，混合之比例為 2：1。

表 3-6 水泥系材料黏結劑之配比

| 類型 | W/ C (%) | Unit amount(kg/ m ³) | | | | |
|------|-------------|----------------------------------|--------|--------|------|------|
| | | C | W | S | FA | SBR |
| 水泥砂漿 | 35 | 926.95 | 324.43 | 926.95 | 0.00 | 0.00 |

(資料來源：本研究提供)

3. 試驗方法

基底混凝土製作完成後，因本階段探討表面粗糙度為砂目(細骨材裸露)及中間(介於細骨材裸露和粗骨材裸露之間)之影響，故在基礎混凝土灌製完成並凝結後，利用鋼刷將表面處理至砂目及中間的狀態，如圖 3- 12 及圖 3- 13 所示，並將基底混凝土預留之梯形處，先鏟塗上約 0.5 公分之黏結材，如圖 3- 14 及圖 3- 15 所示，在黏結材尚未乾固前，再將修復材分兩層灌入並搗實，待拆模後置於恆溫恆濕箱內反覆循環 28 天，取出後再進行黏結強度試驗。

黏結強度試驗 JIS A 1171 與 ASTM C1583 試驗方法原理相同，將混凝土修補或覆蓋材料覆蓋在已處理好之基礎混凝土表面，指定齡期後，先將測試區域切至基底混凝土至少 10 mm，再利用黏結劑將鐵片黏合於測試區域上，並去除測試區域周圍多餘的黏結劑，待 24 小時黏結劑乾固後，以 1500 ~ 2000 N/ min 之加載速度沿垂直方向直拉，直到試體破壞修復或覆蓋材料與基礎混凝土分離破壞，使用之儀器如圖 3- 4 所示，本研究所有試體皆採用環氧樹脂膠作為拉片之黏結劑，每一指定齡期至少取 5 個數據之平均值至小數點以下 1 位。其黏結強度公式為：

$$\sigma_a = \frac{T}{1600} \quad (3)$$

其中， σ_a ：黏結強度(MPa)、 T ：最大破壞荷重(N)。



圖 3-12 表面粗糙度之砂目
(資料來源：本研究提供)

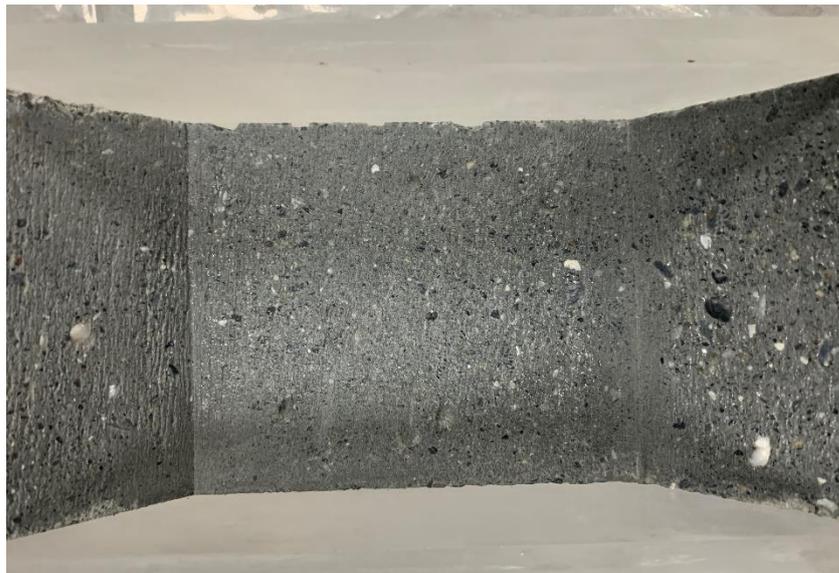


圖 3-13 表面粗糙度之中間
(資料來源：本研究提供)



圖 3-14 水泥系黏結材之水泥砂漿

(資料來源：本研究提供)



圖 3-15 環氧樹脂系黏結材之環氧樹脂

(資料來源：本研究提供)

第四節 鋼筋腐蝕梁構件之修復性試驗建置規劃

本研究主要以鋼筋腐蝕狀況尚不嚴重之梁構件為對象，目的為延長構件之使用年限；一般而言，可視為當鋼筋尚未出現鏽蝕或表面存在廣泛點狀生鏽時，僅去除劣化之混凝土，進行斷面修復。對於鋼筋混凝土腐蝕梁構件之製作，其鋼筋採預腐蝕後埋置，鋼筋腐蝕採用外加電流將梁試體撓曲段之鋼筋，通電電解強迫及加速其腐蝕，鋼筋腐蝕程度參考「鋼筋混凝土建築結構耐久性能診斷技術手冊(草案)(內政部建築研究所，2019)」之鋼筋腐蝕等級評定基準(表 3-7)，製作腐蝕等級IV之腐蝕鋼筋。腐蝕後埋入梁構件中，並將腐蝕段的混凝土敲除再進行除鏽及修復，最後利用四點抗彎試驗，了解其鋼筋腐蝕劣化梁修復後之構件行為。建置流程為：

1. 鋼筋撓曲段預腐蝕。
2. 使用台科大校內之鋼模，並依設計圖製作梁構件。
3. 待試體養護 28 天後進行鋼筋腐蝕段之混凝土敲除。
4. 將裸露之鋼筋腐蝕除鏽，並依照「鋼筋混凝土建築結構耐久性能診斷技術手冊研擬(內政部建研所，2019)」之建議修復程序進行梁構件修復。
5. 待修復處乾固 7 天後，進行四點抗彎試驗。

表 3-7 鋼筋腐蝕等級評定基準

| 等級 | 評定基準 | 重量減少率 |
|-----|---|-------------|
| I | 沒有發生腐蝕或表面僅有一些點狀鏽蝕現象 | < 0.5 % |
| II | 表面存在廣泛點狀生鏽 | 0.5 % ~ 1 % |
| III | 表面點狀生鏽聯繫成面生鏽，產生部分生鏽浮起狀態 | 1 % ~ 3 % |
| IV | 廣泛產生鏽蝕浮起狀態，鋼筋混凝土附著了鋼筋鏽蝕生成物，鋼筋斷面積損失部位約為 20% 以下之可能性 | 3 % ~ 5 % |
| V | 廣泛產生較厚之層狀鏽蝕，鋼筋斷面積損失部分約 20% 以上之可能性 | > 5 % |

(資料來源：內政部建築研究所，2019)

壹、鋼筋預腐蝕實驗建置

本階段之梁構件鋼筋採預腐蝕後埋置，鋼筋腐蝕採用外加電流將梁試體撓曲段之鋼筋，通電電解強迫及加速其腐蝕，實驗方式參考「鋼筋腐蝕對於鋼筋混凝土建築構件耐震性能與生命週期之影響 - 含腐蝕橫向鋼筋的梁構件(內政部建研所，2011)」，本研究鋼筋腐蝕之實際配置如圖 3- 16，腐蝕步驟如下：

1. 鋼筋兩端塗上防鏽劑，中央部位(撓區段 80 公分)放入水箱，如圖 3- 17 及圖 3- 18。
2. 水箱內準備濃度 3.5% NaCl 鹽水。
3. 以直流電源供應器負極接於水中之銅片，如圖 3- 19。
4. 正極接於水箱外之鋼筋，如圖 3- 20。
5. 待鋼筋表面出現生鏽且達本研究的目標腐蝕狀態，如圖 3- 21。



圖 3-16 本研究鋼筋腐蝕之實際配置
(資料來源：本研究提供)



圖 3-17 撓區段鋼筋量測 80 公分
(資料來源：本研究提供)



圖 3-18 兩端塗上防鏽劑
(資料來源：本研究提供)

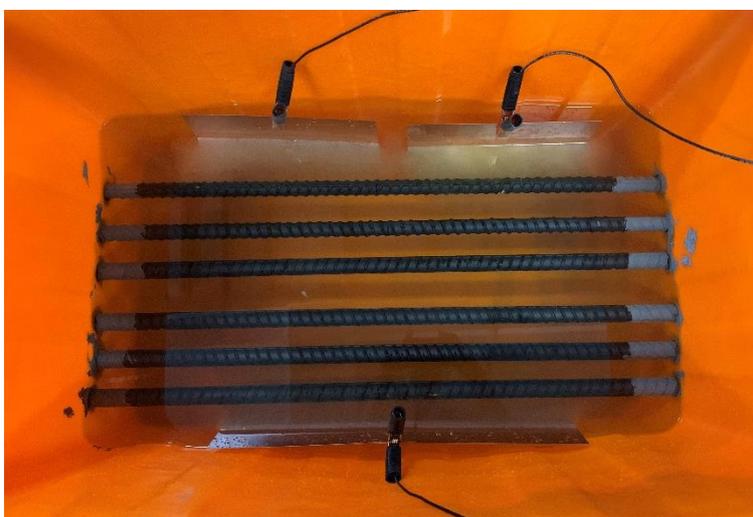


圖 3-19 負極接於水中之銅片
(資料來源：本研究提供)



圖 3- 20 正極接於水箱外之鋼筋
(資料來源：本研究提供)

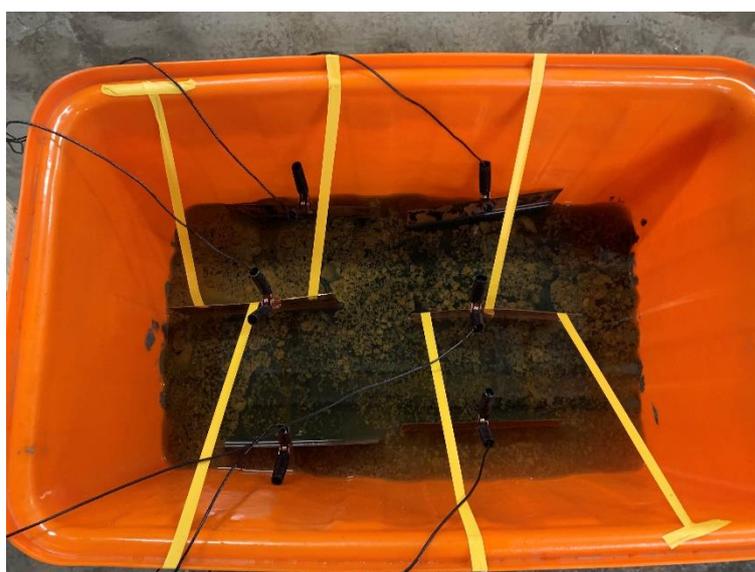


圖 3- 21 待鋼筋表面腐蝕至本研究目標腐蝕狀態
(資料來源：本研究提供)

因本研究之主筋長 460 公分，無法以秤取重量損失率的方法得到準確之值，故最終腐蝕狀態參考「鋼筋混凝土建築結構耐久性能診斷技術手冊(草案)(內政部建築研究所，2019)」中之目視法(如圖 3- 22)，大約與圖中腐蝕等級IV相同狀態下(如圖 3- 23)及停止腐蝕。



圖 3- 22 鋼筋腐蝕等級目視法
(資料來源：內政部建築研究所)



圖 3- 23 本研究鋼筋腐蝕狀態
(資料來源：本研究提供)

貳、梁構件建置

鋼筋混凝土梁構件之設計如圖 3-24，其試體斷面積為 $W 35 \text{ cm} \times H 50 \text{ cm}$ ，試體長度為 470 cm，鋼筋強度 # 4 和 # 8 為 4200 kgf/cm^2 ，基底混凝土設計強度為 210 kgf/cm^2 ，並在中央撓曲段 80 公分處於澆置前置放一保麗龍塊(如圖 3-25)以便修復前之敲除。因使用鋼模進行製作，考量試體翻轉修復及移動，於撓曲段外 40 公分對稱處，各內埋一組吊點，製作及澆置過程詳如圖 3-27 至圖 3-30。

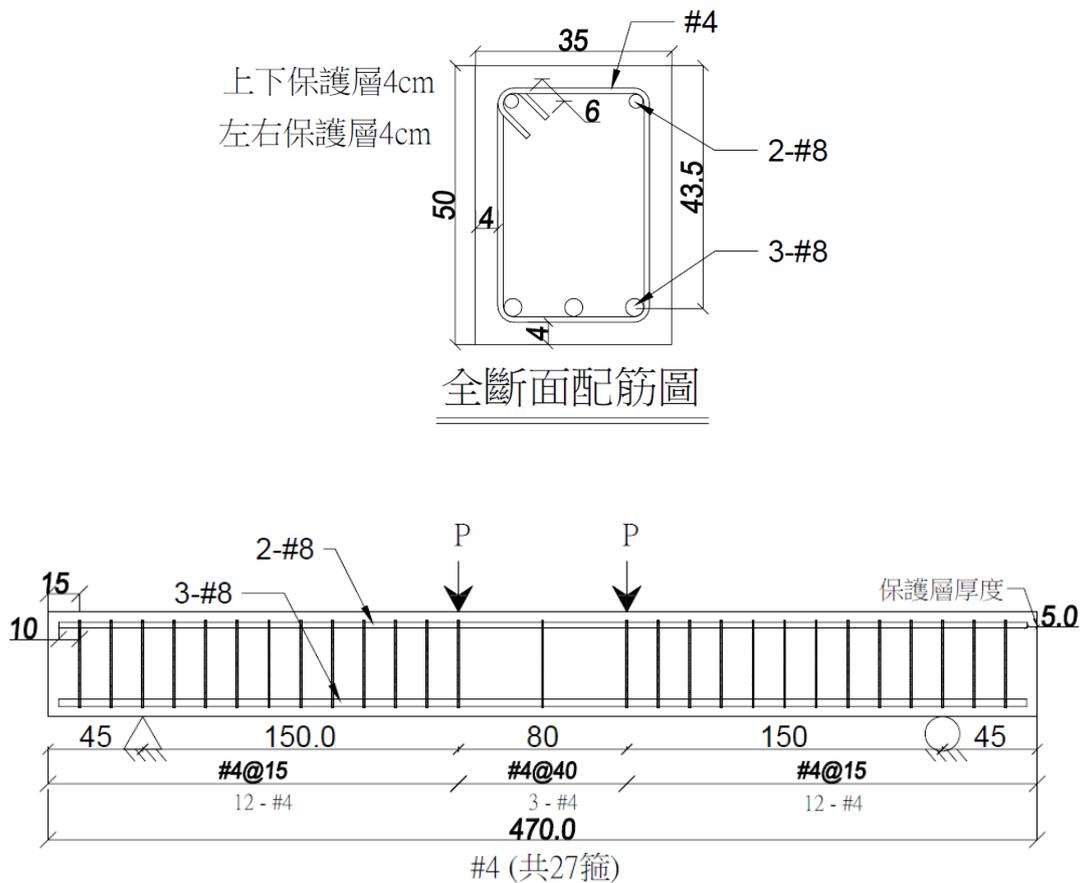


圖 3-24 本研究梁構件之配筋設計
(資料來源：本研究提供)



圖 3- 25 澆置前中央放置之保麗龍
(資料來源：本研究提供)

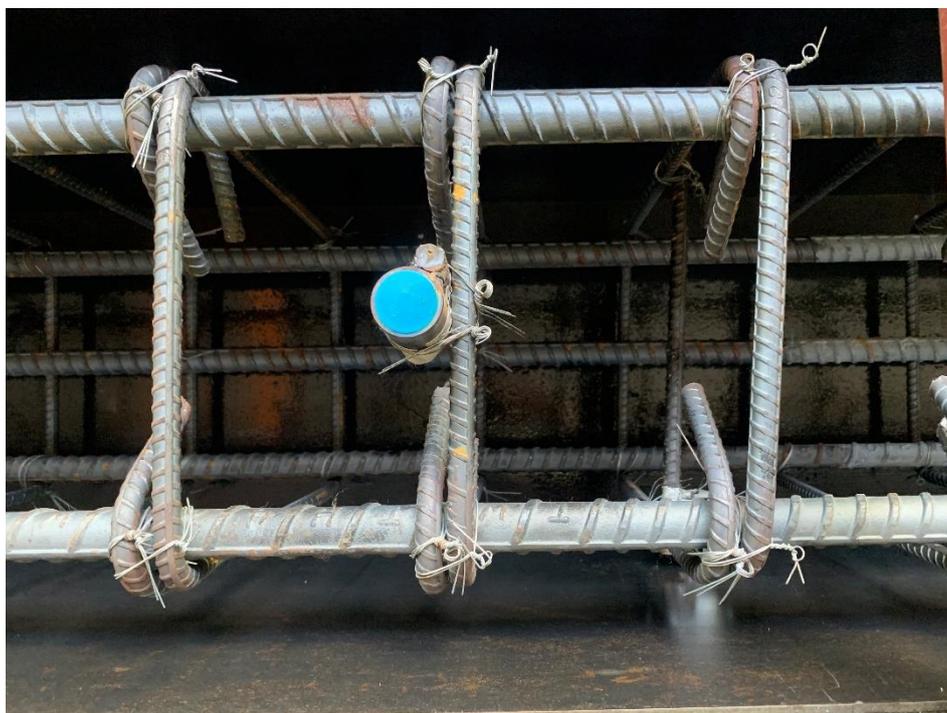


圖 3- 26 內埋式吊點
(資料來源：本研究提供)



圖 3-27 鋼筋綁紮完成
(資料來源：本研究提供)



圖 3-28 梁構件灌漿
(資料來源：本研究提供)



圖 3-29 拆模後翻轉試體
(資料來源：本研究提供)



圖 3-30 初步敲除保麗龍處
(資料來源：本研究提供)

參、鋼筋腐蝕梁構件修復施作

參考「鋼筋混凝土建築結構耐久性能診斷技術手冊(草案)(內政部建築研究所, 2019)」中對於斷面修復法之處理, 本研究修復過程如所示, 步驟如下:

1. 敲除裂化混凝土及鋼筋腐蝕之受損區域至堅實面, 如圖 3-31 及圖 3-32。
2. 清除鋼筋腐蝕, 再以高壓噴槍清除表面粉塵及碎屑, 並塗佈防腐蝕漆, 如圖 3-33 及圖 3-34。
3. 薄塗適當之黏結材, 如圖 3-35 及圖 3-36。
4. 待黏結材尚未乾固前灌入修復材, 完成修復, 如圖 3-37 至圖 3-40。

本階段之梁構件修復選用水泥砂漿修復材與環氧樹脂修復材, 依照「鋼筋混凝土結構修復補強設計參考手冊(中華民國結構工程技師公會全國聯合會, 2008)」之建議與第二階段之試驗結果, 本研究於水泥砂漿修復材之黏結材使用 W/C 為 0.35 之水泥砂漿, 配比如表 3-6, 環氧樹脂砂漿之黏結材使用介面處理專用之環氧樹脂, 其修復材的配比皆與第一階段及第二階段相同。



圖 3-31 敲除裂化混凝土及鋼筋腐蝕之受損區域
(資料來源: 本研究提供)



圖 3-32 敲除深度達鋼筋背側
(資料來源：本研究提供)



圖 3-33 鋼筋腐蝕清除
(資料來源：本研究提供)



圖 3-34 鋼筋表面塗佈防腐蝕漆
(資料來源：本研究提供)



圖 3-35 水泥砂漿黏結材塗佈
(資料來源：本研究提供)



圖 3-36 環氧樹脂黏結材塗佈
(資料來源：本研究提供)



圖 3-37 水泥砂漿修復材灌入
(資料來源：本研究提供)



圖 3-38 環氧樹脂修復材灌入
(資料來源：本研究提供)



圖 3-39 水泥砂漿修復材完成修復
(資料來源：本研究提供)



圖 3-40 環氧樹脂修復材完成修復
(資料來源：本研究提供)

肆、梁構件四點荷重抗彎試驗

1. 試驗裝置：

本研究採用四點荷重抗彎試驗，試驗配置圖如圖 3-41 及圖 3-42 所示，以單組油壓機傳力至鋼梁，並於試體設計中央純彎段 80 公分處上方放置滾支承，左右兩端支承下方不再施加額外預力，直接放置兩組滾支承，以反映真實受力情況。

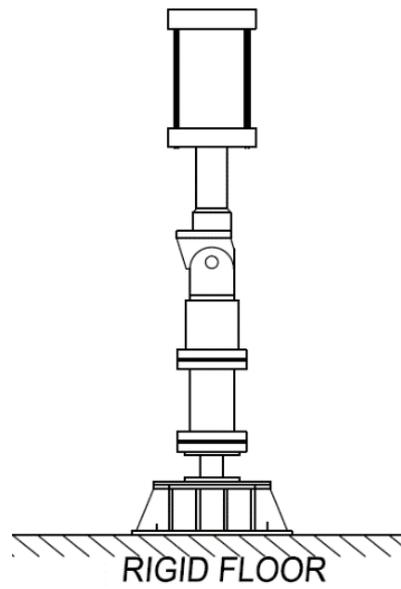


圖 3-41 試驗裝置側視圖
(資料來源：本研究提供)

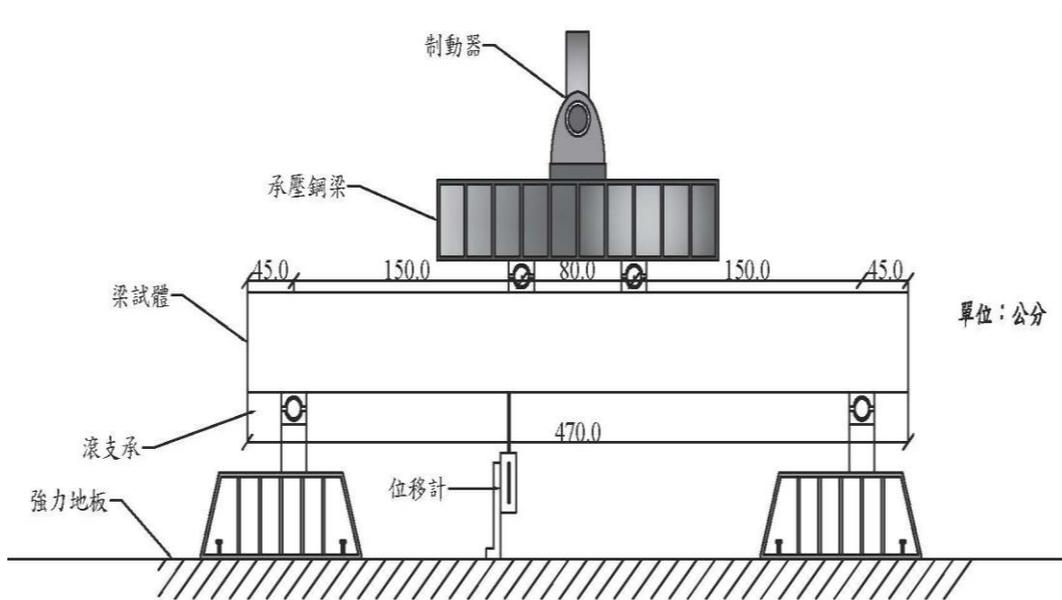


圖 3-42 試驗裝置前視圖
(資料來源：本研究提供)

2. 試驗程序：

本研究試驗採位移控制方式進行，位移量以構件之變位角(Drift Ratio)為基礎，乘上支承中心至分力點中心之距離，求得每階段之位移量。試驗之變位角分別為 0.1%、0.2%、0.3%、0.4%、0.5%、0.6%、0.7%、0.8%、0.9%、1.0%、1.2%、1.4%、1.6%、1.8%、2.0%、2.5% 及 3.0% 逐漸增大，如圖 3-43。試驗至強度衰減 20% 時結束試驗，並於每一階段(0.1%至 3.5%)到達時進行表面裂縫描繪，並記錄其裂縫寬度。

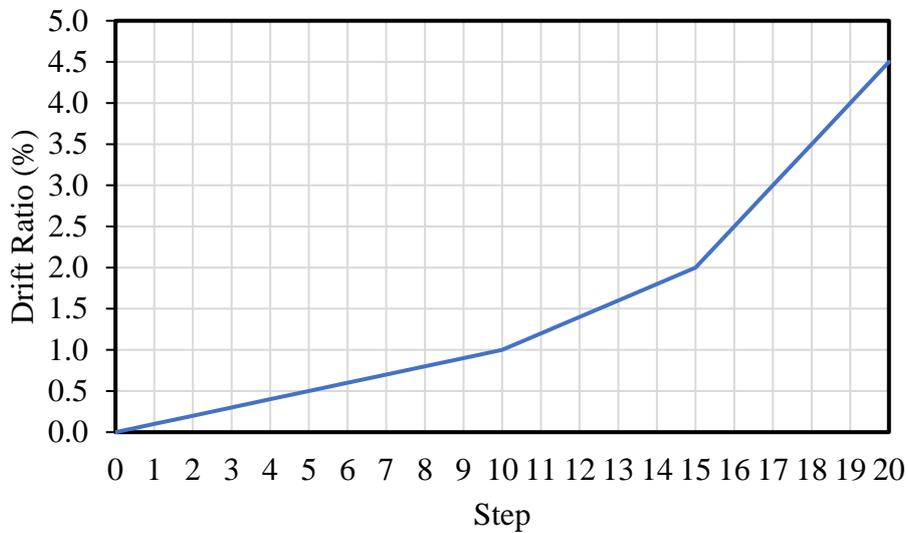


圖 3-43 試驗加載程序
(資料來源：本研究提供)

3. 試驗量測

外部量測使用位移計量測梁構件位移量；材料應變量測則選用 TML 型號：PL-60-11-3L 應變計；裂縫寬度之量測，則是於實驗前將試體粉刷白色油漆並繪製 100 mm × 100 mm 之網格，使實驗時較能觀察裂縫之發展情形，並紀錄該裂縫之最大值及量測位置。

第四章 試驗結果與討論

本研究共分三階段試驗，第一階段係針對不同類型的修復材料之力學性能進行相關試驗，其中修復材料之類型依手冊建議分別有水泥砂漿、聚合物水泥砂漿及環氧樹脂砂漿等，因此本階段使用六種修復材料，分別為：水泥砂漿、水泥砂漿(含飛灰)、聚合物水泥砂漿、聚合物水泥砂漿(含飛灰)、無收縮水泥砂漿和環氧樹脂砂漿，試驗項目包括撓曲強度、抗壓強度、黏結強度(標準環境及冷熱環境)、透水量、吸水率和長度變化，並與表 4-1 之各項品質基準進行比較，後續可根據各項試驗結果提出國內修復材之力學性能評定標準。

第一階段之試驗，指定齡期為 7 天和 28 天，以了解在施工完成後早期及晚期之材料性質。試驗結果與另製作之低水膠比之水泥砂漿與文獻「對於飛灰之水泥砂漿修復材料性能之試驗研究」(高玉荃 et al., 2018) 進行比較與討論，分別使用水膠比 0.45 及 0.60 之水泥砂漿，試體代號分別為 F00SP00-45 與 F00SP00-60。

第二階段試驗係探討界面處理，包括新舊材料接觸面之表面處理方式、粗糙程度之評定、環氧樹脂黏結劑對於增加黏結強度之效益及修復材料類型對黏結劑之影響。此階段針對四種修復材料進行相關試驗，包括水泥砂漿、聚合物水泥砂漿(含飛灰)、環氧樹脂砂漿和無收縮水泥砂漿，試驗項目為黏結強度(標準環境及冷熱環境)，與第一階段黏結強度試驗之差異，包括試體深度為模擬鋼筋腐蝕後修復材須填補的深度、比較與不同表面粗糙度下黏結材使用，並僅於指定齡期 28 天進行試驗。

第三階段試驗以「鋼筋混凝土建築結構耐久性能診斷技術手冊(草案)(內政部建築研究所, 2019)」之鋼筋腐蝕等級 IV 之腐蝕鋼筋埋置於梁構件中，並將腐蝕段的混凝土敲除再進行除鏽及補修，此階段針對兩種修復材料進行試驗，包括水泥砂漿及環氧樹脂砂漿，修復完成後進行四點抗彎試驗，藉由裂縫發展了解鋼筋腐蝕梁修復後之構件行為。

表 4-1 聚合物水泥砂漿之品質基準

| 項目 | | 基準值 |
|--|-------|--------------|
| 撓曲強度(N/ mm ²){kgf/ cm ² } | | 6.0{61} 以上 |
| 抗壓強度(N/ mm ²){kgf/ cm ² } | | 20.4{204} 以上 |
| 黏結強度 (N/ mm ²){kgf/ cm ² } | 標準時 | 1.0{10} 以上 |
| | 冷熱反覆後 | 1.0{10} 以上 |
| 透水量(g) | | 20.0 以下 |
| 吸水量(ml/ hr) | | 0.5 以下 |
| 長度變化(%) | | 0.15 以下 |

(資料來源：日本建築學會，1997)

第一節 第一階段試驗結果與討論

以下分就撓曲強度、抗壓強度、黏結強度、透水量、吸水率和長度變化的試驗結果進行討論，試驗結果如圖 4-1 - 圖 4-7 及表 4-2 - 表 4-32 所示，相關試驗照片如圖 4-8 - 圖 4-41 所示。

1. 撓曲強度

由圖 4-1 中可發現，水泥砂漿、水泥砂漿(含飛灰)、聚合物水泥砂漿(含飛灰)、無收縮水泥砂漿和環氧樹脂砂漿試體之 28 天齡期下撓曲強度皆符合品質基準值(6.0 MPa)，僅聚合物水泥砂漿(F00SP07)未符合，而環氧樹脂砂漿(EPOXY)之撓曲強度最高。就水泥砂漿而言，當水膠比由 0.5 下降至 0.45 時(F00SP00-45)，撓曲強度可以些許提升，但會影響其工作度。當添加飛灰時(F25SP00)，因飛灰於 28 天齡期尚未發生顯著卜作嵐反應，故添加飛灰後撓曲強度降低。然而就聚合物水泥砂漿而言(F00SP07)，似乎聚合物本身與水泥基材間的結合能力不如預期，因此抗拉能力降低，進一步添加飛灰後(F25SP07)，由於飛灰相較於細粒料粒徑小、表面積大，或許因此增加聚合物與其之結合能力，因而提高撓曲強度。

撓曲強度與材料的抗拉強度相關，此結果說明環氧樹脂比砂漿基材具有更佳的抗拉能力。

2. 抗壓強度

由圖 4-2 中可發現，各材料皆能於 7 天即可符合品質基準值(20.4 MPa)。除了環氧樹脂砂漿外，28 天抗壓強度皆高於 7 天抗壓強度，說明水中養護有利於多數試體強度的發展，但不利於環氧樹脂砂漿，可能原因在於本研究所使用之環氧樹脂不適合於水中浸置而發生水解作用。就水泥砂漿而言，如同撓曲強度之試驗結果，水膠比由 0.6 (F00SP00-60) 下降至 0.45 時(F00SP00-45)，抗壓強度可以提升，抗壓強度隨著水灰比的降低而增加。當添加飛灰時(F25SP00)，雖然 7 天抗壓強度降低，但 28 天抗壓強度反而略較空白組高(F00SP00)，說明飛灰的添加有利於長期強度的發展。就聚合物砂漿(F00SP07)而言，即使其 28 天撓曲強度未滿足要求，但其抗壓強度由 7 天至 28 天增加許多，亦較純砂漿試體(F00SP00)高。

3. 黏結強度

由圖 4-3 中可發現，僅 7 天齡期之含飛灰水泥砂漿(F25SP00)及環氧樹脂砂漿(EPOXY)未通過品質基準值 1.0 MPa。就環氧樹脂砂漿而言，本階段試驗並未探討黏結劑對黏結強度之影響，過程中依照廠商所建議之施工方法，並未事先塗布黏結劑於基底混凝土表面，但由試驗結果可以得知，若使用環氧樹脂砂漿時，沒有經過黏著劑塗布，其黏結強度非常差，故施工時需特別注意。此外，經 28 天水養護之黏結強度由高而低分別為：無收縮>F00SP07>F00SP00> F25SP07>F25SP00 與抗壓強度相較：無收縮>F00SP07> F25SP07>F25SP00>F00SP00，除純水泥砂漿(F00SP00)試體外，各試體間黏結強度與抗壓強度的大小順序一致，故未來可用參考抗壓強度評估材料間的黏結強度大小。若考慮環境中的冷熱循環時，可發現純砂漿試體(F00SP00)的黏結強度最高。但就聚合物砂漿(F00SP07)及無收縮漿體而言，相較於水中養護，冷熱循環嚴重降低其黏結強度，說明其較純水泥砂漿試體不能抵抗環境中的溫度變化。由於黏結強度試驗使用混凝土為基底，純水泥砂漿試體與基底的材質接近，界面亦可於養護期間發生水化作用，因此黏結強度較高；整體而言，冷熱循環條件下各材料之黏結強度仍高於 1.0 MPa。

4. 透水量

由圖 4-4 中可發現，除了無收縮漿體外，各材料皆能於 28 天時符合品質基準值要求(10 g 以下)，其中以環氧樹脂砂漿幾乎為不透水狀態。若不考慮飛灰添加時，聚合物水泥漿試體的透水量較水泥砂漿試體低。整體而言，養護有助於降低透水量，尤其就水泥砂漿(F25SP00)及聚合物水泥砂漿(F25SP07)而言，即使 7 天時水泥砂漿較聚合物水泥砂漿透水量高，但於 28 天時反而較低。兩者皆含飛灰時，於 7 天時之透水量甚高，但於 28 天顯著降低，因此添加飛灰有助於降低長期透水量，可能原因在於飛灰於 28 天時因少許卜作嵐反應而進一步填塞，阻擋水滲入。

5. 吸水量

由圖 4-5 中可發現，除環氧樹脂砂漿(EPOXY)外，各材料於 28 天齡期時仍無法滿足品質基準值 0.5 ml/hr 以下，但若參考 2016 年日本對於特定聚合物之吸水量標準(10 %以下)，則以吸水率之結果(圖 4-6)比

較時，除了無收縮試體外，其他材料則可通過該要求性能。整體而言，養護有助於降低吸水率，但吸水率隨著齡期的變化並不如透水量明顯，即使各試體間比較時，除無收縮水泥外，各試體間的差距不大。無收縮水泥試體具高吸水率但低透水量，可能反應其孔隙可能較大但連結性較低。

6. 長度變化

由圖 4- 7 中可發現，各材料皆能符合品質基準值(0.15%以下)，惟無收縮水泥砂漿其長度變化率結果呈現膨脹，符合該材料之特性，並且通過品質基準之要求性能。

表 4- 2 F00SP00 之撓曲強度

| 配比-齡期 | F00SP00-7 天 | | | | |
|-----------|--------------|--------|--------|--------|--------|
| 試體編號 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| 最大荷重(kgf) | 293.50 | 269.00 | 259.50 | 276.50 | 269.50 |
| 撓曲強度(MPa) | 6.2 | | | | |
| 配比-齡期 | F00SP00-28 天 | | | | |
| 試體編號 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| 最大荷重(kgf) | 332.75 | 292.50 | 289.75 | 286.50 | 302.75 |
| 撓曲強度(MPa) | 6.8 | | | | |

(資料來源：本研究整理)

表 4- 3 F25SP00 之撓曲強度

| 配比-齡期 | F25SP00-7 天 | | | | |
|-----------|--------------|--------|--------|--------|--------|
| 試體編號 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| 最大荷重(kgf) | 237.25 | 236.75 | 234.25 | 227.5 | 238.25 |
| 撓曲強度(MPa) | 5.4 | | | | |
| 配比-齡期 | F25SP00-28 天 | | | | |
| 試體編號 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| 最大荷重(kgf) | 268.75 | 265.75 | 252.00 | 262.50 | 244.25 |
| 撓曲強度(MPa) | 6.1 | | | | |

(資料來源：本研究整理)

表 4-4 F00SP07 之撓曲強度

| 配比-齡期 | F00SP07-7 天 | | | | |
|-----------|--------------|--------|--------|--------|--------|
| 試體編號 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| 最大荷重(kgf) | 249.75 | 258.75 | 261.50 | 233.00 | 239.00 |
| 撓曲強度(MPa) | 5.3 | | | | |
| 配比-齡期 | F00SP07-28 天 | | | | |
| 試體編號 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| 最大荷重(kgf) | 252.75 | 242.75 | 226.00 | 236.25 | 231.25 |
| 撓曲強度(MPa) | 5.4 | | | | |

(資料來源：本研究整理)

表 4-5 F25SP07 之撓曲強度

| 配比-齡期 | F25SP07-7 天 | | | | |
|-----------|--------------|--------|--------|--------|--------|
| 試體編號 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| 最大荷重(kgf) | 226.50 | 229.50 | 219.75 | 223.25 | 223.25 |
| 撓曲強度(MPa) | 5.1 | | | | |
| 配比-齡期 | F00SP07-28 天 | | | | |
| 試體編號 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| 最大荷重(kgf) | 284.50 | 289.50 | 285.50 | 272.00 | 275.25 |
| 撓曲強度(MPa) | 6.5 | | | | |

(資料來源：本研究整理)

表 4-6 無收縮水泥砂漿試體之撓曲強度

| 配比-齡期 | 無收縮水泥砂漿-7 天 | | | | |
|-----------|--------------|--------|--------|--------|--------|
| 試體編號 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| 最大荷重(kgf) | 257.75 | 273.00 | 231.00 | 245.25 | 222.25 |
| 撓曲強度(MPa) | 5.9 | | | | |
| 配比-齡期 | 無收縮水泥砂漿-28 天 | | | | |
| 試體編號 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| 最大荷重(kgf) | 271.00 | 254.25 | 254.50 | 268.75 | 231.50 |
| 撓曲強度(MPa) | 6.1 | | | | |

(資料來源：本研究整理)

表 4-7 環氧樹脂砂漿試體之撓曲強度

| 配比-齡期 | 環氧樹脂砂漿-7 天 | | | | |
|-----------|-------------|--------|--------|--------|--------|
| 試體編號 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| 最大荷重(kgf) | 887.75 | 866.75 | 746.00 | 710.75 | 810.25 |
| 撓曲強度(MPa) | 18.5 | | | | |
| 配比-齡期 | 環氧樹脂砂漿-28 天 | | | | |
| 試體編號 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| 最大荷重(kgf) | 782.75 | 922.75 | 912.25 | 650.00 | 945.25 |
| 撓曲強度(MPa) | 20.0 | | | | |

(資料來源：本研究整理)

表 4-8 F00SP00 之抗壓強度

| 配比-齡期 | F00SP00-7 天 | | 配比-齡期 | F00SP00-28 天 | |
|-------|---------------|---------------|-------|---------------|---------------|
| 試體編號 | 最大荷重 (kgf) | 抗壓強度 (MPa) | 試體編號 | 最大荷重 (kgf) | 抗壓強度 (MPa) |
| 1-1 | 4247.00 | 29.7 | 1-1 | 5741.00 | 34.3 |
| 1-2 | 5149.50 | | 1-2 | 5792.00 | |
| 2-1 | 4491.75 | | 2-1 | 5858.25 | |
| 2-2 | 5185.25 | | 2-2 | 5114.00 | |
| 3-1 | 4458.75 | | 3-1 | 4785.00 | |
| 3-2 | 4346.50 | | 3-2 | 4940.50 | |
| 4-1 | 5618.75 | | 4-1 | 5193.00 | |
| 4-2 | 5261.75 | | 4-2 | 6067.25 | |
| 5-1 | 4887.00 | | 5-1 | 5990.75 | |
| 5-2 | 5004.25 | | 5-2 | 6694.50 | |

(資料來源：本研究整理)

表 4-9 F25SP00 之抗壓強度

| 配比-齡期 | F25SP00-7 天 | | 配比-齡期 | F25SP00-28 天 | |
|-------|---------------|---------------|-------|---------------|---------------|
| 試體編號 | 最大荷重 (kgf) | 抗壓強度 (MPa) | 試體編號 | 最大荷重 (kgf) | 抗壓強度 (MPa) |
| 1-1 | 4096.25 | 23.8 | 1-1 | 5032.25 | 35.4 |
| 1-2 | 3423.75 | | 1-2 | 5822.50 | |
| 2-1 | 3059.25 | | 2-1 | 5894.00 | |
| 2-2 | 4158.00 | | 2-2 | 5848.00 | |
| 3-1 | 3982.00 | | 3-1 | 6363.00 | |
| 3-2 | 3602.25 | | 3-2 | 6138.75 | |
| 4-1 | 3745.00 | | 4-1 | 5700.25 | |
| 4-2 | 4145.25 | | 4-2 | 5628.75 | |
| 5-1 | 4219.00 | | 5-1 | 5463.25 | |
| 5-2 | 3882.50 | | 5-2 | 5730.75 | |

(資料來源：本研究整理)

表 4- 10 F00SP07 之抗壓強度

| 配比-齡期 | F00SP07-7 天 | | 配比-齡期 | F00SP07-28 天 | |
|-------|---------------|---------------|-------|---------------|---------------|
| 試體編號 | 最大荷重 (kgf) | 抗壓強度 (MPa) | 試體編號 | 最大荷重 (kgf) | 抗壓強度 (MPa) |
| 1-1 | 3936.00 | 22.0 | 1-1 | 6587.25 | 42.2 |
| 1-2 | 3757.75 | | 1-2 | 6903.50 | |
| 2-1 | 3400.75 | | 2-1 | 7056.50 | |
| 2-2 | 3612.25 | | 2-2 | 6358.00 | |
| 3-1 | 3393.00 | | 3-1 | 7296.00 | |
| 3-2 | 3507.75 | | 3-2 | 7087.00 | |
| 4-1 | 3892.75 | | 4-1 | 6714.75 | |
| 4-2 | - | | 4-2 | 7143.00 | |
| 5-1 | 3513.00 | | 5-1 | 6439.50 | |
| 5-2 | 3105.00 | | 5-2 | 7158.50 | |

(資料來源：本研究整理)

表 4- 11 F25SP07 之抗壓強度

| 配比-齡期 | F25SP07-7 天 | | 配比-齡期 | F25SP07-28 天 | |
|-------|---------------|---------------|-------|---------------|---------------|
| 試體編號 | 最大荷重 (kgf) | 抗壓強度 (MPa) | 試體編號 | 最大荷重 (kgf) | 抗壓強度 (MPa) |
| 1-1 | 4310.75 | 26.9 | 1-1 | 6347.75 | 37.7 |
| 1-2 | 4346.50 | | 1-2 | 6143.75 | |
| 2-1 | 4698.25 | | 2-1 | 6903.50 | |
| 2-2 | 4499.50 | | 2-2 | 6215.25 | |
| 3-1 | 4502.00 | | 3-1 | 6011.25 | |
| 3-2 | 4489.25 | | 3-2 | 6057.00 | |
| 4-1 | 4206.25 | | 4-1 | 5073.00 | |
| 4-2 | 4211.50 | | 4-2 | 6021.50 | |
| 5-1 | 4318.50 | | 5-1 | 5950.00 | |
| 5-2 | 4374.50 | | 5-2 | 6383.50 | |

(資料來源：本研究整理)

表 4-12 無收縮水泥砂漿試體之抗壓強度

| 配比-齡期 | 無收縮水泥砂漿-7 天 | | 配比-齡期 | 無收縮水泥砂漿-28 天 | |
|-------|---------------|---------------|-------|---------------|---------------|
| 試體編號 | 最大荷重 (kgf) | 抗壓強度 (MPa) | 試體編號 | 最大荷重 (kgf) | 抗壓強度 (MPa) |
| 1-1 | 6878.00 | 40.9 | 1-1 | 6903.50 | 47.0 |
| 1-2 | 6704.75 | | 1-2 | 8463.75 | |
| 2-1 | 6669.00 | | 2-1 | 7938.50 | |
| 2-2 | 6648.50 | | 2-2 | 8234.25 | |
| 3-1 | 6235.50 | | 3-1 | 8392.25 | |
| 3-2 | 6602.75 | | 3-2 | 7673.25 | |
| 4-1 | 6398.75 | | 4-1 | 7918.00 | |
| 4-2 | 7061.50 | | 4-2 | 7795.75 | |
| 5-1 | 6434.50 | | 5-1 | 6684.25 | |
| 5-2 | 6781.25 | | 5-2 | 7382.75 | |

(資料來源：本研究整理)

表 4-13 環氧樹脂砂漿試體之抗壓強度

| 配比-齡期 | 環氧樹脂砂漿-7 天 | | 配比-齡期 | 環氧樹脂砂漿-28 天 | |
|-------|---------------|---------------|-------|---------------|---------------|
| 試體編號 | 最大荷重 (kgf) | 抗壓強度 (MPa) | 試體編號 | 最大荷重 (kgf) | 抗壓強度 (MPa) |
| 1-1 | 10640.75 | 60.7 | 1-1 | 8224.00 | 54.2 |
| 1-2 | 9947.25 | | 1-2 | 8555.50 | |
| 2-1 | 10008.50 | | 2-1 | 10278.75 | |
| 2-2 | 10197.25 | | 2-2 | 10579.50 | |
| 3-1 | 10426.50 | | 3-1 | 9279.50 | |
| 3-2 | 10396.00 | | 3-2 | 8815.50 | |
| 4-1 | 8973.50 | | 4-1 | 8066.00 | |
| 4-2 | 9345.75 | | 4-2 | 6619.00 | |
| 5-1 | 9687.25 | | 5-1 | 9294.75 | |
| 5-2 | 9254.00 | | 5-2 | 8239.25 | |

(資料來源：本研究整理)

表 4-14 F00SP00 之黏結強度

| 配比-齡期 | F00SP00-7 天 | | 配比-齡期 | F00SP00-28 天 | |
|------------------------|---------------|---------------|----------------|----------------|---------------|
| 試體編號 | 最大荷重 (kN) | 黏結強度 (MPa) | 試體編號 | 最大荷重 (kN) | 黏結強度 (MPa) |
| 1 [△] | 1.26 | 2.3 | 1 [△] | 4.99 | 2.9 |
| 2 [△] | 2.28 | | 2 [△] | 4.15 | |
| 3 [△] | 3.24 | | 3 [△] | 4.56 | |
| 4 [△] | 3.04 | | 4 [△] | 5.04 | |
| 5 [△] | 5.99 | | 5* | 4.99 | |
| 配比-齡期 | F00SP00-7 天循環 | | 配比-齡期 | F00SP00-28 天循環 | |
| 試體編號 | 最大荷重 (kN) | 黏結強度 (MPa) | 試體編號 | 最大荷重 (kN) | 黏結強度 (MPa) |
| 1 [△] | 3.95 | 2.5 | 1 [△] | 2.88 | 2.8 |
| 2 [△] | 3.90 | | 2 [△] | 2.76 | |
| 3 [△] | 4.42 | | 3 [△] | 1.96 | |
| 4 [△] | 3.53 | | 4 [△] | 3.15 | |
| 5 [△] | 4.16 | | 5 [△] | 3.27 | |
| *：試體破壞於修復材與基礎混凝土之介面交界處 | | | | | |
| ○：試體破壞於基礎混凝土處 | | | | | |
| △：試體破壞於修復材處 | | | | | |

(資料來源：本研究整理)

表 4-15 F25SP00 之黏結強度

| 配比-齡期 | F25SP00-7 天 | | 配比-齡期 | F25SP00-28 天 | |
|------------------------|---------------|---------------|----------------|----------------|---------------|
| 試體編號 | 最大荷重 (kN) | 黏結強度 (MPa) | 試體編號 | 最大荷重 (kN) | 黏結強度 (MPa) |
| 1 [△] | 1.58 | 0.8 | 1 [△] | 3.93 | 1.6 |
| 2 [△] | 0.33 | | 2 [△] | 3.43 | |
| 3 [△] | 0.90 | | 3 [△] | 1.75 | |
| 4 [△] | 1.37 | | 4 [△] | 1.80 | |
| 5 [△] | 2.61 | | 5 [△] | 1.89 | |
| 配比-齡期 | F25SP00-7 天循環 | | 配比-齡期 | F25SP00-28 天循環 | |
| 試體編號 | 最大荷重 (kN) | 黏結強度 (MPa) | 試體編號 | 最大荷重 (kN) | 黏結強度 (MPa) |
| 1* | 4.58 | 2.5 | 1 [△] | 4.00 | 2.5 |
| 2 [△] | 4.31 | | 2 [△] | 3.85 | |
| 3 [△] | 3.81 | | 3 [△] | 4.48 | |
| 4 [△] | 3.71 | | 4* | 4.07 | |
| 5 [△] | 3.41 | | 5 [○] | 3.84 | |
| *：試體破壞於修復材與基礎混凝土之介面交界處 | | | | | |
| ○：試體破壞於基礎混凝土處 | | | | | |
| △：試體破壞於修復材處 | | | | | |

(資料來源：本研究整理)

表 4- 16 F00SP07 之黏結強度

| 配比-齡期 | F00SP07-7 天 | | 配比-齡期 | F00SP07-28 天 | |
|------------------------|---------------|---------------|----------------|----------------|---------------|
| 試體編號 | 最大荷重 (kN) | 黏結強度 (MPa) | 試體編號 | 最大荷重 (kN) | 黏結強度 (MPa) |
| 1 [△] | 2.71 | 1.5 | 1 [○] | 5.39 | 3.0 |
| 2 [△] | 2.22 | | 2 [○] | 4.54 | |
| 3 [△] | 2.85 | | 3 [△] | 5.03 | |
| 4 [△] | 2.39 | | 4 [△] | 4.92 | |
| 5 [△] | 1.55 | | 5 [△] | 4.26 | |
| 配比-齡期 | F00SP07-7 天循環 | | 配比-齡期 | F00SP07-28 天循環 | |
| 試體編號 | 最大荷重 (kN) | 黏結強度 (MPa) | 試體編號 | 最大荷重 (kN) | 黏結強度 (MPa) |
| 1 [○] | 4.46 | 2.9 | 1 [△] | 2.22 | 1.6 |
| 2 [△] | 4.35 | | 2 [△] | 3.07 | |
| 3 [△] | 4.71 | | 3 [△] | 2.67 | |
| 4 [△] | 4.88 | | 4 [△] | 2.47 | |
| 5 [△] | 4.69 | | 5 [△] | 2.03 | |
| *：試體破壞於修復材與基礎混凝土之介面交界處 | | | | | |
| ○：試體破壞於基礎混凝土處 | | | | | |
| △：試體破壞於修復材處 | | | | | |

(資料來源：本研究整理)

表 4-17 F25SP07 之黏結強度

| 配比-齡期 | F25SP07-7 天 | | 配比-齡期 | F25SP07-28 天 | |
|------------------------|---------------|---------------|----------------|----------------|---------------|
| 試體編號 | 最大荷重 (kN) | 黏結強度 (MPa) | 試體編號 | 最大荷重 (kN) | 黏結強度 (MPa) |
| 1 [△] | 3.67 | 2.3 | 1 [△] | 3.94 | 2.4 |
| 2 [△] | 3.92 | | 2 [○] | 3.95 | |
| 3 [△] | 3.08 | | 3 [△] | 4.10 | |
| 4 [△] | 4.52 | | 4 [△] | 3.45 | |
| 5 [△] | 3.37 | | 5 [○] | 4.15 | |
| 配比-齡期 | F25SP07-7 天循環 | | 配比-齡期 | F25SP07-28 天循環 | |
| 試體編號 | 最大荷重 (kN) | 黏結強度 (MPa) | 試體編號 | 最大荷重 (kN) | 黏結強度 (MPa) |
| 1* | 4.23 | 2.6 | 1 [○] | 3.25 | 2.6 |
| 2* | 4.32 | | 2 [△] | 4.10 | |
| 3* | 4.39 | | 3 [△] | 3.30 | |
| 4* | 4.25 | | 4 [△] | 5.45 | |
| 5 [△] | 3.84 | | 5 [△] | 4.98 | |
| *：試體破壞於修復材與基礎混凝土之介面交界處 | | | | | |
| ○：試體破壞於基礎混凝土處 | | | | | |
| △：試體破壞於修復材處 | | | | | |

(資料來源：本研究整理)

表 4-18 無收縮水泥砂漿試體之黏結強度

| 配比-齡期 | 無收縮水泥砂漿-7 天 | | 配比-齡期 | 無收縮水泥砂漿-28 天 | |
|------------------------|---------------|---------------|----------------|----------------|---------------|
| 試體編號 | 最大荷重 (kN) | 黏結強度 (MPa) | 試體編號 | 最大荷重 (kN) | 黏結強度 (MPa) |
| 1 [△] | 4.50 | 2.4 | 1 [△] | 4.99 | 3.1 |
| 2 [○] | 3.03 | | 2 [△] | 5.03 | |
| 3 [△] | 3.76 | | 3 [△] | 5.04 | |
| 4 [△] | 3.94 | | 4 [△] | 5.11 | |
| 5 [○] | 3.73 | | 5 [△] | 5.01 | |
| 配比-齡期 | 無收縮水泥砂漿-7 天循環 | | 配比-齡期 | 無收縮水泥砂漿-28 天循環 | |
| 試體編號 | 最大荷重 (kN) | 黏結強度 (MPa) | 試體編號 | 最大荷重 (kN) | 黏結強度 (MPa) |
| 1 [△] | 2.91 | 1.4 | 1 [△] | 1.54 | 2.0 |
| 2 [△] | 1.85 | | 2 [△] | 3.57 | |
| 3 [△] | 1.90 | | 3 [△] | 4.57 | |
| 4 [△] | 2.40 | | 4 [△] | 3.10 | |
| 5 [△] | 1.99 | | 5 [△] | 3.10 | |
| *：試體破壞於修復材與基礎混凝土之介面交界處 | | | | | |
| ○：試體破壞於基礎混凝土處 | | | | | |
| △：試體破壞於修復材處 | | | | | |

(資料來源：本研究整理)

表 4-19 環氧樹脂砂漿試體之黏結強度

| 配比-齡期 | 環氧樹脂砂漿-7 天 | | 配比-齡期 | 環氧樹脂砂漿-28 天 | |
|--|--------------|---------------|-------|--------------|---------------|
| 試體編號 | 最大荷重 (kN) | 黏結強度 (MPa) | 試體編號 | 最大荷重 (kN) | 黏結強度 (MPa) |
| 1* | 0.64 | 0.5 | 1* | 0.38 | 0.4 |
| 2* | 0.96 | | 2* | 0.00 | |
| 3* | 0.63 | | 3* | 0.09 | |
| 4* | 0.94 | | 4* | 1.14 | |
| 5* | 1.11 | | 5* | 1.19 | |
| *：試體破壞於修復材與基礎混凝土之介面交界處 □：試體破壞於基礎混凝土處 △：試體破壞於修復材處 | | | | | |

(資料來源：本研究整理)

表 4- 20 F00SP00 之透水量

| 配比- 齡期 | F00SP00-7 天 | | | 配比- 齡期 | F00SP00-28 天 | | |
|-----------|-----------------------|-----------------------|------------|-----------|-----------------------|-----------------------|------------|
| 試體 編號 | w ₀ (g) | w ₁ (g) | 透水量 (g) | 試體 編號 | w ₀ (g) | w ₁ (g) | 透水量 (g) |
| 1 | 1834.5 | 1848.5 | 14.0 | 1 | 1794.8 | 1805.4 | 13.3 |
| 2 | 1736.4 | 1753.4 | | 2 | 1827.8 | 1843.8 | |

(資料來源：本研究整理)

表 4- 21 F25SP00 之透水量

| 配比- 齡期 | F25SP00-7 天 | | | 配比- 齡期 | F25SP00-28 天 | | |
|-----------|-----------------------|-----------------------|------------|-----------|-----------------------|-----------------------|------------|
| 試體 編號 | w ₀ (g) | w ₁ (g) | 透水量 (g) | 試體 編號 | w ₀ (g) | w ₁ (g) | 透水量 (g) |
| 1 | 1711.6 | 1727.3 | 15.7 | 1 | 1752.3 | 1770.3 | 12.6 |
| 2 | 1667.2 | 1685.2 | | 2 | 1753.6 | 1766.2 | |

(資料來源：本研究整理)

表 4- 22 F00SP07 之透水量

| 配比- 齡期 | F00SP07-7 天 | | | 配比- 齡期 | F00SP07-28 天 | | |
|-----------|-----------------------|-----------------------|------------|-----------|-----------------------|-----------------------|------------|
| 試體 編號 | w ₀ (g) | w ₁ (g) | 透水量 (g) | 試體 編號 | w ₀ (g) | w ₁ (g) | 透水量 (g) |
| 1 | 1778.1 | 1790.4 | 12.3 | 1 | 1794.8 | 1805.4 | 10.6 |
| 2 | 1669.7 | 1687.0 | | 2 | 1827.8 | 1843.8 | |

(資料來源：本研究整理)

表 4-23 F25SP07 之透水量

| 配比- 齡期 | F25SP07-7 天 | | | 配比- 齡期 | F25SP07-28 天 | | |
|-----------|-----------------------|-----------------------|------------|-----------|--------------|-----------------------|-----------------------|
| | w ₀ (g) | w ₁ (g) | 透水量 (g) | | 試體 編號 | w ₀ (g) | w ₁ (g) |
| 1 | 1804.2 | 1829.6 | 24.9 | 1 | 1668.3 | 1685.3 | 15.0 |
| 2 | 1774.6 | 1799.5 | | 2 | 1695.3 | 1710.3 | |

(資料來源：本研究整理)

表 4-24 無收縮水泥砂漿試體之透水量

| 配比- 齡期 | 無收縮水泥砂漿-7 天 | | | 配比- 齡期 | 無收縮水泥砂漿-28 天 | | |
|-----------|-----------------------|-----------------------|------------|-----------|--------------|-----------------------|-----------------------|
| | w ₀ (g) | w ₁ (g) | 透水量 (g) | | 試體 編號 | w ₀ (g) | w ₁ (g) |
| 1 | 1515.3 | 1550.2 | 41.6 | 1 | 1656.7 | 1691.1 | 30.3 |
| 2 | 1666.7 | 1714.9 | | 2 | 1760.5 | 1786.8 | |

(資料來源：本研究整理)

表 4-25 環氧樹脂砂漿試體之透水量

| 配比- 齡期 | 環氧樹脂砂漿-7 天 | | | 配比- 齡期 | 環氧樹脂砂漿-28 天 | | |
|-----------|-----------------------|-----------------------|------------|-----------|-------------|-----------------------|-----------------------|
| | w ₀ (g) | w ₁ (g) | 透水量 (g) | | 試體 編號 | w ₀ (g) | w ₁ (g) |
| 1 | 1444.6 | 1446.0 | 1.4 | 1 | 1498.8 | 1499.8 | 1.2 |
| 2 | 1458.1 | 1460.2 | | 2 | 1399.9 | 1401.3 | |

(資料來源：本研究整理)

表 4- 26 F00SP00 之吸水量

| 配比- 齡期 | F00SP00-7 天 | | | 配比- 齡期 | F00SP00-28 天 | | |
|-----------|-------------|------------------------|------------------------|-----------|-----------------|----------|------------------------|
| | 試體 編號 | w ₀ (ml) | w ₁ (ml) | | 吸水量 (ml/ hr) | 試體 編號 | w ₀ (ml) |
| 1 | 546.0 | 611.4 | 1.2 | 1 | 546.0 | 589.8 | 0.9 |
| 2 | 556.0 | 604.3 | | 2 | 556.0 | 600.9 | |

(資料來源：本研究整理)

表 4- 27 F25SP00 之吸水量

| 配比- 齡期 | F25SP00-7 天 | | | 配比- 齡期 | F25SP00-28 天 | | |
|-----------|-------------|------------------------|------------------------|-----------|-----------------|----------|------------------------|
| | 試體 編號 | w ₀ (ml) | w ₁ (ml) | | 吸水量 (ml/ hr) | 試體 編號 | w ₀ (ml) |
| 1 | 567.7 | 618.8 | 1.1 | 1 | 545.8 | 594.2 | 1.0 |
| 2 | 542.2 | 594.1 | | 2 | 559.1 | 607.8 | |

(資料來源：本研究整理)

表 4- 28 F00SP07 之吸水量

| 配比- 齡期 | F00SP07-7 天 | | | 配比- 齡期 | F00SP07-28 天 | | |
|-----------|-------------|------------------------|------------------------|-----------|-----------------|----------|------------------------|
| | 試體 編號 | w ₀ (ml) | w ₁ (ml) | | 吸水量 (ml/ hr) | 試體 編號 | w ₀ (ml) |
| 1 | 541.4 | 584.5 | 0.9 | 1 | 549.1 | 591.6 | 0.9 |
| 2 | 542.3 | 585.3 | | 2 | 547.7 | 589.5 | |

(資料來源：本研究整理)

表 4-29 F25SP07 之吸水量

| 配比- 齡期 | F25SP07-7 天 | | | 配比- 齡期 | F25SP07-28 天 | | |
|-----------|------------------------|------------------------|-----------------|-----------|--------------|------------------------|------------------------|
| | w ₀ (ml) | w ₁ (ml) | 吸水量 (ml/ hr) | | 試體 編號 | w ₀ (ml) | w ₁ (ml) |
| 1 | 543.1 | 591.2 | 1.0 | 1 | 549.2 | 593.9 | 0.9 |
| 2 | 544.0 | 592.3 | | 2 | 537.5 | 580.5 | |

(資料來源：本研究整理)

表 4-30 無收縮水泥砂漿試體之吸水量

| 配比- 齡期 | 無收縮水泥砂漿-7 天 | | | 配比- 齡期 | 無收縮水泥砂漿-28 天 | | |
|-----------|------------------------|------------------------|-----------------|-----------|--------------|------------------------|------------------------|
| | w ₀ (ml) | w ₁ (ml) | 吸水量 (ml/ hr) | | 試體 編號 | w ₀ (ml) | w ₁ (ml) |
| 1 | 491.4 | 544.1 | 1.1 | 1 | 476.8 | 528.0 | 1.1 |
| 2 | 481.1 | 533.4 | | 2 | 480.8 | 530.6 | |

(資料來源：本研究整理)

表 4-31 環氧樹脂砂漿試體之吸水量數據

| 配比- 齡期 | 環氧樹脂砂漿-7 天 | | | 配比- 齡期 | 環氧樹脂砂漿-28 天 | | |
|-----------|------------------------|------------------------|-----------------|-----------|-------------|------------------------|------------------------|
| | w ₀ (ml) | w ₁ (ml) | 吸水量 (ml/ hr) | | 試體 編號 | w ₀ (ml) | w ₁ (ml) |
| 1 | 439.4 | 439.8 | 0.0 | 1 | 431.3 | 432.6 | 0.0 |
| 2 | 404.3 | 405.5 | | 2 | 438.6 | 439.8 | |

(資料來源：本研究整理)

表 4-32 不同配比試體之長度變化

| 齡期 配比 | 72 小時 | 7 天 | 14 天 | 21 天 | 28 天 |
|----------|--------|---------|---------|---------|---------|
| F00SP00 | 0.000% | 0.026% | 0.045% | 0.050% | 0.000% |
| F25SP00 | 0.000% | 0.013% | 0.034% | 0.046% | 0.000% |
| F00SP07 | 0.000% | 0.028% | 0.028% | 0.035% | 0.000% |
| F25SP07 | 0.000% | 0.041% | 0.053% | 0.057% | 0.000% |
| 無收縮水泥砂漿 | 0.000% | -0.068% | -0.076% | -0.082% | -0.075% |
| 環氧樹脂砂漿 | 0.000% | 0.000% | 0.000% | -0.001% | 0.000% |

(資料來源：本研究整理)

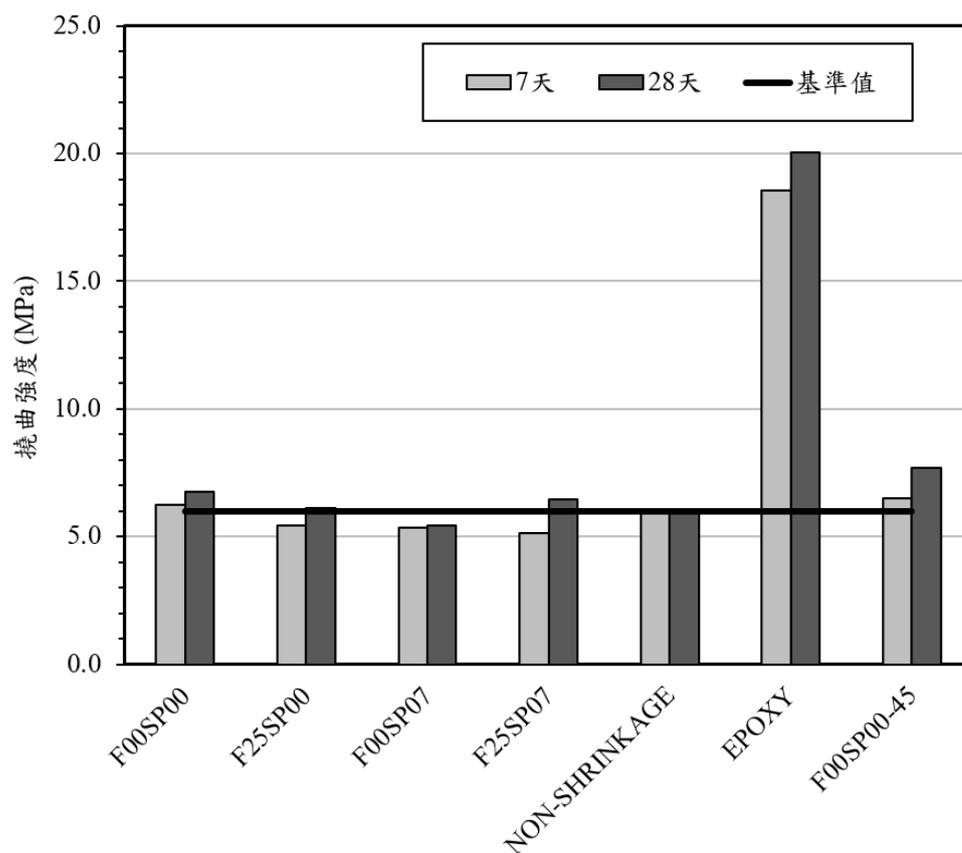


圖 4-1 各試體之撓曲強度結果

(資料來源：本研究整理)

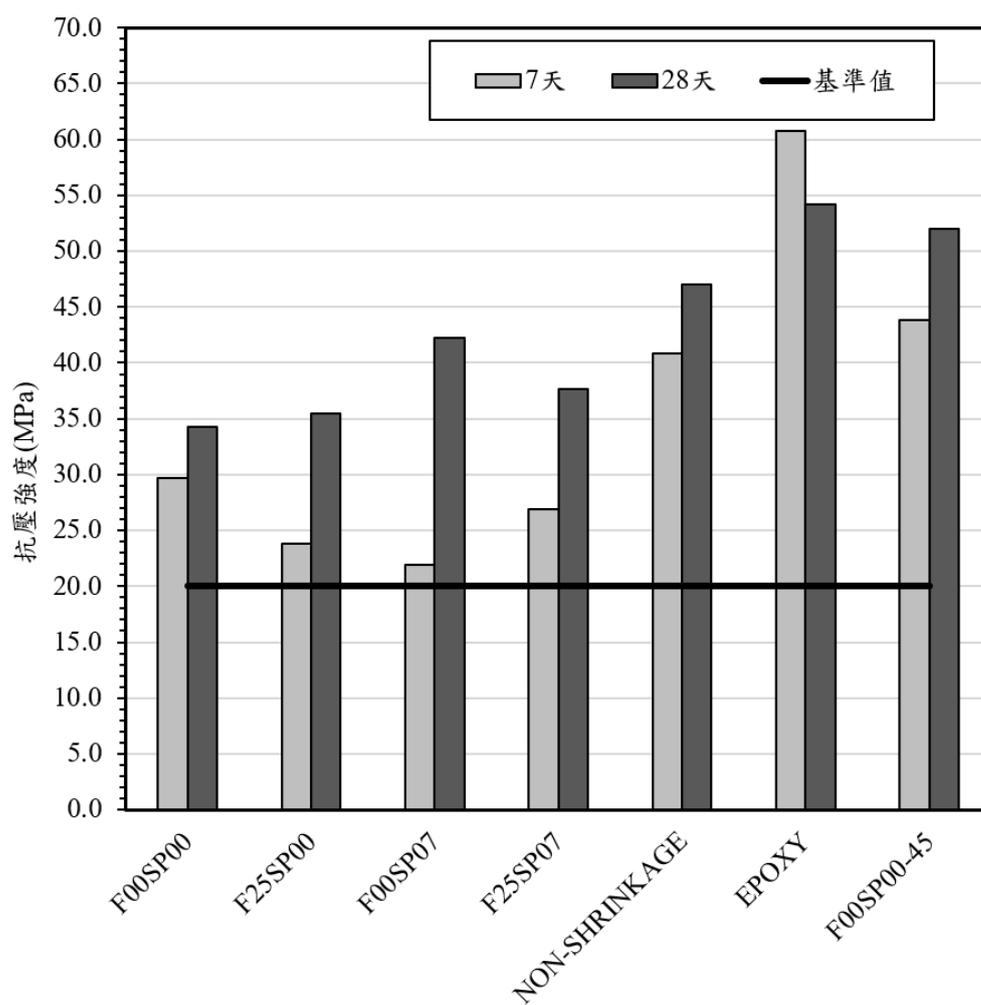


圖 4-2 各試體之抗壓強度結果

(資料來源：本研究整理)

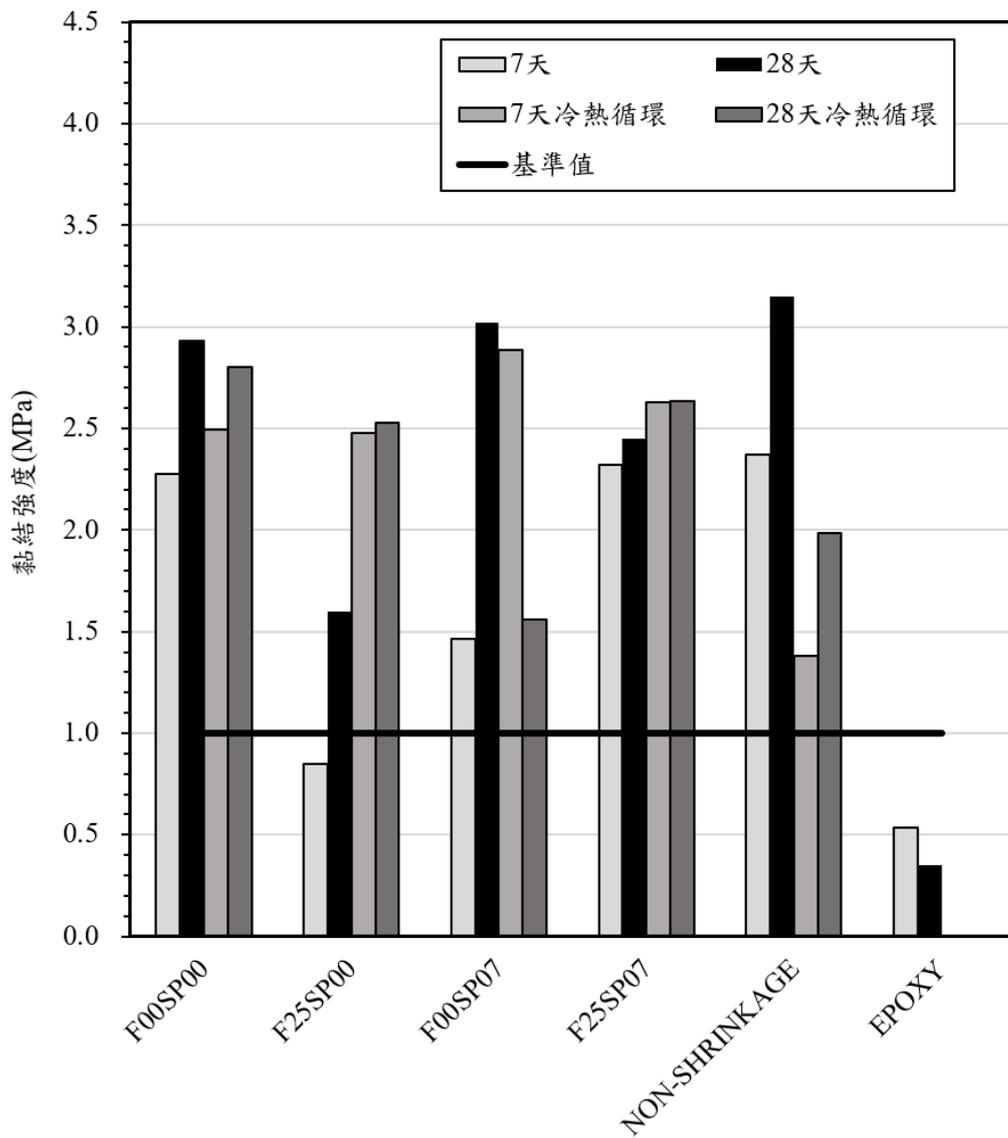


圖 4-3 各試體之黏結強度結果

(資料來源：本研究整理)

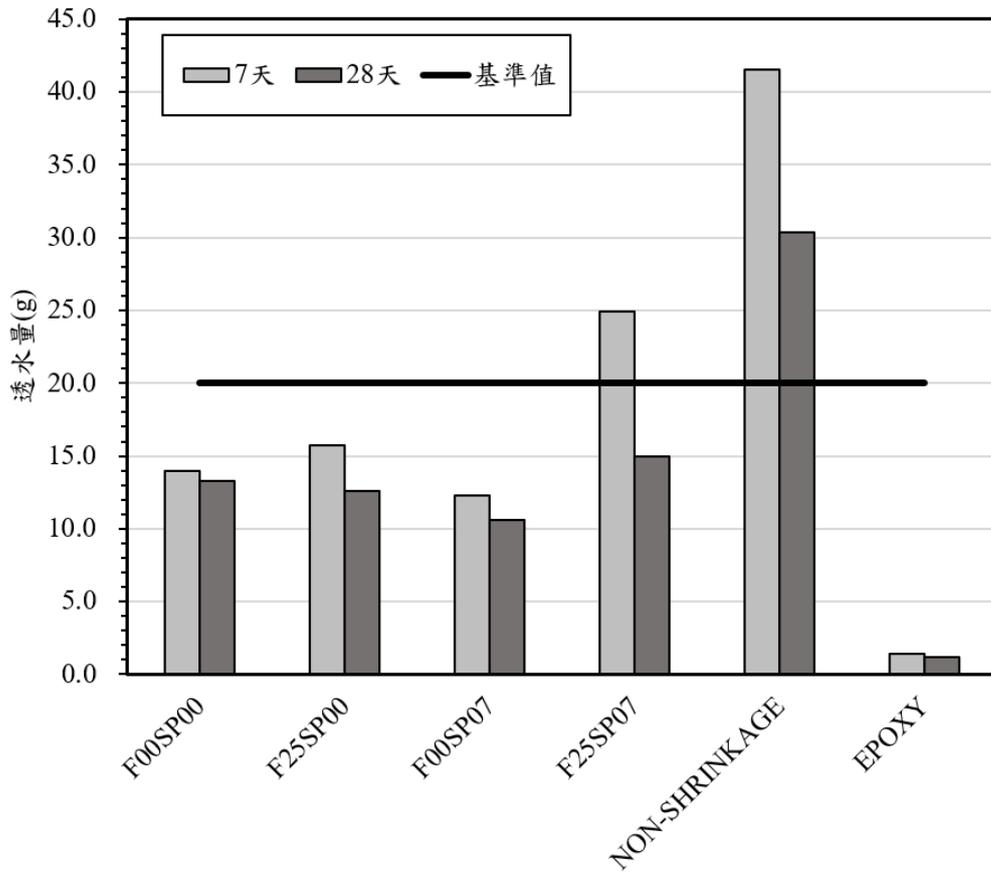


圖 4-4 各試體之透水量結果
(資料來源：本研究整理)

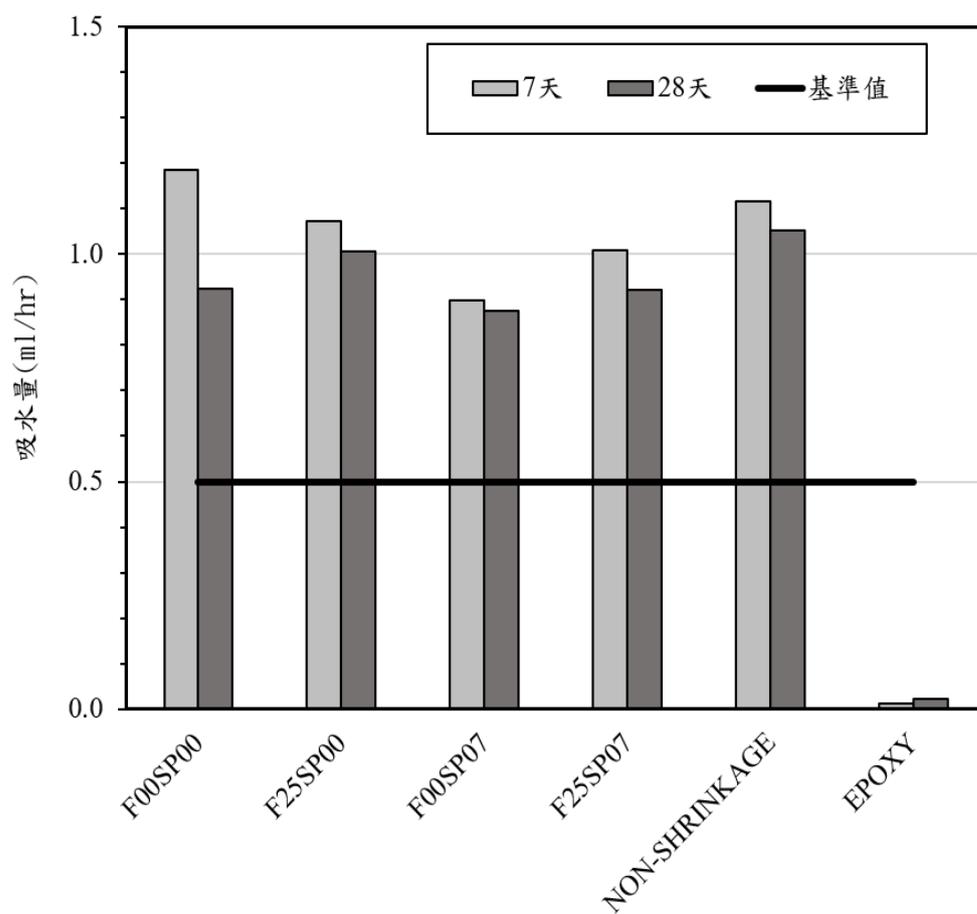


圖 4-5 各試體之吸水量結果
(資料來源：本研究整理)

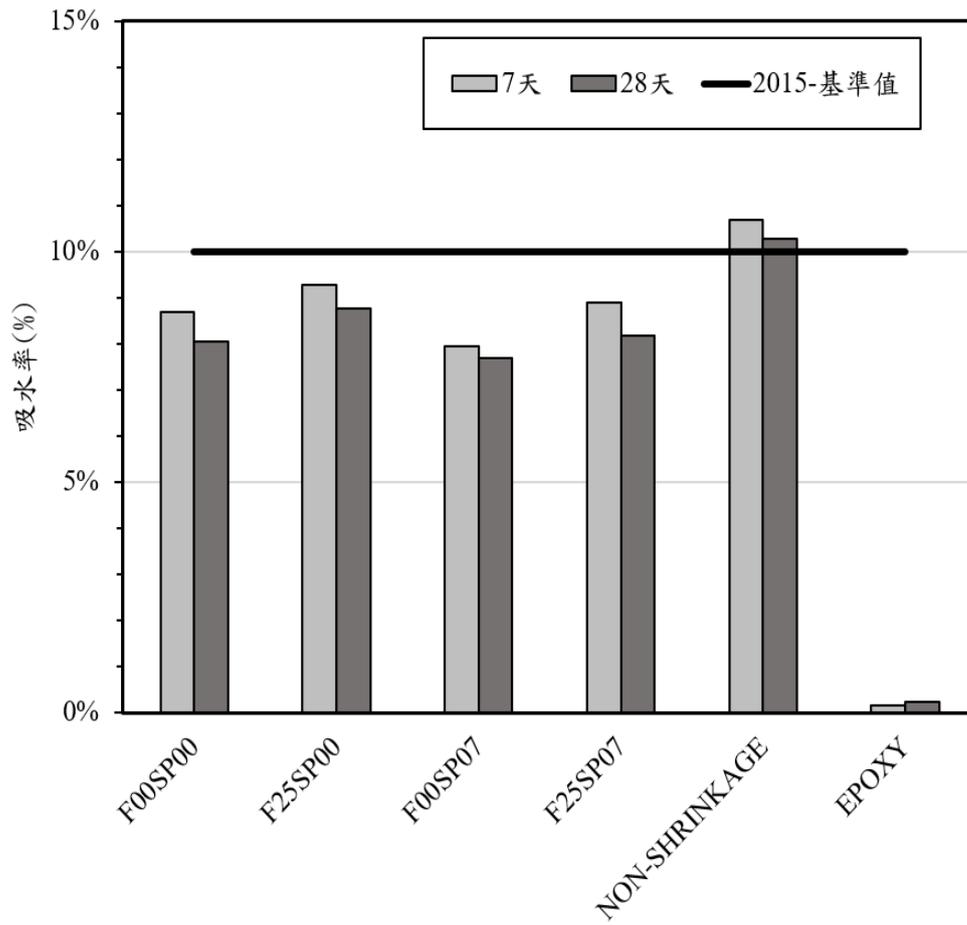


圖 4-6 各試體之吸水率結果
(資料來源：本研究整理)

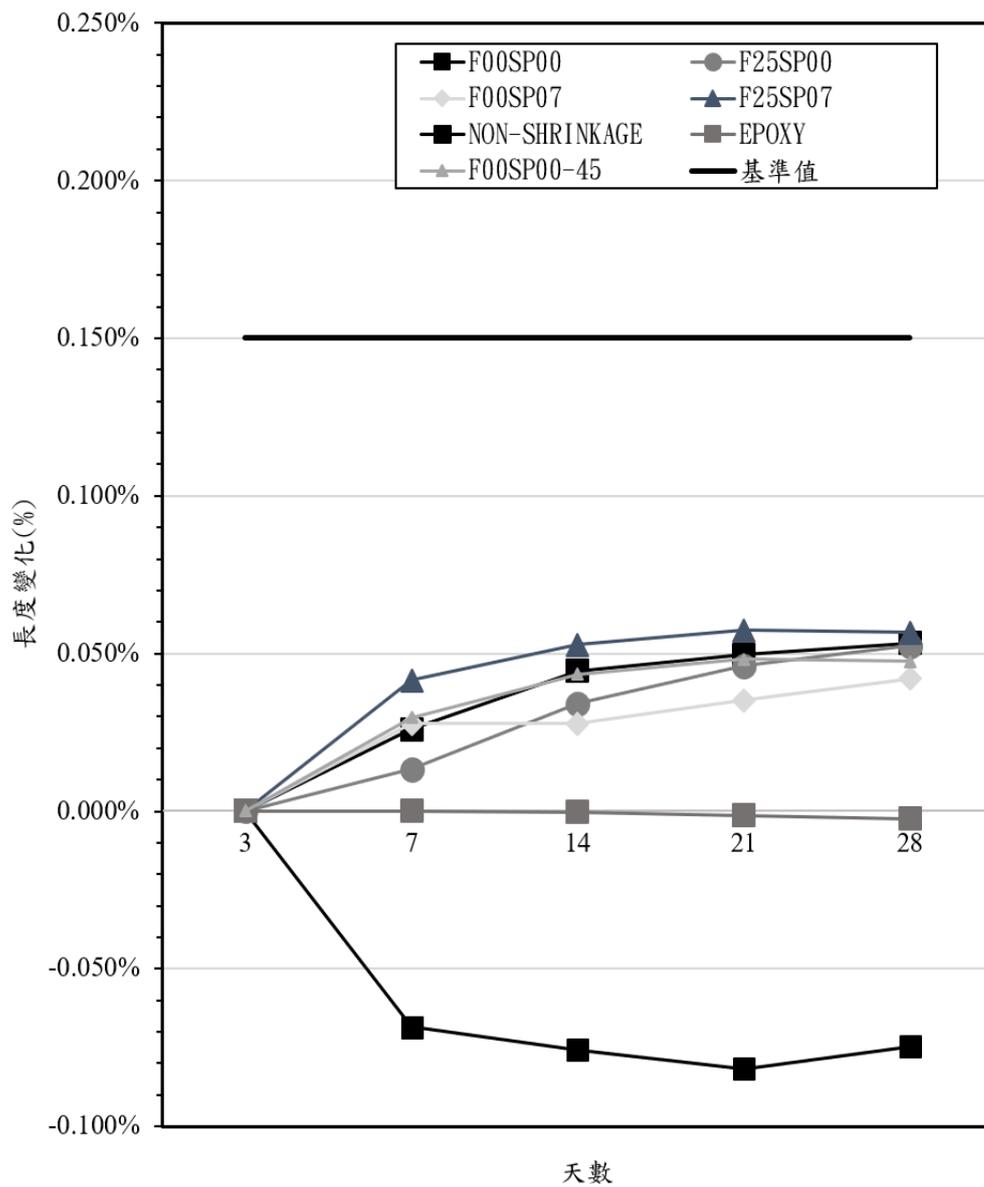


圖 4-7 各試體之長度變化結果
(資料來源：本研究整理)



圖 4-8 F00SP00 之 7 天齡期下撓曲及抗壓試驗照片

(資料來源：本研究整理)



圖 4-9 F00SP00 之 28 天齡期下撓曲及抗壓試驗照片

(資料來源：本研究整理)



圖 4-10 F00SP00 之 7 天齡期下黏結強度試驗照片

(資料來源：本研究整理)

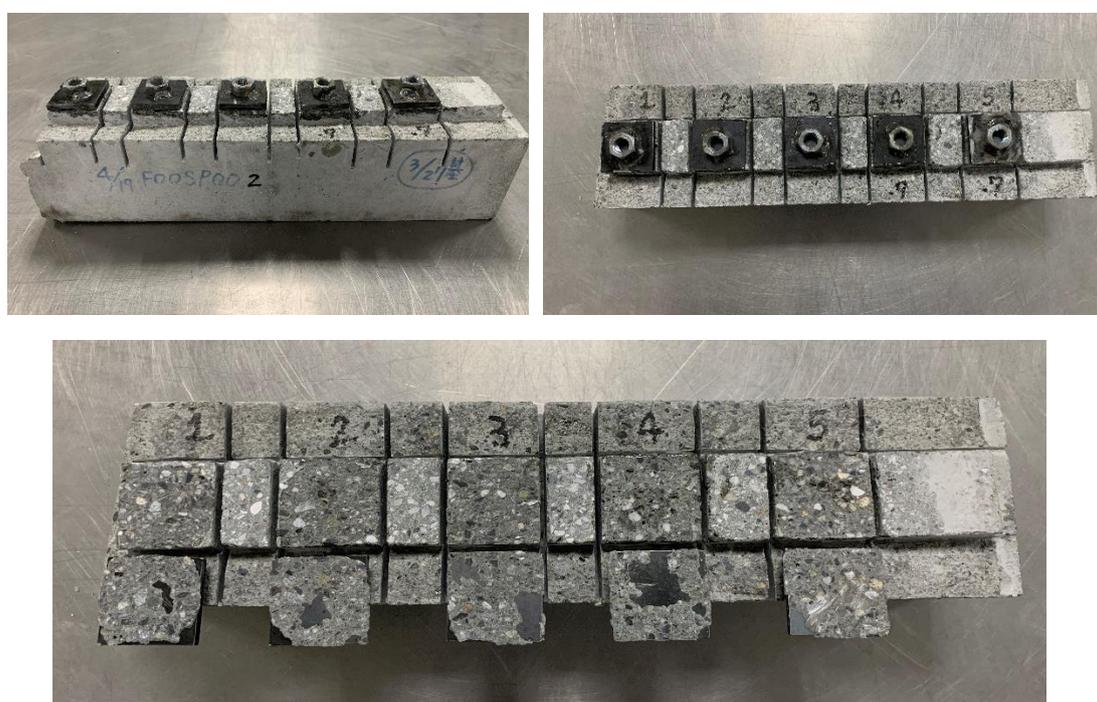


圖 4-11 F00SP00 之 28 天齡期下黏結強度試驗照片

(資料來源：本研究整理)



圖 4-12 F00SP00 之 7 天循環齡期下黏結強度試驗照片

(資料來源：本研究整理)



圖 4-13 F00SP00 之 28 天循環齡期下黏結強度試驗照片

(資料來源：本研究整理)



圖 4-14 F25SP00 之 7 天齡期下撓曲及抗壓試驗照片

(資料來源：本研究整理)



圖 4-15 F25SP00 之 28 天齡期下撓曲及抗壓試驗照片

(資料來源：本研究整理)

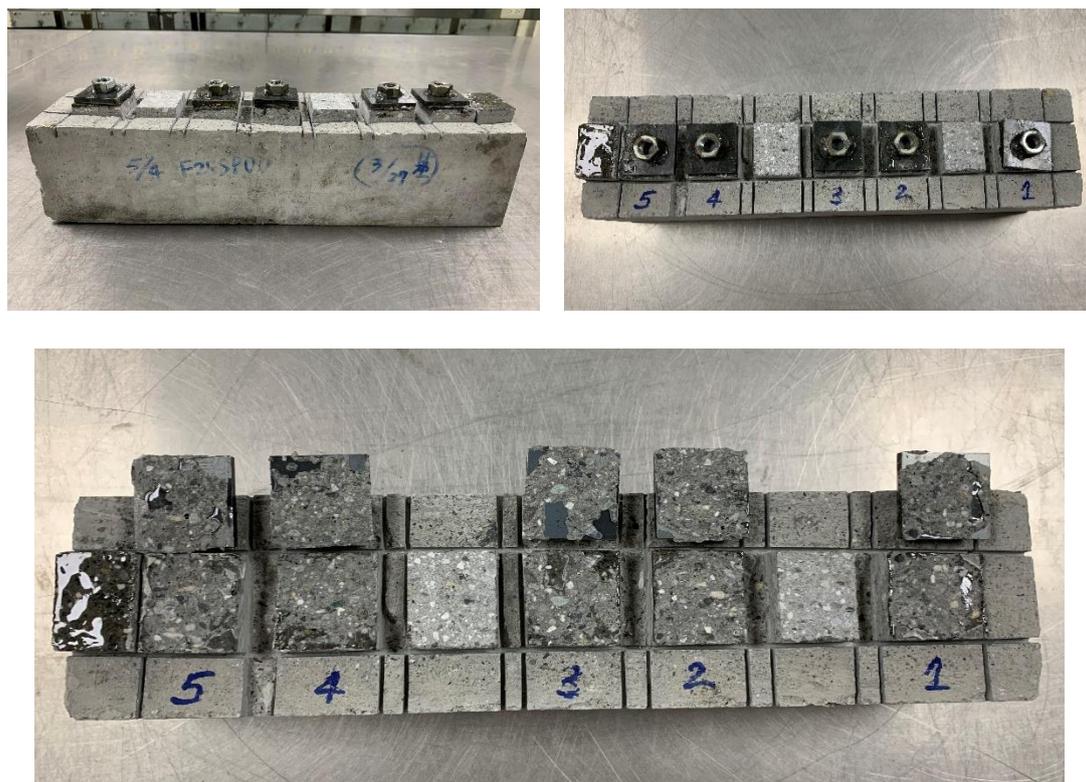


圖 4-16 F25SP00 之 7 天齡期下黏結強度試驗照片

(資料來源：本研究整理)

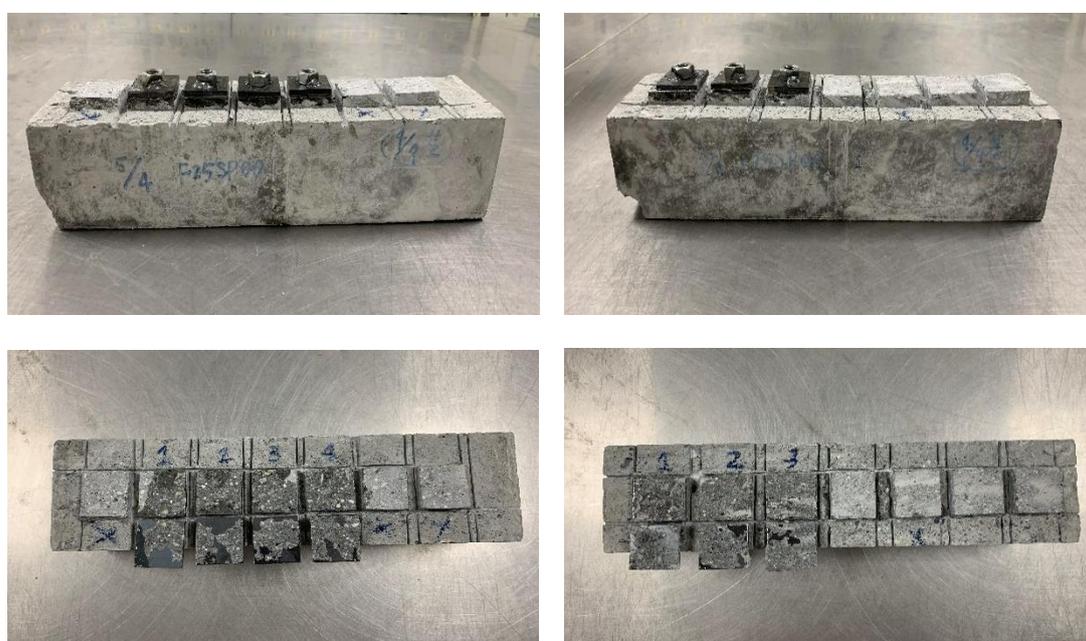


圖 4-17 F25SP00 之 28 天齡期下黏結強度試驗照片

(資料來源：本研究整理)

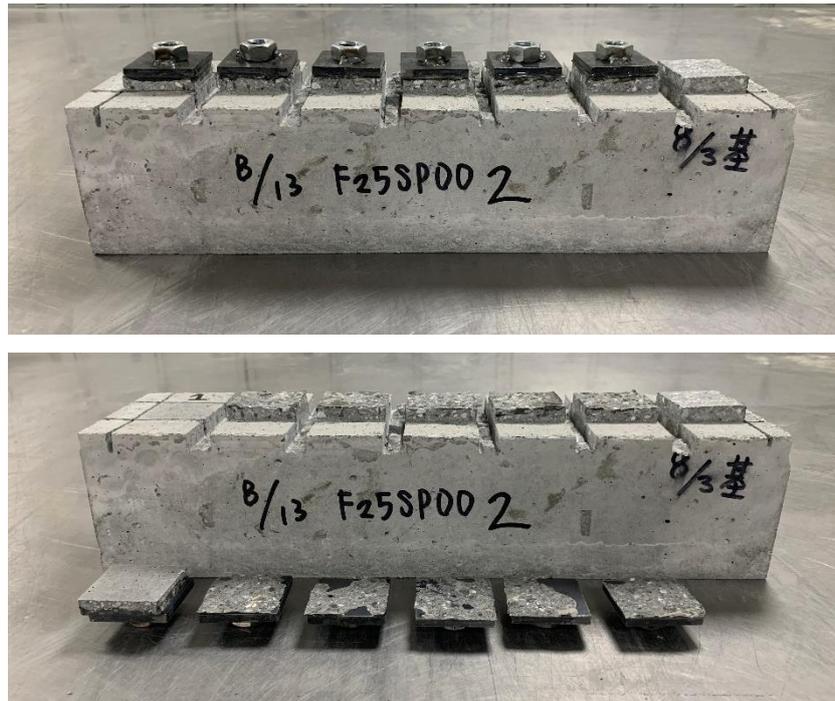


圖 4- 18 F25SP00 之 7 天循環齡期下黏結強度試驗照片

(資料來源：本研究整理)

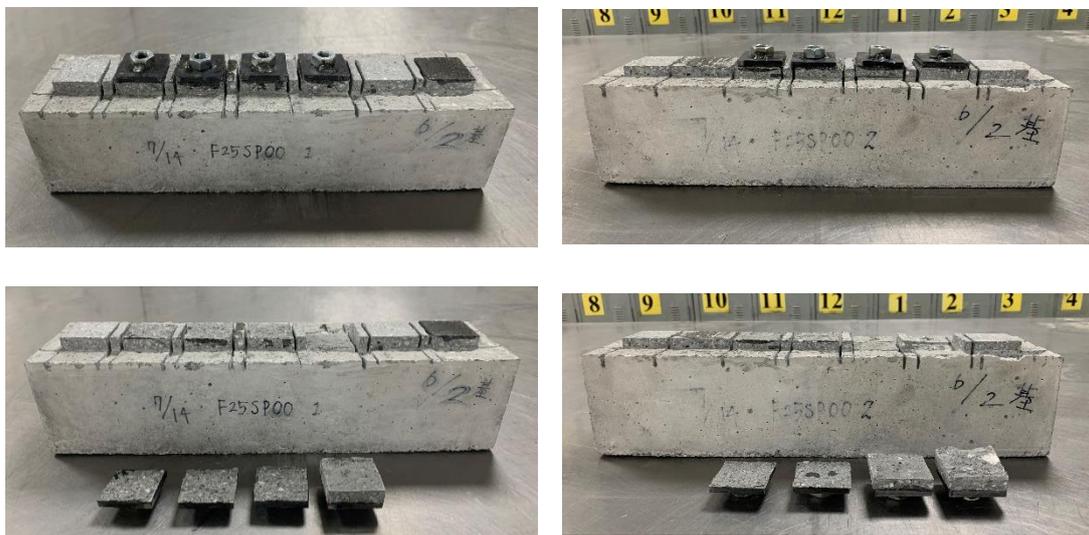


圖 4- 19 F25SP00 之 28 天循環齡期下黏結強度試驗照片

(資料來源：本研究整理)



圖 4-20 F00SP07 之 7 天齡期下撓曲及抗壓試驗照片

(資料來源：本研究整理)



圖 4-21 F00SP07 之 28 天齡期下撓曲及抗壓試驗照片

(資料來源：本研究整理)



圖 4-22 F00SP07 之 7 天齡期下黏結強度試驗照片

(資料來源：本研究整理)



圖 4-23 F00SP07 之 28 天齡期下黏結強度試驗照片

(資料來源：本研究整理)



圖 4- 24 F00SP07 之 7 天循環齡期下黏結強度試驗照片
(資料來源：本研究整理)



圖 4- 25 F00SP07 之 28 天循環齡期下黏結強度試驗照片
(資料來源：本研究整理)

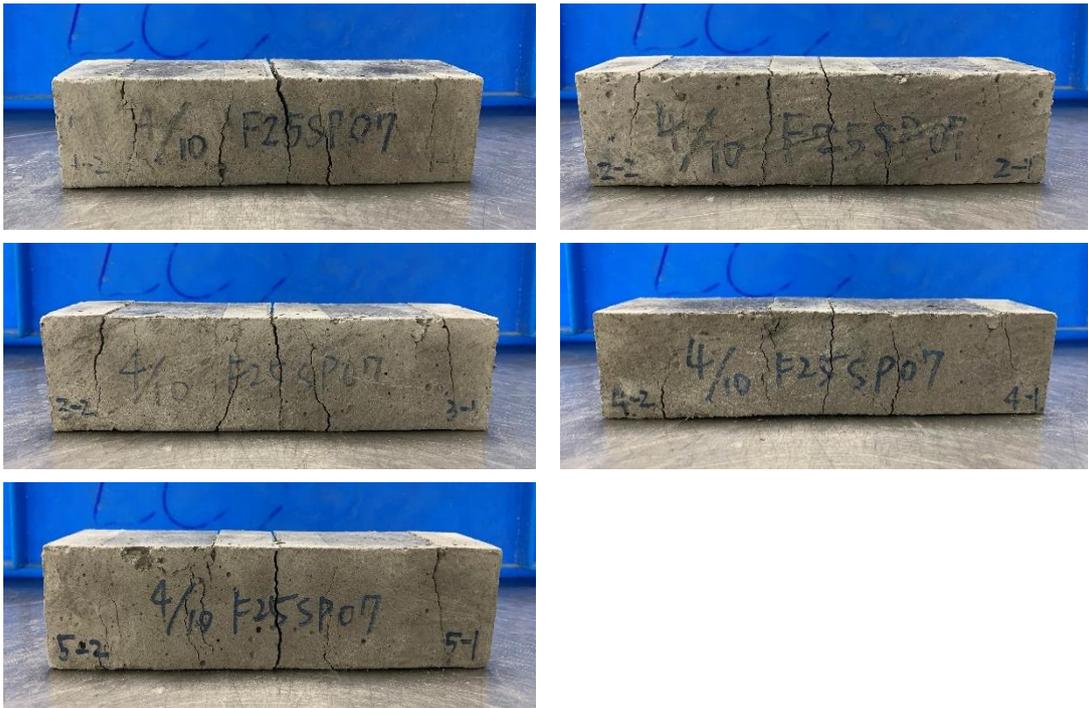


圖 4-26 F25SP07 之 7 天齡期下撓曲及抗壓試驗照片

(資料來源：本研究整理)



圖 4-27 F25SP07 之 28 天齡期下撓曲及抗壓試驗照片

(資料來源：本研究整理)



圖 4-28 F25SP07 之 7 天齡期下黏結強度試驗照片

(資料來源：本研究整理)



圖 4-29 F25SP07 之 28 天齡期下黏結強度試驗照片

(資料來源：本研究整理)



圖 4-30 F25SP07 之 7 天循環齡期下黏結強度試驗照片

(資料來源：本研究整理)



圖 4-31 F25SP07 之 28 天循環齡期下黏結強度試驗照片

(資料來源：本研究整理)



圖 4-32 無收縮水泥砂漿試體於 7 天齡期下撓曲及抗壓試驗照片

(資料來源：本研究整理)



圖 4-33 無收縮水泥砂漿試體於 28 天齡期下撓曲及抗壓試驗照片

(資料來源：本研究整理)



圖 4-34 無收縮水泥砂漿試體於 7 天齡期下黏結強度試驗照片
(資料來源：本研究整理)



圖 4-35 無收縮水泥砂漿試體於 28 天齡期下黏結強度試驗照片
(資料來源：本研究整理)

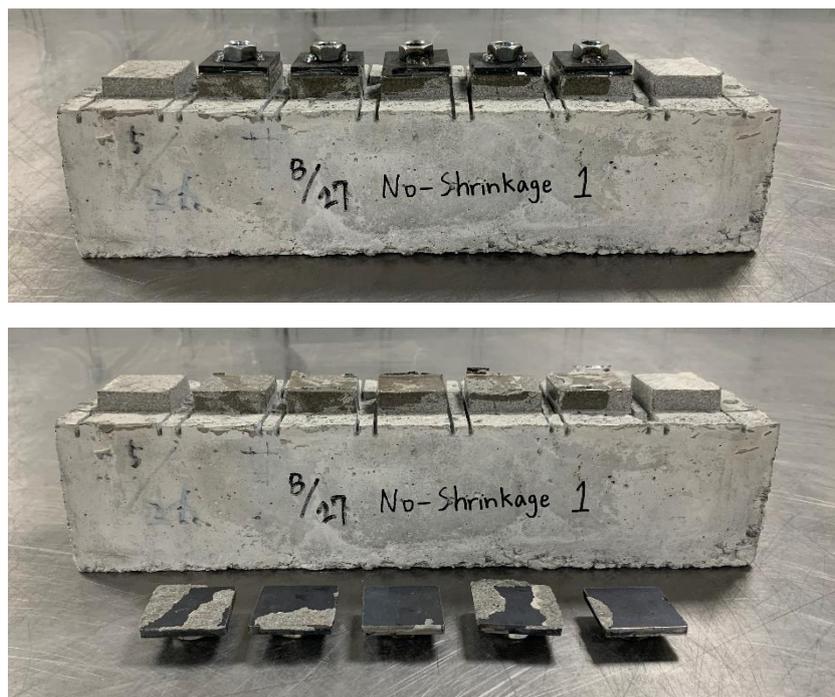


圖 4-36 無收縮水泥砂漿試體於 7 天循環齡期下黏結強度試驗照片
(資料來源：本研究整理)



圖 4-37 無收縮水泥砂漿試體於 28 天循環齡期下黏結強度試驗照片
(資料來源：本研究整理)



圖 4-38 環氧樹脂砂漿試體於 7 天齡期下撓曲及抗壓試驗照片

(資料來源：本研究整理)



圖 4-39 環氧樹脂砂漿試體於 28 天齡期下撓曲及抗壓試驗照片

(資料來源：本研究整理)

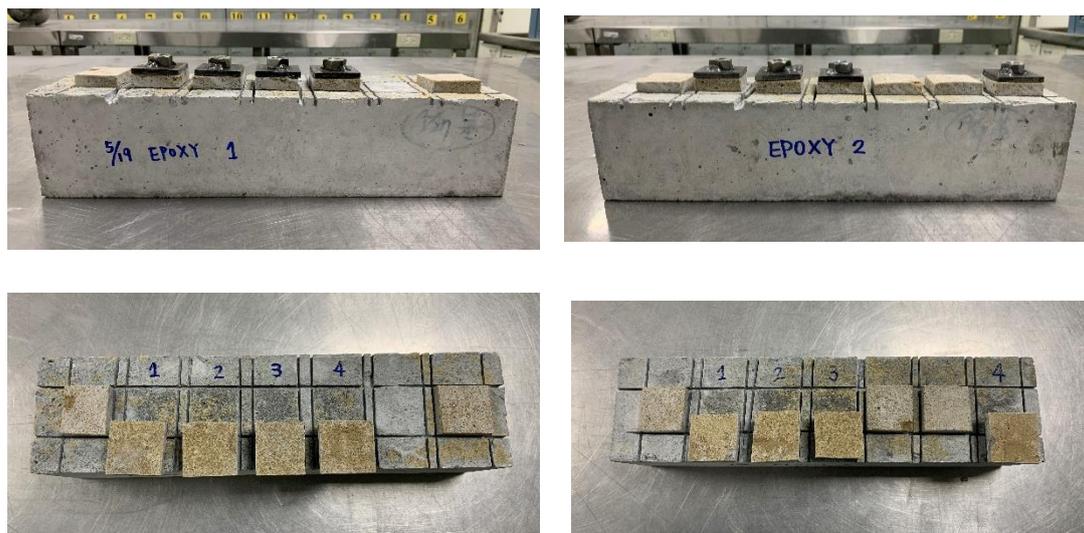


圖 4-40 環氧樹脂砂漿試體於 7 天齡期下黏結強度試驗照片

(資料來源：本研究整理)



圖 4-41 環氧樹脂砂漿試體於 28 天齡期下黏結強度試驗照片

(資料來源：本研究整理)

第二節 第二階段試驗結果與討論

本階段試驗探討各材料搭配不同黏結材、不同表面粗糙度及冷熱循環下之黏結強度，試驗結果如表 4- 33 及圖 4- 42 所示，相關試驗照片圖 4- 43 圖 4- 58 所示。

由圖 4- 42 可發現純水泥砂漿(F00SP00)及聚合物含飛灰水泥砂漿(F25SP07)在冷熱環境下強度仍可發展，冷熱環境對於此兩種修復材料不會造成太大影響。黏結材之施作部分若與第一階段中黏結強度試驗(如圖 4- 3)相比，鏝塗黏結材的結果會 28 天齡期下有更好的黏結強度。無收縮水泥砂漿之表面粗糙度影響較為明顯，推斷在表面粗糙度低的情況下因無收縮水泥砂漿之細粒料相較水泥砂漿細，造成其黏節強度較差。環氧樹脂砂漿的部分，使用正確之環氧樹脂砂漿介面處理劑之主劑(A 劑)和硬化劑(B 劑)作為黏結材，相較第一階段中無使用黏結材之環氧樹脂砂漿之黏結強度高出許多，從試驗結果可以了解到，使用正確的介面黏結劑對於環氧樹脂砂漿有相當大的影響。

表 4-33 不同配比表面粗糙度與環境溫度影響下之 28 天齡期黏結強度

| 配比 | 環境 | 砂目 | | 中間 | |
|---------|------|--------------|---------------|--------------|---------------|
| | | 最大荷重 (kN) | 黏結強度 (MPa) | 最大荷重 (kN) | 黏結強度 (MPa) |
| F00SP00 | 一般 | 2.99 | 1.9 | 5.36 | 3.4 |
| | 冷熱循環 | 5.26 | 3.3 | 5.38 | 3.4 |
| F25SP07 | 一般 | 2.96 | 1.9 | 4.93 | 3.1 |
| | 冷熱循環 | 3.52 | 2.2 | 5.42 | 3.4 |
| 無收縮水泥砂漿 | 一般 | 4.45 | 2.8 | 0.54 | 0.3 |
| | 冷熱循環 | 4.12 | 2.6 | 3.73 | 2.3 |
| 環氧樹脂砂漿 | 一般 | 2.93 | 1.8 | 4.46 | 2.8 |
| | 冷熱循環 | 1.81 | 1.1 | 3.16 | 2.0 |

(資料來源：本研究整理)

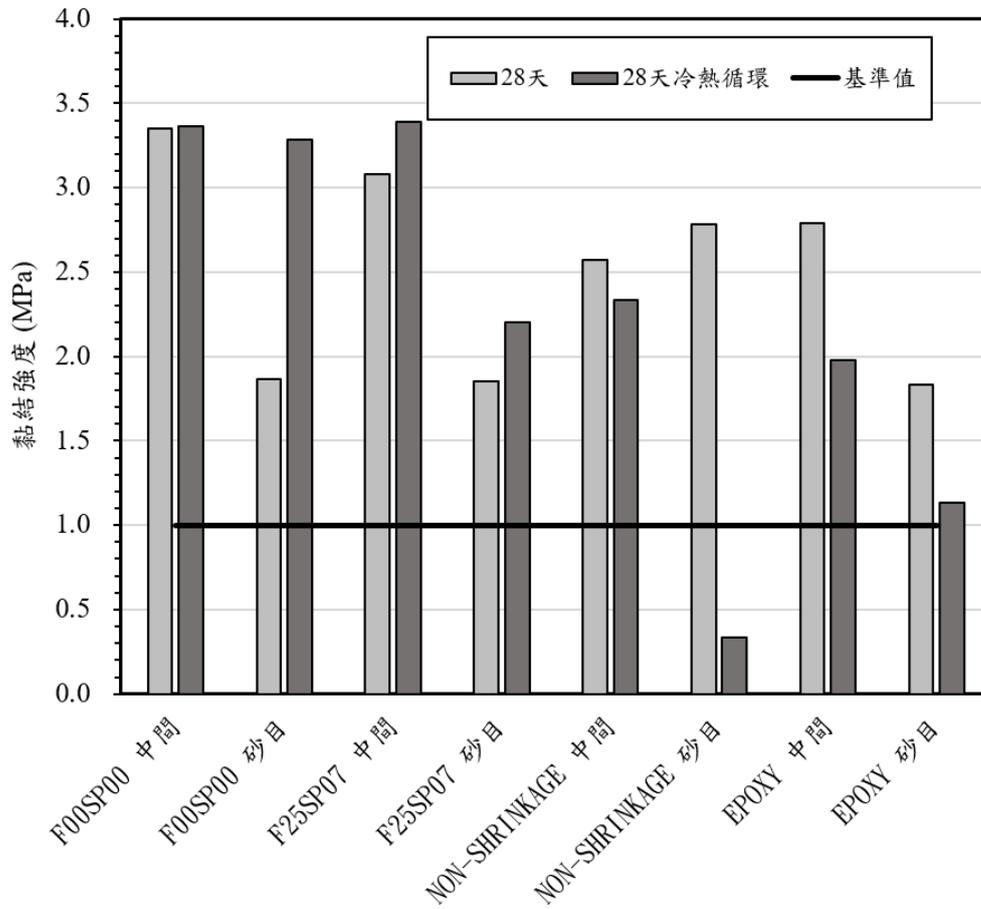


圖 4-42 各材料在不同表面粗糙度與冷熱循環下之 28 天試驗結果

(資料來源：本研究整理)



圖 4-43 F00SP00 之 28 天齡期下表面粗糙度為中間之黏結強度試驗照片
(資料來源：本研究整理)

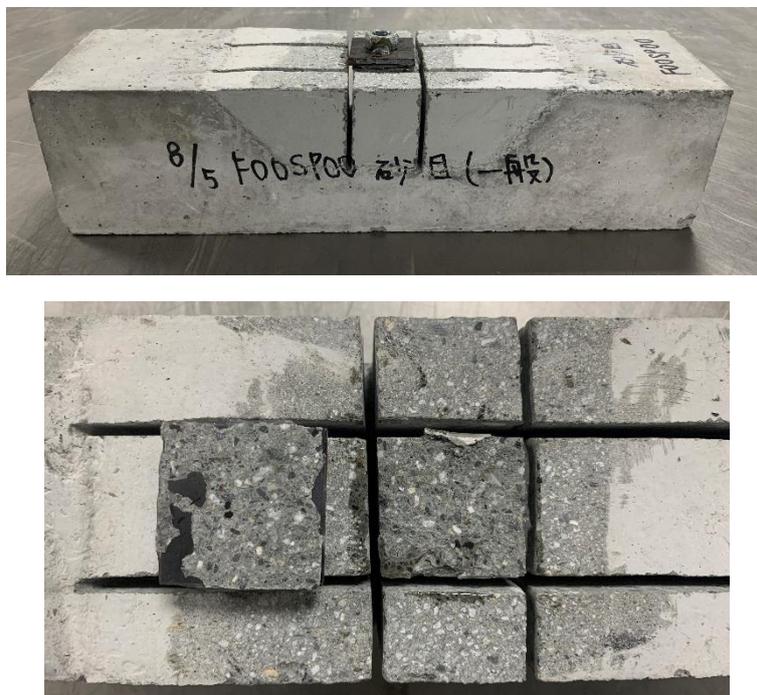


圖 4-44 F00SP00 之 28 天齡期下表面粗糙度為砂目之黏結強度試驗照片
(資料來源：本研究整理)



圖 4-45 F00SP00 之 28 天循環齡期下表面粗糙度為中間之黏結強度試驗照片
(資料來源：本研究整理)



圖 4-46 F00SP00 之 28 天循環齡期下表面粗糙度為砂目之黏結強度試驗照片
(資料來源：本研究整理)



圖 4-47 F25SP07 之 28 天齡期下表面粗糙度為中間之黏結強度試驗照片

(資料來源：本研究整理)



圖 4-48 F25SP07 之 28 天齡期下表面粗糙度為砂目之黏結強度試驗照片

(資料來源：本研究整理)



圖 4-49 F25SP07 之 28 天循環齡期下表面粗糙度為中間之黏結強度試驗照片
(資料來源：本研究整理)

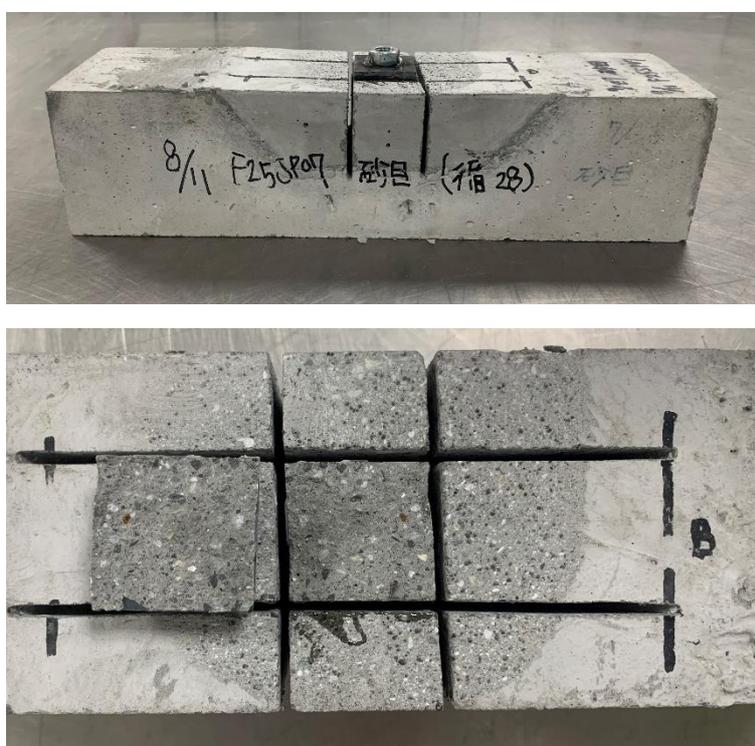


圖 4-50 F25SP07 之 28 天循環齡期下表面粗糙度為砂目之黏結強度試驗照片
(資料來源：本研究整理)

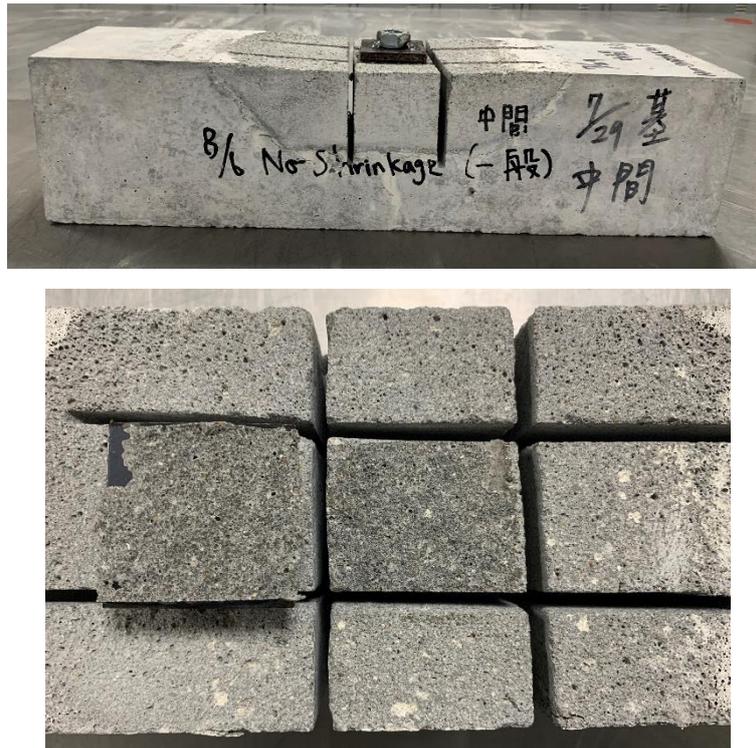


圖 4-51 無收縮水泥砂漿之 28 天齡期下表面粗糙度為中間之黏結強度試驗照片
(資料來源：本研究整理)



圖 4-52 無收縮水泥砂漿之 28 天齡期下表面粗糙度為砂目之黏結強度試驗照片
(資料來源：本研究整理)



圖 4-53 無收縮水泥砂漿之 28 天循環齡期下表面粗糙度為中間之黏結強度試驗照片

(資料來源：本研究整理)



圖 4-54 無收縮水泥砂漿之 28 天循環齡期下表面粗糙度為砂目之黏結強度試驗照片

(資料來源：本研究整理)



圖 4-55 環氧樹脂砂漿之 28 天齡期下表面粗糙度為中間之黏結強度試驗照片
(資料來源：本研究整理)



圖 4-56 環氧樹脂砂漿之 28 天齡期下表面粗糙度為砂目之黏結強度試驗照片
(資料來源：本研究整理)



圖 4-57 環氧樹脂砂漿之 28 天循環齡期下表面粗糙度為中間之黏結強度試驗照片

(資料來源：本研究整理)



圖 4-58 環氧樹脂砂漿之 28 天循環齡期下表面粗糙度為中間之黏結強度試驗照片

(資料來源：本研究整理)

第三節 第三階段試驗結果與討論

本階段將梁構件之破壞模式設計為撓曲破壞，並利用四點抗彎試驗設計之純彎矩段，觀察修復材在受拉力的情況下，是否造成修復界面損壞或修復材剝落等行為。試驗之位移量由變位角 0.1 % 開始，為觀察修復區域之變化及裂縫發展，將加載速率放慢至 0.1 mm/s 進行，以下將針對裂縫發展探討其力學行為。

壹、使用水泥砂漿修復之腐蝕梁構件

試驗進行至變位角為 0.1 % 時(如圖 4-59)，純彎段出現撓曲裂縫，水泥砂漿修復材中央出現寬度為 0.2 mm 之裂縫，且裂縫由底端受拉處向上延伸穿越修復界面至基底混凝土，而修復材與基底混凝土之界面出現寬度為 0.15 mm 之界面裂縫；試驗進行至變位角為 0.4 % 時(如圖 4-60)，修復材最大裂縫為 0.4 mm，並出現第二條由界面延伸至基底混凝土之裂縫，寬度為 0.2 mm，界面裂縫最大則達到 0.3 mm，梁構件左右兩端之剪力裂縫最大寬度為 0.15 mm；試驗進行至 1.0 % 時，修復材最大裂縫達到 1.0 mm，界面裂縫最大達到 0.65 mm，此時有 5 條撓曲裂縫於水泥砂漿修復材及 3 條修復界面裂縫沿著界面發展；當試驗進行至 3.5 % 時(如圖 4-61)，修復材最大裂縫出現於最大撓曲裂縫之界面處，裂縫寬度為 5.0 mm，剪力裂縫之寬度則介於 0.2 mm 至 0.4 之間；當試驗進行至 7.5 % 時(如圖 4-62)，梁試體強度衰減 20%，結束試驗，此時梁構件上部因鋼筋挫曲造成混凝土擠壓剝落，但下部水泥砂漿修復處皆未出現修復材剝落、掉落及界面損壞之現象。其水泥砂漿梁構件於各變位角之裂縫發展可參考圖 4-63。



圖 4- 59 由水泥砂漿修復之鋼筋腐蝕梁構件達變位角 0.1 %之修復區域
(資料來源：本研究整理)



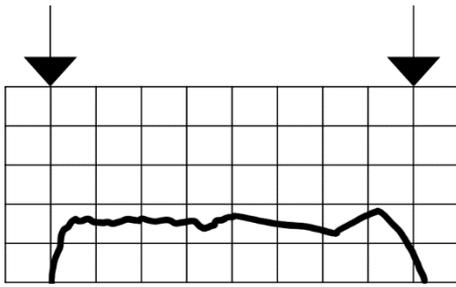
圖 4- 60 由水泥砂漿修復之鋼筋腐蝕梁構件達變位角 0.4 %之修復區域
(資料來源：本研究整理)



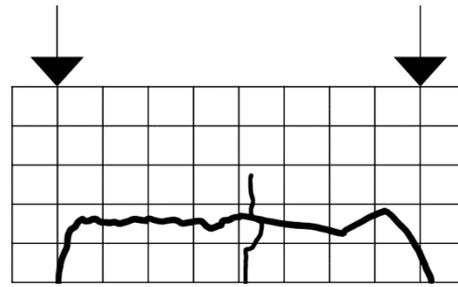
圖 4- 61 由水泥砂漿修復之鋼筋腐蝕梁構件達變位角 3.5 %之修復區域
(資料來源：本研究整理)



圖 4- 62 由水泥砂漿修復之鋼筋腐蝕梁構件達破壞時之修復區域
(資料來源：本研究整理)



(a) 0.0 %



(b) 0.1 %



(c) 0.2 %



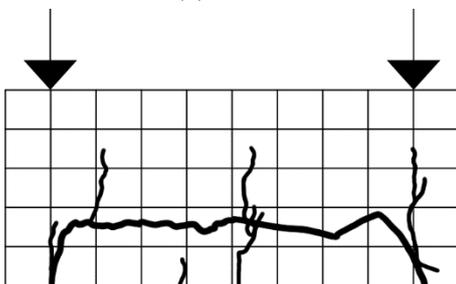
(d) 0.3 %



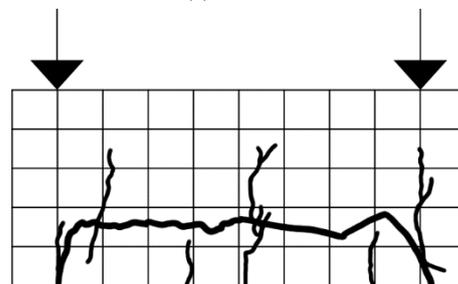
(e) 0.4 %



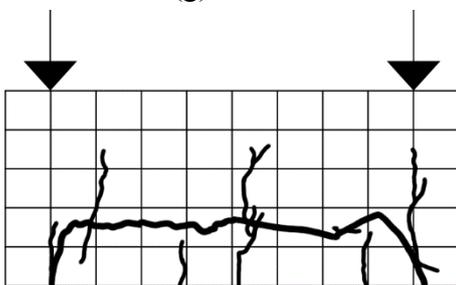
(f) 0.5 %



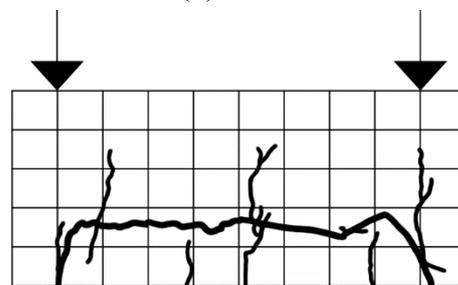
(g) 0.6 %



(h) 0.7 %



(i) 0.8 %



(j) 0.9 %

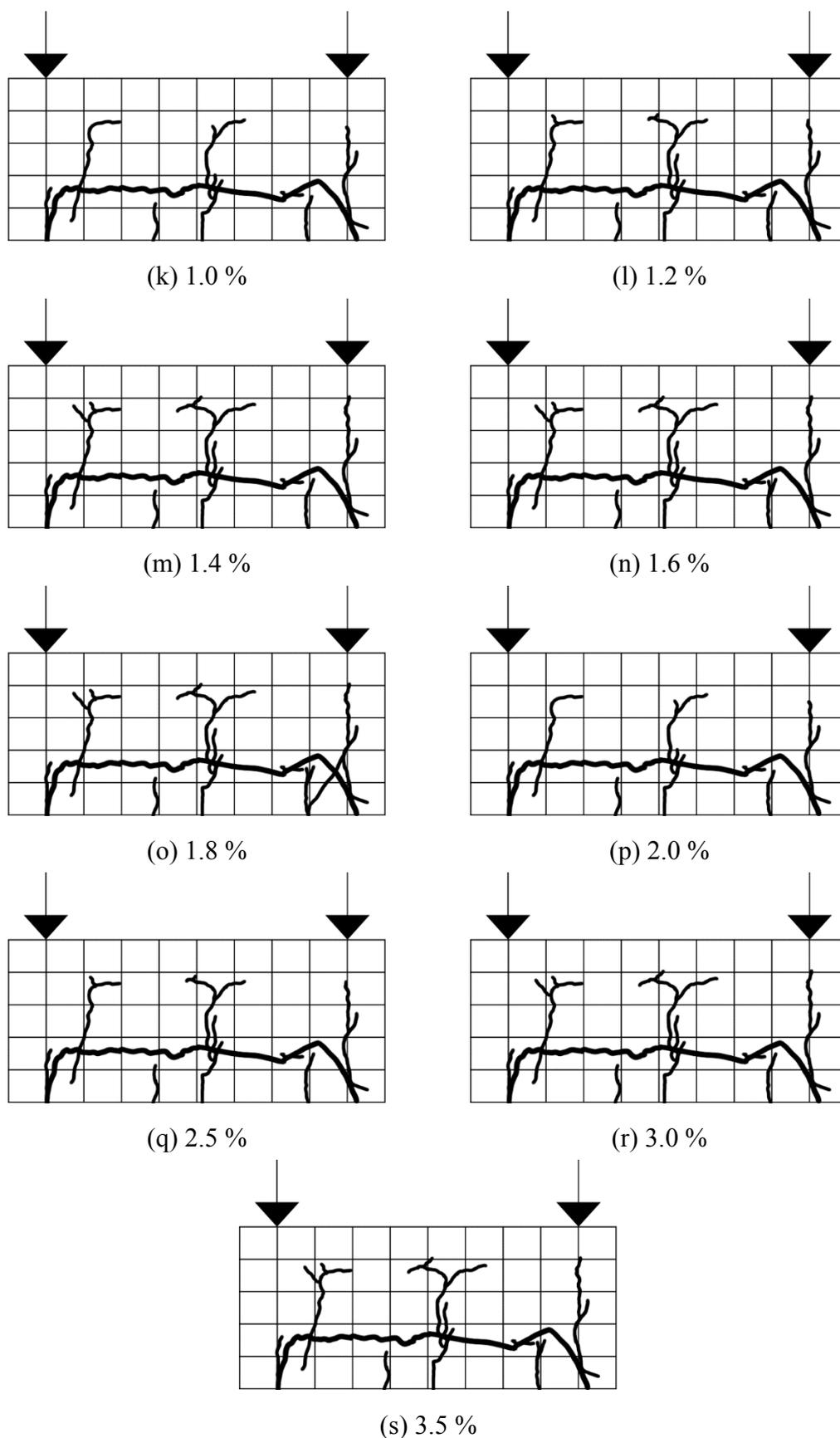


圖 4- 63 水泥砂漿修復材之梁構件純彎段各變位量之裂縫發展圖

貳、使用環氧樹脂砂漿修復之腐蝕梁構件

試驗進行至變位角為 0.1 % 時(如圖 4- 64)，純彎段無出現裂縫，試體左右兩端則出現剪力裂縫，最大寬度為 0.04 mm；試驗進行至變位角為 0.2 % 時(如圖 4- 65)，環氧樹脂砂漿修復材之修復介面出現第一條由介面向上延伸至基底混凝土的裂縫，寬度為 0.07 mm；試驗進行至變位角為 0.4 % 時(如圖 4- 66)，修復材料中央處出現第一條撓曲裂縫，並延伸至基底混凝土，裂縫寬度為 0.3 mm，同時最大修復材之介面裂縫為 0.2 mm，左右兩端之剪力裂縫寬度最大為 0.16 mm；試驗進行至變位角為 0.8 % 時(如圖 4- 67)，修復材料處出現第二條撓曲裂縫，且由底部延伸至基底混凝土，裂縫寬度為 0.42 mm，修復材之最大撓曲裂縫寬度為 0.6mm，左右兩端之剪力裂縫最大則為 0.38 mm；當試驗進行到變位角 3.5 % 時(如圖 4- 68)，修復處最大裂縫達到 4.5 mm，修復介面之裂縫最大為 3.0 mm，剪力裂縫最大則介於 0.23 mm 至 0.55 mm 之間；當試驗進行至 8.5 % 時(如圖 4- 69)，梁試體強度衰減 20%，結束試驗，此時梁構件上部因鋼筋挫曲造成混凝土擠壓剝落，但下部環氧樹脂砂漿修復處未出現修復材剝落、掉落及介面損壞之現象。其環氧樹脂砂漿梁構件於各變位角之裂縫發展可參考圖 4- 70。



圖 4- 64 由環氧砂漿修復之鋼筋腐蝕梁構件達變位角 0.1 %之修復區域
(資料來源：本研究整理)



圖 4- 65 由環氧砂漿修復之鋼筋腐蝕梁構件達變位角 0.2 %之修復區域
(資料來源：本研究整理)



圖 4-66 由環氧砂漿修復之鋼筋腐蝕梁構件達變位角 0.4 %之修復區域
(資料來源：本研究整理)



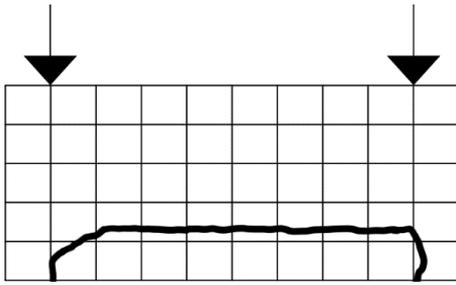
圖 4-67 由環氧砂漿修復之鋼筋腐蝕梁構件達變位角 0.8 %之修復區域
(資料來源：本研究整理)



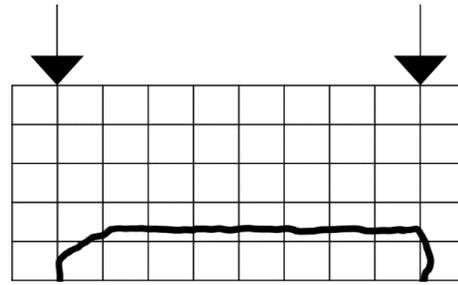
圖 4- 68 由環氧砂漿修復之鋼筋腐蝕梁構件達變位角 3.5 %之修復區域
(資料來源：本研究整理)



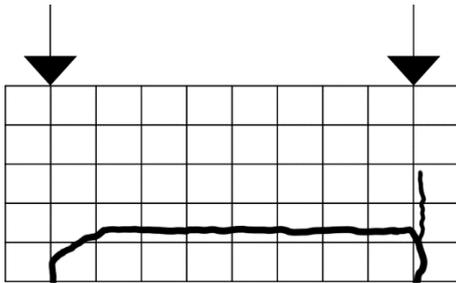
圖 4- 69 由環氧砂漿修復之鋼筋腐蝕梁構件達變位角破壞時之修復區域
(資料來源：本研究整理)



(a) 0.0 %



(b) 0.1 %



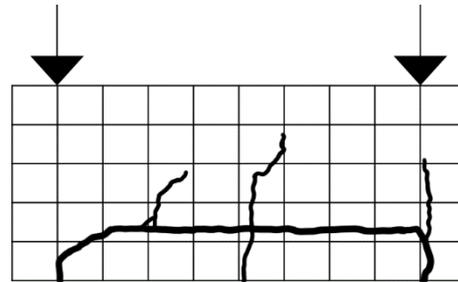
(c) 0.2 %



(d) 0.3 %



(e) 0.4 %



(f) 0.5 %



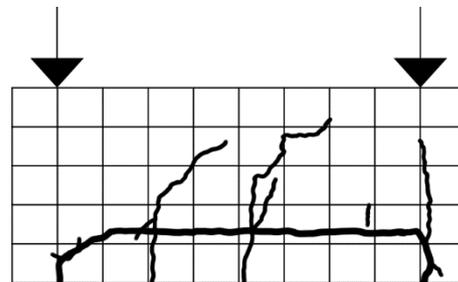
(g) 0.6 %



(h) 0.7 %



(i) 0.8 %



(j) 0.9 %

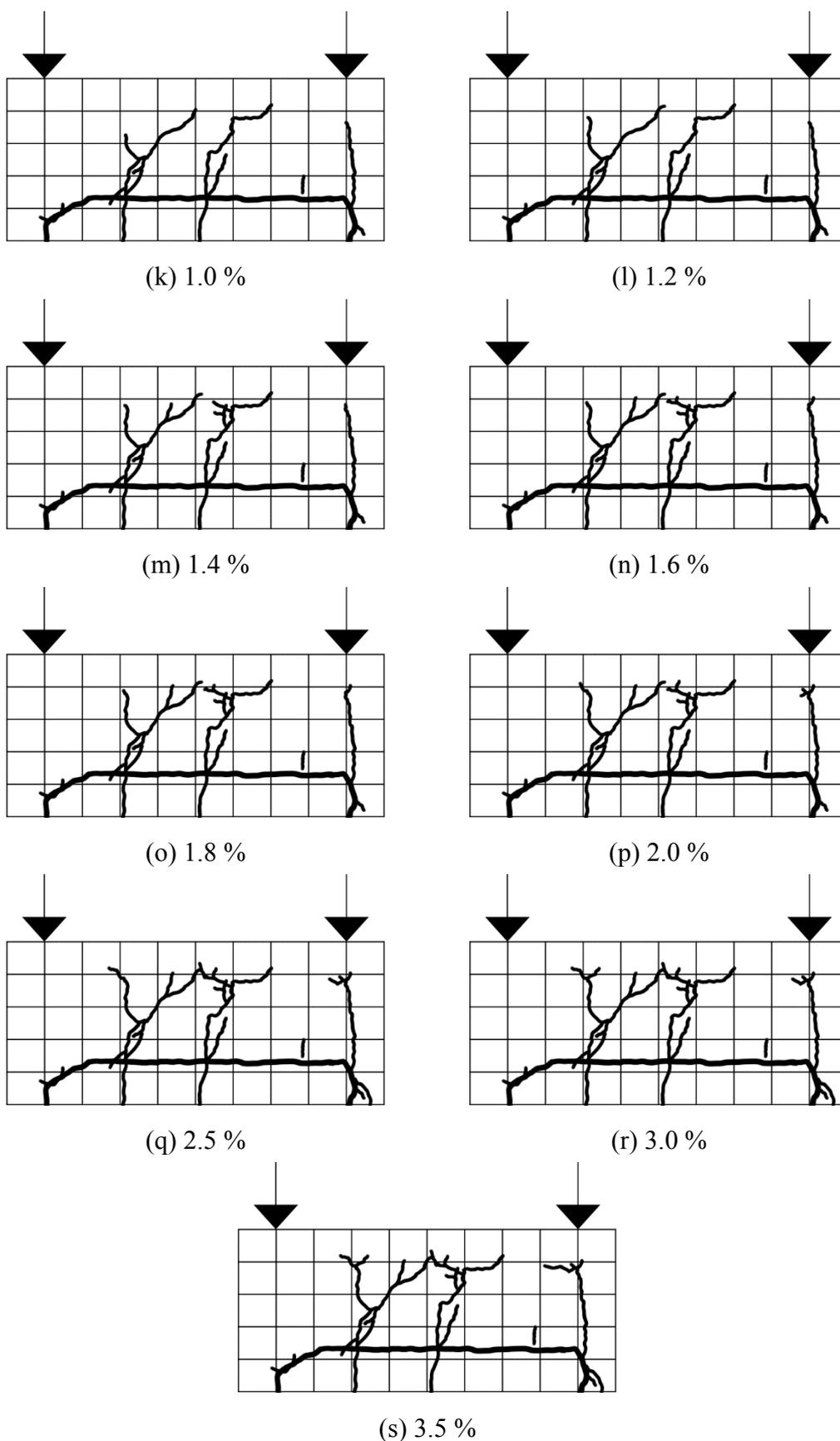


圖 4-70 環氧樹脂修復材之梁構件純彎段各變位量之裂縫發展圖

參、水泥砂漿修復材與環氧樹脂砂漿修復材於腐蝕梁構件之比較

由圖 4-71 中可以發現，水泥砂漿修復材之撓曲裂縫總和較環氧樹脂砂漿修復材寬，但由圖 4-72 中又可以發現，當變位角逐漸增大時，環氧樹脂砂漿的最大裂縫寬度卻大於水泥砂漿的最大裂縫寬度。當材料與鋼筋握裹得越好其發展出的裂縫雖然多，卻不會造成太大的裂縫，相對的，若握裹能力較低，則裂縫雖然少，卻會較大的裂縫，試驗中當變位角達 1.8 % 時，水泥砂漿之最大撓曲裂縫為 3.0 mm，由修復區域發展出 6 條撓曲裂縫，最大撓曲裂縫總和為 6.57 mm，環氧樹脂砂漿的最大撓曲裂縫為 3.5 mm，由修復區域僅發展出 2 條撓曲裂縫，其最大撓曲裂縫總和卻為 5.50 mm；又當變位角達 2.5 % 時，水泥砂漿的最大撓曲裂縫為 3.5 mm，此時撓曲裂縫總共發展出 8 條，而環氧樹脂砂漿的最大撓曲裂縫為 4.50 mm，其撓曲裂縫總共發展出 2 條，由結果推測水泥砂漿因與鋼筋之握裹較好，所以由修復區域發展出的裂縫雖然較多，但最大裂縫卻比環氧樹脂砂漿來的小。

藉由四點抗彎試驗結果可以發現，梁構件若依照正確修復程序，且使用適當黏結材進行界面處理，水泥砂漿及環氧樹脂修復材料並不那麼容易脫落及剝離。

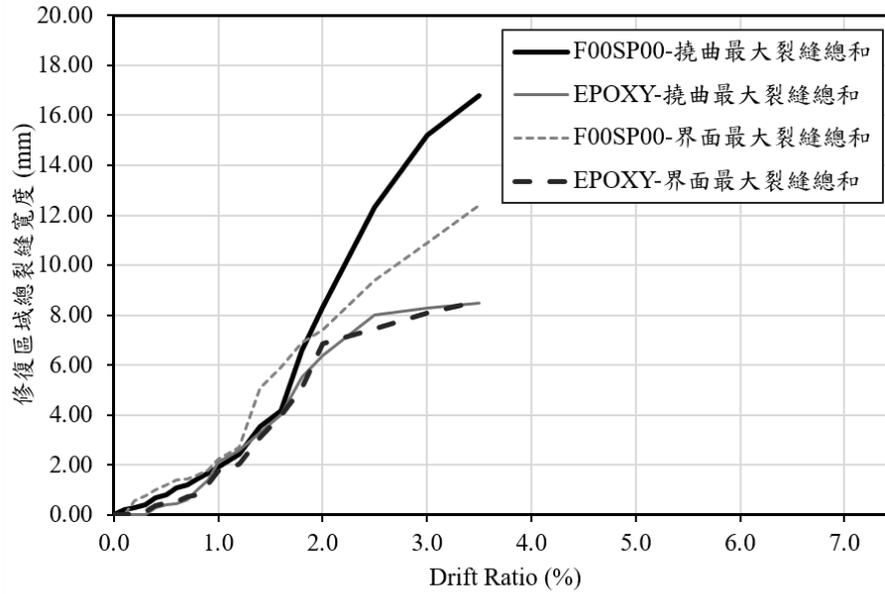


圖 4-71 水泥砂漿與環氧樹脂砂漿之撓曲裂縫總和與變位角之關係
(資料來源：本研究整理)

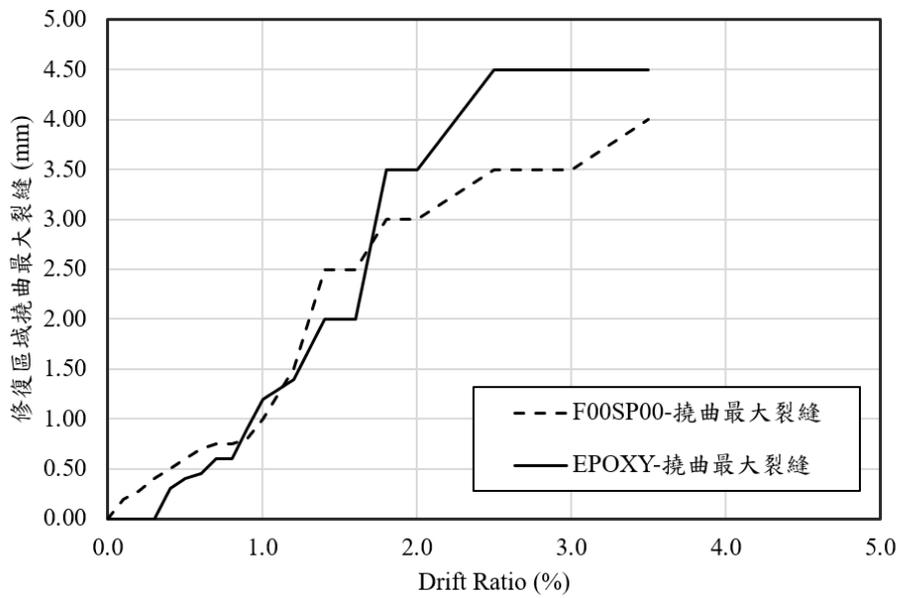


圖 4-72 水泥砂漿與環氧樹脂砂漿之最大撓曲裂縫與變位角之關係
(資料來源：本研究整理)

第五章 鋼筋腐蝕構件斷面補修工法

第一節 構件劣化修復策略

既有鋼筋混凝土建築物於自然狀態下因鋼筋混凝土材料或本身材料不良，所引發的老劣化現象，當建築物根據劣化診斷及調查結果被判斷建築物需要對劣化之構件或未來有可能劣化之結構物進行抑制，使耐久性提升或恢復，以及除去或減低第三者(外力)之影響度而進行修復工作。首先，設定目標恢復等級(圖 5-1)並根據混凝土結構維護管理流程(圖 5-2)來制訂修復策略。

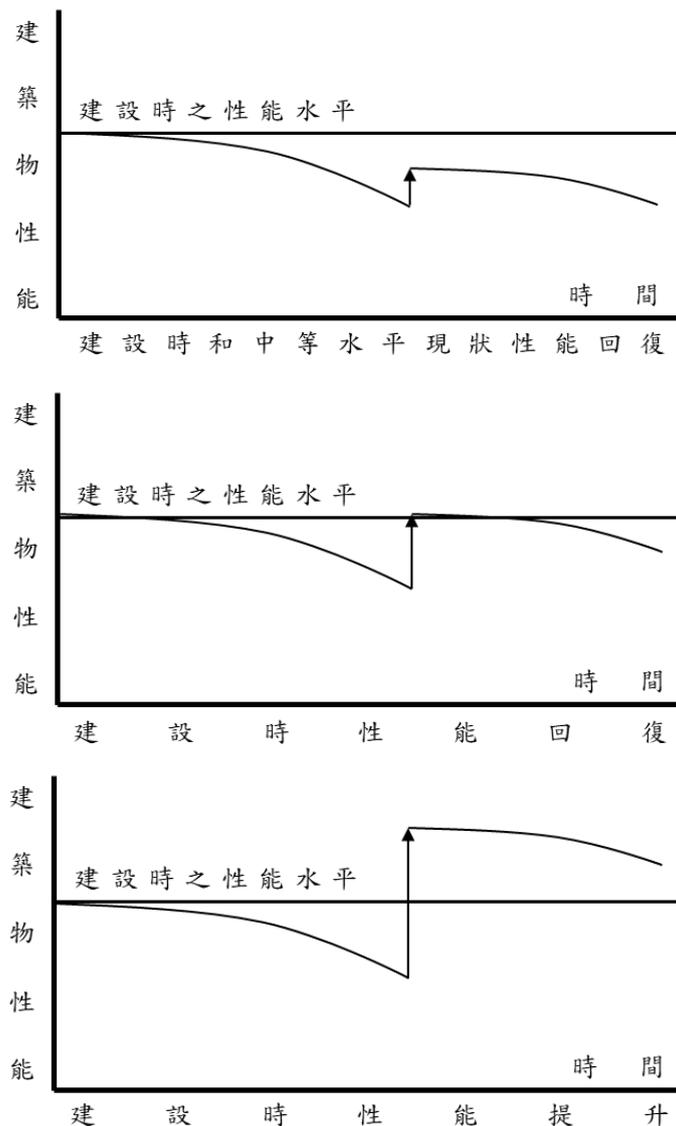


圖 5-1 目標恢復等級

(資料來源：日本土木學會，2007)

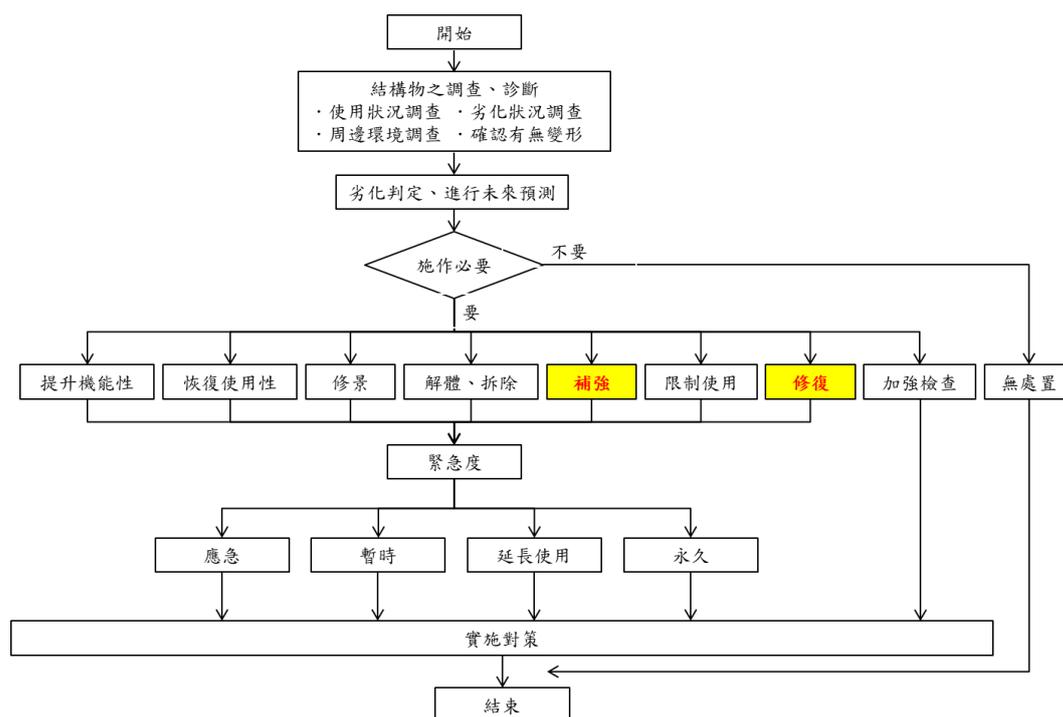


圖 5-2 維護管理流程

(資料來源：日本水泥協會，2011)

關於修復工法之選定，應考量之條件有(1)構造物之種類、用途和使用環境、(2)劣化狀況、(3)修復目的、(4)施工條件和(5)經濟性(圖 5- 3)。在選擇修復工法時，需考量目的性和劣化原因，以目的性來說，如是為恢復或提升結構物之耐久性，建議可使用表面保護工法(斷面補修、表面塗層、表面浸漬)、電化學防蝕工法(電化學防蝕、脫鹽、再鹼化、電鍍)、裂縫補修工法(表面塗抹、灌注、填充、浸漬材塗抹)；如是為恢復或提升結構物之力學性能，可使用替換工法、增設工法、增厚工法、包覆工法、接合工法、導入預力工法。以劣化原因來說，對於中性化、鹽害、凍害、化學侵蝕、ASR、疲勞和磨耗分別有對應之修復方針和修復工法。綜合考量後，選擇最適當之修復工法

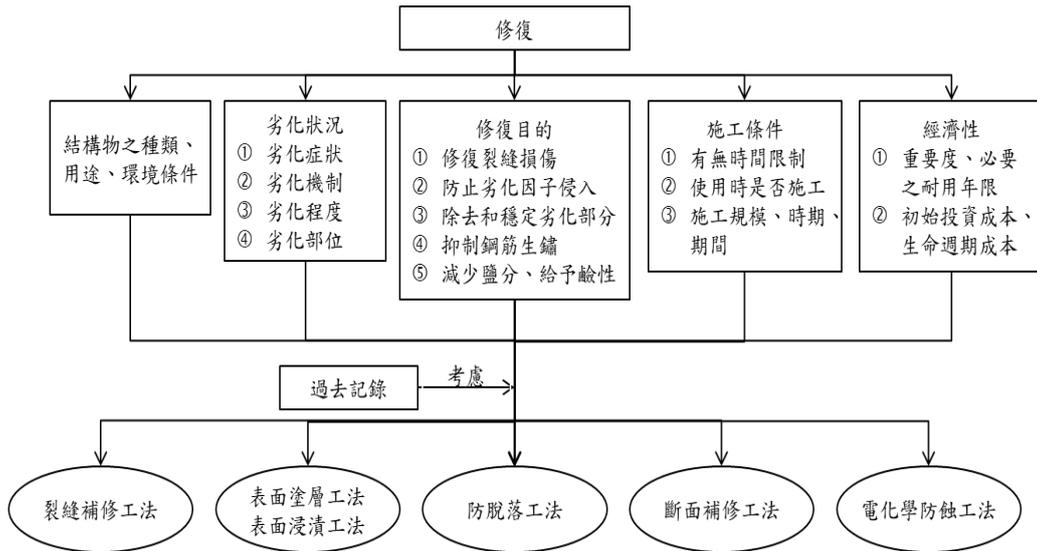


圖 5-3 修復工法選擇考慮條件

(資料來源：日本水泥協會，2011)

根據日本土木學會「コンクリート標準示方書 [維持管理編]」(2013)提出之受氯離子或中性化劣化適用之補修工法(表 5- 1)中可發現，斷面補修工法為最常被使用之修復方法。斷面補修工法之優點不但可抑制劣化和除去所有劣化因子使結構恢復到健全狀態，且修復過後接近既有混凝土之特性，甚至還可讓構件能力提升至超過建設時。斷面補修工法與其他修復工法配合使用具有加成之功效，亦可用做補強(提高力學性能)。

表 5-1 氯離子或中性化劣化適用之補修工法

| 劣化原因 | 劣化過程 | 劣化狀況 | 工法選定 |
|------|-------|----------------------------------|--|
| 氯離子 | 潛伏期 | 外觀無變化。 | 表面保護工法 |
| | 進展期 | 外觀無變化。 氯離子濃度超過腐蝕發生極限，開始腐蝕。 | 表面保護工法 脫鹽工法、電化學防蝕工法 斷面補修工法 內部注入工法 |
| | 加速期前期 | 腐蝕裂縫產生。 銹汁。 混凝土浮起。 | 電化學防蝕工法 斷面補修工法 內部注入工法 |
| | 加速期後期 | 腐蝕裂縫長且多。 混凝土剝離、剝落。 | 電化學防蝕工法 斷面補修工法 內部注入工法 |
| | 劣化期 | 大規模地剝離、剝落。 鋼筋斷面積減少。 位移、偏移。 | 斷面補修工法+補強工法 |
| 中性化 | 潛伏期 | 外觀無變化。 | 表面保護工法 |
| | 進展期 | 外觀無變化。 殘留中性化超過腐蝕發生極限，鋼筋開始腐蝕。 | 表面保護工法 再鹼化工法、電化學防蝕工法 斷面補修工法 內部注入工法 |
| | 加速期前期 | 腐蝕裂縫產生。 | 表面塗層工法 電化學防蝕工法 斷面補修工法 內部注入工法 |
| | 加速期後期 | 腐蝕裂縫發展。 混凝土剝離、剝落。 | 表面塗層工法 電化學防蝕工法 斷面補修工法 內部注入工法 |
| | 劣化期 | 大規模地剝離、剝落。 鋼筋斷面積減少。 | 斷面補修工法+補強工法 |

(資料來源：本研究整理)

第二節 斷面補修工法種類與適用範圍

斷面補修工法之應用範圍包括(1)施工期間發生未填滿之混凝土或混凝土部分質量劣化區域，(2)混凝土開裂或剝落、鋼筋腐蝕等劣損區域，以及(3)需去除劣化因子之混凝土開裂或剝落、鋼筋腐蝕等具體損壞區域。如果混凝土中之氯離子含量超過腐蝕發生極限並已經開始發生腐蝕或混凝土內之鋼筋位置發生中性化使得鋼筋開始發生腐蝕等劣化現象，則應清除含有劣化因子(氯離子、中性化等)之混凝土，之後再用斷面修復材料進行斷面修復。一般而言，斷面補修工法是用於修復混凝土脆弱部位(浮起、剝落、鋼筋裸露、斷面缺陷之部位)，目的在去除混凝土之劣化因子。

如移除混凝土後出現鋼筋裸露，需檢查鋼筋狀況，視情況進行鋼筋除銹、防銹或添加鋼筋，再填補修復材料，其施工流程詳見圖 5-4。在進行鋼筋處理(前處理)時，會使用高壓清洗機和研磨機將鋼筋上的鐵銹徹底清除，為了預防鋼筋再腐蝕，鐵鏽脫落後應立即塗抹防銹材，並注意鋼筋紋路(螺紋、人字紋)確實讓防銹材附著在鋼筋表面。

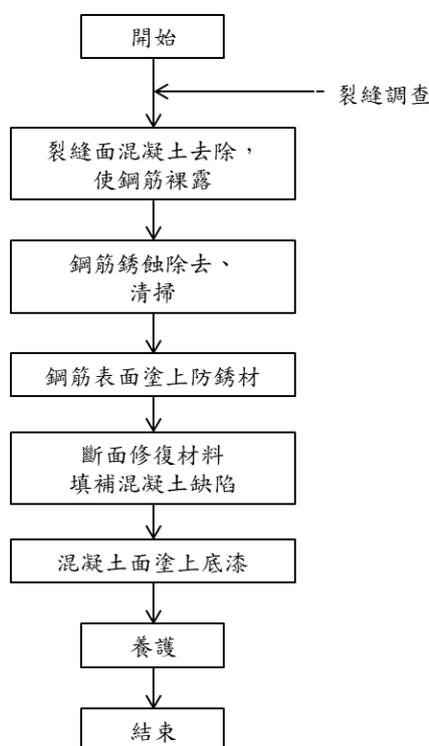


圖 5-4 斷面補修工法施作流程

(資料來源：日本水泥協會，2011)

斷面補修工法根據修復範圍可分為局部斷面補修工法和大面積斷面補修工法。局部斷面補修工法其施工範圍相對較小，因此主要使用塗抹法(本研究主要研究對象)。由於劣化之混凝土已被去除，因此可以被認為劣化因子已部分去除，但由於修復範圍外之劣化因子仍存於混凝土內，因此預計未來仍會發生新的鋼筋腐蝕現象。此外，經修復部位和未修復部位間之介面可能會發生巨觀腐蝕(Macro corrosion)，須謹慎注意。為去除區域範圍內和鋼筋周圍所有劣化因子，大面積斷面補修工法是除去區域範圍內所有的混凝土，以滿足除去劣化因子之要求，之後再用斷面修復材料回填。不管混凝土表面是否有浮起或剝落，大面積斷面補修工法皆適用，其依據目標位置、施工方向、施工規模等不同狀況，可使用塗抹法、噴塗法及灌漿施工法等不同方法。以下對每種工法種類進行介紹：

1. 塗抹法

塗抹法使用於修復面積較小之場合。將斷面修復材料(環氧樹脂砂漿、聚合物水泥砂漿等)用塗抹的方式填補。此法無需使用機具，手動進行，最小施工厚度為 5 mm 以上。塗抹法適用流動性低且黏稠之材料，塗抹厚度小(薄塗層)的情況下建議可用輕質砂漿。

2. 灌漿施工法

灌漿施工法使用於修復面積較大、厚度較深之場合，最小施工厚度為 10 mm 以上。需架設模板，將高流動性砂漿和混凝土倒入模具後壓實。使用高流動性材料，其材料應具備自我填充性能。

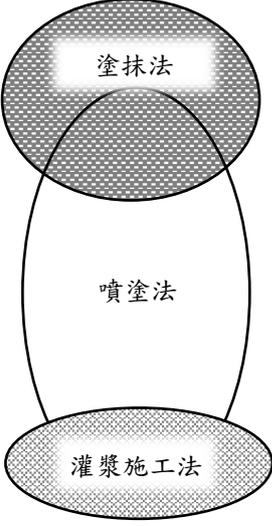
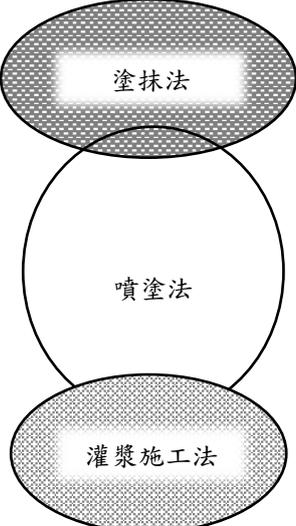
3. 噴塗法

噴塗法使用於無斷面尺寸限制或中大型修復面積之場合，分為濕式和乾式兩種。濕式噴塗法是預先混合斷面修復材料進行噴塗，乾式噴塗法是將粉末、水、混合物分別用泵浦噴塗。此法限用專門機具以吹出之壓縮空氣壓實，最小施工厚度為 10 mm 以上。濕式適用流動性低具黏性之材料，濕式適用流動性低且快硬性材料。

斷面補修工法之各工法種類適用範圍可參考表 5-2，並且針對施工方法和斷面補修深度或用修復面積和深度等標準來選擇斷面補修工法，可參考圖 5-5。總結來說，當施工面積小(10 m^2 以下)且施工厚度不超過 30 mm 時，可使用塗抹法來進行修復(表 5-2 文獻建議可至 10 cm)；當施工面積超過 10 m^2 以上，可使用灌漿施工法和噴塗法，但灌漿施工法需要架設模板，而噴塗法不用。向上施工或

側面施工時，若修復深度不超過 10 cm，建議可使用噴塗法，且乾式施工性較濕式為佳。

表 5-2 斷面補修工法適用範圍概念

| 修復位置 | 下表面 | 側面 | 上表面 |
|-------------|--|---|--|
| 施工方向 | 向上施工 | 橫向施工 | 向下施工 |
| 修復面積 | | | |
| 小 ↓ 大 |  |  |  |

(資料來源：日本土木學會，2005)

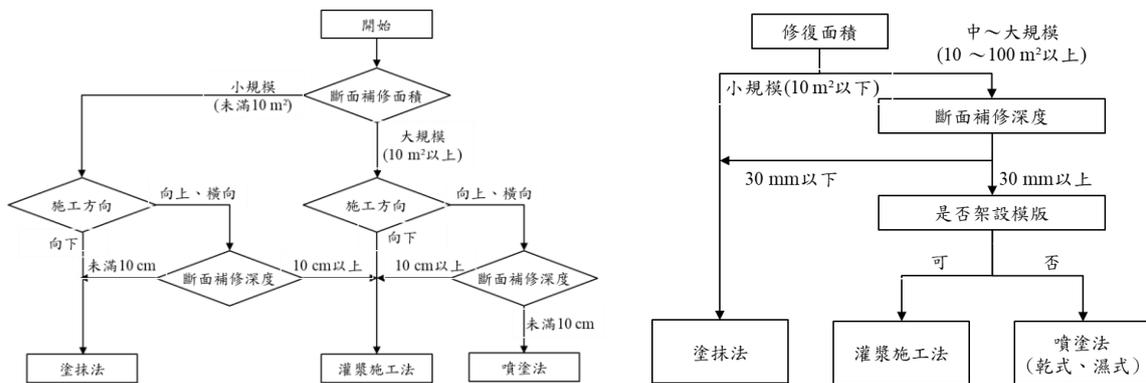


圖 5-5 斷面補修工法之選擇參考

(資料來源：日本水泥協會，2011 和日本建設顧問協會，2016)

第三節 斷面補修材料分類與試驗

對於混凝土建築物之修復工作，在確實地實施調查和診斷後，對結構物制定正確地修復策略，並且選擇合乎需求之修復材料，每一項皆非常重要(圖 5- 6)。在挑選斷面修復材料時，須根據施工單位之修復標準或手冊選擇符合品質規格之商品，如施工單位之修復標準或手冊無限定斷面修復材料之品質規格，則可參考類似之相關規定來選定修復材料(圖 5- 7)。由於導致混凝土劣化原因相當複雜，所以在進行混凝土補修時，其斷面補修之工法、步驟及材料的選擇上必須仔細評估並執行。為了避免結構在維修後再度損壞，修復工程應考慮施工方便性，及需具有耐久性、安全性、經濟性和環境適應能力，並且也要將後續維護管理納入考量。

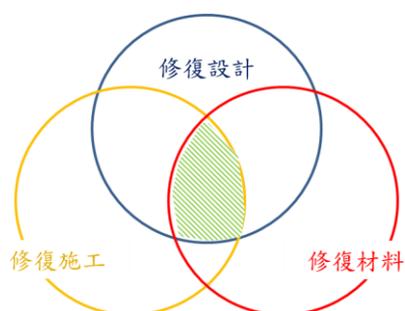


圖 5- 6 修復設計、修復施工及修復材料之關係

(資料來源：日本水泥協會，2011)

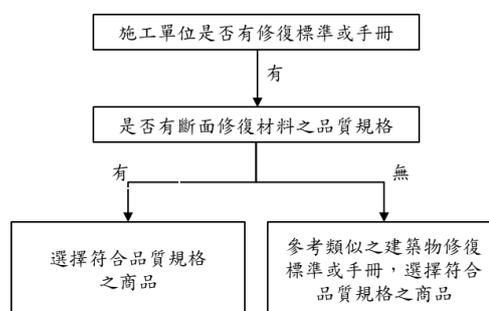


圖 5- 7 斷面修復材料之選定流程

(資料來源：日本水泥協會，2011)

由於內部鋼筋腐蝕膨脹、霜凍損壞、ASR(鹼骨材反應)引起之混凝土劣化(裂縫)，或含有中性化、氯離子等劣化因子之混凝土，或因孔洞造成混凝土保護能力下降，將上述之劣化部位敲除並進行鋼筋防銹處理後，用於填補其斷面之修復材料依種類可區分為：

1. 水泥系修復材料：普通水泥砂漿/混凝土(本研究採用)、早強水泥砂漿/混凝土、高流度水泥砂漿/混凝土等。
2. 聚合物水泥砂漿修復材料：SBR 水泥砂漿(本研究採用)、PAE 水泥砂漿、EVA 水泥砂漿、防銹劑添加水泥砂漿等。
3. 樹脂系修復材料：環氧樹脂(輕質)砂漿(本研究採用)、甲基丙烯酸甲酯(Methyl methacrylate)砂漿等。

水泥系修復材料具有與混凝土性質相近、使用範圍廣泛、施工容易、較經濟，以及可根據需求來添加特殊摻料或藥劑等優點。其缺點為凝結時間長、強度發展慢、黏結強度低、抗裂性差、脆性大和無法改善就有混凝土之抗滲透性等缺點。聚合物水泥砂漿修復材料係於水泥砂漿中加入聚合物(如 SBR、PAE 等)，聚合物可改善水泥系補修砂漿之撓曲和抗拉強度、滲透性、黏結能力、抵抗化學侵蝕能力及抗凍融能力。由於聚合物特殊的成膜性能，可將氫氧化鈣包裹住，降低氫氧化鈣對耐久性的影響。除此之外，因聚合物之成膜過程與水泥水化反應同步進行，當水分被水化反應使用或蒸發，聚合物便在基體中膠結成一堅韌緻密的薄膜網絡結構，不但填充了混凝土/砂漿內部之孔隙，還隔絕了與外界接觸的可能性，進一步改善材料性能。但是，聚合物補修砂漿因熱膨脹係數較大、成本高且含有化學毒性，在使用前必須了解其材料特性和使用方法，以避免補修失敗。環氧樹脂砂漿與水泥系補修砂漿之施工方法相類似。然而，當環氧樹脂材料混合在一起時會發生化學作用，此化學反應屬於放熱反應，一旦溫度上升則會使反應速度加快，硬固的時間便會相對縮短，容易在未施工完畢前就硬固，且使用時必須加熱，因此會有熱應力現象發生。其優點為適用於薄邊緣區域之補修、緊急時可快速修復、比水泥系補修砂漿擁有更高的不透水性(李有豐 1998)。

除此之外，為了解斷面修復材料之性能，需進行各項相關試驗，根據性能分類將各試驗方法整理成表 5-3 所示。斷面修復材料之試驗有為了解力學性能(抗壓強度、撓曲強度、黏結強度、彈性係數、熱膨脹係數)之相關試驗、裂縫抵抗能力(長度變化)相關試驗以及耐久性能(中性化、氯離子、抗凍融)相關試驗等。

表 5-3 斷面修復材料之相關試驗

| 性能分類 | 項目 | 試驗方法 |
|--------|---------|--------------------------------------|
| 力學性能 | 抗壓強度 | JIS A 1171:ポリマーセメントモルタルの試験方法 |
| | 撓曲強度 | JIS A 1171:ポリマーセメントモルタルの試験方法 |
| | 黏結強度 | JIS A 1171:ポリマーセメントモルタルの試験方法 |
| | | JSCE-K 561-2003:コンクリート構造物用断面修復材の試験方法 |
| | 彈性係數 | JIS A 1149:コンクリートの静彈性係數試験方法 |
| | 熱膨脹係數 | JSCE-K 561-2003:コンクリート構造物用断面修復材の試験方法 |
| 裂縫抵抗能力 | 長度變化 | JIS A 1171:ポリマーセメントモルタルの試験方法 |
| 耐久性 | 中性化速率係數 | JIS A 1153:コンクリートの促進中性化試験方法 |
| | | JIS A 1171:ポリマーセメントモルタルの試験方法 |
| | 磨耗深度 | 表面被覆材の水砂噴流摩耗試験 (案) |
| | 相對動彈性係數 | JIS A 1148:コンクリートの凍結融解試験方法 |

(資料來源：本研究整理)

在進行抗壓強度試驗時，要注意試體之形狀尺寸和養護環境。根據研究統計，利用 JIS A 1108 試驗方法(圓柱試體)得到之強度會比利用 JIS A 1171 試驗方法(方塊試體)獲得之強度低，是因為試體尺寸效應之影響。除此之外，環境溫度亦會影響早期抗壓強度，環境溫度越低，早期強度也越低。對於斷面修復材料來說，黏結強度係十分重要的性能指標之一。如果沒有足夠之黏結強度來確保修復材料能充分地貼附在舊有基礎混凝土上，則修復材料可能因脫落或剝落而無法有效地發揮其修復效用。考慮建築物之環境和修復位置，日本土木學會提出斷面修復材料

黏結強度試驗之試體養護條件分別有標準環境、潮濕環境、低溫環境、水中環境、乾溼循環環境和冷溫循環環境，可視修復環境之情況選擇。在進行黏結強度試驗時，其試體破壞位置會出現四種狀況，(1)破壞在基礎混凝土處、(2)破壞在混凝土與斷面修復材料之介面、(3)破壞在斷面修復材料處、(4)直拉貼片脫落，以至於須視情況謹慎判斷。關於中性化試驗及氯離子滲透深度試驗，可噴灑酚酞試劑和硝酸銀溶液來測試，受中性化或氯離子滲透之部位會因試劑而變色。除此之外，斷面修復材料之坍流度與施工性能有關，塗抹法與噴塗法主要以流度值試驗和坍度試驗來確認材料之施工性，灌漿施工法係使用坍落試驗(漏斗法)來評價其施工性。

第四節 補修材料性能要求

斷面修復材料種類繁多，單純地選擇材料性質優於既有混凝土的斷面修復材料並非最恰當的，而修復材料之性能將根據修復構件、環境條件、施工方法等不同而變化，但共通點如下：

1. 抗壓、撓曲、抗拉強度必須等於或高於既有混凝土。
2. 熱膨脹係數、彈性係數、柏松比必須與既有混凝土相同。
3. 乾燥收縮小、附著力高。
4. 因為需在現場施工，所以工作性要好。

由於斷面修復材與基礎混凝土需具有黏合性和完整性，對於日本最常用使用的斷面補修材料是聚合物水泥砂漿，表 5-4 將列出水泥砂漿、聚合物水泥砂漿和聚合物砂漿分別對於不同劣化機制之適用性。

表 5-4 斷面修復材之適用效果

| 主要期待效果 | 要求性能/ 劣化機制 | 斷面修復材料種類 | | |
|------------------------|---------------------|----------|-------------|-------|
| | | 水泥砂漿 | 聚合物水泥 砂漿 | 聚合物砂漿 |
| 除去劣化因子造成之劣化，和劣化、損傷部分修復 | 力學性能 | ○ | ○ | ○ |
| | 抵抗裂縫能力 | △ | ○ | △ |
| 修復劣化，並抑制和預防劣化因子再侵入 | 中性化 | ○ | ○ | ○ |
| | 鹽害 | △ | △ | ○ |
| | 凍害 | ○ | ○ | ○ |
| | 化學侵蝕 | △ | △ | ○ |
| | 鹼骨材反應 ¹⁾ | △ | △ | ○ |
| 與美觀、景觀相關性能 | 美觀、景觀 | △ | △ | ○ |
| 第三者影響度 | 剝落抵抗性 ²⁾ | ○ | ○ | ○ |

○：適用；△：有再檢討之必要(配合其他工法使用等)

¹⁾標準防水性判斷結果；²⁾標準黏結性能判斷結果

(資料來源：日本建設顧問協會，2016)

參考「JIS A 6203 セメント混和用ポリマーディスパージョン及び再乳化形粉末樹脂」及「農業水利施設の補修・補強工事に関するマニュアル[開水路補修編](案)」，整理出斷面修復材料的必要性能要求，包含黏結力、相容性、透水、吸水性和尺寸安定性，並根據修復計畫可能之要求，提出其他之個別性能標準以供參考，表 5-5 為預計修復效果可維持 20 年的斷面修復材料之性能要求。

表 5-5 斷面修復材料之性能要求

| 性能要求 | | 項目 | 品質規格值 | 試驗方法 | |
|------------|--------|-------------|---|-------------------------------|------------|
| 基本性能 | 黏結力 | 黏結強度 | 標準 | 1.5 N/mm ² 以上 | JIS A 1171 |
| | | | 潮濕 | | JSCE-K 561 |
| | | | 低溫 | | |
| | | | 水中 | | |
| | | | 乾溼循環 | | |
| | | | 冷溫循環 | | |
| | 相容性 | 抗壓強度 | 24.0 N/mm ² 以上 | JIS A 1171 | |
| | | 撓曲強度 | 8.0 N/mm ² 以上 | JIS A 1171 | |
| | | 彈性係數 | 2 ~ 2.8×10 ⁴ N/mm ² | JIS A 1149 | |
| | | 熱膨脹係數 | 15×10 ⁻⁶ /°C 左右 | JSCE-K 561 | |
| 透水、 吸水性 | 透水量 | 15.0 g 以下 | JIS A 1171 | | |
| | 吸水率 | 10.0 % 以下 | JIS A 1171 | | |
| 尺寸安定性 | 長度變化 | 0 ~ 0.150 % | JIS A 1171 | | |
| 個別性能 | 抵抗中性化性 | 中性化速度 | 中性化深度 5 mm 以下(4週) 中性化速度係數 18 mm/√t (年) 以下 | JIS A 1153 | |
| | 耐磨耗性 | 磨耗深度 | (材齡 28 天，試驗時間 10 小時) 平均磨耗深度比 1.5 以下 | 表面被覆材 の水砂噴流 摩耗試験 (案) | |
| | 耐凍害性 | 相對動彈性 係數 | 85 % 以上 | JIS A 1148 | |

(資料來源：本研究整理)

1. 黏結力

修復材料與既有混凝土間必須要有良好的黏結力，如果黏結力不足，斷面修復材料提前剝落，則就無法發揮應有之修復效用，導致構件再度損壞。其次，介面處之處理也是非常重要的一環，須將既有混凝土上之已破壞或鬆動之混凝土和表面灰塵等雜質徹底清除，才能避免對材料間的黏結造成阻礙。關於斷面修復材料對黏結強度之要求，在標準條件下，JIS A 6203 表明黏結強度需大於 1.0 N/mm^2 ，雖然日本下水道局(Japan Sewage Works Agency)將黏結強度規定為大於 1.5 N/mm^2 ，但目前尚未有明確說明 1.5 N/mm^2 之必要性，故本研究在此先將黏結強度之標準值定為大於 1.5 N/mm^2 ，而乾溼循環和冷溫循環條件與材料耐久性有關，在嚴苛地加速劣化環境下，黏結強度仍需大於 1.5 N/mm^2 。此外，本研究會依據試驗結果進行相關建議。

2. 相容性

在選擇斷面修復材料時，雖然水泥用量偏高之產品能有效地提高抗壓強度，但同時也容易發生乾縮或裂縫，所以應選擇與基底材料抗壓強度相似之修復材料。除了抗壓強度外，還需考慮材料強度之變化，早期抗壓强度高之材料有可能使其整體的使用壽命與耐久性能降低。此外，彈性係數是度量材料受力後的變形指標。當修復材料和既有混凝土之黏結面與外力作用方向平行時，彈性係數較高之材料容易產生應力集中。如斷面修復材料之彈性係數高於基底材料許多，將導致其修復材料承受的應力大於基底混凝土，容易使介面處產生裂縫。同理，修復材料與混凝土之熱膨脹係數差異亦不可過大。當溫度出現劇烈變化時，材料介面處將產生剪應力，一旦此應力大於黏結力，就會發生破壞。所以在環境溫度變化較大之地區，需選擇考量修復材料與既有混凝土間之熱膨脹相容性。因混凝土之彈性係數為 $2 \sim 2.8 \times 10^4 \text{ N/mm}^2$ 、熱膨脹係數為 $10 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$ ，為保持相容性，故斷面修復材料之彈性係數和熱膨脹係數需與混凝土相近。

3. 透水、吸水性

無論是混凝土還是斷面修復材料皆為多孔性材料，環境中之水分能通過孔隙和微細裂縫之毛細管吸收物力作用或靜水壓力滲入，水分滲入

會造成鋼筋腐蝕導致混凝土劣化，所以斷面修復材料需具有低吸水性 and 有一定之抗透水能力。

4. 尺寸安定性

大部分在需要進行修復之混凝土幾乎已停止乾燥收縮，因此在選擇斷面修復材料時，應優先選擇乾燥收縮較小或無收縮之材料，以避免造成修復材料在邊緣處因張應力發生龜裂。

5. 抵抗中性化、耐磨耗性、耐凍害性

斷面補修工法可去除既有混凝土中之劣化因子，填補之修復材料必須具有抵抗劣化因子滲透之能力。斷面修復材料經加速中性化試驗 4 週後，使用酚酞示劑量測中性化滲透深度需在 5 mm 以下，且中性化速度係數是由中性化加速試驗獲得之中性化滲透深度所計算出，中性化速度係數之公式為

$$A = C / \sqrt{t} \quad (1)$$

其中， A 為中性化速度係數(mm/ $\sqrt{\text{年}}$)； C 為平均中性化深度； t 為材齡。加速試驗為期 4 週，約為 0.077 年。

耐磨耗性試驗是利用水砂磨耗試驗方法，將含砂的水流以 2 MPa 之水壓持續沖刷 10 小時後，計算其平均磨耗深度。斷面修復材料之平均磨耗深度與標準試體之平均磨耗深度的比值即為平均磨耗深度比。此為針對修復位置會長期遭受水流沖刷，如下水道、渠道等。

斷面修復材料可用 JIS A 1148 コンクリートの凍結融解試験方法來檢查材料之凍融作用。無機斷面修復材料比有機斷面修復材料更容易吸水，因此使用無機斷面修復材料會更容易因凍融發生劣化。

對於斷面補修工法使用之防銹劑，根據日本建築學會「鉄筋コンクリート造建築物の耐久性調査・診断及び補修指針(案)・同解説」內「付 1.3 鉄筋コンクリート補修用防せい材の品質基準(案)」中，防銹劑之試驗方法及品質規格須滿足表 5-6 所述之條件。防銹劑可抑制腐蝕因素影響鋼筋，並且需要對鋼筋具有很強的沾附性，也要與斷面修復材料有良好之黏結性，以及在介面上不會造成影響。

表 5-6 斷面補修用之防銹劑品質規格

| 要求性能項目 | 品質項目 | 品質規格 |
|---------|------|--------------------------|
| 耐鹼性 | 耐鹼性 | 塗膜內無發現異常 |
| 與鋼筋之黏結性 | 黏結強度 | 7.8 N/mm ² 以上 |
| 防銹性 | 防銹率 | 防銹率 50% 以上 ¹⁾ |

¹⁾防銹劑塗抹於鋼筋後，用普通砂漿覆蓋，生鏽機率比無使用防銹劑之情況下降 50%。

(資料來源：農林水產省，2015)

第五節 施工程序與注意事項

經調查、診斷後被判定為需要進行斷面補修之鋼筋混凝土建築物，其施工程序可分為前處理和斷面補修兩階段，圖 5-8 為斷面補修工法之施工流程。

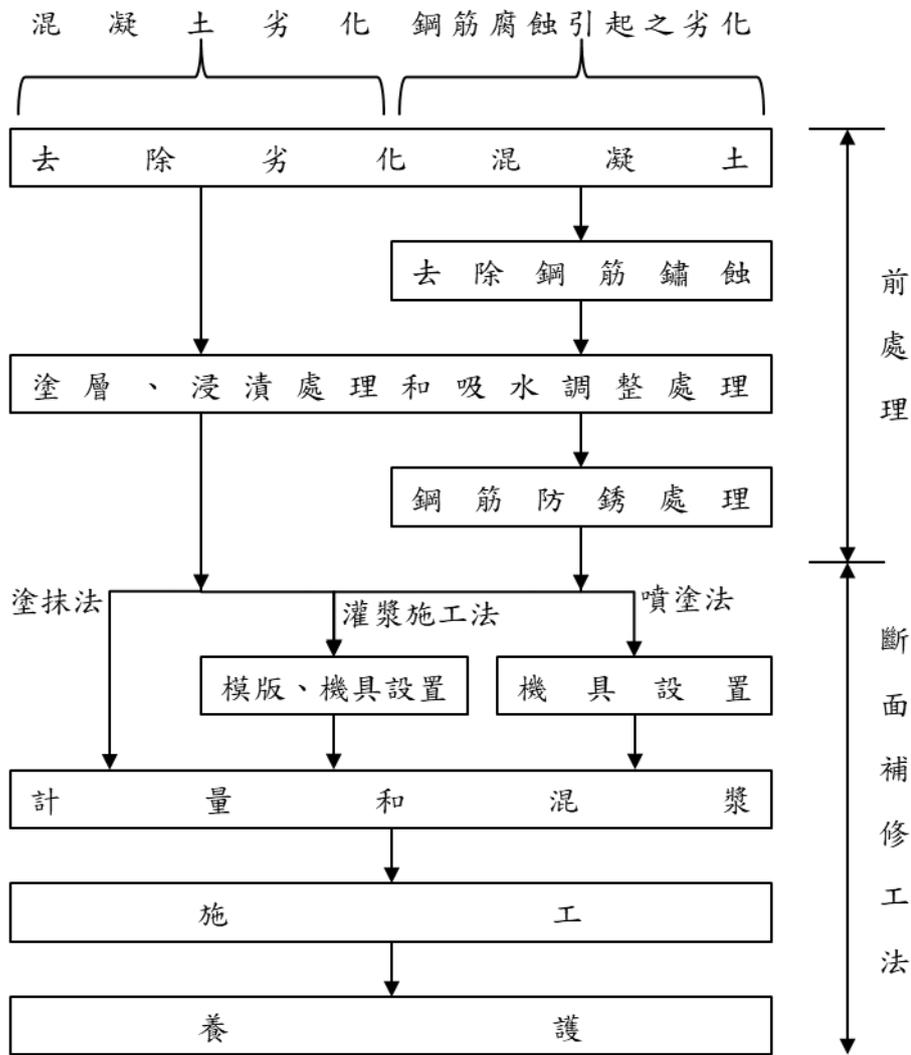


圖 5-8 斷面補修工法之施工流程

(資料來源：日本水泥協會，2011)

1. 前處理

當混凝土出現劣化現象時，係由於環境中之劣化因子滲入混凝土中，其可能造成混凝土表面出現裂縫甚至內部鋼筋腐蝕。斷面補修工法之前處理，如只是單純地混凝土表面劣化，則只需將劣化之部分去除，清除細碎混凝土和灰塵後，塗抹防銹劑和黏結材以及進行吸水性調整等介面處理，之後才能執行斷面補修。如是因鋼筋腐蝕引起之劣化，在除去劣

化之混凝土後，使用高壓清洗機將鋼筋上的鐵銹徹底清除，把修復範圍內之細碎混凝土、灰塵和鐵鏽全部清除乾淨後，於鋼筋上塗抹防銹劑和進行介面處理，即可開始進行斷面補修。前處理步驟詳見圖 5-9 和圖 5-10。

除此之外，執行前處理時有以下幾點特別注意事項：

- (1) 標記修復範圍時，需要將劣化部位和預計可能劣化的部分盡可能地包含在內，且切除混凝土時要注意避免破壞到鋼筋。此外，為了預防再劣化，修復範圍包含混凝土劣化部分再向外延伸 10 mm，且邊緣必須為健全之混凝土。
- (2) 鋼筋除銹後，為了預防鋼筋再腐蝕，鐵鏽脫落後應立即塗抹防銹材，並注意鋼筋紋路(螺紋、人字紋)，確實地讓防銹材附著在鋼筋表面。
- (3) 防銹劑塗抹於鋼筋背部時，可用刷子或噴槍，使用噴槍後，必須注意避免防銹劑滴落。
- (4) 混凝土介面之表面粗糙程度可分為平滑、砂目(細骨材裸露)、中間(介於細骨材裸露和粗骨材裸露之間)和洗出(粗骨材裸露)。待除去混凝土後，表面粗糙度至少要達到砂目或中間程度，才能增加斷面修復材料與既有混凝土之黏結力。
- (5) 黏結材(界面劑)的使用應符合斷面修復材料之種類，例如水泥系修復材料或聚合物水泥砂漿修復材料，係使用水泥砂漿作為黏結材，配比如表 5-7；環氧樹脂砂漿則使用環氧樹脂作為黏結材。
- (6) 介面處理時，黏結材必須均勻塗抹，如黏結材塗抹不確實，可能導致修復材料剝離、剝落。

表 5-7 水泥系材料黏結劑之配比

| 類型 | W/ C (%) | Unit amount(kg/ m ³) | | | | |
|------|-------------|----------------------------------|--------|--------|------|------|
| | | C | W | S | FA | SBR |
| 水泥砂漿 | 35 | 926.95 | 324.43 | 926.95 | 0.00 | 0.00 |

(資料來源：本研究提供)

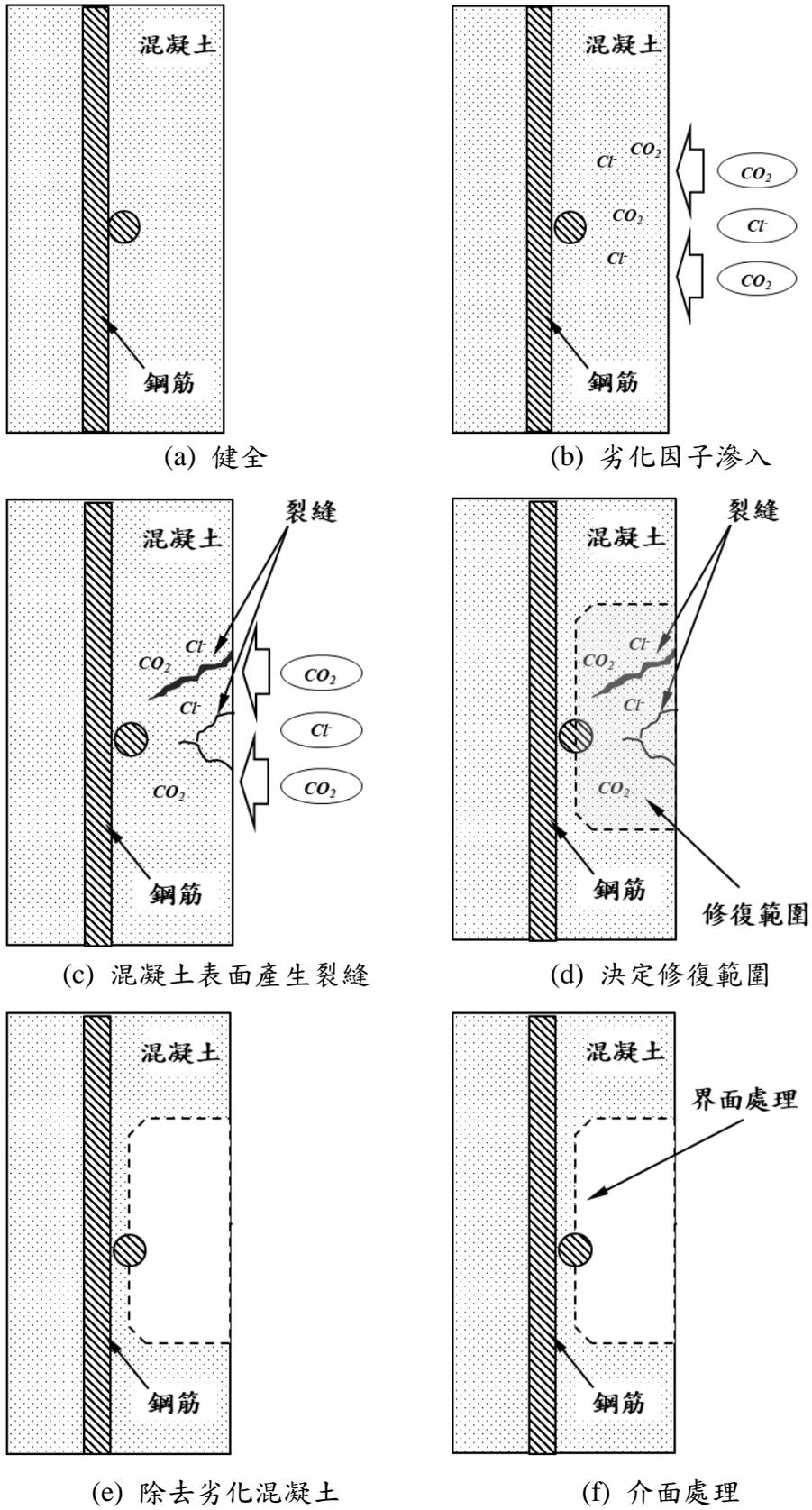


圖 5-9 前處理(單純混凝土劣化)

(資料來源：本研究整理)

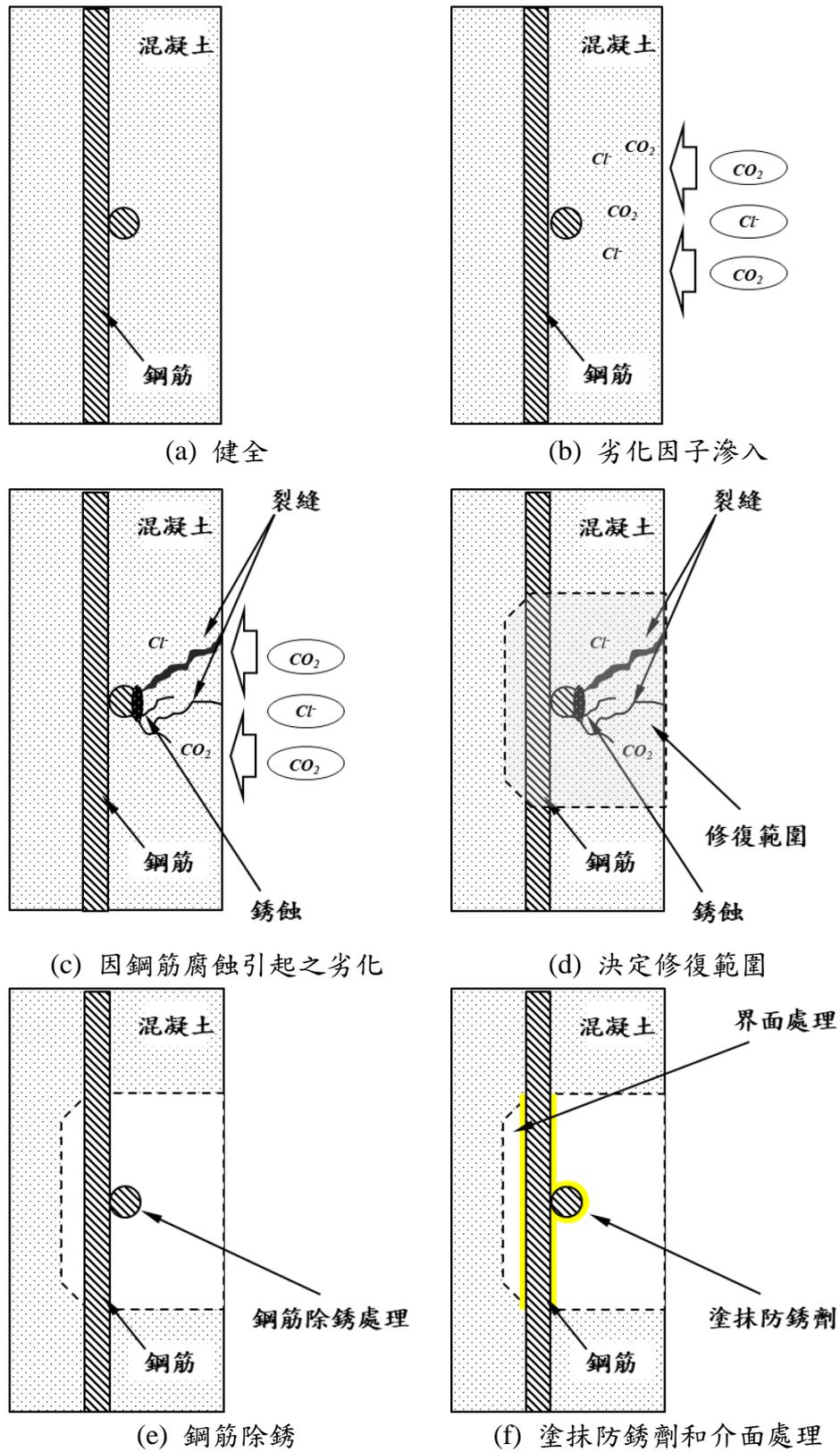


圖 5-10 前處理(鋼筋腐蝕引起之劣化)

(資料來源：本研究整理)

2. 斷面補修工法之種類選擇

斷面補修工法有塗抹法、灌漿施工法、塗抹法三種，根據修復範圍規模和修復深度可選擇合適之方法(圖 5-5)。如修復面積為 10 mm^2 以下或在中~大規模修復面積但修復深度為 30 mm 以下，可選用塗抹法；當修復面積為中~大規模且修復深度為 30 mm 以上，如需架設模版，使用灌漿施工法，不需要模版時，可用噴塗法。各項工法之介紹，詳見第二節工法種類與適用範圍。

3. 計量和混漿

斷面修復材料之計量，請根據廠商規定計量混合。混漿水量與斷面修復材料之性能有關，其兩者關係可整理成下表 5-8。對於不同工法之使用材料，斷面修復材料混漿時手動攪拌器葉片建議適當挑選。此外，除乾式噴塗法外，其他工法使用之斷面修復材料皆必須與水充分混合，混漿時間與材料之黏結強度有關，尤其對聚合物水泥砂漿來說，如果混和時間不夠，則聚合物材料沒有吸收充足之水分，將導致聚合物材料無法發揮效用；如混和時間過長，則會因夾帶空氣過多而導致強度下降，故混漿時間務必確認清楚。

表 5-8 水量對混漿之影響

| 指標 | 混漿水量過多 | 混漿水量不足 |
|---------|--------|--------|
| 流動性 | 上升 | 下降 |
| 鏟刀抹平 | 流瀉 | 增壓 |
| 噴霧 | 流瀉 | 堵塞 |
| 抗壓、撓曲強度 | 下降 | 上升 |
| 黏結力、耐久性 | 下降 | 上升 |

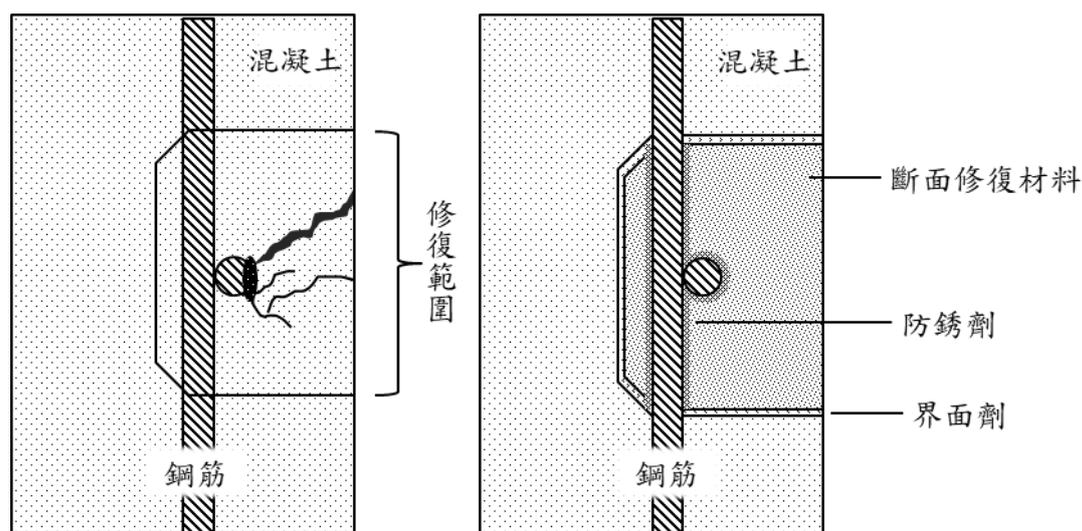
(資料來源：日本水泥協會，2011)

4. 養護

修復完畢後進行養護時，避免強風或陽光直射，防止修復材料表面乾燥而產生裂縫。在夏季高溫時，須適時地灑水做好冷卻工作。修復工作結束後，應進行最後檢測確認斷面補修材料不會剝落。

第六節 參考圖說範例

因鋼筋腐蝕導致混凝土劣化，經調查和診斷為需要使用斷面補修工法進行修復，其施工步驟必須先確認斷面補修範圍、修復範圍表面清除，之後再進行鋼筋除鏽、塗抹防鏽劑、表面清理和介面處理，最後再將斷面補修材料混漿和填補，結束養護後即完成修復工作，其詳細施工步驟如圖 5-11、施工範例如圖 5-12。



施工步驟

1. 確認斷面補修範圍：確認混凝土劣化範圍、面積、深度等。
2. 修復範圍表面清理：將劣化混凝土清除，深度達到鋼筋處，讓腐蝕之鋼筋全部露出，敲除混凝土時切勿損傷鋼筋。
3. 鋼筋除鏽：用砂輪機清除鋼筋表面之鐵鏽，待鐵鏽清除後，清潔鋼筋表面並即刻塗抹防鏽劑，避免鋼筋與空氣接觸時間過長。
4. 塗抹防鏽劑：用刷子或噴槍塗抹防鏽劑時，務必將防鏽劑確實附著在鋼筋上。
5. 表面清理：防鏽劑固化後，處理表面粗糙度，之後再用刷子和噴槍清除表面殘留物。
6. 介面處理：均勻塗抹水泥漿或環氧樹脂黏結材。
7. 混漿

-水泥系修復材料：粉料和水混合成斷面修復材料(水泥砂漿或聚合物水泥砂漿)。

-環氧樹脂系修復材料：環氧樹脂 AB 劑根據一定比例混合並添加細骨材混和成環氧樹脂砂漿。因水氣會影響環氧樹脂砂漿之黏結力，使

用環氧樹脂砂漿時，須確保混凝土表面乾燥。

8. 填補斷面修復材料：根據修復範圍使用合適之工法將斷面修復材料回填。
 - 塗抹法：修復面積 10 mm^2 以下或修復深度小於 30 mm 。
 - 灌漿施工法：修復面積 10 mm^2 以上和修復深度超過 30 mm ，以及須使用模版。
 - 噴塗法：修復面積 10 mm^2 以上和修復深度超過 30 mm ，以及無須使用模版。
9. 養護：施作完成後進行養護。

圖 5-11 參考圖說

(資料來源：本研究整理)



(a) 敲除混凝土



(b) 清除表面



(c) 塗抹黏結材



(d) 修復材料混合



(e) 填補修復材料



(f) 修復完成

圖 5-12 斷面補修工法之施工範例

(資料來源：本研究整理)

第七節 補修材料性能要求

因鋼筋腐蝕導致混凝土劣化，經調查和診斷為需要使用斷面補修工法進行修復，其施工步驟需按照標準程序修復外，使用之修復材料也需符合修復材料之性能要求，其中水泥砂漿修復材料及環氧樹脂修復材料之性能要求，如表 5-9 所示。

表 5-9 補修材料性能要求

| 項目 | | 基準值 | | 標準試驗法 |
|-----------|-------|----------|----------|-------------------------|
| | | 水泥砂漿 | 環氧樹脂砂漿 | |
| 撓曲強度(MPa) | | 6.0 以上 | 10.0 以上 | JIS A 1171 ASTM C348 |
| 抗壓強度(MPa) | 7 天 | 20.0 以上 | 20.0 以上 | JIS A 1171 |
| | 28 天 | 28.0 以上 | 35.0 以上 | ASTM C109 |
| 黏結強度(MPa) | 標準時 | 1.5 以上 | 1.5 以上 | JIS A 1171 |
| | 冷熱反覆後 | 1.5 以上 | 1.5 以上 | ASTM C1583 |
| 透水量(g) | | 15.0 以下 | 15.0 以下 | JIS A 1171 |
| 吸水率(%) | | 10.0 以下 | 10.0 以下 | JIS A 1171 |
| 長度變化(%) | | 0.150 以下 | 0.150 以下 | JIS A 1171 ASTM C596 |

(資料來源：本研究整理)

第六章 結論與建議

第一節 結論

鋼筋混凝土構造由於成本低、耐久性高及容易維護，為臺灣最普遍之建築結構形式。然而，臺灣四面環海、氣候潮濕且地震頻繁，鋼筋混凝土建築物長期暴露在潮濕之環境下，且許多建築物使用了近五十年之久，致使絕大多數之構件皆已出現劣化或老化之現象，甚至達到安全疑慮之臨界階段。當鋼筋混凝土構件劣化到影響其安全性與使用性，此時便需要進行修復、補強或拆除重建。近年政府大力推動建築結構補強與改修，同時亦會針對結構劣損區域進行補修。然而，依現地調查結果及建物使用者反應，修復區域之再劣化現象非常顯著，且大多未滿一年即發生新舊材料分離或修復材料剝離，進而造成鋼筋裸露、鏽蝕等現象。此情形可能係由於修復材料之黏結力不足，或介面處理不確實。當修復材料與舊有基底混凝土間之黏結能力不足，將導致修復材料剝離，則修復材料便無法發揮應有之效用。臺灣之修復施作過程大多全憑現場人員經驗操作，並無明確之使用材料性能要求與施作條件或程序。因此，確實地量化黏結劑對新舊材料介面黏結力之貢獻能力，對混凝土斷面修復材料之修復效果，係非常重要的課題之一。

本研究目的為鋼筋混凝土梁構件之腐蝕補修工法研擬，將採用鋼筋腐蝕劣化梁構件進行一系列試驗，來探討國內常見的斷面修復材之修復性能。為探討國內常見的斷面修復材之修復性，本研究採用鋼筋腐蝕梁構件進行三階段試驗，以提出適合斷面修復處介面處理之建議。第一階段試驗，針對不同類型的修復材料之力學性能進行相關試驗，修復材料之類型參考既有混凝土結構物維修及補強技術手冊之建議，分別使用水泥砂漿、聚合物水泥砂漿及環氧樹脂砂漿等常見之斷面修復材，試驗項目包括撓曲強度、抗壓強度、黏結強度(標準環境下和冷熱反覆循環環境下)、透水量、吸水量和長度變化，並根據各項試驗結果來提出國內具本土性之斷面修復材之力學性能評定標準。第二階段試驗，主要探討新舊材料介面性能，包含表面處理方式、粗糙程度評定，及介面黏結劑之使用，並針對有可能影響到修復材料黏結力之原因提出介面處理之建議。第三階段試驗是進行鋼筋腐蝕劣化梁構件之修復，以進一步探討修復材料之修復性。將經修復後的鋼筋腐蝕劣化梁構件藉由四點抗彎試驗，探討修復材料於受拉側之裂縫發展、剝落或剝離狀態，以量化其修復性能。藉由此一計畫之執行，並統整相關文獻建議，以建構具實用性之鋼筋腐蝕斷面補修工法建議，而對於技師或建築師於補強或修復工程規

劃時有其必需性。本研究完成工項如下所述：

1. 完成混凝土斷面修復材料之相關基本性質試驗
2. 完成混凝土斷面補修工法對鋼筋腐蝕梁構件的修復性能試驗
3. 建議鋼筋混凝土構件之斷面修復材料性能評定標準
4. 建立鋼筋混凝土構件之斷面修復施作工法程序
5. 完成鋼筋混凝土梁構件之斷面修復介面處理建議

第二節 建議

依技師報 864 期內容指出，據統計全台屋齡超過 30 年的老公寓約有 72 萬棟，而就台北市居住資訊服務網指出台北市 30 年以上老屋以宅數而言約占總宅數 68%，由此調查已知台灣建築物屋齡老化現象已趨嚴重，因此進行建築物之耐久性診斷是必要的。在台灣，鋼筋建築物常見劣化狀況之一，便是內部鋼筋鏽蝕而造成混凝土裂縫或剝落，且當裂縫發生或混凝土剝落，亦會加劇鋼筋鏽蝕速度，進而影響建築物之安全性。當鋼筋混凝土構件劣化到某些程度時，將導致影響結構物之安全性與使用性，根據構件劣化程度，此時便需要進行補修、補強或拆除重建。一般來說，補修係將建築物之劣化部份去除，以恢復建築物之美觀和提高耐久性為目的，並提供建築物持續保有安全性、使用性和回復力學性能之對策。今年度執行計畫已針對不同補修材料，包含水泥砂漿、聚合物水泥砂漿、無收縮水泥砂漿及環氧樹脂砂漿等進行相關補修材料基本性能試驗，包括抗壓強度、撓曲強度、黏結強度、乾縮率、透水量及吸水率等。除外，亦利用足尺鋼筋腐蝕梁構件探討斷面補修工法之施作程序與其力學性能。

日本建築學會(2018)中提到，補修材料除其基本性能須滿足基準要求(日本建築學會，1997)外，為確保構件劣損區域於修復後之耐久性，仍具有對中性化、氯離子滲透及化學侵蝕等之抵抗能力。為此，未來研究應對補修材料進行中性化與氯離子加速滲透試驗，以了解其耐久性能。另外，亦可利用縮尺寸 RC 版構件，並加速鋼筋腐蝕以產生劣損區域，經補修復原後再進行單向加載試驗，以了解修復工法之力學性能。最後，建研所可統整歷年試驗成果與相關建議，草擬鋼筋混凝土構件腐蝕劣損區域之補修工法手冊，供技師或建築師依現場構件之劣損狀態或程度，選擇合適補修工法並可確保其修復性能。

一、主要建議事項

建議一

本研究針對修復材料訂量化標準，並針對腐蝕構件之斷面修復法之施作程序進行試驗，補足內政部建築研究所於 108 年度所執行的鋼筋混凝土建築物之耐久性能診斷中提及之工法且加以驗證，後續可將斷面修復工法提供給建築師、土木結構技師公會參考，以推動建築物依耐久性診斷結果決定修復策略：立即可行建議

主辦機關：中華民國全國建築師公會、中華民國土木技師公會全國聯合會、中華民國結構工程技師公會全國聯合會

協辦機關：內政部建築研究所

據統計全臺屋齡超過 30 年的老公寓約有 72 萬棟，而就臺北市居住資訊服務網指出臺北市 30 年以上老屋以宅數而言約占總宅數 68%，由此調查已知臺灣建築物屋齡老化現象已趨嚴重，因此進行建築物之耐久性診斷後之修復是必要的。因目前國內尚無對於修復材料明確之使用手冊或量化數據，後續可將鋼筋混凝土補修工法之建議，提供給建築師、土木結構技師公會參考，以推動建築物之耐久性診斷與維護。

建議二

本研究已建立斷面修復材料之量化標準與腐蝕梁構件相關之補修工法，為確保構件劣損區域於修復後之耐久性，仍具有對中性化、氯離子滲透及化學侵蝕等之抵抗能力，臺灣目前尚無相關技術文件或規定可供參考，建議後續可規劃相關課題，並可利用試驗證實其有效性：中長期建議

主辦機關：內政部建築研究所

協辦機關：內政部建築研究所

結合本研究之相關建議，深入補充及草擬鋼筋混凝土構件腐蝕劣損區域之補修工法手冊，供技師或建築師依現場構件之劣損狀態或程度，選擇合適補修工法並可確保其修復性能。

附錄一 工作會議記錄

本研究已舉行工作會議主要報告工作進度及後續規劃，會議紀錄如下所列：

工作會議記錄

計畫名稱：鋼筋混凝土梁構件之鋼筋腐蝕斷面補修工法研擬

執行期間：109 年 1 月 31 日至 109 年 12 月 31 日

研究主持人：邱建國

協同主持人：陳君弢

時間：109 年 5 月 28 日(星期三)上午 10 時 00 分開會

地點：大坪林聯合開發大樓 15 樓簡報室(新北市新店區北新路 3 段 200 號 15 樓)

主持人：陳召集人建忠

列席者(依姓氏筆畫排序)：邱教授建國、陳教授君弢、陳研究助理儷文

紀錄者：李博士台光

討論事項：

1. 建議於報告書中添加背景資料蒐集及案例分析，例如：補強的房屋類型、數量及失敗案例…等等。
2. 本案之工作目標訂定：工法研擬為提供哪種建築物之補強方法，如：公有房屋或私有房屋？
3. 建議報告書中能說明材料之性能，及補強建議。
4. 建議提供適當之補強材料之使用方法與施工方式。

附錄二 歷次專家座談會議紀錄

本研究已舉行第一次專家座談會議，主要針對第一階段試驗結果與後續試驗安排進行討論，第二次專家座談會則針對本案試驗結果進行討論，第一次與第二次專家座談會議紀錄如下所列：

第一次專家座談會為議紀錄

計畫名稱：鋼筋混凝土梁構件之鋼筋腐蝕斷面補修工法研擬

執行期間：109年1月31日至109年12月31日

研究主持人：邱建國

協同主持人：陳君弢

時間：109年6月4日(星期四)上午10時00分開會

地點：國立臺灣科技大學營建系會議室 E2-222

主持人：邱教授建國

出席人員(依姓氏筆畫排序)：李教授翼安、黃教授中和、廖教授文正、廖教授硃岑、陳教授君弢

列席者：陳研究助理儷文

專家發言重點：詳見附表 2-1 (依發言順序排序)。

附表 2-1 第一次專家座談會議紀錄

| 專家 | 專家意見 |
|-------|--|
| 黃中和教授 | 1. 建議調整水泥砂漿之配比，因水泥砂漿之強度受到水灰比影響大，隨著水灰比下降，強度隨著升高，可彌補試驗結果。 |
| | 2. 大面積修復與小面積修復之標準，可於手冊中提出建議及註明其差異。 |
| | 3. 個人研究室的試驗經驗，黏結強度試驗結果之變異性大，建議能訂出標準施作方法。 |
| | 4. 臺灣鋼筋混凝土的保護層厚度為4公分，若使用純材料進行模擬試驗，可能無法與現地有相同的拉拔強度，因現地有鋼筋提供握裹力。 |
| | 5. 溫度變化對材料的影響大，可重新衡量溫濕度的變化方式。 |
| | 6. 鋼筋腐蝕超過1mm以上，腐蝕速率增加，且腐蝕深度越深 |

| 專家 | 專家意見 |
|-------|--|
| | 影響越大，建議可調整腐蝕等級。 |
| 廖文正教授 | 1. 建議探討基材狀態與修復材間之比例關係，避免單以修復材料面訂定標準。 |
| | 2. 無收縮水泥砂漿之試驗結果未達無收縮水泥砂漿之手冊標準，誤差過大，建議要重新製作評估。 |
| | 3. 溫濕度變化的部分，因固定濕度 70% 的情況可能對於修復材料來說是一適合發展強度的環境，建議可以降低濕度進行試驗，或許差異性會更明顯。 |
| | 4. 若大面積填補需要執行現地試驗，建議於手冊中提供現地施作之標準程序，例如：立面及頂面之拉拔試驗施作方法。 |
| 李翼安教授 | 1. 現在校舍補強之現場拉拔試驗較隨便，建議於手冊中提供測試布置與標準試驗程序。 |
| | 2. 因樓板為頂面，建議拉拔試驗可增加頂面的測試。 |
| 廖硃岑教授 | 1. 建議訂定拉拔試驗之標準試驗方法與限制。 |

第二次專家座談會為議紀錄

計畫名稱：鋼筋混凝土梁構件之鋼筋腐蝕斷面補修工法研擬

執行期間：109 年 1 月 31 日至 109 年 12 月 31 日

研究主持人：邱建國

協同主持人：陳君弢

時間：109 年 10 月 16 日(星期五)下午 2 時 00 分開會

地點：國立臺灣科技大學營建系會議室 E2-222

主持人：邱教授建國

出席人員(依姓氏筆畫排序)：吳教授崇豪、廖教授文正、鄭教授安、陳教授君弢

列席者：許研究助理譽騰、陳研究助理儷文

專家發言重點：詳見附表 2-2 (依發言順序排序)。

附表 2-2 第二次專家座談會議紀錄

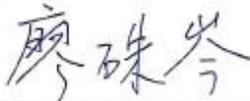
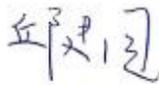
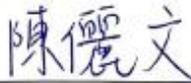
| 專家 | 專家意見 |
|-------|--------------------------------------|
| 鄭安教授 | 1. 透水量訂在 15 克以下，是否太嚴苛? |
| 吳崇豪教授 | 1. 此試驗是否能避免腐蝕區域之轉移? |
| | 2. 環氧樹脂砂漿與水泥砂漿之耐久性能是否良好?是否會誘發其他區域腐蝕? |
| | 3. 環氧樹脂砂漿之抗紫外線能力，例如：施作屋頂修復時。 |
| 廖文正教授 | 1. 為什麼第三階段試驗沒有選擇無收縮水泥砂漿? |
| | 2. 若是室內修復，其透水量及吸水量是必要的條件嗎? |
| | 3. 抗壓強度規定在 7 天之必要性? |

附錄三 第一次專家座談會議簽到表

內政部建築研究所「鋼筋混凝土梁構件之鋼筋腐蝕斷面補修工法研擬」委託研究計畫
 專家座談會議

時間：109年06月04日（星期四）上午10時00分

地點：台北市大安區基隆路四段43號E2-222

| 單位 | 姓名 (依姓氏筆畫順序) | 簽到 |
|----------|-----------------|---|
| 國立中興大學 | 李翼安 |  |
| 國立臺北科技大學 | 黃中和 |  |
| 國立臺灣大學 | 廖文正 |  |
| 國立高雄大學 | 廖殊岑 |  |
| 國立台灣科技大學 | 邱建國 |  |
| 國立台灣科技大學 | 陳君強 |  |
| 國立台灣科技大學 | 陳儷文 |  |
| | | |

附錄四 第二次專家座談會議簽到表

內政部建築研究所「鋼筋混凝土梁構件之鋼筋 腐蝕斷面補修工法研擬」委託研究計劃

專家座談會議

時間：109年10月16日（星期五）下午2時00分

地點：台北市大安區基隆路四段43號E2-222

| 單 位 | 姓 名 (依姓氏筆畫順序) | 簽 到 |
|----------|------------------|-----|
| 國立中原大學 | 吳崇豪 | 吳崇豪 |
| 國立臺灣大學 | 廖文正 | 廖文正 |
| 國立宜蘭大學 | 鄭安 | 鄭安 |
| 國立臺灣科技大學 | 邱建國 | 邱建國 |
| 國立臺灣科技大學 | 陳君弢 | 陳君弢 |
| 國立臺灣科技大學 | 許譽騰 | 許譽騰 |
| 國立臺灣科技大學 | 陳儷文 | 陳儷文 |

參考書目

- American Concrete Institute , (2006) , ACI 546.3R-06 Guide for the Selection of Materials for the Repair of Concrete.
- American Concrete Institute , (2007) , ACI 503.7-07. Specification for Crack Repair by Epoxy Injection.
- American Concrete Institute , (2013) , ACI 506.2-13. Specification for Shotcrete.
- American Concrete Institute , (2014) , ACI 546R-14. Guide to Concrete Repair.
- American Concrete Institute , (2018) , ACI 563-18. Specifications for Repair of Concrete in Buildings.
- American Concrete Institute , (2019) , ACI 562-19. Code Requirements for Assessment, Repair, and Rehabilitation of Existing Concrete Structures and Commentary.
- American Society for Testing and Materials , (2014) , Standard Test Method for Restrained Expansion of Shrinkage-Compensating Concrete (ASTM C878 / C878M).
- American Society for Testing and Materials , (2016) , Standard Test Method for Time of Setting of Concrete Mixtures by Penetration Resistance (ASTM C403 / C403M).
- American Society for Testing and Materials , (2016) , Standard Test Method for Change in Height at Early Ages of Cylindrical Specimens of Cementitious Mixtures (ASTM C827 / C827M).
- American Society for Testing and Materials , (2018) , ASTM C596. Standard Test Method for Drying Shrinkage of Mortar Containing Hydraulic Cement (ASTM C596).
- American Society for Testing and Materials , (2020) , Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (Using 2-in. or [50-mm] Cube Specimens) (ASTM C109 / C109M).
- American Society for Testing and Materials , (2020) , Standard Test Method for Bond Strength of Epoxy-Resin Systems Used With Concrete By Slant Shear (ASTM C882 / C882M).
- American Society for Testing and Materials , (2020) , Standard Test Method for Bleeding of Concrete (ASTM C232 / C232M).

American Society for Testing and Materials , (2020) , Standard Test Method for Slump of Hydraulic-Cement Concrete(ASTM C143 / C143M).

American Society for Testing and Materials , (2020) , Standard Test Method for Tensile Strength of Concrete Surfaces and the Bond Strength or Tensile Strength of Concrete Repair and Overlay Materials by Direct Tension (Pull-off Method) (ASTM C1583/C1583M).

International Organization for Standardization , (2014) , Maintenance and repair of concrete structures(ISO 16311).

Yu-Chuan Kao, Chien-Kuo Chiu, Takao Ueda, Yu-Jou Juan , (2018) , Experimental Investigation on Mechanical Properties of SBR-Modified Mortar with Fly Ash for Patch Repair Material. Journal of Advanced Concrete Technology. No.16(8) pp.382-385.

中國土木工程學會，(2005)，既有混凝土結構物維修及補強技術手冊。

中國土木工程學會，(2007)，混凝土工程施工規範與解說。

中華民國國家標準，(1992)，環氧樹脂及硬化劑黏度測定法(CNS 13065)。

中華民國國家標準，(1993)，水硬性水泥壩料抗壓強度檢驗法(用 50 mm 或 2 in. 之立方體試體) (CNS 1010)。

中華民國國家標準，(2009)，水硬性水泥壩料抗拉強度檢驗法(CNS 1011)。

中華民國國家標準，(2011)，建築灌注補修用環氧樹脂(CNS 10141)。

中華民國國家標準，(2014)，新拌混凝土中水溶性氯離子含量試驗法(CNS 13465)。

中華民國結構工程技師公會全國聯合會，(2008)，鋼筋混凝土結構修復補強設計參考手冊。

內政部建築研究所，(2000)，鋼筋混凝土建築物之修復與補強技術彙編(二)。

內政部營建署，(2011)，結構混凝土施工規範。

日本コンクリート工学協会，(2016)，コンクリート診断技術 '16，日本。

日本土木學會，(2005)，コンクリートライブラリー119 号 表面保護工法 設計施工指針(案)，日本：日本混凝土委員會。

日本土木學會，(2007)，コンクリート標準示方書[維持管理編]，日本。

日本土木學會，(2013)，コンクリート標準示方書[維持管理編]，日本。

日本土木學會，(2018)，セメント系材料を用いたコンクリート構造物の補修・補強指針，日本：丸善出版。

- 日本水泥協會，(2011)，すぐに役立つセメント系補修・補強材料の基礎知識，日本：技報堂出版。
- 日本建設顧問協會，(2016)，材料・工法の選定に関する参考資料(案)。
- 日本建築研究所，(2002)，既存マンション躯体の劣化度調査・診断技術マニュアル，日本。
- 日本建築學會(AIJ)，(1997)，鉄筋コンクリート造建築物の耐久性調査・診断および補修指針(案)・同解説，日本：丸善株式會社。
- 日本建築學會，(1997)，鉄筋コンクリート造建築物の耐久性調査・診断および補修指針(案)・同解説。日本。
- 日本混凝土維護協會，(2017)，コンクリート構造物の維持管理～塩害・中性化・ASR 補修の考え方～技術資料 Ver. 4.2，日本。
- 日本産業標準 JIS A 1171，ポリマーセメントモルタルの試験方法，日本。
- 日本纖維補修補強協會，(2013)，断面修復工法の紹介，その 2，日本。
- 片平博，渡辺博志，(2014)，付着面の表面粗さが断面修復材の付着強度に与える影響，コンクリート構造物の補修・補強，アップグレードシンポジウム，第 14 卷，pp. 265-270，日本。
- 加藤誠司，(2018)，コンクリート断面修復部の変形，強度特性，日本。
- 何明錦、歐昱辰、邱建國、蔡煒銘、陳君弢、范鴻達，(2011)，鋼筋腐蝕對於鋼筋混凝土建築構件耐震性能與生命週期之影響 - 含腐蝕橫向鋼筋的梁構件，內政部建築研究所。
- 李有豐，(1998)，混凝土結構物劣化機制與維修補強要領。結構物補研討會論文集，工業技術研究院，中華民國新竹市。
- 邱建國、陳君弢、林昭妤、姚廷穎，(2019)，鋼筋混凝土建築結構耐久性能診斷技術手冊研擬，內政部建築研究所。
- 宮川豊章，(2011)，コンクリート補修・補強ハンドブック，日本：朝倉書店。
- 高玉荃、邱建國，(2019)，含飛灰之 SBR 水泥砂漿補修材料性能之試驗研究，博士論文，國立臺灣科技大學。
- 國立研究開發法人土木研究所，(2016)，コンクリート構造物の補修対策施工マニュアル，日本。
- 國家地震工程研究中心，(2016)，鋼筋混凝土建築物補強及修復參考圖說及解説研討會 - 耐久性修復及防水工程。

- 陳建忠、宋裕祺、蔡益超、陳長佑、李台光、謝宗典、邱毅宗、顏志良，(2016)，
鋼筋混凝土建築物耐震能力初步評估平台開發與應用，內政部建築研究所。
- 農林水省，(2015)，農業水利施設の補修・補強工事に関するマニュアル[開水路
補修編]（案）。
- 鄭元良、邱建國、陳君弢、周楷峻、陳美儒、陳重利，(2013)，鋼筋混凝土建築
物耐久性能診斷方法研擬，內政部建築研究所。

鋼筋混凝土梁構件之鋼筋腐蝕斷面補修工法研擬

出版機關：內政部建築研究所

電話：(02) 89127890

地址：新北市新店區北新路3段200號13樓

網址：<http://www.abri.gov.tw>

編者：邱建國、陳君弢、陳儷文、許譽騰

出版年月：109年12月

版次：第1版

ISBN：ISBN 978-986-5450-44-1 (平裝)